ISSN 1343−2885

日 本 大 学 工 学 部 紀 要

第 57 巻 第 1 号

平 成 27 年 9 月

日 本 大 学 工 学 部
工 学 研 究 所

目　　次

工　学　編

平成23年9月台風15号に関する須賀川市における住民の危機意識と行政対応に関する課題
…… 井上 直行・長林 久夫・手塚 公裕 （ 1 ）

Consistent Shape Function for Free Vibration of Linearly Tapered Timoshenko Beam Element
…… TRINH Thanh Huong・Takumi HIBINO・Buntara S. GAN （ 7 ）

東日本大震災に伴う福島県の歴史的建造物の被害と修復の状況
…… 速水 清孝 （15）

鉄骨置屋根形式RC造建屋の耐震補強方法に関する研究
…… 清水 健次・日比野 巧・浅里 和茂 （25）

双方向進化型構造最適化法の概念を導入したAnt Colony Optimizationの提案
－ 構造最適化問題におけるトラス構造最適化への応用について －
…… 原　崇太・Buntara S. GAN （35）

既存屋内運動場におけるはり継手補強ディテールの検討
……日比野 巧・浅里 和茂 （43）

細長い平面形を有する建物における耐震補強効果の検討
－ 1方向補強時の立体振動性状 －
……日比野 巧・千葉 正裕 （51）

地方都市におけるコンビニエンスストア駐車場の有効利用に関する研究
……廣田 篤彦・三浦 金作 （61）

停滞回避PSOの提案と評価
…… 小林 史典・金子 正人・岩井 俊哉 （67）

総合教育編

R. シュタイナーの「霊学」はヴァルドルフ教育においてどのように継承されているか
－「輪廻とカルマ」論の継承 －
…… 土屋 文明 （77）

運動部経験者のライフスキルとメンタルヘルス関連要因の検討
……種ケ嶋尚志・渡邉眞由美 （89）

工　学　編

平成23年 9 月台風15号に関する須賀川市における住民の危機意識と行政対応に関する課題

井上 直行 *・長林 久夫 **・手塚 公裕 ***

RELATION BETWEEN ADMINISTRATIVE SUPPORT AND CRISIS AWARENESS OF RESIDENTS IN SUKAGAWA OF 15TH TYPHOON SEPTEMBER 2011

Naoyuki INOUE*, Hisao NAGABAYASHI** and Masahiro TEZUKA***

Abstract

In September 2011, all over the country was damaged by the 15th typhoon. Many residences were flooded due to the inland inundation in the upper reaches of the Abukuma River basin. In the present study, we analyzed the developmental processes of inland water disaster from rainfall characteristics and flood characteristics. Furthermore, the questionnaire survey of the damages and the evacuation of the in-land inundation disaster were executed in Sukagawa cities. As a result, the first showed inland water dis-aster occurred in conjunction with the rapid rise of river water level. The second revealed that the past ex-perience of inundation affected to the evacuation. The third found that hazard map and publicity vehicles could not work effectively during flood period. Finally, it is shown that residents expect to a capacity im-provement of drainage pump, and a victim's support of the flood.

Key words: *Inland inundation disaster, questionnaire survey, Inundation past experience, hazard map, the Abukuma River basin*

1．はじめに

平成23年 9 月21日から22日にかけて台風15号が来襲し，全国各地で大きな被害を及ぼした。この災害により，全国では，死者16名，行方不明者 2 名，全壊12棟，半壊17棟，床上浸水1, 527棟，床下浸水3, 630棟の人的・住家被害が生じている[1)]。須賀川市においても，床上浸水169棟，床下浸水82棟となる甚大な被害を受け，東日本大震災に伴い建設された仮設住宅も床上浸水，床下浸水の被害を受けた。

須賀川市では，これまでも昭和61年 8 月，平成10年 8 月などに大きな洪水被害を受けており，最近では，平成14年 7 月以来の水害であった。過去の須賀川市における水害の特徴は，須賀川市内を流下する一級河川阿武隈川やその支流の釈迦堂川の合流部における洪水氾濫によるものであった。

阿武隈川では，平成10年 8 月の洪水を契機に国土交通省東北地方整備局が河川改修事業と災害復旧事業を総合的に短期間で集中して実施する，いわゆる「平成の大改修」と呼ばれる治水対策を実施した。そのため，平成14年 7 月の大規模な洪水では阿武隈川流域において浸水面積，浸水戸数ともに大幅な減少が見られ，外水による氾濫被害は大幅に減少する一方で，内水排水不良による浸水被害が流域全体で発生し，内水被害が顕在化していることが報告されている[2)]。

このように，本川の河川整備率の向上と併せて支川での内水排除の問題が阿武隈川流域を問わず，全国各地で生じている。また，近年の都市化による流出量の増加や流下速度の上昇，気候変動等による集中豪雨の増加により内水氾濫の頻度，被害が増加し[3)]，自治体において内水対応が重要な問題となっている。

内水対応について，既往の研究では，末次[3)]は内水排水ポンプ作業時，計画高水位を超えた場合，破堤や越流の危険性があるため，河川管理者が作業を停止するように指示することを述べている。また，避難情報に基づく住民の避難行動について，及川ら[4)]は過去の水害経験が避難行動に悪影響を及ぼすことや情報伝達の方法によって避難が遅れることを報告している。さらに，洪水ハザードマップにおいて，片田ら[5),6)]は住民が内容を理解していないことや，配布後，紛失してしまい有効活用されない可能性を指摘している。

そこで，本研究では，今後増大する内水災害に対処するために，須賀川市における内水氾濫の特性や避難情報の発令，排水ポンプの運転等の行政の災害対応をまとめた。併せて災害時の住民の危機意識や行政からの避難情報に対する住民行動，洪水ハザードマップの効果を把握するため，アンケート調査を実施した。その結果，行政による排水ポ

平成27年 1 月29日受理
* 日本大学工学部客員研究員
** 日本大学工学部研究員
*** 日本大学工学部土木工学科

ンプの対応や情報の発令における課題を示し，アンケート調査から浸水経験がハザードマップの認知度や避難行動に影響することを明らかにした。

2．内水氾濫の被害及び浸水特性

(1)　内水氾濫の被害

平成23年９月台風15号による須賀川市の内水氾濫による被害箇所を図-１に示す。被害箇所は，釈迦堂川に流入する準用河川の下の川，笹平川，雨水幹線の西部２号幹線，堀底２号幹線の合流域で発生している。内水排水対策として，固定式及び可搬式ポンプにより排水を実施している。なお，今回の内水被害で浸水した箇所の多くは，これまでも経験しており，過去の洪水被害の状況を表-１に示す。昭和61年８月では阿武隈川の洪水氾濫により，須賀川観測所で計画高水位を超え，釈迦堂川との合流地点では浸水深３m近くを記録し，内水により古屋敷，館取町も甚大な浸水被害を受けている[7)]。さらに平成10年８月では洪水波形，計画高水位が二山となる指定水位を超える洪水期間が５日間となる長期化した洪水により，釈迦堂川の合流地点のほか，古屋敷，館取町も被害を受けている[8)]。また，阿武隈川の「平成の大改修」による河川整備後の平成14年７月には，台風による豪雨により外水による被害は減少したが，平成10年と同様に内水により古屋敷，館取町が被害を受けている。平成23年９月では古屋敷，館取町に加え，新たに卸町や下の川上流域でも内水被害を受けている。

(2)　降雨特性と出水特性

平成23年台風15号による須賀川市の降雨特性と出水特性を図-２に示し，併せて，過去の水害の出水特性と比較している。表示期間は，9月21日０時から９月22日24時までの２日間であり，今回の台風15号における最大水位の時間に合わせて，過去の水害の最大水位を表示している。雨量は阿武隈川の須賀川観測所，水位は釈迦堂川の西川観測所における観測値を使用した。９月20日からの雨量は312mmに達し，年間の４分の１に相当する雨量を記録した。21日には，15mm/hを超える雨が５時間続き，15時から20時までの５時間で120mmとなった。特に19時からの45mm/hとなる激しい豪雨を記録した。水位は21日22時にはん濫危険水位を超える5.4mとなった。また，過去の出水時の最高水位と待機水位から避難判断水位までの水位上昇速度を表－２に示す。水防団待機水位から避難判断水位までの到達時間は約５時間，0.43m/hの水位上昇速度であり，平成10年の約６時間，0.30m/hを上回る水位の上昇であった。これらの降雨特性と出水特性により，本川の急激な水位上昇と併せて豪雨が発生したことがわかる。この本川の水位上昇時において，すでに内水が湛水していたとの情報が報告されており，９月21日19時頃の豪雨により内水被害が拡大したものと考えられる。須賀川市以外の自治体においても，近年の集中豪雨の増加により，このような急激な水位上昇が懸念され，行政の対応の在り方が問われることは事実である。

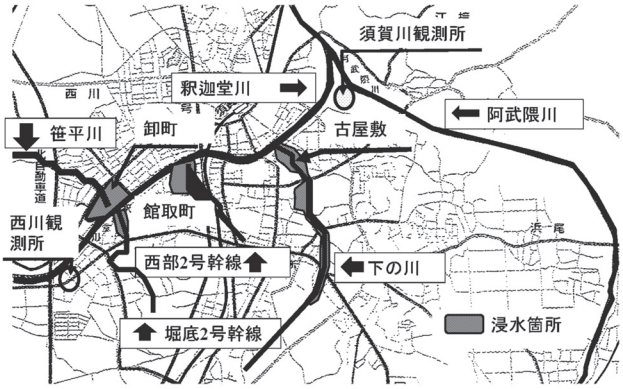


図-１　須賀川市の内水被害箇所

表-１　須賀川市の過去の水害被害

	床下浸水	床上浸水
昭和 61 年 8 月	126 棟	293 棟
平成 10 年 8 月	65 棟	192 棟
平成 14 年 7 月	35 棟	69 棟
平成 23 年 7 月	82 棟	169 棟

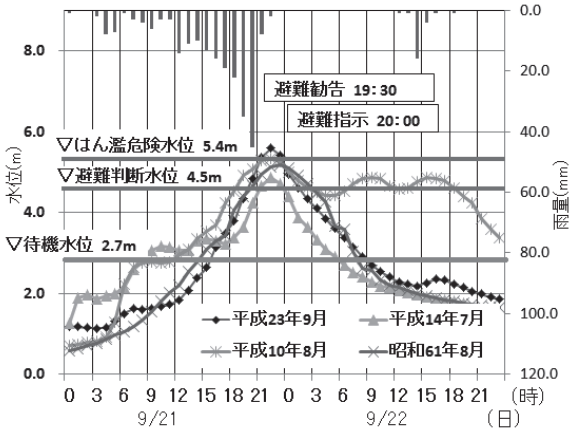


図-２　須賀川市の降雨特性と出水特性

表-２　須賀川市（西川観測所）の過去の水位と水位上昇速度

	最高水位(m)	上昇速度(m/h)
昭和 61 年 8 月	5.35	0.17
平成 10 年 8 月	5.12	0.30
平成 14 年 7 月	4.88	0.15
平成 23 年 7 月	5.56	0.43

3．行政の対応

須賀川市は平成22年度に地域防災計画を策定しており，今回の水害対応は防災計画に基づき実施している。防災計画ではハード対策では排水ポンプによる内水排水，ソフト対策では災害対策本部の設置，避難勧告・指示の発令による避難情報の提供，市のホームページでの情報の発信等を規定している。また，洪水ハザードマップを作成し，浸水被害のあった地区住民以外に対してもハザードマップを配

布している。平成23年９月台風15号における須賀川市の排水ポンプ運転及び避難勧告･避難指示の状況を表-３に示す。21日13時に館取町と古屋敷，15時に卸町で固定式ポンプにより排水を実施した。22時，卸町で原動機の配電盤が浸水したため，ポンプ排水が不可能となった。その後，22日１時，卸町で可搬式ポンプを使用し，排水を実施した。また，22時30分頃，釈迦堂川の急激な水位上昇による破堤，越水の危険を理由に古屋敷可搬式ポンプによる内水排水を停止している。なお，著者らは既設排水ポンプによる内水排除の効果を検証した結果，十分な効果が得られないことを示している[9)]。しかし，卸町では過去の浸水状況を考慮し配電盤の位置を検討すれば内水作業が継続できたと考えられる。今後の内水対応では，ポンプが適切に稼働できるような設備の点検・準備，浸水防止措置や河川管理者との操作方法の協議が必要である。

避難勧告は，18時40分に古屋敷，18時50分に下の川に隣接するかみきた仮設住宅，19時30分に釈迦堂川流域で出され，避難指示は20時に発令されている。須賀川市の避難勧告の基準は，釈迦堂川が避難判断水位4.5mを超えた場合，避難指示は，はん濫危険水位5.4mを超えた場合である[6)]。古屋敷，かみきた仮設住宅では内水位の急激な上昇のため，基準よりも約１時間早く避難勧告が出されている。しかし，発令時，45mm/hとなる激しい降雨状況であり，また内水浸水が拡大していたため，避難が困難であったと考えられる。

４．アンケート調査概要

アンケート調査は，台風15号により内水災害を受けた，下の川地区で古屋敷，かみきた仮設住宅，天良町，上町，西部２号幹線地区で館取町，たてとり仮設住宅を対象とした。調査は関係町内会の協力を得て，平成24年６月に町内会を通じて住民に配布し，郵送による回収という方法で実施した。調査概要は表-４のとおりである。なお，内水被害を受けた郡山市小原田地区でも同様の調査を実施しており，今後，地域性における防災対応の違いや課題を考察する予定である。

質問項目は，内水に関して，台風が接近する前の内水被害の予測と実際の浸水被害である。避難行動において，避難行動の有無と避難決定の情報取得方法，避難行動時の危機意識，避難所への避難状況である。そして，水害対応について，ハザードマップの有用性や行政に対する期待の項目である。

５．アンケート調査結果

(1)　台風襲来前後の危機意識

住民の過去の浸水経験，被害経験を踏まえた台風襲来前後の水害に対する危機意識について，図-３に示し，(a)は台風襲来前の浸水予測，(b)は台風襲来時の浸水被害について示した。ここで，『経験なし』は過去の洪水経験がない，『被害なし』は過去の洪水で被害がないことを示す。台風襲来前では，『経験がない』と答えた人の方が，『被害がな

表-３　須賀川市の排水ポンプ及び避難情報の状況

時刻	対応状況
９月21日	
13:00	館取町，古屋敷固定式ポンプ稼働
15:00	古屋敷可搬式ポンプ稼働
18:30	卸町固定式ポンプ稼働
18:40	避難勧告発令（古屋敷）
19:00	避難勧告発令（かみきた仮設住宅）
19～20	最大時間雨量 45mm
19:20	避難勧告発令（阿武隈川流域）
19:30	避難勧告発令（釈迦堂川流域）
19:50	避難勧告発令（下の川流域）
20:00	避難指示発令（阿武隈川流域）
22:00	卸町固定式ポンプ停止
22:10	釈迦堂川最高水位 5.56m
22:30	古屋敷可搬式ポンプ停止
22:40	阿武隈川最高水位 8.65m
９月22日	
1:00	卸町式可搬式ポンプ稼働
5:00	古屋敷可搬式ポンプ稼働
7:00	避難勧告解除
17:49	避難指示解除

表-４　調査概要

対象地域	配布地区	配布数	回収数(率)
郡山	小原田地区他	575	182(31.7%)
須賀川	上町，旭町他	375	85（22.7%）

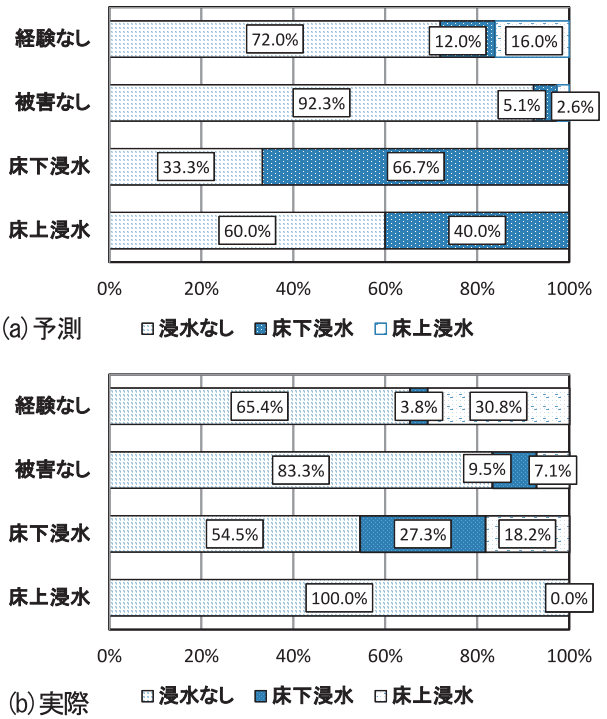


図-３　浸水に対する予測と実際の浸水被害

い』と答えた人よりも浸水を予測しており，危機意識が高い。これは，及川ら[4]が示したように過去の浸水経験が悪影響を及しており，結果として，過去の浸水で被害がなかった場合，浸水予測を楽観的に想定すると考えられる。また，『床下浸水』，『床上浸水』を経験した人も被害を予測した人はそれぞれ66%，40%であり，『経験なし』，『被害なし』と比較すると割合が高いが，過去の経験が危機意識に必ずしも結びついていない。そして，台風襲来時の浸水被害では，『経験なし』と答えた人が『被害なし』と答えた人より浸水被害を受けている一方，過去に『床下浸水』を経験している人の方が『床上浸水』を経験している人より被害を受けている。これは，今回の水害で初めて被害を受けた，浸水経験がない地区（下の川）で被害があったことによる。そして，過去に床上浸水を受けた地区（丸田町）では宅地地盤を嵩上げしており，被害がなかったものと考えられる。なお，この床上浸水地区の嵩上げによる自衛策により，『床下浸水』を経験していると答えた人よりも，過去に『床上浸水』を経験した人の方が浸水に対する危機意識が低くなったと考えられる。これらの結果から，浸水経験が危機意識の醸成につながっていないことが明らかであり，今後，行政や町内会による防災に対する意識啓発活動が望まれる。

(2)　避難行動と避難を決定した情報取得の方法

避難行動の有無と避難を決定した情報取得の要因を図-4に示す。一般的な避難率は50%以下との報告が多い[10]が須賀川市の避難率は51%であり著しく高いとは言えない。避難を決定した情報取得の方法は，町内会役員からが最も多く，近所からの情報取得も併せた町内会内からの割合は53%となり，広報車や消防署といった行政から取得した38%よりも高い。既往の研究においても，町内会や近所からの情報伝達により避難を決定したとの報告があり，問題として伝達に時間を要するため避難の決定時期が遅れることが指摘されている[11]。そのことから，今回，避難情報が豪雨時に発令されており，町内会での伝達過程，また避難時に危険を伴った可能性がある。そして，広報車による情報伝達状況を図-5に示す。放送を聞こえなかった人が53%であり，また，聞き取りにくかった，内容がわかりにくかった人は60%を超えており，十分に機能していなかったことがわかる。この理由は，避難情報発令時，豪雨だったことから放送が聞き取りにくい状態であったことや自治体の広報車の台数も限られており，細かく住宅地を回ることができなかったためと考えられる。これらから，町内会からの情報の伝達は有効であるが，豪雨時は危険が伴う可能性や広報車での情報提供が正確に伝わらないことがあるため，豪雨時においても住民に対し情報を適切に伝達する仕組みを整備する必要がある。なお，通常，避難情報は防災無線でも住民に知らされるが，今回故障して使用できなかった。防災無線により情報を伝達していれば広報車と併せた行政による情報が避難の決定要因とする回答が大きくなった可能性がある。

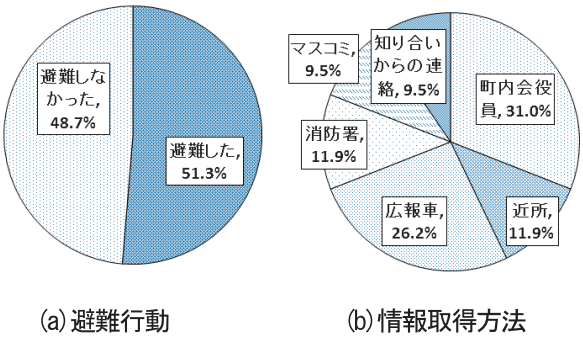


図-4　避難行動の有無と避難決定の情報取得方法

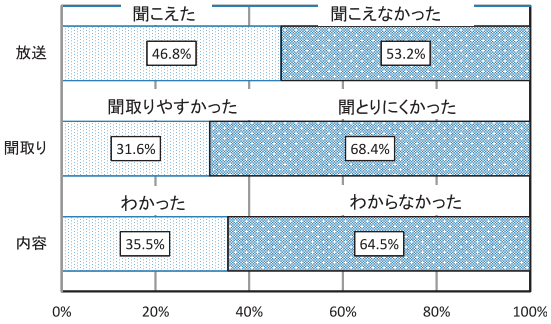


図-5　広報車による情報伝達状況

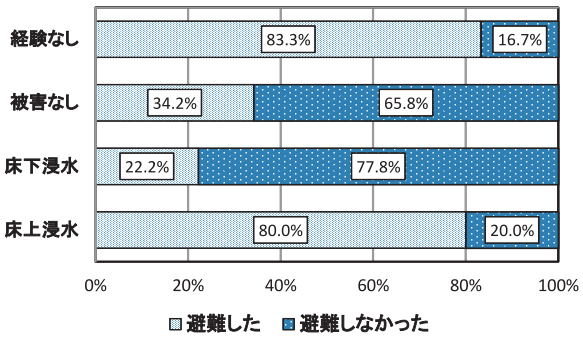


図-6　避難行動

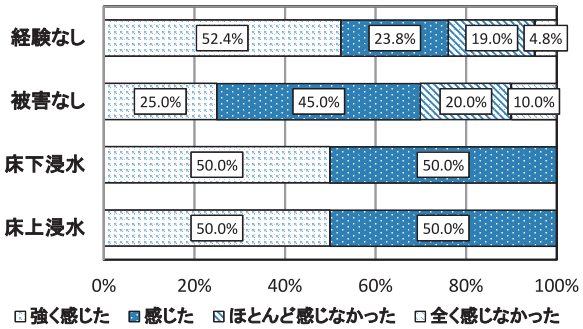


図-7　避難の必要性の認識

(3)　避難行動時の危機意識

過去の洪水経験を踏まえた避難行動を図-6に示す。水害を経験していない人の避難率が最も多く，次に床上浸水を経験した人が高くなっている。一方，過去に被害がない，床下浸水を経験した人の避難率は顕著に低くなっている。これは過去の経験が避難行動に影響していると考えられる。

次に，避難情報発令時における避難の必要性の認識を図-7に示す。必要性について，『強く感じた』，『感じた』の回答を危機意識の表示とすると，床下浸水，床上浸水を経験した人の危機意識が高い。しかし，先に示した図-6と比較すると床下浸水については，危機意識が避難行動に必ずしも結びついていない。一方，経験がない人と被害がない人を比較すると，経験がない人の方が危機意識が高く，『強く感じた』の回答が，被害がない人の約2倍であり，より強く危機意識を持っている。

これから避難行動時の危機意識でも，過去に被害ない，または床下浸水といった軽度の場合，浸水経験が事態を楽観的に想定するといった悪影響を与えることがわかる。

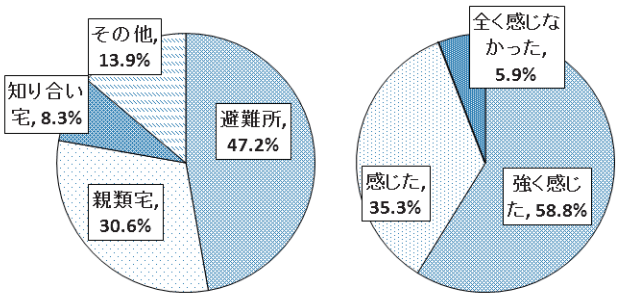
(4)　避難所への避難状況

避難先と市が指定した避難所への避難時の危険意識を図-8に示す。避難先は市の指定した避難所が最も多く，次に親戚宅，知り合い宅となっている。避難所について，平時は防災訓練や市の防災啓蒙活動，また，避難情報の発令時は広報車により避難所の場所を周知していることから避難先として選ぶ割合が高くなったと考えらえる。しかし，アンケート結果では指定の避難所が東日本大震災により使用できなくなっており，別の避難所に避難しなければならなかったとの回答もあった。そのため，避難所の位置がわからず，指定の避難所以外の場所に避難をした可能性がある。今後，行政は代替えの避難所を選定し，周知する必要がある。

(5)　ハザードマップの有用性

過去の浸水経験により区分したハザードマップの所持・認知状況を図-9に示す。ハザードマップの所持については過去に床下，床上浸水の経験があった人の50%を超える人が所持しており，水害を経験していない人は33.3%，被害経験がない人は4.3%と極めて低い。また，ハザードマップを知らない人については過去に床下，床上浸水の経験がある人が10%台と低く，水害を経験していない人が78.3%，被害がない人が31.0%となっている。そして，「持っていないが，知っている」を加えた認知状況については浸水経験がある人で80%台，被害がない人でも68.7%であり，経験がない人の21.7%と比較すると高い。このことから，浸水経験によりハザードマップの所持や認識に差が出ることがわかる。

次に，ハザードマップを所持していた人のハザードマップの利用状況について図-10に示す。なお，床上浸水を経験した人の回答がなかったため，表から除外している。経験及び被害の有無を問わず，役立ったなかった人が多く，全体から見ても31.2%の人にしか役立っていない。役に立たなかった理由として，「浸水が速くて見る暇がなかった」，「自宅が浸水箇所ではなかった」等がある。一方，役立った理由として，「避難場所が載っていた」，「防災情報を確認した」があり，一定の効果があったことがわかる。片田ら[12]は行政による説明によって住民のハザードマップの内容に対する理解が深まることを指摘している。今後，行政は住民にハザードマップの周知を図るとともに住民に利用してもらえるような取組みをする必要がある。



（a）避難先（b）避難場所への避難時の危険意識

図-8　避難先と避難所への避難時の危険意識

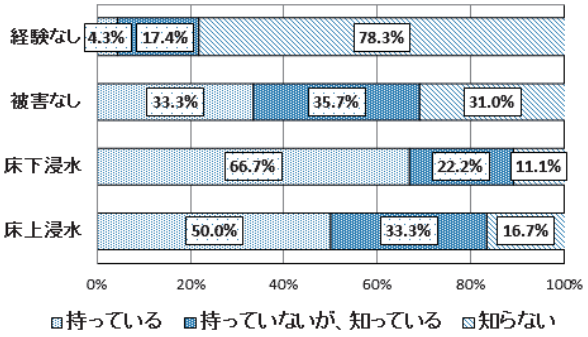


図-9　ハザードマップの所持・認知状況

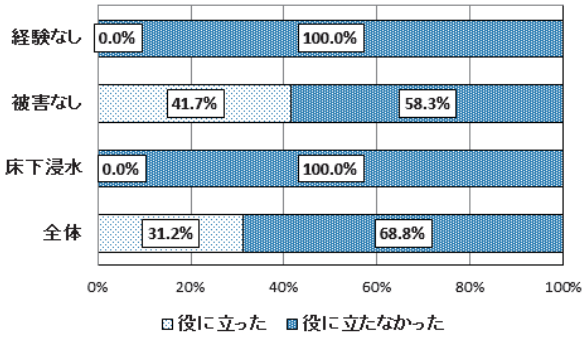


図-10　ハザードマップの利用状況

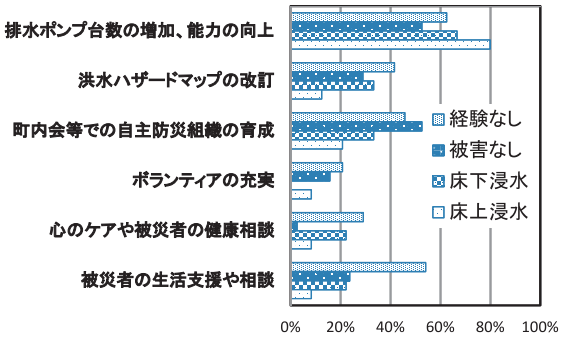


図-11　行政に対する内水対応への期待

⑹　行政に対する期待

過去の浸水経験により区分した行政に対する内水対応への期待を図-11に示す。浸水経験の有無を問わず排水ポンプ台数の増加，能力の向上への期待が最も高く，特に床下浸水を経験した人の80％が期待している。また，水害を経験していない人では，次に被災者の生活支援が期待されており，併せて心のケアやボランティアの充実が他の住民よりも高くなっている。これは浸水被害の90％が床上浸水であり，被害が大きかったことから災害後の対応への期待が高くなったと考えられる。そして，床上浸水を経験した人は排水ポンプ以外の期待はいずれも20％よりも低くくなっている。これは前述した嵩上げによる自衛の防災対応により浸水被害がなかったためと考えられる。なお，自主防災組織の育成やハザードマップの改訂において，床上浸水を経験している人以外では明確な違いみられないことがわかる。しかし，アンケート結果でハザードマップ浸水地区以外で被害が生じていることから，行政はハザードマップに今回の浸水区域を加えることや浸水箇所以外でも被害が生じることを説明する必要がある。

6. おわりに

本研究から得られた結果を以下に示す。

1）洪水経験により避難行動を比較すると,『過去に被害がない』,『床下浸水（軽度の被害)』の場合に危機意識が低い。危機意識の低さが水害時の避難行動等の防災対応の遅れにつながる恐れがあり，行政はこのような住民に対し，危機意識を向上させる取組みが必要である。

2）ハザードマップの所持・認知状況は，過去の洪水経験によって差があり，経験がない人，被害がない人は低い。さらに，住民全体を通して30％の人しか役に立ったと考えていない。行政はハザードマップを周知することは当然であるが，利用方法や有用性を伝える取組みが重要である。また，行政はハザードマップの浸水想定箇所以外でも浸水の危険があることを伝え，浸水に対する意識向上を図ることが求められる。

4）住民の行政に対する期待について，浸水経験の有無によらず，排水ポンプの排水容量向上への期待が高くなっている。また，水害を経験していない人は被災者の生活支援や心のケアへの期待が高くなっており，水害後の対応も重要である。ただ，水害後，行政は多くの職員を復旧事業にあてることが予想され，十分な支援ができない可能性があり，社会福祉団体やNPO法人などとの協働による体制づくりが必要である。

謝　　辞

本研究をまとめるにあたり，須賀川市役所から資料の提供を受けたことを付記し，謝意を表すとともに，アンケート調査に協力をしていただいた須賀川市の皆さんに深謝したい。また，アンケート調査の集計をしてくれた日本大学工学部土木工学科の学生に感謝したい。

参考文献

1）内閣府：平成23年台風第15号による被害状況等について，2011
2）国土交通省東北整備局：阿武隈川水系河川整備計画，2012
3）末次忠志：河川の減災マニュアル，pp. 226-228，山海堂，2004
4）及川康，河川洪水時の避難行動における洪水経験の影響構造に関する研究，自然災害科学，Vol. 18，№1，pp. 103-118，1999
5）片田敏孝，淺田順作，及川康：洪水氾濫に備える河川情報，日本災害情報学会1999研究発表論文集，№1，pp. 159-166，1999
6）及川康，片田敏孝：山地中小河川流域の豪雨災害に対する住民の危険度認識と情報理解に関する研究，土木学会水工論文集，第45巻，pp. 43-48，2001
7）首藤伸夫，木村喜代治，高橋迪夫，長林久夫：1986年台風10号による関東・東北地方の災害に関する調査研究，第11章阿武隈川の水害，昭和61年度文部科学省科学研究自然災害特別研究費報告（研究代表　高橋裕），pp. 103-111，1987
8）建設省福島工事事務所：出水報告　平成10年8月末豪雨阿武隈川出水状況，2000
9）井上直行，長林久夫：平成23年9月台風15号による須賀川市の内水被害について，土木学会第67回年次学術講演会，Ⅱ-1　75，pp. 349-350，2012
10）牛山素行，横幕早季，貝沼征嗣：2010年9月8日静岡県小山町豪雨災害における避難行動の検証，土木学会水工学論文集，第56巻，pp. 1093-1098，2012
11）淺田純作，片田敏孝，及川康：平成10年8月末郡山水害における住民の災害情報取得に関する実態分析，土木学会水工学論文集，第44巻，pp. 307-312，2000
12）片田敏孝，児玉真，佐伯博人：洪水ハザードマップの住民認知とその促進策に関する研究，土木学会水工学論文集，第48巻，pp. 433-438，2004

J. Coll. Eng. Nihon Univ. 57(1), September, 2015

Consistent Shape Function for Free Vibration of Linearly Tapered Timoshenko Beam Element

TRINH Thanh Huong*, Takumi HIBINO** and Buntara S. GAN**

Abstract

Tapered Beam elements are of great importance in a broad range of structural applications because of their optimized distribution of strength and weight compared with the uniform ones. Vibration analysis of beams with variable properties has been receiving great interest from engineers and researchers for a long time. This paper presents the way in which new shape functions are constructed and used for analyzing the free vibration of Timoshenko beams with linear variation in height or width and various boundary conditions. Natural frequencies from the present work are compared with those obtained by different formulation and approaches. The shape functions in the paper are derived for a solid rectangular beam with linearly taper changing in its sectional dimensions. With the aid of the consistently derived shape functions in the finite element calculation, the solution of vibration problems with the least number of elements can be evaluated with high accuracy. A detailed example is presented and compared with a reference work to illustrate the accuracy and computational efficiency for vibration analysis of linearly tapered Timoshenko beams.

Key words: Free Vibration, Natural Frequency, Tapered Beam, Shape Function, FEM, Timoshenko Beam

1. INTRODUCTION

Tapered beam elements are of great importance in a broad range of structural applications because of their optimized distribution of strength and weight compared with the uniform ones. Vibration analysis of beams with variable properties has been receiving great interest from engineers and researchers for a long time. This paper presents the way in which new shape functions are constructed and used for analyzing the free vibration of Timoshenko beams with linear variation in height and different boundary conditions. Natural frequencies in the work are compared with those obtained by various formulations.

Numerous investigations on vibration analysis of non-uniform beam have been published. Lee[1] and his co-workers presented a closed-form solution for the free and forced vibration of non-uniform Bernoulli-Euler beam with general elastically restrained boundary conditions. Tong[2] extended the step-reduction method to investigate free and forced vibration of Timoshenko beams with arbitrary non-homogeneity and arbitrary variable cross-section. Based on the classical conjugate beam principle, Aristizabal et al.[3] proposed an algorithm by which all the characteristic matrices could be obtained in a coherent manner from the beam's basic stiffness coefficients. With the aid of the derived formulas, the author found great applicability in the static, stability and vibration analyzes of non-prismatic beams and framed structures. Cleghorn et al.[4] constructed the shape functions from the homogenous solution of the governing equations for static deflections for free vibration of tapered Timoshenko beams. The author To[5,6] showed the explicit expressions for the element mass and stiffness matrices for vibration analysis of two higher order and linearly tapered beam elements including shear deformation and rotary inertia. By taking into account of shear deformation and rotary inertia, Gutierrez[7] and his co-workers presented two independent solutions (the optimized Rayleigh-Ritz method and the finite element approach) to analyze vibration of Timoshenko beams with non-uniform thickness. Mou[8] proposed an exact dynamic stiffness matrix for beams whose cross-sectional area and moment of inertia vary in accordance with any two arbitrary real number powers. The method is exact; however, the accurate of the results has to depend on the solver used to solve the exact frequency equation. Using numerical integration based on Gauss quadrature, Vu Quoc et al.[9] constructed the flexibility matrices of the tapered I-beam finite element with different slopes for the eigenvalue analyzes. Bayat et al.[10] presented a new implementation of the ancient method named Max-Min Approach and Homotopy Perturbation Method for analysis of large amplitude free vibrations of tapered beams.

In this paper, the analysis of free vibration of rectangular Timoshenko tapered beams is investigated by using

Received May 25, 2015

* Graduate School of Engineering Nihon University

** Department of Architecture College of Engineering Nihon University

the consistent new shape functions. Since the new shape functions were derived consistently from the Timoshenko beam theory, vibration of a beam by using the least number of elements can be evaluated with high accuracy. Trinh et al.[11] presented detailed of formulations to construct shape functions for linearly tapered Timoshenko beam.

2. TIMOSHENKO BEAM THEORY

The axial and vertical displacements of an arbitrary point in a beam can be expressed by,

$$\begin{cases} U(x,z) = u(x) - z\theta(x) \\ W(x,z) = w(x) \end{cases}. \tag{1}$$

where $U(x, z)$ and $W(x, z)$ are the global axial displacement and transverse displacement of an arbitrary point in a beam; $u(x)$, $w(x)$ and $\theta(x)$ are the local axial displacement, transverse displacement and rotation of the arbitrary point in the beam; (x, y, z) is the cartesian coordinate system where the x axis coincided with the neutral axis of the beam.

From the theory of linear elasticity, the axial and shear strains of the point can be given by the following equations.

$$\begin{cases} \varepsilon_x = u_{,x} - z\theta_{,x} \\ \gamma_{xz} = w_{,x} - \theta \end{cases}. \tag{2}$$

The first order strain energy and kinetic energy for a tapered Timoshenko beam element can be given by,

$$\begin{aligned} U &= \frac{1}{2}\int_0^l \int_{A(x)} (E\varepsilon_x^2 + \kappa G\gamma_{xz}^2) dA dx \\ &= \frac{1}{2}\int_0^l \int_{A(x)} \left[E(u_{,x} - z\theta_{,x})^2 + \kappa G(w_{,x} - \theta)^2 \right] dA dx \\ &= \frac{1}{2}\int_0^l \left[EA(x)u_{,x}^2 + EI(x)\theta_{,x}^2 + \kappa GA(x)(w_{,x} - \theta)^2 \right] dx \\ &= \int_0^l F(u_{,x}, w_{,x}, \theta, \theta_{,x}) dx \end{aligned} \tag{3a}$$

$$\begin{aligned} T &= \frac{1}{2}\int_0^l \int_{A(x)} \rho(u_{,t}^2 + w_{,t}^2) dA dx \\ &= \frac{1}{2}\int_0^l \int_{A(x)} \left[\rho(u_{,t} - z\theta_{,t})^2 + \rho w_{,t}^2 \right] dA dx \\ &= \frac{1}{2}\int_0^l \left[\rho A(x)u_{,t}^2 + \rho I(x)\theta_{,t}^2 + \rho A(x)w_{,t}^2 \right] dx \\ &= \int_0^l F(u_{,t}, w_{,t}, \theta_{,t}) dx \end{aligned} \tag{3b}$$

where $(.),x$ and $(.),t$ represent differentiations with respect to coordinate x and time t, respectively; κ is the shear correction factor, E and G are respectively the Young's and shear moduli; ρ is the density; A and I are respectively the cross section area and moment of inertia vary in the x direction.

From the compatibility conditions, the following equations are hold.

$$\begin{cases} -\dfrac{\partial}{\partial x}\dfrac{\partial F}{\partial u_{,x}} = 0 \\ -\dfrac{\partial}{\partial x}\dfrac{\partial F}{\partial w_{,x}} = 0 \\ \dfrac{\partial F}{\partial w_{,x}} - \dfrac{\partial}{\partial x}\dfrac{\partial F}{\partial \theta_{,x}} = 0 \end{cases} \tag{4}$$

By using Eq. 3a and 4, the equilibrium equations in the transverse direction force and bending moment are given by,

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(EA(x)\frac{\partial u}{\partial x}\right)=0\,, \tag{5a}$$

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(\kappa GA(x)\left(\frac{\partial w}{\partial x}-\theta\right)\right)=0 \quad , \tag{5b}$$

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(EI(x)\frac{\partial \theta}{\partial x}\right)+\kappa GA(x)\left(\frac{\partial w}{\partial x}-\theta\right)=0 \quad . \tag{5c}$$

The degrees of freedom of a two-node Timoshenko beam element shown in Fig. 1 are given as follow.

$$\{\mathbf{u}\}=\{u_1 \quad u_2\}^T \;,\quad \{\mathbf{w}\}=\{w_1 \quad \theta_1 \quad w_2 \quad \theta_2\}^T \tag{6}$$

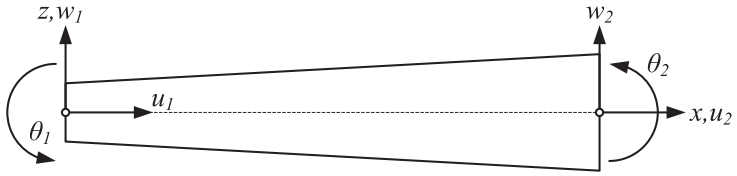


Fig. 1 Beam element degree of freedom

2.1 Formulation of tapered beam shape functions

Fig. 2 shows a linearly tapered beam with its cross section varying continuously along its length.

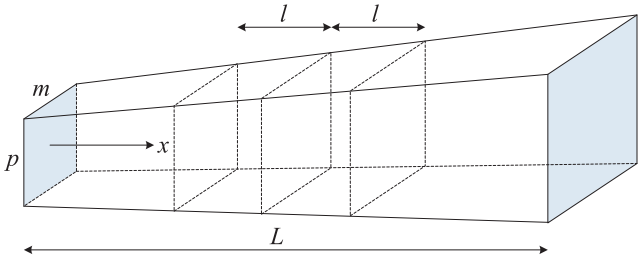


Fig. 2 Linearly tapered beam cross section

Linear equations used to vary the width, and height of the beam can be given as follow.

$$b(x)=\left(m+\frac{\alpha m}{L}x_{Ti}\right)+\frac{\alpha m}{L}x \quad , \quad 0\le x\le l \tag{7a}$$

$$h(x)=\left(p+\frac{\beta p}{L}x_{Ti}\right)+\frac{\beta p}{L}x \quad , \quad 0\le x\le l \tag{7b}$$

Parameters α and β are two linear rate of changes in width and height at the beginning and the end of the beam. l is the elemental length of the beam while L is the total length of the beam in global coordinate. The x_{Ti} and x are distances in the elemental and global coordinates of the beam, respectively.

3. SHAPE FUNCTION FOR TAPERED TIMOSHENKO BEAM

The second order shape functions for the axial displacement of the Timoshenko beam can be given as

$$u(x)=\begin{bmatrix}N_{u1} & N_{u2}\end{bmatrix}\begin{Bmatrix}u_1\\ u_2\end{Bmatrix}. \tag{8}$$

The axial displacement shape functions[11] and its k^{th} order derivatives ($k=0\,,1\,,2$) of the linear tapered Timoshenko beam varying in height or width can be provided in a series form as

$$N_{ui}=\frac{1}{\alpha}\sum_{i=1}^{2}\sum_{j=k}^{2}\mathbf{R}_{uij}\left(\frac{x}{L}\right)^j \;, \tag{9a}$$

$$\frac{d^k}{dx^k}(N_{ui}) = \frac{1}{\alpha L^k}\sum_{i=1}^{2}\sum_{j=k}^{2}\left\{\frac{j!}{(j-k)!}\mathbf{R}_{uij}\left(\frac{x}{L}\right)^{(j-k)}\right\}. \tag{9b}$$

where α is a constant defined from taper coefficients (for a uniform section $n=0$; $q=0$; $\alpha = 2m^2p^2$), and R_{uij} is the axial shape function coefficient corresponding to the i^{th} node and the j^{th} degree of freedom.

Similarly, the shape functions[11] for transverse displacement and rotation of the beam and their derivatives can be defined as followed:

$$N_{wi} = \frac{1}{\gamma}\sum_{i=1}^{4}\sum_{j=k}^{3}\mathbf{R}_{wij}\left(\frac{x}{L}\right)^{j}, \tag{10a}$$

$$\frac{d^k}{dx^k}(N_{wi}) = \frac{1}{\gamma L^k}\sum_{i=1}^{4}\sum_{j=k}^{3}\left\{\frac{j!}{(j-k)!}\mathbf{R}_{wij}\left(\frac{x}{L}\right)^{(j-k)}\right\}, \tag{10b}$$

$$N_{\theta i} = \frac{1}{\gamma}\sum_{i=1}^{4}\sum_{j=k}^{2}\mathbf{R}_{\theta ij}\left(\frac{x}{L}\right)^{j}, \tag{11a}$$

$$\frac{d^k}{dx^k}(N_{\theta i}) = \frac{1}{\gamma L^k}\sum_{i=1}^{4}\sum_{j=k}^{2}\left\{\frac{j!}{(j-k)!}\mathbf{R}_{\theta ij}\left(\frac{x}{L}\right)^{(j-k)}\right\}. \tag{11b}$$

where γ is a constant defined from taper coefficients (for a uniform section $n=0$; $q=0$; $\gamma = 12(1+\varphi)m^3p^3$), R_{wij} and $R_{\theta ij}$ are respectively the transverse and rotation shape function coefficients corresponding to the i^{th} node and the j^{th} degree of freedom.

4. FREE VIBRATION OF TIMOSHENKO BEAM

By applying the principle of stationary total energy to Eqs. 3a -3b and substituting the derivative shape functions from Eq. 9b, Eq.10b and Eq.11b, the following discrete beam element stiffness equations can be obtained in a matrix forms as

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{D}} + \mathbf{K}\mathbf{D} = \mathbf{F}_{ex} \tag{12}$$

where K and M are the stiffness matrix and mass matrix of the beam, respectively; F_{ex} is the external nodal load vector. In the free vibration analysis, the right-hand side of the Eq.12 is set to zero and a harmonic response, $D = \bar{D}\sin\omega t$ is assumed so that the Eq.12 deduced to an eigenvalue problem as

$$(\mathbf{K} - \omega^2\mathbf{M})\bar{\mathbf{D}} = \mathbf{0} \tag{13}$$

$$\mathbf{K} = \int_0^L \begin{bmatrix} [N_{u,x}] \\ [N_{\theta,x}] \\ [N_{w,x}] - N_\theta \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} EA(x) & 0 & 0 \\ 0 & EI(x) & 0 \\ 0 & 0 & \kappa GA(x) \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} [N_{u,x}] \\ [N_{\theta,x}] \\ [N_{w,x}] - N_\theta \end{Bmatrix} dx$$

$$\mathbf{M} = \int_0^l \begin{bmatrix} [N_u] \\ [N_\theta] \\ [N_w] \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} \rho A(x) & 0 & 0 \\ 0 & \rho A(x) & 0 \\ 0 & 0 & \rho I(x) \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} [N_u] \\ [N_\theta] \\ [N_w] \end{Bmatrix} dx$$

where ω is the circular frequency and $\bar{D}$ is the vibration amplitude.

5. NUMERICAL RESULTS

5.1 Clamped-Free Tapered Timoshenko Beam

Considering a Clamped-Free beam in Fig. 3- a) with $r^2 = I_0/(A_0L^2) = 0.08$, $m = 0.5$, $p = 0.3$, $L = 25p/4\sqrt{3}$, $E/\kappa G = 3.059$, $\kappa = 2/3$ made of steel (E=210 GPa, $\rho = 7850\ kg/m^3$). Non-dimensional frequencies of the beam that is defined as $\mu = \omega\sqrt{\rho A_0 L^4/(EI_0)}$ with different values of taper ratios α and β are listed in Table 1 in comparison with that of Attarnejad et al.[12]. From Table 1, the results of non-dimensional frequencies in Clamped-Free tapered example, the present formulation is in a good agreement with that of the results reported by Attarnejad et al.[12]. In both formulations, four elemental divisions for the beam were employed to obtain the results.

5. 2 Clamped-Clamped Tapered Timoshenko Beam

In order to illustrate the accuracy and computational efficiency in analyzing the vibration of tapered beams, two following examples are presented and compared with the results shown in the reference[13]. The following data of tapered Timoshenko beams are employed in both examples: E=210 GPa, G=80 GPa, ρ=7800 kg/m^3, m=p=2.54 cm, α = 0, β = −0.5, k=0.667, L=25.4 cm, A_0=6.45 cm^2, A_1=0.5A_0 cm^2. In which, A_0 and A_1 are the cross-sectional areas at the left end and the right end of the beam, respectively.

As the first example, considering a Clamped-Clamped tapered beam shown in Fig. 3- b). For comparison, the first five natural frequencies of the present formulation and the results by Cleghorn[13] are listed in Table 2 by varying the number of element division $nELE$. The result shows a superior rate of convergence of the natural frequency of the present formulation. From Table 2, the results of the first five natural frequencies of the present formulation give better results compared to the results by Cleghorn[13]. Furthermore, with only six elemental divisions, the present formulation show faster convergences results compared to twelve elements required by the results of Cleghorn[13]. Table 3 shows the corresponding mode shapes of the tapered Timoshenko beam of two, seven and twelve element divisions.

5. 3 Various Boundary Conditions of Tapered Timoshenko Beam

Let consider a tapered beam in Fig. 3- a), b), c) with $r^2=I_0/(A_0L^2)$=0.01, m=0.05, p=0.3, α = 0, L= $5p/\sqrt{3}$, $E/\kappa G$=3.12, $\kappa = 2/3$ made of steel (E=210 GPa, ρ=7850 kg/m^3) under various boundary conditions (Clamped-Free, Clamped-Clamped, and Clamped-Pinned). The cross-session is rectangular with constant width and linear-varying height. Non-dimensional frequencies of the beam that is defined as $\mu = \omega\sqrt{\rho A_0 L^4/(EI_0)}$ with two height ratio values (0 and −0.2) are showed in Table 3 in comparison with that of Attarnejad et al.[12]. From Table 4, the results of non-dimensional frequencies of the present formulation give lower convergence results under various boundary conditions compared to the results by Attarnejad et al.[12]. In both formulations, four elemental divisions for the beam were employed to obtain the results.

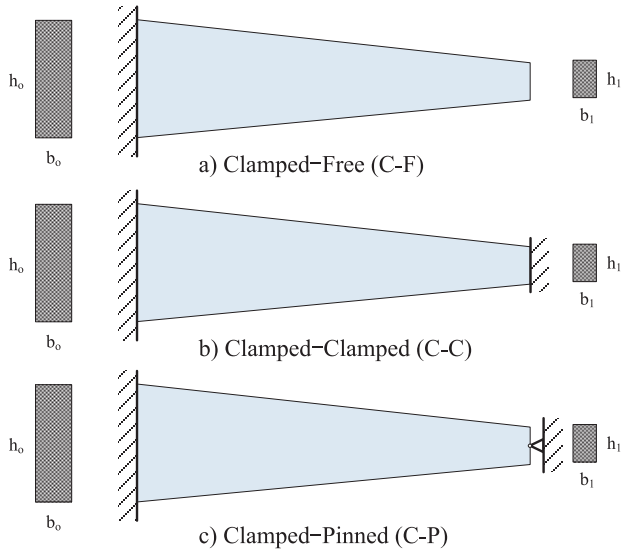


Fig. 3 Various boundary conditions of tapered beams

Table 1 Non-dimensional natural frequencies of Clamped-Free tapered Timoshenko beam

β		$\alpha = 0.0$		$\alpha = -0.4$		$\alpha = -0.6$		$\alpha = -0.8$	
		Present	Attarnejad[12]	Present	Attarnejad[12]	Present	Attarnejad[12]	Present	Attarnejad[12]
0.0	μ_1	3.3241	3.3240	3.9112	3.8605	4.4307	4.2883	5.0656	5.0062
	μ_2	16.2941	16.2889	17.2282	17.1270	18.0116	17.7867	19.0341	18.9024
	μ_3	36.7734	36.7073	37.5315	37.3608	38.2154	37.9216	39.0645	38.9849
	μ_4	58.5389	58.2778	59.3135	58.8777	60.0091	59.4326	61.0089	60.5467
-0.2	μ_1	3.4343	3.4247	4.0254	3.9544	4.5492	4.3953	5.1944	5.1198
	μ_2	15.8588	15.8905	16.7347	16.6816	17.4810	17.3110	18.4642	18.3917
	μ_3	35.3910	35.4301	36.1100	36.0704	36.7707	36.6141	38.0050	37.6454
	μ_4	57.0774	56.8910	57.7212	57.4552	58.3519	57.9630	59.1035	58.9814
-0.4	μ_1	3.5881	3.5605	4.1840	4.0941	4.7127	4.5386	5.2870	5.2703
	μ_2	15.2551	15.3528	16.0752	16.0970	16.7846	16.6961	17.8902	17.7423
	μ_3	33.5437	33.7876	34.2514	34.4189	34.8942	34.9495	35.9609	35.9542
	μ_4	54.6209	54.7561	55.2431	55.3024	55.8352	55.7815	56.7765	56.7371
-0.6	μ_1	3.8299	3.7623	4.4327	4.3011	4.9670	4.7498	5.5329	5.4887
	μ_2	14.4462	14.6448	15.2098	15.3418	15.8822	15.9106	17.0885	16.9223
	μ_3	31.0385	31.6239	31.7372	32.2486	32.3656	32.7688	33.8003	33.7509
	μ_4	50.8914	51.6225	51.5114	52.1660	52.0846	52.6309	53.5682	53.5473
-0.8	μ_1	4.2137	4.1177	4.6301	4.6655	5.0703	5.1194	5.8328	5.8629
	μ_2	13.7675	13.7574	14.1723	14.4055	14.8087	14.9439	15.9182	15.9229
	μ_3	28.6360	28.6360	29.1165	29.2519	29.3482	29.7625	30.7144	30.7255
	μ_4	46.8186	46.8289	47.4496	47.3811	47.7198	47.8432	48.7358	48.7392

Table 2 Natural frequencies of a Clamped-Clamped tapered Timoshenko beam

nELE		ω_1	ω_2	ω_3	ω_4	ω_5
2	**Cleghorn[13)]**	0.93856E+04	0.34163E+05			
	Present	0.95200E+04	0.25770E+05			
3	**Cleghorn[13)]**	0.92332E+04	0.25050E+05	0.59150E+05	0.11991E+06	
	Present	0.94300E+04	0.25260E+05	0.48360E+05	0.74550E+05	
4	**Cleghorn[13)]**	0.91972E+04	0.24561E+05	0.47191E+05	0.91471E+05	0.15040E+06
	Present	0.92700E+04	0.24390E+05	0.45380E+05	0.71120E+05	0.10098E+06
5	**Cleghorn[13)]**	0.91845E+04	0.24359E+05	0.46219E+05	0.74565E+05	0.12980E+06
	Present	0.92000E+04	0.24200E+05	0.44900E+05	0.69900E+05	0.98400E+05
6	**Cleghorn[13)]**	0.91788E+04	0.24261E+05	0.45701E+05	0.72990E+05	0.10616E+06
	Present	0.92000E+04	0.24200E+05	0.44900E+05	0.69900E+05	0.98400E+05
7	**Cleghorn[13)]**	0.91758E+04	0.24208E+05	0.45389E+05	0.72051E+05	0.10389E+06
	Present	0.92000E+04	0.24200E+05	0.44900E+05	0.69900E+05	0.98400E+05
8	**Cleghorn[13)]**	0.91740E+04	0.24176E+05	0.45195E+05	0.71395E+05	0.10248E+06
	Present	0.92000E+04	0.24200E+05	0.44900E+05	0.69900E+05	0.98400E+05
9	**Cleghorn[13)]**	0.91728E+04	0.24155E+05	0.45067E+05	0.70944E+05	0.10138E+06
	Present	0.92000E+04	0.24200E+05	0.44900E+05	0.69900E+05	0.98400E+05
10	**Cleghorn[13)]**	0.91720E+04	0.24141E+05	0.44979E+05	0.70628E+05	0.10057E+06
	Present	0.92000E+04	0.24200E+05	0.44900E+05	0.69900E+05	0.98400E+05
11	**Cleghorn[13)]**	0.91714E+04	0.24131E+05	0.44916E+05	0.70398E+05	0.99963E+05
	Present	0.92000E+04	0.24200E+05	0.44900E+05	0.69900E+05	0.98400E+05
12	**Cleghorn[13)]**	0.91710E+04	0.24123E+05	0.44869E+05	0.70226E+05	0.99506E+05
	Present	0.92000E+04	0.24200E+05	0.44900E+05	0.69900E+05	0.98400E+05

Table 3 Mode shapes of two, seven and twelve divisions Clamped-Clamped tapered Timoshenko beam

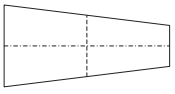
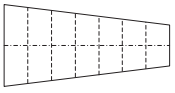
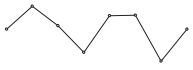
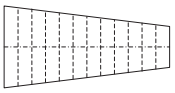
nELE		ω_1	ω_2	ω_3	ω_4	ω_5
2		0.95200E+04	0.25770E+05			
7		0.92000E+04	0.24200E+05	0.44900E+05	0.69900E+05	0.98400E+05
						
12		0.92000E+04	0.24200E+05	0.44900E+05	0.69900E+05	0.98400E+05

Table 4 Non-dimensional natural frequencies of tapered Timoshenko beams with various boundary conditions

β	*Boundary Condition*		μ_1	μ_2	μ_3	μ_4	μ_5
0	*C-F*	**Present**	3.22720	14.47780	31.50240	48.19680	62.87280
		Attarnejad[12)]	3.22713	14.46893	31.50254	47.90902	62.34702
	C-P	**Present**	11.08680	27.17590	45.11830	59.44520	63.59720
		Attarnejad[12)]	11.08250	27.11438	44.84353	59.20303	63.33950
	C-C	**Present**	13.83890	28.58680	45.95580	61.42410	68.86960
		Attarnejad[12)]	13.83476	28.51793	45.66595	61.86205	68.28361
-0.2	*C-F*	**Present**	3.34530	14.32890	30.91900	48.13030	65.05240
		Attarnejad[12)]	3.33065	14.28921	30.71080	47.75021	64.99695
	C-P	**Present**	10.75020	26.31190	44.03880	62.05360	68.56940
		Attarnejad[12)]	10.68689	26.10717	43.59072	61.65596	68.42075
	C-C	**Present**	13.31860	27.95770	45.12020	61.90550	72.36990
		Attarnejad[12)]	13.22227	27.77822	44.69713	61.80658	72.55473

6. CONCLUSIONS

In the present work, consistent formulation of shape functions for the linearly varying width and height of a Timoshenko beam section were derived based on the minimum total potential energy principle. By using the derived shape functions, in the finite element formulations, the solution of vibration problems with the least number of elements can approximate the results with high accuracy.

REFERENCES

1) S. Y. Lee, H. Y. Ke and Y. H. Kuo: Analysis Of Non-uniform Beam Vibration. Journal of Sound and Vibration, 142, 1, pp.15-29 (1990)

2) X. Tong, B. Tabarrok and K. Y. Yeh: Vibration Analysis Of Timoshenko Beams With Non-homogeneity And Varying Cross-section. Journal of Sound and Vibration, 186, 5, pp.821-835 (1995)

3) J. D. Aristizabal and Ochoa: Static, Stability And Vibration Of Non-Prismatic Beams And Columns. Journal of Sound and Vibration, 162, 3, pp.441-455 (1993)

4) W. L. Cleghorn and B. Tabarrok: Finite Element Formulation Of A Tapered Timoshenko Beam For Free Lateral Vibration Analysis. Journal of Sound and Vibration, 152, 3, pp.461-470 (1992)

5) C. W. S. To: Higher Order Tapered Beam Finite Elements For Vibration Analysis. Journal of Sound and Vibration, 63, 1, pp.33-50 (1979)

6) C. W. S. To: A Linearly Tapered Beam Finite Element Incorporating Shear Deformation And Rotary Inertia For Vibration Analysis. Journal of Sound and Vibration, 78, 4, pp.475-484 (1981)

7) R. H. Gutierrez, P. A. A. Laura and R. E. Rossi: Natural Frequency Of Vibration Of A Timoshenko Beam Of Non-uniform Thickness. Journal of Sound and Vibration, 145, 2, pp.341-344 (1991)

8) Y. Mou, R. P. S. Han and A. H. Shah: Exact Dynamics Stiffness Matrix For Beams Of Arbitrarily Varying Cross Sections. International Journal For Numerical Methods In Engineering, 40, pp.233-250 (1997)

9) L. Vu Quoc and P. LeGer: Efficient Evaluation Of The Flexibility Of Tapered I-Beams Accounting For Shear Deformations. International Journal For Numerical Methods In Engineering, 33, pp.553-566 (1992)

10) Mahmoud Bayat, I. Pakar and Mahdi Bayar: Analytical Study On The Vibration Frequencies Of Tapered Beams. Latin American Journal of Solids and Structures, 8, pp.149-162 (2011)

11) T.H. Trinh and Buntara S. Gan: Development of Consistent Shape Functions for Linearly Solid Tapered Timoshenko Beam. Journal of Structural and Construction Engineering, Transaction of AIJ, 80, 713, pp.1103-1111 (2015)

12) R. Atarnejad, S. J. Semnani and A. Shahba: Basic Displacement Functions For Free Vibration Analysis Of Non-prismatic Timoshenko Beams. Finite Elements in Analysis and Design, 46, pp.916-929 (2010)

13) W. L. Cleghorn and B. Tabarrok: Finite element formulation of a tapered Timoshenko beam for free lateral vibration analysis, J. Sound and Vibration, 152, 3, pp.461-470 (1992)

14) O.O. Ozgumus and M.O. Kaya: Flapwise Bending Vibration Analysis Of A Rotating Double-tapered Timoshenko Beam. Arch Appl Mech, 78, pp.379-392 (2008)

15) A.Y.T Leung, W.E. Zhou, C.W. Lim, K.K. Yuen and U. Lee: Dynamic Stiffness For Piecewise Non-uniform Timoshenko Column By Power Series − Part I: Conservative Axial Force. Int. J. Numer. Meth. Eng., 51, pp.505-529 (2001)

日本大学工学部　紀要　第57巻　第1号　September,　2015

東日本大震災に伴う福島県の歴史的建造物の被害と修復の状況

速　水　清　孝*

ON DAMAGE AND RESTORATION OF HISTORICAL BUILDINGS IN FUKUSHIMA PREFECTURE: AFTER GREAT EAST JAPAN EARTHQUAKE

Kiyotaka HAYAMI*

Abstract

This paper is a report about actual condition of damage and restoration of historical buildings in Fukushima prefecture after Great East Japan Earthquake. As a result of 1,119 building research, damages are not critical since 90% historical buildings in Fukushima prefecture are wooden. However, over 400 buildings still need to be restored. There was a peak of restoration in 2011, yet over half of the buildings have not been restored. There is a view from classification of cultural properties, affecting restoration of registered cultural property to be delayed.

Key words: Great East Japan Earthquake, Fukushima prefecture, Historical Building, Damage, Building restoration

要　　約

本稿は，東日本大震災に伴う福島県の歴史的建造物の被害と修復の進捗に関する報告である。本県の文化財をはじめとする歴史的価値があると考えられる1,119棟の建造物の震災での被害を調べたところ，何らかの被害のあったものは755棟に及んでいた。それら修復を要する建造物のうち，文化財建造物やそれに準じるものに指定・登録・認定されたもの576棟に限定して修復の進捗を探ると，半数以上が未修復であり，また，修復は震災直後の2011年度に早くもピークを迎え，以後急速に減り，修復すべきものを残す形で2015年度にはほぼ終わりを告げることが分かった。会津若松市や白河市が条例などで指定する景観建造物の修復が2011年度に大きく進んだことがそうした傾向を顕著なものにしていた。これに次いで進むのは，順に県・国・市町村指定文化財であったが，その一方で，工事費に対する補助の不利な国登録有形文化財は遅れがちであるという，文化財等の種類による差異を把握した。

キーワード：東日本大震災，福島県，歴史的建造物，被害，修復

1．はじめに

筆者は，2011（平成23）年3月11日の東日本大震災（以下，震災）の発生以来，日本建築学会建築歴史・意匠委員会災害特別調査研究WG（以下，WG）[1]の一員としての活動をはじめ，福島県の歴史的建造物の被害の把握と復旧の支援に務めてきた。

その過程で得た状況については，速報となる『2011年東北地方太平洋沖地震災害調査報告』（以下，『速報』）[2]に被害を報告し，また既報「東日本大震災に伴う福島県の建築物の公費解体と修理補助について」[3]では，歴史的建造物の保護の観点から，震災に伴い市町村が実施した公費解体という制度に潜む問題を指摘した。

WGとしての被災調査は，歴史的建造物を包括的に把握するというよりはむしろ，震災発生時に「日本建築学会歴史的建築総目録データベース」（以下，「データベース」，http://glohb-aij.eng.hokudai.ac.jp/）に収録されていた建造物や国登録有形文化財建造物を中心とするというように対象が限定されていた。そのこともあって調査は1年で打ち切りとなり，翌2012（平成24）年度からは，活動を，当初より並行して実施されていた，被害を受けた建造物の復旧支援に移していった。

本県の場合，主に調査に参加可能な専門家の不足から，震災発生時に「データベース」に「現存有」として収録されていた660棟のうち，『速報』に報告できたのは188棟に留まっており，それ以後のものを加えても2011年度のみでは成果として不十分と言わざるを得なかった。

「データベース」には，必ずしも歴史的に価値のある建造物が悉皆的・網羅的に収録されているわけではない。それでも，すでに何らかの文化財になっているものばかりでなく，現時点では文化財ではないものの将来文化財になり得るものが多く含まれていることも確かである。それを考えると，筆者にはこのWGでの被災調査終了をもって本県の被災調査終了としてよいかどうかについて疑問があった。

平成27年5月30日受理

＊日本大学工学部建築学科

また，「データベース」への収録の有無とは無関係に，文化財建造物については，国指定は文化庁が，県指定は県が，市町村指定は市町村が，といったようにそれぞれ別な被災調査が実施されていた。しかし，調査主体や実際の調査員がそれぞれに異なり細分化されていることで，歴史的建造物全体を考えた時に，かえって遺漏の残る可能性があることが懸念された。

さらに，建築史や土木史などの研究の進展に伴い新たに登場してきたカテゴリーに該当する建造物の，本県内の残存状況を把握するために震災以前に行われていた，近代和風建築調査[4]（1998（平成10）年）などの調査や，福島県建築士会郡山支部が地域の建築資産の発掘を目的に2005（平成17）年に行った『身近な郡山の建築遺産50選』などの地元有志による調査[5]で拾い上げられた建造物には，「データベース」に未収録の建造物が含まれていた。こうしたものも一定の価値ある歴史的建造物と考えるべきであり，これらの建造物の震災での動向についても把握することが必要と感じた。

こういったことを考えるうちに，仮に本県一県に限ったとしても，被災地は広く，また調査対象は膨大ではあるものの，未曽有の大災害であることを思えば，広く歴史的建造物を集め，その被害の全体像を可能な限り同じ目で見る形で調査・報告がなされることが必要なのではないか，と思うようになった。

そこで筆者は，WG による2011年度の調査以後も被災調査を続け，震災から 3 年目にあたる2013（平成25）年の暮れまでに，本県に建つ歴史的建造物，すなわち①．国県市町村指定文化財建造物・国登録有形文化財建造物・国県市町村史跡や国県市町村指定有形民俗文化財に含まれる建造物・重要伝統的建造物群保存地区内の歴史的価値のあると思われる建造物（つまり，文化財保護法（昭和25年法律第214号）とそれに基づく条例で国県市町村が指定・登録した建造物），②．市が景観条例や地域における歴史的風致の維持及び向上に関する法律（平成20年法律第40号，以下，歴史まちづくり法）で指定した建造物（以下，景観建造物），③．経済産業省が近代化産業遺産に認定した建造物（以上②・③に該当する文化財保護法以外の法的根拠によって国県市町村が指定・登録・認定した建造物を，本稿では，文化財に準じる建造物と称することにする），④．震災発生時に「データベース」に「現存有」とされていた建造物，⑤．近代和風建築調査と近代化遺産調査[6]（2010（平成22）年）で報告された建造物，そして⑥．『身近な郡山の建築遺産50選』のように地元建築士会等によって拾い上げられていた歴史的に価値のあると思われる建造物[7]について，被害の概要の把握を終えた。

これによって，震災発生時に拾い上げられていた本県の歴史的建造物について，原則として，事故当初に政府が避難を求めた福島第一原子力発電所から30キロメートル圏内に該当する地域にあるものや，土木構造物・電力関連の生産施設・所在地不明のもの・所有者の協力が得られず外観すら見ることのできなかったものを除く，調査可能な範囲で全棟の概要を把握したことになった。ちなみにこれは筆者が知る限り，少なくとも東北地方では他に例を見ない。

とはいえこの調査は，あくまでも初動のものであり，本来であれば震災発生からほどなく完了すべきものであった。それを震災から 2 年を超えて進めることになったこともあって，調査の中では次第に修復を終えた建造物を目にするようになっていた。

そこで，調査は，所有者に不安を与えないよう外観の目視に留めることを原則とした当初の形から，2 年目以降は，できる限り内観も見，また，適宜，所有者に修復の有無・部位・方法を尋ねることを加える形に改め，行っていった。

また，修復されたものが目に付き始める中で，どのようなものが修復され，逆に，修復されずにいるのか。例えば，国県市町村の指定文化財と国登録有形文化財では，修復についてどのような差異が現れたのか，といったことを把握しておくことも必要と考え，調べることとした。

よって，本稿ではまず，震災に伴う福島県の歴史的建造物の被害の概要を述べ，その上で修復の進捗を報告する。

この種の事柄は，『速報』はじめ，この 7 月に日本建築学会が発行した震災の最終報告書[8]などの中にも断片的には記されている。また，新聞記事をはじめ様々に報じられてもきたから，そうしたものから推し量って知ることも可能ではあろう。

しかしながら，例えば上記の両報告書のそれぞれの部分はごく限られた紙幅のため記述は十分とは言い難く，また少なくとも最終報告書で本県を担当した筆者の稿[9]では，脱稿の時期的制約から，本県の被害と修復の全体像を記したものとはなっていない。また，その他新聞等で報じられたものも，本報告ほどの内容を持たず，そして本県については知る限りこの規模の調査はなされていない。そうした意味で本稿は意味のあるものと考えている。

2．福島県の歴史的建造物の被害状況

2．1　歴史的建造物の被災調査について

まず本県の歴史的建造物の被害について記すことにするが，はじめに，その前提となる建造物の数を整理する必要がある。

これは，前記①～⑥には，例えば，a．①国指定文化財であり，かつ③近代化産業遺産であるといったように複数の文化財ないしそれに準じる制度によって重複して指定・登録・認定されたものがある（図 1 ）。b．1件が 1 棟の場合もあれば，1件の中に複数棟が含まれる場合もある。そして，c．重要伝統的建造物群保存地区は範囲で指定されるため，その中に含まれる歴史的価値のある建造物の具体的な棟数が不明である，といった問題があるためである。

そこで，a・b についてはこれを精査し，c については，築年数などの点から歴史的価値のあると思われるものを数え直すなどしたところ，震災発生時に存在した本県の歴史的建造物は1, 139棟となった。

ちなみに，本県の被災調査は，筆者に加え，2011年度には WG への参加者である日本建築学会・日本建築家協会・

「安積歴史博物館(旧福島県尋常中学校本館)」(郡山市，1889年，国指定・近代化産業遺産，2011年筆者撮影)

「白河ハリストス正教会」(白河市，1915年，県指定・景観建造物，2012年筆者撮影)

「旅館・向瀧」(会津若松市，明治30年代-昭和10年代，国登録･景観建造物，2012年筆者撮影)

「甲斐家住宅」(喜多方市，1917-23年，国登録・近代化産業遺産，2013年筆者撮影)

図１　複数の文化財ないしそれに準じる制度で指定・登録・認定された福島県の歴史的建造物の例

福島県建築士会会津支部と同郡山支部の有志，そして会津若松市都市計画課によって行われ，2013年12月までに上記の1,139棟のうち，所在地不明・所有者の協力が得られないなどによる20棟を除く計1,119棟について実施した。

したがって本稿は，筆者のみの調査によるものだけでなくWGによる調査結果を含んだ形で報告することになる。そのため，以下，本稿において「筆者ら」と記した場合には，本県のこの被災調査の体制のことを指すことにする。

ところで本被災調査は，前述のように震災発生直後の短期間に全てを完了させることが望ましいものであった。調査が長引けばそれだけ，被害が震災に起因するか否かが分かりにくくなるからである。また，やはり前述のように，本被災調査は当初WGで実施され，それゆえそこでは，自ずと複数の調査員が入り乱れる形で調査が行われていた。これは歴史的建造物の，被害の概要の把握を急ぐことと拙速な取り壊しを防ぐことに重点が置かれ，その意味では有効であった。しかしその半面，いかに専門家の判定とはいっても，個々の調査員によって微妙な差異の出ることを防ぎ得ないものとなっていた。

これらの点で，本被災調査の判定結果は，これを統計として扱うには不向きな性格を備えることも確かである。しかし，これについて前段落で懸念した２つの事項のうち，前者，調査の長期化が判定に及ぼす影響に関しては，２年目からではあるものの，前述のように調査方法の改善によって補った。また後者の，複数の調査員が介在することによる判定の差異については，同一建造物を異なる調査員が複数回訪れたもの[10]を含めて，調査棟数の内訳としては，筆者以外のものが350棟，筆者と他者が共同で行ったものが25棟，筆者単独のものが860棟であった。したがって筆者は，885棟を調べたことになり，これは全体のおよそ８割に該当する。これらによって本県の被災調査のデータは，比較的統計として扱うことが許されるレベルのものになっていると考えている。

２．２　歴史的建造物の被害状況

さて，そうした前提の下に，被災調査の結果から，表１には本県の歴史的建造物の構造別の割合を，表２には被害の総合と部位別の判定を，表３には被害の構造別の総合判定を示した。なおそれぞれの判定は，WGが震災後の被災調査開始にあたって設けた基準[11]に則って行った。

まず，表１から本県の歴史的建造物の構成は，木造（67.6%）と土蔵造（19.8%）で全体の９割近くを占めていることが分かる。

続いて，歴史的建造物の被害の傾向を表２の総合判定に

表１　福島県の歴史的建造物の構造

上：棟，下：%

木造	土蔵造	ＲＣ造	鉄骨造	石造	煉瓦造	混構造	不明*	計
758	222	24	0	22	39	32	22	1,119
67.6	19.8	2.1	0.0	2.0	3.5	2.9	2.0	100

*：出典に未記載で，かつ調査票に記入なしのもの
ＲＣ造：鉄筋コンクリート造

表２　福島県の歴史的建造物の震災による被害（総合・部位別）

上：棟，下：%

被害なし	軽微	部分破壊	傾斜	半壊	全壊	不明*	計
＜総　合＞							
279	417	227	57	52	3	84	1,119
24.9	37.3	20.3	5.1	4.6	0.3	7.5	100
＜部位別＞							
基礎							
729	190	55	22	4	1	118	1,119
65.1	17.0	4.9	2.0	0.4	0.1	10.5	100
軸部・架構							
698	90	45	104	18	1	163	1,119
62.4	8.0	4.0	9.3	1.6	0.1	14.6	100
屋根							
793	75	111	9	15	2	134	1,119
70.6	6.7	9.9	0.8	1.3	0.2	10.2	100
外壁							
426	275	269	14	39	3	93	1,119
38.1	24.6	24.0	1.3	3.5	0.3	8.3	100
内部							
272	159	111	12	20	1	544	1,119
24.3	14.2	9.9	1.1	1.8	0.1	48.6	100

*：所在不明・福島第一原子力発電所近傍にあるもの・調査票判定欄に無記入のもの

表３　福島県の歴史的建造物の震災による被害（構造別，総合判定）

上：棟，下：%

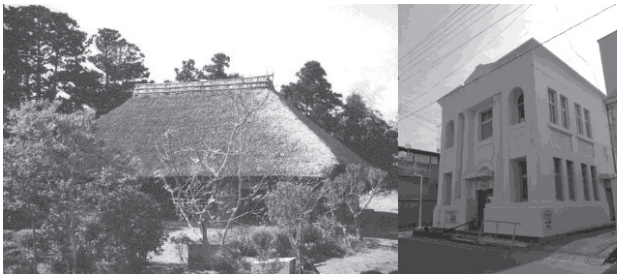
被害なし	軽微	部分破壊	傾斜	半壊	全壊	不明*	計
木造							
216	305	123	50	29	3	32	758
28.5	40.2	16.2	6.6	3.8	0.4	4.2	100
土蔵造							
34	71	83	5	17	0	12	222
15.3	32.0	37.4	2.3	7.7	0.0	5.4	100
ＲＣ造							
11	6	1	0	0	0	6	24
45.8	25.0	10.3	0.0	0.0	0.0	12.8	100
鉄骨造							
0	0	0	0	0	0	0	0
－	－	－	－	－	－	－	－
石造							
3	9	4	0	2	0	4	22
13.6	40.9	18.2	0.0	9.1	0.0	18.2	100
煉瓦造							
13	15	4	0	2	0	5	39
33.3	38.5	10.3	0.0	5.1	0.0	12.8	100
混構造							
2	11	12	2	2	0	3	32
6.5	35.5	38.7	6.5	6.5	0.0	9.4	100
不明							
0	0	0	0	0	0	22	22
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	100	100

*：所在不明・福島第一原子力発電所近傍にあるもの・調査票判定欄に無記入のもの
ＲＣ造：鉄筋コンクリート造

「旧佐藤家住宅」（国見町，江戸中期頃，県指定，部分破壊，2011年狩野勝重博士撮影）
外壁の例（亀裂）

「桑折町文化記念館（旧伊達郡役所）」（桑折町，1883年，国指定，部分破壊，2012年筆者撮影）
内壁の例（剥落）

図２　土壁に被害を受けた福島県の歴史的建造物の例



「観海堂」（新地町，明治期，県史跡，全壊，出典：「うつくしま電子辞典」http://www.gimu.fks.ed.jp/shidou/jiten/）

「旧四倉銀行」（いわき市，1926年，国登録，部分破壊，2011年大橋竜太博士撮影）

図３　津波で被害を受けた福島県の歴史的建造物の例

うかがうと，被害なし279棟（24.9%），軽微417棟（37.3%），部分破壊227棟（20.3%），傾斜57棟（5.1%），半壊52棟（4.6%），全壊３棟（0.3%）で，傾斜以上の被害は１割に留まっている。

また，部位（表２）としては，外壁に被害が目立つ。これは，土蔵などの厚塗りの土壁の亀裂などが目に付いたことの反映である（図２）。なお，調査の制約から不明が多いものの，内壁にも相応に被害があったと考えるべきである。内壁については，柱と壁の取り合い部（チリ廻り）の亀裂や，総じて塗厚の薄い土壁や紙張壁の紙自体の亀裂・脱落が目立った。この薄い土壁については，斜め木摺りの上にわずかな厚みで塗った「桑折町文化記念館（旧伊達郡役所）」（桑折町，国指定，部分破壊）のように，近代になって登場した構法の影響を指摘する報告もある[12]。

さらに，被害を構造別に示した表３からは，木造・鉄筋コンクリート造・石造・煉瓦造の被害は，比較的軽微なものが多く，それに比べると土蔵造・混構造は部分被害の割合が目立つことが分かる。とはいえ，いずれの構造でも，傾斜以上の深刻な被害はほとんどない様子も見て取れる。

これらのことから，本県の歴史的建造物の被害は総じて小さく済んだと言ってよいが，その理由としては，多くが木造という本県の歴史的建造物の構成と，木造に被害を及ぼしやすい周期の振動が少なく，その結果木造に被害を及ぼしにくかった今回の地震の性質[13]がまずは大きい。また，津波を被った地域に建つ歴史的建造物（図３）が，「観海堂」（新地町，県史跡，全壊）や「旧四倉銀行」（いわき市，国登録，部分破壊（のちに解体））などそれほどに多くないことも一因に挙げることができるだろう。

それでも，内外壁に亀裂が入ったものや軸部が傾斜したもの，度重なる余震で地盤に傷みが出たものも散見され，総合判定から見れば，軽微以上の被害のあった計755棟（67.5%）が何らかの修復を要するものとなる[14]。

なお，既報[15]に触れたものの，こうした被害を受けたものの中には，筆者らの判定で軽微ないし部分破壊ほどであったにもかかわらず解体されたものもある。

３．福島県の歴史的建造物の修復状況

３．１　文化財等建造物の修復状況

続いて本県の歴史的建造物の修復状況を述べる。

これについては，本来は被災調査の対象と数を一致させ，1,119棟全てに対して実施することが望ましい。しかしその徹底には多くの再調査が生じ，時間的制約の面から現実的でなかった。

そこで修復については，歴史的建造物のうち，前記①の文化財建造物や②・③の文化財に準じる建造物（以下，これらを文化財等建造物，ないし文化財等と総称することがある）に限ることとし，県市町村の文化財担当者からの聞き取りを交えたものとした。すなわち，修復については，2013年９月時点に県内で指定・登録・認定されていた文化財等建造物576棟[16]を対象とした。

この576棟のうち，筆者らの被災調査で被害を認め，修復が必要と判断した402棟に，県市町村の別な調査で被害が判明し，修復された22棟を加えた計424棟を，被害の大きさと文化財等の種類に注目して示したのが表４である。

なおここには，前述のように，文化財でありかつ文化財に準じる建造物であるというように，複数の文化財ないしそれに準じる制度によって指定・登録・認定されたものが含まれている。全21棟あるそれらのうち，筆者らの被災調査で被害を認めたのは11棟あった。本表中の各々の文化財等の中にはこれらの重複を含み，逆に全体の計からはこれらを除く形で示している。

この表から，修復済み・修復中・具体的な修復予定が決まっているもの（以下，修復の目途がついたもの）は計151棟（35.6%）に留まり，273棟（64.4%）に予定がないという状況にあることが分かる。

ただし，この修復の有無の前提となる修復の要否についての県市町村の認識は，筆者とは異なる可能性がある。すなわち，筆者の修復の要否の判定は，できる限り統計的に扱うことを念頭に置いて，軽微なものであっても，被害があれば一律に修復を要するものとみているが，県市町村のものはより所有者の生活実態に即した上での判定となっているものと思われる。

そのため，これら予定のないものには，「修復したいが予算や所有者の高齢化によりできない」ことを理由とするものはもちろん，例えば真壁のチリ廻りに亀裂があったものには，「被害はあるものの軽微」として修復不要[17]と，あるいは早急には修復は要さないとされたものもある。さらに被害そのものを「震災によるものではない」，「経年劣化による」として修復を急がないとされたものもあり，そ

表４　福島県の文化財とそれに準じる建造物の修復状況（要修復，被害別）

			被害*1	修復済	修復中	修復予定有	修復予定無	計
文化財建造物	指定文化財建造物	国宝・国	被害なし	6	0	0	5	11
			軽微	4	0	0	13	17
			部分破壊	2	1	1	2	6
			傾斜	0	1	1	2	4
			半壊	0	1	0	1	2
			全壊	0	0	0	0	0
			小計　棟	12	3	2	23	40
			%	30.0	7.5	5.0	57.5	100
		県	被害なし	1	0	0	0	1
			軽微	5	2	3	9	19
			部分破壊	8	0	1	1	10
			傾斜	1	1	0	0	2
			半壊	0	0	2	3	5
			全壊	0	0	0	0	0
			小計　棟	15	3	6	13	37
			%	40.5	8.1	16.2	35.1	100
		市町村	被害なし	4	1	0	0	5
			軽微	15	2	1	41	60
			部分破壊	4	0	0	7	11
			傾斜	4	0	0	12	16
			半壊	1	1	0	3	5
			全壊	0	0	0	1	1
			不明*4	0	0	2	0	2
			小計　棟	28	5	3	64	100
			%	28.0	5.0	3.0	64.0	100
	国登録有形文化財	国	被害なし	4	0	0	1	5
			軽微	11	1	0	29	41
			部分破壊	3	0	1	19	23
			傾斜	0	0	0	2	2
			半壊	2	0	0	0	2
			全壊	0	0	0	0	0
			不明*4	1	0	0	2	3
			小計　棟	21	1	1	53	76
			%	27.6	1.3	1.3	69.7	100
	史跡	県	被害なし	0	0	0	0	0
			軽微	0	0	0	1	1
			部分破壊	0	0	0	0	0
			傾斜	0	0	0	0	0
			半壊	0	0	0	0	0
			全壊	0	0	0	1	1
			小計　棟	0	0	0	2	2
			%	0.0	0.0	0.0	100	100
		市町村	被害なし	0	0	0	0	0
			軽微	0	0	0	2	2
			部分破壊	0	0	0	0	0
			傾斜	0	0	0	0	0
			半壊	0	0	0	0	0
			全壊	0	0	0	0	0
			小計	0	0	0	2	2
			%	0.0	0.0	0.0	100	100
	指定有形民俗文化財	国	被害なし	0	0	0	0	0
			軽微	0	0	0	1	1
			部分破壊	0	0	0	0	0
			傾斜	0	0	0	0	0
			半壊	0	0	0	0	0
			全壊	0	0	0	0	0
			小計　棟	0	0	0	1	1
			%	0.0	0.0	0.0	100	100
		市町村	被害なし	0	0	0	0	0
			軽微	0	0	0	0	0
			部分破壊	0	0	0	0	0
			傾斜	0	0	0	0	0
			半壊	0	0	1	0	1
			全壊	0	0	0	0	0
			小計　棟	0	0	1	0	1
			%	0.0	0.0	100	0.0	100
	重要伝統的建造物群保存地区	国	被害なし	1	0	0	0	1
			軽微	0	0	0	41	41
			部分破壊	0	0	0	7	7
			傾斜	0	0	0	2	2
			半壊	0	0	0	0	0
			全壊	0	0	0	0	0
			小計	1	0	0	50	51
			%	2.0	0.0	0.0	98.0	100
文化財に準じる建造物	近代化産業遺産		被害なし	1	0	0	0	1
			軽微	1	0	0	2	3
			部分破壊	2	0	0	1	3
			傾斜	0	0	0	0	0
			半壊	0	0	0	0	0
			全壊	0	0	0	0	0
			小計　棟	4	0	0	3	7
			%	57.1	0.0	0.0	42.9	100
	市景観建造物*2		被害なし	4	1	0	0	5
			軽微	19	1	4	28	52
			部分破壊	19	0	0	26	45
			傾斜	1	0	0	3	4
			半壊	4	0	0	8	12
			全壊	0	0	0	0	0
			小計　棟	47	2	4	65	118
			%	39.8	1.7	3.4	55.1	100
計*3			棟	121	13	17	273	424
			%	28.5	3.1	4.0	64.4	100

※：表中，修復に関する事項は2013年９月時点。修復予定不明のものは省略した。
*1：筆者らの被災調査での総合判定。*2：会津若松市歴史的景観指定建造物・歴史的景観登録建造物，白河市歴史的風致形成建造物。*3：「文化財建造物」と「文化財に準じる建造物」には重複があるため，重複を除いた。*4：調査票に記載なきもの。
出典：筆者らの調査と県内各自治体提供資料と担当者への聞き取りにより作成

れらを数えると計30棟（8.8%）にこうした判定の差があった。正確にはこれらの捉え方によって修復の進捗の評価はいくぶん変わる。とはいえ，いずれにしても，半数に修復の予定がないことに違いはない。

修復の目途がついたものでは，文化財の種類による差は極端ではないものの，指定文化財では県（64.9%），国（42.5%），市町村（36.0%）の順となる。

逆に，修復の予定のないものには被害が軽微なものも確かに多いが，部分破壊・傾斜・半壊と相応に被害を受けたものも散見される。被害の大きなものでは，修復の際の，材料・構法に至るまでを当初の形に戻って行う復原を嫌って行政の補助を拒んだ「中山家住宅」（三春町，国指定，半壊）[18]もある。その一方で，被災後に文化財に指定されたこともあって予定がまだ立てられない「八槻都々古別神社神官住宅」（棚倉町，県指定，半壊）や，被害を経年によるものと見て，後の対処に廻した「満照寺不動堂」（いわき市，県指定，半壊）[19]，また石造で，修復方針を検討中のため残る「福島市写真美術館（旧日本電気計器検定所福島試験所社屋）」（福島市，市指定，部分破壊），所有者は維持を負担に感じ解体を望むものの，唯一の村の文化財のため方針を決めあぐねる「旧北畠豊彦氏住居」（天栄村，村指定，半壊）[20]のように，必ずしも放置とは言えないものもある（図４）。

なお，県市町村の文化財担当者に，こうした文化財の種類が修復の着手順に影響するかを尋ねたところ，国指定，県指定，市町村指定の順にするよう配慮する市町村（例：

「八槻都々古別神社神官住宅」（棚倉町，県指定，半壊，2013年筆者撮影）

「満照寺不動堂」（いわき市，室町後期，県指定，半壊，2011年狩野勝重博士撮影）

「福島市写真美術館（旧日本電気計器検定所福島試験所社屋）」（福島市，1922年，市指定，部分破壊，2011年筆者撮影）

「旧北畠豊彦氏住居」（天栄村，江戸期，村指定，半壊，2013年筆者撮影）

図４　修復予定の立たない福島県の文化財建造物の例

表５　福島県の文化財とそれに準じる建造物の修復年度（要修復）

上段：棟，下段：%

2011年	2012年	2013年	2014年予定	2015年以後予定	計*
67	63	27	17	5	179
37.4	35.2	15.1	9.5	2.8	100

*：修復は複数年度にわたることもあるなどの理由で，表４と計が一致しない。

猪苗代町）もあれば，逆に，市町村指定を優先し，県指定，国指定となるよう配慮する市町村（例：伊達市），また，そうした順は一切考慮しない市町村（例：郡山市）があり，一様ではなかった。

この表と修復の目途がついたものの修復時期を示した表５とを併せると，修復は早くも震災直後の2011年度にピークを迎え，以後年を経るごとに減り，すでに終息に向かいつつあることが分かる。

2011年度に数が最も多くなったのは，文化財に準じるもののうち，会津若松市が景観条例（平成４年条例第１号）で定めた歴史的景観指定建造物や，白河市が歴史まちづくり法を根拠に定めた歴史的風致形成建造物といった景観建造物で被害を受けたものの修復が，一斉に行われたことが大きい。

このうち会津若松市のものは，同市が2009（平成21）年に景観法（平成16年法律第110号）による景観行政団体に認定され，同法に基づく景観協定地区内の建造物に対して市の補助に加え国土交通省の補助が得られたこと，白河市のものも，歴史まちづくり法による「白河市歴史的風致維持向上計画」の認定を受け，やはり国土交通省の補助が受けられたことによる。特に後者は，計画の認定が震災直前の2011年２月23日だったことが功を奏して，将来の文化財候補が運よく護られたとも言える。

それでも，これらは厳密には文化財ではなく，また単年度工事となったこともあって，市内で同種の修復工事が輻輳することとなり，外観の保全を図る傍ら，予算の都合や職人の繁忙もあって，材料・構法に最善を尽くすことは難しく，土壁をモルタルで補修するような例も見られた（図５）。白河市の上記計画の年限は10年であり，同市文化財課によれば[21]，これらの建造物は，計画年限を終えた2020（平成32）年を目途に文化財にすることが想定されていることもあり，この処置が後の指定に影響しないかどうか心配される。

「奈良屋呉服店建造物群」（白河市，1893-1913年，市歴史的風致形成建造物，部分破壊，2012年筆者撮影）

「小峰城外堀土塁跡及び林家住宅建造物群」（白河市，明治中期，市歴史的風致形成建造物，部分破壊，2013年筆者撮影）

図５　不適切な修復がされた福島県の文化財に準じる建造物の例

「阿部家住宅」（福島市，江戸末－明治期，部分破壊，2011年左知子氏撮影）

「細井家住宅資料館」（南会津町，江戸後期－，部分破壊，2013年筆者撮影）

図６　修復を中止ないし断念した福島県の国登録有形文化財の例

そして，再び表４に戻ると，指定文化財に比べて国登録有形文化財が遅れている様子も分かる。指定文化財に対しては，震災直後より当面の間，国・県・市町村の補助を工事費の最大85％にまで引き上げる措置が採られ[22]，これによって所有者の負担が軽減されたが，国登録有形文化財建造物に対しては，震災後の2012年度より，県[23]や喜多方市[24]・本宮市[25]が工事費に対する補助制度を設けたものの，多くは従前のまま設計監理費に対する補助のみであり，工事費への補助がないことが原因にあるだろう。

このため，2012年11月末までの経過について既報[26]に述べたように，自治体の文化財担当課は芸術文化に関する民間助成団体への応募を所有者に促すなど対策を講じたが，助成実績に見る限り建築を対象としているかどうか疑わしいものもあり，結果として助成が受けられたものは多くはなかった。

こうした修理補助の不足が修復を妨げた事例に，一度は複数棟の修復を行う形で県の補助が決まりながらも，資金難で中止した「阿部家住宅」（福島市，国登録，部分破壊），所有者の高齢化も加わり断念した「細井家住宅資料館」（南会津町，国登録，部分破壊）などを挙げることができる（図６）。

ところで，表４で最も修復の予定のないものが多いのは重要伝統的建造物群保存地区内の歴史的建造物であり，ほぼ全棟である。ただし，本県の同地区に建つ建造物の被害はそもそもごく軽微で，急を要するものがないこと，同地区内の建造物は，制度上，継続的かつ計画的に修復が行える環境にあることがこうした形となって現れている。

３．２　被害を受けた文化財等建造物の修復期間

次に，表６には筆者が得た，被害を受けた文化財等建造物で修復期間が複数年度にわたるものを示した。

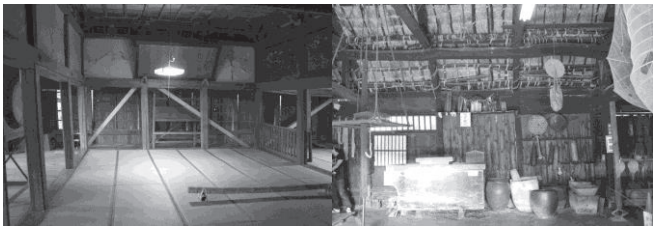
主に国指定や県指定で，軸部が傾くなど被害の大きなものもある（図７）。その一方で，中には通常の修理と併せた結果，長期にわたったものもある（「白水阿弥陀堂」（いわき市，国宝，軽微）・「旧南会津郡役所」（南会津町，県指定，軽微），図８）。しかし修復の目途がついた151棟のうちのわずか14棟であり，ほとんどが単年度で行われたことになる。

前述の会津若松市や白河市の景観建造物ばかりでなく，地盤の傷みによって基礎廻りの強化を要し，地中梁打設のため建物全体をジャッキアップして修復を行った「願成寺本堂」（喜多方市，県指定，部分破壊）や，１尺を超える土壁の左官工事のあった「開成館」（郡山市，県指定，部分破壊）も単年度で行われた（図９）。特に後者の文化財建造物では，しばしば指摘される会計年度の制約が工事に及ぼす不都合が，今回も変わらず問題としてあったことになる。

表６　福島県の文化財建造物で震災被害修復が複数年度にわたるもの

建造物名	所在地	被害*1	文化財	修復済み・修復中・修復予定有 2011年	2012年	2013年	2014年	2015年～
なかむらや旅館本館	福島	部分破壊	国登録	■	■	■		
なかむらや旅館新館	福島	なし	国登録	■	■	■		
安積歴史博物館*3	郡山	部分破壊	国指定・産業*2		■	■		
桑折町文化記念館*4	桑折	部分破壊	国指定		■	■		
旧南会津郡役所	南会津	軽微	県指定	■	■	■		
旧馬場家住宅	猪苗代	傾斜	国指定			■	■	
西光寺阿弥陀堂	古殿	傾斜	県指定		■	■		
白水阿弥陀堂	いわき	軽微	国宝	■	■			
飯野八幡宮本殿	いわき	軽微	国指定	■	■	■		
飯野八幡宮宝殿	いわき	部分破壊	国指定	■	■	■		
専称寺本堂	いわき	半壊	国指定	2019年度迄				
専称寺庫裏	いわき	部分破壊	国指定		2019年度迄			
専称寺総門	いわき	傾斜	国指定	2019年度迄				
大国魂神社本殿	いわき	半壊	市指定				2015年度迄	

*1：筆者らの被災調査での総合判定　*2：近代化産業遺産　*3：旧福島県尋常中学校本館　*4：旧伊達郡役所
出典：福島県文化財課『東日本大震災に伴う国指定等文化財の被害状況について　2013年８月16日現在』2013.・同『東日本大震災に伴う県指定等文化財の被害状況について　2013年８月16日現在』2013.（福島県文化財課資料）より筆者作成



「専称寺」（いわき市，鎌倉後期，国指定，半壊，2012年筆者撮影）　「旧馬場家住宅」（猪苗代町，江戸中期，国指定，傾斜，2012年筆者撮影）

図７　被害が大きく，修復が複数年度にわたる福島県の文化財建造物の例

「白水阿弥陀堂」（いわき市，平安後期，国宝，軽微，修復時，2012年筆者撮影）　「旧南会津郡役所」（南会津町，1875年，県指定，軽微，修復時，2012年筆者撮影）

屋根の葺き替え　基礎廻りの改修

図８　通常の修理と併せて修復の済んだ福島県の文化財建造物の例

「願成寺本堂」（喜多方市，江戸前期，県指定，部分破壊，修復時，2012年筆者撮影）　「開成館」（郡山市，1874年，県指定，修復時，部分破壊，2012年筆者撮影）

ジャッキアップしての基礎の改修　土壁の塗り直し

図９　震災による被害からの修復の済んだ福島県の文化財建造物の例

表７　福島県の文化財とそれに準じる建造物の修復状況（要修復，市町村別）

単位：棟

地方	市町村	文化財等総数	修復済	修復中	修復予定有	修復予定無	計
中通り	福島市	37	12	0	2	17	31
	二本松市	17	1	2	0	7	10
	伊達市	12	4	0	0	5	9
	本宮市	**2**	**2**	**0**	**0**	**0**	**2**
	桑折町	**2**	**0**	**1**	**0**	**0**	**1**
	国見町	**5**	**3**	**0**	**2**	**0**	**5**
	川俣町	3	0	0	0	1	1
	郡山市	**16**	**9**	**1**	**0**	**0**	**10**
	須賀川市	14	3	0	0	8	11
	田村市	6	4	0	0	1	5
	天栄村	1	0	0	0	1	1
	石川町	6	2	0	0	2	4
	玉川村	1	0	0	0	1	1
	古殿町	**1**	**0**	**1**	**0**	**0**	**1**
	三春町	6	0	0	0	2	2
	小野町	4	0	0	0	2	2
	白河市	92	28	2	4	45	79
	西郷村	7	3	0	0	4	7
	泉崎村	1	0	0	0	1	1
	棚倉町	3	0	0	0	2	2
	塙町	5	2	0	0	2	4
	鮫川村	2	0	0	0	2	2
会津	会津若松市	70	23	0	1	26	50
	喜多方市	46	3	1	1	20	25
	西会津町	2	0	0	0	2	2
	猪苗代町	12	6	1	0	3	10
	会津坂下町	3	0	0	0	2	2
	湯川村	1	0	0	0	1	1
	柳津町	1	0	0	0	1	1
	三島町	1	0	0	0	1	1
	金山町	1	0	0	0	1	1
	会津美里町	9	0	0	0	4	4
	下郷町	51	1	0	0	40	41
	桧枝岐村	2	0	0	0	0	0
	只見町	3	1	0	0	2	3
	南会津町	69	0	2	1	38	41
浜通り	相馬市	15	0	0	0	10	10
	南相馬市*	1	－	－	－	－	－
	広野町*	1	－	－	－	－	－
	浪江町	2	0	0	2	0	2
	楢葉町*	2	－	－	－	－	－
	新地町	1	0	0	0	1	1
	いわき市	40	14	2	4	18	38
計		576	121	13	17	273	424

※：表は2013年９月時点。**太字**：修復の目途のついた市町村。*：文化財建造物の被害の把握が未了などのため，修復を要するものがあるか否か自体が不明。
出典：各自治体提供資料を交え筆者作成

３．３　市町村別に見た文化財等建造物の修復状況

市町村別の修復の進捗についても見ておきたい。

表７には，県内59市町村のうち文化財等建造物が建つ42市町村の修復状況を示した。目途がついた市町村が５つある一方で，予定のないものが残るのが33市町村とほとんどである。ただし，目途がついた市町村にはそもそも被災した文化財等建造物が少ないことも確かである。

なお，軽微な被害のあった建造物の修復の要否については，表４に関連して上で指摘したのと同様に，筆者と市町村の捉え方に差異がある。

４．ま　と　め

本稿では，東日本大震災に伴う福島県の歴史的建造物の被害の全体像と，同県内に建つ文化財とそれに準じる建造物の修復の進捗の可能な限り全ての状況を報告した。

本県の歴史的建造物の被害は，津波によるものが少なく，地震の特徴もあって必ずしも深刻と言えるものではなかった。それでも修復を要するものは多く，文化財等建造物に限ると半数以上に修復の予定がなかった[27]。

また，修復は，震災直後の2011年度に早くもピークを迎えていた。市が条例などで指定する景観建造物の修復が進

んだことがそうした傾向を強くした面がある。これに次いで修復の進むのが県・国・市町村指定文化財であったが，その一方で，工事費に対する補助の不利な国登録有形文化財は遅れがちであるという，文化財等の種類による差異を，量をもって示した。

なお，本調査の結果は，できることであれば多くの目にとまる形で報告することが望ましいと筆者は考える。また，実際にそうした求めもある。しかしながら，調査対象に，現に今文化財であるものばかりではない一般の建造物が相当数含まれるため，個人情報保護の観点から公開がはばかられる面がある。こうした考慮すべき事項はあるものの，今後の課題として何らかの形で社会に還元する方策を考えてゆきたいと思っている。

最後に，本稿は，2014年度日本建築学会大会で報告した「東日本大震災後の福島県の文化財等建造物の修復状況について」[28]と第57回日本大学工学部学術研究報告会で報告した「東日本大震災に伴う福島県の歴史的建造物の被害と修復について」[29]に大幅に加筆・修正を施したものであることを付記しておく。

謝　　辞

調査にあたっては，福島県内市町村各課や建造物所有者の方々，日本建築学会建築歴史・意匠委員会災害特別調査研究WGで本県調査にご参加下さった皆様のご協力と，狩野勝重博士のご指導，そして渡邉潤氏をはじめとする日本大学工学部建築学科建築歴史意匠研究室の所属学生諸氏の尽力を得ました。なお，本研究は平成25年度日本大学工学部研究費区分⑵研究費Ⅰ「福島県の歴史的建築インベントリー再構築に関する調査研究」（研究代表者　速水清孝）の成果です。記して御礼を申し上げます。

注

1）このWGでは，震災発生直後の2011（平成23）年度より2013（平成25）年度の3年間にわたって，文化庁の委託による東日本大震災文化財被災建造物復旧支援事業（略称：文化財ドクター派遣事業）として，専門家による，①．被災文化財建造物等の概要把握のための調査，②．所有者等の要請に応じた応急措置・復旧に向けた技術支援を実施した。

2）速水清孝「福島県の歴史的建造物の被害」『2011年東北地方太平洋沖地震災害調査報告』日本建築学会，pp. 136-137，2011．7.

3）速水清孝「東日本大震災に伴う福島県の建築物の公費解体と修理補助について」『日本建築学会技術報告集』Vol. 20，No. 44，pp. 363-366，2012．2．

4）福島県教育委員会『福島県の近代和風建築－福島県近代和風建築総合調査報告書－』1998.

5）福島県建築士会郡山支部身近な郡山の建築遺産調査事業委員会『身近な郡山の建築遺産50選』2005.

6）福島県教育委員会『福島県の近代化遺産（建造物等）総合調査報告書』2010.

7）例えば，福島県建築士会郡山支部の活動に刺激を受け，同田村支部の有志が調査した『（仮）三春の建築遺産』（未定稿）。

8）日本建築学会・地盤工学会・土木学会他『東日本大震災合同調査報告書　建築編4　木造建築物・歴史的建造物の被害』2015.

9）前掲注8）pp. 132-135.

10）同一建造物に対して異なる調査員によって重複して調査が行われた場合の調査結果については，本稿では，筆者が調査した建造物の場合には筆者のものを採用し，筆者が調査していない建造物の場合にはより精度の高いものを採用した。

11）日本建築学会『東北関東大震災文化遺産調査シート記入要項』2011．4．25.

12）松本直之・藤田香織「近代木造建築の地震被害に関する研究－平成23年東北地方太平洋沖地震による振動被害を事例に－」『日本建築学会大会学術講演梗概集（構造Ⅲ）』pp. 339-340，2013．8．

13）これに関して言及したものは新聞記事をはじめ多くあるが，例えば，境有紀「2011年東北地方太平洋沖地震で発生した地震動と建物被害の対応性」『日本建築学会構造系論文集』Vol. 78，No. 683，pp. 35-40，2013．1．・「震災の揺れは6分間　キラーパルス少なく　東大地震研」『朝日新聞』2011．3．17.
（http://www.asahi.com/special/10005/TKY201103170129.html）

14）初動の調査であるため，この後の調査で被害が発見されたものもある。

15）前掲注3）

16）あくまでも筆者の把握した棟数である。例えば，会津若松市が景観条例で定めるものには，歴史的景観指定建造物と同登録建造物とがあるが，後者，歴史的景観登録建造物については，リストが非公開のため，知ることができない。したがって福島県内の文化財等建造物の全てを把握できたわけではない。

17）例えば，喜多方市文化財担当者のご教示によるもの（2013（平成25）年11月14日）。

18）狩野勝重博士のご教示による（2012（平成24）年2月28日）。

19）いわき市文化財担当者のご教示による（2013（平成25）年11月29日）。

20）文化財ドクター派遣事業での修復支援の際の聞き取りによる（2013（平成25）年2月16日）

21）白河市文化財担当者のご教示による（2013（平成25）年11月19日）。

22）文化庁長官裁定「災害復旧に係る文化財補助金の補助率について」1998（平成10）年11月20日（2010（平成22）年5月1日改正）による措置。これは，本来は国指定文化財（建造物・史跡・民俗文化財・重要伝統的建造物群保存地区など）に対する補助制度であるが，震災後は，例えば福島県については「文化財保存事業補助制度について」（2013（平成25）年11月1日，福島県文化財課資料）でといったように，県市町村指定にも適用された。なお，震災前は，工事費に対して国1/3，県・市町村1/3の補助で，自己負担が1/3であったから，自己負担は15％に減ったことになる。

23）福島県補助金「地域に根差した文化財災害復旧支援事業補助金」（2013（平成25）年11月1日，福島県文化財課資料）

24）「喜多方市文化財保存事業補助金の交付に関する要綱」2006（平成18）年1月4日（2012（平成24）年4月1日改正，喜多方市文化課資料）

25）「東日本大震災に伴う登録有形文化財修繕事業に関する補助金交付要綱」（2012（平成24）年6月21日本宮市告示第102号）

26）前掲注3）

27）なお，修復せず放置することが建造物にとってよくないこ

とは自明である。例えば，筆者の被災調査の判定では半壊であった「御仕法造り住宅」（相馬市，1863年，市指定）は，修復予定がなく，長く放置されている間に状態の悪化が進み，2015（平成27）年４月28日に倒壊が確認された（狩野勝重「半壊状態にある『福島県相馬市の御仕法づくり旧佐藤家住宅』の保全に向けた活動報告」『伝統建築文化推進協議会　2015年研究集会』伝統建築文化推進協議会，2015.）。

28）速水清孝「東日本大震災に伴う福島県の文化財建造物等の修復状況について」『日本建築学会大会学術講演梗概集（建築歴史・意匠）』pp. 769-770，2014. 9.
29）伊藤隼・速水清孝「東日本大震災に伴う福島県の歴史的建造物の被害と修復について」『第57回　日本大学工学部学術研究報告会講演要旨集　建築学部会』pp. 51-54，2014. 12.

鉄骨置屋根形式 RC 造建屋の耐震補強方法に関する研究

清水 健次 *・日比野 巧 **・浅里 和茂 **

Study on seismic retrofitting method of RC structure building with steel roof

Kenji SHIMIZU*, Takumi HIBINO** and Kazushige ASARI**

Abstract

From The 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake damage of RC concrete building with steel roof, a new damage has surfaced. Therefore, we were subjected to elastic-plastic response analysis of this building. Then, a new seismic retrofitting methods have been proposed. As a result, when the sectional area of the roof brace is increased, the reinforcing effect is not changed even just the outer peripheral. At that time, the cross-sectional area is required about twice. In order to reduce damage to the roof joint, knee brace reinforcement is effective. This reinforcing method can reduce or omit the anchor bolts.

Key words: 鉄骨置屋根，耐震補強，屋根面ブレース，弾塑性振動解析，置屋根支持部

1．はじめに

東北地方太平洋沖地震（2011）の発生は，巨大地震による激しい揺れが日本国内のいずれにおいても起こりうることを示した。この地震により各地で建築物は多大な被害を受け，倒壊，大破に至ったものも甚大な数に上る[1)]。また，構造躯体の損傷が小さくても，局所的な接合部破壊および天井落下に代表される内外装仕上げ材の被害により使用できなくなった建築物もきわめて多い。そのため，本来避難所となるべき体育館が閉鎖されたり，工場停止によりサプライチェーンが寸断されて全国的に生産が滞ったりした。

現代社会においては，エネルギー施設や産業基盤となるような工場を含めたインフラ関連施設を災害時でも平常通り稼働させることがきわめて重要であり，それがいち早い復興につながるはずである。このように公共施設やインフラ関連施設にはこれまで以上の高い耐震性能が要求され，性能が未達の建物に対して耐震補強工事が行われているが，継続稼働の問題は工事期間中でも同様である。

本研究で対象とするインフラ関連施設は，機器収納のために大きな吹抜空間が必要となり，躯体 RC 構造に鉄骨置屋根形式となる場合が多い。この形式の建物は屋根重量が軽く，これまで目立った地震被害も報告されなかったが，今回の地震により屋根支持部や独立柱・壁などの損傷が多く指摘されている[2)]。特に屋根支持部のコンクリート破壊，敷きモルタルの圧壊，アンカーボルトの破断は新たな被害として注目されている。置屋根形式の場合，設計段階において躯体 RC と鉄骨屋根がそれぞれ独立に設計されるため，地震力の設定や接合部分での検討がこれまで不十分であった可能性もある。

本論文では，耐震補強が行われた躯体 RC 造鉄骨置屋根形式建物を対象として，耐震補強効果を検証し，今後の被害軽減のための補強方法を提示することを目的とする。そこで対象建物の弾塑性振動解析を行い，耐震補強前後の補強効果，屋根面ブレースの補強量が補強効果に与える影響と補強工事に際しての稼働の可能性および経済性に関して検討を行った。さらに屋根支持部の損傷軽減のために方杖補強を行った場合の有効性についても検討する。

2．解析概要

2．1　建物概要

本研究で対象とする建屋の 1 階略伏図，Y_0 通り略軸組図を図 2．1 に，2 階略伏図，屋根面略伏図を図 2．2 示し，X_0 通り略軸組図を図 2．3 に，主要な断面を表 2．1 に示す。建設年は1970年代で，X 方向15m，Y 方向21m，高さ14. 2m の躯体 RC 造，鉄骨置屋根形式の建屋である。2 階床は X0 - X1 間，X4 - X5 間のみであり，それ以外は機器収納のための大きな吹抜空間となっている。X 方向の 2 階以上には耐震壁が存在せず，Y_0 通り，Y_5 通りには外壁 ALC 版を支える鉄骨間柱のみとなっている。このように，中心部には柱がなく，X_0 通り，X_5 通りにある 2，3 階の柱は X 方向に対して独立柱となっている。さらに 2，3 階で断面が変化し，特異な独立柱である。Y 方向には耐震壁が多く存在し，耐震性能を満足しているため，今回の主要な補強は X 方向のみを対象としている。屋根はアングル材による平行弦トラスが RC 柱頭部にアンカーボルトで固定されている。

本補強は建物用途が特殊であるため余裕をみた設計を行っている。補強図を図 2．4 に，補強部材を表 2．2 に示す。Y_0，Y_5 通りは外壁を撤去した後に，桁ばりと柱を新設して鉄骨ブレースにより耐震性を確保するとともに，屋

平成27年 5 月30日受理

* 日本大学大学院工学研究科建築学専攻
** 日本大学工学部建築学科

根面ブレースを増設して剛性を高め，独立柱の被害を防ぐこととした。また，Y 方向では壁の開口による柱のせん断破壊を防ぐために開口閉塞を 1 か所行っている。屋根支持部のアンカーボルトは補強前が 4 -22φ，補強後は12-22φ～14-22φである。

補強前後の 2 次診断による Is 値を表 2．3 に示す。なお，本建物の構造耐震判定指標は Iso ＝0. 6である。補強前 X 方向は 2，3 階で Iso ＝0. 6を下回り，3 階できわめて小さな Is 値となっている。これらは，耐力不足および SD 指標が小さいためである。SD 指標は吹抜による減点，剛性率，偏心率による Fe，Fs の逆数で低減されている。この剛性率，偏心率は仮に剛床と想定した弾性解析の結果より求められており，雑壁の剛性も考慮している。このように吹抜部を剛床と仮定しないと独立柱の局所的な変形により，不明確な値となってしまうことから，次善の策ではあるが剛床とした。

補強後はこれらが改善され，各層で Is ≧ Iso ＝0. 6となった。Y 方向では補強前後で各層とも Iso ＝0. 6を満足している。

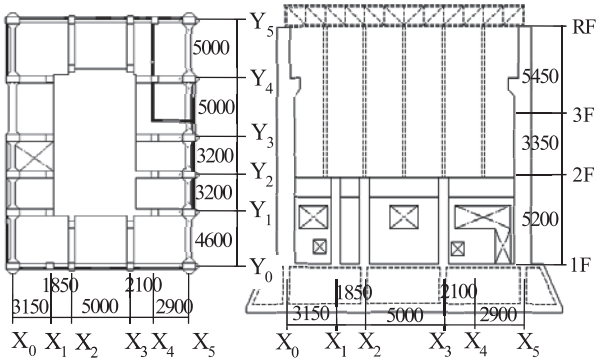


図 2．1　1 階略伏図・Y0 通り略軸組図

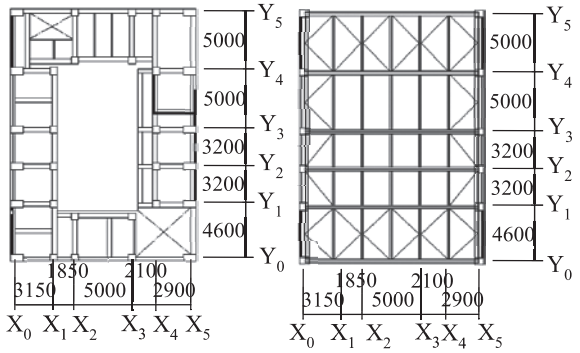


図 2．2　2 階略伏図・屋根面略伏図

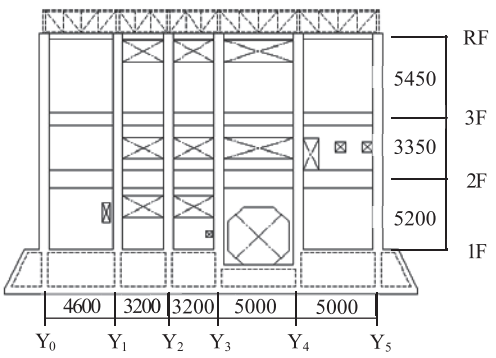


図 2．3　X0 通り略軸組図

2．2　解析方法概要

図 2．5 に建屋全体の解析モデルを示す。3 次元弾塑性振動解析を行うにあたって，部材はすべて線材とし，耐震壁は壁エレメント法によりモデル化した。屋根トラスは上下弦材と同断面の直線部材に置換し，柱上部で両端ピン支持となるよう，下部架構とはスプリング要素で接続した。また，質量は面材も含め，各々の部材中央を境界として各節点に向けて振り分けた節点集中質量とした。入力地震波は，EL CENTRO NS（1940），TAFT EW（1952），八 戸 EW（1968）および東北地方太平洋沖地震時に K-NET により観測された郡山 EW（2011）とした。加速度の最大値はレベ

表 2．1　主要部材リスト

階	X0, X5通 Y0(Y5)軸	X0, X5通 Y2, Y4軸	X0, X5通 Y1, Y3軸	X1, X4通
3F	800×600 10－D25	800×600 10－D25	800×600 10－D25	------
2F	1100×600 24(18)－D25	1100×600 26－D25	1100×600 20－D25	------
1F	1100×600 28(22)－D25	1100×600 34－D25	1100×600 28－D25	600×600 18－D25
HOOP	D13@100, 150	D13@100, 150	D13@100, 150	D10@100, 150
W18	タ　テ　D10@200　ダブル			
W20	ヨ　コ　D10@250　ダブル			
屋根面ブレース	L－75×75×9			

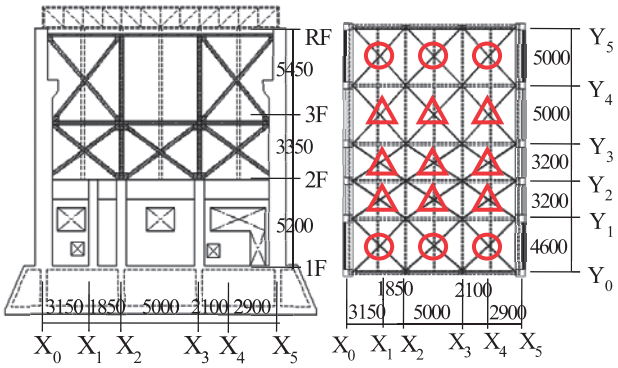


図 2．4　補強図（Y0 通略軸組図・屋根略伏図）

表 2．2　補強部材リスト

部材名	補強部材
柱	□－250×250×12×36
桁梁・軸組ブレース	H－200×200×8×12
屋根面ブレース○	2L－90×90×13
屋根面ブレース△	L－90×90×13
アンカーボルト	M22

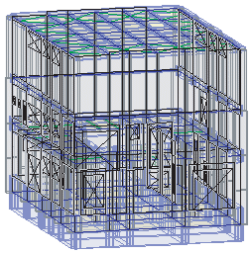


図 2．5　対象建屋全体モデル図

ル 2 入力を想定し, 50kine に基準化を行った。郡山 EW は加速度応答スペクトルの応答値が郡山 NS を全般的に上回ったため採用した。入力方向は耐震補強を行った X 方向のみとし, 解析には SNAP Ver. 6 を使用した。解析名は補強前を Case 0，補強後を Case 1 とした。

3．耐震補強効果の検討

1 次固有周期を表 3．1 に示す。躯体が RC 造であり屋根が鉄骨で軽量ではあるが，補強前の X 方向は独立柱と吹抜の影響により一般的な RC 造よりも長い固有周期となった。補強後ではブレースによる剛性の上昇のため，補強前の約 40％に短周期化した。

補強前後における応答層せん断力の最大値を図 3．1，応答層間変形角の最大値を図 3．2 に示す。層せん断力では，剛性の増大した Case 1 が全体的に Case 0 を上回る数値となった。補強前後どちらも最大値である郡山 EW の 1 階では Case 1 は Case 0 の約 2．3 倍の応答量を示した。入力地震波で比較すると Case 0 では 2，3 階はあまり差がなく，1 階の最大と最小の比は 1．9 倍となった。また，Case 1 においては郡山 EW が他の 3 波を大きく上回り，最大と最小の比では 1 階で4. 7倍，2 階では5. 1倍，3 階で約4. 9倍と大きな応答量を示した。これは補強後では固有周期が短くなったため，短周期成分の大きい郡山 EW で応答量が増加したためであると考えられる。

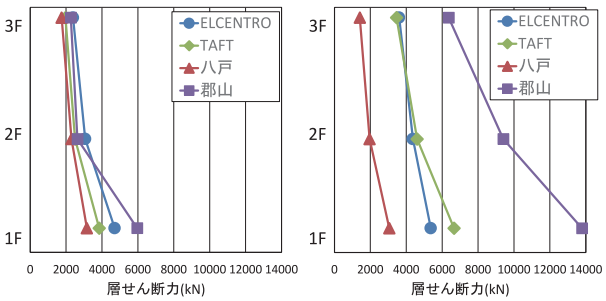
層間変形角では Case 0 の 3 階がきわめて大きい値を示している。これは独立柱の面外変形を屋根面で抑えることが出来ず，局部的に変形が過大となったためである。3 階における最大値は Case 0 で 1 /44，Case 1 では 1 /239となり，補強ブレースの効果で変形が減少したことがわかる。

Case 1 の応答せん断力ならびに応答層間変形角の最大値は郡山 EW によるものであるため, 以降は郡山 EW を入力地震波として採用し，検討を行う。

各層せん断力－層間変形角曲線を図 3．3 に示す。ここでの層変位は各節点変位を層の重心位置変位に変換したものである。Case 0 では 1 階の剛性に比べて 3 階の剛性が小さく，大きな変形を示しており，他の階でも不規則な応答および塑性変形が見られる。Case 1 では 1 階のせん断力が大きく若干の塑性変形を示している。2 階は 1 階よりもせん断力は小さいがほぼ同じ挙動を示しており，こちらも若干の塑性変形が見られる。3 階は各ブレースによる補強が有

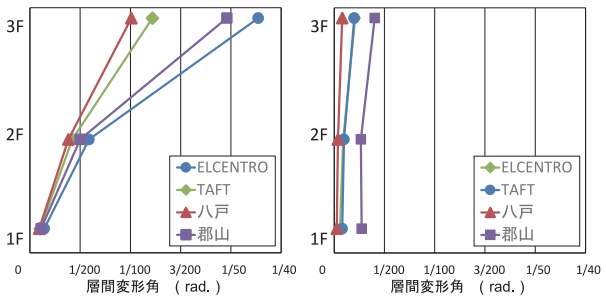
表 3．1　1 次固有周期（sec）

解析ケース	X方向	Y方向
Case 0	0.517	0.166
Case 1	0.217	0.136



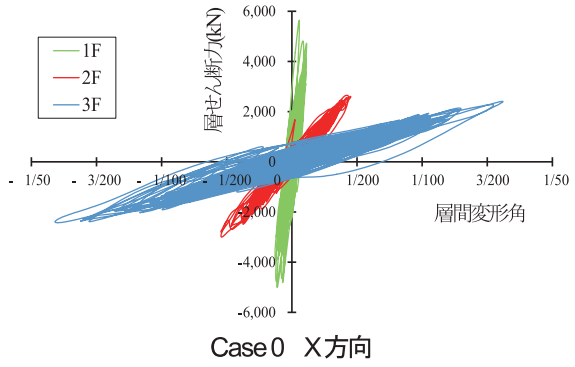
(a) Case 0　X 方向　　(b) Case 1　X 方向

図 3．1　応答層せん断力最大値



(a) Case 0　X 方向　　(b) Case 1　X 方向

図 3．2　応答層間変形角最大値



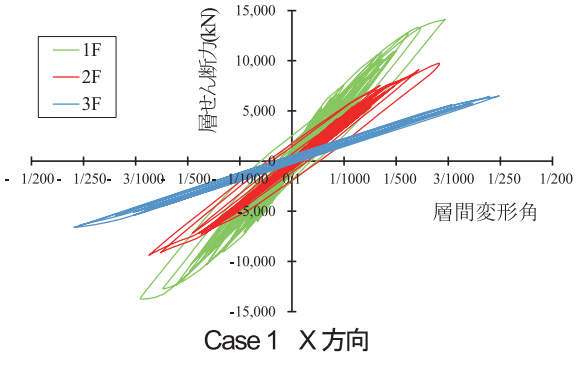


図 3．3　各層せん断力－層間変形角曲線（郡山 EW）

表 2．3　耐震診断結果（2 次診断）

方向	補強有無	階	Fu	E_0	SD	T	Is
X	補強前 (Case 0)	3F	1.000	0.452	0.517	0.960	0.224
		2F	1.000	1.034	0.597	0.960	0.593
		1F	1.000	1.356	0.773	0.960	1.007
	補強後 (Case 1)	3F	1.270	1.259	0.861	0.960	1.041
		2F	1.270	3.608	0.950	0.960	3.290
		1F	1.000	1.234	0.633	0.960	0.750
Y	補強前 (Case 0)	3F	1.000	2.216	0.950	0.960	2.021
		2F	1.000	1.862	0.950	0.960	1.698
		1F	1.000	1.740	0.950	0.960	1.587
	補強後 (Case 1)	3F	1.000	2.144	0.950	0.960	1.955
		2F	1.000	1.736	0.950	0.960	1.583
		1F	1.000	1.943	0.950	0.960	1.772

効に働いたため，弾性挙動を示している。

本補強を行ったことにより，耐力が上昇することは耐震診断結果から示されているが，最大変形および振動挙動からも十分な補強効果があることが明らかとなった。

4．屋根面ブレース配置変更による補強効果への影響

本建屋の補強では，屋根面の耐力および剛性を十分に確保するために全面にブレース補強を行った。そこでブレースの配置を変更し，同様の解析を行ったうえで，ブレース位置が応答に与える影響を検討する。その結果から補強量の低減，および経済性を含めた稼働の可能性について検討する。

4．1　屋根面ブレース配置パターン

ブレース配置を図 4．1 に部材断面を表 4．1 に示す。ブレース配置パターンは，全面補強を Case 1 とし，Case 1 からブレース面数を減らしたパターンを Case 2 A ～ Case 2 C とした。

Case 2 A － Y 1 - Y 2，Y 3 - Y 4 通りの X 2 - X 3 通り間のブレースを削除

Case 2 B － Y 1 - Y 2 通り間，Y 3 - Y 4 通り間の 2 スパン分のブレースをすべて削除

Case 2 C － 中心部のブレースを削除し，外周部のみ

表 4．2 に屋体基準[3]により算定した X 方向の屋根面ブレース耐力と必要耐力との比を示す。Case 1 では全体が必要耐力を上回っている。Case 2 A では負担面積の広い Y 3 - Y 4 間のみ NG となり，Case 2 B はブレースのあるスパン間では Case 1 と同じである。Case 2 C では Y 0 - Y 1 間，Y 4 - Y 5 間以外が NG となっている。

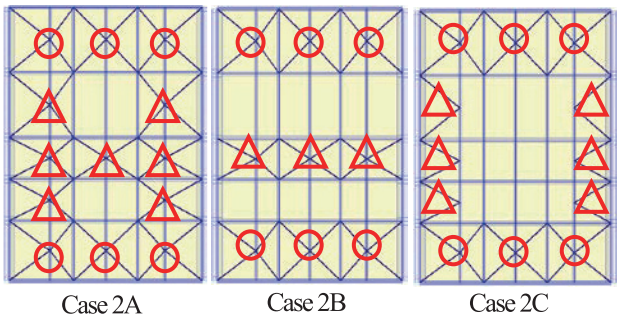


図 4．1　補強屋根面ブレース配置パターン

表 4．1　補強部材リスト

記号	部材断面
○	2L－90×90×13
△	L－90×90×13

表 4．2　屋根面ブレースの必要耐力比

通り	Case 1	Case 2A	Case 2B	Case 2C
Y4-Y5	1.114	1.114	1.114	1.114
Y3-Y4	1.231	0.820	0.000	0.410
Y2-Y3	1.466	1.466	1.466	0.489
Y1-Y2	1.804	1.203	0.000	0.601
Y0-Y1	1.433	1.433	1.433	1.433

4．2　屋根面ブレース配置変更による解析結果

ブレース配置パターンによる応答層せん断力の最大値を図 4．2，応答層間変形角の最大値を図 4．3 に示す。層せん断力はブレース面数が減ることにより，それぞれ減少していることがわかる。

層間変形角は 3 階が最も大きく Case 1，Case 2 A，Case 2 C で同程度となり，Case 2 B がわずかに小さくなっている。また，1 階での大小関係は層せん断力と同様である。これら応答最大値からは，ブレース配置パターンの優劣を決定することは出来ない。

各パターンの各層せん断力－層間変位曲線を図 4．4 に

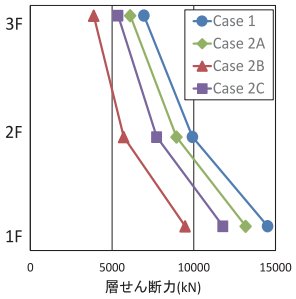


図 4．2　応答層せん断力最大値

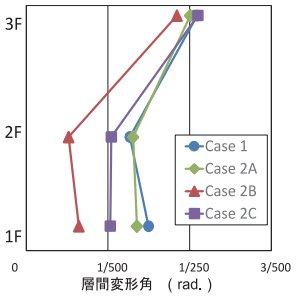


図 4．3　応答層間変形角最大値

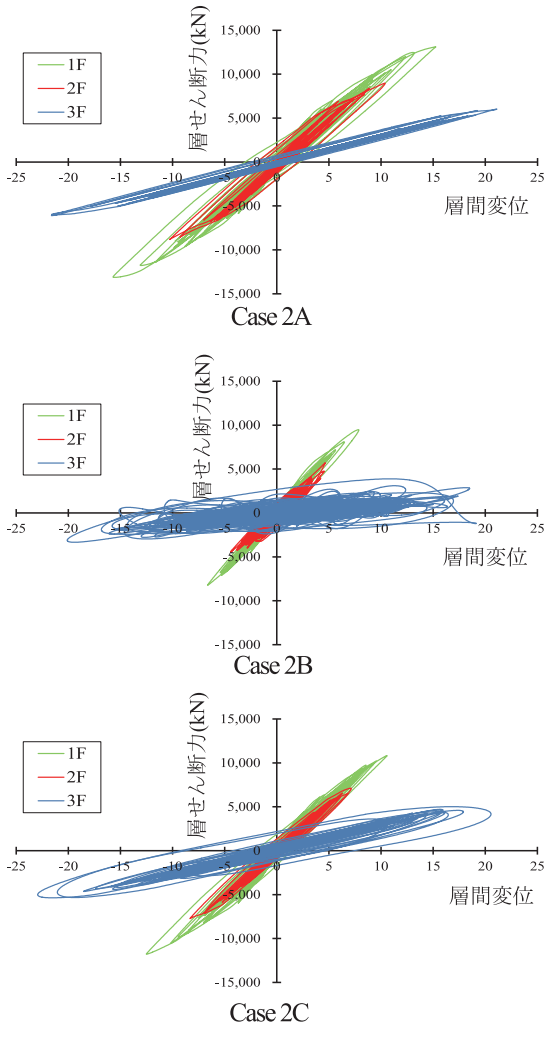
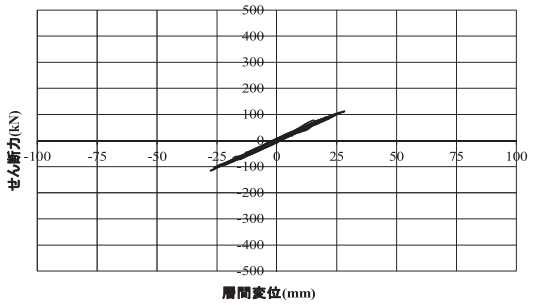


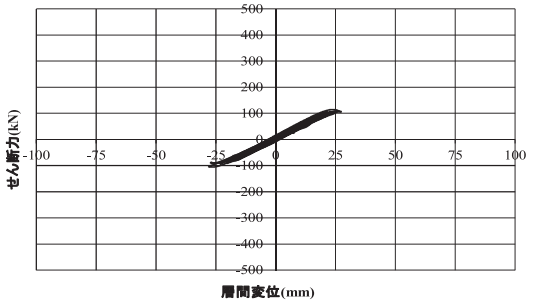
図 4．4　各層せん断力－層間変形曲線（郡山 EW）

示す。Case 1 の場合と同様に，いずれも大きな塑性変形が見られず，ほぼ弾性挙動を示している。しかし，Case 2 B の Q - δ 曲線では，3 階で不規則な挙動を示しており，屋根面の剛性不足による影響と考えられる。また，この挙動のために下層階で応答が小さくなったと思われる。

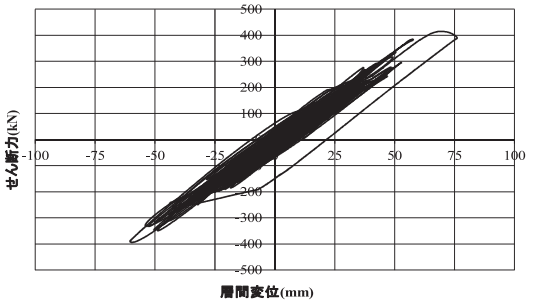
屋根面ブレースによる独立柱の挙動の変化を確認するため，図 4．5 に 3 階 X_5 通り，Y_3 軸の独立柱のせん断力－層間変形曲線を示す。Case 2 A は Case 1 とほぼ同等であるのに対して，Case 2 B は Case 1 よりも大幅に変形が大きく不規則である。Case 2 C では Case 2 B で見られた不規則性がなく，変形も減少しており，ブレースを半分程度まで減少させたほどの影響は見られない。また，性状も Case 2 A に似ていることから，ブレースによる変形の抑え込みができていると考えられる。



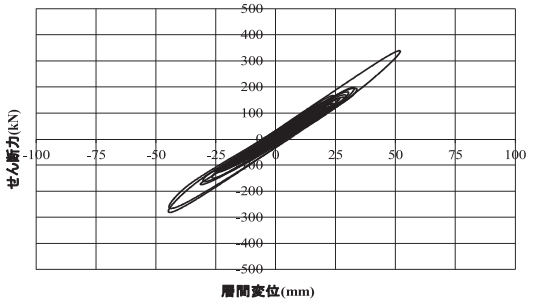
(a) Case 1



(b) Case 2A



(c) Case 2B



(d) Case 2C

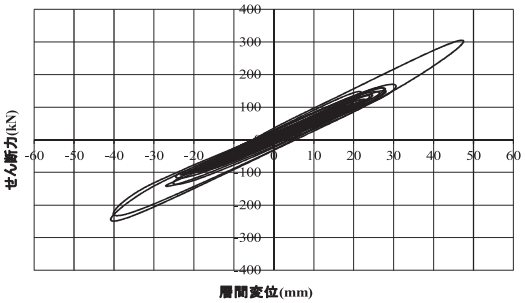
図 4．5　独立柱 X 方向せん断力－層間変形曲線

表 4．3　独立柱　最大変位

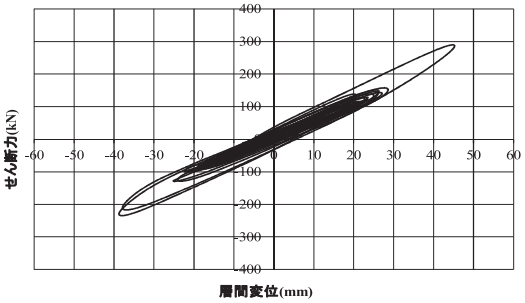
Case 2C				
断面積倍率	1.25	1.50	1.75	2.00
変位最大値（㎜）	46.0	43.7	28.9	27.2

4．3　Case 2 C の補強部材断面の検討

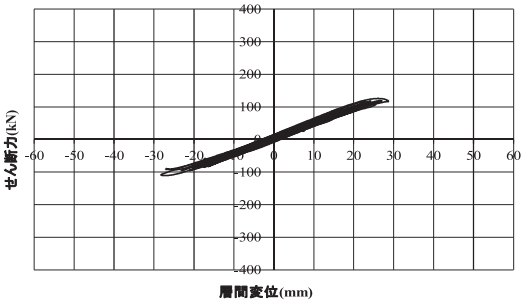
これまでの結果より，Case 2 C では Case 1 よりもブレース面数を減らした影響は少ないことがわかった。そこで，補強部材の断面を剛性確保のために大きくすることで，補



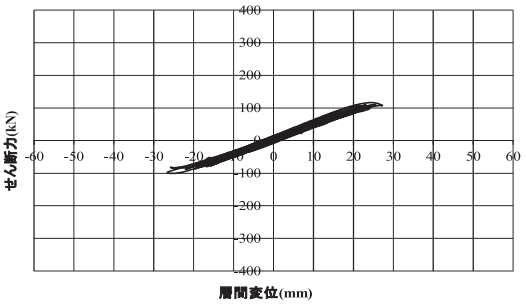
Case 2C　1.25 倍



Case 2C　1.50 倍



Case 2C　1.75 倍



Case 2C　2.0 倍

図 4．6　独立柱 X 方向せん断力－層間変形曲線

強効果にどのような影響があるのか確認した。まず，部材断面を Case 2 C の1. 25倍，1. 5倍，1. 75倍，2. 0倍として応答解析を行った。

各断面積倍率で変位が最大であった独立柱の最大変位を表 4．3 に示す。1. 5倍と1. 75倍を境に変位が33％減少している。3 階 X_5 通り，Y_3 軸の独立柱のせん断力－層間変形曲線を図 4．6 に示す。

最大変位同様に1. 5倍と1. 75倍を境に曲線が変化していることがわかる。また，ブレース断面を1. 75倍，2 倍とした独立柱の応答は同様であり，Case 1 の応答値との比較ではせん断力で1. 75倍の時108％，2. 0倍のとき100％となる。

また，層間変位では1. 75倍の時102％，2. 0倍の時96％となる。

必要耐力比は表4. 2より，2. 0倍とすると Y3- Y4間が 0. 820，Y 2 - Y 3 間が0. 978と不足するが，他は耐力の条件を十分に満たす。これらより，ブレース面数を減らすと同時に，ブレース断面積を大きくし，外周部を補強することで，同様の補強効果が得られることが明らかとなった。

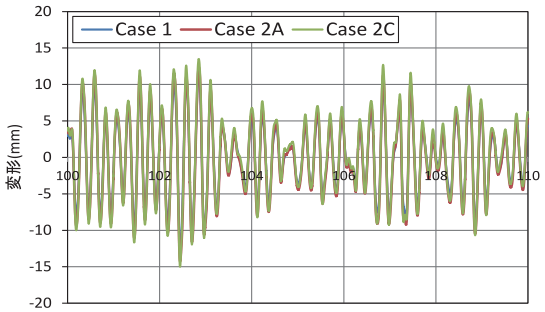
この変形の程度を確認するために，X_5 通りの両端の変形（Y_0，Y_5）に対する中央部（Y_3）の差を求め，その時刻歴を図 4．7 に示す。ここで Case 2 C は断面を 2 倍としたものである。(a)のグラフから，Case 2 A・Case 2 C の変形は Case 1 の場合とほぼ等しく，補強面を減らした影響は見られない。しかし(b)のグラフを見ると，Case 2 B の変形は Case 1 に比べてきわめて大きいことが明らかであり，補強方法として不適切である。

4．4　Ai 値についての検討

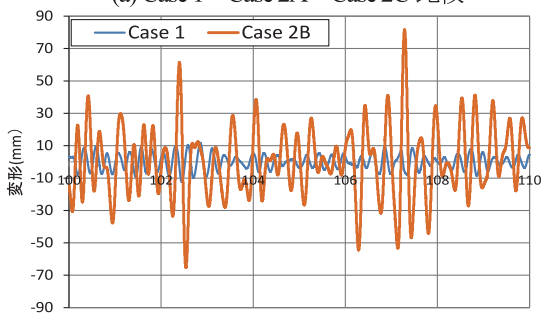
設計用の Ai と置屋根支持部の応答 Ai の比較を表 4．4 に示す。応答 Ai は支持部の応答せん断力の総和を屋根自重で除した最大値である。下層階に適切な補強を行った結果，下層階の剛性が増大し，設計用 Ai を上回る結果となった。また，置屋根部に作用する地震力として屋体基準[3)] に従い，Fes を剛性率 NG として適用すると下式となり，設計用 Ai を下回る。

$$K_n = 0.55 \cdot A_i \cdot F_{es} = 0.55 \cdot 1.570 \cdot 1.5 = 1.295$$

このように，置屋根形式建屋の Ai は成層建物の Ai を大きく上回る。そのため地震力の設定は，設計者の判断に負うところが大きく，損傷の一因になる恐れがある。



(a) Case 1・Case 2A・Case 2C 比較



(b) Case 1・Case 2B 比較

図 4．7　柱頭部 X 方向変形時刻歴

4．5　経済性および稼働の可能性

屋根面ブレース部材の重量と補強対象面積を表 4．5 に示す。この際，部材長は節点間距離，面積はブレースが存在する矩形枠面積とした。表の比較では Case 2 C は断面積が重くなる2. 0倍を使用した。Case 2 C は剛性確保のため部材断面積を 2 倍としたため，重量が全面補強の1. 50倍となり，材料・加工費は上昇する。しかし，補強対象面積は30％減少するため仮設工事費は低減できる。また，外周部のみが工事範囲となることにより，機器等への影響が小さくなり，工事中の稼働の可能性が高まると考えられる。

5．方杖補強による屋根支持部の損傷軽減

これまでの結果より，補強による耐震性能の向上および独立柱の健全性を確認することが出来た。しかしながら東北地方太平洋沖地震の被害から屋根支持部にはコンクリートの側方破壊やアンカーボルト破断を引き起こしかねないせん断力が作用し，大きな損傷を生じさせる恐れのあることが明らかとなっている[2)]。そこで方杖補強が屋根支持部の損傷軽減に有効に作用するのか検討を行う。

5．1　方杖補強方法

本建屋はコンクリート強度も健全であり，軸組および屋根面の各ブレース補強により独立柱を含む下部架構の耐震性能は向上している。そのため下部 RC 柱の耐力上昇は望

表 4．4　設計用 Ai と応答 Ai の比較

Case	方向	設計時	解析結果	比率
Case 0	X	1.471	1.242	0.844
	Y		1.235	0.840
Case 1	X	1.570	1.886	1.201
	Y		2.088	1.330
Case 2C	X		2.350	1.497
	Y		2.058	1.311

表 4．5　部材重量および補強対象面積の比

補強パターン	ブレース重量 (kg)	対全面補強比	補強対象面積 (m^2)	対全面補強比
Case 1	4787	1.00	315.00	1.00
Case 2A	4345	0.91	274.00	0.87
Case 2B	3453	0.72	192.00	0.61
Case 2C	7197	1.50	215.82	0.69

まずに，屋根支持部への負担低減を図るためだけの目的で方杖補強を行うこととする。ただし，天井走行クレーンが設置されているため，これに干渉しないように設置位置には制限があり，角度，本数の異なる補強方法により検証する。図５．１に方杖補強パターンを示す。

Case３A － クレーンに干渉しない柱上部位置から角度45° でトラスと接続

Case３B － クレーンに干渉しない柱上部位置からトラスと小ばりの交点へ接続

Case３C － Case３B と同様にクレーンに干渉しない柱上部位置から，小ばりとブレースの交点へ２本接続

方杖部材断面は降伏および座屈させない前提でトラス斜材断面を上回る程度の断面積として決定し，すべて円形鋼管○－190.7×7.0（STK400，A ＝4040mm^2）とする。

また，補強軸組ブレース上部の R 階はりとトラスを斜材節点で接続することで妻面の一体性を高め，隅部の負担軽減に役立てるものとする。

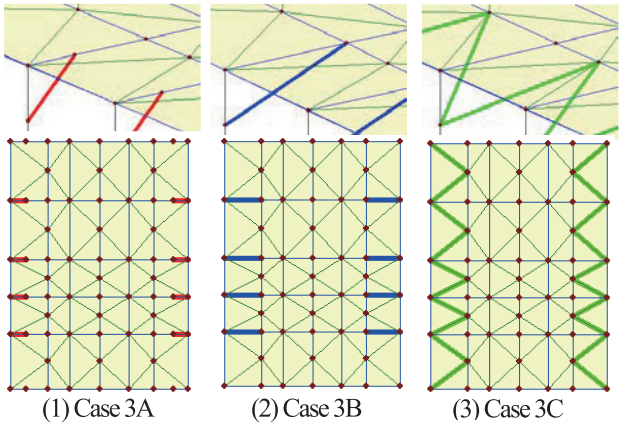


図５．１　方杖設置パターン

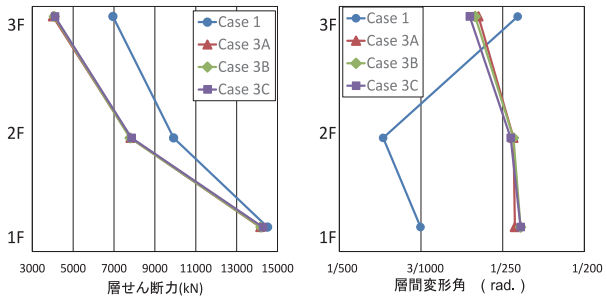


図５．２　各層応答層せん断力・層間変形角最大値

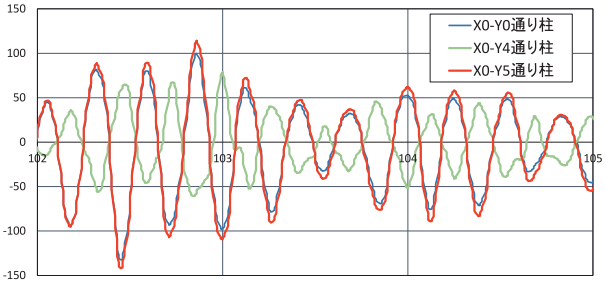


図５．３　柱せん断力時刻歴

解析に関する諸条件はこれまでと同様であり，入力方向は X 方向のみとし，入力地震波は応答の最も大きかった郡山 EW とした。

各層の応答層せん断力および層間変形角最大値を図５．２に示す。方杖設置パターンの違いによる差異は，層せん断力，層間変形角共にほとんど見られない。方杖設置前の Case１と比較すると，層せん断力は１階では同等であり，２階で20%，３階で40%減少している。層間変形角では Case１と比較して１階，2階で1．5倍程度となったが，３階では柱の部材長が短くなったために10%程度下回っている。

図５．３に３階独立柱せん断力の時刻歴応答を示す。Y４通りの柱と他の柱の応答が逆位相となっており，層せん断力が単純和とはならない。しかし，変形の逆位相はわずかであり，そのことが層間変形角の増減と層せん断力の増減が合致しない要因となっている。ただし，すべての解析パターン，階共に層間変形角は１/200以下である。

５．２　方杖補強による他部材への影響

方杖の軸力が最大となった X_0-Y_0 から Y_1 向き方杖の Case３C における軸力－伸び曲線を図５．４に示す。当初断面を決定した際の想定通り弾性挙動を示し，降伏，座屈のいずれも生じていない。

方杖が取り付く下部 RC 柱の健全性を確認するため，該当柱の塑性率を表５．１に示す。Case３A，３B はほぼ同じ値となり，Case３C はこれをわずかに上回っている。また，値は最大でも0.21であり，いずれも1.0を大きく下回っているため，方杖を設置したことによる柱への影響は少ない。

屋根面ブレースの塑性率が大きい Y1-Y2通間のブレース配置，節点番号を図５．５に示し，塑性率一覧を表５．２に示す。Case３A，３B は同程度の塑性率となっており，Case３C では１か所を除き，これらを下回った。ただし，いずれの塑性率も2.0以下であり，破断に至ることはない。

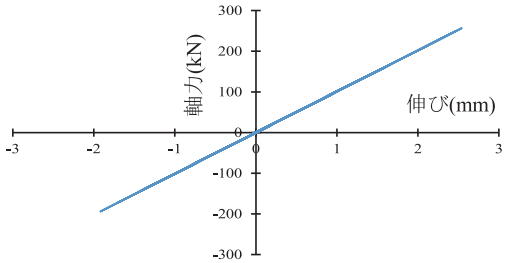


図５．４　方杖　軸力－伸び曲線（Case３C）

表５．１　方杖下部柱　塑性率一覧

X_0通	Y_0	Y_1	Y_2	Y_3	Y_4	Y_5
Case 3A	0.11	0.08	0.06	0.05	0.17	0.09
Case 3B	0.11	0.08	0.06	0.06	0.17	0.09
Case 3C	0.21	0.09	0.05	0.06	0.19	0.18
X_5通	Y_0	Y_1	Y_2	Y_3	Y_4	Y_5
Case 3A	0.11	0.09	0.06	0.06	0.18	0.09
Case 3B	0.11	0.09	0.06	0.07	0.19	0.09
Case 3C	0.19	0.11	0.05	0.05	0.21	0.18

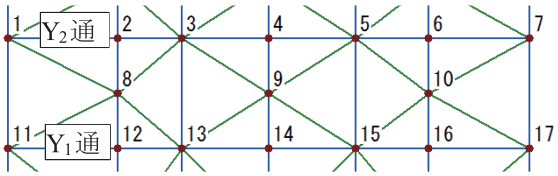


図５．５　屋根面ブレース　Y_1-Y_2通間節点番号

表５．２　屋根面ブレース　Y_1-Y_2通間　塑性率一覧

トラス節点番号	1-8	8-3	3-9	9-5	5-10	10-7
Case 3A	1.13	1.16	1.26	1.42	1.07	1.51
Case 3B	1.16	1.08	1.22	1.41	1.04	1.52
Case 3C	0.90	1.51	1.12	1.20	1.26	1.21
トラス節点番号	11-8	8-13	13-9	9-15	15-10	10-17
Case 3A	1.70	1.19	1.74	1.17	1.59	1.09
Case 3B	1.67	1.19	1.70	1.19	1.58	1.09
Case 3C	0.79	1.25	1.47	1.16	1.29	0.72

以上より，方杖補強による他部材への影響は無いものと考えられる。

５．３　置屋根支持部の検討

置屋根支持部に作用するせん断力，および側方破壊耐力を表５．３に示す。表の支持部せん断力は，トラス置換ばりと下部 RC 架構を接続したスプリング要素に作用するせん断力の最大値とする。ここで Case 0 のせん断力最大値は応答が小さく，いずれの耐力も下回ったため，表からは省いている。側方破壊耐力は各種合成構造設計指針[4]による１本あたりの耐力を本数倍したものを指針式とし，破壊耐力評価式[5]によるものを CCD 式として示す。せん断耐力はアンカーボルトの破断耐力で次式によるが，独立柱の変形がアンカーボルトに与える強制変形の影響は考慮していない。また，各耐力は補強の要否を検討するため，補強前 Case 0 で各支持点４-22ϕでの値である。

$$\text{せん断耐力} = \textit{AnchorBolt}\ \text{全断面積} \times F_u/\sqrt{3}$$

補強時のアンカーボルトは，ベースプレートを溶接により拡幅し，接着系あと施工アンカーボルトを隅部で10-M22，中間部で８-M22をそれぞれ追加している。

側方破壊耐力のうち CCD 式の値は，隅部の Y_0，Y_5軸でへりあき距離が短くなるため中間部より小さくなる。

せん断力最大値は Case 1 では屋根面ブレース補強によって剛性が増大したことにより応答量が増大した。特に隅部に応力が集中し，中間部の６倍から17倍ときわめて大きくなった。Case 2 C では Case 1 と同等の補強効果を得られていることから，支持部においても同様のせん断力を示している。方杖補強を行った Case 3 シリーズでは最大値が全体的に平均化している。補強パターンごとでは，Case 3 A と Case 3 B では大きな差異が見られない。しかし方杖を２方向とした Case 3 C では，3 A，3 B より隅部で25％減少したほか，中間部ではスパンの大きい Y3軸で20％減少し，他の軸でも５％から15％程度減少している。このように２方向補強とした Case 3 C が最も有効な補強であることがわかる。

表５．３　側方破壊耐力と支持部せん断力の比較

通	軸	方向	Case 0			支持部せん断力最大値				
			指針式	CCD式	せん断耐力	Case 1	Case 2C	Case 3A	Case 3B	Case 3C
X0	Y0	X	238.0	237.8	351.2	1489.8	1239.0	410.8	407.6	300.8
	Y1	X	238.0	355.2	351.2	161.1	158.2	321.5	323.1	307.4
	Y2	X	238.0	355.2	351.2	86.9	74.4	360.3	377.5	324.0
	Y3	X	238.0	355.2	351.2	123.5	102.0	408.5	427.7	334.9
	Y4	X	238.0	355.2	351.2	250.3	214.7	401.6	403.5	348.3
	Y5	X	238.0	237.8	351.2	1398.6	1230.6	406.6	404.7	302.9
X5	Y0	X	238.0	237.8	351.2	1448.0	1239.1	398.2	397.1	301.2
	Y1	X	238.0	355.2	351.2	188.2	161.8	320.3	322.6	309.9
	Y2	X	238.0	355.2	351.2	88.4	80.7	365.2	386.4	316.5
	Y3	X	238.0	355.2	351.2	96.5	100.8	402.4	426.6	348.8
	Y4	X	238.0	355.2	351.2	213.5	182.8	395.4	392.6	355.9
	Y5	X	238.0	237.8	351.2	1452.3	1235.1	399.7	399.4	300.2

表５．４　置屋根支持部アンカーボルト変位量

Case	Case 0	Case 1	Case 2C	Case 3C
アンカーボルト伸び(mm)	7.24	2.22	2.10	1.67
ベースプレートずれ(mm)	0.119	0.009	0.008	0.005

Case 0 の各耐力と比較すると Case 3 C のせん断力最大値は，せん断耐力をほぼ下回っており，これに限れば支持部の補強は不要となる。しかしながら，側方破壊耐力との比較では指針式の値をすべての位置で上回り，CCD 式では隅部で上回っている。

文献５によれば CCD 式は危険側の値となるとされており，側方破壊を防ぐためには補強が必要となるが，あと施工アンカーボルトの本数を減らすことは可能である。

５．４　アンカーボルトの強制変形

独立柱の変形によりアンカーボルトに強制変形が与えられる[6]。ここではその変形量について検討する。

置屋根支持部アンカーボルトの変位量を表５．４に示す。アンカーボルト伸び，ベースプレートずれは下式において算出した。

$$\text{変形角：}\ \theta = \frac{3}{2} \times \frac{\delta}{h} \qquad \text{アンカーボルト伸び：} d\sin\theta$$

$$\text{ベースプレートずれ：} d \times (1 - \cos\theta)$$

変形角に用いた δ は３階柱の柱頭・柱脚の節点間の変位，h は３ F ～ RF 間の柱長さとし，表の値は各 Case について節点間変位が最大だったものについて計算した値とする。d はベースプレート幅からアンカーボルトの端あき長さを引いたものである。

無補強の Case 0 についてはアンカーボルト伸びが明らかに大きく，破断に至ることも予想される。そのほか補強を行なったものでは２mm 前後とそれほど大きな値は示していない。しかし，接合部には敷きモルタルがされており，

支持部に変形が生じる際にモルタルに偏圧を加えながらクラッシュさせ，これが急速に行われることでモルタルの飛散も予想される。

8．ま と め

大きな吹抜空間を持つ鉄骨置屋根形式建屋の補強前後における弾塑性振動解析により以下のことが明らかとなった。

⑴ 軸組ブレース，全面屋根面ブレースによる補強により，十分な補強効果が得られる。

⑵ 屋根面ブレース補強を外周部のみとした場合でも，ブレース断面積を増大させることで，全面補強と同等の補強効果が得られる。補強量は屋体基準による耐力を満足させる断面とすることで決定できる。

⑶ 外周部のみの補強が可能となれば，機器の稼動率，仮設工事費を考慮することにより，大きく経済性に寄与できる。

⑷ 鉄骨置屋根形式における Ai の値は通常設計法の Ai を上回る。

⑸ 置屋根支持部周辺に方杖を設置することにより，支持部の損傷を軽減することが可能である。また，補強アンカーボルトを省略，低減できる。

参 考 文 献

1）日本建築学会編：東日本大震災合同調査報告，建築編 3，鉄骨造建築物，2014. 9

2）建築研究開発コンソーシアム：2014年度鉄骨置屋根構造に関する研究会報告書，2015. 3

3）文部科学省；屋内運動場の耐震性能診断基準（平成18年版），2008. 7

4）日本建築学会；各種合成構造設計指針・同解説，p236-238，2010. 11

5）浅田勇人他；鉄骨造露出型柱脚における鉄骨コンクリート基礎・アンカー系の側方破壊挙動，日本建築学会構造系論文集，第654号，1517-1525，2010. 8

6）一般社団法人日本建築構造技術者協会東北支部；東日本大震災における鉄骨置屋根構造の被害調査報告，p83-98，2012. 8

7）清水健次，浅里和茂，成瀬啓一，瀬下守，菅沼咲希，日隈宏法:鉄骨置屋根形式RC造建屋の耐震補強における屋根面ブレース設計に関する研究，日本建築学会大会学術講演梗概集（近畿），p. 553-556，2014. 9

8）星小百合，浅里和茂，清水健次，成瀬啓一，瀬下守，千葉正裕，日比野巧：鉄骨置屋根形式 RC 造建屋の耐震補強における屋根面ブレース設計に関する研究，日本建築学会東北支部研究報告集，p. 89-92，2015. 6

9）清水健次，浅里和茂，成瀬啓一，瀬下守，曽我和正，星小百合：鉄骨置屋根支持部の損傷を軽減させる補強方法研究，日本建築学会大会学術講演梗概集(関東)，p. 975-978，2015. 9

双方向進化型構造最適化法の概念を導入した Ant Colony Optimization の提案
－ 構造最適化問題におけるトラス構造最適化への応用について －

原　崇太 *・Buntara S. GAN**

Ant Colony Optimization by Innovating Concept of Bi-directional Evolutionary Structural Optimization
－ Application in Truss Structure Problem －

Takahiro HARA* and Buntara S. GAN**

Abstract

Structural optimization is receiving attention in structural engineering because computer technology has been developed recently. However, because the problems have a large size of the search space, huge number of design constraints and a large number of design variables, are hard to solve a global optimal solution in reasonable time. In this view, heuristics optimization algorithm that doesn't solve a global optimal solution but near optimal solutions is studied in the recent decade. Ant Colony Optimization（ACO）is one of among algorithms in the method. ACO is an algorithm that is imitated the behavior of ants in nature. However, because this algorithm is not suitable for solving structural optimization, hence it is necessary to make improvements for solving the structural problems more efficient. In this paper, the innovation is adopted based on the concept of Bi-directional Evolutionary Structural Optimization（BESO）for improving the ACO. The proposed method, ACO by using the innovating concept of BESO is verified by several optimization examples of truss structure problems to show the effectiveness of the method.

Key words : Ant Colony Optimization, Bi-directional Evolutionary Structural Optimization, Truss Structure, Structural Optimization

1．緒　　言

近年，最適化手法を力学の分野に適用した，最適設計及び形状最適化などの構造最適化に関する研究が進められており，比較的短時間で最適解を得ることが要求されている。構造最適化問題は，設計者の目指すものを目的関数，満たすべき設計規定を制約条件として定式化し，各関数の勾配を用いた数理計画法を応用することで設計者の求める構造形態を得ることができる。しかしながら，現実に存在する構造最適化問題は，設計領域の広さ，設計変数の多様性，制約条件の多さなどの理由から，勾配ベースの数理計画法に基づく解法では，現実的な時間で最適解を求めることが困難になる[20] ことが知られている。

このような問題に対し，遺伝的アルゴリズム（Genetic Algorithm, GA）[1]や，タブーサーチ（Tabu Search, TS）[2-4]，シミュレーテッド・アニ―リング（Simulated Annealing, SA）[5] などのヒューリスティクス（Heuristics）による解法が提案されており，比較的短時間で良好な解が得られることが報告されている[6-9]。ヒューリスティクスとは，発見的手法とも呼ばれ，複雑な最適化問題の近似解を，比較的短時間で求めることのできるアルゴリズムである。また，ヒューリスティクスの中でも，汎用性が高く，任意の最適化問題に対応できるように設計されたものをメタヒューリスティクス（Metaheuristics）という。このような手法の中に，蟻コロニー最適化（Ant Colony Optimization, ACO）[10] がある。

ACO は，巡回セールスマン問題（Traveling Salesman Problem，TSP）のような最短経路問題を解くための手法として提案された。そのため ACO を構造最適化問題に応用するためには，改良を加える必要がある。

構造最適化問題において，上記のような方法以外に進化型構造最適化法（Evolutionary Structural Optimization, ESO）[11] や，双方向進化型構造最適化法（Bi-directional Evolutionary Structural Optimization，BESO）[12] といった，構造形態を進化させることで最適な構造形態を得る方法が提案されている。これらの手法は，有限要素法（Finite Element Method，FEM）により得られた結果から，ある基準量を算出し，前者ではその基準量に基づいて不要な要素の削除のみを，後者では削除及び必要な要素の付加を繰り返すことで，最適な構造形態を求める手法である。これらの手法は，多くの研究者によりさまざまな構造最適化問題へ応用されておりその有効性が確認されている。そこで ACO を構造最適化問題へ応用する際，BESO の基準量に基

平成27年 5 月30日受理

＊日本大学大学院工学研究科建築学専攻
＊＊日本大学工学部建築学科

づく要素の付加及び削除の概念を導入することで，構造最適化問題を効果的に解くことが可能になると考えられる。

そこで本論文では，双方向進化型構造最適化法の概念を導入した Ant Colony Optimization を提案し，構造最適化問題におけるトラス構造最適化へ応用し，いつかの応用例を用いてその有効性を示す。

2．ANT COLONY OPTIMIZATION

2．1　最適化アルゴリズム

ACO は，ブリュッセル自由大学の Dorigo ら[10] によりメタヒューリスティクスのひとつとして提案された。

蟻は餌をコロニーまで運ぶ際，揮発性のフェロモンを地面に残し，このフェロモンの濃度によって経路を選択する。従って，良い経路はより多くの蟻により選択され，フェロモンの濃度が濃くなる。一方で選択されなかった経路のフェロモンは，揮発性であるため蒸発する。蟻はこのようなサイクルを繰り返すことで，巡回路を形成し，最終的に得られる巡回路が結果的に最短経路となる。この現象を模倣したアルゴリズムが ACO である。

2．2　ACO の流れ

Fig. 1 に ACO のフローチャートを示す。ACO のアルゴリズムは，以下の通りである。

1．初期条件として各経路のフェロモンの初期値を設定する。
2．次に初期の蟻の経路を乱数に基づいて決定する。
3．終了条件を満たすまで以下の処理を繰り返す。
　3．1　各蟻に対して，フェロモンとヒューリスティックな情報に基づいて確率的な経路の選択を行う。
　3．2　各蟻が経路に残すフェロモンを計算する。
　3．3　フェロモンの更新を行う。
4．もっとも成績の良い蟻の解を出力する。

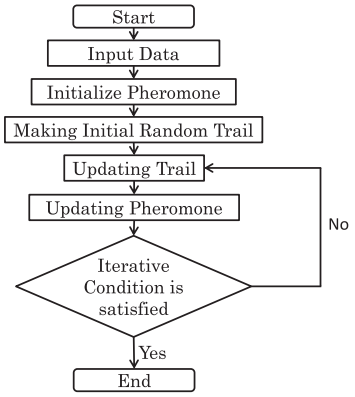


Fig. 1　Flowchart of Ant Colony Optimization

3．双方向進化型構造最適化法（BESO）

3．1　最適化アルゴリズム

BESO は，1999年に Yang ら[12] により提案された。この手法は，不要な要素の削除と，必要な要素の付加を繰り返すことで，合理的な構造形態を探索する手法である。

3．2　敏感数（Sensitivity number）

敏感数（Sensitivity number）は，要素の付加及び削除を行う際の，基準量のことである。Sensitivity Number は，FEM 解析により得られた，部材の応力や節点変位などの情報から算出され，応力に関するものや，コンプライアンスに関するものなど，さまざまなものが提案されている[11, 21]。例として，BESO を骨組構造へ応用する際に用いられる Sensitivity Number の定義を以下に示す。

$$Cr_i^k = \frac{\sigma_i^k}{\sigma_{target}} \tag{1}$$

ここに，Cr_i^k：ステップ k における i 番目の部材の Sensitivity Number，σ_i^k：ステップ k における i 番目の部材の応力，σ_{target}：部材の目標応力とする。

3．3　BESO の流れ

Fig. 2 に BESO のフローチャートを示す。BESO のアルゴリズムは以下の通りである。

1　初期形態を設定し，初期条件として，体積制約：V *，進化率（Evolutionary Ratio）：ER 及び最大追加体積比：AR_{max} を設定する。
2　終了条件を満たすまで以下の処理を繰り返す。
　2．1　FEM 解析を行う。

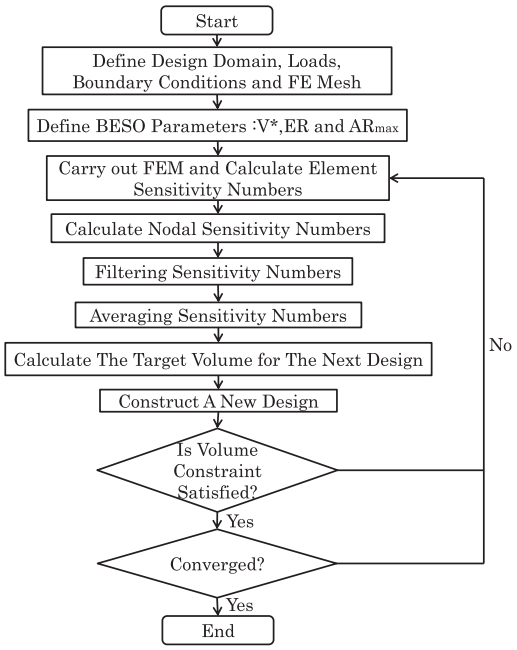


Fig. 2　Flowchart of Bi-directional Evolutionary Structural Optimization

2．2　FEM 解析により得られた結果から，基準量として敏感数（Sensitivity Number）を算出する。
2．3　Sensitivity Number のフィルタリングを行う。
2．4　フィルタリングされた Sensitivity Number と閾値を比較し，要素の付加及び削除を行う。
3　最終的に得られた構造体を出力する。

4．双方向進化型最適化法の概念を導入した ACO

4．1　最適化アルゴリズム

本論文で提案する手法は，ACO のアルゴリズムを基本とし，ACO におけるフェロモンの更新の際に BESO の Sensitivity Number による要素の付加と削除の概念を導入したものである。

4．2　本提案手法の流れ

本提案手法のフローチャートを，Fig. 3 に示す。本提案手法のアルゴリズムは以下のとおりである。

1．初期条件を設定する。
2．次に初期の蟻の経路を乱数に基づいて決定する。
3．FEM 解析を行う。
4．FEM 解析の結果から Sensitivity Number を算出する。
5．終了条件を満たすまで以下の処理を繰り返す。
5．1　各蟻に対して，フェロモンとヒューリスティックな情報に基づいて確率的な経路の選択を行う。
5．2　FEM 解析を行う。
5．3　FEM 解析の結果から Sensitivity Number を算出する。
5．4　各蟻が経路に残すフェロモンを，BESO の Sensitivity Number に基づく要素の付加及び削除の概念に基づいて算出する。
5．5　フェロモンの更新を行う。
6．最終的に得られた構造体を出力する。

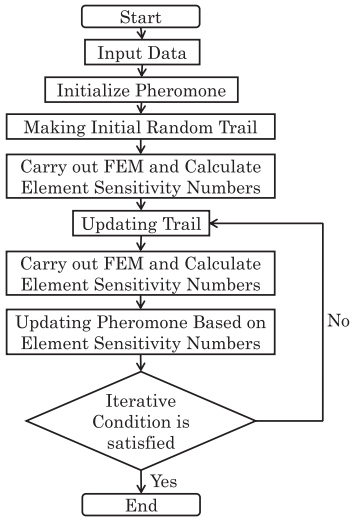


Fig. 3　Flowchart of ACO by Innovating Concept of BESO

4．3　問題の定式化

本論文ではトラス構造最適化問題を取り扱い，目的関数をコンプライアンスの最小化，制約条件を部材応力及び節点変位とする。その定式化は以下のようになる。

$$\begin{aligned} &minimize \quad f_t(\boldsymbol{A}) = \frac{1}{2}\boldsymbol{d}^T\boldsymbol{K}\boldsymbol{d} \\ &subject\ to \quad \sigma_i \le \sigma_{\max} \\ &\qquad\qquad \delta_i \le \delta_{\max} \end{aligned} \tag{2}$$

ここに，$f_t(\boldsymbol{A})$：構造物全体のコンプライアンス，$\boldsymbol{d}$：節点変位ベクトル，$\boldsymbol{K}$：剛性行列，σ_i：i 番目の部材の応力，σ_{max}：許容最大応力，δ_i：i 番目の節点の節点変位，δ_{max}：許容最大節点変位とする。

4．4　フェロモンの更新式

ACO では蟻が通った経路にはフェロモンが蓄積され，通らなかった経路のフェロモンは蒸発する。従来の ACO では，蟻の通った経路においてフェロモンの蓄積のみを行うが，本提案手法では蓄積に加えて蒸発も行うものとし，さらに更新を各部材ごとに行う。その更新式を以下のように定義する。

$$Ph_i^{k+1} = \begin{cases} Ph_i^k + \Delta Ph_i^{k+1} & ,if \quad i \in Trail^{k+1} \\ Ph_i^k - \rho \times \max A & ,if \quad i \notin Trail^{k+1} \end{cases} \tag{3}$$

ここに，Ph_i^k：ステップ k における i 番目の部材のフェロモン，ΔPh_i^{k+1}：ステップ $k+1$ における i 番目の部材のフェロモンの蓄積及び蒸発量，ρ：フェロモンの蒸発率，max$A$：最大断面積，$Trail^{k+1}$：ステップ $k+1$ における蟻の経路とする。

4．5　BESO の概念に基づくフェロモンの蓄積及び蒸発量

本提案手法では，フェロモンの蓄積及び蒸発量を BESO の基準量に基づく要素の付加及び削除の概念に基づいて決定する。その値は以下の式により与えられる。

$$\Delta Ph_i^{k+1} = \begin{cases} aQ \times \max A & ,if\ Cr_i^{k+1} > RR^{k+1} \\ -aQ \times \max A & ,if\ Cr_i^{k+1} \le RR^{k+1} \end{cases} \tag{4}$$

ここに，ΔPh_i^{k+1}：ステップ $k+1$ におけるフェロモンの蓄積及び蒸発量，aQ：フェロモンの蓄積及び蒸発率，Cr_i^{k+1}：ステップ $k+1$ における i 番目の部材の Sensitivity Number，RR^{k+1}：ステップ $k+1$ における閾値とする。

(4)式において，Cr_i^{k+1} を算出するために，以下の値を定義する。

$$C_{ave}^{k+1} = \frac{\max(C_i^{k+1}) + \min(C_i^{k+1})}{2} \tag{5}$$

ここに，C_{ave}^{k+1}：ステップ $k+1$ における部材のコンプライアンスの平均値，max (C_i^{k+1})：ステップ $k+1$ における部材のコンプライアンスの最大値，min (C_i^{k+1})：ステップ $k+1$ における部材のコンプライアンスの最小値である。

本論文では，(5)式より算出した C_{ave}^{k+1} を用いて，Cr_i^{k+1} を

以下のように定義する。

$$Cr_i^{k+1} = \alpha \times \frac{\left|\sigma_i^{k+1}\right|}{\sigma_{\max}} + \beta \times \frac{\left|C_i^{k+1}\right|}{C_{ave}^{k+1}} \tag{6}$$

ここに，α，β：重み係数，σ_i^{k+1}: ステップ $k+1$ における i 番目の部材の応力，C_i^{k+1}: ステップ $k+1$ における i 番目の部材のコンプライアンス，C_{ave}^{k+1}：(5)式により算出したステップ $k+1$ における部材のコンプライアンスの平均値とする。

さらに閾値 RR^{k+1} は BESO の方法に従って以下のように与える。

$$RR^{k+1} = RR^k + ER \tag{7}$$

ここに，ER：Evolutionary Ratio とする。この値を導入することによって，ステップが進むにつれて閾値が上昇し，ステップの後半においてもフェロモンの更新を行うことが可能となり，制約条件を満たす解が得られる。

4．6　蟻の経路選択

本提案手法での各蟻の経路選択は，以下の式から選択確率を算出し，ルーレットランダム方式を用いて行うものとする。

$$Pr_i^k = \frac{\alpha \times \tau_i^k + \beta \times \eta_i^k}{\sum_{j=1}^{NE} \alpha \times \tau_j^k + \beta \times \eta_j^k}$$
$$\tau_i^k = \left|1 - \frac{\left|\sigma_i^k\right|}{\sigma_{\max}}\right|, \eta_i^k = \left|1 - \frac{\left|C_i^k\right|}{C_{ave}^k}\right| \tag{8}$$

ここに，Pr_i^k: ステップ k における i 番目の部材を選択する確率，α，β：重み係数，NE：各節点に接続されている部材の数とする。

構造最適化問題では部材が存在しない場合があるため，ACO を構造最適化問題へ応用するためには，部材のない経路を選択する確率を 0 にする必要がある。そこで，(8)式に加え，以下のような選択確率を定義する。

$$Pr_i^k = 0 \text{ , } if \ \ i \notin EL \tag{9}$$

ここに，EL：構造物に存在する部材の集合とする。

(9)式のような選択確率を導入することで，蟻は部材のない経路を選択しなくなるが，一方で蟻の選択できる部材がなくなり，蟻が立ち往生する場合が生じる。そこで本論文では，そのような状態に陥った蟻を，乱数に基づいてまだ訪れていない節点に移動させる。この操作を行うことで，蟻は部材の存在しない経路を選択することなく，すべての節点を訪れることが可能となる。

4．7　プログラムの開発環境及び実行環境

本論文では，前述したようなアルゴリズムをもとに The MathWorks MATLAB Version 7. 8. 0347(R2009a) 32- bit (win32)によりプログラムの開発を行い，プロセッサ:Intel (R) Pentium(R) CPU G3250 @ 3. 20GHz 3. 20GHz，実装メモリ (RAM)：4. 00GB，システムの種類：64ビットオペレーティングシステムの，コンピューター—を用いて，そのプログラムを実行した。

5．解析例①-15本平面トラス

5．1　解析モデル及び解析条件

解析例①として，15本平面トラスの最適断面を求める。他の研究者の結果と比較するために，解析条件として，密度を7, 800kg / m^3，弾性係数を200GPa，初期の断面積を750mm^2, 蟻の数を 5 匹, RR^{k+1}の初期値 RR^1 を0. 2, ステップ数を1, 000と設定した。また，制約条件として，許容最大応力を ±120MPa，許容最大節点変位 ±10mm と設定した。荷重の作用位置は，節点 4 (P_y = −35kN)，節点 6 (P_y = −35kN)，節点 8 (P_y = −35kN) とした。Table 1 に15本平面トラスの解析条件及び制約条件，Fig. 4 に解析モデルを示す。

Table 1　Analysis condition and constraints of 15-bar planar truss

Density	7,800kg/m^3
Modulus of elasticity	200GPa
Maxmum stress	±120MPa
Maximum displacement	10mm
Initial cross-sectional area	750mm^2
Number of ants	5
Step	1,000
aQ	2.0×10^{-3}
ρ	5.0×10^{-4}
α	0.9
β	0.1
RR^1	0.2
ER	1.0×10^{-3}

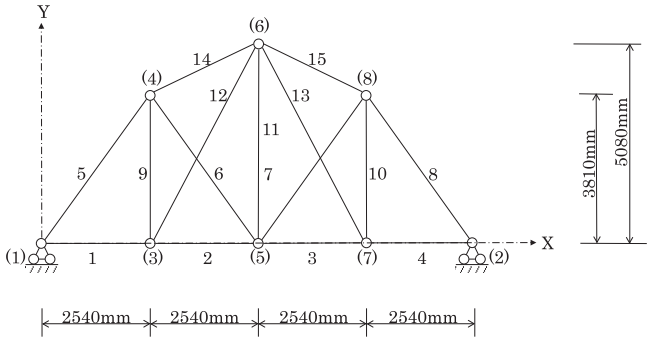


Fig. 4　Geometry of a 15-bar planar truss

5．2　解析結果及び考察

本提案手法により得られた各部材の断面積及び構造物全体の重量を，他の方法により得られた結果と比較したものを Table 2 に示す。また，コンプライアンスと構造物全体の重量の履歴を Fig. 5 に示す。

Table 2 から，本提案手法により得られた結果は，HPSO により得られた結果と同等の値となっており，その他の手

法と比べて良い結果が得られている。このことから本提案手法は，平面トラスの構造最適化問題に対して有効であると考えられる。

Fig. 5から構造物の重量が下がるにつれコンプライアンスの値が大きくなっており，約700ステップで収束していることが読み取れる。また，本解析では収束までに約1分かかった。

Table 2　Comparison of optimal designs of the 15-bar planar truss structure

Element area	Present	Zhang[15]	PSO[16]	PSOPC[16]	HPSO[16]
A_1	113.20 mm^2	308.60 mm^2	185.90 mm^2	113.20 mm^2	113.20 mm^2
A_2	113.20 mm^2	174.90 mm^2	113.20 mm^2	113.20 mm^2	113.20 mm^2
A_3	113.20 mm^2	338.20 mm^2	143.20 mm^2	113.20 mm^2	113.20 mm^2
A_4	113.20 mm^2	143.20 mm^2	113.20 mm^2	113.20 mm^2	113.20 mm^2
A_5	736.70 mm^2	736.70 mm^2	736.70 mm^2	736.70 mm^2	736.70 mm^2
A_6	113.20 mm^2	185.90 mm^2	143.20 mm^2	113.20 mm^2	113.20 mm^2
A_7	113.20 mm^2	265.90 mm^2	113.20 mm^2	113.20 mm^2	113.20 mm^2
A_8	736.70 mm^2	507.60 mm^2	736.70 mm^2	736.70 mm^2	736.70 mm^2
A_9	113.20 mm^2	143.20 mm^2	113.20 mm^2	113.20 mm^2	113.20 mm^2
A_{10}	113.20 mm^2	507.60 mm^2	113.20 mm^2	113.20 mm^2	113.20 mm^2
A_{11}	113.20 mm^2	279.10 mm^2	113.20 mm^2	113.20 mm^2	113.20 mm^2
A_{12}	113.20 mm^2	174.90 mm^2	113.20 mm^2	113.20 mm^2	113.20 mm^2
A_{13}	113.20 mm^2	297.10 mm^2	113.20 mm^2	185.90 mm^2	113.20 mm^2
A_{14}	334.30 mm^2	235.90 mm^2	334.30 mm^2	334.30 mm^2	334.30 mm^2
A_{15}	334.30 mm^2	265.90 mm^2	334.30 mm^2	334.30 mm^2	334.30 mm^2
Weight	105.75 kg	142.13 kg	108.97 kg	108.97 kg	105.75 kg

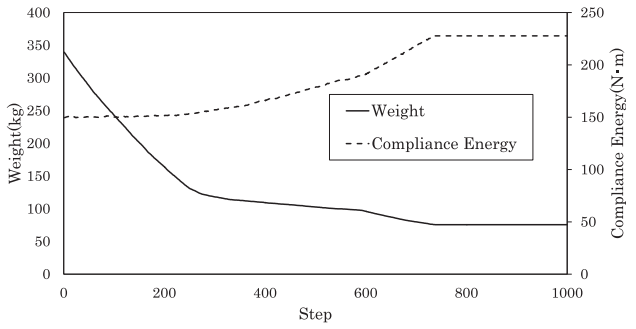


Fig. 5　History of the optimal compliance and weight

6．解析例②-25本立体トラス

6．1　解析モデル及び解析条件

解析例②として，25本立体トラスの最適断面を求める。得られた断面積は，(1)A1，(2)A2～A5，(3)A6～A9，(4)A10～A11，(5)A12～A13，(6)A14～A17，(7)A18～A21，(8)A22～A25のようにグループ化するものとする。他の研究者の結果と比較するために，解析条件として，密度を0.1 lb/in^3(2,768kg/m^3)，弾性係数を10,000ksi (68.9GPa)，初期の断面積を6.0in^2(3,870mm^2)，蟻の数を5匹，RR^{k+1}の初期値RR^1を0.1，ステップ数を500と設定した。また，制約条件として，許容最大応力を ±40 ksi (275.8MPa)，許容最大節点変位 ±0.35 in (8.89mm) と設定した。

荷重の作用位置は，節点1 (P_y = 20kips(89kN)，P_z = −5 kips (−22kN))，節点2 (P_y = −20kips(89kN)，P_z = −5 kips (−22kN)) とした。Table 3に解析条件及び制約条件，Fig. 6に解析モデルを示す。

Table 3　Analysis conditions and constraints of 25-bar spatial truss

Density	0.1 lb/in^3 (2,768kg/m^3)
Modulus of elasticity	10,000 ksi (68.9GPa)
Maxmum stress	±40 ksi (±275.8MPa)
Maximum displacement	0.35 in (8.89mm)
Initial cross-sectional area	6.0 in^2 (3,870mm^2)
Number of ants	5
Step	500
aQ	2.0×10^{-3}
ρ	1.0×10^{-3}
α	0.9
β	0.1
RR^1	0.1
ER	5.0×10^{-4}

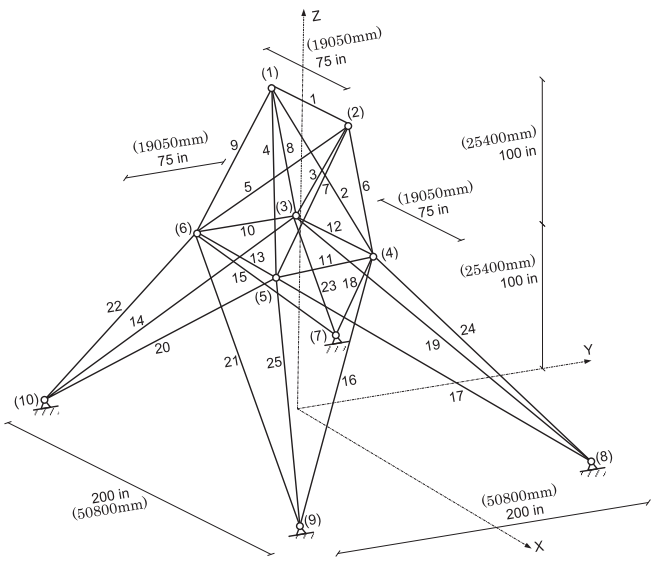


Fig. 6　Geometry of a 25-bar spatial truss

6．2　解析結果及び考察

本提案手法により得られた各部材の断面積及び構造物全体の重量と，他の手法により得られた結果と比較したものをTable 4に示す。また，各手法により得られた断面積を用いてFEM解析を行い，得られた，部材14-17及び部材22-25の応力及び軸力をそれぞれ，Table 5及びTable 6，節点1 - 6の変位をTable 7に示す。さらに，得られた圧縮及び引張応力度の最大値と節点変位の最大値をTable 8に示す。また，コンプライアンスと構造物全体の重量の履歴をFig. 7に示す。

Fig. 7から構造物の重量が下がるにつれコンプライアンの値が大きくなっており，約300ステップで収束している

ことが読み取れる。また，本解析では収束までに約20秒かかった。

Table 4 から本提案手法により得られた結果は，その他の手法と比べて良い結果が得られていることが読み取れる。これは，他の研究者が構造物全体の重量最小化を目的関数としていることに対し，本提案手法では，部材のコンプライアンスを一様化することで，構造物全体のコンプライアンス最小化を目的関数としていることが影響していると考えられる。このことから，ただ単純に構造物全体の重量を最小化するのではなく，構造物全体のコンプライアンスの最小化をした結果として得られる構造物の方が構造物全体の重量を軽量化することが可能であると考えられる。

本提案手法は，他の手法に比べて，部材14-17及び部材22-25の断面積が極めて小さな値となっているが，Table 5 から，他の手法により得られる結果では，部材14-17及び部材22-25の応力が，許容最大応力275. 8MPa に対して，きわめて小さな値となっていることが読み取れる。従って，部材14-17及び部材22-25の断面積が不必要に大きくなっているため，断面積をさらに小さくすることが可能であると考えられる。節点変位に関しては，Table 7 から本提案手法もその他の手法も節点 1 - 2 が最大節点となっていることが読み取れる。また，本提案手法の節点 1 - 2 の節点変位は，HS，HPSACO とほぼ同じ値となっており，許容最大節点変位に近い値となっているが，GA は許容最大節点変位に対して，少し余裕がある。節点 3 - 6 に関しては，その他の手法では，許容最大節点変位に対してかなり余裕があるが，本提案手法では，許容最大変位に対して，少し余裕があるものの，その他の手法と比較して，約 2 倍の値となっており，余裕が少なくなっていることが読み取れる。従って，部材14-17及び部材22-25の断面積を小さくすることで，部材14-17及び部材22-25の応力を，許容最大応力に近づけることができ，さらに，各節点の変位を許容最大節点変位に近づけることが可能になったと考えられる。よって，本提案手法では，部材応力及び節点変位を，制約条件の境界に近づけるために，部材14-17及び部材22-25の断面積が小さくなっていると考えられる。そのため，得られた解析結果は妥当であるといえる。

Table 8 から他の研究者により得られた立体トラスは，許容最大応力が ±40ksi（±275. 8MPa）であることに対して部材の最大引張応力及び最大圧縮応力はそれぞれ約6. 3～7. 8ksi（約43. 5～53. 8MPa），約6. 8～7. 9ksi（約46. 9～54. 5MPa）となっており許容最大応力に対して小さな値となっていることが読み取れる。このことに対して，本提案手法により得られた立体トラスでは，部材の最大引張応力及び最大圧縮応力はそれぞれ約6. 3ksi（約43. 5MPa），約10. 1ksi（約69. 6MPa）となっており，他の手法よりも許容最大応力に近づいていることが読み取れる。このことが他の手法に比べて構造物全体の重量の軽量化につながったと考えられる。また節点変位に関しても，許容最大節点変位よりも小さいことが読み取れる。したがって本提案手法により得られた立体トラスは制約条件を満たしていることは明らかである。

以上のようなことから，本提案手法は，立体トラスの構造最適化問題に対して有効であると考えられる。

Table 4　Comparison of optimal designs of the 25-bar spatial truss structure

Element area	Present	Wu and Chow[17] GA	Lee and Geem[18] HS	Kaveh[19] HPSACO
A_1	0.10 in^2 (64.52 mm^2)	0.40 in^2 (258.07 mm^2)	0.01 in^2 (6.45 mm^2)	0.01 in^2 (6.45 mm^2)
A_2～A_5	2.10 in^2 (1,354.85 mm^2)	2.00 in^2 (1,290.33 mm^2)	2.00 in^2 (1,290.33 mm^2)	1.60 in^2 (1,032.26 mm^2)
A_6～A_9	3.60 in^2 (2,322.59 mm^2)	3.60 in^2 (2,322.59 mm^2)	3.60 in^2 (2,322.59 mm^2)	3.20 in^2 (2,064.53 mm^2)
A_{10}～A_{11}	0.20 in^2 (129.03 mm^2)	0.01 in^2 (6.45 mm^2)	0.01 in^2 (6.45 mm^2)	0.01 in^2 (6.45 mm^2)
A_{12}～A_{13}	0.40 in^2 (258.07 mm^2)	0.01 in^2 (6.45 mm^2)	0.01 in^2 (6.45 mm^2)	0.01 in^2 (6.45 mm^2)
A_{14}～A_{17}	0.20 in^2 (129.03 mm^2)	0.80 in^2 (516.13 mm^2)	0.80 in^2 (516.13 mm^2)	0.80 in^2 (516.13 mm^2)
A_{18}～A_{21}	1.90 in^2 (1,225.81 mm^2)	2.00 in^2 (1,290.33 mm^2)	1.60 in^2 (1,032.26 mm^2)	2.00 in^2 (1,290.33 mm^2)
A_{22}～A_{25}	0.10 in^2 (64.52 mm^2)	2.40 in^2 (1,548.40 mm^2)	2.40 in^2 (1,548.40 mm^2)	2.40 in^2 (1,548.40 mm^2)
Weight	430.66 lb (195.35 kg)	592.50 lb (268.76 kg)	560.59 lb (254.28 kg)	551.61 lb (250.21 kg)

Table 5　Comparison of stresses of element14-17 and element22-25

Element stress	Present	Wu and Chow[17] GA	Lee and Geem[18] HS	Kaveh[19] HPSACO
σ_{14}	-10.1ksi (-69.6MPa)	-2.5ksi (-17.4MPa)	-2.4ksi (-16.4MPa)	-2.8ksi (-19.1MPa)
σ_{15}	4.5ksi (30.8MPa)	1.1ksi (7.8MPa)	1.0ksi (6.9MPa)	1.4ksi (9.6MPa)
σ_{16}	4.5ksi (30.8MPa)	1.1ksi (7.8MPa)	1.0ksi (6.9MPa)	1.4ksi (9.6MPa)
σ_{17}	-10.1ksi (-69.6MPa)	-2.5ksi (-17.4MPa)	-2.4ksi (-16.4MPa)	-2.8ksi (-19.1MPa)
σ_{22}	-7.3ksi (-49.8MPa)	-0.9ksi (-6.5MPa)	-1.1ksi (-7.5MPa)	-0.5ksi (-3.4MPa)
σ_{23}	-3.2ksi (-21.8MPa)	-0.8ksi (-5.4MPa)	-0.5ksi (-3.6MPa)	-1.1ksi (-7.5MPa)
σ_{24}	-7.3ksi (-49.8MPa)	-0.9ksi (-6.5MPa)	-1.1ksi (-7.5MPa)	-0.5ksi (-3.4MPa)
σ_{25}	-3.2ksi (-21.8MPa)	-0.8ksi (-5.4MPa)	-0.5ksi (-3.6MPa)	-1.1ksi (-7.5MPa)

Table 6　Comparison of axial forces of element14-17 and element22-25

Element axial force	Present	Wu and Chow[17] GA	Lee and Geem[18] HS	Kaveh[19] HPSACO
N_{14}	-2.0kips (-9.1kN)	-2.0kips (-9.1kN)	-1.9kips (-8.5kN)	-2.2kips (-10.0kN)
N_{15}	0.9kips (4.0kN)	0.9kips (4.1kN)	0.8kips (3.6kN)	1.1kips (5.0kN)
N_{16}	0.9kips (4.0kN)	0.9kips (4.1kN)	0.8kips (3.6kN)	1.1kips (5.0kN)
N_{17}	-2.0kips (-9.1kN)	-2.0kips (-9.1kN)	-1.9kips (-8.5kN)	-2.2kips (-10.0kN)
N_{22}	-0.7kips (-3.3kN)	-2.3kips (-10.1kN)	-2.6kips (-11.6kN)	-1.2kips (-5.3kN)
N_{23}	-0.3kips (-1.5kN)	-1.9kips (-8.5kN)	-1.2kips (-5.5kN)	-2.6kips (-11.7kN)
N_{24}	-0.7kips (-3.3kN)	-2.3kips (-10.1kN)	-2.6kips (-11.6kN)	-1.2kips (-5.3kN)
N_{25}	-0.3kips (-1.5kN)	-1.9kips (-8.5kN)	-1.2kips (-5.5kN)	-2.6kips (-11.7kN)

Table 7　Comparison of node displacements of node 1 - 6

Node displacement	Present	Wu and Chow[17] GA	Lee and Geem[18] HS	Kaveh[19] HPSACO
Node1	0.34in (8.64mm)	0.32in (8.13mm)	0.34in (8.64mm)	0.35in (8.89mm)
Node2	0.34in (8.64mm)	0.32in (8.13mm)	0.34in (8.64mm)	0.35in (8.89mm)
Node3	0.26in (6.61mm)	0.14in (3.56mm)	0.16in (4.07mm)	0.14in (3.56mm)
Node4	0.20in (5.08mm)	0.11in (2.80mm)	0.13in (3.31mm)	0.11in (2.80mm)
Node5	0.26in (6.61mm)	0.14in (3.56mm)	0.16in (4.07mm)	0.14in (3.56mm)
Node6	0.20in (5.08mm)	0.11in (2.80mm)	0.13in (3.31mm)	0.11in (2.80mm)

Table 8　Constraints variables of the 25-bar spatial truss structure

Constraints veriables	Present ACO	Wu and Chow[17] GA	Lee and Geem[18] HS	Kaveh[19] HPSACO
Maximum tensile stress	6.3ksi (43.5MPa)	6.3ksi (43.4MPa)	6.7ksi (46.1MPa)	7.8ksi (53.8MPa)
Maximum complesive stress	-10.1ksi (-69.6MPa)	-6.8ksi (-46.9MPa)	-7.4ksi (-50.5MPa)	-7.9ksi (-54.1MPa)
Maximum node displacement	0.34in (8.64mm)	0.32in (8.13mm)	0.34in (8.64mm)	0.35in (8.89mm)

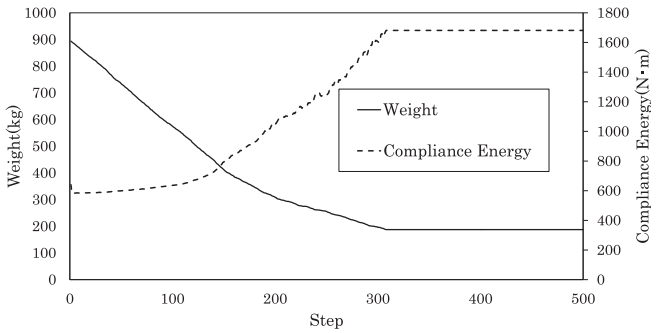


Fig. 7　History of the optimal compliance and weight

7．結　　言

本論文では，双方向進化型構造最適法を導入した Ant Colony Optimization　を提案し，構造最適化問題におけるトラス構造最適化への応用例を示した。解析の結果以下のことが明らかとなった。

(1) ACO を構造最適化問題へ応用する際に BESO の概念を導入することで，構造最適化問題を解くことに特化したアルゴリズムとすることができる。

(2) 本提案手法を用いることで，本論文における制約条件の下，目的関数を満たすような構造形態を得ることができる。

(3) 本提案手法は，平面トラス及び立体トラス部材の断面積最適化問題に対して有効である。

参 考 文 献

1. J. Holland：Adaptation in natural and artificial systems, University of Michigan（2004）
2. F. Glover：Tabu Search - Part Ⅰ, ORSA Journal on Computing, Vol. 1, No. 3 , 190-206（1989）
3. F. Glover：Tabu Search - Part Ⅱ, ORSA Journal on Computing, Vol. 2 , No. 1 , 4 -32（1990）
4. F. Glover, E. Taillard and D. de Warra：A user' s guide to tabu search, Annals of Operations Research, Vol. 41, pp. 3 -28（1993）
5. S. Kirkpatrick, C. Gelatt and M. Vecchi：Optimization by simulated annealing, Science, Vol. 220, pp. 671-680（1983）
6. P. Hajela and E. Lee：Genetic algorithm in truss topological optimization, International Journal of Solids and Structures, Vol. 32, No. 22, pp. 3341-3357（1995）
7. J. E. Baker：Adaptive Selection Methods for Genetic Algorithms, Proc.1st International Conference on Genetic Algorithms and Their Applications, pp. 101-111（1985）
8. M. Ohsaki：Genetic algorithm for topology optimization of trusses, Computers and Structures, Vol. 57, No. 2, pp. 219-225,（1995）
9. R. J. Balling：Optimal steel frame design by simulated annealing, Journal of Structural Engineering, Vol. 117, No. 6, pp. 1780-1795（1991）
10. M. Dorigo and T. Stutzle：Ant Colony Optimization, Cambridge, Massachusetts, London（2004）
11. Y. M. Xie and G. P. Steven：Evolutionary Structural Optimization, Springer-Verlag London Ltd.（1997）
12. X. Y. Yang, Y. M. Xie, G. P. Steven and O. Querin：Bidirectional Evolutionary Method for Stiffness Optimization, AIAA Journal, Vol. 37, No. 11, pp.1483-1488（1999）
13. V. Young, O. Querin, G. P. Steven and Y. M. Xie：3D and multiple load case bi-directional evolutionary structural optimization（BESO）, Structural and Multidisciplinary Optimization, Vol. 18, No. 2, pp. 183-192（1999）
14. R. Ansola, J. Canales and J. A. Tarrago：An efficient sensitivity computation strategy for the evolutionary structural optimization（ESO）of continuum structures subjected to self-weight loads, Finite Elements in Analysis and Design, Vol. 42, No. 14-15, pp. 1220-1230（2006）
15. Y. N. Zhang, J. P. Liu, B. Liu, C. Y. Zhu and Y. Li：Application of improved hybrid genetic algorithm to optimize, J South China Univ. Technol., Vol. 33, No. 3, pp. 69-72（2003）
16. L. J. Li, Z. B. Huang and F. Liu：A heuristic particle swarm optimization method for truss structures with discrete variables, Computers and Structures, Vol. 87, No. 7 -8, pp. 435-443（2009）
17. S. J. Wu and P. T. Chow：Steady-state genetic algorithms for discrete optimization of trusses, Computers and Structures, Vol. 56, No. 6, pp. 979-991（1995）
18. K. S. Lee and Z. W. Geem：A new structural optimization method based on the harmony search algorithm, Computers and Structures, Vol. 82, No. 9 -10, pp. 781-798（2004）
19. A. Kareh and S. Talatahari：A particle swarm ant colony optimization for truss structures with discrete variables, Journal of Constructional Steel Research, Vol. 65, No. 8 - 9, pp. 1558-1568（2009）
20. A. Kareh, B. F. Azar and S. Talatahari：Ant Colony Optimization for Design of Space Trusses, International Journal of Space Structures, Vol. 23, No. 3, pp. 167-181（2008）
21. X. Hung and Y. M. Xie：Evolutionary Topology Optimization of Continuum Structures - Methods and Application, John Wiley & Sons Ltd（2010）

既存屋内運動場におけるはり継手補強ディテールの検討

日比野 巧＊・浅里 和茂＊

Reinforcement Detail of Beam Joint on Existing Steel Gymnasium

Takumi HIBINO* and Kazushige ASARI*

Abstract

The many buildings that have been built in the new seismic design method previously, seismic performance is very low. These buildings was severely damaged in the earthquake. So seismic retrofitting is required. The connection of the old steel frame buildings vulnerable, reinforcement is required. However, details of the repair method is not been decided. An object of this study is the determination of the joint details. Parameter to consider is the weldability and the angle of the reinforcing plate. From this result, we determined to 30 degrees the angle, be 40 mm the mounting position of the tab.

Key words: Seismic retrofitting, Beam joint, FEM analysis, Stress concentration

1．は じ め に

東北地方太平洋沖地震（2011）の地震動による建築物の構造的被害は，そのほとんどが1981年に施行された新耐震設計法以前のものであり[1)]，いわゆる既存不適格建築物によるものであった。これら耐震安全性の低い建物，特に公共施設や児童生徒が使用する学校施設に対する耐震補強は，弱者の人的被害や被災後の災害復旧に大きく影響するため，積極的に進められている。

学校施設における屋内運動場は多くが鉄骨構造であり，部材断面性能よりも接合部の耐力不足が原因で耐震性能が低いことがきわめて多い。また，軽量 H 形鋼が使用されている場合，耐力不足がさらに助長される。現行設計法[2)]では接合部の耐力を部材が十分に塑性化するまで確保する保有耐力接合が義務づけられている。しかし，1981年以前の建物ではこれを満足していないものも多く，中でもボルト接合部は不適切なボルト配置などのため断面積が不足し，保有耐力接合で要求される耐力が得られない。

H 形鋼ボルト継手接合部の代表的な補強方法としては，フランジの両縁に鋼板を溶接し，断面欠損を補う手法（以下，耳板補強）が挙げられるが，補強鋼板の寸法詳細について明確なガイドラインは示されていない[3)]。そこで筆者らは既報[4)]で，耳板補強部の応力状態を FEM 解析により明らかにし，耳板補強形状の目安を示した。

本研究では，既報と同じく耳板補強鋼板の取り付き角度，長さなどをパラメータとしているが，あらたに引張実験を行った。その上で試験体および実大補強部モデルの FEM 解析を行った。それら結果から，補強部の挙動を比較した上で適切な補強方法を提案することを目的とする。

平成27年 6 月 1 日受理

＊日本大学工学部建築学科

2．H 形鋼フランジ補強接合部の引張実験

2．1　実験概要

本実験で想定した補強接合部を図 2．1 に示す。フランジが薄く，ボルト孔による断面欠損により耐力が不足して，保有耐力接合が成立しない。研究対象とするのは，フランジ両縁に耳板と呼ばれる補強鋼板が完全溶込み溶接接合された部位である。この耳板断面は設計者の判断により余裕をみて，かつ耳板のみでも十分な耐力が得られるようにフランジ断面積と同等以上とすることが多い。そのため両板幅でフランジ幅と同程度，板厚は形鋼端の曲線部を自然開先として利用できるようにワンサイズアップ以上とする。また，耳板端部はエンドタブを使用したいため，鋭角な形状ではなく隅切を設けるものとする。実験の変動因子としては，この耳板の角度，長さおよび溶接施工性を考えた隅切の有無である。実際の施工では，はり継手を解体することは不可能であるため，添板とボルトが残された状態で溶接作業をすることとなる。使用鋼材は補強対象となる建物に最も一般的に使用されていた SS400とした。

図 2．2 に隅切の有無による試験体を代表として各一体ずつ示し，表 2．1 には試験体の条件を示す。フランジ幅は試験機の制限のため100mm とし，耳板幅はフランジ幅の 1 /2，50mm とした。鋼板厚はフランジが 6 mm，耳板を

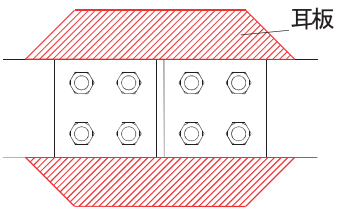


図 2．1　耳板補強概要

9 mm とした。これによりボルト孔周辺部以外での破断を確実にすることを狙っている。

耳板の形状は，フランジとの平行部分をボルト孔最外縁までとして，断面欠損を補うものとした。この耳板のはりフランジに対する取り付き角度を30度，45度，60度と変化させたものをそれぞれ PL-30，PL-45，PL-60とした。また，フランジと鉛直となる90度では，ボルト孔最外端からの距離（A）が 0 mm，耳板幅と同じ50mm のものをそれぞれ PL-90S，PL-90L とした。図２．２（b）にはエンドタブの設置を考慮して耳板の鋭角部分を切断したものを隅切補強タイプとして示す。このモデルは耳板がフランジに取り付く鋭角部分を切断し，30mm の鉛直部を確保したもので，角度を30度，45度のものをそれぞれ PL-30C，PL-45C とした。図２．３に溶接部詳細を示す。開先は45度，ルートギャップは 6 mm とし，すべてに裏当金を使用している。また，使用した鋼材の機械的性質を表２．２に示す。

試験体セットアップを写真２．１に示す。引張にはアムスラー型万能試験機を使用し，下げ振りにより試験体の鉛直を確認して設置した。全体の変形は試験機クロスヘッド間の変位を200mm 変位計で測定し，試験体上下つかみ部分の滑りを25mm 変位計で測定した。このクロスヘッド間変位から加力中のつかみ部分の滑りを除くことにより，試験体の全体変形としている。

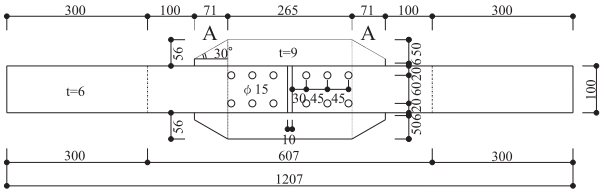
２．２　実験結果

試験体の破壊状況を写真２．２に示す。PL-30，PL-30C は耳板の補強端部からの破断となったが，PL-30C の方がボルト孔方向への破断が少ない。また，PL-45，PL-45C，PL-60，PL-60C も同様に補強端部からの破断となった。PL-90S は耳板が最も短いためボルト孔を横断する，へりあき破断となった。これより補強部が長い PL-90L は補強部から離れた位置でのフランジ軸部破断であった。

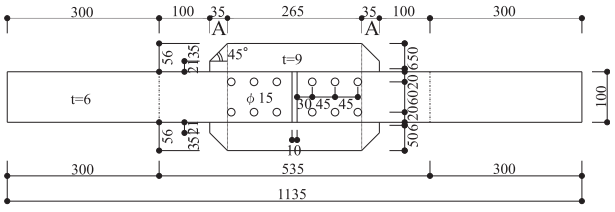
引張実験から得られた荷重－伸び率曲線を隅切無モデル

表２．１　試験体条件

試験体名	耳板角度 (度)	ボルト孔外端距離 A (mm)	隅切
PL-30	30	71	無
PL-45	45	41	無
PL-60	60	23.5	無
PL-90S	90	0	無
PL-90L	90	50	無
PL-30C	30	60.5	有
PL-45C	45	35	有



(a) 耳板角度を変えた試験体（PL-30）



(b) 隅切を施した試験体（PL-45C）

図２．２　試験体形状

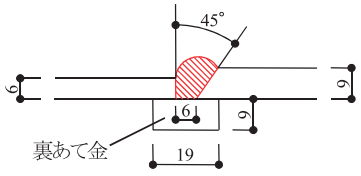


図２．３　試験体溶接部詳細

表２．２　鋼材の機械的性質

鋼板	E (10^5N/mm^2)	σ_y (N/mm^2)	ε_y (%)	ε_{st} (%)	σ_u (N/mm^2)	降伏比
6mm	2.11	324	0.150	3.23	444	0.73
9mm	1.86	337	0.180	1.57	428	0.79

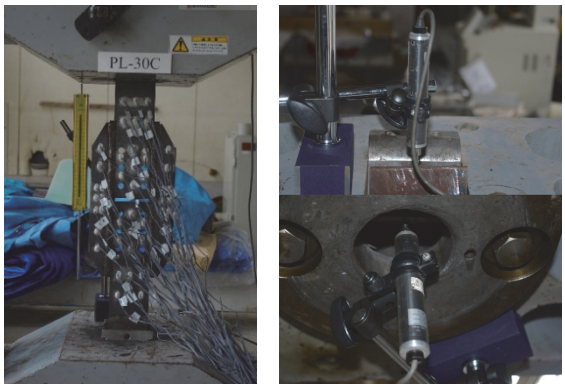
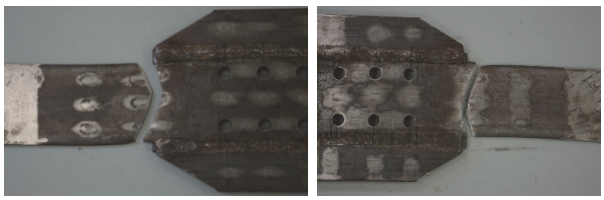


写真２．１　試験体セットアップ



（a）PL-30 試験体　　（b）PL-30C 試験体

（c）PL-90S 試験体　　（d）PL-90L 試験体

写真２．２　破壊状況

については図２．４に，隅切有モデルについては図２．５に示す。ここで伸び率は，試験体の全体変形を実験前のクロスヘッド間距離で除したものであり，図中の太横線は母材の降伏耐力の1.3倍を示す。また，表２．３には降伏荷重と最大荷重を示す。

隅切無モデルでは，PL-90L で破断形式がフランジ軸部破断となったため最も耐力ならびに伸び性能が良好となった。それに対して PL-90S はボルト孔位置での破断となったため，荷重および伸び率ともに他よりもきわめて小さい。PL-30，PL-45は最大荷重に至るまで PL-90L と全く同じ挙動を示したが，伸び率は大きく下回った。PL-60は PL-30，PL-45よりも荷重，伸び率ともにわずかに下回った。PL-90S を除く隅切モデルは降伏荷重と最大荷重ともに，ほぼ同等の値となったが，伸び性能は PL-90L より下回った。これはボルト孔外端距離が PL-90L より短く，破断位置が耳板端部となっており，溶接端部にわずかな断面欠損が生じていたためである。

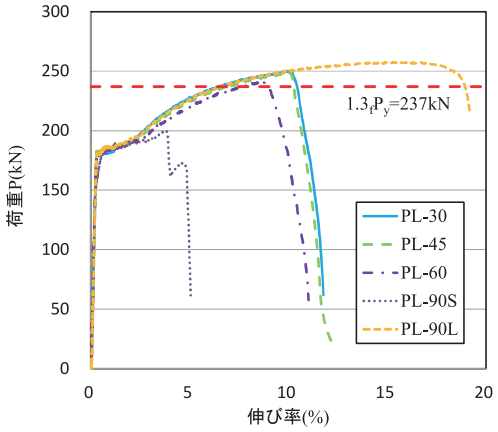


図２．４　荷重－伸び率曲線（隅切無モデル）

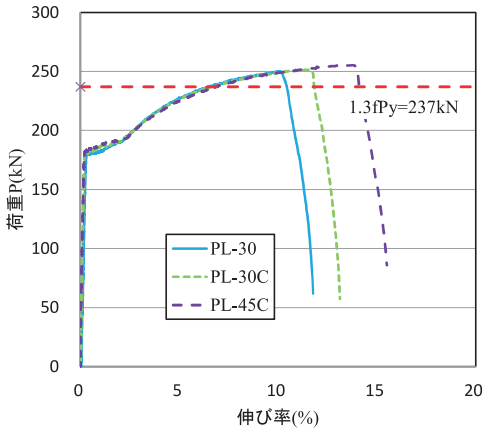
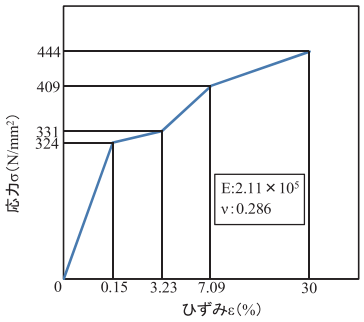


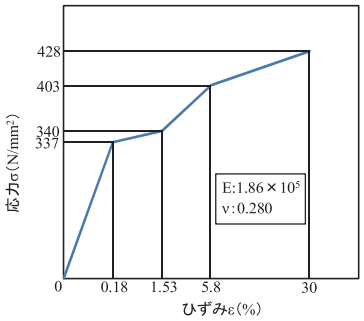
図２．５　荷重－伸び率曲線（隅切有モデル）

表２．３　降伏荷重・最大荷重

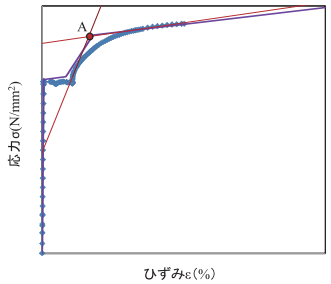
試験体	実験値		計算値	
	Py (kN)	Pu (kN)	Py (kN)	Pu (kN)
PL-30	180	250	187	256
PL-45	183	249	187	257
PL-60	181	241	188	257
PL-90S	151	199	132	181
PL-90L	181	258	187	256
PL-30C	183	251	187	256
PL-45C	183	255	188	257



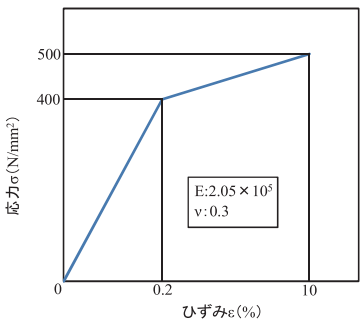
（a）母材材料モデル（6mm）



（b）母材材料モデル（9mm）



（c）ひずみ硬化後折点算出方法



（d）溶接部材料モデル

図３．１　試験体解析用材料非線形モデル

隅切有モデルでは，荷重－伸び率曲線の性状が隅切無モデルと全く同じになり，変形性能はより改善されたが，PL-90L よりは劣る結果となった。耳板端部の溶接は隅切無モデルでは，その鋭角形状からエンドタブの使用ができなかったため，十分ではなかった。これを改善するための隅切有モデルではあったが，隅切長さが短いため期待通りの改善とはならなかった。しかしながら，保有耐力接合の条件を満足するための最低限の耐力，変形性能は確保できた。

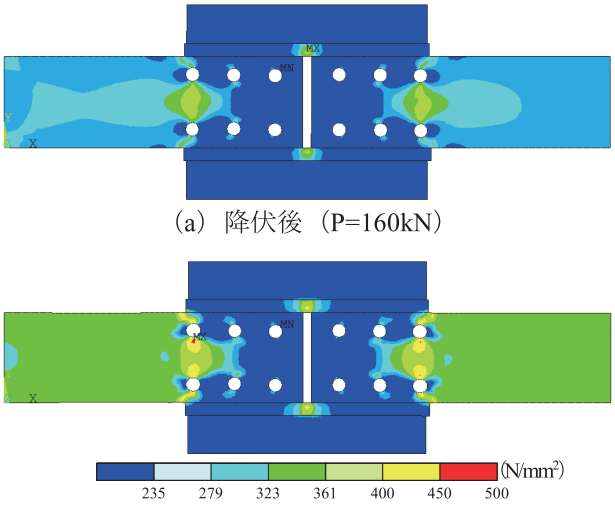
3．H 形鋼フランジ補強接合部の FEM 解析

3．1　引張試験体の解析

本補強接合部の性状を解析により明らかにするため，まず前章で述べた実験に用いた試験体の FEM 解析を行った。材料非線形性を反映させるために，表 2．2 に示した使用鋼材の機械的性質および応力ひずみ曲線から，多直線で構成される材料モデルとした。使用した材料モデルを図 3．1 に示す。各折れ点のポイントは鋼材の引張試験結果の平均値としているが，ひずみ硬化後のポイントは図 3．1 (c) に示すようにひずみ硬化部分およびひずみ硬化終了後をそれぞれ直線近似し，この 2 つの近似直線の交点とした。また，溶接部は Bi - Linear 型[5]の材料モデルとし，ヤング係数とポアソン比は標準的な鋼材と同等とした。解析には文献 4 と同じく ANSYS13を使用し，解析モデルの一端を固定，他端を一方向漸増載荷とした。

図 3．2 に実験結果と解析結果の比較を荷重－伸び曲線として示す。ここでは耐力および変形が著しく小さい PL-90S は除いている。解析では急激な耐力低下については再現できていないが，そこに至るまでの曲線性状は弾塑性域にわたって良好に追跡できている。最も変形量の大きい PL-90L では，破断までの100mm を越える伸びに対しても，解析結果は充分に対応できている。

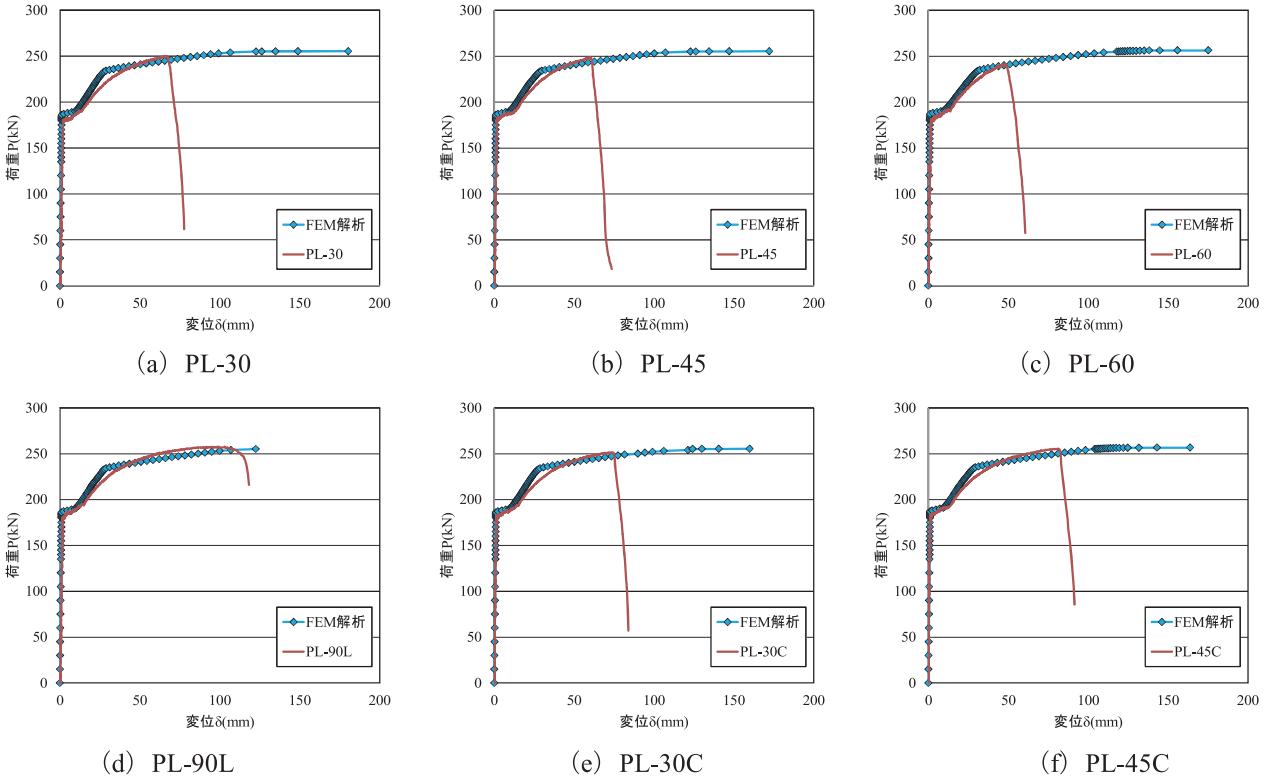
PL-90S の解析による応力度分布を図 3．3 に示す。降伏後から最外端のボルト孔間に高い応力が見られ，破断時にはボルト孔間ならびにボルト孔から耳板溶接部外縁にかけて400（N／mm^2）を越える応力となっている。このこと



（a）降伏後（P=160kN）

（b）破断時（P=190kN）

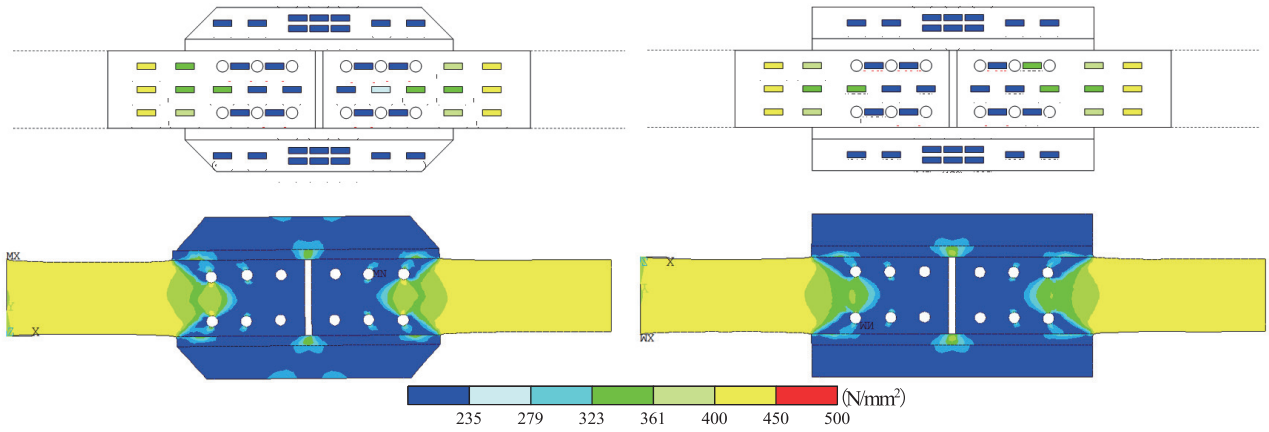
図 3．3　PL-90S 試験体応力度分布



（a）PL-30　（b）PL-45　（c）PL-60

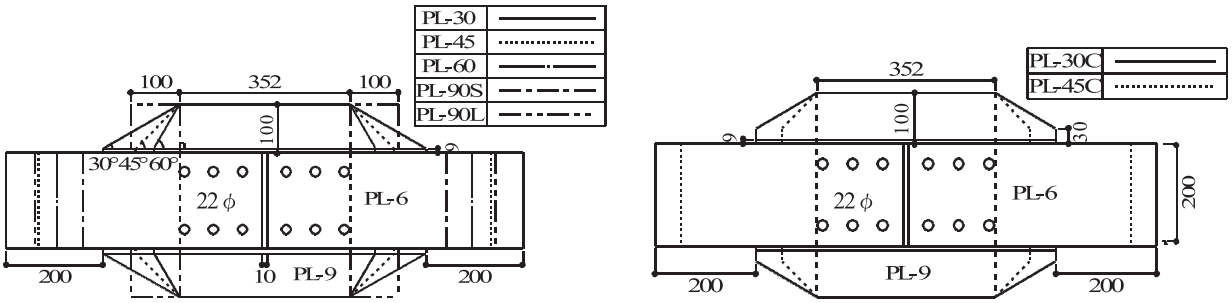
（d）PL-90L　（e）PL-30C　（f）PL-45C

図 3．2　荷重－伸び曲線の比較（試験体実験結果－解析結果）



（a）PL-45　　（b）PL-90L

図３．４　応力度分布の比較（試験体実験結果－解析結果）



（a）隅切無しモデル　　（b）隅切を施したモデル

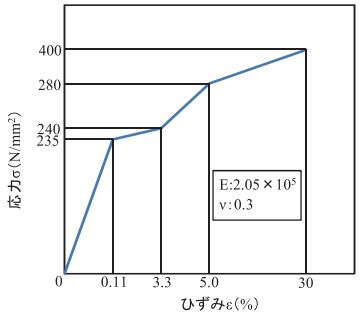
図４．１　実在解析モデル

からも PL -90S が早期に破断し，補強として不適切であることが明らかである。

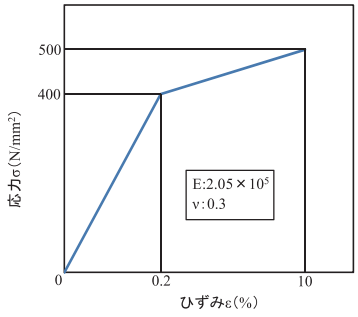
応力分布を比較するために，代表として PL -45, PL -90L について解析による応力度分布とひずみゲージにより測定したひずみから求めた応力度を図３．４に示す。また，ここでは相違が出やすいと思われるひずみ硬化が終了した，P ＝240kN 時点での応力度分布を示し，解析結果のコンター図と同様の色で実験結果による応力度も表している。

解析結果ならびに実験結果のいずれも補強部以外のフランジでは破断間近の大きな応力度を示し，耳板補強端部から接合部中央に向かって最初のボルト孔付近まで，ひずみ硬化域程度の高い応力度を示している。また，接合部中央のクリアランスギャップ部分では，解析は比較的高い応力度を示しているのに対して，実験結果からはこのような傾向は見られない。これはひずみゲージ貼付位置が離れていたためと溶接部の材料モデルを一般的な Bi - Linear 型としたためであるが，補強接合部全体の挙動に対しては影響がないと考える。

これら以外の耳板部分やフランジボルト孔部分はすべて弾性域に留まっており，補強は効果的に働いていると思われる。



（a）鋼材材料モデル



（b）溶接部材料モデル

図４．２　材料非線形モデル

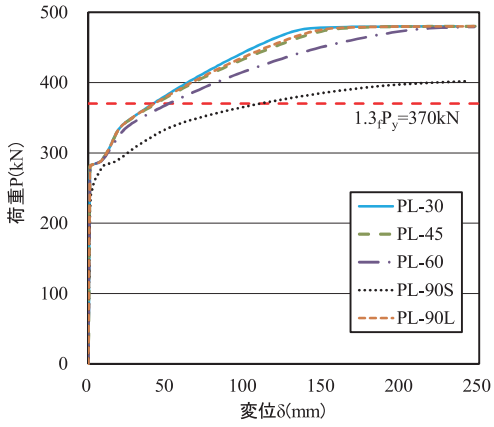


図４．３　荷重－伸び曲線（隅切無モデル）

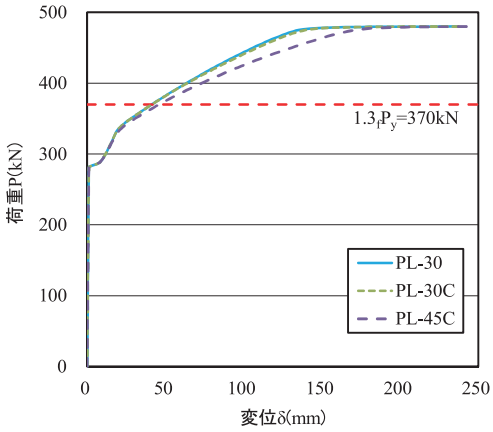
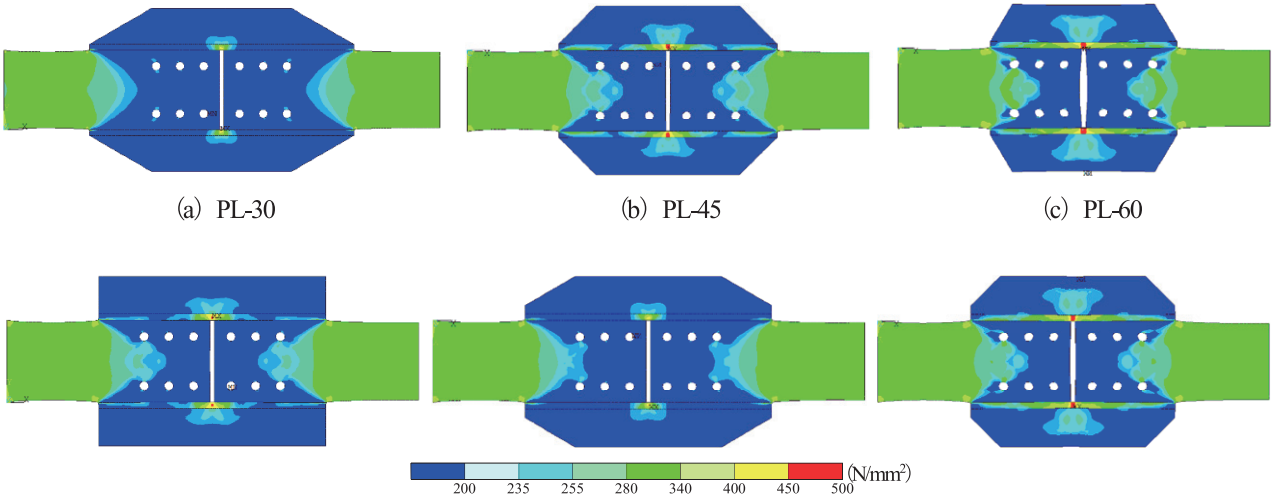


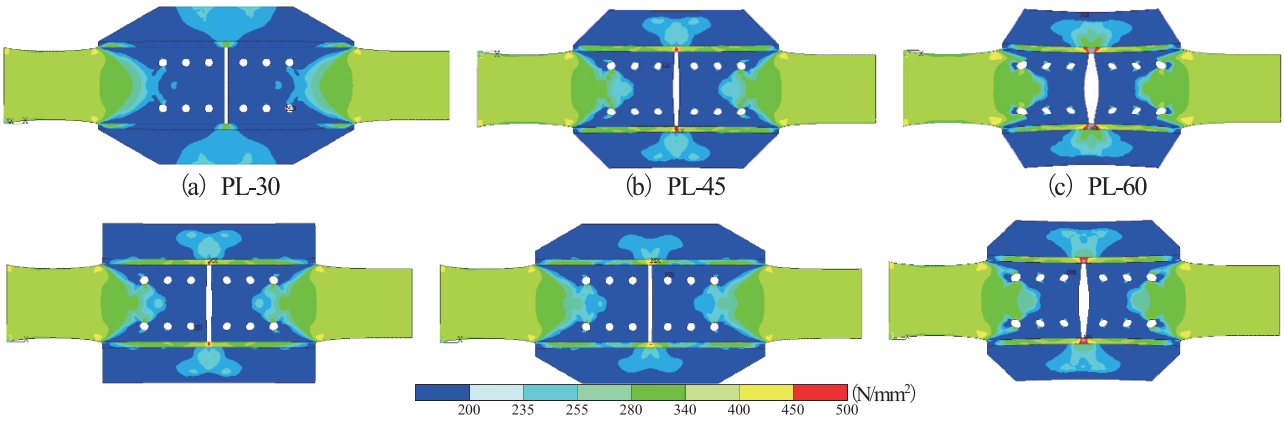
図4．４　荷重－伸び曲線（隅切有モデル）



(a) PL-30　(b) PL-45　(c) PL-60

(d) PL-90L　(e) PL-30C　(f) PL-45C

図４．５　解析による応力度分布（P ＝380kN 時）



(a) PL-30　(b) PL-45　(c) PL-60

(d) PL-90L　(e) PL-30C　(f) PL-45C

図４．６　解析による応力度分布（P ＝440kN 時）

4．実在補強接合部への適用

前章における実験を行った試験体のFEM解析結果より，補強接合部の変形や応力度分布を解析により明らかにすることができることが確認できた。そこで，実験では試験機の制限より試験体が縮小モデルとなったため，より現実的なサイズの接合部をモデル化して解析を行い，補強方法を検討する。

解析を行った補強接合部モデルを図4．1に示す。基本的な補強設計方針はこれまでと全く同じで，耳板のフランジに対する取り付き角度を主要因として30度，45度，60度，90度，これに隅切有のモデルも加えている。

本解析で使用した材料非線形モデルを図4．2に示す。一般的な材料を想定し，鋼材の降伏応力度や引張強さはSS400のJIS規格値を使用した。その他の数値は過去に筆者らが行った実験結果から平均的な値を使用した。また，ひずみ硬化後の折点ポイントも前章のモデルと同様に求めた。

隅切無モデルの荷重－伸び曲線を図4．3に示す。この結果では，PL-30，PL-45，PL-90Lがほぼ同じ性状を示し，最も耐力が大きい結果となっている。PL-60の降伏後の曲線性状がこれらを下回ったが，最終的な耐力は同等となっている。PL-90Sは最終的に保有耐力接合の条件を上回ったが，降伏直後から他のモデルよりも変形が大きく，最大耐力も大きく下回り，性能が最も低くなっている。

隅切有モデルの荷重－伸び曲線を図4．4に示す。比較対象としてPL-30も同時に示す。いずれも保有耐力接合の条件を満たしており，隅切有のPL-30Cと隅切無のPL-30が全く同じ曲線となっている。また，PL-45Cはそれをわずかに下回るものとなっている。

以上の曲線性状からは，PL-30，PL-45，PL-30C，PL-90Lが優れた耳板形状であり，PL-90Sは実験結果同様に不適切であることが言える。

解析から得られた応力度分布コンターをPL-90Sを除いて，図4．5および図4．6に示す。ここでは保有耐力接合の条件を上回るP＝380kN時および充分に塑性化が進展しているP＝440kN時を示している。

P＝380kN時では，補強部分のほとんどが弾性域に止まっており，補強外のフランジ部分から最外端ボルト孔に向かって塑性域が拡がってきている。また，PL-30からPL-60へと取り付き角度が大きくなるほど，耳板補強部の降伏部分が拡がりを見せており，同時にボルト孔に向かっての拡がりも大きくなっている。さらに，フランジ同士のクリアランスギャップ部にPL-30およびPL-30C以外では，大きな応力集中が見られる。隅切の有無では，隅切有の方がボルト孔に対する塑性域の拡がりが大きくなっているが，大きな差異ではない。

P＝440kN時では，PL-30以外はボルト孔群に向かっての塑性化が大きくなり，溶接部分でも塑性化が進んでいる。耳板自身では，PL-30が弾性域ながら他よりも応力の大きい部分が拡がっているが，これは応力集中があまり生じていないためでもある。このPL-30を除いて，溶接部およびクリアランスギャップ部で塑性化の進展が少なく，応力集中が少ないのはPL-30C，PL-90Lである。

ここまでの変形および応力度分布をあわせて判断して，耳板形状として優れているのはPL-30，PL-30C，PL-90Lの3種類となる。

5．推奨ディテールの提案

フランジ接合部補強に用いる耳板形状として，前章までにPL-30，PL-30C，PL-90Lが挙げられた。ここで推奨ディテールを決定するにあたり，耳板端部が鋭角であるとエンドタブが使用できず，溶接施工性が劣るためPL-30は除外する。また，PL-30CとPL-90Lは同等の性能であると判断できるが，文献3で指示されている形状を優先して考え，PL-30Cに基づいて提案する。

推奨ディテールの概略図を図5．1に示し，それぞれの条件を以下に述べる。

(1) 補強耳板厚さは，補強対象とするフランジ厚さよりも1～2サイズアップとする。
(2) 補強耳板幅は，補強対象とするフランジの1／2以上とし，十分な断面積を確保する。
(3) 補強耳板の同幅平行部は，ボルト孔の断面欠損を補うためにボルト孔外端よりも長くする。
(4) 補強耳板の取り付き角度は30度とし，ボルト孔から耳板端部までの長さは耳板幅の1.8倍以上とする。
(5) 溶接施工性を考慮した隅切長さは，既成セラミックタブ設置も考慮して30～40mmとする。

6．ま　と　め

筆者らはH形鋼フランジ耳板補強接合部を対象としたFEM解析[4]を行っていたが，今回，補強接合部の引張実験を行い，さらにひずみ硬化部を含めた詳細な材料モデルによる試験体と実大モデルの解析を行った。その結果から，補強鋼板としての耳板の形状を含めて推奨補強ディテールを決定した。

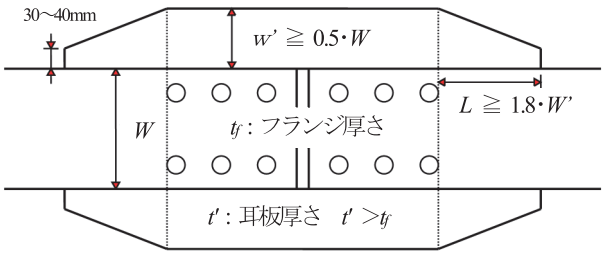


図5．1　推奨ディテール

謝　　辞

本論文の実験および解析に協力頂いた本田優君（現福島県庁）に対して，ここに記して感謝致します。

参 考 文 献

1）日本建築学会編：東日本大震災合同調査報告，建築編 3，鉄骨造建築物，2014. 9
2）日本建築学会編：鋼構造設計規準，許容応力度設計法，2005. 9
3）日本建築防災協会:既存鉄骨造建築物の耐震改修施工マニュアル，2013. 8
4）日比野巧，本田優，浅里和茂：既存鉄骨造はり継手の補強方法に関する研究，日本大学工学部紀要，Vol. 54，No. 1，2012. 9
5）佐藤邦彦：溶接強度ハンドブック，理工学社，1998. 1
6）日本建築防災協会：耐震改修促進法のための既存鉄骨造建築物の耐震診断および耐震改修指針・同解説，2012. 7
7）文部科学省大臣官房文教施設企画部：屋内運動場の耐震性能診断基準，2008. 7

細長い平面形を有する建物における耐震補強効果の検討
－ 1方向補強時の立体振動性状 －

日比野 巧＊・千葉 正裕＊

Effects of Seismic Reinforcement in Long and Slender Building Configuration
－ Three-dimensional Vibration Characteristics in One Directional Reinforcement Case －

Takumi HIBINO* and Masahiro CHIBA*

Abstract

There is no method established that can evaluate antiseismic reinforcement effects by measuring a building directly. This paper is aimed to clarify the relation between three-dimensional behavior and seismic reinforcement of the building which were performed by using multipoint microtremor measurements in long and slender building configuration. The summary of measurement results of building with one-way brace reinforcement are shown below.

1） Displacement magnification factor in the direction of seismic strengthening was smaller than the previous reinforcement of the building.

2） The natural period of in the direction of seismic reinforcement became shorter than the previous reinforcement of the building.

3） Vibration mode is different after the seismic reinforcement.

Key words : 耐震補強, 常時微動, 立体振動, 固有周期, 振動モード

1．序　　論

1995年兵庫県南部地震における建物被害[1)]の多くは，1981年以前に建設された建物であったと言われている。これらは，建設当時の耐震基準を満足するものの，1981年施行の耐震基準に準拠していない既存不適格の建物である。そこで，1995年に施行された「建築物の耐震改修の促進に関する法律」により，既存建築物の耐震診断[2)]を行い耐震性能が不十分と判断される場合には，耐震性能を改善するための耐震改修を行うよう規定されている。

通常，耐震改修による耐震性能の向上効果は，構造計算により確認するのが一般的である。しかし，既存建築物の設計図書がない場合や実際の施工状態がよく分からない場合もあり，質量や剛性評価が難しいことも多い。そのため，構造計算通りの耐震性能を有しているかは不明確である。これに対して，既存建物を直接実測することで耐震改修効果が確認可能であれば，非常に簡便かつ実用的な評価手法となり得るが，現在までにオーソライズされた手法がないのが現状である。

そこで，本論文では常時微動測定を用いた評価手法の確立を目的として，耐震補強前後の建物に対して多点常時微動測定を行い，振動性状の変化と補強効果の関係を明らかにする。また，測定対象は一方向のみを補強した建物とし，補強効果の検討を行いやすくする。なお，本論文の対象とする建物は災害時に地域の防災の拠点となることが想定される学校建築のなかでも，多点にわたる立体的な測定が難しく，複雑な振動性状を示す，細長い平面形を有する建物[3),4)]とする。

平成27年6月1日受理

＊日本大学工学部建築学科

2．建物概要および耐震補強計画

常時微動測定を行う建物は日本大学工学部構内にある1号館であり，この北西約600m の位置に東北新幹線が走っている。建物は,1962年に当時の耐震基準に基づいて設計･建設された鉄骨鉄筋コンクリート造で，地上3階，一部塔屋を有し地階はない。図1に1階平面図，図2にR階平面図を示す。また，表1に建物概要を示す。建物の規模は，長辺方向87. 0m，短辺方向13. 0m，軒高12. 2m であり，延床面積3577. 98m^{2}である。

図3に耐震補強箇所を示し，表2に耐震補強前後における構造耐震指標（Is）値を示す。耐震補強前の Is 値は，X（桁行）方向の1，2階で0. 26, 0. 62となっており, Iso＝0. 70を下回っている。Y（張間）方向は，耐震壁の効果もあり，各階の Is 値は Iso ＝0. 70を全て上回っている。耐震補強は，強度の不足するX方向の1，2階のみであり，外付け鉄骨K型ブレースの設置を行っている。表3に耐震補強に用いる耐震ブレース概要を示す。

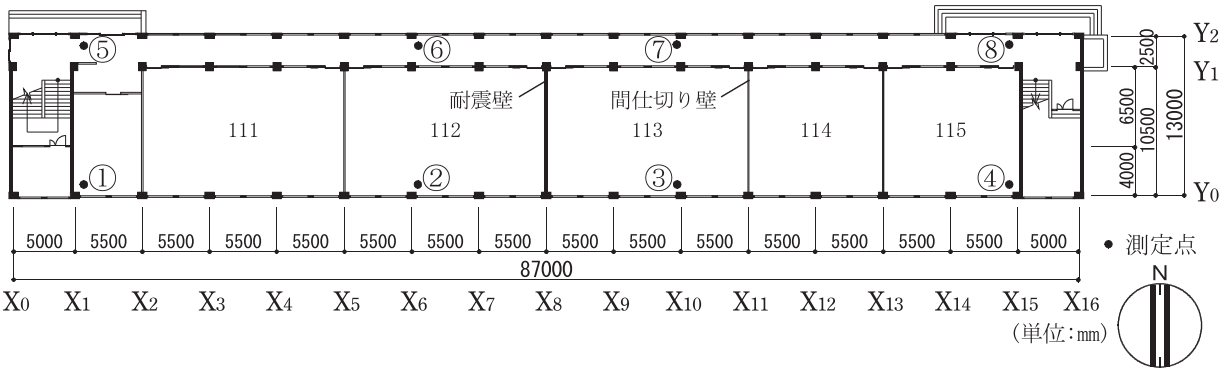


図 1　1 階平面図

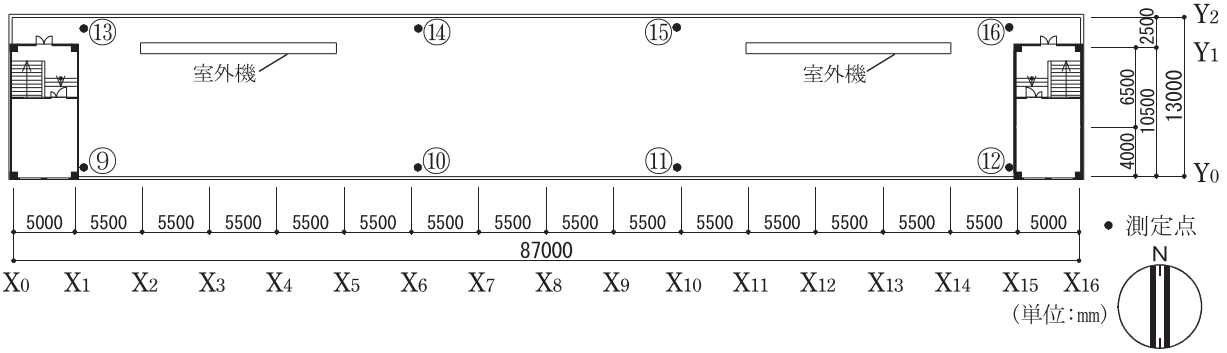


図 2　R 階平面図

表 1　建物概要

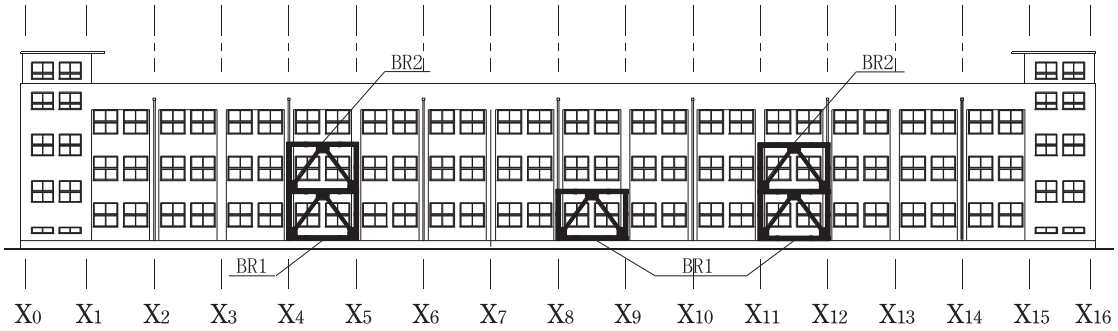
建概物要	用途	教室棟
	建設年月日	昭和37年（経過年数 53年）
建物規模	長辺方向	87.0　m
	短辺方向	13.0　m
	軒高	12.2　m
	延床面積	3577.98　m^2
	構造種別	鉄骨鉄筋コンクリート造
	塔屋	有
	地下室	無
仕概上要	屋根	シート防水仕上げ
	内壁	モルタル下地ペイント
使用構造材料	コンクリート	普通　Fc＝17.7N/mm^2
	鉄骨	柱・梁　SS400（400N/mm^2）
	鉄筋	柱主筋・梁主筋　SR235（235N/mm^2）
		帯筋・あばら筋　SR235（235N/mm^2）
		壁筋・スラブ筋　SR235（235N/mm^2）
	基礎	独立基礎

表 2　耐震診断および耐震改修計画の Is 値

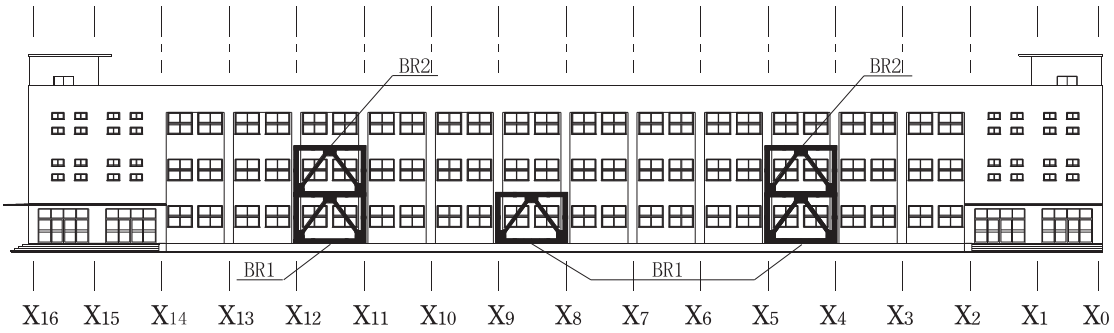
	耐震補強前		耐震補強後	
階	X方向	Y方向	X方向	Y方向
3	0.92	1.80	0.92	1.79
2	0.62	1.16	1.02	1.15
1	0.26	0.88	0.83	0.87

表 3　耐震ブレース概要

符号		BR1	BR2
部材		φ273.1-12（鋼管）	φ244.5-12（鋼管）
枠材		H-350×175×7×11	H-350×175×7×11
鋼材		SS400	SS400
形式		K型	K型
スタッド		2-16φ@150	2-16φ@150
アンカー筋	柱	1-D22@165	2-D22@165
	上部梁	1-D22@165	2-D22@165
	下部梁	1-D22@165	2-D22@165
スパイラル筋		2-6φ@60(径120)	2-6φ@60(径120)



(a)　南側立面図



(b)　北側立面図

図３　耐震補強箇所

３．測 定 概 要

常時微動測定は，耐震補強前後の雑振動の少ない夜間に行う。測定階は１階およびR階とし，測定位置は図１および図２に●印で示すように，各階ともX_1，X_6，X_{10}，X_{15}およびY_0，Y_2通りの交点にある柱近傍の床板上とする。測定方向は，建物のX軸（EW）およびY軸（NS）に合わせた水平２成分とし，合計32成分の同時測定である。測定には，周期２秒程度までほぼ平坦な振動特性を持つ長周期速度計を用い，積分回路による変位測定とする。また，得られた波形は，15Hzのローパスフィルタを用いて雑振動を低減させた後，A／D変換を行い，サンプリング周波数200Hzで連続したデータを収録した。解析対象には，耐震補強前後とも測定記録の中から雑振動が混入していない40.96秒間，新幹線が本学部付近を複数回通過した記録の中からR階の水平変位が最も大きい40.96秒間をそれぞれ選定し，常時微動時および新幹線通過時とする。

４．測 定 結 果

４．１　最大変位

表４に常時微動時，表５に新幹線通過時の耐震補強前後における各最大変位を示す。全体的にNS方向の振幅がEW方向の振幅に比べて大きくなる傾向が見られる。耐震補強前後における常時微動時の最大変位は，1階のNS方向でそれぞれ約0.27μm，約0.13μm，EW方向でそれぞれ約0.22μm，約0.13μmであり，R階のNS方向でそれぞれ約0.35μm，約0.20μm，EW方向でそれぞれ約0.24μm，約0.14μmである。また，耐震補強前後における新幹線通過時の最大変位は，1階のNS方向でそれぞれ約2.17μm，約2.03μm，EW方向でそれぞれ約1.03μm，約1.11μmであり，R階のNS方向でそれぞれ約7.25μm，約7.08μm，EW方向でそれぞれ約2.92μm，約2.74μmである。

図４に常時微動時，図５に新幹線通過時の耐震補強前後におけるR階の時刻歴変形モードを示す。変形モードは，R階の最大変位時刻を含む１秒間をそれぞれ0.025秒刻みで表している。耐震補強前後とも同様な変形モードを示しており，常時微動時では，NS方向とEW方向の並進振動が見られる。また，新幹線通過時では，NS方向で建物両端の変位に対して建物中央の変位が大きくなる傾向が見られ，EW方向にはあまり振動をしていない。

表６に常時微動時，表７に新幹線通過時の耐震補強前後における１階の各最大変位に対するR階の各最大変位倍率を示す。全体的にNS方向の各最大変位倍率は，EW方向の最大変位倍率より大きくなる傾向が見られる。耐震補強前後における常時微動時の最大変位倍率は，NS方向でそれぞれ約1.3倍，約1.7倍，EW方向でそれぞれ約1.2倍，約1.2倍であり，常時微動時においては，NS方向およびEW方向とも耐震補強前後による最大変位倍率に違いがあまり見られない。しかし，耐震補強前後における新幹線通過時の最大変位倍率は，NS方向でそれぞれ約3.9倍，約3.7倍，EW方向でそれぞれ約3.2倍，約2.5倍であり，振幅の大きくなる新幹線通過時においては，NS方向では耐震補強の有無にかかわらず同程度であるが，K型ブレースを設置したEW方向では耐震補強前に比べて耐震補強後の最大変位

表 4　常時微動時の各最大変位（μm）

耐震補強	測定成分	階	①・⑨	②・⑩	③・⑪	④・⑫	⑤・⑬	⑥・⑭	⑦・⑮	⑧・⑯
補強前	NS	R 階	0.276	0.267	0.314	0.346	0.263	0.297	0.331	0.335
		1 階	0.233	0.240	0.264	0.262	0.224	0.248	0.265	0.267
	EW	R 階	0.237	0.211	0.229	0.225	0.213	0.219	0.217	0.240
		1 階	0.197	0.198	0.212	0.214	0.190	0.193	0.221	0.214
補強後	NS	R 階	0.128	0.147	0.195	0.203	0.131	0.156	0.179	0.196
		1 階	0.114	0.106	0.121	0.120	0.114	0.106	0.123	0.129
	EW	R 階	0.132	0.129	0.136	0.143	0.129	0.131	0.125	0.134
		1 階	0.114	0.113	0.123	0.128	0.118	0.113	0.122	0.125

表 5　新幹線通過時の各最大変位（μm）

耐震補強	測定成分	階	①・⑨	②・⑩	③・⑪	④・⑫	⑤・⑬	⑥・⑭	⑦・⑮	⑧・⑯
補強前	NS	R 階	4.014	6.343	7.246	5.315	3.908	6.551	7.050	5.293
		1 階	1.526	1.739	1.848	2.173	1.430	1.776	1.868	2.138
	EW	R 階	2.736	2.708	2.889	2.924	2.310	2.074	2.098	2.356
		1 階	0.858	0.892	0.942	1.026	0.863	0.860	0.903	0.868
補強後	NS	R 階	4.208	6.357	7.079	5.085	4.105	6.519	6.927	5.110
		1 階	1.590	1.891	1.933	2.029	1.501	1.950	1.941	2.015
	EW	R 階	2.084	2.221	2.580	2.743	2.173	2.060	1.981	1.975
		1 階	0.963	1.033	1.108	1.102	0.994	0.964	0.992	0.958

表 6　常時微動時における 1 階の各最大変位に対する R 階の各最大変位倍率

耐震補強	測定成分	⑨	⑩	⑪	⑫	⑬	⑭	⑮	⑯
補強前	NS	1.185	1.113	1.189	1.321	1.174	1.198	1.249	1.255
	EW	1.123	1.387	1.612	1.692	1.149	1.472	1.455	1.519
補強後	NS	1.203	1.066	1.080	1.051	1.121	1.135	0.982	1.121
	EW	1.158	1.142	1.106	1.117	1.093	1.159	1.025	1.072

表 7　新幹線通過時における 1 階の各最大変位に対する R 階の各最大変位倍率

耐震補強	測定成分	⑨	⑩	⑪	⑫	⑬	⑭	⑮	⑯
補強前	NS	2.630	3.647	3.921	2.446	2.733	3.689	3.774	2.476
	EW	2.647	3.362	3.662	2.506	2.735	3.343	3.569	2.536
補強後	NS	3.189	3.036	3.067	2.850	2.677	2.412	2.323	2.714
	EW	2.164	2.150	2.329	2.489	2.186	2.137	1.997	2.062

表 8　建物の各次固有周期（秒）

耐震補強	1 次	2 次	3 次
補強前	0.24	0.20	0.14
補強後	0.24	0.19	0.14

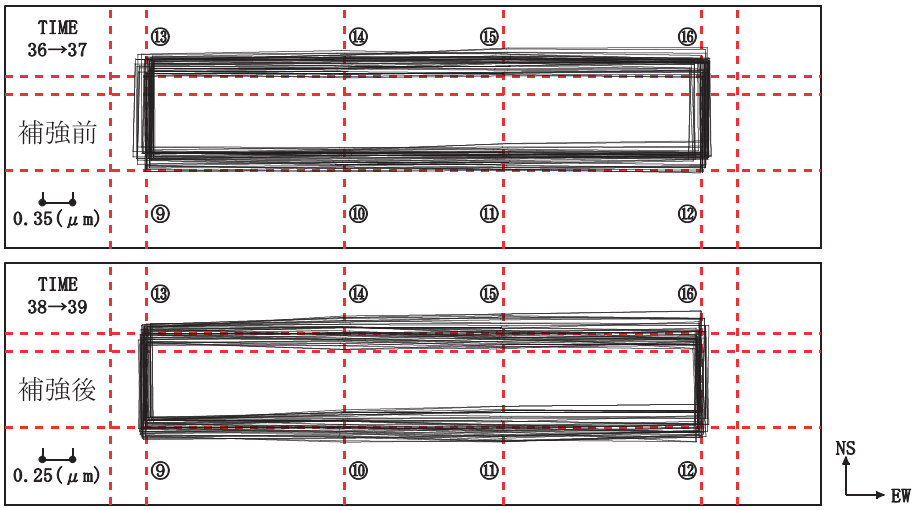


図４　常時微動時における R 階の変形モード

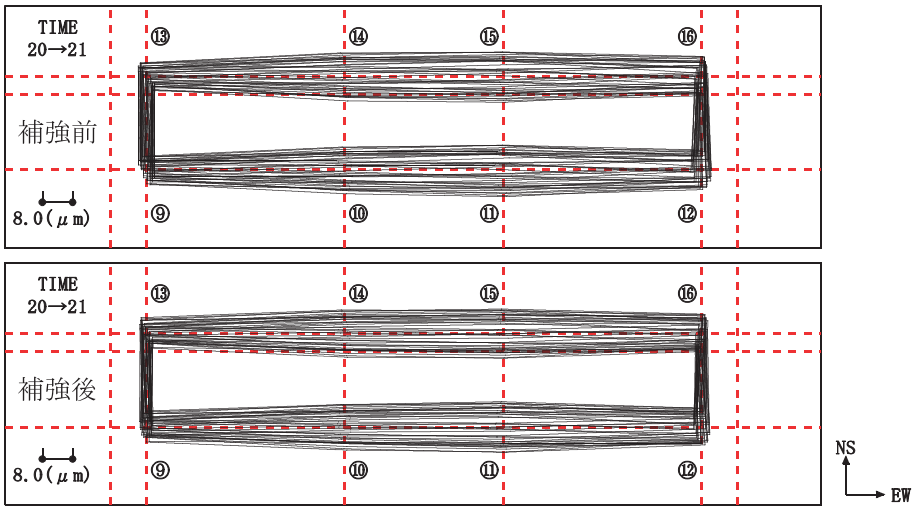


図５　新幹線通過時における R 階の変形モード

倍率が小さくなる傾向が見られる。

４．２　周期特性

耐震補強前後における測定建物の周期特性および固有周期を検討するため，各測定点の変位波形よりフーリエスペクトルを求め，さらに各測定点のフーリエスペクトルから１階に対する R 階のスペクトル比を求める。なお，ピークの判別を行いやすくするため，フーリエスペクトルおよびスペクトル比とも，バンド幅0.1Hz の Parzen ウィンドウを用いて移動平均する。

図６に常時微動時，図７に新幹線通過時の耐震補強前後における Y_0 通りのフーリエスペクトル比を示す。常時微動時における NS 方向では，耐震補前後とも0.24秒近傍に明確なピークが見られ，0.14秒近傍にやや明確なピークが見られる。常時微動時における EW 方向では，耐震補強前で0.20秒近傍に明確なピークが見られ，耐震補強後では0.19秒近傍に明確なピークが見られる。新幹線通過時における NS 方向では，耐震補強前後とも0.24秒近傍および0.14秒近傍に明確なピークが見られる。新幹線通過時における EW 方向では，耐震補強前で0.20秒近傍に明確なピークが見られ，耐震補強後では0.19秒近傍に明確なピークが見られる。常時微動時および新幹線通過時とも NS 方向では，耐震補強前後もピークはよく一致しているが，K 型ブレースを設置した EW 方向では，耐震補強前に比べて耐震補強後のピークが短周期化する傾向が見られる。

常時微動時と新幹線通過時のスペクトル比を考え合わせると，建物の各次固有周期は，耐震補強前で0.24秒，0.20秒，0.14秒，耐震補強後では0.24秒，0.19秒，0.14秒であると考えられる。表８に耐震補強前後における建物の各次固有周期を示す。

４．３　振動モード

各次固有周期における測定建物の振動モードを検討するため，フーリエスペクトルのある区間に帯域フィルタを乗

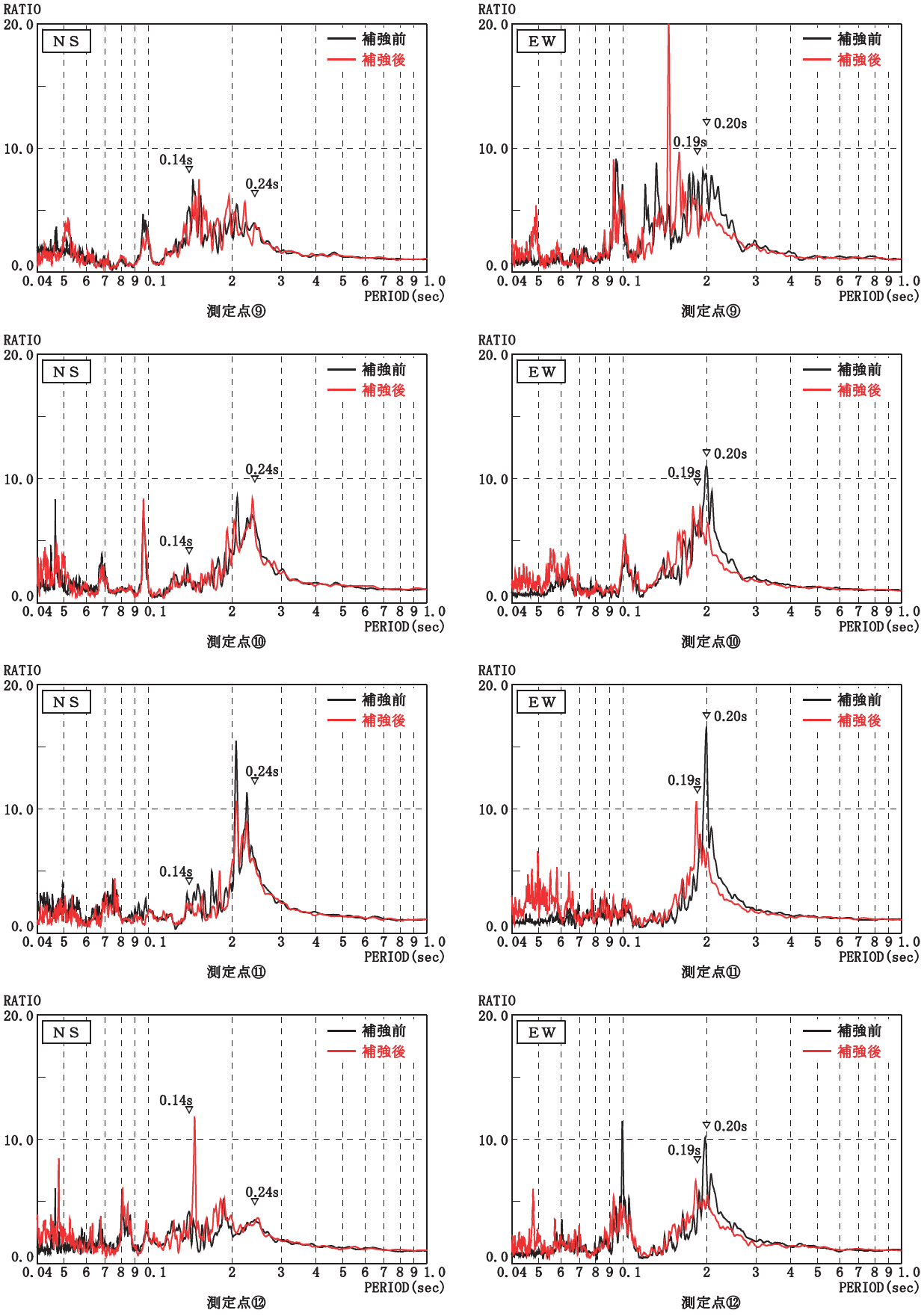


図 6　常時微動時のフーリエスペクトル比

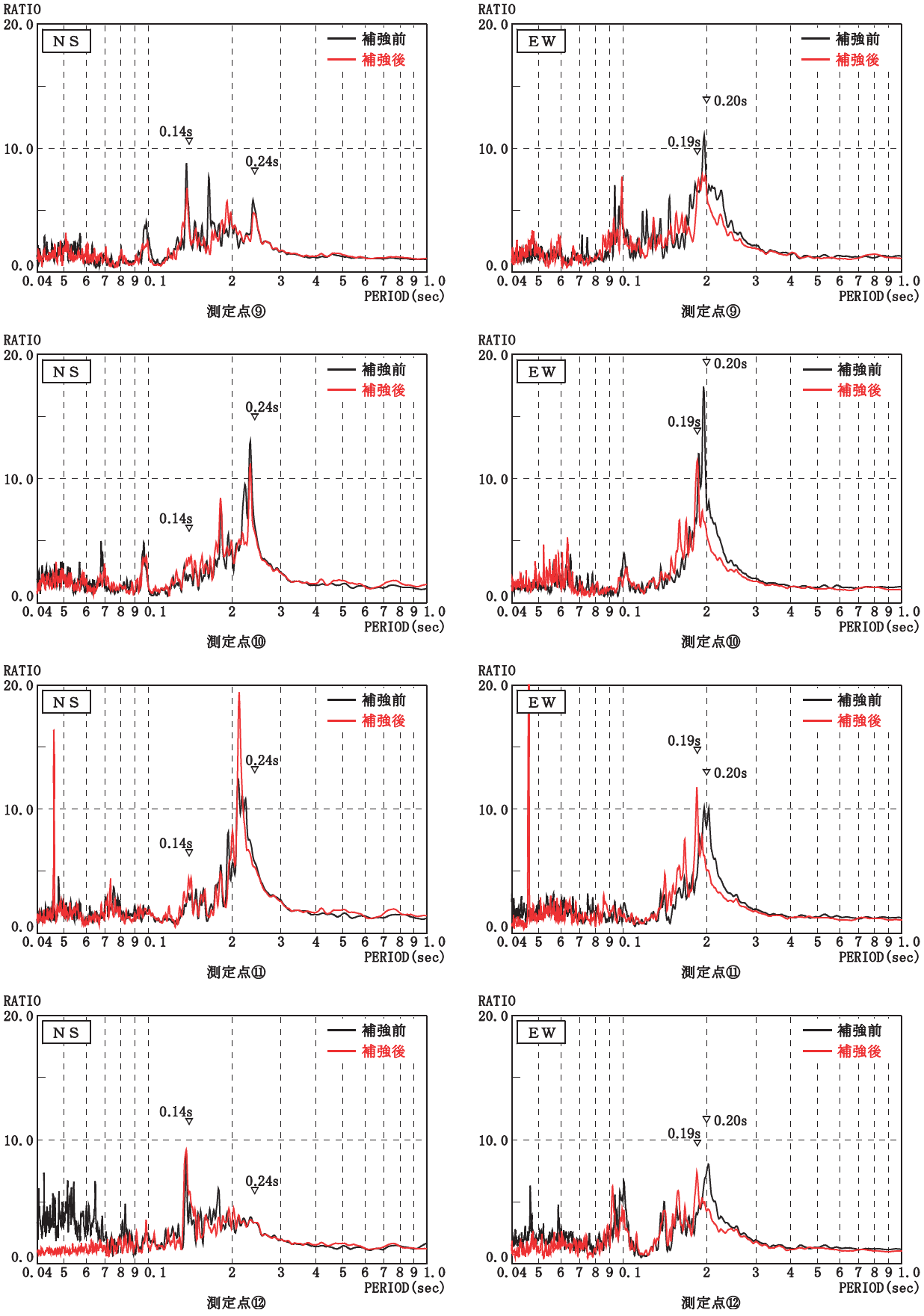


図７　新幹線通過時のフーリエスペクトル比

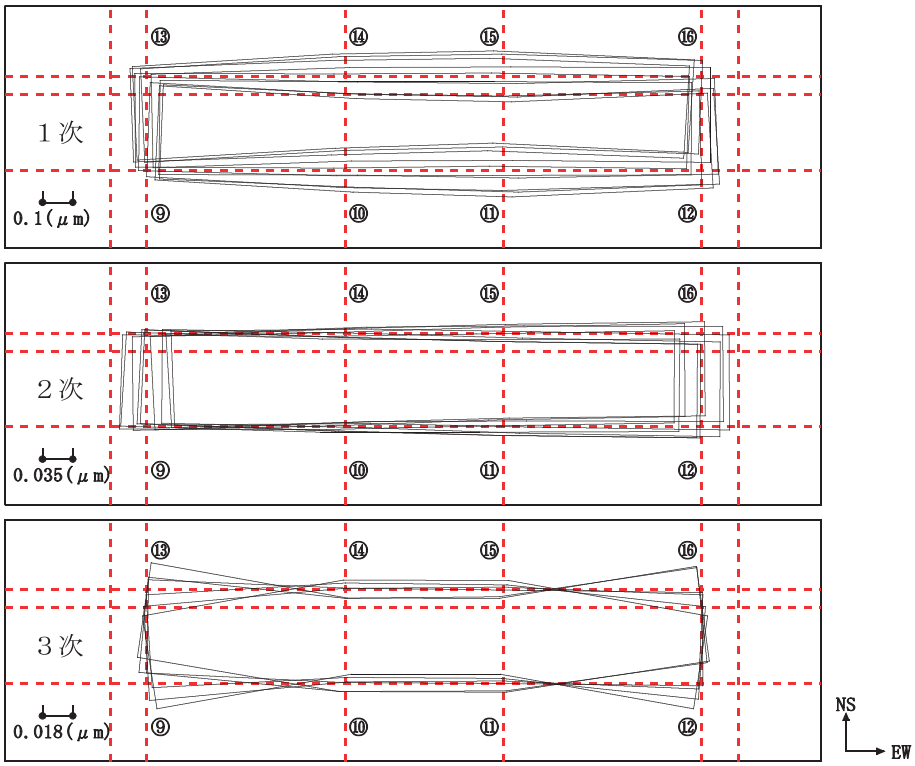


図 8　耐震補強前の各次固有周期に対応する振動モード

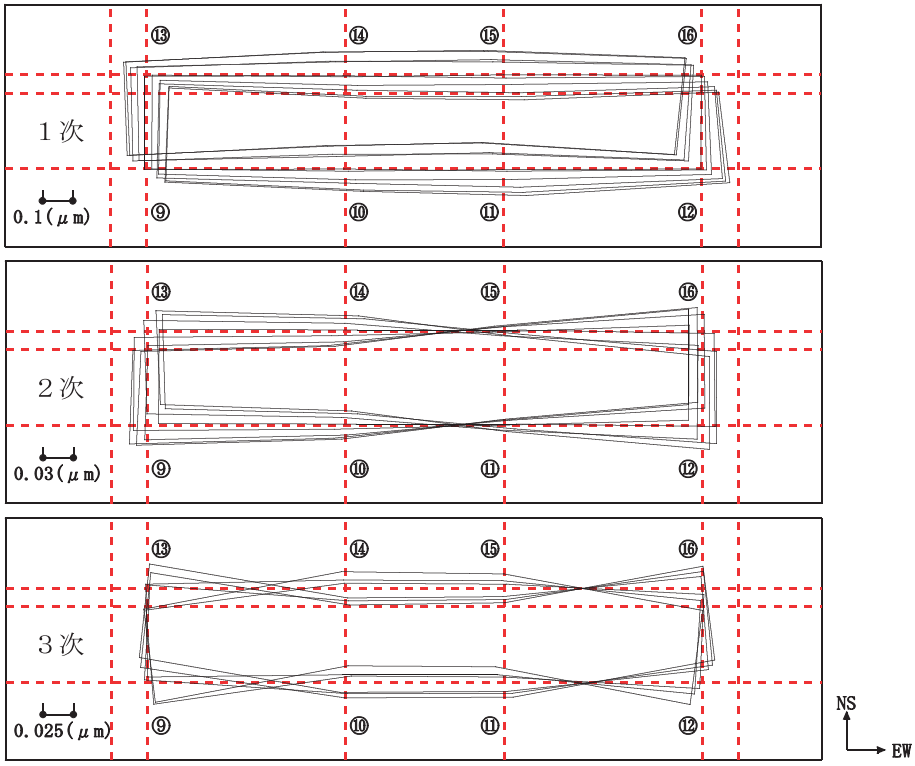


図 9　耐震補強後の各次固有周期に対応する振動モード

じ，それによって得られたフーリエスペクトルをフーリエ逆変換することにより，その区間の周期特性のみが表れた変位波形を求める。次に，この変位波形から，各次固有周期における測定建物の振動モード（相対変位）を求める。

図８に耐震補強前，図９に耐震補強後における各次固有周期に対応する振動モードを示す。１次固有周期に対応する振動モードは，建物端部に対して建物中央が大きく変形するモードであり，耐震補強前後ともよく一致している。２次固有周期に対応する振動モードは，耐震補強前がEW方向に並進振動するモードであり，耐震補強後は建物の両端が逆位相に変形するモードである。３次固有周期に対応する振動モードは，建物両端に対して建物中央が逆位相になるモードであり，耐震補強前後ともよく一致している。

５．結　　論

常時微動時における１階の各最大変位に対するR階の各最大変位倍率は，建物の振幅量が小さいため，耐震補強の有無による相違は見られなかった。しかし，新幹線通過時においては，K型ブレースによる耐震補強を行ったEW方向で耐震補強前に比べて耐震補強後の最大変位倍率が小さくなる傾向が見られた。

フーリエスペクトル比から見た卓越周期は，耐震補強を行っていないNS方向では耐震補強前後による相違は見られないが，K型ブレースを設置したEW方向では耐震補強前に比べて耐震補強後の卓越周期が短周期化する傾向が見られた。

振動モードは，短周期化をした２次固有周期に対応する振動モードにおいて，耐震補強前後の振動モードに違いが見られた。

今後は，耐震補強による補強量や補強箇所の違いが建物の振動性状に与える影響をより正確に把握し，定量的な評価手法を確立していく予定である。

参 考 文 献

１）日本建築学会：1995年兵庫県南部地震鉄筋コンクリート造建築物の被害調査報告書，第Ⅱ編学校建築，1997. 3
２）日本建築防災協会：2009年改訂版既存鉄骨鉄筋コンクリート造建築物の耐震診断基準･改修設計指針･同解説，2009. 12
３）日比野巧，千葉正裕：細長い平面形を有する建物の多点常時微動測定，日本大学工学部紀要，第44巻，第１号，pp. 71-94，2002. 9
４）日比野巧，倉田光春：細長い平面形を有する建物の立体振動解析－変位入力による微動応答解析－，日本大学工学部紀要，第44巻，第２号，pp. 19-36，2003. 3

地方都市におけるコンビニエンスストア駐車場の有効利用に関する研究

廣田 篤彦 *・三浦 金作 **

A STUDY ON THE EFFECTIVE USE OF CONVENIENCE STORE PARKING IN PROVINCIAL CITIES

Atsuhiko HIROTA* and Kinsaku MIURA**

Abstract

This is a study on actual conditions of parking lots for convenience stores in provincial cities and their relation in arrangement to primary safe shelters. The results of measurement and analysis using GIS have made clear that the lot size of convenience stores is far larger than that of self-governing public halls used as safe shelters and that the grounds of convenience stores can fully function as outdoor spaces of refuge complementing safe shelters because they are often located midway between the shelters.

Key words: コンビニ, 駐車場, 地方都市, 避難所, GIS

1．研究の目的と背景

我が国のコンビニエンスストア（以下コンビニと表記）の最大手である，セブンイレブン 1 号店誕生から既に40年が経過した[注1)]。平成26年12月には，同店を含むコンビニの総店舗数は 5 万店を超え，近年も尚，増加傾向にある（図 1 ）。当初は市街地を中心に展開されていたが，現在では，地方都市や，郊外の住宅地にも立地するなど，全国至るところで目にすることができる。この間，取扱商品やサービスの多様化も進み，宅配物の取次，ATM，各種料金の収納代行に加え，一部の店舗では，住民票や印鑑証明の請求・交付といった行政サービスの代行業務も開始されるなど，日常生活の拠点施設へと発展しつつある。また，最近では，駐車場での健康診断実施や，高齢者の見守り活動への期待が高まるなど，コンビニを高齢者のケアの場として活用する試みが模索されるとともに，街の防犯や災害時における生活物資供給の場としても注目されている。

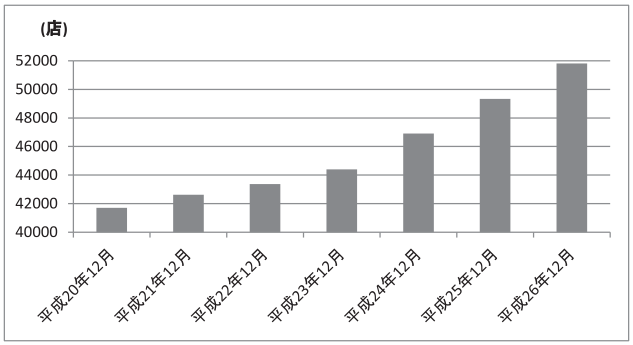


図 1　コンビニの店舗数推移
（出展：日本フランチャイズチェーン協会公表資料より抜粋）

近年，首都直下地震や南海・東南海地震の発生が危惧されるなど，大震災の危険は全国各地に及んでいる。こうした状況を鑑み，各地で防災・避難計画の見直しが急ピッチで進められつつあり，とりわけ避難に関する計画の見直しが検討されている。各自治体では，避難所[注2)]に小学校や公民館等が位置付けられており，一定区域毎に避難先が配備されるよう設定されているが，高齢者や障害者などを考慮すると，自宅から避難所までの距離は短いほど効果的であることから，避難所の増設，もしくは避難所を補完する代替地の指定・設置が望まれる。そこで本稿では，代替地の候補の一案として，場所の認知度が高く，日常生活の拠点施設として街中に点在するコンビニに着目し，分布形態を地図上にプロットすることにより，既存避難所との位置関係の比較を行う。ここでは特に，地方都市のコンビニの特徴である，広大な駐車場に着目し，延焼火災や建物の倒壊に対する一時避難場所[注3)]としての活用の可能性について検証を行う。

コンビニを対象とした研究事例は幾つかあるが，主として立地[1)2)3)4)]や防犯[5)6)]，エネルギー[7)8)]に関するものが多い。また，最近では，GIS を用いた出店[9)]や立地[10)]，災害時におけるコンビニの役割についての研究[11)12)13)]も幾つか散見され，これらは本稿と特に関わりの深い研究事例であるといえる。このうち，村尾・岩本[14)]の報告では，物資供給の場としてのコンビニの資質が検証され，都市部における分布形態から，その有効性が既に明らかになっているが，本稿では，駐車場の面積や空地率，分布形態から，避難所の補完・代替地としての「避難スペース」[注4)]とし

平成27年 6 月 3 日受理
＊日本文理大学工学部建築学科
＊＊日本大学工学部建築学科

ての有効性について検討することを目的としている。

2．調査・分析の方法

1）調査対象地区

九州地方の東側沿岸域のうち，南海・東南海地震において比較的津波の被害が軽減されると想定されている豊後水道以北のエリアの中から，大分県大分市を例として調査・分析を行う[注5)]。

2）避難所の分布とコンビニの分布について[注6)]

大分市が指定している避難所，及び大分市に立地するコンビニを，GIS[注7)] を用いて地図上にプロットし，分布状況を比較する。

3）コンビニの敷地面積と空地率の計測

ゼンリンの住宅地図をベースとして，GIS 上で，各コンビニのおおよその敷地面積と建築面積[注8)] を計測し，空地率を算出。

4）避難所・コンビニのバッファ解析

地図上にプロットした避難所・コンビニを中心としてバッファ解析を行い，バッファ条件毎の重複率を算出。

5）コンビニ駐車場の利用率の調査

幹線道路に面したコンビニをランダムに抽出し，日中の駐車場利用状況を定時間毎に観察し，平均駐車率を算出[注9)]。

3．大分市の避難所について

3．1　大分市の避難所一覧

大分市の指定避難所は合計126 ヶ所で，内訳は，小学校53，中学校21，県立高校・聾学校 4，保育所・幼稚園 4，公民館35，その他 9（体育館等）となっている（平成23年時）。中でも小学校，中学校は，市内学校数のそれぞれ85. 5%，75. 0%が指定されており，同市避難所の中核と位置付けられている。また，公民館に関しては，市営の地区公民館9，校区公民館4，自治公民館が22であり，特に地区公民館は，全施設（13館）の 7 割が担っている（表 1）。

3．2　避難所の分布

避難所の位置情報を，GIS を用いて地図上にプロットし，避難所の配置状況を整理する（図 2）。市内中心部（図中上段中程～左方付近）に多く指定されていて密度も高いが，東部の沿岸部（佐賀関）や，南部（大南地区）･南西部（野津原地区）などの山間部にも点在して指定されていることが確認できる。

3．3　避難所の面積

市内の小中学校は，敷地面積と延床面積が公表されている。このうち，避難所に指定されている学校の平均敷地面積は21, 703㎡ であり，最小7, 375㎡ ～最大40, 643㎡ となっている。同様に，平均延床面積は5, 941㎡ で，最小2, 119㎡

表 1　避難所一覧

1	金池小学校	22	豊府小学校	43	明野北小学校	64	大塔公民館	85	寒田小学校	106	木佐上小学校
2	上野ヶ丘中学校	23	南大分中学校	44	鶴崎小学校	65	半田中学校	86	稙田東中学校	107	稚の木会館
3	大分上野ヶ丘高等学校	24	南大分公民館	45	鶴崎公民館	66	半田米良公民館	87	敷戸小学校	108	佐賀関中学校
4	コンパルホール	25	南大分体育館	46	三佐小学校	67	ひばりが丘公民館	88	鴛野小学校	109	佐賀関小学校
5	荷揚町小学校	26	城南小学校	47	家島公民館	68	半田小学校	89	賀来中学校	110	佐賀関公民館
6	長浜小学校	27	城南中学校	48	小中島公民館	69	竹中中学校	90	賀来公民館	111	関崎海星館
7	中島小学校	28	滝尾小学校	49	明治小学校	70	竹中小学校	91	大在西小学校	112	田中体育館
8	浜町保育所	29	滝尾校区公民館	50	明治北小学校	71	河原内くすのきホール	92	大在小学校	113	白木体育館
9	住吉小学校	30	下郡小学校	51	大東中学校	72	吉野中学校	93	大在公民館	114	田ノ浦生活改善センター
10	碩田中学校	31	森岡小学校	52	岡原公民館	73	吉野小学校	94	大在中学校	115	一尺屋小学校体育館
11	春日町小学校	32	森岡校区公民館	53	別保小学校	74	稙田小学校	95	大在浜公民館	116	野津原東部小学校
12	王子中学校	33	津留小学校	54	鶴崎中学校	75	稙田公民館	96	細公民館	117	入蔵公民館
13	生石保育所	34	舞鶴小学校	55	もりまち幼稚園	76	上宗方公民館	97	坂ノ市小学校	118	野津原公民館
14	大分西部公民館	35	東大分小学校	56	高田小学校	77	下宗方公民館	98	坂ノ市中学校	119	野津原中学校
15	大道小学校	36	城東中学校	57	松岡小学校	78	宗方小学校	99	坂ノ市公民館	120	野津原中部小学校
16	県立聾学校	37	日岡小学校	58	川添小学校	79	稙田西中学校	100	和光保育園	121	上詰公民館
17	西の台小学校	38	大分東部公民館	59	宮河内ハイランド公民館	80	胡麻鶴公民館	101	大分東高等学校	122	荷小野公民館
18	大分西中学校	39	桃園小学校	60	広内公民館	81	横瀬小学校	102	丹生小学校	123	小原公民館
19	大分西高等学校	40	原川中学校	61	陽光台公民館	82	横瀬西小学校	103	久土公民館	124	今市町公民館
20	八幡小学校	41	明野東小学校	62	戸次中学校	83	東稙田小学校	104	延命寺公民館	125	今市健康増進センター
21	神崎小学校	42	明野西小学校	63	上戸次小学校	84	田尻小学校	105	こうざき小学校	126	練ヶ迫公民館

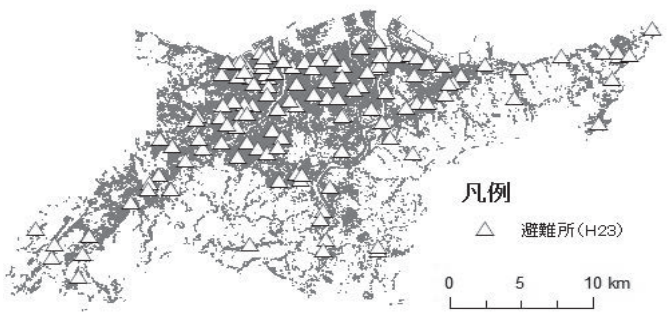


図 2　避難所の分布

～最大10,870㎡であった。一方，保育所・幼稚園や地区公民館などは延床面積のみが公表されており，保育所・幼稚園の平均延床面積は655㎡，地区公民館の平均延床面積は2,110㎡であった。

4．大分市のコンビニエンスストアについて

4．1　大分市のコンビニ一覧

平成23年4月現在，大分市内のコンビニは7社あり，合計で179店舗立地している[注10)]。そのうち，同一敷地内に専用の駐車場を有しない店舗[注11)]は12店舗であり，同店を除く167店舗を調査対象店舗と設定した。

4．2　コンビニの分布

コンビニの位置情報を，GISを用いて地図上にプロットし，コンビニの配置状況を整理する（図3）。避難所と同様に，市内中心部（図中上段左方付近）に多く立地し密度も高いが，市内北部の市街地にも比較的多く出店されている様子が見てとれる。また，避難所とコンビニのレイヤを重ねてみると，東部沿岸部（佐賀関）や，南部（大南地区），南西部（野津原地区）など，山間部での立地が少なく，営業戦略上の立地特性を確認できる（図4）。

4．3　避難所とコンビニの面積の比較

GISを用いて，コンビニ及び自治公民館等，データ公開されていない施設のおおよその敷地面積・建築面積を計測した。各施設の平均値と最小・最大値は表2に示す通りである。平均建築面積が最も大きな施設は学校であり(3,048㎡)，次いで地区公民館（1,520㎡），保育所・幼稚園（484㎡），校区公民館（353㎡），自治公民館（186㎡）の順となっている。これに対し，コンビニの建築面積は最少82㎡～最大367㎡の間であったが，平均建築面積188㎡は，ほぼ自治公民館と同等であった。しかしながら，公民館のようにホールや集会室を有しないコンビニは，居室としての収容能力は極めて低く，建物自体を避難所として機能させることは難しい。

一方，敷地面積に関しては，学校施設（21,763㎡）が突出しており，以下，地区公民館(3,978㎡)，校区公民館(1,389㎡)，保育所・幼稚園（1,249㎡），自治公民館（519㎡）の順となっている。これに対し，コンビニの敷地面積は最小192㎡～最大3,029㎡で，平均敷地面積1,141㎡は，校区公民館や保育園・幼稚園と大差なく，これは自治公民館の約2.2倍に相当する。また，コンビニの平均空地率（駐車場含む＝約83%）は，保育所・幼稚園（61%）と自治公民館（64%）を大きく上回っており，保育所・幼稚園の平均空地面積（765㎡）や自治公民館の平均空地面積（333㎡）に対するコンビニの平均空地面積（1019㎡）の割合は，各々1.3倍と3.0倍にあたる。

5．避難所とコンビニのバッファ解析

国土交通省の東日本大震災の避難実態に関する調査報告[注12)]によると，一人当たりの平均避難距離は約1.5㎞であり，そのうち徒歩移動による避難距離は400～500m，自転車による避難距離が1600mほどであったという。本章では，これらの数値を参考に，大分市における各避難所を中心とした，500m，1000m，1500mのバッファ解析をGIS上で行い，各条件におけるバッファ相互の接続率から，現有避難所の配置形態における避難距離の現状を整理するとともに，コンビニを避難スペースとして加味した場合の有効性について併せて検証を行う。

5．1　避難所のバッファ解析

各避難所を中心として，まず，避難限界距離と言われる

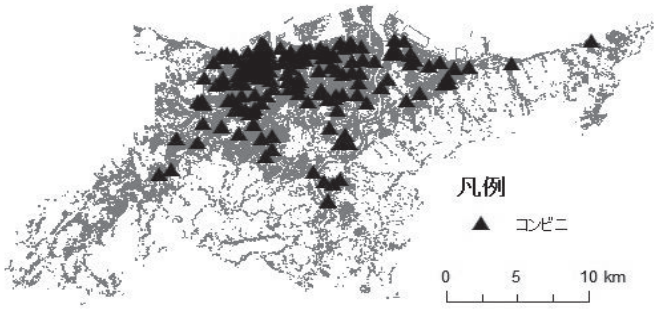


図3　コンビニの分布

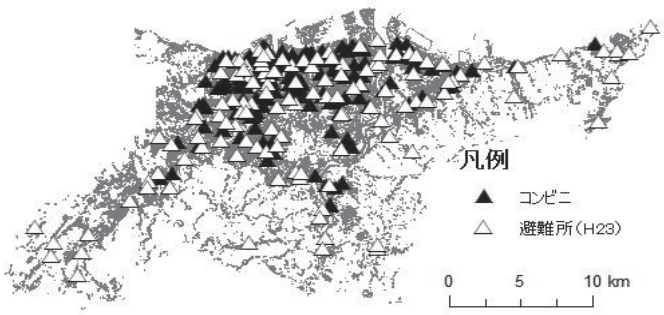


図4　コンビニと避難所の分布

表2　避難所・コンビニの平均面積の比較

	敷地面積(㎡)			延床面積(㎡)			建築面積(㎡)			平均
	最少	最大	平均	最少	最大	平均	最少	最大	平均	空地率(%)
学校	7,375	40,643	21,703	2,119	10,807	6,301	900	5,782	3,048	86.0
地区公民館	2,620	4,927	3,978	997	3030	1,840	1,292	1,859	1,520	61.8
校区公民館	837	2,306	1,389	366	431	398	212	587	353	74.6
自治公民館	318	936	519	−	−	−	96	445	186	64.2
保育所・幼稚園	1,135	1,355	1,249	615	694	655	466	515	484	61.3
コンビニ	192	3,029	1,141	−	−	−	82	367	188	83.4

1500m のバッファを作成する（図５）。市内北部および市内北西部の中心市街地ではバッファ同士が多重に重なり合う様子が確認でき，人口密度の低い市内東部や南部，南西部においてもバッファの連担が見られる。また，バッファ同士の接続が全くない避難所はわずか２か所に留まっており，市内全域で，概ね1500m 以内での避難距離を確保できていることが伺える。次に，バッファ距離を1000m に縮小して同様の解析を行う（図６）。未接続バッファの数は７か所に拡大し，特に市内東部に集中している。また，市内中部に，他と接続することができない避難所が新たに１か所確認されたが，二つ以上のバッファ同士が接続する「バッファ連担率」[注13] は引き続き高い水準を維持しているといえる（94.4%）。続いて，徒歩による避難が想定される，500m バッファを作成する（図７）。市街地北部および北西部にも未接続のバッファが点在している。バッファ連担率は69.8%まで減少し，南西部は全て未接続となるなど，避難距離500m を担保できていないエリアが大幅に増加している。

５．２　避難所＋コンビニのバッファ

図７に，コンビニの500m バッファのレイヤを重ね，各々の配置状況から，コンビニ駐車場を避難スペースと仮定した場合の有効性について検証を行う（図８）。コンビニの敷地面積の分散が大きいことから，ここでは，既存の避難所のうち，最も平均空地面積の小さい自治公民館を基準として，同面積（333㎡）を担保し得る店舗に限定して分析

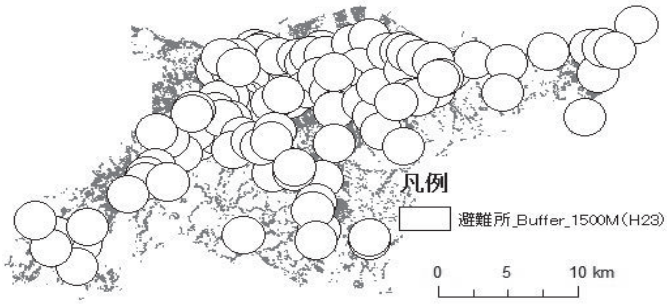


図５　避難所の1500m バッファ

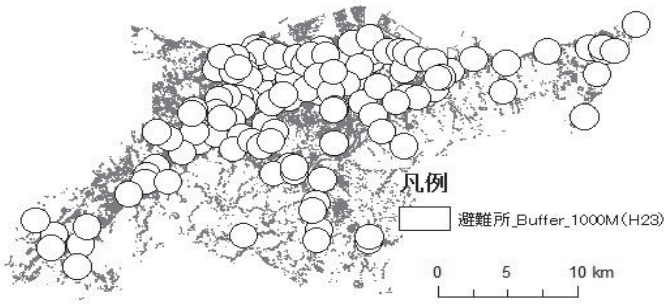


図６　避難所の1000m バッファ

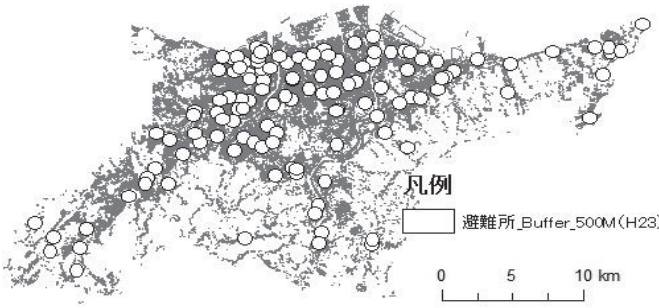


図７　避難所の500m バッファ

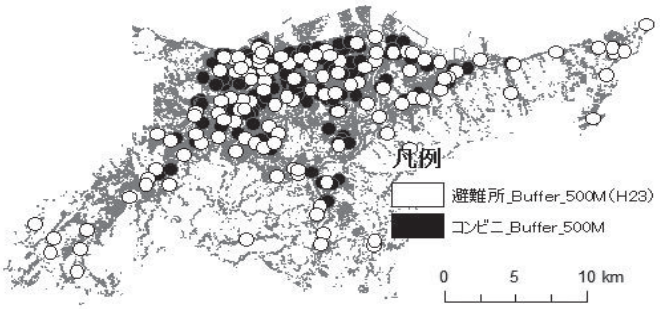


図８　コンビニ（333㎡）と避難所の500m バッファ

表３　コンビニ駐車場の平均駐車率

店舗名	10:00	12:00	14:00	16:00	18:00	許容台数	平均台数	平均駐車率
A	3	9	3	8	2	14	5.0	35.7%
B	6	6	3	4	4	16	4.6	28.8%
C	7	12	8	3	7	19	7.4	38.9%
D	5	6	1	4	5	11	4.2	38.2%
E	5	8	7	4	8	24	6.4	26.7%
F	6	4	8	4	6	21	5.6	26.7%
G	7	10	6	2	11	16	7.2	45.0%
H	3	10	8	3	7	16	6.2	38.8%
I	4	9	6	11	7	15	7.4	49.3%
J	7	7	3	5	4	11	5.2	47.3%
K	5	3	7	4	8	12	5.4	45.0%
L	11	5	3	5	8	20	6.4	32.0%
M	8	10	8	7	5	19	7.6	40.0%
N	8	14	8	5	10	25	9.0	36.0%
O	5	8	3	4	7	24	5.4	22.5%

駐車率50%以上

を行う（147店舗）。市内東部および南西部など，比較的人口密度の低い地域におけるバッファ同士の新たな接続はほとんど見られないものの，市内中部や北部，北西部の未接続は大幅に解消されていることが確認できる。連担率は84.1％まで上昇し，避難所と連担しない店舗も新たに５店確認できる。特に中心市街地では，避難所の間を埋めるようにコンビニが連担しており，避難所を補完する代替地として十分機能し得ることが窺える。

５．３　コンビニ駐車場の利用率

平均敷地面積（1,311㎡）以上のコンビニの中から，15店舗をランダムに抽出し，平日の日中の駐車場利用率を計測した（表３）。各店舗の駐車許容台数は11～25台であり，昼時に最大駐車率を示す店が多い。日中の平均駐車率は36.7％で，最小22.5％～最大49.3％であった。１台あたりの駐車スペースを2.5m（W）×5.0m（D）と仮定すると，最大で312㎡ が駐車場の占有面積となるが，平均店舗面積（160㎡）と併せても，およそ800㎡ 程度以上＋空き駐車スペースが空地ということになる。

６．ま　と　め

大分市の避難所は126ヶ所で，内訳は小学校53，中学校21，県立高校・聾学校４，保育所・幼稚園４，公民館35，その他９（体育館等）となっている（平成23年時）。公表されているデータおよびGISを用いた計測結果から，各施設の平均敷地面積の比較では，学校施設（21,763㎡）が突出しており，以下，地区公民館（3,978㎡），校区公民館（1,389㎡），保育所・幼稚園（1,249㎡），自治公民館（519㎡）の順となっている。これに対し，コンビニの敷地面積は最小192㎡ ～最大3,029㎡ で，平均敷地面積1,141㎡ は，校区公民館や保育園・幼稚園と大差なく，自治公民館の約2.2倍に相当する。また，コンビニの平均空地率（駐車場含む＝約88％）は，保育所･幼稚園（61％）と自治公民館（64％）を大きく上回っており，保育所･幼稚園の平均空地面積（765㎡）や自治公民館の平均空地面積（333㎡）に対するコンビニの平均空地面積（1,019㎡）の割合は，実質1.3倍と3.0倍となる。加えて，コンビニの駐車場利用率が平均で３割程度であることからも，空地の大半を常に利用できる状態にある。

各避難所を中心とした，500m，1000m，1500mのバッファ解析により，各条件におけるバッファ相互の接続率から，現有避難所の配置形態における避難距離の現状を整理すると，避難限界距離と言われる1500mのバッファでは，バッファ同士の接続が全くない避難所はわずか２か所で，バッファ距離1000mでは７か所に拡大したものの，二つ以上のバッファが接続するバッファ連担率は94.4％と高い水準を維持している。しかしながら，徒歩による避難が想定される，500mバッファのバッファ連担率は69.8％まで減少し，南西部は全て未接続となるなど，避難距離500mを担保できていないエリアが大幅に増加していることが確認された。

一方，避難所の500mバッファに，自治公民館と同等規模以上の空地面積（333㎡）を有するコンビニの500mバッファのレイヤを重ね，コンビニ駐車場を一次避難所と仮定した場合，比較的人口密度の低い地域におけるバッファ同士の新たな接続はほとんど見られないものの，連担率は84.1％まで上昇し，避難所と連担しない店舗も新たに５店確認できる。特に中心市街地では，避難所の間を埋めるようにコンビニが連担しており，コンビニの駐車場が，延焼火災や建物倒壊に対する「屋外避難スペース」として，現有避難所を補完する代替機能を十分有し得ることが確認された。

住民が日頃から避難場所を認知しておくことは，非常時に迅速かつ適切な避難を遂行する上でも特に重要な要件の一つであるが，日常的利便施設として街の拠点ともなっているコンビニを利用することは，認知度の観点からも合理的であるといえる。特に地方都市においては，多くの店舗で散見される広大な敷地が，延焼火災のバッファーゾーンとして機能し得る可能性が高いと考えられるとともに，災害用品を併せて完備することにより，災害時の短期的拠点施設として位置付けることも可能であろう。

本調査結果より，店舗の分布状況及び空地面積の観点から，地方都市におけるコンビニ駐車場の災害時利用の有効性がある程度明らかになったが，より精度の高い評価を行うためには，人口や面積のカバー率の観点からも今後検証を加えていく必要があるといえる。また，海抜や津波被害想定を考慮して有効店舗の区分けをすることにより，例えば避難ビルとの併用など，より効果的な避難計画の立案が可能であるとともに，第一種低層住居専用地域内の対応など，都市計画的観点からの誘導手法も今後検討していく必要があろう。

注

注１）1974年，東京都江東区に開店。コンビニの起源は，試験的に開店した，1969年のマイショップ１号店を日本初の事例とするケースもある。

注２）学校や公民館など，災害発生時に，被災者が一定期間滞在できる施設。収容避難場所ともいう。自治体によっては，一次避難所と二次避難所に区別することもある。

注３）災害から身の安全を確保するため，緊急的に避難する場所。グランドや公園など。自治体によっては呼称が異なる。例えば大分市の場合は，「緊急避難場所」という言葉で定義され，自治公民館等を除く，避難所の約８割が緊急避難場所を兼ねている。

注４）事情により，避難所に入れなかった人（ペット同伴者や，避難所への移動が困難な場合など）が，一時避難場所等の広大な広場にテントなどを設営し，一定期間，仮設住宅化することも想定。

注５）本研究では，分析過程において海抜を考慮していないため，比較的津波による被害が少ないと想定される地域を調査対象地区に選定した。

注６）平成23年度現在

注７）ESRI社「ArcGIS」

注８）航空写真をベースとした地図上における水平投影面積。

注９）平日９：00～19：00。１時間毎に定時の駐車状況を３日間調査。平均。

注10）ココストア（11），セブンイレブン（38），デイリーヤマザキ（7），ファミリーマート（37），ポプラ（12），ローソン（64），エブリワン（10）
注11）ビル内の店舗で，専用の駐車場を有しないもの。
注12）国土交通省:「東日本大震災の津波被災現況調査結果（第3次報告）～津波からの避難実態調査結果（速報）～」2011．12
注13）作成したバッファの数に対する接触しているバッファの割合。

参考文献

1）近藤康浩，小嶋勝朗，井上敏行，石井雅彦:「住宅地におけるコンビニエンスストアの立地及び消費者動向に関する研究」日本建築学術講演梗概集，F，pp. 451-452，1991. 9
2）釜由記子，本間里見，両角光男，位寄和久:「熊本市におけるコンビニエンスストアの立地特性に関する研究」日本建築学会学術講演梗概集，F -1，pp. 703-704，1999. 9
3）石崎研二:「コンビニエンスストアの品揃えと立地」日本建築学会建築雑誌 Vol. 116，No. 1470，pp. 22-25，2001. 4
4）遠田博史，奥俊信，森傑:「コンビニエンスストアの立地分布に関する研究」日本建築学会学術講演梗概集，F -1，pp. 797-798，2004. 8
5）近江隆，伊藤篤，柏原哲郎:「都市的空間要因からみたコンビニエンスストア犯罪の発生に関する研究」日本建築学会東北支部研究報告集　第59号，pp. 171-174，1996. 6
6）壬生淳，村上正浩，竹下正光:「コンビニ強盗を誘発する物的環境要因に関する研究」日本建築学会学術講演梗概集，F -1，pp. 627-628，2006. 9
7）中野隆司，坂本雄三 :「コンビニエンスストアの省エネルギーに関する研究」日本建築学会学術講演梗概集，D -2，pp. 191-192，2004. 8
8）青木俊樹，湯浅和博:「証明設備からみたコンビニエンスストアの省エネルギーの可能性」日本建築学会学術講演梗概集，D -1，pp. 727-728，2008. 9
9）鈴木竜太，谷村秀彦:「GIS を利用したコンビニエンスストアの出店に関する研究」日本建築学会計画系論文集，第499号，pp. 57-62，1991. 9
10）小松義典:「新たな公共トイレとしてのコンビニエンスストアの役割」日本建築学会学術講演梗概集，D -1，pp. 457-458，2006. 9
11）澤田雅浩，田中俊輔，高橋信之，尾島俊雄:「地震災害地時における民間商業施設活用の可能性に関する研究」日本建築学会学術講演梗概集，D -1，pp. 995-996，1997. 9
12）小笠原広，澤田雅浩，高橋信之，尾島俊雄:「広域災害時におけるコンビニエンスストア活用の可能性に関する研究」日本建築学会学術講演梗概集，D -1，pp. 659-660，1999. 9
13）岩本宜式，村尾修:「川崎市における災害時のコンビニエンスストア活用に関する研究」日本建築学会学術講演梗概集，F -1，pp. 799-800，2004. 8
14）村尾修，岩本宜式:「コンビニエンスストア各社の防災対策とその立地を考慮した川崎市におけるコンビニ寄与度マップの作成」日本建築学会計画系論文集，第594号，pp. 77-84，2005. 8

日本大学工学部　紀要　第 57 巻　第 1 号　September,　2015

停滞回避 PSO の提案と評価

小林 史典 *・金子 正人 **・岩井 俊哉 **

Proposal and Evaluation of Stagnation Avoidance PSO

Fuminori KOBAYASHI*, Masato KANEKO** and Toshiya IWAI**

Abstract

Particle swarm optimization（PSO）is one of meta-heuristics that can be applied to continuous optimization problems such as minimization problems of function. Generally, meta-heuristics require both the global search ability, which make particles explore the never visited regions of the search space, and the local search ability, which make particles explore the already visited regions of the search space. Standard PSO often causes particles to be trapped into local optimum, because it has high local search ability. Thus, various PSO variants are proposed with the aim to incorporate the global search ability. However, the search efficiency of the PSO variants change according to the difference in the type of functions. Therefore, it is important to devise such a PSO variant that perform well for all types of functions. Based on Dynamical Multi Swarm PSO (DMS-PSO), we propose Stagnation Avoidance PSO（SA-PSO）that adaptively incorporate both local and global search abilities. When searching processes stagnate, SA-PSO enable global search particles to prevent stagnation convergence into a local minimum and local search particles to exploit around regions where particles stagnate. By comparison with SA-PSO and various PSO variants, it is found that SA-PSO show high search efficiency for minimization problems of benchmark functions irrespective of the types of the functions.

Key words:particle swarm optimization（PSO）, continuous optimization problem, stagnation convergence, local search, global search

概　　要

Particle Swarm Optimization（PSO）は，関数の最小値問題のような連続値最適化問題に適用できるメタヒューリスティクスの一つである。一般にメタヒューリスティクス解法では，まだ訪れていない探索空間を探索する大域探索能力と既に訪れた探索空間をさらに探索する局所探索能力が必要である。標準の PSO は局所探索能力が強く，局所解に陥りやすい。そのため標準の PSO に大域探索能力を取り込んだ様々な PSO の改良版が考案されている。しかしながら，改良版 PSO は関数のタイプにより探索性能が異なる。従って，関数のタイプに依らず探索性能が高い汎用的な PSO を改良することが重要である。我々は Dynamical Multi Swarm-PSO（DMS-PSO）を基に大域的および局所的な探索能力を適応的に取り込んだ停滞回避 PSO を提案する。停滞回避 PSO では，探索の停滞時に大域探索粒子により初期収束を防ぎ局所探索粒子により停滞位置の局所探索を行う。ベンチマーク関数の最小値問題で提案手法と既存手法との性能比較により，提案手法が関数のタイプに依らず高い探索性能を持つことを示す。

キーワード：粒子群最適化法，連続値最適化問題，初期収束，局所探索，大域探索

1．はじめに

粒子群最適化（Particle Swarm Optimization,PSO と略記）[1,2] とは，J. Kennedy と R. C. Eberhart らによって提案された群知能の一種であり，鳥や魚の群れの振る舞いを模倣したメタヒューリスティクスである。PSO では目的関数が定義された多次元空間上を位置ベクトルと速度ベクトルを持つ多数の粒子が，情報を共有して問題の最適値の探索を行う。一般に，PSO だけでなくメタヒューリスティクス解法では，まだ訪れていない探索空間を探索する大域探索能力と，既に訪れた有望な探索空間をさらに探索する局所探索能力が必要である。しかし，この二つの能力は相反する性質を持つため，バランスよく二つの能力を実装することは難しい。標準の PSO [3] は局所探索能力が強く，多峰性関数の関数最適化問題では局所解に陥りやすい欠点を持っている。そのため大域探索能力を取り込んだ CLPSO [4]，DMS - PSO [5]，StPSO [6] など様々な PSO の改良版が考案されている。これらの改良版 PSO は標準の PSO より探索性能が高いが，関数のタイプにより探索性能が異なる。例えば CLPSO は単峰性関数に比べ多峰性関数で探索性能が高く，逆に DMS - PSO は多峰性関数に比べ単峰性関数で探索性能が高い。また，StPSO はこれらに比べると全般的に解の探索精度が劣る。関数の性質が未知であ

平成27年 5 月25日受理

＊日本大学大学院工学研究科情報工学専攻
＊＊日本大学工学部情報工学科

る関数最適化問題を解くためには，関数のタイプに依らず探索性能が高い汎用的な PSO の改良が必要である。それに対して，探索の状態に適応してパラメータを自律的に調節する APSO[7,8] などの手法が提案されている。これらの手法では探索過程における粒子の平均速度[8]や粒子の分布状態を示す指標[7]から探索の段階を推定し，適切なパラメータ値を設定することができ，高い探索性能を示している。しかし，あらゆるタイプの関数に適用できる汎用的な探索段階の推定や探索段階に適したパラメータ値の決定は難しい問題である。

本研究では Dynamical Multi Swarm PSO（以下，DMS - PSO と略記）を基に，停滞回避アルゴリズムにより大域および局所探索能力を適応的に取り込んだ停滞回避 PSO を提案する。一般的に探索の停滞は局所解への初期収束あるいは最適解への収束によって生じる。そこで停滞回避アルゴリズムでは，探索の停滞時に大域探索粒子により初期収束を防ぐと同時に，局所探索粒子により停滞位置の局所探索を行う。このように提案手法では大域探索と局所探索のバランスの向上を目指し，トポロジーを適応的に変更する手法である。ここで，トポロジーとは同時に情報を共有する粒子間の隣接関係を意味する。本稿では，提案手法の探索性能を検証するために，ベンチマーク関数の最小値問題を用いて既存手法（標準の PSO[3]，CLPSO[4]，DMS - PSO[5]，StPSO[6]）との性能比較を行う。

本稿の構成を述べる。まず 2 章では提案手法の基になる DMS - PSO と MDMS - PSO を説明し，提案手法である停滞回避 PSO を説明する。次に 3 章では数値実験の内容と方法を述べ，4 章で数値実験の結果と考察を示す。最後に 5 章で結論を述べる。

2．停滞回避 PSO の提案

まず 2．1 節では，提案手法の基になっている DMS - PSO とその一部改良版である MDMS - PSO の二手法を説明する。DMS - PSO を提案手法の基にした理由は，PSO，StPSO や CLPSO に比べ DMS - PSO は探索の序盤で大域探索能力が高く終盤で局所探索能力が高い手法であり，本研究で提案する停滞回避アルゴリズムを追加することで探索性能が高まると考えたためである。2．2 節では提案手法である停滞回避 PSO の概要を説明し，2．3 節で提案手法で用いている停滞回避アルゴリズムを詳しく述べる。提案手法の基となる DMS - PSO と MDMS - PSO の二種類に対応して，停滞回避 PSO には停滞回避 DMS - PSO と停滞回避 MDMS - PSO の二種類がある。以下では，二つの提案手法を合わせて提案手法と略記し，区別するときには停滞回避 DMS - PSO を提案手法 D と停滞回避 MDMS - PSO を提案手法 M と略記する。以下，関数の最小値問題を例に説明する。

2．1　DMS - PSO

DMS - PSO とは，Liang らによって提案された PSO の改良版の一つである。DMS - PSO は，全粒子を複数のグループに分割して，グループ内で情報を共有しながら探索を行うことで大域探索能力を取り込んだ手法である。世代数を t として，i 番目粒子の速度ベクトル v_i，位置ベクトル x_i の第 d 次元成分の更新式を式(1)，(2)に示す。

$$v_{id}^{(t+1)} = wv_{id}^{(t)} + c_1 r_{1,id}\left(p_{id}^{(t)} - x_{id}^{(t)}\right) + c_2 r_{2,id}\left(l_{jd}^{(t)} - x_{id}^{(t)}\right) \quad (1)$$

$$x_{id}^{(t+1)} = x_{id}^{(t)} + v_{id}^{(t+1)} \quad (2)$$

ここで，$p_{id}{}^{(t)}$ は i 番目粒子の初期世代から現世代までの軌道上の最適な位置ベクトル（以下，pbest と略記）の第 d 次元成分であり，$l_{jd}{}^{(t)}$ は現世代までにグループ j 内で見つけた最適な位置ベクトル（以下，lbest と略記）の第 d 次元成分である。なお，t 世代では i 番目粒子はグループ j に属している。w は 1 ステップ前の速度を抑制する慣性重み定数で 1 より小さい値を取る。c_1，c_2は重み定数と呼ばれるものであり，それぞれ粒子が pbest や lbest へ向かおうとする力の度合いを表す。$r_{1,id}$，$r_{2,id}$ は［0，1］の値を取る一様乱数である。DMS - PSO では，各粒子は一つのグループに属し，各グループのメンバー数を一定数に固定する。また R 世代ごとにグループの組換え（再グループ化）を行う。この再グループ化の際，各粒子の位置・速度および pbest は保持されるが，lbest は新たなグループで再計算される。オリジナルの DMS - PSO では，探索の終盤で局所探索を行うため標準の PSO へアルゴリズムを切り替える。すなわち，探索終盤で式(1)の速度の更新式における lbest を全粒子の pbest の中の最適な位置ベクトル（以下，gbest と略記）に変更し，全グループを一つのグループに併合する。このように DMS - PSO はグループごとに情報を共有することで大域探索を実現し，再グループ化によるグループ間での情報交換を通して全粒子間でゆっくりと情報を伝達させる。従って DMS - PSO は，PSO と比べ局所探索能力が劣るが，大域探索能力に優れている。PSO の強すぎる局所探索能力を考えると，PSO より DMS - PSO の方が二つの探索能力をバランス良く実装している。

次に，DMS - PSO を一部改良した Modified DMS - PSO（以下，MDMS - PSO と略記）を説明する。MDMS - PSO は，DMS - PSO の速度更新式(1)中の lbest をグループメンバーの現在の最良位置に置き換えたアルゴリズムである。従って，DMS - PSO における lbest の関数値と比較して MDMS - PSO における lbest の関数値は大きな値を取る可能性が高く，一般的に MDMS - PSO は DMS - PSO よりも大域探索能力が高い。

2．2　提案手法の概要

提案手法では，2．1 節で説明した DMS - PSO，MDMS - PSO を基にして探索の停滞時に全粒子を大域探索粒子と局所探索粒子という二つのグループ群に二分する停滞回避アルゴリズムを導入する。停滞回避アルゴリズムと停滞判定の詳細は 2．3 節で示す。

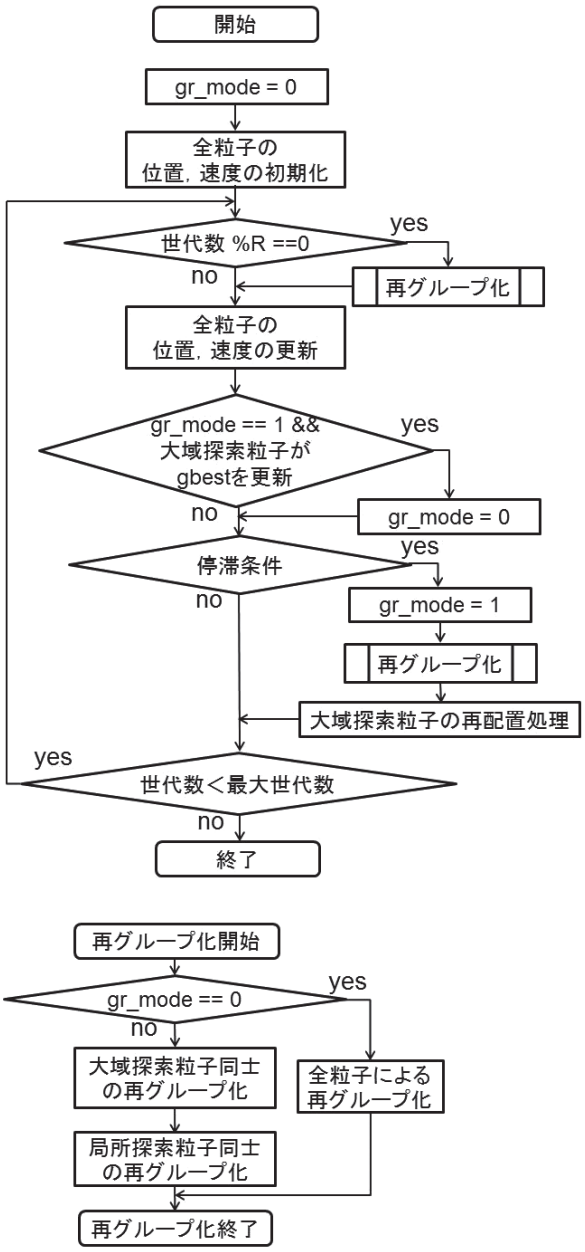


図１　停滞回避 PSO のフローチャート

図１に提案手法のフローチャートを示す。提案手法 D と M の違いはフローチャート中の「全粒子の位置，速度の更新」で使用する更新式の違いにあるため，両手法を図１のフローチャートで説明できる。フローチャート中の gr_mode とは探索の状態を定める変数であり，gr_mode ＝０では全粒子を DMS - PSO あるいは MDMS - PSO の粒子（以下，両手法ともに DMS 粒子と略記）として扱い，gr_mode ＝１では全粒子を大域探索粒子と局所探索粒子に二分する。最初に gr_mode ＝０として全ての粒子を DMS 粒子として探索空間内にランダムに配置し，各粒子の pbest を現在位置とし，グループ化を行う。次に，更新則に従い粒子の位置と速度を更新し，R 世代毎に再グループ化を行う。また更新時に停滞判定を行う。もし停滞条件が満たされた場合，停滞回避アルゴリズムを実行する。すなわち，全粒子は局所解あるいは最適解へ落ち込んでいる可能性があるので，gr_mode ＝１として全粒子を大域探索粒子と局所探索粒子に二分し，大域探索粒子の再配置処理を行う。ここで局所解に落ち込んだ場合の対策として，大域探索粒子を再配置することにより初期収束を回避して大域探索を進める。一方，最適解付近に停滞した場合の対策として，局所探索粒子による最適解のさらなる探索を進める。停滞回避アルゴリズムで行う再配置処理と再配置時に大域探索粒子が保持する情報に関しては２．３節で詳しく述べる。停滞回避アルゴリズムの適用後，更新則に従い粒子の位置と速度を更新し，R 世代ごとに再グループ化を行う。ただし，大域探索粒子間･局所探索粒子間で別々に再グループ化を行う。探索が進み大域探索粒子が gbest を更新した場合，局所探索粒子は更新された gbest と異なる局所解の探索を行っている可能性が高い。そこで，更新された gbest の情報を局所探索粒子にも共有させるために，gr_mode ＝０として全粒子を DMS 粒子とする。

このように停滞判定と gbest の更新に従い gr_mode を変更させながら終了条件が満たされるまで探索を行う。本研究では規定世代数に達した場合，探索を終了させる。

２．３　停滞回避アルゴリズム

２．２節で述べたように，探索が停滞した時に全粒子を大域探索粒子と局所探索粒子に二分し，大域探索粒子の再配置処理を行う。停滞の判定は，次に示すように粒子の速度（V_{av}）と最良個体の位置（gbest）に関する二つの条件で行う。

(I)　**速度による判定**：次式で定義する速さの平均 V_{av} を求める。

$$v_{av} = \frac{1}{P_g D} \sum_{i=1}^{P_g} \sum_{d=1}^{D} | v_{id} | \qquad (3)$$

ここで，P_g は gr_mode ＝０のとき DMS 粒子数であり，gr_mode ＝１のとき大域探索粒子数である。D は関数空間の次元数であり，v_{id} は i 番目粒子の速度の第 d 次元成分である。カウンタ変数 count_V を設け，式(3)の平均速度が規定値より小さくなると count_V を加算し，count_V ≧3000 のとき速度の観点から停滞と判定する。なお，平均速度が基準値より大きくなったときには count_V を０にリセットする。カウンタ変数の加算の詳細な条件については省略するが，様々なベンチマーク関数での準備実験を繰り返すことで条件および上の停滞の判定の閾値3000を決定した。

(II)　**最良個体の位置（gbest）による判定**：世代毎に gbest を計測し，カウンタ変数 count_g を設け，大域探索粒子により gbest が更新され，その関数値の減少分が規定値以下のとき count_g を加算する。count_g ≧200のとき最良個体の位置の観点から停滞と判定する。なお，gbest の関数値の減少分が規定値より大きいとき count_g を０にリセットする。速度による判定と同様に，様々なベン

チマーク関数での準備実験を繰り返すことで上の停滞の判定の閾値200を決定した。

上の二つの停滞判定が両立したとき，再配置処理を行う。再配置処理は次の(1)〜(4)からなる。(1)全粒子を大域探索粒子と局所探索粒子に二分し，二つのグループ群を作成する。(2)大域探索粒子の位置と速度をランダムに再配置する。(3)大域探索粒子が再配置前の pbest を保持している場合，大域探索粒子は再び停滞位置に停滞する可能性があるので，pbest を次元成分ごとに確率 P で再配置し，確率 $1-P$ で pbest の当該成分を保持させる。(4)さらに，pbest の再配置によって群全体の情報である gbest を失った場合，探索性能が低下する可能性がある。そこで m 個の粒子をランダムに選び，その粒子の pbest に gbest を格納することで gbest を保存する。これは遺伝的アルゴリズムでのエリート保存を参考にしたものである[9]。

3．数 値 実 験

3．1　数値実験の内容と方法

まず，ベンチマーク関数の最小値問題の数値実験を行い，提案手法と DMS‐PSO で大域探索能力を比較する。そのため，式(4)，(5)で定義する全粒子・全次元成分の解からの平均変位 μ とその標準偏差 σ を求め，$\mu-\sigma$，μ，$\mu+\sigma$ の世代推移を比較する。

$$\mu=\frac{1}{ND}\sum_{i=1}^{N}\sum_{d=1}^{D}x_{id}-s_d \tag{4}$$

$$\sigma=\sqrt{\frac{1}{ND}\sum_{i=1}^{N}\sum_{d=1}^{D}(x_{id}-\mu)^2} \tag{5}$$

ここで，s_d は解の第 d 次元成分であり，N は全粒子数を表す。

次に，提案手法と 5 つの既存手法（PSO，DMS‐PSO，MDMS‐PSO，StPSO，CLPSO）との探索性能を比較するため，ベンチマーク関数の最小値問題をそれぞれの手法で100回数値実験し，そこで得た gbest の関数値の加算平均（以下，＜f(gbest)＞と記述）の世代推移を測定する。さらに，各ベンチマーク関数に対する各手法での100回の数値実験での解到達回数を測定する。

全手法で用いるパラメータの値を表 1 に示した。表 1 の「速度成分の最大値」とは，粒子が持つ速度の各次元成分の大きさの最大値である。つまり，速度更新で求めた次世代の速度成分の大きさが最大値を超えたとき，それを最大値に設定する。また，慣性重み w の値が大きすぎると大域探索能力が強くなり，小さすぎると局所探索能力が強くなることが知られている[10]。DMS‐PSO と比較すると MDMS‐PSO は大域探索能力が高い。そこで，提案手法 M の大域探索能力をさらに強めることで提案手法 D との探索能力の違いを生み出すため，本稿では表 1 のように提案手法 D では w を世代に依らず一定とし，提案手法 M では世代とともに w の値を線形減衰させる。表 2 に，提案手法で必要となるパラメータ値を示す。変更確率 P を様々な値に設定して数値実験を行った結果，次元数に関わらず pbest の約 2 成分を再配置したときに探索性能が大きくなる傾向が見られた。そこで，変更確率 P の値を $2/D$ とする。また，pbest に gbest をエリート保存する粒子数 m の値を大きくすると大域探索能力が失われるので m の値を 2 に定める。粒子の運動の境界条件は，全手法で反射型境界条件を採用する[11]。

表 1　全手法で用いるパラメータ値

パラメータ名	値	
粒子数 N	90	
次元数 D	10	30
最大世代数	30000	200000
実験回数	100	
速度成分の最大値	$0.2L$，$0.6L$	
重み係数 $c1$	1.1，2.0：StPSO	
	1.49445：その他の手法	
重み係数 $c2$	なし：CLPSO	
	$c1$ と同値：その他の手法	
慣性重み w	0.729 ：PSO，DMS-PSO，提案手法 D	
	0.9-0.7×現世代数/最大世代数 ：MDMS-PSO，提案手法 M	
	0.9-0.5×現世代数/最大世代数 ：StPSO，CLPSO：	
グループ内粒子数 n	3：DMS-PSO，MDMS-PSO， 提案手法	
	なし：その他の手法	
再グループ化周期数 R	10：DMS-PSO，MDMS-PSO， 提案手法	
	なし：その他の手法	

表 2　停滞回避 PSO のパラメータ

パラメータ名	値
大域探索粒子数	$N/2$
局所探索粒子数	$N/2$
pbest の変更確率 P	$2/D$
再配置処理で gbest の情報を保存する粒子数 m	2

表 3　ベンチマーク関数の性質

関数名	形状	変数間の依存関係	解
①Sphere	単峰性	なし	$\forall d$ で $x_d=0$
②Rosenbrock	単峰性	あり	$\forall d$ で $x_d=1$
③Rastrigin	多峰性	なし	$\forall d$ で $x_d=0$
④Schwefel	多峰性	なし	$\forall d$ で x_d=420.9687..
⑤Griewank	多峰性	あり	$\forall d$ で $x_d=0$
⑥Ackley	多峰性	なし	$\forall d$ で $x_d=0$
⑦Rotated-Rastrigin	多峰性	あり	$\forall d$ で $x_d=0$
⑧Rotated-Griewank	多峰性	あり	$\forall d$ で $x_d=0$

3．2　ベンチマーク関数

本研究では，表 3 の①～⑧の 8 つのベンチマーク関数の最小値探索問題の数値実験を行った。各関数の形状・変数間の依存関係の有無および解を表 3 にまとめ，関数式を式(6)～(13)に示す。なお，全ての関数の最小値は 0 である。

① Sphere 関数

$$f(x)=\sum_{d=1}^{D}x_d^2 \qquad (-5.12\le x_d\le 5.12) \tag{6}$$

② Rosenbrock 関数

$$f(x)=\sum_{d=1}^{D-1}(100(x_{d+1}-x_d^2)^2+(1-x_d)^2) \qquad (-2.048\le x_d\le 2.048) \tag{7}$$

この関数では，最適解付近に関数値の小さい領域が双曲線状に広がっているため，探索序盤で大域的な探索が必要である。

③ Rastrigin 関数

$$f(x)=\sum_{d=1}^{D}(x_d^2-10\cos(2\pi x_d)+10) \qquad (-5.12\le x_d\le 5.12) \tag{8}$$

この関数では，最適解の周辺に格子状に局所解が存在するため大域的な探索が必要である。

④ Schwefel 関数

$$f(x)=418.9829\times D-\sum_{d=1}^{D}x_d\sin(\sqrt{|x_d|}) \qquad (-512\le x_d\le 512) \tag{9}$$

この関数では，局所解と最適解が離れているため高い大域探索能力を必要とする。

⑤ Griewank 関数

$$f(x)=1+\sum_{d=1}^{D}\frac{x_d^2}{4000}-\prod_{d=1}^{D}(\cos(\frac{x_d}{\sqrt{d}})) \qquad (-512\le x_d\le 512) \tag{10}$$

この関数は複雑な多峰性関数である。

⑥ Ackley 関数

$$f(x)=20+e-20\exp(-0.2\sqrt{\frac{1}{D}\sum_{d=1}^{D}x_d^2})-\exp(\frac{1}{D}\sum_{d=1}^{D}\cos(2\pi x_d)) \qquad (-32.768\le x_d\le 32.768) \tag{11}$$

この関数は大域的には Sphere 関数と似た概形を成すが，局所的には多数の局所解を持つ。

⑦ Rotated - Rastrigin 関数

$$f(x)=\sum_{d=1}^{D}(y_d^2-10\cos(2\pi y_d)+10) \qquad \boldsymbol{y}=\boldsymbol{M}\bullet\boldsymbol{x}\quad,\ (-5.12\le x_d\le 5.12) \tag{12}$$

回転行列 $\boldsymbol{M}$ を用いて Rastrigin 関数の座標軸を回転させた関数である。

⑧ Rotated - Griewank 関数

$$f(x)=1+\sum_{d=1}^{D}\frac{y_d^2}{4000}-\prod_{d=1}^{D}(\cos(\frac{y_d}{\sqrt{d}})) \qquad \boldsymbol{y}=\boldsymbol{M}\bullet\boldsymbol{x}\quad,\ (-512\le x_d\le 512) \tag{13}$$

回転行列 $\boldsymbol{M}$ を用いて Griewank 関数の座標軸を回転させた関数である。

4．数値実験結果と考察

4．1　提案手法と DMS - PSO との大域探索能力比較

提案手法と DMS - PSO との大域探索能力の比較を行うため，D =10の Griewank 関数の最小値探索の数値実験を 1 回行い，式(4)，(5)で定義した各世代での解からの平均変位 μ とその標準偏差 σ を求めた。図 2 に DMS - PSO で求めた $\mu+\sigma$，μ，$\mu-\sigma$ の世代推移を示す。図中の上から黒い曲線が $\mu+\sigma$，赤い曲線が μ，黒い曲線が $\mu-\sigma$ であり，図 3 － 6 でも同様である。図より1700世代あたりから μ も σ も変化がなく，μ は約1. 07の値であることから，DMS - PSO では局所解へ初期収束したことが分かる。このように，DMS - PSO は探索の早い段階で大域探索能力が弱まる傾向がある。図 3 に提案手法 D で求めた $\mu+\sigma$，μ，$\mu-\sigma$ の世代推移を示す。探索位置を－30から30に拡大した図 4 を示す。図 5 に提案手法 M で求めた $\mu+\sigma$，μ，$\mu-\sigma$ の世代推移を示す。また，探索位置を－30から30に拡大した図 6 を示す。図 3，5 から，再配置処理により標準偏差が Griewank 関数の一次元方向の定義域の 1 / 5 である200あたりまで増加していることが分かる。図 3，5 では解からの平均変位がほぼ 0 に見えるが，拡大図 4，6 より平均変位は 0 でなく 0 近傍で変動していることが分かる。また，図 4 の8000世代の直前の再配置処理によって，平均変位が急激に 0 に近づいており，このとき局所収束からの粒子の脱出が起こったと推測できる。また図 3，5 を比較すると，提案手法 M の方が探索の序盤における σ の値が大きいこと

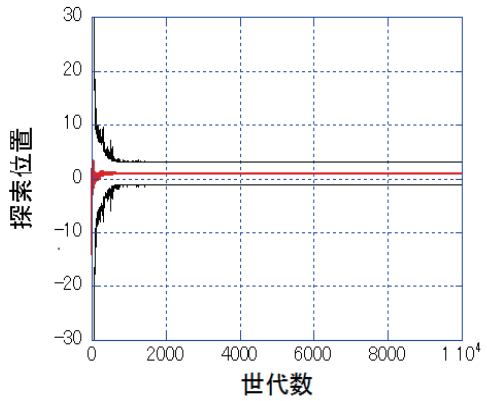


図 2　解からの平均変位と標準偏差の推移
（Griewank 関数，D =10，DMS - PSO，図中の上から黒い曲線が $\mu+\sigma$，赤い曲線が μ，黒い曲線が $\mu-\sigma$ である）

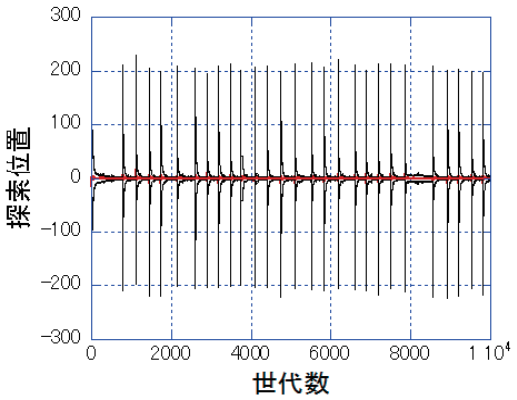


図 3　解からの平均変位と標準偏差の推移
（Griewank 関数，D ＝10，停滞回避 DMS - PSO，図中の上から黒い曲線が $\mu+\sigma$，赤い曲線が μ，黒い曲線が $\mu-\sigma$ である）

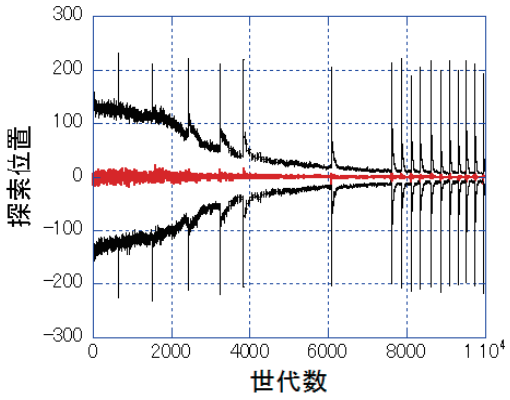


図 5　解からの平均変位と標準偏差の推移
（Griewank 関数，D ＝10，停滞回避 MDMS - PSO，図中の上から黒い曲線が $\mu+\sigma$，赤い曲線が μ，黒い曲線が $\mu-\sigma$ である）

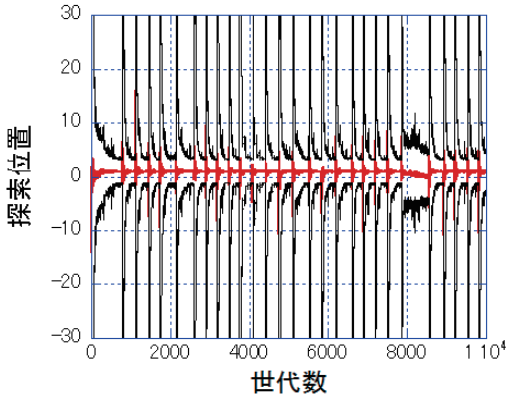


図 4　解からの平均変位と標準偏差の推移（拡大図）
（Griewank 関数，D ＝10，停滞回避 DMS - PSO，図中の上から黒い曲線が $\mu+\sigma$，赤い曲線が μ，黒い曲線が $\mu-\sigma$ である）

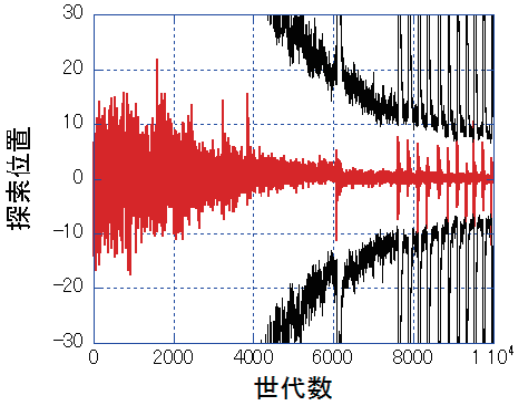


図 6　解からの平均変位と標準偏差の推移（拡大図）
（Griewank 関数，D ＝10，停滞回避 MDMS - PSO，図中の上から黒い曲線が $\mu+\sigma$，赤い曲線が μ，黒い曲線が $\mu-\sigma$ である）

が分かる。これから探索の序盤において提案手法 M は提案手法 D よりも大域探索能力に優れていることが分かる。

4．2　既存手法との探索性能比較

8 つのベンチマーク関数での数値実験から得た＜f(gbest)＞の世代推移を図 7 ～14に示す。本研究では D ＝10，30での数値実験を行ったが，多くの関数では次元数が大きいほど探索効率が低くなる傾向が見られた。しかし，よく知られていることであるが，Griewank 関数では次元数が小さいほど探索効率が低くなった。そこで Griewank 関数と Rotated - Griewank 関数では D ＝10の結果を示し，その他の関数では D ＝30の結果を示す。また，粒子の速度の次元成分の最大値を0. 2L，0. 6L の二通りで数値実験を行った結果を比較し，より良い探索性能を示した最大値を採用したところ，Schwefel 関数では最大値を0. 6L，その他の関数では0. 2L とした。これは Schwefel 関数では局所解と最適解の距離が大きく，最適解を早く探索するために粒子の速度成分の最大値を大きくした方がよいためと推測する。

Sphere 関数での＜f(gbest)＞の世代推移を図 7 に示す。Sphere 関数は単純な単峰性関数であるため，大域探索能力を必要としないと考えられる。図 7 より15000世代までに全ての手法で最適解に達しているように見えるが，StPSO，CLPSO では最適解に達していない。また，MDMS - PSO と提案手法 M では最適解に達するまでに長い世代を要している。このように StPSO，CLPSO，MDMS - PSO および提案手法 M の探索性能が低い結果となった。この理由として，これらの手法では w の値を線形減衰させており序盤で探索の多様性が高すぎたためと考えられる。

Rosenbrock 関数での＜f(gbest)＞の世代推移を図 8 に示す。図 8 では，DMS - PSO の探索性能が最も良く，次に提案手法 D が良い。Rosenbrock 関数は単峰性関数であるため，強い局所探索能力が必要であると考えられる。一方，この関数は変数間に強い依存関係を持っており，最小値付近には関数値の小さい領域が双曲線状に大きく広がっているため，探索の序盤では大域探索能力も必要であると考えられる。そのため強い局所探索能力を持っているが，大域的な探索能力に欠ける PSO では低い解探索性能を示したと考えられる。それに比べ二つの能力をある程度バランスよく持っている DMS - PSO は高い探索性能を示している。

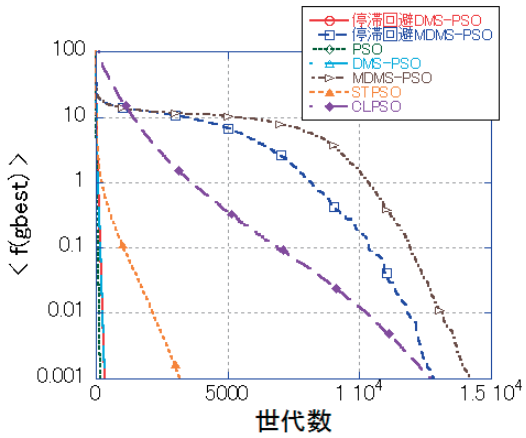


図 7　＜ f(gbest)＞の推移
（Sphere 関数，D ＝30）

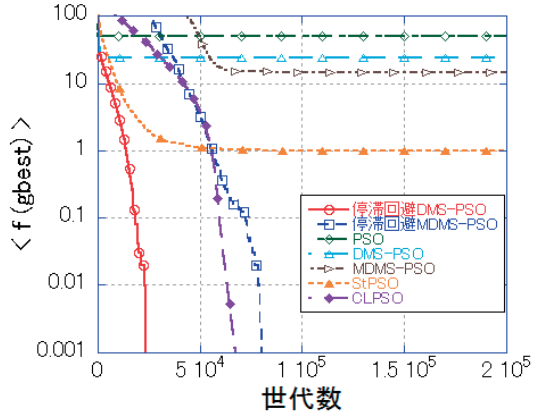


図 9　＜ f(gbest)＞の推移
（Rastrigin 関数，D ＝30）

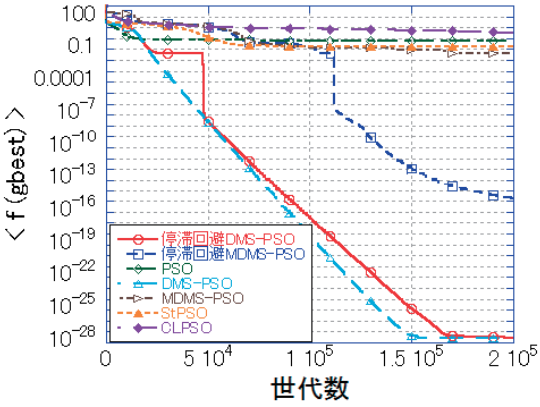


図 8　＜ f(gbest)＞の推移
（Rosenbrock 関数，D ＝30）

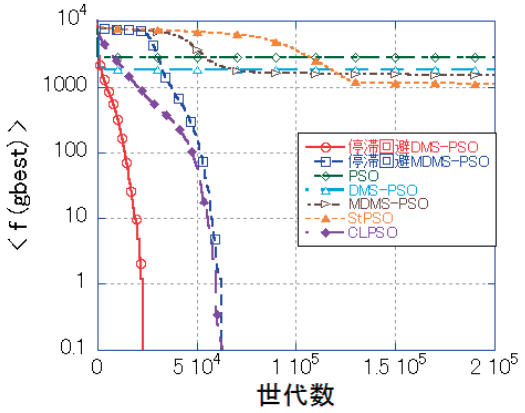


図10　＜ f(gbest)＞の推移
（Schwefel 関数，D ＝30）

一方 DMS - PSO に停滞回避アルゴリズムを追加した提案手法 D は，停滞回避アルゴリズムによる再配置処理が無駄になり，結果として DMS - PSO より低い探索性能を示したと考えられる。また，CLPSO の探索性能は比較した手法の中で最も低いことが分かる。

Rastrigin 関数での＜ f(gbest)＞の世代推移を図 9 に示す。図 9 では，提案手法の二手法と CLPSO で最適解に到達している。また，図10に Schwefel 関数での＜ f(gbest)＞の世代推移を示す。図10でも提案手法の二手法と CLPSO の解探索性能が良いことが分かる。この二つの関数のように多峰性で変数間に依存関係がない関数において提案手法と CLPSO が高い探索性能を示していることが分かる。それに比べ，提案手法の基となっている DMS - PSO，MDMS - PSO は局所解から抜け出すことができていない。従って，初期収束を回避する停滞回避アルゴリズムが多峰性関数で有効に働いていると考えられる。以上より，提案手法と CLPSO は変数間に依存関係のない多峰性関数において優れた大域探索能力を持つことが分かる。

Griewank 関数での＜ f(gbest)＞の世代推移を図11に示す。図11では CLPSO の探索性能が最も良いが，次に MDMS - PSO が良い。図12の Ackley 関数では PSO 以外の手法は最適解に近い解を探索しているが，中でも提案手法 D と DMS - PSO の解探索が最も早いことが分かる。Ackley 関数は変数間の依存関係がある多峰性関数であるが，Rastrigin 関数や Schwefel 関数と異なり大域的には Sphere 関数と似た概形を成すため，局所探索能力の高い DMS - PSO が高い探索能力を示したと考えられる。Rotated - Rastrigin 関数と Rotated - Griewank 関数の＜ f(gbest)＞の世代推移を示した図13，14では MDMS - PSO と提案手法 M の探索性能が高い。Griewank 関数・Rotated - Rastrigin 関数および Rotated - Griewank 関数は変数間に依存関係のある多峰性関数であり，他の関数に比べ解探索が難しい問題であるため，世代が推移しても＜ f(gbest)＞は他の関数に比べ高い値を取る結果となった。＜ f(gbest)＞が大きな値ではあるが，提案手法 D よりも提案手法 M の方が高い探索性能を発揮していることが分かる。

手法ごとに特徴をまとめると，PSO は多くの関数で初期収束している。DMS - PSO，MDMS - PSO は，大域探索能力より局所探索能力が高いことが分かる。StPSO は探索の序盤から中盤の間で，探索が停滞してしまう傾向が見ら

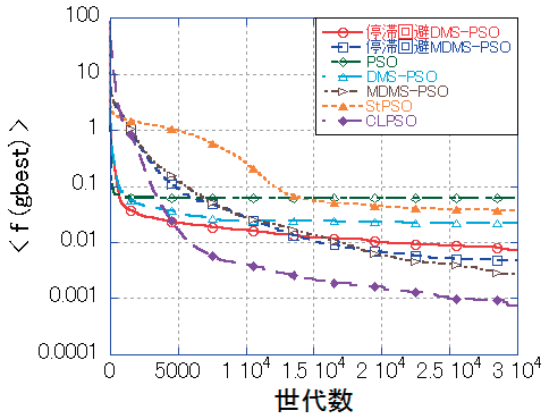


図11　＜ f(gbest)＞の推移
（Griewank 関数，D ＝10）

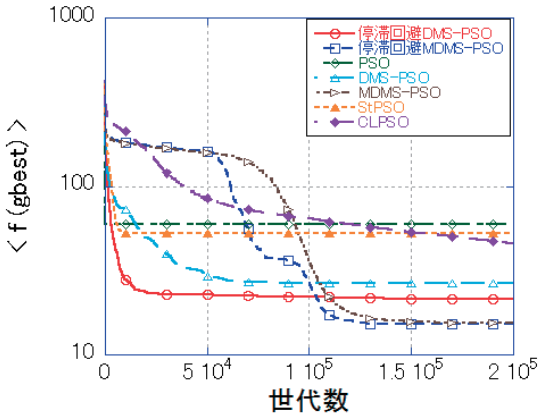


図13　＜ f(gbest)＞の推移
（Rotated － Rastrigin 関数，D ＝30）

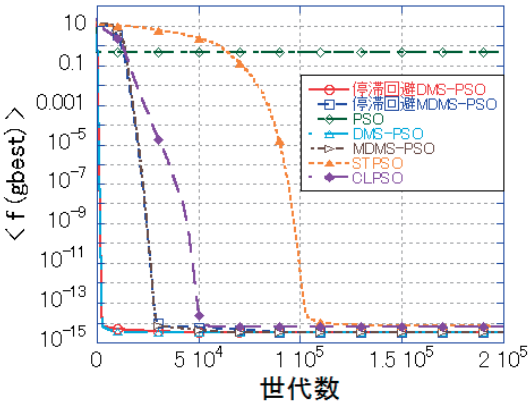


図12　＜ f(gbest)＞の推移
（Ackley 関数，D ＝30）

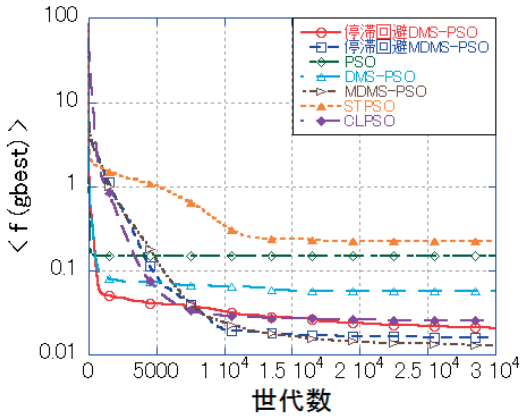


図14　＜ f(gbest)＞の推移
（Rotated － Griewank 関数，D ＝10）

れる。CLPSO は多峰性関数では探索性能が高いが，単峰性関数である Rosenbrock 関数では探索の中盤で，探索が停滞している。このことから CLPSO は大域探索能力が高いが，局所探索能力は低いと推測できる。提案手法は，単峰性・多峰性および変数間の依存関係の有無によらず，全ての関数において最適解近くを探索できていることから，大域探索能力と局所探索能力の双方の能力をうまく発揮できていることが分かる。

4．3　解到達回数による探索性能比較

各手法での各関数の100回の数値実験で得た解到達回数を表 4 に示す。全ての関数の最適値が 0 であるので，各数値実験で関数値が規定値（1.0×10^{-10}）を下回った粒子が一つでも観測された場合，当該数値実験は解に到達したと判定した。また表 4 中の①～⑧は表 3 に示したベンチマーク関数の番号である。

表 4 より，① Sphere 関数では全手法・全数値実験で解を探索できている。② Rosenbrock 関数では提案手法 D と DMS - PSO において全数値実験で解を探索できており，次に提案手法 M と MDMS - PSO では，ほとんどの数値実験で解を探索できている。③ Rastrigin 関数，④ Schwefel 関数では提案手法の二手法と CLPSO が全数値実験で解を探索できている。⑤ Griewank 関数では CLPSO が最も多くの解を探索できている。⑥ Ackley 関数では PSO 以外の手法が全数値実験で解を探索できている。⑦ Rotated - Rastrigin 関数はどの手法でも解を探索できず，⑧ Rotated - Griewank 関数は提案手法と DMS - PSO，MDMS - PSO で解を探索しているが解到達回数は少ない。その理由として，これらの関数は変数間の依存関係をもつ多峰性関数であり，他の関数に比べ最適解を求めることが難しい問題であるためと推測する。

表 4 全体を眺めると，Griewank 関数を除くと提案手法は既存手法より解到達回数が大きくなった。また，CLPSO は Rosenbrock 関数では解到達回数が 0 であるが，他の関数では解到達回数が大きい。以上より，CLPSO と提案手法の探索性能が高いが，提案手法の方が CLPSO より全関数に大きな偏りなく解を探索できていることが分かる。また，この結果は，4．2 節の図 7 ～14に関して述べた結果と定性的に等しいことが分かる。

表 4　解到達回数

手法名	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧
停滞回避 DMS-PSO	100	100	100	100	41	100	0	5
停滞回避 MDMS-PSO	100	97	100	100	59	100	0	9
PSO	100	76	0	0	0	63	0	0
DMS-PSO	100	100	0	0	13	100	0	5
MDMS-PSO	100	97	0	0	63	100	0	8
StPSO	100	62	46	0	1	100	0	0
CLPSO	100	0	100	100	82	100	0	0

5．ま　と　め

本研究では，既存手法である DMS‐PSO と MDMS‐PSO を基に停滞回避アルゴリズムを追加し，大域および局所探索能力を適応的に取り込んだ停滞回避 PSO を提案した。数値実験による提案手法と５つの既存手法の比較により，既存手法は単峰性・多峰性および変数間の依存関係の有無によらず，様々なタイプの関数に適用できる汎用的な PSO であることが分かった。その理由として，提案手法では大域探索能力と局所探索能力をそれぞれ発揮できる二種類の粒子を共存させることにより，双方の能力をアルゴリズム上で並列に行えるように実装している点が挙げられる。ただし，多峰性で変数間の依存関係のある Rotated‐Rastrigin 関数と Rotated‐Griewank 関数では，提案手法を含む本稿で示した全ての手法で満足のいく探索性能を示していない。これは変数間の依存関係をもつ多峰性関数では最適解を求めることが難しいためと推測する。これらの関数で探索性能を改善することが今後の課題である。

文　　献

1）J. Kennedy, and R. C. Eberhart : Particle swarm optimization, Proc. of IEEE the International Conference on Neural Networks, Vol.4, pp. 1942-1948（1995）.

2）R. C. Eberhart, and J. Kennedy：A new optimizer using particle swarm theory, Proc. of the Sixth Int. Symposium on Micromachine and Human Science, Nagoya, Japan, pp. 39-43（1995）.

3）M. Clerc, and J. Kennedy：The Particle Swarm-Explosion, Stability, and Convergence in a Multidimensional Complex Space, IEEE Transactions on Evolutionary Computation, Vol. 6, No. 1 , pp. 58-73（2002）.

4）J. J. Liang, A. K. Qin, P. N. Suganthan, and S. Baskar：Comprehensive Learning Particle Swarm Optimizer for Global Optimization of Multimodal Functions, IEEE Transactions on Evolutionary Computation, Vol.10, No. 3 , pp. 281-295（2006）.

5）J. J. Liang, and P. N. Suganthan：Dynamical multiswarm particle swarm optimizer, Proc. of the IEEE swarm intelligence symposium（SIS）, pp.124-129（2005）.

6）A. Z. Sevkli, and F. E. Sevilgen：StPSO：Strngthened particle swarm optimization, Turkish Journal Of Electrical Engineering & Computer Sciences, Vol.18, No.3, pp.1095-1114（2010）.

7）Z. H. Zhan, J. Zhang, Y. Li, and H. S. Chung：Adaptive particle swarm optimization, IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B: Cybernetics, Vol.39, No. 6 , pp. 1362-1381（2009）.

8）K. Yasuda, and N. Iwasaki：Adaptive Particle Swarm Optimization using Velocity Information of Swarm, Proc. of IEEE the International Conference on Systems, Man & Cybernetics, pp. 3475-3481（2004）.

9）㈳電気学会：進化技術ハンドブック，pp. 19-57，近代科学社，（2010）.

10）Y. Shi, and R. C. Eberhart：A modified particle swarm optimizer, Proc. of the IEEE international conference on evolutionary computation（CEC）, pp. 69-73（1998）.

11）A. D. Olsson, Particle Swarm Optimization：Theory, Techniques and Applications, Nova Science Publishers, Inc., pp. 127-167（2011）.

総合教育編

日本大学工学部　紀要　第 57 巻　第 1 号　September,　2015

R. シュタイナーの「霊学」はヴァルドルフ教育においてどのように継承されているか
－「輪廻とカルマ」論の継承 －

土　屋　文　明＊

How R. Steiner's "*Geisteswissenschaft*" takes over Waldorf Pedagogy.
－ Inheritance of the concept of "recarnation and karma" by Steiner －

Fumiaki TSUCHIYA*

Abstract

This paper examines how R. Steiner's "*Geisteswissenschaft*", especially "transmigration of souls" takes over Waldorf Pedagogy.

This study shows the following:

1. Educationists and teachers who are concerned in Waldorf Pedagogy accept uncritically R. Steiner's "*Geisteswissenschaft*" that he created by spiritual forces. They are great believers in R. Steiner's powers.
2. The concept of "recarnation and karma" by R. Steiner have an important place in Waldorf Pedagogy.
3. This concept forms the foundation of the objective of character building in Waldorf School. The objective of this School is to develop the individuallity pupils keep from their former recarnation.
4. This concept sets a guideline for the education and guidance Principle in this School. This concept also leads to the dignity of man.
5. In Waldorf School some teachers educate generally without Steiner's concept. This concept is now Waldorf Padagogy itself.

Key words : Waldorf Pedagogy, Rudolf Steiner, recarnation and karma

1　問題の所在と課題

前稿では，ヴァルドルフ学校の教育原則である「クラス担任制」に焦点を当て，考察した。「クラス担任制」，およびそれを支える教師の「権威」は，ルドルフ・シュタイナー（Rudolf Steiner，1861-1925）の言説が基礎にあること，さらに，その言説は，彼の「霊学 Geisteswissenschaft」に源泉があることを確認した。

シュタイナーの教育理念が「霊学」に拠るものであることは周知の事実であり，従来のアカデミズムによるヴァルドルフ教育研究において，シュタイナーの「霊学」は，批判の対象であった（註1）。形而上学の分野で「霊学」を論ずることはできても，「霊学」が，学校教育の基盤であるという主張は，その学問（科学）性が問題にされる。筆者にとって，「霊学」の持つ神秘主義，スピリチュアル性は，研究対象にするには力量が不足している。しかし，ヴァルドルフ教育を研究対象とする限りにおいて，「霊学」を無視することはできないとこれまで考えてきた。ヴァルドルフ学校の教育実践をいくら論じても，その基礎にあるといわれる「霊学」を省いた教育論は，画竜点睛を欠くのである。

このような問題意識から，この「霊学」が，ヴァルドルフ教育においてどのように継承されているのか，受けとめられているのかに目を向けることにしたい。管見ではあるが，シュタイナーの「霊学」が教育論において扱われるのは，とりわけ「輪廻とカルマ」の部分である。したがって本稿では，シュタイナーの「輪廻とカルマ」論の継承に焦点をあてる。

本稿の結論を記す。第一に，シュタイナーの「輪廻とカルマ」論は，その継承者によってヴァルドルフ教育に忠実に受け継がれている，第二に，この「輪廻とカルマ」論は，教育の根幹をなすものである，とヴァルドルフ教育内ではとらえられている。この 2 点を本稿では明らかにしたい。

そのために，シュタイナーから直接薫陶を受けたエーリッヒ・ガーベルト（Erich Gabert，1890-1968），ヴァルドルフ学校の現職教師ウヴェ・ベルマン（Uwe Buermann，1968-　），そしてギムナジウムの教師ヴァレンティン・ヴェムバー（Valentin Wember，1957-　）の論文を取り上げる。

2　シュタイナーの「輪廻とカルマ」論と教育の課題

「輪廻とカルマ」について，「輪廻とカルマ」と教育の課

平成27年 6 月 1 日受理

＊日本大学工学部総合教育

題とのかかわりについて，シュタイナーはどのように語っているのだろうか。この節では，シュタイナーの論を確認したい。この論の妥当性を論ずることではない。

ヴァルドルフ教育において,『霊学の観点からの子どもの教育』は，シュタイナーの教育関係の基本的著書とされている。この小著は，ヴァルドルフ教育の骨格が語られているので，頁数にかかわらず，ヴァルドルフ教育関係者が重視する著書である。しかし，この著書の表題に含まれるキイワード「霊学」は，従来戸惑いの種である。「霊学」とは何か。

この本でシュタイナーは, 学問 Wissenschaft と比較しながら「霊学」について触れている。両者の違いは，前者が「感覚的な知覚を通して得られた事実をもとに, 悟性を用いて思考することによって」成立し，「このような範囲のかなたにある事柄に関しては拒絶の態度をとる」のに対して，後者は，「高次の器官を発達させることによって，通常の感覚をとおして知覚している世界とは全く別の世界を認識することができる」ところにあるという（子どもの教育，47-48）（カッコ内は，文献の略とページ数。以下同様）。つまり「霊学」は，通常の感覚器官をもつ人間にはとらえられないが,「高次の感覚器官」を発達させた者，例えばシュタイナーのような超能力者にしかとらえることのできない世界である。従来，ヴァルドルフ教育についての，ヴァルドルフ教育関係者の研究とアカデミズムの研究との違い，及び両者の主な対立は，上で触れたようにこの「霊学」をどのように解釈するかによるものであった。この「霊学」研究から，以下にみる「輪廻とカルマ」論が導かれたとされる。

⑴　シュタイナーの「輪廻とカルマ」論

シュタイナーの「カルマ」論は，公になっているものとしては，下の引用文の出典であるところの，1903年に彼が主宰する雑誌に掲載された論文「輪廻とカルマ」（引用文献 4 ）が，早いもののようである。彼は，「カルマ」(註 2) について次のように書いている。

> 自然研究者が，動物の形態を理解するために，その発生元の形態にさかのぼるのと同じように，この自然研究を基盤にする魂の研究者は，魂の形態を理解するために，その発生元の形態にさかのぼらなければならないだろう。後続の状態は，先の状態の作用の結果である。しかも後ろの物質的状態は，前の物質的状態の結果である。後ろの魂の状態もまた，前の魂の状態の作用の結果である。これが，カルマの法則の中身である。この法則が意味することは，以下である。私が私の現在の生においてできること，していることのすべては，それ自体独立したかたちで奇跡としてあるのではない。そうではなくそれは，私の魂の以前の存在様式と作用の結果としてつながっており，後の存在様式と原因としてつながっている（Reinkarnation，87）。（傍点部分原文イタリック体，以下同様）

引用文では，シュタイナーが「霊学」を語るときの，常套のメッセージを確認できる。自らの「霊学」は，「自然科学的研究の手法」に従ったものであることが，言外に示されている。ともあれ，シュタイナーは，「カルマ」を人間の「魂」と「関連」するものであり，現世の「魂」は，「以前の」「魂」の「作用の結果」としてあるものであり，「未来」へもつながるものであると，とらえている。

シュタイナーは，上に続く次の論文「いかにカルマは作用するか」（引用文献 5 ）では，「輪廻とカルマ」について次のように書いている。

> 論文「輪廻とカルマ」で説明されたことは，現代の自然科学的思考様式が，それ自体を真に理解するならば，人間の霊の発展が，何度も生を通り抜けて永遠に続くという，太古の教えにつながるということであった（Karma，92）。

シュタイナーは,「輪廻」を,「人間の霊の発展が，何度も生を通り抜けて永遠に続く」ことであると書いて，彼の人間理解を示している。つまりシュタイナーは，人間を，現世に限定したとらえ方をしていない。その本性，引用文で言う「霊」が「永遠に発展を続ける」存在であるととらえる。これが，シュタイナーの根本的な人間理解である。

そして，人間を,「霊 Geist」「魂 Seele」「身体 Leib」の本性を持つものととらえ,「輪廻」をさらに次のように説明する。

> 身体と霊は，相互に向き合っている。両者の間になければならないのが，［略］魂である。魂は，前の生の私の諸行為の結果を保持している。霊は，先行する生が霊から作り出したものとして新たな肉体の中に現れるが，それを引き起こすのは魂である。このように，身体と魂と霊は，結びついている。霊は，永遠である。誕生と死が，物質世界の法則に従って肉体を支配している。魂は，諸行為から運命を編みながら，永遠と，誕生と死の両者を何度も統合する（ebd., 96f. ）。

どのようにして「輪廻」が生ずるか。それは，人間の「霊」が，死後「身体」から離れて,「超感覚的世界」（後の論文等では,「霊界」と表現される）に入り,「誕生」によって「物質世界の諸法則」に従う「身体」と合体する。この際,「霊」と「身体」の仲立ちをするのが「魂」である。これが，シュタイナーのいう「輪廻」である。

そして先の引用文にあったように,「人間の霊の発展が，何度も生を通り抜けて永遠に続く」。どのようにか。

> ［略］人間の霊は，肉体から離れるときに諸体験のすべてを所有する。霊はそれを超感覚的世界に携えていく。［略］霊が，自らを物質的存在に縛りつける諸々の願望を振り捨てたときでも，その経験の成果は霊に残されている（ebd., 102）。

このように「霊」は，この世での成果を携えて，「超感覚的世界」に行く。そして，再び「物質界」に戻ってくる。「霊は，以前の生においてなされた体験が自分の固有な本性となった諸成果を携えてくる（ebd., 103）」。このようなくり返しによって，先の「人間の霊の発展が」「永遠に続く」，というのである。ここで，ヴァルドルフ教育の核的概念「自由」の源泉が明らかになる。この繰り返しの中で「霊」は，「自由」にも近づいていく。シュタイナーのいう「自由」は，「輪廻とカルマ」論から導き出されるものである。

［略］新たな生ごとに霊の周りはしだいに明るくなる。霊は，自分の周りの環境の諸法則の知識，認識を獲得する。［略］環境世界の強制がしだいに減少し，霊は，自分自身で決定できることがしだいに多くなる。自分自身に基づいて決定する霊は，自由な霊である。完全にはっきりした意識による行為は，自由な行為である。［略］人間の霊の完全な自由は，霊発展の理想である。（ebd., 104f.）。

人間が究極の「自由」を獲得することは，「理想」であり，人間は，「輪廻」を繰り返しながら，「理想」の「自由」を追い求める存在である。これが，シュタイナーのいう「自由」である。そして「カルマ」は，人間の「自由」を妨げるものではない。

私たちの運命，すなわちカルマが，絶対避けられない形で私たちに迫ってくることは，私たちの自由の妨げにはならない。なぜなら，私たちが行為をするとき，自分たちで手にした適度な自立性をもって，この運命に迫るからである。運命が行為するのではなく，私たちがこの運命の法則に従って行為する。／［略］私は一つの行為を私のカルマの必然的法則の意図通りに行うことしかできない。だがこの必然的法則を実行するのは私である。そして私に端を発する行為によって，新たなカルマが創造される［略］（ebd.,105）。

引用文にあるように，人間は「カルマ」という前もって定められた伝記通りにこの世を消化する存在ではない。「カルマ」を実行に移す人生のあり方によって，「自由」を得る可能性が生まれる。「自由」を「理想」として，その「自由」を永遠に追い求めるのが，シュタイナーのいう「輪廻とカルマ」である。

⑵ 「輪廻とカルマ」と教育の課題

シュタイナーは，論文「いかにカルマは作用するか」の最後の方のところで，教育の問題への橋渡しとなりうる論を加えている。彼は，個人のもつ「カルマ」とそれに対する第三者による援助について書いている。

人間の霊が以前の生において築いた運命の作用にたいして，私が何もできなことは確かである。だが重要なことは，その人間が自分の運命の正しい方向がわかること，そして彼が，新たな運命を古い運命の影響の下で創造することである。私が彼に援助の手を差し伸べるならば，彼が自らの行為を通して，自分の運命を恵まれた方向に転換することに，私は貢献できるかもしれない。私がこの援助をしないとするならば，もしかしたら逆のことが生じるかもしれない。もっとも，私の援助が賢明なものかあるいはそうでないかが重要なのだろうが（ebd., 105f.）。

シュタイナーがこの論文を書いたのは，1903年である。最初のヴァルドルフ学校が創設されたのは，1919年である。学校創設は，当時の経済的支援者からの依頼によるものであり，この論文執筆時は，教育や学校がシュタイナーの念頭になかったかもしれない。しかし上の論文執筆時すでに，教育の課題がシュタイナーに芽生えていたことになる。

ヴァルドルフ・アストリア・タバコ工場主から依頼を受けて創設された，ヴァルドルフ学校の教師のために，シュタイナーは何回かの連続講義を行う。その第１回目の講義において，シュタイナーは教育の課題を提示する。そこに集まった教師たちは，シュタイナーの「霊学」についての理解者であると考えられる。というのは，第１回目の講義の初めの方で，彼は次のように語るからである。

「今私たち一人ひとりは，霊界の存在たちの委託を受けて仕事をしようとしている。その霊的存在たちと，どのようにして結びつきを持つことが出来るのだろうか」―このことを今初めに考えたいのです。ですからこの言葉を，一つの祈りとして受け取ってください。それは，この課題を引き受ける私たちの背後に立ち，私たちに想像力と直観力を与えてくれる霊界の存在たちに対する祈りです（一般人間学，5）。

「霊界」という言葉が登場して，戸惑いを感じる教師はいなかったであろう。もし「霊学」の理解がないとするならば，シュタイナーの連続講義で話される，ヴァルドルフ学校の教育方針や教育課題などの意味が不明なものとなるだろう。「霊界の存在たち」は，学校で教育を引き受ける子どもが，誕生前にいた世界の「存在たち」のことである。シュタイナーは，「この地上の土地で，この人間存在のために，生まれるまでは高次の存在たちが行なってきた事柄を，私たちは継続していかなければならないのです（同上，７）。」という。ヴァルドルフ教育の課題は，「霊界」で行われたことの「継続」をこの世で行うことであるという。教育の対象となる子どもは，「輪廻」を経て，「カルマ」を携えてこの世に生を受けて，教師の前にいる。このような意味でヴァルドルフ学校の教師は，特別な課題を引き受けることになる。

偏見にとらわれずに観察しますと，地上に生まれてきた子どもの霊的魂，あるいは魂的霊は，身体とまだよく

結びついていないことに気がつきます。教育の課題は，霊的な観点から見ますと，この霊魂と身体との調和した結びつきの実現を意味するのです。この二つは互いに調和しなければなりません。［略］なぜなら，霊魂と身体とは，子どもが物質界に生まれたということだけでは，まだ結びついていないからです。教育者あるいは担任教師の課題は，この二つの部分の一致と調和をはかることにあるのです（同上，11）。

この世に生を受けた人間は，誕生時に「身体」を獲得する。その時彼は，「霊界」から「カルマ」を携えてきており，それを引用文では「霊的魂」といっている。つまり，「霊的魂」と「身体」が合体した状態で誕生する（註 3）。しかし，誕生時は，「霊」と「身体」が「調和」していないことから，両者の「一致と調和をはかること」が必要となる。「霊」と「身体」とを調和させることが，ヴァルドルフ教育の課題である，とシュタイナーはいう。このように，ヴァルドルフ教育の課題は，「輪廻とカルマ」にかかわる人間を教育の対象にするために，この世の一代限りの成長に視野をおくのではない。過去，現在，未来をも見据えたところに生じる。ここに，他の教育論・教育実践と異なる，ヴァルドルフ教育の独自性（異質性）がある。

3　シュタイナーから指導を受けた教師による「輪廻とカルマ」論の継承

前節のシュタイナーのいう「輪廻とカルマ」は，ヴァルドルフ教育者によってどのように継承されているのだろうか。まず，ヴァルドルフ学校においてシュタイナーから直接の指導を受けたとされる（註 4）エーリッヒ・ガーベルトのテキストに目を向けてみよう。

ヴァルドルフ学校連盟の研究文献シリーズ＜人間学と教育＞の第 1 番と第 2 番目が，ガーベルトの『自己教育と子どもの教育における罰』，及び『権威と自由－教育における母性と父性の要素』の 2 著である。この両文献は，ヴァルドルフ教育の原理と，生徒との関係における教師のあり方の基本などが書かれたもので，内容から判断しても，＜人間学と教育＞シリーズの最初の位置づけはふさわしい。

前節において，シュタイナーの教育言説が「輪廻とカルマ」を基礎にしていることを確認するために，シュタイナーのテキストを引用した。以下でみていくガーベルトのシュタイナー文献からの引用箇所は，貴重な情報を与えてくれる。ヴァルドルフ教育関係者が，シュタイナーの「輪廻とカルマ」の重要部分がどこにあるととらえているかがわかるからである。

(1)『自己教育及び子どもの教育における罰』における「輪廻とカルマ」

『自己教育及び子どもの教育における罰』は，独立した 2 つの論文からなる。前者は，「罰と自己教育」，後者は，「子どもの教育における罰」と題されている。両論文ともに，人間の倫理の養成が中心テーマであるが，前者は，人間の自己教育による倫理養成，後者は，教育者による子どもの倫理養成が主題になっている。ガーベルトがこのように最初に「倫理」を主題とし，「倫理」がヴァルドルフ教育の優先課題であることを示すことは，シュタイナー教育観の趣旨にそのまま沿うものである。シュタイナーは，第 1 回目の教師向けの講義を，次のように始める。「私たちの課題は，知的情緒的なものではなく，この上なく道徳的精神的なものです。そう考えた時はじめて，私たちは正しい態度をとることができるのです（一般人間学，5）」。

「自己教育における罰」のテーマは，上に書いたように人間の倫理の問題である。道徳性の発達において，「罰」が重要な作用をもつことが書かれている。ガーベルトは，まず日常生活や仕事と，倫理的行いの結果の対応の大きな違いを指摘する。

> エンジニアが新しく製造したマシーンに予想しない欠陥を発見したら，がっかりするだろうが，最終的に客観的な態度でそれを甘受するだろう。というのはマシーンのすべての組立活動は，客観的に行われるからである。倫理的な欠点が問題になる場合には，事情はまったく別である。この場合には，初めからその人間の人格的な特性，情熱，本能，衝動が大いに入り込んでくる（Strafe, 17）。

人間は，仕事や生活において，経験を重ねることによって成長する。例えばエンジニアのマシーン製造過程を考えてみるならば，もしその過程において，計画通りの結果が得られない場合，「苦悩体験」は避けられない。しかし失敗の原因を探り当初の計画通りの製品が完成するまで，その努力は継続される。その場合製品の欠陥は，エンジニアにとって製品製造のための手がかりを与えてくれる認識上の情報源となる。ガーベルトは，このような製造過程で生じる欠陥を「罰」と呼ぶ。そして，この「罰」は，現実の具体的客観的認識や行動の是正を促すものであり，エンジニアにとって「当然の罰 gerechte Strafe」（ebd., 18）として受け入れられやすい，という。学問に限らず，日常生活において，問題状況が正確な認識向上につながり，問題解決への道につながる場合がある。

その一方で，倫理面に関しては，仮に経験において生じる失敗に関する正しい認識を得たとしても，それが必ずしも問題解決につながらない場合がある。それは，失敗によって被る罰が，「当然の罰」として受け入れられにくいからである。なぜか。ガーベルトは次のように書いている。

> 人間がその道徳性や性格上の欠点や弱さから犯す過誤行為の場合，認識の欠如に対するのと同じように努力して，理解が深められることはない。逆である。道徳においては，願望，欺瞞，見せかけが，強い影響力をもって繰り返し干渉する（ebd., 11f.）。

倫理に関しては，自分の性格や行為の結果についての正確な認識が蓄積されたとしても，そのことが，必ずしも倫

理向上につながらない理由が書かれている。倫理的行動を方向づけるのは，正しい認識よりも，個人的，恣意的な願望などだというのである。

> 自分をまったくの理想主義者のように思えることは，自分に不都合な現実の具体的客観的認識に苦労しながらかかわるよりもはるかに快い。この潜在意識は，真の自己認識に何度も抵抗し，自分の弱点をベールで隠し，生じた不愉快な行為を言いつくろう（ebd., 13）。

ガーベルトは，自分の行動に反省が必要な場合に，正しい認識が前進させることがあるが，場合によってもっとそれ以上に強く作用する要因を，人間は本来的に持っている。それは，引用文にある「潜在意識」である。人間は，「苦悩体験」をしたとしても，この「潜在意識」の抵抗によって，自分の弱点から招いた事象を「当然の罰」として甘受しにくい。

しかしそのような状況においても，人間は，4つの要因がそろえば「当然の罰」を受け入れることができる，という。「第 1 は，それがたとえ別人の行うことの鏡像の中であれ，自分の行ったことの結果の中に見出されるものであれ，具象的な直観。／第 2 は，行為の結果の中にある，すべての主観的観念や感情から離れた，まぎれもない客観的事実。／第 3 は，直観的な苦悩，あるいは行為結果の反動により体験される苦悩による，感情（後悔の念）の覚醒。／第 4 は，将来に向けての償い，道徳的埋め合わせ，行いの改善のための（行動による悔悟の）意志を伴う決心」（ebd., 21f. ）。この 4 つの要因である。

これらの要因が満たされたとき，自らの行為によって招いた結果を「当然の罰」として受け止めることができ，倫理上の発達が達成されるとされる。しかし，とガーベルトは続ける，「後悔する罪人の願望にもかかわらず，咎められるべき行為の償い補償が，もはや全く生じえない場合も，しばしばあるだろう」（ebd., 24）と。つまり，日常の生活において，当然甘んじるべき「当然の罰」がすり抜けられる場合も，人間の生涯において少なからずあるというのである。もしそうであるとするならば，人間の倫理に対する根本的な解決策はないことになる。

⑵ 「カルマ」と「浄化期間」

ここで，シュタイナーの「輪廻とカルマ」が登場する。この問題について，ガーベルトが参考にし，引用しているのは，シュタイナーの「神秘学概論」の「眠りと死」の部分である。「輪廻とカルマ」が，どのように関わってくるのか。ガーベルトは，人生において受けるべきであった「当然の罰」がすり抜けられたとき，それを「確実に」行うのが，死後の「浄化期間」であるという。彼は，「死後の浄化の期間と宿命（カルマ）の法則」という節を設けて，「神秘学概論」に示されている，死後の「浄化期間」において，「生前の欲望の世界が焼き尽くされ，新たな課題をもって，再受肉される」（ebd., 28ff. ）という趣旨のシュタイナーの言説を，解説を加えながら抜粋する。そして「浄化期間」の有効性を次のようにまとめる。

> 具象的直観，変更できない客観性，意識への苦痛に満ちた深い介入，そして償いの意志，これらのすべての要因が，今比類のないくらい大きな力と勢いをもって生じているにすぎない。「深部への作用」，意志決定につながる意識の広がりもまた，かつての地上生活において可能であったのと比べものにならないくらい徹底している。なぜなら霊界では，人間が道徳的意志の方向や意志の力として次の地上生活へと持ち込み，その道徳的性格を示すだろうものと同じ決断がなされるからである（ebd., 30f. ）。

例外なく死を迎える人間は，必然的に「霊界」における「浄化期間」を通過する。そこでは，生前において「当然の罰」をすり抜けた事実もすべて「燃えつくされ」[註5]「浄化」される。ガーベルトは，このようなシュタイナーの「輪廻とカルマ」論をそのまま受容し，次のように結論づける。

> 自分の近視眼的なエゴイズムを克服し，深い洞察へと導き，それによって自分の意志を決定させるための確実な手段は，まさに死後の浄化期間である（ebd., 32）。

ガーベルトが，シュタイナーの「輪廻とカルマ」において重要視していることの一つは，引用文のように「死後の浄化」である。「死後の浄化」に，「カルマ」に関する叙述が続く。ガーベルトはシュタイナーテキストからの引用を次の部分で閉じる。

> 死の直後，一種の記憶像が人間の自我のまえに現われたように，いま，来たるべき人生の予見像が現われる。このときに人間が見る画像は，人間がさらに進化するなら取り払わねばならない妨害のすべてを示す。そのようにして人間が見るものが，新しい人生にたずさえていかねばならない力の出発点となる。自我がふたたび人生のなかに歩み入るとき，前世において他者に与えた苦痛の像が，その苦痛を代償するように自我を駆り立てる力になる。このように，前世は新しい人生を規定する。新しい人生の行為の原因は，前世の行為にある（神秘学概論，117-118）。

引用文は，シュタイナーが「輪廻とカルマ」について叙述している箇所である。ガーベルトは，「前世は新しい人生を規定する。新しい人生の行為の原因は，前世の行為にある」という「カルマ」論をそのまま受けとめている。人間は，「カルマ」を背負ってこの世に誕生するとするならば，人間は「カルマ」とどのように向き合えばよいのだろうか。シュタイナーにとって「霊界」で起きることは，すべて詳らかであり，「カルマ」の性格についても不明なところは

ない。それを受容するガーベルトの言動も明確である。

普遍的なカルマの認識は，自分の運命のつながりについての明るい認識をも必然的に伴う。だが自分のカルマが意識によって何度もとらえられると，従来まだ作用しなかった要因が，その都度新たに意識に組込まれる。人間は，自分の宿命に積極的に取り組み始める。カルマは，人間の洞察や意志と無関係ではない。カルマは，そのまま宿命を定めるわけでも，見えない，変えることのできない運命でもない。そうではなくそれは，すべての罪が一度その償いを見出さなければならなかったり，人間がそれぞれの時点で，この償いに自分から関与し始めることができたりするほどに，確かなものでもある。そして人間の洞察は，鋭く，深く，広範囲であれば，それだけ一層強く働きうる（ebd., 32f. ）。

人間は，「カルマ」を背負ってこの世に生を持つ。但し「カルマ」は，人間の生をもっぱら運命づけるだけではない。人間自身が，自らの「カルマ」に対する洞察を持ち，積極的に取り組むならば，運命を変えることができる。「カルマ」はそのような性格を持つものだと，引用文に書かれている。

さらにガーベルトは，シュタイナーの「輪廻とカルマ」論を日常の教育において，どのように受けとめることができるかを次のように書いている。

教育者にとっての最強の援助は，自分が繰り返しかかわる人間本性としての子どもについての観念 Gedanken である。例えば，教育者は，この世において彼のさらなる霊的発達と完全化に努力し，手助けをするために，目の前にいる子どもの肉体的－魂の形態の中に，その真の，高次の本性をまだ完全には目にしていないこと，霊界に根ざし，この地上に生を得た例の高次の存在を目にしていないという観念，このような観念は，子どもの人格との，必要で，語られることはないが支える力のある結びつきを確立するために，教師の最強の支援でありうる（ebd., 114）。

シュタイナーの「輪廻とカルマ」論がヴァルドルフ教育の根底にあることを，ガーベルトは断言している。ここに，ヴァルドルフ内部においては確固とした共通理念であるにもかかわらず，外部からはわかりにくい，ヴァルドルフ教育の特徴が顕れる。「教師の最強の支援」は，教育とは何かという，教師がヴァルドルフ教育の使命を自覚させることに作用する。教育とは，この世に誕生した子どもが，その生まれながらに持つ才能を開花させ，社会人として成長するための準備を整えることという，一般に異論のない使命を持つものではない。そうではなく，人間は，「カルマ」を抱いて「輪廻」をし，「高次の本性」へと常に進化する存在である。教育は，過去，現在，未来への途上においてなされるものである。このために，教師にまず一番に必要とされることは，「子どもの人格」との「結びつき」である。授業力，教育力が問われる以前に，教師に，この課題を自覚させるという意味で，「輪廻とカルマ」論が根底にある(註6)。以上のガーベルトの論は，シュタイナーの「輪廻とカルマ」論及びその教育課題についても，忠実に継承していることが確認された。

上で検討したガーベルトの文献は，既述したように，ヴァルドルフ学校連盟の研究文献シリーズ＜人間学と教育＞の第 1 番目に位置づけられている。つまり，研究文献の第 1 番目において，ヴァルドルフ学校の教育課題が，明示されている。この文献で，シュタイナーの「輪廻とカルマ」が重要なものとして論じられている。その意味は小さくない。すなわちヴァルドルフ教育内において，「輪廻とカルマ」が重要な核であることを認識させ，そこから生まれる教育課題を共有させるものになっている。

この「輪廻とカルマ」論は，ガーベルト以後，ヴァルドルフ教育において引き続き忠実に継承されている。このことを確認するために，ヴァルドルフ教育の専門誌 *Erziehungskunst* に掲載された論文を取り上げる。2004年 4 月号は，「輪廻とカルマ」の特集号であった。その巻頭言に，編集者による注目すべき記述がある。第 1 に，ヴァルドルフ教育の本質的な，問題の核心は，「輪廻とカルマ」にあると書かれている（S. 385）。この基本的理解が，この号の編集方針になっているはずである。第 2 に，*Erziehungskunst* が，このテーマを扱ったのは初めてだ，と書かれている（ebd. ）。この編者の言から読み取ることができるのは，ヴァルドルフ教育内では，シュタイナーの「輪廻とカルマ」論が教育の核心部分であるという共通認識にもかかわらず，従来，そのことを外部に向けて情報発信することには慎重であったという点である。この点を考えるならば，*Erziehungskunst* が，周到な準備をし，執筆者の選定に慎重を期し，論文内容を十分に吟味したであろうことは想像できる。「輪廻とカルマ」に関する 9 本の論文と，1つのインタビューが掲載されている。いずれの論文においても，上で確認した編集者の巻頭言にある主題が，言葉を変えた形で語られている。本稿では，紙数の関係から 2 本の論文を取り上げる。

4　現職教師による「輪廻とカルマ」論の受容と継承

ウヴェ・ベルマン(註7) の論文の書き出しは，「輪廻とカルマ」思想が「人智学的教育学」，すなわちヴァルドルフ教育学の核心であるという主張から始まる。

輪廻とカルマの思想は，人智学の中心的理念のひとつである。この思想は，真の人間認識の鍵であり，人智学に基づくすべての教育に基盤を提供する。このことから，輪廻とカルマ思想を取り入れない共同体教育や教育を，人智学的と呼ぶことはできない（Schicksal, 435）。

ベルマンによれば，「輪廻とカルマ」は，ヴァルドルフ教育の核心である。この引用文では，ガーベルトの記述よりも，明確な表現がなされている。ヴァルドルフ教育の実

践に裏打ちされた確信のようなものを読み取ることができる。教育において，それ以前に人間理解に際して，「輪廻とカルマ」は，どのような役割を果たすのだろうか。

> 人間の生涯を観察する際に視野を狭めることは，現代を特徴づけるあらゆる社会生活上の障害の主原因になっている。視角を自己制限して，諸能力や弱さの原因を一つの人生にのみ探る者は，誤った判断にならざるをえない（ebd.）。

まずベルマンは，誕生から死に至るまでを一生涯として人間をとらえるやり方を，矮小化した人間像とみなす。そのような人間のとらえ方からは，本来あるべき人間教育の道筋はみえてこない，引用文にはそのように書かれている。そして，「輪廻とカルマ」の理解がなければ，その者がもって生まれた本来あるべき運命に対する手助けができない，という（ebd.）。その意味では，子どもの「カルマ」を認識することは，その子どもが持って生まれた運命を開花するために，教師に必要である，という論理になる。

ベルマンは，「カルマ」はある人間の行動に対して作用するというのだが，もう一方においてそのように「カルマ」によって条件づけられた地上生活の中で，人間の「自由」な行為が，必然的に未来の影響を作り出す，ともいう。「カルマ」と「自由」は一見相反するようであるが，ベルマンの主張は，先にみたシュタイナーの「カルマ」のとらえ方に沿うものである。

そして次のように続ける。

> 私たちは，古いカルマを「使い果たす」だけではなく，まさしく常に新しいカルマをも作り出すことによって，このカルマの観念は，自由の観念と矛盾しない（ebd., 436）。

引用文でベルマンは，「カルマ」には「霊界」から引き継いだ部分と，この世で自らが創造する部分があるといっている。つまり，人間は「カルマ」に運命づけられている存在であると同時に，運命を作り出す存在でもあるという。ベルマンは，人間の日常生活が「カルマ」によるつながりで成り立っていることを意識する必要があるという。人間は，「カルマ」とのつながりを意識することによって，人間生活の何が変わるというのだろうか。ベルマンは，これについて2点強調している。

「カルマは，原因と結果の法則そのものである」（ebd.）。このことを意識することは，生活の出来事や様々な人との間に起こる出会いなどは，重要なものであれ，すぐに忘れ去られるものであれ，自分の過去の行為の結果から生じていることを意識するということである。意識を現在におけば，今感じ思考し行動していることが，自分の後の生活の結果につながるという自覚が生まれる。すなわち，「カルマ」を意識することによって，現実の生活への視野が過去，現在そして未来のつながりへと広くなり，自分のあらゆる行為をしだいに「責任感の強いものにする」（ebd.）という。

次にベルマンは，「カルマ」思想は，生活に「安心感」をもたらすという。「カルマ」を，生まれながらの運命とだけとらえるならば，宿命以外の何物でもなくなる。しかし上のように，「カルマ」を過去，現在，未来のつながりをもつと捉えるならば，「解放的なものとして」「カルマ」を認識する視点が生まれる。すなわち，現在のあらゆる行為が未来につながるという視点が得られるならば，現在の生活において，過去の埋め合わせをすることによって，未来をよりよいものにできるという「安心感」が生まれるというのである。「カルマ」認識はこのように，一部の超能力者に委ねられているのではなく，現実の生活に対する内面的な姿勢に影響を与えるものであることを，論理的に考えることのできる人間なら誰でも理解できる。諸現象と「カルマ」のつながりに，恒常的に取り組むことによって，過去，現在そして未来の複雑なつながりが理解できるようになる，そのようにベルマンはいう（ebd.）。

学校教育においてこの「カルマ」認識は，どのように活用されるのだろうか。上でみたように，「カルマ」には新旧あり，新しい「カルマ」の創造は，人間の「自由」な行為である。この新しい「カルマ」の創造をどの成長段階からできるようになるかととらえるかによって，教育の在り方が異なってくる。この「カルマ」と子どもとの関係は，ヴァルドルフ教育ではどのように捉えられているのだろうか。

> 子どもの行為が，携えてきた能力や素質によって規定され，そして主に内在的法則性に従って外的な出来事や出会いに対して反応する期間は，子どもが自分で新しいカルマを創造することはできない。人間は，自分の環境と素質から解放される程度に応じて，自らカルマを創造できるようになる（ebd., 436f.）。

引用文の解釈として，ヴァルドルフ教育で言われるいわゆる「第1七年期」の子どもは，もっぱら誕生時にもっている「カルマ」に従う存在としてとらえられている。「自分の環境と素質から解放される」時期は，いわゆる「第2七年期」の初め頃と考えてよいだろう。乳幼児期の段階の子どもは，もっぱら「カルマ」を生きる存在としてとらえられている。そして，「自分の環境と素質から解放される」就学年齢期以降においては，子どもたちの「カルマ」を正しく認識し，教育することが必要になる。このことは，この時期の教育において，教師に「権威」が求められ，しかも8年間一貫して担任を受け持つことと密接に関連している。また，子ども一人ひとりの「カルマ」理解は，十分な時間をかけてこそ可能となる。そのために8年というスパンでもって1人の教師が，同じ子どもたちを担当することになっている。ベルマンが主張するように，シュタイナーの「輪廻とカルマ」論は，ヴァルドルフ教育の重要な基盤になっている。

そしてベルマンが言うように，教育が「純粋にカルマの

出来事」(ebd., 437) であるとするならば，教師と子どもとの出会いそのものが，偶然のものではなく，「カルマ」によって出会うべく定められたものである。そしてこの「カルマ」による出会いは，教員同士そして子どもたちの父母にまで広げた，共同体全体が「カルマ」によって結びついていることを意味する。この意味をしっかり意識することが教師の重要な課題となる。なぜなら，それによって学校内で起こる教育活動，出来事に対する見方が，「カルマ」認識を持たない場合と異なってくるからである。ヴァルドルフ学校が，一つの「共同体」であろうとするところに，この学校の特色の一つがあるが，これもシュタイナーの「カルマ」のとらえ方から発展したものであると考えることもできる。

ベルマンによれば，「カルマ」認識は，教育上困難が生じたときに，能力を伸ばしたり，発達を促したりするために必要であるという。そしてそれは，8年間同じクラスを担当するクラス担任に特に当てはまるという（ebd., 438)。

担任教師は，ある子どもの教育や指導がうまくいかないとき，その原因を探るために，通常行われるような多面的な情報を得るだけでなく，今の困難を引き起こしていると考えられる「カルマ」に目を向ける必要がある，そのようにベルマンはいう（ebd.)。この論文では，教師による「カルマ」認識の具体的なやり方については触れられていない。したがって，「カルマ」認識による教育が，望ましいものであり，効力を発揮するものであるのか，この点の検証をするための情報は，この論文にはない。

いずれにせよ，以上みたベルマンの「輪廻とカルマ」とその教育における位置づけ論は，ガーベルトと同様に，シュタイナーの忠実な継承に努めていることを示している。

ベルマンは，この論文の最後の方で，教師が日常の教育実践の中で，子どもの「カルマ」を何度も思い起こし，教育に応用する共同の努力が教師に必要であると書いている。そして最後に，未熟者教師に対するシュタイナーの励ましの言葉の引用で終わっている。このことをヴァルドルフ教育関係者以外の視点で推測するならば，ヴァルドルフ学校現場では，「カルマ」の重要性が認識されながら，ヴァルドルフ教育実践が既に確立され，「カルマ」への顧慮抜きに教育が可能になっているという現実を物語っているかもしれない。こうした現実は，外部の者による記述によって，よりはっきりと語られる。

5　外部の視点からのヴァルドルフ教育における「輪廻とカルマ」の継承

ヴァレンティン・ヴェムバー(註8) は，ギムナジウムの教師である。ヴァルドルフ学校に所属していないために，ヴァルドルフ教育について，外部の視点からの発言もみられる。シュタイナーの「霊学」がヴァルドルフ教育内で，どのように受容されているかについての現状が，比較的冷静に語られているように思われる。論文は，次のように始まる。

> 輪廻とカルマは，人智学において中心の位置を占めるにもかかわらず，それがヴァルドルフ教育とその80年以上にわたる教育実践のために語られることはない。そのことは，個々の教師たちにとって輪廻とカルマの問題が，自分たちの教育にきわめて重要な意味をもつということと矛盾しない。教師たちは，担当する子どもたちの過去，現在そして未来の運命を問う。教師たちは，このように問いながら生活し，この生活から，教育活動のためのインスピレーションを得る（Pädagogik, 402)。

「輪廻とカルマ問題」は，「教育に極めて重要な意味をもつ」ものであり，教師は「子どもたちの過去，現在そして未来の運命を問う」という。この教育の核のとらえ方は，先の二人のヴァルドルフ教育者と何ら変わるものではない。その核の部分が語られない事実を指摘していることに，ヴェムバーの論文では注目すべきであろう。彼は，次のように続ける。

> 一般に知られているいわゆる「ヴァルドルフのエッセンス」でさえ、通常「輪廻とカルマ」と直接関連を持たせられていない。エポック授業、クラス担任制、点数評価がない、落第がない、オイリュトミーの授業、１年生から始める外国語、芸術教科や芸術的授業法の重視、これらのいわゆる「エッセンス」は、輪廻とカルマの背景を欠いても実現することができる。また人智学者として自認せず、あるいは人智学に対してもむしろ静観したり懐疑的な態度をとったりする、ヴァルドルフ学校の現場教師たちがしだいに増えてさえいる。そのことは，彼らが上に挙げた原理やその他の原理を，教育的に意味があり，望ましい価値があるとみなしたり，これらの原理に従って教育したりすることの妨げにはならない（ebd.)。

このヴェムバーの発言は，現在のヴァルドルフ学校の現状の一端を述べているものである。しかし，大変重要な発言でもある。つまり，ヴァルドルフ教育は「輪廻とカルマ」と密接に結びつきながら，あるいはこれらを前提にして構築されている一方で，ヴァルドルフ学校の教師は，「人智学（霊学)」に対する姿勢に関係なく実践できるよ，と精神的な意味での「霊学」抜きの教育実践の現状を語っているからである。

またヴェムバーは，1996年ヴァルドルフ学校の世界教師会議において，「輪廻」が初めて中心テーマになったと書いている。その中で「輪廻とカルマの理念が背景にないとするならば，教育の何が変わるか」という疑問が出され，それに対する答えとして，ほとんど変わらない，という回答があったことを報告している。そして多くの教師の場合，日常の教育実践が「輪廻とカルマ」問題と関わらない形で行われているという現状があるとも書いている。具体的な情報源が示されているわけではないので，どの程度のヴァルドルフ教師に当てはまるかは分からないが，少なくともヴァルドルフ学校現場の一端を報告するものとして注目される。但し，この報告の最後のところでは，「輪廻」と教育との本来の関係についてヴェムバーは，次のように書い

ている。

ヴァルドルフ教育全体の核は，輪廻とカルマが中心的事実になっている人間像にある。より正確にいえば，ヴァルドルフ教育は，その核心部分で，「霊学的」研究によって得られた人間像を前提にする。この人間像において輪廻とカルマは，霊的な経験的諸事実であり，信条でも，幻視がもたらしたものでもない（ebd.,402f.）。

ヴァルドルフ学校の実情として，「霊学」が念頭にない実践が行われていることを認めながら，ヴェムバーは，ヴァルドルフ教育のよって立つ根拠を引用文のようにいう。そして，次のように続ける。

ヴァルドルフ教育の方法論は，シュタイナーが描写している霊の探求法によって得られた人間像に基づいている。この方法論のすべては，人間の個別の霊が輪廻を通り抜けるという人間認識を基礎にしている。ことの真相は，霊探究者にとって，そして適合する経験を自力で追体験し，みずから体験したその弟子たちにとってのみわかることである。事実である証拠はない。だがこの認識過程のステップは，合理的に追体験することができる。〔略〕そしてこのような成果に基づくヴァルドルフ学校の教育方法論は，十分な理解をもって応用され，実践において有効であると証明される，真理発見を助ける教育仮説になっている（ebd., 405）。

引用文は，要するに，「霊」体験が事実であることに疑問をさしはさまないが，その真相の証拠はないといっている。「霊」体験者しかこの領域の真実性を知ることができない。ヴェムバーは，シュタイナーの「霊」体験を否定しないが，同時に，この「霊」体験は関係者以外立ち入りできない領域であると，部外者からの視点の発言をしている。

ここでは，「霊」体験の真実性について判断する場ではない。引用文の「このような成果に基づくヴァルドルフ学校の教育方法論は，」「真理発見を助ける教育仮説になっている」，というヴェムバーの判断に注目したい。

ヴェムバーによれば，「輪廻とカルマ」認識の教育への有効性の第１は，「教育の基本姿勢」が促進される点であるといい，次のように続ける。

教師なら誰でも，生徒の永遠の本性が不可侵のものであることを知っている。この本性は，教師によって教育できるものでもない。すべての教育は，結局のところこの背景を見すえながら，子どもの中でその本性がしだいに開かれるような教育を目指すことができるだけである。すべての教育は，この輪廻する本性がもつ身体と魂の器に向けられるのであり，この２つの器が相互に調和するように手助けするという大きな課題をもっている（ebd.）。

生徒は，「輪廻とカルマ」を自分の本性としてもった状態で，誕生する。教師は，生徒の「輪廻とカルマ」の部分に畏敬の念をもつべきであり，この部分に対して教育指導を行うことはできない，という認識が必要だ，と引用文にある。だとするならば，教育の課題とは何か。それは，生徒の本性であるところの「身体」と「魂」相互の調和を援助することである。この教育課題は，シュタイナーが教師の前で提示した課題である。

ヴェムバーは，この課題のために行われるヴァルドルフ教育の例を，2点挙げている。最初の例は，気質 Temperament と本性 Wesen との違いを区別するというものである。気質は，「身体」に対応するものであり，本性は，「魂」に対応するものである。すなわち，気質は，生徒のこの世における仮の器であり，本性は，「霊界」から持ち込んだものである。ヴァルドルフにおける教育課題は，本性に調和するように気質に働きかけることである。ヴェムバーは，次のように書いている。

（略）教育の課題は，気質がこの生徒の個性を妨げたり隠したりするのではなく，健全に生徒の意のままになるように働きかけることにある。それゆえ，教師はこのやり方で生徒の気質を調整し，コントロールできる手助けの仕事をするとき，輪廻を経て，器としての気質を用いようとする生徒の永遠の個性に奉仕することで，手助けしていることを認識する（ebd., 406）。

短く書かれているもう１例では，子どもに内在する，「身体」を形成する造形力が「前世」の生に根源があることを理解し，その子どもの音楽や言語の能力は，将来開かれる一種の芽として理解するとき，教師は教育の課題を正しく理解することになる，とされる（ebd.）。

上でいわれていることを，これまでの表現で言い直すと，「輪廻とカルマ」とつながっている「身体」の造形力は，教師にとって不可侵の部分である。そして音楽や言語能力が「身体」の造形力と調和しながら発達するよう手助けすることが，教育の課題ということになる。

ヴェムバーの以上の記述は，人間が，「霊界」から持ち込まれた部分と，この世界の誕生によって新たに得られた部分からなるととらえられ，両者の調和的発達が，教育の課題であるというシュタイナーの主張が，ヴァルドルフ教育において，そのまま受容，継承されている現状を，追認するものである。但し，このいわゆる「魂」と「身体」とを区別する境界線が，教育実践の場でどのようにひかれているのかは，ヴェムバーの記述では明確ではない。

また，先に触れたことだが，各生徒の「霊界」から持ち込んだものの認識なしに，教育実践している教師の実態に関する記述があった。こうした事実について，ヴェムバーは次のように書いている。

もちろんヴァルドルフ教育のこれらの教育上の試みや手法さえ，輪廻とカルマについての確信がなくとも適用

することはできる。しかしその場合教育の試みや手法は，そのリアルな根拠を失ってしまう（ebd.）。

引用文のようにヴェムバーは，「輪廻とカルマ」についての理解や認識がなくとも，シュタイナー理論に基づいて既に築かれた教育方法を，日常的に実践することは可能であるといっている。その一方で，「霊学」の認識の欠如は，その教育方法のよって立つ根拠を失うことだと彼は書いている。彼は，これについて引用文以外のことはいっていないので，「霊的」認識のない教育実践に対する彼の評価判断は，示されているとは言えない。

ヴェムバーの「輪廻とカルマ」の本質を語る部分は，シュタイナーを受容し，継承したガーベルト，あるいはベルマンのそれと重なるものであり，ヴェムバー独自の論ではもちろんない。しかし，それ以外の，とくにシュタイナーの「輪廻とカルマ」論が，日常のヴァルドルフ学校実践において，教師によって意識されない現状もあるという指摘は，注目すべきである。*Erziehungskunst* に掲載されたヴェムバー論文は，部外者である彼にしかできない役割をになったといえる。

6　結論：ヴァルドルフ教育における「輪廻とカルマ」の継承

シュタイナーの「輪廻とカルマ」論が，ヴァルドルフ教育関係者によって，忠実に継承されていることが，ガーベルト，ベルマンの論文の検討によって明らかになった。「輪廻とカルマ」論の教育的意義は，ヴァルドルフ教育における教育課題は，第一に人間の「倫理」にあることを明示していることである。また，教育対象である子ども（人間）のとらえ方，教師生徒関係のあり方についての教育の原理を提供していることにある。さらに，部外者のヴェムバーの論文によって，この問題を巡るヴァルドルフ学校内の現実的状況を示唆する情報も得られた。これらの点を，以下のようにまとめることにしたい。

第 1 に，ヴァルドルフ教育の後継者は，「超感覚」でしかとらえることのできないシュタイナーの「霊学」を，そのまま受け入れ継承している。上で取り上げたすべての論文において，シュタイナーの「輪廻とカルマ」に対する疑義はみられない。各論者は，もっぱらそれを，教育の分野でどのように活かすことができるかに念頭をおいた考察をしている。ヴァルドルフ教育の特色は，ヴァルドルフ教育関係者が，「霊学」を源泉とするシュタイナーの教育論研究，およびその実践化を通して，「共同体」意識を強く持っていることにある。

第 2 に，ヴァルドルフ教育においては，「輪廻とカルマ」は，教育の課題を明示するがゆえに教育の中核にあると，受けとめられていることが明らかになった。「輪廻とカルマ」論は，既にみたように，生徒の過去，現在，未来までを見すえた課題を提示する。そして教育の出発点としての教師生徒が，教え，教えられるという関係以前に，相互に「カルマ」を抱いた「個」と「個」との関係であるという基本的認識を，教師に明示する。

「輪廻とカルマ」から，人間は，絶対的な尊厳を持つ存在であるという「人間観」が得られる。教師の口からよく言われる「一人ひとり」の子どもの意味は，普通の学校で言われるそれより，極めて重い。ヴァルドルフ学校における「一人ひとり」は，教師であるからといって，子どもが携えている「個」に安易に踏み込むことはできないことを意味する。教師と生徒との関係は，上下の関係ではなく，年齢の違いの関係でもなく，対等でもなく，まさに人間の「個」対「個」の関係が原則になる。ここに，ヴァルドルフ教育の他の教育と比較できない，独自性の一つがある。ヴァルドルフ教育で言われる教師の「権威」は，このような背景の認識なくして，正しく理解することはできない。本稿では，ヴァルドルフ教育における教師の生徒との関わりにおいて，「輪廻とカルマ」の理念が根本にあることなどを確認できたに過ぎないのだが。

第 3 に，「輪廻とカルマ」は，人間形成というヴァルドルフ学校の重要課題の基礎になっている。ここでの人間形成の課題は，子どもの「個」の発達にある。「個」の発達は，「個」の生きる社会に適応することでも，社会に必要とされる能力を身につけることでもない。「個」の発達課題は，誕生以前に定められているものであり，現世でその課題を達成することが人間に課されていると，とらえられている。しかし，「個」が携えている「カルマ」は，その人間の現世の生き方を宿命づけているだけではない。「個」は，現世において自らの「カルマ」に従うだけではなく，新たな面を創造することができる。ヴァルドルフ教育では，このことに人間の「自由」があるととらえられている。子どもの「個」を見定め，「個」の「自由」が開花するために，環境を整える役割を担うのが，ヴァルドルフ学校の教師である。

第 4 に，「輪廻とカルマ」論が，ヴァルドルフ教育にしっかりと根づいている。根づいているの意味は，シュタイナーの「輪廻とカルマ」を継承したリーダー的後継者たちによって，この論が教育理念となり，その理念が，ヴェムバーの表現を借りれば，「ヴァルドルフのエッセンス」に浸透しているということである。この理念は，ヴァルドルフ学校の教師の教育実践，本稿で確認できたことに限れば，生徒との人間的な取り組みの基本的指針になりえている。

第 5 に，シュタイナーの「霊学」「輪廻とカルマ」を意識することなく，ヴァルドルフ教育は実践されている，あるいは実践可能であるという現状がある。このことは，第 4 で確認したことの裏返しである。これに関しては，とりわけヴァルドルフ教育外部の教師，ヴェムバーの論文からうかがうことができる。一般人が，「超感覚」によって認識される「霊学」に対して違和感を覚えることが，ヴァルドルフ学校の教師にないとはいえないだろう。

さらに，ヴァルドルフ教育全体の経験的蓄積もかなり進んでいる。つまり，教師が教育実践する際に，全体として蓄積された教育成果が，例えば先にふれた＜人間学と教育＞シリーズの著書などが，教師の日常の教育において参

考にできる領域を拡大させている。そのような環境において，教師一人ひとりの独自の創意工夫は当然ある一方で，シュタイナーの「霊学」というヴァルドルフ教育の根本が，教育内容や方法に，自然な形で浸透して，日常の教育実践において顧みられない状況は生じうるかもしれない。*Erziehungskunst* において，シュタイナー思想や，「輪廻とカルマ」の特集が組まれるという事実は，このような状況を物語っている。この状況は，ヴァルドルフ学校の教育内容，教育方法のこれまでの蓄積が共有化され，ある種マニュアル化されていることの裏返しであるといえるかもしれない。

＜註＞

(1) 参考文献１などを参照のこと。

(2) シュタイナーは，インド思想と仏教に関心をもち，論文や多くの講演の中で言及しているが，専門的な仏教学を研究した形跡はない，と新田義之氏は書いている（この註にある文献の64頁）。筆者も同意見である。本稿では，仏教などでいわれている「カルマ」という表現を使いながら，シュタイナーは，独自の「カルマ」を論じていると理解する。なお，シュタイナーの仏教理解をおおよそ判断できる論文「仏陀（Budda）」が，翻訳されている。シュタイナー，新田義之訳「仏陀」，『人智学・神秘主義・仏教』，1986年，人智学出版社，（25-60頁）。

(3) 「いかにカルマは作用するか」では，「霊 Geist」「魂 Seele」「身体 Leib（Körper）」が区別され，「霊」と「魂」が結合したものが「霊魂 Geist − Seele」と説明されている（Karma, 99）。「一般人間学」では，「霊魂 Geistseele」と「身体 Leibeskörper」が使われている。参考文献５も参照のこと。

(4) 参考文献６の1997年版が出た際に，E．ガーベルトの略歴が論文の前に記載されている。その中に，「ルドルフ・シュタイナーが指導したシュトゥットガルトヴァルドルフ学校の教職員に任命された最後の教師であった」（S. 7）とある。

(5) シュタイナーは次のように表現している。「ある対象が火に捕えられ，燃え尽きるように，いま述べた欲望の世界は崩壊し，消え去る」（神秘学概論，103）。

(6) *Erziehungskunst* 上で，アカデミズムの批判者の代表格である，ハイナー・ウルリッヒが，ヴァルドルフ学校教師の授業力に疑問を呈し，教員養成において専門的知識の教育が優先されていないと批判したのに対し，ヴァルドルフ教員養成の当事者であるヴァルター・リートミュラーが，決然と，肝心なことは，生徒との「有益な関係」を確立すること，自らの全魂で生徒の「本性の中にもぐりこむこと」である，という趣旨の発言をして応酬した。この発言の真意は，その背景にある「輪廻とカルマ」論が結びつかないと，十分に理解できないと思われる。参考文献１（36〜37頁）。

(7) U．ベルマンは，ハンブルクにあるルドルフ・シュタイナー学校でコンピュータ教育を担当している。なお，彼の引用文献はすべてシュタイナーのものである。GA（Gesamtausgabe）130『秘教的キリスト教と人類の霊的指導』，GA178『人間の心魂の中での個体的神霊存在の働き』，GA294『教育芸術』（筑摩書房など），GA300 『自由ヴァルドルフ学校の教員会議』，GA303『子どもの健全な成長』（アルテ），GA311『人間理解からの教育』（筑摩書房）。以上のすべては講演集である。GA130と GA178は，いわゆる「人智学」協会員対象に行われており，本来外部には公開されない秘教的な性格のものである。

(8) V. ヴェムバーは，シュトゥットガルトにあるギムナジウム上級学年の，ドイツ語と歴史の教師である。ヴァルドルフ学校を訪問しているとされる。立場はどうであれ，ヴァルドルフ教育専門誌 *Erziehungskunst* に論文が掲載されていることから判断すれば，ヴァルドルフ教育との精神的距離は，小さいといわなければならない。なお，引用文献は，すべてシュタイナーのものである。GA９『神智学』（イザラ書房など），GA13『神秘学概論』（イザラ書房など），GA35「哲学・人智学論集」（論文集），GA65「中欧の精神生活から」（講演），GA303『子どもの健全な成長』（アルテ）。このうち，GA35と GA65以外は，日本語に訳されていることからもわかるように，ヴァルドルフ教育を理解するうえでの基本文献である。

＜引 用 文 献＞

(1) R. シュタイナー，松浦賢訳『霊学の観点からの子どもの教育』（1999年，イザラ書房）「**子どもの教育**」と略す。

(2) Rudolf, Steiner：Die Erziehung des Kindes vom Gesichtspunkte der Geisteswissenschaft, 1921, Philosophisch-anthroposophischer Verlag. **Kind** と略す。

(3) R. シュタイナー，西川隆範訳『**神秘学概論**』（1997年，イザラ書房）「神秘学概論」と記す。

(4) R.Steiner：Reinkarnation und Karma, vom Standpunkte der modernen Naturwissenschaft notwendige Vorstellungen. In：Lucifer - Gnosis, 1987, Rudolf Steiner Verlag. **Reinkarnation** と略す。

(5) R.Steiner：Wie Karma wirkt. In：Lucifer - Gnosis. **Karma** と略す。

(6) R. シュタイナー，高橋巌訳『教育の基礎としての一般人間学』（1994年，筑摩書房）「**一般人間学**」と略す。

(7) Erich,Gabert：Die Strafe in der Selbsterziehung und in der Erziehung des Kindes, 1975, Verlag Geistes Leben（V. G. L）**Strafe** と略す。

(8) Uwe,Buermann：Schicksal und Gemeinschaft. In：Erziehungskunst, April, 2004, V. G. L.. **Schicksal** と略す。

(10) Valentin,Wember：Reinkarnation und Pädagogik. In：Erziehungkunst, April, 2004. **Pädagogik** と略す。

＜参 考 文 献＞

(1) 拙稿「ヴァルドルフ学校の『クラス担任制』−『改革』の試みと教育原理の普遍性−」，「日本大学工学部紀要」，第55巻第２号，2014年３月，（35-45頁）

(2) R. シュタイナー，高橋巌訳『いかにして超感覚的世界の認識を獲得するか』（昭和56年，イザラ書房）

(3) R. シュタイナー，高橋巌訳『神智学』（昭和53年，イザラ書房）

(4) R. Steiner：Die Geheimwissenschaft im Umriss, 1989, Rudolf Steiner Verlag.

(5) R. Steiner：Allgemeine Menschenkunde als Grundlage der Pädagogik, 1960, Verlag der Rudolf Steiner - Nachlassverwaltung.

(6) Erich, Gabert：Autorität und Freiheit, 1981, V. G. L.

(7) Stefan, Leber：Die Menschenkunde der Waldorfpädagogik, 1993, V. G. L.

運動部経験者のライフスキルとメンタルヘルス関連要因の検討

種ケ嶋尚志 *・渡邉眞由美 **

A Study of Relationship between Life skills and Mental health in people with experience at an athletic club

Hisashi TANEGASHIMA* and Mayumi WATANABE**

Abstract

This study aimed to investigate related factors between life skills and mental health with experience at some athletic clubs through comparing gender differences or other factors in order to make mental health improved and maintained. The results showed that male with experience at athletic clubs knew both their own good and bad points very well and they tended to keep on training for a long time and make all possible efforts regardless of others' expectation. Long experience of athletic clubs was not a factor which contributes to gain life skills and make mental health better. We consider that the types of life skills vary in effecting mental health on daily life and athletic life skills. We found that gaining all four types of life skills compared with not gaining life skills at all was the factor makes mental health better. However, life skills effect on daily each life skill and athletic life skill differently. In other word, it was important for mental health of daily life to gain physical skills and for that of athletic life to gain mental skills.

Key words: メンタルヘルス, ライフスキル, 不合理な信念

I. 諸　　言

青年期における運動・スポーツは身体的な発育発達のみならず精神的成長や社会的成長に寄与し，その結果ストレスへの適応性が高まるといわれている。精神的健康の改善あるいはストレスに対して身体活動が寄与することが報告（永松，2009）されており，青年期の積極的な身体活動としては運動部やスポーツクラブの活動などが挙げられていることが，その一論拠である。一方，競技スポーツにおいては，それらのスポーツ活動そのものが身体的にストレッサーとなることや，結果を出すことのプレッシャーも多い。

スポーツ選手は，様々なスポーツ場面でストレッサーを受けるが，同様のストレッサーを受けても，人によってパフォーマンス発揮には違いがみられる。重要な試合前や試合中の勝敗を左右するような場面において，スポーツ選手がネガティブな思考を持ち，過度に緊張したり不安になったりすることで競技パフォーマンスが低下することはよく見られる。これはストレスに対処する過程で生起する思考例である「〜しなければならない」「自分は〜でなければならない」といったネガティブな思考が大きく関係している。

ところで，ネガティブな思考や不安などの感情を生起させるメンタルヘルス要因の一つに，不合理な信念が挙げられる。信念には，合理的な信念（Rational Belief）と不合理な信念（Irrational Belief）とがあり，Ellis（1962）は論理情動療法において，この二つを中心概念とし，外界の出来事（Activating event）は人間の信念（Belief）を通して，感情や行動といった結果（Consequence）を引き起こす，という ABC 理論を提唱している。体育系大学生のメンタルヘルス研究（2002）によると，ストレッサーと不合理的信念には交互作用があり，ストレスが低いときには不合理的信念の影響はないが，ストレスが高いときには，不合理的信念がメンタルヘルスに影響を与えることを明らかにしている。つまりストレスが高くても，「〜しなければならない」とか「〜すべきである」というような思考や考え方をしないことで，メンタルヘルス不調に陥る可能性を減らすことを示唆している。

メンタルヘルス不調に陥り難いと考えられる強いチームに在籍する選手などによく見られる礼儀正しさや自発的に取り組む姿は，コミュニケーション能力，問題解決能力といったライフスキルの要素である。ライフスキルとは WHO により「日常の様々な問題や要求に対し，より建設的かつ効果的に対処するために必要な能力」と定義されている。村上ら（2002）の研究によると，メンタルヘルスと試合前の心理状態に関係が認められるとし，ライフスキルを有する選手は，試合前の集中力が優れていると報告している。先行研究からも学生アスリートの競技力向上には精神的なサポートに加えライフスキル教育の面からのサポートも必要であると言える。

既述の如く，スポーツ経験はライフスキル獲得に影響を及ぼすことが考えられるが，スポーツには正の側面も負の側面もあり，常に結果を求められる勝利至上主義の競技スポーツでは精神的に負の影響が大きいのではないかと考え

平成27年 6 月11日受理

＊日本大学工学部総合教育
＊＊埼玉県立伊奈学園総合高等学校

られる。

以上のことから本研究では，運動部経験者のメンタルヘルス関連要因とライフスキルについて調査し，性差や要因間における差異について比較検討することで，メンタルヘルスの維持・向上に役立てることを目的とする。

II. 方　　法

1．調査対象者：大学運動部所属学生216名（男性106名，女性110名）（有効回答率82.8％）平均年齢:19.93歳（SD＝1.22）

2．調査期間：2013年9月−12月

3．調査内容：以下の調査を実施した。

⑴　フェイスシート：性別，年齢，所属部活動名，経験年数，部内での役職，生活形態，出場経験を調査した。

⑵　日本版 Irrational Belief Test 短縮版（JIBT -20）

松村(1991)が作成した日本版 Irrational Belief Test の短縮版で，森，長谷川（1994）らが作成した，5因子（自己期待，依存，倫理的非難，問題回避，無力感），20項目からなる質問紙を用いた。判定は1＝「まったくそう思わない」から5＝「まったくそう思う」の5段階で評価した。Irrational　Belief とは「不合理な信念」と訳され，高得点ほど不合理的信念を抱いていると評価される。不合理な信念とは，上述したような「〜でなければならない」という考えの他に，「〜は我慢ならない」「〜ではやっていけない」という事態の評価が過度にひどく評価されているような信念も代表例である。

⑶　運動部員のライフスキル尺度

吉田・徳永ら（2000）が作成した質問紙を用いた。4尺度（身体的スキル，心理的スキル，社会的スキル，スピリチュアル），39項目からなる（8，13，15，20，23，25，29，39は逆転項目）。判定は1＝「ほとんどあてはまらない」から5＝「いつもそうである」の5段階で評価した。運動部活動が日常生活に影響するスキルなどを得点化し，高得点ほどライフスキルを獲得していると評価される。ライフスキルの構成要素として⑴意思決定能力　⑵問題解決能力　⑶創造的思考　⑷批判的思考　⑸効果的なコミュニケーション能力　⑹対人関係の構築と維持能力　⑺自己認識　⑻共感する能力　⑼感情を制御する能力　⑽緊張とストレスに対処する能力を WHO（世界保健機構）は挙げている。

⑷　スポーツ選手のメンタルヘルス評価尺度改訂版（MHSA - 2）

村上・橋本・徳永ら（2001）が作成したスポーツ選手のメンタルヘルス評価尺度の改訂版質問紙（2003）を用いた。この尺度は日常生活のメンタルヘルスと競技面のメンタルヘルスの2尺度からなる。「日常場面のメンタルヘルス」では5因子（睡眠，心身のコンディショニング，疲労・ストレスの対処，食事，酒・タバコのコントロール），18項目。「競技場面のメンタルヘルス」では7因子（挑戦的態度，自己理解，危機回避能力，個性の発揮，積極的思考，チームへの適応，ケガへの対応），30項目から構成されている。判定は1＝「あてはまらない」から5＝「良くあてはまる」の5段階で評価した。スポーツ選手のメンタルヘルスを得点化し，高得点ほどメンタルヘルスが良いと評価される。

本研究では，上記調査項目を得点化し以下のような統計的手法を用いて比較検討を行った。メンタルヘルス関連要因やライフスキルの性差及び経験年数の検討は，対応無しの t 検定や相関分析（Pearson 積率相関係数）を用いた。さらに前述の検定結果を用いて，メンタルヘルスとライフスキルの影響度を検証するために2要因分散分析，重回帰分析を用いてメンタルヘルスを規定するライフスキル要因の分析を行った。

4．結果の処理:本研究における分析は，統計ソフト SPSS Statistics 22によって行ない，各検定の有意水準は5％未満に設定した。

III. 結　　果

1．性差の検討

不合理的信念，ライフスキル，メンタルヘルスの性差を明らかにするために，JIBT -20，運動部員ライフスキル尺度，MHSA - 2の各下位尺度について男女別に得点を算出し，両者間の t 検定を行った。その結果，不合理な信念とライフスキルの下位尺度間に統計的有意差は認められなかったが，メンタルヘルスでは「挑戦的態度」（t (214) = 2.457，p <.05），「自己理解」（t (214) = 2.906，p <.05），「個性の発揮」（t (214) = 2.515, p <.05），「心身のコンディショニング」（t (214) = 2.304，p <.05）において統計的な有意差が認められ，いずれも女性よりも男性のほうが高かった。（表1）

2．運動部経験年数とライフスキル及びメンタルヘルスの検討

運動部経験年数とライフスキル及びメンタルヘルスの各下位尺度得点との間に相関関係が認められるか否かを検討するために，相関分析（Pearson の積率相関係数）を行った。なお，メンタルヘルスについては性差が見られたため，男女別に相関分析を行った。その結果，経験年数とライフスキルでは「心理的スキル」及び「社会的スキル」と有意な正の相関（.21，p <.01および.18，p <.05）が見られた。また経験年数とメンタルヘルスでは男性において「危機回避」及び「チーム適応」と有意な正の相関（.24，p <.01および.24，p <.01）が見られ，女性においては「酒・たばこのコントロール」と有意な負の相関（−.22，p <.05）が見られた。（表2 表3）

3．不合理な信念及びライフスキルとメンタルヘルスの検討

不合理な信念とライフスキルがメンタルヘルスに及ぼす影響を検討するために，「日常生活のメンタルヘルス（以

表１　性別によるメンタルヘルス得点の比較

		性別	*M*	*SD*	*t*値
競技のメンタルヘルス	挑戦的態度	男性(n=106)	18.59	3.22	2.46*
		女性(n=110)	17.45	3.63	
	自己理解	男性(n=106)	17.80	2.94	2.91**
		女性(n=110)	16.55	3.35	
	怪我対応	男性(n=106)	11.50	3.34	1.31
		女性(n=110)	10.91	3.28	
	個性発揮	男性(n=106)	13.82	2.86	2.52*
		女性(n=110)	12.84	2.83	
	危機回避	男性(n=106)	12.40	3.19	1.05
		女性(n=110)	11.96	2.88	
	積極的思考	男性(n=106)	11.42	2.80	0.74
		女性(n=110)	11.14	2.74	
	チーム適応	男性(n=106)	12.59	2.76	1.19
		女性(n=110)	12.11	3.22	
日常のメンタルヘルス	睡　　眠	男性(n=106)	13.69	2.80	-1.30
		女性(n=110)	14.19	2.88	
	心身のコンディショニング	男性(n=106)	14.85	2.35	2.30*
		女性(n=110)	14.05	2.70	
	疲労ストレス対処	男性(n=106)	12.59	2.84	-1.35
		女性(n=110)	13.09	2.55	
	食　　事	男性(n=106)	11.38	3.01	0.94
		女性(n=110)	11.00	2.92	
	酒タバココントロール	男性(n=106)	8.59	2.13	-0.70
		女性(n=110)	8.80	2.19	

*$p<0.05$　**$p<0.01$

表２　経験年数とメンタルヘルス相関分析

	挑戦的態度	自己理解	怪我対応	個性発揮	危機回避	積極的思考	チーム適応	睡眠	心身のコンディショニング	疲労ストレス対処	食事	酒タバココントロール
経験年数（男性=106）	.105	.148	.159	.115	.236*	.123	.239*	.043	.161	.038	.014	-.187
経験年数（女性=110）	-.009	.083	.010	.042	.040	.063	-.045	-.154	.023	-.148	-.013	-.221*

*$p<0.05$

表３　経験年数とライフスキル相関分析

	身体的スキル	心理的スキル	社会的スキル	スピリチュアル
経験年数（n=216）	.03	.21**	.18**	.08

**$p<0.01$

下「日常場面」）」と「競技場面のメンタルヘルス（以下「競技場面」）」，それぞれを従属変数として，2（不合理な信念：高群・低群）×２（ライフスキル：高群・低群）の分散分析を男女別に行った。なお，不合理な信念とライフスキルの高群・低群は，調査対象者の平均値を基準にして設定した。

その結果，男性ではライフスキルの主効果が見られ，（日常場面：$F(1, 102) = 13.60$, $p < .001$，競技場面：$F(1, 102) = 30.85$, $p < .001$）ライフスキル高群の方が日常場面・競技場面，両方のメンタルヘルス得点が高かった。女性ではライフスキルの主効果（日常場面：$F(1, 106) = 17.11$, $p < .001$，競技場面：$F(1, 105) = 32.50$, $p < .001$）と不合理な信念の主効果（$F = 6.03$, $p < .05$）が見られ，ライフスキル高群の方が日常場面・競技場面，両方のメンタルヘルス得点が高く，不合理な信念低群の方が日常場面のメンタルヘルス得点が高かった。（表４表５）

表４　不合理な信念とライフスキルによる各得点と分散分析結果（男性ｎ＝106）

JIBT-20	低群		高群		主効果		交互作用
ライフスキル	低群	高群	低群	高群	JIBT2群	ライフ2群	
日常メンタル	59.70	64.55	58.36	62.45	2.02	13.60***	0.03
	6.83	6.29	4.56	6.84			
競技メンタル	91.52	105.95	91.36	104.86	0.06	30.85***	0.76
	12.98	13.36	13.41	11.83			

上段：平均値，下段：標準偏差　***$p<0.001$

表５　不合理な信念とライフスキルによる各得点と分散分析結果（女性ｎ＝110）

JIBT-20	低群		高群		主効果		交互作用
ライフスキル	低群	高群	低群	高群	JIBT2群	ライフ2群	
日常メンタル	59.94	65.19	57.54	61.89	6.03*	17.11***	0.15
	7.20	4.68	6.05	5.63			
競技メンタル	84.12	102.08	89.00	100.37	0.38	32.5***	1.64
	13.73	14.45	14.05	10.77			

上段：平均値，下段：標準偏差　*$p<0.05$　***$p<0.001$

４．メンタルヘルスと４つのライフスキルの検討

ライフスキルが高いことはメンタルヘルスに良い影響を与えていることが考えられるため，ライフスキルを４尺度（身体的スキル，心理的スキル，社会的スキル，スピリチュアル）に分類し，メンタルヘルス（日常場面・競技場面）を従属変数として，2（ライフスキル：高群・低群）×２（男

表 6　身体的スキルと性別による各得点と分散分析結果

性別	男性(n=106)		女性(n=109)		主効果		交互作用
身体的スキル	低群	高群	低群	高群	性別	スキル2群	
日常メンタル	57.42	63.62	58.22	63.95	0.49	54.80***	0.77
	5.71	5.88	6.58	5.18			
競技メンタル	94.09	100.87	87.11	99.46	4.68*	24.32***	2.06
	14.48	13.94	14.46	13.57			

上段：平均値，下段：標準偏差　　*$p<0.05$　***$p<0.001$

表 7　心理的スキルと性別による各得点と分散分析結果

性別	男性(n=106)		女性(n=109)		主効果		交互作用
心理的スキル	低群	高群	低群	高群	性別	スキル2群	
日常メンタル	59.15	62.48	58.68	63.18	0.01	20.65***	0.46
	5.52	63.86	6.86	5.55			
競技メンタル	90.90	103.24	85.61	99.87	5.53*	51.96***	0.27
	13.28	13.13	14.44	12.80			

上段：平均値，下段：標準偏差　　*$p<0.05$　***$p<0.001$

表 8　社会的スキルと性別による各得点と分散分析結果

性別	男性(n=106)		女性(n=109)		主効果		交互作用
社会的スキル	低群	高群	低群	高群	性別	スキル2群	
日常メンタル	59.37	62.60	59.28	62.15	0.09	11.70**	0.04
	6.13	6.57	6.50	6.39			
競技メンタル	92.36	103.07	84.15	98.44	11.35**	42.95***	0.88
	14.26	12.85	14.35	13.36			

上段：平均値，下段：標準偏差　　**$p<0.01$　***$p<0.001$

表 9　スピリチュアルと性別による各得点と分散分析結果

性別	男性(n=106)		女性(n=109)		主効果		交互作用
スピリチュアル	低群	高群	低群	高群	性別	スキル2群	
日常メンタル	57.53	63.95	59.57	62.49	0.12	31.47***	4.41*
	5.52	5.90	6.92	5.94			
競技メンタル	93.70	101.64	87.44	98.56	5.81*	24.17***	0.67
	11.41	15.75	14.14	14.40			

上段：平均値，下段：標準偏差　　*$p<0.05$　***$p<0.001$

性・女性）の分散分析を行った。ライフスキル（4 尺度）と性別の高群・低群は，被調査者の平均値を基準にして設定した。

その結果，「身体的スキル」ではメンタルヘルスにおよぼす主効果（日常場面：$F(1, 212) = 54.80$，$p < .001$，競技場面：$F(1, 212) = 24.32$，$p < .001$）と性別の競技場面メンタルヘルスにおよぼす主効果（$F(1, 212) = 4.68$，$p < .05$）が見られ，身体的スキル高群の方が日常場面・競技場面ともに得点が高く，男性の方が競技場面の得点が高かった（表 6）。また，「心理的スキル」ではメンタルヘルスにおよぼす主効果（日常場面：$F(1, 212) = 20.65$，$p < .001$，競技場面：$F(1, 211) = 51.96$，$p < .001$）と性別の競技場面メンタルヘルスにおよぼす主効果（$F(1, 211) = 5.53$，$p < .05$）が見られ，心理的スキル高群の方が日常場面・競技場面ともに得点が高く，男性の方が競技場面の得点が高かった（表 7）。また，「社会的スキル」ではメンタルヘルスにおよぼす主効果（日常場面：$F(1, 212) = 11.70$，$p < .001$，競技場面：$F(1, 211) = 42.95$，$p < .001$）と性別の競技場面メンタルヘルスにおよぼす主効果（$F(1, 211) = 11.35$，$p < .05$）が見られ，社会的スキル高群の方が日常場面・競技場面ともに得点が高く，男性の方が競技場面の得点が高かった（表 8）。また，「スピリチュアル」では「日常生活のメンタルヘルス」に有意な交互作用がみられ（$F(1, 212) = 4.41$，$p < .05$），単純主効果の検定を行った。その結果，性別の単純主効果が有意であり（男性：$F(1, 212) = 29.07$，$p < .001$，女性：$F(1, 212) = 6.31$，$p < .05$），男性・女性ともにスピリチュアル高群の方が日常生活のメンタルヘルス得点が高かった。さらに，「競技場面メンタルヘルス」におよぼすスピリチュアルと性別の主効果（$F(1, 211) = 24.17$，$p < .001$，$F(1, 211) = 5.81$，$p < .05$）が見られ，スピリチュアル高群及び男性の方が競技場面メンタルヘルス得点が高かった（表 9）。

5．メンタルヘルスに影響するライフスキル要因の検討

身体的スキル，心理的スキル，社会的スキル，スピリチュアルがメンタルヘルスに与える影響について検討するために，「メンタルヘルス（競技場面・日常場面）」を従属変数に「ライフスキル（身体的スキル，心理的スキル，社会的

表10　メンタルヘルスとライフスキルの重回帰分析
（従属変数：日常生活メンタルヘルス）

	男性	女性
	β	β
身体的スキル	0.51***	0.59***
心理的スキル	-0.15	0.02
社会的スキル	0.00	0.02
スピリチュアル	0.37***	-0.13
R^2	0.40***	0.30***

***p<.001　R^2重決定係数
β：標準偏回帰係数

表11　メンタルヘルスとライフスキルの重回帰分析
（従属変数：競技場面メンタルヘルス）

	男性	女性
	β	β
身体的スキル	0.02	0.14
心理的スキル	0.53***	0.28*
社会的スキル	0.06	0.25*
スピリチュアル	0.10	0.12
R^2	0.39***	0.46***

*p<.05, ***p<.001　R^2重決定係数
β：標準偏回帰係数

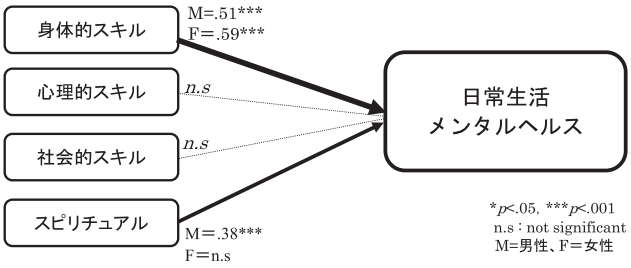


図１　日常生活メンタルヘルスに影響するライフスキル要因

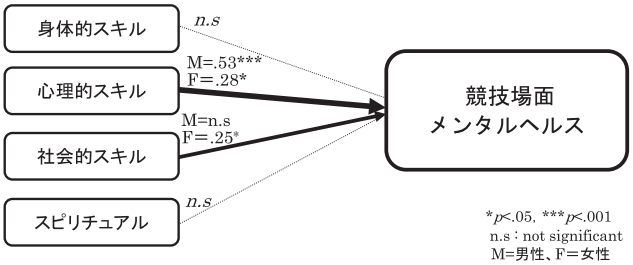


図２　競技場面メンタルヘルスに影響するライフスキル要因

スキル，スピリチュアル）を独立変数に男女別の重回帰分析を行った。その結果を表10，表11に示し，重回帰分析に基づくパス図を図１，図２に示す。「日常場面のメンタルヘルス」では男女ともに重回帰係数は有意（男性：R^2 = .40, p < .001，女性：R^2 = .30，p < .001）であり，男性は身体的スキル（標準偏回帰係数（以下β）= .51，p < .001）が最も強く影響し，次にスピリュアル（β = .37，p < .001）と続いた。女性は身体的スキル（β = .51，p < .001）が強く影響していた。「競技場面のメンタルヘルス」でも男女とも重回帰係数は有意（男性：R^2 = .39，p < .001，女性：R^2 = .46, p < .001）であり，男性は心理的スキル（β = .53, p < .001）が強く影響し，女性では心理的スキル（β = .28, p < .05）と社会的スキル（β = .25，p < .05）が影響していた。

IV. 考　　察

メンタルヘルス関連の性差について

先行研究（森ら1994）においては「依存」について女性の方が高い得点を示すことが明らかとなっているが，本研究では不合理的信念は，性差が見られなかった。本研究の対象者が運動部の学生のみであったことから，運動部に所属することによって男性同様の自立性が獲得されているものと考える。また，ライフスキルも性差が見られなかったが，先行研究（吉田ら2000）では男性の方が高い得点を示すことが明らかとなっている。本研究の対象者は運動部の大学生のみであったが，先行研究の対象者は中学生から大学生まで対象としていたため，発達段階の影響から違いが見られたと考えられた。

メンタルヘルスでは競技場面のメンタルヘルスに当たる「挑戦的態度」「自己理解」「個性の発揮」と日常場面のメンタルヘルスに当たる「心身のコンディショニング」の得点が男性の方が高い得点を示している。男性の方が練習を頑張り続けることや周囲の期待に負けずに努力する意識が強く，さらに今やるべきことや今後の課題や心身のコンディションをコントロールすることなど，自分の長所や短所，状況を理解していることがその一要因とも考えられる。

ライフスキルとメンタルヘルス関連要因の関係について

経験年数とメンタルヘルスとの関係は，男性において相関関係が見られ，特に男性は周囲に適応することや危機を乗り越えるためには所属経験が必要になってくることが考えられた。また女性は運動部に長く所属することだけでは，メンタルヘルスが良好になる要因にはなりにくいことが考えられた。

ライフスキル獲得度や不合理な信念の程度がメンタルヘルスに及ぼす影響について検討したところ，男性女性ともにライフスキルをより多く獲得している方が日常場面や競技場面のメンタルヘルス得点が高い傾向にあるということが示唆された。つまり，ライフスキルを獲得することは，メンタルヘルスを良好にする要因であることが考えられた。不合理な信念では，女性のみであるが，不合理な信念を多く持つことで日常場面のメンタルヘルスを不調にさせることが考えられ，女性は男性に比べて合理的思考が不得手で，ネガティブな思考の影響を強く受けることが考えられた。

さらに４つのライフスキル獲得度とメンタルヘルスについて比較検討したところ，「身体的スキル」「心理的スキル」「社会的スキル」「スピリチュアル」をより獲得することは，日常場面や競技場面両方のメンタルヘルスを向上させることが明らかとなった。

メンタルヘルスを規定するライフスキルの要因について

4つのライフスキルがメンタルヘルスにどのような影響をしているのか重回帰分析を行ったところ，男性は「身体的スキル」「スピリュアル」が日常場面のメンタルヘルスに影響し，「心理的スキル」が競技場面のメンタルヘルスに影響していた。女性は「身体的スキル」のみ日常場面のメンタルヘルスに影響し，「心理的スキル」「社会的スキル」が競技場面のメンタルヘルスに影響していた。

つまり，日常生活と競技生活のメンタルヘルスでは，求められるライフスキルが異なっており，日常生活が適応的でメンタルが良好な状態で過ごすには，バランスの取れた食事や睡眠，運動といった生活習慣を整えているといった「身体的スキル」が大変重要であると考えられる。さらに競技生活が適応的でメンタルが良好な状態で過ごすためには，集中力や自己主張力，リラックス能力といった「心理的スキル」が重要であることが考えられた。

4つのライフスキルすべてを獲得することは，獲得していないことに比較してメンタルヘルスを向上させる要因ではあるが，ライフスキルの影響度から考えると，日常生活と競技生活のメンタルヘルスそれぞれに及ぼす影響は異なっていることが明らかとなった。

V. ま と め

・男性運動部経験者は，練習を頑張り続けることや周囲の期待に負けずに努力する意識が強く，自分の長所や短所を理解している。
・運動部に長く所属しても，ライフスキルの獲得やメンタルヘルスを良好にする要因にはなりにくい。
・日常生活と競技生活のメンタルヘルスに影響するライフスキルのタイプは異なっている。
・日常生活のメンタルヘルスに重要であるのは「身体的スキル」であり，競技生活のメンタルヘルスに重要なのは「心理的スキル」の獲得であることが明らかとなった。

参 考 文 献

広沢俊宗（2002）孤独の感情，対処行動に及ぼす孤独感，Aloneness への耐性の影響．関西国際大学研究紀要(3) 81-96

伊藤英之（2012）大学生卓球選手における不合理な信念と試合前の心理コンディションの関係．國學院大學人間開発学研究(3) 89-96

森治子，長谷川浩一，石隈利紀，他（1994）不合理な信念尺度（JIBT -20）の開発の試み．ヒューマンサイエンスリサーチ(3) 43-58

村上貴聡，橋本公雄，徳永幹雄（2003）スポーツ選手のメンタルヘルス評価尺度改訂版の作成．健康科学(25)67-77

村上貴総，徳永幹雄，橋本公雄．スポーツ選手のメンタルヘルスと試合前の心理状態との関係（2002）日本体育学会大会号(53)281

村上貴聡，徳永幹雄，橋本公雄（2001）スポーツ選手メンタルヘルス評価尺度の開発(28)44-56

村上貴聡，徳永幹雄，橋本公雄（2001）スポーツ選手のライフスキル獲得に関する研究．日本体育学会大会号(52)249

直井愛里．〈心理療法の領域〉スポーツカウンセリング－スポーツ選手へのメンタルサポート－（2008）近畿大学臨床心理センター紀要．(1) 57-64

中出（北出）薫（2006）イラショナル・ビリーフと感情の体験様式との関連－感情体験尺度作成の試みを通してパーソナリティ研究⑭ 241-253

永松俊哉，鈴川一宏，甲斐裕子，他（2009）青年期における運動・スポーツ活動とメンタルヘルスとの関係．体力研究(107)11-14

西野明，土屋裕睦（2002）大学スポーツ選手の精神的健康とストレス過程に関する研究，千葉大学教育学部研究紀要(51) 111-114.

西野明，土屋裕睦（1999）体育系大学生の精神的健康(1)－その特徴と不合理的信念の影響－．日本体育学会大会号(50)352

徳永幹雄，橋本公雄，磯貝浩久，他（2002）競技スポーツの心理．徳永幹雄編．健康と競技のスポーツ心理．東京：不堂出版99-189

徳永幹雄，吉田栄治，重枝武司，他（2000） スポーツ選手の心理的競技能力にみられる性差，競技レベル差，種目差．健康科学(22)109-120

坂野雄二，嶋田洋徳，三浦正江，他（1994）高校生の認知的個人差が心理的ストレスに及ぼす影響．早稲田大学人間科学研究．(7) 75-90

涌井佐和子，下光揮一，小田切優子，他（1991）女子大学生における摂食障害傾向，減量行動およびウエイトサイクリング：運動実践状吉田安宏（2001）運動・スポーツ経験がライフスキルに及ぼす影響．九州大学大学院人間環境学府博士論文

況との関連について．体力科学(48)607-618

米本竜太郎，大蔵雅夫（2013）先延ばしと自己効力感が抑うつに与える影響．徳島文理大学研究紀要(86)41-46

日本大学工学部紀要　　第57巻第1号

平成27年9月20日　印刷
平成27年9月25日　発行

非売品

編集兼
発行者　日本大学工学部工学研究所
〒963-8642　福島県郡山市田村町徳定字中河原1
Tel.（024）956-8648
〈e-mail address〉　kenkyu@ao.ce.nihon-u.ac.jp

印刷者　共栄印刷株式会社
〒963-0724　福島県郡山市田村町上行合字西川原7-5
Tel.（024）943-0001㈹

VEGETABLE OIL INK

JOURNAL OF THE COLLEGE OF ENGINEERING
NIHON UNIVERSITY
Vol. LVII, No. 1, 2015

CONTENTS

ENGINEERING

RELATION BETWEEN ADMINISTRATIVE SUPPORT AND CRISIS AWARENESS OF RESIDENTS IN SUKAGAWA OF 15TH TYPHOON SEPTEMBER 2011
.....Naoyuki INOUE, Hisao NAGABAYASHI and Masahiro TEZUKA （ 1 ）

Consistent Shape Function for Free Vibration of Linearly Tapered Timoshenko Beam Element
.....TRINH Thanh Huong, Takumi HIBINO and Buntara S. GAN （ 7 ）

ON DAMAGE AND RESTORATION OF HISTORICAL BUILDINGS IN FUKUSHIMA PREFECTURE:
AFTER GREAT EAST JAPAN EARTHQUAKE
.....Kiyotaka HAYAMI （15）

Study on seismic retrofitting method of RC structure building with steel roof
..... Kenji SHIMIZU, Takumi HIBINO and Kazushige ASARI （25）

Ant Colony Optimization by Innovating Concept of Bi-directional Evolutionary Structural Optimization
－Application in Truss Structure Problem－
..... Takahiro HARA and Buntara S. GAN （35）

Reinforcement Detail of Beam Joint on Existing Steel Gymnasium
..... Takumi HIBINO and Kazushige ASARI （43）

Effects of Seismic Reinforcement in Long and Slender Building Configuration
－Three-dimensional Vibration Characteristics in One Directional Reinforcement Case－
.....Takumi HIBINO and Masahiro CHIBA （51）

A STUDY ON THE EFFECTIVE USE OF CONVENIENCE STORE PARKING IN PROVINCIAL CITIES
..... Atsuhiko HIROTA and Kinsaku MIURA （61）

Proposal and Evaluation of Stagnation Avoidance PSO
.....Fuminori KOBAYASHI, Masato KANEKO and Toshiya IWAI （67）

GENERAL STUDIES

How R. Steiner's "*Geisteswissenschaft*" takes over Waldorf Pedagogy.
－Inheritance of the concept of "recarnation and karma" by Steiner－
..... Fumiaki TSUCHIYA （77）

A Study of Relationship between Life skills and Mental health in people with experience at an athletic club
.....Hisashi TANEGASHIMA and Mayumi WATANABE （89）