

# 日本大学工学部紀要

第 54 卷 第 2 号

平成 25 年 3 月

日本大学工学部  
工学研究所

# 目 次

## 工 学 編

- 鋼製永久型枠を用いたRC造梁部材の寸法効果に関する研究  
..... Sanjay PAREEK・遠藤 正美・鈴木 裕介 ( 1 )
- ネットワーク及び補修剤を用いた自己修復システムにおける  
コンクリートの自己修復性能についての検討  
..... Sanjay PAREEK・大平 旭洋 ( 7 )
- 有機酸塩系ブラインの基本的性質  
－ 第1報：ギ酸カリウム水溶液の密度，屈折率，比熱および粘度 －  
..... 佐々木直栄・小川 清 ( 13 )
- 有機酸塩系ブラインの基本的性質  
－ 第2報：酢酸カリウム水溶液の密度，屈折率，比熱および粘度 －  
..... 小川 清・佐々木直栄 ( 19 )
- Enhancement and Retardation Mechanism of Ultra-Thin SiO<sub>2</sub> Growth on Thermally Oxidized  
Cr-Contaminated n-Type Si(001) Surfaces  
..... Hirofumi SHIMIZU and Yuji SANADA ( 25 )
- 広領域梨地表面の作成法の提案と実加工  
.....小林 純・畠山 浩史・溝口 知広・小林 義和・白井 健二・近藤 司 ( 35 )
- 全方向移動可能な小型加工ロボットの開発  
..... 大山 仁・溝口 知広・小林 義和・白井 健二・近藤 司 ( 39 )
- 地上型レーザスキャナを用いた森林バイオマス推定のための樹木パラメータの全自動推定手法  
.....溝口 知広・小林 義和・白井 健二・若林 裕之  
.....原 靖彦・子田 康弘・岩城 一郎・李 和樹 ( 45 )

## 総合教育編

- A Theory of Binarism and Its Extension II: *Application to the Taxonomy of Parts of Speech*  
..... Masashi KAWASHIMA ( 51 )
- 2009年新型インフルエンザに対する行政機関の対応  
－ 自治体へのアンケート調査の結果分析 －  
..... 石突 美香・小松 志朗・小森 雄太 ( 65 )



工 学 編

# 鋼製永久型枠を用いた RC 造梁部材の寸法効果に関する研究

Sanjay PAREEK\*・遠藤 正美\*\*・鈴木 裕介\*\*\*

## An Experimental Study on Size-Effect of RC Beams with Permanent Steel Forms

Sanjay PAREEK\*, Masaharu ENDO\*\* and Yusuke SUZUKI\*\*\*

### Abstract

In this study, RC beams of span 1m, 2m, 3m and 4m using permanent steel forms are subjected to flexure tests and studied for the size effect due to permanent steel forms. The beams were subjected to static four-point flexural test and monitored for the load-displacement along with the strain of the main reinforcement and permanent steel forms at respective points during loading. From the bending test results of RC beams with permanent steel forms, the tensile reinforcement ratios ( $p_{t-PSF}$ ) greatly influences the flexural strength and are found to be in an inversely proportional relationship with the increase in sectional size of the RC beams with permanent steel forms.

Furthermore, the RC beams with permanent steel forms showed a high degree of correlation to the section size of the RC beams at a  $p_{t-PSF}$  ratio of 1.0% for the neutral axis ratio at the yield load. Finally, from the overall results, the permanent steel forms contribute to a remarkable increase in the strength and ductility of the full-scale RC beams.

**Key words:** Permanent Steel Forms, Size Effect, RC Beam, Neutral Axis Ratio, Ratio of PSF Reinforcement

### 1. はじめに

鉄筋コンクリート (RC) 構造物のコンクリート打設時における合板を用いた型枠工法 (以下, 在来工法) は, 原料となる丸太を大量に使用し, その上, 数回の使用で使い捨てられる現状であることから, 自然環境に悪影響を及ぼすといった致命的な問題点が挙げられている。そのため, 在来工法に代わる新たな型枠の提案が求められている。以上を背景に既往の研究では, コンクリート打設後, 躯体と一体となることから RC 構造物の補強効果が期待できる, 強度を有する鋼製永久型枠 (Permanent Steel Form, 以下, PSF) に着目し, 実験的研究を行った。その結果, PSF が縮小モデル化した矩形断面 ( $b \times D = 120 \times 200\text{mm}$ ) の RC 造梁部材の強度及び変形に及ぼす影響を明らかにしている<sup>1)</sup>。しかし, PSF の板厚は, 作製する梁の断面寸法に関わらず一定であるため, 断面寸法が拡大するに連れ, RC 梁の有効断面積 ( $bd$ ) に対する引張応力を受ける PSF の断面積の比 (以下, PSF の引張補強筋比  $p_{t-PSF}$ ) は減少する<sup>2), 3)</sup>。よって, PSF の実用化を考慮する際, 実寸大に近い梁部材をはじめとする様々な梁断面寸法に対して, PSF が構造的に及ぼす影響に関する基礎的データを提示する必要があると考える。そこで本研究では, 既往の研究で検討した RC 造梁部材 (Table 2 中の Plain - 2 を参照) を基

準試験体とし断面寸法及びスパンを0.5, 1.5及び2.0倍となる様に変化させ, また, その時の各鉄筋比の目標値に対する誤差が0.1%以内に収まる様に設計, 施工した試験体を用いて, 静的曲げ載荷試験を行い, その実験結果から PSF を用いた RC 造梁部材の寸法効果に及ぼす影響について比較・検討している。なお, 本研究における寸法効果とは, 寸法の異なる RC 梁の強度及び変形に対して PSF が及ぼす影響を評価するものである。

### 2. 実験概要

#### 2.1 使用材料

Table 1 に使用した PSF の材料特性を, Photo 1 にその形状を示す。本研究で使用する PSF は, 施工の効率面から派生したものであり, 単位面積重量  $4.8\text{kg}/\text{m}^2$  と軽量であり, 厚さ ( $t_{PSF}$ )  $0.4\text{mm}$  と超薄型の型枠材である。また, 鋼板表面に特殊な配合を行った亜鉛めっき層が塗装されており, 耐食性に非常に優れている。また,  $25\text{mm}$  間隔の折れ目線を有しているため, 型枠加工及び組立ての施工が容易であること, 更には,  $50\text{mm}$  間隔に設けられている円状の切れ目から, コンクリート打設の際, 余剰水分のみ排出されるといった利点を持っている。コンクリートについては, 後述する全長  $L = 3\text{m}$  及び  $L = 4\text{m}$  の試験体に, 既往の研究<sup>1)</sup> で検討した試験体 ( $L = 2\text{m}$ ) と同様, 設計基準強度  $F_c = 24\text{N}/\text{mm}^2$  の普通コンクリートを使用した。なお,  $L = 1\text{m}$  の試験体にコンクリートを打設した場合, 流動性が悪く, 明らかな空隙が発生したため,  $L = 1\text{m}$  の試験体に限り, 同等の圧縮強度を有するセメントモルタルを使用した。

平成24年6月7日受理

\* 日本大学工学部建築学科

\*\* 日本大学大学院 工学研究科建築学専攻

\*\*\* 京都大学大学院工学研究科建築学専攻

各試験体の主筋にはSD295を使用し、あばら筋にはSR295を使用した。

2.2 試験体概要

Fig. 1に在来工法で作製した試験体である Plain 及び PSF を使用した試験体の配筋形状を示し、Fig. 2に断面形状を示す。また、Fig. 3にPSFを使用した試験体形状を示し、Table 2に試験体諸元を示す。試験体は矩形断面  $b \times D = 60 \times 100, 120 \times 200, 180 \times 300$  及び  $240 \times 400 \text{mm}$  とし、各寸法の試験体に対する配筋は、各鉄筋比の目標値に対する誤差が0.1%以内に収まるように設計した。各寸法及び配筋、並びに圧縮鉄筋比 ( $s_{pc}$ )、引張鉄筋比 ( $s_{pt}$ ) 及びあばら筋比 ( $s_{pw}$ ) は、Table 2中に記されている。

2.3 荷重及び測定方法

Fig. 4に荷重方法及び変位計設置位置を示す。なお、変位計の取付位置は左右対称とする。荷重方法として、試験体をアムスラー型万能試験機に設置し、試験体上面がコンクリートの圧壊に至るまで漸増荷重を加えた。なお、加力中において、荷重の測定とともに、各荷重階における各変位及びひずみ度の測定を行った。

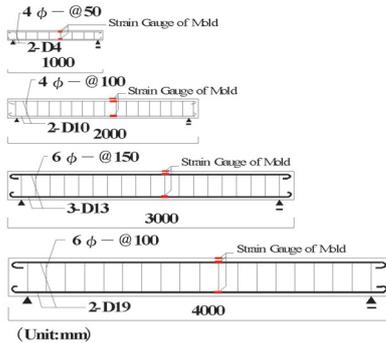


Fig. 1 Re-bar Arrangement for RC Beams with PSF

Table 1 Properties of Permanent Steel Form

Weight per Unit Area (kg/m <sup>2</sup> )	Thickness (mm)	Yield Strength (N/mm <sup>2</sup> )	Young's Modulus (N/mm <sup>2</sup> )
4.8	0.4	195	2.06×10 <sup>5</sup>

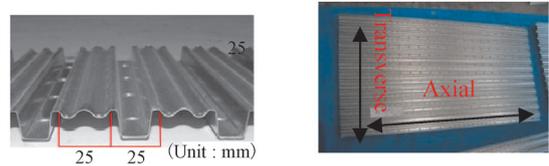


Photo 1 Shape and Dimension of Permanent Steel Form

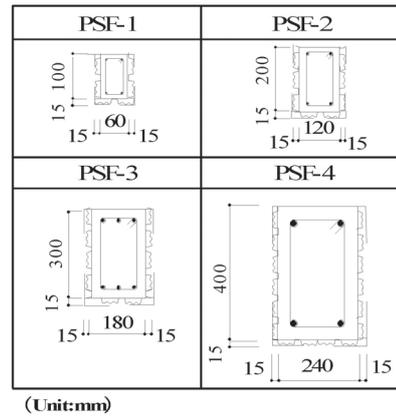


Fig. 2 Cross - Section of RC Beams Using PSF

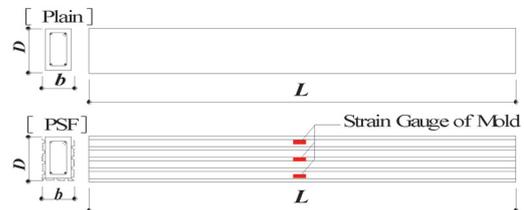


Fig. 3 Position of Strain Gauges and Arrangement Patterns of PSF for RC Beams

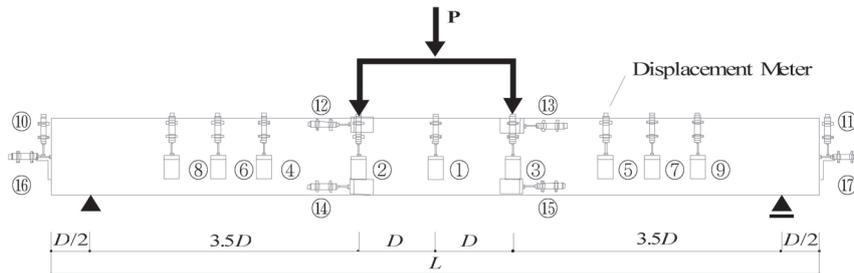


Fig. 4 Details of RC Beam for Flexural Strength Test Set-up and Position of Displacement Meters

Table 2 Identifications and Reinforcement Ratio of RC Beams for Flexural Strength Test Using PSF

Identification	D (mm)	b (mm)	d (mm)	L (mm)	Top Reinforcement	$s_{pc}$ (%)	Bottom Reinforcement	$s_{pt}$ (%)	Stirrup	$s_{pw}$ (%)
Plain-1	100	60	80	1000	2-D4-SD295	0.59	2-D4-SD295	0.59	4φ-SR295@50	0.21
PSF-1	100	60	80	1000	2-D4-SD295	0.59	2-D4-SD295	0.59	4φ-SR295@50	0.21
Plain-2	200	120	175	2000	2-D10-SD295	0.68	2-D10-SD295	0.68	4φ-SR295@100	0.21
PSF-2	200	120	175	2000	2-D10-SD295	0.68	2-D10-SD295	0.68	4φ-SR295@100	0.21
Plain-3	300	180	264	3000	3-D13-SD295	0.78	3-D13-SD295	0.78	6φ-SR295@150	0.21
PSF-3	300	180	264	3000	3-D13-SD295	0.78	3-D13-SD295	0.78	6φ-SR295@150	0.21
Plain-4	400	240	350	4000	2-D19-SD295	0.68	2-D19-SD295	0.68	6φ-SR295@100	0.24
PSF-4	400	240	350	4000	2-D19-SD295	0.68	2-D19-SD295	0.68	6φ-SR295@100	0.24

### 3. 実験結果

#### 3.1 強度結果

Table 3 に強度結果一覧を示す。なお、[ ] 内には Plain との比率を示している。初期ひび割れ荷重 ( $P_c$ ) は、Plain 1~4 ではひび割れを目視により確認できた時の値とした。一方、PSF を用いた試験体では目視による確認ができないため、試験体中央における圧縮及び引張鉄筋のひずみ度測定値を用いて、断面解析から引張側最外縁コンクリートの応力度を算出し、その応力度が Plain 試験体の初期ひび割れ発生時における引張側最外縁コンクリート応力度に達した時の値とした。また、降伏荷重については、試験体中央の引張鉄筋が降伏した時の値とした。

PSF を用いた試験体は、Plain と比較し、初期ひび割れ荷重 ( $P_c$ ) は 1.25~1.73 倍、降伏荷重 ( $P_y$ ) は 1.71~5.58 倍、最大荷重 ( $P_{max}$ ) は 1.72~4.30 倍の荷重を示し、いずれの寸法においても各耐力の上昇が確認された。寸法別に比較すると、 $P_y$  及び  $P_{max}$  の値では梁幅及び梁せいが小さくなるに連れ、Plain と比較した上昇率が高くなっている。一方  $P_c$  の値に関しては、断面寸法の大きさに比例して、Plain からの上昇率が高くなる傾向が見られた。前者については、寸法が小さくなることで、断面に対する PSF の補強効果が増すため高応力下ではその影響が顕著に表れていると容易に推察される。一方、後者の  $P_c$  と RC 梁寸法の関

係については、RC 梁の断面寸法の拡大に連れて PSF 内面とコンクリート表面との付着面積が大きくなるため、コンクリート表面から PSF への応力伝達が円滑になされたことが影響していると考えられる。

#### 3.2 曲げ剛性

Table 4 に各試験体の各種剛性 (Primary, Secondary, Tertiary Stiffness) を示す。表中の各剛性は後述する荷重-変形曲線の特異点を結ぶ直線の勾配として算出し、初期剛性 (Primary) は加力開始点から初期ひび割れ発生点まで、2次剛性 (Secondary) は初期ひび割れ発生点から引張鉄筋降伏点まで、3次剛性 (Tertiary) は引張鉄筋降伏点から最大荷重点までの直線の勾配とした。

PSF を使用した試験体を Plain と比較すると、初期剛性では 1.26~2.60 倍、2次剛性では 1.27~4.66 倍、並びに 3次

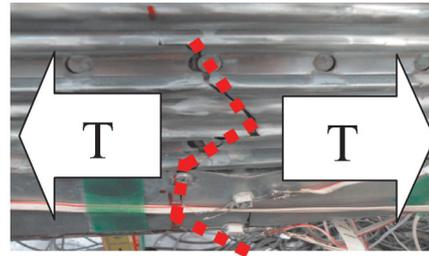


Photo 2 Tearing Failure of PSF

Table 3 Results of RC Beams Tested for Flexural Strength Using PSF

Identification	Initial Crack Load		Yield Load		Maximum Load	
	$P_c$ (kN)	[ ]	$P_y$ (kN)	[ ]	$P_{max}$ (kN)	[ ]
Plain-1	2.16	[ 1.00 ]	5.56	[ 1.00 ]	8.00	[ 1.00 ]
PSF-1	2.73	[ 1.26 ]	31.01	[ 5.58 ]	34.43	[ 4.30 ]
Plain-2	9.77	[ 1.00 ]	26.10	[ 1.00 ]	31.07	[ 1.00 ]
PSF-2	12.25	[ 1.25 ]	73.15	[ 2.80 ]	87.85	[ 2.83 ]
Plain-3	23.28	[ 1.00 ]	67.27	[ 1.00 ]	83.94	[ 1.00 ]
PSF-3	36.27	[ 1.56 ]	131.23	[ 1.95 ]	168.60	[ 2.01 ]
Plain-4	29.04	[ 1.00 ]	100.10	[ 1.00 ]	128.78	[ 1.00 ]
PSF-4	50.24	[ 1.73 ]	171.66	[ 1.71 ]	221.65	[ 1.72 ]

[ ]:Ratio to Plain

Table 4 Stiffness of RC Beams Using PSF

Type of Specimen	Primary Stiffness		Secondary Stiffness		Tertiary Stiffness	
	(kN/mm)	[ ]	(kN/mm)	[ ]	(kN/mm)	[ ]
Plain-1	6.10	[ 1.00 ]	1.75	[ 1.00 ]	0.14	[ 1.00 ]
PSF-1	7.71	[ 1.26 ]	8.17	[ 4.66 ]	0.75	[ 5.32 ]
Plain-2	21.71	[ 1.00 ]	5.14	[ 1.00 ]	0.21	[ 1.00 ]
PSF-2	43.15	[ 1.99 ]	6.55	[ 1.27 ]	0.82	[ 3.91 ]
Plain-3	16.39	[ 1.00 ]	7.74	[ 1.00 ]	0.33	[ 1.00 ]
PSF-3	42.67	[ 2.60 ]	14.52	[ 1.88 ]	1.79	[ 5.42 ]
Plain-4	26.76	[ 1.00 ]	8.05	[ 1.00 ]	0.60	[ 1.00 ]
PSF-4	50.25	[ 1.88 ]	14.98	[ 1.86 ]	2.53	[ 4.21 ]

[ ]:Ratio to Plain

剛性では、3.91~5.42倍という高い結果が得られた。寸法別に比較すると、 $L = 1 \sim 4$  mの試験体では3次剛性においてPlainの約4倍以上と著しい上昇が観察された。一方、 $L = 2 \sim 4$  mの試験体の2次剛性は1.27~1.88倍であるが $L = 1$  mの試験体では4.66倍の値を示している。これは、 $L = 1$  m試験体の断面に対するPSFの補強効果が過多であったことによって引張鉄筋が降伏する前からPSFが負担する応力が過大になったためと考えられる。

### 3.3 荷重-たわみ関係及び破壊挙動

Fig. 5に荷重 ( $P$ ) - たわみ ( $\delta$ ) 曲線を示す。たわみは、梁中央に設置した変位計から測定された値を用いた。図中の▲は各試験体の初期ひび割れ発生点、●は引張主筋降伏点を示し、■はPSFの破断点を示し、×は梁上端面のコンクリート上面の圧壊発生点を示している。また、Photo 2にPSFの破断時の写真を示す。

PSFを用いた試験体は、鉄筋が降伏するまで高い剛性を維持し、降伏後も耐力が緩やかに上昇し続け、最大荷重を示した。最大荷重に達すると同時に、PSFが引張側から破断し、PSFの破断の進展とともに、耐力は徐々に低下した。また、さらに変形が進行すると、梁上面のコンクリートが圧壊し、終局に至った。なお、PSFの試験体に関する降伏までの耐力及び剛性の上昇、降伏後の耐力上昇とその後の耐力劣化については、寸法の違いによる大差は見られなかった。しかし、コンクリート上面の圧壊発生（終局）時におけるたわみ量をPlainと比較すると、寸法による違いが確認される。つまり、 $L = 1$  mの試験体では、Plain-1のたわみ量が28mmであるのに対し、PSF-1は16mmであ

り、これらのたわみ量の比は43%となる。 $L = 2$  mの試験体では、Plain-2のたわみ量が28mmに対し、PSF-2は32mmで、比は13%である。同様に、 $L = 3$  mでは終局時のたわみ量の変形性能比が9%、 $L = 4$  mの試験体では4%と、寸法が大きくなるに連れ、その変形性能の差が小さくなる傾向が見られた。以上の事は、PSFの引張補強筋比が影響しているためと容易に推察できる。試験体断面が小さくなるとPSF引張補強筋比が増大するため、圧縮側断面領域の面積が小さくなり、圧縮縁に過大な応力が集中する。特に、 $L = 1$  mの試験体では、梁断面に対するPSFの引張補強筋比が過多となったため、Plainに比べ、早期の圧壊発生に至ったものと考えられる。

## 4. 寸法が異なるRC梁に対するPSFの影響 (寸法効果)

### 4.1 強度・変形への影響

本節では、寸法の違いによるPSFの補強効果をより明確に検討するため、各試験体の梁中央における曲げモーメント及びたわみを断面寸法及びスパンのパラメータで規準化した強度 ( $M/bD^2$ ) とたわみ角 ( $R$ ) の関係から考察する。これまで、在来工法によって作製された寸法が異なるRC造梁部材の報告例としては、断面寸法が拡大するに連れ強度が低下すること、並びに、寸法を変化させても終局たわみ角には影響しないことなどが述べられている<sup>3)~7)</sup>。本論文においても、各試験体の最大曲げ応力度及び終局たわみ角に着目し、考察を行う。

Fig. 7にPlain 1~4の強度 ( $M/bD^2$ ) - たわみ角 ( $R$ ) 曲線を示す。なお、図中の▲は初期ひび割れ発生点、●は

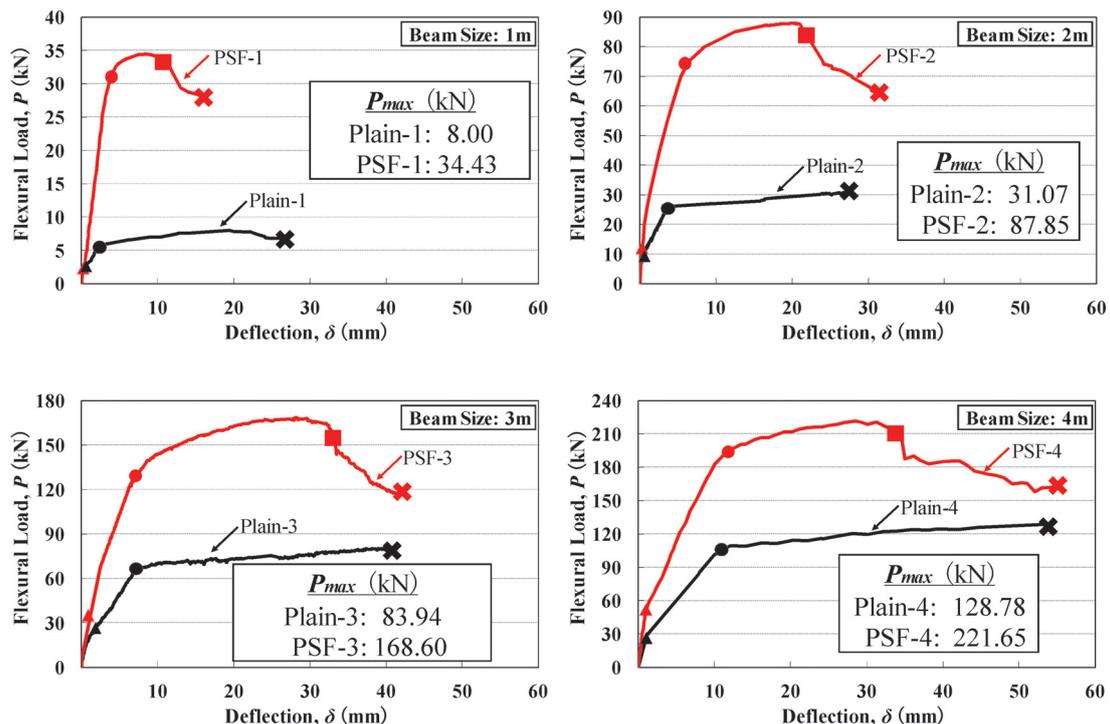


Fig. 5 Load ( $P$ ) - Deflection ( $\delta$ ) Curves of RC Beams Tested for Flexural Strength Using PSF

引張鉄筋降伏点及び×は圧壊発生点を示している。本研究における在来工法 Plain では、引張鉄筋比に多少の誤差があるため、引張鉄筋比が高いもの程、最大強度が大きい値を示している。また、引張鉄筋比が同一である Plain - 2 及び Plain - 4 の圧壊時強度の比較では寸法の大きい Plain - 4 が上回っている。RC 梁の寸法を拡大させることは、コンクリート打設などの施工不備につながり、これに伴って圧壊時曲げ強度の低下に影響すると考えられるが、本研究における Plain 試験体は、Plain - 2 と Plain - 4 の圧壊時曲げ強度の比較から寸法拡大に対する施工不備は生じていないことを確認した。一方、各 Plain 試験体の終局たわみ角の比較については、既往の研究結果と同様、寸法の違いによる差異は見られなかった。

Fig. 8 に PSF の強度 ( $M/bD^2$ ) - たわみ角 ( $R$ ) 曲線を示す。PSF を用いた試験体では、寸法が小さくなるに連れ、梁主筋降伏時及び最大荷重時強度が上昇する結果が得られた。一方、終局たわみ角の値については、Plain と同様、寸法の違いによる大差は見られなかった。曲げ応力度の結果については、当初の想定通り、PSF の引張補強筋比が影響していることは明白である。よって次節では、梁断面に対する PSF の引張補強筋比について検討・考察する。

4.2 梁断面に対する PSF の引張補強筋比の検討

Table 5 に引張鉄筋降伏時の中立軸比 ( $x_{n1}$ ) 及び PSF の引張補強筋比 ( $p_{t-PSF}$ ) を示す。表中の中立軸比は、試験体中央に貼付けたひずみゲージ (Fig. 1 内に示す圧縮及び引張鉄筋、並びに Fig. 3 内に示す PSF 側面における 3 点) の測定値から得た引張鉄筋降伏時の断面ひずみ度分布を作成し (Fig. 6), その分布から算出した。なお、表中の PSF 引張補強筋比 ( $p_{t-PSF}$ ) は、以上で得た鉄筋降伏時の中立

軸位置を考慮し、中立軸位置から下側の PSF の断面のみを引張側として算出した値である。以下に  $p_{t-PSF}$  の算出式 (1) を示す。

$$p_{t-PSF} = \frac{\{2(D - x_n) + b\} \cdot t_{PSF}}{bd} \dots \dots \dots (1)$$

Fig. 9 に中立軸比 ( $x_{n1}$ ) と PSF の引張補強筋比 ( $p_{t-PSF}$ ) の関係を、Fig. 10 に中立軸比と引張側 PSF と引張主筋を合算した補強筋比 ( $p_t$ ) との関係を示す。本研究の降伏時における  $x_{n1}$  と  $p_{t-PSF}$  の関係を検討すると、本実験における PSF - 1 から PSF - 3 までの断面寸法であれば、梁断面寸法が大きくなるに連れ中立軸比が徐々に増大し、その増分は小さなものである。しかし、PSF - 4 になると中立軸比が PSF - 3 に比べ約 0.1 上昇するため、 $L = 4 \text{ m}$  試験体以上のより実寸大に近い梁部材を用いた更なる実験的研究が必要と考えられる。

しかし、これらの中立軸比を考慮して算出している

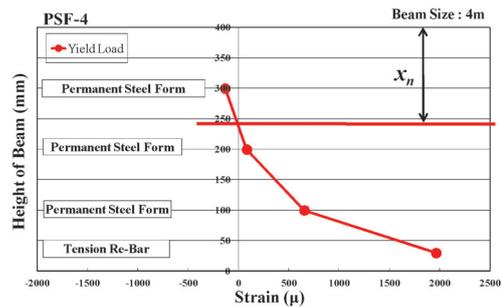


Fig. 6 Strain Profile along Depth of PSF - 4

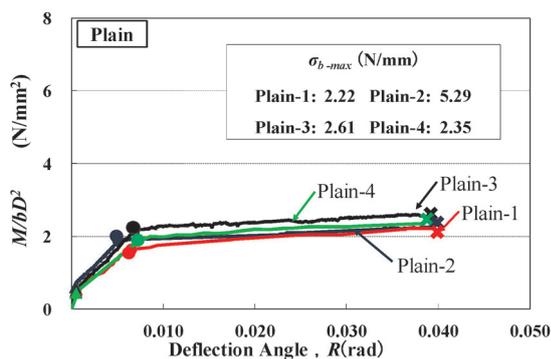


Fig. 7  $M/bD^2$  vs. Deflection Angle ( $R$ ) Curves of Plain

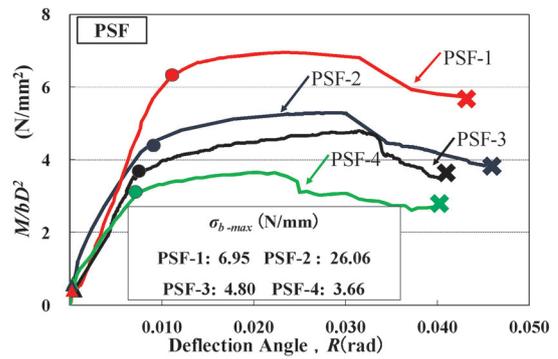


Fig. 8  $M/bD^2$  vs. Deflection Angle ( $R$ ) Curves of RC Beams Using PSF

Table 5 Identifications, Reinforcement Details and Neutral Axis Ratios of RC Beams Using PSF

Type of Specimen	$d$ (mm)	$A_{PSF}$ ( $\text{mm}^2$ )	$x_n$ (mm)	$x_{n1}$ (-)	$p_{t-PSF}$ (%)	$s p_t$ (%)	$p_t$ (%)	
PSF-1	75	84	25.0	0.31	1.87	[ 1.00 ]	0.59	2.46
PSF-2	150	168	50.0	0.33	0.93	[ 0.50 ]	0.68	1.61
PSF-3	209	239	91.0	0.34	0.64	[ 0.34 ]	0.78	1.42
PSF-4	245	292	155.0	0.44	0.50	[ 0.26 ]	0.68	1.18

[ ]:Ratio to PSF-1

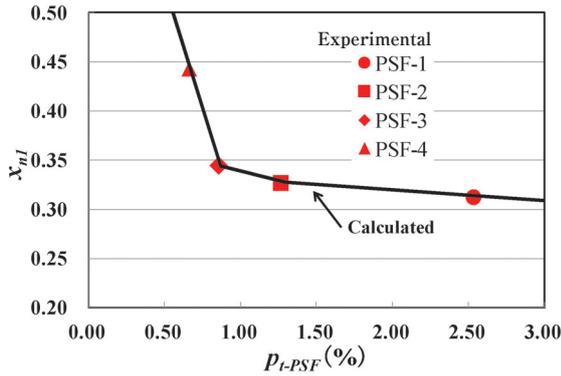


Fig. 9 Neutral Axis Ratio ( $x_{n1}$ ) vs. Tensile PSF Reinforcement Ratio ( $p_{t-PSF}$ )

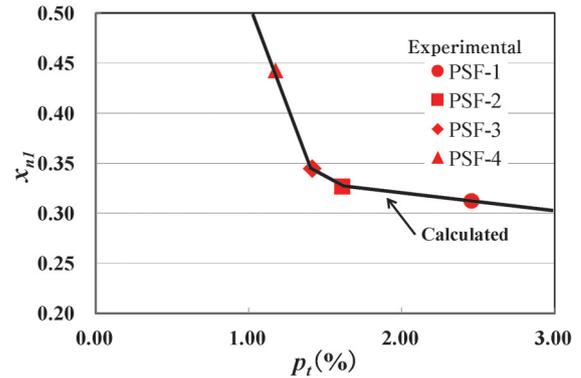


Fig.10 Neutral Axis Ratio ( $x_{n1}$ ) vs. Total PSF Reinforcement Ratio ( $p_t$ )

$p_{t-PSF}$  の値のみ (Table 5 参照) に着目すると、梁断面寸法が大きくなるに連れ、その値が  $1/2, 1/3, 1/4$  になるといった高い相関性が確認された。

Fig. 11 に PSF の強度 ( $M/bD^2$ ) と PSF 補強筋比 ( $p_{t-PSF}$ ) の関係を示す。図に示す様に、 $p_{t-PSF}$  の増加とともに、PSF の強度がほぼ比例的に上昇するといった関係が認められる。しかし、本研究のみでは、試験体数及びパターンが限られているため、今後より多くの実験試料 (特に、 $p_{t-PSF} = 0.5 \sim 1.0\%$ ) を提示することで、さらなる精細なデータを示す必要がある。

## 5. 結 論

本研究から得られた知見を以下に示す。

- (1) PSF を用いた試験体は、実寸大に近い寸法においても、Plain と比較して著しい耐力及び剛性上昇が得られることを確認した。
- (2) PSF を用いた試験体は、寸法が小さくなるに連れ、PSF 引張補強筋比が増大するため、Plain に比べて小さいたわみ量でコンクリートの圧壊を生じることを確認した。
- (3) PSF を用いた試験体の曲げ強度は、PSF の引張補強筋比に大きく影響され、本研究における試験体に関する限り、ほぼ比例的に増加することが確認された。
- (4) PSF を用いた試験体の梁降伏時における中立軸比は、 $p_{t-PSF}$  が約 1.0% 未満になると、顕著に増加する傾向が見られたが、その中立軸を基に算出した  $p_{t-PSF}$  の値は、梁断面寸法と高い相関関係が確認された。
- (5) 今後、 $p_{t-PSF} = 0.5 \sim 1.0\%$  の範囲となる断面を有した梁部材の実験試料を提示する必要性があると考えられる。

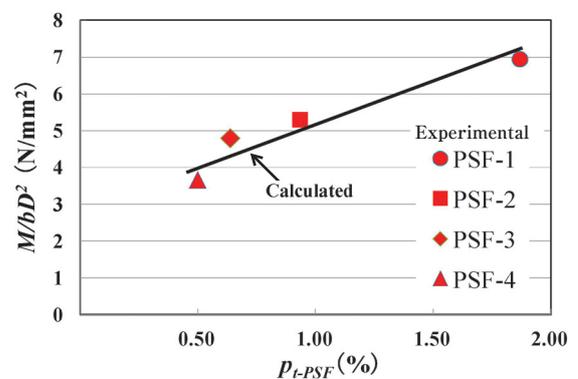


Fig.11  $M/bD^2$  vs. Tensile PSF Ratio ( $p_{t-PSF}$ )

## 参 考 文 献

- 1) 寺田 健一郎, Sanjay PAREEK: 鋼製永久型枠を用いた RC 梁部材の力学特性に関する基礎的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol. 31, No. 2, pp. 1651-1656, 2009. 7
- 2) 日本建築学会: 鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説 - 許容応力度設計法 - 1999, pp. 106-116, 1999
- 3) 寺井 雅和: 大断面 RC 基礎部材と寸法効果, 福山大学工学部紀要, 第30巻 pp. 85-94, 2006. 12
- 4) 日本コンクリート工学協会: 破壊力学の応用研究委員会報告書, pp. 141-171, 1993
- 5) Bazant, Z. P., Planas, J: Fracture and Size Effect in Concrete and Other Quasibrittle Materials, CRC Press pp. 616, 1998
- 6) 楠 浩一, 古市 耕輔: 鉄筋コンクリートはりの曲げ挙動に関する寸法効果の影響, コンクリート工学, Vol. 37, No. 2, pp. 35-38, 1999. 2
- 7) 桐生 博也, 中西 三和, 安達 洋: 曲げ破壊する鉄筋コンクリート造梁の寸法効果に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol. 26, No. 2, pp. 325-308, 2004. 2

# ネットワーク及び補修剤を用いた自己修復システムにおける コンクリートの自己修復性能についての検討

Sanjay PAREEK\*・大平 旭洋\*\*

## Evaluation of Self-Repair Performance of Concrete Using Self-Repair System Consisting of Network and Repair Material

Sanjay PAREEK\* and Akihiro OHIRA\*\*

### Abstract

The service life span of RC structures is drastically shortened by the cracks in concrete. The objective of this research work is to develop a self-repair system for cracks of reinforced concrete structures by using a network system. In this study, the regain of flexural strength of ordinary cement mortars by the self-repair system using a repair material in the network system and the storage period of the repair material in the network was taken into consideration. In addition to this, the influence of viscosity of the repair material injected in the network on the regain of flexural strength by self-repair system was also evaluated. In order to prolong the storage period of the repair material in the network, several types of surface treatment techniques were applied and tested.

**Key words:** Self-Repair, Crack, Network, Flexural Strength, Regain of Flexural Strength, Water Leakage Test

### 1. はじめに

現在建設されている大半の構造物にコンクリートが用いられており、適切な配慮の下に工事がなされている。しかしながら、コンクリートはその材料強度を超える過度の引張応力、セメントの水和反応に伴う温度応力及び収縮に伴う引張応力によりひび割れが発生し、その完全な防止は非常に困難である。また、ひび割れはコンクリートの強度や気密性の低下などの直接的な性能劣化だけでなく、中性化や塩害などによる劣化を促進し、鉄筋の錆を誘発することで早期劣化の原因となる。ひび割れによるコンクリートの早期劣化は、構造物の耐久性、安全性を低下させ、耐用年数を短いものにしてしまう。そのため、定期的な検査が必要になってくるが、検査や補修作業による構造物の使用停止などは望ましくない<sup>1)</sup>。

しかし、構造物の安全性は人々の生命や安全にも大きく関わってくる為、コンクリートの高耐久化への社会的要請は大きく、構造物の長寿命化が望まれている。

そこで近年では、自動的な補修作業を行うデバイス類をコンクリート内に埋設し、ひび割れを自己修復させる研究が盛んに行われている<sup>2), 3), 4), 5)</sup>。

本研究では、ネットワーク及び補修剤による自動的な補修作業を行うデバイスをコンクリートに付与し、構造物の耐久性向上の可能性について追求する。

ネットワークとは、供試体内部に設けた、空洞で円管状

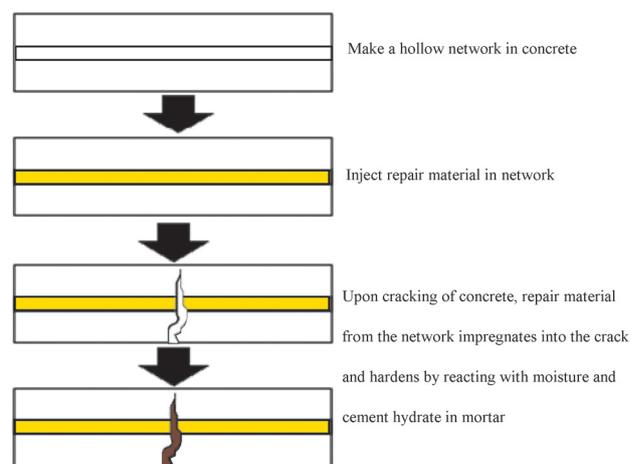


Fig. 1 Concrete Self-Repair System

の孔（つきぬけた穴）を示す。Fig. 1に当自己修復システムのコンセプトを示す。

Fig. 1より、打込み時に供試体内部に作製したネットワークに補修剤を注入し、補修剤を内包する。そして、ひび割れ発生時に、補修剤を内包したネットワークに亀裂が発生する。すると、中から補修剤が放出し、ひび割れに充填され硬化し、修復が行われる<sup>6), 7)</sup>。このような手法で、人の手による補修作業を必要とせず、補修剤がひび割れに自動的に充填され、ひび割れの修復を行う。

### 2. 実験目的

著者らはこれまでに、コンクリートのひび割れの補修方

平成24年6月7日受理

\* 日本大学工学部建築学科

\*\* 日本大学大学院工学研究科建築学専攻



## 4. 実験概要

### 4.1 繰り返し修復を行った際の強度回復率の変化

実際の RC 構造物を複数回復することを想定し、ひび割れの発生と修復を 8 回繰り返し、強度回復率の変化を比較することで、当自己修復システムの修復機能はどこまで保持できるか検討を行う。

Fig. 5 に供試体の設置状況を示す。まず、JIS R5201（セメントの物理試験方法）に従い、変位制御式載荷装置を用いて、作製したモルタル供試体 3 体の第 1 載荷の曲げ試験を行い、最大荷重に達してから破壊されるまでの荷重を機械的に制御することで、ひび割れ幅 0.05mm ～ 0.20mm のひび割れを発生させた。

第 1 載荷試験後、シリンダーを用いてネットワークに補修剤を注入し、ゴムを取り付け一定の圧力を加え、ひび割れに補修剤を自動的に充填させた。

1d 乾燥 [20℃, 60% (RH)] 養生を行い、ネットワーク内の補修剤の硬化を防ぐため、ネットワーク内の未硬化の補修剤をコンプレッサーを用いて排出した。次に、6d 乾燥 [20℃, 60% (RH)] 養生を行い、ひび割れに充填した補修剤を硬化させた。

養生終了後、第 2 載荷の曲げ試験を行い、同様の作業を行った後、第 3 載荷の曲げ試験を行った。これを第 8 載荷まで繰り返し、第 1 載荷試験時の曲げ強度と、第 2～第 8 載荷時の曲げ強度を比較し、各載荷ごとの強度回復率を算出した。強度回復率に用いた算出式を式(1)に示す。

$$C = \frac{B}{A} \times 100[\%] \quad (1)$$

A：第 1 載荷の曲げ強度 B：各第 2～第 8 載荷の曲げ強度  
C：強度回復率

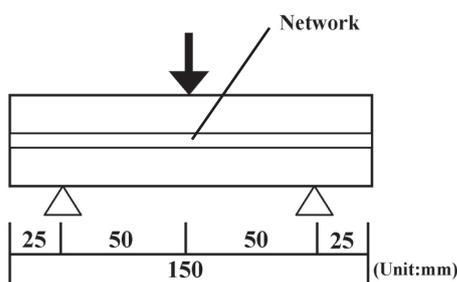


Fig. 5 Loading Conditions for Flexural Strength Test

### 4.2 養生温度が補修剤の硬化期間に及ぼす影響

補修剤として使用している 1 液性のエポキシ樹脂は、空気中の水分及びモルタル中の水和物と反応し硬化する。しかし、養生時の温度が補修剤の硬化に及ぼす影響及び補修剤の正確な硬化期間は明らかにされていない。そこで、各養生条件ごとに養生温度及び養生期間を設定し強度回復率を比較することで、補修剤の硬化条件に関して明らかにする。

まず、JIS R5201 に従い、変位制御式載荷装置を用いて作製したモルタル供試体 3 体の第 1 載荷の曲げ試験を行い、最大荷重に達してから破壊されるまでの荷重を機械的に制御することで、幅 0.05mm ～ 0.20mm のひび割れを発生させた。第 1 載荷試験後、シリンダーを用いてネットワークに補修剤を注入し、ゴムを取り付け一定の圧力を加え、ひび割れに補修剤を自動的に充填させた。

次に、乾燥養生を行い、ひび割れに充填した補修剤を硬化させた。なお、養生温度は [20℃, 60% (RH)], [30℃, 60% (RH)], [40℃, 60% (RH)] の 3 種類とした。養生期間は 1d, 3d, 5d, 7d の 4 種類とし、各養生温度ごとに 3 体ずつ試験を行った。

養生終了後、第 2 載荷の曲げ試験を行い、第 1, 第 2 載荷時の曲げ強度を比較し、式(1)の計算式を用いて、強度回復率を算出し、養生条件ごとに比較を行った。

### 4.3 補修剤の粘性及びひび割れ幅の違いがひび割れへの充填に及ぼす影響

既往の研究結果<sup>6)</sup>より、低粘性及び中粘性の補修剤 (L, M) を用いることで、ひび割れ幅 0.05mm ～ 0.20mm のひび割れを修復することができた。しかし、より大きなひび割れに対し、同様に修復を行うことができるのか、補修剤 (L, M) はどの程度のひび割れまで修復することが可能なのか課題となった。そこで、鉄筋を配筋したコンクリート供試体を作製し、曲げ試験を行い、大きなひび割れを発生させる。そして、粘性の異なる補修剤を用いて修復を行うことで、補修剤の粘性及びひび割れ幅の関係について明らかにする。

4.1 及び 4.2 では、修復前後の強度を測定することで強度回復率を算出し、修復の目安としていたが、本研究では鉄筋が配筋されているため、強度回復率の測定ができない。そこで、ネットワークに色水（青）を注入する漏水試験を行うことでひび割れの修復を確認する。

供試体の設置状況を Fig. 6 に示す。まず、JIS R5201 に従い、アムスラー型万能試験機を用いて、2 点集中載荷による曲げ試験を行い、コンクリート供試体にひび割れを発生させた。

次に、ネットワークに色水を注入し、圧力を加えることで、供試体に発生したひび割れを目視で確認した。ひび割れの確認後、シリンダーを用いて、ネットワーク内に補修

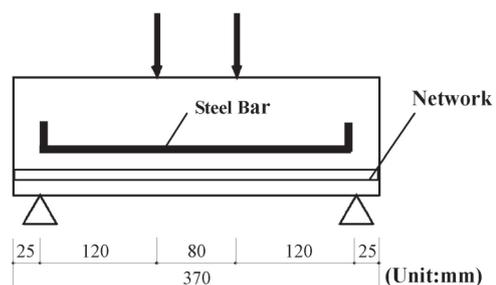


Fig. 6 Loading Conditions for Flexural Strength Test

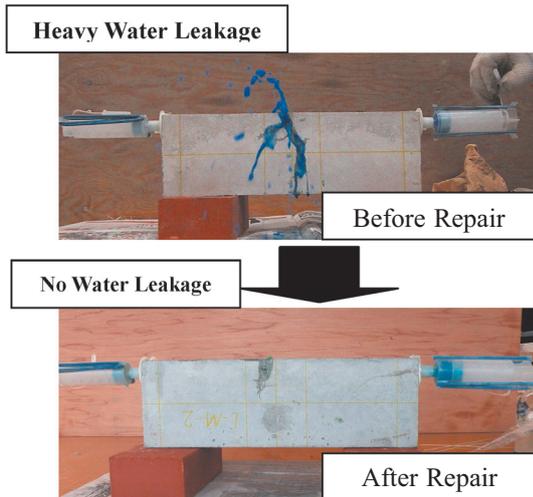


Photo 3 A View of Test for Water Leakage Before Repair and After Repair

剤を注入し、圧力を加えることでひび割れに補修剤を充填させた。補修剤は粘性の異なる M 及び L の 2 種類を使用し、2本のネットワーク内に、補修剤 L のみを注入したものを L-L、補修剤 M のみを注入したものを M-M、補修剤 L を注入した後に M の補修剤を注入したものを L-M、補修剤 M を注入した後に補修剤 L を注入したものを M-L とし、各3体ずつ試験を行った。

その後、促進養生を行い、ひび割れに充填された補修剤を硬化させることで、ひび割れの修復を行った。

第2養生後、ひび割れの確認時と同様に、着色した色水をネットワーク内に注入し、圧力を加えることで、ひび割れの修復を漏水の有無により確認した。なお、促進養生の養生条件は5 d 乾燥 [20℃, 60% (RH)] + 4 h 蒸気 (50℃) + 20h 乾燥機 (50℃) + 1 d 乾燥 [20℃, 60% (RH)] 養生として行った。

### 5. 試験結果及び考察

#### 5.1 繰り返し修復を行った際の強度回復率の変化

Table 3 及び Fig. 7 にひび割れの発生と修復を8回繰り返した際の試験結果を、Photo 4 に供試体の破壊状況を示す。

Fig. 7 より、ひび割れの修復を8回繰り返していても高い強度回復率を示していることから、当自己修復システムは修復回数に関係なく、優れた自己修復機能を発現させることが可能であるといえる。

また、各載荷ごとに曲げ強度及び強度回復率が上昇していき、第8載荷時には、元の強度の2倍近い曲げ強度を示していることも確認できる。

強度上昇の要因として、Photo 4 に示すように、供試体の中央付近に発生したひび割れを繰り返し修復しているため、供試体の中央部が補修剤 (エポキシ樹脂) の硬化により補強されたこと、低粘性の補修剤が繰り返し修復を行う事で供試体内部に浸透していき、モルタル供試体の空隙を埋めたことなどが考えられる。

Table 3 Details of Repeated Flexural Test and Self-Repair of Mortar Specimen

Loading Cycle	Max Load (kN)	Flexural Strength (N/mm <sup>2</sup> )	Regain of Flexural Strength (%)
1st Loading	2.07	5.07	—
2nd Loading	2.62	6.15	121.5
3rd Loading	2.94	6.88	134.9
4th Loading	3.04	7.12	139.7
5th Loading	3.37	7.90	157.2
6th Loading	3.47	8.13	161.3
7th Loading	3.58	8.45	166.7
8th Loading	3.95	9.25	182.8

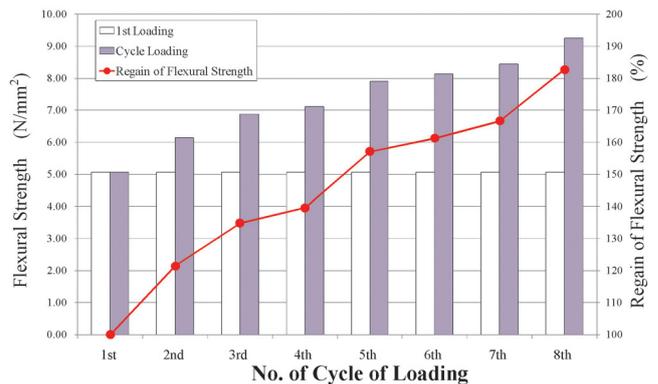


Fig. 7 Repeated Flexural Tests and Self-Repair of Mortar Specimens for 8 Cycles

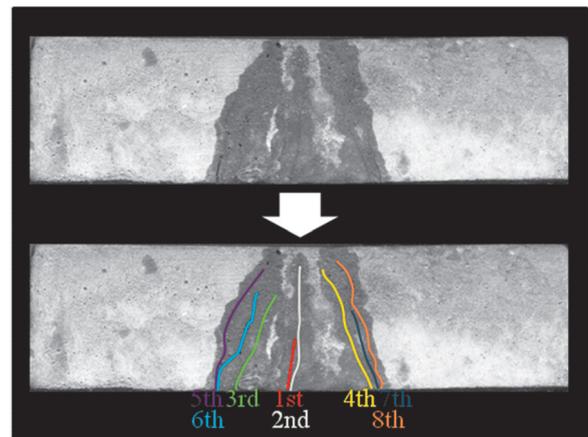


Photo 4 Specimen After Repeated 8 Times Flexural Test and Self-Repair

Table 4 Results of Flexural Tests After Self-Repair at Different Curing Temperatures

Type of Specimen	Curing Condition	1st Loading	2nd Loading	Regain of Strength (%)
		Flexural Strength (N/mm <sup>2</sup> )	Flexural Strength (N/mm <sup>2</sup> )	
1d-20	Normal (20℃)	6.62	2.95	44.6
3d-20		5.78	7.02	121.4
5d-20		6.91	8.51	123.0
7d-20		6.95	6.57	94.5
1d-30	Normal (30℃)	5.61	7.98	142.2
3d-30		5.15	6.06	117.7
5d-30		6.66	6.83	102.5
7d-30		7.44	7.12	95.7
1d-40	Normal (40℃)	6.24	7.17	115.0
3d-40		7.07	7.21	102.0
5d-40		7.12	8.18	114.9
7d-40		6.41	6.51	101.6

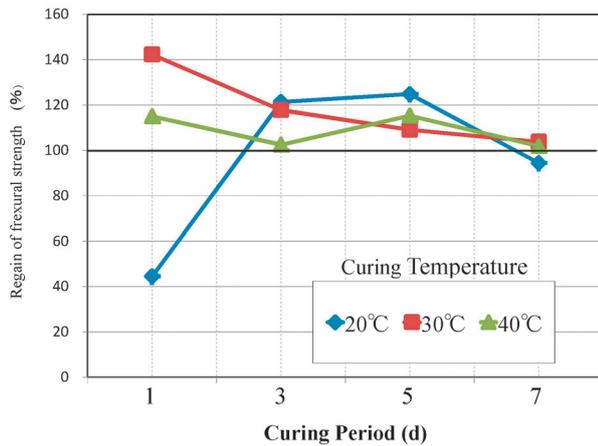


Fig. 8 Effect of Curing Temperature on Flexural Strength

### 5.2 養生温度が補修剤の硬化期間に及ぼす影響

Table 4 及び Fig. 8 に、各養生条件の試験結果を示す。

養生温度20℃の供試体に関しては、1dの養生期間では、強度回復率は50%以下であり、補修剤は十分に硬化していないことが確認できる。しかし、3d以降は強度回復率は100%以上を示しており、養生温度20℃で補修剤を硬化させるには、3dの養生期間が必要であるといえる。

養生温度30℃、40℃の供試体に関しては、1dの養生期間で100%以上の強度回復率を示しており、補修剤が十分に硬化していることが確認できる。このことより、養生温度が30℃以上の場合、補修剤を硬化させるのには1dの養生期間で十分であるといえる。

養生温度により、補修剤の硬化期間に差が生じている要因として、温度が高くなるほど、エポキシ樹脂と空気中の水分の反応が促進されるためだと考えられる。

### 5.3 補修剤の粘性及びひび割れ幅の違いがひび割れへの充填に及ぼす影響

曲げ試験により供試体に発生したひび割れ及び色水によるひび割れの修復の確認の結果を Fig. 9 及び Table 5 に示す。

曲げ試験の結果より、供試体に0.17mm～0.64mmのひび割れを発生させることができた。これらのひび割れに対し、色水の注入による確認を行った結果、供試体の底面に関しては、ひび割れ幅、ひび割れの本数及び補修剤の粘性に関わらず、全ての供試体においてひび割れからの漏水が見られなかった。これにより、供試体の底面に発生したひび割れは完全に修復されているといえる。

しかし、側面に関しては、L-Mを除くほぼ全ての供試体で若干の漏水が見られた。特に補修剤Lに関しては、補修剤が全てのひび割れに充填されているように見えるが、色水によるひび割れ修復の確認を行うと、補修剤Mより漏水の量が多い結果となった。

ひび割れ幅ごとに見ていくと、補修剤Mは0.20mm以下の細かなひび割れを完全に修復することはできないが、0.50mmまでのひび割れを完全に修復することができ、

Table 5 Evaluation of Self-Repair by Water Leakage Test for Different Crack Widths

Crack Width (mm)	Epoxy L	Epoxy M
0.05～0.10	●	×
0.10～0.20	●	▲
0.20～0.30	●	●
0.30～0.40	●	●
0.40～0.50	×	●
0.50～0.60	×	▲
0.60～0.70	×	▲

● Completely Repaired ▲ Partially Repaired  
× Not Repaired

0.70mmの大きなひび割れに対しても、ある程度修復することが可能であるといえる。

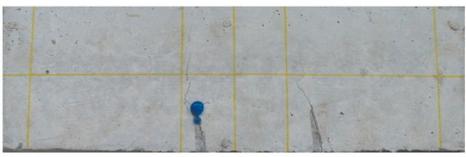
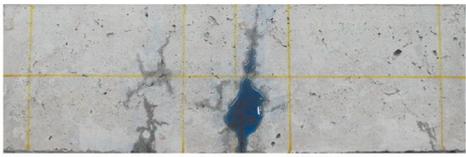
補修剤Lは、0.10mm以下の細かなひび割れから、0.40mmまでのひび割れを完全に修復することができるが、0.40mm以上の側面のひび割れに対しては完全に修復を行うことができないという結果になった。

Table 1より、Mの粘性は1900mPa・sに対しLは150mPa・sとLの粘性が低いため、ひび割れ幅の大きなものに対しては、ひび割れに浸透することができたが、充填されずに補修剤が流れ出てしまったことが要因と考えられる。

## 6. ま と め

- 1) 当自己修復システムは、修復回数に関係なく自己修復機能を発現させることができる。また、繰り返し修復を行う事で供試体の強度は徐々に増加していく。
  - 2) ひび割れに充填された補修剤は、20℃で3d、30℃及び40℃では1dの養生期間で完全に硬化する。
  - 3) 中粘性の補修剤Mは、0.20mm～0.50mmまでのひび割れを完全に修復することが可能であり、0.70mmまでのひび割れに関しても、ある程度の修復が期待できる。
- 低粘性の補修剤Lは、0.05mm～0.40mmまでのひび割れを完全に修復することができるが、それ以上のひび割れに関しては修復が難しいという結果になった。本実験より、当自己修復システムの自己修復性能に関して以上の事が明らかになった。

今後の課題としては、ネットワーク及び補修剤を用いた自己修復システムの研究結果を実構造物に应用することを検討するために、実際のRC梁を用いた試験を行う必要があると考えられる。

Evaluation of Self-Repair of Concrete						
● : Completely Repaired			●			
▲ : Partially Repaired						
✕ : Not Repaired						
▲				✕		

Specimen Identification	M-M-1			M-L-1		
Surface	Right Side	Left Side	Bottom	Right Side	Left Side	Bottom
Crack Width (mm)	a=0.54 b=0.22			a=0.49 b=0.22		
Test by Water Leakage	a: ▲ b: ●	a: ▲ b: ●	a: ● b: ●	a: ✕ b: ●	a: ● b: ●	a: ● b: ●

Specimen Identification	M-M-2			M-L-2		
Surface	Right Side	Left Side	Bottom	Right Side	Left Side	Bottom
Crack Width (mm)	a=0.52 b=0.23			a=0.38		
Test by Water Leakage	a: ▲ b: ●	a: ▲ b: ●	a: ● b: ●	a: ●	a: ●	a: ●

Specimen Identification	M-M-3			M-L-3		
Surface	Right Side	Left Side	Bottom	Right Side	Left Side	Bottom
Crack Width (mm)	a=0.64 b=0.17			a=0.36 b=0.35		
Test by Water Leakage	a: ▲ b: ●	a: ▲ b: ●	a: ● b: ●	a: ● b: ●	a: ● b: ●	a: ● b: ●

Specimen Identification	L-L-1			L-M-1		
Surface	Right Side	Left Side	Bottom	Right Side	Left Side	Bottom
Crack Width (mm)	a=0.24 b=0.60			a=0.28 b=0.16		
Test by Water Leakage	a: ● b: ✕	a: ● b: ✕	a: ● b: ●	a: ● b: ●	a: ● b: ●	a: ● b: ●

Specimen Identification	L-L-2			L-M-2		
Surface	Right Side	Left Side	Bottom	Right Side	Left Side	Bottom
Crack Width (mm)	a=0.46 b=0.18			a=0.36		
Test by Water Leakage	a: ✕ b: ●	a: ✕ b: ●	a: ● b: ●	a: ●	a: ●	a: ●

Specimen Identification	L-L-3			L-M-3		
Surface	Right Side	Left Side	Bottom	Right Side	Left Side	Bottom
Crack Width (mm)	a=0.56			a=0.16 b=0.51		
Test by Water Leakage	a: ✕	a: ✕	a: ●	a: ● b: ▲	a: ● b: ●	a: ● b: ●

Fig. 9 Details of Self-Repair of Crack in Concrete by Self-Repair System Using Various Combination of Epoxy Resin for Injection

## 参考文献

- セメント系材料の自己修復性の評価とその利用法研究専門委員会, 社団法人日本コンクリート工学協会, 2009. 3
- Yachuan Kuang, Jinping Ou: Self-repairing performance of concrete beams strengthened using superelastic SMA wires in combination with adhesives released from hollow fibers, J Cent South Univ Technol, Vol.15, No. 3, pp. 411-417, 2008. 4
- Sze Dai, Phuoc Thao, Tran Diep, Ser Tong : Self-healing concrete structural elements, Third International Conference Self-Healing Materials, pp. 322-323, 2011. 6
- Tomoya Nishiwaki, Akihiro Oohira, Sanjay Pareek: AN EXPERIMENTAL STUDY ON THE APPLICATION OF SELF-REPAIRING SYSTEM TO RC STRUCTURE USING SELECTIVE HEATING, Third International Conference Self-Healing Materials, pp. 320-321, 2011. 6
- Kshitij C. SHRESTHA, Sanjay PAREEK, Toshihiro OMO-RI, Yoshikazu ARAKI : FEASIBILITY OF SELF-REPAIR NETWORK SYSTEM IN CONCRETE BEAMES WITH Cu-Al-Mn SUPERELASTIC ALLOY BARS, コンクリート工学年次論文集, 第34巻, 第1号, pp. 1438-1443, 2012.
- 熊田廣樹, Sanjay PAREEK: ネットワークを用いた曲げ強度の自己修復機能を有するモルタルに関する基礎的研究, コンクリート工学年次論文集, 第32巻, 第1号, pp. 1871-1876, 2010.
- Sanjay PAREEK, Akihiro OOHIRA : A FUNDAMENTAL STUDY ON REGAIN OF FLEXURAL STRENGTH OF MORTARS BY USING A SELF-REPAIR NETWORK SYSTEM, Third International Conference Self-Healing Materials, pp. 46-47, 2011. 6

# 有機酸塩系ブラインの基本的性質

— 第1報：ギ酸カリウム水溶液の密度，屈折率，比熱および粘度 —

佐々木直栄\*・小川 清\*

## Fundamental Properties of an Organic Acid-Salt System as Brine — 1st Report: Density, Refractive Index, Specific Heat and Viscosity of an Aqueous Potassium Formate Solution —

Naoe SASAKI\* and Kiyoshi OGAWA\*

### Abstract

Currently, various types of brine are used as secondary refrigerants. Recently, some new types have been recognized, and the type of brine that uses a potassium formate (PF) solution is increasingly gaining attention because its use can decrease environmental pollution.

In this study, the fundamental properties of an aqueous PF solution, such as density, refractive index, specific heat and viscosity are investigated experimentally. The results indicate that the measured properties except specific heat increases with solution concentration and decreases with increasing solution temperature. In addition, the empirical equations of these properties are presented and are in good agreement with experimental results.

**Key words:** Potassium formate solution, Density, Refractive index, Specific heat, Brine

### 1. 緒 言

近年、環境問題をはじめ夏場の電力負荷平準化などが問題となっている。また、この度の福島原子力発電所の事故や全国に設置されている原子力発電所の再稼動をめぐる議論がなされており、電力供給はひっ迫化の状況にある。電力不足を補うために火力発電所の再稼動や新たな火力発電所の建設が進められているが、それに伴って火力発電所から排出される燃焼ガス中のCO<sub>2</sub>による更なる環境悪化が懸念される。したがって、再生可能エネルギーの利用促進、省エネルギーやエネルギーの有効利用をより一層推進していく必要がある。

このような状況において、CO<sub>2</sub>削減に貢献しながら安価な夜間電力を活用できるヒートポンプ給湯システムや、夏場の電力消費量のピークシフトを可能とする氷蓄熱冷房システムなどが開発・実用化されている。最近では、地中熱を利用するヒートポンプシステムが注目を集め、採熱媒体としてグリコール系のプロピレングリコールなどのいわゆる二次冷媒（ブライン）が用いられている<sup>1)</sup>。また、そのほかに塩化カルシウムなどの無機塩類系、アルコール系および有機溶媒系など数多くのブラインが使用されてきたが、その中には環境汚染が危惧されるため諸外国ではすでに規制あるいは使用が禁止されているものもある。昨今の環境問題の高まりとともに、より環境負荷の小さい、安全で省エネルギー性の高いブラインの開発が望まれている。

このような観点より次世代ブラインとして有機酸塩系ブラインであるギ酸カリウムや酢酸カリウムが注目されている<sup>2-4)</sup>。しかしながら広範囲な温度ならびに濃度についての詳細な物性に関する報告が見当たらないのが現状である。本報ではギ酸カリウム水溶液の基本的な熱物性である密度、屈折率、比熱および粘度に及ぼす温度および濃度の影響を明らかにし、また測定結果に基づき近似式を作成したので、その結果について述べる。

### 2. 測定方法

蒸留水に純度99.4%のギ酸カリウムを溶解し、所定の濃度に調整した水溶液について大気圧下で諸物性を測定した。

#### 2.1 密 度

振動式密度計（Anton Paar DMA48, 精度： $\pm 1 \times 10^{-4}$  g/cm<sup>3</sup>, 温度精度： $\pm 0.01^\circ\text{C}$ ）によって温度0～70°C, 濃度0～50wt%の範囲で密度を測定した。

#### 2.2 屈 折 率

アッペ屈折計（アタゴ DR-A1, 精度： $\pm 0.0002^{\text{nd}}$ , 温度最小表示： $0.1^\circ\text{C}$ ）によって温度5～50°C, 濃度0～50wt%の範囲で屈折率を測定した。

#### 2.3 比 熱

固有振動周期測定方式による液体比熱計（京都電子工業 SHA-500, 精度： $\pm 0.05\text{J}/(\text{g}\cdot\text{K})$ , 温度調節精度： $\pm 0.1^\circ\text{C}$ ）によって温度5～50°C, 濃度0～50wt%の範囲で比熱を測

定した。

## 2.4 粘度

シリンダー形状の回転式スタービンゲージ粘度計 (Anton Paar SVM3000, 再現性: 1.0%, 温度再現性: 0.05°C) により温度 0~50°C, 濃度 10~50wt% の範囲で粘度を測定した。

## 3. 測定結果および考察

### 3.1 密度

密度の測定結果を Fig. 1 に示す。密度は, 他の塩類水溶液と同様に, 温度の上昇に伴って徐々に減少し, 濃度の増加に伴って顕著に増加する傾向が得られた。また, 水の密度と比べて約 1.05~1.35 倍と大きな値となった。

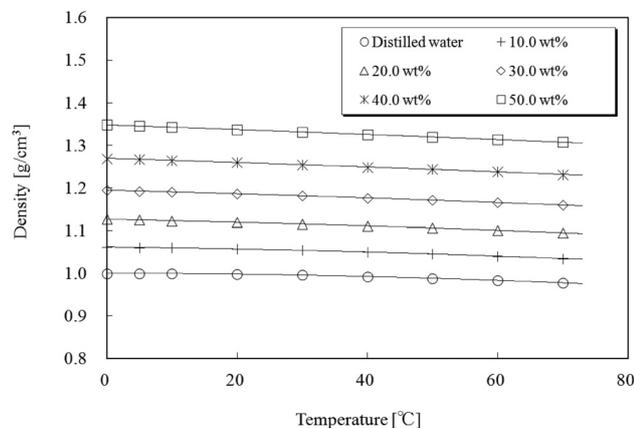


Fig. 1 Relation between density and solution temperature.

これらの測定結果に基づき, 密度  $\rho$  [g/cm<sup>3</sup>] を温度  $t$  [°C] の 2 次式で表す以下の近似式を作成した。

$$\rho = a + bt + ct^2 \quad (1)$$

$$0 \leq t \leq 70^\circ\text{C} \quad 0 \leq x \leq 50\text{wt}\%$$

ただし, 式(1)の各係数は, 濃度  $x$  [wt%] の関数として以下に示す。

$$a = 1.0005 + 5.808 \times 10^{-3}x + 2.2587 \times 10^{-5}x^2$$

$$b = -2.3844 \times 10^{-5} - 1.7585 \times 10^{-5}x + 2.2591 \times 10^{-7}x^2 - 1.5252 \times 10^{-9}x^3$$

$$c = -4.2630 \times 10^{-6} + 1.4579 \times 10^{-7}x - 2.3012 \times 10^{-9}x^2 + 1.6104 \times 10^{-11}x^3$$

式(1)は, 本測定値を最大偏差 0.08%, 平均偏差 0.04% で近似することができた。また, Landolt-Bronstein<sup>5)</sup> (以下, L-B), International Critical Table<sup>6)</sup> (以下, ICT) ならびに日本機械学会蒸気表<sup>9)</sup> (以下, JSME) (0.1MPa, 温度 10~50°C の水) による値と比較するために, 本近似式からの偏差 [%] を Fig. 2 に示した。

その結果 L-B による値と 0.37% 以内で, ICT と 0.12% 以内で, JSME とは -0.07% 以内でそれぞれ一致することが分かった。

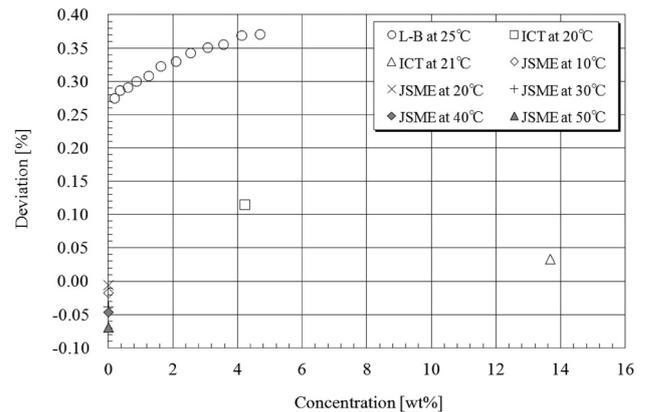


Fig. 2 Comparison of calculated values and literature values of density.

### 3.2 屈折率

屈折率の測定結果を Fig. 3 に示す。屈折率は温度上昇に伴って緩やかに減少し, 濃度の増加に伴って増加する傾向を示した。また, 水の屈折率と比較して大きな値となることが分かった。

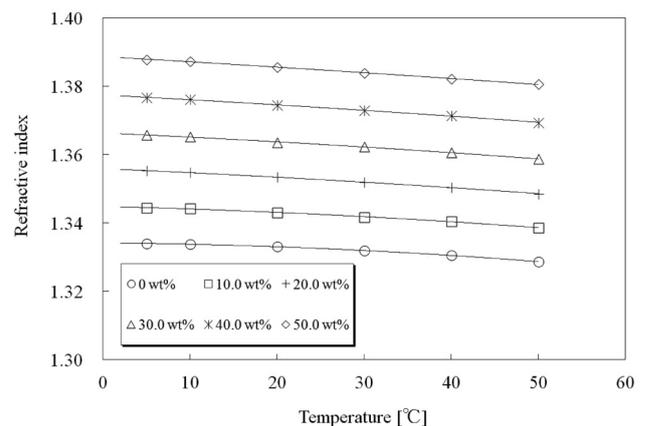


Fig. 3 Relation between refractive index and solution temperature.

これらの測定結果に基づき屈折率を温度  $t$  [°C] の 2 次式で表す以下の近似式を作成した。

$$n_D = a + bt + ct^2 \quad (2)$$

ただし, 式(2)の各係数は, 濃度  $x$  [wt%] の関数として以下に示す。

$$a = 1.33402 + 1.08927 \times 10^{-3}x$$

$$b = -1.87796 \times 10^{-5} - 6.25675 \times 10^{-6}x + 1.25678 \times 10^{-7}x^2 - 1.04185 \times 10^{-9}x^3$$

$$c = -1.80115 \times 10^{-6} + 8.44659 \times 10^{-8}x - 2.17969 \times 10^{-9}x^2 + 2.16806 \times 10^{-11}x^3$$

式(2)は, 本測定値を最大偏差 0.03%, 平均偏差 0.012% で近似することができた。また, ICT<sup>7)</sup> ならびに JSME<sup>9)</sup> (10~50°C の水) による値と比較するために, 本近似式か

らの偏差 [%] を Fig. 4 に示した。ICT<sup>7)</sup> の濃度28.6wt%の値との偏差が-0.17%とやや大きい<sup>8)</sup>、濃度16wt%以下においては0.04%以内で一致することが確認された。また、JSME<sup>9)</sup> とは0.062%以内で一致した。

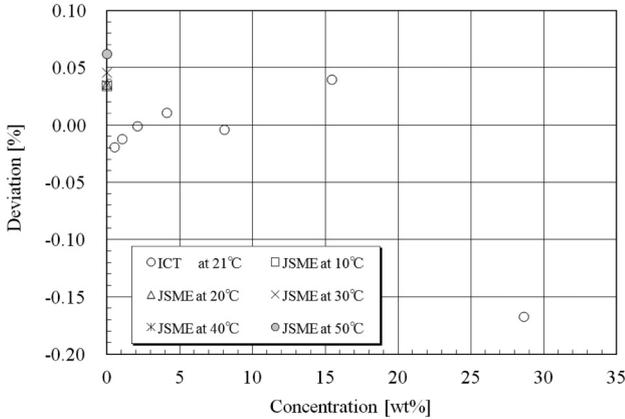


Fig. 4 Comparison of calculated values and literature values of refractive index.

### 3.3 比熱

比熱の測定結果を Fig. 5 に示す。比熱は、温度の上昇に伴って僅かではあるが増加の傾向を示し、濃度の増加と共に減少する傾向が得られた。また、水の比熱と比べ小さな値となることが分かった。

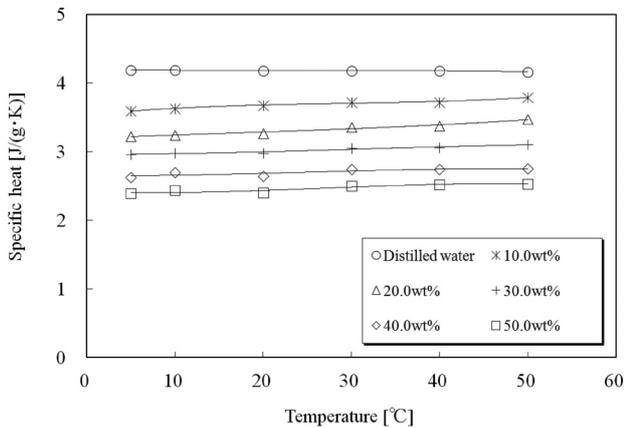


Fig. 5 Relation between specific heat and solution temperature.

これらの測定結果に基づき、比熱  $c_p$  [J/(g·K)] を温度  $t$  [°C] の3次式で表す近似式を作成した。

$$C_p = a + bt + dt^3 \quad (3)$$

$$5 \leq t \leq 50^\circ\text{C} \quad 0 \leq x \leq 50\text{wt}\%$$

ただし、式(3)の各係数は、濃度  $x$  [wt%] の関数として以下に示す。

$$a = 4.191 - 7.757 \times 10^{-2}x + 1.685 \times 10^{-3}x^2 - 1.697 \times 10^{-5}x^3$$

$$b = -2.548 \times 10^{-3} + 3.893 \times 10^{-3}x - 3.084 \times 10^{-4}x^2 + 8.144 \times 10^{-6}x^3 - 7.100 \times 10^{-8}x^4$$

$$c = 1.029 \times 10^{-4} - 1.269 \times 10^{-4}x + 1.061 \times 10^{-5}x^2 - 2.866 \times 10^{-7}x^3 + 2.548 \times 10^{-6}x^4$$

$$d = -1.389 \times 10^{-6} + 1.432 \times 10^{-9}x - 1.137 \times 10^{-7}x^2 + 2.956 \times 10^{-9}x^3 - 2.557 \times 10^{-11}x^4$$

式(3)は、Fig. 6 に示すように、本測定値を最大偏差約3.0%以内で、平均偏差0.93%で近似することができた。また、この水溶液の報告例が見当たらないので JSME<sup>9)</sup> による0.1MPa、10~50°Cの水の比熱と比較した結果、0.8%以内で一致することが確認された。なお、図中の  $c_{p,eq}$  は測定時の温度ならびに濃度を用いて近似式(3)より得た比熱を、 $c_{p,exp}$  は測定値を、それぞれ表す。

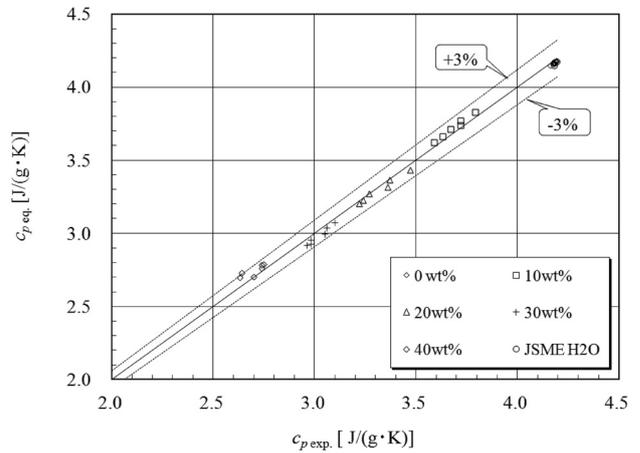


Fig. 6 Comparison of calculated values and measured values.

### 3.4 粘度

粘度の測定結果を Fig. 7 に示す。粘度は、温度上昇に伴って減少し、濃度の増加と共に増加する傾向が得られた。

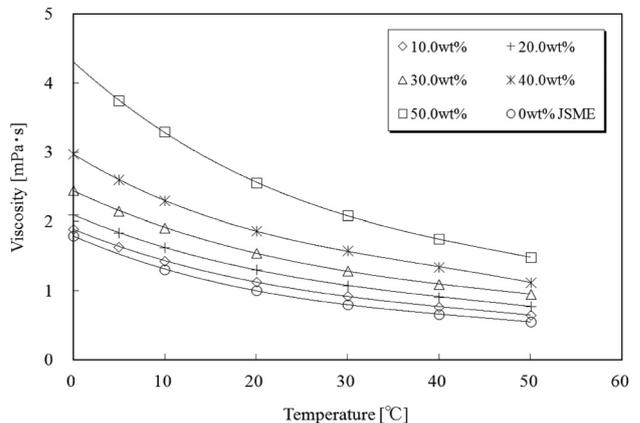


Fig. 7 Relation between viscosity and solution temperature.

今回測定した物性値の中で温度ならびに濃度による影響が最も顕著に表われた。また、水の粘度と比べ大きな値となることが分かった。

これらの測定結果に基づき、粘度  $\eta$  [mPa・s] を温度  $t$  [°C] の3次式で表す近似式を作成した。

$$\eta = a + bt + ct^2 + dt^3 \quad (4)$$

$$0 \leq t \leq 50^\circ\text{C} \quad 10 \leq x \leq 50\text{wt}\%$$

ただし、式(4)の各係数は、濃度  $x$  [wt%] の関数として以下に示す。

$$a = 1.792 - 1.119 \times 10^{-2}x + 2.785 \times 10^{-3}x^2 - 9.644 \times 10^{-5}x^3 + 1.307 \times 10^{-6}x^4$$

$$b = -5.726 \times 10^{-2} + 1.057 \times 10^{-3}x - 9.972 \times 10^{-5}x^2 + 3.419 \times 10^{-6}x^3 - 4.705 \times 10^{-8}x^4$$

$$c = 1.034 \times 10^{-3} - 5.553 \times 10^{-5}x + 7.476 \times 10^{-6}x^2 - 3.925 \times 10^{-7}x^3 + 8.608 \times 10^{-9}x^4 - 6.325 \times 10^{-11}x^5$$

$$d = -7.738 \times 10^{-6} + 8.819 \times 10^{-7}x - 1.399 \times 10^{-7}x^2 + 7.918 \times 10^{-9}x^3 - 1.822 \times 10^{-10}x^4 + 1.440 \times 10^{-12}x^5$$

式(4)は、Fig. 8に示すように、本測定値を最大偏差2.0%、平均偏差0.60%で近似することができた。さらに、式(4)は、ICT<sup>8)</sup>の濃度4.04wt%、温度15°Cの値と-9.9%の偏差で、JSME<sup>9)</sup>による0.1MPa、温度0~50°Cの水の値と平均偏差0.42%で一致することが確認された。なお、図中の $\eta_{\text{eq}}$ は測定時の温度と濃度を用いて近似式より得た粘度を、 $\eta_{\text{exp}}$ は測定値を、それぞれ表す。式(4)とICT<sup>8)</sup>との偏差が比較的大きい要因として、ICT<sup>8)</sup>の濃度が本研究における測定範囲よりも小さいことが考えられる。水(濃度0 wt%)の場合には式(4)による計算値とJSME<sup>9)</sup>の文献値が良く一致していることから、濃度0 <  $x$  < 10wt%の低濃度領域の粘度を高精度に予測可能な実験式の開発が今後の課題と考えられる。

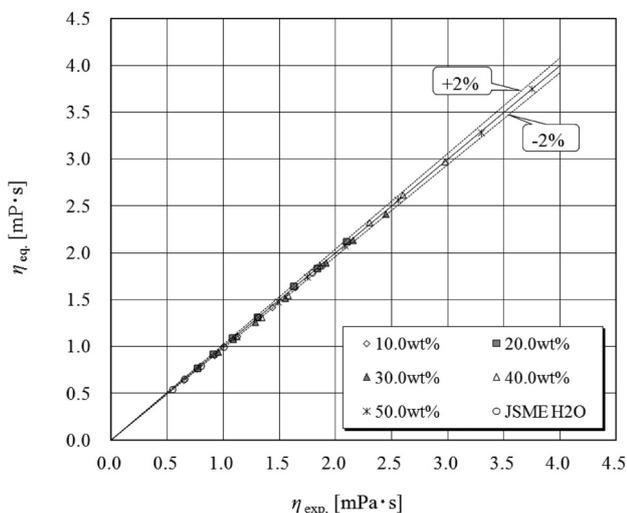


Fig. 8 Comparison of calculated values and experimental values.

#### 4. プロピレングリコール水溶液との比較

ブラインとして望ましい性質は環境に対する負荷が小さく毒性がないことは勿論のこと、粘度が小さく、比熱ならびに熱伝導率が高いことなどが挙げられる。ここで、本測定結果のギ酸カリウム水溶液(以下、PF水溶液)とブラインとして実用化されているプロピレングリコール水溶液(以下、PG水溶液)のそれぞれの粘度<sup>10)</sup>ならびに比熱<sup>11)</sup>を、溶液温度をパラメータにとり、Fig. 9に示す。

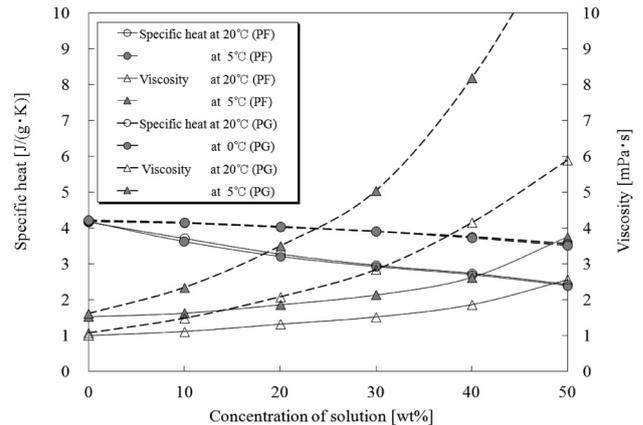


Fig. 9 Comparison of potassium formate solution and propylene glycol solution.

PF水溶液の比熱は、PG水溶液と同様に、濃度の増加に伴って徐々に減少し、また溶液の温度変化による影響は、両者とも僅かであることが示された。しかし、PF水溶液の比熱は、PG水溶液と比べて、濃度の増加による減少が大きく、濃度50wt%において約30%の減少となった。

一方、両者の粘度は濃度の増加および温度の低下による増加率は比熱と比べ顕著に表れ、またPF水溶液の粘度はPG水溶液に比べ全体的に低く、その差は濃度の増加と共に大きくなり、たとえば濃度50wt%で比較すると、PG水溶液に対し約1/3程度となることが示された。よって、Fig. 9で示した温度ならびに濃度範囲の粘度に限って言えば、PF水溶液は輸送のためのポンプの消費電力が少なく済むことから、省エネルギー効果が期待できるブラインであることが分かる。

#### 5. 結 言

ギ酸カリウム水溶液の基本的な熱物性を大気圧下で測定した結果、以下のことが明らかとなった。

- (1) 測定した密度、屈折率ならびに粘度は温度の上昇と共に減少し、また濃度の増加に伴って増加することを明らかにした。さらに、これらの測定結果に基づき温度と濃度で示す近似式をそれぞれ作成した結果、それらの近似式による計算結果と測定値との偏差は、密度の場合には0.08%以内、屈折率の場合には0.03%以内、粘度の場合には2.0%以内であった。

- (2) 比熱を測定した結果、比熱は温度とともに僅かながら増加し、濃度の増加に伴って減少することを明らかにした。また、水の比熱より小さな値となることが分かった。また、比熱を温度と濃度で表す近似式を作成した結果、測定値と3.0%以内で一致した。
- (3) ギ酸カリウム水溶液の粘度と比熱は、同じ温度、濃度のプロピレングリコール水溶液と比べ小さいことが分かった。

### 謝 辞

粘度測定において測定器の提供などご協力いただきました本学生命応用化学科の児玉大輔准教授に感謝の意を表します。

### 参考文献

- 1) 北海道大学地中熱利用システム工学講座：「地中熱ヒートポンプシステム」, 第1版, 第1刷, pp. 54-56, オーム社, 東京 (2007)
- 2) 水谷増美：冷凍, 80 (928), pp. 140-146 (2005)
- 3) 世利修美, 藤原賢彰, 水谷佳一, 山田豊：日本金属学会誌, 75 (1), pp. 75-81 (2011)
- 4) A. Aittomaki, A. Lahti：Int. J. Refrig., 20 (4), pp. 276-282 (1997)
- 5) K. - H. Hellwege (ed)：「LANDOLT - BORSTEIN Numerical Data and Functional Relationships in Science and Technology」, New Series, 1 (Part b), pp. 112, Springer-Verlag, Berlin (1977)
- 6) E. W. Washburn (ed)：「International Critical Table of Numerical Data, Physics, Chemistry and Technology」, Vol. III, pp. 90, McGRAW-Hill Book Company, New York, (1928)
- 7) *ibid*, Vol. VII, pp. 76 (1930)
- 8) *ibid*, Vol. V, pp. 18 (1928)
- 9) 日本機械学会編：「蒸気表」, 第5版, pp. 49, 120, 136, 142, 日本機械学会 (1999)
- 10) 日本熱物性学会編：「新編 熱物性ハンドブック」, pp. 480, 養賢堂, 東京 (2008)
- 11) 日本冷凍空調学会編：「新版 冷凍空調便覧」, 基礎編, 第1巻, 第6版, pp. 95, 日本冷凍空調学会, 東京 (2010)



# 有機酸塩系ブラインの基本的性質

— 第2報：酢酸カリウム水溶液の密度，屈折率，比熱および粘度 —

小川 清\*・佐々木直栄\*

## Fundamental Properties on Organic Acid Salt System as Brine — 2nd Report : Density, Refractive index, Specific heat and Viscosity of Aqueous potassium acetate solution —

Kiyoshi OGAWA\* and Naoe SASAKI\*

### Abstract

Brine of various kinds is used as a secondary refrigerant today. Recently, some new brine are proposed, and the brine using potassium acetate (PA) is paid to attention because the environmental load can be decreased.

In this study, the fundamental properties of aqueous PA solution, such as density, refractive index, specific heat and viscosity, were investigated experimentally. As a result, the measured properties with the exception of specific heat has increased with an increase in the solution concentration and it has decreased with an increase in the solution temperature. In addition, the empirical equations of these properties were presented, and the empirical equations are in good agreement with experimental results.

**Key words:** Potassium acetate solution, Density, Refractive index, Specific heat, Viscosity, Brine

### 1. 緒 言

近年，化石燃料の枯渇や環境問題をはじめ夏場の電力負荷平準化などが問題となっている。また，この度の福島原子力発電所の事故や全国に設置されている原子力発電所の再稼働や必要性をめぐる議論がなされており，電力供給はひっ迫化の状況にある。そのため電力不足を補うため火力発電所の再稼働や新たに火力発電所の建設が進められている。それに伴って火力発電所から排出される燃焼ガス  $\text{CO}_2$  によるさらなる環境悪化が懸念される。そのため再生可能エネルギーなどの利用促進によるエネルギー源の多様化を図り，さらに省エネルギー機器の開発やエネルギーの有効利用をより一層推進していく必要がある。

このような状況において  $\text{CO}_2$  削減に貢献でき安価な夜間電力を用いたヒートポンプ給湯システムや夏場の電力消費量のピークシフトのために氷蓄熱冷房システムなどが開発され実用化されている。最近では地中熱を利用するヒートポンプシステムが注目を集め，このヒートポンプの熱媒体としてグリコール系のプロピレングリコールなどいわゆる二次冷媒であるブラインが用いられている<sup>1)</sup>。また，そのほかに塩化カルシウムなどの無機塩類系，アルコール系および有機溶媒系など数多くのブラインが用いられてきた。しかし，その中には環境汚染が危惧されるため諸外国ではすでに規制あるいは使用が禁止されているものもある。昨

今の環境問題の高まりと共に環境負荷の低い，安全で省エネルギー性の高いブラインの開発が望まれている。

このような観点より次世代ブラインとして有機酸塩系ブラインである酢酸カリウムやギ酸カリウムが注目されている。<sup>2-4)</sup> しながら広範囲な温度ならびに濃度についての詳細な物性に関する報告が見当たらないのが現状である。本報では酢酸カリウム水溶液の基本的な熱物性である密度，屈折率，比熱および粘度に及ぼす温度および濃度の影響を明らかにし，また測定結果に基づき近似式を作成したので，その結果について述べる。

### 2. 測定方法および結果

蒸留水に純度99.8%以上の酢酸カリウムを溶解し，所定の濃度に調整した水溶液について大気圧下で諸物性を測定した。

#### 2.1 密 度

振動式密度計 (Anton Paar DMA48, 精度:  $\pm 1 \times 10^{-4} \text{ g/cm}^3$ , 制御温度精度:  $\pm 0.01^\circ\text{C}$ ) によって温度  $0 \sim 70^\circ\text{C}$ , 濃度  $0 \sim 50\text{wt}\%$  の範囲で密度を測定した。その結果を Fig. 1 に示す。

密度は Fig. 1 に示されたように温度の上昇に伴って徐々に減少し，濃度の増加に伴って顕著に増加する傾向が得られた。また，水の密度に対し約1.05~1.3倍と大きな値となった。

これらの測定結果に基づき密度  $\rho$  [ $\text{g/cm}^3$ ] を温度  $t$  [ $^\circ\text{C}$ ] の2次式で，係数  $a$ ,  $b$ ,  $c$  を濃度  $x$  [ $\text{wt}\%$ ] で表す以下の近

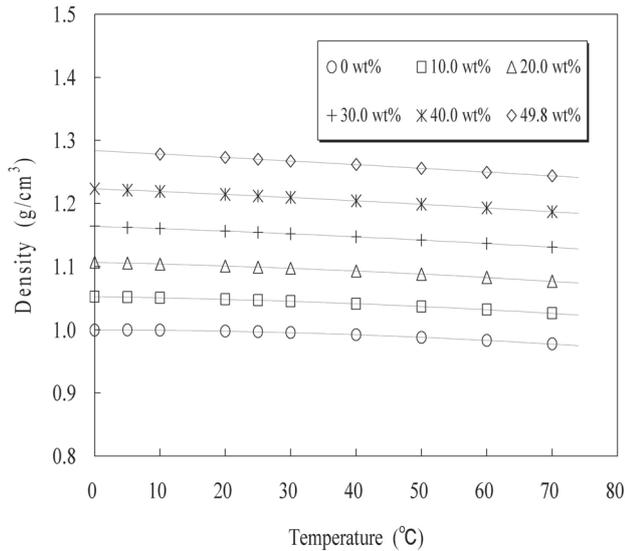


Fig. 1 Relation between density and solution temperature

似式を作成した。

$$\rho = a + bt + ct^2 \quad (1)$$

$$0 \leq t \leq 70^\circ\text{C} \quad 0 \leq x \leq 50\text{wt}\%$$

式(1)の各係数  $a$ ,  $b$ ,  $c$  は、以下の通りである。

$$a = 1.0001 + 5.1128 \times 10^{-3}x + 1.1592 \times 10^{-5}x^2$$

$$b = -2.6221 \times 10^{-6} - 1.4533 \times 10^{-5}x$$

$$+ 1.4213 \times 10^{-7}x^2 - 9.9922 \times 10^{-10}x^3$$

$$c = -4.6630 \times 10^{-6} + 1.3438 \times 10^{-7}x$$

$$- 1.7106 \times 10^{-9}x^2 + 8.8366 \times 10^{-12}x^3$$

この式(1)は本測定値を偏差  $\pm 0.03\%$  以内で、平均偏差  $0.014\%$  で近似することができた。また  $25^\circ\text{C}$  の Landolt-Brönstein<sup>5)</sup> (以下, LB) による値ならびに International Critical Table<sup>6)</sup> (以下, ICT) による温度  $18^\circ\text{C}$ ,  $25^\circ\text{C}$  の値と比較するため、本近似式からの偏差で Fig. 2 に示す。その結果、濃度  $1 \sim 55\text{wt}\%$  の範囲において LB による値と  $0.06\%$  以内で、ICT とは  $0.09\%$  以内で、それぞれ一致することが確認された。なお、図中の  $\rho_{\text{eq}}$  は上述の文献値の温度ならびに濃度を用いて近似式(1)より得た密度を、 $\rho_{\text{lit}}$  は文献値の密度をそれぞれ表す。

さらに、一例として今回測定した酢酸カリウム水溶液(以下, PA 水溶液)ならびに以前測定したギ酸カリウム水溶液(以下, PF 水溶液)の密度と、すでに報告されているプロピレングリコール水溶液(以下, PG 水溶液)の密度<sup>7)</sup>のグラフより読み取った値とを比較するため、それぞれの値を Fig. 3 に示す。なお、濃度は  $40\text{wt}\%$  である。PA 水溶液と同様に他の水溶液の密度も温度上昇と共に減少し、その中でも PA 水溶液の密度は PF 水溶液よりも僅かながら小さい値を示すが、PG 水溶液に対しては約  $1.2$  倍と大きな結果となった。

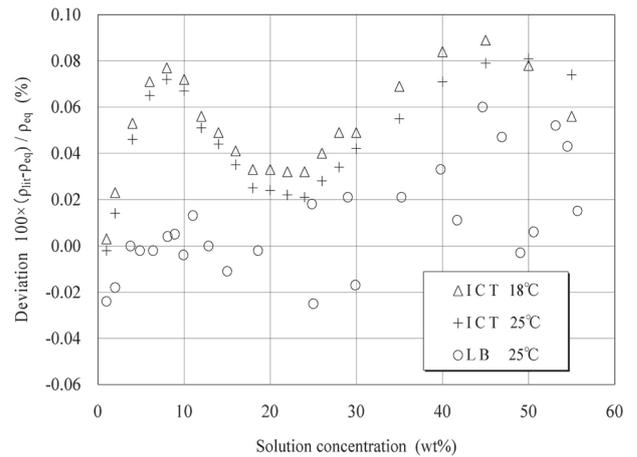


Fig. 2 Deviations between literature values and values calculated with eq.(1)

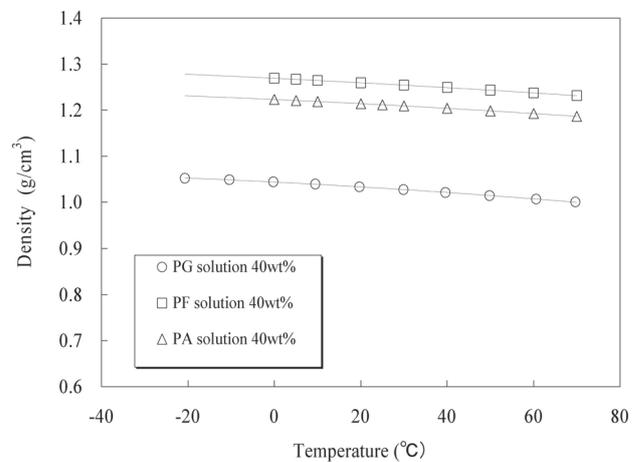


Fig. 3 Comparison of density at 40wt% solution

## 2.2 屈折率

アッペ屈折計(アタゴ DR-A1, 精度:  $\pm 0.0002\text{nD}$ , 最小表示温度:  $0.1^\circ\text{C}$ )によって温度  $5 \sim 50^\circ\text{C}$ , 濃度  $0 \sim 50\text{wt}\%$  の範囲で屈折率を測定した。その結果を Fig. 4 示す。

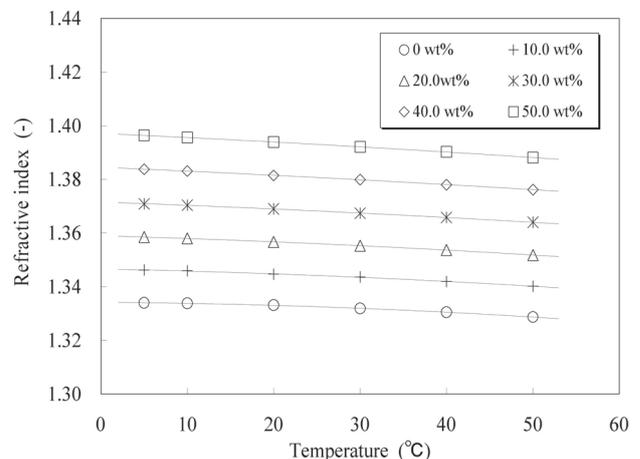


Fig. 4 Relation between refractive index and solution temperature

Fig. 4より屈折率は、密度と同様に温度上昇に伴って緩やかに減少し、濃度の増加に伴って増加する傾向が示された。また、水の屈折率と比較して大きな値となることが分かった。

これらの測定結果に基づき屈折率  $n_D$  を温度  $t$  [°C] の2次式で、係数  $a$ ,  $b$ ,  $c$  を濃度  $x$  [wt%] で表す以下の近似式を作成した。

$$n_D = a + bt + ct^2 \quad (2)$$

$$5 \leq t \leq 50^\circ\text{C} \quad 0 \leq x \leq 50\text{wt}\%$$

式(2)の各係数は、以下の通りである。

$$a = 1.33375 + 1.26679 \times 10^{-3}x$$

$$b = -3.02911 \times 10^{-5} - 3.65392 \times 10^{-6}x + 2.58204 \times 10^{-8}x^2$$

$$c = -1.26469 \times 10^{-6} - 1.71892 \times 10^{-8}x + 2.02150 \times 10^{-9}x^2 - 2.87235 \times 10^{-11}x^3$$

この式(2)は本測定値を偏差  $\pm 0.036\%$  以内で、平均偏差  $0.01\%$  で近似することができ、また Fig. 5 に本近似式からの偏差で示した  $18^\circ\text{C}$  の ICT<sup>8)</sup> による値と  $0.036\%$  以内で、化学便覧<sup>10)</sup> による  $17.5^\circ\text{C}$  の値とでは  $0.025\%$  以内で一致することが確認された。さらに、JSME の  $0.1\text{MPa}$  による  $10 \sim 50^\circ\text{C}$  の水の値<sup>11)</sup> とは  $0.06\%$  以内で一致した。なお、図中の  $n_{\text{eq}}$  は上述の文献値の温度ならびに濃度を用いて近似式(2)より得た屈折率を、 $n_{\text{lit}}$  は文献値をそれぞれ表す。

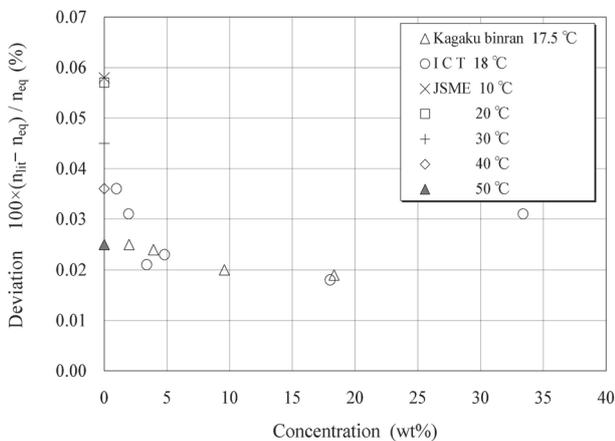


Fig. 5 Deviations between literature values and values calculated with eq.(2)

### 2.3 比熱

固有振動周期測定方式による液体比熱計 (京都電子工業 SHA-500, 精度:  $\pm 0.05\text{J}/(\text{g}\cdot\text{K})$ , 温度調節精度:  $\pm 0.1^\circ\text{C}$ ) によって温度  $5 \sim 50^\circ\text{C}$ , 濃度  $0 \sim 50\text{wt}\%$  の範囲で比熱を測定した。その結果を Fig. 6 に示す。

Fig. 6より比熱は温度の上昇に伴って僅かではあるが増加の傾向を示し、濃度の増加と共に減少する傾向が得られた。また、水の比熱と比べ小さな値となることが分かった。

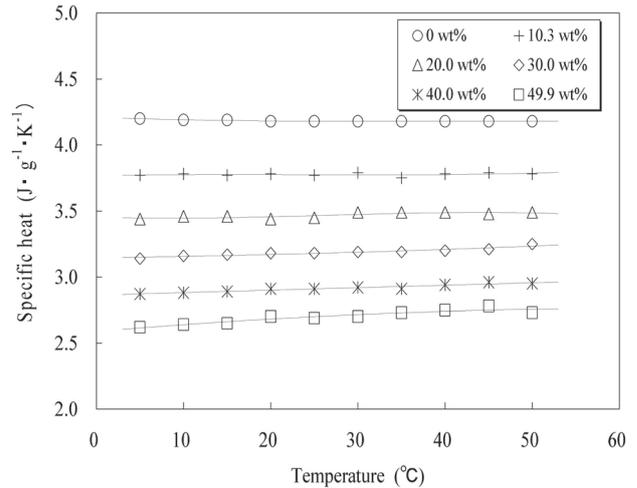


Fig. 6 Relation between specific heat and solution temperature

これらの測定結果に基づき、比熱  $C_p$  [ $\text{J}/(\text{g}\cdot\text{K})$ ] を温度  $t$  [°C] の3次式で、係数  $a$ ,  $b$ ,  $c$ ,  $d$  を濃度  $x$  [wt%] で表す以下の近似式を作成した。

$$C_p = a + bt + ct^2 + dt^3 \quad (3)$$

$$5 \leq t \leq 50^\circ\text{C} \quad 0 \leq x \leq 50\text{wt}\%$$

式(3)の各係数は、以下の通りである。

$$a = 4.204 - 4.294 \times 10^{-2}x + 2.254 \times 10^{-4}x^2$$

$$b = -1.976 \times 10^{-3} - 6.717 \times 10^{-5}x + 2.053 \times 10^{-5}x^2 - 3.697 \times 10^{-7}x^3$$

$$c = 3.658 \times 10^{-5} + 1.241 \times 10^{-5}x - 1.261 \times 10^{-6}x^2 + 2.161 \times 10^{-8}x^3$$

$$d = -1.833 \times 10^{-7} - 1.961 \times 10^{-7}x + 1.787 \times 10^{-8}x^2 - 3.022 \times 10^{-10}x^3$$

この式(3)は本測定値を偏差  $\pm 1.1\%$  以内で、平均偏差  $0.32\%$  で近似することができ、また、Fig. 7 に示した LB による値<sup>12)</sup> とでは  $2.3\%$  以内の偏差で一致することが確認された。なお、図中の  $C_{\text{peq}}$  は上述の文献値の温度ならびに濃度を用いて近似式(3)より得た比熱を、 $C_{\text{plit}}$  は文献値をそ

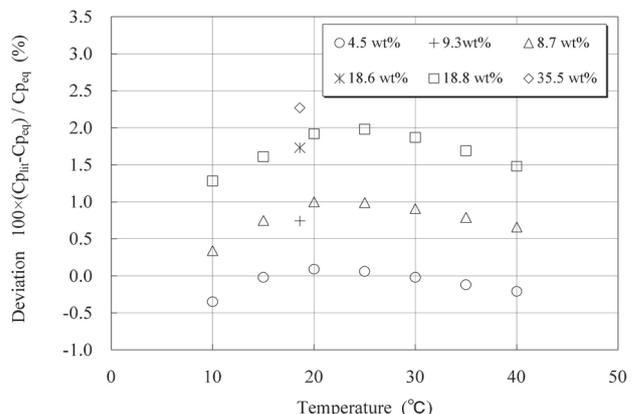


Fig. 7 Deviations between literature values<sup>11)</sup> and values calculated with eq. (3)

れぞれ表す。

さらに、ブラインを選定するうえで比熱は重要な物性値となることからPA水溶液ならびにPF水溶液の比熱とPG水溶液の比熱<sup>13)</sup>の値をFig. 8に示す。PA水溶液と同様に他の水溶液においても溶液温度の上昇による比熱への影響は僅かとなり、一方、濃度の増加による影響は温度とは異なり大きく表れた。この中でPF水溶液が最も小さい値を示し、次にPA水溶液、PG水溶液の順に大きな値となることが明らかとなった。

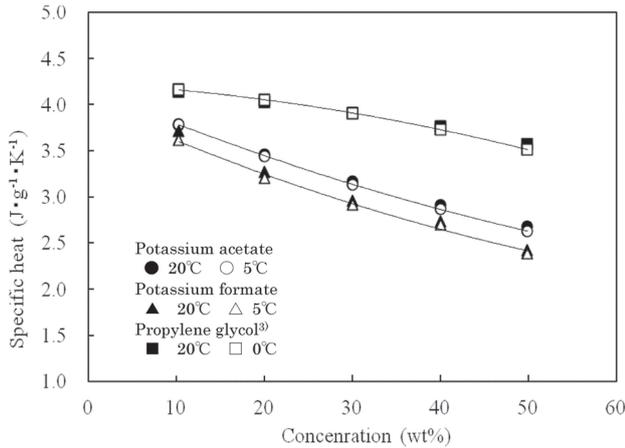


Fig. 8 Comparison of specific heat

## 2.4 粘 度

スタビンゲル粘度計 (Anton Paar SVM3000) により温度0~50℃, 濃度10~50wt%の範囲で粘度を測定した。その測定結果をFig. 9に示す。また参考までにJSMEの水の文献値<sup>14)</sup>を図中に示す。

Fig. 9より各濃度の粘度は温度上昇に伴って減少し、濃度の増加と共に増加する傾向が得られた。また、図中の水の文献値と比べPA水溶液の粘度は大きな値となり、0℃, 50wt%においては約6倍と最も大きくなった。これらの測定結果に基づき、粘度 $\eta$  [mPa·s]を温度 $t$  [℃]の3次式

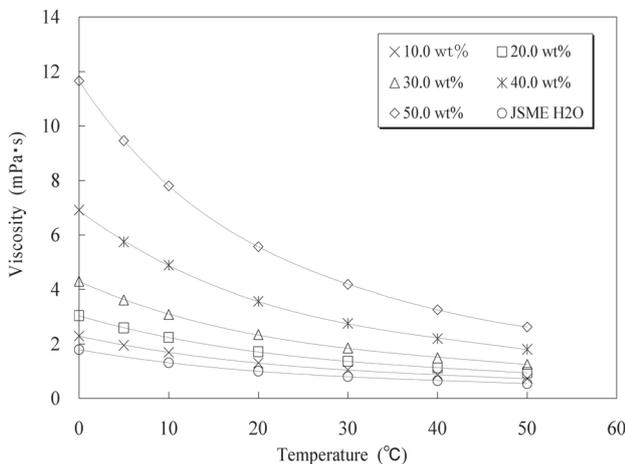


Fig. 9 Relation between viscosity and solution temperature

で、係数 $a$ ,  $b$ ,  $c$ ,  $d$ を濃度 $x$  [wt%]で表す以下の近似式を作成した。

$$\eta = a + bt + ct^2 + dt^3 \quad (4)$$

$$0 \leq t \leq 50^\circ\text{C} \quad 10 \leq x \leq 50\text{wt}\%$$

式(4)の各係数は、以下の通りである。

$$a = 1.274 + 1.420 \times 10^{-1}x - 5.386 \times 10^{-3}x^2 + 1.336 \times 10^{-4}x^3$$

$$b = -7.709 \times 10^{-2} + 3.126 \times 10^{-3}x - 3.378 \times 10^{-4}x^2 + 9.759 \times 10^{-6}x^3 - 1.467 \times 10^{-7}x^4$$

$$c = 2.690 \times 10^{-3} - 3.140 \times 10^{-4}x + 2.282 \times 10^{-5}x^2 - 6.182 \times 10^{-7}x^3 + 6.811 \times 10^{-9}x^4$$

$$d = -2.947 \times 10^{-5} + 4.179 \times 10^{-6}x - 2.889 \times 10^{-7}x^2 + 7.719 \times 10^{-9}x^3 - 7.937 \times 10^{-11}x^4$$

この式(4)はFig. 10で示したように本測定値を偏差 $\pm 2.2\%$ 以内で、平均偏差0.6%で近似することができた。なお、図中の $\eta_{\text{eq}}$ は測定時の温度と濃度を用いて近似式(4)より得た粘度を、 $\eta_{\text{exp}}$ は測定値をそれぞれ表す。さらに式(4)の温度ならびに濃度の範囲において、ICT<sup>9)</sup>の18℃, 8.9~28.2wt%の粘度の値3点と-7.4%以内の偏差で、また15℃, 9.4wt%のLB<sup>15)</sup>の値1点とは-1.6%の偏差で一致することが確認された。

さらに比熱と同様、PA水溶液、PF水溶液ならびに文献のグラフより読み取ったPG水溶液の粘度<sup>7)</sup>を比較するため、一例をFig. 11に示す。溶液温度はそれぞれ0℃, 20℃である。

同じ濃度ならびに温度における粘度はPF水溶液、PA水溶液、PG水溶液の順に大きな値となり、その傾向は低濃度の10wt%から濃度が増加するに従ってグラフに見られるようにそれぞれの粘度は指数関数的に増加した。また20℃より0℃と温度降下による粘度への影響はPF水溶液が最も小さく、次にPA水溶液、PG水溶液の順となり、

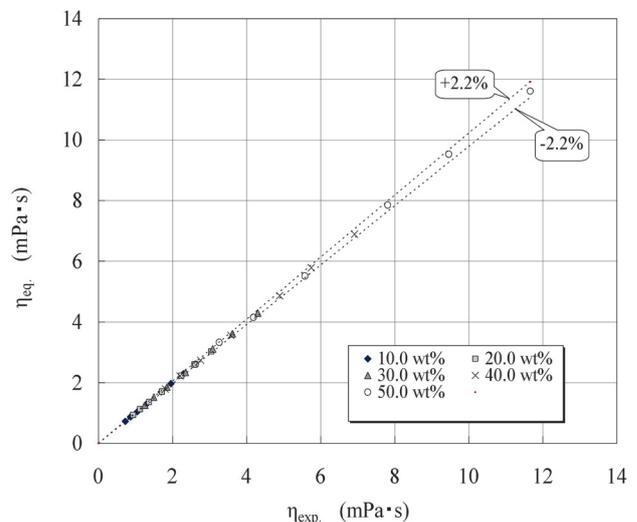


Fig. 10 Comparison between measured viscosity and viscosity calculated with eq.(4)

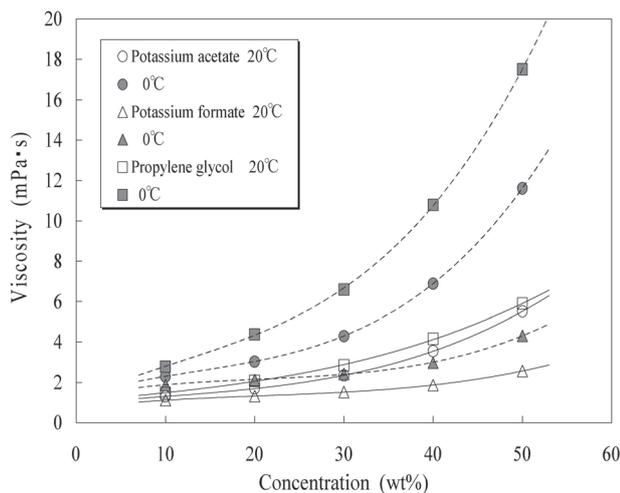


Fig. 11 Comparison of viscosity at 0°C and 20°C, respectively

PG水溶液の粘度が最も温度、濃度の影響を受けることが分かる。よって、これら水溶液の輸送時においてはPF水溶液が省エネルギー性の高いブラインであることが分かる。また、使用する環境の最低温度にもよるが、できる限り低濃度の溶液を用いたほうが有利となると考えられる。

### 3. 結 言

酢酸カリウム水溶液の基本的な熱物性を大気圧下で測定し、また、その測定値に基づき近似式を作成した結果、以下のことが明らかとなった。

- 1) 密度、屈折率ならびに粘度を測定した結果、温度の上昇と共に減少し、また濃度の増加に伴って増加することを明らかにした。さらに、これらの測定結果に基づき温度と濃度で示す近似式をそれぞれ作成した結果、それらの近似式は密度を0.03%以内で、屈折率を0.036%以内で、粘度を2.2%以内の偏差で、測定値と一致した。
- 2) 比熱を測定した結果、比熱は温度上昇と共に僅かながら増加し、濃度の増加に伴って減少することを明らかにした。また、水の比熱より小さな値となることが分かった。さらに比熱を温度と濃度で表す近似式を作成した結果、測定値と1.1%以内の偏差で一致した。
- 3) 酢酸カリウム水溶液の比熱は、同じ温度、濃度においてギ酸カリウム水溶液より僅かに大きい、プロピレングリコール水溶液より小さな値となることが分かった。
- 4) 酢酸カリウム水溶液の粘度は、同じ温度、濃度においてギ酸カリウムよりも大きい、プロピレングリコール水溶液と比べ小さいことが分かった。

### 謝 辞

粘度測定において協力いただきました本学の児玉大輔准教授に感謝の意を表します。

### 参考文献

- 1) 北海道大学地中熱利用システム工学講座：地中熱ヒートポンプシステム，第1版，第1刷，pp. 54-56，オーム社，東京（2007）
- 2) 水谷増美：冷凍，80（928），pp. 140-146（2005）
- 3) 世利修美，藤原賢彰，水谷佳一，山田豊：日本金属学会誌，75（1），pp. 75-81（2011）
- 4) A. Aittomaki, A. Lahti: Int. J. Refrig., 20（4），pp. 276-282（1997）
- 5) K. H. Hellwege (ed.): LANDOLT-BÖRSTEIN Numerical Data and Functional Relationships in Science and Technology, New Series, 1 (Part b), pp. 123 Springer-Verlag, Berlin (1977)
- 6) E. W. Washburn (ed.): International Critical Table of Numerical Data, Physics, Chemistry and Technology, Vol. III, pp. 90, McGRAW-Hill Book Company, New York (1928)
- 7) 日本熱物性学会編：新編 熱物性ハンドブック，pp. 480，養賢堂，東京（2008）
- 8) E. W. Washburn (ed.): International Critical Table of Numerical Data, Physics, Chemistry and Technology, Vol. VII, pp. 76, McGRAW-Hill Book Company, New York (1930)
- 9) ibid, Vol. V, pp. 18, (1929)
- 10) 社団法人日本化学会（編）：化学便覧 基礎編 II，改定3版，丸善，pp. II-555（1984）
- 11) 日本機械学会：蒸気表，第5版，pp. 136，日本機械学会（1999）
- 12) K. H. Hellwege (ed.): LANDOLT-BÖRSTEIN Numerical Data and Functional Relationships in Science and Technology, New Series, Group IV, 1 (Part b), pp. 305, Springer-Verlag, Berlin (1977)
- 13) 日本冷凍空調学会編：冷凍空調便覧 第I巻 基礎編，第6版，pp. 95，日本冷凍空調学会（2010）
- 14) 日本機械学会：蒸気表，第5版，pp. 142，日本機械学会（1999）
- 15) H. Brochers (ed.): LONDORT-BÖRNSTEIN Zahlenwerte und Functionen aus Physik, Chemie, Astoronmie und Technik, II Band, 5 Teil, pp. 369, Springer-Verlag, Berlin (1969)



# Enhancement and Retardation Mechanism of Ultra-Thin SiO<sub>2</sub> Growth on Thermally Oxidized Cr-Contaminated n-Type Si(001) Surfaces

Hirofumi SHIMIZU\* and Yuji SANADA\*\*

## Abstract

At the beginning of the oxidation of Cr-contaminated n-type Si(001) surfaces, Cr reacted with oxygen (O<sub>2</sub>) on the Si substrate to form Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and oxygen-induced point defects (emitted Si + vacancies). SiO<sub>2</sub> growth was mainly enhanced by catalytic action of Cr. At 810 °C, SiO<sub>2</sub> growth of the contaminated samples were faster than reference samples rinsed in RCA solution during the first 120 min. However, it substantially slowed and became less than that of the reference samples. As the oxidation advanced, approximately half of the contaminated Cr atoms became concentrated close to the surface area of the SiO<sub>2</sub> film layer. This Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-rich SiO<sub>2</sub> layer acted as a diffusion barrier against oxygen species. The diffusion of oxygen atoms toward the SiO<sub>2</sub>/Si interface may have been reduced, and in turn, the emission of Si self-interstitials due to oxidation-induced strain may have been decreased at the SiO<sub>2</sub>/Si interface, resulting in the retarded oxide growth. These results are evidence that emitted Si self-interstitials are oxidized not in the Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-rich SiO<sub>2</sub> layer, but at the SiO<sub>2</sub>/Si interface in accordance with the model proposed by Kageshima et al. [Jpn. J. Appl. Phys. **38** (1999) L971] and Takakuwa and Ogawa et al. [Appl. Surf. Sci. **216** (2003) 133., Jpn. J. Appl. Phys. **46** (2007) 3244.]. A possible mechanism based on the interfacial Si emission model is speculated on. The activation energies for the oxidation in the reduced growth range of the Cr-contaminated samples are determined to be 2.3±0.1 eV, which is in good agreement with that for the oxidation of the fourth atomic layer obtained by Yasuda et al. [Phys. Rev. B **67** (2003) 195338]. The activation energies for the oxide growth are found to be in accord with the enhanced and reduced growth of the Cr-contaminated samples.

**Key words:** Si, oxidation, ultra thin oxide, chromium

## 1. Introduction

Upon scaling down to 22 nm and below in deep submicron high end microprocessor Si device technology, it is one of the most common items to understand the influence of metals on ultra-thin oxide on Si for fabricating aggressively miniaturized Si devices.

So far, the effect of Al in retarding growth rate of SiO<sub>2</sub> has been investigated<sup>1,2)</sup> in thermally oxidized metal-contaminated Si surfaces, an atomic bridging-type and/or a Schottky barrier-type alternating current (AC) surface photovoltage (SPV) has been reported to occur.<sup>3)</sup> Recently, in Cr-aqueous-solution-rinsed Si(001) surfaces, an irregular behavior of transition from Schottky barrier to atomic bridging-type AC SPV has been reported with air exposure time at room temperature. The transition occurred because the Cr(OH)<sub>3</sub> becomes Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> through the reaction  $2\text{Cr}(\text{OH})_3 \rightarrow \text{Cr}_2\text{O}_3 + 3\text{H}_2\text{O}$ , causing Cr-induced negative oxide charge described as (CrOSi)<sup>-</sup> and/or CrO<sub>2</sub><sup>-</sup> networks in Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.<sup>4)</sup> Cr is a reactive element. The formation of Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> on Si surface may affect SiO<sub>2</sub> growth rate, thus it is worthy to investigate the effect of Cr on the SiO<sub>2</sub> growth rate as a function of oxidation temperature.

Regarding ultra-thin oxide growth research, a layer-by-layer oxidation on Si has attracted much attention in the formation of SiO<sub>2</sub> gate dielectrics.<sup>5-8)</sup> In contrast to the first oxide layer growth without an apparent energy barrier,<sup>7)</sup> the activation energies for the oxidation of the second layer on a Si(001) surface have been reported to be 0.3 eV<sup>7)</sup> and 1.2±0.3 eV.<sup>8)</sup> This large difference in the activation energy seems point to the effect of the oxidation condition of the first oxide layer growth as pointed out in ref. 8.

Deal and Grove<sup>9)</sup> were the first to propose an oxidation model for a relatively thick oxide regime (≥ 30 nm), however the oxidation rates were found to be much faster than that their prediction when the oxide thickness is less than 30 nm. Since then a number of studies have tried to bridge this gap, and have produced modified kinetic models for the thin oxide regime (2 ~ 30 nm).<sup>10-12)</sup> Furthermore, several experimental and theoretical studies have established models for the initial stages of the Si surface oxidation processes, these include the Si self-interstitial emission and

---

Received October 30, 2012

\* Department of Electrical and Electronic Engineering, College of Engineering, Nihon University

\*\* Tachibana Kiko Co., Ltd.

unified Si oxidation reaction models.<sup>7, 8, 13-22)</sup> Ibane et al.<sup>22)</sup> recently reported that Si self-diffusion is enhanced near the SiO<sub>2</sub>/Si interface during thermal oxidation, which is evidence supporting the Si self-interstitial emission model.<sup>14, 16, 20, 21)</sup> Akiyama et al.<sup>23)</sup> proposed that the effects of interfacial stress on the reaction of O<sub>2</sub> molecules are important during thermal oxidation of Si nanostructures.

Scanning reflection electron microscopy observation has shown that furnace oxidation proceeds in the layer-by-layer manner caused by two-dimensional (2D) oxide island growth,<sup>15, 20)</sup> progressing up to oxide thickness of 5 - 6 nm on both Si(001) and Si(111) surfaces while maintaining a smooth step-terrace structure at the SiO<sub>2</sub>/Si interface similar to that before oxidation.<sup>24)</sup>

In particular, our study on SiO<sub>2</sub> growth on thermally oxidized Al-contaminated Si(001) wafers in a dry oxidizing ambient at 600 °C<sup>24)</sup> found that the growth saturated after a certain time (approximately 250 min) for film thicknesses of 3 - 3.5 nm. This saturation is because SiO<sub>2</sub> growth and the desorption of SiO molecules<sup>15)</sup> eventually reach a balance at the reacting surface, resulting in no further growth which can be deduced to be from an active oxidation. The Si(001) surfaces that were contaminated by Al<sup>25)</sup> and/or Zn<sup>26)</sup> and thermally oxidized show retarded SiO<sub>2</sub> growth compared with those rinsed in RCA (Radio Corporation of America),<sup>27)</sup> depending on temperature and oxidation duration time. In thermally oxidized Zn-contaminated Si(001) surfaces, Zn on the Si surface became segregated in the top layer of the SiO<sub>2</sub> and a ZnO-rich SiO<sub>2</sub> layer formed.<sup>26)</sup> This layer was postulated to be a good diffusion barrier against oxygen that would retard oxide growth.<sup>26)</sup>

In our previous report on the initial oxidation of Al-contaminated Si(001) surfaces,<sup>25)</sup> the Arrhenius plot of the initial growth rate indicated that there was a discontinuity in the oxidation rate at 760 °C. At temperatures below 760 °C, the activation energy at the surface for the initial oxide layers was determined to be 0.27 eV for samples rinsed in RCA alkaline solution (Standard Clean I: SC I), and 0.57 eV for the Al-contaminated samples. These results were in good agreement with those of Watanabe et al.<sup>7)</sup> who asserted that the first oxidation layer was barrier less and the activation energy for oxidation of the second layer is 0.3 eV. For the Al-contaminated samples, a single monolayer of Al, which covered almost all of the Si surface, may easily combine with oxygen. As a result, an Al-rich SiO<sub>2</sub> layer may give rise to a greater activation energy (0.57 eV) than the uncontaminated ones.<sup>25)</sup> On the other hand, the activation energy at temperatures above 760 °C was found to be  $1.54 \pm 0.6$  eV. Using the sectioning method the value was found to be  $1.8 \pm 0.1$  eV. The latter results are in good agreement with those of Yasuda et al.,<sup>8)</sup> who reported that the activation energy for oxidation increases in the depth direction toward the SiO<sub>2</sub>/Si interface, becoming equal to the bulk oxidation value,  $2.0 \pm 0.2$  eV, at the third layer from the surface and  $2.2 \pm 0.2$  eV at the fourth layer.

We reported that the Al during oxidation became segregated near the top surface of the SiO<sub>2</sub> film layer, reducing the oxidation rate in the temperature range between 600 and 900 °C.<sup>25)</sup> Our analysis was based on the Si self-interstitial emission model.<sup>16, 19, 22)</sup> Other undesirable metal impurities might affect oxide growth rates and degrade gate oxide integrity, and this means the effect of metal impurities such as Cr on ultra-thin oxide growth deserves investigation.

The present study investigated the influence of Cr on the growth of ultra-thin oxides on Si(001) surfaces in the temperature range from 550 to 900 °C by using ellipsometry, X-ray photoelectron spectroscopy (XPS), and chemical analyses. A survey of the initial oxidation kinetics depending on temperature was carried out with the aim of clarifying the effect of Cr on the oxide growth rate.

## 2. Experimental procedures

### 2.1 Sample preparation

Si samples were prepared from commercially available (001) wafers, 76 mm in diameter. The wafers were phosphorus (P)-doped (n-type) with a resistivity of  $10 \pm 0.5 \Omega \cdot \text{cm}$  (P concentration of  $\sim 4 \times 10^{14}$  atoms/cm<sup>3</sup>). The sample wafers were cleaned in deionized water for 10 minutes in an ultrasonic bath. After cleaning, they were treated with an aqueous hydrofluoric acid (HF) solution (HF:H<sub>2</sub>O=1:99) for 5 min, and then rinsed in deionized water for 5 min. After the initial treatment, two further types of samples were prepared: 1) a RCA alkaline rinse (Standard Clean 1:(SC 1)), ammonium hydroxide/hydrogen peroxide/water; NH<sub>4</sub>OH:H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>:H<sub>2</sub>O=1:1:10 in volume %), and 2) a Cr-aqueous-solution-rinse, denoted as "RCA" and "Cr", respectively. For the "RCA" samples, the RCA alkaline solution was maintained at  $85 \pm 2$  °C for 10 min and the "Cr" samples were dipped for 20 min in the Cr-contaminated aqueous solution, for which the Cr concentration in the water was 10 μg/ml, using the standard Cr(NO<sub>3</sub>)<sub>3</sub> solution (1000 ppm) for atomic absorption spectroscopy (AAS). The surfaces of both types of samples ("RCA" and

“Cr”) immediately after the treatment were hydrophilic. After the drying treatment, the samples were oxidized in a dry oxygen ambient (1 L/min) between 600 and 900 °C, for times ranging from 10 to 360 min.

## 2.2 Chemical analysis of metal impurities on wafer surfaces

A flameless type of AAS (Hitachi Z-8270) was used to measure the ion concentration of Cr and other possible background impurities (Fe, Cu, Ni, Al, Zn, and Co) on the wafers. The impurities were extracted using the pack extraction method (PEM),<sup>28)</sup> in which samples were immersed in 5 ml of solution (HF : HCl : HNO<sub>3</sub> : H<sub>2</sub>O = 1 : 3 : 1 : 95) in a clean polypropylene bag (< 10<sup>9</sup> atoms/cm<sup>2</sup>) at 100 °C for 60 min. During the extraction, the wafer surface was etched to a depth of about 0.1 μm. All reagents and water used were semiconductor grade.

## 2.3 XPS measurement

XPS (ULVAC-PHI, Inc.: PHI 5000 VersaProbe) was used to examine the Cr bonding state on the Si surface. The XPS spectra were obtained at room temperature (RT) and measured with monochromated Al K $\alpha$  radiation ( $h\nu = 1486.6$  eV) at an output of 300 W (15 kV, 20 mA). The pressure of the chamber was maintained below  $1 \times 10^{-8}$  Pa.

## 2.4 Oxide thickness measurement

Oxide thicknesses were measured using ellipsometry. The ellipsometer had a He-Ne laser (wavelength : 632.8 nm) with a measurement beam diameter of 1 mm on the wafer surface. The incident angle was 70° to the sample surface and the refractive index was 1.46. Oxide thicknesses were measured at nine locations per wafer and the mean thickness was evaluated. In every case, the standard deviation of the mean thickness was within 0.05 nm.

# 3. Experimental Results and discussion

## 3.1 Concentrations of impurities on Si(001) surfaces

Table I summarizes the concentrations of the impurities on the surfaces of Cr-aqueous-solution-rinsed Si(001) wafers and those thermally oxidized between RT and 850 °C. PEM<sup>28)</sup> dissolved the native oxide and thermal oxide of wafers. Thus, the metal concentrations listed in the table correspond to the total amounts of impurities that ex-

Table I The concentrations of the impurities on surfaces of Cr-aqueous-solution-rinsed Si(001) wafers at RT and those thermally oxidized between 100 and 850 °C.

		Concentration ( $\times 10^{11}$ atoms/cm <sup>2</sup> )						
		Cr	Fe	Cu	Ni	Al	Zn	Co
Cr-contaminated in aqueous solution at RT		$1.5 \times 10^4$	<1.2	<2.2	<1.1	<1.0	<4.5	<0.36
Cr-contaminated and oxidized	100 °C 30 min	$1.5 \times 10^4$	<1.2	<2.2	<1.1	<1.0	<4.5	<2.9
	100 °C 4 h	$1.5 \times 10^4$	<1.2	<2.2	<1.1	<1.0	<4.5	<2.9
	200 °C 30 min	$1.5 \times 10^4$	<1.2	<2.2	<1.1	<1.0	<4.5	<2.9
	200 °C 4 h	$1.5 \times 10^4$	<1.2	<2.2	<1.1	<1.0	<4.5	<2.9
	300 °C 30 min	$1.5 \times 10^4$	<1.2	<2.2	<1.1	<1.0	<4.5	<2.9
	300 °C 4 h	$1.5 \times 10^4$	<1.2	<2.2	<1.1	<1.0	<4.5	<2.9
	400 °C 30 min	$7.2 \times 10^3$	<1.2	<2.2	<1.1	<1.0	<4.5	<2.9
	400 °C 4 h	$7.2 \times 10^3$	<1.2	<2.2	<1.1	<1.0	<4.5	<2.9
	500 °C 30 min	$7.2 \times 10^3$	<1.2	<2.2	<1.1	<1.0	<4.5	<2.9
	500 °C 4 h	$1.6 \times 10^3$	<1.2	<2.2	<1.1	<1.0	<4.5	<2.9
	550 °C 10 min	$5.8 \times 10^2$	<1.2	<2.2	<1.1	<1.0	<4.5	<2.9
	550 °C 4h	$4.2 \times 10^2$	<1.2	<2.2	<1.1	<1.0	<4.5	<2.9
	710 °C 10 min	$3.0 \times 10^2$	<1.2	<2.2	<1.1	<1.0	<4.5	<2.9
	710 °C 1 h	$8.6 \times 10^2$	<1.2	<2.2	<1.1	<1.0	<4.5	<2.9
	710 °C 6 h	$5.1 \times 10^2$	<1.2	<2.2	<1.1	<1.0	<4.5	<2.9
	810 °C 10 min	$4.0 \times 10^2$	<1.2	<2.2	<1.1	<1.0	<4.5	<2.9
	810 °C 1 h	$4.4 \times 10^2$	<1.2	<2.2	<1.1	<1.0	<4.5	<2.9
	850 °C 10 min	$3.3 \times 10^2$	<1.2	<2.2	<1.1	<1.0	<4.5	<2.9

isted in both the surface and the bulk SiO<sub>2</sub> film. The deliberately aqueous- solution-rinsed concentration of Cr on the Si surface was  $1.5 \times 10^{15}$  atoms/cm<sup>2</sup>, comparable to the calculated atomic density on a Si {001} surface ( $6.78 \times 10^{14}$  atoms/cm<sup>2</sup>). This indicates that the Cr atomic layer must be formed on the Si surface.

The samples oxidized at temperatures between 100 and 300°C had Cr concentrations in the SiO<sub>2</sub> films that were as high as the wafers immediately after rinsing in Cr aqueous solution, indicating that most of the Cr atoms were involved in the SiO<sub>2</sub> thin film. As oxidation temperature increased (400 and 500°C), the Cr concentrations in the SiO<sub>2</sub> film layer commenced to decrease because of the gradual activated diffusion of Cr atoms into the bulk Si. Above 550 °C, the Cr concentrations in SiO<sub>2</sub> were reduced to be  $\sim 10^{13}$  order of magnitude (atoms/cm<sup>2</sup>) presumably due to an active diffusion of Cr atoms into the bulk Si. The Cr concentrations in SiO<sub>2</sub> saturated at higher oxidation temperatures than 550 °C<sup>4)</sup> and became segregated near the surface of the SiO<sub>2</sub> film layer, as reported previously.<sup>29)</sup>

### 3. 2 XPS spectral analyses of thermally oxidized Cr-aqueous-solution-rinsed Si (001) wafers

XPS spectra revealed sub-peaks, corresponding to Si<sup>1+</sup> and Si<sup>2+</sup> sub-oxides, in the Si 2p main peak. On this basis, the residual native oxide thickness immediately after the Si(001) surface was immersed in a HF aqueous solution was determined to be 0.2 nm. The surface may correspond to a state of oxygen adsorbing to a Si dangling bond (the Si surface may be hydrophobic, but native oxide may still grow). Thus, it is highly likely that the Cr was deposited on the Si surface by electron capture ( $\text{Cr}^{3+} + 3e^- \rightarrow \text{Cr}$ ) because the oxidation reduction potential of Cr<sup>3+</sup> is higher than that of Si.

After rinsing the n-type Si(001) wafer in the Cr aqueous solution, it has been reported that the deposited Cr already changed into chromium hydroxide Cr(OH)<sub>3</sub> during air exposure on the basis of XPS measurement as previously reported (Fig. 1 of ref. 4). On thermal oxidation at 550°C for 30 min, the deposited Cr changed into Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (Fig. 3 of ref.4). Thus, in the case of thermal oxidation, the behavior of the deposited Cr at relatively low temperatures is needed to investigate.

Figure 1 shows the XPS profile of an n-type Si(001) surface rinsed with Cr aqueous solution and thermally oxidized at 100 °C for 30 min. The binding energy of the Cr 2p<sub>3/2</sub> was determined to be 576.8 eV and that of Cr 2p<sub>1/2</sub> was 586.0 eV. The binding energies of Cr (metal) are reported to be 574.4 and 583.6 eV.<sup>30)</sup> Thus, these results imply that the Cr-O<sub>2</sub> reaction causes a chemical shift because Cr is a reactive element,<sup>31)</sup> displaying a high potential on oxidation at 100 °C. A handbook summarizing various XPS spectra<sup>30)</sup> reports the binding energy of Cr 2p<sub>3/2</sub> in Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> to be 576.6 eV. The present results are in good agreement with the reported value. These results indicates that the deposited Cr, here Cr(OH)<sub>3</sub>, had changed into Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> during the oxidation at 100 °C through the reaction  $2\text{Cr}(\text{OH})_3 \rightarrow \text{Cr}_2\text{O}_3 + 3\text{H}_2\text{O}$  as previously reported.<sup>4)</sup>

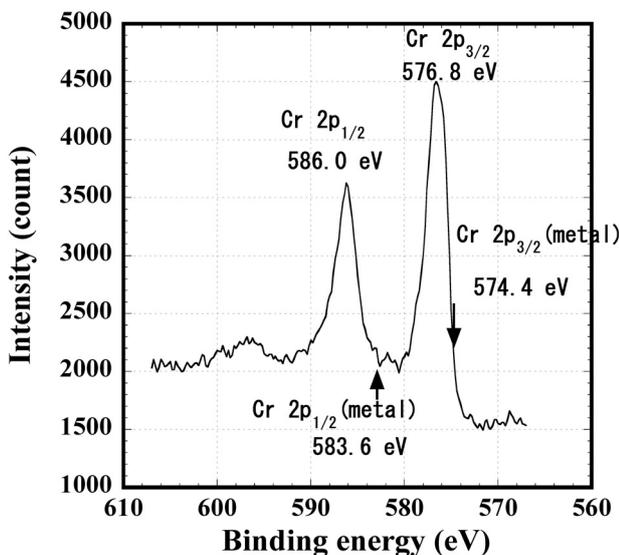


Fig. 1 Cr 2p spectra for n-type Si(001) wafers rinsed with Cr-aqueous solution and thermally oxidized at 100 °C for 30 min (measured by XPS).

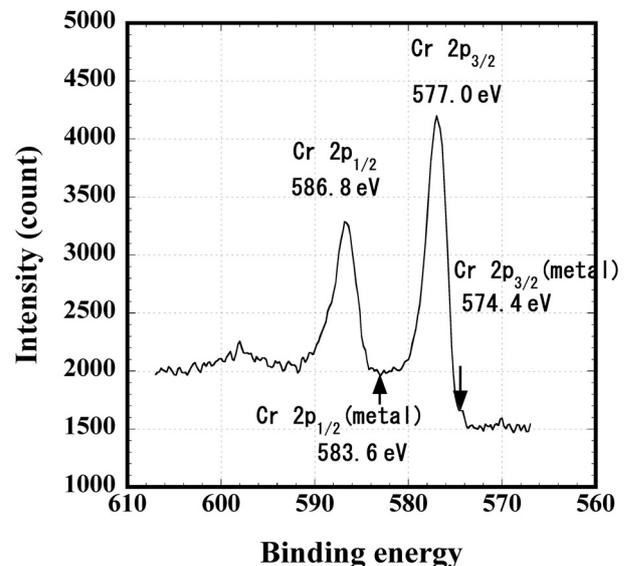


Fig. 2 Cr 2p spectra for n-type Si(001) wafers rinsed with Cr-aqueous solution and thermally oxidized at 100 °C for 4 h (measured by XPS).

Figure 2 plots the XPS profile of an n-type Si(001) wafer rinsed with Cr aqueous solution and thermally oxidized at 100 °C for 4 h, then the sample was measured by XPS. The binding energy of the Cr 2 p<sub>3/2</sub> was determined to be 577.0 eV and that of Cr 2 p<sub>1/2</sub> was 586.8 eV. The binding energy of Cr 2 p<sub>3/2</sub> in Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> is reported to be 576.6 eV<sup>30)</sup> which showed the same tendency in Fig. 1. These results confirmed that the deposited Cr completely changed into Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> during oxidation at relatively low temperatures as demonstrated previously.<sup>4, 29)</sup>

### 3.3 Thermal oxide thickness vs oxidation time

Figure 3 plots the thermal oxide thickness versus the oxidation time at 550 °C. At this temperature, the oxide growths on "Cr" samples were enhanced compared with those of "RCA" samples, possibly because of the catalytic action of Cr, and the growth saturated after a certain time (~ 150 min). A plausible reason for this behavior is that the SiO<sub>2</sub> growth and the desorption of SiO molecules<sup>14)</sup> balance at the surface, resulting in no further SiO<sub>2</sub> growth. If the temperature measured by Yasuda et al.<sup>8)</sup> holds in the present experiments, there is another possible explanation, which is that the activation energy increased as the SiO<sub>2</sub>/Si interface moved deeper into the Si substrate, reaching 2.0 eV for bulk oxidation. For the two samples of "Cr" and "RCA" oxidized at 600 °C for 10 min, the native oxide thicknesses were 0.8 and 1.0 nm, and thermally grown oxide thicknesses were 3.8 and 1.4 nm, respectively. This implies that Cr affects the oxide growth just like a catalyst, bearing in mind that Cr has been reported to form a Schottky like native oxide barrier.<sup>25)</sup> In Cr-aqueous-solution-rinsed n-type Si(001) surfaces, a Schottky barrier contact was proved to be formed on the basis of frequency-dependent AC SPV method.<sup>4)</sup> Thus, Cr may cause the initial oxidation reaction Si+O<sub>2</sub>→SiO<sub>2</sub> to occur under barrier-less condition. This will be discussed later.

Figure 4 plots the thermal oxide thickness versus the oxidation time at 710 °C. At this temperature, the oxide growth of "Cr" samples was still enhanced compared with that of the "RCA" sample up until an oxidation time of 350 minutes (oxide thickness was 8 nm). At 810 °C, the SiO<sub>2</sub> growth curves of the "Cr" and "RCA" samples "crossed-over" and growth retardation of the "Cr" samples started at approximately 120 minutes (oxide thickness was 12 nm) as shown in Fig. 5. This retardation tendency became more prominent at 900 °C as shown in Fig. 6. These phenomena will be discussed in section 3.5.

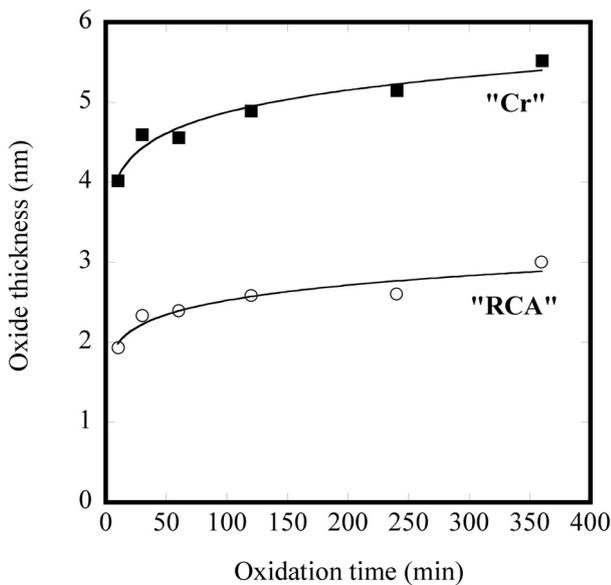


Fig. 3 Relationship between the thermal oxide thickness and oxidation time at 550 °C

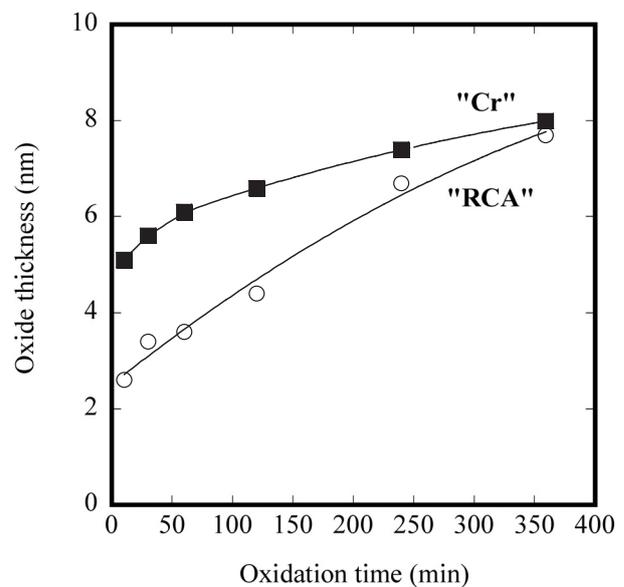


Fig. 4 Relationship between the thermal oxide thickness and oxidation time at 710 °C

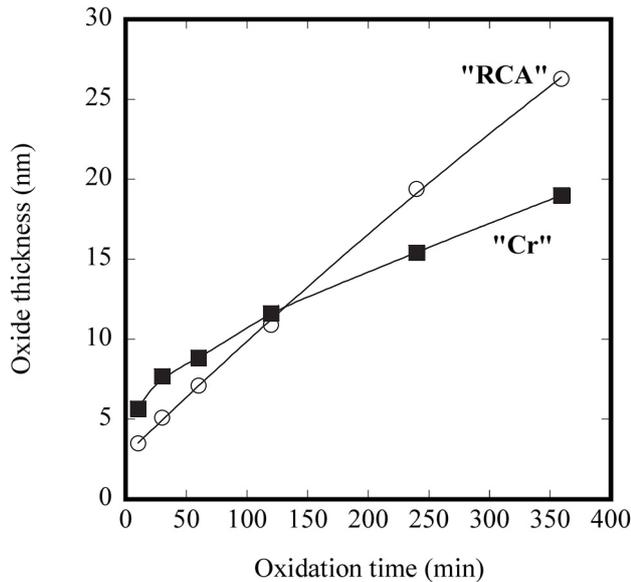


Fig. 5 Relationship between the thermal oxide thickness and oxidation time at 810 °C.

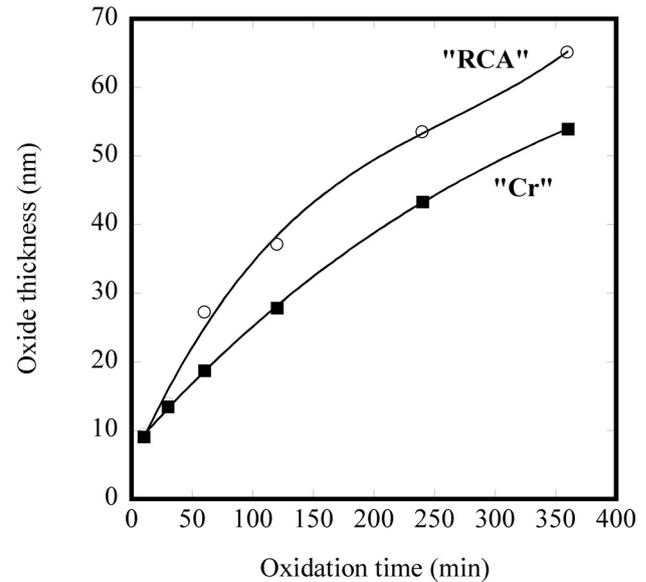


Fig. 6 The relationship between the thermal oxide thickness and oxidation time at 900 °C

### 3. 4 Activation energies obtained by the initial oxidation rates and sectioning methods

The activation energy for oxidation was determined using both the Arrhenius plots of the initial growth rates and a sectioning method.<sup>31)</sup> On the basis of the SiO<sub>2</sub> thicknesses versus oxidation time relationships, the initial oxidation rates extrapolated to time zero ( $t = 0$ ) can be defined and described using the Arrhenius-type equation  $dt_{ox}/dt = C_1 \exp(-E/kT)$ , where  $t_{ox}$  is the oxide thickness,  $C_1$  is a constant,  $E$  is the activation energy for oxidation,  $k$  is the Boltzmann constant, and  $T$  is the absolute temperature. The Arrhenius plots of the initial growth rates between 600 and 900 °C was conducted in the ref. 28. The results indicated the nonlinear temperature dependence at 760 °C. At temperatures less than 760 °C, the activation energies of two samples, "RCA" and "Cr", were determined to be 0.26 eV and 0.05 eV, respectively. The activation energy of "RCA" sample values were close to that given by Watanabe and coworkers<sup>7)</sup> who reported a value of 0.3 eV for oxidation of the second atomic layer. In contrast, the activation energy for "Cr" samples was smaller than that given by Watanabe et al.<sup>7)</sup> A possible explanation is as follows: the Cr on the Si surface,  $1 \times 10^{15}$  atoms/cm<sup>2</sup>, almost entirely covers the first atomic layer of Si. On the basis of XPS analyses, the deposited Cr already changed into Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>,<sup>4)</sup> because Cr is a reactive element, thereby, causing barrier less reaction in the first atom layer. This result implies that Cr atoms play a catalytic role in enhancing the SiO<sub>2</sub> growth. In contrast, at temperatures higher than 760 °C, the activation energies for the "RCA" and "Cr" samples have been reported to be 1.58 eV and 0.46 eV, respectively.<sup>28)</sup> Yasuda et al.<sup>8)</sup> have recently reported that the activation energies of the first, second and third atomic layers were determined to be  $1.0 \pm 0.2$  eV,  $1.3 \pm 0.2$  eV and  $2.0 \pm 0.2$  eV, respectively, in the temperature range from 730 to 900 °C. Above 760 °C, the activation energy for the "RCA" may be a good agreement with that of the second layer by Yasuda et al.<sup>8)</sup> Thus, the obtained value of 1.58 eV may possibly be close to the oxidation of the second or third layer.

Furthermore, the result of the "Cr" sample (0.46 eV) was smaller than those previously reported,<sup>2)</sup> and rather close to that of Watanabe et al.<sup>7)</sup> In our previous work on Al contamination, the activation energy obtained in a similar way at temperatures above 760 °C was 1.60 eV.<sup>24)</sup> Therefore, the activation energies determined by the initial oxidation rates may be connected to the oxidation temperature and characteristics of the metal impurities. Consequently, a more detailed investigation of the oxidation mechanism at temperatures below 760 °C is required.

For oxide thicknesses ranging from 5 to 18 nm at temperatures higher than 760 °C, the activation energy was determined by a sectioning method.<sup>32)</sup> The reciprocal of the time required to grow the same oxide thickness at each temperature follows an Arrhenius-type equation  $1/t = C_2 \exp(-E/kT)$ . Figure 7 shows the Arrhenius plots between  $1/t$  and  $10^3/T$ . The activation energies obtained were  $2.1 \pm 0.3$  eV for "RCA" samples (the results for 15 and 18 nm is unreliable because of less data) and  $2.3 \pm 0.1$  eV for "Cr" samples. These values are close to the energy required to break Si-Si bonds and to form Si-O-Si bonds (1.83 eV) upon diffusion of oxidizing species through the oxide. These values were also in good agreement with those obtained by Yasuda et al.<sup>8)</sup> who obtained bulk oxidation activation en-

ergies for the third and fourth layers. Therefore, for oxides grown thicker than 5 nm at 760 °C, the oxidation process was concluded to be diffusion-controlled. This result provides evidence that the Deal and Grove model<sup>9)</sup> does not hold even for the thickness of approximately 5 nm.

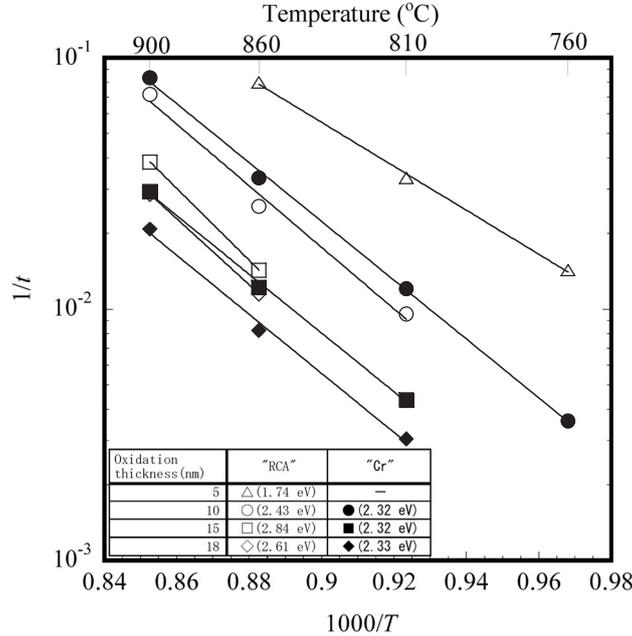


Fig. 7 Arrhenius plots between  $1/t$  and  $10^3/T$  for various oxide thicknesses, ranging from 5 to 18 nm, at temperatures greater than 760 °C.

### 3. 5 Enhanced and retarded growth mechanism for thermally oxidized Cr-contaminated Si wafers

Based on XPS analyses, immediately after rinsing n-type Si(001) surfaces with Cr-contaminated aqueous solution, Cr existed as Cr(OH)<sub>3</sub>, and after long air exposure Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> is formed.<sup>4)</sup> At the very beginning of oxidation, Cr may act as catalyst to promote a Si-O<sub>2</sub> reaction on the surface of the Si, enhancing SiO<sub>2</sub> film growth compared with "RCA" samples as indicated in Fig. 3. At 710 °C, the oxidation of "Cr" samples was enhanced at thicknesses of less than 8 nm as shown in Fig. 4. As the oxidation advanced, for example, at 710 °C for 4 h, Cr atoms may be mainly situated near to the surface of the SiO<sub>2</sub>,<sup>28)</sup> and became diluted as they moved towards the SiO<sub>2</sub>/Si interface. Thus, a Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-rich SiO<sub>2</sub> layer may act as a diffusion barrier for oxygen species as previously reported in the Al and Zn cases.<sup>25,26)</sup> At 810 °C, oxidation of the "Cr" samples was initially enhanced, while later (oxidation time of 120 min: oxide thickness was 12 nm) the growths of the "Cr" and "RCA" samples "crossed over" and growth retardation started at approximately 120 minutes. This retardation tendency became more prominent for all measurements at 900 °C as shown in Fig. 6. Therefore, as the oxidation temperature increases, the role of the Cr atoms may vary, probably due to the thickness of the SiO<sub>2</sub>.

Figures 8 (a), (b) and (c) illustrate point defect generation at the SiO<sub>2</sub>/Si interface during layer-by-layer oxidation<sup>33)</sup> and the speculated oxide growth retardation behavior of thermally oxidized Fe-contaminated n-type Si(001) wafers. Figure 8 (a) shows the reaction mechanism of Si-surface layer-by-layer oxidation from the viewpoint of the point defect generation mechanism proposed by Ogawa et al.<sup>33)</sup> In the model proposed by Ogawa and Takakuwa et al.,<sup>14,20,21,33,34)</sup> point defect generation induced by the oxidation-induced strain plays an important role as a rate-limiting reaction in the unified Si oxidation reaction model for very thin oxide growth and decomposition. Ogawa et al.<sup>33)</sup> suggested that vacancies resulting from Si atom emissions are predominantly induced in the first strained Si layer (Fig. 8 (a)). Figure 8 (b) illustrates the reaction between diffused oxygen molecules and emitted Si atoms at the SiO<sub>2</sub>/Si interface when the oxide is not contaminated with Fe. Figure 8 (c) illustrates the case in which there is a segregated Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> layer formed at the top of the SiO<sub>2</sub> film. The growth retardation phenomenon can be envisaged as follows: the Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-rich SiO<sub>2</sub> layer is a diffusion barrier preventing much O<sub>2</sub> from reaching the SiO<sub>2</sub> layer. This in turn suppresses the emission of Si self-interstitial atoms due to oxidation-induced strain at the SiO<sub>2</sub>/Si interface and thus, the oxidation reaction at the SiO<sub>2</sub>/Si interface is reduced. Our results indicate that emitted Si is

oxidized not at the surface of the  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ -rich  $\text{SiO}_2$  film layer, but at the  $\text{SiO}_2/\text{Si}$  interface in accordance with the interfacial Si emission model proposed by Kageshima et al.<sup>16, 19)</sup> and by Ogawa and Takakuwa et al.<sup>14, 20, 21, 33, 34)</sup>

The Cr-induced negative oxide charge [ $(\text{CrOSi})^-$  and/or  $\text{CrO}_2^-$  networks] in  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  is not responsible for the phenomena of the enhanced and retarded growth. This is because  $(\text{CrOSi})^-$  network has been reported to collapse during oxidation above  $850^\circ\text{C}$  through the effect of frequency-dependent AC SPV, but in our experiments, the oxide still grew at this temperature.<sup>35, 36)</sup>

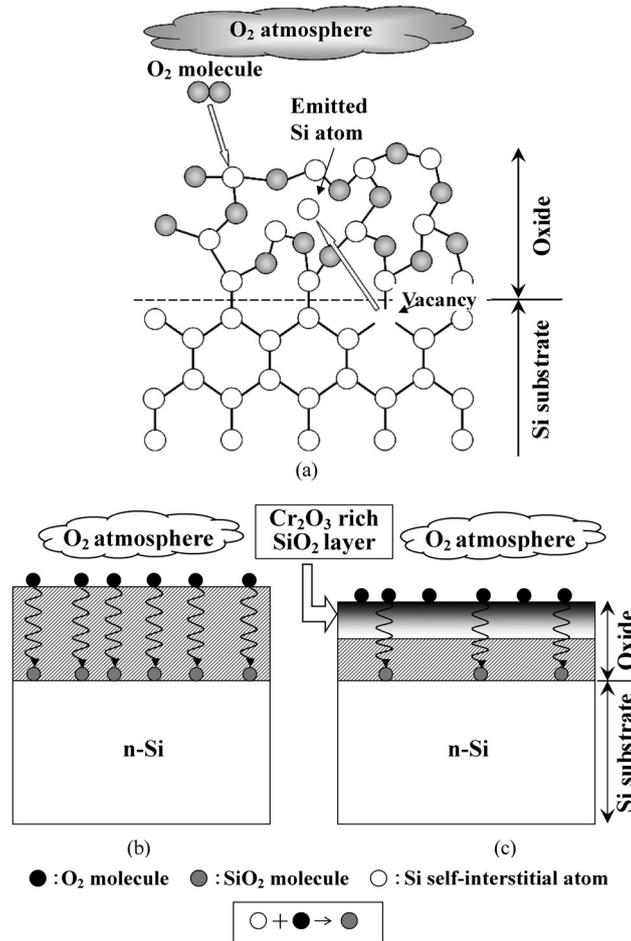


Fig. 8 Schematic illustration of (a) point defect generation at the  $\text{SiO}_2/\text{Si}$  interface following the Si self-interstitial emission model proposed by Ogawa et al.,<sup>33)</sup> (b) reaction between emitted Si atoms and diffused oxygen molecules on cleaned Si surface at the  $\text{SiO}_2/\text{Si}$  interface, (c) the case in which a  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ -rich  $\text{SiO}_2$  layer (diffusion barrier).

#### 4. C onclusions

Oxide growth on thermally oxidized Cr-contaminated n-type Si(001) surfaces was investigated in the temperature range from  $550$  to  $900^\circ\text{C}$  in a dry oxygen ambient by using ellipsometry and XPS. The catalytic and reactive characteristics of Cr caused an enhanced oxide growth to assist the Si- $\text{O}_2$  reaction on Si(001) surfaces less than  $710^\circ\text{C}$ . For shorter oxidation times at  $810^\circ\text{C}$  (thickness:  $< 10\sim 12$  nm), the samples contaminated with Cr ("Cr") showed enhanced oxide growth. As the oxidation proceeded, however, the oxidation rates of "Cr" samples slowed and became less than that of samples rinsed in RCA ("RCA"). This retardation tendency became more prominent at  $900^\circ\text{C}$ . The Cr on the Si surface became segregated near the top surface of the  $\text{SiO}_2$ , resulting in a  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ -rich  $\text{SiO}_2$  layer. The retardation phenomenon in thermally oxidized Cr-contaminated Si can be envisaged on the basis of the interfacial Si emission model; the  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ -rich  $\text{SiO}_2$  layer is a good diffusion barrier against oxygen ( $\text{O}_2$ ). The diffusion of oxygen atoms toward the  $\text{SiO}_2/\text{Si}$  interface is reduced, and consequently, the emission of Si self-interstitials due to oxidation-induced strain decreases at the  $\text{SiO}_2/\text{Si}$  interface, resulting in the retarded oxide growth. Our results are evidence that the emitted Si is oxidized not in the  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ -rich  $\text{SiO}_2$  layer, but at the  $\text{SiO}_2/\text{Si}$  interface in accordance with the

proposed interfacial Si emission model. The activation energies for the oxide growth are in accordance with the growth behavior of the Cr-contaminated samples. The Cr-induced negative oxide charge (the (CrOSi)<sup>-</sup> network) in Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> is not responsible for the oxide growth retardation.

### Acknowledgments

Part of this work was conducted at the Center for Nano Lithography & Analysis at the University of Tokyo, under the support of the Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology (MEXT), Japan. The authors are grateful for the financial support from Nihon University.

### References

- 1) J. M. deLarios, D. B. Kao, C. R. Helms, and B. E. Deal : *Appl. Phys. Lett.* **54** (1989) 715.
- 2) S. W. Lim, F. Machuca, H. Liao, R. P. Chiarello, and R. C. Helm : *J. Electrochem. Soc.* **147** (2000) 1136.
- 3) H. Shimizu : *J. Electrochem. Soc.* **150** (2003) G725.
- 4) H. Shimizu and Y. Sanada : *Jpn. J. Appl. Phys.* **51** (2012) 055702.
- 5) F. M. Ross and J. M. Gibson : *Phys. Rev. Lett.* **68** (1992) 1782.
- 6) K. Ohishi and T. Hattori : *Jpn. J. Appl. Phys.* **33** (1994) L675.
- 7) H. Watanabe, K. Kato, T. Uda, K. Fujita, M. Ichikawa, T. Kawamura, and K. Terakuwa: *Phys. Rev. Lett.* **80** (1998) 345.
- 8) T. Yasuda, N. Kumagai, M. Nishizawa, S. Yamasaki, H. Oheda, and K. Yamabe: *Phys. Rev. B.* **67** (2003) 195338.
- 9) B. E. Deal and A. S. Grove : *J. Appl. Phys.* **36** (1965) 3770.
- 10) H. Z. Massoud, J. D. Plummer, and E. A. Irene : *J. Electrochem. Soc.* **132** (1985) 1745.
- 11) H. Z. Massoud, J. D. Plummer, and E. A. Irene : *J. Electrochem. Soc.* **132** (1985) 2685.
- 12) S. T. Dunham and J. D. Plummer : *J. Appl. Phys.* **59** (1986) 2541.
- 13) T. Yasaka, M. Takakuwa, S. Miyazaki, and M. Hirose : *Mater. Res. Soc. Symp. Proc.* **222** (1991) 225.
- 14) Y. Takakuwa, M. Nihei, and N. Miyamoto : *Appl. Surf. Sci.* **117/118** (1997) 141.
- 15) M. Suemitsu, E. Yoshihara, and Y. Miyanishi : *Phys. Rev. Lett.* **82** (1999) 2334.
- 16) H. Kageshima, K. Shiraishi and M. Uematsu : *Jpn. J. Appl. Phys.* **38** (1999) L971.
- 17) K. Kato, T. Uda, and K. Terakura : *Phys. Rev. Lett.* **80** (1998) 2000.
- 18) H. Watanabe, T. Baba, and M. Ichikawa : *J. Appl. Phys.* **39** (2000) 2015.
- 19) M. Uematsu, H. Kageshima, and K. Shiraishi : *J. Appl. Phys.* **89** (2001) 1948.
- 20) Y. Takakuwa, F. Ishida, and T. Kawawa : *Appl. Surf. Sci.* **216** (2003) 133.
- 21) S. Ogawa and Y. Takakuwa : *Jpn. J. Appl. Phys.* **45** (2006) 7063.
- 22) K. Ibano, K. M. Itoh, and M. Uematsu : *J. Appl. Phys.* **103** (2008) 026101.
- 23) T. Akiyama, H. Kageshima, M. Uematsu, and T. Ito: *Jpn. J. Appl. Phys.* **47** (2008) 7089.
- 24) N. Miyata, H. Watanabe, and M. Ichikawa : *Phys. Rev. B.* **58** (1998) 13670.
- 25) H. Shimizu and T. Sato : *Jpn. J. Appl. Phys.* **44** (2005) 808.
- 26) H. Shimizu, H. Wakashima, T. Ishikawa, M. Ikeda, and T. Sato : *Jpn. J. Appl. Phys.* **46** (2007) 7702.
- 27) K. Kern and D. A. Puotinen : *RCA Rev.* **31** (1970) 187.
- 28) H. Shimizu and S. Ishiwari : *Semicond. Sci. Technol.* **15** (2000) 776.
- 29) H. Shimizu and T. Sato : *Surf. Interface Anal.* **38** (2006) 506.
- 30) J. F. Moulder, W. F. Stickle, P. E. Sobol, and K. D. Bomben: in *Handbook of X-ray Spectroscopy*, ed. J. Chastain and R. C. King (Physical Electronics, Inc., Eden Prairie, Minnesota, 1995) p. 76.
- 31) S. Ostendorp, Y. Lei, and G. Wilde : *Chem. Phys. Lett.* **513** (2011) 99.
- 32) P. G. Shewmon : *Diffusion on solids*, (MacGraw-Hill, 1963).
- 33) S. Ogawa, A. Yoshigoe, S. Ishidzuka, Y. Teraoka, and Y. Takakuwa : *Jpn. J. Appl. Phys.* **46** (2007) 3244.
- 34) S. Ogawa and Y. Takakuwa : *Surf. Sci.* **601** (2007) 3838.
- 35) H. Shimizu, S. Shimada, and M. Ikeda : *Jpn. J. Appl. Phys.* **49** (2010) 038001.
- 36) H. Shimizu and Y. Sanada : *Jpn. J. Appl. Phys.* **50** (2011) 111301.



# 広領域梨地表面の作成法の提案と実加工

小林 純\*・畠山 浩史\*・溝口 知広\*\*・小林 義和\*\*・白井 健二\*\*・近藤 司\*\*\*

## Generation of Wide Domain Satin-Finished Surface for Machining

Jun KOBAYASHI\*, Hiroshi HATAKEYAMA\*, Tomohiro MIZOGUCHI\*\*,  
Yoshikazu KOBAYASHI\*\*, Kenji SHIRAI\*\* and Tsukasa KONDO\*\*\*

### Abstract

This research is designed to create an extensive domain image by connecting individually created surface textures. In this study, micro domain images were connected by averaging on a personal computer to compose, a large domain image. The created image was then used for machining. Discontinuous relaxation of the gray-scale was confirmed between the micro domain images after averaging.

**Key words:** Satin-Finished Surface, Milling, Machining, discontinuous

### 1. 緒 言

近年、自動車、家電品等の工業製品の表面には、表面テクスチャと呼ばれる微細な凹凸形状が付加されているものが多く存在する。表面テクスチャは主にサンドブラストやエッチングによって作成されている。しかしながら、その作成には、熟練した技術を必要とし、再現性に乏しいという問題がある。そのため、より高効率に高精度な表面テクスチャを作成するために表面テクスチャをデジタル化することが必要とされている<sup>1)</sup>。デジタル化する表面テクスチャが広領域の場合、加工に用いる工具経路のデータ量が膨大になる、そして、加工に用いる広領域加工データを一般的なPC（パーソナルコンピュータ）で作成する場合、工具経路（CLデータ）を求めるための処理に長時間を要し、現実的ではない。そこで本研究においては、一般的なPCにより広領域加工データを作成する手法を提案した。本手法においては、あらかじめ広領域画像と3つの狭領域画像、3つの狭領域画像から三次元加工データを準備する。広領域画像から任意のサイズの微小領域を指定し、微小領域を3つの狭領域画像中で走査しながら、互いに最も類似している領域を探索し、探索した微小領域画像データを使って、つなぎ合わせた広領域画像を作成し、かつ、つなぎ合わされた広領域加工データの作成を目指す。接合部分に不連続が発生してしまう。不連続部分に平均化を施すことにより、不連続部分を緩和する手法を提案した。

### 2. 提案手法

#### 2.1 広領域 CL データの作成手順

図1に示すように、広領域 CL データを作成する方法を

提案した。その手順を以下に示す。

- ① 画像処理ソフトを使用してノイズをランダムに発生させ、梨地画像を作成する。このとき広領域画像と3つの狭領域画像を作成する。3つの狭領域画像はデータ量削減のために用いる。
- ② 3つの狭領域画像から三次元加工用データをあらかじめ作成しておく。
- ③ 図1のAに示すように広領域画像に対し、任意のサイズの微小領域（大きさ  $dx$ ,  $dy$ ）を指定する。
- ④ 下記⑤~⑧を広領域画像の端まで順次実行し、微小領域画像をつなぎ合わせて広領域画像データを作成し、これからつなぎ合わされた広領域加工データを作成する。
- ⑤ 図1(b)に示すように微小領域画像を3つの狭領域画像中で走査しながら比較し、互いに最も類似している領域をプレートマッチング法（正規化相互相関法）により探索する。
- ⑥ 図1(c)に示すように探索した微小領域画像データを使って、つなぎ合わせた広領域画像を作成し、かつ、つなぎ合わされた広領域加工データ（CLデータ）を作成する。
- ⑦ 図1(c)に示すように⑤で探索した領域に隣接する新たな微小領域に対し上記④を実施して最も類似した新たな微小領域画像を求める。そしてつなぎ合わされた広領域画像を作る際に微小領域画像データと新たに求めた微小領域画像の間にオーバーラップ領域  $t$  を設けて配置する。加工データに対しても同様にオーバーラップ領域  $t$  を設ける。
- ⑧ 次節2.2に示すようにそれぞれのオーバーラップ領域に対し平均化を施す。

平成24年5月 15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

\*\*\* 函館工業高等専門学校

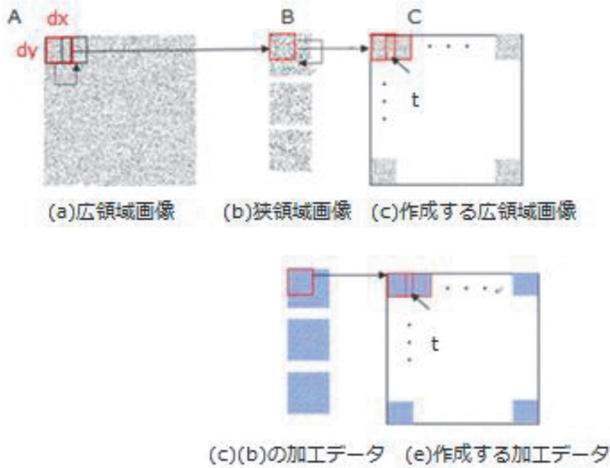


図1 提案手法の流れ

2.2 オーバーラップ領域に対する平均化の手順

平均化の概要を図2に示す。オーバーラップ領域に施す平均化とは、探索した微小領域画像①と②のオーバーラップ領域tの間で、探索した微小領域画像①の重みを100%から線形的に減少させ、探索領域②の重みを0%から線形的に増加させることによりオーバーラップ領域画像の階調値を求めるものである。式(1)により各ピクセルに掛ける重みを求め、式(2)に代入することによりオーバーラップ領域のデータを求めるものである。

$$w[i] = i / t \quad (1)$$

$$I' [x][y] =$$

$$I_1 [x][y] * (1 - w[i]) + I_2 [x][y] * w[i] \quad (2)$$

tはオーバーラップの長さ、iは0からtまで増加させる。w[i]はオーバーラップ領域にかける重み、I' はオーバーラップ領域のデータ、I<sub>1</sub>は探索した微小領域画像①の階調値、I<sub>2</sub>は探索した微小領域画像②の階調値とする。

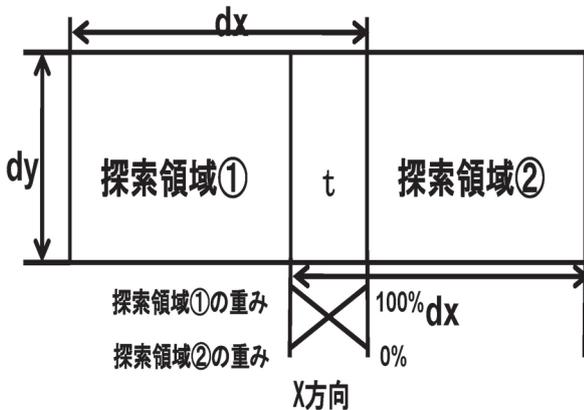


図2 平均化の概要

3. 広領域梨地画像の一部の作成実験

3.1 平均化を施さない場合

図3(a)に示す、1000×1000ピクセルの広領域画像と図3(b)に示す図3(a)の一部から抜き出した200×200ピクセルの狭領域画像3枚を広領域梨地画像の一部の作成に用いた。探索に用いる微小領域画像を(dy (= dy))を100ピクセルとしオーバーラップ領域を設けず、広領域梨地画像の一部を作成した。作成結果の一部を図4に示す。オーバーラップ領域を設けなかったため、印(▼)の位置に、広領域梨地画像の一部を作成するためにつなぎ合わせた微小領域画像の境界にグレースケールの不連続が発生している。

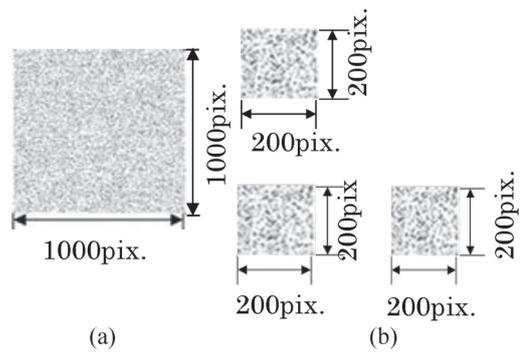


図3 用いる梨地表面

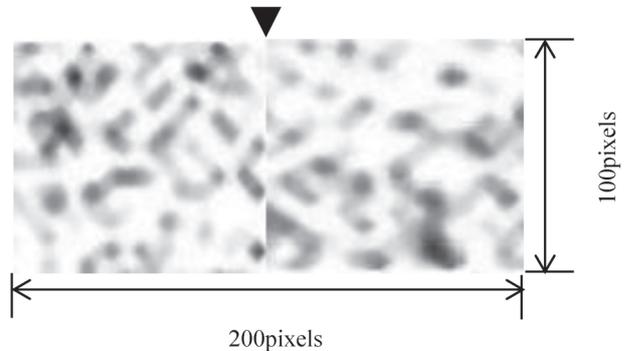


図4 つなぎ合わされた広領域画像 (一部拡大) 境界に不連続あり

3.2 平均化を施した場合

上記と同様の画像に対し、類似画像を探索する微小領域画像(dy (= dy))を100ピクセル、オーバーラップ領域を30ピクセル(30%)の条件とし、オーバーラップ領域内で平均化を施し、つなぎ合わされた広領域梨地画像を作成した。作成結果を図5に示す。オーバーラップ領域をとった分、つなぎ合わされた画像が小さくなっていることが確認できる。また、平均化を施す前に発生していた微小領域画像間のグレースケールの不連続が緩和していることが確認できる。

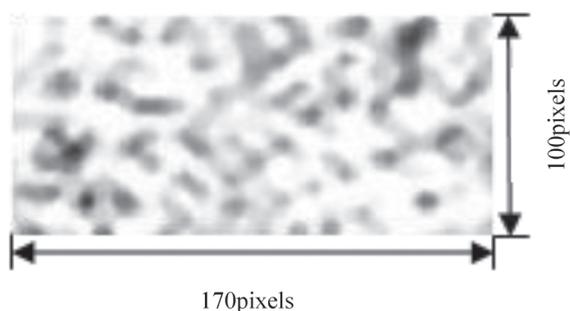


図5 つなぎ合わされた広領域画像 (一部拡大) 境界平均化後

#### 4. 加工実験

##### 4.1 加工条件

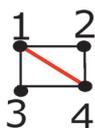
提案手法の有効性を確認するために、図4、図5に示す画像を対象とし、加工実験を行った。加工には、STLデータを用いた。STLデータとは (Standard Triangulated Language) の略で三角形メッシュの組み合わせにより、三次元形状を表現することができるものである。被削材はケミカルウッド、粗加工に半径1.0mm、仕上げに半径0.2mmのボールエンドミルを使用した。①STLデータを構成するデータ間隔を200 $\mu$ mとして三次元形状を作成した。②エンドミルの送りは、粗加工に200 $\mu$ m、仕上げに50 $\mu$ mとして加工を行なった。

##### 4.2 STLデータの作成手順

STLデータの作成手順を以下に示す。

- (1) 各ピクセルの諧調値を取得し、座標及びzの値を(x, y, z)の点群データへ変換する。
- (2) 以下の(3)~(5)の処理を隣接可能なすべての4点で行う。以上の処理により加工に必要なSTLデータが作成できる。
- (3) 図6に三角形分割の手順を示す。点1と4の高低差、点2と3の高低差を調査し、それぞれの対角線の高低差を比較し、差が少ない方に線を引き、三角形分割を行う。
- (4) 三角形分割した三角形の法線ベクトルを計算する。
- (5) 次に法線ベクトルの値をファイルへ書き込む。

14の差の方が小さい場合



23の差の方が小さい場合

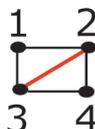


図6 三角形分割の手順

##### 4.3 加工結果

図4、図5に示す画像に対し、上記の手法により作成したSTLデータを使用しRoland MDX650Aにより加工実験を行った。不連続が発生した作成結果を図7に、平均化を施した作成結果を図8に示す。図8では、オーバーラップ領域内のテクスチャは、それ以外の領域のテクスチャと同様な形状で作成されていることが分かる。このように目的とした不連続を緩和することに成功した。ただし、凸部の高さが若干低くなっている部分がある。

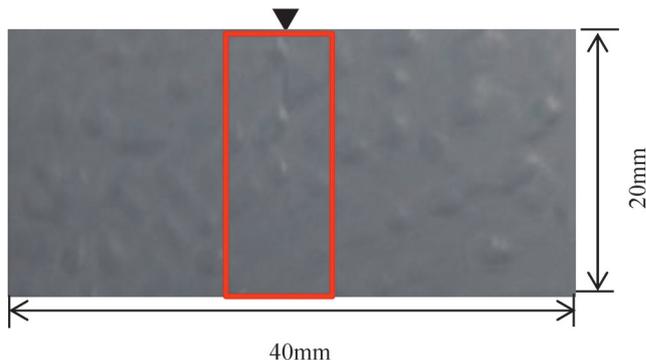


図7 作成結果 (不連続)

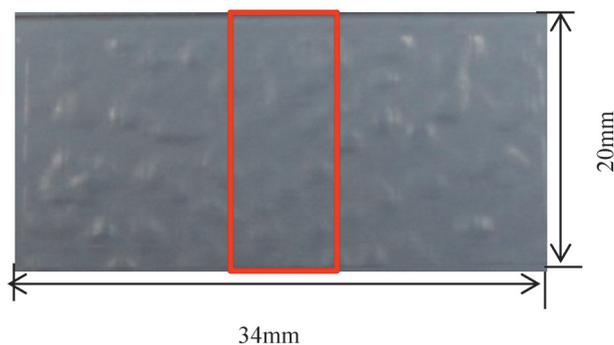


図8 作成結果 (平均化)

#### 5. 結 言

##### 5.1 結 論

表面テクスチャにおける微小領域画像をつなぎ合わせて広領域画像を作成する研究を行なった。つなぎ合わせた微小領域画像間に発生する不連続の緩和をはかるため、各微小領域間にオーバーラップ領域をとってつなぎ合わせた。オーバーラップ領域の中で両画像の平均化を施して広領域梨地画像を作成した。また、オーバーラップ領域内の諧調値を検証し、以下の結論を得た。

- (1) つなぎ合わせる微小領域画像間のオーバーラップ領域における画像の諧調値は、両微小領域間の距離に応じて線形的に重みをとった平均値として求める。平均値を求めるためのプログラムを作成した。
- (2) つなぎ合わせた微小領域のオーバーラップ領域に平均化を施す前に発生していたグレースケールの不連続が、

平均化を施したことにより不連続を緩和できた。

- (3) 表面テクスチャの広領域加工における CL データ作成の手法を提案した。
- (4) つなぎ合わされた広領域梨地画像を作成し、これから加工データを求めて広領域梨地表面を加工した。つなぎ合わせたオーバーラップ領域に不連続が発生していないことを確認した。

## 5. 2 今後の課題

- (1) 本研究では、オーバーラップ領域に平均化を施したが、イメージキルティング法<sup>[8]</sup>により接合したものと不連続の比較を行う。
- (2) 今回は、異なる模様 of 広領域画像の一部から加工データを求めたが、微小領域の加工データのみを用い、広領域加工データを求める。
- (3) 表面テクスチャの形状にはさまざまなものが存在する。今回作成した異なる模様のテクスチャに対しても広領域加工データを求め、加工実験を継続して行う。

## 参考文献

- 1) Yoshikazu Kobayashi, Kenji Shirai, Kiyotaka Kawasaki : GENERATION AND ASSESSMENT OF RANDOM SURFACE TEXTURE IN A WIDE AREA, 10th International Symposium on Measurement and Quality Control (2010) 191.
- 2) Gary Bradski, Adrian Kaehle (松田 晃一訳) : 詳解 OpenCV - コンピュータビジョンライブラリーを使った画像処理・認識, pp44-50
- 3) 奈良先端科学技術大学 OpenCV プログラミングブック作成チーム : OpenCV プログラミングブック, pp176-183
- 4) 佐藤敦 : 白色干渉法を利用した最新の表面形状評価技術, 表面技術 Vol. 57 No. 8, (2006), pp. 554-558
- 5) 畠山 浩史, 小林 義和, 白井 健二 : ミーリングによる梨地表面の作成法の提案, 型技術協会第16回 型技術ワークショップ in 宇都宮, 型技術第25巻第12号 pp10-11
- 6) 畠山 浩史, 溝口 知広, 小林 義和, 白井 健二 : 広領域梨地表面の作成法とその表面加工, 型技術協会第17回 型技術ワークショップ in 栃木, 型技術第26巻第12号 pp48-49
- 7) 中石雅之, 小林義和, 白井健二, 前田幸久 : イメージキルティング法によるテクスチャ形状の接合と加工, 2010年度精密工学会春季大会学術講演会 pp947-948

# 全方向移動可能な小型加工ロボットの開発

大山 仁\*・溝口 知広\*\*・小林 義和\*\*・白井 健二\*\*・近藤 司\*\*\*

## Development of Omni-directional Miniature Robot for Machining

Hitoshi OYAMA\*, Tomohiro MIZOGUCHI\*\*, Yoshikazu KOBAYASHI\*\*, Kenji SHIRAI\*\*  
and Tsukasa KONDO\*\*\*

### Abstract

In recent years, surface texture and relief are increasingly being added to buildings and interiors. These machining techniques are effective for improving visual added-value and design characteristics. However, the machining of surface texture and relief by hand requires considerable time and labor. In addition, depending on the size of the workpiece, large processing machines are required for the machining work. In this study, we thus developed a small robot that can machine large planar workpieces at low costs. We conducted experiments to validate the machining accuracy of the robot, and evaluated the usefulness and functions of the robot system. As a result, we found that within target error values were achieved.

**Key words:** omni-directional miniature robot, machining, machining accuracy.

### 1. 緒 言

近年、建築物やインテリアなどには表面テクスチャやレリーフが付加されている。これらの加工は視覚的な付加価値を向上させ、意匠性を向上させる効果がある。従来、表面テクスチャやレリーフは人手により作成されていた。しかしながら、これらは熟練した技術が必要であり、再現性に問題がある。近年の機械加工の高精度化の進展により、上述の問題が解決されつつある<sup>1)</sup>。一方、これらの方法においては、例えば、1000mm×1000mm 程度の大型の被削材に対して、人手により表面テクスチャやレリーフを加工する場合、多大な時間と労力が要求される。また、機械加工においては、被削材の大きさに対応した大型の加工機が必要である。この加工機導入のためには加工機用のスペースと高コストが要求される。

そこで、本研究においては、平面の大型被削材を対象に、低コストで加工可能な小型ロボットを開発することとした<sup>2)~6)</sup>。今回の対象はローレリーフと呼ばれる素材を微小に切り込む平面的な浮き彫り加工である。表面テクスチャはミリメートルオーダーの加工を想定しているため、目標誤差を1 mm 以内に設定している。オムニホイールを用いた全方向移動可能なロボットにスピンドルと工具を搭載させることにより、その検証をした。

また、開発した加工ロボットにより加工実験をし、本ロボットシステムの機能とその有用性を評価した。

### 2. 全方向移動小型加工ロボットの概要

#### 2.1 開発したロボットの構成

開発したロボットの本体寸法は、図1に示すように、縦、横260mm、高さ180mmである。車輪は4輪であり、オムニホイールを用いた。オムニホイールは車輪の円周方向に回転可能なローラが複数装着されており、前後のみならず左右にも動作可能な特殊な車輪である。この車輪がステッピングモータと連結部品により接続されており、各々独立して動作し、中心に向かって90° 間隔で設置することにより、種々の合力が生成され、全方向への移動が可能となる。ステッピングモータの仕様を表1に示す<sup>7)</sup>。またZ軸ステージにスピンドルを固定し、これに工具を装着する。スピンドルの仕様を表2に示す<sup>8)</sup>。工具はエンドミルを使用する。このロボットを被削材上で動作させることによって、加工を行う。

#### 2.2 システム構成

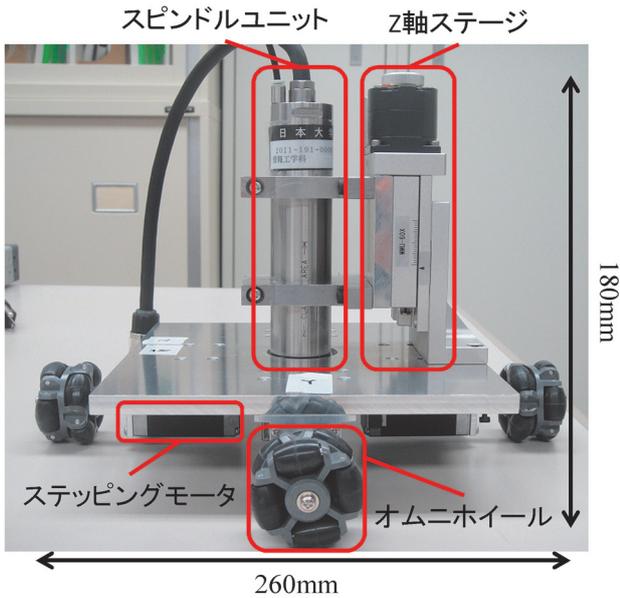
全方向移動ロボットのシステム構成を図2に示す。本システムは制御用PCと全方向移動ロボットにより構成されている。制御用PCは、ステッピングモータとZ軸ステージの2つを制御している。ステッピングモータはモータドライバ、コントロールボードを介して制御用PCに接続されている。ステッピングモータはモータドライバによりあらかじめ1パルスで回転する角度を決定される。制御用PCから指令パルスを送り、送られてきたパルスに応じて回転速度が変化する。Z軸ステージはZ軸のコントロールユニットと制御用PCをRS-232Cにより接続している。スピンドルはスピンドルのコントロールユニットにより手動操作される。ロボットの動作は、ミリメートルを単位として座標を手動により入力し、移動する。

平成24年9月 20日受理

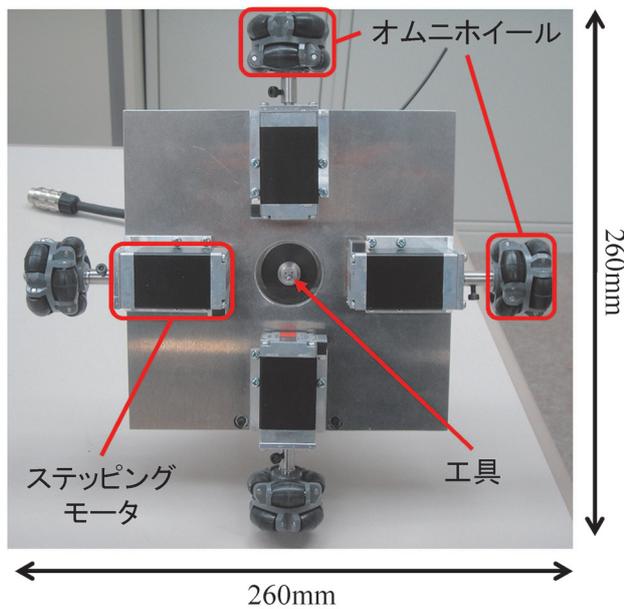
\* 日本大学大学院工学研究科情報工学専攻

\*\* 日本大学工学部情報工学科

\*\*\* 函館工業高等専門学校機械科



(a) 側面



(b) 下面

図1 開発したロボットの構成

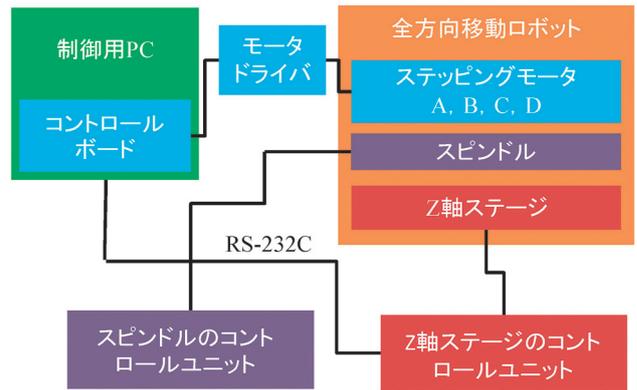


図2 システムの構成

表1 ステッピングモータの仕様

製品名	CMK225PAP
励磁最大静止トルク	0.09N·m
ローター慣性モーメント	$18 \times 10^{-7} \text{J} \cdot \text{kg} \cdot \text{m}^2$
定格電流	0.95A/相
基本ステップ角	1.8°
質量	0.2kg

表2 スピンドルの仕様

製品名	EMS-3060A
外径	Φ30mm
回転速度	$60,000 \text{min}^{-1}$
スピンドル振れ精度	1μm 以内
最大出力	350W
質量	495g

### 3. 直線移動に対する加工実験

#### 3.1 実験の概要

直線移動に対する加工実験は、一辺の長さ30mmの正方形の模様を被削材上に加工し、本ロボットの有効性を評価した。被削材はケミカルウッド、工具は半径1mmのボールエンドミルである。加工条件として、切り込み深さ0.5mm、スピンドルの回転速度30,000rpm、移動速度約19.6mm/sとし、今回使用した被削材の大きさにより、横1列に加工できるのは5回であるため、2列分の10回の加工を試みた。図3にその一例を示す。

#### 3.2 精度評価

加工精度を評価するため、図3に示すよう被削材の各辺と角にそれぞれ検証用の番号をつけ、長さと角度を計測した。計測方法は、フリーソフト“三点式計測器”<sup>9)</sup>を使用した。画像中に基準となる定規などで基準値を設定し、そこから、指定した3点の位置からの長さ、角度を計測する方式である。今回は、画像中の定規を基準値として、工具中心となる部分にポイントを置き計測した。10回の加工結果の平均、標準偏差、平均絶対誤差を表3に示す。表3により、平均絶対誤差は辺の長さ0.5mm以内、角度1.0°以内となり、目標の誤差以内の結果を得た。また、標準偏差には大きなばらつきはみられなかった。この結果より、本ロボットは直線と直角の加工に対しては有効であることを検証できた。

### 4. 斜め移動に対する加工実験

#### 4.1 実験の概要

前章において、直線移動に対する加工の有効性を検証した。本章においては斜め移動（すなわちX、Y同時2軸加工）に対する精度の検証を行った。被削材はケミカルウッド、エンドミルは半径1mmのボールエンドミルである。加工条件として、切り込み深さ0.5mm、スピンドルの回転速度30,000rpm、移動速度を約19.6mm/sとし、のこぎり波形状を加工した。のこぎり波形状を図4に示す。図4に示すように四角で囲った1つの波を1とし、今回使用した被削材の大きさにより、横1列に加工できるのは7回であるため、2列分の計14回の加工を試みた。その結果の一部を図5に示す。目視によっても移動始動時と加工途中に歪みの発生していることがわかる。

#### 4.2 計測と精度評価

計測方法として、前章同様にフリーソフトの“三点式計測器”を採用した。その結果としての平均、標準偏差、平均絶対誤差を表4に示す。辺の長さの平均絶対誤差は0.5mm以内となった。角度の平均絶対誤差は、1.0°以内となったが、誤差率や標準偏差の値を辺の長さと比較すると、値が少し大きく、ばらつきがある。平均絶対誤差が最初の目標値とした1.0mm以内であり、角度も1.0°以内であり、数値的には十分な結果を得られた。しかしながら、図

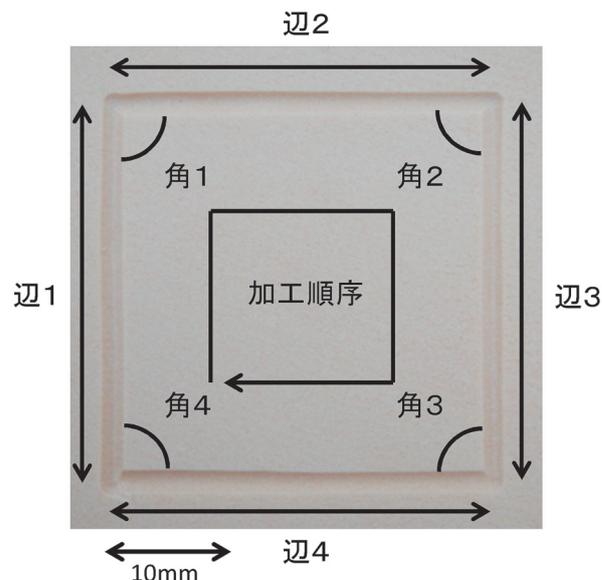


図3 直線移動加工結果

表3 直線移動加工10回の計測結果

#### (a) 辺の長さ

	辺1	辺2	辺3	辺4
平均	29.59	29.70	29.74	29.77
標準偏差	0.36	0.43	0.38	0.25
平均絶対誤差	0.41	0.41	0.38	0.27

単位：mm

#### (b) 角度

	角1	角2	角3	角4
平均	89.91	90.17	89.72	90.12
標準偏差	0.60	0.74	0.56	0.98
平均絶対誤差	0.50	0.60	0.49	0.82

単位：°

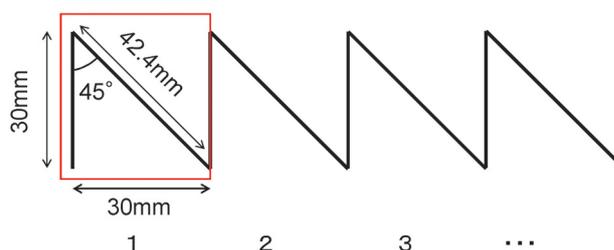


図4 目的とする加工形状

5から判断すると目視によつては、十分な結果とはなっていない。これは、斜め移動の始点と終点はほぼ正しい位置にあるが、途中の経過が良くないことを示している。この原因としては、ロボット本体に搭載されているZ軸ステージが片側に存在しているため、オムニホイールにかかる負荷にばらつきが生じている可能性があるためであると考えられる。

## 5. 重量バランスをとった斜め移動加工実験

### 5.1 実験概要

前章の実験において、斜め移動の精度が十分ではない原因として、ロボット本体に搭載されているZ軸ステージが片側にだけ存在しているため、オムニホイールにかかる負荷にばらつきが生じていることが考えられた。したがって、本体の重量のバランスを考慮することにより、精度を向上させることができる。Z軸ステージの重量は557.9gであった。反対側に同じ程度の荷重の物体を存在させ、前章同様の条件のもとで加工実験を行った。前章の加工結果とバランスをとった加工結果の一部を比較したものを図6に示す。目視において判断するとバランスをとることにより歪みの軽減がわかる。

### 5.2 計測結果と比較

計測方法は、3章に示した方法と同様にフリーソフトの“三点式計測器”方式を採用した。計測の平均、標準偏差、平均絶対誤差を表5に示す。4章の表4と比較すると角度においては、重量のバランスをとった場合の方が、平均が約0.7mm、絶対誤差平均が約0.5mm良くなった。しかしながら、直線移動の移動距離がすべての場合で短くなり、平均値、絶対誤差平均ともに精度が落ちた。さらに、目標誤差値以内ではなかった。これは、移動距離を算出にオドメトリを使用していること、本体の重量が重くなりすぎてしまったことの2つの要因によるものである。オドメトリとはタイヤの回転角から現在位置を推定する手法である。オドメトリはタイヤが滑らないことが前提となっている。よって、本体の重量が重くなりすぎてしまったため、モータの軸が空転してしまい、指定した数値分パルスは送られているが、車輪は回転していないため誤差が生じたためだと考えられる。

## 6. 結 言

### 6.1 まとめ

今回、平面の大型被削材を対象にした、低コストで製作可能な全方向移動小型加工ロボットを開発し、そのロボットの有用性を示すために加工実験をし、以下の成果を得た。

- (1) 直線移動に対する加工においては、平均絶対誤差は辺の長さ0.5mm以内 角度1.0°以内となり、目標とする誤差内の結果を得た。
- (2) 斜め移動に対する加工においては、平均絶対誤差は辺の長さ0.5mm以内 角度1.0°以内となり、目標の誤差内の結果を得た。しかしながら、目視による測定で歪みが見られた。その原因は重量バランスにと考えられる。
- (3) 斜め移動に対する加工の重量バランスにより、角度に関しては絶対誤差平均が約0.5mm良くなったが、直線移動の精度は落ちた。その原因は、軸が空転しているためであると考えられる。

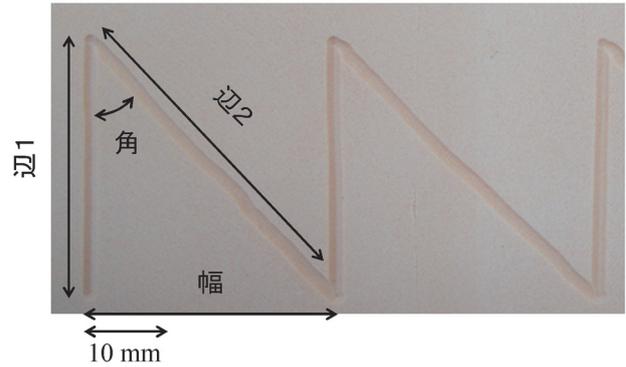
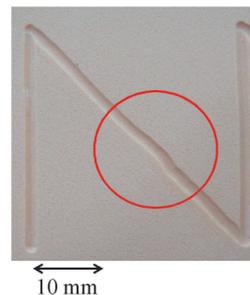


図5 加工結果

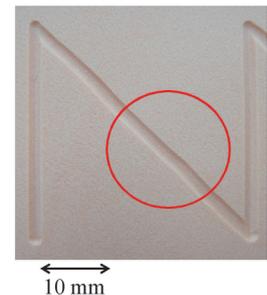
表4 斜め移動計測結果

	辺1	辺2	幅	角
平均	29.53	41.97	30.08	45.93
標準偏差	0.37	0.30	0.39	0.86
絶対誤差平均	0.47	0.44	0.28	0.94

長さ単位：mm 角度単位：°



バランスをとっていない  
加工結果



バランスをとった  
加工結果

図6 重量のバランスをとった加工結果の比較

表5 重量のバランスをとった加工の計測結果

	辺1	辺2	幅	角
平均	29.22	40.85	28.83	44.80
標準偏差	0.30	0.65	0.67	0.70
絶対誤差平均	0.78	1.17	1.55	0.39

長さ単位：mm 角度単位：°

### 6.2 今後の課題

- (1) 移動精度向上のために新たにセンサの導入を検討する。
- (2) 切り込み深さの精度についても更に検証する。
- (3) 現在、直線加工のみを対象としているが、曲線加工についても検討する。

### 参考文献

- 1) Y. Kobayashi, K. Shirai, M. Sato, K. Tozawa : Development of Surface Texturing System by Mechanical Ma-

- ching, ASPE, 2004.
- 2) 大山仁, 溝口知広, 小林義和, 白井健二: 全方向移動可能な小型加工ロボットの開発, 計測自動制御学会東北支部第268回研究集会268-12.
  - 3) 大山仁, 溝口知広, 小林義和, 白井健二: 全方向移動可能な小型加工ロボットの開発と高速加工法の提案, 平成23年度第54回日本大学工学部学術研究報告会 pp. 65-66.
  - 4) 大山仁, 溝口知広, 小林義和, 白井健二: 全方向移動加工ロボットの開発, 2012年度精密工学会春季大会学術講演論文集.
  - 5) H. Oyama, T. Mizoguchi, Y. Kobayashi, K. Shirai : Development of Omni-directional Miniature Robot for Machining , euspen , pp.503-506, 2012.
  - 6) 大山仁, 溝口知広, 小林義和, 白井健二: 全方向移動小型加工ロボットを用いた基礎加工実験と評価, 2013年度精密工学会北海道支部学術講演会.
  - 7) ステッピングモータの仕様  
<http://www.orientalmotor.co.jp/hppwc/HMD0201.do?gid=CMK225PAP&sflg=1&lng=ja&uc=&wid=ja001003002023001002>
  - 8) スピンドルユニットの仕様  
<http://www.nsknakanishi.co.jp/industrial/hpms/e3000/e3000.pdf>, pp.5.
  - 9) 三点式計測器  
<http://www6.ocn.ne.jp/~dage/soft02.html>



# 地上型レーザスキャナを用いた森林バイオマス推定のための 樹木パラメータの全自動推定手法

溝口 知広\*・小林 義和\*・白井 健二\*・若林 裕之\*  
原 靖彦\*・子田 康弘\*\*・岩城 一郎\*\*\*・李 和樹\*\*\*\*

## Automatic Tree Parameter Extraction for Forest Biomass Estimation based on Terrestrial Laser Scanner

Tomohiro MIZOGUCHI\*, Yoshikazu KOBAYASHI\*, Kenji SHIRAI\*, Hiroyuki WAKABAYASHI\*,  
Yasuhiko HARA\*, Yasuhiro KODA\*\*, Ichiro IWAKI\*\* and Hwa-soo LEE\*\*\*\*

### Abstract

In this paper, we develop an automatic method for accurately estimating forest biomass from point cloud captured by terrestrial laser scanner for evaluating amount of carbon dioxide absorption. For this purpose, we first present a segmentation method for identifying each tree in point cloud, and then present a method for estimating height and breast-height diameter of individual tree which are required for biomass estimation. The effectiveness of our proposed methods is demonstrated through experiments on real point cloud of forest.

**Key words:** Forest Biomass, Terrestrial Laser Scanner

### 1. 緒 言

森林による二酸化炭素吸収量評価のため、森林バイオマスを高精度に推定可能な技術が強く要求されている<sup>1)2)3)</sup>。このバイオマス推定は一般に衛星データや航空レーザ計測データを用いて行われているが、広範囲を評価できるというメリットがあるものの、個々の樹木を評価することができず、高い精度でバイオマスを推定することはできない。そのためこの広範囲推定結果の裏付けや補正の目的のため、地上にて人手により樹木毎の高精度なバイオマス推定も行っているが、これには多大な時間と労力を要している。この問題解決のため近年では、地上型レーザスキャナにより取得した森林の計測点群データより地上バイオマスを推定する研究が盛んに行われている。

地上バイオマスを推定するためには、各樹木の樹高と胸高直径を推定することが最低限必要とされる。胸高直径とは一般に地上から130cmの高さの幹の直径を意味する。この樹高と胸高直径が分かれば、樹種ごとに経験的に用意された係数を掛け合わせることで、計算より各樹木のバイオマスが推定でき、その総和として森林バイオマスも推定できる<sup>1)</sup>。そのため高精度な地上バイオマス推定のためには、各樹木の樹高と胸高直径といった樹木パラメータを高精度に推定することが必要となる。

#### 1.1 関連研究

文献<sup>4)5)6)</sup>では、森林のレーザ計測データより、各樹木の胸高直径を推定可能な手法を提案している。これらの手法では、まず地上から130cm付近の点群を抽出し、これらの $xy$ 平面への投影に基づき点群データを画像化し、この画像上でハフ変換に基づき幹が形成する円弧をそれぞれ認識し、得られた各円弧上の点群に対して最小二乗円弧を当てはめ、その半径より胸高直径を推定する。しかしながらこのような手法では、幹部に枝葉が多く含まれる場合には推定が行えないといった問題があり、さらには幹部の中心軸が $z$ 方向に一致しない場合に推定精度が落ちるといった問題もある。

Liangら<sup>7)</sup>は、同じく森林の地上レーザ計測データより、データ中の各樹木をそれぞれ特定し、樹幹部全体を円柱列でモデル化する手法を提案している。この手法ではまず、計測点毎にその近傍点集合に対する主成分分析から固有値、固有ベクトルを計算し、これを手掛かりとしてデータを地表面、樹幹、樹冠に3分類する。例えば、地表面では最小固有値に対応するベクトルが $z$ 方向に平行であり、樹幹部では同じベクトルが $z$ 方向に対して垂直であるといった特性を利用して、閾値処理にて分類を行う。最後に得られた樹幹部の点群に対して、円柱列をロバストに当てはめることで樹幹部全体のモデル化を行う。胸高直径は対応する高さの円柱半径より推定できる。しかしながらこの手法では、各点ごとに主成分分析を行うため、近年の森林計測では一般的な数千万から数億点ほどの大規模データを扱う場合には、計算コストが莫大となるといった問題がある。さらに下草や落下物がある場合や、樹幹表面に大きな凹凸がある

平成24年10月31日受理

\* 日本大学工学部情報工学科

\*\* 日本大学工学部土木工学科

\*\*\* 日本大学理工学部機械工学科

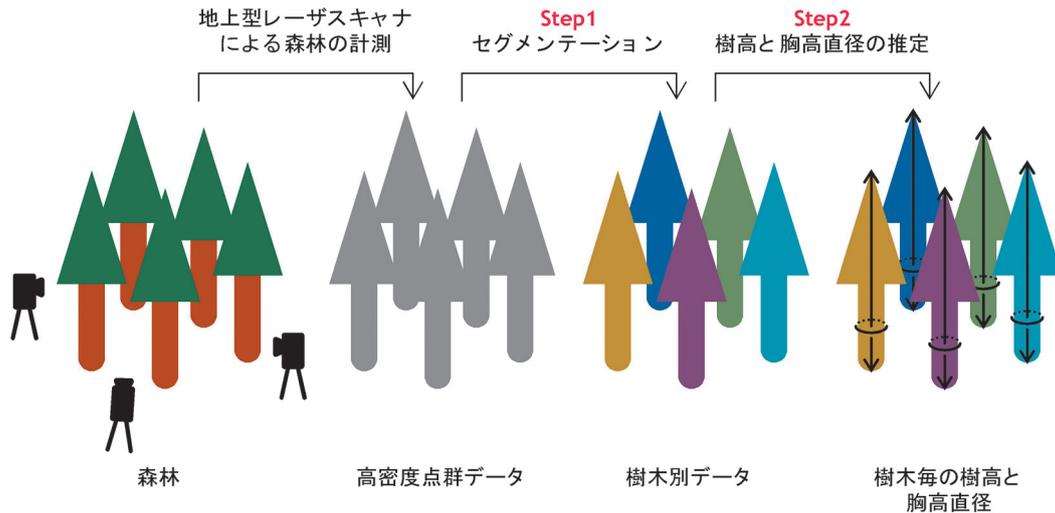


図1 本研究の概要

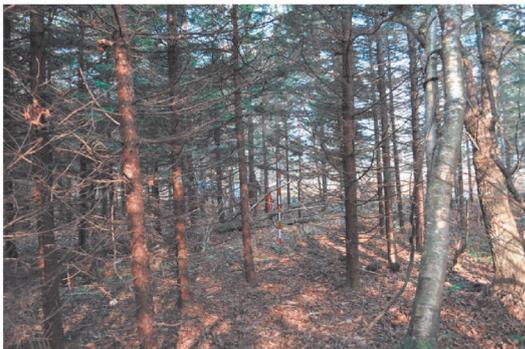


図2 テストサイトのアカエゾマツ林

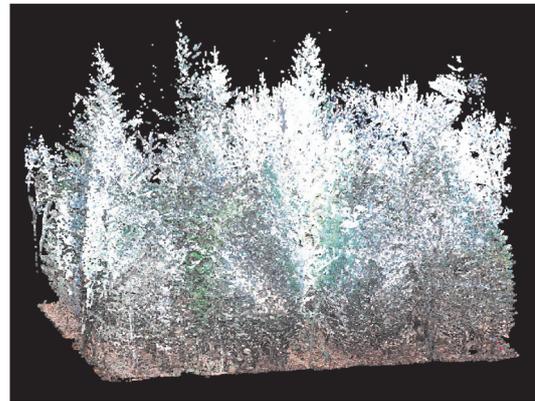


図3 地上型レーザスキャナによる計測点群データ

場合に望ましい固有値・固有ベクトルが計算できず、それゆえ適切な分類が行えないといった問題がある。

Holopainen ら<sup>8)</sup>は、地上バイオマス推定にレーザスキャナが有効であることを、計測点群から推定した胸高直径等の樹木パラメータと現地調査結果とを比較することで実証している。しかしながらこの研究では、点群からの樹木パラメータの抽出は全てユーザ操作で行っており、この自動化が望まれる。

## 1.2 本研究の目的と提案手法の特徴

本研究では、地上型レーザスキャナにより取得した森林の計測点群データより、森林バイオマス推定に不可欠な樹高と胸高直径といった樹木パラメータを効率的かつ高精度に全自動推定可能な手法の開発を目的とする。本研究の概要を図1に示す。本研究ではまず、点群中の樹木をそれぞれ認識するため、点密度分布を利用したセグメンテーション手法を提案する(Step 1)。さらに得られた各樹木のデータより、バイオマス推定に必要な樹高と胸高直径を高精度かつ全自動で推定可能な RANSAC 法<sup>9)</sup>に基づく手法を提案する(Step 2)。また実際の森林計測点群データに対す

る実験より、その有効性を検証する。

提案手法の特徴として、まずセグメンテーションステップにおいて、高密度点群を疎な画像に変換し、この画像に対して処理を行うことで、数千万点ほどもある大規模点群に対しても効率的に処理が行える。また胸高直径推定ステップにおいて RANSAC 法を利用することで、枝葉が多く含まれる場合でも安定に推定が行える。さらに同じステップにおいて円柱当てはめを利用することで、樹幹中心軸が $z$ 方向に対して傾斜していても高精度に推定が行える。

## 1.3 テストサイトと使用したレーザスキャナ

図2に本研究でテストサイトとした苫小牧市にある人工のアカエゾマツ林を、図3にはその計測点群データを示す。こちらの点群データは、 $20\text{m} \times 20\text{m}$ の範囲を対象とし、範囲内外の合計5か所から計測を行い取得した5つのデータを、マーカーを利用して1つに統合したものである。合計点数は約6,000万である。計測にはリーグル社のVZ-400を使用した。

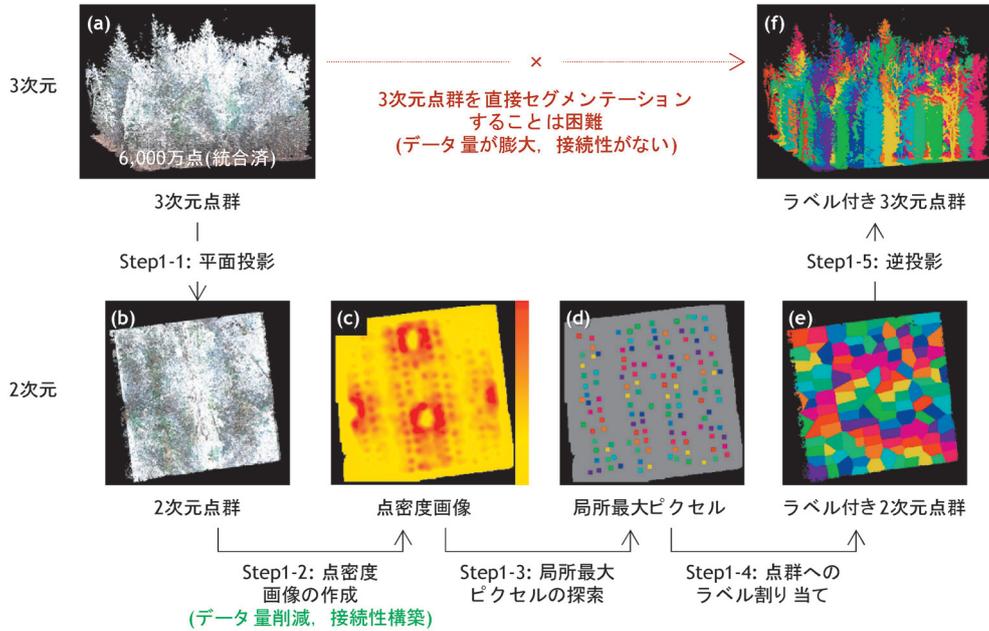


図4 セグメンテーション手法の概要

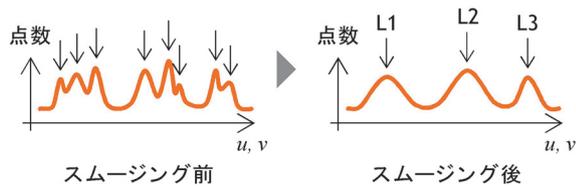


図5 ラプラシアンスムージング

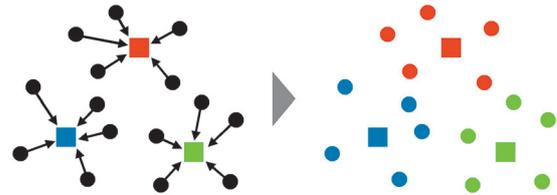


図6 点群へのラベル割り当て

## 2. セグメンテーション

本章では、計測点群中の各樹木をそれぞれ特定するセグメンテーション手法について述べる。提案手法の概要を図4に示す。点群データはその点数が数千万と膨大であり、なおかつ点の接続性を持たないため、この計測点群を直接処理することは困難である。そこで本手法では、計測点群を平面上に投影し、この投影平面上で点群から画像を作成し、この画像上でセグメンテーションを行い、その結果を3次元にフィードバックすることで効率的にセグメンテーションを行う。計測データ中の点密度は樹木が存在する箇所ではその周辺と比べると高くなるため、計測点群を $xy$ 平面に投影した際に、この平面上で点密度が局所最大となる領域の周辺点群は1本の樹木に相当する点群であると考えられる。本手法ではこの性質を利用し、計測点群データを樹木毎にセグメンテーションする。以下に、提案手法の詳細を示す。

**Step 1-1 平面投影**：本手法ではまず、図4(a)に示す3次元点群中の各点 $p_i$ の $z$ 座標を $z_i = 0$ とすることで、図4(b)に示すように点群の $xy$ 平面への投影を行う。

**Step 1-2 点密度画像の作成**：次に、この $xy$ 平面をグリッド分割し、投影点 $p_i^+$ の $x, y$ 成分より各ピクセル内の点数を数えることで、図4(c)に示す点密度画像を作成する。

様々な実験より、ピクセルサイズは $0.1\text{m} \times 0.1\text{m}$ に設定した。このように投影点群から画像を作成することで、データ量を入力点数約6,000万点に対し約4万ピクセルまで削減でき、計算を大幅に効率化できる。さらに、点群データは点の接続情報を持たないが、画像においてはピクセル間の接続性が得られ、これを利用して処理が容易に行えるようになるといった利点もある。

**Step 1-3 局所最大ピクセルの抽出**：次に、得られたピクセル内の点数に対して、図5に示すようなラプラシアンスムージングを複数回適用する。本手法では10回適用した。その後、点数が局所最大となるピクセルを抽出し、それぞれに固有のラベルを持たせておく。スムージングを行う前では、1つの樹木に対して複数の局所最大ピクセルが抽出されてしまうケースが多いが、スムージング後ではこれが減少し、図4(d)に示すように、おおよそ1つの樹木につき局所最大ピクセルが1つずつ抽出できるようになる。

**Step 1-4 点群へのラベル割り当て**：次に、図6に示すように、各 $p_i^+$ から全局所最大ピクセルのうちで最も距離が近いピクセルを探索し、そのピクセルの持つラベルを $p_i^+$ にも割り当てる。この処理の結果を図4(e)に示す。

**Step 1-5 逆投影**：最後に、各 $p_i^+$ の $z$ 座標を初期座標値に戻すことで逆投影を行い、図4(f)に示すようなラベル付き3次元点群が得られ、セグメンテーションが行える。

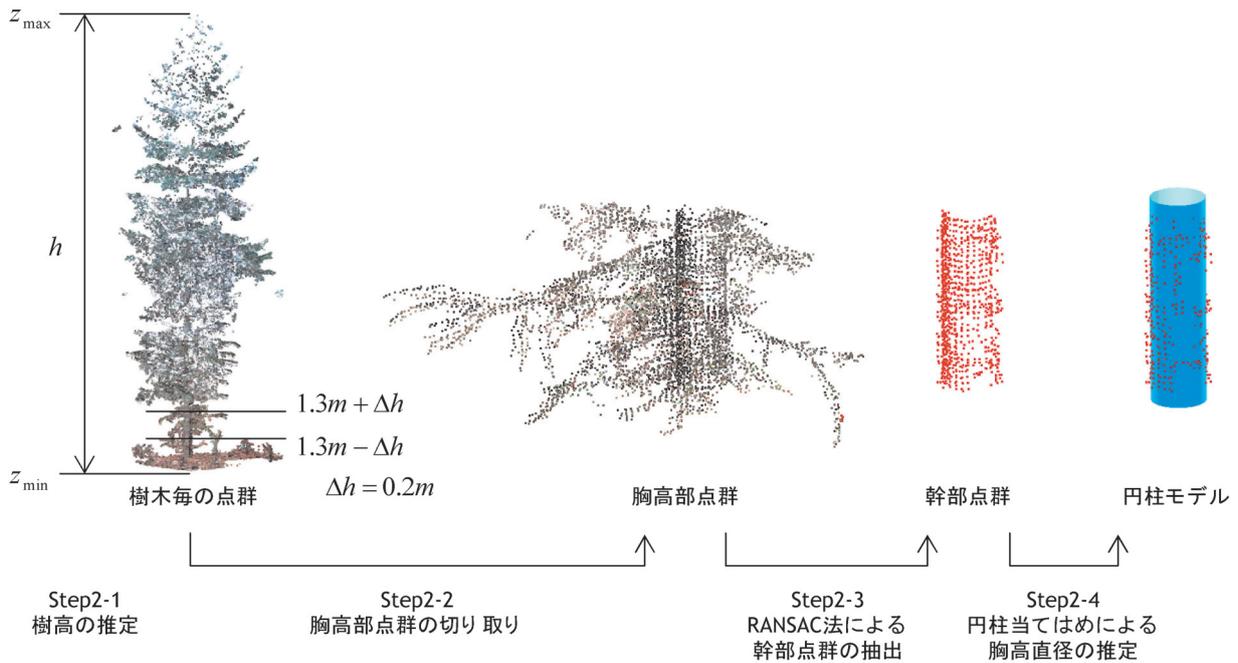


図7 樹高と胸高直径の自動推定手法の概要

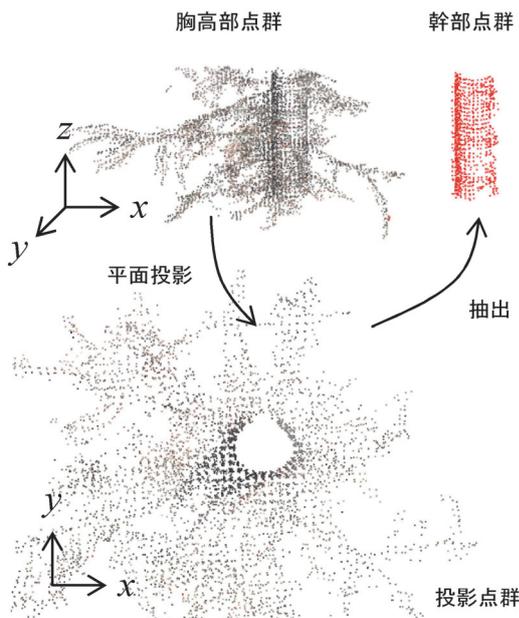


図8 幹部点群の抽出手法の概要

### 3. 樹高と胸高直径の全自動推定

本手法では、セグメンテーションより得られた樹木毎の点群データを入力とし、樹高及び胸高直径を自動推定する。提案手法の概要を図7に示す。本手法ではまず、各樹木の $z$ 座標の最大値と最小値の差分を樹高として推定する。次に、胸高部位点群を抽出し、RANSAC法を用いてそれに含まれる枝葉に相当する点群を除外した幹部点群を抽出し、最後に幹部点群に対して円柱を最小二乗法で当てはめ、その半径より胸高直径を推定する。

**Step 2-1 樹高の推定：**データ中の各点の $z$ 成分の最大

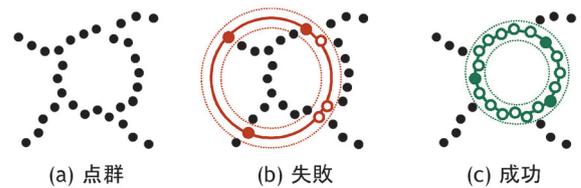


図9 RANSAC法による幹部点群の抽出

値 $z_{max}$ と最小値 $z_{min}$ を探索し、その差分 $h = z_{max} - z_{min}$ を樹高として推定する。

**Step 2-2 胸高部位点群の切り取り：**胸高直径とは一般に地上から1.3mの高さの幹の直径のことを言う。これを点群データから抽出するため、 $z$ 座標の最小値から1.3mの高さを基準に、 $z$ 成分が $\pm \Delta h$ の範囲内にある胸高部位点群を抽出する。本研究では $\Delta h = 0.2m$ に設定した。

**Step 2-3 RANSAC法による幹部点群の抽出：**次にこの胸高部位点群を、図8のように $xy$ 平面に投影する。これより幹に相当する部分点群が円弧を形成することが分かる。次にこの枝葉部分をも含んだ投影点群から、RANSAC法を用いて幹部のみを抽出する。ここではランダムに3点を選択し、3点から円弧を決定し、この円弧から一定距離 $r$ 内にある点数を数える。この処理を十分な回数繰り返し、距離 $r$ 内の点数が最も多かった円弧と、この円弧から $r$ 内にある部分点群を抽出する。図9にこの手法の概要を示す。図9(a)には胸高部位点群を模擬した図を示す。この図では円弧上に分布する点が幹部に相当し、それ以外は枝葉に相当する。繰り返しのほとんどでは図9(b)のように幹部以外の点をも含んだ点群が抽出されるが、十分な繰り返しを行うことで、図9(c)のように幹部の点群のみが適切に抽出できる。本実験では $r = 10mm$ に、繰り返し回数は10,000に設

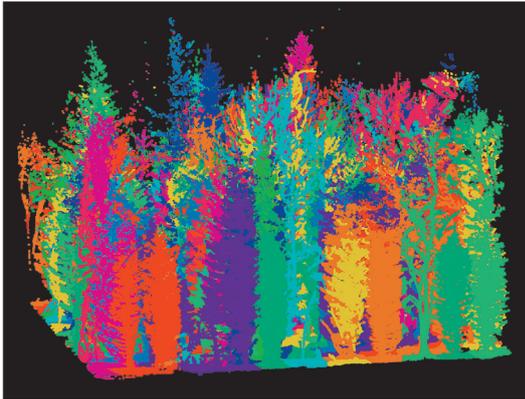


図10 セグメンテーション結果

定した。最後に得られた点群に対して、円弧の最小二乗当てはめを行う。

**Step 2-4 円柱当てはめによる胸高直径の推定：樹幹の中心軸が $z$ 方向に厳密に一致していれば、Step 2-3で得られる円弧半径より胸高直径を推定しても十分な精度が得られるはずである。しかしながら実際には中心軸と $z$ 方向は一致しておらず、そのため胸高部の幹断面が厳密に円弧であっても Step 2-3で得られる投影点群は楕円状に分布し、これに対して当てはめた円弧半径から胸高直径を推定することは精度の点から望ましくない。そこで本手法では、得られた幹部点群に円柱を式(1)の評価関数を最小化するように当てはめることで、中心軸をも同時に推定しながら円柱半径より胸高直径を推定する<sup>10) 11)</sup>。**

$$f = \sum_i \left\{ \frac{|\mathbf{a} \times (\mathbf{p}_i - \mathbf{q})|^2 - r^2}{2r} \right\}^2 \rightarrow \min \quad (1)$$

ここで $\mathbf{a}$ は軸方向単位ベクトル、 $\mathbf{q}$ は軸上の点、 $r$ は半径、 $\times$ は外積である。 $\mathbf{a}$ の初期値は $(0, 0, 1)$ としている。また $\mathbf{q}$ と $r$ の初期値は、Step 2-3で当てはめた円弧より算出する。

#### 4. 実験結果

本章では、森林を地上型レーザスキャナで計測して取得

した点群データに対する実験結果を示す。実験は全て Xeon 2.00GHz CPU の環境で行った。

##### 4.1 セグメンテーション結果

図10にセグメンテーション結果を示す。図3の計測データを目視で確認したところ、合計136本の樹木があった。一方で図10に示す結果では、合計132個のセグメントが抽出された。そのうち100個では図11(a)に示すように1本ずつ樹木の幹部分が含まれており、セグメンテーションに成功した。残りの32個では、図11(b)に示すように、①樹木同士が非常に近い距離にある場合に、1つのセグメントに2本、または3本の樹木が含まれていたり、逆に図11(c)に示すように、②幹部分が含まれず枝葉のみしか抽出できていない場合もあった。既存手法<sup>7)</sup>では、同程度の規模のセグメンテーションに対して数十分から数時間程度の計算時間が必要になると考えられるが、本手法による計算時間は114秒であり、効率的に処理が行えていることが分かる。

##### 4.2 樹高と胸高直径の推定結果

図12に、抽出した幹部点群と当てはめた円柱モデルを示す。図10のセグメンテーション結果のうち、幹が1つずつ含まれていた100本のデータに対する幹部点群抽出及び円柱当てはめ結果を目視で確認したところ、87本で妥当な結果が得られていた。それ以外の13本では、幹部点群が抽出できない場合や、点群が抽出できても円柱当てはめが高精度に行えない場合があった。これらの失敗の主な原因としては、図13に示すように、①幹部の計測点数が極端に少ない場合があること、②樹木が極端に傾いており、Step 2-3において投影平面上で幹部点群が円弧を形成せず、それゆえ RANSAC 法で点群抽出が適切に行えない場合があること、③全周360度のうちのわずかな範囲の点群しか計測できていないため当てはめ精度が低い場合があることがあげられる。計算時間は151秒であった。本研究で対象とした森林では、胸高部に枝葉が含まれる樹木がほとんどであり、既存研究<sup>4) 5) 6)</sup>のようなハフ変換に基づく方法では、胸高直径の推定が安定に行えないことは明らかである。

当てはめ精度検証のため、本大学キャンパス内の10本の樹木を対象に、樹木の計測データに当てはめた円柱の直径

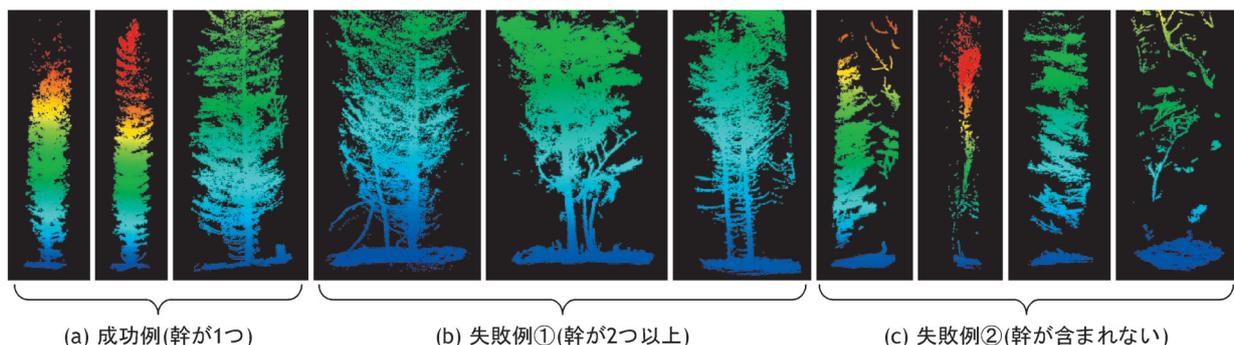


図11 セグメンテーションの成功例と失敗例

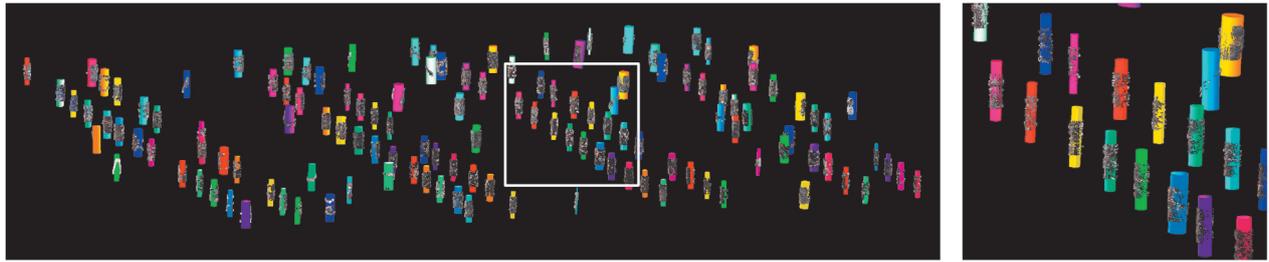
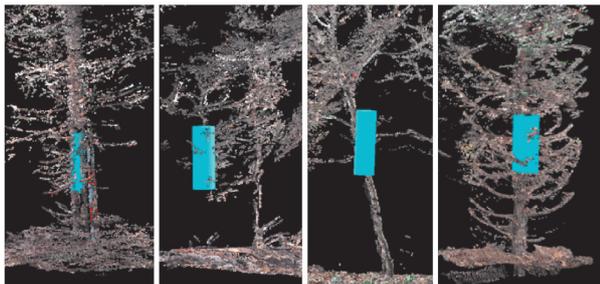


図12 幹部点群の抽出と円柱当てはめ結果 (左: 全体図, 右: 拡大図)



成功例 失敗例① (点が少ない) 失敗例② (極端な傾き) 失敗例③ (角度分布小)

図13 円柱当てはめの成功例と失敗例

と、人手でメジャーを使用して測定した胸高直径とを比較した。その結果、計測データの位置合わせが高精度に行われている場合には1 cm 以内の誤差で当てはめが行えることが確認できた。逆に位置合わせ精度が低い場合には、最大で5 cm 程度の誤差が確認された。

樹高の推定に関しては詳細な検証は行っていないが、計測地点から見て奥にある樹木では、手前の樹木に遮られ、樹冠部最高点が計測できず、樹高の推定が正確に行えない場合もあった。これについては今後、地上型レーザスキャナに加え、ビデオなどの他の装置をも併用したデータ取得方法の検討も必要であると考えている。

## 5. 結論と今後の課題

本論文では、地上型レーザスキャナを用いた森林バイオマス推定を目的とし、計測データのセグメンテーション手法及び樹高と胸高直径の全自動推定手法を提案し、その有効性を検証した。今後は得られた樹高と胸高直径からバイオマスを算出し、その推定精度の検証を行う予定である。またインタラクティブなセグメンテーション手法、及び樹幹全体モデルの構築によるバイオマス推定の高精度化手法の開発に取り組む。さらにロボットにスキャナを搭載し、森林内を自律移動しながら3次元データを取得するシステムの開発も検討している。これにより地上型レーザスキャナのみを使用する場合と比べ、はるかに広範囲のデータを低コストで取得可能となる。

## 謝 辞

この研究は、平成22年度 23年度日本大学学術研究助成

金(総合研究)、科学研究費補助金(23710180)の支援のもとで行われました。レーザ計測にあたっては、リーグルジャパンの松田様、佐々木様にご協力を頂きました。

## 参考文献

- 1) 大政ら, 「可搬型 ScanningLidar データを用いたカラマツ林の樹林マッピングと胸高直径及びバイオマスの推定」, 日本リモートセンシング学会誌, 22(5), pp. 550-557, 2002.
- 2) 福土ら, 「高解像度デジタル航空写真と LiDAR データによる DTM を組み合わせたカラマツ林の現況推定」, 日本森林学会誌, 90(5), pp. 297-305, 2008.
- 3) R. A. Houghton *et al.*, "Importance of biomass in the global carbon cycle," *Journal of Geophysical Research*, Vol. 114, G00E03, 2009.
- 4) M. Simonsen *et al.*, "Automatic determination of forest inventory parameters using terrestrial laser scanning," *Proc. of the ScandLaser Scientific Workshop on Airborne Laser Scanning of Forests*, pp. 251-257, 2003.
- 5) T. Aschoff *et al.*, "Describing Forest Stands Using Terrestrial Laser-Scanning," *ISPRS International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol. 35, pp. 237-241, 2004.
- 6) H. G. Mass *et al.*, "Automatic forest inventory parameter determination from terrestrial laser scanner data," *International Journal of Remote Sensing - 3D Remote Sensing in Forestry*, 29(5), pp. 1579-1593, 2008.
- 7) X. Liang *et al.*, "Automatic Stem Mapping Using Single-Scan Terrestrial Laser Scanning," *IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing*, 50(2), pp. 661-670, 2012.
- 8) M. Holopainen *et al.*, "Biomass estimation of individual trees using stem and crown diameter TLS measurements," *Proc. ISPRS Workshop Laser scanning*, XXXIII, 2011.
- 9) M. A. Fischler and R. C. Bolles, "Random Sample Consensus: A paradigm for Model Fitting with Applications to Image Analysis and Automated Cartography," *Communications of the ACM*, 24(6), pp. 381-395, 1981.
- 10) C. M. Shakerji, "Least-Squares Fitting Algorithms of the NIST Algorithm Testing System," *Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology*, 103(6), pp. 633-641, 1998.
- 11) G. Lukács *et al.*, "Faithful Least-Squares Fitting of Spheres, Cylinders, Cones and Tori for Reliable Segmentation," *Proc. 5th European Conference on Computer Vision*, 1, pp. 671-686, 1998.

# A Theory of Binarism and Its Extension II: Application to the Taxonomy of Parts of Speech

Masashi KAWASHIMA\*

## Abstract

This paper, part II of diptych, is primarily concerned with the application of Binarism. The author first reviews the discussion of the previous paper. Connectedness Theory is then introduced to enhance the case for binary analysis. Binarism is supported favorably in terms of learnability.

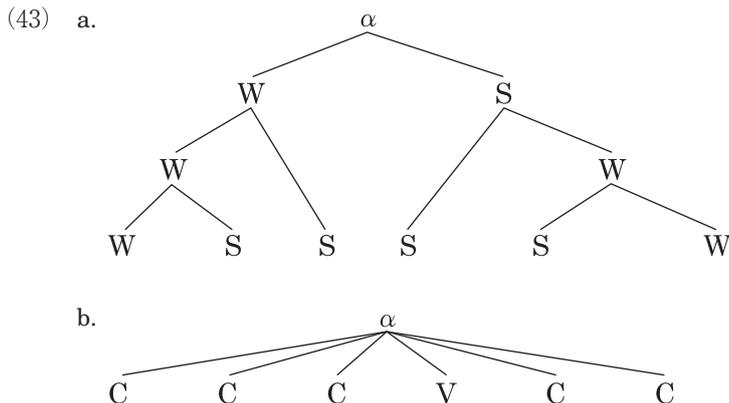
In Section 3, the author attempts to analyze major parts of speech in a binary manner and show the effectiveness of Binarism in taxonomy of parts of speech. The major parts of speech, including verbs, nouns, adjectives, adverbs, prepositions, and conjunctions are defined. However, pronouns and interjections are excluded on the ground that the former are a subclass of pro-forms and the latter being an isolated part of speech with no syntactic interaction with other parts of speech. The author then goes on to the first branching of prepositions and conjunctions from other parts. The branching node is proposed by introducing the notion of open/closed class. The two are the closed class parts of speech because they are limited in number and conscious coining is not allowed. They serve as functional category, without being able to convey a meaning alone.

After the first branch, the remaining six parts of speech are again processed in a binary manner in terms of the notion of sentence elements. Nouns and verbs are considered to be sentence elements because they can be shown to be indispensable to complete a sentence. In other words a sentence becomes ungrammatical if they lack nouns or verbs. Adjectives and adverbs are not viewed as sentence elements but modifiers. Although modifiers help add some information to a sentence, they are optional in nature and can be skipped when conveying a minimum proposition.

## 2. Review and Extension<sup>1</sup>

### 2.1 Review

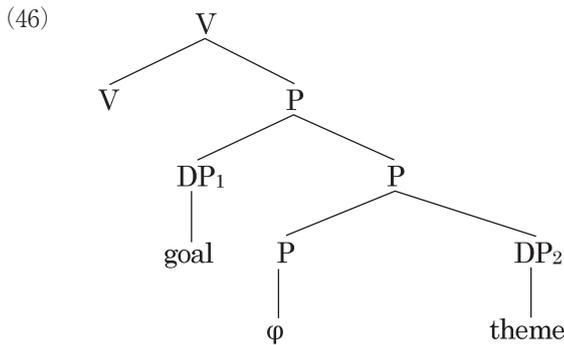
We have seen in the previous paper the mechanism of the binary structure and its validity. The basic structure of Binarism, repeated here is like (43a), not (43b).



The validity is supported in terms of a pronominal coreference (44 (= (15))) and a quantifier floating (45 = (21 – 25)) in Japanese and double object construction in English (46 (= (41b))).

- (44) a. John<sub>i</sub> loves his<sub>i</sub> mother.  
 b. \*He<sub>i</sub> loves John's<sub>i</sub> mother.  
 c. John's<sub>i</sub> mother loves him<sub>i</sub>.  
 d. \*His mother<sub>i</sub> loves John<sub>i</sub>.

- (45) a.  $[_{NP}$  Sannin-no          gakusei-ga] sake-o nonde-iru  
           three-persons-GEN students-NOM sake-ACC drinking  
           (Three students are drinking sake)  
 b.  $[_{NP}$  Gakusei-ga] sannin sake-o nonde-iru  
 c. John-ga     $[_{NP}$  sanbon-no          sake-o] motteki-ta  
           NOM    three-bottle-GEN sake-ACC bring-PAST  
           (John brought three bottles of sake)  
 d. John-ga     $[_{NP}$  sake-o] sanbon motteki-ta  
           NOM    sake-ACC        bring-PAST  
 e. \* $[_{NP}$  Gakusei-ga] sake-o sannin nonde-iru  
 f.  $[_{NP}$  sake-o] John-ga sanbon motteki-ta



Now, Connectedness Theory can be considered as another case for Binarism.

2.2. *Connectedness Theory<sup>ii</sup>*

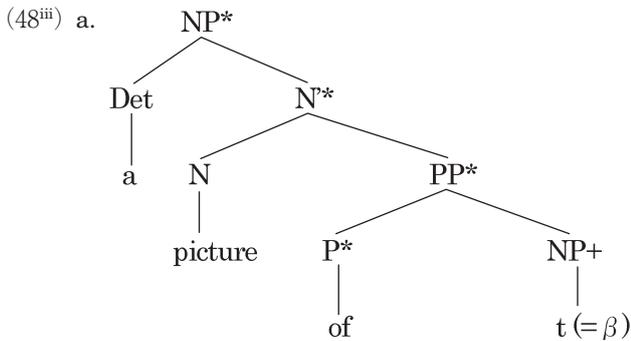
Kayne (1983) proposed that under a certain Empty Category Principle based on the notion of g-protection (47), if an empty category and its antecedent satisfies the connectedness condition, the empty category is “connected” to its antecedent and thus becomes grammatical.

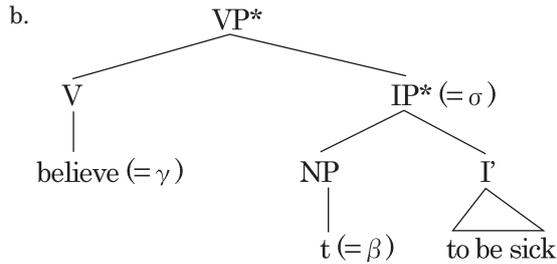
(47) g-protection set

g-protection set  $G_\beta$  in the category  $\beta$  with a governor  $\alpha$  is defined as below.

- a. if a category  $\pi$  is a g-projection of  $\gamma$ , then  $\pi$  is an element of  $G_\beta$ .
- b.  $\beta$  is an element of  $G_\beta$ .
- c. in the case where  $\sigma$  dominates  $\beta$ , and  $\sigma$  does not dominate  $\gamma$ ,  $\sigma$  is element of  $G_\beta$ .

From the definition of g-projection, the \* category in (48) can be seen as g-projection of  $\beta$ . (47c) is so intended as to treat the case of exceptional Case-marking, whereby IP and VP are also g-projection of  $\beta$ .



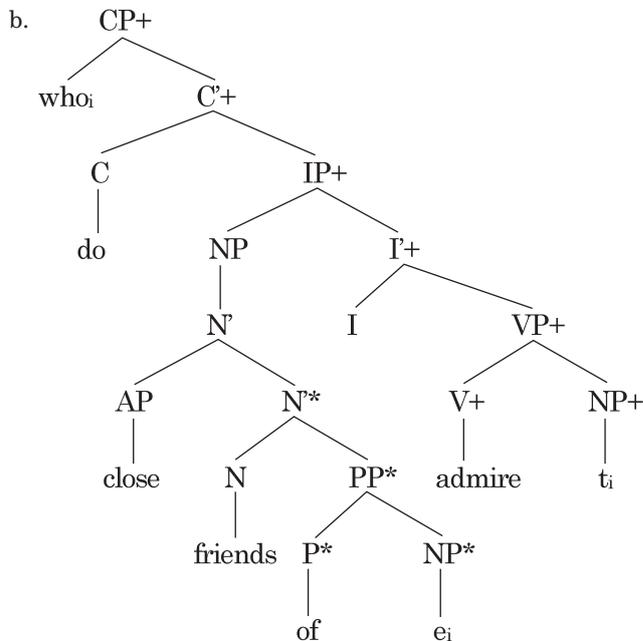


Next, connectedness condition is defined as in (49).

(49) In the phrase marker T where there are  $n$  empty categories, these are described as  $\beta_1, \dots, \beta_j, \beta_{j+1}, \dots, \beta_n$ . By assuming each  $\beta$  is locally bound by an identical category  $a$ , there should be  $n$  numbered projection set of  $G_{\beta_j}$  containing  $\beta_j$ , in which case every sum of sets of  $G_{\beta_j}$  and a sum of sets of  $\{a\}$  is required to form a subtree.

Take, for example, the case of the parasitic gap of (50).

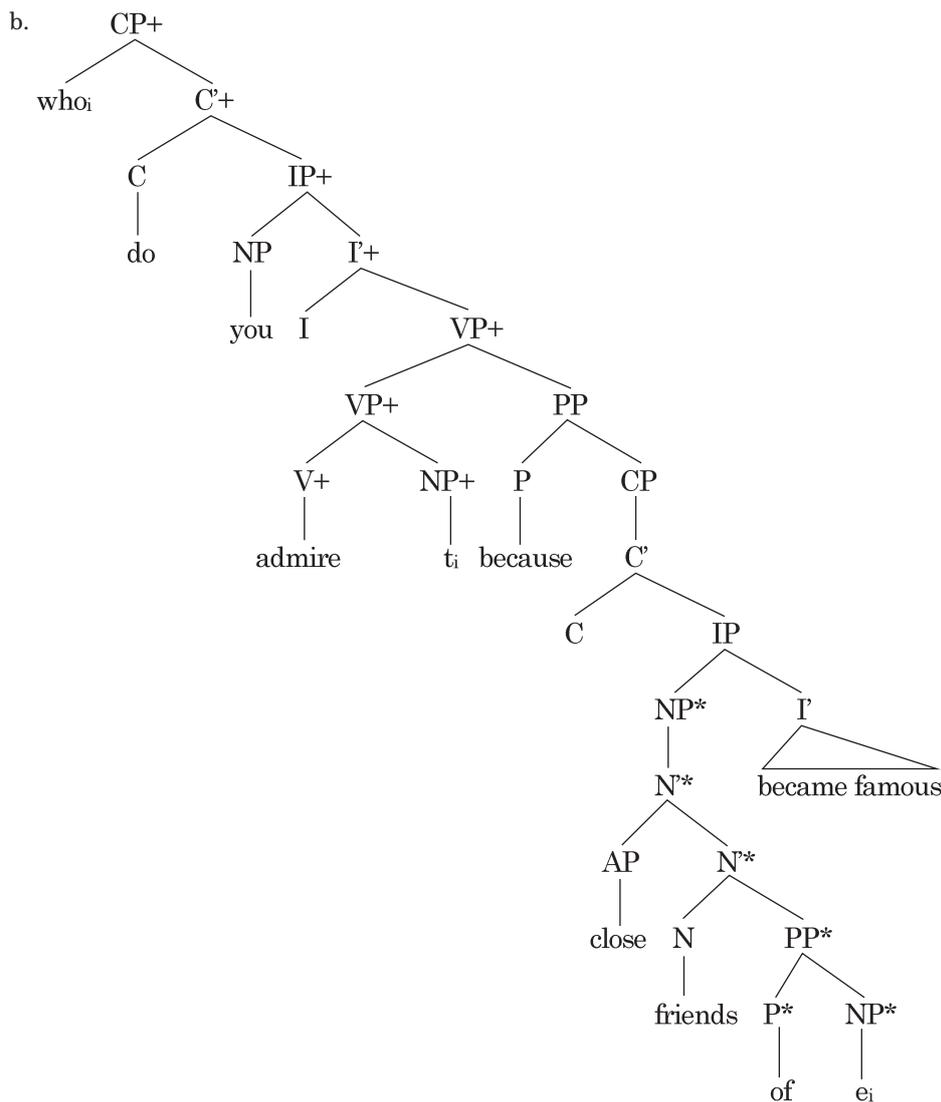
(50) a. Who do close friends of  $e$  admire  $t$  ?



If we think of  $e_i$  as  $\beta_1$ , and  $t_i$  as  $\beta_2$ ,  $g$ -projection set of  $\beta_1$  are categories assigned\*, whose topmost category is the subject NP and  $g$ -projection set of  $\beta_2$  are categories assigned +, whose topmost category is CP. These two  $g$  projection sets and  $who$ , which is  $a$ , constitute a subtree, because the topmost category of  $g$ -projection set of  $\beta_1$ ,  $NP^*$ , is directly dominated by an intermediate category of  $g$ -projection of  $\beta_2$ ,  $IP^+$ , and thus is connected, and  $who$ , which is  $a$ , is also directly dominated by  $CP^+$ , the topmost category of  $g$ -projection of  $\beta_2$ . Therefore, the structure of (50b) is considered to be grammatical.

In (51), the improper structure is shown to be correctly eliminated.

(51) a. \* Who do you admire  $t$  because close friends of  $e$  became famous?



In (51b),  $t_i$  is seen as  $\beta_1$  and + are added to g-projection set. Also  $e_i$  is seen as  $\beta_2$  and \* are added to g-projection set. Who, which is  $a$ , is connected to g-projection set of  $\beta_1$  but is not connected with g-projection of  $\beta_2$ . It then follows that the "who" does not constitute an independent tree and violate the connectedness condition.

This illustrates that connectedness theory can support the plausibility of Binarism.

We now need to examine the case for Binarism in terms of learnability before proceeding to its application.

### 3. Binarism in Learnability

The fundamental purpose of learnability theory is to give an adequate account of a palpable fact<sup>vi</sup> (52).

(52) Every normal child can acquire any kind of natural language naturally<sup>vi</sup>.

Learnability theory whose ultimate purpose is to investigate (52) aims at giving clear definition (53 a, b, c).

- (53) a. A set of grammar which humans can learn  
 b. Primary linguistic data used in the acquisition  
 c. Language-learning procedure to pick a correct grammar based on primary linguistic data as input

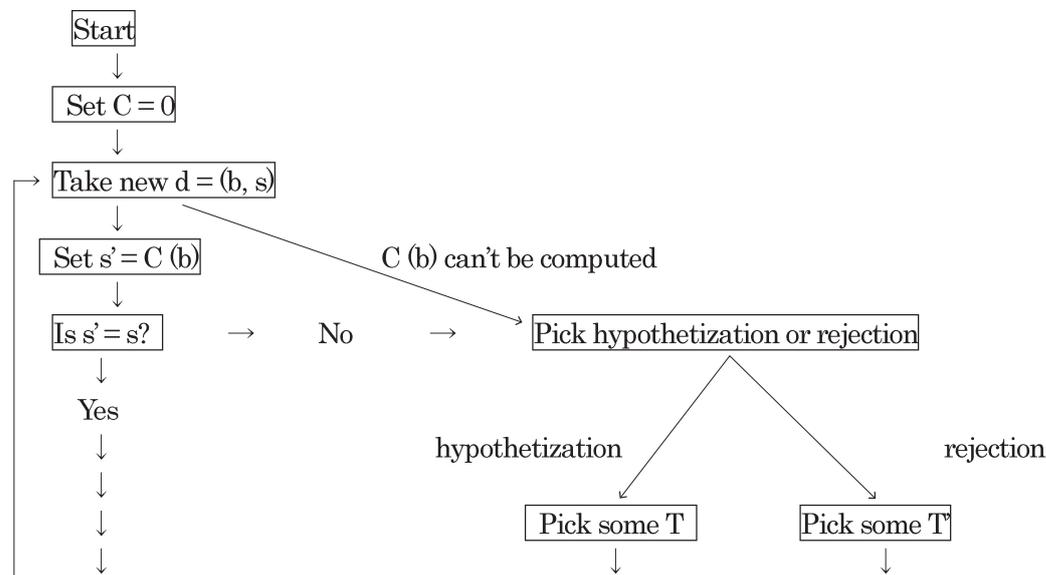
In the early stage of generative grammar, or transformational grammar, Gold (1967) argued that context-free grammar was not learnable<sup>vii</sup>. He also argued that, since transformational grammar included in its base context-free

grammar, which is unlearnable, it becomes a natural consequence that transformational grammar itself is unlearnable, by definition of superset theorem. On the other hand, in the case of informant presentation, where grammatical sentences and ungrammatical sentences were given in distinct forms, context-free grammar is learnable<sup>viii</sup>.

There exist two approaches to solve Gold's problem. The first is Wexler and Hamburger (1973). They adopted universal base analysis, which specifies context-free grammar, which is incorporated in the base of transformational grammar, to uniform grammar. In this approach, they explained that by positing a common (universal) base across every all natural languages, the difference among the languages was to be given account of by the difference at the transformational stage. It is true that by adopting this hypothesis, there will no need to learn base since it is innately acquired. However, it was also indicated at the same time, that in the case where text was presented, transformational grammar was still unlearnable.

The second approach was also presented in Wexler and Hamburger (1973). The same constraint was assigned as to base, but they made the set of  $(b, s)$  pairs of deep structure  $(b)$  and corresponding surface sentence  $(s)$  in (52).

(52)



The transformational component starts as an empty set. Then the data are presented, which consist of a pair of deep structure and surface sentence  $(d = (b, s))$ , and learning procedure applies set  $C$  (which starts as an empty set) to deep structure  $b$  and generates surface sentence  $s'$  ( $s' = C(b)$ ). If  $s' = s$ , then the transformational component undergoes no change and receives new input. In case of  $s \neq s'$ , a new transformational rule  $T$  is added (hypothetization) or a transformational rule  $T'$  is removed from  $C$  (rejection). Furthermore, in the case where derivation  $C(b)$  "can't be computed", the same operation of hypothetization or rejection is repeated and the transformational component is revised. After it has been revised, a new material is received as input. By repeating the learning procedure (52), the transformational component of adult grammar is learned. This is better than the instantaneous model proposed in Chomsky (1975) in that the learner (a) is not required to remember materials given in the past and (b) the learning procedure is steady and gradual because the addition and removal of one transformational rule is done in one procedure.

Here, it should be noted that the binary principle is assigned to the transformational component.

(53) Binary Principle

The transformational rule cannot be applied to the phrase structure over two or more B-cycle node.

By assigning constraints to the base and the transformational component, this limits possible grammar. And by enriching input information, or by making it a pair of  $(b, s)$ , this proves the learnability of transformational grammar.

## 4. Binarism and Parts of Speech

### 4.1 Parts of Speech in English

Before proceeding to the analysis, we need to have some agreed notion of parts of speech in English. The notion of parts of speech originates in Latin “parts orations”. “Word class” can be used instead and is used for classification of form or function rather than meaning. Tens of thousands of words intentions can be classified into several categories. Although there is some dispute in the detailed case, it is important to set in the initial stage of analysis, a certain standard of categorization. The primary purpose is not the classification itself, but a preliminary to make easier grammatical explanation or description. So if we find it useful to attain grammatical description or explanation, with all its insufficiency of criterion, there is certain advantage. Such judgment has established several categories in parts of speech. Traditionally there exist eight (or nine, or ten) parts of speech. We will start by surveying eight parts of speech, and go on to reduce them to six “prototypes”.

In Latin, or Greek, where words abound in inflection, it is not difficult to distinguish them by means of form. In modern English, however, it is less clear how words are classified and by what standard. Still the classification itself is not hopelessly mistaken. Although in modern English, which lacks much of the inflection form, classification cannot be solely based of word forms, we may need to fall back on other grammatical relation, say, position in the sentence. Nouns have singular/plural inflections. Verbs have tense and modal word inflections and have past and past participle forms. Adjectives and adverbs can make comparative and superlative forms by attaching - er/est or more/most. Modern English can be categorized based on form, but pronouns, aside from personal, adverbs like here/there/where, conjunctions, prepositions, interjections lacks inflectional clues, and therefore must be classified by functional standards.

The traditional eight parts of speech according to above standards are as follows.

- (54) (a) Nouns: which go through number, and case changes.  
 e. g. boy – boys (singular – plural number)  
 boy – boy’s (unmarked – genitive case)
- (b) Pronouns: which go through number, case, gender and person changes.  
 e. g. he – they (singular – plural number)  
 he – him (nominative – accusative case)  
 he – she (masculine – feminine gender)  
 I – he (first – third person)
- (c) Verbs: which have number, person, and tense.  
 e. g. he *is* – they *are* (singular – plural number)  
 I *am* – you *are* (first – second person)  
 I *am* – I *was* (present – past tense)
- (d) Adjectives: which go through comparative/superlative changes.  
 (nominal modification)  
 e . g. young – younger – youngest
- (e) Adverbs: which go through comparative/superlative changes.  
 (verbal, adjectival, adverbial and sentential modification)  
 e . g. well – better – best
- (f) Conjunctions: which link coordinate or subordinate clauses.  
 e. g. John is a doctor *and* he is efficient. (Coordinate conjunction)
- (g) Prepositions: which link subordinate words.  
 e. g. *in* the park
- (h) Interjections: which are related to no elements in any way.  
 e . g. Hem!

Determiners (a/the and so on) may be counted as the ninth part of speech since they behave differently from numeral adjectives in that they do not have comparative/superlative forms and they do not serve as predicates. Auxiliaries (can, may and so forth) may also count as the tenth part of speech because they have inflectional forms and

are independent of verbs. The author will not initially investigate in detail and abide by the standard eight parts of speech.

#### 4.2. Preliminary Analyses of Eight Parts of Speech

##### 4.2.1. Preliminary I: Interjection

Among the eight parts of speech, interjections may be omitted from discussion, since they are independent of other parts and can constitute an utterance to express emotion. They are emotive words which do not enter into syntactic relations. They may be any member of class of words and are grammatically isolated. Although interjections may not be one word to be so used (56), they may often be contained within larger sentences (57). They can completely stand alone (55).

- (55) a. Ouch!  
b. Ugh!
- (56) a. *Good grief!*  
b. *Oh my goodness.*
- (57) a. *Oh, I didn't even think of it.*  
b. *Wow, you made it!*

##### 4.2.2. Preliminary II: Pronouns (as an Instance of pro-forms).

In traditional eight parts of speech, pronouns are treated as independent parts of speech. This may be true considering that they are so in Greek or Latin, in which pronouns are rich in inflection since inflection is a major clue to positing an independent part of speech. Unfortunately, this is not totally the case in English. Personal pronouns do have inflections (58), but others, which most likely serve as quantifying expression do not (59).

- (58) a. *He* is now member of our club. (Nominative Case)  
b. He agreed to pay *his* club fee. (Genitive Case)  
c. We are all happy to welcome *him*. (Accusative Case)
- (59) a. Each has to pay one' s club fee. (Nominative Case)  
b. It has to be paid each year. (Genitive Case)  
c. The membership card will be sent to each. (Accusative Case)

One can argue that both (58) and (59) are equally treated if (59) has null paradigm parallel to (58).

##### (60) Paradigm of Case Shift of Pronouns

	Nominative Case	Genitive Case	Accusative Case
personal third masculine	he	his	him
quantifying impersonal	each	each	each

Apart from the discussion of inflection, the author presents the notion of "pro-form". Pronouns are the instance of pro-forms representing nouns. They cannot be independently introduced but must always refer to their antecedent and syntactically be bound by the antecedent.

- (61) a. \**He<sub>i</sub>* lost *his<sub>i</sub>* temper.  
b. *John<sub>i</sub>* lost *his<sub>i</sub>* temper.

This is one of the instances of pro-forms, where the function is not limited to replacing nouns.

(62) I don't *like beef* but my father *does*.

The *does* in the utterance in (62) stands for *likes beef* and can be taken as the pro-form of a verb phrase. It is called pro-verb to avoid the repetitive use of the same verbs as pronouns and is used to serve the same purpose of repeating the same noun<sup>ix</sup>.

#### 4.3. Six Prototypes and Their Binary Analysis

##### 4.3.1. First Branching: Closed Categories

We have seen so far, that two parts of speech do not function as major parts and can be eliminated from the prototype parts of speech in English. The rest, targets of analysis, are verb, noun, adjective, adverb, preposition and conjunction. We can now see how the remaining major six parts of speech are classified in a binary manner.

First, the author will separate prepositions and conjunctions by the classic notion of "open" and "closed" categories. An open category has the following two properties (Emonds (1985)).

(63) a. Only open categories have indefinite numbers in the dictionary of a language – say several hundred at least. Closed categories have twenty or thirty members at most.

b. Conscious coining of new lexical entries by speakers is allowed only in the open categories.

(Emonds (1985:159))

Thus, defined, the only possible open categories are the major lexical categories; nouns, adjectives, and verbs.

Closed categories are the remaining two parts of speech, prepositions and conjunctions. The number of them depends on how they are defined. This does not involve the vital discussion that they are limited in number and conscious coining is not allowed. They serve primarily as functional, rather than lexical. That is, they do not convey a meaning alone, like open categories but are combined with other parts to constitute a unit.

(64) Intelligibility in Independent Situation.

a. Nouns: Rainbow/Dogs/Money, ...

b. Verbs: Stay/Freeze/Run, ...

c. Adjectives: Cool/Beautiful/Natural, ...

d. Adverbs: Enough/Quickly/Definitely, ...

e. Prepositions: \*Of/At/With, ...<sup>xi</sup>

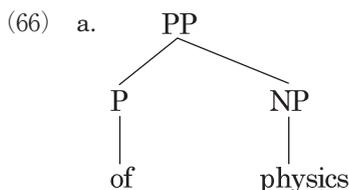
f. Conjunctions: And/If/Though, ...

(65) Closed Categories in a Unit

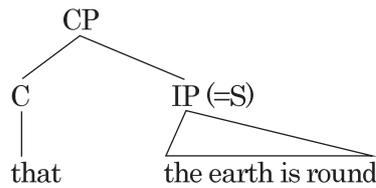
a. Prepositions: Of course/At the same time/With you, ...

b. Conjunctions: And what/If I saw you in heaven/Though he is selfish, ...

The difference between a preposition and a conjunction is what follows. A preposition is followed by noun to make a larger unit than a noun, phrase. A conjunction is followed by sentence to make a larger unit than a sentence, that is, a clause.

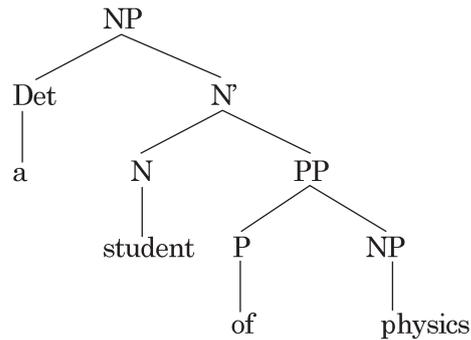


b. structure of clause

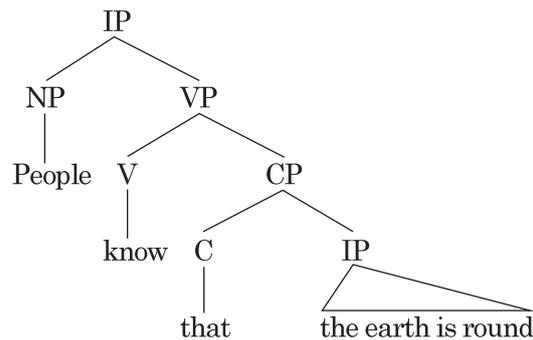


Phrases can be commanded by nouns, so can clauses by sentences.

(67) a. a student of physics

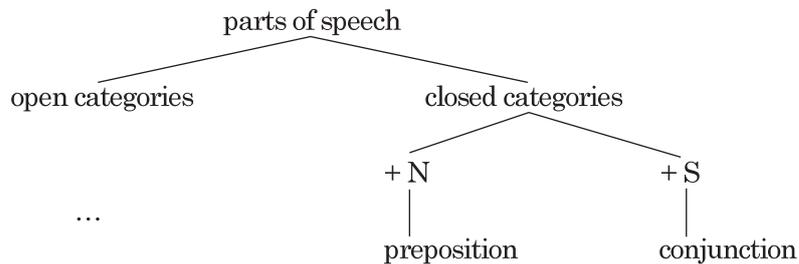


b. People know that the earth is round.



So far, the binary branching node of parts of speech is illustrated in (68).

(68)



Next, we will proceed to the second branching of the major four categories.

#### 4.3.2. Second Branching: Sentence Elements<sup>xii</sup>

The other four open categories - verb, noun, adjective, and adverb - will go through the next branching node. Consider the following sentences.

(69) Students often buy inexpensive computers recently.

There are some essential words to make a sentence, or logical proposition, and others ignorable, although their existence can give further detailed information.

(70) STUDENTS often BUY inexpensive COMPUTERS recently.

These capitalized words are indispensable to make up a single sentence while the others can be omitted to convey the minimal message.

- (70) a. STUDENTS BUY COMPUTERS.  
 b. \*Often BUY inexpensive COMPUTERS recently.  
 c. \*STUDENTS often inexpensive COMPUTERS recently.  
 d. \*STUDENTS often BUY inexpensive recently.

The capitalized words function as sentence elements. Quirk et al. (1985) defines sentence elements are more functional than formal. They are shown as in (71)<sup>xiii</sup>.

- (71) subject (S)  
 verb (V)  
 object (O) – direct object (DO)  
                   – indirect object (IO)  
 complement (C) – subject complement (SC)  
                       – object complement (OC)

The sentence elements serve to constitute five sentence patterns.

- (72) a. SP I           The sun shines.  
                           S     V  
 b. SP II           Your brother seems a coward.  
                           S     V     SC  
 c. SP III          That lecture bored me.  
                           S     V     DO  
 d. SP IV          I sent my parents an anniversary card.  
                           S V           IO           DO  
 e. SP V          Most students find Phillip a liar.  
                           S     V     DO     OC

The sentence elements consist of a verb and noun (and a secondary use of adjective). None of the labeled elements above is can be deleted, otherwise the sentence would be ungrammatical or miss the target interpretation<sup>xiv</sup>.

- (73) a. The case where verb is deleted.  
 SP I           \*The sun.  
 SP II          \*Your brother a coward.  
 SP III         \*That lecture me.  
 SP IV         \*I my parents an anniversary card.  
 SP V          \*Most students Phillip a liar.  
 b. The case where subject is deleted.  
 SP I           \*Shines.  
 SP II          \*Seems a coward.  
 SP III         \*Bored me.  
 SP IV         \*Sent my parents an anniversary card.  
 SP V          \*Find Phillip a liar.  
 c. The case where object is deleted.  
 SP III         \*That lecture bored.  
 SP IV         \*I sent an anniversary card<sup>xv</sup>.

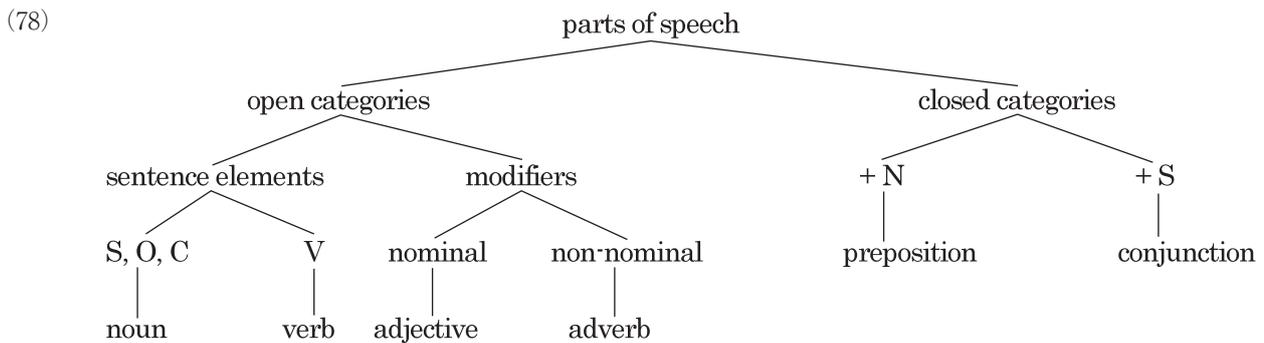


c. (Happily) he didn't divorce.

In (77a), (very) modifies the adjacent adjective good. In (77b), (very) modifies the adjacent well, and (77c) is the case where sentence initial adverb (Happily) modifies the sentence<sup>xxi</sup>.

The different behavior of two modifiers is summarized in the way that adjectives are nominal modifiers and adverbs are non-nominal modifiers.

Now the above preliminary binary tree in (68) goes through the second branching with the diagram of (78).

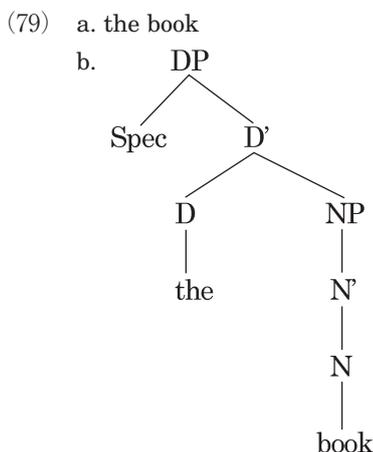


## 5. Summary and Further Investigations

In Section 2, the previous paper was reviewed to support the case for binary branching analysis. Kayne's connected theory has been added to enhance the plausibility of Binarism. In Section 3, by surveying Hamburger and Wexler, which gives another support for Binarism from the point of learnability, it has been shown that Binarism is a well established system for analysis. The theory of Binarism has been applied to the taxonomy of apparently complicated parts of speech in Section 4. First, by eliminating interjection and pronoun, the major eight parts of speech have been reduced to six. They go through the first branching of the Binarism with the notion of "open/closed categories". Preposition and conjunction are filtered out as closed categories, the former commanding noun to make up a phrase (P+N), the latter commanding sentence to make up a clause (C+S). The remaining four go through the second branching, with the notion of "sentence elements/modifier". Noun and verb are classified as sentence elements because they cannot be dispensed with in a sentence, while adjectives and adverbs are viewed as modifiers because they can be skipped with the remaining sentence conveying the minimal meaning.

The author mentions adjacency in discussing the distinction of nominal/non-nominal modification. The condition is by no means accidental but well motivated cognitively. The author may wish to discuss it on some other occasion.

In the current theory of generative grammar, the functional category can be the head of a projection and takes a complement of lexical category<sup>xxiii</sup>. Take the case of DP, where determiner heads functional category DP and take a lexical category NP as its complement.



This may affect the traditional classification of parts of speech. If so, the first branching in (68) might need to be discussed under a new light.

- i This paper is part II of a theory of Binarism. Those readers who are not familiar with the discussion are referred to Kawashima (2012).
- ii In the previous paper an anonymous referee suggested the author introduce Kayne if he is to discuss binary branching. The author would like to take the opportunity of doing so here in this paper. The author is grateful to the invaluable suggestion.
- iii The author has hinged on Ando and Ono (1998) for the source of discussion.
- iv The author has referred to Araki and Yasuda (1992) for details.
- v By natural language, it is defined a first language or mother language.
- vi Refer to Wexler (1982), Wexler and Cullicover (1980) for detailed discussion.
- vii In his term “nonidentifiable in the limit”.
- viii Brown and Hanlon (1970) reported that no evidence was found in actual linguistic material that adult gave a child negative information about syntactic errors. Therefore, it will not be empirically adequate that both positive and negative information is given as input.
- ix The notion of pro-infinitive is sometimes introduced in terms of pro-forms.  
 a. I didn’t have enough time *to clean the room* although I desperately wanted *to*.  
 The point is, the second *to* in the above sentence (a) refers to antecedent *to clean the room* and should be treated as one of pro-forms. What makes the difference is that in the above the second part of the repetition is presented by means of *to*, which can be taken as part of the preceding infinitive *to clean the room* and can be considered to be the instances of ellipsis or empty category, like  $t_i$  in (b) below.  
 b. Which book do you want to keep before throwing away  $t_i$ ?  
 The author will not discuss it here in detail.
- x Adverbs can be considered as a derived form of adjectives. Since they behave syntactically differently from adjectives, the author will treat them as an independent part of speech here. The possibility of the unified treatment of the two will be another paper topic.
- xi Some may argue there can be such expressions as “In” as shown at the entrance of the parking. It can only be possible with surroundings with a gate and a parking and so on. in the very sense, it can safely be said that the preposition only precede the concealed surroundings: In (this way). The same holds when we use the conjunctions “And…” or “So…”. They can only make sense by following and preceding a series of dialogue.
- xii Usually tagged “clause elements”. The author refrains from the term because it may cause confusion with the use of “clauses seen above.” The author limits the usage of clauses to the unit with a conjunction and sentence.
- xiii Quirk et al (ibid.) considers adverbial to be a functional category of clauses constituents and propose seven sentence patterns. The author will adopt the traditional five sentence patterns without discussion.
- xiv It may be the case that , in the Sentence Pattern V, the sentence can sound grammatical when missing either a direct object or an object complement.  
 a. Most student find Phillip.  
 b. Most student find a liar.  
 Still, it cannot be interpreted in the same way as (72b) . In this sense the above (a,b) can be said to be incomplete as Sentence Pattern V.
- xv Plausible in the sense of SP III, where “an anniversary card” serves as direct object of “sent”. Not the case here.
- xvi Plausible as well when used, say, to the question, “Who did you sent to the party?” with “my parents” functioning as direct object of “sent”. Not the case here, either.
- xvii Plausible if taken to make up SP III as a reply to “Who found a liar (among the committee) ?”
- xviii Noun can be seen serving as nominal modifier.  
 a. a paper lion  
 These are limited in production, and do not affect discussion.
- xix In English, some involve post-nominal modification by adjectives  
 a. He tried every means possible.  
 This is also limited in its appearance.
- xx Adjective also can serve as complement.  
 a. John looks happy.  
     S   V   SC  
 b. The news made John happy.  
     S   V   O   OC  
 As we have seen in (72b, e), a noun serves as complement. Therefore, the function is not limited to adjectives. Only adjectives

tive can serve to modify noun, it is a natural consequence to argue that the primary function of an adjective is nominal modification.

xxi Take the contrast

a. He didn't divorce (happily).

Where the sentence final adverb (happily) modifies the matrix verb divorce, deriving a different interpretation.

xxii Refer to Fukui (1986) and Abney (1987).

## References

- Abney, Steven. (1987), *The English Noun Phrase in Its Sentential Aspect*. Ph.D. Dissertation, MIT.
- Ando, Sadao and Takahiro Ono. (1998), *Seisei Bunpoo Yoogo Jiten*. Taishukan, Tokyo.
- Araki, Kazuo and Minoru Yasuda. (eds). (1992), *New Dictionary of English Grammar*. Sanseido, Tokyo.
- Brown, Roger and Camille Hanlon. (1970), "Derivational Complexity and Order of Acquisition in Child Speech," in John. R. Hayes (ed.) (1970), *Cognition and the Development of Language*. New York, John Wiley & Sons.
- Chomsky, Noam. (1975), *Reflection on Language*. Pantheon Books.
- Emonds, Josef E. (1985), *A Unified Theory of Syntactic Categories*. Foris, Dordrecht.
- Fukui, Naoki. (1986), *A Theory of Category Projection and Its Application*. Ph.D. Dissertation, MIT.
- Gold, E. Mark. (1967),. "Language Identification in the Limit," *Information and Control* 10.
- Kawashima, Masashi. (2012), "A Theory of Binarism and Its Extension I: Binarism and Configurationality" in *Journal of the College of Engineering, Nihon University*. Vol. 53. No.2.
- Kayne, Richard. (1983), "Connectedness," *Linguistic Inquiry* 14.
- Kayne, Richard. (1984), *Connectedness and Binary Branching*. Foris, Dordrecht.
- Radford, Andrew. (1981), *Transformational Syntax*. Cambridge. Cambridge University Press.
- Quirk, Randolph, Sidney Greenbaum, Geoffrey Leech and Jan Svartvik. (1985), *A Comprehensive Grammar of the English Language*. Longman, London.
- Wexler, Kenneth. (1982), "A Principle Theory for Language Acquisition" in E. Wanner and L. Gleitman (eds.) (1982). *Language Acquisition: The State of Art*. Cambridge. Cambridge University Press.
- Wexler, Kenneth and Peter Culicover. (1980), *Formal Principles of Language Acquisition*. Cambridge, Massachusetts, MIT Press.
- Wexler, Kenneth and Henry Hamburger. (1973), "Insufficiency of Surface Data for the Learning of Transformational Languages" in Hintikka, Jaakko. and Julius Moravcsik and Patrick. Suppes (eds.) (1973), *Approaches for Natural Language: Proceedings of the 1970 Stanford Workshop on Grammar and Semantics*. Reidel, Dordrecht.

# 2009年新型インフルエンザに対する行政機関の対応

— 自治体へのアンケート調査の結果分析 —

石突 美香\*・小松 志朗\*\*・小森 雄太\*\*\*

## Measures the administration took against Influenza Pandemic (H1N1) 2009 — Analysis of the result of the questionnaire survey to the local government —

Mika ISHIZUKI\*, Shiro KOMATSU\*\* and Yuta KOMORI\*\*\*

### Abstract

This article clarifies and analyzes the result of the questionnaire survey on the measures against Influenza Pandemic (H1N1) 2009 that we carried out for the local governments of the whole country. It was a mail-in survey for cities and special wards conducted in August, 2012. The purpose is to build a more concrete analytical investigation and a new theory model based on our past collaborative study.

What we found is as follows; many local governments made action plans before outbreak and carried out prior preparations such as taking the cooperation with the medical institution; therefore they were able to respond to the situation after outbreak relatively well; the media news ahead in giving information made confusion among the relationship between the central and local governments and between the local governments and the public; after the end of the pandemic, many local governments made new action plans or modifications on existing ones and took measures such as building the cooperation system with the medical association and the medical institution. We are going to push forward further this study by identifying the factors which determine what measures the government takes and constructing the model based on the data which became clear in these findings.

**Key words:** リスク, 政策過程, 地方自治体, 新型インフルエンザ

### 1. はじめに

本論文は、全国の自治体を対象に行った2009年新型インフルエンザへの対応に関するアンケート調査の結果を明らかにし、分析を行うものである。

著者らが参加している研究グループは、リスクに対する政策過程の共同研究を行っている<sup>1)</sup>。その目的は、政治学の観点から、リスクに対する政策過程、特にリスクに対応する諸機関（中央政府や地方自治体等）の相互関係や、諸機関による対応を決定する要因を解明することである。特に具体的な事例として2009年に発生した新型インフルエンザを取り上げ、以下の二つを中心に研究を進めている。ひとつは「新型インフルエンザ対策をめぐる中央政府—地方自治体の関係（多数事例の全般的把握）」<sup>2)</sup>であり、もうひとつは「地方自治体の新型インフルエンザ対策（少数事例の詳細な分析）」<sup>3)</sup>である。本稿は、前者に関係するものである。

今回、共同研究のこれまでの成果を踏まえ、より具体的な分析調査と理論モデルの構築を目指して、2012年8月に全国の市と特別区（東京23区）（以下、市と特別区を「自治体」と表す）を対象に郵送調査にてアンケート調査を実

施した。アンケート票の郵送にあたっては、新型インフルエンザ対応において中心的役割を担っていたと思われる保健健康関連部署（健康福祉局、健康保健課、保健センターなどの名称）を宛先とした。郵送数810票に対して、返信数451票、有効回答数450票（有効回答率55.6%）、無効回答数1票という結果が得られた<sup>4)</sup>。

この調査結果をまとめた本論文は、当時の自治体の対応を把握するための貴重な基礎資料となり、また自治体の今後の対策を考えるうえでも、有益な示唆を含むものだとはいえるであろう。

以下、新型インフルエンザの海外発生までの時期（～2009年4月25日）、海外発生から国内発生までの時期（4月25日～5月16日）、国内発生以降の時期（5月16日～）という3つの時期区分を設定し、その時々における自治体の対策や対応をアンケートの調査結果にもとづいて詳述していくこととする。国の『新型インフルエンザ対策行動計画』は状況の変化に合わせて対策を変えていくスキームを採用しており、そのなかで「海外発生」と「国内発生」を一つの区切りとしている。そして自治体もその行動計画を前提に各自の対策を講じていることから、上記の時期区分を用いて議論を整理することは妥当であろう。

### 2. 海外発生以前

はじめに、新型インフルエンザの海外発生までの時期（～2009年4月25日）の各自治体の対応（事前準備）について

平成24年11月2日受理

\* 日本大学工学部総合教育 非常勤講師

\*\* 早稲田大学現代政治研究所特別研究所員

\*\*\* 明治大学研究・知財戦略機構研究推進員

尋ねた。国は2005年12月版を改定するかたちで、2009年2月に『新型インフルエンザ対策行動計画』を作成している。この『行動計画』は、WHO(世界保健機関)の『WHO Global Influenza Preparedness Plan (WHO 世界インフルエンザ事前対策計画)』<sup>5)</sup>に依拠して作成されたものであり、対策の基本方針として、1, 感染拡大を可能な限り抑制し、健康被害を最小限にとどめる、2, 社会・経済を破綻に至らせない、ということ掲げている<sup>6)</sup>。『行動計画』は、都道府県や市区町村が、この行動計画等を踏まえ、地域の実情を考慮した詳細かつ具体的なマニュアルや役割分担を事前に定めることなどにより、新型インフルエンザが発生した場合に混乱せずに的確な対策を迅速に実施することの重要性について言及している<sup>7)</sup>。

以上の点を踏まえて、「新型インフルエンザに対する行動計画(またはそれに類するもの)を作成していましたか」という質問を行った。これに対して得られた回答は「はい」44.0%、「いいえ」56.0%であった。行動計画を作成していない自治体の方が多かったわけである。国が『行動計画』を作成してから間もない時期であり、作成途中であったり、これから作成を検討するという自治体も多かったと考えられる【図1】。

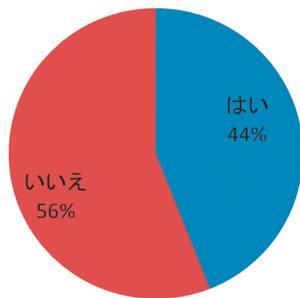


図1 事前の行動計画の作成

上記の質問について、「はい」と答えた回答者に対して、「何を参考にして行動計画(またはそれに類するもの)を作成していましたか」と複数回答で尋ねたところ、多かった順に「政府の行動計画・ガイドライン」79.8%、「他の自治体の計画」65.7%、「WHOやCDCなどのガイドライン」14.1%、「医師会の意見」13.6%、「有識者の意見」5.1%、「外国政府・自治体の行動計画」3.0%という回答が得られた。「その他」は8.6%であった。「その他」のなかで多く見られた回答は、「県の行動計画を参考にした」というものである【図2】。

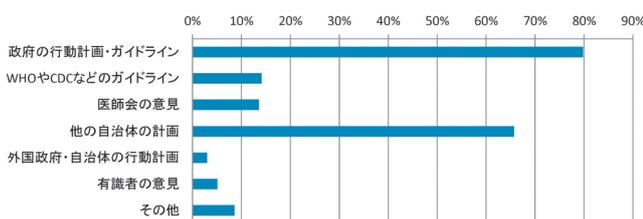


図2 行動計画の作成に参考にしたもの

また、最初の質問において、「いいえ」(事前の行動計画の作成なし)と回答した自治体に対して、「その後、あなたの自治体は、新型インフルエンザに対する行動計画(またはそれに類するもの)を作成しましたか」と尋ねたところ、「はい」73.1%、「いいえ」26.9%というように、「はい」の回答が上回った。新型インフルエンザが実際に発生した後は、多くの自治体が行動計画を作成するなどの対策をとったことが分かる【図3】。

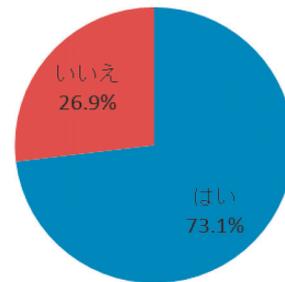


図3 その後の行動計画の作成

次に、新型インフルエンザの海外発生以前に行っていた準備について複数回答で尋ねたところ、一番多かったのは、「医師会、医療機関等と連携できる体制を作っていた」33.6%であり、次に、「計画をさらに具体化したマニュアルを策定していた」12.7%、そして「新型インフルエンザを想定した業務継続計画を策定していた」10.9%、「新型インフルエンザ対策を想定した実動訓練を実施していた」10.9%、「新型インフルエンザ対策を想定した図上訓練を実施していた」7.1%の順で続いた。「関連のある専門職(医師、看護師、保健師等)を増やした」0.9%、「大学・研究機関等の専門家からの協力を得られる体制を作っていた」0.7%という回答はわずかしかなかった。「その他」は26.2%であった。「その他」のなかで目立った回答は、「マスク、消毒液など医療用の備蓄をしていた」というものである【図4】。

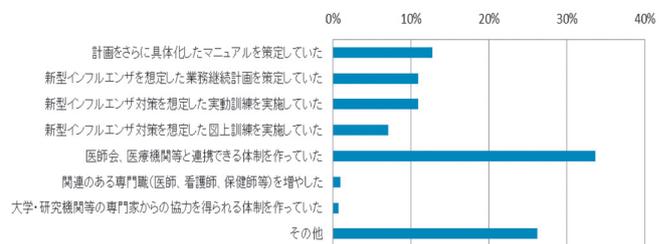


図4 発生以前の準備

専門職の人員拡大や専門家との協力体制の構築に取り組んでいた自治体が少ないこと背景には、恐らく、そもそも多くの自治体にはそれを実現するための資源(人材、資金)が不足しているという現実があるのであろう。実際、アンケート調査の自由記述にはそのような指摘が散見され、また著者らの共同研究にて行ったインタビュー調査<sup>8)</sup>の中でも、多くの関係者がこの問題に言及している。

### 3. 海外発生から国内発生まで

次に、新型インフルエンザの海外発生が認められてから国内で発生するまでの時期（4月25日～5月16日）について尋ねた。

まず、海外発生の第一報を入手した手段について尋ねたところ、「テレビ・新聞などによる報道」64.4%という回答が圧倒的に多かった。その次に「政府からの連絡文書」16.4%、「専門家・専門機関からの情報提供」3.1%、「WHOやCDCなどの海外の専門機関からの情報提供」1.6%の順で続いた。「その他」2.7%、「無回答」11.8%であった【図5】。多くの自治体において、新型インフルエンザの第一報は「テレビ・新聞などによる報道」であり、「政府からの連絡文書」を上回る結果となった。なお、質問表の作成にあたり、「政府からの連絡文書」がどの文書を指すのかについての具体的な提示は行わなかった。厚生労働省健康局結核感染症課から、各都道府県、政令市、特別区の新型インフルエンザ担当部（局）に対し、「ブタインフルエンザに対する対応について」という文書が4月26日付で出されているので、この文書を念頭におき回答されたものとみえる。この通知では、WHOが現在の状況を「国際的に懸念される公衆の保健上の緊急事態」であると位置づけたことが示されている<sup>9)</sup>。

自治体は新型インフルエンザの情報を、一般市民と同じようにマスコミから入手していたわけである。これについては、果たして行政機関が市民と同じようにマスコミからの情報に頼っていて良いのかという問題が指摘されて然るべきであろう。とりわけ、マスコミ報道がややもすると過剰な内容に傾きがちな点を鑑みれば、やはり中央—地方の行政組織内で正確かつスピーディな連絡経路を確立する必要がある。

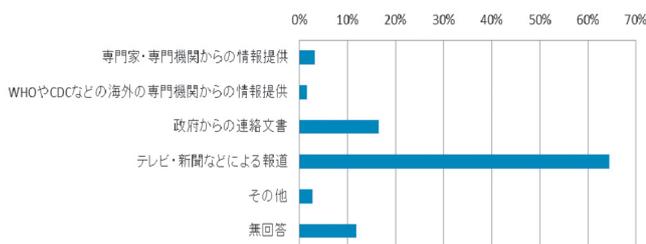


図5 海外発生の第一報の入手手段

次に、海外発生の後、国内発生に備えて自治体を実施したことを複数回答で尋ねたところ、多かった回答は、「市民への啓発」85.3%、「対策本部の設置」70.2%、「電話相談窓口の開設」67.8%であった。多くの自治体で国内発生に向けた対策が取られたことがわかる。一方、少なかったのは、「シミュレーション」6.0%、「訓練の実施」4.2%である。「その他」は18.4%であった【図6】。「市民への啓発」が最も多いというのは、それだけ自治体が市民の身近にいる行政機関であるからであろう。逆にいえば、訓練やシミュレーションのような専門知識、資源が必要とされる

対応ができないからこそ、地道で基本的な対策にエネルギーを注ぐ結果になるといえるかもしれない。

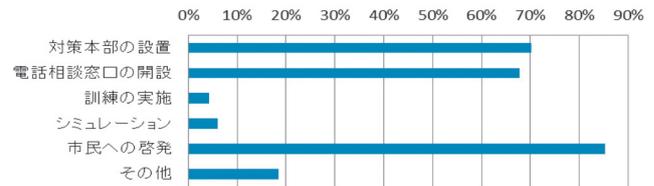


図6 国内発生に備えて実施したこと

さらに、この期間の政府の対策全般についての印象を尋ねた。最も多かった回答は、「あまり評価できない」71.1%である。以下、「やや評価できる」19.1%、「全く評価できない」2.2%、「とても評価できる」1.1%と続いた。「無回答」は6.4%であった【図7】。「あまり評価できない」という回答が多かったことには、当時空港などで行われた過剰ともいえる水際対策の影響もあると思われる。

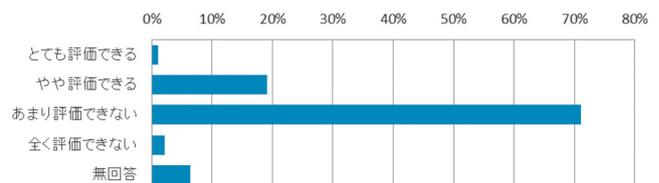


図7 国内発生までの政府の対策全般への印象

### 4. 国内発生以降

次に国内での新型インフルエンザの発生が確認された以降（5月16日～）の時期について見ていく。ここでは、①多くの自治体において行われた「休校」の実態と、②自治体が連携を取る必要のある諸機関（政府、都道府県、医師会、医療機関）との関係に注目する。そして、自治体の対応や、諸機関との関係に影響を及ぼした可能性のある③マスメディアの影響も明らかにしたい。

#### 4-1. 休校の実施

まずは、自治体で休校措置が実施されたかどうかを尋ねた。「はい」74.2%、「いいえ」24.0%（「無回答」1.8%）、というように、多くの自治体で休校措置が実施されていた

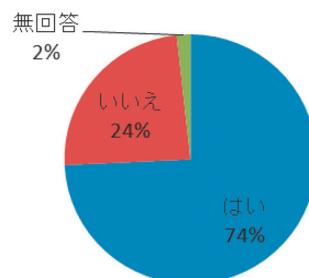


図8 休校措置の実施

ことがわかる【図8】。

次に、休校措置が実施されたと答えた回答者を対象に、休校措置の実施単位について尋ねた。解答のなかで圧倒的に多かったのは、「学校ごと」90.6%であった。これと比べて「市内の学校すべて」7.3%、「校区ごと」0.9%、「学区ごと」1.2%という回答は少ない。休校措置は、学校ごとに実施されるケースが多いようである【図9】。

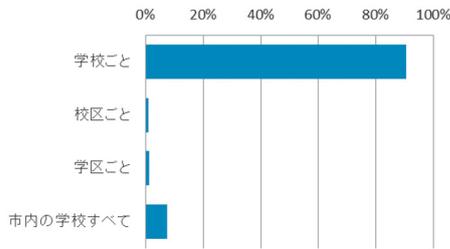


図9 休校措置の実施単位

また、同じ回答者に対して、休校措置を実施する際、休校のタイミングや生徒父兄への連絡方法等について、学校と十分に調整できていたかどうか尋ねた。回答は、「ある程度調整ができた」59.7%が一番多く、以下「十分調整ができた」19.4%、「あまり調整ができなかった」16.5%、「全く調整ができなかった」4.5%の順で続いた【図10】。

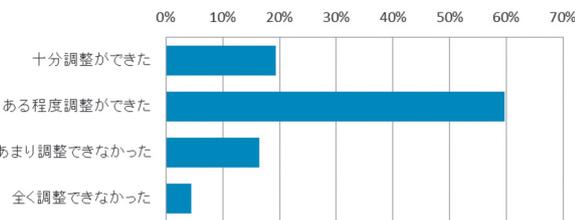


図10 休校連絡方法等に関する学校との調整

また、休校措置に関連する質問として、政府が出した休校措置の基準についても尋ねた。基準があいまいであったかどうか尋ねたところ、「ややそう思う」54.2%、「とてもそう思う」13.8%の合計が、「あまりそう思わない」27.3%、「全くそう思わない」1.1%の合計を上回る結果となった【図11】。なお、休校措置の基準は厚生労働省が5月22日に出した「医療の確保、検疫、学校・保育施設等の臨時休業の要請等に関する運用指針」で示され、その後は6月19日と

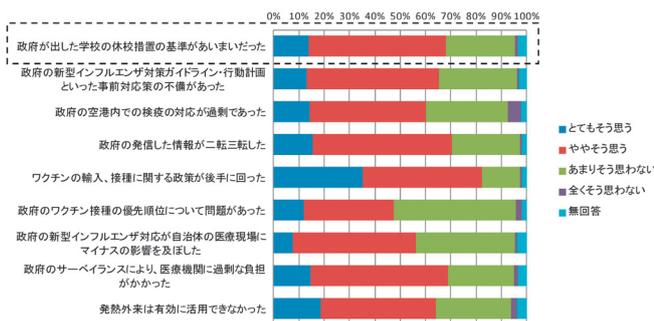


図11 政府の対応について

10月1日の指針の改訂とともに変更されている。但し、「基準」とはいっても、「発生した患者が児童・生徒等である場合」や「患者が多く発生した場合」といった大まかなものに過ぎず、しかも6月19日の改訂以降は自治体が地域の実情に合わせて判断することになった。

4-2. 諸機関との関係

また、政府、都道府県、医師会、医療機関のような新型インフルエンザに対応する各機関との連携体制についても尋ねた。

【政府—自治体】

「政府との情報交換が円滑に行われたか」という質問に対して、「あまり円滑に行われなかった」51.3% 「ある程度円滑に行われた」23.8% 「全く円滑に行われなかった」16.9% 「円滑に行われた」1.1% 「無回答」6.9%という回答が得られた【図12】。ここでいう「情報交換」の具体的な中身は様々あるであろう。例えば、海外渡航歴や、渡航者との接触歴のない高校生の感染が確認され、新型インフルエンザ患者の国内第一号が発生した神戸市では、国との連携について、厚生労働省神戸検疫所から協力を得られたり、対応変更等の判断を行う上で、国と直接調整しながら、柔軟な対応を行うことができた、と振り返っている<sup>10)</sup>。

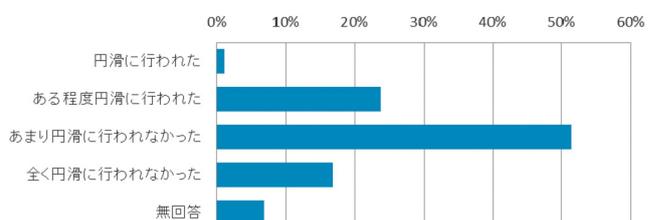


図12 政府との情報交換は円滑であったか

【都道府県—自治体】

同じく、「都道府県との情報交換が円滑に行われたか」という質問に対して、「ある程度円滑に行われた」54.9% 「あまり円滑に行われなかった」35.6% 「円滑に行われた」5.1% 「全く円滑に行われなかった」3.6% 「無回答」0.9%という回答が得られた【図13】。前記の神戸市の例で見ると、県とは「相互に連絡員を派遣しあうなど、情報の共有を図った」と述べながらも、「その一方で、共有された情報の量が不足していた」などとしている。具体的な例を挙げると、

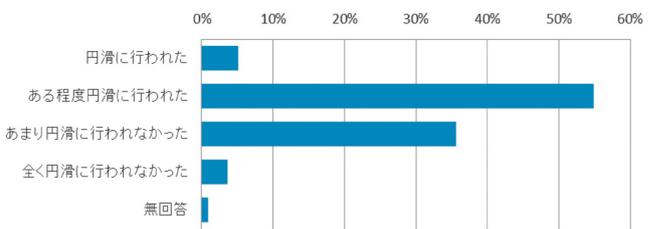


図13 都道府県との情報交換は円滑であったか

「学校名の公表について県と市で対応にずれが生じることもあった」としている<sup>11)</sup>。

### 【医師会—自治体】

医師会との関係については、ワクチンの集団接種において、自治体と医師会など現場との意思疎通は十分であったか尋ねた。最も多かったのが「ややうまくいった」46.0%であり、「あまりうまくいかなかった」11.3%、「とてもうまくいった」9.6%、「全くうまくいかなかった」1.8%という意見が続いた。ワクチンの集団接種が行われなかった自治体も多く、「無回答」31.3%であった【図14】。

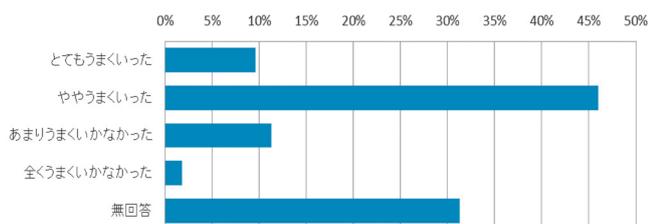


図14 ワクチン集団接種時の医療現場との意思疎通

### 【医療機関—自治体】

医療機関との連携に関しては、「ある程度連携ができていた」64.2%、「連携ができていた」21.3%、「あまり連携ができていなかった」12.4%、「全く連携ができていなかった」1.3%、「無回答」0.7%であった。医療機関との関係については、おおむね連携が取れていたことがわかった【図15】。

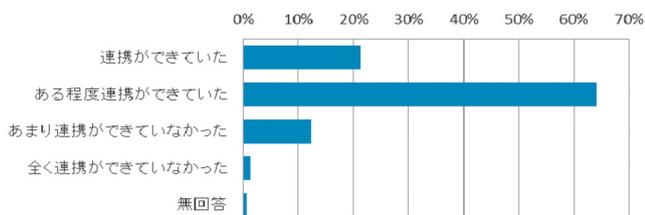


図15 医療機関との連携

### 4-3. マスメディアの影響

マスコミ報道に対する意見や、マスコミへの情報提供についても尋ねた。「マスコミの報道により、市民の不安が増した」という質問に対する回答は、「ややそう思う」50.7%、「とてもそう思う」40.4%、「あまりそう思わない」8.0%、「全くそう思わない」0.4%、「無回答」0.4%という結果であった。「とてもそう思う」と「ややそう思う」の合計が90%を超えることから、マスコミ報道の影響の大きさが窺える。

次に、「マスコミ報道が自治体の対応に余計な混乱を招いたか」という質問に関しては、「ややそう思う」46.4%、「とてもそう思う」25.8%、「あまりそう思わない」25.8%、「全くそう思わない」1.3%、「無回答」0.7%という回答であった。マスコミ報道は、自治体の対応にあまりよくない

影響を及ぼしたようである。

また、「マスコミの報道と政府の情報が錯綜して正確な情報を把握することが難しかったか」という質問については、「ややそう思う」51.3%、「あまりそう思わない」27.8%、「とてもそう思う」18.9%、「全くそう思わない」0.9%、「無回答」1.1%という回答であった。情報が錯綜した典型例としては、ワクチンの接種回数をめぐる政策過程と報道が挙げられる。2009年10月中旬に厚生労働省における専門家を交えた会議において、接種回数を1回にするか2回にするかという議論が続くなかで、最終決定が出る前に報道が先走って混乱が生じたのである。

一方で、「マスコミに対する情報提供をあなたの自治体は積極的に行ったか」という問いに対しては、「あまりそう思わない」45.1%、「ややそう思う」38.2%、「全くそう思わない」7.6%、「とてもそう思う」7.1%、「無回答」2.0%という回答になった。自治体からマスコミへの情報提供はあまり積極的に行われなかったようである【図16】。

以上をまとめると、自治体は新型インフルエンザに対応するなかで、マスコミ報道からあまりよくない影響を受けたことがわかる。アンケート調査における自由記述の中には、「自治体職員よりも先に住民がマスメディアから最新情報を得ることがないように、政府から自治体への情報提供が円滑に行われるようなシステムが必要である」といった回答や、「情報が国や県から通知される前にマスコミにより流されるため、市民からの問い合わせに明確に答えられないことも多かった」といった回答が見られた。政府—自治体—市民の関係において、マスコミ情報が及ぼす影響は大きく、またそれがしばしば混乱のもとになる。今後の対策を考える上で、マスコミ報道も重要な論点になるといえるよう。自治体とマスメディアの関係については、さらなる分析が重要である。

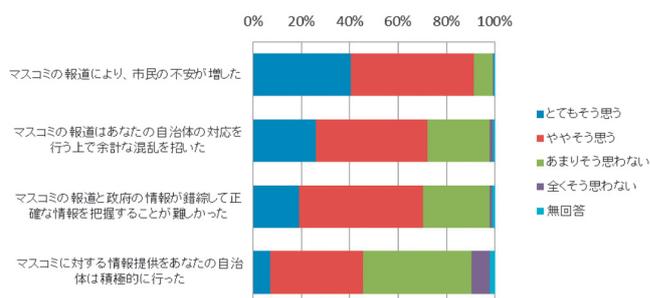


図16 マスコミ報道に関する意見について

## 5. 終 息 後

これまでの質問を踏まえて、自治体が新型インフルエンザに対して十分に対応できたかを尋ねた。最も多かったのは、「ある程度対応できた」79.8%であり、以下、「あまり対応できなかった」14.7%、「十分対応できた」4.4%、「全く対応できなかった」0.4%、「無回答」0.7%の順で続いた。このように自治体における自己評価は高い傾向にある【図

17】。

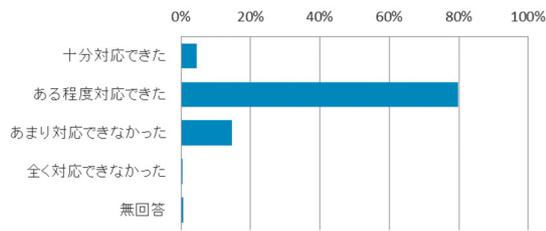


図17 十分に対応できたか

最後に、新型インフルエンザが終息した後、次の新型インフルエンザに備えてどのような準備をしているかを複数回答で尋ねた。一番多かったのは、「新型インフルエンザ対策行動計画（またはそれに類するもの）を修正した」26.0%である。それに続いたのは「新型インフルエンザを想定した業務継続計画を策定した（または、それまでの業務継続計画を修正した）」24.0%、「医師会、医療機関等と連携できる体制を作った」23.3%であった。以下、「計画をさらに具体化したマニュアルを新たに策定した（または、それまでのマニュアルを修正した）」12.9%、「新型インフルエンザ対策を想定した実動訓練を実施している」5.8%、「新型インフルエンザ対策を想定した図上訓練を実施している」4.0%、「大学・研究機関等の専門家からの協力を得られる体制を作った」0.9%、「関連のある専門職（医師、看護師、保健師等）を増やした」0.7%と続いた。「その他」26.4%のなかに比較的多く見られた回答は、「今後、新型インフルエンザ行動計画を修正する予定、検討中」というものである。そのほかには、「マスク、消毒液などの備蓄」も多く見られた【図18】。

この結果を見ると、自治体は今回の経験を通じて、事前準備の重要性を再認識したものと思われる。中央レベルにおいても、今回のパンデミックが終息してから、次の新型インフルエンザに備えて行動計画・ガイドラインの改定作業が進められており、それに伴う法整備も進んでいる。リスク対応においては常に大きな不確実性がつきまとう以上、どれだけ事前に様々な事態を想定して対策を固めておけるかがカギとなる。その意味で2009年新型インフルエンザの対応にあたったことは、多くの自治体によって貴重な経験になったといえよう。

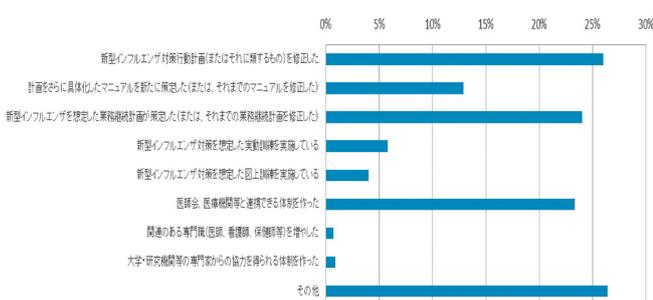


図18 次の発生に備えた準備

## 6. おわりに

以上のアンケート調査の結果から、新型インフルエンザに対応した自治体の実態が把握できた。本調査の実施により、行動計画の策定といった事前対策を行うことによって、地方自治体が新型インフルエンザ発生時に対応出来ずに機能不全に陥るような事態が回避されたことを、ある程度解明出来たと考える。また、終息後においては、多くの自治体で行動計画の修正・策定や、医師会・医療機関との連携体制の構築などの対策がとられていることがわかった。

一方で、今回の調査からは、自治体と国や都道府県との情報共有などの連携体制、そして市民への広報を含めたマスコミとの関係といった点においては、大きな課題があったと看做し得る。

中央と自治体の関係における重要な課題の一つは、円滑な情報交換である。自治体が新型インフルエンザの情報をマスコミに頼る現状は、早急に改善されなければならない。中央から確実でスピーディな情報提供がなければ、自治体や地方の医療現場は動揺し、ひいては国民や社会の混乱につながりかねない。国民の立場からしても、例えば新型インフルエンザの情報を求めて行政に電話しようとするなら、その相手は中央省庁よりまずは地元の自治体になるであろう。自治体が常に確かな情報をもっていることは、非常時の社会の不安定化を防ぐために必要である。それはある意味で、新型インフルエンザ対策の基盤とすら言えるかもしれない。

中央と自治体の関係におけるもう一つの重要な課題は、専門知識の確保・普及である。多くの自治体は、十分な専門知識を備えた職員が不足しており、必要な時にいつでも相談できる専門家も周りにあまりいない。それゆえ、新型インフルエンザ対策の選択肢も自ずと限られてくるわけである。この課題は、日本全体でインフルエンザや感染症の専門家をバランスよく育成・配置するという政策課題に置き換えられるかもしれない。しかし現実的にみて、自治体がすぐに職員を研修に出したり、専門家を育成したりすることは難しいであろう。そこで差し当たり取り組むべきなのは、専門知識が足りない自治体に対する中央のサポートを充実させることではないか。例えば、それぞれの自治体が必要とする知識を収集・提供できるようなネットワークを、中央—地方関係のなかで構築していくべきであろう。新型インフルエンザの専門知識は中央省庁がもっていれば済むというものではない。地方の現場で感染に向き合う自治体にとっても、それは不可欠なツールなのである。

次に、マスコミの影響と役割は、良くも悪くも大きかったといえる。グローバル化の進んだ現代社会では、メディアの多様化に伴い、海外での発生状況などの情報を誰でも容易に、しかも瞬時に得ることができる。そのため、新型インフルエンザが発生した当初は、事態の展開に政府と自治体間の連絡体制や、自治体から市民への広報体制が追いつけず、市民や自治体はマスコミを通じて情報を知ることが多く、政府と自治体、自治体と市民の関係に混乱が生じ

た。

市民が自治体とマスコミという異なる情報源から、異なる情報を受け取るとは混乱のもとになる。複数ある情報源のなかから、市民はどうすれば信頼できる情報を選び取ることが出来るであろうか。そこで自治体としては、市民に対して確かな情報を正しく、早く伝えるためのチャンネルを確立しておくことが必要であろう。さらにそれと関連して、普段から市民にとって重要かつ有用な情報をコンスタントに提供し、市民の自治体に対する信頼を確保しておくことも求められよう。すなわち、マスコミから流れる大量の情報に住民が戸惑うことのないよう、自治体は信頼できる情報源に変わらなければならないのである。

2009年の経験を踏まえて、新しい行動計画の策定など次の新型インフルエンザに備えた対策作りが進められている。そうしたなかで、自治体の担う役割や、適切な中央—地方関係といった政策課題について考えることが求められている。本稿の研究成果はそのための重要な示唆を多く含んでいるといえよう。ただし、それを明確な形で示すには、より洗練された理論的アプローチや丁寧な実証研究が必要である。研究グループとしては今後、この調査結果で明らかになったデータをもとに、整理した情報を十分に活用しながらリスクに対する行政対応の決定要因を明らかにし、さらにはその政策過程のモデル化などに取り組んでいき、研究をさらに発展させていく予定である<sup>12)</sup>。

#### [付記]

本稿は日本学術振興会科学研究費助成事業（学術研究助成基金助成金（挑戦的萌芽研究））（研究課題名：リスクに対する政策過程の研究—新型インフルエンザを事例として—（研究課題番号：23653039），研究代表者：宮脇健）の助成を受けた研究成果の一部である。

#### 参考文献

- 石川晃司・石突美香・小松志朗・笹岡伸矢（2011）「パンデミックと政治」島方洗一編『危機管理 新たな疾病との戦い』文真堂、113-138頁。
- 尾身茂・岡部信彦・河岡義裕・川名明彦・田代真人（2010）「パンデミック（H1N1）2009 わが国の対策の総括と今後の課題」『公衆衛生』74（8）、636-646頁。
- 木村盛世（2009）『厚生省と新型インフルエンザ』講談社。
- 厚生労働省健康局結核感染症課「ブタインフルエンザに対する対応について」2009年4月26日。  
<http://www.mhlw.go.jp/kinkyu/kenkou/influenza/090426-02.html>（2013年2月25日閲覧）
- 神戸市新型インフルエンザに係る検証研究会（2009）「神戸市新型インフルエンザ対応検証報告書」。  
[http://www.phcd.jp/shiryo/shin\\_influ/H22hokenjogenbajoho\\_1010\\_kobecityHC2.pdf](http://www.phcd.jp/shiryo/shin_influ/H22hokenjogenbajoho_1010_kobecityHC2.pdf)（2013年2月25日閲覧）
- 新型インフルエンザ及び鳥インフルエンザに関する関係省庁対策会議（2009）『新型インフルエンザ対策行動計画』。
- 宮村達男監修・和田耕治編集（2011）『新型インフルエンザ（A／H1N1）わが国における対応と今後の課題』中央法規出版。

#### 註

- 1) これまでの研究成果の一部として、以下のようなものがある。厚生労働科学研究費補助金による研究として、宮脇健編（2012）『厚生労働科学研究費補助金（政策科学総合研究事業（政策科学推進事業））総括研究報告書 リスクにおける政策過程の理論モデルの構築 神戸市、仙台市の新型インフルエンザ対応を事例として』厚生労働省。文部科学省研究費補助金による研究として、笹岡伸矢・福本博之（2012）「リスクと政治的選択 ゲーム理論を用いた2009年新型インフルエンザへの対応の分析」『修道法学』34（2）、広島修道大学法学会、466-444頁。宮脇健（2011）「リスクにおける日本の行政対応 新型インフルエンザの事例分析」『法学紀要』5、日本大学法学部法学研究所、487-512頁。そのほか、日本政治学会報告（2010年度 2012年度）など。
- 2) 日本学術振興会科学研究費助成事業（学術研究助成基金助成金（挑戦的萌芽研究））（研究課題名：リスクに対する政策過程の研究—新型インフルエンザを事例として—（研究課題番号：23653039），研究代表者：宮脇健）。
- 3) 厚生労働科学研究費補助金（行政政策研究事業（政策科学総合研究事業））（研究課題名：リスクにおける政策過程の理論モデルの構築—新型インフルエンザを事例として—（研究課題番号：H23-政策-若手-013），研究代表者：宮脇健）。
- 4) アンケート調査は、共同研究の他のメンバーの協力のもと実施された。また、データ処理や執筆にあたり、日本大学法学部助手宮脇健氏と、広島修道大学法学部准教授笹岡伸矢氏よりアドバイスを頂いた。心より感謝申し上げる。
- 5) WHO(2005), 'WHO Global Influenza Preparedness Plan: The Role of WHO and Recommendations for National Measures Before and During Pandemics.'
- 6) 新型インフルエンザ及び鳥インフルエンザに関する関係省庁対策会議（2009）、4頁。
- 7) 新型インフルエンザ及び鳥インフルエンザに関する関係省庁対策会議（2009）、6頁。
- 8) 著者らが参加している研究グループは、これまでに2009年新型インフルエンザへの対応に従事した研究者（岩田健太郎神戸大学教授（2011年11月24日実施）、押谷仁東北大学教授（2011年12月18日実施））や、実務者（桜井誠—神戸市監査委員（元神戸市健康保健局長）（2011年11月25日実施）、岩崎恵美子氏（前仙台市副市長）（2011年12月6日実施）、正林督章厚生労働省健康局結核感染症課長（元新型インフルエンザ対策室長）（2011年12月22日実施））を対象としたインタビュー調査を実施しているが、ほとんどの対象者がこの問題に言及している。前記総括研究報告書を参照のこと。
- 9) 厚生労働省健康局結核感染症課「ブタインフルエンザに対する対応について」2009年4月26日。
- 10) 神戸市新型インフルエンザに係る検証研究会（2009）、18頁。
- 11) 神戸市新型インフルエンザに係る検証研究会（2009）、18-19頁。
- 12) 本調査結果を利用した研究として、笹岡伸矢（2013）「2009年新型インフルエンザに関する地方自治体アンケートの分析」『修道法学』35（2）、広島修道大学法学会、936-927頁。

**2009年新型インフルエンザに対応した行政機関へのアンケート調査 単純集計**

**【調査の概要】**  
 調査方法: 郵送調査法  
 郵送数: 810 票  
 返信数: 451 票  
 有効回答数: 450 票 (有効回答率 55.6%)  
 無効回答数: 1 票  
 調査実施期間: 2012年8月

**●新型インフルエンザの発生(2009年4月25日)以前のあなたの自治体の対応について伺います。**

問1 あなたの自治体は新型インフルエンザに対する行動計画(またはそれに類するもの)を作成していましたか。

1. はい……………44.0%  
 2. いいえ……………56.0%

付問 a) はいと答えた方に伺います。何を参考にして行動計画(またはそれに類するもの)を作成しましたか。以下1~7のうちあてはまるものすべてに○をつけてください。

1. 政府の行動計画、ガイドライン……………79.8%  
 2. WHOやCDCなどのガイドライン……………44.1%  
 3. 医師会の意見……………43.6%  
 4. 他の自治体の計画……………65.7%  
 5. 外国政府・自治体の行動計画……………3.0%  
 6. 有識者の意見……………5.1%  
 7. その他……………8.6%

b) いいえと答えた方に伺います。その後、あなたの自治体は、新型インフルエンザに対する行動計画(またはそれに類するもの)を作成しましたか。

1. はい……………73.1%  
 2. いいえ……………26.9%

問2 あなたの自治体では、新型インフルエンザ発生以前にどのような準備をされていましたが、あてはまるものすべてに○をつけてください。

1. 計画をさらに具体化したマニュアルを策定していた……………12.7%  
 2. 新型インフルエンザを想定した業務継続計画を策定していた……………10.9%  
 3. 新型インフルエンザ対策を想定した実施訓練を実施していた……………10.9%  
 4. 新型インフルエンザ対策を想定した向上訓練を実施していた……………7.1%  
 5. 医師会、医療機関等と連携できる体制を作っていた……………33.6%  
 6. 関連のある専門職(医師、看護師、保健師等)を増やした……………0.9%  
 7. 大学・研究機関等の専門家からの協力を得られる体制を作っていた……………9.7%

1

8. その他……………26.2%

**●新型インフルエンザの海外発生から国内で発生するまで(4月25日~5月16日)のあなたの自治体の対応について伺います。**

問3 あなたの自治体では、海外での新型インフルエンザの発生を知らせる第一報を、何を通じて入手しましたか。あてはまるもの1つに○をつけてください。

1. 専門家・専門機関からの情報提供……………3.1%  
 2. WHOやCDCなどの海外の専門機関からの情報提供……………1.6%  
 3. 政府からの連絡文書……………16.4%  
 4. テレビ・新聞などによる報道……………64.4%  
 5. その他……………2.7%  
 無回答……………11.8%

問4 あなたの自治体で国内発生に備えて実施したことは何ですか。あてはまるものすべてに○をつけてください。

1. 対策本部の設置……………76.2%  
 2. 電話相談窓口の開設……………47.8%  
 3. 訓練の実施……………4.2%  
 4. シミュレーション……………6.0%  
 5. 市民への啓発……………85.3%  
 6. その他……………18.4%

問5 この期間の政府の対策全般についてどのような印象を持ちましたか。あてはまるもの1つに○をつけてください。

1. とても評価できる……………1.1%  
 2. やや評価できる……………19.1%  
 3. あまり評価できない……………71.1%  
 4. 全く評価できない……………2.2%  
 無回答……………6.4%

**●新型インフルエンザの国内発生(5月16日)以降の政府の対応とあなたの自治体の対応について伺います。**

問6 政府の新型インフルエンザ対応について専門家、マスメディアなどから様々な問題点が指摘されたが、以下のa)~d)の問題についてあなたの自治体はどのようにお考えですか。あてはまるもの1つずつ○をつけてください。

3. あまり円滑に行われなかった……………35.6%  
 4. 全く円滑に行われなかった……………3.6%  
 無回答……………0.9%

問10 新型インフルエンザ対策について、参考にした情報は何か。以下の1~7のうちあてはまるものすべてに○をつけてください。

1. 政府からの情報……………69.2%  
 2. WHOやCDCなど海外機関からの情報……………36.7%  
 3. 医師会からの情報……………37.6%  
 4. 近隣自治体からの情報……………50.4%  
 5. 国立感染症研究所の情報……………63.6%  
 6. 有識者からの意見……………14.4%  
 7. その他……………15.3%

問11 新型インフルエンザ対策について、医療機関との連携はできていましたか。あてはまるもの1つに○をつけてください。

1. 連携ができていた……………21.2%  
 2. ある程度連携ができていた……………64.2%  
 3. あまり連携ができていなかった……………12.4%  
 4. 全く連携ができていなかった……………1.3%  
 無回答……………0.7%

問12 あなたの自治体では、林枝措置が実施されましたか。どちらかに○をつけてください。

1. はい……………74.2%  
 2. いいえ……………24.0%  
 無回答……………1.8%

付問 問12で「1. はい」を選択された方におねします。  
 a) 林枝措置の実施単位としてあてはまるもの1つに○をつけてください。

1. 学校ごと……………90.6%  
 2. 校区ごと……………0.9%  
 3. 学区ごと……………1.2%  
 4. 市内の学校すべて……………7.3%

b) 林枝措置を実施する際、林枝のタイミングや年次交代への連絡方法等について、学校と十分に調整できていたと思います。あてはまるもの1つに○をつけてください。

1. 十分調整ができた……………19.4%  
 2. ある程度調整ができた……………59.7%  
 3. あまり調整ができていなかった……………16.5%  
 4. 全く調整ができていなかった……………4.6%

2

	1 とても 思う	2 やや 思う	3 あまり 思う ない	4 全く 思わ ない	無 回 答
a) 政府の新型インフルエンザ対策ガイドライン(行動計画)といった事前対応の準備があった	12.9%	52.2%	31.1%	0.7%	3.1%
b) 政府の空港内での検疫の対応が適切であった	14.4%	45.6%	32.7%	5.1%	2.2%
c) 政府の発信した情報が二重三重した	15.6%	54.9%	28.9%	0.7%	2.0%
d) ワクチンの輸入、接種に関する情報が偏りがあった	35.3%	46.9%	15.1%	0.7%	2.0%
e) 政府のワクチン接種の能率に関しても問題があった	11.8%	35.8%	48.2%	2.2%	2.0%
f) 政府の新型インフルエンザ対策が自治体の医療機関にマイナスの影響を及ぼした	7.6%	48.4%	39.3%	0.9%	3.6%
g) 政府からのメッセージにより、医療機関に過剰な負担があった	14.7%	54.0%	28.6%	1.3%	3.6%
h) 医療従事者は有償で活用できなかった	18.7%	45.3%	29.9%	2.2%	4.9%
i) 政府が出した学校の休校措置の基準があいまいだった	13.8%	54.2%	27.3%	1.1%	3.6%

問7 ワクチンの接種情報において、あなたの自治体と医師会など関係との意思疎通は十分でしたが、あてはまるもの1つに○をつけてください。

1. とてもうまくいった……………6.6%  
 2. ややうまくいった……………66.9%  
 3. あまりうまくいかなかった……………11.3%  
 4. 全くうまくいかなかった……………1.8%  
 無回答……………13.3%

問8 新型インフルエンザの感染拡大に関して、政府とあなたの自治体との間で情報交換は円滑に行われたと思いますか。あてはまるもの1つに○をつけてください。

a) 円滑に行われた……………1.1%  
 2. ある程度円滑に行われた……………23.8%  
 3. あまり円滑に行われなかった……………51.3%  
 4. 全く円滑に行われなかった……………16.9%  
 無回答……………6.9%

問9 あなたの自治体は新型インフルエンザの感染拡大に関して、都道府県との情報交換は円滑に行われたと思いますか。あてはまるもの1つに○をつけてください。

1. 円滑に行われた……………5.1%  
 2. ある程度円滑に行われた……………54.9%

3

問13 テレビや新聞などのマスコミ報道に関する以下のa)~d)の意見についてどのように思いますか。1~4の中であてはまるもの1つずつに○をつけてください。

a) マスコミの報道により、市民の不安が増した

1. とても思う……………40.4%  
 2. やや思う……………59.7%  
 3. あまり思う……………8.0%  
 4. 全く思わない……………0.4%  
 無回答……………0.4%

b) マスコミの報道はあなたの自治体の対応を行う上で余計な混乱を招いた

1. とても思う……………25.8%  
 2. やや思う……………46.4%  
 3. あまり思う……………25.8%  
 4. 全く思わない……………1.3%  
 無回答……………0.7%

c) マスコミの報道と政府の情報が錯綜して正確な情報を把握することが難しかった

1. とても思う……………18.9%  
 2. やや思う……………51.2%  
 3. あまり思う……………27.8%  
 4. 全く思わない……………0.9%  
 無回答……………1.1%

d) マスコミに対する情報提供をあなたの自治体は積極的に行った

1. とても思う……………7.1%  
 2. やや思う……………38.2%  
 3. あまり思う……………45.1%  
 4. 全く思わない……………7.6%  
 無回答……………2.0%

問14 あなたの自治体は新型インフルエンザ対策について十分な対応ができましたか。あてはまるもの1つに○をつけてください。

1. 十分対応できた……………4.4%  
 2. ある程度対応できた……………79.8%  
 3. あまり対応できなかった……………14.7%  
 4. 全く対応できなかった……………0.4%  
 無回答……………0.7%

問15 新型インフルエンザの終息後、あなたの自治体では、次の新型インフルエンザに備えてどのような準備をされていますか。あてはまるものすべてに○をつけてください。

1. 新型インフルエンザ対策行動計画(またはそれに類するもの)を修正した……………26.6%  
 2. 計画をさらに具体化したマニュアルを新たに策定した……………12.9%  
 3. 新型インフルエンザを想定した業務継続計画を策定した(または、それまでのマニュアルを修正した)……………24.0%  
 4. 新型インフルエンザ対策を想定した実施訓練を実施している……………5.8%  
 5. 新型インフルエンザ対策を想定した向上訓練を実施している……………4.0%  
 6. 医師会、医療機関等と連携できる体制を作った……………23.3%  
 7. 関連のある専門職(医師、看護師、保健師等)を増やした……………0.7%  
 8. 大学・研究機関等の専門家からの協力を得られる体制を作った……………0.9%  
 9. その他……………26.4%

**●最後にあなたの自治体について伺います。**

感染症や危機管理を総合的に扱う部署などはありませんか。

1. はい……………38.0%  
 2. いいえ……………39.1%  
 無回答……………2.9%

4

問16 感染症や危機管理を総合的に扱う部署などはありませんか。

1. はい……………38.0%  
 2. いいえ……………39.1%  
 無回答……………2.9%

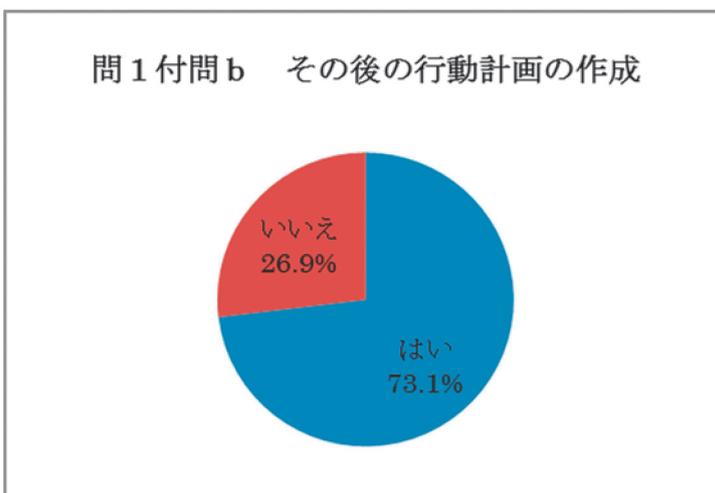
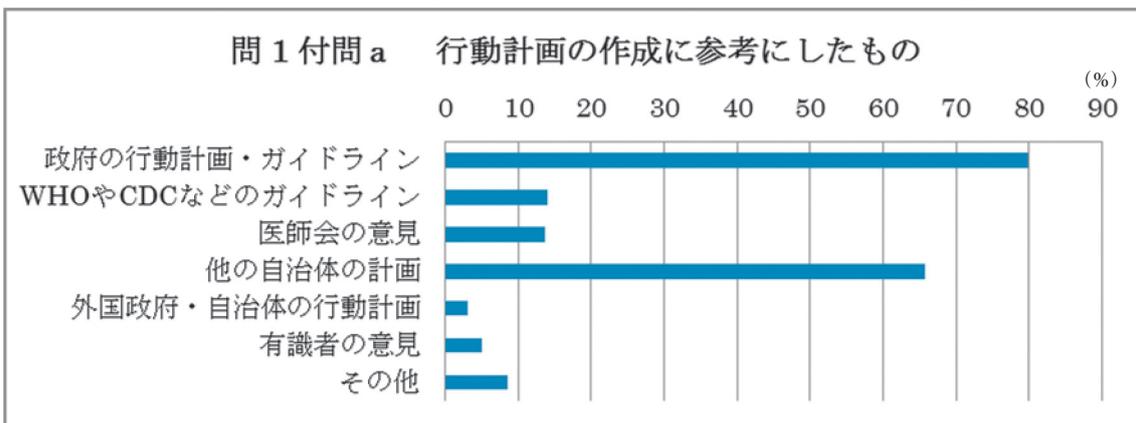
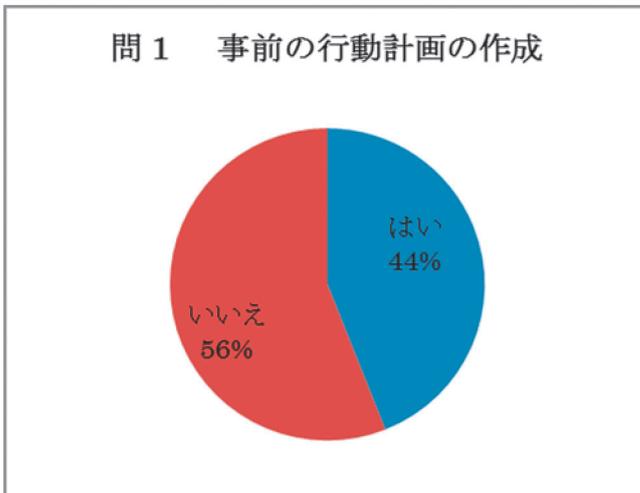
5

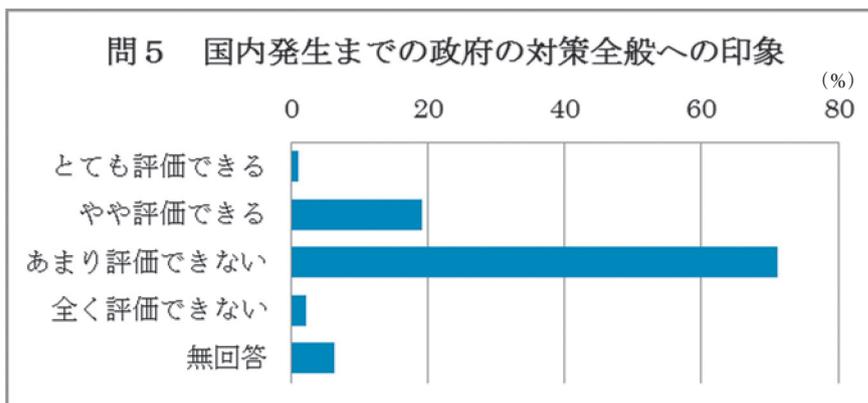
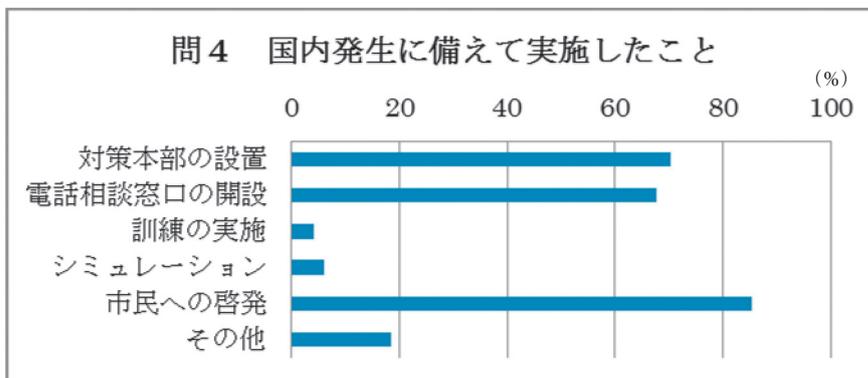
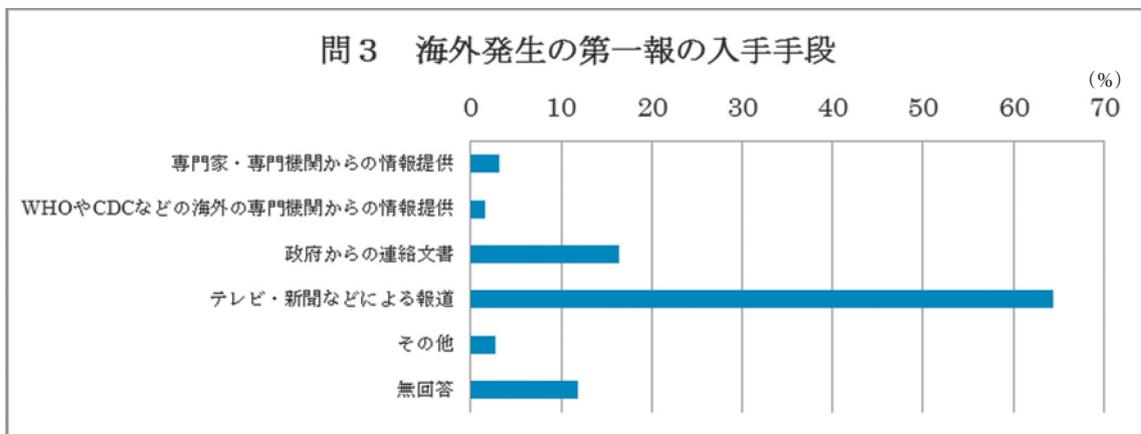
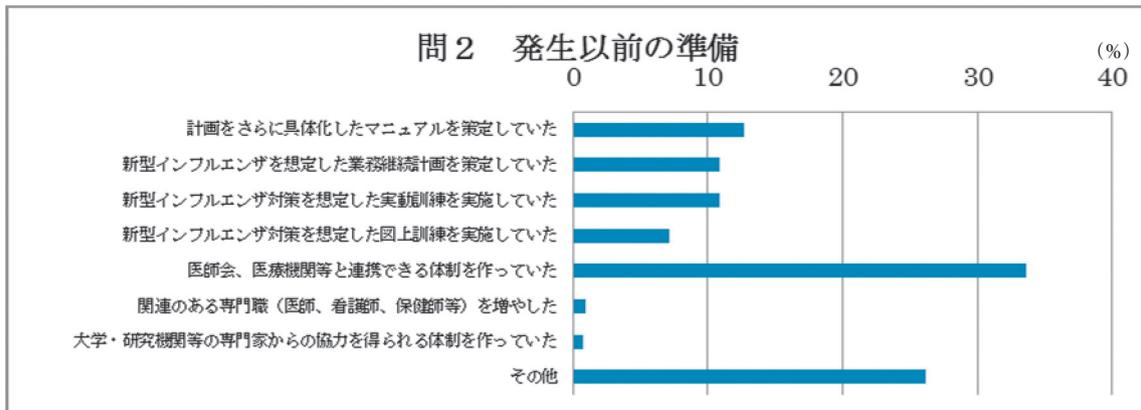
問17 感染症や危機管理を総合的に扱う部署などはありませんか。

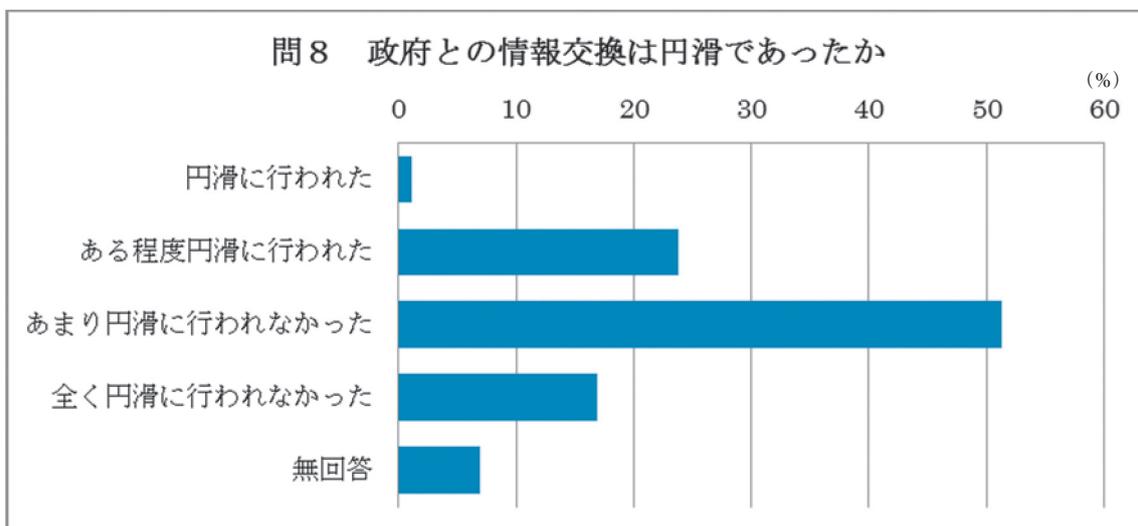
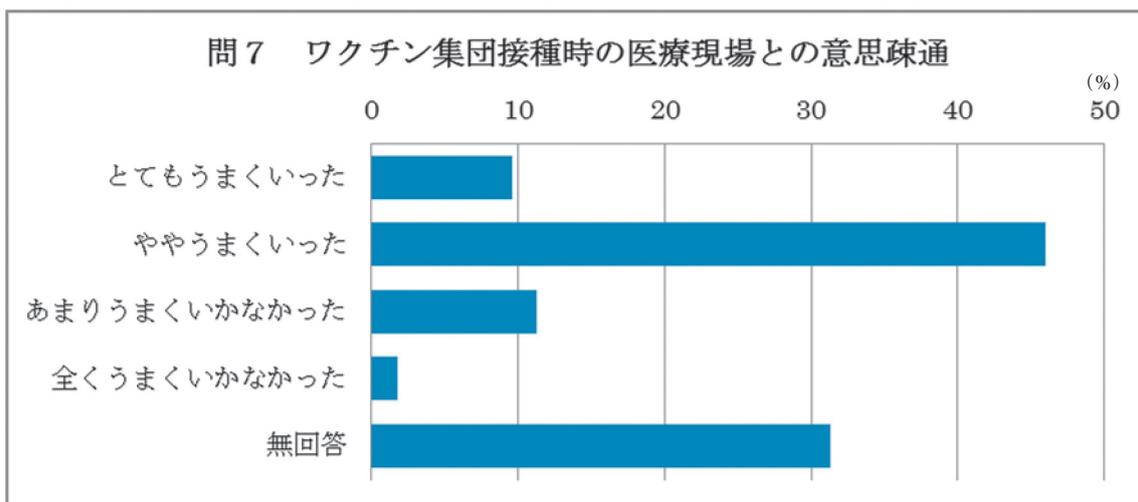
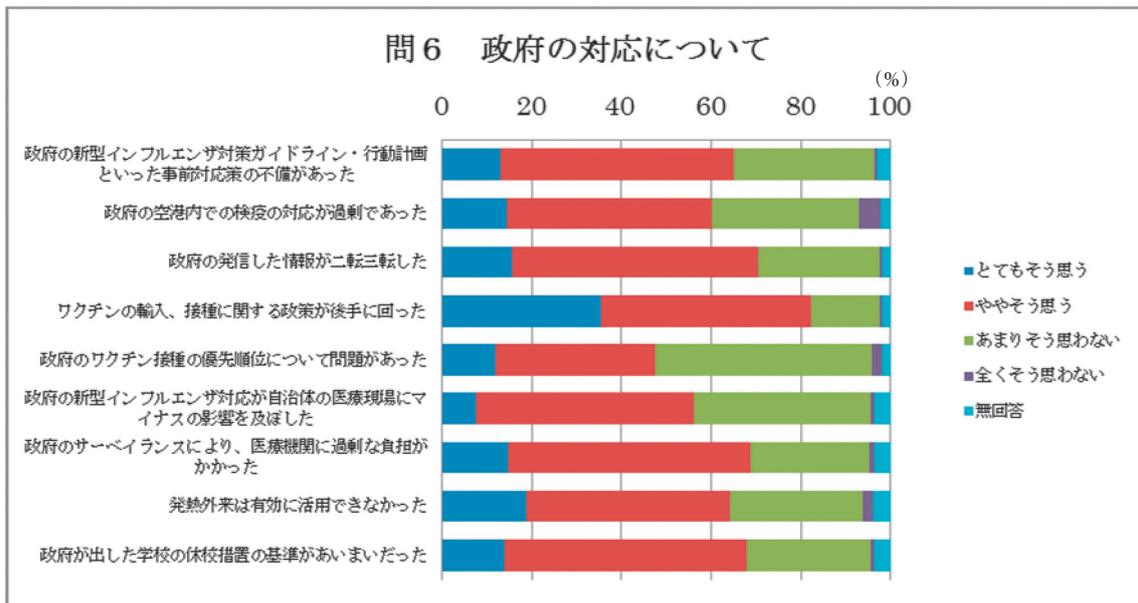
1. はい……………38.0%  
 2. いいえ……………39.1%  
 無回答……………2.9%

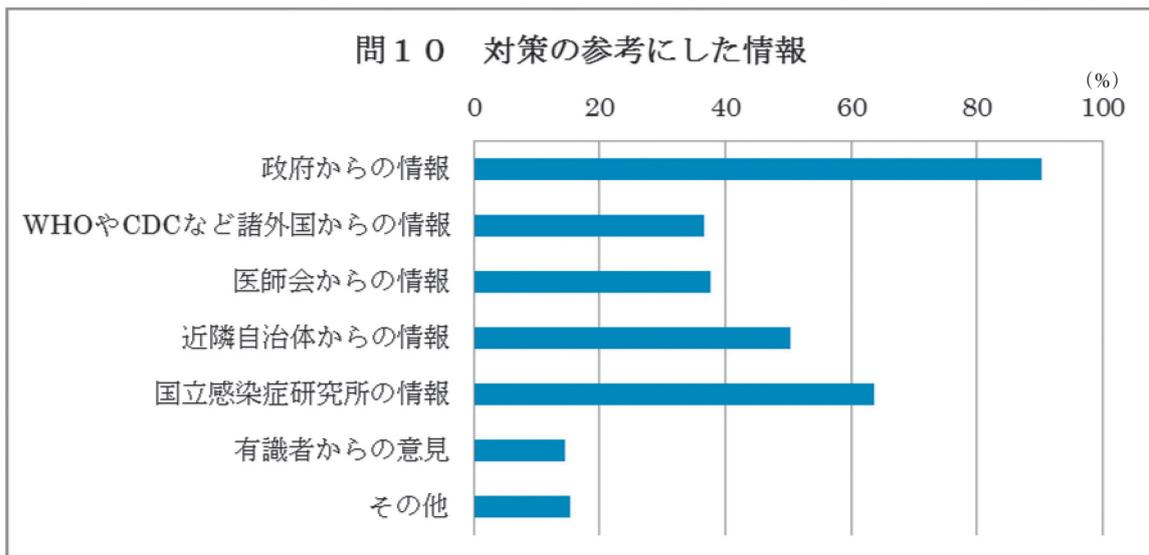
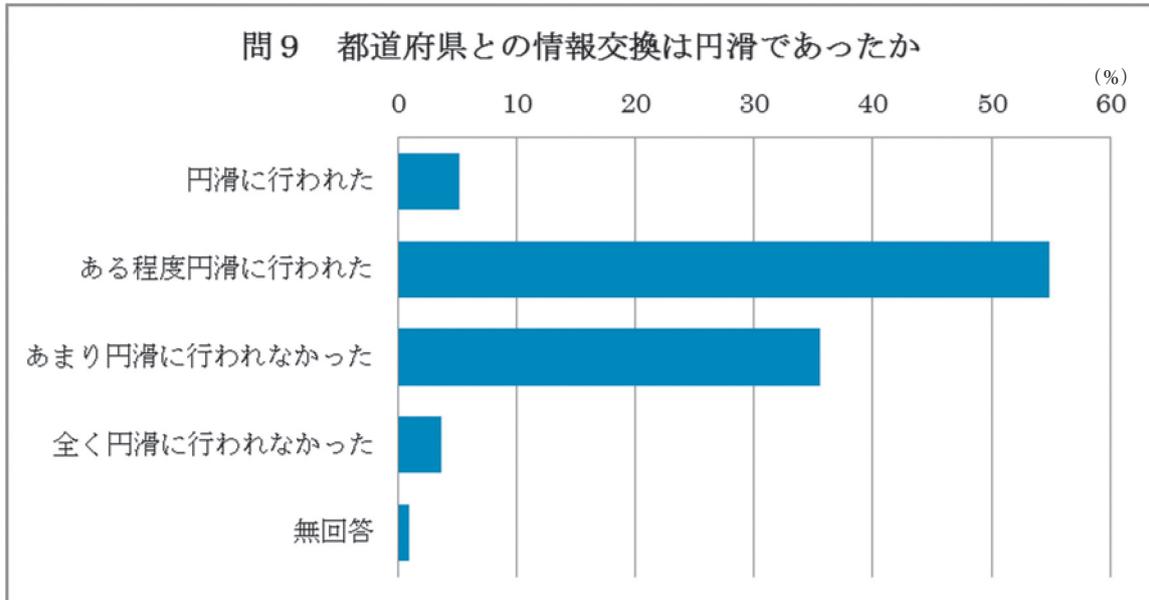
6

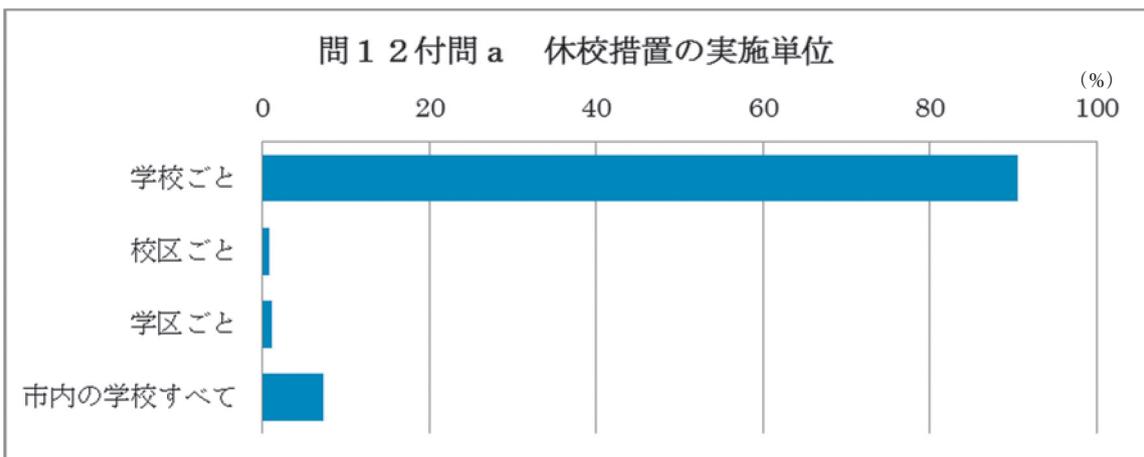
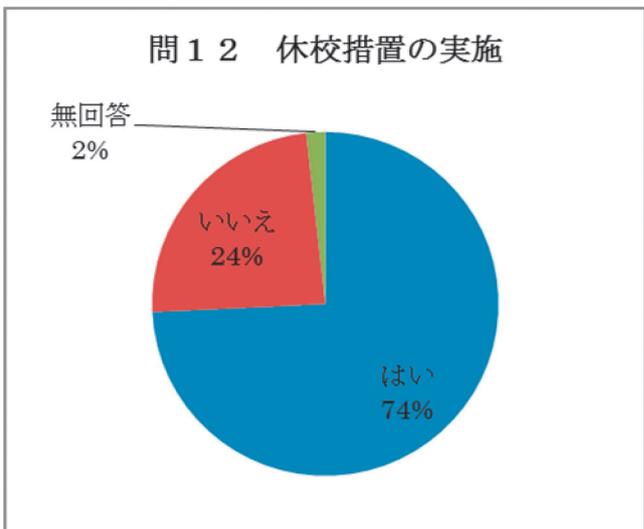
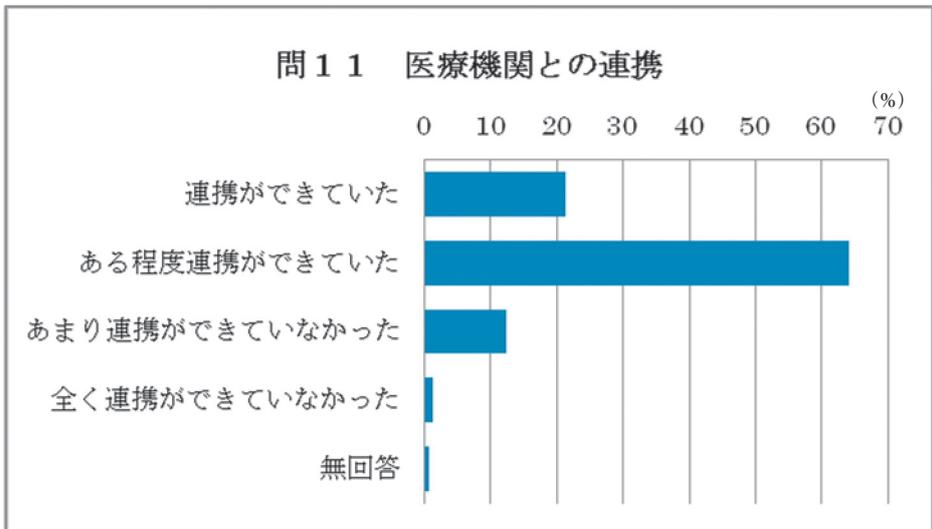
2009年新型インフルエンザに対応した行政機関へのアンケート調査 グラフ

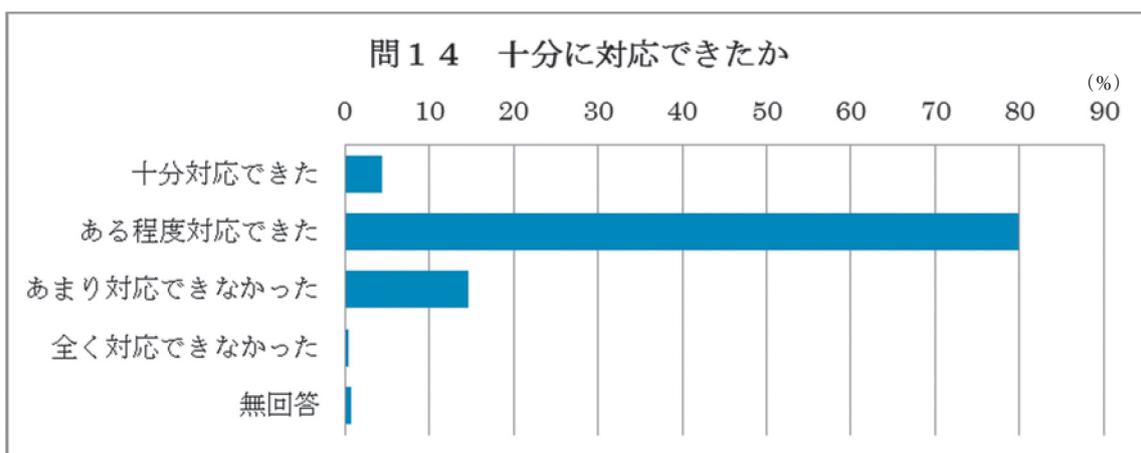
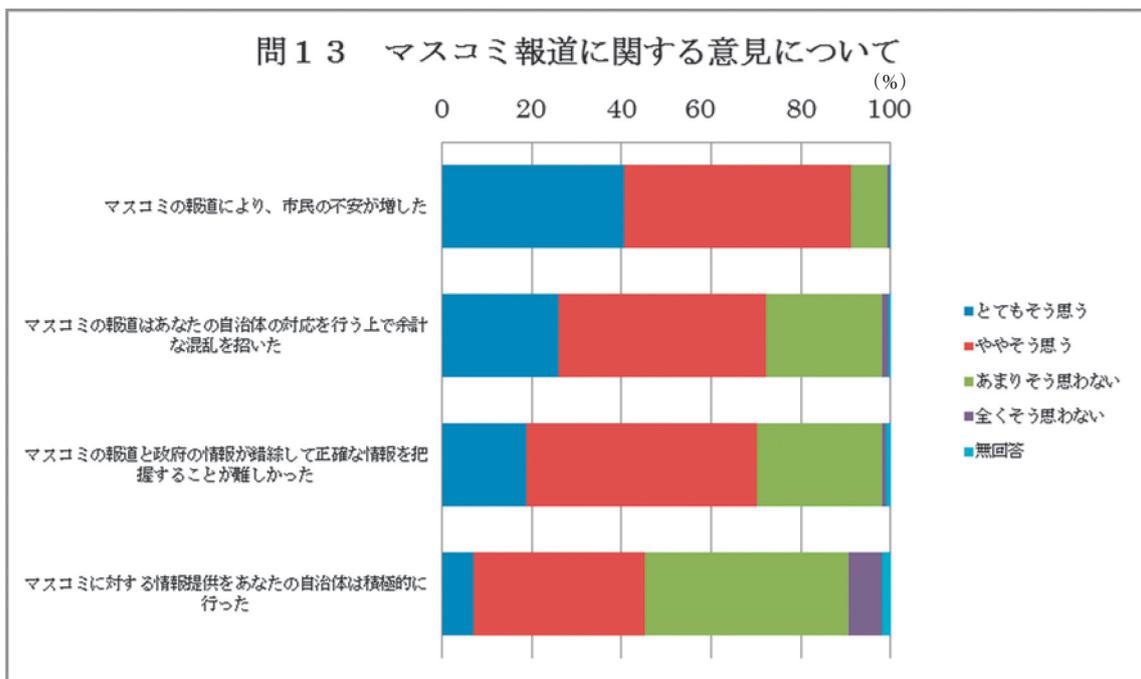
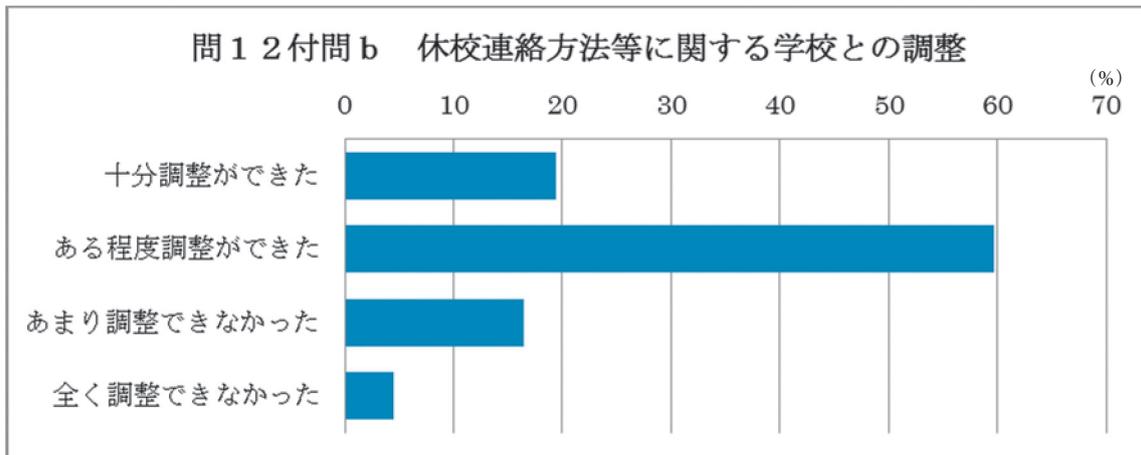


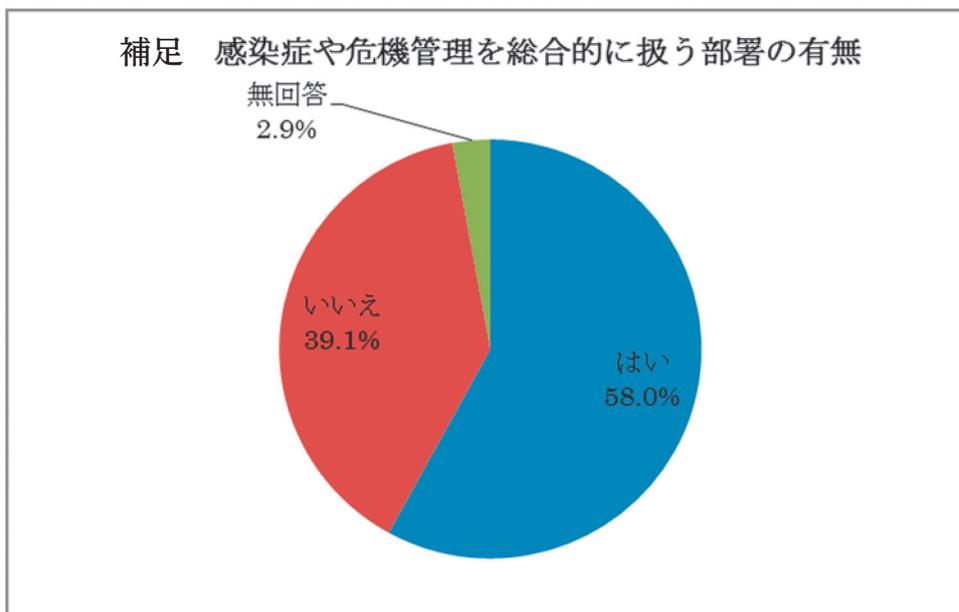
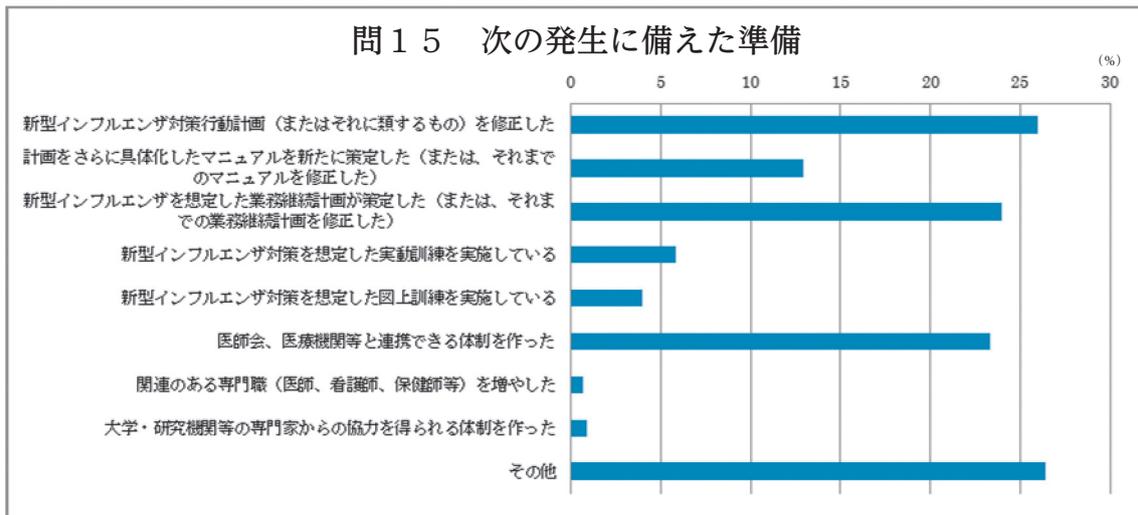














---

日本大学工学部紀要

第54巻第2号

平成25年3月21日 印刷

平成25年3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(代)

---



JOURNAL OF THE COLLEGE OF ENGINEERING  
NIHON UNIVERSITY  
Vol. LIV, No. 2, 2013  
CONTENTS

ENGINEERING

- An Experimental Study on Size-Effect of RC Beams with Permanent Steel Forms  
.....Sanjay PAREEK, Masaharu ENDO and Yusuke SUZUKI ( 1 )
- Evaluation of Self-Repair Performance of Concrete Using Self-Repair System Consisting of  
Network and Repair Material  
.....Sanjay PAREEK and Akihiro OHIRA ( 7 )
- Fundamental Properties of an Organic Acid-Salt System as Brine  
– 1st Report: Density, Refractive Index, Specific Heat and Viscosity of  
an Aqueous Potassium Formate Solution –  
.....Naoe SASAKI and Kiyoshi OGAWA ( 13 )
- Fundamental Properties on Organic Acid Salt System as Brine  
– 2nd Report : Density, Refractive index, Specific heat and Viscosity of  
Aqueous potassium acetate solution –  
.....Kiyoshi OGAWA and Naoe SASAKI ( 19 )
- Enhancement and Retardation Mechanism of Ultra-Thin SiO<sub>2</sub> Growth on Thermally Oxidized  
Cr-Contaminated n-Type Si(001) Surfaces  
.....Hiroyuki SHIMIZU and Yuji SANADA ( 25 )
- Generation of Wide Domain Satin-Finished Surface for Machining  
..... Jun KOBAYASHI, Hiroshi HATAKEYAMA, Tomohiro MIZOGUCHI,  
..... Yoshikazu KOBAYASHI, Kenji SHIRAI and Tsukasa KONDO ( 35 )
- Development of Omni-directional Miniature Robot for Machining  
.....Hitoshi OYAMA, Tomohiro MIZOGUCHI, Yoshikazu KOBAYASHI,  
.....Kenji SHIRAI and Tsukasa KONDO ( 39 )
- Automatic Tree Parameter Extraction for Forest Biomass Estimation based on  
Terrestrial Laser Scanner  
.....Tomohiro MIZOGUCHI, Yoshikazu KOBAYASHI, Kenji SHIRAI,  
..... Hiroyuki WAKABAYASHI, Yasuhiko HARA, Yasuhiro KODA,  
..... Ichiro IWAKI and Hwa-soo LEE ( 45 )

GENERAL STUDIES

- A Theory of Binarism and Its Extension II: *Application to the Taxonomy of Parts of Speech*  
..... Masashi KAWASHIMA ( 51 )
- Measures the administration took against Influenza Pandemic (H1N1) 2009  
– Analysis of the result of the questionnaire survey to the local government –  
..... Mika ISHIZUKI, Shiro KOMATSU and Yuta KOMORI ( 65 )