

新しい予防医学システムの開発

—脳と心の健康評価法、健康増進による予防法、健康データ管理システム (PLR) —

酒谷 薫¹⁾ (橋田浩一²⁾、Angelo Compare³⁾)

1) 日大工・電気電子 2) 東京大学・ソーシャル ICT 研究センター

3) University of Bergamo・Department of Human and Social Sciences(Italy)

【緒論】

高齢化社会の進展に伴い、認知症、老人性うつ病など高齢者特有の精神神経疾患が急増しており、高齢者が継続的に社会参加を続ける Active aging を達成するためには脳と心の障害を予防する技術開発は極めて重要な課題である。そこで、本研究では、センサー技術とネットワークインフラを活用し、脳と心とからだの健康状態の維持・増進により、高齢者あるいは被災者の脳と心の疾病を予防し、コミュニティでの活動を支援するシステムを構築することを目的としている。

初年度である本年度は、近赤外分光法 (NIRS) を用いてストレスと認知機能の非侵襲的評価法を開発した。研究計画調書に従い NIRS には極短パルス光を用いて安静時ヘモグロビン (Hb) 濃度を定量的に計測する時間分解スペクトロスコピー (TRS) を使用し、脳機能研究における有用性について検討する。本 TRS システムを用いて、高齢者の認知機能を向上させる治療法の効果を検証した。一つは化粧療法である [1]。化粧療法の高齢女性に対する臨床的効果は報告されていたが、神経生理学的メカニズムは明らかではなかった。もう一つは、高齢者の認知機能を向上させる Pyrroloquinoline quinone (PQQ) と呼ばれるサプリメントの効果について検討した [2]。

さらに本年度は、福島県郡山市と連携し ICT による脳と心の健康モニターシステムの開発を開始した。本システムは、NIRS による脳機能計測に加えて、新たに開発した睡眠時の呼吸、脈拍、

体動、離床を非拘束で計測できる睡眠モニターにより構成され、健康状態を遠隔モニターすることが可能である。本 ICT 健康モニターシステムに使用する NIRS は、高齢者施設などでも使用できるように、軽量小型で無線通信機能を有し、容易に装着できるように改良した。次に、本年度成果の詳細について報告する。

【TRS による脳機能研究 (1) : 化粧療法の認知機能に対する効果】 [1]

対象は、高齢女性 61 名 (82.2±6.3 才) で、軽度認知機能障害群 (29 名、平均 MMSE 24.1±3.8) と中等度認知機能障害群 (32 名、平均 MMSE 10.3±5.8) の 2 群に分類した。化粧療法は資生堂のセラピストにより実施した。まず、TRS (TRS-20、浜松ホトニクス社製) を用いて、安静時の両側前頭前野のヘモグロビン (Hb) 濃度を計測した。化粧療法の実施後 (実施時間 50 分)、再度、TRS にて安静時の両側前頭前野の Hb 濃度を計測した (図 1)。



図 1 TRS による前頭前野 Hb 濃度の計測法

本 TRS 計測は、被験者に課題を与える必要がなく、短時間 (3 分程度) で終了するため、高齢者でも容易に実施することができる利点がある。さらに、化粧療法中に測定プローブを一旦外すことができるのも TRS の大きな利点の一つである。

軽度認知機能障害群では、化粧療法により安静時の前頭前野 Hb 濃度が上昇した (図 2)。特に、左側では統計学的に優位の Hb 濃度の上昇が認められた。一方、中等度認知機能障害群では化粧療法により前頭前野の安静時 Hb 濃度は変化しなかった。総 Hb においても同様の変化が認められた。

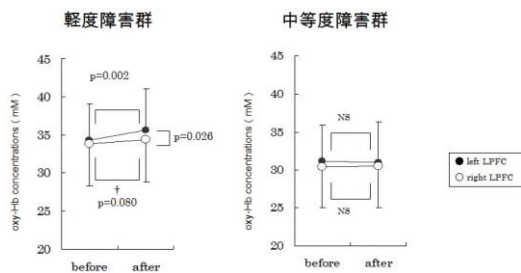


図 2 化粧療法前後の安静時前頭前野 Hb 濃度の変化
さらに、同時に計測した唾液中コルチゾールの濃度は化粧療法後に低下した (図 3)。

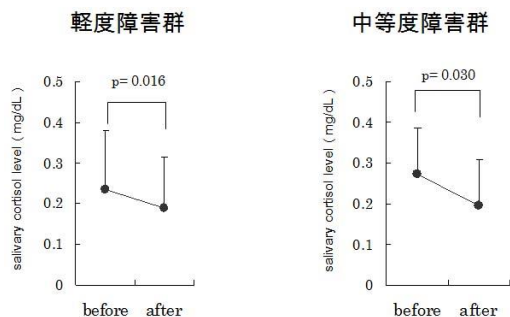


図 3 化粧療法前後の唾液中コルチゾール濃度変化

これらの変化は、軽度認知機能障害群では化粧療法により主に左側前頭前野が活性化されたことを示唆している。Hellige によると左側の前頭前野はポジティブな感情、右側はネガティブな感情を司ると考えられている [3]。また、我々の NIRS 研究でも同様の結果が得られている [4]。これらの結果は、化粧療法により左側前頭前野が活性化され、ポジティブな感情が誘発され、ストレス緩和効果が得られたことを示唆している。しかしながら、化粧療法の前頭前野に対する効果は中等度認知機能障害群では認められず、化粧療法の効果には限界があることを示唆している。

【TRS による脳機能研究 (2) : サプリメント (PQQ) の認知機能に対する効果】 [2]

PQQは水溶性のキノン還元酵素で、抗酸化作用を有し、ラットの学習効果の向上効果[5-12]などが報告されている。我々は、高齢者を対象にストルーテストなどを用いてPQQの認知機能に対する効果を検討し、PQQは前頭葉機能を向上させることを報告した[6]。そこでTRSを用いて、PQQの前頭前野に対する効果を検討した。

対象はプラシーボ群 10 例 (60.9±4.5 才)、PQQ 群 10 例 (59.5±3.7 才)。PQQ 群では、PQQ (1 日量 20 mg、三菱化成製) を 12 週間投与した。

PQQ 群では、投与後に安静時の右側前頭前野の酸素化 Hb、総 Hb が上昇した (各々 $p = 0.008$ 、 0.032)。安静時の酸素飽和度 (SO₂) は右側前頭前野で減少した ($p = 0.001$)。一方、プラシーボ群では Hb 濃度変化を認めなかった (図 4)。

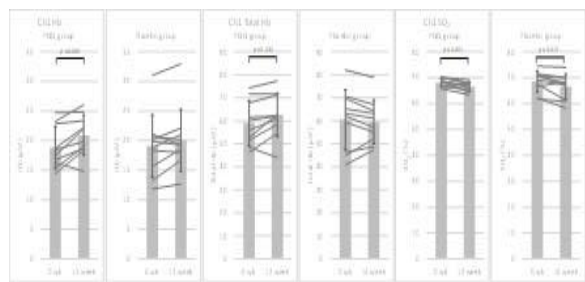


図 4 右前頭前野における安静時 Hb 濃度変化 実線は各症例の変化、棒グラフ (灰色) は平均値を示す。

TRS の計測結果は、PQQ の連用により右側前頭前野の局所脳血流と血液量が増加し、酸素代謝が亢進したことを示しており、PQQ が右側前頭前野を活性化したことが示唆された。

TRS を用いて安静時の脳内 Hb 濃度を計測することにより、長期間の治療効果を判定することが可能と考えられた。

【小型 NIRS による脳機能研究 (1) : 鍼灸のストレス緩和効果に関する研究】 [7]

ICT 健康モニターシステムに使用する NIRS は、軽量小型で無線通信機能を有し、容易に装着できる必要がある。初年度は、そのプロトタイプを使用して鍼灸のストレス緩和効果について検討し、

小型 NIRS の有用性について検討した。

対象は、ストレスによる不安神経症にて結鍼灸院（大阪）を受診した 10 症例（41.8±6.8 才）。鍼灸は、鍼灸師により実施した。使用した経穴は、東洋医学的診断に基づいて WHO-GV23, GV20, GV9, GV14, BL7, GV4, BL17, BL19, BL20, TE5, GB41, PC6, SP4 等を使用した。

無線機能付小型 2 チャンネル式 NIRS（PNIRS、ダイナセンス社製）を用いて、両側前頭前野の安静時における酸素化 Hb 濃度の揺らぎを測定し、次式により LIR（Laterality Index at rest）を算出した。

$$LIR = \frac{\sum_{t \in \text{analysis interval}} ((\Delta\text{oxy}R_t - \Delta\text{oxy}R_{\min}) - (\Delta\text{oxy}L_t - \Delta\text{oxy}L_{\min}))}{\sum_{t \in \text{analysis interval}} ((\Delta\text{oxy}R_t - \Delta\text{oxy}R_{\min}) + (\Delta\text{oxy}L_t - \Delta\text{oxy}L_{\min}))}$$

LIR がプラスを示す時は右優位の活動、マイナスの時は左優位を示す。最近の研究により、LIR は状態特性不安検査（STAI）の状態不安（STAI-1）と正の相関があることが明らかとなった。すなわち、マイナス方向はストレス緩和効果を示す。

鍼灸治療により STAI-1 のスコアが低下した。このことは治療により、状態不安が改善したことを示す（図 5 A）。一方、STAI-2 は変化せず、鍼灸は特性不安には影響を与えていないことがわかった。さらに LIR は、10 例中 7 例において低下した。これらの症例では、安静時の前頭前野の神経活動が左優位の方向に変化したことを示している。

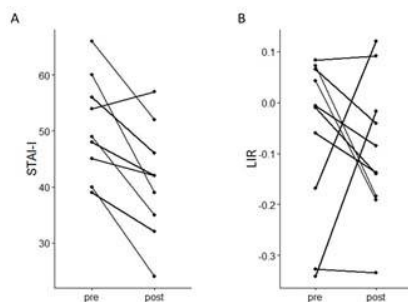


図 5 鍼灸治療前後の STAI-1 (A) と LIR (B) の変化

ン効果をもたらしていることを示唆している。このような鍼灸のストレス緩和効果の神経生理学的メカニズムはアロマセラピーと類似しており [8]、感覚刺激によるストレス緩和効果の共通の神経基盤かもしれない。

【小型 NIRS による脳機能研究（2）：ユマニチュードの効果に関する研究】 [9]

ユマニチュードは、新しいケアの方法として注目を集めている。認知症患者に対して、見つめる、触れる、話しかける、立ってもらう、というシンプルな技術だが認知症患者の周辺症状を緩和する効果がある。本年度は、小型 2 チャンネル式 NIRS（PNIRS、ダイナセンス社製）を用いて、ユマニチュードの効果の神経基盤を検討した。

3 ヶ月間のユマニチュードの前後で、認知症患者の行動をビデオで撮影しながら口腔ケア中の両側前頭前野活動を NIRS で計測した（図 6）。口腔ケアにより酸素化 Hb が上昇している。この時、患者は苦悶の表情を示しており、ケアに伴うストレスにより前頭前野が活動したものと推察される。しかしながら、ユマニチュードを行う前は口腔ケアを拒否したり、体動が激しく NIRS による脳機能計測が困難な症例が多く、測定プローブの改良など今後の課題が明らかとなった。

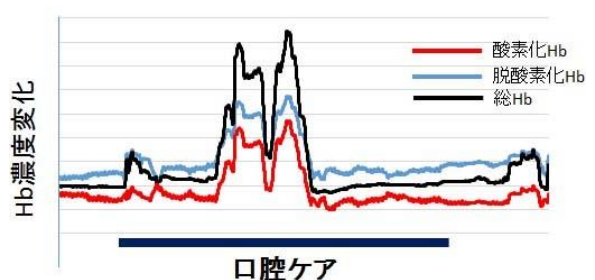


図 6 認知症の口腔ケア中の NIRS パラメータ変化

【ICT 健康管理システムの構築】

2025 年までに団塊の世代が 75 歳以上の後期高齢者になり、高齢者が急増し介護・医療費等社会保障費の急増が懸念される 2025 年問題は日本の医療行政の喫緊の課題である。酒谷は郡山市の

2025年問題対策アドバイザーに就任し（2014年10月）、郡山市と日本大学工学部が連携し2025年問題の解決に取り組むことになった。そこで2025年問題の解決にむけて「郡山モデル」を創案した。郡山モデルは、①脳と心の健康モニター（小型NIRS）、②見守り（睡眠センサー）、③ICTの3要素からなる。睡眠センサーは、初年度に産学連携（㈱NJI）により開発した装置であり、12個の圧電素子を使用して呼吸、心拍、体動、離床が遠隔モニターできる（図7）。

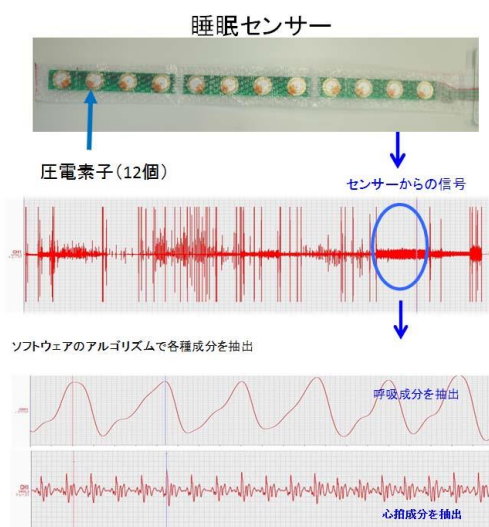


図7 睡眠センサー内部(上)、センサーの信号(中)、アルゴリズムにより抽出された呼吸、心拍波形(下)

郡山モデルでは、自宅などに睡眠センサー、NIRSなどの生体機能モニターを設置し、ICTにて遠隔モニターするシステムである（図8）。

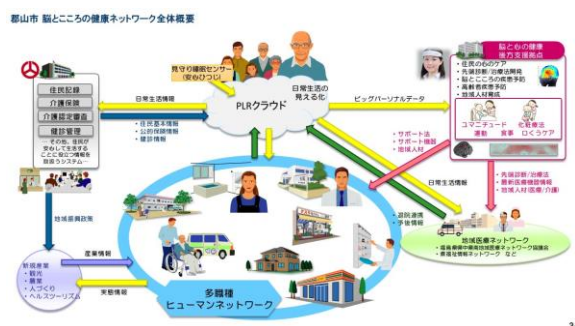


図8 郡山モデルの概略

【国際共同研究】

本年度より、イタリアのベルガモ大学とストレスに関する国際共同研究を開始した。酒谷は同大

学客員教授に就任し（2014年9月）、Compare教授の研究グループとNIRSを用いたストレス研究を開始し、その研究成果は国際学会（2015年7月）で発表予定である [10]。

【まとめ】

本年度は、TRSを用いて高齢者の認知機能障害に対する治療法（化粧療法、サプリメント）の効果を検証し、その有用性について検討した。郡山市と連携しICTによる脳と心の健康モニターシステムの開発を開始した。本システムにシステムに使用する睡眠センサー及び無線機能付小型NIRSの開発と実証試験を行った。さらにイタリアとストレスに関する国際共同研究を開始した。初年度は、研究計画調書の内容はほぼ達成されていると思われる。

参考文献

- [1] Machida A, et al. Effects of cosmetic therapy on cognitive function in elderly women evaluated by time-resolved spectroscopy study. *Adv Exp Med Biol.* 2015 (in press)
- [2] Nakano M, et al. Effects of antioxidant supplements (BioPQQ™) on cerebral blood flow and oxygen metabolism in the prefrontal cortex. Abstract for ISOTT2015 (China)
- [3] Davidson RJ, et al. Emotion, plasticity, cortex, and regulation: perspectives from affective neuroscience. *Psychol Bull* 2000;126:890-909
- [4] Ishikawa W, et al. Correlation between asymmetry of spontaneous oscillation of hemodynamic changes in the prefrontal cortex and anxiety levels: a near-infrared spectroscopy study. *J Biomed Opt.* 2014;19:027005.
- [5] Ohwada K, et al. Pyrroloquinoline quinone prevents cognitive deficit caused by oxidative stress in rats. *J Clin Biochem Nutri* 2008;42:29-34.
- [6] Itoh Y, et al. Effect of the antioxidant supplement Pyrroloquinoline quinone disodium salt on cognitive functions. *Adv Exp Med Biol.* 2015 (in press)
- [7] Sakatani K, et al. Effects of acupuncture on anxiety levels and prefrontal cortex activity measured by near-infrared spectroscopy: a pilot study. *Adv Exp Med Biol.* 2015 (in press)
- [8] Sakatani K. Optical diagnosis of mental stress: review. *Adv Exp Med Biol.* 2012;737:89-95.
- [9] 酒谷薫 ユマニチュードの脳科学研究、訪問看護と介護 2015 : 20 ; 291-295
- [10] Compare A, et al. Effects of positive and negative mood induction on the prefrontal cortex activity measured by near infrared spectroscopy. Abstract for ISOTT2015 (China)

災害に強い医療情報ネットワークの開発

見越 大樹¹⁾ 竹中 豊文¹⁾

1) 日大工・情報

1 はじめに

近年、無線端末をマルチホップで接続することで、地理的に離れた無線端末間の通信を実現するマルチホップ無線ネットワークが注目されている。マルチホップ無線ネットワークは、端末間をマルチホップで中継することで目的地までデータを届けるため、災害時において通信インフラが断絶した場合においても通信が可能であり、耐故障性に対して優れたネットワークである。

我々は災害に強い医療情報ネットワークの実現のために、マルチホップ無線ネットワークを利用する。図1に想定するネットワーク形態を示す。集会所や家庭に血圧計などの医療機器と無線端末（ホームゲートウェイ）があり、医療機器にはBluetoothが搭載されている。ホームゲートウェイはBluetoothで医療機器から情報を受信して、インターネット上の情報管理サーバに情報を送信する。ホームゲートウェイから情報管理サーバへの接続は3つの形態を想定している。1つ目は光ネットワーク、2つ目はセルラーネットワーク、3つ目はマルチホップ無線ネットワークである。光ネットワークとセルラーネットワークは、通常時の接続形態であり、マルチホップ無線ネットワークは非常時の接続形態である。なお、光ネットワークとセルラーネットワークについては、既設の通信インフラを利用して接続される。一方、マルチホップ無線ネットワークについては、ネットワークを新たに開発する必要がある。

マルチホップ無線ネットワークの適用例としてセンサネットワークが注目されており、我々は、センサネットワークを医療情報ネットワークへ適用することを考えており、本稿では、センサネットワークの長寿命化を実現するための手法を提案する。センサネットワークでは、無線通信機能を有したバッテリー駆動型センサ端末（以下、ノード）により、温度・湿度といった環境情報等をモニタリングする。ノードはバッテリーで駆動しているため、データ送受信時における消費電力を低減し、センサネッ

トワークの稼働時間を長くすることが重要な課題である。特に、マルチホップ通信を行うセンサネットワークでは、データ中継回数の多いノードほど、多くの電力が消費される。そのため、データ中継回数の削減を図れるクラスタリング手法 [1] が提案されている。

クラスタリング手法では、隣接ノード間でクラスタを形成し、クラスタ内の代表ノードであるクラスタヘッド（以下、CH）を決定する。CHは、クラスタ内のノードからセンサデータを収集し、CH間でマルチホップ通信を行い、シンク（基地局）にセンサデータを送信することで、センサネットワーク全体で消費される電力の低減を図っている。

クラスタリングの実現手法として、我々はこれまでにPARC (Power Aware Routing and Clustering scheme for wireless sensor networks)[2] を提案した。PARCでは、クラスタリングとルーチングを同時に行うことで、制御パケットによる消費電力の削減を図っている。しかし、PARCにおいてもCH間は、マルチホップ通信によりデータの中継を行うため、シンク付近のCHはホットスポット問題が発生する。

我々は、この問題点を解決するため、PARCに移動シンクを導入する方式を提案する [3]。提案方式では、データを収集するための停止地点を予め複数箇所選択し、各停止地点で移動シンクはPARCによりデータを収集する。更に、各停止地点での収集回数を最適化することにより、収集地点の近傍のノードの負荷の均一化を図り、ネットワークの長寿命化を図っている。

2 PARC

PARCは、CHをネットワーク内に均一に配置し、CH間の負荷分散を図るとともに、クラスタリングによるデータの集約によりデータ中継回数を削減し、消費電力の削減を図っている。以下に、PARCのクラスタリング・ルーチング手法を説明する。

2.1 クラスタリング・ルーチング手法

各ラウンド（クラスタリング構築周期）開始時、シンクは出力小の電波で、スレーブ制御パケットを送信する。スレーブ制御パケットには、シンクのノードIDが含まれている。スレーブ制御パケットを受信したノードは、シンクのスレーブノードとなり、電力の消費を抑えるため即座に送受信機の電源を切る。シンクは、出力小でスレーブ制御パケットを送信した後、即座に出力大でRREQ (RouteRequest) パケットを送信する。RREQには、送信元ノードID、parentID（転送元ノードID）、中継ホップ数、シーケンス番号が含まれている。RREQ

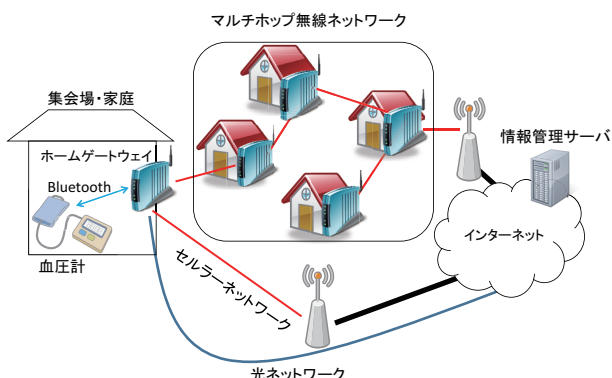


図1 想定するネットワーク形態

を受信したノードは、タイマをセットする。タイマ値は、初期バッテリー量と自身の残余電力量の比率となる。このタイマが最初にタイムアウトしたノードが CH となる。CH となったノードは、シンクと同様にスレーブ制御パケット、RREQ を送信する。もしタイマ稼働中のノードが、CH となったノードからの同一シーケンス番号の RREQ を受信した場合、当該ノードは、RREQ を送信した CH のスレーブノードとなり、タイマをリセットする。また、同一シーケンス番号の RREQ を複数受信した場合、最も早く受信した CH のスレーブノードとなる。CH が、RREQ をフラッディングしてから一定時間経過後、同一シーケンス番号の RREQ を再度受信しない場合、その CH は外縁 CH となり、RREP (RouteREply) をシンクまで返送する。各 CH は、自身の保持する parentID ノードに RREP を返送していくことにより、sink から外縁 CH までの経路が構築される。

2.2 PARC の問題点

PARC では、シンクに向けてマルチホップでデータを送信するため、シンク付近の CH は、他の CH よりもデータパケットの中継回数が多くなる。そのため、シンク付近の CH はホットスポット問題によりバッテリーが早期に枯渇し、シンクへデータを送信できなくなってしまう。一方、外縁 CH は、親 CH に向けて集約したデータを送信するだけで、他の CH からのデータの中継を行わないため、シンク付近の CH より消費電力が少ない。このノード間の消費電力の不均一は、ネットワーク寿命低減の原因となっている。

3 提案方式

本稿では、PARC におけるホットスポット問題を解決するため、PARC に移動シンク方式を導入する。提案方式における移動シンクは、ネットワーク領域の外周部を巡回する。ネットワーク領域の外周部において、停止地点を一定間隔に選択する。このとき、すべての停止地点における移動シンクの電波範囲がネットワークの外周部を覆い、かつ、電波範囲が被覆しないように、停止地点を決定する。これは、停止地点の電波範囲が被覆する区域内に存在するノードは、CH となる頻度が増え、バッテリーが早期に枯渇してしまい、ネットワークの寿命を劣化させる原因となるためである。停止地点を選択した後、各停止地点でのデータ収集ラウンド数を各停止地点での電波範囲内のノード数に応じて決定する。次節にデータ収集ラウンド数の決定手法を説明する。

3.1 各停止地点でのデータ収集ラウンド数の最適化

移動シンクがデータ収集を行う際、各停止地点のデータ収集ラウンド数は各停止地点の電波範囲内のノード数によって決定される。これは、各停止地点の周囲のノード数に大きな差が生じている環境で、すべての停止地点のデータ収集ラウンド数が同一の場合、ホットスポット問題が発生するためである。以下に、各停止地点での

データ収集ラウンド数を決定するアルゴリズムを記す。

- 1) 初期状態において、移動シンクは各停止地点を巡回し、各停止地点にて移動シンクとノード間で HELLO メッセージを交換し、各停止地点のノード数を求める。
- 2) 移動シンクは以下の式を使用し、すべての停止地点でのデータ収集ラウンド数を計算する。

$$ROUND \left(\frac{d_i}{\min_{k \in N} d_k} \right) \quad (1)$$

d_i : 停止地点のノード数

N : 停止地点数

4 性能評価

PARC と提案方式の性能を比較評価する。評価環境を以下に示す。

- 1) ノードの台数は 500 台。
- 2) ネットワーク領域は $100m^2$ とし、ノード配置は格子状配置とランダム配置の 2 通り。
- 3) RREQ の情報量を 1000bit、スレーブ制御パケットの情報量を 500bit とする。ノードの 1 回の収集データ量を 12bit とする。
- 4) 出力大の通信範囲は 22.36m とし、出力小の通信範囲を 11.18m とする。
- 5) 1 ラウンド毎のデータ収集回数を、事前のシミュレーション実験の結果を考慮して 100 とする。
- 6) シミュレーション終了条件は、データ到達率が 0 になった時点とする。

4.1 格子状配置での評価

格子状配置における提案方式では、各停止地点の電波範囲内のノード数に差がほとんどないため、すべての停止地点の最適な収集回数は 1 となった。

図 2 に、格子状配置でのデータ到達率を示す。PARC では、データ収集回数が 46,000 を過ぎてから急激にデータ到達率が低下した。これは、固定シンクの周囲でホットスポット問題が発生したためである。そのため、シンクの周囲のノードのバッテリーは枯渇し、シンクはデータ収集が不可能となった。一方、提案方式によるデータ到達率 100% 期間は約 165,000 まで続き、提案方式は PARC に比べネットワーク寿命が約 4 倍に延びている。これは、移動シンクを導入することによりホットスポット問題を軽減したためである。

4.2 ランダム配置での評価

ランダム配置における提案方式では、各停止地点の電波範囲内のノード数によって、各停止地点のデータ収集ラウンド数が変化している。また、今回データ収集ラウンド数の最適化を行った場合と、最適化を行わなかった場合の両方の性能も評価した。最適化を行わなかった場合では、すべての停止地点でのデータ収集ラウンド数は 1 とする。

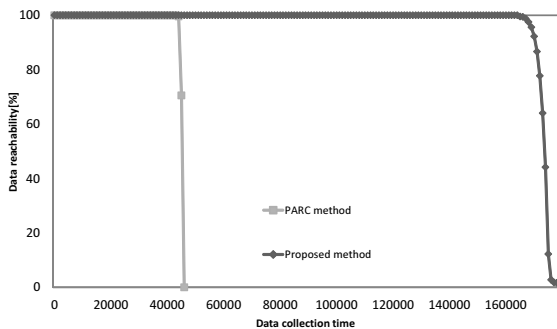


図2 データ到達率 (配置:格子状)

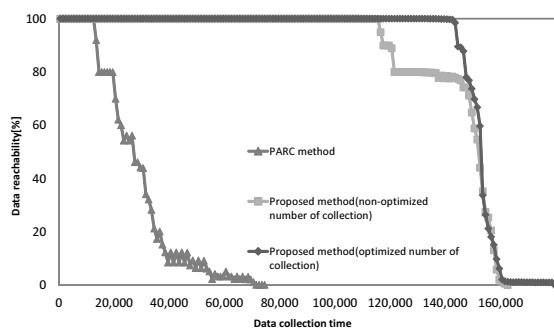


図3 データ到達率 (配置:ランダム)

図3に、ランダム配置におけるデータ到達率を示す。PARCでは、データ収集回数が13,000以降データ到達率が低下しており、ランダム配置でのPARCにおけるデータ到達率は、格子状配置でのPARCにおけるデータ到達率よりも劣化している。これは、ランダム配置時の固定シンクの周囲のノードの数は、格子状配置における固定シンクの周囲のノードよりも少ない。これにより、ランダム配置時におけるデータ到達率の劣化が格子状配置におけるデータ到達率よりも早くなった。最適化を行わなかった場合の提案方式では、データ到達率100%維持期間がデータ収集回数約109,000まで継続した。これは、移動シンク方式によりホットスポット問題が軽減されたためである。しかし、データ収集回数110,000周辺でデータ到達率が徐々に低下している。これは、データ収集ラウンド数が、各停止地点における電波範囲内のノードの数に応じて最適化されていないためである。最適化を行った場合の提案方式では、データ収集回数133,000までデータ到達率100%維持期間が継続され、すべての方式の中で最長のネットワーク寿命となっている。これは、各停止地点のデータ収集ラウンド数の最適化によって停止地点の周囲のノード間の負荷が分散したためである。

5 システムの開発状況

医療情報を収集するシステムとして、心拍情報をセルラーネットワークを通じて収集するシステムを開発した。心拍情報を検知する機器としてユニオンツール株式会社の心拍センサ WHS-2 [4] を利用した。また、ホームゲー

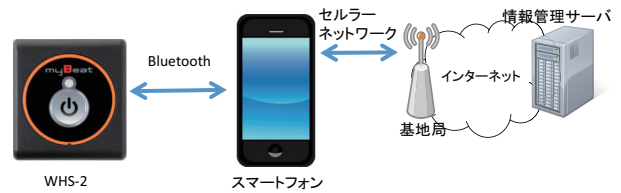


図4 心拍情報収集システム

トウェイとしてスマートフォンを利用した。WHS-2は、小型の心拍センサであり、Bluetooth通信に対応している。スマートフォンの画面に心拍、体表温を表示可能である。開発したシステムを図4に示す。WHS-2とスマートフォン間はBluetoothで通信を行う。スマートフォンはセルラーネットワークを利用して、情報管理サーバへ心拍情報を送信する。現段階では、情報管理サーバで心拍情報を保存するのみであり、保存された情報を表示するシステムは今後の課題である。

6 むすび

PARCにおけるホットスポット問題を解決するために、PARC手法に移動シンク方式を導入する方式を提案した。提案方式では、移動シンクがデータを収集するための停止地点を複数選択し、各停止地点の電波範囲内のノード数に応じてデータ収集ラウンド数の最適化を行うことで、ホットスポット問題を軽減し、ノード間の負荷を均一にした。シミュレーション結果により格子状、ランダムどちらにおいても提案手法の有効性を示した。

また、小型の心拍センサとスマートフォンを用いて、心拍情報を収集するネットワークを開発した。今後は、マルチホップ無線ネットワークで心拍情報を送信するネットワークの開発を行う。

参考文献

- [1] W. R. Heinzelman, A. P. Chandrakasan, H. Balakrishnan "An Application Specific Protocol Architecture for Wireless Microsensor Networks," IEEE Transactions on Wireless Communications, pp.660-670, 2002.
- [2] Taiju MIKOSHI, Shinichi MOMMA, and Toyofumi TAKENAKA,"PARC:Power Aware Routing and Clustering Scheme for Wireless Sensor Networks", IEICE Trans. Vol.E94-B, No.12, pp.3471-3479.
- [3] 渡辺拓実, 見越大樹, 竹中豊文, "移動シンクによるPARCを用いた無線センサネットワークの長寿命化," 電子情報通信学会論文誌 B, J98-B no. 5, pp. 442-447, 2015年5月
- [4] 心拍センサ WHS-2, <http://www.uniontool.co.jp/product/sensor/index.html>

高齢者の頭部構造を再現したシミュレーションモデルの構築

西本 哲也

日大工・機械

【はじめに】

近年高齢化に伴い高齢者による交通事故が増加している。警察庁交通局⁽¹⁾の報告では交通事故による死亡者の 52.7%を 65 歳以上の高齢者が占めており、高齢者の死亡率は例年増加傾向にある。また交通事故総合分析センター⁽²⁾の報告では交通事故死亡要因において頭部外傷が最も多く、全体の 46.6%を占めている。これまで日本人の若年者頭部形状を使用したシミュレーションモデルによる衝撃解析⁽³⁾は行われているが、若年者と高齢者の頭部構造の違いに着目した研究は行われておらず、その傷害発生メカニズムの差異はいまだ明らかになっていない。

本研究では頭部の回転衝撃解析を目的とした有限要素モデルの構築を行った。まず若年男性の頭部 CT 画像を用いて衝撃解析のための若年者頭部モデルを構築し、それを基に修正を行い 58.6 歳の変化した頭部構造を再現することで高齢者頭部モデルの構築を行った⁽⁴⁾。本稿ではさらに高齢となった場合として、79.5 歳の脳萎縮率を再現した高齢者モデルの構築を行い 20 代の若年者モデルとの比較を行った。

1. 若年者頭部モデルの構築

【ボクセルモデル】

モデル構築には画像を積層するボクセル法を用いた。ボクセル法は断層画像のピクセルに厚みを持たせ 3 次元のボクセルへと変換することで、モデルを構築する。ボクセル法は個体差のある身体形状など、CAD 設計図のない複雑な形状のものでも再現が可能であるという利点がある。

【画像条件】

ボクセル法によるモデル構築は断層画像が必要となるため、本研究では渡邊ら⁽³⁾の研究におい

て用いられた若年者頭部 CT 画像データを使用した。画像は 20 代男性の頭部を X 線 CT により水平方向に撮影したもので、解像度は 512×512pixel、撮影間隔は 0.6mm、撮影枚数は 433 枚の DICOM ファイル形式の CT 画像データである。

【頭部組織の分類】

モデルを構築する際、力学的特性の異なる頭部組織を区別する必要がある。今回は図 1 に示すように頭部を皮膚、脂肪、眼球、頭蓋骨、硬膜、大脳鎌、小脳テント、脳脊髄液、脳組織、脳室の 11 種類に分類を行った。

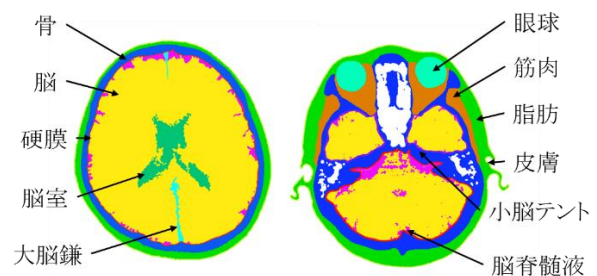


図 1 頭部組織分類

【画像処理】

CT 画像は皮膚や筋肉など頭蓋外部の組織は鮮明に写るが、頭蓋内部の脳組織は判別し難いという特徴がある。本研究では CT 画像のみを用いて頭部組織を判別するため画像の明暗であるグレースケールの補正を行った。図 2 に画像処理の工程を示す。頭蓋外部の組織は画像のグレースケールを広域化し、頭蓋内部の組織はグレースケールを狭域化することで組織の判別を可能とした。補正を行った画像において画像処理ソフトにより鮮明化された組織の着色を行った。同一組織を単色で着色することでモデル化を行う際に組織の区別とともに適した材料特性値を設定することが可能となる。着色を行った画像を合成すること

でモデル構築に用いる画像の作成を行った。

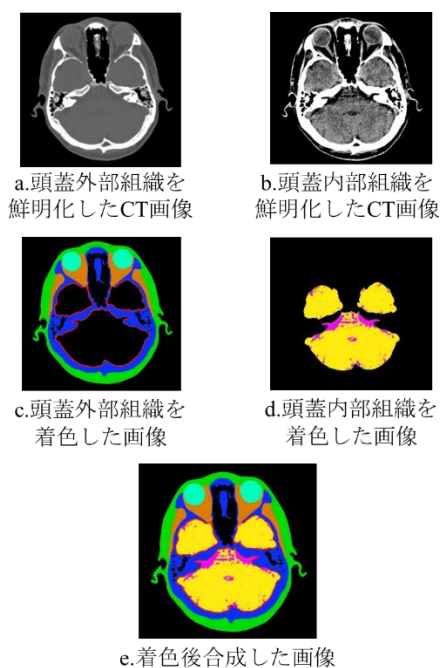


図2 画像処理工程

2.高齢者頭部モデルの構築

【高齢者頭部特性】

高齢者の頭部特性として加齢による脳の萎縮を用いた。ヒトの脳は誕生と共に著しい成長を遂げ20歳代で形態的に完成形となり、30歳から70歳代までわずかずつ体積減少を示し、80歳を過ぎると急激に体積減少を示すことが確認されている⁵⁾。図3の頭部矢状断面の模式図に示すように高齢者の頭部は加齢と共に脳の萎縮が進行し、脳脊髄液で満たされた硬膜下腔と脳室が拡大することが確認されている。頭蓋内部には脳と硬膜とを結ぶ架橋静脈が通っており、頭部衝撃時にこの静脈が破綻することで急性硬膜下血腫を発症する。出血が硬膜下腔に溜まり血腫となり、脳を圧迫することで死に至る危険性がある。加齢により脳が萎縮し可動域が拡大することで静脈にかかる負荷が増大し、重度の急性硬膜下血腫を形成する危険性が高まるとされている⁶⁾。このことから高齢者の加齢による頭部構造の変化が頭部傷害の程度に及ぼす影響を明らかにする必要がある。

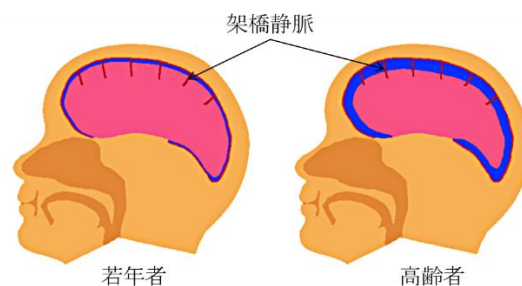


図3 脳萎縮を表した頭部矢状断面の模式図

【脳萎縮指標】

高齢者頭部モデルは若年者頭部モデルの組織形状を変化させることで構築する。脳萎縮を表す指標として脳萎縮指数 BAI (Brain Atrophy Index) と脳室面積指数 VAI (Ventricular Area Index) ⁷⁾を用いた。BAI は頭蓋内面積に対する頭蓋内腔面積を表し、脳萎縮が進行することで増加する。VAI は脳組織面積に対する脳室面積を表し、脳室拡大が進行することで増加する。これらは頭部水平断面画像における硬膜下腔、脳室、脳組織の3つの組織の面積を式(1)、(2)で計算することにより得ることができる。図4に側脳室体部の高さの水平断面画像と算出に用いる組織を示す。

$$BAI = \frac{B}{B + V + S} \quad (1)$$

$$VAI = \frac{V}{B + V} \quad (2)$$

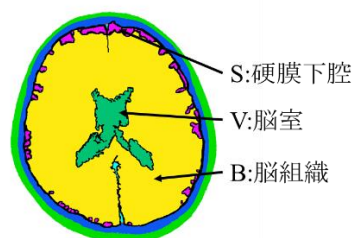


図4 脳萎縮率算出に用いる組織

【脳萎縮率の算出】

若年者モデルの構築が像から各組織の面積を測定し、式(1)、(2)から BAI, VAI を計算した。計算によって得た若年者の BAI, VAI と、恒屋ら⁷⁾の文献より用いた平均年齢 79.5 歳の BAI, VAI を表1に示す。BAI は大きいほど脳萎縮の進行を表

し、VAIは大きいほど脳室拡大の進行を表す。それぞれの値を比較するとBAIは若年者が9.4%、高齢者が14.3%であり、若年者に比べ高齢者の値が増加しており脳萎縮が進行していることがわかる。VAIは若年者が7.0%、高齢者が12.7%であり、同様に若年者に比べ高齢者の値が増加しており、脳室の拡大も進行していることがわかる。

表1 脳萎縮率

| | 若年者頭部 | 高齢者頭部 |
|--------|-------|-------|
| 年齢 | 20歳代 | 79.5歳 |
| BAI(%) | 9.4 | 14.3 |
| VAI(%) | 7.0 | 12.7 |

【画像処理】

高齢者の脳萎縮率から、式(1)、(2)を用いて逆計算することにより、脳萎縮が進行している組織の面積を求めた。次に若年者モデルの断面画像において、画像処理により硬膜下腔と脳室を拡大し脳組織を縮小することで図5のように高齢者のBAI、VAIの再現を行った。高齢者は脳室が拡大することで脳が内部から大きく萎縮していることが見て取れる。また硬膜下腔は脳室ほどに大きな変化は表れていないが、脳の外縁部がわずかに萎縮することにより硬膜と密接していた脳組織に間に硬膜下腔が生じた。これにより頭蓋内部での脳の可動性が高まったと考えられる。

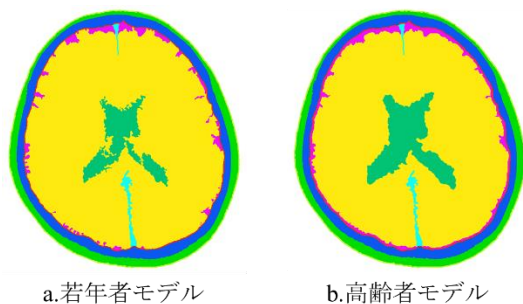


図5 脳萎縮率を再現した頭部水平断面画像

【結論】

本稿では高齢者と若年者の頭部傷害発生の差異を明らかにするための衝撃解析を目的とした頭部モデルの構築について述べた。本モデルでは若年者の頭部の外部形状を保ったまま脳組織の形状のみを変化させているため、頭部衝撃時における脳萎縮の影響を比較することが可能である。脳萎縮と脳室拡大を再現したことで脳の可動性が増大し、急性硬膜下血腫が生じる可能性が高い頭部構造を再現できたと考えられる。現在のモデルは頭蓋内部の脳組織の形状のみを変化させているが、加齢による材料物性値の変化も検討する必要がある。今後は頭部に回転衝撃を与えるシミュレーション解析を行うことで頭部衝撃時における若年者と高齢者の頭蓋内応力の比較を行う。

参考文献

- (1) 警察庁交通局, 平成25年中の交通事故死者数について
- (2) 交通事故総合分析センター, 交通統計
- (3) 渡邊大他, ボクセル法による衝撃解析用人体頭部有限要素モデルの開発と局所性脳損傷の評価シミュレーション, 日本機械学会論文集(A編), Vol.74, No.740, pp.137-146, (2008)
- (4) 鈴木光他, 交通事故傷害解析のための高齢者頭部モデルの構築, 自動車技術会関東支部2014年度学術研究講演会前刷集, D3-5, (2015)
- (5) 大極進他, 加齢に伴う終脳外套の体積の変化, 昭和医学会誌, Vol.57, No.2, pp125-131, (1985)
- (6) 刈部博他, 高齢者頭部外傷の特徴と問題点, 脳神経外科ジャーナル, Vol.3, No.12, pp.965-972, (2014)
- (7) 恒屋昌一他, 高齢者の頭部CTの二次元計測による脳の加齢変化と直立時重心動揺, 埼玉学療法会誌, Vol.4, pp14-19, (1996)