

平成22年 5月20日現在

研究種目：若手研究 (B)

研究期間：2007～2009

課題番号：19700519

研究課題名 (和文) シミュレーションと実験とを併用したヒト骨格筋内の局所応力ならびに局所変形の解明

研究課題名 (英文) Determination of local stress and deformation in human skeletal muscles using a combined approach of in vivo experiments with computer simulation.

研究代表者

小田 俊明 (ODA TOSHIAKI)

兵庫教育大学・大学院学校教育研究科・准教授

研究者番号：10435638

研究成果の概要 (和文)：Spin tagging MRI, Phase contrast MRI, Diffusion tensor MRI 等を応用し筋組織の生体情報 (e.g. 局所変形, 筋線維走行) の新たな取得法を確立した。また、この新規手法で得られた実測値を入力と妥当性検証に用いることで、筋線維の3次元配置をもち、収縮ダイナミクスによる内力発揮と変形が生じる実形状骨格筋有限要素シミュレーションモデルを開発した。運動時の組織ひずみの不均一性、ひずみ集中の挙動、腱膜の機能的意義、腱組織の力学的特性と組織損傷の関係等が明らかとなった。

研究成果の概要 (英文)：Novel methods based on clinical MRI sequences (e.g. Spin tagging MRI, Phase contrast MRI and Diffusion tensor MRI) were established to investigate muscle information in detail such as local deformation and fiber arrangement. In addition, by usage of these experimental results as data of both input and model validation, a new finite element simulation model was successfully developed. This model has 3 dimensional fascicle arrangement and contractile dynamics of muscle fibers, and could compute deformation by internal force generated in muscle fibers during exercise. Non-uniformity of tissue strain, strain concentration, significance of aponeurosis, relation between mechanical properties of tendon and damage of tissues etc. were investigated.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	1,400,000	0	1,400,000
2008年度	800,000	240,000	1,040,000
2009年度	700,000	210,000	910,000
年度			
年度			
総計	2,900,000	450,000	3,350,000

研究分野：総合・新領域系 (総合領域)

科研費の分科・細目：健康・スポーツ科学・1401

キーワード：有限要素法，シミュレーション，筋腱複合体，力学的特性，ひずみ，応力

## 1. 研究開始当初の背景

(1) 骨格筋の形状と機能の変化を引き起こす引き金となる筋内の局所応力や局所変形を定量し，運動やトレーニングによって生じた組織への力学的負荷と，スポーツ障害との関係や，その後が生じる適応による筋形状や筋機能の変化との関連とを明らかにすることは，様々なトレーニング方法を検討する上での非常に重要な知見になり得ると考えられる。しかしながら，これまでの方法では，これらを実験的に計測することが不可能に近かった。

(2) 申請者は既に腱組織の有限要素モデルを作成し，腱内の局所変形・局所応力の知見を得ることに成功している。現在の成果を発展させ有限要素法を用いた筋腱複合体のコンピュータモデルを作成し，これまでに蓄積してきた実験技術・データと併用することで，先述の様に従来の方法論では獲得できなかった革新的な知見を得ることが可能になると考えられた。

## 2. 研究の目的

本研究は，マルチスケール，マルチフィジックスでヒト骨格筋（筋腱複合体）コンピュータモデルを作成し，実験的には検証することが困難である「骨格筋における適応による形状ならびに機能の変化に関するメカニズム」を明らかにすることを念頭においている。この目的を達成する過程として，本研究課題の申請期間内においては，有限要素法を用いたコンピュータシミュレーションと *in vivo* 実験とを併用することにより，実験的に計測することが困難であるヒト骨格筋の運動やトレーニング時の局所応力や局所変形の状

況を明らかにし，これらのスポーツ障害との関連性，ならびに，その後が生じる適応による筋形状や筋機能の変化との関連を検討することをを行った。

## 3. 研究の方法

研究には *in vivo* 実験ならびに有限要素シミュレーションを用いた。それぞれに用いた方法の具体について以下に述べる。

### (1) *in vivo* 実験

・MRI，超音波 B モード法を用いた安静時筋腱複合体形状情報の取得：シミュレーションモデルの作成のため，MRI により筋ならびに腱組織の形状を計測した。また，筋線維の筋内における 3 次元配置をモデル化するために超音波 B モード法，ならびに **Diffusion tensor MR** を用いた計測を行った。

・シミュレーションモデルの妥当性検討のための収縮時筋腱複合体形状情報の取得：収縮時の変形を用いて，モデルの妥当性検討をするため，**Spin tagging MR** ならびに **Phase contrast MR** を用いた局所変形の計測を行った。また，筋線維（筋束）長と発揮筋力との時系列変化を計測した。

### (2) 有限要素シミュレーション

・筋腱複合体有限要素シミュレーションモデルの開発：開発の初期には，形状モデルにはボクセルモデル，材料モデルには線形材料モデルを用いたシミュレーションモデルを作成し，運動時における組織の力学的状態における解析を行った。次の段階としては，個人の筋や腱の形状を高精細に表現可能な 6 面体ならびに 4 面体のメッシュモデルを使用して形状を現すことを可能とした。腱組織と筋組織の受動組織は超弾性体である

Mooney-Rivlin 体を用い、筋線維の収縮ダイナミクスならびに長さ変化を伴う内力発生には Hill タイプの筋モデルを用いた。

・モデルの検証とシミュレーション： In vivo 実験で得たデータを用い、モデルの妥当性検証を行い、運動時の筋腱複合体に生じる応力やひずみの力学解析を行い、それらの結果とスポーツ障害との関連性、ならびに、その後生じる適応による筋形状や筋機能の変化との関連を検討した。

#### 4. 研究成果

##### (1) in vivo 実験の成果

過去発表されている筋腱複合体のシミュレーション (Yucesoy et al. 2003; Blenker et al. 2005 等) では、動物や屍体から得た計測値を解析に用いている。しかし、これらの物性や形状特性は、ヒトの in vivo 組織とは大きく異なることが指摘されている (Martin et al. 2001; Ward and Lieber 2005)。そこで、我々は、シミュレーションの入力パラメータと妥当性検証に不可欠な生きた人体筋の生理・力学情報を CT, MRI, 超音波エコーなどのイメージング装置を用いて直接取得し、これらを使用したモデルを作成することをモデル開発のオリジナリティとした。他臓器で報告されてきた手法やシーケンスの開発・改良によりデータを得た。安静時のみならず、収縮時のデータを取得していることが本計測の特に注目すべき点である。

具体的には、まずシミュレーションに必要な計算モデルを作成するための実験が実施された。3次元形状のメッシュモデルを作成するために不可欠である筋腱複合体の3次元全体形状を、MRI を用いた T1 強調連続画像から得た。また、これまでに詳細な報告がほとんどない人体筋の筋線維の筋内配置を計測

するために Diffusion MR ならびにその画像を用いた fiber tracking の実験・解析法を確立した (学会発表⑥)。

次に、シミュレーション結果の妥当性を検討するための計測データとして、運動時や収縮時の筋線維 (筋束) の挙動について超音波 B モードを用いた実験的な計測が行われた。それらの実験の一部は雑誌論文③, ⑤として公表されている。これらでは、実験的な知見として各種運動条件において筋線維と腱組織の長さの経時変化を計測した。そして、筋線維と腱組織の筋腱相互作用、ならびに協働筋同士の間相互作用が筋の発揮する張力の時系列に大きな影響をもっていることが示唆された。

また、収縮時における局所的な変形挙動の計測については、Tagging MR (雑誌論文⑥, ⑦, ⑧, 学会発表⑨, ⑬), ならびに Phase contrast MR (学会発表①, ⑦, ⑧) を用いた。多臓器で用いられる手法を筋腱複合体用にチューニングしデータ取得を行った。この計測により、実験的な知見としては生体内の主ひずみ分布ならびに、筋線維の垂直ひずみ、せん断ひずみを推定でき、筋内のひずみ分布が非常に不均一であり、運動の種類によってひずみ分布が大きく変化することが示唆された。具体的な成果としては、収縮時には、腓腹筋の遠位部の最大主ひずみが近位より有意に大きく、ひらめ筋内では差がないこと (雑誌論文②, ⑥), ならびに、腓腹筋の筋束中央の変形は小さく、その両端における変形が大きいため、つまり、同一筋束においても変形の不均一性が存在すること (学会発表⑦, ⑧) の報告が公表された。

これらの結果は、上記の様に、単にシミュレーションモデル用の計測値として取得されただけではなく、新たな計測手法を用いることで初めて取得することが可能となった応

用生理学の新規知見を数多く含んでいたことは特筆すべき事項である。

## (2) 有限要素シミュレーション

初期においては、汎用の有限要素解析システムを用い、受動的な組織の変形に対する解析を主としたが、段階的に筋収縮による力発生の生理メカニズムを実装していくことで、筋線維の状態によって時々刻々と変化し得る収縮による筋張力の変化を考慮したシミュレーションを可能にした（学会発表②，④，⑤）。入力パラメータ，ならびに解析結果の妥当性検証には，可能な限り上記の *in vivo* 実験データを使用した。また，計算に必要な大変形を伴う粘弾性組織を扱うソルバ，生体軟部組織の物性値同定のための自作プログラム，曲面の多い生体組織を高品質にメッシング可能なメッシュ等，解析ツール群が共同研究者によって開発が進められ，解析に利用した。

力学・生理パラメータの取得状況やモデルの開発の段階に応じて，可能な解析事例を対象に力学シミュレーションを行なった。整形外科学，リハビリテーションでの応用として，運動時に生じる障害や外傷の発生と関連が高い局所ひずみ，ならびに応力の解析を行った。その結果，実験的に得ることの非常に困難である各種条件での運動時の3次元的な組織ひずみ分布傾向を知ることが可能となった。これらの解析により，明らかとなった知見の具体例としては，1) 筋において腱膜の存在により筋腱移行部におけるひずみと応力集中が大きく緩和されること（雑誌論文⑨，学会発表⑩），2) 腱組織の力学的特性の個人差や変化による，筋組織の局所ひずみ，組織損傷，全体の形状変化への影響を検討し，腱組織が柔らかいことで筋・腱組織への損傷が減少する程度を定量的に検討したもの（学

会発表⑫），3) 腱組織の力学的特性の変化により，運動時の弾性エネルギーの蓄積部位ならびに筋出力へ与える影響が大きく変化する様子をシミュレーションしたもの（学会発表⑩），などが挙げられる。これらの知見により，障害予防のための介入手段の示唆を得ることができており，今後，開発されたプログラム群を用いて，各種解析が行われる予定である。

## 5. 主な発表論文等

（研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線）

〔雑誌論文〕（計9件）

- ① 小田俊明，衣笠竜太，川上泰雄，片岡弘之，山村直人，Luis Alves, Cristian Teodosiu, Mayoran Rajendra, 山本晃生，横田秀夫，高木周，姫野龍太郎，骨格筋の有限要素シミュレーション，生体力学シミュレーション研究，査読無，2010，51-60
- ② 片岡弘之，小田俊明，横田秀夫，Mayoran Rajendra, 山本晃生，樋口敏郎，姫野龍太郎，硬軟組織のシミュレーションと応用に関する研究開発 臓器の力学的物性値の無侵襲計測，生体力学シミュレーション研究，査読無，2010，68-75
- ③ K Chino, N Mitsukawa, K Kobayashi, Y Miyoshi, T Oda, H Kanehisa, T Fukunaga, S Fukushima, Y Kawakami, The influence of fascicle behavior on the lack of velocity dependence in eccentric joint torque in humans: *in vivo* observation, J. Appl. Biomech, 査読有, Vol25, 2009, 111-118
- ④ M Rajendra, A Yamamoto, T Oda, H Kataoka, H Yokota, R Himeno, T Higuchi, Motion generation in MR environment using electrostatic film motor for motion triggered cine-MRI, IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 査読有, Vol13, 2008, 278-285
- ⑤ K Chino, T Oda, T Kurihara, T Nagayoshi, K Yoshikawa, H Kanehisa, T Fukunaga, S Fukushima, Y Kawakami, *In vivo* fascicle behavior of synergistic muscles in concentric and

eccentric plantar flexions in humans, *Journal of Electromyography and Kinesiology*, 査読有, Vol18, 2008, 79-88

- ⑥ 小田俊明, 片岡弘之, 横田秀夫, 姫野龍太郎, 収縮に伴う骨格筋局所変形の定量, 日本ロボット学会講演論文集, 査読有, 2008 電子媒体
- ⑦ 小田俊明, 筋組織局所変形の可視化, *トレーニング科学*, 査読有, Vol20, 2008, 97-102
- ⑧ T Oda, R Kinugasa, R Himeno, H Kataoka, Hi Kanehisa, T Fukunaga, Y Kawakami, Strain distribution within human triceps surae muscles during isometric contraction: in vivo study by Tagging MRI, *The FASEB Journal*, 査読有, Vol 22, 2007, 753
- ⑨ 小田俊明, 姫野龍太郎, 金久博昭, 加藤えみか, 福永哲夫, 川上泰雄, 受動伸長時における下腿三頭筋の局所ひずみの大きさ・分布に腱膜が与える影響, *東京体育学研究*, 査読有, 2007, 19-27

[学会発表] (計16件)

- ① L Alves, N Yamamura, T Oda, C Teodosiu, Numerical simulation of musculo-skeletal systems by V-biomech, *Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering*, 2010年2月25日, Valencia (スペイン)
- ② 小田俊明, 運動時に筋腱組織に生じる局所変形 - 外傷, ならびに力発揮との関係に着目して -, 運動と健康に関する研究会 2010, 2010年1月25日, 神戸大学
- ③ 山村直人, Luis Alves, 小田俊明, Cristian Teodosi, 筋収縮を考慮したヒト骨格筋の有限要素シミュレーション, *バイオエンジニアリング講演会*, 2010年1月9日, 岡山理科大学
- ④ 小田俊明, 下腿三頭筋における筋束の配向と伸張性収縮時の変形挙動との関係, *日本トレーニング科学会*, 2009年12月6日, 名古屋大学
- ⑤ N Yamamura L Alves, T Oda, C Teodosiu, Development of the Finite Element Simulator for Mechanical Analysis of Human Skeletal Muscle, *Workshop on multi-scale muscle mechanics*, 2009年9月19日, Woods Hole (アメリカ)
- ⑥ R A Waggoner, T Oda, R Kinugasa, K Ueno, K Cheng, H Yokota, R Himeno, DTI based Muscle Fiber Tractography in Humans at 4 Tesla using Stimulated-Echos, *ISMRM*, 2009年4

月27日, Honolulu(アメリカ)

- ⑦ T Oda, R Kinugasa, R Himeno, Y Kawakami, Velocity fields of in vivo human skeletal muscle tissues during dynamic joint actions, *Workshop on multi-scale muscle mechanics*, 2009年9月19日, Woods Hole (アメリカ)
- ⑧ T Oda, R Kinugasa, J Yamauchi, S Iwanuma, R Himeno, Y Kawakami, Local behaviors of fascicles in human skeletal muscles in vivo during dynamic movements, *International Society of Biomechanics*, 2009年7月9日, Cape Town (南アフリカ)
- ⑨ 小田俊明, 片岡弘之, 横田秀夫, 姫野龍太郎, 収縮に伴う骨格筋局所変形の定量, *日本ロボット学会*, 2008年9月9日, 関西大学
- ⑩ 小田俊明, 姫野龍太郎, 栗原俊之, 金久博昭, 福永哲夫, 川上泰雄, 腱と腱膜における弾性エネルギー利用の貢献度は筋発揮張力により変化する, *日本バイオメカニクス学会*, 2008年8月26日, 仙台大学
- ⑪ T Oda, R Himeno, K Chino, Y Kawakami, H Yokota, R Himeno, The significant effect of aponeurosis on tissue strain among triceps surae muscles during eccentric contraction, *European College of Sports Sciences*, 2008年7月10日, Estril (ポルトガル)
- ⑫ T Oda, E Kato, K Chino, R Himeno, H Kanehisa, Y Kawakami, Effect of tendon mechanical properties on strain of triceps surae muscle-tendon unit under eccentric contraction, *American College of Sports Medicine*, 2008年5月29日, Indiana polis (アメリカ)
- ⑬ T Oda, R Kinugasa, R Himeno, H Kataoka, H Kanehisa, T Fukunaga, Y Kawakami, Strain distribution within human triceps surae muscles during isometric contraction: in vivo study by tagging MRI, *2008 Experimental Biology*, 2008年4月6日, San Diego (アメリカ)
- ⑭ 小田俊明, 金久博昭, 川上泰雄, 姫野龍太郎, エキセントリック収縮時に下腿三頭筋に生じる応力・ひずみの大きさとその分布: シミュレーション研究, *トレーニング科学会*, 2007年11月18日, 東京大学
- ⑮ 小田俊明, 川上泰雄, 片岡弘之, 横田秀夫, 姫野龍太郎, ジャンプ時におけるアキレス腱組織のひずみと応力の推定, ス

ポーツ工学会 ジョイントシンポジウム, 2007年11月15日, 筑波大学

- ⑩ 小田俊明, 姫野龍太郎, 金久博昭, 加藤えみか, 福永哲夫, 川上泰雄, 受動伸長時における下腿三頭筋の局所ひずみの大きさ・分布に腱膜が与える影響, 東京体育学会, 2007年3月1日, 東京大学, 学会賞受賞

6. 研究組織

(1) 研究代表者

小田 俊明 (ODA TOSHIAKI)  
兵庫教育大学・大学院学校教育研究科・准教授

研究者番号：10435638

(2) 研究分担者

なし ( )

研究者番号：

(3) 連携研究者

なし ( )

研究者番号：