

氏名	木村哲也
学位(専攻分野)	博士(人間・環境学)
学位記番号	人博第353号
学位授与の日付	平成19年3月23日
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当
研究科・専攻	人間・環境学研究科共生人間学専攻
学位論文題目	SURFACE MECHANOMYOGRAM FOR APPLIED PHYSIOLOGY (筋音図に関する応用生理学的研究)
論文調査委員	(主査) 教授 森谷敏夫 教授 小田伸午 助教授 林 達也

論文内容の要旨

筋音図は筋収縮の機械的側面を反映する斬新な手法である。また、その信号特性や測定方法から見ても臨床上、有用な手法となることが期待される。そこで本研究は、筋音図の臨床意義の確立を目的とした。

まず、筋音図の振幅値や周波数成分が筋の機械的特性(収縮特性)を反映するか否かを、実験的に惹起させた筋温度の低下条件で詳細に検討した。被験者は男子学生8名で、筋音図の測定にはマイクロフォンセンサーを用い、内側腓腹筋、ヒラメ筋の筋腹上にそれぞれ固定した。筋の内部温度を変化させた際(常温、25°C、20°C、15°C)に後頸骨神経の単収縮刺激と連続刺激(10Hz、8秒間)を超最大強度で行い、筋音図と同時に発揮張力と誘発筋電図(M波)を記録した。その結果、筋の内部温度がより低い状態ではM波の振幅は増大した一方で、筋の収縮特性の変化(最大発揮張力、最大収縮速度、最大弛緩速度の低下と収縮時間、弛緩時間の延長)によって、連続刺激中の張力曲線の振幅が減少した。筋音図においても連続刺激中における振幅が筋内部温度の低下に伴い張力曲線の振幅の減少にほぼ対応して減少した。また、筋音図の周波数成分は筋電気刺激周波数とほぼ同じだったことから、筋音図が筋活動電位のインパルス発射頻度を反映したものであると考えられた。これらの結果から、様々な環境において特に筋音図の振幅・周波数成分から筋の機械的特性(収縮特性)や運動単位の発火頻度を検知できることが実験的に示された。

次に、持続的筋収縮時における筋音図の変化について筋線維組成の異なる2つの筋(上腕二頭筋・ヒラメ筋)において検討を行った。被験者は男子学生8名で、等尺性随意収縮を実験対象とした。上腕屈曲、足底屈曲、各々の50%最大随意収縮力での張力維持中に上腕二頭筋、ヒラメ筋から筋音図及び表面筋電図を同時記録した。測定は各被験者の最大収縮持続時間まで行い、全持続時間における各信号の時間領域、周波数領域の変化を解析した。その結果、筋電図の振幅は各筋で連続的に増大し、上腕二頭筋での増大の傾きはヒラメ筋に比べ大きい値を示した。一方で、筋音図の振幅は上腕二頭筋において収縮開始直後増大し、その後連続的に減少した。しかしながら、ヒラメ筋では筋音図振幅の顕著な低下は認められなかった。このような測定筋による筋音図振幅値の変化の違いは運動単位の強縮特性の差異に起因すると考えられる。すなわち、持久性の低い運動単位が比較的多く含まれる上腕二頭筋では筋線維収縮・弛緩速度の低下が顕著に起こり、収縮活動にある筋線維の強縮を惹起したものと考えられる。さらに上腕二頭筋における各被験者の筋音図振幅減少の大きさは筋電図振幅の増大の大きさと相関を示した。これらの結果から、持続的な随意筋収縮において筋音図を用いた運動単位強縮特性の検知が可能であることが明らかになった。一方で、足底屈曲の発揮張力維持の限界点においてヒラメ筋で顕著な筋音図振幅低下が認められなかったことは、筋収縮持続の限界に対する中枢性因子の関与(運動ニューロン発火頻度増大による完全強縮の欠如)が考えられ、筋音図を用いた新たな生理学的知見の提示の可能性を示唆するものである。

さらに、運動療法における運動種目として最も良く利用される自転車エルゴメータに関して、筋音図測定応用の検討を行った。被験者は男子学生8名として、(1)運動負荷と筋音図の関係、(2)無酸素性作業閾値と筋音図の関係、(3)サドルの高さの変化による筋の機械効率の変化と筋音図の関係、に関して測定を実施した。各測定において、外側広筋及び大腿直筋から筋

音図を記録した。記録した筋音図はペダルからのトリガー信号を基にして10秒間ごとに加算平均した後、積分値を求めた。その結果、(1)各筋の筋音図積分値は運動負荷の増加に伴い直線的に増加すること、(2)筋音図積分値と運動負荷の関係は無酸素性作業閾値前後で大きく変化し、その変化は筋線維の収縮速度の低下に起因すること、(3)自転車サドルの高さによって筋音図積分値の大きさは変化し、その変化は筋のパワー出力の変化と関連があること、が明らかとなり、筋音図が自転車運動時においても筋の機械的な活動特性を検知する実践的手法となる可能性が示唆された。

以上、本研究の結果から、筋音図は静的筋収縮時及び動的筋収縮時における筋線維の機械的特性を検知する指標として、基礎筋生理学的研究や臨床応用で有用な手法であることが明らかとなった。

論文審査の結果の要旨

本学位申請論文は筋収縮の機械的側面を反映する斬新な手法である筋音図に関する基礎研究及び運動療法への応用を目指したものである。基礎筋生理学の分野では運動単位 (Motor Unit: MU) の活動を間接的に記録する筋電図が従来から広く利用されてきた。特に皮膚表面から記録できる表面筋電図は筋収縮特性や筋疲労の解析に用いられ、筋の電気的活動を記録したものである。一方、筋音図は筋線維が運動ニューロンからの電気的信号 (活動電位) により興奮収縮し、筋線維の機械的な側方拡大により生じる圧波を皮膚表面のマイクロフォンセンサーで記録したものである。先行研究により筋音図は運動ニューロンのインパルス発射頻度 (Rate Coding) や動員様式 (MU Recruitment) を反映することが明らかにされてきた。本学位申請論文は、これらの先行研究の結果を更に発展させるために、独創的な実験手法や解析方法を駆使し新たな知見を見出し、静的筋収縮のみならず動的筋収縮にも筋音図を応用したものである。

本学位申請論文は主に3つの研究課題から構成されている。第一の研究課題は、筋音図の振幅値や周波数成分が筋の機械的特性 (収縮特性) を反映するか否かを、実験的に惹起させた筋温度の低下条件で詳細に検討したものである。この研究では骨格筋を電気刺激 (後頭骨神経の単収縮刺激と連続刺激 (10Hz, 8秒間)) することにより再現性の非常に高い筋収縮を実験的に惹起させることに成功している。また、筋収縮速度を意図的に変化させるために筋を冷却して内部温度を常温、25°C, 20°C, 15°C に制御して実験を行っている。その結果、筋の内部温度の低下により惹起された筋の収縮特性の変化 (最大発揮張力, 最大収縮速度, 最大弛緩速度の低下と収縮時間, 弛緩時間の延長) によって、連続刺激中の張力曲線の振幅が減少した。筋音図においても連続刺激中における振幅が筋内部温度の低下に伴い、張力曲線の振幅の減少にほぼ対応して減少することを明らかにした。また、筋音図の周波数成分は筋電気刺激周波数とほぼ一致しており、筋音図が筋活動電位のインパルス発射頻度を反映したものであると考察している。これらの結果は、筋音図の振幅・周波数成分から筋の機械的特性 (収縮特性) や運動単位の発火頻度を検知できることを実験的に示したもので、独創性の高い内容であり、すでに国際電気生理運動学会の機関紙: *Journal of Electromyography and Kinesiology* に掲載済みである。

第二の研究課題は持続的筋収縮時における筋音図の変化について筋線維組成の異なる2つの筋 (上腕二頭筋・ヒラメ筋) において検討を行ったもので、筋疲労の解析、定量化への応用を試みたものである。等尺性随意収縮条件で各筋群の50%最大随意収縮力で同時記録した筋電図とともに比較検討し、全持続時間における各信号の時間領域、周波数領域の変化を解析した。その結果、筋電図の振幅は疲労し易い速筋線維を多く含む上腕二頭筋で有意に増大したが、大部分が遅筋線維で構成されるヒラメ筋では筋電図に大きな変化は認められなかった。一方で、筋音図の振幅は上腕二頭筋において収縮開始直後増大し、その後連続的に減少したが、ヒラメ筋では筋音図振幅の顕著な低下は認められなかった。速筋線維が比較的多く含まれる上腕二頭筋では、疲労に伴い筋線維収縮・弛緩速度の低下が顕著に起こり、収縮活動に参加している筋線維が強縮したものと考えられる。つまり、筋音図振幅値の変化の違いは運動単位の強縮特性の差異に起因する可能性を示唆するもので、詳細な筋音図解析により筋疲労時の筋の機械的特性が検知できることを示した。これらの知見はすでに国際学会で発表され高い評価を受けるとともに、*European Journal of Applied Physiology* に掲載されている。

第三の研究課題は筋音図の臨床への応用を目指したもので、臨床医学、予防医学分野の運動療法で最も利用される自転車エルゴメータを使用して3つの実験を行っている。最初の実験ではこれまでほとんど解析されなかった動的筋収縮時における運動負荷と筋音図の関係を検討したもので、自転車運動に参画する各筋の筋音図積分値は運動負荷の増加に伴い直線的に増加することを明らかにした。記録した筋音図をペダルからのトリガー信号を基にして加算平均する技法を駆使した点は申

請者のコンピュータ解析ソフトの開発能力の高さを示すものである。さらに、無酸素性作業閾値前後で筋音図が大きく変化し、その変化は筋線維の収縮速度の低下に起因することを明らかにした実験結果は学会でも大きな反響を呼んだもので今後の研究成果が大いに期待できる内容である。臨床応用を目指したサドル高の変化と筋の機械効率に関する実験では、自転車サドルの高さによって筋音図積分値の大きさは変化し、その変化は筋のパワー出力の変化と関連があることが明らかになった。つまり、静的筋収縮時と同様に筋音図が動的筋収縮が主体である自転車運動時においても筋のメカニカルな活動特性を検知する実践的手法となる可能性が示唆された。

以上のように、この博士学位申請論文は、筋収縮の機械的側面を反映する斬新な手法である筋音図に関する基礎研究及び臨床の運動療法への応用を目指したもので、その独創的な実験手技や解析方法は非常に高い評価が与えられる。博士学位申請論文は人間がどのような基本的な機能を持つかを解明し、人間が今までの文明の中で作り出した環境とどのように関わっていくかを究明する共生人間学専攻の目的にふさわしい内容を備えたものと言える。

よって本論文は、博士（人間・環境学）の学位論文として価値あるものと認める。また、平成19年1月9日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行った結果、合格と認めた。