

国際医療福祉大学審査学位論文(博士)

大学院医療福祉学研究科博士課程

呼吸筋疲労に対する
呼気筋トレーニング (EMT) の効果

平成 29 年度

保健医療学専攻・理学療法学分野・基礎理学療法学領域

学籍番号：15S3041 氏名：塚本 敏也

研究指導教員：丸山 仁司 教授

副研究指導教員：町田 和 講師

呼吸筋疲労に対する呼気筋トレーニング (EMT) の効果

塚本 敏也 著

要旨

【目的】呼吸筋疲労に対する呼気筋トレーニング(EMT)の効果を検証することである。

【方法】健康成人男性 31 名を対象とし、EMT 群 15 名とトレーニングを行わない対照群 16 名に無作為に振り分けた。EMT 群は 50%の負荷で 4 週間、週 7 日、1 日 2 回、1 回 15 分の EMT を実施した。EMT の介入前後に吸気負荷を行い、吸気負荷中と休息期に最大口腔内圧(PImax, PEmax)、呼吸筋の中央周波数(MDF)を表面筋電図で測定した。

【結果】EMT 群介入前は、PImax と PEmax が経時的に低下し、休息後に回復した。MDF は呼気筋と胸鎖乳突筋が低下した。EMT 群介入後は PEmax が有意に高値を示し、吸気負荷による PImax と PEmax 及び呼吸筋の MDF の低下を認めなかった。対照群では 4 週間前後に変化を認めなかった。

【結語】EMT は吸気筋と呼気筋の筋疲労耐性の向上に作用し、呼吸筋疲労の発生を抑制する効果がある。

キーワード：呼吸筋疲労，呼気筋トレーニング，最大口腔内圧，表面筋電図

Effects of Expiratory Muscle Training (EMT) on Respiratory Muscle Fatigue

Tsukamoto Toshiya

Abstract

[Purpose] This study is verify to the effects of expiratory muscle training (EMT) on respiratory muscle fatigue.

[Methods] We examined 31 healthy adult males, who were randomly divided into an EMT group (n=15) and a control group that did not engage in any training (n=16). The EMT group engaged in EMT training at 50% loading for 15 min/session, two sessions/day, and 7 days/week for 4 weeks. Inspiratory loading was performed before and after EMT intervention, and the maximum mouth pressure (P_Imax and P_Emax) and respiratory muscle median frequency (MDF) were evaluated using surface electromyography during inspiratory loading and while resting.

[Results] Before intervention in the EMT group, both P_Imax and P_Emax decreased over time and recovered after rest. MDF decreased in the expiratory and sternocleidomastoid muscles. After intervention in the EMT group, P_Emax values were significantly higher, and inspiratory loading did not cause any decline in P_Imax, P_Emax, or expiratory muscle MDF. No changes were observed before and after 4 weeks in the control group.

[Conclusions] EMT improves inspiratory and expiratory muscle fatigue resistance and prevents respiratory muscle fatigue.

Keywords: Respiratory muscle fatigue, Expiratory muscle training, Maximum mouth pressure, surface Electromyogram

目 次

第1章	はじめに	1
第1節	呼吸リハビリテーションと呼吸筋疲労	1
第2節	呼吸筋疲労について	1
第3節	呼吸筋について	3
第4節	呼吸筋疲労の評価	3
1-4-1	呼吸筋力について	3
1-4-2	筋電図(EMG)による評価	5
1-4-3	筋電図周波数解析による評価	5
第5節	本研究における筋疲労の定義	6
第6節	COPDにおける呼吸筋疲労と骨格筋の機能異常	7
第7節	呼吸筋トレーニング(VMT)の効果判定と呼吸筋疲労	7
第8節	呼気負荷における呼吸筋疲労特性について(著者の先行研究)	8
1-8-1	最大口腔内圧(PImax, PEmax)と呼吸筋毎の筋疲労について	8
1-8-2	H/L ratio と最大口腔内圧(PImax, PEmax)について(著者の先行研究)	8
1-8-3	まとめ	8
第9節	吸気負荷における呼吸筋疲労特性について	9
第10節	呼吸筋トレーニング(VMT)について	9
1-10-1	国際ガイドラインとエビデンス	9
1-10-2	呼吸筋トレーニング(VMT)の方法とプロトコール	9
1-10-3	呼吸筋疲労に対する呼気筋トレーニング(EMT)の必要性和新規性	10
第11節	研究の目的	10
第12節	研究の仮説	11
第2章	吸気抵抗負荷における呼吸筋疲労の分析	12
第1節	目的	12
第2節	対象および方法	12
2-2-1	対象	12
2-2-2	倫理上の配慮	12
2-2-3	方法	12
2-2-3-1	使用機器	12
2-2-3-2	測定項目と方法	14
2-2-3-3	測定手順	17
2-2-4	統計処理	18
第3節	結果	19
2-3-1	最大口腔内圧(PImax, PEmax)の経時的変化の比較	19
2-3-2	中央周波数(MDF)の経時的変化の比較	19

2-3-3	最大吸気口腔内圧(PImax)と最大呼気口腔内圧(PEmax)および Borg scale の 相関	19
2-3-4	H/L ratio の呼吸筋疲労開始時間の比較	20
2-3-5	呼吸機能検査	20
第4節	考察	29
2-4-1	最大吸気口腔内圧(PImax)における経時的変化と呼吸筋疲労	29
2-4-2	最大呼気口腔内圧(PEmax)における経時的変化と呼吸筋疲労	30
2-4-3	中央周波数(MDF)と H/L ratio の低下に関する機序	30
2-4-4	中央周波数(MDF)の経時的変化と最大吸気口腔内圧(PImax), 最大呼気口腔内圧 (PEmax)の経時的変化への影響	31
2-4-5	筋線維組成からみた呼吸筋毎の筋疲労への影響	31
2-4-6	最大吸気口腔内圧(PImax)と最大呼気口腔内圧(PEmax)および Borg scale との 関係性	32
2-4-7	H/L ratio からみた呼吸筋疲労と最大吸気口腔内圧(PImax), 最大呼気口腔内圧 (PEmax)の経時的変化について	32
2-4-8	まとめ	33
第3章	呼吸筋疲労に対する呼気筋トレーニング(EMT)の効果	34
第1節	目的	34
第2節	対象および方法	34
3-2-1	対象	34
3-2-2	倫理上の配慮	34
3-2-3	方法	34
3-2-3-1	対象者の振り分けと呼気筋トレーニング(EMT)プロトコール	34
3-2-3-2	使用機器	35
3-2-3-3	測定項目と方法	36
3-2-3-4	測定手順	36
3-2-4	統計処理	37
第3節	結果	38
3-3-1	呼気筋トレーニング(EMT)実施状況と正規性, 等分散性の検定および呼吸機能 検査	38
3-3-2	最大吸気口腔内圧(PImax), 最大呼気口腔内圧(PEmax)における介入前後の 比較	38
3-3-3	最大口腔内圧(PImax, PEmax)の経時的変化の比較	38
3-3-4	中央周波数(MDF)の経時的変化の比較	39
3-3-5	最大吸気口腔内圧(PImax)と最大呼気口腔内圧(PEmax)および Borg scale の 相関と Borg scale の介入前後の比較	39
3-3-6	H/L ratio の呼吸筋疲労開始時間の比較と介入前後の比較	39

第4節 考察	56
3-4-1 最大吸気口腔内圧(PImax)と最大呼気口腔内圧(PEmax)および呼吸機能検査の介入前後の比較	56
3-4-2 最大吸気口腔内圧(PImax)と最大呼気口腔内圧(PEmax)における介入前後の経時的変化の比較	57
3-4-3 中央周波数(MDF)における介入前後の経時的変化の比較	57
3-4-4 呼気筋トレーニング(EMT)による呼気筋強化が呼吸筋疲労に及ぼす影響	58
3-4-5 H/L ratio における呼吸筋疲労開始時間の比較と呼吸筋毎の介入前後における比較	59
3-4-6 中央周波数(MDF)と H/L ratio からみた呼吸筋疲労の比較	59
3-4-7 Borg scale と最大吸気口腔内圧(PImax)および最大呼気口腔内圧(PEmax)との関係性と Borg scale における介入前後の比較	60
3-4-8 まとめ	60
3-4-9 研究限界について	60
第4章 総括および今後の課題	61
第1節 総括および今後の課題	61
第2節 継続研究の展開について	62
第5章 謝辞	62
第6章 文献一覧	63

第1章 はじめに

1-1 呼吸リハビリテーションと呼吸筋疲労

呼吸リハビリテーションは、American Thoracic Society(以下、ATS)/European Respiratory Society(以下、ERS)ステートメントによると、慢性閉塞性肺疾患(chronic obstructive pulmonary disease ; 以下、COPD)の呼吸困難を軽減し、運動能力を高め、個人の生活の質 (Quality of Life ; 以下、QOL) を改善することが明らかとされており¹⁾、わが国の COPD ガイドラインにおいても呼吸リハビリテーションの重要性が指摘されている²⁾。呼吸リハビリテーションのプログラムには呼吸理学療法が含まれており、その具体的方法としてリラクゼーションや呼吸練習、呼吸筋トレーニング、胸郭可動域練習、運動療法、気道クリアランス法など、適応されるあらゆる手段を包括したものとして用いられている³⁾。

呼吸リハビリテーションの代表的な対象疾患である COPD では、とくに呼吸筋疲労が呼吸不全の原因となる場合が多く⁴⁾、呼吸筋疲労に伴う呼吸筋の収縮力低下が、呼吸器疾患における呼吸困難、運動制限に大きく関わっていることがいわれている⁵⁾。しかし、臨床では呼吸筋疲労の重要性はあまり認識されておらず⁶⁾、呼吸筋疲労を評価することは殆ど行われていないのが現状であり⁵⁾、呼吸補助筋を含めた呼吸筋疲労特性については明らかにされていない。また呼吸筋疲労の治療法として、呼吸理学療法では呼吸筋トレーニング(Ventilatory Muscle Training ; 以下、VMT)が行われているが^{5,7)}、呼吸筋疲労に対する効果については不明な点が多い。そこで、本研究では呼吸筋疲労特性を明らかにし、呼吸筋疲労に対する呼吸筋トレーニング(VMT)の効果について着目し検証を行った。以下に、呼吸筋疲労、呼吸筋、呼吸筋疲労に対する評価、呼吸筋トレーニング(VMT)について先行研究を踏まえ述べていく。

1-2 呼吸筋疲労について

呼吸筋疲労は、1977年に Roussos と Macklem ら⁸⁾により、呼吸筋不全により換気障害が生じ、低酸素血症および高炭酸ガス血症が発生するという概念が提唱された。1984年には Grassino ら⁹⁾により、呼吸筋不全とは「一定の肺胞換気量を維持するために必要とする圧変化を、呼吸器系に対し持続的に発生し得ない状況である」とし、1990年には、Respiratory Muscle Fatigue Workshop Group¹⁰⁾により、呼吸筋疲労とは「負荷に対する仕事により筋の収縮力あるいは収縮速度が低下した状態であり、筋を休息させることで回復するもの」と定義され、呼吸筋疲労の発生は呼吸不全の主要病因の一つとされるようになった¹¹⁾。呼吸筋疲労を引き起こす負荷については、外部抵抗による負荷圧が生じている呼吸が含まれており、このような機械的負荷が呼吸筋疲労の原因とされている¹⁰⁾。

呼吸不全はガス交換に関係する肺実質の機能不全である肺不全と換気に関係する呼吸筋不全に由来するポンプ不全に大別される(図1)¹²⁾。

呼吸不全の原因を調べた先行研究では、Gross ら¹³⁾による、50%の負荷圧による吸気抵抗負荷(以下、吸気負荷)が横隔膜の疲労を発生させ、表面筋電図による横隔膜の周波数が減少することを報告した。さらに Roussos ら¹⁴⁾は、吸気負荷により横隔膜と呼吸補助筋の筋疲労および呼吸困難感の発生が生じることを報告した。また Aubier ら¹⁵⁾は、吸気負荷により横隔膜疲労を発生させ、

この時の刺激周波数から高周波数成分の疲労回復時間は短く、低周波数成分の疲労回復時間は長いことを報告した。臨床研究では Cohen ら¹⁶⁾が、呼吸筋疲労を生じた患者は pH が減少し、高炭酸ガス血症が悪化することを報告している。この他、健常者においても 50%の負荷圧による吸気負荷で最大吸気口腔内圧(maximum inspiratory mouth pressure ; 以下, PImax)が経時的に低下し、負荷圧に耐えることができず、換気量が保てなくなる状態を呼吸筋疲労とポンプ不全とすることや(図 2)⁹⁾、呼気抵抗負荷(以下、呼気負荷)による呼気筋疲労と呼吸困難感が密接に関係していることが報告されている¹⁷⁾。

呼吸筋疲労が発生する負荷圧については、Macklem ら¹⁸⁾によると呼吸筋疲労が発生する上で重要な負荷圧として最大発生圧の 40%以上であることを報告し、臨界圧力を 50 から 70%に推定している。Suzuki ら¹⁷⁾は、25 から 32 歳の健常成人男性(非喫煙者)を対象に最大の 40%と 60%の負荷圧による呼吸筋疲労を検討し、40%の負荷圧では負荷中に変化を示さない対象者が存在すること、また 60%の負荷圧では著しい呼吸筋疲労が発生し、対象者の過半数以上がその負荷条件を終了することができなかったことを報告した。著者ら^{19,20)}の先行研究では、20 から 27 歳の健常成人男性(非喫煙者)を対象に最大の 50%の負荷圧による呼吸筋疲労を分析し、全対象者が負荷条件を終了し、吸気筋疲労と呼気筋疲労が発生したことを報告した。これら先行研究と臨界圧力より、健常者において呼吸筋疲労が発生する上で約 50%の負荷圧が必要であるとされている。

このように呼吸筋疲労は、吸気または呼気に負荷が課せられた結果、呼吸筋の収縮力が低下し、呼吸筋不全により適切な換気を維持できない状態であり、肺自体には異常がなくても、低酸素血症や高炭酸ガス血症を来し、呼吸不全の原因となることが考えられている。今回、呼吸筋不全により換気障害に影響を与え、呼吸不全の原因となる呼吸筋疲労に対する検証を検討した。

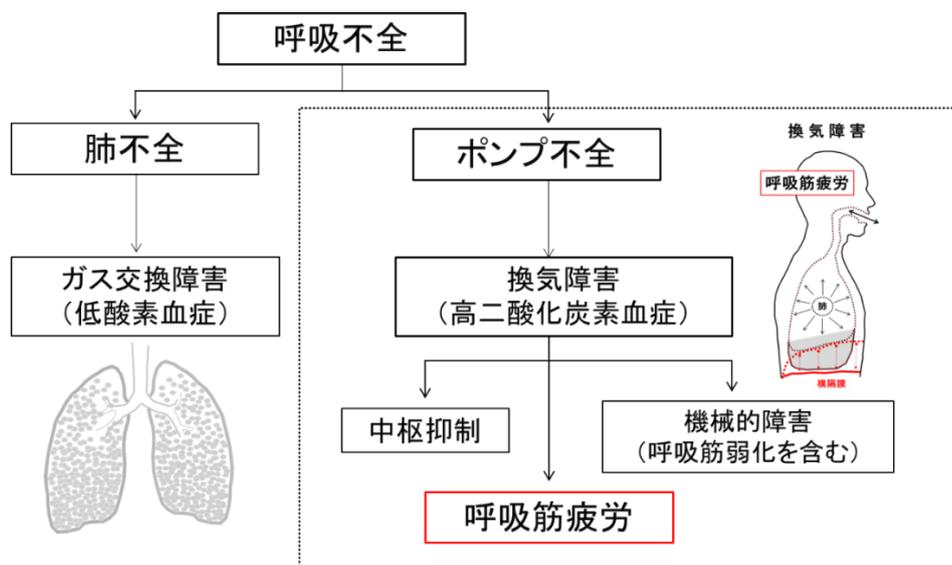


図 1 呼吸不全の分類 文献 12)より引用一部改変

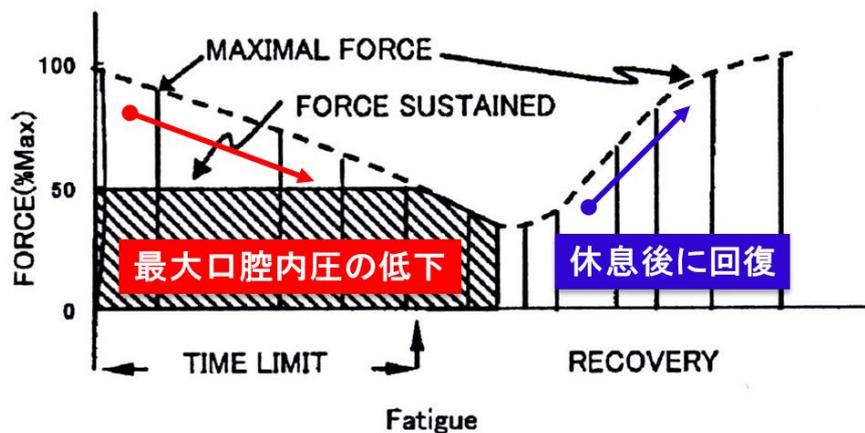


図2 呼吸筋疲労のシエーマ 文献9)より引用一部改変

1-3 呼吸筋について

換気は呼吸筋による呼吸運動によるもので、肺自体には運動能力がないため¹¹⁾、呼吸器系における呼吸筋は、循環器系における心筋と同様に、呼吸筋はポンプ機能として極めて重要な働きをもつ²¹⁾。呼吸筋は、吸気筋と呼気筋に分かれ²²⁾、主要な吸気筋としての横隔膜の他に、努力呼吸にのみ動員される筋を呼吸補助筋という²³⁾。吸気補助筋として斜角筋、胸鎖乳突筋、僧帽筋、大胸筋および小胸筋などが挙げられる²¹⁾。呼気筋は腹壁の筋群が主働的で²⁴⁾、腹直筋、外腹斜筋、内腹斜筋、腹横筋が挙げられ呼吸運動に関与している²⁵⁾。このように呼吸運動に係る横隔膜、頸部や胸部の呼吸補助筋、呼気筋である腹筋群を総称して呼吸筋とされている²⁶⁾。呼吸筋も骨格筋の一種であり²⁷⁾、呼吸筋の仕事量の増加とそれに対するエネルギーの供給の不均等で筋疲労が発生することがいわれている²⁸⁾。

1-4 呼吸筋疲労の評価

1-4-1 呼吸筋力について

呼吸筋疲労の評価には、筋の収縮力を測定する方法と筋電図(ElectroMyoGram ; 以下、EMG)をとる方法がある²⁸⁾。呼吸筋の収縮力を測定する方法すなわち呼吸筋力の測定法は、対象者に最大吸気努力あるいは最大呼気努力をさせたときの筋力を測定する方法と神経を電気刺激して筋の収縮力を測定する方法がある²⁹⁾。前者には、侵襲的な方法として最大径横隔膜圧(maximal transdiaphragmatic pressure ; 以下、Pdimax)の計測と、非侵襲的な方法として最大吸気口腔内圧(PImax)、最大呼気口腔内圧(maximum expiratory mouth pressure ; 以下、PEmax)を計測する方法がある。Pdimax は、食道バルーンを留置したときに得られる食道内圧と同様の手技で胃にバルーンを留置し得られる胃内圧、さらにこの2つの差をとった径横隔膜圧で評価する³⁰⁾。PImax とPEmax は、呼吸筋力計に装着したマウスピースをくわえて、吸気筋あるいは呼気筋全体の最大収縮力を測定する^{28,29)}(図3)。呼吸筋疲労を評価するためには、最大口腔内圧(PImax, PEmax)といった被験者のコントロール値から経時的变化を検証する必要がある²⁷⁾(図4)。

Pdimax のようにバルーンを用いた方法は、横隔膜の純粋な収縮力が得られる反面、侵襲的で操作が難しく理学療法分野に適さないとされている³⁰⁾。また先に述べた、神経を電気刺激して呼吸筋の収縮力を測定する方法(Pdi-frequency curve)は、頸部で横隔神経を電気刺激して径横隔膜圧を測定するため客観的ではあるが^{28,31)}、Pdimax と同様に侵襲的な方法であり理学療法分野には適していない。しかし、PImax と PEmax は、非侵襲的に呼吸筋力を包括的に評価できるためにスクリーニングとしても非常に有用であり³⁰⁾、臨床においても用いられることが多いが、呼吸筋全体の最大収縮力を反映していることから、PImax と PEmax といった呼吸筋力のみでは個々の呼吸筋疲労を捉えることが難しい点がある。

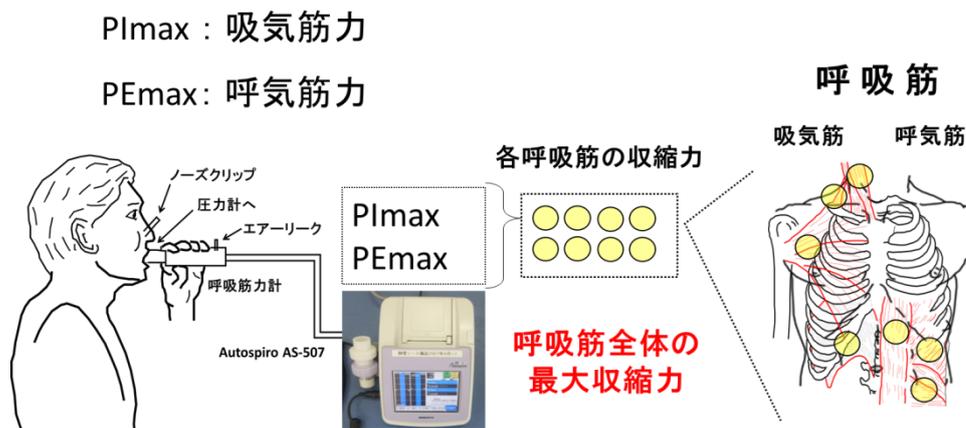


図 3 吸気筋力(PImax), 呼気筋力(PEmax)の測定(呼吸筋全体の最大収縮力)

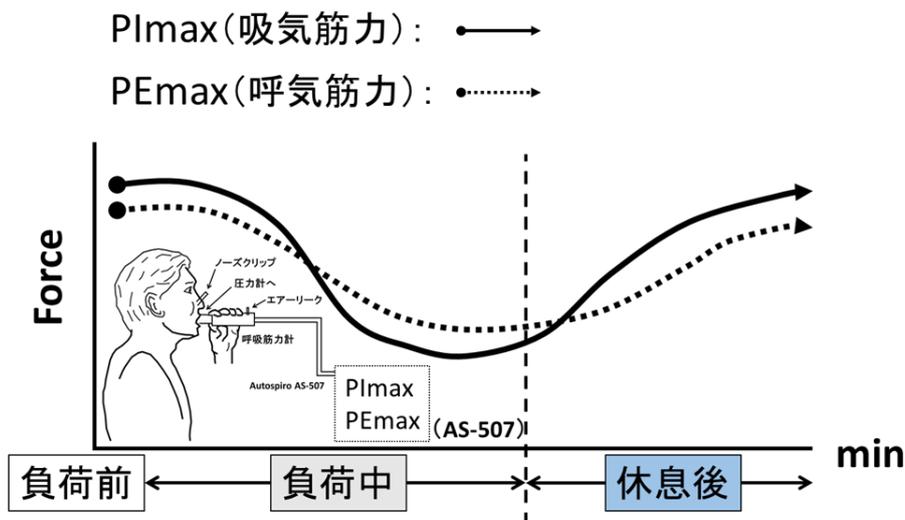


図 4 呼吸筋疲労の評価: 吸気筋力(PImax), 呼気筋力(PEmax)の経時的変化
呼吸筋疲労時のイメージ図を示す

1-4-2 筋電図(EMG)による評価

EMG における呼吸筋活動を評価するためには、電極の種類を選択が必要となる。電極の種類には、針電極、ワイヤー電極を用いた侵襲的な方法と表面電極を用いた非侵襲的な方法がある。横隔膜のように深層に位置する筋活動を局所的に抽出するためには、侵襲的な方法が用いられることがある。この方法は、局所的な単一筋線維からの電位を導出できる反面、侵襲的であり呼吸筋を評価する際には危険を要する。そのため、表面電極を用いた方法が行われてきた^{13,15,16)}。また、Gross ら¹³⁾は横隔膜の表面電極と食道電極で得られた筋電図の周波数は一致することから、表面電極から横隔膜疲労を検出できる方法であると報告している。このため、表面電極から筋活動を評価する方法として表面筋電図(surface EMG ; 以下, sEMG)が呼吸筋疲労を抽出する方法として用いられている。

1-4-3 筋電図周波数解析による評価

sEMG による筋疲労の評価は、筋電図周波数解析が指標に用いられている¹³⁾。筋電図波形は、様々な周波数を含んでおり、周波数成分の分布を示したものが EMG パワースペクトラムといわれ、各周波数成分の振幅の 2 乗が信号のパワーとして用いられている³²⁾。筋電図周波数解析では、筋疲労が発生すると各周波数の構成成分が低周波数へシフトする現象を利用したものであり³³⁾、筋疲労の評価や筋線維タイプの変化を捉えることに用いられている³²⁾。永田²⁴⁾によると、この「EMG パワースペクトラムの低い周波数への移動(徐波化)」を筋疲労と定義している。

筋電図周波数解析では、筋活動から得られた筋電位の中央周波数(Median power Frequency : 以下, MDF)、高周波数(H ; 150-350Hz)と低周波数(L ; 20-40Hz)の周波数帯域を 2 分した比率(以下, H/L ratio)が筋疲労の指標として用いられている^{13,16,34)}。中央周波数(MDF)は、抽出された筋電波形における EMG パワースペクトラムの面積を 2 つの等しいエリアに分ける周波数の代表値で³²⁾、EMG スペクトル波形の総合的な筋疲労の指標を表す²⁴⁾。また、中央周波数(MDF)は最大筋力発揮時でも最大下筋力発揮時においても筋疲労が出現すると時間の経過とともに低周波数帯域へ移行することがいわれている(徐波化)^{24,32)}。H/L ratio においては、速筋線維(以下, type II 線維)は高周波数帯域を、遅筋線維(以下, type I 線維)は低周波数帯域を反映するといわれており³⁵⁾、H/L ratio の低下は筋線維タイプにおける収縮代謝機構が疲労に傾く時点を捉えているとされ^{34,36)}、負荷前(基準値)から 20%以上の低下を筋疲労の指標とされている^{16,34,37)}。このため筋電図周波数解析では、中央周波数(MDF)と H/L ratio を用いることで筋疲労の総合的な評価と筋線維タイプにおける収縮代謝機構の両者から筋疲労を捉えることができると考えられた(図 5)、(図 6)。

EMG による評価の特徴として、個々の筋の評価と筋間の協調性評価が可能であることが挙げられる³⁸⁾。PI_{max} と PE_{max} の単独測定では呼吸筋全体の最大収縮力を評価するにとどまり、個々の呼吸筋疲労を捉えられなかった課題に対し、EMG の評価の特徴を組み合わせることで、PI_{max} と PE_{max} においても個々の呼吸筋疲労を選択的に評価できると考えた。

以上のことから、呼吸筋疲労の評価には呼吸筋力として PI_{max} と PE_{max}、sEMG では呼吸筋毎の中央周波数(MDF)と H/L ratio の筋電図周波数解析を組み合わせ、経時的に検証することで、筋疲労特性を捉えることが可能であると考えられる。

中央周波数 (MeDian power Frequency : MDF)

● 筋疲労を総合的に評価

周波数帯域: 20 - 350 Hz

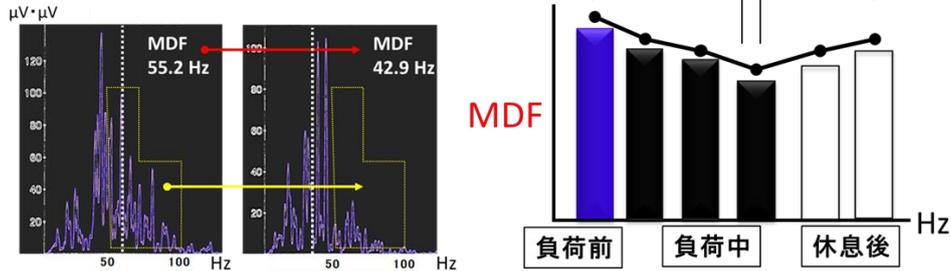


図5 中央周波数(MDF)による個々の呼吸筋疲労の評価

高周波数帯域と低周波数帯域の比 (H / L ratio)

● 筋線維タイプの疲労を評価 (疲労順序性)

H: 高周波数帯域	L: 低周波数帯域
150-350Hz	20-40Hz
type II 線維	type I 線維

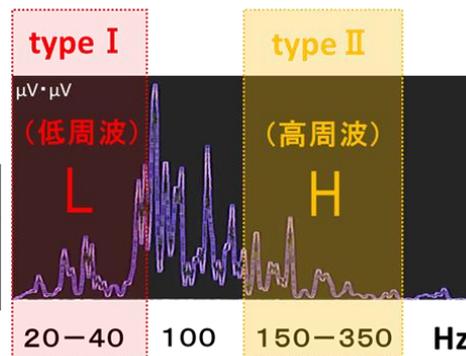


図6 高周波数帯域と低周波数帯域の比率(H/L ratio)による個々の呼吸筋疲労の評価

1-5 本研究における筋疲労の定義

本研究における筋疲労の定義については、Respiratory Muscle Fatigue Workshop Group¹⁰⁾の定義と永田²⁴⁾による筋電図周波数解析による定義を用いた。Respiratory Muscle Fatigue Workshop Group¹⁰⁾は呼吸筋疲労を「負荷に対する仕事により筋の収縮力あるいは収縮速度が低下した状態であり、筋を休息させることで回復するもの」と定義していることから、呼気負荷と吸気負荷により呼吸筋の収縮力である最大吸気口腔内圧(PImax)と最大呼気口腔内圧(PEmax)が低下し、休息後に回復するものを呼吸筋疲労とした。筋電図周波数解析による筋疲労は、永田²⁴⁾によると「EMG パワースペクトラムの低い周波数への移動(徐波化)」を筋疲労と定義していることから、EMG パワースペクトラムの代表値である中央周波数(MDF)の低下を筋疲労とした。また、EMG パワースペクトラムを高周波数帯域と低周波数帯域の比率である H/L ratio については、負荷前の計測値から 20%以上の低下を筋疲労とし^{16,34,37)}、20%以上低下した時点筋疲労開始時間とした。さらに、筋電図周波数解析による中央周波数(MDF)の低下は筋疲労の総合的な評

価指標とし、H/L ratio は筋線維タイプによる収縮および代謝特性における筋疲労の評価指標とした。

1-6 COPDにおける呼吸筋疲労と骨格筋の機能異常

慢性閉塞性肺疾患(COPD)患者では、動的肺過膨張や気道抵抗による呼吸筋疲労が吸気筋のみならず呼気筋においても生じると考えられており^{5,39)}、呼吸困難や運動制限に大きく関わっているとされ^{5,40)}、呼吸筋疲労による呼吸筋力の低下はCOPDの死亡率増加と関連することが報告されている⁴¹⁾。

COPDの状態にある骨格筋は、筋量の低下に加え、筋力、筋持久力の低下、易疲労性などの機能異常を示している⁴²⁾。COPDの骨格筋の変化には、好氣的代謝能力の高いtype I線維の減少、相対的なtype II線維の比率の増大、毛細血管密度の減少、筋肉内の酸化系酵素の量的減少などがあり、これらは筋肉内における好氣的代謝能力の低下に繋がっているとされている⁴³⁾。一方で、呼吸筋機能不全については横隔膜が慢性的な過負荷に対応して疲労に対する高い耐性を示していることが報告されている^{43,44)}。これは、横隔膜などの呼吸筋は非呼吸筋とは違う反応を示したとの報告もあり、COPDの横隔膜はtype I線維の比率は健常人よりも高く、type II線維の比率は健常人よりも有意に低いことがいわれている⁴²⁾。これはtype I線維が遅筋線維、type II線維が速筋線維に対応しており⁴⁵⁾、吸気筋である横隔膜は張力が弱く持続的な収縮が可能なtype I線維が有意な状態を示しており、COPDは吸気筋力が低下していると報告されている⁴³⁾。

COPDにおける骨格筋の機能異常に伴う好氣的代謝能力の低下は、筋の活動能力を低下させることがいわれ⁴⁶⁾、呼吸筋疲労と密接に関わっていることが考えられる。COPDでは吸気筋の負荷過剰の状態と閉塞性障害に伴う呼気への気道抵抗増加により、吸気筋と呼気筋は疲労し、明らかに吸気筋力と呼気筋力は低下していることが報告されている⁴⁷⁾。このような、呼吸筋の筋力低下と呼吸筋疲労は呼吸不全の病態が増悪する機序で重要な位置を占めているとされ⁴⁶⁾、疲労した呼吸筋の収縮力増強と持続力回復を目的に呼吸筋トレーニング(VMT)が行われている^{5,48)}。

1-7 呼吸筋トレーニング(VMT)の効果判定と呼吸筋疲労

VMTにおける効果判定には、PI_{max}とPE_{max}が手技として容易でありスクリーニングとしても有用とされているが、前述の通り、個々の呼吸筋活動を評価できない難点があった。このため、呼吸筋毎の状態把握や目的とした呼吸筋の収縮力の増強の有無や筋疲労耐性については効果判定が困難であったことから、吸気負荷、呼気負荷時における呼吸筋疲労特性は明らかにされておらず、呼吸補助筋を含めた呼吸筋疲労は不明な点が多かった。また、VMTにおける吸気筋疲労、呼気筋疲労への介入効果を明記した報告は現時点で見当たらず、呼気負荷時と吸気負荷時の呼吸筋疲労特性は明らかにされていないのが現状であった。

以上のことから、吸気負荷、呼気負荷時の呼吸筋疲労特性を明らかにし、その特性に対応したVMTの機械的負荷による方法と目的とした呼吸筋の収縮力改善および筋疲労耐性の向上を図る有用な基礎データを得たいと考えた。

1-8 呼気負荷における呼吸筋疲労特性について(著者の先行研究)^{19,20)}

1-8-1 最大口腔内圧(PImax, PEmax)と呼吸筋毎の筋疲労について¹⁹⁾

COPD では、動的肺過膨張や気道抵抗による呼吸筋疲労が吸気筋と呼気筋の両者に生じることが報告され、閉塞性障害に伴う呼気筋は負荷が大きく、呼気筋疲労を発生しやすい状況にあることがいわれている⁵⁾。しかし、呼気に対する呼吸負荷中から休息後までの呼気筋と吸気筋の双方に与える影響を検証した報告はなく、呼吸筋疲労特性は不明な点が多かった。このため著者ら¹⁹⁾は、PEmax の 50%の負荷量(以下、50%PEmax)による呼気負荷における呼吸筋疲労特性を明らかにすることを目的に健常成人男性を対象に検証した。方法は、呼気負荷中と休息期におけるPImax と PEmax を測定し、僧帽筋、胸鎖乳突筋、大胸筋、腹直筋、外腹斜筋、内腹斜筋の 6 筋の筋活動を筋電図周波数解析における中央周波数(MDF)を用いて測定した。その結果、PImax と PEmax は呼気負荷中に経時的に低下し、休息後に回復がみられ、両者に正の相関が認められた。また、中央周波数(MDF)では腹直筋、外腹斜筋、内腹斜筋が低下し筋疲労が認められた。このことから、呼吸筋疲労特性として、呼気負荷による呼気筋疲労が吸気と呼気双方の呼吸筋疲労に影響を与える可能性が考えられた(図 7)。

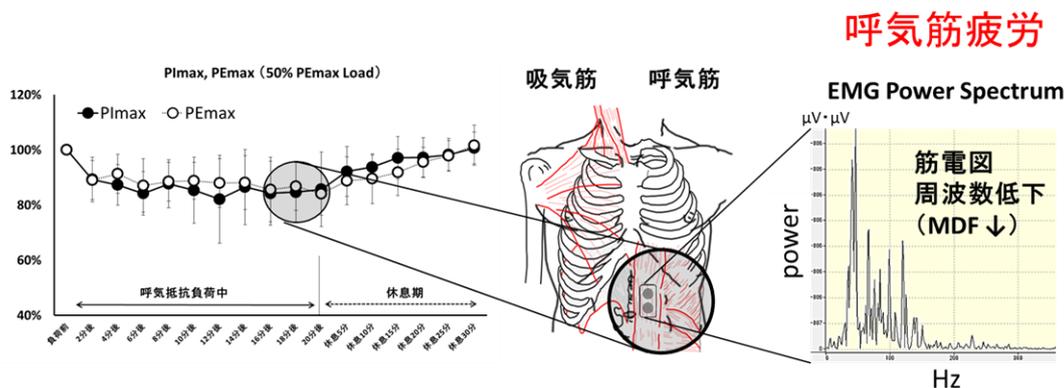


図 7 呼気負荷(50%PEmax)による呼吸筋疲労特性

1-8-2 H/L ratio と最大口腔内圧(PImax, PEmax) について(著者の先行研究)²⁰⁾

著者ら²⁰⁾は、呼気負荷時の筋電図周波数解析において呼吸筋の筋活動における H/L ratio から呼吸筋の筋疲労特性を検証した。この H/L ratio は、筋線維タイプの収縮および代謝特性から疲労順序性を検証することを目的とした。その結果、呼気負荷によって上記測定筋 6 筋の全筋で筋疲労を認め、呼吸筋の筋疲労開始までの所要時間については呼気筋と吸気筋に差がないことを報告した。さらに、この H/L ratio は PImax と PEmax の低下よりも早期に筋疲労を検出できる可能性が考えられた。

1-8-3 まとめ

呼気負荷における呼気筋疲労が呼気と吸気双方の呼吸筋疲労に影響を与えることが考えられた。また、COPD では呼吸筋疲労が吸気筋と呼気筋に生じていることが考えられていることから、吸気負荷における呼吸筋疲労特性を検証する必要があると考えた。

1-9 吸気負荷における呼吸筋疲労特性について

COPD では吸気筋への負荷が増大しており、横隔膜を中心とする吸気筋は負荷過剰の状態では疲労に陥りやすく、吸気筋力が明らかに低下していることがいわれている^{6,43)}。その理由として、COPD では肺の過膨張により横隔膜が押し下げられ平坦化すると、横隔膜の筋線維は正常よりも短縮した状態になるため、筋の長さ-張力関係から筋の収縮力は低下し、横隔膜の機能は低下することがいわれている⁴⁹⁾。さらに、吸気時の気道抵抗の増加は吸気筋の仕事量を直接的に増加させることが報告され⁵⁾、呼吸筋疲労に伴う換気の制限が生じていることが報告されている⁵⁰⁾。

吸気負荷を用いた呼吸筋疲労に関する先行研究では、健常者を対象とした場合、高い吸気負荷では横隔膜だけでなく全ての吸気筋が疲労することや¹⁴⁾、COPD 患者を対象とした場合には、最大吸気口腔内圧(PImax)の 40%で横隔膜や肋間筋の疲労が生じることが報告されており³⁴⁾、さらに胸鎖乳突筋と横隔膜の疲労が呼吸困難に影響を及ぼすとされている³⁷⁾。これらはいずれも吸気負荷に対する吸気筋の疲労に限定されたものであり、呼気筋の疲労に対しては報告がされていない。吸気負荷における吸気筋と呼気筋の双方の筋疲労特性を検証し、呼吸筋の収縮力改善と疲労抑制を目的とした呼吸筋トレーニング(VMT)の開発に向けた基礎データが必要である。

1-10 呼吸筋トレーニング(VMT)について

1-10-1 国際ガイドラインとエビデンス

呼吸筋トレーニング(VMT)の国際ガイドラインにおける位置づけは、Global Initiative for Chronic Obstructive Lung Disease(以下、GOLD)ガイドライン⁵¹⁾と American College of Chest Physicians(以下、ACCP)/ American Association of Cardiovascular and Pulmonary Rehabilitation(以下、AACVPR)ガイドラインがある⁵²⁾。呼吸筋トレーニング(VMT)に関して、GOLD ガイドラインでは「呼吸筋トレーニング(VMT)は特に全身運動トレーニングと併用すると効果的である(エビデンス C)」と評価を受けている。ACCP/AACVPR においては、「吸気筋トレーニングを呼吸リハビリテーションの必須の構成要素としてルーチンに行うことを支持するエビデンスはない(エビデンス 1B)」と評価されている。このように、国際ガイドラインでは呼吸リハビリテーションにおける呼吸筋トレーニング(VMT)の評価は必ずしも高いとはいえず、決定的な科学的根拠を示せていないのが現状である。

1-10-2 呼吸筋トレーニング(VMT)の方法とプロトコール

呼吸筋トレーニング(VMT)は、呼吸リハビリテーションの基盤的な重要な種目の一つとして行われ^{53,54)}、COPD を中心とした呼吸器疾患のみならず慢性心不全、神経筋疾患、脊髄損傷や心臓・呼吸器疾患の術前、人工呼吸器の離脱において一定の成果を上げている⁵³⁾。呼吸筋トレーニング(VMT)は慢性呼吸不全患者、特に COPD を対象として呼吸困難や運動耐容能の改善、疲労した呼吸筋の収縮力増強と持続力回復を目的に実施されている^{5,48)}。呼吸筋トレーニング(VMT)とは、呼吸筋に対して吸気あるいは呼気抵抗を負荷し、意識的に努力呼吸をすることで呼吸筋を強化するものである⁵⁵⁾。呼吸筋トレーニング(VMT)の方法としては、自発的過換気法、抵抗負荷法、腹部重錘負荷法などが行われているが、持久力にターゲットを絞った自発的過換気法は一般化されておらず、腹部重錘負荷法はエビデンスとしては十分ではないことから⁴⁶⁾、抵抗負荷法が用いら

れている。抵抗負荷法による呼吸筋トレーニング(VMT)では、機械的負荷による負荷圧を利用し、呼吸筋力を増大させる方法がよく用いられている⁵⁶⁾。この中でも、Threshold load はバネや重りで押さえられたバルブが発生圧によって開く仕組みになっており、流量に関係なく圧設定が可能であるため呼吸筋トレーニング(VMT)に最も適しているといわれている⁵⁶⁾。

呼吸筋トレーニング(VMT)の実施については、頻度、強度、持続時間、種類を明らかにして実施されることが推奨されており、吸気筋トレーニング(Inspiratory Muscle Training ; 以下, IMT)であれば、最大吸気口腔内圧(PImax)の30%以上で1日2回、1回15分で実施されている^{46,57)}。トレーニング期間については、統一した見解が得られていないが、最短で3週間⁵⁸⁾、そして4週間^{48,59)}、6から8週間⁴⁶⁾、12週間^{40,60)}などのトレーニングが行われており、その効果については4週間のトレーニング期間で明確に示されている^{48,59)}。本研究においても、上記のプロトコルを参考に、呼吸筋トレーニング(VMT)による介入研究の検討を行った。

1-10-3 呼吸筋疲労に対する呼気筋トレーニング(EMT)の必要性和新規性

呼吸筋トレーニング(VMT)の内容は、吸気筋を対象としたものが多いが^{46,59,61,62,63)}、これは呼気筋が強制呼気以外には積極的に関与しないと考えられ、呼吸困難や運動耐容能の改善には繋がらないとされたことが理由である⁶⁴⁾。しかしMotaら⁶⁵⁾は、COPD患者に対して呼気筋トレーニング(Expiratory Muscle Training ; 以下, EMT)を実施し、呼気筋力の増加、6分間歩行距離、呼吸困難感、QOLが改善したことを報告している。またSuzukiら¹⁷⁾は、呼気負荷時における腹直筋の疲労が呼吸困難感に関与するとし、著者ら^{19,20)}が行った先行研究においても、呼気負荷時の腹直筋と内・外腹斜筋の疲労が吸気と呼気双方の呼吸筋疲労に影響を与えることを報告した。COPD患者は、吸気筋と呼気筋の双方で呼吸筋疲労が生じている状態であることから^{17,47)}、双方に効果を及ぼす呼吸筋トレーニング(VMT)が必要と考えられる。さらに、従来の呼吸筋トレーニング(VMT)の効果検証の指標は、呼吸筋力を現す最大口腔内圧(PImax, PEmax)や運動能力の向上、呼吸困難感を指標とするものがほとんどで^{40,65)}、筋疲労をパラメータにした報告が少ない。今回、吸気負荷時の呼吸筋疲労特性を検証することで、これらの課題を解決できると考えられた。

以上のことより、吸気筋と呼気筋の双方の疲労耐性向上を目的とした呼吸筋トレーニング(VMT)の構築を図ることが本研究の目的であり、独創的かつ新規性を含んだ点である。

1-11 研究の目的

呼吸筋疲労は、呼吸負荷に対して筋の収縮力や収縮速度が低下した状態であり、休息後に回復するものである。呼吸筋疲労は、換気障害における呼吸不全の主要病因の一つとされ、特にCOPDでは動的肺過膨張や気道抵抗による呼吸筋疲労が問題となる。呼気負荷においては、呼気筋疲労により吸気と呼気双方の呼吸筋疲労が発生する特性を認めた。しかし、吸気負荷における呼吸筋疲労特性は明らかにされておらず、不明な点が多い。

そこで本研究では、吸気負荷における呼吸筋疲労特性を明らかにし、吸気筋と呼気筋の疲労特性に対応した呼気筋トレーニング(EMT)が呼吸筋疲労に与える影響について検証することを目的とした。

1-12 研究の仮説

吸気負荷に対する仮説として、著者ら^{19,20)}の呼気負荷に対する呼気筋疲労が吸気と呼気双方の呼吸筋疲労と呼吸困難に影響を与えたことから、吸気負荷においても同様の結果が出現するという仮説を立てた。また、著者ら^{19,20)}の先行研究の結果と吸気負荷に伴う呼吸筋疲労特性の仮説から、呼気筋トレーニング(EMT)を取り入れることで呼気筋が強化され、吸気負荷に伴う吸気と呼気双方の呼吸筋疲労の抑制と呼吸困難感の改善に効果があると仮説を立てた。

第2章 吸気抵抗負荷における呼吸筋疲労の分析

2-1 目的

本研究では、最大吸気口腔内圧(PImax)の50%の負荷量(以下、50%PImax)が呼吸筋に与える影響を検証し、呼吸筋疲労特性を明らかにすることを目的とする。この、吸気負荷と著者ら^{19,20)}の先行研究である呼気負荷の両者から呼吸筋疲労特性を明らかにし、その特性に対応した呼吸筋トレーニング(VMT)の介入研究における基礎データを得たいと考えた。

2-2 対象および方法

2-2-1 対象

喫煙歴、呼吸器疾患、神経学的疾患、頸部・体幹の整形外科的疾患の既往がない健康成人男性14名(年齢 26.0 ± 3.3 歳、身長 171.3 ± 4.0 cm、体重 66.7 ± 6.8 kg)を対象とした。また、年齢は20歳以上40歳未満とし、未成年は研究対象者から除外した。対象者の背景を表1に示す。

対象者の選定は、常葉学園静岡リハビリテーション専門学校理学療法学科学生および同学科卒業の理学療法士に対して被験者の募集を行い決定した。

表1 対象者の背景

人数(名)	年齢(歳)	身長(cm)	体重(kg)	BMI(kg/m ²)
14	26.0 ± 3.3	171.3 ± 4.0	66.7 ± 6.8	22.7 ± 2.0

単位:()内、平均±標準偏差

2-2-2 倫理上の配慮

対象者には研究内容を十分に説明し、書面にて同意を得た。また、本研究は国際医療福祉大学倫理審査委員会からの承認を得て実施した(承認番号 15-10-105)。その他、常葉学園静岡リハビリテーション専門学校倫理委員会の承認を得て実施した(承認番号 108)。

2-2-3 方法

2-2-3-1 使用機器

- 1) スパイロメーター[(ミナト医科学株式会社製 Autospiro AS-507), (図 8)]
- 2) 呼吸筋力計[(ミナト医科学株式会社製 Autospiro AS-507 オプション呼吸筋力計ユニット ASS), (図 9)]
- 3) 表面筋電計装置[(キッセイコムテック社製 テレメトリー筋電計 MQ16), (図 10)]
- 4) 筋電図解析ソフト(キッセイコムテック社製 Kinealyzer Ver4)
- 5) インピーダンスチェッカー[(Noraxon 社製 EM-570), (図 11)]
- 6) 超音波画像診断装置[(GE ヘルスケア・ジャパン LOGIQ P6 Expert), (図 12)]



図 8 Autospiro AS-507



図 9 呼吸筋力計ユニット ASS



図 10 表面筋電計装置(テレメトリー筋電計 MQ16)

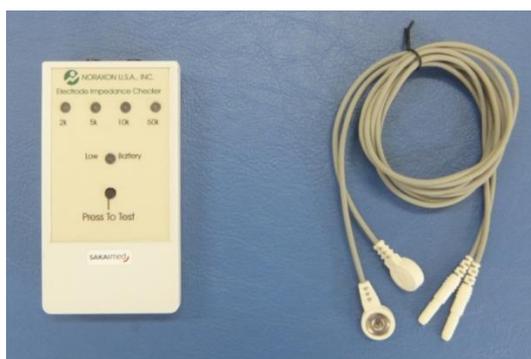


図 11 インピーダンスチェッカー(EM-570)



図 12 超音波画像診断装置(LOGIQ P6)

2-2-3-2 測定項目と方法 (図 13)

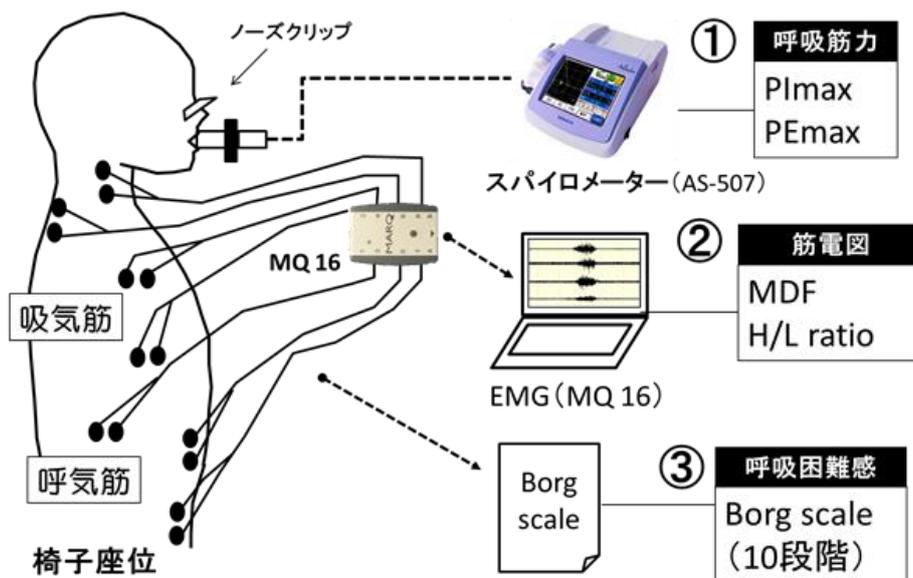


図 13 負荷中および休息期の測定項目と方法

1) 呼吸機能検査

呼吸機能検査の測定には、ミナト医科学株式会社製 Autospiro AS-507(以下, AS-507)を使用し、測定肢位を椅子座位とし、ノーズクリップを装着しマウスフィルタをくわえて測定した。努力性肺活量(Forced Vital Capacity ; 以下, FVC), 1秒量(Forced Expiratory Volume in one second ; 以下, FEV_{1.0}), 1秒率(Forced Expiratory Volume in one second % ; 以下, FEV_{1.0}%), ピークフロー(Peak Expiratory Flow ; 以下, PEF)をそれぞれ3回測定し、各々の最大値を採用した。

2) 呼吸筋力(PImax, PEmax)

呼吸筋力の指標として最大口腔内圧(PImax, PEmax)を測定した。呼吸筋力の測定は、静的な最大口腔内圧(PImax, PEmax)により評価した⁶⁶⁾。測定には、AS-507を使用し、呼吸筋力計ユニット ASS(以下, 呼吸筋力計)を接続して最大口腔内圧(PImax, PEmax)を測定した。呼吸筋力の測定は、Black と Hyatt の方法⁶⁷⁾すなわちノーズクリップを装着しマウスフィルタをくわえて、全肺気量(Total lung capacity ; TLC)位から最大呼気を行い、残気量(Residual Volume ; RV)位から最大吸気を行い、その圧を約3秒間維持させた。吸気および呼気をそれぞれ3回ずつ測定し、最大値を最大口腔内圧(PImax, PEmax)とした。また、PImax 施行時の声門の閉塞、PEmax 施行時の頬筋の使用を防ぐため、内径2mm、長さ20mm~30mmのチューブによるエアリークを生じさせた⁶⁸⁾。測定機器であるAS-507を含め、ATS/ERSステートメントで発表された標準法に準拠した測定法にて実施した⁶⁸⁾。測定肢位は、椅子座位にて背もたれを使用し、左上肢にて呼吸筋力計を把持し頸部や体幹の動きに注意し測定した(図14)。しかし、吸気負荷中の測定はPImax, PEmaxを休息時の1分間で測定する必要があったため1回目を最大値とした。

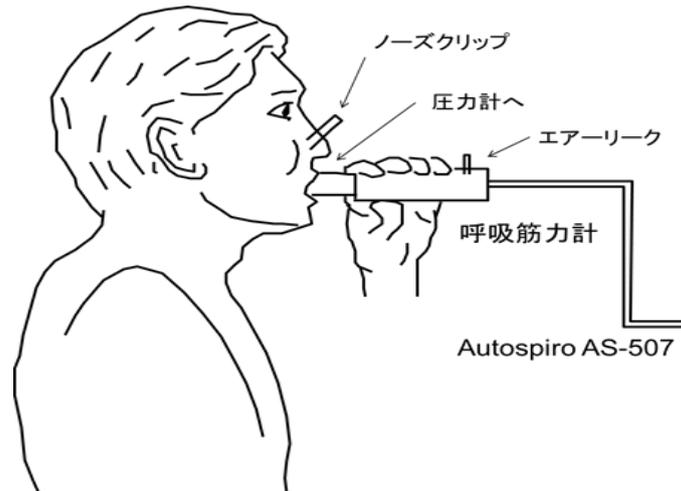


図 14 呼吸筋力測定 文献 68)より引用し一部改変

3) 呼吸筋活動

呼吸筋活動の電氣的評価として、表面筋電計装置(キッセイコムテック社製 テレメトリー筋電計 MQ16 ; 以下, EMG 装置)を用いた(図 10). EMG 装置には, デジタルビデオカメラ(SONY 社製 HANDYCAM HDR-CX560)を AD 変換器(CANOPUS 社製 ADVANCEDDV ADVC-55)にて接続し, 時間同期させた状態で課題動作遂行時に動画撮影を行った. 測定筋は, 吸気筋として僧帽筋, 胸鎖乳突筋, 大胸筋, 横隔膜とし, 呼気筋として腹直筋, 外腹斜筋, 内腹斜筋の計 7 筋とした. 測定部位については, 対象者の右側の呼吸筋を対象とした. 測定筋の電極装着部位は, 体毛を剃り皮膚前処理剤スキンピュア(日本光電社製)を使用し, 油分や角質を落とす皮膚前処理を十分に行った. その後, インピーダンスチェッカー(Noraxon 社製 EM-570)を使用し, インピーダンスレベルが $5k\Omega$ 以下になったことを確認し測定した(図 11). 体表面筋電計電極は, デュアル電極(Noraxon 社製 EM-272S ; 以下, 電極)を使用し電極間距離を 2cm とした.

電極装着部位については, 僧帽筋は肩峰と第 7 頸椎との結線の中央部⁶⁹⁾, 胸鎖乳突筋は筋腹中央部⁷⁰⁾, 大胸筋は腋窩高位の胸部⁶⁹⁾, 横隔膜は右鎖骨中央線上の第 6-7 肋間^{13,71)}, 腹直筋は臍上 1cm で白線より 2 横指外側⁷²⁾, 外腹斜筋は第 8 肋骨外側^{32,73)}, 内腹斜筋は上前腸骨棘の 1cm 内側で左右の上前腸骨棘を結んだ線よりも下方に装着した^{32,73)}(図 15), (図 16)⁷⁴⁾. 横隔膜の電極装着部位については, 横隔膜の位置を確認するために超音波画像診断装置(LOGIQ P6 Expert ; 以下, LOGIQ P6)を使用し, リニア型プローブにて B モード法, 空間分解能 10MHz, 深度 5cm の設定にて測定した(図 12). 測定部位は, 横隔膜の位置が確認できる右中腋窩線状の第 8-9 肋間に垂直にあてたプローブを走査し⁷⁵⁾, 右鎖骨中央線上の第 6-7 肋間にて横隔膜を確認した上で電極を装着し, 腹式呼吸を行わせ筋電図波形が出現することを確認した(図 17).

sEMG 計測は双極導出にて, $P_{I\max}$, $P_{E\max}$ を測定し, その際の筋電活動を記録した. サンプリング周波数 1,500Hz にて得られた筋電波形は, A/D 変換してコンピューターに取り込み, 測定した筋活動における安静時振幅の最大値を超えた時点を筋活動開始とし, 筋活動開始後 0.5 秒間の筋電波形を解析に用いた. また, EMG に心電図波形の混入を認めた場合は, その影響を最小限にするため心電図の QRS 成分を外して^{71,76)}, QRS 成分と QRS 成分の間の筋電波形を解析

に用いた³⁶⁾。抽出した筋電波形は、20-350Hzのバンドパスフィルターを使用し処理した。解析には、Kinealyzer Ver4を使用し、高速フーリエ変換(Fast Fourier Transform; 以下, FFT)による周波数解析を行い、その中央周波数(MDF)を用いた。また、EMG パワースペクトラムを算出し、高周波数(H; 150-350Hz)と低周波数(L; 20-40Hz)に帯域を2分し、その比率である H/L ratio の低下を筋疲労の指標とした^{13,16,34)}。呼吸筋疲労の指標は、負荷前の H/L ratio を 100%とし^{36,76)}、その 20%以上の低下をもって筋疲労とした^{16,34,37)}。

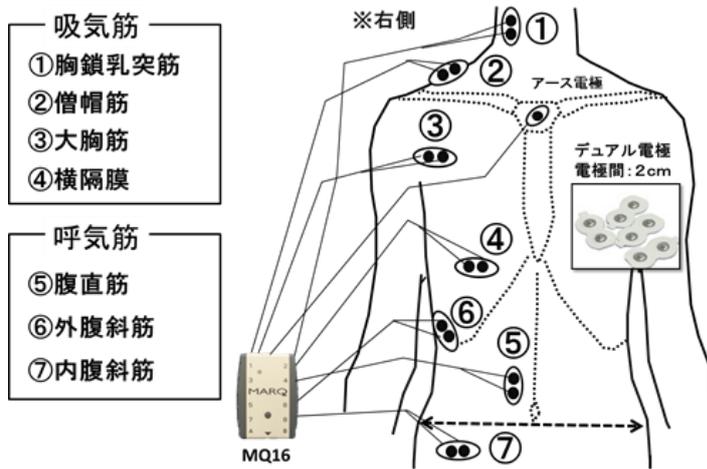


図 15 電極装着位置

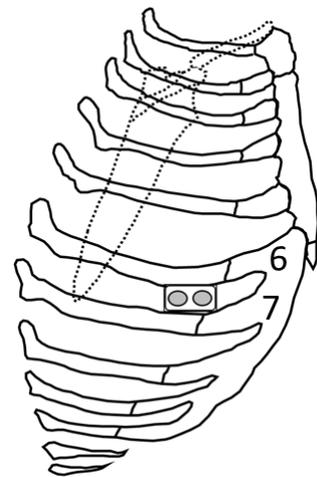


図 16 横隔膜電極装着位置

文献 74)より引用一部改変

横隔膜(右)超音波画像 1例

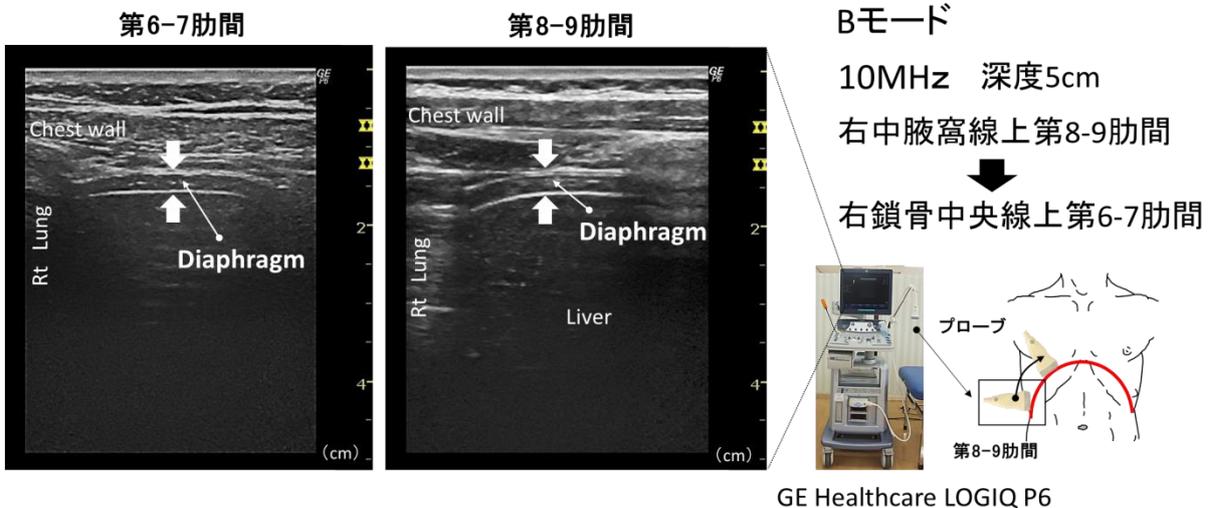


図 17 超音波画像における横隔膜の確認方法

4) 呼吸困難感(10段階 modified Borg scale)

呼吸困難感の主観的運動強度(Rating of Perceived Exertion scale ; 以下, RPE)の測定には 10 段階の modified Borg scale(以下, Borg scale)を用い, 負荷中の 1 分間の休息時, 負荷終了後の 5 分毎の休息期に測定した(表 2). Borg scale は, 対象者に分かるように提示し, 指差しをさせ測定した.

表 2 modified Borg scale

0	全くなし
0.5	ごくごくわずか (かろうじて認識できる程度)
1	ごくわずか
2	軽度
3	中等度
4	ややきつい
5	きつい
6	
7	かなりきつい
8	非常にきつい(ほぼ最大限)
9	非常にきつい(ほぼ最大限)
10	もうこれ以上耐えられない

2-2-3-3 測定手順 (図 18)

測定手順は, まず呼吸機能検査を実施し, 拘束性換気障害, 閉塞性換気障害の有無を確認し, 正常値であるかの確認を行った. その後, 最大口腔内圧(PImax, PEmax)を測定する上で必要な測定方法を説明し, 少なくとも数回の練習を行った³⁰⁾. 説明事項として, 残気量位から最大吸気努力, 全肺気量位から最大呼気努力を行い測定すること, また測定回路内にエアリークがあるため最大吸気努力と最大呼気努力を行った直後にピーク圧が記録され⁴⁶⁾, 数値は測定機器(AS-507)により自動で求めることを説明した. また, 最大口腔内圧(PImax, PEmax)測定時のピーク圧が遅れないように, 全肺気量位, 残気量位から一気に最大吸気努力, 最大呼気努力を行うように練習と説明を行った.

負荷開始前に最大口腔内圧(PImax, PEmax)を測定し, この時の呼吸筋活動を EMG 装置にて記録し負荷前の指標とした. 測定肢位は, 椅子座位にて背もたれを使用し, ノーズクリップを装着した上で測定した. sEMG は, 負荷前の指標となる呼吸筋力の測定時から負荷中と休息期までの間を連続記録した. 負荷前の最大口腔内圧(PImax, PEmax)から 50%PImax を算出し, 吸気に対して 50%PImax の負荷を最大 20 分間行い, その後 30 分間の休息期を設けた. 50%PImax の吸気負荷は, 一方向抵抗弁付の圧閾値型負荷器具 Threshold IMT[(米国 Respironics New Jersey 社製), (図 19)]または POWERbreathe PLUS[(英国 POWERbreathe international 社製), (図 20)]を用いた. Threshold IMT は 41cmH₂O までの負荷が可能であるため, 対象者の 50%PImax がこれを超える場合は POWERbreathe PLUS を用いた. 負荷方法は, 断続的吸気閾値負荷とし, 2 分間の負荷, 1 分間の休息, 続けて 2 分間の負荷, 1 分間の休息を繰り返し, 負荷時間の合計が

20 分間となった時点で負荷を終了とした。呼吸条件は、1 分間 15 回、吸気時間、呼気時間も 2 秒に設定し^{77,78)}、メトロノームの音に合わせて行った。終了条件として、負荷圧に達せなくなった時点もしくは呼吸困難で継続できない場合とした。測定は、負荷中の 1 分間の休息時に最大口腔内圧(PImax, PEmax)を測定し、この時の吸気筋、呼気筋の呼吸筋活動を記録した。負荷終了後の休息期は、5 分毎 6 回、負荷中と同様の測定を実施した。呼吸困難感の RPE の測定には 10 段階の Borg scale を用い、負荷中の 1 分間の休息時、負荷終了後の 5 分毎の休息期に測定した。

この他本章の検証では、各対象者に対して 50%PImax の吸気負荷ありの条件下と吸気負荷なしの条件下での計測をそれぞれ実施した。吸気負荷なしの計測は、対象者と日程調整を行い、吸気負荷ありの計測から 4 週間以内の別日に実施した。また対象者には、各条件間の期間に新たにスポーツ(水泳、マラソン、筋力トレーニング等)や喫煙の開始がないように通常の生活をさせていただくことを説明した。

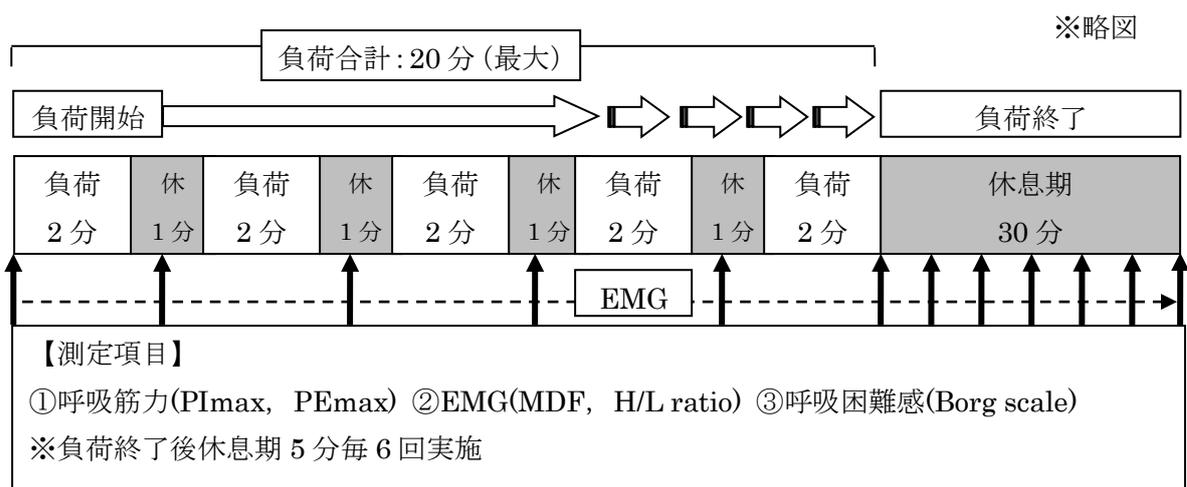


図 18 測定手順 文献 78)より引用し一部改変



図 19 Threshold IMT



図 20 POWERbreathe PLUS

2-2-4 統計処理

統計処理は、 χ^2 適合度検定を用いて正規性の検定を行い、その結果から Bartlett 検定による等分散の検定もしくはノンパラメトリック検定を選択し、有意水準 5%にて処理した。

50%PImax の吸気負荷中における PImax と PEmax および MDF の経時的変化に対し、負荷中

2分毎と休息期5分毎の計測値を要因とした一元配置分散分析反復測定を行ない、主効果がみられた場合には Bonferroni の多重比較検定を行い、有意水準 5%にて処理した。さらに、負荷中断後の休息期における PImax と PEmax および MDF の経時的変化を比較する目的で、50%PImax の吸気負荷開始 20 分後と休息期の比較について一元配置分散分析反復測定を行ない、主効果がみられた場合には Bonferroni の多重比較検定を行い、有意水準 5%にて処理した。

50%PImax 吸気負荷中における PImax と PEmax および Borg scale の関係性について、Spearman の順位相関係数を用いて相関を検証した。

呼吸筋の筋疲労までの所要時間を検証するため、H/L ratio が負荷開始前から 20%以上低下した時点までの所要時間(以下、呼吸筋疲労開始時間)については Friedman 検定を行い、Tukey の方法を用いて測定筋の間で比較した。

統計処理については、50%PImax の吸気負荷なしの条件下の計測においても同様の統計処理を行った。

統計処理には、統計解析ソフト JSTAT version 13.0 を使用した。

2-3 結果

2-3-1 最大口腔内圧(PImax, PEmax)の経時的変化の比較 (表 3), (図 21-23)

PImax と PEmax および MDF の計測値については、 χ^2 適合度検定を実施し、正規分布に従うことを確認した($p<0.05$)。その後、Bartlett 検定を実施し、等分散性の結果を得た($p<0.05$)。

50%PImax の吸気負荷における PImax と PEmax の経時的変化を比較した結果、PImax では負荷開始前と負荷中 14 分後から 20 分後との間、PEmax では負荷開始前と負荷中 14 分後、18 分後、20 分後との間で有意な差を認めた。また、負荷開始 20 分後と負荷中断後の休息期との比較では、PImax で休息期 15 分後から 30 分後との間、PEmax で休息期 30 分後との間で有意な差を認めた [$F(16, 221)=4.6, p<0.05$], [$F(16, 221)=2.6, p<0.05$]。図 23 に、50%PImax の吸気負荷中における PImax と PEmax の経時的変化を負荷前の計測値を基準とした百分率で示す。

50%PImax の吸気負荷なしの条件下では、PImax, PEmax とも有意差を認めなかった。

2-3-2 中央周波数(MDF)の経時的変化の比較 (表 4a), (表 4b), (表 5a), (表 5b), (図 24-27)

50%PImax の吸気負荷における測定筋毎の MDF の経時的変化を比較した結果、PImax で胸鎖乳突筋が負荷開始前と負荷中 20 分後との間で有意な差を認め、負荷中 20 分後と休息期との比較では休息期 5 分後、15 分後、30 分後との間で有意な差を認めた ($F(16, 221)=2.5, p<0.05$)。PEmax では腹直筋が負荷開始前と負荷中 20 分後との間で有意な差を認めた ($F(16, 221)=2.0, p<0.05$)。

50%PImax の吸気負荷なしの条件下では、測定筋毎の MDF に有意差を認めなかった。

2-3-3 最大吸気口腔内圧(PImax)と最大呼気口腔内圧(PEmax)および Borg scale の相関 (図 28-33), (表 6)

PImax と PEmax は、 χ^2 適合度検定により正規分布に従わず ($p<0.05$)、Borg scale は順序尺度であるためノンパラメトリック検定 (Spearman の順位相関係数) の方法で結果を得た。

PImax と PEmax および Borg scale の相関分析の結果、50%PImax の吸気負荷における PImax

と PEmax との間に正の相関を認め($r=0.58$, $p<0.05$), PImax と Borg scale との間に負の相関を認めた($r=-0.43$, $p<0.05$). また, PEmax と Borg scale との間に弱い負の相関を認めた($r=-0.24$, $p<0.05$). 50%PImax の吸気負荷なしの条件下では, PImax と PEmax との間に正の相関を認めたが($r=0.58$, $p<0.05$), Borg scale との間にはいずれも相関を認めなかった.

2-3-4 H/L ratio の呼吸筋疲労開始時間の比較 (表 7), (図 34-37)

H/L ratio による呼吸筋疲労開始時間については, χ^2 適合度検定を実施し, 正規分布に従わなかったため($p<0.05$), ノンパラメトリック検定(Friedman 検定)の方法で結果を得た.

H/L ratio による筋疲労までの所要時間を測定筋毎に比較した結果, 20%以上低下した時点までの呼吸筋疲労開始時間は PImax と PEmax とともに有意差を認めなかった. 50%PImax の吸気負荷なしの条件下においても, PImax と PEmax における呼吸筋疲労開始時間については有意差を認めなかった.

2-3-5 呼吸機能検査 (表 8)

呼吸機能検査より FVC 4.5 ± 0.4 L(%FVC 107.3 ± 8.0 %), FEV_{1.0} 3.9 ± 0.2 L, FEV_{1.0%} 87.3 ± 6.1 %, PEF 9.3 ± 1.1 L/s(%PEF 82.6 ± 10.2 %)と全ての対象者は正常範囲内であることが認められた.

表 3 最大口腔内圧(PImax, PEmax)の経時的変化

	PImax		PEmax	
	吸気負荷あり	負荷なし	吸気負荷あり	負荷なし
負荷前	112.7 ± 22.0	121.2 ± 18.0	89.3 ± 17.5	96.4 ± 20.3
2分後	106.8 ± 28.8	112.8 ± 21.4	84.2 ± 17.9	90.9 ± 19.9
4分後	102.4 ± 27.3	118.3 ± 21.6	78.5 ± 23.6	92.4 ± 20.4
6分後	101.6 ± 26.7	117.3 ± 18.8	85.4 ± 19.6	93.9 ± 18.7
8分後	101.2 ± 26.6	119.4 ± 21.7	82.7 ± 21.1	94.2 ± 21.0
10分後	101.4 ± 23.4	118.1 ± 19.0	80.1 ± 20.8	91.2 ± 21.0
12分後	100.5 ± 23.3	120.0 ± 20.9	79.6 ± 24.0	91.3 ± 21.1
14分後	97.7 ± 24.1*	121.9 ± 22.8	76.7 ± 23.3*	93.0 ± 22.2
16分後	98.5 ± 26.7*	119.2 ± 21.0	78.2 ± 20.7	93.0 ± 18.6
18分後	97.7 ± 24.6*	120.3 ± 18.1	75.9 ± 21.5*	94.9 ± 17.6
20分後	90.7 ± 22.5*	123.3 ± 20.1	72.6 ± 21.3*	93.0 ± 21.3
休息5分	105.2 ± 22.3	120.4 ± 22.6	80.9 ± 18.7	92.1 ± 21.1
休息10分	103.4 ± 20.0	117.9 ± 22.4	82.3 ± 17.5	93.0 ± 20.5
休息15分	109.7 ± 20.5 [†]	121.3 ± 17.7	83.8 ± 18.5	93.2 ± 21.1
休息20分	108.5 ± 19.0 [†]	118.4 ± 20.6	83.6 ± 16.7	92.1 ± 20.1
休息25分	110.5 ± 14.9 [†]	125.2 ± 18.0	81.9 ± 19.0	95.9 ± 19.6
休息30分	114.2 ± 18.9 [†]	127.4 ± 20.2	85.5 ± 18.7 [†]	97.0 ± 19.3

単位: cmH₂O (平均±標準偏差), (n=14).

*: $p<0.05$ (負荷前との比較), [†]: $p<0.05$ (負荷20分後と休息期との比較)

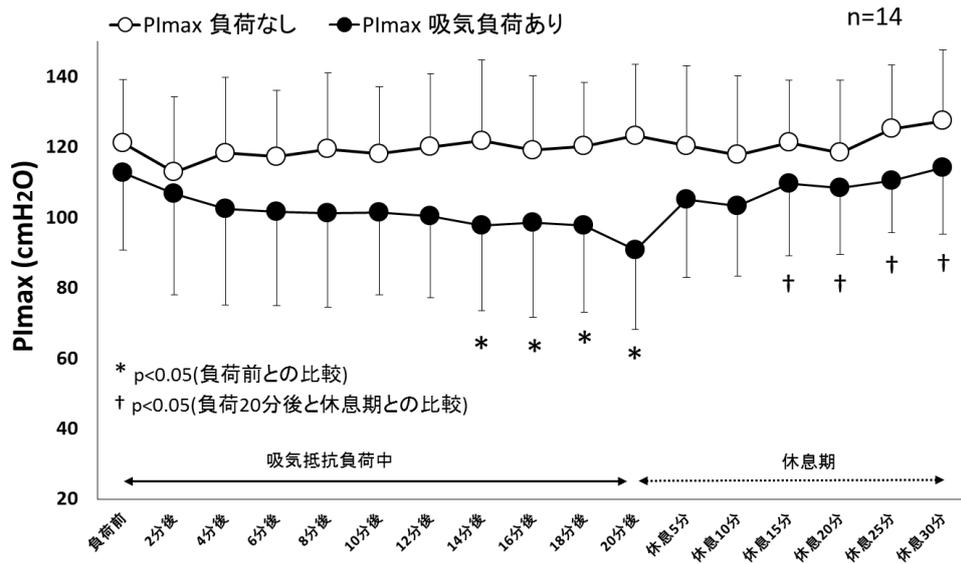


図 21 最大吸気口腔内圧(PImax)の経時的変化(吸気負荷あり, 負荷なし)

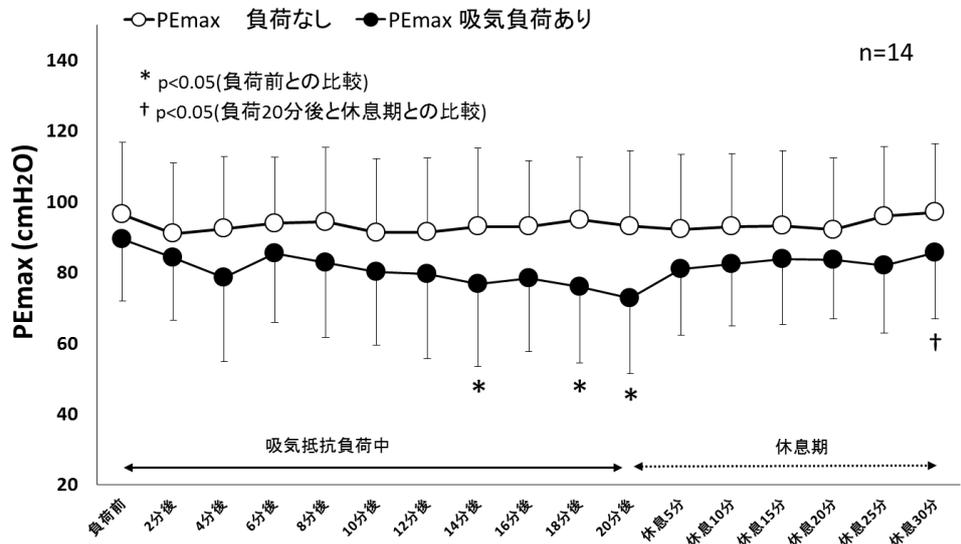


図 22 最大呼気口腔内圧(PEmax)の経時的変化(吸気負荷あり, 負荷なし)

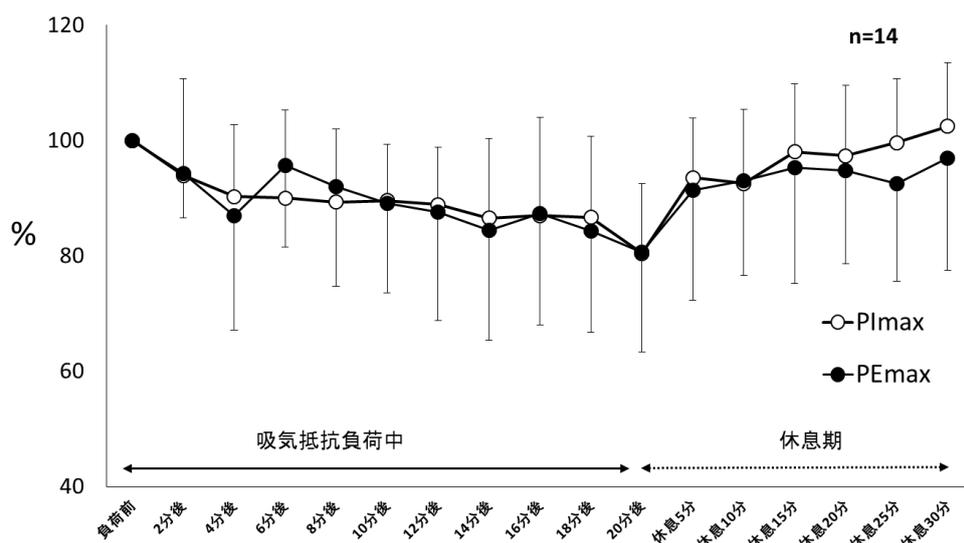


図 23 50%PImax の吸気負荷における最大口腔内圧(PImax, PEmax)の経時的変化 (負荷前の計測値を基準とした百分率)

表 4a 最大吸気口腔内圧(PImax)測定時の中央周波数の経時的変化(吸気負荷あり)

	PImax (n=14)						
	僧帽筋	胸鎖乳突筋	大胸筋	横隔膜	腹直筋	外腹斜筋	内腹斜筋
負荷前	64.8 ± 13.4	78.3 ± 12.7	67.9 ± 10.4	73.2 ± 13.2	73.3 ± 20.3	62.3 ± 12.4	87.3 ± 26.4
2分後	58.6 ± 14.5	70.8 ± 10.2	62.5 ± 12.0	65.8 ± 13.8	72.6 ± 22.7	59.8 ± 16.4	89.4 ± 30.5
4分後	62.4 ± 18.4	71.7 ± 7.5	68.0 ± 8.4	67.8 ± 9.2	74.0 ± 20.2	56.2 ± 11.1	89.9 ± 27.2
6分後	61.3 ± 15.2	72.2 ± 14.5	74.5 ± 11.7	71.4 ± 11.8	72.3 ± 24.2	56.8 ± 12.4	83.4 ± 30.3
8分後	64.6 ± 15.7	73.5 ± 10.9	68.2 ± 13.3	71.8 ± 13.3	74.4 ± 21.1	56.3 ± 12.4	82.7 ± 28.0
10分後	62.4 ± 18.3	73.0 ± 12.3	69.7 ± 13.0	69.3 ± 10.2	71.5 ± 22.2	60.9 ± 16.8	85.8 ± 33.2
12分後	60.9 ± 16.2	73.7 ± 12.5	69.7 ± 13.4	69.1 ± 9.8	74.5 ± 23.3	56.7 ± 12.6	83.5 ± 32.3
14分後	62.7 ± 13.7	72.8 ± 12.4	65.3 ± 9.7	67.9 ± 12.6	73.5 ± 27.3	55.2 ± 10.0	79.9 ± 31.3
16分後	67.9 ± 12.5	74.7 ± 10.4	66.5 ± 15.7	67.9 ± 6.3	69.9 ± 22.9	55.3 ± 15.3	79.3 ± 26.3
18分後	61.0 ± 14.8	70.7 ± 10.9	69.4 ± 16.4	66.0 ± 13.5	66.7 ± 22.4	58.6 ± 11.4	80.2 ± 26.5
20分後	67.2 ± 10.8	65.4 ± 9.6*	71.4 ± 15.9	66.7 ± 12.3	66.9 ± 16.7	57.0 ± 11.2	83.3 ± 34.6
休息期 5分	64.2 ± 15.9	78.8 ± 13.0 [†]	67.8 ± 18.9	66.3 ± 12.9	66.8 ± 16.0	57.2 ± 13.2	81.8 ± 31.9
休息期10分	61.6 ± 16.5	73.3 ± 12.4	65.6 ± 18.4	68.8 ± 14.1	68.5 ± 18.1	58.6 ± 9.6	84.4 ± 37.9
休息期15分	59.4 ± 15.1	75.4 ± 9.5 [†]	74.5 ± 16.7	71.0 ± 13.3	69.0 ± 21.9	55.3 ± 10.7	76.3 ± 31.5
休息期20分	65.0 ± 16.0	73.3 ± 10.3	69.3 ± 10.8	66.5 ± 14.1	70.7 ± 19.4	59.9 ± 11.1	80.5 ± 29.5
休息期25分	62.0 ± 14.6	72.9 ± 12.9	68.5 ± 15.2	66.7 ± 13.3	65.9 ± 20.7	54.3 ± 10.6	75.7 ± 32.9
休息期30分	61.0 ± 12.8	75.6 ± 9.8 [†]	68.1 ± 14.1	67.1 ± 15.3	68.4 ± 19.0	55.8 ± 13.4	86.2 ± 33.1

単位: Hz (平均±標準偏差), *:p<0.05(負荷前との比較), †:p<0.05(負荷20分後と休息期との比較), (n=14).

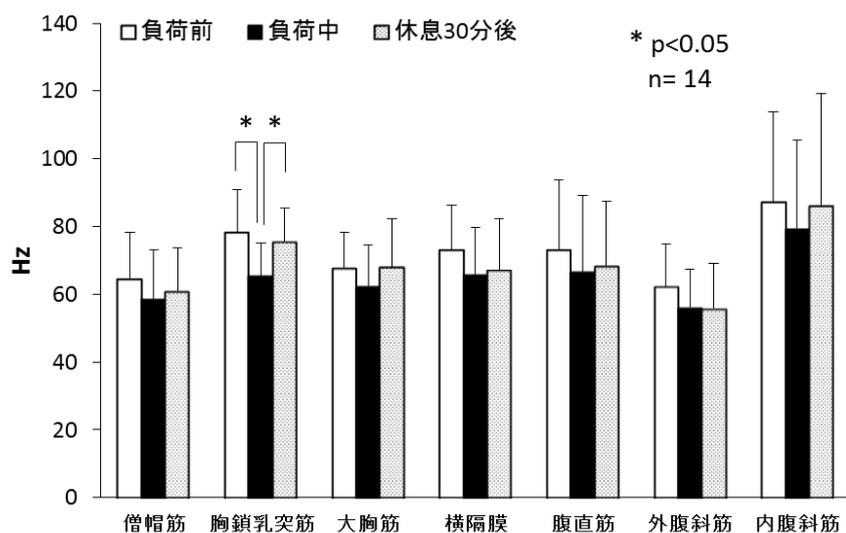


図 24 最大吸気口腔内圧(PImax)測定時の中央周波数の経時的変化(吸気負荷あり)
 グラフは負荷前, 負荷中最小値, 休息 30 分後の中央周波数の変化を示す

表 4b 最大呼気口腔内圧(PEmax)測定時の中央周波数の経時的変化(吸気負荷あり)

	PEmax (n=14)						
	僧帽筋	胸鎖乳突筋	大胸筋	横隔膜	腹直筋	外腹斜筋	内腹斜筋
負荷前	69.5 ± 14.1	67.8 ± 16.1	65.8 ± 11.3	72.8 ± 11.9	80.4 ± 15.7	62.4 ± 13.7	103.3 ± 30.0
2分後	65.7 ± 17.1	68.9 ± 12.7	59.1 ± 9.4	64.6 ± 14.3	70.5 ± 11.6	63.2 ± 15.4	97.4 ± 28.0
4分後	63.4 ± 16.3	68.4 ± 11.6	59.8 ± 12.8	68.8 ± 10.5	72.3 ± 9.1	60.9 ± 18.1	92.4 ± 26.8
6分後	64.2 ± 15.2	72.8 ± 16.3	62.2 ± 11.5	74.7 ± 13.1	76.1 ± 11.7	62.5 ± 16.8	97.2 ± 31.0
8分後	68.7 ± 15.9	67.7 ± 9.3	63.8 ± 11.5	74.1 ± 12.5	75.1 ± 10.7	60.1 ± 13.6	101.4 ± 27.0
10分後	69.2 ± 13.0	66.3 ± 11.4	62.9 ± 12.1	67.3 ± 11.7	71.7 ± 12.7	55.5 ± 13.2	94.3 ± 27.9
12分後	64.2 ± 16.8	68.7 ± 10.3	61.9 ± 8.9	70.8 ± 12.3	72.8 ± 11.2	56.0 ± 11.3	100.0 ± 30.8
14分後	64.4 ± 14.1	66.5 ± 11.5	64.4 ± 11.5	75.3 ± 13.6	69.4 ± 14.9	63.8 ± 18.9	101.5 ± 29.1
16分後	67.3 ± 15.1	73.3 ± 17.5	61.6 ± 13.8	72.8 ± 15.6	70.2 ± 8.8	60.9 ± 16.1	96.7 ± 24.7
18分後	65.1 ± 15.2	73.5 ± 14.8	62.2 ± 12.0	71.4 ± 8.6	66.9 ± 7.5	63.5 ± 16.2	97.8 ± 30.0
20分後	70.7 ± 13.3	70.6 ± 13.6	60.1 ± 10.6	71.3 ± 11.9	63.9 ± 6.6*	57.1 ± 12.4	92.2 ± 23.3
休息期 5分	67.1 ± 17.8	73.3 ± 13.2	65.9 ± 13.3	69.3 ± 6.0	68.9 ± 12.0	61.2 ± 17.0	92.2 ± 28.8
休息期10分	64.4 ± 17.8	70.1 ± 13.9	66.7 ± 15.1	69.9 ± 8.7	69.2 ± 14.0	58.8 ± 15.7	96.7 ± 32.6
休息期15分	62.4 ± 16.7	65.3 ± 6.1	65.8 ± 15.0	69.7 ± 13.2	67.0 ± 16.1	59.8 ± 15.9	95.0 ± 26.6
休息期20分	66.6 ± 17.0	70.8 ± 10.7	66.6 ± 9.4	73.3 ± 15.9	72.2 ± 14.4	60.3 ± 16.1	89.7 ± 27.0
休息期25分	62.9 ± 17.9	70.3 ± 11.2	66.5 ± 11.0	73.5 ± 13.7	67.8 ± 12.7	57.9 ± 13.0	94.5 ± 28.5
休息期30分	67.7 ± 15.6	70.9 ± 12.4	64.6 ± 12.4	69.9 ± 16.4	67.6 ± 11.9	58.0 ± 12.2	100.4 ± 22.9

単位: Hz (平均±標準偏差), *: p<0.05(負荷前との比較), †: p<0.05(負荷20分後と休息期との比較), (n=14).

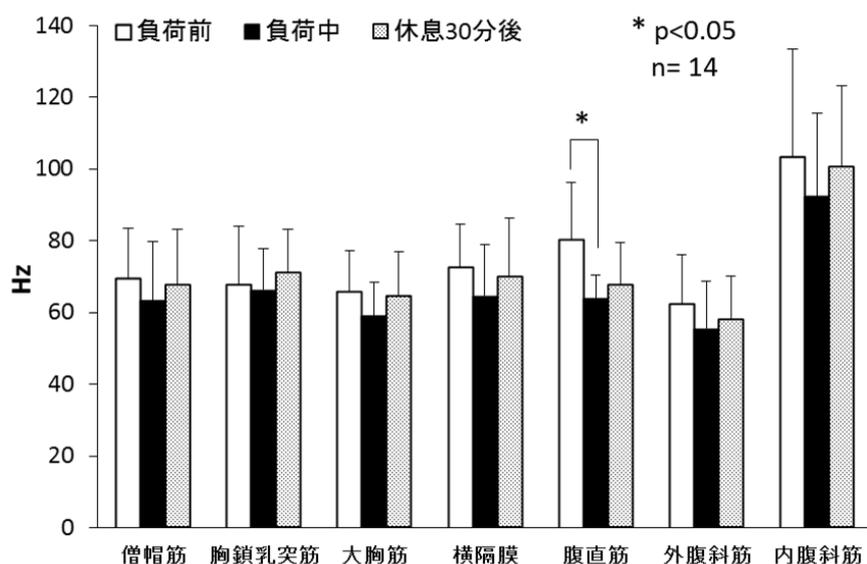


図 25 最大呼気口腔内圧(PEmax)測定時の中央周波数の経時的変化(吸気負荷あり)
 グラフは負荷前, 負荷中最小値, 休息 30 分後の中央周波数の変化を示す

表 5a 最大吸気口腔内圧(PImax)測定時の中央周波数の経時的変化(負荷なし)

	PImax (n=14)						
	僧帽筋	胸鎖乳突筋	大胸筋	横隔膜	腹直筋	外腹斜筋	内腹斜筋
負荷前	56.4 ± 13.6	78.7 ± 11.4	68.0 ± 12.5	70.7 ± 13.1	76.5 ± 18.7	57.4 ± 10.3	89.0 ± 30.6
2 分後	60.9 ± 15.7	74.9 ± 9.6	78.6 ± 18.0	75.3 ± 14.6	78.6 ± 25.0	58.2 ± 9.1	86.2 ± 33.6
4 分後	61.0 ± 15.4	72.1 ± 9.5	76.7 ± 11.7	69.8 ± 15.6	84.7 ± 21.4	54.7 ± 9.5	86.4 ± 35.4
6 分後	61.1 ± 11.5	74.0 ± 7.0	76.6 ± 19.0	78.2 ± 18.7	85.4 ± 23.1	58.2 ± 12.5	93.9 ± 25.8
8 分後	60.1 ± 15.3	78.7 ± 11.4	76.7 ± 19.6	71.5 ± 16.1	82.1 ± 23.1	57.0 ± 10.5	91.6 ± 34.3
10分後	61.5 ± 13.0	75.5 ± 10.5	79.7 ± 18.3	74.1 ± 16.6	80.5 ± 22.5	53.4 ± 11.4	107.9 ± 42.2
12分後	59.6 ± 14.8	78.5 ± 10.4	78.2 ± 17.0	71.3 ± 13.3	82.9 ± 22.2	55.7 ± 10.7	99.4 ± 37.2
14分後	65.8 ± 19.8	79.5 ± 11.9	71.3 ± 14.3	71.0 ± 15.0	78.5 ± 22.7	54.5 ± 10.2	96.7 ± 33.6
16分後	62.4 ± 18.2	84.1 ± 17.7	69.7 ± 9.1	75.3 ± 15.1	79.9 ± 25.0	57.1 ± 12.0	95.4 ± 27.2
18分後	60.7 ± 14.0	78.9 ± 16.6	72.1 ± 14.4	78.6 ± 16.4	83.5 ± 25.6	58.1 ± 10.3	94.7 ± 31.9
20分後	66.1 ± 17.5	77.2 ± 9.0	71.4 ± 10.4	75.1 ± 16.1	78.8 ± 19.5	58.0 ± 15.3	94.6 ± 32.9
休息期 5分	64.6 ± 16.2	79.2 ± 8.4	73.2 ± 10.8	70.4 ± 13.5	82.3 ± 20.4	56.4 ± 10.1	94.7 ± 34.7
休息期10分	63.4 ± 18.1	78.5 ± 16.1	77.3 ± 15.4	71.6 ± 13.5	82.4 ± 24.8	53.3 ± 10.3	90.1 ± 35.7
休息期15分	58.2 ± 20.1	78.2 ± 12.2	72.9 ± 12.2	74.0 ± 14.8	77.0 ± 21.9	60.0 ± 12.2	84.8 ± 24.6
休息期20分	61.8 ± 14.3	77.3 ± 11.7	71.6 ± 13.3	73.8 ± 12.3	80.0 ± 21.9	54.9 ± 10.3	102.4 ± 37.1
休息期25分	60.3 ± 17.5	77.7 ± 11.7	71.5 ± 17.1	76.4 ± 17.5	83.6 ± 21.5	58.4 ± 6.6	94.6 ± 31.0
休息期30分	61.2 ± 15.8	81.0 ± 14.1	70.0 ± 16.8	71.9 ± 12.0	77.7 ± 17.2	60.0 ± 10.4	86.5 ± 29.9

単位: Hz (平均±標準偏差), *: p<0.05(負荷前との比較), †: p<0.05(負荷20分後と休息期との比較), (n=14).

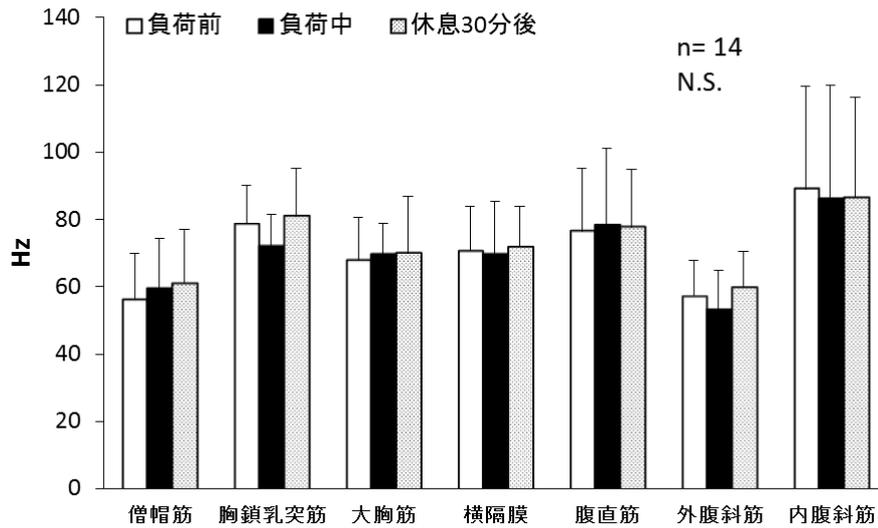


図 26 最大吸気口腔内圧(PImax)測定時の中央周波数の経時的変化(負荷なし)
 グラフは負荷前, 負荷中最小値, 休息 30 分後の中央周波数の変化を示す

表 5b 最大呼気口腔内圧(PEmax)測定時の中央周波数の経時的変化(負荷なし)

	PEmax (n=14)						
	僧帽筋	胸鎖乳突筋	大胸筋	横隔膜	腹直筋	外腹斜筋	内腹斜筋
負荷前	64.7 ± 19.6	72.3 ± 11.6	65.2 ± 18.3	67.3 ± 12.6	81.0 ± 27.1	61.2 ± 11.6	93.0 ± 25.9
2 分後	70.6 ± 17.5	72.3 ± 15.3	72.2 ± 21.4	70.5 ± 11.4	80.1 ± 23.0	57.5 ± 12.6	103.0 ± 25.3
4 分後	68.4 ± 22.5	79.1 ± 21.8	72.0 ± 23.6	73.2 ± 18.7	75.5 ± 20.4	60.8 ± 20.0	97.1 ± 26.4
6 分後	69.8 ± 23.0	73.2 ± 15.1	70.9 ± 21.2	69.6 ± 10.2	85.1 ± 25.7	60.8 ± 13.7	97.8 ± 25.4
8 分後	71.4 ± 22.7	78.2 ± 19.2	77.3 ± 27.6	68.3 ± 8.0	80.6 ± 24.3	61.9 ± 11.5	103.2 ± 23.1
10分後	66.9 ± 15.0	76.9 ± 21.1	71.1 ± 20.3	74.8 ± 15.8	85.2 ± 20.0	65.3 ± 21.4	99.1 ± 24.4
12分後	71.3 ± 17.0	68.1 ± 11.9	76.1 ± 26.5	72.5 ± 13.7	82.0 ± 18.3	63.4 ± 16.1	104.7 ± 23.1
14分後	68.1 ± 19.7	76.2 ± 23.1	68.6 ± 24.6	70.1 ± 14.5	81.7 ± 23.9	65.3 ± 25.7	99.0 ± 20.4
16分後	69.5 ± 14.4	80.1 ± 35.3	67.9 ± 17.3	70.9 ± 12.9	75.7 ± 18.5	59.9 ± 13.5	100.9 ± 25.6
18分後	72.8 ± 14.8	86.1 ± 26.8	67.0 ± 18.3	67.3 ± 11.4	77.5 ± 23.5	66.4 ± 20.5	100.9 ± 23.6
20分後	73.4 ± 20.5	83.9 ± 28.2	72.8 ± 26.5	67.5 ± 9.0	76.3 ± 19.1	64.2 ± 12.2	100.3 ± 20.0
休息期 5分	68.5 ± 21.0	75.4 ± 21.5	69.0 ± 22.3	70.2 ± 8.5	77.3 ± 16.8	65.3 ± 16.3	100.9 ± 22.1
休息期10分	68.2 ± 18.2	81.0 ± 23.5	70.5 ± 19.4	65.0 ± 12.2	80.4 ± 23.6	74.6 ± 33.5	95.7 ± 20.7
休息期15分	72.4 ± 18.2	74.5 ± 18.9	64.4 ± 19.0	70.0 ± 11.4	75.9 ± 18.9	65.2 ± 19.7	99.1 ± 27.0
休息期20分	77.1 ± 22.3	72.7 ± 16.2	68.4 ± 18.4	69.9 ± 14.5	78.5 ± 24.4	74.9 ± 36.2	98.6 ± 19.7
休息期25分	73.1 ± 19.1	81.3 ± 19.8	72.9 ± 23.8	68.8 ± 10.5	80.1 ± 23.0	66.0 ± 22.1	101.8 ± 24.1
休息期30分	73.3 ± 20.8	77.3 ± 22.6	68.4 ± 22.5	71.3 ± 11.8	80.5 ± 22.1	69.7 ± 14.8	100.5 ± 21.1

単位: Hz (平均±標準偏差), *: p<0.05(負荷前との比較), †: p<0.05(負荷20分後と休息期との比較), (n=14).

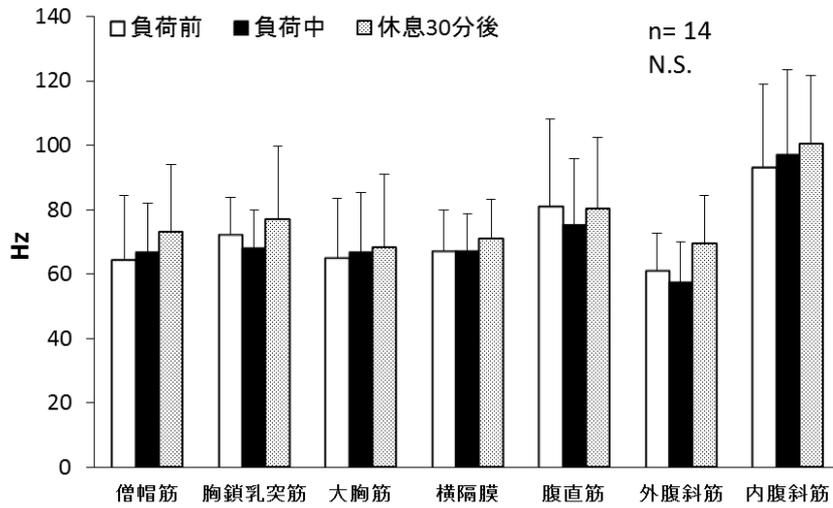


図 27 最大呼気口腔内圧(PEmax)測定時の中央周波数の経時的変化(負荷なし)
 グラフは負荷前, 負荷中最小値, 休息 30 分後の中央周波数の変化を示す

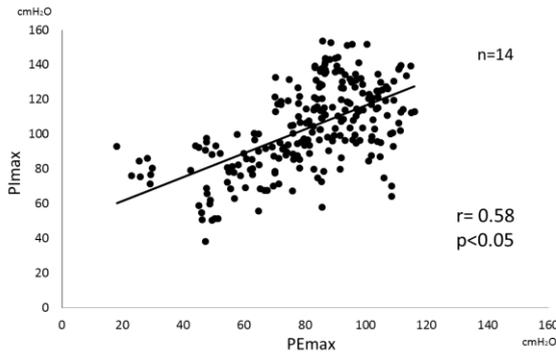


図 28 PImax と PEmax の相関(吸気負荷あり)

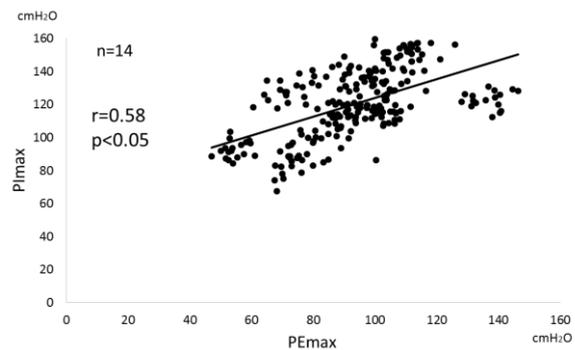


図 29 PImax と PEmax の相関(負荷なし)

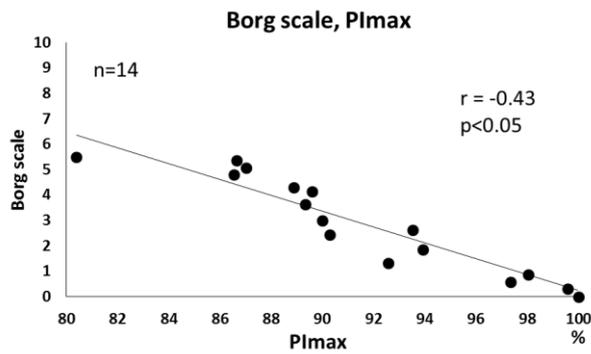


図 30 Borg scale と PImax の相関
 (吸気負荷あり)

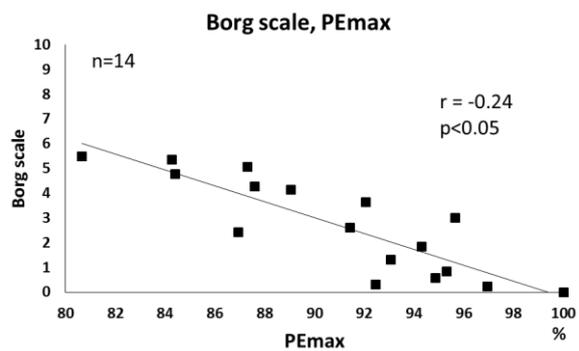


図 31 Borg scale と PEmax の相関
 (吸気負荷あり)

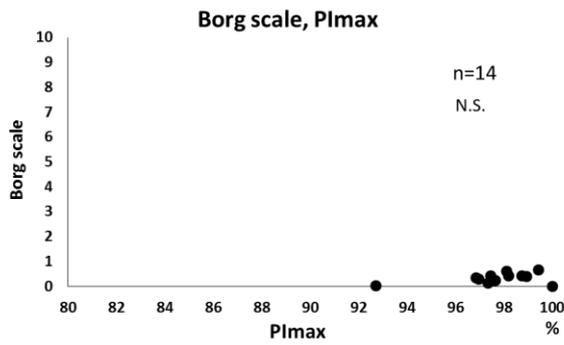


図 32 Borg scale と PImax の相関
(負荷なし)

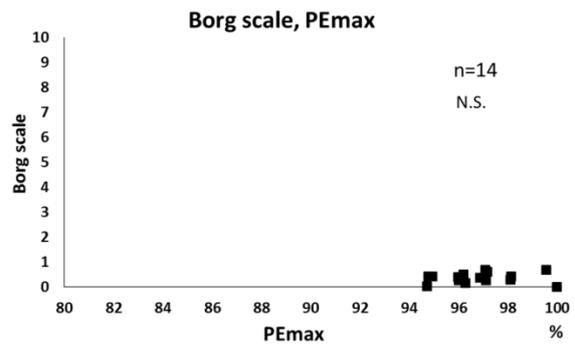


図 33 Borg scale と PEmax の相関
(負荷なし)

表 6 modified Borg scale の経時的変化

	modified Borg scale (0-10)	
	吸気負荷あり	負荷なし
負荷前	0.0 (0.0, 0.0)	0.0 (0.0, 0.0)
2 分後	2.0 (1.0, 2.3)	0.0 (0.0, 0.0)
4 分後	2.0 (1.8, 3.3)	0.0 (0.0, 0.1)
6 分後	3.0 (2.0, 4.0)	0.0 (0.0, 0.3)
8 分後	4.0 (3.0, 4.0)	0.0 (0.0, 0.3)
10分後	4.0 (3.0, 5.0)	0.0 (0.0, 0.5)
12分後	5.0 (3.0, 5.0)	0.0 (0.0, 0.5)
14分後	5.0 (4.0, 6.0)	0.0 (0.0, 0.5)
16分後	5.0 (4.0, 6.3)	0.0 (0.0, 0.6)
18分後	5.0 (4.0, 7.0)	0.0 (0.0, 0.9)
20分後	5.0 (4.0, 6.5)	0.0 (0.0, 0.9)
休息期 5分	3.0 (1.8, 4.0)	0.0 (0.0, 0.1)
休息期10分	1.0 (0.4, 2.0)	0.0 (0.0, 0.5)
休息期15分	0.5 (0.0, 2.0)	0.0 (0.0, 0.1)
休息期20分	0.5 (0.0, 1.0)	0.0 (0.0, 0.1)
休息期25分	0.0 (0.0, 0.6)	0.0 (0.0, 0.1)
休息期30分	0.0 (0.0, 0.6)	0.0 (0.0, 0.5)

median (25percentile, 75percentile), n=14.

表 7 H/L ratio による呼吸筋疲労開始時間

	吸気負荷あり		吸気負荷なし	
	PImax	PEmax	PImax	PEmax
僧帽筋	4.0 (2.0, 11.0)	3.0 (2.0, 9.0)	8.0 (2.0, 14.0)	4.0 (2.0, 8.5)
胸鎖乳突筋	4.0 (2.0, 4.5)	8.0 (2.0, 16.0)	2.0 (2.0, 4.0)	4.0 (2.0, 14.0)
大胸筋	2.0 (2.0, 10.5)	2.0 (2.0, 4.0)	4.0 (2.0, 8.0)	6.0 (2.0, 13.0)
横隔膜	2.0 (2.0, 12.0)	—	3.0 (2.0, 8.0)	—
腹直筋	6.0 (2.0, 11.5)	2.0 (2.0, 13.0)	4.0 (2.0, 7.0)	2.0 (2.0, 10.0)
外腹斜筋	2.0 (2.0, 5.0)	4.0 (2.0, 6.5)	4.0 (3.5, 10.5)	2.0 (2.0, 3.0)
内腹斜筋	5.0 (2.0, 7.0)	2.0 (2.0, 4.0)	4.0 (2.0, 8.0)	4.0 (2.5, 11.0)

単位: min, median (25percentile, 75percentile), PEmax 横隔膜は除外, n=14.

測定筋毎の筋疲労開始時間の比較: *p<0.05

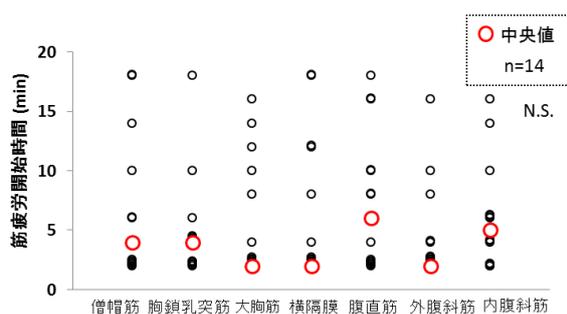


図 34 H/L ratio による筋疲労開始時間 (PImax, 吸気負荷あり)

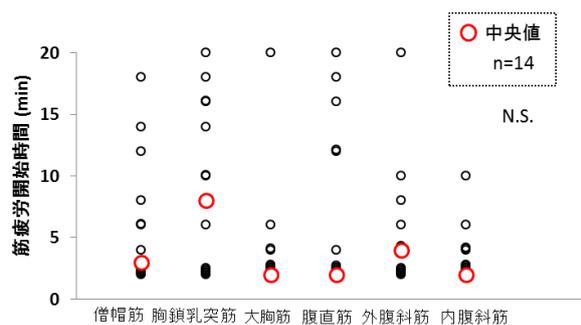


図 35 H/L ratio による筋疲労開始時間 (PEmax, 吸気負荷あり)

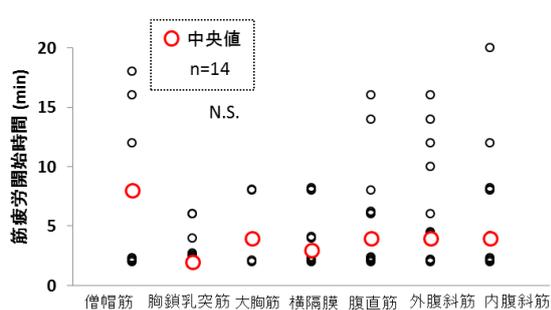


図 36 H/L ratio による筋疲労開始時間 (PImax, 負荷なし)

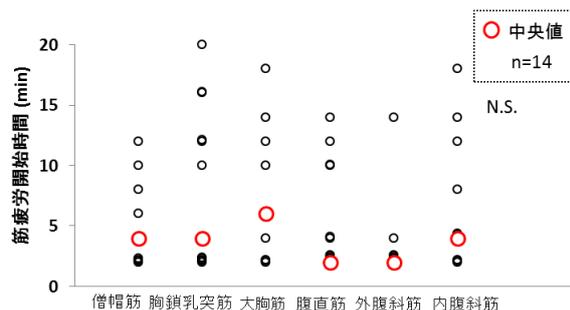


図 37 H/L ratio による筋疲労開始時間 (PEmax, 負荷なし)

表 8 呼吸機能検査(各指標)

FVC (L)	%FVC (%)	FEV _{1.0} (L)	FEV _{1.0} (%)	PEF (L/s)	%PEF (%)
4.5±0.4	107.3±8.0	3.9±0.2	87.3±6.1	9.3±1.1	82.6±10.2

単位:()内, 平均±標準偏差, n=14.

2-4 考察

今回、50%PI_{max}の吸気負荷における呼吸筋疲労を分析するため、呼吸筋力である最大口腔内圧(PI_{max}, PE_{max})と各測定筋の表面筋電図周波数解析を行った。その結果、50%PI_{max}の吸気負荷では、最大吸気口腔内圧(PI_{max})と最大呼気口腔内圧(PE_{max})は経時的な低下を示し、負荷中断後の休息期に回復がみられたことから呼吸筋疲労が出現したことが観察された。また、呼吸筋の筋疲労特性として吸気負荷に対して吸気と呼気双方に呼吸筋疲労が生じることが明らかとなり、両者の間に正の相関がみられた($r=0.58$, $p<0.05$)。また、吸気負荷中の最大吸気口腔内圧(PI_{max})と呼吸困難感には負の相関性がみられた($r=-0.43$, $p<0.05$)。表面筋電図周波数解析の結果、吸気筋で胸鎖乳突筋、呼気筋で腹直筋に筋疲労が出現した。呼吸筋疲労開始時間は、吸気筋と呼気筋で有意な差がみられなかった。

本研究では、呼吸筋疲労の分析を行うにあたり、プロトコール自体が呼吸筋疲労へ及ぼす影響を検証する必要があった。そのため、50%PI_{max}の吸気負荷なしの条件下においても同様の計測を行ったが、最大吸気口腔内圧(PI_{max})と最大呼気口腔内圧(PE_{max})および中央周波数(MDF)の経時的な低下がみられず、呼吸筋疲労は観察されなかった。このため、本研究で用いた50%PI_{max}の吸気負荷が呼吸筋疲労を出現させたことが確認された。

呼吸筋疲労の指標には、筋の収縮力を測定する方法と筋電図をとる方法があり²⁸⁾、前者では呼吸筋力として最大吸気口腔内圧(PI_{max})と最大呼気口腔内圧(PE_{max})、後者ではsEMGによる筋電図周波数解析を用いた。呼吸筋力の測定は、呼吸運動により胸腔や口腔で発生する陽圧および陰圧の最大値が筋力の指標として用いられ⁵⁶⁾、呼吸筋が発生する力を最大口腔内圧(PI_{max}, PE_{max})として表すことから⁷⁹⁾、最大吸気口腔内圧(PI_{max})と最大呼気口腔内圧(PE_{max})を呼吸筋力の指標とした。sEMGによる筋電図周波数解析では、呼吸筋毎に抽出した筋電図波形からEMGパワースペクトラムを算出し、中央周波数(MDF)とH/L ratioを呼吸筋活動の指標とした。本研究における筋疲労の定義については、第1章、第5節(1-5)を用いて検証した。

2-4-1 最大吸気口腔内圧(PI_{max})における経時的变化と呼吸筋疲労

50%PI_{max}の吸気負荷により、吸気筋力であるPI_{max}が負荷開始20分後に約20%の有意な低下を認め、休息後に回復がみられたことから吸気筋疲労が出現した。吸気筋には、主要な吸気筋としての横隔膜と努力呼吸時に働く呼吸補助筋がある。横隔膜の収縮は、安静時呼吸量の65%から75%を担っているといわれており^{22,44)}、横隔膜の収縮の変化が最大口腔内圧や換気機能に与える影響が大きいことが報告されている²²⁾。一方で、呼吸補助筋には胸鎖乳突筋、斜角筋、僧帽筋、大胸筋、小胸筋がある。この中でも、胸鎖乳突筋は重要な役割をしていることがいわれており²¹⁾、鎖骨や胸骨を引き上げることで胸郭の前後径を増大させ^{25,80)}、吸気負荷量増加に伴い活動量が直線的に増加することが報告されている⁸¹⁾。今回、50%PI_{max}の吸気負荷による中央周波数(MDF)で比較した結果では、主要な吸気筋である横隔膜の疲労は有意な差は認められず、呼吸補助筋である胸鎖乳突筋の筋疲労が認められた。このことは、吸気への負荷量増加に伴い、胸鎖乳突筋の活動が増加したことで筋疲労が生じ、吸気筋力であるPI_{max}を低下させた要因であったことが考えられた。

2-4-2 最大呼気口腔内圧(PEmax)における経時的变化と呼吸筋疲労

50%PImax の吸気負荷により、吸気筋力である PImax のみならず呼気筋力である PEmax の低下と休息後の回復がみられ、吸気筋疲労に加え呼気筋疲労が認められた。さらに、呼気筋である腹直筋の中央周波数(MDF)が有意に低下していたことから、腹直筋の筋疲労が出現したことが考えられた。腹直筋が筋疲労を起こした理由として、換気亢進に伴う横隔膜の収縮効率を改善させるための結果と推測された。

呼気筋は、安静時の呼吸では胸郭や肺の弾性力により呼気が行われており、呼気筋はエネルギーを必要としていないことが知られている。しかし、今回のような吸気負荷により呼吸補助筋が動員され換気の需要が高まった状態や運動時などにおいては、呼気筋の活動が吸気筋よりも著しくなるとの報告や²⁴⁾、呼気筋は換気が亢進することで呼気の早期から活動をはじめ、その後の吸気まで続くことがいわれている⁸²⁾。本研究で用いた 50%PImax の吸気負荷により、換気の亢進が出現した際には、呼気時の腹直筋の収縮により腹圧を陽圧にするために横隔膜を胸腔内に押し上げ、横隔膜筋線維を最適長に近づけることで、次の吸気における横隔膜の収縮効率を改善させる役割があることが考えられている⁵⁾。横隔膜が収縮する上で効率の良い筋線維の最適長は、筋の長さ-張力関係で表され、最大の収縮張力を発生する長さであり、安静呼気位での長さに近いとされている²⁹⁾。この、筋の長さ-張力関係で表された最適長よりも短縮した状態で収縮する場合、筋の収縮力は低下し、より迅速に疲労することがいわれており¹⁰⁾、横隔膜の収縮効率が悪い状態を表す。このため、腹直筋による腹圧の上昇は、横隔膜の筋線維を最適長に近づけることで、次の吸気における横隔膜の収縮効率を改善させ、吸気負荷時の吸気筋の疲労を最小限に抑制している可能性が推測された。このような呼気筋への負荷増加に伴う機能的残気量(Functional Residual Capacity ; 以下、FRC)の上昇時は、横隔膜が押し下げられ、横隔膜の筋線維は正常よりも短縮した状態になるため、筋の長さ-張力関係から筋の収縮力は低下することが報告されている⁴⁹⁾。横隔膜の発生圧は Laplace の法則(横隔膜発生圧 : P, 筋収縮力 : T, 曲率半径 : R とした場合、 $P=2T/R$)により求められる⁸³⁾。FRC 上昇により横隔膜が平坦化すると、曲率半径は増大し、横隔膜発生圧は低下する。横隔膜発生圧を補うためには、筋収縮力を増加させる必要があるため、腹筋群の活動による腹圧の上昇により、横隔膜を胸腔内に押し上げ、横隔膜筋線維を最適長に近づけることで横隔膜の収縮効率を改善させる必要がある。しかし本研究結果から、呼気筋である腹直筋の筋疲労が出現していたことから、腹圧が減少し、横隔膜の筋収縮力は増大せず、結果的に横隔膜発生圧の低下を引き起こしたことが、PImax の低下に繋がった一つの要因であったことが推測された。このように、吸気負荷に伴う腹圧の上昇は、腹筋群への負荷を増加させ、腹直筋の疲労により PEmax の低下を引き起こしたことが考えられた。今回の 50%PImax の吸気負荷において PImax のみでなく PEmax の低下がみられ、両者に正の相関性がみられたことから、吸気筋力と呼気筋力には関係性があることが考えられた。

2-4-3 中央周波数(MDF)と H/L ratio の低下に関する機序

筋電図周波数解析では、最大吸気口腔内圧(PImax)、最大呼気口腔内圧(PEmax)測定時における MDF と H/L ratio の低下を筋疲労の指標とした。筋電図周波数解析では、MDF において胸鎖乳突筋と腹直筋が有意に低下し筋疲労が認められた。H/L ratio については、筋線維タイプによる

筋疲労徴候を全筋で検出し、筋疲労開始時間については有意な差は認められなかった。

筋電図周波数解析による MDF は、筋疲労が発生すると疲労の進行に伴い EMG パワースペクトラムは低減にシフトし、MDF は一貫して低下するといわれている⁸⁴⁾。MDF の低下の原因として、活動電位の持続時間の延長や伝導速度の遅延が主な原因とされ⁸⁵⁾、伝導速度の低下は筋収縮による乳酸などの代謝産物の蓄積により細胞外 pH が変化し、活動電位の筋線維伝導速度が低下することが考えられている^{84,86)}。また、筋線維による筋疲労特性に関連したものとして、type II 線維は伝導速度が速いが耐久性に劣り、type I 線維は耐久性に優れているが伝導速度が速筋線維よりも遅いということが存在する⁸⁶⁾。周波数解析においては、type II 線維は高周波数を、type I 線維は低周波数を反映するといわれており³⁵⁾、type II 線維が活動を停止しても、type I 線維は活動を維持しているために、筋全体としては伝導速度が低下したように観察される⁸⁶⁾。このことから、呼吸筋疲労により活動電位の伝導速度が低下したことで、筋線維タイプによる筋の疲労特性の影響が同時に出現したことで、MDF の低下が出現したことが考えられた。

H/L ratio の低下については、筋疲労が生じると高周波数成分(type II 線維)が減少し、低周波数成分(type I 線維)が増加することから^{13,16)}、高周波数と低周波数の比率が低下する。このため、H/L ratio は筋線維タイプにおける筋組織内の収縮代謝特性から疲労に傾く時点を捉えていると考えられており^{34,36)}、より選択的に筋線維タイプの疲労徴候を反映した結果と考えられた。このため、20-350Hz と広範囲な周波数から解析している MDF では筋疲労が抽出されなくても、H/L ratio の低下による疲労徴候が出現していた可能性が考えられた。

2-4-4 中央周波数(MDF)の経時的変化と最大吸気口腔内圧(PImax)、最大呼気口腔内圧(PEmax)の経時的変化への影響

最大吸気口腔内圧(PImax)測定時の中央周波数(MDF)では、胸鎖乳突筋が負荷中 20 分後に有意な低下を示し、休息期 5 分後、15 分後、30 分後に回復が認められた。休息後の疲労回復において、高周波数の疲労は早期に回復するが、低周波数の疲労は長時間持続することから¹⁵⁾、胸鎖乳突筋の筋疲労は高周波数の疲労が出現していたことが推測された。この高周波数は、type II 線維を反映するとされていることから、胸鎖乳突筋は収縮速度が速く、大きな張力を発揮する type II 線維の活動により筋疲労が出現していたことが考えられた。

最大呼気口腔内圧(PEmax)測定時の中央周波数(MDF)では、腹直筋が負荷中 20 分後に有意な低下を示した。このことから、吸気負荷により呼気筋の中でも腹直筋に筋疲労が出現することが考えられた。最大呼気口腔内圧(PEmax)は呼気筋全体の最大収縮力を測定する方法であることから、呼気筋である腹直筋の筋疲労は最大呼気口腔内圧(PEmax)の低下に影響を与えたことが考えられた。この他、腹直筋の収縮は腹圧を増大させ、横隔膜を上方に持ち上げ、ドーム軸を伸ばす役割があるため⁸⁷⁾、腹直筋といった呼気筋疲労は、横隔膜の長さ-張力関係から発生圧(PImax)を維持・増大させるのに不利な状況下となり、PEmax のみでなく PImax への影響を与えた可能性が推測された。

2-4-5 筋線維組成からみた呼吸筋毎の筋疲労への影響

各筋線維タイプの筋線維数の総筋線維数に対する比率のことを筋線維組成といわれ、筋全体の

収縮特性と代謝特性の指標となる⁴⁵⁾。最大吸気口腔内圧(PImax)における胸鎖乳突筋の筋線維組成については、type II 線維が 64.8%、type I 線維が 35.2%であり⁸⁸⁾、胸鎖乳突筋については type II 線維が他の骨格筋よりも多く存在する。このため、胸鎖乳突筋は易疲労性の type II 線維である高周波数の疲労が生じ、中央周波数(MDF)の低下と休息後の回復に影響を与えていたことが考えられた。同じ吸気筋である横隔膜の筋線維組成については、type II 線維が 45%、type I 線維が 55%と疲労しにくい収縮特性を持っていることから^{44,89)}、吸気負荷による持続的な収縮においても筋疲労を生じにくい特性を備えていることが考えられた。

最大呼気口腔内圧(PEmax)における腹直筋の筋線維組成については、type II 線維が 53.9%、type I 線維が 46.1%であり⁸⁸⁾、他の骨格筋と比較し筋線維組成の割合については大きな差がみられない。同じ呼気筋である外腹斜筋と内腹斜筋の筋線維組成は、外腹斜筋で type II 線維が 42%、type I 線維が 58%、内腹斜筋で type II 線維が 44%、type I 線維が 56%という報告がある⁹⁰⁾。腹直筋は、外腹斜筋と内腹斜筋より type II 線維の割合が多いことから、呼気筋の中で筋疲労を生じやすい特徴があることが原因の一つになったと考えられた。

2-4-6 最大吸気口腔内圧(PImax)と最大呼気口腔内圧(PEmax)および Borg scale との関係性

Borg scale と PImax, PEmax の関係性については、Borg scale による呼吸困難感が吸気に対する負荷時間の増加に伴い PImax と PEmax が低下し負の相関がみられた。これは負荷呼吸を続けるために、筋疲労の発生に対応して呼吸中枢からの出力が増加し、呼吸努力感あるいは呼吸困難感の増大を引き越したことがいえる⁷⁷⁾。今回、吸気負荷であったことから、Borg scale と PImax の負の相関が Borg scale と PEmax よりも強かったことが考えられた。また、PImax の低下には胸鎖乳突筋が影響している可能性が考えられたことから、吸気負荷に伴う胸鎖乳突筋の疲労が呼吸困難感に関連していることが考えられた。さらに COPD 患者の呼吸困難感は、胸鎖乳突筋が横隔膜よりも早期に疲労し影響を与えるとされていることから³⁷⁾、本研究結果と一致する内容であったことが考えられた。

2-4-7 H/L ratio からみた呼吸筋疲労と最大吸気口腔内圧(PImax)、最大呼気口腔内圧(PEmax)の経時的変化について

PImax, PEmax 測定時における H/L ratio の呼吸筋疲労開始時間の検証において、吸気筋と呼気筋の筋疲労開始時間に差がみられなかった。中央値であるが、PImax では各測定筋は吸気負荷開始 2 分後から 6 分後までの間、PEmax では 2 分後から 8 分後までの間に H/L ratio の低下による筋疲労の徴候が出現した。H/L ratio の低下は、最大口腔内圧(PImax, PEmax)の低下よりも早期から確認され、筋線維タイプによる筋疲労徴候が吸気筋、呼気筋ともに認められた。この H/L ratio の低下は、呼吸筋による発生圧(最大口腔内圧)よりも早期に疲労を検出できる方法であることが報告されているため^{13,44)}、本研究結果からもその可能性が考えられた。今回、筋電図周波数解析において中央周波数(MDF)と H/L ratio を指標として呼吸筋疲労の検出を行ったが、中央周波数(MDF)といった周波数の総合的な評価指標と H/L ratio のような周波数帯域を分けて筋線維タイプ(type I 線維, type II 線維)による収縮代謝特性を評価することでより詳細に筋組織内の疲労特性を検出できる可能性があると考えられた。また、臨床においても H/L ratio による呼吸筋疲

労を早期に検出する試みがされており⁴⁴⁾、筋疲労の早期発見に有用な指標の一つになることが考えられた。しかし、H/L ratioの低下による呼吸筋疲労開始時間は測定値にばらつきが大きく、負荷開始直後からH/L ratioの低下が認められた。先行研究においても、H/L ratioの測定にばらつきが生じたこと¹³⁾、筋疲労時の特徴では高周波数帯域が初期から低下することが報告されているため^{16,33)}、本研究においてもその点を踏まえ解釈する必要がある。また、吸気負荷時の最大吸気口腔内圧(PImax)測定時の腹直筋と最大呼気口腔内圧(PEmax)測定時の胸鎖乳突筋の結果から、高周波数帯域の低下(H/L ratioの低下)が初期から表れる対象者と表れない対象者の両者が混在している結果が認められた。筋疲労開始時間については、呼吸筋毎の比較において有意な差はみられなかったが、吸気負荷時ではtype II線維とtype I線維の使い方に個人差が生じる可能性が考えられた。これは、同じ筋であっても収縮特性や疲労特性は個人によっても異なることがいわれており⁸⁵⁾、筋線維タイプにおける疲労特性については個人間の相違についても念頭におく必要があると考えられた。さらに呼吸筋については、同じ吸気筋あるいは呼気筋でも、安静換気時、負荷呼吸時および呼吸筋疲労時など呼吸状態に応じて働きに違いが生じることがいわれており⁹¹⁾、負荷呼吸時(吸気負荷あり)と負荷のない呼吸時(吸気負荷なし)など呼吸状態に変化がある場合の比較には注意が必要であると考えられた。今回、胸鎖乳突筋において吸気負荷ありでは、負荷なしよりも最大呼気口腔内圧(PEmax)測定時の筋疲労開始時間が遅い傾向を示した。胸鎖乳突筋は、吸気負荷時に呼吸困難の増大とともに働きが強くなることが報告されており⁸⁰⁾、吸気負荷ありとなしでは最大呼気口腔内圧(PEmax)測定時のような呼気負荷時における働きに違いが生じた結果と推測された。吸気負荷ありの胸鎖乳突筋は、最大吸気口腔内圧(PImax)測定時における中央周波数(MDF)は有意な低下を認め、最大呼気口腔内圧(PEmax)測定時では中央周波数(MDF)の有意な低下を認めなかったことから、吸気負荷時における働きが強くなり筋疲労を出現させていたことが考えられた。

2-4-8 まとめ

本研究では、健常成人男性を対象に、50%PImaxの吸気負荷による呼吸筋疲労を呼吸筋力である最大口腔内圧(PImax, PEmax)と表面筋電図周波数解析から検証することができた。呼吸筋疲労は呼吸不全の原因の一つとなることから、呼吸筋疲労や呼吸筋力を評価することは临床上重要である。また、疲労した呼吸筋の収縮力増強と持続力回復を目的に呼吸筋トレーニング(VMT)が行われているが、その機械的負荷による方法や呼吸筋疲労への効果判定などは不明な点が多い。このため、今回の50%PImaxの吸気負荷における呼吸筋疲労の検証と、著者ら^{19,20)}の50%PEmaxの呼気負荷における呼吸筋疲労の検証の二つから基礎データを得ることができた。その結果、吸気負荷、呼気負荷における呼吸筋疲労特性として、呼気筋疲労が吸気と呼気双方の呼吸筋疲労に影響を与えている可能性が考えられた。このため、呼吸筋トレーニング(VMT)では呼気筋トレーニング(EMT)を取り入れることで呼気筋が強化され、吸気筋疲労と呼気筋疲労の双方の疲労を抑制する作用が生じるという仮説を立て、第3章の呼気筋トレーニング(EMT)の介入研究を検討した。

第3章 呼吸筋疲労に対する呼気筋トレーニング(EMT)の効果

3-1 目的

吸気負荷と呼気負荷における呼吸筋疲労特性として、吸気と呼気双方で呼吸筋疲労が生じることが明らかとなった。また、吸気負荷と呼気負荷における呼気筋疲労は、吸気と呼気双方の呼吸筋疲労に影響を与える可能性が考えられた。これらの呼吸筋疲労特性から、呼気筋トレーニング(EMT)による呼気筋強化が、吸気と呼気双方の呼吸筋疲労に対する抑制効果について検証することを目的とした。

3-2 対象および方法

3-2-1 対象

喫煙歴、呼吸器疾患、神経学的疾患、頸部・体幹の整形外科的疾患の既往がない健常成人男性 31 名(年齢 27.0 ± 4.0 歳, 身長 171.8 ± 5.4 cm, 体重 65.9 ± 7.3 kg)を対象とした。また対象者の選定は、学校法人常葉大学の卒業生とし、年齢は 20 歳以上 40 歳未満の対象者とした。

3-2-2 倫理上の配慮

対象者には研究内容を十分に説明し、書面にて同意を得た。また、本研究は国際医療福祉大学倫理審査委員会からの承認を得て実施した(承認番号 16-Io-140)。この他、常葉大学研究倫理委員会の承認を得た(承認番号 研静 16-18, 研静 17-2)。

3-2-3 方法

3-2-3-1 対象者の振り分けと呼気筋トレーニング(EMT)プロトコール

全対象者のうち、EMT を行う EMT 群 15 名、トレーニングを行わない対照群(Normal Controls ; 以下、NC 群)16 名の 2 群にランダムに振り分けた。対象者の背景については表 9 に示す。

EMT 群は、50%PE_{max} で EMT を 1 日 2 回 15 分ずつのトレーニングを 4 週間実施した。NC 群は、この 4 週間の研究期間中にトレーニングを非実施とした。EMT 群は、EMT を実施する前(以下、EMT 介入前)と EMT を 4 週間実施したトレーニング後(以下、EMT 介入後)に、呼吸機能検査と呼吸筋力(P_Imax, PE_{max})および 50%P_Imax の吸気負荷における呼吸筋疲労の測定を実施した。EMT 群は介入前の PE_{max} の計測値から EMT に用いる 50%PE_{max} を算出した。NC 群は、初回の測定(以下、NC 群介入前)と 4 週間後(以下、NC 群介入後)に同じく呼吸機能検査と呼吸筋力(P_Imax, PE_{max})および 50%P_Imax の吸気負荷における呼吸筋疲労の測定を実施した。EMT 群、NC 群介入前後の測定は、使用機器、測定項目と方法、測定手順は、それぞれ第 2 章、第 2 節における 2-2-3-1, 2-2-3-2, 2-2-3-3 と同様の方法で行った。

EMT 群における EMT は、EMST150[米国 Aspire Products 社製, (図 38)]を用いた。この負荷器具の特徴は、最大 150cmH₂O の負荷圧が呼気に対して可能であり、健常者を対象とした負荷圧にも対応が可能な点である。また、EMST150 は一方向弁付きの圧閾値型呼気負荷器具であり、設定した圧に達するとバネ式の負荷弁が開き、空気(呼気)が流れる仕組みとなった EMT 機器であ

る。EMT 群には、EMT の方法を十分に説明し、EMST150 を貸与して 4 週間のトレーニングを実施した。EMT のプロトコールとして、50%PEmax の負荷圧で 4 週間、週 7 日、1 日 2 回、1 回 15 分の計 30 分の EMT を実施した(表 10)。EMT の記録は、トレーニング記録用紙に EMT の負荷圧、実施期間、実施頻度、実施時間を対象者に記録してもらい、トレーニング開始から 4 週間後の介入後計測時にトレーニング記録用紙を提出し実施率の確認を対象者と共に行った。

表 9 対象者の背景

	人数 (名)	年齢 (歳)	身長 (cm)	体重 (kg)	BMI (kg/m ²)
EMT 群	15	27.3±2.4	173.2±5.0	64.8±7.4	21.5±1.5
NC 群	16	26.7±5.1	170.5±5.4	67.0±7.0	23.1±2.1

単位:()内, 平均±標準偏差

EMT 群: Expiratory Muscle Training を行う群

NC 群: Normal Control 対照群



図 38 Aspire Products EMST150

表 10 EMT プロトコール

EMT プロトコール	
負荷圧	50% PEmax (介入前測定値より算出)
トレーニング機器	Aspire Products EMST150 (貸与)
期間	4週間 (頻度: 週7日)
回数	1日2回 (1回15分, 計30分)

3-2-3-2 使用機器

第 2 章(2-2-3-1)と同様の使用機器を用いて検証した。

- 1) スパイロメーター[(Autospiro AS-507), (図 8)]
- 2) 呼吸筋力計[(Autospiro AS-507 呼吸筋力計ユニット ASS), (図 9)]
- 3) 表面筋電計装置[(テレメトリー筋電計 MQ16), (図 10)]
- 4) 筋電図解析ソフト(Kinealyzer Ver4)
- 5) インピーダンスチェッカー[(EM-570), (図 11)]
- 6) 超音波画像診断装置[(LOGIQ P6 Expert), (図 12)]

3-2-3-3 測定項目と方法

第2章(2-2-3-2)と同様とし、EMT群、NC群とも介入前後に測定した。

呼吸機能検査の測定は、AS-507を使用し、努力性肺活量(FVC)、1秒量(FEV_{1.0})、1秒率(FEV_{1.0%})、ピークフロー(PEF)をそれぞれ3回測定し、各々の最大値を採用した。

呼吸筋力は、AS-507に呼吸筋力計を接続して最大吸気口腔内圧(PImax)、最大呼気口腔内圧(PEmax)を測定した。呼吸筋力の測定は、椅子座位にてノーズクリップを装着し、マウスフィルタをくわえて、全肺気量(TLC)位から最大呼気、残気量(RV)位から最大吸気を行い、最大吸気および呼気をそれぞれ3回ずつ測定し、その最大値を最大吸気口腔内圧(PImax)、最大呼気口腔内圧(PEmax)とした。測定方法と機器については、ATS/ERSステートメントで発表された標準法に準拠して実施した(図14)⁶⁸⁾。しかし、吸気負荷中の測定は最大吸気口腔内圧(PImax)、最大呼気口腔内圧(PEmax)を休息時の1分間で測定する必要があったため1回目を最大値とした。

呼吸筋活動については、EMG装置を用いて右側の僧帽筋、胸鎖乳突筋、大胸筋、横隔膜、腹直筋、外腹斜筋、内腹斜筋を測定筋とした(図15)。電極装着部位については、皮膚前処理を十分に行い、インピーダンスチェッカーを使用し、インピーダンスレベルが5k Ω 以下になったことを確認し測定した。表面筋電計電極についてはデュアル電極(EM-272S)を使用し、電極間距離を2cmに統一した。横隔膜の電極装着位置については、超音波画像診断装置(LOGIQ P6)を使用し、横隔膜の位置を確認した上で右鎖骨中央線上の第6-7肋間に電極を装着し^{13,71)}、腹式呼吸を行わせ筋電波形が出現することを確認し測定した(図16)、(図17)。

表面筋電図(sEMG)計測は双極導出にて、最大吸気口腔内圧(PImax)、最大呼気口腔内圧(PEmax)を測定し、その際の筋活動をEMG装置にて記録した。サンプリング周波数は1,500Hzとし、測定した筋活動における安静時振幅の最大値を超えた時点を筋活動開始とし、筋活動開始後0.5秒間の筋電波形を解析に用いた。また、筋電図(EMG)に心電図波形の混入を認めた場合は、その影響を最小限にするため心電図のQRS成分を外して^{71,76)}、QRS成分とQRS成分間の筋電波形を解析に用いた³⁶⁾。筋電波形は、20-350Hzのバンドパスフィルターを使用し、解析にはKinealyzer Ver4を用いて処理した。筋電図周波数解析は、高速フーリエ変換(FFT)による中央周波数(MDF)とEMGパワースペクトラムを高周波数(H; 150-350Hz)と低周波数(L; 20-40Hz)帯域に2分した比率(H/L ratio)を筋疲労の指標に用いた。

呼吸困難感については、10段階のmodified Borg scale(Borg scale)を用いて、負荷中の1分間の休息時と負荷終了後の5分毎の休息期に測定した。Borg scaleは、対象者に分かるように提示し、指差しをさせ測定した(表2)。

3-2-3-4 測定手順 (図18)

第2章(2-2-3-3)と同様とし、EMT群、NC群とも介入前後に測定した。

測定手順は、まず呼吸機能検査を実施し、拘束性換気障害、閉塞性換気障害の有無を確認し、対象者が正常値であるかの確認を行った。その後、対象者に最大口腔内圧(PImax、PEmax)の測定方法と注意事項を説明し、少なくとも数回の練習を行った³⁰⁾。

負荷開始前に最大口腔内圧(PImax、PEmax)を測定し、この時の呼吸筋活動をEMG装置にて記録し負荷前の指標とした。測定肢位は、椅子座位にてノーズクリップを装着し、左上肢にて呼

吸筋力計を把持した上で測定した。負荷前の最大口腔内圧(PImax, PEmax)から 50%PImax を算出し、吸気に対して 50%PImax の負荷を最大 20 分間行い、その後 30 分間の休息期を設けた。50%PImax の吸気負荷は、一方向抵抗弁付の圧閾値型負荷器具で Threshold IMT または POWERbreathe PLUS を使用した(図 19), (図 20)。負荷方法は、断続的吸気閾値負荷とし、2 分間の負荷、1 分間の休息、続けて 2 分間の負荷、1 分間の休息を繰り返し、負荷時間の合計が 20 分間となった時点で負荷を終了とした。負荷中の呼吸条件は、1 分間 15 回、吸気時間、呼気時間とも 2 秒に設定し、メトロノームの音に合わせて行った。終了条件として、負荷圧に達せなくなった時点もしくは呼吸困難で継続できない場合とした。測定は、負荷中の 1 分間の休息時に最大口腔内圧(PImax, PEmax)を測定し、この時の呼吸筋活動を EMG 装置にて記録した。負荷終了後の休息期 5 分毎 6 回の計測についても負荷中と同様とした。呼吸困難感については Borg scale を用いて、負荷中の 1 分間の休息時と負荷終了後の 5 分毎の休息期に測定した。

EMT 群については、EMT 介入前における負荷前の最大呼気口腔内圧(PEmax)の測定値から EMT 介入における負荷量(50%PEmax)を算出し、トレーニング記録用紙への記載と EMST150 の設定を行った。

3-2-4 統計処理

統計処理は、 χ^2 適合度検定を用いて正規性の検定を行い、その結果から Bartlett 検定による等分散の検定もしくはノンパラメトリック検定を選択し、有意水準 5%にて処理した。

EMT 群と NC 群における介入前後の PImax と PEmax および呼吸機能検査の比較に、対応のある t 検定を有意水準 5%にて処理した。

50%PImax の吸気負荷中における PImax と PEmax および MDF の経時的変化に対し、EMT 群と NC 群それぞれの介入前後と負荷中から休息期の各時間帯の計測値を二要因とした二元配置分散分析反復測定を行い、交互作用についての検証を有意水準 5%にて処理した。その後、PImax と PEmax および MDF の経時的変化に対し、負荷中 2 分毎と休息期 5 分毎の計測値を要因とした一元配置分散分析反復測定を行い、主効果がみられた場合には、Bonferroni の多重比較検定を行い、有意水準 5%にて処理した。さらに、負荷中断後の PImax と PEmax および MDF の経時的変化を比較する目的で、吸気負荷開始 20 分後と休息期の比較について一元配置分散分析反復測定を行い、主効果がみられた場合には、Bonferroni の多重比較検定を行い、有意水準 5%にて処理した。

EMT 群と NC 群の 50%PImax の吸気負荷中における PImax と PEmax および Borg scale の関係性について、Spearman の順位相関係数を用いて相関を検証した。また、Borg scale については、各時間帯の計測値における介入前後の比較に wilcoxon の符号付順位和検定をそれぞれ有意水準 5%にて処理した。

EMT 群と NC 群の筋疲労までの所要時間を検証するため、H/L ratio が負荷前から 20%以上低下した時点までの所要時間については Friedman 検定を行い、Tukey の方法を用いて測定筋の間で比較した。さらに、測定筋毎の筋疲労開始時間における介入前後の比較には wilcoxon の符号付順位和検定をそれぞれ有意水準 5%にて処理した。

統計処理には、統計解析ソフト JSTAT version 13.0 を使用した。

3-3 結果

3-3-1 呼吸筋トレーニング(EMT)実施状況と正規性, 等分散性の検定および呼吸機能検査 (表 11), (表 12), (図 39), (図 40)

全ての対象者は, 介入前後における呼吸筋疲労の分析に必要な測定項目を実施することができた. また, EMT 群の介入実施率は 97.4%であった.

呼吸機能検査と PImax, PEmax および MDF の計測値については, χ^2 適合度検定を実施し, 正規分布に従うことを確認した($p<0.05$). その後, PImax, PEmax および MDF の計測値については, Bartlett 検定を実施し, 等分散性の結果を得た($p<0.05$).

呼吸機能検査より, FVC 4.5 ± 0.5 L(%FVC $105.4\pm 10.3\%$), FEV $_{1.0}$ 3.9 ± 0.4 L, FEV $_{1.0\%}$ $87.7\pm 5.1\%$, PEF 9.6 ± 1.1 L/s(%PEF $85.9\pm 10.7\%$)と全ての対象者は正常範囲内であることが認められた. また, EMT 群介入前後の呼吸機能検査の比較では PEF が 9.5 ± 1.1 L/s(%PEF $83.9\pm 9.7\%$)から 10.2 ± 1.1 L/s(%PEF $90.3\pm 8.5\%$)と有意に高値を示した($p<0.05$). NC 群介入前後の比較では, 呼吸機能検査に有意差を認めなかった.

3-3-2 最大吸気口腔内圧(PImax)と最大呼気口腔内圧(PEmax)における介入前後の比較 (表 12), (図 41), (図 42)

EMT 群, NC 群介入前後の負荷開始前における PImax, PEmax を比較した結果, EMT 群介入前後の PImax は 118.8 ± 16.8 cmH $_2$ O から 127.1 ± 19.7 cmH $_2$ O と有意差を認めず, PEmax で 108.0 ± 23.7 cmH $_2$ O から 130.1 ± 28.6 cmH $_2$ O と有意に高値を示した($p<0.05$). NC 群介入前後の比較では, PImax, PEmax に有意差を認めなかった.

3-3-3 最大口腔内圧(PImax, PEmax)の経時的変化の比較 (表 13), (図 43-46)

50%PImax の吸気負荷中における PImax と PEmax の経時的変化を比較した結果, EMT 群介入前後で交互作用を認め[(F(16, 476)=4.8, $p<0.05$), (F(16, 476)=4.4, $p<0.05$)], NC 群介入前後では交互作用を認めなかった. EMT 群介入前は, PImax で負荷開始前と負荷中 2 分後, 8 分後, 12 分後から 20 分後との間, PEmax は負荷開始前と負荷中 2 分後から休息期 15 分後までの全ての時間との間で有意な差を認め, PImax と PEmax とも負荷中 20 分後と負荷中断後の休息期 10 分後から 30 分後との間で有意な差を認めた[(F(16, 238)=9.7, F(16, 238)=9.1, $p<0.05$)]. EMT 群介入後は, PImax と PEmax に主効果を認めなかった.

NC 群介入前は, PImax で負荷開始前と負荷中 18 分後と 20 分後との間, PEmax は負荷開始前と負荷中 2 分後から 6 分後, 10 分後から休息期 5 分後との間で有意な差を認め, 負荷中 20 分後と負荷中断後の休息期との比較では, PImax で負荷中 20 分後と休息期 30 分後との間, PEmax で負荷中 20 分後と休息期 20 分後から 30 分後との間で有意な差を認めた[(F(16, 255)=3.0, F(16,255)=4.7, $p<0.05$)]. NC 群介入後は, PImax で負荷開始前と負荷中 6 分後, 14 分後から休息期 10 分後との間, PEmax は負荷開始前と 14 分後, 18 分後, 20 分後との間で有意な差を認め, 負荷中 20 分後と休息期との比較では, PImax で負荷中 20 分後と休息期 30 分後との間, PEmax で負荷中 20 分後と休息期 15 分から 30 分後との間で有意な差を認めた[(F(16, 255)=3.1, F(16, 255)=3.6, $p<0.05$)].

3-3-4 中央周波数(MDF)の経時的変化の比較 (表 14-17), (図 47-54)

測定筋毎の MDF の経時的変化を比較した結果, EMT 群, NC 群の介入前後で交互作用を認めなかった. EMT 群介入前は, P_Imax で胸鎖乳突筋が負荷開始前と負荷中 2 分後, 10 分後から 14 分後, 18 分後から休息期 25 分後との間で有意な差を認めた(F(16, 238)=3.6, p<0.05). P_Emax では腹直筋が負荷開始前と 10 分後, 18 分後との間, 外腹斜筋が負荷開始前と負荷中 2 分後, 4 分後との間で有意な差を認め, 内腹斜筋が負荷開始前と休息期 5 分後, 20 分後, 30 分後との間で有意な差を認めた[F(16, 238)=2.0, F(16, 238)=2.1, F(16, 238)=2.1, p<0.05)]. EMT 群介入後は, MDF の経時的変化に主効果を認めなかった.

NC 群介入前は, P_Imax で胸鎖乳突筋が負荷開始前と負荷中 16 分後, 20 分後, 休息期 15 分後, 30 分後との間, P_Emax は腹直筋が負荷開始前と負荷中 2 分後, 20 分後, 休息期 15 分後, 25 分後との間で有意な差を認めた[F(16, 255)=2.1, F(16, 255)=1.8, p<0.05)]. NC 群介入後は, P_Imax で胸鎖乳突筋が負荷開始前と負荷中 16 分後から 20 分後との間, P_Emax は腹直筋が負荷開始前と負荷中 2 分後, 4 分後, 8 分後から 12 分後, 16 分後から休息期 30 分後との間で有意な差を認めた[F(16, 255)=2.4, F(16, 255)=3.5, p<0.05)].

3-3-5 最大吸気口腔内圧(P_Imax)と最大呼気口腔内圧(P_Emax)および Borg scale の相関と Borg scale の介入前後の比較 (図 55-66), (表 18)

P_Imax と P_Emax は, χ^2 適合度検定により正規分布に従わず(p<0.05), Borg scale は順序尺度であるためノンパラメトリック検定(Spearman の順位相関係数)の方法で結果を得た.

P_Imax と P_Emax および Borg scale の相関分析の結果, EMT 群介入前後で P_Imax と P_Emax との間に正の相関を認めた(r=0.48, r=0.50, p<0.05). EMT 群介入前は, P_Imax と Borg scale および P_Emax と Borg scale との間に負の相関を認めたが(r=-0.47, r=-0.48, p<0.05), EMT 群介入後はいずれも相関を認めなかった. NC 群介入前は P_Imax と P_Emax に相関を認めず, 介入後は弱い正の相関を認めた(r=0.30, p<0.05). NC 群介入前後で, P_Imax と Borg scale および P_Emax と Borg scale との間に弱い負の相関を認めた[(r=-0.33, r=-0.23, p<0.05), (r=-0.32, r=-0.27, p<0.05)]. EMT 群介入前後の Borg scale の比較では, 負荷中 6 分後から 20 分後までの全ての時間で, 介入後に有意な低値を示した(p<0.05). NC 群介入前後の Borg scale においては, 負荷中の全ての時間で有意差を認めなかった.

3-3-6 H/L ratio の呼吸筋疲労開始時間の比較と介入前後の比較 (表 19), (図 67-74)

H/L ratio による呼吸筋疲労開始時間については, χ^2 適合度検定により正規分布に従わなかったため(p<0.05), ノンパラメトリック検定(Friedman 検定, wilcoxon の符号付順位和検定)の方法で結果を得た.

H/L ratio による筋疲労までの所要時間を測定筋毎に比較した結果, EMT 群, NC 群の介入前後で P_Imax と P_Emax とも有意差を認めなかった. EMT 群介入前後の筋疲労開始までの比較では, P_Imax と P_Emax で有意差を認めなかった. NC 群においては, 介入後に P_Emax で僧帽筋の筋疲労開始までの所要時間が有意な短縮を示したが(p<0.05), P_Imax においては有意差を認めなかった.

表 11 呼吸機能検査各指標(全対象者)

FVC (L)	%FVC (%)	FEV _{1.0} (L)	FEV _{1.0%} (%)	PEF (L/s)	%PEF (%)
4.5±0.5	105.4±10.3	3.9±0.4	87.7±5.1	9.6±1.1	85.9±10.7

単位:()内, 平均±標準偏差

表 12 最大口腔内圧(PImax, PEmax), 呼吸機能検査各指標の介入前後の変化

	PImax (cmH ₂ O)	PEmax (cmH ₂ O)	FVC (L)	%FVC (%)	FEV _{1.0} (L)	FEV _{1.0%} (%)	PEF (L/s)	%PEF (%)
EMT群 介入前	118.8±16.8	108.0±23.7	4.5±0.5	106.3±10.7	4.0±0.4	88.2±5.9	9.5±1.1	83.9±9.7
介入後	127.1±19.7	130.1±28.6*	4.6±0.6	107.3±11.6	4.0±0.4	87.8±6.2	10.2±1.1*	90.3±8.5
NC群 介入前	108.4±17.3	98.1±14.8	4.4±0.4	104.5±9.8	3.8±0.4	87.1±4.2	9.8±1.1	87.7±11.3
介入後	112.1±22.1	95.3±14.5	4.4±0.4	104.6±10.3	3.8±0.4	86.7±3.7	9.6±0.9	86.2±8.8

単位:()内, (平均±標準偏差)

介入前との比較: *p<0.05

EMT群: Expiratory Muscle Training を行う群

NC群: Normal Control 対照群

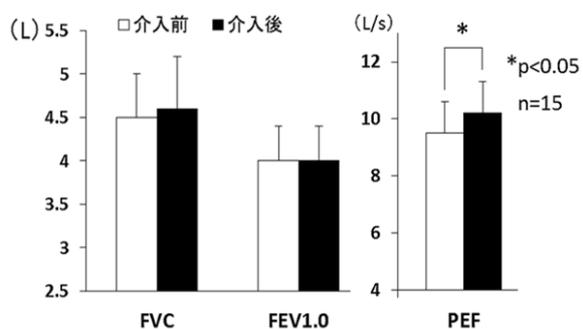


図 39 FVC, FEV_{1.0}, PEF (EMT 群介入前後)

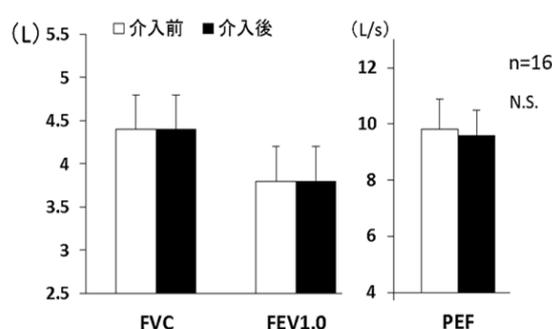


図 40 FVC, FEV_{1.0}, PEF (NC 群介入前後)

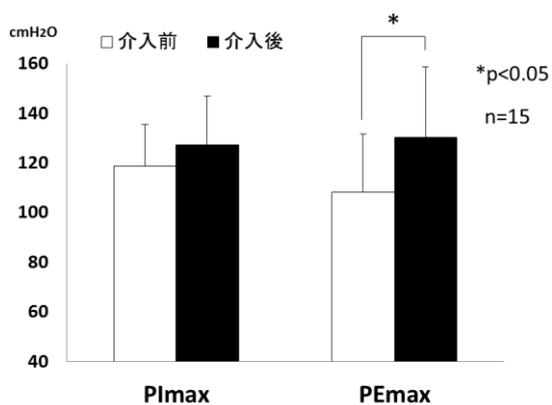


図 41 PImax, PEmax(EMT 群介入前後)

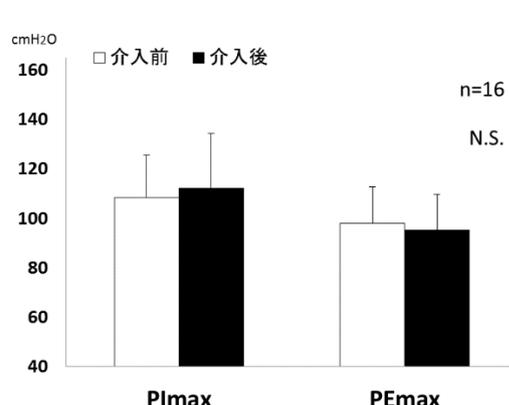


図 42 PImax, PEmax(NC 群介入前後)

表 13 最大口腔内圧(PImax, PEmax)の経時的変化

	EMT群 (n=15)				NC群 (n=16)			
	PImax		PEmax		PImax		PEmax	
	介入前	介入後	介入前	介入後	介入前	介入後	介入前	介入後
負荷前	118.8±16.8	127.1±19.7	108.0±23.7	130.1±28.6	108.4±17.3	112.1±22.1	98.1±14.8	95.3±14.5
2分後	109.0±16.0*	125.4±20.9	98.2±22.8*	125.7±24.0	99.5±18.3	104.5±20.7	87.3±14.3*	93.8±17.4
4分後	110.3±13.5	127.3±21.2	98.0±24.4*	125.2±29.8	100.7±18.0	104.2±22.1	85.6±16.2*	89.9±16.1
6分後	111.1±16.3	128.7±21.9	93.6±24.1*	122.0±31.5	97.2±15.8	100.7±19.7*	88.1±14.7*	89.5±14.1
8分後	107.7±16.1*	127.3±23.6	93.9±24.7*	125.4±38.2	98.5±15.4	105.3±17.3	90.9±14.4	89.1±17.2
10分後	109.3±13.9	125.1±23.1	92.9±25.0*	125.8±32.5	102.0±15.6	102.6±17.8	88.2±12.8*	92.2±16.9
12分後	104.5±13.1*	124.0±23.3	91.6±26.2*	121.0±28.4	97.9±13.8	103.3±16.6	85.9±13.9*	88.2±16.5
14分後	98.8±16.5*	124.5±23.4	87.6±26.3*	126.1±35.4	101.9±15.8	99.2±19.5*	85.7±15.1*	83.5±12.9*
16分後	104.3±17.4*	124.5±23.4	89.9±24.5*	127.0±29.1	96.7±15.3	98.6±19.0*	83.3±14.8*	86.8±14.9
18分後	105.2±16.2*	124.9±23.9	89.4±23.6*	124.7±34.2	96.1±18.0*	97.2±15.6*	81.8±17.0*	84.9±16.6*
20分後	102.2±16.5*	126.3±16.9	86.0±22.9*	127.5±34.0	95.4±19.4*	96.7±17.8*	81.3±17.7*	82.0±15.6*
休息期 5分	109.3±13.9	122.1±19.5	96.0±22.0*	124.1±34.2	103.1±17.4	100.4±19.8*	86.4±14.8*	86.1±14.9
休息期10分	114.8±12.7†	126.3±20.3	97.1±24.5*†	120.9±29.4	106.3±17.3	98.9±21.8*	88.6±14.4	88.9±11.7
休息期15分	115.8±16.4†	125.8±18.3	97.6±21.3*†	120.6±30.8	103.8±15.7	104.1±20.0	90.8±15.4	92.8±13.2†
休息期20分	116.0±16.4†	122.5±17.3	100.0±23.7†	122.0±30.9	101.1±16.8	105.7±18.0	93.7±13.5†	95.8±17.3†
休息期25分	114.9±15.1†	121.9±18.9	99.9±21.9†	119.2±32.0	107.2±16.6	103.6±21.8	91.4±13.8†	91.1±16.7†
休息期30分	121.2±16.9†	123.2±19.4	101.5±22.9†	121.3±31.0	108.3±17.5†	108.1±19.3†	93.1±12.4†	93.3±15.4†

単位: cmH₂O, 平均±標準偏差

負荷前との比較: * p<0.05, 負荷20分後と休息期との比較: † p<0.05

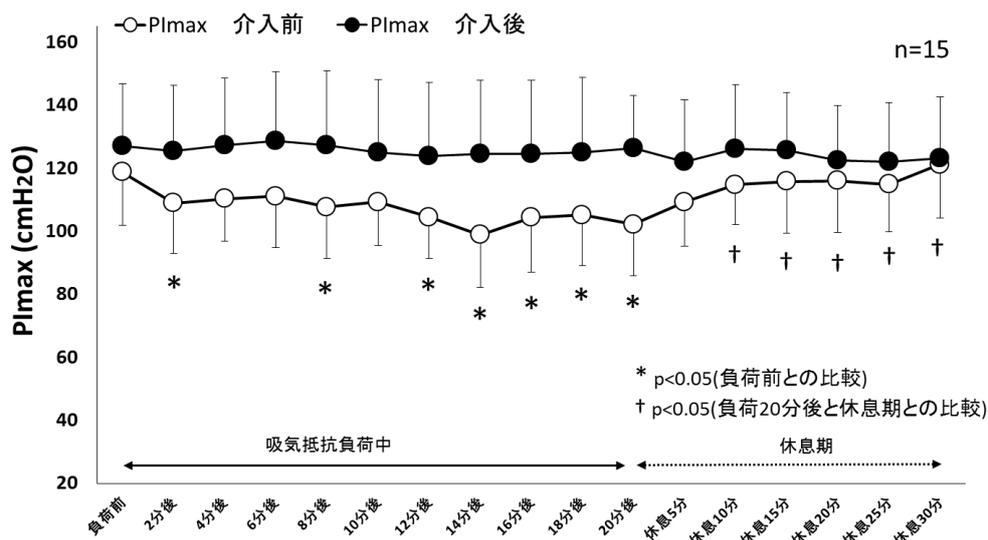


図 43 PImax の経時的変化(EMT 群介入前後)

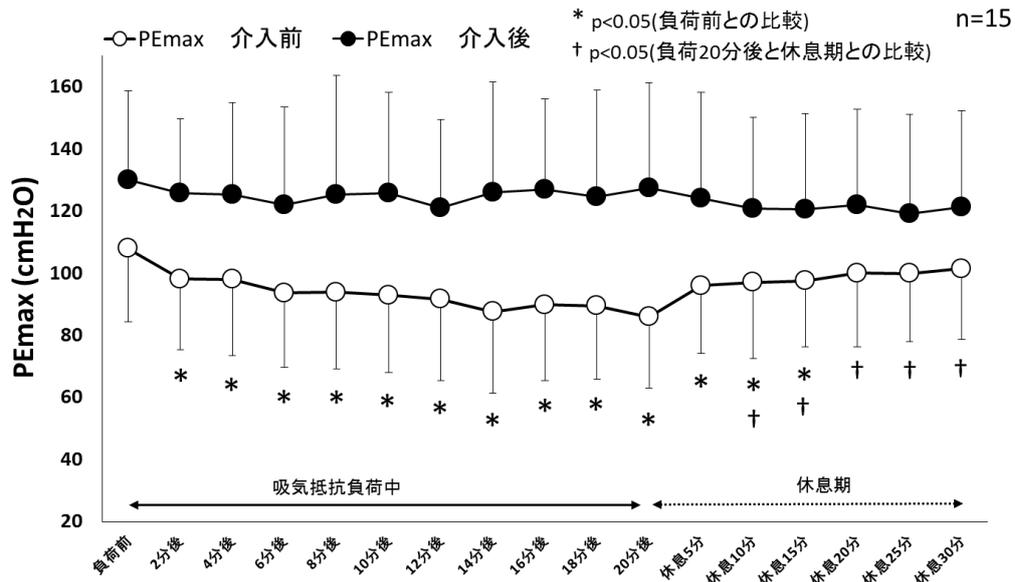


図 44 PEmax の経時的変化(EMT 群介入前後)

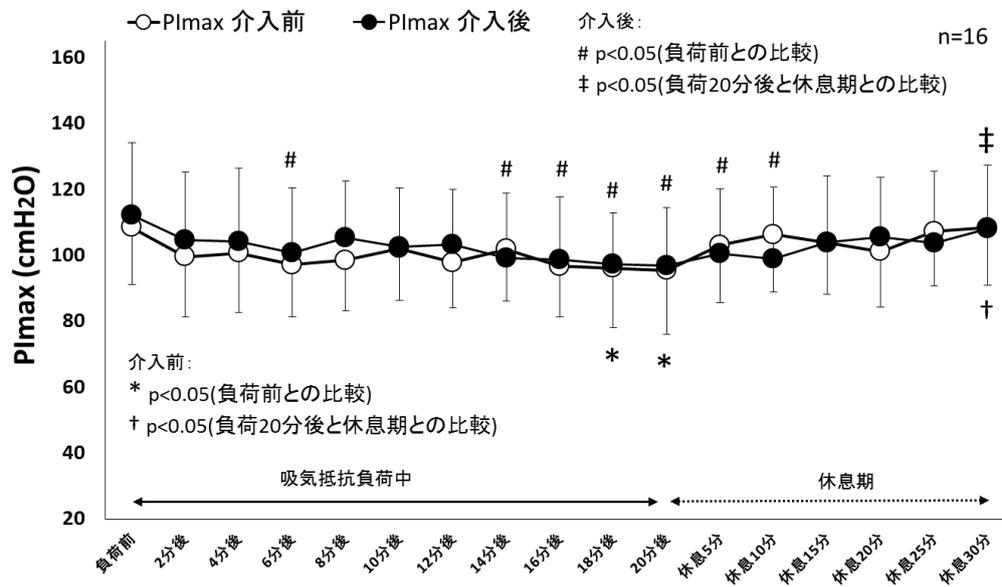


図 45 PImax の経時的変化(NC 群介入前後)

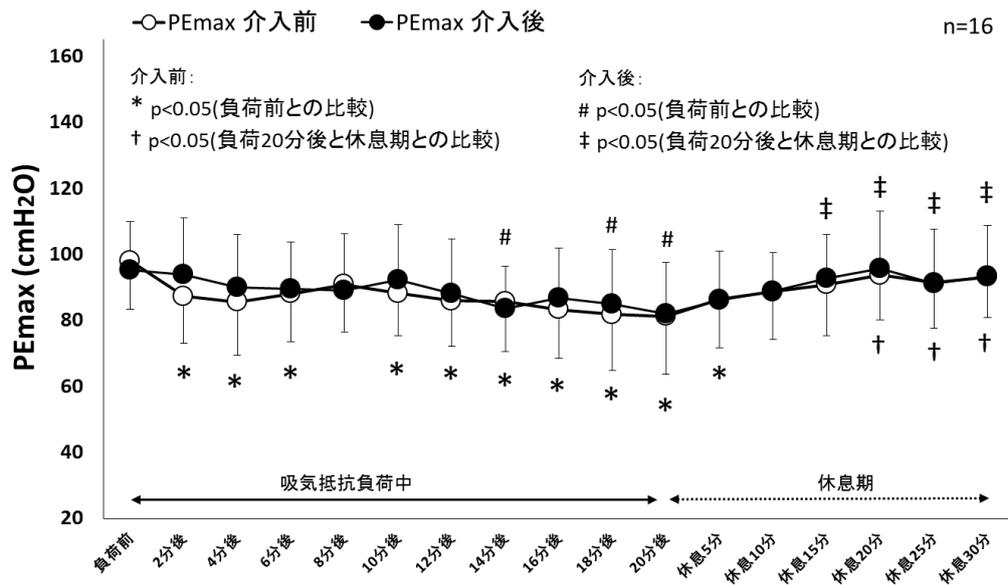


図 46 PEmax の経時的変化(NC 群介入前後)

表 14 EMT 群：最大吸気口腔内圧(PImax)測定時の中央周波数の経時的変化

	PImax (n=15)													
	僧帽筋		胸鎖乳突筋		大胸筋		横隔膜		腹直筋		外腹斜筋		内腹斜筋	
	介入前	介入後	介入前	介入後	介入前	介入後	介入前	介入後	介入前	介入後	介入前	介入後	介入前	介入後
負荷前	64.3±9.4	69.7±15.9	93.0±26.1	84.9±19.5	77.3±23.4	76.9±16.7	72.2±12.5	73.0±9.5	74.7±15.0	66.2±8.0	63.9±14.6	65.0±10.3	91.9±35.0	96.3±37.5
2分後	59.2±8.7	64.5±16.9	74.8±24.2*	86.9±24.6	70.4±26.1	74.0±20.2	67.7±13.1	75.5±14.6	72.6±18.6	67.1±10.4	61.7±12.1	67.2±13.3	83.6±39.4	84.2±30.8
4分後	60.2±12.8	70.4±22.6	84.7±21.7	82.6±17.5	71.5±22.1	68.6±18.7	70.8±13.2	68.4±14.8	68.3±12.3	69.0±11.7	61.7±16.8	62.0±11.2	85.5±40.6	84.6±30.7
6分後	58.1±12.3	63.7±16.3	84.3±27.9	83.1±17.0	73.3±24.3	72.9±20.2	71.1±9.3	72.5±14.8	72.2±16.7	68.2±11.1	61.1±13.8	62.2±12.4	83.6±41.6	92.6±35.8
8分後	57.4±14.5	69.1±21.9	85.1±24.6	82.8±17.1	71.1±26.2	72.5±20.4	68.0±12.9	72.5±13.7	71.0±18.0	63.1±11.6	57.7±14.6	60.7±10.6	83.6±40.7	86.0±38.8
10分後	59.6±15.4	66.7±24.8	80.1±21.5*	82.6±20.4	75.1±26.1	70.8±15.7	67.4±10.0	71.7±11.8	73.4±12.0	66.1±11.3	60.8±15.5	61.4±12.0	82.1±38.2	86.0±34.8
12分後	55.3±11.1	64.2±19.1	80.1±20.1*	81.7±19.2	76.5±27.9	73.9±18.7	67.4±12.8	75.4±12.3	72.9±10.5	66.1±10.1	57.3±11.8	60.3±7.2	83.3±38.0	86.1±41.1
14分後	62.2±14.3	67.7±24.2	80.5±22.1*	85.7±20.1	72.8±23.1	73.3±17.8	69.2±13.6	79.4±15.1	73.0±17.4	64.4±9.2	58.6±12.6	60.9±11.1	80.3±37.8	93.5±33.7
16分後	63.9±13.3	69.3±22.4	84.0±20.0	83.6±19.1	72.3±22.0	68.5±16.0	67.4±11.7	70.4±8.5	72.4±13.8	63.5±11.7	62.5±14.1	62.0±11.5	83.0±29.0	82.2±36.2
18分後	63.3±12.8	67.2±20.2	78.1±20.4*	81.7±18.7	78.3±26.9	72.1±19.0	69.0±9.9	70.6±15.3	68.2±15.8	64.8±10.0	63.0±13.3	59.0±11.7	81.4±34.5	86.1±31.9
20分後	59.0±13.9	66.0±24.1	81.6±19.3*	82.6±17.5	73.6±23.1	73.7±19.7	65.1±13.1	77.9±14.2	69.8±15.5	69.3±9.7	60.2±14.9	61.5±12.7	80.8±28.7	90.7±38.0
休息期 5分	59.6±15.3	68.4±21.2	81.6±17.2*	85.3±18.0	73.6±22.6	74.7±20.5	66.4±13.3	73.2±13.8	70.6±18.9	64.0±9.2	62.2±14.4	63.4±11.9	84.9±31.7	90.3±35.3
休息期 10分	60.8±11.6	65.8±20.9	77.5±18.0*	77.5±15.8	69.9±21.5	71.4±15.7	65.7±15.4	71.9±8.5	70.2±13.3	60.6±10.3	57.4±11.6	62.5±12.0	88.3±39.3	88.5±34.0
休息期 15分	59.1±15.1	66.4±10.4	80.9±24.8*	86.4±20.6	73.1±21.7	71.9±15.9	70.5±15.6	68.7±11.0	72.2±15.1	66.2±11.2	58.9±13.2	64.9±13.2	85.0±39.9	93.7±38.8
休息期 20分	60.2±10.6	66.4±11.3	79.0±19.5*	80.2±13.9	72.3±24.0	69.0±8.4	69.4±18.7	69.6±11.9	75.8±17.9	62.9±10.0	62.3±15.4	63.5±12.2	89.7±40.8	85.1±28.0
休息期 25分	55.4±14.6	66.1±12.8	77.6±21.9*	79.0±11.5	72.3±23.1	69.1±16.3	70.1±15.1	71.6±12.2	70.1±10.0	63.3±7.5	57.9±13.0	67.4±11.1	88.4±42.9	86.8±28.9
休息期 30分	60.9±15.7	65.9±11.0	83.3±23.5	80.2±11.5	70.4±23.8	68.9±16.4	65.8±14.6	76.4±16.5	73.5±17.7	66.1±11.1	61.3±16.6	63.5±12.6	79.2±26.3	91.8±27.1

単位: Hz, 平均±標準偏差

負荷前との比較: * p<0.05, 負荷20分後と休息期との比較: † p<0.05

表 15 EMT 群：最大呼気口腔内圧(PEmax)測定時の中央周波数の経時的変化

	PEmax (n=15)													
	僧帽筋		胸鎖乳突筋		大胸筋		横隔膜		腹直筋		外腹斜筋		内腹斜筋	
	介入前	介入後	介入前	介入後	介入前	介入後	介入前	介入後	介入前	介入後	介入前	介入後	介入前	介入後
負荷前	74.0±10.1	84.1±29.7	86.7±18.7	82.3±17.2	67.6±13.6	69.3±18.6	87.0±32.8	86.1±23.2	79.6±15.5	79.4±19.3	73.8±21.2	67.5±12.7	108.9±41.4	111.5±30.1
2分後	62.6±14.1	79.6±33.2	77.1±8.9	78.9±18.3	59.6±14.3	64.9±12.9	79.6±28.1	85.3±28.9	69.7±15.8	72.4±20.8	59.7±19.5*	64.2±13.9	94.7±41.2	109.1±30.2
4分後	64.1±14.0	79.3±37.1	75.1±17.9	77.9±21.0	62.7±10.6	66.7±18.0	80.1±24.1	83.9±23.5	71.4±13.7	76.5±17.7	62.7±18.5*	67.8±11.1	102.4±48.4	108.7±33.0
6分後	66.5±14.0	78.1±18.3	79.5±15.5	78.7±18.8	61.6±14.1	65.4±12.9	84.2±25.5	81.7±26.1	75.0±14.9	75.6±18.0	68.0±23.3	67.5±12.0	99.2±44.0	108.5±25.1
8分後	67.5±14.8	82.4±33.1	72.7±14.0	79.9±19.5	63.5±14.3	63.1±11.4	87.3±34.2	84.5±25.7	71.7±14.8	73.4±16.4	67.3±25.1	70.2±15.2	99.4±43.3	109.9±30.0
10分後	72.9±15.8	80.8±33.0	79.7±13.3	79.7±20.7	61.9±12.1	62.2±16.1	80.8±27.6	80.2±23.4	66.0±9.8*	72.1±18.3	65.2±24.5	65.6±11.6	94.9±35.0	111.1±30.7
12分後	68.6±15.0	79.4±23.5	77.6±20.3	82.3±18.9	66.7±15.8	65.1±14.6	77.2±25.6	86.1±27.3	73.9±14.3	72.8±24.8	65.3±18.8	65.0±14.1	97.9±43.3	104.8±36.0
14分後	69.7±16.6	79.1±32.1	81.4±22.1	78.7±20.6	66.4±19.6	64.1±20.9	80.4±24.8	85.1±26.4	73.4±16.2	73.0±18.3	66.0±16.2	64.2±12.0	98.6±44.1	107.4±33.2
16分後	71.1±12.2	82.9±30.4	80.6±20.5	83.3±21.0	62.1±16.2	65.0±18.1	79.9±26.3	86.3±29.1	72.1±14.6	75.3±17.7	70.3±26.6	63.6±10.3	101.3±42.3	108.2±33.2
18分後	71.7±15.4	84.5±35.7	76.7±17.7	82.9±20.4	65.8±11.8	67.6±22.9	84.4±27.8	83.6±16.9	65.8±11.3*	73.5±15.7	67.8±21.6	66.5±10.5	98.4±44.0	105.9±35.4
20分後	71.1±15.1	74.5±18.8	77.0±20.0	81.7±18.7	66.3±21.2	64.5±15.9	82.9±32.7	85.5±26.1	68.4±14.4	74.2±18.7	66.9±17.7	67.7±12.2	96.6±35.2	110.5±34.3
休息期 5分	73.1±15.0	77.6±22.2	76.7±23.9	82.7±19.6	66.9±16.2	66.9±15.5	88.1±32.2	86.1±23.5	73.3±13.7	72.1±20.8	67.9±24.2	67.8±12.1	90.3±39.0*	109.9±33.8
休息期10分	67.5±14.4	78.5±25.2	78.3±23.1	80.7±18.5	63.1±17.6	65.2±17.3	82.5±26.8	81.3±17.9	71.2±15.7	72.8±22.1	67.0±21.0	63.9±12.7	96.4±45.0	108.8±29.7
休息期15分	67.7±13.4	79.0±19.9	72.5±15.1	78.0±15.4	64.8±17.7	68.9±21.5	85.6±30.8	82.8±28.9	68.7±14.5	72.2±17.3	66.1±20.5	73.3±22.7	93.8±37.6	110.0±33.4
休息期20分	70.7±14.4	73.1±22.5	78.4±16.7	79.1±19.0	62.6±11.9	67.9±19.5	81.2±20.7	79.2±24.3	74.1±19.9	74.3±20.3	66.2±25.4	69.9±18.8	90.5±40.9*	107.9±34.2
休息期25分	66.5±15.7	85.1±36.6	77.4±18.6	79.3±13.1	61.1±12.5	65.4±18.7	86.2±33.1	83.4±28.3	76.7±14.9	73.2±19.7	65.1±19.9	66.4±12.0	102.0±44.9	113.6±39.5
休息期30分	66.7±15.6	72.4±20.5	75.6±14.1	78.8±18.5	61.0±17.5	66.5±18.7	79.6±30.6	80.7±18.4	74.9±18.5	76.4±15.5	66.0±19.7	65.2±10.4	92.5±42.8*	109.7±31.4

単位: Hz, 平均±標準偏差

負荷前との比較: * p<0.05, 負荷20分後と休息期との比較: † p<0.05

表 16 NC 群：最大吸気口腔内圧(PImax)測定時の中央周波数の経時的変化

	PImax (n=16)																			
	僧帽筋		胸鎖乳突筋				大胸筋				横隔膜				腹直筋		外腹斜筋		内腹斜筋	
	介入前	介入後	介入前	介入後	介入前	介入後	介入前	介入後	介入前	介入後	介入前	介入後	介入前	介入後	介入前	介入後	介入前	介入後		
負荷前	65.3±11.8	68.2±24.0	81.0±9.2	83.8±12.8	81.3±16.3	83.0±16.8	77.1±20.5	75.6±18.5	76.0±12.9	70.5±9.8	59.5±12.1	59.8±8.9	88.1±33.8	89.6±31.9						
2分後	58.0±14.4	62.5±24.9	74.7±13.6	79.9±16.0	82.4±20.8	79.8±19.2	73.5±23.1	69.0±11.4	71.1±15.4	69.3±12.1	57.9±12.8	53.5±7.9	82.1±36.7	83.9±27.8						
4分後	61.4±14.6	58.7±17.4	73.8±8.0	77.3±13.4	84.4±19.6	85.4±19.1	75.8±20.8	68.4±17.7	73.4±17.4	67.2±10.6	55.0±11.3	54.9±10.5	84.6±40.5	79.8±29.8						
6分後	62.2±14.3	60.8±18.9	75.5±7.6	76.4±17.0	86.9±21.4	82.4±17.5	70.2±20.3	69.3±12.2	72.8±11.0	70.7±8.7	60.2±12.7	56.8±11.7	80.6±41.6	79.2±24.8						
8分後	58.7±10.7	62.6±25.2	73.4±11.4	75.3±14.1	78.7±24.3	79.8±15.6	73.4±22.7	70.4±12.4	64.9±11.4	67.4±7.8	56.2±11.5	59.7±11.1	77.8±39.5	82.8±25.4						
10分後	60.0±17.0	68.2±27.2	75.3±8.6	76.0±20.0	84.2±21.1	82.4±15.5	70.2±20.1	71.4±14.2	75.9±21.5	64.6±6.3	54.1±8.5	55.1±11.0	88.3±42.8	76.8±26.3						
12分後	57.7±11.9	61.9±24.8	73.4±9.4	76.0±13.1	85.4±16.8	78.0±16.3	72.3±24.4	73.5±19.7	73.0±13.6	66.7±12.1	58.3±13.8	56.4±7.3	82.6±35.7	78.3±24.2						
14分後	60.2±11.3	63.6±24.8	72.4±9.2	80.0±15.2	80.9±19.7	81.8±19.2	71.0±15.3	70.3±19.6	70.2±16.3	68.2±8.1	53.9±9.3	55.5±10.1	83.7±40.8	81.6±32.3						
16分後	62.0±15.3	65.0±18.5	70.5±8.6*	73.5±18.8*	80.5±15.7	82.5±20.9	70.6±19.7	73.5±25.1	70.4±15.3	70.3±13.0	54.3±10.9	57.4±8.7	79.6±42.3	79.0±27.9						
18分後	61.1±18.5	62.1±19.9	73.9±10.4	74.2±15.3*	85.6±24.0	76.0±18.4	71.0±24.3	71.3±15.2	74.1±14.7	67.4±13.8	52.7±10.7	56.2±11.3	78.4±26.6	81.8±26.6						
20分後	57.9±10.2	62.6±23.7	71.9±8.8*	74.0±15.3*	86.2±19.6	78.6±17.1	71.8±26.9	73.3±24.7	71.4±13.1	69.6±9.6	55.8±11.0	55.2±6.5	80.4±27.9	83.7±31.8						
休息期 5分	56.8±16.1	63.4±25.7	72.8±9.2	79.6±12.9	83.7±20.6	76.6±14.4	71.1±18.8	70.5±16.1	73.0±17.2	67.4±12.9	56.5±9.7	59.3±10.4	79.8±38.6	78.7±27.6						
休息期 10分	61.0±16.4	62.2±21.5	73.3±10.9	76.8±16.7	75.7±17.3	75.2±19.4	75.6±21.1	68.5±18.3	75.7±20.4	68.9±9.9	54.2±12.7	61.9±12.8	85.1±38.5	83.4±40.7						
休息期 15分	59.1±14.9	64.8±23.1	71.5±7.2*	81.2±15.3	79.6±17.4	78.2±16.4	73.3±19.8	71.4±16.1	72.4±16.6	66.2±11.0	55.6±10.8	56.7±6.8	83.2±30.8	86.6±31.3						
休息期 20分	52.5±10.8	64.5±19.5	74.2±10.5	76.1±13.3	79.0±21.1	77.4±12.7	72.8±22.2	72.1±17.9	73.2±17.9	69.8±13.3	56.3±10.5	56.6±9.9	79.4±24.3	88.3±35.2						
休息期 25分	57.6±17.6	63.7±27.7	72.7±7.9	76.1±15.4	78.3±17.3	80.1±15.3	74.5±26.8	67.8±14.0	74.0±18.8	67.6±11.3	57.8±14.2	55.6±9.8	82.2±28.8	77.6±24.1						
休息期 30分	63.9±15.8	65.9±20.9	67.5±8.3*	76.0±15.6	73.1±16.1	77.2±16.4	73.1±25.8	69.5±16.5	71.0±16.9	66.5±9.4	56.0±10.9	54.2±10.5	79.0±25.5	83.9±35.1						

単位: Hz, 平均±標準偏差

負荷前との比較: * p<0.05, 負荷20分後と休息期との比較: † p<0.05

表 17 NC 群：最大呼気口腔内圧(PEmax)測定時の中央周波数の経時的変化

	PEmax (n=16)																	
	僧帽筋		胸鎖乳突筋		大胸筋		横隔膜		腹直筋		外腹斜筋		内腹斜筋					
	介入前	介入後	介入前	介入後	介入前	介入後	介入前	介入後	介入前	介入後	介入前	介入後	介入前	介入後				
負荷前	68.7±11.0	71.6±30.9	75.8±7.8	79.0±11.5	74.3±20.0	75.3±21.7	82.6±17.6	84.4±16.0	91.0±20.1	93.4±20.5	69.8±12.2	66.8±9.8	99.6±41.9	93.8±28.4				
2分後	64.6±10.1	64.9±29.2	74.2±12.9	78.4±16.0	70.2±17.1	68.5±17.8	84.3±20.8	74.6±18.8	78.3±20.9*	78.7±17.6*	65.5±14.6	61.0±11.0	91.1±42.4	86.8±27.6				
4分後	65.2±13.9	65.8±30.9	74.7±13.6	72.6±16.2	74.8±26.7	72.2±24.8	78.1±16.8	79.1±17.8	84.6±14.8	78.9±17.2*	62.4±11.5	60.6±10.9	91.6±45.7	87.0±28.5				
6分後	66.0±11.7	63.8±31.0	75.2±10.8	77.8±14.7	70.4±20.9	76.4±29.3	82.6±19.5	82.1±17.4	79.9±20.7	85.2±21.1	61.9±12.9	61.1±12.0	93.4±45.2	85.0±28.8				
8分後	61.5±11.1	69.1±30.4	76.5±11.9	77.2±18.8	69.0±17.6	74.0±25.4	84.6±21.5	78.3±18.1	83.8±19.8	76.9±19.8*	68.7±16.4	62.0±8.5	94.2±45.2	86.9±24.2				
10分後	64.9±13.6	67.7±29.3	76.0±11.1	83.1±17.3	73.7±24.4	72.4±24.0	82.5±19.3	79.1±16.3	82.1±15.5	77.4±20.1*	66.1±14.2	60.9±11.2	95.1±44.0	84.0±23.6				
12分後	65.7±13.5	65.1±29.1	76.8±12.1	79.2±17.7	70.2±25.1	75.2±24.5	83.0±19.1	79.7±16.4	83.7±19.3	81.5±18.4*	64.5±13.2	63.4±9.5	92.4±43.5	87.3±26.2				
14分後	68.9±11.7	67.9±31.7	75.5±12.7	79.1±14.9	76.5±26.6	76.6±27.1	84.1±18.6	80.9±15.5	81.9±22.6	85.6±20.2	66.2±16.1	62.2±11.4	91.9±41.2	84.1±30.5				
16分後	66.5±10.1	69.8±29.0	72.6±8.1	78.7±14.4	70.0±22.8	77.6±29.3	78.7±17.0	79.4±15.1	82.2±18.9	79.6±21.0*	66.4±20.9	62.7±10.2	88.1±41.0	81.8±32.3				
18分後	66.1±12.1	68.5±29.8	80.0±14.5	79.1±18.8	70.9±19.1	76.6±25.6	81.1±18.1	77.9±17.6	79.5±18.4	80.5±19.8*	60.5±13.8	59.9±11.2	87.8±39.3	80.6±27.5				
20分後	66.0±12.6	67.4±29.2	73.9±8.7	78.9±18.3	72.8±22.7	72.2±24.3	83.7±18.5	80.9±19.3	77.7±12.2*	76.6±20.5*	61.5±9.9	61.1±10.1	90.4±40.7	82.8±29.6				
休息期 5分	63.3±17.2	72.8±37.8	71.2±10.3	80.0±14.0	73.0±26.3	74.6±26.2	81.6±18.9	76.9±14.4	82.4±13.9	78.7±21.2*	63.7±13.4	60.5±11.6	93.4±45.1	83.0±30.4				
休息期 10分	60.5±14.8	70.6±31.9	75.8±13.9	78.2±17.7	73.5±23.4	72.0±25.5	79.8±19.4	83.1±18.6	82.0±17.4	76.4±17.3*	64.0±11.9	65.8±12.9	89.7±44.1	90.9±31.1				
休息期 15分	66.3±17.4	65.9±29.0	74.0±12.4	81.0±19.1	72.0±14.0	72.4±26.6	76.6±17.3	84.6±19.3	78.5±17.6*	76.5±18.4*	64.8±15.4	66.4±13.9	85.1±23.6	88.7±32.7				
休息期 20分	64.0±14.9	68.9±31.7	78.8±11.0	78.1±12.5	68.6±16.8	71.4±25.3	78.6±22.9	77.7±16.0	80.7±20.0	79.1±15.5*	62.9±14.0	62.4±9.8	84.6±29.3	89.6±27.7				
休息期 25分	66.4±17.6	68.9±28.2	75.2±10.3	80.5±13.8	69.0±21.9	70.6±26.0	80.1±14.5	80.2±16.7	77.2±17.8*	79.2±19.4*	63.4±10.4	61.0±10.4	84.4±22.8	85.7±26.2				
休息期 30分	62.1±17.8	71.4±28.0	74.3±9.0	81.4±11.9	68.1±18.5	69.8±23.5	79.1±18.9	82.3±12.7	82.7±18.4	79.4±21.8*	62.6±13.9	66.5±12.7	85.0±23.8	84.6±28.1				

単位: Hz, 平均±標準偏差

負荷前との比較: * p<0.05, 負荷20分後と休息期との比較: † p<0.05

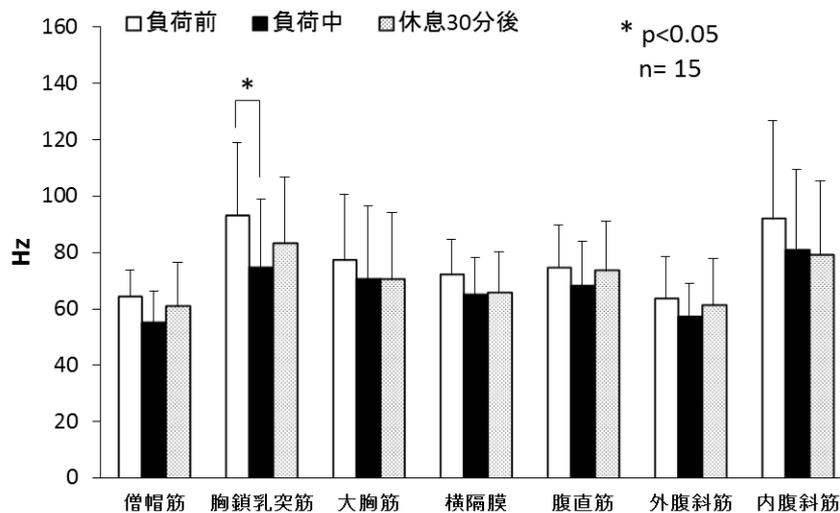


図 47 EMT 群介入前：最大吸気口腔内圧(PI_{max})測定時の中央周波数の経時的変化
 グラフは負荷前，負荷中最小値，休息 30 分後の中央周波数の変化を示す

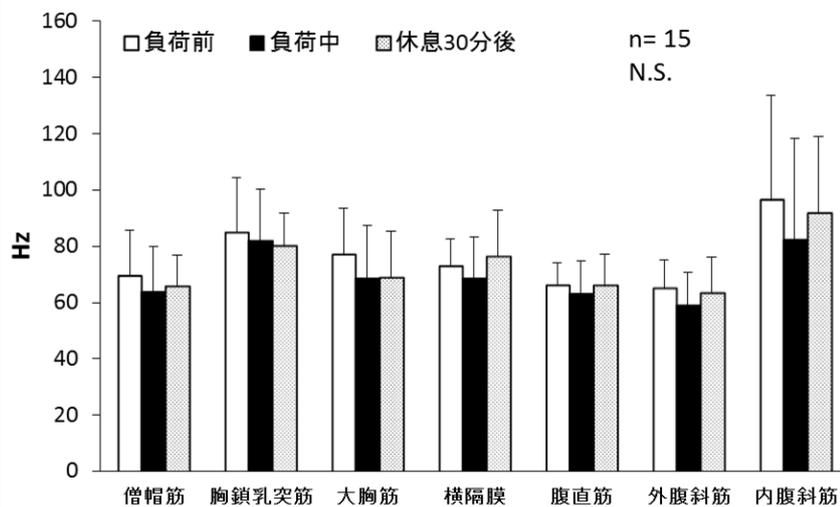


図 48 EMT 群介入後：最大吸気口腔内圧(PI_{max})測定時の中央周波数の経時的変化
 グラフは負荷前，負荷中最小値，休息 30 分後の中央周波数の変化を示す

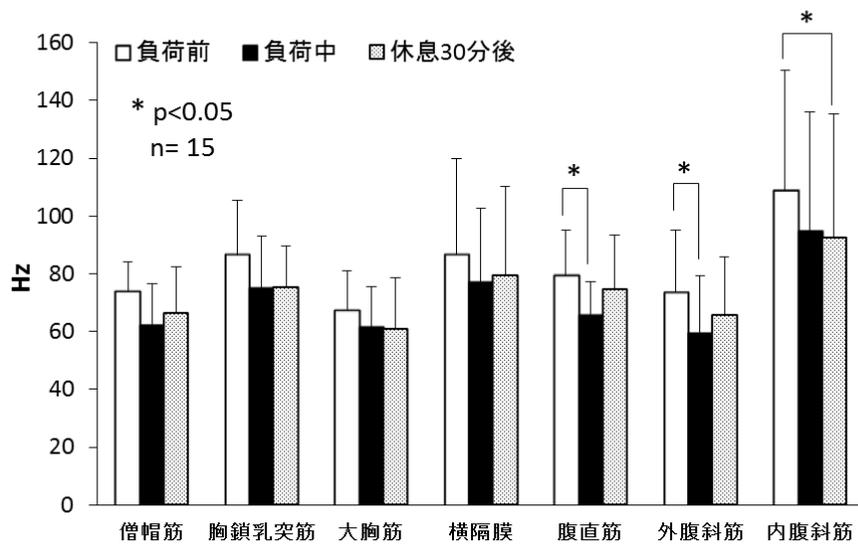


図 49 EMT 群介入前：最大呼気口腔内圧(PE_{max})測定時の中央周波数の経時的変化
 グラフは負荷前，負荷中最小値，休息 30 分後の中央周波数の変化を示す

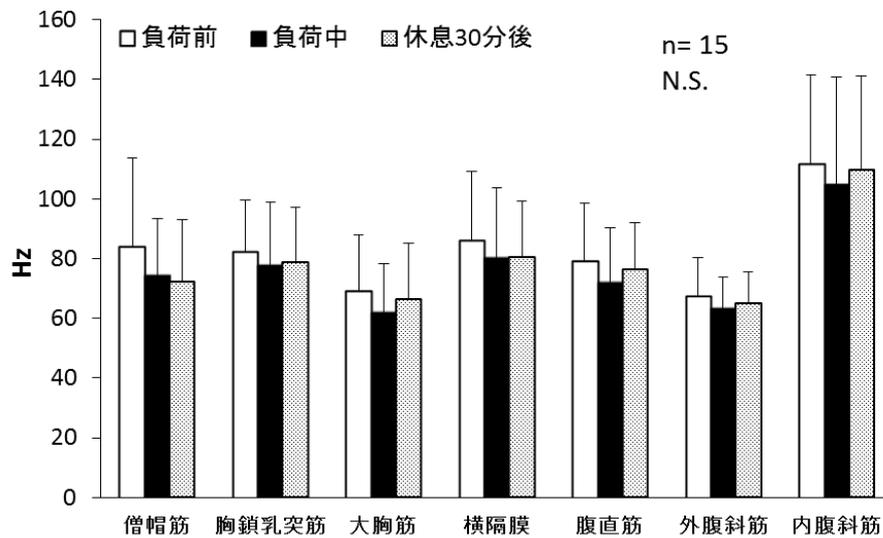


図 50 EMT 群介入後：最大呼気口腔内圧(PE_{max})測定時の中央周波数の経時的変化
 グラフは負荷前，負荷中最小値，休息 30 分後の中央周波数の変化を示す

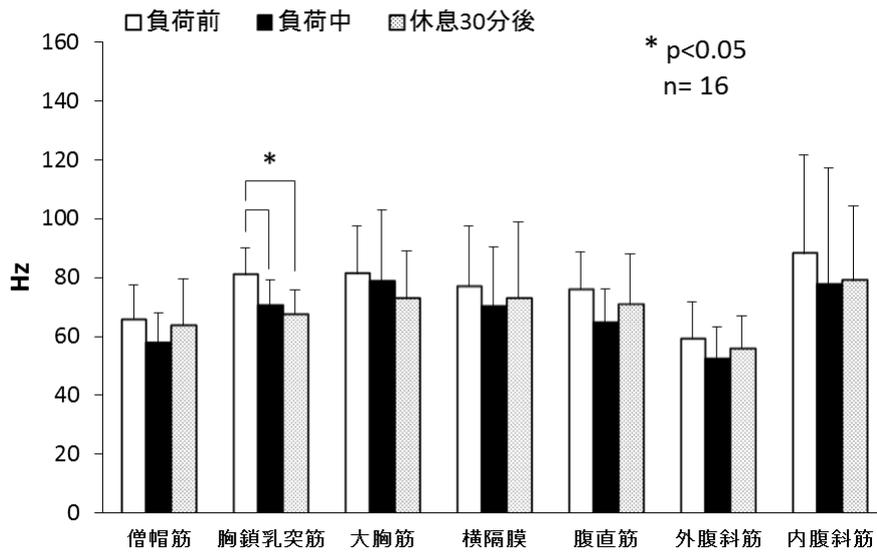


図 51 NC 群介入前：最大吸気口腔内圧(PImax)測定時の中央周波数の経時的変化
 グラフは負荷前，負荷中最小値，休息 30 分後の中央周波数の変化を示す

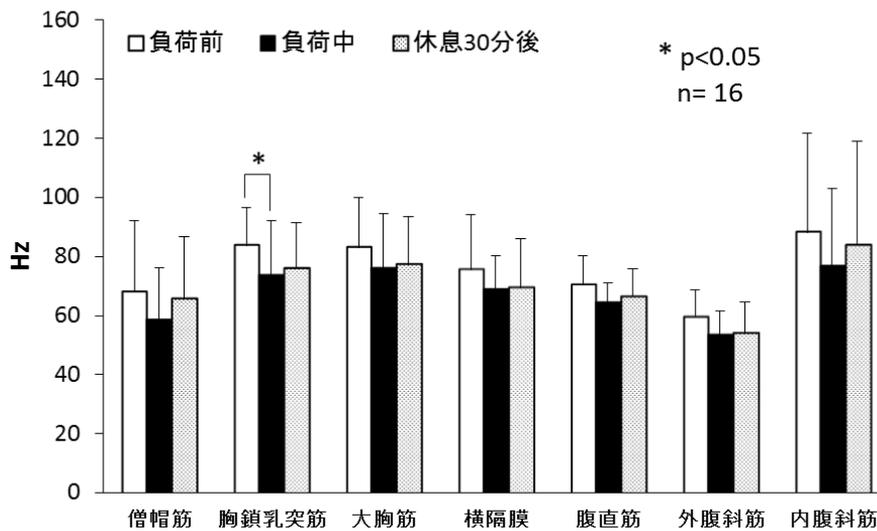


図 52 NC 群介入後：最大口腔内圧(PImax)測定時の中央周波数の経時的変化
 グラフは負荷前，負荷中最小値，休息 30 分後の中央周波数の変化を示す

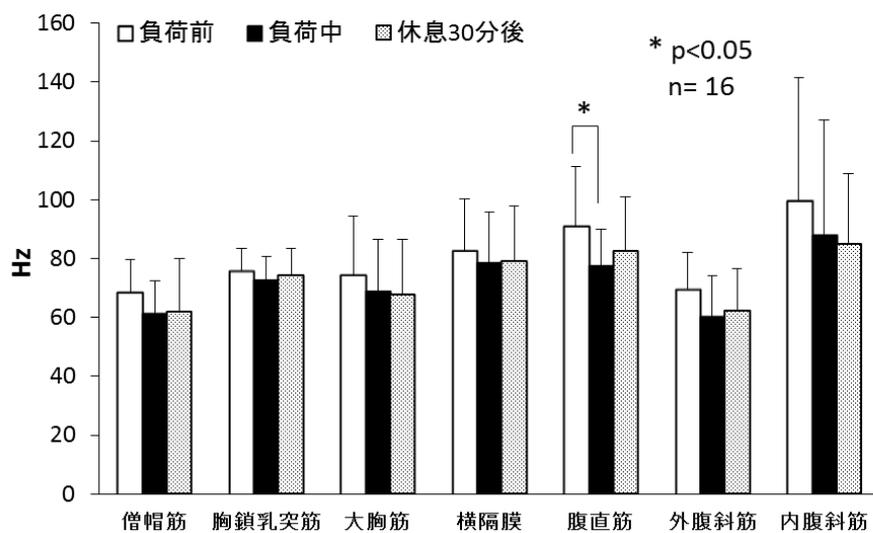


図 53 NC 群介入前：最大呼気口腔内圧(PE_{max})測定時の中央周波数の経時的変化
 グラフは負荷前，負荷中最小値，休息 30 分後の中央周波数の変化を示す

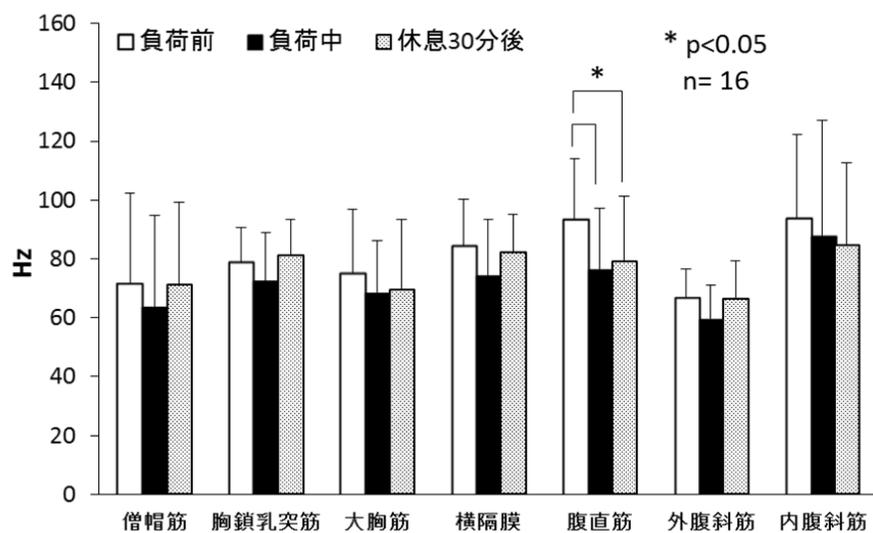


図 54 NC 群介入後：最大呼気口腔内圧(PE_{max})測定時の中央周波数の経時的変化
 グラフは負荷前，負荷中最小値，休息 30 分後の中央周波数の変化を示す

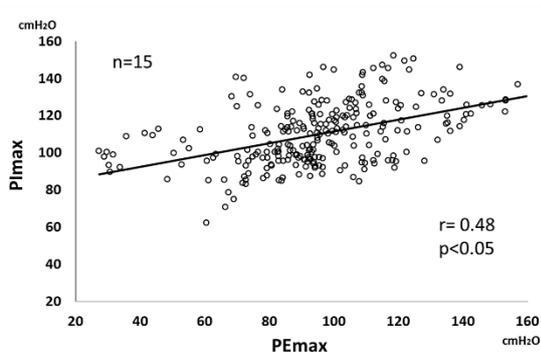


図 55 PImax, PEmax の相関
(EMT 群介入前)

EMT : Expiratory Muscle Training

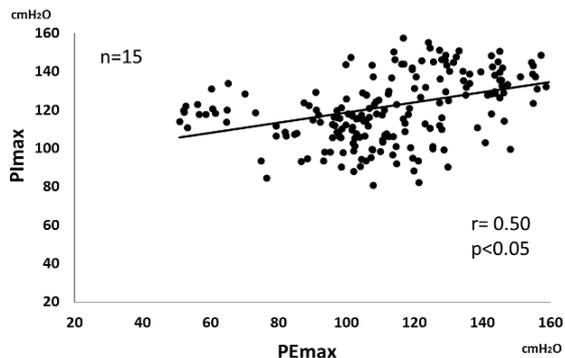


図 56 PImax, PEmax の相関
(EMT 群介入後)

EMT : Expiratory Muscle Training

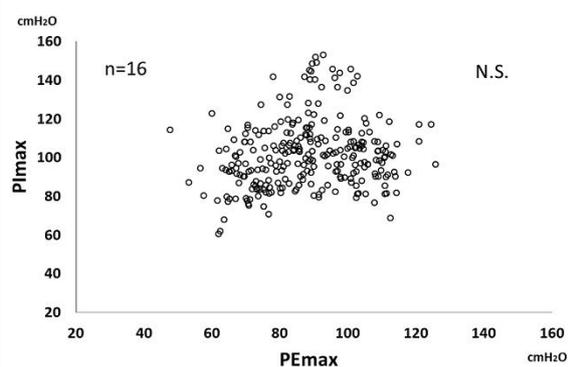


図 57 PImax, PEmax の相関
(NC 群介入前)

NC : Normal Controls

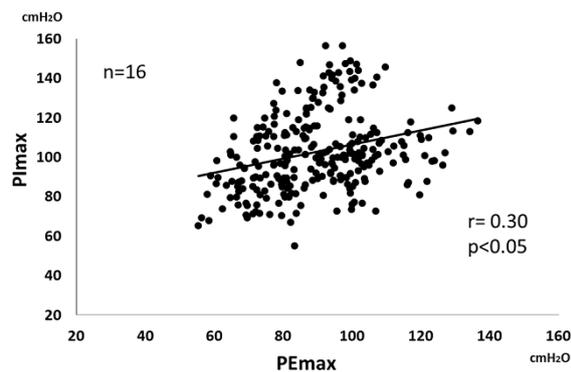


図 58 PImax, PEmax の相関
(NC 群介入後)

NC : Normal Controls

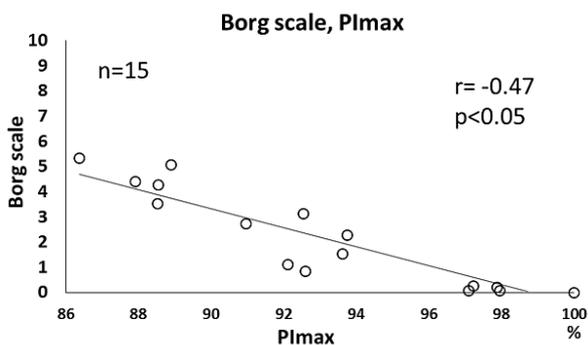


図 59 Borg scale と PImax の相関
(EMT 群介入前)

EMT : Expiratory Muscle Training

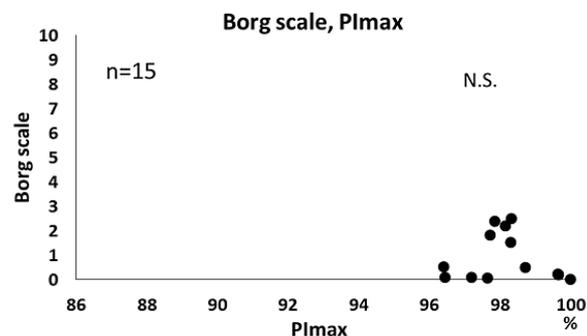


図 60 Borg scale と PImax の相関
(EMT 群介入後)

EMT : Expiratory Muscle Training

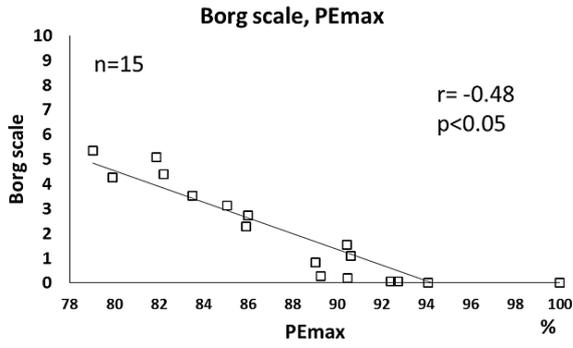


図 61 Borg scale と PEmax の相関
(EMT 群介入前)
EMT : Expiratory Muscle Training

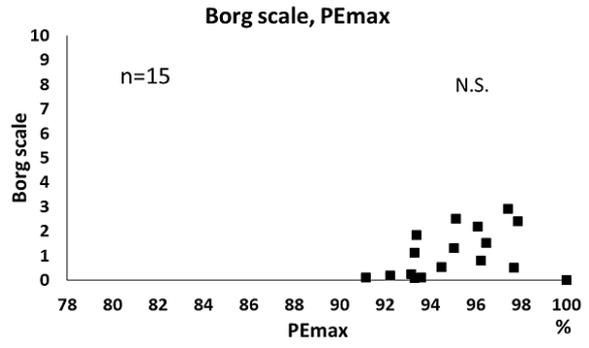


図 62 Borg scale と PEmax の相関
(EMT 群介入後)
EMT : Expiratory Muscle Training

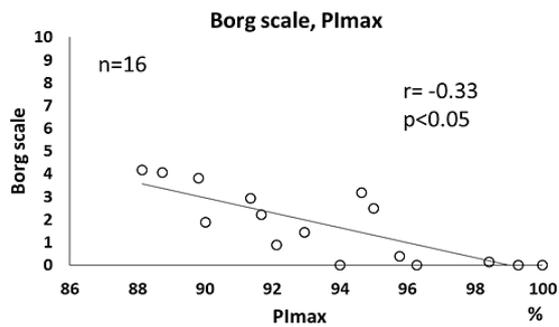


図 63 Borg scale と PImax の相関
(NC 群介入前)
NC : Normal Controls

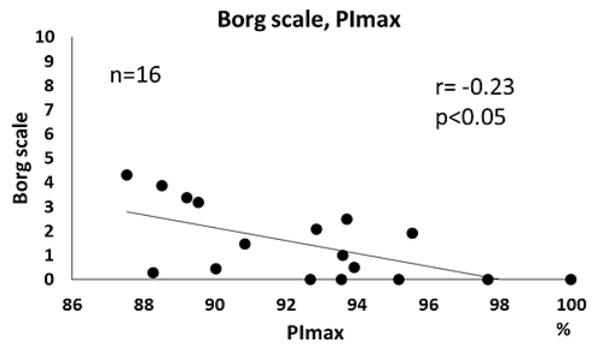


図 64 Borg scale と PImax の相関
(NC 群介入後)
NC : Normal Controls

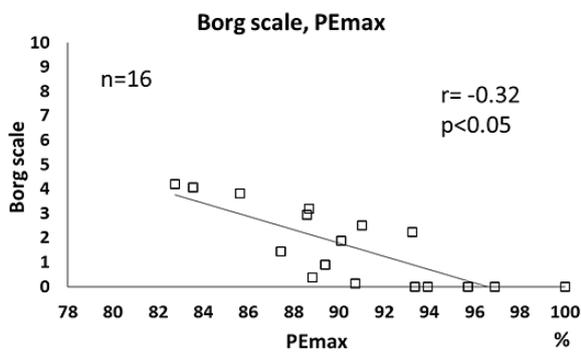


図 65 Borg scale と PEmax の相関
(NC 群介入前)
NC : Normal Controls

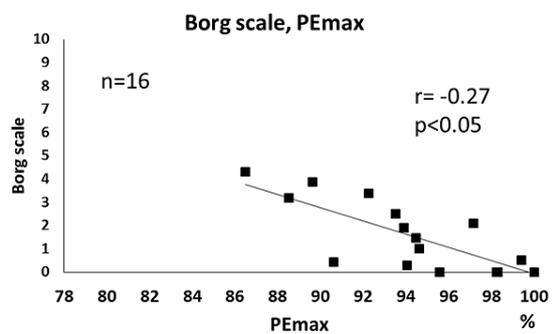


図 66 Borg scale と PEmax の相関
(NC 群介入後)
NC : Normal Controls

表 18 modified Borg scale の経時的変化

	modified Borg scale (0-10)			
	EMT群 (n=15)		NC群 (n=16)	
	介入前	介入後	介入前	介入後
負荷前	0.0 (0.0, 0.0)	0.0 (0.0, 0.0)	0.0 (0.0, 0.0)	0.0 (0.0, 0.0)
2分後	0.5 (0.5, 1.0)	0.5 (0.0, 0.5)	0.5 (0.5, 1.0)	0.5 (0.0, 0.9)
4分後	1.0 (0.5, 2.0)	0.5 (0.0, 1.0)	1.0 (0.6, 2.0)	1.0 (0.5, 1.8)
6分後	2.0 (1.0, 4.0)	0.5 (0.5, 2.0)*	1.5 (1.0, 2.8)	1.5 (0.6, 2.0)
8分後	3.0 (2.0, 4.0)	1.0 (0.5, 2.0)*	2.0 (1.3, 3.0)	2.0 (1.0, 2.8)
10分後	3.0 (2.0, 4.0)	1.0 (0.5, 2.0)*	2.0 (2.0, 3.0)	2.0 (2.0, 2.8)
12分後	3.0 (2.0, 5.0)	2.0 (1.0, 2.0)*	3.0 (2.0, 5.0)	2.5 (2.0, 3.0)
14分後	4.0 (3.0, 5.0)	2.0 (1.0, 3.0)*	3.0 (2.0, 3.8)	3.0 (3.0, 4.0)
16分後	4.0 (3.0, 6.0)	2.0 (1.0, 3.0)*	2.0 (1.0, 3.0)	3.0 (3.0, 4.0)
18分後	5.0 (4.0, 6.0)	2.0 (2.0, 3.0)*	4.0 (3.0, 5.0)	4.0 (3.3, 4.0)
20分後	5.0 (4.0, 7.0)	3.0 (2.0, 4.0)*	4.0 (3.0, 5.0)	4.0 (4.0, 5.0)
休息期 5分	1.0 (0.0, 1.0)	0.0 (0.0, 1.0)	0.0 (0.0, 0.5)	0.0 (0.0, 0.5)
休息期10分	0.0 (0.0, 1.0)	0.0 (0.0, 0.5)	0.0 (0.0, 0.0)	0.0 (0.0, 0.5)
休息期15分	0.0 (0.0, 0.0)	0.0 (0.0, 0.5)	0.0 (0.0, 0.0)	0.0 (0.0, 0.0)
休息期20分	0.0 (0.0, 0.0)	0.0 (0.0, 0.0)	0.0 (0.0, 0.0)	0.0 (0.0, 0.0)
休息期25分	0.0 (0.0, 0.0)	0.0 (0.0, 0.0)	0.0 (0.0, 0.0)	0.0 (0.0, 0.0)
休息期30分	0.0 (0.0, 0.0)	0.0 (0.0, 0.0)	0.0 (0.0, 0.0)	0.0 (0.0, 0.0)

median (25percentile, 75percentile), 介入前後の比較: *p<0.05.

表 19 H/L ratio による呼吸筋疲労開始時間

	EMT群 (n=15)				NC群 (n=16)			
	PImax		PEmax		PImax		PEmax	
	介入前	介入後	介入前	介入後	介入前	介入後	介入前	介入後
僧帽筋	3.0 (2.0, 6.0)	2.0 (2.0, 5.0)	2.0 (2.0, 2.0)	2.0 (2.0, 9.0)	2.0 (2.0, 7.0)	2.0 (2.0, 4.0)	4.0 (2.0, 6.0)	2.0 (2.0, 2.0)*
胸鎖乳突筋	2.0 (2.0, 2.0)	3.0 (2.0, 4.5)	2.0 (2.0, 2.0)	2.0 (2.0, 8.0)	2.0 (2.0, 4.0)	4.0 (2.0, 8.0)	5.0 (2.0, 10.0)	4.0 (2.0, 12.0)
大胸筋	3.0 (2.0, 7.5)	4.0 (2.0, 4.0)	2.0 (2.0, 10.0)	4.0 (2.0, 4.5)	4.0 (2.0, 10.5)	6.0 (2.0, 12.0)	2.0 (2.0, 6.0)	4.0 (2.0, 10.0)
横隔膜	2.0 (2.0, 6.0)	5.0 (2.0, 8.0)	—	—	2.0 (2.0, 3.0)	3.0 (2.0, 4.0)	—	—
腹直筋	2.0 (2.0, 4.0)	2.0 (2.0, 8.0)	2.0 (2.0, 11.5)	2.0 (2.0, 10.0)	3.0 (2.0, 4.0)	6.0 (2.0, 11.0)	2.0 (2.0, 6.0)	2.0 (2.0, 6.0)
外腹斜筋	2.0 (2.0, 4.0)	4.0 (2.0, 6.0)	2.0 (2.0, 2.5)	3.0 (2.0, 9.5)	2.0 (2.0, 8.0)	2.0 (2.0, 6.0)	3.0 (2.0, 4.0)	4.0 (2.0, 4.0)
内腹斜筋	2.0 (2.0, 9.5)	2.0 (2.0, 4.0)	2.0 (2.0, 2.5)	4.0 (2.0, 8.0)	2.0 (2.0, 7.0)	2.0 (2.0, 8.0)	2.0 (2.0, 4.0)	2.0 (2.0, 6.0)

単位: min, median (25percentile, 75percentile), PEmax 横隔膜は除外.

測定筋毎の介入前後の比較: *p<0.05.

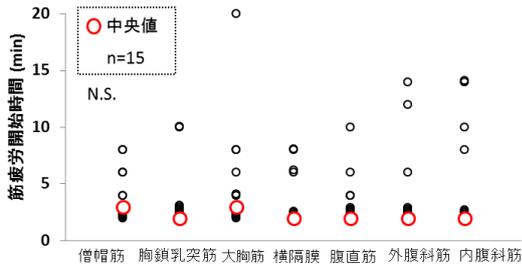


図 67 H/L ratio による筋疲労開始時間
(EMT 群介入前 : PImax)
EMT : Expiratory Muscle Training

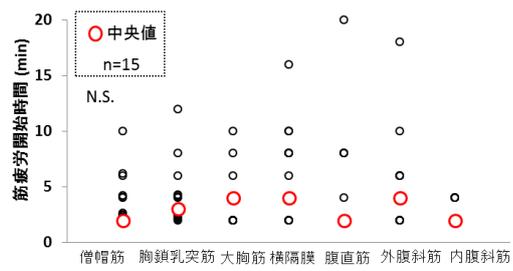


図 68 H/L ratio による筋疲労開始時間
(EMT 群介入後 : PImax)
EMT : Expiratory Muscle Training

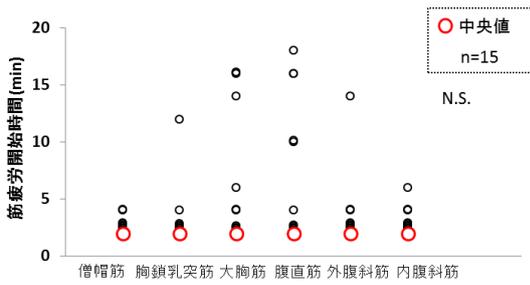


図 69 H/L ratio による筋疲労開始時間
(EMT 群介入前 : PEMax)
EMT : Expiratory Muscle Training

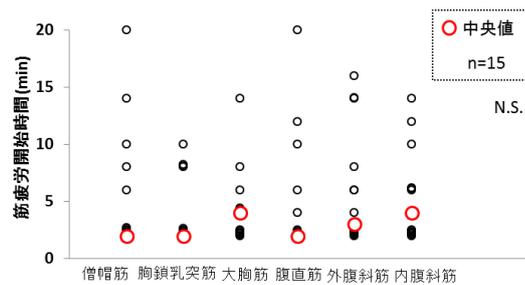


図 70 H/L ratio による筋疲労開始時間
(EMT 群介入後 : PEMax)
EMT : Expiratory Muscle Training

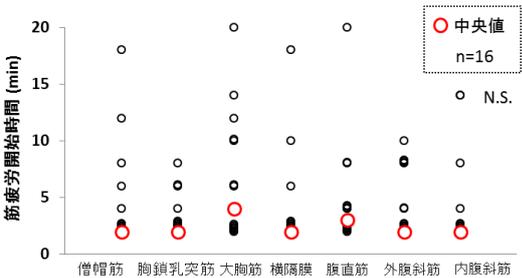


図 71 H/L ratio による筋疲労開始時間
(NC 群介入前 : PImax)
NC : Normal Controls

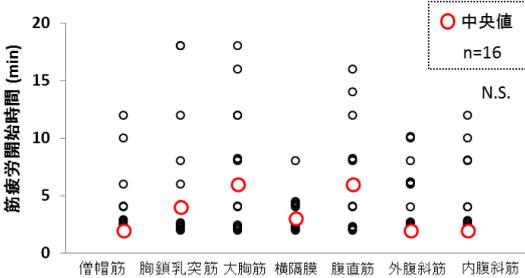


図 72 H/L ratio による筋疲労開始時間
(NC 群介入後 : PImax)
NC : Normal Controls

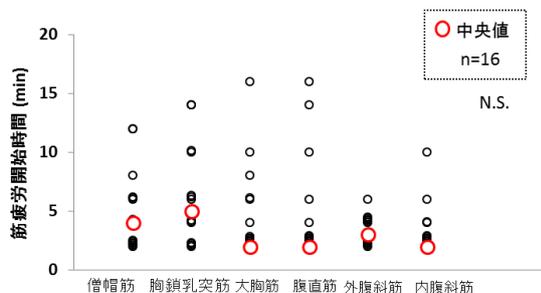


図 73 H/L ratio による筋疲労開始時間
(NC 群介入前 : PEmax)

NC : Normal Controls

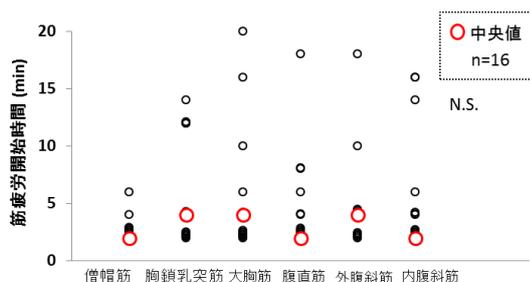


図 74 H/L ratio による筋疲労開始時間
(NC 群介入後 : PEmax)

NC : Normal Controls

3-4 考察

本章では、呼吸筋疲労に対する呼気筋トレーニング(EMT)の効果を検証することを目的に行った。呼吸筋疲労の評価は、呼吸筋力である最大口腔内圧(PImax, PEmax)および筋電図周波数解析から中央周波数(MDF)と H/L ratio を用いて検証した。

本章の結果、50%PEmax での呼気筋トレーニング(EMT)を4週間実施したことで、PEmax が有意に増加し、吸気負荷での吸気と呼気双方の筋疲労を抑制することが明らかとなった。また、PImax と PEmax との間には正の相関がみられた。50%PEmax におけるトレーニング効果として、呼気筋である腹直筋と外腹斜筋および内腹斜筋、吸気補助筋である胸鎖乳突筋の筋疲労耐性が向上した。さらに、呼吸困難感は介入前で PImax との間に負の相関がみられたが、介入後には相関がみられず、有意に減少することが明らかとなった。この他、介入前後における呼吸筋毎の筋疲労開始時間に有意差はなかったことから、トレーニングが疲労の順序性に影響を与えないことが考えられた。

今回、トレーニングを行わない NC 群では、4週間前後(介入前後)の比較に PImax, PEmax および呼吸筋疲労に有意な変化を示さなかった。このことから、呼気筋トレーニング(EMT)の介入効果が健常者において得られたことが考えられた。

3-4-1 最大吸気口腔内圧(PImax)と最大呼気口腔内圧(PEmax)および呼吸機能検査の介入前後の比較

今回、4週間の呼気筋トレーニング(EMT)によって、EMT 群の呼気筋力である PEmax が介入後に 22.1cmH₂O と約 20%有意に増加した。Mota ら⁶⁵⁾は、COPD を対象に 50%PEmax の負荷量で 5週間の呼気筋トレーニング(EMT)を実施した場合、呼気筋力が 19%増加したことを報告した。また、Neves ら⁹²⁾の COPD を対象とした呼気筋トレーニング(EMT)のメタアナリシスでは、介入時の負荷量が 10%から 60%と様々であったが、PEmax で 21.5cmH₂O の増加があることを報告しており、これらの結果は本研究結果とよく一致している。本研究では健常成人男性を対象としているが、COPD を対象とした先行研究と一致した効果を得ることができ、50%PEmax と

いった呼気筋トレーニング(EMT)の負荷量と介入期間において適切であったと考えられた。しかし、今回 EMT 群の吸気筋力である PImax は介入後に 8.3 cmH₂O と約 7%の増加を示したが、介入前と比較し統計学的に有意な差はみられなかった。今回、呼気筋トレーニング(EMT)を 50%PEmax の負荷量で 4 週間介入した結果では、PImax と PEmax の双方とも増加を示したが、有意な効果を示すのは呼気筋力である PEmax であることが明らかとなった。

呼吸機能検査における介入前後の比較では、ピークフロー(PEF)のみが EMT 介入後に有意に高値を示した。Kojima ら⁹³⁾によると、呼気筋トレーニング(EMT)が呼気筋を強化し咳嗽能力の指標である咳嗽時最大呼気流速(Peak Cough Flow; 以下, PCF)の改善に有効であることを報告し、柳澤ら⁹⁴⁾は呼気筋トレーニング(EMT)による PCF と PEF の増加は有意な正の相関を示すことを報告している。このため今回、呼気筋トレーニング(EMT)による呼気筋強化が呼気筋力のみでなく最大呼気流速にも効果を示したことから、咳嗽能力の改善にも有効である可能性が示唆された。

3-4-2 最大吸気口腔内圧(PImax)と最大呼気口腔内圧(PEmax)における介入前後の経時的変化の比較

吸気負荷における PImax と PEmax の経時的変化を介入前後で検証した結果、EMT 群介入前においては PImax と PEmax は負荷開始 2 分後より経時的な有意な低下を示し、休息後に回復がみられたことから吸気と呼気の双方に呼吸筋疲労が出現していたことが考えられた。しかし、EMT 群介入後においては、PImax と PEmax の経時的な低下が認められず、吸気と呼気の双方で呼吸筋疲労は出現しなかった。この PImax と PEmax には、正の相関がみられた。これらのことから、呼気筋トレーニング(EMT)により吸気負荷における呼吸筋疲労を吸気と呼気の双方で抑制する効果があることが明らかとなった。Gosselink ら⁶³⁾の吸気筋トレーニング(IMT)におけるメタアナリシスの報告を参考にすると、COPD の吸気筋トレーニング(IMT)による効果として吸気筋力と耐久力が増強し、呼吸困難感を減少させることが報告されている一方で、呼吸筋疲労の発症を減少させ、運動能力を改善するといった検証が必要であることが報告されている。このことから今回、呼気筋トレーニング(EMT)の介入において、吸気負荷による呼吸筋の疲労耐性を吸気と呼気双方で増強する効果が得られたことは、臨床における COPD や慢性呼吸器疾患の呼吸筋疲労の改善や予防に対する介入研究を行う基礎データとなることが考えられた。

3-4-3 中央周波数(MDF)における介入前後の経時的変化の比較

呼気筋トレーニング(EMT)における、吸気負荷中の呼吸筋毎の効果について考察する。まず、呼吸筋毎の筋疲労の評価には筋電図周波数解析による中央周波数(MDF)と H/L ratio の低下を筋疲労の指標とした。呼吸筋毎の呼気筋トレーニング(EMT)の効果として、呼気筋である腹直筋、外腹斜筋、内腹斜筋、吸気補助筋である胸鎖乳突筋の筋疲労耐性が向上した。EMT 介入前の中央周波数(MDF)では、腹直筋で 10 分後、18 分後、外腹斜筋で 2 分後、4 分後の負荷中に筋疲労がみられ、内腹斜筋では負荷中断後の休息期 5 分後、20 分後、30 分後、胸鎖乳突筋は負荷中で 2 分後、10 分後から 14 分後、18 分後から 20 分後、休息期 5 分後から 25 分後に筋疲労がみられ、筋疲労の出現する時間に統一性がなかった。これは、呼吸筋を疲労しにくい状態にするために順序よく筋線維タイプを動員して至適な運動パターンを作り³⁵⁾、吸気筋と呼気筋が同時に疲労しな

いように代償し⁹⁵⁾、呼吸筋が協調し活動している可能性を示唆するものであった。しかし EMT 介入前にみられた呼吸筋疲労は、EMT 介入後では負荷中、休息後ともに中央周波数(MDF)の有意な低下はみられず、中央周波数(MDF)からは筋疲労の徴候はみられなかった。Neves ら⁹²⁾の呼気筋トレーニング(EMT)におけるメタアナリシスでは、呼気筋トレーニング(EMT)が吸気筋および呼気筋の強度を改善する有効な方法であることを報告している。このことから呼気筋トレーニング(EMT)により呼気筋である腹直筋、外腹斜筋、内腹斜筋のみでなく吸気補助筋である胸鎖乳突筋の疲労耐性が向上したことが考えられた。

3-4-4 呼気筋トレーニング(EMT)による呼気筋強化が呼吸筋疲労に及ぼす影響

呼気筋トレーニング(EMT)の介入によって吸気負荷による呼吸筋疲労を吸気と呼気の双方で抑制できた効果について、第2章の吸気負荷における呼吸筋疲労の分析を参考に考察する。第2章では、吸気負荷によって、吸気と呼気の双方で呼吸筋疲労が発生し、この時の呼吸筋活動から呼気筋である腹直筋と吸気補助筋である胸鎖乳突筋が呼吸筋疲労に影響していることが考えられた。本章においても、EMT 群介入前は胸鎖乳突筋と腹直筋、外腹斜筋、内腹斜筋の筋疲労が認められ、第2章と類似した結果を示した。しかし、EMT 群介入後には、胸鎖乳突筋、腹直筋、外腹斜筋、内腹斜筋の全筋で筋疲労が認められず、筋疲労耐性が向上したことが考えられた。

呼気筋トレーニング(EMT)の介入により、吸気と呼気双方の筋疲労を抑制した効果について3つの視点から考察する。

まず一つ目として、胸鎖乳突筋の疲労耐性が向上したことが挙げられる。胸鎖乳突筋は介入前でみられた筋疲労徴候(MDF は 93.0Hz から 74.8Hz と約 20%の低下)が介入後(84.9Hz から 81.7Hz と約 4%の低下)ではみられず、筋疲労耐性の向上が認められた。胸鎖乳突筋は、強い呼気負荷時で活動を示すことが報告されているため⁸¹⁾、呼気筋トレーニング(EMT)の負荷設定を 50%にしたことで活動を誘発し、吸気に加えて呼気筋の疲労耐性を向上させるまでの要因になったことが考えられた。

二つ目に、腹筋群の疲労耐性向上に伴う最大呼気口腔内圧(PE_{max})の上昇と、腹圧の上昇に伴う横隔膜の収縮効率向上が挙げられる。介入前では、筋疲労による中央周波数(MDF)の有意な低下がみられたが(腹直筋：79.6Hz から 65.8Hz と約 17%の低下、外腹斜筋：73.8Hz から 59.7Hz と約 19%の低下、内腹斜筋：108.9Hz から 90.3Hz と約 17%の低下)、介入後では有意な低下はみられなかった(腹直筋：79.4Hz から 72.1Hz と約 9%の低下、外腹斜筋：67.5Hz から 63.6Hz と約 6%の低下、内腹斜筋：111.5Hz から 104.8Hz と約 6%の低下)。呼気筋である腹筋群には吸気的作用もあるとされ、これは呼気時の腹筋の収縮により横隔膜を胸腔内に押し上げ、横隔膜筋線維を最適長に近づけることで横隔膜の収縮効率を改善させる役割や胸郭の形状と安定性に影響を与えることで吸気に作用したものである^{5,96)}。このように、腹筋群の疲労耐性向上により直接的に呼気筋の疲労耐性を向上させ、間接的に吸気筋の疲労耐性を向上させた要因になったと考えられた。

三つ目に、筋構造変化による疲労耐性が向上したことが挙げられる。Ramirez ら⁹⁷⁾は、50%PI_{max}の負荷を用いた吸気筋トレーニング(IMT)で、外肋間筋の type I 線維の割合が約 38%増加し、耐久性が増加したことを報告しており、本研究で用いた負荷と介入期間が同程度であることから、type I 線維の割合が増加したことが推測され、疲労耐性の向上に結びついたと予測さ

れる。

以上の3つの視点から、胸鎖乳突筋と腹筋群の疲労耐性向上と筋構造変化の要因により、吸気と呼気双方の呼吸筋疲労を抑制したことが考えられた。

3-4-5 H/L ratio における呼吸筋疲労開始時間の比較と呼吸筋毎の介入前後における比較

H/L ratio では、高周波数(H; 150-350Hz)と低周波数(L; 20-40Hz)の比率を呼吸筋毎に算出し、負荷開始前の最大口腔内圧(PImax, PEmax)測定時の H/L ratio を 100%として、20%以上低下した時点呼吸筋疲労開始時間とした。その結果、EMT 群、NC 群とも呼吸筋毎の筋疲労開始時間について有意な差が認められず、筋疲労の順序性は検出できなかった。

H/L ratio による呼吸筋疲労開始時間を呼吸筋毎に中央値にて比較すると、EMT 介入前は2分から3分の間、介入後は2分から5分の間と介入前後の比較においても有意な差を認めなかったことから、呼気筋トレーニング(EMT)の介入において筋疲労開始時間については呼吸筋毎に差が生じないことが考えられた。一方で、NC 群の PEmax 測定時の僧帽筋のみ介入後に筋疲労開始時間が有意に短縮していた。これは、一場ら⁸⁾によると強い呼気負荷時には僧帽筋の活動が認められ、共同収縮が生じることが報告されている。このため、NC 群介入後では吸気負荷に伴う吸気のみでなく呼気に対しても強い負荷が課せられ、僧帽筋の代償による共同収縮の増大が筋疲労開始時間を短縮したことが考えられた。

白井³⁴⁾によると、H/L ratio の低下は筋組織内の収縮代謝機構が疲労に傾く時点を捉えているとされていることから、筋線維タイプからみた吸気筋、呼気筋の筋疲労は、吸気負荷開始の2分後と早期から同時期に出現している可能性が考えられた。

3-4-6 中央周波数(MDF)と H/L ratio からみた呼吸筋疲労の比較

EMT 介入後において、筋線維タイプの疲労徴候による H/L ratio の低下がみられたが、中央周波数(MDF)では有意な低下がみられず、測定筋の全筋で筋疲労を認めなかった。H/L ratio による、高周波数は type II 線維、低周波数は type I 線維に対応するとされていることから³⁵⁾、吸気負荷により易疲労性である type II 線維が減少し、疲労抵抗性の type I 線維が活動を増加させることで H/L ratio が低下することがいわれている^{13,16)}。このため、呼吸筋の筋線維タイプにおける収縮代謝特性から筋疲労の徴候が早期から確認されたと考えられる。しかし、H/L ratio は高周波数が 150-350Hz、低周波数が 20-40Hz の周波数帯域の比率を抽出し筋疲労を確認しているのに対し、中央周波数(MDF)は 20-350Hz と広範囲の EMG パワースペクトルを抽出し筋疲労を総合的に確認している。このため、中央周波数(MDF)は中周波数帯域やそれ以外の周波数帯域の変化に影響を受けることになる。この中周波数帯域(46-80Hz)は type II a 線維に対応するとされており³⁵⁾、この type II a 線維は速筋線維であるが比較的疲労耐性の高い筋線維となる⁹⁸⁾。永田³⁵⁾によると、中周波数帯域は全周波数帯域の 45%以上に参与することが報告されており、EMT 介入後に呼吸筋の中央周波数(MDF)が経時的に有意な低下を示さなかった理由の一つとして、中周波数帯域の変化が生じていたことが推測された。また、50%PEmax という負荷量で EMT を行うことで、比較的疲労耐性の高い type II a 線維の強化に繋がる可能性が推測された。このため、中央周波数(MDF)や H/L ratio のみでなく中周波数帯域を含めた全周波数帯域を分析することで、より詳細

な筋線維タイプにおける収縮代謝特性の評価を可能にすることが考えられた。H/L ratio は呼吸筋による発生圧(最大口腔内圧)よりも早期に疲労を検出できる方法であることがいわれているが^{13,44)}、EMT 介入前の最大口腔内圧(PImax, PEmax)は負荷開始 2 分後と早期から有意な低値を示したため、H/L ratio と同時期に筋疲労を検出した。さらに、NC 群では、最大口腔内圧(PImax, PEmax)の有意な低値を示す前または同時期に H/L ratio による筋疲労の徴候がみられていたことから、呼吸筋力である最大口腔内圧(PImax, PEmax)の変化よりも早期に筋疲労を検出できる可能性があることが考えられた。

EMT 介入前後で、H/L ratio からは疲労の順序性はみられなかった。H/L ratio は、筋線維タイプにおける筋疲労を反映した結果であったことが考えられ、個々の呼吸筋の筋線維タイプにおける疲労の発生に差がないことが考えられた。このことは、吸気負荷において呼吸筋の筋線維タイプにおける疲労徴候が吸気筋、呼気筋の双方で発生するという特性が考えられた。また、吸気負荷時には吸気筋と呼気筋が協調して活動し、負荷呼吸に対応している可能性が考えられた。

3-4-7 Borg scale と最大吸気口腔内圧(PImax)および最大呼気口腔内圧(PEmax)との関係性と Borg scale における介入前後の比較

Borg scale と最大口腔内圧(PImax, PEmax)の関係性について考察する。EMT 介入前では、吸気負荷時間の延長に伴い負の相関関係がみられたが、介入後では相関がみられなかった。さらに吸気負荷中の Borg scale を比較すると、6 分後から 20 分後の時間で介入前に比べて介入後で有意に低下した。

呼吸困難感の増加は、呼吸筋に負荷が課せられた場合や疲労により収縮力の低下が生じ、これを補うために呼吸中枢からの出力を増加させることで引き起こされる機序が報告されている⁸²⁾。本研究でみられた介入前の呼吸困難感の増加はこのためと考えられ、介入後で介入前に比べて有意に低下したことから、筋疲労耐性が向上したことで、呼吸中枢からの出力に依存せず吸気負荷中でも一定の呼吸運動が継続できた結果と考えられる。また、呼吸困難感には胸鎖乳突筋が影響することが報告されており^{37,99)}、介入後で呼吸困難感が有意に低下した結果は、胸鎖乳突筋の筋疲労耐性の向上が影響したと考えられる。

3-4-8 まとめ

健常者を対象とした呼気筋トレーニング(EMT)の介入により呼気筋力が向上し、吸気負荷時の呼吸筋疲労を吸気と呼気の双方で抑制し、呼吸困難感を改善させる効果があることが明らかとなった。

3-4-9 研究限界について

本研究の限界として、呼吸筋力測定は最大呼気位(残気量位)、最大吸気位(全肺気量位)での測定であるため、得られた値は肺と胸郭の弾性収縮力が加わっていること、ATS/ERS⁶⁰⁾で発表された標準法に準拠した呼吸筋力の測定には声門の閉塞、頬筋の使用を防ぐために測定回路内においてエアリークが生じている点がある。前者については、呼吸筋力の測定における肺と胸郭の弾性収縮力の影響について検討ができていないことや、胸郭の動きや柔軟性についての検討ができて

いなかったことが研究限界と反省点といえる。後者については、最大口腔内圧(PImax, PEmax)において、ピーク圧を記録した後、その絶対値が徐々に減少するといわれている点が挙げられる。このため、ピーク圧が遅れてきた場合には、測定開始時の肺気量の圧を反映しないことがいわれており、口腔内圧測定の特性上、肺気量までを規定した計測ができなかった点が研究限界として挙げられる。一般にこの値は小さく問題とならないとされているが、肺気量までを規定した口腔内圧の計測についても検討していきたいと考える。また、健常成人男性を対象としており、性別の違いによる影響が不明な点や実際の COPD や慢性呼吸器疾患における呼吸疲労を捉えていない点などが挙げられるため今後の検討課題としたい。

第4章 総括および今後の課題

4-1 総括および今後の課題

今回、健常成人男性を対象に、吸気負荷における呼吸筋疲労の分析と呼吸筋疲労に対する呼気筋トレーニング(EMT)の効果について検証した。その結果、吸気負荷における呼吸筋疲労特性として、吸気と呼気の双方に呼吸筋疲労が生じることが明らかとなった。また、この時の呼吸筋毎の筋疲労を表面筋電図周波数解析により検証し、胸鎖乳突筋と腹直筋に筋疲労が生じることが明らかとなった。この他、吸気負荷時の呼吸困難感と呼吸筋力には負の相関関係を認め、呼吸筋疲労開始時間については各呼吸筋の間で有意な差がみられなかった。著者ら^{19,20)}の先行研究では、呼気負荷における呼吸筋疲労特性として吸気と呼気の双方で呼吸筋疲労が生じていることを報告している。この呼気負荷時においては、腹筋群である呼気筋疲労が吸気と呼気双方の呼吸筋疲労に影響を与えていることが考えられた。これら、吸気負荷と呼気負荷における呼吸筋疲労特性は類似した結果を示し、吸気と呼気双方の呼吸筋疲労に腹筋群である呼気筋疲労が影響していることが考えられた。このため、呼吸筋トレーニング(VMT)では呼気筋トレーニング(EMT)を行うことで呼気筋を強化し、吸気と呼気双方の呼吸筋疲労を抑制できるという仮説を立て、呼気筋トレーニング(EMT)における介入研究を実施した。

呼気筋トレーニング(EMT)の介入研究では、トレーニングを行う EMT 群とトレーニングを行わない NC 群に無作為に分け、50%PEmax の負荷量で4週間の呼気筋トレーニング(EMT)の介入研究を実施した。EMT 群、NC 群は吸気負荷における呼吸筋疲労の評価を介入前後で実施し、その前後比較を行った。その結果、EMT 群では呼気筋力が有意に増加し、吸気負荷における吸気と呼気双方の呼吸筋疲労を抑制する効果を示した。また、筋電図周波数解析から呼吸筋毎の筋疲労の状態を評価した結果、呼気筋である腹直筋、外腹斜筋、内腹斜筋、吸気補助筋である胸鎖乳突筋の筋疲労耐性が向上することが明らかとなった。このことから、呼気筋トレーニング(EMT)の介入により呼気筋が強化され、呼気筋力が増加することで吸気と呼気双方の呼吸筋疲労を抑制する効果があることが明らかとなった。これは、本研究の仮説を実証するものであった。

従来、呼吸筋トレーニング(VMT)は吸気筋トレーニング(IMT)といった吸気筋強化が主流であり、吸気筋力や耐久性の増強、呼吸困難感の減少などその効果が示されている。しかし、吸気筋トレーニング(IMT)においても呼吸筋疲労への有効性を明記した報告は現時点ではなく、吸気筋と呼気

筋を含めた呼吸筋疲労特性は明らかにされていなかった。今回、著者ら^{19,20)}の先行研究と本研究において、呼気負荷と吸気負荷のどちらにおいても吸気と呼気の双方で呼吸筋疲労が生じるといった呼吸筋疲労特性を明らかにすることができた。また、呼気筋トレーニング(EMT)による呼気筋強化が呼気筋力を有意に増加させ、吸気と呼気双方の呼吸筋疲労を抑制し、呼吸困難感を改善させる効果を得ることができた。これは臨床において、吸気や呼気負荷または両者の負荷により呼吸筋疲労が生じている COPD や慢性呼吸器疾患の患者に対し、呼吸リハビリテーションの一種目を提供する一助となることが考えられる。しかし、今回の呼気筋トレーニング(EMT)の介入研究はあくまで健常成人男性で得た効果であるため、実際の COPD や呼吸器疾患をもつ患者の呼吸筋疲労を分析し、呼気筋トレーニング(EMT)の有効性について検証していく必要がある。

呼吸筋トレーニング(VMT)の適応基準については統一した見解が得られていないが、COPD 患者における呼吸困難、最大吸気口腔内圧(PImax)の低下している(PImax \leq 60cmH₂O)状態¹⁰⁰⁾、呼吸筋疲労に呼気筋疲労が関与している状態¹⁰¹⁾、肺過膨張や横隔膜の平底化をきたしている呼吸障害が適応とされているが⁴⁶⁾、著しい呼吸筋疲労の患者は実施されるべきではないことが報告されており⁵⁵⁾、臨床では呼吸筋疲労を評価した上で実施する必要がある。

呼吸筋疲労は呼吸不全の原因となることから、呼吸筋疲労を評価し予防していくことが臨床上重要であると考え。今回、健常者で得た呼気筋トレーニング(EMT)による呼吸筋疲労の抑制効果を基礎データとし、臨床における介入研究と有効性の検証を今後検討していきたいと考える。

4-2 継続研究の展開について

今回、健常成人男性を対象とした呼気筋トレーニング(EMT)の呼吸筋疲労に対する影響について検証し、吸気と呼気双方の呼吸筋疲労を抑制する効果を得ることができた。しかし、高齢者や実際の慢性呼吸器疾患患者に対する効果については不明である。また、高齢者や COPD、慢性呼吸器疾患をもつ患者の呼吸補助筋を含めた呼吸筋の筋疲労特性は明らかにされていないため、呼吸筋疲労の発生の有無や呼吸筋疲労を引き起こしている呼吸筋の抽出と簡便な評価方法などについても検証していきたいと考えている。さらに、呼吸筋疲労の抑制効果が運動耐容能や運動制限に与える影響についても今後検証する必要があると考える。

第5章 謝辞

本研究を行うにあたり、ご指導ご協力いただきました丸山仁司教授、町田和講師、理学療法学分野の先生方ならびに被験者としてご参加いただいた皆様に心から感謝いたします。また、本研究に際し、機器借用や研究場所、研究時間をご提供くださった、常葉大学健康科学部静岡理学療法学科ならびに関係者の皆様に深く感謝いたします。最後に、私のこれまでの生活を支えてくれた家族に心より感謝申し上げます。

第6章 文献一覧

- 1) Spruit MA, Singh SJ, Garvey C, et al. An official American Thoracic Society/ European Respiratory Society statement: key concepts and advances in pulmonary rehabilitation. *American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine* 2013; 188(8): e13-e64
- 2) 日本呼吸器学会 COPD ガイドライン作成委員会. COPD(慢性閉塞性肺疾患)診断と治療のガイドライン. 第4版. 東京: 株式会社メディカルレビュー, 2013: 71-78
- 3) 神津玲, 千住秀明(監), 眞淵敏(監)ら. 呼吸理学療法標準手技. 東京: 医学書院, 2008: 4-14
- 4) 宮川哲夫. 呼吸筋トレーニング. *理学療法学* 1988; 15(2): 208-216
- 5) 鈴木俊介. 呼吸筋疲労と呼吸筋訓練. *日本呼吸管理学会誌* 1999; 9(2): 111-117
- 6) 鈴木俊介. リハビリテーション医学の進歩と展開－呼吸筋疲労と呼吸筋トレーニング. *現代医療* 2000; 32(6): 1411-1418
- 7) 大久保隆男, 鈴木俊介. 呼吸不全と呼吸筋疲労. *日本内科学会雑誌* 1994; 83(9): 1621-1626
- 8) Roussos C, Macklem PT. Diaphragmatic fatigue in man. *Journal of Applied Physiology* 1977; 43(2): 189-197
- 9) Grassino A, Bellemare F. Mechanisms and assessment of respiratory muscle fatigue. In: *Chronic Obstructive Pulmonary Disease*. London: Churchill Livingstone, 1984: 161-182
- 10) NHLBI Workshop. Respiratory muscle fatigue. Report of the Respiratory Muscle Fatigue Workshop Group. *The American Review of Respiratory Disease* 1990; 142(2): 474-480
- 11) 上田敏, 大川弥生. リハビリテーション医学大辞典 第1版. 東京: 医歯薬出版, 1996: 190-191
- 12) Roussos C, Macklem PT. The respiratory muscles. *The New England Journal of medicine* 1982; 307(13): 786-797
- 13) Gross D, Grassino A, Ross WR, et al. Electromyogram pattern of diaphragmatic fatigue. *Journal of Applied Physiology* 1979; 46(1): 1-7
- 14) Roussos C, Fixley M, Gross D, et al. Fatigue of the inspiratory muscles and their synergic behavior. *Journal of Applied Physiology* 1979; 46(5): 897-904
- 15) Aubier M, Farkas G, DeTroyer A, et al. Detection of diaphragmatic fatigue in man by phrenic stimulation. *Journal of Applied Physiology* 1981; 50(3): 538-544
- 16) Cohen CA, Zagelbaum G, Gross D, et al. Clinical manifestations of inspiratory muscle fatigue. *The American Journal of Medicine* 1982; 73(3): 308-316
- 17) Suzuki S, Suzuki J, Ishii T, et al. Relationship of respiratory effort sensation to expiratory muscle fatigue during expiratory threshold loading. *The American Review of Respiratory Disease* 1992; 145: 461-466
- 18) Macklem PT, Roussos C. Respiratory muscle fatigue. a cause of respiratory failure?. *Clinical Science and Molecular Medicine* 1977; 53(5): 419-422
- 19) 塚本敏也, 内田全城, 丸山仁司ら. 50%最大呼吸気口腔内圧による呼吸負荷に対する呼吸筋疲労の分析. *理学療法科学* 2015; 30(6): 817-822

- 20) 塚本敏也, 内田全城, 三浦和ら. 呼気抵抗負荷における呼吸補助筋の筋疲労特性. 理学療法科学 2016; 31(1): 143-150
- 21) 小林千里, 阿部直. 神経・呼吸筋の機能. 呼吸 2001; 20(3): 265-272
- 22) 本間生夫, 田中一正, 柿崎藤泰. 呼吸運動療法の理論と技術. 東京: メジカルビュー社, 2008: 140-151
- 23) De Troyer A, Loring SH. Action of the respiratory muscles. In Handbook of Physiology. The respiratory system. Bethesda: American Physiological Society, 1986: 443-461
- 24) 永田晟. からだ運動の科学-バイオダイナミクス入門-. 東京: 朝倉書店, 1983: 13-56, 75-82
- 25) 本間生夫. 呼吸筋・胸郭の生理. 呼吸 2000; 19(1): 49-53
- 26) 進藤千代彦. 呼吸筋疲労とは. 呼吸 1997; 16(1): 39-44
- 27) 菊池喜博. 呼吸筋力の指標. 呼吸 1984; 3(10): 1282-1288
- 28) 鈴木俊介. 呼吸不全と呼吸筋疲労. 臨床医 1977; 23(2): 249-253
- 29) 鈴木俊介. 呼吸筋疲労の評価法. アレルギーの臨床 2001; 21(8): 650-655
- 30) 解良武士. 呼吸筋力の測定. 理学療法科学 2002; 17(4): 265-271
- 31) 土橋ゆかり, 阿部直. 診断と病態把握の方法ーその実際と読みかたー呼吸筋疲労の評価と対策. Medical Practice 1997; 14: 245-247
- 32) 下野俊哉. 表面筋電図マニュアル基礎・臨床応用. 東京: 酒井医療株式会社, 2010: 54-67, 72-122, 123-159
- 33) Edwards RH. Human muscle function and fatigue. Ciba Foundation symposium 1981; 82: 1-18
- 34) 白井誠一. 慢性閉塞性肺疾患患者における呼吸筋疲労に関する研究. 大阪市医学会雑誌 1986; 35(1): 121-136
- 35) 永田晟. 筋と筋力の科学-筋収縮のスペクトル解析-. 東京: 不味堂出版, 1984: 115-125, 152-156
- 36) Bellemare F, Grassino A. Evaluation of human diaphragm fatigue. Journal of Applied Physiology 1982; 53(5): 1196-1206
- 37) 松下晴彦. 慢性閉塞性肺疾患患者における運動負荷時の呼吸困難及び呼吸筋の活動に関する検討. 日本胸部疾患学会雑誌 1992; 30(7): 1242-1249
- 38) 下野俊哉. 電気生理検査による機能障害の評価, 表面筋電図による筋力と筋疲労評価. 臨床リハ 2012; 21(12): 1193-1198
- 39) Martin J, Aubier M, Engel LA. Effects of inspiratory loading on respiratory muscle activity during expiration. The American Review of Respiratory Disease 1982; 125(3): 352-358
- 40) Weiner P, Magadle R, Beckerman M, et al. Comparison of specific expiratory, inspiratory, and combined muscle training programs in COPD. Chest 2003; 124(4): 1357-1364
- 41) Hodgev VA, Kostianev SS. Maximal inspiratory pressure predicts mortality in patients with chronic obstructive pulmonary disease in a five-year flow-up. Folia Medica 2006; 48(3-4): 36-41
- 42) 谷口博之. COPD における骨格筋, 呼吸筋の機能異常. COPD FRONTIER 2003; 2(4):

294-300

- 43) ATS/ERS Pulmonary Rehabilitation Writing Committee. American Thoracic Society/ European Respiratory Society Statement on Pulmonary Rehabilitation. *American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine* 2006; 173(2): 1390-1413
- 44) 道免和久, 馬淵敏, 高橋紀代. 最新包括的呼吸リハビリテーション. 大阪: メディカ出版, 2005: 1-24
- 45) 大野秀樹, 井澤鉄也, 長澤純一ら. 運動生理・生化学辞典. 東京:大修館書店, 2001:136-137
- 46) 日本呼吸ケア・リハビリテーション学会呼吸リハビリテーション委員会ワーキンググループ 日本呼吸器学会呼吸管理学術部会, 日本リハビリテーション医学会呼吸リハビリテーションガイドライン作成委員会, 日本理学療法士協会呼吸理学療法診療ガイドライン作成委員会.呼吸リハビリテーションマニュアルー運動療法ー. 第二版. 東京: 照林社, 2012: 16-24, 42-52, 138-139
- 47) 鈴木俊介. 吸気筋疲労と呼気筋疲労. *呼吸* 1997; 16(3): 412-417
- 48) 佐藤麻知子, 佐竹将宏, 塩谷隆信ら. 呼吸筋トレーニングにおける効果的な負荷圧の検討. *理学療法学* 2002; 29(2): 37-42
- 49) 中田紘一郎, 谷本普一. 慢性閉塞性肺疾患患者の呼吸筋. *呼吸* 1987; 6(11): 1236-1240
- 50) Kyroussis D, Polkey MI, Keilty SE. et al. Exhaustive exercise slows inspiratory muscle relaxation rate in chronic obstructive pulmonary disease. *American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine* 1996; 153(2): 787-793
- 51) Global Initiative for Chronic Obstructive Lung Disease (GOLD) ガイドライン. GOLD 2011 改訂版(日本語版). 日本語版監修 日本委員会, 2011: 17-26
http://www.goldcopd.org/wp-content/uploads/2016/04/GOLDReport2011_Japanese.pdf
2017.5.27
- 52) Ries AL, Bauldoff GS, Carlin BW, et al. Pulmonary Rehabilitation: Joint ACCP/AACVPR Evidence-Based Clinical Practice Guidelines. *Chest* 2007; 131(5): 4s-42s
- 53) 川越厚良, 高田靖夫, 菅原慶勇ら. 高負荷圧条件で 30 回の呼吸回数を指定した吸気筋トレーニングの効果. *日本呼吸ケア・リハビリテーション学会誌* 2010; 20(1): 57-63
- 54) 塩谷隆信, 佐竹将宏, 上村佐知子ら. 呼吸筋トレーニングのエビデンスと進展. *日本呼吸ケア・リハビリテーション学会誌* 2016; 26(1): 26-32
- 55) 石川朗, 玉木彰. 理学療法テキスト 内部障害理学療法学呼吸. 東京: 中山書店, 2012: 69-78
- 56) 解良武士. 呼吸筋力と増強. *理学療法科学* 2003; 18(1): 1-6
- 57) Larson JL, Kim MJ, Sharp JT, et al. Inspiratory muscle training with a pressure threshold breathing device in patients with chronic obstructive pulmonary disease. *The American Review of Respiratory Disease* 1998; 138(3): 689-696
- 58) Beaumont M, Mialon P, Le Ber-Moy C, et al. Inspiratory muscle training during pulmonary rehabilitation in chronic obstructive pulmonary disease: A randomized trial. *Chronic Respiratory Disease* 2015; 12(4): 305-312
- 59) Heydari A, Farzad M, Ahmadi Hosseini SH. Comparing inspiratory resistive muscle training with incentive spirometry on rehabilitation of COPD patients. *Rehabilitation*

Nursing 2015; 40(4): 243-248

60) Weiner P, Magadle R, Beckerman M, et al. Maintenance of inspiratory muscle training in COPD patients: one year follow-up. *The European Respiratory Journal* 2004; 23(1): 61-65

61) Villafranca C, Borzone G, Leiva A, et al. Effect of inspiratory muscle training with an intermediate load on inspiratory power output in COPD. *The European Respiratory Journal* 1998; 11(1): 28-33

62) Petrovic M, Reiter M, Zipko H, et al. Effects of inspiratory muscle training on dynamic hyperinflation in patients with COPD. *International Journal of COPD* 2012; 7: 797-805

63) Gosselink R, De Vos J, van den Heuvel SP, et al. Impact of inspiratory muscle training in patients with COPD: what is the evidence? *The European Respiratory Journal* 2011; 37(2): 416-425

64) 秋吉史博, 高橋仁美, 菅原慶勇ら. 呼吸筋強化の呼吸筋力に及ぼす影響. *理学療法学* 2001; 28(2): 47-52

65) Mota S, Guell R, Barreiro E, et al. Clinical outcomes of expiratory muscle training in severe COPD patients. *Respiratory Medicine* 2007; 101(3): 516-524

66) Hughes J.M.B, Pride N.B(福地義之助訳). 肺機能検査呼吸生理から臨床応用まで. 第1版. 東京:メディカルサイエンス・インターナショナル株式会社, 2004: 53-68

67) Black LF, Hyatt RE. Maximal respiratory pressures: normal values and relationship to age and sex. *The American Review of Respiratory Disease* 1969; 99(5): 696-702

68) ATS/ERS statement on respiratory muscle testing. *American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine* 2002; 166(4): 518-624

69) 市川毅, 木村雅彦, 室崎明美ら. 立位の違いが呼吸筋活動, 胸郭運動および呼吸機能に及ぼす影響. *理学療法研究* 2009; 26: 39-42

70) 大久保修一. 呼吸筋筋電図の取り方. *呼吸* 1990; 9(7): 820-823

71) Dekhuijzen PN, Folgering HT. Target-flow inspiratory muscle training during pulmonary rehabilitation in patients with COPD. *Chest* 1991; 99(1): 128-133

72) Aldo O.Perotto(栢森良二訳). 筋電図のための解剖ガイド. 第3版. 東京: 西村書店, 2007: 263-265

73) Ng Jk, Kippers V, Richardson CA. Muscle fibre orientation of abdominal muscles and suggested surface EMG electrode positions. *Electromyography clinical Neurophysiology* 1998; 38(1): 51-58

74) Taylor A. The contribution of the intercostal muscles to the effort of respiration in man. *The Journal of Physiology* 1960; 151: 390-402

75) Cohn D, Benditt J.O, Eveloff S, et al. Diaphragm thickening during inspiration. *Journal of Applied Physiology* 1997; 83(1): 291-296

76) 大久保修一, 藤枝一雄, 森成元ら. 正常人における吸気抵抗負荷時の横隔膜筋電図変化. *呼吸生理* 1985; 17(1): 39-44

77) 鈴木俊介. 呼吸筋疲労と呼吸困難. *日本胸部疾患学会雑誌* 1992; 30(4): 547-553

- 78) 櫻井敬市, 山路雄彦. 呼吸抵抗負荷による呼吸筋への影響. 理学療法群馬 2006; 17:1-6
- 79) 解良武士, 古泉一久. 呼吸筋トレーニングによる持久性能力の向上の可能性. 理学療法科学 2009; 24(5): 767-775
- 80) 宮川哲夫. 呼吸筋の運動学・生理学とその臨床応用. 理学療法学 1994; 21(8): 553-558
- 81) 一場友美, 解良武士, 島本隆司ら. 呼吸抵抗負荷の相違による呼吸筋活動の分析. 理学療法科学 2002; 17(3): 195-198
- 82) 鈴木俊介. 呼吸筋機能と運動能. 臨床スポーツ医学 1999; 16(1): 17-23
- 83) 西村善博, 仲田裕行, 前田均ら. 慢性呼吸不全における呼吸筋疲労. 呼吸 1997; 16(4): 582-586
- 84) 岡田守彦. 臨床神経生理学 表面筋電図. JOURNAL OF CLINICAL REHABILITATION 1999; 8(10): 964-970
- 85) 木塚朝博, 増田正, 木竜徹ら. バイオメカニズムライブラリー表面筋電図. 東京: 東京電気大学出版社, 2008: 39-64, 65-92
- 86) 佐渡山垂兵, 細谷聡. 理学療法における筋電図学的評価法 筋疲労と筋電図学評価. 理学療法 2005; 22(2): 421-427
- 87) 本間生夫, 田中一正. 呼吸リハビリテーションの生理的背景. 呼吸 2007; 26(11): 981-989
- 88) Johnson MA, Polgar J, Weightman D, et al. Data on the distribution of fiber types in thirty-six human muscles. An autopsy study. Journal of the Neurological Sciences 1973; 18(1): 111-129
- 89) Keens TG, Ianuzzo CD. Development of fatigue-resistant muscle fibers in human ventilatory muscles. The American Review of Respiratory Disease 1979; 119(2): 139-141
- 90) Haggmark T, Thorstensson A. Fibre types in human abdominal muscles. Acta Physiologica Scandinavica 1979; 107(4): 319-325
- 91) 生井世雄, 阿部直. 呼吸筋の電気生理学的検査. 呼吸 2000; 19(3): 251-258
- 92) Neves LF, Reis MH, Plentz RD, et al. Expiratory and expiratory plus inspiratory muscle training improves respiratory muscle strength in subjects with COPD: systematic review. Respiratory Care 2014; 59(9): 1381-1388
- 93) Kojima H, Yamada T, Takeda M, et al. Effectiveness of cough exercise and expiratory muscle training: a meta-analysis. Journal of Physical Therapy Science 2006; 18(1): 5-10
- 94) 柳澤幸夫, 松尾善美, 直江貢ら. 在宅要介護認定者の咳嗽能力に対する呼吸筋トレーニングの効果. 日本呼吸ケア・リハビリテーション 2012; 22(1): 82-88
- 95) 岩井安理, 吉村章子, 片桐佐知子ら. 呼吸筋疲労. 日本胸部疾患学会雑誌 1992; 30: 133-138
- 96) Mead J. Functional significance of the Area of apposition of diaphragm to rib cage. The American Review of Respiratory Disease 1979; 119(2): 31-32
- 97) Ramirez-Sarmiento A, Orozco-Levi M, Guell R, et al. Inspiratory muscle training in patients with chronic obstructive pulmonary disease structural adaptation and physiologic outcomes. American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine 2002; 166(11): 1491-1497

- 98) 市橋則明. 運動療法学－運動と代謝機能－. 第2版. 東京: 文光堂, 2014: 126-133
- 99) Suzuki J, Suzuki S, Okubo T. Effects of fenoterol on inspiratory effort sensation and fatigue during inspiratory threshold loading. *Journal of Applied Physiology* 1996; 80(3): 727-733
- 100) Lotters F, van Tol B, Kwakkel G, et al. Effects of controlled inspiratory muscle training in patients with COPD a meta-analysis. *The European Respiratory Journal* 2002; 20(3): 570-576
- 101) 大久保隆男. 呼吸不全の基礎と臨床. *日本胸部疾患学会誌* 1997; 35(1): 15-22