

呼吸筋力を向上させるトレーニングプログラムの確立 – 高強度負荷に着目して –

国立スポーツ 科学センター	安藤良介
(共同研究者) 同	大沼勇人
同	鈴木康弘
中京大学	大家利之
同	草薙健太

Development of Training Program for Improving The Inspiratory Muscle Strength – Based on Difference in Intensity –

by

Ryosuke Ando, Hayato Ohnuma, Yasuhiro Suzuki
Japan Institute of Sports Sciences (JISS)
Toshiyuki Ohya, Kenta Kusanagi
Chukyo University

ABSTRACT

This study mainly aimed to elucidate whether differences in training intensity affect increase in maximal inspiratory mouth pressure (P_Imax) after 6 weeks inspiratory muscle resistive training. Twenty-four collegiate swimmers were divided into a control group (n=8), a 50% training group (n=8), and a 75% training group (n=8). Two training groups performed maximal inspiration exercise at load resistance of 50% and 75% of individual P_Imax, respectively. This exercise was performed 30 times per session, 2 sessions per day, 6 days per week for 6 weeks. Before and after the intervention, P_Imax and time trial of 50 m free-style swimming were measured.

PI_{max} were significantly increased in all groups, and relative changes in PI_{max} were not different among groups. 50 m free-style performance was not changed before and after 6 weeks in all groups. These results demonstrated that training intensity did not influence on the magnitude of increased PI_{max} after inspiratory muscle resistive training and increase in PI_{max} did not affect swimming performance in sub-elite swimmers.

要 旨

本研究の主な目的は、吸息筋トレーニング時の吸気抵抗値の違いが6週間後の最大吸気口腔内圧 (PI_{max}) へ与える影響を検討することであった。24名の大学男子水泳部員 (19±4歳) をコントロール群 (n=8)、50% 負荷のトレーニング群 (n=8)、75% 負荷のトレーニング群 (n=8) に分けた。2つのトレーニング群は、PI_{max} の50% および75% の抵抗をかけた装置を口に咥え、全力で吸引する運動様式をトレーニングに用いた。30回/セッション、2セッション/日、6日/週を6週間実施した。6週間前後に、PI_{max} と50m自由形泳タイムの測定を行った。PI_{max} は、全ての群において6週間後に有意に増加し、その増加率は群間に差がなかった。50m自由形泳タイムは、全ての群において6週間後に有意な変化が見られなかった。以上の結果より、吸気抵抗値の違いは、吸息筋トレーニングの効果に影響を及ぼさないこと、PI_{max} の向上は、競技レベルが高い競泳選手の自由形泳パフォーマンスに影響を与えないことが明らかとなった。

緒 言

競泳選手は、速く泳ぐために、呼吸に要する時間を可能な限り短くする必要がある。この一部は、吸息筋の素早い収縮によって可能になる¹⁾。Lomax と McConnell¹⁾ は、レースの90-95% に相当するスピードでの200m自由形泳後に吸息筋力

の指標である最大吸気口腔内圧 (PI_{max}) が低下することを報告している。したがって、少なくともエリート競泳選手においては、呼吸筋の筋力や筋持久力がパフォーマンスに影響する因子の1つであると考えられる。

吸気に抵抗をかけるトレーニングにより、PI_{max} は向上する²⁻⁷⁾。Kilding ら⁸⁾ は、6週間の吸気抵抗型のトレーニングにより、100m と200mの自由形泳タイムが向上することを示している。さらに、Vašičková ら⁹⁾ は、呼吸筋トレーニングにより、フィンスイミングのパフォーマンスが向上することを明らかにしている。呼吸筋トレーニングによりフィンスイミングのパフォーマンスが向上した理由については明らかではないが、この結果は、呼吸筋トレーニングの実施により、呼吸の回数そのものを減らせる可能性を示している。これらの結果からも、呼吸筋のトレーニングは、競泳選手にとって有益であると考えられる。

吸気抵抗型の吸息筋トレーニングによりPI_{max} が向上することが明らかにされているが、適切な負荷 (抵抗値) 設定については十分に検討されていない。多くの先行研究では、個人のPI_{max} の50% の抵抗値を用いている^{2,5,8)} が、その理由については言及されていない。過負荷の原理に基づいて考えれば、50% より高い強度 (抵抗値) でトレーニングを行うことにより、高いトレーニング効果を得られると推測できる。しかしながら、これについて検討した研究は、我々が知る限り1件である¹⁰⁾。

PI_{max} は横隔膜の機能に影響されるが、胸鎖乳突筋や外肋間筋などの呼吸補助筋の機能の影響も受ける¹¹⁾。先述のように、多数の研究が吸気抵抗型のトレーニングによりPI_{max}が向上することを報告しているが、横隔膜と呼吸補助筋の機能の適応については十分に明らかにされていない。

以上の背景より、本研究の目的は、1) 吸気抵抗値の違いが6週間のトレーニング後のPI_{max}へ与える影響を検討すること、2) PI_{max}の向上が大学競泳選手の自由形泳パフォーマンスに与える影響を検討すること、3) 吸気抵抗型のトレーニングが横隔膜と呼吸補助筋の機能に及ぼす影響を検討することとした。

1. 研究方法

1.1 対象

被験者は大学体育会水泳部に所属する男子24名(年齢:19±4歳, 身長:175±35cm, 体重:70±15kg)であった。これら無作為にコントロール群(Con群), 50%でのトレーニング群(50%Tr群), 75%でのトレーニング群(75%Tr群)に分けた。実験に先立って、本実験の概要、目的、実験に伴う危険性、実験から得られる有効性について説明し、書面において同意を得た。本研究は、国立スポーツ科学センター倫理委員会の承認(#032)を得て行われた。また、本研究はヒトを対象とする医学研究に関わる指針を定めたヘルシンキ宣言に則って実施された。

1.2 実験デザイン

まず、吸気筋トレーニング時における抵抗値の違いの影響を検討するため、Con群, 50%Tr群, 75%Tr群を設定した。6週間の介入後のPI_{max}とパフォーマンス(50m自由形泳タイム)の変化を3群間で比較した。また、吸気筋トレーニングが横隔膜と呼吸補助筋の機能に与える影響を検討するため、Con群と50%Tr群のそれらの機能を評

価し、2群間で比較した。

1.3 トレーニングプロトコール

吸気筋のトレーニングにはPOWERbreathe(Hab International Ltd., Warwickshire, UK)を用いた。50%Tr群は、PI_{max}の50%の抵抗値でトレーニングを行った。75%Tr群は、始めの2週間は50%の抵抗値でトレーニングを行い、残りの4週間は75%の抵抗値でトレーニングを行なった。PI_{max}を毎週測定し、1週間ごとに抵抗値を調整した。30回の全力吸引を1セッションとし、2セッション/日、6日/週を6週間実施した。3群共に、スイムトレーニングとストレングストレーニングは通常通り実施した。

1.4 PI_{max}の測定と最大下のタスク

PI_{max}の測定は、電子スパイロメータ(ミナト医科学, 大阪, 日本)を用い、ガイドライン¹²⁾にしたがって実施した。被験者は、実験用の椅子に座り、右腕を上肢台に置く姿勢をとった¹¹⁾。スパイロメータのトランスデューサーを左手で握って口に咥え、鼻はノーズグリップで閉じた。被験者は、最大呼気位から可能な限り速く、かつ強く吸い込み、1秒間以上維持した。PI_{max}の測定は7回実施し、変動係数(CV)値が最も小さくなる5回の値の平均値を代表値とした。その後、PI_{max}の15%、45%、75%の努力度での吸引を実施した。これら最大下の吸引は5秒間維持し、各強度を5回実施した。順番はランダムであり、試行間は1分間程度の休息を設けた。

1.5 剛性率の測定

横隔膜の機能は、超音波エラストグラフィ(Aixplorer, SuperSonic Imagine, Aix-en-Provence, France)を用いて測定される剛性率から評価した。筋の剛性率は、発揮する張力と直線的な関係にあることが示されているため¹³⁻¹⁵⁾、間接的に筋の

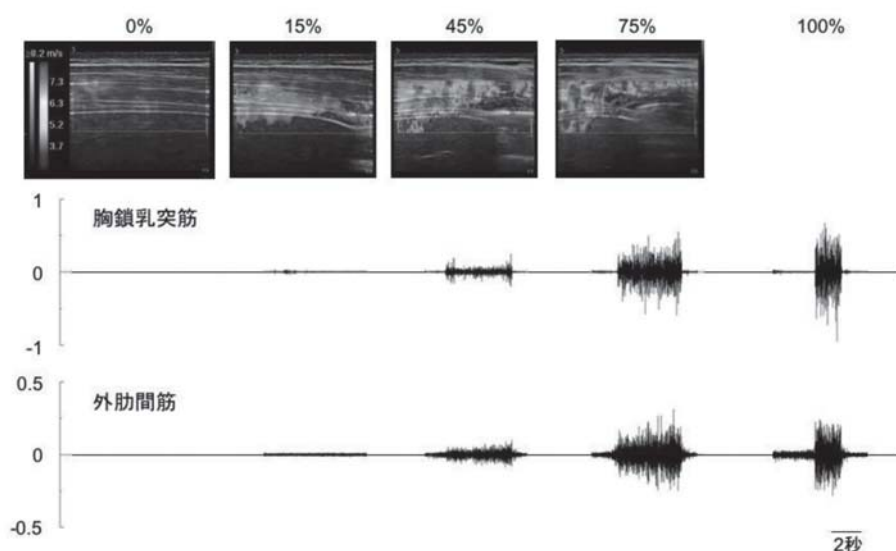


図1 超音波エラストグラフィ画像と筋電図信号

張力の変化を推測することができる。

剛性率の測定にはリニアアレイ型プローブ (SL15-4, SuperSonic Imagine) を用いた。右半身の第8肋間で、かつ前腋窩線上付近から横隔膜を撮影した (図1)。横隔膜の剛性率を測定する関心領域 (1.5cm × 4cm) を画像上に設定した。撮影は安静呼吸時から吸気時、呼気時までを通して 2 Hz で行なった。それぞれの強度 (PImax の 15%, 45%, 75%) での吸気時の静止画において、横隔膜を伝播する剪断波の速度を超音波エラストグラフィの解析ソフトウェア (Q-Box trace) を用いて測定した。この伝播速度 (V) から、以下の式を用いて剛性率 (μ) を算出した。

$$\mu = \rho V^2$$

ρ は軟組織の密度 (1000 kg/m³) である。撮影は、各強度において5度行い、CV値が最も小さくなる3つの値の平均値をその後の解析に用いた。これらの測定を行うには、5秒間程度の吸気を維持する必要があるが、PImax時に実施するのは困難である。したがって、PImax時の横隔膜の剛性率は、15%、45%、75%時の剛性率の直線回帰式から求めた。

1. 6 表面筋電図

呼吸補助筋の機能は、PImax時における表面筋電図の振幅値から評価した。表面筋電図の記録には能動電極 (FSE-SEMG1; 株式会社フォーアシスト, 東京, 日本) を用いた。電極の詳細は、以下に示す通りであった。増幅形式: 差動増幅, 電極間距離: 1cm, センサ部分: 0.1 × 0.5cm の銀製, 電極内における増幅率: 10倍, 入力インピーダンス: 1010Ω以上, 同相信号除去比: 95dB。増幅器による増幅率は100倍であり、信号の増幅率は合計1,000倍であった。胸鎖乳突筋の電極の貼付位置は、左半身の乳様突起から鎖骨内側端までの距離の中間位とした。外肋間筋の電極の貼付位置は、左半身の第6肋間であり、前腋窩線上とした。電極の貼付前の皮膚処理として、皮膚表面を研磨した後にアルコールで拭いた。得られた信号は、アナログ・デジタル変換器 (PowerLab, ADInstruments, Melbourne, Vic, Australia) を介してパーソナルコンピュータ上のソフトウェア (Chart5.5, ADInstruments) に記録された。PImax時の筋電図信号は、1秒間をサンプリングし、その二乗平均平方根 (Root mean square: RMS) を

求めた。

1. 7 パフォーマンステスト

50mの自由形泳タイムを計測した。計測は25m室内プールにおいて行った。被験者は計測者の合図に合わせてバックプレート付きのスタート台から飛び込んだ。タイムの計測は、ストップウォッチ（スイミングマスター、SEIKO、東京、日本）を用いて手動計測で行い、呼吸のタイミングや回数については自由とした。

1. 8 統計解析

以後の統計結果については、全て平均値 ± 標準誤差で示した。各群において、P_Imaxの6週間前後の比較は、ウィルコクソンの符号順位検定を用いて行なった。P_Imaxの変化率の群間比較は、クラスカル・ウォリスの検定を用いて行なった。各群において、50m自由形タイムの6週間前後の比較は、ウィルコクソンの符号順位検定を用いて行なった。Con群と50%Tr群における横隔膜の剛性率および胸鎖乳突筋と外肋間筋の筋電図のRMSは、6週間前後でウィルコクソンの符号順位検定を用いて比較した。有意水準は5%未満とした。統計処理には、SPSS Statisticsソフトウェア（version 24.0, IBM Corp., Armonk, NY, USA）を用いた。

2. 研究結果

P_Imaxの値および50mの自由形泳タイムの結果を表1に示した。Con群、50%Tr群、75%Tr群の全てにおいて、6週間後にP_Imaxが有意に増加した。P_Imaxの6週間前後の変化率は、群間に

表1 最大吸気口腔内圧 (P_Imax) と 50m 自由形泳タイム

	P _I max (cmH ₂ O)		50m time (s)	
	Pre	Post	Pre	Post
Con	-138 ± 7	-154 ± 8*	24.8 ± 0.1	24.5 ± 0.0
Tr50%	-129 ± 7	-163 ± 9*	24.6 ± 0.1	24.5 ± 0.1
Tr75%	-136 ± 9	-168 ± 11*	24.3 ± 0.1	24.2 ± 0.1

平均値 ± 標準誤差, Con: コントロール群, Tr50%: 50% 負荷のトレーニング群, Tr75%: 75% 負荷のトレーニング群, *: P<0.05 vs 前

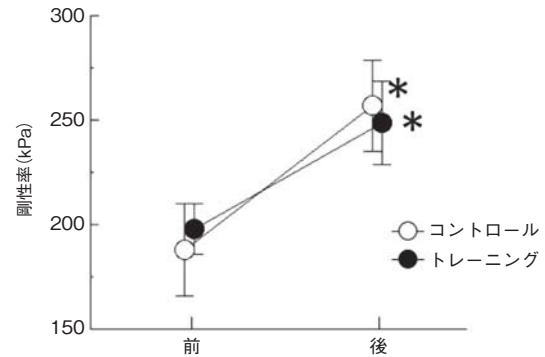


図2 P_Imax時の横隔膜の剛性率 平均値 ± 標準誤差
*: P<0.05 vs 前

有意差が認められなかった。全ての群において、6週間後に50mの自由形泳タイムの有意な変化は見られなかった。

P_Imax時における横隔膜の剛性率の推定値を図2に示した。剛性率の推定値は、Con群とTr50%群において6週間後に有意に増加した。胸鎖乳突筋と外肋間筋の表面筋電図信号のRMSを図3に示した。胸鎖乳突筋のRMSは、Tr50%群において6週間後に有意に向上したが、Con群においては有意な変化は見られなかった。外肋間筋のRMSは、両群共に有意な変化が見られなかった。

3. 考察

本研究は、1) 吸気抵抗値の違いが6週間のトレーニング後のP_Imaxへ与える影響、2) P_Imaxの向上が大学競泳選手の自由形泳パフォーマンスに与える影響、3) 吸気抵抗型のトレーニングが横隔膜と呼吸補助筋の機能に及ぼす影響を検討した。その結果、吸気抵抗値の違いは、トレーニング効果 (P_Imaxの向上) に影響せず、P_Imaxの向

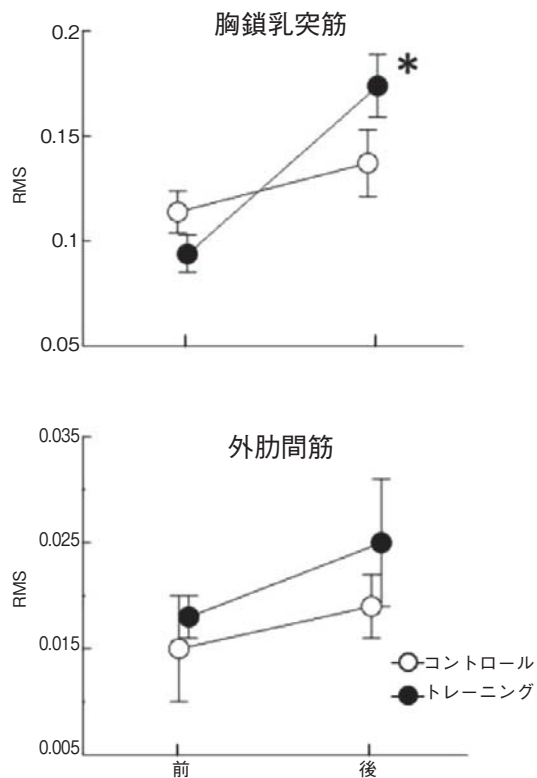


図3 胸鎖乳突筋と外肋間筋の二乗平均平方根 (RMS) 平均値±標準誤差 *: $P < 0.05$ vs 前

上は本研究の被験者の競技レベルにおいては、自由形泳タイムに影響を及ぼさなかった。また、吸気抵抗型のトレーニングにより、横隔膜に加えて、胸鎖乳突筋の機能も向上することが示された。

1946年から2011年までの呼吸筋トレーニングについてまとめたシステマティックレビューによれば、吸気抵抗値の違いがトレーニング効果に及ぼす影響を論じた研究は見当たらない¹⁶⁾。P_Imaxの50%の抵抗値を用いる先行研究が最も多いが、それ以上の抵抗値を用いた先行研究もある¹⁶⁾。P_Imaxの80%の抵抗値を用いたMickleboroughら¹⁰⁾の研究では、P_Imaxの向上が認められている。そこで、本研究において、P_Imaxの50%と75%の抵抗値を比較したところ、P_Imaxの変化率に有意差は見られなかった(表1)。したがって、先行研究で用いられてきたように、P_Imaxを向上させるには、P_Imaxの50%の抵抗値で十分であ

ることが示唆された。

本研究では、コントロール群を含む全ての群においてP_Imaxの向上が認められたが、50m自由形泳タイムの向上は見られなかった(表1)。Kildingら⁸⁾によれば、P_Imaxの向上に伴い、100mと200mの自由形泳タイムも向上している。本研究において、パフォーマンスの向上が見られなかった理由として、競技レベルの違いが考えられる。Kildingらの被験者の100m自由形泳タイムは約63秒であるが、本研究に併せて行なった100m自由形泳のタイムトライアルの平均は53秒であった。すなわち、本研究のような競技レベルの高い被験者においては、P_Imaxの向上が自由形泳タイムに影響を及ぼさないのかもしれない。

P_Imax時における横隔膜の剛性率の推定値は、両群において有意に増加した(図2)。骨格筋が発揮する張力と剛性率は直線的な関係にあるため¹³⁻¹⁵⁾、P_Imax時における横隔膜の発揮張力が増加していると推測できる。Con群における胸鎖乳突筋と外肋間筋の表面筋電図の振幅値が増加しなかったため(図3)、Con群におけるP_Imaxの向上(12±3%)の大部分は、横隔膜の機能向上により説明できることが示唆される。

50%Tr群における胸鎖乳突筋の表面筋電図の振幅値は有意に向上したが、Con群のそれは変化しなかった(図3)。筋電図の振幅値は、骨格筋のレジスタンストレーニングにより、増加することが多数の先行研究において示されており¹⁷⁻²¹⁾、この適応は神経系の改善と考えられている^{22,23)}。したがって、6週間の吸気抵抗型のトレーニングにより、胸鎖乳突筋の神経系の改善が示唆された。

一方、外肋間筋の表面筋電図の振幅値は、両群において6週間前後で有意な変化は見られなかった。前段落で示した理論に従って考えると、吸気抵抗型のトレーニングは、外肋間筋の神経系に影響を及ぼさない。本研究において、外肋間筋の表面筋電図の振幅値に変化が見られなかった原因

として2つ考えられる。1つ目として、トレーニング期間が短かったことである。しかしながら、Moritani と deVries²³⁾ は、8週間トレーニング期間において、筋肥大に先行して筋活動の増加が生じることを示している。また、本研究において、胸鎖乳突筋には筋活動の増加が見られている。以上のことを考慮すると、トレーニング期間は十分であったかもしれない。2つ目として、トレーニング前後の変化を示すための十分な筋電図信号を得られていなかったことである。外肋間筋の表面筋電図は、肋間に電極を貼付するが、肋間の幅は被験者によって異なる。本研究では、全ての被験者において電極を貼付することができたが、SN比には個人差が見られた。このように、方法論的な問題もあるため、吸気抵抗型のトレーニングによる外肋間筋の神経系の適応については、注意して結論づける必要がある。

本研究において、コントロール群のP_Imaxが向上した理由は、以下の2つが考えられる。トレーニングの強度を適切に保つため、毎週P_Imaxの測定を行った。これは、トレーニングを行わないコントロール群も行っていった。すなわち、毎週のP_Imaxの測定が6週間後のP_Imaxの向上に繋がった可能性がある。2つ目として、日々のスイムトレーニングとストレングストレーニングがP_Imaxの向上に繋がった可能性がある。本研究の被験者のように、比較的競技レベルが高い選手の日々のトレーニングを制限することは、現実的に困難であるため、これについては本研究の限界であった。

4. 結 論

吸気抵抗値の違いは、吸息筋のトレーニング効果に影響を及ぼさないこと、P_Imaxの向上は、競技レベルが高い競泳選手の自由形泳パフォーマンスに影響を及ぼさないこと、吸気抵抗型の吸息筋トレーニングを行うことにより、呼吸補助筋である胸鎖乳突筋の機能を向上させることが明らかと

なった。しかしながら、吸気抵抗型のトレーニングは、統計学的にはパフォーマンスの向上を示さなかったが、エリート競泳選手のパフォーマンス向上に本当に効果がないかについては更なる検討が必要であろう。吸気抵抗型のトレーニング実施により、呼吸補助筋の機能向上が示唆されたことは、P_Imax向上の機序を考えるうえで有用な知見であると考えられる。

謝 辞

本研究に対してご助成賜りました公益財団法人石本記念デサントスポーツ科学振興財団に厚く御礼申し上げます。また、本研究を実施するにあたり、実験にご協力いただいた中京大学大学院の小泉潤氏に御礼申し上げます。

文 献

- 1) Lomax M.E., McConnell A.K., Inspiratory muscle fatigue in swimmers after a single 200 m swim, *J. Sports Sci.*, 21 (8) :659-64(2003)
- 2) Archiza B., Andaku D.K., Caruso F.C.R. et al., Effects of inspiratory muscle training in professional women football players: a randomized sham-controlled trial, *J. Sports Sci.*, 36(7) :771-80(2018)
- 3) Hartz C.S., Sindorf M.A.G., Lopes C.R., Batista J., Moreno M.A., Effect of Inspiratory Muscle Training on Performance of Handball Athletes, *J. Hum. Kinet.*, 6343-51(2018)
- 4) Ramsook A.H., Molgat-Seon Y., Schaeffer M.R. et al., Effects of inspiratory muscle training on respiratory muscle electromyography and dyspnea during exercise in healthy men, *J. Appl. Physiol.*, 122(5) :1267-75(2017)
- 5) Romer L.M., McConnell A.K., Jones D.A., Effects of inspiratory muscle training on time-trial performance in trained cyclists, *J. Sports Sci.*, 20(7) :547-62(2002)
- 6) Wells G.D., Pyley M., Thomas S., Goodman L., Duffin J., Effects of concurrent inspiratory and expiratory muscle training on respiratory and exercise performance in competitive swimmers, *Eur J. Appl. Physiol.*, 94(5-6) :527-40(2005)
- 7) Witt J.D., Guenette J.A., Rupert J.L., McKenzie

- D.C., Sheel A.W., Inspiratory muscle training attenuates the human respiratory muscle metaboreflex, *J. Physiol.*, **584**(Pt 3) :1019–28 (2007)
- 8) Kilding A.E., Brown S., McConnell A.K., Inspiratory muscle training improves 100 and 200 m swimming performance, *Eur. J. Appl. Physiol.*, **108**(3) :505–11 (2010)
- 9) Vašičková J., Neumannová K., Svozil Z., The Effect of Respiratory Muscle Training on Fin-Swimmers' Performance, *J. Sports Sci. Med.*, **16**(4) :521–6 (2017)
- 10) Mickleborough T.D., Nichols T., Lindley M.R., Chatham K., Ionescu A.A., Inspiratory flow resistive loading improves respiratory muscle function and endurance capacity in recreational runners, *Scand. J. Med. Sci. Sports*, **20**(3) :458–68 (2010)
- 11) Chino K., Ohya T., Katayama K., Suzuki Y., Diaphragmatic shear modulus at various submaximal inspiratory mouth pressure levels, *Respir. Physiol. Neurobiol.*, **252**–25352–7 (2018)
- 12) American Thoracic Society/European Respiratory S. ATS/ERS Statement on respiratory muscle testing, *Am. J. Respir. Crit. Care Med.*, **166**(4) :518–624 (2002)
- 13) Ates F., Hug F., Bouillard K. et al., Muscle shear elastic modulus is linearly related to muscle torque over the entire range of isometric contraction intensity, *J. Electromyogr. Kinesiol.*, **25**(4) :703–8 (2015)
- 14) Bouillard K., Nordez A., Hug F., Estimation of individual muscle force using elastography, *PLoS One*, **6**(12) :e29261 (2011)
- 15) Bouillard K., Hug F., Guével A., Nordez A., Shear elastic modulus can be used to estimate an index of individual muscle force during a submaximal isometric fatiguing contraction, *J. Appl. Physiol.*, **113**(9) :1353–61 (2012)
- 16) HajGhanbari B., Yamabayashi C., Buna T.R. et al., Effects of respiratory muscle training on performance in athletes: a systematic review with meta-analyses, *J. Strength Cond. Res.*, **27**(6) :1643–63 (2013)
- 17) Balshaw T.G., Massey G.J., Maden-Wilkinson T.M., Lanza M.B., Folland J.P., Neural adaptations after 4 years vs 12 weeks of resistance training vs untrained, *Scand. J. Med. Sci. Sports*, **29**(3) :348–59 (2019)
- 18) Bandy W.D., Hanten W.P., Changes in torque and electromyographic activity of the quadriceps femoris muscles following isometric training, *Phys. Ther.*, **73**(7) :455–65 (1993)
- 19) Narici M.V., Roi G.S., Landoni L., Minetti A.E., Cerretelli P., Changes in force, cross-sectional area and neural activation during strength training and detraining of the human quadriceps, *Eur. J. Appl. Physiol. Occup. Physiol.*, **59**(4) :310–9 (1989)
- 20) Noorkoiv M., Nosaka K., Blazeovich A.J., Neuromuscular adaptations associated with knee joint angle-specific force change., *Med. Sci. Sports Exerc.*, **46**(8) :1525–37 (2014)
- 21) Watanabe K., Kouzaki M., Moritani T., Spatial EMG potential distribution of biceps brachii muscle during resistance training and detraining, *Eur. J. Appl. Physiol.*, **115**(12) :2661–70 (2015)
- 22) Akima H., Takahashi H., Kuno S., Y. et al., Early phase adaptations of muscle use and strength to isokinetic training, *Med. Sci. Sports Exerc.*, **31**(4) :588–94 (1999)
- 23) Moritani T., deVries H.A., Neural factors versus hypertrophy in the time course of muscle strength gain, *Am. J. Phys. Med.*, **58**(3) :115–30 (1979)