

胸郭圧迫が運動時の呼吸・循環応答, 筋酸素動態および パフォーマンスに及ぼす影響

名古屋大学 石田 浩 司
(共同研究者) 同 片山 敬 章
同 岩本 えりか
中部大学 堀田 典 生
名古屋医専 杉浦 弘 通

The Effects of Chest Wall Restriction on Cardio-respiratory Responses, Muscle Oxygenation and Performance during Exercise

by

Koji Ishida, Keisho Katayama

*Research Center of Health, Physical Fitness and Sports,
Nagoya University*

Erika Iwamoto

Graduate School of Medicine, Nagoya University

Norio Hotta

College of Life and Health Sciences, Chubu University

Hiromichi Sugiura

Nagoya Isen

ABSTRACT

The purpose of the present study was to elucidate the effects of chest wall restriction by external chest compression on endurance performance, and cardio-respiratory responses, muscle energy metabolism and oxygenation during exercise. Nine collegiate male subjects performed maximal exercise to exhaustion (MAX) under chest wall

restriction (CR) and non restriction control (NR) conditions, and sub-maximal constant load exercise (SUB) for 15 min under both conditions at 40, 60, and 80% of peak oxygen uptake (peak $\dot{V}O_2$) measured during CR conditions. We found that under CR conditions, as compared with NR, 1) peak $\dot{V}O_2$ and endurance time were less by about 9% in MAX, and 3 of the subjects could not complete the 80% load task during SUB, 2) minute ventilation was greater at the sub-maximal level during MAX and at 40% and 60% load tasks during SUB, but the maximal value was lower in MAX, 3) tidal volume was less while respiratory rate was higher throughout the experiment, 4) oxygen saturation (SpO_2) became less at a higher exercise intensity during both MAX and SUB, 5) heart rate was higher during SUB and at exhaustion, 6) the muscle deoxygenation rate estimated by near-infrared spectroscopy showed no difference at only 80% load task but tended to decrease in the other cases, 7) blood lactate concentration was less at the maximal value in MAX, but showed no difference during incremental and sub-maximal exercise, 8) respiratory discomfort measured by the subjects' rating of perceived exertion tended to be higher during SUB. These results indicate that endurance performance should be decreased by CR, and this would be attributed directly to impaired respiration due to CR.

要 旨

胸部圧迫による胸郭制限が、持久的運動のパフォーマンスおよび生理学的機能にどのような影響を及ぼすか明らかにするため、9名の被検者に、ストラップで胸部を締める胸郭制限 (CR) 条件と非制限 (NR) 条件で、漸増負荷による最大運動テストを行った。さらに、CR 条件での最高酸素摂取量の 40, 60, 80% の運動強度で 15 分間の最大下の定常負荷運動テストも実施した。その結果、NR 条件に比べ CR 条件では、1) 最高酸素摂取量と運動継続時間は低下し、80% 強度の定常負荷運動で 3 名の被検者が運動継続できなくなった、2) 毎分換気量は 80% より下の運動強度では高いがその最大値は低く、その影響で 80% 強度以上で動脈血酸素飽和度 (SpO_2) は低下する、3) 一回換気量は低く、呼吸数は高い、4) 筋の脱酸素化率は 80% 強度では差がないが、それ以外は低い傾向を示す、5) 乳酸濃度は最高値

は低い、最大下および乳酸閾値や乳酸蓄積開始点 (OBLA) は差がない、6) 呼吸の疲労度 (困難感) が高い、ことが明らかとなった。胸郭制限により持久的運動のパフォーマンスが低下し、それには呼吸系の機能低下が直接的に影響することが示唆された。

緒 言

最近流行の伸縮性のあるタイトなスポーツウェアをはじめ、剣道の胴着、ダイビングのウェットスーツ、腰痛対策のコルセット、さらに、ライフジャケットや着物、防弾チョッキなどの着用時には、胸部を圧迫し胸郭の動きがかなり制限された状態で運動を実施することになる。胸郭制限は呼吸運動に影響を与え、一回換気量の低下をもたらし、結果的に持久的能力が低下することが推察される。また、加齢とともに胸郭の柔軟性 (コンプライアンス) が低下するが、これが高齢者の運動時の換気応答遅延の原因であ

る可能性が示唆されている¹⁾。

肺や胸郭の正常な伸展が、胸水貯留などで阻害される換気障害を「拘束性換気障害」と呼ぶ。呼吸関連学会が提唱する「呼吸リハビリテーションに関するステートメント」のなかで、拘束性換気障害について、「運動制限や呼吸困難の機序についての科学的検討が不十分である」ことが指摘されている²⁾。実際、胸郭制限時の運動パフォーマンスや呼吸・循環応答についての研究は少ない。先行研究^{3,4)}では、胸郭制限時に最高酸素摂取量および運動継続時間が低下することが報告されているが、その原因ははっきりしていない。また、最大下の定常負荷での研究も少なく、一つの研究（同一被検者）で軽～高強度までの異なる負荷を網羅した研究はない。

最大運動の制限因子や最大下運動での生体への負担度を検討する場合、換気量や心拍数など酸素運搬能に関連する呼吸・循環機能を観察するだけでなく、末梢の筋で何が起きているか、すなわち筋での酸素の抜き取りなどの筋酸素動態や、無酸素性エネルギー供給機構への移行や筋疲労の指標となる乳酸濃度を測定する必要がある。しかしこれらを検討した胸郭制限の研究は見当たらない。

そこで本研究では、胸部圧迫による胸郭制限が、漸増負荷による最大運動時、および3種類の強度での最大下の定常負荷運動時のパフォーマンス、呼吸・循環応答および筋での代謝・酸素動態に及ぼす影響を明らかにすることを目的とした。

1. 方法

1.1 被検者

被検者は健康な男子大学生9名（年齢：19.8 ± 0.7歳，身長：170.5 ± 2.1 cm，体重：62.7 ± 3.7 kg，平均値 ± 標準誤差）であった。被検者に実験内容を説明し、予備的に胸郭制限や運動負荷

を経験させた後、実験参加の同意を書面で得た。本研究は名古屋大学総合保健体育科学センターの、ヒトを対象とする研究審査委員会の承認を得て実施された。

1.2 胸郭制限法

胸郭を制限する方法として、先行研究^{5,6)}をもとに胸部（腋下から第10肋骨部まで）を外部から圧迫する方法を用いた。すなわち、胸部をキルティング生地の布で覆い、その上から幅5cmの伸長性のない合成繊維のストラップ3本を用い、バネ計りで10kgの力で牽引し、ベルクロテープで固定した。この時、被検者には最大呼気位で保持させた。装着後、被検者に痛みがないことを確認した。装着前後で肺活量を測定し、制限による肺活量の低下が25～40%の範囲に収まることを確認した。胸郭制限条件（CR条件）と制限しないコントロール条件（NR条件）の2条件について、ランダムに実験を実施した。

1.3 実験プロトコル

最大運動テスト：被検者に自転車エルゴメータ（Combi社，Aerobike 75XLII）に座らせ、左手指先から乳酸濃度測定用の血液を採取した。2分間の安静値収集の後、初期負荷20Wで2分ごとに20Wずつ負荷が増加する多段階漸増負荷法を用いて、60rpmのテンポで疲労困憊（Exhaustion）までの自転車こぎ運動を実施した。Exhaustionの基準として、推定の最高心拍数（220 - 年齢）近くに達し、呼吸交換比が1を超えており、かつ60rpmのテンポに追いつかない時点とした。各負荷の最後の30秒と運動終了3分後および5分後に血液を採取した。終了後10分以上経過した時点で、近赤外分光装置の生理学的較正ため、カフインフレーター（Hokanson社，E20）を用いて右脚大腿上部を300mmHgの圧力で約10分間疎血した。

最大下運動テスト：CR と NR の両条件とも CR 条件での最高酸素摂取量の 40, 60, 80% の強度で、定常負荷運動を実施した。安静時の乳酸値を測定した直後、被検者に Borg の主観的運動強度の表（6 - 20 段階）を見せ、主観的な疲労度を呼吸（RPE (Resp)）および脚部（RPE (Leg)）について指差させた。2 分間の安静の後、40, 60, 80% 強度の順番で自転車こぎ運動をそれぞれ 15 分間実施した。4 分 30 秒、9 分 30 秒、14 分 30 秒で乳酸の測定および呼吸と脚部の RPE の測定を行った。40% および 60% 強度の運動終了後は、10 分以上の休息を挟み、心拍数が前負荷の運動前の安静値の 5 拍 / 分以内に下がった時点で、次の負荷の運動を実施した。80% 強度の運動では、最大運動テストでの最高心拍数の 10 拍 / 分以内に達し、被検者が 60rpm のテンポに追いつかなくなった時、および呼吸困難感で継続不可能になった時は終了とし、継続可能な被検者は 15 分間負荷とした。80% 強度での運動終了後、最大運動テストと同様に採血と大腿上部の疎血を実施した。

1.4 測定および分析方法

酸素摂取量 ($\dot{V}O_2$)、毎分換気量 (\dot{V}_E)、一回換気量 (VT)、呼吸数 (fb) は代謝測定装置（アルコシステム社、ARCO-1000）を用い、breath-by-breath 法で測定した。心電図は胸部双極誘導法を用いて測定し、オフラインで心拍数 (HR) を算出した。動脈血酸素飽和度 (SpO_2) はパルスオキシメーター（Ohmeda 社、Biox3740）を用い、右指尖にプローブを装着して測定した。これらのアナログ信号は A/D カード（Interface 社、CSI-320312）を通じて 200Hz で A/D 変換し、自作のプログラム（Microsoft 社、VB6）を用いて PC に取り込み、解析した。

活動筋の酸素動態を検討するため、近赤外分光装置（Omron 社、HEO-200）を利用した。プロ-

ブは右脚外側広筋に装着した。この装置から得られる値は絶対値ではなく任意の単位であるため、疎血による生理学的較正を行って脱酸素化レベルを求めた^{7,8)}。すなわち、運動開始直前の安静時の還元型ヘモグロビン / ミオグロビン (Deoxy Hb/Mb) 濃度を 0%、疎血時の Deoxy Hb/Mb の最高値を 100% として、脱酸素化率 (%Deoxy) を算出した。

これらのデータは、最大運動テスト時には各ステージの最後の 30 秒の平均値をそのステージの代表値とし、最大下運動テスト時は 1 分ごとに平均した。

血中乳酸濃度 (La) の測定は携帯型血中乳酸測定器（Arkray 社、Lactate Pro）を用いた⁹⁾。さらに、乳酸閾値および乳酸濃度が 4mmol/l に達した時点（onset of blood lactate accumulation; OBLA）を専用のソフト（Arkray 社、MEQNET LT Manager）で算出した。

1.5 統計的検定

最高酸素摂取量の比較などの単純な条件間比較には対応のある t 検定を用いた。また、各運動中については、胸郭制限の要因（CR と NR 条件）と時間の要因の 2 要因の反復測定の分散分析を行った。統計の検定には統計ソフト（IBM 社、PASW Statistics 18）を用い、 $p < 0.05$ を有意水準とした。

2. 結果

2.1 胸郭制限の効果

最大および最大下運動テスト前の胸郭制限前後で、肺活量がそれぞれ $32.6 \pm 5.8\%$ 、 $35.9 \pm 7.6\%$ 低下し、また、一秒量もそれぞれ $31.6 \pm 4.1\%$ 、 $32.3 \pm 7.6\%$ 低下した。拘束性換気障害の基準が予測肺活量の 80% 以下であることから、今回の胸郭制限により、軽度の拘束性換気障害が起こっていたと言える。

2.2 最大運動テスト

各パラメータの変化と最高値 (SpO₂ は最低値) を図1と表1に示す。パフォーマンスの指標となる運動継続時間は、NR条件に比べCR条件で8.3%有意に低下し、また最終到達負荷も9.7%

有意に低下した。呼吸・循環応答については、 $\dot{V}O_2$ は最大下では両条件で有意差はなく、最高酸素摂取量のみCR条件が9.5%有意に低値を示した。 \dot{V}_E は最大下では高強度までCR条件で有意に高く、最大換気量のみCR条件で有意に低かつ

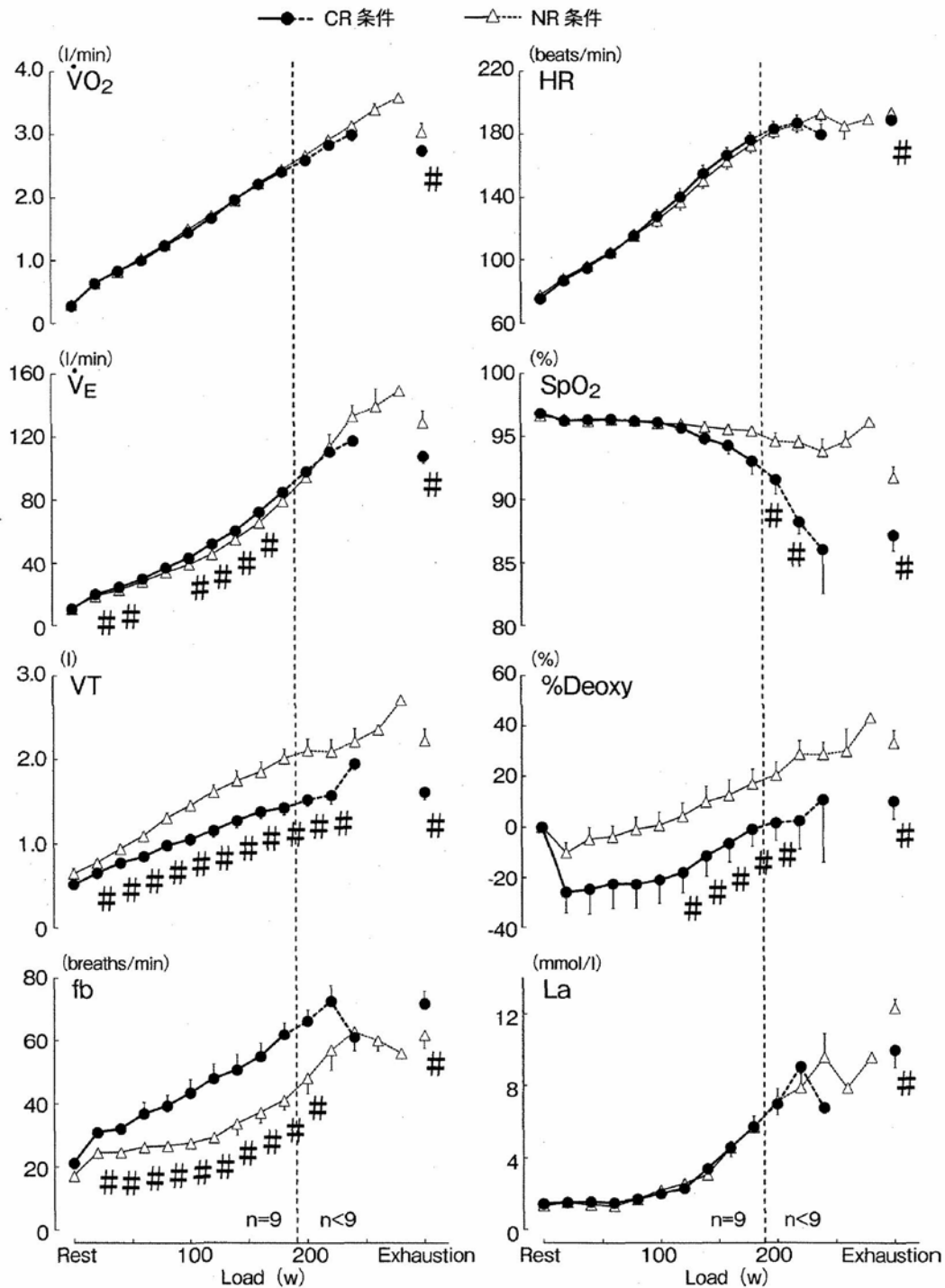


図1 漸増負荷による最大運動時の生理学的パラメータの変化

CR条件 (●) とNR条件 (△) の平均値と標準誤差を示す。 $\dot{V}O_2$: 酸素摂取量, \dot{V}_E : 毎分換気量, VT: 一回換気量, fb: 呼吸数, HR: 心拍数, SpO₂: 動脈酸素飽和度, %Deoxy: 脱酸素化率, La: 乳酸濃度, #: CR条件とNR条件に有意差あり。180W以降は被検者数が少なくなっていくことに注意

表1 最大運動テストにおけるNR条件とCR条件の測定最高値（または最低値）の比較

	NR条件	CR条件	低下率 (%)	有意差
運動継続時間 (分:秒)	23:10 ± 0:54	21:11 ± 0:42	8.3 ± 1.8	p<0.005
最終到達負荷 (W)	240.0 ± 9.4	215.6 ± 6.5	9.7 ± 2.4	p<0.01
最高酸素摂取量 (ℓ/分)	3.05 ± 0.13	2.75 ± 0.09	9.5 ± 2.0	p<0.005
最大毎分換気量 (ℓ/分)	129.1 ± 7.8	107.7 ± 4.6	15.5 ± 2.7	p<0.001
最大呼吸数 (回/分)	61.9 ± 4.2	72.0 ± 3.9	-18.2 ± 6.0	p<0.05
最大一回換気量 (ℓ)	2.23 ± 0.14	1.62 ± 0.09	26.7 ± 2.7	p<0.001
最高心拍数 (拍/分)	194.3 ± 2.5	189.3 ± 2.7	2.6 ± 0.9	p<0.05
最低動脈血酸素飽和度 (%)	91.8 ± 0.9	87.2 ± 1.2	4.9 ± 1.8	p<0.05
最高脱酸素化率 (%)	33.4 ± 5.1	10.3 ± 7.0	43.8 ± 34.7	p<0.05
最高乳酸濃度 (mmol/ℓ)	12.4 ± 0.5	10.0 ± 1.0	19.8 ± 6.2	p<0.05

CR条件：胸郭制限条件，NR条件：非制限条件．値は平均値 ± 標準誤差 (n=9)

た。VTはNR条件で、またfbはCR条件で最大値を含め有意に高値を示した。HRは最高値のみ平均5拍/分程度であるが、CR条件で有意に低値を示した。SpO₂はCR条件の運動後半で急激に低下し、高強度および最小値で有意差が認められた。%Deoxyは個人によって変化パターンは異なるが、ほとんどの被検者で開始直後に減少し、その後時間とともに増加してプラス側に移行した。運動中盤の%Deoxyおよびその最高値はCR条件で有意に低値を示した。Laについては最大下では両条件で差は認められなかったが、その最高値はCR条件で有意に低値を示した。また、乳酸閾値は、CR条件で95.2±15.1 W、NR条件で94.4±18.8 Wで有意差は認められず、その時の乳酸値も両条件とも1.7±0.7 mmol/lで差はなかった。OBLaにも有意差は認められなかった (CR条件：153.1±20.6 W、NR条件：154.6±19.0 W)

2.3 最大下運動テスト

CR条件における最高酸素摂取量の40、60、80%強度の運動負荷値は、それぞれ65.4±5.9 W、113.3±10.4 W、161.3±15.4 Wであった。図2、3に最大下運動テスト時の変化を示す。CR条件の80%強度において、3名の被検者がそれぞれ5、9、12分で運動終了に至ったため、それらの被検者は終了直前1分間の、それ以外の被検者は15分目の値を最終値 (Last) とした。V̇O₂については

全ての運動の全ての時間で両条件に有意差は認められなかった。V̇Eは40、60%強度ではCR条件で有意に高値を示したが、80%強度の運動後半では有意差は認められなかった。VTはNR条件で、fbはCR条件でほとんどの時間で有意に高値を示した。HRは開始3分までを除き、CR条件で有意に高かった。SpO₂については40%では差はなく、60%のCR条件で低下傾向を示し、80%では中盤以降CR条件で有意に低値を示した。%Deoxyは40%ではCR条件で有意に低いことが多く、60%でもその傾向が認められるが有意差はほとんどなく、80%では両条件に差は見られなくなった。Laについては15分目の値で有意差が認められる場合もあるが、両条件とも同じような変化を示した。RPE (Leg) はCR条件の60%強度で低いが、大きな差は認められなかったのに対し、RPE (Resp) はほとんどの時間においてCR条件で有意に高値を示した。

3. 考察

3.1 最大運動

最大運動時のパフォーマンスの指標である運動継続時間は胸郭制限で低下し、持続的能力の指標である最高酸素摂取量も低下したことから、胸郭制限は最大運動時の呼吸・循環機能を低下させ、パフォーマンスを下げる事が明らかとなった。

最大運動の制限因子として、筋への酸素運搬

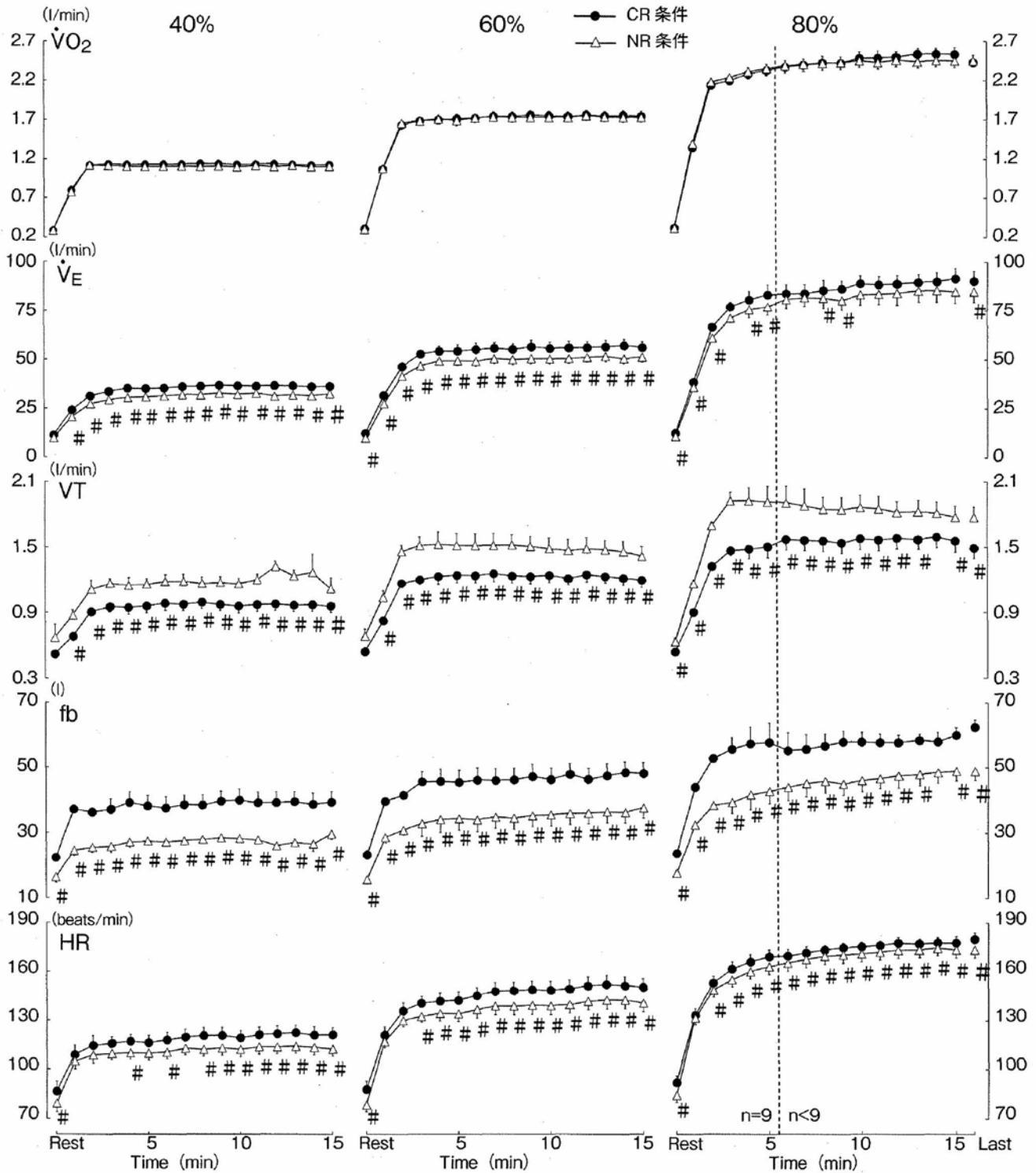


図2 最大下常負荷運動中の呼吸・循環パラメータの変化

CR 条件(●)と NR 条件(△)の平均値と標準誤差を示す。シンボルは図 1 と同様。Last:80% 強度での各自の運動終了前 1 分間の平均値。CR 条件の 80% 強度の 5, 8, 12 分で各一人ずつ運動が終了している

能力と筋での酸素消費能力が挙げられる。本研究では、筋疲労の指標となる乳酸濃度や筋の脱酸素化が胸郭制限で低いレベルにあることから、末梢の筋ではまだ余裕があり、筋の酸素消費能

力が制限因子になっていたとは言えない。一方、毎分換気量は 80% 強度近くまでは胸郭制限で高値を示すが、最大換気量は逆に低下していることから、激しい運動時には胸郭制限のために換気

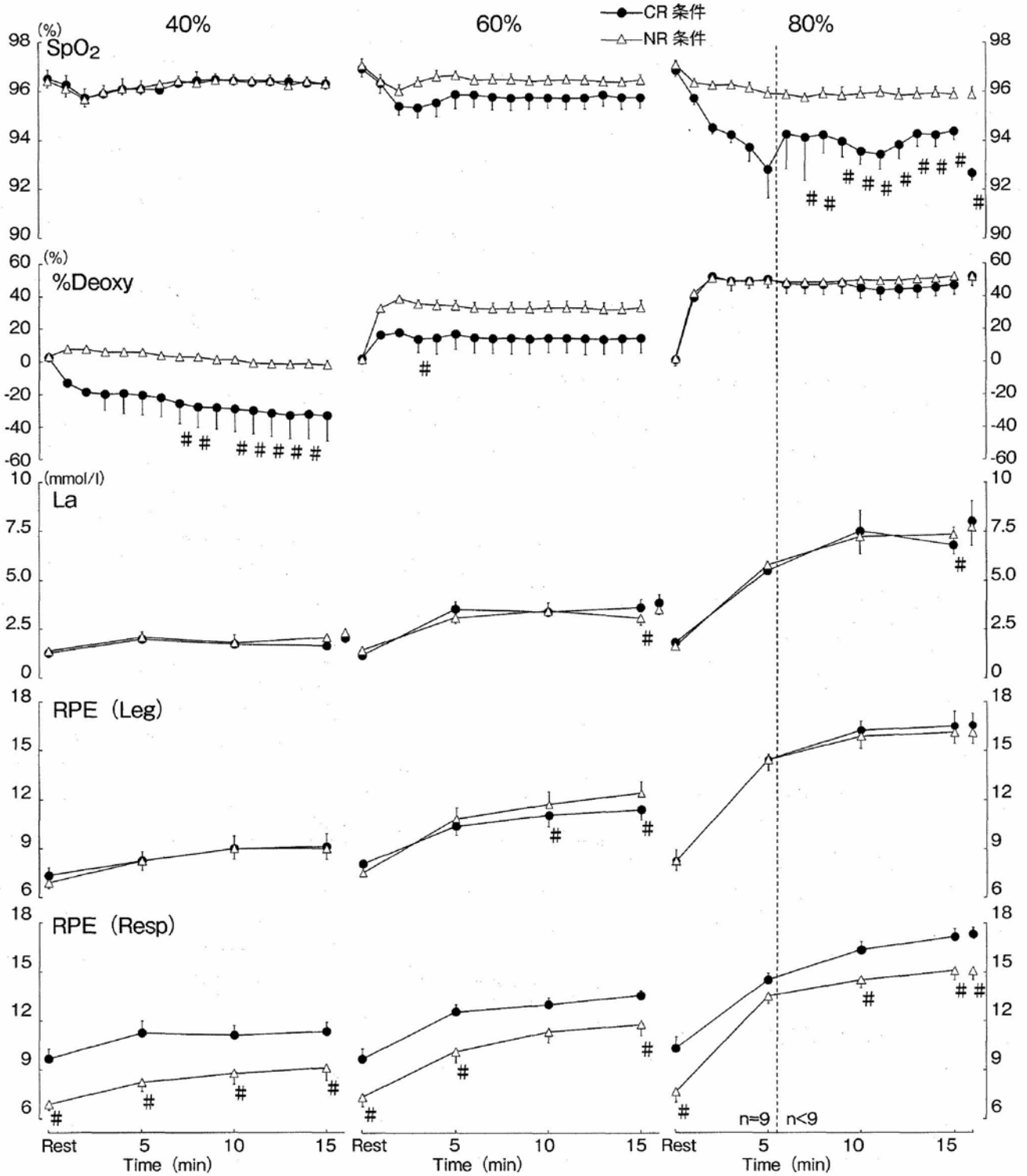


図3 最大下定常負荷運動中の末梢系のパラメータの変化

CR条件(●)とNR条件(△)の平均値と標準誤差を示す。シンボルは図1,2と同様。RPE(Leg):脚の主観的運動強度(RPE), RPE(Resp):呼吸のRPE。Laでの15分値の後のシンボルは、各負荷での最高乳酸値を示す

が抑制され、早期に換気の限界に達することが、最高酸素摂取量を制限すると考えられる。また、最大運動テストでは測定していないが、呼吸のRPEは最大下の80%強度の運動で「非常にきつ

い」近くに達している。激しい運動で呼吸をしたいにもかかわらず呼吸できないため、呼吸困難感が非常に高まり、運動継続できなくなっていることも考えられる。

Dempsey ら¹⁰⁾は、激しい運動時には呼吸筋にも血流を大量に送らなければならないため、活動筋への血流を減らし、それが最大運動の制限因子になることを示唆している。その仮説に従えば、今回のように呼吸筋活動を増大させると、活動筋への血流が低下するため、活動筋への酸素供給が間に合わず、無酸素性エネルギー供給機構に移行して早期に筋疲労が起こることになるが、本研究では最大下レベルでの乳酸濃度に差がなく、最高乳酸濃度は胸郭制限で低下しており、Dempsey らの仮説に一致しない。Kowalchuk ら⁷⁾は呼吸抵抗を付加しながら最高酸素摂取量の95%程度の激しい運動を行わせて呼吸筋の活動を上げて、活動筋の脱酸素化は増加しないことから、活動筋への血流は低下しないことを示唆している。本研究でも脱酸素化率は胸郭制限により最大運動時で低く、80%の激しい運動時では非制限と差がなく、Kowalchuk らの結果と一致している。従って、本研究では呼吸筋疲労による間接的影響ではなく、呼吸そのものが最大運動の制限因子になっていたと考えられる。

3.2 最大下運動

9名中3名の被検者が80%強度の途中で運動継続できなくなったことから、高強度の運動では胸郭制限によりパフォーマンスが低下する可能性が示唆された。40%および60%強度でも毎分換気量や心拍数が制限条件で高いことから、生体への負担度は高くなっており、パフォーマンスに影響することが考えられる。胸郭制限により一回換気量は低下し、それを補うように呼吸数が増加するが、浅く早い呼吸では肺胞換気量が減少し、それを補うために換気をより上げる必要があり、その結果、40%と60%強度で毎分換気量が有意に高値を示したと考えられる。一方、80%強度では両条件の運動後半で差がなくなり、同時に制限条件のSpO₂が低下し始めている。こ

の80%強度のあたりで胸郭制限のために毎分換気量が上がりにくくなり、動脈血酸素不飽和が起こることが推察される。先行研究では定常運動時の毎分換気量が、胸郭制限で増加するとする報告^{3,6,11)}と変わらないとする報告^{4,12,13)}に分かれているが、この不一致は、胸郭制限の度合いや用いた運動強度の違いが原因と考えられる。本研究のように軽中強の3つの異なる負荷を用いた研究はこれまでになく、毎分換気量の変化は運動強度依存であることが明らかとなった。

胸郭制限により呼吸筋の仕事が増え、そのため呼吸筋が疲労したことも考えられる。Hussain ら¹⁴⁾は高強度の負荷で、またTomczak ら¹³⁾は中程度の負荷で、胸郭制限中の自転車運動により横隔膜が疲労することを報告しており、本研究でも40%強度から呼吸筋疲労が起こっていた可能性がある。一方、呼吸の疲労度(RPE)はほとんどの場合、胸郭制限で高値を示しており、先行研究^{3,11,13)}と一致している。Harty ら¹¹⁾は、呼吸の不快感は、呼吸の努力感の増大や、呼吸不全による肺からの異常なフィードバックなどが原因であり、運動中止の主要因であるとしている。脚のRPEや乳酸濃度には両条件で差がないことから、末梢系ではなく、呼吸筋疲労や呼吸困難感など呼吸系の制限が、最大下の運動パフォーマンスに影響すると考えられる。

3.3 応用

先行研究では、胸郭制限を拘束性換気障害の疾病モデルとしてとらえることが多かったが、本研究の結果は胸郭制限を伴うスポーツへの応用も可能である。また、胸郭制限を呼吸筋など呼吸系のトレーニングに応用できる可能性がある。さらに、低酸素環境では換気が増大し、動脈血酸素飽和度が低下するなど、胸郭制限と同様の変化が起こる。低酸素環境での持久力トレーニングが生活習慣病の予防と改善に有用であると

の報告^{15, 16)}もあることから, 胸郭制限を加えた持久力トレーニングにも同様の効果があるかもしれない。今後さらなる研究が必要である。

4. 結 論

胸部圧迫による胸郭制限により, 持久的運動のパフォーマンスが低下することが明らかとなり, それには胸郭制限による換気量増加の抑制, 呼吸筋疲労, 呼吸困難感など, 呼吸系の機能低下が直接的に影響していることが示唆された。

謝 辞

本研究の遂行にあたり, 研究助成を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。

文 献

- 1) Ishida K., Sato Y., Katayama K., Miyamura M., Initial ventilatory and circulatory responses to dynamic exercise are slowed in the elderly. *J. Appl. Physiol.*, **89**: 1771-1777 (2000)
- 2) 日本呼吸管理学会, 日本呼吸器学会, 呼吸リハビリテーションに関するステートメント. *日呼管誌*, **11**: 321-3330 (2002)
- 3) O'Connor S., McLoughlin P., Gallagher C.G., Harty H.R., Ventilatory response to incremental and constant-workload exercise in the presence of a thoracic restriction. *J. Appl. Physiol.*, **89**: 2179-2186 (2000)
- 4) Coast J.R., Cline C.C., The effect of chest wall restriction on exercise capacity. *Respirology*, **9**: 197-203 (2004)
- 5) O'Donnell D.E., Hong H.H., Webb K.A., Respiratory sensation during chest wall restriction and dead space loading in exercising men. *J. Appl. Physiol.*, **88**: 1859-1869 (2000)
- 6) Miller J.D., Beck K.C., Joyner M.J., Brice A.G., Johnson B.D., Cardiorespiratory effects of inelastic

- chest wall restriction. *J. Appl. Physiol.*, **92**: 2419-2428 (2002)
- 7) Kowalchuk J.M., Rossiter H.B., Ward S.A., Whipp B.J., The effect of resistive breathing on leg muscle oxygenation using near-infrared spectroscopy during exercise in men. *Exp. Physiol.*, **87**: 601-611 (2002)
- 8) Grassi B., Marzorati M., Lanfranconi F., Ferri A., Longaretti M., Stucchi A., Vago P., Marconi C., Morandi L., Impaired oxygen extraction in metabolic myopathies: detection and quantification by near-infrared spectroscopy. *Muscle Nerve*, **35**: 510-520 (2007)
- 9) Tanner R.K., Fuller K.L., Ross M.L., Evaluation of three portable blood lactate analysers: Lactate Pro, Lactate Scout and Lactate Plus. *Eur. J. Appl. Physiol.*, **109**: 551-559 (2010)
- 10) Dempsey J.A., Romer L., Rodman J., Miller J., Smith C., Consequences of exercise-induced respiratory muscle work. *Respir. Physiol. Neurobiol.*, **151**: 242-250 (2006)
- 11) Harty H.R., Corfield D.R., Schwartzstein R.M., Adams L., External thoracic restriction, respiratory sensation, and ventilation during exercise in men. *J. Appl. Physiol.*, **86**: 1142-1150 (1999)
- 12) Hussain S.N., Rabinovitch B., Macklem P.T., Pardy R.L., Effects of separate rib cage and abdominal restriction on exercise performance in normal humans. *J. Appl. Physiol.*, **58**: 2020-2026 (1985)
- 13) Tomczak S.E., Guenette J.A., Reid W.D., McKenzie D.C., Sheel A.W., Diaphragm fatigue after submaximal exercise with chest wall restriction. *Med. Sci. Sports Exerc.*, **43**: 416-424 (2011)
- 14) Hussain S.N., Pardy R.L., Inspiratory muscle function with restrictive chest wall loading during exercise in normal humans. *J. Appl. Physiol.*, **58**: 2027-2032 (1985)
- 15) Katayama K., Goto K., Ishida K., Ogita F., Substrate utilization during exercise and recovery at moderate altitude. *Metabolism*, **59**: 959-966 (2010)
- 16) Nishiwaki M., Kawakami R., Saito K., Tamaki H., Takekura H., Ogita F., Vascular adaptations to hypobaric hypoxic training in postmenopausal women. *J. Physiol. Sci.*, **61**: 83-91 (2011)