

博士論文(要約)

筋持久カトレーニングにおける高酸素環境の影響

小嶋 裕太

目次

第1章 序論

1.1. 日常生活やスポーツにおける筋持久力の重要性.....	1
1.2. 筋持久カトレーニング法.....	6
1.3. 高酸素環境での運動パフォーマンスに関する研究小史.....	11
1.4. 高酸素環境を筋持久カトレーニングに応用するために必要な検討事項.....	21
1.5. 本研究の目的	24
1.6. 本研究の意義	26
1.7. 本論文の構成と各章の位置づけ.....	27
1.8. 高酸素環境での筋持久カトレーニングに関する生理的機構.....	29

第2章 高酸素環境が動的筋持久力に及ぼす急性の影響

2.1. 研究背景・目的.....	38
2.2. 方法	39
2.3. 結果	56
2.4. 考察	67
2.5. まとめ.....	73

第3章 高酸素環境が静的筋持久力に及ぼす急性の影響

3.1. 研究背景・目的.....	74
3.2. 方法	75
3.3. 結果	88
3.4. 考察	100
3.5. まとめ.....	105

第4章 高酸素環境下での筋持久力トレーニングの効果

4.1. 研究背景・目的.....	106
4.2. 方法.....	107
4.3. 結果.....	115
4.4. 考察.....	128
4.5. まとめ.....	131

第5章 結語

5.1. 実験結果のまとめ.....	132
5.2. 本研究から得られた知見.....	133
5.3. 本研究で得られた知見の社会への適用.....	134
5.4. 今後の検討課題.....	135
謝辞.....	136
引用文献.....	138

本研究で用いた省略記号

1RM: 1 Repetition maximum (最大挙上重量)

○% 1RM: 最大挙上重量の○% ORM: ○回挙上可能な最大挙上重量

ACSM: American College of Sports Medicine (アメリカスポーツ医学会)

ADP: Adenosine diphosphate (アデノシン二リン酸)

ATP: Adenosine triphosphate (アデノシン三リン酸)

bpm: beat per minute (分時心拍数)

CaO₂: Arterial oxygen content (動脈血酸素含量)

DNA: Deoxyribonucleic acid (デオキシリボ核酸)

ECE: Endothelin-converting enzyme (エンドセリン変換酵素遺伝子)

ET: Endothelin (エンドセリン遺伝子)

EX: Exhaustion (疲労困憊)

EMG: Electromyography (筋電図)

HOX: Hyperoxia (高酸素)

HR: Heart rate (心拍数)

HR_{max}: 最大心拍数

LBM: Lean body mass (除脂肪量)

LT: Lactate threshold (乳酸性作業閾値)

MVC: Maximal voluntary contraction (最大随意筋力)

NIRS: Near-infrared spectroscopy (近赤外分光法)

NOX: Normoxia (通常酸素)

PaO₂: Partial pressure of oxygen in arterial blood (動脈血酸素分圧)

P_IO₂: Partial pressure of inspired oxygen (吸気酸素分圧)

QOL: Quality of life (クオリティ・オブ・ライフ)

R: Respiratory exchange rate (呼吸交換比)

R_{max}: Repetition maximum (最大挙上回数)

RMS: Root mean square (二乗平均平方根)

RPE: Rating of perceived exertion (主観的運動強度)

SaO₂: Arterial oxygen saturation (動脈血酸素飽和度)

T_{max}: Maximal muscle contraction time (最大力発揮時間)

$\dot{V}CO_2$: Carbon dioxide production (二酸化炭素排出量)

VEGF: Vascular Endothelial Growth Factor (血管内皮増殖因子)

$\dot{V}O_2$: Oxygen uptake (酸素摂取量)

Peak $\dot{V}O_2$: Peak oxygen uptake (最高酸素摂取量)

$\dot{V}O_{2max}$: Maximal oxygen uptake (最大酸素摂取量)

第1章 序論

1.1.日常生活やスポーツにおける筋持久力の重要性

1.1.1. 筋持久力の重要性

私達の生活では、長時間歩く、階段を昇り続ける、電車などで立ち続けるといった繰り返し力を発揮する場面が多くある。また、スポーツ現場においてもボート競技などで長時間ストロークをし続ける、ボルダリング競技などでホールドを握り続ける、体操競技などで規定の姿勢を維持し続けるなど繰り返し力を発揮し続ける能力が必要である。このような場面で必要な能力が筋持久力である。筋持久力とは、筋疲労が引き起るまで繰り返し筋収縮を繰り返す、もしくは一定の力発揮を長時間し続ける能力と定義されており(Charles, 2018)、筋がいかに長く作業を続けることができるかを表す能力である。筋持久力は心臓や肺などの働きが重要な役割を果たす全身持久力(心肺持久力)とは区別される。筋持久力が低下してしまうと、日常生活においては歩き続けることなどができなくなってしまう、様々な行動に制限がかかりクオリティ・オブ・ライフ(Quality of life: QOL)の低下を引き起こす可能性がある。一方で、スポーツにおいては筋持久力の低い状態では筋の疲労が早く生じることになり、競技パフォーマンスの低下が早く生じる可能性がある。

積極的に身体活動をするために必要な能力を行動体力というが、当然ながらその構成要素に筋持久力が含まれている(図 1-1)。そのため、我が国の国民の体力を評価する目的でスポーツ庁(文部科学省)が実施する、新体力テスト(旧スポーツテスト)にも筋持久力を評価する種目が含まれており、現在は30秒間上体起こし(30秒間全力で上体起こしを実施し、30秒間の上体起こしの回数を測定)から筋持久力を評価している。また、近年では、運動不足に起因する生活習慣病が増大していることから、生活習慣病の予防や治療、QOLの維持・向上に関係する体力要素である健康関連体力(health-related fitness)が着目されているが、筋持久力はその構成要素の一つでもある(図 1-2)。

これらのことから、筋持久力を向上させることは、日常生活とスポーツ現場の両方において、極めて重要な要素であるといえる。しかしながら、筋持久力や筋持久力トレーニングに関する研究は筋力や筋肥大に関する研究に比べ非常に少なく、従来のトレーニング方法よりも効果的なトレーニング方法が開発されていないのが現状である。もしも、従来のトレーニング方法よりも効果的なトレーニング方法を確立することが可能であれば、日常生活においては QOL の向上などにつながり、スポーツ現場においては更なる競技力の向上につながるため有益であると考えられる。

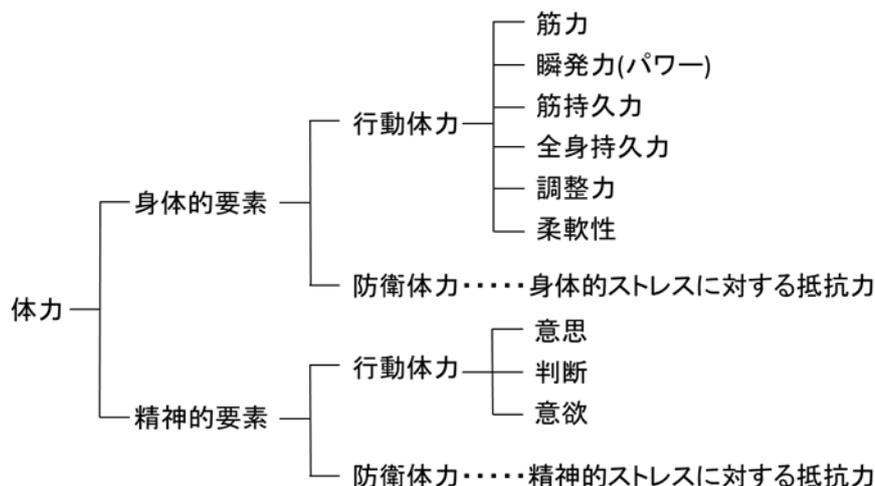


図 1-1. 体力の分類 (Ikai, 1962 より筆者作成)

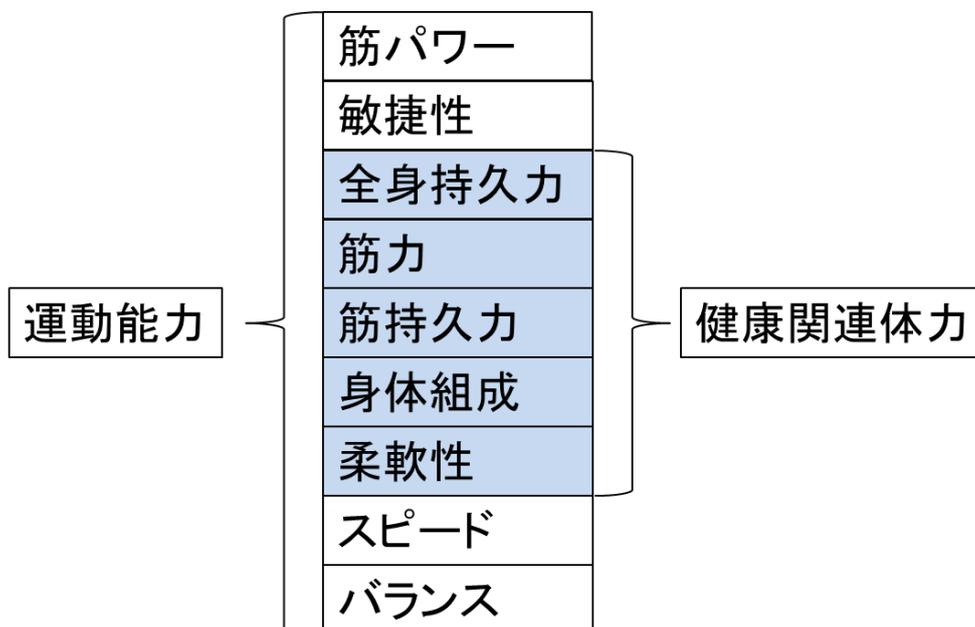


図 1-2. 健康関連体力 (Pate, 1983 より筆者作成)

1.1.2. 筋持久力の種類

筋持久力は、力の発揮が動的(等張性収縮)であれば動的筋持久力、静的(等尺性収縮)の場合には静的筋持久力として区別される(図 1-3)。等張性収縮とは筋が自身の長さを変化させながら一定の張力を発揮する収縮様式のことであり、関節動作を伴う。例えば、一定の負荷のダンベルを持ち上げたり、下げたりする場面に使われる収縮様式である。一方で、等尺性収縮とは、筋が自身の長さを変化せずに張力を発揮する収縮様式のことであり、関節動作を伴わない。例えば、一定の負荷のダンベルを保持する際などに使われる収縮様式である(図 1-4)。動的筋持久力は動的な力発揮における筋持久力を示し、日常生活では階段を昇り続ける場面など、スポーツの現場ではボート競技などで長時間ストロークをし続ける場面など動きを伴いながら力発揮を行い続ける際に重要な能力である。一方で、静的筋持久力は静的な力発揮における筋持久力を示し、日常生活では電車などで立ち続ける場面など、スポーツ現場では体操競技などで規定の姿勢を維持し続ける場面など動きを伴わないで力発揮を行い続ける際に重要な能力である。動的筋持久力は一定の荷重を一定のテンポで挙上するという動作を反復させた際の反復可能な回数が評価指標となり、静的筋持久力では一定の荷重を保持あるいは動きを伴わず一定の力を発揮し続ける時間が評価指標となる。

動的筋持久力と静的筋持久力の両方の種類の筋持久力が持つ特徴として、力の発揮水準が高くなるにつれ(力を強く発揮するにつれ)、挙上回数(図 1-5)あるいは力発揮持続時間(図 1-6)は指数関数的に減少するという特徴を持っている(猪飼ら, 1965; Monod and Scherrer, 1965)。さらに、同一の負荷でも作業頻度が多くなるにつれ、反復可能な回数が減少する傾向がみられる(猪飼, 1965; 図 1-5)。

反対に、動的筋持久力と静的筋持久力の大きな違いとして、動作中における筋の収縮様式の違いによる、筋内の血液循環の違いが挙げられる。動的筋持久力では筋の収縮、弛緩の繰り返しを伴うため、筋ポンプ作用(筋肉の収縮と弛緩により血管が圧迫されることによって、末梢の静脈血の還流量が増加する現象)が働き、血液の循環が起こる。酸素は血液によって運ばれるため、血液の

循環が起こりやすい動的筋持久力では、静的筋持久力に比べ酸素が活動筋に届きやすい。一方で、静的筋持久力では、ある一定の力で力発揮を行い続けるため、筋の内圧によって血管が圧迫され、血流の阻害が生じる。その結果、血流の阻害が生じる静的筋持久力では、血液の循環が生じる動的筋持久力に比べ、酸素が活動筋に届きにくい。そのため、静的筋持久力においては、動きを伴いながら力発揮をし続ける動的筋持久力に比べ、少ない酸素を効率よく利用する必要がある。したがって、血液の循環が生じにくい静的筋持久力では、筋への酸素運搬能力よりも筋に貯蔵されているエネルギー源や筋の酸素利用能力が筋持久力を決定づける重要な因子であると考えられる。このように、動的筋持久力と静的筋持久力では同じ筋持久力であっても、筋内の血液循環が異なる。

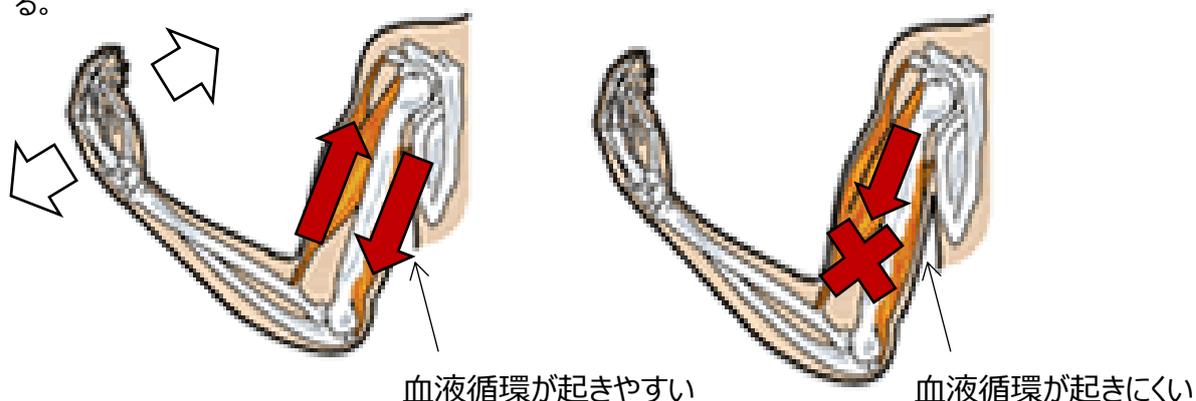


図 1-3. 動的筋持久力(左図)と静的筋持久力(右図)

動的な動作では、筋ポンプ作用が働くため血液循環が起きやすい。一方で静的な動作では筋内圧の上昇により、血液循環が起きにくい。

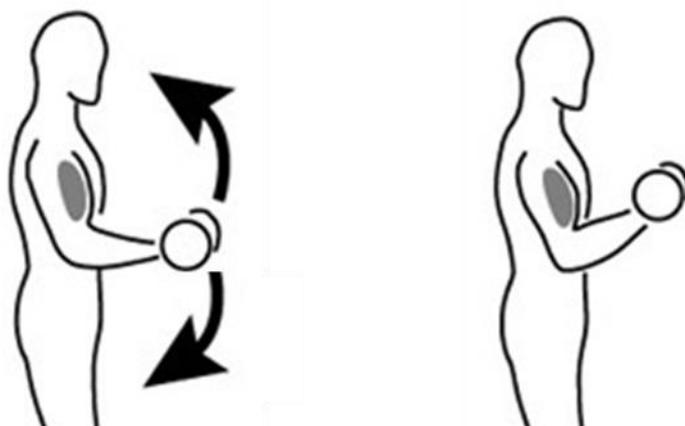


図 1-4. 等張性収縮(左図)と等尺性収縮(右図)

等張性収縮(左図)は一定の負荷のダンベルを持ち上げたり、下げたりする際に使われる収縮様式であり、等尺性収縮(右図)は一定の負荷のダンベルを保持する際に使われる収縮様式である。

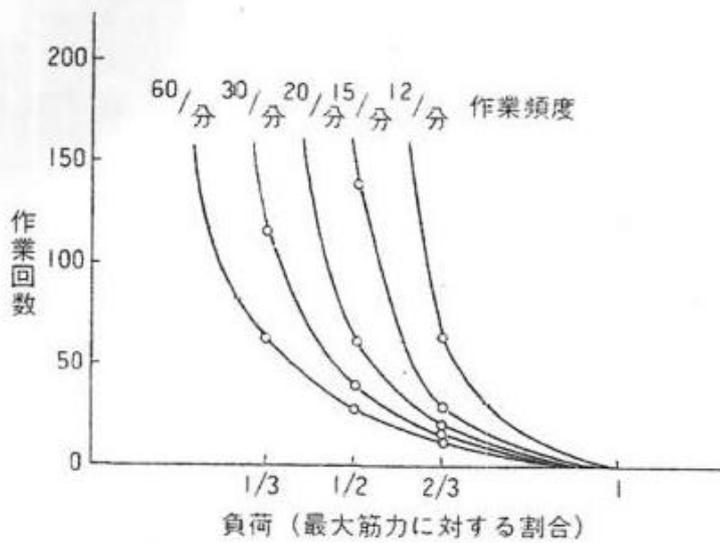


図 1-5. 動的作業における作業負荷の大きさと作業頻度と作業回数との関係 (猪飼, 1965)
 (石川と竹宮 運動生理学シリーズ 持久力の科学より引用)

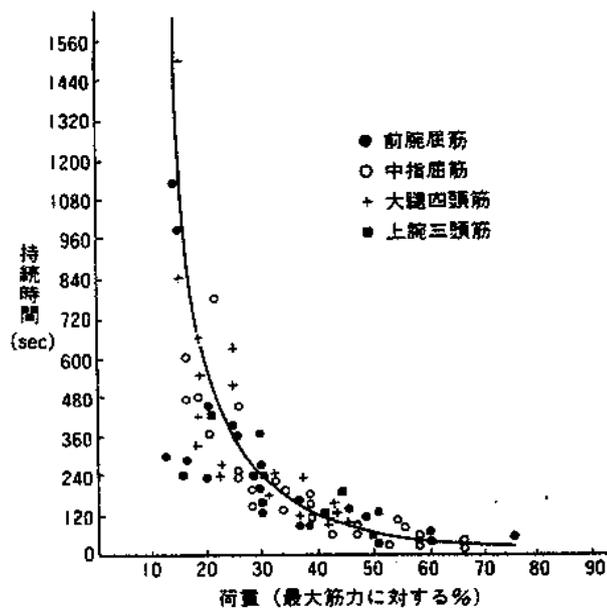


図 1-6. 静的作業時間と力(荷重)の関係 (Monod and Scherrer, 1965)
 (石川と竹宮 運動生理学シリーズ 持久力の科学より引用)

1.2. 筋持久カトレーニング法

1.2.1. 現在推奨されている筋持久カトレーニング法

この項では現在行われている筋持久カトレーニングの方法について述べる。ヘルスフィットネス分野で世界をリードしているアメリカスポーツ医学会(American College of Sports Medicine: ACSM)は、筋持久力向上を目的としたトレーニング方法として、低～中の負荷 [最大挙上重量(1 Repetition maximum: 1RM)の 50%未満の重さ(< 50% 1RM)]を用いて、15～25 回、もしくはそれ以上の回数を、少ないセット数(1 つの筋群に対し、1 もしくは 2 セット)で、セット間の休息時間を短く(1～2 分)実施することを推奨している(American College of Sports Medicine, 2009; Deschanes and Garber, 2018)。ACSM がこのような筋持久力のトレーニング方法を推奨している理由は、筋持久カトレーニングに関する以下の報告がなされているからである。Stone and Coulter(1994)は 6～8RM の負荷を用いて、3 セット(セット間の休息時間 2～3 分)行う群、15～20RM の負荷を用いて、2 セット(セット間の休息時間 2～3 分)行う群、そして 30～40RM の負荷を用いて、1 セット行う群の 3 群に分け、オールアウト(疲労困憊、これ以上力発揮ができない状態)まで実施するレジスタンストレーニングを週 3 回の頻度で、9 週間行わせた。その結果、統計的に有意な差は認められなかったものの、最も軽い負荷である 30～40RM の負荷を用いてトレーニングを行った群は、他のトレーニング群よりも絶対負荷における筋持久力(25kg の負荷重量における、スクワットの最大挙上回数)と相対的負荷における筋持久力(55% 1RM の負荷重量における、スクワットの最大挙上回数)が向上したと報告している。また、Campos et al. (2002)は 3～5RM の負荷を用いて、4 セット(セット間の休息時間 3 分)行う群、9～11RM の負荷を用いて、3 セット(セット間の休息時間 2 分)行う群、20～28RM の負荷を用いて、2 セット(セット間の休息時間は 1 分)行う群、そしてトレーニングを行わない群(コントロール群)の 4 群に分け、オールアウトまで実施するレジスタンストレーニングを週 2～3 回の頻度で、8 週間(前半の 4 週間は週 2 回の頻度、後半の 4 週間は週 3 回の頻度で実施)行わせたところ、コントロール群を含む他のトレーニング群と比較して、最も軽い負荷である 20～28RM の負荷を用いてトレーニングを行っ

た群が有意に筋持久力(60%1RM 負荷におけるレッグプレス、スクワット、レッグエクステンションの最大挙上回数)が向上したと報告している。

上記に挙げた研究結果に基づき、ACSM は筋持久力を向上させるためには、低～中の負荷を用いて、高回数、少ないセット数で、セット間の休息時間を短くトレーニングを実施することを推奨している。そのため、現在でも多くのトレーニングの現場で上記のトレーニング方法が採用されているが、先述したように、上記の方法よりも効果的な筋持久力トレーニング法が開発されていないのが現状である。

1.2.2. 筋持久力向上のために必要な負荷と挙上回数に関する検討

我が国で行われた筋持久力トレーニングに関する研究の中には、トレーニング時の負荷と挙上回数の観点から、筋持久力のトレーニング効果について検討した研究がある(猪飼ら, 1967; 加賀谷, 1970)。トレーニング負荷に関する研究では、最大筋力の 1/2、1/3、1/4 に相当する 3 つの負荷を用いて、オールアウトまで行うトレーニングを週 6 回の頻度で 6 週間行い、トレーニング負荷の違いからトレーニング効果を検討した。6 週間のトレーニング終了後、いずれの負荷を用いた群に対しても、最大筋力の 1/3 に相当する負荷を用いて、オールアウトまで行うことができる作業回数を測定し、トレーニング効果を評価した。その結果、負荷が軽くなるにつれトレーニング効果は大きく表れ、最も低負荷である 1/4 の負荷を用いた群(軽い重りを用いた群)は、オールアウトまでの作業回数(筋持久力)が最も向上した(加賀谷, 1970; 図 1-7)。トレーニング時の挙上回数に関する研究では、最大筋力の 1/3 に相当する負荷での最大挙上回数を基準に、最大、2/3、1/2 の 3 つの挙上回数で、週 6 回の頻度で 12 週間のトレーニングを行い、トレーニング効果を検討した。その結果、挙上回数が増加するにつれトレーニングの効果は大きく表れ、最大の挙上回数まで行った群が最も作業回数(筋持久力)が向上した(猪飼ら, 1967; 図 1-8)。

上記の研究結果を考慮にいれると、効果的な筋持久力トレーニングを実施するためには、低負荷を用いて、より多くの挙上回数を行う必要があると考えられる。ただし、最大筋力の 1/4 負荷よりも

軽い負荷は筋持久力の改善に必要な負荷強度にはならないと考えられる。なぜならば、筋活動の強さと挙上回数あるいは持続時間との関係(図 1-5、1-6)から判断して、最大筋力の 1/4 負荷よりも軽い負荷では疲労が生じにくい、すなわちオールアウトがしにくいからである。最大筋力の 1/4 負荷よりも軽い負荷でのトレーニング効果の実態については明らかにされていないが、上述した猪飼ら(1967)の報告や筋持久力の向上が認められた研究の多くがオールアウトまでトレーニングを実施したこと(Campos et al. 2002; 加賀谷, 1970; Stone and Coulter, 1994)を考慮にいれると、筋持久力を向上させるためにはオールアウトまで追い込むことが重要である可能性がある。したがって、オールアウトまで追い込むことが困難な最大筋力の 1/4 の負荷よりも軽い負荷は筋持久力の改善に必要な負荷強度にはならないと考えられる。

上記のことから、低負荷(ただし最大筋力の 1/4 以上の負荷)を用いて、高回数、オールアウトまでトレーニングを実施することは効果的に筋持久力を向上させることができると考えられる。

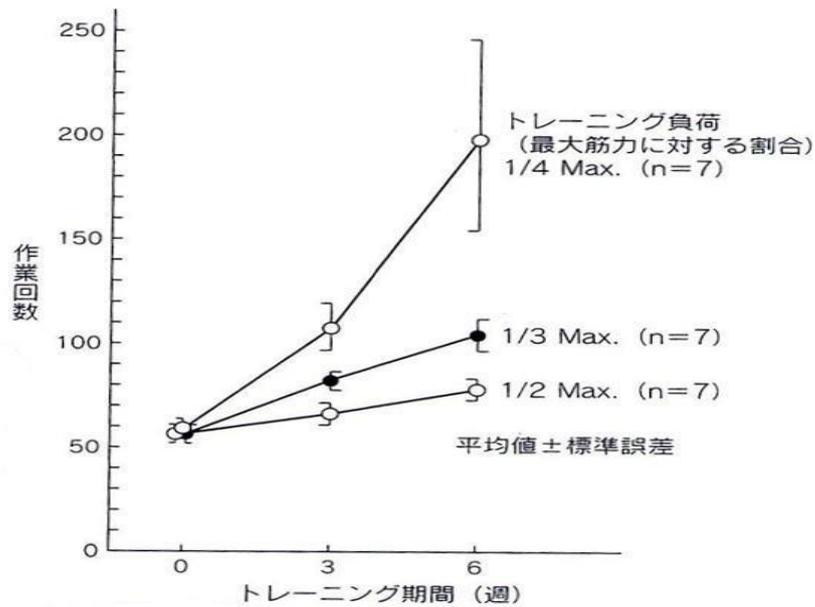


図 1-7. トレーニング強度に関する研究結果 (加賀谷, 1970)

Max は最大筋力を示しており、1/2Max は最大筋力の 1/2 の負荷、1/3Max は最大筋力の 1/3 の負荷、そして 1/4Max は最大筋力の 1/4 の負荷を用いて筋持久力トレーニングを実施した結果をそれぞれ示す。

(川久保清(編), 健康運動指導士養成講習会テキストより引用)

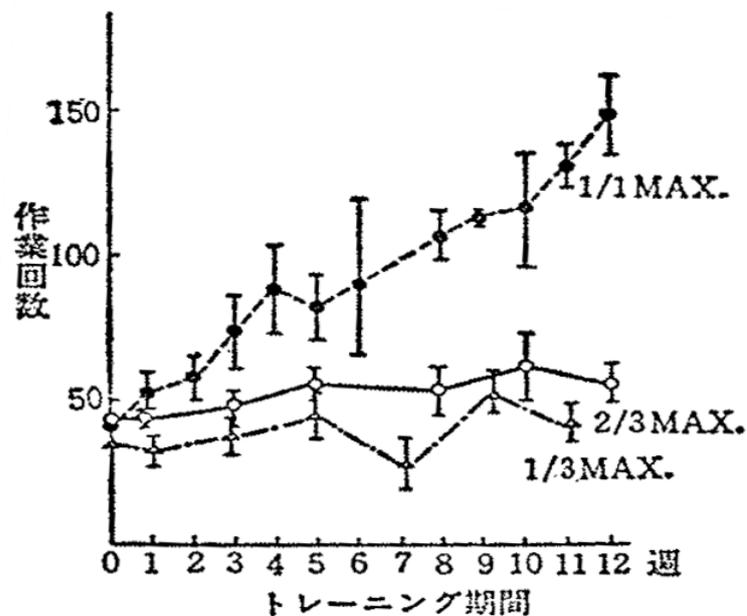


図 1-8. 挙上回数に関する研究結果 (猪飼ら, 1967)

MAX は最大挙上回数を示しており、1/3MAX は最大挙上回数の 1/3 の回数、2/3MAX は最大挙上回数の 2/3 の回数、そして 1/1MAX は最大挙上回数まで筋持久力トレーニングを実施した結果をそれぞれ示している。

(石川と竹宮, 運動生理学シリーズ 持久力の科学より引用)

1.2.3. 筋持久力トレーニング法における現在の課題

1.1.1.で述べたように、筋持久力は日常生活とスポーツの現場の両方で重要な能力であるにも関わらず、筋持久力に関する研究は筋力や筋肥大に関する研究よりも少ないのが現状である。そのため、筋力や筋肥大の向上を目的とするトレーニング方法は、加圧トレーニングやスロートレーニングなど、従来行われてきた高負荷を用いたレジスタンストレーニング以外のトレーニング方法が開発されているが、筋持久力の向上を目的としたトレーニングは 1.2.1.で述べた、低~中負荷を用いたレジスタンストレーニング(筋持久力トレーニング)しかないのが現状である。もしも、現在行われている筋持久力トレーニングよりも効果的なトレーニング方法を開発することが可能であれば、QOL の向上や更なる筋持久力向上を目指すアスリートなどに対し、効果的なトレーニングを提供することが可能である。したがって、現在行われているトレーニング方法よりも効果的な方法を開発することは、日常生活とスポーツ現場の両方に対し有意義であると考えられる。一方で、筋持久力トレーニング時に負荷を変えず、オールアウトまでの挙上回数を増やす手段があれば、より効果的に筋持久力トレーニングを行うことが可能であると推測される。その手段として、本研究では次節に示す高酸素環境に着目した。

1.3. 高酸素環境での運動パフォーマンスに関する研究小史

前節で、より効果的に筋持久カトレーニングを行う手段として、高酸素環境に着目したと述べた。高酸素環境とは大気中の酸素濃度(20.9%)より高い濃度の酸素の環境を示し、酸素濃度は 20% 代のものから 100%まで多岐にわたる。高酸素環境では通常酸素環境よりも体内により多くの酸素を取り込むことが可能であり、血液中の酸素分圧などが上昇する。そのため、本節では、高酸素環境が運動パフォーマンスに及ぼす効果に関する先行研究をまとめるとともに、高酸素環境を筋持久カトレーニングに応用するためにはどの点を明らかにする必要があるかについて述べる。

1.3.1. 高酸素環境が運動パフォーマンスに及ぼす急性の効果

高酸素環境が運動パフォーマンスに及ぼす急性の影響について検討した研究は非常に多い。中でも、高酸素環境が最大下強度での全身持久力に及ぼす急性の影響について検討した研究は多く、運動パフォーマンスの向上を報告した例は多い(Adams and Welch, 1980; Allen et al., 1977; Plet et al., 1992)。例えば、Plet et al. (1992)は、酸素濃度 55%の高酸素と 21%の通常酸素を吸入させながら、通常酸素環境下における最大酸素摂取量(Maximal oxygen uptake: $\dot{V}O_{2max}$)の 80%の運動強度($80\% \dot{V}O_{2max}$)で自転車ペダリング運動をオールアウトまで行わせ、それぞれの条件における最大運動継続時間を酸素条件間で比較した。その結果、高酸素を吸入した条件の方が最大運動継続時間は有意に長くなった。また、運動途中の換気量と心拍数の値は高酸素条件の方が有意に低かったと報告している。Allen et al. (1977)は酸素濃度 80%の高酸素と 21%の通常酸素を吸入させながら、 $80\% \dot{V}O_{2max}$ と $50\% \dot{V}O_{2max}$ の運動強度で 10 分間のランニングを行い、主観的運動強度(Rating of perceived exertion: RPE)を酸素条件間で比較したが、いずれの負荷強度においても、高酸素条件の方が通常酸素条件よりも有意に低い RPE の値を示した。この結果は高酸素条件の方が通常酸素条件よりも楽に運動を行えたことを示している。他にも、最大下強度での運動パフォーマンスが向上したという報告は数多くされており、そのような報告では $\dot{V}O_{2max}$ の向上(Ekblom

et al., 1975)、心拍数、血中乳酸濃度の低下(Adams et al., 1986)、筋グリコーゲンの分解抑制(Stellingwerff et al., 2006)などが運動中に生じたと報告されている。

高酸素環境が最大強度での運動パフォーマンスに及ぼす急性の影響についても様々な検討が行われている。例えば、Nielsen et al.(1999)は酸素濃度 30%の高酸素と 21%の通常酸素を吸入させながら、ローイングエルゴメーターを用いて 6 分間の最大ローイング動作を行ったところ、最大無酸素性パワーは高酸素を吸入した条件の方が通常酸素条件よりも有意に高い値を示したと報告している。また、運動中における脳内の酸素飽和度、動脈血酸素飽和度(Arterial oxygen saturation: SaO₂)および動脈血酸素含有量(Arterial oxygen content: CaO₂)は高酸素条件の方が通常酸素条件よりも有意に高い値を示したことも報告している。また、Linnarsson et al.(1974)は 1.4 絶対気圧の酸素(高酸素)と 1 絶対気圧の酸素(通常酸素)を吸入させながら、自転車エルゴメーターを用いて、全力の自転車ペダリングを行った。その結果、高酸素条件の方が通常酸素条件よりも有意に長い時間運動を継続することができた。他にも最大強度での運動パフォーマンスが向上したという報告は数多くされており、そのような報告ではグルコース 6 リン酸と乳酸の蓄積の抑制 (Linossier et al., 2000)、筋酸素摂取量の上昇(Richardson et al., 2000)などが運動中に生じたと報告されている。

高酸素環境による運動パフォーマンス向上の要因として、通常酸素環境に比べ(1)中枢性の疲労抑制(Nielsen et al., 1999)、(2) H⁺濃度の増加の抑制 (Welch, 1982)、(3)より速いクレアチンリン酸の再合成(Eiken et al. , 1987)、(4)筋グリコーゲンの分解抑制 (Stellingwerff et al., 2006)などが生じることが挙げられる。これらの知見を考慮に入れると、高酸素環境の急性の効果として末梢性と中枢性の疲労が抑制され、筋持久力を向上させる可能性が考えられる。しかしながら、高酸素環境による急性の効果について検討した研究の多くは、上記に示したような全身持久力や無酸素性パワーをみたものがほとんどであり、筋持久力をみた研究は数えるほどしかない。筋持久力をみた例として、Eiken et al.(1987)は、酸素濃度 100%の高酸素(1.3 絶対気圧)と 21%の通常酸素(1 絶対気圧)を吸入させながら、60 回の最大膝関節伸展運動を行わせ、ピークトルクを酸素条件間で比較した。その結果、高酸素を吸入した条件の方が通常酸素を吸入した条件よりも、60 回全体の平均の

ピークトルクと運動後半の平均ピークトルク(37~48 回目と 49~60 回目における平均ピークトルク)は高い値を示したと報告している。また、筋持久力をみた他の研究例として、Eiken & Tesch(1984)は酸素濃度 99%の高酸素と酸素濃度 21%の通常酸素を吸入させながら、60 回の最大膝関節伸展運動を行わせ、ピークトルクを酸素条件間で比較した。その結果、Eiken et al.(1987)の結果と同様に、高酸素を吸入した条件は通常酸素を吸入した条件よりも、60 回全体の平均のピークトルクと運動後半の平均ピークトルク(37~48 回目と 49~60 回目における平均ピークトルク)が高い値を示したと報告している。さらに、彼らは同様な酸素(酸素濃度 99%の高酸素と酸素濃度 21%の通常酸素)を吸入させながら、最大筋力の 27%の力で等尺性膝関節伸展力発揮を続け、疲労困憊(オールアウト)までの力発揮時間を酸素条件で比較も行った。その結果、高酸素条件と通常酸素条件との間に有意な差が認められなかったと報告している。高酸素環境が筋持久力に及ぼす急性の影響について検討した研究は私の知る限り、上記の研究しか存在せず、高酸素環境が筋持久力に及ぼす影響については十分な知見が得られていないのが現状である。

1.3.2. 高酸素環境下でのトレーニング効果

前項で示したように、高酸素環境下で運動を実施すると、急性の効果として運動パフォーマンスが向上するという報告が数多くされている。高酸素環境による急性の効果を検討した研究に対して、研究の数は少ないが、高酸素環境でトレーニング実験を実施し、そのトレーニング効果について報告した先行研究がいくつかある。本項ではそれらの研究についてまとめる。

Perry et al. (2005)は、高酸素環境(酸素濃度 60%)と通常酸素環境(酸素時濃度 21%)でトレーニングを行う群に分け、それぞれの酸素条件における最大心拍数(Maximal heart rate: HR_{max})の 90%に相当する負荷を用いて 10 分×4 セット(セット間の休息时间 2 分)の自転車ペダリング運動での全身持久力トレーニングを週 3 回の頻度で 6 週間実施し、酸素条件間でトレーニング効果を比較した。トレーニング効果を比較するために、両トレーニング条件ともに、6 週間のトレーニング開始後に、90% $\dot{V}O_{2max}$ の運動強度で自転車ペダリング運動を通常酸素環境下にてオールアウトまで実

施し、オールアウトまでの最大運動継続時間をトレーニング条件間で比較した。その結果、両トレーニング条件ともに、トレーニング実験開始前よりも有意に最大運動継続時間が増加したが、トレーニング条件間で比較すると、高酸素条件でのトレーニング後の最大運動継続時間は、通常酸素条件よりも有意に高い値を示した。この結果から、彼らは高酸素環境でのトレーニングは効果的であると結論付けた。また、彼らはトレーニング条件間で相対的負荷は同じにも関わらず、高酸素条件におけるトレーニング実施時の負荷が通常酸素条件よりも有意に高かったことも報告しており、高酸素環境の効果によるこの負荷の増加分が、運動パフォーマンス向上に対する追加刺激となったため、トレーニング効果は高酸素条件の方が高かったと考察している。Chick et al. (1993)は高酸素(酸素濃度 70%以上)を吸入させながら、最大負荷の 50~80%負荷で 5 分間自転車ペダリング運動を 8 セット、週 4 回の頻度で 6 週間全身持久力トレーニングを実施したところ、漸増負荷自転車ペダリング運動テストにおけるオールアウトまでの運動継続時間や最大負荷の 85%でオールアウトまで行う自転車ペダリング運動における運動継続時間が向上したことを報告している。ただし、この研究は、対照群が設けられていない実験のため、解釈には注意が必要である。

上記のように高酸素環境でのトレーニング効果に関して肯定的な見解を示している研究がある一方で、高酸素環境と通常酸素環境でのトレーニング効果に差がなかったことから、高酸素環境でのトレーニングに対し否定的な見解を示している研究もある (Armstrong et al., 2000; Kilding et al., 2012; Prazyklenk et al., 2018)。例えば、Kilding et al. (2012)は男性自転車競技選手を対象に、高酸素環境(酸素濃度 60%)と通常酸素環境(酸素時濃度 21%)でトレーニングを行う群に分け、全力自転車ペダリング運動 2 分を 12 セット(セット間の休息时间 2 分)と同様なエクササイズを 3 分 5 セット(セット間の休息时间 3 分)のインターバルトレーニングを交互に週 2 回の頻度で 4 週間行い、トレーニング条件間でトレーニング効果を比較した。その結果、トレーニング効果を検討するために測定した、漸増負荷テスト、60 秒間ウイングートテストおよび 20km の自転車レースのタイムに対するトレーニング効果に、トレーニング条件間で有意な差が認められなかった。この結果から、彼らは高酸素環境でのトレーニングは効果がないと結論づけた。

まとめると、高酸素環境でのトレーニングの多くは、高酸素環境による急性の運動パフォーマンス向上効果を応用し、相対的運動強度は変わらないにも関わらず、通常酸素環境下よりも高い負荷強度や力発揮で運動を行うことによって、更なるトレーニング効果を目指す方法であった。現在まで行われてきた高酸素環境でのトレーニング実験は全身持久力と無酸素性パワーに対するトレーニング実験がほとんどであり、本研究で着目している筋持久カトレーニングを含むレジスタンストレーニングに対する研究は私の知る限り一つもない。一方で、高酸素環境下でのトレーニング効果については通常酸素環境でのトレーニング効果と変わらないという報告も多いことから議論の余地がある。また、高酸素環境でのトレーニング効果が認められなかった研究の中には、高酸素環境でのトレーニング実施時の発揮パワーが、通常酸素環境でのトレーニング実施時の値と有意な差がなかったという報告もある(Armstrong et al. , 2000)。前述したように、Perry et al. (2005)は、高酸素環境でのトレーニング効果が高かったのは、高酸素環境ではトレーニング時に通常酸素環境よりも高い負荷を扱えたことがトレーニング効果に関係していると考えしている。これらの知見を考慮に入れると、高酸素環境でトレーニング効果を得るためには、トレーニング時の負荷強度や力発揮が高酸素環境の効果によって高くなることが前提であると考えられる。したがって、これらの先行研究の報告から、高酸素環境を筋持久カトレーニングに応用するためには、まず高酸素環境の急性の効果として、筋持久力が向上するか確認する必要があると推察される。

1.3.3. 低酸素環境下でのトレーニング効果

前項で示したように、高酸素環境でのトレーニング実験は、現在のところ全身持久力や無酸素性パワーに関するトレーニングについての検討がほとんどであり、筋持久カトレーニングを含むレジスタンストレーニングに関する検討を行った報告は私の知る限り一つもない。一方で、低酸素環境では、高酸素環境でのトレーニングに比べ、数多くのトレーニング実験に関する結果が報告されており、レジスタンストレーニングについて検討した研究もいくつか報告されている。そこで、本項では低酸素環境下でのレジスタンストレーニングについての報告をまとめるとともに、本研究で提案する高酸素環境下での筋持久カトレーニング(レジスタンストレーニング)との違いについて述べる。

低酸素環境下でレジスタンストレーニングを実施した研究の多くは、通常酸素環境下でのレジスタンストレーニングよりも効果的に筋力を増大させることや筋を肥大させることを目的に研究が行われている。なぜならば、低酸素環境下でレジスタンストレーニングを行うと、筋肥大に関わるホルモンである成長ホルモンやテストステロンなどのアナボリックホルモンが通常酸素環境下でのレジスタンストレーニングよりも有意に向上することが報告されているからである(Kon et al., 2010)。実際に、低酸素環境下でのレジスタンストレーニングを行った研究では、通常酸素環境下でのレジスタンストレーニングよりも有意な筋力の向上 (Manimmanakorn et al., 2013; Nishimura et al., 2010)、筋横断面積や筋厚の増大 (Kurobe et al., 2015; Manimmanakorn et al., 2013)が報告されている。一方で、低酸素環境下でのレジスタンストレーニングを行った研究の中には、筋力の向上や筋肥大の増大を目的にトレーニングを行ったにも関わらず、筋持久力が通常酸素環境下でのレジスタンストレーニングよりも向上したと報告している研究もある(Kon et al., 2014; Manimmanakorn et al., 2013)。例えば、Kon et al. (2014)は低酸素環境下(酸素濃度 14.4%)と通常酸素環境下(酸素濃度 20.9%)の異なる酸素環境でトレーニングを行う群に分け、高負荷のレジスタンストレーニング (70%1RM の負荷でベンチプレスとレッグプレスを各 10 回、5 セット、セット間の休息时间 90 秒で実施)を週に 2 回の頻度で 8 週間実施した。その結果、低酸素環境でトレーニングを行った群は、通常酸素環境でトレーニングを行った群よりも筋持久力の指標として測定した 70%1RM を用いたレッグプレスのエクササイズボリューム

ム(挙上重量×挙上回数で算出)が有意に向上しただけでなく、筋持久力の決定因子の 1 つである筋内(外側広筋)の毛細血管密度と血管新生などに関わる血管内皮増殖因子(Vascular Endothelial Growth Factor : VEGF)が有意に向上したと報告している。このような結果が得られた要因として、彼らは低酸素環境下でレジスタンストレーニングは VEGF の発現量の増加を促し、筋内の毛細血管密度が増加し、筋持久力が向上したと彼らは考察している。また、低酸素環境下でのレジスタンストレーニングに関する研究の中には、筋持久力トレーニングに及ぼす影響について検討した研究もある(Friedmann et al., 2003)。Friedmann et al. (2003)は低酸素環境下(酸素濃度 12%)と通常酸素環境下(酸素濃度 20.9%)で、低負荷強度、高回数でのレジスタンストレーニング(30% 1RM の負荷で片脚でのレッグエクステンションを 25 回、6 セット、セット間の休息时间 1 分で実施)を週 3 回、4 週間実施し、トレーニング条件間でトレーニング効果を比較した。彼らは、低酸素環境下で筋持久力トレーニングを行うことは、前述したようなアナボリックホルモンの効果で筋持久力だけでなく、筋力の向上や筋肥大が生じるという仮説を立て、実験を行った。しかしながら、両トレーニング条件ともに筋持久力(50 回連続の全力膝関節伸展力発揮における仕事量)は向上したものの、トレーニング条件間でトレーニング効果に差は認められなかった。また、両トレーニング条件ともに筋力(等尺性最大膝関節伸展筋力)と筋横断面積(外側広筋)に対するトレーニング効果は認められなかった。他にも、この研究と同様、低酸素環境でのレジスタンストレーニングについて効果が認められない報告もされているため(Ho et al., 2014)、必ずしも低酸素環境でのレジスタンストレーニングが通常酸素環境でのトレーニングよりも効果的であるとはいえないのが現状である。

まとめると、低酸素環境下でのレジスタンストレーニングは低酸素環境によって誘発されるホルモンや増殖因子の応答によって、通常酸素環境下でのトレーニングよりも大きな効果を狙う方法である。一方で、本研究で提案する高酸素環境下での筋持久力トレーニングは、高酸素環境によってトレーニング時の挙上回数や力発揮時間を増加させることによって効果的なトレーニングを行うアプローチ法であり、低酸素環境下でのトレーニングとは根本的に発想が異なったトレーニング方法である。

1.3.4. 高酸素環境が運動パフォーマンスに及ぼす効果の個人差

興味深いことに、高酸素環境に関する先行研究では、高酸素環境が運動パフォーマンスに及ぼす効果には個人差があると報告されており、特に、運動誘発性低酸素血症 (exercise-induced arterial hypoxemia: EIAH)がこの個人差に関係することが報告されている(Grataloup et al., 2005; Harms et al., 2000; Powers et al., 1989)。EIAHとは、最大運動時に SaO_2 と動脈血酸素分圧 (Partial pressure of oxygen in arterial blood: PaO_2) が著しく低下する症状である (Dempsey et al., 1984)。EIAH が生じる者の特徴として、持久力の指標の一つである $\dot{V}\text{O}_{2\text{max}}$ などが高い傾向にあり (Powers et al., 1989)、動脈血に流れる酸素を運動エネルギーとして利用する能力に長けている。そのため、 SaO_2 や PaO_2 が著しく低下するまで、酸素を運動するためのエネルギーとして利用することができるため、最大運動時にこのような症状が生じる。EIAH と高酸素環境による個人差の関係をみた研究の例として、Grataloup et al. (2005)は、30%の高酸素吸入による $\dot{V}\text{O}_{2\text{max}}$ の増加率を EIAH が生じる者と生じない者と比較したところ、EIAH が生じる者の方が増加率は有意に高いことを示した。また、彼らは EIAH が生じる者の方が、生じない者よりも SaO_2 の増加率が高いことも確認しており、この増加率の違いが、 $\dot{V}\text{O}_{2\text{max}}$ の増加率に関係していると報告している。この研究を考慮に入れると、体力要素(持久力)が高酸素環境による運動パフォーマンス向上効果の個人差に関係する可能性が挙げられる。一方で、高酸素環境による運動パフォーマンス向上効果の個人差は EIAH が生じるような、身体能力が高い者でなくても生じる。例えば、Heraud et al. (2008)は慢性閉塞性肺疾患の患者が高酸素環境下で有酸素運動を行った際に、高酸素環境の効果によって運動パフォーマンスが向上した者、変わらなかった者、そして低下した者がいると報告している。しかしながら、この研究では、運動パフォーマンスに違いが生じた理由については明らかにすることができなかった。この研究結果を考慮に入れると、アスリートのような体力要素を持ち合わせた者でなくても、高酸素環境による運動パフォーマンス向上効果は生じる可能性が考えられる。

高酸素環境では報告例がないが、低酸素環境では形態的要素と低酸素環境による生理応答について検討した研究がある。低酸素環境では換気量が増加するが、肥満者はこの反応が一般人

に比べ、変わることが報告されている(Burwell et al., 1994, Ge et al., 2005, Kunimoto et al., 1988)。ただし、肥満者の方が一般の人に比べ換気量は増加したという報告(Burwell et al., 1994; Kunimoto et al., 1988)と減少したという報告(Ge et al., 2005)があり、一貫した知見が得られていないのが現状である。

上記の知見を考慮に入れると、アスリートのような体力を持ち合わせていない、一般人を対象としても、高酸素環境が筋持久力に及ぼす効果にも個人差が生じ、その効果の個人差は形態的要素や体力的要素などが関係する可能性が考えられる。しかしながら、高酸素環境が筋持久力に及ぼす効果の個人差について検討した研究は一つもないのが現状である。

1.3.5.研究小史のまとめ

研究小史の内容をまとめると、以下のようになる。

1. 高酸素環境下でのトレーニングはトレーニング時に、高酸素環境の効果により高い負荷強度や力発揮で運動を行うことによって、更なるトレーニング効果を目指す方法であり、低酸素環境下でのトレーニングのように低酸素環境によって誘発されるホルモンや増殖因子の応答によって、通常酸素環境下でのトレーニングよりも大きな効果を狙うトレーニング方法とは根本的に発想が異なったトレーニング方法である。
2. 高酸素環境下でのトレーニング効果を得るためには、トレーニング時の負荷強度や力発揮が通常酸素環境よりも高くなることが前提であると考えられる。そのため、高酸素環境による急性の効果で運動パフォーマンスが向上することを明らかにする必要がある。
3. 高酸素環境による急性の効果によって筋持久力は向上する可能性がある。ただし、高酸素環境による急性の効果には個人差が生じる可能性があり、その個人差は形態的要素や体力的要素に関わる可能性がある。
4. 高酸素環境が筋持久力に及ぼす急性の効果について検討した先行研究はほとんどなく、トレーニング効果(長期的な効果)について検討した先行研究は存在しない。

高酸素環境が運動パフォーマンスに及ぼす影響について検討した研究の多くは全身の持久力や無酸素性パワーについて調べた研究が多く、筋持久力に及ぼす影響について検討した研究は非常に少ないのが現状である。中でも高酸素環境での筋持久力トレーニングに及ぼす影響について検討した研究は私の知る限り1つも行われていない。そのため、高酸素環境が筋持久力に及ぼす影響について検討することは、高酸素環境に関する研究分野においては非常に新規性の高い研究となる。

1.4. 高酸素環境を筋持久カトレーニングに応用するために必要な検討事項

前節の研究小史のまとめから、高酸素環境下で筋持久カトレーニングを実施すると、高酸素環境の急性の効果として筋持久力が向上する可能性が考えられる。このことは、筋持久カトレーニング時における挙上回数もしくは力発揮時間が向上する可能性があることを示している。そのため、高酸素環境下で筋持久カトレーニングを実施すると、高酸素環境による挙上回数もしくは力発揮時間の向上が、筋持久力向上に対する追加刺激となり、通常酸素環境下での筋持久カトレーニングよりも効果的に実施できる可能性が挙げられる。

上述したように、本研究で提案する高酸素環境下での筋持久カトレーニングは、高酸素環境によってトレーニング時の挙上回数もしくは力発揮時間が向上することが前提である。また、1.3.で述べたように、筋持久カトレーニングは低負荷強度で行うことが推奨されている。したがって、高酸素環境を筋持久カトレーニングに応用するためには、まず高酸素環境の急性の効果として、低負荷強度における筋持久力が向上するかについて検討し、筋持久カトレーニング時の挙上回数もしくは力発揮時間が向上するか評価する必要がある。

1.1.2.で述べたように筋持久力には動的筋持久力と静的筋持久力の2種類の筋持久力があり、これらの筋持久力における筋内の血液循環は、筋収縮の違いにより異なる血液循環を示す(動的筋持久力では筋ポンプ作用によって筋内の血液循環が起こりやすく、静的筋持久力では、収縮中の筋内圧の上昇によって、血管が圧迫され、筋内の血液循環が起こりにくくなる)。そのため、血液循環が起こりやすい動的筋持久力では、高酸素環境によって増えた酸素が筋内まで届き、エネルギーとして使われ、結果として筋持久力が向上する可能性があるが、一方で血液循環が起こりにくい静的筋持久力では、高酸素環境によって増えた酸素が筋内まで届きにくいいため、筋持久力は向上しない可能性がある。このように、筋持久力の種類によって、高酸素環境による効果が異なる可能性がある。繰り返しになるが、本研究で提案する高酸素環境下での筋持久カトレーニングは、高酸素環境の急性の効果として挙上回数もしくは力発揮時間が向上することが前提である。したがって、高

酸素環境を筋持久力トレーニングに応用するためには、高酸素環境による急性の効果が、筋持久力の種類によって異なるのかについて検討する必要がある。もしも、高酸素環境による急性の効果が、筋持久力の種類によって異なり、急性の効果として挙上回数もしくは力発揮時間の向上が認められない種類の筋持久力の存在が明らかとなった場合、その種類の筋持久力は高酸素環境下での筋持久力トレーニングに応用することができないと考えられる。

高酸素環境の急性の効果として挙上回数もしくは力発揮時間が向上することが評価されたら、実際に高酸素環境下での筋持久力に対するトレーニング実験を実施し、トレーニング効果を検討する必要がある。そして、新たな筋持久力トレーニング方法として、高酸素環境下での筋持久力トレーニングを社会に普及させるためには、高酸素環境下での筋持久力トレーニングと従来のトレーニング(通常酸素環境下での筋持久力トレーニング)の効果を比較検討し、高酸素環境下での筋持久力トレーニングの有用性を明らかにする必要がある。

高酸素環境や低酸素環境などの特殊酸素環境に対する生理応答には個人差があり、その効果の程度は形態的要素や体力的要素に関係すると先行研究で報告されている。上記の知見を考慮に入れると、高酸素環境が筋持久力に及ぼす効果にも個人差が生じ、その効果の個人差は形態的要素や体力的要素などが関係する可能性が考えられる。このことは、形態的要素や体力的要素が、高酸素環境下でのトレーニング実施時における、挙上回数もしくは力発揮時間の増加率に影響を及ぼすことを意味する。高酸素環境下での筋持久力トレーニングはこの増加率を応用するものであるため、増加率が大きい者程、筋持久力に対するトレーニング効果が高くなることが予想される。逆に、高酸素環境による増加率が小さい者は、通常酸素環境での筋持久力トレーニングとあまり変わらない可能性があるため、あえて高酸素環境で筋持久力トレーニングを実施する必要がないと考えられる。そのため、個人差に及ぼす要因を明らかにすることは、高酸素環境で筋持久力トレーニングを実施すべき者とあえて実施する必要がない者のスクリーニングに役立つ可能性があるため、有意義な研究であると考えられる。

上記の内容をまとめると、高酸素環境を筋持久力トレーニングに応用するためには、実際に高酸

素環境下でトレーニング実験を行い、その効果について検討する必要がある。また、このトレーニングは、トレーニング時の挙上回数もしくは力発揮時間が高酸素環境によって向上することが前提条件である。そのため、トレーニング実験を行う前に高酸素環境の急性の効果として挙上回数(動的筋持久力)と力発揮時間(静的筋持久力)が向上するかについて評価する必要がある。高酸素環境による急性の効果として、筋持久力が向上することが確認されたら、実際に高酸素環境でトレーニング実験を実施し、トレーニング効果について検討する必要がある。そして、高酸素環境が筋持久力に及ぼす効果に対して個人差が認められた場合、個人差の要因を明らかにする必要がある。

1.5. 本研究の目的

本研究では、高酸素環境下での筋持久力トレーニングの効果について明らかにすることを主目的とした。この主目的を達成するためには、実際に高酸素環境下でトレーニング実験を行い、その効果について検証する必要がある。また、このトレーニングは、トレーニング時の挙上回数もしくは力発揮時間が高酸素環境によって向上することが前提条件である。そのため、トレーニング実験を行う前に高酸素環境の急性の効果として挙上回数(動的筋持久力)と力発揮時間(静的筋持久力)が向上するかどうかについて検証する必要がある。さらに、高酸素環境による効果には個人差が生じる可能性がある。そこで、上記のことを確認するために以下の3つの研究を行った(図 1-9)。

研究 1. 高酸素環境が動的筋持久力に及ぼす急性の影響

研究 2. 高酸素環境が静的筋持久力に及ぼす急性の影響

研究 3. 高酸素環境下での筋持久力トレーニングの効果

研究 1 と 2 では、高酸素環境が動的筋持久力(研究 1)と静的筋持久力(研究 2)に及ぼす急性の影響について明らかにすることを目的とした。研究 3 では、高酸素環境下での筋持久力トレーニングの効果について明らかにすることを目的とした。

先行研究で報告されている内容などから、本研究では以下のような仮説を立てた。

1. 動的筋持久力と静的筋持久力では筋内の血液動態が異なるため、高酸素環境による急性の影響は、筋持久力の種類によって異なる。
2. 筋ポンプ作用が働き、筋内の血液循環が生じやすい動的筋持久力では、高酸素環境によって増加した酸素が活動筋に届くことが予想されるため、高酸素環境の急性の効果によって筋持久力が向上する。
3. 筋内圧の上昇による血流阻害が生じやすい、静的筋持久力では、高酸素環境によって増加した酸素が活動筋に届きにくいことが予想されるため、高酸素環境の急性の効果によって筋持久力が向上しない。

4. 高酸素環境下での筋持久カトレーニングは、通常酸素環境よりもトレーニング時の挙上回数もしくは力発揮時間が増加するため、トレーニング効果が高くなる。
5. 高酸素環境が筋持久力に及ぼす効果には個人差が生じ、その個人差は形態的要素や体力的要素と関係する。

高酸素環境下での筋持久カトレーニング

高酸素環境の効果によってトレーニング時の挙上回数もしくは力発揮時間が向上することが前提

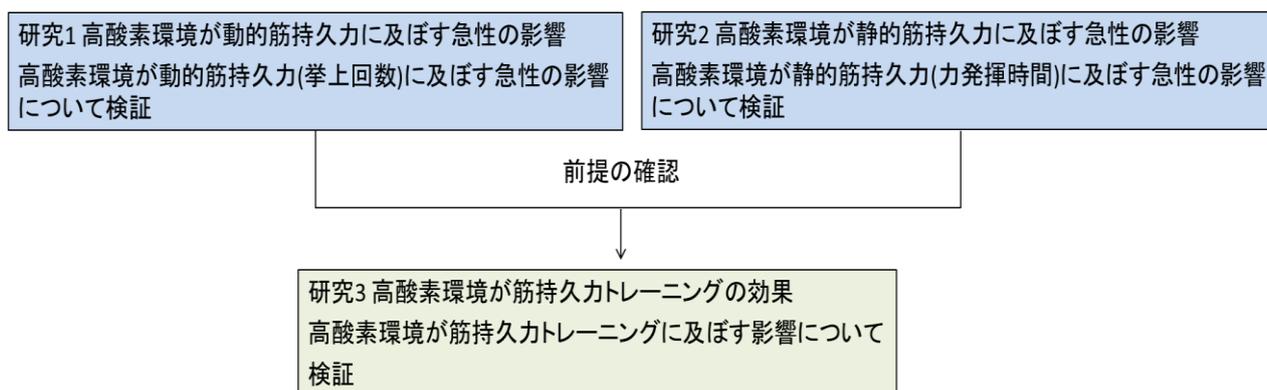


図 1-9. 本研究の構成

1.6. 本研究の意義

筋持久力は日常生活、スポーツの両方において重要な能力である。しかしながら、筋持久力に関しては、従来のトレーニング方法よりも効果的な方法が提案されていないのが現状である。したがって、従来よりも効果的なトレーニング方法を開発することによって、より効果的に筋持久力を向上させることが可能である。そのため、本研究で高酸素環境下での筋持久力トレーニングの効果について評価することが可能であれば、QOL の向上や更なる筋持久力向上を目指すアスリートなどに対し、効果的なトレーニングを提供することが可能であると考えられる。

現在までに行われてきた、高酸素環境が運動パフォーマンスに及ぼす影響について検討してきた研究の多くは、全身持久力や無酸素性パワーに及ぼす影響について検討した研究が多く、筋持久力に及ぼす影響について検討した研究は非常に少ない。また、筋持久力トレーニングに対する高酸素環境の効果について検討した研究は、私の知る限り一つもないのが現状である。したがって、本研究から得られた知見は、高酸素環境に関する研究分野に新たな知見を提供することが可能である。

1.7. 本論文の構成と各章の位置づけ

本論文は全 5 章から構成される(図 1-10)。

第 1 章では本研究の背景、目的および高酸素環境での筋持久カトレーニングに関する生理的機構について述べた。

第 2 章と第 3 章では高酸素環境を筋持久カトレーニングへ応用するための前提条件を確認するために実施した研究について述べる。第 2 章では研究 1「高酸素環境が動的筋持久力に及ぼす急性の影響」、第 3 章では研究 2「高酸素環境が静的筋持久力に及ぼす急性の影響」についての研究結果をそれぞれ述べる。高酸素環境下での筋持久カトレーニングは、トレーニング時の挙上回数(動的筋持久力)もしくは力発揮時間(静的筋持久力)が高酸素環境によって向上することが前提条件である。そこで、研究 1 と 2 を通し、前提条件を満たすか検証した。

第 4 章では高酸素環境を筋持久カトレーニングへの応用するために実施した研究である、研究 3「高酸素環境下での筋持久カトレーニングの効果」についての研究結果を述べる。本研究の主目的は高酸素環境下での筋持久カトレーニングについて評価することである。研究 3 では実際に高酸素環境下で筋持久カトレーニングを実施し、トレーニング効果を検証した。

第 5 章では本研究によって得られた結果についてまとめる。そして、本研究から得られた知見の社会への適用と今後さらに検討を要する課題について述べる。

第1章: 本研究全体の背景、目的

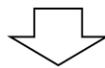
研究背景 筋持久力は日常生活、スポーツの両方において重要な能力

問題 筋持久力に対して従来の方法よりも効果的なトレーニング方法は確率されていない

新規性

- ・高酸素環境を利用すれば、従来の方法よりも効果的な筋持久力トレーニングが実施できる可能性あり
- ・高酸素環境が筋持久力に及ぼす影響についての研究は非常に少ない

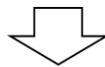
研究目的 **高酸素環境下での筋持久力トレーニングの効果について検証**



第2章&第3章: 高酸素環境を筋持久力トレーニングへ応用するための前提の確認

研究背景 高酸素環境を筋持久力トレーニングに応用するためには高酸素による急性の効果を検証する必要あり

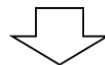
研究目的 高酸素環境が動的筋持久力(第2章)および静的筋持久力(第3章)に及ぼす急性の影響について検証



第4章: 高酸素環境を筋持久力トレーニングへ応用するための実験

研究背景 高酸素環境を筋持久力トレーニングへ応用するためには高酸素環境でのトレーニング効果を検証する必要あり

研究目的 高酸素環境での筋持久力トレーニングの効果について検証



第5章: 結語

実験結果のまとめ、本研究から得られた知見、社会への適用、今後の検討課題

図 1-10. 本論文の構成

1.8. 高酸素環境での筋持久カトレーニングに関する生理的機構

1.8.1. 筋持久力を決定する因子

筋持久力を決定する因子として、(1)筋に貯蔵されているエネルギー源、(2)筋への酸素運搬能力、(3)筋の酸素利用能力、(4)神経系の機能が挙げられる。

(1) 筋に貯蔵されているエネルギー源

筋が収縮し張力を発揮するためのエネルギーはアデノシン三リン酸(Adenosine triphosphate: ATP)がアデノシン二リン酸(Adenosine diphosphate: ADP)に分解する時に放出されるエネルギーでまかなえる。したがって、筋が強い収縮を繰り返すと筋中の ATP が減少する。ATP の再合成には、クレアチンリン酸のクレアチンとリン酸への分解およびグリコーゲンの分解によるエネルギーが利用されるが、運動強度が高くなるにともない、筋グリコーゲンの利用度が高まる。また、運動前の筋グリコーゲン量が多い程、疲労困憊に至る運動持続時間が長く、疲労しにくいことが報告されている(猪飼ら, 1965)。つまり、筋内のクレアチンリン酸やグリコーゲンの貯蔵量が筋持久力の能力に関係する。

(2) 筋への酸素運搬能力

筋収縮を生み出す ATP を長時間にわたって多量に再合成するためには有酸素代謝の電子伝達系への酸素の供給が必要である。筋への酸素の供給は血中のヘモグロビンにより行われるが、筋へ運搬されるヘモグロビンの量は筋の血流量によって決定される。つまり、筋内の血流量が多いほど、酸素が筋へ供給されるため、筋持久力は向上する。この筋内の血流量に関わるのが、毛細血管であり、筋持久力の向上には筋内の毛細血管密度を向上させる必要がある。

(3) 筋の酸素利用能力

筋収縮を長く続けるには、供給された酸素を利用して、ATPを再合成する必要がある。その働きにおいて重要な役割を担っているのがミトコンドリアである。そのため、筋持久力を向上させるためにはミトコンドリアの量を増やすことや活性化させることなどが重要である。

(4) 神経系の機能

力発揮を長時間持続するためには、先述した筋における生理学的因子(末梢性の因子)だけでなく、大脳皮質を含めた中枢神経系からの電気信号(インパルス)を筋に継続的に送ることが重要である。そのため、筋持久力の向上には、筋に対する酸素の運搬能力や利用能力といった末梢性の因子だけでなく、脳などの中枢性の疲労を抑制することも重要である。

筋持久力トレーニングなどの持続的トレーニングを行うと、①遅筋線維などの酸化系が優位な筋線維の肥大、②ミトコンドリアが大きくなり、数が増加、③毛細血管(密度)の増加、④酸化系や電子伝達系の酵素活性値の上昇が起こり、筋に貯蔵されるエネルギー源の節約、酸素運搬能力や酸素利用能力が向上することによって、筋持久力が向上する。

1.8.2. 高酸素環境での生理応答について

一般に、私達が生活している通常酸素環境（平地）では、空気中に含まれる酸素濃度は20.9%で、気圧は760 Torrである。生体はこの空気から酸素を取り込み、血液中に酸素を拡散する。ヒトの身体における酸素運搬の過程は、鼻や口を通して酸素を吸い込み、それが身体の組織や器官に到達するまでに起こる酸素分圧の変化によって決定される。私たちが生活している通常酸素環境(平地)における吸気酸素分圧(Partial pressure of inspired oxygen: P_{iO_2})は約150 Torrであるが、吸気が鼻や口から肺へ進むにつれて低下する。そのため、もともと約150 Torr あった P_{iO_2} は肺胞内(肺胞気)では約100 Torrまで低下する。一方で、全身から静脈血によって肺に戻った血液の酸素分圧(肺動脈の酸素分圧)は約40 Torrである。先述したように、肺胞内の酸素分圧は約100 Torrであり、肺胞内と肺動脈の酸素分圧に較差が生じる。すると、拡散の原理によって、肺胞内の酸素分子は肺の血液中へ拡散する(外呼吸; 図 1-11)。外呼吸が正常に行われた場合、血液中の酸素分圧は100 Torrとなり、酸素に富む血液となる。この酸素に富む血液こそ動脈血であり、この血液の酸素分圧が P_{aO_2} (動脈血酸素分圧)である。動脈血は肺静脈を経て心臓に運ばれ、その後全身を循環する。そして、この血液が骨格筋などの組織における毛細血管床に達すると、動脈血と組織の酸素分圧に較差が生じるため(P_{aO_2} は約100 Torr、組織の酸素分圧約40 Torr)、肺胞での外呼吸と同様に、酸素が毛細血管から組織へ拡散され(内呼吸)、拡散された酸素は組織で有酸素エネルギー産生に利用される。内呼吸によって、酸素に乏しくなった血液(約40 Torr)は静脈を通過して心臓に戻り、心臓から肺動脈を通して肺に戻った後、再び肺胞で外呼吸が行われ、上記の過程を経て酸素が運搬される(図 1-12)。

上述したように、私たちが吸った酸素は、肺での外呼吸により血液中に拡散され、動脈を通り、組織で有酸素エネルギー産生に利用される。組織への酸素の運搬は、ヘモグロビンと結合し酸素化ヘモグロビンとなり運搬される方法と血漿中に溶解し運搬される方法の2種類の方法で運搬される。前者を結合型酸素、後者を溶解型酸素という。一般成人の血中ヘモグロビン量は血液100 mLあたり12~17 g/dLであり、ヘモグロビンは1 gあたり1.34 mLの酸素を運搬できる。仮に血中ヘモグロビン

量を 15g/dL とした場合、血中のヘモグロビンには結合型酸素として 20.1mL/dL(15g/dL × 1.34mL/g)の酸素運搬能力がある。しかしながら、安静時の動脈血中のヘモグロビンの酸素飽和度を示す動脈血酸素飽和度(Arterial oxygen saturation: SaO₂)は約 98%なので、実際にはヘモグロビンによって 100mL あたり 19.7mL(20.1ml × 0.98)程度の酸素が運搬されていることになる。一方で、溶解型酸素として血漿中に溶解して運搬される酸素の量は、血液 100mL あたり約 0.3mL である。したがって、両者を合わせると血液 100mL あたり約 20mL の酸素を運搬しており、その大半はヘモグロビンと結合した結合型酸素によって運ばれていることになる。

通常酸素環境下では動脈血中の酸素の量は、ヘモグロビンの量などに規定されるが、高酸素を吸入すると通常酸素環境下で約 98%であった SaO₂ が 100%となり、加えて血液に溶解する酸素(溶解型酸素)の量が増加する。SaO₂ と PaO₂ の関係は酸素解離曲線(図 1-13)から表現される。酸素解離曲線からみてもわかるように、高酸素吸入によって PaO₂ を高め続けたとしても、SaO₂ は途中で飽和状態(100%)となるため、結合型酸素の量は頭打ちとなる。一方、溶解型酸素は「温度が一定であれば気体が液体に溶解する量は、気体の圧力(分圧)に比例する」というヘンリーの法則に従い、高酸素吸入による PaO₂ の上昇に従い増加する(酸素分圧 1Torr につき 0.003mL 溶解)。一方で、高酸素環境によって SaO₂ が飽和状態になると、結合型酸素の量は変化しなくなる。したがって、高酸素環境による、CaO₂ などの増加は、溶解型酸素の増加による影響が大きい。

高酸素による PaO₂ や CaO₂ の増加は酸素を消費する組織での内呼吸を活発化する。前述の通り、組織内の酸素分圧は約 40 Torr であるが、高酸素環境によって PaO₂ が上昇すると、組織との酸素分圧の較差が通常酸素の時よりも大きくなる。酸素分圧の較差が大きくなると、組織への酸素の拡散が引き起りやすくなるため、組織に対しより多くの酸素を供給できる。そのため、酸素分圧の較差が大きくなる高酸素環境では、通常酸素環境に比べ、組織により多くの酸素を供給することができる。その結果、高酸素環境下で運動を実施すると、有酸素エネルギーとして利用可能な酸素が増加するため、(1)中枢性の疲労抑制(Nielsen et al., 1999)、(2) H⁺濃度の増加の抑制 (Welch, 1982)、(3)より速いクレアチンリン酸の再合成(Eiken et al., 1987)、(4)筋グリコーゲンの分解抑制

(Stellingwerff et al., 2006)などが生じ、研究小史で述べたような運動パフォーマンスの向上が生じると考えられる。

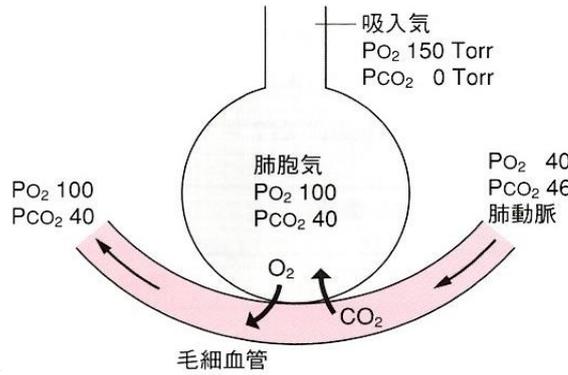


図 1-11. 外呼吸

肺胞気と肺動脈の酸素分圧(図の PO_2)に較差が生じるため、拡散の原理により、肺胞気から肺の血液に酸素が拡散される。(三宅 よくわかるより血液ガスより引用)

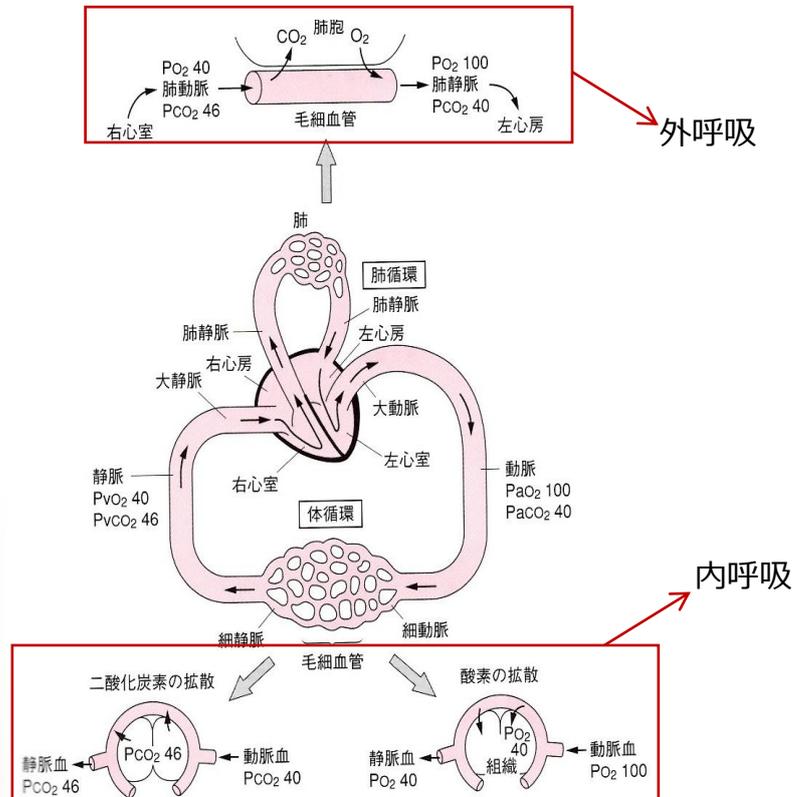


図 1-12. 体内での酸素分圧の変動 (三宅 よくわかるより血液ガスより引用、筆者一部改変)

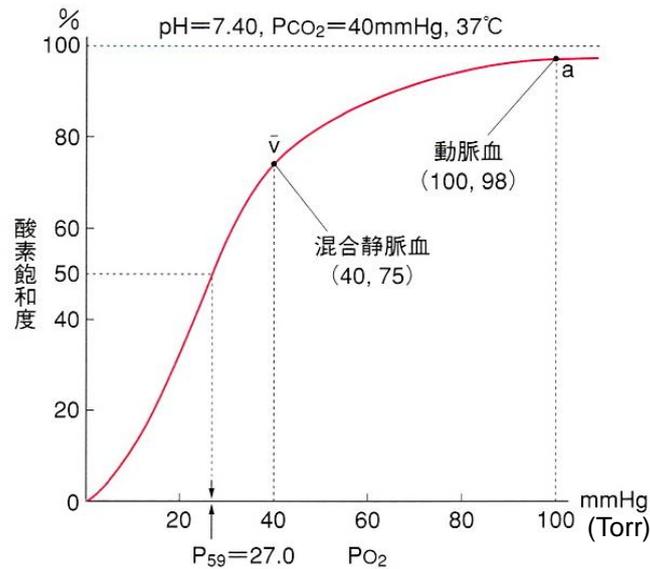


図 1-13. 酸素解離曲線

高酸素環境によって、 PaO_2 が増加したとしても、 SaO_2 は飽和状態になるため、結合型酸素の量は頭打ちになる。(三宅 よくわかるより血液ガスより引用、筆者一部改変)

1.8.3. 本研究で用いる酸素環境について

高酸素環境には、高圧高酸素環境と常圧高酸素環境がある。高圧高酸素環境は、高気圧チャンバーなどを用いて気圧そのものを高めることでつくられる。空気あるいは高酸素ガスの気圧を高めることで、吸気中の酸素分圧を高めることができる。一方、常圧高酸素環境は、吸気の気圧は変えずに酸素濃度を高めることで、吸気中の酸素分圧を高める方法である。どちらの方法も、吸気中の酸素分圧が高まることから、ヘンリーの法則に従い、 PaO_2 や CaO_2 の上昇が生じる。

高圧高酸素環境では、気圧と酸素濃度が可変のため、常圧高酸素環境に比べ、吸気中の酸素分圧をより高めることができるという利点がある。しかしながら、実際に人が利用することを考えるとデメリットもある。例えば、気圧の変動により中耳、内耳、副鼻腔、肺などに気圧外傷が発生する恐れがある(Hadanny, 2016)。また、高い酸素分圧により、活性酸素が産生され、視野傷害、意識障害や痙攣などの中枢神経障害の酸素中毒が発生する可能性も指摘されている(石田ら, 2010)。一方で、常圧高酸素環境では、気圧がかからない分、上記のような気圧外傷が発生する恐れがな

いという利点がある。以上の理由から、体への安全性を考慮し、本研究では常圧高酸素環境を採用した。

酸素を体に供給する方法として、酸素マスク(図 1-14)とダグラスバッグ(図 1-15)を用いて供給する方法と環境シミュレーター室(図 1-16)のように部屋全体を高酸素環境下にした環境を用いて供給する方法の 2 つの方法が挙げられる。いずれの方法でも、気圧に関係なく、酸素マスクを外したりシミュレーター室の扉を開けたりすることで、高酸素環境をすぐに中断することができるため、万が一の体調不良や怪我が生じた際にも早急に対応することができるという利点もある。しかしながら、酸素マスクとダグラスバッグを用いて酸素を供給する方法では、これら装置の着用によるストレスが生じ、運動パフォーマンスに悪影響を及ぼす可能性が挙げられる。一方で、環境シミュレーター室を用いた場合、設定可能な酸素濃度は限られるが、部屋全体の酸素濃度を変化させることが可能であるため、酸素マスクやダグラスバッグなどの装置の着用によるストレスが生じず、運動を実施することが可能である。本研究では、運動パフォーマンスへの悪影響を防ぐため、酸素を体に酸素を供給する方法として環境シミュレーター室を用いた方法を採用した。

本研究で用いる常圧高酸素環境の酸素濃度は 30%を選択した。この酸素濃度は酸素中毒や DNA の酸化障害の発症の危険性がほとんどなく、なおかつ運動パフォーマンスを向上させる可能性があると考えられるためである。酸素中毒は、濃度 100%の酸素を 2 気圧以上で摂取した場合に生じる可能性が高いといわれており、今回用いる常酸素下で酸素濃度 30%の酸素を吸引するという条件では、発症する危険性は低いといえる。私たちの研究室のパイロット・スタディでは、濃度 100%の酸素を 1.3 気圧で 60 分間摂取する条件で実験を行ったが、その際にも急性の酸素中毒の発症はなく、体調不良を訴える被検者もなかった。また、同じ実験条件で DNA の酸化障害についても合わせて調べたが、酸化障害の指標に有意な変化は認められなかった。したがって、上記のパイロット・スタディよりも気圧と酸素濃度が低い本研究の実験条件では、高酸素による身体への悪影響は極めて低いと考えられる。一方で、運動パフォーマンスについては、酸素濃度 30%以下の高酸素環境で運動パフォーマンスや運動パフォーマンスに関わる生理指標が向上したという報告が数多くされてい

る(Grataloup et al., 2005, Nielsen et al., 1999; Powers et al., 1989)。例えば、本研究と同様な酸素濃度である 30%の高酸素を吸引させながら、全力のローイング動作を実施したら、発揮パワーが通常酸素を吸引した時よりも向上したと報告されている(Nielsen et al., 1999)。本研究よりも酸素濃度の低い 26%の高酸素を用いた研究では、鍛錬された選手に対し、高酸素を摂取させたら、通常酸素よりも $\dot{V}O_{2max}$ と SaO_2 が有意に向上したと報告している。また、本研究室の先行研究では、常圧の酸素濃度 30%と 21%のガスを 5 分間吸入させた後の PaO_2 の変化を検討したところ、酸素濃度 21%のガスを吸入させた条件では有意な変化が認められなかったが、30%のガスを吸わせた条件では PaO_2 の値が有意に向上したことを確認した (岡根谷, 2013; 図 1-17)。先の先行研究と考えると、酸素濃度 30%でも PaO_2 を上昇させ、運動パフォーマンスを向上させる可能性が考えられる。これらの知見を考慮にいと、酸素濃度 30%の常圧高酸素環境は運動パフォーマンス向上に対して十分に効果があると考えられる。そこで、本研究では環境シミュレーター室を用いた酸素濃度 30%の常圧高酸素環境を採用した。

高酸素環境での筋持久カトレーニングを社会に普及させるためには、安全に運動 (トレーニング) が実施でき、かつ環境として設定することが困難でなく、運動としての効果が高いことが望まれる。本研究の実験条件は、それらを満たす実験条件であるといえる。



図 1-14. 酸素マスク



図 1-15. ダグラスバッグ



図 1-16. 環境シミュレーター室

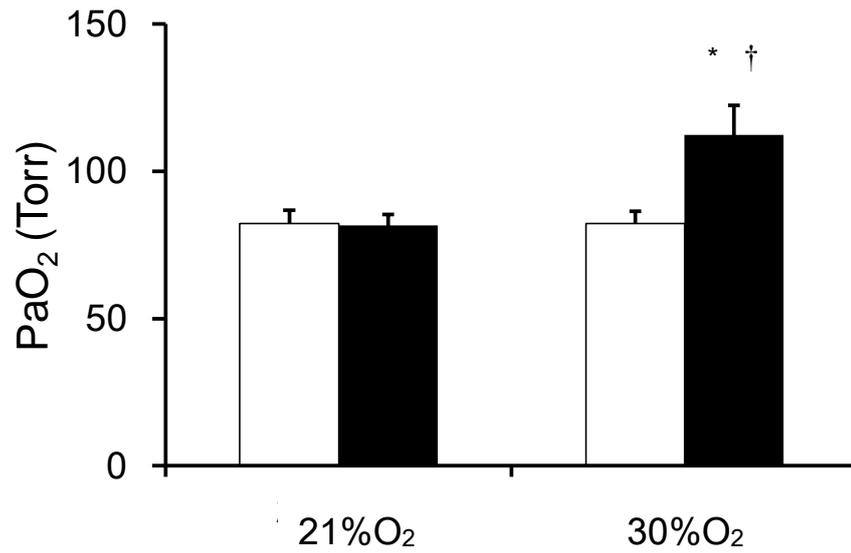


図 1-17. ガス吸引前後の PaO₂ の変化 (岡根谷 2013 より引用)

□はガス吸引前、■はガス吸引後の PaO₂ を示す。

*: $P < 0.05$ vs ガス吸引前 †: $P < 0.05$ vs 21%O₂

第2章

高酸素環境が動的筋持久力に及ぼす急性の影響

第2章は単行本もしくは雑誌掲載等の形で刊行される予定があるため、インターネット公表できません。

第3章

高酸素環境が静的筋持久力に及ぼす急性の影響

第3章は単行本もしくは雑誌掲載等の形で刊行される予定があるため、インターネット公表できません。

第4章

高酸素環境下での筋持久カトレーニングの効果

第4章は単行本もしくは雑誌掲載等の形で刊行される予定があるため、インターネット公表できません。

第5章 結語

5.1. 実験結果のまとめ

本研究では高酸素環境下での筋持久力トレーニングの効果について明らかにすることを主目的とした。この主目的を達成するためには、実際に高酸素環境下でトレーニング実験を行い、その効果について検証する必要がある。また、このトレーニングは、トレーニング時の挙上回数もしくは力発揮時間が高酸素環境によって向上することが前提条件である。そのため、トレーニング実験を行う前に高酸素環境の急性の効果として挙上回数(動的筋持久力)と力発揮時間(静的筋持久力)が向上するかどうかについて検証する必要がある。そこでこれらのことを確認するために、本研究では3つの研究を行った。

研究1では、高酸素環境が動的筋持久力に及ぼす急性の影響について明らかにすることを目的に実験を行った。その結果、高酸素環境の急性の効果として動的筋持久力を向上させることが明らかとなった。また、高酸素環境による効果が認められた者に関しては、高酸素環境下ではエクササイズ後半における筋活動水準と ΔO_2Hb の上昇が通常酸素環境下に比べて緩やかに生じた。高酸素環境による急性の動的筋持久力向上効果は全身持久力と筋持久力に依存することが確認された。

研究2では、高酸素環境が静的筋持久力に及ぼす急性の影響について明らかにすることを目的に実験を行った。その結果、高酸素環境の急性の影響によって、静的筋持久力が向上する者と低下する者がおり、全体で見ると、高酸素環境は静的筋持久力に対して統計的に有意な急性の影響を及ぼさないことを明らかにした。このような効果の違いはエクササイズ中の活動筋への酸素供給の程度が関係している可能性が示唆された。

研究3では、高酸素環境下での筋持久力トレーニングの効果について明らかにすることを目的とした。その結果、高酸素環境での筋持久力トレーニングは通常酸素環境でのトレーニングよりもトレ

ニング効果が高い傾向にあった。両酸素環境間でトレーニング効果に統計的な有意差は認められなかったが、その要因は高酸素環境の効果に大きな個人差があるためと考えられた。さらに、高酸素環境での筋持久力のトレーニング効果はトレーニング開始前における高酸素環境による急性の筋持久力向上効果に依存することが示唆された。

これらの研究結果から、新たな筋持久力トレーニング法として提案した高酸素環境下での筋持久力トレーニングは高酸素環境による急性の効果が高い者に対しては、極めて効果的な筋持久力のトレーニングに成り得ることが示唆された。したがって、高酸素環境による急性の筋持久力向上効果が認められる者に対しては、高酸素環境で筋持久力トレーニングを実施することが薦められる。

5.2. 本研究から得られた知見

高酸素環境に関する先行研究の多くは高酸素環境が全身持久力に及ぼす影響について検討した研究であり、筋持久力に及ぼす影響について検討した研究はほとんどない。また、高酸素環境が筋持久力に及ぼす影響の個人差について検討した研究は私の知る限りないので現状である。

本研究は高酸素環境の急性の効果として動的筋持久力を向上させるが、静的筋持久力に対しては統計的に有意な影響を及ぼさないことを明らかとした。また、動的筋持久力に及ぼす効果は全身持久力と筋持久力に依存することも確認した。一方で、静的筋持久力に及ぼす効果は人によって異なり、その違いはエクササイズ中の活動筋への酸素供給の程度に依存していることを確認した。そして、高酸素環境が筋持久力トレーニングに及ぼす効果を確認するために、高酸素環境と通常酸素環境で筋持久力トレーニングを実施し、トレーニング効果を比較検討した。その結果、高酸素環境でのトレーニング効果は通常酸素環境よりも大きい傾向があり、その効果はトレーニング前の高酸素環境による急性の効果に依存することが実証された。

5.3. 本研究で得られた知見の社会への適用

本研究によって、高酸素環境下での筋持久カトレーニングが従来のトレーニングよりも効果的なトレーニングに成り得る可能性を示すことができた。そのため、次のようなトレーニング方法を提案することができる。

まず、高酸素による急性の筋持久力向上効果が高いか確認を行う。本研究では高酸素による急性の筋持久力向上効果が約 15%以上認められた者は、筋持久力の劇的な向上(700%以上のトレーニング効果)が認められた(図 5-1)。したがって、15%を 1 つの目安として、高酸素による急性の筋持久力向上効果が大きく認められた者は高酸素環境で筋持久カトレーニングを行うことによって、通常酸素環境でのトレーニングよりもトレーニング効果が高くなる可能性が大いにある。そのため、このトレーニング方法は、これまで筋持久カトレーニングを行っていない一般の人に加え、既に筋持久カトレーニングを行っているが、筋持久力が伸び悩んでいるトレーニング実践者やさらなる筋持久力向上を目指すトップレベルのアスリートにも応用することができる可能性がある。

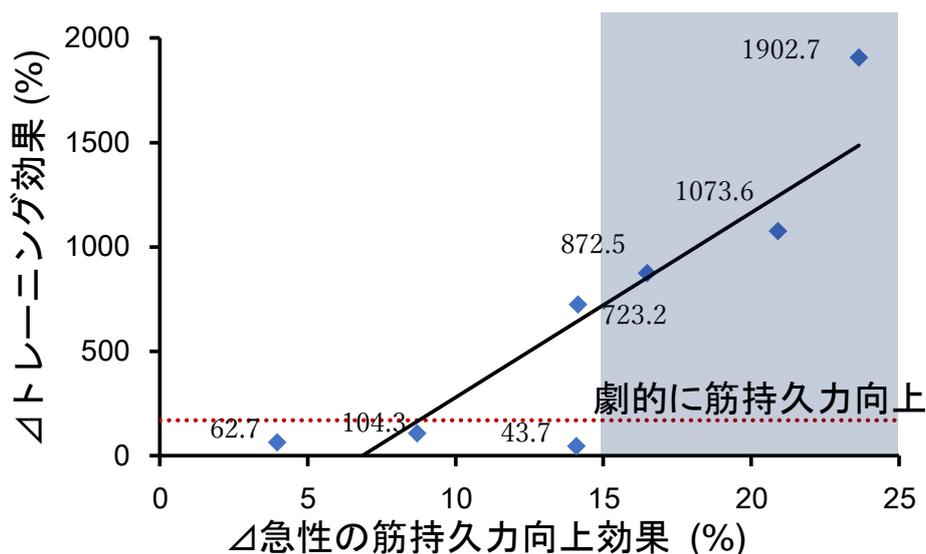


図 5-1. 高酸素条件でトレーニングを行った群におけるトレーニング効果と高酸素による急性の筋持久力向上の関係

縦軸に 6 週間のトレーニングによるトレーニング効果、横軸にトレーニング開始前における高酸素による急性の筋持久力向上効果を示す。プロットに表記されている数字は各被検者のトレーニング効果を示す。赤色の点線は通常酸素条件でトレーニングを実施した人たちのトレーニング効果の平均値を示す(171.2%)

5.4. 今後の検討課題

本研究のトレーニング実験の被検者は一般の健康な成人男性のみであった。高酸素環境下での筋持久力トレーニング法を社会実装するためには、本研究で被検者として採用した一般の健康な成人男性だけでなく、様々な人に対して本研究と同様な結果が得られるか確認する必要がある。したがって、今後は女性、高齢者、アスリートといった本研究の被検者と年齢、性別、運動能力が異なる被検者を対象とし検討を行う必要がある。

また、本研究では高酸素環境による急性の動的筋持久力向上効果が高い者ほど、トレーニング効果が高い結果を示した。一方で、高酸素環境による急性の効果が低い者は高いトレーニング効果を得ることができなかった。また、急性の動的筋持久力向上効果の程度は、全身持久力と筋持久力に依存していた。そのため、もともと高酸素環境による急性の効果が低い者でも、全身持久力と筋持久力を向上させることによって、急性の効果が高まり、高酸素環境下でのトレーニング効果が高くなる可能性が考えられる。したがって、より多くの対象に高酸素環境のトレーニングを応用させるためには、この点も明らかにする必要がある。

謝辞

本研究は、多くの方々に支えられ成り立ちました。ここに感謝の意を表します。

指導教官である東京大学大学院総合文化研究科・新領域創成科学研究科の石井直方先生には、修士2年間、博士5年間の計7年間の長きにわたり多大なるご指導を賜りました。研究の方法論やデータの解釈などについて幅広い視点から多くのことを指導して頂き、心より御礼申し上げます。

東京大学大学院新領域創成科学研究科の福崎先生には、修士2年間、博士5年間の計7年間の長きにわたり多大なるご指導を賜りました。特に、本論文と投稿論文は先生の協力なしでは完成しませんでした。毎晩遅くまでご指導して下さいありがとうございました。心より御礼申し上げます。

東京大学大学院新領域創成科学研究科の割澤伸一先生、小竹元基先生、東京大学大学院総合文化研究科の久保啓太郎先生には、ご多忙の中、本論文のために時間を割いて頂きました。厚く御礼申し上げます。

東京大学大学院新領域創成科学研究科の飛原英治先生には、環境シミュレーター室など、実験に不可欠な実験環境や装置の修理、学会発表のサポートなどにおいてご尽力頂きました。この場を借りてお礼申し上げます。

東京大学スポーツ先端科学研究拠点の田丸博朗特任研究員には、研究内容について貴重なご意見、ご助言を賜りました。また、挫けそうになった時に、いつも私を励ましてくれました。この場を借りてお礼申し上げます。

秘書の近松智津子様と特任研究員の Leetawesup Kannika 様には、実験に使用する機器や消耗品の発注、被験者への謝金の支払い手続きなど、迅速な事務手続きをして頂きました。この場を借りてお礼申し上げます。

本研究に参加頂いた被検者の皆さまには、大変お世話になりました。皆さまのご協力なくしては、

本研究は成り立ちませんでした。この場を借りてお礼申し上げます。

健康スポーツ科学研究室の皆様には、研究内容についての貴重なご意見、ご助言を賜りました。研究室の皆様がいたおかげで、大学院での生活がとても有意義なものとなりました。この場を借りて深く感謝致します。

そして最後に、7年間の大学院生活を支えて頂いた母親とおそらく天国から見守っているであろう父親に感謝致します。

引用文献

- **Abe T, Kearns CF, Fukunaga T.** Sex differences in whole body skeletal muscle mass measured by magnetic resonance imaging and its distribution in young Japanese adults. *Br J Sports Med* 37: 436-40, 2003.
- **American College of Sports Medicine.** American College of Sports Medicine position stand. Progression models in resistance training for healthy adults. *Med Sci Sports Exerc* 41: 687-708, 2009.
- **Adams RP, Welch HG.** Oxygen uptake, acid-base status, and performance with varied inspired oxygen fractions. *J Appl Physiol Respir Environ Exerc Physiol* 49: 863-8, 1980.
- **Adams RP, Cashman PA, Young JC.** Effect of hyperoxia on substrate utilization during intense submaximal exercise. *J Appl Physiol (1985)* 61: 523-9, 1986.
- **Amann M, Romer LM, Pegelow DF, Jacques AJ, Hess CJ, Dempsey JA.** Effects of arterial oxygen content on peripheral locomotor muscle fatigue. *J Appl Physiol (1985)* 101: 119-27, 2006.
- **Armstrong WJ, Jacks DE, Sowash J, Andres FF.,** The effect of training while breathing oxygen-enriched air on time-to-exhaustion and aerobic capacity. *J Exerc Physiol Online* 3: 23-36, 2000.
- **Allen PD, Pandolf KB.** Perceived exertion associated with breathing hyperoxic mixtures during submaximal work. *Med Sci Sports* 9: 122-7, 1977.
- **Ball N, Scurr J.** An assessment of the reliability and standardisation of tests used to elicit reference muscular actions for electromyographical normalisation. *J Electromyogr Kinesiol* 20: 81-88, 2010.
- **Baechle TR, Earle RW.** Chapter 1. Structure and Function of the Muscular, Neuromuscular, Cardiovascular, and Respiratory Systems in *Essentials of strength training and conditioning 3rd ed.* Human Kinetics, 2008.
- **Bassett DR, Jr., Howley ET.** Limiting factors for maximum oxygen uptake and determinants of endurance performance. *Med Sci Sports Exerc* 32: 70-84, 2000.
- **Bemben MG.** Age-related alterations in muscular endurance. *Sports Med* 25: 259-69, 1998.
- **Borg GA.** Perceived exertion: a note on "history" and methods. *Med Sci Sports* 5: 90-3, 1973.
- **Burwell CS, Robin ED, Whaley RD, Bickelmann AG.** Extreme obesity associated with

alveolar hypoventilation--a Pickwickian Syndrome. *Obes Res* 2: 390-7, 1994.

- **Casey DP, Joyner MJ, Claus PL, Curry TB.** Hyperbaric hyperoxia reduces exercising forearm blood flow in humans. *Am J Physiol Heart Circ Physiol* 300: H1892-7, 2011.
- **Campos GE, Luecke TJ, Wendeln HK, Toma K, Hagerman FC, Murray TF, Ragg KE, Ratamess NA, Kraemer WJ, Staron RS.** Muscular adaptations in response to three different resistance-training regimens: specificity of repetition maximum training zones. *Eur J Appl Physiol* 88: 50-60, 2002.
- **Charles LD.** Chapter 4 *Health-related physical fitness testing and interpretation in ACSM's guidelines for exercise testing and prescription 10th ed.* Wolters Kluwer, 2018.
- **Chick TW, Stark DM, Murata GH.** Hyperoxic training increases work capacity after maximal training at moderate altitude. *Chest* 104: 1759-62, 1993.
- **Cohen J.** Chapter 2. *The t Test for Means in Statistical Power Analysis for the Behavioral Sciences. 2nd ed.* Lawrence Erlbaum Associates, 1988.
- **DeLorey DS, Kowalchuk JM, Paterson DH.** Relationship between pulmonary O₂ uptake kinetics and muscle deoxygenation during moderate-intensity exercise. *J Appl Physiol (1985)* 95: 113-20, 2003.
- **Dempsey JA, Hanson PG, Henderson KS.** Exercise-induced arterial hypoxaemia in healthy human subjects at sea level. *J Physiol* 355: 161-75, 1984.
- **Deschenes MR, Garber CE.** Chapter 6 *General Principles of Exercise Prescription in ACSM's guidelines for exercise testing and prescription 10th ed.* Wolters Kluwer, 2018.
- **Eiken O, Tesch PA.** Effects of hyperoxia and hypoxia on dynamic and sustained static performance of the human quadriceps muscle. *Acta Physiol Scand* 122: 629-33, 1984.
- **Eiken O, Hesser CM, Lind F, Thorsson A, Tesch PA.** Human skeletal muscle function and metabolism during intense exercise at high O₂ and N₂ pressures. *J Appl Physiol (1985)* 63: 571-5, 1987.
- **Eklom B, Huot R, Stein EM, Thorstensson AT.** Effect of changes in arterial oxygen content on circulation and physical performance. *J Appl Physiol* 39: 71-75, 1975.
- **Faul F, Erdfelder E, Lang AG, Buchner A.** G*Power 3: a flexible statistical power analysis program for the social, behavioral, and biomedical sciences. *Behav Res Methods* 39: 175-91, 2007.
- **Friedmann B, Kinscherf R, Borisch S, Richter G, Bärtsch P, Billeter R.** Effects of low-resistance/high-repetition strength training in hypoxia on muscle structure and gene expression. *Pflugers Arch* 446: 742-51, 2003.
- **Ge RL, Stone JA, Levine BD, Babb TG.** Exaggerated respiratory chemosensitivity and association with SaO₂ level at 3568 m in obesity. *Respir Physiol Neurobiol* 146: 47-54. 2005.

- **Grassi B, Pogliaghi S, Rampichini S, Quaresima V, Ferrari M, Marconi C, Cerretelli P.** Muscle oxygenation and pulmonary gas exchange kinetics during cycling exercise on-transitions in humans. *J Appl Physiol (1985)* 95: 149-58, 2003.
- **Grataloup O, Prieur F, Busso T, Castells J, Favier FB, Denis C, Benoit H.** Effect of hyperoxia on maximal O₂ uptake in exercise-induced arterial hypoxaemic subjects. *Eur J Appl Physiol* 94: 641-45, 2005.
- **Hadanny A, Meir O, Bechor Y, Fishlev G, Bergan J, Efrati S.** The safety of hyperbaric oxygen treatment--retrospective analysis in 2,334 patients. *Undersea Hyperb Med* 43: 113-22, 2016.
- **Harms CA, McClaran SR, Nickele GA, Pegelow DF, Nelson WB, Dempsey JA.** Effect of exercise-induced arterial O₂ desaturation on $\dot{V}O_{2max}$ in women. *Med Sci Sports Exerc* 32: 1101-8, 2000.
- **Héraud N, Prefaut C, Durand F, Varray A.** Does correction of exercise-induced desaturation by O₂ always improve exercise tolerance in COPD? A preliminary study. *Respir Med* 102: 1276-86, 2008.
- **Hill AV,** The heat of shortening and the dynamic constants of muscle, *Proc.Roy. Soc B*126: 136-95, 1938.
- **Ho JY, Kuo TY, Liu KL, Dong XY, Tung K.** Combining normobaric hypoxia with short-term resistance training has no additive beneficial effect on muscular performance and body composition. *J Strength Cond Res* 28: 935-41, 2014.
- **Hogan MC, Cox RH, Welch HG.** Lactate accumulation during incremental exercise with varied inspired oxygen fractions. *J Appl Physiol Respir Environ Exerc Physiol* 55: 1134-40, 1983.
- **Houssiere A, Najem B, Cuylits N, Cuypers S, Naeije R, van de Borne P.** Hyperoxia enhances metaboreflex sensitivity during static exercise in humans. *Am J Physiol Heart Circ Physiol* 291: H210–5, 2006.
- **Hoppeler H.** Exercise-induced ultrastructural changes in skeletal muscle. *Int J Sports Med* 7: 187-204, 1986.
- **Howald H, Hoppeler H, Claassen H, Mathieu O, Straub R.** Influences of endurance training on the ultrastructural composition of the different muscle fiber types in humans. *Pflugers Arch* 403: 369-76, 1985.
- **Humphreys PW, Lind AR.** The blood flow through active and inactive muscles of the forearm during sustained hand-grip contractions. *J Physiol* 166: 120-35, 1963.
- **Ikai M.** Physical fitness studies in Japan. *Japan Journal of Physical Education, Health and*

Sport Sciences 6: 1-14, 1962.

- 猪飼 道夫, 石井 喜八, 中村 淳子. 血流量からみた筋持久力 III. 体育の科学 15: 334-340, 1965.
- 猪飼 道夫, 石井 喜八, 中村 淳子, 田口 貞善. 筋持久力のトレーニング. 体力科学 17: 297, 1967.
- 石田 等, 立原 敬一, 諏訪 邦夫. 高気圧療法の現状. 帝京短期大学紀要 16: 145-49, 2010.
- 石河 利寛, 竹宮 隆. 運動生理学シリーズ 持久力の科学. 杏林書院, 1994.
- 加賀谷 淳子. 筋持久力トレーニング負荷の研究. 体力科学 19: 146, 1970.
- 加賀谷 淳子. 身体運動の生理学 第1版, 杏林書院, 1975.
- Kilding AE, Wood M, Sequira G, Bonetti DL. Effect of hyperoxic-supplemented interval training on endurance performance in trained cyclists. *Int J Sports Med* 33: 359-63, 2012.
- 川久保 清(編). 健康運動指導士養成講習会テキスト, 南江堂, 2016.
- Kon M, Ikeda T, Homma T, Akimoto T, Suzuki Y, Kawahara T. Effects of acute hypoxia on metabolic and hormonal responses to resistance exercise. *Med Sci Sports Exer* 42: 1279-85. 2010.
- Kon M, Ohiwa N, Honda A, Matsubayashi T, Ikeda T, Akimoto T, Suzuki Y, Hirano Y, Russell AP. Effects of systemic hypoxia on human muscular adaptations to resistance exercise training. *Physiol Rep* 6: e12033, 2014.
- Kunitomo F, Kimura H, Tatsumi K, Kuriyama T, Watanabe S, Honda Y. Sex differences in awake ventilatory drive and abnormal breathing during sleep in eucapnic obesity. *Chest*. 93: 968-76, 1988.
- Kurobe K, Huang Z, Nishiwaki M, Yamamoto M, Kanehisa H, Ogita F. Effects of resistance training under hypoxic conditions on muscle hypertrophy and strength. *Clin Physiol Funct Imaging* 35: 197-202, 2015.
- Lippold OCJ, Redfearn JWT, Vučo J. The electromyography of fatigue. *Ergonomics* 3: 121-31, 1960.
- Linnarsson D, Karlsson J, Fagraeus L, Saltin B. Muscle metabolites and oxygen deficit with exercise in hypoxia and hyperoxia. *J Appl Physiol* 36: 399-402, 1974.
- Linossier MT, Dormois D, Arsac L, Denis C, Gay JP, Geysant A, Lacour R. Effect of hyperoxia on aerobic and anaerobic performances and muscle metabolism during maximal

- cycling exercise. *Acta Physiol Scand* 168: 403-11, 2000.
- **Manimmanakorn A, Hamlin MJ, Ross JJ, Taylor R, Manimmanakorn N.** Effects of low-load resistance training combined with blood flow restriction or hypoxia on muscle function and performance in netball athletes. *J Sci Med Sport* 16: 337-42, 2013.
 - **水本 篤, 竹内 理.** 研究論文における効果量の報告のために -基本的概念と注意点-. 関西英語教育学会紀要『英語教育研究』31: 57-66, 2008.
 - **三宅 修司.** よくわかる血液ガス, 中外医学社, 2007.
 - **Monod H, Scherrer J.** The work capacity of synergic muscular group. *Ergonomics* 8: 329-38, 1965.
 - **Moritani T, Muro M, Nagata A.** Intramuscular and surface electromyogram changes during muscle fatigue. *J Appl Physiol (1985)* 60: 1179-85, 1986.
 - **Mourtzakis M, Gonzalez-Alonso J, Graham TE, Saltin B.** Hemodynamics and O₂ uptake during maximal knee extensor exercise in untrained and trained human quadriceps muscle: effects of hyperoxia. *J Appl Physiol (1985)* 97: 1796-1802, 2004.
 - **Nielsen HB, Boushel R, Madsen P, Secher NH.** Cerebral desaturation during exercise reversed by O₂ supplementation. *Am J Physiol* 277: H1045-52, 1999.
 - **Nishimura A, Sugita M, Kato K, Fukuda A, Sudo A, Uchida A.** Hypoxia increases muscle hypertrophy induced by resistance training. *Int J Sports Physiol Perform* 5: 497-508, 2010.
 - **岡根谷真平.** 高酸素環境が運動時生理応答に与える影響とその個人差の検討. 東京大学大学院新領域創成科学研究科 修士学位論文, 2013.
 - **Pate RR.** Chapter 1 Health Fitness in Physical education and sport for the secondary school student Reston, Va, 1983.
 - **Perry CG, Reid J, Perry W, Wilson BA.** Effects of hyperoxic training on performance and cardiorespiratory response to exercise. *Med Sci Sports Exerc.* 37: 1175-9, 2005.
 - **Plet J, Pedersen PK, Jensen FB, Hansen JK.** Increased working capacity with hyperoxia in humans. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol* 65: 171-7, 1992.
 - **Ploutz-Snyder LL, Simoneau JA, Gilders RM, Staron RS, Hagerman FC.** Cardiorespiratory and metabolic adaptations to hyperoxic training. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol* 73: 38-48, 1996.
 - **Powers SK, Lawler J, Dempsey JA, Dodd S, Landry G.** Effects of incomplete pulmonary gas exchange on $\dot{V}O_{2max}$. *J Appl Physiol (1985)* 66: 2491-5, 1989.

- **Przyklenk A, Aussieker T, Gutmann B, Schiffer T, Brinkmann C, Strüder HK, Bloch W, Mierau A, Gehlert S.** Effects of Endurance Exercise Bouts in Hypoxia, Hyperoxia, and Normoxia on mTOR-Related Protein Signaling in Human Skeletal Muscle. *J Strength Cond Res* Epub ahead of print, 2018.
- **Ranadive SM, Joyner MJ, Walker BG, Taylor JL, Casey DP.** Effect of vitamin C on hyperoxia-induced vasoconstriction in exercising skeletal muscle. *J Appl Physiol (1985)* 117: 1207-11, 2014.
- **Richardson RS, Leigh JS, Wagner PD, Noyszewski EA.** Cellular PO₂ as a determinant of maximal mitochondrial O₂ consumption in trained human skeletal muscle. *J Appl Physiol (1985)* 87: 325-31, 1999.
- **Sale DG.** Influence of exercise and training on motor unit activation. *Exerc Sport Sci Rev* 15: 95-151, 1987.
- **Saltin B.** Hemodynamic adaptations to exercise. *Am J Cardiol* 55: 42D-7D, 1985.
- **Scribbans TD, Edgett BA, Vorobej K, Mitchell AS, Joannis SD, Matusiak JB, Parise G, Quadrilatero J, Gurd BJ.** Fibre-specific responses to endurance and low volume high intensity interval training: striking similarities in acute and chronic adaptation. *PLoS One* 9, e98119. 2014.
- **Stellingwerff T, Leblanc PJ, Hollidge MG, Heigenhauser GJ, Spriet LL.** Hyperoxia decreases muscle glycogenolysis, lactate production, and lactate efflux during steady-state exercise. *Am J Physiol Endocrinol Metab* 290: 1180-90, 2006.
- **Stone WJ, Coulter SP.** Strength/endurance effects from three resistance training protocols with women. *J Strength Cond Res* 8: 231-4, 1994.
- **Welch HG, Bonde-Petersen F, Graham T, Klausen K, Secher N.** Effects of hyperoxia on leg blood flow and metabolism during exercise. *J Appl Physiol* 42: 385-90, 1977.
- **Welch HG.** Hyperoxia and human performance: a brief review. *Med Sci Sports Exerc* 14: 253-62, 1982.
- **山路啓司.** 最大酸素摂取量の科学 改訂第2版, 杏林書院, 2001.