

第3回研究会 令和5年12月5日

特殊環境下における身体反応および適応に関する運動生理学的研究

～低酸素トレーニングおよび新型コロナ禍の影響～

時任 真一郎 (法学部教授)

I. はじめに

これまでに継続して特殊環境として、常圧低酸素および水中運動について研究してきた。今回、長期国内研究としてお時間をいただき、更なる研究を進める予定であったが、新型コロナウイルスのパンデミックの影響、コロナ禍から出口に差し掛かった状況ではあったが、依然人を対象とした測定・実験および研究を計画的に進めることは困難を極めた。

当初の研究予定としては、

1. 陸上競技における低酸素環境下トレーニングがパフォーマンスに及ぼす影響
2. 低酸素環境下トレーニング実施可否がスピードスケート選手のパフォーマンスに及ぼす影響
3. 新型コロナウイルスへの感染および濃厚接触による隔離が運動選手のパフォーマンスに及ぼす影響
4. 学童期の低酸素環境下トレーニングがパフォーマンスに及ぼす影響
5. 高齢者の低酸素環境下トレーニングが身体

に及ぼす影響

6. 環境に制限のあるトレーニングがパフォーマンスに及ぼす影響

を計画して長期国内研究をスタートした。

まだまだ、コロナ禍の影響が残り、思うような計画遂行はできなかったが、この機会であるからこそできること、新たな知見を得ることができた。

本報告ではこの長期国内研究の1年で得られたもの、特に特殊環境については常圧低酸素環境を中心に報告する。

II. 常圧低酸素環境におけるトレーニングについて

1. 背景

これまでの継続研究において常圧低酸素トレーニングの有効性を示してきた。大学スポーツの中でも注目度が高い箱根駅伝に出場するチームにおいても、重点的に活用していることが多々報道されている。また、所属するスポー

ツ研究所と産学連携委託研究を基に、一般的に低酸素トレーニングの実施とその有効性の検証も進められている。

しかしながら、低酸素トレーニングは決して万能の方法でないことを留意する必要がある。低酸素トレーニングは競技種目の特性そのものを向上させることはない。例えば、サッカーのドリブルが上手くなったり、シュートが上手くなったりといった、種目の特異的スキルなどを直接的に向上させることはない。低酸素トレーニングで確かに変化するのは、身体機能の向上である。例えば、酸素摂取量が増加したり、乳酸生成能力が改善されたりなど、間接的に競技力を向上させる可能性がある。結論として、直接的に競技特殊性に関わるパフォーマンスが向上するのではなく、フィジカルが向上することで競技に間接的に関わり、パフォーマンスが向上すると言える。そのため、向上させる身体機能、フィジカルについてターゲットを絞る必要がある。

2. コロナ禍の影響

コロナ禍において、いろいろな制限を受ける可能性が今後も存在することが確認された。そのため、継続的にかつ非接触的に身体活動をモニタリングすることは、必要不可欠である。そのため基礎的に再確認する必要がある。新型コロナウイルスがもたらした影響は

- ・罹患(感染者)は、隔離され、日常生活を含め活動を停止する。
 - 活動、行動が制限され、身体機能の低下が顕著となる。
- ・身体への影響として呼吸器系へのダメージが大きいと報告される。
 - 酸素飽和度(SpO₂)の測定により、状況を把握することができる。
- ・罹患(感染者)だけでなく、隔離、行動制限される人もいた。
 - 活動、行動が制限され、身体機能の影響。これらのことは、Japan High Sport Center

<デイトレーニング> 隔離や活動制限によるパフォーマンスへの影響

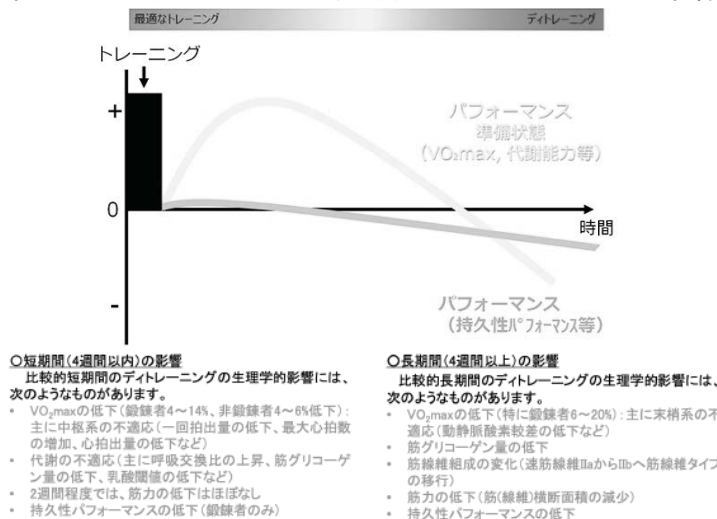


図1 隔離や行動制限によるデイトレーニングの期間に応じたパフォーマンスへの影響

が公開しているディトレーニングによる隔離や活動制限によるパフォーマンスの影響(図1)と合わせて確認する機会となった。

Ⅲ. 研究内容

1. 酸素濃度とSpO₂に関する基礎的研究

常圧低酸素環境下において、酸素濃度と血中酸素飽和度(SpO₂)は変動することはこれまでに多くの報告をしている。2015年の所報でも、トレーニングが進むにつれ、変化することを報告している。これまで運動時の継続測定は心拍数(HR)が一般的である。しかしながら常圧低酸素環境下ではSpO₂の変動をモニタリングすることは非常に重要である。基礎的研究、非接触での生理指標のモニタリング方法として、酸素濃度の変化および軽度な活動時の継続的測定によって、その変化について検討した。

基礎的研究として

- ・酸素濃度とSpO₂の関係
- ・活動状況とSpO₂の関係

について再確認をした。通常、常圧常酸素(平地)時の運動時は、高負荷、低負荷に関わらずSpO₂が90を下回することはほとんどない。また、常圧低酸素環境での運動時においては、SpO₂が80を下回らないようにする。

健康状態の指標として、SpO₂の測定で確認することがコロナ禍において確認されている。また、近年、運動時においてHRだけでなく、SpO₂の同時測定によって、酸素動態を評価する試みも増えている。

1) 方法(表1)

対象：30代一般男性

環境：酸素濃度20.9%~10.0%まで段階的に変化

状態：安静時、会話時(日常生活を想定)

運動時(トレッドミル歩行、自転車エルゴメータ)

測定項目：SpO₂ および HR

2) 結果

- ・酸素濃度 12.0% (標高 約3,700m相当)までは安静状態であれば、SpO₂は90%前後を推移した。12.0%において「会話」をするだけで80%を下回った図(2、3)。
- ・酸素濃度 10.0% (標高 約5,700m相当)では安静状態においても80%を下回り、「会話」によって70%を下回るまで落ち込んだ(図2、4)。

表1 酸素飽和度の継続測定 プロトコル

対象：30代一般男性

環境：酸素濃度20.9%~10.0%まで段階的に変化

状態：安静時
会話時(日常生活を想定)
運動時(トレッドミル歩行、自転車エルゴメータ)

測定項目：SpO₂ および HR

	①	②	③	④	⑤	⑥
酸素濃度	20.9	18.0	16.0	14.0	12.0	20.9
状態	安静	安静	安静	立ち上がり 20秒	会話	安静(会話)
					安静	
⑦	⑧	⑨	⑩	⑪		
酸素濃度	10.0	20.9	14.0	20.9	14.5	
状態	安静	安静(会話)	安静	安静(会話)	安静	
	会話		歩行 3km/h 1分		エルゴメータ 90W 1分	
	安静		歩行 4km/h 1分		エルゴメータ 100W 1分	
			歩行 6km/h 3分		エルゴメータ 110W 1分	
			歩行 3km/h 1分		安静	
			エルゴメータ 60W 1分			
			エルゴメータ 70W 1分			
			エルゴメータ 80W 1分			
			エルゴメータ 90W 1分			
						安静以外の状態

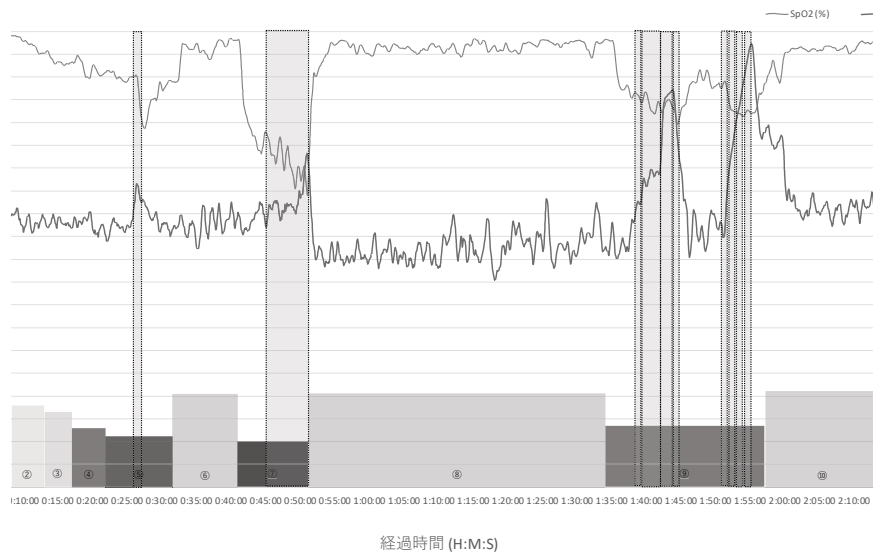


図2 酸素飽和度の継続測定酸素濃度および活動状況とSpO₂の関係(全体)

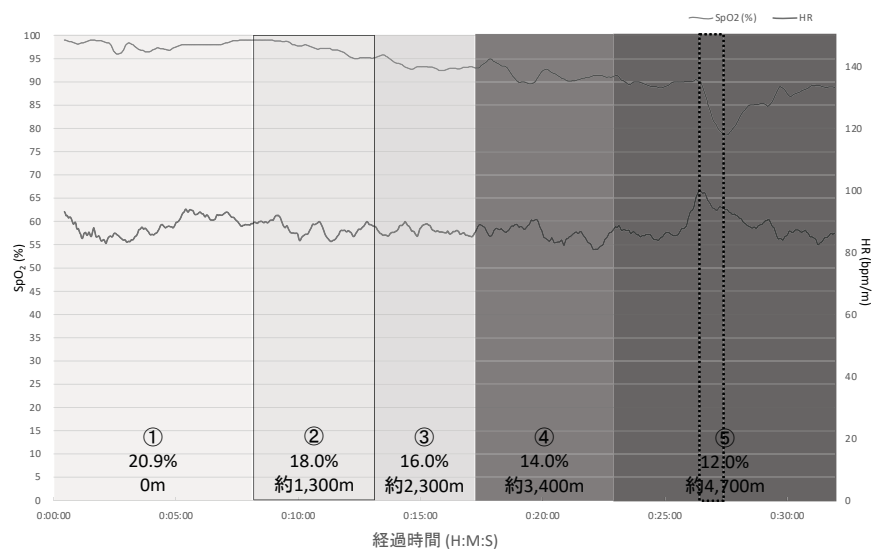


図3 酸素飽和度の継続測定 酸素濃度および活動状況とSpO₂の関係 < A 20.9%~12.0%段階的変化時のSpO₂とHRの変動 >

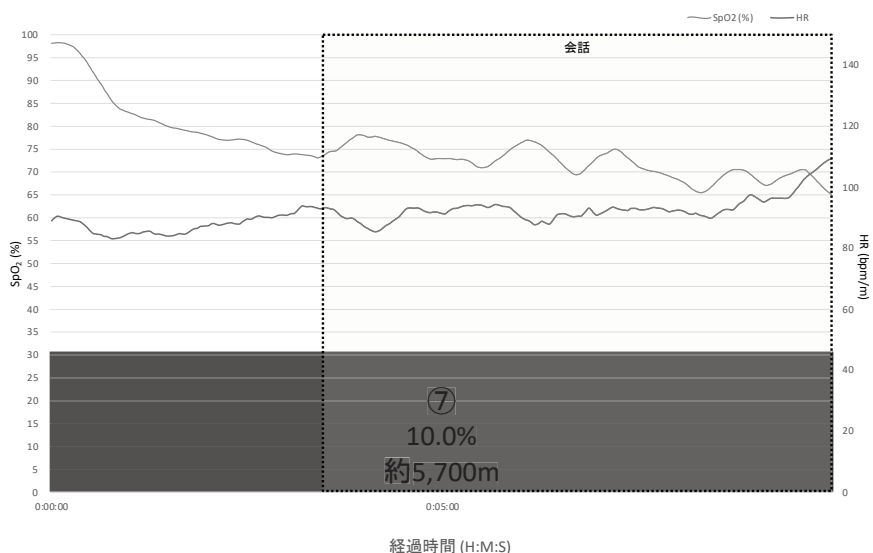


図4 酸素飽和度の継続測定 酸素濃度および活動状況とSpO₂の関係
 <B 10.0% (標高約5,700m)における安静時および会話時とSpO₂とHRの変動>

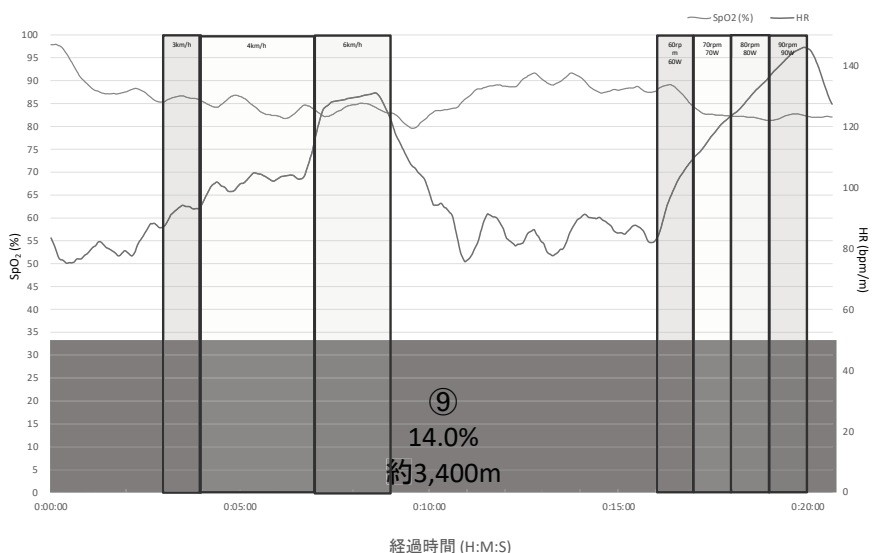


図5 酸素飽和度の継続測定 酸素濃度および活動状況とSpO₂の関係
 <C 14.0% (標高約3,700m)における運動形態および運動負荷の違いによるSpO₂とHRの変動>

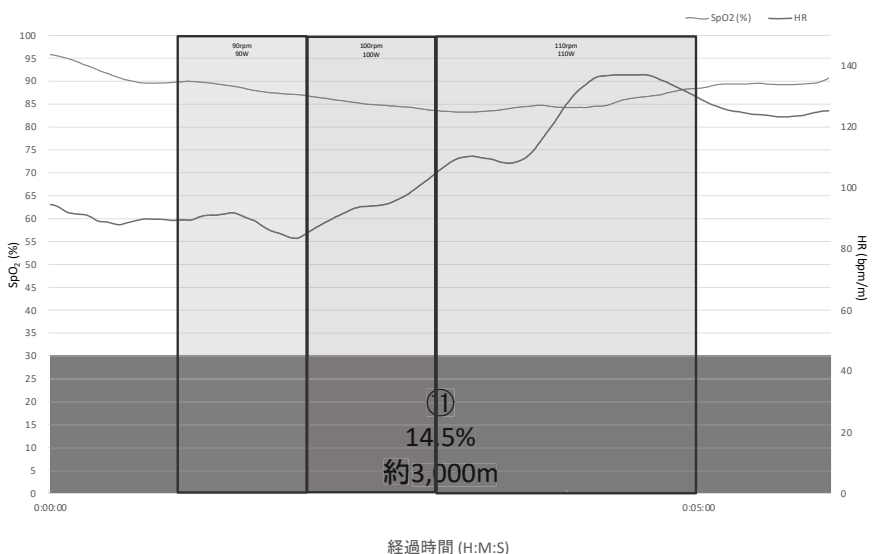


図6 酸素飽和度の継続測定 酸素濃度および活動状況とSpO₂の関係
 <D 酸素濃度 14.5% (標高約3,700m)における運動時のSpO₂とHRの変動>

・酸素濃度 14.0% (標高 約3,000m相当)までは、最大心拍数の70~80%までの運動であれば、SpO₂が80%を下回することはなかった(図2、5、6)。

2. 産学連携受託研究の民間事業における低酸素トレーニングについて

- ・2017~2019年度の3カ年間研究所にて実施
- ・2019年度より民間にて実施
- ・実施における身体組成の変動を2019年の所報に報告

1) 民間事業で低酸素トレーニング実施内容と検証

トレーニング時間：1回30分のトレーニング
 トレーニング頻度：1~2回/週のトレーニング頻度

トレーニング内容：実施者のフィジカル、年齢等に応じた個別プログラム

比較項目：コロナ以前、コロナ禍、アフターコロナを含んだ身体組成の変化

今回の検討期間については、次の影響が加味される。

- ・自粛制限、働き方の変容に伴う、身体活動量の減少の影響
- ・活動範囲の制限、3密による市井の運動施設への影響
- ・罹患、濃厚接触による活動制限等の身体組成やフィジカルへの影響

そのため、特別な加入等はず、前述条件下による測定データのみを提供いただき、分析した。(図7、8、9)

その結果、継続的に実施することで、筋肉量が増加することが認められた(図7、8)。

筋肉量の増加は見られなかったが、体脂肪量、体重の減少が見られ、継続して運動することで、体脂肪量の減少に効果があることが考えられる(図9)。

また、1,000日を超える対象者については、コロナ禍のデータも含まれており、行動制限等がある中でも、1回30分/週2回程度のスポーツ活動が、日常行動を含む身体活動を維持することに寄与する可能性が示された。

2) 青少年期の低酸素トレーニング実施内容と検証

次のような地域事情等を鑑み、青少年期について低酸素トレーニングを実施し、これまでに報告の少ないヘモグロビン(非侵襲方法)の

測定も合わせて行なった。

- ・北海道、東北、北陸など冬季に屋外の活動に制限がかかる地域
- ・移動手段等の関連から、身近に実施できるスポーツや運動機会を創出すること
- ・少年期への低酸素トレーニングの構築と身体適応状況の確認
- ・適応変化を継続的に観察する指標として、ヘモグロビンの測定

その結果、成長に応じた骨格量、筋肉量の増加が見られた。体脂肪率の変化はなかったことから、1回30分/週2回程度の身体活動が地位固有の活動制限に伴う肥満防止に寄与するかは今後継続してモニタリングする必要があると考える。(図10)

また、ヘモグロビン量の変化も見られなかったことから、低酸素暴露による血液性状への影響は少ないと考えられ、低酸素暴露による身体ストレスについても適度であることが考えられる。

3. 低酸素トレーニング実施可否がパフォーマンスに及ぼす影響について

スピードスケート部のトレーニング評価を継続的に実施している。スピードスケートのトレーニングは、その特性からシーズン(8月~3月 リンクトレーニングと競技会)とオフシーズン(4月~7月のリンク外トレーニング)に分けることができる。そのため、オフシーズンのトレーニングおよびフィジカルの評価測定として、最大酸素摂取量(VO₂max)と血中乳酸濃度を測定、評価してきた。1回目と2回目の測定間隔はおおよそ2ヶ月としている。

1回目: 毎年5月・・・トレーニング前の測定
→ オフトレーニング(バイクトレーニング) 負荷等の設定に利用

2回目: 毎年7月・・・オフトレーニング評価として測定
→ 氷上トレーニングおよびバイクトレーニングの負荷等の設定に利用

低酸素トレーニングを実施した年としなかった年がある。

2021年度・・・低酸素トレーニングを実施
2022および2023年度・・・低酸素トレーニングを非実施

今回は、実施・非実施による、VO₂max、乳酸、パフォーマンスとしてエルゴメーター運動の実施時間および到達負荷(パワー)について、比較検討した。

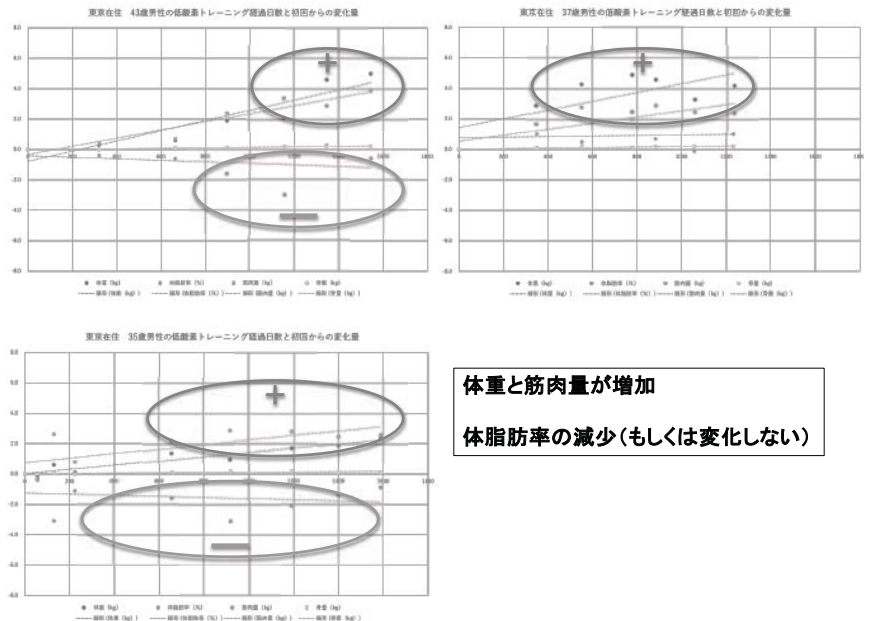


図7 低酸素トレーニング経過人数と初回からの変化量 パターン1

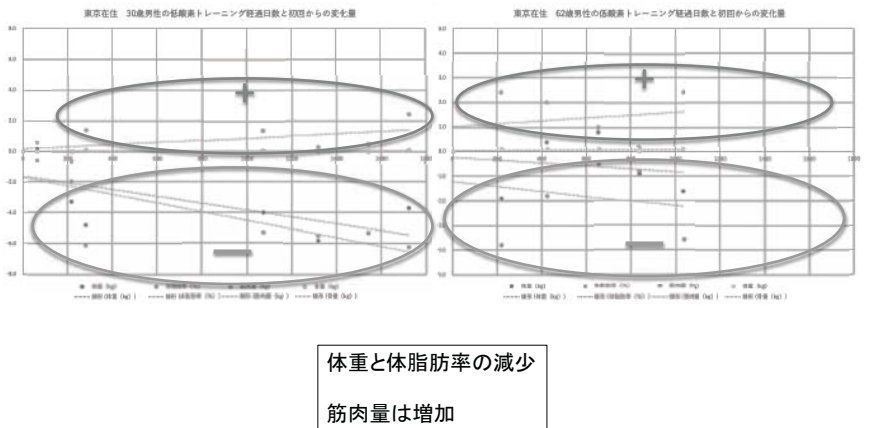


図8 低酸素トレーニング経過人数と初回からの変化量 パターン2

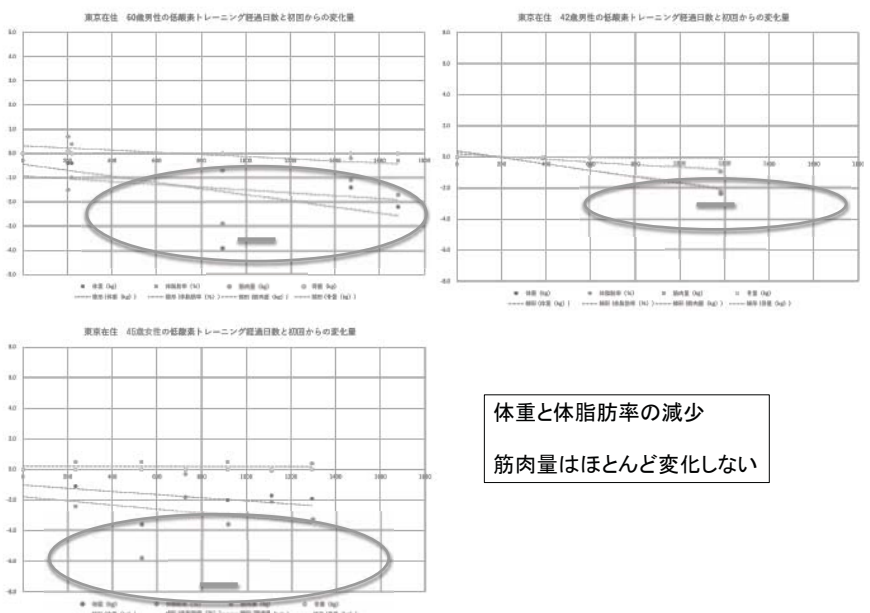


図9 低酸素トレーニング経過人数と初回からの変化量 パターン3

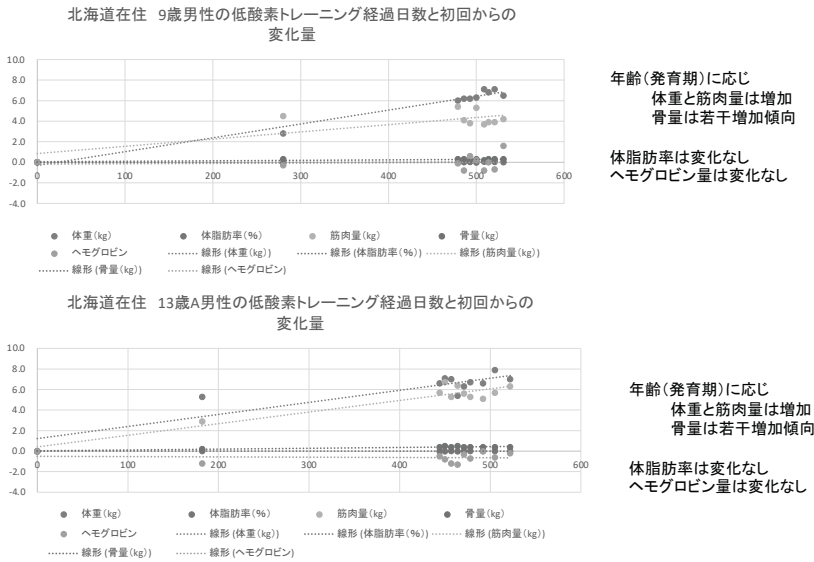


図10 低酸素トレーニング経過人数と初回からの変化量(対象:青少年)

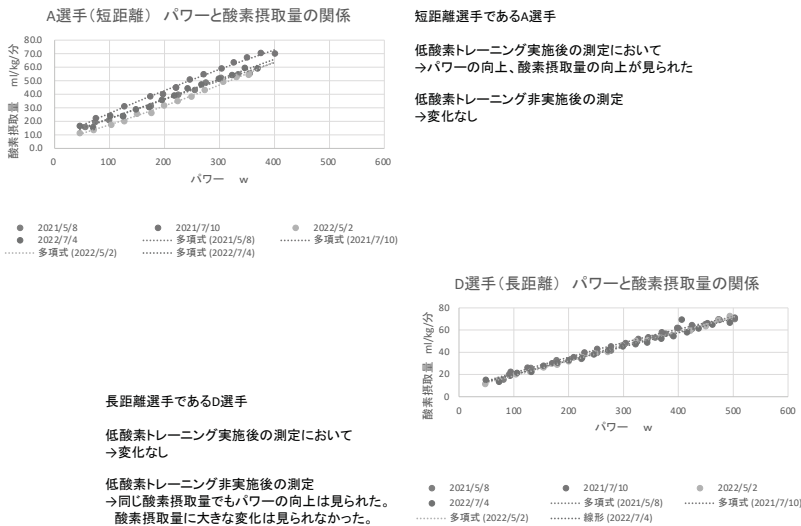


図11 低酸素トレーニング実施・非実施におけるパワーと酸素摂取量の関係

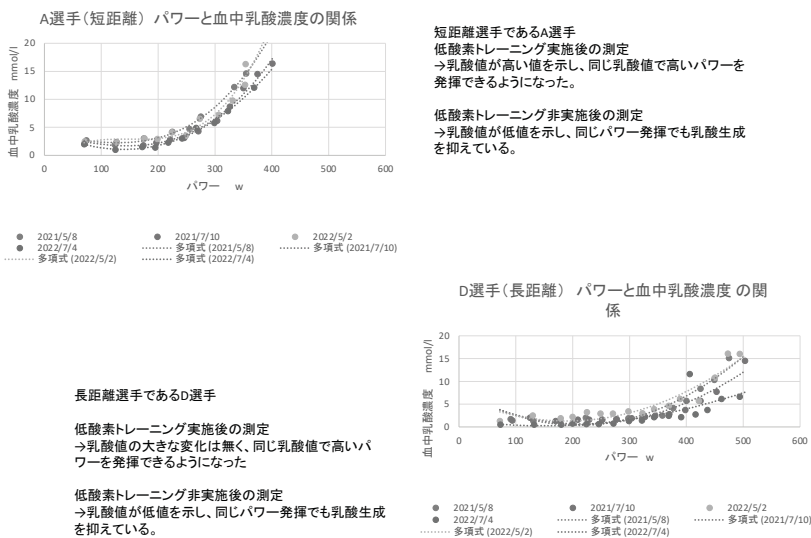


図12 低酸素トレーニング実施・非実施におけるパワーと血中乳酸濃度の関係

1) 測定内容

自転車エルゴメーターを用いた漸増負荷法によるVO₂maxの測定
呼気ガス分析 (VO₂max) : ダグラスバック法 (サンプリング 30秒)
血中乳酸濃度: 漸増負荷毎に侵襲方法にて測定 (各負荷段階後半 30秒間に採血測定)

2) 結果

パワーと酸素摂取量の関係を図11)に示した。その結果、短距離選手であるA選手は、低酸素トレーニング実施後の測定において、パワーの向上、酸素摂取量の向上が見られたが、低酸素トレーニング非実施後の測定では変化が見られなかった。

長距離選手であるD選手は、低酸素トレーニング実施後の測定において、変化は見られなかったが、低酸素トレーニング非実施後の測定においては、同じ酸素摂取量でもパワーの向上は見られた。しかしながら、酸素摂取量に大きな変化は見られなかった。

パワーと血中乳酸濃度の関係を図12)に示した。その結果、短距離選手であるA選手は、酸素トレーニング実施後の測定において、乳酸値が高い値を示し、同じ乳酸値で高いパワーを発揮できるようになったが、低酸素トレーニング非実施後の測定においては、乳酸値が低値を示し、同じパワー発揮でも乳酸生成を抑えている傾向が見られた。

長距離選手であるD選手は、低酸素トレーニング実施後の測定において、乳酸値の大きな変化は無く、同じ乳酸値で高いパワーを発揮できるようになったが、低酸素トレーニング非実施後の測定においては、乳酸値が低値を示し、同じパワー発揮でも乳酸生成を抑えている傾向がみられた。

これらのことから低酸素トレーニング実施可否がパフォーマンスに及ぼす影響について・オフシーズン(4月~7月)のリンク外トレーニングにおいて

低酸素トレーニングを実施することで、身体特性が変化する傾向が見られたが、距離特性によって、変化のある指標が異なる可能性が見られた。そのため、低酸素トレーニング及ぼす影響について、変化する(変化させる)ターゲットを明確にし、トレーニングとして低酸素トレーニングを有効に活用できることが示された。なお、共通してシーズンの競技成績との

関係性については分析せず、測定項目についてのみの分析である。

4. 新型コロナウイルスへの感染および濃厚接触による隔離・行動制限がパフォーマンスに及ぼす影響について

陸上競技(駅伝・長距離)への低酸素トレーニングおよびトレーニング評価を運動生理学の指標等を用いて次の内容で行なってきた。

- ・低酸素トレーニングの継続実施
- ・トレーニング実施時の生理応答指標の提供および評価
- ・夏季期間の準高地トレーニングの後の生理応答指標の測定

今回の研究員期間については、上記に加え2022年入学生を中心に約2ヶ月毎に最大酸素摂取量の測定計画をした。

- 第1回目・・・2022年5月下旬(入学初期測定、基準値)【実施】
- 第2回目・・・2022年7月下旬(大学トレーニング順化、合宿前測定)【実施】
- 第3回目・・・2022年9月下旬(準高地合宿後、予選会2週間前)【一部実施、中断】
- 第4回目・・・2022年11月下旬(本戦1ヶ月前)【未実施】
- 第5回目・・・2023年1月下旬(本戦後、ディートレーニング期)【未実施】

しかしながら、新型コロナウイルスへの罹患、隔離などが起こり、図13で示す通り計画的に測定を継続することが困難となった。その一方、これまでにない新たな知見が得られた。

陸上競技(駅伝・長距離)への低酸素トレーニングおよびトレーニング評価

- ・低酸素トレーニングを継続
- ・トレーニング評価
- ・トレーニング実施時の生理応答指標の提供
- ・夏季期間の準高地トレーニングの後の生理応答指標の測定を目的として

- 2022年入学生を中心に約2ヶ月毎に最大酸素摂取量を測定計画
- 第1回目・△・2022年5月下旬(入学初期測定、基準値)
- 第2回目・△・2022年7月下旬(大学トレーニング順化、合宿前測定)
- 第3回目・△・2022年9月下旬(準高地合宿後、予選会2週間前)
- 第4回目・✕・2022年11月下旬(本戦1ヶ月前)
- 第5回目・✕・2023年1月下旬(本戦後、ディートレーニング期)

※ △は、実施。ただし、第1~3回の中で実施できなかった者を含む
 ※ ✕は、実施せず。

図13 陸上競技(駅伝・長距離)のトレーニング評価当初計画とその実施状況

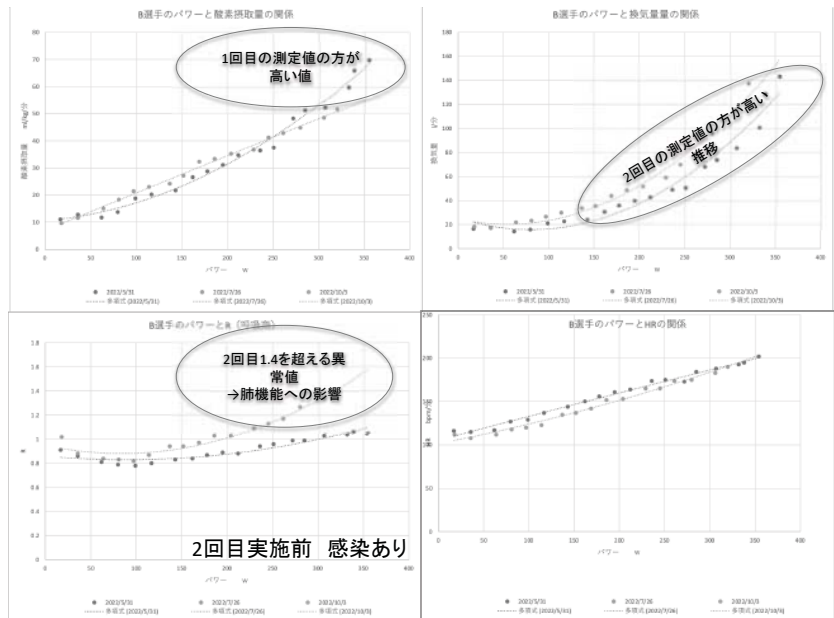


図14 新型コロナウイルス感染と各種測定値の関係 パターン1

1) 測定内容

自転車エルゴメーターを用いた漸増負荷法によるVO₂maxの測定
 呼気ガス分析(VO₂max)：ダグラスバッグ法(サンプリング30秒)

2) 結果

新型コロナウイルスへの感染および濃厚接触による隔離・行動制限がパフォーマンスに及ぼす影響について

- ・新型コロナウイルス罹患後2週間程度において、呼吸・循環系への影響、特に呼吸器系への影響が大きいと見られる測定値が確認された(図14、15、16)。2ヶ月後以降においても、影響が残る可能性が確認された。しかしながら、パワー値などはさほど影響がないこ

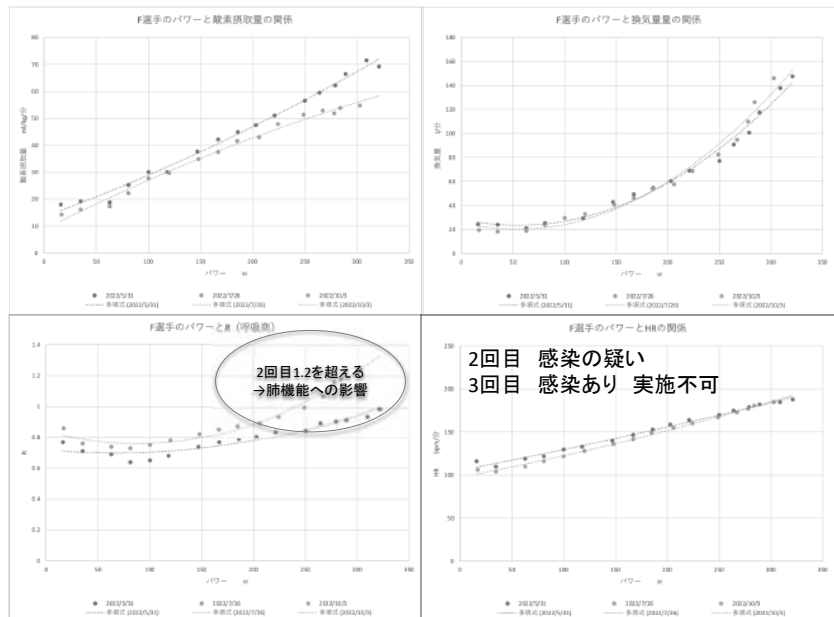


図15 新型コロナウイルス感染と各種測定値の関係 パターン2

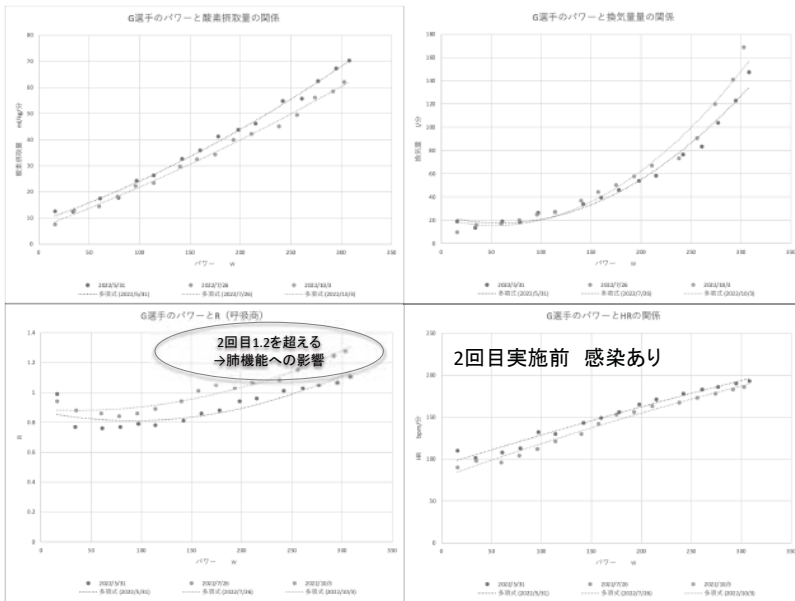


図16 新型コロナウイルス感染と各種測定値の関係 パターン3

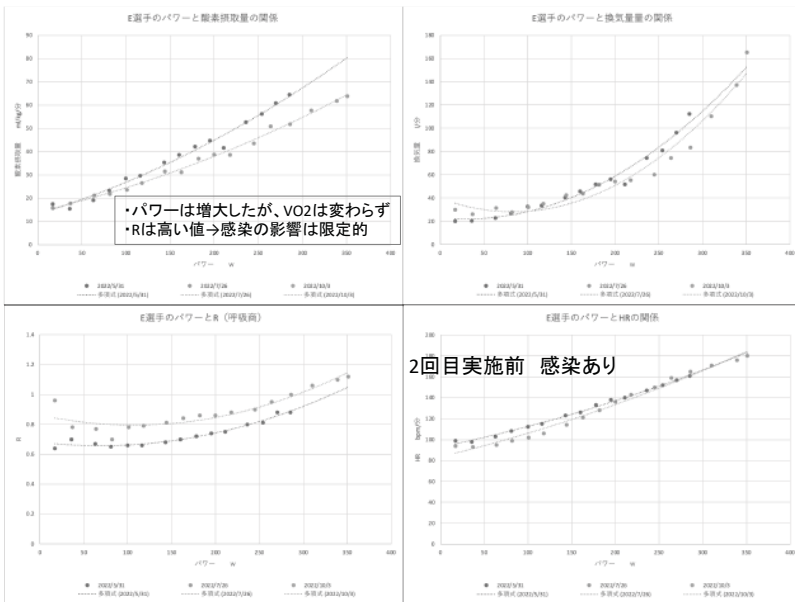


図17 新型コロナウイルス感染と各種測定値の関係 パターン4

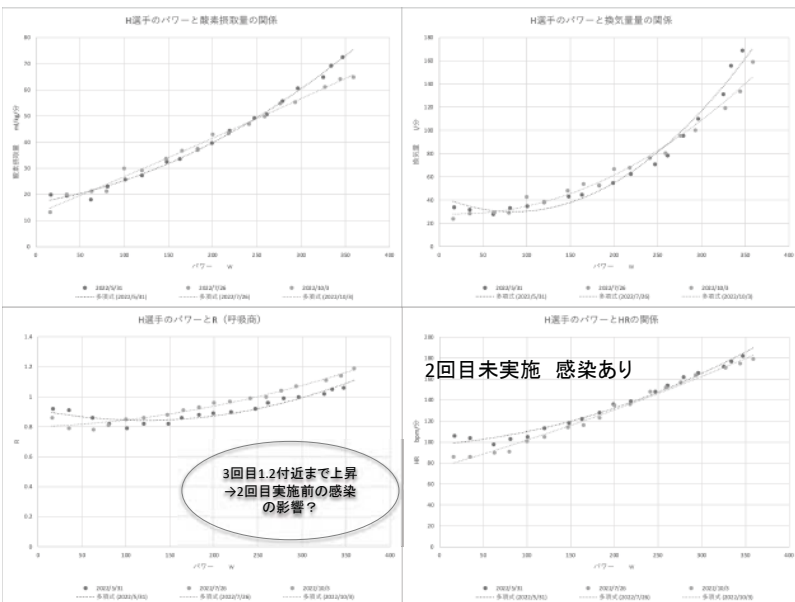


図18 新型コロナウイルス感染と各種測定値の関係 パターン5

とも確認された。

- 自身の罹患でなく、行動制限や隔離等によって一定の影響はあると見られるが、1週間程度であれば酸素摂取量、パワー値にはさほど影響しないことが確認された(図17、図18)。このことは冒頭にも述べたJapan High Sport Centerが公開しているディトレーニングの影響で示されている想定範囲の変容と同様の傾向を示した。一方、2回目実施前に感染し、2回目未実施、3回目を実施できた例では、Rが1.2付近まで上昇し、高値を示した(図18)。また、1回目の実施前に感染し、2回目・3回目を実施した例では、3回目に大幅な測定値の上昇(改善)が見られた。先述の例と照らし合わせると、1回目の実施前の感染の影響があり、2回目の測定時は本来より低値を示し、3回目の測定時には完成の影響がなくなり、測定値が高値を示したとの推測も考えられる。このことは、新型コロナウイルスへの感染が8~10週後も呼吸器系に影響を及ぼし、16~18週後には影響が低減あるいは無くなっている可能性が考えられる。
- 新型コロナウイルス罹患直後・症状発症前(発熱など)は、呼吸器系やパワーなど運動パフォーマンスに対する影響は、発症後や回復期より影響が少ない傾向であることも示され(図20)、発症による各身体諸器官へのダメージがその後大きく影響する可能性が考えられる。

IV. まとめ

新型コロナウイルスの影響で計画通りに研究を進めることができなかった反面、この機会であれば得られない、思わぬ条件下での研究、測定ができたことは収穫のあったと言える。規定のデータ、想定外のデータを比較する良い機会となり、今後の研究によって得られるデータ等の扱いを慎重に扱う必要性を再確認できた。

付記：本報告は、令和4年度長期国内研究員の研究成果である。

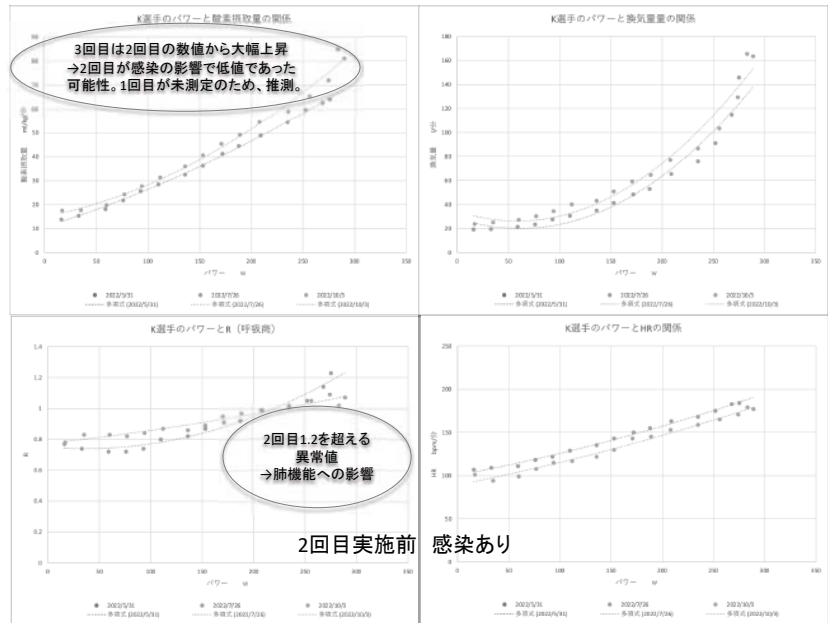


図19 新型コロナウイルス感染と各種測定値の関係 パターン6

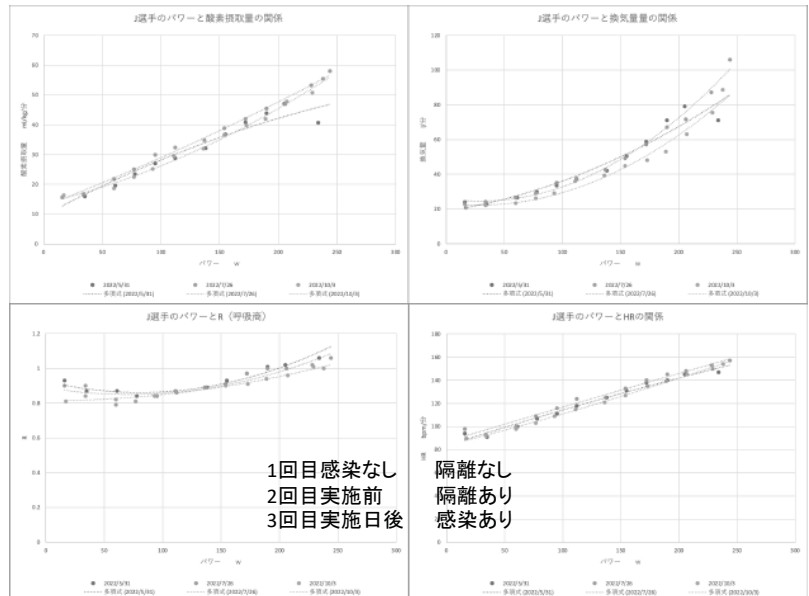


図20 新型コロナウイルス感染と各種測定値の関係 パターン6