

茨城県立医療大学大学院博士論文

運動学習にとって最適な課題難易度に関する研究

秋月千典

茨城県立医療大学大学院博士後期課程保健医療科学研究科

保健医療科学専攻

2015年3月

目次

論文要旨	1
第 1 章 序論	3
1.1 研究背景	3
1.1.1 リハビリテーションと運動学習	3
1.1.2 運動学習研究の歴史的変遷と理学療法との接点	6
1.1.3 Challenge Point Framework	14
1.1.4 機能的課題難易度の測定	30
1.2 本研究の目的	46
1.3 本研究の意義	46
1.4 本論文の構成	47
1.5 研究の倫理的配慮	47
第 2 章 機能的課題難易度の測定方法の確立	48
第 1 節 身体活動が唾液 α -アミラーゼに与える影響の検討	48
2.1.1 はじめに	48
2.1.2 目的	49
2.1.3 方法	50
2.1.4 結果	52
2.1.5 考察	56
第 2 節 唾液 α -アミラーゼを用いた機能的課題難易度測定の妥当性の検討	57
2.2.1 はじめに	57
2.2.2 目的	57
2.2.3 方法	57
2.2.4 結果	64
2.2.5 考察	69
第 3 節 第 2 章まとめ	71

第 3 章	Optimal Challenge Point に相当する機能的課題難易度の定量化	72
	3.1 はじめに	72
	3.2 目的	72
	3.3 方法	73
	3.4 結果	77
	3.5 考察	84
第 4 章	総括	89
	4.1 本論文の結論	89
	4.2 理学療法への示唆	91
	4.3 今後の展望	93
謝辞		94
引用文献		95

表一覽

表 1.	Gentile の課題分類	19
表 2.	唾液 α -アミラーゼに影響を与える要因	40
表 3.	NASA-TLX に含まれる項目と各項目の説明文	44
表 4.	研究協力者の属性	53
表 5.	嫌気性代謝閾値と唾液閾値における運動負荷量の比較	53
表 6.	協力者特性	77
表 7.	NASA-TLX に含まれる各項目の得点と Stability index との関係	81

図一覽

図 1.	対象を”humans”に限定した条件で“rehabilitation” AND ”motor learning”により検索される論文数の推移	5
図 2.	Learning- Performance distinction	11
図 3.	Transfer design の構成	12
図 4.	機能的課題難易度の構成要素	15
図 5.	機能的課題難易度が練習中のパフォーマンスと学習利得に与える影響	17
図 6.	課題配置方法ーブロック練習とランダム練習ー	21
図 7.	課題配置方法が練習中のパフォーマンスと運動学習の成果に与える影響	22
図 8.	課題配置方法が機能的課題難易度に与える影響	23
図 9.	代表的な KR の与え方	25
図 10.	フィードバックの与え方が練習中のパフォーマンスと運動学習の成果に与える影響	26
図 11.	フィードバックの与え方が機能的課題難易度に与える影響	28
図 12.	身体介助が機能的課題難易度に与える影響	29
図 13.	Kahneman の注意容量モデル	31
図 14.	主課題の注意需要と二次課題に配分可能な注意量	32
図 15.	Wickens の多重資源モデル	34
図 16.	プローブ反応時間の最大延長点	36
図 17.	ストレス刺激に対する応答 (HPA 系・SAM 系)	39

図 18.	唾液 α -アミラーゼの変換式	41
図 19.	注意とメンタルワークロードの関係	42
図 20.	NASA-TLX の評価表	44
図 21.	運動負荷試験のプロトコール	50
図 22.	唾液アミラーゼモニターと試験紙	51
図 23.	運動負荷試験中に唾液 α -アミラーゼが示す動態	54
図 24.	嫌気性代謝閾値と唾液閾値の関係	55
図 25.	Balance System (Biodex 社製)	59
図 26.	足部位置	59
図 27.	実験デザイン	62
図 28.	Stability level と Stability index	64
図 29.	Stability level と唾液 α -アミラーゼの変化率	65
図 30.	Stability level とプローブ反応時間の変化率	66
図 31.	Stability index と唾液 α -アミラーゼの変化率	67
図 32.	Stability index とプローブ反応時間の変化率	67
図 33.	唾液 α -アミラーゼの変化率とプローブ反応時間の変化率	68
図 34.	足部の位置 (左脚が練習脚の場合)	73
図 35.	実験手続き	75
図 36.	各 Stability level における Stability index の推移	78
図 37.	保持テストと転移テストにおける改善率	79
図 38.	Stability index と唾液 α -アミラーゼの変化率	80

図 39. 学習利得と唾液 α -アミラーゼの変化率	80
図 40. Stability index と作業成績 (NASA-TLX) の関係	82
図 41. 唾液 α -アミラーゼと作業成績 (NASA-TLX) の関係	82
図 42. 学習利得と作業成績 (NASA-TLX) の関係	83

博士論文に関連する研究業績

1) 学術論文

- ・ Akizuki K, Ohashi Y. Changes in practice schedule and functional task difficulty: a study using the probe reaction time technique. *Journal of Physical Therapy Science*, 2013; 25(7): 827-831.
- ・ 秋月千典, 大橋ゆかり. KR 付与方法が運動学習の成果及び機能的課題難易度に与える影響. *日本生理人類学会誌*, 2013; 18(4): 171-179.
- ・ Akizuki K, Yazaki S, Echizenya Y, Ohashi Y. Anaerobic threshold and salivary α -amylase during incremental exercise. *Journal of Physical Therapy Science*, 2014; 26(7): 1059-1063.
- ・ Akizuki K, Ohashi Y. Salivary α -amylase reflects change in attentional demands during postural control: comparison with probe reaction time. *Research Quarterly for Exercise and Sport*, 2014; 85(4): 502-508.

2) 学会発表

- ・ 秋月千典, 大橋ゆかり. 課題の配置方法により運動学習過程における注意需要の変化は異なるか. 第 47 回日本理学療法学会 (兵庫) 2012 年 5 月.
- ・ 秋月千典, 大橋ゆかり. KR 付与方法が運動学習の成果及び課題の注意需要に与える影響. 第 31 回関東甲信越ブロック理学療法士学会 (埼玉) 2012 年 9 月.
- ・ 秋月千典, 矢崎祥一郎, 越前谷友樹, 大橋ゆかり. 唾液アミラーゼ活性を用いた AT の推定. 第 48 回日本理学療法学会 (愛知) 2013 年 5 月.
- ・ Akizuki K, Ohashi Y. Salivary alpha-amylase reflects changes in attentional demand during postural control. The 6th Asia-Western pacific regional congress of the world confederation for physical therapy & The 12th International congress of Asian confederation for physical therapy (Taichung, Taiwan) September 2013.

論文要旨

課題難易度の設定は運動学習の成果を左右する重要な要因であるにもかかわらず、その設定は理学療法士の直感や経験に基づいて行われている。その背景として、運動学習にとっての至適課題難易度は概念的に示されてはいるものの、課題難易度の測定方法が未確立であることや、運動学習にとっての至適課題難易度が定量的に明らかとなっていないことが挙げられる。至適課題難易度に難易度を設定するための方法が明らかとなれば、適切に課題難易度を設定することが可能となり、理学療法場面における運動学習は効率化されると考えられる。そこで、本研究では、生理学的指標である唾液 α -アミラーゼおよび主観的指標である NASA-TLX を用いて、運動学習における至適課題難易度を定量化することを目的とした。

本研究では、課題難易度を定量的に評価できる指標の確立と運動学習における至適課題難易度の定量化を目的に 3 つの実験を行った。第 1 実験では、身体活動が唾液 α -アミラーゼに与える影響を明らかにすることで、運動課題遂行時における課題難易度測定指標としての唾液 α -アミラーゼの利用可能性を確認した。第 2 実験では、課題難易度測定指標として広く用いられているプローブ反応時間と唾液 α -アミラーゼの関連を明らかにすることで、課題難易度測定指標としての唾液 α -アミラーゼの妥当性を検討した。第 3 実験では、第 1・第 2 実験で得られた知見に NASA-TLX を加え、運動学習における至適課題難易度の定量化を行った。

まず、第 1 実験では 11 名の健常成人男性（平均年齢 23.8 ± 1.8 歳）に運動負荷試験を行わせ、運動負荷試験中の呼気ガス、唾液 α -アミラーゼを測定した。その結果、唾液 α -アミラーゼには、漸増する運動負荷に対して急激にその値が上昇する点である唾液閾値が存在することが明らかとなった。また、その唾液閾値が生じる運動強度は、呼気ガス分析から得られる嫌気性代謝閾値が生じる運動強度と一致することが明らかとなった。さらに、唾液 α -アミラーゼは唾液閾値を超えるまでその値に変化が認められないことが明らかとなった。この結果から、嫌気性代謝閾値未満の運動強度であれば唾液 α -アミラーゼは身体活動の影響を受けないことが示された。

次に、第 2 実験では 16 名の健常若年者（平均年齢 23.9 ± 3.4 歳）に 3 段階に不安定性を設定した不安定板上での姿勢制御課題を与え、課題遂行中のプローブ反応時間と課題遂行直後の唾液 α -アミラーゼを測定した。その結果、不安定性が増すにつれて姿勢制御課題の成績は低下するとともに、プローブ反応時間の延長と唾液 α -アミラーゼの上昇が認めら

れた。さらに、プローブ反応時間と唾液 α -アミラーゼには中等度の相関が認められた。以上の結果から、唾液 α -アミラーゼはプローブ反応時間と同程度に課題難易度を反映する指標であることが明らかとなった。

第 1・第 2 実験の結果から、唾液 α -アミラーゼは唾液閾値未満の運動強度であれば、課題難易度を反映する指標であることが明らかとなった。第 1・第 2 実験で得られた知見を基に、第 3 実験では 60 名の健常若年者（平均年齢 22.5 ± 2.2 歳）に学習課題として不安定板上での姿勢制御課題を与え、姿勢制御課題の成績、課題遂行後の唾液 α -アミラーゼと NASA-TLX の測定を行った。不安定板の不安定性を操作することで 4 段階の難易度を設定し、各難易度に 15 名の研究協力者を振り分けた。実験は 2 日間行い、1 日目には姿勢制御課題の練習、唾液 α -アミラーゼと NASA-TLX の測定を行った。そして、2 日目には学習の成果を測定するためのポストテストを行った。その結果、課題難易度が上がるにつれて姿勢制御課題の成績は低下した。また、学習利得と課題難易度は逆 U 字型の関係を示し、2 番目に高い難易度において最も学習利得が大きく、最も課題難易度が高い条件と最も課題難易度が低い条件では学習利得が小さくなった。さらに、本実験の結果から、唾液 α -アミラーゼが安静時から 81% 上昇する、あるいは NASA-TLX に含まれる作業成績の得点が 51.5 となる課題難易度が運動学習にとっての至適課題難易度に相当することが示された。

本研究により、運動学習にとっての至適課題難易度が定量的に明らかとなった。唾液 α -アミラーゼあるいは NASA-TLX を用いて課題難易度を調整することで、運動学習の効率化を図ることが可能となる。しかし、本研究の成果は、課題難易度を調整すべき方向とその程度を示すものであり、どのように課題や練習条件を調整すれば最も効率よく至適課題難易度に調整できるかについては十分に言及できない。今後、課題の配置方法やフィードバックの与え方、身体介助がどの程度課題難易度に影響を与えるかを定量的に解明していくことで、効率的な課題難易度調整方法の確立に繋がると考えられる。

第 1 章 序論

1.1 研究背景

1.1.1 リハビリテーションと運動学習

リハビリテーションには複数の定義が存在する¹⁾が、1982年に国際連合が「障害者に関する世界行動計画」のなかで示した「リハビリテーションとは、身体的、精神的、社会的に最も適した生活水準の達成を可能とすることによって、各人が自らの人生を変革していくための手段を提供していくことを目指し、かつ、時間を限定した過程である」という定義が広く受け入れられている^{1,2)}。また、Hass³⁾はリハビリテーションの定義とリハビリテーションチームの役割について、「リハビリテーションとは、個人の生理的、解剖的あるいは心理的な機能障害、環境の制約、個人の希望および寿命と一致した、身体的、心理的、社会的、職業的、余暇的および教育的可能性が最大に達するまで、個人を手助けする過程である。患者と家族、関与するリハビリテーションチームは、たとえ機能障害をもたらした病理学的過程が不可逆的であっても、現実的な目標を設定して、残存障害（機能的制限）があっても最適な生活機能を獲得するための計画を、なし遂げるように協力する」と述べている。以上の定義から、リハビリテーションチームの一員である理学療法士には、限定された時間のなかで患者が残存機能に見合った最適な生活機能を獲得できるように専門的支援を行うことが期待されている。

理学療法士が行う理学療法の内容として、日本理学療法士協会からは次の業務指針が出されている⁴⁾：

理学療法士は、主として次の理学療法を行う。

- 1) 基本的動作能力の回復を図るために、治療体操その他の運動を行わせる運動療法。
- 2) 骨関節機能、神経筋機能、心肺循環器機能、代謝機能などの改善を図る運動療法。
- 3) 電気刺激、徒手的操作（マッサージ他）、温熱、水治、光線その他の物理的手段を加えることを治療として行う物理療法。
- 4) 基本的動作能力の改善をより実用的なものとするための日常生活動作指導。

- 5) 基本的動作能力の回復を図り治療体操その他の運動を行わせ、日常生活動作の効率を向上させる。また、生活適応の拡大に必要な補装具、リハビリテーション機器、福祉機器等を選定・開発し、日常生活周辺の環境を整備指導する。
- 6) 運動療法の補助的手段として、スポーツ、遊戯、ダンスなどを用いる。

上記の業務指針から、理学療法の内容は基本的動作能力の回復を図るために身体機能の改善を図る部分（1, 2, 3, 6）と日常生活動作の改善あるいは効率化を図るために動作方法を学習する部分（4, 5）とに大きく分類できる。また、大橋⁵⁾は理学療法について、「理学療法とは、運動しやすいうように患者の体の状態を整え、運動の仕方を教える仕事である」と述べている。運動しやすいうように患者の体の状態を整えることは、身体機能の改善を図ることに相当し、運動の仕方を教えることは動作方法の学習に相当する。従って、理学療法士には、身体機能の改善と動作方法の学習を通じて、患者が残存機能に見合った最適な生活機能を獲得できるように支援していくことが求められている。

患者が理学療法士からの指導により日常生活動作を改善させる過程、あるいは動作練習により日常生活動作の効率化を図る過程は運動学習（motor learning）である。運動学習は「練習や経験に基づく一連の過程であり、結果として技能的行動を行い得る能力の比較的永続的な変化をもたらすもの」と定義されている⁶⁾。リハビリテーションにおける運動学習の重要性はこれまでも報告されており、神経系理学療法学の科学的基盤を検討するために1990年に米国で開催されたII STEP会議では、それまでの反射階層理論を批判し、システム論と運動学習に基づく運動療法が採択されている⁷⁾。また、1997年にNational Center for Medical Rehabilitation Research (NCMRR) 主催で開催されたワークショップにおいても運動学習はリハビリテーションの中核を成すと述べられている⁸⁾。このような流れもあり、近年、リハビリテーションにおける運動学習研究の論文数は増加している⁹⁾。

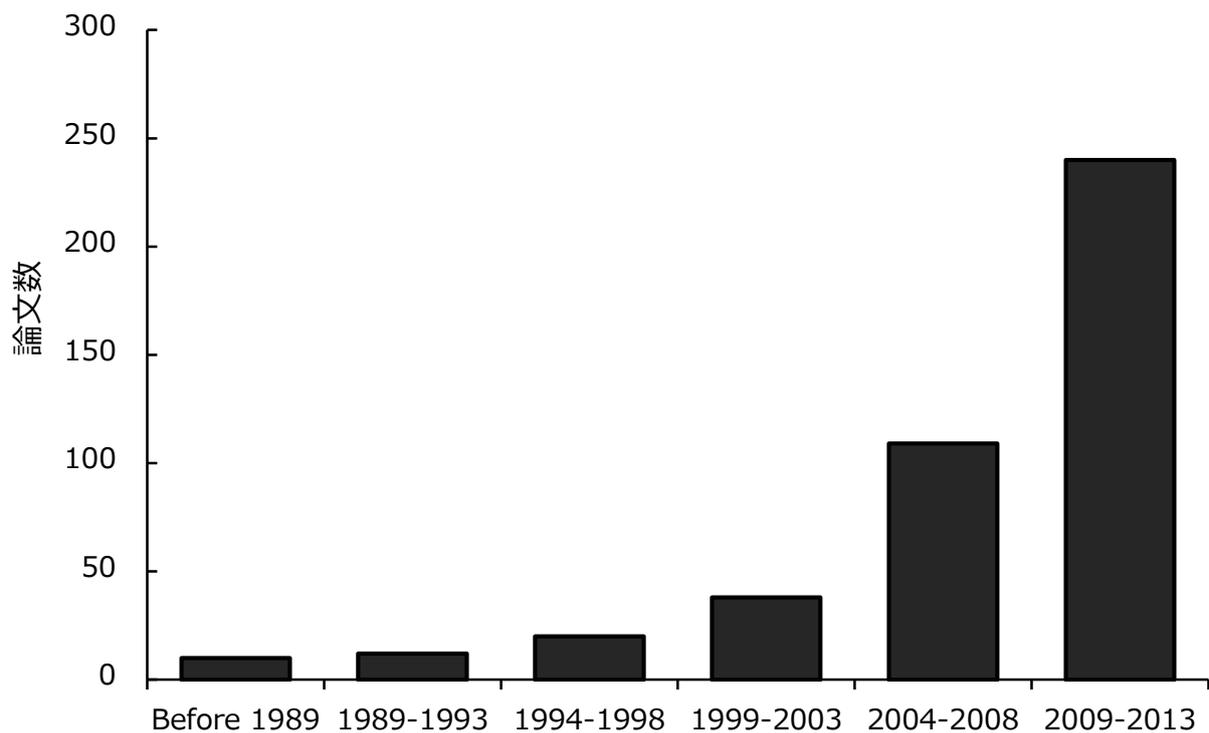


図 1. 対象を”humans”に限定した条件で“rehabilitation” AND ”motor learning”により検索される論文数の推移
(PubMed を使用)

図 1 のように、リハビリテーションにおける運動学習研究の報告数は増加しているものの、具体的な方法論を伴う報告は少ないのが現状である。それ故、多くの理学療法士は運動学習の原理を直感的に、または、自己の経験に基づいて使用しているとも指摘される⁷⁾。その結果、運動学習場面において非効率な練習方法が使用され続けてしまうことにも繋がる¹⁰⁾。従って、運動学習理論を実際のリハビリテーション場面に展開するための方法論の構築は、円滑なリハビリテーションの確立のために重要性の高い研究課題となっている。

1.1.2 運動学習研究の歴史的変遷と理学療法との接点

1.1.2.1 運動学習研究の歴史的変遷

運動学習研究は Bryan & Harter^{11,12)}による学習曲線に関する報告が起源とされている¹³⁻¹⁵⁾。彼らはモールス信号の送受信の学習について研究し、モールス信号の受信に対する学習曲線が高原現象 (plateaus) を示すことを明らかにした。高原現象とは、練習による学習の成果が停滞する時期のことであり、Bryan & Harter は、モールス信号の受信において 1 分間に処理可能な文字数が直線的に増加する時期 (first ascent) の後に、増加の程度が停滞する時期が生じ (first plateau)、その後、処理可能な文字数が増加する時期 (second ascent) が再度訪れることを明らかにした。そして、高原現象は、モールス信号の処理単位が文字レベルから単語レベル、単語レベルから文節や文章レベルへと移行する時期に生じており、下位のレベルでの処理能力は最大限に高められつつあるものの、上位のレベルに移行できるほどには十分に自動化されていない時期であると説明した。Bryan & Harter の研究は、技能の階層構造とその学習過程について述べられたものであり、その後、高原現象の存在と解釈に関して長きに渡る論争を巻き起こした^{16,17)}。

Bryan & Harter の研究に端を発してから現在に至るまで、運動学習研究は様々な要因に影響を受けながら変遷してきている。運動学習研究の歴史的な変遷についての概説はこれまでも Arthur L. Irion¹³⁾, Jack A. Adams¹⁴⁾, Richard A. Schmidt¹⁵⁾ により行われている。それらの共通点は運動学習研究を複数の期間に区分しているところであり、全ての概説が第 2 次世界大戦前後で期間を区分している。Irion¹³⁾ は 1890 年から 1927 年を第 1 期とし、この時期を定義 (definition) と探索 (exploration) の時期だと述べている。さらに、1927 年から 1945 年を第 2 期とし、この時期には、他の心理学領域から実験手法や概念を取り込むことに加え、いくつかの理論が構築されることによって、実験研究が飛躍的に洗練化されたと述べている。第 3 期 (1945-1965) は運動制御・運動学習に関する研究報告が爆発的に増えた時期であり、他の時期と比較すると約 3 倍も報告数が増加したと述べている。Irion はこの増加を当然と捉えており、その理由として、①第 2 次世界大戦による社会的要請により、運動技能 (航空機の操縦や射撃など) やその学習過程に関する高度な知識を有した心理学者の研究グループが多数構成され、その心理学者達が戦時中に蓄積しておいた研究構想に戦後取り組んだ、②第 2 期においていくつかの理論モデルが構築されており、運動技能に関する研究の位置付けと方向付けがされていた、③第 2 次世界大戦前に心理学者が使用していたデータ分析手法よりも精巧で有力なデータ分析手

法が開発された，④第2次世界大戦後においても運動技能に関する研究には豊富な研究資金が与えられたことを挙げている。

Adams¹⁴⁾はさらに，1970年から1987年について述べている。この時期，第2次世界大戦後に増大していた運動学習研究に減衰が認められるようになった。その原因として Adams は，軍事機器の自動化の進展に伴い運動学習研究に対する政府支援が減少したこと，1940年代と1950年代の研究に影響を与えた理論モデルに研究者が魅力を感じなくなってきたこと，行動主義に代わり認知心理学者が台頭するようになったが，1980年代に入るまで認知心理学者は学習に興味を持っていなかったことを挙げている。さらに，なぜ認知心理学者が運動学習研究に興味を持っていなかったのかについて，行動主義心理学者との対立により注意や記憶，高度な精神的処理といった観点とともに学習に関する研究も排除されてしまったこと，当時の認知心理学は人間の認知過程をデジタルコンピュータに仮定した情報処理アプローチに基づいており，コンピュータそのものは学習しないことから，そのアプローチにも学習は含まれていなかったことが影響していると述べている。このような背景により，心理学領域における運動学習研究に対する注目は減衰した。しかしその一方で，体育学領域において運動学習が注目されるようになった。体育学領域において運動学習が注目されるようになったのは，体育学領域における運動行動研究の生みの親とされている Franklin M. Henry の功績によるところが大きい。Henry は，心理学と体育学の両領域に精通しており，心理学的な手法や実験装置，測定方法を使用する一方で，スポーツ動作のような全身運動を課題に用いた。Henry は素早い運動制御における運動プログラムの役割^{18,19)}，反応時間²⁰⁾，パフォーマンスの個人差^{21,22)}などについて検討した。また，多くの大学院生を指導し，彼の手法や観点到に賛同する多くの研究者を輩出した。体育学や運動学の分野に対する Henry の直接的あるいは間接的な影響は，1970年から1980年頃までの広範囲に及んだとされている¹⁵⁾。

現在では，運動学習は様々な領域で扱われる学際的なテーマとなっている。例えば，運動学，体育学，神経生理学，実験心理学，教育心理学，人間工学，運動発達学などが挙げられ²³⁾，このことは運動制御と運動学習の両側面を持ち合わせた理論である Schema 理論²⁴⁾が多様な領域で引用されていることから窺い知ることができる。その中には，理学療法学や作業療法学も含まれており，リハビリテーションの領域において運動学習は欠かせない概念となっている。

1.1.2.2 理学療法との接点

次に、運動学習研究と理学療法の接点について述べる。

理学療法では患者の日常生活動作の改善あるいは効率化を図る。日常生活動作は、ADL (Activities of Daily Living) の日本語訳としてリハビリテーション領域において広く定着している概念であり、1945年に Deaver と Brown²⁵⁾によって生み出され、さらに1952年に Rusk と Lawton²⁶⁾によって発展した。日本では1976年に日本リハビリテーション医学会²⁷⁻²⁹⁾が、「ADLは、ひとりの人間が独立して生活するために行う基本的な、しかも各人ともに共通して毎日繰り返される一連の身体動作群をいう。この動作群は、食事、排泄などの目的をもった各作業（目的動作）に分類され、各作業はさらにその目的を実施するための細目動作に分類される。リハビリテーションの過程や、ゴール決定にあたって、これらの動作は健常者と量的、質的に比較され記録される」と定義している。この定義ではADLを動作群と捉えているが、上田³⁰⁾は、ADLは単なる身体動作ではなく、目的をもった行為であることから日常生活行為とするのがより適切であろうと提案している。中村ら³¹⁾は人間の運動行動(motor behavior)を運動(movement)、動作(motion)、行為(action, conduct)の3側面から捉えた上で、「運動は姿勢(体位と構え)が時間的に連続して変化したもので、身体軸と重力の関係(体位: position)、身体の動きの方向、身体の各部位の相対的な位置関係(構え: attitude)の変化として記述される。動作は、運動によって具体的に行われる仕事(work)、課題(task)との関係で行動を分析するときの単位となる。行動を、それが示す社会文化的意味や意図との関連でとらえるときには、行為が単位となる」と述べている。従って、動作、行為はともに運動行動に含まれる概念であり、大きく捉えると、理学療法では患者の運動行動の改善あるいは効率化を図ることが目的となると言い換えることができる。運動行動を行い得る能力は運動技能(motor skillsあるいはskills)であり、運動技能は、Annett³²⁾により「練習の結果としてより良く組織化され、効果的になった人間のあらゆる活動」と定義され、Gnetile³³⁾により「一貫して目的を達成できる能力」と定義されている。さらに、練習や経験の結果として、運動技能に比較的永続的な変化が生じる過程は運動学習である。従って、理学療法では運動学習を通じて患者の日常生活動作の改善あるいは効率化を図っているといえる。

運動技能の習熟には練習が不可欠であり、高度に運動技能を習熟させるためには長期に及ぶ練習が必要であるとされている。Crossman³⁴⁾は葉巻を作成するのに要する時間と練習回数との関係を調査し、運動技能と練習回数の関係を数学的モデルで表している。その報告では、葉巻を作

成するのに要する時間がそれ以上短縮しないまでに運動技能が向上するのに必要とする期間は2年間、回数にして300万回の反復練習が必要であることが示された。また、Ericssonら³⁵⁾は、習熟したピアニストは少なくとも10000時間以上の練習を重ねていると推定し、素人のピアニストと比較すると、その練習量は5倍以上になると述べた。以上の報告からも、運動技能の獲得、習熟において練習量が重要な要因であることは明らかである。しかし、実際の理学療法場面では練習期間は限られている場合が多く、限られた期間の中で如何に運動技能の習熟を図るかが重要になってくる。期間による制約が存在する中で、最大限に運動学習を引き起こすためにはいくつかの方策が考えられる。その1つが限られた期間の中で練習回数を多く確保することである。この考え方は、Carr & Shepherdの治療概念³⁶⁻³⁸⁾にも取り入れられている。入院中の患者の多くが、理学療法以外の大半の時間を安静にして過ごしており³⁹⁻⁴¹⁾、理学療法時間であってもその42%が臥位での非活動、11%が臥位での活動、16%が座位での活動、31%が立位での活動に充てられ、典型的な有酸素運動は行われたとしても3分未満であったと報告されている⁴²⁾。Carr & Shepherdはこのような現状に対して、ある技能を獲得したいと思うのであれば1日のうちの多くの時間を練習に費やす必要があり、神経系に障害を有する者であっても例外ではないと述べ、サーキット・クラス・トレーニングを提唱した³⁸⁾。サーキット・クラス・トレーニングは①2人以上の患者に同時に提供する、②個々の患者に合わせたプログラムを行う、③様々な機能を有する集団に対して提供する、④スタッフと患者の比率は1:3程度を満たすトレーニングを指す⁴³⁾。このトレーニング方法では理学療法士と患者が1対1で練習をするだけでなく、理学療法士または助手による半監視あるいは患者がグループで一緒に練習を行うことで練習時間の確保に繋げる。サーキット・クラス・トレーニングの効果は多くの研究によって明らかにされており、通常 of 理学療法に加えて行うことで、脳卒中患者の移動能力を高める^{44,45)}、上肢機能を改善させる⁴⁶⁾ことが報告されている。さらに、サーキット・クラス・トレーニングとマンツーマンでの理学療法の効果を比較した研究⁴³⁾では、サーキット・クラス・トレーニングを受けた群はマンツーマンで理学療法を受けた群と同程度の歩行能力と上肢機能の改善を示したことに加え、退院時の歩行自立度と介入に対する満足度がマンツーマンでの理学療法よりも有意に優れていたことが報告されている。このように、患者が練習する機会を増やせるような環境を整備することは、運動技能の獲得に有効な方策であると考えられる。

他の方策としては、運動学習を効率化するという考え方がある。ここでの運動学習の効率化とは、限られた練習期間や練習回数の中で最大限に運動技能を高めること、あるいは求められる水準まで運動技能の習熟

を引き起こすのに必要な練習回数を減少させることである。練習回数が同一であれば、運動学習の効率と練習による運動技能の習熟には正の相関が存在するといえる。実際の理学療法場面では練習できる期間が限られており、その制約の中で必要な動作を獲得しなければならないため、運動学習の効率化は理学療法における命題といえる。運動学習研究では、練習条件が運動学習の成果に与える影響は様々に検討されてきており、理学療法の臨床に示唆を与えるものも多い⁴⁷⁻⁴⁹⁾。従って、以下では運動学習研究の中でも理学療法場面に特に重要な示唆を与えると思われる事象について述べる。

Learning-Performance-distinction

練習中のパフォーマンスには、練習による一時的効果 (temporary effects) と永続的効果 (relatively permanent effects) が含まれており、その全てが学習の成果を反映しているわけではない。つまり、練習中のパフォーマンスと運動学習の成果には乖離 (Learning- Performance distinction) が存在する^{50,51)}。この乖離に関する初期の報告に Tolman & Honzik の報告がある。Tolman & Honzik⁵¹⁾はラットに迷路課題を与え、その学習過程を観察した。その観察の中では、課題を何度繰り返してもラットのパフォーマンス (目的地にたどり着くまでの時間) は変わらなかったが、餌による報酬を与えたところ、ラットのパフォーマンスが突然向上した。以上の結果から、Tolman & Honzik は、ラットは学習していなかったのではなく、意欲の低下により学習の成果が隠されていたのだと述べた。人間の場合も同じように、練習中のパフォーマンスは様々な要因から影響を受けることが明らかになっている⁵²⁾。例えば、指導者から与えられる教示や演示、フィードバック、学習者の意欲や身体的あるいは精神的疲労、練習環境などが挙げられる。運動学習の定義が「技能的行動を行い得る能力の比較的永続的な変化を引き起こす練習や経験に基づく一連の過程」であることから、パフォーマンスの変化のうち、練習・経験による永続的効果のみを運動学習の成果と見做すことができる。練習中に生じる一時的効果は、学習者が休憩することや、実験的操作が取り除かれることにより消失してしまうことから、学習の成果とは見做されない。練習によるパフォーマンスの変化がどの程度永続的効果を含んでいるかをその場で判断することが困難であることから、Schmidt & Bjork⁵²⁾は、学習者が練習中に示すパフォーマンスは学習の成果を表す指標としては不完全であると述べている。

練習中のパフォーマンスと運動学習の成果には乖離が存在することは、理学療法の臨床に重要な示唆を与える。なぜなら、患者が理学療法を受けている間に示すパフォーマンスには、練習により生じる一時的効果と永続的効果が混在しており、この時のパフォーマンスを基に運動学習の

成果を判断することは適切ではないことを示しているからである(図2)。Bjork¹⁰⁾は、指導者が学習者の練習中のパフォーマンスを基に間違っただけの強化を受け、学習者がその場でのより良いパフォーマンスに安心感を抱くことが、間違っただけの練習方法が使用され続ける原因だと述べている。間違っただけの強化とは、練習中のパフォーマンスと運動学習の成果を同一のものとして捉え、練習中のパフォーマンスを高められる練習方法が運動学習の成果も高めるという誤った認識を持ってしまうことである。多くの場合、理学療法場面では、一時的なパフォーマンスよりも永続的なパフォーマンスの向上が求められるため、永続的な効果を高められる練習方法に基づいて理学療法を展開することが必要となる。

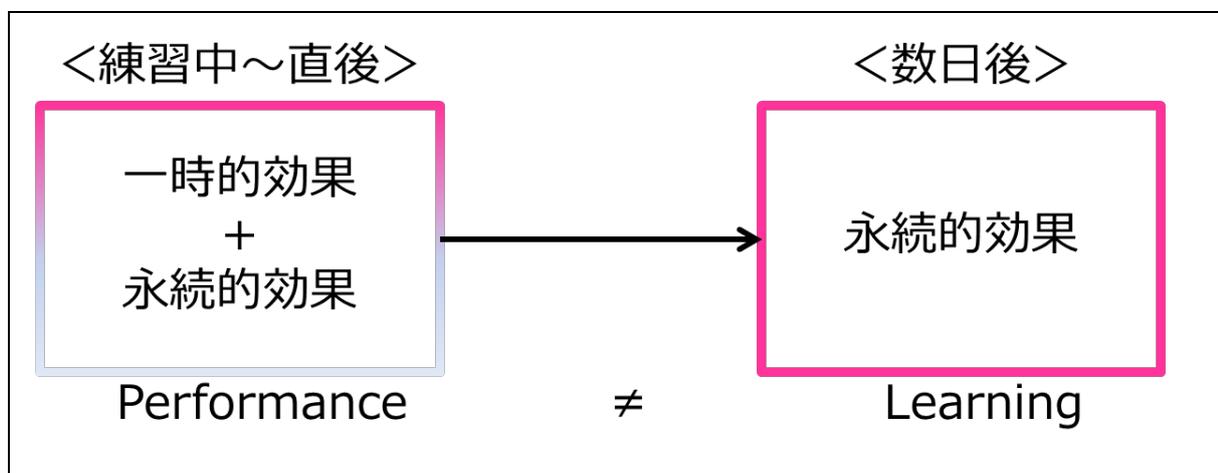


図 2. Learning- Performance distinction

Transfer design

Learning- Performance distinction の存在は古くから知られていた^{51,53-55)}にも関わらず、多くの運動学習研究では練習中のパフォーマンスと運動学習の成果を区別せずに扱っていた。そのような状況に対し、Salmoni ら⁵³⁾は概念の転換が必要であると述べ、練習中のパフォーマンスと運動学習の成果を区別する必要性を唱えた。そこで考案されたのが、トランスファー・デザイン(Transfer design)という実験手法である⁶⁾。トランスファー・デザインの目的は、練習中に生じるパフォーマンスの変化から一時的効果を排除し、永続的効果のみを抽出することにある。

トランスファー・デザインは大きく分けてプレテスト、練習試行、ポストテストの3つの要素から構成される(図3)。プレテストとは、練習試行前の学習者の技能レベルを把握するために行うテストであり、練習前の個人差を把握するために実施される。練習試行では、実験の目的に沿って様々に練習条件が操作される。そして、各操作による運動学習への影響を検討することによって、運動学習に有利な練習方法の開発や運動学習の根底にある機構の解明を行う。ポストテストとは、練習試行後にある程度の期間を空けてから行われるテストであり、練習した課題と同じ課題を用いるポストテストは保持テスト(retention test)、練習した課題とは異なる課題を用いるポストテストは転移テスト(transfer test)と呼ばれている。練習による一時的効果は時間経過とともに消失するので、練習試行とポストテストの間に十分な時間間隔を設けることにより、一時的効果を排除することができる。そして、練習によるパフォーマンスの変化から一時的効果を除いたものを練習による永続的効果、つまり学習の成果と見做すことができるのである。

トランスファー・デザインの観点は理学療法臨床にも応用が可能である。例えば、プレテストとして理学療法実施前における患者の技能レベルを測定し、保持テストとして同一環境における翌日の患者の技能レベルを測定する。あるいは転移テストとして異なる環境(病棟や自宅など)における患者の技能レベルを測定する。このような手続きを踏むことで、理学療法場面においても運動学習の成果を判断することが可能となる。

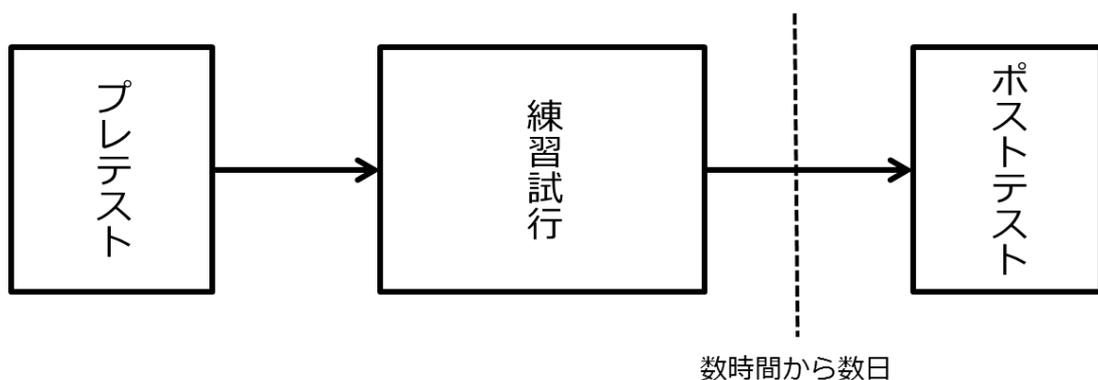


図 3. Transfer design の構成

Task difficulty

トランスファー・デザインの考案以降，練習中のパフォーマンスと運動学習の成果が明確に区別されるようになり，運動学習の成果をより引き出せる練習条件の探索が盛んに行われるようになった。その中でも課題配置方法とフィードバックの与え方は大きな注目を受け，広い範囲で研究された。その結果，ランダム練習や低頻度フィードバックが運動学習にとって効果的であると一般的に認識されるようになった。しかし，近年，この認識に対して異議が唱えられるようになった。その中心となったのが Wulf & Shea⁵⁶⁾と Guadagnoli & Lee⁵⁷⁾である。Wulf & Shea⁵⁶⁾はこれまでの運動学習研究を概観し，その多くが比較的単純な課題を用いた実験であることを指摘し，複雑な課題を用いた実験では単純な課題を用いた実験とは異なる結果が得られていることを報告した。Wulfらの指摘以降，実験室的課題から実際のスポーツ動作のような課題を用いた研究が増加し，その中にはランダム練習よりもブロック練習の方が運動学習に良い影響をもたらすといった報告⁵⁸⁾や，高頻度フィードバックが低頻度フィードバックよりも運動学習を促すといった報告⁵⁹⁾が見受けられるようになった。

また，Guadagnoli & Lee⁵⁷⁾は，同一の運動課題であったとしても，異なる技能レベルを持つ学習者に対しては異なる課題に相当するという観点から，課題の難易度を課題自体の複雑さと学習者の技能レベルの関係から捉えた。そして，運動学習にとって最適な課題難易度を説明する枠組みとして **challenge point framework** を提唱した。この枠組みでは，同一の課題であったとしても，それを遂行する学習者の技能レベルにより最適な練習条件は異なることが示されている。

Wulf & Shea の指摘と Guadagnoli & Lee により提唱された枠組みは，運動学習研究で培われてきた知見を理学療法の臨床に応用する際に重要な示唆を与える。なぜなら，理学療法の臨床において理学療法士が患者に運動を指導する際，技能レベルは患者によって異なるため，練習方法を画一的に決定することはできないことを示しているからである。従って，理学療法士には患者の技能レベルと学習課題の難易度の関係から，適切な練習条件を選択することが求められる。しかし，現在までに，適切に練習条件を選択するための明確な指針は存在しておらず，理学療法士の主観的あるいは経験に基づいた選択に依存せざるを得ないのが現状である。明確な指針が確立され，適切に練習条件を設定できるようになれば，理学療法の臨床において運動学習は効率化されると考えられる。そこで，本論文では，**challenge point framework** に基づき，最適な練習条件を選択するための手段の確立を図る。それ故，以降では **challenge point framework** について概説し，その検討方法について述べる。

1.1.3 Challenge Point Framework

課題難易度が運動制御や運動学習に影響を与える重要な要因の1つであることは広く認識されているものの、その用語を定義することは容易ではないとされている。Wulfら⁵⁶⁾は、多種多様な運動課題に対して共通する課題難易度を定義することは、実用的および理論的な理由から困難であると述べている。例えば、先行研究において課題難易度と反応時間^{19,60)}、動作時間⁶¹⁾、反応の誤差やばらつき⁶²⁾、運動の自由度⁶³⁾が関連することが提唱されている。しかし、ある種の離散運動では動作時間が有効な指標に成り得たとしても、連続運動では動作時間が有効な指標とは成り得ない。同様に、到達課題では自由度の数が増えるにつれて制御しなければならない変数が増えるため課題難易度は上昇する傾向があるが、機器の操縦課題などでは両手操作よりも片手操作の方が課題の遂行が困難であり、課題難易度が高くなる傾向がある。このような場合、自由度の数を課題難易度の指標として用いることは適切ではない。以上より、ある課題にとって課題難易度を反映する良い指標であったとしても、その指標が他の課題にとっても良い指標ではあるとは限らない。

そこで、Guadagnoli & Lee⁵⁷⁾は、過去の研究で用いられてきた課題難易度に対する様々な操作的定義から課題難易度を2つに分類し、課題難易度と学習利得 (learning benefit) を関連付ける枠組みとして challenge point framework を提唱した。この枠組みの特徴は、課題難易度を名目的課題難易度 (nominal task difficulty) と機能的課題難易度 (functional task difficulty) という2つのカテゴリーに分類している点と、運動学習における最適な課題難易度は学習者の技能レベルにより異なるということを示している点にある。

名目的課題難易度とは、学習者の技能レベルや練習条件に影響を受けない課題難易度であり、課題固有の難易度のみを表す。そのため、同じ運動課題を初心者か、あるいは熟練者が遂行するかによってその課題の成功率や成績は異なるが、課題自体は同じであるため、名目的課題難易度は同じである。

機能的課題難易度とは、課題の複雑さ (名目的課題難易度)、学習者の技能レベル、練習環境に影響を受ける課題難易度である。そのため、同じ課題であったとしても、その課題を遂行する学習者の技能レベルや練習環境が異なれば機能的課題難易度は異なる。名目的課題難易度、学習者の技能レベル、練習環境と機能的課題難易度の関係を図4に示す。

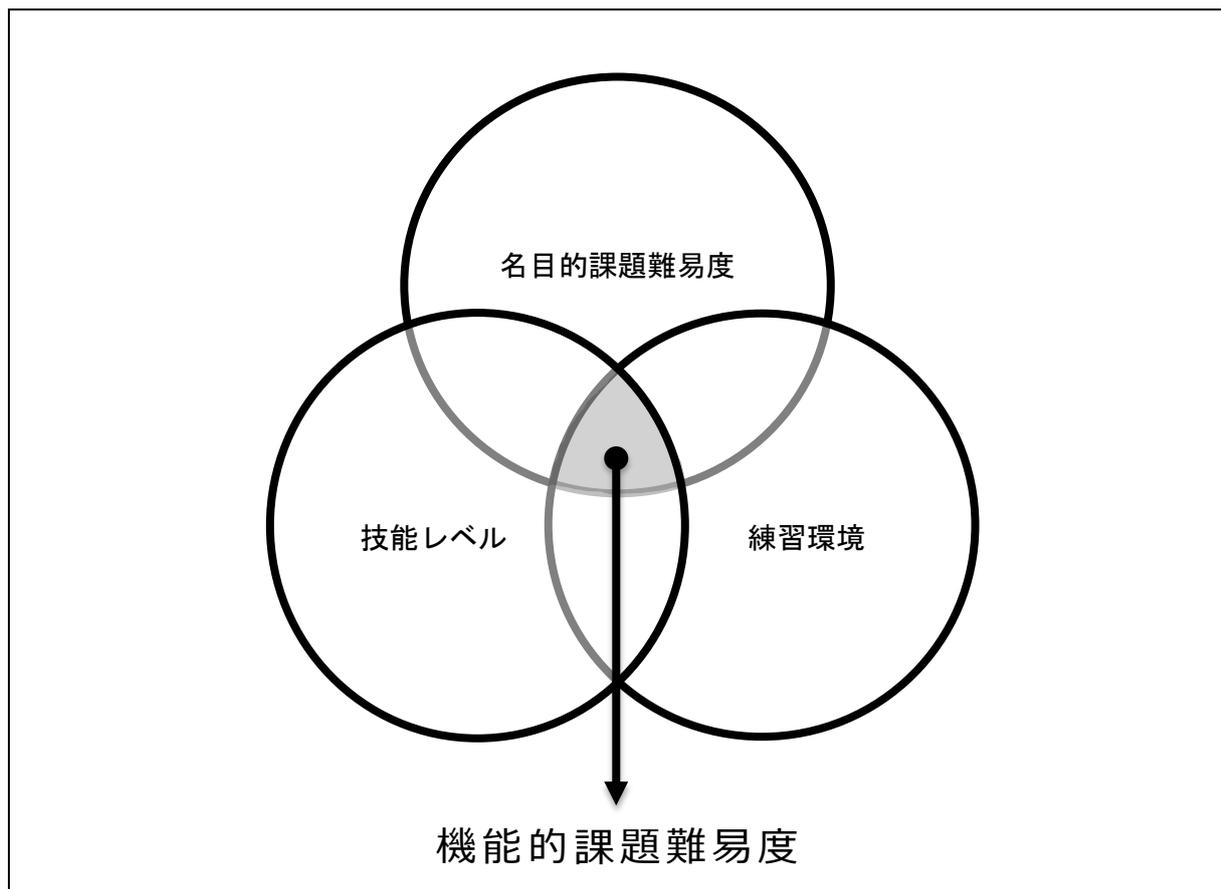


図 4. 機能的課題難易度の構成要素

challenge point framework は、情報理論に基づいた枠組みであり、機能的課題難易度を課題の有する情報量と学習者の情報処理能の関係から説明している。課題の有する情報量とは、課題遂行中に遂行者が利用可能な情報であり、この情報は運動プランとフィードバックから得られるとしている⁵⁷⁾。ここでの運動プランとは一連の行為を実行する順序を制御する生活体内の階層構造的過程⁶⁴⁾と定義され、運動制御と運動学習を統合した理論であるフィードバック誤差学習理論における内部モデル^{65,66)}として作用する。フィードバック誤差学習では目標の軌道と実際の軌道間の誤差が運動指令の誤差信号として下オリーブ核から登上線維を通して小脳プルキンエ細胞に伝達される。登上線維からの入力は、長期抑圧などのメカニズムによってプルキンエ細胞に可塑性変化をもたらし、運動の遂行毎に小脳の内部モデルの修正が行われる。そして、内部モデルが修正されることで運動の精度が増すとされている。フィードバック誤差学習理論は多くの先行研究により支持されており、運動指令にあたるプルキンエ細胞の単純スパイク発火頻度の変化が理論の予測と一致していること⁶⁷⁾や、登上線維入力によりプルキンエ細胞に生じる複雑スパイクが運動指令の誤差情報を反映していること⁶⁸⁾が報告されてい

る。ここで、フィードバック誤差学習理論における内部モデルが **challenge point framework** における運動プランに相当すると考えられることから、**challenge point framework** における情報とはフィードバック誤差学習理論における誤差信号に相当し、誤差信号が大きければ大きいほど、利用可能な情報は増加することになる。学習者は課題遂行中あるいは遂行後に利用可能な情報を解釈し、運動プランを修正することで運動技能を向上させていく。そのため、利用可能な情報の増加は解釈可能な情報の増加を引き起こし、学習利得を高める。しかし、ある程度以上に利用可能な情報が増加してしまうと、学習者はそれ以上の情報を解釈できなくなってしまう。なぜなら、学習者の情報処理能には限界が存在するからである⁶⁹⁾。それどころか、学習者の情報処理能を上回る情報が与えられてしまうと、学習者の情報処理機構は破綻してしまい、運動学習は阻害されてしまう⁷⁰⁾。従って、学習利得を高めるためには、学習者の情報処理能に見合った情報量を有する課題を学習者に与えることが必要となる。

1.1.3.1 機能的課題難易度と学習利得の関係

利用可能な情報量は名目的課題難易度と練習環境に依存し、学習者の情報処理能は技能レベルに相当する。利用可能な情報量と学習者の情報処理能の関係により解釈可能な情報量が定められることから、解釈可能な情報量は機能的課題難易度に相当する。また、解釈可能な情報が運動学習に直接的な影響を与えることから、2つに分類された課題難易度のうち機能的課題難易度が運動学習に直接的な影響を与えるとされている。機能的課題難易度が低い状態では、学習者の情報処理能に対して利用可能な情報が少なく、学習利得が小さくなってしまう。その結果、必要な水準まで運動技能を習熟させるのに要する時間は長くなり、学習効率が悪くなる。一方で、機能的課題難易度が高い状態では、学習者の情報処理能に対して利用可能な情報が過多となり、学習者の情報処理機構が破綻することで、運動学習の効率は悪くなる。学習者の情報処理能に見合った情報量を有する課題が与えられた時に、最も効率的に情報が処理され、学習利得は最適化される。**challenge point framework** では学習利得が最も大きくなる機能的課題難易度を **optimal challenge point** と呼んでいる(図5)。機能的課題難易度は、名目的課題難易度や練習環境(課題配置方法やフィードバックの与え方、身体介助の有無やその程度)を操作することで調整が可能であり、機能的課題難易度を意図的に **optimal challenge point** と一致させることで、運動学習を効率化することができると考えられる。

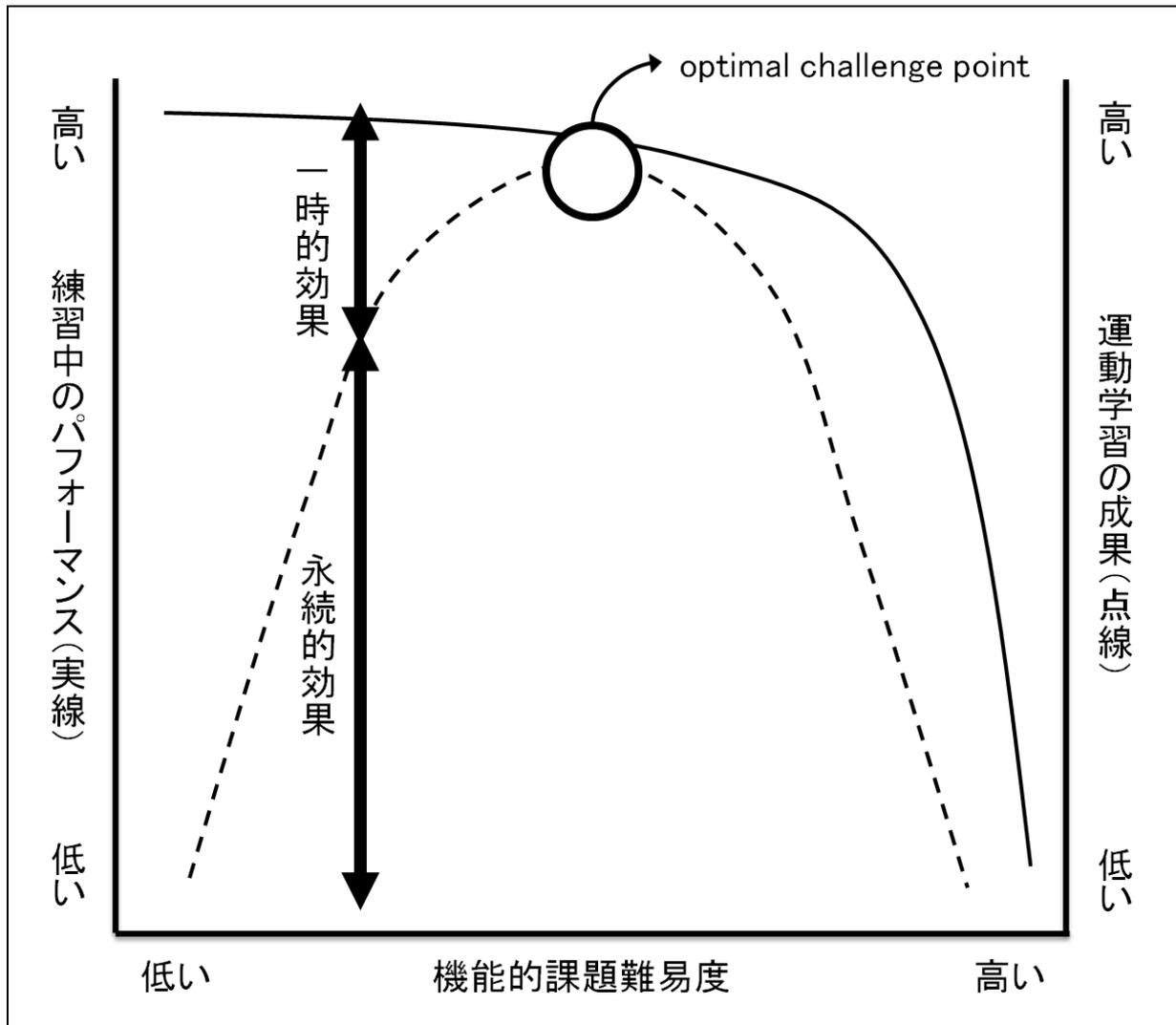


図 5. 機能的課題難易度が練習中のパフォーマンスと学習利得に与える影響

1.1.1.3.2 機能的課題難易度に影響を与える要因

challenge point framework における最適な課題難易度とは、optimal challenge point に相当する機能的課題難易度である。機能的課題難易度は名目的課題難易度、学習者の技能レベル、練習環境に影響を受けることから、それらの変数を操作し、機能的課題難易度を optimal challenge point と一致させることで運動学習は促進される。しかし、実際には、学習者の技能レベルそのものを操作することは困難であるため、学習者の技能レベルに合わせて課題や練習条件を操作することで、機能的課題難易度を操作することとなる。

1.1.3.2.1 課題の操作

運動課題の分類

課題を操作する際、Gentileの課題分類¹⁾を参考にすることができる。Gentile³³⁾は、課題を環境の規制状態（課題遂行中の環境変化の有無）、試行間変動性（試行間における環境変化の有無）、身体姿勢（身体移動の有無）、操作（対象物操作の有無）の4つの面から分類している（表1）。この分類では、課題遂行中の環境と試行間における環境に変化が無く、身体移動や対象物の操作を伴わない課題において最も課題の変動性が低く、課題の有する情報量が少ない。一方で、課題遂行中の環境と試行間における環境に変化があり、身体移動や対象物の操作を伴う課題において最も課題の変動性が高く、課題の有する情報量が多くなる。課題の有する情報量を操作することによって機能的課題難易度を調整することが可能なため、学習者の技能レベルに合わせて課題の変動性を操作することで機能的課題難易度を調整することが可能である。

装具や歩行補助具

また、理学療法場面で歩行練習を行う際の課題難易度調整方法として装具や歩行補助具の段階的な使用が挙げられる⁷¹⁾。例えば、短下肢装具を使用する場合には、足関節の関節自由度が削減されるため、学習者は膝関節と股関節の制御に関する情報処理に集中することができる。長下肢装具を使用する場合には、足関節に加え膝関節の関節自由度も削減されるため、学習者は体幹や股関節の制御に集中することができる。機能的課題難易度は課題の有する情報量と学習者の情報処理容量の関係で規定されるため、装具により運動の自由度を操作することで、課題の有する情報量を操作することが可能である。

以上のように、実際の臨床場面では獲得すべき動作が定められているため、課題そのものを変更することは現実的ではないが、運動課題の分類を参考に課題の変動性を操作することや、装具や歩行補助具により自由度を操作することで課題に含まれる情報量を操作することは可能である。そして、機能的課題難易度を **optimal challenge point** と一致させるように課題に含まれる情報量を調整することで、運動学習を促進させることができる。

表 1. Gentile の課題分類

環境規制状況	身体の移動なし		身体の移動あり	
	対象物の操作なし	対象物の操作あり	対象物の操作なし	対象物の操作あり
環境変化なし				
試行間変動性なし	身体移動のない閉運動課題	対象物の操作を含む身体移動のない閉運動課題	身体移動のある閉運動課題	対象物の操作を含む身体移動のある閉運動課題
試行間変動性あり	異なる固定環境における身体移動のない閉運動課題	異なる固定環境において対象物の操作を含む身体移動のない閉運動課題	異なる固定環境における身体移動のある閉運動課題	異なる固定環境において対象物の操作を含む身体移動のある閉運動課題
環境変化あり				
試行間変動性なし	一定の動的環境における身体移動のない閉運動課題	一定の動的環境において対象物の操作を含む身体移動のない閉運動課題	一定の動的環境における身体移動のある閉運動課題	一定の動的環境において対象物の操作を含む身体移動のある閉運動課題
試行間変動性あり	身体移動のない開運動課題	対象物の操作を含む身体移動のない開運動課題	身体移動のある開運動課題	対象物の操作を含む身体移動のある開運動課題

1.1.3.2.2 練習条件

これまでに、運動学習は課題配置方法^{72,73)}、フィードバックの与え方^{74,75)}、注意の焦点^{76,77)}、メンタルプラクティス^{78,79)}など多くの要因に影響を受けることが明らかにされている。その中でも、課題配置方法とフィードバックの与え方は、運動学習研究の中心的なテーマに位置付けられており¹⁴⁾、先行研究も多い。従って、以下では課題配置方法とフィードバックの与え方が機能的課題難易度に与える影響について述べる。さらに、理学療法の臨床場面で用いられることの多い身体介助が、機能的課題難易度に与える影響についても併せて述べる。

課題配置方法

課題配置方法とは複数の課題をどのような順序で練習するかに焦点を当てた変数であり、複数の課題を1課題ずつまとめて練習するブロック練習と複数の課題を無作為な順序で練習するランダム練習が比較されることが多い(図6)。多くの先行研究^{72,73)}により、練習中のパフォーマンスではブロック練習が優れているが、運動学習の成果を反映する保持テストではランダム練習が優れていることが報告されている(図7)。この現象は文脈干渉効果(contextual interference effect)として知られており、Battig⁸⁰⁾による言語学習領域の研究に起源を持ち、Shea & Morgan⁸¹⁾により運動学習領域においても同一の現象が確認されている。Shea & Morganは、3つの上肢運動課題をブロック練習する群とランダム練習する群に対象者を振り分け、練習中のパフォーマンスと練習終了10分後と10日後のパフォーマンスを比較した。その結果、練習中のパフォーマンスはブロック練習群の方が優れているものの、保持テストになるとランダム練習群の方が優れたパフォーマンスを示すことが明らかとなった。Shea & Morganの報告以降、文脈干渉効果は様々な単純課題を用いた実験室的研究により支持され、その効果の頑健性が示されている。

これまでに、文脈干渉効果の根底に存在する機構を説明するためにいくつかの仮説が提唱されている。その代表的なものに精緻化仮説^{82,83)}と忘却仮説⁸⁴⁾が挙げられる。精緻化仮説によると、ランダム練習では試行ごとに課題が異なるので、短期記憶内に複数の課題情報が併存することになり、課題間の特徴の比較・対比といった弁別処理が行われやすくなる。この課題間の比較・対比により、運動の記憶の精緻化が促され、パフォーマンスの長期的な保持が促進される。しかし、ブロック練習では短期記憶内に1つの課題情報しか存在しない。そのため、1つの課題についての情報処理は深まりやすいが、ランダム練習時に生じるような課題間の情報処理は行われない。このブロック練習に特徴的な課題内で

の情報処理は，練習中のパフォーマンスの改善には効果的であるが，長期的なパフォーマンスの保持の観点からは利益が少ないとされている。

一方，忘却仮説では，運動プランの忘却とそれに引き続いて起こる運動プランの再構築が強調されている。ランダム練習では試行ごとに課題が異なるため，再度同じ課題を遂行するまでに，異なる課題が数試行挿入されている。そのため，前回遂行時に使用した運動プランを忘却してしまい，新たに運動プランを構築する必要がある。毎試行における運動プランの再構築は，学習者の練習中における認知的負荷の上昇を引き起こし，練習中のパフォーマンスの低下を引き起こすが，パフォーマンスの長期的な保持（つまり，運動学習）は促進される。しかし，ブロック練習では同じ課題が連続して与えられるので，新たに運動プランを構築する必要がない。そのため，ランダム練習とブロック練習を比較すると，練習中のパフォーマンスではブロック練習の方が優れているが，保持テストではランダム練習の方が優れているとされている。

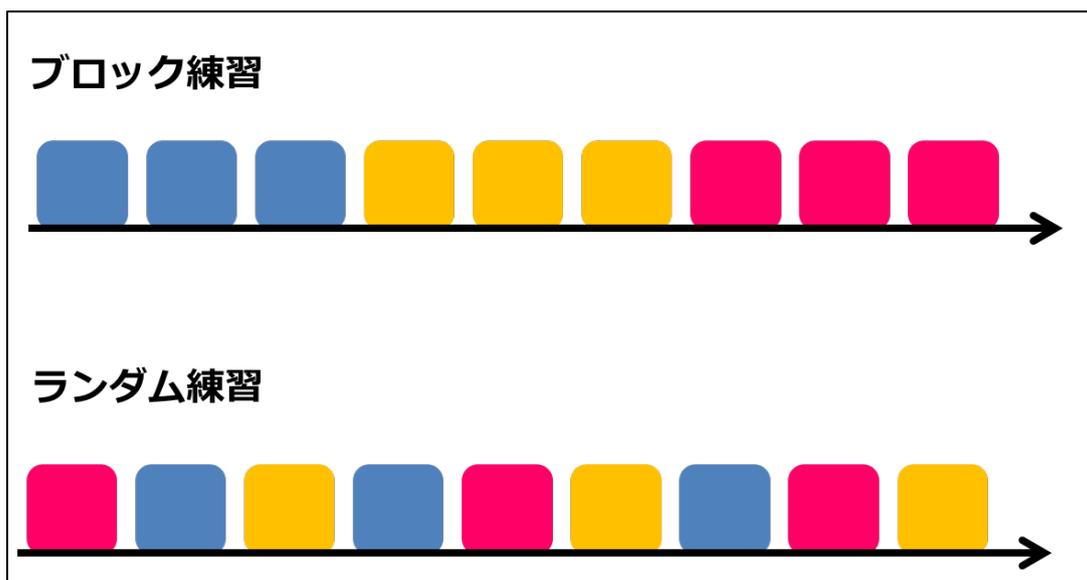


図 6. 課題配置方法ーブロック練習とランダム練習ー

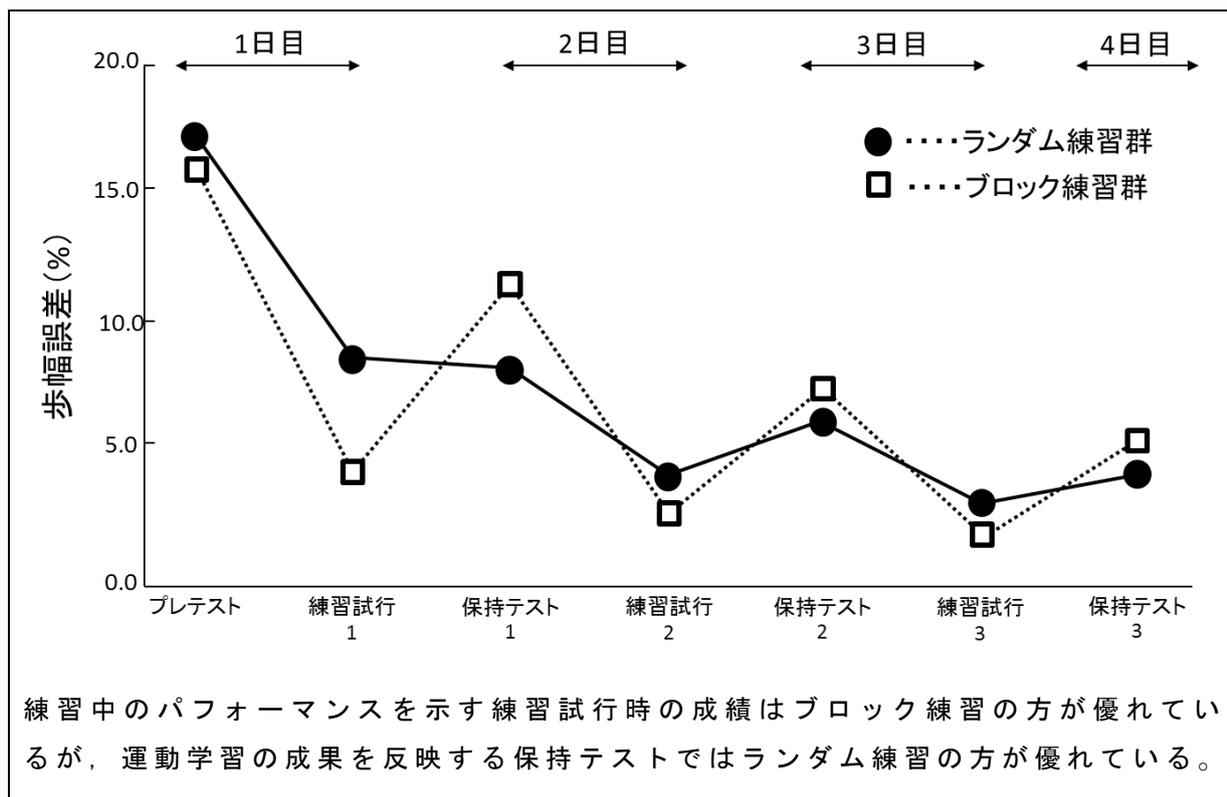


図 7. 課題配置方法が練習中のパフォーマンスと運動学習の成果に与える影響⁸⁵⁾

しかしながら、文脈干渉効果を検証するための過去の報告では単純な課題を用いた実験的研究が多く、Wulf & Shea⁵⁶⁾では、実際のスポーツ動作の様な複雑な課題を用いた検討の必要性が指摘されている。Hebert ら⁸⁶⁾は、大学生を対象にテニスのフォアハンドとバックハンドのストローク課題を用いて、課題配置方法に関する研究を報告している。対象者はプレテストの成績をもとに高技能群と低技能群に分けられ、さらにそれぞれの群はランダム練習群とブロック練習群に振り分けられた。その結果、高技能群ではポストテストの成績に練習条件による差は認められなかったにもかかわらず、低技能群ではランダム練習群よりもブロック練習群の方が優れた成績を示した。また、Albaret & Thon⁵⁸⁾は課題の複雑さと文脈干渉効果の関係を検討し、単純な課題では文脈干渉効果が認められるものの、課題が複雑になるにつれてその効果が減弱することを明らかにした。

以上の研究結果を考慮すると、ランダム練習はその特性から機能的課題難易度を上昇させる効果があり、単純な課題あるいは学習者の技能レベルが高い場合には運動学習にとって有効な練習条件であると考えられる（図 8. 左）。しかし、複雑な課題あるいは学習者の技能レベルが低い場合には、既に機能的課題難易度が高い状態にあるにも関わらず、ランダム練習に伴う認知的負荷の上昇により機能的課題難易度がさらに引き上げられることにより、機能的課題難易度が optimal challenge point を超過してしまい、運動学習を阻害してしまう。そのような場合には、ブロック練習のような練習条件が有効であると考えられる（図 8. 右）。

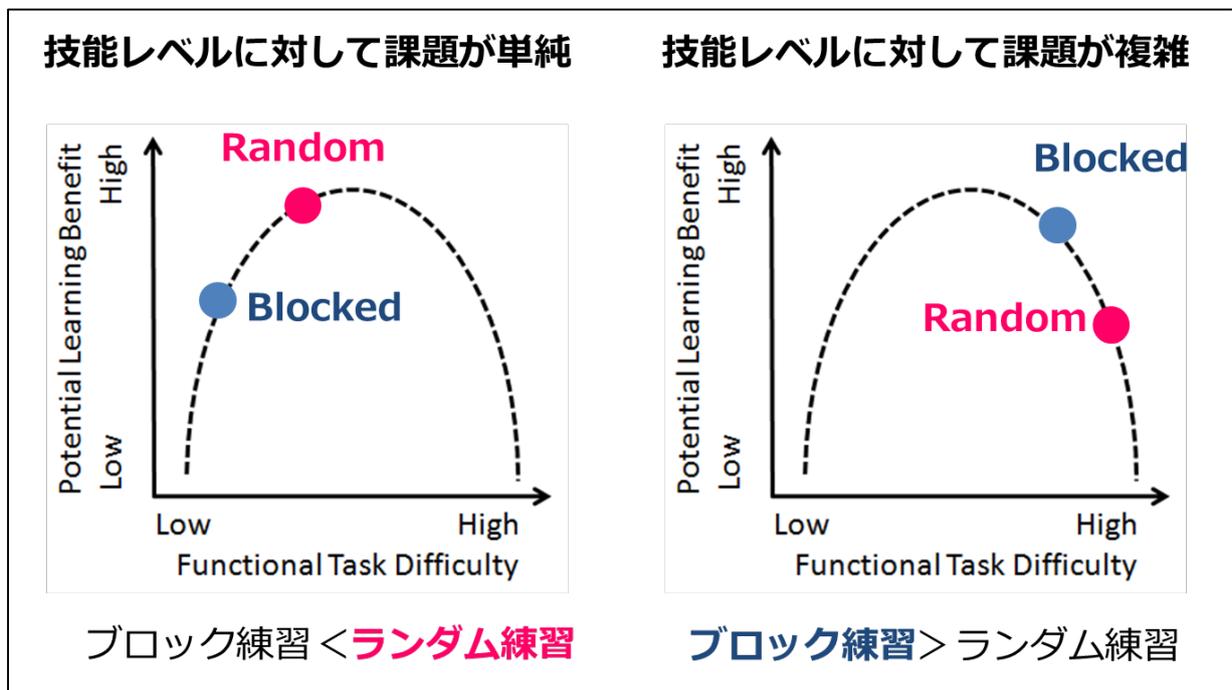


図 8. 課題配置方法が機能的課題難易度に与える影響

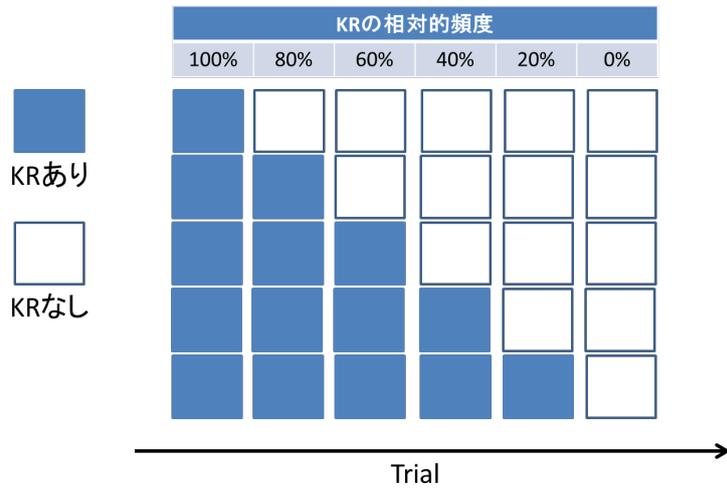
フィードバックの与え方

フィードバックとは、練習中あるいは練習後に動作の修正のために用いられる情報で、運動の結果として利用可能なものを指し、視覚、聴覚、固有受容感覚などの内在的フィードバックと外部から人工的に与えられる外来的フィードバックに分類される^{87,88)}。指導者が課題遂行後の学習者に与える言語的情報は外来的フィードバックであり、特に、目標とされる結果に対して学習者の遂行した結果がどの程度であったかの情報は、結果の知識（**Knowledge of Results**; 以下、**KR**）と呼ばれている。

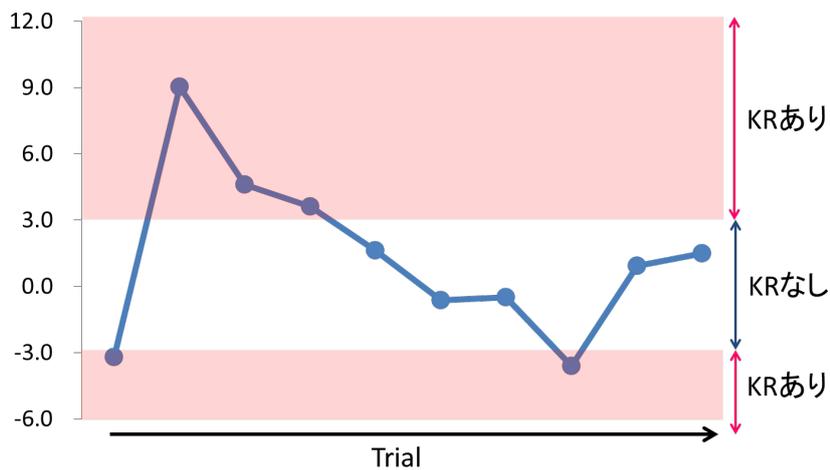
KRの与え方には様々な方法⁸⁹⁻⁹³⁾が提案されており（図9）、**KR**の与え方が運動学習に与える影響を検討した従来の研究では、遂行した試行に対して高頻度に**KR**を与えるよりも低頻度に**KR**を与えた方が運動学習を促進することが報告されている⁹¹⁾。また、毎試行直後に**KR**を与える即時**KR**よりも数試行分の**KR**をまとめて与える要約**KR**の方が運動学習には効果的であることが報告⁹²⁻⁹⁴⁾されている（図10）。この現象は、**Salmoni**ら⁵³⁾によって提唱されたガイダンス仮説（**guidance hypothesis**）により説明されることが多い。ガイダンス仮説では、**KR**は本来、誤差を伝える情報であるという性質から、高頻度あるいは即時的な**KR**には、練習中の学習者のパフォーマンスをより誤差の小さいものへと誘導する作用があると考えられている。そのため、正しい運動パターンを認識する必要がある学習初期段階の学習者に対しては、高頻度あるいは即時的な**KR**は正しい運動パターンを把握するのに有効に作用すると考えられる。その反面、高頻度あるいは即時的な**KR**は学習者の**KR**に対する依存を引き起こし、環境や課題からの手がかり、課題遂行によって生じる内在的フィードバック情報など課題遂行に関連する他の重要な情報に学習者が注意を向けることを阻害してしまう。そのため、学習の効率に対して抑制的に作用すると考えられている。

Schmidtら⁹³⁾は**Summary KR**の手法を用いた研究により、ガイダンス仮説を検証している。**Summary KR**はいくつかの試行に対する**KR**を試行終了後にまとめて与える**KR**付与方法である。従って、何試行分の**KR**をまとめて与えるかにより、**Summary KR**に含まれる**KR**数を操作することができる。**Schmidt**らはガイダンス仮説に基づき、以下の予測を立てた。**Summary KR**に含まれる**KR**数が少ない（つまり、より即時的に**KR**が与えられる）場合、**KR**の誘導作用により練習中のパフォーマンスは改善するが、**KR**への依存作用により、学習は阻害される。一方、**Summary KR**に適度な**KR**数が含まれている場合、**KR**による誘導作用が減弱し、練習中のパフォーマンスは阻害される。しかし、**KR**への依存が減少し、課題遂行による内在的フィードバックに注意が向けられることにより、誤差検出能の向上と誤差修正メカニズムの発達が促さ

● 削減的 KR (Faded KR) : 徐々に KR の相対的頻度を減少させていく方法



● バンド幅 KR (Bandwidth KR) : 予めバンド幅 (帯域幅) を設定し、バンド幅を超えた誤差に対してのみ KR を与える方法



● 要約 KR (Summary KR) : 複数の KR をまとめて与える方法

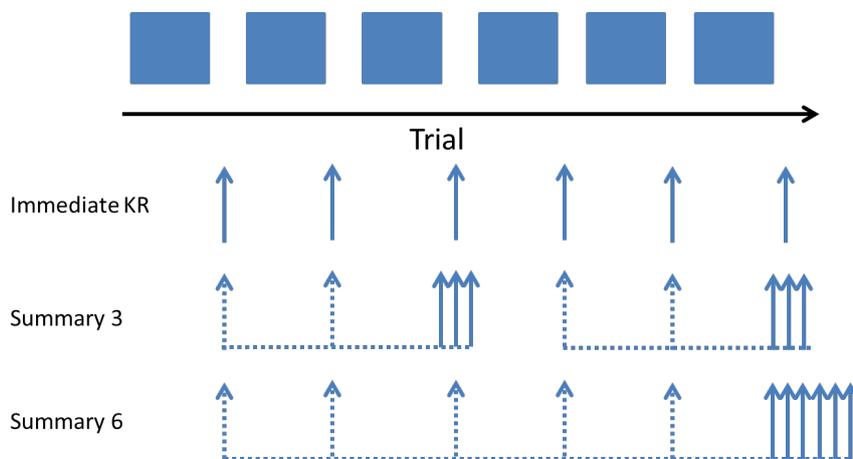


図 9. 代表的な KR の与え方

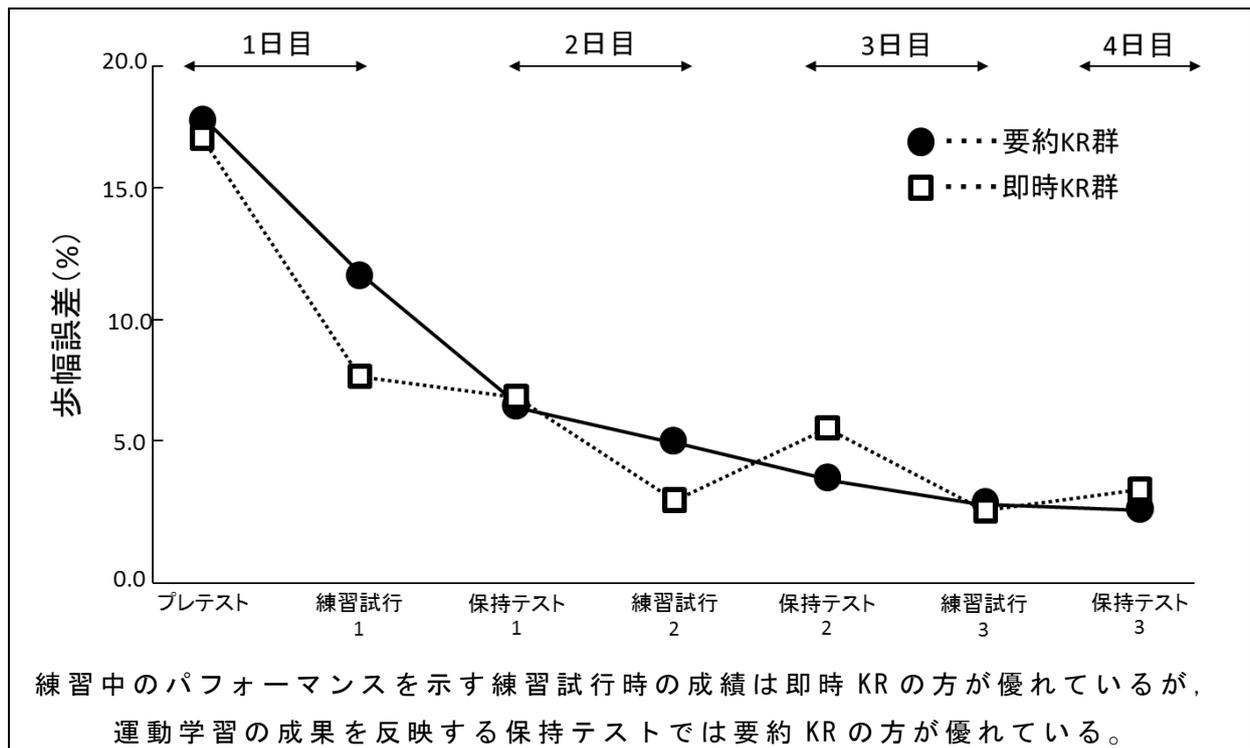


図 10. フィードバックの与え方が練習中のパフォーマンスと運動学習の成果に与える影響⁹⁴⁾

れ、学習過程にとって効果的である。しかし、Summary KR に含まれる KR 数が過度に多い（課題遂行から KR が与えられるまでの時間間隔が長い）場合、さらに KR の誘導作用が減弱することで、目的とする運動パターンが不明瞭となり、学習が阻害される。この予測に基づいて Schmidt らは、Summary KR に含まれる KR 数を 1（毎試行後に KR が与えられる）、5、10、15 に設定し、練習中のパフォーマンスと学習の効率を比較した。その結果、Summary KR に含まれる試行数が増大するにつれて、練習中のパフォーマンスは低下した。しかし、KR が与えられない 2 日後の保持テストでは、5 試行毎に KR がまとめて与えられる条件が最も学習成績に優れており、Summary KR に含まれる KR が少なくても多すぎても運動学習が遅延する結果となった。この結果は、KR の誘導作用と依存作用による練習中のパフォーマンスと学習の効率への異なる影響を示しており、ガイダンス仮説を支持する結果となった。

しかし、課題配置方法と同様に、KR の効果を検証するための報告には単純な課題を用いた実験的研究が多い。そこで、Wulf ら⁵⁹⁾はスキーシミュレータを使用した実験を行った。スキーシミュレータを経験したことのない学生を対象者とし、対象者は毎試行後に KR が与えられる 100% KR 群、全試行のうち 50%の試行に対してのみ KR が与えられる 50% KR 群、KR が与えられないコントロール群に無作為に振り分けられた。そして、連続する 2 日間でスキーシミュレータの練習を行い、3 日目に保持テストを行った。その結果、練習中のパフォーマンス、保持テストはともに 100% KR 群が他の 2 群を上回り、最も良い成績を示した。Wulf らによる実験の結果は、ガイダンス仮説とは矛盾しており、高頻度に KR が与えられる条件において高い学習効果が得られたことを示している。この結果は、学習課題が複雑な場合には、低頻度に KR を与えるよりも高頻度に KR を与えた方が、学習利得は大きくなることを示している。従って、Wulf らの報告は、従来の研究で多く用いられていた単純な課題であれば高頻度に KR が与えられるよりも低頻度に KR を与えた方が学習利得は高いが、複雑な課題であれば、低頻度に KR が与えられるよりも高頻度に KR を与えた方が学習利得は高いことを示唆している。

さらに、Guadagnoli ら⁹⁵⁾は学習者の技能レベルと学習課題の複雑さにより、学習を促進する KR の付与方法が異なることを報告している。技能レベルの低い学習者に対し、複雑な課題が与えられた場合、より高頻度あるいは即時的な KR が運動学習を促進した。一方、単純な課題が与えられた場合には、ある程度の頻度の削減あるいは遅延を含んだ KRの方が学習効果は高かった。しかし、技能レベルの高い学習者にとっては、単純な課題、複雑な課題ともにある程度の頻度の削減あるいは遅延を含んだ KR が学習を促進し、高頻度あるいは即時的な KR は学習を低下させた。Guadagnoli らの報告は、Summary KR の様なある程度の頻度の削減あるいは遅延を含んだ KR 付与方法の方が、100%KR の様な高頻度あるいは即時的な KR 付与方法よりも、機能的課題難易度を上昇させる可能性があることを示唆している。

従って、課題が単純あるいは学習者の技能レベルが高く、機能的課題難易度が低い状態にある時に、Summary KR の様なある程度の頻度の削減あるいは遅延を含んだ KR 付与方法を利用することは、運動学習の効率化に有効であると考えられる (図 11. 左)。対照的に、課題が複雑あるいは学習者の技能レベルが低く、既に機能的課題難易度が高い状態にある場合には 100%KR の様な高頻度あるいは即時的な KR 付与方法が有効と考えられる (図 11.右)。

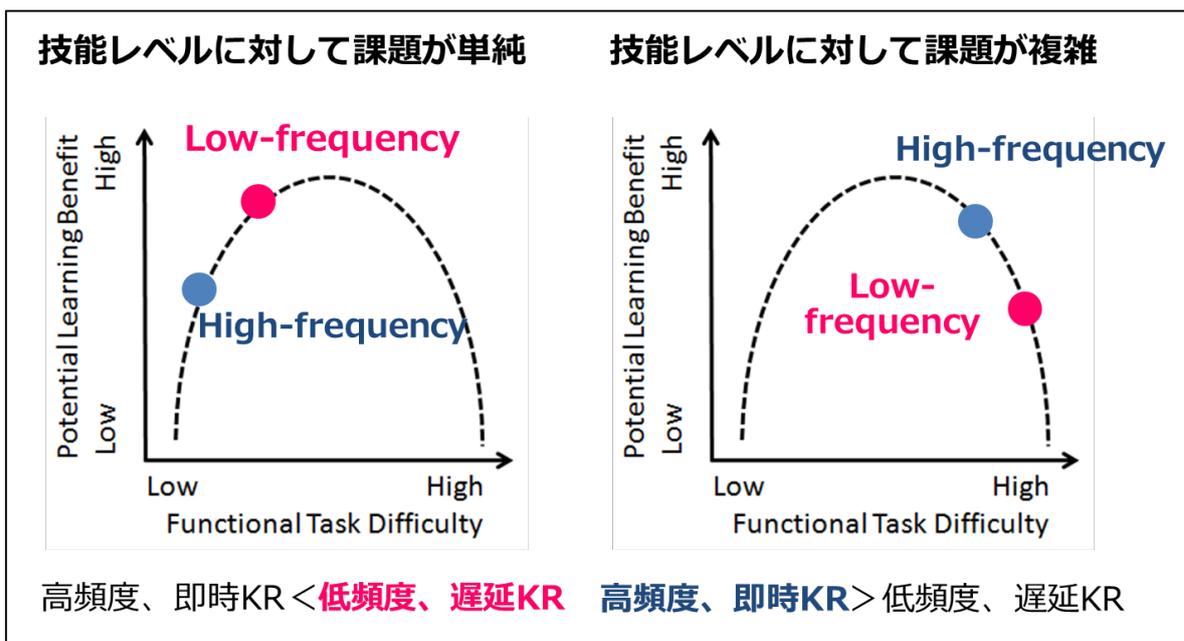


図 11. フィードバックの与え方が機能的課題難易度に与える影響

身体介助

身体介助 (physical guidance あるいは physical assistance) は、理学療法場面において多く用いられている動作指導方法の 1 つである。理学療法士が患者に身体介助を行うことで課題遂行における安全性の向上、課題遂行に伴う恐怖感の減弱、患者一人では困難な課題の遂行が可能となる。しかし、運動学習への影響については否定的な報告が多い。例えば、Domingo ら⁹⁶⁾は健常若年成人を対象に歩行動作における身体介助の有効性を検討している。対象者は身体介助の有無によって 2 群に分けられ、さらにそれぞれの群は課題の難易度によって 2 群に分けられた (計 4 群)。課題はトレッドミルに取り付けられた梁上での歩行であり、梁の幅は 2.5cm (低難易度) と 1.27cm (高難易度) に設定された。身体介助は装置によって機械的に行われ、骨盤の位置と梁の中心が一致するように介助が行われた。その結果、練習中のパフォーマンスは身体介助あり群が優れていたにもかかわらず、運動学習の成果では身体介助なし群が有意に優れていた。この結果は、身体介助は課題遂行時の誤差を減少させるため練習中のパフォーマンスを改善させるが、誤差に基づいて運動プログラムを修正する機会も減少させてしまうため、運動学習を阻害してしまうことを示唆している。また、課題難易度が低く、身体介助がある群は、他の 3 条件と比較して最も運動学習の成果が小さくなったことから、身体介助の有効性が課題難易度に影響を受けることが示された。

身体介助と課題難易度の関係に対して、Marchal-Crespo ら⁹⁷⁾は、健康若年者と高齢者を対象にドライビングシミュレータの操縦課題を用いて、身体介助が運動学習の成果に及ぼす影響を検討している。その結果、身体介助により練習中のパフォーマンスが改善すること、年齢に関係なく身体介助は練習開始時における技能レベルが低い者の運動学習を促進させる効果があること、技能レベルの高い者には身体介助の効果がないことが明らかにされた。

以上の研究を考慮すると、身体介助は機能的課題難易度を下げる役割を担っており、過剰に機能的課題難易度が高くなってしまっている者に対しては運動学習を促進する方向に作用し（図 12. 右）、そうでない者に対しては運動学習を抑制する方向に作用すると考えられる（図 12. 左）。

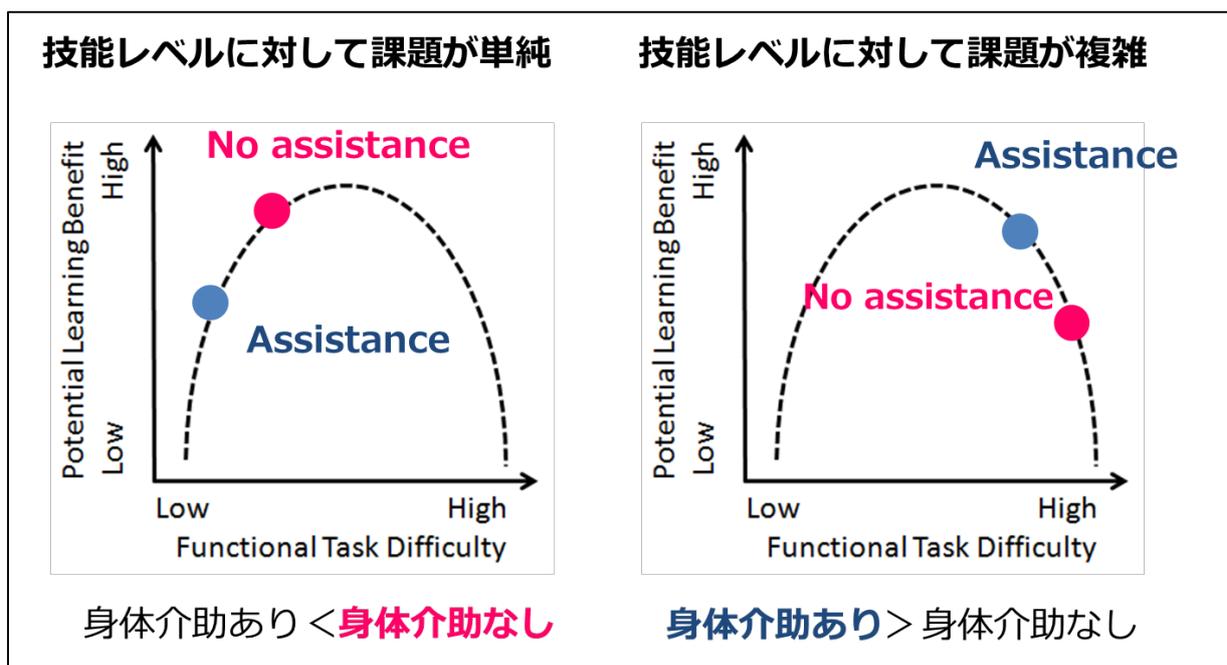


図 12. 身体介助が機能的課題難易度に与える影響

1.1.4 機能的課題難易度の測定

ここまでは練習条件が機能的課題難易度に与える影響について先行研究を概観することで推察し、名目的課題難易度と学習者の技能レベルの関係から、どのような練習条件を選択すべきかについて述べてきた。適切な練習条件を選択することで、機能的課題難易度は **optimal challenge point** に接近し、運動学習が促進される。その結果、技能獲得に要する期間は短縮すると考えられる。従って、如何に機能的課題難易度を **optimal challenge point** に接近させられるかが焦点となる。常に **optimal challenge point** となるように機能的課題難易度を調整できれば、運動学習は最も効率化される。

しかし、現段階では具体的な機能的課題難易度の測定方法が確立されていないことに加え、どの程度の機能的課題難易度が **optimal challenge point** に相当するのかも明らかになっていない。それ故、**optimal challenge point** に機能的課題難易度を調整することは困難である。従って、**optimal challenge point** の存在は概念的に示されてはいるものの、機能的課題難易度を **optimal challenge point** に接近させるための方法は確立されていないのが現状である。そのため、その時々局面において機能的課題難易度を上げるべきか下げるべきか、変化させるとすればどの程度変化させるべきかなどについては、結局、理学療法士の直感や経験に基づいて行わざるを得ない。**challenge point framework** から導き出される考え方は、理学療法における運動学習の効率化を図る上で有用な考え方である。しかし、実際に理学療法の臨床に応用するとすると、その方法論が確立されていないために、その考え方を十分に活用することができない。

そこで、本研究では機能的課題難易度の定量的評価方法の確立を試みる。機能的課題難易度は課題の有する情報量と学習者の情報処理能の関係に従うことから、機能的課題難易度は情報処理状況を反映する指標を用いることで定量的に測定できるのではないかと考えた。本研究では、従来の研究で情報処理状況を測定する指標として広く用いられている行動的指標であるプローブ反応時間、簡便に測定が可能な生理学的指標である唾液 α -アミラーゼ、主観的指標である **National Aeronautics and Space Administration -Task Load Index** (以下、NASA-TLX) に着目した。以下では、それぞれの指標の特徴について述べる。

プローブ反応時間

プローブ反応時間は二重課題法の1つであり、Kahneman⁹⁸⁾によって提唱された単一容量モデルに基づいた手法である。単一容量モデルとは、これまでに概念化されている注意資源モデルの1つであり、人間は情報処理の様々な段階で、使用可能な容量が限られた注意資源を配分方針に従って配分することで複数の活動を同時に行うという前提で組み立てられたものである(図13)。このモデルにおいて注意は、種々の情報処理を発動し、実行するために必要な、いわば心的エネルギー源として特徴づけられている。課題が複雑になり、課題を遂行するのに必要な情報量が増すと、それを処理するために必要な注意量も増加する。課題の有する情報を処理するために配分される注意量は、注意需要(attentional demand)と呼ばれている。注意資源の容量は限られているため、課題の数やその要求が大きくなると資源プールが枯渇し、課題に関連するパフォーマンスは低下してしまう。

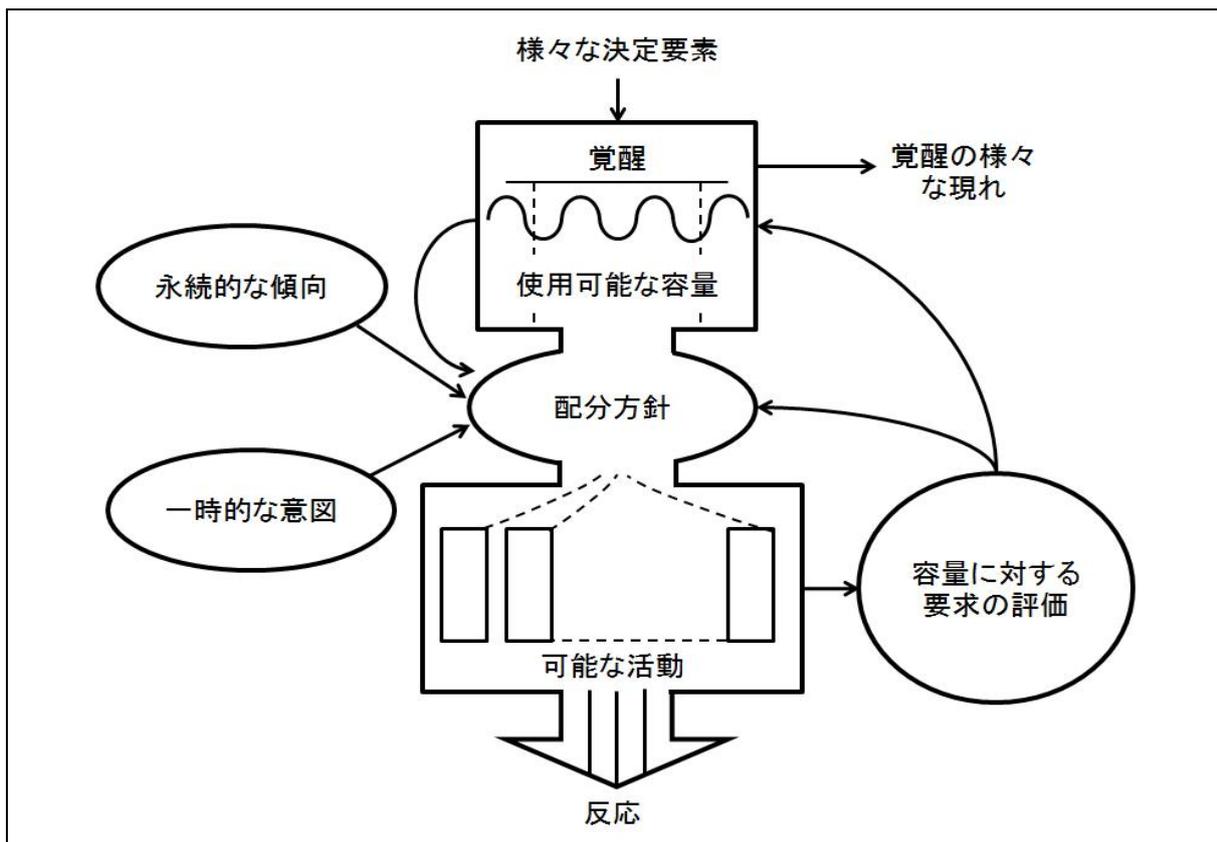


図13. Kahnemanの注意容量モデル

二重課題法では，この単一容量モデルに基づいて，主課題（primary task）の遂行中に二次課題（secondary task）を挿入し，二次課題の遂行成績により主課題の注意需要を推定する。例えば，主課題に多くの注意を要する場合，二次課題に配分できる注意は少なくなり，二次課題の成績は低下する。一方で，主課題に多くの注意を必要としない場合，二次課題にも十分な注意が配分され，二次課題の成績は向上すると考えられる（図 14）。

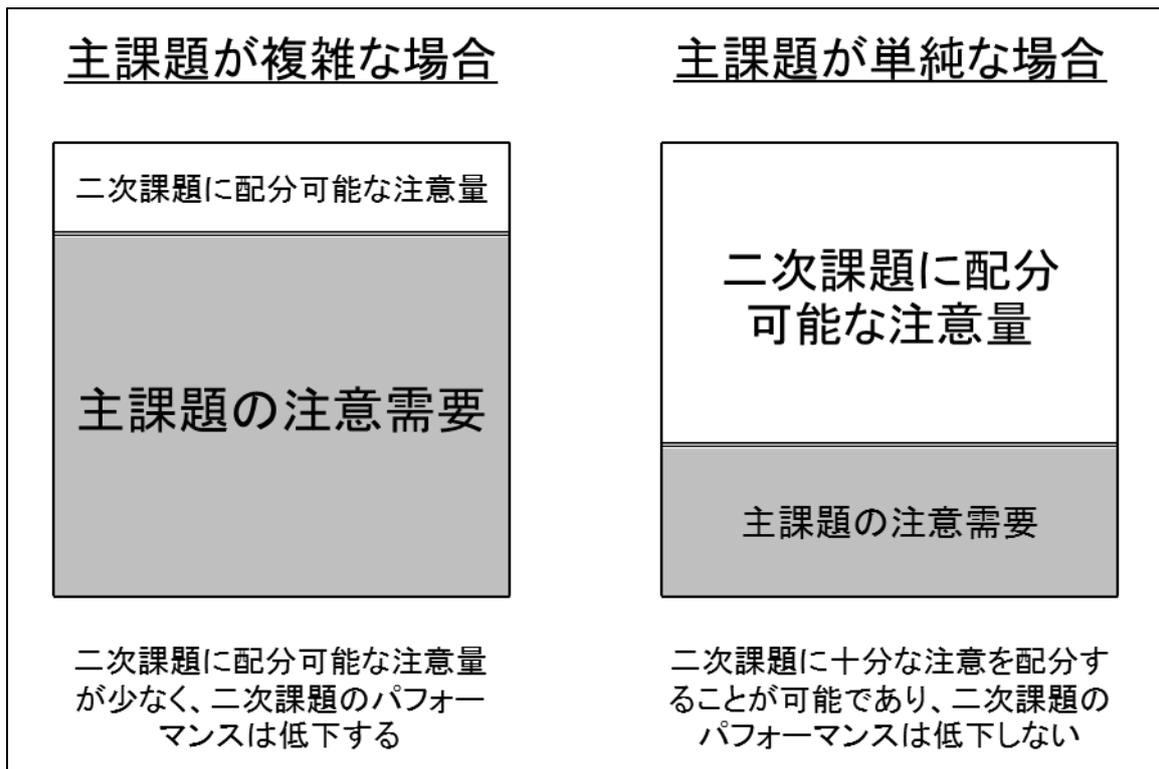


図 14. 主課題の注意需要と二次課題に配分可能な注意量

二重課題法は，様々な知覚運動課題を用いた研究で課題の注意需要を測定するための方法として使用されてきた⁹⁹⁻¹⁰³⁾。その中でも，二重課題法の1つであるプローブ反応時間は，運動課題遂行中の注意需要を鋭敏に反映するとされており，これまでに，プローブ反応時間と歩行周期¹⁰⁴⁾，義足の適合性¹⁰⁵⁾，歩行率¹⁰⁶⁾との関連など様々な観点からの検討がなされている。

Glencross & Gould¹⁰⁷⁾は異なる運動精度が要求される右上肢を使用した単純課題を用いて、運動精度とプローブ反応時間の関係を明らかにしている。標的となるターゲットには 8cm×23cm のブロックあるいは直径 2cm の円（第 1 実験）と直径 1cm の円（第 2 実験）が用いられた。Glencross らの実験ではターゲットが小さくなるほど要求される運動精度は高いと見做すことができる。対象者は可能な限り素早く、正確に動作を遂行することを指示された。プローブ反応時間は異なるタイミングで挿入された音刺激に対して左上肢で反応するまでの時間として計測された。その結果、要求される運動精度が高くなるにつれて、動作開始前のプローブ反応時間は延長した。この結果に対し、Glencross らは、要求される運動精度が高くなるにつれて、実際に動作を遂行する前に構築される動作のプランニングが複雑になることで、プローブ反応時間は延長したと考察した。標的となるターゲットが小さくなるほど名目的課題難易度は高くなり、名目的課題難易度の上昇に応じて機能的課題難易度も上昇すると考えることができることから、Glencross らの実験結果は主課題の機能的課題難易度の変化をプローブ反応時間によって捉えることが可能であることを示唆している。

また、Lajoie ら¹⁰⁸⁾は座位、開脚立位、閉脚立位、歩行中のプローブ反応時間を測定し、座位中は他の条件よりもプローブ反応時間が有意に短縮し、歩行中は他の条件よりもプローブ反応時間が有意に延長することを示した（座位；235ms，開脚立位；257ms，閉脚立位；266ms，歩行；303ms）。さらに、歩行中における片脚支持期と両脚支持期のプローブ反応時間を比較し、片脚支持期においてプローブ反応時間が有意に延長することを示した（片脚支持期；328ms，両脚支持期；270ms）。Lajoie らの報告は、姿勢制御課題の難易度とプローブ反応時間の関係を表しており、より難易度が高いと考えられる不安定な条件においてプローブ反応時間が延長することを示している。

Glencross らや Lajoie らの報告は、プローブ反応時間が機能的課題難易度を測定する手法として使用可能であることを示唆している。しかし、その一方で、単一容量モデルには大きな欠点が存在することも複数の研究で報告されている。例えば、Wickens^{109,110)}は、2つの課題のうち一方の難易度を操作したとしても、もう一方の課題成績に影響が及ばないことを複数の実験で証明している。単一容量モデルでは、共通した注意資源を各課題に配分することによって反応を生成することから、一方の課題の難易度を操作すれば、一方もしくは両方の課題のパフォーマンスに変化が生じるはずである。従って、Wickens らの実験結果を単一容量モデルで説明することは不可能であり、単一容量モデルの限界が示されている。

そこで Wickens は多重資源理論を提唱した (109-111)。多重資源理論は、注意資源の容量を情報処理段階 (符号化・中枢処理、反応)、知覚モダリティー (視覚、聴覚)、処理コード (空間的、言語的) で分割し、それぞれに特有の資源が存在すると仮定する (図 15)。従って、2 つの課題間で干渉が生じるのは、両課題間で同一の資源が共有される時である。また、資源の競合は各資源において独立して生じ、課題間で多くの種類の資源が共有されるほど、より多くの干渉が生じると考えられる。Wickens が提唱した多重資源理論に基づくと、二重課題法を採用する場合は、主課題の性質に見合った二次課題を選択することが重要であると考えられる。

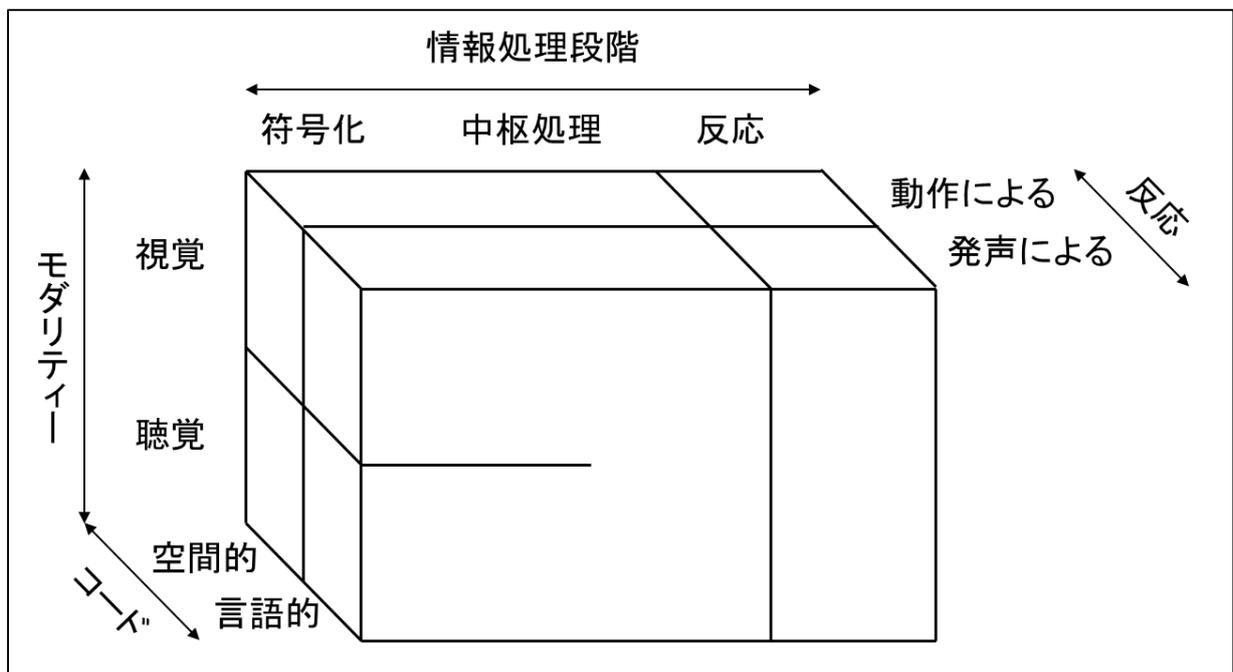


図 15. Wickens の多重資源モデル

多重資源理論に基づいて課題を選択し、課題間の干渉を生じやすくすることで Wickens の指摘する問題は克服することができるが、二重課題法には他にも留意しなければならない問題が存在する。Goh ら¹¹²⁾はプローブ反応時間を用いることの問題点として、プローブ課題自体の学習が生じること、主課題とプローブ課題との間でトレードオフが生じること、課題の優先順位が入れ替わってしまう可能性があることを挙げている。プローブ課題自体の学習が生じてしまうと、プローブ反応時間の短縮が、主課題の注意需要の減少を反映しているのか、プローブ課題自体の学習によるものなのか判別が難しくなる。また、主課題とプローブ課題間でトレードオフが生じたり、課題の優先順位の入れ替わりが生じたりすると、プローブ反応時間は主課題の注意需要を反映しなくなってしまう。この現象は配分方針に依存する。Kahneman⁹⁸⁾は、配分方針は4つの要因－永続的意向 (enduring dispositions)、瞬時の意図 (momentary intentions)、要求の評価 (the evaluation of demands)、覚醒の影響 (effects of arousal)－によって制御されていると述べている。永続的意向とは、意識を用いて注意を振り向けようとしなくても、自然に注意が注がれる心的状態⁹⁸⁾であるため、厳密に統制することは極めて困難である。さらに、プローブ反応時間には最大延長点が存在する^{85,94)}ことが明らかになっている (図 16)。主課題の課題難易度を上昇させていくとプローブ反応時間は延長していくが、ある点を境にプローブ反応時間が延長しなくなる。この点がプローブ反応時間の最大延長点を示しており、トレードオフや優先順位の入れ替わり同様、配分方針による影響と考えられる。

上記の問題に対し、プローブ課題自体の学習を抑えるためにはプローブ課題の難易度を高めることが有効であるとされている¹¹²⁾が、プローブ課題の難易度が高いと配分方針による問題が出現しやすくなってしまう。現在のところ、この問題に対し根本的な解決方法は得られていない。従って、配分方針の影響を受けない二重課題法以外での機能的課題難易度測定方法を検討する必要がある。そのため、本研究では行動的指標を除いた生理学的指標と主観的指標を用いての機能的課題難易度測定方法の検討を行った。

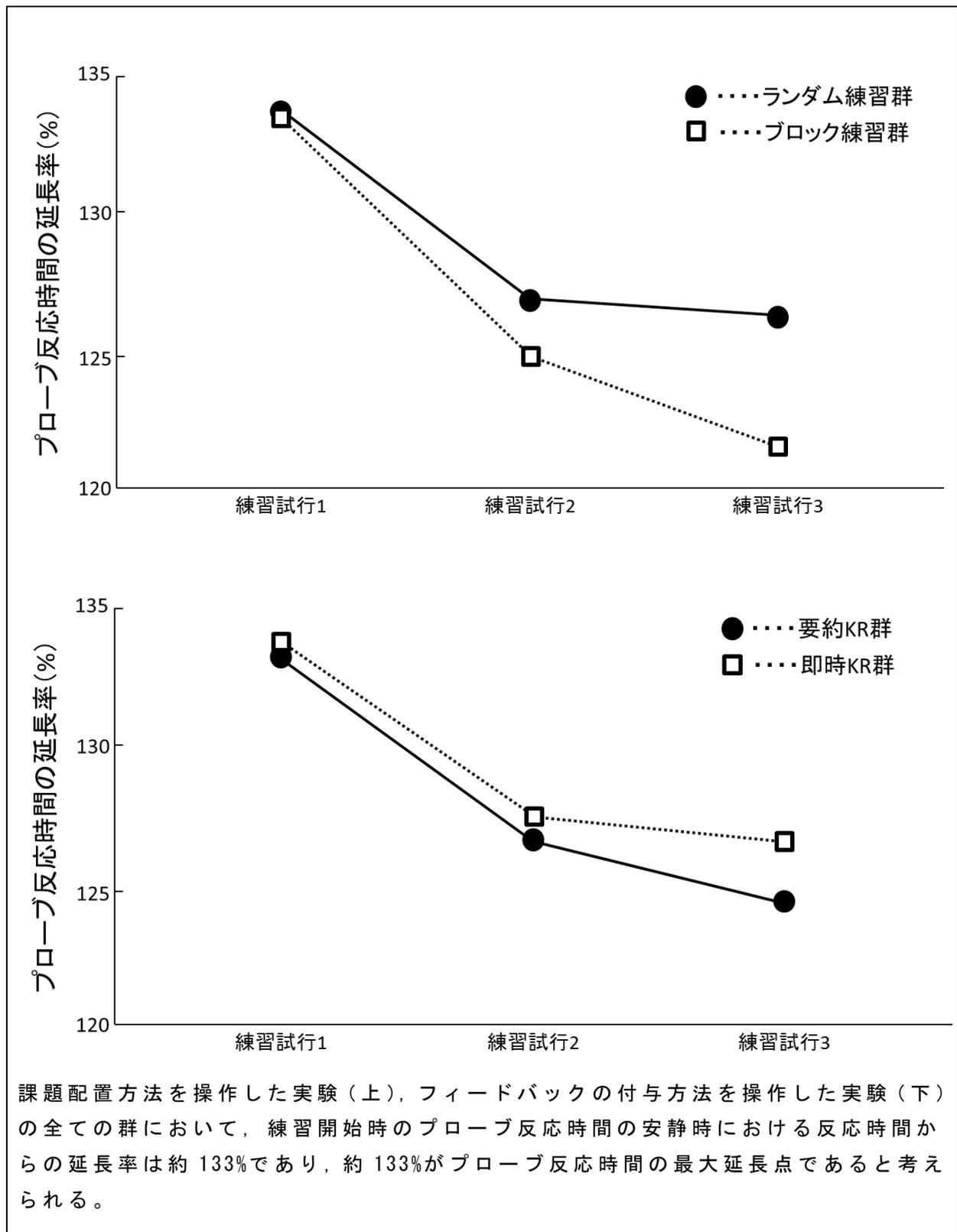


図 16. プローブ反応時間の最大延長点 (85,94)

唾液 α -アミラーゼ

注意需要の評価指標には行動的・生理学的・主観的指標がある。行動的指標は主に作業成績であり、主課題の作業量、エラー率、反応時間などで測定される。また、前述した二重課題法による二次課題の作業成績や瞬目、眼球運動、瞳孔径など目に関する指標も行動的指標に含まれる。

生理学的指標には、脳波、事象関連電位 (event-related potentials; ERP)、呼吸、心拍および心拍変動、血圧、皮膚電気活動、末梢皮膚温度、生化学物質などが含まれる。ERPの中でも事象から約 300ms 後にピークをもつ正電位 (P300) は注意需要を反映することが知られており¹¹³⁾、課題の難易度が高いほど、刺激提示に伴う P300 振幅は大きくなることが報告されている¹¹⁴⁾。また、二重課題法と ERP を組み合わせた方法では、主課題の難易度が高い条件ほど二次課題刺激に対する P300 振幅が小さくなることが明らかにされている¹¹⁵⁾。ERP の測定は非侵襲的に可能であり、様々な実験操作に敏感、同一個人や同一条件下で安定したパターンを示す、時間分解能が良いなどの利点を有している¹¹⁶⁾。一方で、空間分解能が悪く電位の脳内での発生源を特定できない、多くの場合は平均加算法を用いて測定されるので一回限りの事象に対して使用できない、筋電図など脳以外から発生する電位 (アーチファクト) の混入を防ぐために対象者の動きを厳しく制限しなければならないといった欠点が存在する¹¹⁶⁾。これらの欠点は、ERP を測定することができる運動課題を制限してしまうため、運動学習時における機能的課題難易度測定指標としての利用可能性は高くはない。

生化学物質にはカテコールアミン (catecholamine)、コルチゾール (cortisol)、プロラクチン (prolactin) などが含まれ、身体的、精神的ストレスや疲労に伴って増加すると報告されている¹¹⁷⁾。カテコールアミンにはアドレナリン (adrenaline) やノルアドレナリン (noradrenaline) が含まれている。これらの物質の血中濃度は刺激に対する反応は早いですが、血液採取に専門的資格が必要となることや、侵襲や疼痛を伴うことから対象者の抵抗感も大きいという問題を孕んでいる。また、尿には刺激の蓄積的影響が表れてしまう。一方で、唾液中のコルチゾールは採取時点のストレス状態を反映することが明らかにされており¹¹⁸⁾、採取も簡単という利点がある。しかし、生化学的指標は刺激から反応が生じるまでの遅延が生じるという難点があり、唾液コルチゾールでも 20 分から 30 分くらいの遅延が生じてしまうため、即時的な測定には向いていない。実際の理学療法場面において機能的課題難易度を調整するための指標として用いることを考慮すると、その指標の測定方法には非侵襲性、即時性、かつ簡便性が求められる。以上の条件を満たす生理学的指標として、唾液 α -アミラーゼが挙げられる。

唾液 α -アミラーゼは唾液に含まれている酵素の 1 つであり、全ての唾液腺から分泌されるたんぱく質の 40%から 50%を占めている。安静時には、唾液 α -アミラーゼの 65%が顎下腺、20%が耳下腺、7-8%が舌下腺から分泌され、残りの約 10%は小唾液腺から分泌されている。しかし、刺激が与えられることでその割合が変化し、刺激時には耳下腺から 50%以上の唾液 α -アミラーゼが分泌されることが明らかになっている¹¹⁹⁾。

唾液の分泌には自律神経系、特に交感神経が大きく関与しており^{120,121)}、次の 2 つの経路によって制御されている (図 17)。1 つは視床下部-下垂体-副腎(hypothalamic-pituitary-adrenal: HPA)系であり、視床下部より副腎皮質刺激ホルモン放出ホルモンが分泌されて下垂体に作用し、下垂体より副腎皮質刺激ホルモンが分泌されて副腎皮質に作用し、最終的に副腎皮質からコルチゾールが分泌される。もう一つは交感神経-副腎髄質(sympathetic-adrenal medullary: SAM)系であり、視床下部から直接、交感神経が活性化され、副腎髄質からカテコールアミンが分泌される。HPA 系は血液を介した経路であるため、刺激から応答までに時間がかかる。そのため、HPA 系によって分泌が支配されている唾液コルチゾールには刺激から反応が生じるまでに遅延が生じてしまう。一方で、唾液 α -アミラーゼは SAM 系によって分泌が支配されており、SAM 系は HPA 系とは異なり直接的に交感神経系を活性化させるため、刺激が与えられてから反応が生じるまでの時間は HPA 系よりも短い。

これまでに様々な種類のストレスラーを用いて、ストレスが唾液 α -アミラーゼに与える影響が検討されている。ストレスとは、「外界からのあらゆる要求(demand)に対する生体の非特異的な反応」と定義されており^{122,123)}、ストレスラーは「ストレスを惹起するもの」と定義されている¹²²⁾。例えば、暗算課題^{124,125)}、ドライビングシミュレータ¹²⁶⁾、口頭試験¹²⁷⁾、面識のない二人の評定者の前でスピーチと暗算課題を行う Trier Social Stress Test (TSST)¹²⁸⁾などの心理的ストレスラーや寒冷昇圧試験¹²⁹⁾などの物理的ストレスラーを利用した実験が報告されている。以上の先行研究において、唾液 α -アミラーゼはストレスに対して速やかに反応し、ストレスが与えられている最中あるいは直後に分泌量が増加(50-100%程度)するとされている。

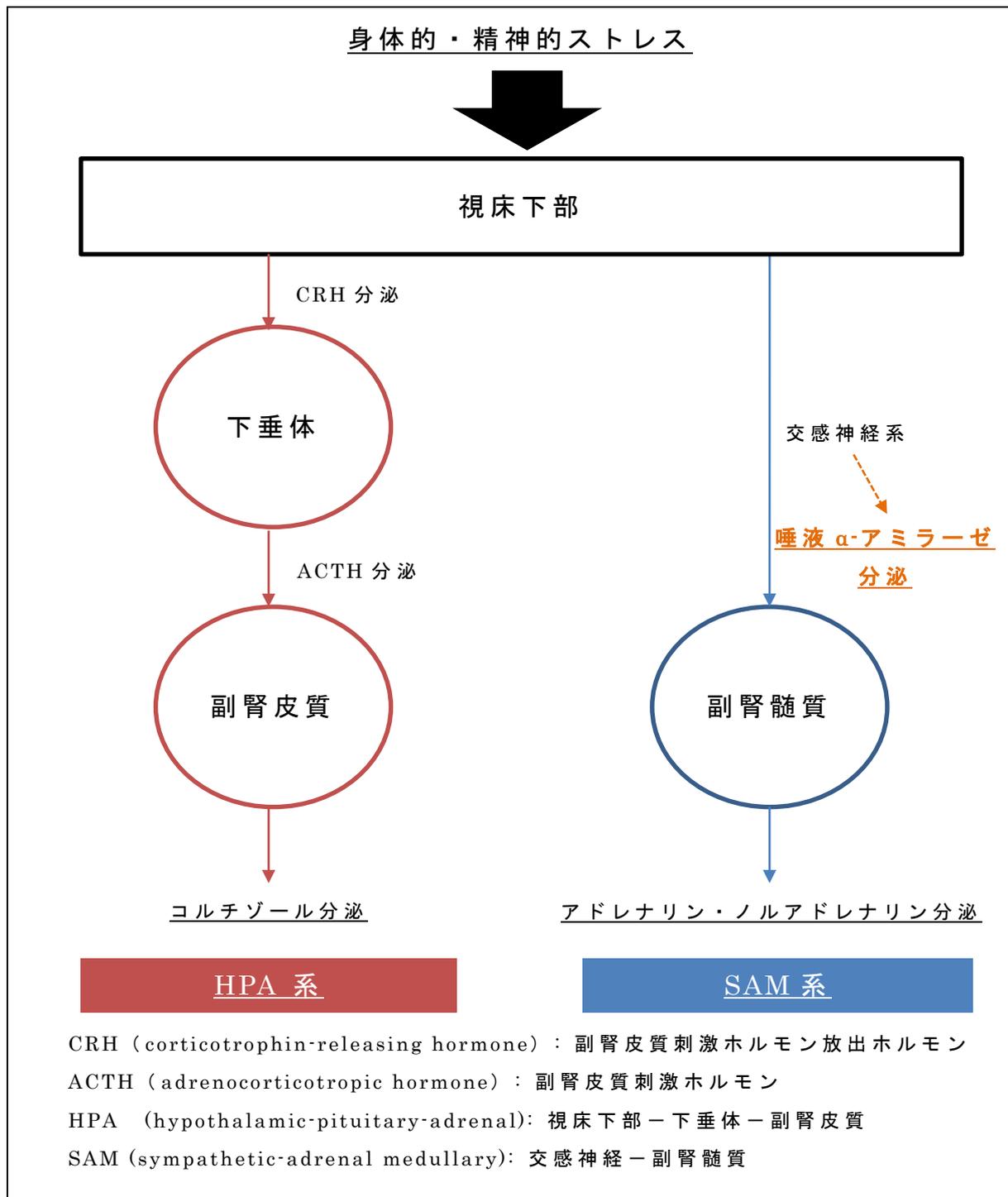


図 17. ストレス刺激に対する応答 (HPA 系・SAM 系)

非侵襲的，即時的，かつ簡便に測定が可能な唾液 α -アミラーゼではあるが，その測定にはいくつかの留意点が存在することが報告されている。例えば，唾液 α -アミラーゼには日内変動（circadian rhythm）が存在する。Nater ら¹³⁰⁾は 76 名の健常者を対象に，起床直後，起床 30 分後，起床 1 時間後，9 時から 20 時までの 1 時間おきに唾液を採取し，唾液 α -アミラーゼの日内変動を検討した。その結果，起床直後から起床後 1 時間にかけて唾液 α -アミラーゼは低下するものの，それ以降は漸増することが明らかとなった。唾液 α -アミラーゼに日内変動が存在することは，測定を行う時間帯を統制しなければならないことを示唆しており，唾液 α -アミラーゼを用いた実験を行う上での留意点となる。その他の唾液 α -アミラーゼに影響を与える要因を表 2 にまとめた。表に示されているように，唾液 α -アミラーゼに影響を与える要因は多数存在する¹³¹⁾。

表 2. 唾液 α -アミラーゼに影響を与える要因

要因	作用
性別	ベースライン，変化量ともに関連はないとされている。ただし，妊娠中は反応が減弱する。
年齢	3 歳以降は，ベースラインは安定し，年齢による影響はない。変化量に関しては参照すべきデータがない。
喫煙	習慣的な喫煙はベースラインを低下させる恐れがある。変化量に関しては参照すべきデータがない。
飲酒	明らかな結果は導かれていないが，過度な飲酒はベースラインを低下させる恐れがある。
医薬品	アドレナリン作動薬またはアドレナリン拮抗薬は強力な影響を与える。
カフェイン	急性の変化を及ぼす。カフェインを習慣的に摂取する頻度による影響は明らかでない。
飲食	急性の変化を及ぼす。また，食べ物の文化によりベースラインが異なる可能性が報告されている。
運動	高強度な運動は急性の上昇を引き起こす。運動習慣によりベースライン・変化量が異なるかは明らかではない。
精神障害	低下または上昇を引き起こす。

ベースラインは安静時における唾液 α -アミラーゼの値を表し，変化量は刺激による影響の受けやすさを表す。

また，唾液 α-アミラーゼは個人差が大きい指標であり，その個人差の影響を抑えるためにいくつかの解析方法が開発されている。その中には対数変換¹³²⁾，平方根変換¹³³⁾などの変数変換を用いる方法や，濃度曲線化面積 (area-under-curve) を用いる方法¹³⁴⁾，各個人における唾液 α-アミラーゼの最大値と最小値を用いて測定値を変換する方法¹³⁵⁾などが含まれる (図 18)。しかし，それらの方法は即時的な解析が困難であるため，本研究には適していない。

$$AMY_{score} = 4 \frac{AMY - AMY_{min}}{AMY_{max} - AMY_{min}} + 1$$

AMY：唾液 α-アミラーゼの測定値， AMY_{max} ：唾液 α-アミラーゼの最大値
 AMY_{min} ：唾液 α-アミラーゼの最小値

図 18. 唾液 α-アミラーゼの変換式

最も単純な解析方法は刺激付与前後の唾液 α-アミラーゼの差分 (変化量) を求めることであり，Rohleder ら¹²⁸⁾により TSST 前後における唾液 α-アミラーゼの変化量とノルエピネフリンの変化量が相関することが報告されている。また，Noto ら¹²⁴⁾は心理的ストレスラーとして暗算課題を使用し，暗算課題前，直後，10 分後に状態・特性不安検査 (State Trait Anxiety Inventory) と唾液 α-アミラーゼ，唾液コルチゾールの採取を行い，状態・特性不安検査の得点と唾液 α-アミラーゼ，唾液コルチゾールの関係を検討した。Noto らは解析方法として変化率を算出する方法を採用しており，暗算課題前の得点あるいは値を基準に暗算課題後に何%上昇したかを求めた。その結果，状態・特性不安検査の得点の変化率と唾液 α-アミラーゼの変化率の間には有意な相関が認められた ($r = 0.589$, $p < 0.01$)。一方で，状態・特性不安検査の得点の変化率と唾液コルチゾールの変化率の間には有意な相関が認められなかったと報告した。これは前述したストレスが与えられてから反応が生じるまでのタイムラグによるもので，唾液 α-アミラーゼにはストレスによる反応が速やかに生じることを示しているとともに，変化率を解析に用いることの妥当性を明らかにしている。変化量，変化率ともに処理が簡便で，即時的に解析を行うことが可能であるため，実際の理学療法場面で使用することを考慮すると，これらの解析方法が実用的であると考えられる。

National Aeronautics and Space Administration–Task Load Index

主観的指標の代表的なものとして SWAT (Subjective Workload Assessment Technique) ¹³⁶⁾と, NASA-TLX (National Aeronautics and Space Administration–Task Load Index) ¹³⁷⁾が挙げられる。ともに航空機のコックピット設計や飛行任務のメンタルワークロードを評価することを主目的として開発されたものであり, 各尺度の得点は操作の困難度や, 作業遂行に必要な注意資源を主に反映するものと考えられている。

メンタルワークロードとは, Kantowitz¹³⁸⁾により「注意と同様に, 環境の要求と有機体の処理能力 (capability) の間のずれを調整する媒介変数である」と定義されている。Kantowitz¹³⁹⁾はメンタルワークロードと注意の関係を図 19 のように示し, その中でも (c) を支持すると述べている。メンタルワークロードが注意の下位概念に相当するのであれば, メンタルワークロードを評価するための指標は注意需要を評価するための指標としても利用できる可能性がある。Moray¹⁴⁰⁾は, メンタルワークロードを測定する指標の中でも, 主観的指標が最も感度良く効果的にメンタルワークロードを測定することができる指標であると述べている。従って, ここではメンタルワークロードの主観的指標として広く使用されている SWAT と NASA-TLX について述べる。

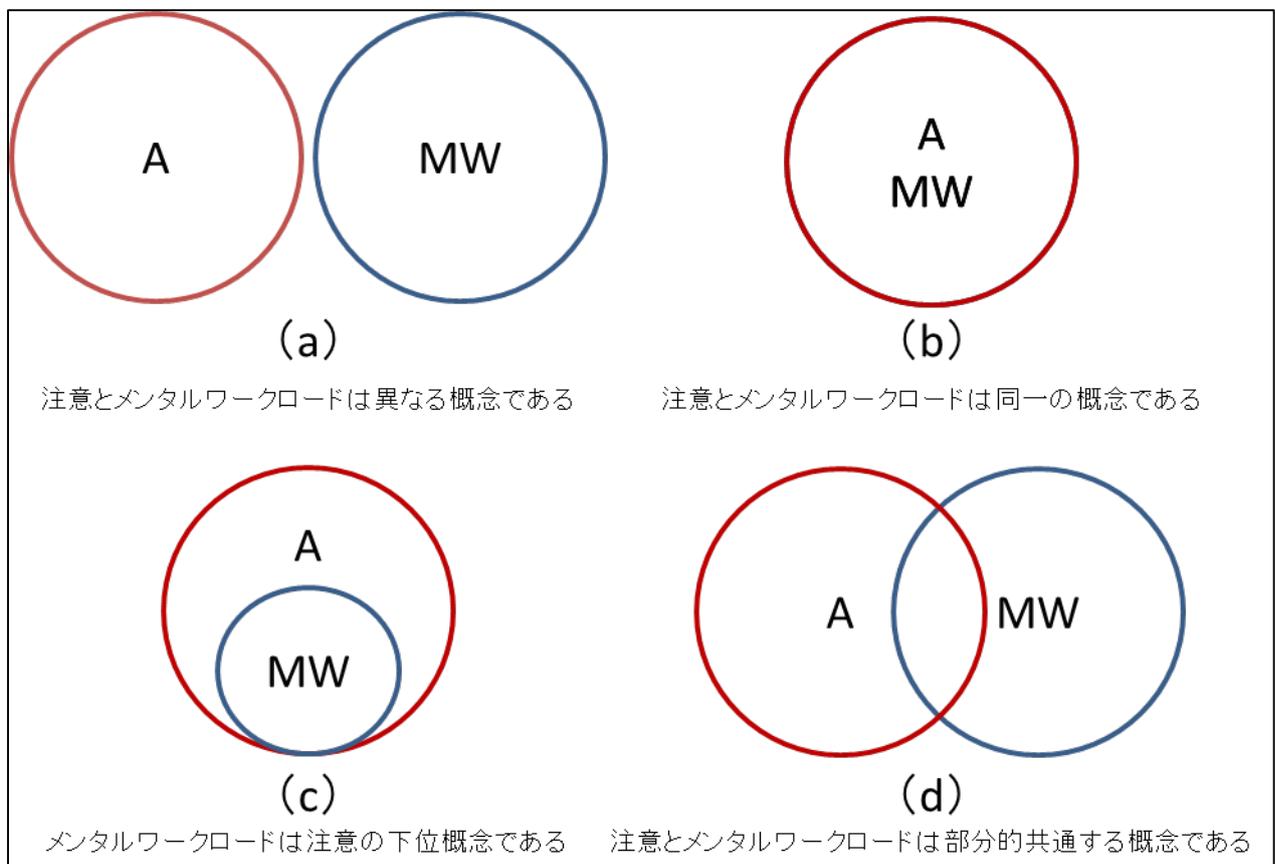


図 19. 注意とメンタルワークロードの関係

SWAT は時間的切迫性（時間的余裕の程度）、精神的努力（注意の集中あるいは精神的努力の程度）、心理的ストレス（不安、不満あるいは混乱の程度）の 3 項目から構成され、各項目について 3 段階で評定を行う尺度である。3 項目を 3 段階で評定するので合計 27 通りの組み合わせが生成され、対象者はその中から 1 つを選択することになる。SWAT ではさらに、対象者に 27 通りの組み合わせが 1 枚ずつ印刷された 27 枚のカードを自分にとって作業負荷が低いと思われる順序に並べ替える作業を行わせる。このカードソートの結果と対象者が選択した組み合わせによって、0 から 100 の尺度値が算出される。このカードソートによる優先順位の決定は SWAT の特徴でもあるが、27 通りもの組み合わせを順番に並び替える作業は容易ではなく、30 分から 60 分程度の時間を要する。また、カードソートの結果と対象者が選択した組み合わせから尺度値を算出するためには、特別なコンピュータプログラム（SWATPRGM）が必要であり、プログラムを利用できない者は SWAT を使用できないという欠点がある。しかし、SWAT が有する問題点に対する解決策も報告されている。三宅と神代¹⁴¹⁾はカードソートや特別なプログラムを使用せずに尺度値を算出できる SWAT-Equidistant scale (SWAT-E) を考案している。この方法は、合計 27 通りの組み合わせに等間隔の尺度値を当てはめるものであり、対象者が判断する 3 項目の作業負荷への寄与に対する順位と各項目の評定値から尺度値を求めることができる。例えば、最も作業負荷への寄与が大きい項目の評定値が 1、次に作業負荷への寄与が大きい項目の評定値が 2、最も作業負荷への寄与が小さい項目の評定値が 3 だとすると、この結果を既存の等間隔尺度値算出のための得点表と照らし合わせるだけで 19.23 という尺度値を算出することができる。この方法で求められる尺度値とカードソートを用いて行う本来の方法で算出した尺度値の相関係数は 0.895 であり、十分に利用可能な簡便法となっている。また、Biers ら¹⁴²⁾はより簡便な方法として各項目に対する得点の単純和 (SUM) により尺度値を算出する方法を提案している。この SUM で求められた尺度値と本来の方法で算出した尺度値の相関係数は 0.842 であり、十分に高い相関係数が得られている。

NASA-TLX は 6 つの項目（知的要求、身体的要求、時間的切迫感、作業成績、努力、不満）で構成されている尺度である（表 3）。対象者には説明文に沿った質問がなされ、その後、図 20 に示したような線分上に印をつけることが求められる。各線分の右端を 0、左端を 100 とし、線分上に印された位置を 0 から 100 の数値として読み取り、各項目の得点とする。NASA-TLX では、6 項目の各得点から総合点を算出するために、個人ごとに算出された重み付け係数を用いる。6 項目から 2 つの項目を抽出し、その 2 項目のうちどちらの項目がよりメンタルワークロードへ

表 3. NASA-TLX に含まれる項目と各項目の説明文

項目名	説明文
知的要求	どの程度の知的・知覚的活動（考える，記憶するなど）を必要としましたか
身体的要求	どの程度の身体的活動（押す，引く，回す，制御する，動き回るなど）を必要としましたか．作業は楽でしたか，きつかったですか
時間的切迫感	課題はゆっくりとして余裕があるものでしたか，それとも速くて余裕のないものでしたか
作業成績	課題の目標をどの程度達成できたと思いますか
努力	課題を達成するために精神的・身体的にどの程度一生懸命に作業しなければなりませんでしたが
不満	課題中に，不安感，落胆，イライラ，ストレスをどの程度感じましたか

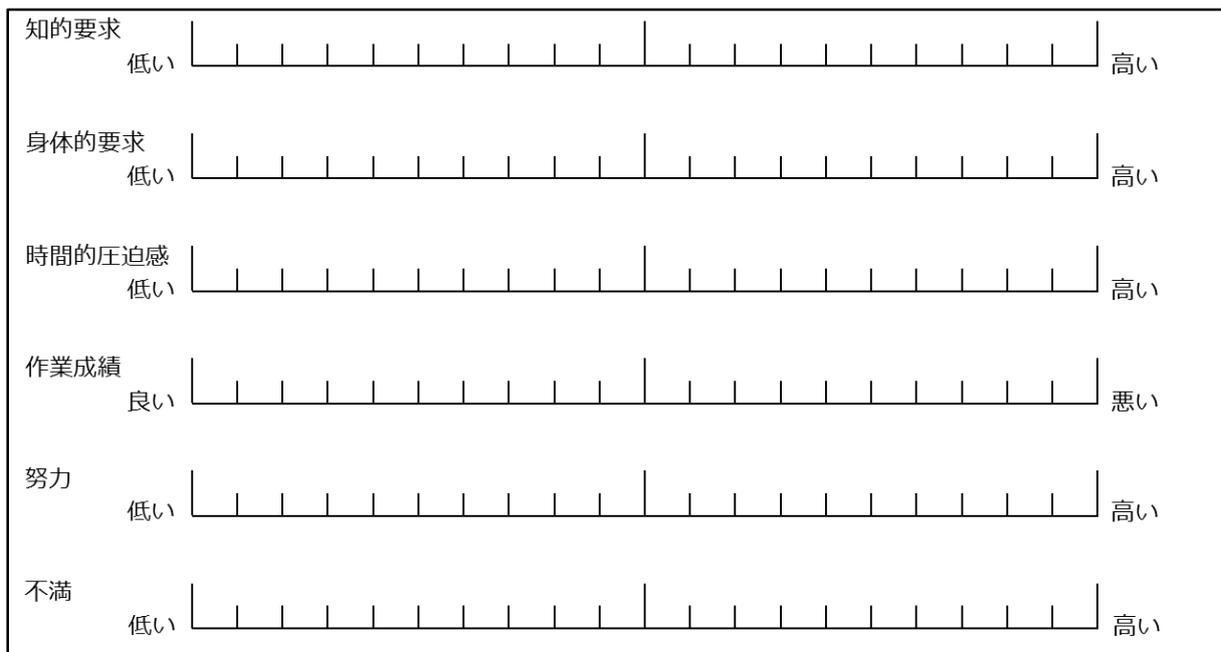


図 20. NASA-TLX の評価表

の寄与が高いかを判断させる。合計 15 通りの組み合わせが生成されるため、15 回この判断を繰り返す。一対比較の結果は、それぞれの項目がよりメンタルワークロードへの寄与が高いと判断された回数を数えることによって処理され、その回数をそのまま各項目の重み付け係数として使用する。その後、各得点に各項目の重み付け係数を乗じたものの総和を算出し、最後に重み付け係数の総和 15 で割ることで重み付けされたワークロードの平均値 (weighted workload: WWL) を得ることができる。NASA-TLX で用いられる重み付けの手続きに要する時間は数分間であるため、SWAT のカードソートと比較すると時間は掛からない。しかし、介入できる時間に厳しい制約が存在する理学療法の現場では、例えば数分間であったとしてもその指標を使用することの障壁となってしまう。また、よりメンタルワークロードへの寄与が高いと判断された回数を重み付け係数として使用することは、1 度も選択されなかった場合に重み付け係数が 0 となる可能性を内在しており、重み付け係数が 0 であった場合、平均値を 5 項目のみで算出することになる。その結果、線形モデルの効率を減少させ、対象者間のバラつきを増加させることに繋がること指摘されている¹⁴³⁾。そこで、SWAT と同様に、NASA-TLX にも簡便法がいくつか報告されている。その中で最も簡便に測定できる方法が、6 項目の得点を単純平均 (Raw TLX : RTLX) する方法である。Byers ら¹⁴⁴⁾によって RTLX と WWL の相関係数は 0.96-0.98 であることが示されており、単純に得点を平均するのみで十分に使用することが可能であることが明らかにされている。

SWAT と NASA-TLX の比較は多くの研究でなされている¹⁴⁵⁻¹⁴⁷⁾が、それぞれに利点と欠点が存在し、状況によって使い分けられているのが現状である。本研究では、NASA-TLX が SWAT よりも詳細にメンタルワークロードを測定できることから (SWAT が 3 項目に対して、NASA-TLX は 6 項目)、本研究では NASA-TLX を主観的指標として用いることとした。

1.2 本研究の目的

本研究の目的は、機能的課題難易度を定量的に測定する方法を確立し、運動学習にとっての至適課題難易度（optimal challenge point）を定量化することである。

1.3 本研究の意義

本研究により、これまで経験的に行われてきた課題難易度の調整を根拠に基づいて行うことが可能となる。根拠に基づいて課題難易度を調整することで、経験年数や運動学習に関連する知識の程度に依らず、多くの理学療法士が適切に課題難易度を調整することが可能となる。その結果、理学療法が効率化され、患者の在院日数の短縮に繋がる。さらに、十分な技能を獲得した上での早期退院は、患者のQOLを高められるだけでなく、医療費の削減にも繋がると考えられる。

1.4 本論文の構成

第2章では、機能的課題難易度を定量的に測定する指標として唾液 α -アミラーゼの妥当性を検討する。第1節では、身体活動が唾液 α -アミラーゼに与える影響を明らかにすることで、運動課題の難易度測定指標としての唾液 α -アミラーゼの利用可能性を確認する。第2節では、課題難易度測定指標として広く用いられているプローブ反応時間と唾液 α -アミラーゼの関連を明らかにすることで、課題難易度測定指標としての唾液 α -アミラーゼの妥当性を検討する。

第3章では、第2章において機能的課題難易度を定量的に測定する指標としての検討を行った唾液 α -アミラーゼと、機能的課題難易度の主観的指標として簡便に測定が可能なNASA-TLXを用いて、至適課題難易度の定量化を試みる。

第4章では、研究成果を統括し、論を結ぶ。

1.5 研究の倫理的配慮

研究協力者には、事前に書面と口頭にて研究の目的と方法、研究上の不利益、プライバシー保護などについて十分な説明を行った。尚、本研究は茨城県立医療大学の倫理委員会の承認を受けて実施した（承認番号：494）。

第 2 章 機能的課題難易度の測定方法の確立

第 1 節 身体活動が唾液 α -アミラーゼに与える影響の検討

2.1.1 はじめに

本節では、運動課題遂行時における課題難易度測定指標としての唾液 α -アミラーゼの利用可能性を検討することを目的に、身体活動が唾液 α -アミラーゼに与える影響を明らかにする。

唾液 α -アミラーゼは唾液を採取するのみで簡便に測定可能ではあるが、様々な要因により影響を受けることが明らかとなっている¹³¹⁾。唾液 α -アミラーゼに影響を与える要因の 1 つに身体活動 (physical activity) が含まれており、身体活動により唾液 α -アミラーゼは上昇するとされている。しかし、その上昇の程度は身体活動の強度に依存するとされており、低強度の運動であれば影響は少ないとされている¹⁴⁸⁾。従って、身体活動が唾液 α -アミラーゼに影響を及ぼし始める運動強度を明らかにすることは、本研究における課題設定および唾液 α -アミラーゼを用いた機能的課題難易度測定の適応範囲の決定を行う上で重要である。

運動強度を設定するための客観的な指標として嫌気性代謝閾値 (Anaerobic threshold ; 以下 AT) が提案されている¹⁴⁹⁾。AT とは増大する運動強度において有機的エネルギー産生に無機的代謝によるエネルギー産生が加わる直前の運動強度であり、血中乳酸濃度が安静水準以上に増大する直前の運動強度である乳酸閾値 (Lactate Threshold ; 以下 LT) や、運動負荷量の増大に伴う換気量の増大が非線形的に増大する直前の運動強度である換気閾値 (Ventilatory Threshold ; 以下 VT) から推定される^{150,151)}。VT と LT はほぼ一致することが知られており¹⁵⁰⁾、ともに運動強度指標としての有用性が報告されている^{152,153)}。しかし、VT の測定には呼気ガス分析装置が必要であることや、LT の測定には血液の採取が必要であることから汎用性に乏しいという欠点が存在する。

そこで、現在までに AT を簡便に推定するための代替手段が幾つか開発されている。その代表が二重積 (Double Product ; 以下 DP) を用いた二重積屈曲点 (Double Product Break Point ; 以下 DPBP) である¹⁵⁴⁾。DP は収縮期血圧と心拍数から規定される変数であり、収縮期血圧と心拍数はともに交感神経系による制御を受けている。運動負荷試験中に運動負荷を漸増していくと、交感神経系の活動を反映する血漿カテコールアミン濃度は低強度の運動では増加しない、または僅かに増加する程度であるが、LT 付近で急に増大することが報告されており、血漿カテコー

ルアミン濃度と血中乳酸濃度は相関することが報告されている^{155,156)}。そのため、DPは交感神経系の活動の変化を反映し、血漿カテコールアミン濃度を通して間接的に血中乳酸濃度を反映していると考えられている。DPBPはDPが運動負荷試験中に急に上昇する変曲点であり、2つの回帰直線の交点から求めることができる。DPBPはATと高い相関($r = 0.87, p < 0.001$)を有することが報告されており、その妥当性が確認されている¹⁵⁷⁻¹⁵⁹⁾。

本研究で用いる唾液 α -アミラーゼは交感神経—副腎髄質系の制御を受けていることが明らかとなっており^{120,121)}、交感神経系の活動を鋭敏に反映することが知られている¹⁴⁸⁾。そのため、唾液 α -アミラーゼもDPと同様の動態を示す可能性がある。Calvoら¹⁶⁰⁾は20名の健常者を対象に多段階漸増負荷法による運動負荷試験を行い、運動負荷試験中の唾液 α -アミラーゼと血中乳酸濃度を測定した。その結果、運動負荷を上昇させていく中で唾液 α -アミラーゼにはその値が急に上昇する唾液閾値 (Saliva threshold; 以下Tsa)が存在することを明らかにした。さらにTsaはLTと高い相関($r = 0.95, p < 0.001$)を有していることを明らかにした。Calvoらの結果は、唾液 α -アミラーゼがDPと同様に、ATに相当する運動強度で急に上昇することを表している。しかし、ATとTsaの関係に関する報告は限られていることに加え、AT未満の運動強度において唾液 α -アミラーゼがどのような動態を示すか具体的な検討がされていない。

2.1.2 目的

本節では運動負荷試験中の唾液 α -アミラーゼを測定することで以下の事項を明らかにする。

1. ATとTsaの関連を明らかにする。
2. 増大する運動強度に対し唾液 α -アミラーゼがどのような動態を示すかを明らかにする。

2.1.3 方法

2.1.3.1 研究協力者

健常成人男性 11 名を研究協力者とした。研究協力者には事前に書面と口頭にて研究の目的と方法，研究上の不利益，プライバシー保護などについて説明し，研究協力の承諾を得た。

2.1.3.2 手続き

運動負荷試験装置には自転車エルゴメータ（AEROBIKE 75XL，COMBI 社製）を使用した。運動負荷試験は全ての協力者で同一時間帯（18：00-20：00）に実施し，室温は 24℃に設定した。全ての協力者には予め，前日のアルコール摂取の禁止，測定 2 時間前から水以外の飲食の禁止，測定開始前の激しい身体運動の禁止を指示した。

運動負荷試験の負荷様式には多段階漸増負荷法を用いた（図 21）。まず，エルゴメータ上での 3 分間の安静座位をとり，その後，10Watt にて 3 分間のウォーミングアップを行った。ウォーミングアップ終了後，30Watt から試験を開始した。運動負荷は 3 分毎に 20Watt のペースで段階的に漸増させた。運動負荷試験中のペダル回転数は 50rpm で統一した。運動終了基準は，下肢疲労により運動が持続できなくなった時，もしくは AT が観察された負荷から 2 段階後の負荷が終了した時点とした。

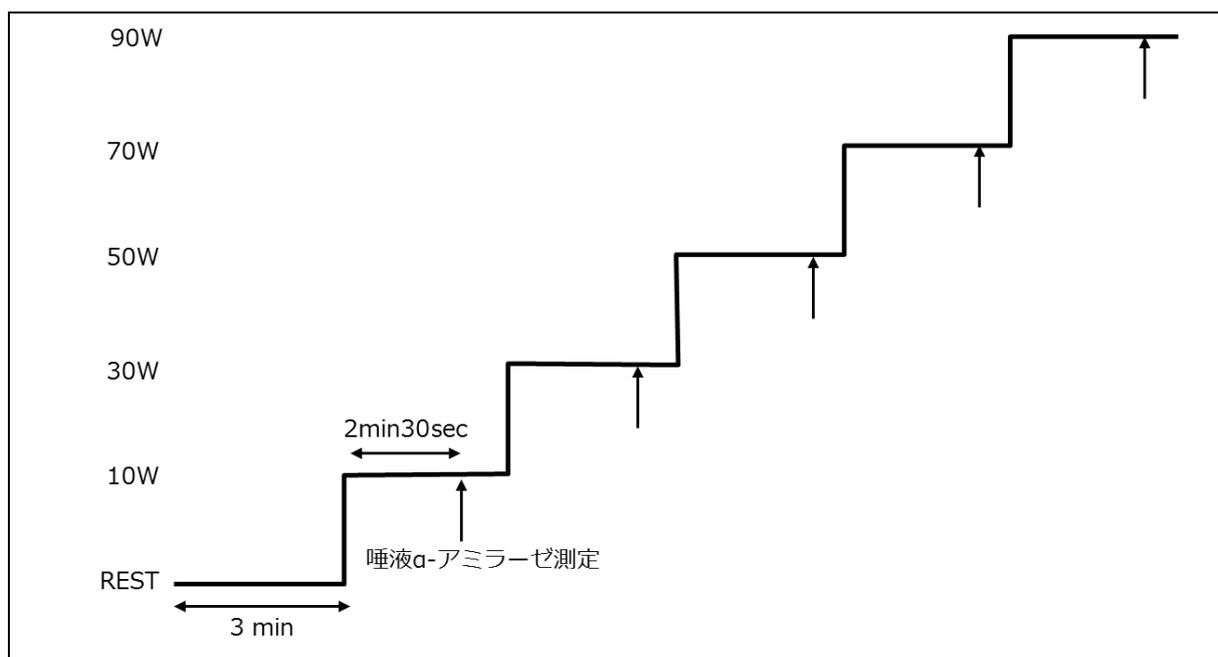


図 21. 運動負荷試験のプロトコール

2.1.3.3 測定項目

呼気ガス

呼気ガス測定には呼吸代謝測定装置（AE-300，MINATO 社製）を使用した。測定方法は **breath by breath** 方式とし，呼気ガス・データは 15 呼吸ごとに移動平均した。AT の決定には **V-slope** 法¹⁶¹⁾を使用した。

唾液 α -アミラーゼ

唾液 α -アミラーゼの測定には酵素分析装置（唾液アミラーゼモニター，NIPRO 社製）と試験紙（唾液アミラーゼモニターチップ，NIPRO 社製）を用いた（図 22）。この装置は唾液転写装置と光学ユニットで構成されており，唾液 α -アミラーゼ 10–230 kIU/L の範囲において，高い正確度（生化学装置 [Olympus AU 400，Olympus 社製] で得られた値に対して $R^2 = 0.989$ ）と精度（ $CV < 9\%$ ）を有していることが確認されている¹⁶²⁾。試薬紙には α -アミラーゼの基質である

2-chloro-4-nitrophenyl-4-O- β -D-galactopyranosylmaltoside を含んでおり，2-chloro-4-nitrophenyl-4-O- β -D-galactopyranosylmaltoside は α -アミラーゼにより β -D-galactopyranosylmaltose と黄色の

2-chloro-4-nitrophenol に加水分解される。そして，10 秒間の酵素活性の後の反射率を 430nm の波長を用いて測定する。その測定された色は唾液 α -アミラーゼに比例する（つまり，黄色が濃い程，唾液 α -アミラーゼ値が高い）。酵素分析装置の小型演算処理装置は唾液 α -アミラーゼ値を計算し，ディスプレイにその値を表示する。



図 22. 唾液アミラーゼモニターと試験紙

本実験では、運動負荷試験の各段階の残り 30 秒の時点で唾液の採取を行った。唾液採取のため協力者から呼気ガス分析用マスクを取り外し、唾液採取紙を口腔内の舌下部に 30 秒間挿入することで唾液を採取した。唾液採取後、呼気ガス分析用マスクを再装着した。Tsa の決定は、運動強度を従属変数として、運動強度を漸増していく中で唾液 α -アミラーゼが急に上昇する変曲点を 2 つの回帰直線の交点として求めた。

2.1.3.4 統計解析

統計解析には、IBM SPSS Statistics 20 を使用した。それぞれの指標間に運動負荷量の差異があるのかを確認するため、AT、Tsa 時の運動負荷量を対応のある t 検定により比較した。また、AT と Tsa 時の運動負荷量の関係を Pearson の積率相関係数を用いて検討した。さらに、運動負荷の増大に伴う唾液 α -アミラーゼの変動を明らかにするため Tsa を示した負荷量を基準に Tsa-1, Tsa-2, Tsa-3 の時の唾液 α -アミラーゼを反復測定による一元配置分散分析により比較した。危険率 5%未満を統計学的有意とした。

2.1.4 結果

協力者の特性を表 4 に示す。本実験の結果、AT は全ての協力者で検出することができた (100%) が、Tsa は 2 名の協力者で検出できなかった (検出力 82%)。そのため、以下の解析では、Tsa が確認できなかった協力者のデータを除いて比較を行った。その結果、AT 時の酸素摂取量、心拍数、運動負荷量はそれぞれ 18.1 ± 2.3 ml/min/kg, 116.2 ± 16.4 beats/min, 70.0 ± 28.3 Watt であった。唾液 α -アミラーゼは安静時に 22.2 ± 27.5 kIU/l であり、Tsa 時に 40.0 ± 18.1 kIU/l であった。Tsa 時の運動負荷量は 61.1 ± 28.5 Watt であった。対応のある t 検定の結果、AT 時と Tsa 時の運動負荷量間に有意な差は認められなかった (表 5)。

表 4. 研究協力者の属性

年齢	(yr)	23.8 ± 1.8
身長	(m)	1.73 ± 0.05
体重	(kg)	64.6 ± 6.3
BMI	(kg/m ²)	21.7 ± 1.3
安静時心拍数	(beats/min)	70.0 ± 11.4
AT 時心拍数	(beats/min)	116.2 ± 16.4
AT 時酸素摂取量	(ml/min/kg)	18.1 ± 2.3
安静時唾液 α-アミラーゼ	(kIU/l)	22.2 ± 27.5
Tsa 時唾液 α-アミラーゼ	(kIU/l)	40.0 ± 18.1

BMI ; Body Mass Index, AT ; 嫌気性代謝閾値, Tsa ; 唾液閾値
 平均値 ± 標準偏差

表 5. 嫌気性代謝閾値と唾液閾値における運動負荷量の比較

嫌気性代謝閾値	(W)	70.0 ± 28.3
唾液閾値	(W)	61.1 ± 28.5

平均値 ± 標準偏差

本実験で測定された運動負荷に伴う唾液 α -アミラーゼの変動を図 23 に示す。反復測定による一元配置分散分析の結果、負荷量の主効果が有意であったため ($F_{1.58, 12.6} = 24.0, p < 0.01, \text{partial } \eta^2 = 0.75$)、事後検定として Bonferroni 法による多重比較を行った。その結果、Tsa と Tsa-1, Tsa-2, Tsa-3 にそれぞれ有意差が認められた (順に $p < 0.05, p < 0.01, p < 0.01$)。

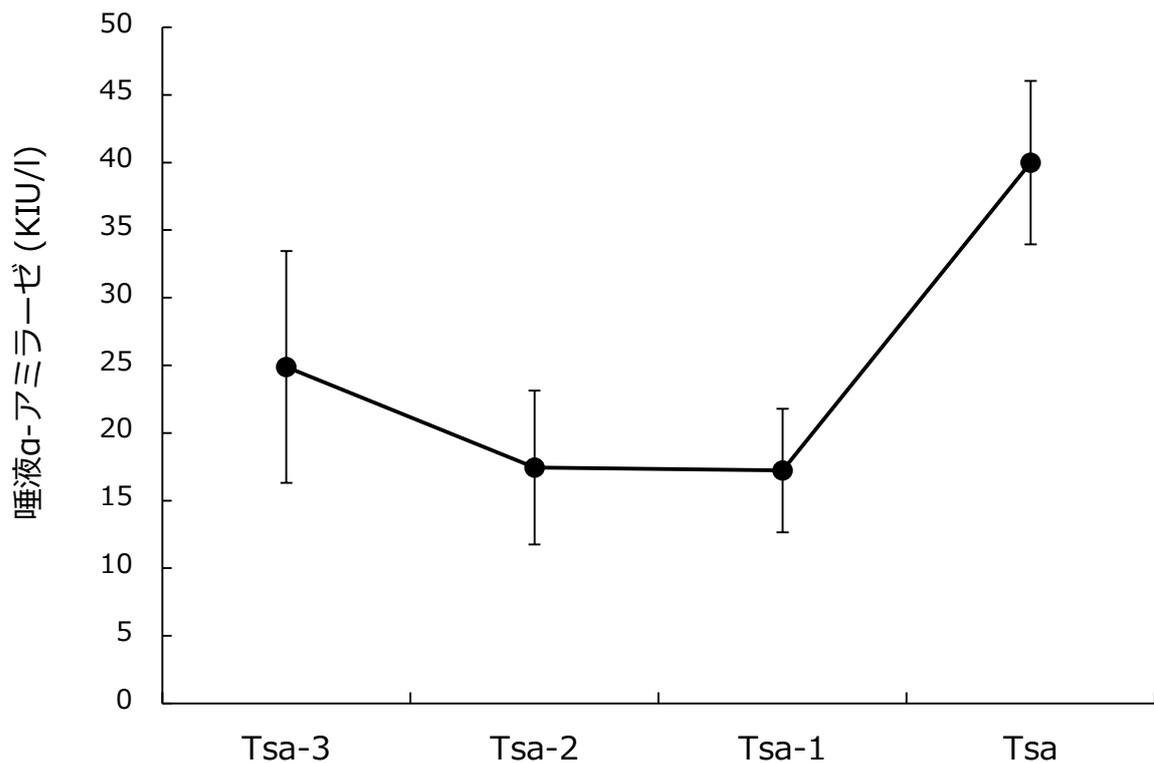


図 23. 運動負荷試験中に唾液 α -アミラーゼが示す動態

Tsa は唾液 α -アミラーゼが急激に上昇した時の運動負荷量を表しており、Tsa-1 は Tsa より 1 段階前の運動負荷量を表す。

平均値 \pm 標準誤差

AT と Tsa の関係を図 24 に示す。Pearson の積率相関分析の結果、AT と Tsa には有意な相関が認められた ($r = 0.951$, $p < 0.01$)。

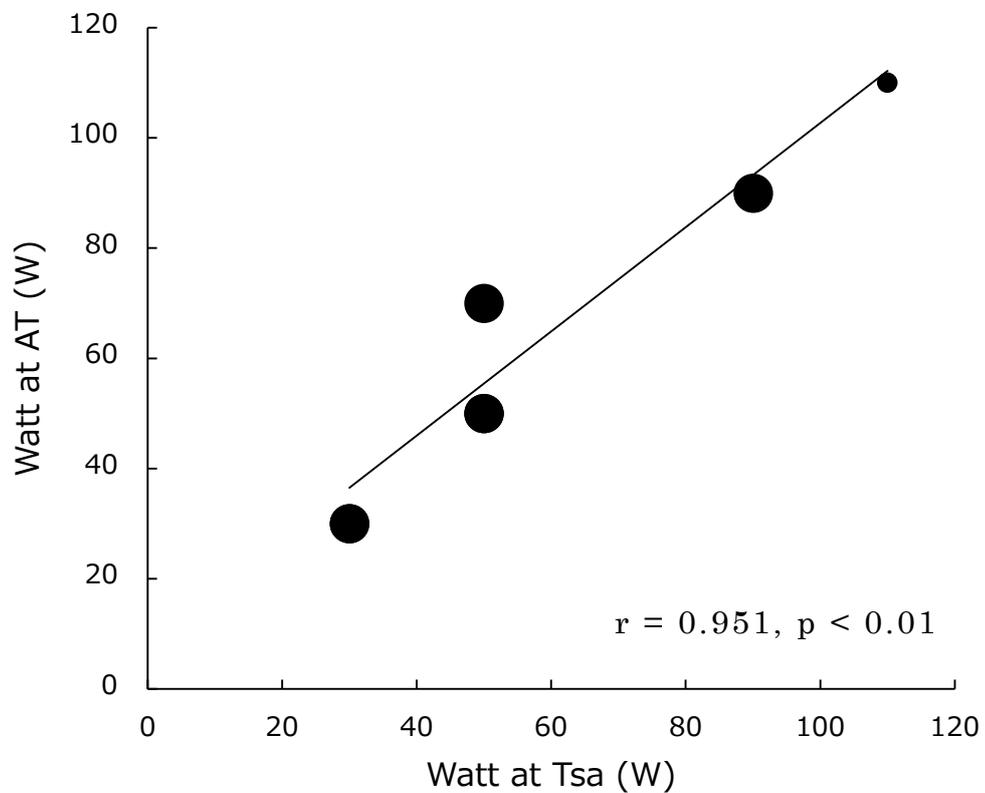


図 24. 嫌気性代謝閾値と唾液閾値の関係

AT ; 嫌気性代謝閾値, Tsa ; 唾液閾値

● … 2 persons, ● … 1 person

2.1.5 考察

運動負荷が段階的に増大する運動負荷試験中の唾液 α -アミラーゼを測定した結果、唾液 α -アミラーゼにはその値が急激に上昇する点が存在することが明らかとなった。この結果は Calvo ら¹⁶⁰⁾の報告を支持するものであり、唾液 α -アミラーゼには運動負荷に対する閾値 (Tsa) が存在することを示している。また、呼気ガス分析により得られた AT と Tsa には有意な相関 ($r = 0.951, p < 0.01$) が認められ、AT と Tsa における運動負荷量間には有意な差が認められなかったことから、Tsa と AT は同一の機序により生じている可能性があると考えられる。

Yamamoto ら¹⁶³⁾は心拍変動 (heart rate variability) を用いた手法により運動負荷中の交感神経系の活動と副交感神経系の活動を調査し、副交感神経系の活動は安静時から 60% VT の運動強度までは漸減すること、交感神経系の活動は運動強度が VT を超えた時点で増加し始めることを明らかにしている。Yamamoto らの報告は、AT を反映する VT において交感神経系の活動が変化することを示しており、交感神経系の活動と AT が密接な関係を有していることを示唆している。

また、Chatterton ら¹⁴⁸⁾は研究協力者にウォーキング、ジョギング、ランニングを行わせ、それらの活動時の唾液 α -アミラーゼを計測し、ウォーキングでは唾液 α -アミラーゼは変化しないものの、ジョギングやランニングでは唾液 α -アミラーゼが上昇することを報告している。Chatterton らの報告は、ある一定以上の運動強度の身体活動によって唾液 α -アミラーゼの上昇が引き起こされることを裏付けている。本実験の結果と Calvo ら¹⁶⁰⁾の報告から、ある一定以上の運動強度とは AT に相当する運動強度であると考えられる。さらに、Chatterton ら¹⁴⁸⁾は唾液 α -アミラーゼと血漿カテコールアミンの相関を検討し、唾液 α -アミラーゼと血漿カテコールアミンには有意な相関が存在することを明らかにしている (ノルエピネフリン, $r = 0.64, p < 0.001$; エピネフリン, $r = 0.49, p < 0.001$)。この結果は、唾液 α -アミラーゼが交感神経系の活動を反映していることを示している。

以上の報告から、Tsa と AT はともに交感神経系が活動し始める点を反映しているため、両者の間には強い相関が認められたと考えられる。また、唾液 α -アミラーゼは Tsa を超えると増大するものの、Tsa 未満の運動強度では変化しないことが明らかとなった。これは、交感神経系の活動は運動強度が AT を超えた時点で増加し始めることから、交感神経系の活動を反映する唾液 α -アミラーゼも運動強度が AT を超えた時点で上昇し始めるためであると考えられる。

第 2 節 唾液 α -アミラーゼを用いた機能的課題難易度測定の妥当性の検討

2.2.1 はじめに

本節では機能的課題難易度を測定するための認知的負荷の指標として唾液 α -アミラーゼを用いることの妥当性を明らかにすることを目的に、プローブ反応時間と唾液 α -アミラーゼの関連を検討する。

2.2.2 目的

本節では運動課題遂行中のプローブ反応時間と課題遂行直後の唾液 α -アミラーゼを測定することで以下の事項を明らかにする。

1. 課題難易度の変化に伴う唾液 α -アミラーゼの変化を明らかにする。
2. 課題の遂行成績と唾液 α -アミラーゼの関係を明らかにする。
3. プローブ反応時間と唾液 α -アミラーゼの関連を明らかにすることで、機能的課題難易度指標としての唾液 α -アミラーゼの妥当性を明らかにする。

2.2.3 方法

2.2.3.1 研究協力者

健常若年者 16 名（男性 10 名，女性 6 名）を研究協力者とした。平均年齢は 23.9 ± 3.4 歳であり，平均身長は 166.3 ± 10.0 cm であった。唾液 α -アミラーゼはアルコール摂取，服薬，飲食，カフェイン等に影響を受けるため¹³¹⁾，全ての研究協力者に実験参加の 24 時間前からアルコール摂取を禁止し，実験開始 2 時間前から水以外の飲食を禁止するよう伝えた。全ての研究協力者に対し事前に研究の内容に関する説明を行い，書面および口頭で実験参加に対する同意を得た。

2.2.3.2 機器と課題

姿勢制御課題

姿勢制御課題には Balance System(Biodex 社製)を使用した(図 25)。Balance System は不安定な支持面上での姿勢安定性を定量的に測定可能な機器であり,円状のプラットフォームとモニターで構成されている。プラットフォームの最大傾斜角度は 20° であり,その不安定性を 8 段階(1;最も不安定, 8;最も安定)で調整することが可能である。本実験では Stability level 1, 2, 3 を使用した。Balance System による姿勢制御課題の成績は Stability index として課題遂行後にモニターに表示される。Stability index とは課題遂行中に前後・左右にどの程度プラットフォームが傾斜したかを反映する指標であり,以下の式(1)により算出される:

$$\text{Stability Index} = \sqrt{\frac{\Sigma(0-x)^2 + \Sigma(0-y)^2}{n}} \quad \dots \text{式 (1)}$$

x は左右方向へのプラットフォームの傾斜角度であり, y は前後方向へのプラットフォームの傾斜角度である。 n はサンプル数である。本実験では 1 試行を 20 秒に設定しており, サンプリング周波数が 20Hz であるためサンプル数は 4000 となる。本実験では Stability index を姿勢制御課題の成績とした。研究協力者には, できる限りこの Stability index が小さくなるように努めることを求めた。

課題遂行時の姿勢は閉脚立位とした(図 26)。その際, 履物による影響を除くため課題は裸足で遂行すること, 視野による影響を除くため研究協力者の視線の高さに設定された注視点を見ること, 上肢運動による影響を除くため, 上肢は身体の側面に位置させることとした。足部の位置は, プラットフォーム上に描かれているグリッド線を参考にする事で試行毎に足部の位置が変わってしまうことを避けた。



図 25. Balance System (Biodex 社製)



図 26. 足部位置

プローブ反応時間

姿勢制御課題の注意需要を測定するためにプローブ反応時間を用いた。研究協力者には予め“ピッ”という音刺激に対して、“パッ”と可能な限り素早く発声するように事前に教示を行った。音刺激は予め作成した音刺激ファイルを取り込んだミュージックプレーヤー（Apple 社製）とスピーカー（Logitech 社製）から構成される音刺激装置により与えた。音刺激ファイルは 11 種類あり、課題開始 5 秒後から 15 秒後まで 1 秒ずつ課題開始後から音刺激が与えられるまでの時間間隔が異なる。この音刺激ファイルをランダムな順序で再生することで、予測による反応時間への影響を抑えた。さらに、予測による影響を減じるために、音刺激を 5 試行につき 3 試行のみに与え、2 試行を catch trial とした（プローブ頻度：60%）。音刺激の持続時間は全て 50msec とした。音刺激と発声をレコーダー（Sony 社製）で録音し、解析に用いた。

唾液 α -アミラーゼ

唾液 α -アミラーゼの測定には前節と同様に酵素分析装置と試験紙を用いた。試薬を含んだ試験紙を直接口腔内の舌下部に 30 秒間挿入することで、およそ 20–30 μ l の唾液を採取した。唾液採取直後、試験紙を酵素分析装置に挿入することで唾液 α -アミラーゼを測定した。唾液の採取から測定値を得るまでに要する時間は 60 秒程度であった。

2.2.3.3 手続き

研究協力者を2つのうちの1つのグループに男女比が同じになるように振り分けた（男性5名，女性3名）。全ての研究協力者は，プローブ反応時間の測定が含まれる課題15試行（Probe session）と，プローブ反応時間の測定が含まれない課題15試行（No-probe session）を遂行した（合計30試行）。Probe sessionでは，40%の割合でcatch trialを含めたので，実際にプローブ反応時間を測定した試行は9試行であった。No-probe sessionでは，プローブ反応時間を測定しないことを研究協力者にも事前に伝えた。1試行は20秒に設定し，5試行で1ブロックとした。1つのブロックに，Stability level 1, 2, 3の中から1つのStability levelを割り当て，1つのセッションに異なるStability levelが割り当てられた3ブロックが含まれるようにした。遂行するStability levelの順序は，研究協力者間でカウンターバランスを取った。各ブロック終了後に唾液を採取した。グループAに振り分けられた研究協力者はProbe sessionの後にNo-probe sessionを遂行し，グループBに振り分けられた研究協力者はNo-probe sessionの後にProbe sessionを遂行した（図27）。

課題の説明と実験の流れを説明した後，基準値となるプローブ反応時間の測定を3回行った。基準値となるプローブ反応時間の測定条件は，課題遂行中と同様の条件としたが，その際にBalance Systemのプラットフォームは固定し，安定した支持面上でプローブ反応時間を測定した。プローブが与えられるタイミングは，課題遂行中と同様，予測効果を減少させるために無作為とした。基準となるプローブ反応時間を測定後，振り分けられた条件に基づいて1試行20秒の課題を30試行遂行した。その際に試行間間隔は20秒に設定した。また，15試行目が終了した後に5分間の休憩を挿入した。

尚，実験は同一の時間帯（16：00-20：00）に実施した。

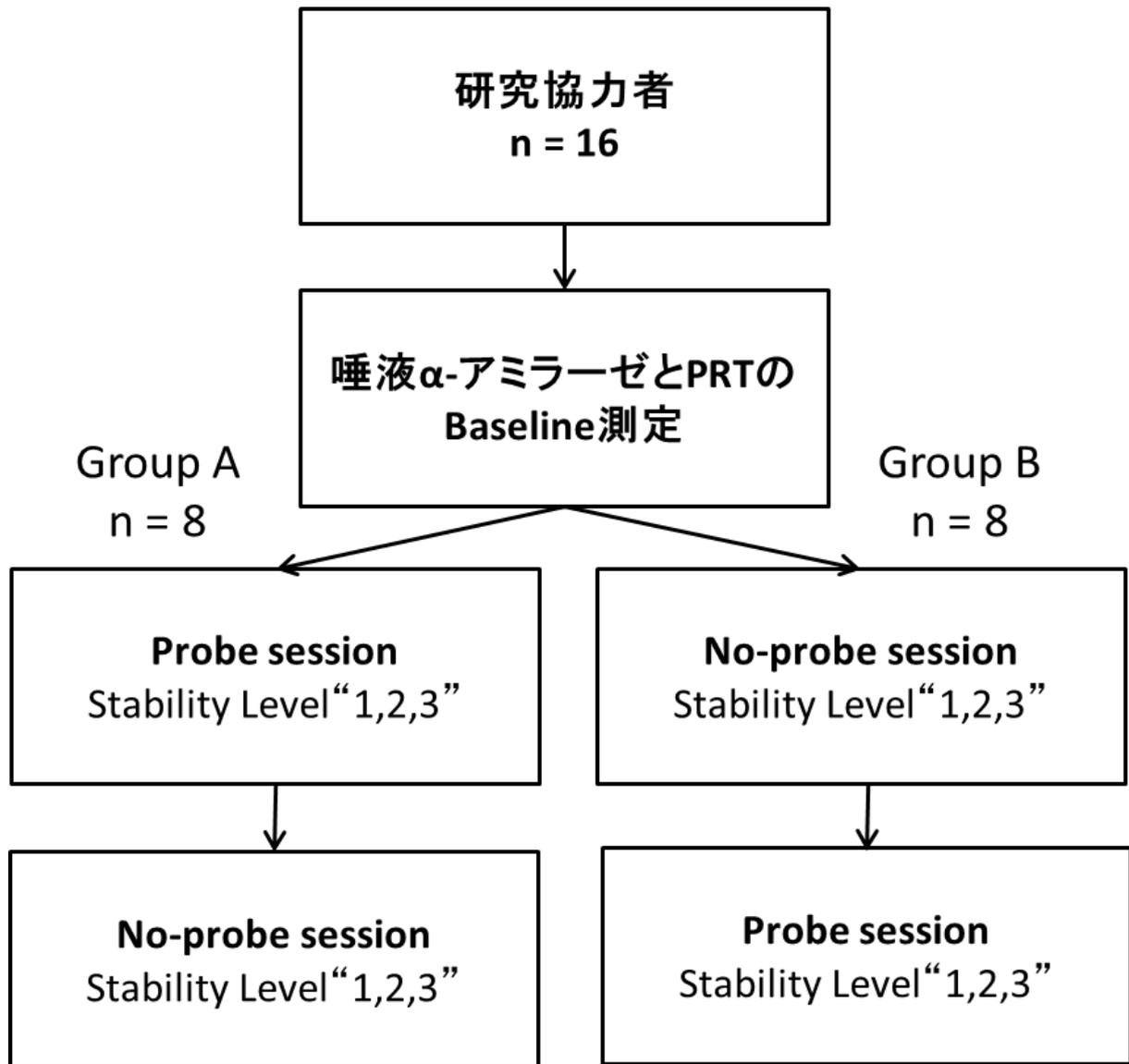


図 27. 実験デザイン

Probe session は PRT の測定を含むが、No-probe session は PRT の測定を含まない。各セッションには Stability level 1, 2, 3 が含まれ、遂行する順序は条件間でカウンターバランスを取った。

PRT : プローブ反応時間

2.2.3.4 統計解析

Stability index

姿勢制御課題の難易度とプローブ課題の有無が **Stability index** に与える影響を明らかにするために、**Stability level** (1, 2, 3) と課題条件 (**Probe**, **No-probe**) を要因とする二元配置分散分析を行った。危険率 5%未満を統計学的有意とした。

唾液 α -アミラーゼの変化率

唾液 α -アミラーゼは個人差が大きいので、本実験では唾液 α -アミラーゼの変化率を用いた。課題遂行後の唾液 α -アミラーゼを安静時の唾液 α -アミラーゼで除し、100 を乗ずることで唾液 α -アミラーゼの変化率を算出した。姿勢制御課題の難易度とプローブ課題の有無が唾液 α -アミラーゼの変化率に与える影響を明らかにするために、**Stability level** (1, 2, 3) と課題条件 (**Probe**, **No-probe**) を要因とする二元配置分散分析を行った。危険率 5%未満を統計学的有意とした。

プローブ反応時間の変化率

唾液 α -アミラーゼと同様に、プローブ反応時間も個人差が大きいため変化率を使用した。課題難易度によるプローブ反応時間への影響を明らかにするために、**Stability level** (1, 2, 3) を要因とする一元配置分散分析を行った。危険率 5%未満を統計学的有意とした。

変数間の関連

Stability index と唾液 α -アミラーゼの変化率、**Stability index** とプローブ反応時間の変化率、唾液 α -アミラーゼの変化率とプローブ反応時間の変化率の関連を明らかにするため **Pearson** の積率相関分析を行った。さらに、唾液 α -アミラーゼの変化率とプローブ反応時間の変化率の関係を明らかにするために、単回帰分析を行った。危険率 5%未満を統計学的有意とした。

2.2.4 結果

Stability Index

Stability level が減少するにつれて，Stability index は上昇した（図 28）。二元配置分散分析の結果，Stability level に有意な主効果が認められた（ $F_{2, 30} = 409.28$, $p < 0.001$, $\eta_p^2 = 0.965$ ）。しかし，課題条件の主効果（ $F_{1, 15} = 0.079$, $p = 0.78$, $\eta_p^2 = 0.005$ ）と課題条件と Stability level の交互作用（ $F_{2, 30} = 0.089$, $p = 0.92$, $\eta_p^2 = 0.006$ ）は有意ではなかった。Stability level に有意な主効果が認められたため，多重比較を行ったところ，全ての Stability level 間に有意差が認められた（全て $p < 0.01$ ）。また，課題条件の主効果と課題条件と Stability level の交互作用が認められなかったことは，プローブ反応課題が姿勢制御に影響を与えなかったことを示している。

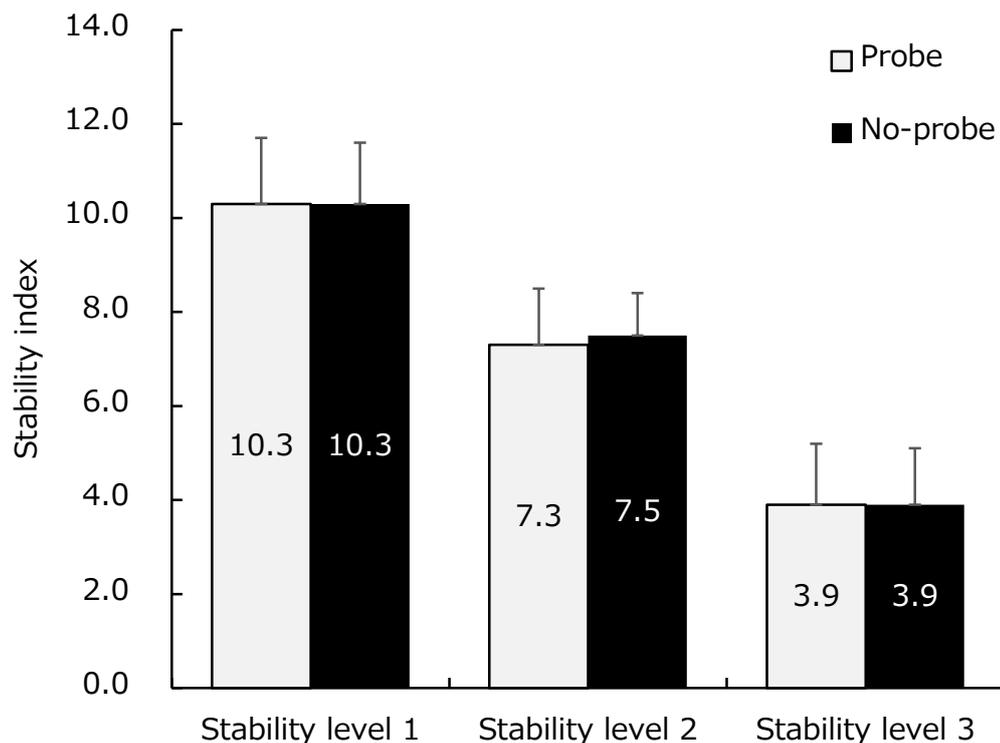


図 28. Stability level と Stability index

平均値 ± 標準偏差

唾液 α-アミラーゼの変化率

Stability level が減少するにつれて唾液 α-アミラーゼは上昇した（図 29）。二元配置分散分析の結果，Stability level の有意な主効果が認められた（ $F_{2, 30} = 23.00, p < 0.001, \eta_p^2 = 0.605$ ）。しかし，課題条件の主効果（ $F_{1, 15} = 1.20, p = 0.29, \eta_p^2 = 0.074$ ）と課題条件と Stability level の交互作用（ $F_{2, 30} = 1.51, p = 0.24, \eta_p^2 = 0.092$ ）は有意ではなかった。Stability level に有意な主効果が認められたため，多重比較を行ったところ，全ての Stability level 間に有意差が認められた（全て $p < 0.01$ ）。また，課題条件の主効果と課題条件と Stability level の交互作用が認められなかったことはプローブ反応課題が唾液 α-アミラーゼに影響を与えなかったことを示している。

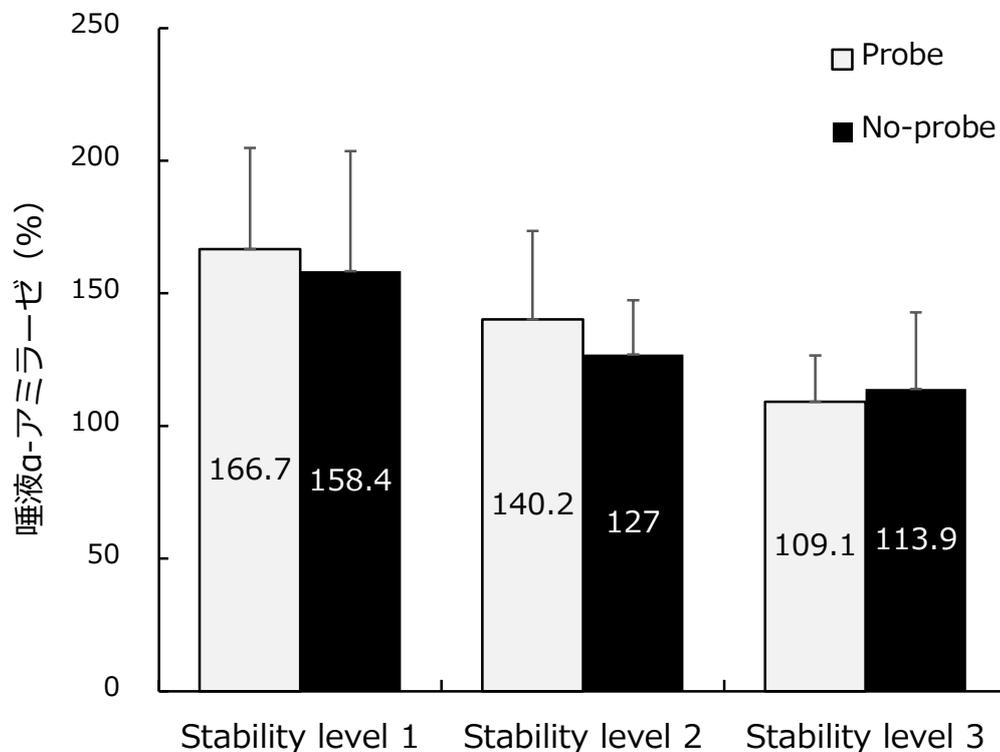


図 29. Stability level と唾液 α-アミラーゼの変化率

平均値 ± 標準偏差

プローブ反応時間の変化率

各 Stability level におけるプローブ反応時間の変化率を図 30 に示す。一元配置分散分析の結果、プローブ反応時間には Stability level の有意な主効果が認められた ($F_{2, 30} = 53.95$, $p < 0.001$, $\eta_p^2 = 0.782$)。Stability level に有意な主効果が認められたため、多重比較を行ったところ、全ての Stability level 間に有意差が認められた (全て $p < 0.05$)。

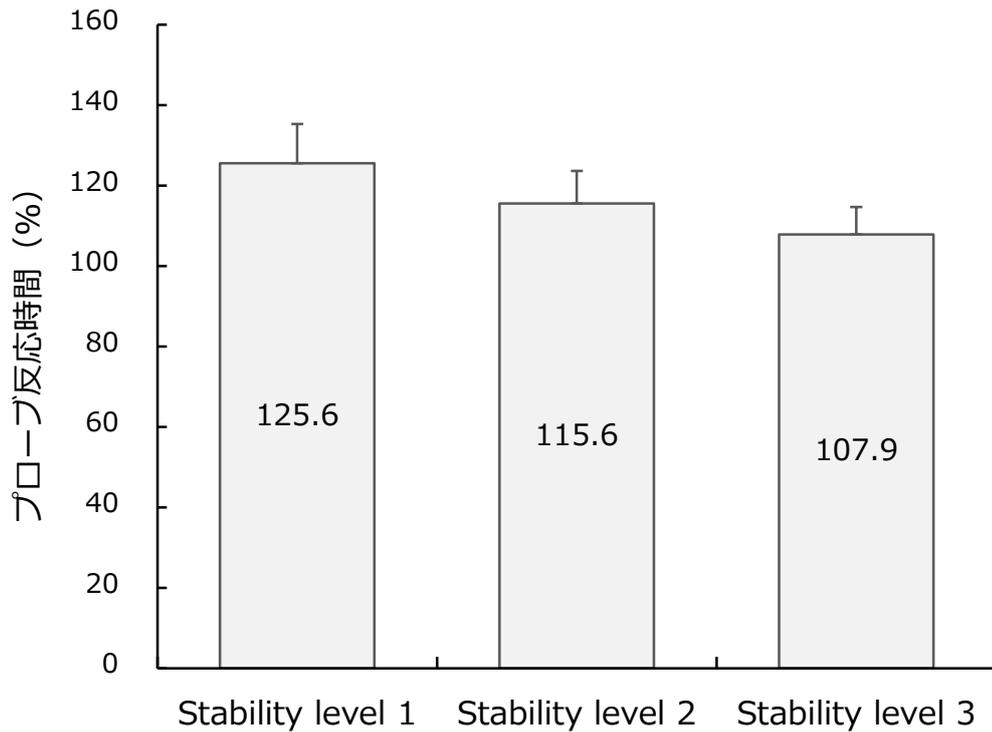


図 30. Stability level とプローブ反応時間の変化率

平均値 ± 標準偏差

変数間の関連

Stability index と唾液 α -アミラーゼの変化率の関係を図 31 に、Stability index とプローブ反応時間の変化率の関係を図 32 に示す。Stability index と唾液 α -アミラーゼの変化率には中等度の正の相関が認められ ($r = 0.64$)、Stability index とプローブ反応時間の変化率にも中等度の正の相関が認められた ($r = 0.62$)。

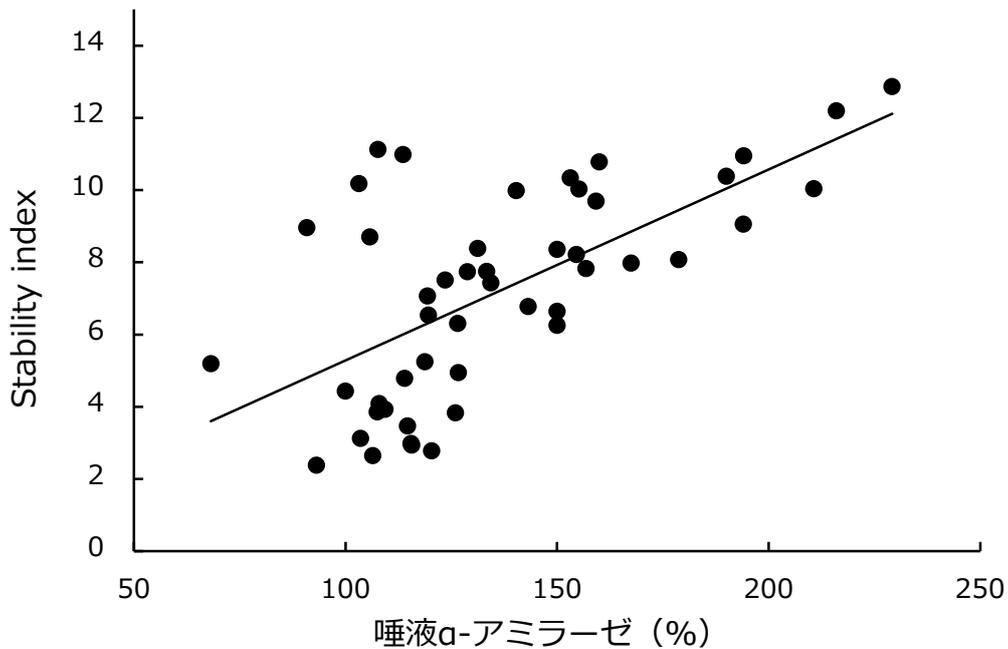


図 31. Stability index と唾液 α -アミラーゼの変化率

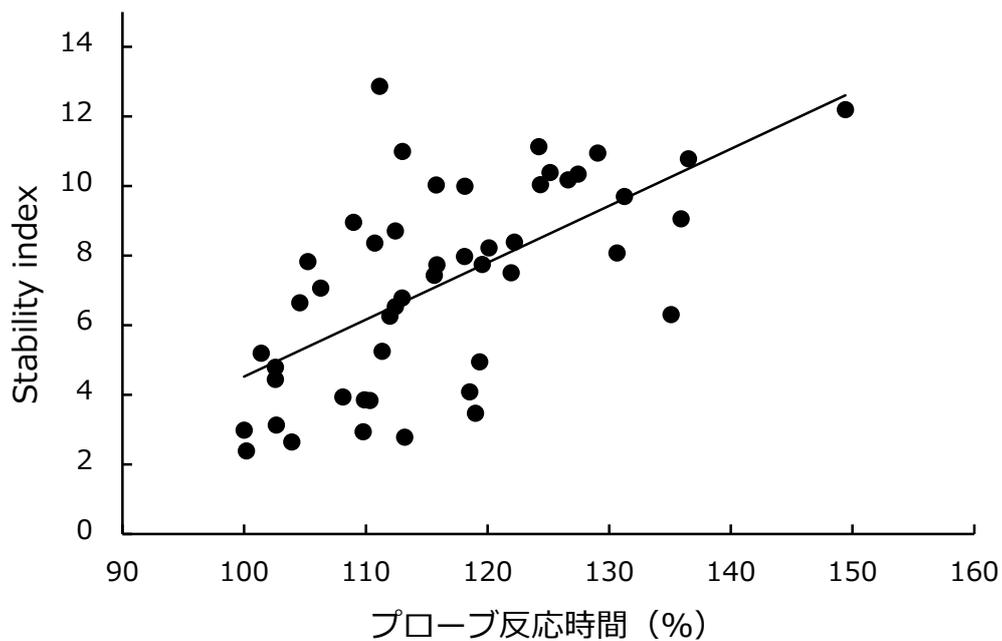


図 32. Stability index とプローブ反応時間の変化率

さらに、唾液 α -アミラーゼの変化率とプローブ反応時間の変化率の関係を図 33 に示す。唾液 α -アミラーゼの変化率とプローブ反応時間の変化率の間には中等度の正の相関が認められた ($r = 0.58$)。唾液 α -アミラーゼの変化率とプローブ反応時間の変化率から次の回帰式が得られた ($y = 0.1834x + 0.9139, R^2 = 0.3412$)。

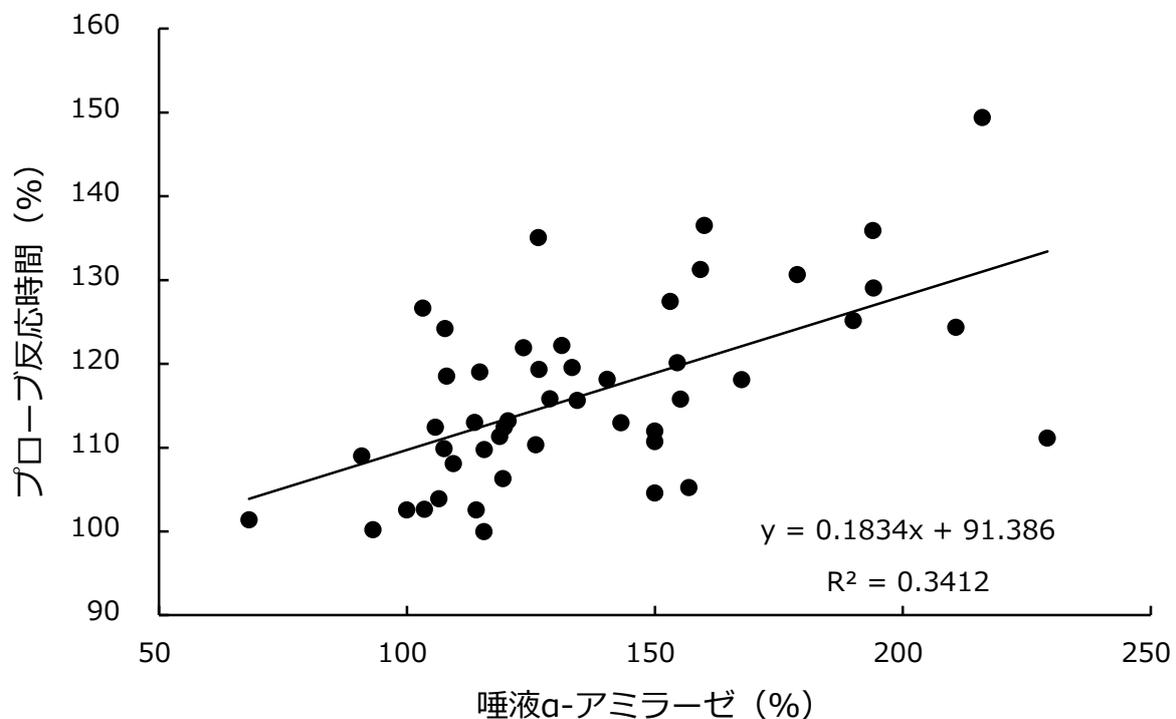


図 33. 唾液 α -アミラーゼの変化率とプローブ反応時間の変化率

2.2.5 考察

本実験の目的は、注意需要を測定する指標として広く用いられているプローブ反応時間と唾液 α -アミラーゼの関連を確認することで、姿勢制御課題遂行中の機能的課題難易度を測定する指標としての唾液 α -アミラーゼの妥当性を明らかにすることである。本実験の結果、Stability level を下げるにつれて課題の遂行成績である Stability index が上昇することが明らかとなった。本実験で使用した Balance System では、Stability level が名目的課題難易度に相当するため、名目的課題難易度の上昇に伴って機能的課題難易度も上昇し、課題の遂行成績が低下したと考えられる。この結果は、Stability level を調整することで、名目的課題難易度と機能的課題難易度を操作することが可能であることを示している。また、本実験では Probe session と No-probe session を設定することで、プローブ課題による姿勢制御に対する影響と唾液 α -アミラーゼに対する影響を検討した。その結果、プローブ課題の有無は姿勢制御課題の成績と唾液 α -アミラーゼには影響を与えないことが明らかとなった。従って、以降ではプローブ課題の有無の要因を除いて考察を行う。

Stability level とプローブ反応時間、唾液 α -アミラーゼの関係を検討した結果、Stability level が下がるにつれてプローブ反応時間は有意に延長し、さらに唾液 α -アミラーゼは有意に上昇することが明らかとなった。この結果は、プローブ反応時間と唾液 α -アミラーゼがともに課題難易度を反映していることを示しており、プローブ反応時間が姿勢制御課題における課題難易度を反映するという点において Lajoie ら¹⁰⁸⁾の報告と一致している。Lajoie らは、様々な姿勢においてプローブ反応時間を測定し、難易度の高い姿勢ほどプローブ反応時間が延長することを示している。しかし、Lajoie らが行った実験では、各姿勢の支持基底面の広さや重心の高さから課題難易度を推測しており、各姿勢の課題難易度が明確にされていない。また、姿勢制御課題の遂行成績を測定していないため、姿勢制御課題の遂行成績とプローブ反応時間の関係については述べられていない。そこで、本実験では、Balance System の Stability level を名目的課題難易度の尺度として用いることで、姿勢制御課題の難易度を明確に設定した。さらに、Stability index を姿勢制御課題の遂行成績とすることで、姿勢制御課題の遂行成績を定量的に測定した。その結果、Stability index とプローブ反応時間の変化率、Stability index と唾液 α -アミラーゼの変化率の間には中等度の相関が認められることが明らかとなった。Stability index とプローブ反応時間の変化率の関連については、Remaud ら¹⁶⁴⁾の報告と一致している。Remaud らは、姿勢制御課題の成績と反応時間の変化率の関係を調べ、姿勢制御課題の成績と反応時間の変化率の間には中等度の正の相関が認められることを明らかにした。

これらの知見は、姿勢制御課題の難易度が上昇するにつれて姿勢制御に配分される注意資源が増加し、その結果、プローブ反応時間が延長していることを示している。従って、二重課題法の1つであるプローブ反応時間には、前述したような問題点が指摘されてはいるものの、姿勢制御課題の注意需要を測定することに関しては、主課題と二次課題に要する注意資源が共有されていることから干渉が生じ、主課題の難易度の変化を捉えることが可能であると考えられる。また、本実験の結果、唾液 α -アミラーゼの変化率はプローブ反応時間の変化率と同程度に *Stability index* と相関することが明らかとなった。第2章第1節の実験において、AT未満での運動強度では唾液 α -アミラーゼは身体活動の影響を受けないことが明らかとなっているため、この結果は、唾液 α -アミラーゼの変化率が姿勢制御課題の注意需要を反映していることを示していると考えられる。仮に、本実験で用いた課題がAT以上の強度であれば、AT未満の *Stability level* とAT以上の *Stability level* において唾液 α -アミラーゼの値に著明な差が生じ、*Stability index* との相関係数は低下すると考えられる。また、散布図(図31)からも、そのような傾向は認められないため、本実験で用いた課題はAT未満の強度であったと考えられる。

さらに、本実験の結果から、唾液 α -アミラーゼの変化率とプローブ反応時間の変化率の間には中等度の正の相関が認められることが明らかとなった。この結果は、運動課題遂行中の注意需要を測定するための指標としての唾液 α -アミラーゼの妥当性を示している。しかしその一方で、唾液 α -アミラーゼの変化率とプローブ反応時間の変化率が同程度に姿勢制御課題の注意需要を反映したにも関わらず、両者の相関の程度は中等度に留まった。この点に関しては、注意需要を測定するための指標としての行動的指標と生理学的指標の差異が影響していると考えられる。行動的指標に含まれるプローブ反応時間は、主課題の遂行中に二次課題である単純反応課題を挿入し、その反応時間から主課題の注意需要を推定する。一方で、生理学的指標である唾液 α -アミラーゼは、その分泌が交感神経系により制御されていることから^{120,121)}、認知あるいは運動課題の遂行によって生じる情報を処理する際の交感神経系の活動から課題の注意需要を推定する。従って、プローブ反応時間と唾液 α -アミラーゼは、それぞれ異なる様式で注意需要を推定している。それ故、2つの指標が同程度に姿勢制御課題の注意需要を反映するにも関わらず、その2つの指標間には中等度の相関しか認められなかったと考えられる。

以上より、唾液 α -アミラーゼは、プローブ反応時間と同程度に課題の注意需要を推定することが可能であることに加え、行動的指標が孕んでいる様々な問題点を回避することができることから、機能的課題難易度測定指標としての有用性は高いと考えられる。

第 3 節 第 2 章まとめ

本章では唾液 α -アミラーゼを用いた機能的課題難易度測定の妥当性を明らかにするため 2 つの実験を行った。

まず、第 1 節では 11 名の健常成人男性（年齢 23.8 ± 1.8 歳）に運動負荷試験を行わせ、運動負荷試験中の呼気ガス、唾液 α -アミラーゼを測定した。その結果、唾液 α -アミラーゼには、漸増する運動負荷に対して急激にその値が上昇する点である唾液閾値が存在することが明らかとなった。また、その唾液閾値が生じる運動強度は呼気ガス分析から得られる嫌気性代謝閾値が生じる運動強度と一致することが明らかとなった。さらに、唾液 α -アミラーゼは唾液閾値を超えるまでその値に変化が認められないことが明らかとなった。以上の結果から、唾液閾値未満の運動強度であれば唾液 α -アミラーゼは身体活動の影響を受けないことが示された。

次に、第 2 節では、16 名の健常若年者（年齢 23.9 ± 3.4 歳）に 3 段階に不安定性を設定した不安定板上での姿勢制御課題を与え、課題遂行中のプローブ反応時間と、課題遂行直後の唾液 α -アミラーゼを測定した。その結果、不安定性が増すにつれて姿勢制御課題の成績は低下するとともに、プローブ反応時間の有意な延長と唾液 α -アミラーゼの有意な上昇が認められた。さらに、プローブ反応時間と唾液 α -アミラーゼには中等度の相関が認められた。以上の結果から、唾液 α -アミラーゼはプローブ反応時間と同程度に課題難易度を測定することが可能な指標であることが明らかとなった。

以上の実験結果から、唾液 α -アミラーゼは AT 未満の運動強度であれば機能的課題難易度を反映する指標として妥当な指標であるという結論を得た。

第 3 章 Optimal Challenge Point に相当する機能的課題難易度の定量化

3.1 はじめに

第 2 章で行った実験により、唾液 α -アミラーゼは、AT 未満の運動強度であれば機能的課題難易度を反映する指標として妥当な指標であることが明らかとなった。従って、ここでは唾液 α -アミラーゼを用いて運動課題遂行時の機能的課題難易度を測定し、学習利得と機能的課題難易度の関係を定量的に解明することに加え、optimal challenge point に相当する機能的課題難易度を定量化する。さらに、より簡便に機能的課題難易度を測定することができる代替的指標の候補として NASA-TLX の有用性を確認する。

3.2 目的

本実験の目的は、唾液 α -アミラーゼと NASA-TLX を使用することで optimal challenge point に相当する機能的課題難易度を明らかにすることである。

以下の 4 つを作業仮説とした。

1. 機能的課題難易度が高すぎても低すぎても運動学習は遅延し、適度な機能的課題難易度において運動学習が最も促進される。
2. 唾液 α -アミラーゼにより、運動課題遂行時における機能的課題難易度の変化を捉えることが可能である。
3. 学習利得と唾液 α -アミラーゼの変化率の関係を確認することで、optimal challenge point を定量化することが可能である。
4. 唾液 α -アミラーゼと同様に、NASA-TLX を用いることで機能的課題難易度の測定、optimal challenge point の定量化が可能である。

3.3 方法

3.3.1 研究協力者

健常若年者 60 名を研究協力者とした。唾液 α -アミラーゼはアルコール摂取，服薬，飲食，カフェイン等に影響を受けるため¹³¹⁾，全ての研究協力者に実験参加の 24 時間前からアルコール摂取を禁止し，実験開始 2 時間前から水以外の飲食を禁止するよう伝えた。全ての研究協力者に対し事前に研究の内容に関する説明を行い，書面および口頭で実験参加に対する同意を得た。

3.3.2 機器と課題

姿勢制御課題

第 2 章第 2 節と同様に Balance System (Biodex 社製) を使用した。

課題遂行時の姿勢は閉脚立位とし，学習者が片脚立位を保持し易い方の脚（以下，練習脚）の足部中央とプラットフォームの中心が一致するように立位位置を調整した（図 34）。その際，履物による影響を除くため課題は裸足で遂行すること，視野による影響を除くため研究協力者の視線の高さに設定された注視点を見ること，上肢運動による影響を除くため，上肢は身体の側面に位置させることとした。足部の位置は，プラットフォーム上に描かれているグリッド線を参考にすることで，試行毎に足部の位置が変わってしまうことを避けた。

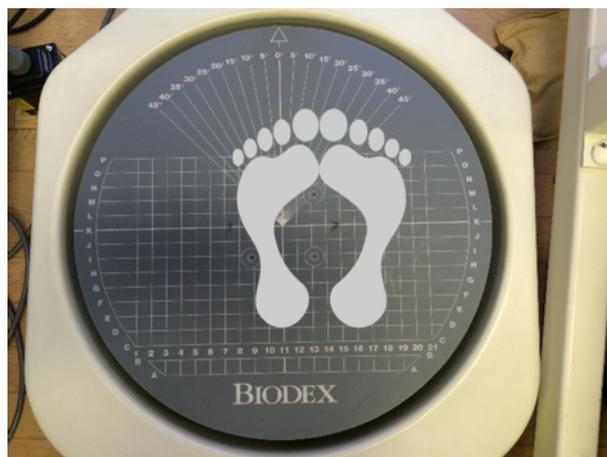


図 34. 足部の位置（左脚が練習脚の場合）

唾液 α -アミラーゼ

前章と同様に、酵素分析装置と試験紙を用いた。

NASA-TLX

NASA-TLX は、それぞれの項目に対して、0 から 100 の両極尺度を用いて評定を行った。

3.3.3 手続き

研究協力者を 4 つの異なるグループ (Stability level 1, 2, 3, 4) にそれぞれ 15 名ずつ無作為に振り分けた。その際、男女の比率が偏らないように制約を加えた。本実験において Stability level は名目的課題難易度に相当し、各グループで練習試行時の Stability level は異なる。Stability level 1 に振り分けられた研究協力者は最も難しい名目的課題難易度で練習を行い、Stability level 4 に振り分けられた研究協力者は最も易しい名目的課題難易度で練習を行った。

実験は 2 日間行った (図 35)。実験 1 日目には、基準値となる安静時における唾液 α -アミラーゼを測定した。振り分けられたグループに関係なく、全ての研究協力者はプレテストを行った。プレテストには各 Stability level を 1 試行ずつ無作為な順序で含めた。プレテスト時の姿勢は閉脚立位とし、学習者が片脚立位を保持し難い方の脚 (以下、非練習脚) の足部中央とプラットフォームの中心が一致するように立位位置を調整した。その際に KR は与えなかった。

プレテスト終了後、研究協力者は振り分けられた条件のもと、合計 12 試行 (3 ブロック \times 4 試行) の姿勢制御課題を練習した。全ての研究協力者は、各課題終了後に検者から口頭で Stability index を KR として伝えられた。1 試行は 20 秒に設定し、試行間間隔は 20 秒とした。各ブロック間には 5 分間の休憩を挿入した。各ブロック終了直後に唾液 α -アミラーゼを測定した。全てのブロックと唾液 α -アミラーゼの測定を終了した後 NASA-TLX の測定を実施した。

練習試行終了から約 24 時間後の実験 2 日目には、プレテストと同様の内容で転移テストを実施した。転移テスト終了後、練習試行と同様の条件で保持テストを 4 試行実施した。保持テスト、転移テストでは唾液 α -アミラーゼの測定及び NASA-TLX の測定を行わなかった。

尚、実験は同一の時間帯 (16:00-20:00) に実施した。

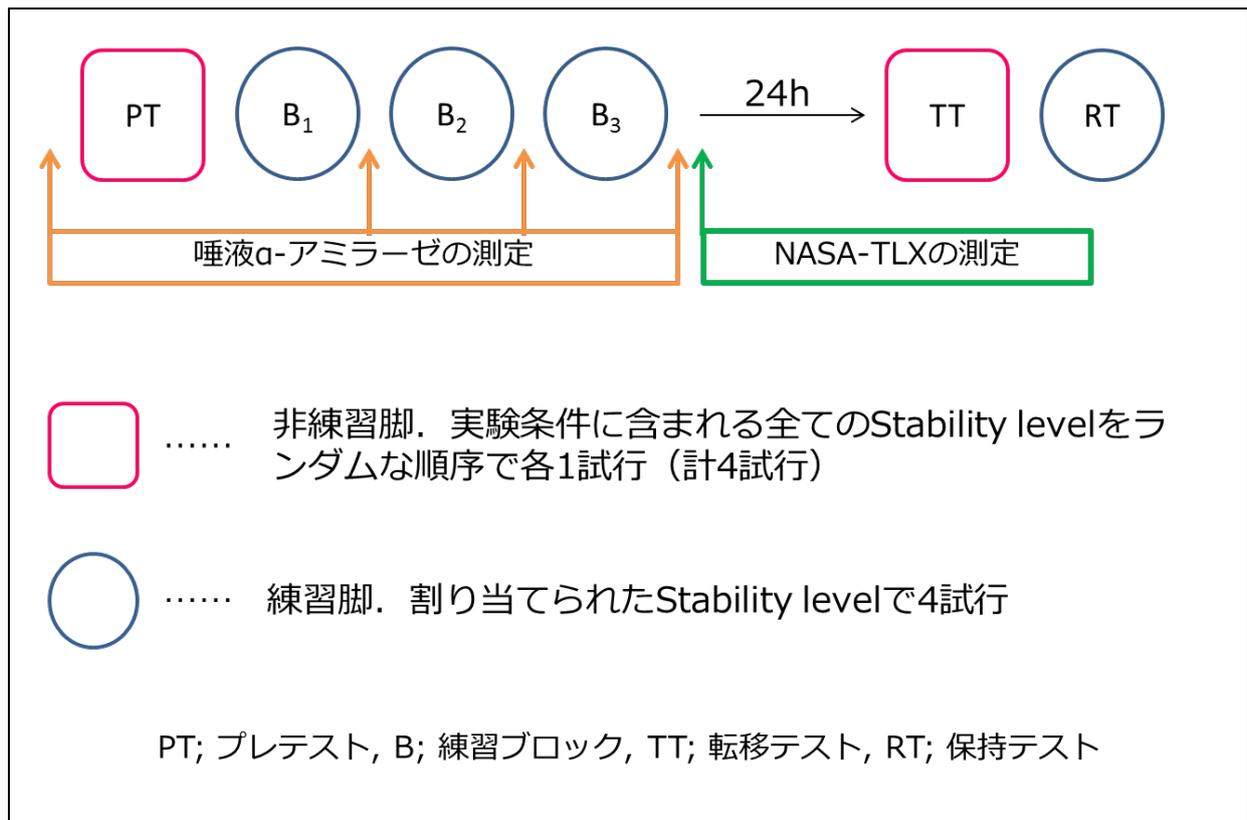


図 35. 実験手続き

3.3.4 データ解析

練習試行前の技能レベルの差を確認するために、プレテスト時における **Stability index** に対して **Stability level** を要因とする一元配置分散分析を実施した。

Stability level が姿勢制御課題の成績に与える影響を明らかにするために、練習試行時における **Stability index** に対して **Stability level** と練習ブロックを要因とする二元配置分散分析を実施した。

保持テストにおける解析では、各条件で保持テスト時の課題難易度が異なるため、姿勢制御課題の成績の改善率を使用した。なぜなら、単純に保持テスト時の成績を比較してしまうと、**Stability level** の高い条件において成績が良く、**Stability level** の低い条件において成績が悪くなってしまい、学習の成果を判別することが困難となってしまうからである。そこで、改善率を使用することで保持テスト時の課題難易度の影響を極力抑えた上で条件間の比較を行った。改善率はブロック 1 時の成績に対する保持テスト時の成績で求めた。練習時の課題難易度が保持テス

ト時における成績に与える影響を明らかにするために、ブロック 1 から保持テストまでの改善率に対して **Stability level** を要因とする一元配置分散分析を行った。

さらに、プレテストと転移テスト間における改善率に対して **Stability level** を要因とする一元配置分散分析を行った。プレテストと転移テストの内容は同一であり、全ての研究協力者が同一の条件でテストを行っているため、本実験では転移テストにおける改善率を主要なアウトカムに設定し、その改善率を学習利得と定義した。

唾液 α -アミラーゼは個人差が大きいため、安静時からの変化率を使用した。唾液 α -アミラーゼの変化率は、課題遂行後の唾液 α -アミラーゼの値を安静時の値で除し、100 を乗ずることで求めた。練習中の **Stability index** と唾液 α -アミラーゼの変化率の関係を調べるために、**Pearson** の積率相関分析を実施した。さらに、学習利得と唾液 α -アミラーゼの変化率の関係をモデル化するために曲線回帰分析を実施した。

課題難易度の変化を反映する項目を明らかにするために、**NASA-TLX** はそれぞれの項目ごとに分析を行った。練習試行における **Stability index** と各項目の値の関係を明らかにするために、**Pearson** の積率相関分析を実施した。続いて、課題難易度の変化を反映する項目として抽出された項目と唾液 α -アミラーゼの変化率との関連を **Pearson** の積率相関分析で明らかにすることで、機能的課題難易度測定指標としての妥当性の検討を実施した。さらに、唾液 α -アミラーゼの変化率と同様に、学習利得と **NASA-TLX** の各項目の関係をモデル化するために曲線回帰分析を実施した。

全ての解析において危険率 5%未満を統計学的有意とした。

3.4 結果

3.4.1 研究協力者の特性

各 Stability level に振り分けられた研究協力者の特性を表 6 に示す。各 Stability level 間で性別，年齢，体格に大きな偏りは認められなかった。練習脚は Stability level 2 と Stability level 4 において，その他の Stability level よりも左下肢で測定を行った者が多い結果となった。

表 6. 協力者特性

		Stability level							
		1		2		3		4	
		M	SD	M	SD	M	SD	M	SD
人数									
男性	(名)	9		9		8		8	
女性	(名)	6		6		7		7	
総数	(名)	15		15		15		15	
年齢	(歳)	22.3 ± 2.2		22.3 ± 2.5		22.4 ± 2.1		22.9 ± 2.2	
身長	(cm)	168.9 ± 7.6		168.8 ± 7.1		164.2 ± 7.7		164.5 ± 8.1	
体重	(kg)	58.8 ± 6.6		57.3 ± 5.8		55.2 ± 9.1		58.1 ± 9.2	
BMI	(kg/m ²)	20.6		20.1		20.5		21.4	
練習脚									
右	(名)	11		7		11		9	
左	(名)	4		8		4		6	

M; mean, SD; standard deviation, BMI; body mass index.

3.4.2 Stability index

各 Stability level における Stability index の推移を図 36 に示す。

3.4.2.1 プレテスト

一元配置分散分析の結果，Stability level の主効果は認められなかった ($F_{3, 56} = 2.76, p = 0.943, \eta_p^2 = 0.129$)。この結果は，プレテストの時点において各条件間に技能レベルの差がないことを保証している。

3.4.2.2 練習試行

練習試行では Stability level が低い群ほど Stability index が大きく，練習が進むにつれてすべての条件で Stability index が小さくなった。Stability level とブロックを要因とした二元配置分散分析の結果，Stability level ($F_{3, 56} = 36.81, p < 0.001, \eta_p^2 = 0.664$) とブロック ($F_{2, 112} = 32.76, p < 0.001, \eta_p^2 = 0.369$) の有意な主効果が認められた。しかし，Stability level とブロックの交互作用は有意ではなかった ($F_{6, 112} = 1.17, p = 0.330, \eta_p^2 = 0.059$)。Stability level に対して多重比較を行った結果，Stability level 3 と Stability level 4 には有意差が認められなかったが，その他の条件間では Stability level の小さい条件の方が大きい条件よりも有意に Stability index が大きかった。ブロックに対する多重比較では，ブロック 1 はブロック 2 とブロック 3 よりも有意に Stability index が大きく，ブロック 2 はブロック 3 よりも有意に Stability index が大きかった。

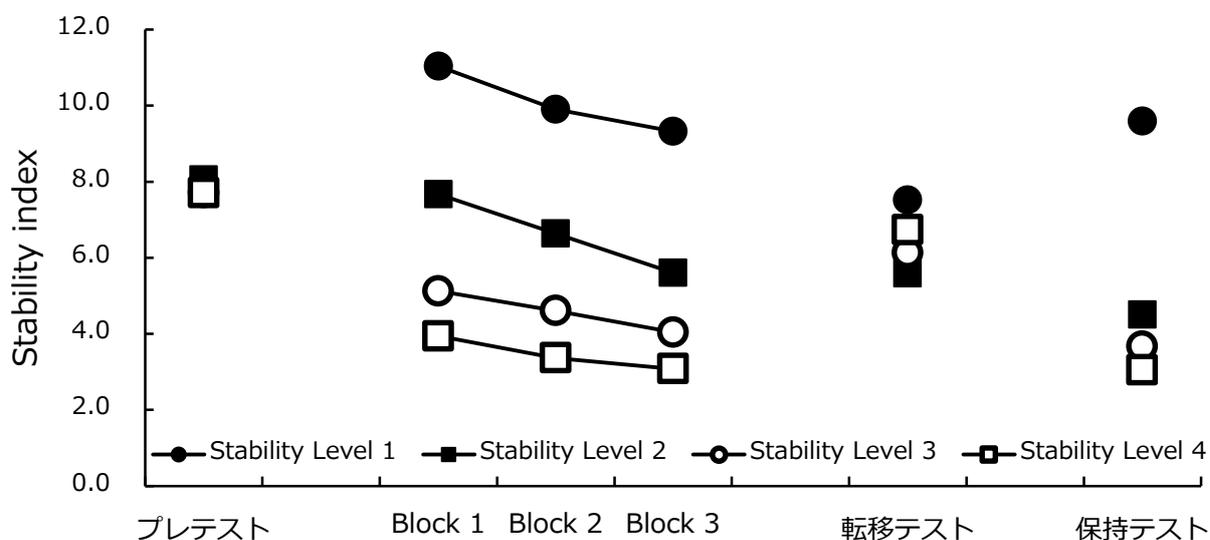


図 36. 各 Stability level における Stability index の推移

3.4.2.3 保持テスト

ブロック 1 から保持テストにかけて最も大きな改善が認められたのは Stability level 2 であった (図 37. 左)。一方で、あまり改善が認められなかったのは Stability level 1 と Stability level 4 であった。分散分析の結果、Stability level の有意な主効果が明らかとなったため ($F_{3, 56} = 2.78, p < 0.05, \eta_p^2 = 0.130$)、多重比較を行ったところ、Stability level 2 は Stability level 1 よりも有意に Stability index の改善率が大きかった。

3.4.2.4 転移テスト

転移テストの改善率は、保持テストの改善率と同様の傾向を示した。分散分析の結果、Stability level の有意な主効果が明らかとなったため ($F_{3, 56} = 5.45, p < 0.01, \eta_p^2 = 0.227$)、多重比較を行ったところ、Stability level 2 と Stability level 3 は Stability level 1 よりも有意に Stability index の改善率が大きかった (図 37. 右)。

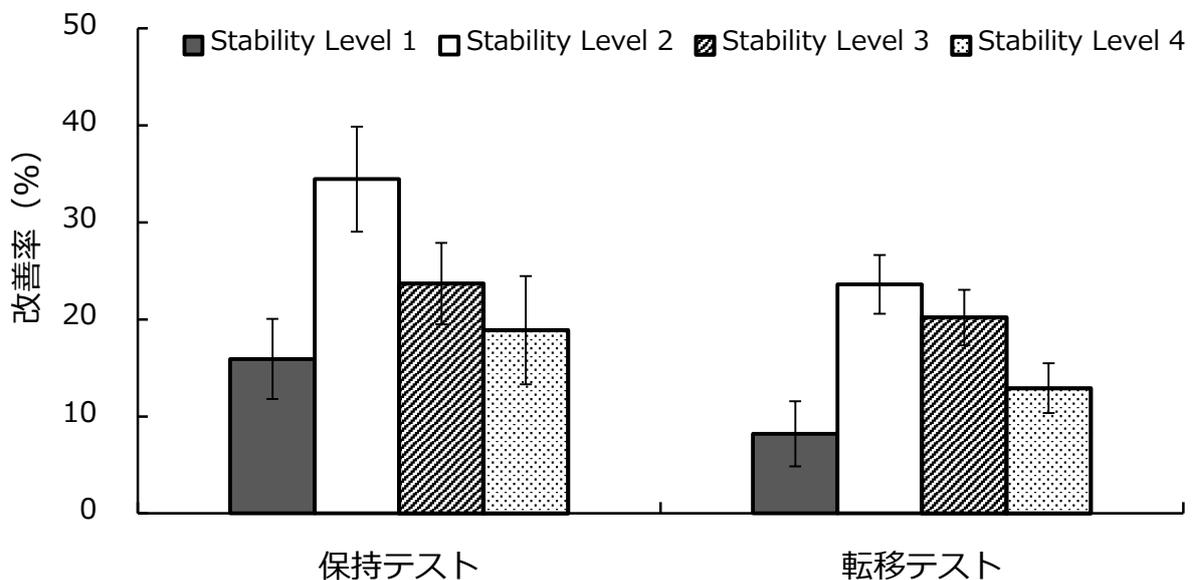


図 37. 保持テストと転移テストにおける改善率
平均値 ± 標準誤差

3.4.3 唾液 α-アミラーゼの変化率

Pearson の積率相関分析の結果，練習試行中の Stability index と唾液 α-アミラーゼの変化率の間には強い正の相関が認められた ($r = 0.815$, $p < 0.001$) (図 38)。また，曲線回帰分析の結果，プレテストと転移テストの間の改善率として定義された学習利得と唾液 α-アミラーゼの曲線回帰式は $y = -0.003x^2 + 1.013x - 68.236$ ($R^2 = 0.371$, $p < 0.001$) で表された (図 39)。回帰曲線が頂点を示すときの唾液 α-アミラーゼの変化率は 181% (基準値から 81%上昇) であった。

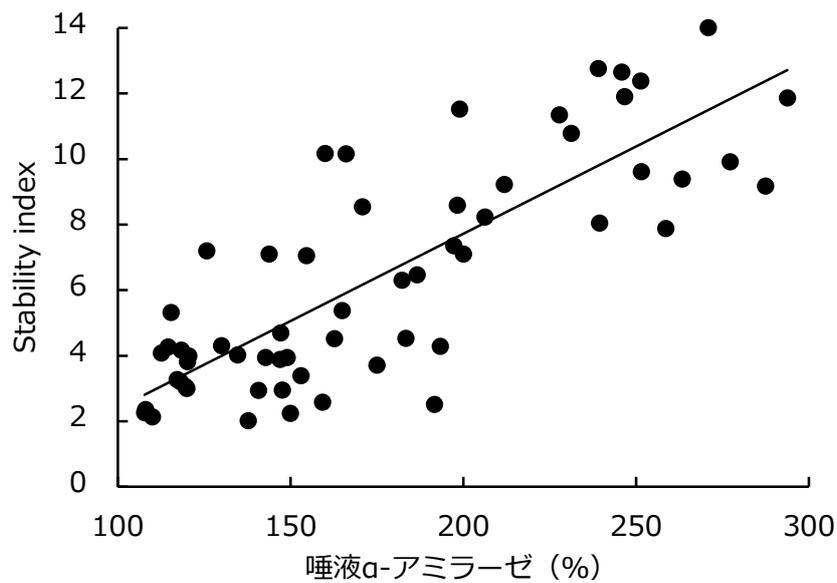


図 38. Stability index と唾液 α-アミラーゼの変化率

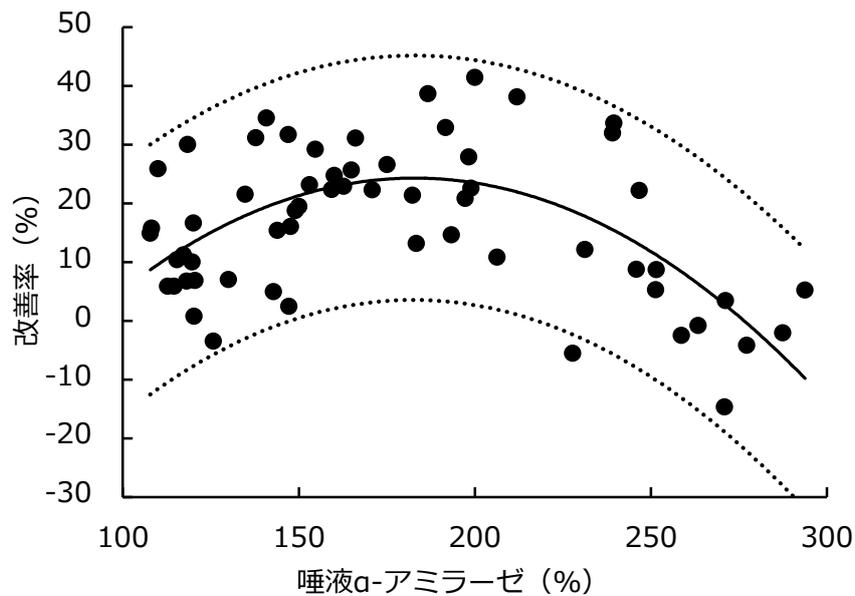


図 39. 学習利得と唾液 α-アミラーゼの変化率
実線は近似曲線，点線は 95% 予測区間を表す。

3.4.4 NASA-TLX

NASA-TL に含まれる各項目の得点と練習試行時における Stability index の相関係数を表 7 示す。その結果、作業成績の項目が最も課題難易度の変化を反映することが明らかとなった (図 40)。従って、作業成績の項目と唾液 α -アミラーゼの変化率の関連を調査したところ、両変数間には強い相関 ($r = 0.844$) が認められた (図 41)。さらに、学習利得と作業成績の得点に関する曲線回帰分析を実施したところ、 $y = -0.011x^2 + 1.144x - 7.175$ ($R^2 = 0.218, p < 0.001$) の回帰式が得られた (図 42)。この回帰曲線が頂点を示すときの作業成績の得点は 51.5 であった。

表 7. NASA-TLX に含まれる各項目の得点と Stability index との関係

項目名	Stability level				Correlation	
	1	2	3	4	r	p
知的要求	53.0 (28.3)	62.3 (24.6)	58.3 (24.1)	47.3 (22.4)	-0.07	0.60
身体的要求	82.0 (12.4)	78.7 (15.2)	74.7 (11.4)	70.3 (19.3)	0.31	0.02
時間的切迫感	44.7 (27.0)	47.0 (23.7)	37.3 (22.4)	44.0 (20.6)	0.12	0.37
作業成績	79.7 (11.3)	67.3 (16.1)	37.0 (10.8)	33.3 (12.3)	0.79	<0.01
努力	78.0 (11.9)	77.0 (17.7)	73.3 (17.6)	68.0 (18.1)	0.20	0.12
不満	33.7 (23.8)	30.7 (23.7)	33.9 (17.1)	29.7 (19.9)	1.76	0.18

平均値 (標準偏差)

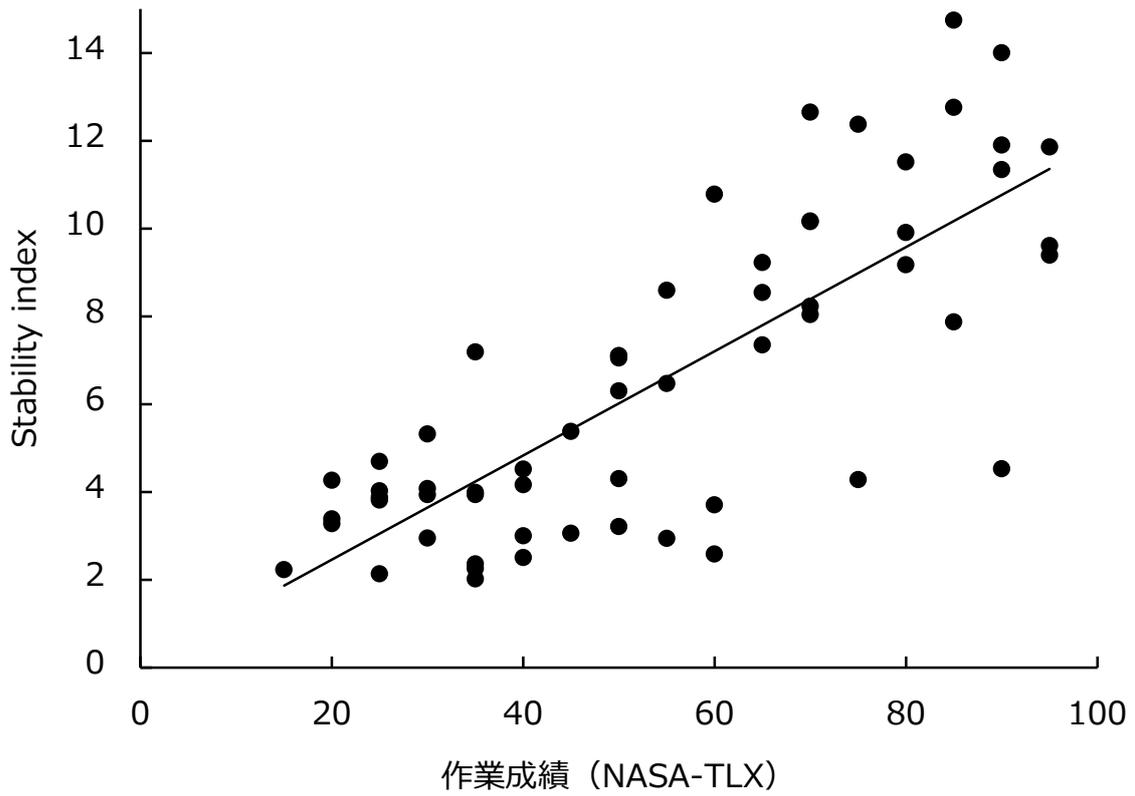


図 40. Stability index と作業成績 (NASA-TLX) の関係

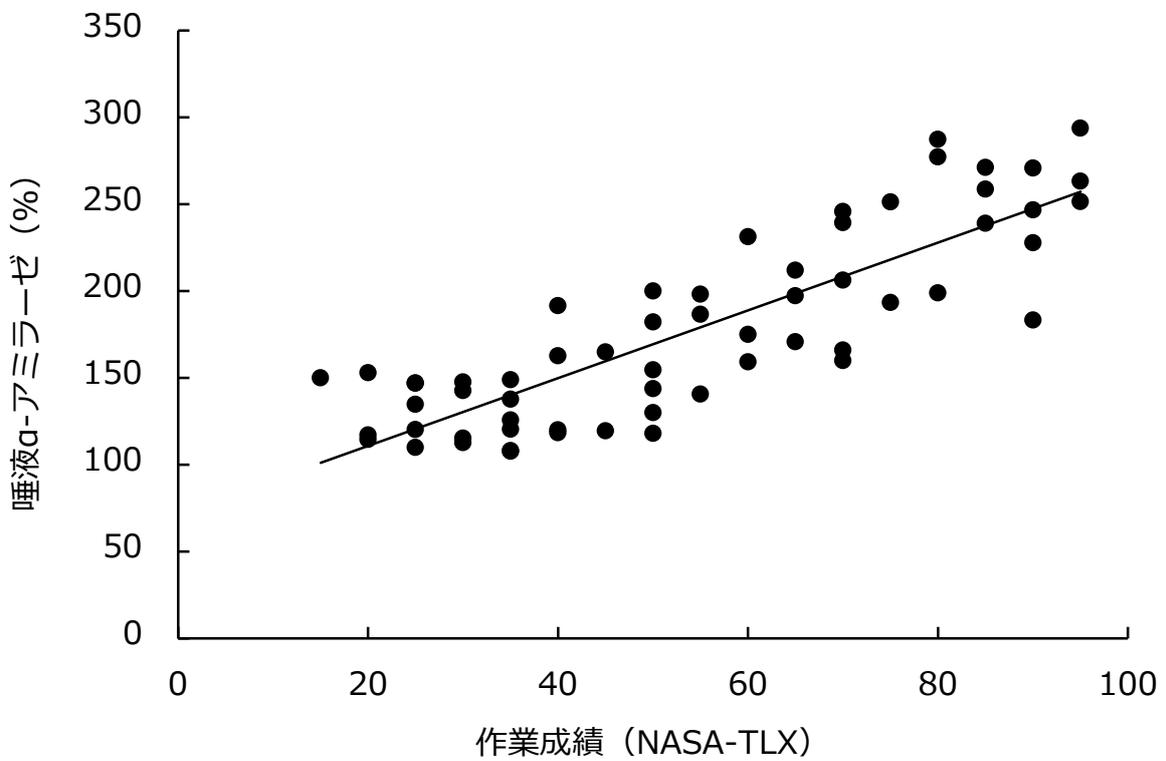


図 41. 唾液 α-アミラーゼ と作業成績 (NASA-TLX) の関係

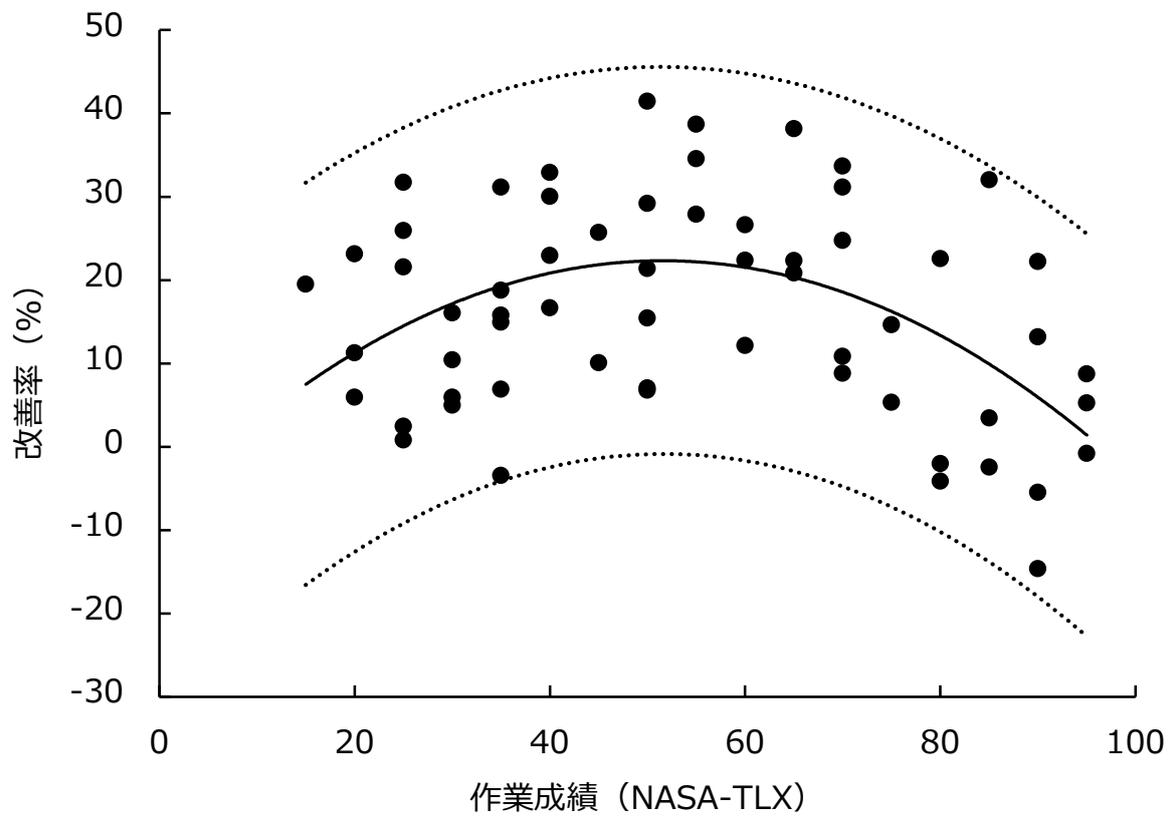


図 42. 学習利得と作業成績 (NASA-TLX) の関係
 実線は近似曲線，点線は 95%予測区間を表す。

3.5 考察

本実験の目的は、**challenge point framework**の中で提唱されている**optimal challenge point**に相当する機能的課題難易度を定量化することである。本実験では、名目的課題難易度を実験的に操作することが可能な**Balance System**を用いた姿勢制御課題を学習者に与え、その学習利得と学習者が課題遂行時に示す機能的課題難易度を唾液 α -アミラーゼと **NASA-TLX**を用いて測定した。

本実験では、機能的課題難易度を実験的に操作するために、名目的課題難易度に相当する**Stability level**の操作を行った。その結果、**Stability level**を下げることによって姿勢制御課題の成績である**Stability index**は上昇することが示された。**challenge point framework**では、機能的課題難易度の上昇に応じて課題の成績は低下すると述べられており、その機能的課題難易度は名目的課題難易度、学習者の技能レベル、練習環境に影響を受けるとされている。本実験では、練習試行前にプレテストを行うことで、練習前には群間に技能レベルの差がないことを確認している。また、**KR**の付与方法や課題の配置方法などの練習環境も同一である。従って、群間で異なるのは名目的課題難易度に相当する**Stability level**のみであり、群間の機能的課題難易度の差は名目的課題難易度の差に起因していると考えられる。**Stability level**の変化に応じて**Stability index**が変化するという結果は、名目的課題難易度の操作に機能的課題難易度が影響を受け、機能的課題難易度の変化に伴って練習中のパフォーマンスが変化していることを示している。この結果は、**Stability level**の操作による機能的課題難易度の調整が想定した通りに行われていることを裏付けており、本実験における課題設定の妥当性を保証している。

また、本実験では、**Stability level**と保持テストおよび転移テストの改善率は逆U字型の関係を示した。**Stability level 2**が保持テストおよび転移テストにおいて最も高い改善率を示し、**Stability level 1**と**Stability level 4**は改善率が低かった。さらに、**Stability level 4**は**Stability level 3**よりも学習利得が低かった。この結果は、**challenge point framework**の中で概念的に示されている機能的課題難易度と学習利得の関係を実験的に証明している。同様の結果は、タイミング課題を用いて**Summary KR**の長さが運動学習に与える影響を検討したSchmidtら⁹³⁾により報告されている。Schmidtらの研究では、**Summary KR**の長さは1, 5, 10, 15に操作され、**Summary KR**の長さが運動学習の成果に与える影響が検討された。その結果、運動学習の成果と**Summary KR**の長さは逆U字型の関係を示すことが明らかとなり、

Summary KR の長さが 5 の時に最も高い学習の成果を示すことが明らかにされた。さらに、Summary KR 10 と Summary KR 15 を比較すると、Summary KR 10 の方が学習の成果が高い結果となった。これらの結果は、Summary KR 5 よりも KR の長さが長くても短くても運動学習の効率が悪化することを示しており、さらに、その乖離が大きくなるほど悪化の程度も大きくなることを示している。また、Schmidt らの研究では、Summary KR 5 の条件において最も運動学習の成果が高かったことから、Summary KR 5 の条件で課題を遂行する時に生じた機能的課題難易度が最も optimal challenge point に接近していたと考えられる。その一方で、Summary KR 1 の機能的課題難易度は低すぎ、Summary KR 10, 15 の機能的課題難易度は高すぎていたと考えられる。2 つの研究は、機能的課題難易度を操作する方法が異なるものの、機能的課題難易度が高すぎても低すぎても運動学習が阻害されるという点において類似しており、適度な機能的課題難易度において運動学習が最も促進することを示している。また、本実験では学習利得を転移テストの改善率と定義しており、Stability level 2 において最も高い学習利得が認められた。さらに、練習条件による影響を受ける保持テストの改善率も、転移テストの改善率と同様の傾向を示した。従って、Stability level 2 の条件で課題を遂行する際に学習者が示す機能的課題難易度が最も optimal challenge point に接近していたと考えられる。

Schmidt らの研究では、機能的課題難易度を測定していないため機能的課題難易度が optimal challenge point に最も接近していたと考えられる Summary KR 5 の条件において、学習者がどの程度の機能的課題難易度を示していたかを定量的に知ることはできない。しかし、本実験では optimal challenge point に相当する機能的課題難易度を定量的に明らかにするため、機能的課題難易度を唾液 α -アミラーゼと NASA-TLX を用いて測定した。その結果、Stability level を下げるにつれて唾液 α -アミラーゼの変化率は有意に上昇するという結果が得られた。また、転移テストの改善率と唾液 α -アミラーゼの変化率は、逆 U 字型の関係を示した。転移テストの改善率と唾液 α -アミラーゼの関係を詳細に検討するため、各研究協力者の転移テストの改善率と唾液 α -アミラーゼの変化率の関係を曲線回帰分析によりモデル化した結果、二次回帰曲線が得られ、その回帰曲線は唾液 α -アミラーゼの変化率が 181% の時に頂点を示すことが明らかとなった。この回帰曲線の頂点は、最も転移テストの改善率が高まる点を示しており、本実験における optimal challenge point を表している。従って、唾液 α -アミラーゼが基準値から 81% 上昇する程度の機能的課題難易度が optimal challenge point に相当すると考えられる。

本実験で得られた唾液 α -アミラーゼの変化率と optimal challenge point の関係を実際の理学療法場面に適応する場合、運動学習時の機能

的課題難易度を唾液 α -アミラーゼが基準値から 81%上昇する程度になるように課題あるいは練習環境，またはその両方を調整すれば良いということになる。しかし，先行研究において唾液 α -アミラーゼは様々な要因に影響を受けることが明らかになっている¹³¹⁾。従って，唾液 α -アミラーゼを用いることによって課題や練習環境を調整する上での有効な手掛かりとすることができものの，実際の理学療法場面で使用するとすると制約が多いことが難点となっている。

そこで本実験では，より簡便に機能的課題難易度を測定できる指標の開発を目指し，メンタルワークロードの主観的指標として用いられている NASA-TLX の有用性の検討を行った。NASA-TLX は，知的要求，身体的要求，時間的切迫感，作業成績，努力，不満の 6 項目で構成される尺度であり，課題遂行に伴って生じるメンタルワークロードを多面的に測定することが可能な尺度である。まず，NASA-TLX に含まれる各項目の得点と課題の遂行成績の相関を確認することで，NASA-TLX に含まれる項目の中から機能的課題難易度を反映する項目の抽出を行った。その結果，NASA-TLX に含まれる作業成績の得点が課題の遂行成績である **Stability index** と強い相関 ($r = 0.79$) を示すことが明らかとなった。他方で，身体的要求と **Stability index** との間にも弱い相関 ($r = 0.31$) が認められた。しかし，身体的要求は課題遂行に伴う身体活動の強度を反映しており，**Stability index** との間に相関を有するのは当然と思われる。**Stability index** が高いということは課題遂行中における **Balance System** のプラットフォームの傾斜が大きいということを表しており，プラットフォームを水平に保つためにより多くの身体活動が必要となる。そのため，身体的要求と **Stability index** との間に相関が認められたと考えられる。また，身体的要求の項目が測定しているメンタルワークロードの構成要素は，情報処理状況を反映している機能的課題難易度とは概念的に乖離しており，機能的課題難易度の測定指標として用いるには妥当ではないと考えられる。NASA-TLX に含まれる作業成績は，どの程度研究協力者自身が課題を達成できたかと感じたかという行動関連指標である¹³⁷⁾。つまり，この指標は研究協力者が考える理想の状態と，現在の状態の乖離を反映していると考えられる。本実験における理想は，課題遂行中にできるだけ動揺しないことであるため，課題遂行中に動揺すればするほど理想の状態と現在の状態の乖離は大きくなる。その結果，NASA-TLX に含まれる作業成績の得点は **Stability index** と相関を示したと考えられる。NASA-TLX に含まれる作業成績が反映している理想の状態と現在の状態の乖離は **challenge point framework** における利用可能な情報の概念と一致しており，理想の状態と現在の状態の乖離が大きくなればなるほど，利用可能な情報は増える。従って，NASA-TLX に含まれる作業成績の得点と **Stability index** の間には強い相関が認められ

たとえられる。

続いて、NASA-TLXに含まれる作業成績の項目を用いた機能的課題難易度測定の妥当性に対する検討を行った。その結果、NASA-TLXに含まれる作業成績の得点と唾液 α -アミラーゼの変化率との間には強い相関が認められた ($r = 0.84$)。唾液 α -アミラーゼは、AT未満の運動強度であれば機能的課題難易度を測定するための指標としての妥当性を有することが第2章で明らかになっているため、その唾液 α -アミラーゼと強い相関を有する作業成績の得点も機能的課題難易度を測定するための指標として妥当性を有していると考えられる。

さらに、作業成績の得点を用いることによって **optimal challenge point** に相当する機能的課題難易度の定量化に対する検討を行った。作業成績の得点と学習利得の関係を明らかにするため、各研究協力者の転移テストの改善率と作業成績の得点の関係を曲線回帰分析によりモデル化した。その結果、二次回帰曲線が得られ、その回帰曲線は作業成績の得点が **51.5** の時に頂点を示すことが明らかとなった。この回帰曲線の頂点は最も転移テストの改善率が高まる点を示しているため、作業成績の得点が **51.5** 程度となる機能的課題難易度が **optimal challenge point** に相当すると考えられる。NASA-TLXに含まれる作業成績の項目は、各学習者が望む状態と実際の状態の乖離を反映しているため、その得点が高すぎるということは学習者が多くの誤差を経験し、修正しなければならない点が過剰に存在することを示している。一方で、得点が低すぎるということは、学習者が僅かな誤差しか認識しておらず、情報処理効率が悪化していることを示している。両方のケースにおいて、学習利得は小さくなる。従って、NASA-TLXに含まれる作業成績の得点が中等度を示すときに、学習者が認識する誤差量と学習者の情報処理容量が適切な関係にあることを示唆しており、その結果、**optimal challenge point** に相当する作業成績の得点は **51.5** を示したと考えられる。

また、作業成績の得点を用いたモデルの寄与率は **21.8%** であり、唾液 α -アミラーゼの変化率を用いたモデルの寄与率は **37.1%** であった。この結果は、作業成績の得点は、唾液 α -アミラーゼの変化率よりも寄与率という点において劣ることを示している。しかし、作業成績の項目を用いた機能的課題難易度の測定には、様々な利点も存在する。まず、唾液 α -アミラーゼとは異なり生理学的要因の影響を受けない。従って、生活習慣や内服状況、測定の間隔や測定前の飲食の影響を受けない。この利点により、作業成績は唾液 α -アミラーゼよりも測定を行う上での制約が少なくなっている。次に、作業成績を用いた機能的課題難易度の測定は、学習者に簡単な質問をするだけで測定ができるため、素早く簡便に測定が可能である。測定の即時性、簡便性においては唾液 α -アミラーゼもそ

の他の生理学的指標と比較すると優れており、約 60 秒程度で測定が可能である。しかし、作業成績の測定に要する時間は数秒程度であり、唾液 α -アミラーゼを上回る即時性と簡便性を有している。機能的課題難易度の測定結果に基づいて練習条件を調整し、その調整が妥当であったかどうかを確認するために再測定を行うことを考慮すると、一回の測定に要する時間は短ければ短いほど良い。特に、理学療法現場では時間の制約があるため、作業成績を用いた機能的課題難易度測定の即時性と簡便性は大きな利点である。最後に、作業成績の測定には特別な機器を使用しないため、経済的という利点が存在する。測定のために機器を必要とする指標では、その機器の有無により、測定の可否が決定付けられてしまう。測定に機器を必要としない指標であれば、測定に要する費用を最大限抑えた上で、あらゆる施設、あらゆる場面における測定が可能となる。以上の利点は、NASA-TLX に含まれる作業成績の得点が唾液 α -アミラーゼの変化率よりも寄与率という点において劣っているという点を補うに十分であると考えられる。

しかし、本実験にはいくつかの限界が存在する。第 1 に、本実験では唾液 α -アミラーゼと NASA-TLX を使用することで機能的課題難易度を定量的に測定し、**optimal challenge point** に相当する機能的課題難易度を定量化した。しかし、今回、検証を行った課題は姿勢制御課題のみであり、他の性質を有する課題においても適応可能かについては今後の検討が必要である。第 2 に、本実験のみでは機能的課題難易度を **optimal challenge point** に調整する具体的な方法については十分に言及することができない。従って、課題配置方法やフィードバックの与え方、身体介助の量などが、どの程度機能的課題難易度に影響を与えるかを今後検討することによって、機能的課題難易度を **optimal challenge point** に調整するための具体的な方法を確立させる必要がある。最後に、本実験で用いた方法が機能的課題難易度を測定するための方法として最善であるとは限らない。より高精度に学習利得を予測するためにも、他の指標の利用も含めて、測定方法の改善を検討していかなければならない。

第 4 章 総括

4.1 本論文の結論

本論文では、運動学習にとっての至適課題難易度を challenge point framework の観点から検討を行った。challenge point framework の考え方に基づくことで、技能レベルが異なる様々な学習者に対してどのように課題を設定し、どのような練習条件を導入すれば良いかについての示唆を得ることができる。しかし、challenge point framework の考え方を理学療法の臨床場面で用いるための方法論が確立されておらず、十分に活用することができていない。そこで、本論文では機能的課題難易度の定量的評価方法の確立と optimal challenge point の定量化を図ることで、challenge point framework の臨床応用を試みた。

本研究では、機能的課題難易度の定量的評価方法の確立を図るにあたり、生理学的指標の 1 つである唾液 α -アミラーゼに着目した。しかし、唾液 α -アミラーゼを情報処理状況の指標として用いた研究はこれまでに報告されていないことに加えて、唾液 α -アミラーゼは様々な要因に影響を受けることが報告されていることから、唾液 α -アミラーゼを用いた機能的課題難易度測定の妥当性を確認する必要がある。そこで第 2 章では、唾液 α -アミラーゼを用いた機能的課題難易度測定の妥当性の検討を行うために 2 つの実験を行った。

第 1 実験では、運動負荷試験中の呼気ガス、唾液 α -アミラーゼを測定することで、身体活動が唾液 α -アミラーゼに与える影響を検討した。第 2 実験では、姿勢制御課題遂行中のプローブ反応時間と課題遂行直後の唾液 α -アミラーゼを測定することで、唾液 α -アミラーゼを用いた機能的課題難易度測定の妥当性の検討を行った。この 2 つの実験により、唾液 α -アミラーゼは AT 未満の運動強度では機能的課題難易度を反映する指標として妥当な指標であることが明らかとなった。しかし、唾液 α -アミラーゼは、実際に臨床場面で使用するには制約が多いことが難点であった。そこで本研究では、理学療法の臨床場面でより簡便に機能的課題難易度を測定できる評価尺度として、メンタルワークロードを主観的に測定する尺度である NASA-TLX に着目した。メンタルワークロードは注意の下位概念であると述べられており、NASA-TLX ではメンタルワークロードを 6 つの次元で測定できることから、NASA-TLX のいずれかの項目が機能的課題難易度を反映すると考えた。

そこで、第 3 章では optimal challenge point の定量化を目的に、練習時に学習者が示す機能的課題難易度と学習利得の関係を唾液 α -アミ

ラーゼと NASA-TLX を用いて検討した。その結果、学習利得と機能的課題難易度は、逆 U 字型の関係を示すことが明らかとなった。つまり、唾液 α -アミラーゼが安静時より 81%上昇するあるいは NASA-TLX に含まれる作業成績の得点が 51.5 となる時に最も学習利得は大きくなり、その点からの乖離が大きくなるほど学習利得は小さくなることが示された。

以上の結果から、唾液 α -アミラーゼの変化率あるいは NASA-TLX に含まれる作業成績の項目を使用することで、機能的課題難易度の定量的評価が可能であり、それぞれの指標の **optimal challenge point** に相当する値を参考にすることで、**optimal challenge point** に機能的課題難易度を接近させることが可能であることが示唆された。また、**optimal challenge point** に相当する機能的課題難易度を推定するためのモデルの適合度では NASA-TLX は唾液 α -アミラーゼの変化率よりも劣っているが、その測定に要する利便性では NASA-TLX は唾液 α -アミラーゼの変化率よりも優れていることが明らかとなった。従って、機能的課題難易度をより正確に測定したい状況では唾液 α -アミラーゼの変化率を使用し、簡便に測定したい状況では NASA-TLX の作業成績の項目を使用するなど、目的や必要性に応じて使い分けることが可能であると考えられる。

4.2 理学療法への示唆

理学療法場面では、様々な技能レベルを有する患者に対して、課題を与え、練習条件を調整することで運動学習を促していく。そのため、技能レベルに応じた課題や練習条件の設定が可能となる **challenge point framework** の考え方は、理学療法場面において有用であると考えられる。しかし、これまでに **challenge point framework** の考え方を実際の理学療法場面に展開するための方法論は確立されておらず、実際に理学療法場面に応用しようとするると 2 つの問題が生じていた。

第 1 の問題は、どのような練習条件を導入すべきかの判断材料が明らかになっていないことである。課題の配置方法を例に挙げると、**challenge point framework** では学習者の技能レベルに対し課題が単純な場合、ランダム練習が運動学習を促進させるとされている。その一方で、学習者の技能レベルに対し課題が複雑な場合は、ブロック練習が有効であるとされている。これは、機能的課題難易度と **optimal challenge point** の相対関係から捉えることが可能であり、機能的課題難易度が **optimal challenge point** よりも低い場合にはランダム練習のように機能的課題難易度を上昇させる練習条件が有効であり、機能的課題難易度が **optimal challenge point** よりも高い場合にはブロック練習のように機能的課題難易度の上昇を抑える練習条件が有効であるとされている。このように機能的課題難易度と **optimal challenge point** の相対関係によって導入すべき練習条件は異なるが、患者の機能的課題難易度が **optimal challenge point** とどのような関係にあるのかを判断するための材料が明らかとなっていないため、最終的には自己の知識や経験に基づき直感で判断せざるを得ない。そして、その判断が正しいものであったかを確認する時に、第 2 の問題が生じる。

第 2 の問題とは、運動学習の成果を確認するためには、ある程度の時間間隔を空けなければならないという問題である。現在、確立されている運動学習の成果の確認方法は、運動学習が練習や経験に基づく一連の過程であり、結果として技能的行動を行い得る能力の比較的永続的な変化をもたらすものであることから、時間間隔を空けることで練習による能力の変化から練習による一時的変化を取り除き、運動学習の成果である永続的な変化のみを抽出する方法である。しかし、この方法では即時的に運動学習の成果を確認することができない。つまり、理学療法士が設定した練習条件が正しいものであったかを確認するためには、ある程度の時間が必要であり、その場では確認できないということになる。さらに、練習による一時的変化を取り除いている間にも、患者は様々な活動を行っており、それらの活動による運動学習の成果への影響も考えら

れる。その結果，理学療法士が操作を行った練習条件が運動学習の成果に与えた影響を正確に判断することは困難となってしまう。

このように，**challenge point framework** の考え方は理学療法場面に有用ではあるものの，その方法論が確立されていないためにその考え方を十分に活用できていない。

そこで，本研究では，唾液 α -アミラーゼと NASA-TLX を用いることで機能的課題難易度を定量的に測定することを可能にした。その結果，課題遂行直後の患者の唾液 α -アミラーゼを測定する，あるいは NASA-TLX に含まれる作業成績の項目を測定することで，患者の機能的課題難易度が **optimal challenge point** とどのような関係にあるのかを判断することが可能となり，基準に沿った練習方法の選択が可能となった。具体的な例としては，測定された唾液 α -アミラーゼの変化率が 81% 未満，あるいは NASA-TLX に含まれる作業成績の得点が 51.5 未満だった場合には，ランダム練習のような複雑な課題配置方法を練習に導入する，フィードバックの頻度を減少させる，身体介助量を減らすあるいは身体介助を行わないことによって学習利得を高められると考えられる。一方で，測定された唾液 α -アミラーゼの変化率が 81% を超過する，あるいは作業成績の得点が 51.5 を超過する場合には，ブロック練習のような単純な課題配置方法を導入する，フィードバックの頻度を増やす，身体介助量を増やすことによって学習利得を高められると考えられる。

このように，自己の知識や経験に基づき直感で練習条件を決定するのではなく，明確な基準に沿って練習条件を選択することで，経験年数や運動学習に関連する知識の程度に依らず，多くの理学療法士が適切に課題難易度を調整することが可能となる。その結果，理学療法が効率化され，患者の在院日数の短縮に繋がると考える。さらに，十分な技能を獲得した上での早期退院は，患者の QOL を高められるだけでなく，医療費の削減にも繋がると考えられる。

4.3 今後の展望

本研究により、唾液 α -アミラーゼあるいは NASA-TLX を用いることによって機能的課題難易度の定量的評価が可能であること、唾液 α -アミラーゼが安静時より 81%上昇するあるいは NASA-TLX に含まれる作業成績の得点が 51.5 となるときに、機能的課題難易度が **optimal challenge point** に最も接近していることが明らかとなった。従って、唾液 α -アミラーゼが安静時より 81%上昇するあるいは NASA-TLX に含まれる作業成績の得点が 51.5 となるように課題や練習条件を設定することで、学習利得が高まると考えられる。

しかし、本研究では実際に唾液 α -アミラーゼあるいは NASA-TLX を用いて課題や練習条件を調整することによって学習利得が高められるのかを確認できていない。従って、今後の課題として唾液 α -アミラーゼ、あるいは作業成績の項目を用いて課題や練習条件を調整することで学習利得が高まるかについての検討を行っていく必要がある。

また、本論文では姿勢制御課題を用いた検討しか行っていない。運動課題を遂行するのに必要な運動技能は、課題の構成から連続的技能と系列技能、離散的技能に分類され、環境予測性から開放技能と閉鎖技能に分類される¹⁶⁵⁾。従って、運動技能を 2 つの次元から分類し、それぞれの組み合わせを考えると、6 つの運動技能に大別することが可能となる。その中で、本論文で用いた姿勢制御課題は、連続的技能—解放技能を要する課題に分類される。他の技能が求められる課題においても同様の結果が得られるかについて検討を続けていく必要がある。

さらに、本論文で得られた知見は、課題難易度を調整すべき方向とその程度を示すものであり、具体的にどのように調整すれば良いかについて示すものではない。課題配置方法やフィードバックの与え方、身体介助がどの程度課題難易度に影響を与えるかを定量的に解明していくことで、**optimal challenge point** と機能的課題難易度の乖離に応じた練習条件の段階的な調整方法が確立できると考える。

最後に、本論文では唾液 α -アミラーゼ、NASA-TLX を用いることによって、運動学習の至適課題難易度を定量化した。しかし、その寄与率は唾液 α -アミラーゼが 37%、NASA-TLX が 22%であり、決して高いものではなかった。より正確に機能的課題難易度を測定することが可能となれば、よりの確に練習条件を調整することが可能となり、運動学習はさらに効率的になる。従って、機能的課題難易度の測定精度を高めていくことが今後の検討課題となる。

謝辞

本研究は指導教員である大橋ゆかり教授の指導のもとに行われました。大橋ゆかり教授には、終始親切丁寧な御指導を頂き、本稿を完成に導いて頂きました。さらに、本稿作成を通じて、運動学習研究の玄妙さと醍醐味を教えて頂きました。深く感謝申し上げます。

茨城県立医療大学理学療法学科 水上昌文教授には、副指導教員として多大なご指導を頂いたことに心より感謝いたします。

また、本稿をまとめるにあたり、的確なご助言を頂きました主査 茨城県立医療大学人間科学センター 岩井浩一教授，副査 茨城県立医療大学理学療法学科 上岡裕美子教授，増本正太郎准教授，学外審査員 国際医療福祉大学理学療法学科 谷浩明教授に心から御礼申し上げます。

本論文の第2章第1節は三郷中央総合病院で測定を行いました。三郷中央総合病院リハビリテーション技術科の皆様には、多忙な業務の中、多大なご協力を賜りました。厚く御礼申し上げます。

第2章第2節は茨城県立医療大学で測定を行いました。測定にご協力頂いた茨城県立医療大学大学院生、学部生の皆様に深く感謝いたします。

第3章は三郷中央総合病院と茨城県立医療大学で測定を行いました。測定にご協力いただいた方々に重ねて御礼申し上げます。

茨城県立医療大学大学院大橋研究室（通称，RTC）の皆様には、本論文の構想から執筆に至るまで様々な視点からの御指摘，御助言を頂きました。また，公私にわたり温かい御支援を頂きました。RTCで得られた経験は，何事にも代え難い宝物となりました。深く感謝いたします。

最後に，私が研究に専念できるように常に支え続けてくれた妻 彩と，無邪気な笑顔で私に元気を与えてくれる長男 楓に心より感謝を申し上げます。

2015年3月
秋月 千典

引用文献

- 1) 千田富義, 天草万里, 砂子田篤, 金田安正, 倉内紀子, 佐藤徳太郎, 鈴木堅二, 関和則, 富井豊人, 長岡正範, 早坂大輔, 藤田正明, 細川恵子, 細川徹, 山内保孝, 山田嘉明. リハビリテーションとは. 中村隆一, 差尚信彦 (編). *入門リハビリテーション概論 第7版*. 医歯薬出版 (東京). 2009; 1-27.
- 2) 大橋ゆかり. 理学療法総論. 大橋ゆかり (編). *ビジュアルレクチャー 基礎理学療法学*. 医歯薬出版 (東京). 2012; 2-26.
- 3) Hass J. Ethical considerations of goal setting for patient care in rehabilitation medicine. *American Journal of Physical Medicine & Rehabilitation*, 1993; 72(4): 228-232.
- 4) 公益社団法人日本理学療法士協会. 「理学療法業務指針」. (http://www.japanpt.or.jp/about/about_jpta/04_index/), 2015年1月9日参照.
- 5) 大橋ゆかり. 運動学習理論と理学療法ーオーバービュー. *PTジャーナル*. 2012; 46(1): 9-15.
- 6) Schmidt RA. Motor learning: Fundamental concepts and research methods. In Schmidt RA (Ed.), *Motor Control and Learning: A Behavior Emphasis (2nd Ed.)*. Human Kinetics (Champaign), 1988; 345-376.
- 7) Lister MJ, ed. *Contemporary Management of Motor Control Problems: Proceedings of the II STEP Conference*. Foundation for Physical Therapy (Alexandria); 1991.
- 8) Fuhrer MJ, Keith RA. Facilitating patient learning during medical rehabilitation: a research agenda. *American Journal of Physical Medicine & Rehabilitation*, 1998; 77(6): 557-561.
- 9) Fisher B, Morton S, Lang C. From motor learning to physical therapy and back again: the state of the art and science of motor learning rehabilitation research. *Journal of Neurologic Physical Therapy*, 2014; 38(3): 149-150.
- 10) Bjork RA. Memory and metamemory considerations in the training of human beings. In Matecalfe J. & Shimamura AP (Eds.), *Metacognition: Knowing about knowing*. MIT Press (Cambridge), 1994: 185-205.
- 11) Bryan WL, Harter N. Studies in the physiology and psychology of the telegraphic language. *Psychological Review*, 1897; 4(1): 27-53.
- 12) Bryan WL, Harter N. Studies on the telegraphic language: The acquisition of a hierarchy of habits. *Psychological Review*,

- 1899; 6(4): 345-375.
- 13) Irion AL. A brief history of research on the acquisition of skill. In E. A. Bilodeau (Ed.), *Acquisition of skill*. Academic Press (New York), 1966: 1-46.
 - 14) Adams JA. Historical review and appraisal of research on the learning, retention, and transfer of human motor skills. *Psychological Bulletin*, 1987; 101(1): 41-74.
 - 15) Schmidt RA. Description and origins of a field of study. In Schmidt RA (Ed.), *Motor Control and Learning: A Behavior Emphasis (2nd Ed.)*. Human Kinetics (Champaign), 1988; 3-17.
 - 16) Keller FS. The phantom plateau. *Journal of the Experimental Analysis of Behavior*, 1(1), 1-13.
 - 17) Robertson RJ, Glines LA. The phantom plateau returns. *Perceptual and Motor Skills*, 1985; 61(1): 55-64.
 - 18) Henry FM. Development of the motor memory trace and control program. *Journal of Motor Behavior*, 1986; 18(1): 77-100.
 - 19) Henry FM, Rogers DE. Increased response latency for complicated movements and a "Memory Drum" theory of neuromotor reaction. *Research Quarterly. American Association for Health, Physical Education and Recreation*, 1960; 31(3): 448-458.
 - 20) Henry FM. Reaction time-movement time correlations. *Perceptual and Motor Skills*, 1961; 12(1): 63-66.
 - 21) Henry FM. Reliability, Measurement error, and intra-individual difference. *Research Quarterly. American Association for Health, Physical Education and Recreation*, 1959; 30(1): 21-24.
 - 22) Henry FM, Whitley JD. Relationships between individual differences in strength, speed, and mass in an arm movement. *Research Quarterly. American Association for Health, Physical Education and Recreation*, 1960; 31(1): 24-33.
 - 23) Shea CH, Wulf G. Schema theory: A Critical appraisal and reevaluation. *Journal of Motor Behavior*, 2005; 37(2): 85-102.
 - 24) Schmidt RA. A schema theory of discrete motor skill learning. *Psychological Review*, 1975; 82(4): 231-240.
 - 25) Brown M. Daily activity inventory and progress record for those with atypical movement. *The American Journal of Occupational Therapy: Official Publication of The American Occupational Therapy*, 1950; 4(6): 261-272.
 - 26) Buchwald E. *Physical Rehabilitation for Daily Living*.

- Mc-Graw-Hill (New York), 1952.
- 27) 今田拓. 日常生活活動（動作）の概念・範囲・意義. 土屋利之, 今田拓, 大川嗣雄（編）. *日常生活活動（動作）－評価と訓練の実際－第3版*. 医歯薬出版（東京）. 1992; 1-25.
 - 28) 鎌倉矩子. 日常生活活動（ADL）の概念とその範囲. 伊藤利之, 鎌倉矩子（編）. *ADL とその周辺：評価・指導・介護の実際 第2版*. 医学書院（東京）. 2008; 1-8.
 - 29) 日本リハビリテーション医学会. ADL 評価について. *リハビリテーション医学：日本リハビリテーション医学会誌*, 1976; 13(4): 315.
 - 30) 上田敏. ADL から QOL へ－リハビリテーションにおける目標の転換. *総合リハビリテーション*, 1984; 12(4); 261-266.
 - 31) 中村隆一, 齋藤宏, 長崎浩. *基礎運動学*. 医歯薬出版（東京）. 2003; 287-312.
 - 32) Annett J. Acquisition of skill. *British Medical Bulletin*, 1971; 27(3): 266-271.
 - 33) Gentile AM. Skill acquisition: action, movement, and neuromotor processes. In Carr JH, Shepherd RB (eds.), *Movement science. Foundations for rehabilitation, 2nd ed.* Aspen (Gaithersburg); 93-154.
 - 34) Crossman E. R. F. W. A theory of the acquisition of speed-skill. *Ergonomics*, 1959; 2(2): 153-166.
 - 35) Ericsson KA, Krampe RT, Tesch-Römer C. The role of deliberate practice in the acquisition of expert performance. *Psychological Review*, 1993; 100(3): 363-406.
 - 36) Carr JH, Shepherd RB. *A Motor Relearning Programme for Stroke. 2nd ed.* Heinemann Medical Books (Oxford), 1987.
 - 37) Carr JH, Shepherd RB. *Stroke rehabilitation: guidelines for exercises and training to optimize motor skill.* Butterworth-Heinemann (Oxford), 2003.
 - 38) Carr JH, Shepherd RB. *Neurological rehabilitation: Optimizing motor performance. 2nd ed.* Churchill Livingstone (London), 2011.
 - 39) Esmonde T, McGinley J, Wittwer J, Goldie P, Martin C. Stroke rehabilitation: patient activity during non-therapy time. *The Australian Journal of Physiotherapy*, 1997; 43(1): 43-51.
 - 40) Bernhardt J, Dewey H, Thrift A, Donnan G. Inactive and alone physical activity within the first 14 days of acute stroke unit care. *Stroke*, 2004; 35: 1005-1009.
 - 41) Askim T, Bernhardt J, Løge AD, Indredavik B. Stroke patients

do not need to be inactive in the first two-weeks after stroke: results from a stroke unit focused on early rehabilitation.

International Journal of Stroke, 2012; 7(1):25-31.

- 42) MacKay-Lyons MJ, Makrides L. Cardiovascular stress during a contemporary stroke rehabilitation program: is the intensity adequate to induce a training effect?. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*, 2002; 83(10): 1378-1383.
- 43) English CK, Hillier SL, Stiller KR, Warden-Flood A. Circuit class therapy versus individual physiotherapy sessions during inpatient stroke rehabilitation: a controlled trial. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*, 2007; 88(8): 955-963.
- 44) Dean CM, Richards CL, Malouin F. Task-related circuit training improves performance of locomotor tasks in chronic stroke: a randomized controlled pilot trial. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*, 2000; 81(4): 409-417.
- 45) Pang MY, Eng JJ, Dawson AS, McKay HA, Harris JE. A community based fitness and mobility exercise program for older adults with chronic stroke. A randomized controlled trial. *Journal of the American Geriatrics Society*, 2005; 53(10): 1667-1674.
- 46) Blennerhassett J, Dite W. Additional task-related practice improves mobility and upper limb function early after stroke: a randomized controlled trial. *The Australian Journal of Physiotherapy*, 2004; 50(4): 219-244.
- 47) Winstein CJ. Knowledge of results and motor learning—implications for physical therapy. *Physical Therapy*, 1991; 71(2): 140-149.
- 48) Wulf G. Self-controlled practice enhances motor learning: implications for physiotherapy. *Physiotherapy*, 2007; 93(2): 96-101.
- 49) McNevin NH, Wulf G, Carlson C. Effects of attentional focus, self-control, and dyad training on motor learning: implications for physical rehabilitation. *Physical Therapy*, 2000; 80(4): 373-385.
- 50) Kantak SS, Winstein CJ. Learning-performance distinction and memory processes for motor skills: a focused review and perspective. *Behavioural Brain Research*, 2012; 228(1): 219-231.
- 51) Tolman EC, Honzik CH. "Insight" in rats. *University of California Publications in Psychology*, 1930; 4: 215-232.

- 52) Schmidt RA, Bjork RA. New conceptualizations of practice: common principles in three paradigms suggest new concepts for training. *Psychological Science*, 1992; 3(4): 207-217.
- 53) Salmoni AW, Schmidt RA, Walter CB. Knowledge of results and motor learning: a review and critical reappraisal. *Psychological Bulletin*, 1984; 95(3): 355-386.
- 54) Griffith CR. An experiment on learning to drive a golf ball. *The Athletic Journal*, 1931; 11: 11-13.
- 55) Hull CL. *Principles of behavior*, Appleton-Century-Crofts (New York), 1943.
- 56) Wulf G, Shea CH. Principles derived from the study of simple skills do not generalize to complex skill learning. *Psychonomic Bulletin & Review*, 2002; 9(2): 185-211.
- 57) Guadagnoli MA, Lee TD. Challenge point: a framework for conceptualizing the effects of various practice conditions in motor learning. *Journal of Motor Behavior*, 2004; 36(2): 212-224.
- 58) Albaret JM, Thon B. Differential effects of task complexity on contextual interference in a drawing task. *Acta Psychologica*, 1998; 100(1-2): 9-24.
- 59) Wulf G, Shea CH, Matschiner S. Frequent feedback enhances complex motor skill learning. *Journal of Motor Behavior*, 1998; 30(2): 180-192.
- 60) Klapp ST. Motor response programming during simple and choice reaction time: the role of practice. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception & Performance*, 1995; 21(5): 1015-1027.
- 61) Fitts PM. The information capacity of the human motor system in controlling the amplitude of movement. *Journal of Experimental Psychology*, 1954; 47(6): 381-391.
- 62) Schmidt RA, Zelaznik H, Hawkins B, Frank JS, Quinn JJ. Motor-output variability: a theory for the accuracy of rapid motor acts. *Psychological Review*, 1979; 47(5): 415-451.
- 63) Bernstein N. *The co-ordination and regulation of movements*. Pergamon (Oxford), 1967.
- 64) Miller GA, Galanter E, Pribram KH. プランと行動の構造. 十島 雍蔵, 佐久間章, 黒田輝彦, 江頭幸晴(訳). 誠信書房(東京), 1980. (原著) Miller GA, Galanter E, Pribram KH. *Plans and the structure of behavior*. Holt (New York), 1960.
- 65) 道免和久. 運動学習とリハビリテーション. バイオメカニズム学

- 会誌, 2001; 25(4): 177-182.
- 66) 川人光男. 脳の計算理論. 産業図書 (東京), 1996; 119-189.
- 67) Shidara M, Kawano K, Gomi H, Kawato M. Inverse-dynamics model eye movement control by Purkinje cells in the cerebellum. *Nature*, 1993; 365(6441): 50-52.
- 68) Kobayashi Y, Kawano K, Takemura A, Inoue Y, Kitama T, Gomi H, Kawato M. Temporal firing patterns of Purkinje cells in the cerebellar ventral paraflocculus during ocular following responses in monkeys II. Complex spikes. *Journal of Neurophysiology*, 1998; 80(2): 832-848.
- 69) Miller GA. The magical number seven, plus or minus two: some limits on our capacity for processing information. *Psychological Review*, 1956; 63(2): 81-97.
- 70) Marteniuk RG. *Information processing in motor skills*. Holt, Rinehart, & Winston (New York), 1976.
- 71) 才藤栄一, 横田元実, 大塚圭, 金田嘉清. 運動学習からみた装具 - 麻痺疾患の歩行練習において. *総合リハビリテーション*, 2010; 38(6): 545-550.
- 72) Magill RA, Hall KG. A review of the contextual interference effect in motor skill acquisition. *Human Movement Science*, 1990; 9(3-5): 241-289.
- 73) Brady F. A theoretical and empirical review of the contextual interference effect and the learning of motor skills. *QUEST*, 1998; 50(3): 266-293.
- 74) Schmidt RA. Frequent augmented feedback can degrade learning: evidence and interpretations. In Requin J and Stelmach GE (Eds.), *Tutorials in Motor Neuroscience*. Kluwer Academic (Netherlands), 1991; 59-75.
- 75) Swinnen SP. Information feedback for motor skill learning: a review. In Zelaznik HN (Ed.). *Advances in motor learning and control*. Human Kinetics (Champaign), 1996: 37-66.
- 76) Wulf G. Attentional focus and motor learning: a review of 15 years. *International Review of Sport and Exercise Psychology*, 2013; 6(1): 2013.
- 77) Shea CH, Wulf G. Enhancing motor learning through external-focus instructions and feedback. *Human Movement Science*, 1999; 18(4): 553-571.
- 78) Shea CH, Wulf G, Whitacre C, Wright DL. Physical and observational practice afford unique learning opportunities. *Journal of Motor Behavior*, 2000; 32(1): 27-36.

- 79) Wulf G, Shea CH, Lewthwaite R. Motor skill learning and performance: a review of influential factors. *Medical Education*, 2010; 44(1): 75-84.
- 80) Battig WF. The flexibility of human memory. In Cermak LS, Craik FIM (Eds.), *Levels of processing in human memory*. Lawrence Erlbaum Associates (Hillsdale), 1979; 23-44.
- 81) Shea JB, Morgan RL. Contextual interference effects on the acquisition, retention, and transfer of a motor skill. *Journal of Experimental Psychology: Human Learning and Memory*, 1979; 5(2): 179-187.
- 82) Boutin A, Bandin Y. On the cognitive processes underlying contextual interference: Contributions of practice schedule, task similarity and amount of practice. *Human Movement Science*, 2010; 29(6): 910-920.
- 83) Shea JB, Zimny ST. Context effects in learning movement information. In Magill RA (Ed.). *Memory and the control of action*. North-Holland (Amsterdam), 1983; 345-366.
- 84) Lee TD, Magill RA. The locus of contextual interference in motor-skill acquisition. *Journal of Experimental Psychology : Learning, Memory, and Cognition*, 1983; 9(4): 730-746.
- 85) Akizuki K, Ohashi Y. Changes in practice schedule and functional task difficulty: a study using the probe reaction time technique. *Journal of Physical Therapy Science*, 2013; 25(7): 827-831.
- 86) Hebert EP, Landin D, Solmon MA. Practice schedule effects on the performance and learning of low- and high-skilled students: an applied study. *Research Quarterly for Exercise and Sport*, 1996; 67(1): 52-58.
- 87) Schmidt RA. Feedback and Knowledge of Results. In Schmidt RA (Ed.), *Motor Control and Learning: A Behavior Emphasis (2nd ed.)*. Human Kinetics (Champaign), 1988; 423-455.
- 88) 谷浩明. セラピストによる教示やフィードバックは学習に効果的か?. *理学療法科学*, 2006; 21(1): 69-73.
- 89) Sherwood DE. Effect of bandwidth knowledge of results on movement consistency. *Perceptual and Motor Skills*, 1988; 66(2): 535-542.
- 90) Ishikura T. Average KR schedule in learning of tiing: influence of length for summary knowledge of results and task complexity. *Perceptual and Motor Skills*, 2005; 101(3): 911-924.

- 91) Lee TD, White MA, Carnahan H: On the role of knowledge of results in motor learning: exploring the guidance hypothesis. *Journal of Motor Behavior*. 1990; 22(2): 191-208.
- 92) Lavery JJ. Retention of simple motor skills as a function of type of knowledge of results. *Canadian Journal of Psychology*, 1962; 16(4): 300-311.
- 93) Schmidt RA, Lange C, Young DE. Optimizing summary knowledge of results for skill learning. *Human Movement Science*, 1990; 9(3-5): 325-348.
- 94) 秋月千典, 大橋ゆかり. KR付与方法が運動学習の成果及び機能的課題難易度に与える影響. *日本生理人類学会誌*, 2013; 18(4): 171-179.
- 95) Guadagnoli MA, Dornier LA, Tandy RD. Optimal length for summary knowledge of results: the influence of task-related experience and complexity. *Research Quarterly for Exercise and Sport*, 1996; 67(2): 239-248.
- 96) Domingo A, Ferris DP. Effects of physical guidance on short-term learning of walking on a narrow beam. *Gait & Posture*, 2009; 30(4): 464-468.
- 97) Marchal-Crespo L, McHughen S, Cramer SC, Reinkensmeyer DJ. The effect of haptic guidance, aging, and initial skill level on motor learning of a steering task. *Experimental Brain Research*, 2010; 201(2): 209-220.
- 98) Kahneman D. *Attention and Effort*. Prentice-Hall (Englewood Cliffs), 1973.
- 99) Eills JG. Analysis of temporal and attentional aspect of movement control. *Journal of Experimental Psychology*, 1973; 99(1): 10-21.
- 100) Kerr B. Processing demands during movement. *Journal of Motor Behavior*, 1975; 7(1): 15-27.
- 101) Salmoni AW, Sullivan SJ, Starkes JL. The attention demands of movements: a critique of the probe technique. *Journal of Motor Behavior*, 1976; 8(3): 161-169.
- 102) Shumway-Cook A, Woollacott M. Attentional demands and postural control: the effects of sensory context. *The Journals of Gerontology Series A: Biological Sciences and Medical Sciences*, 2000; 55 (1): 10-16.
- 103) Woollacott M, Shumway-Cook A. Attention and the control of posture and gait: a review of an emerging area of research. *Gait & Posture*, 2002; 16(1): 1-14.

- 104) Sajiki N, Isagoda A, Moriai N, Nakamura R. Reaction time during walking. *Perceptual and Motor Skills*, 1989; 69(1): 259-262.
- 105) Nakamura R, Moriai N, Sajiki N. Reaction times of normal subjects and amputees with below-knee and above-knee prostheses during stepping. *Journal of Prosthetics & Orthotics*, 1984; 8(2): 100-102.
- 106) Cavagna GA, Franzetti P. The determinants of the step frequency in walking in humans. *Journal of Physiology*, 1986; 373: 235-242.
- 107) Glencross DJ, Gould JH. The planning of precision movement. *Journal of Motor Behavior*, 1979; 11(1): 1-9.
- 108) Lajoie Y, Teasdale N, Bard C, Fleury M. Attentional demands for static and dynamic equilibrium. *Experimental Brain Research*, 1993; 97(1): 139-144.
- 109) Wickens CD. Processing resources in attention. In Parasuraman R and Davies R (Eds.), *Varieties of attention*. Academic Press (New York), 1984; 63-101.
- 110) Wickens CD. *Engineering psychology and human performance (2nd ed.)*. HarperCollins (New York), 1992.
- 111) Wickens CD, Liu Y. Codes and modalities in multiple resources: A success and a qualification, *Human Factors*, 1988; 30(5): 599-616.
- 112) Goh H, Gordon J, Sullivan KJ, Winstein CJ. Evaluation of attentional demands during motor learning: validity of a dual-task probe paradigm. *Journal of Motor Behavior*, 2014; 46(2): 95-105.
- 113) Wickens CD, Kramer A, Vanasse L, Donchin E. Performance of concurrent tasks: a psychophysiological analysis of the reciprocity of information-processing resources. *Science*, 1983; 221(4615): 1080-1082.
- 114) Ullsperger P, Metz AM, Gille HG. The P300 component of the event-related brain potential and mental effort. *Ergonomics*, 1988; 31(8): 1127-1137.
- 115) Isreal JB, Wickens CD, Chesney GL, Donchin E. The event-related brain potential as an index of display-monitoring workload. *Human Factors*, 1980; 22(2): 211-224.
- 116) 中島義明. 情報処理心理学: 情報と人間の関わり of 認知心理学. サイエンス社 (東京), 2009.
- 117) Meyerhoff JL, Oleshansky MA, Mougey EH. Psychologic stress

- increases plasma levels of prolactin, cortisol, and POMC-derived peptides in man. *Psychosomatic Medicine*, 1988; 50(3): 295-303.
- 118) Kakimoto Y, Nakamura A, Tarui H, Nagasawa Y, Yagura S. Crew workload in JASDF C-1 transport flights: I. Change in heart rate and salivary cortisol. *Aviation, Space, And Environmental Medicine*, 1988; 59(6): 511-516.
- 119) Nater UM, Rohleder N. Salivary alpha-amylase as a non-invasive biomarker for the sympathetic nervous system: current state of research. *Psychoneuroendocrinology*, 2009; 34(4): 486-496.
- 120) Speirs RL, Herring J, Cooper WD, Hardy CC, Hind CR. The influence of sympathetic activity and isoprenaline on the secretion of amylase from the human parotid gland. *Archives of Oral Biology*, 1974; 19(9): 747-752.
- 121) Nater UM, Rohleder N, Gaab J, Berger S, Jud A, Kirschbaum C. Human salivary alpha-amylase reactivity in a psychosocial stress paradigm. *International Journal of Psychophysiology*, 2005; 55(3): 333-342.
- 122) Selye H. 現代社会とストレス. 杉靖三郎, 田多井吉之介, 藤井尚治, 竹宮隆 (訳). 法政大学出版局 (東京), 1988. (原著) Selye H. *The stress of life*. Mc-Graw-Hill (New York), 1976.
- 123) 平野鉄雄, 新島旭. 脳とストレス—ストレスにたちむかう脳. 共立出版 (東京), 1995.
- 124) Noto Y, Sato T, Kudo M, Kurata K, Hirota K. The relationship between salivary biomarkers and state-trait anxiety inventory score under mental arithmetic stress: a pilot study. *Anesthesia and Analgesia*, 2005; 101(6): 1873-1876.
- 125) Goi N, Hirai Y, Harada H, Ikari A, Ono T, Kinase N, Hiramatsu M, Nakamura K, Takagi K. Comparison of peroxidase response to mental arithmetic stress in saliva of smokers and non-smokers. *The Journal of Toxicological Sciences*, 2007; 32(2): 121-127.
- 126) Yamaguchi M, Sakakima J. Evaluation of driver stress in a motor-vehicle driving simulator using a biochemical marker. *The Journal of International Medical Research*, 2007; 35(1): 91-100.
- 127) Schoofs D, Hartmann R, Wolf OT. Neuroendocrine stress responses to an oral academic examination: No strong influence of sex, repeated participation and personality traits.

- Stress*, 2008; 11(1): 52-61.
- 128) Rohleder N, Nater UM, Wolf JM, Ehlert U, Kirschbaum C. Psychosocial stress-induced activation of salivary alpha-amylase: an indicator of sympathetic activity?. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 2004; 1032: 258-263.
- 129) van Stegeren AH, Wolf OT, Kindt M. Salivary alpha amylase and cortisol responses to different stress tasks: impact of sex. *International Journal of Psychophysiology: Official Journal of The International Organization of Psychophysiology*, 2008; 69(1): 33-40.
- 130) Nater UM, Rohleder N, Schlotz W, Ehlert U, Kirschbaum C. Determinants of the diurnal course of salivary alpha-amylase. *Psychoneuroendocrinology*, 2007; 32(4): 392-401.
- 131) Rohleder N, Nater UM. Determinants of salivary alpha-amylase in humans and methodological considerations. *Psychoneuroendocrinology*, 2009; 34(4): 469-485.
- 132) Rohleder N, Wolf JM, Maldonado EF, Kirschbaum C. The psychosocial stress-induced increase in salivary alpha-amylase is independent of saliva flow rate. *Psychophysiology*, 2006; 43(6): 645-652.
- 133) Gordis EB, Granger DA, Susman EJ, Trickett PK. Asymmetry between salivary cortisol and alpha-amylase reactivity to stress: relation to aggressive behavior in adolescents. *Psychoneuroendocrinology*, 2006; 31(8): 976-987.
- 134) Pruessner JC, Kirschbaum C, Meinlschmid G, Hellhammer DH. Two formulas for computation of the area under the curve represent measures of total hormone concentration versus time-dependent change. *Psychoneuroendocrinology*, 2003; 28(7): 916-931.
- 135) Yamaguchi M, Deguchi M, Wakasugi J, Ono S, Takai N, Higashi T, Mizuno Y. Hand-held monitor of sympathetic nervous system using salivary amylase activity and its validation by driver fatigue assessment. *Biosensors & Bioelectronics*, 2006; 21(7): 1007-1014.
- 136) Reid GB, Nygren TE. The subjective workload assessment technique: a scaling procedure for measuring mental workload. In Hancock PA & Meshkati N (Eds.), *Human mental workload*. Elsevier (North-Holland), 1988; 185-218.
- 137) Hart SG, Staveland LE. Development of NASA-TLX (Task Load Index): results of empirical and theoretical research. In

- Hancock PA & Meshkati N (Eds.), *Human mental workload*. Elsevier (North-Holland), 1988; 139-183.
- 138) Kantowitz BH. Defining and measuring pilot mental workload. In Comstock JR, Jr. (Ed.), *Mental state estimation 1987*. National Aeronautics and Space Administration, Scientific and Technical Information Division (Hampton), 1988; 179-188.
- 139) Kantowitz BH. Attention and mental workload. *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, 2000; 44(21): 3-456-3-459.
- 140) Moray N. Subjective Mental Workload. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, 1982; 24(1): 25-40.
- 141) 三宅晋司, 神代雅晴. メンタルワークロードの主観的評価法: NASA-TLX と SWAT の紹介および簡便法の提案. *人間工学*, 1993; 29(6): 399-408.
- 142) Biers DW, McInerney P. An alternative to measuring subjective workload: use of SWAT without the card sort. *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, 1988; 32(17): 1136-1139.
- 143) Nygren TE. Psychometric properties of subjective workload measurement techniques: implications for their use in the assessment of perceived mental workload. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, 1991; 33(1): 17-33.
- 144) Byers JC, Bittner AC, Hill SG. Traditional and raw task load index (TLX) correlations: are paired comparisons necessary?. In Mital A (Ed.), *Advances in industrial ergonomics and safety*. Taylor & Francis (London), 1989; 481-4855.
- 145) Battiste V, Bortolussi M. Transport pilot workload: a comparison of two subjective techniques. *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, 1988; 32(2): 150-154.
- 146) Hill SG, Iavecchia HP, Byers JC, Bittner AC, Zaklade AL, Christ RE. Comparison of four subjective workload rating scales. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, 1992; 34(4): 429-439.
- 147) Nataupsky M, Abbott TS. Comparison of workload measures on computer-generated primary flight displays. *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, 1987; 31(5): 548-552.

- 148) Chatterton RT, Vogelsong KM, Lu YC, Ellman AB, Hudgens GA. Salivary alpha-amylase as a measure of endogenous adrenergic activity. *Clinical Physiology*, 1996; 16(4): 433-448.
- 149) Brooks GA. Anaerobic threshold: review of the concept and directions for future research. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 1985; 17(1): 22-34.
- 150) Wasserman K, Whipp BJ, Koysl SN, Beaver WL. Anaerobic threshold and respiratory gas exchange during exercise. *Journal of Applied Physiology*, 1973; 35(2): 236-243.
- 151) Beaver WL, Wasserman K, Whipp BJ. Improved detection of lactate threshold during exercise using a log-log transformation. *Journal of Applied Physiology*, 1985; 59(6): 1936-1940.
- 152) Tanaka H, Shindo M. The benefits of the low intensity training. *The Annals of Physiological Anthropology*, 1992; 11(3): 365-368.
- 153) Strzelczyk TA, Quigg RJ, Pfeifer PB, Parker MA, Greenland P. Accuracy of estimating exercise prescription intensity in patients with left ventricular systolic dysfunction. *Journal of Cardiopulmonary Rehabilitation*, 2001; 21(3): 158-163.
- 154) Tanaka H, Kiyonaga A, Terao Y, Ide K, Yamauchi M, Tanaka M, Shindo M. Double product response is accelerated above the blood lactate threshold. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 1997; 29(4): 503-508.
- 155) Mazzeo RS, Marshall P. Influence of plasma catecholamines on the lactate threshold during graded exercise. *Journal of Applied Physiology*, 1989; 67(4): 1319-1322.
- 156) Schneider DA, McGuiggin ME, Kamimori GH. A comparison of the blood lactate and plasma catecholamine thresholds in untrained male subjects. *International Journal of Sports Medicine*, 1992; 13(8): 562-566.
- 157) Riley M, Maehara K, Pórszász J, Engelen MP, Bartstow TJ, Tanaka H, Wasserman K. Association between the anaerobic threshold and the break-point in the double product/work rate relationship. *European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology*, 1997; 75(1): 14-21.
- 158) Brubaker PH, Kiyonaga A, Matrazzo BA, Pollock WE, Shindo M, Miller HS, Tanaka H. Identification of the anaerobic threshold using double product in patients with coronary artery disease. *The American Journal of Cardiology*, 1997;

- 79(3): 360-362.
- 159) Omiya K, Itoh H, Harada N, Maeda T, Tajima A, Oikawa K, Koike A, Aizawa T, Fu L, Osada N. Relationship between double product break point, lactate threshold, and ventilatory threshold in cardiac patients. *European Journal of Applied Physiology*, 2004; 91(2-3): 224-229.
- 160) Calvo F, Chicharro JL, Bandrés F, Lucía A, Pérez M, Álvarez J, Mojares LL, Vaquero AF, Legido JC. Anaerobic threshold determination with analysis of salivary amylase. *Canadian Journal of Applied Physiology*, 1997; 22(6): 553-561.
- 161) Beaver WL, Wasserman K, Whipp BJ. A new method for detecting anaerobic threshold by gas exchange. *Journal of Applied Physiology*, 1986; 60(6): 2020-2027.
- 162) Shetty V, Zigler C, Robles TF, Elashoff D, Yamaguchi M. Developmental validation of a point-of-care, salivary α -amylase biosensor. *Psychoneuroendocrinology*, 2011; 36(2): 193-199.
- 163) Yamamoto Y, Hughson RL, Peterson JC. Autonomic control of heart rate during exercise studied by heart rate variability spectral analysis. *Journal of Applied Physiology*, 1991; 71(3): 1136-1142.
- 164) Remaud A, Boyas S, Caron GA, Bilodeau M. Attentional demands associated with postural control depend on task difficulty and visual condition. *Journal of Motor Behavior*, 2012; 44(5): 329-340.
- 165) Schmidt RA. Methodology for studying motor behavior. In Schmidt RA (Ed.), *Motor Control and Learning: A Behavior Emphasis (2nd ed.)*. Human Kinetics (Champaign), 1988; 45-73.