

## 【原 著】

## 1 分間の高強度運動反復時のエネルギー代謝の検討

高島 直之<sup>\*1</sup>, 平川 和文<sup>\*2</sup><sup>\*1</sup>株式会社ゴールドウィン, <sup>\*2</sup>京都学園大学 健康医療学部

Study of energy metabolism during 1 min. repeated high-intensity exercises

Naoyuki TAKASHIMA<sup>\*1</sup>, Kazufumi HIRAKAWA<sup>\*2</sup><sup>\*1</sup> GOLDWIN Inc.<sup>\*2</sup> Faculty of Health and Medical Sciences, Kyoto Gakuen University

## 要 約

本研究の目的は、1分間の高強度運動を反復した場合のエネルギー代謝に及ぼす影響を、呼気ガス分析から検討することであった。6名の大学陸上競技選手が被験者として参加した。彼らは自転車エルゴメーターを用いて1分間で疲労困憊に至る高強度運動を30分の休息をはさんで2回実施した。安静・運動・回復中の心拍数・酸素摂取量・血中乳酸濃度が測定された。1回目と2回の運動パフォーマンスは同様な値を示した。運動時の心拍数・酸素摂取量・最高血中乳酸濃度は2回の運動間に有意な違いは認められなかった。運動前の酸素摂取量・心拍数・血中乳酸濃度は2回目が有意に高い値を示した。酸素負債量は2回目の方が1回目より、有意ではないが、低い値を示した。以上の結果から、1分間の高強度運動を30分の休息をはさんで繰り返した場合、2回目の運動では十分な無酸素的エネルギー供給がなされないが、有酸素的エネルギー供給が改善されるため、両運動パフォーマンスには違いは認められなかったものと推察された。

## SUMMARY

Purpose of this study was to examine effects of 1 min. high-intensity exercise being exhausted on energy metabolism. Six healthy male University-athletes were participated in this study as subjects. They performed the exercise repeated twice with 30 min resting interval, and were measured HR, VO<sub>2</sub>, and LA during rest, exercise and recovery periods. There was no significant difference in exercise time between the exercises. Peak HR, peak VO<sub>2</sub>, and peak LA, also showed no significant differences between the exercises. O<sub>2</sub> debt of the 2nd exercise was lower than that of the 1st exercise. Pre-exercise HR, VO<sub>2</sub> and LA of the 2nd exercise showed higher values than those of the 1st exercise. These results suggested that performance of the 2nd exercise kept the similar level with the 1st exercise by efficient improvement of aerobic energy supply, though anaerobic energy supply was negatively affected like decrease of O<sub>2</sub> debt.

キーワード：1分間高強度運動, 反復, 酸素摂取量, 酸素負債量, パフォーマンス

Key words: 1 min. high-intensity exercise repeated, O<sub>2</sub> intake, O<sub>2</sub> debt, performance

## I 諸 言

我々は、自転車エルゴメーターを用いて、60秒間の高強度激運動を3種（15分、30分、60分）の休息時間条件でそれぞれ2回反復させ、1回目と2回目の発揮パワーより、2回目のパフォーマンスの回復特徴を比較検討した結果、総発揮パワーの回復には30分以上の休息が必要なこと、運動序盤の発揮パワーは、休息時間条件に係わらずいずれも低下すること、30・60分の休息では2回目の運動終盤のパフォーマンスが向上することを報告した<sup>16)</sup>。また、2回目の激運動では筋電図積分値が第1回目より減少傾向にあることを認め、高強度激運動における運動序盤の発揮パワーの低下は、無酸素的エネルギー供給あるいは局所の筋収縮機構の不十分な回復が影響し、運動終盤における発揮パワーの向上は筋の有酸素的エネルギー代謝能力の改善が推察されることを報告した<sup>16)</sup>。

1分間程度の高強度激運動時の身体エネルギー供給動態を酸素摂取からみた先行研究をみると、山本は45秒以降の発揮パワーは有酸素性能力と高い相関があること<sup>19)</sup>、Bangsbo<sup>2)</sup>、Bogdanis<sup>7,8)</sup>、Layec<sup>12)</sup>は、運動を反復した場合、2回目の終盤は有酸素性由来のエネルギー供給の貢献が増大することを報告している。これらの報告は、我々の先行研究結果<sup>16)</sup>を支持するものである。また、1分程度の高強度激運動時の酸素摂取動態に関しては、45～60秒で最大酸素摂取水準に達する<sup>2,5)</sup>ことや、Vanhatelo et al.<sup>17,18)</sup>とJones et al.<sup>11)</sup>らは、主運動前に短時間の高強度運動を行うことで酸素摂取の立ち上がりが速くなることを報告している。

一般に、1分間程度の高強度激運動を反復した場合、発揮パワーは時間経過とともに低下する。また我々の先行研究<sup>16)</sup>によって、1回目と2回目の発揮パワーは、休息時間の違いにも影響されながら、経時的推移も異なることが報告されている。発揮パワーが異なるということは、その運動遂行のためのエネルギー供給動態も変化すると考えられる。そのため、先行研究のようなスタートから常に最大努力が求められ、1分間で疲労困憊に至る高強度激運動を反復する場合のエネルギー供給動態を検討する場合、荷重・回転数を固定した条件で1分間で疲労困憊に至るような高強度運動時の応答を比較検討することにより、より明確にエネルギー供給動態への影響を明らかに出来るものと考えられる。

そこで本研究は、先行研究で認めた2回目の高強度激運動後半の発揮パワーの回復に、有酸素および無酸素的エネルギー供給能がどのように関与してい

るかを明らかにするため、ほぼ1分間で疲労困憊に至る固定負荷による高強度激運動を、30分の休息をはさんで反復した場合について、呼気ガス分析より検討することを目的とした。

## II 方 法

### 1. 被験者

被験者は、某大学体育会陸上競技部に所属し、400mあるいは800m競技を専門とする男子大学生6名とした。被験者の競技歴・年齢・身長・体重は、それぞれ $4.4 \pm 1.5$ 年、 $19.7 \pm 1.5$ 歳、 $169.9 \pm 3.8$ cm、 $63.8 \pm 4.5$ kgであった。彼らの400mのベスト記録は $50.68 \pm 1.49$ 秒であった。被験者には、事前に実験の手順と起こりうる危険性を書面および口頭で説明し、参加の同意を得た。

### 2. 実験プロトコル

まず、自転車エルゴメーター POWERMAX-V IIIを用い、荷重を体重の7.5%と固定し<sup>3)</sup>、数種の規定された回転数による自転車運動を疲労困憊まで行わせた。回転数はメトロノームに合わせるように指示した。疲労困憊の判定は、規定回転数を維持できなくなり、5rpm以上下回った時点とした。得られた運動時間と回転数を直線回帰処理し、内挿法により1分間で疲労困憊に至る回転数を決定した。その結果、60秒で疲労困憊に至る回転数は、100rpmが2名、95rpmが3名、90rpmが1名であった。

図1に本実験のプロトコルを示す。本実験では、体重の7.5%固定荷重で<sup>3)</sup>、決定された回転数による疲労困憊までの最大努力自転車運動を、30分間の休息をはさんで2回実施した<sup>16)</sup>。疲労困憊の判定は、前述と同様規定回転数を5rpm下回った時点とした。被験者は、心拍メモリー装置装着後、5分間の座位安静を保ち、その後W-upとして60Wの不可で5分間の自転車運動と5分間のストレッチ、さらに7秒間の最大自転車こぎ運動を1回行った。W-up終了後呼気ガス用マスクを装着し、自転車エルゴメーター上で10分の座位安静を保った後、1回目の疲労困憊に至る最大努力運動テスト(T1)を行った。T1が終了すると被験者は直ちにエルゴメーターから降り30分間座位安静を保った。30分の休息の後、2回目の最大努力運動テスト(T2)を行った。T2終了後、T1と同様に30分間の座位安静を保った後、測定を終了した。

呼気ガス分析にはミナト医科学社製エアロモニタ AE-310Sを用い、breath-by-breath法により測定した。得られたデータは3点移動平均処理し分析に用いた。安静時の酸素摂取量( $VO_2$  rest)は、実験スタート時の座位安静時3～5分時の値( $4.5 \pm 0.3$  ml/

kg/min)とした。T1およびT2運動前の酸素摂取量 (VO<sub>2</sub> pre-ex.)はT1・T2直前2分間の平均値とした。また、T1、T2の酸素負債量 (O<sub>2</sub> debt)は、30分間の回復時総酸素摂取量からVO<sub>2</sub> restを引いて算出した。血中乳酸濃度 (La)は、安静時 (La rest)とT1・T2テストの前後 (La pre-ex.およびLa peak)の計5回測定した。心拍数は実験を通して心拍数モニタ (RS800CX MULTI, POLAR社製)を用いて測定した。安静時心拍数 (HR rest)は座位安静時の3～5分間の平均値を、運動前の心拍数 (HR pre-ex.)はそれぞれ直前2分間の平均値とした。運動中のピーク心拍数 (HR peak)は運動終了直前5秒間の平均値とした。

### 3. 統計処理

統計処理には、統計解析ソフト (SPSS11.5)を用いた。T1とT2の平均値の差の検定は、正規性が認められた項目には対応のあるスチューデントのt検

定を、認められなかった項目にはウェルチのt検定を用いた。全ての比較において有意水準は5%未満とした。

## Ⅲ 結 果

表1にT1、T2の各測定結果を示す。T1・T2の疲労困憊時間は、T1が66.8±4.93秒、T2が66.1±6.67秒で、両運動間に有意な違いは認められなかった。T1・T2運動時の酸素摂取量はいずれの経時ポイントにおいても有意な差は認められなかった (図2)。VO<sub>2</sub> peakは、T1が48.9±2.6、T2が50.2±3.0 ml/kg/minで、両運動間に有意な差は認められなかった。運動後のLa peakは、T1が15.0±3.5、T2が15.5±0.8 mmol/lで、有意な違いは認められなかった。HR peakも、T1が176.6±7.6、T2が176.1±5.4 bpmで、有意な違いは認められなかった。

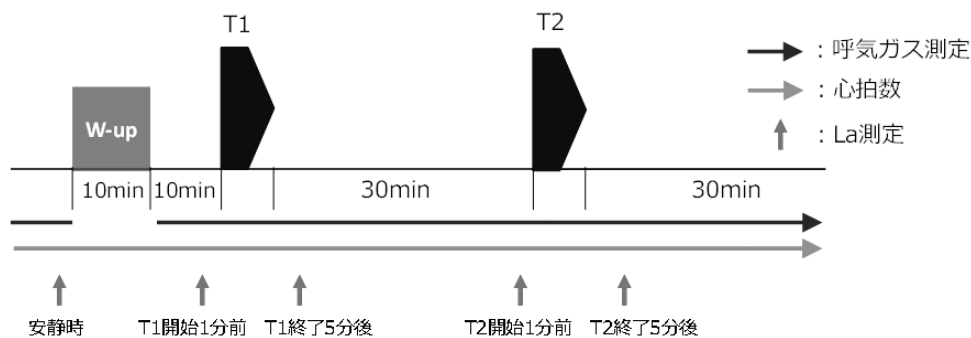


図1. 本実験プロトコルと測定項目

表1. T1・T2の各測定項目の比較

測定項目	T1	T2	有意性
運動持続時間 (sec)	66.8±4.93	66.1±6.67	NS
VO <sub>2</sub> pre-ex. (ml/kg/min)	5.74±0.26	6.07±0.29	*
VO <sub>2</sub> peak (ml/kg/min)	48.9±2.39	50.2±3.0	NS
O <sub>2</sub> debt (ml/kg/30 min) <sup>1)</sup>	96.5±7.08	90.41±10.0	NS
O <sub>2</sub> debt (ml/kg/30 min) <sup>2)</sup>	61.7±13.0	46.4±11.7	*
HR pre-ex. (bpm)	84.4±10.7	102.1±12.2	*
HR peak (bpm)	176.6±7.6	176.1±5.4	NS
La pre-ex. (mmol/l)	4.0±0.3	8.5±1.9	**
La peak (mmol/l)	15.0±3.5	15.5±0.8	NS

\*\* : p<0.01, \* : p<0.05, NS : no significance

1) : VO<sub>2</sub> rest を差し引いた酸素負債量

2) : VO<sub>2</sub> pre-ex. を差し引いた酸素負債量

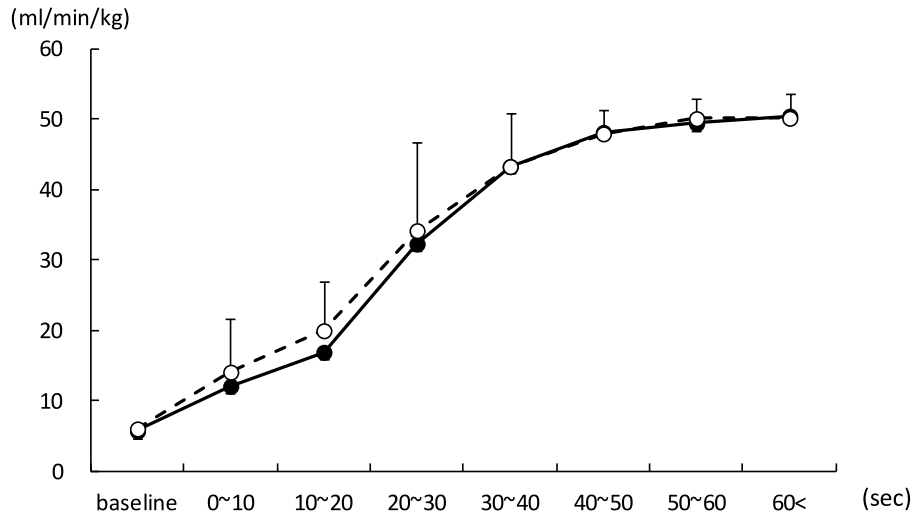


図2. T1, T2 運動時  $VO_2$  の経時的変化 (実線: T1, 破線: T2)

$VO_2$  pre-ex., HR pre-ex., La pre-ex. は, それぞれ T1 が  $5.74 \pm 0.26$ , T2 が  $6.07 \pm 0.29$  ml/kg/min ( $p < 0.05$ ), T1 が  $84.4 \pm 10.7$  と, T2 が  $102.1 \pm 12.2$  bpm ( $p < 0.05$ ),  $4.0 \pm 0.75$ , T2 が  $8.5 \pm 1.29$  mmol/l ( $p < 0.01$ ) で, いずれの項目も T2 が有意に高い値を示した.

酸素負債量は, T1 は  $96.5 \pm 10.8$ , T2 は  $90.4 \pm 10.0$  ml/kg/30min で, 両運動間に有意な差は認められなかったが, T2 が T1 より少ない傾向にあった. 酸素負債量をそれぞれの  $VO_2$  pre-ex. を基準に算出すると, T1 が  $61.7 \pm 13.03$ , T2 が  $46.4 \pm 11.7$  ml/kg/30min で, T2 が有意に低い値 ( $p < 0.05$ ) を示した.

#### IV 考 察

本研究は, 1分間で疲労困憊に至る高強度運動を2回反復した場合, 1回目の運動が2回の運動時エネルギー供給に, どのように影響するかを検討することを目的とした. その結果, 得られた主な知見は, 1分間程度で疲労困憊に至る固定負荷の自転車運動を, 30分の休息をはさんで2回繰り返した場合, 運動パフォーマンスおよび運動時酸素摂取量には有意な違いは認められなかったが, 酸素負債量は2回目の運動において減少する傾向が認められたことである.

酸素負債量は運動後の過剰な酸素摂取量の総和より安静時酸素摂取量を引いたものであり, 運動時の無酸素性エネルギー供給能力の指標として用いられる. 運動後に酸素摂取量が安静時よりも高値を示すのは, 運動中に蓄積した無機代謝物質の分解処理に酸素を必要とするからである. 本研究では, 運動

前の安静時酸素摂取量, 心拍数, 血中乳酸量は, いずれも T2 が T1 よりも有意に高い値を示した. このことは, 1回目の運動により生じた乳酸代謝や体温上昇等によるエネルギー代謝動態に変化が生じ, 30分間の休息では十分回復されていないことを示唆すると考えられる. 運動により蓄積した乳酸の一部はグリコーゲンに再合成される<sup>1)</sup>こと, また運動後の過剰な酸素摂取はアラニン代謝を介した糖新生に関与すること<sup>13)</sup>という報告からも, 本研究ではグリコーゲンやグルコースをエネルギー源とする解糖系エネルギー供給が2回目の運動では十分でなかったものと推察される.

1分間の高強度運動中の酸素摂取量の経時的変化は T1・T2 で有意な差は認められなかった. Vanhatalo et al.<sup>17,18)</sup>は, 運動反復時の酸素摂取量は, 事前の運動によるクレアチンリン酸 (PCr) の減少が影響する可能性を示唆している. Bogdanis et al.<sup>7)</sup>は, PCr の再合成に関して, 30秒間の Wingate test 後の PCr は6分間でおよそ90%にまで回復すること, Forbes et al.<sup>10)</sup>は, 激運動によって減少した PCr は15分の休息によって安静時の水準まで回復することを報告している. また, Vanhatalo et al.<sup>18)</sup>は, 30秒の Wingate test 後に15分の休息をはさむと, その後の運動における酸素摂取量の立ち上がりに差が生じなかったことを報告している. したがって, 本研究では30分の休息で PCr は十分に回復しており, 運動時酸素摂取量は違いが生じなかったものと推察される.  $VO_2$  peak においても, 疲労困憊に至る運動を繰り返しても最大酸素摂取量に変化は見られないという Stanford et al. の研究<sup>15)</sup>と一致

した。また Bhambhani et al.<sup>6)</sup> や Vanhatalo A. et al.<sup>17, 18)</sup> は、60秒間の Wingate test 中の最高酸素摂取量は、漸増負荷試験によって測定した最大酸素摂取量と同程度であったと述べており、本研究とこれらの研究では運動様式が異なるものの、最大努力を発揮するという点では一致し、T1・T2の運動においても、有酸素的エネルギー供給は個人の最大値近くに達していたものと推察される。このことから、1分間程度で疲労困憊に至る高強度運動を2回反復した場合、有酸素的エネルギー供給はいずれも同様になされるものと考えられる。

本研究では、T2では有酸素性エネルギー供給能はT1と差が見られなかったが、酸素負債量が減少傾向を示し無酸素性エネルギー供給能の低下が考えられたが、パフォーマンスにはT1と差は認められなかった。本研究ではこの違いを明らかにすることは出来なかったが、ひとつの要因として、Bangsbo et al.<sup>2)</sup> と Layce te al.<sup>12)</sup> は、運動反復時には筋中の酸素含量が増加し、有酸素系におけるATPの生成効率が向上すると報告していることから、T1運動による刺激が有酸素的エネルギー効率や筋の酸素利用系が改善し、T1と同程度のパフォーマンスを発揮できたものと推察される。

以上、6名の大学陸上競技選手が被験者として、1分間の高強度運動を、30分の休息をはさんで、反復した時のパフォーマンスに及ぼす影響を、呼気ガス分析から検討した。その結果、2回の高強度運動の持続時間は同様な値を示した。運動時の心拍数・酸素摂取量・最高血中乳酸濃度には有意な違いは認められなかったが、2回目の運動前の酸素摂取量、心拍数、血中乳酸濃度は1回目より有意に高い値を示した。酸素負債量は1回目より有意ではないが低い値を示した。

以上の結果から、1分間の高強度運動を30分の休息をはさんで2回繰り返した場合、2回目の運動では、1回目に比べて無酸素的エネルギー供給は減少傾向にあるが、有酸素的エネルギー供給がより効率的に働くことにより、パフォーマンスに差が認められなくなるものと考えられる。

本研究の限界と課題として、まず被験者数が少ないことがあげられる。他に、本研究の運動は1分程度で疲労困憊に至る高強度運動であり、その運動時身体エネルギー供給能を無酸素性能力としては酸素負債量を、有酸素性能力としてはピーク酸素摂取量を用いたが、ATP-PCr系エネルギー供給能動態を知る必要があったと考えられる。また高強度反復運動においては運動前の高強度W-upがその後の運動序盤パフォーマンスに影響する可能性があることか

ら<sup>4)</sup>、両運動前のW-upをしっかりとコントロールする必要があった。

本研究を踏まえたスポーツ現場への提言として、次の2点を提言する。高強度運動において休息時間が短い場合は、極力安静を保ち無酸素性能力の回復を図ることが重要である。一方、休息時間が比較的長く最初から最大努力が求められる高強度運動の場合は、反復運動の前にW-upとして数秒程度の最大努力運動を数回行い、筋のrecruitmentとpotentiationを刺激し、運動序盤の発揮パワーを高めること重要であろう<sup>9, 14)</sup>。本研究では運動開始から一定強度の高強度運動を行わせた。しかし、陸上競技の400mのような運動ではペース配分等レース戦略が存在する。この点について本研究では考慮することができなかった。また、球技など間欠的な運動には本研究の結果をそのまま適用することはできないと考える。

## 文 献

- 1) Bangsbo J., Gollnick P. D., et al: Substrates for muscle glycogen synthesis in recovery from intense exercise in man. *Journal of Physiology* 434:423-440, 1991
- 2) Bangsbo J., Krstrup P., Gonzalez-Alonso J., et al: ATP production and efficiency of human skeletal muscle during intense exercise: effect of previous exercise and Metabolism. *American Journal of Physiology-Endocrinology* 280:956-964, 2001
- 3) Bar-Or, O: The Wingate anaerobic test: An update on methodology, reliability and validity. *Sports Medicine*. 4: 381-394., 1987
- 4) Baudry S. and Duchateau J.: Postactivation potentiation in a human muscle: effect on the rate of torque development of tetanic and voluntary isometric contraction. *Journal of Applied Physiology* 102:1394-1401, 2007
- 5) Bhambhani Y., Maikala R., Esmail S.: Oxygenation trends in vastus lateralis muscle during incremental and intense anaerobic cycle exercise in young men and women. *European Journal of Applied Physiology* 84:547-556, 2001
- 6) Bhambhani Y. N., Kennedy M. D., Maikala R. V.: Cardiorespiratory and vastus lateralis oxygenation-blood volume responses during incremental and modified Wingate test. *International Journal of Industrial Ergonomics* 40:197-205, 2010
- 7) Bogdanis G. C., Nevill M. E., Boodis L. H., et al: Recovery of power output and muscle metabolites following 30s of maximal sprint cycling in man. *Journal of Physiology* 482(2):467-480, 1995

- 8) Bogdanis G. C., Nevill M. E., Boodis L. H., et al: Effects of active recovery on power output during repeated maximal sprint cycling. *European Journal of Applied Physiology* 74:461-469, 1996
- 9) Daniel L.: Postactivation potentiation: an introduction. *Int J Sports Phys Ther.* 6(3): 234-240, 2011
- 10) Forbes S. C., Raymer G. H., Kowalchuk J. M., et al: Effects of recovery time on phosphocreatine kinetics during repeated bouts of heavy-intensity exercise. *European Journal of Applied Physiology* 103:665-675, 2008
- 11) Jones A. M., Berger J. A. N., Wilkerson D. P., et al: Effects of "priming" exercise on pulmonary O<sub>2</sub> uptake and muscle deoxygenation kinetics during heavy-intensity cycle exercise in the supine and upright position. *Journal of Applied Physiology* 101:1432-1441, 2006
- 12) Layec G., Bringard A., Fur Y. L., et al: Effects of a prior high-intensity knee-extension exercise on muscle recruitment and energy cost: a combined local and global investigation in humans. *Experimental Physiology* 94(6):704-719, 2009
- 13) 大島秀武, 田中繁宏, 宮本忠吉 他: 最大運動負荷後の酸素摂取量の回復動態と血中乳酸, グルコースおよびアラニンの関係. *体力科学* 46:479-488, 1997
- 14) Robbins D.W.: Postactivation potentiation and its practical applicability: a brief review. *J Strength Cond Res.* 19: 453-458, 2005
- 15) Stanford B. A., Rowland R., Moffatt R. J.: Effects of severe prior exercise on assessment of maximal oxygen uptake. *Journal of Applied Physiology* 44(4):559-563, 1978
- 16) 高島直之, 平川和文: 1分間の高強度激運動による疲労からの運動パフォーマンスおよび生理学的パラメーターの回復. *京都学園大学健康医療学部紀要* 1:39-45, 2016
- 17) Vanhatalo A. and Jones A. M.: Influence of prior sprint exercise on the parameters of the 'all-out critical power test' in men. *Experimental Physiology* 94(2):255-263, 2008
- 18) Vanhatalo A., Poole D. C., Dimenna F. J., et al: Muscle fiber recruitment and the slow component of O<sub>2</sub> uptake: constant work rate vs. all-out sprint exercise. *American Journal of Physiology* 15:700-707, 2011
- 19) 山本正嘉: 全力ベダリング持続時の発揮パワー特性による非乳酸性, 乳酸性, および有酸素性能力の同時評価テストの開発-テストの妥当性についての検討-, *国際武道大学研究紀要* 1: 87-96, 1985