

オランダ王国における水泳研究事情

伊藤 雅浩 (Masahiro Itoh) 熊本大学医療技術短期大学部

【要旨】

私は平成6年度、および平成9年度の計1年5ヶ月間、オランダ王国へ留学する機会を得た。研修先であったフライエ大学では、推進効率や機械的効率の算出を試みるバイオメカニクス的な研究を主体とし、水泳運動におけるエネルギー産生のモデル化を探究した。その測定による水泳運動の解析は4泳法にまで及んでいないものの、選手の生理的能力および身体的特徴から競技記録の正確な評価、および将来性の予測が可能な方程式の完成に近づいている。これらの成果は、競技力向上に寄与するスポーツの科学的研究としての役割を十分果たす内容である。本報告では、現在のオランダ王国の水泳研究事情を簡単にまとめてみた。

◆キーワード：水抵抗、推進効率、エネルギー産生、定量化

1.はじめに

オランダ王国の首都アムステルダムにあるVrije Universiteit (フライエ大学；以下「VU」と略す)にて研修を行った。VUには、Faculty of Human Movement Science (ヒトの動きを科学的に分析研究する学部)があり、私はA.Peter Hollander博士のもと、水泳の研究に携わった。彼らの名を世に知ら

しめたのは、世界的にユニークで画期的な装置である“MAD system (以下「MAD」と略す)”を用いた研究成果であろう⁹⁾。MADとは、クロールストロークで泳いでいる間のプッシュオフの力を直接測定し、被験者の水抵抗 (active drag force) と泳速度の関係式を算出する装置である。図1はそのプッシュオフの力を測定するパッドを、図2はその測定模様を示す。また、VUは長野オリンピック大会のスピードスケート競技にて世界記録更新に多大な貢献

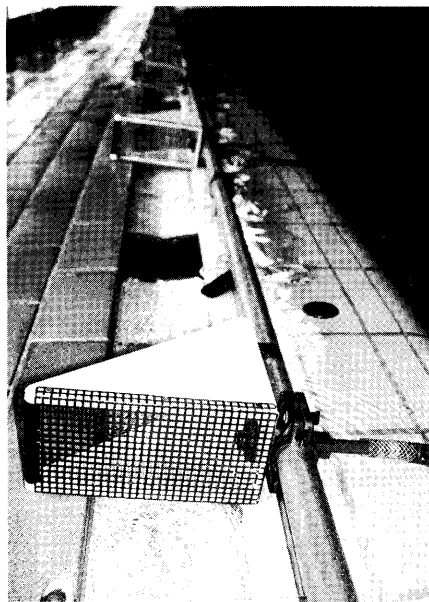


図1 MAD system。クロールストロークのプッシュオフの力が加えられるパッドは1.35m間隔で装着されている。測定時はこのパッドを水深0.8mの位置に固定する。



図2 MAD systemを利用した水抵抗測定。被験者はパッドを推して前方に進む。

をしたスラップスケートを長年、研究開発している大学としてもその名を世界に馳せている。VUにおける水泳運動に関する研究成果を次に説明する。ただし、未発表の内容もあり、それらについては明言を避け、言葉を濁している。この点はご了承願いたい。

2. これまでの知見

有酸素性および無酸素性エネルギーの供給機構と運動継続時間との因果関係については、Ward-Smith¹⁸⁾がランニング中のエネルギー産生をモデル化したように、数多くの身体活動で報告されている^{7,8,10)}。一方、水泳運動におけるモデル化はToussaint and Hollander¹⁹⁾によって検討された。その測定では、3次元的な映像解析や酸素摂取量の採取等による方法がとられている。Hollander博士の研究室では、後者の手段を主に用い、そのモデル化を図っている。これまでオランダ王国の研究者が明らかにしてきた事実をまじえ、水泳運動の定量分析法を以下に著した。

1) 力学的パワー測定によるエネルギー産生のモデル化 (A; 比例定数, V; 泳速度, m sec⁻¹)

水抵抗 (Fd; newton, 以下「Fd」と略す) は泳速度の2乗に比例する。

$$Fd = A \cdot V^2 \quad (\text{式1})$$

水抵抗と泳距離 (d; m) の積が推進するための仕事 (Wd; joule, 以下「Wd」と略す) となる。

$$Wd = Fd \cdot d = A \cdot V^2 \cdot d \quad (\text{式2})$$

水抵抗と泳速度の積が推進するための仕事率

(Pd; watt, 以下「Pd」と略す) となる。

$$Pd = Fd \cdot V = A \cdot V^3 \quad (\text{式3})$$

多くの研究者がこれらを証明している^{5,9)}。また、Toussaint and Beek¹⁴⁾は身長と体重から個々人の比例定数 (A) を求める簡便な計算式を提言し、Fd, Pdを算出している。MADを利用した研究では、より精巧な方程式を導くために、先ずそれぞれの数値のより正確な測定から始まる。図3に低泳速度から高泳速度まで、MADを用いて泳いだ場合のFdと泳速度の関係を示す。

2) 生理学的パワー測定によるエネルギー産生のモデル化

水泳運動ではPdと同時に、無駄な力、いわゆる水に奪われる仕事率 (Pk; watt, 以下「Pk」と略す) が必要であり、その両者の和が実際に発揮される機械の仕事率 (Po; watt, 以下「Po」と略す) と考えられる。ある泳速度での運動強度が有酸素性機構のみにてエネルギーを供給する水泳運動であれば、酸素摂取量の採取によってPoが算出される⁹⁾。

$$Po = Pd + Pk \quad (\text{式4})$$

これまでPkを正確に測定することは非常に困難であったが、MADの開発がその問題点を解決した。つまり、MADでの水泳は“Po=Pd”であるため、通常の水泳運動との差異がPkとなる。Pkが定量化されたことによって、推進効率 (ep; %) という新しい概念が考案された。これはPoに対するPdの割合を示す指標である¹²⁾。Toussaint et al.¹²⁾の研究では、競泳選手はトライアスリートよ

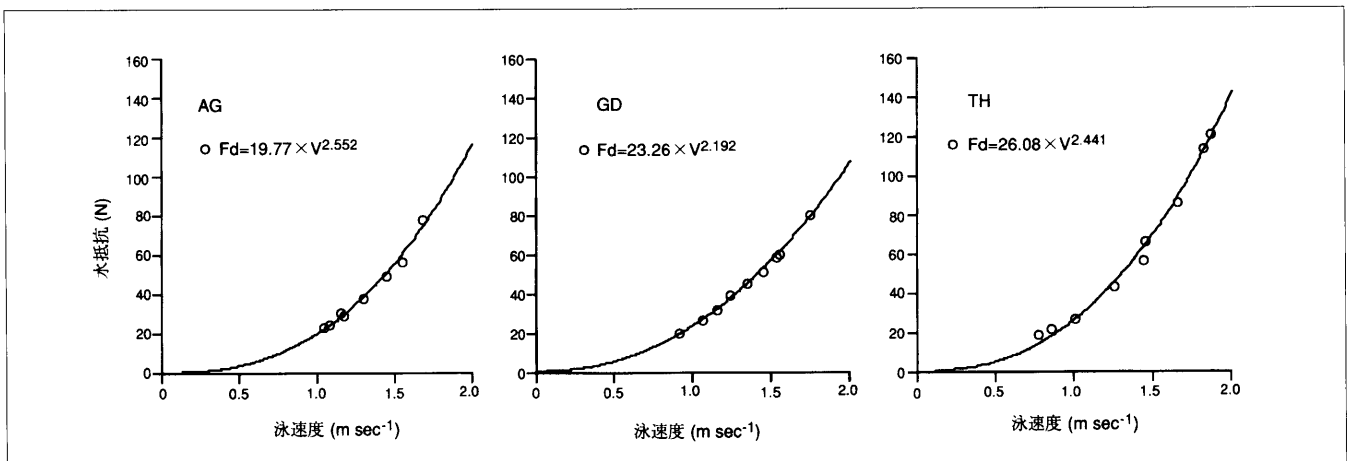


図3 各被験者における水抵抗と泳速度間関係

りも有意に推進効率が高いことを見出し、推進効率と競技力との深い関連性を提唱した。

$$ep = \frac{Pd}{Po} = \frac{Pd}{Pd+Pk} \quad (\text{式5})$$

また、ヒトは身体運動を行う際の筋活動によって熱エネルギーを発生する。この熱エネルギーを含めた仕事率 (\dot{E} ; watt, 以下「 \dot{E} 」と略す) に対する Po の割合は機械的効率 (eg ; %) と定義されており、推進効率とは異なる指標である。これまで、機械的効率では競技力や性差による有意な差を認めず、水泳技能を評価する値にはならないと報告されている^{3,13)}。

$$eg = \frac{Po}{\dot{E}} \quad \dot{E} = \frac{Po}{eg} \quad (\text{式6})$$

式3、5、6から、水泳運動で発揮された \dot{E} が算出される。

$$\dot{E} = \frac{Pd}{eg \cdot ep} = \frac{A \cdot V^3}{eg \cdot ep} \quad (\text{式7})$$

式7を仕事 (E ; joule, 以下「 E 」と略す) に変換する。つまり式7を積分すると運動継続時間内に遊離されたエネルギー産生が算出できる。

$$E = \frac{A \cdot V^2 \cdot d}{eg \cdot ep} = \frac{A \cdot d^3}{t^2 \cdot eg \cdot ep} \quad (\text{式8})$$

3) エネルギー遊離曲線を関数として捉えてのモデル化

筋では、ATP-PCr系、解糖系、酸化系のそれぞれの供給機構からエネルギーが産生され、その合計が運動中に発揮された \dot{E} となる¹¹⁾。この \dot{E} は無酸素性と有酸素性機構に分けられ、それぞれ指数

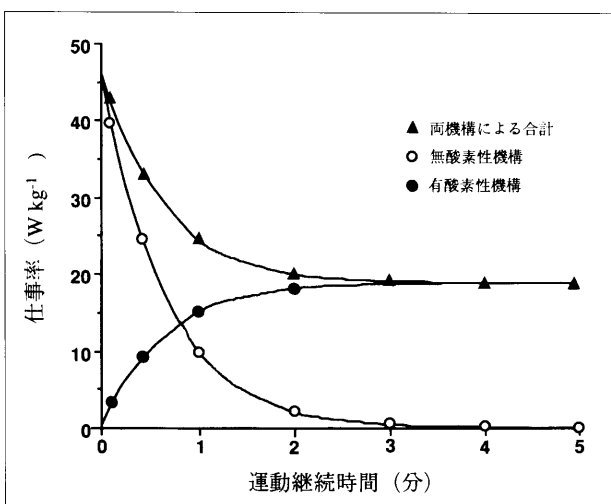


図4 運動時間の経過に伴う仕事率の変化

関数的に増減する (図4)。換言すれば、両機構から遊離されるエネルギーの最大値 (Pan,max ; watt, 最大無酸素性仕事率, $Paer,max$; watt, 最大有酸素性仕事率)、時間経過に伴う無酸素性仕事率の減少度あるいは有酸素性仕事率の増加度を規定する時定数 (λ ; 時定数)、関連因子を測定することで、両機構によるエネルギー産生の定量化が可能と考えられる。また、時定数は両機構でほぼ同じ値であると報告されている¹⁸⁾。 (Pan ; watt, 無酸素性機構による仕事率, $Paer$; watt, 有酸素性機構による仕事率, τ ; sec, 仕事時間, e ; 自然対数の底)

$$Pan = Pan,max e^{-\lambda\tau} \quad (\text{式9})$$

$$Paer = Paer,max(1 - e^{-\lambda\tau}) \quad (\text{式10})$$

これを E に変換、つまりこの関数をそれぞれ積分 (競技記録を τ に代入、つまり0から τ まで) すれば、式8と同様に運動を継続した時間内に遊離されたエネルギー産生が算出できる (Ean ; joule, 無酸素性機構による仕事, $Eaer$; joule, 有酸素性機構による仕事)。

$$Ean = \int_0^{\tau} Pan,max e^{-\lambda t} dt = \frac{Pan,max}{\lambda} (1 - e^{-\lambda\tau}) \quad (\text{式11})$$

$$Eaer = \int_0^{\tau} Paer,max(1 - e^{-\lambda t}) dt = Paer,max\tau + \frac{Paer,max}{\lambda} (e^{-\lambda\tau} - 1) \quad (\text{式12})$$

式8、11、12から、水泳運動中のエネルギー産生の定量化、およびモデル化ができる。従って、次の方程式が理論的には成り立つ。

$$\frac{A \cdot d^3}{t^2 \cdot eg \cdot ep} = \frac{Pan,max}{\lambda} (1 - e^{-\lambda\tau}) + Paer,max\tau + \frac{Paer,max}{\lambda} (e^{-\lambda\tau} - 1) \quad (\text{式13})$$

上記の理論に基づき、力学的また生理学的な関連因子の測定から選手のパフォーマンス、つまり競技記録の予測の妥当性が検討された¹¹⁾。その研究によると、実測記録と予測記録間の関係では、相関係数 r が50 m自由形で0.94、100 m自由形で0.91となり、両者間に高い相関を認めた。また、競技記録の向上には、無酸素性や有酸素性機構にて遊離されるエネルギー産生がトレーニングによ

って増大されるよりも、推進効率の向上がパフォーマンスの向上に遥かに貢献することを定量的に立証した¹⁵⁾。従って、選手の生理的能力、身体的特徴の測定は、現在の競技力を正確に評価するばかりでなく、将来の競技力の可能性（泳速度、記録）を客観的に概算できるものと考えられる。

$$V = \sqrt[3]{\frac{eg \cdot ep \cdot E}{A}} \quad (\text{式 14})$$

3. エネルギー産生の完全なモデル化を目指して

しかしながら、MADでは下肢による推進力を省いて計算し、加えて泳速度増加に伴う推進効率の変化については未だ不明な点も残されている。MADでは、水泳運動のエネルギー産生を完全にモデル化できていない可能性も否めないのである。そこで私の研修では、それを検証する実験を行い、水泳運動中のエネルギー産生の更なる定量化を試みた。その測定では、ヒトの水泳運動のエネルギー産生が無酸素性および有酸素性機構の両過程から獲得されている強度、つまり高泳速度中における推進効率と機械的効率の変化を調べた。その結果は、Cappaert et al.²⁾やBergar et al.¹⁾の報告と同様に、無酸素性機構から遊離されるエネルギーの増加に伴い推進効率の低下が観察された。これは機械的効率同様に推進効率にも至適速度が存在する可能性を示唆しているのかもしれない。しかしながら、一方で無酸素性機構の貢献が開始されても推進効率が向上した被験者も散見され、これは魚を調査した研究結果¹⁹⁾に類似する傾向であった。Triantafyllou and Triantafyllou¹⁷⁾が魚のロボットを用いた研究で、うず（vortices）が推進効率の向上に関与することを示唆しており、Strouhal numberを如何ようにヒトに適用させるかが今後の研究課題の1つかもしいない。以上の結果は、水泳運動の競技力向上の可能性、術、また指針を提起できる内容と考えられる。

4. おわりに

VUでは、様々な運動種目におけるエネルギー産生のモデル化を試みる実験が盛んで、水泳運動も然りである。現在のところ、それらは水泳運動におけ

るエネルギー産生のモデル化を目指した方程式の完成にまで至っていない可能性もあるが、現在までの研究結果は競技力向上に必要な情報をトレーニング現場に十分提供している。また、トレーニング現場のコーチもその内容に興味を抱いている。

本稿を終えるにあたり、私の理解が不十分な箇所も散見されると思われる。不得要領な点は、是非ご指摘、ご批判頂きたい。最後に、この分野における研究が今後も一層推し進められると同時に、各種競技会におけるオランダ人選手の尚一層の活躍にも期待し、筆をおくこととする。

【参考文献】

- 1) Bergar, M., Itoh, M. and Hollander, A.P. (1997) Propelling efficiency and swimming velocity. Proceedings of the XIIth FINA World Congress on Sports Medicine. Goteborg, Sweden, April: 12-15.
- 2) Cappaert, J.M., Bone, M. and Troup, J.P. (1992) Intensity and performance related differences in propelling and mechanical efficiencies. In D.MacLaren et al.(eds.), Biomechanics and medicine in swimming, Swimming Science VI, London: 49-52.
- 3) Charbonnie, J.P., Lacour, J.R., Riffat, J. and Flandrois, R. (1975) Experimental study of the performance of competition swimmers. Eur.J.Appl.Physiol. 34: 157-167.
- 4) Garby, L. and Astrup, A. (1987) The relationship between the respiratory quotient and the energy equivalent of oxygen during simultaneous glucose and lipid oxidation and lipogenesis. Acta Physiol.Scand. 129: 443-444.
- 5) Holmer, I. (1975) Efficiency of breaststroke and freestyle swimming. In:Clarys, J.P., Lewillie, L. editors. Swimming, II. Baltimore, University Park Press: 130-136.
- 6) Hollander, A.P., Groot, G.de, Ingen Schennau, G.J.van, Toussaint, H.M., Best, H.de, Peeters, W., Meulemans, A. and Schreurs, A.W. (1986) Measurement of active drag during crawl arm stroke swimming. J.Sport Sci. 4: 21-30.
- 7) Koning, J.J.de, Groot, G.de and Ingen Schenau, G.J.van (1992) A power equation for the sprint in speed skating. J.Biomechanics 25: 573-580.
- 8) Peronnet, F., Thibault, G. (1989) Mathematical analysis of running performance and world running records. J.Appl.Physiol. 67: 453-465.
- 9) Prampero, P.di, Pendergast, D.R., Wilson, D.W. and Rennie, D.W. (1974) Energetics of swimming in man. J.Appl.Physiol. 37: 1-5.
- 10) Prampero, P.E.di (1986) The energy of human locomotion on land and in water. Int.J.Sports Med. 7: 55-72.
- 11) Serresse, O., Lortie, G., Bouchard, C., and Boulay, M.R. (1988) Estimation of the contribution of the various energy system during maximal work of short duration. Int.J.Sports

- Med. 9, 456-460.
- 12) Toussaint, H.M., Beelen, A., Rodenburg, A., Sargeant, A.J., Groot, G.de, Hollander, A.P. and Ingen Schenau, G.J.van (1988) Propelling efficiency of front crawl swimming. *J.Appl.Physiol.* 65: 2506-2512.
 - 13) Toussaint, H.M., Knops, W., Groot, G.de. and Hollander, A.P. (1990) The mechanical efficiency of front crawl swimming. *Med.Sci.Sports Exerc.* 22: 402-408.
 - 14) Toussaint, H.M. and Beek, P.J. (1992) Biomechanics of competitive front crawl swimming. *Sports Med.* 13: 8-24.
 - 15) Toussaint, H.M. and Hollander, A.P. (1994) Mechanics and energetics of front crawl swimming. *Biomechanics of Swimming* 39, 107-116.
 - 16) Toussaint, M.H. and Hollander, A.P. (1994) Energetics of competitive swimming. -Implications for training programmes-. *Sport Med.* 18: 384-405.
 - 17) Triantafyllou, M.S. and Triantafyllou, G.S. (1995) An efficient swimming machine. *Scientific American March*: 40-48.
 - 18) Ward-Smith, A.J. (1985) A mathematical theory of running, based on the first law of thermodynamics, and its application to the performance of world-class athletes. *J.Biomechanics* 18: 337-349.
 - 19) Webb, P.W. (1971) The swimming energetics of trout 2. Oxygen consumption and swimming efficiency. *J. Experiment Biology* 55: 521-540.