

無線搬送方式によるエネルギー代謝測定システムの開発

	名古屋大学	宮村実晴
(共同研究者)	同	池上康男
	同	蛭田秀一
	名古屋聖霊短期大学	池上久子

Development of Telemetry System for Measuring Energy Metabolism

by

Miharu Miyamura, Yasuo Ikegami and Shuichi Hiruta

Nagoya University

Hisako Ikegami

Nagoya Holy Spirit Junior College

ABSTRACT

A new system for continuous measurement of oxygen uptake by means of telemeter was developed. Oxygen uptake and pulmonary ventilation during rest and exercise was determined using portable oxygen consumption meter (Oxylog, Morgan, England).

The subject wears a face mask, with inspiratory and expiratory valves, to which is attached a turbine type flow meter to measure inspiratory volume. The oxygen difference between the inspired and expired air was measured by two oxygen electrodes in instrument. From the flow and oxygen difference thus obtained, volume of oxygen extracted from air was calculated by microcomputer.

An analog signals from the oxylog were transferred to interface in order to digitize using a A—D converter. A FM type telemeter system (model 271, NEC Sanei, Japan) with 76.47 MHz was used to transmit the digital signal.

The signal from receiver was demodulated and the data of oxygen uptake and pulmonary ventilation were printed out by the printer. Oxygen uptake during sports activities were determined continuously by

the telemetry system developed in this study.

It was found that peak values of energy expenditure during tennis and badminton games were 0.172 and 0.120 kcal/kg/min, respectively.

要 旨

新しい酸素摂取量無線連続測定システムの開発を試みた。酸素摂取量と換気量の測定には携帯用酸素摂取量計(オキシログ, モーガン社製, 英国)を用いた。吸気と呼気の酸素較差はオキシログ内の2つの酸素電極で, 吸気流量は被検者に装着した呼吸マスクに取り付けた turbine 型流量計によって測定した。

こうして得られたガス流量と酸素較差をもとにオキシログ内のマイクロコンピュータにより酸素摂取量を算出した。酸素摂取量と換気量のアナログ信号はオキシログに内蔵したA-D変換器に送り, デジタル信号に変換した。デジタル信号の搬送には, 76.47 MHzのFM方式無線システム(モデル271, NEC 三栄社製, 日本)を用いた。送られた信号を受信機で検出した後, 酸素摂取量と換気量のデータをプリンターに打出させた。この無線システムを用いてスポーツ活動中の酸素摂取量を連続的に測定した結果, テニスおよびバドミントンのゲーム中のエネルギー消費量のピーク値はそれぞれ 0.172, 0.120 kcal/kg/min であった。

結 言

身体運動時における酸素摂取量を測定することは, エネルギー代謝ばかりでなく, 機械的効率や熱の産生量も知ることができる。また一定時間内の酸素の最大摂取能力(最大酸素摂取量: $\dot{V}O_2$ max) は, ヒトの有酸素的作業能力(全身持久性能力あるいは狭義の体力)の最もよい指標として国際的にも広く用いられ, 近年では患者の運動処方やリハビリテーションにおいても酸素摂取量を含めた呼吸循環機能の測定が行われるようになってきた。

てきた。

これまで酸素摂取量の測定には, ダグラスバッグ法が用いられてきた。この方法は原理的にも正しく, 得られた値も信頼できるものである。しかし, この方法では呼気ガスをいったんダグラスバッグに採集し, 呼気ガス量の測定と呼気ガス中の酸素(O_2)と炭酸ガス(CO_2)濃度の分析をしなければならないため, 結果が得られるまでにかかなりの時間を要し, とくに長時間の測定ともなると大変な手数と労力が必要となる。我々はこれらの問題点を克服するため, 呼気ガスのガス流量とガス濃度を電氣的に測定し, ミニコンピュータにより運動中の O_2 摂取量を連続的に測定することができるオンラインシステムを開発してきた^{1,2)}。このオンラインシステムを用いての測定はトレッドミルや自転車エルゴメータを用いるといった特定条件下の運動中の O_2 摂取量の測定には極めて便利であるが, これらの条件外の実際の作業やスポーツ活動に対してはこれを適用することはできない。

一般にスポーツの運動強度はエネルギー代謝率(Relative metabolic rate; RMR)や, 測定した O_2 摂取量の最大 O_2 摂取量に対する百分率($\% \dot{V}O_{2max}$)で表わされている。これまで報告されてきたテニス^{3,4)}, ゴルフ⁵⁾, ダンス⁶⁾, バドミントン^{7,8)}, 乗馬⁹⁾, 鉄棒¹⁰⁾といったスポーツ種目やその部分的動作¹¹⁾のエネルギー消費量(またはRMR)は, すべてダグラス・バッグ法によって求められたものである。この場合にはその運動の平均エネルギー消費量を求めることはできるが, 運動を中断することなく, 時々刻々と変化する運動中のエネルギー代謝を長時間にわたって測定することはできない。

本研究では、高精度の O_2 電極とガス流量計から成る携帯用 O_2 摂取量計を利用し、ダグラスバッグ法では不可能であった各種スポーツ活動中の O_2 摂取量（エネルギー代謝量）を連続的かつ遠隔測定できるシステムを開発することを試みるとともに、その実用性について検討しようとした。

1. システムの概要

今回我々が開発したシステムは、携帯用 O_2 摂取量計からの毎分換気量および毎分 O_2 摂取量を伝送し、受信側でデジタル表示およびプリントアウトすることができるものであり、その構成は

- 1) O_2 摂取量測定部
 - 2) O_2 摂取量測定部とデータ送信部とのインターフェース
 - 3) データ送信部と受信部
 - 4) データ処理部に大別される
- 1) O_2 摂取量および換気量測定部

O_2 摂取量と換気量の測定は、英国 モーガン社製の携帯用 O_2 摂取量計（オキシログ、S型）を



写真1 携帯用酸素摂取量計（オキシログ）の概観

用いた（写真1）。このオキシログはガスサンプリングポンプ、 O_2 電極、マイクロコンピュータおよび充電可能な電源を内蔵し、長時間の測定が可能となっている。すなわち、換気量は呼吸マスクの吸気側に取り付けたガス流量計の羽根の回転をフォトセルでとらえることにより測定し、吸気および呼気の O_2 濃度は、2組の O_2 電極によって分析することができる。

そしてマイクロコンピュータによって毎分換気量および O_2 摂取量を求め、それをデジタル表示することができることから、測定値を目視できるようにもなっている。さらに頑丈なシャーシで組み立てられているが、携帯用としては小型（ $18.5 \times 8.2 \times 21.5\text{cm}$ ）、軽量（約2.5kg）である。

- 2) O_2 摂取量測定部とデータ送信部のインターフェース

インターフェースは、オキシログで測定された O_2 摂取量および換気量のデジタル化とデジタル化されたパルスの直列パルスへの変換、さらにこれを周波数変調して送信部に送る働きをする。

実際の測定に際して、被検者の動きをできるだけ制限しないように、装置全体を小型、軽量化することが望ましいことはいうまでもない。ここではインターフェース部をオキシログ内の空きスペースに実装し、インターフェースの電源もオキシログの電源と共用させることにより、小型、軽量化を計った。なお電源の共用化に伴う消費電力の増加分は、およそ20%以下であった。

O_2 摂取量の測定値を伝送するために、オキシログから出力されているアナログ信号を用いた。

すなわち、インターフェース内でA-D変換回路でデジタル化し、オキシログより出力されている1分のクロックパルスによりラッチ回路を用いて1分値をホールドし、その値を伝送した。また換気量の伝送は、オキシログより出力されるパルスを直接用いることとした。つまり、このパルスは換気量1Lにつき1パルスとなっており、これ

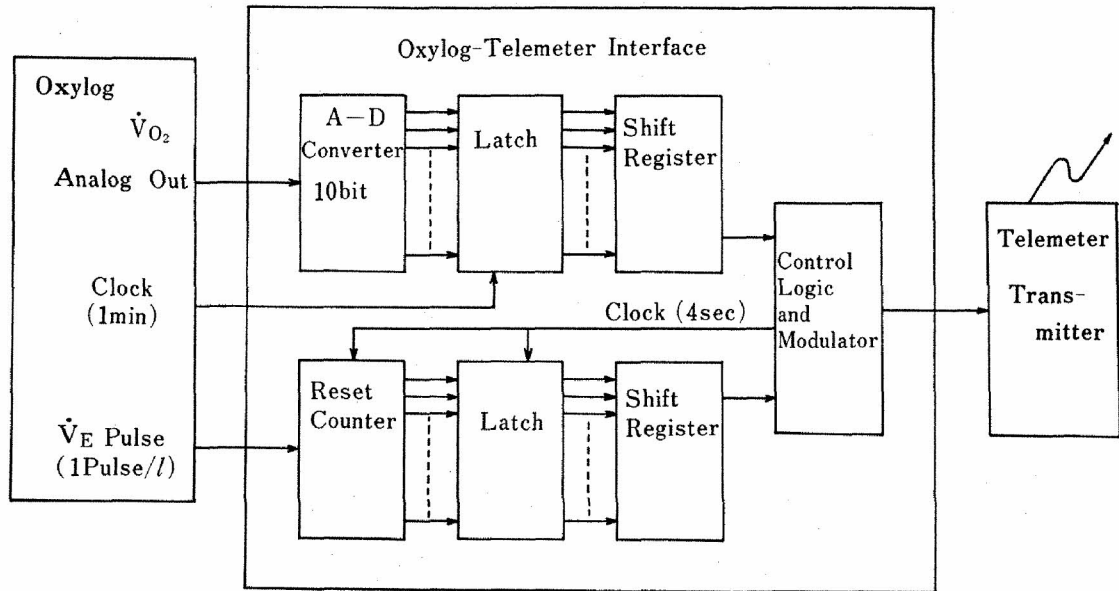


図1 データ伝送のブロックダイアグラム

をインターフェース部でカウントし、そのカウントの結果を伝送した。

本システムでは、データの送信間隔は4秒毎および1分毎の両方を選択できるようにした。4秒毎の送信では、 O_2 摂取量の値は直前の1分値を、換気量はその4秒間の換気量を伝送するようにした(図1)。このように4秒毎に送信するようにした理由は、電波障害などにより伝送路系が不安定になった場合でも、可能なかぎり正しい O_2 摂取量の値が得られるようにするためである。

伝送方式はパルス周波数変調方式とした。この方式は、デジタル信号(基本的には2進数)を2つの周波数の信号に対応させて伝送するもので、2つの周波数は326 Hzと239 Hzを用いた。インターフェース部では、 O_2 摂取量および換気量に対応したデジタル信号をシフトレジスタを用いてシリアルパルスに変換しさらにモデレータにより周波数変調し、変調された信号をデータ送信部に送るようにした。

3) データ送信部とデータ受信部

データ送信部とデータ受信部は、市販の生体信号用テレメータである日本電気三菱社製の多用途テレメータシステム (Model 271型) を用いた。

このテレメータシステムは、心電図、筋電図、脳波などの生体信号を4チャンネル同時に無線搬送することが可能なことから、インターフェースから送られてきた O_2 摂取量および換気量の信号ばかりでなく、心電図や筋電図も同時に搬送することができる。

搬送方式はFM方式で、搬送周波数は76.47 MHzであった。受信部では、受信された搬送波から4チャンネル分の信号が分離され、インターフェースからの信号はデータ処理部へ送るようにした。

4) データ処理部

データ処理部では、テレメータ受信機から送られた信号を復調し、シリアルパルスとしてマイクロコンピュータに入力することにより O_2 摂取量および換気量の値を表示したり、プリンターに出力するようにした(図2)。またデータ処理部では、電波障害などの伝送路上の障害によるデータの誤りなどのチェックが行えるようにした。

2. システムの性能

本システム性能は主に1) 換気量と O_2 摂取量の測定精度と

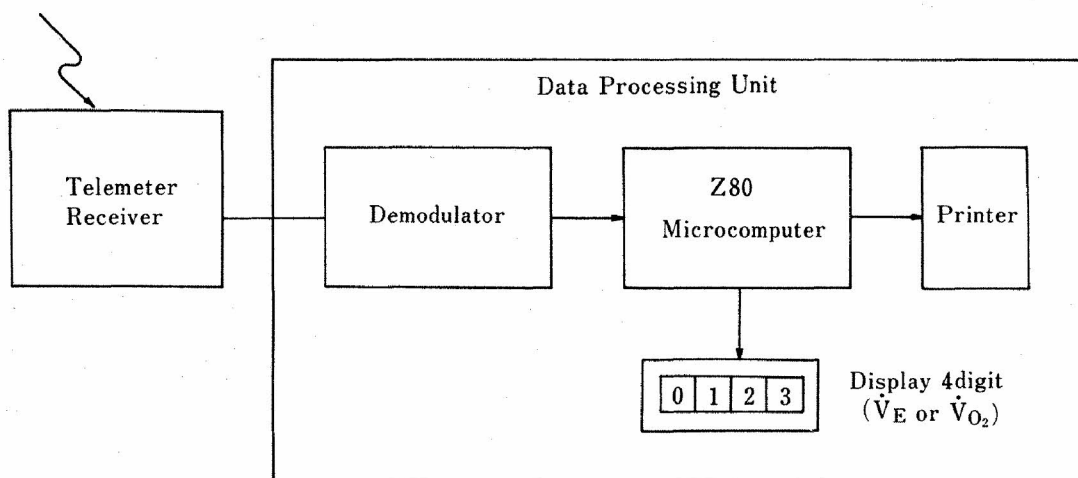


図2 データ処理のブロックダイアグラム

2) 測定可能な距離によって影響されることから、実際のスポーツ活動の測定に適用する前に上記の2点について検討した。

1) 換気量および O_2 摂取量の測定精度

本システムでは換気量と O_2 摂取量の測定結果はデジタル伝送方式で伝送したため、伝送中に測定精度が落ちることはない。したがって、測定精度はオキシログの性能そのものが反映されることになることから、使用したオキシログの精度をチェックするためにダグラスバッグ法との比較を行った。

まずオキシログの底部にある排気口に蛇管を取り付け、三方活栓を介してダグラスバッグに呼気ガスを採集できるようにした。健康な成人男子1名と女子1名を対象に、安静時と自転車エルゴメータ運動中の換気量と O_2 摂取量をオキシログとダグラスバッグ法を用いて同時測定を行った。ダグラスバッグに採集した呼気ガス量は、湿式ガスメータにより測定し、呼気ガス中の O_2 および CO_2 濃度はモーガン社(英国)の O_2 分析装置とゴダルト社(オランダ)の赤外線 CO_2 分析器を用いて分析した。なお測定時の気圧、気温、湿度からオキシログによる結果もダグラスバッグによる結果も、すべて酸素摂取量は STPD (Standard Temperature Pressure, Dry) に、換気量は BTPS

(Body Temperature, Pressure, Saturated with Water Vapor) に換算した。

図3と図4はオキシログとダグラスバッグ法を用いて測定した毎分換気量と毎分 O_2 摂取量の結果を示したものである。

図3で示すように換気量は毎分80 L程度までは両者の測定値はよく一致した。しかしながら、酸素摂取量においては、毎分 2 l 以下ではオキシログとダグラスバッグで得られた値はよく一致したが、2 l 以上になるところではオキシログで測定

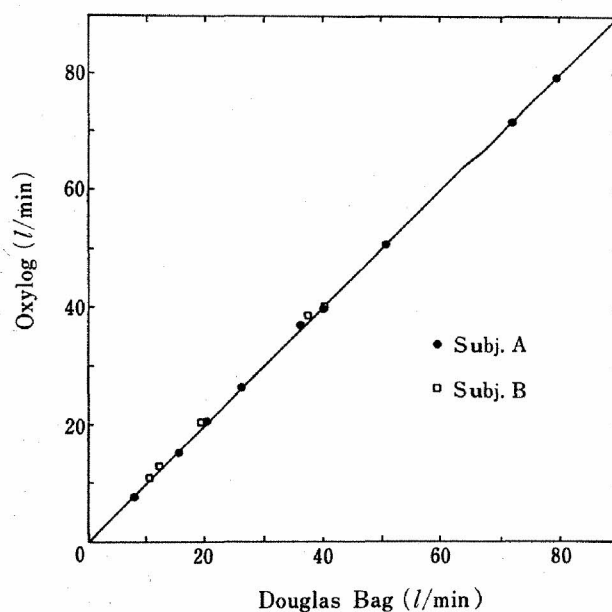


図3 オキシログとダグラスバッグ法で測定した毎分換気量の比較

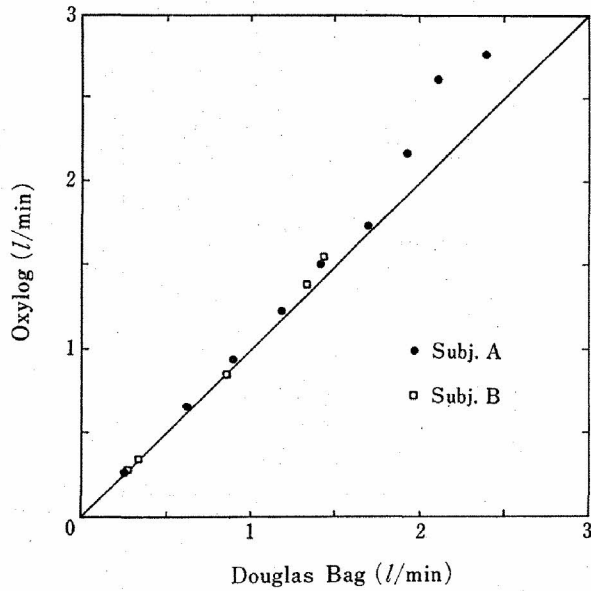


図4 オキシログとダグラスバッグ法で測定した酸素摂取量の比較

した値の方が高くなる傾向であった。

このように換気量はオキシログとダグラスバッグの結果は極めてよく一致したにもかかわらず、 O_2 摂取量が毎分2*l*を越える時点から両者の差が大きくなったことは、 O_2 濃度の測定結果に違いがあったことを意味するものである。すなわち、もし、ダグラスバッグ法による測定誤差はオキシログより十分小さいと仮定すると、オキシログの O_2 濃度の分析に問題があることを示唆するものである。

オキシログの O_2 濃度の分析に関して、オキシログのサンプリングポンプは内臓されているバッテリーによって駆動している。そして長時間の測定を可能にするため、ドライカラムやサンプリングチューブなどによって生ずる死腔 (Dead Space) がサンプリングの速度の割合には大きくなっている。このため呼気ガス中の O_2 濃度が急激に変化する場合には、その変化に追従できなくなり結果としてダグラスバッグ法と違いを生じたものと考えられる。

この理由については今後の検討を要するところであるが、図3と図4で示したように、今回用い

たオキシログにより換気量では毎分80*l*程度、 O_2 摂取量では毎分2*l*以下であればダグラスバッグ法とほぼ同程度の精度で測定できることが明らかとなった。

2) 測定可能な距離

遠隔測定可能な距離は、システムの重要な性能の一つである。先にも述べたように、本システムではデジタル伝送方式としたが、測定可能な距離は使用するテレメータの送・受信機の性能に依存する。

今回用いたテレメータシステムは、その使用にあたって特別の免許を必要としない機種であるため、その送信出力は小さく、受信側で通常用いるロッドアンテナを使用した場合、雑音となる他の電波が少なく見通しのよい所での送信可能距離は40m前後であった。

そこで本研究では、測定可能な距離を延長するために、FM帯域専用のアンテナとブースタを用いることにより、同じ送・受信機で見通しのよい所で約80m弱の距離まで測定が可能となった。

3. 本システムによるスポーツ活動の実測

モーガン社の仕様によれば先の写真1で示したように、身体運動中の O_2 摂取量および換気量を測定する際には、オキシログの入った革のケースのベルトを肩からかけるようになっている。作業や運動が非常に単純な場合には、このような肩から吊す方式でも動きのさまたげにならないかもしれない。しかしこの方式では実際のスポーツ場面における活動のさまたげになることは十分考えられる。

本研究では、被検者の運動に対する制約をできるだけ少なくするために特製のリュックサックを試作しこのリュックサックにオキシログを入れ、これを背負って身体運動中の O_2 摂取量および換気量の測定を行った。

写真2は被検者の腰の部分にテレメータシステ

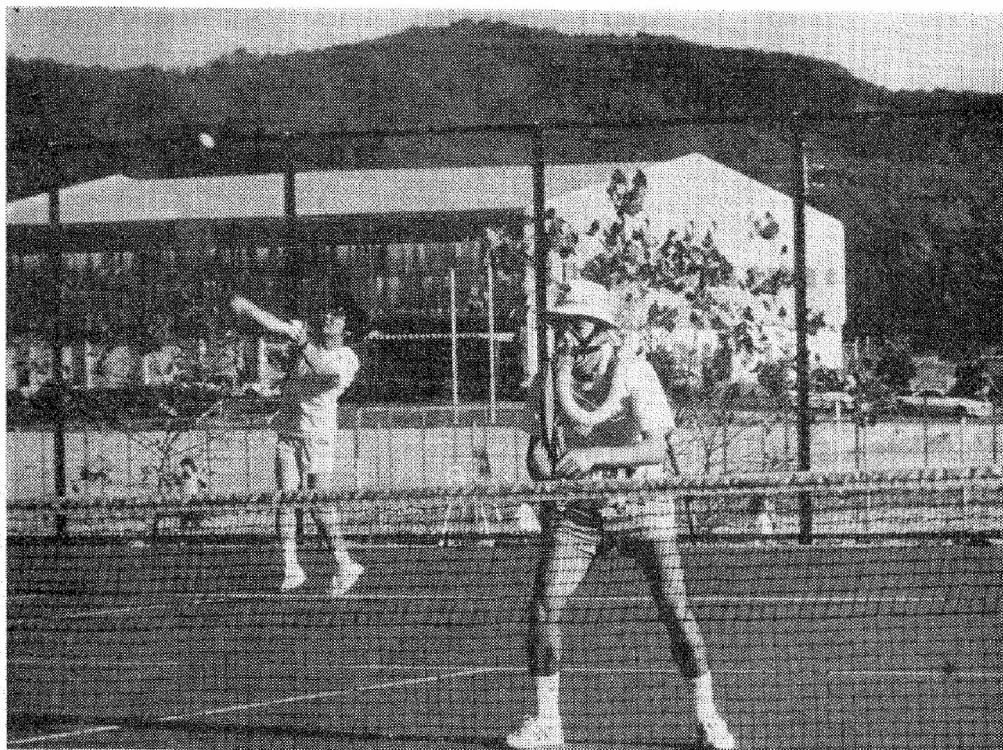


写真2 テレメータシステムによるエネルギー代謝の測定風景

ムを、背にオキシログの入ったリュックを装着し、硬式テニスの練習および試合中のエネルギー代謝の測定風景を示したものである。

浅野³⁾の報告によると硬式テニスの1ストローク当りのエネルギー需要量は0.51~0.57 kcalである。星川⁵⁾らもテニスマシンから連続的に打ち出されるボールを相手コートにフォアハンドストロークで打ち返す時、1ストローク当りのエネルギー需要量は0.55~0.80 kcalであったと報告している。また浅野によれば、男子ダブルスのRMRは7.7であり、体重当りのエネルギー消費量は0.156 kcal/kg・分であると報告している。

図5は健康な成人男子(被検者 S.S)を対象とし、今回開発したシステムを用いて硬式テニスにおけるストロークとボレー練習およびダブルスの試合中の毎分酸素摂取量($\dot{V}O_2$)と毎分換気量($\dot{V}E$)の結果を示したものである。O₂1lで約5 kcalとすると本実験で得られたストロークやボレーの練習における体重当りのエネルギー消費量

は0.106~0.147 kcal/kg・分であった。浅野⁴⁾は軟式テニスのゲームにおける前衛と後衛のRMRを比較し、前衛を1.0としたとき後衛のそれは1.7であったと述べている。

本実験では、被検者がサービスをしている時のエネルギー消費量はそうでない時と比べ明らかに高くなる傾向が認められた。そして体重当りのエネルギー消費量の最も高い値は、0.172 kcal/kg・分(毎分O₂摂取量では約2.1l/分)であった。傾斜8.6%のトレッドミルスピード漸増法で求めた被検者S.Sの最大O₂摂取量は3.39l/分(体重当りの最大O₂摂取量55.1ml/kg・分)であったことから、サービスゲーム時における運動強度は最大O₂摂取量のおよそ50~60%であるといえる。

先の星川⁵⁾らは運動開始5分目の心拍数からO₂摂取量を推定し、硬式テニスゲームの運動強度は、最大O₂摂取量の約54%であると報告している。この値は本実験のそれよりもやや高いように思われるが、その理由については明らかでない。

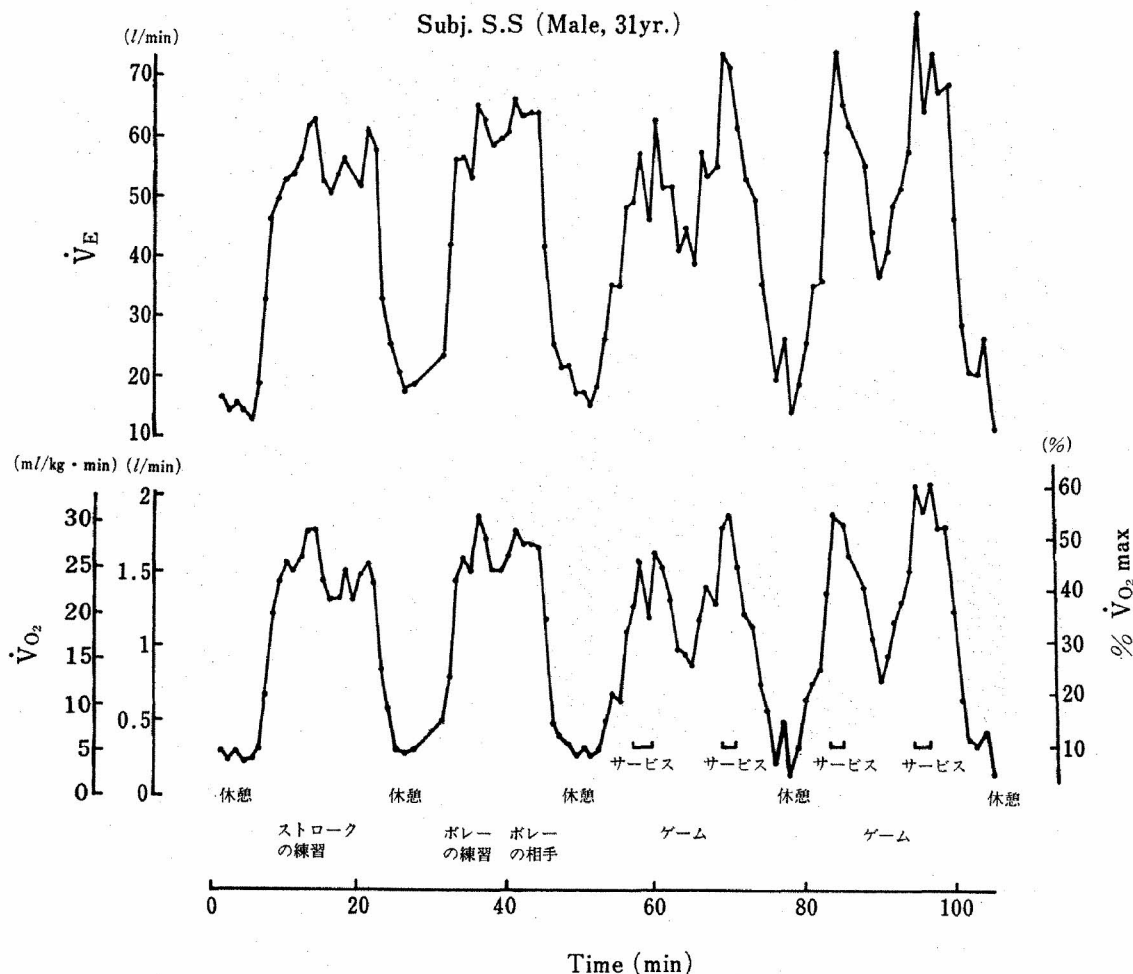


図5 硬式テニスの練習および試合中の酸素摂取量と換気量の変動

なお本実験で得られた毎分換気量の変動は、 O_2 摂取量のそれとよく一致していた (図5)。

一方、石河⁷⁾らは男子学生を対象に、高木⁸⁾らは女子学生を対象にし、それぞれバドミントンにおけるエネルギー代謝量をダグラスバッグ法で測定している。中でも高木らの報告によれば、女子シングルのRMRは4.3~6.0, 消費熱量は30~85 kcal, ダブルスではRMR 3.0~4.0, 消費熱量30~60 kcalである。

図6は女子大学生(被検者K.E)を対象とし、バドミントンの練習およびシングルスゲーム中の O_2 摂取量(\dot{V}_{O_2})と換気量(\dot{V}_E)を本システムを用いて測定した結果を示したものである。ハイクリアーの練習における体重当りのエネルギー消費量は平均0.129 kcal/kg・分であった。またシング

ルスのゲームにおける体重当りのエネルギー消費量のピーク値は、0.120 kcal/kg・分(毎分 O_2 摂取量約1.4 l/分)であった。

この被検者の最大 O_2 摂取量は2.60 l/分(体重当りの最大 O_2 摂取量44.9 ml/kg・分)であったことから、ハイクリアーの運動強度は最大 O_2 摂取量のおよそ50%になる。

先に述べた高木らによれば、女子バドミントンシングルのゲームにおけるエネルギー消費量は、0.101 kcal/kg・分であると報告している。本実験で得られたゲーム中のエネルギー消費量は高木らのそれと比べかなり低かった。この違いについては、高木らは練習試合を8 mmで撮影し、タイムスタディをとり、これに基本的な動作の消費量を代入して、試合中のエネルギーの消費を推定

Subj. K.E (Female, 19yr.)

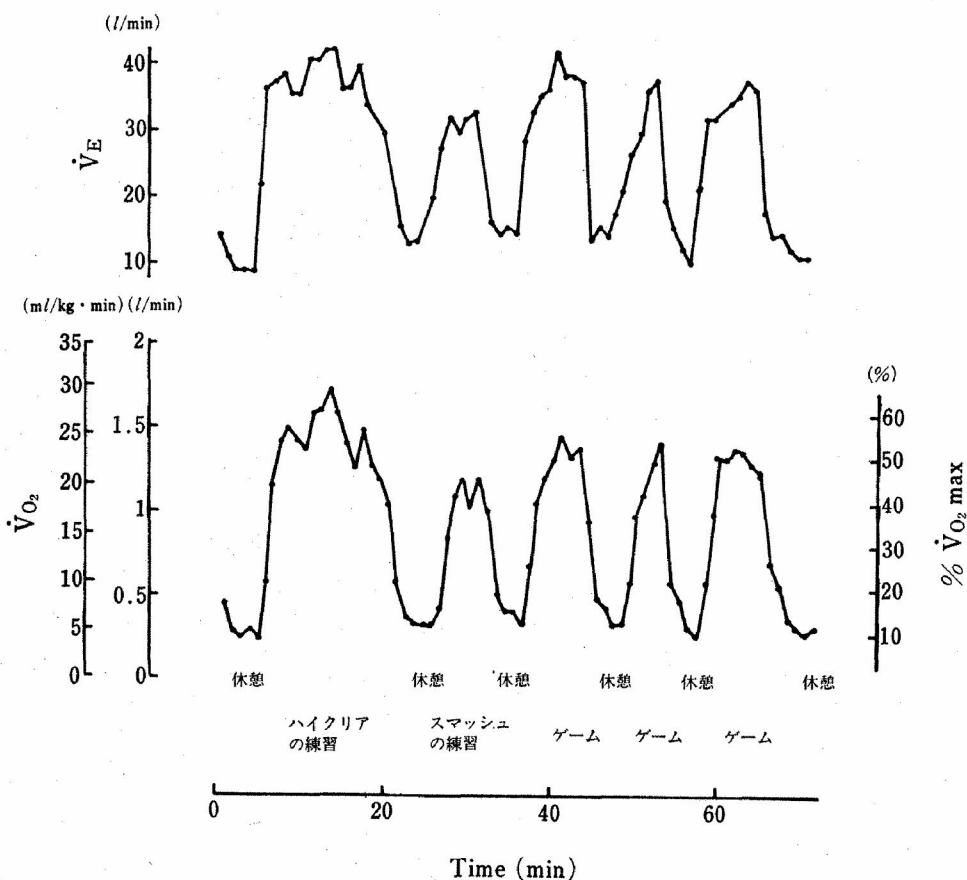


図6 バドミントンの練習および試合中の酸素摂取量と換気量の変動

したため、過大評価した可能性が考えられる。

しかしながら、これら結果の違いについては今後さらに検討しなければならないだろう。

要 約

本研究では各種の作業およびスポーツ活動中の酸素摂取量（エネルギー代謝量）を連続的かつ遠隔測定するシステムを開発し、その実用性について検討した。

1) O₂ 摂取量と換気量の測定は、英国モーガン社製の携帯用 O₂ 摂取量計（Oxylog, S型）を用いた。

2) 装置全体をできるかぎり小型、軽量化するため、インターフェースをオキシログ内に実装し、電源もオキシログの電源と共用した。

3) 電波障害などで伝送が不安定になった場合でも、可能なかぎり正しい値が得られるように、データ送信間隔は4秒毎と、1分毎の両方選択できるようにした。

4) データの送・受信部は、多用途テレメータシステム（日本電気三栄, Model 271型）を用いた。

5) データ処理部ではテレメータ受信機から送られた信号を復調し、O₂ 摂取量および換気量の値をプリンターに出力するようにした。

6) 被検者の運動に対する制約をできるだけ少なくするため、特製のリュックを試作しこのリュックにオキシログを入れてスポーツ活動中の O₂ 摂取量の遠隔測定を行った。

7) 今回開発したシステムにより硬式テニスと

バドミントンの練習および試合中の O_2 摂取量を測定した。硬式テニスダブルスおよびバドミントンシングルのゲーム中の体重当りのエネルギー消費量のピーク値は、それぞれ 0.172 と 0.120 kcal/kg・分であった。

文 献

- 1) 池上康男, 宮村実晴, 松井秀治, 齊藤満; 有酸素および無酸素的作業能力の連続測定システムの開発, デサントスポーツ科学, **4**: 137—145 (1983)
- 2) 安田好文, 重松浩一, 臼井支朗, 宮村実晴; ガス交換連続測定システムの開発とその問題点, 呼吸と循環, **35**: (1987) 印刷中
- 3) 浅野辰三; 庭球試合のエネルギー代謝について, 民族衛生, **22**: 170—173 (1956)
- 4) 浅野辰三; 軟式庭球試合におけるエネルギー代謝に関する研究, 体育学研究, **1**: 550—557 (1955)
- 5) 星川保, 村瀬豊, 水谷四郎, 松井秀治; 呼吸循環機能改善刺激としてのレクリエーションスポーツの役割, 体育科学, **6**: 77—89 (1978)
- 6) 渡辺俊男, 只木英子, 小川庄吉; 学校ダンスのエネルギー代謝について, 体育学研究, **3**: 76—78 (1958)
- 7) 石河利寛, 広田公一, 和泉貞男, 佐藤良子, 松井秀治, 広沢昭男; バドミントンにおける男子学生のエネルギー代謝について, 体育学研究, **3**: 70—75 (1958)
- 8) 高木公三郎, 木内一生, 伊藤稔, 吉岡文雄; バドミントンにおける女子学生のエネルギー代謝について, 体育学研究, **3**: 61—69 (1958)
- 9) 浅野辰三, 山崎忠志, 高田恒夫, 岸本祐一郎, 佐藤奎; 乗馬運動におけるエネルギー代謝について, 体育学研究, **3**: 53—55 (1958)
- 10) 佐々木隆, 照尾常吉; 鉄棒運動のエネルギー代謝に及ぼす熟練の影響について, 体育学研究, **3**: 56—60 (1958)
- 11) 丹羽正, 家治川豊, 和久田賢夫; 各種スポーツ部分的動作に要するエネルギー消費について, 体力科学, **9**: 57—64 (1960)