

# 有酸素及び無酸素的作業能力の 連続測定システムの開発

名古屋大学 池上 康 男  
(共同研究者) 同 宮村 実 晴  
同 松井 秀 治  
豊田工業大学 斉藤 満

## Development of On-line Measurement System for Aerobic and Anaerobic Work Capacity

by

Yasuo Ikegami, Miharu Miyamura, Hideji Matsui

*Nagoya University*

Mitsuru Saito *Toyota Technological Institute*

### ABSTRACT

A new system for continuous and automatic measurement of  $O_2$  uptake using mini-computer system was developed.

Pulmonary ventilation was measured by the piston type spirometer with rotary-encoder to detect the displacement of the piston which is proportional to the volume changes. Electric pulse generated from the rotary-encoder was integrated with electric counter and transferred to the computer system.  $O_2$  and  $CO_2$  concentrations in the expired gas were determined with  $O_2$  gas analyzer using zirconium sensor and infrared type  $CO_2$  gas analyzer and analog signals from  $O_2$  and  $CO_2$  gas analyzer were inputted to the computer system using A-D converter.  $O_2$  uptake, pulmonary ventilation,  $CO_2$  output, R.Q. etc. were calculated by the computer system.

Accuracy and reliability of the new system were examined comparing with the Douglas bag method. It was found that the difference in  $O_2$  uptake obtained by the new system and the Douglas bag method was less

than 5% to the extent of 150l/min of ventilation and 3.5l/min of O<sub>2</sub> uptake.

Main factor of the error depended on the difference of O<sub>2</sub> concentration measured by the Douglas bag method and the new system using mixing chamber. In order to obtain higher accuracy, it will be necessary to improve the mixing chamber.

## 要 旨

従来のダグラスバッグ法にかわる、酸素摂取量の自動的・連続的測定のための新しいシステムの開発を試みた。

換気量の測定はピストン式スパイロメータを用い、ピストンの移動をロータリーエンコーダによって検出し、それを電気的なパルスに変換し積算することによって行った。

呼気ガス中の酸素および炭酸ガス濃度の測定は、ジルコニウム方式と赤外線方式の分析計を用い、それぞれ電気的信号として検出し、さらにA-D変換器によってデジタル信号に変換した。

これらの信号から、酸素摂取量やそれに関連する諸量を計算するために小規模のミニコンピュータシステムを用いた。

測定精度を検討するために、ダグラスバッグ法との比較を行った。その結果、本システムの精度は、最大運動時でも5%以内であることが推定された。さらに5%の誤差の原因について検討した結果、ミクシングチャンバーを用い、ソフトウェアによって平均化されたガス濃度と、ダグラスバッグ法によるガス濃度に差のあることが主な理由であることが判明した。

## 緒 言

これまで、有酸素および無酸素的作業能力の指標としての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。この方法では、呼気を一たんダグラスバッグに採取した後、換気量や呼気

ガス中の酸素および炭酸ガス濃度の測定を行うため、測定には多くの人手が必要であった。さらに、ガス濃度の分析は、シリンダーガス分析器といった化学的な方法で行われてきたために、結果が得られるまでにかかなりの時間を要した。

しかし、近年になって、これらの化学的方式にかわって、精度が高く安定性の優れた電気的測定方式のガス分析装置が開発され、多くの研究室で酸素摂取量の測定に利用されるようになってきた。

本研究では、これらのガス分析器とミニコンピュータをベースとした小規模汎用データ処理システムを組み合わせることにより、酸素摂取量およびそれに関連する諸量の自動測定システムの開発を試みると共に、その実用性について検討しようとしたものである。

## 方 法

### 1) 換気量の測定

換気量の測定には、クレハ製ピストン式スパイロメータを用いた。このスパイロメータは、1回の呼気をシリンダー内に集め、呼気量をピストンの移動量に変換することによって測定するものである。

すなわち、ピストンの移動はプリーを用い、ロータリーエンコーダの回転量として電気的パルスに変換された。このパルスは、シリンダー内の容積が増加する方向にピストンが移動する場合のみ発生するようになっている。また、呼気の終りでは、パルスがとだえることからこれを検出し、

電磁バルブを作動させ、吸気の際にシリンダー内の呼気ガスが排気される。

このようにして得られたパルスカウンターで積算し、一定時間（サンプリングサイクル）ごとにコンピュータに転送した。

## 2) ガス濃度の測定

呼気ガスのガス濃度を平均化するために、容積 10 $l$  のミクシングチャンバーを作製した。ミクシングチャンバー内には、電子器機の冷却用のファンを取り付け、ミクシングが促進されるようにした。ミクシングチャンバーの中央から毎分 0.5 $l$  の速度でサンプルガスを吸引し、酸素および炭酸ガス濃度を測定した。

酸素濃度の測定にはモーガン社製 Oxygen Analyzer (S-3A)、炭酸ガス濃度の測定には、ゴダルト社製 Capnograph (TYPE BE) を用いた。

水蒸気圧による誤差を除くために、塩化カルシウムによってサンプルガスの除湿を行った。

## 3) 測定の制御とデータの処理

測定の制御およびデータ処理のために、ミニコンピュータをベースとした小規模汎用データ処理システムを用いた。

図 1 は、本システムの概要をブロックダイアグラムとして示したものである。

測定の開始と終了は、スタートおよびストップボタンを手動で押すことにより、CPU（データ処理システムの中央処理装置）へスタート、ストップ信号として送られる。1 サンプルングサイクルの長さは 1 秒とした。各サンプルングサイクルの終りでは、換気量を示すカウンターの値、酸素および炭酸ガス濃度の A-D 変換された値を読み込み、これらのデータを磁気ディスクに一たん書き込んだ。測定の終了（ストップボタンが押された）後は、必要な諸量の計算を行い、結果をラインプリンターに出力するとともに、必要があれば、それらのデータを磁気ディスクにデータファイルとして保存できるようにした。データ処理装

置の働きを図 2 にフローチャートで示す。

## 4) 測定誤差の補正

本システム全体の精度は、主に、換気量、酸素および炭酸ガス濃度の測定精度に依存すると考えられる。まず、呼吸量計（スパイロメータ、13.5 $l$  型）によって校正した容積約 1 $l$  のピストン付きの校正用シリンダーを用い、異なる換気速度で換気量の校正を行った。

また、酸素および炭酸ガス濃度の補正は、あらかじめシロランダーガス分析器で分析した 2 種類の校正ガスを用いて行った。

## 5) ダグラスバッグ法との比較

本システム全体の精度を検討するために、ダグラスバッグ法との比較を行った。本システムで用いたピストン式スパイロメータは、その構造上の理由から、換気量が増大したときには、ダグラスバッグ法との同時（直列）測定が困難であることから、1 分ごとに三方活栓を切り換えることにより、ダグラスバッグ法と本システムによる測定を交互に行う方法を用いた。

## 結果と考察

本システムによる測定結果の出力例を図 3 に示した。

本システムの最大の利点は、従来のダグラスバッグ法と異なり、様々な時間間隔での測定を連続的に行うことができることである。すなわち、検者は被検者に一たん呼吸マスクを装着し、測定を開始した後は、安静・運動・回復などの開始および終了の時刻を記録するだけでよい。

さらに本システムでは、サンプリングサイクルを 1 秒としているため、1 秒ごとの必要なデータが磁気ディスクに保存されるため、測定後に、任意の時間単位での集計を行ったり、あるいは、回復期のデータから酸素負債量等も簡単に計算することができる。

前述のように、今回用いたスパイロメータの構

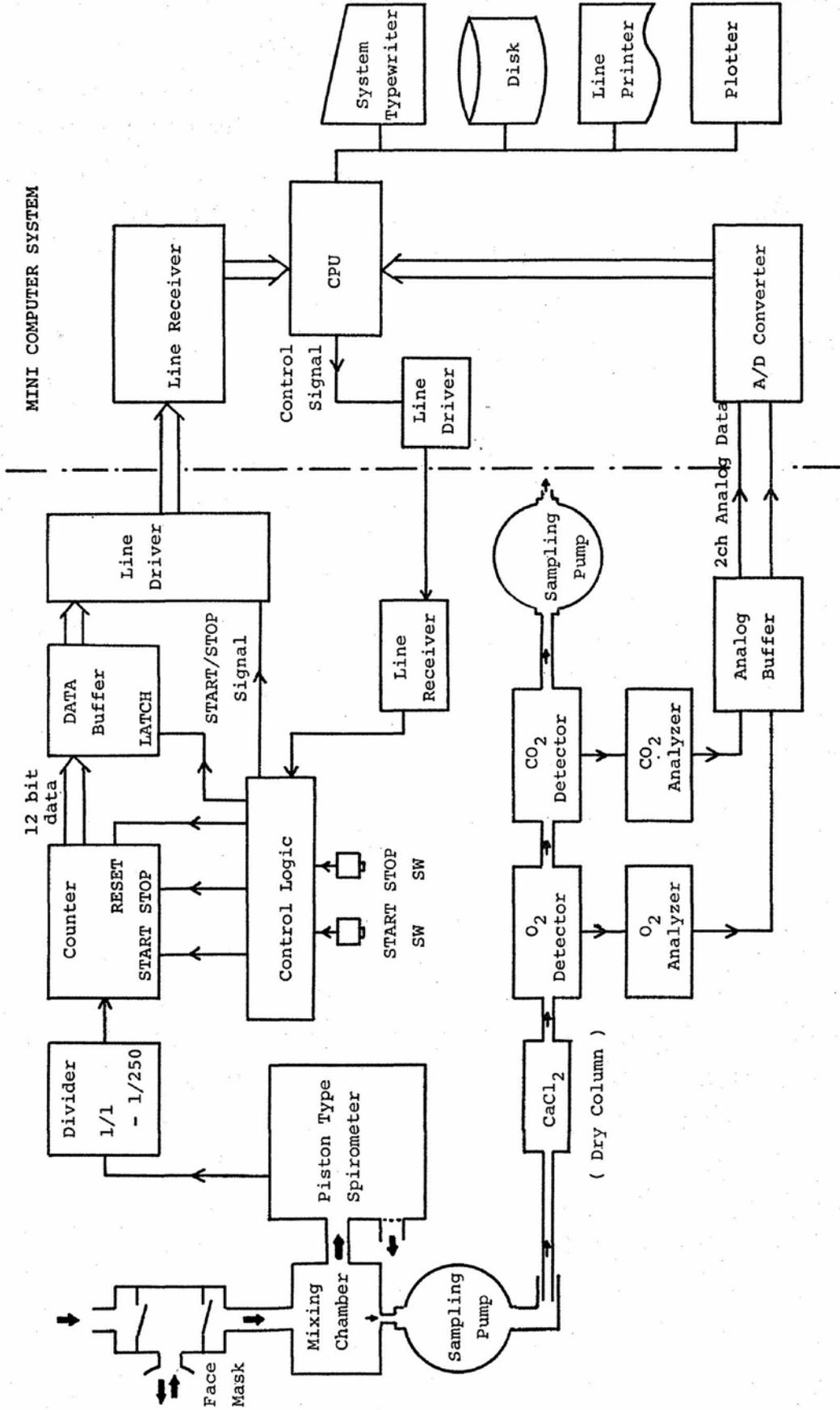
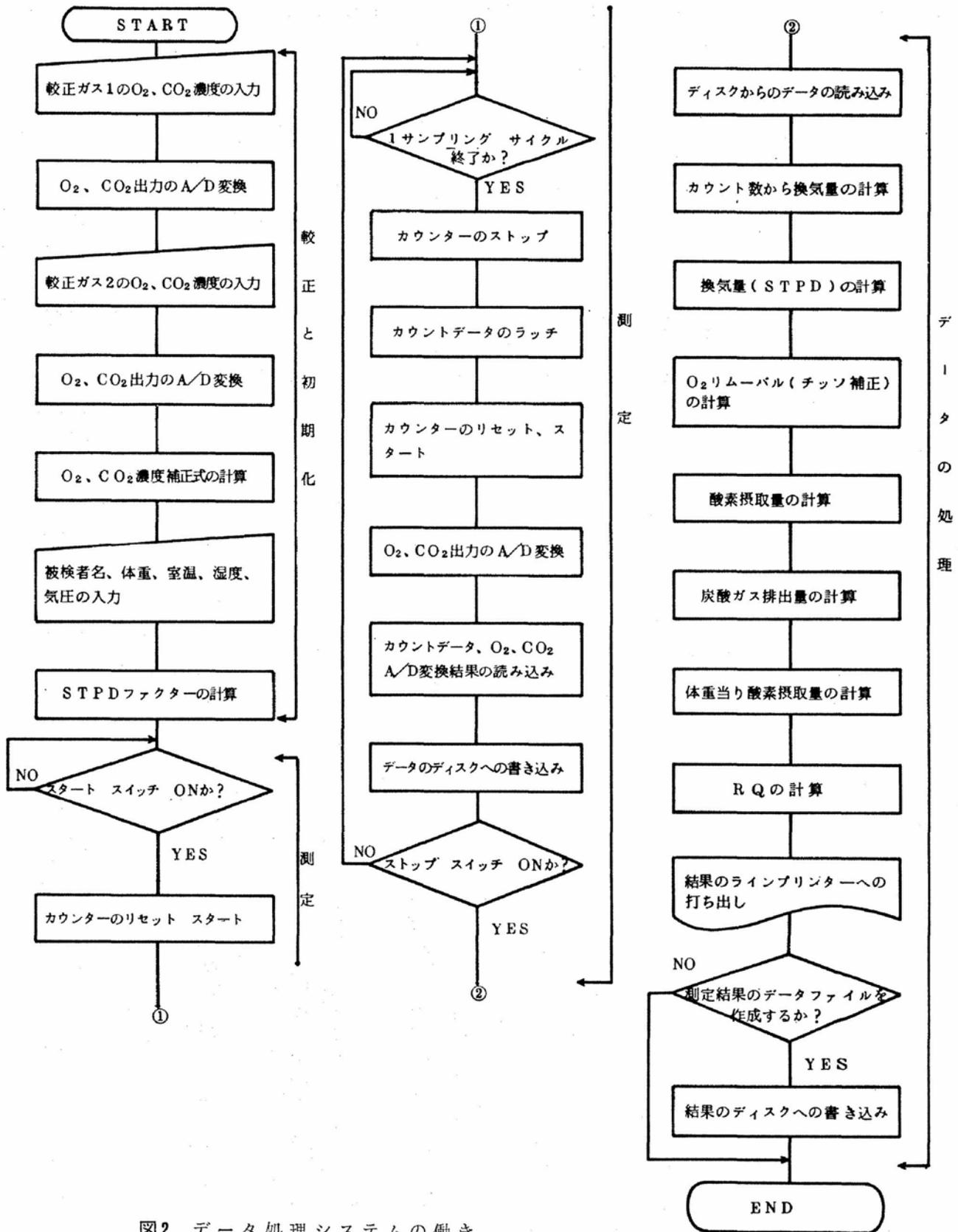


図1 システムの概要



造上の理由により、ダグラスバッグ法との同時測定が行えないことから、本システムとダグラスバッグ法を交互に用い、本システムの精度を推定し

た。

図4および図5は健康な成人男子を対象に、自転車エルゴメータを用いて最大運動を行わせ、本

\*\*\* MEASUREMENT OF OXYGEN UPTAKE \*\*\*

DATE 2/18/81 TIME 14:48:32

SUBJECT : KANAI TRIAL : 2 WEIGHT : 58.5 [KG]

TIME [M]	VE [L/M]	O2 [%]	CO2 [%]	VO2 [L/M]	VCO2 [L/M]	VO2/BW [ML/KG/M]	RQ
1	8.30	18.47	2.27	0.20	0.19	3.44	0.92
2	7.77	18.34	2.27	0.20	0.17	3.43	0.87
3	7.75	18.38	2.27	0.20	0.17	3.37	0.88
4	6.89	18.24	2.36	0.19	0.16	3.17	0.87
5	7.02	17.90	2.67	0.21	0.19	3.64	0.87
6	8.36	18.53	1.37	0.22	0.11	3.69	0.52
7	8.04	18.40	2.33	0.20	0.18	3.43	0.92
8	7.69	18.50	2.30	0.18	0.17	3.13	0.95
9	8.45	18.40	2.21	0.21	0.18	3.65	0.86
10	7.00	17.92	2.61	0.21	0.18	3.63	0.85
11	6.63	18.02	2.58	0.19	0.17	3.29	0.88
12	7.33	18.05	2.51	0.21	0.18	3.63	0.86
13	6.96	17.77	2.55	0.22	0.18	3.84	0.78
14	7.50	18.21	2.28	0.21	0.17	3.52	0.82
15	8.19	18.15	2.30	0.23	0.19	3.94	0.81
16	11.91	17.22	3.12	0.45	0.37	7.70	0.82
17	15.26	17.12	3.20	0.59	0.48	10.11	0.82
18	14.45	17.05	3.09	0.58	0.44	9.87	0.76
19	13.24	17.02	3.31	0.53	0.43	9.01	0.82
20	14.90	17.23	3.21	0.56	0.47	9.53	0.85
21	15.54	17.75	2.77	0.50	0.43	8.50	0.86
22	15.83	16.77	3.58	0.67	0.56	11.44	0.84
23	15.96	16.94	3.58	0.64	0.57	10.95	0.88
24	15.10	16.91	3.42	0.62	0.51	10.55	0.83
25	18.88	16.71	3.71	0.81	0.70	13.77	0.86
26	22.04	16.84	3.74	0.90	0.82	15.42	0.91
27	21.62	16.68	3.78	0.93	0.81	15.86	0.87
28	21.97	16.77	3.62	0.93	0.79	15.83	0.85
29	28.95	16.94	3.54	1.17	1.02	19.93	0.87
30	34.07	16.91	3.80	1.36	1.28	23.23	0.95
31	34.87	16.83	3.90	1.42	1.35	24.24	0.95
32	36.91	16.96	3.86	1.44	1.41	24.69	0.98
33	39.70	16.94	3.82	1.57	1.50	26.83	0.96
34	40.16	17.05	3.74	1.54	1.49	26.25	0.97
35	40.45	17.16	3.65	1.50	1.46	25.68	0.97
36	41.89	16.89	3.72	1.69	1.55	28.92	0.91
37	41.85	17.10	3.64	1.59	1.51	27.12	0.95
38	26.80	17.28	3.56	0.96	0.95	16.44	0.98
39	17.06	18.46	2.69	0.40	0.45	6.78	1.14
40	13.52	18.78	2.26	0.28	0.30	4.71	1.10
41	16.20	18.31	2.44	0.42	0.39	7.16	0.93
42	14.62	18.46	2.44	0.35	0.35	5.98	1.01
43	14.33	18.59	2.35	0.32	0.33	5.52	1.03
44	11.90	18.45	2.27	0.29	0.27	4.99	0.91
45	13.21	18.81	2.20	0.26	0.29	4.53	1.08
46	11.85	18.60	2.29	0.27	0.27	4.56	1.00
47	12.80	18.51	2.31	0.30	0.29	5.18	0.96

図3 測定結果の出力例

システムとダグラスバッグ法で測定した結果である。

図4, 5で示したように、換気量で毎分 150l、酸素摂取量で毎分 3.5l 程度の範囲で、ダグラス

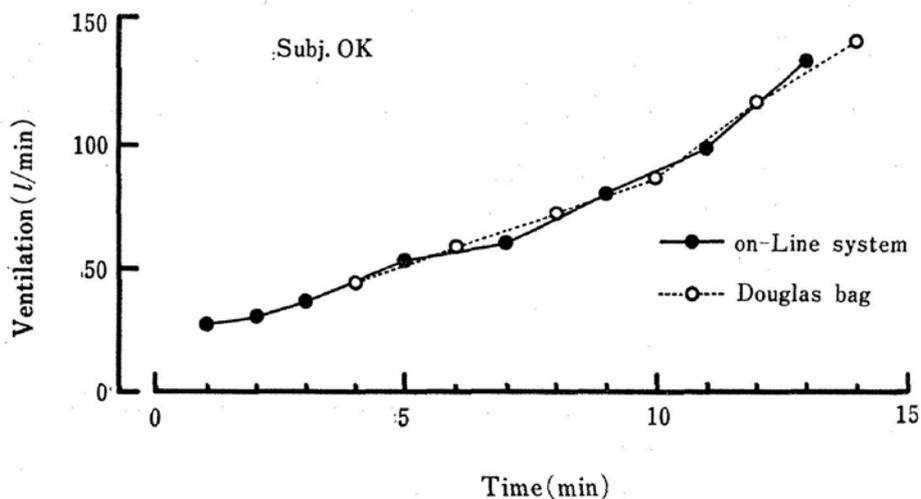


図4 ダグラスバッグ法との比較—換気量

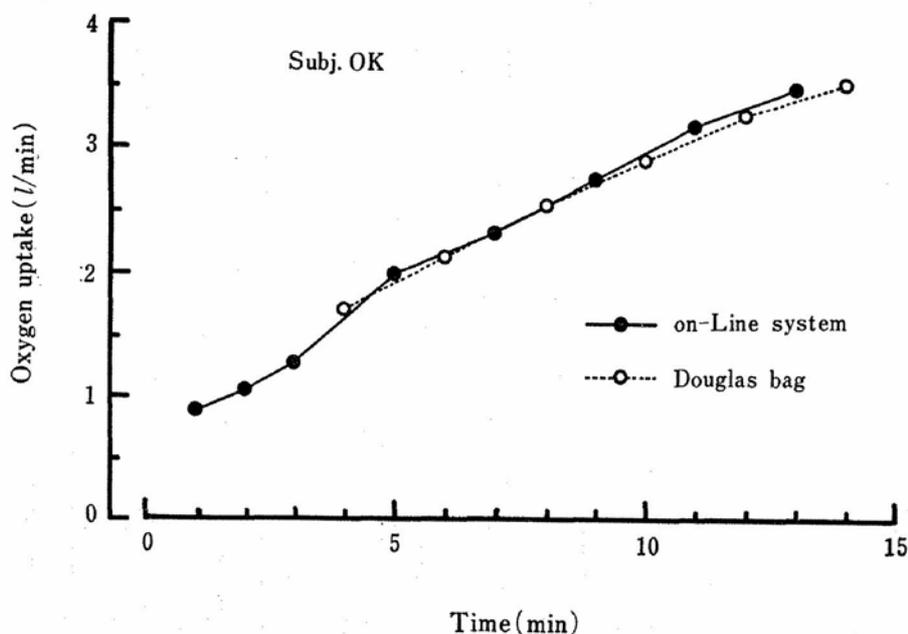


図5 ダグラスバッグ法との比較—酸素摂取量

バッグ法を基準とした本システムの誤差は、ほぼ5%以内に納まることが推定された。本研究で行ったような最大運動時でも、その精度が5%以内に納まるような連続測定システムについての報告は見当たらない。

本システムの誤差は、主に換気量およびガス濃度（特に酸素ガス濃度）測定の精度に依存すると考えられる。

まず換気量に関して、これまで我々は田口ら<sup>5)</sup>の方法に倣い、ライトの流量計を用いて酸素摂取

量の連続測定を試みてきた<sup>4)</sup>。しかし、ライトの流量計を用いた場合、毎分換気量が50l以下であれば約5%の精度で測定可能なものの、毎分換気量が50lを超えたときには、精度が大きく低下することを明らかにしてきた。

一方、一呼吸ごとの酸素摂取量を測定する、いわゆる breath-by-breath 法を行う目的で、ニューモタコグラフや熱線流量計が用いられてきた<sup>1-3)</sup>。これらの方法では、リニアライズの技法などを用いることにより、かなりの高精度が得ら

れることが報告されている。しかしながら、いずれも安静時から軽運動時の結果と思われるもので、本研究で行ったような、最大運動時、特に換気量が 150l/分を越えるような場合について、その精度を検討した報告はなされていない。

今回用いた方法は、breath-by-breath による測定は行えないものの、毎分 100l までの範囲内においても、その精度は 1% 程度であった。

このようなことから、ダグラスバッグ法に対する本システムの誤差は、主として酸素濃度測定上の誤差によるものと考えられる。

そこで、本システムを用いて連続的にガス濃度をモニターし、同時にダグラスバッグに呼気を採集し、そのガス濃度を測定し比較を行った (図 6)。

その結果、酸素および炭酸ガス濃度は、1 分間の測定中にもかなり大きく変動することが認められた。

さらに、図 6 に見られるように、ダグラスバッグ

法による濃度と、連続測定による濃度の 1 分間の平均は明らかに一致していなかった。

よって、本システムの測定誤差は、ミクシングが完全に行われていなかったことによると考えられる。

これを解決する方法として、今回用いたミクシングチャンバーよりもさらに大きい容積のものを用いることもできるが、その場合、酸素摂取量の急激な変化に対し、応答の遅れが大きくなることになる。

三条ら<sup>2)</sup>は、これらの問題を解決するため、ソフトミクシングチャンバーを用いる方法を開発している。しかし、今回我々が用いたスパイロメータは、呼気の終了を検出し、排気を行うため、この方法を用いることができなかった。

したがって、本システムの精度をさらに向上させるためには、今後ミクシングの方法についての開発や改良がなされる必要がある。

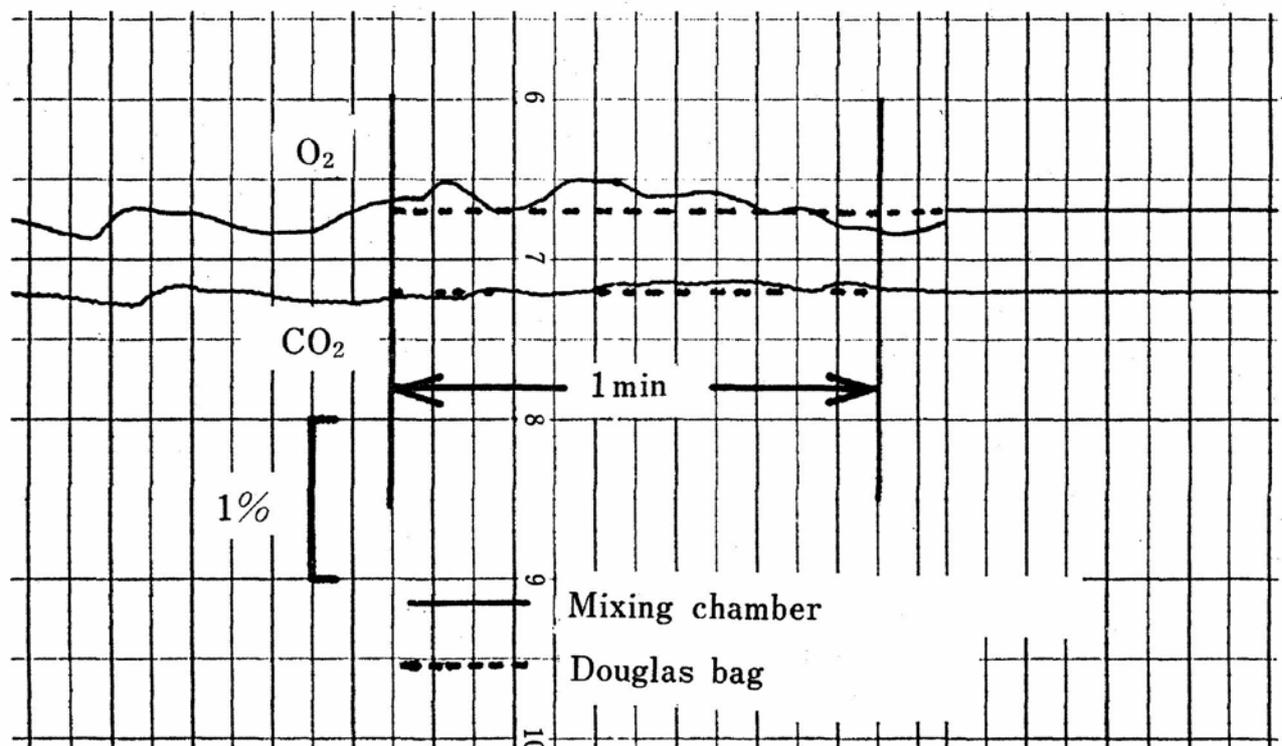


図 6 ミクシングチャンバーを用いたガス濃度の連続測定と、ダグラスバッグ法によるガス濃度測定との比較 (本文参照)

## 要 約

酸素摂取量およびそれに関連する諸量の連続的かつ自動的測定システムの開発を試み、その精度について検討した。

- 1) 換気量の測定には、新しく開発されたピストン式スパイロメータを用いた。呼気ガス中の酸素および炭酸ガス濃度は、ジルコニウム方式の酸素分析計と赤外線方式の炭酸ガス分析計を用いた。
- 2) 呼気ガス濃度を平均化するために、約 10l のミクシングチャンバーを用いた。
- 3) 酸素摂取量およびそれに関連する諸量の計算および測定制御のために、ミニコンピュータを用いたデータ処理システムを用いた。
- 4) 本システムの精度は、ダグラスバッグ法と比較することによって検討した。その結果、換気量で毎分 150l 程度、酸素摂取量で毎分 3.5l 程度の範囲内において、ダグラスバッグ法との差は最大でも 5% 程度であった。
- 5) この誤差の要因について検討した結果、ダ

グラスバッグ内のガス濃度と、ミクシングチャンバーを用いた場合の平均濃度に差のあることが明らかとなった。

今後、精度をさらに向上させるためには、ミクシングの方法の改良が重要であることが示唆された。

## 文 献

- 1) Beaver, W.L. et al.; On-line computer analysis and breath-by-breath graphical display of exercise function tests, *J. Appl. Physiol.*, 34-1; 128-132 (1973)
- 2) 三条芳光他; Soft Mixing Chamber を利用した  $\dot{V}O_2$ ,  $\dot{V}CO_2$ , R.Q. モニター, 呼吸と循環, 28-2; 153-159 (1980)
- 3) 島田康弘他; 酸素摂取量, 炭酸ガス排泄量の連続モニターの精度の検討, 呼吸と循環, 31-2; 151-155 (1983)
- 4) 松井秀治他; 有酸素作業能力の連続測定システムの開発, 昭和54, 55年度科学研究費補助金(試験研究 2) 研究成果報告書 (1981)
- 5) 田口貞善, 熊本水頼; 酸素摂取量の連続測定法とその応用, 日本体育学会第27回大会号; 200 (1976)