

エネルギー代謝測定における二・三の基礎的問題の 検討と、ある連続自動測定装置の信頼性について

沖田富美子・崔 在順・上林博雄

On a Few Fundamental Problems in Measuring Method of the Energy Metabolism of Human Body, and on Reliability of a New Measuring Apparatus of It

FUMIKO OKITA, JAE-SOON CHOI AND HIROO KAMBAYASHI

1. 研究目的

呼気量と O_2 および CO_2 の定量分析とによる人体のエネルギー代謝量の測定は、よく普及した一般的な手法である。この化学的定量分析器具の使用上の改善はわが国では労働科学研究所等でおこなわれ、広く採用されている。一方、呼気の O_2 および CO_2 濃度の電氣的測定法は第二次大戦後急速に開発され、利用に供せられるようになってきた。これは、化学的定量分析法では熟練しても日に数件の分析しかできないのに対し、簡便に測定できるからである。しかし、それら電氣的測定器械の指示指標の設定および読みの較正等は、すべて化学的定量分析法によっている。呼気分析によるエネルギー代謝量の測定が現在でも重要なのは、他の労働量の測定方法が身体全体からみれば部分的な労働強度を指示するものであったり、また参考の資料となりえても労働を量的に評価するのに不十分な指数しか示しえないものであったり、一般の住生活にみられないほどの高強度の労働量の範囲以外では正確な指度が示されないものであったりするからである。他方、エネルギー代謝率測定が現代的な意義をもつのは、生活者を主体として人間系→環境系に及ぶ所謂「人間工学」⁽¹⁾的なデザイン・設計システムが重要であることが、改めて一般に認識されてきたことによるのであろう。

元来、エネルギー代謝測定は特定の研究所や医科系の衛生学教室が中心となって行ってきた。その技法の詳細はそれぞれの機関に流儀的なものがあり、必ずしも一般的にその公正さが討議されてきたとはいえない。戦後になって測定の精度等についても公的に討議されるようになり、たとえば橋本那衛氏等は普遍的に用いられているダグラス・バッグに呼気を採取し、湿式ガスメータによって呼気量を測定する方法は誤差が大きいことを指摘

しており⁽²⁾、また筆者の一人である上林も呼気ガスの化学的定量分析に恒温室 ($20^{\circ}C \pm 0.3^{\circ}C$) を用いることにより安定した高い精度の測定値がえられることを指摘した⁽³⁾。

今般、新たに採用した連続呼気自動分析装置 (S 測器 KKIHO-6 型) の使用にあたり、その装置の計測上の信頼性を吟味する目的で、エネルギー代謝測定における二・三の基礎的問題につき検討をおこなう。

2. 在来法による呼気量の測定について

すでに述べたように、従来一般に用いられた呼気量の測定方法はガス・マスクより導管を通じダグラス・バッグに呼気を採取し、これを湿式ガスメータで計量するものである。本節では先ずこの測定方法につき検討をおこない、次いで湿式ガスメータを基準として乾式ガスメータおよびローターメータの検定をおこなう。

(1) ダグラス・バッグ法の検討

一般に気体の流量測定の検定には、水置換法が用いられる。こゝでは一定差圧範囲 (=一定流量範囲) について水置換法で検定された湿式ガスメータを用いて実験をおこなった。まず既使用の湿式ガスメータ2台につき比較測定をおこなった。小型プロアを用い送気し、各流量においてそれぞれ新旧2台を前後別に連続して測定した。既使用の1台は相当発錆がみられ測定値は全然合致しなかった。しかし既使用の他の1台は新たに更正したメータと前、後の別にかゝらず殆んど測定値が一致し、湿式ガスメータの安定性を示した (両者の誤差は1/1000以下で、データの提示を略す)。

試行的予備実験を経て、ダグラス・バッグ法の検定の結果、図-1のような実験結果をえた。この回帰直線式を求めると次のようになる。

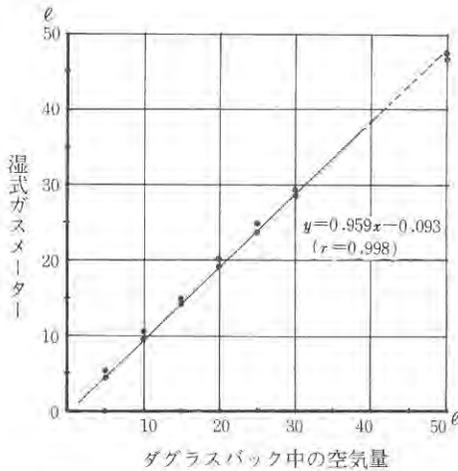


図-1 ダグラスバッグ法の検定
水圧ゲージ差7mm以下の場合

$$Y_1 = 0.959x - 0.093 \quad [\text{lit}] \quad (1)$$

ちなみに相関係数 r は (+0.998) がえられ、検定をおこなうまでもなく十分な精度がえられることが明らかであろう。この結果は注記(2)に示した文献の結果とは相違するが、以下に記する実験手法上の諸条件を充足する必要がある。

a) 使用するダグラス・バッグには一定量の空気を入れたものを使用し、流量測定、ある場合は濃度測定時に清算すること——ダグラス・バッグより完全に空気を抜いた場合、バッグ自体の弾性によって強い負圧を生じる。したがってこの措置をしないで使用するとマスクの弁を通じて呼吸以外の定量されていない空気が浸入する。なおこの措置は空気抜き直後におこなった方がよく、時間が経つと洩れによって不定量の空気が浸入する場合がある。

b) ガス・マスクとダグラス・バッグ、または流量計との接続管として市販の蛇腹管を採用すべきではない——一般に使用されている蛇腹管は被験者の運動によって、繰りかえしのフイゴ運動をなし、管内圧力に正負の振動を生じる。負値のときマスクおよびダグラス・バッグより浸入した空気は、正值のときダグラス・バッグ、または流量計に流入することがある。特に流量計の空気導入口に逆止弁がついている場合には測定誤差は甚しく大きくなる。また湿式ガスメータに直結する場合も誤差は無視できない。

c) ダグラス・バッグ内の採集空気量の測定は厳密に指定範囲内の圧力差および流量のもとにおこなわなければならない——使用湿式ガスメータは適正使用範囲として水圧ゲージ差 $7\text{mm}^{\text{Avecal}}$ 以下および流量 0.25 lit/min 以上とされている。この範囲を脱して測定した

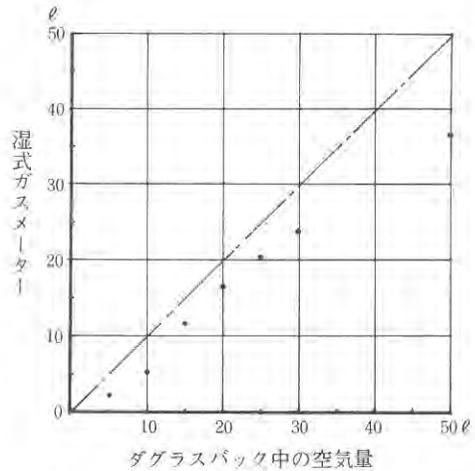


図-2 ダグラスバッグ法の検定
水圧ゲージ差7mm~13mmの場合

場合を参考として図-2に示す。以上よりも予め決められた折りた、み方法に従い慎重に計測しなければならぬことが明白である。なお4名の測定者に個人差は殆んど見られなかった。

(2) 湿式ガスメータを基準とした乾式ガスメータの検定

実験は乾式ガスメータから湿式ガスメータに接続した場合と、逆の場合との2通りおこなった。測定流量を湿式ガスメータの適正使用範囲で実施した実験結果を、図-3および図-4に示す。図より明らかなように、流量が 2 lit/min 以下では乱れが相当あり(図-3)、それ以上では安定した状態で両メータの指度が殆んど正確であることが観察される(図-4)。そこで流量範囲を2つに区分し吟味する。

まず $0.25 \sim 2\text{ lit/min}$ 範囲では、乾式ガスメータから湿式ガスメータに接続して測定した場合(I)、常に前者の指度が後者より大になり、湿式ガスメータから湿式ガスメータに接続した場合(II)にも同様にこの前者の湿式ガスメータの指度が後者より大になる傾向がうかがわれる。それぞれを回帰直線式として図-3に付記すれば上述の現象は明瞭に示される。以上により湿式ガスメータには磨擦等による指示低下が量的に α あり、乾式ガスメータには同様に β ありと仮定すれば、(I)の場合の乾式ガスメータの指度(D)から湿式メータの指度(W)を減じた値は α となり、(II)の場合は $(W - D)$ は β となる。いま、 α と β の差の平均値より導いた t 検定をおこなうと

$$t > t(29, 0.01) \quad (2)$$

となり、1%水準において高度に有意差があり、測定値を1本の回帰直線式にまとめるのは論理的に無理であることがわかる。

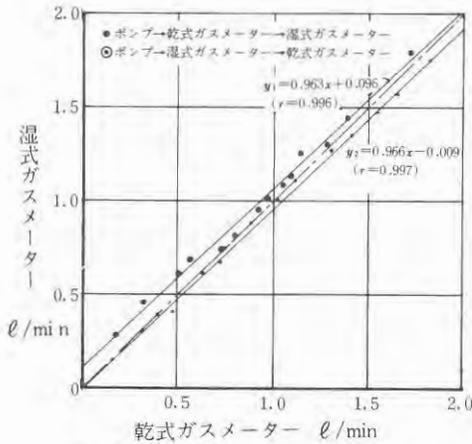


図-3 乾式ガスメーターの検定
流量2 l/min 以下の場合

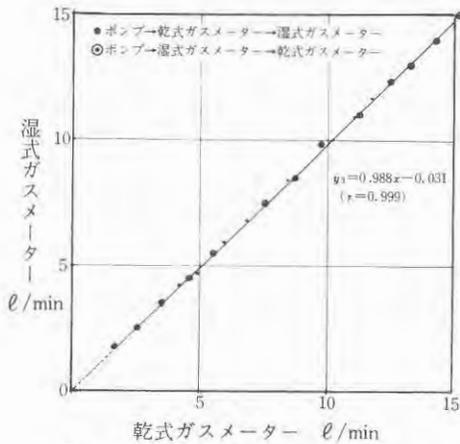


図-4 乾式ガスメーターの検定
流量 2l/min 以上の場合

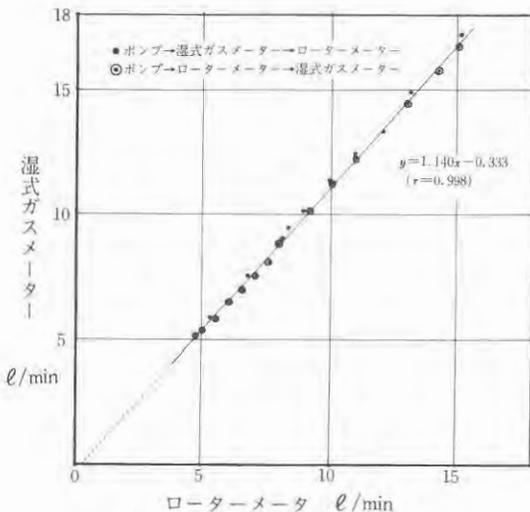


図-5 ローターメータの検定

次に同様な操作を流量 2 lit/min 以上の範囲についておこなうと (図-4 参照)

$$t > t(9, 0.05) \quad (3)$$

となり、5%水準で有意差ありとはいえ、t 検定の仮説は認められることになる。この部分の回帰直線式を求めると

$$Y_2 = 0.988x - 0.031 \quad (4)$$

これは両ガスメータが殆んど一致した指度を示すことを表現している (図-4 に付記)。

(3) 湿式ガスメータを基準としたローターメータの検定
ローターメータは簡便な流量計であるが、5 lit/min 以下の小風量の測定には用いられない。測定値を図-5 に示し、回帰直線式を付記する。図よりローターメータの指度は小さい値となることが解るが、充分な規則性をもっているといえよう。

3. 採用装置のライトレスピロメータの検定

本装置には英国の National Institute for Medical Research の B. M. Wright が開発した Wright Respirometre を呼気量の測定に用いている。この計器は極めて軽い 2 枚羽根の回転翼をもち、抵抗を小さくするため光学的パルスを計数して回転数をよむ機構をとっている。すでに R・P・Riendeau 等は呼気にかえて人工的脈

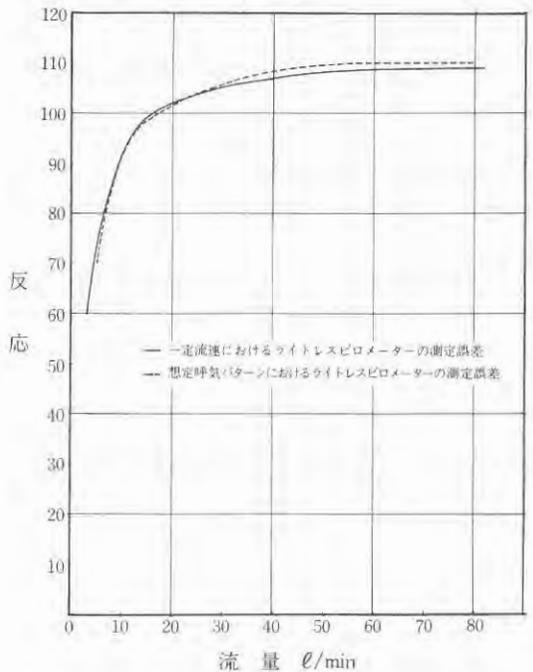


図-6 ライトレスピロメーターの測定誤差
(S 測定器提供資料)

流(三角波)を用いて標準ガスメータとの比較を、5~80 lit/min の範囲について測定し、報告している⁽⁴⁾。また、遠藤敏夫氏は呼気量をテレメータで発信し、自動測定をするのにライトレスピロメータを採用し、非常に精度の高い結果をえたと報告している⁽⁵⁾。なお、メーカー(S測器)側の資料として、一定流速における本計器の測定誤差および想定呼気パターンにおける測定誤差を流量別に%で示したものがあ(図-6参照)。こゝでは先ず一定流量の場合を検定し、次いで使用上、最も重要な自然状態の呼気流量の場合を検定する。

1) 一定流量の場合のライトレスピロメータの検定

測定結果を図-7および図-8に示す。図-7の流量範囲(0.25~17 lit/min)では回帰直線式がえられるものと仮定して次式をえた。

$$Y_3 = 0.868x + 2.078 \quad \text{lit}^{\uparrow} \quad (5)$$

上式の信頼限界の中を信頼率95%としてチェックすると測定点25個中、10個において充足されている。この結果は(5)式成立の限界あたりを示しているよう。なおこれを2次回帰式として求めると、

$$Y_4 = 0.002769x^2 + 0.825737x + 2.192819 \quad \text{lit}^{\uparrow} \quad (6)$$

本式では(5)式との誤差比較において、より高い信頼性を示す結果をえた。

図-8の流量範囲は17~80 lit/minで、測定技術上湿式ガスメータの測定値は、一たんダグラス・バッグに採取した空気量を湿式ガスメータで測定したものである。測定値は少ないきらいがあるが、回帰直線式は次のようになる。

$$Y_5 = 0.900x + 2.572 \quad \text{lit}^{\uparrow} \quad (7)$$

(7)式を(4)式と同様に信頼率95%として信頼限界の中を求めると7測定点中、6測定点が充足し、十分信頼しうることが証明される。

2) 呼気流量の場合のライトレスピロメータの検定

自然状態における呼気流量を検定した結果を図-9にまとめて示す。2.5~12 lit/minの範囲では回帰直線式は下記のようなになる。

$$Y_6 = 0.798x + 2.231 \quad \text{lit}^{\uparrow} \quad (8)$$

(8)式を95%の信頼率で、信頼限界を求めてチェックすると、18測定点全部が充足されている。

次に12~36 lit/minの範囲で同様に回帰直線式を求めると

$$Y_7 = 0.890x + 1.148 \quad \text{lit}^{\uparrow} \quad (9)$$

となり、前者と同様に信頼性をチェックすると、19測定点中、12点において充足されており、相当高い信頼性を示している。

以上、自然状態における呼気量について、ライトレス

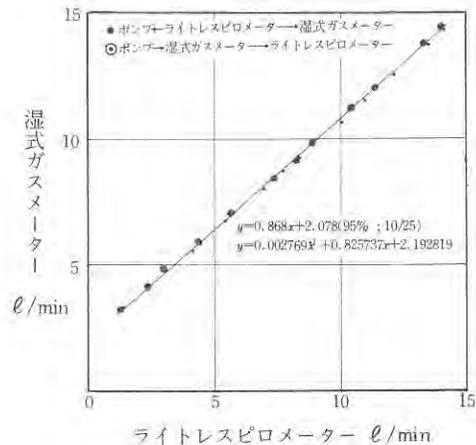


図-7 ライトレスピロメーターの検定
一定流量の場合(1~15 l/min)

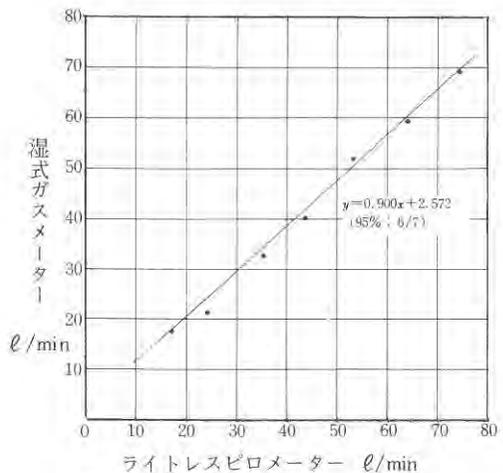


図-8 ライトレスピロメーターの検定
一定の流量の場合(17 l/min以上)

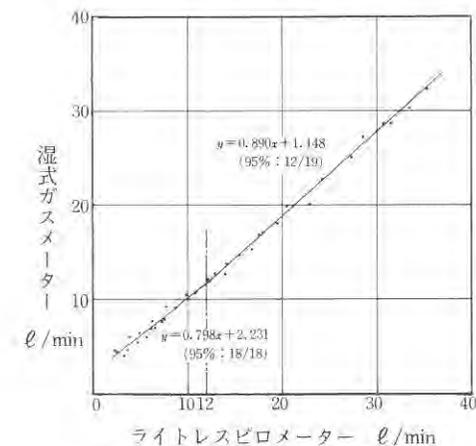


図-9 ライトレスピロメーターの検定
呼気流量の場合

ピロメータの指数が検定されたことは、採用装置の利用に明るい見通しをあたえるものであろう。

4. 呼気中の O₂ および CO₂ 濃度の検定

本節ではエネルギー代謝測定において呼気流量と同じように重要性をもつ O₂ および CO₂ 濃度の検定をおこなう。すでに採用装置に組み込まれているガス定量分析器と同種のグロー放電によるイオン計数による測定法の信頼性については報告がある⁽⁶⁾。すなわち広島大学医学部の西田氏等は労研式呼気分析器と同原理の化学的定量分析を手法とする Scholanders' Gas Analyzer を標準として実験をおこなっている。その結果を O₂ は $\gamma=0.994$ 、CO₂ は $\gamma=0.991$ と相関係数のみで示している。

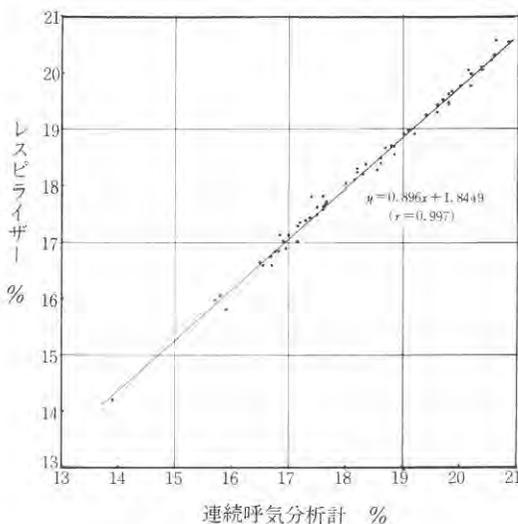


図-10 呼気中の O₂ 濃度の検定

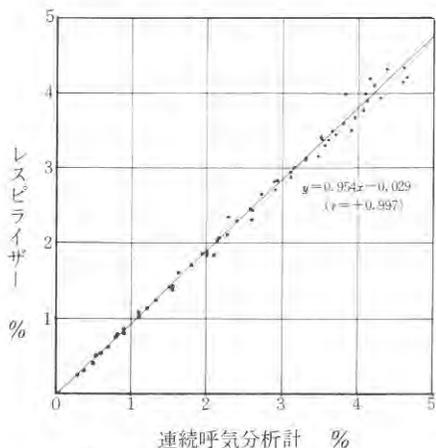


図-11 呼気中の CO₂ 濃度の検定

本検定では標準計器として、労研式呼気分析器で実験にあたり新に更正したレスピライザー (F 医理化 K・K・) を採用した。レスピライザーと採用のエクスパイアード・ガス・アナライザーの測定原理は全く異なるもので、前者は O₂ ガス濃度の測定にはその電磁性を利用し、CO₂ 濃度の測定にはその熱伝導性を利用しているのに対し、後者は前述のように放電イオン分離法を利用しているのである。

実験には「息こらえ」と「過呼吸」の状態で種々の濃度の Sample Gas を作り、これを 2 つの計器に吸入させて計測した。測定は実験日をかえて 4 回にわたっておこない、その結果を O₂ ガス濃度については図-10 に、CO₂ ガス濃度については図-11 に示す。

O₂ ガス濃度は毎回の測定が安定し、回帰直線式は次のものをえた、

$$Y_o = 0.896x + 1.8449 \quad [\%] \quad (10)$$

本式は信頼性が高いものである。ちなみに相関係数 γ は (+0.997) を示した。

次に CO₂ ガス濃度の測定では毎回の指数基準点への照合が、多少不安定であったが、全実験を通じて測定値の回帰直線式を求めると、図-11 に付記するように次式をえた、

$$Y_u = 0.954x - 0.029 \quad [\%] \quad (11)$$

(11) 式にも十分な信頼性を有するものであり、参考のため同様に γ を求めると (+0.997) をえた。

5. 結 論

本論文はエネルギー代謝量をセービングするために、如何に人間の Physical な環境をデザインすべきであるかということを命題の基本においている。この種の研究の Tool として、エネルギー代謝量を連続的、自動的、かつ高い精度において測定しうる実験装置が望まれるところである。われわれの研究室においては昨年度に S 測器 K・K・製の、この種の装置を入手した。これは呼気量測定にはライトレスピロメータ、呼気中の O₂ および CO₂ の濃度測定にはエクスパイアード・ガス・アナライザー、それらの積算およびデジタル表示装置、ガス濃度連続自記装置等を内蔵するものである。

この装置を利用する前提として、エネルギー代謝測定の精度を検討したものが本論文である。

自然状態の呼気流量の精度を検定すると (第 3 節、第 2 項参照)、信頼率 95% として信頼限界の幅を検し、十分信頼しうる値がえられることが明らかになった。また呼気中の O₂ および CO₂ 濃度の検定において (第 4 節参照)、その測定値は非常に高い信頼性をもつことが明らかに

なった。したがって、それらの積等より求められるエネルギー代謝量は呼気量測定信頼性に近似するものであろう。

別に本研究に関連してえられた成果については、第2節第1項、第2項、第3項に詳述したので省略する。

後 記

- 1) 本研究の実験には卒業学生林久美子、三村佳子、長安サカエの諸氏が当った。
- 2) 本研究の統計学的処理については三平和雄教授の御助言をえたことを感謝する。

注 記

- (1) 所謂「人間工学」的研究は、わが国では元来、衛生学のなかで扱われてきた。ここに「人間工学」という言葉に多少抵抗を感じるのは、アメリカの 'Human Engi-

neering' とイギリスの 'Ergonomics' とドイツの 'Arbeitsphysiologie' のあいだに、学問成立の背景が同様ではなく、その本質が必ずしも明確でないことによっている。

- (2) 橋本邦衛, ほか: 鉄道労働科学 Vol. 4, 追録 1-14, 1953.
- (3) 上林博雄: 立位作業台の適当高さを求める 2, 3 の実験について, 日本建築学会近畿支部論文報告集, 1964.
- (4) Riendeau, R. P. et al: J. Appl. Physiol. 14, 154-156, 1959.
- (5) 遠藤敏夫: 呼気量のテレメータリングによる自動測定, 人間工学, Vol. 11, No. 2, 3, 1975.
- (6) 西田修実, 他 8 名: エクスバイアード・ガス・アナライザーの導入系の改良とその有用性, 臨床病理 Vol. 20, No. 11, S47, 11.

Summary

We are studying the method for design of physical environment, above all, the house, the fixture, the furniture, and the utensil, to aim at saving the energy consumption of human body. At first, it has been needed for us to measure the volume and concentration of human respiration accurately.

Here, we have selected a new apparatus, which contains both the recording system of the volume and concentration of human respiration with the Wright Spirometre and the Expired Gas Analyzer, and the computer system which multiplies the volume by the concentration of it.

In order to confirm the reliability of this apparatus, we have taken the next results statistically.

1. On the volume

a. of the constant flow,

$$0.25 \sim 17 \text{ lit/min}; y_4 = 0.002769x^2 + 0.825737x + 2.192819 \quad (\text{lit})$$

$$17 \sim 80 \text{ lit/min}; y_5 = 0.900x + 2.572 \quad (\text{lit})$$

b. of the natural respiring flow,

$$2.5 \sim 12 \text{ lit/min}; y_6 = 0.798x + 2.231 \quad (\text{lit})$$

$$12 \sim 36 \text{ lit/min}; y_7 = 0.890x + 1.148 \quad (\text{lit})$$

where x is measuring value of the Wright Spirometre included in this apparatus.

2. On the concentration

a. of O₂ gas; $y_8 = 0.896x + 1.845 \quad (\%)$

b. of CO₂ gas; $y_9 = 0.954x - 0.029 \quad (\%)$

where x is measuring value of the Expired Gas Analyzer included in this apparatus.

We have come to the conclusion that this apparatus will satisfy our needs generally, to study the energy metabolism of human body.