

## 浮腫評価のための体肢容積計の開発

中村隆夫, 合田典子<sup>1)</sup>, 白井喜代子<sup>1)</sup>, 楠原俊昌, 山本尚武

### 要 約

周産期医学にとって浮腫の定量評価は重要である。これまでは、測定部位の2箇所の周囲長をメジャーで測り、その変化により浮腫を評価している。また周囲長により容積を推定する方法も提案されている。しかしながら、この方法ではメジャーの測定部位への巻き付け方による誤差や容積を推定する根拠となる測定部位のモデル形状と実際の測定部位の形状との誤差など様々な誤差の影響により、精度の点からは十分とはいえない。

そこで、本研究では浮腫評価のための高精度で日常的な使用に適した体肢容積計を開発した。この測定原理はアルキメデスの原理を適用したもので、水を入れた水槽に測定部位を入れる前後の質量変化により、その容積を量るしくみである。まず、この容積計の出力の線形性、分解能、安定性、再現性について検討を行った。この結果、本装置の仕様は最大計測容積25,000 cm<sup>3</sup>、分解能1 cm<sup>3</sup>、非直線性0.007%以下となり、非常に高精度であるといえる。また、被験者3名の足部、下腿部の容積の日内変化を測定した結果、各被験者の容積変化の特徴を明らかにすることができ、浮腫評価への応用ができることを確認した。

キーワード：体肢容積計, 浮腫, アルキメデスの原理

### はじめに

周産期医学にとって浮腫の定量評価は重要である。浮腫を定量化する場合これまでは、測定部位の2箇所の周囲長をメジャーで測り、周囲長変化により浮腫の状態を評価している<sup>1)</sup>。ストレインゲージを用いて周囲長を測定することによりその部位のその容積を推定する方法が提案されている<sup>2,3)</sup>。しかしながら、周囲長を測る方法ではメジャーやストレインゲージの測定部位への巻き付け方による誤差や容積を推定する根拠となる測定部位のモデル形状と実際の測定部位の形状との誤差など様々な誤差の影響により、精度の点からは十分とはいえない。比較的精度の高い方法としてMRI<sup>4)</sup>、レーザ光やパターン光による人体形状計測があるが、いずれも装置が高価かつ大がかりで日常的な使用には不向きである。

そこで、本研究では浮腫評価のための高精度で日常的な使用に適した体肢容積計を開発した。この測定原理はアルキメデスの原理を適用したもので、水を入れた水槽に測定部位を入れる前後の質量変化により、その容積を量るしくみである。まずこの容積

計の出力の線形性、分解能、安定性、再現性について検討を行った。次に、実際に人の足部、下腿部を測定した結果を示し、浮腫評価への応用について検討した。

### 測定原理および測定システム

#### 1. 測定原理

本システムの容積測定においてはアルキメデスの原理を適用して測定を行う<sup>5)</sup>。すなわち物体は液体の中にあるとき、その排除した液体の体積分だけ浮力を受ける現象を利用している。具体的には水槽に水(密度 $\rho$  [g/cm<sup>3</sup>])をいれてあらかじめその質量 $M$  [g]を測定しておく。この水槽に下肢などの体肢を入れてもう一度質量 $M'$  [g]を測定する。このとき、水に入っている部分を体積 $V$  [cm<sup>3</sup>]とすると、この体積 $V$ が押しのかけた水の質量 $\rho V$  [g]の加重に相当する浮力を体積 $V$ が受ける。よって、この浮力が質量の増加分 $M'-M$ に一致することから、以下の式が成り立つ。

$$V = \frac{M' - M}{\rho} \quad (1)$$

よって $\rho$ は既知(本研究では水温を30℃としたため、 $\rho=0.99565$ )であり、 $M$ を測定するための高精度の質量計の製作が重要となる。

## 2. 測定システム

本装置の概略図を図1に示す。本装置は、水槽、水槽の質量を測定するための質量計、質量計を固定してある台座を昇降するためのリフトからなる。水槽として市販のポリプロピレン製のボックス(215 mm×320 mm×500 mm)を用い、この容積が約20,000 cm<sup>3</sup>となるように内部を加工した。測定時にはこれに水温30℃の水を約15,000 cm<sup>3</sup>入れる。質量測定には50 kgまで測定可能な高精度のロードセル(SLC-50 kg, イシダ)を用いて行う。ロードセルの出力電圧をA/D変換を介してコンピュータにて信号処理し、質量や体積への変換を行う<sup>9)</sup>。測定したい物体(体肢)は位置を固定したままで、あらかじめ測定物体の下にセットした水槽をリフトによって上昇させて、物体の水に入れる部分の調整を行う。このリフトの昇降はACリバーシブルモータ(4RK25RGK-A2, 出力25 W, オリエンタルモータ)にて行われ、位置決めおよび速度制御をリフトコントロールボックスのスイッチ等で行う。位置決め分解能は0.1 mm程度である。測定物体を水に入れる前後で質量を測定し、式(1)によって容積を算出する。

下腿部の容積測定の場合について説明する。被験者は台の上に設置した椅子に腰掛けて座る。あらかじめセットしておいた容積計の水槽の質量 $M$ を測定後、リフトによって上昇させ、被験者の下腿部を水

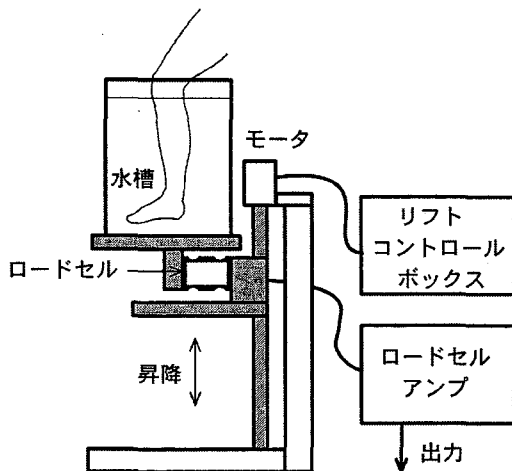


図1 体肢容積計の概略図

槽の水の中に入れていく。このときに水槽の底や壁面に下肢が直接触れないように注意する。決められた部位に水面がくるように水槽の高さを調整後、このときの質量 $M'$ を測定し容積を算出する。

## 測定項目および測定結果

まず、本装置の精度を確認するために、線形性、分解能、安定性、再現性について検討を行い、最後に被験者3名の足部と下腿部の測定を行った。

### 1. 線形性

質量計に5 kgずつ負荷をかけて、50 kgまでの質量計の出力特性について測定を行った。図2にロードセルの定格値50 kgに対する質量計の誤差率を示す。負荷が25 kgまでの最大誤差は-1.69 gであった。この場合非直線性は、0.007%以下であり、線形性が非常に高い結果となった。しかしながら、同図に示すように25 kg以上の荷重に対する線形性は悪くなった。

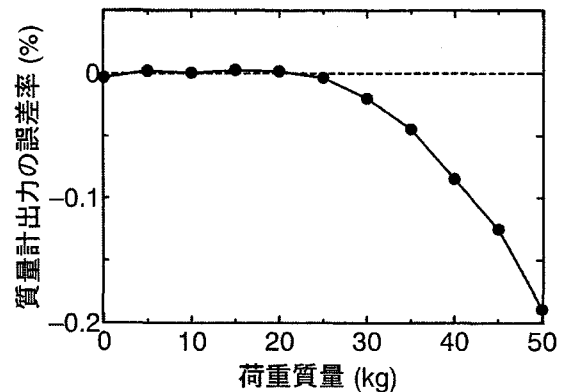


図2 荷重質量に対する質量計出力の誤差率

### 2. 分解能および安定性

図3に5分毎に5 g, 10 gと負荷を変化させたときの測定結果を示す。同図において横軸は経過時間を表し、0~5分と15~20分までは無負荷の状態、5~10分までは5 gの負荷、10~15分までは10 gの負荷をかけた。各負荷ともに出力のドリフトは小さく安定していることがわかる。この場合の出力の最大変動幅は0.1 mV以内であり、これは質量に換算すると0.5 gに相当する。よって、本装置は1 gの質量変化を検出できることより分解能を1 gとする。

### 3. 再現性

本装置は質量計としては高精度であることが示されたが、体肢の一部を水に入れて容積を量るため、

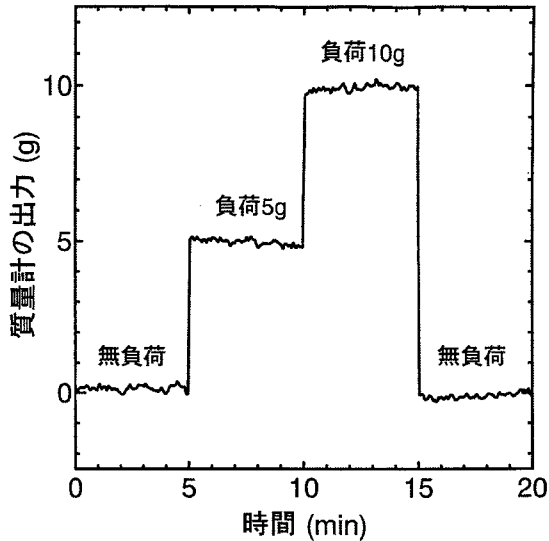


図3 荷重変化に対する質量計の出力

その部分を水に入れる精度が、容積計の精度に影響する。よって、水中での浮力による不安定を防ぐため、水とおもり（鉛）を入れて質量を調整した2リットルのペットボトルの側面に印を付け、その部分より下部の容積を繰り返し測定した。このとき印を付けた部分の断面積が80.3 cm<sup>2</sup>であった。その結果、平均値と標準偏差は1850.1 ± 2.08 cm<sup>3</sup>となり、変動係数は0.112%であった。また、同様に被験者の上肢の体積を測定した平均値と標準偏差は1485.7 ± 7.89 cm<sup>3</sup>となり、変動係数は0.531%であった。

#### 4. 体肢の測定

3名の被験者の足部、下腿部の容積測定を行った。各被験者それぞれ10時、14時、18時の4時間毎の日

表1 下腿部、足部の容積測定の結果

被験者	年齢 性別	部位	10:00	14:00	18:00		
			cm <sup>3</sup>	cm <sup>3</sup>	%	cm <sup>3</sup>	%
A	59M	下腿部	2161	2200	2.7	2326	7.7
		足部	945	959	1.5	989	4.6
		全体	3106	3179	2.4	3315	6.7
B	54F	下腿部	1638	1642	0.2	1638	0.0
		足部	597	607	1.7	638	6.8
		全体	2235	2249	0.6	2276	1.8
C	48F	下腿部	2000	2030	1.5	2100	5.0
		足部	624	631	1.1	677	8.5
		全体	2624	2661	1.4	2777	5.8

%は、10:00からの変化率

内変化を表1に示す。同表より各被験者とも時間経過とともに各部の容積の変化が見られる。

#### 考 察

アルキメデスの原理を用いた容積の測定方法として、満水状態の水槽に測定物体を入れてあふれ出す水の量から容積を算出する方法も考えられる。これは、本システムと比較して軽荷重（数kg程度）の質量を測定するという利点があるものの、(1)あふれ出す水を集める部分が必要となること、(2)水槽に体肢を入れすぎた場合に、もう一度水槽を満水にしてから測定をやりなおす必要があることの欠点がある。そのため、システムや測定の簡便性を考えると本法のほうがより適しているといえる。また、体肢に柔軟なシート状のゴムを巻き付け、このシートと体肢との間に水や空気を注入した状態で静脈閉塞法を行い、注入した水の変動や空気圧によって容積変化を計測する方法が提案されている<sup>7,8)</sup>。しかし、これらの方法は浮腫による容積変化の測定には適していない。

負荷が25 kgを超えるとロードセルへの偏荷重の影響が大きくなり、線形性が悪くなることがわかった。そのため、体肢の容積を測定することが目的であること、25 kgまでの線形性は非常によいことを鑑みて、本装置の標準秤量を25 kgとした。また原理に基づく理論上の最大計測容積は25,000 cm<sup>3</sup>となる。体肢測定の場合には、図3に示すように数分間も連続して測定することはなく、むしろ短時間で行うことが適当と考えられる。いずれにせよ負荷がある場合の出力のドリフトが小さく、安定していることは、測定に関しては重要なことである。また、質量測定の分解能1 gと水の密度が約1 g/cm<sup>3</sup>であることより、本装置の分解能を1 cm<sup>3</sup>とする。この場合のダイナミックレンジ(最大計測容積/分解能)は25,000という高精度のものとなる。以上、実験結果により本装置の仕様をとりまとめて表2に示す。

水温は30℃に設定した。これにより、下腿の核心温が31℃とされていることから<sup>9)</sup>、下腿の熱放散量を最小限とし、浮腫の増減による容積変化のみを測定できる。水の密度は30℃付近において0.03%/℃という温度依存性がある。これは、容積2,500 cm<sup>3</sup>には1℃の温度変化に対して0.75 cm<sup>3</sup>の容積変化となる。温度変化への対応は、(1)温度制御を行う方法、(2)測定時の水温に対する密度を用いる方法が考えられる。しかしながら本実験を行った環境では、測定中の水温変化は1℃以内であったため、いずれ

表2 体肢容積計の定格表

容積測定部	
最大計測容積	25,000 cm <sup>3</sup>
非直線性	0.007%
分解能	1 cm <sup>3</sup>
出力感度	0.2 mV/cm <sup>3</sup>
リフト部分	
全高	765 mm
最高位	610 mm
最低位	218 mm
揚程	392 mm
昇降速度	0-470 mm/min

の方法も採用しなかった。

物体（ペットボトル）の容積の繰り返し測定の結果は $1850.1 \pm 2.08 \text{ cm}^3$ であり、質量測定の精度と比べると精度が悪くなっている。これは、目印の所に水面を合わすことの再現性と大きく関係している。すなわち10回の測定の標準偏差 $2.08 \text{ cm}^3$ が物体の目印の位置と水面の位置との差（位置合わせ誤差）によるものと考えられる。よって、目印の位置の断面積 $80.3 \text{ cm}^2$ により、位置合わせ誤差は $2.08[\text{cm}^3] \div 80.3[\text{cm}^2] \approx 0.259[\text{mm}]$ から、 $0.3 \text{ mm}$ 以下となり、位置合わせの精度としては悪くないといえる。同様に被験者の上肢容積の測定の位置合わせ誤差を求めると $1.7 \text{ mm}$ 以下とペットボトルの結果と比べ大きな値となった。これは、ペットボトルの結果で示した位置合わせ誤差に、(1)上肢の水面に対する角度、(2)測定部位の筋肉の緊張状態、(3)測定部位の貯血量などの変動による影響が重畳していると考えられる。よって、被験者をできるかぎり同じ姿勢にして、測定部位の筋肉の緊張状態も一定になるように指導した上で、何度か繰り返し測定し平均をとる必要がある。これによって本装置のデータは、各測定に含まれる誤差のばらつきが大きいものの、浮腫評価をするための体肢容積データとして信頼できるものとする。

メジャーやストレインゲージによって周囲長を測定し、体積を推定する方法ではメジャーの測定部位への巻き付け方による誤差や容積を推定する根拠となる測定部位のモデル形状と実際の測定部位の形状との誤差により、高い精度で容積を測ることはできない。静脈閉塞法における下腿部の容積変化を下腿部に装着した2つのストレインゲージによって測定した場合、それぞれ示す下腿部の容積変化の比は、1ではなく0.6となることが報告されている<sup>10)</sup>。こ

れは、任意の部位の周囲長で容積を推定することが困難であることを示している。

被験者3名の足部、下腿部の日内変動を測定した結果、各被験者の容積増加、すなわち浮腫の程度が定量的に評価できる。被験者A、Cはともに足部、下腿部とも容積増加が観測された。特に被験者Aの増加率が大きい。また被験者Bにおいては、下腿部の変化はほとんど見られず、足部の増加のみであった。このように、浮腫の部位の判定やその増加の評価ができることが示された。

## ま と め

アルキメデスの原理を利用した高精度の体肢容積計を開発した。本装置は被験者が椅子に座る姿勢で下腿部の容積を分解能が $1 \text{ cm}^3$ という高精度で測定できる特長をもつ。今後、浮腫評価への応用が期待できる。

## 文 献

- 1) 我部山キヨ子：性周期に伴う浮腫に関する研究－浮腫の主観的評価と客観的評価の関連性－。周産期医学，31：262-267，2002。
- 2) Whitney, R. J.: The measurement of volume change in human limbs. *J. Physiol.*, 121: 1-27, 1953.
- 3) Geddes, L. A. and Baker, L. E.: Principles of APPLIED BIOMEDICAL INSTRUMENTATION (Third Edition). 45-49, John Wiley & Sons, Inc.: New York, 1989.
- 4) 長岡智明, 櫻井清子, 国枝悦夫, 渡辺惣一, 本間寛之, 鈴木 保, 河合光正, 酒本勝之, 小川幸次, 此川公紀, 久保田勝巳, 金鳳洙, 多氣昌生, 山中幸雄, 渡辺 敏: 日本人成人男女の平均体型を有する全身数値モデルの開発。生体医工学, 40: 239-246, 2002。
- 5) 石井千穎 (監訳): ライフサイエンス物理学. 209, 廣川出版: 東京, 1983.
- 6) Yamamoto, Y., Yamamoto, T., Öberg, P. Å. and Yoshida, A.: Venous Occlusion Plethysmography Using a Load Cell as the Sensing Element. *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, 39: 987-990, 1990.
- 7) Dahn, I.: On the Calibration and Accuracy of Segmental Calf Plethysmography with a Description of a New Expansion Chamber and a New Sleeve. *Scand. J. Clin. Lab. Invest.*, 16: 347-356, 1964.
- 8) Dahn, I., Johnson, B., and Nilsen, R.: A Plethysmographic Methods for Determination of Flow and Volume Pulsations in a Limb. *J. Appl. Physiol.*, 28: 333-336, 1970.
- 9) 中山昭雄 (編): 温熱生理学. 8, 理工学社: 東京, 1981.
- 10) Yamamoto, Y., Yamamoto, T., Öberg, P. Å.: Impedance plethysmography for blood flow measurements in human limbs Part 2 Influence of limb cross-sectional area. *Med. & Biol. Eng. & Comput.*, 30: 518-524, 1992.

## Development of human limb volume meter for evaluation of edema

Takao NAKAMURA, Noriko GODA<sup>1)</sup>, Kiyoko SHIRAI<sup>1)</sup>,  
Toshimasa KUSUHARA and Yoshitake YAMAMOTO

### Abstract

Quantitative evaluation of the edema is important for perinatal medicine. In a conventional method, the volume of human limb has been estimated by 2 circumferences of the measurement position, which is measured with the tape measure. However, the following errors makes this measurement insufficient; •the error by the way of winding of a measure to the measurement position, •the error between volume of model geometry of measurement position and one of real shape of measurement position and so on.

Then, we have developed a volume meter of human limb for the edema evaluation, which is high precision and suitable for the everyday use. Archimedes' principle was applied as this measurement principle. The mass change of water tank with water, when the measurement part water in, was converted to volume of measurement part. The linearity, resolution, stability, reproducibility of the volume meter was investigated. Considering these results, we found that the specification of this equipment was high precise as follows; maximum volume of 25,000 cm<sup>3</sup>, resolution of 1 cm<sup>3</sup>, nonlinearity of 0.007%. We also measured the diurnal volume change of foot and lower leg in three subjects. We found that the differences between foot and lower leg or among the subjects.

The developed volume meter can be expected to apply to quantitative evaluation of the edema.

---

**Key Words** : volume meter, edema, Archimedes' Principle

---

Department of Radiological Technology, Faculty of Health Sciences, Okayama University Medical School  
1) Department of Nursing, Faculty of Health Sciences, Okayama University Medical School