

近赤外線分光法を用いた下腿筋血流測定

佐々木規之* 飛田 研二* 四方 裕夫*
坂本 滋* 松原 純一* 斎藤 建夫**

要 旨：近赤外線分光法(NIRS)を用い、健康人10人19肢について腓腹筋の血流量をvenous occlusion法を行い、測定した。四肢血流量測定法のうち代表的なものであるストレンゲージ容積脈波計(以下、RSG)法で得た値と比較して、血流量測定に利用可能であるという結果が得られたので報告する。(J. Jpn. Coll. Angiol., 2003, 43: 345-349)

Key words: Near infrared spectroscopy, Venous occlusion method, Oxygen saturation in tissue, Metabolic ratio for oxygen

はじめに

近赤外線分光法(near infrared spectroscopy: NIRS)とは700~2500nmの近赤外波長域における光の吸収及び発光に基づく光計測法である。NIRSの特徴は、ヘモグロビンなどの酸素代謝関連物質を酸素化状態をも含めて無侵襲的に測定できること、また動的状態においてもリアルタイムな測定が可能なことである。1977年Jobsisの近赤外線を用いた、生体の酸素代謝の無侵襲測定法の報告以来、多くの臨床応用が試みられてきた¹⁾。

目 的

NIRSを用いることによって、組織のヘモグロビン量を求めることが可能で、その単位時間当たりのヘモグロビン量の変化を血液中のヘモグロビン濃度で割ると局所血流量が求められる。NIRSの原理を用いて開発されたバイオメディカルサイエンス社製PSA-III N(波長: 700nm, 750nm, 830nm)にて得られたvenous occlusion施行時の血流量と、四肢血流量の無侵襲的測定法であるRSG法で得られた血流量の値を比較して、NIRSが血流量の測定に利用可能であるかを検討するものである。

対 象

下肢に血行障害のない健康成人男性10人、19肢につ

いて測定を行った(年齢26~49歳 平均33.6歳)。

方 法

使用した測定装置は、バイオメディカルサイエンス社製PSA-III N(波長: 700nm, 750nm, 830nm)(Fig. 1A)、NIRSプロベ照射深度: 3~5cm(Fig. 1左下段)、トラバースストレンゲージ(HORKANSON社製、30~36cm)(Fig. 1左下段)、ストレンゲージプレスチモグラフ(Fig. 1B)およびvenous occlusionを施行するためにrapid cuff inflator(Fig. 1C)を準備した。運動負荷装置(Fig. 1左上段)としては、パネ付きの板を自作した。これはパネの力に抗して足関節を底屈させるものである。被験者を仰臥位とし、Fig. 2に示したとおり下肢負荷装置を測定する下肢の足底部に装着し大腿部にvenous occlusion用のカフを装着した。下腿周径の最も大きい部位にトラバースストレンゲージを巻き付け、腓腹筋内側頭上にはNIRSのプロベを装着した。このような状態でまず安静時に大腿部を70mmHgで駆血しNIRSとRSGを同時に測定しこの値を安静時値とした。駆血解除後、足部の底屈運動負荷を5回行い、その直後に安静時と同様に大腿部を駆血してNIRSとRSGを同時に測定した。同様の方法で運動負荷を10回、20回、40回行い、それぞれの運動負荷後の値を測定した。記録はNIRSではPSA-III Nに付属のコンピューターソフトChart v 3.5.2で行い、RSGではペンレコーダーで行っ

* 金沢医科大学胸部心臓血管外科

** 株式会社バイオメディカルサイエンス

2003年3月1日受付 2003年8月26日受理

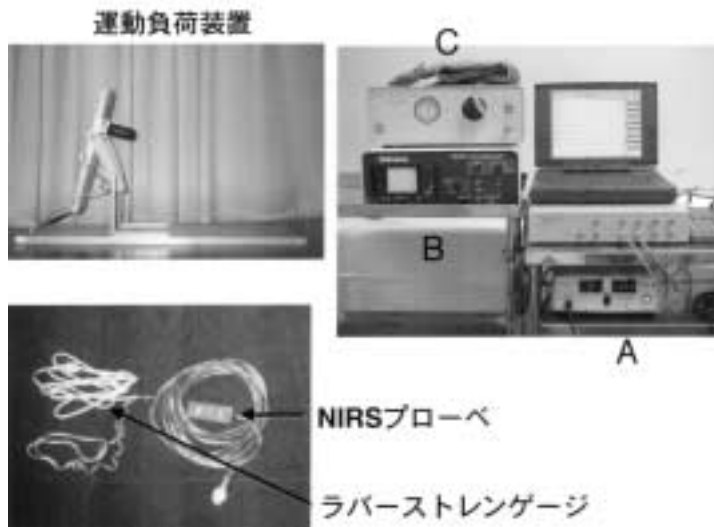


Figure 1 Overview of the proposed system.
A: Measuring device of near infrared spectroscopy.
B: Strain gauge plethysmography.
C: Rapid cuff inflator.
Upper left panel: Plantar flexion exercise device.
Lower left panel: NIRS probe, Rubber strain gauge.



Figure 2 Schematic photograph of the experimental setup for flexion exercises.

た。RSGによる血流量の算出にはFig. 3に示したように記録された脈波の2または3拍目に接線を引き、その傾きから血流量を導いた。NIRSによる血流量の算出はFig. 4のように得られたT-Hb量の曲線において立ち上がり部位に接線を引き、この接線の1分経過時のT-Hb増加量を1分間当たりのT-Hb変化量とした。このT-Hb変化量をHb濃度で割ることによって局所の血流量が得られる。今回はHb濃度を15g/dlと仮定し、以下の数式によって血流量を算出した。

今回は健康な成人の男性を対象とした検討であったため、Hbの増減による血流量、ひいては酸素消費量の

変化を検討したものではないため15g/dlと仮定した。

$$\begin{aligned} & \text{1分間当たりの血流量 (dl/min)} \\ &= \Delta \text{total Hb (cm} \cdot \text{g/l)} \div [\text{Hb}] \text{ (g/dl)} \end{aligned}$$

結 果

RSGによって得られた血流量とNIRSによって得られた血流量が運動負荷を加えることによって変化することをそれぞれFig. 5とFig. 6で示した。いずれも運動負荷が増加するにつれて血流量は有意に増加した。以上のことから、NIRSによって得られた血流量とRSGによって得られた血流量について散布図 (Fig. 7) を作成し、相関関係を求めてみた。すると、多少のばらつきはあるものの、 $r=0.484$ と比較的よい相関を認めた。また組織の血流量と動静脈の酸素濃度差を用いることにより、Fickの法則から組織酸素消費量 (以下、 MRO_2 : Metabolic Ratio for Oxygen) を求めることができる。以下の数式で算出される。

$$\begin{aligned} \text{MRO}_2 &= \text{組織血流量} \times \text{動静脈酸素濃度差} \\ &= \text{組織血流量} \times 1.36 \times (\text{SaO}_2/100 - \text{SvO}_2/100) \\ & \quad [\text{ml}(\text{min} \cdot 100\text{g})] \end{aligned}$$

* SaO_2 は98と仮定し、 SvO_2 は StO_2 で代用した。

RSGによる血流量の算出

カフに圧を加えてからの時間を算出。

$$T(\text{sec}) = X(\text{mm}) \div \text{ペーパースピード}(5\text{mm/sec})$$

T(sec)より、60秒換算する。

$$60(\text{sec}) \div T(\text{sec}) = A$$

$$Y(\text{mm}) \times A = B(\text{mm})$$

ここで、1%校正波の高さが10(mm)(RANGE:1%/cm)だとすると、校正波1%は、100ml中に1mlの血流(1ml/100ml)が流入した時の高さを表すので

$$Q(\text{ml/min}/100\text{ml}) = B(\text{mm}) \div 10(\text{mm})$$

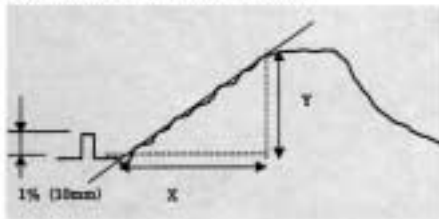


Figure 3 Calculation of blood flow by rubber strain gauge plethysmography.

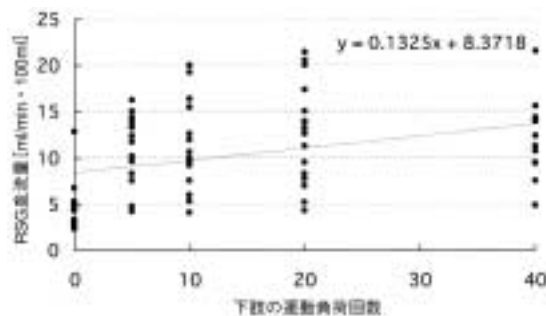


Figure 5 The relationship between plantar flexion exercise and blood flow of rubber strain gauge plethysmography.

1.36 : 1 gのHbに結合するO₂容積。

StO₂ : PSA-III Nで測定可能な組織酸素飽和度。

このようにして得られたMRO₂と下肢の運動負荷量との間には $r=0.569$ という良好な相関が得られた (Fig. 8)。

考 察

従来のNIRS装置では酸素化ヘモグロビン、還元ヘモグロビン及び総ヘモグロビンを測定することが可能であるが、いずれも定性的な変化を求めるものがほとんどであり、絶対値を求めるまでには至ってい

NIRSによる血流量測定

T-Hb量曲線において、立ち上がり部位に接線を引く。この接線の1分経過時のT-Hb増加量を1分間当たりのT-Hb量($\text{cm} \cdot \text{g/l}$)の変化量： $\Delta \text{total Hb}(\text{cm} \cdot \text{g/l/min})$ とする。

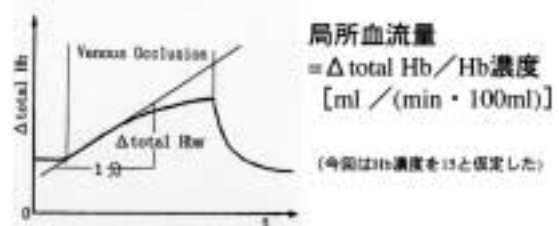


Figure 4 Calculation of blood flow by near infrared spectroscopy.

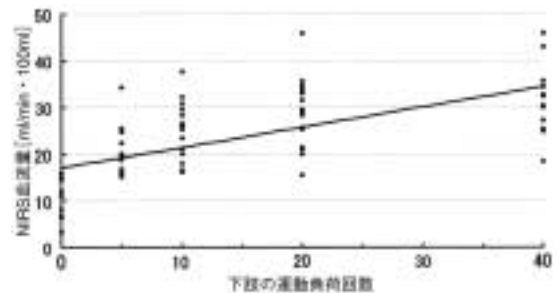


Figure 6 The relationship between plantar flexion exercise and blood flow of near infrared spectroscopy.

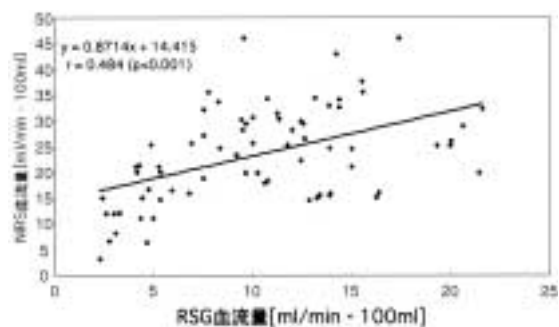


Figure 7 The relationship between rubber strain gauge plethysmography and blood flow of near infrared spectroscopy.

ない。近年、本研究で用いた装置のように、組織酸素飽和度(StO₂)とTotal Hb量からvenous occlusion法を行うことによって組織血流量を求めることが可能となっている⁴⁾。四肢の一定組織内の血流量を測定する

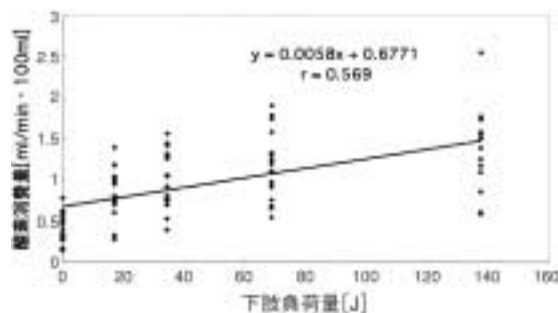


Figure 8 The relationship between metabolic ratio for oxygen and plantar flexion exercise.

代表的なものに静脈閉塞性プレスモグラフィがある。これは肢の静脈をカフで圧迫してoutflowを止めると、肢の容積が増加するが、この容積増加率の初期値が動脈から流入する血流量ということになる。中でも簡便な方法にストレンゲージプレスチモグラフがある³⁾。本研究はNIRS装置にて四肢の血流量を測定する際、このvenous occlusion法を応用することによって測定された、組織血流量の妥当性を求めるものである。ストレンゲージプレスチモグラフで得られた血流量と、NIRSによる血流量はある一定の運動負荷を加えることによっていずれも増加し、相関を認めた。本研究で使用した装置を用いて斎藤らは、上肢においてはvenous occlusion法施行時のNIRSによって求めた血流量は水素クリアランス法によって求めた血流量とほぼ等しい値を示したと報告している⁴⁾。また、前腕においてNIRSとRSGによってそれぞれ求められた血流量は非常によく相関したとの報告もある⁵⁾。今回は下腿筋の血流量を求めたが、これはストレンゲージプレスチモグラフで得られた血流量と相関を示したことから、四肢血流量測定にNIRSは利用可能であることが示唆された。NIRS装置については、基本的原理の違いから、Lambert-Beer法適用のものや、spatially resolved spectroscopy(空間分解法)、time resolved spectroscopy(時間分解法)、phase resolved spectroscopy(位相差測定法)など、種々のタイプが存在する⁶⁾。これら装置の差異の比較検討が十分でなく、また統一された規格もないが、本研究に用いた装置では他の装置で得られる組織酸素化指標、もしくは組織酸素化率を組織酸素飽和度(StO_2)として求めることができる⁷⁾。前述のごとくFickの法則から、組織血流量と動静脈酸素濃度差を用いることに

よって組織酸素消費量を(MRO_2)求めることができる。NIRSで得られた血流量から、 SaO_2 は98と仮定し、 SvO_2 は StO_2 で代用し、 MRO_2 算出を試みた。 MRO_2 を求める際、 SaO_2 の測定は不可欠である。今回は健康な成人の男性を対象とした検討で、 SaO_2 の増減による酸素消費量の変化を検討したものではないため98%と仮定した。組織中の血液は動脈血と静脈血が混在したもので、その大部分は静脈である。 StO_2 は SvO_2 との間に有意な相関を示すと酒井ら⁷⁾が述べていることから、 SvO_2 を StO_2 で代用した。以上のことから求められた安静時 MRO_2 は $0.68 \text{ (ml} \cdot \text{min}^{-1} \cdot 100\text{g}^{-1})$ であり、日本ME学会資料編に記載されている骨格筋の MRO_2 $0.2 \text{ ml} / (\text{min} \cdot 100\text{g})$ に近い値を得た⁸⁾。また運動負荷量を増加することで MRO_2 も増加を示し、 MRO_2 と運動負荷量に相関を認めた。このことから MRO_2 は組織における酸素代謝を知る上で重要なパラメーターの一つであると考えられた。今後は本法を用いて、間歇性跛行を訴える閉塞性動脈硬化症の患者を対象に組織血流量測定の妥当性を見出したいが、大腿部を70mmHgで駆血する必要のあるvenous occlusion法では足関節圧が70mmHg以下の患者では測定不能である。したがって、足関節圧80mmHg以上であるという条件のもとで、組織血流量の測定を行い、また組織酸素消費量と重症度との関係も検討していきたい。

結 語

バイオメディカルサイエンス社製PSA-III Nを用いて健康人の下腿筋の血流量測定を試みた。同装置は組織血流量測定と、さらには組織酸素消費量を求めることに利用可能であることが示唆された。今後は跛行肢における同研究を試み、検討を積み重ねていきたい。

文 献

- 1) Jobsis FF: Noninvasive infrared monitoring of cerebral and myocardial oxygen sufficiency and circulatory parameters. Science, 198; 1264-1267, 1977.
- 2) 酒井秋男, 斎藤建夫: 近赤外分光法を用いた組織酸素消費量の無侵襲連続測定. Ther Res, 16(9): 247-250, 1995.
- 3) 塩野谷恵彦, 大原 到, 阪口周吉編集: 末梢血管疾患の無侵襲診断法. 225-234, 1983.
- 4) 斎藤建夫, 酒井秋男: 近赤外分光法を用いたVenous

- Occlusion法による組織血流計測 . Ther Res, 17(6): 137-140 , 1996 .
- 5)De Blasi RA, Ferrari M, Natali A et al: Noninvasive measurement of forearm blood flow and oxygen consumption by near infrared spectroscopy. J Appl Physiol, 76: 1388-1393, 1994.
- 6)竹内光吉, 佐々木健, 田端強志他 : 使用経験に基づく近赤外線分光装置の問題点 . 脈管学 , 40 : 409-422 , 2000 .
- 7)酒井秋男, 斎藤建夫他 : 組織酸素飽和度(StO₂)およびヘモグロビン量(Hb vol)測定装置の開発 . 医科器械学 , 64(6): 264-269 , 1994 .
- 8)医用電子生体工学ME事典 , 日本ME学会編 . 1978 .

Measurement of Calf Muscle Blood Flow Using Near Infrared Spectroscopy

Noriyuki Sasaki*, Kenji Hida*, Hiroo Sikata*, Sigeru Sakamoto*, Juniti Matubara*, and Takeo Saito**

* Cardiovascular Surgery, Kanazawa Medical University, Ishikawa, Japan

** Biomedical Science Inc., Ishikawa, Japan

Key words: Near infrared spectroscopy, Venous occlusion method, Oxygen saturation in tissue, Metabolic ratio for oxygen

Using near infrared spectroscopy (NIRS), calf muscle blood flow was noninvasive evaluation by inducing a 70 mmHg venous occlusion. Ten healthy subjects were studied both at rest and after leg exercise during vascular occlusion. Calf blood flow was also measured by strain-gauge plethysmography. These values showed a correlation ($r=0.484$) with those obtained by the plethysmography. NIRS suggested that it was possible to measure of tissue blood flow.

(J. Jpn. Coll. Angiol., 2003, 43: 345-349)