

レーザースペックル二次元血流画像化法を用いた 温熱刺激による足部皮膚血流変化の特徴 －サーモグラフィとの比較からみたフットケアへの 有用性の検討（第一報）－

Feature of the foot skin blood flow change by thermal stimulation using a
two-dimensional blood flow imaging methods laser speckle
－ Usefulness to foot care as seen from the comparison with thermography
(first report) －

張替直美、箕越功浩

Naomi Harikae, Katsuhiko Minokoshi

要約

本研究の目的は、二次元レーザー血流計がフットケアに臨床応用できるかどうかを検討することにある。本稿ではその第一歩として、足背に温熱刺激を加えサーモグラフィと測定値や画像の変化を比較することで、二次元レーザー血流計の有用性を検討した。

その結果、二次元レーザー血流計はサーモグラフィによる表面温度とは異なる循環動態を反映していた。画像の色調は血流が増加するにつれ寒色から暖色へと変化し、皮膚血流を可視化する媒体となり得ることが確認できた。また、画像の見え方がサーモグラフィに比べ環境温度の影響を受けにくいいため、冷え性の人や発汗時の末梢循環動態の測定に適しており、フットケアへの臨床応用の可能性が示唆された。

キーワード：二次元レーザー血流計、足部皮膚血流、フットケア、温熱刺激

Two-dimensional laser blood flow meter, foot skin blood flow, foot care, thermal stimulation

I. はじめに

レーザー血流計は末梢皮膚血流を測定できる機器として、看護ケアの効果判定に用いられてきた¹⁾⁻³⁾。笠田ら⁴⁾は、一次元のレーザー血流計を用いて透析患者の足背と足底で皮膚血流を測定し、Fontaine分類との関連から透析患者のフットケアにおける検査項目として有用であるとしている。近年、レーザー血流計はレーザースペックル画像化法により二次元測定が可能となり、可視化できるようになった⁵⁾⁻⁷⁾。現在、この二次元血流計は主に眼底の血流測定に用いられている⁸⁾⁻⁹⁾。皮膚の血流測定としては、褥瘡や味覚の種類と顔面の皮膚血流変化についての論文がみられる¹⁰⁾⁻¹¹⁾。

糖尿病の慢性合併症には、最小血管症である網膜

症、腎症、神経障害と、大血管症である冠動脈疾患、脳血管疾患と末梢動脈性疾患に分類される。そして、糖尿病足病変は末梢動脈病変の一部であり¹²⁾、これは21世紀における糖尿病患者の抱える大きな問題の一つとして注目されてきた¹³⁾。

平成20年度の診療報酬改定において、糖尿病合併症管理料が認められ、医師が糖尿病足病変に関する指導の必要性があると認めた場合にはフットケアが点数化された。このことにより、糖尿病認定看護師や糖尿病療養指導士を中心にフットケア外来の試みやフットケアプログラムの開発が盛んに行われている^{14) 15)}。

糖尿病足病変の原因は、糖尿病による末梢神経障害と末梢循環不全、および易感染性である。そのうち、末梢循環不全は患者にとって分かりやす

*山口県立大学看護栄養学部看護学科

**山口県立大学大学院健康福祉学研究科博士前期課程

* Yamaguchi Prefectural University Faculty of Nursing and Nutrition Department of Nursing.

** Yamaguchi Prefectural University Graduate School of Health and Welfare Studies Master's Division

い指標であり、患者教育の指標・媒体として有用性が高いと考える。現在、フットケアにおける末梢循環動態の指標は、皮膚の色調や温度感覚から始まり、ドップラー血流計、レーザー血流計、サーモグラフィ、足関節/上腕血圧比 (ankle-brachial pressure index : ABI)、皮膚灌流圧 (skin perfusion pressure : SPP) などがある。これら諸指標の組み合わせから、末梢循環動態を判断しているのが現状であるが、患者にとってわかりやすい指標とは言い難い。そこで、レーザーベクトル二次元血流画像化法がフットケアに臨床応用できれば、患者にとって末梢循環を可視化できる媒体として有用性が高いと考えた。

本研究の目的は、二次元レーザー血流計がフットケアに臨床応用できるかどうかを検討することにある。本稿ではその第一歩として、健康人を対象に足部に温熱刺激を加え、二次元レーザー血流計による皮膚血流の変化と画像の見え方をサーモグラフィと比較検討した。

II. 研究方法

1. 対象

対象は、足部の血流に影響する疾患や病変および服薬のない健康な学生 12 名であった。平均年齢は、 23.3 ± 13.7 歳 (18 歳～37 歳)、男性 6 名、女性 6 名であった。

2. 実験方法

1) 実験期間

2011 年 9 月 5 日～9 月 15 日

2) 測定機器

①二次元レーザー血流計 (以下、LFG-1-W)

本装置は皮膚など生体表面の末梢血流速度分布を非接触、無侵襲に測定し、二次元のマップ状に表示する装置である。本実験では、アドバンス社の LFG-1-W を用いた。血流測定の原理と概念は、図 1 の通りである。

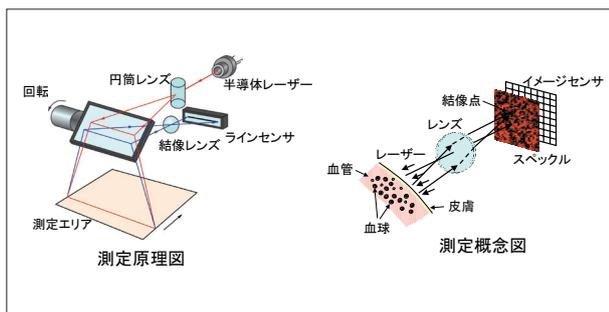


図 1 二次元レーザー血流計の測定原理と概念

半導体レーザーから出射した光は、円筒レンズによりライン状に広げられ、ミラーで反射した後皮膚表面を照射する。皮膚表面上のラインスポットで散乱された光は、ミラーで反射した後、レンズを通してイメージセンサ上に結像する。イメージセンサの出力信号をマイコンで処理して観測ライン上の血流分布を測定した後、ミラーをモーターで回して観測ラインを 1 ステップ移動し、同様の測定を繰り返して血流の二次元マップを求めている。この血流マップ内に領域を指定し、その内部の平均血流値 (FLOW) を相対値として読み取ることができる。図 2 は、パソコン上の測定画面である。

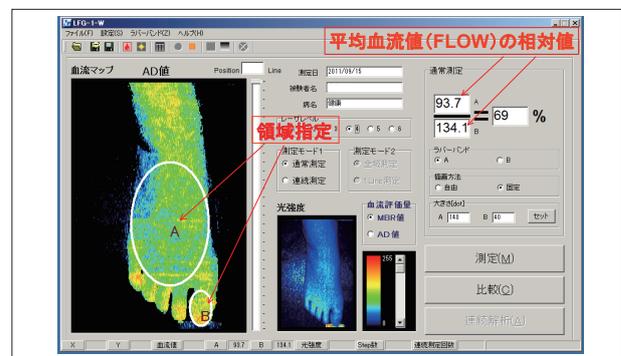


図 2 二次元レーザー血流計の測定画面

血流を測定する際のレーザー光は最大 20 mW の出力が出るので、レーザーの安全基準 (JIS C6802) のクラス分類では 3 B に相当する。皮膚に対する生理的な影響はないとされている。図 3 は、血流計のシステム構成と測定状況である。

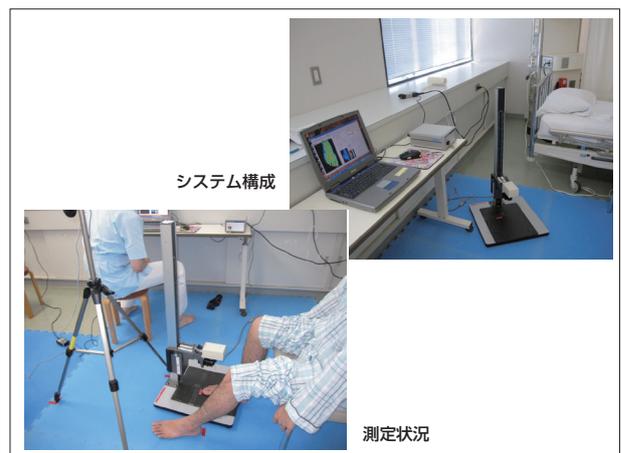


図 3 二次元レーザー血流計のシステム構成と測定状況

②サーモグラフィ

赤外線サーモグラフィは、対象物から出ている赤外線放射エネルギーを検出し温度に変換して温度分布を画像表示する装置である。また、広い範囲の表

面温度の分布を相対的に比較できる方法である。本実験では NEC 多機能サーモグラフィ R300 を用いた。本装置は、パソコンとオンラインで熱画像、可視画像、合成画像のリアルタイム表示と録画が可能で、測定温度の解析も可能である。

3) 実験環境

室温は平均 $27.5 \pm 1.1^{\circ}\text{C}$ (26.4 ~ 28.6)、湿度は平均 $47.6 \pm 5.4\%$ (42.2 ~ 53) であった。

4) 測定方法

アドバンス社の LFG-1-W と NEC 多機能サーモグラフィ R300 を用いて右足の足背部の皮膚血流と皮膚表面温度を測定した。測定は、臥床安静 15 分後に 1 回目、その後座位安静 15 分後に 2 回目、そして脚温器（フジカ製スマートイレグホット® LH-2）を用いて 20 分間座位で下肢を温めた後に 3 回目の測定を行った。被験者はパジャマを着用し、臥床安静時は肩から足先までタオルケットを掛けた。

脚温器は下腿の約 3 分の 2 が保温できる形状であり、容器内の温度は $40 \pm 3^{\circ}\text{C}$ であった。脚温器を用いて下肢に温熱刺激を加えた実験を脚温実験、温熱刺激を加えない実験を対照実験とし、被験者一人に対し日を変えて 2 回実施した。

被験者には、測定前日の多量の飲酒と測定直前の喫煙や入浴、激しい運動や足を強く圧迫する靴の着用は控えるように伝えた。

5) 倫理的配慮

この研究は、研究者の所属する大学の生命倫理委員会の承諾(平成 23 山県第 192 号)を得て実施した。

3. データの分析方法

LFG-1-W とサーモグラフィの測定において、足首と足指の付け根を長径、長径の中間点を短径とした楕円を A、右第 1 指中央部の最大の楕円を B として範囲指定し、皮膚血流と表面温度の平均値を測定値とした。また、臥床安静後の値を基準値とした測定値の割合 $[(\text{測定値}) \div (\text{基準値}) \times 100]$ を算出した。

III. 結果

1. 脚温実験による足背の皮膚血流と表面温度の変化

脚温実験時の皮膚血流と表面温度の変化は図 4 の通りである。臥床安静 15 分後から座位安静 15 分後の LFG-1-W による血流は、足背 (A) で 87.6% (-12.4%) に減少した。

一方、サーモグラフィを用いた表面温度は、98.2% (-1.8%) に減少した。同様に右第 1 指 (B) では、血流は 82.7% (-17.3%) に、温度は 98% (-2%) に減少した。

脚温器を用いて下肢を 20 分間温めた時の血流は、足背 (A) で 87.6% から 106.5% (+ 18.9%) に増加した。また、表面温度は、98.2% から 107.6% (+ 9.4%) に増加した。

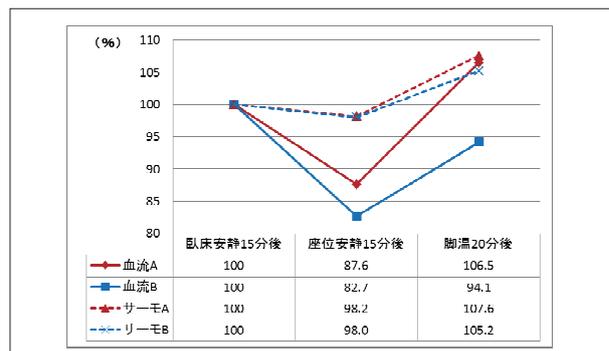


図 4 脚温実験時の皮膚血流と表面温度の変化

右第 1 指 (B) では、血流は 82.7% から 94.1% (+ 11.5%) に、温度は、98% から 105.2% (+ 7.2%) に増加した。

2. 対照実験による足背血流と表面温度の変化

対照実験の皮膚血流と表面温度の変化は図 5 の通りである。臥床安静 15 分後から座位安静 15 分後の血流は、足背 (A) で 91.1% (-8.9%) に減少した。一方、表面温度は、97.8% (-2.2%) に減少した。右第 1 指 (B) では、血流は 98.2% (-1.8%) に、温度は 99.1% (-0.9%) に減少した。

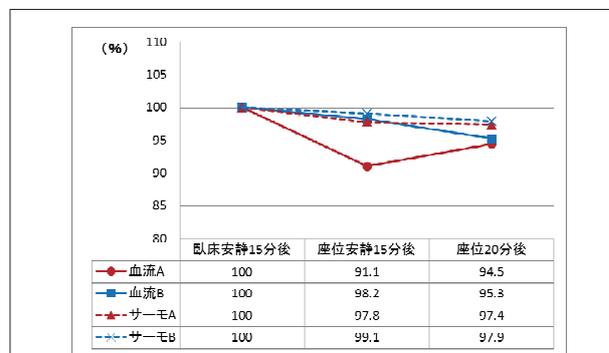


図 5 対照実験時の皮膚血流と表面温度の変化

座位安静 15 分後から座位 20 分後の足背 (A) の血流は、91.1% から 94.5% (+ 3.4%) に増加し、温度は 97.8% から 97.4% (-0.4%) に減少した。右第

1 指 (B) では、血流は 98.2% から 95.3% (-3%) に、温度は、99.1% から 97.9% (-1.2%) に減少した。

3. LFG-1-W とサーモグラフィの画像の比較

LFG-1-W とサーモグラフィの測定時の画像を図 6～図 8 に示す。図 6 は、脚温実験時の臥床安静後、座位安静後、脚温後の 3 時点の画像である。LFG-1-W の画像とサーモグラフィの画像の色調は明らかに異なっている。特に、脚温後はサーモグラフィでは全体が赤いが、LFG-1-W では部位により青や緑の寒色系から黄色や赤の暖色系と血流量の違いを反映した色調変化が見られる。図 7 は、冷え性の人の脚温実験時の画像である。LFG-1-W では、足の輪郭や色調は比較的明瞭であるが、サーモグラフィでは臥床安静後の足先と座位安静後の足指から足背にかけての画像の色調が周囲と同化し、足の輪郭が見えにくい。図 8 は、被験者が座位安静後と座位後に発汗した時の画像である。被験者は、座位安静後と座位後に足首周囲から足背にかけて発汗し、サーモグラフィによる画像は周囲と色調が同化し、足の輪郭が見え難い。特に座位後の画像は、発汗が強くなり周囲との境界がより不明瞭になっている。

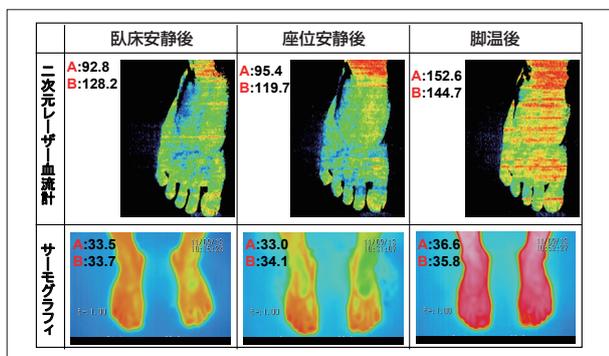


図 6 脚温実験時の LFG-1-W とサーモグラフィの画像

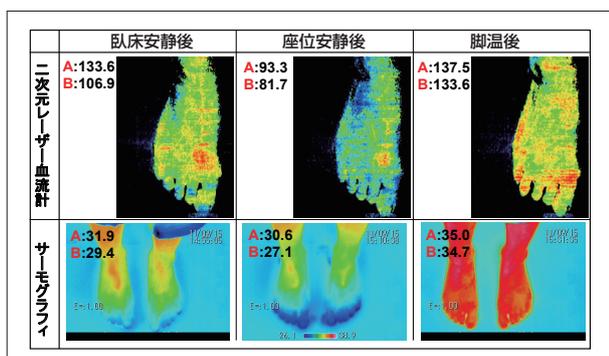


図 7 冷え性の人の LFG-1-W とサーモグラフィの画像

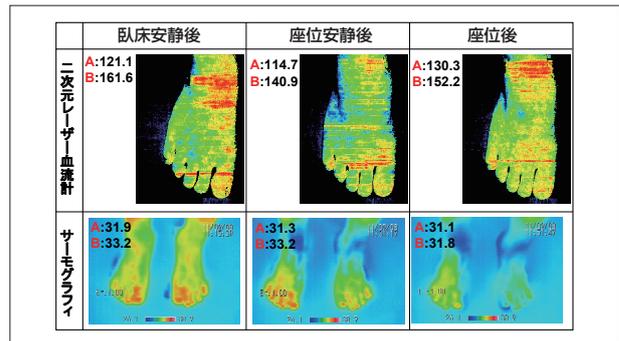


図 8 発汗時の LFG-1-W とサーモグラフィの画像

IV. 考察

1. 体位変換時における皮膚血流と表面温度の変化の違い

臥床安静から座位安静へと体位を変えることで、LFG-1-W による皮膚血流は足背全体も指先も減少していた。臥位から座位になることで上半身の拳上と下肢の下垂により、血液は重力のため下腿に流れ、一時的に足背の皮膚血流量は増加すると考える。そして、末梢血管に血液が鬱滞することで流速が減少し、座位安静 15 分後には流速と流量の積である皮膚血流 (FLOW) は減少したのではないかと。同時に、臥位から座位になることで交感神経が刺激され血管が収縮して血流は減少する。この現象は、対照実験も脚温実験も同様である。

一方、サーモグラフィでは臥位から座位への変化時は、両実験とも血流と比較してわずかな温度下降を示すのみであった。このことは、足を下垂することによる循環動態の変化、つまり LFG-1-W による皮膚血流の減少に伴って、サーモグラフィによる表面温度の下降が起きたためと考える。

これらのことから、臥位から座位時の LFG-1-W とサーモグラフィの測定値の変化の違いは、LFG-1-W が皮膚表面温度とは異なる末梢循環動態を反映しているためと考えた。

2. 温熱刺激による皮膚血流と表面温度の変化の違い

下肢に温熱刺激を加えた脚温実験では、対照実験と比較し明らかに LFG-1-W とサーモグラフィによる皮膚血流と皮膚表面温度の増加率が高かった。また、両実験とも表面温度と比較し皮膚血流の増加率が高かった。

このことは、温熱刺激により血管が拡張し、血流量も流速も増加しその積である LFG-1-W による皮膚血流 (FLOW) は増加率が高い。それに対し、

表面温度は皮膚血流の増加に伴って変化するため緩やかに上昇したと考える。

これらのことから、体位の変化時と同様にLFG-1-Wは、サーモグラフィと比較し明らかに末梢の循環動態、つまり皮膚血流を反映しているといえる。

3. サーモグラフィ画像との比較からみたフットケアへの臨床応用の可能性

体位の変化や温熱刺激によるLFG-1-Wとサーモグラフィの画像を比較すると、LFG-1-Wではサーモグラフィよりも部位による色調の変化が比較的明瞭に見られる。特に、足背部に温熱刺激を加えた場合、サーモグラフィでは足全体が赤くなるが、LFG-1-Wでは部位による色調の違いが見られる。このことは、サーモグラフィが皮膚の表面温度を、LFG-1-Wは皮膚血流を二次元の画像で可視化しているためと考える。また、色調はサーモグラフィが温度が高くなるほど寒色から暖色へと変化するのと同様に、LFG-1-Wも血流が増加するにつれて寒色から暖色へと変化する。この色調の変化は、医療職にとっても患者にとっても循環動態を把握するためには非常にわかりやすい指標となる。

冷え性の人の脚温実験の画像から、サーモグラフィでは脚温時以外は、冷えている足先が周囲の温度に近い画像の色調が周囲と同化して見えにくい。しかし、LFG-1-Wの皮膚血流は足の形状が明瞭なばかりでなく、血流の違いによる部位の色調変化もみられる。同様に被験者の発汗時の画像から、サーモグラフィでは発汗により周囲の温度と同化して画像が見え辛いですが、LFG-1-Wの皮膚血流では足の形状や、血流の違いによる部位の色調変化も見られる。このことはすなわち、サーモグラフィは表面温度の画像であり、LFG-1-Wは二次元の皮膚血流を反映した画像といえる。そのため、LFG-1-Wはサーモグラフィと違い、環境温度に影響を受けにくく発汗時にも測定でき、フットケアにおける血流測定に臨床応用できる可能性が示唆された。

4. 今後の課題

レーザー血流計による末梢皮膚血流は、皮下1ミリ程度の微小循環を反映しているといわれる。本実験では、サーモグラフィとの比較から、LFG-1-Wが表面温度とは異なる末梢循環動態を反映していることが明らかとなった。今後更に、健常人の運動負荷や駆血による血流変化を測定し、二次元血流計の実測値や画像の特徴を明らかにする必要がある。

また、足の病変時および糖尿病や慢性腎臓病などの疾患を有する対象にも測定を行い、臨床への応用を検討することが課題である。

また、LFG-1-Wの画像はレーザー照射のラインにより画像に横縞ができていますが、機器の進歩により画像の精度は改善している。今後、更に改良された機器での実験を実施しながらフットケアへの臨床応用を検討していきたい。

V. 結論

LFG-1-Wを用いた足部の血流測定は、サーモグラフィによる表面温度とは異なる末梢循環動態を反映していた。また、画像から微細な血流変化が可視化でき、足部の循環動態をみる有用な媒体となる可能性がある。更に、サーモグラフィと比較して画像の色調が環境温度に影響を受けにくいため、冷え性の人の足先や発汗時の測定にも有用であり、フットケアの臨床応用への可能性が示唆された。

謝辞

本研究にあたり機器をお貸しいただいた広島大学医学部保健学科の宮腰由紀子教授、機器に関する知識や技術を提供していただいたアドバンス社の広岡繁生様、ソフトケア社の藤居仁様、高橋則善様に感謝いたします。

引用文献

- 1) 渡邊順子, 江幡美智子, 入江晶子 他: 体位変換における仙骨部の循環血液動態に関する研究, 日本看護科学会誌, Vol.13, No.3, P292, 1993.
- 2) 真砂涼子, 斉藤やよい, 松田たみ子: 清拭技術の生体に及ぼす影響—摩擦方法と温度の循環促進効果への影響—, Vol.15, No.3, P239, 1995.
- 3) 三瓶まり, 福井美香, 南前恵子: 体感音響システムによるリラクゼーション効果の検討(2)～末梢血流量からの分析～, Vol.15, No.3, P244, 1995.
- 4) 笠田寿美子, 秋山人美, 福岡幸子 他: 維持透析患者のフットケア取り組みにおけるレーザー血流測定の意義～Fontaine分類による検討～, 山梨透析研究会会誌, 28巻: 9-11, 2010.
- 5) 藤居仁: レーザー空間プロファイルの原理, あたらしい眼科, 15(2), 175-180, 1998.
- 6) 藤居仁: レーザー空間を利用した血流画像化技術, 計測と制御, Vol.39 No.4, 246-252, 2000.

- 7) 藤居仁,小西直樹他:レーザー-散乱を利用した血流画像化法の現状,レーザー学会第325回研究会報告, No.RTM-04-22,13-16,2004.
- 8) 田川博,佐々木紀子,田下亜左子 他:レーザーベクトル血流画像化法を用いた網膜血管の血流測定法,日本眼科紀要,第51巻:第2号,121-125,2000.
- 9) 橋本雅人,田川博,大塚賢二:レーザーベクトル法により血流動態が確認できたAIONの1例,臨眼,54巻:2号,265-268,2000.
- 10) 仲上豪朗,ユニタサリ,飯坂真司 他:レーザーベクトル血流画像化法を用いた圧迫による虚血性創傷の血流評価,Confidential report,1-6,東京大学,2008.
- 11) Kashima H, Hayashi N: Basic taste stimuli elicit unique responses facial skin blood flow. PLoS ONE ,December,Vol6,Issue 12,1-5, 2011.
- 12) 糖尿病治療ガイド:日本糖尿病学会,74,文光堂,2012-2013.
- 13) 糖尿病患者の足病変—新世紀における大きな問題— http://www.novonordisk.co.jp/idm_001/p_01.html,2002. (2002.6.1アクセス)
- 14) 大徳真珠子,江川隆子:糖尿病患者のフットケア行動に対する看護介入の成果,日本糖尿病教育・看護学会誌,Vol.8: No.1,13-24,2004.
- 15) 瀬戸奈津子,和田幹子:わが国のフットケアの現状と課題—社団法人日本糖尿病学会認定教育施設の実態調査より—,糖尿病,51巻:4号,347-356,2008.