

弾性ストッキングの着用が下腿血液循環に およぼす効果

鶴田 徳美・西村 宗修・渡邊 紳一・松尾 崇

[研究論文] 弾性ストッキングの着用が下腿血液循環におよぼす効果

鶴田徳美¹・西村宗修²・渡邊紳一²・松尾崇²

1. 総合東京病院臨床工学科 (神奈川工科大学臨床工学科 2022 年 3 月卒業)
2. 健康医療科学部 臨床工学科

The effect of elastic stockings on blood circulation in the lower leg

Narumi TSURUTA¹, Hironobu NISHIMURA², Shin-ichi WATANABE², Takashi MATSUO²

Abstract

Compression using elastic stockings in the lower leg is known to be useful in treatment of edema, fatigue, and venous diseases affecting the lower extremities. To get insight into the mechanisms of the compression effects, the measurements were made for hemoglobin (Hb) concentrations in the gastrocnemius muscle during a series of posture change and gait (5 min.-supine position, 5 min.-standing, 5 min.-walking, 5 min.-standing, and 5 min.-spine position), using the infrared spectrometry. The measurements were conducted with or without elastic stockings for comparison. The hemoglobin concentrations (oxy-Hb, deoxy-Hb, and total-Hb) and tissue oxygen saturation in the gastrocnemius were found to be markedly changed during the posture change and walking. The elastic stockings yielded about 10% decrease in total-Hb concentration throughout the spine position, standing, and walking, indicating the increase of venous return in the lower leg.

Keywords: Elastic stocking, Blood circulation, Hemoglobin concentration, Infrared spectrometry, Lower leg, Posture change, Walking

1. はじめに

医療、看護、介護などの現場では立位での業務が多い。これらの業務従事者の職業病として、下肢の疲労やむくみなどの症状のほか、下肢静脈瘤、深部静脈血栓症、高血圧さらに心疾患などが知られている¹⁾。これらの疾患の主要な要因として、下肢における静脈還流の障害が考えられている。この血液還流障害の対処法として弾性ストッキング (Elastic stocking, 以下 ES) などによる下肢の圧迫法が用いられるようになった。ES は長期の臥床状態における静脈還流の改善にも用いられている²⁾。

ES の効果については、締め付け圧の計測、むくみの計測、主要静脈血流速の測定などにより、数多くの研究が行われてきた^{3,4)}。いっぽう、組織における血液の性状 (血液量、ヘモグロビン量など) は血液循環動態と組織での物質交換に関係する。最近の赤外光技術の発達により、血液の状態を非侵襲的に測ることができるようになった⁵⁾。立位を続けることの下腿血液性状におよぼす影響、および弾性ストッキングの静脈還流効果を理解するためには、組織における血液の状態変化をとらえる研究が必要であるが、組織ヘモグロビン量に関連した研究は極めて少ない。

本研究の目的は立位維持および歩行運動時における

組織循環の変化を明らかにし、さらに ES による組織循環改善のメカニズムを明らかにすることにある。そのために、立位および歩行運動時での下腿組織 (腓腹筋) における組織ヘモグロビン量の変化を測定した。ES の未着用時と着用時の結果を比較することにより、組織循環の観点から ES の効果を調べた。

2. 実験方法

2.1 実験条件

本研究は「神奈川工科大学ヒトを対象とした研究に関わる倫理審査委員会」の審査・承認を得て行った (承認番号: 2021-045)。被験者には書面および口頭で、実験内容・方法、実験の危険性と安全確保、実験に参加することによる不利益、個人情報の保護などについて説明し、書面で同意を得た。

被験者は 21 歳の健康な女子大学生 5 名である。実験は神奈川工科大学 E1 号館 201 室で行い、室温は $25 \pm 1^{\circ}\text{C}$ 、湿度 $40 \pm 5\%$ に設定した。

2.2 組織ヘモグロビンとその測定法

ヘモグロビン (Hb) は赤血球内に存在する色素タンパク質である。組織における酸素化ヘモグロビン (oxy-Hb)

濃度と脱酸素化ヘモグロビン (deoxy-Hb) 濃度の和が総ヘモグロビン (total-Hb) 濃度である。Oxy-Hb は組織での酸素消費量、酸素供給量、および単位組織当たりの血液量に影響される。また、一般に組織血液量の変化は total-Hb 量に反映される。組織酸素飽和度 (SdO₂) は酸素化率とも言われ、total-Hb に対する oxy-Hb の割合として算出される。組織酸素飽和度は血液量の変化の影響が除外されるので、酸素消費量と酸素供給量のバランスのみで決定される⁵⁾。

今回、下腿 (腓腹筋) におけるヘモグロビン濃度は「無侵襲酸素モニタ：島津製作所製 OM-220」を用いて測定を行った。測定には、赤色光 (780nm) および近赤外光 (830nm) の 2 種類の光が用いられる。これらの光は生体組織に対し高い透過性をもち、主としてヘモグロビンによって吸収される。Oxy-Hb と deoxy-Hb では異なる光吸収特性を示すので、この 2 つの光の組織中での吸光度を測定することにより、それぞれのヘモグロビン濃度が求まる⁶⁾。

ヘモグロビン濃度を絶対量として求める場合は、ランベルト・ベールの法則において、光の光路長を知ることが必要であるが、これは事実上困難である。今回使用した測定装置では、光拡散理論を用いた空間分解法 (散乱後の光の計測を 2 点で行う方法) により、定量的にヘモグロビン量を測定できるとされる⁶⁾。

2.3 弾性ストッキング (ES) の選択と装着方法

ES のサイズは、被験者の足長、足関節周囲径および腓腹筋周囲径を計測し、メーカー指定のサイズ表をもとに 2 つのサイズの中から選択した。ES はスリムウォーク® メディカルリンパソックスショート (ピップ株式会社製) 膝下タイプを使用した。製品仕様は、生地はナイロンとポリウレタン、設計装着圧は足関節上部で 20.2~24.7mmHg、腓腹部で 12.7~17.2mmHg である。ES の装着にあたっては、実験者による装着方法の指示のもと被験者自ら装着を行った。

2.4 実験手順

被験者にはまず仰臥位になってもらい、ヘモグロビン測定用プローブを右腓腹筋上部に装着する。

安静姿勢を仰臥位として測定を開始する。

- ① 5 分間の仰臥位安静の後、ゆっくり起立してもらう。
- ② 5 分間立位姿勢を維持してもらう。
- ③ 5 分間、メトロノームのテンポ (110bpm) に合わせた歩行運動を繰り返してもらう。
- ④ 5 分間立位姿勢を維持してもらう。
- ⑤ 立位から仰臥位になってもらい、5 分間安静姿勢をとってもらう。
- ⑥ ES を装着してもらい、①~⑤の手順を繰り返す。

①~⑥の間、連続して組織ヘモグロビン量および組織酸素飽和度 SdO₂ をモニタした。また実験開始時、弾性ストッキング着用直前、実験終了時において、腓腹筋周囲径を測定した。さらに、弾性ストッキング着用時にストッキングの締め付け圧を簡易圧力測定器 (パーム Q) で

測定した。

3. 結果と考察

3.1 ヘモグロビン濃度の測定結果

Figure 1 には、ES 未着用時のヘモグロビン濃度について、被験者 1 名の測定結果を示してある。今回の実験では 1 秒毎にデータのサンプリングを行った。Oxy-Hb 濃度 (赤) と deoxy-Hb 濃度 (青) を足し合わせたものが total-Hb 濃度 (黄) である。

ヘモグロビン濃度の単位は通常 [g/dl] が用いられる。今回の測定装置では定量的データが得られるとされているが、センサーの装着部位 (皮膚の状態)、装着圧等の影響を強く受けるため、本報告では任意単位 [arb.] として表示した。

Figure 1 の結果は、仰臥位、立位、歩行など、体位の変換や体の動きにより、全てのヘモグロビン濃度が影響を受けることを示している。ヘモグロビン濃度は動作の変換時に、速やかに反応することが分かる。さらに、立位においては、時間経過とともにかなり大きな変化が生じることが分かる。これらの変化は、被験者 5 名に共通して生じることが分かった。

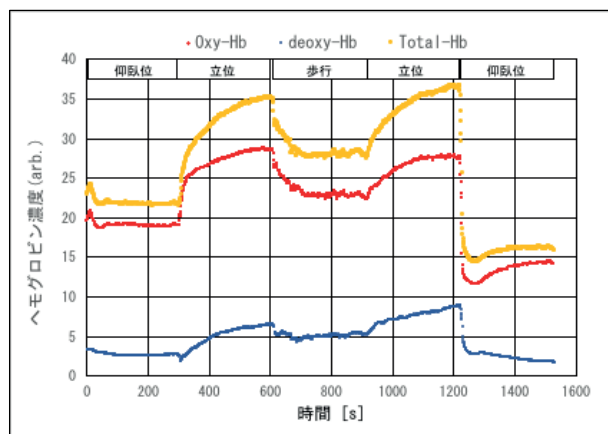


Fig.1 Hemoglobin (Hb) concentrations in the gastrocnemius muscle during a series of posture change and gait. An example for one volunteer.

3.2 Total-Hb 濃度の測定結果

ES 未着用時および着用時における下腿 total-Hb 濃度のグラフを Fig.2 に示す。この結果は、各測定時の被験者 5 名の結果を平均したものである。

Figure2 のグラフより、total-Hb 濃度は、ES 着用 (橙色) により全体的に低い値をとることが分かる。時間的な変化のしかたは、両者とも似かよっている。いずれの場合も、total-Hb 濃度は仰臥位時に低く、立位になると、速やかに上昇し、その後緩やかに上昇を続ける。これは立位に変換した際に動脈圧の上昇により下腿への輸入血流量が上昇したためである。さらに、立位から歩行運動を始めると速やかに減少し、その後やや上昇傾向を示すが、変化の幅は小さい。

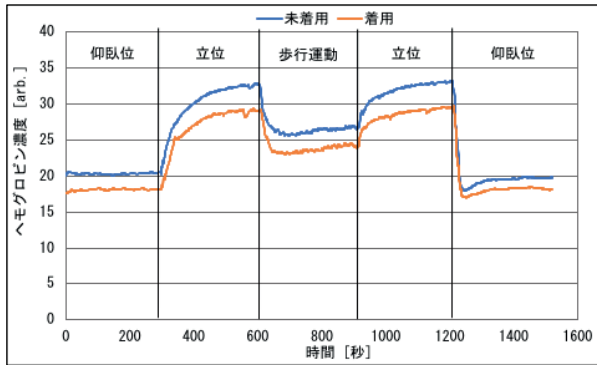


Fig.2 Total-Hb concentrations measured with (red curve) or without (blue curve) elastic stockings. Data averaged for 5 volunteers are shown.

Total-Hb 濃度の変化は組織血液量の変化と相関するため、下腿組織における血液量は、ES 着用時に減少したといえる。ES 着用による下腿の圧迫で、末梢から心臓へ戻る静脈血流量が増加し下腿組織の血液量が減少する⁴⁾。下腿静脈の血流速を測定した報告では、ES 着用により、流速が増加したと報告されている。このように、ES 着用は下肢静脈血のうっ滞を減少させていると言える。

また立位時と歩行時でヘモグロビン濃度を比較すると、歩行時に減少し、立位時に上昇する結果となった。歩行運動によって、下肢の筋肉(腓腹筋)で収縮と弛緩を繰り返すと、筋ポンプ作用により心臓への静脈還流量が増加するため、下腿に貯留する血液量が減少したと考えられる⁷⁾。

3.3 Oxy-Hb および deoxy-Hb 濃度の測定結果

Figure 3 は ES 未着用時、着用時における腓腹筋 oxy-Hb 濃度および deoxy-Hb 濃度の結果である。被験者 5 名のデータを平均したグラフを示してある。

まず、ES 未着用時の oxy-Hb 濃度(青)と deoxy-Hb 濃度(緑)を比較する。初期仰臥位では、oxy-Hb はほぼ一定の濃度に保たれている。立位直後から 45 秒間程度は急に増加し、その後は緩やかに増加して一定になる傾向を示す。立位から歩行に移行した場合には、50 秒間程度急に減少し、その後緩やかに増加傾向を示す。歩行から立位に移行すると、再び増加に転じるが、仰臥位→立位のような大きな増加は見られない。立位→仰臥位の場合には、30 秒程度の間に、急激な減少を示すがその後増加に転じ、アンダーシュートの様相を示す。これは、立位による下腿動脈圧の上昇から解放されることによる動脈血流入量の減少、それに続く静脈還流の増加による動脈血流入量の緩やかな増加によると考えられる。

ES 未着用の場合、deoxy-Hb 濃度(緑)は oxy-Hb と同様の傾向を示している。ただ、立位においては、oxy-Hb 濃度にはプラトー領域が表れるのに対して、deoxy-Hb 濃度は 5 分の測定時間中、上昇を続けるという特徴がある。これは、下腿静脈における血液のリザーバー効果、つまり静脈血量の増加(うっ滞)によると考えられる。

ES 着用時の場合、oxy-Hb (赤)と deoxy-Hb(茶)の濃

度を ES 未着用時と比較すると、全測定時間を通して低い値を示している。特に立位の場合、deoxy-Hb 量は上昇が抑えられ、頭打ちになる(プラトー)領域が生じる。これは先に述べた静脈血のうっ滞が、ES 着用により改善されたことを示している。

Deoxy-Hb は、未着用、着用いずれの場合もアンダーシュートの様相は示さない。これは、仰臥位では、緩やかであるが持続的に静脈還流が改善しているためであると考えられる。

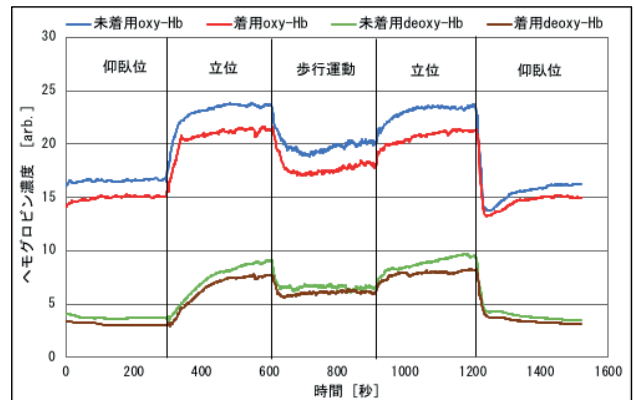


Fig.3 Oxy-Hb and deoxy-Hb concentrations averaged for 5 volunteers. Blue curve: oxy-Hb without stockings, red curve: oxy-Hb with stockings, green curve: deoxy-Hb without stockings, and brown curve: deoxy-Hb with stockings.

3.4 組織酸素飽和度の測定結果

腓腹筋組織酸素飽和度 SdO_2 の結果を Fig.4 に示す。被験者 5 人の平均値を ES 未着用時、ES 着用時に分けて示してある。測定された組織酸素飽和度は体位や歩行により大きく変化する。値としては、72%から 88%の間にある。パルスオキシメータで測られる動脈血酸素飽和度 SpO_2 (基準値 95%以上) より小さいのは、測定に毛細血管や細静脈での血液も含まれるからである。

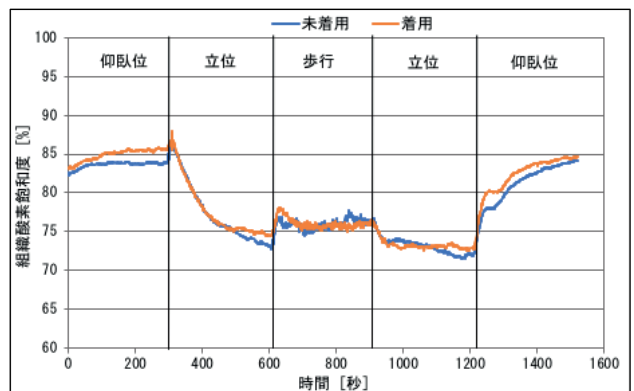


Fig.4 Tissue oxygen saturations (SdO_2) in the gastrocnemius, averaged for 5 volunteers. Orange curve: measurements with stockings, and blue curve: those without stockings.

ES 未着用 (青) と ES 着用 (橙) を比較してみると、大きな違いはみられないが、各期において特徴的な違いが見られる。仰臥位後の立位においては、体位変換後 150 秒くらいまでは ES 未着用と着用の結果は重なり、同じ減少率を示している。しかし約 150 秒以降では、ES 着用の方が傾きが小さくなり、高い飽和度を示すようになる。この差は時間が経過するにつれて大きくなる。また、立位後の歩行時では、立位後期より高い値を示しており、筋ポンプ作用の効果が現れている。今回は、5 分の立位時間をとったが、より詳しく立位の影響を調べるには、立位時間を長くして測定することも必要だと思われる。

SdO₂ は total-Hb に対する oxy-Hb の割合を示すもので、組織における酸素供給量と酸素消費量のバランスで決定される⁵⁾。そのため ES 着用によって酸素供給量の増加または酸素消費量の抑制が起きたと考えられる。Fig.3 の oxy-Hb 濃度の結果より、oxy-Hb 濃度の変化は流入血液量の影響によるものと考えられる。一方 deoxy-Hb 濃度は、立位後半に最も高い値をとり、ES 着用時に緩やかな傾きとなり、濃度の上昇が抑えられていた。よって SdO₂ との関係から、長時間立位が原因となる下腿組織での酸素消費量増加は、ES 着用によって抑制されたと言える。

3.5 ES 着用による total-Hb 濃度の変化率 (%)

Figure 5 に示すグラフは、各測定時点において、ES 着用時と未着用の total-Hb 濃度の差を未着用時の濃度で割り、[%] で表示した結果である。

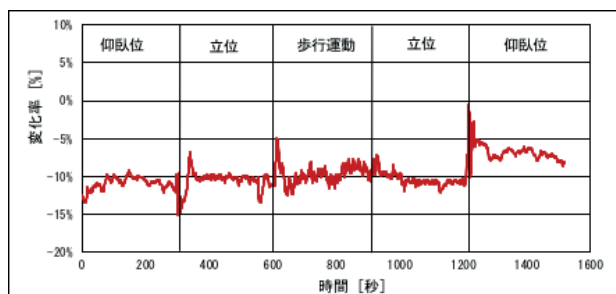


Fig.5 Effect of elastic stockings on tissue circulation evaluated by the concentration ratio: (total-Hb concentrations with ES minus those without ES) divided by the total-Hb without ES.

変化率の結果を各実験期で平均をとり比較した。その結果、変化率は開始仰臥位で-11%、運動前立位で-10%、歩行運動で-9.8%、運動後立位で-10%、終了仰臥位で-6.9%であった。Fig.5 のグラフからも、測定開始から 1200 秒までの全ての時点で、変化率が約-10%の割合で推移していることが見てとれる。よって、姿勢や歩行に関係なく、ES 着用により、下腿のヘモグロビン濃度は未着用時より約 10%減少したと言える。

この減少率は今回用いたストッキングの結果であり、異なる締め付け圧のストッキングを用いた場合は、減少

率は変化すると考えられる。

3.6 経時データの統計処理について

これまで見てきたように、今回の研究では 1500 秒の間に 1500 点のデータを収集した。これは、いろいろな条件で組織ヘモグロビン濃度が時間的にどのように変化するかを調べるためである。そして、仰臥位、立位など各実験期において、ヘモグロビン量は顕著な時間的変化を示すことを示した (Fig.1~Fig.4)。統計解析を行うために、各条件での平均値を求めることがよく行われるが、平均値で話をすると時間的に変化する現象を捉えることができない。よって、今回は各期の平均値の差の統計検定は行わなかった。

もう 1 つの理由は、P 値を使った検定に対して、アメリカ統計協会 (ASA) から問題点を指摘する声明が 2016 年に出されているからである。この声明の邦訳が佐藤⁸⁾により出されているが、その中で、特に P 値の有意水準 (通常 $P < 0.05$) で結果を判断することが問題になっている。ASA の声明に関する別の解釈も報告されており⁹⁾、これまでの統計検定を否定する本¹⁰⁾も出版されているが、この本に対してもまた問題点が指摘されている。P 値による検定の解決法については、我々が利用できる明確な方法は見当たらず、混沌状態にあるように思われる。

3.7 腓腹筋周径囲

被験者 5 名の実験開始時、ES 未着実験直後、ES 着用実験終了時の 3 時点において、腓腹筋周径囲を測定し平均値を算出した。その結果は、それぞれ $32.7 \pm 1.69\text{cm}$ 、 $33.0 \pm 1.82\text{cm}$ 、 $32.5 \pm 1.80\text{cm}$ となった。ES 未着用時の実験により径が約 0.3cm 増加し、ES 着用時の実験により径が約 0.5cm 減少した。ES 未着用の実験において、下肢の毛細血管血圧の上昇と血液貯留が生じたことで、間質液側へ水の移動が起きて浮腫が生じ、下肢肥大が起きた可能性が考えられる²⁾。

また、二元配置分散分析法で検定した結果、 $P < 0.05$ という条件下で判断すると、3 つの場合の組み合わせにおいて有意差があるとは言えない結果となった。一方、被験者 5 名の結果には認められた ($P < 0.001$)。被験者間の違いは、個体差というより、センサー取り付け位置の皮膚の光透過に対する性質、取り付け圧の影響など、系統誤差 (かたより誤差) に起因する要因が含まれると考えられる。前節で述べた理由により、ここでは P 値による検定は結果だけを記述するにとどめる。

4. まとめ

本研究では、弾性ストッキング着用による下腿圧迫が下腿組織循環に及ぼす効果を、組織ヘモグロビン量を測定することにより調べた。1500 秒間の一連の動作 (仰臥位、立位、歩行、立位、仰臥位) の間、連続かつ安定したデータを得ることができた。総ヘモグロビン量の結果より、ES の着用により下腿組織における血液量の減少および酸素消費量の抑制が確認された。また ES 着用およ

び ES 未着の両方の場合について、歩行（腓腹筋を動かす）により下腿組織における血液量の減少が認められた。このことから ES 着用による下腿圧迫は、姿勢変化の影響を受けることなく、各姿勢で同程度の組織血液量の減少を生じさせ、静脈還流を充進させていることが分かった。これは浮腫などの改善につながると考えられる。今回は実験条件として 5 分間の期間を設定した。立位や歩行の場合には、経時的なヘモグロビン濃度の変化が 5 分以降にも生じることが示唆された。よって、より長い測定時間をとることが、下腿血液循環の特性や弾性ストッキングの効果を理解する上で重要である。

5. 参考文献

- [1] 山田典一, 松田明正, 萩原義人, 辻明宏, 太田覚史, 石倉健, 中村真潮, 伊藤正明: 弾性ストッキングの現状とエビデンス, 深部静脈血栓症・肺血栓塞栓症の予防, 静脈学, Vol. 23, No. 3, pp. 233-238, (2012).
- [2] 齋藤誠二, 村木里志: 長時間歩行および立位姿勢中の下肢のむくみに起因する不快感に関する研究, バイオメカニズム学会誌, Vol. 40, No. 2, pp. 121-129, (2016).
- [3] 佐久田 斉, 孟 真八杉 巧, 杉山悟, 岩田 博英, 松原 忍, 今井 崇裕: 弾性ストッキング・圧迫療法コンダクター, 日本フットケア・足病医学会誌, Vol. 1, No. 3, pp. 118-124, (2020).
- [4] 黒岩政之, 宇治橋善勝, 高平尚伸, 栗田かほる, 横田友希, 長田真由美, 鈴木政子, 見井田和正, 川谷弘子, 荒井有美: 下肢深部静脈に対する弾性ストッキングの血流増加効果, 静脈学, Vol. 25, No. 3, pp. 326-331, (2014).
- [5] 尾方寿好: 近赤外分光法を用いた筋酸素化動態測定の意義, 北海道大学大学院教育学研究紀要, Vol. 125, pp. 79-90, (2016).
- [6] 島津・酸素モニターOM-220 取扱説明書, (2000).
- [7] 和田大徹, 吉村勲, 松井利樹, 森健一: 立位作業におけるヘモグロビン濃度変化の検討 人間工学, 第 35 巻特別号 2, pp. 400-401, (1999).
- [8] 佐藤俊哉: ASA 声明と疫学研究における P 値, 計量生物学, Vol. 38, No. 2, pp. 109-115, (2017).
- [9] 三輪哲久: ASA 声明に関するおおざっぱなコメント, 計量生物学, Vol. 38, No. 2, pp. 163-170, (2017).
- [10] 豊田秀樹: 瀕死の統計学を救え, 朝倉書店, (2020).

研究推進機構運営会議

議長 脇田 敏裕

構成委員 石田 裕昭

小池あゆみ

上平 員丈

高橋 勝美

星野 潤

井上 哲理

岡崎 美蘭

一色 正男

山家 敏彦

新田 晃司

山口 淳一

黄 啓新

兵頭 和人

三枝 亮

井藤 晴久

栗原 誠

高村 岳樹

井上 秀雄

塩川 茂樹

神奈川工科大学研究報告

B-47 理工学編 通巻 47 号

令和 5 年 3 月 1 日 発行

編集兼発行者 神 奈 川 工 科 大 学

〒 243-0292 神奈川県厚木市下荻野1030

電 話 046-241-6221

印 刷 者 株式会社スクールパートナーズ

当該研究報告に掲載された論文の著作権は本学に帰属する。