

論 文

末梢血流量制御課題における
血流量バイオフィードバックの可能性について早稲田大学人間科学研究科 長野 祐一郎
科学警察研究所法科学第一部心理研究室
廣田 昭久

要 約

皮膚温バイオフィードバックは、最も簡便かつ一般的な方法として多くのバイオフィードバック訓練で用いられて来た。しかし、過去のいくつかの研究例では様々な問題を皮膚温バイオフィードバックに見いだしている。今回我々は、皮膚温バイオフィードバック訓練の特徴を分析し、末梢血管活動のより適した制御方法として、血流量バイオフィードバック訓練を提案した。この研究の目的は、皮膚温バイオフィードバックと血流量バイオフィードバックを比較し、後者の優位性を検証する事である。18名の大学生が今回の研究に参加し、皮膚温、血流量、呼吸数、筋電位が計測された。皮膚温は、サーミスターを用いた標準的なバイオフィードバック装置を用いて計測され、血流量は、レーザードップラー方式の血流計を用いて計測された。被験者は、皮膚温バイオフィードバックグループ(Temp-BF)、血流量バイオフィードバックグループ(Flow-BF)に振り分けられた。前者は、左手指尖部の皮膚温をフィードバック情報として受け、後者は同一部位から血流量をフィードバック情報として受けた。合計8セッションが行われ、一回のセッション内で上昇・下降双方向の訓練が行われた。セッションの間隔は約一週間であった。その結果、Flow-BF群においてのみ、上昇訓練と下降訓練の間に有意な差が見られ、末梢血管活動制御における、血流量バイオフィードバックの優位性が示された。

はじめに

皮膚温バイオフィードバック訓練は、その簡便さや適応範囲の広さによって、過去多くの研究、治療で用いられてきたが、それらの研究の結果は必ずしも、皮膚温バイオフィードバックの成功を示すものではなかった[1]。皮膚温バイオフィードバック訓練において注意すべき事柄が、Taup & School[2]によってまとめられているが、概して皮膚温バイオフィードバックは環境の影響を受け易すぎるといふ短所があると言えよう。

かつて皮膚温は末梢の血流量の大まかな指標として用いられてきたという側面があるが、より直接的な心臓血管活動の指標である血流量をフィードバック刺激として用いたバイオフィードバック訓練は、現在までに皮膚温バイオフィードバックを適用してきた様々な分野において、より有効な手段となることが期待できる。

過去の研究において血流量が用いられなかったのは、技術的な問題から直接血流量を計測するのが困難であったためであるが、近年開発されたレーザー式血流計は、安定性や精度、価格面などの問題を克服している。レー

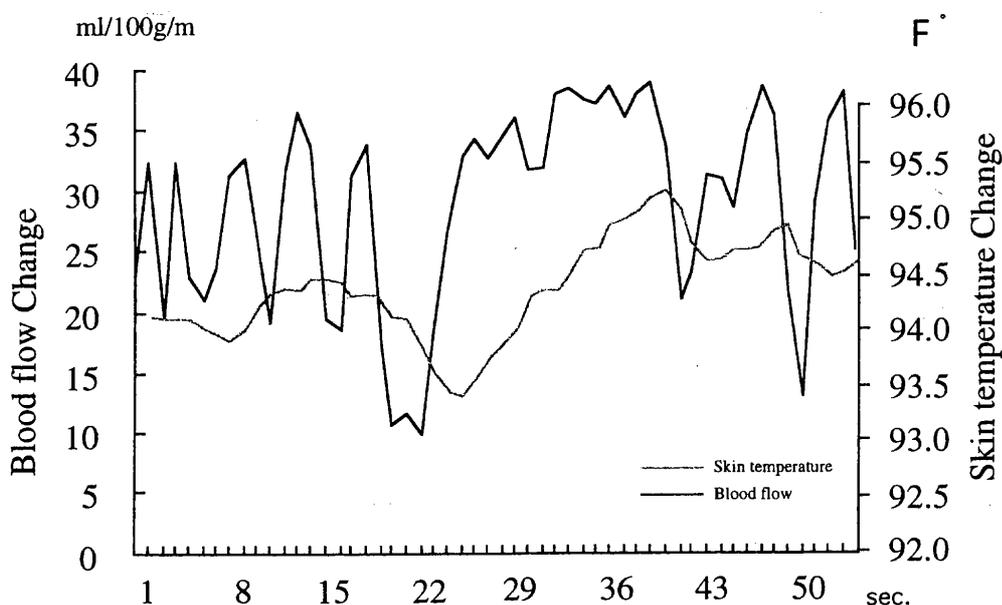


Fig.1 Comparison between skin temperature and blood flow at the same phase.

レーザー式血流計は、サーミスタを用いた皮膚温バイオフィードバック機器と比較し、センサーの取り付けが容易である、エアコンの風などの外気の影響を受けにくいという利点がある。さらに重要なのはフィードバックすることのできる情報の質的、量的違いであろう。Fig.1を参照すると、血流量変化は、皮膚温変化に比べて潜時が短いこと、皮膚温変化からでは予測できない急激な血流量の変化が存在することが明かである。

バイオフィードバック訓練において重要な要因である被験者の動機づけは、制御指標に対する被験者のコントロール可能・不可能感に依存すると思われる。皮膚温バイオフィードバック訓練では、血流量の変化が正確にフィードバックされないため、被験者の動機づけが下がってしまうという現象が予測できる。一方、血流量バイオフィードバック訓練では、血流量変化が正確にフィードバックされるため、動機づけが高く維持されることが予測できる。

目 的

血流量バイオフィードバック訓練は、皮膚温バイオフィードバック訓練に比して、より直接的なフィードバック情報を用いるため、被験者が動機づけを高く保ち易いと思われる。したがって、血流量は皮膚温よりも末梢血流量を制御する上で適した指標であり、被験者により容

易な末梢血流量の制御をもたらすであろう、という事が本研究の主な仮説である。

被験者

被験者は健常者を用いて行った。大学生16名(男子3名、女子13名、20~23歳、平均年齢21.8歳)を被験者とした。自律神経活動に影響を与える薬物の使用者、それらに関連する既往歴のある者は含まれていなかった。また、この種の実験の経験のある者も除外した。

装置

1. 計測

リクライニングチェアに座った被験者の、左手人さし指末節部腹側にYSI Series 700 Thermiliner Temperature Plobes (Yellow Spring社製)を、同側中指末節部腹側にレーザー式血流計測用プローブ(アドバンス社製)を装着した。被験者の腹部に呼吸ピックアップ(日本光電製、TR-651T)を装着し、前腕部指屈筋部位に直径8mmの小型生体電極(日本光電製、血型Ag/AgCl電極)を装着し、筋電位を測定した。皮膚温はAutogen1000b (Autogenic Systems社製)、血流量はレーザー血流計ALF21R(株式会社アドバンス社製)、筋電位はAutogen1100 (Autogenic Systems社製)を用いて計測し、日本光電製ポリグラフシステムを介し、PC 9821Ap(日本電気製:クロック周波数66MHz)により光磁気ディスク(日本電気

製：OPTICAL DISK UNIT PC-OP301R) に記録した。AD変換は12bitの精度、サンプリング周波数は250Hzであった。また、ビデオカメラによって実験室内の被験者の様子をモニターした。室温は実験期間を通してエアコンにより $23.5^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ に保たれた。

2. フィードバック

視覚的フィードバック刺激は、被験者の前方1メートルに設置したディスプレイモニターを用いてシールドルームの窓越しに線グラフで提示した。グラフは画面の左から右へ向かって描画され、4分毎に更新され再び左側から描画された。表示範囲は $87^{\circ}\text{F} \sim 97^{\circ}\text{F}$ であった。

同時に前方約1メートル離れた位置にスピーカーを設置し、聴覚的フィードバック刺激(コンピュータ内臓音源)を呈示した。皮膚温/血流量ともに、増加時に低音、減少時に高音をバイナリで提示した。

手続き

1. 群配置

皮膚温フィードバック群、血流量フィードバック群の2群を設けた。フィードバックなしの皮膚温制御課題における制御成績と、各種質問紙の成績をもとに、両群が均等となるように被験者をふりわけた。用いた質問紙は、Questionnaire upon Mental Imagery(QMI:)、Autonomic Perception Questionnaire(APQ:)、State-Trait Anxiety Inventory(STAI:)であった。

2. 訓練内容

呼吸は故意に変化をさせぬように教示によって統制し、VTRでチェックを行った。また、指の屈伸の影響を避けるため、左手指屈筋のEMGの計測を行った。

無意識に呼吸を吹きかけて、皮膚温を下げる事を学習してしまう等の、アーティファクトの混入を除去するために、上昇・下降の双方向の訓練を行った。また、両訓練間で皮膚温及び血流量をベース値に近い状態に戻すためのRest期を導入した。1セッションの訓練内容は、Adaptation(約10分間)、Training1(5分間)、Rest1(5分間)、Training2(5分間)、Rest2(5分間)、であり、被験者の動機付けを維持するために、各セッション終了後に制御成績を報告した。このような内訳で、1セッション45分として、約一週間おきに、被験者一人につき計7セッション行った。各期間についての詳細は以下のとおりであった。

Adaptation:

体動の禁止、閉眼を教示し、生体反応の計測を行った。Adaptation期間の終了(訓練の開始)の判断は、皮膚温

の変化が少なく安定していること、血流量波形が高原状となり、変化が少なくなること、の二点を基準に行った。10分以内で基準を満たした場合は、10分経過するまで待って訓練を開始し、どうしても安定が得られない場合は日程を変更した。

Training1/2:

インターホンにより、目的方向へ皮膚温/血流量を変化させるよう教示を与え、視覚的・聴覚的フィードバックを行った。1セッション2回の訓練の内、一方は上昇、他方は下降訓練であり、訓練の方向の順序はカウンターバランスをした。

Rest1/2:

生体反応がベースレベル付近に回復するまで待つ期間とした。また、Rest期の間もデータの計測をおこなった。

結果

全ての分析は、皮膚温、血流量の双方について行った。呼吸、筋電位は、身体的媒介によるアーティファクトの除外を目的としたものなので、分析の対象外とした。

1. 群間の差

訓練時の皮膚温/血流量変化を分析した。分析には、記録した皮膚温/血流量のデータを1分毎に平均化した値を用いた。また、皮膚温/血流量どちらも絶対値ではなく、ベース値からの変化量を用いた。その際、第1試行のベース値は最初のAdaptation期間の最後の3分間の平均値を、第2試行のベース値はRest1の最後の1分間の値を用いた。皮膚温変化量について、2(フィードバック:皮膚温/血流量)×7(セッション:セッション1~7)×2(訓練方向:上昇/下降)×5(Period:最初の1分~5分)の4要因の分散分析を行ったところ、訓練方向(F(1/14)=7.286, $p < .05$)の主効果および、訓練方向とPeriodの交互作用(F(4/56)=3.027, $p < .05$)が有意であった。他の主効果、交互作用はいずれも有意ではなかった。また、Tukey法による下位検定では、血流量群においてのみ、上昇・下降訓練間に有意な差が認められた。(F(1/14)=6.184, $p < .05$) (Fig.2 参照)

同様に、血流量変化量について、2(フィードバック:皮膚温/血流量)×7(セッション:セッション1~7)×2(訓練方向:上昇/下降)×5(Period:最初の1分~5分)の4要因の分散分析を行ったところ、こちらは、Period(F(4/56)=22.112, $p < .01$)の主効果のみが有意であった。また、単純主効果を求めると、皮膚温データで行った場合と同様に、血流量群のみに上昇・下降訓練間に有意差傾向がある事がわかった。(F(1/14)=3.278, $p < .10$)

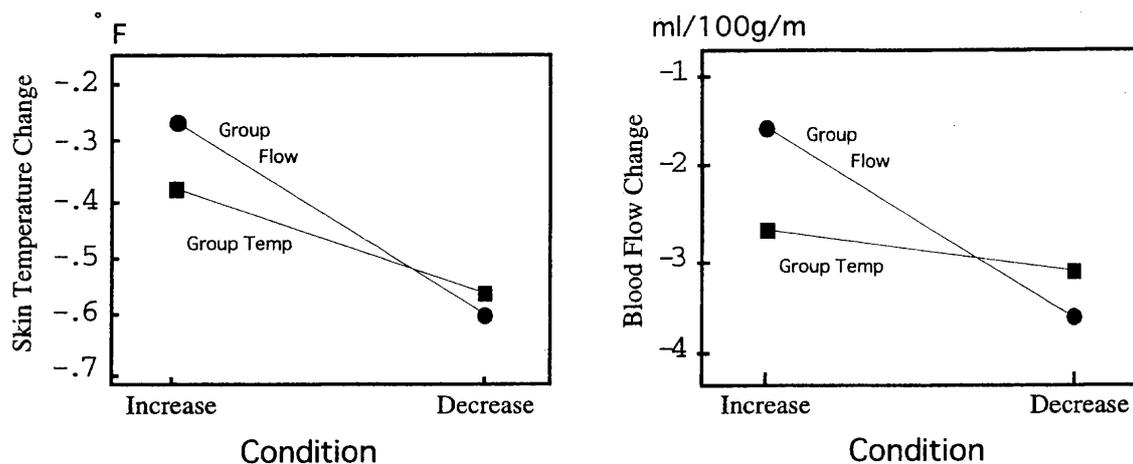


Fig.2 Mean of skin temperature and blood flow changes of each group for each condition.

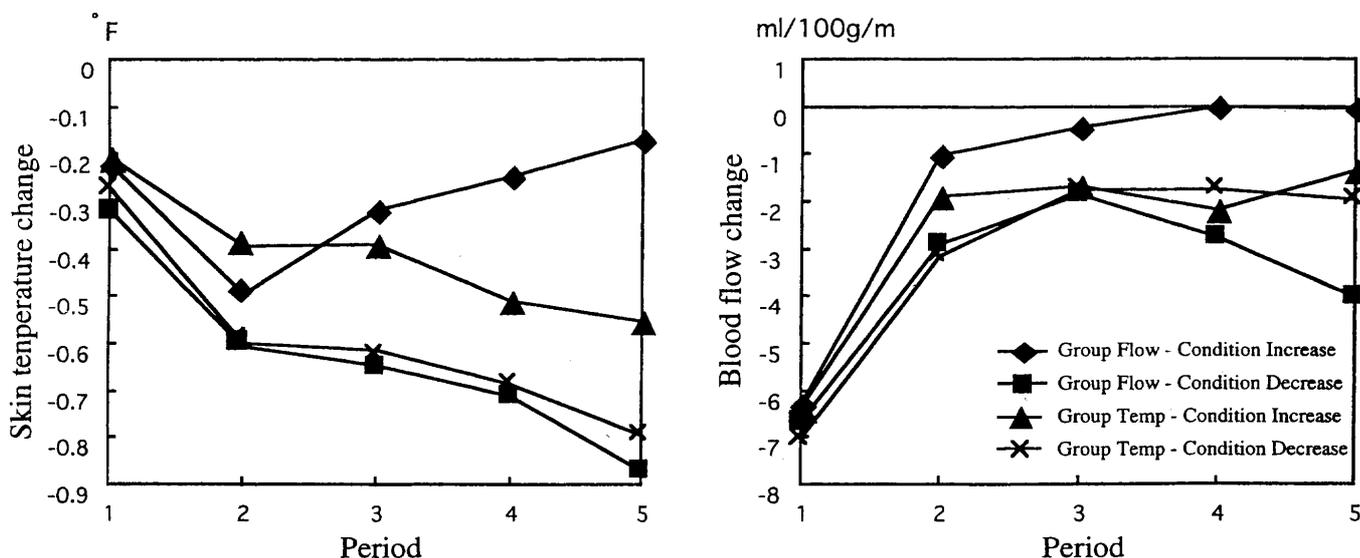


Fig.3 Mean skin temperature and blood flow change in both groups of each condition through all training period

Fig.3 は、訓練全体の皮膚温/血流量変化量を、群別、訓練の方向別に、各Periodごとにプロットしたものである。皮膚温、血流量ともに、どの群も訓練の開始直後、急速に低下している。また、どの条件も訓練課題に関係なく、訓練を通してAdaptationで計測したベースレベルより低い値を保持した。皮膚温データ、血流量データともに、最も上昇方向へと変化したのは血流量群の上昇訓練であり、最も下降方向へと変化したのは血流量群の下降訓練であった。血流量群は、上昇・下降訓練間で、差異が明確であったが、そのような明確な差は、皮膚温群では認められなかった。

2. 訓練順序の効果

順序効果についての分析を行った。その結果、皮膚温

群・血流量群ともに上昇→下降よりも下降→上昇の訓練順序の方が、上昇訓練での変化量が大きかった。

両群のデータのうち皮膚温のデータについて、2 (フィードバック：皮膚温/血流量) × 2 (訓練順序：上昇→下降/下降→上昇) × 2 (訓練方向：上昇/下降) × 5 (Period：最初の1分～5分) の4要因の分散分析を行ったところ、訓練方向の主効果(F(1/14)=8.371, p<.05)と、訓練方向と訓練順序の交互作用(F(1/14)=5.139, p<.05)が有意であった。Tukey法による下位検定の結果は、下降→上昇の順序の場合のみ、上昇訓練と下降訓練の差が有意(p<.05)である事を示していた。また、訓練方向と訓練順序の交互作用の単純主効果の分析から、上昇訓練時に、訓練順序による有意な差 (F(1/14)=10.531, p<.01)が認められた。これは、上昇→下降の順より、下降→上昇の順

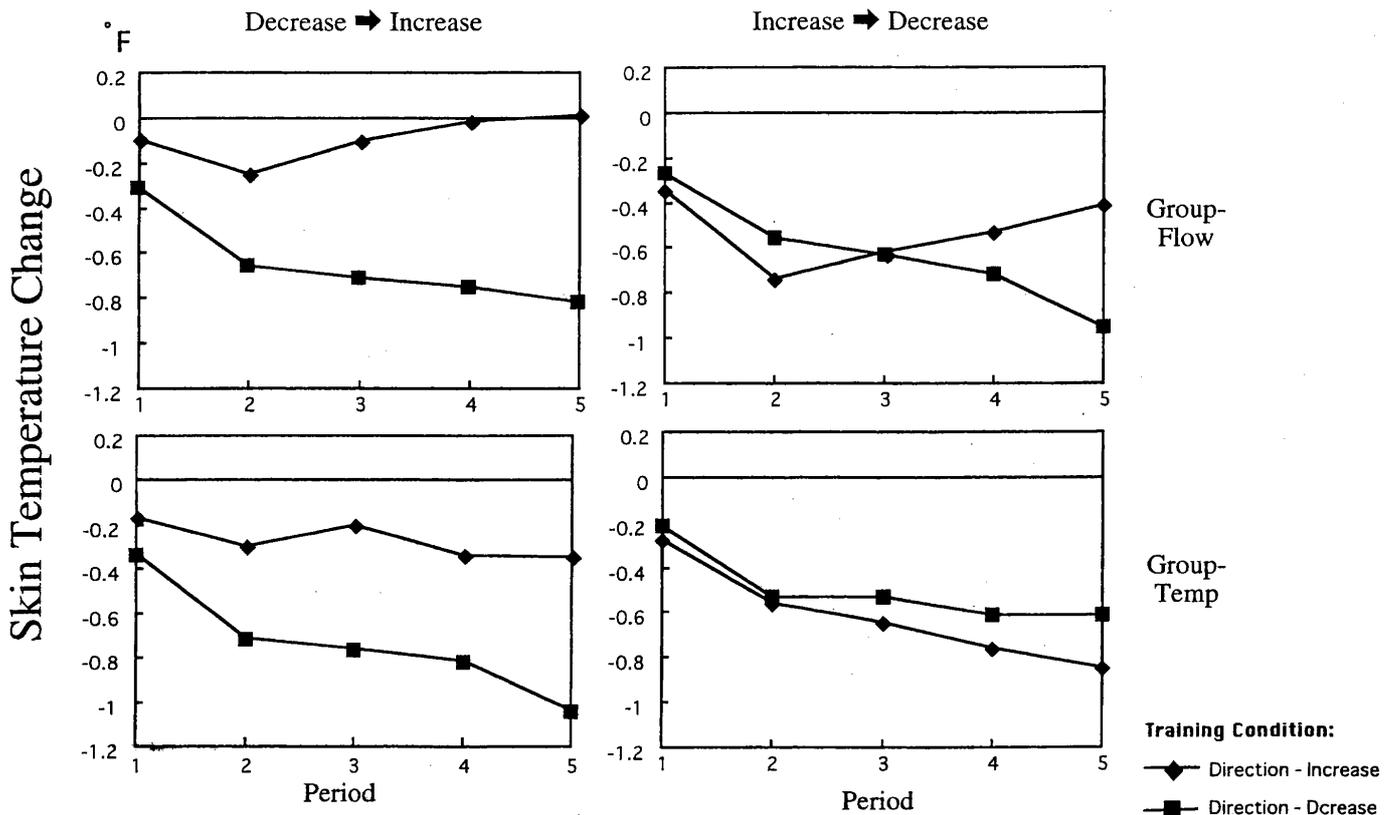


Fig.4 Mean skintemperature change of each training order of both groups for training period. Influence of training order on the performance of skin temperature change shown in this chart.

のほうが、上昇訓練に効果的であることを示すものであった。(Fig.4 参照)

血流量データについて、2 (フィードバック：皮膚温/血流量) × 2 (訓練順序：上昇→下降/下降→上昇) × 2 (訓練方向：上昇/下降) × 5 (Period：最初の1分～5分) の4要因の分散分析を行ったところ、Periodの主効果 ($F(4/56)=21.061, p<.01$) と群×訓練順序×訓練方向×Periodの交互作用 ($F(4/56)=4.452, p<.01$) に有意な差が、訓練方向 ($F(1/14)=3.691, p<.10$) に有意差傾向が見られた。

3. ベース値の変化

上記の訓練効果に関する分析では、上昇→下降の順序よりも、下降→上昇の方が変化量が大きい事を示している。しかし、第2訓練のベース値を第1訓練のRestから求めるという方法を用いているため、第1訓練後のRestで皮膚温/血流量がAdaptation期間に近い状態までもどっていなかった場合は、第2訓練の訓練効果にホメオスタシスによる回復効果(一定温度まで体温を戻そうとする働き)が混入してしまう可能性がある。そこで、第1訓練のベース値と第2訓練のベース値の変化を分散分析によって検討した。皮膚温データを用い、2 (フィードバ

ック：皮膚温/血流量) × 2 (訓練：訓練1/訓練2) × 7 (セッション1～7) の3要因の分散分析を行ったところ、訓練の主効果 ($F(1/14)=7.802, p<.05$) が有意であった。また、セッション ($F(6/84)=2.201, p<.10$)、に有意差傾向が認められた。また、単純主効果をもとめると、訓練1における群間 ($F(1/14)=53.088, p<.01$) に、皮膚温群における訓練間の差が有意であった ($F(1/14)=62.690, p<.01$)。また、同様の分析を、血流量データをもとに行ったところ、有意な差は見られなかった。

4. フィードバックの効果

皮膚温・血流量ともに、絶対値を用いた検定により訓練中の各Periodの平均値とベース値の平均値の差を検討したが、有意差が検出されたのは全て下降方向への変化であった。訓練中、皮膚温・血流量ともに、群、訓練方向にかかわらず、ベース値より統計的に有意に上昇した試行はなかった。

5. 内観

どのような方法を用いて皮膚温/血流量制御を行うかという質問に対し、両群とも、「緊張している場面」などの感情をともなった場面のイメージを行うという回答が最も多かった。2番目には、「ただぼーっとする」「リ

ラックスする」などがあり、3番目に多かったのは、「体がポカポカする」等の身体的イメージを行うものであった。皮膚温群では大半の被験者が下降訓練の方が容易であると回答したが、血流量群においては上昇が難しいとする者と下降が難しいとする者は、ほぼ半々であった。両者のコントロール可能感には明確な差はみられなかった。

考 察

1. 群間の差

フィードバックされる情報の量、潜時の点で有利な血流量群の方が皮膚温群より良い制御成績を示すであろう、ということが本実験における仮説であった。両群間の制御成績には統計的に有意な差は無かったが、Fig.3を参照すると両データともに、皮膚温群では上昇訓練と下降訓練に明確な差異が見られないのに対し、血流量群では統計的に有意な差がみられる。これは、末梢血流量をコントロールする場合、血流量の方が皮膚温よりフィードバック情報として適した指標である、ということを示唆するものである。

2. 順序効果

また、順序効果の分析では、下降→上昇の順で訓練を行った場合にのみ上昇訓練、下降訓練の変化量の間に有意な差がみとめられた。また、上昇訓練の変化量の比較では、上昇→下降の順番よりも、下降→上昇の順のほうが成績が良いことがわかった。これは、同様の実験デザインを用いた、大河内、山本、上里[3]の実験と共通の結果を示すものである。

本実験のように、訓練2のベース値を直前のRestからとめる場合、訓練1と訓練2のベース値に大きな差が生じると、訓練2における制御成績に、ホメオスタシスによる回復効果が混入してしまう可能性がある。下降→上昇の順の場合、訓練1で下降した皮膚温・血流量が、Rest1で十分に回復せず、訓練2において回復する可能性がある。分析の結果、皮膚温データに関しては訓練1のベース値より訓練2のベース値のほうが低いことが明らかになった。したがって、訓練順序による成績の違いは、訓練順序による影響というよりは、実験計画上生じてしまった見かけ上の差と考えるべきであろう。

3. フィードバック情報としての両者の違い

フィードバック情報として血流量と皮膚温を比較すると、第1に言えることは、皮膚温は血流量に対しタイムラグがあるということである。皮膚温変化のピークを血流量の変化のピークと比較すると約20～30秒の遅延が見られる。末梢皮膚温は末梢毛細血管を通過する血流量によって規定されるので、基本的には両者の変動の間には、

高い相関があるはずであり、従ってこの皮膚温変化の遅延は、身体内部の熱伝導の所要時間および、皮膚温センサーからアンプまでの熱伝導時間と考えられるが、制御を学習する上で強化となるフィードバック情報の遅延は、被験者の制御学習の妨げとなっている事が予測できる。

第2には、血流量フィードバックの方が情報量が多いと言うことが挙げられる。血流量が急激に落ち込み、直後に回復するような場合、皮膚温はそれに十分追従することができず、そのような変化が連続して生じると、血流量で見られる様な激しい山谷の変化は皮膚温では殆ど平坦化されて認めることが困難になる。

また、血流量の変化を追うことにより明らかになった事として、血流量には被験者ごとに、一定の上限値がある、という事がある。そのため、被験者がリラクセスし、血流量が安定してくると、血流量のグラフには山の部分の欠けた、高原状の形が生じる。通常、ベース値計測時、被験者が十分にリラクセスしている場合にはこのような状態になっている事が多い。このような、血流量の上限の存在の事実を考えると、上昇訓練中に皮膚温がベース値よりも上昇することは非常に考えにくい事である。これは、「多くの被験者はベース値計測時、すでにリラクセスしてしまうため、さらにリラクセスの方向に反応水準を変化させるのはきわめて困難であり、その変化量も小さく、バイオフィードバックの効果は検出しにくくなる」とする、天井効果説[4]を支持する結果である。

結 論

本実験においては、血流量群においてのみ上昇訓練・下降訓練の成績の差が有意であったという結果により、血流量フィードバックの方が末梢の血管活動の制御には適しているという仮説が間接的に支持された。しかし、制御成績には訓練順序の効果が混入している可能性も明らかになった。本実験においては、アーティファクトの混入を避けるために、上昇訓練、下降訓練を連続で1セッション内で行うといった実験計画を用いたが、これが新たな「順序による誤差」という評価の歪みを生じる原因となった。

また、本実験における血流量の計測結果は、前述の天井効果説を支持し、従来の研究における「下降よりも上昇が難しい」とする結果[1]を、具体的なデータをもって支持するものとなった。また、この結果は、十分に安定した状態からの、皮膚温/血流量変化では、バイオフィードバックによる訓練効果は正当に評価し難いということを示している。このような視点に基づけば、緊張状態からの皮膚温/血流量上昇訓練といった課題が予測されるが、そのような実験計画ではホメオスタシスによる回

復の効果をいかに除くかが新たな課題となるであろう。

References

- 1) King, N.J. & Montgomery, R.B. (1980) Biofeedback-Induced Control of Human Peripheral Temperature: A Critical Review of the Literature. *Psychological Bulletin*, 88, 738-752.
- 2) Taub, E. & School, P.J. (1978) Some methodological considerations in thermal biofeedback training. *Behavior Resarch Methods & Instrumentation*, 10, 617-622.
- 3) 大河内浩人・山本麻子・上里一郎 (1991) 皮膚温制御に及ぼすフィードバックと訓練順序の効果. *行動療法研究*, 17, 20-25.
- 4) Williamson, D.A., & Blanchard, E.B. (1979) Heart rate and blood pressure biofeedback. A review and integration of recent theoretical models. *Biofeedback and self regulation*, 4, 35-50.

Potential of Blood Flow Biofeedback for Controlling Peripheral Blood Flow

Yuichiro Nagano, Graduate School of Human Sciences, Waseda University

Akihisa Hirota, Department of Psychology, Sophia University

Summary

While skin temperature biofeedback is one of the most convenient and popular procedures among various biofeedback trainings, many past studies found some difficulties in it. The features of skin temperature biofeedback training were analyzed and blood flow biofeedback was proposed as a more appropriate procedure for control of peripheral vasomotor activity. The purpose of this study was to compare skin temperature biofeedback and blood flow biofeedback and demonstrate the advantage of the latter procedure. Eighteen undergraduates participated in this study, and their skin temperature, blood flow, respiration rate, electro myograph were measured. Skin temperature was measured with standard thermistor type biofeedback instrument. Blood flow was measured with laser-doppler flowmeter. The subjects were assigned into two groups: Skin temperature biofeedback(Temp-BF) group and blood flow biofeedback(Flow-BF) group. The former was given digital skintemperature feedback from their left hand and the latter was given blood flow feedback in the same way. They participated in 8 sessions in this study. Each session consisted of one increase training and one decrease training, in which they were instructed to change their skin temperature or blood flow to the targeted direction. Inter session interval was approximately one week. In the result, significant difference between performance of increase training and that of decrease training was observed only in Flow-BF group. This result indicated an evidence of the superiority of Flow-BF training for control of peripheral vasomotor activity.

Key words: skin temperature, blood flow, laser doppler, vasomotor activity

Adress: Nagano, Yuichiro
Graduate School of Human Sciences, Waseda University
2-579-15, Mikajima, Tokorozawa, Saitama, 359, Japan