

呼吸深度が脳内酸素代謝に与える影響

西原直枝, 羽田正沖, 植木雅典, 川村明寛, 中嶋馨, 中村駿介, 田辺新一
早稲田大学

The Effect of Depth of Breathing on Cerebral Oxygenation Changes

Naoe NISHIHARA, Masaoki HANEDA, Masanori UEKI, Akihiro KAWAMURA, Kaoru NAKAJIMA,
Shunsuke NAKAMURA and Shin-ichi TANABE

Waseda University

Abstract :

In this paper, the measurement of cerebral oxygenation changes by Near Infrared Spectroscopy is focused as the evaluation method of the effect of indoor environmental quality on productivity. The subjective experiment was conducted in the climatic chamber to study the effect of depth of breathing on cerebral oxygenation changes. After 10 seconds of their holding the breath for 20 seconds, on the right side, the concentration of total hemoglobin were significantly higher ($p < 0.05$) and the concentration of oxygenated hemoglobin tended to be higher ($p < 0.1$) than that of resting state. During their deep breathing, the right side of the concentration of total hemoglobin and oxygenated hemoglobin tended to decrease ($p < 0.1$). The depth of breathing affected cerebral oxygenation changes.

Key Words: NIRS, Cerebral oxygenation changes, Productivity, Indoor environmental quality, Breathing

要旨 :

本報では、温熱環境や室内空気質環境のような室内環境質が知的生産性に与える影響を評価する為の、人体反応の客観的評価手法の一つとして、近赤外線分光を用いた脳内酸素代謝測定に着目した。人体の呼吸の深さが脳内酸素代謝に与える影響を調べるための被験者実験について報告した。呼吸深度状態について、安静時との比較を行ったところ、息止め後 10 秒において、右額側にて総ヘモグロビン濃度が有意に増加し ($p < 0.05$)、酸化型ヘモグロビン濃度が増加する傾向があった ($p < 0.1$)。また、深呼吸時は、右額側で、総ヘモグロビン濃度および酸化型ヘモグロビン濃度は減少する傾向があった ($p < 0.1$)。呼吸深度の変化により脳内血流内の CO_2 分圧が変化し、脳内酸素代謝に影響を与える可能性が示唆された。
キーワード：近赤外線分光、脳内酸素代謝、知的生産性、室内環境質、呼吸

1. はじめに

近年、オフィス空間の新たな評価指標として知的生産性への関心が高まってきている。建物オーナーや企業経営者に、室内環境質の改善が知的生産性の向上につながることを定量的に示すことができれば、室内環境質改善を促す大きな推進力となると考えられる。これまでの研究で、室内環境質と知的生産性の評価における概念図¹⁾を示し、知的生産性の評価手法を整理してきた。知的生産性を評価する際、室内環境が疲労やメンタルワークロードなどの「人体反応」に影響を与え、それにより作業成績が変化すると考え、作業成績だけでなく、そのときの人体反応を、心理的・生理的測定によりとらえる点が特徴的である。

特に、人体反応の客観的評価手法の一つとして、近赤外線分光を用いた脳内酸素代謝測定を行ってきた。温熱環境や空気質環境が知的生産性に与える影響を、脳内酸素代謝を用いて評価する際、人体の呼吸の深さが影響する可能性がある。本報では、呼吸深度と脳内酸素代謝に関する被験者実験について報告する。

2. 脳内酸素代謝を用いた知的生産性評価

2.1. 脳内酸素代謝

Fig. 1 に近赤外線酸素モニタ (NIRO-300 浜松ホトニクス) を示す。近赤外分光法を利用した、生体内酸素代謝測定システムである。測定プローブは、半導体レーザーを光源とした近赤外線照射プローブおよび光

検出プローブからなる。生体組織を通った吸収変化を測定し、Modified Beer-Lambert則に基づき、ヘモグロビンの酸素濃度変化（単位： $\mu\text{mol/l}$ ）を計算することができる²⁾。

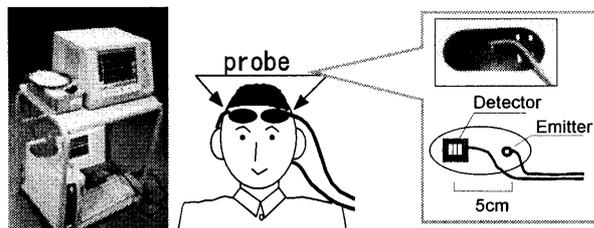


Fig.1 近赤外線酸素モニタ装置

脳内酸素代謝に関しては、既往の研究より、暗算作業や鏡映描写作業などの精神作業負荷時に、酸化型ヘモグロビン濃度の増加、還元型ヘモグロビン濃度の減少、および総ヘモグロビン濃度の増加が、典型的に認められると報告されている^{3), 4)}。また、NishiharaとTanabe⁵⁾は、課す計算作業の難易度や努力の程度によって脳内酸素代謝状態が異なることを示し、メンタルワークロードの客観的指標として有効である可能性を示した。

2.2. 温熱環境・室内空気質環境における既往研究

作用温度 26°C および 33.5°C の各環境に 50 分間被験者を順応させた後、計算作業を課した実験⁶⁾では、酸化型および総ヘモグロビン濃度変化量は、 33.5°C 条件が 26°C 条件よりも有意に増加量が大きい結果となり、暑い環境下でメンタルワークロードが高い可能性が示唆された。なお、この実験では、作用温度 26°C と 33.5°C の各条件下で、50 分間の順応を行っているが、順応前後において、安静状態では、脳内酸素代謝に有意差が認められなかった。

近赤外線酸素モニタの測定領域には、頭皮や頭蓋骨も含まれるが、脳内静脈の体積よりはるかに小さく、一般的に、測定値に対する影響は少ないといわれている⁷⁾。また Kohri らは入光部と出光部の距離を 4cm 離れた場合に 69% は脳内組織を測定していると報告している⁸⁾。前額の血管は暑熱環境において体温調節により拡張するため⁹⁾、脳内の血流量増加だけでなく皮膚血流量増加の影響があることが考えられるが、環境曝露のみ（順応後の値）で 26°C 条件と 33.5°C 条件との間に有意な差が認められないことから、作業時の Δ 総ヘモグロビン濃度の環境による違いは、作業へのメンタルワークロードの違いであると考えられる。

Bakó-Biró らは、空気質環境の違いにより被験者の代謝量が異なることを報告した¹⁰⁾。そのメカニズムは未だ明らかになっていないが、その原因ひとつに呼吸パターンの変化が考察として挙げられている。

以上のように、温熱環境と室内空気質環境が脳内酸素代謝に与える影響やそのメカニズムに関しては、未だ不明な点が多い。

3. 実験目的

総ヘモグロビン濃度は、脳内血流内の CO_2 分圧の上昇により増加すると報告されている¹¹⁾。呼吸が浅くなることにより、脳内血流内の CO_2 分圧が高くなると、総ヘモグロビン濃度変化（脳内血流量）が上昇する可能性がある。暑い環境、換気量が少ない環境では、空気を「むっとする」側に感じる事が予測される。そのとき、呼吸が浅くなり、脳内酸素代謝に影響を与える可能性が考えられる。温熱環境および空気質環境が知的生産性に与える影響について脳内酸素代謝状態のデータを用いて精度よく評価する為には、呼吸と脳内酸素代謝の関係を明らかにしておく必要がある。

本実験では、呼吸深度が脳内酸素代謝に与える影響を調べることを目的とし被験者実験を行った。呼吸は、安静時、息止め時（苦しくならない程度、20 秒間目安）、息止め解除後 10 秒後、深呼吸時、乗算作業時、乗算作業後を対象とした。

4. 実験方法

実験は、2006 年 8 月 14 日に早稲田大学理工学部大久保キャンパス 61 号館温熱環境室内人工気候室にて被験者 6 名（男性 4 名： 23.3 ± 1.9 歳，身長 173.7 ± 3.5 cm，体重 62.1 ± 2.2 kg，女性 2 名： 22 歳および 31 歳，身長 159.0 ± 1.4 cm，体重 48.0 ± 2.8 kg）で行った。被験者の利き手はすべて右手であった。Fig.2 に実験風景を示す。実験室内の環境は、作用温度 25°C 、相対湿度 50%RH、机上面照度 700lx、暗騒音で一定とした。Table 1 に環境測定項目、Table 2 に室内環境測定結果を示す。被験者は各自の衣服を着用し、暑くも寒くもない状態となるようにした。

Fig.3 に実験手順を示す。人工気候室内に入室後、NIRO-300 の測定プローブ部を左右額に装着し、5 分間椅座位安静をとり、2 分間目を閉じて安静にした（閉眼安静）。次に 20 秒程度の息止め（苦しくならない程度）と、その後の呼吸を整える時間を含めた 1 分間のセッション、続いて 2 分間の閉眼安静の後、2 秒吸、2 秒吐を繰り返す 1 分間の深呼吸セッションを行った。その後、紙面上での 3 桁 $\times 3$ 桁の乗算作業を 10 分間課し、作業の前後に 2 分間の閉眼安静をとった。

脳内酸素代謝は近赤外線分光による脳内酸素モニタを用い、実験中継続して測定した。センサは入光部と出光部との距離を 5cm とし左右の両額部に設置した。

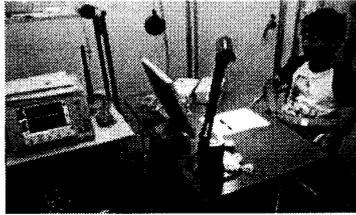


Fig.2 実験風景

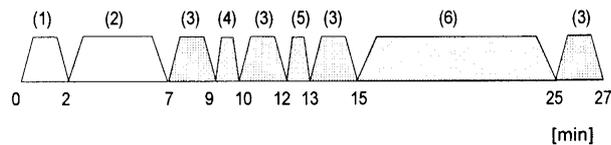
Table 1 環境測定項目

測定項目	測定機器	測定位置	測定間隔
空気温度	銅-コンスタンタン熱電対	床上 0.1,0.6,1.1, 1.7,2.3m	1分
放射温度	グローブ温度計	床上 1.1m	
相対湿度	温湿度測定器(ESPEC, Thermo Recorder RS-11)		
CO ₂ 濃度	IAQ モニタ(KANOMAX, MODEL2332)		
O ₂ 濃度	酸素濃度計(新コスモス電 機, XP-3180)		
等価騒音 レベル	精密騒音計(RION ,NL-31)		1秒
机上面 照度	デジタル照度計 (ESPEC, TRL-10)	床上 0.7mの 作業机上面	実験開始 前 1回

Table 2 室内環境測定結果

作用温度 [°C]	相対湿度 [%RH]	CO ₂ 濃度 [ppm]	O ₂ 濃度 [vol%]	机上面 照度 [lx]	等価騒音 レベル [dBA]
24.7 (0.3)	51 (3)	567 (41)	21.5 (0.0)	661 (28)	56

() Standard deviation



(1)実験説明・NIRO 設置 (2)安静 (3)閉眼安静 (4)息止め(20秒程度) (5)深呼吸(2秒吸、2秒吐の繰り返し) (6)乗算作業

Fig. 3 実験手順

実験中 1 秒毎に酸化型ヘモグロビン濃度変化量 (Δ oxy-Hb)および還元型ヘモグロビン濃度変化量 (Δ deoxy-Hb)を測定し総ヘモグロビン濃度変化量 (Δ total Hb= Δ oxy-Hb + Δ deoxy-Hb)を算出した。各閉眼安静時は前後 30 秒ずつを除いた 60 秒間の平均値、息止め後 10 秒は息止め解除直後から 10 秒間の平均値、深呼吸時は前後 15 秒ずつを除いた 30 秒間の平均値、乗算作業時は前後 2 分ずつを除いた 6 分間の平均値を用いた。平均値の比較には、対応のある t 検定(両側検定)を用い、「息止め後 10 秒」「深呼吸時」「乗算作業時」に関して各々対応する直前の閉眼安静時の平均値との比較、および左右額における測定値の比較を行った。

5. 実験結果・考察

Fig.4 に酸化型ヘモグロビン濃度変化量を示す。右額にて息止め後 10 秒で増加、深呼吸時に減少する傾向が認められた (p<0.1)。乗算作業時は、左額、右額ともに有意に増加した (左 p<0.01、右 p<0.05)。乗算作業時の左額側の濃度増加は右額側より大きい傾向があった (p<0.1)。

+p<0.1, *p<0.05, **p<0.01

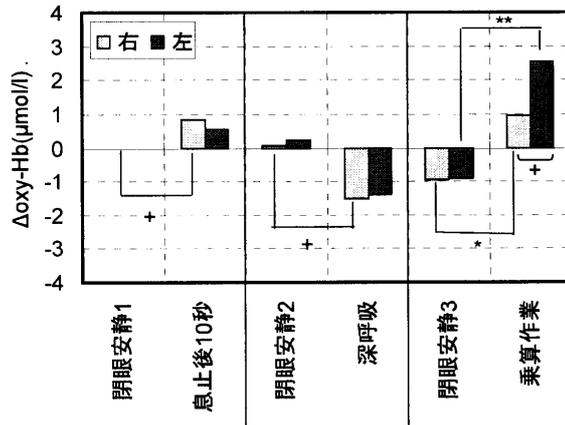


Fig.4 酸化型ヘモグロビン濃度変化量

Fig.5 に還元型ヘモグロビン濃度変化量を示す。右額で乗算作業時(p<0.05)に有意に減少した。左右間の比較では、深呼吸後の閉眼安静で、左額が右額よりも有意に増加側 (p<0.05) であった。

+p<0.1, *p<0.05, **p<0.01

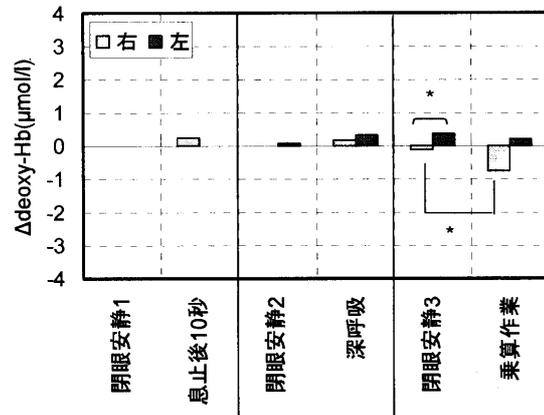


Fig.5 還元型ヘモグロビン濃度変化量

Fig.6 に総ヘモグロビン濃度変化量を示す。右額にて息止め後 10 秒で有意に増加し(p<0.05)、深呼吸時に減少する傾向が認められた (p<0.1)。乗算作業時は左額で有意に増加した(p<0.01)。また、乗算作業時の左額側の濃度増加量は右額側より有意に大きかった (p<0.05)。

乗算作業時の左右差に関しては、分割脳の研究により、左半球が言語機能に優位で言語的思考や計算の中核であり、右半球は操作空間的等の能力を持ち、非言語的思

考に優位である¹²⁾ことが要因であると考えられる。なお、本実験の被験者は全員の利き手が右であったが、利き手が右の人の場合、言語脳はほとんどが左脳側であるといわれている^{13), 14)}。

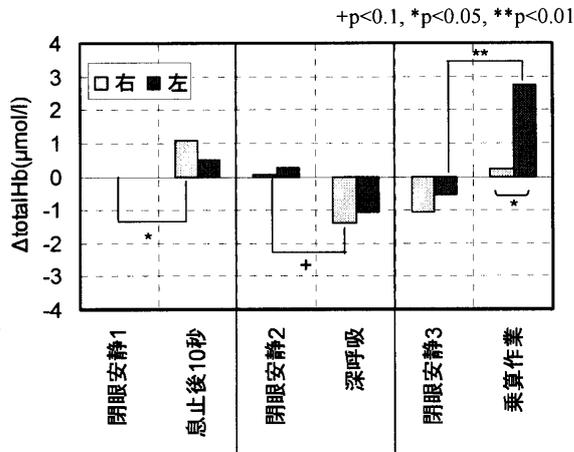


Fig.6 総ヘモグロビン濃度変化量

息止め後 10 秒において、右額側にて、総ヘモグロビン濃度および酸化型ヘモグロビン濃度が増加した。また、深呼吸時は、右額側で、総ヘモグロビン濃度および酸化型ヘモグロビン濃度は減少した。息を止めることによって脳内血流内のCO₂分圧が高くなり脳血管拡張が起これ¹¹⁾、総ヘモグロビンおよび酸化型ヘモグロビン濃度が増加したと考えられる。一方、メカニズムは解明されていないが、深呼吸時は、逆に脳内血流内のCO₂分圧が下がり、それにより脳血管収縮が起これたと推察している。

6. まとめ

- 1) 本報では、温熱環境や室内空気質環境のような室内環境質が知的生産性に与える影響を評価する為の、人体反応の客観的評価手法の一つとして、近赤外線分光を用いた脳内酸素代謝測定に着目した。人体の呼吸の深さが脳内酸素代謝に与える影響を調べるための被験者実験について報告した。
- 2) 息止め後 10 秒において、右額側にて、総ヘモグロビン濃度が有意に増加し(p<0.05)、酸化型ヘモグロビン濃度が増加する傾向があった(p<0.1)。また、深呼吸時は、右額側で総ヘモグロビン濃度および酸化型ヘモグロビン濃度は減少する傾向があった(p<0.1)。呼吸深度により脳内血流内のCO₂分圧が変化し、脳内血流量に影響を与えたと考えられる。
- 3) 乗算作業時は、総ヘモグロビン濃度は左額側で有意な増加が認められた (p<0.01)。酸化型ヘモグロビン濃度は、左右ともに有意に増加した (左: p<0.01, 右: p<0.05)。また、左額側は右額側よりも、総ヘモグロビン濃度増加は有意に大きく

(p<0.05)、酸化型ヘモグロビン濃度増加は大きい傾向があった(p<0.1)。これは、左脳が言語的思考や計算の中核であることが要因であると考えられる。左額側の総ヘモグロビン濃度変化および酸化型ヘモグロビン濃度変化は、計算作業時の人体に対する作業負荷やメンタルワークロードの指標として有効であると考えられる。

謝辞 本研究の一部は科学研究費補助金（特別研究員奨励費）により実施した。

7. 文献

- 1) 田辺, 西原, 羽田: 室内温熱環境と知的生産性, 空気調和・衛生工学会学術講演会論文集, pp.159-162, 2006
- 2) Delpy, D.T., Cope, M., van der Zee, P., Arrige, S., Wray, S. and Wyatt, J.: Estimation of optical pathlength through tissue from direct time of flight measurement, *Phys Med Biol*, Vol.33, pp.1433-1442, 1988
- 3) 木戸: 近赤外線吸収で測る精神作用, *医用電子と生体工学*, Vol. 33, 特別号, p.357, 1995
- 4) Villringer, A., Planck, J., Hock, C., Schlinkofer, L., and Dirnagl, U.: Near infrared spectroscopy (NIRS): a new tool to study hemodynamic changes during activation of brain function in human adults, *Neuroscience Letters*, Vol.154, pp.101-104, 1993
- 5) Nishihara, N. and Tanabe, S.: Evaluation of Input-Side Parameter of Productivity by Cerebral Blood Oxygenation Changes, Roomvent 2004, CD-ROM 6pages, 2004
- 6) Nishihara, N. and Tanabe, S.: Office Workers' Productivity in Moderately Hot Environment -Task Performance, Fatigue and Cerebral Blood Flow-, ICHES'05, pp.233-237, 2005
- 7) 酒谷, 左: 近赤外線分光法の応用, *脳神経外科の最前線 No.2*, 先端医療技術研究所, 2000
- 8) Kohri, S., Hoshi, Y., Tamura, M., Kato, C., Kuge, Y. and Tamaki, N.: Quantitative evaluation of the relative contribution ratio of cerebral tissue to near-infrared signals in the adult human head: a preliminary study, *Institute of Physics Publishing, *Physiol. Meas.** 23, pp.301-312, 2002
- 9) 中山, 入来: 新生理科学大系 第22巻, エネルギー代謝・体温調節の生理学, 医学書院, 1987
- 10) Bakó-Biró, Z.S., Wargocki, P., Wyon, D.P. and Fanger, P.O.: Poor Indoor Air Quality Slows Down Metabolic Rate of Office Workers, *Proceedings of Indoor Air 2005*, pp.76-80, 2005
- 11) Lumb, A. B.: *Nunn's Applied Respiratory Physiology-5th Edition*, p.463, Reed Educational and Professional Publishing, Cornwall, 2000
- 12) 大野: 分離脳と半球優位性, 標準生理学第4版(本郷ら編), p191, 医学書院, 東京, 1996
- 13) 久保田: 手と脳, 紀伊国屋書店, 東京, 1982
- 14) 坂野: かくれた左利きと右脳, 青木書店, 東京, 1982

<連絡先>

著者名 西原 直枝

住所: 〒169-8555 東京都新宿区大久保3-4-1

55N701 早稲田大学理工学部建築学科田辺研究室

所属: 早稲田大学・日本学術振興会特別研究員

e-mail: nishihara@tanabe.arch.waseda.ac.jp