

非定常状態の温熱環境における人体の快適性の研究

—脳内血流量実測結果に基づく非定常温冷感予測の検討—

創造理工学専攻 環境都市コース 6164080017-7 倉成 誠

(指導教員 近本智行)

1. はじめに

定常状態における温冷感については PMV や SET* などの指標によって確立されているが、非定常状態における温冷感^{文1)}の指標については確立されていないのが現状である。また、非定常状態の温熱環境に関しては、現地での実測による温熱環境の評価や、温冷感予測の評価の試みなどで近年注目されている^{文2, 3)}。

既往の研究^{文4, 5)}では、人体に急激な温熱環境の変化(ショック)を与え、また、徐々に温熱環境の変化(順応)させたときに、その与え方(部位)や時間の違いがどのように快適性に影響を与えるかを検討した。

そこで本研究では、夏期と冬期に被験者実験を行い、非定常温熱環境下で、簡易な PC 作業^{注1)}を行った場合の代謝量の非定常や利き腕の違いが脳内血流に及ぼす影響について検討を行い、主に脳内血流の変化に着目して人体の快適性評価を行う。そして、更に心理反応と生理反応の関係を探り、非定常温熱環境の下で脳内血流の変化が他の人体反応とどのように関わっているのかを確認するとともに、今後の非定常温冷感の研究におけるの評価方法を見出すことを目的としている。

2. 実験概要：図2、3、表1～3

移動状態に応じて2つのケースを設けて実験を行った。冬期の場合は□で表記する。

定常ケース：暑い空間、快適空間、緩和空間、寒い空間のそれぞれで事前に20分間待機し、平衡に達した後、周辺環境と生理反応、心理反応を60分間測定する。このとき、実験開始後30分からPC作業を20分間行う。それ以外のときは着座・安静とする。

非定常ケース：事前に寒い空間で20分間待機し、平衡に達した後、暑い[寒い]空間で30分待機し、オフィスまでの徒歩の移動を想定し10分間踏み台昇降運動を行う(1.4 Met^{注2)})。その後、緩和・快適・寒い[暑い]空間へそれぞれ移動し、60分間滞在する。空間移動後の実験の流れは定常ケースと同様である。

実験開始時からの周辺環境と生理反応、心理反応を測定する。心理量はアンケート調査により、快適感申告・温冷感申告を中心に、生理反応は皮膚温(12点^{注4)})、平深部温均皮膚温はHard&DuBoisの12点面積重み平均にて算出)、(鼓膜温)、脳内血流(TOI、 Δ total Hb^{注5)})、脈拍数を計測し検討を行った。測定機器と測定内容について

表1 実験条件

CASE	空間	設定温度
1.1	暑い	33±1℃
1.2	緩和	28±1℃
1.3	快適	25±1℃
1.4	寒い	21±1℃
3.1	暑い	33±1℃
3.2	快適	24±1℃
3.3	緩和	20±1℃
3.4	寒い	10～15℃

表2 非定常 測定概要

CASE	空間
2.1	暑い→緩和
2.2	暑い→快適
2.3	暑い→寒い
4.1	寒い→暑い
4.2	寒い→快適
4.3	寒い→緩和



図1 実験中の様子

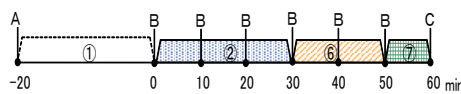


図2 定常条件 実験の流れ

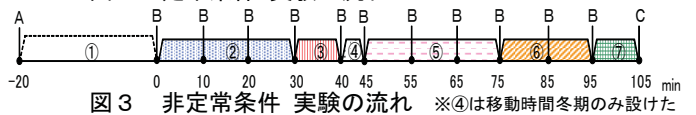


図3 非定常条件 実験の流れ

※④は移動時間冬期のみ設けた

表3 定常・非定常ケース 移動・滞在内容

記号	内容	合計時間(分)
①	実験室A入室+測定機器取り付け+着座・安静	20
②	測定開始+着座・安静	30
③	踏み台昇降運動(※非定常条件のみ)	10
④	空間移動(試験室B入室)+測定機器取り付け(※非定常条件のみ)	5
⑤	着座・安静	30
⑥	PC作業	20
⑦	着座・安静	10
A	アンケートA(開始時)を記入	—
B	アンケートB(実験中)を記入	
C	アンケートB(実験中)+アンケートC(終了時)を記入	

注3) —

※④の移動時間は冬期のみ設けた

は文4を参照。

被験者は、健康な男子学生10名(うち左利きは夏期4名、冬期3名)とした。着衣量は、夏期は、肌着・半袖シャツ・長ズボンの0.7cloとし、冬期は、「暑い空間」「快適空間」「緩和空間」においては、肌着・長袖シャツ・長ズボンの0.8clo、「寒い空間」においては、それにスーツ・コートを羽織り1.5cloとした。

3. 夏期実験考察

3-1 快適感・温冷感申告(心理反応)：図4、5

定常ケース(Case 1.1～1.4)において、温冷感・快適感申告ともに概ね妥当な結果となった。

非定常ケースにおいては、どのケースにおいても、空間移動前の温熱環境の履歴や代謝量の変化により人体に熱が蓄積されたことで、定常ケースと異なる心理反応となった。Case 2.1(暑い→緩和)はCase 1.2(緩和)と比較すると、快適感申告値は実験終了時まで低い値を示し、また、温冷感申告値は70分でCase 1.2(緩和)とほぼ同じ値をとるまでは低かった。このことから空間に移動後30分程度で心理反応はその空間と一致したものと考えられる。Case 2.2

(暑い→快適)においては、快適感申告値は Case 1.3(快適)と概ね同じ値を示し、温冷感申告値は 50~70 分までは下降して、その後は同じ推移を示した。このことから空間に移動後 40 分程度で心理反応はその空間と一致したものと考えられる。Case 2.3 (暑い→寒い)においては、Case 1.4 (寒い)と比較すると温冷感・快適感申告値は 90 分まで高く、60 分まで快適側にあった。なお、温冷感申告値が 100 分でほぼ同じ値をとったことから、空間に移動後 60 分程度で心理反応はその空間と一致したものと考えられる。以上のことから、空間移動前後での温度差が大きければ、心理反応の遅れも長くなる結果となった。

また、PC 作業による代謝量の変化では、熱的に中立でない空間に移動する Case 2.1 (暑い→緩和) と Case 2.3 (暑い→寒い) は快適感が下がった。なお、被験者ごとにみた場合には、空間移動後の経過が定常状態の心理反応と差異の見られない者(被験者 B、D)、PC 作業による代謝量の増加により変化しない者(被験者 F)のように、非定常状態の心理反応の時間経過による推移は、被験者により異なる傾向がみられた。

3-2 平均皮膚温(生理反応) 注9) : 図 6

定常ケースにおいて、Case 1.1 (暑い)、Case 1.2 (緩和)、Case 1.4(寒い)において末端部の皮膚温の順応が足りず、測定開始時から上昇、下降したが、概ね妥当な結果となった。

非定常ケース注6)において、どのケースにおいても移動直後の変化が著しく、Case 2.1 (暑い→緩和)においては空間移動後、55 分付近までは緩やかに下降し、70 分には、PC 作業により代謝量が増えたことで、温冷感申告(図 5)の上昇とともに、皮膚温の上昇がみられた。Case 2.2 (暑い→快適)は空間移動後から 50 分付近までは著しく下降し、その後は緩やかに下降した。Case 2.3 (暑い→寒い)は空間移動後から、50 分まで著しく下降し、その後は緩やかに下降し、60 分には Case 1.4(寒い)と概ね同じ値をとった。

3-3 脳内血流(生理反応)考察 : 図 7-9

定常ケースにおいて、 $\Delta_{total} Hb$ は設定温度が高い空間ほど増加傾向が見られた。TOI は既往の研究^{6,7)}と同様、被験者によって若干ばらつきがみられたが設定温度が高いと概ね TOI も高くなる傾向を示した。

非定常ケースにおいて、空間移動後の $\Delta_{total} Hb$ をみた時、70 分(PC 作業開始時)までは、温熱環境の緩和と代謝量の減少に伴い脳内が沈静化することで、各ケースそれぞれ異なる下降の変化を示し、Case 2.1 (暑い→緩和)は緩やかに減少し、Case 2.2 (暑い→快適)は移動直後の 45 分付近まで増加したが、その後緩やかに減少、Case 2.3 (暑い→寒い)では空間移動直後 5 分間急激に減少し、その後緩やかに減少した。その後 70~90 分(PC 作業中)は、どのケースにおいても、70 分時の数値を保ち安定した。そして、その後 10 分間は各ケースで変化はばらついたが、いずれも 0[$\mu\text{mol/L}$]に近づいた。

PC 作業による代謝量の変化による $\Delta_{total} Hb$ の増加を被験

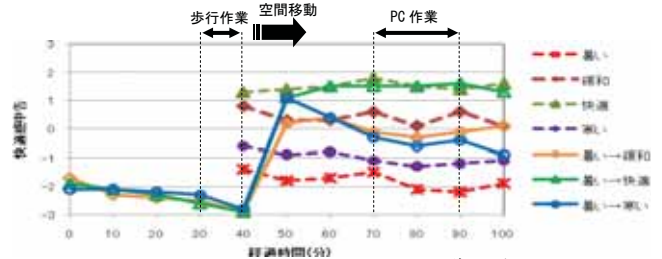


図 4 快適感申告-平均注7, 8)

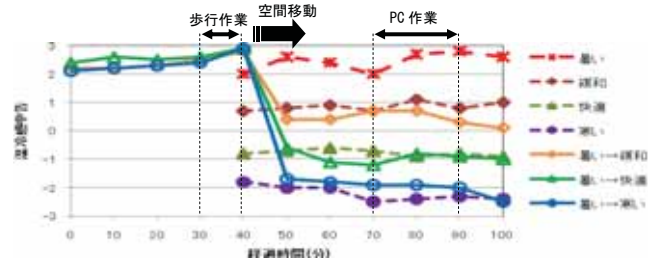


図 5 温冷感申告-平均注7, 8)

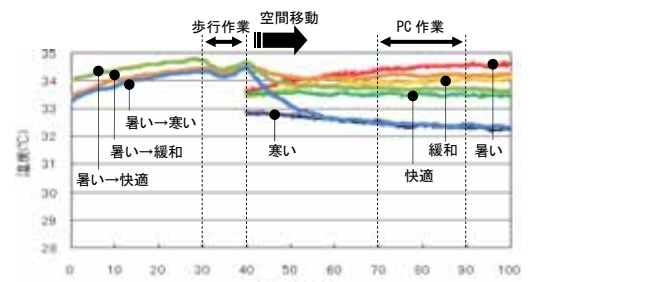


図 6 皮膚温-平均注6, 8, 9)

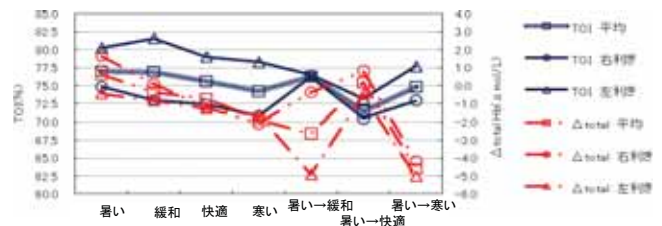


図 7 各ケース-TOI・総ヘモグロビン濃度変化-平均注10)

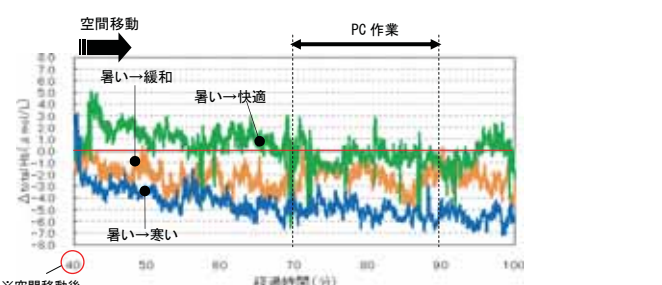


図 8 非定常ケース-総ヘモグロビン濃度変化-平均

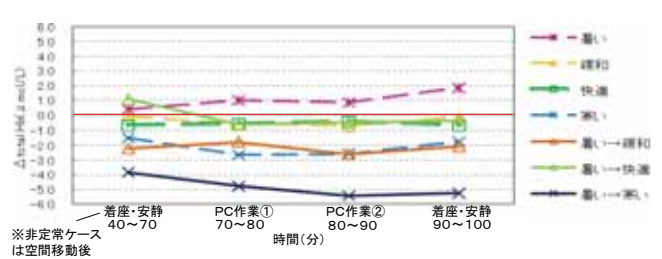


図 9 総ヘモグロビン濃度変化-平均注8)

者ごとに見ると、Case 2.1 (暑い→緩和) は 9 人、Case 2.2 (暑い→快適) は 7 人、Case 2.3 (暑い→寒い) では 4 人が 70～80 分または 80～90 分の PC 作業時に増加した。Case 2.3 (暑い→寒い) の PC 作業時に $\Delta_{total} Hb$ が増加した被験者は少ないが、空間移動後の $\Delta_{total} Hb$ が大きく下降し続けていたのに対し、PC 作業時にその下降が若干緩和された。なお、本実験結果から利き腕の違いが脳内血流に及ぼす影響についてはみられなかった^{注11)}。

4. 冬期実験考察

4-1 快適感・温冷感申告 (心理反応) : 図 10, 11
 定常ケース (Case 3.1~3.4) において、温冷感・快適感申告ともに概ね妥当な結果となった。

非定常ケースにおいて、どのケースにおいても、空間移動前の温熱環境の履歴や代謝量変化により人体に熱が蓄積されたことで、定常ケースと異なる心理反応となった。Case 4.1 (寒い→暑い) において、快適感申告値は空間移動後の 10 分間は上昇し、その後 95 分 (PC 作業終了時) まで減少し続けたが、75 分までは快適側にあった。また、95 分に Case 3.1 (暑い) の温冷感申告値とほぼ同じ値をとったことから、心理反応は 95 分にその空間と一致したものと考えられる。Case 4.2 (寒い→快適) において、快適感申告値は 75 分で Case 3.2 (快適) とほぼ同じ値をとり、その後は有意な差はみられなかった。また、温冷感申告値は 95 分 (PC 作業終了時) まで高い値をとり、この時、Case 3.2 とほぼ同じ値をとったことから、心理反応は 95 分にその空間と一致したものと考えられる。Case 4.3 (寒い→緩和) において、Case 3.3 (緩和) に比べ、快適感・温冷感申告値ともに空間移動後はやや高い値をとり、快適感申告値は 95 分 (PC 作業終了時)、温冷感申告値は 85 分で Case 3.3 の値とほぼ同じ値をとり、その後は有意な差は見られなかった。このことから、心理反応は 85 分にその空間と一致したものと考えられる。以上のことから、冬期においては夏期とは違い、心理反応の遅れは空間移動前後での温度差による影響はみられず、比較的長くなる結果となった。これは冬期の場合は、外部空間と内部空間の温度差が夏期より大きいことが原因の 1 つと考えられる。

PC 作業による代謝量の変化をみると、Case 2.2, 3.2 (快適空間) と Case 2.3, 3.3 (緩和空間) は快適感が上昇し、Case 2.1, 3.1 (暑い空間) と Case 2.4, 3.4 (寒い空間) は下降し、不快環境化で作業を行った場合に快適感は減少する傾向となった。また、被験者ごとにみた場合では、空間移動後の経過が定常状態の心理反応と差異の 見られない 者 (被験者 F)、PC 作業による代謝量の増加により 変化しない 者 (被験者 C、F、I) のように、非定常状態の心理反応の時間経過には推移は異なった傾向がみられた。

4-2 平均皮膚温 (生理反応) ^{注9} : 図 12

定常ケース (Case 3.1~3.4) において、末端部皮膚温の順応が足りず (40 分程度で順応)、開始時から上昇する傾向

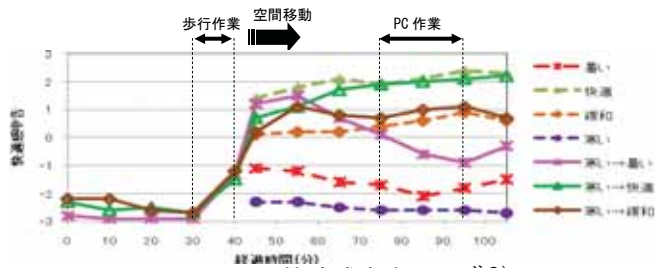


図 10 快適感申告-平均^{注8)}

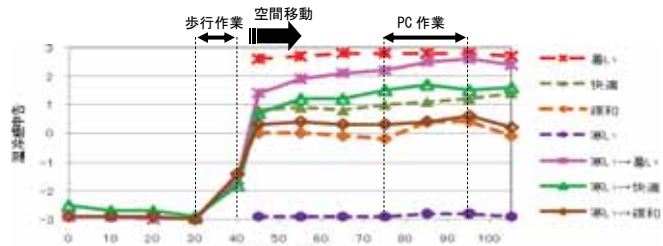


図 11 温冷感申告-平均^{注8)}

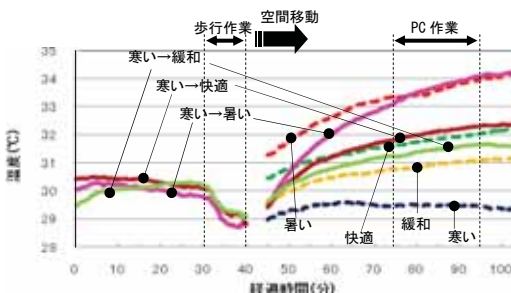


図 12 皮膚温-平均^{注6, 8, 9)}

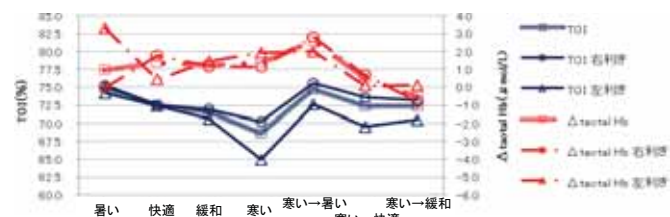


図 13 各ケース-TOI・総ヘモグロビン濃度変化-平均^{注10)}

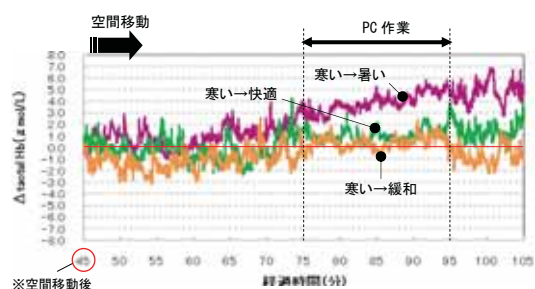


図 14 非定常ケース-総ヘモグロビン濃度変化-平均

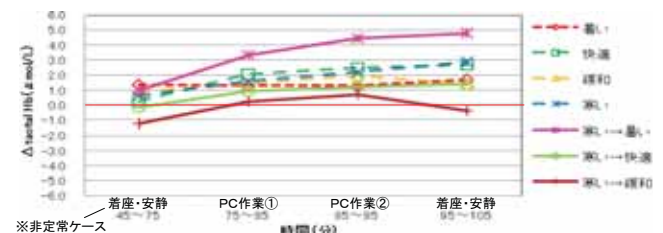


図 15 総ヘモグロビン濃度変化-平均^{注8)}

が見られたが、概ね妥当な結果となった。

非定常ケース^{注6)}において、どのケースにおいても、空間移動後5分間の上昇が著しく、その後、Case 4.1(寒→暑)とCase 4.2(寒→快適)は緩やかに上昇し続け、Case 4.2は95分(PC作業終了時)にその上昇は止まった。また、Case 4.3(寒→緩和)は心理反応と同様で、「寒」空間での歩行作業により体内に蓄積した熱が、その後の「緩和空間」でも持続し、その結果、Case 3.3(緩和)の定常状態より皮膚温は高い値を示した。なお、PC作業の代謝量変化による影響は、皮膚温平均からはみられなかった。

4-3 脳内血流(生理反応): 図13-15

定常ケース(Case 3.1~3.4)において、被験者によって若干ばらつきがみられたが、 Δ total Hbは設定温度が高い空間ほど概ね増加傾向が見られた。TOIは既往の研究^{文6,7)}と同様、設定温度が高いとTOIも高くなる傾向を示した。

非定常ケースにおいて、温熱的に中立でない空間に移動するCase 4.1(寒→暑)とCase 4.3(寒→緩和)は、空間移動後も脳内が活発化し、 Δ total Hbは増加した。また、時間経過による変化を見たとき、Case 4.1の空間移動後10分間は減少し、その後増加する傾向がみられ、心理反応(快適感申告)との関連性がみられた。

PC作業による代謝量の変化をみると、全ての実験ケースにおいて脳内が活性化することで Δ total Hbは増加した。なお、本実験結果から利き腕の違いが脳内血流に及ぼす影響についてはみられなかった^{注11)}。

5. 総ヘモグロビン濃度変化と心理反応の関係: 図16

Δ total Hbの変化には個人差が大きく、個別の被験者(冬期の被験者A)で、非定常ケースについて考察を行う^{注12)}。Case 4.1(寒→暑)において、移動後10分間は快適性が向上(快適感申告値: 0→2)し、この時 Δ total Hbは負の側

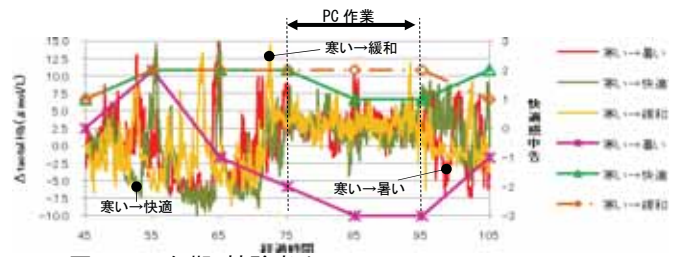


図16 冬期-被験者A
-総ヘモグロビン濃度変化と快適感申告の関係

に下降しており、また、Case 4.2(寒→快適)とCase 4.3(寒→緩和)においても、移動後10分間で快適性が向上(快適感申告値: 1→2)した時、負の側に下降した。その後、3ケースにおいて、 Δ total Hbはしばらくの間下降し続け、PC作業開始とともに Δ total Hbは上昇し、作業中は安定した。そして、作業後は0[μ mol/L]の間を行き来した。

このことから、総ヘモグロビン濃度の変化は生理量であり、皮膚温と同様で温熱環境の変化に対し比較的早く反応するが、応答遅れの変化は心理反応の変化と関連性があるのではないかと考えられる。

6. まとめ

夏期と冬期において、異なる温熱環境に移動することで、同じ環境後でも異なる生理、心理反応を示す結果となった。今回の実験では、空間移動や代謝量を変化させた時の脳内血流の変化に着目し、非定常状態でPC作業を行った際の総ヘモグロビン濃度の増加傾向を確認した。また、総ヘモグロビン濃度の応答遅れ成分の変化が、心理反応の変化と関係がある可能性がみられた。今後は定量的解析を進めるとともに、脳内血流の変化と他の生理、心理反応の関係を把握することで、非定常状態における温熱環境指標の確立を図っていく予定である。

注1) 百マス計算を行った。なお、PC作業の作業成績は問わず、着座・安静時と比べて代謝量を変化させる為に行った。

注2) 代謝量は、身体活動量計測計 アクティマーカー (Panasonic W4800P) を用い、1.4Met に統一させた。

注3) Aは被験者の特徴、Bは快適感・温冷感(部位も含む)・許容度・湿度・発汗の有無など、Cは実験中の感想などの自由記載。

注4) 額、腕、手背、腹、胸、背中、腰、大腿前・後、下腿前・後、足背

注5) TOI(組織酸素化指標)は、ヘモグロビンの酸素飽和度を示し、 Δ total Hbは総ヘモグロビン濃度の変化量を示す。これらは血流が活発に働くにつれ高い値を示し、周辺環境の変化との関連性が見られたため、生理量の目安に用いた。なお、右脳は被験者により大きくばらついたため、今回は左脳の値を使用した。測定は歩行作業時を除いて行った。

注6) 歩行運動時に皮膚温が上昇する被験者と熱電対が外れる被験者が両方いたため歩行運動時に皮膚温の上昇がみられず、平均は異様な曲線を描いた。

注7) 40分時の温冷感快適感申告は空間移動前の申告とする。

注8) 定常ケース(夏期: Case 1.1-1.4、冬期Case 3.1-3.4)は、非定常ケース(夏期: Case 2.1-2.3、冬期Case 4.1-4.3)と比較する為に、夏期は40分、冬期は45分を開始点としてグラフに表示した。

注9) 深部温(鼓膜温)の変化は非常に小さく、今回の実験では関連性がみられなかった。

注10) 夏期は右利き6名と左利き4名の被験者、冬期は右利き7名と左利き3名の被験者からそれぞれの平均を出した。

注11) 一般的に、脳の左半球が言語機能に有意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、非言語的思考に有意であるとい

われている。本研究においてPC作業を行うことで左脳の Δ total Hbの変化量が多いと予測されたが、本研究では有意な差は見受けられなかった。

また、利き腕が右手の人の場合、言語脳はほとんどであるといわれており、本研究において右利きと左利きで比較した場合に、PC作業時に右利きの被験者の方が Δ total Hbの変化量が多いと予測されたが、本研究では有意な差は見受けられなかった。

注12) この傾向は一部の被験者で表れた。今後、更なるデータの蓄積が必要といえる。

文1) 久野: 温熱環境の快適性とプレゼントネス, 建築雑誌 pp.22-23, 1995年6月

文2) 森・鈴井・高田・田中: 非定常状態における温熱感予測に関する実験的考察, 日本建築学会計画系論文集, pp.9-15, 2003年1月

文3) 柄原・隈本・榎本: 下半身の加湿が人体生理・心理反応に及ぼす影響: その1, 建築学会大会環境系論文集 pp.377-388, 2008年9月

文4) 近本, 倉成: 快適性を考慮した空調制御に関する研究(その5), 空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集 pp.1157-1160, 2008年8月

文5) 近本, 倉成: 非定常状態の温熱環境における人体の快適性の研究(その3), 空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集 pp.1291-1294, 2009年9月

文6) 西原・田辺: 室内環境における知的生産性(その2), 空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集 pp.669-672, 2003年9月

文7) 佐々・久保・磯田・梁瀬: 温熱的快適性の個人差に関する実験的研究, 日本建築学会計画系論文集, pp.369-370, 1996年9月

文8) De Dear, R.J., Banger, G.S and Cooper, D.J.: Developing an adaptive model of thermal comfort and preference, Final Report on ASHRAE RP-884, 1997年

文9) Fanger, P. O.: Thermal comfort-Analysis and applications in environmental engineering, Mc Graw-Hill Book Company, 1972年