

名古屋工業大学博士論文

甲第308号(課程修了による)

平成12年3月23日授与

博士論文

建築空間における温熱・光環境条件が
人体生理心理反応に及ぼす影響

2000年

石井 仁

建築空間における温熱・光環境条件が人体生理心理反応に及ぼす影響

論文要旨

ヒトは可視光線の青を中心とした短波長色に涼しい感覚を受け、赤を中心とした長波長色に暖かい感覚を受ける。このような感覚を与える色相は一般にそれぞれ寒色、暖色と呼ばれている。この色相と寒暖の感覚に関する既存の研究では、ある色相から寒暖の心理的な印象は受けるが、温度感覚や熱的快適性のような、物理的温熱環境に因る心理反応には、影響を及ぼさない、あるいはその影響は僅少であり、実効的ではないと報告されている。よって、この感覚には空気調和機器にかかるエネルギーを削減する効果は、期待できないとされている。同様に、光源の色温度も寒暖の感覚を与える要因とされており、色温度が高いと涼しく、低いと暖かい感覚を受ける。この光源の色温度と寒暖の感覚に関する既存の研究では、色温度が低い光源からは視覚的に暖かい印象を受け、色温度が高い光源からは、視覚的に涼しい印象を受けると、心理的な印象に関する報告はされている。しかし、温度感覚や熱的快適性のような、温熱環境に因る心理反応に及ぼす影響に関する研究は、ごく僅かである。また光源の照度に関しても、照明の明視条件などに関する研究は数多く行われているが、温熱環境に因る心理反応に及ぼす影響に関する研究は、ごく僅かである。そこで本研究は、人工光源を温熱的な観点で捉え、人工光源を温熱的に表現するための温熱環境に関する諸係数を導出し、人工光源の色温度、照度が温熱環境条件と共に、温熱環境に因る人体生理・心理反応に及ぼす影響を、被験者実験をとおして明らかにすることを目的としている。さらに、日本人を対象にした、心地よい照明の色温度と照度の関係を併せて検討している。

本論文は、以下の第1章から第5章で構成されている。

第1章「序論」においては、本研究の目的および意義を述べている。文献より、色相、光源の色温度、照度が人体心理・生理反応に及ぼす影響に関する研究の調査を行い、本研究の目的とした、人工光源の色温度、照度が人体生理・心理反応に及ぼす影響に関する研究が僅少であることを述べている。また、人体と環境との間の熱交換経路の一つである、対流による熱交換量に関わる、人体の自然対流熱伝達率に関する既往の研究の文献調査を行い、本研究の人工光源の人体影響に関する実験で、人体の自然対流熱伝達率を用いるにあたり、本研究で直接利用できる研究が極めて僅かであることを述べている。これらを前提として、本研究の方法と範囲を明らかにしている。

第2章「人体と環境との間の熱交換量および作用温度」においては、人体と環境との間の物理的相互関係を記述した、人体熱収支式を提示している。さらに人

体熱収支式内で記述され、第3章において実測を行う、経路別熱交換量に関する理論式を提示している。この人体熱収支式に基づき、第4章で述べる、人工光源の色温度、照度が温熱環境に因る、人体生理・心理反応に及ぼす影響を明らかにする際に必要とされる作用温度を提示している。

第3章「実測による人体と環境との間の放射および対流による熱交換量に関する係数の導出」においては、第4章で人工光源を、温熱的に表現するための温熱環境に関する諸係数を、青年男子のべ12名を用いた被験者実験より、提案している。諸係数とは、人体全身の自然対流熱伝達率および放射熱伝達率、人体部位の自然対流熱伝達率および部位放射熱伝達率である。それらの諸係数を既存の研究と比較し、本研究で用いた、導出手法の有用性を検討している。また、人体の自然対流熱伝達率および放射熱伝達率の分布性状を把握した。

第4章「人工光源の色温度、照度が温熱環境に因る人体生理・心理反応に及ぼす影響」においては、人工光源の色温度、照度が温熱環境と共に、人体に及ぼす温熱的な影響を把握するため、青年男子4名を用いた被験者実験を実施し、生理的および心理的な人体影響への検討・考察を行っている。その結果、人体生理反応としての皮膚温、経路別熱交換量には、人工光源の影響が、明確には認められないことを明らかにした。人体心理反応としての温冷感は、温熱環境が熱的中立より若干寒い側（作用温度25℃）、および熱的中立（作用温度28℃）において、人工光源の色温度、照度の影響が及ぼされることを明らかにした。色温度に関して、白色蛍光ランプ（色温度4200K）よりも色温度の低い、白熱電球（色温度2850K）の環境を、被験者は、より暑く感じており、光色を色相と捉えるならば、色相と寒暖の心理的印象の関係と同様の傾向が示されたと考えられる。照度に関して、白熱電球の場合、被験者が光源の照度の高低を放射温度の高低と捉え、照度の高い環境ほど、より暑く感じる傾向が示された。人体心理反応としての快適感には、温熱環境が熱的中立より若干寒い側、熱的中立において、人工光源の色温度、照度の影響が及ぼされることを明らかにした。色温度に関して、熱的中立より若干寒い環境では、白熱電球よりも色温度の高い、白色蛍光ランプの環境を、被験者は、より快適に感じる傾向が示された。熱的中立環境では、白色蛍光ランプよりも色温度の低い、白熱電球の環境を、被験者は、より快適に感じる傾向が示された。照度に関して、熱的中立より若干寒い環境では、1000lx程度の高照度の蛍光ランプの環境をより快適に感じ、熱的中立環境では、100lx程度の低照度の蛍光ランプ、500lx程度の白熱電球の環境を、より快適に感じる傾向が示された。快適感に関しては、欧米の既存の研究と、必ずしも同様の傾向を示す結果とはならず、日本人の心地よい照明の色温度と照度に関する特異性の一端が窺えた。

第5章「結論」においては、各章で述べてきた結果を総括して結論とし、今後の研究に対する課題と将来への展望について述べている。

目次

第1章 序論	1
1.1 研究の目的と意義	3
1.2 既往の研究	7
1.2.1 色相, 光源の色温度, 照度が人体の生理・心理反応に及ぼす 影響に関する研究	7
1.2.2 人体の自然対流熱伝達率に関する研究	13
1.3 研究の方法と範囲	17
1.4 摘要	19
第1章引用文献	20
第2章 人体と環境との間の熱交換量および 作用温度	23
2.1 緒言	25
2.2 人体熱収支式	25
2.2.1 代謝量	27
2.2.2 対流による熱交換量	27
2.2.3 放射による熱交換量	30
2.2.4 蒸発による放熱量	33
2.3 作用温度	34
2.4 摘要	35
第2章引用文献	36
第3章 実測による人体と環境との間の放射および 対流による熱交換量に関する係数の導出	37
3.1 緒言	39
3.2 実験計画	39
3.2.1 実験概要	39
3.2.2 実験条件	40
3.2.3 被験者	40

3.2.4	実験手順	41
3.2.5	測定項目および測定機器	42
3.3	実験結果	44
3.3.1	温熱環境条件の実測結果 (実験 I, II)	44
3.3.2	形態係数の実測結果 (実験 I, II)	44
3.3.3	皮膚温の経時変動 (実験 I)	46
3.3.4	人体各部位における周径方向の皮膚温分布 (実験 II)	47
3.3.5	放射および対流による熱交換量 (実験 I)	48
3.3.6	人体各部位における周径方向の放射による 熱交換量分布 (実験 II)	48
3.3.7	人体各部位における周径方向の対流による 熱交換量分布 (実験 II)	50
3.3.8	代謝量, 経路別放熱量および熱収支量 (実験 I)	52
3.4	考察	53
3.4.1	人体各部位における周径方向の 放射熱伝達率分布 (実験 II)	53
3.4.2	人体各部位における周径方向の 自然対流熱伝達率分布 (実験 II)	55
3.4.3	人体各部位および全身の放射熱伝達率 (実験 I)	57
3.4.4	人体各部位および全身の自然対流熱伝達率 (実験 I)	58
3.5	摘要	66
	第3章引用文献	67

第4章 人工光源の色温度, 照度が温熱環境に因る 人体生理・心理反応に及ぼす影響

4.1	緒言	71
4.2	実験計画	71
4.2.1	実験条件	71
4.2.2	実験室概要	72
4.2.3	被験者	72
4.2.4	実験手順	72
4.2.5	測定項目および測定機器	74
4.3	実験結果	76
4.3.1	実験環境の測定結果	76

4.3.2	皮膚温・舌下温・平均皮膚温の経時変動	76
4.3.3	人体各部位および全身の経路別熱交換量	79
4.3.3.1	人体各部位での対流による熱交換量	79
4.3.3.2	人体各部位での放射による熱交換量	81
4.3.3.3	人体全身の経路別熱交換量	83
4.4	考察	85
4.4.1	人体生理反応としての皮膚温に及ぼす影響	85
4.4.2	人体生理反応としての経路別熱交換量に及ぼす影響	86
4.4.3	人体心理反応としての温冷感に及ぼす影響	87
4.4.3.1	作用温度 25℃条件	87
4.4.3.2	作用温度 28℃条件	90
4.4.3.3	作用温度 31℃条件	93
4.4.3.4	温冷感の総括	96
4.4.4	人体心理反応としての快適感に及ぼす影響	97
4.4.4.1	作用温度 25℃条件	97
4.4.4.2	作用温度 28℃条件	100
4.4.4.3	作用温度 31℃条件	103
4.4.4.4	快適感の総括	106
4.4.5	温冷感と快適感の関係	108
4.5	摘要	110
	第4章引用文献	111
	第5章 結論	113
5.1	総括	115
5.2	今後の課題と将来への展望	117
	引用文献	121
	謝辞	129
	発表論文一覧	133
	付録	139

第3章付録	141
付録3-1 皮膚温・舌下温・平均皮膚温の経時変動 (実験Ⅰ)	141
付録3-2 周径方向の部位皮膚温分布 (実験Ⅱ)	144
付録3-3 放射および対流による熱交換量 (実験Ⅰ)	145
付録3-4 周径方向の部位放射熱交換量分布 (実験Ⅱ)	148
付録3-5 周径方向の部位対流熱交換量分布 (実験Ⅱ)	149
付録3-6 周径方向の部位放射熱伝達率分布 (実験Ⅱ)	150
付録3-7 周径方向の部位自然対流熱伝達率分布 (実験Ⅱ)	151
付録3-8 人体各部位および全身の放射熱伝達率 (実験Ⅰ)	152
付録3-9 人体各部位および全身の自然対流熱伝達率 (実験Ⅰ)	153
第4章付録	154
付録4-1 皮膚温・舌下温・平均皮膚温の経時変動	154
付録4-2 人体全身および各部位の対流による熱交換量	172
付録4-3 人体全身および各部位の放射による熱交換量	180
付録4-4 人体全身の蒸発による放熱量	188
付録4-5 温冷感の経時変動	189
付録4-6 快適感の経時変動	191

第1章 序論

1.1 研究の目的と意義

1.2 既往の研究

1.2.1 色相, 光源の色温度, 照度が人体の生理・心理反応に及ぼす
影響に関する研究

1.2.2 人体の自然対流熱伝達率に関する研究

1.3 研究の方法と範囲

1.4 摘要

第1章引用文献

1.1 研究の目的と意義

ゲーテが「青は常に何らかの暗さを伴っていて、寒冷の感情を与え、また陰影を連想させる。」と記述しているように、ヒトは可視光線の青を中心とした短波長色に涼しい感じを受け、赤を中心とした長波長色に暖かい感じを受ける。そのような感覚を与える色彩は一般的に寒色 (cool color)、暖色 (warm color) と呼ばれており、インテリア雑誌などでは部屋を暖色系の色でまとめると暖かみのある部屋になる、などよく目にする。この感覚に実証的検討が試みられはじめたのは、「色彩科学ハンドブック」(色彩照明学会 編)¹⁾によると、1926年の Morgensen and English の研究²⁾ からである。その研究の多くは、被験者あるいは無作為に抽出した市民に、数種類の色相を提示し、暖かさ、涼しさを感じる順序に並べ替えさせたり、比較させたりする手法で行われている。すなわち視覚的に色彩を提示したときに、その色彩から受ける寒暖の印象を回答させる手法であった。結果、短波長色からは涼しい印象を受け、長波長色からは暖かい印象を受けることが、多くの実験から実証され、定説となっている。色相のほか、彩度や明度が及ぼす影響に関する研究も、同様に行われてはいるが、それらは未だ、定まった説であるとは言い難い。

寒色、暖色などの色相が、人体の温熱的な生理反応、温冷感などの温度感覚や、不快指数などの熱的快適性のような、温熱環境に起因する、人体心理反応に及ぼす影響に関する研究は、1960年代から行われはじめた。これらの研究では、色相と温度感覚の関係のことを "hue-heat" hypothesis³⁾ と捉え、視覚的な色彩が、ヒトの温度判断に及ぼす影響を明らかにすることを目的としていた。さらに当時、増加傾向にあった空気調和機器のエネルギー消費量を削減する、有効的手段としての可能性も検討しており、時代の要請に答えた、実効性の高い研究であった。これらの研究の多くは、赤、青など数種の色相に整えた実験室に被験者を曝露して、温冷感、熱的快適性などの心理反応を比較する実験を行ったり、あるいは色相の整えられた実験室を、被験者が好ましく感じる気温に調整させ、その気温を比較する実験を行って、人体影響を検討している。その際、実験室の色相を整える方法として、実験室の内装材を単一色相でしつらえたり、照明の色相を変化させることにより、実験室の色相を整えたり、あるいは被験者に有色のゴーグルを装着させ、室内の色相を整えるものであった。結果、多くの研究が、人体の温熱的生理反応、ヒトの温度感覚、熱的快適性などの温熱環境に因る人体心理反応に、色相は影響を及ぼさないと報告している。あるいはその影響は僅少であり実効的ではないと報告しており、"hue-heat" hypothesis は、未だ立証されているとは言い難い。ゆえに色相には、空気調和機器のエネルギーを削減する効果は期待できないとされている。

建築空間のインテリアを考えた際、色彩の要素を含んでいるものに、仕上材や

調度品の色彩以外に、光源の色温度と照度が考えられる。光源の色温度は、色相と捉えることができ、光源の照度は、明度として捉えることができると考えられる。色温度に関しては、夕日の射し込む部屋は、ほのかに赤みがかかり、昼間とは異なる印象を受けたり、照明器具のランプを取り替えるだけで、部屋は全く異なった印象を受けることなどは、想像に難くないと言える。照度に関しても同様に、夏の照りつける太陽はまぶしく暑い感じを受け、冬のどんよりとした曇り空は肌寒い感じを受けると言える。「昼光照明の計画」(日本建築学会編)⁴⁾には、人工光源の光色の見え方は、「色温度が高いと涼しく、低いと暖かい」と色温度と寒暖の印象との関係について記載されている。光源の色温度に関して寒色、暖色の視覚的印象の研究と同様に、光源の色温度と寒暖の視覚的印象に関する研究は僅かではあるが行われている。その研究の一例⁵⁾によると、色温度が低い光源からは、視覚的に暖かい(visually warm)印象を受け、色温度が高い光源からは、視覚的に涼しい(visually cool)印象を受けると報告している。さらに色相が温熱環境に因る人体生理・心理反応に及ぼす影響に関する研究と同様に、光源の色温度が、温熱環境に因る生理・心理反応に及ぼす影響に関する研究も、数例行われてはいるが、色温度が温熱環境に関する生理・心理反応に及ぼす影響の有無については、研究により結論が異なっており、未だ、定まった見解が得られている、とは言い難い。これには研究手法が異なることが一因として考えられるが、やはり研究報告の蓄積不足によるものと考えられ、さらなる研究遂行の必要性が考えられる。光源の照度においては、照明の明視性に関する研究は、数多く行われているが、照度が温熱的生理反応に及ぼす影響や、心地よい色温度と照度に関する研究は、極めて僅かであり、さらに光源の照度が温熱環境に因る人体心理反応に及ぼす影響に関する研究は、ほとんどない。光源の照度に関しても、同様にさらなる研究遂行の必要性があると考えられる。以上の観点から、光源の色温度、照度が、温熱環境に因る人体生理・心理反応に及ぼす影響を解明することは、十分有意義かつ、必要性のある研究であると考えられる。

Kruithof⁶⁾は、心地よい(原文:pleasing)、光源の色温度と照度の関係の線図を提案している。またCIE(国際照明委員会)の屋内照明ガイド⁷⁾には、色温度を3段階、照度を5段階に分け、心地よい色温度と照度の関係を挙げている。CIEの屋内照明ガイドに対し、乾⁸⁾は、「主として北西ヨーロッパ諸国が中心となつてつくったものであるので、気候の異なる国で適用するときは修正が必要であろう。日本では総じて冷たい光が好まれると考えられる。」と記述している。冷たい光とは高色温度光源のことと考えられ、例えば白色蛍光ランプがそれにあたる。ここで人工光源の普及率について言及すると、日本の住宅は、世界一蛍光ランプを用いている割合が多い。1983年のデータ⁹⁾によると、一世帯あたり、およそ8割が照明器具に蛍光ランプを用いている。これは諸外国と比較すると、特

異的な普及率である。CIEの日本委員会は、日本における蛍光ランプ普及の理由に関する調査¹⁰⁾を行っている。その調査によると、普及理由のひとつとして、元来日本人は、障子からの明るく拡散された昼光に馴染んでいることを挙げ、このことが同様の特性を持つ、蛍光ランプに違和感を感じず、諸外国に例をみない、蛍光ランプの普及率であると報告している。先に述べた乾の指摘や、日本における蛍光ランプ普及率を考えると、日本人を対象とした心地よい人工光源の色温度と照度の関係を検討する必要があると考えられる。そこで本研究では、人工光源の色温度、照度が温熱環境に因る人体生理・心理反応に及ぼす影響に関する研究を行うなかで、日本人を対象とした、心地よい人工光源の色温度と照度の関係を併せて検討する。

本研究では、人工光源の色温度、照度の温熱的な生理・心理反応に及ぼす影響を明らかにすることを目的としているが、そのためには、光源からの発熱量の温熱的な効果を、適切に評価する必要があると考えられる。温熱環境が等価な条件の下で、光源の心理反応に及ぼす影響の比較を行わないと、その影響を抽出することは、不可能であると考えられる。気温のみでは、物理的に温熱環境の比較は正確に行えないと考えられ、本研究では、その光源からの発熱量を加味した温度として、作用温度を用いることとした。人体と環境との間の対流および放射熱交換量を物理的に評価している、作用温度を算定するには、人体の対流および放射熱伝達率を、正確に把握することが必要とされる。人体の対流および放射熱伝達率に関する研究は数多く行われているが、本研究の実験条件に即してみた場合、放射熱伝達率に関しては、既往の研究データを用いて作用温度を設定することは可能だが、対流熱伝達率に関しては人体の体型・体格や姿勢、空気の物性値により異なる値をとるため、本研究に適した既往の研究データがあるとは言い難く、作用温度を適切に設定することは困難である。また作用温度を、より精度高く設定するには、人体局所の対流熱伝達率、放射熱伝達率の分布性状を把握する必要があると考えられる。そこで本研究は、人体局所の対流熱伝達率および放射熱伝達分布性状を把握し、人体全身の対流、放射熱伝達率を実測より推定し、日本人を対象とした、人工光源の色温度、照度が温熱環境に因る人体生理・心理反応に及ぼす影響を、被験者実験をとおして明らかにすることを目的とする。

本研究の観点

- 1) 作用温度を適切に設定する際、必要とされる人体の対流熱伝達率および放射熱伝達率を推定する。被験者を用いた実験を実施し、人体と環境との間の対流および放射熱交換量を部位ごとに測定する。測定された部位ごとの熱交換量から、人体局所の対流熱伝達率、放射熱伝達率を推定し、その値から人体全身の対流熱伝達率、放射熱伝達率を提案する。さらに主として、対流によ

る熱交換量に分布があると考えられる、人体部位の対流および放射熱交換量の周径方向の分布量を測定し、対流熱伝達率および放射熱伝達率の分布性状を把握する。その値から人体局所の周径方向の分布性状を考慮した全身の対流熱伝達率、放射熱伝達率の提案も併せて行う。

- 2) 提案した対流熱伝達率および放射熱伝達率を用いて、作用温度を適切に設定し、男子学生被験者を用いた実験を行い、異なる人工光源の色温度、照度での人体生理反応としての皮膚温および経路別熱交換量、人体心理反応としての温冷感、快適感などを測定する。被験者実験の測定結果より、人工光源の色温度、照度が温熱環境に因る人体生理・心理反応に及ぼす影響を明らかにする。また、日本人を対象とした、心地よい光源の色温度と照度の関係を検討する。

本研究の意義

- 1) 多数の被験者を用いた実測により、人体の対流熱伝達率を提案した研究は、数多く行われていない。さらに人体部位の局所対流熱伝達率の提案、人体局所対流熱伝達率の周径方向の分布性状を把握した研究は、ほとんどない。よって提案した、人体全身および局所の対流熱伝達率、および周径方向の対流熱伝達率分布は、今後の温熱環境研究に、有益なデータになりうると考えられる。また、ライフスタイルの変化により、日本人の体型・体格は以前とは異なっており、現時点における適当な諸係数が提案できると考えられる。
- 2) 人体と人工光源との間の熱交換量を把握し、人体と光源との間の熱交換量が温熱環境に因る人体生理・心理反応に及ぼす影響を検討することにより、照明器具を熱負荷でなく、熱源の一環として捉え、統合された空気調和・照明設計を行うことが可能となる。また統合的に空気調和・照明機器を制御することにより、より有効的なエネルギー資源の活用が可能であると考えられる。
- 3) オフィス空間や住宅など建築空間における、温熱環境および光環境は、空気調和機器、照明器具を用いて、機械的に調節されることが一般的であるが、人工光源の色温度、照度が温熱環境に因る人体生理・心理反応に何らかの影響を及ぼすのであれば、快適な建築空間を創出する際に、空調機器、照明器具のうち、どちらかエネルギー消費量の少ない方で温熱環境を調節することが可能となる。それにより建築物にかかるエネルギー消費量が削減され、CO₂発生量軽減、都市部でのヒートアイランドの緩和など、地球環境の温暖化防止の一助になりうると考えられる。

1.2 既往の研究

1.2.1 色相, 光源の色温度, 照度が人体の生理・心理反応に及ぼす影響に関する研究

Morgensen and English²⁾ は, 1926年に25名の学生被験者(男子18名, 女子7名)に対して, 定温(42℃)に保たれた, 円筒状の加減抵抗器の周囲を6色(緑, 青, 橙, 黄, 赤, 紫)の色紙で包んだ実験装置を用い, 異なる色の抵抗器を左右の手に握らせ, 温度感覚を比較させる実験を行った。その結果, 緑, 青, 橙, 黄, 赤, 紫の順に, 暖かく感じたと報告している。

Tinker¹¹⁾ は, 1938年に100名の被験者(男性50名, 女性50名)に対して, 8色の有彩色(赤, 青, 黄, 緑, 橙, 紫, 青緑, 黄緑)と, 3色の無彩色(灰, 白, 黒)の紙と布を提示し, 暖かく感じる順序に並べさせる実験を行った。その結果, 暖かく感じる順序に優位な差が認められ, 赤と橙は暖かく感じ, 青緑, 黄緑は涼しく感じ, 青と緑はそれらの中間に位置していると報告している。また無彩色に比べ, 有彩色はより暖かく感じると報告している。

Lewinski¹⁾ は, 1938年に部屋の照明光の色を変えて暖かさを判断させた。その結果, 赤がもっとも暖かく, 青がもっとも冷たく, その間は波長の順に変化し, 緑と紫は, ほぼ中間に位置したと報告している。

Newhall¹⁾ は, 1941年にマンセルの50色の高彩度色表の中から, 最も暖かく見える色, 最も冷たく感じられる色を, 被験者297名に回答させる実験を行った。その結果, warmest colorについては5R(赤)を中心に大きな山ができ, その両側にY(黄)とPB(青紫)付近の小さい山が近接する程度で, 個人差は比較的少なかったが, coolest colorについては, 個人差は大きく, YG(黄緑)とB(青)との二つの山に分かれ, Y(黄)からP(紫)までの広範囲に回答が分散していると報告している。

Kruithof⁶⁾ は, 1941年に照明の色温度と照度に関する研究を行い, 図1-2-1に示す, 2本の曲線で囲まれた心地よい照度と色温度の範囲の線図を提案した。

木村¹²⁾ は, 1950年に色の見かけ上の暖かさに序列をつけることを目的として, 彩色カード配列法, 彩色カード比較法, 着色水比較法の3種の実験を行った。彩色カード配列法は, 彩色カード8枚(赤, 橙, 黄, 緑, 青, 紫, 黒, 白)を被験

者に手渡し、暖かいと思う順番に並べさせる方法で、18名の被験者に対して行い、その結果、赤、橙、黄色、紫、緑、白、青、黒の順序で暖かく感じる傾向が認められた。彩色カード比較法は、上記のカードを2枚ずつ組み合わせて、同時に被験者に提示し、暖かく感じるカードを選択させる方法で、50名の被験者に対して行い、その結果は赤、橙、黄色、紫、緑、青、黒、白の順序で、暖かく感じる傾向が認められた。着色水比較法は、2つのビーカーに体温とほぼ等しい、異なる色相の着色水をそれぞれ容れ、被験者の左右の人差し指を浸し、暖かく感じるビーカーを選択させる方法である。指を浸すまでは、被験者とビーカーの間に衝立を置き、事前に色相が分からないように実験を実施した。被験者45名に対して行い、その結果は赤、橙、黄、緑、紫、黒、青、白となった。以上の3種の実験から、色彩の見かけ上の暖かさの序列は、黒・白・紫を除き、波長が大きいほど暖かく感じると報告している。

Wright¹³⁾ は、1960年に当時、西ドイツの市街地在住の16歳から65歳の市民3569名（男性926名、女性2643名）に、45種類の有彩色と黒、白、灰色の無彩色のカードを提示し、7段階の評定尺度のあるSD法の24項目の形容詞対に対して回答させ、色相、明度、彩度が見かけ上の暖かさ、重さに及ぼす影響の研究を行っている。その結果、色相は見かけ上の暖かさに影響を及ぼすが、Rossが報告している明度と彩度が見かけ上の暖かさに及ぼす影響に関しては、さらなる検討が必要であると報告している。

塚田¹⁴⁾ は、1961年にランダムに抽出した、東京都内および、その周辺に在住する成人400名（男性200名、女性20名）に88色の標準色カードを提示し、[暖かい—どちらでもない—寒い]の3段階で評定させた。その結果、赤、橙、黄橙、赤紫が暖感、緑、青緑、青が寒感であるとし、また彩度に関して、色相の影響を受けるが、高彩度が暖感、低彩度が寒感であると報告している。

Berry¹⁵⁾ は、1961年に5種類の照明（緑、青、黄色、アンバー、白色）を用いて、実験室の気温を徐々に上昇させる実験を行い、照明の光色が不快指数に及ぼす影響に関する研究を行っている。さらに実験と同色の5色の色サンプルを提示し、暖かい順に並べ替える実験を行った。被験者25名（男性19名、女性6名）に対して、実験を実施した結果、照明の光色の種類による、被験者の不快指数に有意な差は認められなかった。しかし、色を暖かい順に並べさせると、被験者は緑色や青色を涼しく感じる傾向が認められた。暑く不快な環境にさらされている人に、有色照明を用いても、不快の閾値は変わらず、不快感に変化が生じること

はないと報告している。

Bennett and Rey³⁾ は、1972年に、青、赤、透明のゴーグルを被験者に装着させ、実験室の平均放射温度を変化させる実験を行い、ゴーグルの色相の差違を実験室内の色相の違いに見立て、部屋の色相が、至適温度判定に及ぼす影響に関する研究を行っている。男子大学生21名の被験者に対して、実験を実施した結果、色相の違いは熱的快適性には、なんら影響を及ぼさないと報告している。さらに"hue-heat" hypothesisを立証できなかった原因の一つとして、輝度を調節しなかったこと指摘している。また照度レベルと光源の色温度について言及し、それらの条件を考慮すれば、"hue-heat" hypothesisは結論が出るであろうと、立証の可能性を報告している。

Fangerら¹⁶⁾ は、1977年に2種類の光色(赤、青)と2種類の騒音レベル(40dB(A), 85dB(A)ホワイトノイズ)を組み合わせた実験を行い、光色と騒音が、人の好む温度に及ぼす影響に関する研究を行っている。被験者16名(男性8名、女性8名)に対して実験を実施した結果、光色に関しては、被験者は赤色照明の場合、青色照明に比べ0.4℃ほど低い温度を好んだが、今回の実験は極端な赤色、青色のもとで行った実験であり、実際の問題として考えた場合、照明の光色の違いが人の好む温度に及ぼす影響は、ほとんどないとしている。騒音レベルに関しては、高レベルの騒音が、血管収縮を引き起こし、それが皮膚温に影響を与えるような結果は得られなかったとしている。以上から光色、騒音は人間の温熱快適感には、実際問題として影響を及ぼさないと報告している。

Rohlesら¹⁷⁾ は、1977年に等しい温熱条件(ET*23.3℃)で、温熱環境実験室を、涼しさが軽減されるようなインテリアにした場合と、何も施さない場合の比較実験を行い、異なるインテリア環境の履歴が、熱的快適性に及ぼす影響に関する研究を行っている。学生被験者48名に(男性24名、女性24名)実験を実施した結果、快適感に関しては、インテリアの違いによる影響は及ぼされないが、温冷感に関しては、何も施さない実験室よりも、涼しさが軽減されるようなインテリアにした実験室をより暖かく感じ、インテリアの違いは、温冷感に影響を及ぼしていると報告している。

Flynn and Spencer⁵⁾ は、1977年に高圧ナトリウムランプ(色温度2050K)、白色蛍光ランプ(色温度4200K)、温白色蛍光ランプ(色温度3500K)、蛍光水銀ランプ(色温度3900K)を室内照明に用いて、被験者にSD法の19項目の形容詞対による、室内評価実験を行い、光源の光色が、利用者の受ける印象や満足

感に及ぼす影響の研究を行っている。48名の学生被験者に対して、実験を実施した結果、色温度が高い光源ほど、視覚的に涼しい (visually cool) 印象を受け、逆に色温度が低い光源ほど、視覚的に暖かい (visually warm) 印象を受ける傾向が認められ、視覚的な温冷感覚は、光源の色温度によって類別できると報告している。

Greenら¹⁸⁾は、1980年に3色の壁面(赤、青、白)と4段階の気温条件(18℃、22℃、29℃、35℃)を組み合わせた実験を行い、壁面の色相が、温度知覚、快適感、雰囲気¹⁹⁾に及ぼす影響の研究を行っている。144名の学生被験者(男子72名、女子72名)に対して実験を実施した結果、気温は快適感、温度知覚に影響を及ぼす。壁面の色は快適感、雰囲気¹⁹⁾に影響を及ぼすが、温度知覚には、なんら影響を及ぼさないとしている。そして壁面の色相には、空調エネルギー削減効果はないと報告している。

杉本¹⁹⁾は、1981年に蛍光灯の照度条件(100~1800lx)が、生理的負担(平均心拍数)と心理反応に及ぼす影響に関する研究を行っている。光源には、色温度4200Kの白色蛍光灯を用いている。18名の男子学生被験者に対して実験を実施した結果、生理的負担は、320~560lxにかけて最小となり、照度がこれ以上になると負担は急増し、以下になると斬増すると報告している。また心理的には800~900lxを中心に、約600~1100lxの範囲の照度が望ましく、約450lx以下あるいは1400lx以上の照度では、心理的望ましさは、普通以下になると報告している。

Rohlesら²⁰⁾は、1981年にオフィス空間を想定して、3種類の蛍光灯(昼光色・色温度6500K、白色・色温度4200K、温白色・3500K)、2色の壁面(白、ウォールナット)、2色のワークステーション(青、橙色)、2段階の気温条件(ET*20℃、ET*25.6℃)を組み合わせた実験を行い、照明の種類、部屋の色相、装飾が熱的快適性に及ぼす影響に関する研究を行っている。6名の学生被験者(男子3名、女子3名)に対して実験を実施した結果、以下の知見を報告している。1) 曝露1時間は、青色のワークステーションに比べ、橙色のワークステーションは快適であるが、それ以降は顕著な差は、なくなる。2) 壁面がウォールナットで、ワークステーションが橙色の場合、それ以外の壁面とワークステーションの組合せ(ウォールナット-青、白-橙、白-青)に比べ、より快適である。3) 熱的中立(ET*25.6℃)では、女性は壁面が白色の場合、壁面がウォールナットよりも、高い気温を好む。4) 熱的中立では、壁面の色は、快適感に何ら影響を及ぼさないが、熱的中立以下(ET*20℃)では、壁面が白色よりも、

ウォールナットの場合は、より快適である。5) 熱的中立では、蛍光灯の種類は快適感に、なんら影響を及ぼさないが、熱的中立以下では昼光色 (6500K)、白色蛍光灯 (4200K) に比べ、温白色蛍光灯 (3500K) は、より快適である。6) 照明が昼光色 (6500K)、白色蛍光灯 (4200K) の場合、温白色蛍光灯 (3500K) よりも高い気温を好み、一方、温白色蛍光灯の場合、昼光色、白色蛍光灯よりも低い気温を好む。7) 部屋の装飾は温冷感、皮膚温に影響を及ぼさない。最後に、これらの知見は、実際の室内環境に適用可能であると報告している。

Nelsonら²¹⁾は、1984年に3段階の気温条件 (13℃, 23℃, 30℃)、3条件の見かけ上の時計 (遅れる時計, 正確な時計, 早く進む時計)、2段階の照度条件 (100lx, 300lx) を組み合わせた実験を行い、気温、時間、照度が、作業効率に及ぼす影響に関する研究を行っている。光源には、色温度6500Kの昼光色蛍光灯を用いている。144名の学生被験者 (男子71名, 女子73名) に対して実験を実施した結果、以下の知見を報告している。1) 疲労は30℃条件で増加し、13℃条件で減少した。2) 早く進む時計は、13℃条件で疲労を減少させ、遅れる時計は30℃条件で疲労を増加させた。3) 気分は300lx-13℃条件と100lx-30℃条件では有意な差が認められなかった。4) 13℃条件がもっとも作業効率が高くなった。5) 女性は100lx条件よりも、300lx条件を好ましく感じた。

大野ら²²⁾は、1987年に2色の壁面 (赤, 青)、5段階の室温変化条件 (34℃→26℃, 30℃→26℃, 26℃→26℃, 22℃→26℃, 18℃→26℃) を組み合わせた実験を行い、室温と部屋の色相が皮膚温、温冷感覚、快適感に及ぼす影響の研究を行っている。光源には、色温度3800Kの高効率メタルハライドランプの拡散光を用いている。のべ32名の学生被験者 (男子8名, 女子24名) に対して、夏季と冬季に実験を実施した結果、以下の知見を報告している。1) 平均皮膚温、温冷感、快適感および暖色寒色感は、いずれも室温と有意な相関を示す。2) 寒暑感、涼暖感への色彩の影響は、寒・暑不快条件から26℃への室温変化中、および変化後30分位は、比較的多く見られた。3) 季節差は涼暖感に、顕著に示された。4) 平均皮膚温は、女性に比べ男性が高く、また男性に比べ、女性はより不快に感じる傾向が示された。

大中ら²³⁾は、1993年に2種類の色温度の蛍光灯 (3000K, 7500K) を使い、室温を25℃→15℃→25℃→35℃→25℃と変動させる実験を行い、照明の色温度および室温の変化が、人体生理・心理反応に及ぼす影響の研究を行っている。11名の青年女子被験者に対して実験を実施した結果、以下の知見を報告して

いる。1) 室温が15℃→25℃に上昇した条件では、寒冷負荷後の収縮期血圧が、7500Kに比べ3000Kが有意に高い。2) 15℃～35℃の範囲では、色温度は温熱感覚に影響を及ぼさない。3) 室温変動が伴う条件では、色温度は快適感に及ぼす影響は小さい。4) 色順応が完了するといわれている、曝露後20分経過した後でも、室温変動に伴い、色温度間で室内雰囲気評価に、有意差が認められた。

迫²⁴⁾は、1995年に3種類の色温度の蛍光ランプ(3000K, 5000K, 7500K)、3段階の気温条件(15℃, 25℃, 35℃)を組合せた実験を行い、色温度と気温が、体位血圧反射に及ぼす影響の研究を行っている。男子学生被験者8名に対して、実験を実施した結果、15℃-7500Kは、15℃-3000K, 15℃-5000Kに比べ収縮期血圧が大きく下降したした後、なかなか回復せず拡張期血圧も同様の傾向を示した。これは同条件下での、血管の拡張を意味しており、色温度と気温の複合的影響が示されたと報告している。

中野ら²⁵⁾は、1997年に2種類の色温度の蛍光ランプ(3000K, 7500K)、2段階の気温条件(22℃, 30℃)を組合せた実験を行い、色温度と気温が人体生理・心理反応に及ぼす影響の研究を行っている。男女9名の被験者に対して実験を実施した結果、22℃-7500Kでは、生理的にリラックスした状態であることを確かめ、また7500Kは、心理反応である快適感が最も高く、温熱刺激によらずKruithofが提案する照明の好みの定義を裏付ける結果であると報告している。

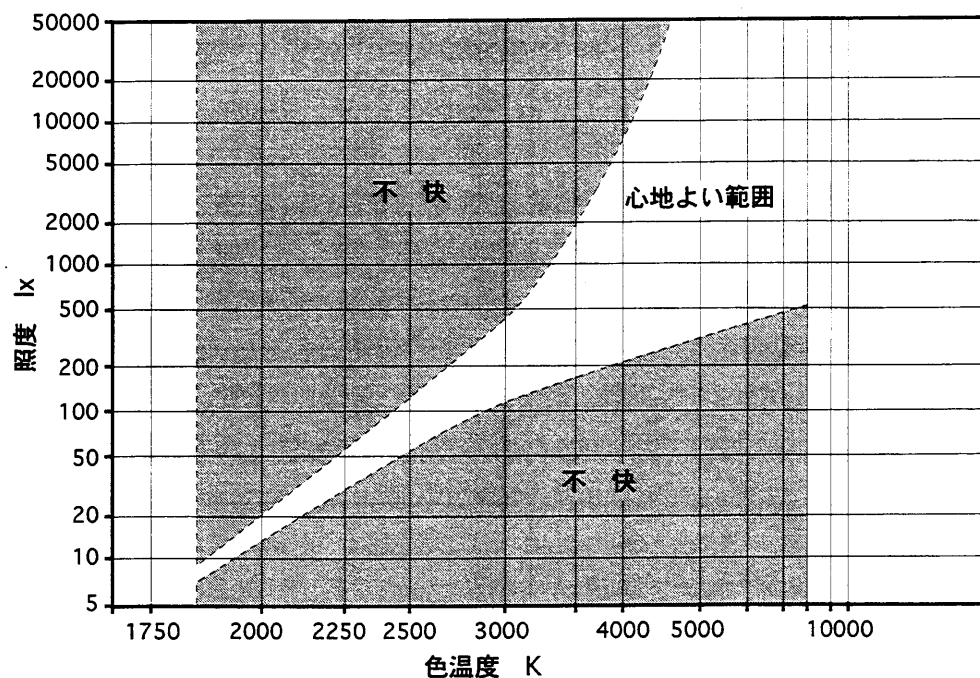


図 1-2-1 Kruithof が提案した心地よい照明の色温度と照度の関係

1.2.2 人体の自然対流熱伝達率に関する研究

対流熱伝達率には、自然対流熱伝達率と強制対流熱伝達率があるが、本研究は人体の自然対流熱伝達率を推定しているため、ここには人体の自然対流熱伝達率に関する、既往の研究を記載した。また既往の研究で提案された、対流熱伝達率の一覧を表1-2-1に示す。

Winslowら²⁶⁾は、1936年にPartitional calorimetryにより、被験者2名の椅座人体の対流熱伝達率を求めている。対流熱伝達率の算出手法は、人体の代謝量、熱収支量、蒸発散量を測定し、気温と皮膚温の温度差を等しくした状態で、重回帰式より有効放射面積を求め、放射放熱量を算定し、熱収支式から対流熱伝達率を算出している。

Hardy and DuBois²⁷⁾は、1937年に人体からの放射、対流による放熱量の測定方法の研究を行い、Direct calorimetryにより、男性被験者2名の仰臥人体からの放射、対流、蒸発放熱量を求めている。放熱量測定の際、気温、平均皮膚温を同時に測定しているため、人体からの対流熱伝達率が推察できる。人体からの対流による放熱量の算出方法は、カロリメーター内を循環している、水の流入出口での水温差と流量から顕熱放熱量を算出し、その値から、放射計で求めた皮膚表面の放射温度と、有効放射面積率から求めた放射放熱量を差し引いて算出している。

Nielsenら²⁸⁾は、1952年にWinslowらとほぼ同様の手法（Partitional calorimetry）を用いて、椅座姿勢の人体の対流熱伝達率および立位、椅座姿勢のサーマルマネキン（Thermosat）の対流熱伝達率に関する研究を行っている。Nielsenらは、垂直平板の無次元式（自然対流、層流）から算出される平均対流熱伝達率の式に近似させるために、実験より得られた人体の対流熱伝達率を修正している。この対流熱伝達率は、Fangerの提案したPMVの快適方程式に用いられている。

Colin and Houdas²⁹⁾は、1967年にWinslowらとほぼ同様の手法（Partitional calorimetry）を用いて、男性被験者14名、女性被験者1名のデータから椅座（リクライニング）姿勢での全身の対流熱伝達率を報告している。

Nishi and Gagge³⁰⁾は、1970年に椅座および立位姿勢の人体の8部位および全身の対流熱伝達率に関する研究を行っている。対流熱伝達率の算出手法は、ナフタレン球（直径3cm）を測定部位に装着し、物質移動と対流熱伝達のアナロ

ジーを用いて、ナフタレンの昇華速度から、部位対流熱伝達率を算出している。全身の対流熱伝達率は、部位対流熱伝達率を、部位体表面積比率で重み平均することにより算出している。

Stolowijk³¹⁾ は、1970年に人体熱収支モデルに関する研究を行うにあたり、人体モデルの部位、および全身の平均対流熱伝達率を求めている。モデル化するために人体を頭部、躯幹、上腕、前腕、大腿、下腿の6部位に分割し、各部位を単純立体（頭部は球、その他の部位は円柱）として、伝熱工学理論の無次元式より、平均対流熱伝達率を算出している。Stolowijkの25node-modelに、この平均対流熱伝達率は用いられている。

Rapp³²⁾ は、1973年に気流速度0.2m/s以下の低風速域での人体モデルの平均対流熱伝達率（mixed convection）に関する研究を行っている。椅座、リクライニング、立位姿勢の人体を直径0.75mの球と仮定し、平均対流熱伝達率を理論的に求めており、純粋な自然対流の場合よりも、低風速域での平均対流熱伝達率は大きく、強制対流の影響は、無視できないと報告している。

Toy and Cox³³⁾ は、1974年に熱流計（Small surface plate calorimeter）を用いて、人体下腿の周経方向（前方、側面、後方）の総合熱伝達率分布を測定している。その際、下腿を垂直および水平の2種類の状態にして測定を行っている。

持田³⁴⁾ は、1977年に人体全身の平均対流熱伝達率を算出する式として、各部位の対流熱伝達率をその部位の表面積比率で加重平均する式を逆算し、人体を直径18cmの垂直円柱と仮定し、HilpertとOosthuizenらの無次元式を用いることによって、自然対流と強制対流を同時に考慮した、平均対流熱伝達率を算定している。

田村ら³⁵⁾ は、1987年に立位姿勢のサーマルマネキン（女性型）の13部位の対流熱伝達率および全身の対流、放射熱伝達率に関する研究を行っている。対流熱伝達率の算出手法は、熱流計をサーマルマネキンの50箇所貼付して、顕熱放熱量を測定し、対流熱伝達率を算出している。

Changら³⁶⁾ は、1988年に歩行姿勢が可能な、立位サーマルマネキンの部位対流熱伝達率（上腕、前膊外、胸乳、大腿、下腿）に関する研究を行っている。対流熱伝達率の算出手法は、ナフタレンの円盤を部位測定点に貼付し、物質移動と対流熱伝達のアナロジー（Cilton - Colburn analogy）を用いて、ナフタレンの

昇華速度から対流熱伝達率を算出している。

李ら³⁷⁾は、1990年に人体モデルの部位および、全身の平均対流熱伝達率に関する研究を行っている。モデル化するために、立位人体を10個の部位に分割し、それぞれを垂直円柱に置き換えた、加熱円柱組合せモデルの76点（各部位、高さ方向に5点ないし3点で前後2箇所）の対流熱伝達率を求めている。またそれらの測定点を、表面積比率による加重平均を行うにより、モデル全身の対流熱伝達率を算出している。対流熱伝達率の算出手法は、予備実験として、人体モデルで用いている円柱の平均対流熱伝達率を、伝熱工学理論の無次元式より算出する。そして算出した平均対流熱伝達率を用いて、円柱の発熱量から、対流放熱量を差し引いて放射放熱量を求め、有効放射定数を算出し、対流熱伝達率を求めている。

石垣ら³⁸⁾は、1991年に立位および椅座姿勢の青年男子の7部位、および全身の対流熱伝達率に関する研究を行っている。対流熱伝達率の算出手法は、熱流計を人体の7部位に貼付して顕熱放熱量を測定し、部位対流熱伝達率を算出している。全身の対流熱伝達率は、部位対流熱伝達率を部位体表面積比率で重み平均することにより算出している。

田辺ら³⁹⁾は、1993年にサーマルマネキンによる室内環境評価法に関する研究を行うにあたり、椅座姿勢のサーマルマネキン（女性型）の、16部位の総合熱伝達率および全身の総合、対流熱伝達率を求めている。全身の総合熱伝達率は、部位総合熱伝達率を、部位体表面積比率で重み平均することにより算出している。全身の対流熱伝達率は、全身の放射熱伝達率を $4.7\text{W}/\text{m}^2\text{C}$ と仮定し、面積加重平均により求められた全身の総合熱伝達率より差し引いて算出している。

崔ら⁴⁰⁾は、1996年に床暖房が人体に及ぼす研究を行うにあたり、胡座姿勢、青年男子の全身の対流熱伝達率に関する研究を行っている。対流熱伝達率の算出手法は、熱流計を人体の7部位に貼付して、顕熱放熱量を測定し、部位対流熱伝達率を算出している。全身の対流熱伝達率は、部位対流熱伝達率を部位体表面積比率で、重み平均することにより算出している。

市原ら⁴¹⁾は、1997年に椅座および立位姿勢のサーマルマネキン（女性型）の11部位の対流、放射熱伝達率および全身の対流、放射熱伝達率を報告している。対流熱伝達率は以下の手法により算出している。作用温度を気温を等しくした実験室内で、サーマルマネキンの発熱量と表面温度から、総合熱伝達率を算出する。次に実験室内の気温と、サーマルマネキンの表面温度を等しくし、放射熱伝達率

を算出し、前述の総合熱伝達率から、放射熱伝達率を差し引いて、対流熱伝達率を算出する。全身の対流熱伝達率は、部位対流熱伝達率を、部位体表面積比率で重み平均することにより算出している。

de Dear ら⁴²⁾ は、1997年に立位および椅座姿勢のサーマルマネキンの16部位の放射、対流熱伝達率および全身の放射、対流熱伝達率に関する研究を行っている。対流熱伝達率の算出手法は、サーマルマネキンの全身に、アルミホイルを密着させ、放射熱伝達率を算出し、総合熱伝達率から放射熱伝達率を差し引いて、対流熱伝達率を算出している。全身の対流熱伝達率は、部位対流熱伝達率を部位体表面積比率で、重み平均することにより算出している。

曾ら⁴³⁾ は、1998年にCFD解析により、立位姿勢の数値サーマルマネキンより、マネキン全身の対流熱伝達率分布および平均対流熱伝達率に関する研究を行っている。数値サーマルマネキンとは、コンピューター解析のためのマネキンのことであり、四肢と躯幹部が一体化された形状をしており、通常のサーマルマネキンとは異なる。

表 1-2-1 人体全身および部位の自然対流熱伝達率一覧

	人体の自然対流熱伝達率 W/m ² °C												備考
	全身	頭部	胸部	背中	臍	腰部	上腕	前腕	手背	大腿	下腿	足背	
Winslow et al. ²⁶⁾	4.5												リクライニング人体
Hardy & DuBois ²⁷⁾	5.2												仰臥人体
Nielsen et al. ²⁸⁾	2.35ΔT ^{0.25*}												椅座人体
Colin & Houdas ²⁹⁾	5.6												リクライニング人体
Nishi & Gagge ³⁰⁾	3.1	3.2	2.5	2.4	-	4.0	3.9	4.6	2.8	3.7	-	-	椅座人体
Stolowijk ³¹⁾		0.7		1.9(躯幹)			4.0(腕部)	6.1	3.6	6.0	-	-	単純立体
Rapp ³²⁾	4.1±11%												単純立体
持田 ³⁴⁾	3.4												単純立体
田村ら ³⁵⁾	5.1	-	-	3.4	3.6	3.4	6.2	7.4	-	-	6.1	-	サーマルマネキン
Chang et al. ³⁶⁾		-	16.6	-	-	-	23.5	22.5	-	18.8	24.5	-	サーマルマネキン
李ら ³⁷⁾	3.4	4.4		3.7						3.3	3.8		人体円柱モデル
	5	5		5						5	5		
	3.9	4.5		4.3						3.9	5.0		
石塚ら ³⁸⁾	1.16ΔT ^{0.33*}												椅座人体
田辺ら ³⁹⁾	3.2												サーマルマネキン
市原ら ⁴¹⁾	4.3	7.7	5.1	5.0	4.9	4.2	6.2	6.1	-	4.8	3.5	3.5	サーマルマネキン
de Dear et al. ⁴²⁾	3.3	3.7	3.0	2.6	-	2.8	3.4	3.8	4.5	3.7	4.0	4.2	サーマルマネキン
曾ら ⁴³⁾	3.9												数値サーマルマネキン

* ΔT は皮膚温と気温の温度差を示す。

1.3 研究の方法と範囲

本研究は、人工光源の色温度、照度が温熱環境に因る人体生理・心理反応に及ぼす影響を明らかにすることを目的としている。この影響を被験者実験をとおして検討するにあたり、適切な作用温度条件設定のため、人体の対流熱伝達率および放射熱伝達率を実測により提案する。また人体と光源との間の熱交換量が人体生理・心理反応に及ぼす影響を明らかにするため、人体局所の対流熱伝達率および放射熱伝達率を実測により提案する。さらに、人体局所の対流熱伝達率および放射熱伝達率の分布性状を考慮した、人体全身および局所対流熱伝達率、放射熱伝達率の推定も試みる。

人工光源の色温度、照度が温熱環境に因る人体生理・心理反応に及ぼす影響を、男子学生被験者を用いた実験を行い、明らかにする。提案した人体の対流熱伝達率および、放射熱伝達率を用いて設定した、作用温度条件下で、被験者を人工光源の色温度、照度の異なる環境に曝露し、温熱環境の物理量、人体生理反応としての皮膚温、経路別熱交換量、人体心理反応としての温冷感、快適感などを測定する。これらの測定結果から、人工光源の色温度、照度が温熱環境に因る人体生理・心理反応に及ぼす影響を検討する。以上述べた、本研究の流れを図1-3-1に示す。

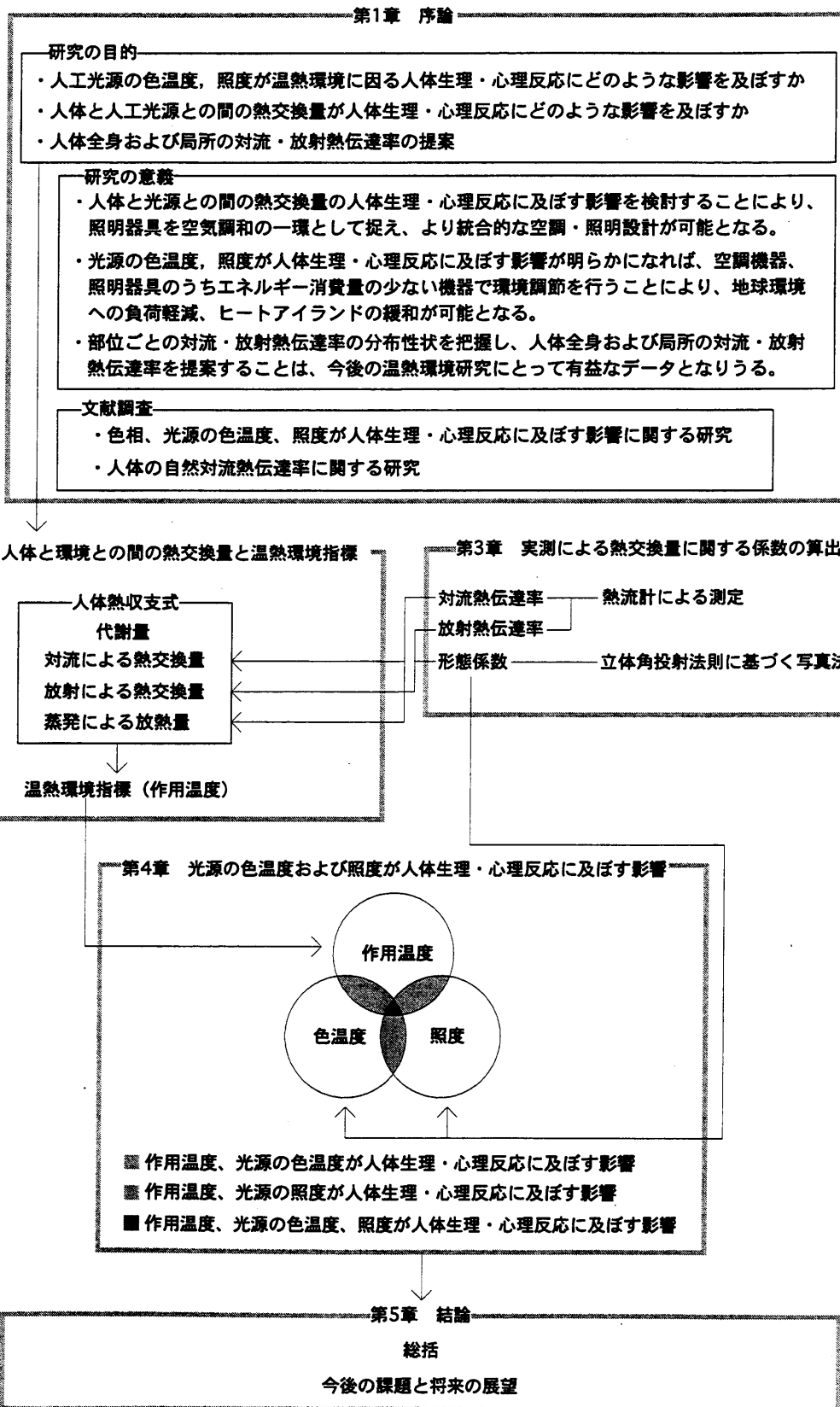


図 1-3-1 本研究の流れ

1.4 摘要

本章において、人工光源の色温度、照度が温熱環境に因る人体生理・心理反応に及ぼす影響を取り扱う、本研究の目的と意義を述べた。色相、光源の色温度、照度が人体心理・生理反応に及ぼす影響に関する既往の研究の文献調査を行い、人工光源の色温度、照度が人体生理・心理反応に及ぼす影響に関する研究が、僅少であることを明らかにした。人体と環境との間の熱交換経路の一つである、対流熱交換量に関わる人体の自然対流熱伝達率に関する、既往の研究の文献調査を行った。本研究の光源の人体影響に関する実験で、作用温度を設定する際、対流熱伝達率を用いるにあたり、既往の研究には、妥当な値のないことを明らかにした。これらを前提として、本研究の方法と範囲を明らかにした。

第1章引用文献

- 1) 色彩照明学会編：色彩科学ハンドブック，南江堂，1962
- 2) Morgensen, M. F. and English, H. : Minor studies from the psychological laboratory of Antioch College I . The apparent warmth of colors, American Journal of Psychology, Vol. 37, pp. 427-428, 1926
- 3) Bennett, C. A. and Rey, P. : What's so hot about red ?, Human Factors, Vol. 14, No. 2, pp. 149-154, 1972
- 4) 日本建築学会編：設計計画パンフレット 30 昼光照明の計画，彰国社，1988
- 5) Flynn, J. E. and Spencer, T. J. : The effects of light source color on user impression and satisfaction, Journal of Illuminating Engineering Society, pp. 167-179, April, 1977
- 6) Kruithof, A. A. : Tubular luminescence lamp for general illumination, Philips Technical Review, Vol. 6, No. 3, pp. 65-73, 1941
- 7) CIE Publication No. 29, Guide on Interior Lighting, 1975
- 8) 乾正雄：建築計画講座 照明と視環境，理工図書，1978
- 9) 伊藤孝：日本における蛍光ランプ普及の背景，照明学会誌，第72巻，第5号，1988
- 10) Obara, K. : Fluorescent home lighting in Japan, International Lighting Review, No. 2, pp. 38-41
- 11) Tinker, M. A. : Effect of stimulus-texture upon apparent warmth and affective value of colors, American Journal of Psychology, Vol. 51, pp. 532-535
- 12) 木村俊夫：色の見かけの暖かさと重さについて，心理学研究第20号，pp. 33-36, 1950
- 13) Wright, B : The influence of hue, lightness and saturation on apparent warmth and weight, American Journal of Psychology, Vol. 75, pp. 232-241, 1962
- 14) 塚田敢：建築色彩の視覚効果に関する基礎事項の研究 第2部，千葉大学工学部研究報告第13号，第24号，pp. 79-123, 1962
- 15) Berry, P. C. : Effect of colored illumination upon perceived temperature, Journal of Applied Psychology, Vol. 45, No. 4, pp. 248-250, 1961
- 16) Fanger, P. O., Breum, N. O. and Jerking, E. : Can colour and noise influence man's thermal comfort ? , Ergonomics, Vol. 20, No. 1, pp. 11-18, 1977
- 17) Rohles, F. H. Jr. and Wells, W. : The role of environmental antecedents

- on subsequent thermal comfort, ASHRAE Transactions, Vol. 83, No. 2, 1977
- 18) Grenne, T. C. and Bell, P. A. : Additional considerations concerning the effect of 'warm' and 'cool' wall colours on energy conservation, *Ergonomics*, Vol. 23, No. 10, pp. 949-954, 1980
 - 19) 杉本賢 : 照明環境要素の生体への影響に関する研究 - 照度と生理的負担の関係 (その2) - 照明学会誌, 第65巻, 第4号, pp. 41-45, 1981
 - 20) Rohles, F. H. Jr., Bennett C. A. and Milliken, A. G. : The effects of lighting, color, and room decor on thermal comfort, ASHRAE Transactions, Vol. 87, No. 2, pp. 511-527, 1981
 - 21) Nelson, T. M., Nilsson, T. H. and Johnson, M. : Interaction of temperature, illuminance and apparent time on sedentary work fatigue, *Ergonomics*, Vol. 27, No. 1, pp. 89-101, 1984
 - 22) 大野秀夫, 久野覚, 木田光郎, 中原信生 : 居住者の温冷感覚に及ぼす温熱環境と色彩環境の複合効果に関する研究, 日本建築学会計画系論文報告集, 第374号, pp. 8-18, 1987
 - 23) 大中忠勝, 枋原裕, 高久佳子, 都築和代 : 照明の色温度および室温の変化が生理・心理反応に及ぼす影響, 生理人類学会第30回記念大会, p. 2, 1993
 - 24) 迫秀樹 : 色温度と環境温度が体位血圧反射に及ぼす影響, 倉敷市立短期大学紀要, 第25号, pp. 135-141, 1995
 - 25) 中野美香, 垣鏑直, 堀越哲美, 稲垣卓造 : 色温度と室温の複合条件評価に関する実験的研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp. 765-766, 1997
 - 26) Winslow, C. E. A., Herrington, L. P. and Gagge, A. P. : The determination of radiation and convection exchanges by partitioned calorimetry, *American Journal of Physiology*, Vol. 116, No. 3, pp. 669-684, 1936
 - 27) Hardy, J. D. and DuBois, E. F. : The technic of measuring radiation and convection, *Journal of Nutrition*, Vol. 15, No. 5, pp. 461-475, 1938
 - 28) Nielsen, M. and Pedersen, L. : Studies on the heat loss by radiation and convection from the clothed human body, *Acta Phys. Scandinav.*, Vol. 27, pp. 272-294, 1952
 - 29) Colin, J. and Houdas, Y. : Experimental determination of coefficient of heat exchange of human body, *Journal of Applied Physiology*, Vol. 22, No. 1, pp. 31-38, 1967
 - 30) Nishi, Y. and Gagge, A. P. : Direct evaluation of convective heat transfer coefficient by naphthalene sublimation, *Journal of Applied Physiology*, Vol. 29, No. 6, pp. 830-838, 1970

- 31) Stolwijk, J. A. J. : Mathematical model of human thermoregulation. In Hardy, J. D., Gagge, A. P. and Stolwijk J. A. J. (Eds), *Physiological and Behavioral Thermoregulation*, Thomas, Springfield, pp. 703-721, 1970
- 32) Rapp, G. M. : Convective heat transfer and convective coefficients of nude man, cylinders and spheres at low air velocities, *ASHRAE Transaction*, No. 2264, pp.75-87, 1973
- 33) Toy, N. and Cox, R. N. : A method of measuring free and forced convection heat transfer from the human microenvironment, *Rev. Gen.*, No. 145, pp. 37-41, 1974
- 34) 持田徹：人体に関する対流およびふく射熱伝達率，日本建築学会計画系論文報告集，第258号，pp. 63-69, 1979
- 35) 田村照子，笠原さつき：人体表面の対流熱伝達率，第10回人間-熱環境系シンポジウム記念大会報告集，pp. 70-73, 1986
- 36) Chang, S. KW., Arens, E. and Gonzalez, R. R. : Determination of the effect of walking on the forced convective heat transfer coefficient using an articulated mannikin, *ASHRAE Transaction*, Vol. 94, 1988
- 37) 李徹球，澤地孝男，本間宏：加熱円柱組み合わせ人体モデルによる人体周辺の自然対流の性状と人体の部位別自然対流熱伝達率に関する実測結果，日本建築学会計画系論文報告集，第416号，pp. 25-34, 1990
- 38) 石垣秀圭，堀越哲美，植松智樹，佐橋政人，土川忠浩，持田徹，稗田哲也，磯田憲生，久保博子：人体の対流熱伝達率に関する実験的研究，人間-生活環境系国際会議，pp. 279-282, 1991
- 39) 田辺新一，長谷部ヤエ：皮膚温度可変型サーマルマネキンによる室内環境評価法に関する研究，日本建築学会計画系論文報告集，第448号，pp. 1-8, 1993
- 40) 崔英植，堀越哲美，宮本征一，水谷彰夫：床暖房時の気温と床温が胡座人体に及ぼす影響に関する研究，日本建築学会計画系論文集，第480号，pp. 7-14, 1996
- 41) 市原真希，齋藤正文，西村美加，田辺新一：サーマルマネキンを用いた立位・座位人体各部位の放射・対流熱伝達率の測定，日本建築学会計画系論文集，第501号，pp. 45-51, 1997
- 42) de Dear, R. J., Arens, E., Hui, Z. and Oguro, M. : Convective and radiative heat transfer coefficients for individual human body segments, *International Journal of Biometeorology*, Vol. 40, pp. 141-156, 1997
- 43) 曾潔，村上周三，加藤信介：室内各種気流場における立位人体表面の対流熱伝達特性に関するCFD解析 数値サーマルマネキンに関する研究（その1），日本建築学会計画系論文集，第505号，pp. 31-38, 1998

第2章 人体と環境との間の熱交換量および作用温度

2.1 緒言

2.2 人体熱収支式

2.2.1 代謝量

2.2.2 対流による熱交換量

2.2.3 放射による熱交換量

2.2.4 蒸発による放熱量

2.3 作用温度

2.4 摘要

第2章引用文献

2.1 緒言

本章では、人体と環境との間の物理的相互関係を記述している人体熱収支式を提示する。さらに人体熱収支式内で記述され、本研究において実測を行う、経路別熱交換量に関する理論式を提示する。この人体熱収支式に基づき、人工光源の色温度、照度が温熱環境に因る人体生理・心理反応に及ぼす影響を明らかにする際に、温熱環境指標として用いる、作用温度を提示する。

2.2 人体熱収支式¹⁾

人体では代謝による発生熱量と放熱量を変化させ、体温の恒常性を保っている。この体温を調節するためのおもな機能は、発汗量の調節、皮膚への血流量の調節、ふるえなどによる熱産生量の増加である。内部で発生した熱は、体組織を熱伝導と血液循環によって、皮膚表面に向かって流れる。この血液循環による熱移動は、主に皮膚への循環量を変化させることによって行われる。皮膚表面へ伝達された熱は、対流、放射、伝導の各経路で外部環境との間で熱交換を行う。本研究では、人体姿勢を椅座としているので、伝導による熱交換量は微少であるため、考慮の対象外とした。また、発汗による蒸発潜熱により、外部環境へ放熱が行われる。これら皮膚表面からの熱交換以外に、呼吸気道からの放熱がある。呼吸気道からの放熱は、体温と外部気温との温度差によって放熱される顕熱と、体内外の水蒸気量の差異によって放熱される、潜熱に分けられる。この呼吸気道からの顕熱放熱量は、ごく僅かであり、本研究では考慮の対象外とした。呼吸気道からの潜熱放熱量に関しては、発汗による蒸発潜熱と併せて取り扱った。代謝による発生熱量と、上述した熱交換量との間で均衡がとれない場合、人体への蓄熱あるいは、身体が冷却される。図2-2-1に、この人体の体温調節機構による、人体と環境との間の経路ごとの熱交換を示す。またこれらの関係は次式²⁾で表記される。本研究では身体活動強度が、椅座安静であるため、外部になした仕事は0とみなした。

$$M - W - C_{res} - E_{res} = C + R + E + Cd + S \quad (2-1)$$

- M : 代謝量 W/m^2
- W : 外部になした仕事 W/m^2
- C_{res} : 呼吸気道からの顕熱放熱量 W/m^2
- E_{res} : 呼吸気道からの潜熱放熱量 W/m^2
- C : 対流による熱交換量 W/m^2
- R : 放射による熱交換量 W/m^2
- E : 蒸発による熱交換量 W/m^2
- Cd : 伝導による熱交換量 W/m^2
- S : 熱収支量 W/m^2

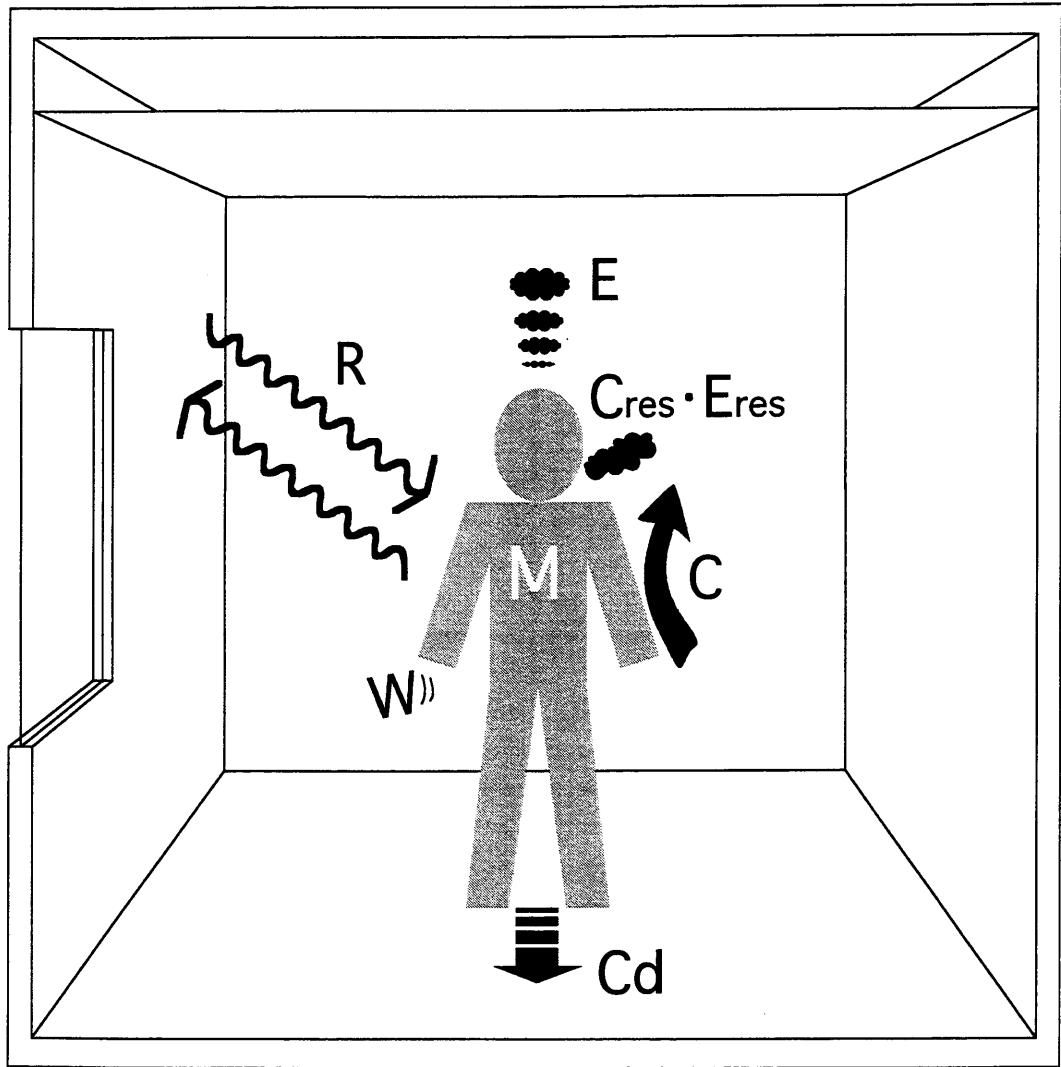


図 2-2-1 人体と環境との間の熱交換経路

2.2.1 代謝量 M

ヒトは外界から食物あるいは養分として、栄養素を取り入れ、それを素材として個体を形成維持している。体内では摂取した物質の分解と合成を行い、これらの化学反応の課程は必然的にエネルギーの流出入を伴う。このエネルギー収支のことを代謝量と呼んでいる。代謝量は、酸素消費量 VO_2 および摂取された酸素量と、排出される二酸化炭素量の比である呼吸商を、測定することにより、間接的に次式¹⁾ より求めることができる。

$$M = 5.87 \times (0.23 \times R + 0.77) \times (60 \times VO_2) / AD \quad (2-2)$$

M : 代謝量 W/m^2

R : 呼吸商 nd

VO_2 : 酸素消費量 l/min

AD : 体表面積 m^2

代謝量は、単位体表面積あたりで表すと、比較的個人差がない。本研究の実験条件のような椅座安静時は、 $60W/m^2$ 程度であり、これを基準の1metとして表すものがMet数である。本研究では、第3章で述べる実測による人体と環境との間の熱交換量に関する係数の算出において、総合代謝機能測定システムを用いて、曝露中、代謝量を自動計測した。

2.2.2 対流による熱交換量 C

対流は、熱が気体または液体から固体へ、逆に固体から気体または液体へ移動する伝熱形式である。人体と環境との間の対流による熱交換は、通常的环境下であれば気体は空気であり、固体は人体皮膚表面になる。対流による熱交換量 C は、Newtonの冷却則により、人体皮膚温 t_s と気温 t_a との温度差と、対流熱伝達率 hc から次式²⁾ で求めることができる。

$$C = hc (t_s - t_a) \quad (2-3)$$

C : 対流による熱交換量 W/m^2

hc : 対流熱伝達率 $W/m^2\text{°C}$

t_s : 人体皮膚温 °C

t_a : 気温 °C

対流熱伝達率は、固体の寸法と形状、流体に特有の物性値に依存するため、これを理論的に求めることは困難である。そこで実験的に求めるため、対流熱伝達率に関わる変数を、独立した無次元式で表すと次式³⁾の関係となる。

$$Nu = f(Re, Pr, Gr) \quad (2-4)$$

Nu : ヌセルト数
 Re : レイノルズ数
 Pr : プラントル数
 Gr : グラスホフ数

ここで、ヌセルト数(Nu)は、流体と伝熱面との間の、熱伝達の強さを示す量で、次式のように定義されている。

$$Nu = \frac{hcL}{\lambda} \quad (2-5)$$

hc : 対流熱伝達率 $W/m^2\text{C}$
 L : 物体の代表長さ m
 λ : 流体の熱伝導率 $W/m\text{C}$

レイノルズ数(Re)は、粘性の影響する現象の解明に利用され、次式のように定義されている。

$$Re = \frac{uL}{\nu} \quad (2-6)$$

u : 流体の代表速度 m/s
 L : 物体の代表長さ m
 ν : 流体の動粘性係数 m^2/s

プラントル数(Pr)は、速度境界層と温度境界層の厚さの、相対的な割合を示す量であり、次式のように定義されている。

$$Pr = \frac{\nu}{\alpha} \quad (2-7)$$

ν : 流体の動粘性係数 m^2/s

α : 流体の熱拡散率 m^2/s

グラスホフ数(Gr)は、流体に働く浮力と粘性に基づく抗力の関係を示し、自然対流に影響を及ぼし、次式のように定義されている。

$$Gr = \frac{L^3 g \beta \theta}{\nu^2} \quad (2-8)$$

L : 物体の代表長さ m

g : 重力加速度 ($= 9.8$) m/s^2

β : 流体の膨張係数 $1/^\circ\text{C}$

θ : 固体表面と流体との温度差 $^\circ\text{C}$

ν : 流体の動粘性係数 m^2/s

式(2-4)を、対流熱伝達率を基準として表すと、次式のようになる。

$$hc = \frac{\lambda}{L} \cdot f(Re, Pr, Gr) \quad (2-9)$$

本研究では、気流速度は静穏気流であるので、自然対流域と考えられ、流速を対象とするレイノルズ数(Re)は独立変数とはなり得ない。そこで式(2-9)は次式のようになる。

$$hc = \frac{\lambda}{L} \cdot f(Pr, Gr) \quad (2-10)$$

本研究の実験条件では、式(2-10)の右辺で変数となる得るのは、グラスホフ数(Gr)の固体表面(皮膚温 t_s)と流体(気温 t_a)との温度差である。そこで式(2-10)は次式のようになる。

$$hc = k (t_s - t_a)^n \quad (2-11)$$

k, n は共に定数であり、第3章で述べる、実測による人体と環境との間の熱交換量に関する係数の算出で、この定数を求め、人体の対流熱伝達率を推定した。

2.2.3 放射による熱交換量 R

物体は、絶対零度でない限り電磁波の形で熱線を放射しており、そのエネルギーの総量は、Stefan-Boltzmannの法則によると、物体の絶対温度の4乗に比例する。物体間の正味の放射熱エネルギー量は、物体間のエネルギー差と物体の位置関係で決まり、図2-2-2に示す、面1と面2の間の放射による熱交換量 R は、次式²⁾で表現される。

$$R = \sigma \varepsilon_1 \varepsilon_2 \varphi_{1-2} T_1^4 A_1 - \sigma \varepsilon_1 \varepsilon_2 \varphi_{2-1} T_2^4 A_2 \quad (2-12)$$

R : 放射による熱交換量 W/m^2

σ : Stefan-Boltzmann 定数 ($= 5.67 \times 10^{-8}$) W/m^2K^4

ε : 面の放射率 nd

φ_{1-2} : 面1の面2に対する形態係数 nd

φ_{2-1} : 面2の面1に対する形態係数 nd

T : 面の絶対温度 K

A : 面の表面積 m^2

1,2 : 面1, 2を表すサフィックス

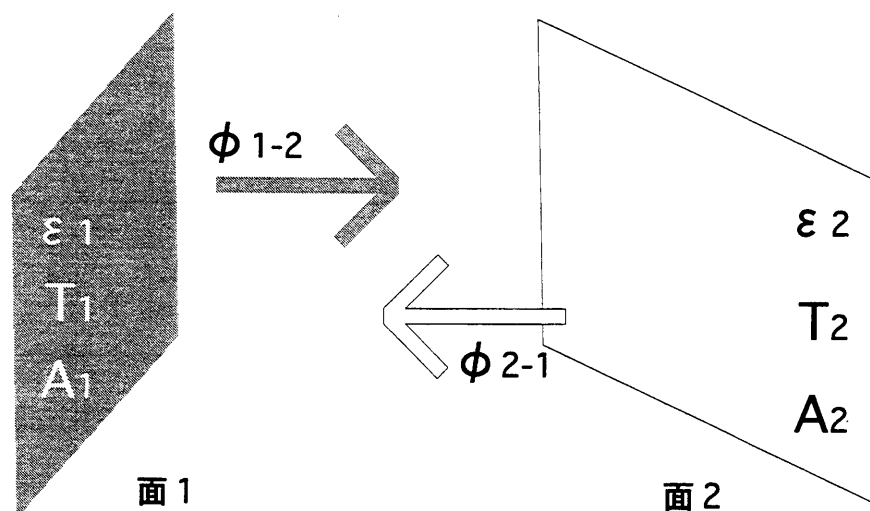


図2-2-2 面1と面2の間の放射による熱交換

放射による熱交換量 R は、通常の温熱環境下では式(2-12)は、近似的に次式のように、線形化することができる。

$$R = h_r(t_1 - t_2)\varphi_{1-2}A_1 \quad (2-13)$$

$$h_r = \sigma \varepsilon_1 \varepsilon_2 [(t_1 - t_2) / 2 + 273.15]^3$$

R : 放射による熱交換量 W/m^2

h_r : 放射熱伝達率 $W/m^2\text{C}$

t : 面の温度 $^{\circ}\text{C}$

σ : Stefan-Boltzmann 定数 ($= 5.67 \times 10^{-8}$) W/m^2K^4

ε : 面の放射率 nd

1,2 : 面 1, 2 を表すサフィックス

形態係数は、図2-2-3に示す立体角投射法則⁴⁾に基づいて、直接測定した。点 O の面 F に対する形態係数⁵⁾ F_{O-F} は、正射影魚眼レンズによる全写像面積 πr^2 に対する、面 F の写像面積 $A_{F''}$ の比として、次式で求めることができる。

$$F_{O-F} = \frac{A_{F''}}{\pi r^2} = \int_{A_F} \frac{\cos \beta_F \cos \beta_O}{\pi d^2} dA_F \quad (2-14)$$

F_{O-F} : 点 O の面 F に対する形態係数 nd

A_F : 面 F の有効放射面積 m^2

β_F : 点 F における法線方向と d のなす角度 rad

β_O : 点 O における法線方向と d のなす角度 rad

d : 点 O と面 F 上の点 F との距離 m

$A_{F''}$: 正射影魚眼レンズ写像上の面 F の面積 m^2

r : 正射影魚眼レンズ写像半径 m

本研究において点 O は、人体上の微小面であり、放射および対流による、熱交換量の計測位置である。面 F は、空間構成面および人体である。人体微小面の空間構成面および、人体に対する形態係数は、熱交換量測定位置に鏡面仕上げのステンレス半球 (直径 50mm) を貼付し、正射影写像を撮影して求めた。図2-2-

4に示すように，ステンレス半球を各測定位置（前額，臍，前膊外，手背，大腿，下腿，足背）に貼付し，半球を正面からカメラで撮影し，その正射影写像をスキャナーによりコンピューターに取り込み，画像処理ソフトを用いて，全正射影写像面積に対する，空間構成面および人体の正射影写像面積の比として，形態係数を算出した。写像の一例を図2-2-5に示す。

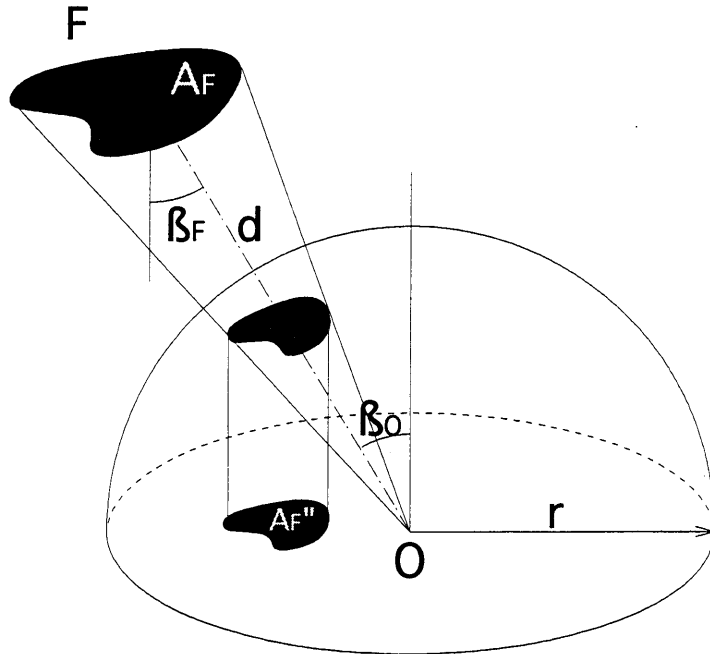


図2-2-3 立体角投射法則による点Oと面Fとの位置関係

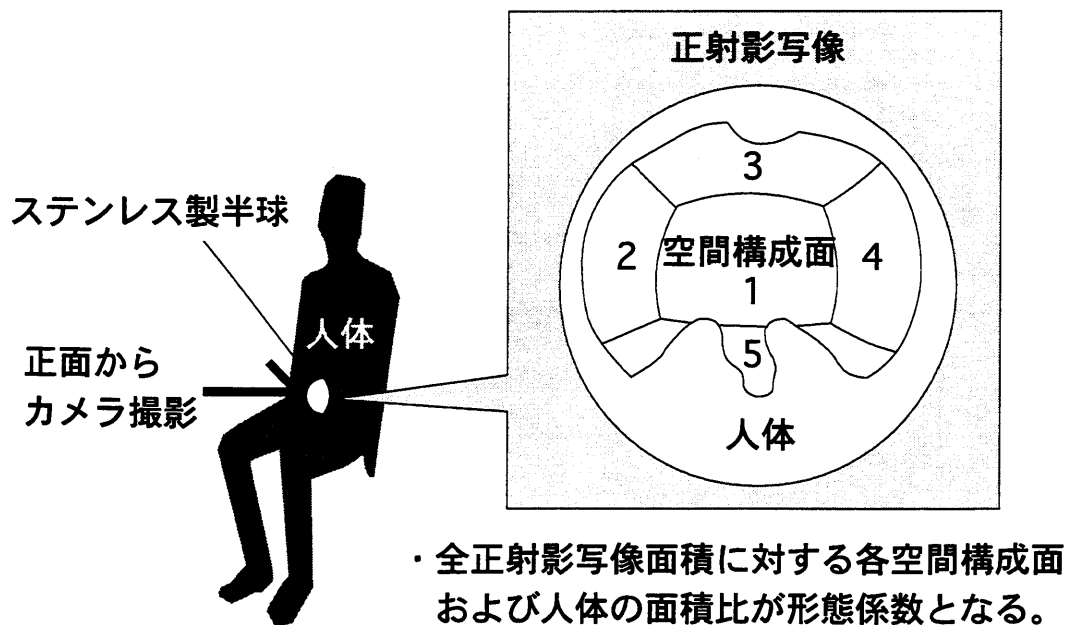


図2-2-4 本研究における各形態係数の算出方法

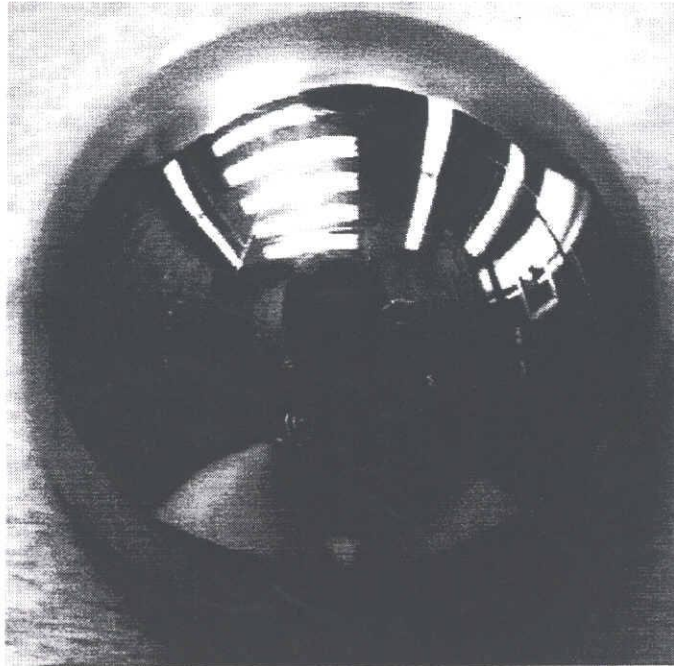


図 2-2-5 正射影写像の一例（臍撮影）

2.2.4 蒸発による放熱量 E

人体から外部環境への、水分蒸発による潜熱移動は、皮膚表面あるいは、呼吸気道で行われる。皮膚表面での潜熱移動には、外部環境、人体の活動レベルに応じて、発汗量を調節し、体温の恒常性を保つための温熱性発汗と不感蒸泄と呼ばれる、外部環境に関わらず、皮膚表面から常に人体に感じることをできない、水分蒸発などがある。呼気気道では通常、体温より低い外気が呼吸により流入し、呼吸気道あるいは、肺胞内で飽和状態付近まで加湿され、呼気として排出される過程で潜熱移動が行われる。これらの蒸発による放熱量を統合して算出する方法として、本研究では精密な台秤を用いて人体の体重減少量を計測し、次式¹⁾に示すように人体の体重減少量に水の蒸発潜熱を乗じて求めた。

$$E = m \times \lambda / AD \quad (2-15)$$

E : 蒸発による放熱量 W/m^2

m : 体重減少量 kg

λ : 水の蒸発潜熱 W/kg

AD : 人体の表面積 m^2

ここで、水の蒸発潜熱 λ は、気温 t_a の関数として次式のように表現される。

$$\lambda = (594.9 - 0.51t_a) \text{ kcal/kg} \quad (2-16)$$

2.3 作用温度 OT

作用温度 (OT) は、1937年に Winslow ら⁶⁾ により提案された、温熱環境指標であり、人体と環境との間の対流・放射熱交換量が物理的に評価されている。作用温度は、次式に示すように気温と平均放射温度を、それぞれの熱伝達に関わる熱伝達率で、重み平均したものであり、また「気温と壁面温の異なる実在環境での、人体と環境との間で、対流と放射による熱交換量と等しい熱交換が行われる、気温と壁面温の等しい仮想環境の温度」とも解釈される。本研究の第4章で述べる、光源の色温度、照度が人体生理・心理反応に及ぼす影響では、気温と光源からの放熱による平均放射温度が温熱環境要因のなかで条件ごとに異なるため、それら条件間の温熱的な比較を行うために本研究では、作用温度を指標として用いた。

$$\begin{aligned} C + R &= h_c (t_s - t_a) + h_r (t_s - t_r) \\ &= h (t_s - OT) \end{aligned} \quad (2-17)$$

ここで

$$\begin{aligned} h &= h_c + h_r \\ OT &= \frac{(h_c \cdot t_a + h_r \cdot t_r)}{h_c + h_r} \end{aligned} \quad (2-18)$$

- OT : 作用温度 $^{\circ}\text{C}$
- C : 対流による熱交換量 W/m^2
- R : 放射による熱交換量 W/m^2
- h_c : 対流熱伝達率 $\text{W}/\text{m}^2\text{C}$
- h_r : 放射熱伝達率 $\text{W}/\text{m}^2\text{C}$
- h : 総合熱伝達率 $\text{W}/\text{m}^2\text{C}$
- t_s : 皮膚温 $^{\circ}\text{C}$
- t_a : 気温 $^{\circ}\text{C}$
- t_r : 平均放射温度 $^{\circ}\text{C}$

2.4 摘要

本章では、人体と環境との間の物理的相互関係を記述している人体熱収支式を提示した。さらに人体熱収支式内で記述され、本研究において実測を行う、経路別熱交換量に関する理論式を提示した。この人体熱収支式に基づき、人工光源の色温度、照度が温熱環境に因る人体生理・心理反応に及ぼす影響を明らかにする際に、温熱環境指標として用いる、作用温度を提示した。

第2章引用文献

- 1) 中山昭雄 編：温熱生理学，理工学社，1981
- 2) 環境工学教科書研究会 編：環境工学教科書，彰国社，1996
- 3) 北山直方：図解 伝熱工学の学び方，オーム社，1982
- 4) 堀越哲美，宮原英男，小林陽太郎：人体と矩形面との間の形態係数および人体の有効ふく射面積に関する研究 1. 算出理論と椅座着衣の場合の実測，日本建築学会論文報告集，第286号，pp. 109-119, 1978
- 5) 渡辺要 編：建築計画原論Ⅱ，丸善，1975
- 6) Winslow, C. -E. A., Harrington, L. P. and Gagge, A. P. : Physiological reactions of the human body to varying environmental temperatures, The American Journal of Physiology, Vol. 120, No. 1, pp. 1-22, 1937

第3章 実測による人体と環境との間の放射および対流による熱交換量に関する係数の導出

3.1 緒言

3.2 実験計画

3.2.1 実験概要

3.2.2 実験条件

3.2.3 被験者

3.2.4 実験手順

3.2.5 測定項目および測定機器

3.3 実験結果

3.3.1 温熱環境条件の実測結果（実験Ⅰ，Ⅱ）

3.3.2 形態係数の実測結果（実験Ⅰ，Ⅱ）

3.3.3 皮膚温の経時変動（実験Ⅰ）

3.3.4 人体各部位における周径方向の皮膚温分布（実験Ⅱ）

3.3.5 放射および対流による熱交換量（実験Ⅰ）

3.3.6 人体各部位における周径方向の放射による熱交換量分布（実験Ⅱ）

3.3.7 人体各部位における周径方向の対流による熱交換量分布（実験Ⅱ）

3.3.8 代謝量，経路別放熱量および熱収支量（実験Ⅰ）

3.4 考察

3.4.1 人体各部位における周径方向の放射熱伝達率分布（実験Ⅱ）

3.4.2 人体各部位における周径方向の自然対流熱伝達率分布（実験Ⅱ）

3.4.3 人体各部位および全身の放射熱伝達率（実験Ⅰ）

3.4.4 人体各部位および全身の自然対流熱伝達率（実験Ⅰ）

3.5 摘要

第3章引用文献

自然対流と同等の温熱環境が、再現されていると考えられる。実験Ⅱは図3-2-2に示す、名古屋工業大学人工環境条件制御室にて実施した。天井面に空調吹出口、人体正面壁下方に空調吸込口が設けられており、人体周辺では、自然対流とほぼ同等の温熱環境が、再現されていると考えられる。温湿度はコンピューター制御で調整される。

3.2.2 実験条件

実験条件を表3-2-1に示す。実験Ⅰでは、実験室の気温を30℃、25℃、20℃の3条件とした。第4章で述べる、光源の色温度、照度が温熱環境に因る、人体生理・心理反応に及ぼす影響を明らかにする実験よりも、気温条件がやや低めに設定してあるが、人体の自然対流熱伝達率を求める際に、発汗の影響を極力小さくするためである。また得られた人体の自然対流熱伝達率に、汎用性を持たせるためことも念頭に置いた。実験室曝露前の温熱環境に関する、履歴を統一すること目的とした、前室の気温は、裸体状態での至適域内である28℃とした。実験Ⅱでは制御室の気温を29℃、23℃、17℃の3条件とした。実験Ⅱでは、人体の自然対流熱伝達率分布を、より明確にする目的で、実験条件間の気温差を6℃に設定した。実験Ⅱでは、曝露前の温熱環境の履歴を統一するために、はじめ制御室の気温を、28℃に設定した。実験Ⅰ、Ⅱとも相対湿度は、60%を目標に制御した。気流は、自然対流と考えられる、静穏気流とした。平均放射温度は、実験室、前室および制御室周囲を、布で覆うことにより、気温と等しくなるようにした。

表 3-2-1 実験条件

		気 温	相対湿度	気流速度	平均放射温度
実験Ⅰ	前 室	28℃	≒60%	自然対流 (<0.25m/s)	≒気 温
	実験室	30℃, 25℃, 20℃			
実験Ⅱ	制御室	28℃ (曝露前)	≒60%	自然対流 (<0.25m/s)	≒気 温
		29℃, 23℃, 17℃			

3.2.3 被験者

実験Ⅰ、Ⅱにおける、被験者の身体データを表3-2-2に示す。被験者は、生理現象が比較的捉えやすい安定状態であること、体型・体格形成が、完成段階であることを考慮し、健康な青年男子とした。実験Ⅰでは10名、実験Ⅱでは2名とした。着衣状態は下着のみの、ほぼ裸体状態とした。表中の体表面積は、日本人を対象にした蔵澄ら²⁾の式を用いて算出した。被験者は、実験内容を理解した善意ある協力者であり、適切な報酬が支払われた。

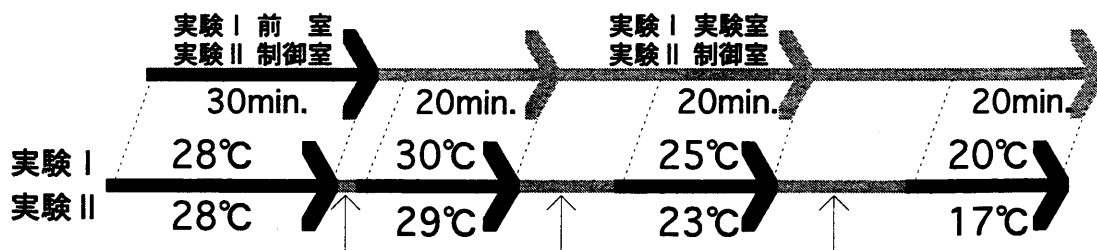
表 3-2-2 被験者身体データ

被験者	身長 cm	体重 kg	体表面積* m ²	年齢	性別	
実験 I	FR	163.4	52.4	1.56	24	男性
	GK	169.7	60.7	1.70	23	
	KT	175.3	74.1	1.88	23	
	MA	179.0	63.9	1.81	32	
	MI	174.7	66.7	1.80	28	
	MR	164.9	47.2	1.51	24	
	MY	168.4	59.7	1.68	23	
	NB	176.7	77.1	1.92	28	
	NK	175.0	64.3	1.78	23	
	YK	178.8	68.2	1.85	22	
実験 II	IC	179.9	70.7	1.89	27	男性
	NB	176.7	77.1	1.92	28	

* 藏澄らの式 (文献 2) $S=100.315W^{0.383}H^{0.693}$ W: 体重 kg H: 身長 cm

3.2.4 実験手順

実験 I および II の実験手順を図 3-2-3 に示す。実験 I では、環境実験室入室後、被験者は脱衣し、熱電対、熱流計を前室内で装着した。装着後、前室にて被験者を、30 分間椅座安静にさせた。その後実験室に移動し、総合代謝機能測定システムを装着し、3 種の気温条件下に、椅座（腕下垂）安静状態で、20 分間ずつ被験者を曝露した。その際、気温条件は 30℃、25℃、20℃ の順序で変化させた。実験 II では制御室入室後、被験者は脱衣し、熱電対、熱流計を制御室内で装着した。装着後、制御室（気温 28℃）にて、被験者を 30 分間椅座安静にさせた。その後、総合代謝機能測定システムを装着し、3 種の気温条件下に椅座（腕下垂）安静状態で、20 分間ずつ被験者を曝露した。その際、気温条件は 29℃、23℃、17℃ の順序で変化させた。実験 I II とも、実験中の読書を禁じた。また、飲食がなるべく実験に影響を及ぼさないように、実験開始 1 時間前までに、飲食を済ませるように依頼した。実験は、各被験者 1 日 1 回を原則とし、9:00～10:30、11:00～12:30、13:30～15:00、15:30～17:00 の時間帯に実施した。また被験者のスケジュール上、1 日 2 回実験を実施する場合は、午前 1 回、午後 1 回とした。



気温条件設定時間
図 3-2-3 実験手順

3.2.5 測定項目および測定機器

実験ⅠおよびⅡにおける、温熱環境条件の測定項目および測定機器を、表3-2-3に示す。温熱環境の測定位置は、椅座人体の中心である床上80cmとした。実験室、前室および制御室の乾湿球温度は、アスマン通風乾湿球湿度計の球部に、0.3mmφT型熱電対を貼付して、30秒間隔で自動測定した。気流速度は、実験Ⅰにおいては熱式風速計（床上10, 80, 150cm）、実験Ⅱにおいては超音波風速計を用いて、30秒間隔で自動測定した。床、壁、天井の表面温度、グローブ温度および上下気温分布（床上10, 80, 150cm 実験Ⅰのみ）は、0.3mmφT型熱電対を用い、30秒間隔で自動測定した。平均放射温度は、Horikoshi and Kobayashi.³⁾の直方体人体モデルを用いて、各形態係数を算出し求めた。直方体の中心は、床上80cmとした。

実験ⅠおよびⅡにおける、人体生理反応の測定項目および測定機器を表3-2-4に、皮膚温および熱流計の測定位置を図3-2-4に示す。人体の部位皮膚温は、Hardy-DuBoisの7点法の各部位に、0.2mmφT型熱電対をサージカルテープで貼付し測定した。舌下温は、0.2mmφT型熱電対を、口腔舌下に含ませて測定した。皮膚温、舌下温とも、30秒間隔で自動測定した。実験Ⅰにおける人体の各部位での対流および放射熱交換量は、Hardy-DuBoisの7点法の各部位に、熱流計（MF-9 英弘精機株式会社）をサージカルテープで、空隙の生じないように密着させ測定した。熱交換量は曝露中、多点式ペンレコーダにより、連続測定した。平均皮膚温、全身からの対流、放射放熱量および、人体の対流、放射熱伝達率は、各部位の表面積比率による重み平均によって求めた。実験Ⅱにおける、各

表 3-2-3 温熱環境条件の測定項目および測定機器

	測定項目	測定機器	測定位置
実験Ⅰ	気 温	アスマン通風乾湿球湿度計	床上80cm
		0.3mmφT型熱電対	床上10cm, 80cm, 150cm
	相対湿度 (湿球温度)	アスマン通風乾湿球湿度計	床上80cm
		0.3mmφT型熱電対	床上80cm
	気流速度	熱式風速計	床上10cm, 80cm, 150cm
	グローブ温度	グローブ温度計	床上80cm
表面温度	0.3mmφT型熱電対	床面（中央）、壁面（床上80cm）、天井面（中央）	
実験Ⅱ	気 温	アスマン通風乾湿球湿度計	床上80cm
		0.3mmφT型熱電対	床上80cm
	相対湿度 (湿球温度)	アスマン通風乾湿球湿度計	床上80cm
		0.3mmφT型熱電対	床上80cm
	気流速度	超音波風速計	床上80cm
	グローブ温度	グローブ温度計	床上80cm
表面温度	0.3mmφT型熱電対	床面（中央）、壁面（床上80cm）、天井面（中央）	

表 3-2-4 人体生理反応の測定項目および測定機器

	測定項目	測定機器	測定位置
実験 I	皮膚温	0.2mmφT型熱電対	Hardy-DuBoisの7点
	舌下温	0.2mmφT型熱電対	口腔舌下
	熱交換量	熱電堆式熱流計	Hardy-DuBoisの7点
	代謝量	総合代謝機能測定システム	
	体重減少量	デジタル台秤	被験者用藤製椅子直下
実験 II	皮膚温	0.2mmφT型熱電対	Hardy-DuBoisの7点
	皮膚温分布	0.2mmφT型熱電対	躯幹, 大腿, 下腿 (45° 間隔), 前腕 (90° 間隔)
	舌下温	0.2mmφT型熱電対	口腔舌下
	熱交換量	熱電堆式熱流計	躯幹, 大腿, 下腿 (45° 間隔), 前腕 (90° 間隔)
	代謝量	総合代謝機能測定システム	
	体重減少量	デジタル台秤	被験者用藤製椅子直下

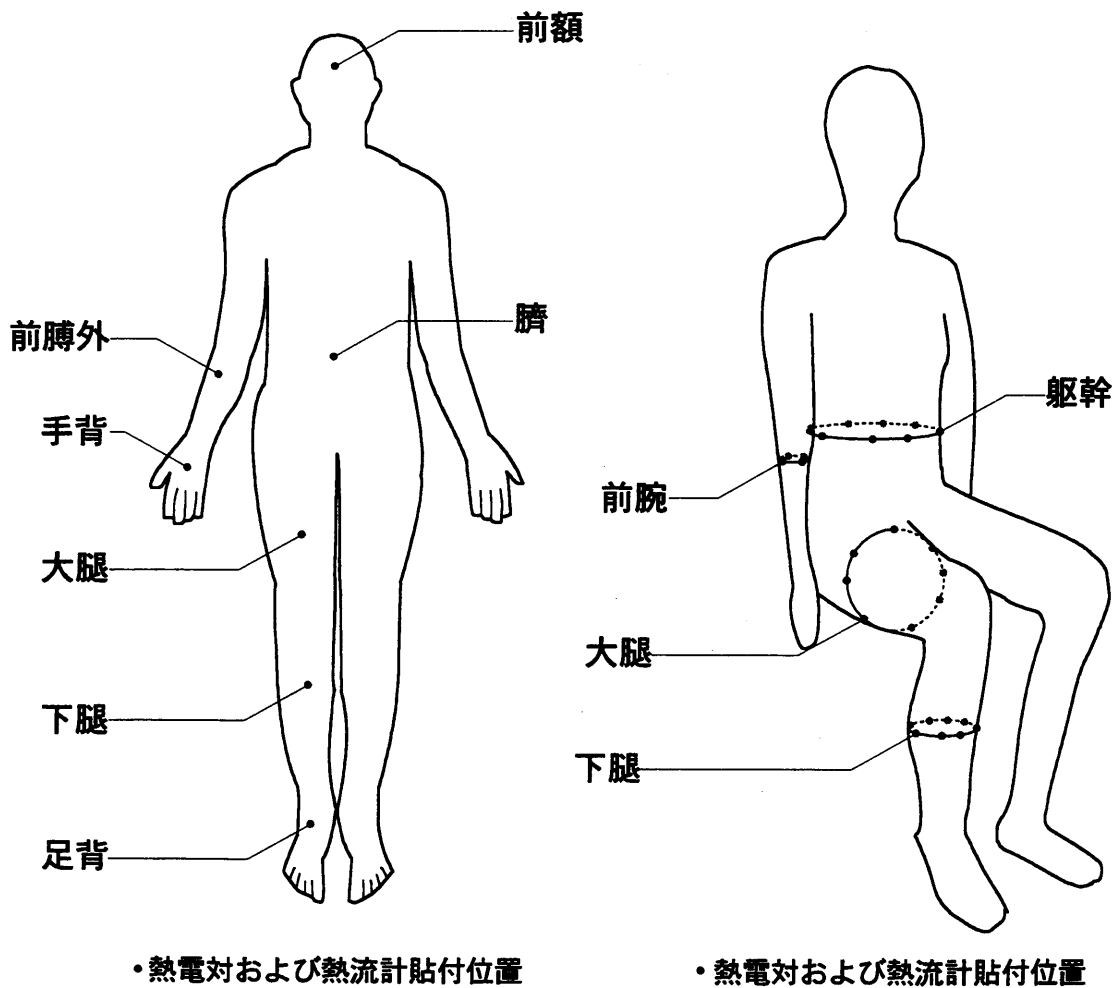


図 3-2-4 熱電対および熱流計の測定位置

部位周径方向の対流および放射による熱交換量は、軀幹、右大腿、右下腿においては45度間隔で、右前腕においては90度間隔で、熱流計（EM1 京都電子工業株式会社）をサージカルテープで、空隙の生じないように密着させ、10秒間隔で自動測定した。熱流計の仕様を表3-2-5に示す。体重減少量は、実験室内および制御室内の、被験者用籐製椅子の下にデジタル台秤を設置し、5分間隔で記録した。代謝量は、総合代謝機能測定システム（エアロモニタ AE-280S ミナト医科学株式会社）を用い、10秒間隔で測定した。なお解析には、各気温条件とも曝露終了前5分間のデータを、平均して用いた。

表 3-2-5 熱流計の仕様

	外形寸法 mm	感度 mV/W・m ²	使用温度範囲 °C	熱抵抗材	被覆材
実験Ⅰ	40×20×1.7	0.012	-20~+120	ポリエステル	シリコン樹脂
実験Ⅱ	30×15×1.5	0.003	-40~+150	シリコンゴム	シリコンゴム

3.3 実験結果

3.3.1 温熱環境条件の実測結果（実験Ⅰ，Ⅱ）

実験室および制御室における、温熱環境要素の実測結果の全被験者での曝露終了前5分間の平均値および標準偏差を、表3-3-1に示す。実験Ⅰにおいて30°C、25°C条件では、相対湿度が、若干高い結果となったが、ほぼ設定条件を実現できたと考えられる。実験Ⅱにおいて23°C、17°C条件では、相対湿度、平均放射温度が、若干高目であるが、ほぼ設定条件を実現できたと考えられる。

3.3.2 形態係数の実測結果（実験Ⅰ，Ⅱ）

実験ⅠでのHardy-DuBoisの7点における、形態係数の実測結果を表3-3-2に示す。表は各部位に対する、人体および各空間構成面への形態係数を表してい

表 3-3-1 温熱環境要素の測定結果 - 括弧内は標準偏差

実験Ⅰ	気 温 °C			相対湿度 %	気流速度 m/s			平均放射温度 °C
	10cm	80cm	150cm	80cm	10cm	80cm	150cm	80cm
30°C	29.0 (0.5)	30.3 (0.4)	31.5 (0.9)	66.8 (9.1)	0.06 (0.04)	0.06 (0.03)	0.10 (0.03)	30.2 (0.5)
25°C	25.4 (0.3)	25.6 (0.1)	26.1 (0.2)	65.5 (7.4)	0.11 (0.05)	0.08 (0.04)	0.07 (0.02)	25.6 (0.2)
20°C	20.6 (0.4)	20.8 (0.4)	21.5 (0.4)	59.1 (7.6)	0.14 (0.07)	0.16 (0.10)	0.08 (0.08)	21.0 (0.5)
実験Ⅱ	気 温 °C			相対湿度 %	気流速度 m/s			平均放射温度 °C
	80cm			80cm	80cm			80cm
29°C	29.1 (0.1)			58.8 (2.7)	0.14 (0.01)			28.3 (0.4)
23°C	23.7 (0.1)			70.0 (3.5)	0.16 (0.01)			24.7 (0.3)
17°C	17.5 (0.2)			76.5 (2.2)	0.16 (0.01)			20.6 (0.2)

る。実測は、実験Ⅰの被験者YKに対して行った。臍、大腿、下腿は部位から人体への形態係数が、比較的大きな値となった。

実験Ⅱでの躯幹、前腕、大腿、下腿の周径方向における、形態係数の実測結果を表3-3-3に示す。表は各部位に対する、人体および各空間構成面への形態係数を表している。実測は、実験Ⅱの被験者2名に対して行い、表は被験者2名の平均値である。躯幹、前腕、大腿は、各部位に対する人体への形態係数が、比較的大きな値となり、また、その部位の角度ごとの、人体への形態係수에差が認められた。

表 3-3-2 形態係数の実測結果（実験Ⅰ）

	人体へ	天井へ	床へ	東壁へ	西壁へ	南壁へ	北壁へ
前額	0.135	0.303	0.099	0.160	0.000	0.161	0.142
臍	0.423	0.108	0.064	0.161	0.000	0.128	0.116
前膊外	0.221	0.120	0.185	0.135	0.116	0.018	0.205
手背	0.156	0.092	0.295	0.117	0.149	0.000	0.191
大腿	0.329	0.138	0.058	0.191	0.026	0.088	0.169
下腿	0.181	0.049	0.328	0.218	0.029	0.045	0.150
足背	0.304	0.058	0.246	0.169	0.034	0.060	0.129

表 3-3-3 形態係数の実測結果（実験Ⅱ）

	人体へ	天井へ	床へ	東壁へ	西壁へ	南壁へ	北壁へ	椅子へ	
躯幹	0°	0.430	0.122	0.079	0.094	0.112	0.000	0.163	0.000
	45°	0.479	0.110	0.085	0.117	0.052	0.004	0.152	0.000
	90°	0.492	0.082	0.119	0.123	0.000	0.000	0.130	0.054
	135°	0.321	0.102	0.225	0.132	0.073	0.147	0.000	0.000
	180°	0.358	0.099	0.208	0.092	0.101	0.141	0.000	0.000
	225°	0.335	0.099	0.227	0.066	0.140	0.133	0.000	0.000
	270°	0.486	0.064	0.128	0.000	0.125	0.000	0.116	0.081
	315°	0.469	0.106	0.092	0.043	0.138	0.000	0.152	0.000
前腕	0°	0.392	0.114	0.159	0.136	0.027	0.027	0.144	0.000
	90°	0.158	0.140	0.287	0.149	0.000	0.141	0.124	0.000
	180°	0.281	0.083	0.222	0.143	0.017	0.110	0.016	0.128
	270°	0.522	0.079	0.103	0.050	0.051	0.048	0.147	0.000
大腿	0°	0.349	0.158	0.070	0.127	0.087	0.025	0.185	0.000
	45°	0.253	0.149	0.176	0.145	0.072	0.039	0.166	0.000
	90°	0.276	0.143	0.266	0.140	0.000	0.042	0.133	0.000
	135°	0.339	0.078	0.319	0.118	0.000	0.038	0.087	0.022
	180°	0.318	0.000	0.390	0.121	0.026	0.020	0.093	0.033
	225°	0.388	0.083	0.336	0.011	0.033	0.000	0.111	0.038
	270°	0.463	0.138	0.186	0.000	0.066	0.000	0.138	0.009
	315°	0.426	0.148	0.091	0.066	0.096	0.017	0.156	0.000
下腿	0°	0.213	0.095	0.337	0.108	0.078	0.009	0.160	0.000
	45°	0.178	0.095	0.345	0.126	0.036	0.060	0.160	0.000
	90°	0.229	0.082	0.339	0.130	0.000	0.058	0.133	0.029
	135°	0.243	0.070	0.337	0.120	0.026	0.053	0.079	0.073
	180°	0.266	0.063	0.330	0.125	0.056	0.059	0.016	0.084
	225°	0.295	0.052	0.321	0.047	0.064	0.038	0.106	0.077
	270°	0.272	0.067	0.339	0.000	0.070	0.039	0.167	0.046
	315°	0.309	0.070	0.326	0.038	0.067	0.010	0.164	0.016

3.3.3 皮膚温の経時変動（実験Ⅰ）

実験Ⅰにおける、被験者NBの皮膚温、舌下温、平均皮膚温の経時変動を、一例として図3-3-1に示す。30℃条件の場合、前膊外、下腿、足背の皮膚温は0.6℃～0.8℃上昇し、それぞれ34.5℃、33.2℃、34.7℃付近で一定となった。臍、手背、大腿の皮膚温は0.2℃～0.4℃上昇し、それぞれ35.1℃、35.4℃、35.0℃付近で一定となった。平均皮膚温は0.5℃上昇し、34.7℃付近で一定となった。25℃条件の場合、前膊外、大腿、下腿、足背の皮膚温は曝露中0.5℃～0.6℃下降し、それぞれ33.2℃、33.5℃、31.9℃、35.0℃となった。平均皮膚温は、曝露中33.9℃付近で一定であった。20℃条件の場合、前額の皮膚温は曝露中33.6℃付近で一定であった。前額を除く、すべての部位で皮膚温は、曝露中0.8℃～2.0℃下降した。平均皮膚温は、曝露中下降し、実験終了時に31.5℃であった。舌下温は、すべての気温条件を通して37.0℃付近で一定であった。

なお、実験Ⅰにおける全ての被験者の皮膚温、舌下温、平均皮膚温の経時変動を、巻末の付録に添付する。

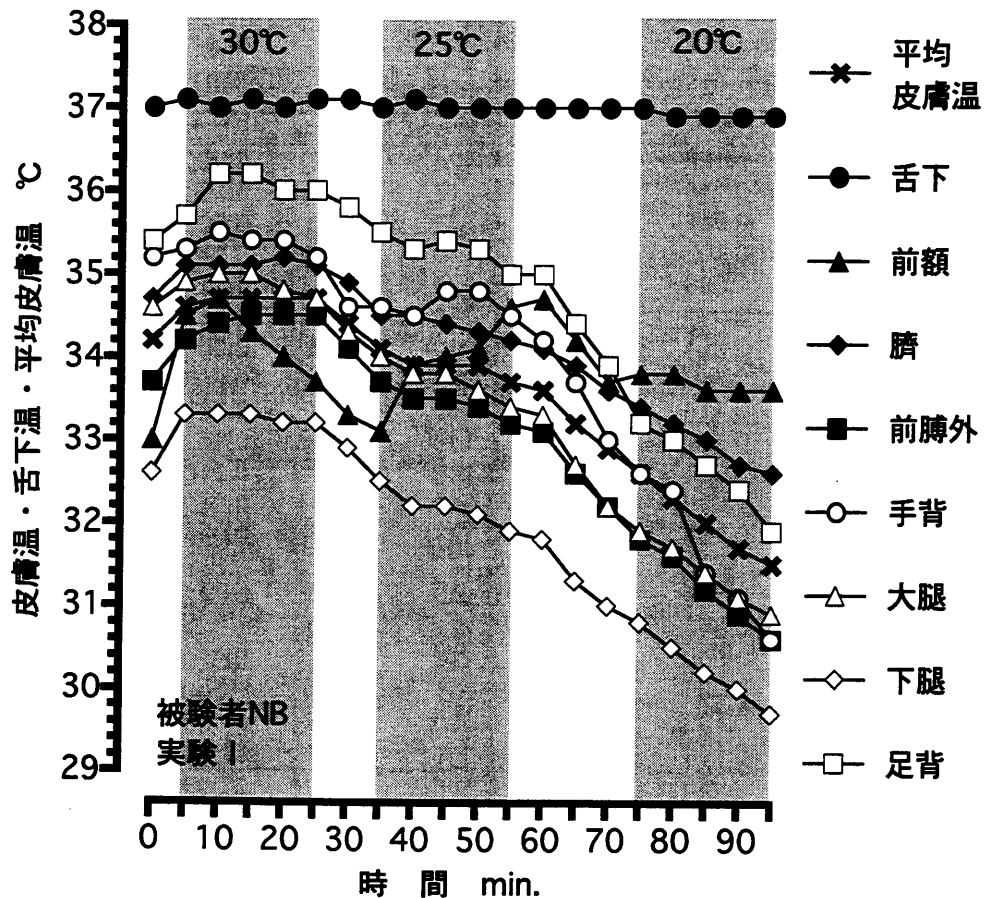


図3-3-1 皮膚温・舌下温・平均皮膚温の経時変動
(被験者NB, 実験Ⅰ)

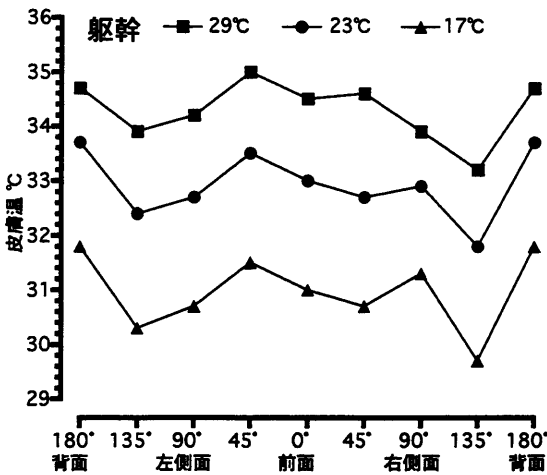
3.3.4 人体各部位における周径方向の皮膚温分布（実験Ⅱ）

実験Ⅱにおける躯幹，前腕，大腿，下腿での周径方向の皮膚温分布を図3-3-2(a)から図3-3-2(d)に示す。皮膚温は，被験者2名の曝露終了前5分間の平均値である。

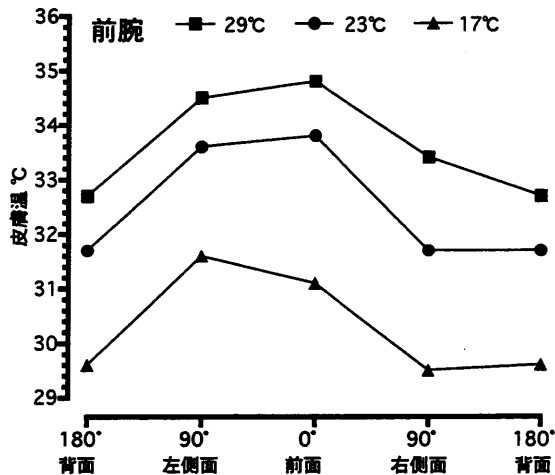
図3-3-2(a)に示す躯幹において皮膚温は，左右135°で低く，左45°，背面の180°で高い，二峰性の分布性状が窺われた。29℃，23℃条件では，周径方向に1.5℃程度の分布，17℃条件では2.0℃程度の分布が認められた。

図3-3-2(b)に示す前腕において皮膚温は，おおよそ前面の0°で高く，背面の180°で低い，分布性状が窺われた。各気温条件とも，周径方向に2.0℃程度の分布が認められた。

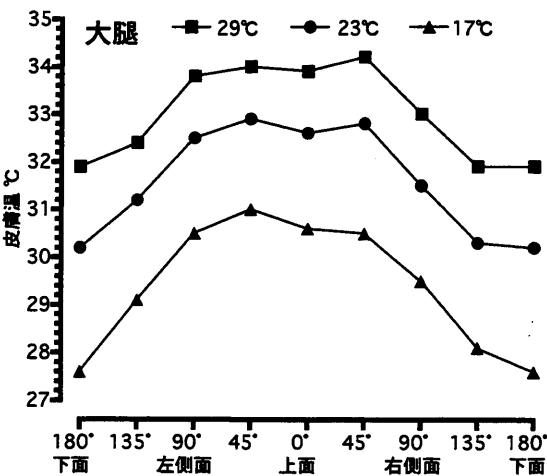
図3-3-2(c)に示す大腿において皮膚温は，左90°から右45°の上面で一様に高く，下面の180°に向けて低くなる分布性状が窺われた。29℃，23℃条件では周径方向に2.0℃程度の分布，17℃条件では，3.0℃程度の分布が認められた。



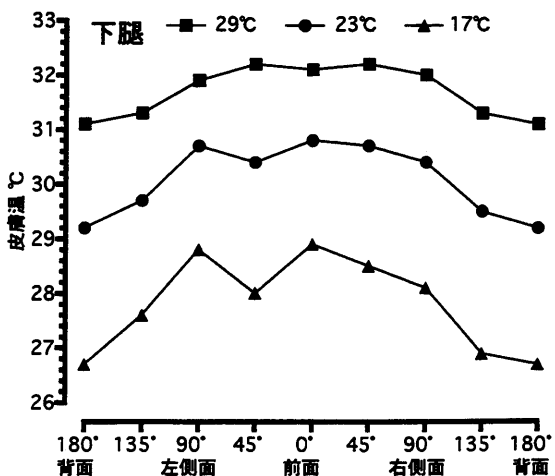
(a) 躯幹での皮膚温分布



(b) 前腕での皮膚温分布



(c) 大腿での皮膚温分布



(d) 下腿での皮膚温分布

図3-3-2 人体各部位における周径方向の皮膚温分布（実験Ⅱ）

図3-3-2(d)に示す下腿において皮膚温は、おおよそ左90° から右90° の前面で一様に高く、背面の180° に向けて低くなる、分布性状が窺われた。また気温条件が低いほど、前面と背面との皮膚温差が増大した。29℃条件では周径方向に1.0℃程度の分布、23℃条件では1.5℃程度の分布、17℃条件では2.0℃程度の分布が、認められた。

なお、実験Ⅱにおける被験者2名の躯幹、前腕、大腿、下腿における周径方向の皮膚温分布を、巻末の付録に添付する。

3.3.5 放射および対流による熱交換量（実験Ⅰ）

実験Ⅰにおける、各気温条件ごとの人体各部位および全身の放射、対流による熱交換量の被験者10名の平均値と標準偏差を図3-3-3に示す。概観すると、気温条件が低いほど、各部位および全身の放射、対流による熱交換量は、大きい結果であった。放射による熱交換量は、各気温条件とも前額において最大であり、臍において最小であった。対流による熱交換量は、前額、臍、大腿で比較的小さく、前膊外では、各気温条件とも最大であった。各気温条件をとおして、対流と放射による熱交換量を比較すると、全身では僅かに、放射による熱交換量が大きかった。前額においては、放射による熱交換量が対流に比べ、著しく大きく、前膊外においては、対流による熱交換量が放射に比べ、大きい結果であった。全身の対流と放射による熱交換量の平均値は、30℃条件で32.3W/m²、25℃条件で64.3W/m²、20℃条件で87.0W/m²であった。

なお、実験Ⅰにおける全ての被験者の人体各部位および全身の放射、対流による熱交換量を、巻末の付録に添付する。

3.3.6 人体各部位における周径方向の放射による熱交換量分布（実験Ⅱ）

実験Ⅱにおける、躯幹、前腕、大腿、下腿での周径方向の、放射による熱交換量分布を図3-3-4(a)から図3-3-4(d)に示す。周径方向の放射による熱交換量分布は、被験者2名の曝露終了前、5分間の平均値である。各部位とも、放射による熱交換量は、おおむね気温条件が低いほど、大きい結果であった。

図3-3-4(a)に示す躯幹において、放射による熱交換量は、前面の0° および背面の180° で大きく、左右90° で小さくなる、二峰性の分布性状が窺われた。また気温条件が低いほど、周径方向の分布が大きくなる結果であった。放射による熱交換量は、背面の180° で最大であった。29℃、23℃条件では周径方向に10W/m²程度の分布が、17℃条件では15W/m²程度の分布が認められた。

図3-3-4(b)に示す前腕において、放射による熱交換量は、左90° および背面の180° で小さく、前面の0°、右90° に向けて大きくなる分布性状が窺われた。また放射による熱交換量は、左90° で最小であった。29℃、23℃条件では周径方向

に10W/m²程度の分布が、17℃条件では15W/m²程度の分布が認められた。

図3-3-4(c)に示す大腿において、放射による熱交換量は、23℃、17℃条件では、背面の180° から右45° に向けて大きくなる分布性状が窺われた。30℃条件では、放射による熱交換量は右45° で若干大きいのが、概ね、周径方向では一様の分布性状であった。29℃条件では5W/m²程度、23℃条件では15W/m²程度の分布が、また17℃条件では、20W/m²程度の分布が認められた。

図3-3-4(d)に示す下腿において、放射による熱交換量は、おおよそ背面の180° から右45° に向けて大きくなる分布性状が窺われた。また気温条件が低いほど周径方向の分布が大きくなる結果であった。29℃条件では5W/m²程度、23℃条件では10W/m²程度の分布が、また17℃条件では15W/m²程度の分布が認められた。

なお、実験Ⅱにおける、被験者2名の躯幹、前腕、大腿、下腿での周径方向の放射による熱交換量分布を、巻末の付録に添付する。

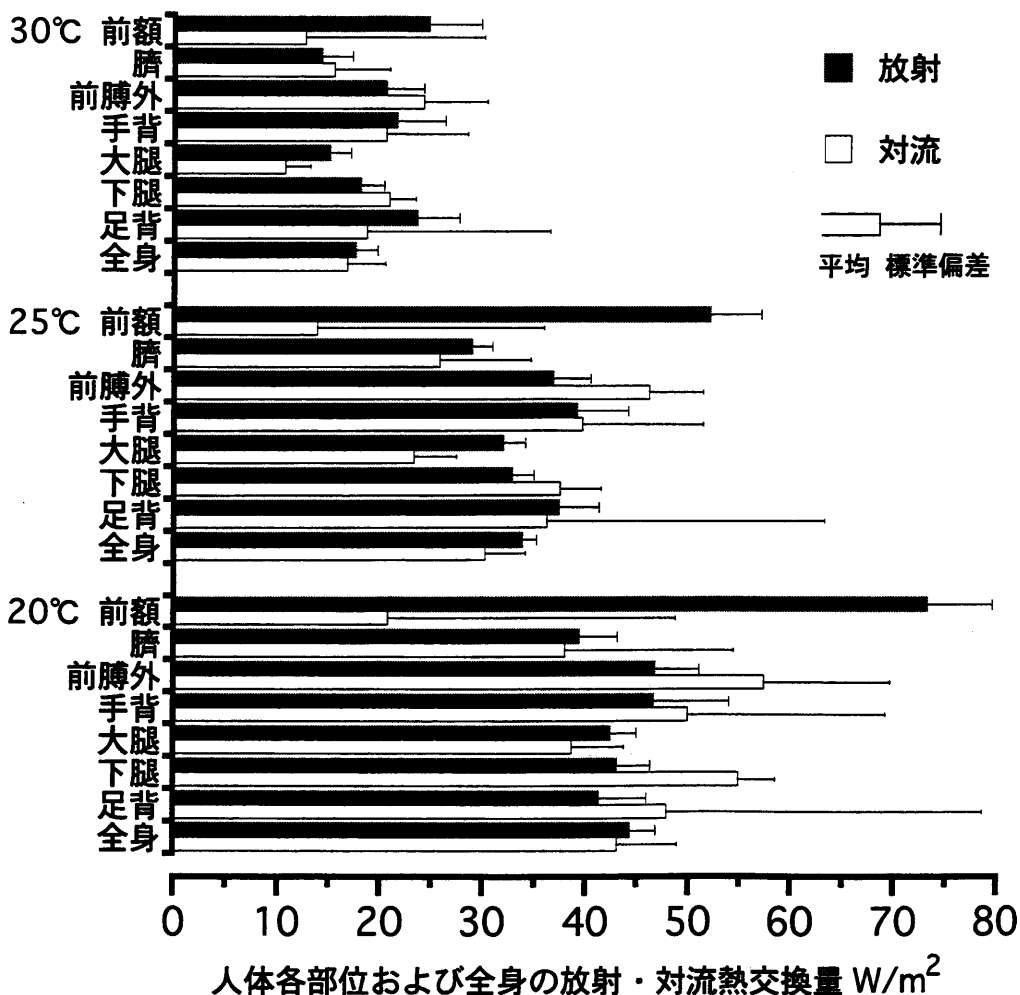
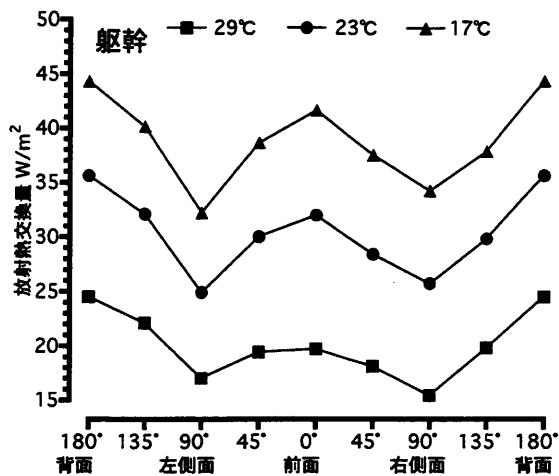
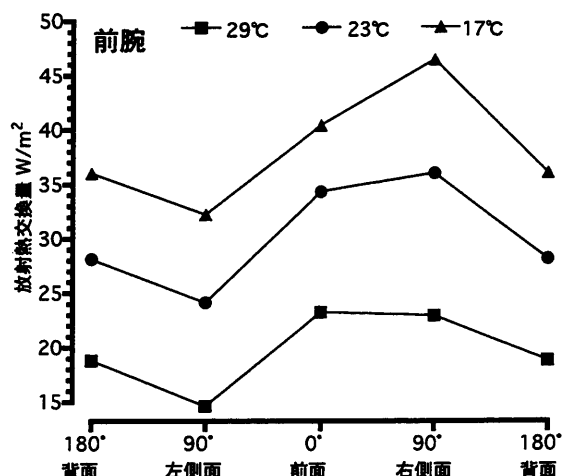


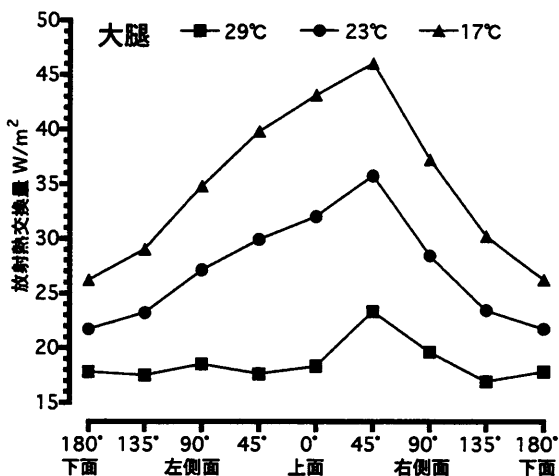
図 3-3-3 各気温条件下の人体各部位および全身の放射，対流熱交換量（実験Ⅰ）



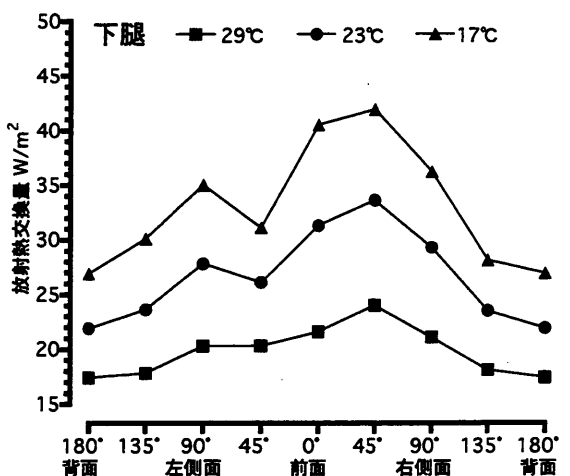
(a) 軀幹での放射熱交換量分布



(b) 前腕での放射熱交換量分布



(c) 大腿での放射熱交換量分布



(d) 下腿での放射熱交換量分布

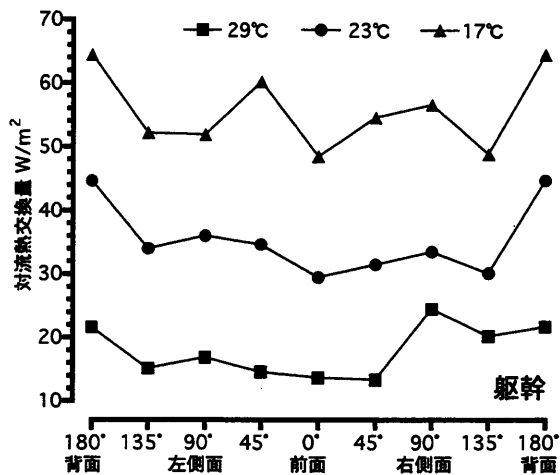
図 3-3-4 人体各部位における周径方向の放射熱交換量分布 (実験 II)

3.3.7 人体各部位における周径方向の対流による熱交換量分布 (実験 II)

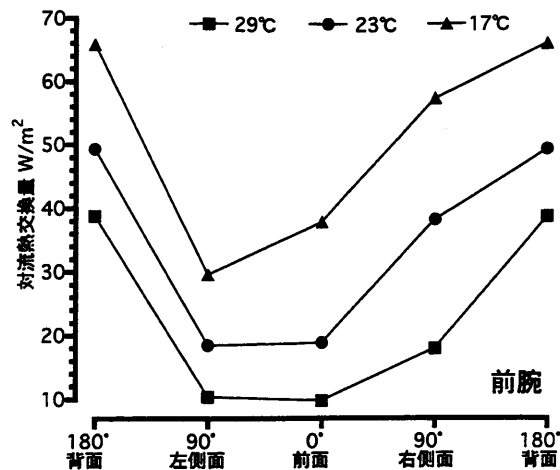
実験 II における、軀幹、前腕、大腿、下腿での周径方向の、対流による熱交換量分布を図3-3-5(a)から図3-3-5(d)に示す。周径方向の対流による熱交換量分布は、被験者2名の曝露終了前、5分間の平均値である。各部位とも対流による熱交換量は、おおむね気温条件が低いほど、大きい結果であった。

図3-3-5(a)に示す軀幹において、対流による熱交換量は、気温条件ごとに分布性状が一様ではないが、背面である180°で大きく、前面から左右側面は、おおよそ等しくなる分布性状が窺われた。29°C条件では周径方向に10W/m²程度の分布が、23°C, 17°C条件では15W/m²程度の分布が認められた。

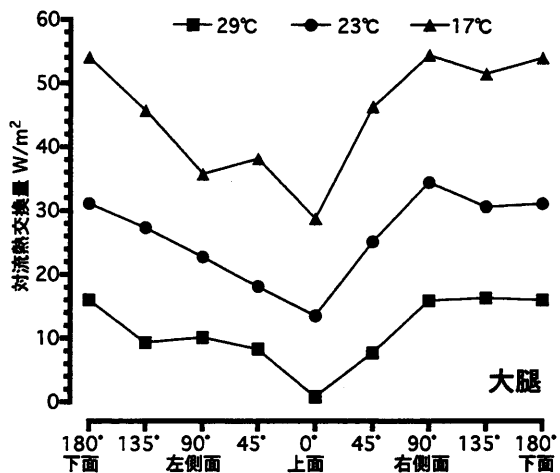
図3-3-5(b)に示す、前腕において、対流による熱交換量は、左90°から背面の180°に向けて大きくなる分布が窺われた。29°C, 23°C条件において左90°と前面



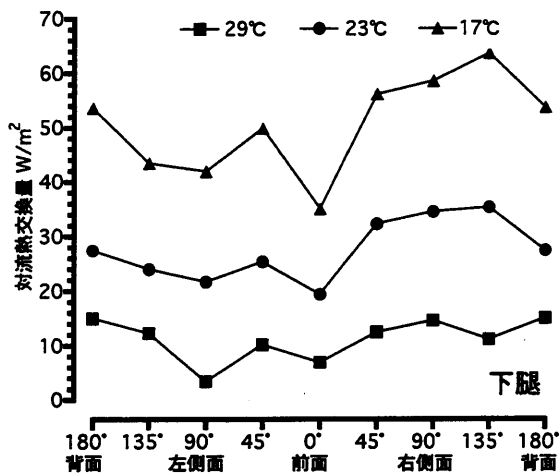
(a) 軀幹での対流熱交換量分布



(b) 前腕での対流熱交換量分布



(c) 大腿での対流熱交換量分布



(d) 下腿での対流熱交換量分布

図3-3-5 人体各部位における周径方向の対流熱交換量分布 (実験II)

の0°の対流による熱交換量の値が、ほぼ等しかった。29℃、23℃条件では、周径方向に30W/m²程度の分布が、17℃条件では35W/m²程度の分布が認められた。

図3-3-5(c)に示す大腿において、対流による熱交換量は、上面の0°で最小となり、おおよそ背面の180°に向けて、大きくなる分布性状が窺われた。また気温条件が低いほど、周径方向の分布が、大きくなる結果であった。右90°から下面の180°の対流による熱交換量は、ほぼ等しい結果であった。29℃条件では周径方向に15W/m²程度の分布が、23℃条件では20W/m²程度の分布が、17℃条件では25W/m²程度の分布が認められた。

図3-3-5(d)に示す下腿において、対流による熱交換量は、気温条件ごとに周径方向の分布性状が一様ではないが、概ね、左側面に比べ、右側面が大きい分布性状が窺われる。また気温条件が低いほど、周径方向の分布が大きくなる結果であった。

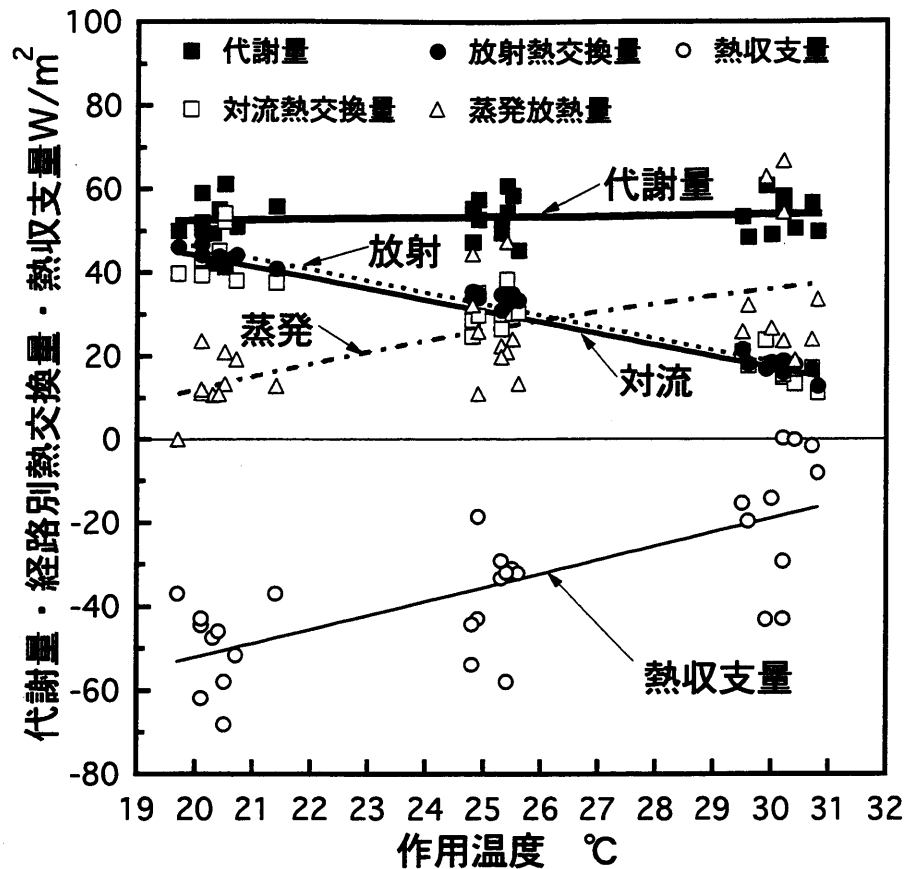


図 3-3-6 作用温度に対する代謝量，経路別放熱量および熱収支量（実験 I）

23℃，17℃条件では前面の0°で，対流による熱交換量が最小となる結果であった。29℃，23℃条件では周径方向に15W/m²程度の分布が，17℃条件では25W/m²程度の分布が認められた。

なお，実験 II における，被験者 2 名の躯幹，前腕，大腿，下腿での周径方向の対流による熱交換量分布を，巻末の付録に添付する。

3.3.8 代謝量，経路別放熱量および熱収支量（実験 I）

実験 I における，作用温度に対する，人体の代謝量，経路別熱交換量，熱収支量との関係を図 3-3-6 に示す。熱収支量は，代謝量から対流，放射，蒸発の各経路別熱交換量を差し引いたものである。代謝量は全実験条件をとおして52W/m²程度，およそ0.9metで一定であった。作用温度25.5℃付近で対流，放射，蒸発による熱交換量が30W/m²程度で等しくなる。蒸発放熱量をみると，作用温度30℃付近で放熱量が比較的大きい被験者が認められ，発汗が開始され蒸発による放熱が増加したものと考えられる。回帰式によると，作用温度36.5℃付近で対流，放射による熱交換量が0W/m²となる。また熱収支量が0W/m²となるのは

作用温度が、35.8℃の時となる。Gagge et al⁴⁾の行った、Partitional calorimetryにより求められた、対流、放射による熱交換量および貯熱量が、0kcal/m²h (=0W/m²)となる作用温度と比較すると、本研究は3℃程度高い結果であった。

3.4 考察

3.4.1 人体各部位における周径方向の放射熱伝達率分布（実験Ⅱ）

実験Ⅱにおける、躯幹、前腕、大腿、下腿での周径方向の放射熱伝達率分布を図3-4-1(a)から図3-4-1(d)に示す。放射熱伝達率分布は、被験者2名の曝露終了前5分間の平均値である。

図3-4-1(a)に示す、躯幹において放射熱伝達率は、左右90°で小さく、前面の0°および180°で大きい、二峰性の分布性状が窺われる。29℃条件では左側面90°から右側面90°にかけて、ほぼ等しい結果となった。各気温条件とも周径方向に、おおよそ1.0W/m²℃程度の分布が認められた。左右側面で放射熱伝達率が小さくなったのは、両腕からの熱放射の影響などが考えられる。

図3-4-1(b)に示す前腕において放射熱伝達率は、左側面90°で最小となり、右側面90°で最大となる分布性状が窺われる。前面の0°、背面の180°の放射熱伝達率は、ほぼ等しいと考えられる。放射熱伝達率に、気温条件による差は、認められなかった。各気温条件とも、周径方向に0.8W/m²℃程度の分布が、認められた。左側面90°で放射熱伝達率が最小となったのは、躯幹からの熱放射の影響によるものと考えられる。

図3-4-1(c)に示す大腿において放射熱伝達率は、23℃、17℃条件では下面の180°および左側面90°で小さく、右45°に向けて大きくなる、分布性状が窺われる。29℃条件では、周径方向の分布が、他の2条件と異なり、今後、検討の余地があると考えられる。23℃条件では周径方向に1.5W/m²℃程度の分布が17℃条件では1.0W/m²℃程度の分布が認められた。放射熱伝達率が、左側面で小さく、右側面で大きくなる分布となったのは、左大腿などからの熱放射の影響によるものと考えられる。

図3-4-1(d)に示す下腿において放射熱伝達率は、背面の180°から左45°にかけて、ほぼ等しく、右45°で最大となる、分布性状が窺われる。29℃条件では周径方向に0.5W/m²℃程度の分布が、23℃、17℃条件では1.0W/m²℃程度の分布が認められた。放射熱伝達率が背面から左側面にかけてほぼ等しいのは、左下腿などからの熱放射の影響によるものと考えられる。

以上から、椅座姿勢の場合、Hardy-DuBoisの7点法の各部位である、躯幹（臍）、前腕（前膊外）、大腿、下腿における、周径方向の部位放射熱伝達率の分布性状を把握できたと考えられる。今回は、分布考慮の研究の出発点なので、部位放射熱伝達率の代表値として、平均的数値を推定することとした。熱流計によ

る測定位置での値から、分布がある場合の、放射熱伝達率の平均値の推定を試みる。測定期間、被験者等が異なるため、厳密さには多少の問題はあるが、実用性に重点をおき、実験Ⅱで得られた各部位放射熱伝達率の分布性状が、実験Ⅰで得られた各部位放射熱伝達率でも、同様の分布の下で測られたと仮定する。実験Ⅱでの、各部位放射熱伝達率の全方位の平均値を、実験Ⅰの測定位置である、正面0°における放射熱伝達率で除した値Aを求めた。この値Aは、実験Ⅰで得られた部位放射熱伝達率に、実験Ⅱにおける、周径方向の部位放射熱伝達率の分布性状を、加味することを意図している。各部位における、この値Aは、躯幹(臍)1.0、前腕(前膊外)0.6、大腿1.1、下腿0.9となった。臍、大腿、下腿においては、値が1.0付近であるので、Hardy-DuBoisの7点法の測定点を、部位放射熱伝達率の代表点としても、支障がないと考えられる。前膊外においては、値が

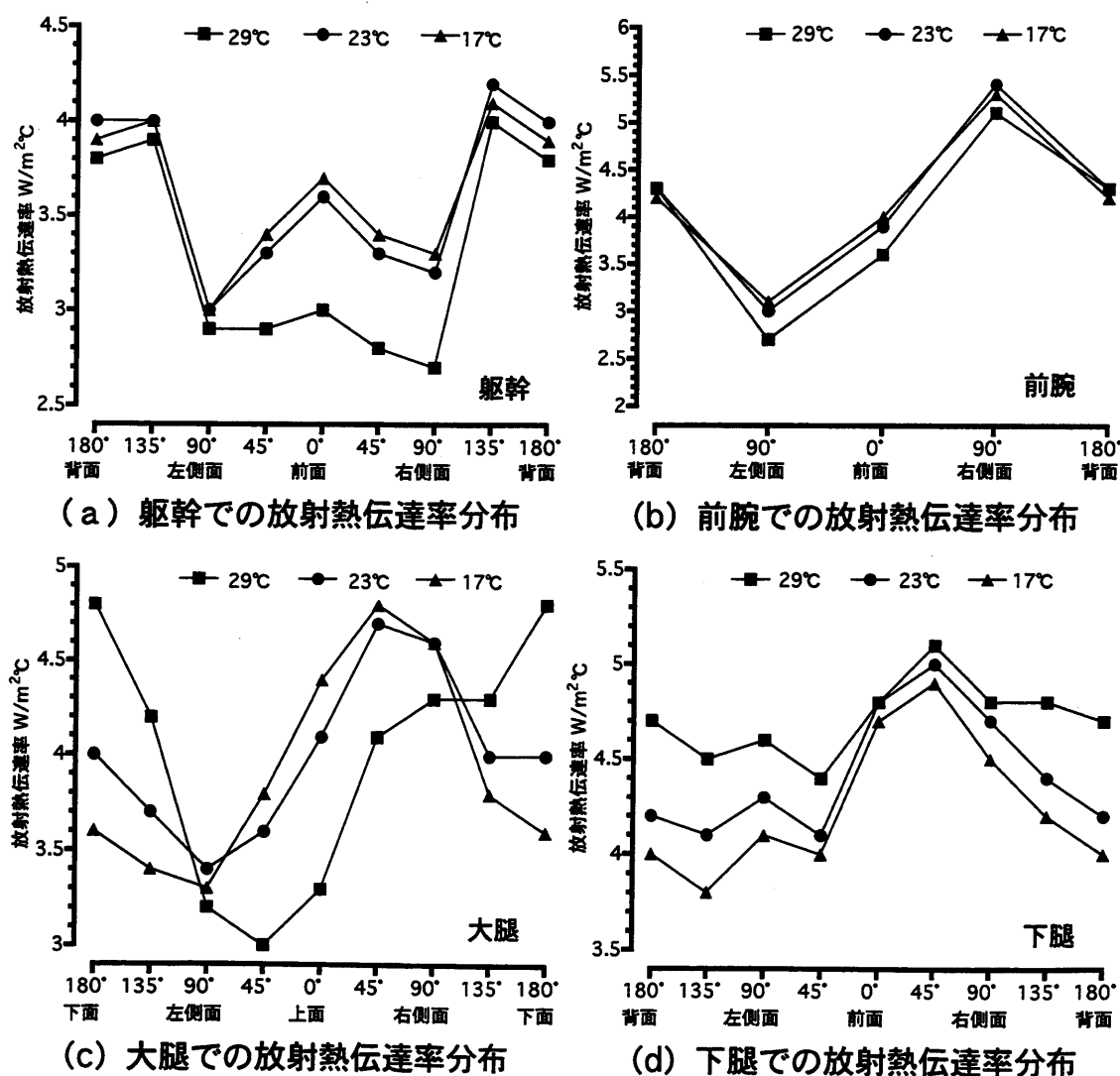


図 3-4-1 人体各部位における周径方向の放射熱伝達率分布 (実験Ⅱ)

1.0以下であるので、Hardy-DuBoisの7点法の測定点では、放射放熱量を過小に評価することが、推察される。この値を、実験Ⅰのそれぞれの部位放射熱伝達率に、乗じることにより、各部位の平均値を求め、分布を考慮した部位放射熱伝達率とした。

なお、実験Ⅱにおける、被験者2名の躯幹、前腕、大腿、下腿での周径方向の放射熱伝達率分布を、巻末の付録に添付する。

3.4.2 人体各部位における周径方向の自然対流熱伝達率分布（実験Ⅱ）

実験Ⅱにおける、躯幹、前腕、大腿、下腿での、周径方向の自然対流熱伝達率分布を図3-4-2(a)から図3-4-2(d)に示す。自然対流熱伝達率分布は、被験者2名の曝露終了前、5分間の平均値である。各部位とも、おおむね気温条件が低いほど、自然対流熱伝達率が大きくなる結果となった。

図3-4-2(a)に示す躯幹において自然対流熱伝達率は、おおむね前面の 0° で最小となり、背面の 180° に向けて、大きくなる分布性状が窺われた。各気温条件において、左右とも 90° 、 135° における自然対流熱伝達率がほぼ等しい結果となった。 23°C 条件では周径方向に $1.0\text{W}/\text{m}^2\text{C}$ 程度の分布が、 17°C 条件では $1.5\text{W}/\text{m}^2\text{C}$ 程度の分布が認められた。側面から背面向けて、自然対流熱伝達率が比較的大きい分布となったが、これは椅座姿勢の場合、大腿からの放熱による上昇気流により、前面の自然対流熱伝達率が側面や背面に比べ、小さくなったことなどが推察される。

図3-4-2(b)に示す前腕において自然対流熱伝達率は、前面の 0° 、左側面 90° では、各気温条件とも $2\text{W}/\text{m}^2$ 程度とほぼ等しく、右側面 90° では、各気温条件とも $4\text{W}/\text{m}^2$ 程度で、ほぼ等しい結果となった。背面の 180° ではそれらに比べ、自然対流熱伝達率が大きい結果となった。背面の 180° では、気温条件が高いほど、自然対流熱伝達率が大きくなり、各部位を概観した場合とは異なる結果となり、今後、検討すべき必要があると考えられる。

図3-4-2(c)に示す、大腿において自然対流熱伝達率は、左側面 90° から上面の 0° で小さく、下面の 180° に向けて大きくなる、分布性状が窺われる。また右側面 90° から下面 180° の自然対流熱伝達率は、ほぼ等しい結果となった。 29°C 条件では周径方向に $4.0\text{W}/\text{m}^2\text{C}$ 程度、 23°C 条件では $3.5\text{W}/\text{m}^2\text{C}$ 程度の分布が、また 17°C 条件では $3.0\text{W}/\text{m}^2\text{C}$ 程度の分布が認められた。左右側面の周径方向の分布性状が一様でなかったのは、椅座姿勢の場合、大腿からの放熱による上昇気流が、鉛直方向であるのに対して、部位が水平方向をなしていること、左大腿の放熱の影響も含まれると考えられる。

図3-4-2(d)に示す下腿において自然対流熱伝達率は、気温条件で周径方向の分布性状が、一様ではないが、前面の 0° で小さく、背面の 180° に向けて大きく

なる分布性状が窺われる。また左右で、周径方向の分布性状が異なる結果となった。自然対流熱伝達率は前面で小さく、背面に向けて大きい分布性状であったが、これは足背からの放熱による上昇気流により、前面の自然対流熱伝達率が側面や背面に比べ、小さくなったことなどが考えられる。左右側面の分布性状が異なったのは、左下腿の影響などが推察される。

以上から、椅座姿勢の場合、Hardy-DuBoisの7点法の各部位である、躯幹(臍)、前腕(前膊外)、大腿、下腿における、周径方向の部位自然対流熱伝達率の分布性状を、把握できたと考えられる。3.4.1で述べた、放射熱伝達率分布と同様に、部位自然対流熱伝達率の代表値として、平均的数値を推定した。各部位自然対流熱伝達率の全方位の平均値を、実験Ⅰの測定位置である正面0°における、自然対流熱伝達率で除した値Bを求めた。この値Bは、実験Ⅰで得られた部位自然対流熱伝達率に、実験Ⅱにおける周径方向の部位自然対流熱伝達率の分布

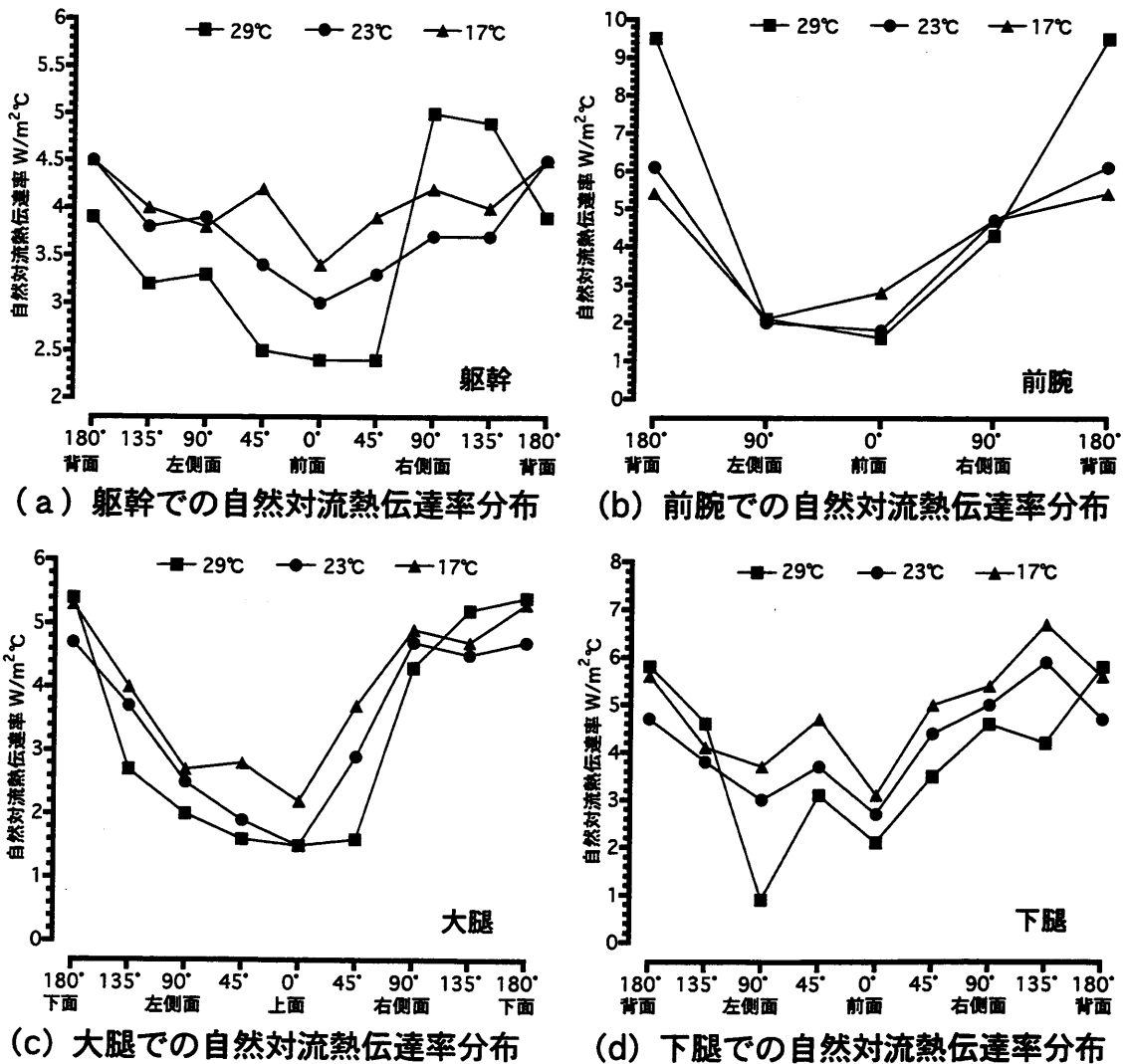


図 3-4-2 人体各部位における周径方向の自然対流熱伝達率分布 (実験Ⅱ)

性状を加味することを意図している。各部位における、この値Bは、躯幹（臍）1.3，前腕（前膊外）1.7，大腿1.8，下腿1.5となり、全ての部位で値が1.0以上となった。臍，前膊外，大腿，下腿の自然対流熱伝達率を求めるにあたり，Hardy-DuBoisの7点法の測定点に熱流計を貼付し，部位代表点とした場合，周径方向では，代表点よりも自然対流熱伝達率が大きくなる箇所があることが考えられ，部位自然対流熱伝達率を，小さく見積もる可能性が，推察される。この値を，実験Ⅰのそれぞれの部位自然対流熱伝達率に乗じることにより，各部位の平均値を求め，分布を考慮した部位自然対流熱伝達率とした。

なお，実験Ⅱにおける，被験者2名の躯幹，前腕，大腿，下腿での周径方向の自然対流熱伝達率分布を，巻末の付録に添付する。

3.4.3 人体各部位および全身の放射熱伝達率（実験Ⅰ）

人体各部位および全身の放射熱伝達率の気温条件ごと，被験者10名の平均値および標準偏差を表3-4-1に示す。気温条件ごとにみると，30℃条件では他の2条件と比べ，前額，下腿，足背の放射熱伝達率が若干の大きい，各気温条件をとおして，人体各部位および全身の放射熱伝達率は，概ね等しいと考えられる。本研究の気温条件の範囲内では，人体各部位および全身の放射熱伝達率を定数として取り扱っても，差し支えないと考えられる。前額および下腿の放射熱伝達率は，他の部位に比べ大きく，臍は他の部位に比べ小さい傾向が伺える。全身およ

表 3-4-1 人体全身および部位の放射熱伝達率－括弧内は標準偏差

部位	放射熱伝達率 W/m ² ℃			
	30℃	本研究 25℃	20℃	市原ら de Dear et al.
前額	4.6 (0.5)	5.3 (0.2)	5.3 (0.1)	4.6 3.9
臍	3.1 (0.1)	3.4 (0.1)	3.4 (0.1)	3.9 4.8
臍分布	3.1 (0.1)	3.4 (0.1)	3.4 (0.1)	
前膊外	4.5 (0.2)	4.7 (0.2)	4.5 (0.2)	3.9 5.2
前膊外分布	2.7 (0.1)	2.8 (0.1)	2.7 (0.1)	
手背	4.2 (0.9)	4.4 (0.6)	4.3 (0.6)	4.4 3.9
大腿	3.7 (0.1)	4.3 (0.1)	4.2 (0.1)	3.8 4.6
大腿分布	4.1 (0.2)	4.7 (0.1)	4.6 (0.1)	
下腿	5.7 (0.2)	5.0 (0.1)	4.7 (0.1)	4.4 5.4
下腿分布	5.2 (0.1)	4.5 (0.1)	4.3 (0.1)	
足背	4.7 (0.1)	4.4 (0.1)	4.2 (0.1)	5.9 4.2
全身	4.7 (0.1)	4.4 (0.1)	4.2 (0.1)	4.3 4.5
全身分布	3.8 (0.1)	4.0 (0.1)	3.9 (0.1)	

び分布を考慮した全身の放射熱伝達率の、すべての条件での平均値は、それぞれ 4.4W/m²°C, 3.9W/m²°Cとなった。人体と環境との間の放射による熱交換量算出のため、通常用いられている人体の放射熱伝達率は4.6W/m²°C⁵⁾であり、本研究での全身の放射熱伝達率は、ほぼ等しい値が得られたと考えられる。分布を考慮した全身の放射熱伝達率は僅かに小さく、今後、検討の余地があると考えられる。サーマルマネキンより算出された、既存の研究と比較すると、前額の放射熱伝達率は市原ら⁶⁾、de Dear et al.⁷⁾の値に比べ僅かに大きく、臍、分布を考慮した前膊外の放射熱伝達率は、僅かに小さい結果となった。

なお、実験Ⅰにおける、全ての被験者の人体各部位、および全身の放射熱伝達率を、巻末の付録に添付する。

3.4.4 人体各部位および全身の自然対流熱伝達率（実験Ⅰ）

人体各部位および全身の自然対流熱伝達率の気温条件ごと、被験者10名の平均値および標準偏差を表3-4-2に示す。表より、部位ごとに比較すると、前膊外、下腿の自然対流熱伝達率が大きく、前額、臍、大腿が比較的小さい結果となり、おおむね対流による熱交換量と同様の傾向となった。椅座姿勢では鉛直方向をなす、四肢の自然対流熱伝達率が、大きくなる傾向があると考えられる。

なお、実験Ⅰにおける、全ての被験者の人体各部位および全身の自然対流熱伝達率を、巻末の付録に添付する。

表 3-4-2 人体の自然対流熱伝達率—括弧内は標準偏差

部位	自然対流熱伝達率 W/m ² °C					
	30°C	本研究 25°C	20°C	市原ら	de Dear et al.	Nishi & Gagge
前額	3.6 (6.0)	1.6 (2.6)	1.6 (2.2)	7.7	3.7	3.2
臍	3.4 (1.0)	2.9 (1.1)	3.1 (1.4)	4.9	2.8	2.5
臍分布	4.4 (1.3)	3.8 (1.5)	4.1 (1.9)	6.1	3.8	3.9
前膊外	5.5 (1.7)	5.6 (1.0)	5.3 (1.3)	6.3	4.5	4.6
前膊外分布	9.4 (2.8)	9.5 (1.7)	9.0 (2.2)	4.8	3.7	2.8
手背	4.0 (1.6)	4.2 (1.2)	4.2 (1.5)	3.5	4	3.7
大腿	2.7 (0.6)	2.9 (0.5)	3.6 (0.5)	3.5	4.2	—
大腿分布	4.8 (1.2)	5.3 (0.9)	6.5 (0.9)	4.3	3.3	3.1
下腿	4.9 (0.7)	5.5 (0.6)	5.6 (0.5)			
下腿分布	7.4 (1.0)	8.2 (0.9)	8.5 (0.7)			
足背	3.0 (3.0)	4.2 (3.4)	4.8 (3.7)			
全身	3.8 (0.6)	3.7 (0.4)	3.9 (0.5)			
全身分布	5.4 (0.7)	5.3 (0.5)	5.7 (0.7)			

人体各部位の皮膚温と気温との温度差(ΔT)に対する、人体各部位の自然対流熱伝達率(hc)および分布を考慮した、部位の自然対流熱伝達率(hc)との関係を、それぞれ図3-4-3(a)から図3-4-3(g)に示す。気温は、前額では床上150cm、臍、前膊外、手背、大腿では床上80cm、下腿、足背では床上10cmの測定値を用いた。図中には、椅座人体の部位自然対流熱伝達率を求めた、既往の研究、および単純立体に対する無次元式より導出した、算定式(自然対流、層流)を併せてプロットした。なおNishi and Gagge⁸⁾の論文には、設定気温(30°C)の記載はあったが、皮膚温に関する記載はなかったため、本研究の30°C条件で得られた、各部位皮膚温の平均値を用いて、皮膚温と気温との温度差とした。

図3-4-3(a)に示す、前額における自然対流熱伝達率は、散らばりが大きく、明確な傾向が認められなかった。また試算した回帰式によると、温度差に対し、自然対流熱伝達率は負の勾配となった。頭部を直径0.25mの球と仮定した場合、平均自然対流熱伝達率⁹⁾は、 $hc=1.80 \Delta T^{0.28}$ と算定される。本研究の回帰式は、算定式とは異なる結果となったが、今回、頭髪で前額が覆われた被験者が多数を占め、前額の対流による熱交換量は、頭髪で覆われた状態で測定されたため、このような結果になったと考えられる。頭髪で前額が覆われていない、被験者MA(図中凡例●)のデータだけを取り出すと、温度差に対する自然対流熱伝達率の回帰式は、正の勾配となる。また、被験者MAの回帰式は、球の算定式とほぼ等しくなった。前額に熱流計を貼付し、頭部自然対流熱伝達率の代表点とする場合、頭髪の取り扱いなど、検討の余地があると考えられる。既往の研究と比較すると、頭髪で覆われていない、被験者MAの自然対流熱伝達率は、ナフタレン昇華法によるNishi and Gagge⁸⁾の結果、サーマルマネキンによるde Dear et al.⁷⁾の結果とほぼ等しかった。

図3-4-3(b)に示す、臍における自然対流熱伝達率は、前額同様、明確な傾向が認められなかったが、温度差の増加とともに、散らばりが大きくなる傾向が、窺える。これは、気温条件を下げていく実験手順から、皮膚温が安定した状態ではなかったことが考えられ、さらに、被験者の姿勢の変化による影響などが、考えられる。回帰式によると、温度差にたいし自然対流熱伝達率は、負の勾配となった。躯幹を、長さ0.6mの垂直円柱と仮定した場合、平均自然対流熱伝達率⁹⁾は、 $hc=1.51 \Delta T^{0.25}$ と算定される。本研究の回帰式は、垂直円柱の算定式とは異なるが、椅座のため臍部直下には大腿が前方にあり、空気流動の乱れも、一因として推察される。皮膚温と気温との温度差が、ほぼ等しい条件で、本研究の結果とNishi and Gaggeの結果を比較すると、3W/m²°C近辺に本研究のデータが多く分布し、Nishi and Gaggeの結果より、僅かに高い。

図3-4-3(c)に示す前膊外における自然対流熱伝達率は、およそ4~6W/m²°C近辺に、分布を考慮した自然対流熱伝達率は、おおむね9~11W/m²°C近辺に分

布している。回帰式は負の勾配となったが、それぞれ $5.5\text{W}/\text{m}^2\text{C}$ 、 $9.0\text{W}/\text{m}^2\text{C}$ 程度で、ほぼ一定であると考えられる。前腕を、長さ 0.25m の垂直円柱と仮定すれば、平均自然対流熱伝達率は、 $hc=1.88 \Delta T^{0.25}$ と算定される。本研究の回帰式は、垂直円柱の算定式と異なる結果となった。李ら¹⁰⁾によると、立位の人体モデルより算出された、前腕の自然対流熱伝達率は、放熱量が小さい場合、ほとんど差がないと報告している。本研究も、同様の結果になったことが考えられる。回帰式より既往の研究と比較すると、前膊外はサーマルマネキンによる市原ら⁶⁾の結果とほぼ等しい結果となった。

図3-4-3(d)に示す、手背における自然対流熱伝達率は、若干散らばりが大きいですが、温度差の増加に伴い自然対流熱伝達率が、大きくなる傾向が窺える。手背を長さ 0.15m の垂直平板と仮定すると平均自然対流熱伝達率⁹⁾は、 $hc=2.83 \Delta T^{0.25}$ と算定される。温度差の増分に対する自然対流熱伝達率の増分が、水平平板の算定式に比べ、回帰式は若干小さいが、本研究の回帰式は算定式とおおむね等しいと考えられる。回帰式より、既往の研究と比較すると、de Dear et al.⁷⁾の結果とほぼ等しいと考えられる。

図3-4-3(e)に示す、大腿における自然対流熱伝達率は、温度差の増加に伴い、自然対流熱伝達率が大きくなる傾向が認められる。大腿を、直径 0.15m の水平円柱と仮定すると、平均自然対流熱伝達率⁹⁾は、 $hc=2.19 \Delta T^{0.25}$ と算定される。本研究で得られた大腿の自然対流熱伝達率の回帰式は、水平円柱の算定式と、ほぼ等しく、分布を考慮した自然対流熱伝達率の回帰式は、やや大きい結果となった。回帰式より既往の研究と比較すると、大腿の回帰式はNishi and Gagge⁸⁾およびde Dear et al.⁷⁾の結果とおおむね等しく、分布を考慮した大腿の回帰式は、市原ら⁶⁾の結果とほぼ等しい。

図3-4-3(f)に示す、下腿における自然対流熱伝達率は、温度差の増加に伴い、自然対流熱伝達率が大きくなる傾向が認められる。下腿を長さ 0.5m の垂直円柱と仮定した場合、平均自然対流熱伝達率⁹⁾は、 $hc=1.58 \Delta T^{0.25}$ と算定される。本研究の回帰式の勾配は、垂直円柱の算定式に比べ、僅かに小さい。これは前述の前膊外同様、李ら¹⁰⁾は下腿の自然対流熱伝達率は、放熱量が小さい場合、ほとんど差がないと報告しており、本研究も同様の結果になったことが推察される。本研究の下腿および分布を考慮した下腿の自然対流熱伝達率は、既往の研究に比べ、若干大きく、また垂直円柱の算定式に比べ大きい結果となった。

図3-4-3(g)に示す、足背における自然対流熱伝達率は、温度差の増加に伴い、自然対流熱伝達率が大きくなる傾向が認められる。足背を、長さ 0.25m の水平平板と仮定した場合、平均自然対流熱伝達率⁹⁾は、 $hc=1.97 \Delta T^{0.25}$ と算定される。本研究の回帰式の勾配が、垂直平板の算定式に比べ、若干大きいですが、近似した結果が得られたと考えられる。回帰式より、既往の研究と比較すると、市原ら⁶⁾、de Dear et al.⁷⁾の結果とほぼ等しいと考えられる。

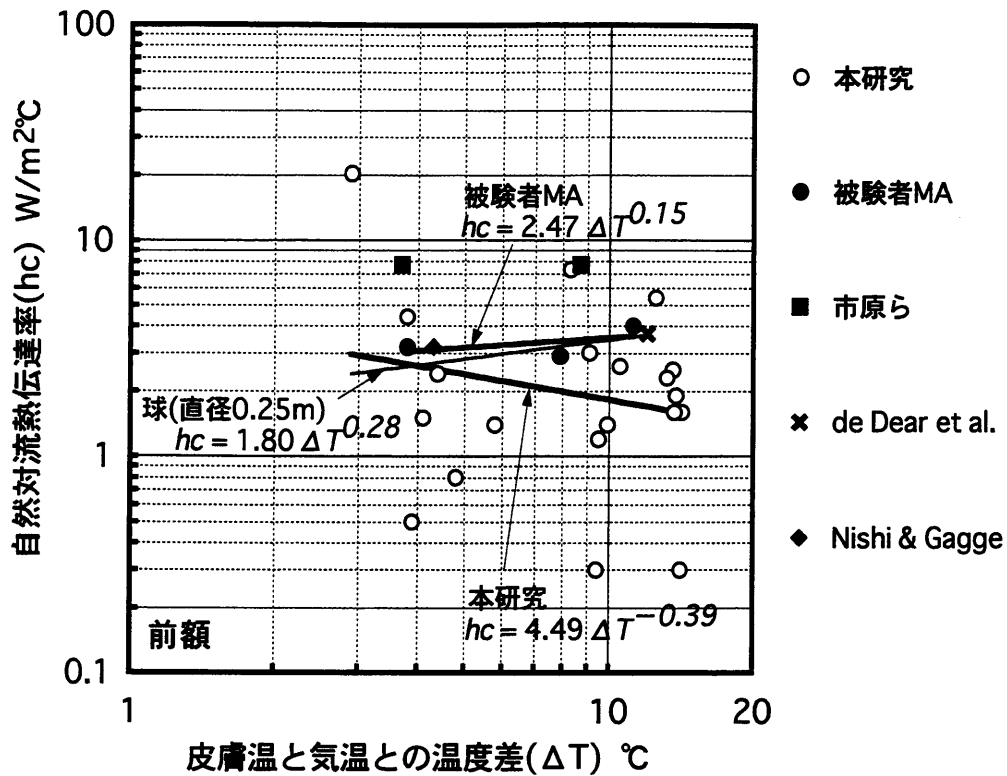


図 3-4-3 (a) 前額における自然対流熱伝達率

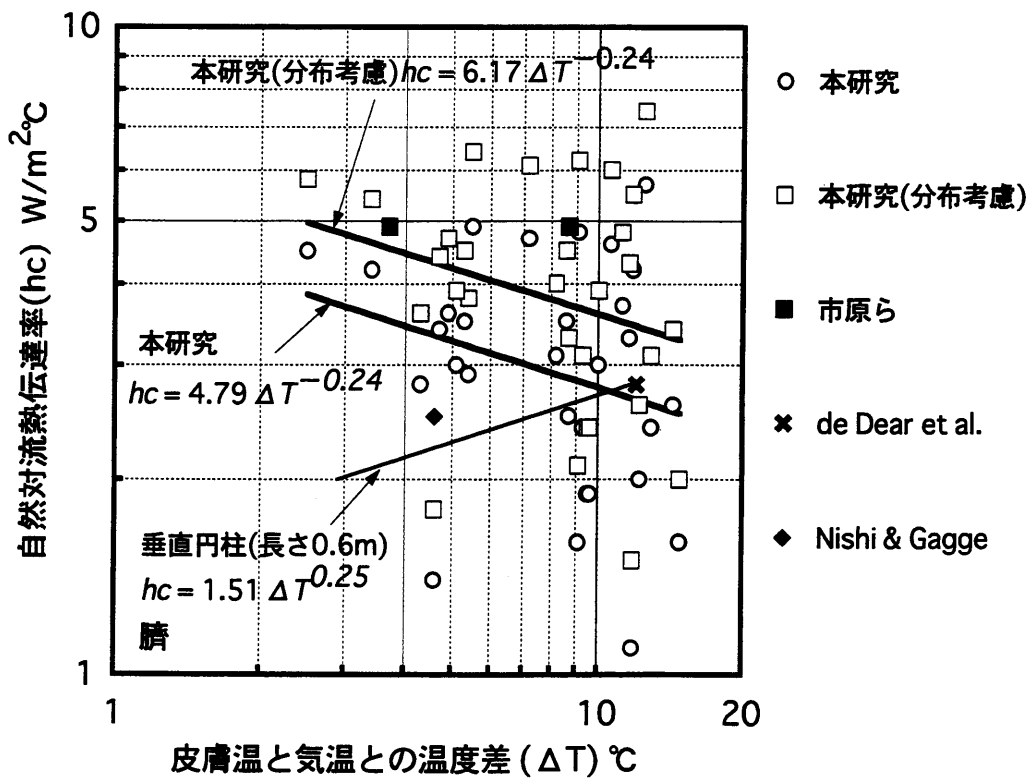


図 3-4-3 (b) 臍における自然対流熱伝達率

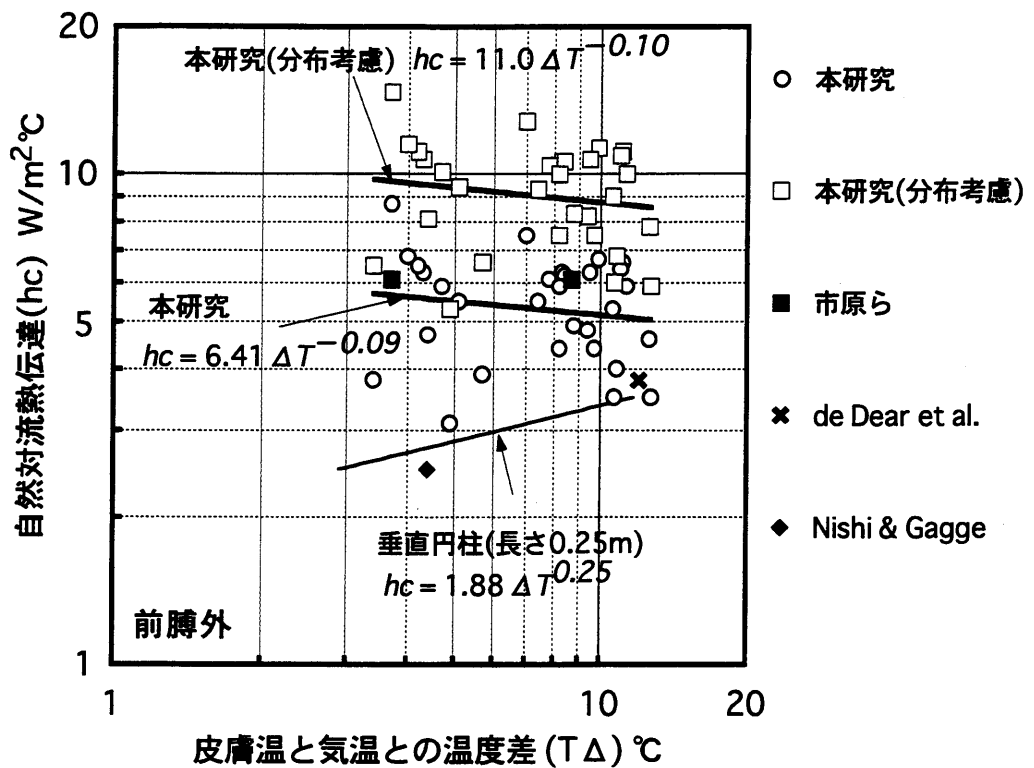


図 3-4-3 (c) 前膊外における自然対流熱伝達率

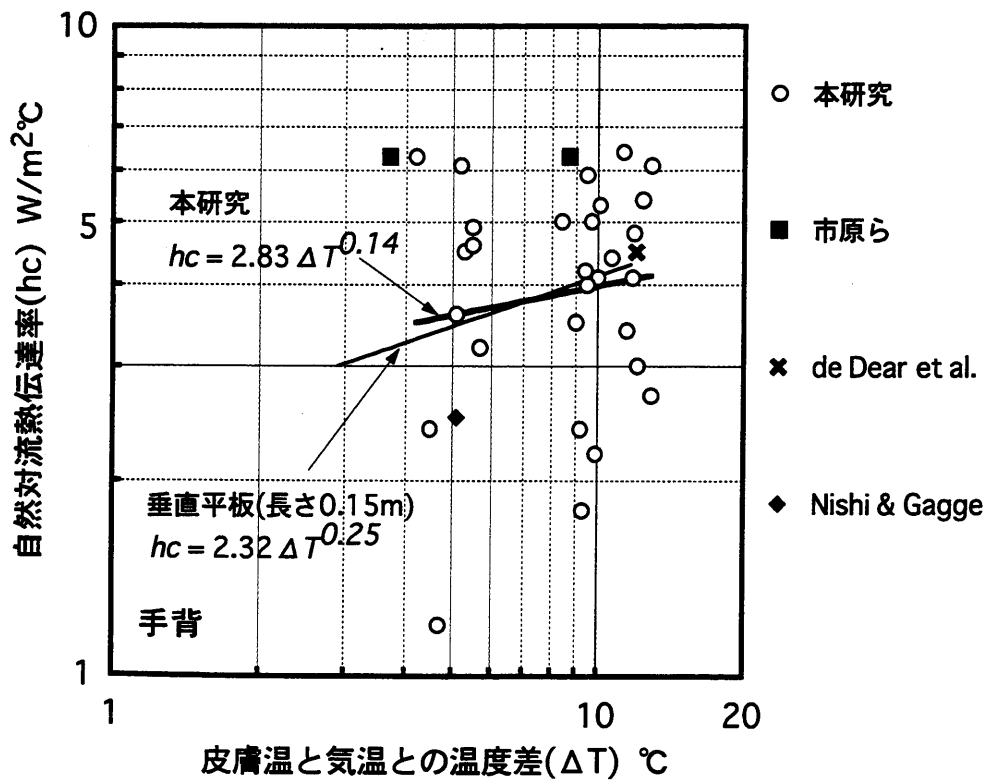


図 3-4-3 (d) 手背における自然対流熱伝達率

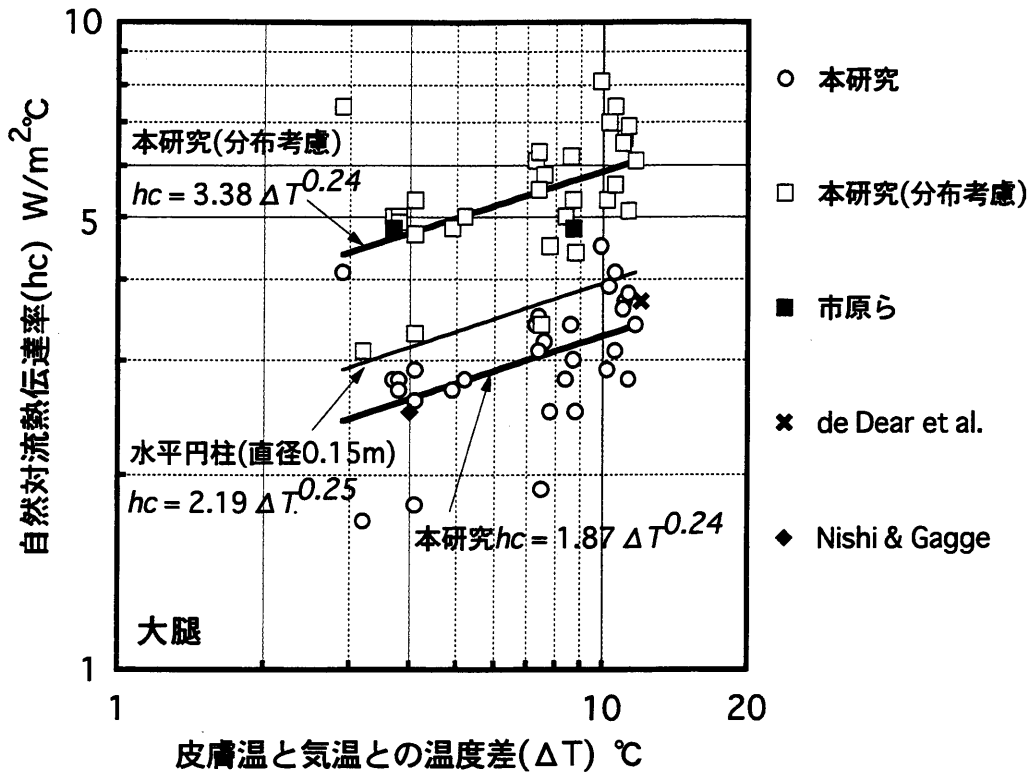


図 3-4-3 (e) 大腿における自然対流熱伝達率

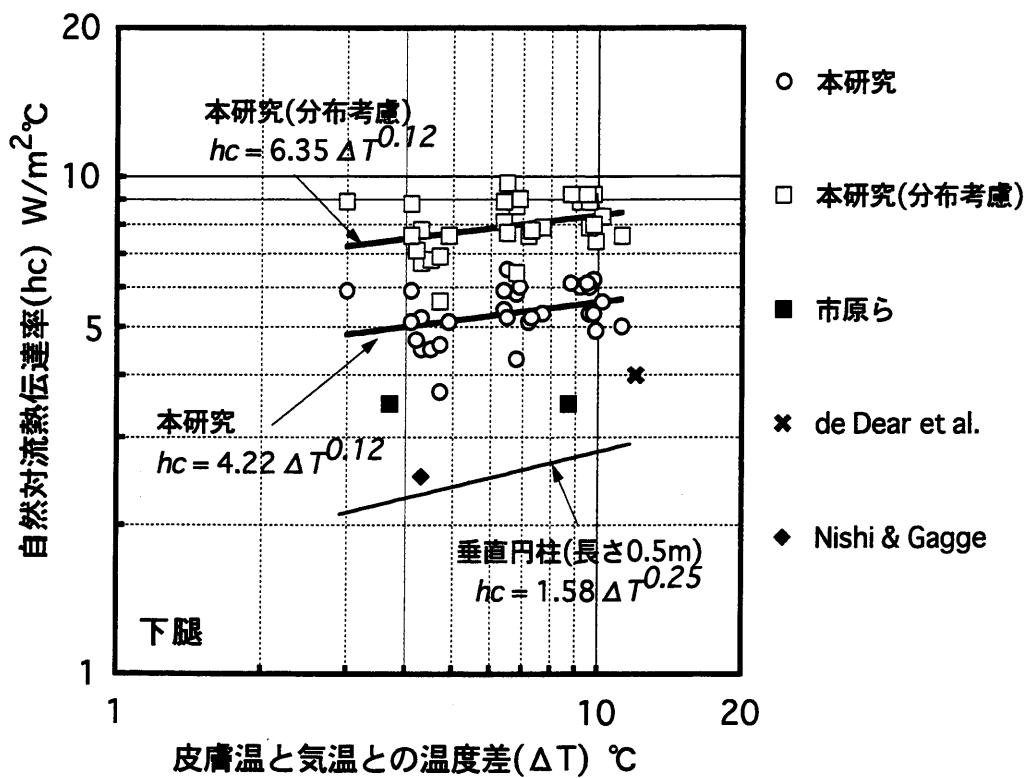


図 3-4-3 (f) 下腿における自然対流熱伝達率

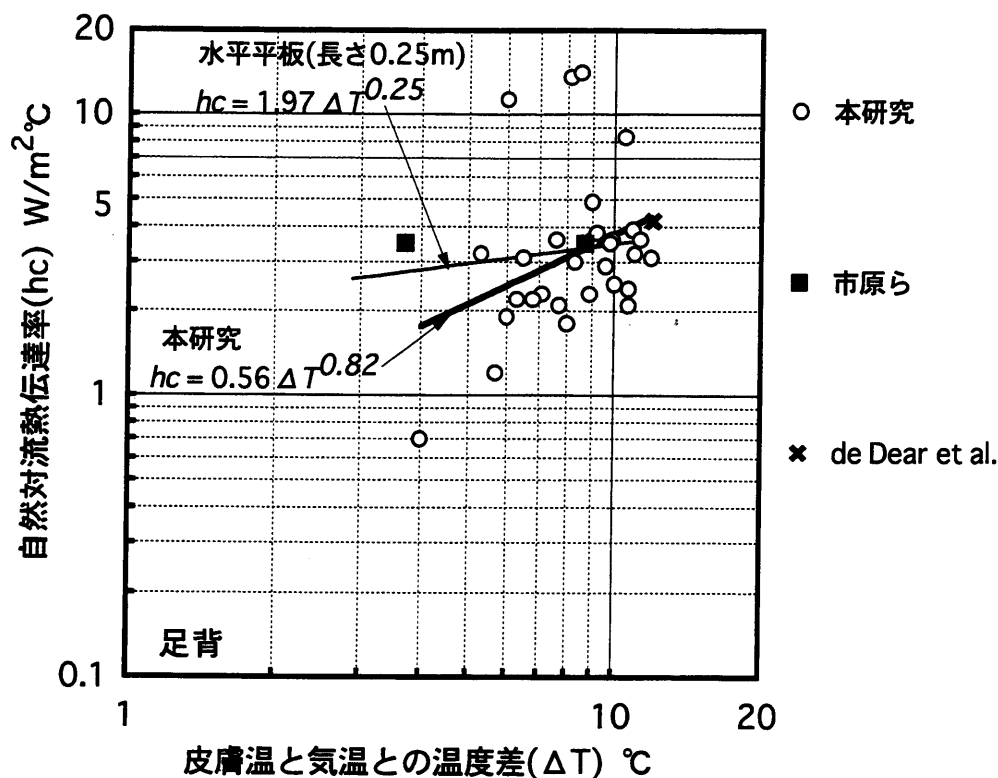


図 3-4-3 (g) 足背における自然対流熱伝達率

平均皮膚温と気温（床上80cm）との温度差(ΔT)に対する、人体全身の自然対流熱伝達率(hc)および、分布を考慮した人体全身の自然対流熱伝達率(hc)の関係を、図3-4-4に示す。椅座人体の自然対流熱伝達率を求めた、既往の研究データを併せてプロットした。本研究での人体全身の自然対流熱伝達率は3~4W/m²°C付近に分布し、分布を考慮した人体自然対流熱伝達率は、5~6W/m²°C付近に分布している。回帰式によると、人体全身および、分布を考慮した人体全身の自然対流熱伝達率は、緩い正の勾配をもつ傾向となった。本研究の気温条件である、20~30°Cの範囲で、回帰式より、人体全身の自然対流熱伝達率を求めると、3.7~3.8W/m²°Cとなり、また分布を考慮した人体全身の自然対流熱伝達率は5.2~5.5W/m²°Cとなり、ほぼ一定であると考えられる。本研究の回帰式より、既往の研究と比較すると人体を球と仮定したRapp¹¹⁾、サーマルマネキンによる市原ら⁶⁾の結果より若干小さく、サーマルマネキンによる田辺ら¹²⁾、direct calorimetryによるMitchell¹³⁾、ナフタレン昇華法によるNishi and Gagge⁸⁾、サーマルマネキンによるde Dear et al. ⁷⁾の結果より若干大きい。partitional calorimetryによるNielsen and Pedersen¹⁴⁾の結果とは、温度差6.5°C付近ではほぼ等しくなった。本研究とほぼ同様の手法で求められた、石垣ら¹⁵⁾の結果と比較すると、人体全身、および分布を考慮した人体全身の自然対流熱伝達率は、大きい結果と

なった。これは放射による熱交換量の算定方法の違いに起因していると考えられる。分布を考慮した人体全身の自然対流熱伝達率は、すべての既往の研究に比べて大きな値となった。これは今後、検討の余地があると考えられる。

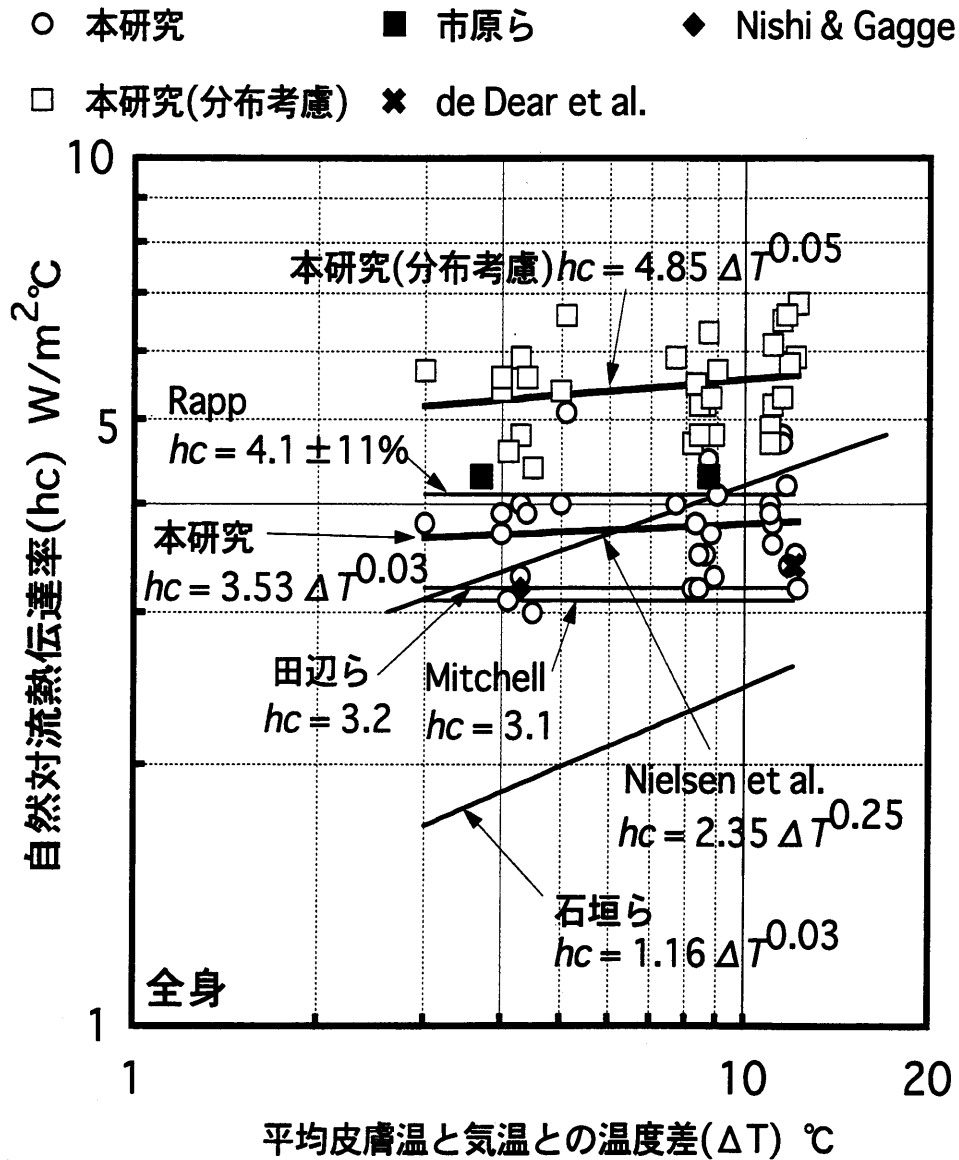


図 3-4-4 人体全身の自然対流熱伝達率

3.5 摘要

本章では、光源の色温度、照度が温熱環境に因る、人体生理・心理反応に及ぼす影響を明らかにする際、作用温度条件を適切に設定するために必要とされる、人体の自然対流熱伝達率および放射熱伝達率を被験者を用いた実測より提案した。また、人体局所と光源との間の熱交換量が、人体生理・心理反応に及ぼす影響を明らかにするために、人体局所の対流および放射熱伝達率を実測より提案した。さらに、対流による熱交換量に分布があると考えられる、人体部位の周径方向の対流および放射熱伝達率の分布性状の把握を試みた。以下に得られた知見を記す。

1. 椅座姿勢の場合、躯幹（臍）、前腕（前膊外）、大腿、下腿における周径方向の対流・放射熱伝達率分布は均一ではなく、その分布性状を把握できた。分布があるという仮定の下での測定部位の値から、その部位における対流・放射熱伝達率の平均値を推定する係数を求めた。係数は、周径方向の部位対流・放射熱伝達率の平均値を、Hardy-DuBoisの7点法の測定位置での対流・放射熱伝達率で除して求めた。この係数を各部位の対流・放射熱伝達率に乗じることにより、分布を考慮した部位対流・放射熱伝達率とした。
2. 部位放射熱伝達率を推定した結果、前額および下腿の放射熱伝達率は他の部位に比べ大きく、臍は他の部位に比べ小さい結果となった。既往の研究と比較した結果、かなりよく一致した。
3. 部位自然対流熱伝達率を推定した結果、頭部、躯幹の皮膚温測定点である、前額、臍では、測定方法や条件に検討の余地があると考えられる。前膊外、手背、大腿、下腿、足背においては、単純立体に対する無次元式から求められた、平均自然対流熱伝達率の算定式、および既往の研究と比較した結果、かなりよく一致し、熱流計を用いて部位自然対流熱伝達率を推定することの有効性が確かめられた。
4. 熱流計を用いて部位放射熱伝達率および自然対流熱伝達率を推定し、それらを面積加重平均することによって、人体全身の放射熱伝達率および自然対流熱伝達率を算定した。既往の研究と比較した結果、人体全身の放射熱伝達率および人体全身の自然対流熱伝達率は、概ね妥当な値がえられたと考えられる。分布を考慮した人体全身の放射および自然対流熱伝達率は、既往の研究と若干値が異なり、今後、検討の余地があると考えられる。気温20℃～30℃の範囲では、本研究の結果より、人体全身の放射熱伝達率は4.4W/m²℃、分布を考慮した人体全身の放射熱伝達率は3.9W/m²℃であった。人体全身の自然対流熱伝達率は、3.7～3.8W/m²℃、分布を考慮した人体全身の自然対流熱伝達率は、5.2～5.5W/m²℃となり、ほぼ一定であると考えられる。

第3章引用文献

- 1) Hardy, J. D. and DuBois, E. F. : The Technic of measuring radiation and convection, *Journal of Nutrition*, Vol. 15, No. 5, pp. 461-475, 1938
- 2) 藏澄美仁, 堀越哲美, 土川忠浩, 松原斎樹 : 日本人の体表面積に関する研究, *日本生気象学会雑誌*, 第31巻, 第1号, pp. 5-29, 1994
- 3) Horikoshi, T. and Kobayashi, Y. : Configuration Factors between a Rectangular Solid as a Model of the Human Body and Rectangular Planes, for Evaluation of the Influence of Thermal Radiation on the Human Body II. Characteristics of Configuration Factors for the Rectangular Solids, *日本建築学会計画系論文報告集*, 第267号, pp. 91-101, 1978
- 4) Gagge, A. P., Winslow, C. -E. A. and Herrington, L. P. : The influence of clothing on physiological reactions of the human body to varying environmental temperatures, *American Journal of Physiology*, Vol. 124, p. 30, 1938
- 5) 中山昭雄 編 : 温熱生理学, 理工学社, 1981
- 6) 市原真希, 齋藤正文, 西村美加, 田辺新一 : サーマルマネキンを用いた立位・座位人体各部位の放射・対流熱伝達率の測定, *日本建築学会計画系論文報告集*, 第501号, pp. 45-51, 1997
- 7) de Dear, R. J., Arens, E., Hui, Z. and Oguro, M. : Convective and radiative heat transfer coefficients for individual human body segments, *International Journal of Biometeorology*, Vol. 40, pp. 141-156, 1997
- 8) Nishi, Y. and Gagge, A. P. : Direct evaluation of convective heat transfer coefficient by naphthalene sublimation, *Journal of Applied Physiology*, Vol. 29, No. 6, pp. 830-838, 1970
- 9) 日本機会学会 : 伝熱工学資料 (改訂第4版), 日本機会学会, 1986
- 10) 李徹球, 澤地孝男, 本間宏 : 加熱円柱組合せ人体モデルによる人体周辺の自然対流の性状と人体の部位別自然対流熱伝達率に関する実測結果, *日本建築学会計画系論文報告集*, 第416号, pp. 25-34, 1990
- 11) Rapp, G. M. : Convective heat transfer and convective coefficients of nude man, cylinders and spheres at low air velocities, *ASHRAE Transaction*, No. 2264, pp. 75-87, 1973
- 12) 田辺新一, 長谷部ヤエ : 皮膚温度可変型サーマルマネキンによる室内環境評価法に関する研究, *日本建築学会計画系論文報告集*, 第448号, pp. 1-8, 1993

- 13) Mitchell, D. : Convective heat loss from man and other animals, in heat loss from animals and man, Butterworth, London, 1974
- 14) Nielsen, M. and Pedersen, L.: Studies on the heat loss by radiation and convection from the clothed human body, Acta phys. Scandinav., Vol. 27, pp. 272-294, 1952
- 15) 石垣秀圭, 堀越哲美, 植松智樹, 佐橋政人, 土川忠浩, 持田徹, 稗田哲也, 磯田憲生, 久保博子: 人体の対流熱伝達率に関する実験的研究, 人間-生活環境系国際会議, pp. 279-282, 1991

第4章 人工光源の色温度，照度が温熱環境に因る 人体生理・心理反応に及ぼす影響

4.1 緒言

4.2 実験計画

4.2.1 実験条件

4.2.2 実験室概要

4.2.3 被験者

4.2.4 実験手順

4.2.5 測定項目および測定機器

4.3 実験結果

4.3.1 実験環境の測定結果

4.3.2 皮膚温・舌下温・平均皮膚温の経時変動

4.3.3 人体各部位および全身の経路別熱交換量

4.3.3.1 人体各部位での対流による熱交換量

4.3.3.2 人体各部位での放射による熱交換量

4.3.3.3 人体全身の経路別熱交換量

4.4 考察

4.4.1 人体生理反応としての皮膚温に及ぼす影響

4.4.2 人体生理反応としての経路別熱交換量に及ぼす影響

4.4.3 人体心理反応としての温冷感に及ぼす影響

4.4.3.1 作用温度 25℃条件

4.4.3.2 作用温度 28℃条件

4.4.3.3 作用温度 31℃条件

4.4.3.4 温冷感の総括

4.4.4 人体心理反応としての快適感に及ぼす影響

4.4.4.1 作用温度 25℃条件

4.4.4.2 作用温度 28℃条件

4.4.4.3 作用温度 31℃条件

4.4.4.4 快適感の総括

4.4.5 温冷感と快適感の関係

4.5 摘要

第4章引用文献

4.1 緒言

本章においては、人工光源として最も普及している、白色蛍光ランプと白熱電球を用い、青年男子4名による被験者実験を行い、人工光源の色温度および照度が、人体生理・心理反応に及ぼす温熱的な影響を、明らかにすることを目的としている。人体と環境との間の対流および放射熱交換量を、物理的に評価している温熱環境指標である、作用温度により温熱環境条件を設定し、人体生理反応としての皮膚温、対流および放射熱交換量を測定し、人体心理反応としての温冷感、快適感などを測定する。測定されたデータより、人工光源の色温度、照度が温熱環境に因る人体生理・心理反応に及ぼす影響を検討する。さらに日本人を対象とした、心地よい光源の色温度と照度の関係を併せて検討する。

4.2 実験計画

4.2.1 実験条件

実験条件を表4-2-1に示す。実験室の環境条件は、以下の通りである。暑くも寒くもない熱的中立環境条件として、作用温度28℃¹⁾を、熱的中立より若干寒い側、暑い側の条件をそれぞれ、作用温度25℃、31℃と設定した。照度は、JISによる照度基準(JIS Z 9110)から選定した。高照度条件として、事務所、住宅等で細かい視作業を行う場合の照度基準から、1000lxと設定した。低照度条件として、事務所の執務室以外、また住宅の全般照明の照度基準から、100lxと設定した。そして、それらの中間的な、照度条件として事務所の執務室の照度基準から500lxと設定した。光源は、日本で最も普及している人工光源²⁾である、白色蛍光ランプ(色温度4200K)と白熱電球(色温度2850K)の2種類とした。相対湿度は、55%を目標に制御した。気流速度は、自然対流と考えられる、0.1m/s以下となるよう制御した。平均放射温度は、気温と等しくなるようにした。すべての被験者にたいして、それらを組み合わせ、計18条件を曝露した。曝露前

表 4-2-1 実験条件

	作用温度	照 度			相対湿度	気流速度	平均放射温度
		100 lx	500 lx	1000 lx			
実験室	25℃	25FD	25FN	25FB	≒55%	≦0.1m/s	≒気温
蛍光ランプ	28℃	28FD	28FN	28FB			
(4200K)	31℃	31FD	31FN	31FB			
実験室	25℃	25ID	25IN	25IB	≒55%	≦0.1m/s	≒気温
白熱電球	28℃	28ID	28IN	28IB			
(2850K)	31℃	31ID	31IN	31IB			
前 室					≒55%	≦0.1m/s	≒気温
蛍光ランプ	28℃		500lx				
(4200K)							

の温熱環境の履歴を、統一することを目的とした、前室の環境条件は、作用温度28℃、照度500lx、光源は白色蛍光ランプとした。相対湿度、気流速度、平均放射温度は実験室と同一条件とした。

4.2.2 実験室概要

実験は、1995年8月7日～9月26日の期間に、名古屋工業大学環境実験室内で実施した。実験室、前室概略図および照明器具配置図を図4-2-1に示す。環境実験室内にアルミ製のアングルで、寸法2800×2400×2000mmのブースを2基作製し、それぞれ実験室、前室とした。ブースの天井高は、人工光源の影響を、より顕著にするために、若干低めに設定した。壁温、天井温、床温が、気温と等しくなるように灰色(N5.5)のカーテンでブース周囲を覆った。実験室、前室とも温湿度は、パッケージ型エアコンを設置し、制御した。照度レベルは、蛍光ランプの場合、蛍光ランプの灯数で調整した。100lx条件は10W白色蛍光ランプを2灯、500lx条件は40W白色蛍光ランプを2灯、1000lx条件は40W白色蛍光ランプを4灯使用した。白熱電球の場合、60W白熱電球14灯を用い、スライダックを用いて、照度レベルを調整した。

4.2.3 被験者

被験者は、生理的・心理的に比較的現象を捉えやすい安定状態であること、さらに体型・体格形成が完成段階であることを考慮して、健康な青年男子4名とした。被験者の身体データを表4-2-2に示す。表中の体表面積の算出には、日本人を対象とした算出式である、藏澄らの式³⁾を用いた。本研究は、光源の色温度、照度の温熱的影響の基本性状を把握することを目的としているため、着衣熱抵抗などの外的要因を、なるべく少なくするため、着衣条件は下着のみの、ほぼ裸体とした。なお、被験者は、実験内容を理解した善意の協力者で、適切な報酬が支払われた。

4.2.4 実験手順

実験手順を図4-2-2に示す。はじめ被験者は、環境実験室入室後、設定条件下の前室にて脱衣し、下着のみの、ほぼ裸体の状態で体重を測定した。その後、前室に設置してある、実験用藤製椅子に被験者を着席させ、実験当日の食事の時間、体調などを被験者に記入させた。一方で測定機器を被験者に装着した。測定機器装着後、被験者の体重を測定し、前室にて被験者を30分間、椅座安静にさせた。30分間安静の後、再び被験者の体重を測定し、実験室に被験者を入室させ、各実験条件に椅座安静状態で60分間曝露させた。曝露終了後、測定装置を装着した状態と下着のみの、ほぼ裸体状態で、被験者の体重を測定し、実験を終了した。

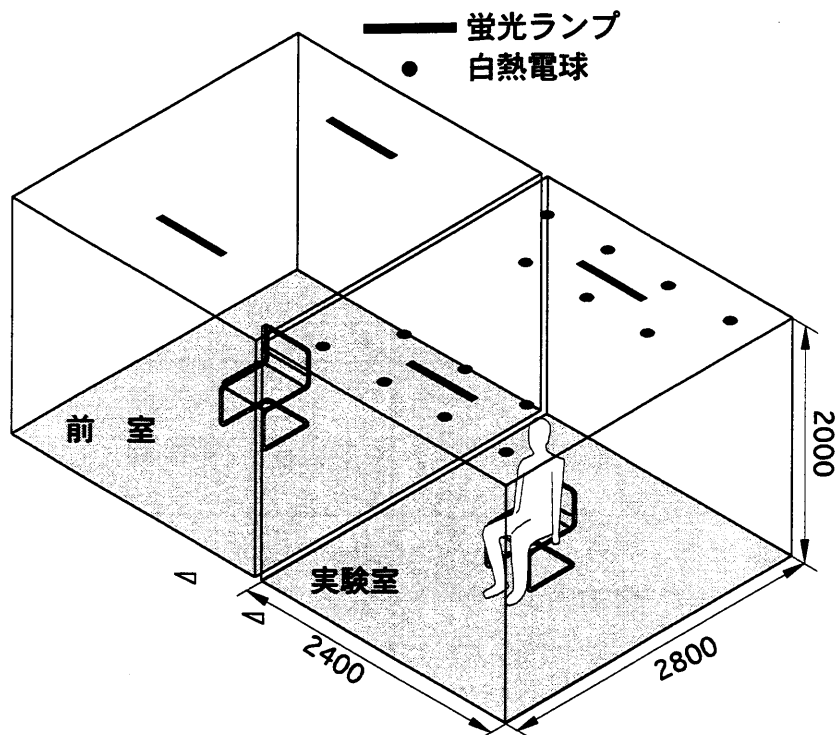


図 4-2-1 実験室、前室概略図および照明器具配置図

表 4-2-2 被験者身体データ

被験者	身長 cm	体重 kg	体表面積* m ²	年齢 歳	出身地	性別
MF	177.5	69.9	1.85	21	愛知県	男性
MO	176.7	55.5	1.69	21	愛知県	
TI	166.5	60.3	1.67	23	愛知県	
YM	167.5	55.4	1.62	22	福井県	

* 藏澄らの算出式 $S = 100.315W^{0.383}H^{0.693}$ W : 体重 kg H : 身長 cm

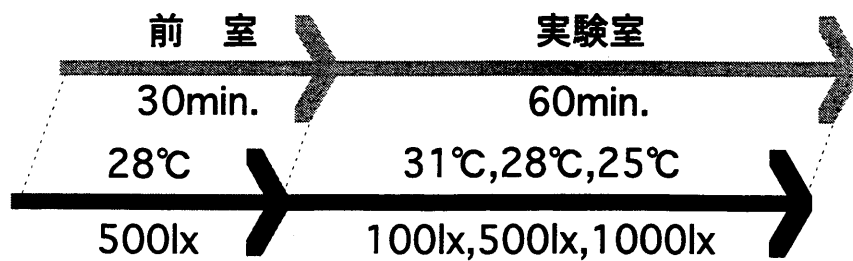


図 4-2-2 実験手順

実験は1回1名ずつで実施した。実験中、被験者に何かを凝視するような教示は行わず、また読書は禁じた。飲食が実験にできるだけ影響を及ぼさないように配慮し、環境実験室入室1時間前までに、飲食を済ませるように依頼した。実験は被験者1人につき1日1回とした。実験は9:30～12:00, 13:30～15:00, 15:30～17:00の時間帯に実施した。被験者ごとに、実験条件、実験実施時間が規則的にならないよう、なるべくランダムに実験を行った。

4.2.5 測定項目および測定機器

環境条件の測定項目を表4-2-3に示す。前室および実験室の乾球、湿球温度はアスマン通風乾湿球湿度計の球部に0.3mmφT型熱電対を貼付し、30秒間隔で自動測定した。気流速度は熱式風速計を用いて、1分間隔で自動測定した。壁面、天井面、床面および光源の表面温度は0.3mmφT型熱電対を貼付して、30秒間隔で自動測定した。グローブ温度はグローブ温度計を用い、0.3mmφT型熱電対にて、30秒間隔で自動測定した。上述の測定項目の測定高さは、前室、実験室とも椅座人体の中心である、床上80cmとした。平均放射温度は、Horikoshi and Kobayashi⁴⁾の直方体人体モデルを用い、人体から矩形面への形態係数を求め、算出した。なお、直方体人体モデルの中心は、床上40cmとした。照度はシリコンフォトセルデジタル照度計を用い、被験者が着席する、実験室および前室中央の床上85cmの水平面照度を測定した。騒音レベルは、普通騒音計を用い、A特性の時間率騒音レベルを、実験開始前または実験終了後に、実験室および前室中央の床上85cmにおいて測定した。

人体生理反応の測定項目を表4-2-4に示す。皮膚温および熱交換量測定位置を図4-2-3に示す。人体各部位皮膚温は、Hardy-Duboisの12点法⁵⁾の各部位に0.2mmφT型熱電対を、サージカルテープで貼付し、30秒間隔で自動測定した。熱交換量は、Hardy-Duboisの7点法⁵⁾の各部位に、熱流計を人体皮膚表面との

表 4-2-3 環境条件の測定項目および測定方法

測定項目	測定機器	測定位置
気 温	アスマン通風乾湿球湿度計 0.3mmφT型熱電対	床上80cm
相対湿度 (湿球温度)	アスマン通風乾湿球湿度計 0.3mmφT型熱電対	床上80cm
気流速度	熱式風速計	床上80cm
グローブ温度	グローブ温度計	床上80cm
表面温度	0.3mmφT型熱電対	壁面・天井面・床面・光源
水平面照度	シリコンフォトセルデジタル照度計	床上85cm
騒音レベル	普通騒音計 (A特性)	床上85cm

間で空隙が生じないように留意して、サージカルテープで貼付し、多点式ペンレコーダにて、前室安静時から実験室曝露終了後まで、連続測定した。舌下温は、0.2mm φ T型熱電対を、口腔内舌下に含ませ、30秒間隔で自動測定した。

人体心理反応は、図4-2-4に示す、申告用紙の直線評定尺度⁶⁾ および数値評定尺度を用いて測定した。測定項目は、温冷感、暖涼感、快適感、気流感、明るさ感、乾湿感、放射感であり、5分間隔で被験者自身に記入させた。被験者には、直線評定尺度の評定方法として、例えば温冷感であれば、尺度の両極は暑い、寒い
の極限を示すなど、すべての測定項目について評定方法を教示した。また快適感
は、室内全体から受ける印象を評価することを教示した。直線評定尺度は統計解
析を行う際、0から100の数値を割り当て、間隔尺度として取り扱った。

表 4-2-4 人体生理反応の測定項目および測定方法

測定項目	測定機器	測定位置
皮膚温	0.2mm φ T型熱電対	Hardy-DuBoisの12点
舌下温	0.2mm φ T型熱電対	口腔舌下
熱交換量	熱電堆式熱流計	Hardy-DuBoisの7点
体重減少量	デジタル台秤	

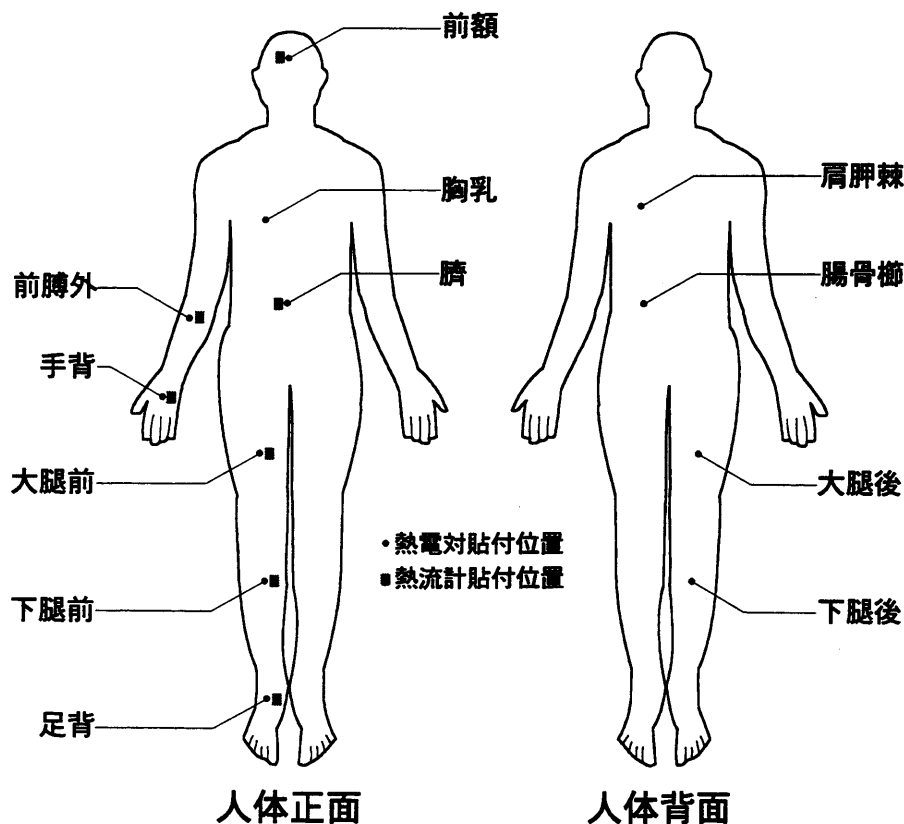


図 4-2-3 皮膚温および熱交換量測定位置

申告用紙	
1995年 月 日 時 分 名前 下記の項目にあなたの感じる度合いについて線分上は印を付け、 数字には○をつけて下さい。	
暑い ←————— 温冷感 —————→ 寒い _____	感じない ←————— 気流感 —————→ 感じる _____
暑い ←————— 寒い 3 2 1 0 -1 -2 -3	感じない ←————— 感じる 1 2 3 4
涼しい ←————— 暖涼感 —————→ 暖かい _____	暗い ←————— 明るさ感 —————→ 明るい _____
涼しい ←————— 暖かい -3 -2 -1 0 1 2 3	暗い ←————— 明るい -3 -2 -1 0 1 2 3
不快 ←————— 快適感 —————→ 快適 _____	湿っている ←————— 乾湿感 —————→ 乾いている _____
不快 ←————— 快適 1 2 3 4	湿っている ←————— 乾いている -3 -2 -1 0 1 2 3
不快 ←————— 不快 1 2 3 4	感じない ←————— 放射感 —————→ 感じる _____
不快 ←————— 不快 1 2 3 4	感じない ←————— 感じる 1 2 3 4

図 4-2-4 申告用紙

4.3 実験結果

4.3.1 実験環境の測定結果

すべての被験者の各実験条件における前室の気温、相対湿度、平均放射温度、作用温度、照度の測定結果の平均値と標準偏差を表4-3-1に、実験室の測定結果の平均値と標準偏差を、表4-3-2に示す。標準偏差は括弧内に記述した。前室に関して、相対湿度および照度が、若干高めではあるが、ほぼ設定条件を実現できたと考えられる。実験室に関して、25℃、28℃条件では、相対湿度が若干高めであり、31℃条件においては、相対湿度が若干低めではあるが、ほぼ設定条件を実現できたと考えられる。すべての実験条件をとおして、前室、実験室における時間率騒音レベルは、50dB(A)程度であった。

4.3.2 皮膚温・舌下温・平均皮膚温の経時変動

図4-3-1に被験者MO、作用温度25℃・蛍光ランプ500lx条件(25FN)における、皮膚温・舌下温・平均皮膚温の経時変動を、一例として示す。時間は、曝露開始時間を0分とし、前室安静時間をマイナスで表記してある。皮膚温は曝露中、全ての部位で低下した。大腿、下腿、足背などの人体下肢部は、皮膚温の低下度合いが、比較的大きく、前額、胸乳、臍などの人体軀幹部は、皮膚温の低下度合いが、比較的小さい。人体が、熱的中立より若干寒い環境に曝された際に、

表 4-3-1 前室の実験環境の測定結果—括弧内は標準偏差

前室 実験条件	気温 ℃	相対湿度 %	平均放射温度 ℃	作用温度 ℃	照度 lx
25FD	28.2 (0.2)	54.6 (5.2)	28.3 (0.3)	28.3 (0.2)	528.0 (15.0)
25FN	28.0 (0.1)	60.1 (3.5)	28.2 (0.2)	28.1 (0.1)	512.8 (5.7)
25FB	28.1 (0.2)	57.9 (3.8)	28.2 (0.3)	28.2 (0.2)	510.5 (14.3)
28FD	28.1 (0.2)	62.4 (1.5)	28.4 (0.4)	28.3 (0.3)	526.0 (10.2)
28FN	28.4 (0.2)	61.8 (7.1)	29.0 (0.6)	28.8 (0.5)	518.5 (4.0)
28FB	28.2 (0.2)	55.8 (6.2)	28.4 (0.5)	28.4 (0.4)	519.5 (15.8)
31FD	28.4 (0.2)	56.3 (4.5)	28.9 (0.8)	28.7 (0.6)	513.0 (14.5)
31FN	28.3 (0.1)	63.1 (3.8)	28.5 (0.4)	28.5 (0.2)	509.8 (28.0)
31FB	28.4 (0.1)	52.2 (10.0)	29.0 (0.6)	28.8 (0.4)	507.5 (24.9)
25ID	28.1 (0.2)	51.0 (2.2)	28.3 (0.2)	28.2 (0.1)	527.3 (7.4)
25IN	28.1 (0.1)	53.5 (3.4)	28.4 (0.2)	28.3 (0.1)	524.5 (8.4)
25IB	28.2 (0.1)	59.5 (10.0)	28.1 (0.2)	28.1 (0.1)	533.0 (2.9)
28ID	27.9 (0.3)	54.1 (2.3)	28.1 (0.3)	28.0 (0.2)	524.0 (10.8)
28IN	28.2 (0.3)	58.6 (5.3)	28.2 (0.2)	28.2 (0.2)	513.0 (13.3)
28IB	28.1 (0.2)	54.0 (2.0)	28.3 (0.2)	28.2 (0.2)	520.5 (15.6)
31ID	28.2 (0.2)	56.0 (3.7)	28.3 (0.1)	28.2 (0.1)	514.8 (7.4)
31IN	28.0 (0.1)	54.9 (3.6)	28.1 (0.1)	28.1 (0.1)	519.0 (14.0)
31IB	28.2 (0.1)	51.4 (7.3)	28.2 (0.4)	28.2 (0.3)	520.3 (8.5)

表 4-3-2 実験室の実験環境の測定結果—括弧内は標準偏差

実験室 実験条件	気温 ℃	相対湿度 %	平均放射温度 ℃	作用温度 ℃	照度 lx
25FD	25.0 (0.1)	59.1 (4.7)	25.7 (0.3)	25.5 (0.2)	102.3 (2.7)
25FN	25.2 (0.2)	62.6 (5.7)	25.9 (0.4)	25.6 (0.3)	491.3 (8.3)
25FB	25.1 (0.1)	64.2 (2.6)	25.9 (0.6)	25.6 (0.3)	1029.3 (75.4)
28FD	28.0 (0.3)	60.2 (4.2)	28.3 (0.6)	28.2 (0.5)	101.3 (1.9)
28FN	28.0 (0.2)	67.1 (1.4)	28.4 (0.1)	28.3 (0.1)	505.0 (22.5)
28FB	28.1 (0.2)	57.0 (11.7)	28.4 (0.2)	28.3 (0.1)	1082.5 (26.3)
31FD	31.0 (0.1)	48.5 (4.2)	30.6 (0.4)	30.7 (0.3)	100.4 (1.3)
31FN	31.0 (0.1)	51.0 (8.7)	30.7 (0.1)	30.8 (0.1)	493.5 (8.1)
31FB	31.1 (0.1)	46.3 (3.3)	31.2 (0.3)	31.1 (0.2)	1026.3 (64.2)
25ID	24.8 (0.1)	58.3 (1.1)	25.3 (0.1)	25.1 (0.1)	102.3 (1.9)
25IN	24.8 (0.1)	56.7 (2.9)	25.5 (0.2)	25.3 (0.1)	505.0 (5.3)
25IB	24.9 (0.1)	58.2 (6.2)	25.9 (0.2)	25.6 (0.1)	1095.0 (45.1)
28ID	27.8 (0.1)	54.9 (3.1)	27.8 (0.1)	27.8 (0.1)	102.5 (3.1)
28IN	27.7 (0.1)	61.0 (5.4)	27.9 (0.1)	27.8 (0.1)	504.8 (3.6)
28IB	27.8 (0.1)	53.9 (4.3)	28.1 (0.1)	28.0 (0.1)	1072.5 (37.7)
31ID	30.8 (0.2)	49.1 (4.2)	30.9 (0.2)	30.9 (0.1)	102.5 (2.4)
31IN	30.6 (0.3)	47.8 (5.6)	30.8 (0.5)	30.7 (0.4)	503.0 (2.6)
31IB	30.0 (0.3)	50.3 (6.5)	30.1 (0.6)	30.1 (0.5)	1050.0 (25.8)

深部体温の低下を防ぐために、末梢部への血流量を減少させる体温調節機構の働きにより、下肢部の皮膚温の低下度合いが、比較的大きくなったことが考えられる。舌下温は、曝露中、36.7℃程度であり、ほぼ一定に推移した。深部体温の低下は、起こらなかったと推察される。平均皮膚温は曝露中、1.0℃程度低下した。

なお、被験者4名の皮膚温・舌下温・平均皮膚温の経時変動を、実験条件ごとに巻末の付録に添付する。

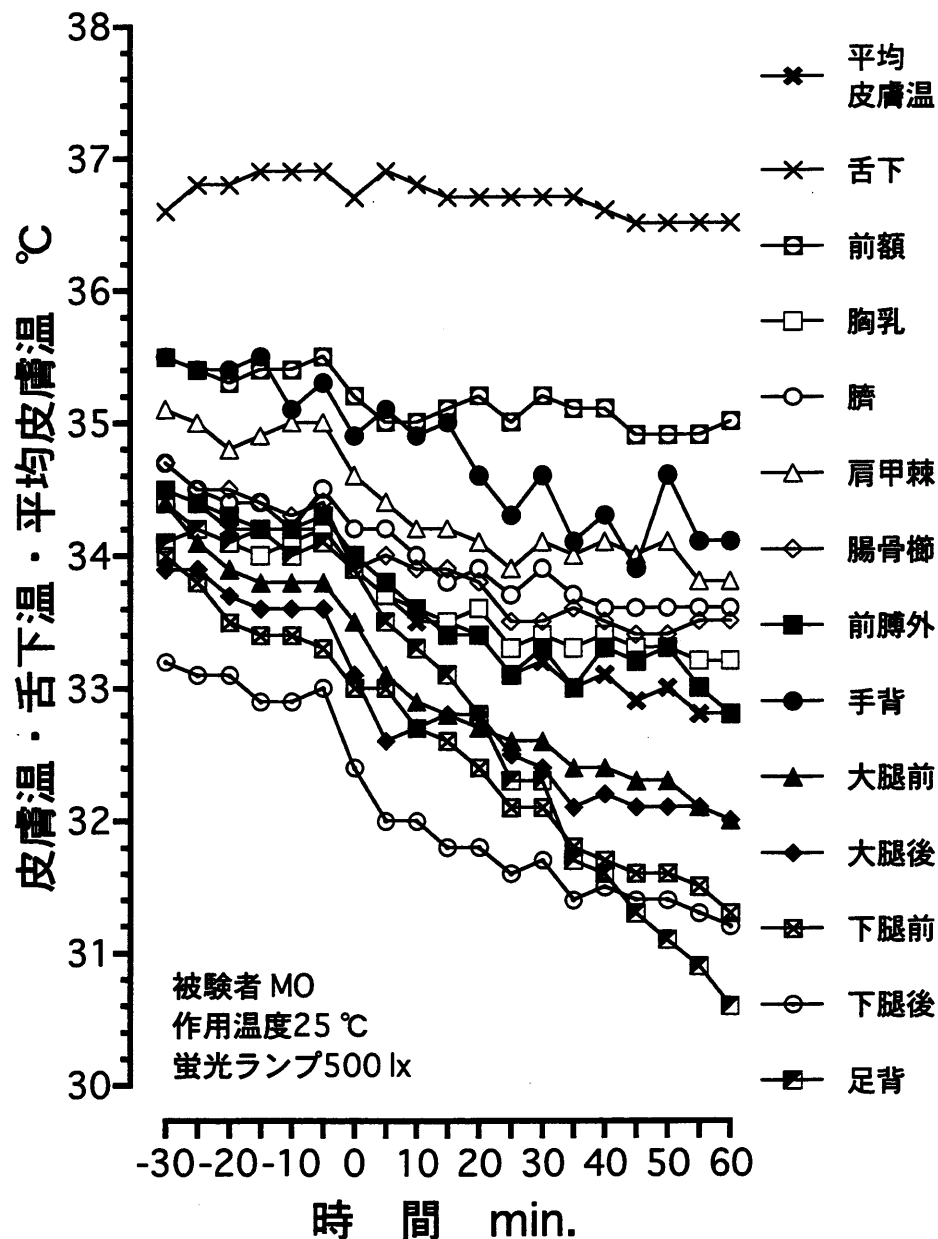


図 4-3-1 皮膚温・舌下温・平均皮膚温の経時変動
(被験者 M0, 作用温度 25℃, 蛍光ランプ 500lx)

4.3.3 人体各部位および全身の経路別熱交換量

4.3.3.1 人体各部位での対流による熱交換量

各実験条件における、人体各部位での対流による熱交換量の被験者4名の平均値と標準偏差を、図4-3-2 (a) から図4-3-2 (g) に示す。熱交換量は、曝露終了前5分間の平均である。人体各部位での対流による熱交換量を概観すると、下腿、足背での対流による熱交換量は比較的大きく、前額、臍、大腿での対流による熱交換量は比較的小さい結果となった。前額、手背、足背での熱交換量は、散らばりが大きい。作用温度条件で比較すると、作用温度が低いほど、熱交換量は

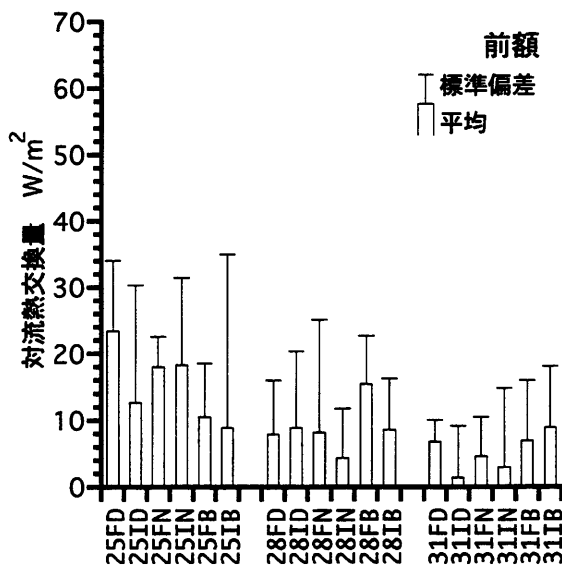


図 4-3-2(a) 前額の対流熱交換量

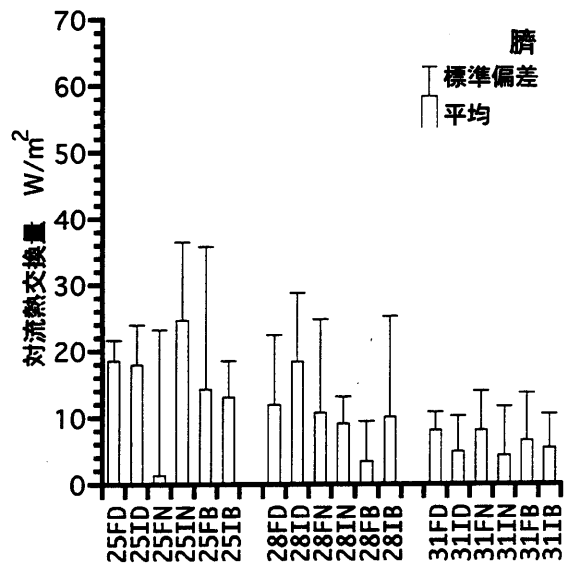


図 4-3-2(b) 臍の対流熱交換量

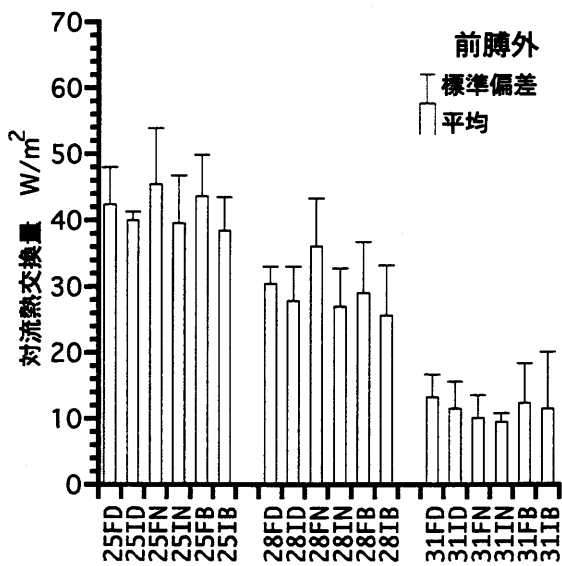


図 4-3-2(c) 前膊外の対流熱交換量

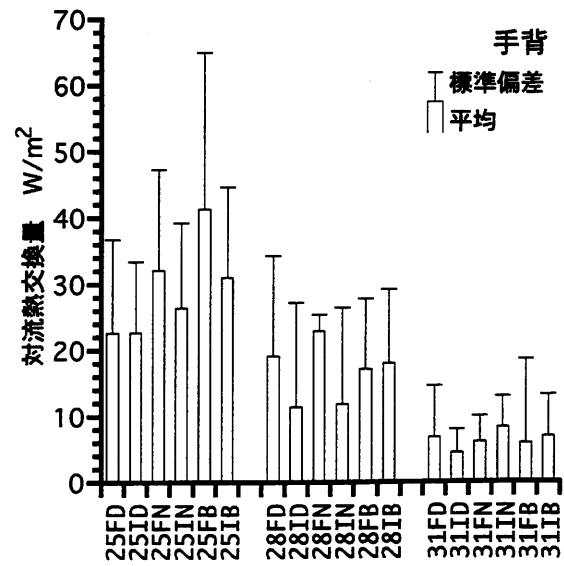


図 4-3-2(d) 手背の対流熱交換量

概ね増加した。光源の色温度 (F, I) で比較すると、白熱電球 (I) に比べ、蛍光灯 (F) での熱交換量が、概ね大きい結果となった。光源の照度 (D, N, B) による、明確な差は認められなかった。

なお、被験者4名の人体各部位での対流による熱交換量を、巻末の付録に添付する。

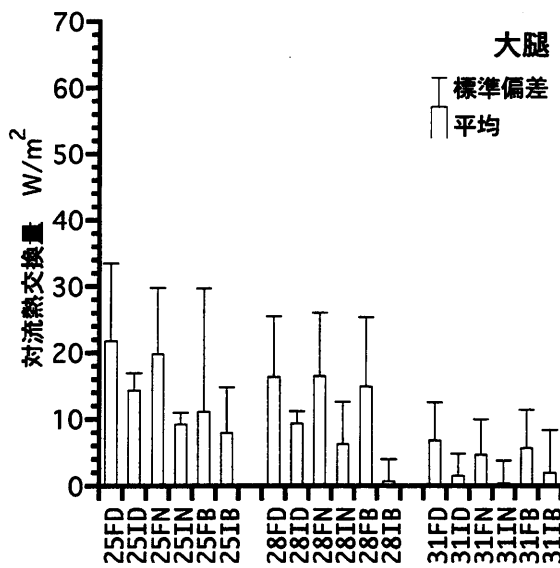


図 4-3-2(e) 大腿の対流熱交換量

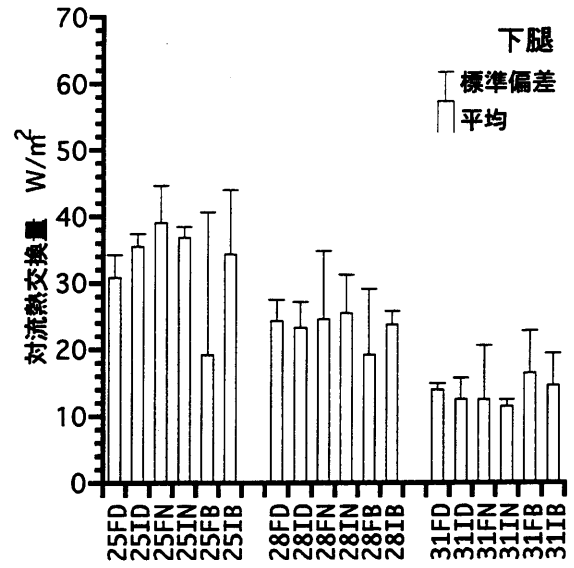


図 4-3-2(f) 下腿の対流熱交換量

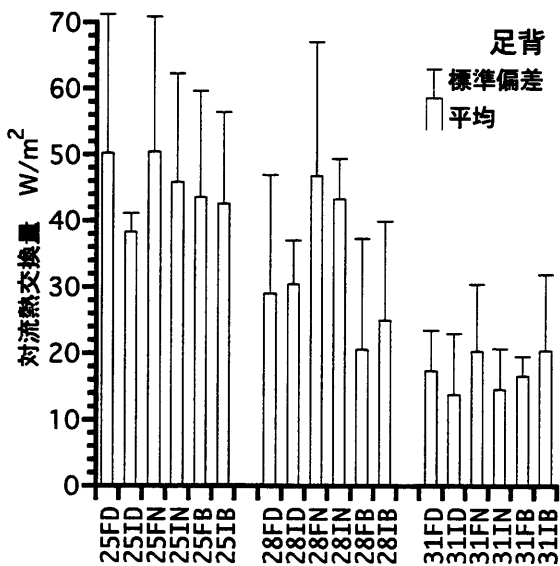


図 4-3-2(g) 足背の対流熱交換量

4.3.3.2 人体各部位での放射による熱交換量

各実験条件における、人体各部位での放射による熱交換量の被験者4名の平均値と標準偏差を、図4-3-3 (a) から図4-3-3 (g) に示す。熱交換量は、曝露終了前5分間の平均である。人体各部位での放射による熱交換量を概観すると、前額、手背での放射による熱交換量が、他の部位に比べ大きく、前額、手背以外の部位での放射による熱交換量は、概ね等しい結果となった。作用温度条件で比較すると、作用温度が低いほど、熱交換量は増加した。光源の色温度 (F, I) で比較すると、各部位とも蛍光ランプ (F) に比べ、白熱電球 (I) での熱交換量が、

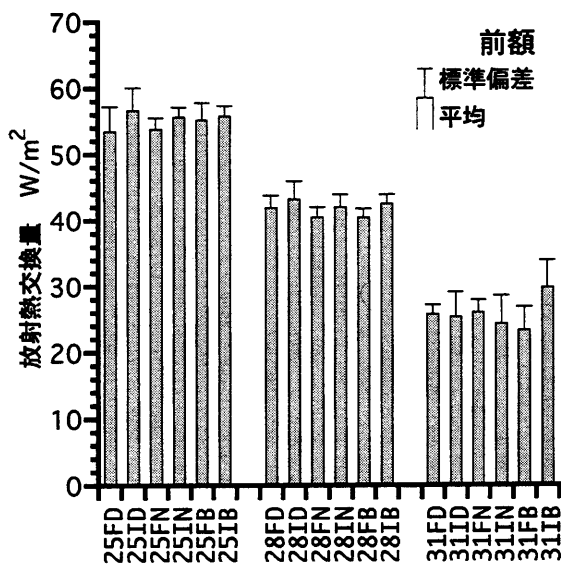


図 4-3-3(a) 前額の放射熱交換量

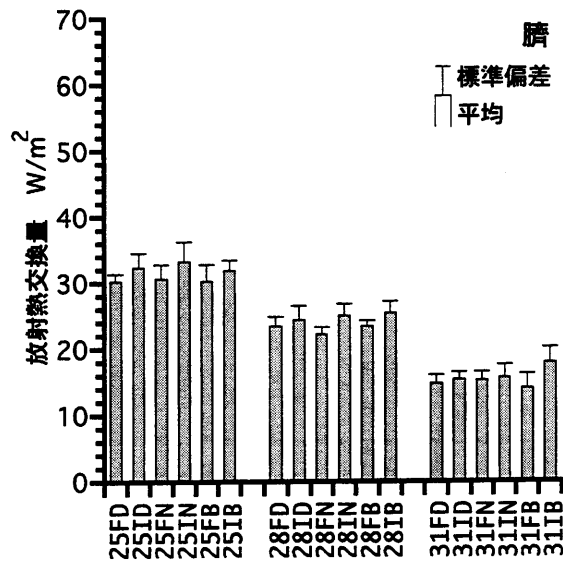


図 4-3-3(b) 臍の放射熱交換量

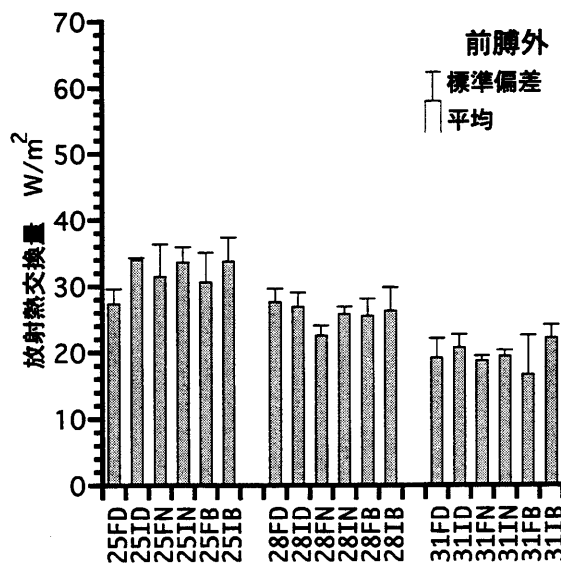


図 4-3-3(c) 前膊外の放射熱交換量

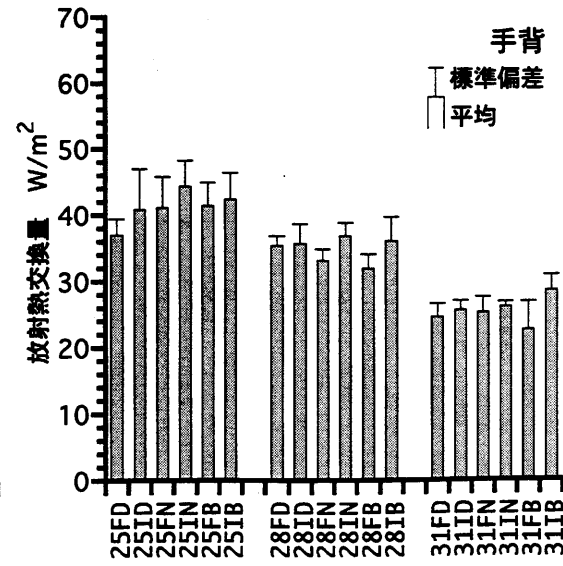


図 4-3-3(d) 手背の放射熱交換量

概ね大きく、作用温度31℃・照度1000lx条件(31FB, 31IB)では、各部位とも熱交換量の差が、比較的大きい結果となった。光源の照度(D, N, B)で比較すると、白熱電球・作用温度31℃条件(31ID, 31IN, 31IB)では、各部位とも照度が高いほど、熱交換量が僅かに大きくなる結果となった。

なお、被験者4名の人体各部位での放射による熱交換量を、巻末の付録に添付する。

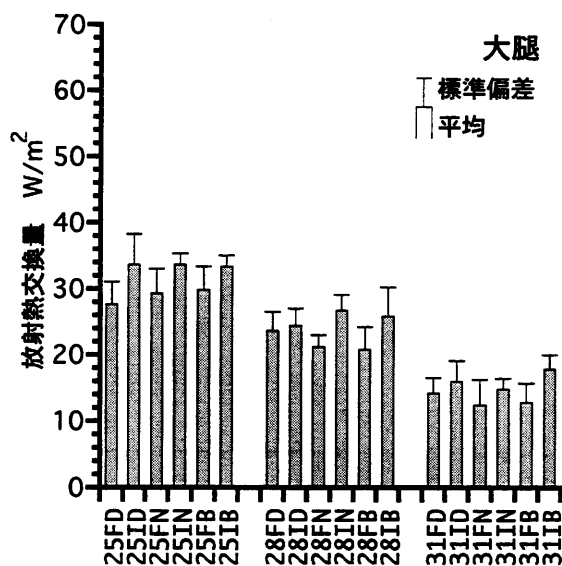


図 4-3-3(e) 大腿の放射熱交換量

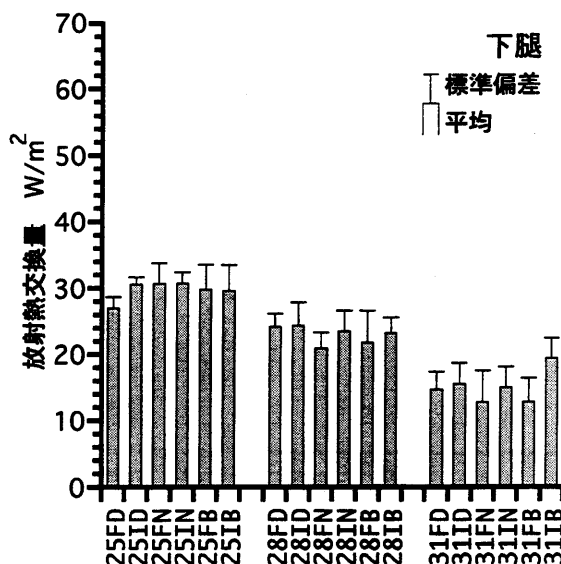


図 4-3-3(f) 下腿の放射熱交換量

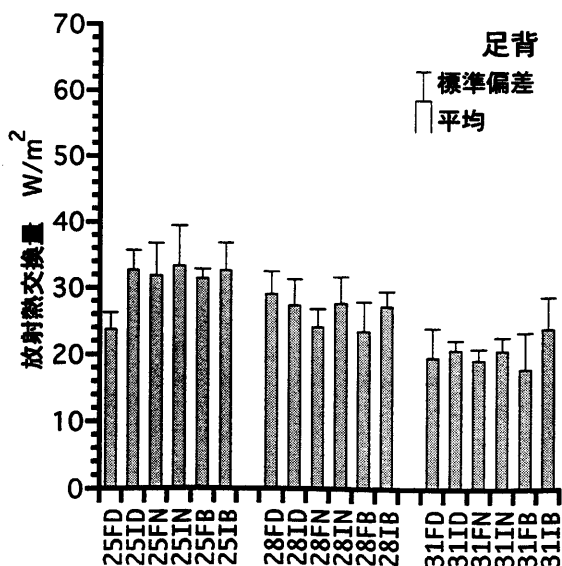


図 4-3-3(g) 足背の放射熱交換量

4.3.3.3 人体全身の経路別熱交換量

各実験条件における人体全身の対流，放射，蒸発による熱交換量の被験者4名の平均値と標準偏差を，図4-3-4 (a) から図4-3-4 (c) に示す。熱交換量は，曝露終了前，5分間の平均値である。作用温度条件で比較すると，対流および放射による熱交換量は，作用温度が低いほど増加し，蒸発による放熱量は，作用温度が高いほど増加した。光源の色温度 (F, I) で比較すると，対流による熱交換量は，作用温度31℃条件では，各照度条件とも白熱電球 (31ID, 31IN, 31IB) に比べ，蛍光ランプ (31FD, 31FN, 31FB) での熱交換量が，大きい結果となった。放射による熱交換量は，各条件とも蛍光ランプ (F) に比べ，白熱電球 (I) での熱交換量が，僅かに大きい結果となった。光源の照度 (D, N, B) による明確な傾向は，経路別熱交換量には，認められなかった。

なお，被験者4名の人体全身の対流，放射，蒸発による熱交換量を，巻末の付録に添付する。

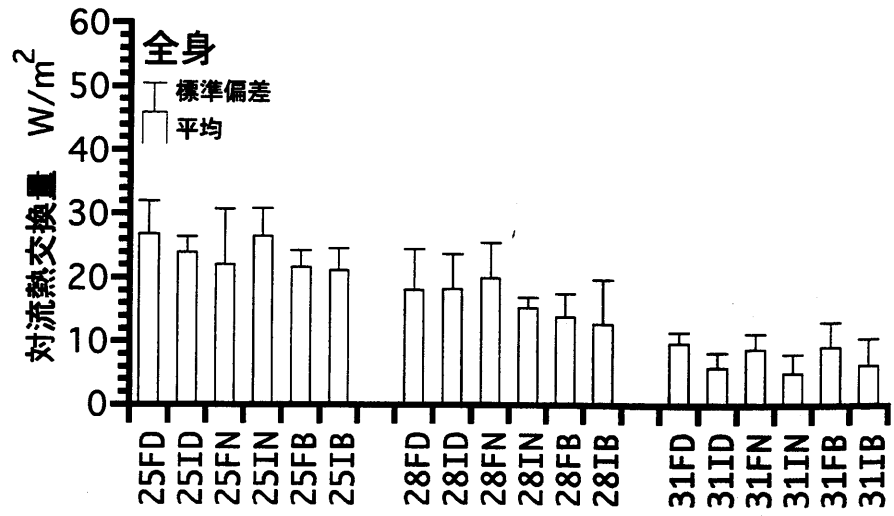


図 4-3-4(a) 人体全身の対流熱交換量

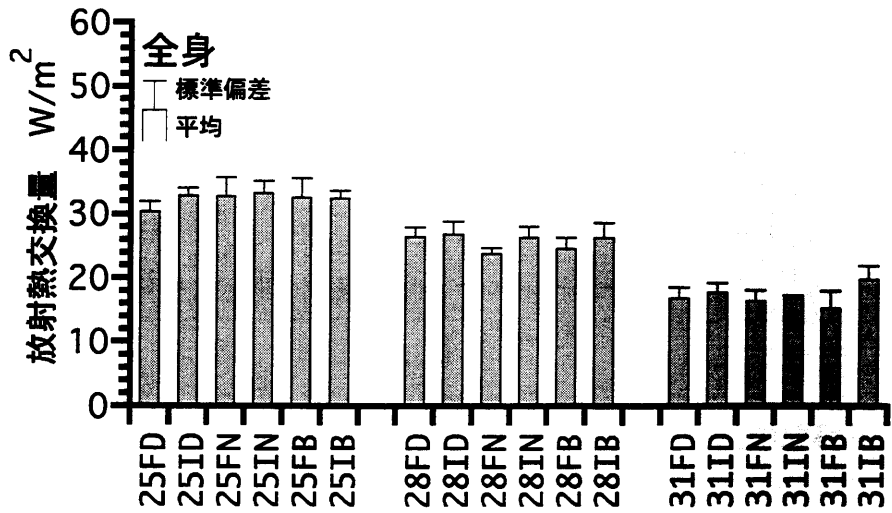


図 4-3-4(b) 人体全身の放射熱交換量

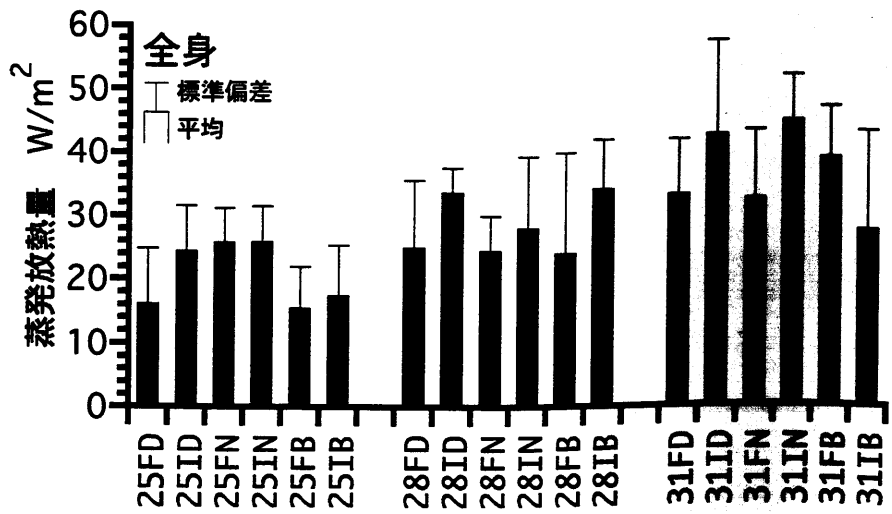


図 4-3-4(c) 人体全身の蒸発放熱量

4.4 考察

4.4.1 人体生理反応としての皮膚温に及ぼす影響

曝露終了前、5分間の作用温度に対する、平均皮膚温の関係を図4-4-1に示す。作用温度、平均皮膚温は、被験者4名の平均である。作用温度が高いほど、平均皮膚温は高くなる傾向が窺われる。作用温度と平均皮膚温には、正の相関 ($r=0.93$, $p<0.01$) が認められる。

図4-4-1より、光源の色温度 (F, I) で比較すると、作用温度25℃条件では蛍光ランプ (25FD, 25FN, 25FB) に比べ、白熱電球 (25ID, 25IN, 25IB) の平均皮膚温は、各照度条件とも高く、その差は最大で0.5℃であった。作用温度28℃条件では、蛍光ランプ500lx, 1000lx条件 (28FN, 28FB) に比べ、白熱電球500lx, 1000lx条件 (28IN, 28IB) の平均皮膚温は、0.3℃程度高い結果となった。蛍光ランプ100lx条件 (28FD) に比べ、白熱電球100lx条件 (28ID) の平均皮膚温は、0.4℃程度低い結果となった。作用温度31℃条件では、平均皮膚温はすべての条件で34.5℃付近であり、光源の色温度による明確な影響は、認められなかった。光源の色温度間で分散分析を行ったところ、すべての色温度間で、平均皮膚温に有意差 ($p<0.05$) は、認められなかった。

図4-4-1より、光源の照度 (D, N, B) で比較すると、作用温度25℃条件では、両光源とも500lx, 1000lx条件 (25FN, 25FB, 25IN, 25IB) に比べ、100lx条件 (25FD, 25ID) の平均皮膚温は、0.5℃程度低かった。500lx, 1000lx条件においては、両光源とも平均皮膚温は、概ね等しく、蛍光ランプ (25FN, 25FB) では32.7℃程度、白熱電球 (25IN, 25IB) では33.2℃程度であった。作用温度28℃条件では、蛍光ランプの場合、500lx, 1000lx条件 (28FN, 28FB) に比べ、100lx条件 (28FD) の平均皮膚温は、0.4℃程度高く、白熱電球の場合、500lx, 1000lx条件 (28IN, 28IB) に比べ、100lx条件 (28ID) の平均皮膚温は、0.4℃程度低い結果となった。500lx, 1000lx条件の平均皮膚温は、両光源とも概ね等しく、蛍光ランプ (28FN, 28FB) では33.7℃程度、白熱電球 (28IN, 28IB) では、34.1℃程度であった。作用温度31℃条件では、両光源とも平均皮膚温は、34.5℃付近であった。光源の照度間で分散分析を行ったところ、すべての照度条件間で、平均皮膚温に有意差 ($p<0.05$) は認められなかった。杉本⁷⁾は、人体生理反応としての平均心拍数が、照度の影響を受けることを報告しているが、本研究において、人体生理反応としての平均皮膚温には、照度の影響は認められなかった。これは、著者らが以前行った、気温と照度の組み合わせが人体生理・心理反応に及ぼす複合的影響の研究⁸⁾と同様の結果となった。

以上から、人体生理反応としての皮膚温は、作用温度の影響を受けるが、光源の色温度、照度による明確な影響は認められなかった。

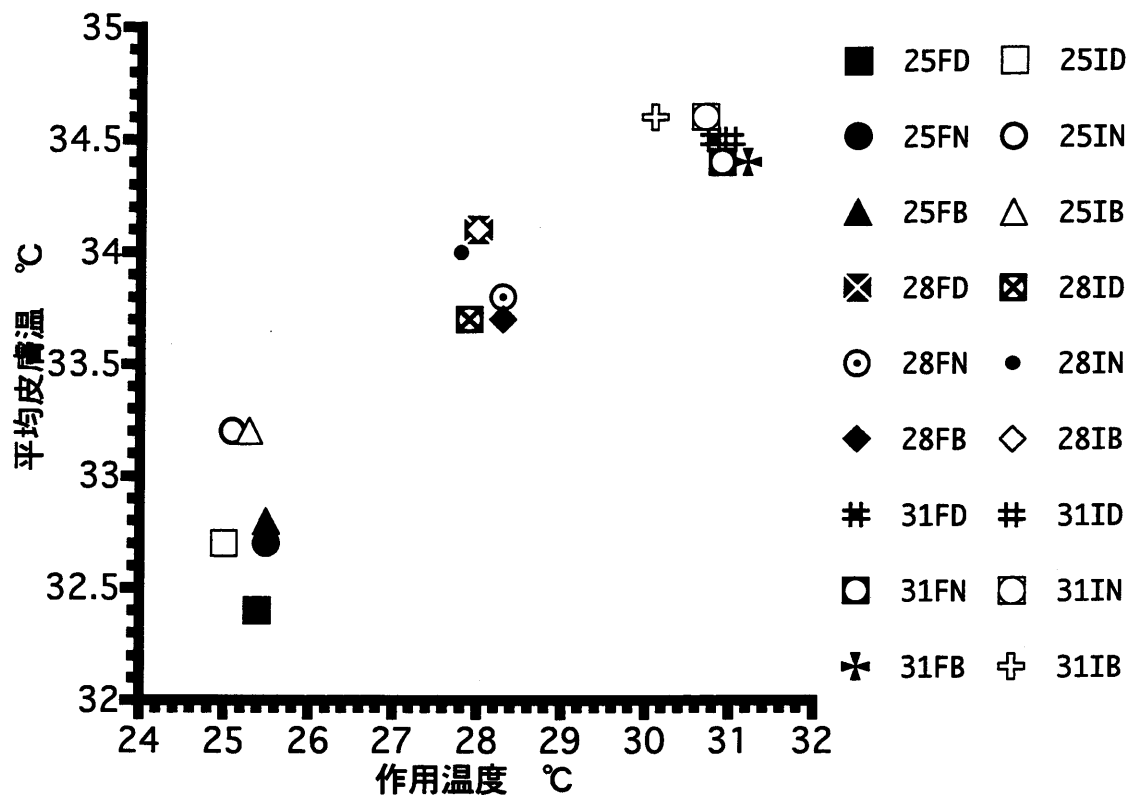


図 4-4-1 作用温度に対する平均皮膚温の関係 (全実験条件)

4.4.2 人体生理反応としての経路別熱交換量に及ぼす影響

人体各部位での対流による熱交換量を、各部位ごと光源の色温度、照度間で分散分析を行ったところ、すべての条件で、熱交換量に有意差 ($p < 0.05$) は、認められなかった。同様に人体各部位での放射による熱交換量を、各部位ごと光源の色温度、照度間で分散分析を行ったところ、足背での放射熱交換量において、光源の色温度、照度間で有意差 ($p < 0.01$) が認められた。図 4-3-3 (g) が示すように、作用温度 25°C・蛍光ランプ 100lx 条件 (25FD) での熱交換量が、他の条件に比べ、小さいことが認められる。被験者の体調不良、実験条件が適切に設定されていなかった事などが、一因として考えられるが、明確な根拠が見いだせられない。今後、検討の余地があると考えられる。

人体全身の対流、放射、蒸発による熱交換量を、経路ごと光源の色温度、照度間で分散分析を行ったところ、すべての条件で、熱交換量に有意差 ($p < 0.05$) は、認められなかった。

以上から、若干検討の余地はあるが、人体生理反応としての経路別熱交換量は、光源の色温度、照度による明確な影響は、認められないと考えられる。

4.4.3 人体心理反応としての温冷感に及ぼす影響

本節においては、人工光源の色温度、照度が人体心理反応としての温冷感に及ぼす影響を、作用温度条件ごとに検討し、最後に統括する。温冷感は、直線評定尺度により測定した結果を用い、統計解析を行うために、0から100の数値を割り当てた。

4.4.3.1 作用温度 25℃条件

作用温度 25℃条件における温冷感の経時変動を、光源の照度条件ごとに図4-4-2 (a) から図4-4-2 (c) に、光源の色温度ごとに図4-4-3 (a), 図4-4-3 (b) に示す。温冷感の経時変動は、被験者4名の平均値と標準偏差である。

光源の色温度 (F, I) で比較すると、図4-4-2 (a) ~ (c) より曝露中、各照度条件とも蛍光ランプ (色温度 4200K) に比べ、白熱電球 (色温度 2850K) の温冷感は、概ね暑い方向の反応であった。光源の色温度間で分散分析を行ったところ、100lx条件 (25FD, 25ID) は、曝露15分~20分経過頃、500lx条件 (25FN, 25IN) は、曝露開始時、1000lx条件 (25FB, 25IN) は、曝露終了頃の温冷感に光源の色温度による有意差 ($p < 0.05$) が認められた。光源の色温度は、温冷感に有意に影響を及ぼし、同一温熱環境でも色温度が低いほど、被験者は、より暑く感じる傾向があると考えられる。また、低中照度においては、温熱環境、光環境の変化する過渡状態に、高照度においては、温度馴化した定常状態において、その傾向が認められた。

光源の照度 (D, N, B) で比較すると、蛍光ランプ (F) の場合、図4-4-3 (a) より曝露中、温冷感は照度が高いほど、暑い方向の反応であった。蛍光ランプの照度間で分散分析を行ったところ、5%の有意水準では温冷感に、照度による有意差は認められないが、10%の有意水準で分散分析を試みると、温冷感に照度による、有意差が認められる。著者らが以前、蛍光ランプを光源として行った、気温と照度の組み合わせが人体生理・心理反応に及ぼす複合的影響の研究⁸⁾においては、曝露終了時に気温25℃、照度1500lx条件での温冷感、他の照度条件 (20lx, 800lx) に比べ、暑い方向の反応であった。本研究では同様の影響が有意に認められなかったが、光源が蛍光ランプの場合、温冷感が、照度の影響を全く受けないとは考え難く、今後、検討の余地があると考えられる。白熱電球 (I) の場合、図4-4-3 (b) より、曝露開始時、温冷感に照度条件が高いほど、暑い方向の反応であり、曝露15分経過頃から各照度条件とも温冷感に、熱的中立よりやや寒い方向 (数値にして45付近) に推移し、その後、一定の反応であった。白熱電球の照度間で分散分析を行ったところ、曝露開始頃の温冷感に、照度条件による有意差 ($p < 0.05$) が認められた。光源が白熱電球の場合、温熱環境および光環境の変化する過渡状態において、光源の照度は、温冷感に有意に影響を及ぼし、同一温熱環境でも照度が高いほど、被験者は、より暑く感じる傾向があると考えられる。

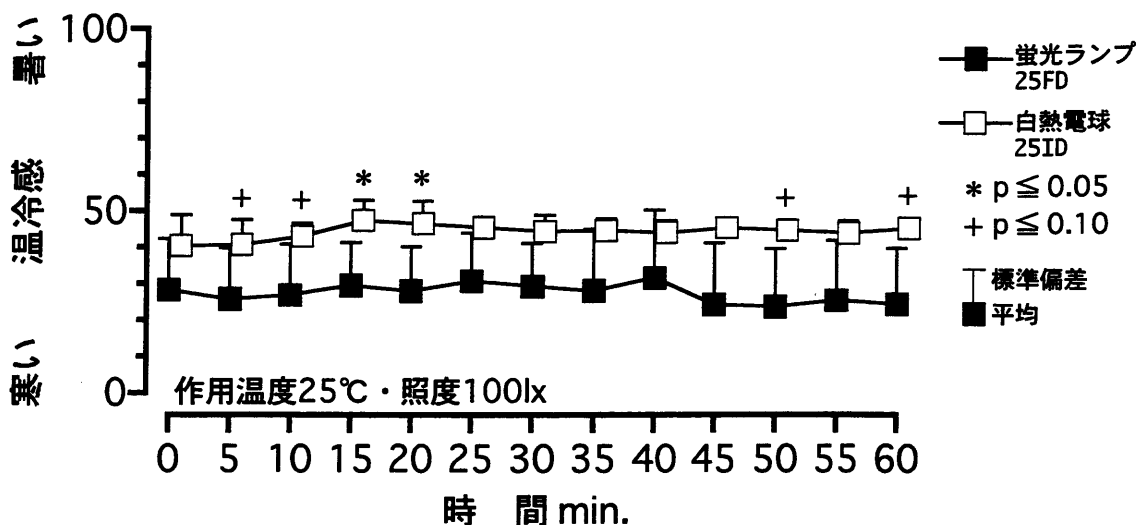


図 4-4-2 (a) 温冷感の経時変動 (色温度比較・100lx)

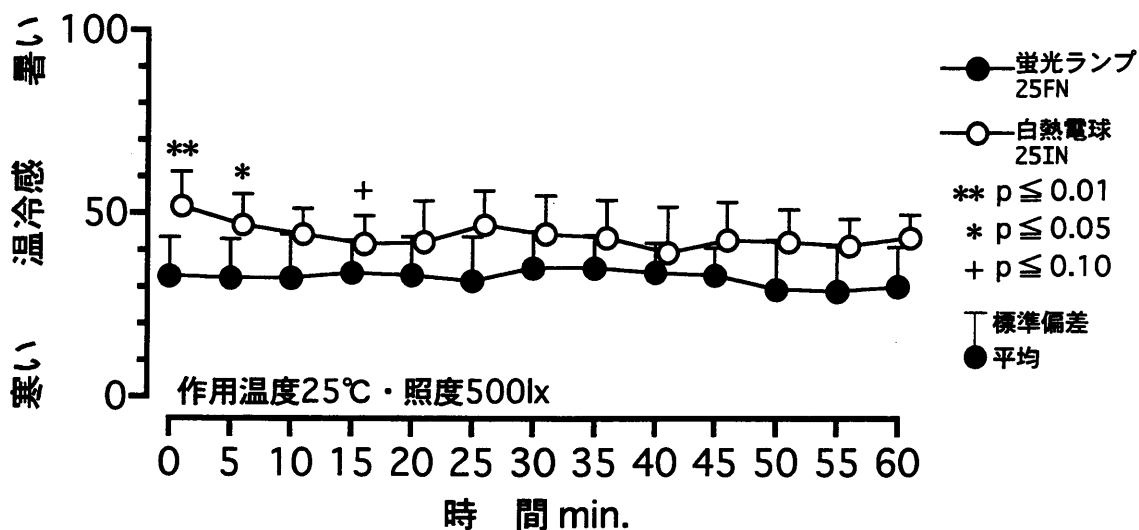


図 4-4-2 (b) 温冷感の経時変動 (色温度比較・500lx)

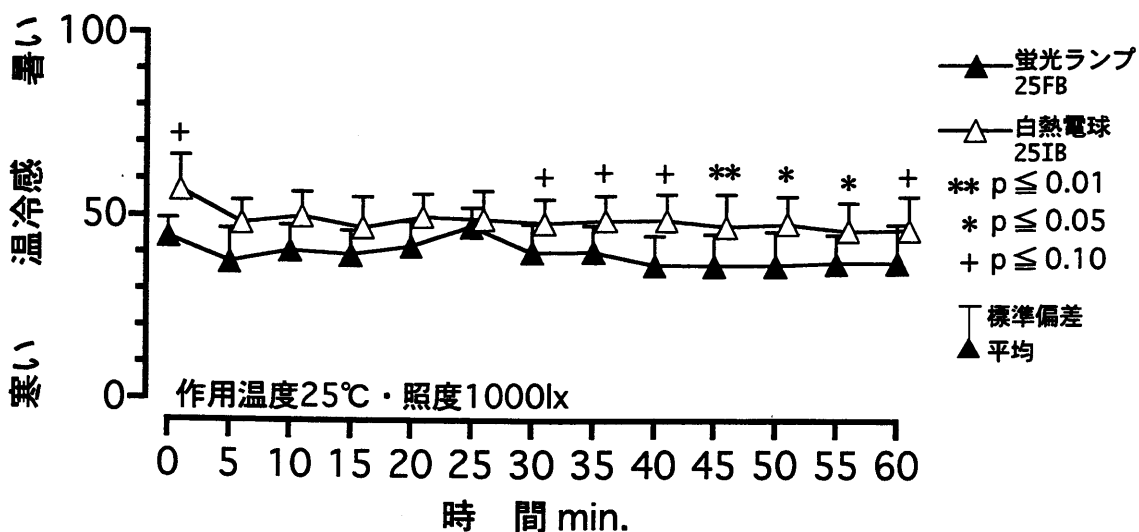


図 4-4-2 (c) 温冷感の経時変動 (色温度比較・1000lx)

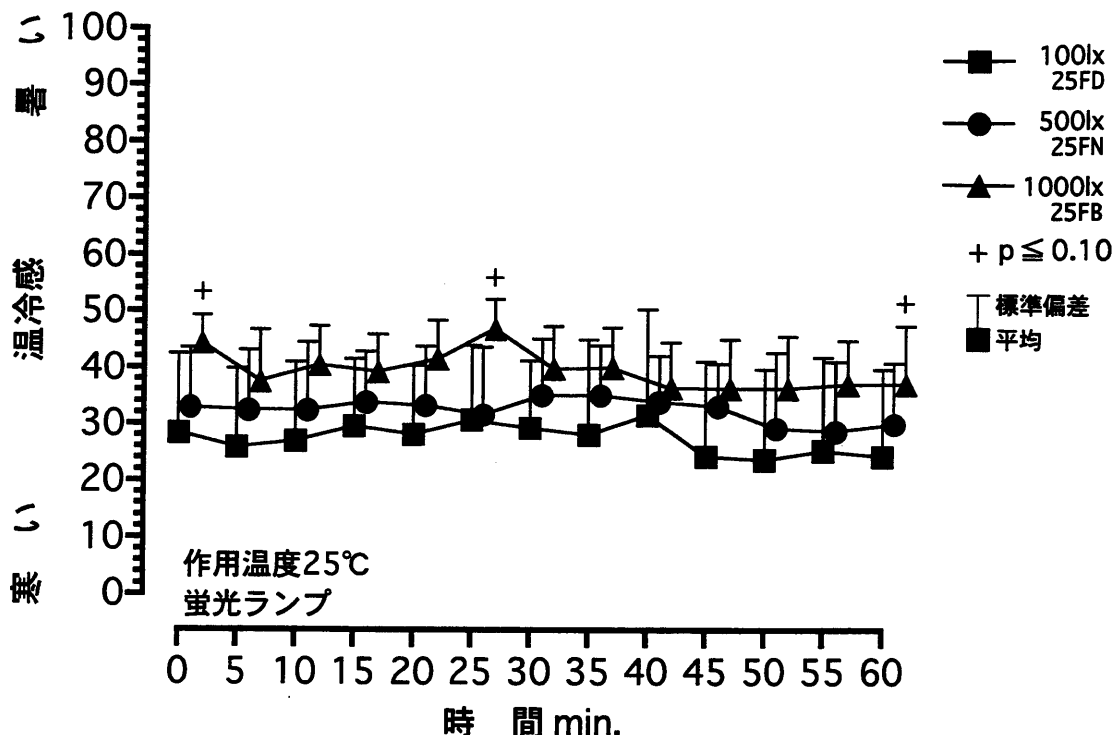


図 4-4-3 (a) 温冷感の経時変動 (照度比較・蛍光ランプ)

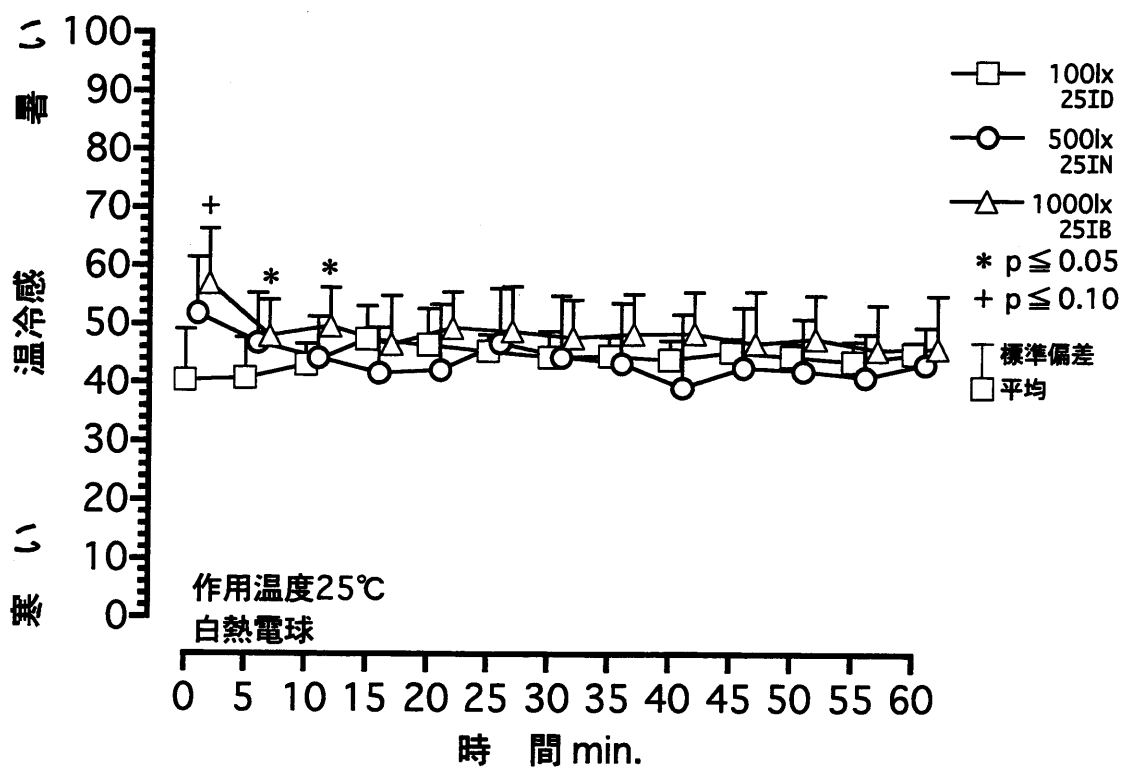


図 4-4-3 (b) 温冷感の経時変動 (照度比較・白熱電球)

4.4.3.2 作用温度 28℃条件

作用温度 28℃条件における温冷感の経時変動を、光源の照度条件ごとに図 4-4-4 (a) から図 4-4-4 (c) に、光源の色温度ごとに図 4-4-5 (a), 図 4-4-5 (b) に示す。温冷感の経時変動は、被験者 4 名の平均値と標準偏差である。

光源の色温度 (F, I) で比較すると、図 4-4-4 (a) ~ (c) より、曝露 15 分経過頃までは、蛍光灯 (4200K) に比べ、白熱電球 (2850K) の温冷感は各照度条件とも、概ね暑い方向の反応であり、それ以降は蛍光灯 100lx 条件 (28FD) を除き、両光源とも温冷感は、熱的中立付近で一定した反応であった。光源の色温度間で分散分析を行ったところ、100lx 条件 (28FD, 28ID) は曝露開始頃、1000lx 条件 (28FB, 28IB) は、曝露開始時および曝露 40 分経過後の温冷感に、光源の色温度による有意差 ($p < 0.05$) が認められた。500lx 条件 (28FN, 28IN) は、温冷感に光源の色温度による、有意差は認められなかった。光源の色温度は、温冷感に有意に影響を及ぼし、同一温熱環境でも色温度が低いほど、被験者はより暑く感じる傾向があると考えられる。低高照度においては、光環境の変化する過渡状態に、その傾向が認められた。

光源の照度 (D, N, B) で比較すると、蛍光灯 (F) の場合、図 4-4-5 (a) より、100lx 条件 (28FD) の温冷感は、曝露中熱的中立より、やや寒い方向 (数値にして 45 付近) で一定した反応であった。500lx, 1000lx 条件 (28FN, 28FB) の温冷感は、曝露中、熱的中立付近 (数値にして 50) で一定した反応であった。蛍光灯の照度間で分散分析を行ったところ、温冷感に照度条件による有意差は認められなかった。白熱電球 (I) の場合、図 4-4-5 (b) より、500lx, 1000lx 条件 (28IN, 28IB) の温冷感は、曝露開始後、寒い方向に推移し、曝露 10 分経過頃から熱的中立付近で一定した反応となった。100lx 条件 (28ID) の温冷感は、曝露中、熱的中立付近で一定した反応であった。白熱電球の照度間で分散分析を行ったところ、曝露開始頃の温冷感に、照度条件による有意差 ($p < 0.05$) が認められた。光源が白熱電球の場合、光環境の変化する過渡状態において、光源の照度は、温冷感に有意に影響を及ぼし、同一温熱環境でも照度が高いと、被験者は暑く感じる傾向があると考えられる。

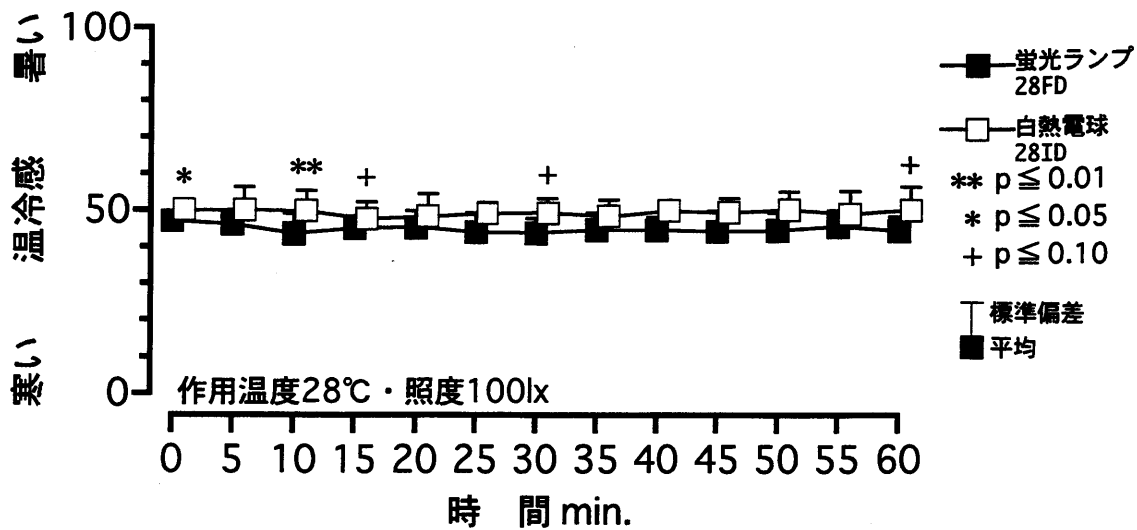


図 4-4-4 (a) 温冷感の経時変動 (色温度比較・100lx)

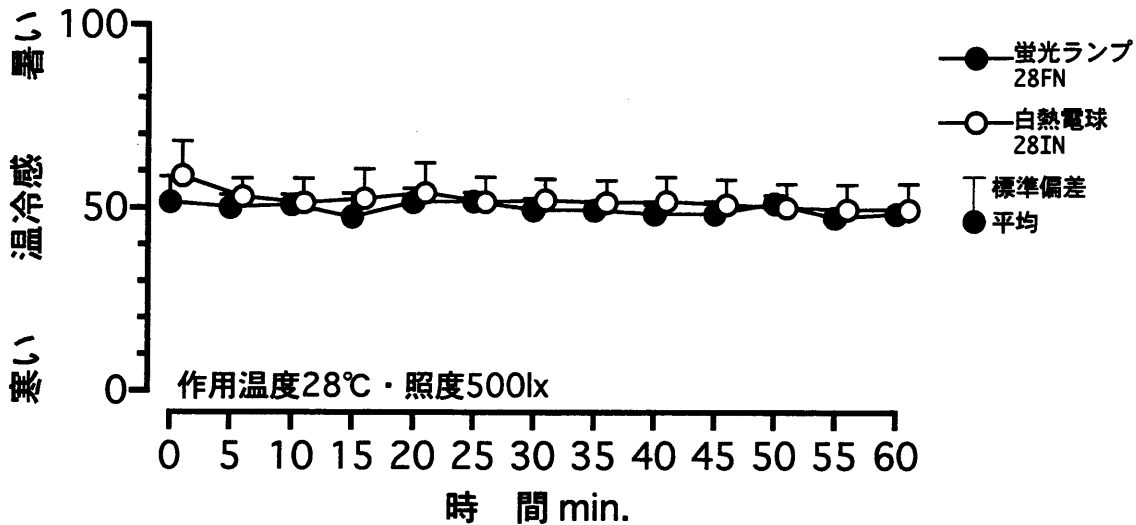


図 4-4-4 (b) 温冷感の経時変動 (色温度比較・500lx)

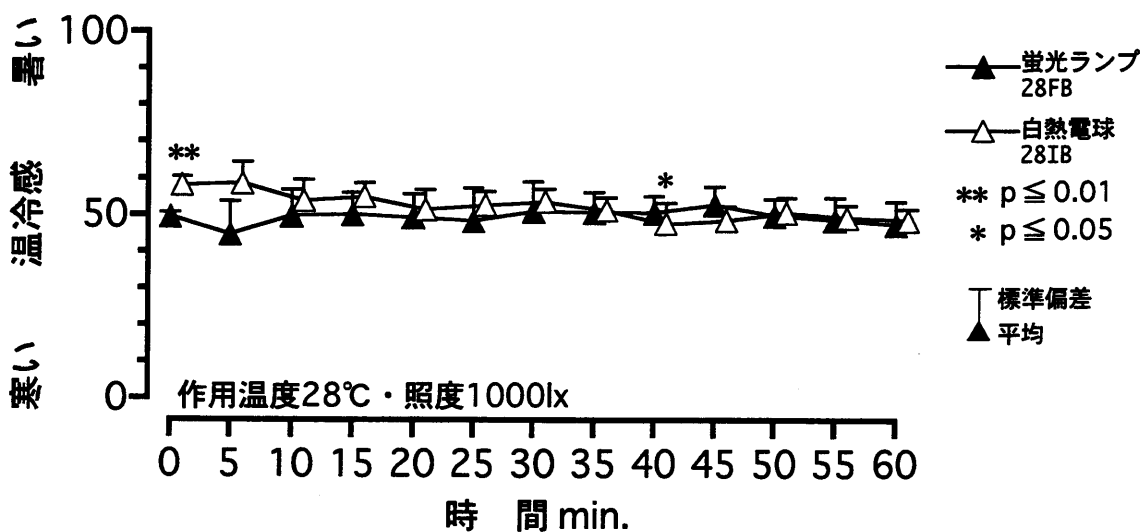


図 4-4-4 (c) 温冷感の経時変動 (色温度比較・1000lx)

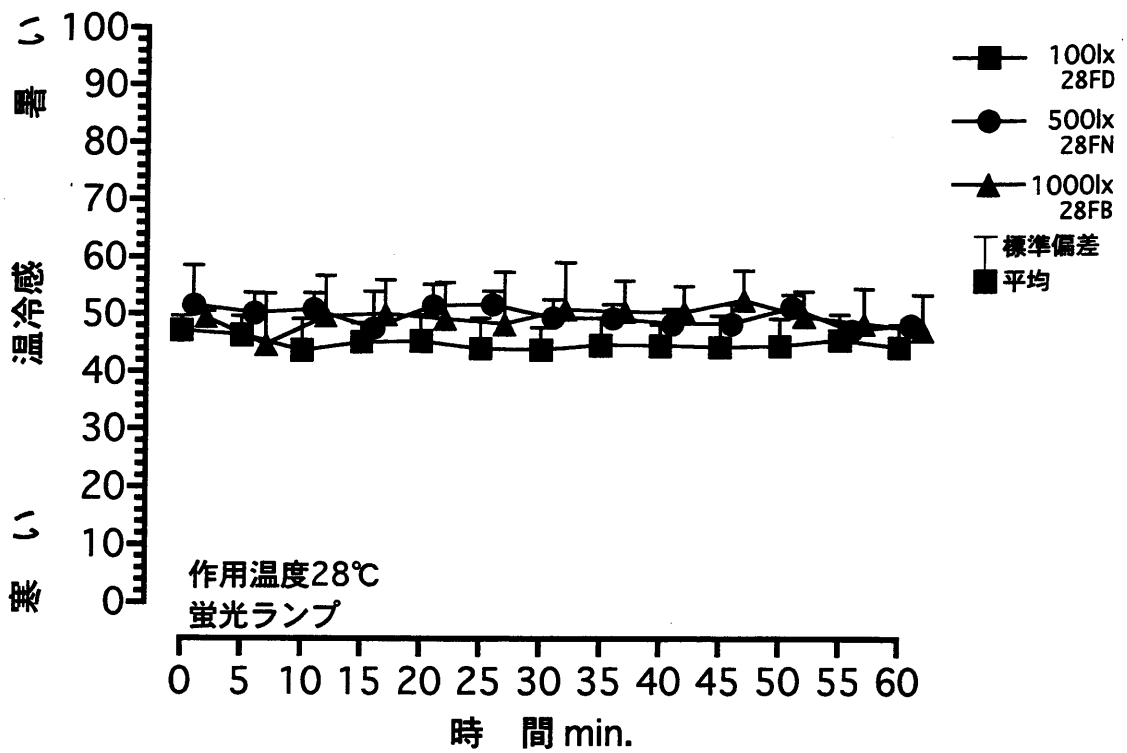


図 4-4-5 (a) 温冷感の経時変動 (照度比較・蛍光ランプ)

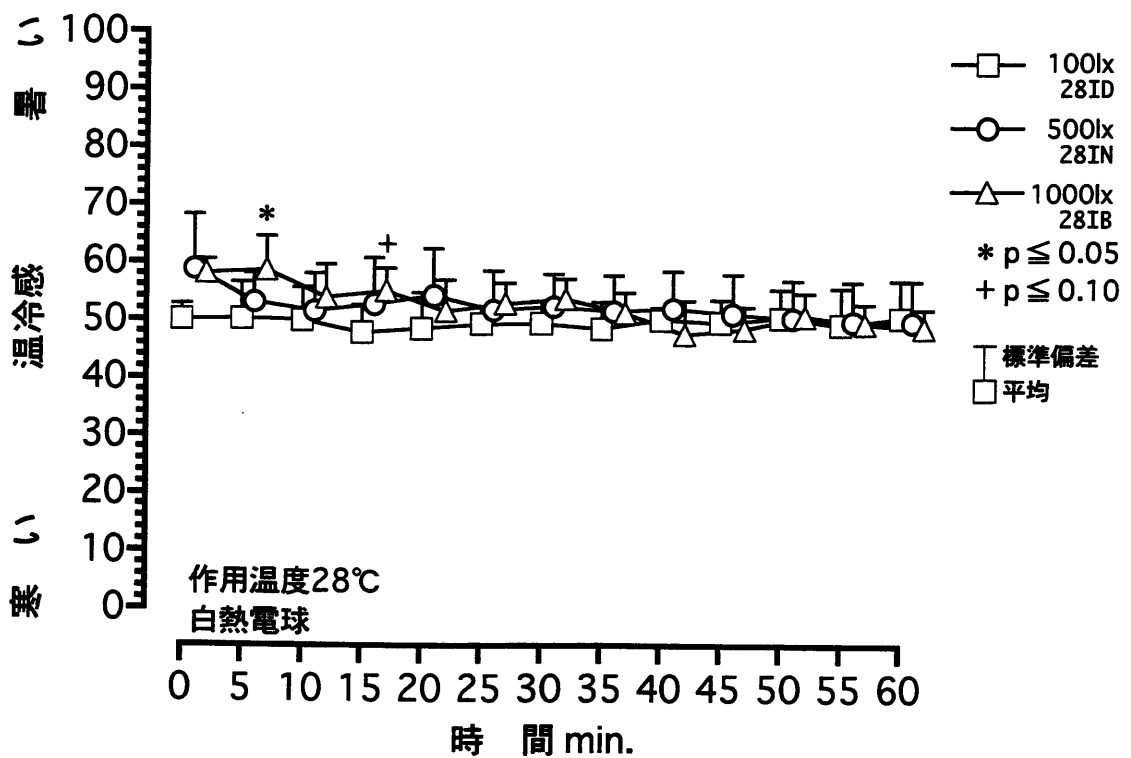


図 4-4-5 (b) 温冷感の経時変動 (照度比較・白熱電球)

4.4.3.3 作用温度31℃条件

作用温度31℃条件における温冷感の経時変動を光源の照度条件ごとに図4-4-6 (a) から図4-4-6 (c) に、光源の色温度ごとに図4-4-7 (a), 図4-4-7 (b) に示す。温冷感の経時変動は、被験者4名の平均値と標準偏差である。

光源の色温度 (F, I) で比較すると、図4-4-6 (a) より、100lx条件 (31FD, 31ID) では、曝露15分経過頃から40分経過頃まで、白熱電球 (2850K) に比べ、蛍光灯 (4200K) の温冷感は、より暑い側の反応であった。図4-4-6 (b) より、500lx条件 (31FN, 31IN) では、白熱電球に比べ、蛍光灯の温冷感が、曝露中僅かであるが、より暑い側の反応であった。図4-4-6 (c) より、1000lx条件 (31FB, 31IB) では、両光源とも曝露中、温冷感は、数値にして75程度の一定した反応であった。光源の色温度間で分散分析を行ったところ、温冷感には光源の色温度による有意差は、認められなかった。

光源の照度 (D, N, B) で比較すると、蛍光灯 (F) の場合、図4-4-7 (a) より、1000lx条件 (31FD) の温冷感は、曝露15分経過頃から30分経過頃まで、他の2照度条件に比べ、より暑い方向 (数値にして85付近) に推移した。白熱電球 (I) の場合、図4-4-7 (b) より、各照度条件とも温冷感は曝露中、暑い側であり、数値にして60から70付近の一定した反応であった。両光源とも照度条件間で分散分析を行ったところ、温冷感には光源の照度による有意差は、認められなかった。

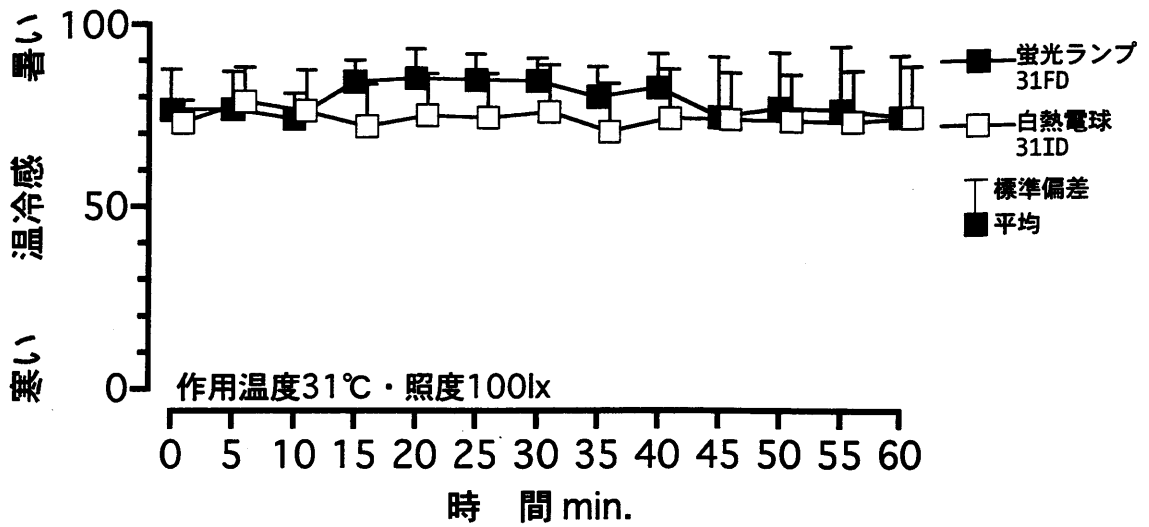


図 4-4-6 (a) 温冷感の経時変動 (色温度比較・100lx)

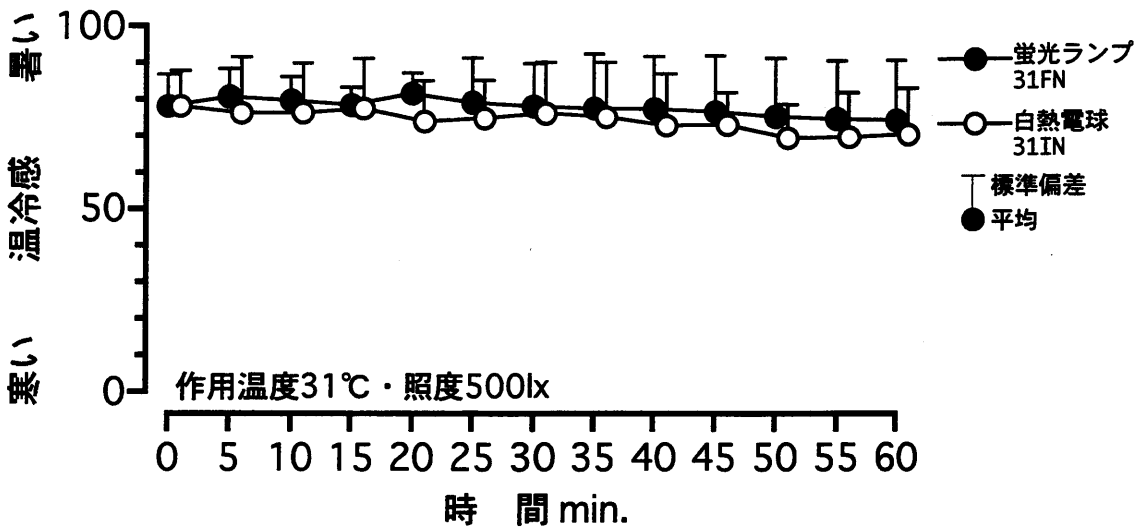


図 4-4-6 (b) 温冷感の経時変動 (色温度比較・500lx)

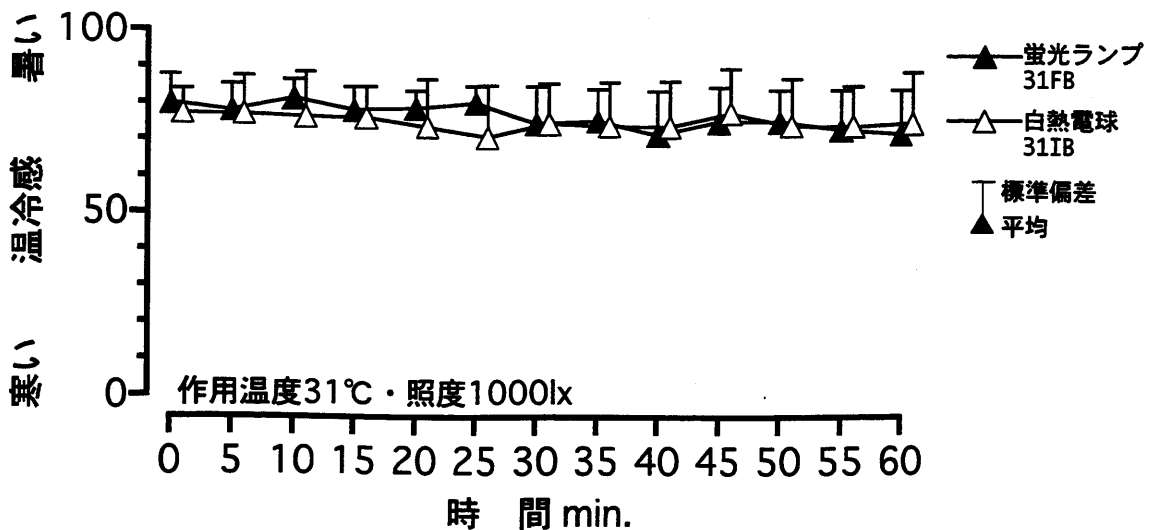


図 4-4-6 (c) 温冷感の経時変動 (色温度比較・1000lx)

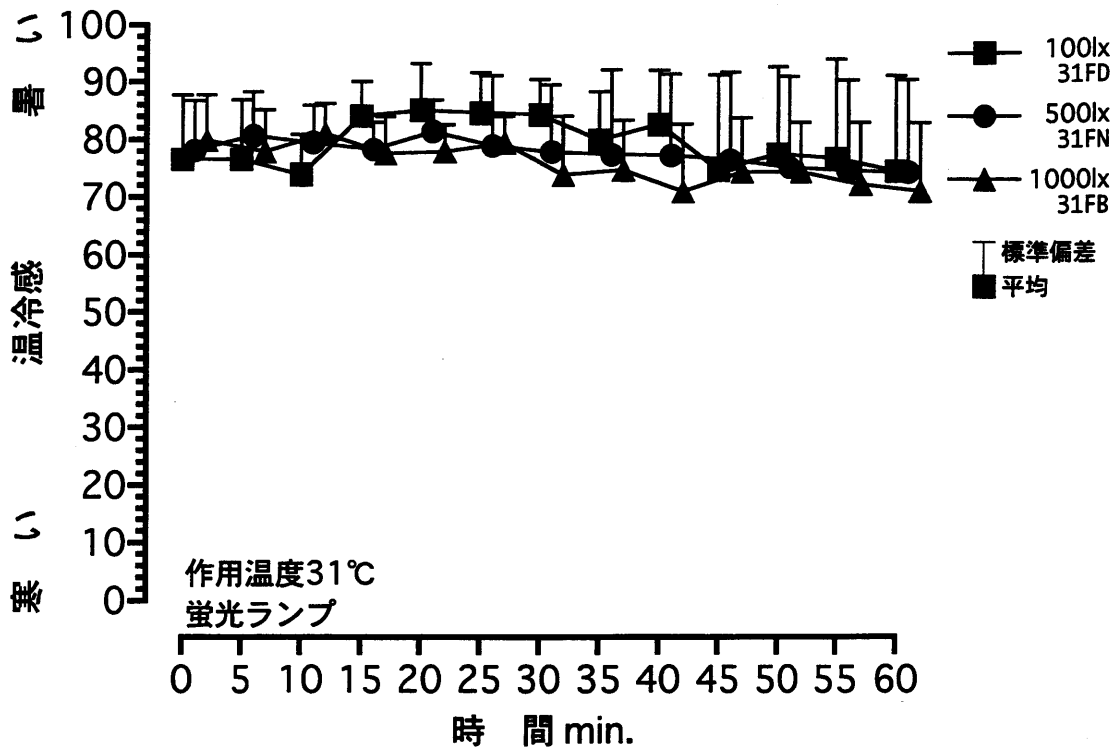


図 4-4-7 (a) 温冷感の経時変動 (照度比較・蛍光ランプ)

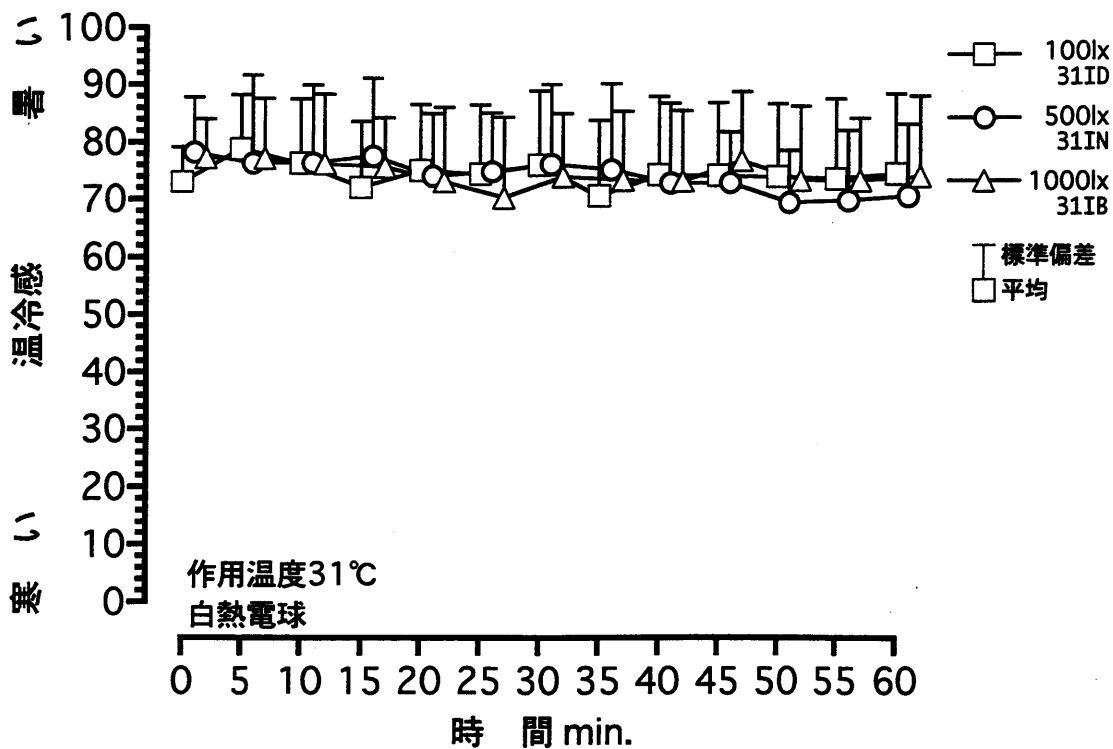


図 4-4-7 (b) 温冷感の経時変動 (照度比較・白熱電球)

4.4.3.4 温冷感の総括

人工光源の色温度、照度が、人体心理反応としての温冷感に及ぼす影響を総括すると、光源の色温度が温冷感に及ぼす影響は、作用温度が25℃あるいは28℃で有意に認められ、蛍光灯（色温度4200K）に比べ、白熱電球（同2850K）の温冷感が暑い方向であった。温熱環境が同一条件でも、光源の色温度が低いほど、被験者は、おかれている環境をより暑く感じた。これは光源の色温度を色相と捉えるならば、"hue-heat" hypothesis⁹⁾を支持する結果であると考えられる。100lx程度の低照度の場合、温熱環境、光環境の変化する過渡状態において、その傾向が認められた。1000lx程度の高照度の場合、色温度が温冷感に及ぼす影響には、時間的な傾向が一定ではなく、また500lx程度の照度の場合、温熱環境により色温度が温冷感に影響を及ぼさない場合もあり、今後、検討の余地があると考えられる。

光源の照度が温冷感に及ぼす影響は、作用温度が25℃あるいは28℃で、光源が白熱電球の場合、曝露開始時において有意に認められ、照度が高いほど、温冷感が、暑い方向であった。温熱環境が熱的中立あるいは、熱的中立より若干寒い側の場合、温熱環境、光環境が変化する過渡状態において、被験者は白熱電球を心理的に放射熱源として捉え、照度が高いほど光源の放射温度を高温に知覚し、その結果、照度が高いほど、より暑く感じたと考えられる。その後、被験者が温熱環境に馴化した定常状態では、光源の照度は温冷感に影響を及ぼさなくなり、温熱環境のみが温冷感に影響を及ぼすと考えられる。光源が蛍光灯の場合、作用温度25℃においては光源の照度が温冷感に全く影響を及ぼさないとは考え難く、また、著者らが以前、蛍光灯を光源として行った、気温と照度の組み合わせが人体生理・心理反応に及ぼす複合的影響の研究結果を併せて考慮すると、今後、更なる研究遂行の必要性があると考えられる。

今回、作用温度31℃条件では、光源の色温度、照度は、温冷感に有意な影響を及ぼさなかったが、その一因として、夏季に実験を実施したこと、熱的中立より若干暑い側の環境の場合、温熱環境以外の環境要因は、温冷感に何ら影響を及ぼさないことなどが考えられる。今後、冬季に実験を実施するなど、検討の余地があると考えられる。

なお、すべての条件における被験者4名の温冷感の経時変動を、巻末の付録に添付する。

4.4.4 人体心理反応としての快適感に及ぼす影響

本節においては、人工光源の色温度、照度が人体心理反応としての快適感に及ぼす影響を、作用温度条件ごとに検討し、最後に統括する。快適感には、直線評定尺度により測定した結果を用い、統計解析を行うために、0から100の数値を割り当てた。

4.4.4.1 作用温度25℃条件

作用温度25℃条件における快適感の経時変動を光源の照度条件ごとに図4-4-8 (a) から図4-4-8 (c) に、光源の色温度ごとに図4-4-9 (a), 図4-4-9 (b) に示す。快適感の経時変動は、被験者4名の平均値と標準偏差である。

光源の色温度 (F, I) で比較すると、図4-4-8 (a), 図4-4-8 (b) より、100lx, 500lx条件 (25FD, 25ID, 25FN, 25IN) の場合、蛍光灯 (色温度4200K) に比べ、白熱電球 (色温度2850K) の快適感には、曝露中、概ね快適方向の反応であった。図4-4-8 (c) より、1000lx条件 (25FB, 25IB) の場合、曝露35分経過までは白熱電球に比べ、蛍光灯の快適感には、快適方向の反応であったが、それ以降は、ほぼ等しい反応となった。光源の色温度間で分散分析を行ったところ、1000lx条件 (25FB, 25IB) の曝露開始時の快適感に、光源の色温度による有意差 ($p < 0.05$) が認められた。光源の色温度は、快適感に影響を及ぼすと考えられ、被験者は色温度が高いほど、より快適に感じると推察される。高照度かつ温熱環境および光環境が変化する過渡状態において、その傾向が認められた。

光源の照度 (D, N, B) で比較すると、蛍光灯 (F) の場合、図4-4-9 (a) より、曝露中、照度が高いほど、快適感には快適方向の反応であった。蛍光灯の照度間で分散分析を行ったところ、曝露35分、40分経過後および曝露終了時の快適感に、照度条件による有意差 ($p < 0.05$) が認められた。著者らが以前、光源を蛍光灯として行った、気温と照度の組み合わせが人体生理・心理反応に及ぼす複合的影響の研究⁸⁾ においては、気温25℃・照度800lxでの快適感が他の2照度条件 (20lx, 1500lx) に比べ、より不快方向の反応である傾向が示された。また、気温25℃・照度20lx, 1500lx条件での快適感には、おおむね快適方向の反応であったが、被験者により反応に差が認められた。本研究は、若干異なる結果となった。光源が蛍光灯の場合、照度は快適感に有意に影響を及ぼし、被験者は照度が高いほど、より快適に感じる傾向があると考えられる。白熱電球 (I) の場合、図4-4-9 (b) より、曝露時間が経過するにつれ、各照度条件とも快適感には、数値にして70付近に推移した。白熱電球の照度間で分散分析を行ったところ、快適感に照度条件による有意差は認められなかった。

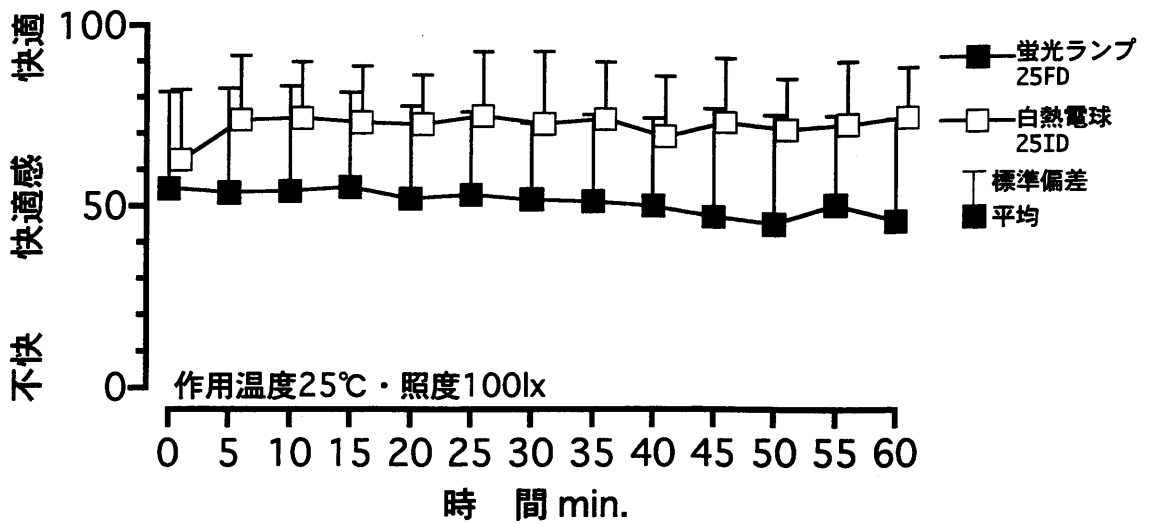


図 4-4-8 (a) 快適感の経時変動 (色温度比較・100lx)

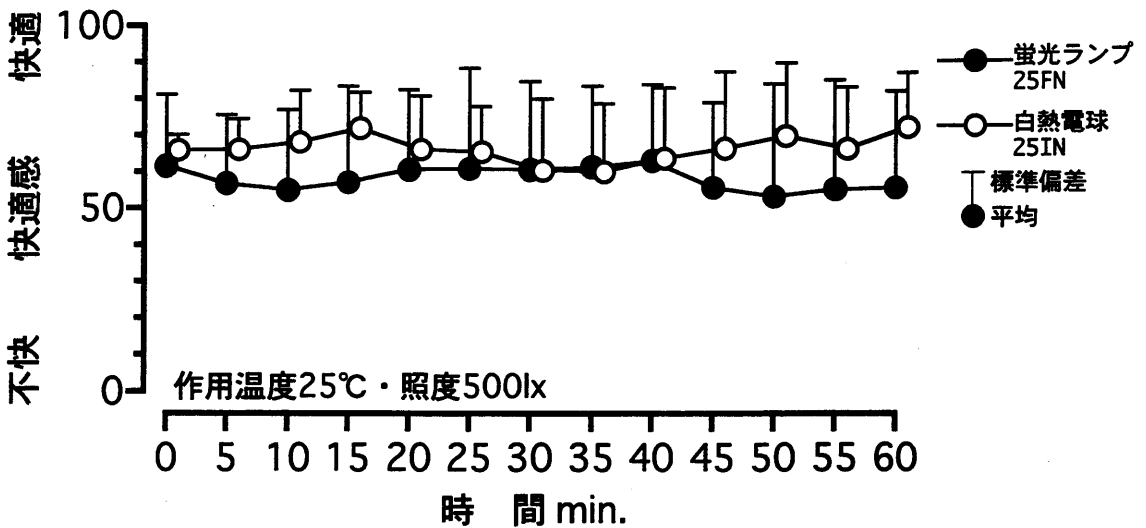


図 4-4-8 (b) 快適感の経時変動 (色温度比較・500lx)

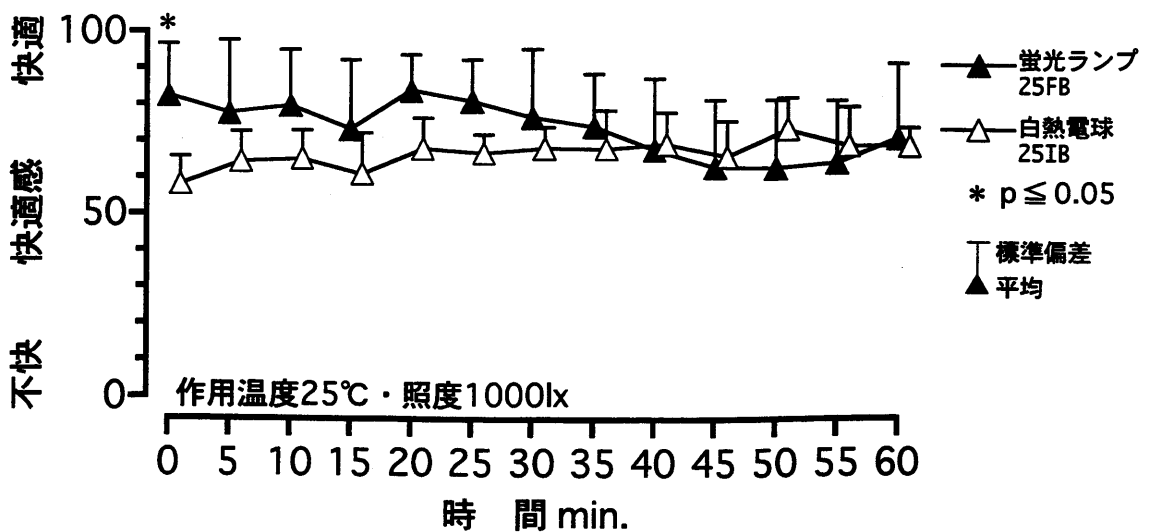


図 4-4-8 (c) 快適感の経時変動 (色温度比較・1000lx)

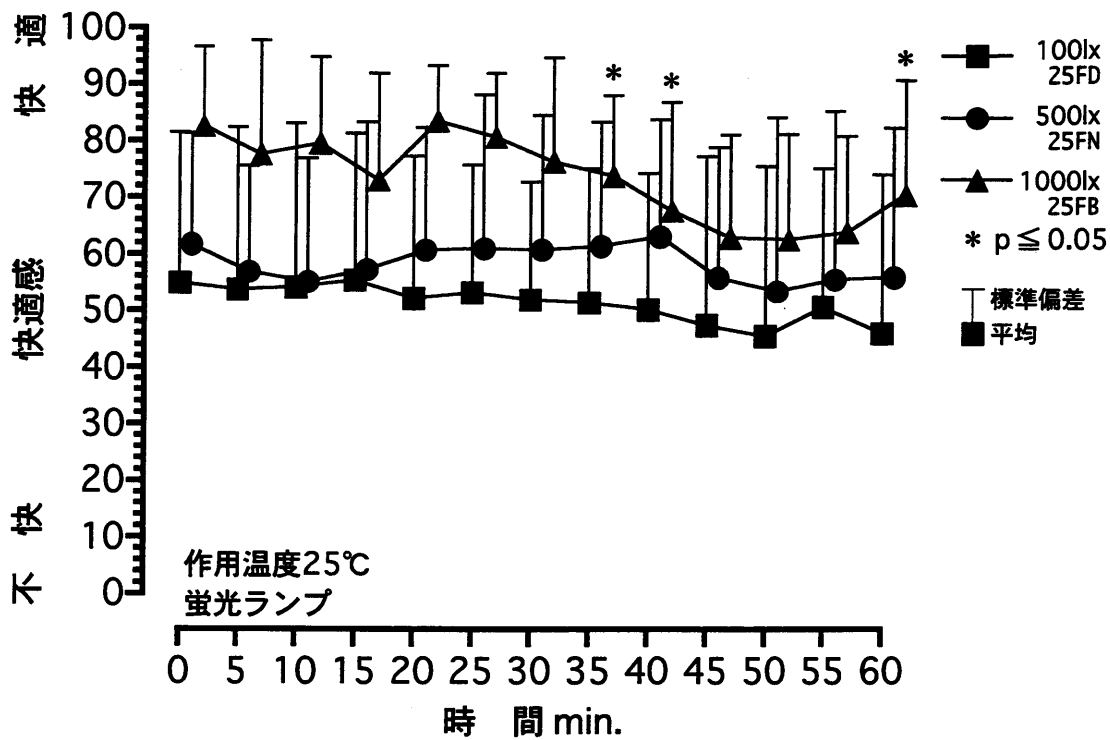


図 4-4-9 (a) 快適感の経時変動 (照度比較・蛍光ランプ)

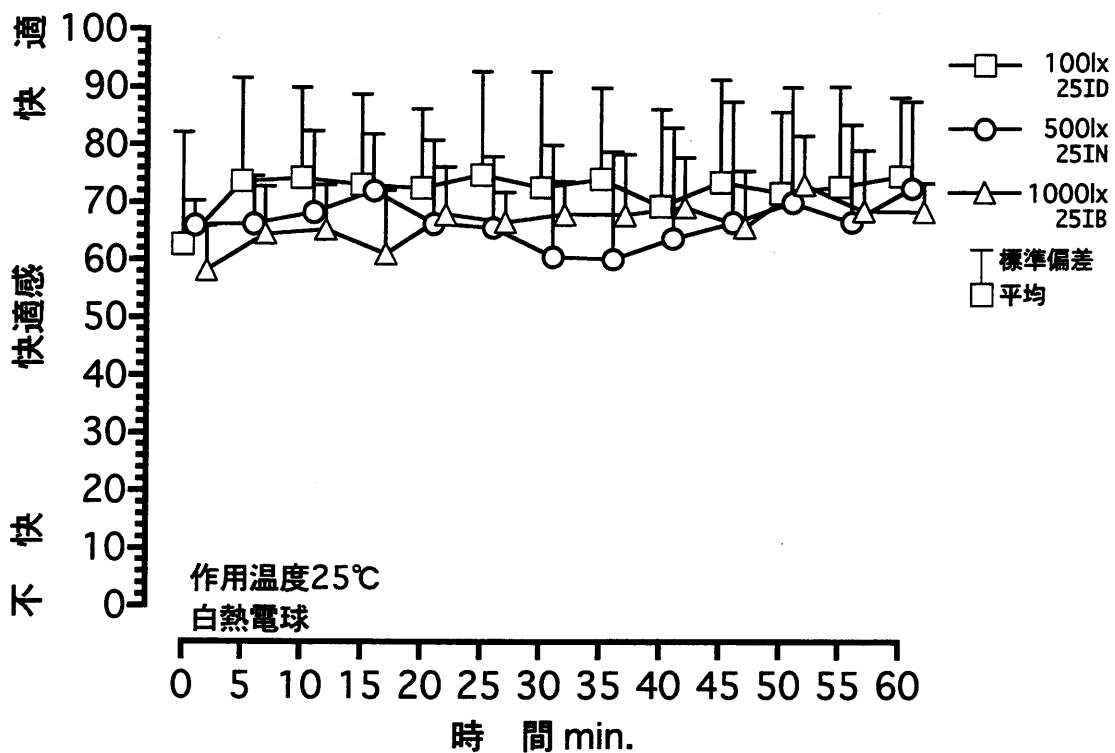


図 4-4-9 (b) 快適感の経時変動 (照度比較・白熱電球)

4.4.4.2 作用温度 28℃条件

作用温度 28℃条件における快適感の経時変動を、光源の照度条件ごとに図 4-4-10 (a) から図 4-4-10 (c) に、光源の色温度ごとに図 4-4-11 (a), 図 4-4-11 (b) に示す。快適感の経時変動は、被験者 4 名の平均値と標準偏差である。

光源の色温度 (F, I) で比較すると、図 4-4-10 (a) に示す、100lx 条件 (28FD, 28ID) の場合、曝露中、両光源とも快適感、数値にして 70 付近の一定した反応であった。図 4-4-10 (b) に示す、500lx 条件 (28FN, 28IN) の場合、両光源とも曝露中、快適感、快適方向に推移した。図 4-4-10 (c) に示す、1000lx 条件 (28FB, 28IB) の場合、曝露中、蛍光灯 (4200K) に比べ、白熱電球 (2850K) の快適感、概ね、快適方向の反応であった。光源の色温度間で分散分析を行ったところ、1000lx 条件 (28FB, 28IB) の曝露 20 分、45 分経過後および曝露終了時の快適感に光源の色温度による有意差 ($p < 0.05$) が認められた。光源の色温度は、快適感に有意に影響を及ぼすと考えられ、1000lx 程度の高照度の場合、色温度が低いほど被験者は、より快適に感じると推察される。

光源の照度 (D, N, B) で比較すると、蛍光灯 (F) の場合、図 4-4-11 (a) より、照度が低いほど快適感、曝露中、概ね快適方向の反応であった。蛍光灯の照度間で分散分析を行ったところ、曝露 10 分、25 分および 50 分経過後の快適感に、照度による有意差 ($p < 0.05$) が認められた。光源が蛍光灯の場合、照度は快適感に有意に影響を及ぼし、被験者は照度が低いほど、より快適に感じる傾向があると考えられる。白熱電球 (I) の場合、図 4-4-11 (b) より、500lx 条件 (28IN) の快適感、曝露中、快適方向に推移し曝露終了時には、白熱電球の照度条件のなかで、最も快適の反応となった。白熱電球の照度間で分散分析を行ったところ、曝露終了時の快適感に照度条件による有意差 ($p < 0.05$) が認められた。光源が白熱電球の場合、照度は快適感に有意に影響を及ぼし、被験者は、500lx 程度の照度を、快適に感じる傾向があると考えられる。

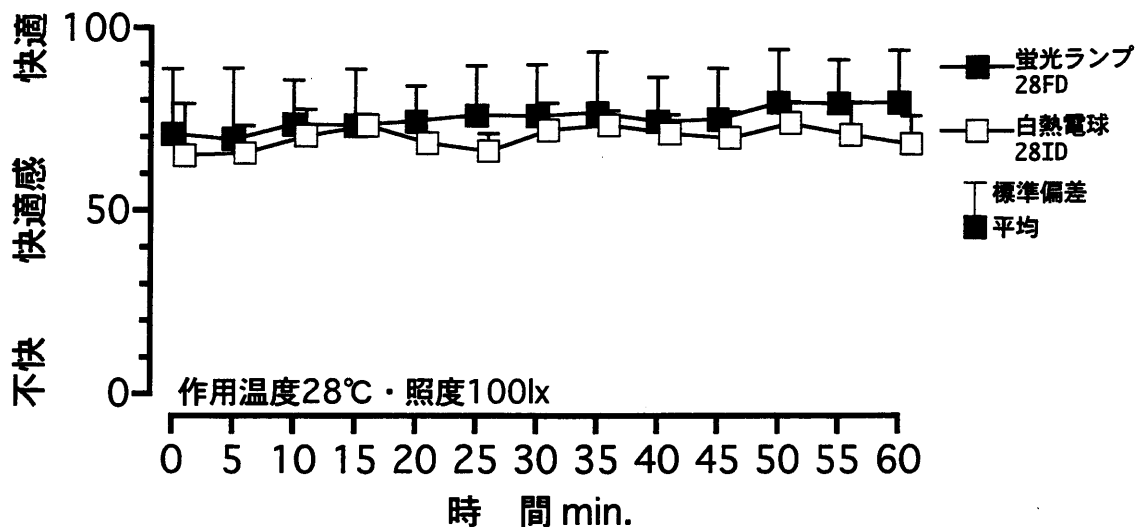


図 4-4-10 (a) 快適感の経時変動 (色温度比較・100lx)

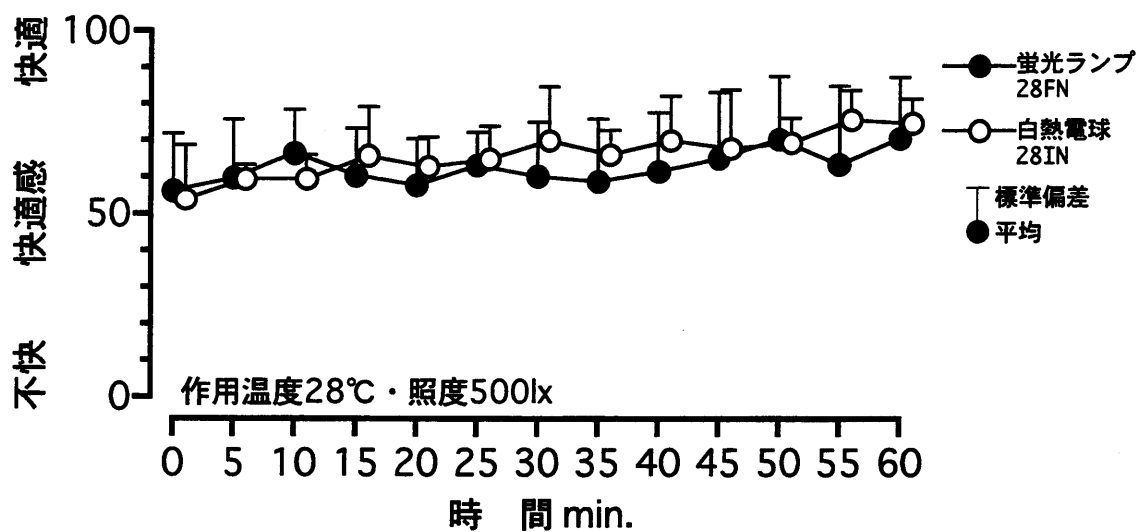


図 4-4-10 (b) 快適感の経時変動 (色温度比較・500lx)

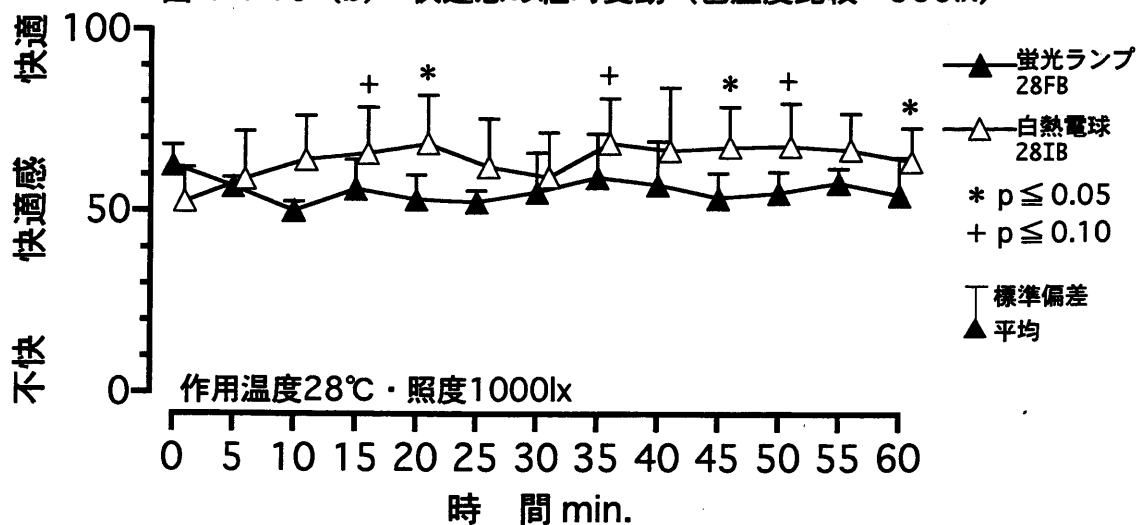


図 4-4-10 (c) 快適感の経時変動 (色温度比較・1000lx)

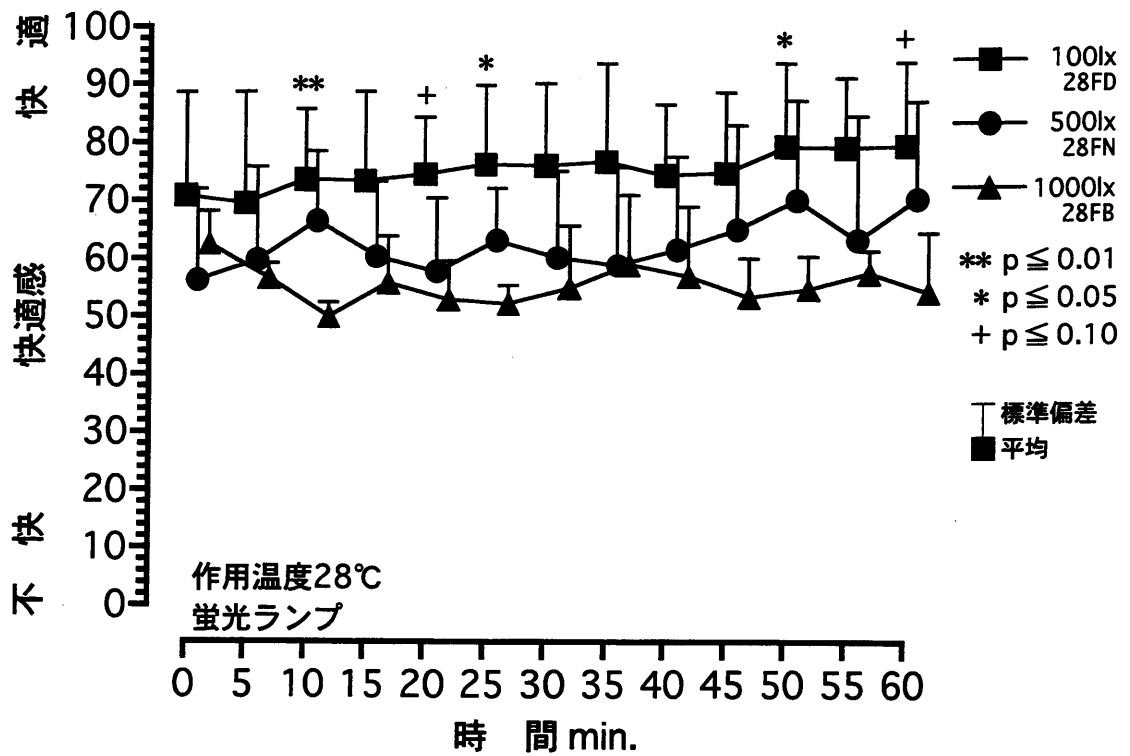


図 4-4-11 (a) 快適感の経時変動 (照度比較・蛍光ランプ)

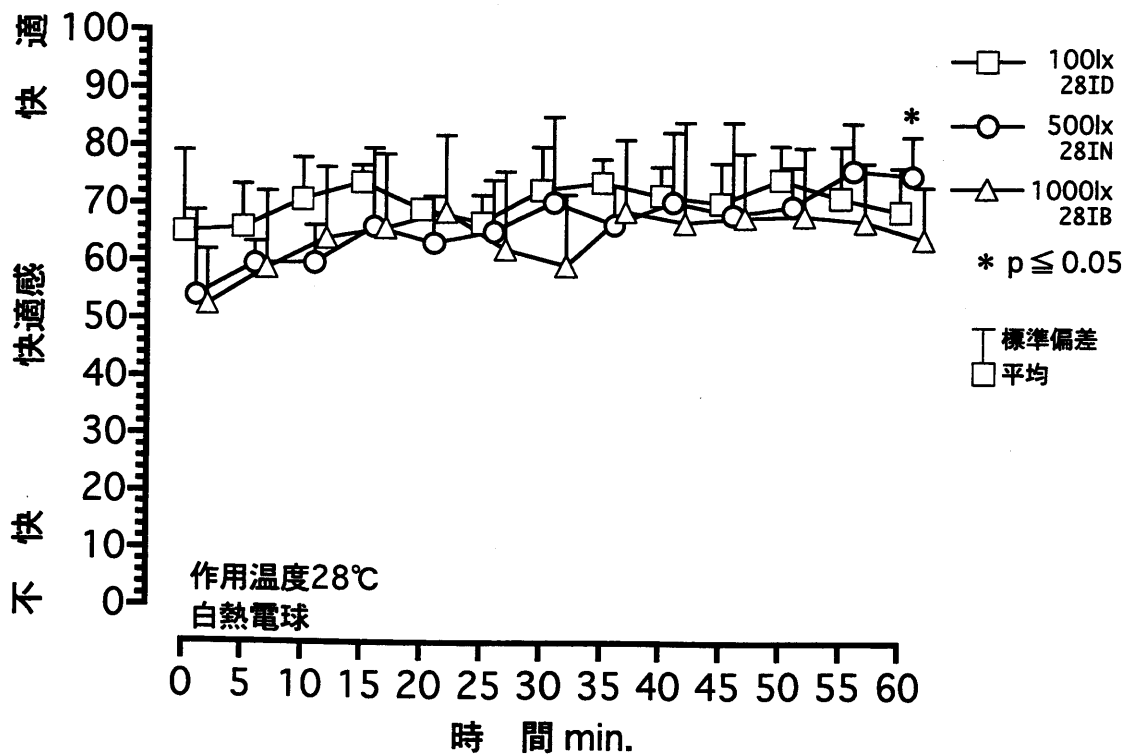


図 4-4-11 (b) 快適感の経時変動 (照度比較・白熱電球)

4.4.4.3 作用温度31℃条件

作用温度31℃条件における快適感の経時変動を光源の照度条件ごとに図4-4-12 (a) から図4-4-12 (c) に、光源の色温度ごとに図4-4-13 (a), 図4-4-13 (b) に示す。快適感の経時変動は、被験者4名の平均値と標準偏差である。

光源の色温度 (F, I) で比較すると、図4-4-12 (a) より、100lx条件 (31FD, 31ID) の場合、曝露15分経過頃から45分経過頃まで蛍光灯 (4200K) に比べ、白熱電球 (2850K) の快適感、快適方向の反応であった。図4-4-12 (b), 図4-4-12 (c) より、500lx, 1000lx条件 (31FN, 31IN, 31FB, 31IB) の場合、両光源とも快適感、曝露中、数値にして30から40程度で、概ね一定の反応であった。光源の色温度間で分散分析を行ったところ、100lx条件 (31FD, 31ID) の曝露25分経過後の快適感に、光源の色温度による有意差 ($p < 0.05$) が認められた。100lx程度の低照度の場合、白熱電球を被験者がより快適に感じる傾向が認められたが、一時的であり、明確な傾向が示されているとは言い難く、今後、検討の余地があると考えられる。

光源の照度 (D, N, B) で比較すると、蛍光灯 (F) の場合、図4-4-13 (a) より、曝露15分経過頃から45分経過頃まで100lx条件 (31FD) の快適感が、不快方向に推移した。500lx, 1000lx条件 (31FN, 31FB) の快適感、曝露中、数値にして30から40程度で、概ね一定の反応であった。蛍光灯の照度間で分散分析を行ったところ、曝露25分経過後の快適感に、照度による有意差 ($p < 0.05$) が認められた。蛍光灯の場合、100lx程度の低照度を被験者が不快に感じる傾向が認められたが、一時的であり、明確な傾向が示されているとは言い難く、今後、検討の余地があると考えられる。白熱電球 (I) の場合、図4-4-13 (b) より、曝露50分経過頃から、500lx条件 (31IN) の快適感が、快適方向に推移した。白熱電球の照度間で分散分析を行ったところ、快適感に照度条件による有意差は、認められなかった。

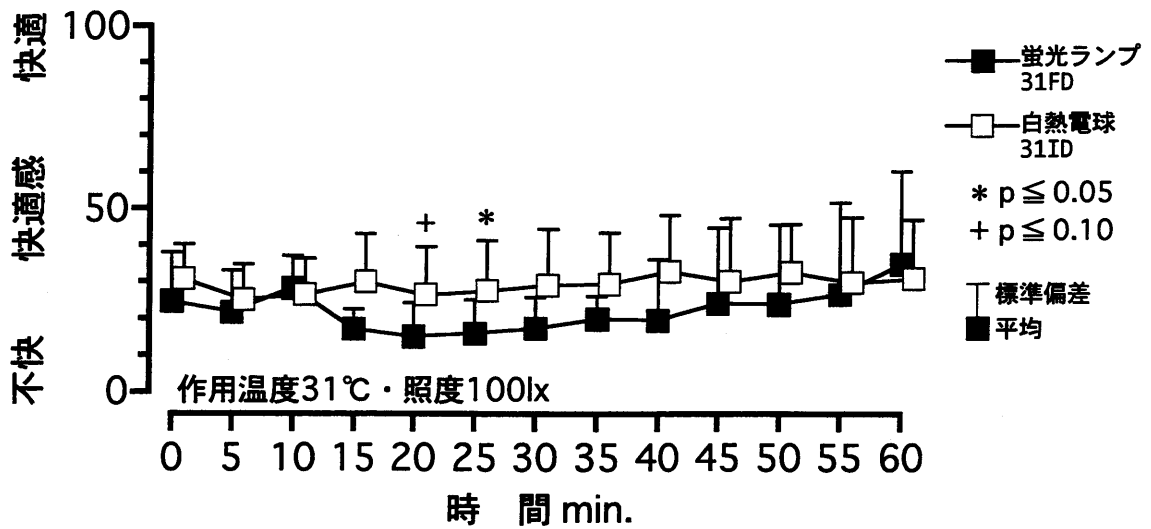


図 4-4-12 (a) 快適感の経時変動 (色温度比較・100lx)

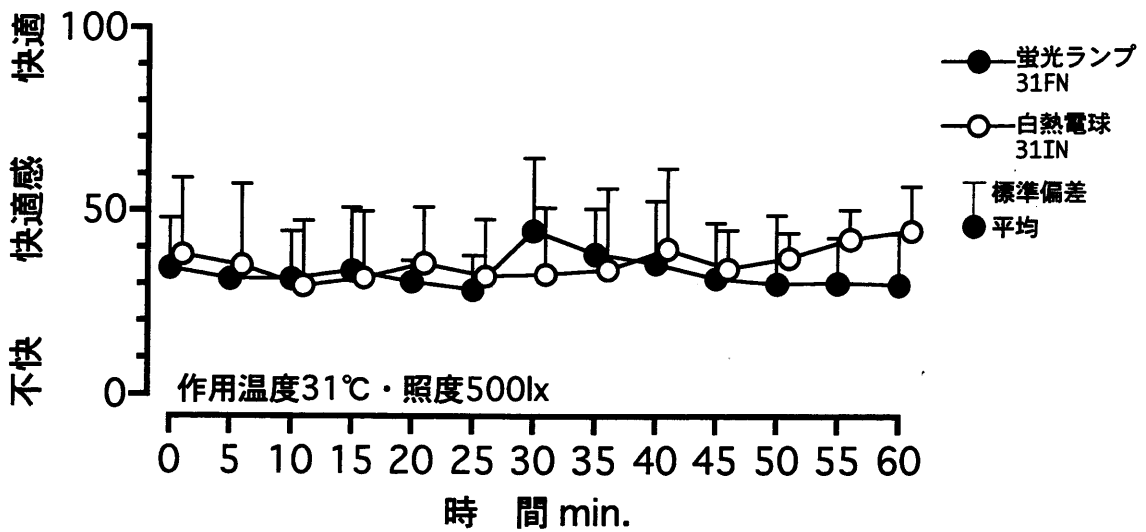


図 4-4-12 (b) 快適感の経時変動 (色温度比較・500lx)

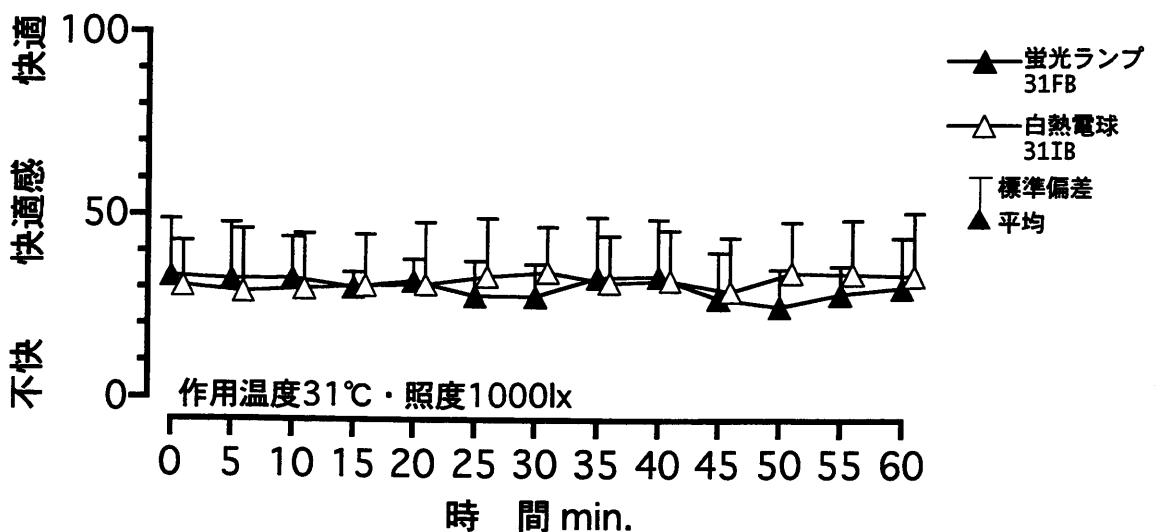


図 4-4-12 (c) 快適感の経時変動 (色温度比較・1000lx)

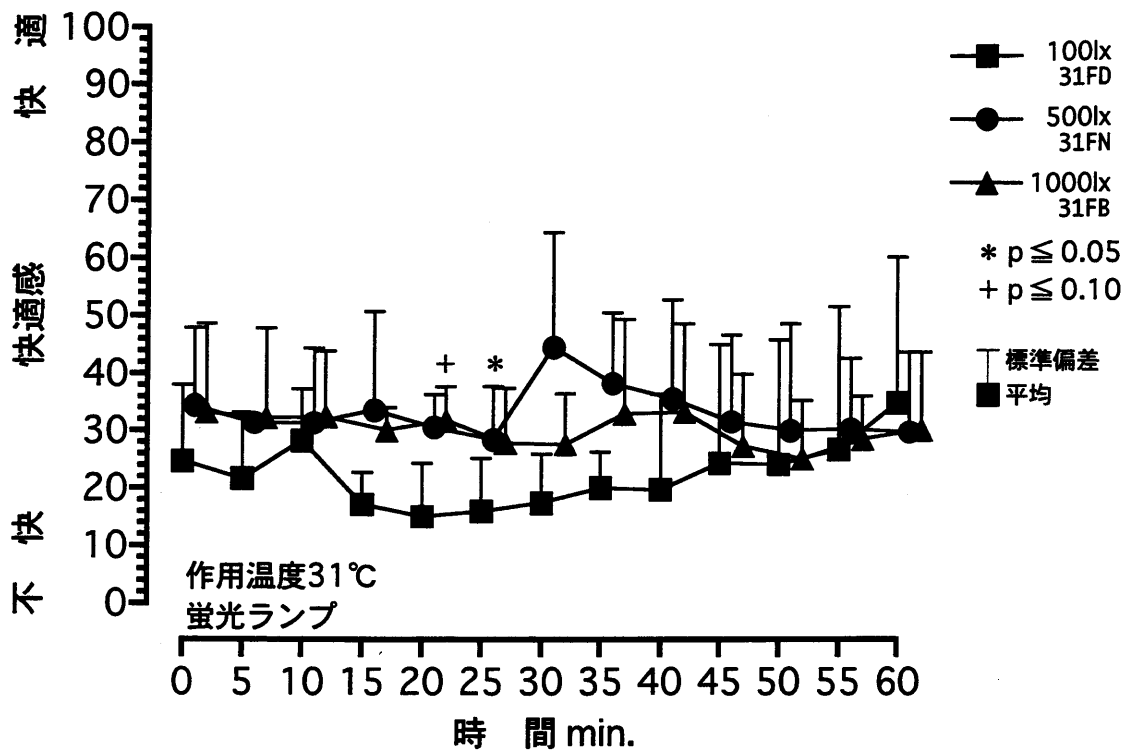


図4-4-13 (a) 快適感の経時変動 (照度比較・蛍光ランプ)

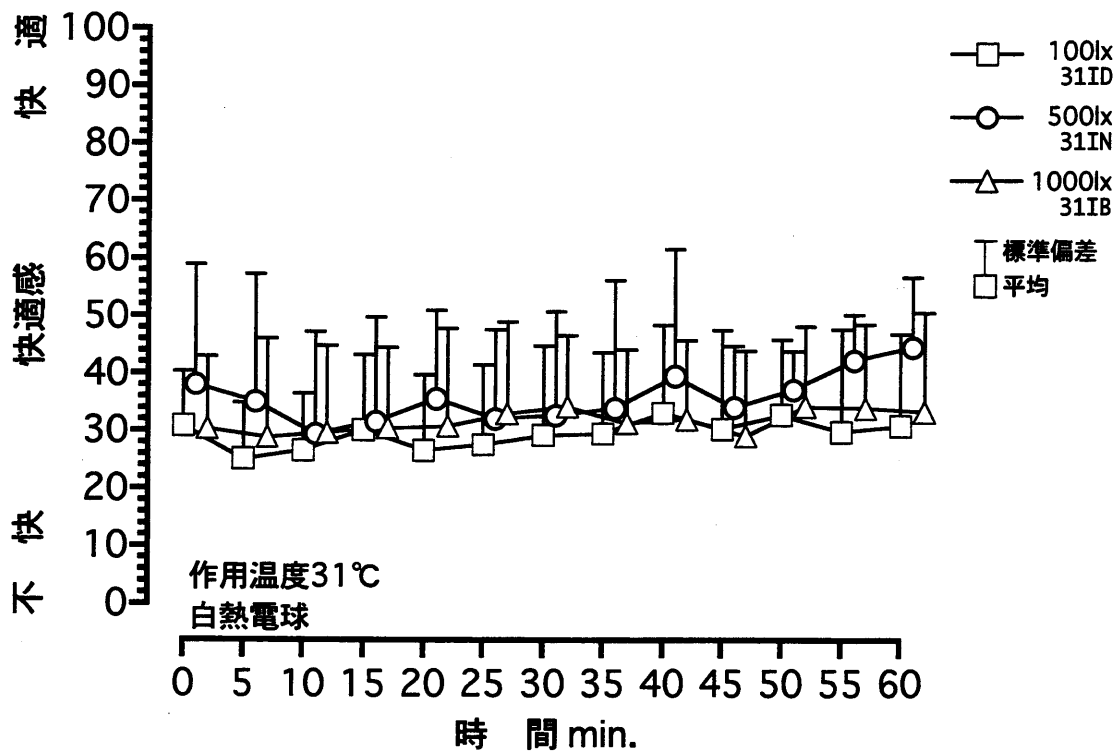


図4-4-13 (b) 快適感の経時変動 (照度比較・白熱電球)

4.4.4.4 快適感の総括

人工光源の色温度、照度が人体心理反応としての快適感に及ぼす影響を総括すると、光源の色温度が快適感に及ぼす影響は、作用温度25℃あるいは28℃、照度1000lxの場合に有意に認められた。作用温度25℃のような、熱的中立より若干寒い側の環境では、1000lx程度の高照度において、被験者は光源の色温度が高いほど、より快適に感じる傾向があると考えられる。温熱環境が熱的中立（作用温度28℃）では、1000lx程度の高照度において、被験者は、光源の色温度が低いほど、より快適に感じる傾向があると考えられる。光源の照度が快適感に及ぼす影響は、蛍光ランプの場合、作用温度25℃あるいは28℃、白熱電球の場合、作用温度28℃で有意に認められた。光源が蛍光ランプの場合、熱的中立より若干寒い側の環境では、照度が高いほど被験者は、より快適に感じ、温熱環境が熱的中立では、照度が低いほど被験者は、おかれている環境を、より快適に感じる傾向があると考えられる。光源が白熱電球の場合、温熱環境が熱的中立で500lx程度の照度を、被験者は最も快適に感じると考えられる。

心地よい光源の色温度と照度の関係の検討を試みるが、本研究で用いた快適感には、環境全体を評定しており、照明のみを評定している、既往の研究結果と単純に比較することはできないと考えられる。堀江ら¹⁰⁾は、不快さは異種環境要因を加算的に表現することができる、非特異的尺度であることを示したが、本研究で用いた快適感も、異種環境要因を加算的に表現することができるならば、本研究で示された、同一温熱環境条件下での快適感の差を、光源の色温度あるいは照度の差異に起因するものとして抽出できると考えられる。以下、快適感をそのように捉え、既往の研究等と比較を行った。

Kruithof¹¹⁾は、図4-4-14に示すような、心地よい色温度と照度の範囲の線図を報告している。本研究の色温度と照度条件をKruithofの結果にプロットすると、蛍光ランプ（色温度4200K）では500lx、1000lxは心地よい範囲内であり、100lxは不快となる。白熱電球（色温度2850K）では、500lx、1000lxは不快であり、100lxは心地よい範囲と不快との境界線付近に位置している。本研究の結果をKruithofの結果に照らし合わせながら、光源の色温度による比較を行う。作用温度25℃では、白熱電球（2850K）に比べ、蛍光ランプ（4200K）光源を被験者は、より快適に感じおり、これはKruithofの結果と同様の傾向であると考えられる。作用温度28℃では、蛍光ランプ（4200K）に比べ、白熱電球（2850K）光源を被験者は、より快適に感じており、Kruithofの結果と異なる傾向であると考えられる。光源の照度による比較を行うと、蛍光ランプ（4200K）の場合、作用温度25℃では照度が高いほど被験者は、より快適に感じており、これはKruithofの結果と同様の傾向であると考えられる。作用温度28℃では照度が低いほど被験者は、より快適に感じており、これはKruithofの結果と異なる傾向

であると考えられる。白熱電球（2850K）の場合、作用温度28℃において、被験者は500lxを、最も快適に感じており、これはKruithofの結果と異なる傾向であると考えられる。以上から本研究の快適感の結果は、作用温度25℃のような熱的中立より若干寒い側の環境では、Kruithofの結果と同様の傾向を示し、作用温度28℃のような熱的中立環境では、異なる傾向を示すと考えられる。今回、快適感に示された傾向から、日本人の心地よい、照明の色温度と照度の関係の一端が、窺えたと考えられるが、温熱環境により、その傾向が異なるため、更なる検討が必要であると考えられる。

Rohlesら¹²⁾は、熱的中立以下（ET*20℃）では、昼光色蛍光ランプ（色温度6500K）、白色蛍光ランプ（4200K）に比べ、温白色蛍光ランプ（3500K）が光源の場合、より快適であると報告している。本研究は、白色蛍光ランプと白熱電球が光源であるので、単純に比較はできないが、作用温度25℃では、白熱電球（2850K）に比べ、白色蛍光ランプ（4200K）が光源の場合、より快適であったので、Rohlesらとは異なる傾向であると考えられる。これは乾¹³⁾が「日本人は総じてより冷たい光が好まれると考えられる。」と述べているように、日本人の光色の好みによるものが一因として考えられる。

CIE室内照明ガイド¹⁴⁾の、心地よい色温度と照度関係によると、白色蛍光ランプ（4200K）では1000lx～2000lx、白熱電球（2850K）では500lx以下を心地よい照度レベルとしている。本研究の作用温度25℃・蛍光ランプ光源、作用温度28℃・白熱電球光源における快適感、CIEガイドと一致する結果となった。作用温度28℃・蛍光ランプ光源における快適感の結果は、CIEガイドとは異なる結果となった。CIE室内照明ガイドを日本に適用させる場合、検討が必要であると考えられる。

なお、すべての条件における被験者4名の快適感の経時変動を、巻末の付録に添付する。

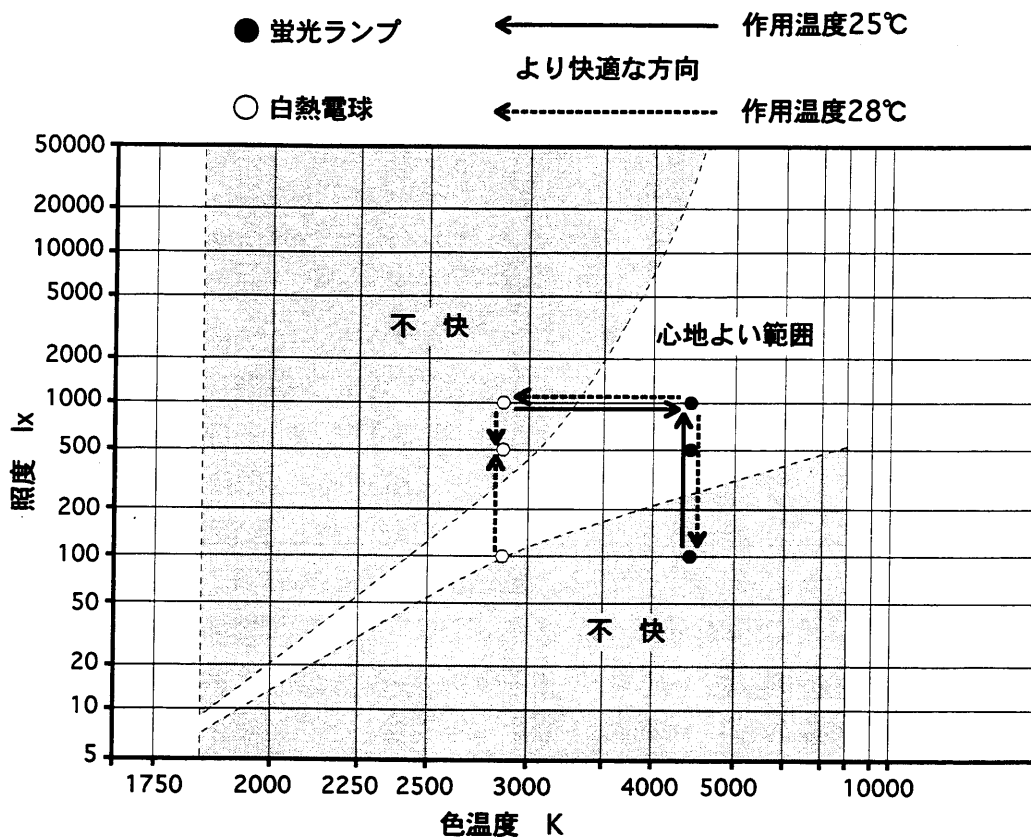


図 4-4-14 Kruthof による、心地よい照明の色温度と照度の関係と本研究における快適感との比較

4.4.5 温冷感と快適感の関係

曝露開始時の温冷感にたいする快適感の関係を図 4-4-15 に示す。温冷感、快適感、被験者 4 名の平均である。曝露開始時に、最も快適であったのは、作用温度 25℃・蛍光ランプ 1000lx 条件 (25FB) であった。その時の温冷感は熱的中立より若干寒い方向 (数値にして 42 程度) であった。

曝露終了時の温冷感にたいする快適感の関係を図 4-4-16 に示す。温冷感、快適感、被験者 4 名の平均である。曝露終了時に、最も快適であったのは、作用温度 28℃・蛍光ランプ 100lx 条件 (28FD) であった。その時の温冷感は熱的中立より若干寒い方向 (数値にして 45 程度) であった。作用温度 25℃・白熱電球の各照度条件 (25ID, 25IN, 25IB) は、温冷感と快適感の関係が、作用温度 28℃・蛍光ランプ 500lx 条件 (28FN), 作用温度 28℃・白熱電球 100lx 条件 (28ID), 同 500lx 条件 (28IN) とほぼ等しい。これらの条件は物理的温熱環境によらず、心理反応が等しいと考えられるが、作用温度 25℃・白熱電球の各照度条件と作用温度 28℃条件とでは、平均皮膚温の差が最大で 2.4℃ある。これは温熱環境が熱的中立以下では、光源が白熱電球である場合、心理反応に現れない生理的熱スト

レスを人体が受けている可能性があることが示唆される。

温冷感と快適感の関係を総括すると、曝露開始時、曝露終了時ともに快適感が最も快適方向となるのは、温冷感が熱的中立より若干寒い方向であった。これは、温熱環境の夏季至適域を提案した志村ら¹⁵⁾の研究と同様の結果となった。曝露開始時の過渡状態と曝露終了時の定常状態では、最も快適であった作用温度、照度レベルは異なったが、光源は両状態とも蛍光灯であった。Obara¹⁶⁾は、日本人は障子越しの明るく拡散された昼光に馴染んでおり、同様の特性を持つ蛍光灯ランプに違和感を感じず、他に例をみない蛍光灯ランプの普及率になったと報告している。Obaraが指摘しているように、最も快適である場合の光源が、蛍光灯ランプであったのは、日本人の心地よい、照明の色温度と照度の関係の特異性が、一因として考えられる。

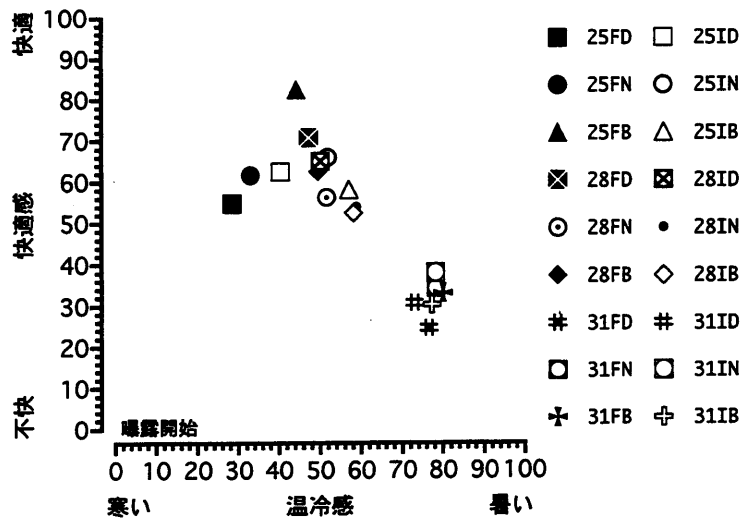


図 4-4-15 温冷感と快適感の関係 (曝露開始時)

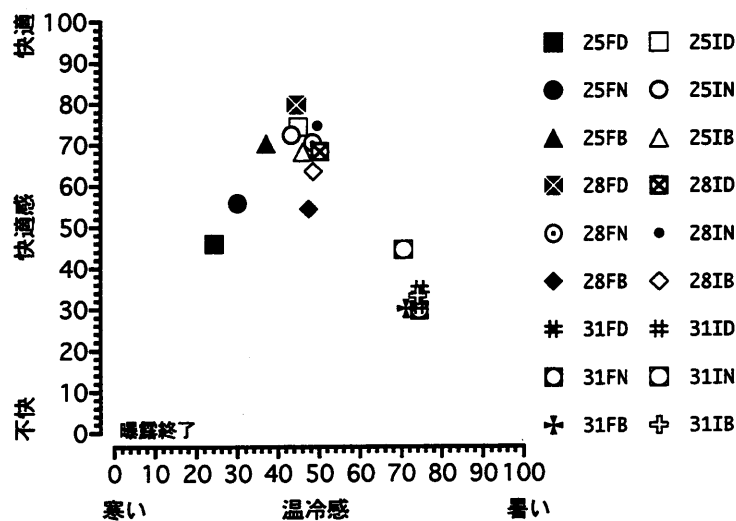


図 4-4-16 温冷感と快適感の関係 (曝露終了時)

4.5 摘要

本章では、人工光源の色温度、照度が温熱環境に因る人体生理・心理反応に及ぼす影響を明らかにすることを目的とし、作用温度3条件 (25℃, 28℃, 31℃)、光源2種類 (白色蛍光ランプ・色温度4200K, 白熱電球・色温度2850K)、照度3条件 (100lx, 500lx, 1000lx) を組み合わせた18条件に、被験者 (青年男子4名) を曝露する実験を行った。また日本人を対象とした、心地よい光源の色温度と照度の関係を併せて検討した。以下に得られた知見を記す。

1. 人体生理反応としての平均皮膚温は、作用温度の影響を受けるが、光源の色温度、照度による明確な影響は認められなかった。
2. 人体生理反応としての経路別熱交換量は、作用温度の影響を受けるが、光源の色温度、照度による明確な影響は認められなかった。
3. 人体心理反応としての温冷感を、光源の色温度で比較すると、作用温度25℃あるいは28℃の場合、色温度4200Kの白色蛍光ランプに比べ、色温度2850Kの白熱電球の温冷感は、暑い方向となる傾向が示された。被験者は、光源の色温度が低い環境ほど、より暑く感じると考えられ、光源の色温度を色相と捉えるならば、"hue-heat" hypothesis を支持する結果となった。
4. 人体心理反応としての温冷感を、光源の照度で比較すると、作用温度25℃あるいは28℃で光源が白熱電球の場合、温熱環境、光環境が変化する過渡状態において、照度が高いほど、温冷感は暑い方向となる傾向が示された。被験者は白熱電球を心理的に放射熱源として捉え、照度が高いほど光源の放射温度を高温に知覚し、より暑く感じたと考えられる。
5. 人体心理反応としての快適感を、光源の色温度で比較すると、作用温度25℃・照度1000lxの場合、曝露開始時の過渡状態で、色温度2850Kの白熱電球に比べ、色温度4200Kの蛍光ランプの快適感が快適方向となる傾向が示された。作用温度28℃・照度1000lxの場合、白色蛍光ランプに比べ、白熱電球の快適感は、快適方向となる傾向が示された。これらは既往の研究と、必ずしも同様の傾向を示す結果とはならなかった。
6. 人体心理反応としての快適感を、光源の照度で比較すると、作用温度25℃・蛍光ランプの場合、照度が高いほど快適感が、快適方向となり、作用温度28℃・蛍光ランプの場合、照度が低いほど快適感が、快適方向となる傾向が示された。作用温度28℃・白熱電球の場合、照度500lxで最も快適となる傾向が示された。これらは既往の研究と、必ずしも同様の傾向を示す結果とはならなかった。
7. 曝露開始時の過渡状態、曝露終了時の定常状態とも、快適感が最も快適方向であったのは、光源が蛍光ランプの場合であった。これは、日本人の照明の色温度と照度の好みに関する特異性が、一因として考えられる。

第4章引用文献

- 1) 堀越哲美, 南野脩, 磯田憲生, 小林陽太郎: 人工気候室内における温熱条件と人体側条件の人体影響に関する実験的研究, 日本建築学会論文報告集, 第229号, pp. 129-139, 1975
- 2) 伊藤孝: 日本における蛍光ランプ普及の背景, 照明学会誌, 第72巻, 第5号, 1988
- 3) 藏澄美仁, 堀越哲美, 土川忠浩, 松原斎樹: 日本人の体表面積に関する研究, 日本生気象学会雑誌, 第31号, 第1巻, pp. 5-29, 1994
- 4) Horikoshi, T. and Kobayashi, Y.: Configuration Factors between a Rectangular Solid as a Model of the Human Body and Rectangular Planes, for Evaluation of the Influence of Thermal Radiation on the Human Body II. Characteristics of Configuration Factors for the Rectangular Solids, 日本建築学会計画系論文報告集第267号pp. 91-101, 1978
- 5) Hardy, J. D. and DuBois, E. F.: The Technic of Measuring Radiation and Convection, Journal of Nutrition, Vol. 15, No. 5, pp. 461-475, 1938
- 6) 堀越哲美, 磯田憲生, 小林陽太郎: 風洞内温熱環境条件の人体に及ぼす影響に関する実験的研究(男子裸体) その2 夏期平均皮膚温と温冷感申告, 空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集, pp. 27-30, 1974
- 7) 杉本賢: 照明環境要素の生体への影響に関する研究-照度と生理負担の関係(その2) -, 照明学会誌, 第65巻, 第4号, pp. 41-45, 1981
- 8) Jin ISHII, Tetsumi HORIKOSHI: The combined effect of air temperature and illuminance on the human physiological and psychological responses, Archives of Complex Environmental Studies, pp. 1-8, 1995
- 9) Bennett, C. A. and Rey, P.: What's So Hot About Red?, Human Factors, Vol. 14, No. 2, pp. 149-154, 1972
- 10) 堀江悟郎, 桜井美政, 松原斎樹, 野口太郎: 室内における異種環境要因がもたらす不快さの加算的表現, 日本建築学会計画系論文報告集, 第387号, pp. 1-7, 1988
- 11) Kruithof, A. A.: Tubular Luminescence Lamps for General Illumination, Philips Technical Review, Vol. 6, No. 3, pp. 65-73, 1941
- 12) Rohles, F. H. Jr., Bennett C. A. and Milliken, A. G.: The effects of lighting, color, and room decor on thermal comfort, ASHRAE Transactions, Vol. 87, No. 2, pp. 511-527, 1981
- 13) 乾正雄: 建築計画講座 照明と視環境, 理工図書, 1978
- 14) CIE Publication No. 29, Guide on Interior Lighting, 1975

- 15) 志村欣一, 堀越哲美, 山岸明浩 : 日本人を対象とした室内温湿度条件の至適域に関する実験的研究, 日本建築学会計画系論文集, 第 480 号, pp. 15-24, 1996
- 16) Obara, K. : Fluorescent Home Lighting in Japan, International Lighting Review, No. 2, pp. 38-41, 1980

第5章 結論

5.1 総括

5.2 今後の課題と将来への展望

5.1 総括

本研究は、照明が温熱環境に起因する人体の生理反応、心理反応に及ぼす影響を明らかにすることを目的として、人工光源を温熱的な観点で捉え、人工光源を温熱的に表現するための温熱環境に関する諸係数を導出し、人工光源の色温度、照度が温熱環境に因る、人体生理・心理反応に及ぼす影響を、被験者実験をとおして検討した。また、日本人を対象とした、心地よい照明の色温度と照度の関係を併せて検討した。以下に本研究で得られた知見を示し、総括とする。

第1章において、人工光源の色温度、照度が温熱環境に因る、人体生理・心理反応に及ぼす影響を取り扱う本研究の目的と意義を述べた。色相、光源の色温度、照度が人体心理・生理反応に及ぼす影響に関する既往の研究の文献調査を行い、人工光源の色温度、照度が人体生理・心理反応に及ぼす影響に関する研究が僅少であることを明らかにした。人体と環境との間の熱交換経路の一つである対流熱交換量に関わる人体の自然対流熱伝達率に関する既往の研究の文献調査を行った。本研究の光源の人体影響に関する実験で、作用温度を設定する際、対流熱伝達率を用いるにあたり、既往の研究には妥当な値のないことを明らかにした。これらを前提として、本研究の方法と範囲を明らかにした。

第2章において、人体と環境との間の物理的相互関係を記述している人体熱収支式を提示した。さらに人体熱収支式内で記述され、本研究において実測を行う、経路別熱交換量に関する理論式を提示した。この人体熱収支式に基づき、人工光源の色温度、照度が温熱環境に因る人体生理・心理反応に及ぼす影響を明らかにする際に、温熱環境指標として用いる、作用温度を提示した。

第3章において、光源の色温度、照度が温熱環境に因る、人体生理・心理反応に及ぼす影響を明らかにする際、作用温度条件を適切に設定するために必要とされる、人体の自然対流熱伝達率および放射熱伝達率を、被験者を用いた実測より提案した。また、人体局所と光源との間の熱交換量が、人体生理・心理反応に及ぼす影響を明らかにするために、人体局所の対流および放射熱伝達率を実測より提案した。さらに、対流による熱交換量に分布があると考えられる、人体部位の周径方向の対流および放射熱伝達率の分布性状の把握を試みた。以下に得られた知見を記す。

1. 椅座姿勢の場合、躯幹（臍）、前腕（前膊外）、大腿、下腿における周径方向の対流・放射熱伝達率分布は均一ではなく、その分布性状を把握できた。分布があるという仮定の下での測定部位の値から、その部位における対流・放射熱伝

達率の平均値を推定する係数を求めた。係数は、周径方向の部位対流・放射熱伝達率の平均値を、Hardy-DuBoisの7点法の測定位置での対流・放射熱伝達率で除して求めた。この係数を各部位の対流・放射熱伝達率に乗じることにより、分布を考慮した部位対流・放射熱伝達率とした。

2. 部位放射熱伝達率を推定した結果、前額および下腿の放射熱伝達率は他の部位に比べ大きく、臍は他の部位に比べ小さい結果となった。既往の研究と比較した結果、かなりよく一致した。
3. 部位自然対流熱伝達率を推定した結果、頭部、躯幹の皮膚温測定点である、前額、臍では、測定方法や条件に検討の余地があると考えられる。前膊外、手背、大腿、下腿、足背においては、単純立体に対する無次元式から求められた、平均自然対流熱伝達率の算定式、および既往の研究と比較した結果、かなりよく一致し、熱流計を用いて部位対流熱伝達率を推定することの有効性が確かめられた。
4. 熱流計を用いて部位放射熱伝達率および自然対流熱伝達率を推定し、それらを面積加重平均することによって、人体全身の放射熱伝達率および自然対流熱伝達率を算定した。既往の研究と比較した結果、人体全身の放射熱伝達率および人体全身の自然対流熱伝達率は、概ね妥当な値がえられたと考えられる。分布を考慮した人体全身の放射および自然対流熱伝達率は、既往の研究と若干値が異なり、今後、検討の余地があると考えられる。気温20℃～30℃の範囲では、本研究の結果より、人体全身の放射熱伝達率は4.4W/m²℃、分布を考慮した人体全身の放射熱伝達率は3.9W/m²℃であった。人体全身の自然対流熱伝達率は3.7～3.8W/m²℃、分布を考慮した人体全身の自然対流熱伝達率は5.2～5.5W/m²℃となり、ほぼ一定であると考えられる。

第4章においては、人工光源の色温度、照度が温熱環境に因る人体生理・心理反応に及ぼす影響を明らかにすることを目的とし、作用温度3条件(25℃, 28℃, 31℃)、光源2種類(白色蛍光ランプ・色温度4200K, 白熱電球・色温度2850K)、照度3条件(100lx, 500lx, 1000lx)を組み合わせた18条件に、被験者(青年男子4名)を曝露する実験を行った。また日本人を対象とした、心地よい光源の色温度と照度の関係を併せて検討した。以下に得られた知見を記す。

1. 人体生理反応としての平均皮膚温は、作用温度の影響を受けるが、光源の色温度、照度による明確な影響は認められなかった。
2. 人体生理反応としての経路別熱交換量は、作用温度の影響を受けるが、光源の色温度、照度による明確な影響は認められなかった。
3. 人体心理反応としての温冷感を、光源の色温度で比較すると、作用温度25℃

あるいは28℃の場合、色温度4200Kの白色蛍光ランプに比べ、色温度2850Kの白熱電球の温冷感は、暑い方向となる傾向が示された。被験者は、光源の色温度が低い環境ほど、より暑く感じると考えられ、光源の色温度を色相と捉えるならば、"hue-heat" hypothesis を支持する結果となった。

4. 人体心理反応としての温冷感を、光源の照度で比較すると、作用温度25℃あるいは28℃で光源が白熱電球の場合、温熱環境、光環境が変化する過渡状態において、照度が高いほど、温冷感は暑い方向となる傾向が示された。被験者は白熱電球を心理的に放射熱源として捉え、照度が高いほど光源の放射温度を高温に知覚し、より暑く感じたと考えられる。
5. 人体心理反応としての快適感を、光源の色温度で比較すると、作用温度25℃・照度1000lxの場合、曝露開始時の過渡状態で、色温度2850Kの白熱電球に比べ、色温度4200Kの蛍光ランプの快適感が快適方向となる傾向が示された。作用温度28℃・照度1000lxの場合、白色蛍光ランプに比べ、白熱電球の快適感は、快適方向となる傾向が示された。これらは既往の研究とは、必ずしも同様の傾向を示す結果とは、ならなかった。
6. 人体心理反応としての快適感を、光源の照度で比較すると、作用温度25℃・蛍光ランプの場合、照度が高いほど快適感が、快適方向となり、作用温度28℃・蛍光ランプの場合、照度が低いほど快適感が、快適方向となる傾向が示された。作用温度28℃・白熱電球の場合、照度500lxで最も快適となる傾向が示された。これらは既往の研究とは、必ずしも同様の傾向を示す結果とは、ならなかった。
7. 曝露開始時の過渡状態、曝露終了時の定常状態とも、快適感が最も快適方向であったのは、光源が蛍光ランプの場合であった。これは、日本人の心地よい照明の色温度と照度の関係の特異性が、一因として考えられる。

5.2 今後の課題と将来への展望

本研究は、人工光源を温熱的な観点で捉え、人工光源を温熱的に表現するための温熱環境に関する諸係数を導出し、人工光源の色温度、照度が温熱環境に起因する、人体生理・心理反応に及ぼす影響を、被験者実験をとおして明らかにし、さらに日本人を対象とした心地よい照明の色温度と光源の関係を検討することを目的としている。結果として温熱環境に関する係数としての椅座人体の自然対流熱伝達率を提案し、光源の色温度、照度が温熱環境に因る、人体生理反応・心理反応に及ぼす影響を明らかにし、さら日本人を対象とした、心地よい照明の色温度と照度の関係を検討した。しかしながら、本研究で得られた知見を、実際の温熱環境設計に適用する場合、若干考慮すべき点がある。このことを踏まえた上で、本研究の今後の課題と将来の展望を以下に述べる。

- 1) 本研究では、健康な青年男子を被験者として、椅座人体の自然対流熱伝達率を提案した。対流熱伝達率は、固体表面の形状に影響を受けるため、体格・体型の異なる幼児や老人あるいは女性に本研究の知見を適用するには、問題があると考えられる。特に幼児や高齢者は、身体機能が青年ほど優れてはいないので、実在の環境における熱交換量を把握するため、あるいは幼稚園、老人ホームを設計するためにも、幼児や高齢者を被験者に用いた、研究を行う必要がある。
- 2) 本研究では、安静状態での人体の自然対流熱伝達率を提案した。しかしヒトは、多様な活動量の下で行動をしており、本研究の知見は、ごく限られた条件のみにしか、適用できないと考えられる。特に、歩行時など活動量が安静でない場合の対流熱伝達率の研究は、ごく僅かであり、本研究で用いた、熱流計の比較的簡便に計測できる特性を考慮すると、安静でない場合の対流熱伝達率を、研究する必要がある。
- 3) 本研究では、椅座姿勢での人体の自然対流熱伝達立を提案した。ライフスタイルが欧米化したと言われてはいるが、日本人は、現在でも胡座や正座など、床座の姿勢をとることがある。しかし、それら床座姿勢を対象とした研究は、ごく僅かであり、床座での対流熱伝達立に関する研究が、必要であると考えられる。そのことにより、日本における生活を考慮した、より日本人に適した対流熱伝達率の提案が可能となる。
- 4) 本研究で明らかにした、光源の色温度、照度が温熱環境に因る、人体生理・心理反応に及ぼす影響は、4名の被験者実験による知見であるため、より普遍的な影響を把握するためにも、被験者数を増やした実験を実施する必要があると考えられる。
- 5) 本研究で明らかにした、光源の色温度、照度が、人体生理・心理反応に及ぼす影響は、夏季に実施した実験による知見であるため、冬季あるいは中間期には、異なる影響が人体生理・心理反応に及ぼされることが考えられる。したがって、冬季などに実験を実施し、人体に及ぼされる影響を把握する必要があると考えられる。
- 6) 本研究では、健康な青年男子を被験者として、光源の色温度、照度が、人体生理反応・心理反応に及ぼす影響を明らかにした。しかし年齢や性別の異なる場合、本研究の知見を適用するには問題があると考えられる。特に、眼球

の機能が低下している高齢者などは、本研究とは異なる反応が示されることが推察される。したがって、高齢者を被験者に用いた、研究を行う必要があると考えられる。

- 7) 本研究では、人工光源として色温度 4200K の白色蛍光ランプと 2850K の白熱電球を使用して、温熱環境に因る人体生理・心理反応に及ぼす影響を明らかにした。しかし、実際には多様な人工光源が、建築空間には用いられており、本研究と異なる光源を用いた場合は、人体生理・心理反応に及ぼす影響は異なることが推察される。したがって、本研究と異なる光源を用いた、研究を行う必要があると考えられる。

引用文献

引用文献一覧

1. 英文

- 1) Bennett, C. A. and Rey, P. : What's so hot about red ?, Human Factors, Vol. 14, No. 2, pp. 149-154, 1972
- 2) Berry, P. C. : Effect of colored illumination upon perceived temperature, Journal of Applied Psychology, Vol. 45, No. 4, pp. 248-250, 1961
- 3) Chang, S. KW., Arens, E. and Gonzalez, R. R. : Determination of the effect of walking on the forced convective heat transfer coefficient using an articulated mannikin, ASHRAE Transaction, Vol. 94, 1988
- 4) CIE Publication No. 29, Guide on Interior Lighting, 1975
- 5) Colin, J. and Houdas, Y. : Experimental determination of coefficient of heat exchange of human body, Journal of Applied Physiology, Vol. 22, No. 1, pp. 31-38, 1967
- 6) de Dear, R. J., Arens, E., Hui, Z. and Oguro, M. : Convective and radiative heat transfer coefficients for individual human body segments, International Journal of Biometeorology, Vol. 40, pp. 141-156, 1997
- 7) Fanger, P. O., Breum, N. O. and Jerking, E. : Can colour and noise influence man's thermal comfort ? , Ergonomics, Vol. 20, No. 1, pp. 11-18, 1977
- 8) Flynn, J. E. and Spencer, T. J. : The effects of light source color on user impression and satisfaction, Journal of Illuminating Engineering Society, pp. 167-179, April, 1977
- 9) Gagge, A. P., Winslow, C. -E. A. and Herrington, L. P. : The influence of clothing on physiological reactions of the human body to varying environmental temperatures, American Journal of Physiology, Vol. 124, p. 30, 1938
- 10) Grenne, T. C. and Bell, P. A. : Additional considerations concerning the effect of 'warm' and 'cool' wall colours on energy conservation, Ergonomics, Vol. 23, No. 10, pp. 949-954, 1980
- 11) Hardy, J. D. and DuBois, E. F. : The technic of measuring radiation and convection, Journal of Nutrition, Vol. 15, No. 5, pp. 461-475, 1938
- 12) Horikoshi, T. and Kobayashi, Y. : Configuration Factors between a Rectangular Solid as a Model of the Human Body and Rectangular Planes, for Evaluation of the Influence of Thermal Radiation on the

- Human Body II. Characteristics of Configuration Factors for the Rectangular Solids, 日本建築学会計画系論文報告集, 第 267 号, pp. 91-101, 1978
- 13) Jin ISHII, Tetsumi HORIKOSHI : The combined effect of air temperature and illuminance on the human physiological and psychological responses, Archives of Complex Environmental Studies, pp. 1-8, 1995
 - 14) Kruithof, A. A. : Tubular luminescence lamp for general illumination, Philips Technical Review, Vol. 6, No. 3, pp. 65-73, 1941
 - 15) Mitchell, D. : Convective heat loss from man and other animals, in heat loss from animals and man, Butterworth, London, 1974
 - 16) Morgensen, M. F. and English, H. : Minor studies from the psychological laboratory of Antioch College I . The apparent warmth of colors, American Journal of Psychology, Vol. 37, pp. 427-428, 1926
 - 17) Nelson, T. M., Nilsson, T. H. and Johnson, M. : Interaction of temperature, illuminance and apparent time on sedentary work fatigue, Ergonomics, Vol. 27, No. 1, pp. 89-101, 1984
 - 18) Nielsen, M. and Pedersen, L. : Studies on the heat loss by radiation and convection from the clothed human body, Acta Phys. Scandinav. , Vol. 27, pp. 272-294, 1952
 - 19) Nishi, Y. and Gagge, A. P. : Direct evaluation of convective heat transfer coefficient by naphthalene sublimation, Journal of Applied Physiology, Vol. 29, No. 6, pp. 830-838, 1970
 - 20) Obara, K. : Fluorescent home lighting in Japan, International Lighting Review, No. 2, pp. 38-41
 - 21) Rapp, G. M. : Convective heat transfer and convective coefficients of nude man, cylinders and spheres at low air velocities, ASHRAE Transaction, No. 2264, pp.75-87, 1973
 - 22) Rohles, F. H. Jr. and Wells, W. : The role of environmental antecedents on subsequent thermal comfort, ASHRAE Transactions, Vol. 83, No. 2, 1977
 - 23) Rohles, F. H. Jr., Bennett C. A. and Milliken, A. G. : The effects of lighting, color, and room decor on thermal comfort, ASHRAE Transactions, Vol. 87, No. 2, pp. 511-527, 1981
 - 24) Stolwijk, J. A. J. : Mathematical model of human thermoregulation. In Hardy, J. D., Gagge, A. P. and Stolwijk J. A. J. (Eds), Physiological and Behavioral Thermoregulation, Thomas, Springfield, pp. 703-721, 1970

- 25) Tinker, M. A. : Effect of stimulus–texture upon apparent warmth and affective value of colors, *American Journal of Psychology*, Vol. 51, pp. 532–535
- 26) Toy, N. and Cox, R. N. : A method of measuring free and forced convection heat transfer from the human microenvironment, *Rev. Gen.* , No. 145, pp. 37–41, 1974
- 27) Winslow, C. E. A., Herrington, L. P. and Gagge, A. P. : The determination of radiation and convection exchanges by partitioned calorimetry, *American Journal of Physiology*, Vol. 116, No. 3, pp. 669–684, 1936
- 28) Winslow, C. –E. A., Harrington, L. P. and Gagge, A. P. : Physiological reactions of the human body to varying environmental temperatures, *The American Journal of Physiology*, Vol. 120, No. 1, pp. 1–22, 1937
- 29) Wright, B : The influence of hue, lightness and saturation on apparent warmth and weight, *American Journal of Psychology*, Vol. 75, pp. 232–241, 1962

2. 和文

- 1) 石垣秀圭, 堀越哲美, 植松智樹, 佐橋政人, 土川忠浩, 持田徹, 稗田哲也, 磯田憲生, 久保博子: 人体の対流熱伝達率に関する実験的研究, 人間-生活環境系国際会議, pp. 279-282, 1991
- 2) 伊藤孝: 日本における蛍光ランプ普及の背景, 照明学会誌, 第72巻, 第5号, 1988
- 3) 市原真希, 齋藤正文, 西村美加, 田辺新一: サーマルマネキンを用いた立位・座位人体各部位の放射・対流熱伝達率の測定, 日本建築学会計画系論文集, 第501号, pp. 45-51, 1997
- 4) 乾正雄: 建築計画講座 照明と視環境, 理工図書, 1978
- 5) 大中忠勝, 栃原裕, 高久佳子, 都築和代: 照明の色温度および室温の変化が生理・心理反応に及ぼす影響, 生理人類学会第30回記念大会, p. 2, 1993
- 6) 大野秀夫, 久野覚, 木田光郎, 中原信生: 居住者の温冷感覚に及ぼす温熱環境と色彩環境の複合効果に関する研究, 日本建築学会計画系論文報告集, 第374号, pp. 8-18, 1987
- 7) 環境工学教科書研究会 編: 環境工学教科書, 彰国社, 1996
- 8) 北山直方: 図解 伝熱工学の学び方, オーム社, 1982
- 9) 藏澄美仁, 堀越哲美, 土川忠浩, 松原斎樹: 日本人の体表面積に関する研究, 日本生気象学会雑誌, 第31巻, 第1号, pp. 5-29, 1994
- 10) 迫秀樹: 色温度と環境温度が体位血圧反射に及ぼす影響, 倉敷市立短期大学紀要, 第25号, pp. 135-141, 1995
- 11) 色彩照明学会編: 色彩科学ハンドブック, 南江堂, 1962
- 12) 志村欣一, 堀越哲美, 山岸明浩: 日本人を対象とした室内温湿度条件の至適域に関する実験的研究, 日本建築学会計画系論文集, 第480号, pp. 15-24, 1996
- 13) 杉本賢: 照明環境要素の生体への影響に関する研究 - 照度と生理的負担の関係 (その2) - 照明学会誌, 第65巻, 第4号, pp. 41-45, 1981
- 14) 曾潔, 村上周三, 加藤信介: 室内各種気流場における立位人体表面の対流熱伝達特性に関するCFD解析 数値サーマルマネキンに関する研究 (その1), 日本建築学会計画系論文集, 第505号, pp. 31-38, 1998
- 15) 田辺新一, 長谷部ヤエ: 皮膚温度可変型サーマルマネキンによる室内環境評価法に関する研究, 日本建築学会計画系論文報告集, 第448号, pp. 1-8, 1993
- 16) 田村照子, 笠原さつき: 人体表面の対流熱伝達率, 第10回人間-熱環境系シンポジウム記念大会報告集, pp. 70-73, 1986

- 17) 崔英植, 堀越哲美, 宮本征一, 水谷彰夫: 床暖房時の気温と床温が胡座人体に及ぼす影響に関する研究, 日本建築学会計画系論文集, 第480号, pp. 7-14, 1996
- 18) 塚田敢: 建築色彩の視覚効果に関する基礎事項の研究 第2部, 千葉大学工学部研究報告第13号, 第24号, pp. 79-123, 1962
- 19) 中野美香, 垣鏑直, 堀越哲美, 稲垣卓造: 色温度と室温の複合条件評価に関する実験的研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp. 765-766, 1997
- 20) 中山昭雄 編: 温熱生理学, 理工学社, 1981
- 21) 日本機会学会: 伝熱工学資料 (改訂第4版), 日本機会学会, 1986
- 22) 日本建築学会編: 設計計画パンフレット30 昼光照明の計画, 彰国社, 1988
- 23) 堀江悟郎, 桜井美政, 松原斎樹, 野口太郎: 室内における異種環境要因がもたらす不快さの加算的表現, 日本建築学会計画系論文報告集, 第387号, pp. 1-7, 1988
- 24) 堀越哲美, 磯田憲生, 小林陽太郎: 風洞内温熱環境条件の人体に及ぼす影響に関する実験的研究 (男子裸体) その2 夏期平均皮膚温と温冷感申告, 空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集, pp. 27-30, 1974
- 25) 堀越哲美, 南野脩, 磯田憲生, 小林陽太郎: 人工気候室内における温熱条件と人体側条件の人体影響に関する実験的研究, 日本建築学会論文報告集, 第229号, pp. 129-139, 1975
- 26) 堀越哲美, 宮原英男, 小林陽太郎: 人体と矩形面との間の形態係数および人体の有効ふく射面積に関する研究 1. 算出理論と椅座着衣の場合の実測, 日本建築学会論文報告集, 第286号, pp. 109-119, 1978
- 27) 持田徹: 人体に関する対流およびふく射熱伝達率, 日本建築学会計画系論文報告集, 第258号, pp. 63-69, 1979
- 28) 李徹球, 澤地孝男, 本間宏: 加熱円柱組み合わせ人体モデルによる人体周辺の自然対流の性状と人体の部位別自然対流熱伝達率に関する実測結果, 日本建築学会計画系論文報告集, 第416号, pp. 25-34, 1990
- 29) 渡辺要 編: 建築計画原論Ⅱ, 丸善, 1975

謝辭

謝辞

本論文は、私が卒業研究以来、取り組んできた研究の成果を取りまとめたものです。本論文をまとめるには、実に多くの方々からのご助言とご協力を賜りました。これらの方々の叱咤激励がなければ、現実逃避しがちな私が、遅々として進まない本論文を完成させることはなかったものと、痛感しております。ここに記して、心から感謝の意を表します。

名古屋工業大学大学院 教授 工学博士 堀越哲美先生には、私が学部4年在学時から今日に至るまで、常に暖かくご指導を賜りました。浅学非才な私に、研究や実験の方法、取り組む姿勢、そして論文の書き方や学会での発表手法にいたるまで、常に適切なご助言を賜りました。さらに、公私にわたり深遠なる知識からご指導を賜りました。ここに、深甚なる感謝の意を表します。

名古屋工業大学 助手 博士（工学）宮本征一先生には、熱放射環境に関して、様々なご助言とご協力を賜りました。ここに、感謝の意を表します。

奈良女子大学 教授 工学博士 磯田憲生先生、足利工業大学 教授 工学博士 垣鍔直先生、京都府立大学 教授 工学博士 松原斎樹先生、姫路工業大学 助教授 工学博士 土川忠浩先生、京都府立大学 助教授 博士（工学）藏澄美仁先生、県立新潟女子短期大学 講師 博士（工学）山岸明浩先生には、学会活動などを通して、多大なる貴重なご助言を賜りました。ここに、感謝の意を表します。

本研究を遂行するにあたり、豊田工業高等専門学校 講師 鈴木健次先生、名古屋工業大学大学院 講師 博士（工学）渡邊慎一先生、千葉大学 大学院生（当時名古屋工業大学研究生）ナセル・コレイニ・ママガニ氏、中部住宅供給公社（当時名古屋工業大学卒業研究生）伊藤芳男氏、伊藤工務店（当時名古屋工業大学卒業研究生）島本聖三氏および、九州芸術工科大学 助手 長野和雄先生（当時名古屋工業大学大学院生）、宇野勇治氏、兼子朋也氏を、はじめとする堀越研究室の大学院生・卒論生の諸氏に感謝に意を表します。また本研究の主旨をご理解いただき、被験者としての実験参加を快諾していただいた方々に、感謝の意を表します。

赴任以来、惜しめない援助を頂いている国立呉工業高等専門学校建築学科の諸先生、学生諸氏をはじめ、教職員の方々に深く感謝申し上げます。

最後に、両親、兄をはじめとする家族には、これまでに多大なる迷惑と心配をかけてきたにもかかわらず、常に暖かい援助を頂いてきました。ここに惜しめない感謝をいたします。MANY THANKS TO SUPERCAR

発表論文一覧

1. 審査論文（本研究に関わるもの）

1. Jin ISHII, Tetsumi HORIKOSHI : The combined effect of air temperature and illuminance on the human physiological and psychological responses, Archives of Complex Environmental Studies, pp. 1-8, 1995
2. Jin ISHII, Tetsumi HORIKOSHI, Kenji SUZUKI, Shin'ichi WATANABE, Nasser Koleini MAMAGHANI : Natural convective heat transfer coefficients for the human body in sedentary posture, Proceedings of Second International Conference on Human - Environment System, pp. 65-68, 1998
3. 石井仁, 堀越哲美 : 異なる作用温度、照度レベル、光源の組み合わせ条件が人体の生理・心理反応に及ぼす複合的影響, 日本建築学会計画系論文集, 第517号, pp. 85-90, 1999
4. 石井仁, 堀越哲美, 渡邊慎一, 鈴木健次, 楊昌智 : 自然対流時における人体および部位の対流熱伝達率の推定, 日本建築学会計画系論文集, 第530号, 2000 (採用決定)

2. 審査論文（本研究に関わらないもの）

1. 山岸明浩, 堀越哲美, 石井仁 : 上下気温分布が人体の皮膚温および温冷感に与える影響について, 人間と生活環境, 第5巻, 第1号, pp. 23-34, 1997
2. 渡邊慎一, 堀越哲美, 石井仁, 鈴木健次, 宮本征一 : 炬燵と電気カーペットの併用が人体に及ぼす影響と温熱的效果 - 青年男子の場合 -, 日本建築学会計画系論文集, 第515号, pp. 63-68, 1999

3. 発表論文

1. 石井仁, 志村欣一, 藤井貴文, 宮本征一, 野原宗道, 堀越哲美 : 光・温熱条件の人体の生理心理への複合的影響に関する研究, 日本建築学会東海支部研究報告集, 第33号, pp. 337-340, 1994
2. 石井仁, 志村欣一, 藤井貴文, 宮本征一, 野原宗道, 堀越哲美 : 室内気温・照度の組み合わせ条件が人体生理心理反応に及ぼす影響, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (東海), pp. 1989-1990, 1994

3. 河内博之, 山岸明浩, 志村欣一, 石井仁, 宮本征一, 堀越哲美: 上下気温分布が人体生理・心理反応に及ぼす影響, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (東海), pp. 331-332, 1994
4. Jin ISHII, Tetsumi HORIKOSHI: The combined effect of air temperature and illuminance on the human physiological and psychological responses, Proceedings of the sixth international conference on the combined effects of environmental factors, pp. 201-208, 1994
5. 荒木孝一, 安達由香, 石井仁, 野原宗道, 堀越哲美: 屋敷林の周囲に形成される微気候に関する実測調査 愛知県海部郡にある集落の場合, 日本建築学会東海支部研究報告集, 第33号, pp. 317-320, 1995
6. 石井仁, 尹仁, 南口泰彦, 加藤伯彦, 堀越哲美: 光源の異なる波長分布特性が明るさ知覚に及ぼす影響に関する研究その1) 昼光色蛍光灯と温白色蛍光灯との比較, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (北海道), pp. 459-460, 1995
7. 尹仁, 石井仁, 南口泰彦, 加藤伯彦, 堀越哲美: 光源の異なる波長分布特性が明るさ知覚に及ぼす影響に関する研究 その2) 4種の蛍光灯の比較 (広視野の場合), 日本建築学会大会学術講演梗概集 (北海道), pp. 461-462, 1995
8. 渡邊慎一, 橋本剛, 石井仁, 野原宗道, 尹仁, 鄭相元, 堀越哲美: 名古屋市における運河を利用した風の道に関する研究 その2. ケーススタディ〜”風の道計画”の提案〜, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (北海道), pp. 581-582, 1995
9. 山岸明浩, 堀越哲美, 石井仁, 河内博之: 不均等な上下気温分布が人体の生理・心理反応に与える影響について, 第19回 人間-生活環境系シンポジウム, pp. 14-17, 1995
10. 山岸明浩, 堀越哲美, 石井仁, 河内博之: 上下気温分布が人体の皮膚温に及ぼす影響 - 青年男子・裸体・椅座・安静時での実験 -, 空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集 (広島), pp. 697-700, 1995
11. 伊藤芳男, 石井仁, 宮本征一, 堀越哲美: 気温と照度が人体生理心理反応に及ぼす複合的影響 ~光源を白熱電球とした場合~, 日本建築学会東海支部研究報告集, 第34号, pp. 525-528, 1996

12. 加藤智也, 山岸明浩, 石井仁, 宮本征一, 堀越哲美: 上下気温分布が人体皮膚温、頭熱放熱量に与える影響, 日本建築学会東海支部研究報告集, 第34号, pp. 373-376, 1996
13. 石井仁, 堀越哲美: 光・熱環境要因が人体生理心理反応に及ぼす複合的影響, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (近畿), pp. 849-850, 1996
14. 山岸明浩, 堀越哲美, 石井仁: 上下気温分布のある環境の表現方法に関する研究, 第20回 人間-生活環境系シンポジウム, pp. 47-50, 1996
15. 石井仁, 堀越哲美, 尹仁: 光・熱環境要因が人体生理心理反応に及ぼす複合的影響 その2 曝露開始時における心理反応の検討, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (関東), pp. 763-764, 1997
16. 石井仁, 島本聖三, 堀越哲美, 渡邊慎一, 鈴木健次: 自然対流時における人体対流熱伝達率, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (九州), pp. 407-408, 1998
17. 渡邊慎一, 堀越哲美, 石井仁, 鈴木健次, 宮本征一: 炬燵採暖と電気カーペットの併用が人体に与える温熱的效果, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (九州), pp. 395-396, 1998
18. 石井仁, 渡邊慎一, 堀越哲美: 人体の自然対流熱伝達率の実測による推定, 日本生気象学会雑誌, 第35巻, 第3号, 54P, 1998
19. 石井仁, 渡邊慎一, 堀越哲美: 強制対流における人体の局所総合熱伝達率分布の実測による推定, 日本建築学会東海支部研究報告集, 第37号, pp. 549-552, 1999
20. 内田博恵, 堀越哲美, 富田明美, 石井仁: 気温と気流の組み合わせ条件下における着衣のゆとりが着衣熱抵抗に及ぼす影響, 日本建築学会東海支部研究報告集, 第37号, pp. 545-548, 1999
21. 石井仁, 堀越哲美, 渡邊慎一, 鈴木健次: 強制対流における人体の総合熱伝達率および対流熱伝達率, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (中国), pp. 387-388, 1999

22. 石井仁, 堀越哲美, 渡邊慎一: 人体の強制対流熱伝達率の実測による推定,
日本生気象学会雑誌, 第36巻, 第3号, 1999

付録

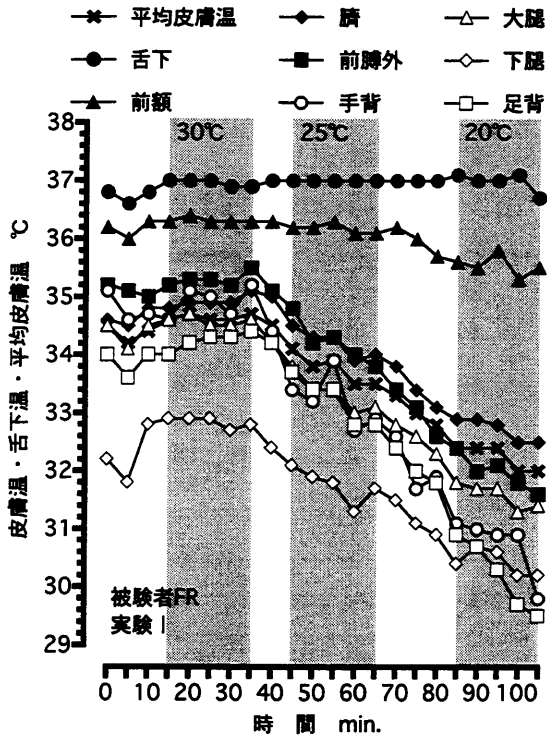
第3章付録

- 付録 3-1 皮膚温・舌下温・平均皮膚温の経時変動（実験Ⅰ）
- 付録 3-2 周径方向の部位皮膚温分布（実験Ⅱ）
- 付録 3-3 放射および対流による熱交換量（実験Ⅰ）
- 付録 3-4 周径方向の部位放射熱交換量分布（実験Ⅱ）
- 付録 3-5 周径方向の部位対流熱交換量分布（実験Ⅱ）
- 付録 3-6 周径方向の部位放射熱伝達率分布（実験Ⅱ）
- 付録 3-7 周径方向の部位自然対流熱伝達率分布（実験Ⅱ）
- 付録 3-8 人体各部位および全身の放射熱伝達率（実験Ⅰ）
- 付録 3-9 人体各部位および全身の自然対流熱伝達率（実験Ⅰ）

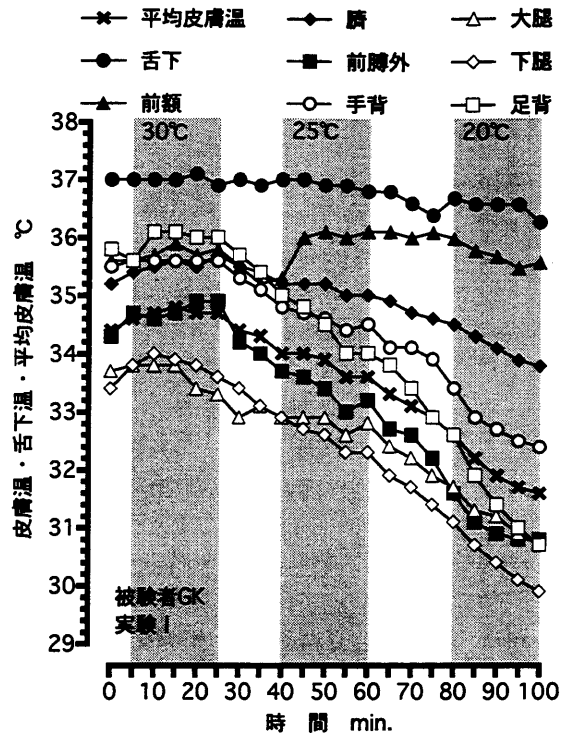
第4章付録

- 付録 4-1 皮膚温・舌下温・平均皮膚温の経時変動
- 付録 4-2 人体全身および各部位の対流による熱交換量
- 付録 4-3 人体全身および各部位の放射による熱交換量
- 付録 4-4 人体全身の蒸発による放熱量
- 付録 4-5 温冷感の経時変動
- 付録 4-6 快適感の経時変動

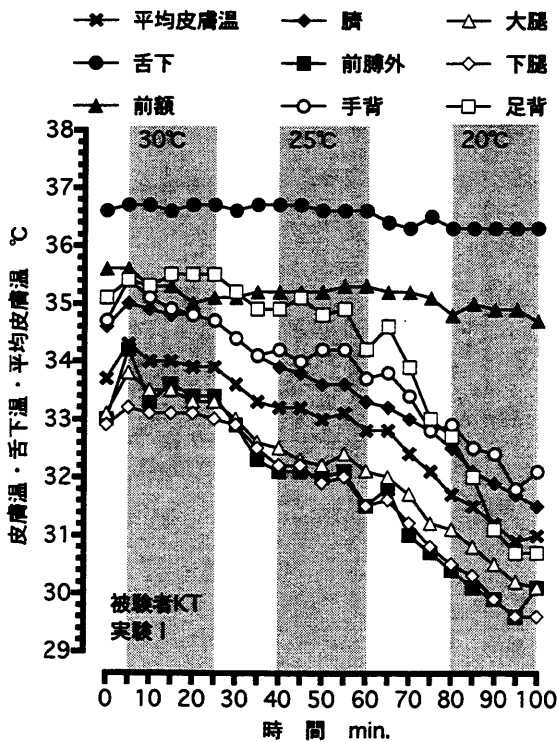
第3章付録



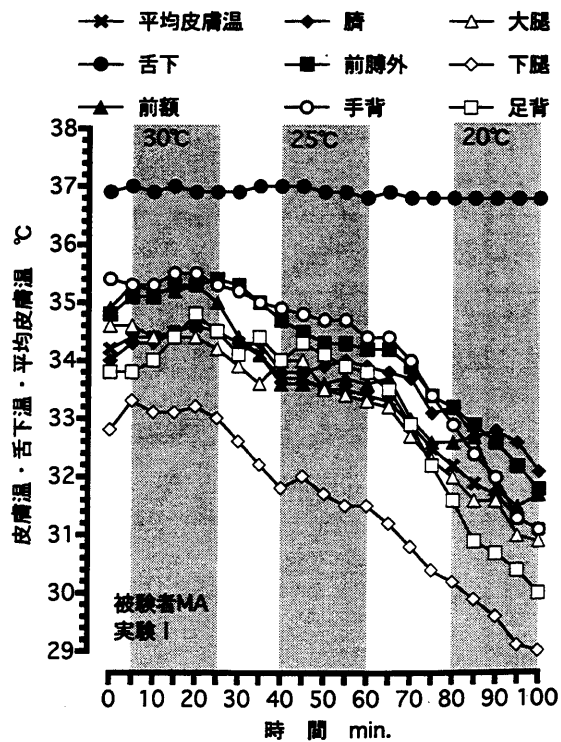
付録 3-1-1 皮膚温・舌下温・平均皮膚温の経時変動 (被験者FR・実験I)



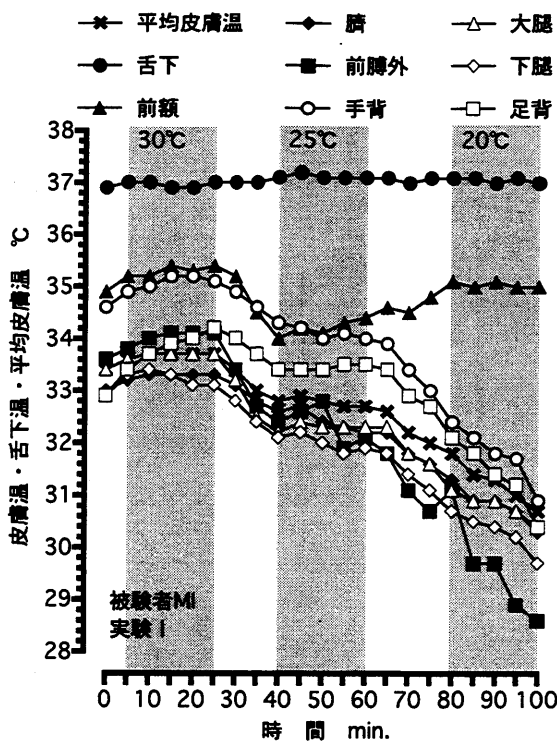
付録 3-1-2 皮膚温・舌下温・平均皮膚温の経時変動 (被験者GK・実験I)



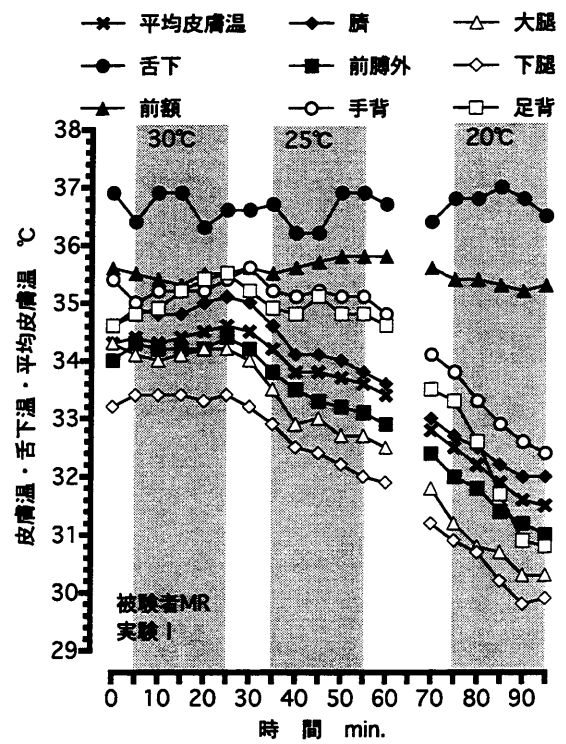
付録 3-1-3 皮膚温・舌下温・平均皮膚温の経時変動 (被験者KT・実験I)



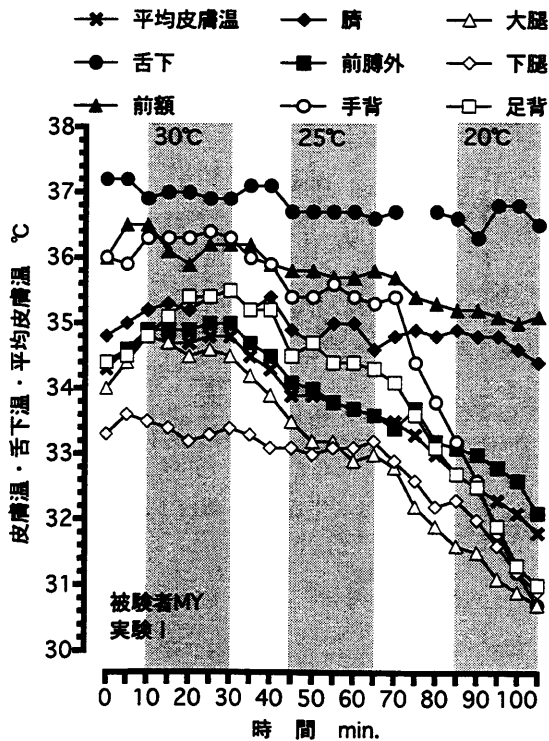
付録 3-1-4 皮膚温・舌下温・平均皮膚温の経時変動 (被験者MA・実験I)



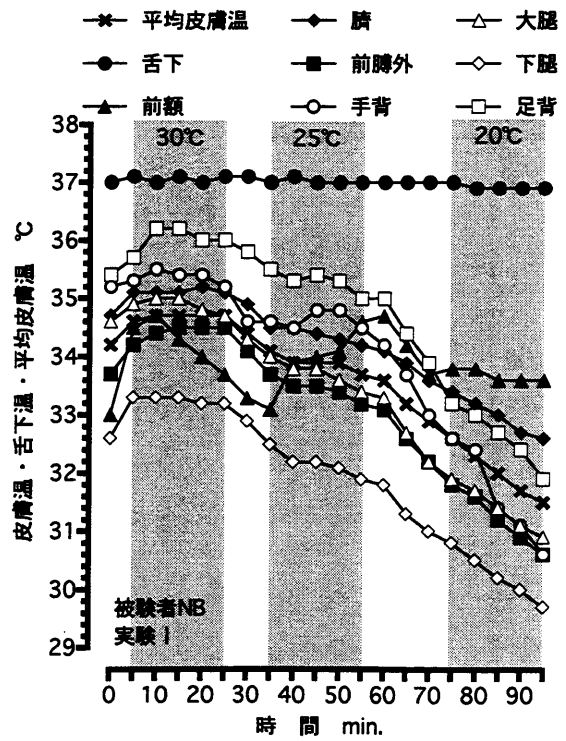
付録 3-1-5 皮膚温・舌下温・平均皮膚温の経時変動 (被験者 MI・実験 I)



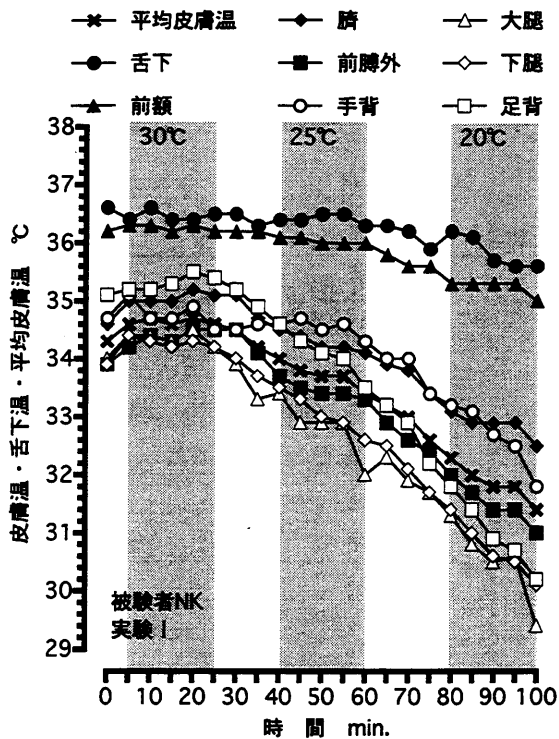
付録 3-1-6 皮膚温・舌下温・平均皮膚温の経時変動 (被験者 MR・実験 I)



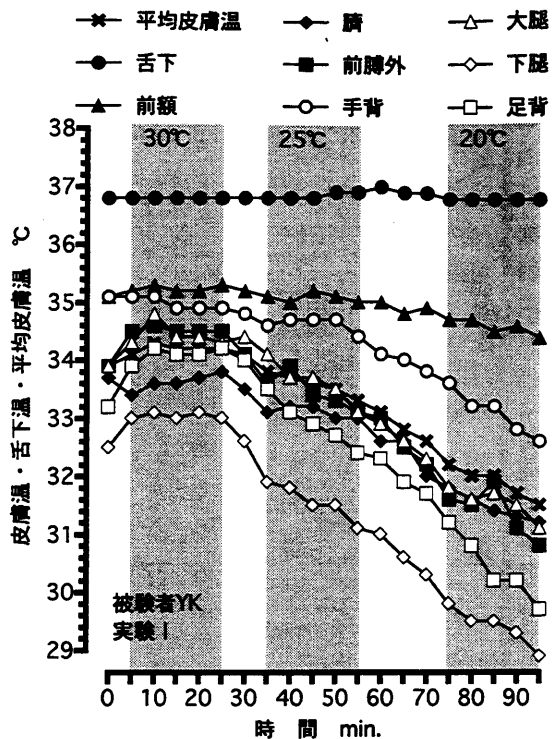
付録 3-1-7 皮膚温・舌下温・平均皮膚温の経時変動 (被験者 MY・実験 I)



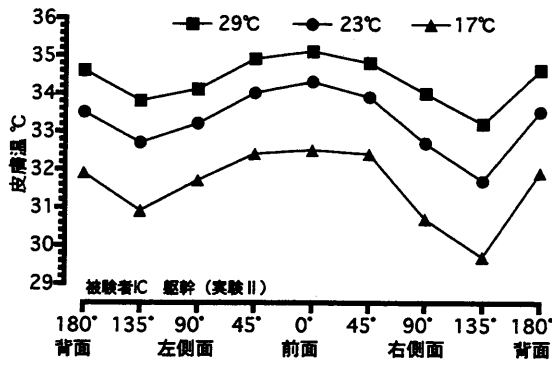
付録 3-1-8 皮膚温・舌下温・平均皮膚温の経時変動 (被験者 NB・実験 I)



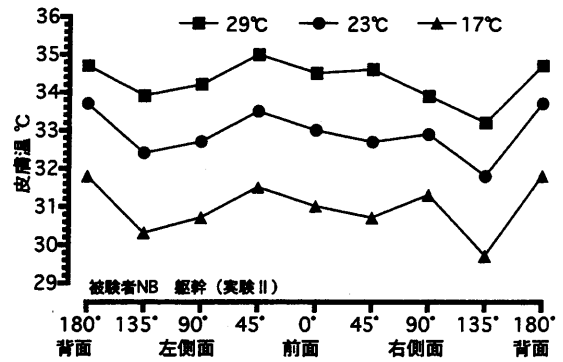
付録 3-1-9 皮膚温・舌下温・平均皮膚温の経時変動 (被験者NK・実験 I)



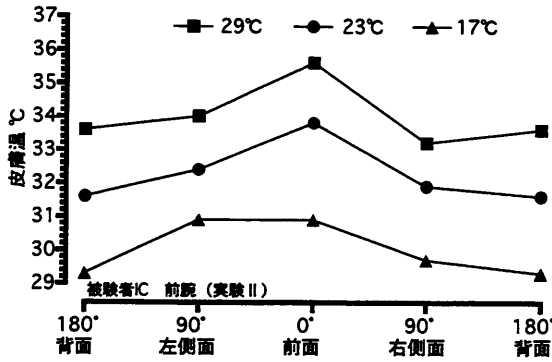
付録 3-1-10 皮膚温・舌下温・平均皮膚温の経時変動 (被験者YK・実験 I)



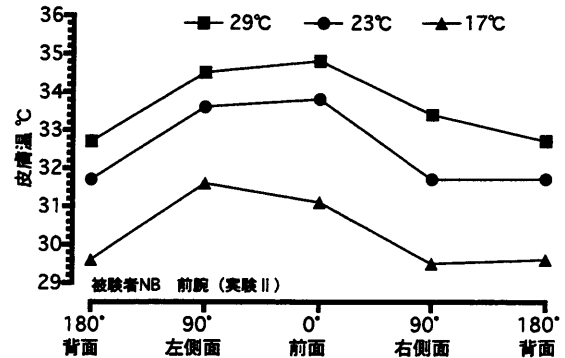
付録 3-2-1 躯幹における周径方向の皮膚温分布 (被験者 IC・実験 II)



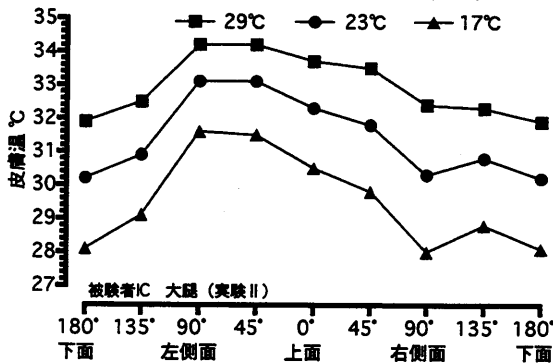
付録 3-2-2 躯幹における周径方向の皮膚温分布 (被験者 NB・実験 II)



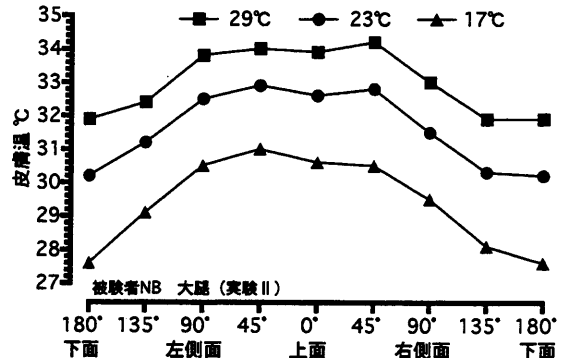
付録 3-2-3 前腕における周径方向の皮膚温分布 (被験者 IC・実験 II)



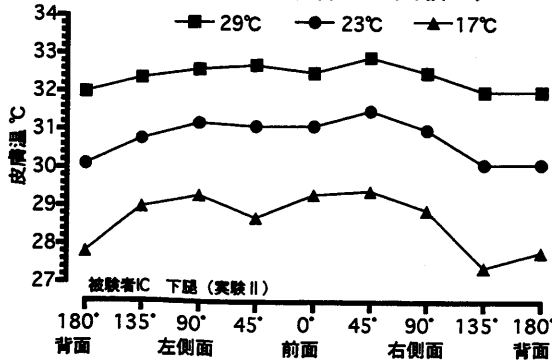
付録 3-2-4 前腕における周径方向の皮膚温分布 (被験者 NB・実験 II)



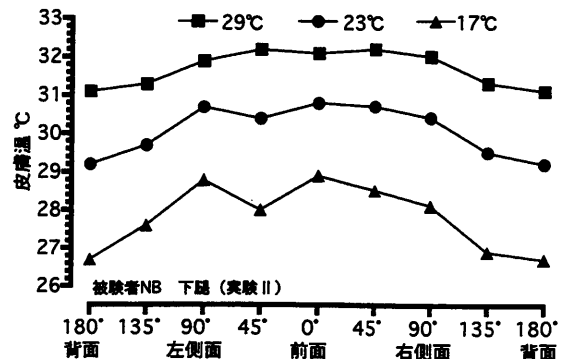
付録 3-2-5 大腿における周径方向の皮膚温分布 (被験者 IC・実験 II)



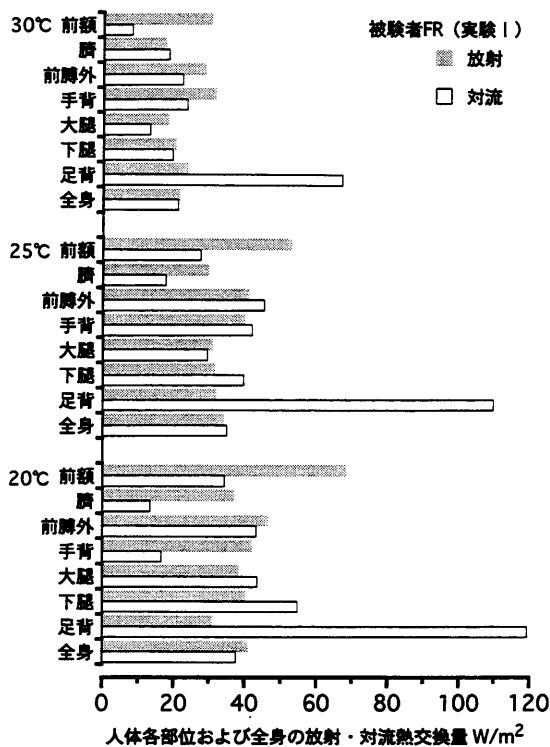
付録 3-2-6 大腿における周径方向の皮膚温分布 (被験者 NB・実験 II)



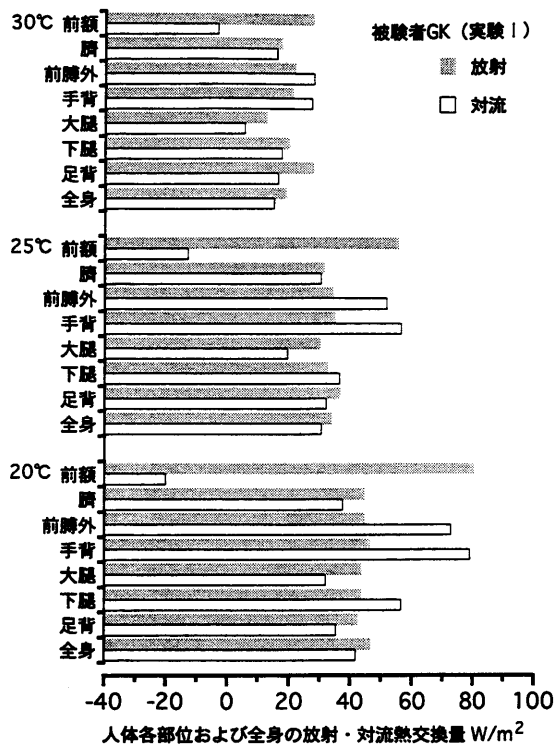
付録 3-2-7 下腿における周径方向の皮膚温分布 (被験者 IC・実験 II)



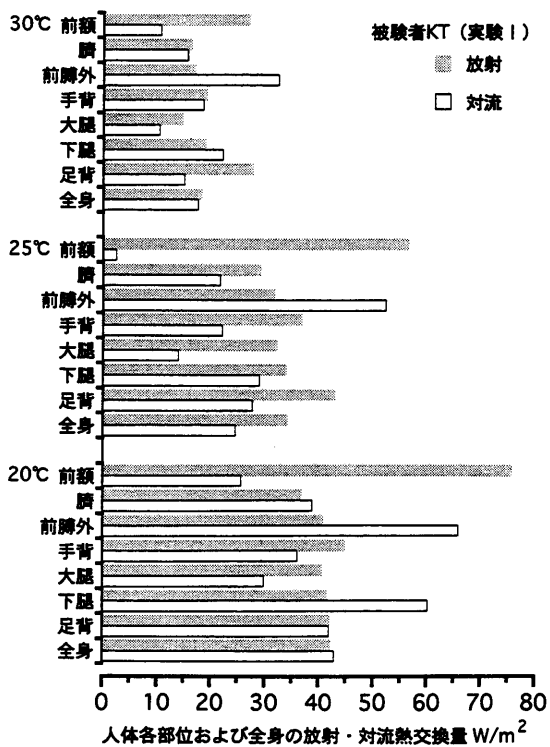
付録 3-2-8 下腿における周径方向の皮膚温分布 (被験者 NB・実験 II)



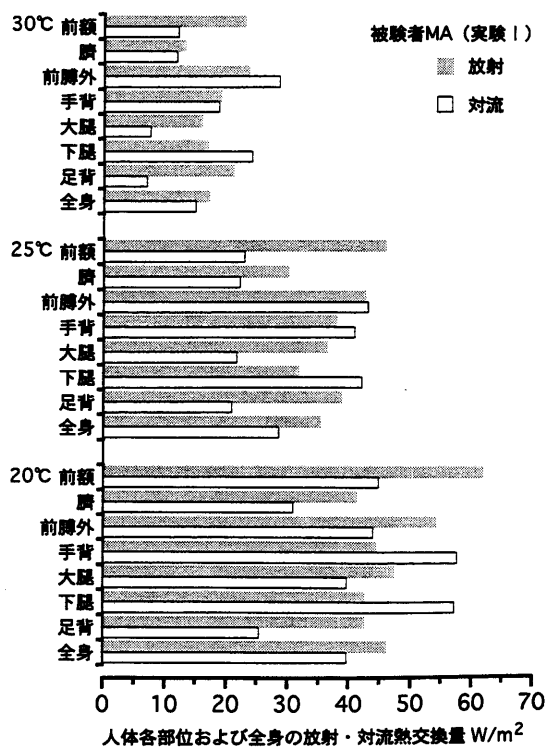
付録 3-3-1 人体各部位および全身の放射・対流による熱交換量 (被験者 FR・実験1)



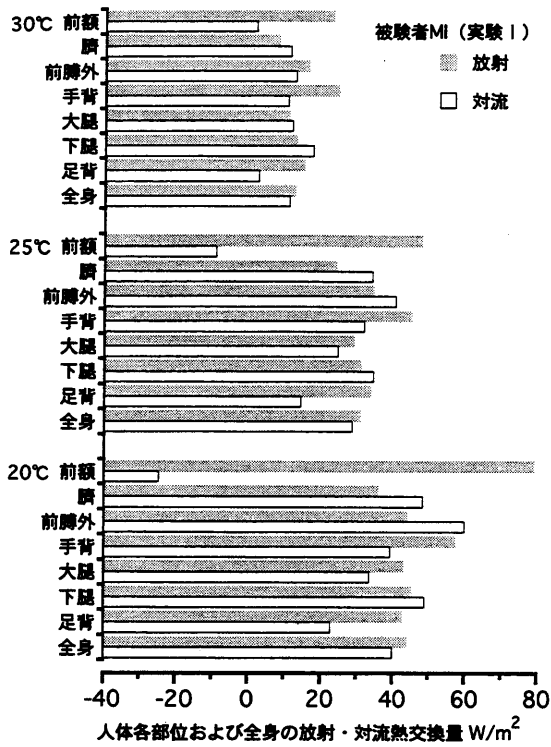
付録 3-3-2 人体各部位および全身の放射・対流による熱交換量 (被験者 GK・実験1)



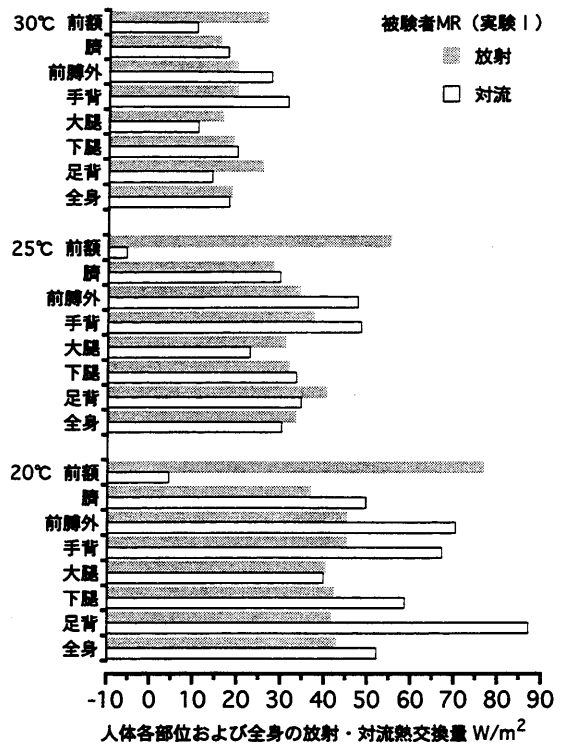
付録 3-3-3 人体各部位および全身の放射・対流による熱交換量 (被験者 KT・実験1)



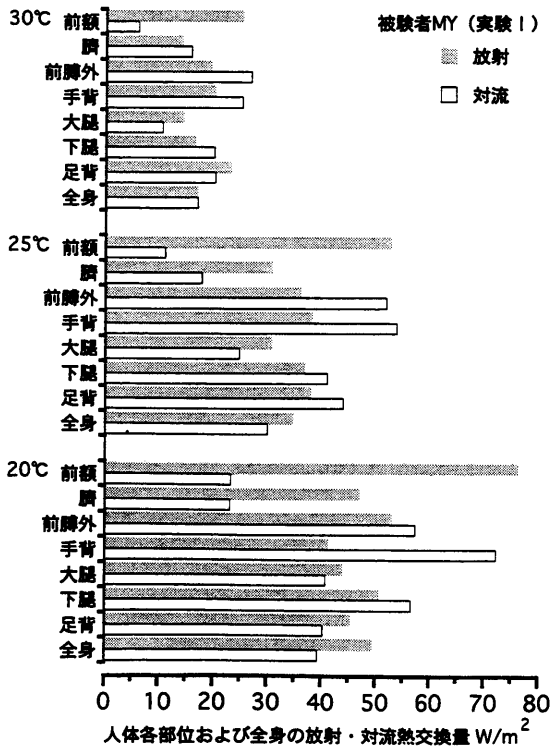
付録 3-3-4 人体各部位および全身の放射・対流による熱交換量 (被験者 MA・実験1)



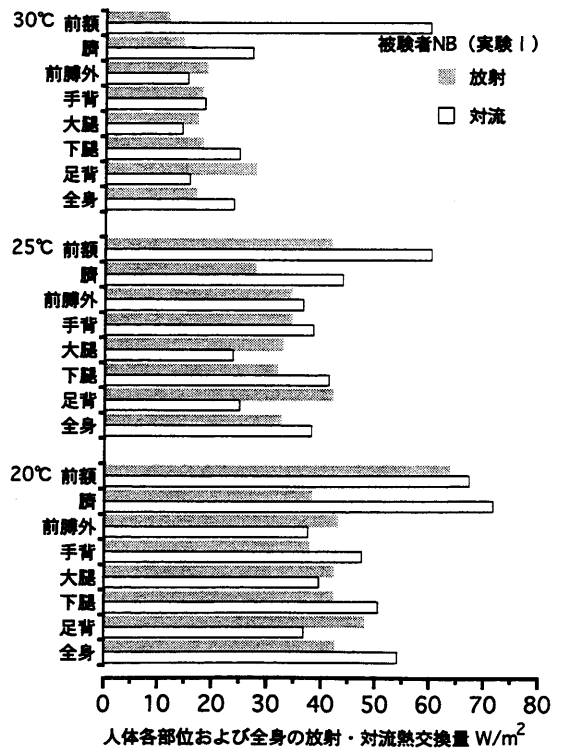
付録 3-3-5 人体各部位および全身の放射・対流による熱交換量 (被験者 MI・実験 I)



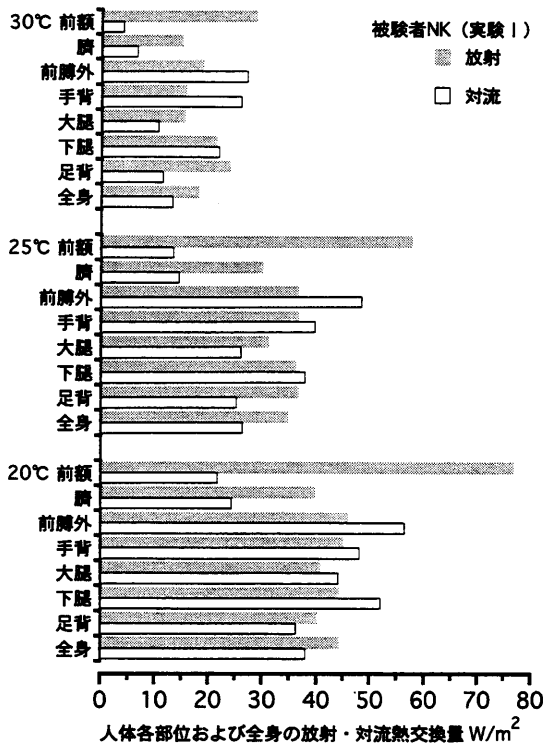
付録 3-3-6 人体各部位および全身の放射・対流による熱交換量 (被験者 MR・実験 I)



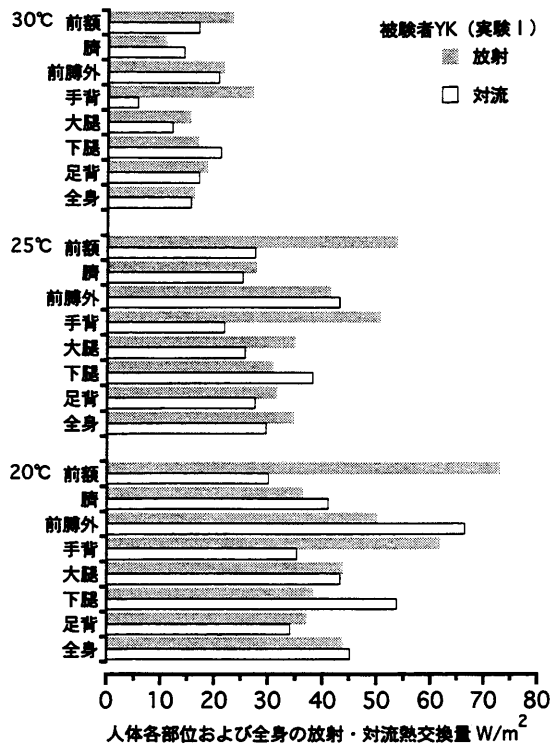
付録 3-3-7 人体各部位および全身の放射・対流による熱交換量 (被験者 MY・実験 I)



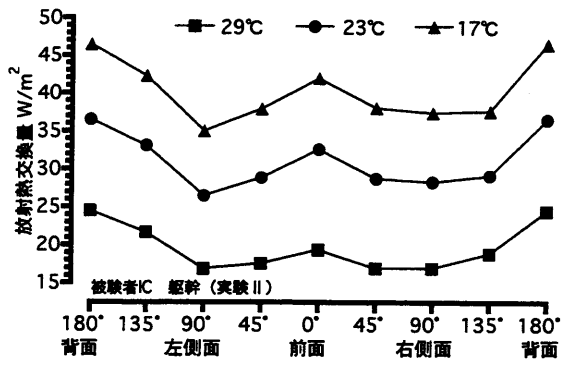
付録 3-3-8 人体各部位および全身の放射・対流による熱交換量 (被験者 NB・実験 I)



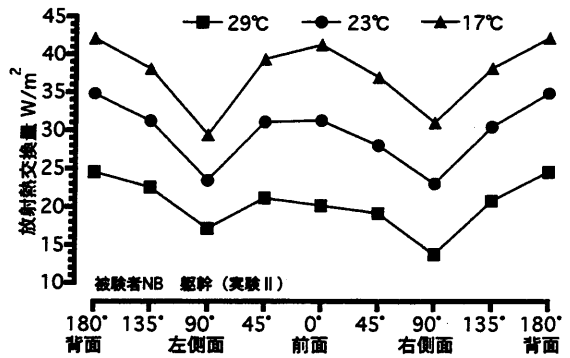
付録 3-3-9 人体各部位および全身の放射・対流による熱交換量 (被験者 NK・実験 I)



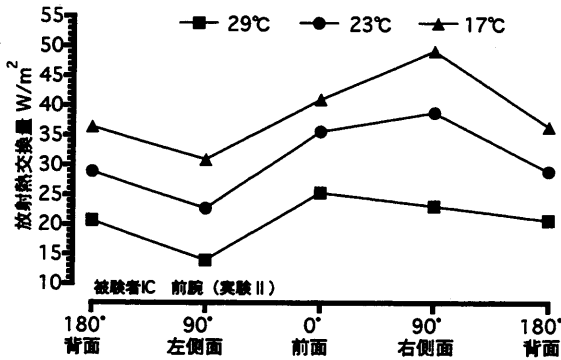
付録 3-3-10 人体各部位および全身の放射・対流による熱交換量 (被験者 YK・実験 I)



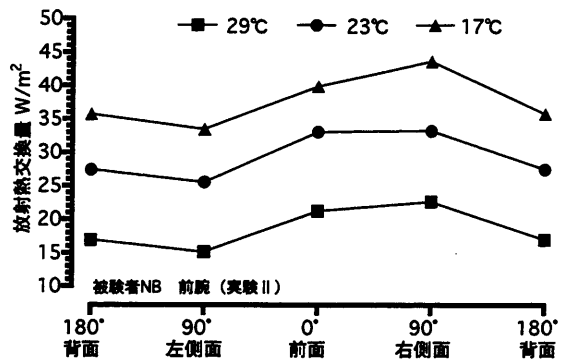
付録 3-4-1 軀幹における周径方向の放射熱交換量分布 (被験者 IC・実験 II)



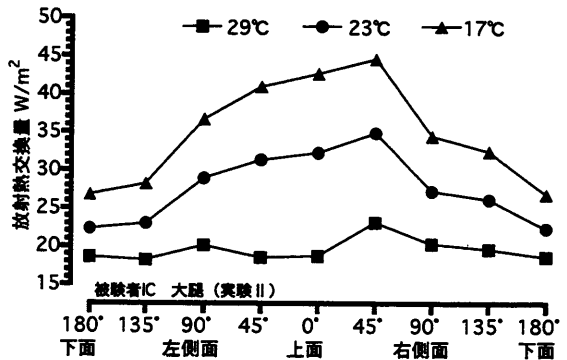
付録 3-4-2 軀幹における周径方向の放射熱交換量分布 (被験者 NB・実験 II)



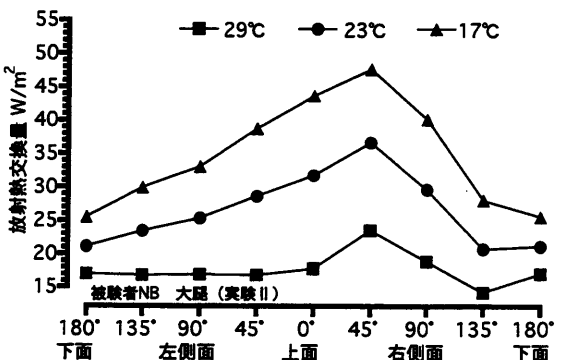
付録 3-4-3 前腕における周径方向の放射熱交換量分布 (被験者 IC・実験 II)



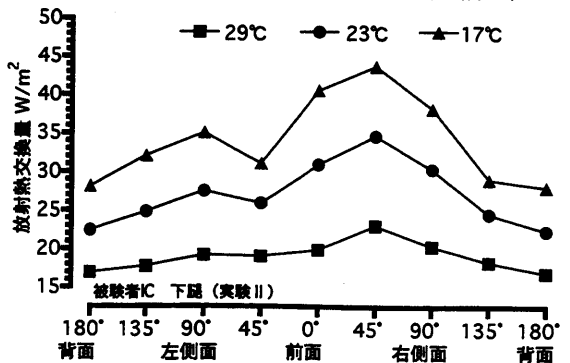
付録 3-4-4 前腕における周径方向の放射熱交換量分布 (被験者 NB・実験 II)



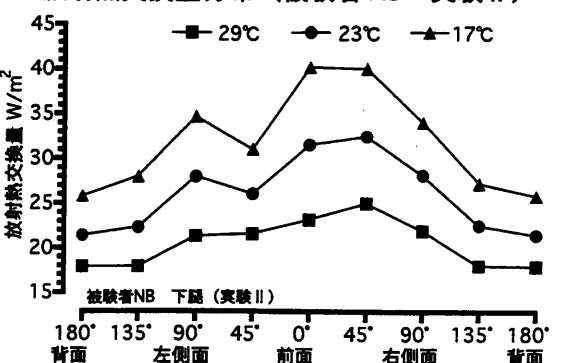
付録 3-4-5 大腿における周径方向の放射熱交換量分布 (被験者 IC・実験 II)



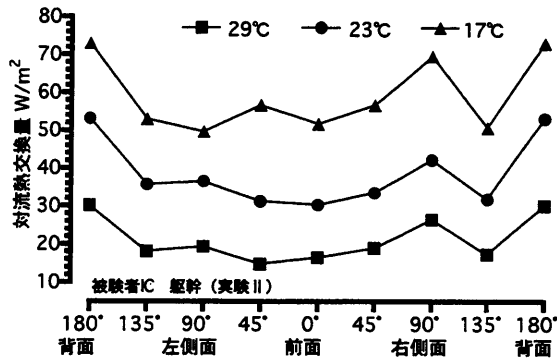
付録 3-4-6 大腿における周径方向の放射熱交換量分布 (被験者 NB・実験 II)



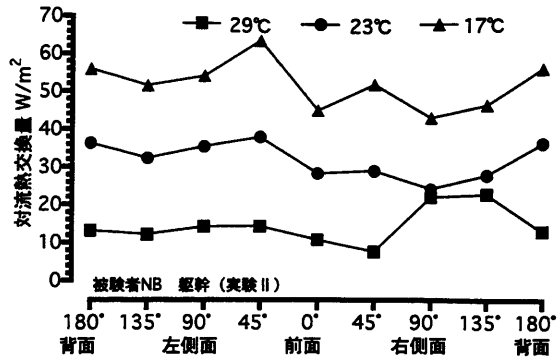
付録 3-4-7 下腿における周径方向の放射熱交換量分布 (被験者 IC・実験 II)



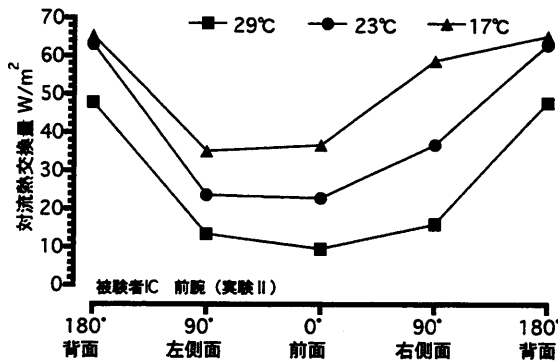
付録 3-4-8 下腿における周径方向の放射熱交換量分布 (被験者 NB・実験 II)



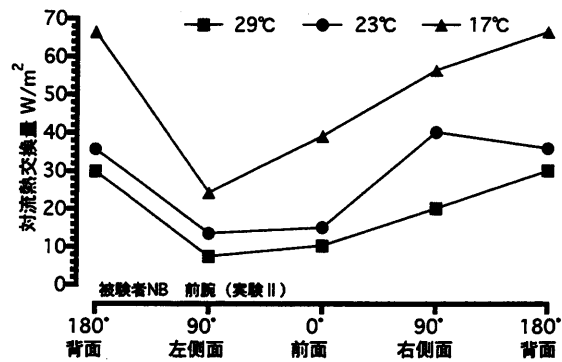
付録 3-5-1 軀幹における周径方向の
対流熱交換量分布 (被験者 IC・実験 II)



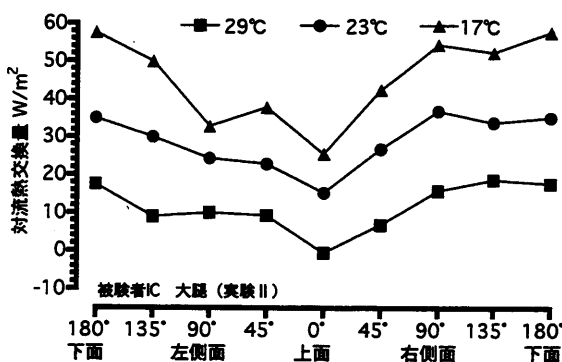
付録 3-5-2 軀幹における周径方向の
対流熱交換量分布 (被験者 NB・実験 II)



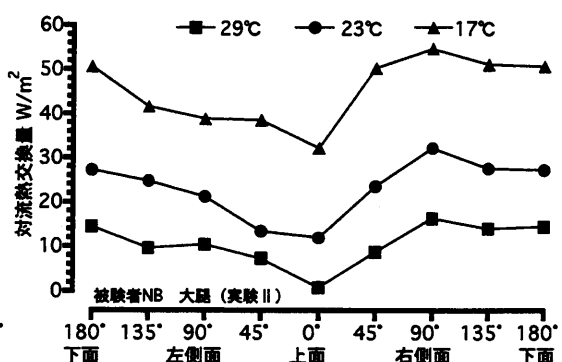
付録 3-5-3 前腕における周径方向の
対流熱交換量分布 (被験者 IC・実験 II)



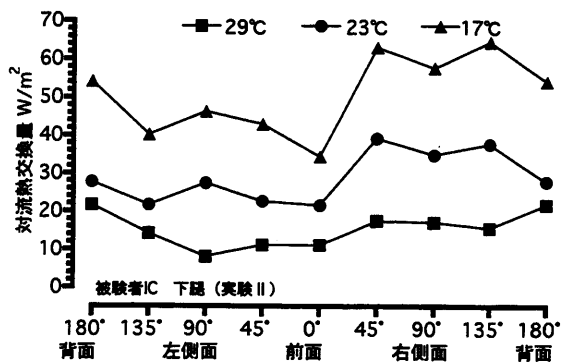
付録 3-5-4 前腕における周径方向の
対流熱交換量分布 (被験者 NB・実験 II)



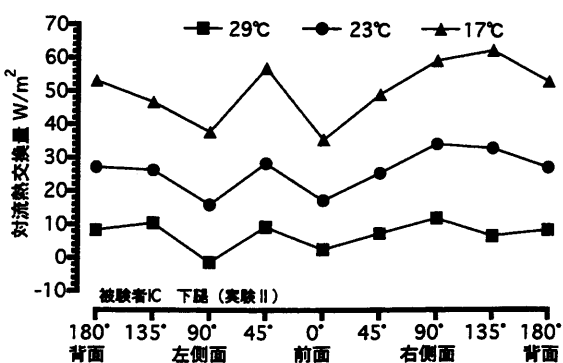
付録 3-5-5 大腿における周径方向の
対流熱交換量分布 (被験者 IC・実験 II)



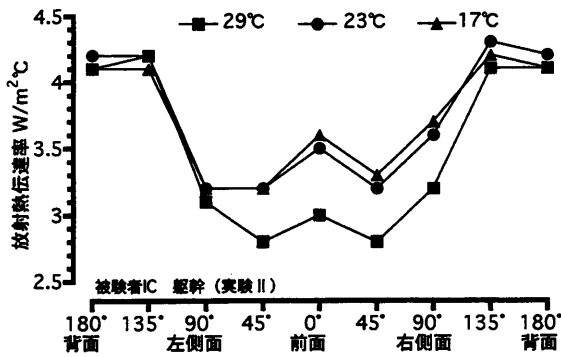
付録 3-5-6 大腿における周径方向の
対流熱交換量分布 (被験者 NB・実験 II)



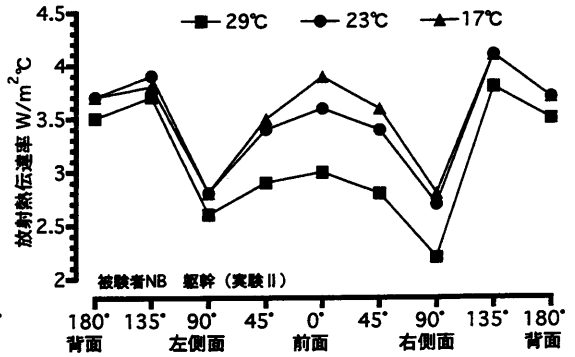
付録 3-5-7 下腿における周径方向の
対流熱交換量分布 (被験者 IC・実験 II)



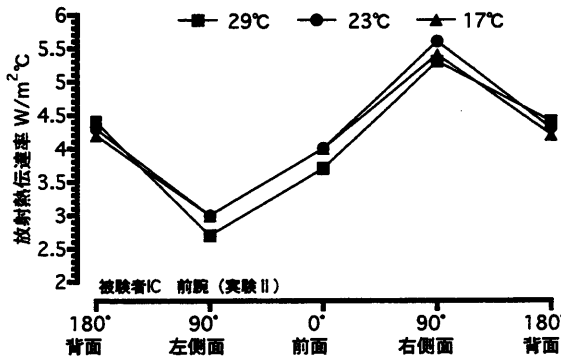
付録 3-5-8 下腿における周径方向の
対流熱交換量分布 (被験者 NB・実験 II)



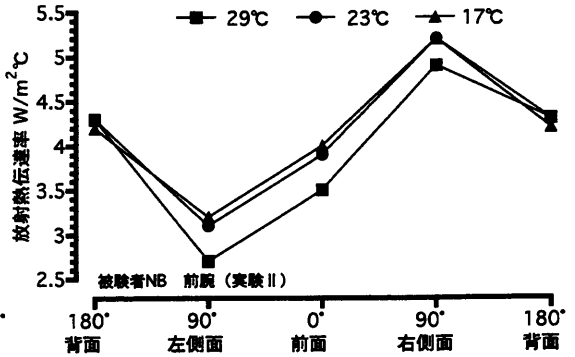
付録 3-6-1 軀幹における周径方向の放射熱伝達率分布 (被験者 IC・実験 II)



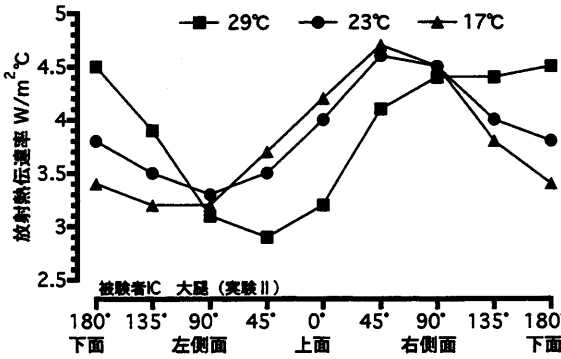
付録 3-6-2 軀幹における周径方向の放射熱伝達率分布 (被験者 NB・実験 II)



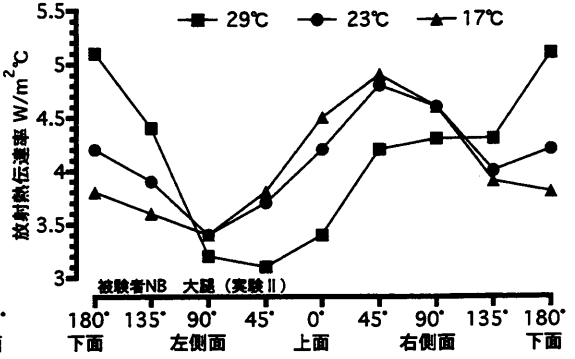
付録 3-6-3 前腕における周径方向の放射熱伝達率分布 (被験者 IC・実験 II)



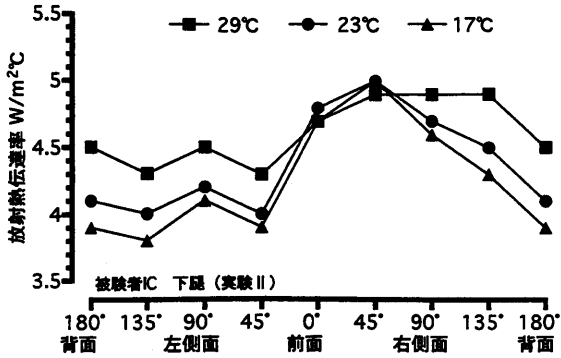
付録 3-6-4 前腕における周径方向の放射熱伝達率分布 (被験者 NB・実験 II)



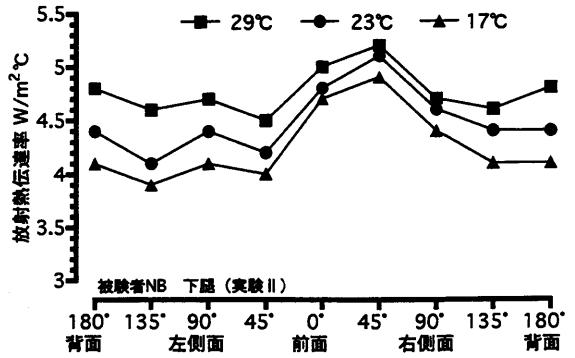
付録 3-6-5 大腿における周径方向の放射熱伝達率分布 (被験者 IC・実験 II)



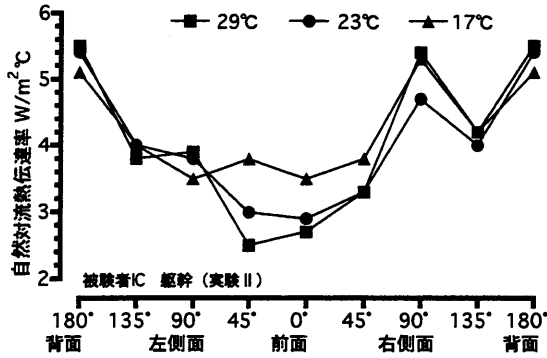
付録 3-6-6 大腿における周径方向の放射熱伝達率分布 (被験者 NB・実験 II)



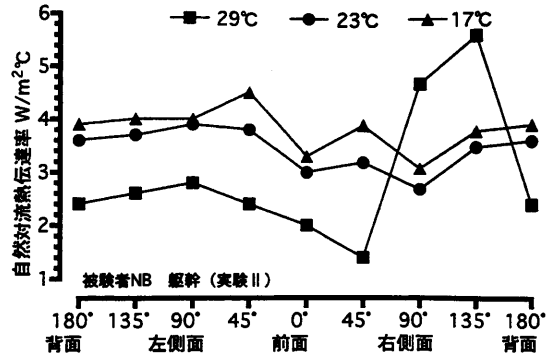
付録 3-6-7 下腿における周径方向の放射熱伝達率分布 (被験者 IC・実験 II)



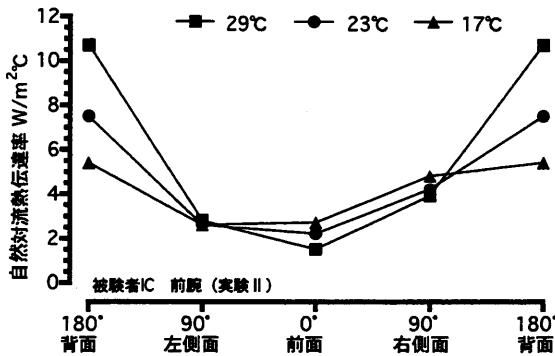
付録 3-6-8 下腿における周径方向の放射熱伝達率分布 (被験者 NB・実験 II)



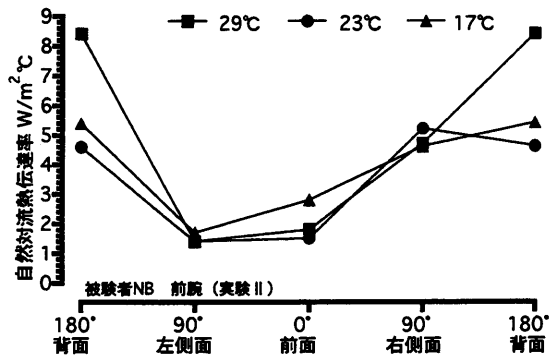
付録 3-7-1 躯幹における周径方向の自然対流熱伝達率分布 (被験者 IC・実験 II)



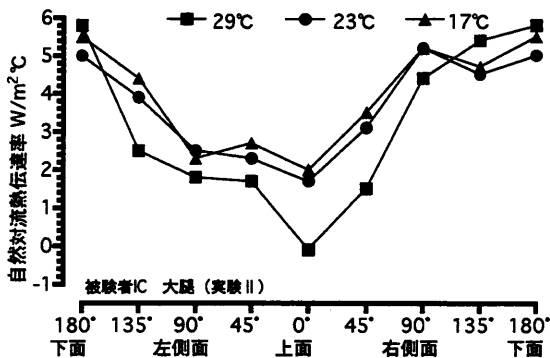
付録 3-7-2 躯幹における周径方向の自然対流熱伝達率分布 (被験者 NB・実験 II)



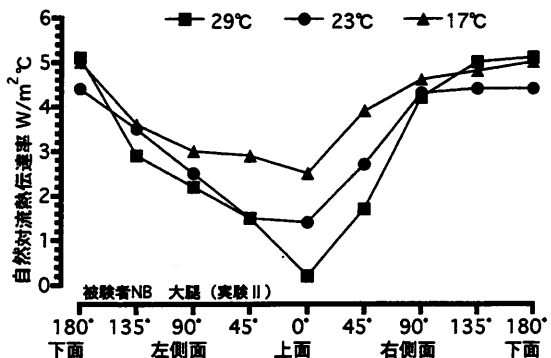
付録 3-7-3 前腕における周径方向の自然対流熱伝達率分布 (被験者 IC・実験 II)



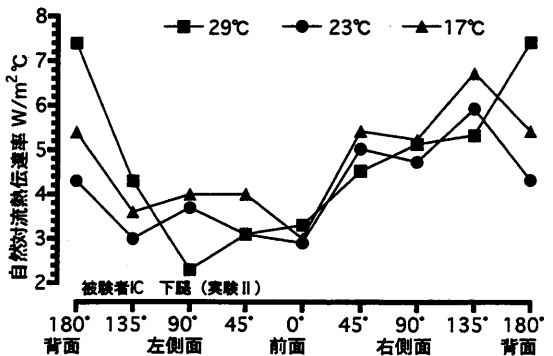
付録 3-7-4 前腕における周径方向の自然対流熱伝達率分布 (被験者 NB・実験 II)



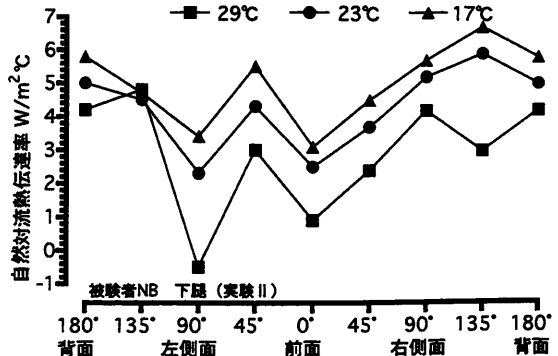
付録 3-7-5 大腿における周径方向の自然対流熱伝達率分布 (被験者 IC・実験 II)



付録 3-7-6 大腿における周径方向の自然対流熱伝達率分布 (被験者 NB・実験 II)



付録 3-7-7 下腿における周径方向の自然対流熱伝達率分布 (被験者 IC・実験 II)



付録 3-7-8 下腿における周径方向の自然対流熱伝達率分布 (被験者 NB・実験 II)

付録 3-8-1 被験者ごとの人体各部位および全身の放射熱伝達率 (被験者 FR から被験者 MI)

部位	放射熱伝達率 W/m ² °C														
	被験者FR			被験者GK			被験者KT			被験者MA			被験者MI		
	30°C	25°C	20°C	30°C	25°C	20°C	30°C	25°C	20°C	30°C	25°C	20°C	30°C	25°C	20°C
前額	4.3	5.0	5.1	4.9	5.4	5.4	4.9	5.4	5.4	4.6	5.3	5.3	5.0	5.5	5.3
臍	3.1	3.4	3.4	3.2	3.4	3.4	3.2	3.4	3.4	3.0	3.4	3.3	3.2	3.6	3.5
臍分布	3.1	3.4	3.4	3.2	3.4	3.4	3.2	3.4	3.4	3.0	3.4	3.3	3.2	3.6	3.5
前膊外	4.7	4.8	4.7	4.5	4.6	4.5	4.5	4.6	4.4	4.5	4.6	4.4	4.9	5.0	4.8
前膊外分布	2.8	2.9	2.8	2.7	2.7	2.7	2.7	2.8	2.7	2.7	2.8	2.7	2.9	3.0	2.9
手背	5.5	5.3	5.1	3.7	4.0	3.9	3.7	4.0	3.9	3.6	4.0	3.9	5.5	5.3	5.1
大腿	3.4	4.0	4.0	3.8	4.3	4.3	3.9	4.4	4.3	3.8	4.3	4.2	3.8	4.3	4.2
大腿分布	3.8	4.4	4.4	4.1	4.7	4.7	4.3	4.8	4.7	4.2	4.7	4.7	4.2	4.7	4.6
下腿	5.9	5.1	4.9	5.6	5.0	4.7	5.5	4.9	4.7	5.8	5.0	4.7	5.7	4.9	4.7
下腿分布	5.3	4.6	4.4	5.0	4.5	4.2	5.0	4.4	4.2	5.2	4.5	4.2	5.1	4.4	4.2
足背	4.6	4.3	4.1	4.7	4.4	4.2	4.7	4.4	4.2	4.7	4.4	4.2	4.6	4.3	4.0
全身	4.1	4.2	4.2	4.0	4.2	4.1	4.1	4.2	4.1	4.0	4.2	4.1	4.2	4.3	4.2
全身分布	3.8	4.0	3.9	3.8	3.9	3.9	3.8	3.9	3.9	3.7	3.9	3.8	3.9	4.1	3.9

付録 3-8-2 被験者ごとの人体各部位および全身の放射熱伝達率 (被験者 MR から被験者 YK)

部位	放射熱伝達率 W/m ² °C														
	被験者MR			被験者MY			被験者NB			被験者NK			被験者YK		
	30°C	25°C	20°C	30°C	25°C	20°C	30°C	25°C	20°C	30°C	25°C	20°C	30°C	25°C	20°C
前額	4.8	5.5	5.3	4.5	5.3	5.2	3.2	4.9	5.0	4.9	5.5	5.4	4.6	5.4	5.3
臍	3.1	3.4	3.3	2.9	3.4	3.3	2.9	3.3	3.3	3.1	3.4	3.4	3.0	3.6	3.5
臍分布	3.1	3.4	3.3	2.9	3.4	3.3	2.9	3.3	3.3	3.1	3.4	3.4	3.0	3.6	3.5
前膊外	4.4	4.6	4.4	4.4	4.6	4.4	4.3	4.5	4.4	4.5	4.6	4.5	4.8	5.0	4.8
前膊外分布	2.7	2.8	2.7	2.6	2.7	2.7	2.6	2.7	2.6	2.7	2.8	2.7	2.9	3.0	2.9
手背	3.7	4.0	3.9	3.6	4.0	3.9	3.5	3.9	3.8	3.7	4.0	3.9	5.6	5.3	5.2
大腿	3.8	4.4	4.3	3.6	4.3	4.2	3.6	4.2	4.2	3.9	4.4	4.3	3.6	4.2	4.2
大腿分布	4.2	4.8	4.7	4.0	4.7	4.6	4.0	4.6	4.6	4.3	4.8	4.7	4.0	4.7	4.6
下腿	5.6	5.0	4.7	5.9	5.0	4.7	5.9	5.1	4.8	5.6	5.0	4.7	5.9	5.0	4.7
下腿分布	5.0	4.5	4.3	5.3	4.5	4.3	5.3	4.6	4.3	5.0	4.5	4.2	5.3	4.5	4.3
足背	4.7	4.5	4.2	4.8	4.5	4.2	4.8	4.5	4.3	4.7	4.4	4.2	4.6	4.3	4.1
全身	4.0	4.2	4.1	3.9	4.2	4.0	3.8	4.1	4.0	4.1	4.2	4.1	4.1	4.3	4.2
全身分布	3.8	4.0	3.9	3.7	3.9	3.8	3.5	3.8	3.8	3.8	4.0	3.9	3.8	4.1	4.0

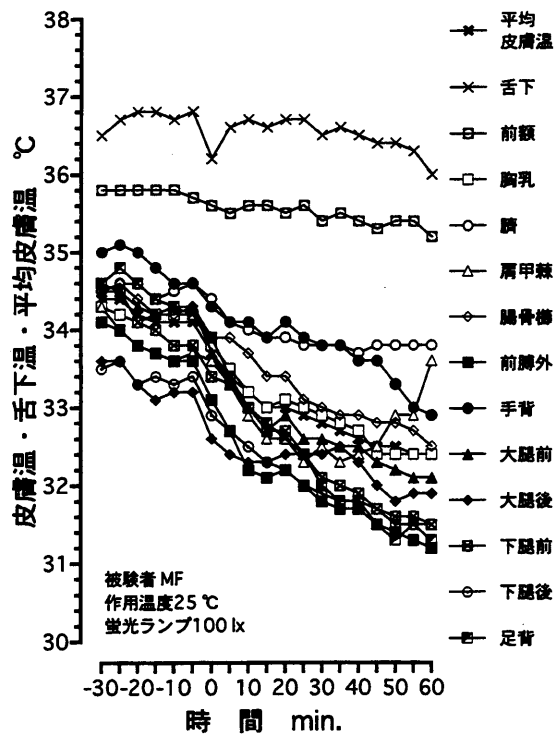
付録 3-9-1 被験者ごとの人体各部位および全身の自然対流熱伝達率（被験者 FR から被験者 MI）

自然対流熱伝達率 W/m ² °C															
部位	被験者FR			被験者GK			被験者KT			被験者MA			被験者MI		
	30°C	25°C	20°C	30°C	25°C	20°C	30°C	25°C	20°C	30°C	25°C	20°C	30°C	25°C	20°C
前額	1.4	2.6	2.5	-0.7	-1.3	-1.3	2.4	0.3	1.9	3.2	2.9	4.0	0.5	-1.0	-1.7
臍	3.5	1.9	1.1	2.9	3.0	2.6	3.0	2.5	3.3	2.8	2.4	2.4	4.5	4.7	4.6
臍分布	4.5	2.4	1.5	3.8	3.9	3.4	3.9	3.3	4.3	3.6	3.1	3.1	5.8	6.1	6.0
前膊外	3.9	4.8	4.0	5.9	6.3	6.6	8.7	7.5	6.7	5.5	4.4	3.5	3.8	5.5	6.3
前膊外分布	6.6	8.2	6.8	10.1	10.6	11.1	14.7	12.8	11.3	9.4	7.5	5.9	6.5	9.3	10.7
手背	4.5	5.0	1.8	4.9	5.9	6.1	3.6	2.4	3.0	3.6	4.1	4.8	2.4	3.5	3.4
大腿	2.7	3.4	4.1	1.7	2.5	2.8	2.8	1.9	2.9	1.8	2.5	3.4	4.1	3.4	3.1
大腿分布	4.8	6.2	7.4	3.1	4.5	5.1	5.0	3.4	5.3	3.3	4.4	6.1	7.4	6.1	5.6
下腿	4.5	5.8	6.0	3.7	5.1	5.6	5.2	4.3	6.2	5.9	6.5	6.0	5.9	5.4	4.9
下腿分布	6.7	8.7	8.9	5.6	7.6	8.3	7.8	6.4	9.2	8.8	9.7	8.9	8.9	8.1	7.4
足背	11.3	13.6	14.1	2.3	3.6	3.2	2.2	2.9	3.9	1.2	2.3	2.4	0.7	1.8	2.1
全身	4.0	4.1	3.8	3.0	3.5	3.5	4.0	3.2	4.0	3.3	3.3	3.4	3.8	4.0	3.9
全身分布	5.4	5.7	5.3	4.4	5.2	5.2	5.9	4.7	5.9	4.8	4.8	4.9	5.7	5.9	5.8

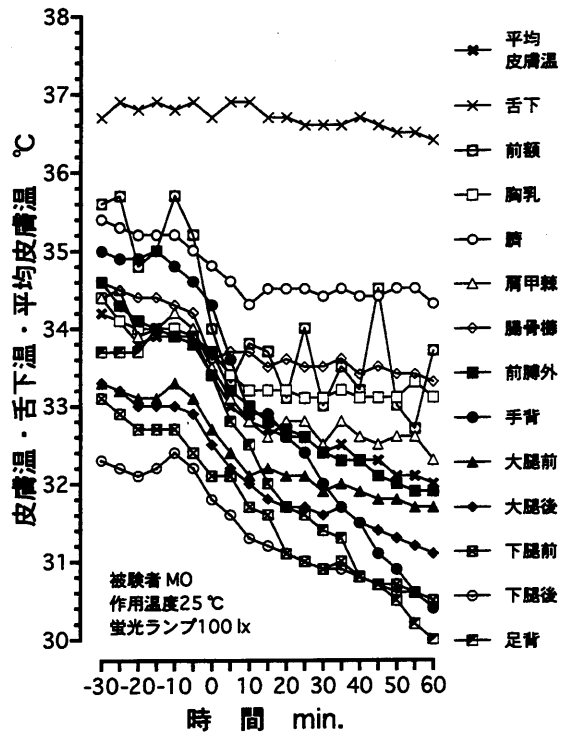
付録 3-9-2 被験者ごとの人体各部位および全身の自然対流熱伝達率（被験者 MR から被験者 YK）

自然対流熱伝達率 W/m ² °C															
部位	被験者MR			被験者MY			被験者NB			被験者NK			被験者YK		
	30°C	25°C	20°C	30°C	25°C	20°C	30°C	25°C	20°C	30°C	25°C	20°C	30°C	25°C	20°C
前額	1.5	1.2	1.6	2.4	-0.6	0.3	20.3	7.3	5.4	0.8	1.4	1.6	4.4	3.0	2.3
臍	3.4	1.9	1.6	3.6	3.5	4.2	4.9	4.8	5.7	1.4	1.6	2.0	4.2	3.1	3.7
臍分布	4.4	2.4	2.0	4.7	4.5	5.5	6.4	6.2	7.4	1.8	2.1	2.6	5.4	4.0	4.8
前膊外	6.3	6.2	4.6	6.5	6.1	6.4	3.1	4.4	3.5	6.8	5.9	5.3	4.7	4.9	5.9
前膊外分布	10.7	10.6	7.8	11.1	10.4	10.9	5.3	7.5	6.0	11.5	10.0	9.0	8.1	8.3	10.0
手背	4.6	5.3	6.4	6.1	5.0	5.4	3.2	4.0	4.4	6.3	4.2	4.1	1.2	2.2	2.7
大腿	2.8	3.2	3.7	2.6	3.1	3.9	2.8	2.8	3.6	2.7	3.5	4.5	2.9	3.0	3.8
大腿分布	5.0	5.8	6.6	4.7	5.5	7.0	5.0	5.0	6.5	4.9	6.3	8.1	5.3	5.3	6.9
下腿	4.5	5.3	5.0	4.7	5.2	6.1	5.1	6.0	5.3	4.6	5.2	5.3	5.1	5.9	6.1
下腿分布	6.8	7.9	7.6	7.1	7.7	9.2	7.6	9.0	7.9	6.9	7.8	8.0	7.6	8.9	9.2
足背	3.1	4.9	3.6	2.2	3.8	8.3	2.1	2.5	3.1	1.9	3.0	3.6	3.2	3.6	3.5
全身	3.7	3.5	3.2	3.9	3.8	4.8	5.1	4.5	4.7	3.1	3.2	3.6	3.9	3.7	4.2
全身分布	5.4	5.2	4.7	5.6	5.5	6.8	6.6	6.3	6.5	4.6	4.8	5.3	5.6	5.3	6.1

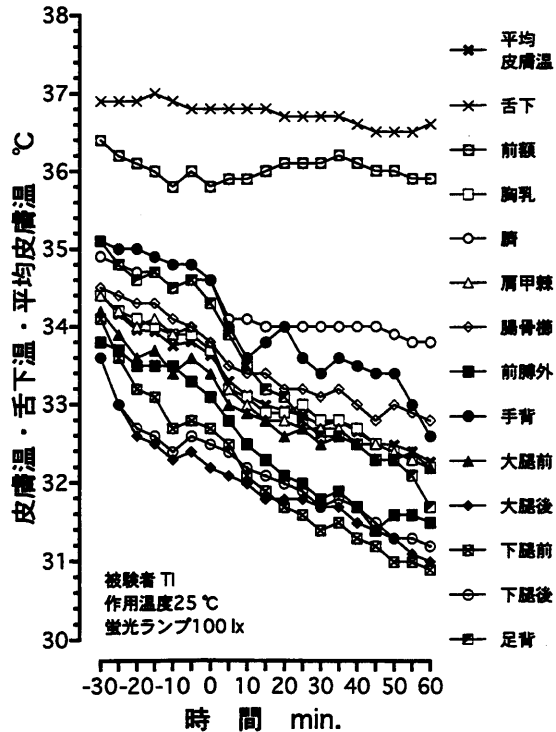
第4章付録



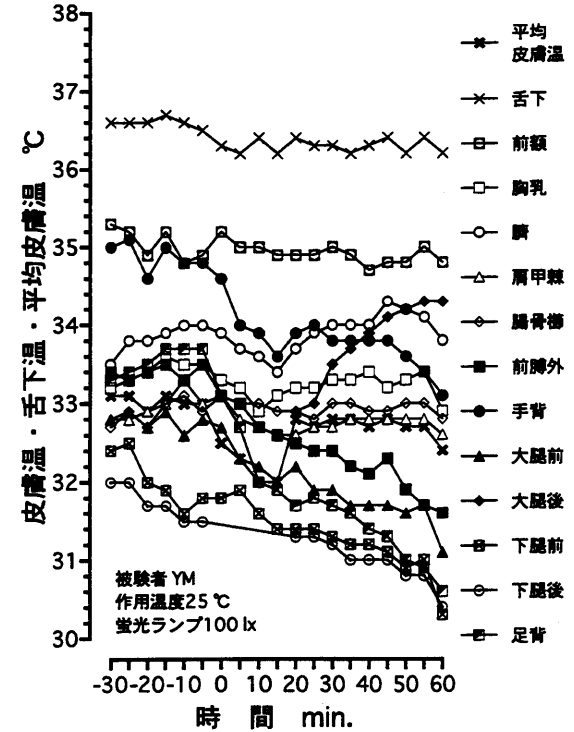
付録 4-1-1 皮膚温・舌下温・平均皮膚温の経時変動 (被験者 MF・25FD)



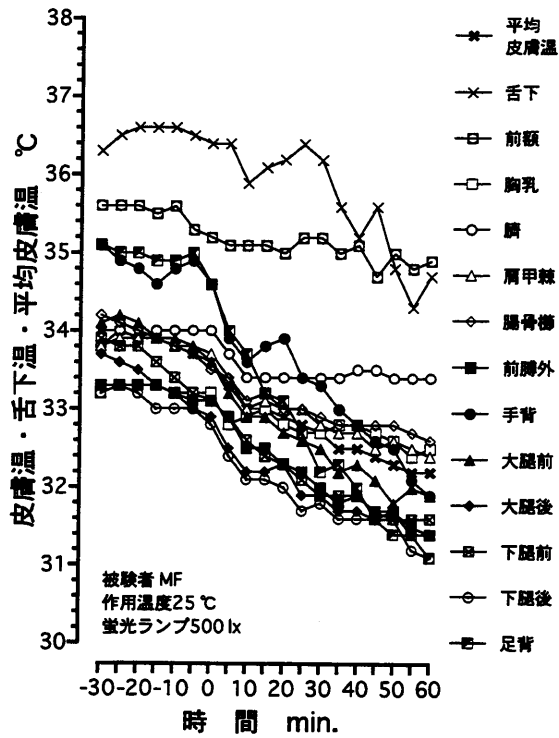
付録 4-1-2 皮膚温・舌下温・平均皮膚温の経時変動 (被験者 MO・25FD)



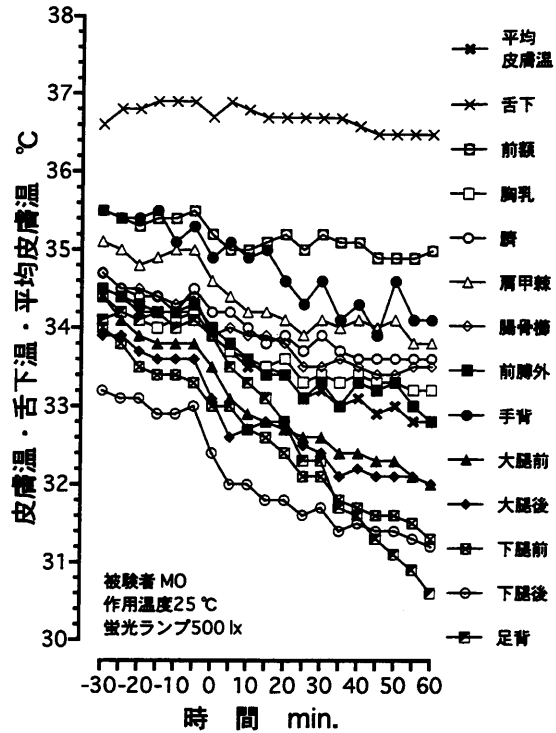
付録 4-1-3 皮膚温・舌下温・平均皮膚温の経時変動 (被験者 TI・25FD)



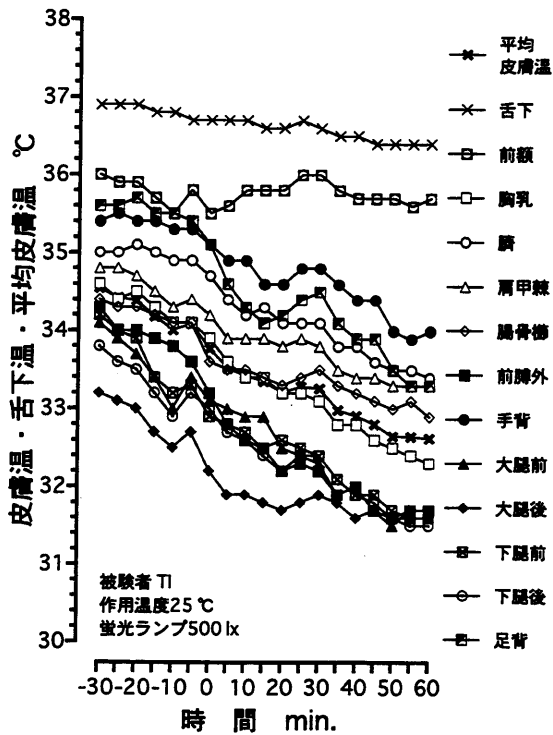
付録 4-1-4 皮膚温・舌下温・平均皮膚温の経時変動 (被験者 YM・25FD)



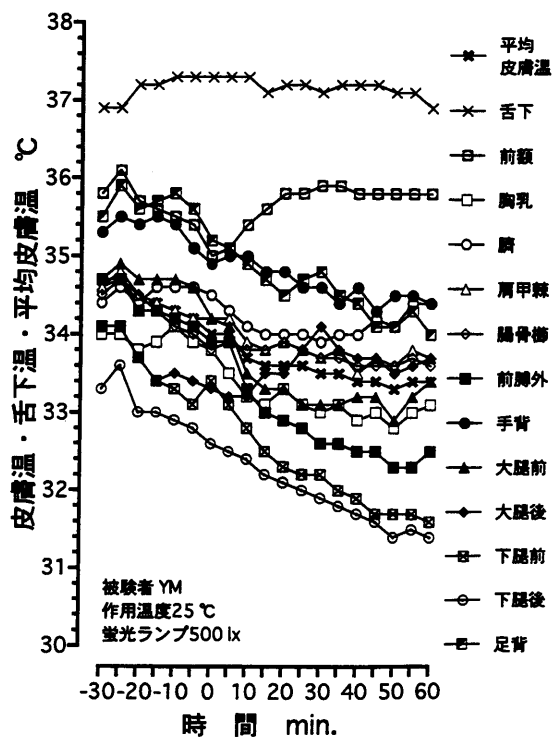
付録 4-1-5 皮膚温・舌下温・平均皮膚温の経時変動 (被験者 MF・25FN)



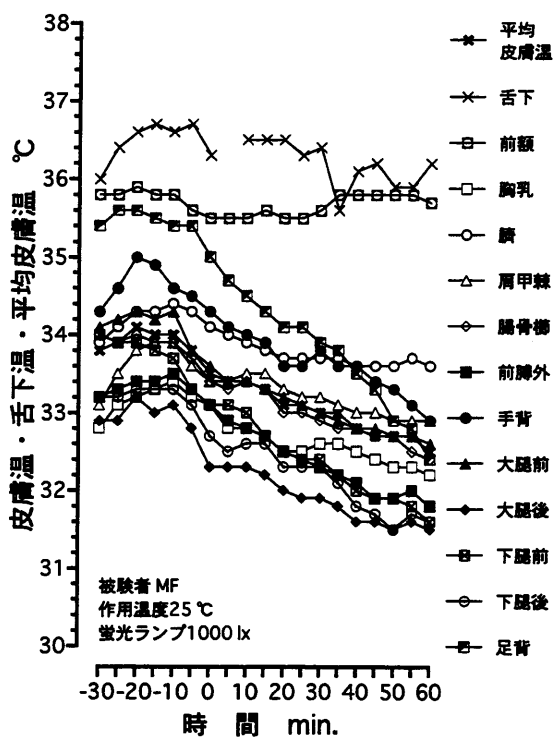
付録 4-1-6 皮膚温・舌下温・平均皮膚温の経時変動 (被験者 MO・25FN)



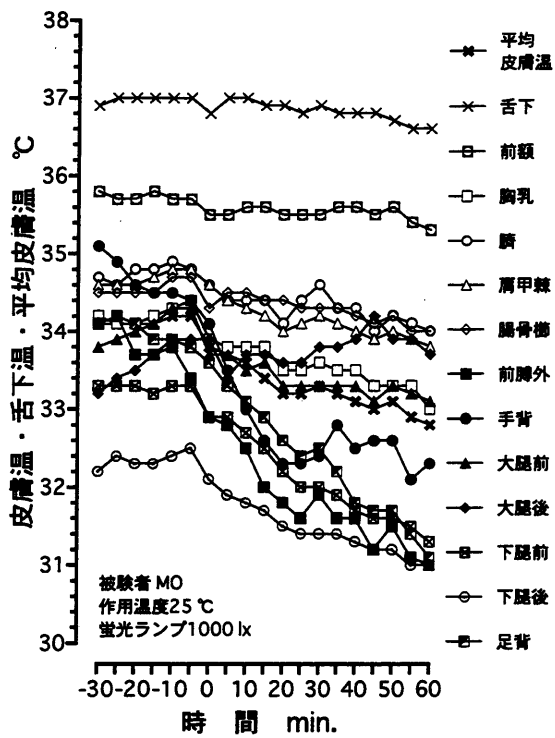
付録 4-1-7 皮膚温・舌下温・平均皮膚温の経時変動 (被験者 TI・25FN)



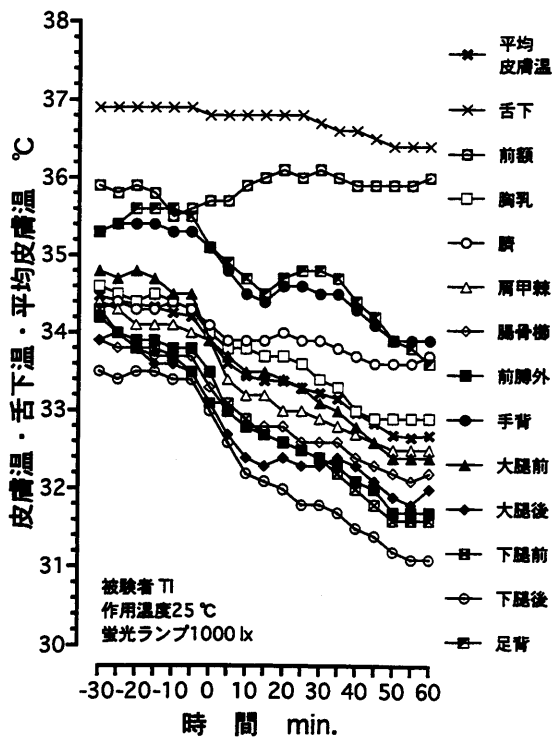
付録 4-1-8 皮膚温・舌下温・平均皮膚温の経時変動 (被験者 YM・25FN)



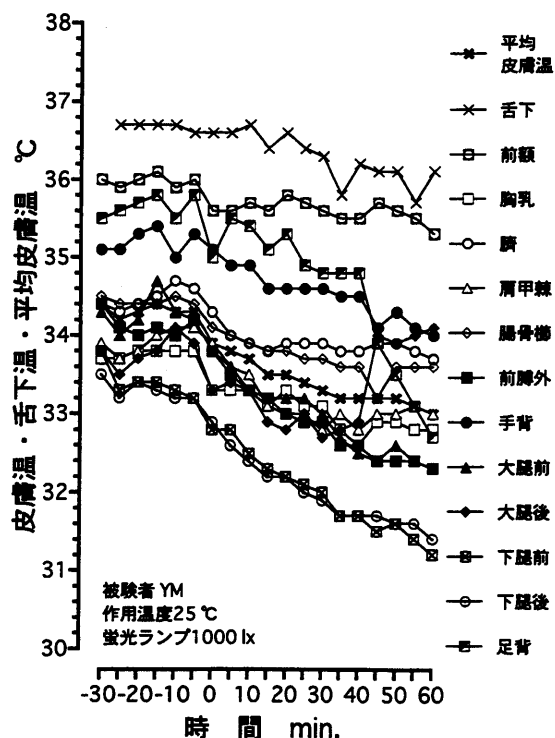
付録 4-1-9 皮膚温・舌下温・平均皮膚温の
経時変動 (被験者 MF・25FB)



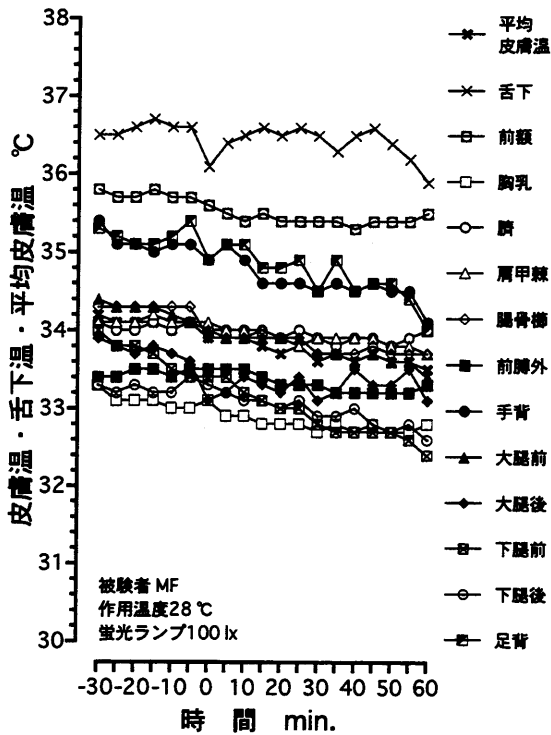
付録 4-1-10 皮膚温・舌下温・平均皮膚温の
経時変動 (被験者 MO・25FB)



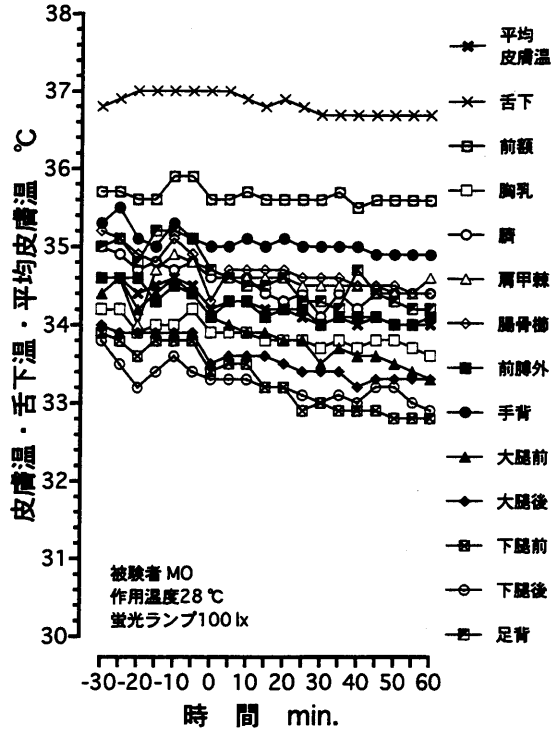
付録 4-1-11 皮膚温・舌下温・平均皮膚温の
経時変動 (被験者 TI・25FB)



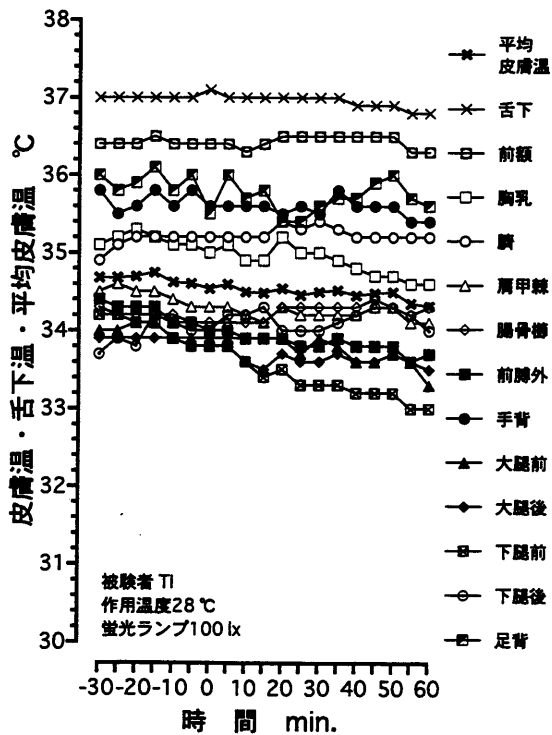
付録 4-1-12 皮膚温・舌下温・平均皮膚温の
経時変動 (被験者 YM・25FB)



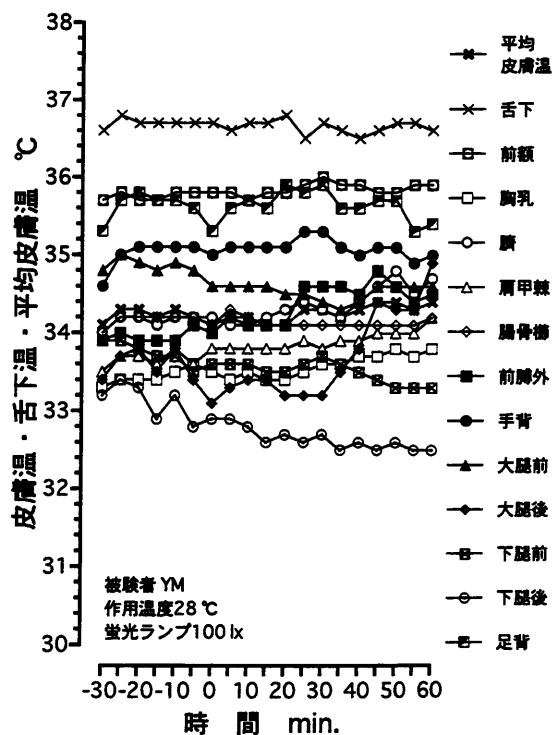
付録 4-1-13 皮膚温・舌下温・平均皮膚温の経時変動 (被験者 MF・28FD)



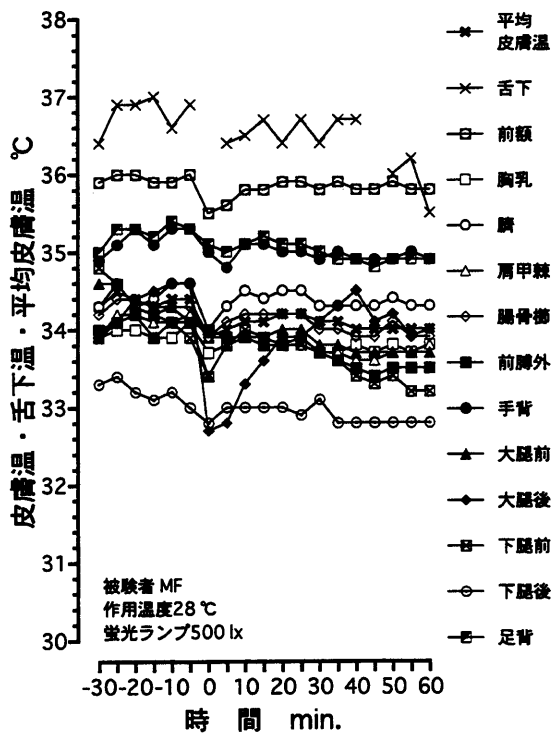
付録 4-1-14 皮膚温・舌下温・平均皮膚温の経時変動 (被験者 MO・28FD)



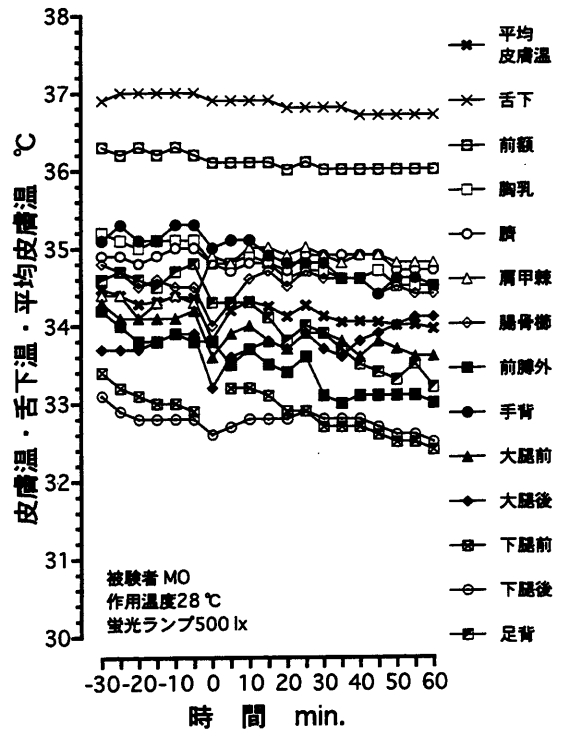
付録 4-1-15 皮膚温・舌下温・平均皮膚温の経時変動 (被験者 TI・28FD)



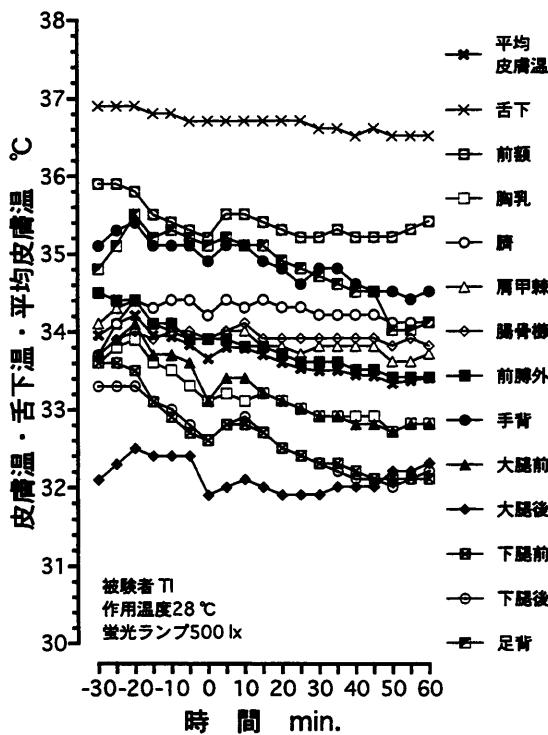
付録 4-1-16 皮膚温・舌下温・平均皮膚温の経時変動 (被験者 YM・28FD)



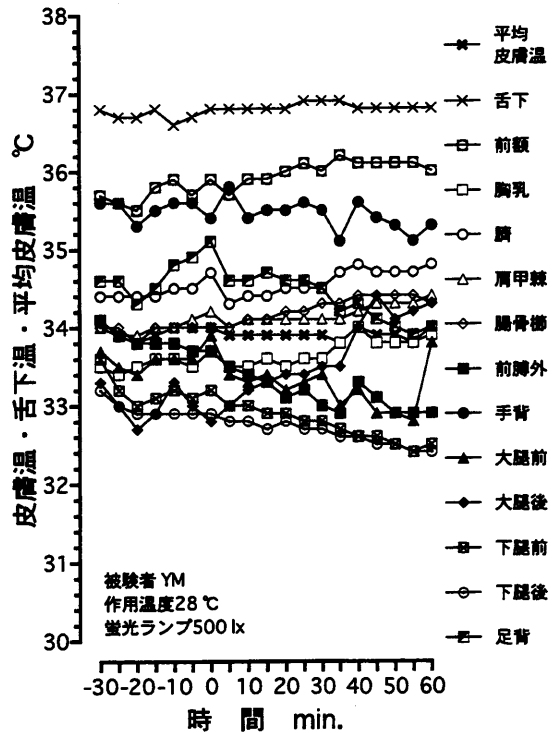
付録 4-1-17 皮膚温・舌下温・平均皮膚温の経時変動 (被験者 MF・28FN)



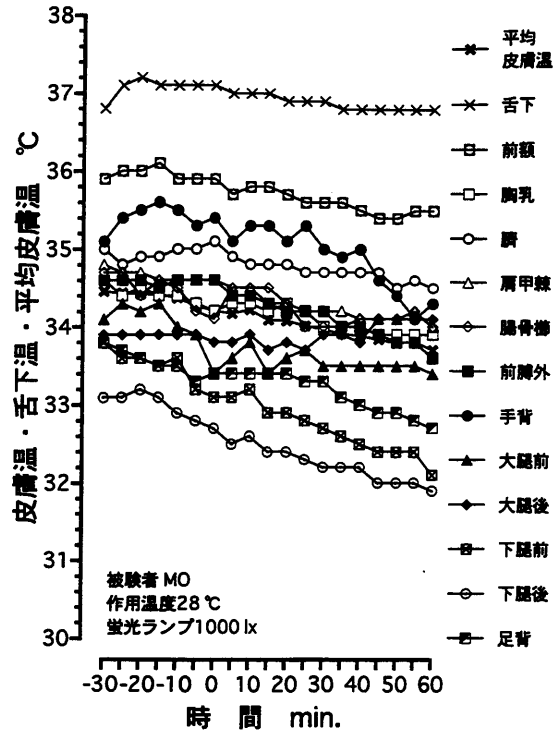
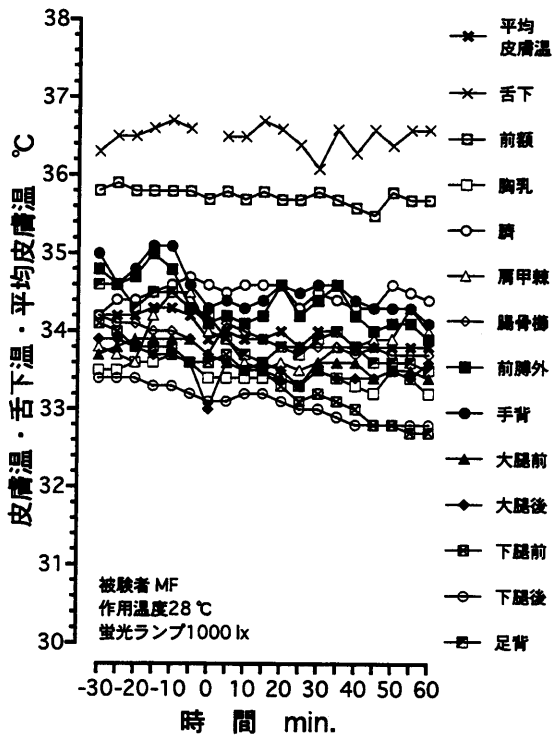
付録 4-1-18 皮膚温・舌下温・平均皮膚温の経時変動 (被験者 MO・28FN)



付録 4-1-19 皮膚温・舌下温・平均皮膚温の経時変動 (被験者 TI・28FN)

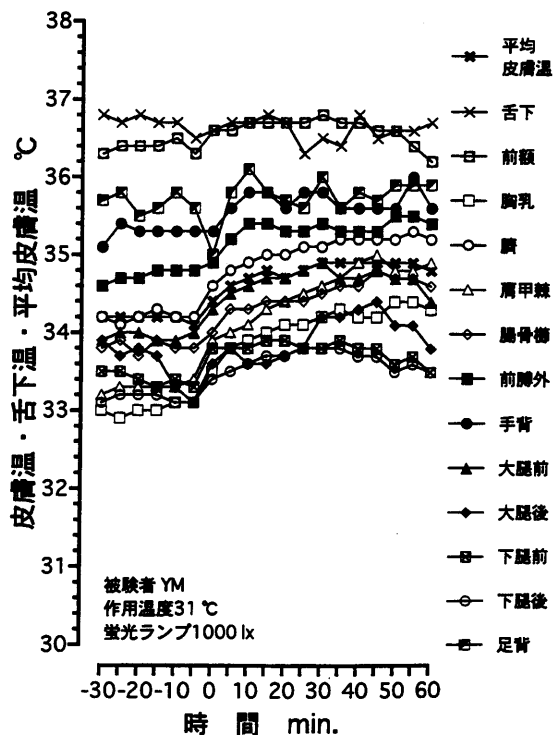
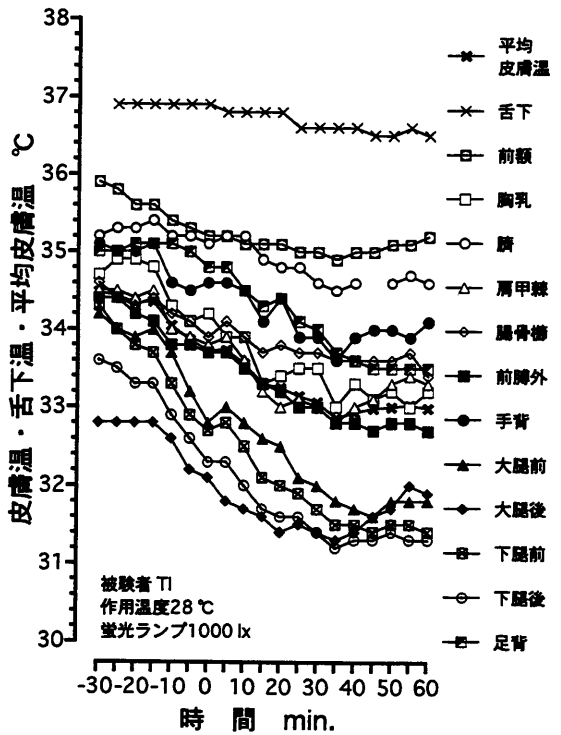


付録 4-1-20 皮膚温・舌下温・平均皮膚温の経時変動 (被験者 YM・28FN)



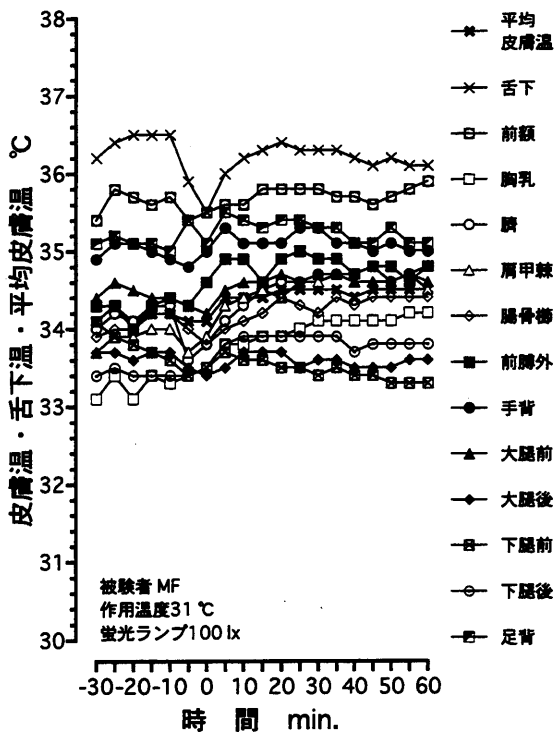
付録 4-1-21 皮膚温・舌下温・平均皮膚温の経時変動 (被験者 MF・28FB)

付録 4-1-22 皮膚温・舌下温・平均皮膚温の経時変動 (被験者 MO・28FB)

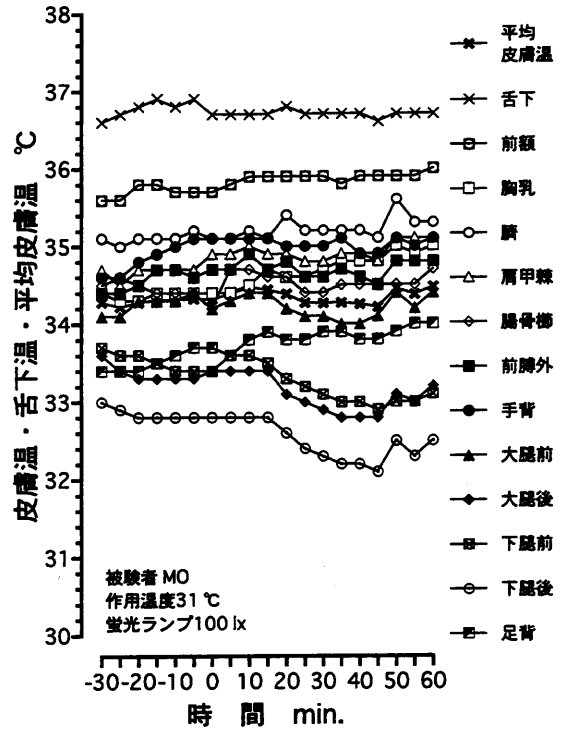


付録 4-1-23 皮膚温・舌下温・平均皮膚温の経時変動 (被験者 TI・28FB)

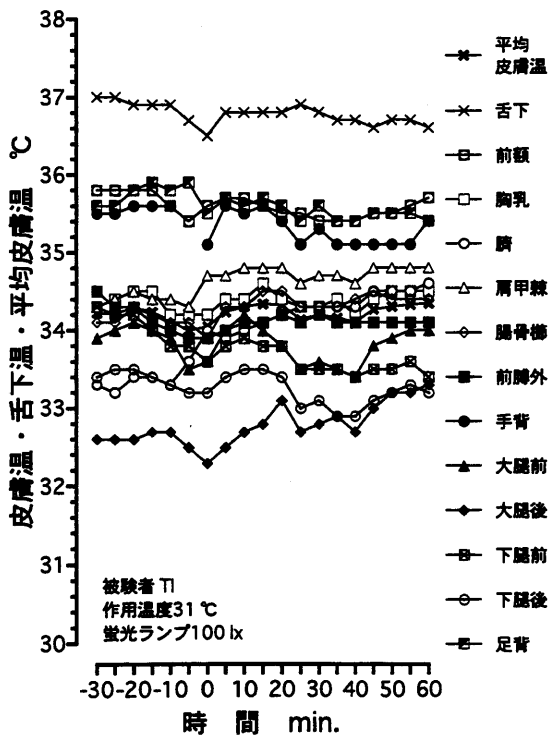
付録 4-1-24 皮膚温・舌下温・平均皮膚温の経時変動 (被験者 YM・28FB)



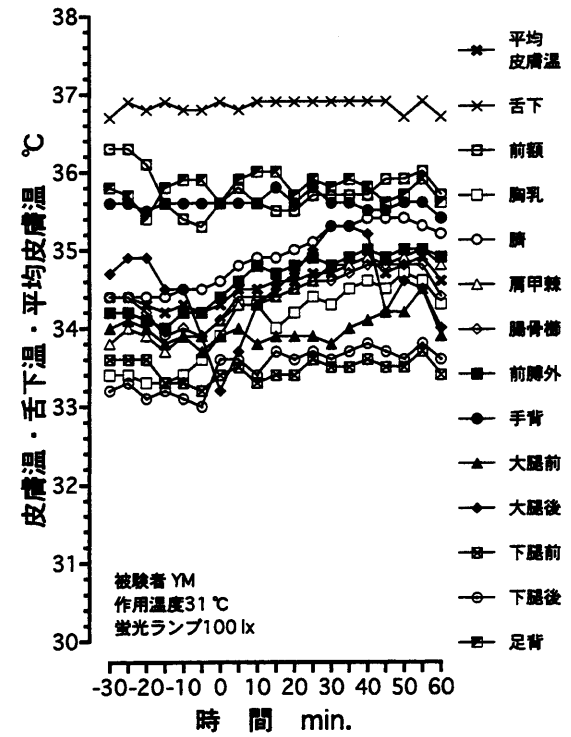
付録 4-1-25 皮膚温・舌下温・平均皮膚温の経時変動 (被験者 MF・31FD)



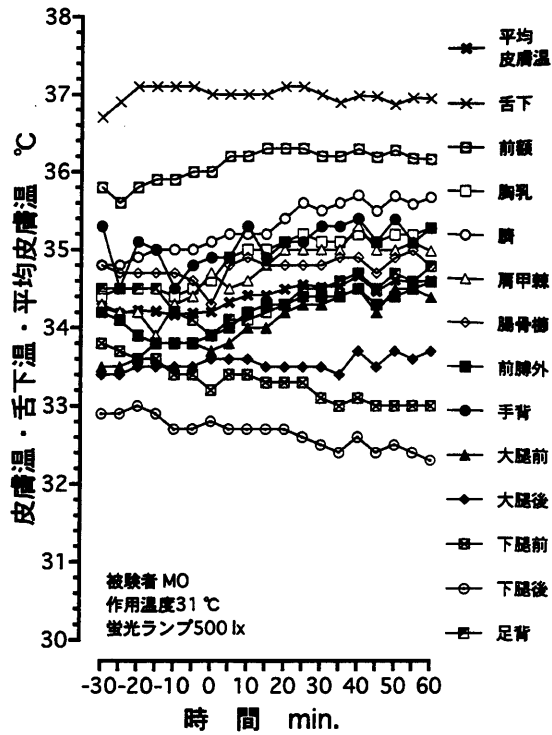
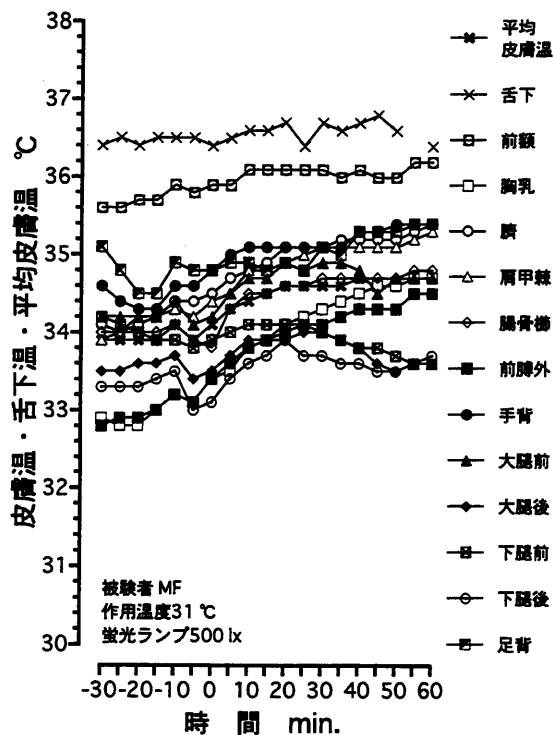
付録 4-1-26 皮膚温・舌下温・平均皮膚温の経時変動 (被験者 MO・31FD)



付録 4-1-27 皮膚温・舌下温・平均皮膚温の経時変動 (被験者 TI・31FD)

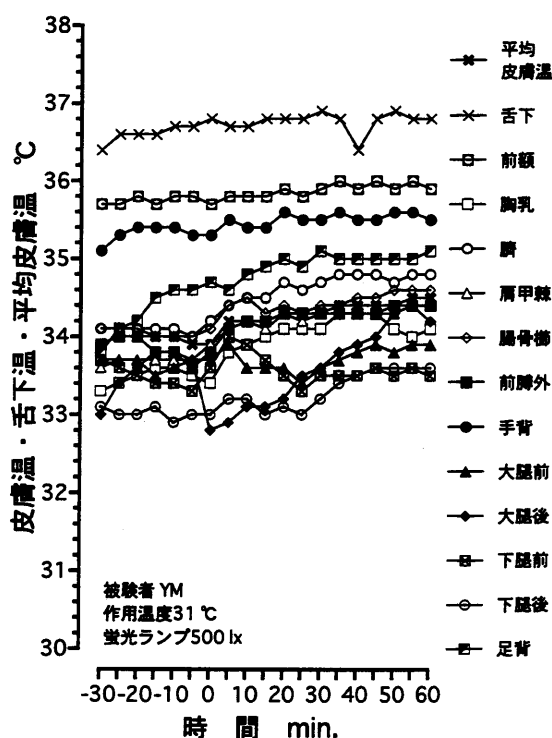
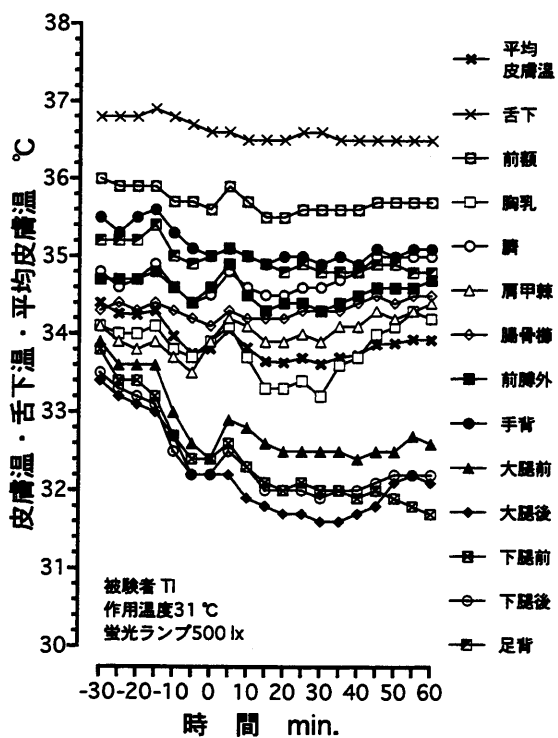


付録 4-1-28 皮膚温・舌下温・平均皮膚温の経時変動 (被験者 YM・31FD)



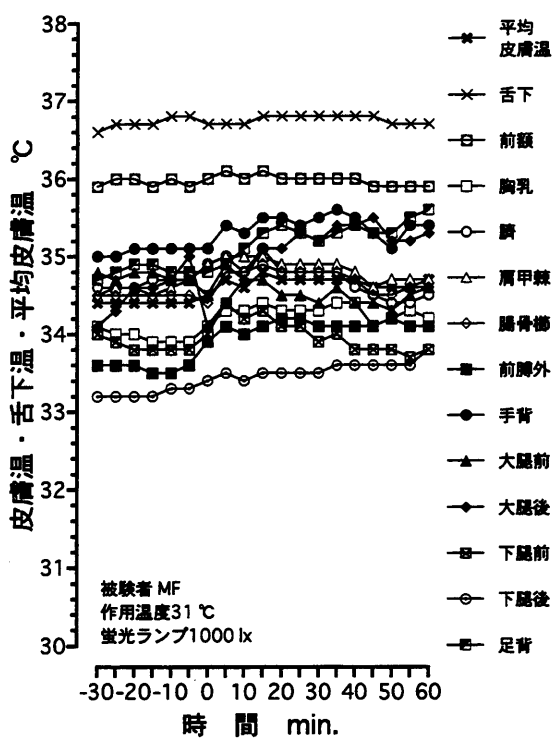
付録 4-1-29 皮膚温・舌下温・平均皮膚温の経時変動 (被験者 MF・31FN)

付録 4-1-30 皮膚温・舌下温・平均皮膚温の経時変動 (被験者 MO・31FN)

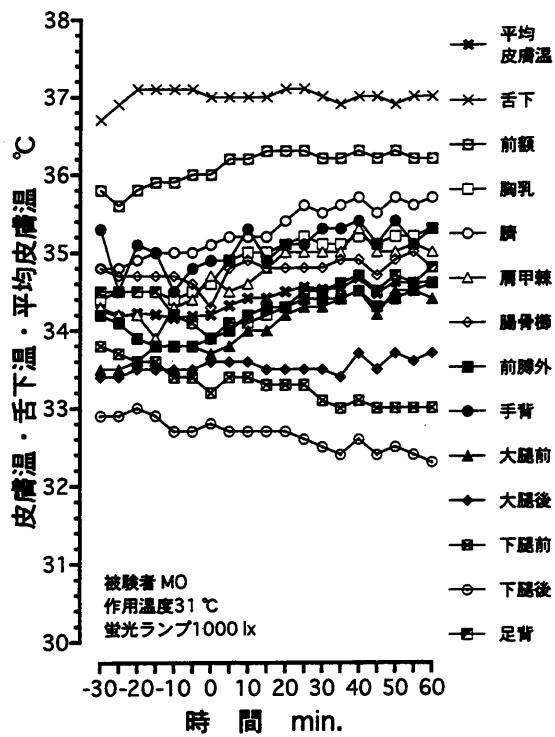


付録 4-1-31 皮膚温・舌下温・平均皮膚温の経時変動 (被験者 TI・31FN)

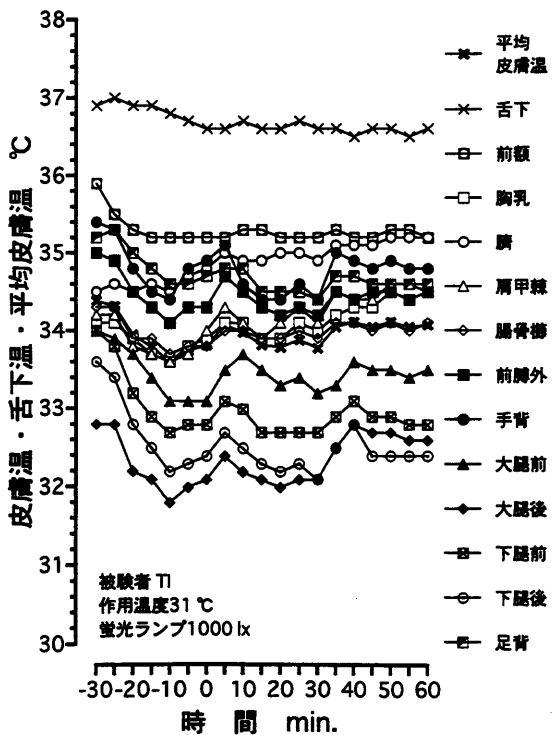
付録 4-1-32 皮膚温・舌下温・平均皮膚温の経時変動 (被験者 YM・31FN)



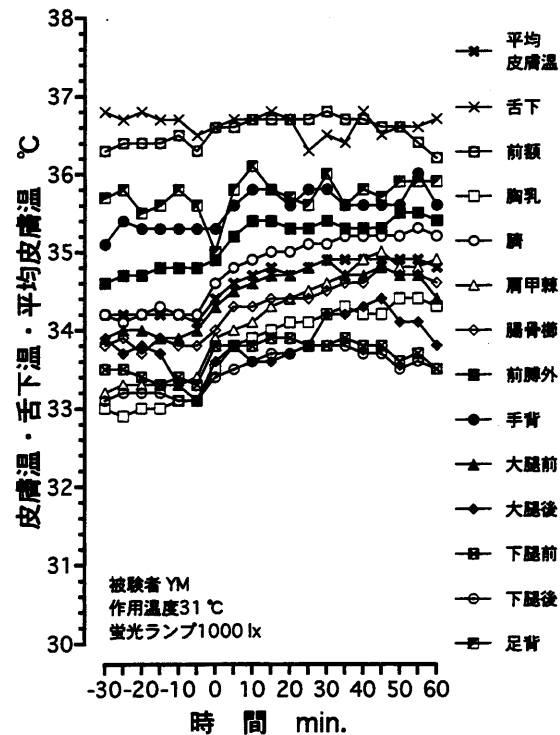
付録 4-1-33 皮膚温・舌下温・平均皮膚温の経時変動 (被験者 MF・31FB)



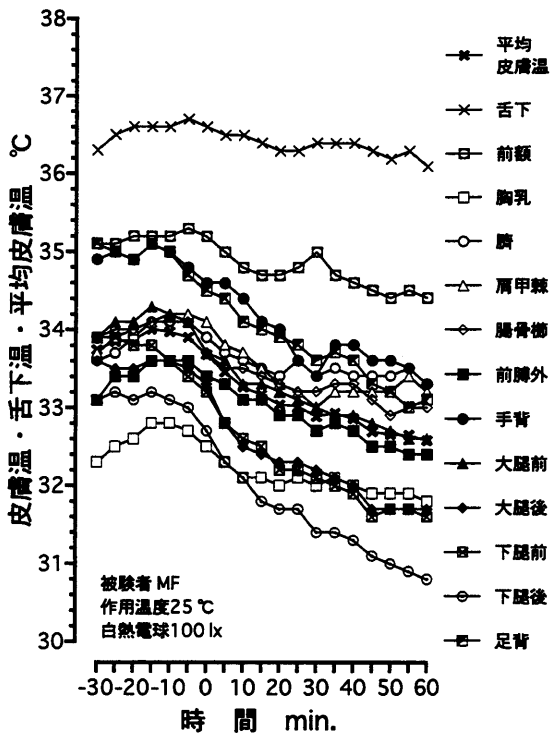
付録 4-1-34 皮膚温・舌下温・平均皮膚温の経時変動 (被験者 MO・31FB)



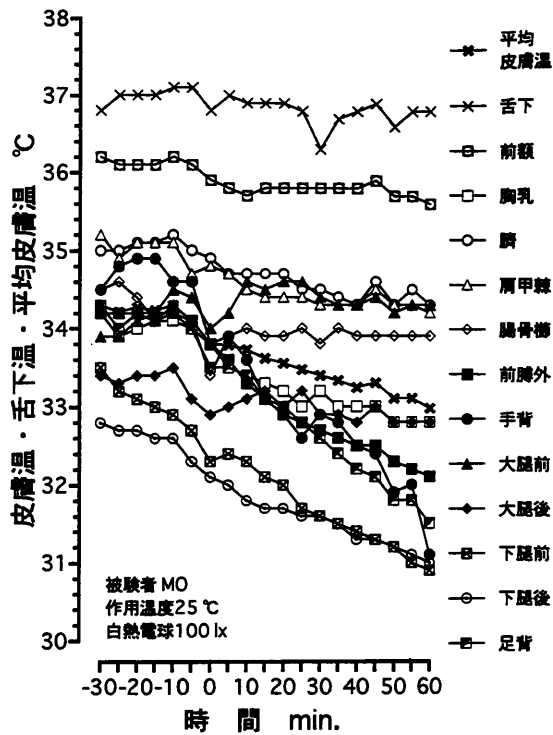
付録 4-1-35 皮膚温・舌下温・平均皮膚温の経時変動 (被験者 TI・31FB)



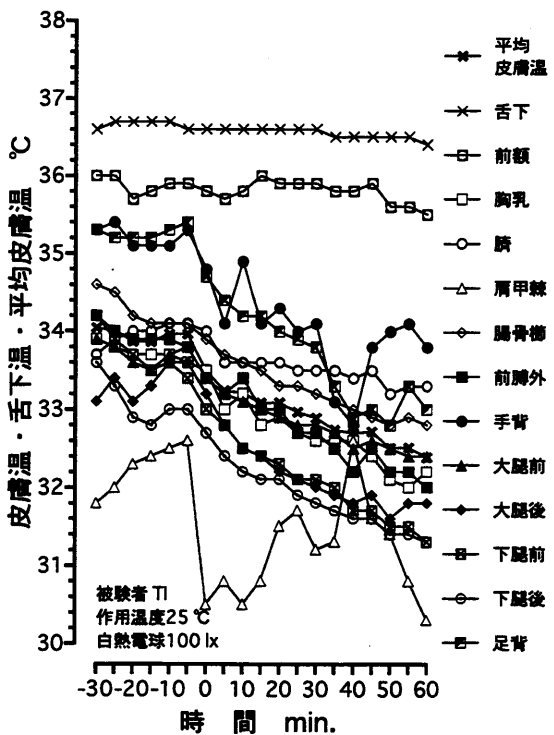
付録 4-1-36 皮膚温・舌下温・平均皮膚温の経時変動 (被験者 YM・31FB)



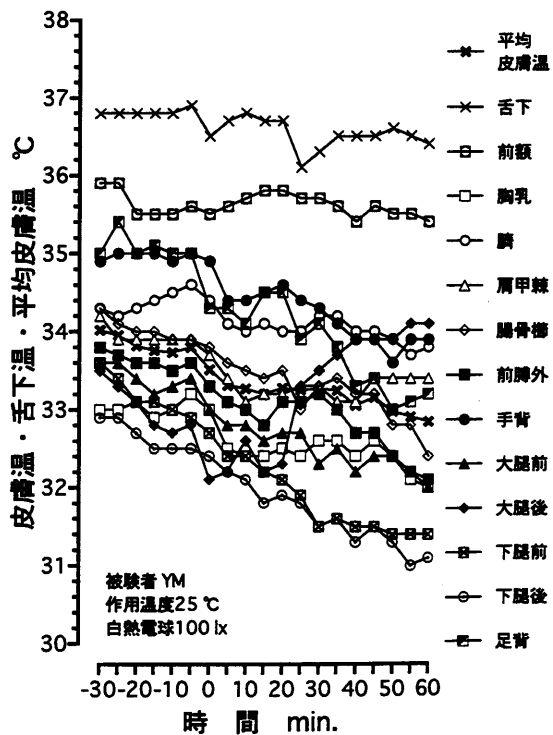
付録 4-1-37 皮膚温・舌下温・平均皮膚温の経時変動 (被験者 MF・25ID)



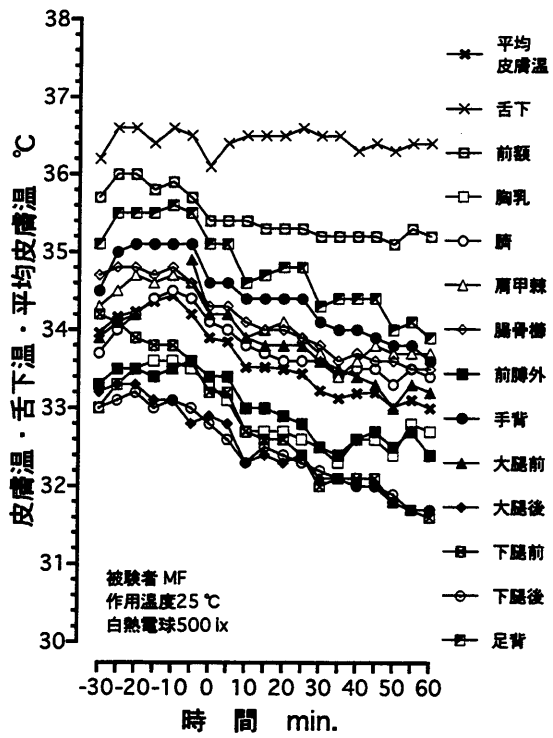
付録 4-1-38 皮膚温・舌下温・平均皮膚温の経時変動 (被験者 MO・25ID)



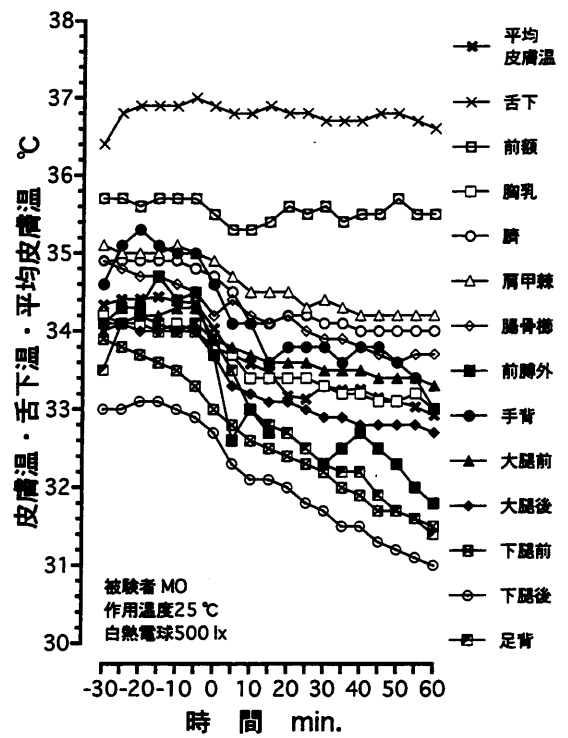
付録 4-1-39 皮膚温・舌下温・平均皮膚温の経時変動 (被験者 TI・25ID)



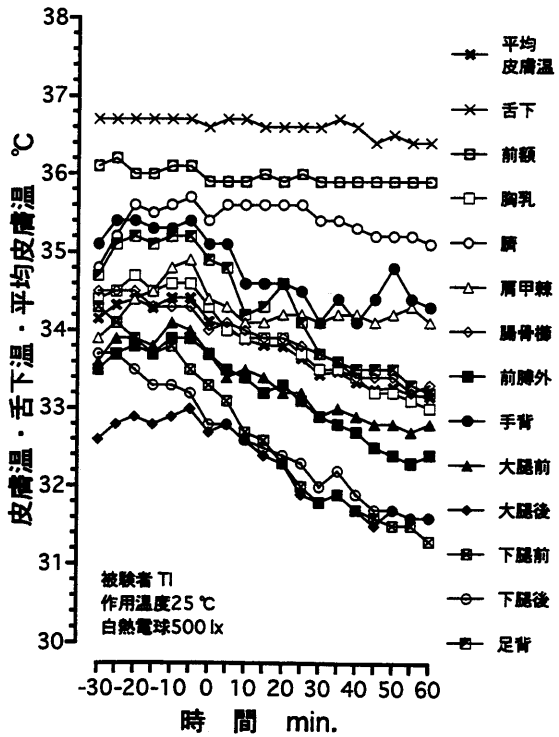
付録 4-1-40 皮膚温・舌下温・平均皮膚温の経時変動 (被験者 YM・25ID)



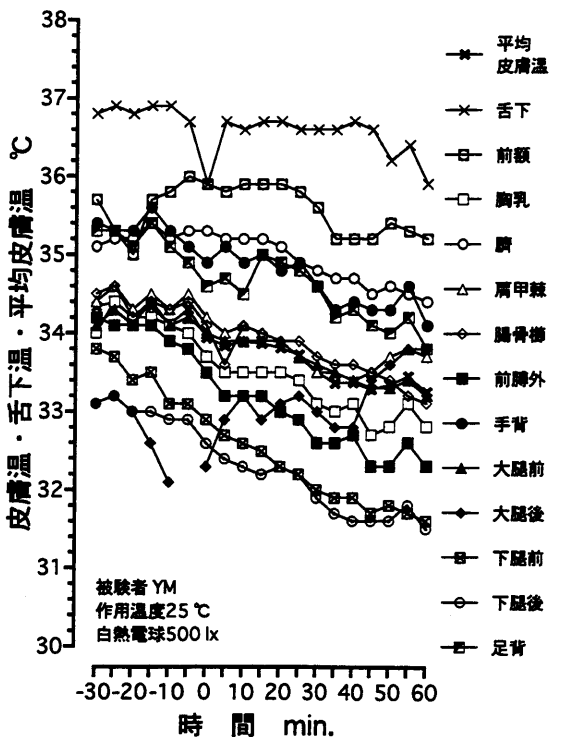
付録 4-1-41 皮膚温・舌下温・平均皮膚温の経時変動 (被験者 MF・25IN)



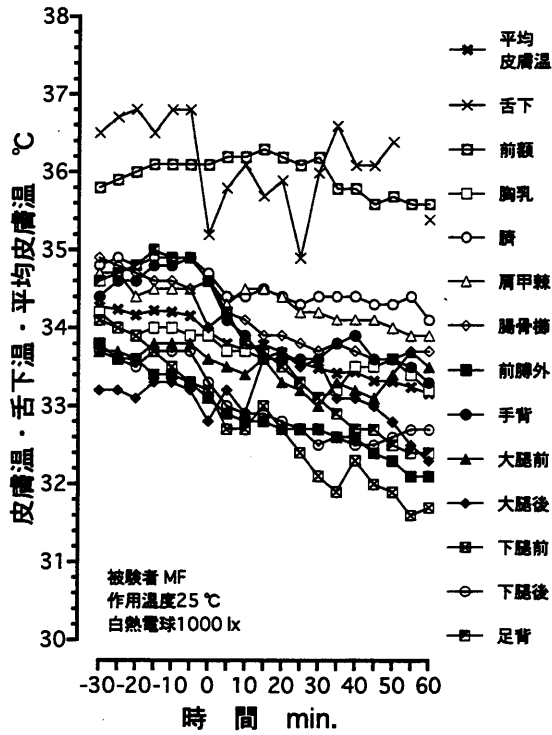
付録 4-1-42 皮膚温・舌下温・平均皮膚温の経時変動 (被験者 MO・25IN)



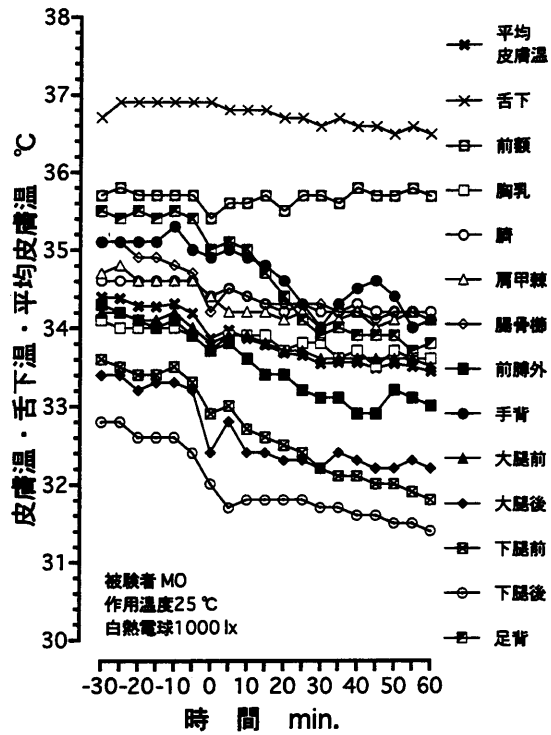
付録 4-1-43 皮膚温・舌下温・平均皮膚温の経時変動 (被験者 TI・25IN)



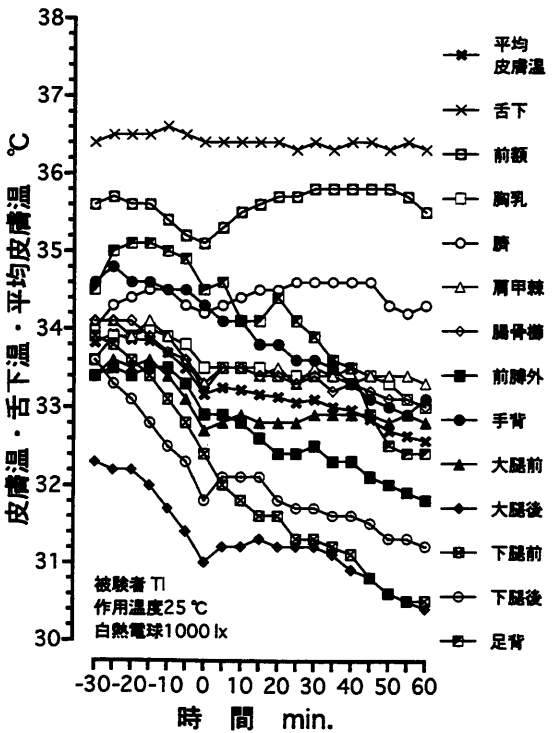
付録 4-1-44 皮膚温・舌下温・平均皮膚温の経時変動 (被験者 YM・25IN)



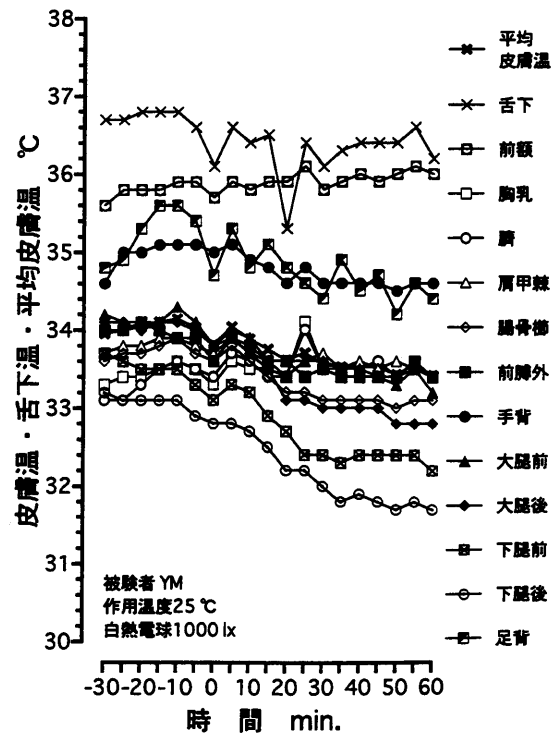
付録 4-1-45 皮膚温・舌下温・平均皮膚温の経時変動 (被験者 MF・25IB)



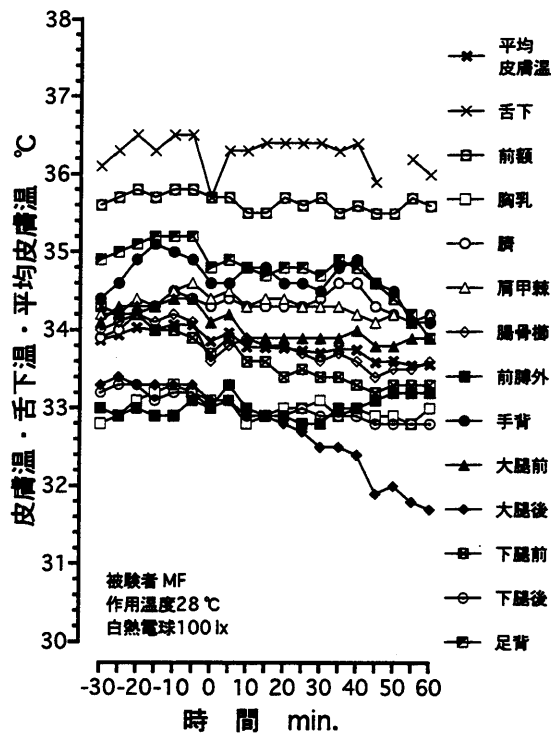
付録 4-1-46 皮膚温・舌下温・平均皮膚温の経時変動 (被験者 MO・25IB)



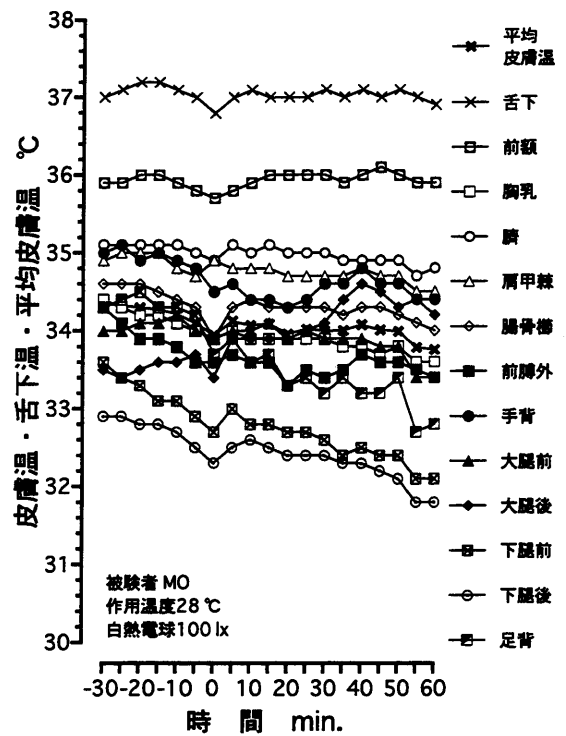
付録 4-1-47 皮膚温・舌下温・平均皮膚温の経時変動 (被験者 TI・25IB)



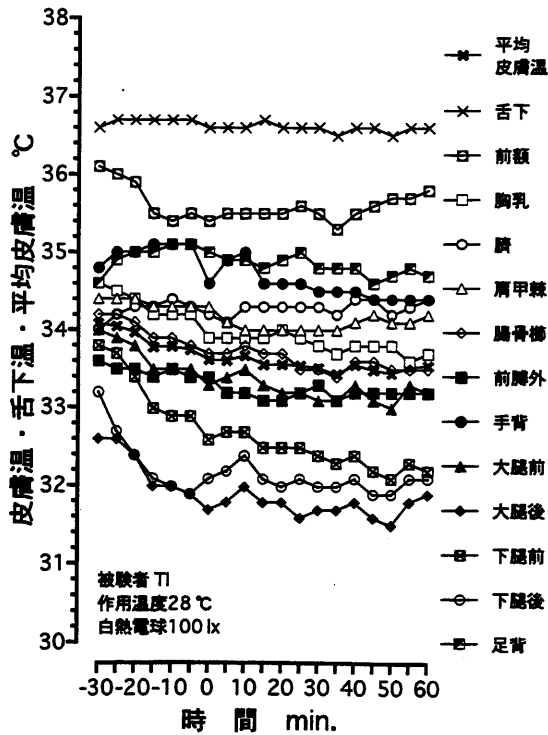
付録 4-1-48 皮膚温・舌下温・平均皮膚温の経時変動 (被験者 YM・25IB)



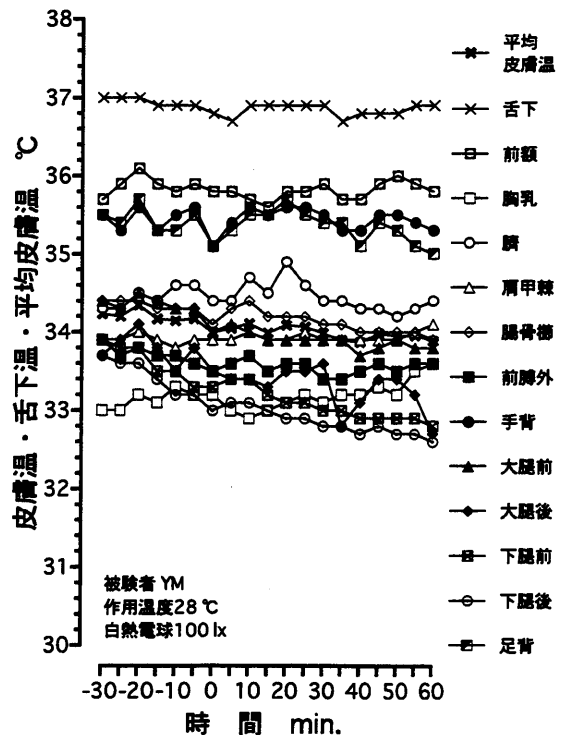
付録 4-1-49 皮膚温・舌下温・平均皮膚温の経時変動 (被験者 MF・28ID)



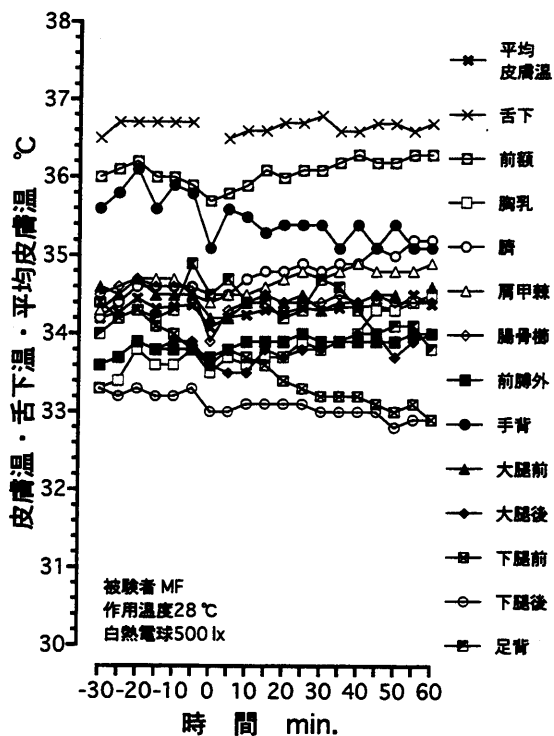
付録 4-1-50 皮膚温・舌下温・平均皮膚温の経時変動 (被験者 MO・28ID)



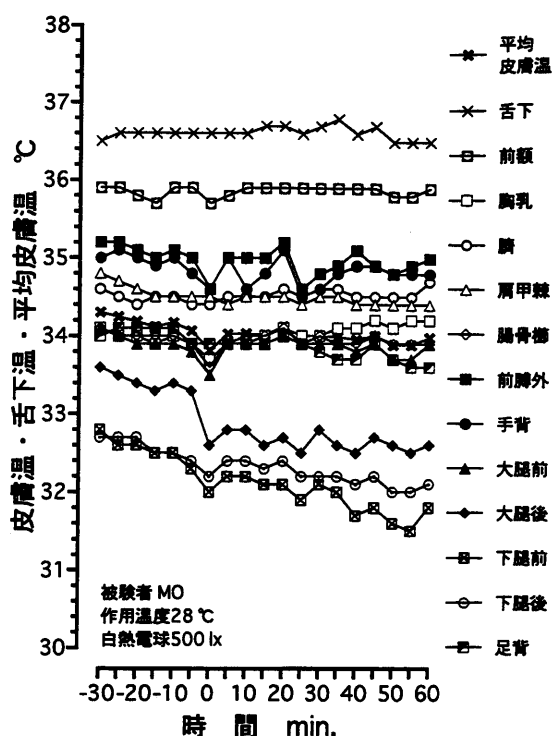
付録 4-1-51 皮膚温・舌下温・平均皮膚温の経時変動 (被験者 TI・28ID)



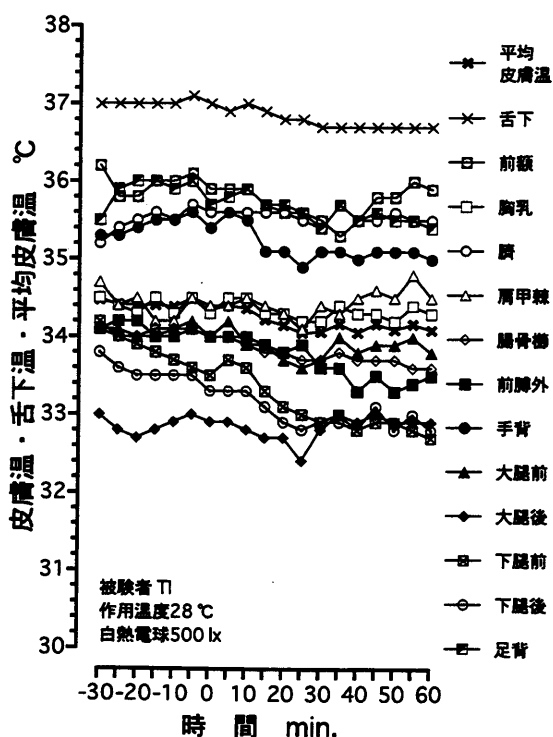
付録 4-1-52 皮膚温・舌下温・平均皮膚温の経時変動 (被験者 YM・28ID)



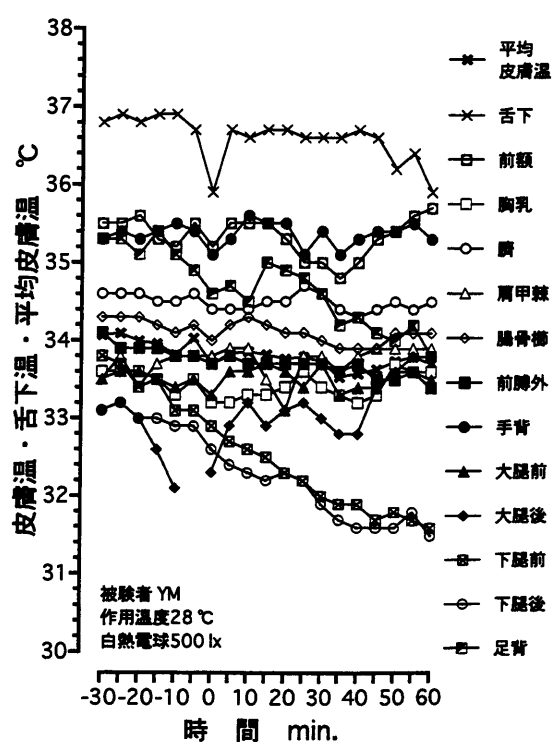
付録 4-1-53 皮膚温・舌下温・平均皮膚温の経時変動 (被験者 MF・28IN)



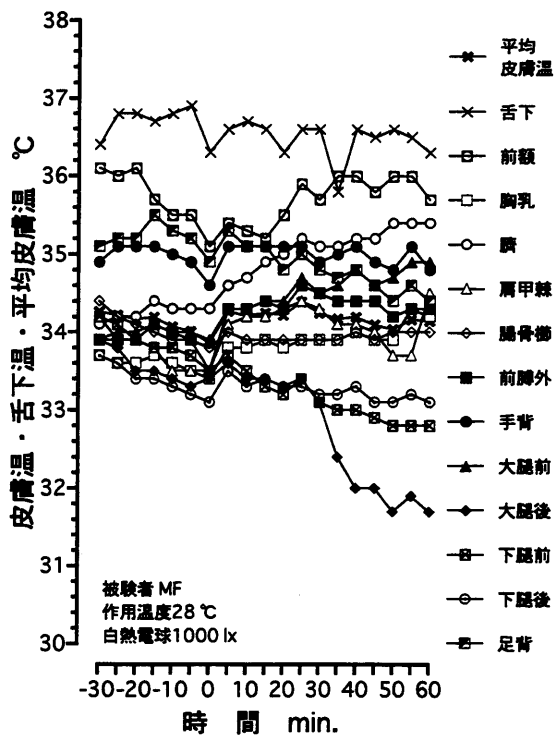
付録 4-1-54 皮膚温・舌下温・平均皮膚温の経時変動 (被験者 MO・28IN)



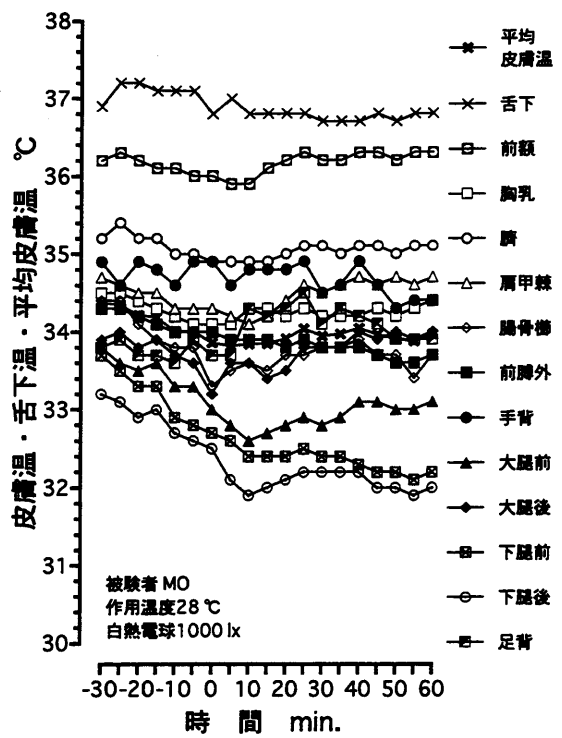
付録 4-1-55 皮膚温・舌下温・平均皮膚温の経時変動 (被験者 TI・28IN)



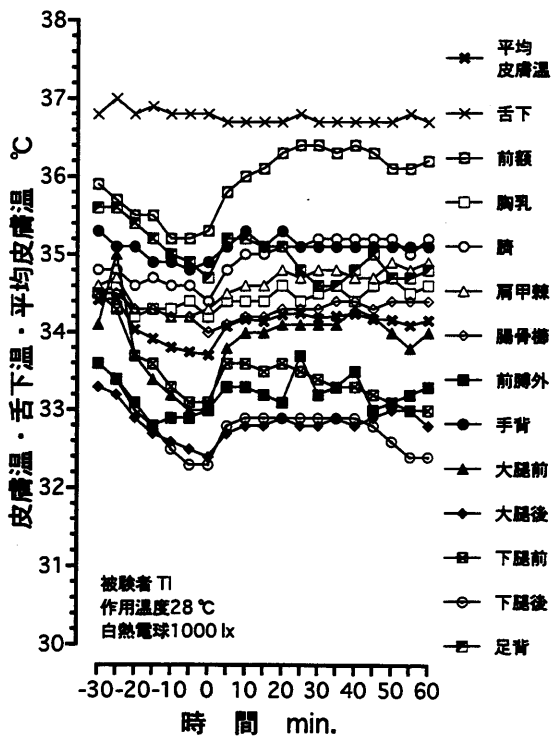
付録 4-1-56 皮膚温・舌下温・平均皮膚温の経時変動 (被験者 YM・28IN)



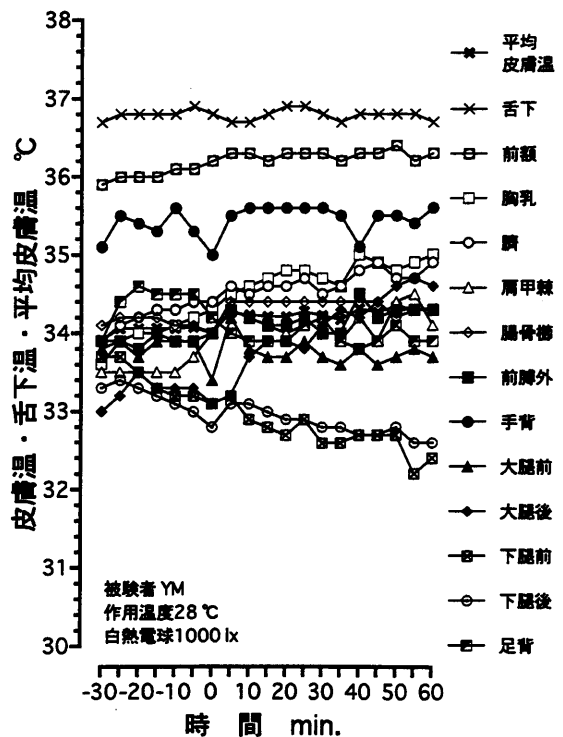
付録 4-1-57 皮膚温・舌下温・平均皮膚温の
経時変動 (被験者 MF・28IB)



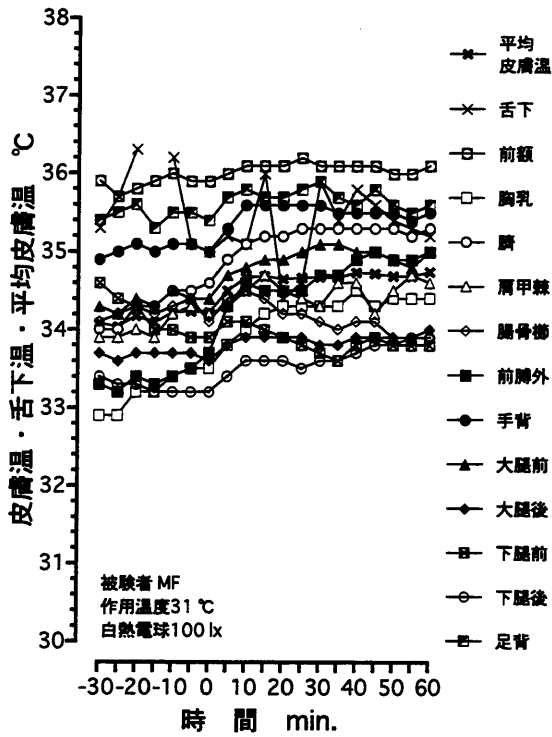
付録 4-1-58 皮膚温・舌下温・平均皮膚温の
経時変動 (被験者 MO・28IB)



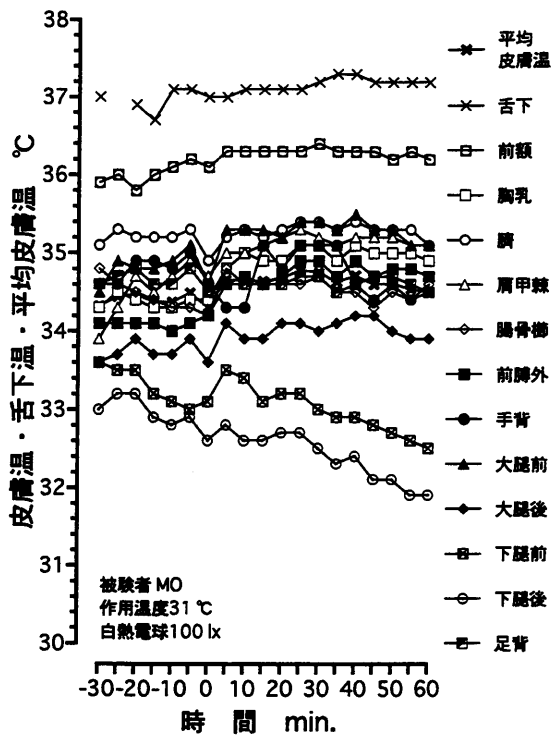
付録 4-1-59 皮膚温・舌下温・平均皮膚温の
経時変動 (被験者 TI・28IB)



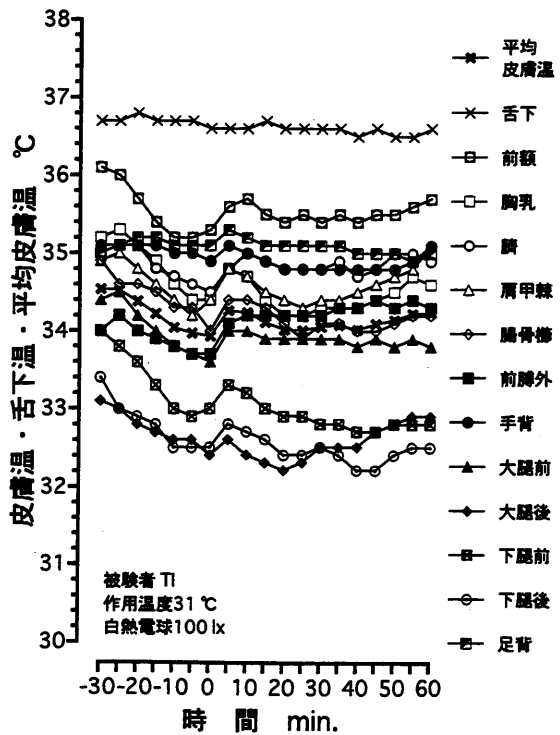
付録 4-1-60 皮膚温・舌下温・平均皮膚温の
経時変動 (被験者 YM・28IB)



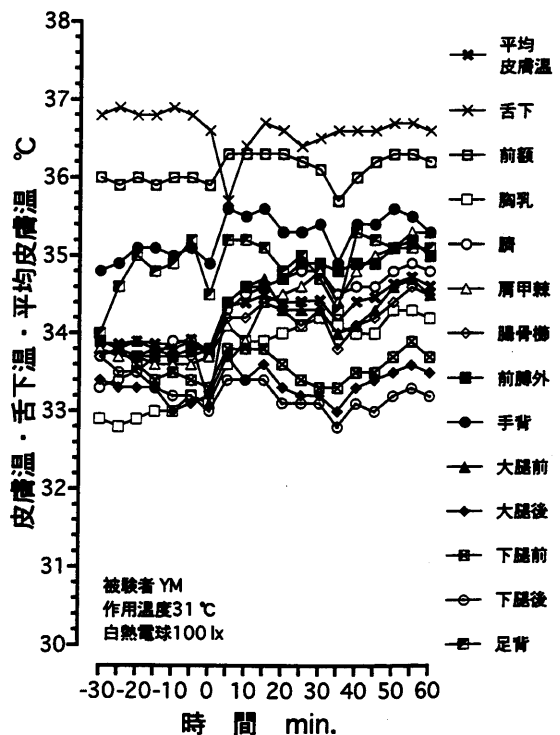
付録 4-1-61 皮膚温・舌下温・平均皮膚温の経時変動 (被験者 MF・31ID)



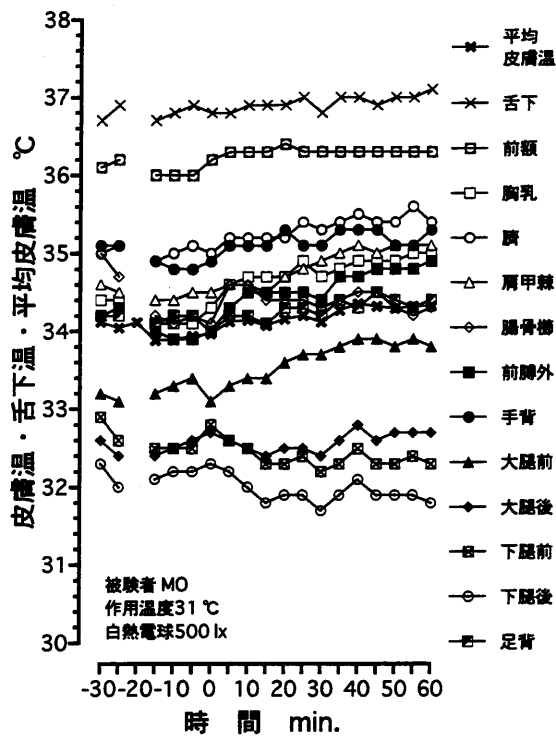
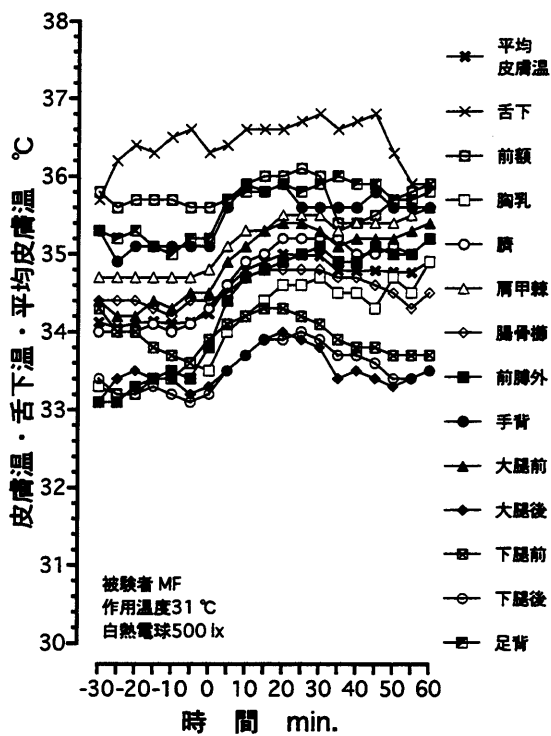
付録 4-1-62 皮膚温・舌下温・平均皮膚温の経時変動 (被験者 MO・31ID)



付録 4-1-63 皮膚温・舌下温・平均皮膚温の経時変動 (被験者 TI・31ID)

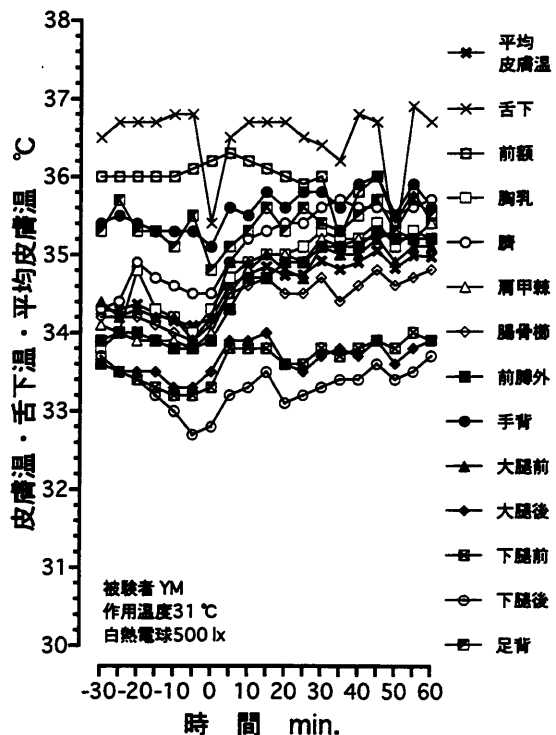
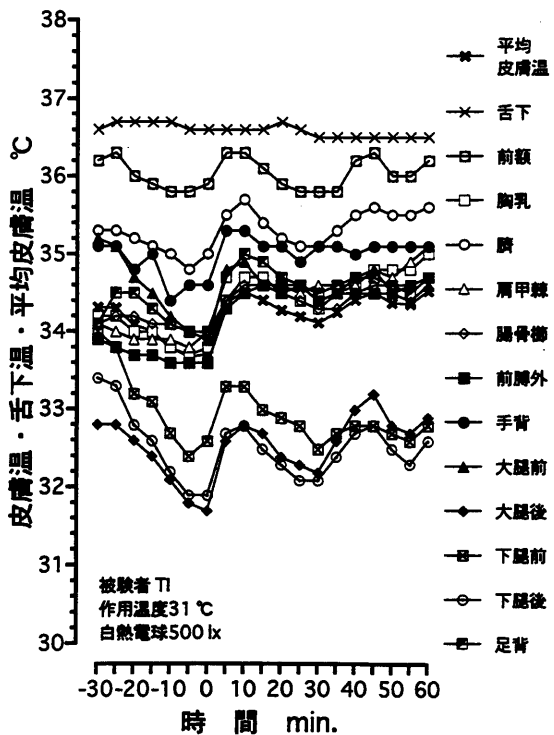


付録 4-1-64 皮膚温・舌下温・平均皮膚温の経時変動 (被験者 YM・31ID)



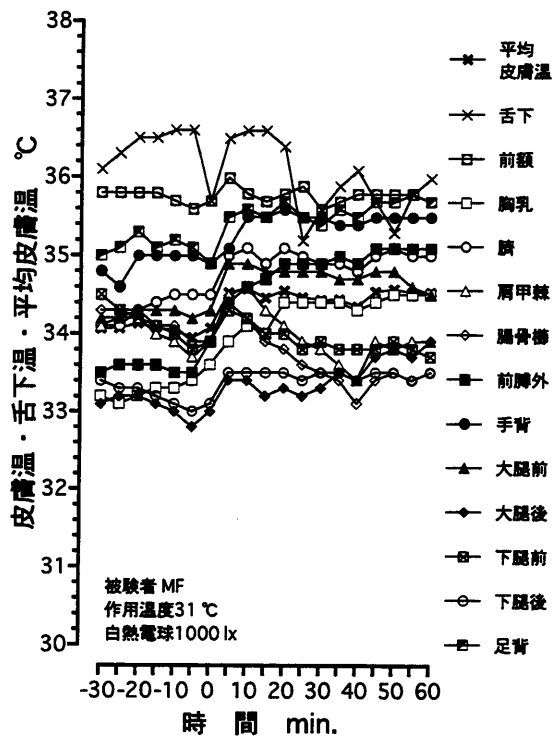
付録 4-1-65 皮膚温・舌下温・平均皮膚温の経時変動 (被験者 MF・31IN)

付録 4-1-66 皮膚温・舌下温・平均皮膚温の経時変動 (被験者 MO・31IN)

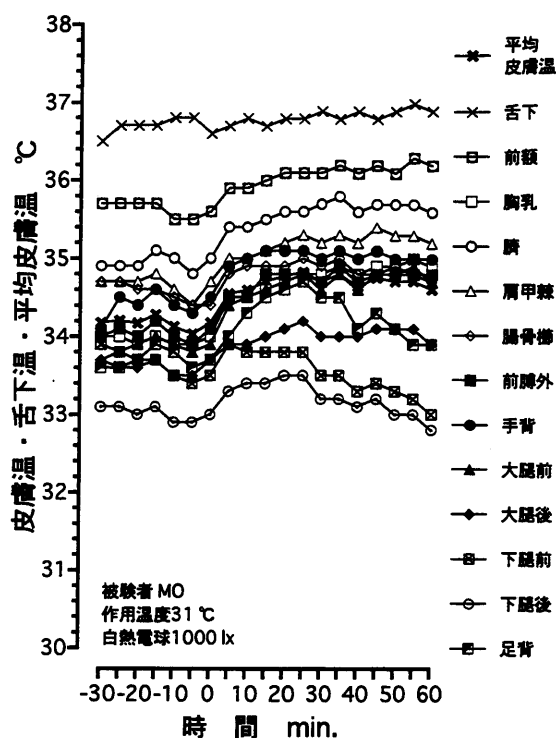


付録 4-1-67 皮膚温・舌下温・平均皮膚温の経時変動 (被験者 TI・31IN)

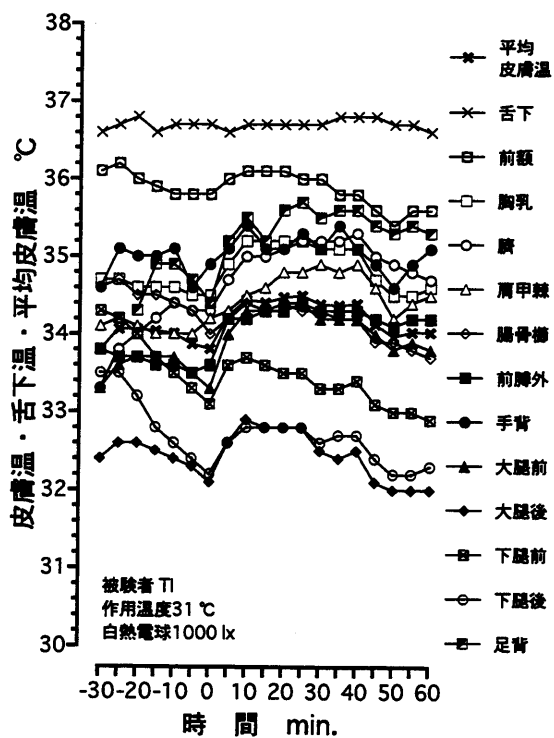
付録 4-1-68 皮膚温・舌下温・平均皮膚温の経時変動 (被験者 YM・31IN)



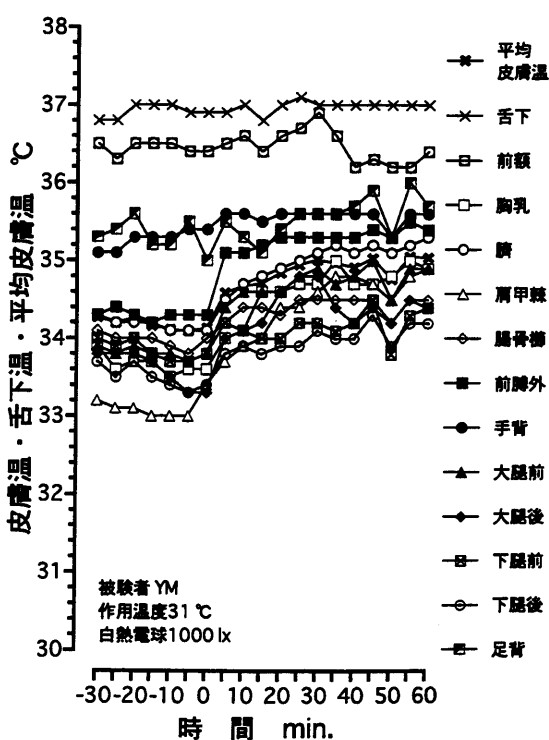
付録 4-1-69 皮膚温・舌下温・平均皮膚温の経時変動 (被験者 MF・31IB)



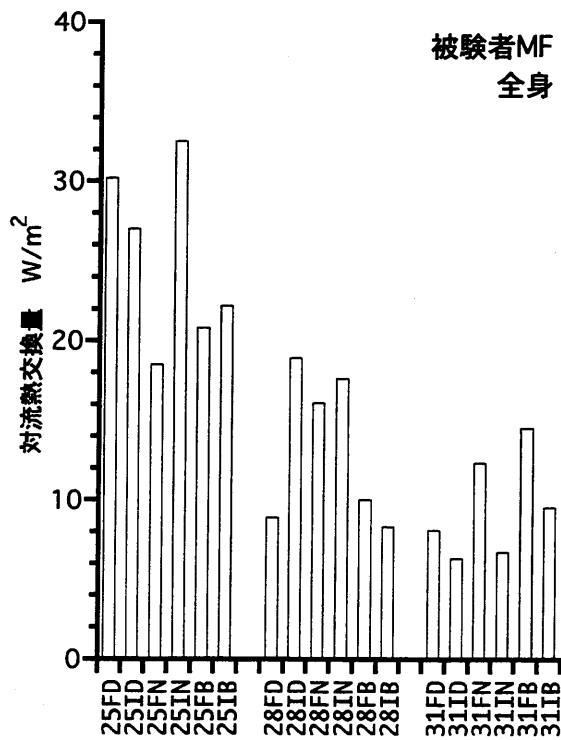
付録 4-1-70 皮膚温・舌下温・平均皮膚温の経時変動 (被験者 MO・31IB)



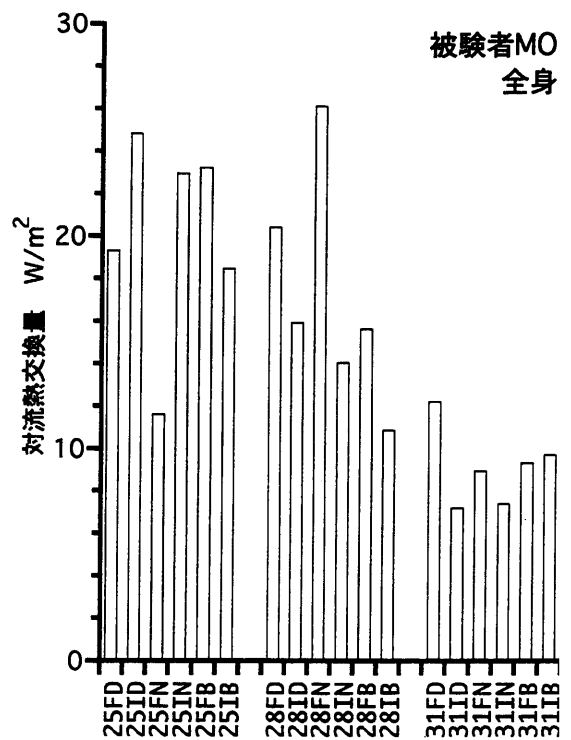
付録 4-1-71 皮膚温・舌下温・平均皮膚温の経時変動 (被験者 TI・31IB)



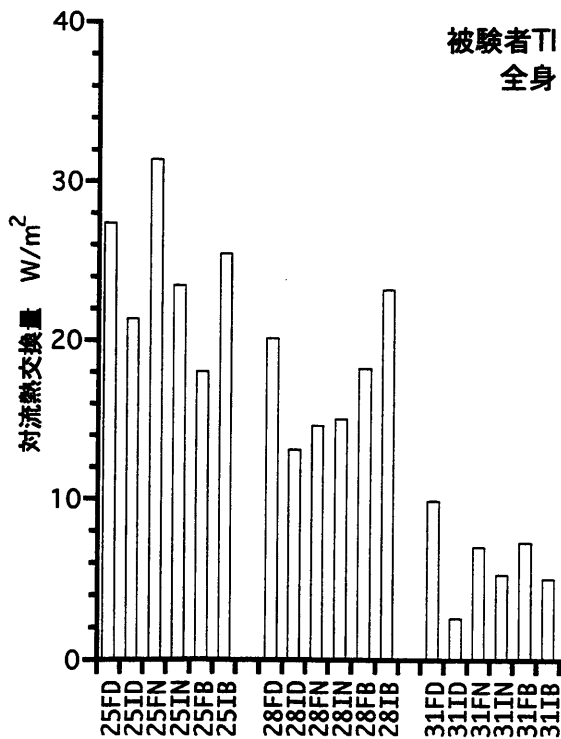
付録 4-1-72 皮膚温・舌下温・平均皮膚温の経時変動 (被験者 YM・31IB)



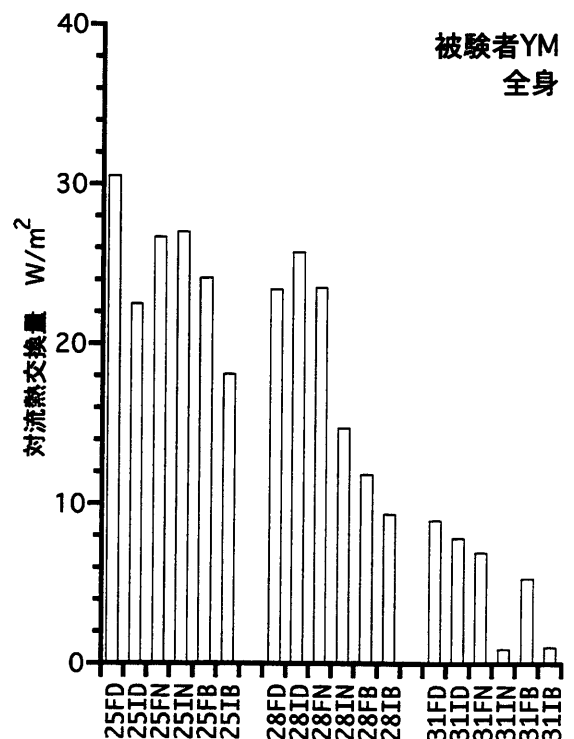
付録 4-2-1 人体全身の対流による熱交換量
(被験者 MF)



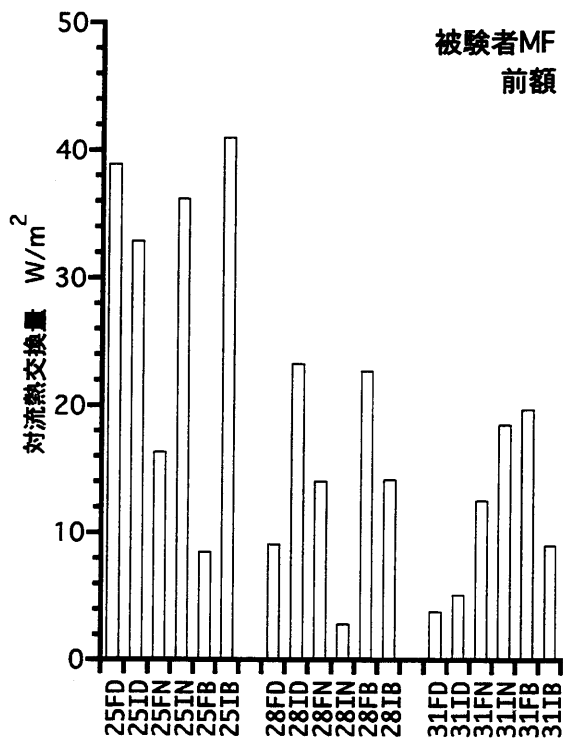
付録 4-2-2 人体全身の対流による熱交換量
(被験者 MO)



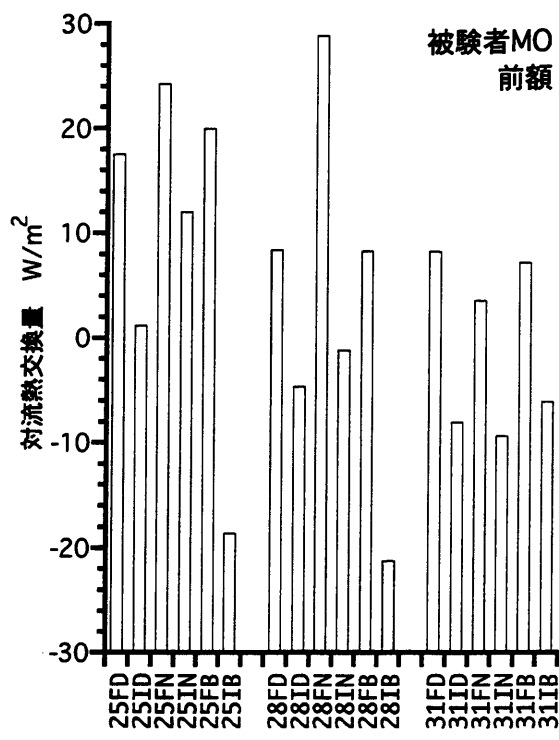
付録 4-2-3 人体全身の対流による熱交換量
(被験者 TI)



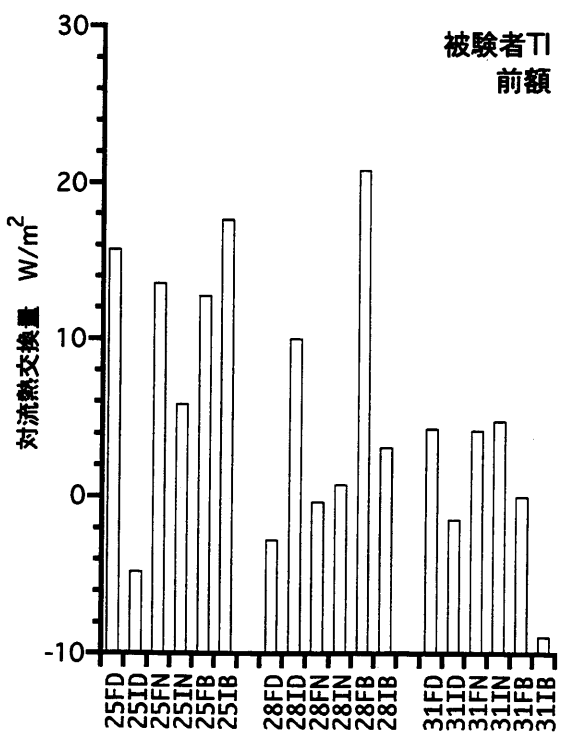
付録 4-2-4 人体全身の対流による熱交換量
(被験者 YM)



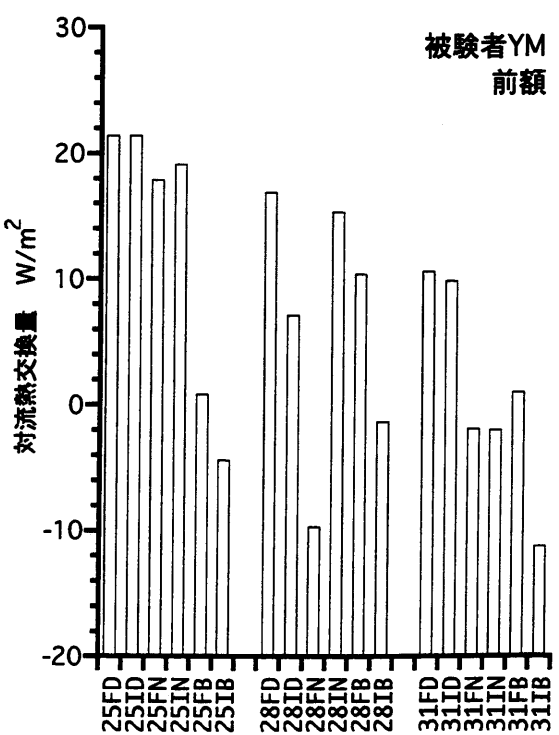
付録 4-2-5 前額の対流による熱交換量 (被験者 MF)



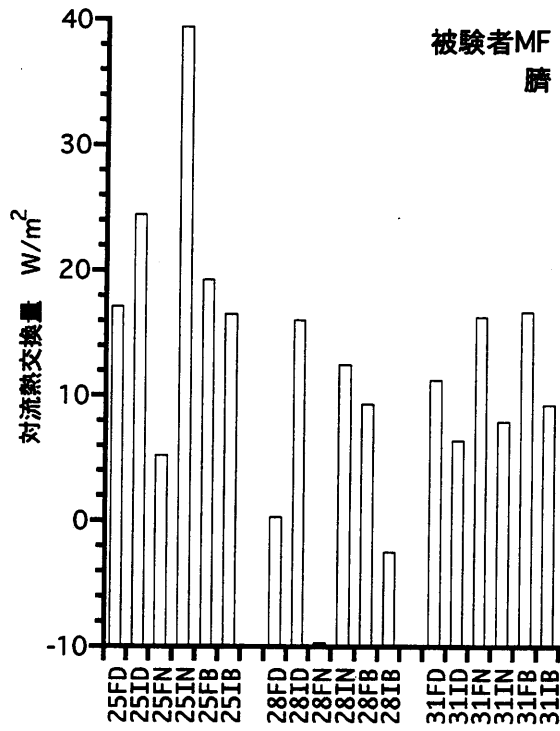
付録 4-2-6 前額の対流による熱交換量 (被験者 MO)



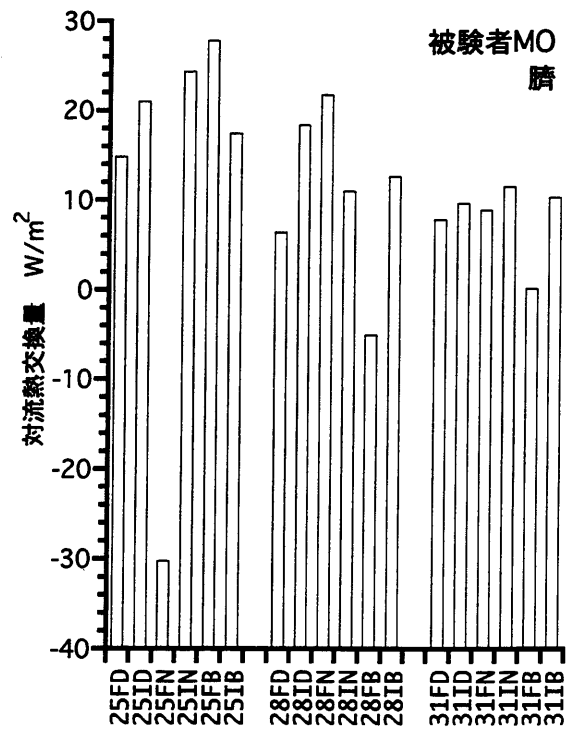
付録 4-2-7 前額の対流による熱交換量 (被験者 TI)



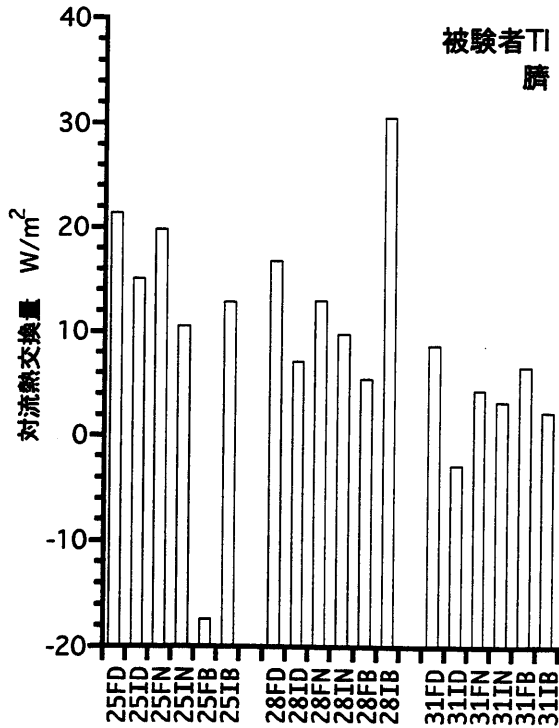
付録 4-2-8 前額の対流による熱交換量 (被験者 YM)



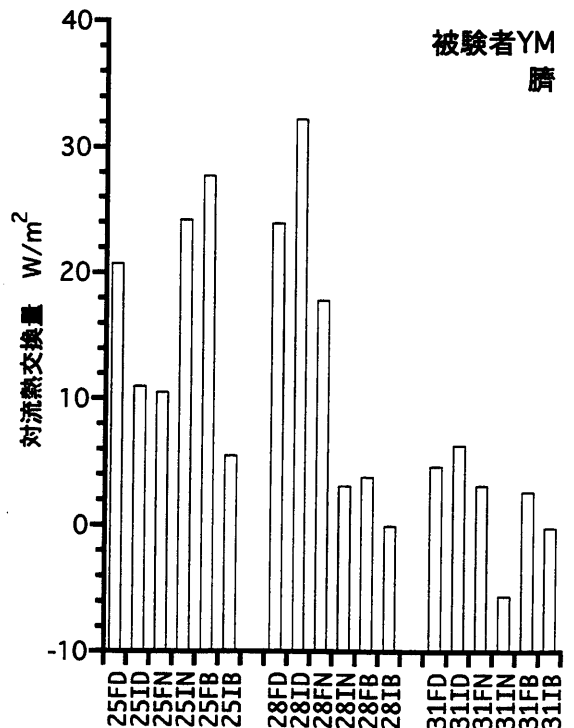
付録 4-2-9 臍の対流による熱交換量
(被験者 MF)



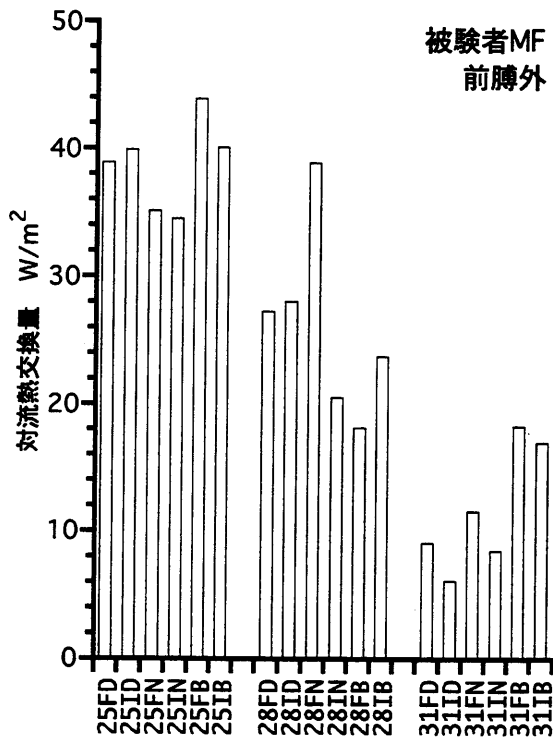
付録 4-2-10 臍の対流による熱交換量
(被験者 MO)



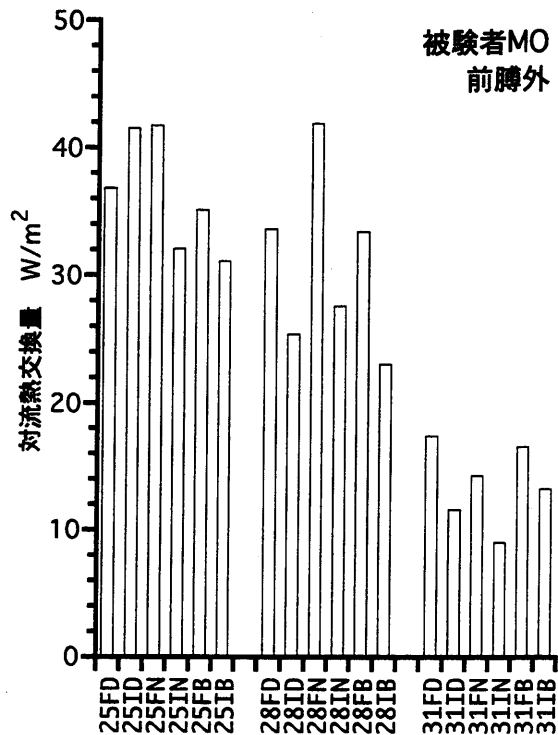
付録 4-2-11 臍の対流による熱交換量
(被験者 TI)



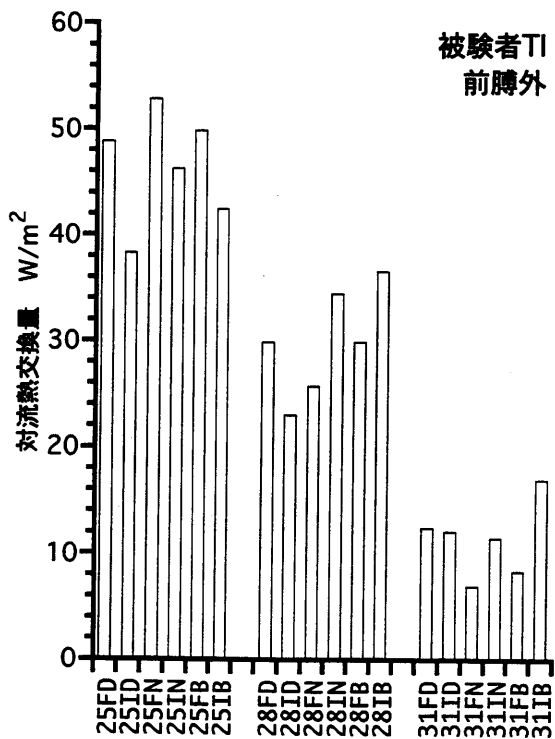
付録 4-2-12 臍の対流による熱交換量
(被験者 YM)



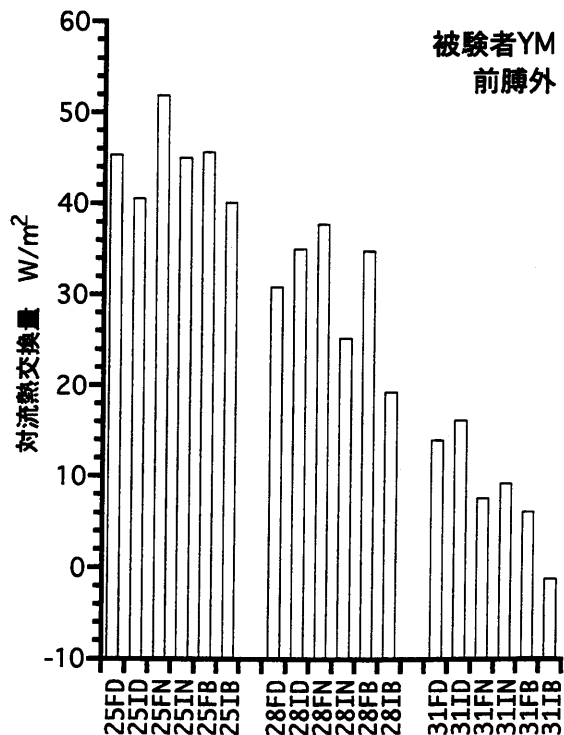
付録 4-2-13 前膊外の前対流による熱交換量 (被験者 MF)



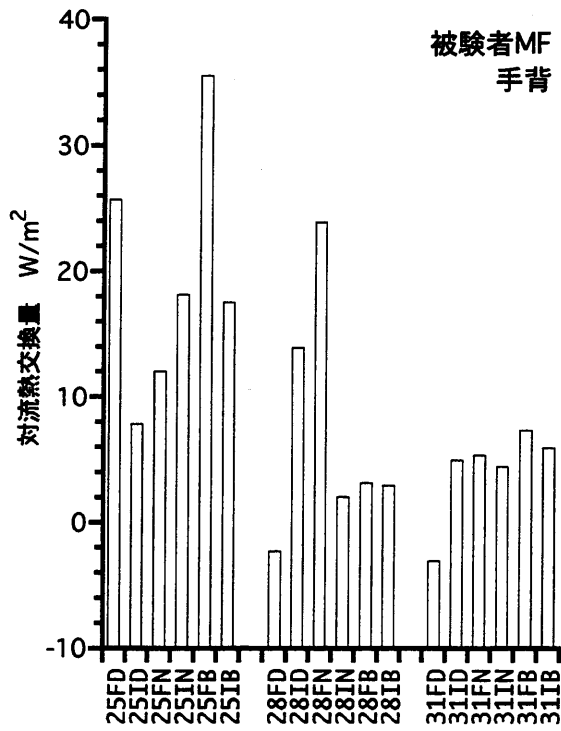
付録 4-2-14 前膊外の前対流による熱交換量 (被験者 MO)



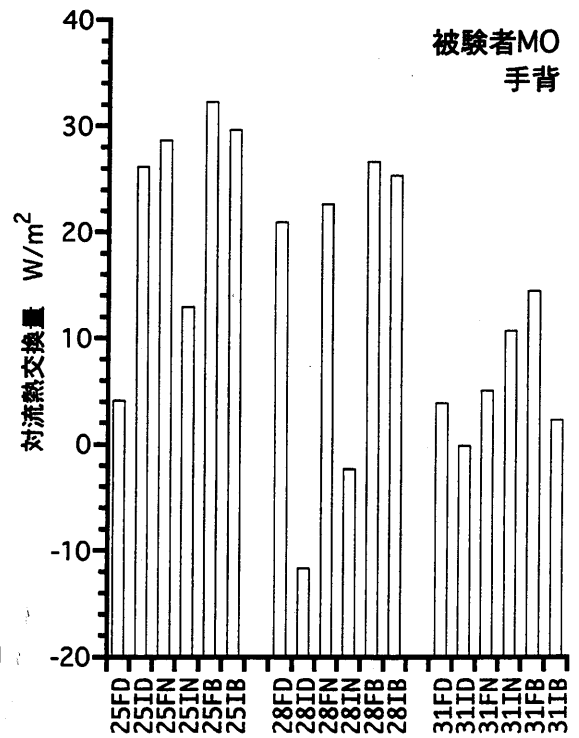
付録 4-2-15 前膊外の前対流による熱交換量 (被験者 TI)



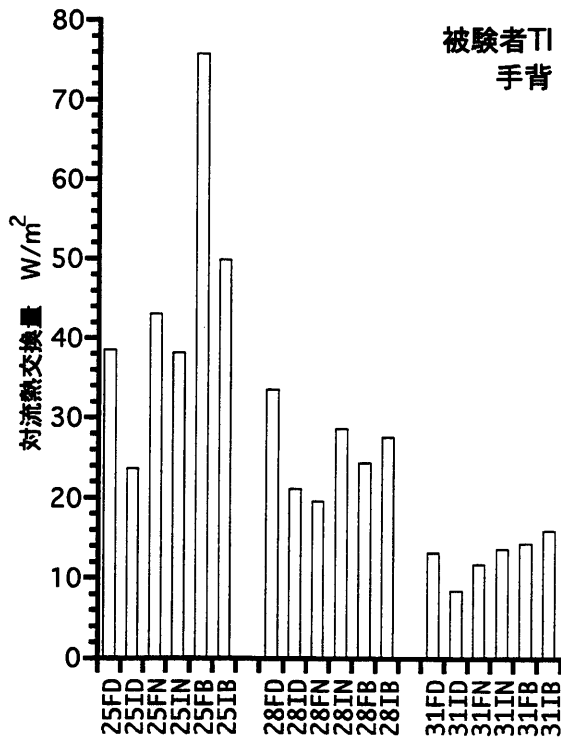
付録 4-2-16 前膊外の前対流による熱交換量 (被験者 YM)



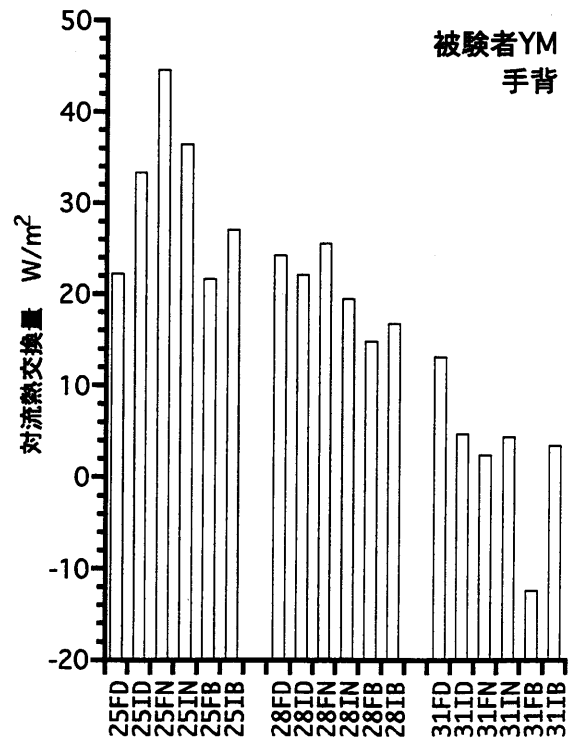
付録 4-2-17 手背の対流による熱交換量
(被験者 MF)



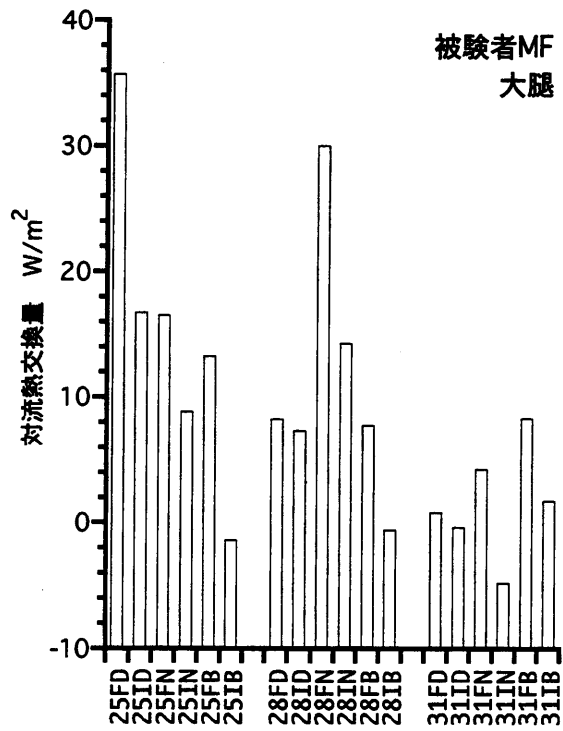
付録 4-2-18 手背の対流による熱交換量
(被験者 MO)



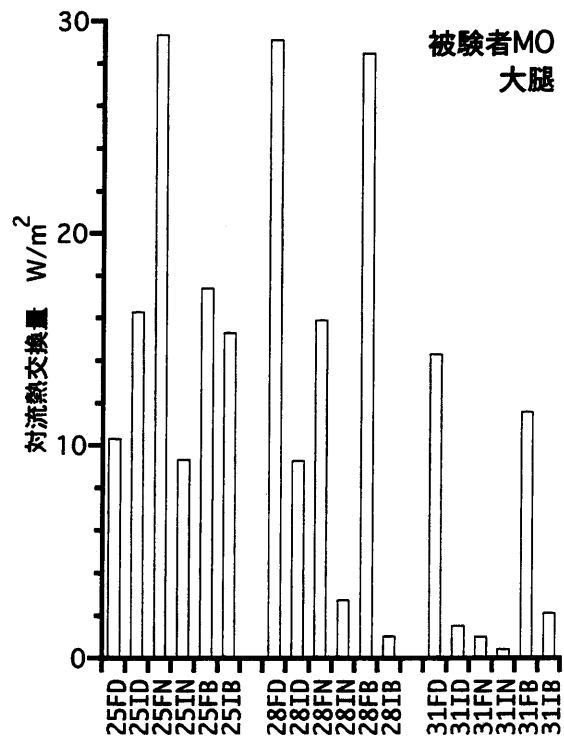
付録 4-2-19 手背の対流による熱交換量
(被験者 TI)



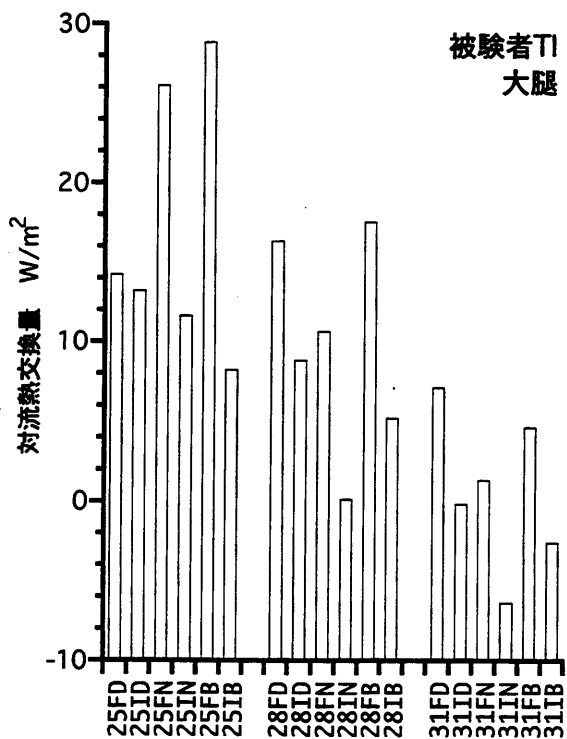
付録 4-2-20 手背の対流による熱交換量
(被験者 YM)



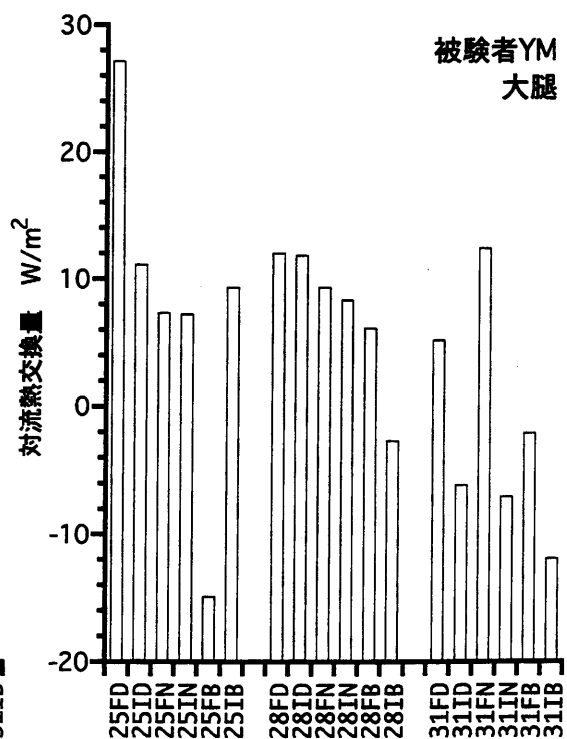
付録 4-2-21 大腿の対流による熱交換量
(被験者 MF)



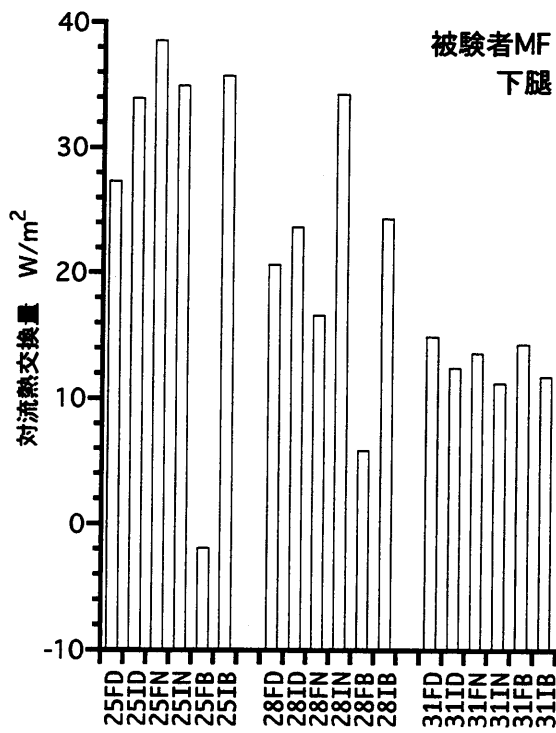
付録 4-2-22 大腿の対流による熱交換量
(被験者 MO)



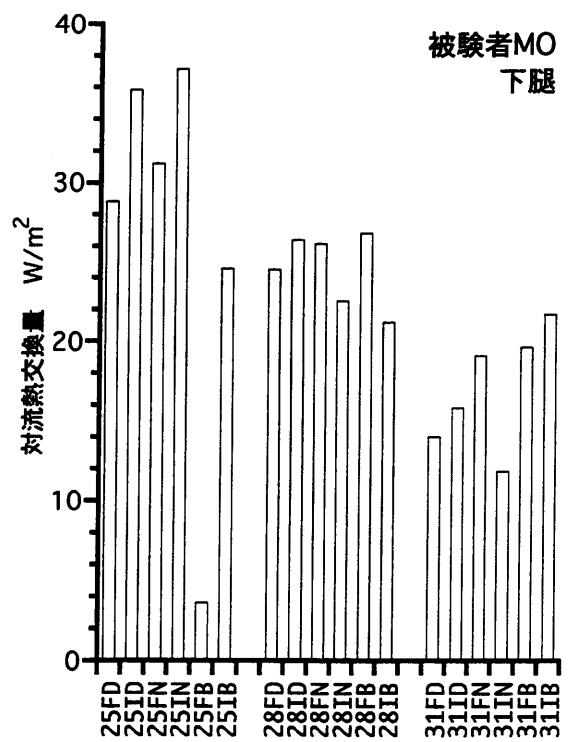
付録 4-2-23 大腿の対流による熱交換量
(被験者 TI)



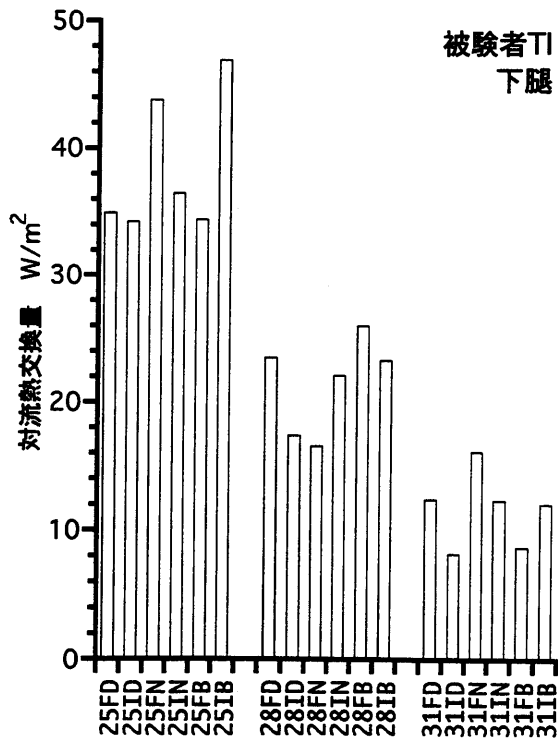
付録 4-2-24 大腿の対流による熱交換量
(被験者 YM)



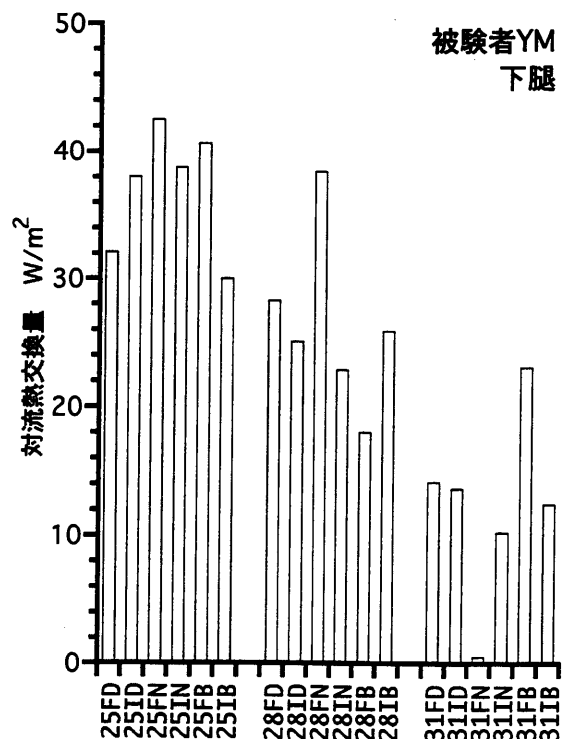
付録 4-2-25 下腿の対流による熱交換量
(被験者 MF)



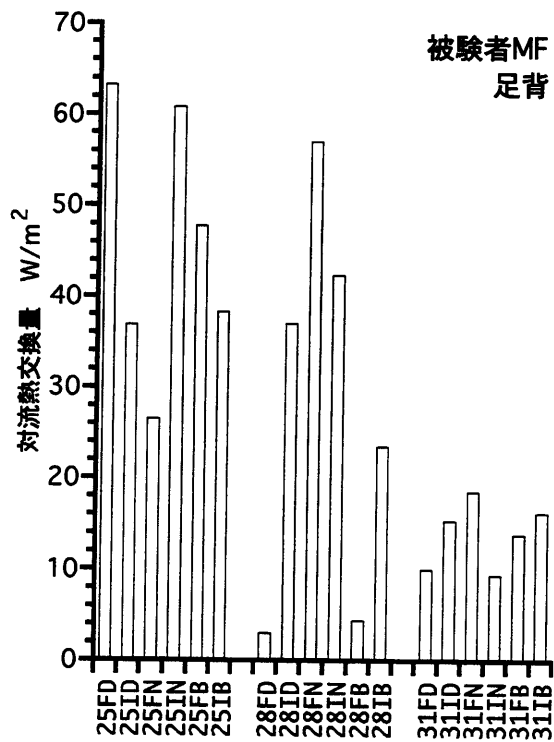
付録 4-2-26 下腿の対流による熱交換量
(被験者 MO)



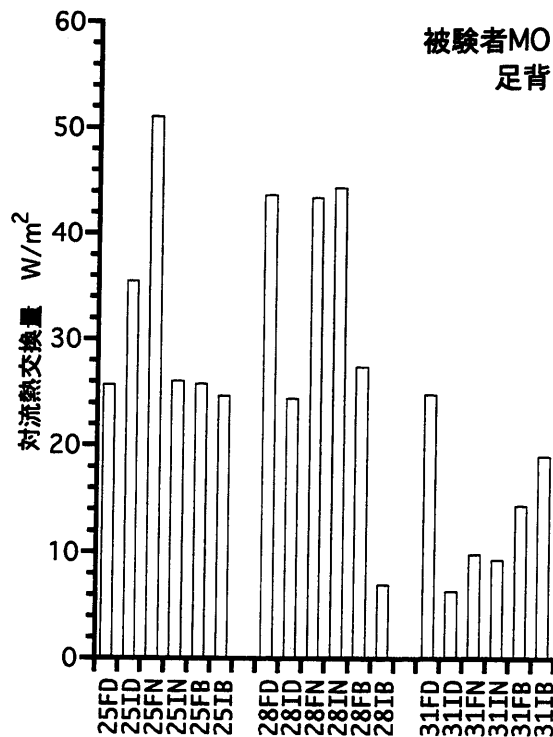
付録 4-2-27 下腿の対流による熱交換量
(被験者 TI)



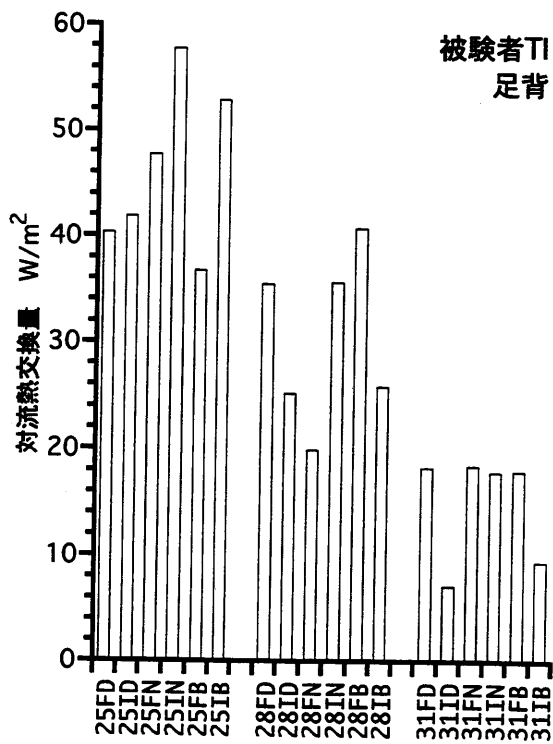
付録 4-2-28 下腿の対流による熱交換量
(被験者 YM)



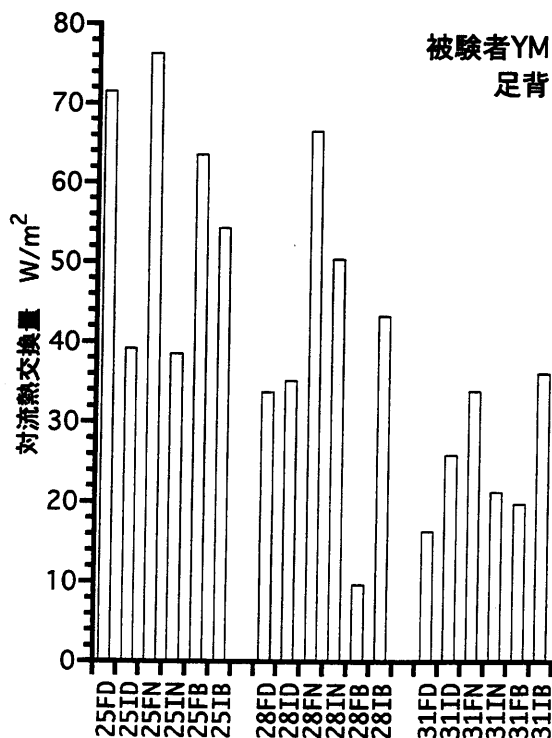
付録 4-2-29 足背の対流による熱交換量
(被験者 MF)



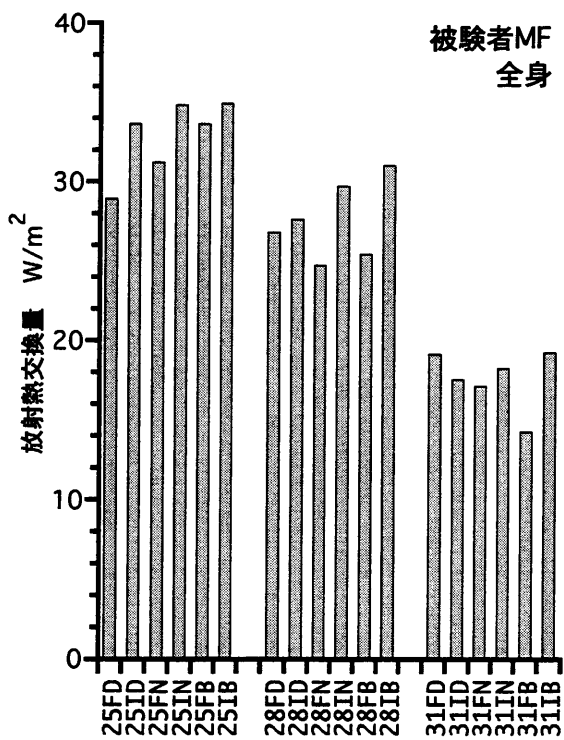
付録 4-2-30 足背の対流による熱交換量
(被験者 MO)



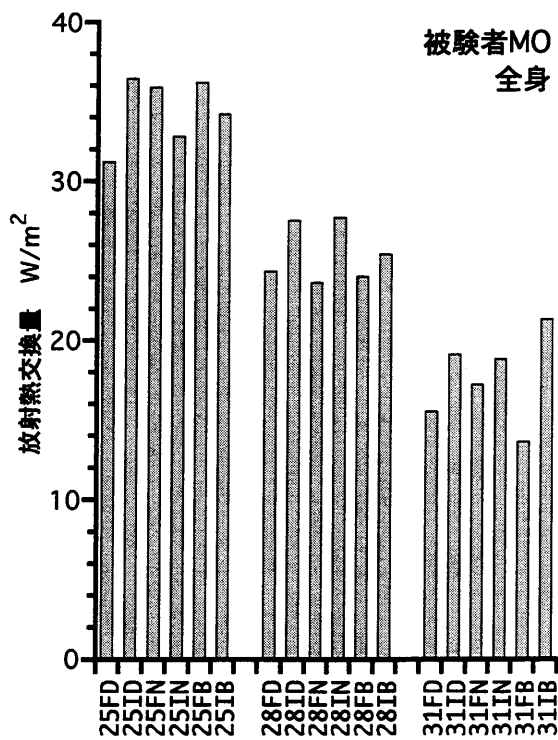
付録 4-2-31 足背の対流による熱交換量
(被験者 TI)



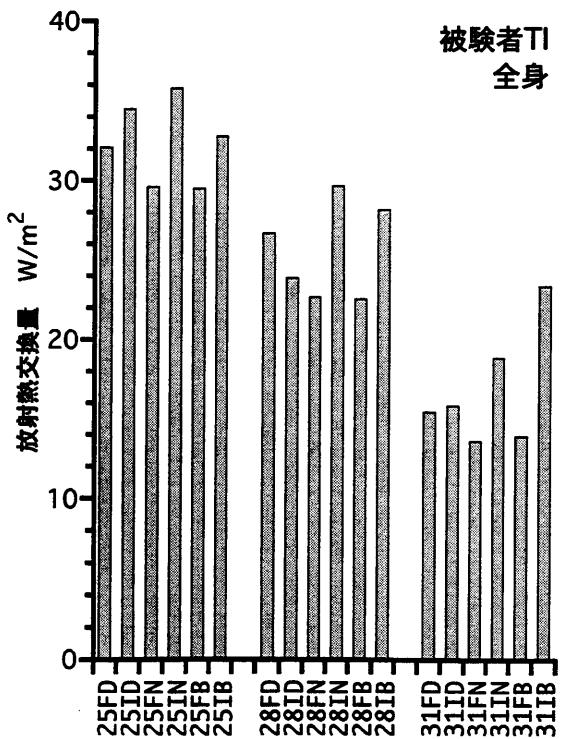
付録 4-2-32 足背の対流による熱交換量
(被験者 YM)



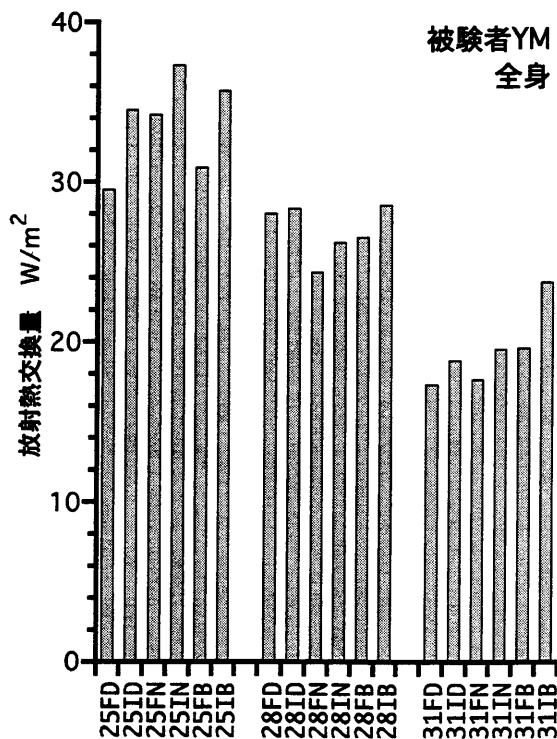
付録 4-3-1 人体全身の放射による熱交換量 (被験者 MF)



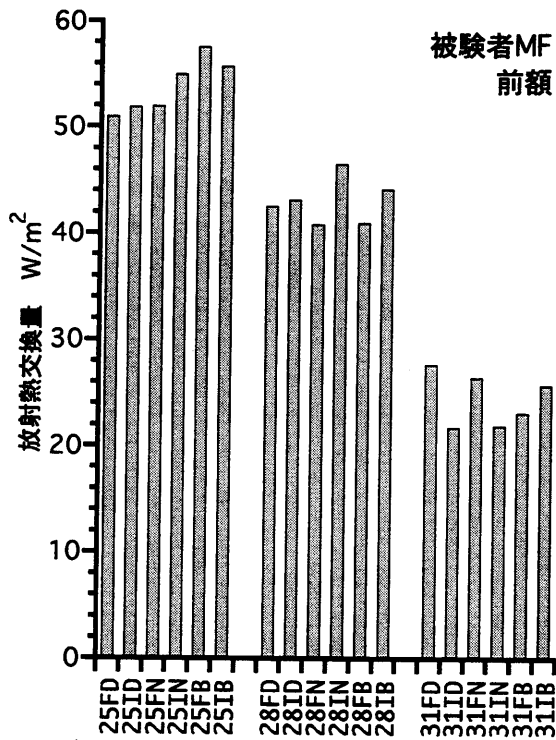
付録 4-3-2 人体全身の放射による熱交換量 (被験者 MO)



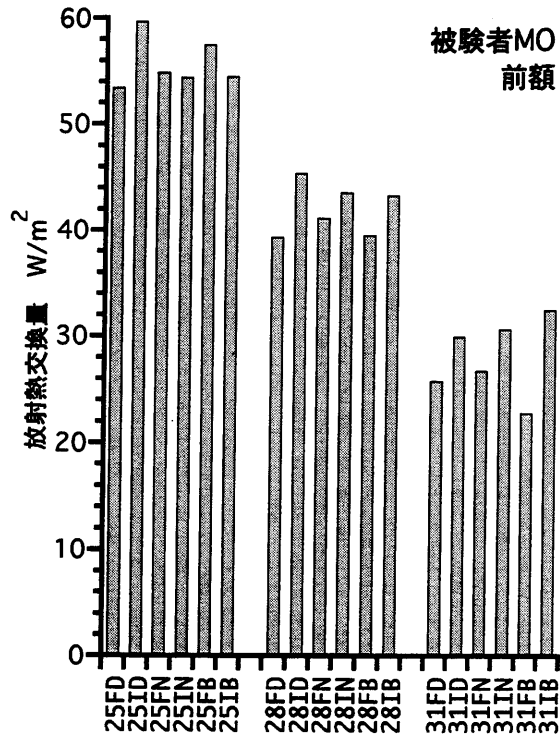
付録 4-3-3 人体全身の放射による熱交換量 (被験者 TI)



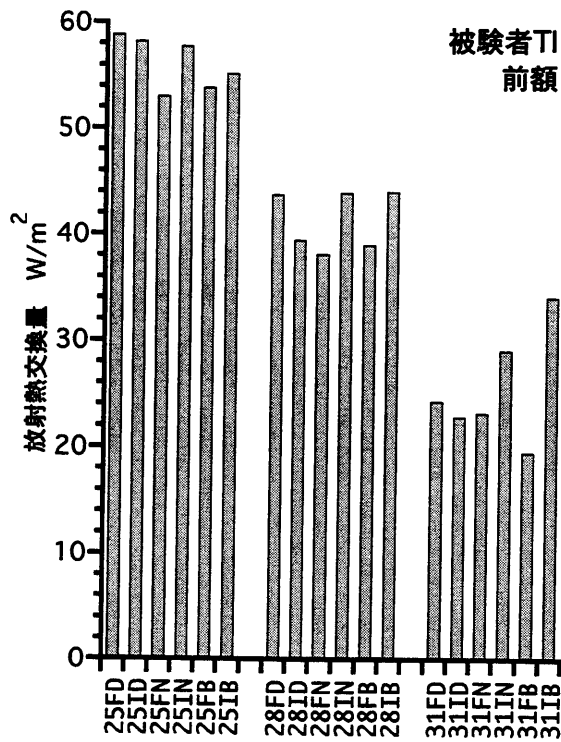
付録 4-3-4 人体全身の放射による熱交換量 (被験者 YM)



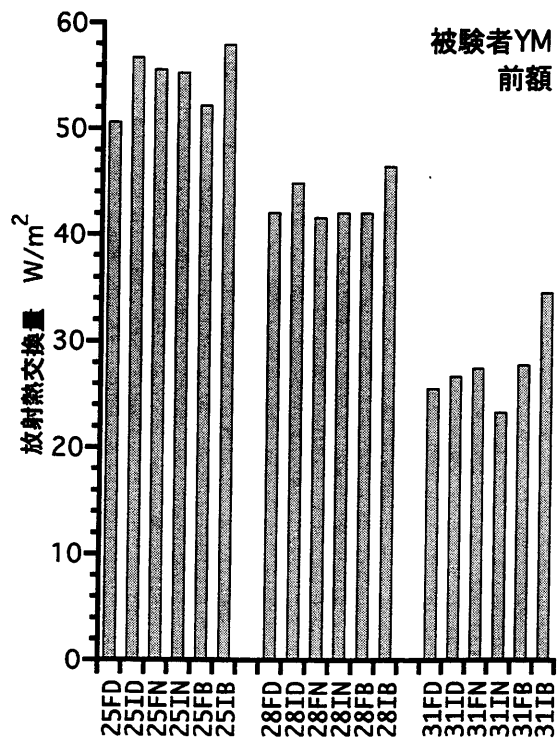
付録 4-3-5 前額の放射による熱交換量
(被験者 MF)



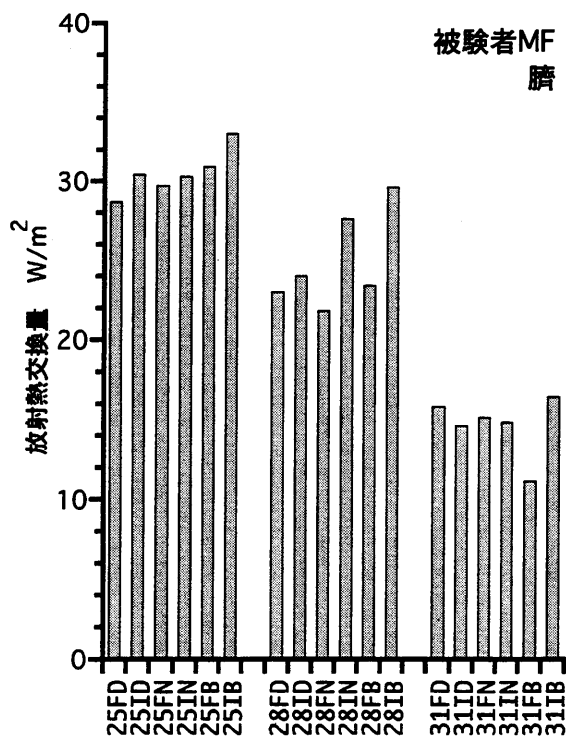
付録 4-3-6 前額の放射による熱交換量
(被験者 MO)



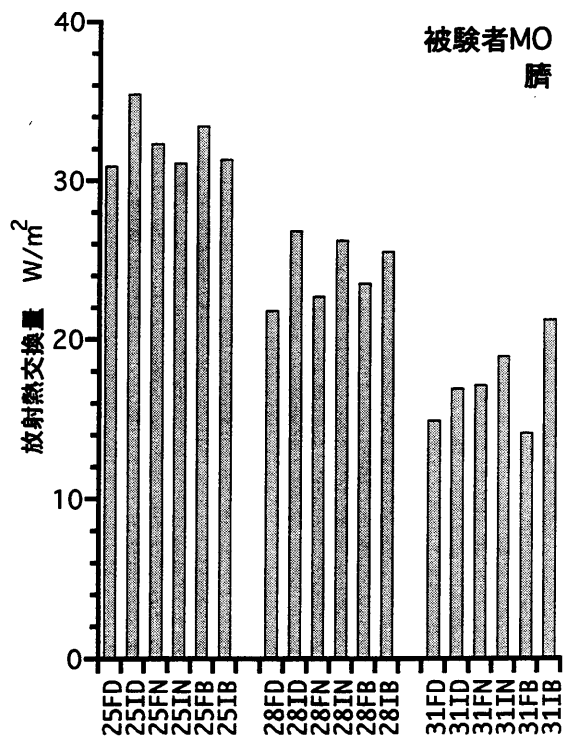
付録 4-3-7 前額の放射による熱交換量
(被験者 TI)



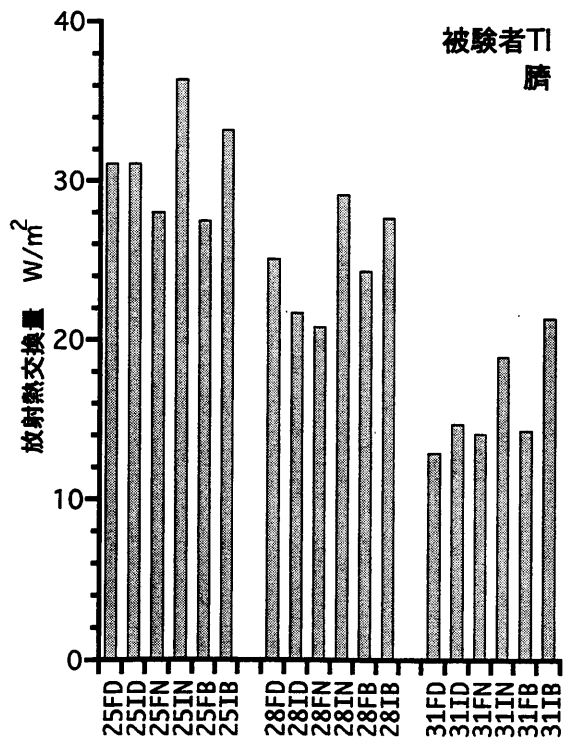
付録 4-3-8 前額の放射による熱交換量
(被験者 YM)



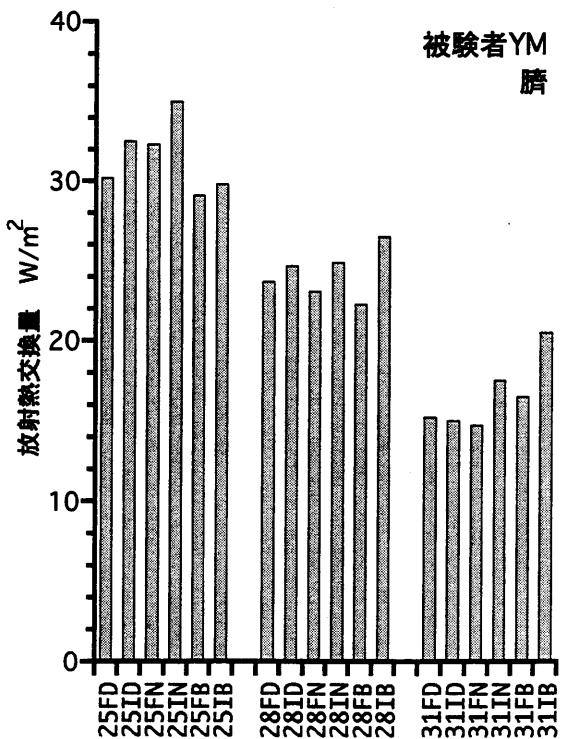
付録 4-3-9 臍の放射による熱交換量
(被験者 MF)



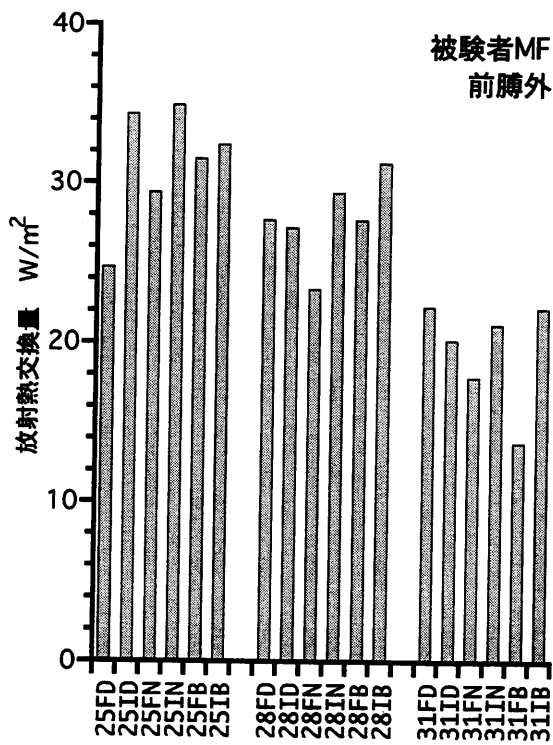
付録 4-3-10 臍の放射による熱交換量
(被験者 MO)



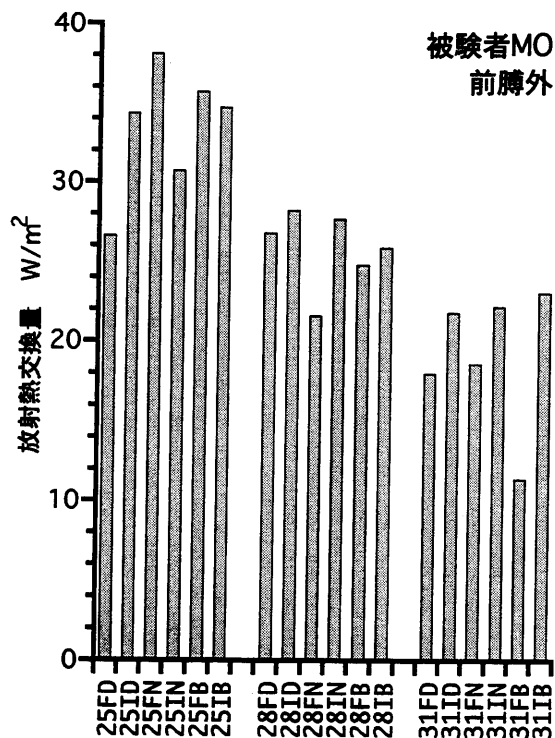
付録 4-3-11 臍の放射による熱交換量
(被験者 TI)



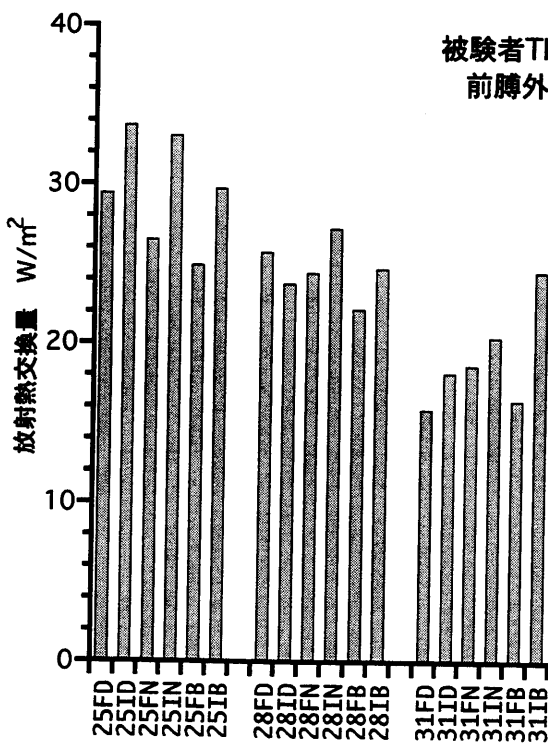
付録 4-3-12 臍の放射による熱交換量
(被験者 YM)



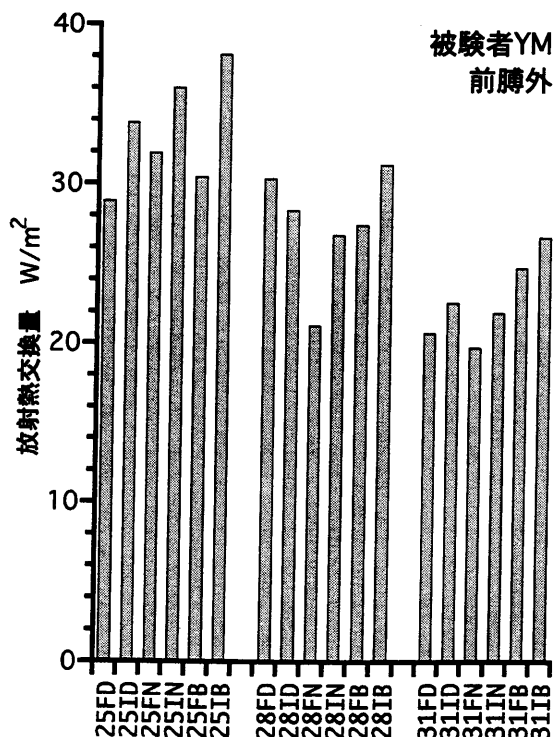
付録 4-3-13 前膊外の放射による熱交換量 (被験者 MF)



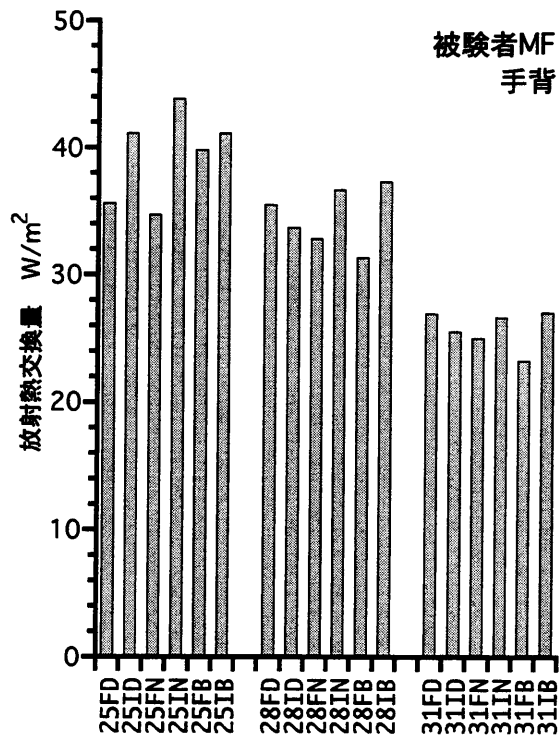
付録 4-3-14 前膊外の放射による熱交換量 (被験者 MO)



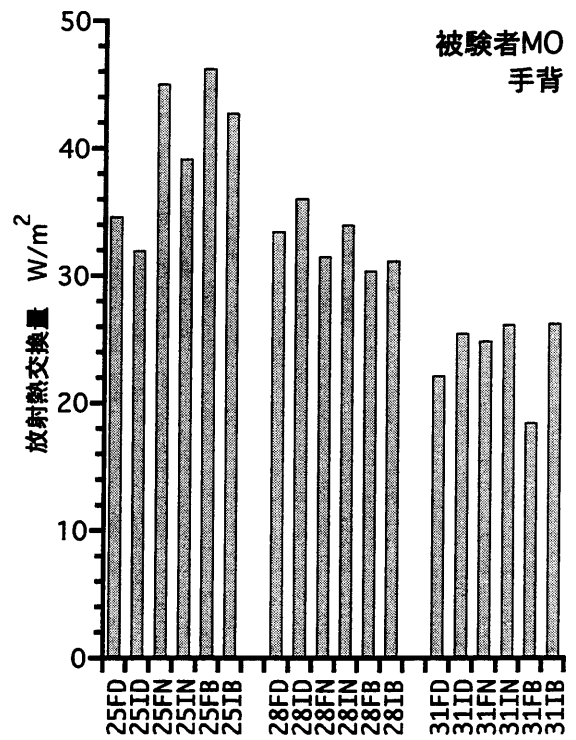
付録 4-3-15 前膊外の放射による熱交換量 (被験者 TI)



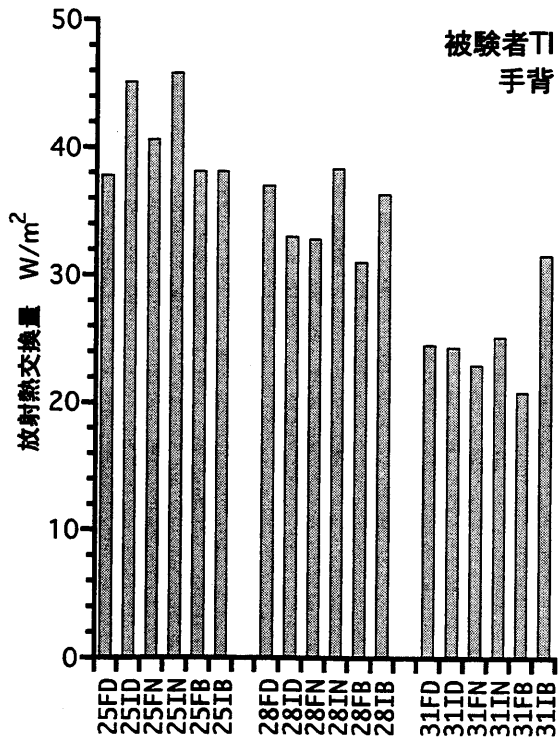
付録 4-3-16 前膊外の放射による熱交換量 (被験者 YM)



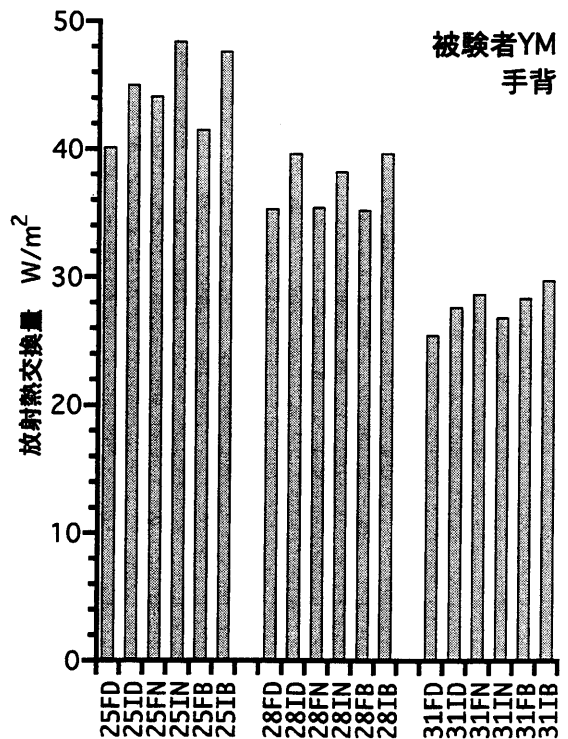
付録 4-3-17 手背の放射による熱交換量
(被験者 MF)



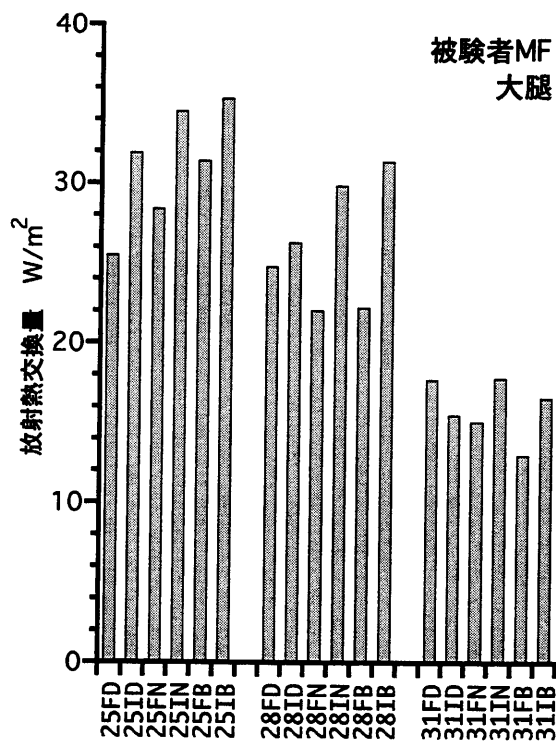
付録 4-3-18 手背の放射による熱交換量
(被験者 MO)



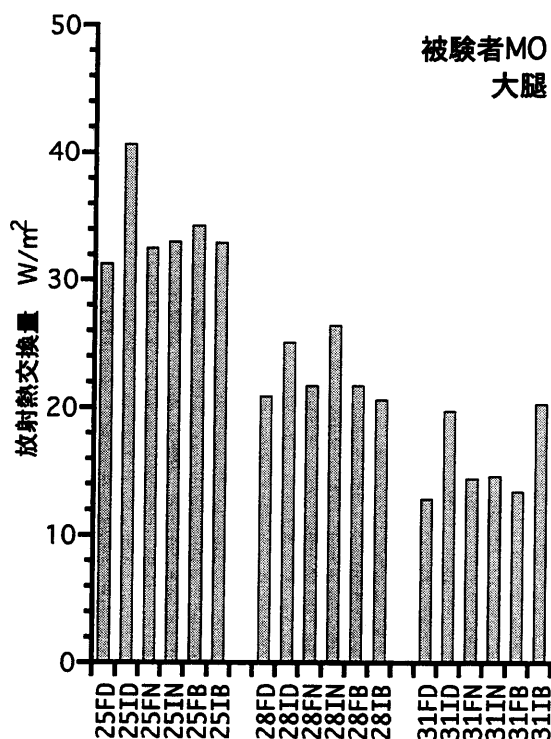
付録 4-3-19 手背の放射による熱交換量
(被験者 TI)



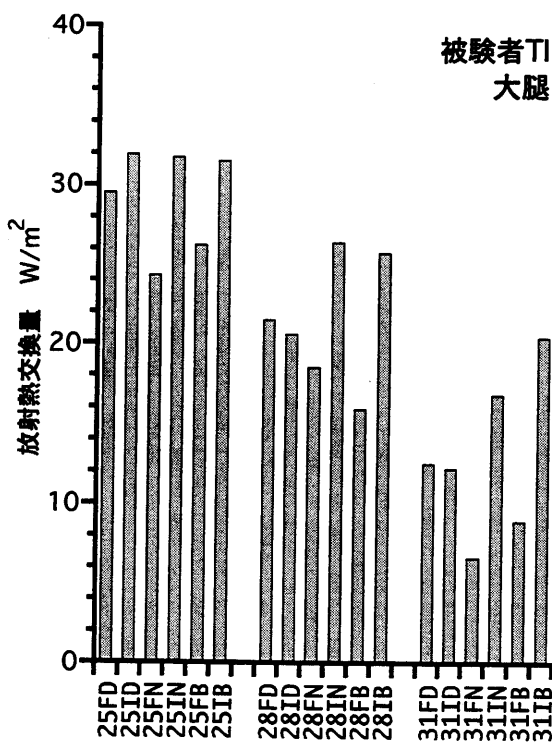
付録 4-3-20 手背の放射による熱交換量
(被験者 YM)



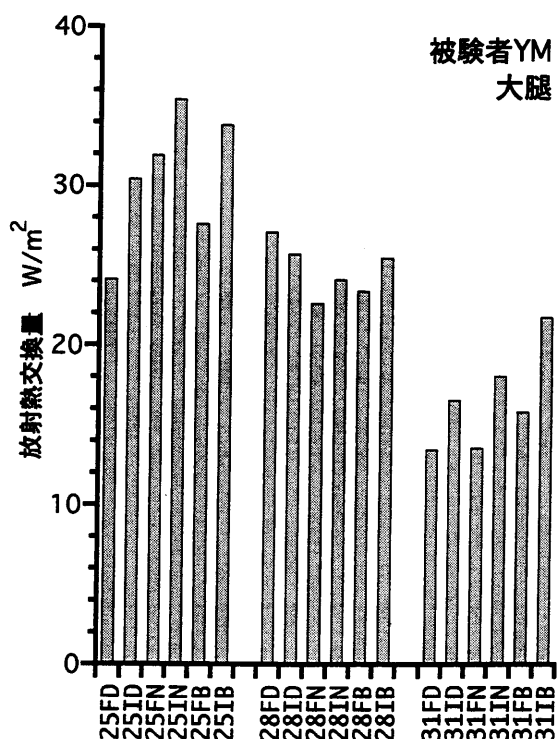
付録 4-3-21 大腿の放射による熱交換量 (被験者 MF)



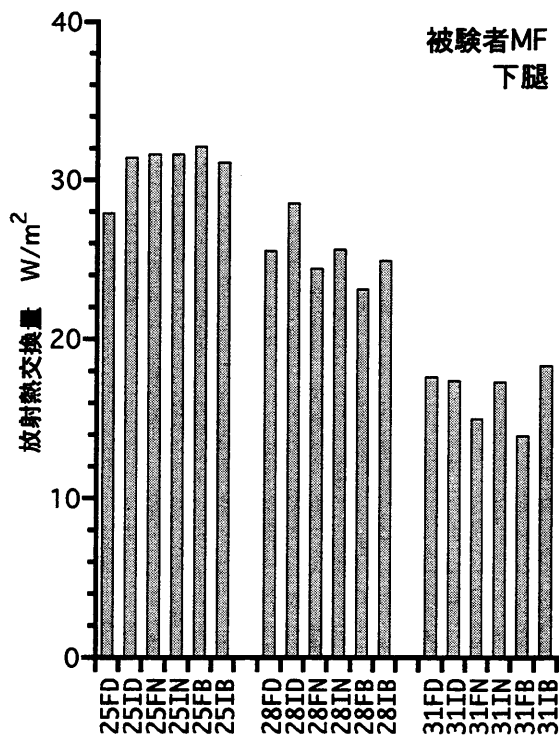
付録 4-3-22 大腿の放射による熱交換量 (被験者 MO)



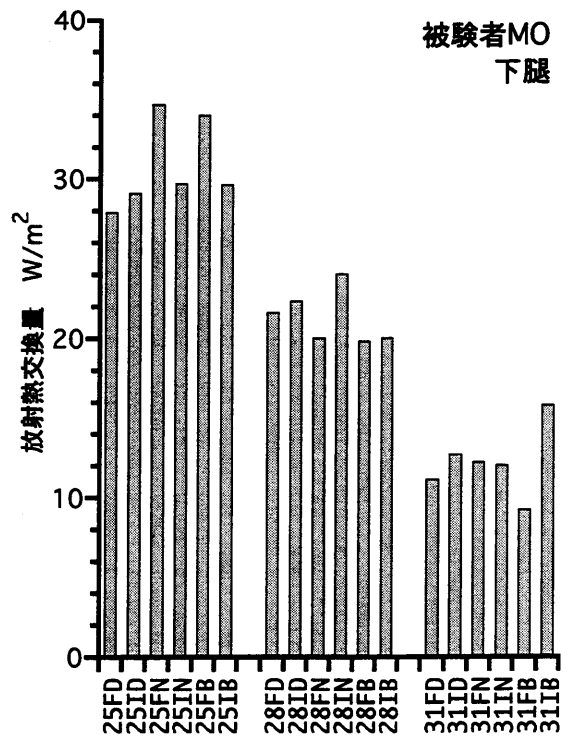
付録 4-3-23 大腿の放射による熱交換量 (被験者 TI)



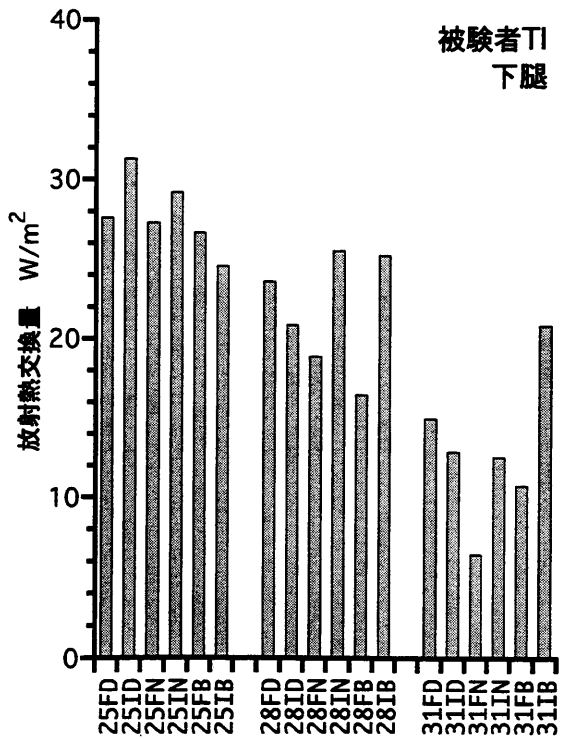
付録 4-3-24 大腿の放射による熱交換量 (被験者 YM)



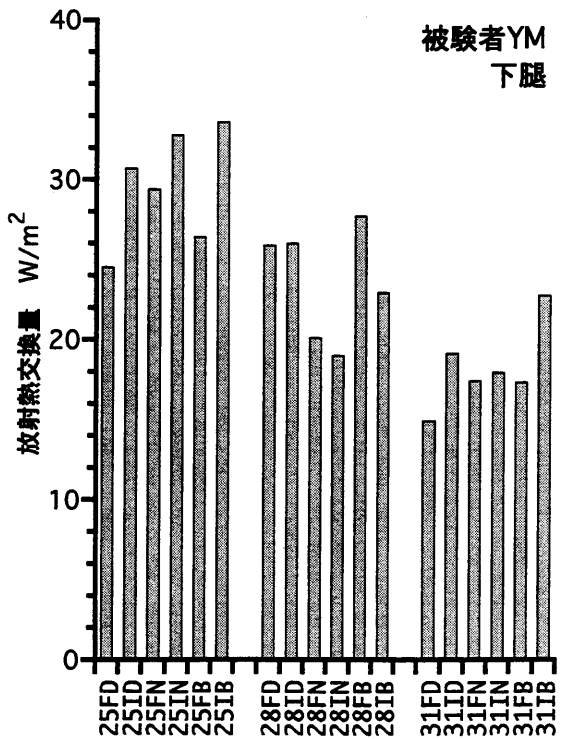
付録 4-3-25 下腿の放射による熱交換量
(被験者 MF)



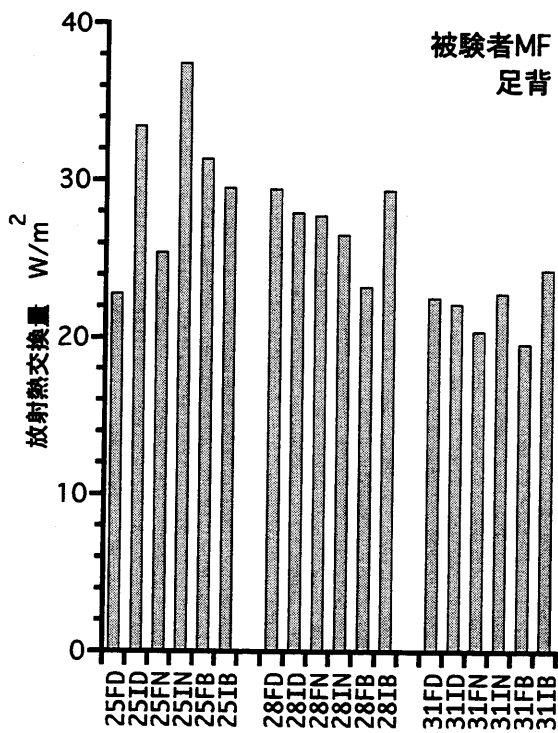
付録 4-3-26 下腿の放射による熱交換量
(被験者 MO)



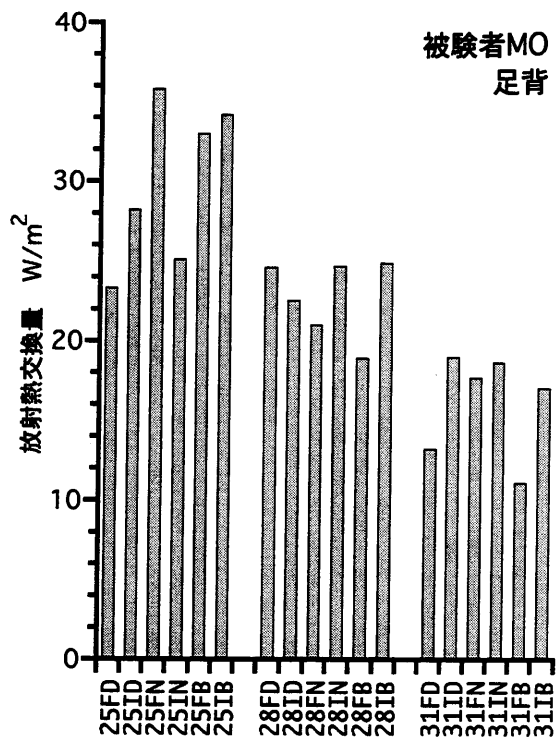
付録 4-3-27 下腿の放射による熱交換量
(被験者 TI)



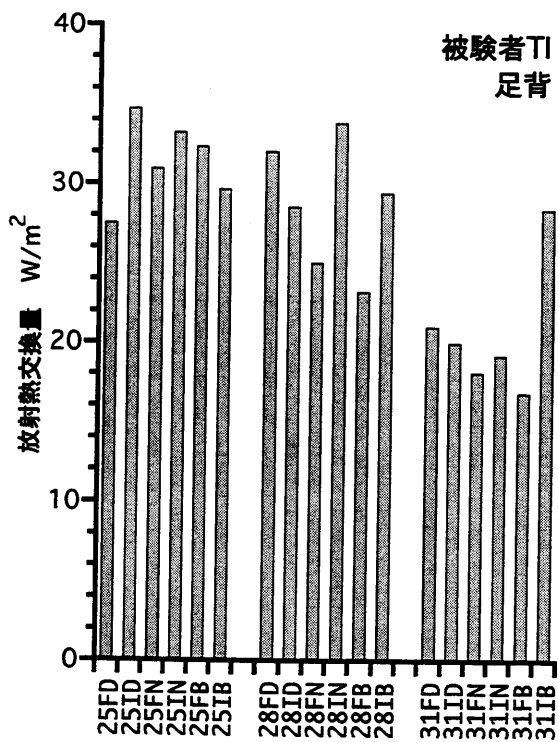
付録 4-3-28 下腿の放射による熱交換量
(被験者 YM)



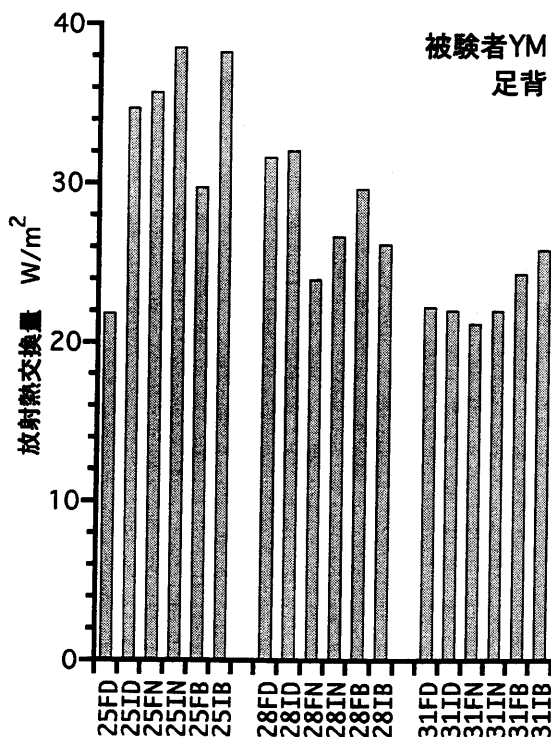
付録 4-3-29 足背の放射による熱交換量 (被験者 MF)



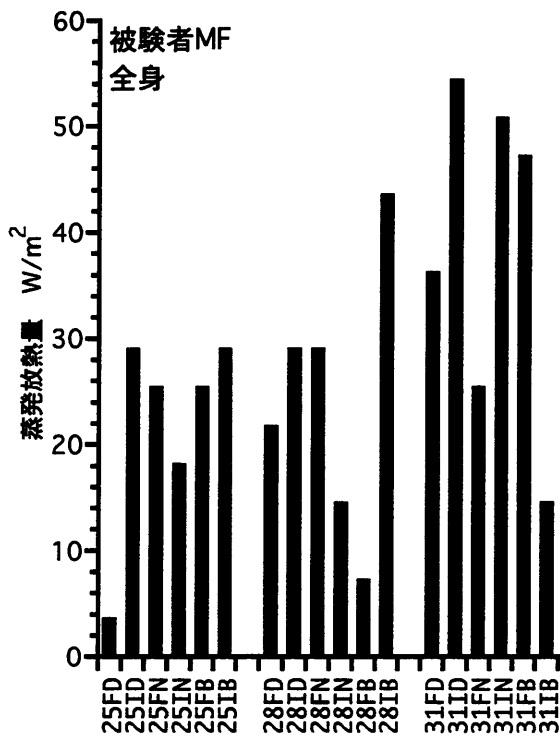
付録 4-3-30 足背の放射による熱交換量 (被験者 MO)



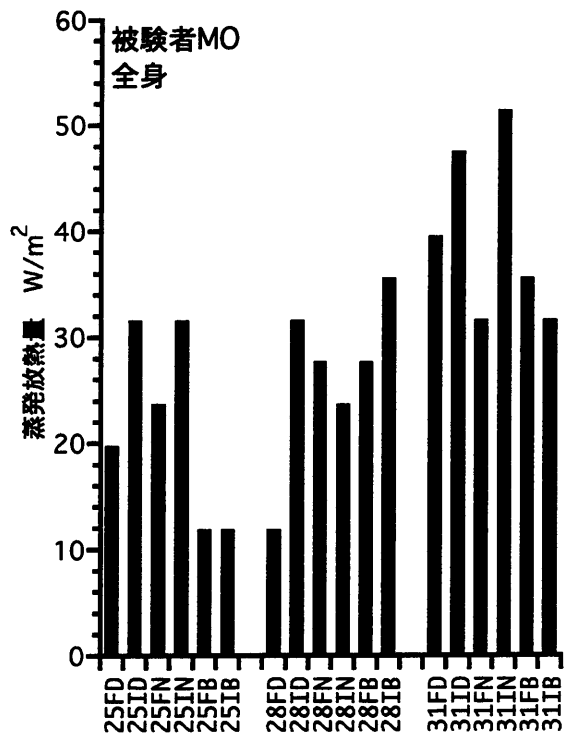
付録 4-3-31 足背の放射による熱交換量 (被験者 TI)



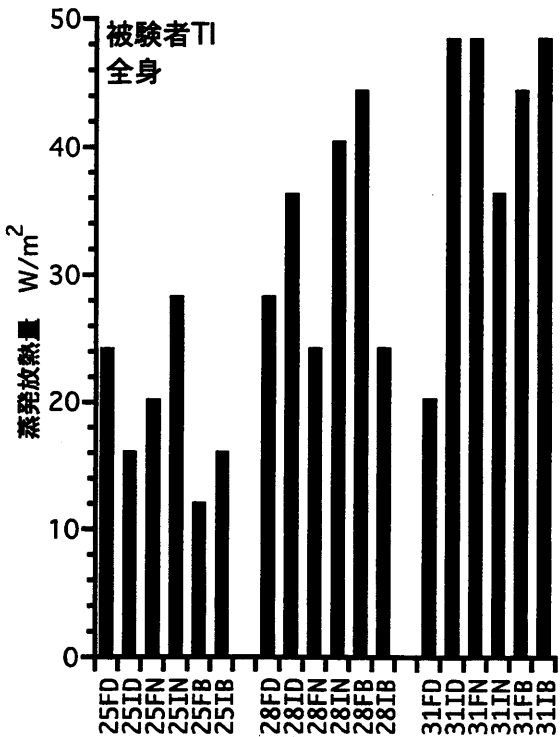
付録 4-3-32 足背の放射による熱交換量 (被験者 YM)



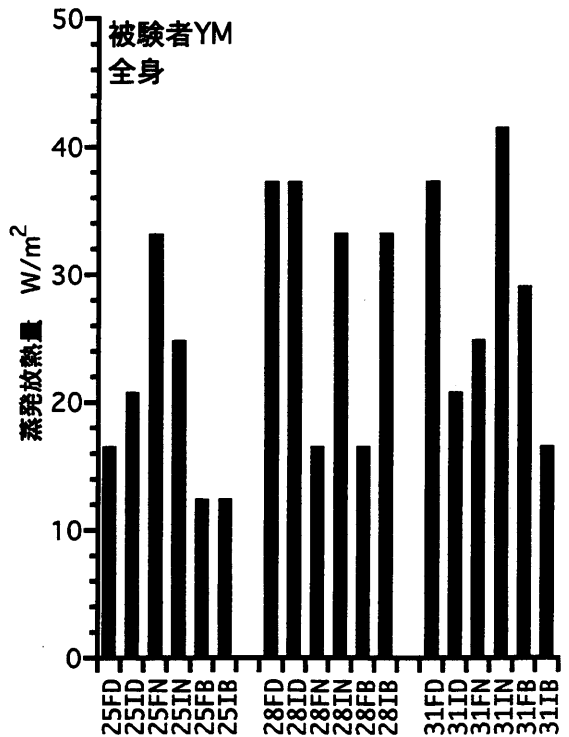
付録 4-4-1 人体全身の蒸発による放熱量 (被験者 MF)



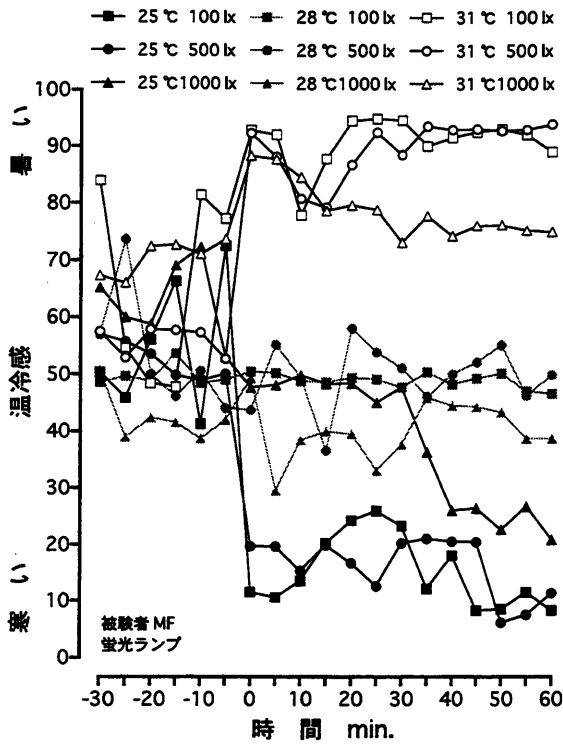
付録 4-4-2 人体全身の蒸発による放熱量 (被験者 MO)



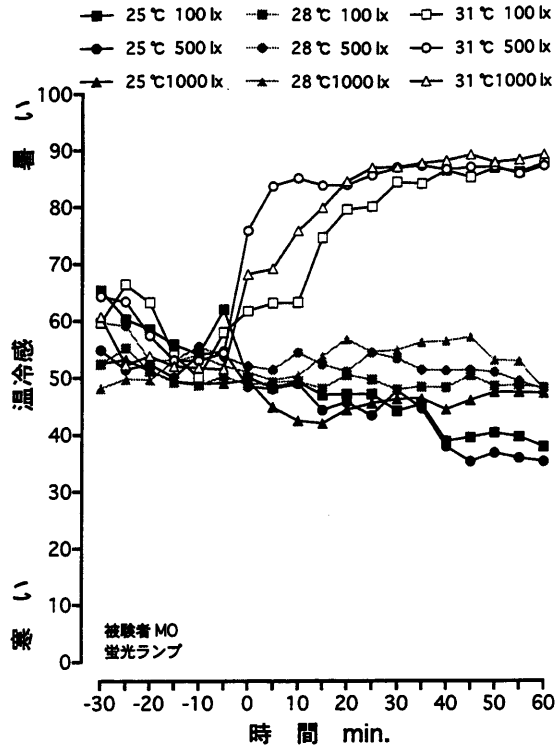
付録 4-4-3 人体全身の蒸発による放熱量 (被験者 TI)



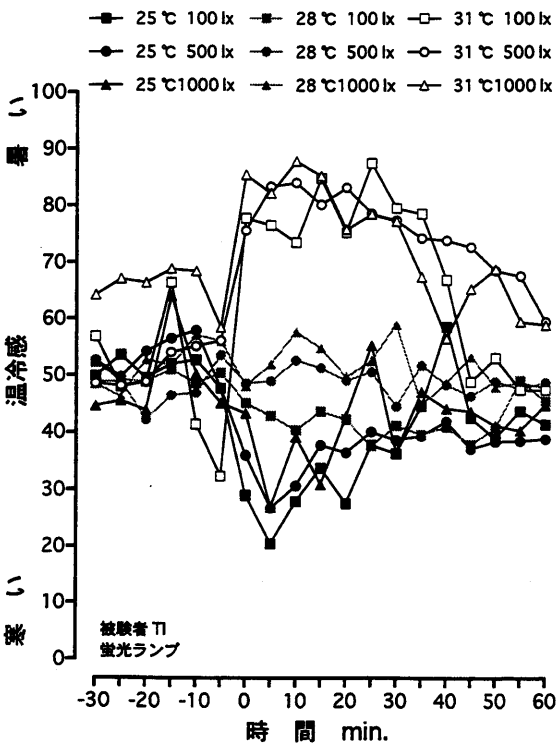
付録 4-4-4 人体全身の蒸発による放熱量 (被験者 YM)



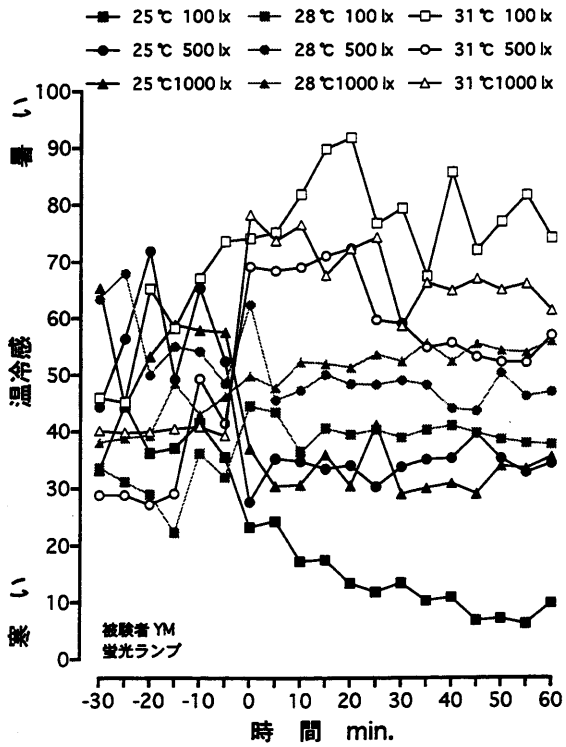
付録 4-5-1 温冷感の経時変動
(被験者 MF・蛍光ランプ)



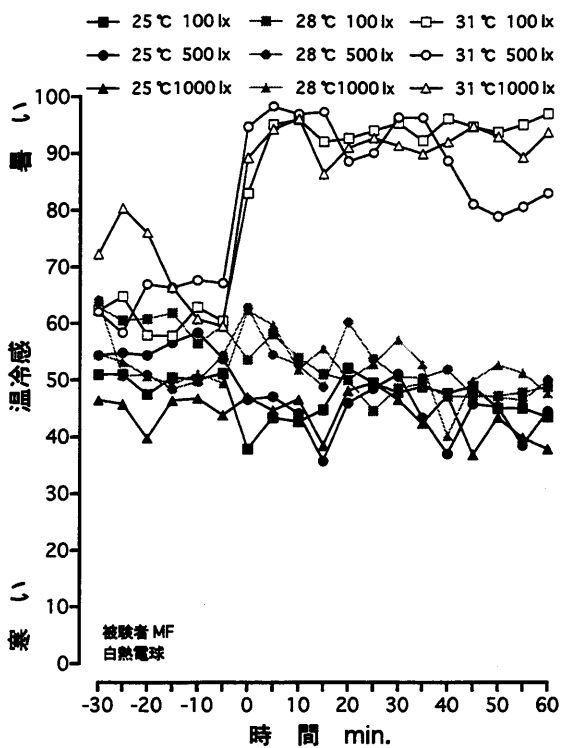
付録 4-5-2 温冷感の経時変動
(被験者 MO・蛍光ランプ)



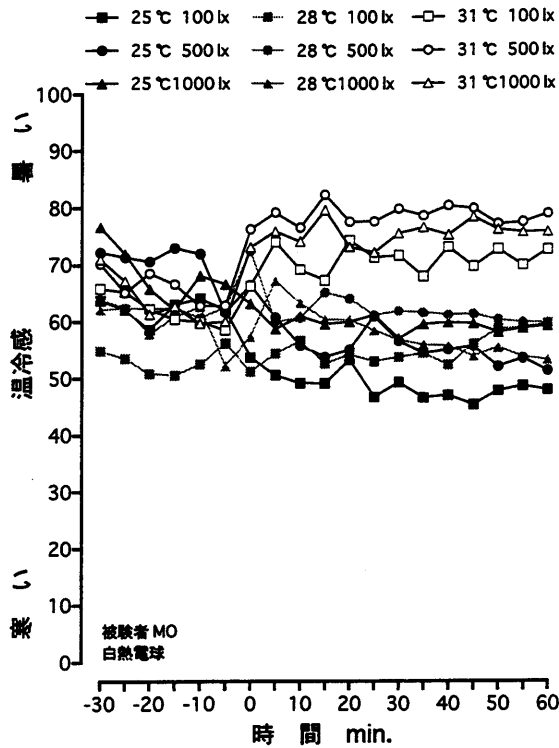
付録 4-5-3 温冷感の経時変動
(被験者 TI・蛍光ランプ)



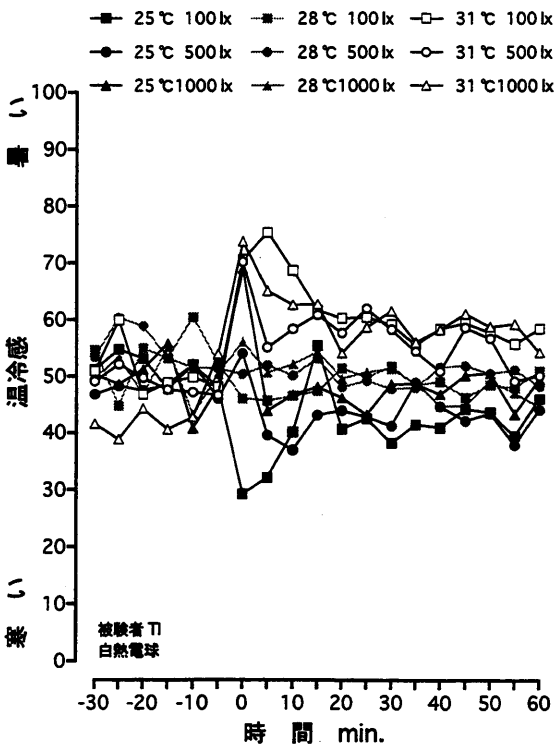
付録 4-5-4 温冷感の経時変動
(被験者 YM・蛍光ランプ)



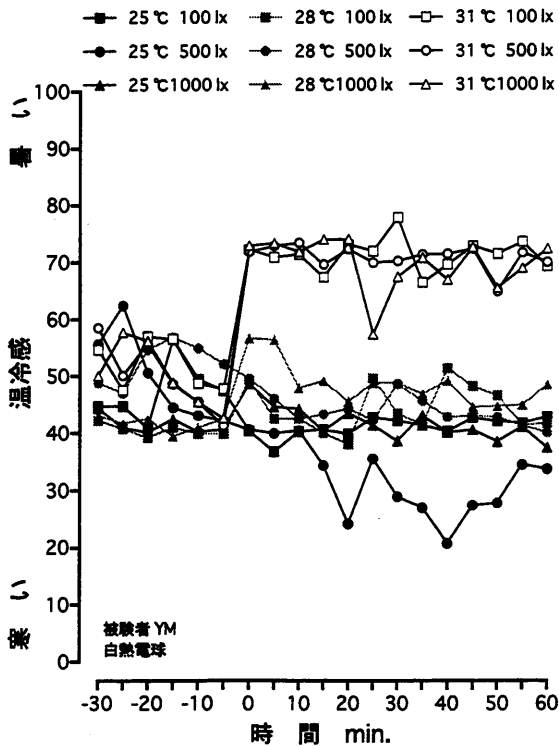
付録 4-5-5 温冷感の経時変動
(被験者 MF・白熱電球)



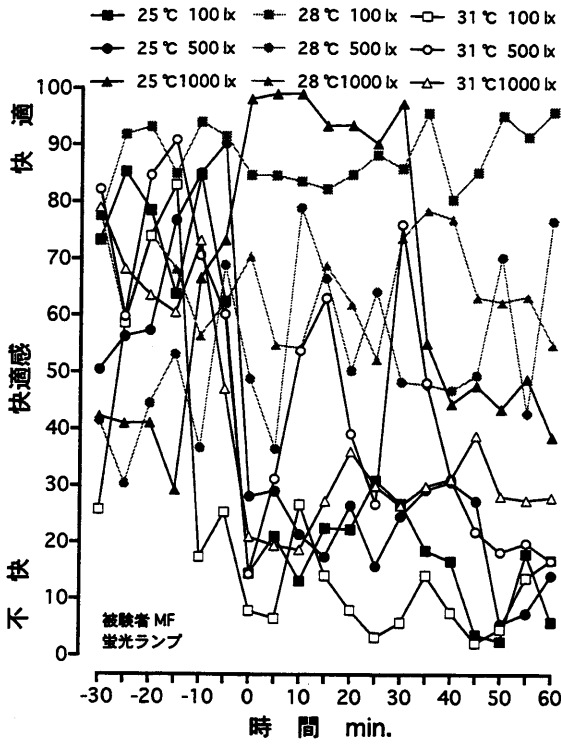
付録 4-5-6 温冷感の経時変動
(被験者 MO・白熱電球)



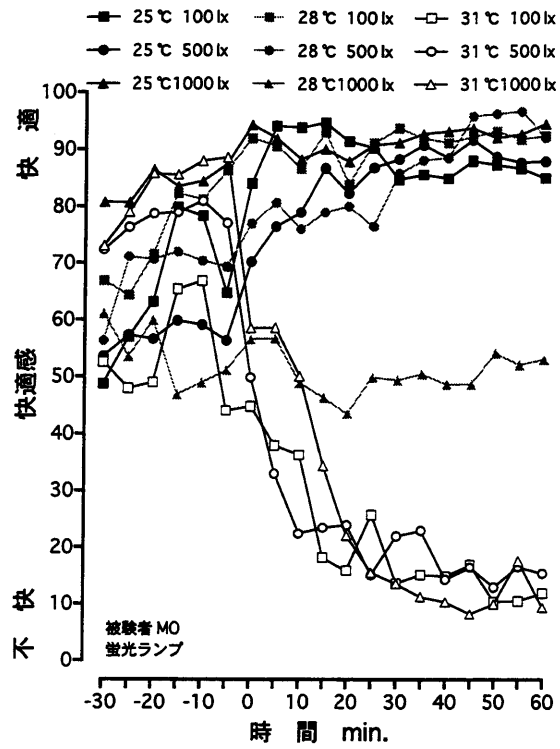
付録 4-5-7 温冷感の経時変動
(被験者 TI・白熱電球)



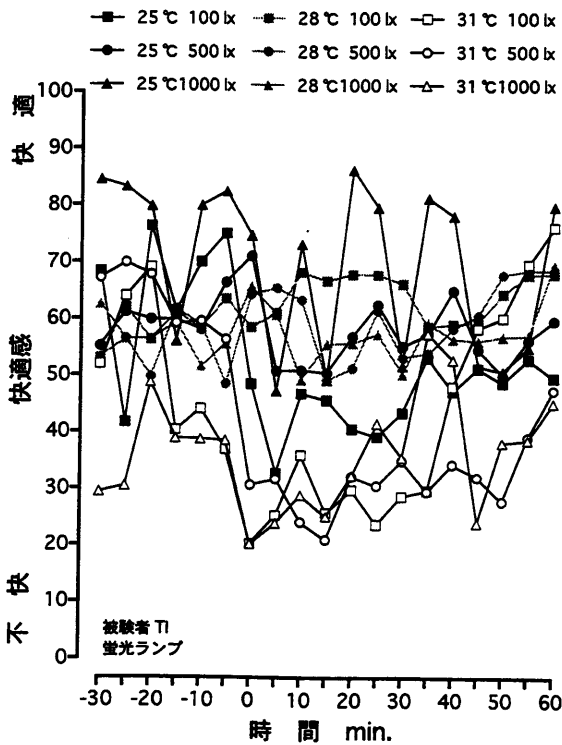
付録 4-5-8 温冷感の経時変動
(被験者 YM・白熱電球)



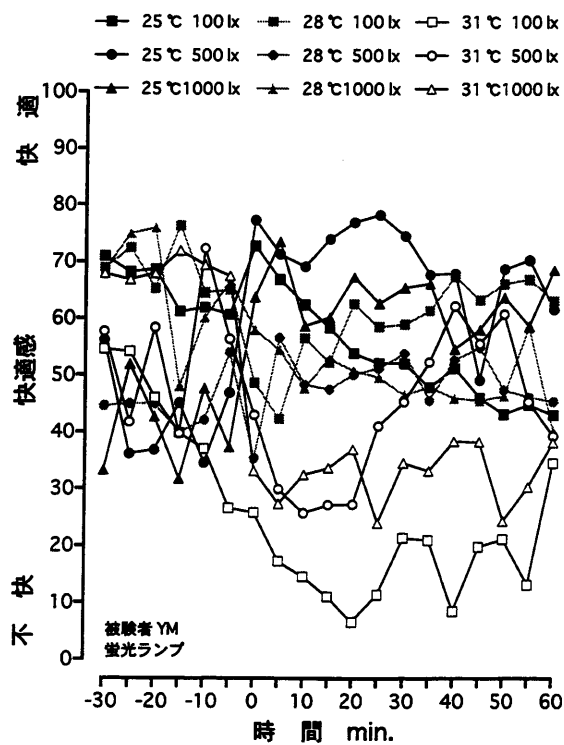
付録 4-6-1 快適感の経時変動
(被験者 MF・蛍光ランプ)



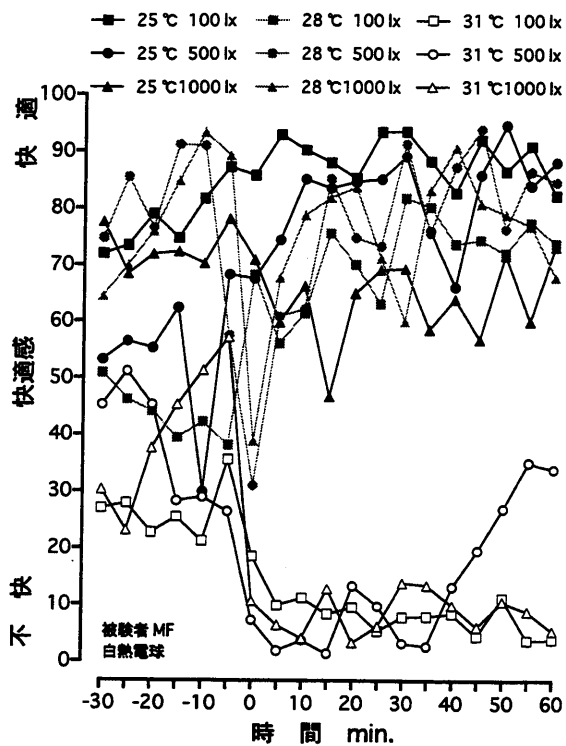
付録 4-6-2 快適感の経時変動
(被験者 MO・蛍光ランプ)



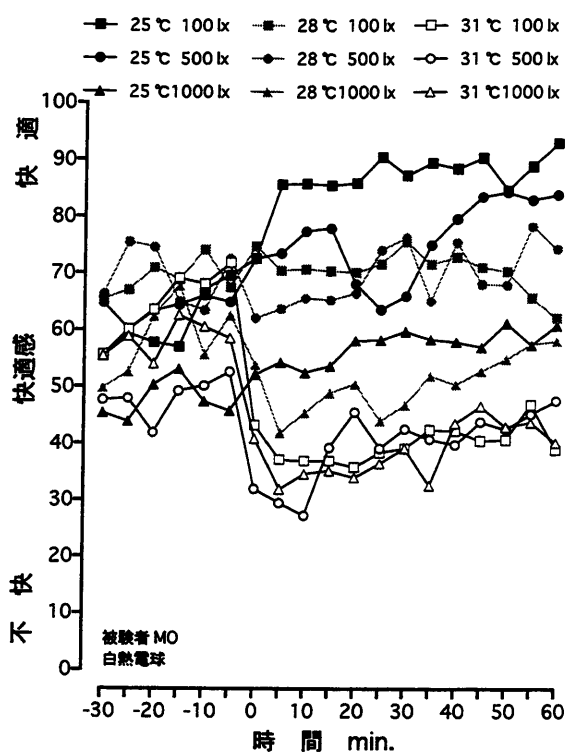
付録 4-6-3 快適感の経時変動
(被験者 TI・蛍光ランプ)



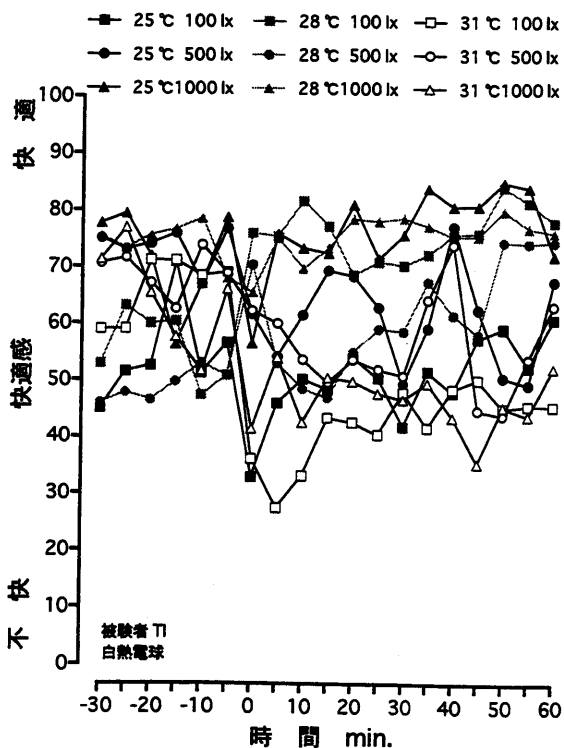
付録 4-6-4 快適感の経時変動
(被験者 YM・蛍光ランプ)



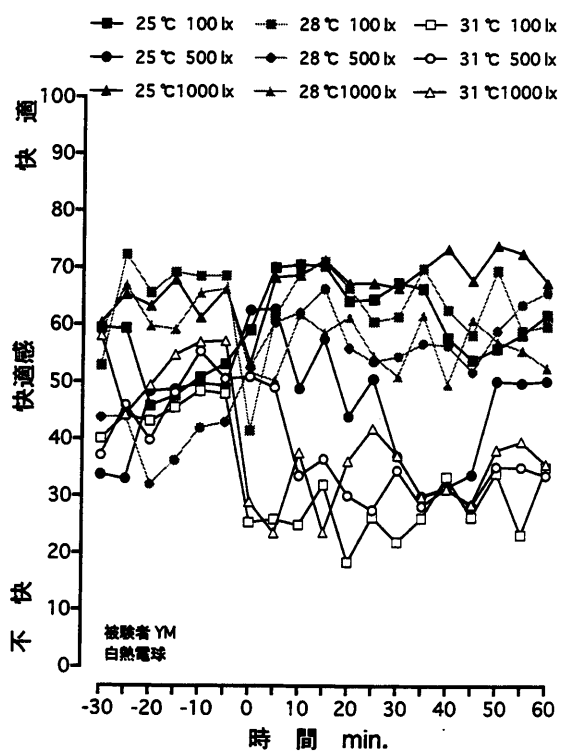
付録 4-6-5 快適感の経時変動
(被験者 MF・白熱電球)



付録 4-6-6 快適感の経時変動
(被験者 MO・白熱電球)



付録 4-6-7 快適感の経時変動
(被験者 TI・白熱電球)



付録 4-6-8 快適感の経時変動
(被験者 YM・白熱電球)