

博士学位論文

暑熱環境下の快適衣服設計
に関する基礎研究

—裸体時及び穿孔フィルム衣服着用時の生理・心理反応から—

文化学園大学 大学院

生活環境学研究科被服環境学専攻

張 静風

2014年6月

Thesis for the Degree of Doctor of Philosophy

A Basic Study on Design of
Comfortable Clothing in
a Hot Environment

—Physiological and Psychological Responses of
Human Body When Unclothed and When Wearing
Perforated Film Clothing—

JING FENG ZHANG

Department of Clothing Environment
Graduate School of Life Environment Research
Bunka Gakuen University
Tokyo, Japan

June, 2014

PH. D. Thesis

A Basic Study on Design of
Comfortable Clothing in a Hot Environment
—Physiological and Psychological Responses of the Human Body
When Unclothed and When Wearing Perforated Film Clothing—

Jing Feng Zhang
Department of Clothing Environment
Graduate School of Life Environment Research
Bunka Gakuen University
Supervised by Prof. Ph. D. Teruko Tamura

Abstract

Recently, the effects of the heat island effect and global warming have grown, not only in Japan but also in monsoon climates in East Asia and

Southeast Asia. High temperatures and humidity have affected our clothing, living and food environments. It is important to clarify their effects and interaction with the environment, material properties and responses of

the human body. However, basic quantitative research combining physical tests and experiments involving human testing is not sufficient.

The purpose of this study was to clarify the effect of macro environments and microclimate clothing on people, and heat and water transport properties of material on microclimate clothing by wearing tests and physical tests.

This thesis consists of the following six chapters:

Chapter 1. Introduction.

The purpose and background literature for this study are described.

Chapter 2. Effects of Humidity Conditions of a High-Temperature Environment on the Physiological and Psychological Responses of the Human Body

In order to clarify the effects of ambient air temperature and humidity on 5 items physiological responses and 3 psychological responses of the human body, 6 young female subjects wearing only shorts and brassiers were exposed to 9 conditions with air temperatures of 28°C, 31°C and 34°C, and 30%, 60% and 90% relative humidity for 60-minutes. The results of the analysis of variance are summarized as follows:

- 1) Mean skin temperature, sweat rate, skin moisture, thermal, humid and uncomfortable sensations significantly increased with an increase in air temperature and humidity.
- 2) Body weight loss and heart rate were significantly affected by air temperature but not by humidity.
- 3) Skin moisture showed a high correlation coefficient with each ineffective sweat rate which was estimated from the difference between the total sweat rate and body weight loss, thermal, humid and an uncomfortable sensation. It was suggested that skin moisture would be an important indicator for humid and uncomfortable sensations.
- 4) Skin wettedness calculated from the ratio of net evaporative heat loss to maximum evaporative heat loss correlated with each humid and uncomfortable sensation. The threshold level between a comfortable and uncomfortable sensation was 0.27.

5) The threshold levels between comfortable and uncomfortable sensations in this study were plotted on a psychrometric chart and then compared and discussed in relation to the results of other studies.

Chapter 3. Effects of Humidity Conditions of a High-Temperature Environment on Autonomic Nervous and Salivary Amylase Activity Responses

In order to clarify the effects of ambient air temperature and humidity on heart rate, and autonomic nervous and salivary amylase activity of the human body, 6 young female subjects wearing only shorts and brassiers were exposed to the same 9 conditions as described above. The results of the analysis of variance are summarized as follows:

- 1) Heart rate significantly increased with an increase in air temperature and humidity.
- 2) LF/HF significantly increased with an increase in air temperature, while HF showed only a tendency decrease when exposed for 30 minutes.
- 3) Salivary amylase activity significantly increased with an increase in humidity, when exposed for 30 minutes.
- 4) High correlation coefficients obtained between skin moisture and uncomfortable sensations ($r=0.888$), humid sensations($r=0.982$), salivary amylase activity($r=0.958$) and LF/HF($r=0.910$) were suggested to be dominant indicators of heat stress. Salivary amylase activity and LF/HF were also suggested to be effective indicators of heat stress.

Chapter 4. Effect of Porosity of Film Clothes on the Microclimate Beneath Clothing and the Physiological and Psychological Responses of the Human Body

In order to examine the quantitative effects of moisture permeability of clothes on clothing climate, blouse type film clothes made of films with different porosities, that is, having holes of 0mm, 3mm, 6mm and 7.5mm in diameter per 4 cm² respectively, were made and used for wearing tests in a climatic chamber at 34°C and 50%RH. The temperature and humidity inside the film clothes, sweat rate and subjective ratings such as humid and comfort sensations were determined. The subjects consisted of 7 young females. The

results were summarized as follow:

- 1) Air and moisture permeability of the film increased and thermal insulation decreased with increasing porosity.
- 2) As a result of the analysis of variance on wearing tests, both factors A (porosity of film clothes) and B (experimental condition) showed a significant difference at the 1% level for each temperature and humidity inside the clothes, and only factor A showed a significant difference for the sweat rate.
- 3) Both heat resistance(R_d) and evaporative heat resistance(R_e) of the film measured through a skin model test decreased with the porosity of the film in the case of an existing air layer beneath the film.
- 4) R_e showed a high correlation with humidity inside clothes and sweat rate, suggesting that R_e was a dominant factor for determining the clothing climate, sweat rate and comfort sensation of subject.
- 5) In addition, the difference between moisture permeability of perforated film and textile clothes was discussed.

Chapter 5. A Comparative Study of Moisture and Heat Transfer Properties of Non-Moisture Permeable Film and Textile Cloths

In this chapter, in order to compare the different properties of film fabric and textile clothes, 4 kinds of porosity film fabric, 5 kinds of cotton fabrics and 6 kinds of polyester fabrics were used for the physical tests and skin model tests. Air and moisture permeability, moisture absorption, water absorption and heat resistance and evaporative heat resistance were determined with skin models. The results are summarized as follow:

- 1) Air and moisture permeability of the film increased with increasing porosity and depended on the area of the porosity. On the other hand, moisture permeability of cotton and polyester were distributed in 45-55%, while air permeability was different between cotton and polyester.
- 2) Moisture permeability of textile was higher than that of film. The results suggested the textiles used have an excellent moisture permeation mechanism.
- 3) Peak level of humidity inside film clothing measured through a skin model test decreased and the keeping time of the peak was shortened with increasing porosity in spite of an air layer in the clothing. The keeping time of

textiles was about 10 minutes longer in an air layer of 7mm than in an air layer of 0mm.

4) Heat resistance (R_d) of every sample affected the air layer and showed a high value in the air layer of 7mm.

5) Evaporative heat resistance (R_e) of film showed a higher value than textiles because R_e contributed to the air and moisture permeability in an air layer of 0mm. However, R_e of the textile increased with an increase of the air layer. Water transport properties of the fabric affected moisture permeability, moisture absorption, and water absorption with an increasing air layer, and the mechanism became more complex.

Chapter 6. Summary

In this chapter, the results obtained in this study were condensed and issues to be considered in the future were discussed.

目次

Abstract	I
目次	VI
List of Tables	VIII
List of Figures	X

序論

1.1 緒言	1
1.2 研究の文献的背景	3
1.2.1 湿度とは何か	4
1.2.2 低温と湿度	5
1.2.3 中立温と湿度	6
1.2.4 高温と湿度	11
1.2.5 環境温湿度が自律神経・ホルモンに及ぼすストレス影響	14
1.2.6 衣服内気候の形成に及ぼす各因子の影響	20
1.3 本論文の構成	23
引用・参考文献	25

高温環境下の湿度条件が人体の体温調節反応・心理反応に及ぼす影響

2.1 緒言	34
2.2 実験方法	35
2.2.1 実験の環境条件	35
2.2.2 被験者	35
2.2.3 測定項目及び測定方法	36
2.2.4 実験手順	37
2.2.5 統計分析	38
2.3 結果	38
2.3.1 温熱的生理反応に及ぼす環境温湿度の影響	38
2.3.2 環境温湿度が心理反応に及ぼす影響	46
2.4 考察	48
2.4.1 人体の体温調節に対する環境温湿度の影響	48

2.4.2 環境温湿度条件と温熱的快・不快の境界について	53
2.5 要約	55
引用・参考文献	56

高温環境下の湿度条件が人体の自律神経活動・唾液アミラーゼ活性に及ぼす影響

3.1 緒言	59
3.2 実験方法	61
3.2.1 測定条件	61
3.2.2 測定項目並びに測定方法	61
3.2.3 実験手順	63
3.2.4 統計分析	64
3.3 結果	64
3.3.1 環境温湿度が自律神経活動に及ぼす影響	64
3.3.2 環境温湿度が心拍数に及ぼす影響	70
3.3.3 環境温湿度が唾液アミラーゼ活性に及ぼす影響	73
3.4 考察	76
3.5 要約	81
引用・参考文献	82

衣服の気孔率が衣服内気候並びに人体の生理・心理反応に及ぼす影響

—赤外線透過フィルム衣服を用いて—

4.1 緒言	85
4.2 実験方法	87
4.2.1 実験服の製作	87
4.2.2 素材の物性実験	89
4.2.3 素材のスキンモデル実験	90
4.2.4 着用実験	92
4.2.5 統計分析	93
4.3 結果	94
4.3.1 物性実験	94
4.3.2 スキンモデル実験	94
4.3.3 着用実験	96
(1) 二元配置分散分析	96
(2) 衣服内温湿度	96
(3) 胸部皮膚温並びサーモグラフィによる温度分布	104
(4) 前額発汗量	108

(5) 心拍数	110
(6) 官能評価	110
4.4 考察	113
4.5 要約	117
引用・参考文献	118
不透過湿膜と布地の熱・水分移動特性の比較に関する検討	
5.1 緒言	119
5.2 実験方法	120
5.2.1 試料布の物性実験	120
5.2.2 スキンモデル	122
5.3 結果	122
5.3.1 物性実験	122
5.3.2 スキンモデル実験	127
(1) 空気層 0mm の結果について	127
(2) 空気層 7mm の結果について	131
5.4 考察	135
5.5 要約	139
引用・参考文献	140
総括	142
謝辞	148

List of Tables

Table	Page
Table 1.1 Hormone substance of the body to be used in the measurement of psychological stress.....	19
Table 2.1 Physical characteristics of subjects.....	36
Table 2.2 Subjective ratings of sensory evaluation.....	37
Table 2.3 Mean and standard deviation of rectal temperature in five subjects	38

Table 2.4	Mean and standard deviation of mean skin temperature in six subjects	39
Table 2.5	Mean and standard deviation of sweat rate in six subjects	39
Table 2.6	Mean and standard deviation of body weight loss in six subjects	40
Table 2.7	Mean and standard deviation of skin moisture in six subjects (in back).....	40
Table 2.8	Mean and standard deviation of skin moisture in six subjects (in forearm).....	41
Table 2.9	Mean and standard deviation of skin moisture in six subjects (in thigh).....	41
Table 2.10	The result of analysis of variance.....	42
Table 2.11	The result of sensation evaluation in analysis of variance.....	46
Table 2.12	Correlation coefficient among physiological responses and psychological measurements.....	49
Table 3.1	Mean and standard deviation of HF in six subjects.....	65
Table 3.2	Mean and standard deviation of LF/HF in six subjects.....	66
Table 3.3	Mean and standard deviation of heart rate in six subjects.....	71
Table 3.4	The result of analysis of variance in changes of heart rate	71
Table 3.5	The salivary amylase activity of six subjects.....	74
Table 3.6	Result of analysis of variance in changes of saliva α	74
Factor A: air temperature Factor B: relativity humidity		
D.F.: degree of freedom **:p<1% *:p<5% significant difference		
Table 3.7	Correlation coefficient among physiological responses, HR, HF, LF/HF and Sa α and psychological measurements.....	80
Table 4.1	Subjective rating scale of comfort, thermal, humid and sweat sensation.....	92
Table 4.2	Result of physical properties of materials.....	94
Table 4.3	Result of skin model test.....	95
Table 4.4	Result of analysis of variance in temperature, humidity clothing climate and physiology responses.....	96
Table 4.5	Result of analysis of variance in sensory evaluation.....	112
Factor A: pore diameter; Factor B: the experimental stage		
**:p<1% *:p<5% significant difference		

Table 4.6	Correlation coefficient among porosity(P), air permeability(A), thermal insulation(T), moisture permeability(M), and skin model and physiological.....	113
Table 5.1	Physical characteristics of samples (C: cotton, P: polyester).....	121
Table 5.2	Correlation coefficient among physical characteristics, Rd and Re P : porosity A : air permeability Tm : thermal insulation M : moisture permeability Wr : water regain.....	138

List of Figures

Figures	Page	
Figure 1-1	Effect of inspiring dry gas on the general humidity sensation	6
Figure 1-2	Diagram of standard effective temperature (SET*) on ASHRAE	10
Figure 1-3	Contour lines of partitional skin wittedness on the psychrometric chart	14
Figure 1-4	Prediction of calotimetry.....	14
Figure 2-1	Experimental schedule. C : control E : experimental room ▼ : enter to experimental room.....	37
Figure 2-2	Effects of Ta, RH on rectum temperature through multiple comparison. means \pm sd(n=5)	42
Figure 2-3	Effects of Ta, RH on the mean skin temperature through multiple comparison. means \pm sd(n=6).....	43
Figure 2-4	Effects of Ta, RH on sweat rate through multiple comparison. means \pm sd(n=6).....	44
Figure 2-5	Effects of Ta, RH on body weight loss through multiple comparison. means \pm sd(n=6).....	44
Figure 2-6	Effects of Ta, RH and measured position on the skin moisture through multiple comparison. B: back, F: forearm, T: thigh. means \pm sd(n=6).....	45
Figure 2-7	Thermal, humid and comfortable sensation in each air temperature and relative humidity(n=6).....	47
Figure 2-8	Relationship between Esk/Emax and comfortable sensation.....	51

Figure 2-9	Relationship between Esk/Emax and humid sensation.....	52
Figure 2-10	Relationship between Esk/Emax and humid sensation.....	52
Figure 2-11	Comparison between comfortable lines and uncomfortable border lines reported by the authors and other researchers.....	54
Figure 3-1	Position of the electrode on NASA induction method G: earth electrode.....	62
Figure 3-2	Blood pressure monitor.....	62
Figure 3-3	Salivary amylase of monitor and measurement method.....	63
Figure 3-4	Experimental protocol; C:control; R:resting ECG: electrocardiogram; HR: heart rate; Sa- α : salivary amylase.....	63
Figure 3-5	Mean of HF at 30 mins(n=6).....	67
Figure 3-6	Mean of LF/HF at 30 mins(n=6).....	67
Figure 3-7	Mean of HF at 55 mins(n=6).....	68
Figure 3-8	Mean of LF/HF at 55 mins(n=6).....	68
Figure 3-9	Effect of Ta, RH on HF at 30mins through multiple comparison (n=6).....	69
Figure 3-10	Effect of Ta, RH on LF/HF at 30mins through multiple comparison (n=6).....	69
Figure 3-11	Effect of Ta, RH on heart rate through multiple comparison (n=6).....	72
Figure 3-12	Effect of Ta, RH on changes of heart rate through multiple comparison (n=6).....	72
Figure 3-13	Effect of Ta, RH on changes of saliva- α at 30mins through multiple comparison.(n=6).....	75
Figure 3-14	Effect of Ta, RH on changes of saliva- α at 55mins through multiple comparison.(n=6).....	75
Figure 3-15	Relationship of the transmission control system and stress	80
Figure 4-1	Selection method of material for the experiment clothing.....	88
Figure 4-2	Design of experiment clothes.....	88
Figure 4-3	Construction of a skin model.....	91
	a:hot plate b:peltier elements c:skin d:sample e:fan f:temperature/humidity sensor g:sweat hole	
Figure 4-4	Changes of humidity and heat flux between hot plate and film	

during experiment in the case of 0mm air layer.....	95
Figure 4-5 Changes of humidity and heat flux between hot plate and film during experiment in the case of 7mm air layer.....	95
Figure 4-6 Changes of temperature and humidity inside clothing in the chest of each subject during experiment.....	97
Figure 4-7 Changes of temperature and humidity inside clothing in the back of each subject during experiment.....	99
Figure 4-8 Changes of temperature and humidity inside clothing in the chest during experiment(n=7).....	102
Figure 4-9 Changes of temperature and humidity inside clothing in the back during experiment (n=7).....	102
Figure 4-10 Effect on porosity of film cloths on clothing climate in the chest(n=7).....	103
Figure 4-11 Effect on porosity of film cloths on clothing climate in the back (n=7).....	103
Figure 4-12 Changes of skin temperature in the chest of each subject and mean(lower right) during experiment.....	105
Figure 4-13 Changes and distribution of temperature beneath film cloths by thermography.....	106
Figure 4-14 Comparison between measured value of temperature on the skin and clothing climate and thermography.....	107
Figure 4-15 Changes of sweat rate on the forehead of each subject.....	108
Figure 4-16 Changes(upper) and comparison(lower) of sweat rate on the forehead(n=4).....	109
Figure 4-17 Comparison of heart rate(n=7).....	110
Figure 4-18 Changes of thermal, humid, sweat and comfort sensation(n=7) R: resting W: winding Re: recovery Ud: undress.....	111
Figure 4-19 Relationship between Rd and air permeability (upper),Re and moisture permeability (lower).....	116
Figure 5-1 Construction of an absorbent system. A: sample, B: water tank, C: stage system.....	121
Figure 5-2 Result of air permeability of each sample.....	123

Figure 5-3	Result of thermal insulation of each sample.....	123
Figure 5-4	Result of moisture permeability of each sample.....	123
Figure 5-5	Result of water regain of fabric samples.....	124
Figure 5-6	Result of water absorbed of cotton samples.....	125
Figure 5-7	Result of water absorbed of polyester samples.....	126
Figure 5-8	Absolute humidity between heat plate and film samples	128
Figure 5-9	Absolute humidity between heat plate and cotton samples.....	128
Figure 5-10	Absolute humidity between heat plate and polyester samples.....	128
Figure 5-11	Heat flux between heat plate and film samples.....	129
Figure 5-12	Heat flux between heat plate and cotton samples.....	129
Figure 5-13	Heat flux between heat plate and polyester samples.....	129
Figure 5-14	Rd of each sample measured by skin model.....	130
Figure 5-15	Re of each sample measured by skin model.....	130
Figure 5-16	Absolute humidity between heat plate and film samples.....	132
Figure 5-17	Absolute humidity between heat plate and cotton samples.....	132
Figure 5-18	Absolute humidity between heat plate and polyester samples.....	132
Figure 5-19	Heat flux between heat plate and film samples.....	133
Figure 5-20	Heat flux between heat plate and cotton samples.....	133
Figure 5-21	Heat flux between heat plate and polyester samples.....	133
Figure 5-22	Rd of each sample measured by skin model.....	134
Figure 5-23	Re of each sample measured by skin model.....	134

第 1 章

序 論

1.1 緒 言

現在、社会の経済的活動を持続しながら、地球環境を守る持続可能性 (sustainability) という新たな概念が定着しつつある。地球規模からみると、目下直面する問題としては、まず地球温暖化と人口増加が取り上げられている。特に、地球温暖化について、IPCC の第 3 次報告書¹⁾で報告された温度上昇は 1901～2000 年の 100 年で 0.6 (0.4～0.8) °C であるのに対して、第 4 次報告書の 1906～2005 年の 100 年では 0.74 (0.56～0.92) °C 上昇した²⁾。つまり、最近の温度上昇が大きいことが示されている。この異常気象や環境破壊に対する人類の危機意識が世界中で拡大している。

日本では、2004 年の猛暑と台風の襲来に始まり、2006 年も、梅雨明けが延び、自然災害が多発した。これらの異常気象に伴い、2011 年の東日本大地震及び原発の発生により、エネルギーや環境問題が、よりいっそう深刻となった。

日常生活における、エネルギー不足や地球温暖化の脅威としては、ヒートアイランド現象による熱中症患者の急増が挙げられる。東日本大震災に伴う電力需給の逼迫による節電対策で冷房を自粛する人が増えたことも一因となっている。このことにより、我々は自分自身の生活や健康を重視する一方、低炭素社会への取り組みや、地球環境の影響に関心を寄せている。人間の健康や生活を守りながら、環境に配慮した社会を構築することは、今後、世界的議論になりつつある。それに対して、我々は衣環境・住環境・食環境など様々な日常生活の中で、省資源、省エネルギーなどを工夫しなければならない。環境に優しいと共に、快適に過ごせる環境が求められている。

衣環境についても、こうした環境・社会・消費者の願望を背景に、繊維産業・アパレル産業における素材・デザインの開発など、新たな動きが注目されている。環境対策を目的とした衣服の軽装化であるクールビズが推奨され、それに端を発して、暑熱環境時の熱ストレス軽減に寄与する素材・デザインなどの開発が盛んとなり、従来の品質評価に加えて、着心地・快適性等の着衣評価が消費者から求

められている。この期待に応えるため、従来の繊維・衣服の評価法に加えて、人間・衣服・環境を一連の系として捉えた着衣の機能性評価、これら三者間の相互影響を明らかにすることこそが今後の重要な課題と考えられる。

環境の変化やその極限状態が生体に及ぼす影響を把握することによって、両者間の架け橋である衣服の機能性をより一層明確に考察することができる。従来、様々な環境因子が生体に及ぼす影響、あるいは着衣の快適性に及ぼす影響に関する研究が数多くなされてきた。衣環境に及ぼす環境因子には、気温、湿度、気流、日射があるが、研究の多くは気温の影響に関するものである。気温の変化が着衣の快適性・温冷感に及ぼす影響や、気温の変化が人体の体温調節に及ぼす影響など、また安静時・運動時・労作時など人体の活動レベルの変化と気温の影響に関する研究等、様々な視点や角度による研究がなされてきた。

人間はホメオスタシスを維持するため、環境との熱交換ルートとして、伝導、対流、放射という顕熱移動と、蒸発という潜熱移動の2種類を調節している。低温環境では発汗を生じることなく、顕熱移動の調節で、環境との熱バランスを保つことができる。しかしながら、高温環境では発汗を生じ、分泌された汗の気化熱によって、体温上昇を防いでいる。汗は蒸発してはじめて体温調節上有効となるものであり、これを有効発汗と言う。滴下し、流れる汗は放熱機序上意味をもたず、無効発汗と言われる^{3~5)}。暑熱環境下では、この有効発汗・無効発汗の割合が、人体の熱ストレスの重要指針とされる。高温環境であっても、湿度を低くすれば、蒸散による潜熱移動が有効に働くが、湿度の上昇により潜熱移動が抑制される場合は、体熱バランスが崩れ、熱ストレスを生じる。つまり、暑熱環境においては、気温を重視すると同時に、湿度の影響が軽視できない。特に、高温多湿の日本における熱中症の増加は、湿度に対する意識管理が不十分のためではないかと考えられる。しかし、前述の通り、環境に関する研究では、気温影響が中心となり、湿度に関する研究まだ不十分の状況にある。

着衣の快適性については、人体の生理反応・心理反応や、環境因子、衣服の熱・

水分特性などが相互に関わっている。人体と衣服の間で形成される衣服内気候は、着用時の生理反応また快適感を大きく左右するため、アパレルの開発・研究においても重要な指標として扱われている。

衣服内気候の形成に影響する要因としては、生体の生理反応と、衣服素材の熱・水分特性、また、人体と衣服を取り巻く外界の環境因子が挙げられる。衣服内気候は、衣服内の温湿度で表わされ、着衣時の温熱的快適性を評価する上で重要な指標の一つである。衣服内温度・湿度に影響を与える人体側の生理反応と衣服素材特性を把握し、それを定量化することができれば、快適な衣服設計推進上有効であると考えられる。

以上を総合すると、快適な衣服設計また着衣のあり方を明らかにするためには、環境要因、人体生理反応及び衣服の素材三面から論ずることが必要であり、本研究では、これら三者間の関係を明らかにしようとするものである。まず、環境が人体に与える影響を明らかにし、次いで、衣服が衣服内気候及び人体に与える影響を検討した。特に東アジア、東南アジアのモンスーン気候の中で、最も堪え難い「湿気」あるいは湿度に焦点を絞り、暑熱環境下の温・湿度変化が着衣の影響を最小限にした状態の人体への影響を明らかにし、人体の体温調節・発汗機序・自律神経系・内分泌系及び心理反応に及ぼす影響を捉え、湿度による人体影響を明らかにしようとするものである。次に、布帛の複雑性を排除した不透湿膜を用い、透湿率の異なる衣服を製作し、衣服の熱・水分移動が衣服内気候、人体の生理・心理変化に及ぼす影響を明らかにした。これらの実験から求められた定量的なデータに基づいて、高温多湿なモンスーン気候下で、快適に生活するための着衣条件の基礎を確立しようと試みた。

1.2 研究の文献的背景

湿度と健康や疾病との関係については、紀元前 5 世紀に Hippocrates⁶⁾ は疾病を生ずるものは、主として季節の変化であり、季節には寒暑の変化がある。干ばつ

は湿潤な天候に比較してより健康に適応し、死亡が少ないと記した。このように Hippokrates は気候と病気との関係に注目していたわけである。日常生活で、疼痛は湿度が高くなると訴える人が増加し、関節炎患者の自覚症状は気圧降下と湿度上昇に関連しているという報告もある。このように昔から温度だけではなく湿度が健康と関係が深いことが記され、湿度の悪影響が述べられている。

湿度は健康のみならず、日常生活で使うもの、衣食住などにも様々な影響を与える。じめじめした梅雨の時期には、衣類、靴、寝具まで、カビが生えたり、虫食いになったりすることを、誰でも経験したことがあるだろう。また、雨季の衣服内の蒸れ感、じめじめ感、湿潤感による着衣時の不快感はよく知られており、夏季の高温多湿な気候のもとで生活している人々にとっては、関心事の一つである。

本研究では、温熱条件のうちで湿度に焦点を絞り、湿度の生理的・心理的影響に関する研究、また、衣服の水分移動特性と湿度の関係、着衣時の人体への生理・心理反応に関する研究について文献的背景をまとめた。

1.2.1 湿度とは何か

湿度とは、空気の中に含まれる水が気化した水蒸気の量、またその割合をいう。湿度はいくつかの表現方法や単位があり、%、 g/m^3 、 $^{\circ}\text{C}$ 、 kg/kg などいろいろに使われているため、使用する分野や、目的や場面によって使い分けられている (JIS Z8806, 2001) ⁷⁾。

① 相対湿度 (relative humidity : RH)

天気予報で、「温度は 20°C 、湿度は 65%」という表現をする。この%で表す湿度を相対湿度という。ある温度における水蒸気が飽和状態になったと仮定した時の水蒸気量に対して、実際に含んでいる水蒸気量の割合を%で示したものである。

② 絶対湿度 (absolute humidity)

単位は二つあり、一つは単位体積 (1m^3) の気体中に含まれている水蒸気の質量

(g) を指し、温度・圧力が変わると気体の体積も変わるので、水蒸気量が同じでも絶対湿度は変わる、単位は、 g/m^3 。もう一つは、水蒸気以外の気体（乾き空気） 1kg に対し、水蒸気を $x\text{ kg}$ の割合で含むときの質量の割合を指し、混合比とも呼ぶ。単位は、 kg/kg 。

③ 露点温度 (dew point temperature)

空気を冷却していくと相対湿度が 100% 、つまり、水蒸気圧が飽和状態となる気温を露点温度という。

④ 飽和水蒸気圧 (saturation vapor pressure)

ある温度の気体は含むことができる水蒸気の量に限界があり、これ以上水蒸気を含めない限界を飽和といい、この時の水蒸気圧を飽和水蒸気圧と呼ぶ。

前に述べたように、湿度は、相対湿度、絶対湿度、水蒸気分圧などの異なったものを表すものであり、湿度の表示にはどの表示法を用いたか明示されねばならない。また、気温に依存することも多く、そのゆえ、湿度の影響は、気温との関係で検討されなければならない。

1.2.2 低温と湿度

低温での湿度の影響は主として低湿（空気の乾燥）によるものである。低湿によって生じる人体への影響は、喉や気管の乾燥による気道粘膜の乾燥と低湿環境で生じやすい静電気の放電によるものと考えられる。田村と小柴⁸⁾は、呼吸気道（鼻と口）による人体の湿り感覚に及ぼす影響について調べ、呼吸気道に乾燥空気を送気した時と、実験室内の湿り空気を吸入した時の、環境湿度変化に対する湿り感の差を検討した。その結果は Fig 1-1 に示すように、湿り空気を吸入時の湿り感覚変化が $0.3\sim 1.8$ までの変化であるのに対し、乾燥空気吸入時の湿り感覚変化は $0.2\sim 0.9$ と変化の幅が狭く低く申告を示した。乾燥空気の吸入が、環境湿度に対する全身の湿り感覚を低下させるということは、全身の湿り空気感受性に対して呼吸気道の感受性が寄与することを示唆した。

冬の乾燥した環境では静電気による電撃をよく経験する。この電撃は物体また人体中に蓄積された電荷が、衝撃的に電流として人体を通ることによって生じる。電荷の蓄積は湿度と関係が深い。湿度は70～80%以上になれば、この静電気は殆ど生じない。奥窪⁹⁾は「衣生活における静電気と健康」の中で、環境の湿度条件がどのような影響をもつかについて報告した。その結果では、湿度の上昇に伴い人体の帯電位は漸次減少し、75%RHの環境では、アスタイル床上でスリッパを履きPVC衣服を脱衣した場合でも、わずか+0.6KVにすぎない。帯電に湿度が影響する理由は、空気中の水分を介して電荷がリークするからである。このように、低湿の環境下あるいは乾燥した冬では、着衣時の衣服内湿度を考慮しながら衣服の設計や素材の開発に手がかりが必要である。

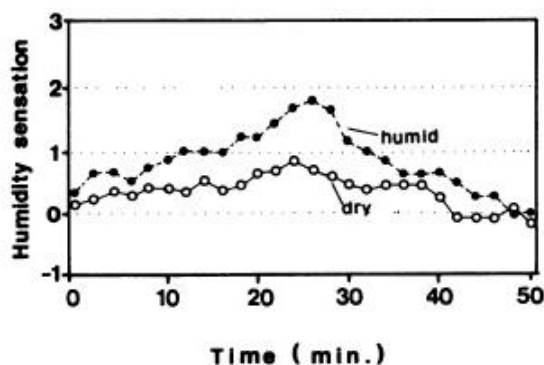


Fig. 1-1 Effect of inspiring dry gas on the general humid sensation.

1.2.3 中立温と湿度

温熱（温度、湿度、輻射熱、気流など）環境の人体の生理機能への影響について、最も顕著なものは、体温調節機能への影響である。

安静時における中等温度での湿度の生理機能への影響は少ない。牛草¹⁰⁾は、温度18℃、20℃、22℃、24℃、26℃、28℃、30℃、32℃、34℃、36℃の2℃刻みの10条件を設定し、湿度は35%、60%、80%、95%の4条件を組合せた40条件下で90分間の曝露実験を行った。温湿度の生理機能への影響については、直腸温、脈拍数、血圧、呼吸数及び腎外水分喪失量における湿度の影響が著明に現れるの

は気温 28～30℃以上であり、28℃また 26℃以下では温湿度による生理機能への影響がわずかであると報告した。

しかし筋作業また運動が行われると、体内の産熱量が増加するに伴い湿度の影響が現れる。渡辺ら¹¹⁾は、気温 23、25、27℃、湿度 55、85、95%の条件を組み合わせ計 9 条件を設定し、実験室に 190 分間暴露した。190 分間の暴露のうちに、熱消費量がほぼ 320kcal/m²となる筋肉労作として踏台昇降作業を行わせ、生理反応への湿度の影響を検討した。その結果、直腸温、平均皮膚温、熱交換量及び心拍数には湿度による有意差がみられなかったが、被験者は湿度の差をよく感知したことを示した。また、丹羽¹²⁾は気温 18、26、34℃、湿度 30、60、85%での環境条件下で、最大酸素摂取量の 50%Vo₂max のエルゴメータ作業を 1 時間行い、湿度による生理機能への影響を検討した。運動終了後、18、26℃での直腸温は湿度による影響を認めず、体温調節が有効に働いていた。この結果は渡辺らの研究結果とほぼ一致した。しかし、26℃では、高湿ほど発汗量が増加し、平均皮膚温は上昇した。丹羽・中山¹³⁾の高湿度環境における運動時の体温調節に関する研究では、気温 26℃一定、3 つの異なる湿度条件 (30、60、90%) のもとで種々の運動強度を負荷し、代謝、体熱量の変化、wet 及び dry の熱放散を算出し、中等温度下の運動時の生体に及ぼす湿度の影響を熱平衡の視点から検討を加えた。直腸温並びに平均皮膚温には運動強度に応じて湿度変化の影響が見られた。また、総発汗量は高湿化に伴って増大し、一方、有効発汗量は高湿化に伴って減少する傾向を示した。

以上の研究結果から、中等温度下における湿度の生体への影響は、安静時には殆ど見られないが労作並びに運動時には影響を生じることが示唆されている。深部体温にはほとんど影響を認めないが、運動時発汗に及ぼす湿度の影響が明らかに示された。湿度変化によって直接的な影響を受けるのは熱放散のルート及び体熱量であり、高温下の放熱ルートとしては、伝導や対流、輻射による乾性放熱が減少し、蒸散による湿性放熱が増加していることが示唆された。運動による発汗

量の増加は体温調節機序への負担増加、温熱的不快感の増加をもたらす。中等温度下の安静時においては湿度の影響を認めないが、運動や労作の場合は 26°C という中等温度でも湿度の影響を認めている。

中等温度下の湿度変化が人体の心理反応に及ぼす影響については、数多く研究されている。Rohles¹⁴⁾は 1600 名の男女被験者に 0.6clo の衣服を着用させ、乾球温 60~98° F (15.1~36.7°C)、湿度 15、25、35、45、55、65、75、85%の環境に 3 時間暴露し、温熱感覚に及ぼす湿度の影響について実験した。湿度条件（低湿 15~35%；中湿 45~55%；高湿 65~85%）別に、室温に対する快適な温熱感覚（やや涼しい、快適、やや暖かい）と回答した被験者の割合を示した。温度感覚が快適であると回答した被験者の分布は各湿度間でほぼ同様な曲線を示したが、そのピークは多少異なり、低湿では 79.9° F (26.5°C)、中湿では 78.6° F (25.9°C)、高湿では 76.9° F (24.9°C) であった。これらの温度範囲では、1° F の温度上昇は湿度 15%の減少により同様な温熱感覚を得ることが示された。Winslow ら¹⁵⁾は最適温度の温度帯では湿度の影響は少ないと、また Nevins ら¹⁶⁾は実験により、20°C から 25°C の範囲では湿度の増減が快適感に及ぼす影響は見られないと報告した。

田村・小柴⁸⁾は、24 名の女性被験者を用い、環境温度 25、31、37°C、湿度は 25 分間で 30~80%に上昇させ、続いて 25 分間で 80~30%まで下降させて、湿度の変化と全身の湿り感との関係について報告した。環境温 25°C では、「やや乾いている」と申告し、環境湿度の上昇・下降にも関わらず変化は見られないが、温度の上昇に伴い、湿度の上昇による湿り感の申告は、「何も感じない」から「大変湿っている」まで申告した。温冷感湿り感ほど湿度変化の影響を反映していなかった。しかし、中等環境温度 25°C ではしだいに皮膚温が低下するとともに、温冷感が低下、それに伴い湿潤感もやや低下して申告された。

松本・福田¹⁷⁾は、全身温冷感中立付近の室温（夏季 28°C、冬季 22°C）において、20~80%RH の湿度が、温冷感、乾湿感、並びに快適感に及ぼす影響と、あわ

せて、かゆみ感、べたつき感、息苦しい感についての官能評価を報告した。その結果は、中立付近の室温では、温冷感は、湿度による影響を殆ど受けていない。乾湿感と湿度には高い相関があり、 $-0.5 < \text{乾湿感} < +0.5$ となる範囲は、夏季に相対湿度 42~58%、冬季に 33~67%となる。快適感と乾湿感は対応し、冬季の湿度は、夏季に比べて広く許容されると述べている。石垣と松原¹⁸⁾ また田辺ら^{19~20)} においても温冷感、湿潤感、快適感についての申告結果では、高気温下または高相対湿度下では湿度の影響を大きく受けるが、熱的中立温では湿度の影響は小さいことを報告している。

最も単純な温熱環境の評価方法は、たとえば気温という単一の物理量によるものである。しかし、気温が等しい環境であっても湿度や風速が異なれば人間の感覚評価は違ったものになる。このように、複数の温熱条件因子の相互作用を考慮し、なおかつ一つの変数で温熱環境を評価することを目的として、多くの研究がなされている。Houghton と Yaglou²¹⁾により 1923 年以来研究された実効温度 ET はそのような試みの一つである。これらの体温調節及び温冷感についての研究成果に基づいて、Gagge²²⁾らは、数値計算により求めた温熱指標である新有効温度 (new effective temperature、ET*) を提案した。その後、Gaggeら自身により、人体からの熱放散量と環境因子・生理因子との関係、並びに生理的な体温調節機能をシミュレートした数学モデルに基づいて、新たな温熱指標である標準有効温度 SET* (standard new effective temperature) を開発した。アメリカ空調学会 ASHRAE はこの SET*を用いて ASHRAE 標準有効温度 (SET*) 線図、あるいは快適線図を発表した²²⁾。Fig. 1-2 は、気流 0.1~0.15m/s、作業強度 1.0~1.2met、着衣量 0.6~1clo という標準状態における快適な温度、湿度範囲を示したものである。冬季 SET*20~22.8℃、夏季 SET*23.9~26.1℃、相対湿度ほぼ 20~70%の範囲である。また、季節の総合評価にすると、SET*22.2~25.6℃の範囲であれば、90%の人が快適であると回答するという。日本における事務所ビル衛生管理法²⁴⁾では、温度、湿度の設定範囲を気温 17~28℃、湿度 40~70%としている。湿度の設定は

アメリカ人の快適である湿度よりやや高い範囲である。これは、東アジア・東南アジアのモンスーン気候のような高温高湿の日本の夏に、順化している日本人では快適に感ずる湿度が高いかもしれない。

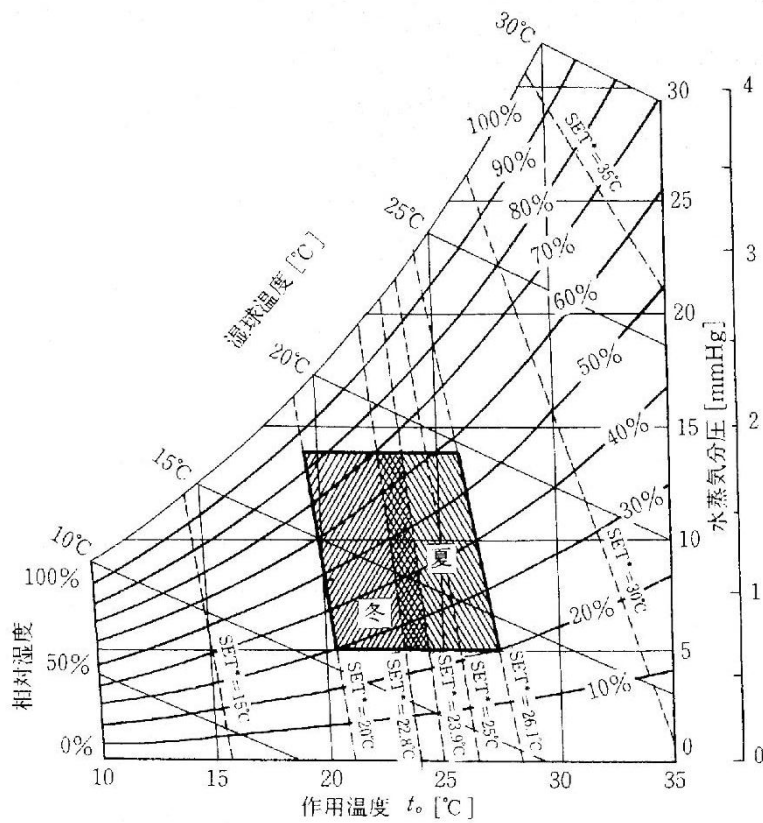


Fig.1-2 Diagram of standard effective temperature (SET*) on ASHRAE.²³⁾

1.2.4 高温と湿度

高温環境における第1の生理反応は皮膚血管の拡張である。高温環境下では、体内の熱を体外に放出するため、皮膚の血管が拡張することにより、皮膚温を上昇させ、皮膚血管が拡張すれば体の深部から表面への熱移動も大きくなり、体温の上昇を防ぐことができる。この時の熱放散ルートとしては、放射、対流及び伝導である。しかし、さらに体温が上昇すれば、放射、対流及び伝導だけでは熱放散が不十分になり、発汗が起こる。発汗は人で最もよく発達した蒸散性熱放散の手段であり、全身の皮膚に分布する汗腺から起こる。発汗は乾球温度で31~32℃から発汗し、これ以上の高温になると湿度が重要な役割を果たすことになる。

身体からの水分蒸発は発汗だけではなく、皮膚や呼吸器からもたえずに水分蒸発している。これは不感蒸散と呼ばれる。不感蒸散は一日約1リットルあり、発汗は一日約10リットルにも達する。汗をうまく蒸発すれば、体温の上昇を抑えることができる。湿度はこの蒸発による放熱に影響を与える。低湿時にこれらの水分蒸発は盛んであるが、高湿時には抑制され、蒸発による熱放散の割合が高温時に湿度の影響は大きくなる。さらに、運動による産熱量の増加は、体熱平衡のために放熱量の増大を要求し、そのような状態では湿度の影響がより一層大きくなる。

高温環境下の湿度の影響を検討すると、主として湿度による発汗への影響について数多く研究がなされている。小川²⁵⁾は発汗の開始には、皮膚温と体温の両方が関与する。暑くなると皮膚血管は拡張し、血流量を増やして皮膚温を上げ、発汗が起こり、体表面の水分の蒸発による体温の上昇を防ぐ。皮膚温が高い方が汗は早く出始め、たくさん出る。しかし、高湿環境下では、蒸散しにくくなり、流れて落ちてしまう汗が多くなる。高温高湿環境で汗をかく場合、流れて落ちる汗が多くなると、汗はそのうちにだんだん減り始め、ついに出なくなる、この現象は、以前は汗腺疲労のためと考えられていたが、暑くても空気が乾燥すれば汗が蒸散しやすい状態では起こりにくく、汗の蒸発が防げられるような高温高湿の環

境条件下で認められる^{26~27)}。汗による蒸発放熱と環境とを関連づける指標としては、皮膚濡れ面積と皮膚相対湿度がある。皮膚濡れ面積率とは、皮膚表面から環境へ蒸発可能な最大蒸発放熱量に対する実際の皮膚からの放熱量の割合と定義されて、生理ストレスの指標として使用される。早川²⁸⁾は (Fig. 1-3)、湿り空気線図上に、気温と湿度の組み合わせ条件における安静時と運動時の裸体生体の実験結果を示し、等温感線を検討した結果、等温感線の傾きが大きいほど湿度の影響は大きくなること示した。安静時では、35℃以下の環境では皮膚温、直腸温には顕著な湿度による差は認められないが、皮膚濡れ面積率には、湿度による顕著な影響が認められ、高湿になればなるほど濡れ面積率は高くなった。運動時における高温高湿の発汗への影響に関して、栃原ら²⁹⁾は気温 30℃、湿度 35、60、85%において、男女学生に 100W の自転車エルゴメータ運動を 1 時間行わせ、生理機能への湿度の影響とその性差について検討した。発汗量を蒸発して身体冷却に関与した有効発汗量と流れ落ちた無効発汗量に分けて示した。高湿では総発汗量が増加するが、その増加は身体冷却に関与しない無効発汗の増加によるものであった。この傾向は男子について顕著であると報告した。

Nishi と Gagge³⁰⁾は被験者を使用した生理実験に基づいた体温調節系数学モデルを考案し、各種環境条件下での人体の生理反応の予測を行った。Fig. 1-4 に種々の温度条件での人体から環境へのルート別放熱量と深部体温、皮膚温の予測値と相対湿度 (45%、85%) の影響について示す。湿度 85% の場合では、蒸発による放熱は気温 34℃ 付近で最高となり、それ以上になると蒸発による放熱量は減少し、身体への蓄熱量となり深部体温の上昇が生じる。一方、湿度 45% では、蒸発による放熱が頭打ちになるのは気温 42℃ 付近であり、高温ほど、湿度の影響が大となる。

以上の研究によると、高温環境における湿度の影響は、不感蒸散と発汗と関連している。つまり、発汗しても高湿によって蒸散できなくなると、皮膚に汗が滞留する発汗が増加し、皮膚の濡れている部分が増えてくる。すると、皮膚からの

放熱を促すために、より一層皮膚血流は増え、皮膚温は高くなる。高湿は高温と結びつくことによって熱負荷すなわち熱ストレスとなると考えられる。

高温環境下の湿度変化が人体の感受性に及ぼす影響については、上記で述べたように、高湿度は汗の蒸発による放熱を阻害することにより高温環境における熱負荷を増加させ、他の生理反応や全身的な主観申告である温冷感や快適感などに影響を与える。また湿り、蒸れや乾きといった湿度感覚が日常生活ではしばしば感じられる。皮膚には暑さ寒さに感ずる温受容器と冷受容器を持っているが、湿度を検知する受容器は現在のところ見つかっていないため、不明な点が多いが、皮膚の湿度感覚は不快感をもたらすことが分かっている。また湿った空気や乾いている空気に長時間暴露すると、呼吸気道や目などの粘膜に影響を与え、不快感ももたらす。皮膚の濡れ感、湿り感、蒸れ感などは、被服分野において環境や被服材料の水分量に対応する着用感の重要な評価指標として調べられてきた。Gwosdow ら³¹⁾は、前腕に接触させた布を引っ張るときの摩擦力と被験者の触覚や快適感との関係を調べたところで、高温高湿環境は着用される衣服のざらざら感が高く、許容度が低下していることから、皮膚表面の湿気が皮膚の摩擦を増加させる可能性を示唆した。局所的な濡れ感覚について、小柴と田村³²⁾は皮膚温より3℃高温、3℃低温の濡れを与えることにより、濡れ感覚の部位差を調べた。その結果は、接触面積が大きく、周囲環境が低温のほうが、濡れ感覚が大きくなった。湿り刺激の影響は、低温、高温、等温の順に大きかった。

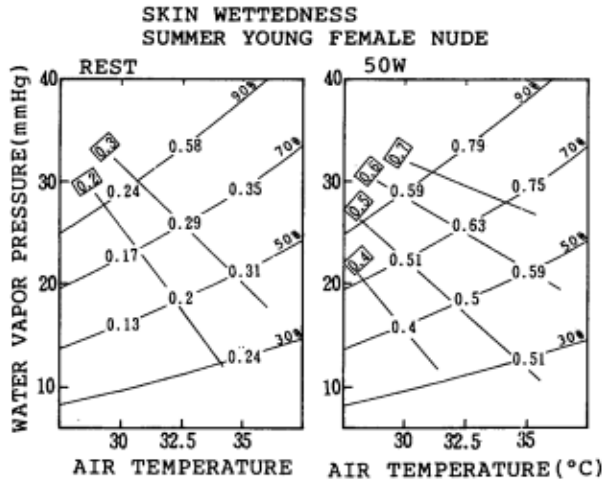


Fig.1-3 Contour lines of partitional skin wittedness on the psychrometric chart.

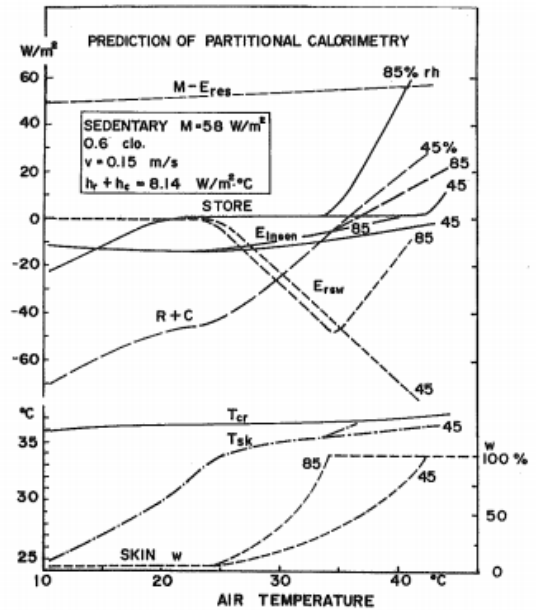


Fig.1-4 Prediction of calorimetry.

1.2.5 環境温湿度が自律神経・ホルモンに及ぼすストレス影響

人体は、多くの器官から構成され、その生命を維持するために内部状態を一定に保ち、外界(環境)からの独立性を維持している。これはヒトに限らず生命の一般的な性質と考えられおり、恒常性(ホメオスタシス、homeostasis)という。この恒常性を維持するために、様々な自動調節機構が存在し各器官が協調して働いている³³⁾。この自動調節機構の中心的な役割を担っているのは、神経系による神経性調節と、内分泌系による液性調節である。また、ヒトの殆どの器官は、交感神経系と副交感神経系の二重支配を受けており、亢進と抑制の両作用が働く仕組みとなっている。

前述のように環境温湿度が人体に与える影響に関する研究は、いずれも体温調節反応また温熱感覚の測定・評価にとどまっている。近年、脳波、脳血流量、血圧、心拍数や心電図などの苦痛を伴わない非侵襲の測定法の開発により、人体に加えられた様々な刺激による自律神経機能の変化を被験者実験によりリアルタイ

ムで観察・評価することができるようになった。その中でも、心拍変動は自律神経機能を反映することが知られており、自律神経機能が心臓血管系に及ぼす影響、特にストレス状態の指標として幅広く用いられている^{34~37)}。

また、この手法はストレス評価への応用のみならず、様々な分野に使われてきた。田中らは³⁸⁾急激に温度が変化した時の心臓・血管系の反応とその生理機序を調べるために、右手を2分間、5℃、34℃、48℃の3種の冷水や温水に浸け、心電図と血圧を記録し、ヒトの皮膚の一部に温度刺激を与え循環器及び自律神経機能を非観血的、経時的に測定した。34℃では、温度負荷により測定値に変化は見られなかったが、低温また高温刺激により、交感神経機能が亢進し、副交感神経機能は低下し、心拍数と血圧は増加したと報告した。環境温度変化が交感神経機能を亢進し、心臓事故の発生に関与することを示唆している。田村と岡本は³⁹⁾衣服による人体加圧が自律神経活動を中心とする生理反応に及ぼす影響を調べるために、非ストレッチベルトとストレッチファブリックを用い、各々の人体部位に加圧した時の交感神経及び副交感神経系の変化を測定した。非ストレッチベルトによる胸部・胴部・腰部の加圧を行った結果、副交感神経活動の有意な増大と交感神経活動の低下が胴部と腰部で観察された。一方、ストレッチファブリックを用い、腰部また下半身(大腿と下腿)を加圧した結果、下半身の加圧は副交感神経の有意な増大、交感神経の有意な低下を示した。自律神経機能がスポーツウェアの設計の指針と考えられる。また、雙田と鳴海は⁴⁰⁾、伸縮力が大きい編布と織布実験服を用い、着衣時の快適性の評価に心拍変動を用いた実験を行った。心拍変動は着衣困難性の客観的指標として用いることが有効で、織布実験服は、編布実験服より交感神経系が優位な状態であった、着にくい服であったという結果を得ている。

自律神経機能変化は環境評価また熱的快適性評価にも応用されている^{41~45)}。入来ら⁴¹⁾は環境湿度を50%一定とし温度22℃、26℃、30℃の定常的な環境に曝露した時の熱快適性について心拍変動解析を用いて検討し、熱快適性の研究で、

少なくとも寒冷に対する熱快適性の研究に心拍変動が有用な指標であることを示唆している。西川らは⁴²⁾室内温度を変化させずに空調機器に付加されている除湿機能に注目し、心拍変動による除湿環境の影響評価を取り上げ、被験者実験を行った。その結果、室内温度また湿度は高いほうが心拍間隔及び心拍間隔の分散は小さくなる傾向が示され、精神的なストレス状態にあるときと同様の生体反応を示したことを報告した。Sollersら⁴⁴⁾は35℃30分間の暑熱負荷によって、心拍数は平均4.5拍/分の増加及び心拍変動HF%の有意な低下とLF%の有意な上昇を認め、副交感神経活動の低下と交感神経活動の亢進を報告している。一方、Brennerら⁴³⁾は40℃30%の暑熱環境に曝露した結果、運動負荷による副交感神経活動の有意な低下と交感神経活動有意な亢進を認めているが、安静時の自律神経バランスに有意な変化はなかった。Yamamotoらは⁴⁵⁾は25℃44%と37℃75%の2条件への曝露実験を行った。その結果、25℃44%下では、HF及びLF/HFともに有意差が認められなかったが、37℃75%下では、HFは有意に減少し、LF/HF及び心拍数は有意に増加したと報告した。さらに、山本ら⁴⁶⁾は、35℃60%下の実験結果では、HF、LF/HFが有意に変化した。これらの研究により、精神ストレスと同様に、暑熱環境への曝露に際して、生体が自律神経による暑熱ストレスを受け、湿度がより大きく自律神経に影響を与える可能性が示唆されている。

以上のように心拍変動による自律神経機能の評価は各分野で応用され、その有効性が確認されてきた。

人体の恒常性を維持するため、生体の内部環境は不随意的に調節されている。これは人体の自律機能によるもので、この自律機能を司っているのは自律神経調節機能以外に、内分泌系がある。内分泌系による生体機能の調節は内分泌腺から分泌されたホルモンによってなされる。ホルモンとは、一般に内分泌腺にある内分泌細胞から体液中に分泌され、主として血行を介して標的器官に達し、微量で特異的な効果を及ぼす物質という。また、神経系がおもに迅速な調節を行うのに対して、内分泌系は主として緩慢だが長期にわたるような調節を行う⁴⁷⁾。

Cannon⁴⁸⁾は、ホルモンの働きをはじめてストレスモデルに取り入れた研究者で、闘争－逃走反応として知られる危機反応の際に、はじめに動員される物質がエピネフリンであることを証明した。彼は骨格筋や内臓筋変化など、ストレスで生じる末梢の生理学的変化の多くは、腎臓の上部に位置する腺(副腎)から分泌される物質の作用によると考え、また、ストレス状況にある動物からの採血実験を行い、エピネフリンのさまざまな作用を実証した。他方、Selye⁴⁸⁾はストレッサーを加える際、下垂体－副腎皮質系の広範で非常に強い活性や、それに伴うコルチコイドの多量分泌の結果であると報告した。これらの初期の研究以来、神経内分泌の調節機能に着目したストレスモデルが浸透し、現在では、多くの研究者によって、ストレス下で重要な役割を果たすと考えられるホルモンに関する研究が飛躍的に増加している。従って、従来の自覚的測定法(主観評価、自覚症状数、自覚疲労度)より、人体に加える様々な刺激を生体の生理反応により客観的に計測することが実現されてきた。Table 1.1 はストレスの心理測定に用いられる生体のホルモン物質を示している³³⁾。表に挙げるようなホルモン物質の分析により、人体に加えられた様々な刺激が人体に与える快・不快の影響を調べることができる。しかし、これらのホルモンは血液に含まれるものが殆どである。採血によるストレッサーも考える必要がある。そのため、非侵襲計測が望ましく、唾液や尿による分析の可能性が研究されている^{49~50)}。Brennerら⁴³⁾の研究では、気温40℃、湿度30%の暑熱環境への曝露により血漿中のエピネフリンは上昇する傾向を示したが、ノルエピネフリンは暑熱環境曝露にもかかわらず変化を示さなかった。野村ら⁵¹⁾は被験者に10分間を安静にさせた後、ある程度の時間間隔で繰り返される単純な計算タスクを課した。このような軽度の精神作業負荷に対するコルチゾールを経時的に評価し、その時間的な特性及び精神負荷に対する指標としての有効性を調べた。コルチゾールは断続的な計算タスクの繰り返しにより増加し、全計算終了後の安静時間においてもベースラインへ回復せず、軽度な精神作業負荷に対する評価指標としての有効化と、視床下部－脳下垂体－副腎系(HPA)³³⁾の緩慢なスト

レス反応の特徴であることを報告した。山口ら⁵²⁾は採血自体が何らかのストレスをもたらすことと、尿中のホルモンの採集による特別な処理が必要であることにより、血液と尿に比べて多くの長所を持つ唾液アミラーゼ活性が精神ストレスの指標になり得ることについて検討した。また、その有効性を検討するために、系統的研究も行った^{53~55)}。現在、唾液アミラーゼ活性はストレスに関する客観的な心理計測技術として確立されている。本宮と二瓶⁵⁸⁾は水辺環境におけるストレス軽減効果を定量的評価するため、岡本ら⁵⁹⁾も救急隊員の仕事に関わる疲労とストレスについて、唾液アミラーゼ活性を用いてそれぞれ調査研究を行った。また、唾液アミラーゼ活性の反応は非常に速やかであるという性質から、医療臨床現場への応用も期待されている。五島と中井⁶⁰⁾は心身症と考えられる耳鼻咽喉患者を対象として、唾液アミラーゼ活性の測定によって、認知行動療法や自律訓練法前後のストレスレベルを客観的に示すことができると報告した。広瀬と加藤⁶¹⁾は麻酔また慢性痛患者へのストレス評価に応用し、その評価の有効性及び患者や医療従事者に対する医療現場の環境評価の参考となることを報告した。それらの研究では、いずれも精神ストレスに対する客観評価であり、環境評価による熱ストレスの研究は殆ど見当たらない現状である。

Table 1.1 Hormone substance of the body to be used in the measurement of psychological stress³³⁾.

指標	項目	体液	特徴
神経系・内分泌系	コルチゾール (CORT)	血液 唾液	ストレス指標として古典的に用いられてきた。
	エピネフリン (EP)	血液	副腎髄質から分泌されたカテコールアミンの 80%はエピネフリン。
	ノルエピネフリン (NE)	血液	ストレス指標として古典的に用いられてきた。ホルモンであると同時に神経伝達物質。血中濃度が低いため唾液での分析は困難。
	ドーパミン(DA)	血液	ノルエピネフリンとともに、神経伝達物質。
	クロモグラニン A (CaA)	唾液	副腎髄質クロム親和性細胞や交感神経から分泌される主要なタンパク質の一種で、精神のストレスを反映。
	アミラーゼ (AMY)	唾液	唾液アミラーゼは交感神経の直接作用と、ノルエピネフリン作用の両作用で分泌される。
	セロトニン (EDTA)	血液 骨髄液	生理的活性アミンの一種で、脳のセロトニンは神経伝達物質である。睡眠、体温、情緒、気分、食欲の調節に関係する。
	5-ハイドロキシインドール酢酸 (5-HIAA)	尿	セロトニンの代謝物を測る中枢神経ホルモン検査で測定される
	黄体刺激ホルモン (LTH)	血液	別名プロラクチン。生理作用は、乳腺の発育や乳汁分泌の開始など。ストレスに伴って変化。
	成長ホルモン(GH)	血液	別名ソマトトロピン。ストレスや運動で分泌が増加することが知られる。
	β -エンドルフィン	血液	内因性モルヒネ様ペプチドの一種。鎮痛活性が高く快楽物質ともいわれる。
	副腎皮質刺激ホルモン(ACTH)	血液	視床下部の刺激で分泌され、副腎皮質のステロイド合成を促す下垂体前葉ホルモンで、朝高く夜低いという明瞭な日内変動がある。

1.2.6 衣服内気候の形成に及ぼす各因子の影響

衣服の着用により皮膚と衣服との間に微気候が形成され、被服材料の諸特性が衣服内微気候の形成に作用し、人体の生理・心理に影響を与える。快適な衣服内気候は、衣服内温度 $32 \pm 1^\circ\text{C}$ 、湿度 $50 \pm 10\%$ と言われている⁶²⁾。衣服には外気環境条件や、人体の活動状況に応じて衣服内の水分や熱を調節して、衣服内気候をたえず快適域に保つ機能が求められる。そのため、被服材料と着衣時の生理・心理反応に関する関係については数多くの報告がなされている。これらの研究は、被服材料のそれぞれの特性に関する評価と、着衣時の衣服内気候に対する評価に大きく分けられる。

衣服内気候に影響を及ぼす重要な被服材料の性質の一つが、布の透湿性といわれ、古くから数多くの研究が報告されている。Fourt 及び Harris⁶³⁾は布の透湿抵抗の求め方を示し、さらに蒸発法及び吸収法を用いて重ね布と透湿抵抗の関係を見出した。Whelan ら⁶⁴⁾は材料の気孔の直径、厚さ及び孔数と透湿性との関係を報告している。日本では丹羽ら^{65~71)}は被服材料の透湿性について系統的に実験を行い、繊維製品の透湿機構を明らかにした。金綱ら^{72~76)}は衣料用革、織布、綿など素材別に被服材料の透湿性、通気性、吸湿に関する研究を行った。

中西と丹羽^{77~78)}は KESF-8 AP 通気度試験機により、用途別の被服材料の通気抵抗と布の重量、厚さ、見かけ比重との関連を、また被服材料の通気機構を布の構造、糸の構造、繊維の配置などの繊維集合構造、及び、繊維の形態などとの関連を検討した。

近年になって、被服材料の単一特性の評価にとどまらず、衣服の水分特性、熱特性の面から着用時の快適性までの総合的評価が求められ、人体を模擬した熱・水分共存系のシミュレーション装置、また人体に近似したサーマルマネキン装置が開発された。シミュレーションを用いた着用時の総合評価、解析に関する研究も盛んになされている。原田ら⁷⁷⁾は平板型装置を開発し、各種繊維素材について

衣服内気候との関係を明らかにした。熱・水分移動特性測定装置としてのサーモラボを用いた研究として、藤本ら⁷⁸⁾は布及び布-空気層試料の伝熱特性を調べ、被服材料の表面特性の影響、及び通気性の役割について議論した。諸岡と丹羽⁷⁹⁾は肌着材料の顕熱抵抗及び潜熱抵抗を試料と熱板との空気間隙及び風向きを変化させ、また、液体水が試料に直接作用する場合の過渡的な放熱性も測定した。これらの諸特性値を肌着の快適性とのかかわりにおいて考察した。中西と丹羽^{80~81)}は水分移動を伴わない熱移動と、熱板と環境との温度勾配のない水分移動及び勾配を与えた状態の熱・水分の同時移動の三つの場合について検討した。また、田村ら⁸²⁾は熱板が制御されるスキンモデルを開発し、山田ら⁸¹⁾はこれを用いて麻素材の水分移動特性評価を行った。その他、衣服レベルの水分・熱移動特性評価においては、田村ら^{84~86)}はサーマルマネキンを用い被服の熱抵抗を左右する種々の要因を取り上げ、各要因と熱抵抗との関係を定量的系統的に評価した。熱抵抗のみならず、発汗サーマルマネキンによる蒸発熱抵抗が衣服内気候に及ぼす影響の評価についても多くの研究がなされている。Tamura と Tomizawa⁸⁷⁾は輸血用装置の応用によって発汗マネキンを開発し、この発汗マネキンを用いて、穿孔フィルム衣服が衣服の蒸発熱抵抗に及ぼす影響を検討し、これにより、発汗マネキンは着衣時の水分移動特性の評価に有効であることを報告した。薩本ら⁸⁸⁾はサーマルマネキンを用いて肌着の温熱的快適性を物理的に解析し衣服内気候への影響を検討した。サーマルマネキンのような物理モデルを用いた衣服内気候に関する研究のみならず、人体の着用実験による被服素材の多種の特性が衣服内気候に及ぼす影響についても多数の研究が報告されている。この中で、潮田^{89~90)}は、繊維素材の異なる特性が衣服内気候及び人体の湿度感覚にどのような影響を与えるのか

について報告した。井上ら⁹¹⁾は素材の吸湿性・吸水性の異なるスポーツウェア着用時の運動時における衣服内気候や体温調節反応を調べ、合成繊維の熱・水分移動特性の影響を検討した。石井ら⁹²⁾は吸湿率の異なる2種類の肌着着用時に環境湿度の違いが平均皮膚温また衣服内気候への影響を比較する実験を行った。また、前田ら⁹³⁾は、透湿性と非透湿性外衣の着用による衣服内気候及び生理・心理反応を調べ、透湿性素材は非透湿性素材よりも温熱ストレスを低減する効果があることを報告した。鈴木ら⁹⁴⁾は、暑熱環境下における農作業において、衣服内空気循環が体温調節反応に及ぼす影響を検討し、衣服内空気循環のよいエコファン付作業服を着用する場合は人体の生理負荷が小さく、熱中症予防対策に有効であることを示唆した。衣服内気候を評価するにおいては、前述のように、人体の複雑な生理反応を排除してサーマルマネキンを用いた評価が最も有効であるが、着用時の快適性を考えるとき、人体側による主観申告及び客観的生理反応に関する考察が必要となり、つまり、物理的な評価と人体の生理・心理反応を比較し総合的に評価することが求められている。しかしながら、着用実験の場合は、繊維製品の特性の複雑性のため、素材のある特性の効果を検証しようとするとき、そのほかの条件例えば布地の厚さや含気率、水分率、透湿性等を一律にそろえることは極めて困難であり、着用実験によってある衣服特性が衣服気候に及ぼす影響を定量的に特定した成果はほとんど見当たらない現状である。

1.3 本論文の構成

本論文は以下の6章で構成される。

第1章「序論」では、本論文の目的、文献的背景及び本論文の構成について記述した。

第2章「高温環境下の湿度条件が人体の生理・心理反応に及ぼす影響」では、暑熱環境下の温度と湿度が人体に及ぼす影響を明らかにするため、気温 28℃, 31℃, 34℃, 湿度 30%, 60%, 90%を組み合わせた計9条件の人工気候室内に、ブラジャーとショーツのみ着用の成人女子6名を60分間滞在させ、直腸温、皮膚温、局所発汗量、体重減少量、皮膚水分量及び心拍数の生理反応6項目、温冷感、湿潤感、快適感の心理反応3項目を測定した。第2章では、全身発汗量と蒸発量との差、すなわち無効発汗量を求め、無効発汗量と皮膚濡れ率、湿潤快適指数と比較した。また、湿り空気図上に、本研究及び従来報告されている研究結果から導き出された快適線と不快境界線を記入し、比較するとともに、着衣による影響を検討した。

第3章「高温環境下の湿度条件が人体の自律神経活動・唾液アミラーゼ活性に及ぼす影響」では、第2章で実施した実験のうち、環境湿度の変化に伴う交感神経・副交感神経及び唾液アミラーゼ活性の変化に着目し、湿度上昇に伴う自律神経、ホルモンの挙動を明らかにした。

第4章「衣服の気孔率が衣服内気候並びに人体の生理・心理反応に及ぼす影響—赤外線透過フィルム衣服を用いて—」では、着衣の透湿性が人体の生理・心理反応に及ぼす影響について検討した。すなわち、本章では、不透湿膜に穿孔を施すことにより、透湿・非透湿の実験服を製作し、衣服内温湿度、局所発汗量、心拍数及び温冷感、湿潤感、発汗感と快適感を求め、衣服の透湿性が衣服内の水分、熱移動に及ぼす影響について考察した。

第5章「不透湿膜と布の熱・水分移動特性の比較に関する検討」では、不透湿

フィルム試料の特性と一般布帛試料との相違を明らかにするため、親水性繊維の綿 100%5 試料と、疎水性繊維のポリエステル 100%6 試料を用いて、各々の物性を比較し、さらに、スキンモデルにより求められた熱抵抗・蒸発熱抵抗により、その熱・水分移動のメカニズムについて比較、検討した。

第六章「総括」では、各章をまとめ、研究全体の結論を記述し、また、着衣の快適性及びそのための衣服設計への展望、残された課題について述べた。

引用・参考文献

- 1) 環境省；気候変化 2001、IPCC 地球温暖化第 3 次評価報告書
- 2) 環境省；気候変動に関する政府間パネル IPCC 第 4 次評価報告書統合報告書の公表について
- 3) T. Ogawa, M. Asayama, J. Sugeno, H. Fujimatu, T. Miyagawa, and Y. Terai;
Temperature regulation in hot-humid environments, with special reference to the significance of diuresis, *J. therm. Biol.*, 9(1/2): 121-125 (1984)
- 4) 柄原裕, 大中忠勝, 山崎信也, 田中正敏, 吉田敬一, 小川庄吉, 井川正治, 伊藤由美, 渡辺佳代子；長時間運動時の生理反応及ばす湿度の影響とその性差, *デサントスポーツ科学*, 6: 234-239 (1985)
- 5) 丹羽健市, 中山昭雄, 大貫義人；運動時の体温上昇と環境湿度, *山形大学紀要 (教育科学)*, 9(2): 265-273 (1987)
- 6) 三浦豊彦；湿度と健康, *労働科学*, 47(1): 1-11 (1971)
- 7) 稲松照子；湿度のおはなし, *日本規格協会*, 64-71 (1997)
- 8) 田村照子, 小柴朋子 (1995)；人体の湿り感覚 (第一報) —全身の湿り感覚感受性—, *繊維消誌*, 36(1): 125-131
- 9) 奥窪朝子；衣生活における静電気と健康, *大阪教育大学家政学研究会, 生活文化研究*, 17: 1-31 (1973)
- 10) 牛草貞雄；環境湿度の生体負加に関する実験的研究, *日衛誌*, 21(2): 6-28 (1966)
- 11) 渡辺明彦, 肝付邦憲, 井上枝一郎, 木村菊二, 米元純三, 三浦豊彦, 松浦分房次郎, 尾豊永 (1976)；中等度環境気温における湿度の人体に及ぼす影響 (第 1 報), *労働科学*, 52 (11): 635-650
- 12) 丹羽健市；運動時の熱平衡に及ぼす湿度の影響, *大阪大医誌*, 30(1-4), 1-18 (1978)

- 13) 丹羽健市, 中山昭雄 ; 高湿度環境における運動時の体温調節, 体力科学, 27 : 11-18(1978)
- 14) Rohles, Jr, F.H; Humidity, human factors, and the energy shortage. ASHRAE J., April, 38-40 (1975)
- 15) C.E.A. Winslow., L.P. Herrington, and A.P. Gagge Relation between atmospheric conditions, physiological reactions and sensations of pleasantness, Amer. J. Hyg., 26(1):103-115(1937)
- 16) Nevins, R.G. and Hardy, J.D.; Humidity and Moisture, Vol. II, 3-11, Humidity effects on the comfort and wellbeing of people(1965)
- 17) 松本泰輔, 福田英司 ; 全身温冷感中立付近の室温における湿度の温冷感, 乾湿感ならびに快適感に及ぼす影響に関する実験的研究, 日本建築学会技術報告集, 17(37):931-936 (2011)
- 18) 石垣秀圭, 松原辰樹, 権田信, 堀越哲美 ; 気温と湿度の組み合わせ条件が人体の生理・心理反応の季節差に及ぼす影響に関する試行実験, 日本建築学会計画系論文集, 543:49-56 (2001)
- 19) 田辺新一, 堤仁美, 鈴木孝佳 ; オフィス空間における湿度が熱的快適性に与える影響に関する研究 (第一報), 空気調和・衛生工学会論文集, 109 : 1-9 (2006)
- 20) 田辺新一, 堤仁美, 鈴木孝佳 ; オフィス空間における湿度が熱的快適性に与える影響に関する研究 (第二報), 空気調和・衛生工学会論文集, 137 : 1-8 (2008)
- 21) Houghten, F.C and Yaglou, C.P. : Determining equal comfort lines, ASHVE Trans. Vol. 29, p. 163(1923)
- 22) Gagge, A.P., J.A.J. Stolwijk, and Y. Nishi : An effective temperature scale based on a simple model of human physiological regulatory response, ASHVE Trans. Vol. 77, p. 247(1971)

- 23) 社団法人空気調和・衛生工学会；快適な温熱環境のメカニズム－豊かな生活空間を目指して：55－66
- 24) <http://www.mhlw.go.jp/bunya/kenkou/seikatsu-eisei10/>
- 25) 小川徳雄；新汗の話－汗と暑さの生理学－，株式会社アドア出版：(1994年)
- 26) 小川徳雄；発汗活動の生理的・病的変化と自律神経，東京女子医科大学雑誌，63(1)：56-61(1993)
- 27) T.Ogawa, M.Asayama, J.Sugenoya, H.Fujimatsu, T.Miyagawa and Y.Terai；Temperature regulation in hot-humid environments, with special reference to the significance of hidromeiosis, J.therm.Biol.Vol.9, 1/2,121-125(1984)
- 28) 早川和代，磯田憲生，梁瀬度子；夏季における気温と湿度が運動時の人体に及ぼす影響に関する研究，日本建築学会計画論文報告集，405:47－55(1989)
- 29) 栃原裕，大中忠勝，山崎信也，田中正敏，吉田敬一，小川庄吉，井川庄治，伊藤由美，渡邊佳代子；長時間運動時の生理反応に及ぼす湿度の影響とその性差，デサントスポーツ科学，6：234－239(1985)
- 30) Nishi.Y. and Gagge.A.p；Humid operative temperature. A biophysical index of thermal sensation and discomfort, J.Physiol, 63, 365－368(1971)
- 31) Gwosdow.A.R, Stevens.J.C, Berglund.L.G and Stolwijk.J.A.J；Skin friction and fabric sensation in neutral and warm environments, Textile Res.J, 56：574－580
- 32) 小柴朋子，田村照子；皮膚濡れ感覚の支配要因，織消誌，36(1)：119－124
- 33) 山口昌樹，新井潤一郎；生命計測工学，コロナ社：(2004)
- 34) Hyndman,B.W. and Gregory,J.R.；Spectral analysis of sinus arrhythmia during mental loading, Ergonomics,18(3):255-270(1975)
- 35) Egelund,N.；Spectral analysis of heart rate variability as an indicator of driver fatigue, Ergonomics,25(7):663-672(1982)

- 36) 早野順一郎；心電図RR間隔変動の自己回帰スペクトル解析による自律神経機能の評価，RR間隔変動係数（CV-RR）との比較，自律神経，25：334-344（1998）
- 37) 南谷晴之，林佐千男，永田隆信；ストレス・疲労にともなう心拍変動 - ニューラルネットによる自律神経活動の評価，社団法人電子情報通信学会，115-122(1999-03)
- 38) 田中悦子，臼井永男，栗原敏；環境温度変化による心臓自律神経機能変化の経時的定量化，デサントスポーツ，18：160-166(1997)
- 39) 田村照子，岡本法子；機能的スポーツウェア設計のための基礎研究－人体加圧の生体影響－，デサントスポーツ，27：3-14(2006)
- 40) 雙田珠巳，鳴海多恵子；心拍変動スペクトル解析を用いた着衣困難性評価における着衣順序の検討，熊本大学教育学部紀要，自然科学，37-44(2009)
- 41) 入来正躬，土家清，長谷部ヤエ，田辺新一，高橋和子；心電図 R-R 間隔検査を用いた熱的快適性の評価，日生氣誌，30(2)：57-63(1993)
- 42) 西川向一，平澤由美，長町三世；温熱環境が心拍変動に与える影響，人間工学，33(2)：105-112(1997)
- 43) Brenner I.K.,Thomas S.and Shephard R.J.;Spectral analysis of heart rate variability during heat exposure and repeated exercise, Eur J Appl Physiol Occup Physiol 76:145-156 (1997)
- 44) John J.Sollers III,Tiffany A.Sanford,Rachel Nabors-Oberg,Craig A Anderson,and Julian F.Thayer.; Examining changes in HRV in response to varying ambient temperature, IEEE Eng Med Bio Mag, 21: 30-34(2002)
- 45) ShinJi Yamamoto, Mieko Iwamoto,Masaiwa Inoue and Noriaki Harada; Evaluation of the effect of heat exposure on the autonomic nervous system by heart rate variability and urinary catecholamines, J Occup Health, 49:199-204(2007)

- 46) 山本真二, 岩本美江子, 井上正岩, 原田規章; 暑熱曝露の生体影響評価に関する検討(その 1)-心拍変動, 尿中カテコールアミンを用いて-, 労働科学, 83(1): 1-6(2007)
- 47) 佐藤昭夫, 佐藤優子, 五嶋摩理; 自律機能生理学, 金芳堂: (1995)
- 48) シェルドン・コーエン, ロナルド C. ケスラー, リン. アンダーウッド・ゴードン; 監訳者, 小杉正太郎, ストレス測定法, 川島書店, 251-274: (1999)
- 49) Dimsdale JE, Moss J. ; Plasma catecholamines in stress and exercise, JAMA 243,340-342(1980)
- 50) Fibiger W, Singer G, Miller AJ. ; Relationship between catecholamines in urine and physical and mental effort, Int J Psychophysiol 1 : 325-333(1984)
- 51) 野村収作, 水野統太, 野澤昭雄, 浅野裕俊, 井出英人; 唾液中のゴルチゾールによる軽度な精神作業負荷の生理評価, バイオフィードバック研究, 36(1), 23-32(2009)
- 52) 山口昌樹, 金森貴裕, 金丸正史, 水野康文, 吉田博; 唾液アミラーゼ活性はストレス推定の指標になり得るか, 医用電子と生体工学, 39-3: 234-239(2001)
- 53) 金丸正史, 金森貴裕, 山口昌樹, 吉田博, 水野康文; 唾液アミラーゼ活性によるジェットコースターの感性評価, 電子情報通信学会, 信学技報、2003-24: 1-6 (2003)
- 54) 東朋幸, 山口昌樹, 出口満生, 若杉純一, 水野康文; 唾液アミラーゼ活性を利用した交感神経活動モニタと運転ストレスの評価, 電子情報通信学会, 信学技報, 2004-110: 35-40 (2004)
- 55) 花輪尚子, 出口満生, 若杉純一, 東朋幸, 宮崎良文, 山口昌樹; 里山における唾液アミラーゼ活性の日内変動, 日本生理人類学会誌, 10, 特別号(1)、第53回大会要旨集: 46-47 (長崎 2005)

- 56) 山口昌樹；唾液マーカーでストレスを測る，日薬理誌，129：80－84（2007）
- 57) 山口昌樹，花輪尚子，吉田博；唾液アミラーゼ式交感神経モニタの基礎的性能，生体医工学，42(2)：161－168(2007)
- 58) 本宮和英，二瓶泰雄；唾液アミラーゼ活性を指標とした河川・湖沼のストレス軽減効果把握の試み，河川技術論文集，第17巻：1－6(2001)
- 59) 岡本博照，菊川忠臣，神山麻由子，照屋浩司，和田貴子；都市部救急隊員の疲労と唾液アミラーゼ活性値，民族衛生，78(3)：61－75(2012)
- 60) 五島史行，中井貴美子；唾液アミラーゼ測定を用いた自律訓練法，カウンセリングによる急性ストレス変化の客観的評価の試み，日本心療内科学会誌，13：79－83（2009）
- 61) 広瀬倫也，加藤実；唾液を検体とした新しいストレス評価法－唾液クロモグラニン A 及び唾液アミラーゼ活性によるストレス評価，臨床検査，53(7)：807－811（2009）
- 62) 日本人間工学会衣服部会，被服と人体，日本出版サービス，p. 180(1981)
- 63) L. Fourt and M. Harris；Diffusion of Water Vapor Through Textiles, Textile Research Journal, 17：256－263(1947)
- 64) Margaret E. Whelan, Lloyd E. MacHattie, A. C. Goodings, and L. H. Turl；A Study of the Transmission of Water Vapor by Diffusion through Perforated Metal Plates, Textile Research Journal, 25：205－211(1955)
- 65) 丹羽雅子；被服材料の透湿性に関する研究，第1報，家政学研究，8(2)：113－118（1961）
- 66) 丹羽雅子；被服材料の透湿性に関する研究，第2報，家政学研究，10(1)：10－15（1963）
- 67) 丹羽雅子；被服材料の透湿性に関する研究，第4報，家政学研究，11(1. 2)：33－42（1964）

- 68) 丹羽雅子；被服材料の透湿性に関する研究，第 5 報，家政学研究，
11(1. 2)：43－49 (1964)
- 69) 丹羽雅子，今井律子，高力紀子；被服材料の透湿性に関する研究，第 6 報，
家政学研究，11(1. 2)：43－49 (1964)
- 70) 丹羽雅子；被服材料の透湿性に関する研究，第 7 報，家政学研究，12(2)：
101－109 (1965)
- 71) 丹羽雅子，高力紀子；被服材料の透湿性に関する研究，第 8 報，家政学研
究，14(2)：155－161 (1967)
- 72) 金網久明，柏原洋子，川村綾；織布の透湿性及び通気性に及ぼす糸間隙の孔
の影響，繊維学会誌，50(3)：129－135(1994)
- 73) 金網久明，神戸倫子，竹中智子，真壁文子；セルロース繊維織物の透湿機構，
繊維学会誌，52(5)：224－233(1996)
- 74) 金網久明，仙田尚美；衣料用豚革および人工皮革の透湿性及び通気性，東京
家政大学研究紀要，36(2)：137－144(1996)
- 75) 金網久明，小澤玲子；各種介護用シーツの構造と透湿性・通気性，及び被験
者実験，東京家政大学研究紀要，37(2)：139－147(1997)
- 76) 金網久明，仙田尚美；衣料用革の透湿と吸湿，繊維学会誌，56(1)：
38－46(1999)
- 77) 原田隆司、土田和義、山内生；衣服素材の水分と熱移動特性-1-衣服内気候
シミュレーション装置の開発、繊維機械学会誌、35(5):203－209 (1982a)
- 78) 藤本尊子，丹羽雅子，関信弘；被服材料の熱輸送特性に及ぼす空気層の効果，
繊維機械学会誌，42(12)：65－76(1989)
- 79) 諸岡晴美，丹羽雅子；肌着材料の熱及び水分移動特性，織消費，27(11)：
42－49(1986)

- 80) 中西正恵、丹羽雅子；衣服材料を通しての定常状態下での熱・水分移動の解析(第1報)－発汗に伴わない熱移動モデル－，日本家政学会誌，
46(4)：337－346(1995)
- 81) 中西正恵、丹羽雅子；衣服材料を通しての定常状態下での熱・水分移動の解析(第2報)－発汗に伴う熱移動モデル－，日本家政学会誌，
46(6)：567－575(1995)
- 82) 田村照子，仙波孝之，加藤康憲；模擬皮膚装置及びそれを用いた特性評価方法，特許公開 2007-171036 (2007)
- 83) 山田巧，田村照子；衣服内気候変動にみる麻布の熱・水分移動特性-スキンモデルによる解析-，繊維製品消費科学年次大会・研究発表要旨 (2006)
- 84) 田村照子，岩崎房子；サーマルマネキンによる被服の熱抵抗に関する研究(第1報)－温風循環方式サーマルマネキンの構造と特性－，
文化研究紀要，：221-229 (1985－01)
- 85) 田村照子，岩崎房子；サーマルマネキンによる被服の熱抵抗に関する研究(第2報)－被覆面積と熱抵抗との関係－，文化研究紀要:231-239
(1985－01)
- 86) 岩崎房子，丸山康子，笠原さつき，田村照子；サーマルマネキンによる被服の熱抵抗に関する研究(第3報)－被服下空気層と熱抵抗との関係－文化研究紀要：22-33 (1987－01)
- 87) Teruko Tamura, Miwa Tomizawa; Thermal Control System for a Sweating Manikin, J Home Econ.Jpn, Vol.44(8):671－677(1993)
- 88) 薩本弥生，村山周子，竹内正顕；暑熱環境下の衣服内気候への肌着の吸湿性の効果，Netsu Bussei, 21 (4)：200－206 (2007)
- 89) 潮田ひとみ；湿度感覚と繊維素材の吸水性に関する研究，デサントスポーツ科学，15：68－76(1994)

- 90) 潮田ひとみ；着衣時の湿度感覚評価方法の解明，デサントスポーツ科学，
18：36－43(1994)
- 91) 井上真理，大上安奈，近藤徳彦；素材の吸湿性・吸水性の有無がタイトフイ
ットスポーツウェア着用時における運動時の衣服内気候に及ぼす影響，デ
サントスポーツ科学，30：33－44(2009)
- 92) 石井与子、平田耕造；吸湿性の異なる肌着着用時の平均皮膚温変化に及ぼす
発汗レベルの影響、織消誌、51:346－353(2010)
- 93) 前田亜紀子、山崎和彦、飯塚幸子、吉田燦；透湿性及び非透湿性外衣の衣服
内気候に及ぼす影響、日生気象誌、36(1)：31－42(1999)
- 94) 鈴木英悟，樫村修生，高橋弘彦，南和広，中井誠一；衣服内空気循環が夏季
暑熱環境下農作業時の体温調節反応に及ぼす影響，日生気象誌，
49 (2)：83－92 (2012)

第2章

高温環境下の湿度条件が人体の 生理・心理反応に及ぼす影響

2.1 緒 言

地球温暖化やヒートアイランド現象により、都市を中心に夏の高温化が顕著化している。我が国では同様な気候変化に加え、さらに東日本大震災と東京電力原子力発電所事故以降の節電意識の高まりも相まって、都市部を中心とする熱中症が急増している。人々が快適で健康な生活を送るためには、環境温熱条件の人体影響に関する正しい情報の提供が重要である。特に日本のみならず東アジア、東南アジアのモンスーン地域の夏は、高温かつ多湿な気候条件に特徴があり、夏季における快適感や熱中症リスクを評価する場合には、温度と共に湿度、放射、気流などへの配慮が重要である。そこで、本章では、夏季を快適に過ごすためのアパレル製品、クールビズ商品開発の視点から、暑熱時の体温調節の最も重要な効果器である発汗とこれに対する湿度の影響に焦点を絞り、環境条件が人体の心理・生理反応に及ぼす影響を明らかにしようと考えた。

環境温湿度が人体に与える影響については、従来多数の研究が行われている。高温または中立温と組み合わせた湿度環境が、衣服内気候、人体の体温調節反応、心理反応に及ぼす影響について調査した結果^{1~5)}で、牛草¹⁾は、蒸暑感の限界温湿度は、26℃・95%、28℃・80%、30℃・60%を結ぶ曲線上にあり、湿度35%になると気温36℃においても蒸暑感は伴わないと報告した。渡辺ら^{3~4)}は、23・25・27℃の環境温では湿度による生理的影響はないが、高湿度は不快感、疲労感を増長することを示唆した。つまり、このような中立温度条件下の湿度が体温調節また血液循環などの生理反応に与える影響は小さいが、気温上昇と共に湿度差を感じやすく、高湿度は不快感や疲労感をもたらすことが報告されている。田村と小柴⁶⁾は、温度一定・湿度のみを30~80%に変化させた人工気候室における湿潤感の変化を調査し、25℃では湿度の変化をほとんど感知しないが28℃以上では気温上昇に伴い湿潤感の感受性が増加することを明らかにし、暑熱下では人体の湿り快適指数 = (現実の発汗量) / (体温調節のための必要発汗量) が不快感と高い相関を示すと述べた。また、「快適感」に対する湿度の影響に関する研究で、Winslowら⁷⁾は最適温度帯での湿度の影響は少ないことを、またNevinsら⁸⁾、Rohles⁹⁾は、20℃から25℃の範囲では湿度の増減が快適感に及ぼす影響は見られないことを報告した。石垣と松原¹⁰⁾ また田辺ら^{11~12)}も、温冷感、湿潤感、快適感の申告が高気温下では湿度の影響を大きく受けるが、熱的中立温での影響は小さいことを報告している。

以上総合すると、先行研究では、中立温度以下では湿度が温冷感に及ぼす影響は少ないが、これ以上の高温下では湿度の上昇と共に温冷感・湿潤感が上昇することが示されている。ただし、これらの研究では着衣がまちまちであり、今後着衣の水分透過性と温熱的快適性との関係について検討を進めようとする著者らの視点からは、着衣が関与しない状態における湿度と湿潤感に関する量的な関係の把握が必要である。そこで本研究では、着衣の影響を最小限にした状態で、環境の温度と湿度を各3段階に設定したときの、人体の心理・生理反応を検討しようと考えた。

2.2 実験方法

2.2.1 実験の環境条件

環境条件は、温度 $28.0 \pm 0.5^{\circ}\text{C}$ 、 $31.0 \pm 0.5^{\circ}\text{C}$ 、 $34.0 \pm 0.5^{\circ}\text{C}$ の3条件、相対湿度 $30.0 \pm 2.0\%$ 、 $60.0 \pm 2.0\%$ 、 $90.0 \pm 2.0\%$ の3条件を組み合わせた計9条件で、気流は全ての条件下で 0.2m/s 以下の静穏気流とした。コントロール条件は、温度 $25.0 \pm 1.0^{\circ}\text{C}$ 、湿度 $40.0 \pm 3.0\%$ である。環境条件の測定位置は、実験中の被験者の位置に合わせて、天秤高 200mm を含め、床上がり 800mm 高さとした。すべての実験は、2012年2月上旬から4月下旬にかけて、文化学園大学文化・衣環境学研究所の人工気候室にて行い、各条件の実験順序は無作為とした。

2.2.2 被験者

被験者は健康な女性6名である。すべての被験者は既往心臓病を持たないことを確認し、また月経による生体リズムに配慮して各被験者の生理周期を記録した。被験者の身体特性を、Table 2.1 に示す。なお、体表面積(BSA)はDuboisの式 $BSA = \text{Height}(\text{cm})^{0.725} \times \text{Weight}(\text{kg})^{0.425} \times 0.007148$ により求めた。着衣はブラジャー、ショーツのみとし、体温の日内リズムの変動を考慮して、すべての実験は13:00~18:00の間に行った。前夜以降は、刺激のある食べ物、アルコール類、コーヒーの摂取及び喫煙を禁じ、実験直前には摂水させて摂水量を記録した。被験者にはあらかじめ、研究の目的、内容、注意項目等を十分に説明し、書面にて実験参加への同意を得るとともに、実験内容について文化学園大学倫理委員会の承認を得た。

Table 2.1 Physical characteristics of subjects.

Subject No	Age (year)	Height (cm)	Weight (kg)	BSA (m ²)
1	23	159	44	1.4
2	29	165	64	1.7
3	24	154	47	1.5
4	24	158	46	1.4
5	23	158	53	1.5
6	25	160	55	1.6
Means	25.0	159.0	52.0	1.5
SD	2.3	3.6	7.4	0.1

2.2.3 測定項目並びに測定方法

測定項目中、直腸温 (Tre)、皮膚温 (Tsk) (頬、胸部、前腕、中指先、背部、大腿、下腿、拇指の 8 点、いずれも右側) の測定にはサーミスタ温度計を用い、データコレクタ (安立計器株式会社 AM - 7052) でデータを収集した。また、平均皮膚温の推定には日本人女性の体表面積比を用いた次の田村式¹³⁾を採用した。

$$\bar{T}_{sk} = (8.1 \text{ 頬} + 17 \text{ 胸部} + 14.2 \text{ 前腕} + 4.8 \text{ 中指先} + 17 \text{ 背部} + 19.7 \text{ 大腿} + 12.8 \text{ 下腿} + 6.4 \text{ 拇指}) / 100.$$

局所発汗量 (SR) の測定には流量補償方式換気カプセル型発汗計 (SKINOS 製 SKN-2000) を用い背部で測定した。蒸散量は、人体精密天秤 (Sartorius 製 F150s) を用いて被験者の体重減少量 (WL) から求めた。実験中の被験者の状態を妨害しないため、汗を拭き取る等の行為は禁じ、デジタルに表示される体重減少量を 5 分毎に記録した。環境変化に伴う発汗の開始については潜伏期に配慮し、実験開始後 30 分目から 60 分目までの体重減少量を求め、1 時間当たりに換算した。皮膚水分量 (Smois) は、静電容量皮膚水分計 (CK 社製 MPA580®) により、肩甲骨棘上、前腕、大腿 (いずれも左側) の 3 点を前室と実験室滞在 60 分後各 5 回測定し平均値を求めた。静電容量皮膚水分計は水分以外の物質の影響を受けにくく皮膚表面から約 15 μm (主に角層) に含まれる水分を測定できる。官能評価項目は快適感 (CS)、温冷感 (TS)、湿潤感 (HS) で、評価に用いた言語尺度は Table 2.2 に示す通りである。

Table 2.2 Subjective ratings of sensory evaluation.

Comfort(CS)	Thermal(TS)	Humid(HS)
0 Comfortable	3 Very hot	3 Very wet
1 Slightly Uncomfortable	2 Hot	2 Wet
2 Uncomfortable	1 Slightly hot	1 Slightly wet
3 Very Uncomfortable	0 Neutral	0 Neutral
	-1 Slightly cold	-1 Slightly dry
	-2 Cold	-2 Dry
	-3 Very Cold	-3 Very Dry

2.2.4 実験手順

実験の手順を Fig.2-1 に示す。被験者はコントロールとして前室にて椅座位を 30 分間維持したのち、25 分間経過した後、皮膚水分量を測定した。その後、人工気候室に入室、直後に体重測定並びに官能評価を実施した。さらに被験者は天秤上の椅子に座り、直腸温センサー、皮膚温センサーを装着、局所発汗カプセルを貼付し、これらの作業を 10 分間以内で完了させた後測定を開始した。実験時間中、直腸温、皮膚温、環境温湿度及び発汗量は 1 分間隔で連続的に測定し、体重は 5 分毎に、また官能評価は 10 分間隔で 60 分間実施した。

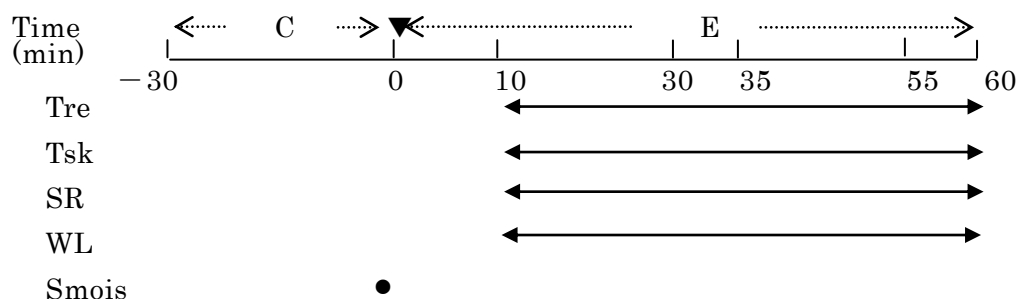


Fig. 2-1 Experimental schedule.

C : control, E : experimental room, ▼ : enter to experimental room

2.2.5 統計分析

結果の統計処理にあたって、直腸温、皮膚温、発汗量、蒸散量(体重減少量)、皮膚水分量については、各実験条件暴露60分間最後の15分間の値を平均した値を用い、官能評価値については実験終了時の評価値を分析に供した。ただし、被験者6人のうち、直腸温については被験者 No2 で測定不能であるため、5人データを統計分析に供した。結果の統計分析に関しては、皮膚水分量を除く項目については、環境温度と環境湿度を要因とする2元配置分散分析を行い、有意差が得られた結果については、Bonferroni の多重比較による有意差検定を行った。皮膚水分量については環境温度、環境湿度、身体部位を要因とする3元配置分散分析を行った。測定項目間の相関性については無相関検定を実施した。いずれも有意水準は5%、1%未満とした。

2.3 結果

2.3.1 温熱的生理反応に及ぼす環境温湿度の影響

Table 2.3~Table 2.9 には各実験条件暴露45~60分間の直腸温、平均皮膚温、発汗量、蒸散量及び各部位の皮膚水分量の生理反応に関する個人平均データ及び6人(直腸温については5人の)の平均値、標準偏差を示す。Table 2.10 にはそれぞれの二元配置の分散分析の結果を、また Fig. 2-2~Fig. 2-6 に多重比較の検定結果を示す。

Table 2.3 Mean and standard deviation of rectal temperature(°C) in five subjects.

Ta(°C)	28°C			31°C			34°C		
	RH(%)	30%	60%	90%	30%	60%	90%	30%	60%
Sub.1	36.70	37.10	37.05	37.22	37.20	37.00	37.01	37.30	37.30
Sub.2	37.00	37.28	37.13	36.90	37.31	37.45	37.29	37.00	37.23
Sub.3	37.60	37.30	37.50	37.50	37.34	37.63	37.51	37.66	37.61
Sub.4	36.96	37.00	37.03	37.15	36.90	36.73	36.98	37.10	37.25
Sub.5	36.82	36.86	36.90	36.96	36.98	36.85	37.06	37.00	37.20
Mean	37.02	37.11	37.13	37.15	37.15	37.13	37.17	37.21	37.32
SD	±0.35	±0.19	±0.22	±0.24	±0.20	±0.39	±0.22	±0.28	±0.17

Table 2.4 Mean and standard deviation of mean skin temperature(°C)
in six subjects.

Ta(°C)	28°C			31°C			34°C		
RH(%)	30%	60%	90%	30%	60%	90%	30%	60%	90%
Sub.1	33.84	33.74	34.46	34.40	35.10	34.91	35.09	35.05	35.82
Sub.2	34.23	34.08	34.40	34.68	35.07	34.81	35.08	35.60	36.14
Sub.3	33.50	33.85	33.89	35.07	35.24	35.34	35.92	35.43	35.91
Sub.4	34.49	34.15	34.60	35.17	35.42	35.40	35.80	36.42	36.18
Sub.5	32.96	33.26	33.93	35.20	34.70	35.19	35.55	36.00	35.72
Sub.6	34.09	33.89	34.31	34.84	35.28	35.26	36.06	35.40	35.98
Mean	33.85	33.83	34.27	34.89	35.14	35.15	35.58	35.65	35.96
SD	±0.55	±0.32	±0.29	±0.32	±0.25	±0.24	±0.42	±0.49	±0.18

Table 2.5 Mean and standard deviation of sweat rate(g/m² · h) in six subjects.

Ta(°C)	28°C			31°C			34°C		
RH(%)	30%	60%	90%	30%	60%	90%	30%	60%	90%
Sub.1	11.44	32.81	54.84	76.62	21.32	48.17	72.90	85.57	282.9
Sub.2	49.82	49.74	44.75	91.15	77.15	115.9	157.8	236.8	308.1
Sub.3	30.72	28.62	29.35	11.40	35.52	39.39	6.030	104.6	124.8
Sub.4	19.70	26.14	46.67	17.41	46.38	110.7	86.51	84.84	110.1
Sub.5	10.67	16.86	32.42	13.24	30.12	39.41	39.07	55.93	128.5
Sub.6	23.00	20.04	30.80	20.40	30.10	50.30	11.79	72.32	156.8
Mean	24.25	29.04	39.81	38.37	40.10	67.31	62.35	106.7	185.2
SD	±14.6	±11.7	±10.4	±35.7	±19.9	±35.9	±51.8	±60.0	±79.5

Table 2.6 Mean and standard deviation of body weight loss(g/m² · h)
in six subjects.

Ta(°C)	28°C			31°C			34°C		
RH(%)	30%	60%	90%	30%	60%	90%	30%	60%	90%
Sub.1	27.17	16.18	9.246	28.90	35.26	20.81	70.52	67.63	69.94
Sub.2	33.97	5.769	33.33	27.56	62.82	61.54	82.05	66.67	30.77
Sub.3	33.80	9.859	19.72	34.51	19.72	94.37	56.34	85.92	32.39
Sub.4	1.389	22.22	36.11	16.67	21.53	8.333	86.11	45.83	65.28
Sub.5	49.32	26.03	26.03	44.52	23.97	10.96	31.51	27.40	28.77
Sub.6	32.68	30.72	15.69	36.60	44.44	18.30	24.84	26.14	36.60
Mean	29.72	18.46	23.35	31.46	34.62	35.72	58.56	53.26	43.96
SD	±15.7	±9.61	±10.4	±9.45	±16.7	±34.6	±25.8	±24.1	±18.6

Table 2.7 Mean and standard deviation of skin moisture(a.u) in six subjects
(in back).

Ta(°C)	28°C			31°C			34°C		
RH(%)	30%	60%	90%	30%	60%	90%	30%	60%	90%
Sub.1	50.67	39.60	72.07	33.70	77.80	83.97	46.90	105.6	113.6
Sub.2	38.97	48.33	78.23	78.93	56.43	92.67	84.27	103.3	103.0
Sub.3	45.60	67.70	86.47	63.40	61.53	84.23	69.07	92.43	118.9
Sub.4	35.03	43.43	63.10	33.07	38.60	62.10	41.97	65.70	109.0
Sub.5	36.73	30.40	39.47	26.00	39.43	37.33	28.73	43.23	88.13
Sub.6	37.17	38.10	55.20	33.33	46.90	61.53	36.97	54.50	91.87
Mean	40.69	44.59	65.76	44.74	53.45	70.31	51.32	77.47	104.1
SD	±6.1	±12.8	±16.9	±21.2	±15.0	±20.6	±21.1	±26.5	±12.2

Table 2.8 Mean and standard deviation of skin moisture(a.u) in six subjects
(in forearm).

Ta(°C)	28°C			31°C			34°C		
RH(%)	30%	60%	90%	30%	60%	90%	30%	60%	90%
Sub.1	34.60	34.80	54.47	26.50	41.83	67.43	36.77	108.3	107.5
Sub.2	26.17	40.03	56.13	55.03	39.57	74.30	59.80	99.10	106.9
Sub.3	42.83	46.27	72.30	46.33	61.67	86.90	56.07	79.93	115.4
Sub.4	26.43	35.67	48.73	27.00	37.77	47.20	27.83	46.77	106.1
Sub.5	30.27	29.60	40.63	34.67	40.37	35.60	23.77	38.17	107.0
Sub.6	26.33	27.77	31.33	25.43	35.80	44.87	26.60	33.83	76.20
Mean	31.11	35.69	50.60	35.83	42.83	59.83	38.47	67.68	103.2
SD	±6.6	±6.8	±14.1	±12.2	±9.5	±19.8	±15.7	±32.4	±13.7

Table 2.9 Mean and standard deviation of skin moisture(a.u) in six subjects
(in thigh).

Ta(°C)	28°C			31°C			34°C		
RH(%)	30%	60%	90%	30%	60%	90%	30%	60%	90%
Sub.1	18.40	21.63	33.70	20.33	35.43	37.63	24.13	73.40	106.2
Sub.2	21.40	25.57	39.27	28.50	35.10	45.90	33.77	43.97	92.73
Sub.3	38.03	44.70	70.60	38.47	46.03	72.03	40.93	71.97	118.3
Sub.4	22.60	26.77	37.90	24.80	24.47	39.07	22.30	48.97	102.9
Sub.5	22.00	24.63	37.50	30.43	35.87	40.13	24.73	32.67	101.8
Sub.6	19.37	18.33	23.33	15.60	21.73	32.77	17.23	20.37	53.23
Mean	23.63	26.94	40.38	26.36	33.11	44.59	27.18	48.56	95.86
SD	±7.2	±9.2	±15.9	±8.0	±8.8	±14.1	±8.6	±21.1	±22.5

Table 2.10 The result of analysis of variance.

Factor	D.F.	F - value			
		Tr	Tsk	SR	WL
A(Ta)	2	1.3	109.4**	15.7**	9.1**
B(RH)	2	0.4	4.6*	4.8*	0.4
A×B	4	0.2	0.6	1.6	0.5
Error	45 (Tre:36)				
Total	53 (Tre:44)				

**: $p < 1\%$ *: $p < 5\%$ significant difference

Ta : ambient temperature. RH : relativity humidity. Tr : rectal temperature.
Tsk : mean skin temperature. SR : sweat rate. WL : weight loss.

直腸温については、分散分析の結果、環境温度・湿度共に有意な影響は認められなかった、しかし、Fig 2-2 のグラフを見ると、温度・湿度共に上昇するほど直腸温が上昇する傾向が示されている。直腸温は人体の深部温を示し、体温調節機構によって比較的外部環境の影響を受けにくいいため、かつ個人差も大きいため有意差は認められなかったが、本結果を見ると今回の暑熱環境範囲においては、深部体温も気温・湿度に影響を受けて変動する傾向が示された。

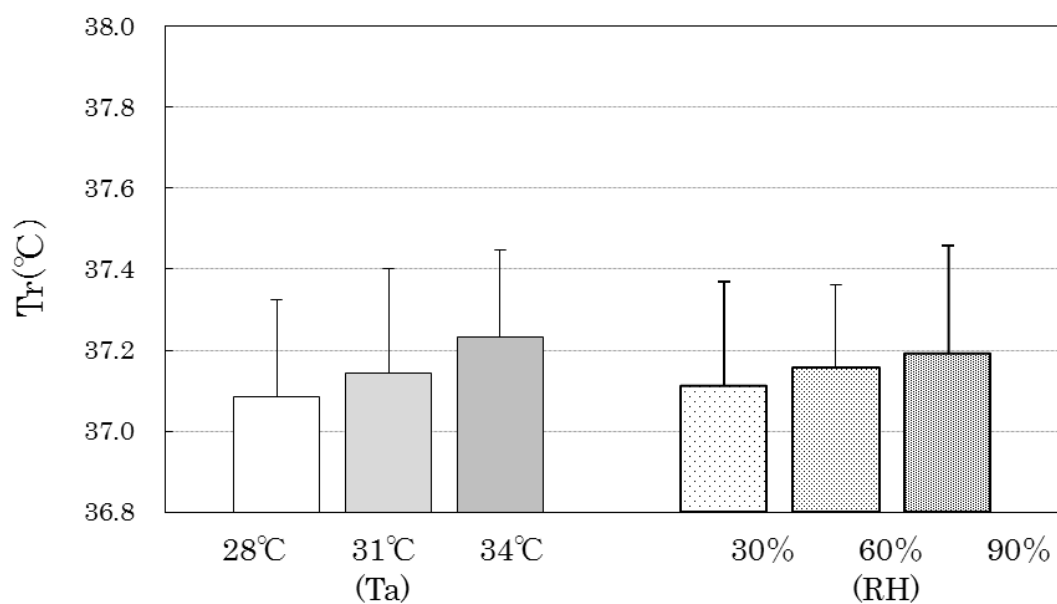


Fig. 2-2 Effects of Ta, RH on rectal temperature through multiple comparison.

Means+SD.(n=5)

これに対し、皮膚温は人体表面の温度であり、体温調節の効果器である皮膚血管の拡張収縮を反映するため、温湿度共に有意な影響を受ける結果となった。Fig. 2-3を見ると環境温度の影響は顕著にみられ、28、31、34℃のいずれの条件間でも有意差が示されている。これに対して湿度の影響は30、60%間に有意差は認められず、90%に上昇すると有意に上昇する。すなわち、人体からの蒸散は湿度60%以上になると熱放散を抑制し、結果として皮膚温の上昇を招くものと考えられる。

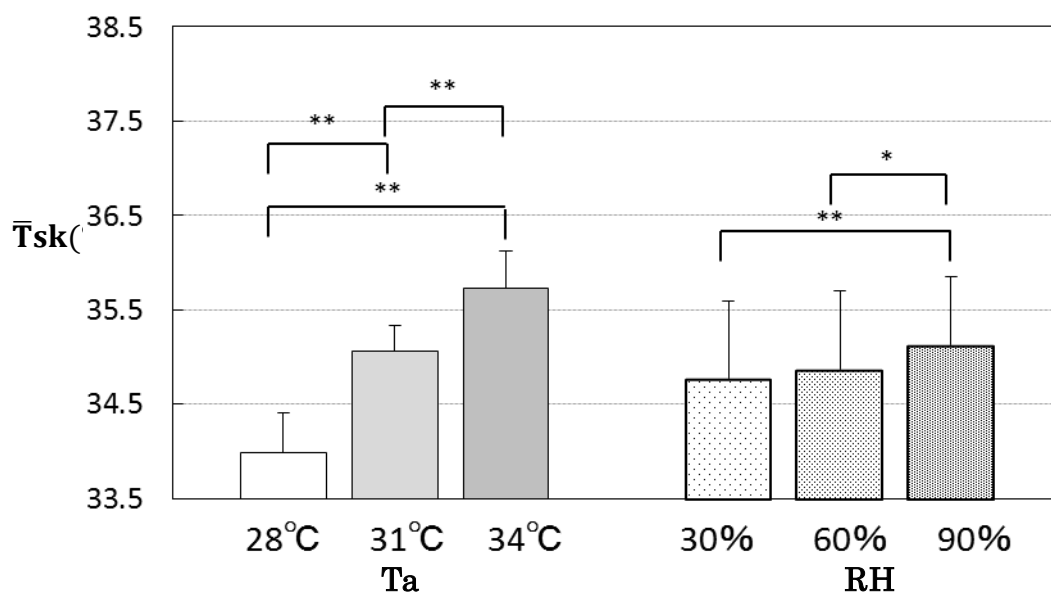


Fig. 2-3 Effects of Ta, RH on the mean skin temperature through multiple comparison. means + SD (n=6). * : p<0.05 ** : p<0.01

背部発汗量の結果を見ると、皮膚温と同様に、気温の効果は1%水準で、湿度の効果は5%水準で有意である。多重比較の結果を見ると、Fig. 2-4に示す通り、環境温度の影響は31℃以下では小さく31・34℃間で急増している。湿度の影響も60%以下では小さく60・90%間で急増することが示された。

蒸散量（体重減少量）の結果をFig. 2-5に示す。図に示すように、蒸散量は環境温度の影響を有意に受け、特に34℃における蒸散量は28、31℃との間に1%水準の有意な上昇を示した。一方、湿度の影響は認められず、むしろ湿度の上昇と共に低下する傾向が示された。蒸散量は皮膚の水蒸気圧と外気の水蒸気圧との差に比例する。前述のように外気の湿度が上昇する場合、発汗量が増加しても、皮膚と外気の水蒸気圧差はむしろ縮小した、蒸散量に及ぼす環境湿度の影響が僅少となったと考える。

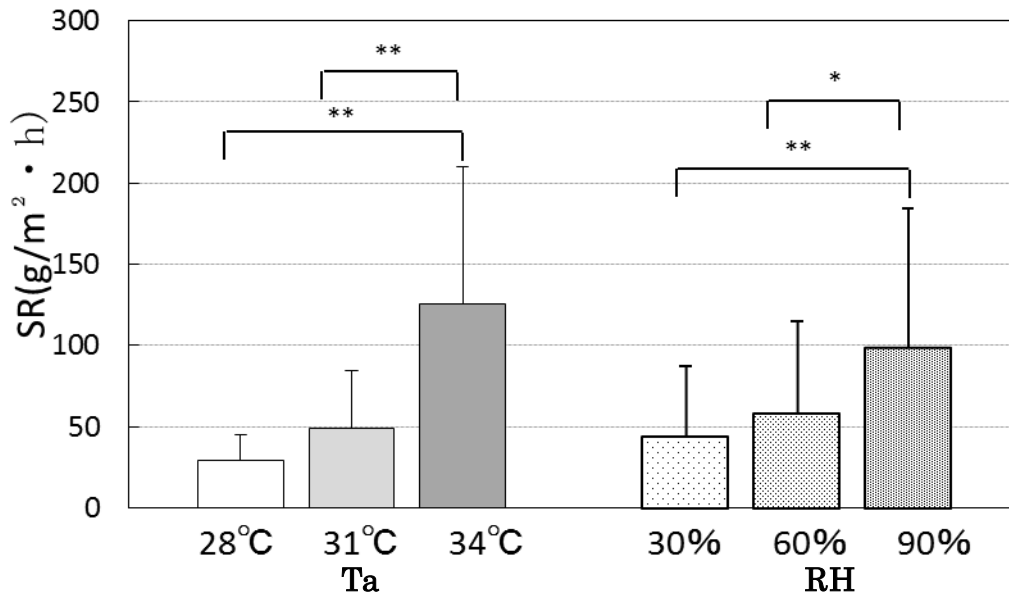


Fig. 2-4 Effects of Ta, RH on sweat rate through multiple comparison.

means + SD (n=6). * : p<0.05 ** : p<0.01

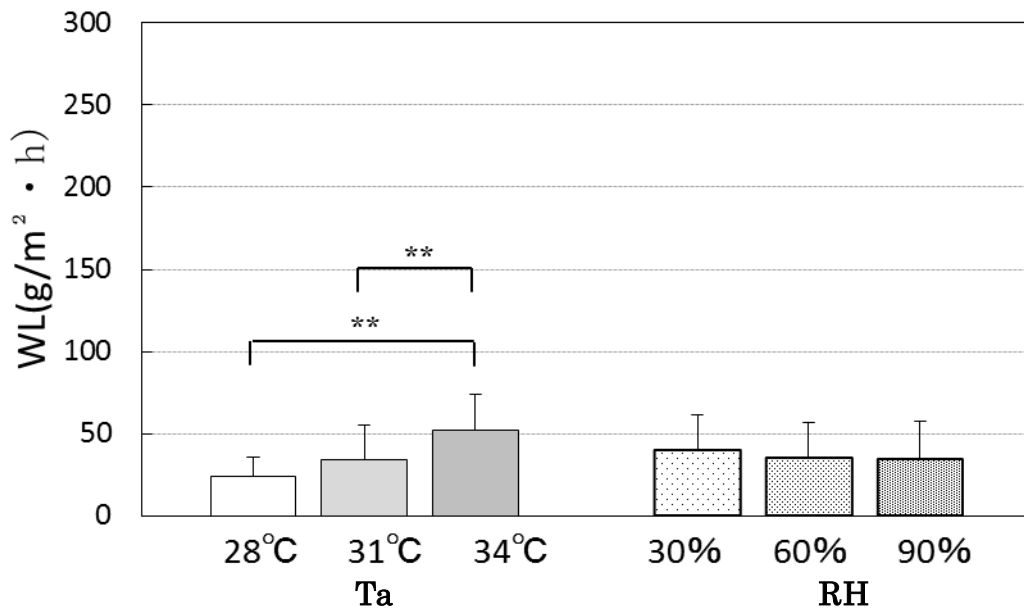


Fig. 2-5 Effects of Ta, RH on body weight loss through multiple comparison.

means + SD (n=6). * : p<0.05 ** : p<0.01

皮膚水分量に及ぼす環境温・湿度及び人体部位の影響について分散分析した結果、いずれの要因についても 1%水準の有意差が認められた。多重比較の検定結果を Fig 2-6 に示す。気温の影響は不感蒸散域と発汗域 28、31℃との間に 1%水準の有意差が示された。環境湿度の影響はさらに顕著であり、湿度が上昇するにつれていずれの湿度条件間でも 1%水準の有意な上昇が認められた。また、部位の影響も大きく、背中 > 前腕 > 大腿の順に皮膚水分率が高い結果となった。皮膚水分量は発汗量と蒸散量との差によって皮膚に残留する水分を反映すると考えられ、発汗の部位差を反映したものと考えられる。

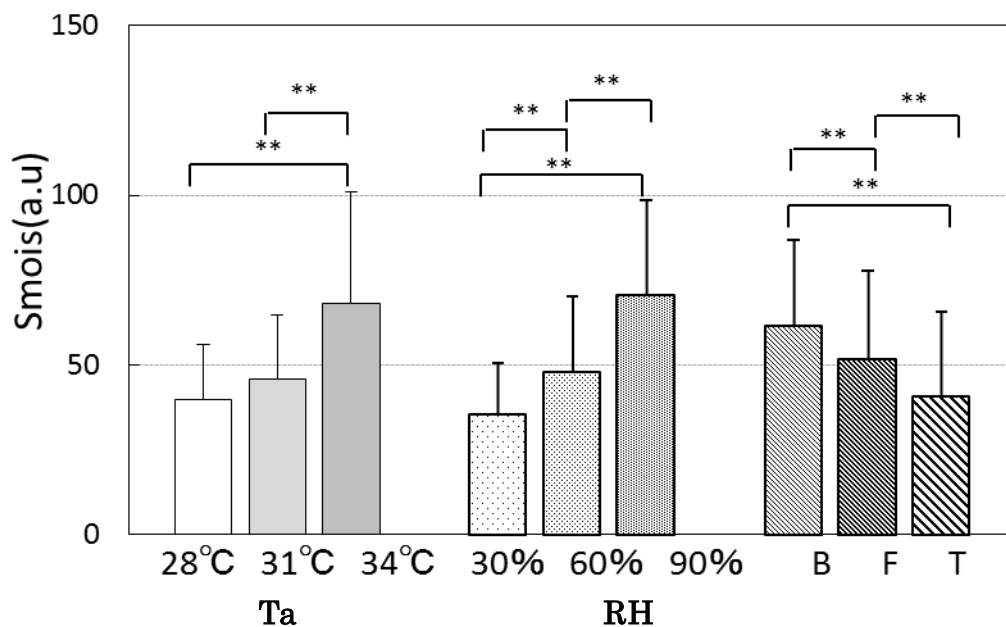


Fig.2-6 Effects of Ta, RH and measured position on the skin moisture through multiple comparison. B: back, F: forearm, T: thigh. means + SD (n=6).

* : p<0.05 ** : p<0.01

2.3.2 環境温湿度が心理反応に及ぼす影響

実験終了時の温冷感、湿潤感、快適感を対象に分散分析を行った結果を Table 2.11 に示す。表に示すように、いずれの要因についても有意であり、また、二因子間ともに有意差が認められた。多重比較の結果を Fig 2-7 に示す。3種の感覚共に、気温、湿度の上昇と共に有意に上昇するが、温冷感には特に気温要因が、湿潤感には湿度要因の影響が強く認められる。また不快感については、比較的中立温度に近い 28℃、31℃間、低湿度から中湿度の 30%、60%間では有意差がなく、高温高湿の 34℃90%になると急に有意な上昇が示されている。

Table 2.11 The result of analysis of variance in sensation evaluation.

F - value				
Factor	D.F.	Thermal(TS)	Humid(HS)	Comfort(CS)
A(Ta)	2	60.56**	15.40**	27.64**
B(RH)	2	20.74**	31.87**	9.38**
A×B	4	2.69*	2.60*	4.63**
Error	45			
Total	53			

** : p < 1% * : p < 5% significant difference.
Ta : temperature. RH : relativity humidity.

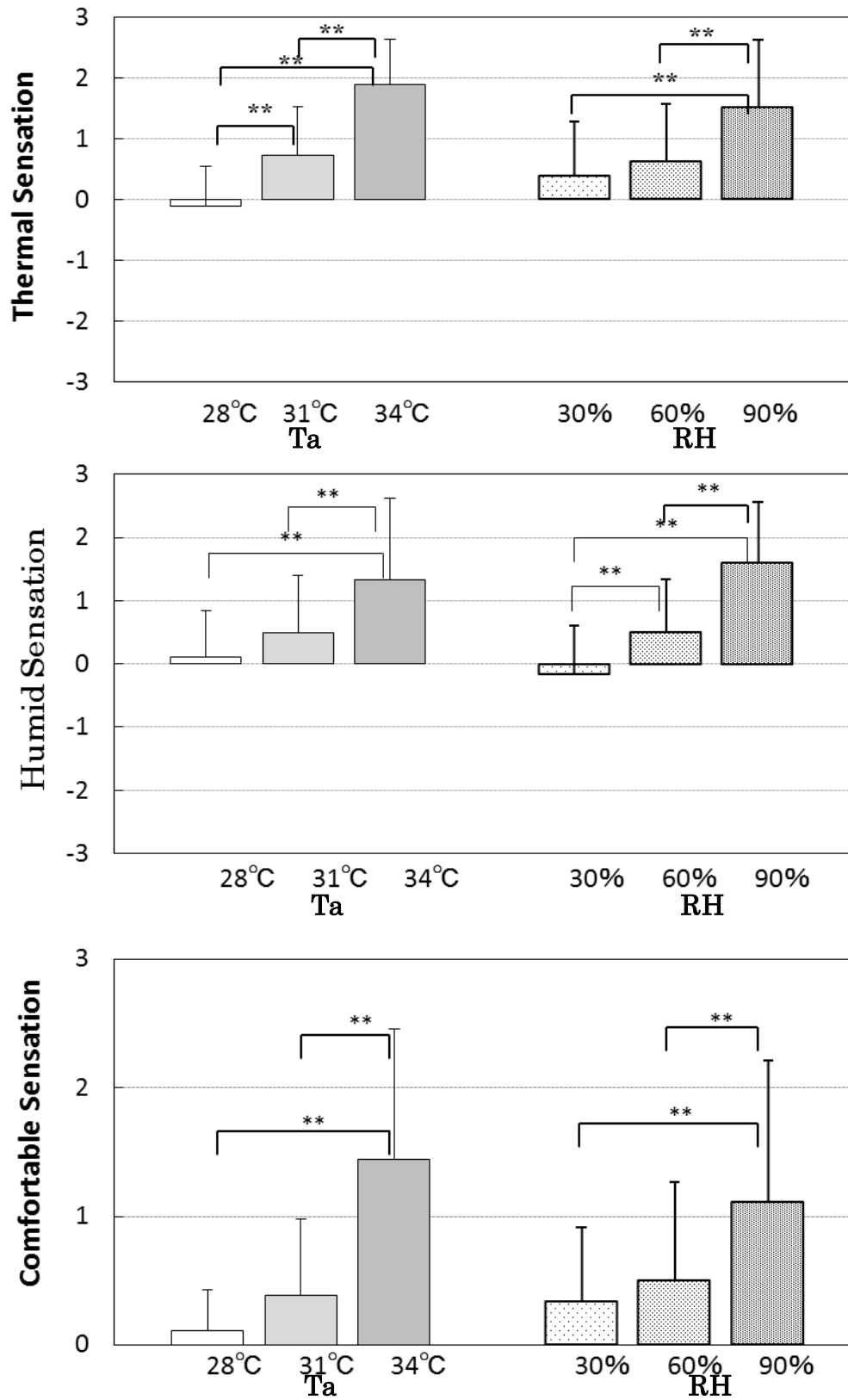


Fig.2-7 Thermal, humid and comfortable sensation in each air temperature and relative humidity (n=6). * : p<0.05 ** : p<0.01

2.4 考 察

以上、高温環境下の各種温湿度条件下における人体の生理・心理反応を調査し、温湿度条件が人体の各種生理・心理反応に及ぼす影響が有意に大なることを明らかにした。ここでは、これらの結果を基に環境の熱負荷を、人体の体温調節視点から検討するとともに、環境の快適域に関する従来の報告事例と合わせて、環境温湿度条件、着衣が人体の快・不快に及ぼす影響、そのボーダーラインについて考察したい。

2.4.1 人体の体温調節に対する環境温湿度の影響

人体が寒冷また暑熱環境に曝露される時、深部体温を保つため、熱産生反応として筋での震え熱産生と、熱放散反応として皮膚血管反応(血管の収縮と血管の拡張)及び発汗反応とがある。環境条件の変化に応じて、これらの調節反応が引き起こされる。本研究では直腸温には高温高湿による顕著な影響は認められないが、平均皮膚温及び発汗量については温湿度による影響が明らかに示された。上記のように皮膚血管及び汗腺は、体温調節のための効果器であり、人体が暑熱環境に曝露された時、皮膚血管の拡張による皮膚温の上昇を生じ、これが放熱を促進する。また、発汗は、体表面の水分蒸発を増加させて体温の上昇を防ぎ、高温環境に対する最も有効な体温調節反応である。従来、このような効果器の調節反応は、フィードバック制御系により統制されることが指摘されてきた¹³⁾。一方、近年、体温調節機構はフィードバック制御系では説明がつかないことがあり、フィードフォワード制御系が作用していることが提案されている^{14), 15)}。本研究において、環境温湿度における直腸温は変動する傾向がみられたが、有意な差が認められなかった。この直腸温の不変性と皮膚温、発汗反応の有意な変化は、後者を支持すると考えられるが、これについてはさらに両者の経時変化の微小なずれを検討することが必要である。

周知のように、人体から環境へ熱放散経路は、伝導、対流、放射及び蒸発である。このうち伝導・対流・放射による顕熱移動は皮膚温と外気温の差に依存し、蒸発による潜熱移動は皮膚水蒸気圧と外気の水蒸気圧の差に依存する。気温の上昇とともに顕熱移動が減少するため、体熱平衡維持のためには蒸汗放熱への依存を高くする。DuBois¹⁶⁾は、気温 23~27℃において、裸体被験者の全放熱量に占める蒸汗放熱の割合は低いことを、また McCormick¹⁷⁾は、椅座位の被験者において、22.8℃では全放熱量の 70%余りが対流によるものであるのに対し、29.4℃になると 80%弱が蒸発によるこ

とを指摘している。汗は暑熱環境下最も有効な体温調節反応である一方、高湿環境下にあっては蒸散しにくく、流れ落ちてしまう、つまり無効発汗が多くなりやすい^{18~20)}、汗の蒸発は周囲空気の温度と湿度に大きく影響される^{21), 22)}。本研究では、環境湿度の上昇に伴い発汗量がそれぞれ1%、5%有意に上昇したが、一方で、蒸散量は湿度の上昇と共に減少する傾向が示された。湿度の上昇により外気の水蒸気圧と皮膚の水蒸気圧との差が縮小し、発汗量が増加しても、蒸発が不十分になったことが考えられ、また、この残留した水分が皮膚をふやけさせ汗孔を縮めてしまい、発汗漸減の現象が起こったものと推察できる^{23~24)}。皮膚水分量はこの発汗量と蒸散量との差により皮膚に残留する水分を反映し、環境湿度条件間で有意な上昇が認められた。さらに、測定部位間でも有意な差異が認められた。皮膚に残留した水分量は暑熱環境下において不快をきたす一つの要因ではないかと考えられる。そこで、本研究の各測定項目間の相互影響を相関行列により検討した。Table 2.12はその相関性を示している。表に示すように、発汗量、皮膚水分量の間には、0.934($p < 0.01$)という高い相関性が示された。さらに、発汗はいずれの官能評価とも0.9以上の高い相関係数($p < 0.01$)を、皮膚水分量は不快感、湿潤感とそれぞれ0.888、0.982の高い相関を示し、暑熱湿潤ストレスの有効な指標であることが示された。本研究では、最小限の着衣条件下で、衣服を介さずに皮膚・環境の間に生じる現象が把握された。これが、衣服の水分透過特性によってどのように変化するのか、衣服が人体にどのようなストレスを負荷するのかを、考察する基盤が得られたと考える。

Table 2.12 Correlation coefficient among physiological responses and psychological sensations.

	Tre	\bar{T}_{sk}	SR	WL	Smois	TS	HS	CS
Tre	1.000							
\bar{T}_{sk}	0.693*	1.000						
SR	0.708*	0.772*	1.000					
WL	0.314	0.841**	0.547	1.000				
Smois	0.640	0.686*	0.934**	0.391	1.000			
TS	0.662	0.872**	0.920**	0.687*	0.883**	1.000		
HS	0.617	0.643	0.906**	0.329	0.982**	0.889**	1.000	
CS	0.616	0.745*	0.970**	0.580	0.888**	0.948**	0.896**	1.000

また、Berglund²⁵⁾等は、体表面における最大蒸散量 (E_{max}) に対する実際の皮膚蒸散量の比を皮膚濡れ率と定義し、 $w = E_{sk}/E_{max}$ 、これが湿潤に伴う不快感と比例関係にあることを報告した。ここでは、この指標を用いて、今回各条件で得られた生理・心理反応の結果の妥当性を検討してみた。

ただし、皮膚濡れ率(以下w)を以下に数式に基づいて算出した¹⁹⁾。

$$W = E_{sk}/E_{max}$$

E_{sk}: 皮膚からの蒸発による放熱量 kcal/m²h

E_{max}: 皮膚からの最大蒸発放熱量 kcal/m²h

E_{sk} と E_{max} は皮膚からの水分移動量に水の潜熱係数をかけることで求められる。

$$E_{sk} = \lambda \cdot e \text{ [kcal/m}^2\text{h]}$$

$$E_{max} = \lambda \cdot m \text{ [kcal/m}^2\text{h]}$$

λ : 水の蒸発潜熱 580kcal/kg

e: 電子天秤による体重減少量

ある皮膚温にて飽和状態での最大水分移動量mの算出は以下の通りである。

$$m = 1 / C_p \cdot p \cdot (D/a)^{2/3} \cdot (1.033 \cdot 10^4 / 760) \cdot$$

$$h_c / [R_v (T + 273.15)] \cdot (P_{sk}^* - P_a) \text{ [kcal/m}^2\text{h]}$$

m: 対流物質伝達率

C_p: 気体の比熱 0.24 kcal/kg°C

p: 比重量 1.16 kg/m³

D: 拡散係数 0.094 m²/h

a: 気体の温度伝達率 0.0811 m²/h

h_c: 対流熱伝達率 [kcal/m²h°C]

R_v: 気体定数 47.1kgm/kgK

T: 皮膚温[平均皮膚温] °C

P_{sk}*: 皮膚温に置ける飽和水蒸気圧 [mmHg]

P_a: 環境温 (28、31、34°C) における水蒸気圧 [mmHg]

Fig. 2-8~Fig. 2-10 には上記の式により求められた濡れ率と快適感、湿潤感及び温冷感との関係を示す。Fig. 2-8 の皮膚濡れ率は湿潤に伴う不快感と高い比例関係を示し、0.27 以上になると不快と回答されている。皮膚の濡れに伴う湿潤感への影響は、Fig. 2-9 に示す通り、不快感と同様に 0.928 の高い相関を示し、皮膚濡れ率 0.24 以上になると、被験者は湿っていると感じている。また、皮膚の濡れ率と温冷感の相関は Fig. 2-10 に示すように、皮膚濡れ率 0.22 以上では、暑いと回答されている。Berglund²⁵⁾ は快から不快へのボーダーは 0.3 とし、また山田と田村²⁶⁾ は 0.25 と報告している。不快感のボーダーには、人種、性別、暑熱順化等が関与するため、この結果はほぼ妥当なものと考えられる。

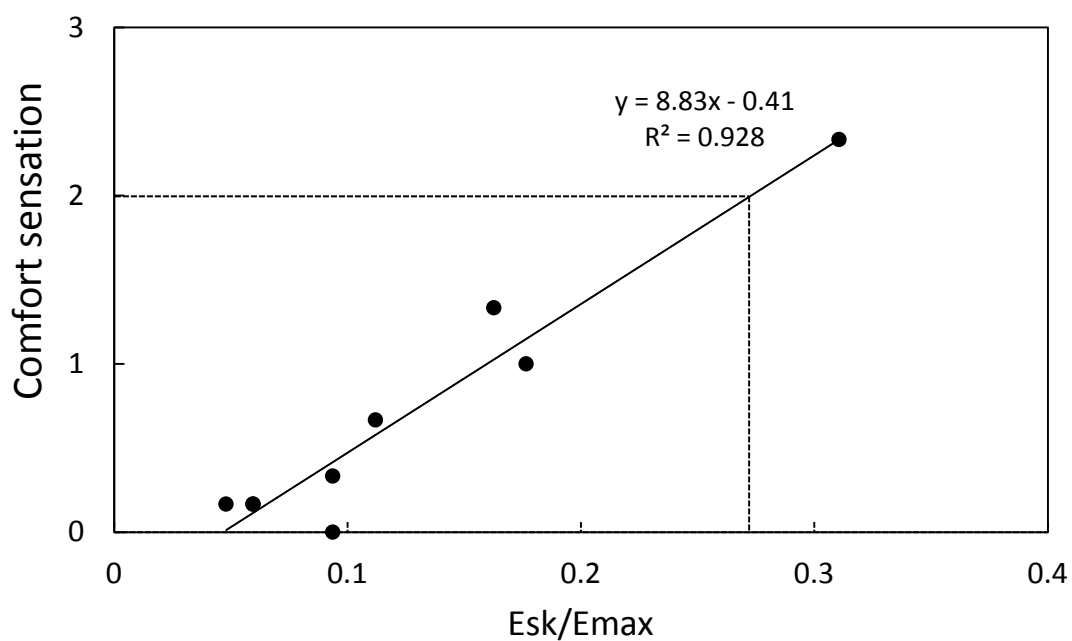


Fig.2-8 Relationship between Esk/Emax and discomfort sensation.

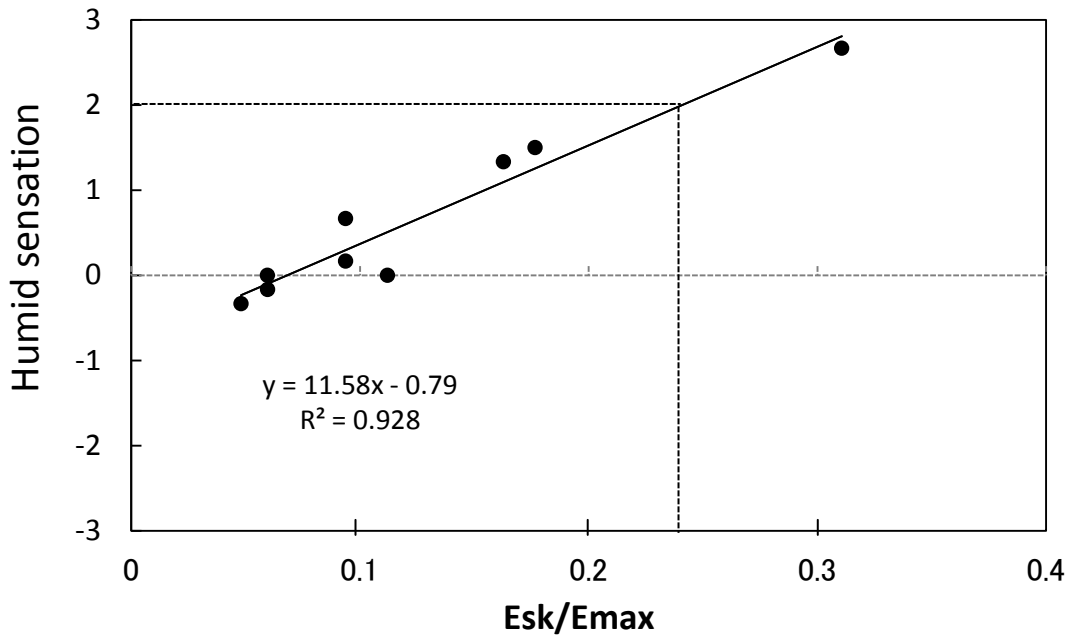


Fig.2-9 Relationship between Esk/Emax and humid sensation.

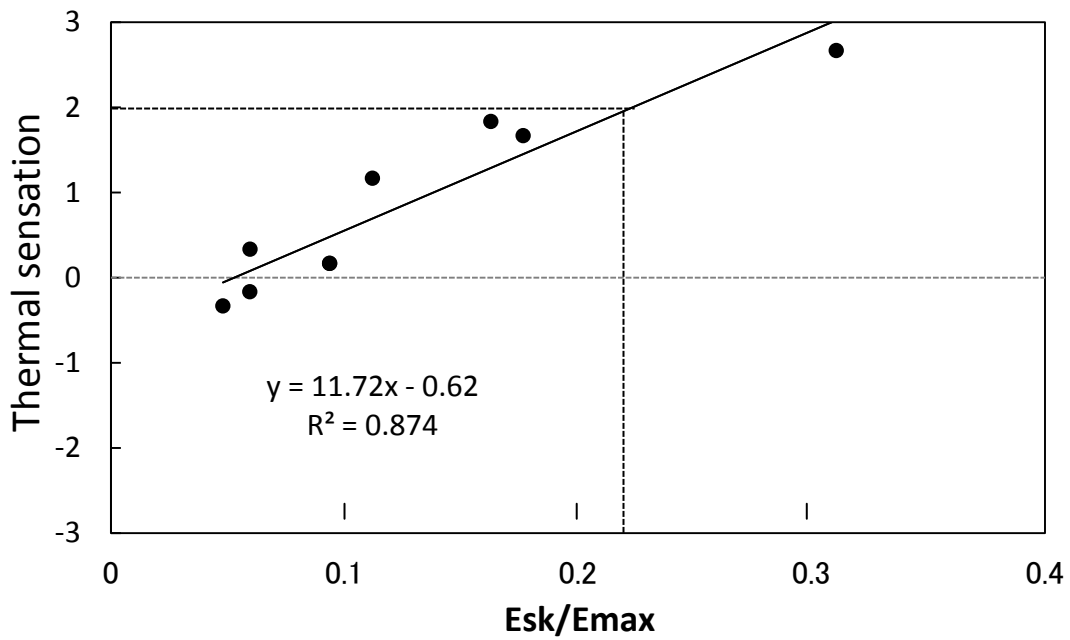


Fig.2-10 Relationship between Esk/Emax and thermal sensation.

2.4.2 環境温湿度条件と温熱的快・不快の境界について

環境温湿度条件と温熱的快・不快の境界については、従来多数の報告がなされている。しかしそれらの研究では着衣条件や活動レベル、被験者の人種、性別等が異なるため、また各研究の実施には膨大な時間と労力がかかるため、なかなか網羅的な研究には至っていないのが現状である。そこで本研究では、それぞれの実験条件下の心理反応から、快適感が得られる条件と不快感に移行する温湿度条件を調べ、それを結ぶ線を本研究の快適線、不快境界線とした。同様に、既往の安静時を対象とした研究結果(早川²⁷⁾; 牛草¹⁾; Nevins²⁸⁾; Rohles²⁹⁾; Fanger³⁰⁾) から、快適線、不快境界線を求め湿り空気線図上に図示した。結果はFig 2-11の通りである。ここで、被験者の着衣を、近裸体(○)、0.4~0.6クロ(□)、0.8~1.0クロ(●)に分け、不快境界線を実線で、快適線を点線で示した。まず不快境界線について、近裸体の早川(3)の結果と今回の結果(1)を比較すると、高湿度条件で2℃、低湿度条件で1℃程度今回の方が高い、近裸体での快適線はFanger(5)と今回の結果(2)が中湿度付近でクロスしているが、近似したゾーンにあり、不快境界線より2.5℃ほど低温側に移動している。同様に0.4クロ~着衣時の不快境界線をSET*30℃(10)から、快適線をRohles(6)、Nevins(7)から引用し、0.9クロ~着衣時の不快境界線を牛草(4)の結果から、快適線をSET*20℃~26.1℃(8)、(9)の結果から引用すると、いずれの着衣条件においても快適線が不快境界線より3~4℃低温側に移動している。また、着衣量別に関係を見ると、着衣が増加するほど快適線、不快線ともに低温側に移動している。

線の勾配については、多くは直線関係で表されているが、曲線関係で示されているものもあり、早川、今回の結果のように高湿部分で湿度の寄与が強くなる凸曲線の結果と、牛草のように高湿より中湿部分で湿度の寄与が高くなる凹曲線の結果が見られた。いずれにして、快適線・不快境界線ともに従来の報告と近似したゾーンにあり、着衣の影響についても矛盾しない結果となった。しかし、衣服の特性といっても指標はクロ値、すなわち保温力に限定されており、夏季のクールビズなどで課題視される衣服の水分透過性について言及した報告は見られない。特に暑熱下の快適性、熱中症防止対策としての衣服の関与については今後の課題であることが示唆された。

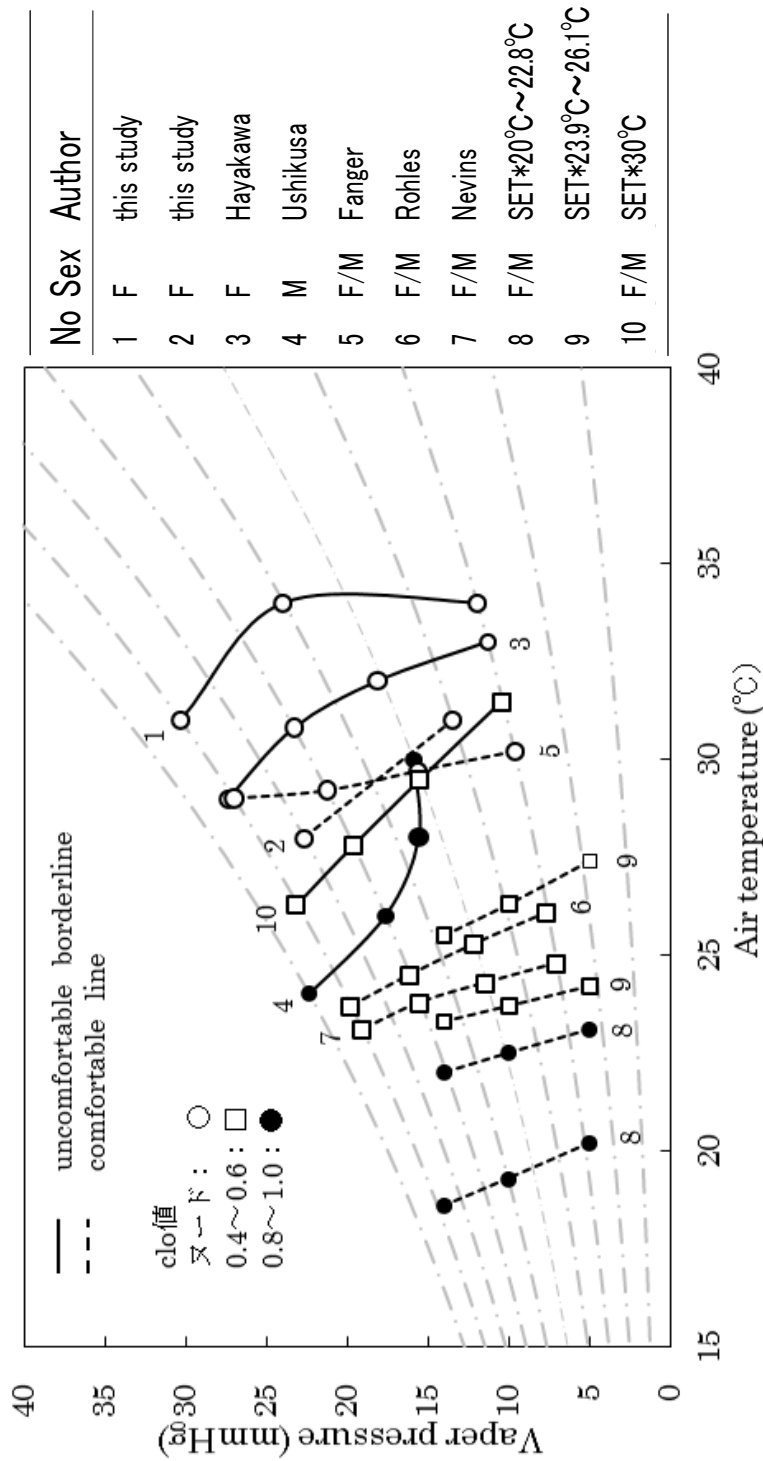


Fig 2-11 Comparison between comfortable lines and uncomfortable borderline reported by the authors and other researchers.

2.5 要 約

暑熱環境下の温度と湿度が人体に及ぼす影響を明らかにするため、気温 28℃、31℃、34℃、湿度 30%、60%、90%を組み合わせた計 9 条件の人工気候室内に、ブラジャーとショーツのみ着用の成人女子 6 名を 60 分間滞在させ、その生理反応 5 項目・心理反応 3 項目を測定した。結果について温・湿度を要因とする分散分析並びに多重比較を行った。主たる結果は以下の通りである。

- 1) 皮膚温、発汗量、皮膚水分量、温冷感、湿潤感、快適感はいずれも温湿度上昇とともに有意に上昇した。
- 2) 体重減少量については温度の影響のみに有意差が認められた。
- 3) 各生理反応・心理反応の相関性を考察したところ、発汗量と皮膚水分量との間に高い相関関係を持ち、発汗量と皮膚水分量はいずれも温冷感、湿潤感及び快適感と高い相関係数を得られ、皮膚に残留した水分が人体に不快を招いた要因の一つであることが示唆された。
- 4) 皮膚濡れ率を算出したところ、不快感と高い相関を示し、0.27 以上では不快となることが示され、従来の結果とよく一致した。
- 5) 湿り空気線図上に、本研究結果および従来報告されている研究結果から導き出された快適線と不快境界線を記入し、比較するとともに、着衣による影響を検討した。いずれの着衣条件でも、不快境界線より快適線は 2.5～4℃低温側に移動し、快適線・不快境界線ともに着衣のクロ値が増加するほど低温側に移動した。

引用・参考文献

- 1) 牛草貞雄;環境湿度の生体負加に関する実験的研究, 日衛誌, 21(2):6-28(1966)
- 2) Nishi, Y. and Gagge, A. P.; Humid operative temperature. A biophysical index of thermal sensation and discomfort, J. Physiol., 63: 365-368(1971)
- 3) 渡辺明彦, 肝付邦憲, 井上枝一郎, 木村菊二, 米元純三, 三浦豊彦, 松浦分房次郎, 尾豊永; 中等度環境気温における湿度の人体に及ぼす影響(第1報), 労働科学, 52(11): 635-650(1976)
- 4) 渡辺明彦, 肝付邦憲, 井上枝一郎, 山本高司, 三浦豊彦, 松浦分房次郎, 尾豊永; 中等度環境気温における湿度の人体に及ぼす影響(第2報), 労働科学, 52(11): 635-650(1977)
- 5) Shapiro, Y., Pandolf, K. B., Avellini, B. A., Pimental, N. A. and Goldman, R. F.; Physiological responses of man and women to humid and dry heat, J. Appl. Physiol., 49(1): 1-8(1980)
- 6) 田村照子, 小柴朋子; 人体の湿り感覚(第一報) — 全身の湿り感覚感受性 —, 織消誌, 36(1): 125-131(1995)
- 7) Winslow, C. E. A., Herrington, L. P. and Gagge, A. P.; Relation between atmospheric conditions, physiological reactions and sensations of pleasantness, Amer. J. Hyg., 26(1): 103-115(1937)
- 8) Nevins, R. G. and Hardy, J. D.; Humidity and Moisture, Vol. II, 3-11, Humidity effects on the comfort and wellbeing of people(1965)
- 9) Rohles, F. H. Jr.; Humidity, human factors and the energy shortage, ASHRAE Journal., April: 38-40(1975)
- 10) 石垣秀圭, 松原辰樹, 権田信, 堀越哲美; 気温と湿度の組み合わせ条件が人体の生理・心理反応の季節差に及ぼす影響に関する試行実験, 日本建築学会計画系論文集, 543: 49-56(2001)
- 11) 田辺新一, 堤仁美, 鈴木孝佳; オフィス空間における湿度が熱的快適性に与える影響に関する研究(第一報), 空気調和・衛生工学会論文集, 109: 1-9(2006)

- 12) 田辺新一, 堤仁美, 鈴木孝佳; オフィス空間における湿度が熱的快適性に与える影響に関する研究(第二報), 空気調和・衛生工学会論文集, 137:1-8 (2008)
- 13) 入来正躬; 体温生理学テキスト, 分光堂, (2003)
- 14) 岩瀬敏, 間野忠明, 新美由紀, 神谷厚憲; 皮膚交感神経活動の温度依存性変化が体温調節に及ぼす影響, KAKEN, 研究課題番号:10670061:(1998-2000)
- 15) Nakamura, K. and Morrison, S. F.; A thermosensory pathway that controls body temperature, *Nat. Neurosci.*, 11(1):62-71 (2008)
- 16) DuBois, E. F. (1948); *Fever and the regulation of temperature body*, p. 13, Charles C. Thomas. -. Springfield
- 17) McCormick, E. J.; *Human factors engineering*, Third edition, New York McGraw-Hill (1970)
- 18) Ogawa, T., Asayama, M., Sugeno, J., Fujimatu, H., Miyagawa, T. and Terai, Y.; Temperature regulation in hot-humid environments, with special reference to the significance of hidromeiosis, *J. therm. Biol.*, 9(1/2): 121-125 (1984)
- 19) 栃原裕, 大中忠勝, 山崎信也, 田中正敏, 吉田敬一, 小川庄吉, 井川正治, 伊藤由美, 渡辺佳代子; 長時間運動時の生理反応及ぼす湿度の影響とその性差, *デサントスポーツ科学*, 6: 234-239 (1985)
- 20) 丹羽健市, 中山昭雄, 大貫義人; 運動時の体温上昇と環境湿度, *山形大学紀要(教育科学)*, 9(2): 265-273 (1987)
- 21) 中山昭雄編; *温熱生理学*, 理工学社, 東京, (1981)
- 22) 窪田英樹, 山越健弘, 鎌田紀彦, 朝比奈亮, 浜田博之, 若松伸司; 暑熱環境における無効発汗を考慮した人体平均皮膚温温度の予測, *建築学会環境系論文集*, 575: 127-136 (2004)
- 23) Ogawa, T., Asayama, M., Sugeno, J., Fujimatu, H., Miyagawa, T. and Terai, Y.; Temperature Regulation in Hot-Humid Environments, with Special Reference to the Significance of Hidromeiosis, *J. therm. Biol.* Vol. 9, No. 1/2, 121-125, 1984
- 24) 小川徳雄; *汗の常識・非常識*, 講談社ブルーバックス, 1998

- 25) Berglund, L. G., Toohori, Cunningham, D. J., Gagge, A. P. ; Vapor resistance of Clothing, Local Skin wetness, and Discomfort. ASHRAE, TRANSACTIONS, 91(2) : 3-12
- 26) 山田巧, 田村照子 ; 暑熱環境における全身体重減少量と局所発汗量・局所蒸散量との関係, 繊維消誌, 53 : 126-133 (2011)
- 27) 早川和代, 磯田憲生, 梁瀬度子 ; 夏季における気温と湿度が運動時の人体に及ぼす影響に関する研究, 日本建築学会計画論文報告集, 405:47-55 (1989)
- 28) Nevins, R. G, Rohles, F. H., Springer, W. ; Temperature-Humidity Chart for Thermal Comfort of Seated Persons, ASHRAE. Trans., 72 : 283-291 (1966)
- 29) Rohles, F. H., Nevins, R. G. ; The Nature of Thermal Comfort for Sedentary Man, ASHRAE. Trans., 77 : 239-246 (1971)
- 30) Fanger, P. O. ; THERMAL COMFORT, Aarhus Stiftsbogtrykkerie, A/S (1970)

第3章

高温環境下の湿度条件が人体
の自律神経活動・唾液アミラーゼ
活性に及ぼす影響

3.1 緒 言

人体を取り巻く気候は、気温、放射、湿度、風速の4要素によって形成される。人間はそれらの気候要素に影響され、「暑い」、「寒い」等の温熱感覚を感じる。特に、近年、地球温暖化が進行する中で、ヒートアイランドの影響も含めて、熱中症の発生が問題視されている。人間がより快適に安全に暮らすためには、温熱環境が人間に及ぼす影響を把握しておく必要がある。従来、温熱環境に関する研究は、気温を主として研究されているが、日本や東南アジアのようなモンスーン気候帯では、湿度にも注目が寄せられてきた。人体は常に環境からの熱負荷に対して、血管反応及び発汗などで体温のホメオスタシスを保っている。第2章で論じたように、環境湿度が高い場合、発汗の蒸散が抑制され、無効発汗の増加に伴う深部体温の上昇を生じ、人体の熱平衡が崩れて熱ストレスに陥る。

熱ストレスの評価については、人体と環境の熱交換、また発汗量、蒸発量による評価が殆どであるが、近年、自律神経やホルモンの非侵襲的測定方法が提案され、人体に対する刺激やそれによって生ずる生理・心理反応に関する評価に加えられている。その中でも、心拍変動は、自律神経（交感神経、副交感神経）が心臓血管系に及ぼす調節作用、特にストレス状態の指標として用いられている¹⁻⁴⁾。

また、内分泌系のストレス指標として用いられるノルエピネフリンなどのホルモンも非侵襲的に採取できる唾液や尿による簡便な測定法が用いられ始めているが、この方法では、ストレス負荷に対する濃度変化が20~30分遅れるという課題があった⁵⁾。交感神経作用の結果として唾液に含まれる α -アミラーゼ活性や唾液流速の増大が報告されて以来、 α -アミラーゼ活性はストレス反応における血漿ノルエピネフリン濃度の有用な指標と考えられるようになった。これに応じて唾液アミラーゼ活性の測定を開発することにより、リアルタイムで人体のストレスを観察することが実現された^{6~7)}。

上記のような自律神経やホルモンによるストレスに関する研究が散見されるようになったが、その多くは精神性ストレスを対象とするものであり、これらの方法を用いて、環境の温熱刺激によるストレスを対象とした研究は殆ど報告されていない。

そこで、本章では、第2章で体温調節や快適閾値による湿度の影響を検討した上で、自律神経系及び唾液アミラーゼホルモンの視点から、環境温湿度特に湿度

がストレッサーとして人体に与える影響を定量的に測定し、環境温湿度は人体にどのような熱ストレスを与えるか、これらの非侵襲評価方法は温熱環境の評価に適応可能であるか否かを検討することを目的とした。

3.2 実験方法

3.2.1 測定条件

実験条件は第2章と同様である。被験者は既往心臓病のない健康な若年成人女性6名、その身体特性は第2章 Table2-1 に示した。ブラジャーとショーツのみの裸体に近い状態で、気温 28、31、34℃、湿度 30、60、90%rh それぞれの温湿度条件の組み合わせ、計9条件の環境条件下において座位安静状態で曝露実験を行った。この安静とは、「背凭れの椅子を用い楽な姿勢で四肢などを動かさず、静かにしている状態」とした。また、日内リズムを考慮するため、すべての実験は 13:00~18:00 の間に行い、前日及び実験日での食事内容は規制しないが、心臓の負担にならないため、刺激のある食べ物、アルコール類、コーヒー及び喫煙を禁じた。

3.2.2 測定項目並びに測定方法

測定項目は心拍数、心拍変動（心電図）、及び唾液アミラーゼ活性の3項目である。

心拍変動は胸骨柄に(-)、剣状突起に(+)、鎖骨にアースという電極配置方法である胸部 NASA 誘導法 (Fig. 3-1) により5分間ずつ3回心電図(ECG)を測定した。心電図の収録には、マルチテレメータを介して多用途生体信号収録装置 (VitalRecorder2 キッセイコムテック株式会社) にて測定した。心電図から得られた R-R 間隔を多用途生体情報解析プログラム BIMUTAS2 によりパワースペクトル解析し、交感神経系活動レベルの指標といわれる LF/HF (LF: Low-frequency 低周波数成分 0.04~0.15Hz, HF: High-frequency 高周波数成分 0.15~0.46Hz)、副交感神経系活動レベルの指標といわれる HF を求めた^{8~10)}。一般に高周波数成分 (HF: High-frequency 0.15~0.40Hz) のパワーは心臓迷走神経活動の定量指標になり、交感神経機能に関与しないことが自律神経遮断剤や刺激剤の投与した時の HF の変換によって確認されている。一方、低周波数成分 (LF: Low-frequency: 0.04~0.15Hz) の発生機序については必ずしも明確化されていないが、現時点では LF/HF が血管運動性交感神経活動及び心臓交感神経活動の指標と幅広く評価されている。また、高周波数成分 (HF) は呼吸数などに影響されるため、本実験では、呼吸数 15 回/分 (0.25Hz) の調節呼吸を行って心拍変動のスペクトル解析を評価した。呼吸統制^{11~13)} については、慣れていない被験者がいるため、予備実験において被験者への精神的な影響を与えないように十分練習させた。

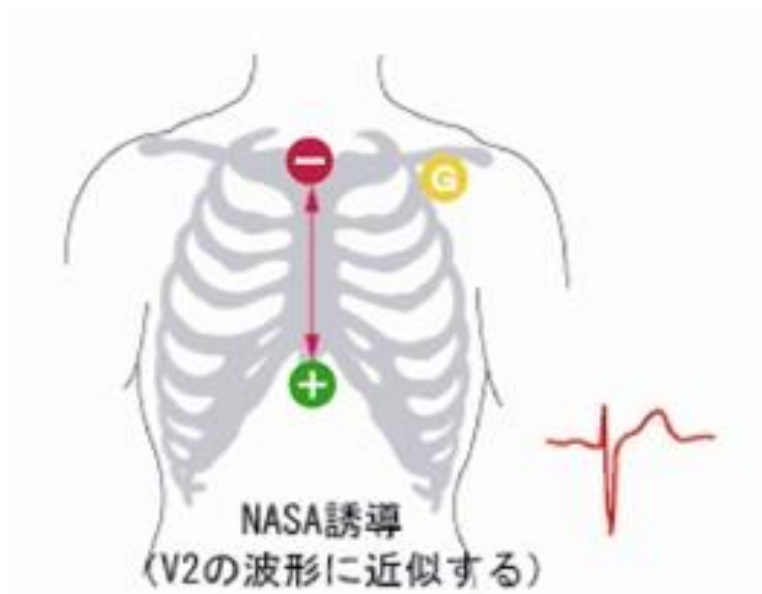


Fig.3-1 Position of the electrode on NASA Induction method.

G: earth electrode

心拍数は全自動血圧計（AND 株式会社 製 TM2655VP Fig. 3-2）により前室安静時と実験室滞在 60 分後の 2 回を測定した。

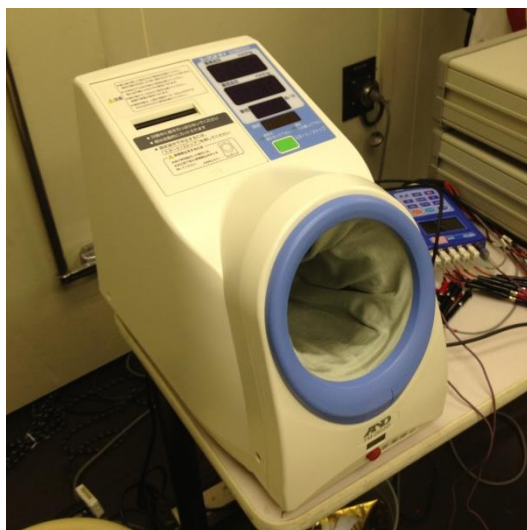


Fig.3-2 Blood pressure monitor.

唾液アミラーゼ活性は携帯式唾液アミラーゼモニター（NIPRO 製 Fig. 3-3）を用いて測定した。図に示すように、チップを舌下に差し込み、30 秒間唾液と反応させた後に、唾液アミラーゼモニターで測定する。唾液アミラーゼ活性は、自律神経の直接刺激により短時間内に反応するため、ストレスの指標として広く使われている。



Fig.3-3 Salivary amylase of monitor and measurement method .

3.2.3 実験手順

Fig. 3-4 に実験手順を示す。被験者は実験前に $25 \pm 1^\circ\text{C}$ 、 $40 \pm 5\% \text{rh}$ の環境下で 30 分間安静を保ち、安静 20 分を経過してから、上記の測定項目をそれぞれ測定した後、設定された人工気候実験室に入室。コントロール 10 分間の後、20 分間安静を保ち、5 分間心拍変動、唾液アミラーゼ活性を 2 回目に測定し、再び 20 分間安静を実施した。二次安静の後に、3 回目の心拍変動と唾液アミラーゼを測定してから、心拍数を測定し、実験を終了した。

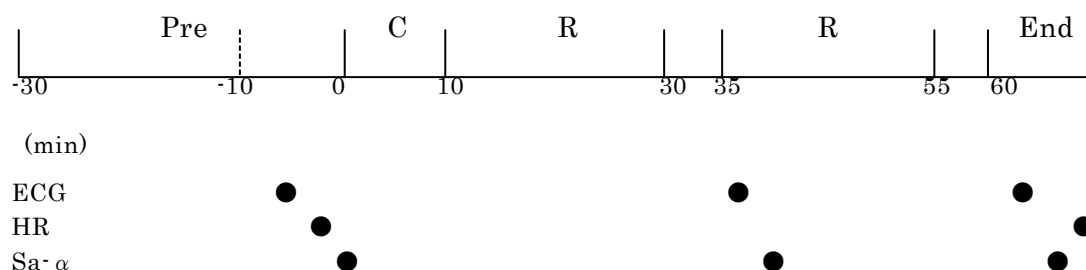


Fig.3-4 Experimental protocol.
C:control; R:resting.

ECG: electrocardiogram, HR: heart rate, Sa- α : salivary amylase.

3.2.4 統計分析

実験から求めたデータの統計分析については、心拍変動から求めた LF/HF、HF 及び唾液アミラーゼ活性については、絶対値の個人差が大きいため、実験室に滞在 30 分と 55 分の値の前室値に対する相対値を用い、心拍数は実験終了時の絶対値及び実験終了時の値と前室との差を共に分析に供した。結果の統計分析に関しては、環境温度、環境湿度は因子 A と B として、二元配置分散分析を行い、有意差が認められた場合は、Bonferroni の多重比較による水準間の有意差検定を行った。有意水準は 1%、5%以下とした。

3.3 結果

3.3.1 環境温湿度が自律神経活動に及ぼす影響

Table 3.1、3.2 には実験室に滞在 30 分と 55 分時の被験者ごとの HF と LF/HF の絶対値を示す。また、Fig. 3-5、3-6 は 30 分時、Fig. 3-7、3-8 は 55 分時の 6 名の平均値をプロットしたものである。30 分間の曝露における環境温湿度の影響は、Fig. 3-5、3-7 に示すように、副交感神経 HF の影響については、28℃時に湿度の上昇による HF の減少が見られたが、31℃、34℃ではそれほど明確な影響として観察されなかった。交感神経 LF/HF については、Fig. 3-6、3-8 に示すように、環境温湿度による影響が明らかに認められた。各温度条件では、湿度の上昇による LF/HF が明瞭に上昇する傾向を示し、特に 34℃の場合は、湿度間の差が大きかった。また、温度の上昇に伴う LF/HF の上昇も観察された。30 分と比べると 55 分の HF は、ほぼ同じ傾向を示したが、LF/HF では、30 分時より、湿度による影響が明らかではなかった。Table 3.1、3.2 に示した個人ごとの結果を観察したところ、HF あるいは LF/HF の数値レベルが、きわめて大きな個人差を示した。したがって、この個人差を消去するため、二元配置分散分析については、各個人の初期値（前室値）に対する相対値、あるいは前室を 1 として、曝露時の測定値と前室の比を用いて分散分析を行った。Fig. 3-9、3-10 に多重比較の結果を示す。HF については環境温湿度ともに有意差が認められなかったが、温湿度の上昇に伴う HF の減少傾向が見られた。LF/HF について温度また湿度の上昇に伴う上昇傾向が明らかに示され、28℃と 34℃の間では 5%の有意差が認められた。

Table 3.1 Mean and standard deviation of HF in six subjects.

30mins		28°C			31°C			34°C		
Sub	30%	60%	90%	30%	60%	90%	30%	60%	90%	
1	3853	4769	4453	5066	4845	3566	4796	3377	2815	
2	7324	4367	5381	7897	3372	4383	3963	11093	7347	
3	7868	13590	11239	13102	3377	6938	4732	3180	4604	
4	10790	9344	3940	5144	3377	4316	11603	2177	5108	
5	55124	19694	4453	9465	54932	12883	27382	13892	17116	
6	7868	30990	13809	9662	13433	7639	4895	9307	13361	
Mean	15471	13792	7213	8389	13889	6621	9637	10255	8392	
SD	19551	10204	4219	3060	20484	3464	9350	9186	5624	

55mins		28°C			31°C			34°C		
Sub	30%	60%	90%	30%	60%	90%	30%	60%	90%	
1	2632	2043	4714	3382	3030	3045	6511	2348	2586	
2	9113	7180	4766	7878	4261	4242	3640	10345	3523	
3	7869	8336	7121	7762	3677	5328	4003	2279	9513	
4	10575	6653	2057	5021	3739	3353	10042	2289	3398	
5	40958	8336	4714	9758	22236	8704	12571	8832	12864	
6	20897	21803	18921	9751	18848	4050	3565	7594	5491	
Mean	15337	9059	7049	7259	9299	4787	6722	5615	6229	
SD	13891	6663	6033	2574	8784	2077	3798	3728	4097	

Table 3.2 Mean and standard deviation of LF/HF in six subjects.

30mins		28°C			31°C			34°C		
Sub	30%	60%	90%	30%	60%	90%	30%	60%	90%	
1	1.84	4.18	2.15	2.40	2.13	3.42	1.36	0.38	8.63	
2	0.66	1.69	1.88	1.20	2.09	1.07	1.36	0.38	1.71	
3	1.25	1.26	1.04	1.50	2.69	2.06	3.36	3.01	4.40	
4	2.23	1.16	1.49	3.21	2.69	4.55	1.59	3.89	1.42	
5	0.34	0.71	2.15	0.82	0.78	1.37	0.96	0.91	0.83	
6	1.25	1.11	1.09	1.90	1.14	1.78	1.90	2.91	2.22	
Mean	1.26	1.69	1.63	1.84	1.92	2.34	1.76	1.91	3.20	
SD	0.70	1.26	0.50	0.86	0.80	1.34	0.84	1.54	2.93	

55mins		28°C			31°C			34°C		
Sub	30%	60%	90%	30%	60%	90%	30%	60%	90%	
1	3.81	7.36	1.77	3.97	3.02	4.24	3.26	2.85	4.34	
2	1.32	3.29	2.18	2.53	1.83	1.47	1.57	1.29	2.66	
3	1.32	1.94	1.57	1.53	2.62	1.68	3.85	2.45	2.35	
4	3.33	2.56	2.41	1.61	2.65	2.78	4.49	3.15	1.85	
5	0.58	1.94	1.77	1.76	1.21	0.83	1.09	1.63	1.11	
6	0.65	0.85	0.80	1.24	1.74	1.44	2.46	0.92	0.93	
Mean	1.84	2.99	1.75	2.11	2.18	2.07	2.79	2.05	2.21	
SD	1.39	2.29	0.56	1.01	0.69	1.24	1.32	0.90	1.24	

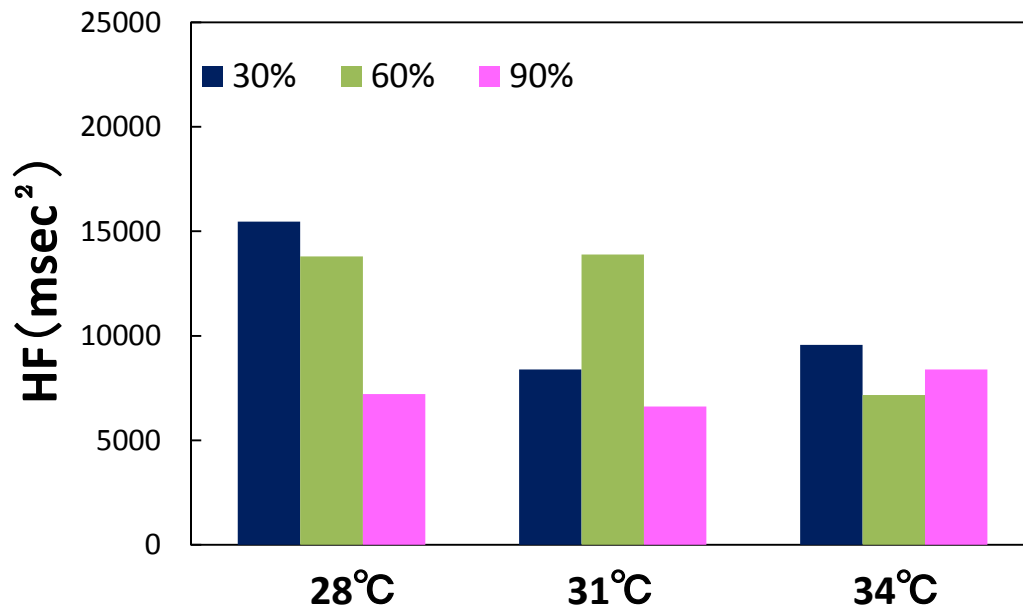


Fig. 3-5 Mean of HF at 30 mins (n=6).

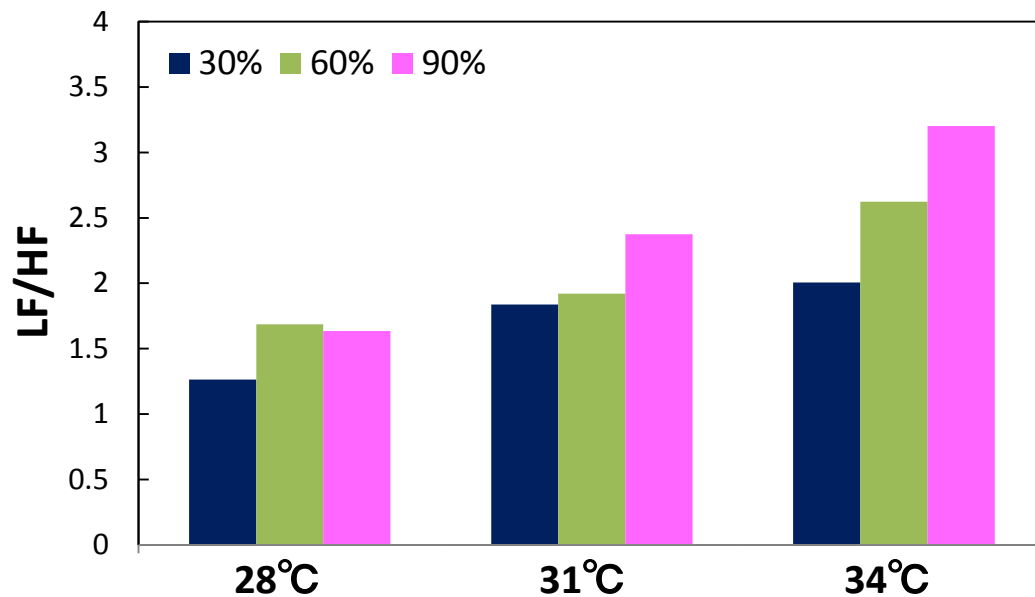


Fig. 3-6 Mean of LF/HF at 30 mins (n=6).

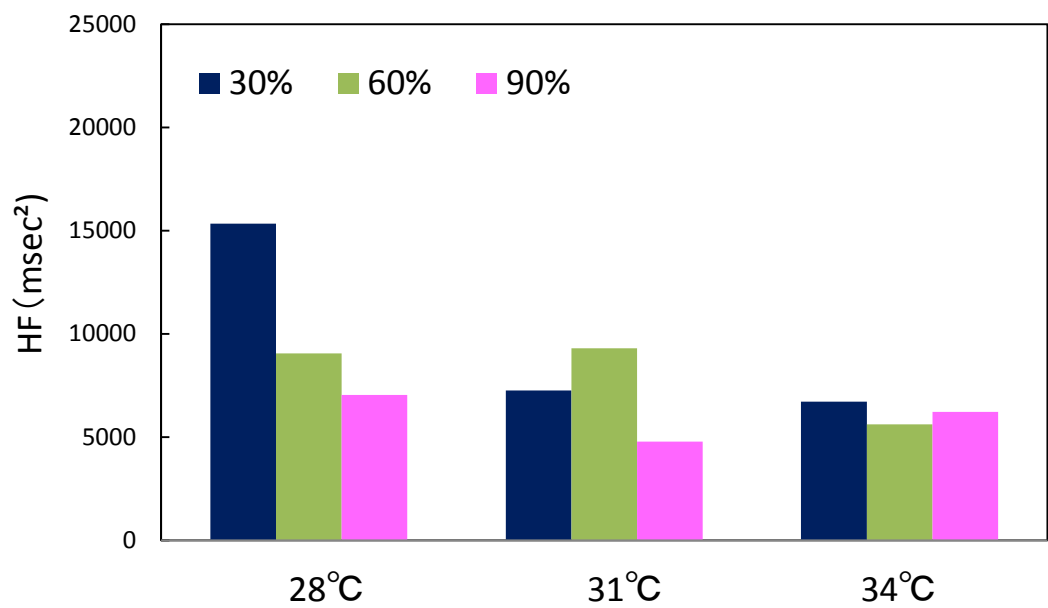


Fig. 3-7 Mean of HF at 55 mins (n=6).

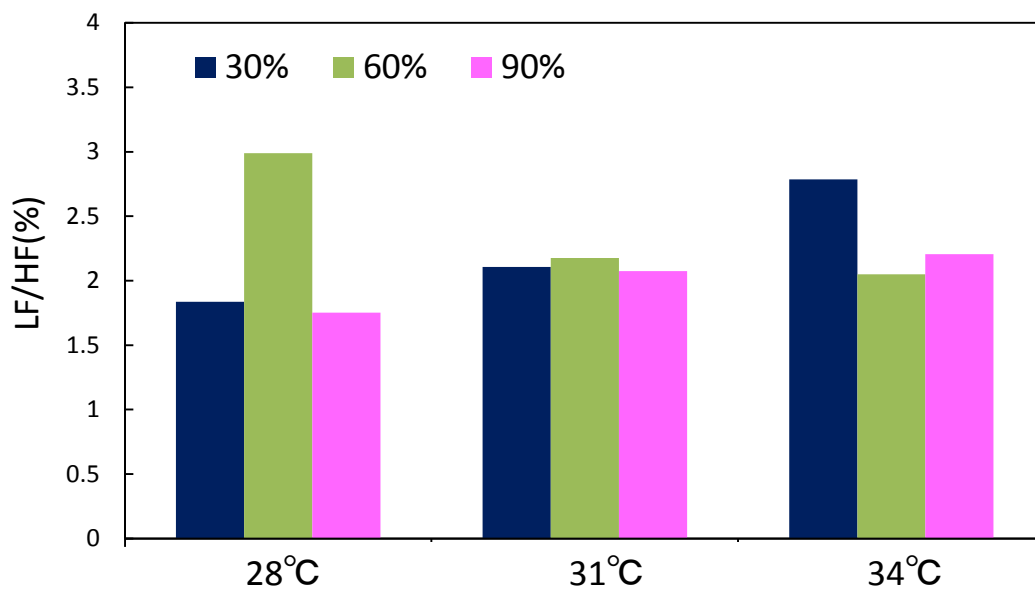


Fig. 3-8 Mean of LF/HF at 55 mins (n=6).

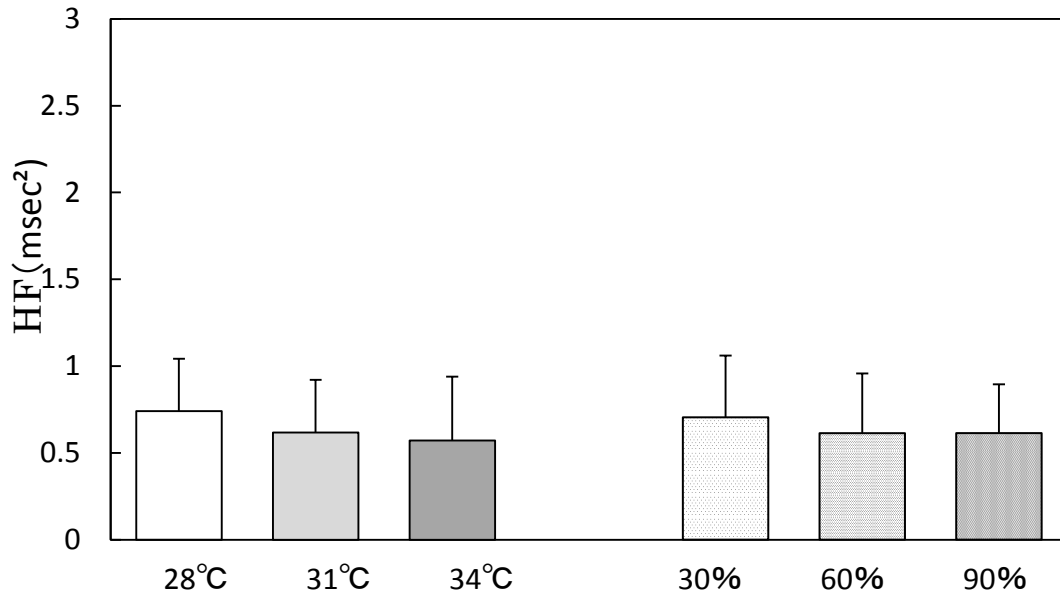


Fig. 3-9 Effect of Ta, RH on HF at 30mins through multiple comparison (n=6).

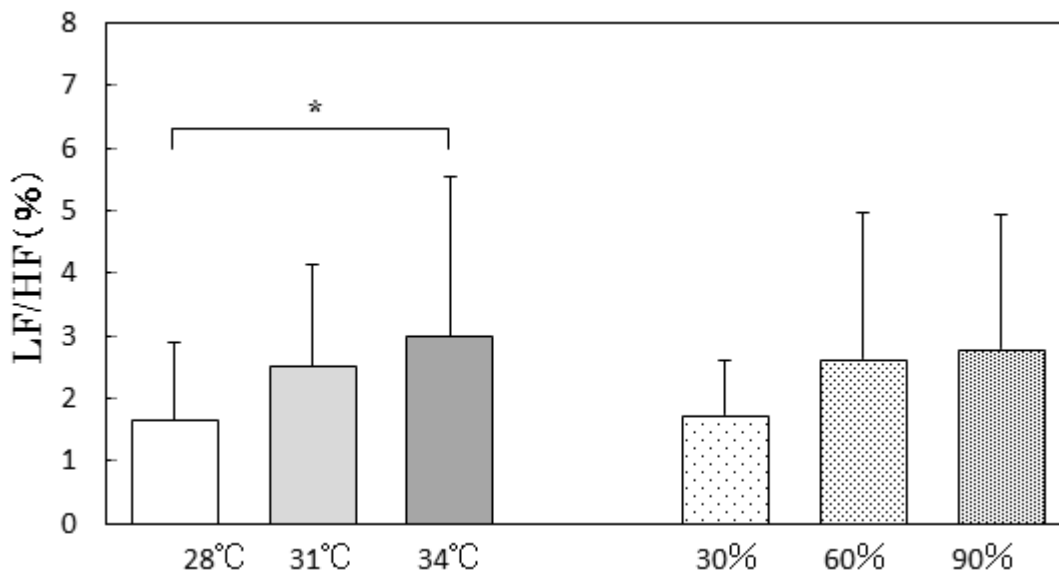


Fig. 3-10 Effect of Ta, RH on LF/HF at 30mins through multiple comparison. (n=6) * : p<0.05 ** : p<0.01

3.3.2 環境温湿度が心拍数に及ぼす影響

Table 3.3 に前室安静時及び実験室に曝露した後、被験者ごとの心拍数結果を示す。全体を見ると、前室と比べて暑熱環境に曝露した後の心拍数は増加する傾向を示している。28℃における曝露後の心拍数は、30%、60%環境下、増加また減少した被験者ともにおり、90%では6名ともに増加した。31、34℃になると、曝露による心拍数の増加が顕著に認められた。特に、34℃90%場合は、16beat/min以上に増加した被験者は6名のうちに4人を超えた。31℃90%でも、10beat/min以上に増加した被験者も3名いる。温度の上昇、また湿度の上昇により心拍数が増加する傾向が見られた。

心拍数の絶対値の二元配置分散分析及び多重比較の結果を、Table 3-4 及び Fig. 3-11 に示す。Table 3.4 は二元配置分散分析表であり、因子 A の環境温度に1%の有意差が認められた。また、多重比較の結果は Fig. 3-11 に示す通り、温度の上昇に伴い心拍数が増加し、28℃と31℃、34℃の間それぞれに5%、1%の有意差が認められた、湿度においても同様の傾向が示され、60%と90%の間では5%の有意差が示された。環境気温による心拍数の変化は不感蒸散域の28℃から開始され、31、34の間では有意に増加した。

また、環境温湿度間における心拍数の挙動を観察するために、実験終了時と前室時の心拍数の差(変化)を求め、二元配置分散分析及び多重比較を行った。心拍数の絶対値に比べ、変化の方は、環境温度要因で1%、湿度要因で5%の有意差を示した。多重比較の結果は Fig. 3-12 に示すように温度の上昇に伴い心拍数が増加し、34℃と28℃、28℃と31℃の間でそれぞれ1%、5%の有意差が認められた、湿度でも同じ傾向が見られ、30%と90%の間で1%の有意差が示された。変化の方が、湿度の影響がより大きく示された。

Table 3.3 Mean and standard deviation of heart rate in six subjects.

		Pre						After					
Subject		1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6
	30%	76	83	74	76	63	66	74	77	71	67	62	72
28°C	60%	74	84	68	68	69	66	76	91	72	77	72	62
	90%	73	77	72	74	63	70	77	85	82	93	67	74

	30%	70	82	80	76	76	66	74	82	82	77	83	77
31°C	60%	72	79	66	65	63	68	76	89	78	75	66	74
	90%	75	79	71	62	75	70	83	89	84	75	84	83

	30%	80	86	71	70	70	78	86	84	97	77	73	91
34°C	60%	76	80	72	77	70	66	77	89	78	91	84	76
	90%	71	79	63	79	68	70	82	91	86	93	85	93

Table 3.4 The result of analysis of variance in changes of HR.

Factor	D.F.	F - value	p - value	Determination
A(Ta)	2	7.613608	0.0014	**
B(RH)	2	2.690985	0.0787	
A×B	4	0.625154	0.6470	
Error	45			
Total	53			

Factor A: air temperature Factor B: relativity humidity
D.F.: degree of freedom **:p<1% *:p<5% significant difference

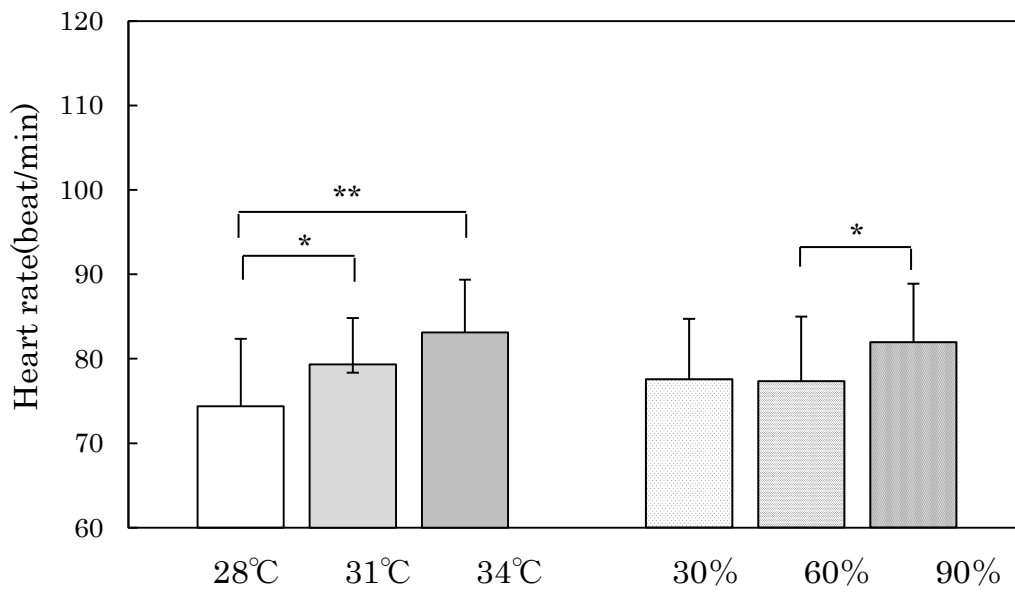


Fig. 3-11 Effect of Ta, RH on heart rate through multiple comparison.(n=6)
 * : p<0.05 ** : p<0.01

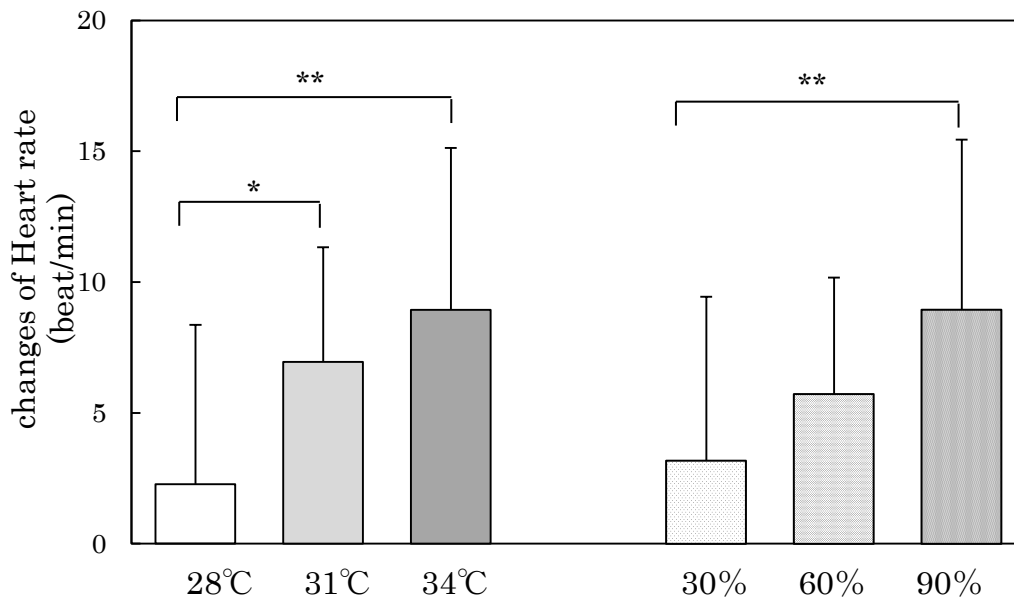


Fig. 3-12 Effect of Ta, RH on changes of heart rate through multiple comparison.(n=6) * : p<0.05 ** : p<0.01

3.3.3 環境温湿度が唾液アミラーゼ活性に及ぼす影響

前室、入室 30 分と 55 分時における唾液アミラーゼ活性の被験者毎の結果を Table 3.5 に示す。表に示すように、唾液アミラーゼ活性の絶対値は被験者により大きく異なり、生データからストレスの影響について議論するのは難しいと考えられる。そこで個人差をなくすため、前室安静時の測定値が一つの基準になると考え、曝露時の測定値と前室測定値との比を「唾液アミラーゼ活性変動値」として求め、統計分析を行った。Table 3.6、Fig. 3-13 は、入室 30 分間時の唾液アミラーゼ活性変動値の分散分析及び多重比較の結果を示している。

Table 3.6 の分散分析結果をみると、環境温度要因には有意差が認められないが、湿度要因には 1%以下の有意差が認められた。また多重比較の結果では、環境温湿度ともに上昇するにつれて唾液アミラーゼ活性変動値が上昇する傾向が見られ、28℃と 34℃の間では 5%、30%と 90%の間では 1%の有意差が認められた。

55 分のアミラーゼ活性は環境温湿度による影響は 30 分間曝露と比べると、明確ではなかった。Fig. 3-13 に示す通り、温湿度の上昇に伴うアミラーゼ活性変動値の上昇に有意差は見られず、むしろ 34℃また 90%では低下する結果が示された。

Table 3.5 The salivary amylase activity of six subjects.

Subject	28°C			31°C			34°C		
Pre	30%	60%	90%	30%	60%	90%	30%	60%	90%
1	54	18	27	44	19	30	30	21	28
2	34	19	20	27	26	16	17	63	19
3	11	11	37	54	11	14	41	15	12
4	31	30	9	13	10	14	14	20	20
5	18	10	31	40	15	24	35	10	20
6	25	18	9	33	14	8	10	10	8
35min	30%	60%	90%	30%	60%	90%	30%	60%	90%
1	23	27	24	27	28	32	79	32	58
2	18	17	26	25	22	28	15	103	18
3	4	11	14	24	44	82	13	52	130
4	40	57	20	18	16	25	6	46	45
5	12	14	59	29	35	29	39	26	49
6	17	10	20	26	9	15	8	19	23
60min	30%	60%	90%	30%	60%	90%	30%	60%	90%
1	73	34	20	21	28	60	62	37	20
2	14	13	33	36	24	15	14	63	16
3	28	33	34	32	85	39	21	79	39
4	35	53	18	28	33	11	22	34	29
5	11	19	59	40	49	47	20	20	59
6	20	18	18	18	13	22	19	10	15

Table 3.6 The result of analysis of variance in changes of saliva α .

Factor	D.F.	F - value	p - value	Determination
A(Ta)	2	3.158135431	0.0521	
B(RH)	2	5.844715406	0.0055	**
A×B	4	0.693120741	0.6006	
Error	45			
Total	53			

Factor A: air temperature Factor B: relativity humidity
D.F.: degree of freedom **:p<1% *:p<5% significant difference

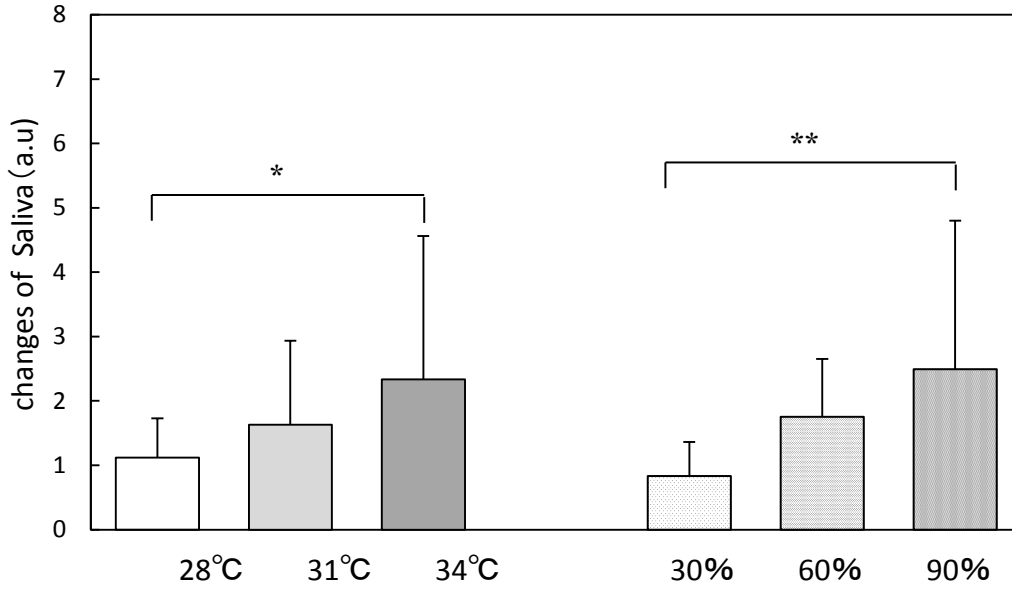


Fig. 3-13 Effect of Ta, RH on changes of saliva- α at 30mins through multiple comparison(n=6).

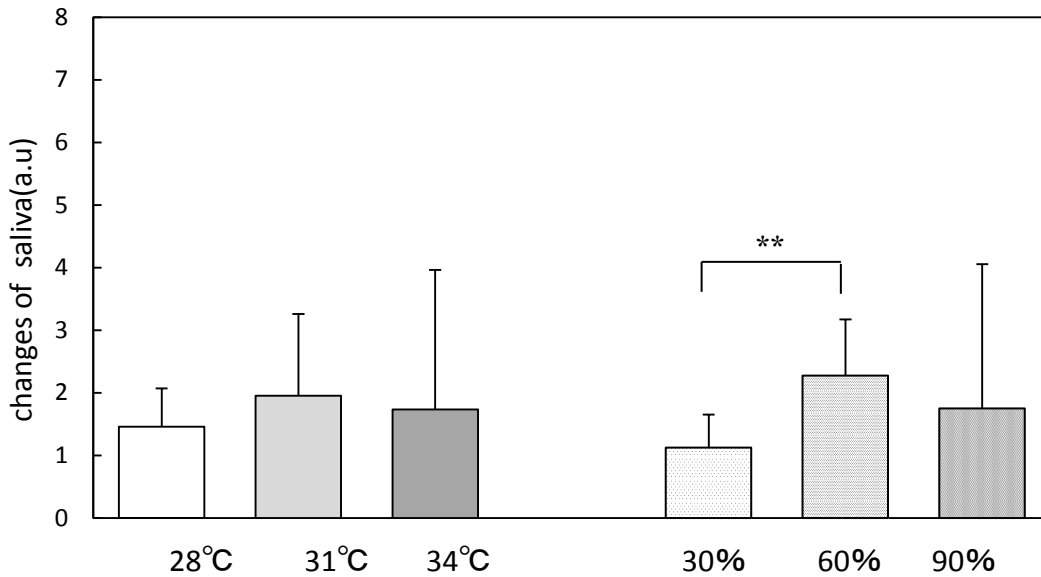


Fig. 3-14 Effect of Ta, RH on changes of saliva- α at 55mins through multiple comparison(n=6).

3.4 考 察

人体に加えられた様々な刺激に対応するために、脳から発せられた指令は、神経系や内分泌系を介して全身に伝達され、各器官の亢進（活性化）や抑制（沈静）などの生体反応として現れる。その生体反応を数値化・定量化することによって、その刺激によるストレスを評価することができる。ストレスを定量評価する手段の開発には大きな社会ニーズがある。近年、脳波（EEG）、脳血流量、血圧、心拍数や心電図（ECG）などの物理計測手段、また、血液、間質液、唾液、尿などの生体サンプルに含まれた化学物質濃度を測る化学手段が様々な領域に幅広く使われている。

本研究では、人体に与えるストレスに関する研究の中で、環境温湿度の刺激、特に環境湿度が人体に及ぼすストレスを、自律神経系と唾液アミラーゼ活性ホルモンの視点から検討した。環境温度 28℃、31℃と 34℃、環境湿度 30、60、90%と組み合わせた計 9 条件の暑熱環境に被験者を曝露し、心拍変動（心電図）、心拍数及び唾液アミラーゼ活性を測定した。

暑熱環境に曝露される際、最も敏感に暑熱の影響を受ける循環機能としては従来より心拍数が注目されている。心拍数は心臓交感神経と心臓副交感神経（迷走神経）の拮抗支配を受けており、交感神経の刺激は、洞房結節のペースメーカー細胞の自発興奮活動を増加させ、そのため心拍数が増加する、逆に副交感神経の刺激は心拍数を低下させる¹⁴⁾として、自律神経系のストレス指標として幅広く使われてきた。渡辺ら^{15~16)}、牛草¹⁷⁾の研究では、気温 28℃以下では湿度の影響による差は判然としないが、30℃以上になると概して高湿による心拍数の増加が著明であると報告している。本研究では、前室と実験終了時の心拍数の差は 34℃・90%では、9 回/分、31℃・60%では 6~7 回/分程度の増加を示した。この心拍数の上昇について、体温調節反応である皮膚温の上昇に伴う皮膚血流量の増加による末梢への血液が溜まり、静脈還流量が減少すると心臓からの一回拍出量の低下とともに、反射的に心拍数の増加をもたらすと考えられる^{18~19)}。気温 31℃でも湿度が高ければ人体に同様な暑熱負荷を与えることが示された。

心拍変動を用いた温熱評価に関する先行研究で、西川らは²⁰⁾室内温度また湿度は高いほうが心拍間隔及び心拍間隔の分散は小さくなる傾向が示され、精神的なストレス状態にあるときと同様の生体反応を示したことを報告した。Sollers ら²¹⁾は 35℃30 分間の暑熱負荷において、心拍変動 HF%の有意な低下と LF%の有意な上昇を認め、副

交感神経活動の低下と交感神経活動の亢進があったことを報告している。また、Kinugasa、Hirayanagi²²⁾によると、18°C50%、24°C38.3%、40°C14.9%及び60°C6.5%のそれぞれの環境に曝露した結果、低温から高温にいくにつれてHFは低下し、LF/HFは上昇する傾向を認めたという。さらにYamamotoらは²³⁾快適な前室環境にて1時間安静後、25°C44%と37°C75%の2条件に曝露実験を行った結果、25°C44%条件下の曝露前後において心拍変動に有意な変化を認めなかったが、37°C75%の曝露においてはHFの減少、LF/HFの増加に有意差を認め、暑熱ストレスにおいては、湿度がより大きく自律神経に影響を与える可能性があるとして述べている。以上の研究は、精神ストレスと同様に、環境温湿度が高ければ、副交感神経活動が抑制され、交感神経活動が促進されることを示唆している。心拍変動の高周波数成分、HF成分は、心臓由来の副交感神経・心臓迷走神経の活動指標といわれ、その活動が高まると、緊張から緩和への生体変化として解釈され、その逆、LF/HF成分である交感神経活動が高まると、精神負荷、緊張状態に陥っていると考えられる。また、心拍数はその交感神経と副交感神経（迷走神経）の拮抗支配を受けており、交感神経賦活あるいは副交感神経の活動低下で心拍数や心収縮力が増加、その逆の場合は心拍数や心収縮力の低下が見られる¹⁴⁾。本研究においても、曝露30分時の副交感神経活動は温湿度の上昇により低下する傾向を示し、交感神経活動は温湿度の上昇により増大した。先行研究と同様、熱ストレスによる交感神経系活動レベルの上昇を確認することができた。

田中らは²⁴⁾、環境温度の急激な変化に対する自律神経及び循環系の反応を知るために、右手を冷水や温水に浸け、実験を行い、自律神経機能を調べた。低温、高温刺激のいずれによっても、心臓副交感神経機能は抑制され、交感神経機能は亢進し、心拍数や血圧は上昇した結果を示した。その反応機序は、刺激から反応までの時間が非常に短いこと、低温、高温刺激のどちらによっても同じ方向の反応が見られたことから、体温調節反応ではなく、反射性機序と考えられることを論じた。しかし、本研究では、局所的刺激ではなく、全身の曝露による穏やかな生体反応が生じ、体温調節反応による自律神経の働きが捉えられていると考えられる。入来²⁵⁾は温度刺激により引き起こされる交感神経反応のパターンについて論じている。温刺激により皮膚交感神経活動が抑制され、拮抗的に応答するため、内臓交感神経活動が亢進すると述べた。すなわち、温刺激により皮膚交感神経活動が抑制され皮膚血管が拡張して皮膚温の上昇に伴う熱放散が促進され、発汗が起こる。これに対し、拮抗的に内臓の副交感神経

活動が低下、交感神経活動が高まり、心拍数が上昇すると考察している。本研究においても第2章でも、温湿度の上昇に伴い皮膚温及び発汗が増加し、同様な交感神経反応パターンと考えられる。また、TamuraとKoshiba⁴⁾は、二つの湿度条件下に被験者を暴露し、いずれの環境条件でも、発汗が多い方が交感神経活動の上昇及び副交感神経の低下を認めている。このように温度また湿度の刺激による自律神経の反応については、体温調節中枢及び循環系を総合した評価・検討が必要と考えられる。

人間のストレス負荷に対する代表的な生体反応は、視床下部-下垂体-副腎皮質系 (hypothal-amus-pituitary-adrenal;HPA系) 及び交感神経-副腎髄質系 (sympatho-adrenal-medullary;SAM系) といわれるストレスホルモン応答系を介して、各種ホルモンの分泌 (コルチゾールやカテコラミン) や、その結果に伴う血圧や心拍数血糖値の上昇などとして現れる。したがって従来、生化学的なストレスの評価法としては、血液、尿及び唾液中のカテコラミンやコルチゾールの測定により評価されてきた²⁶⁾。しかし、採血の侵襲性またストレスに対する応答時間が長いなどが欠点とされてきた。一方、唾液アミラーゼは、交感神経の興奮により副腎髄質から分泌されるノルエピネフリンホルモンの作用により唾液腺からのアミラーゼ酵素の分泌と、交感神経の直接神経作用を受ける2系統がある⁶⁾。交感神経系の直接作用は、ホルモン作用より極めて反応が早く⁵⁾、ネガティブなストレスを受けると増加する^{27), 28)}。

Fig. 3-15に示すように唾液アミラーゼは、交感神経-副腎髄質系 (SAM)、すなわち、ノルエピネフリンの制御を受けながら、直接神経作用による制御システムも存在する。山口らは、この交感神経の新しい指標として、唾液腺における α -アミラーゼ分泌 (唾液アミラーゼ活性) に着目して、唾液を検体として用いることにより、随時的に、即時的に、より簡単に唾液アミラーゼ活性を分析できる携帯式の唾液アミラーゼ活性分析装置を開発した^{5~7)}。以来、唾液アミラーゼ活性は新たなストレスホルモン指標として、広範囲で応用研究されている^{28~32)}。東ら³⁰⁾は、アミラーゼ活性による運転ストレスの研究で、肉体的、精神的なストレスによって、唾液アミラーゼ活性が上昇することを確認した。また、広瀬、加藤²⁸⁾は、アミラーゼ活性の測定によるストレスの臨床応用に関する研究で、全身麻酔下の侵害刺激によりアミラーゼ活性が上昇すると報告した。このように精神的な刺激によるストレスを評価した研究は多数あるが、本研究のように環境の温湿度の刺激による唾液アミラーゼストレス反応を検討した例は少ない。温度28°Cの場合、曝露によるアミラーゼ活性の上昇が見られず、前室とほ

ほぼ同値にとどまった。これに対し、温度が上昇するにつれて唾液アミラーゼ活性値の上昇が認められ、34℃になると、前室より 2.5 倍ほど増加した。湿度については、30% の場合は、アミラーゼ反応が起こらず、60、90%に上昇すると、前室より 3 倍ほどに有意に上昇した。このことにより、環境温湿度、特に高温下の湿度が人体にストレス負荷を与えることが、唾液アミラーゼ活性の測定結果により明らかにされた。唾液アミラーゼ活性は、精神的なストレスのみならず、環境温湿度においても、客観的な指標となりえることが示唆された。この時、自律神経及び唾液アミラーゼ活性のいずれも、実験室滞在 30 分時のみ有意に影響を受けたのに対して、55 分時における影響が顕著ではなかった。これについては、神経系のホルモンによる反応はより迅速に反応するためと考えられ、暑熱環境 60 分間曝露では、疲労感、眠り感、環境への順応などにより反応が捉えにくくなることが示唆された。長時間暑熱環境への曝露による自律神経、唾液アミラーゼ活性の生理機序については、今後の課題として残された。

ここまで、環境温湿度が人体の体温調節反応、自律神経及び唾液アミラーゼホルモン反応への影響を論じたが、第 2 章では、暑熱環境下で汗が十分に蒸散せずに皮膚表面に残留した水分は体温調節機序における熱ストレスの一つの指標として証明された。この残留した皮膚水分量は皮膚表面の湿潤を招き、人体の湿潤感、不快感を招くことが明らかになった。そこで、本章では、第 2 章の体温調節反応、心理反応と、自律神経及びホルモン系との関係を知るために、各項目間の相関を求めた。Table3.7 に得られた相関行列を示す。ここでは、交感神経(LF/HF)、副交感神経(HF)及び唾液アミラーゼ活性は曝露 30 分時のデータを用いた。表に示すように、発汗量また皮膚水分量は交感神経、唾液アミラーゼ活性とそれぞれ 0.946、0.904 と 0.910、0.958 の高い相関性を示した。皮膚水分量は人体の不快感、湿潤感の支配要因であることが、ストレス指標の唾液アミラーゼ活性との高い相関性により明らかにされた。また本研究では、唾液アミラーゼ活性は温度より湿度による影響を有意に受け、温冷感との間で 0.842、湿潤感と 0.965、不快感と 0.862 の高い相関性を示した。唾液アミラーゼ活性も精神的なストレスのみならず、環境温湿度による暑熱ストレスに対する客観的な評価指標となりうることが示唆された。

今後は第 2 章及び本章を基盤として、着衣の諸特性が人体の体温調節、自律神経及びホルモン機能にどのようなストレスを与えるのかについて、定量的に評価、検討したいと考える。

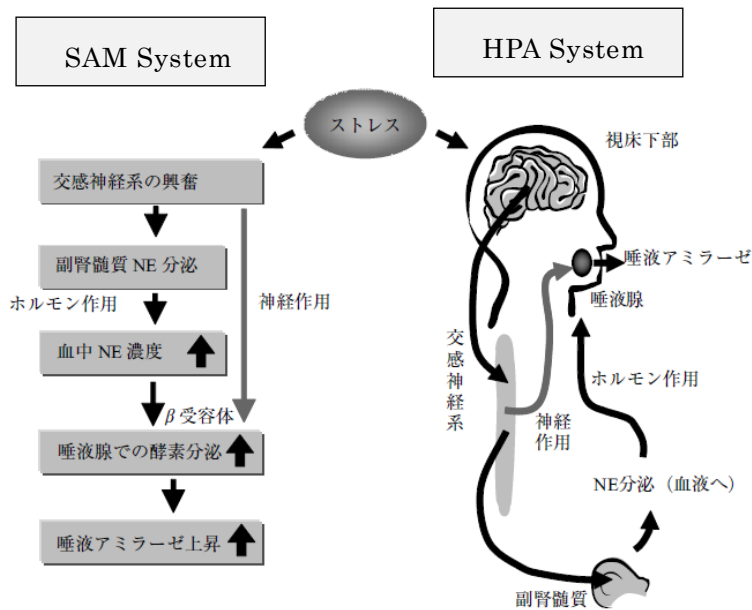


Fig. 3-15 Relationship of the transmission control system and stress.

Table 3.7 Correlation coefficient among physiological responses , HR, HF, LF/HF and Sa - α and psychological measurements.

	Tre	Tsk	SR	WL	Smois	HR	HF	LF/HF	Saliva- α	TS	HS	CS
Tre	1.000											
Tsk	0.693*	1.000										
SR	0.708*	0.772*	1.000									
WL	0.314	0.841**	0.547	1.000								
Smois	0.640	0.686*	0.934**	0.391	1.000							
HR	0.845**	0.845**	0.815**	0.490	0.840**	1.000						
HF	-0.512	-0.683*	-0.409	-0.378	-0.573	-0.723*	1.000					
LF/HF	0.746*	0.866**	0.946**	0.587	0.910**	0.9251**	-0.596	1.000				
Saliva- α	0.682*	0.670*	0.904**	0.315	0.958**	0.878**	-0.510	0.915**	1.000			
TS	0.662	0.872**	0.920**	0.687*	0.883**	0.890**	-0.589	0.965**	0.842**	1.000		
HS	0.617	0.643	0.906**	0.329	0.982**	0.853**	-0.549	0.910**	0.965**	0.889**	1.000	
CS	0.616	0.745*	0.970**	0.580	0.888**	0.786*	-0.342	0.935**	0.862**	0.948**	0.896**	1.000

3.5 要 約

暑熱環境下の温度と湿度が人体の自律神経系及び内分泌系に及ぼす影響を明らかにするため、気温 28℃、31℃、34℃、湿度 30%、60%、90%を組み合わせた計 9 条件の人工気候室内に、ブラジャーとショーツのみ着用の成人女子 6 名を 60 分間曝露した。

非侵襲の測定方法として、心拍数、心電図及び唾液アミラーゼ活性を測定した。また、心電図の R-R 間隔から算出した周波数をパワースペクトル解析し、交感神経系の指標として LF/HF と副交感神経系の指標として HF を求め、温湿度の影響を検討した。

主たる結果以下の通りである。

- 1) 心拍数については温湿度の上昇に伴い有意に増加した。
- 2) 滞在 30 分時の交感神経活動は温湿度上昇とともに有意に上昇し、副交感神経活動は減少する傾向を示した。
- 3) 滞在 30 分時の唾液アミラーゼ活性は、湿度の上昇に伴い有意に上昇した。
- 4) 体温調節反応と自律神経・唾液アミラーゼ活性反応の相関性を調べたところを、皮膚水分量は唾液アミラーゼ活性、交感神経活動とそれぞれ 0.958、0.910 の高い相関を示した。また、唾液アミラーゼ活性は温冷感との間で 0.842、湿潤感と 0.965、不快感と 0.862 の高い相関性を示した。この手法が精神ストレスのみならず、環境によるストレスの評価に対して有効であることが示された。
- 5) 曝露 30 分時の LF/HF、唾液アミラーゼ活性は環境温湿度の影響を受けて、有意に上昇したが 55 分時には、その変化が明確ではなかった。これは、長時間の暑熱曝露においては、環境への順化、疲労感また眠り感などが生じた可能性があると考えられ、その生理機序は今後の課題として検討する必要がある。

引用・参考文献

- 1) 田村照子, 岡本法子; 機能的スポーツウェア設計のための基礎研究, 人体加圧の生体影響, デザントスポーツ科学, Vol. 27 : 3-14 (2006)
- 2) Hyndman,B.W. and Gregory,J.R.: Spectral analysis of sinus arrhythmia during mental loading, *Ergonomics*,18(3):255-270(1975)
- 3) Egelund,N.: Spectral analysis of heart rate variability as an indicator of driver fatigue, *Ergonomics*,25(7):663-672(1982)
- 4) Tamura,T., Koshiha,T. ; Effect of humidity sensation on hormonal responses in saliva and urine, *Environment Ergonomics* (2005)
- 5) 山口昌樹, 花輪尚子, 吉田博; 唾液アミラーゼ式交感神経モニタの基礎的性能, 生体医工学, 42(2) : 161-168(2007)
- 6) 山口昌樹, 新井潤一郎; 生命計測工学, コロナ社 : 137-147
- 7) 山口昌樹, 金森貴裕, 金丸正史, 水野康文, 吉田博; 唾液アミラーゼ活性はストレス推定の指標になり得るか, 医用電子と生体工学, 39-3 : 234-239(2001)
- 8) Akselrod,S.,Gordon,D., Madwed,J.B.,Sindman,N.C., Shannon,D.C., Cohen,R.J; Hemodynamic regulation :investigation by spectral analysis, *Am.J.Physiol.*,249:867-875(1985)
- 9) Freeman,R.,Saul,P.,Roberts,M.S.,Berger,R.D.; Spectral analysis of heart rate in diabetic autonomic neuropathy, *Arch.Neurol.*,48:185-190(1991)
- 10) Ori,Z., Monir,G., Weiss,J., Sayhouni,X.and Singer,D.H.; Heart rate variabilityfrequency domain analysis, *Cardiol.Clin.*,10: 499-537 (1992)
- 11) 早野順一郎; 心電図 RR 間隔変動の自己回帰スペクトル解析による自律神経機能の評価, RR 間隔変動係数 (CV-RR) との比較, 自律神経, 25 : 334-344 (1988)
- 12) 石橋圭太, 小林宏光, 安河内朗; 呼吸統制と呼吸パターンが心拍変動に及ぼす影響, 日本生理人類学会誌, Vol.2, No.2 : 19-24 (1997)
- 13) 谷口郁夫, 景山茂, 相原一夫, 磯貝行秀, 加藤総夫, 福原武彦; 心拍変動のパワースペクトル解析 —呼吸及び体位の影響—, 自律神経, 31(1):78-84(1994)
- 14) 佐藤昭夫, 佐藤優子, 五嶋摩理; 自律機能生理学, 金芳堂, p 41-50(1995)
- 15) 渡辺明彦, 肝付邦憲, 井上枝一郎, 木村菊二, 米元純三, 三浦豊彦, 松浦分房次

- 郎, 尾豊永; 中等度環境気温における湿度の人体に及ぼす影響 (第1報),
労働科学, 52 (11): 635-650 (1976)
- 16) 渡辺明彦, 肝付邦憲, 井上枝一郎, 山本高司, 三浦豊彦, 松浦分房次郎, 尾豊永; 中等度環境気温における湿度の人体に及ぼす影響 (第2報), 労働科学, 52 (11): 635-650 (1977)
- 17) 牛草貞雄; 環境湿度の生体負加に関する実験的研究, 日衛誌 (Jap. J. Hyg.) 21(2): 6-28 (1966)
- 18) 鷹股亮; 衣服を用いた運動時の静脈還流量維持と体温・循環調節反応 その生理学的背景, 織消誌, 47 (12), 18-24 (2006)
- 19) 能勢博, 広瀬宗孝, 中嶋康文, 鷹股亮, 陳勉; 体液浸透圧変化の循環調節に及ぼす影響, 日臨麻会誌, 17 (10), 585-588 (1997)
- 20) 西川向一, 平澤由美, 長町三世; 温熱環境が心拍変動に与える影響, 人間工学, 33(2): 105-112 (1997)
- 21) Sollers, J. J., Sanford, T. A., Nabors-Oberg, R., Anderson, C. A. and Thayer, J. F.; Examining changes in HRV in response to varying ambient temperature, IEEE. Eng. Med. Bio. Mag., 21: 30-34 (2002)
- 22) Kinugasa, H. and Hirayanagi, K.; Effects of skin surface cooling and heating on autonomic nervous activity and baroreflex sensitivity in humans, Experimental. Physiology., 84:369-377 (1999)
- 23) Yamamoto, S., Iwamoto, M., Inoue, M. and Harada, N.; Evaluation of the effect of heat exposure on the autonomic nervous system by heart rate variability and urinary catecholamines, J. Occup. Health., 49:199-204 (2007)
- 24) 田中悦子, 臼井永男, 栗原敏; 環境温度変化による心臓自律神経機能変化の経時的定量化, デサントスポーツ科学, 18: 160-166 (1997)
- 25) 入来正躬; 体温生理学テキスト, 分光堂 (2003)
- 26) 山口昌樹; 唾液マーカーでストレスを測る, 日薬理誌, 129: 80-84 (2007)
- 27) Yamaguchi, M., Wakasugi, J. and Sakakima, J.; Evaluation of driver stress using biomarker in motor-vehicle driving simulator, Conf. Proc. IEEE. Eng. Med. Biol. Soc., 1: 1834-1837 (2006)

- 28) 広瀬倫也, 加藤実; 唾液検体とした新しいストレス評価法—唾液クロモグラニン A 及び唾液 α -アミラーゼ活性にストレス評価、臨床検査, 53(7): 807-811 (2009)
- 29) 金丸正史, 金森貴裕, 山口昌樹, 吉田博, 水野康文; 唾液アミラーゼ活性によるジェットコースターの感性評価, 電子情報通信学会, 信学技報, 2003-24: 1-6 (2003)
- 30) 東朋幸, 山口昌樹, 出口満生, 若杉純一, 水野康文; 唾液アミラーゼ活性を利用した交感神経活動モニタと運転ストレスの評価, 電子情報通信学会, 信学技報, 2004-110: 35-40 (2004)
- 31) 花輪尚子, 出口満生, 若杉純一, 東朋幸, 宮崎良文, 山口昌樹; 里山における唾液アミラーゼ活性の日内変動, 日本生理人類学会誌, 10, 特別号 (1), 第 53 回大会要旨集: 46-47 (長崎 2005)
- 32) 本宮和英, 二瓶泰雄; 唾液アミラーゼ活性を指標とした河川・湖沼のストレス軽減効果把握の試み, 河川技術論文集, 17: 1-6 (2011)

第4章

衣服の気孔率が衣服内気候並びに人体の生理・心理反応に及ぼす影響

— 赤外線透過フィルム衣服を用いて —

4.1 緒 言

外環境と人体の間に存在する衣服は、両者を調和させる役割を果たしている。衣服は外環境条件から人体を保護すると共に、時にはストレスのもとともなる。人体との間に形成される衣服最内層の衣服気候（以下衣服内気候と称す）は、皮膚表面を包み皮膚の感覚受容器を直接刺激する状態量である。衣服内気候は、人体の活動レベル、外界の気候条件、衣服の熱・水分透過特性の相互作用によって形成され、どの要因・条件が動いても変化するが、結果的に、衣服内気候がある温度・湿度範囲、例えば $32\pm 1^{\circ}\text{C}$ 、湿度 $50\pm 10\%$ にあるとき着用者は快適に感じ、この範囲から逸脱するとき不快感を生じることが報告されている¹⁾。この、通常快適衣服内気候と称される条件は、アパレルの開発指標として扱われるほどであるが、どのような環境条件下で、どのような衣服特性がどの程度衣服内気候の決定要因となるかについては十分明らかにされてない。

従来から、衣服の特性とその結果形成される衣服内気候との関係を着用実験によって把握しようとする試みがいくつかなされている。前田ら²⁾は防水布の外衣を着用させた実験において、透湿防水布の外衣着用では非透湿防水布の外衣着用に比べて衣服内温湿度が低下し、透湿防水布は着用者の温熱ストレス低減に有効であることを報告した。石井、平田³⁾は環境湿度を変化させた条件下で、吸湿率の異なる肌着を着用させ、吸湿発熱が平均皮膚温に及ぼす影響を検討し、肌着の吸湿発熱の影響より環境湿度のそれが大なることを報告した。鈴木ら⁴⁾は、エコファン付きの作業服を開発し、この作業服がエコファンなしの作業服着用時に比較して着用者の心拍数、鼓膜温、発汗量を有意に低下させ、熱中症予防上有効であることを報告した。このほかにも衣服素材を変化させたときの衣服気候への影響を検討した研究は多数あるが、繊維製品の特性の複雑性のため、素材のある特性の効果を検証しようとするとき、そのほかの条件例えば布地の厚さや含気率、水分率、透湿性等を一律にそろえることは極めて困難であり、着用実験によってある衣服特性が衣服気候に及ぼす影響を定量的に特定した成果はほとんど見当たらない。

本研究の第2章、第3章では、暑熱環境下の各温湿度条件下に裸に近い着衣状態で曝露させた時の人体反応を調査し、異なる温湿度条件とりわけ湿度条件が人体に及ぼす影響について体温調節系、自律神経・ホルモン系並びに心理反応により検討した。その結果、発汗量と全身蒸発量の差、すなわち無効発汗量は温度・湿度の上昇とともに増加した。また、これと皮膚水分率、湿潤感、不快感との間には高い相

関が示され、無効発汗による皮膚の湿潤が不快感の重要な指標として捉えられた。さらに無効発汗の増加は人体の発汗反応を促し、その結果、心拍数の上昇をきたし、ストレス指標である唾液アミラーゼ活性も上昇した。着衣のなし条件では、外環境特に湿度が人体に直接作用し、体温調節系、自律神経及びホルモン系に大きく影響を与え、蒸発できない汗が皮膚表面に溜まり込んで、熱ストレスを招いたことが明らかになった。

そこで、本章では、第2、3章の実験結果に基づいて、人体に残留した汗また熱が衣服を通して外環境に移動するメカニズムを明らかにすることを目的とした。先行研究である Tamura と Tomizawa⁵⁾は孔サイズおよび被覆面積の異なる数種の穿孔フィルムの実験衣服を用いて、発汗サーマルマネキンによる衣服の蒸発熱抵抗評価の妥当性を検証・報告した。本研究では、この先行研究と同様各種サイズ穿孔フィルムを用いた衣服を作成し、気孔率のみを変化させた衣服が、暑熱時の衣服内気候あるいはこれを着用した被験者の生理・心理反応に及ぼす影響を検討した。また、赤外線透過性衣服であることにより、衣服内温度の分布を面的に観察することも試みた。

4.2 実験方法

4.2.1 実験服の製作

実験服の素材は、市販のフィルム 9 種を対象とし、34℃一定にしたスキンモデルの熱板表面に設置し、その表面をサーモグラフィで観察することにより赤外線透過性の最も高いフィルムを選択した。つまり、Fig. 4-1 に示すように、左側の熱板温度と最も近い温度が示されるフィルム 7 を実験服の素材として選んだ。この実験服の素材は、厚さ 0.012mm の半透明・不透湿性のポリエチレンフィルムで、これに孔なし、直径 3mm、6mm、7.5mm サイズの孔をタテヨコ 2cm 間隔で、鳩目を用いて穿孔したものの 4 種である。

実験服の形状は、頸付け根線、腕付け根線を境界とする衿なし・袖なし・ヒップライン丈で、新文化原型に 4cm のゆとりを追加しウエストダーツを省略したパターンを基本とした。サイズは M と L の 2 サイズを用意し被験者の身体サイズに応じて適合する衣服を着用させた。開きは両肩線とし、すべての前・後身頃接着には両面テープを用いた。また、裾はゴムを通してヒップラインの開口を閉鎖した。Fig. 4-2 に実験服の概要を示す。なお、フィルム衣服は発汗時に皮膚に張り付きやすくこれが快・不快を左右する。これを防止するために保温性の効果を最小限に抑えるための下着としてストッキング素材のランニングシャツと綿 100% のショーツを着用させて実験に供した。

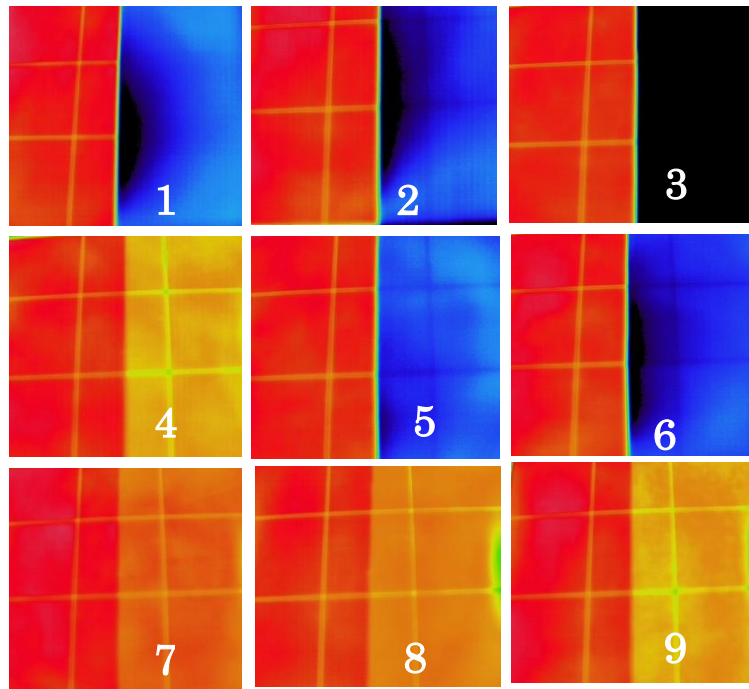


Fig. 4-1 Selection method of material for the experiment clothing.

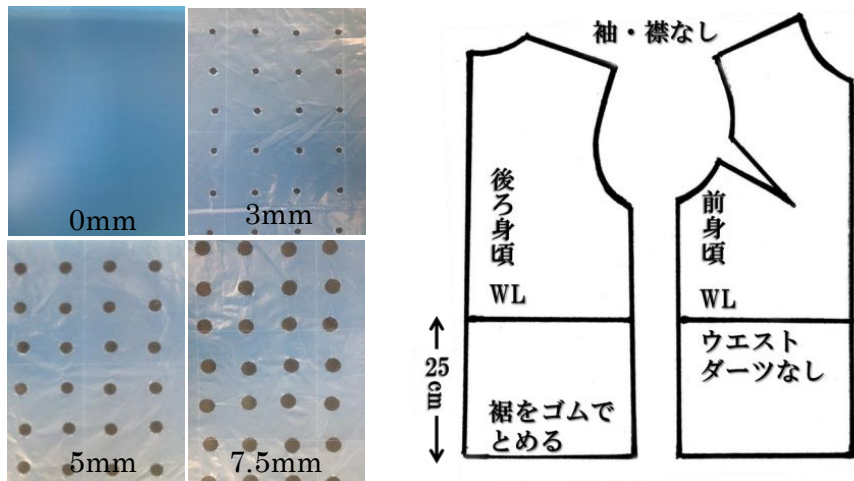


Fig. 4-2 Design of experiment clothes.

4.2.2 素材の物性実験

前述の素材、孔なし（以下 0mm）、直径 3mm、6mm、7.5mm の穿孔フィルムについて、まず面積当たりの気孔率を求めた。また基本特性である、通気度をフラジール形通気度試験機によって、保温率を ASTM 保温性試験機によって、透湿率を蒸発カップ法によって、測定した。

通気度はフラジール型の通気度試験機を用い「JIS L 1096 織物及び編物の生地試験方法」に基づいて試験を実施した。約 200mm×200mm の試験片を 5 枚調整してフラジール型試験機に取り付ける。傾斜形気圧計が 125Pa の圧力になるように吸込みファン及び空気孔を調整し、そのときの垂直形気圧計の示す圧力を測定する。測定した圧力と使用した空気孔の種類から、試験機に付属している換算表によって試験布に通過する空気量 ($\text{cm}^3/\text{cm}^2 \cdot \text{s}$) を求めた。

保温性の測定は ASTM 保温性試験機を用い、20°C65%r. h. の恒温恒湿室に試料布を 24 時間放置してから実験を行った。試料布なしの状態をブランクとして、測定した消費電力量を T_0 、試料布ありの消費電力量を T として、次の式により保温率を求めた。

$$\text{保温率} = (T_0 - T) / T_0 \times 100\%$$

透湿率の測定には蒸発カップ法を用い、20°C65%r. h. の恒温恒湿室にて行った。ビーカーの上端から 1cm 下まで蒸留水を入れ、その上を試料布 (15×15cm) で覆い、周辺を輪ゴムでとめる。恒温恒湿室に 24 時間放置後の減少重量 (W) を測定し、試料布なしの減少重量 (W_0) と比較して、次の式により透湿率を求めた。

$$\text{透湿率} = (W_0 - W) / W_0 \times 100\%$$

4.2.3 スキンモデル実験

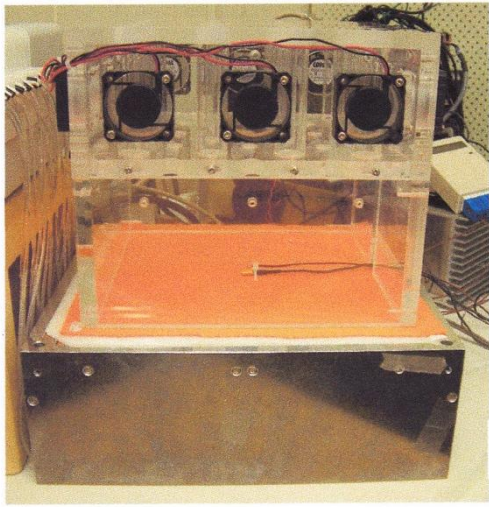
人体における熱・水分移動に配慮し、熱・水分共存系における試料の熱・水分透過特性を評価した。使用した装置は田村ら⁶⁾が開発したスキンモデル装置で、その概要を Fig. 4-3 に示す、本スキンモデルは、制御部、演算部、表示部からなり、制御部は20×20cmのアルミ板表面の温度が4つのペルチェ素子によって34℃一定温度に制御されるとともに、40℃に制御された蒸留水が精密制御ポンプを通して16個の孔からアルミ板表面に吐出されるようになっている。アルミ板表面には模擬皮膚が装着されており、吐出水は素早く模擬皮膚表面に濡れ広がり、発汗時の皮膚を模擬する構造になっている。この模擬皮膚上に試料を設置し、各試料によって形成される模擬皮膚温度、衣服内温度、外部温度、模擬皮膚水蒸気圧、衣服内水蒸気圧、外部水蒸気圧湿度、熱流量の実測値から、次式により熱抵抗、蒸発熱抵抗を求めた。

$$R_d = (t_s - t_a) / H_d$$

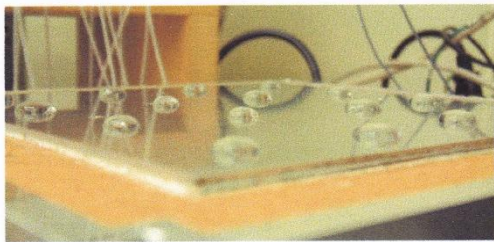
$$R_e = (P_s - P_a) / H_e$$

ここで、 R_d : 試料の熱抵抗 [$^{\circ}\text{Cm}^2\text{W}^{-1}$]、 t_s : 模擬皮膚表面温度 [$^{\circ}\text{C}$]、 t_a : 外気温 [$^{\circ}\text{C}$]、 H_d : 乾燥時の供給熱量 [Wm^{-2}]、 R_e : 試料の蒸発熱抵抗 [$\text{kPa}\text{m}^2\text{W}^{-1}$]、 P_s : 模擬皮膚表面の水蒸気圧 [mmHg]、 P_a : 外気水蒸気圧 [mmHg]、 H_e : 蒸発のための供給熱量 [Wm^{-2}] である。

測定は、20℃、65%、試料直上の気流 0.5m/s の環境条件下で実施し、試料布と模擬皮膚表面の距離すなわち衣服下の空気層は 0mm と 7mm の 2 条件とした。まず乾燥状態で定温度に到達したのち 10 分間、その後吐水 2 分間（吐水量 2.4g）、吐水を停止した後 48 分間の計 60 分間連続して測定記録した。実験は 1 試料につき 2 回測定、測定誤差が 8% を超える場合は実験を追加し誤差 8% 以下であることを確認したのちその平均値を求めた。



Apparent of Skin model



Discharged water by pump

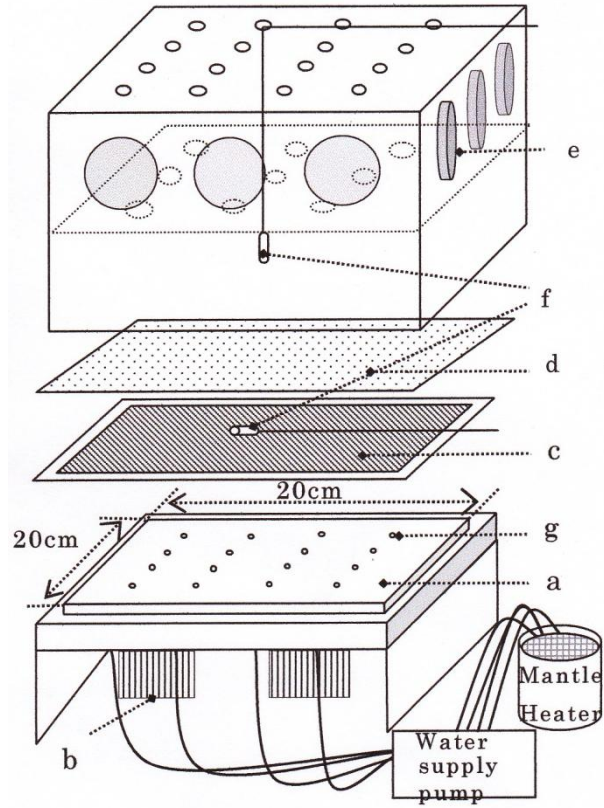


Fig. 4-3 Construction of a skin model.

- a:hot plate b:peltier elements c:skin d:sample
 e:fan f:temperature/humidity sensor g:sweat hole

4.2.4 着用実験

着用実験は文化学園大学の附置研文化・衣環境学研究所の人工気候室にて、 $34.0 \pm 0.5^{\circ}\text{C}$ 、 $50.0 \pm 2.0\%$ の条件下で実施した。実験中の送風条件としては被験者前方150cmの距離から扇風機3台により送風し、整流用フィルタを通して被験者位置で約0.8m/sの気流条件とした。

被験者は20から30歳代の健康な成人女子7名で、平均身長は $162 \pm 4.31\text{cm}$ 、体重は $49. \pm 5.3\text{kg}$ 、BMIは 18.8 ± 2.0 であった。実験は被験者の月経期を避け卵胞期と黄体期の別を記録、同一被験者については同一時刻に実施、前夜からのアルコール類、コーヒーの摂取及び喫煙を禁じた。被験者には予め、実験の目的、内容等を十分に説明し、全員から書面で同意を得た。なお本研究の推進については文化学園大学倫理委員会の承認が得られている。

測定項目は、衣服内温湿度、胸部皮膚温、サーモグラフィ、局所発汗量、心拍数、及び主観申告（快適感・温冷感・湿潤感・発汗感）である。衣服内温湿度はコンパクトサーモロガー（安立計器株式会社）を用いて、胸部と背部の2箇所（ストックキングシャツと実験服間）にて測定した。胸部皮膚温はサーミスタ温度計を用いて、データコレクタ（安立計器株式会社 AM-7052）によって測定した。また、サーモグラフィ（赤外線テクノロジー株式会社）により立位の全面、側面、背面の皮膚温分布を測定した。局所発汗量は前額において換気カプセル型発汗計（SKINOS 製 SKN-2000）によって測定した。心拍数はMEMCALC/BONALY LIGHT(株式会社 ジーエム・エス)により測定した。主観官能評価の評価尺度はTable 4.1に示す通りである。

Table 4.1 Subjective rating scale of comfort, thermal, humid and sweat sensation.

Comfort		Thermal		Humid		Sweat	
0	Comfortable	3	Very hot	3	Very wet	0	No sweating
1	Slightly uncomfortable	2	Hot	2	Wet	1	Sweating
		1	Slightly hot	1	Slightly wet	2	Break out in sweat
2	Uncomfortable	0	Neutral	0	Neutral	3	Sticky with sweat
3	Very uncomfortable	-1	Slightly cold	-1	Slightly dry	4	Sweat flowing
		-2	Cold	-2	Dry		
		-3	Very cold	-3	Very dry		

実験手順は、 $25 \pm 1^{\circ}\text{C}$ 、 $50 \pm 3\%$ の前室で30分間椅座位安静を保ち、20分間を経過してから衣服内温湿度、胸部皮膚温センサー及び心拍変動の電極を貼付した後、実験服を着用させた。 34°C 、 50% に設定された人工気候室に入室後サーモグラフィの撮影と官能評価を実施し、発汗カプセルを貼付してから測定を開始した。実験は30分間椅座位安静、10分間送風、10分間回復の3段階により構成された。測定は実験中連続的に測定し、サーモグラフィの撮影は実験の各段階の終了1分前に実施し、主観官能評価は実験中5分間隔で、また脱衣後に申告してもらった。

4.2.5 統計解析

着用実験における生理反応の結果としては、安静、送風、回復の各実験期間最終5分間のデータを使用した。孔径と実験段階を要因とする二元配置分散分析を行い、有意差が認められた場合は多重比較による因子間の有意差検定を行った。有意水準は1%、5%以下とした。

4.3 結 果

4.3.1 物性実験

Table 4.2 に、穿孔フィルム素材の気孔率、通気度、透湿率及び保温率の結果を示す。当然ながら気孔率の増大とともに通気度、透湿率は増加したが、保温率については気孔率の影響が僅少であった。

Table 4.2 Result of physical properties of materials.

	0mm	3mm	6mm	7.5mm
Porosity (%)	0	2.0	8.0	12.0
Air permeability(cm ³ cm ² sec)	0	17.7	65.1	108.7
Thermal insulation(%)	10.0	9.8	8.5	8.6
Moisture permeability(%)	0	10.0	23.3	25.2

4.3.2 スキンモデル実験

スキンモデル実験における、空気層 0mm、7mm の衣服内湿度（水蒸気圧）及び供給熱流束の変化結果を Fig. 4-4、Fig. 4-5 に示す。また、素材の孔径および衣服下空気層別に求めた熱抵抗 Rd と蒸発熱抵抗 Re の結果を Table 4.3 に示す。図に示す通り空気層にも関わらず衣服内湿度は水の吐出と同時に上昇した後ほぼ恒定に達し、その間吐出水分の蒸発に伴い供給熱量が増大するが、やがて衣服内湿度が低下し始める。恒定衣服内湿度並びにその維持時間は孔径によって異なり、孔径が大きいほど恒定湿度が低く、維持時間も短いことが示された。空気層の違いをしてみると、空気層 7mm に比べると、空気層なし時の孔なし、3mm は実験終了までも衣服内湿度が原点まで下がらなかった。

乾燥時の Rd は空気層なしでは孔径の影響がほとんど見られず、空気層有では孔なしが最も高く、孔径の増加とともに低下した。一方、Re は孔径によらず空気層無の方が大で、また空気層の有無によらず孔径が大なるほど Re が低下することが示された。

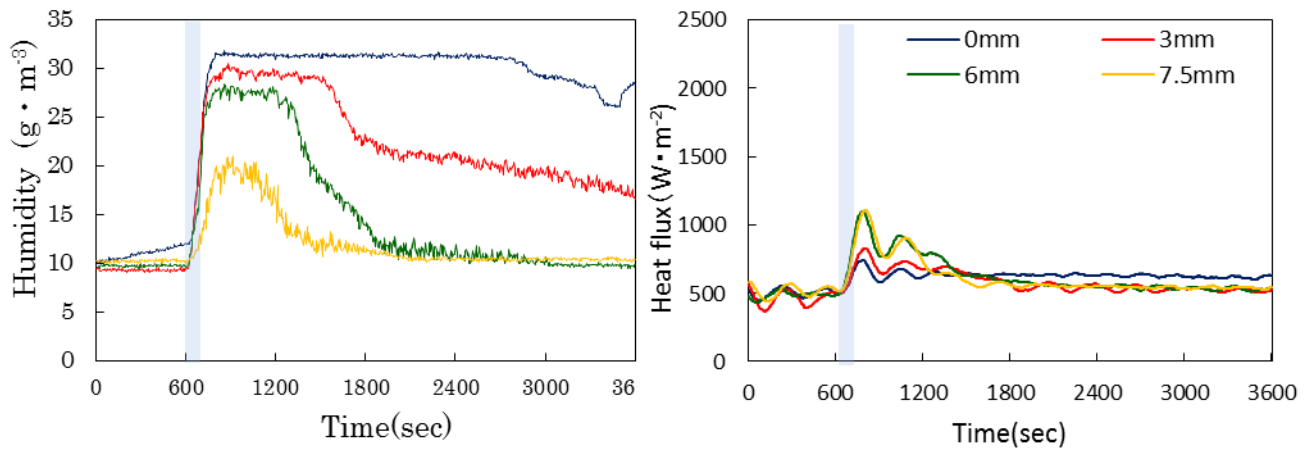


Fig. 4-4 Changes of humidity and heat flux between hot plate and film during experiment in the case of 0mm air layer.

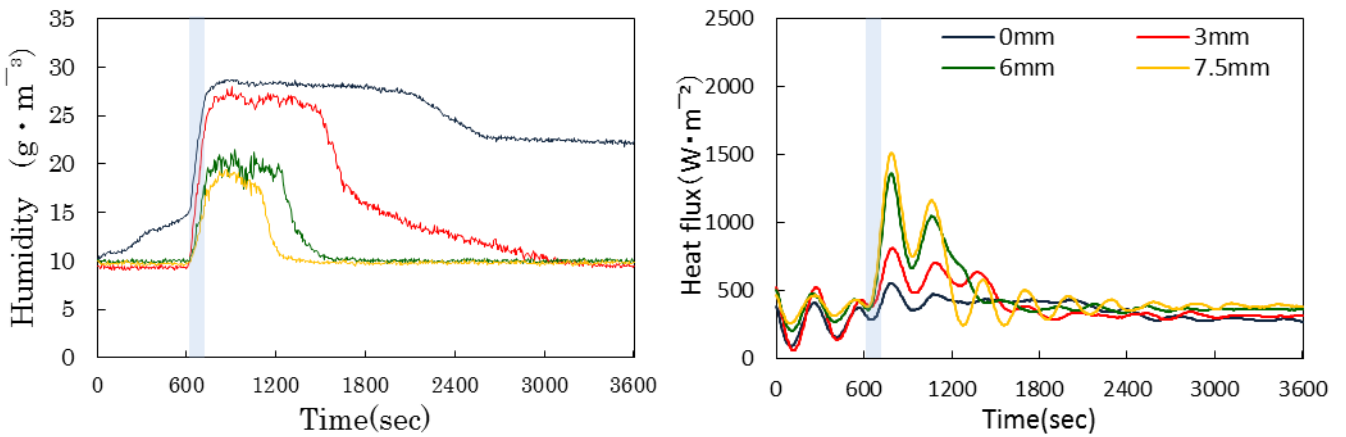


Fig. 4-5 Changes of humidity and heat flux between hot plate and film during experiment in the case of 7mm air layer.

Table 4.3 Result of skin model test.

	0mm	3mm	6mm	7.5mm
$R_d(^{\circ}\text{C}\cdot\text{m}^2\cdot\text{w}^{-1})$				
air layer 0mm	0.014	0.015	0.013	0.011
air layer 7mm	0.025	0.024	0.016	0.014
$Re(\text{kPa}\cdot\text{m}^2\cdot\text{w}^{-1})$				
air layer 0mm	1.484	0.717	0.399	0.214
air layer 7mm	1.223	0.514	0.153	0.108

4.3.3 着用実験

(1) 二元配置分散分析

Table 4.4 は衣服内温・湿度（胸部）、胸部皮膚温(Ts)、前額発汗量（SR）、心拍数（HR）に対し、穿孔フィルム衣服の孔径（A）並びに安静・送風・回復の実験段階（B）を要因とする二元配置分散分析を実施した結果を示している。衣服内温度、湿度については要因 A・B とともに危険率 1% の有意差を、胸部皮膚温については要因 B が 1% の有意差を、発汗量については要因 A が 1% の有意差を示し、心拍数については有意差が認められなかった。

Table 4.4 Result of analysis of variance in temperature and humidity clothing climate and physiology responses.

Factor	D.F.	F - value				
		Temperature	Humidity	Ts	SR	HR
A	3	5.22**	15.97**	2.39	17.54**	2.19
B	2	23.16**	9.66**	6.46**	0.51	0.04
A×B	6	0.38	0.38	0.09	0.16	0.13
Error	72					
Total	83					

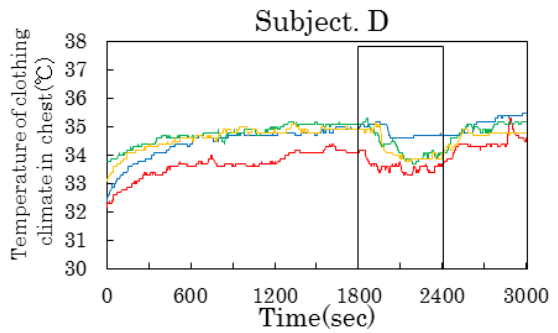
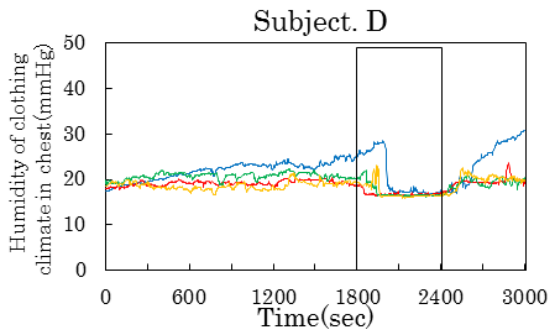
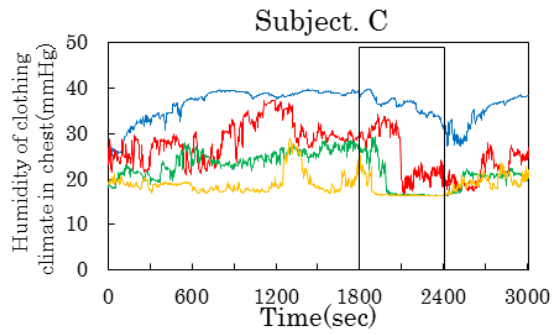
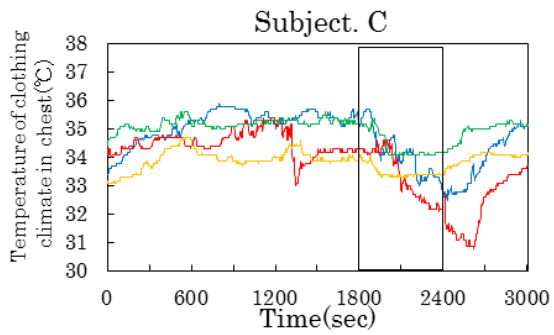
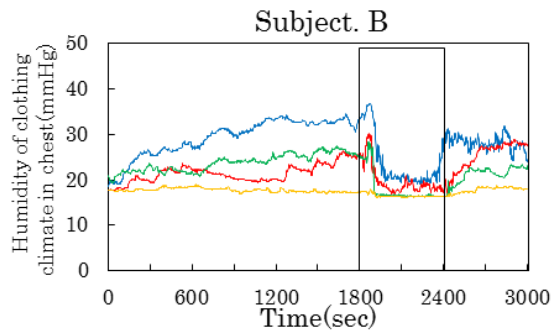
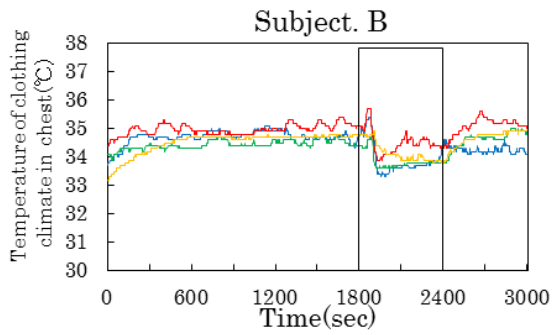
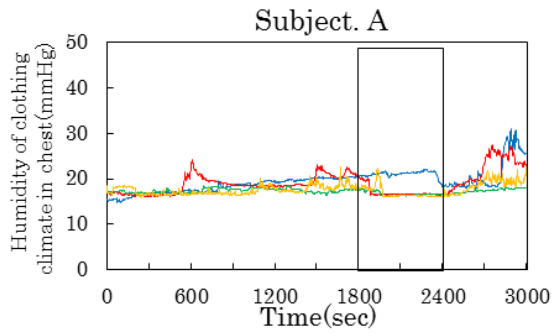
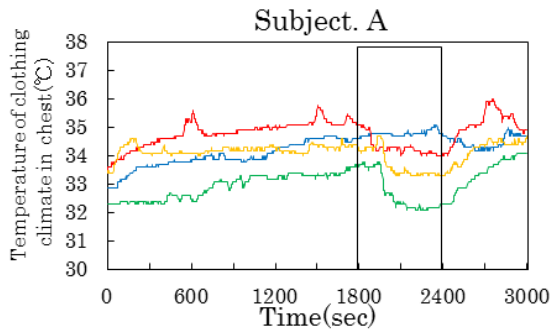
Factor A: pore diameter, Factor B: experimental stage
 **:p<1% * :p<5% significant difference

(2) 衣服内温湿度

各被験者の胸部と背部の衣服内温湿度の経時変化を Fig. 4-6 に、Fig. 4-7 に示す。

胸部衣服内温湿度の経時変化は Fig. 4-6 のようである。衣服内温度は、孔径の違いによる差がみられなかった。衣服湿度は、7 人のうちに 5 人で、孔径による衣服内湿度の違いが認められた。孔なしの衣服内湿度が最も高く、7.5mm は最も低い傾向が示され、3mm と 6mm は被験者毎によってその差が異なっている。また、送風に伴う衣服内温湿度の低下がすべての被験者の結果からみられた。

Fig. 4-7 に背部の衣服内温湿度の経時変化を示す。胸部と同様な傾向が示された。孔径による衣服内温度の差が明確ではない一方、衣服内湿度に与える影響がより明確であった。しかしながら、胸部と比べると、送風に伴う衣服温湿度の低下については、被験者 C、E、G の 3 人のみ明らかに示された。このことは、胸部は真正面に扇風機に向き合い、気流の影響を大きく受けたと考えられる。



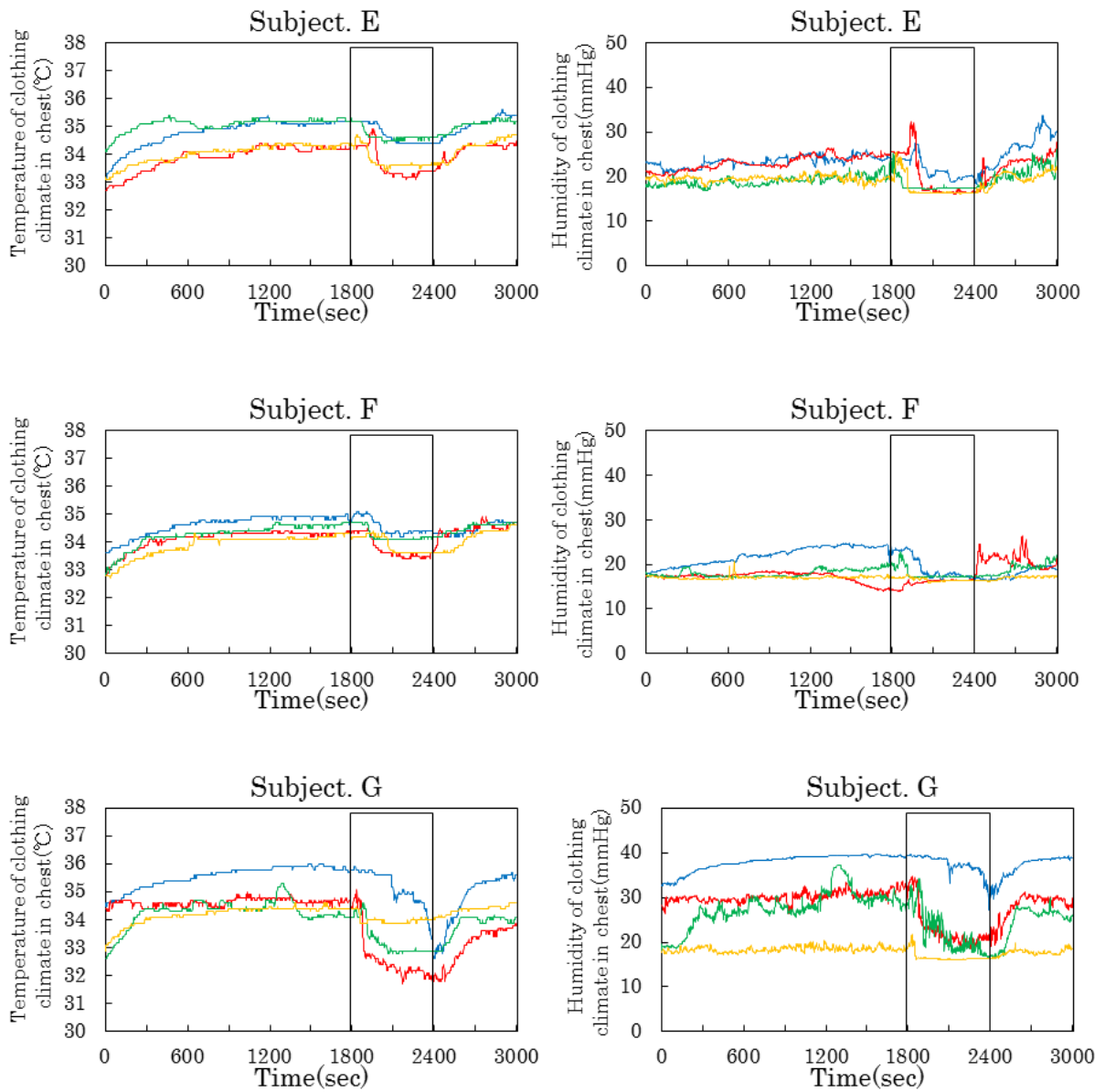
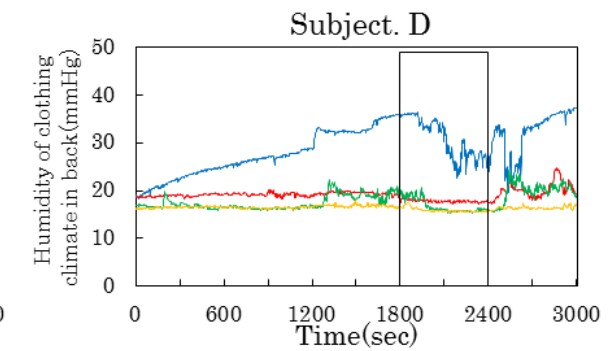
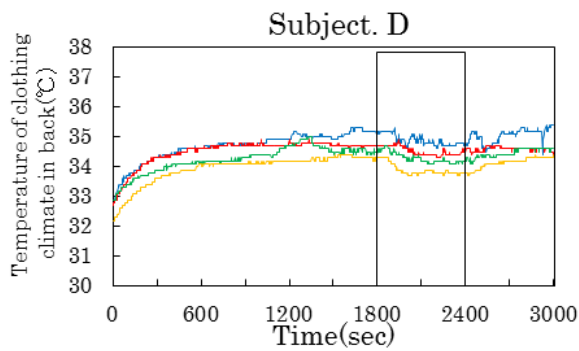
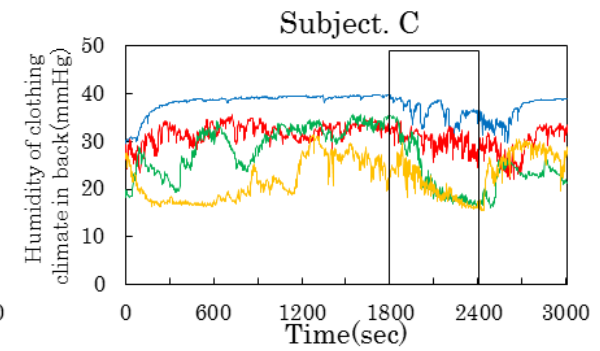
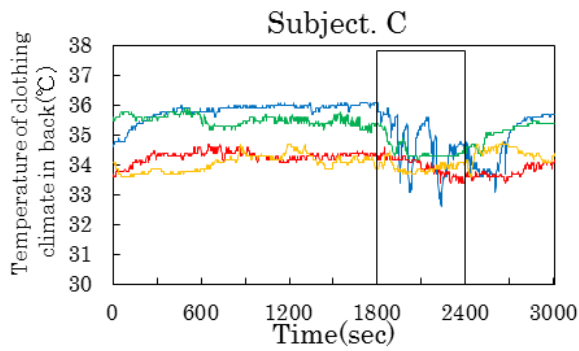
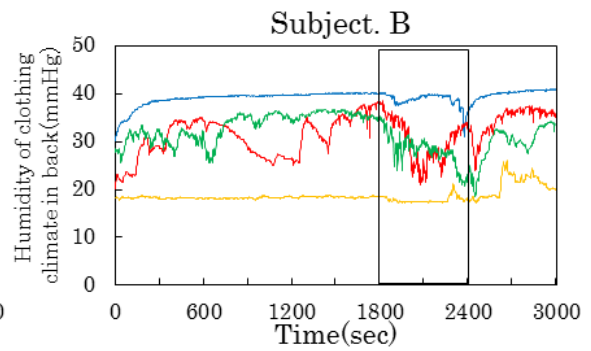
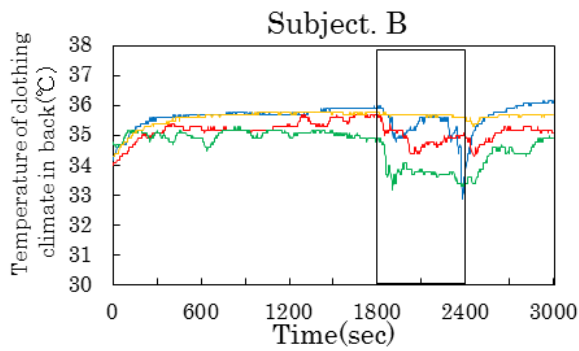
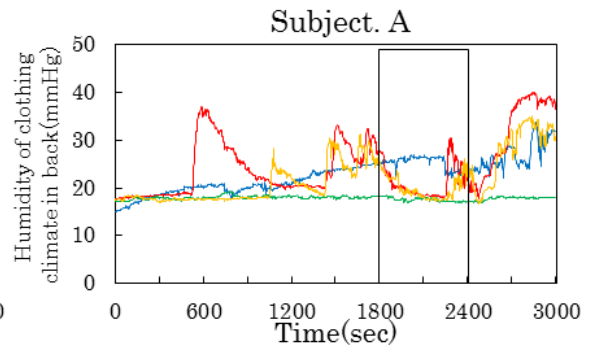
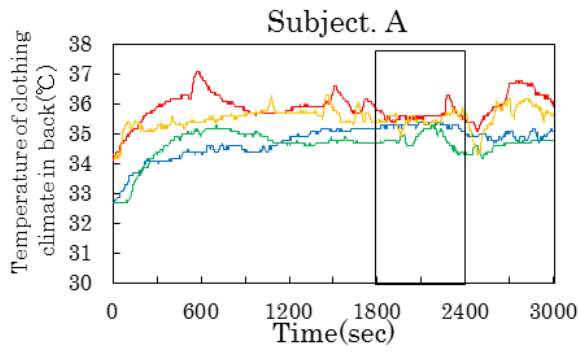


Fig. 4-6 Changes of temperature and humidity inside clothing in the chest of each subject during experiment.

0mm: — 3mm: — 6mm: — 7.5mm: —



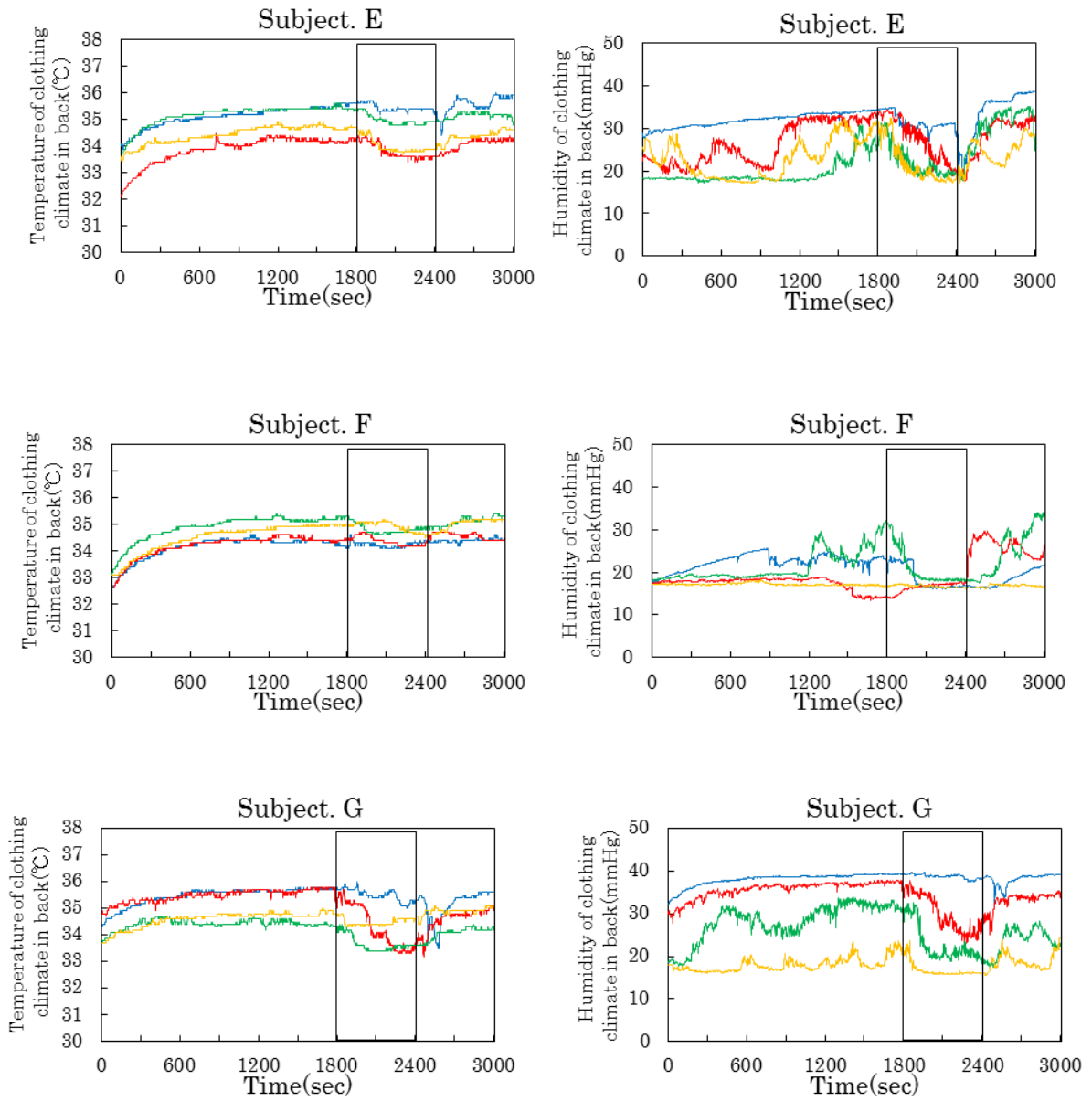


Fig. 4-7 Changes of temperature and humidity i inside clothing n the back of each subject during experiment.

0mm: ——— 3mm: ——— 6mm: ——— 7.5mm: ———

着用実験中の胸部・背部における衣服内温度・湿度の経時変化を7名の平均値によって Fig. 4-8、Fig. 4-9 に示す。胸部の衣服内温度は、安静期に急上昇、送風期に下降、回復期に再び上昇の変化を示し気流の影響が大なることが示された。個人の経時変化より、7名の平均値はより気流による影響が明らかである。孔径の比較では、0mm が 1.7℃程上昇し、その他の3種も 1℃ほど上昇したが、0mm 以外の3種間に大きな差は認められない。胸部の衣服内湿度も類似した経時変化を示したが、全体的に変化量は小さく、孔径の比較では個人経時変化と同様に、0mm > 3mm > 6mm > 7.5mm の順となり孔径の影響がより明確であった。背部の衣服内温度は全体的に 0.5℃高く、0mm が 2℃程度上昇し、その他の3種でも 1.5℃ほど上昇した。背部の衣服内湿度は、胸部より孔径による衣服内湿度の差がより大きくなり、安静時における孔径 7.5mm でも上昇する傾向が示された。直接に風の影響を受けなかったため、送風期でも孔径の影響が明らかに認められた。

胸部の衣服内温湿度の多重比較結果を Fig. 4-10 に示す。衣服内温度を見ると、孔径 0mm が最も高い値を示し、3mm, 6mm, 7.5mm との間に有意差を示したが。他の3種間には差がみられず、先の経時変化グラフの観察結果が確認された。

衣服内湿度は、孔径とともに低下する傾向を示し、0mm と他の3種間、3mm と 7.5mm 間に 1%の有意差が認められたが 3mm と 6mm、6mm と 7.5mm 間の差は傾向にとどまった。なお、衣服内温・湿度ともに、送風期と安静時・回復期との間には有意な差が示されている。

背部の衣服内温湿度の多重比較結果を Fig. 4-11 に示す。胸部とほぼ同様な結果を示したが、衣服内温度は 0mm と 7.5 の間に有意差が認められず、衣服内湿度は、0mm と 3mm の間に 5%の有意差しかが得られなかった。

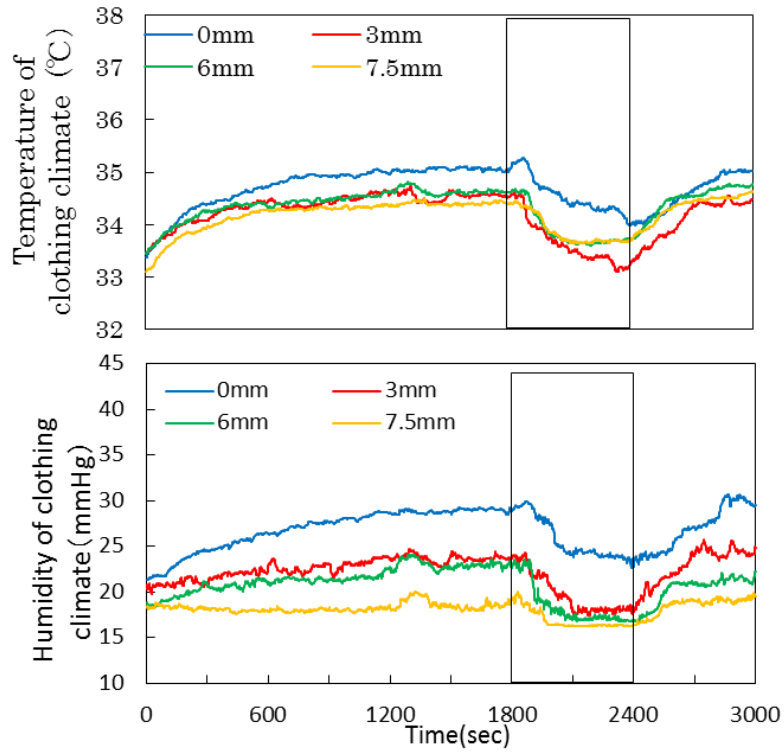


Fig. 4-8 Changes of temperature and humidity inside clothing in the chest during experiment (n=7).

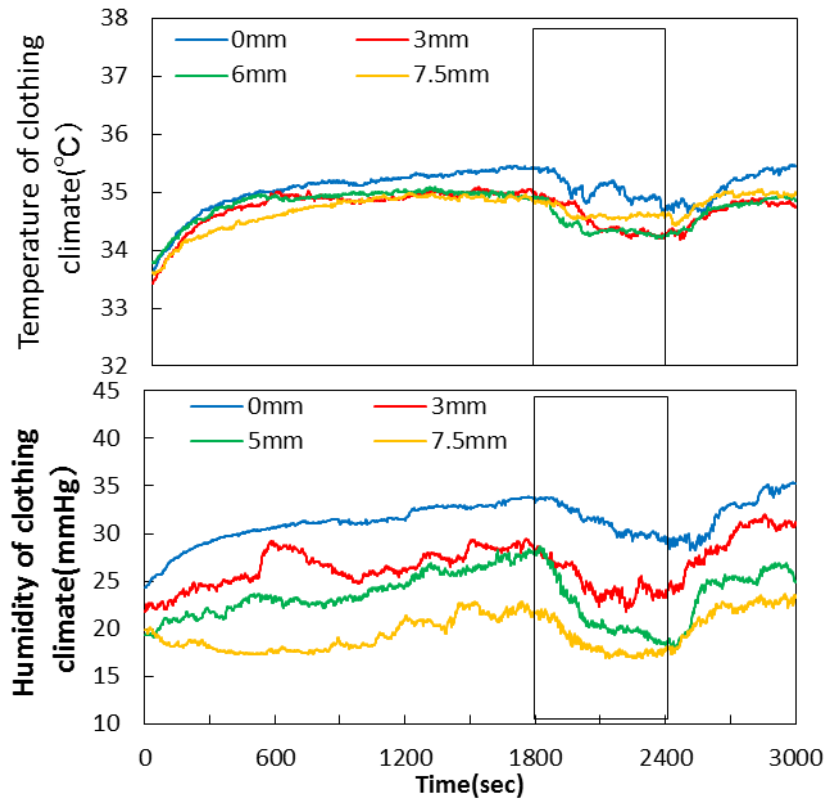


Fig. 4-9 Changes of temperature and humidity inside clothing in the back during experiment (n=7).

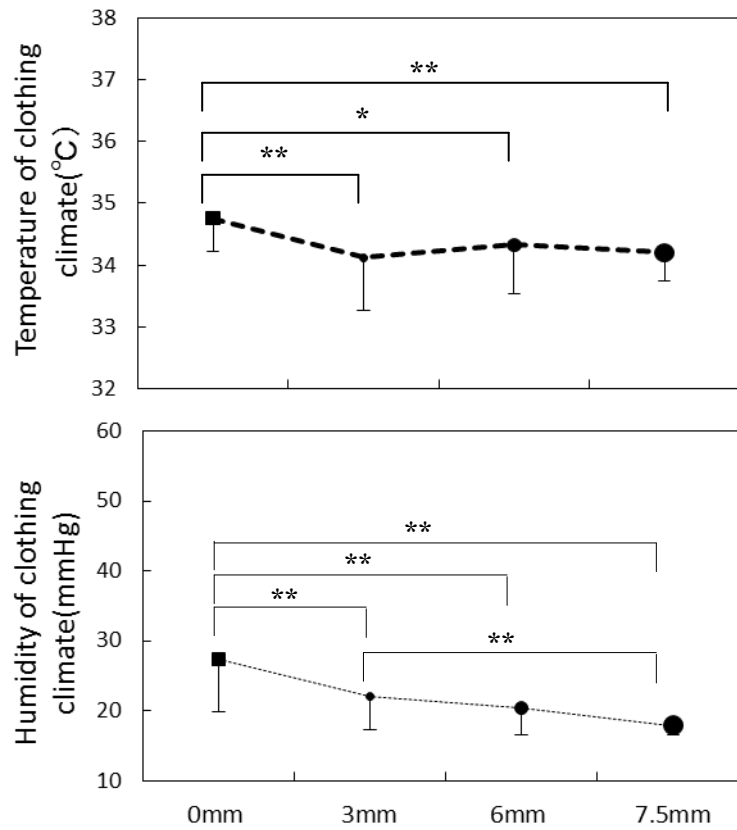


Fig. 4-10 Effect on porosity of film cloths on clothing climate in the chest (n=7).

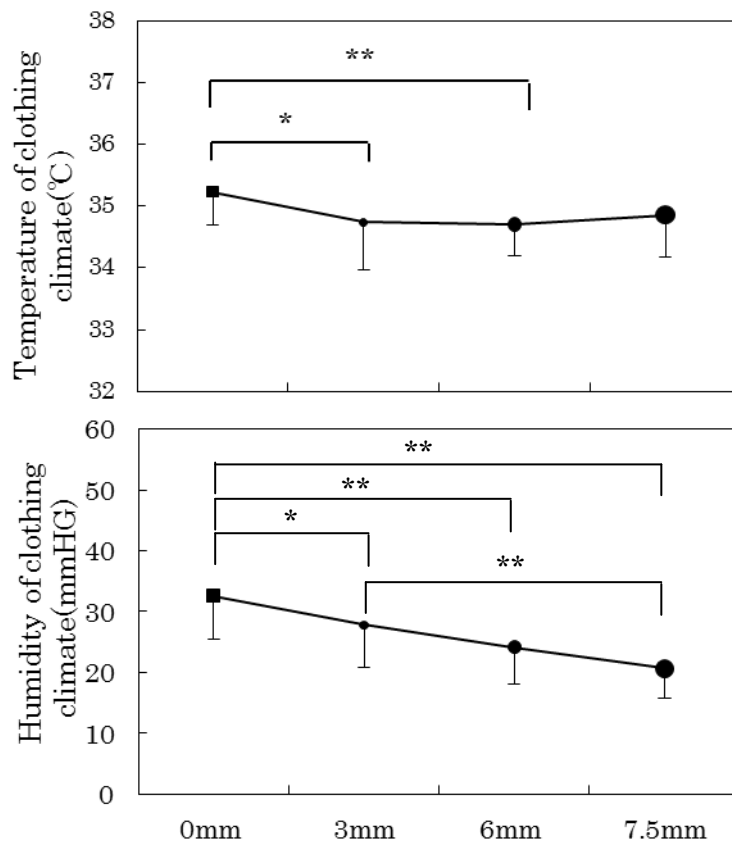


Fig.4-11 Effect on porosity of film cloths on clothing climate in the back (n=7)

(3) 胸部皮膚温並びサーモグラフィによる温度分布

Fig. 4-12 に、各被験者並びに 7 人の平均による胸部皮膚温の経時変化を示す。個人の結果をみると、安静時から徐々に上昇し、送風に伴い下降、回復に再び上昇の挙動を示したが、全体的にその変動量が小さかった。個人における孔経の影響が明確ではない。7 人の平均値では、ほぼ同じ傾向が示されたが、孔なしの皮膚温が最も高く、約 36.3℃まで上昇し、その他の 3 種には大きな差が認められない。また、孔経によらず胸部皮膚温はほぼ 0.8 程度上昇した。

胸部皮膚温の多重比較の結果については、0mm と 3mm、6mm、7.5mm との間にそれぞれ 5% の有意差が認められた。

本研究のフィルム衣服は、赤外線透過性という特徴があるため、サーモグラフィによりフィルム衣服着用時の衣服内の温度変化及び分布を観察することができた。

Fig. 4-13 に、着用実験中、送風直後に撮影した前面・背面の結果の一例を示す。全体的な分布を観察したところ、前面では胸部以上頸部あたり、背面の肩及び後頸部には高温域が、腹部及び腰囲には低温域が示されている。またボックス内の温度分布の平均値を見ると、孔経による大きな差がみられず、前述した衣服内温度また胸部皮膚温の結果とほぼ一致した。しかしながら、サーモグラフィから得られた温度は衣服内温度であるか、皮膚温であるかを検討する必要がある。そこで、実測した胸部皮膚温、衣服内温度とそのセンサーを貼り付けた付近のサーモグラフィの測定値を比較することを試みた。その結果を Fig. 4-14 に示す。孔経にもかかわらず、いずれもの実験服でも、実測した皮膚温が最も高い値を示し、サーモグラフィにより観察した衣服内温度及び皮膚温はほぼ同じ傾向を示している。実測した衣服内温度では、送風後の温度が低下する傾向を示したが、他の実験段階においては、サーモグラフィとほぼ同値を示した。

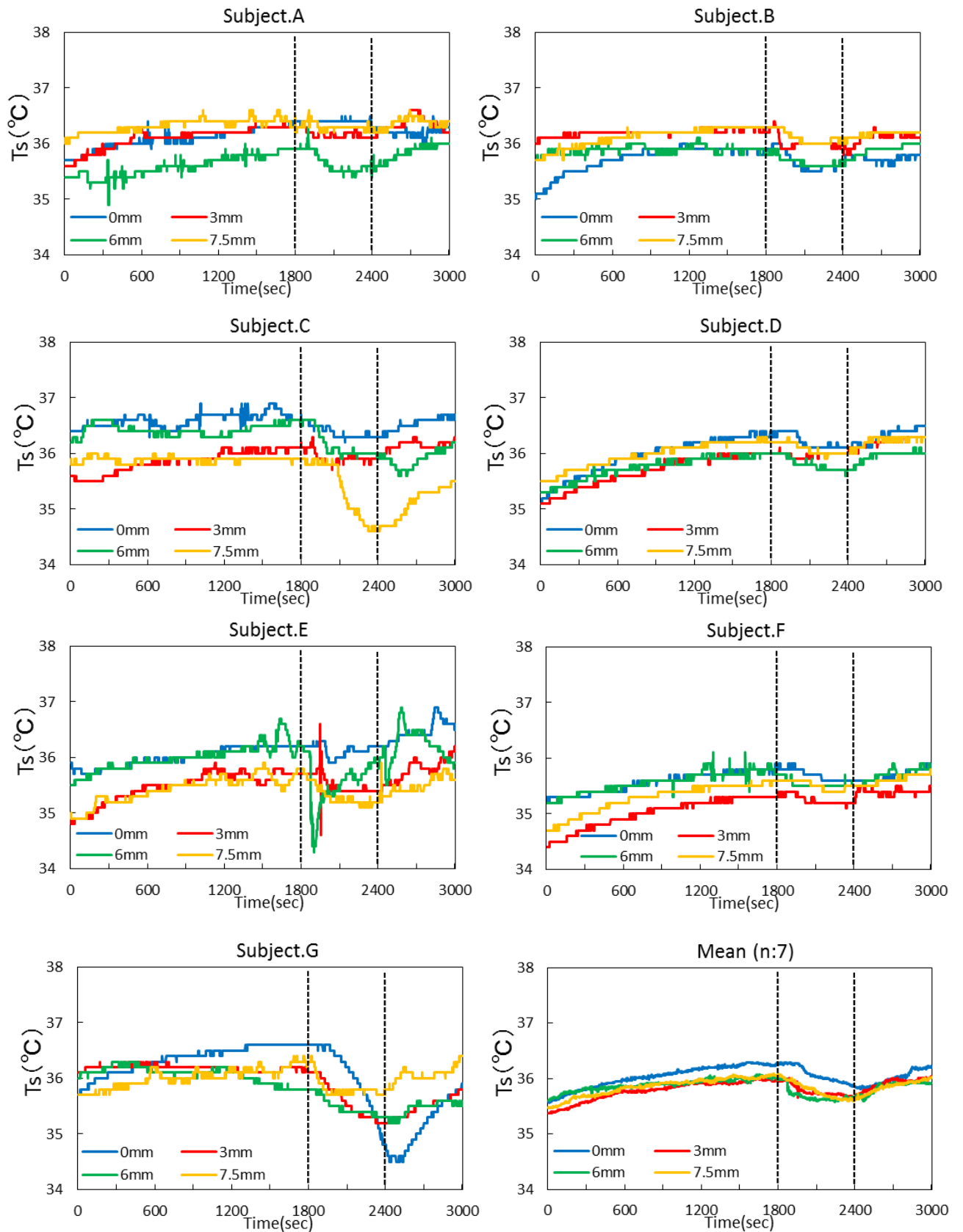


Fig.4-12 Changes of skin temperature in the chest of each subject and mean(lower right) during experiment.

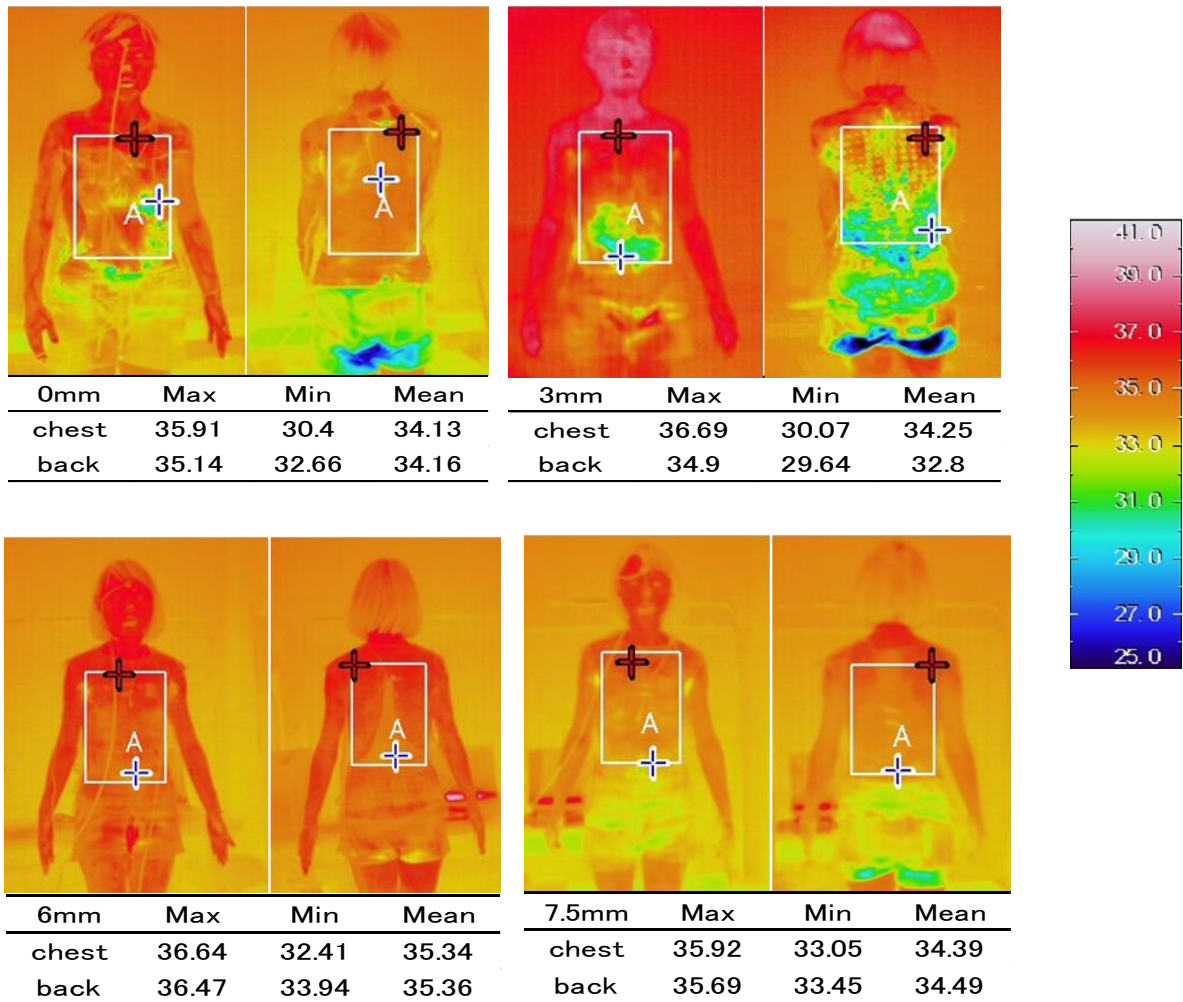


Fig.4-13 Changes and distribution of temperature beneath film cloths by thermography.

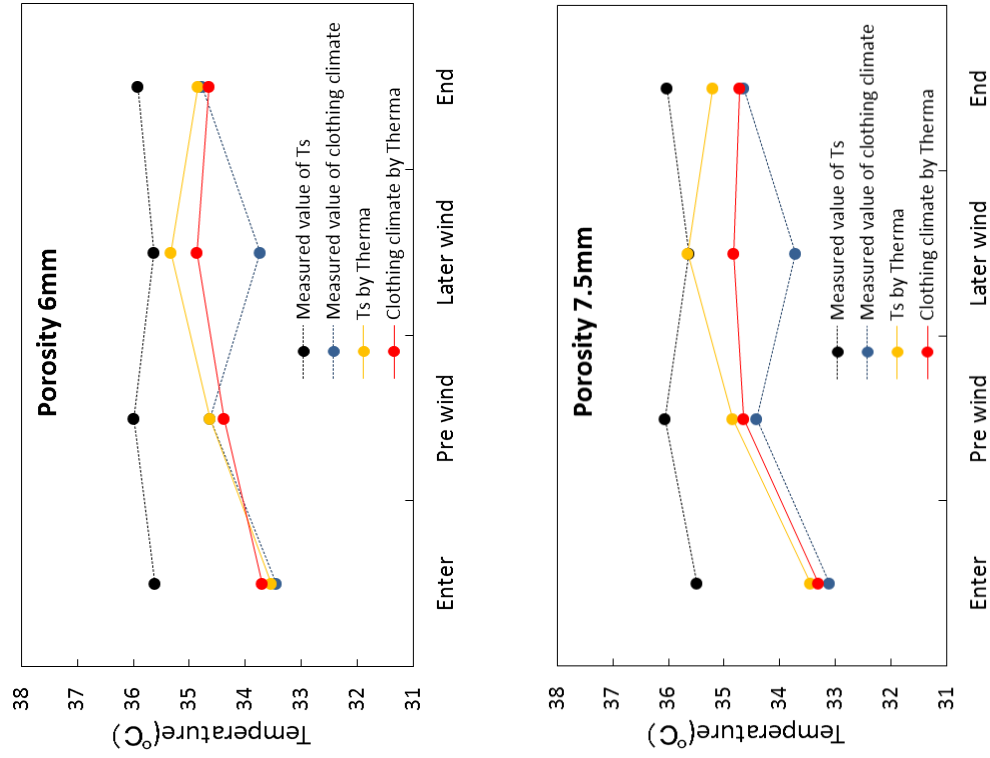


Fig. 4-14 Comparison between measured value of temperature on the skin and clothing climate and thermography.

(4) 前額発汗量

発汗量については被験者 7 人の内 3 人に測定機の不具合があったため、これは 4 人のデータを用いて分析した。Fig. 4-15 には被験者毎の発汗量の経時変化を示す。発汗の頻度及び発汗量は個人差があるにもかかわらず、孔径 0mm の実験服を着用することによって、前額の発汗量はより多く、7.5mm は被験者 G 以外には発汗する兆候が殆どみられなかった。また送風による発汗の影響については、4 人のうち、被験者 C のみ気流の影響を受け、送風期に発汗は下降する傾向がみられた。

4 人を平均した経時変化及び多重比較の結果を Fig. 4-16 に示す。孔径 6mm と 7.5mm の発汗量は全実験中低値にとどまったが、0mm の場合は安静時から徐々に上昇し続け、3mm では両者の中間の値が示されている。4 名の平均値を見ると、0mm が 228g/m²h と最も高く、3mm、6mm、7.5mm との間にそれぞれ 1%の有意差が認められた。3mm の場合も 104 g/m²h という高い値を示し、6mm、7.5mm との間に有意差が認められた。

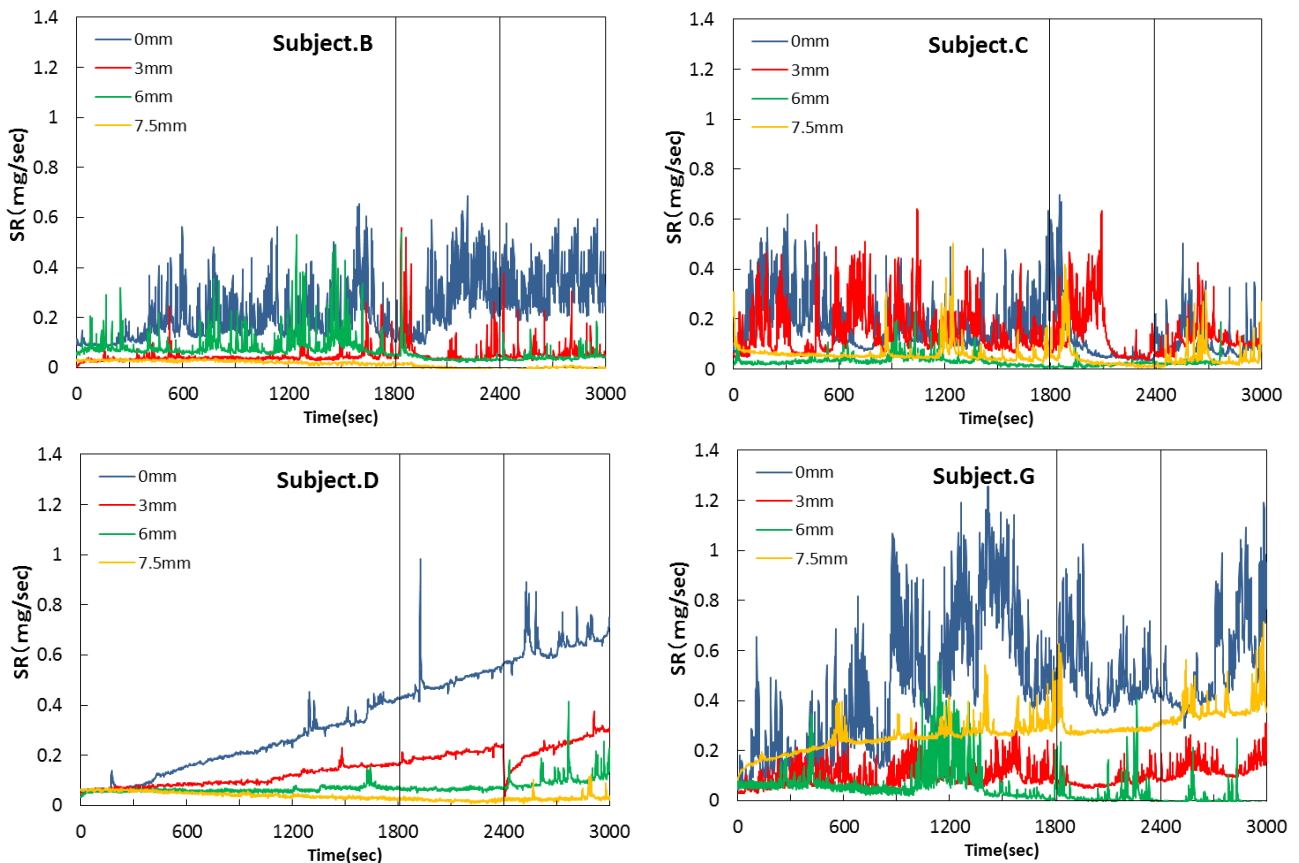


Fig. 4-15 Changes of sweat rate on the forehead of each subject.

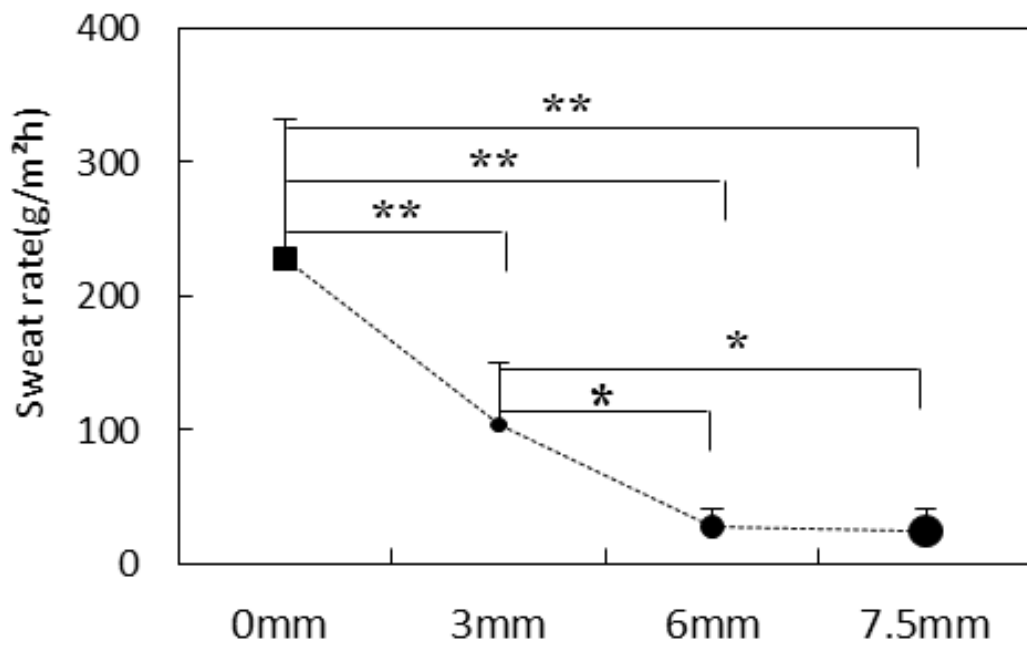
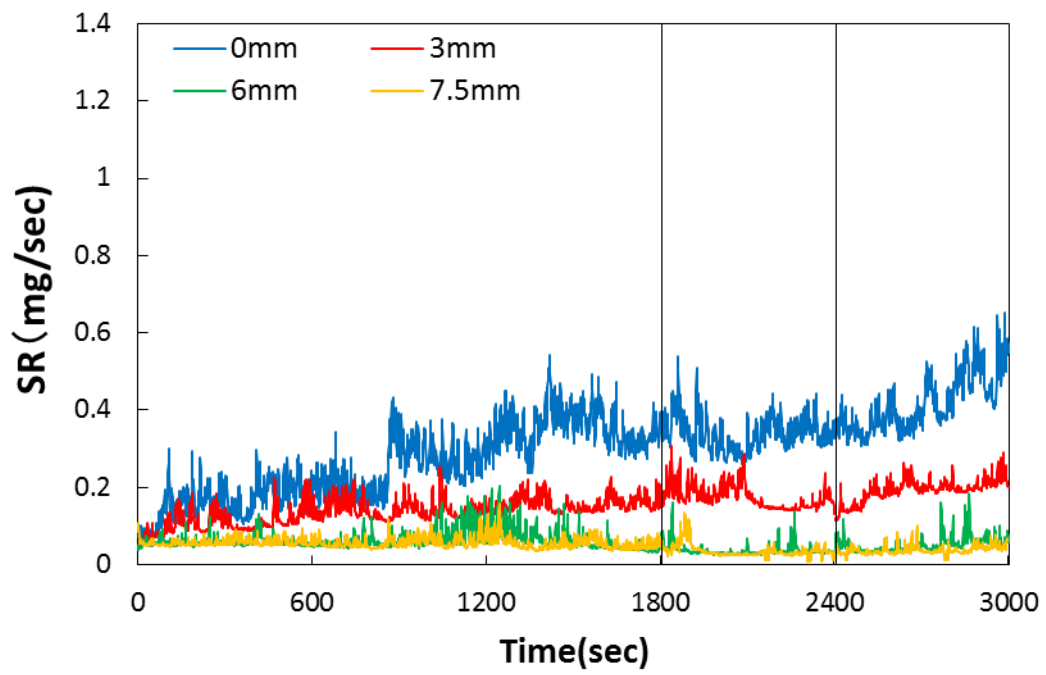


Fig. 4-16 Changes(upper) and Comparison(lower) of sweat rate on the forehead.
 (n=4) * : p<0.05 ** : p<0.01 significant difference

(5) 心拍数

Fig. 4-17 に、心拍数の多重比較の結果を示す。0mm と 7.5mm の間に 5%の有意差が認められた。

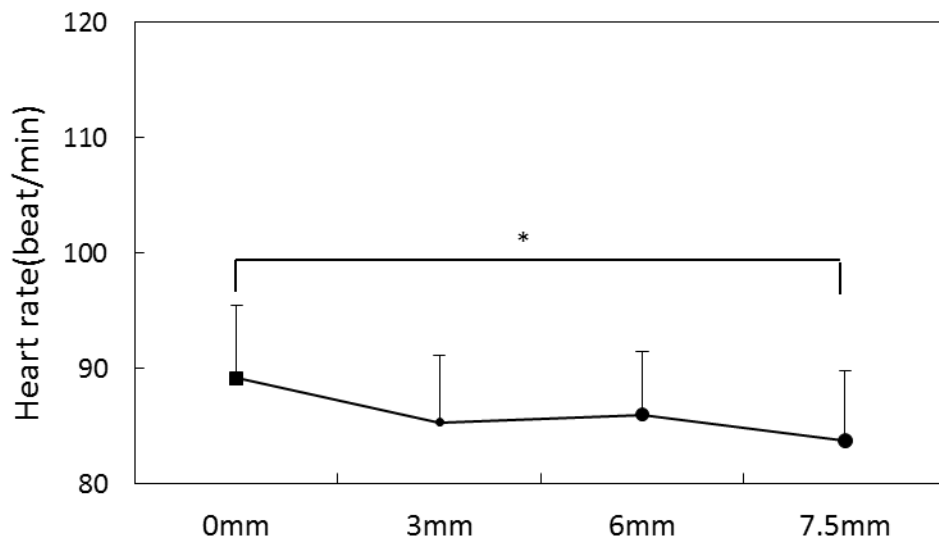


Fig.4-17 Comparison of Heart rate (n=7).

* : $p < 0.05$ ** : $p < 0.01$ significant difference

(6) 官能評価

Fig. 4-18 は温冷感、湿潤感、発汗感及び快適感の経時変化を 7 名の平均値によって示している。いずれの条件においても実験開始とともに不快感が上昇するが、送風に伴い不快感が低下し、孔径による影響が縮小する傾向が示された。また、各々申告項目別に見ると、安静時、回復期及び脱衣後の湿潤感、発汗感は、孔径による影響が明らかに示され、孔径の大きいほど「0 どちらでもない」「0 汗が出てない」という申告に偏り、孔なしでは「2 湿っている」「2 汗が出ている」と、いずれも $0\text{mm} > 3\text{mm} > 6\text{mm} > 7.5\text{mm}$ の順に不快感が低下している。Table 4.5 は、官能評価の分散分析結果である。温冷感を除くいずれの評価項目についても要因 A、要因 B ともに 1%水準での有意性を示し、送風の有無はもちろん、フィルム衣服の孔径が、湿潤感、発汗感、快適感に及ぼす影響の大なることが示された。ただし温冷感については、孔径の有意差が認められず、前述の衣服内温度の結果と呼応している。

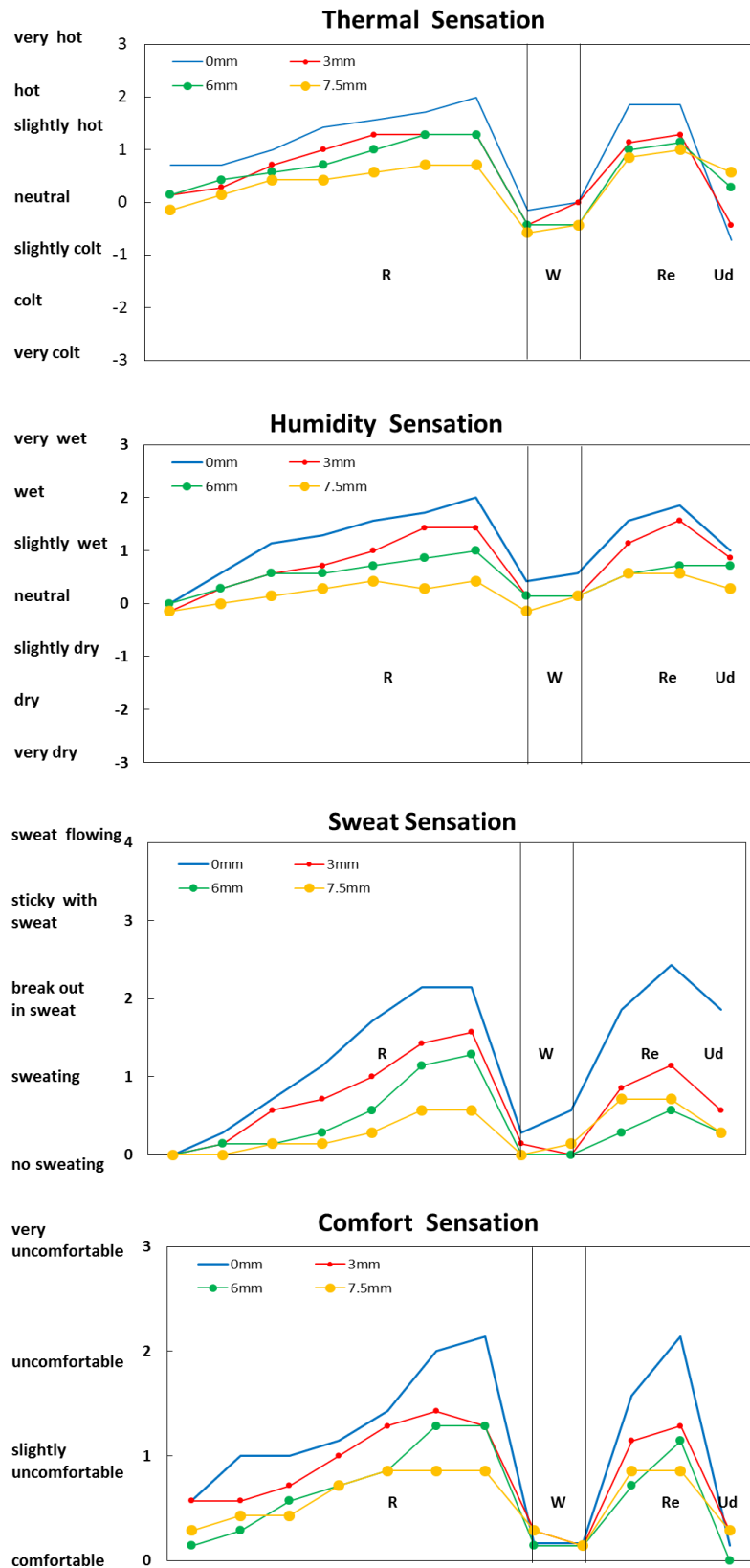


Fig. 4-18 Changes of thermal, humid, sweat and comfort sensation (n=7).

R: resting W: winding Re: recovery Ud: undress

Table 4.5 Result of analysis of variance in sensory evaluation.

Factor	D.F.	F - value			
		Thermal	Humid	Sweat	Comfort
A	3	0.93	10.30**	8.11**	6.94**
B	3	35.01**	11.28**	4.07**	36.03**
A×B	9	3.10**	1.05	2.14*	1.81
Error	96				
Total	111				

Factor A: pore diameter; Factor B: the experimental stage

**: $p < 0.01$ *: $p < 0.05$ significant difference

4.4 考 察

衣服の快適性を左右する要因として被服材料の透湿性が重要であることは自明の理である。しかし被服材料の透湿性は、材料組織の空隙を通じた拡散と繊維自身の吸放湿によるものとの総合であるため、繊維素材を用いた研究で透湿のみの効果を特定することは困難であった。本研究では、不透湿膜に穿孔したフィルム衣服を用いることにより、吸放湿過程をとらない衣服の透湿に限定し、気孔率の変化に伴う透湿率、通気度が衣服内気候に及ぼす影響を検討しようと考えた。ここでは、スキンモデルによるシミュレーション実験の結果と、人体着用実験による生理・心理反応の結果を合わせて、フィルム衣服の透湿・通気が暑熱時の衣服内気候に及ぼす影響について考察を加えることとする。

Table 4.6 は 4 種の穿孔フィルム素材の気孔率、通気度、保温率、透湿率、スキンモデルにより求められた空気層無・有時の熱抵抗、蒸発熱抵抗、およびフィルム衣服着用時の衣服内温度、衣服内湿度、発汗量、心拍数相互の相関行列である。

気孔率と通気度・保温率・透湿率間には極めて高い相関係数、0.998、-0.954、0.963 が示され、当然のことながらフィルム素材の通気性・保温性・透湿性は気孔面積に依存することが分かる。

Table 4.6 Correlation coefficient among porosity(P), air permeability(A), thermal insulation(T), moisture permeability(M) of the perforated films, and the results obtained by the skin model test(Rd. Re) and physiological experiment(temperature and humidity inside clothing, SR and HR).

	P	A	T	M	Rd (0mm)	Rd (7mm)	Re (0mm)	Re (7mm)	Temperature	Humidity	SR	HR
P	1.000											
A	0.998**	1.000										
T	-0.954*	-0.932	1.000									
M	0.963*	0.944	-0.972*	1.000								
Rd (0mm)	-0.840	-0.859	0.752	-0.674	1.000							
Rd (7mm)	-0.990**	-0.977*	0.987*	-0.983*	0.796	1.000						
Re (0mm)	-0.895	-0.884	0.855	-0.953*	0.521	0.896	1.000					
Re (7mm)	-0.874	-0.857	0.863	-0.956*	0.473	0.890	0.995**	1.000				
Temperature	-0.368	-0.361	0.304	-0.513	-0.137	0.363	0.738	0.743	1.000			
Humiditr	-0.797	-0.786	0.754	-0.886	0.363	0.800	0.983*	0.982*	0.850	1.000		
SR	-0.885	-0.866	0.883	-0.966*	0.491	0.904	0.992**	0.999**	0.716	0.973*	1.000	
HR	-0.680	-0.691	0.543	-0.722	0.301	0.637	0.893	0.865	0.893	0.936	0.842	1.000

スキンモデルにおける熱抵抗 R_d と気孔率との相関関係を見ると、空気層無の場合は相関係数が -0.84 であるのに対し、空気層有では -0.990 となり、フィルム衣服の R_d には模擬皮膚と衣服の間の空気およびその流動性が関与していることがうかがわれる。すなわち空気層無の場合は、厚さ 0.012mm のフィルムは模擬皮膚表面の空気の境界層の中に入るため、 R_d は 0.014 から 0.011 の狭い範囲に入り、孔径の影響が僅少である。ところが衣服下空気層有の場合は孔径 0mm の場合フィルム下の空気は静止空気層として熱抵抗を示し R_d は 0.025 と空気層無の場合の 1.79 倍に増加し、孔径が 3mm 、 6mm 、 7.5mm と増大すると R_d は 0.024 、 0.016 、 0.014 と減少し、孔径に伴って衣服下空気の対流を生じ、 R_d の低下を招いたと考えられる。 R_d と通気度との関係を Fig. 4-19 に示す。

一方、スキンモデルにおける蒸発熱抵抗 R_e と気孔率の関係は空気層の有無に関わらず相関係数 -0.89 、 -0.87 、透湿率との関係ではさらに -0.95 、 -0.96 と極めて高く、透湿率がフィルム衣服の R_e を決定していることが示唆された。Fig 4-19 に各フィルムの通気度、透湿率と空気層有・無下で求めた R_e の関係を示す。いずれの条件下でも透湿率の増加と共に R_e は指数関数的に低下し、その寄与率は 0.94 、 0.99 と高い値を示した。しかし空気層の影響は R_d と反対に、衣服下空気層有の方がなしに比べて R_e が小となり、フィルムと模擬皮膚間の空気層の存在によって拡散・対流による水分移動が促進されることが示された。

一般に繊維製品においては熱移動と水分移動間に相似則が成り立つといわれている。これは繊維製品の多くが充填率 0.5 以下、すなわち含気率 0.5 以上と極めて高い含気構造にあることに由来する。本研究における対象は不透湿のフィルム試料であるため、気体における相似性は適用できないことが示された。田村は^{7~8)}は消防防護服やバイオハザード対応防護服などにおいて熱抵抗と蒸発熱抵抗の関係を報告しているが、これによれば通常の繊維製品では両者の相関性が認められるものの、そこに不透湿膜が介在する場合には全く相関性が認められていない。本研究の知見は防護服などの設計に貢献するものと考えられる。

着用実験における衣服内温度についてみると、気孔率、通気度、保温率、透湿率のいずれとの相関も 0.30 から 0.51 程度にとどまり、気孔面積が衣服内温度の強い形成要因とはなっていない。ただしスキンモデルで求められた R_e との相関は 0.74 と比較

的が高く、衣服の Re が高いほど皮膚からの水分蒸発が抑制されることにより、2 次的に衣服内温度が上昇する、すなわち衣服内温度の形成には衣服の Re が間接的に関わっているものと考えられる。衣服内湿度については、気孔率、通気度、透湿率の関与が 0.78 から 0.89 とやや大きいが、さらにスキンモデルで求められた Re との相関は 0.98 にも達し、 Re が衣服内湿度の形成に強く関わっていることが示された。また、 Re は人体側の生理要因である発汗率との間でも 0.99 と高い相関を示し、 Re の大きい衣服は衣服内湿度を上昇させ、これがストレスとなって人体の発汗反応を促し、さらに衣服内湿度の上昇をきたすというフィードバックを引き起こしているであろうことが予測される。このことは心拍数と蒸発熱抵抗の関係、衣服内湿度との間の高い相関からも見ることができる。清水裕子、酒井秀夫も⁹⁾、透湿率の異なる林業雨具の着用実験で、防水雨具の着用が発汗を促進するという同様な結果を報告している。

着用実験における送風の効果としては、送風に伴い衣服内温・湿度が低下し、孔径の差が縮小すること、また温冷感、湿潤感、発汗感、快適感のいずれの官能量も送風と共に有意に低下することが示された。暑熱時の快適感について長谷部、田辺ら¹⁰⁾は、静穏気流下及び 0.5m/s の気流下では、通気度のないまた透湿性の弱い衣服の着用時やや不快であったが、気流が 0.7m/s に増加すると不快感が解消されたことを報告している。本研究における気流速度は 0.8m/s と長谷部の条件とほぼ同レベルであり、同様の結果が得られたが、送風により衣服表面の境界層が縮小し表面の静止空気層の保温効果が低下するとともに、孔部分からの風の侵入によって衣服内温度湿度の低下を招き、これが不快感の解消につながったものと考えられる。

また、赤外線透過性という特徴で、これまで接触型センサーしか測定できなかった皮膚表面と衣服間の温度変化を、サーモグラフィを用いることにより着衣時の変化及び分布として観察することができた。サーモグラフィの観察により、服に覆われている際に、腰囲より上方になるほど温度がより高いことが示された。このことは、人体と服の間の空気層により対流が生じ、空気が上部に移動しやすくなったと考えられる。発汗が生じる場合特に流れる汗は腹部に溜まりやすく、その結果、腹部の温度が他の部位より著しく低くなったことも示された。これらの衣服内の温度分布結果により、人体皮膚表面の温度分布差、発汗部位差に応じた衣服の素材特性、デザインを考慮し快適な衣服設計に応用が可能と考える。

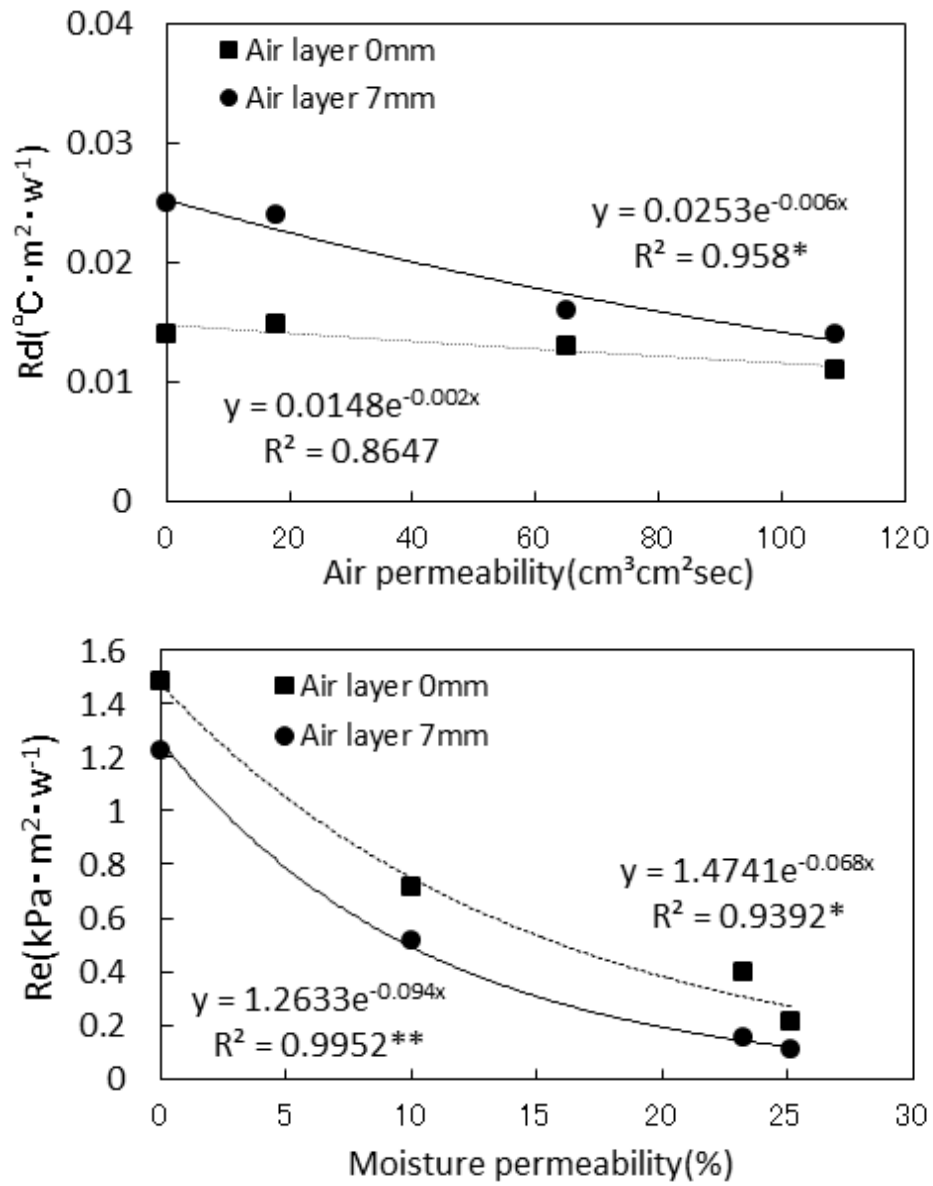


Fig. 4-19 Relationship between Rd and air permeability (upper), Re and moisture permeability (lower).

今回、透湿率と衣服内湿度の関連、スキンモデルによって求められた熱抵抗と蒸発熱抵抗の衣服内湿度予測への有効性等を明らかにすることができた。これらの結果はそのまま不透湿性または難透過性を要する各種防護服の設計上に有効な指針を提供すると考えるが、併せて繊維布帛とフィルムの差を認識することの重要性を指摘するものである。

4. 5 要 約

衣服の水分透過性が衣服内気候及び人体の生理・心理反応に及ぼす影響を定量的に捉えるため、不透湿膜に直径 0mm, 3mm, 6mm, 7.5mm の孔を穿孔したフィルムを用いて衿なし袖なしブラウスを作製し、これを成人女性 7 名に着用させ実験に供した。温度 34℃、湿度 50% に設定した人工気候室において、安静 30 分、0.8m/s の気流送風 10 分、回復 10 分の間、衣服内温・湿度、発汗量、心拍数を測定、同時に快適感・温冷感・湿潤感・発汗感の官能評価を解答させた。穿孔フィルム試料の特性評価については、気孔率、透湿率、通気度、保温率を測定するとともに、著者らが開発したスキンモデルを用いて試料の熱抵抗 (Rd) と蒸発熱抵抗 (Re) を求めた。主たる結果は以下の通りである。

- 1) 試料の通気度、透湿率は気孔率の増大とともに増加し、保温率は減少した。
- 2) スキンモデルにおける発汗後の恒定衣服内湿度は孔径が大きいほど低く、維持時間は孔径と共に短縮された。
- 3) 乾燥時の Rd は空気層なしでは孔径の影響が僅少であり、空気層有では孔径の増加とともに低下した、一方、Re は孔径によらず空気層無の方が大で、また空気層の有無によらず孔径が大なるほど Re が低下した。
- 4) 衣服内温・湿度 (胸部)、前額発汗量、心拍数に対し、フィルム衣服の孔径 (A) 並びに安静・送風・回復の実験段階 (B) を要因とする二元配置分散分析を実施した結果、衣服内温度、湿度については要因 A・B とともに危険率 1% の有意差を、発汗量については要因 A が 1% の有意差を示し、心拍数については有意差が認められなかった。
- 5) 衣服内湿度は、スキンモデルで求められた Re と高い相関を示し、Re が衣服内湿度の形成に強く関わっていることが示された。また、Re は発汗率とも高い相関を

示し、Re の大きい衣服は衣服内湿度を上昇させ、これがストレスとなって人体の発汗反応を促し、さらに衣服内湿度の上昇をきたすというフィードバックを引き起こしているであろうことが予測された。

- 6) 着用実験における送風は、衣服内温湿度及びすべての感覚量に大きい効果を及ぼした。

引用・参考文献

- 1) 日本人間工学会衣服部会，被服と人体，日本出版サービス，p. 180(1981)
- 2) 前田亜紀子，山崎和彦，飯塚幸子，吉田燦；透湿性及び非透湿性外衣の衣服内気孔及ぼす効果，日生気象誌，36(1)：31-42(1999)
- 3) 石井与子，平田耕造；環境湿度の違いが吸湿性の異なる肌着着用時における発汗開始前後の温熱生理反応に及ぼす影響日生気象誌，47(1)：35-44(2010)
- 4) 鈴木英悟，樫村修生，高橋弘彦，南和広，中井誠一；衣服内空気循環が夏季暑熱環境下農作業時の体温調節反応に及ぼす影響，日生気象誌，49(2)：83-92(2012)
- 5) Teruko Tamura and Miwa Tomizawa；Thermal Control System for a Sweating Manikin, J.Home Econ.Jpn, 44(8)：671-677(1993)
- 6) 田村照子，仙波孝之，加藤康憲；模擬皮膚装置及びそれを用いた特性評価方法，特許第 4198152 号(2008)
- 7) 田村照子；バイオハザード対策用防護服の着用時快適性能評価に関する研究 -素材の評価-，バイオハザード対策専用防護服の性能と用途の策定に関する研究，平成 15 年度～平成 18 年度科学研究費補助金(基盤研究 (A))研究成果報告書，課題番号 15209020：262-298(2007)
- 8) Tamura Teruko.；Evaluation of thermal comfort of the protective clothing for firefighters using a movable sweating thermal manikin, Proceedings of Fourth NRIFD Symposium: 77-82(2005)
- 9) 清水裕子，酒井秀夫；林業用雨具の衣服内気候，日林誌，78(2)：119-126(1996)
- 10) 長谷部ヤエ，田辺新一；素材の通気度が衣服に及ぼす影響，繊維学会シンポジウム予稿集，E45-47(1993)

第 5 章

不透湿膜と布地の熱・水分移動 特性の比較に関する検討

5.1 緒 言

快適な衣服を設計するためには、人体と環境の間の熱、水分及び空気の移動メカニズムを解明する必要がある。しかし、繊維集合体である布地の複雑さと、発汗など人体の生理反応のため、衣服を介したこれらの移動現象を明らかにすることは極めて複雑であるため、現在も不明な点が多い。

衣服の快適性に関する研究については、主に衣服素材または衣服の単一特性についての研究が中心であった。丹羽ら^{1~8)}は、快適性に関わる被服材料の透湿性を系統的に研究し、中西ら^{8~9)}は、被服材料の通気性を中心に検討している。最近になって、衣服の水分特性、熱特性の面から着用時の快適性を総合的に評価、解析する方法として、シミュレーション装置を用いた研究がなされている。原田ら^{10~11)}は、衣服内シミュレーション装置を開発し、衣服素材の水分と熱特性を考慮した着心地の総合評価を試みた。田村ら^{12~14)}は被服の熱・蒸発熱抵抗を調べるため、サーマルマネキンを用い系統的評価した。薩本ら¹⁵⁾はサーマルマネキンを用いて物理的側面から肌着の温熱的快適性、衣服内気候への影響を検討した。

本研究の第4章では、被服材料の複雑さを排除するために、不透湿膜に穿孔したフィルム衣服の着用実験を行った。透湿率と衣服内湿度の関連、スキンモデルによって求められた熱抵抗と蒸発熱抵抗の衣服内湿度予測への有効性等を明らかにすることができた。この結果を一般の繊維製品の設計と関連付けるためには、今回の試料の透湿特性が一般の試料のそれとどの程度類似しどの程度乖離したものであるかを見ておく必要がある。そこで、本章においては、繊維集合体である布帛と、穿孔不透湿膜との物理特性を比較した。また、スキンモデルによる衣服気候の評価も加え、繊維布帛と不透湿膜フィルムの違いについて検討した。

5.2 実験方法

試料布は第4章で用いた穿孔フィルム4試料に、布地の織り目の密度や、厚さの異なる親水性繊維である綿100%の5試料(C1~C5)、疎水性繊維であるポリエステル100%(P)の6試料(P1~P6)を加えた15試料である。試料の諸元をTable 5.1に示す。測定項目は、第4章と同様に基本特性実験とスキンモデル実験に分けて行った。基本特性である、通気度、保温性、透湿率の他、布帛では吸湿性、吸水性、含気率を測定した。

5.2.1 試料布の物性実験

第4章に記した実験方法に準じ、透湿率を蒸発カップ法によって、通気度をフラジール形通気度試験機によって、保温性をASTM保温性試験機によって測定した。

また、吸湿性については、試料布を予め予備乾燥し、20℃、65%の恒温恒湿室また20℃、95%のデシケーターの中に24時間放置し、平衡状態になった試料布の吸湿質量W、105℃の乾燥機で試料布を絶乾状態まで乾燥させた絶対乾燥質量W₀を測定した。繊維の絶対乾燥質量に対する吸収水分の質量比、つまり水分率を次の式で求めた。

$$\text{水分率} = (W - W_0) / W_0 \times 100\%$$

吸水性については、Fig. 5-1に示している田村と小田が開発した吸水量測定装置(未発表)により測定した。図に示すように、水槽Bの中に定量の水を入れ、ステージCの上昇により、設置された試料布Aを水槽中の水の中に1mm、5秒間に浸漬した時の吸水量を測定した。

布地の含気率は布地の見かけの体積内に含まれる空気の割合であり、以下の式で求めた。

$$P = (V_a - V_f) / V_a$$

ここで、P：含気率(%)、V_a：布地の見かけの体積、本研究では、布地の厚さと単位面積により求めた：cm³；V_f：布地の中に含まれる繊維実質の体積；V_f=布地の重量/繊維の密度：cm³である。

Table 5.1 Physical characteristics of samples. (C: cotton, P:polyester)

No	Material	Construction	Density(Number/cm) (Warp×Weft)	Thickness (mm)	Weight (g/m ²)
C1	Reversible	Plain weave	101×72	0.388	235
C2	Oxford	Plain weave	65×14	0.350	167
C3	Broad	Plain weave	55×39	0.199	107
C4	Double Gauze	Plain weave	43×25	0.532	150
C5	Mesh	Plain weave	42×27	0.326	105

P1	Doeskin	Twill weave	61×41	0.550	244
P2	Shantung	Twill weave	85×35	0.228	113
P3	Satin	Twill weave	95×40	0.257	142
P4	Satin	Twill weave	99×46	0.257	92
P5	Georgette	Plain weave	48×39	0.251	85
P6	Smooth	Plain weave	No Detect	0.324	142

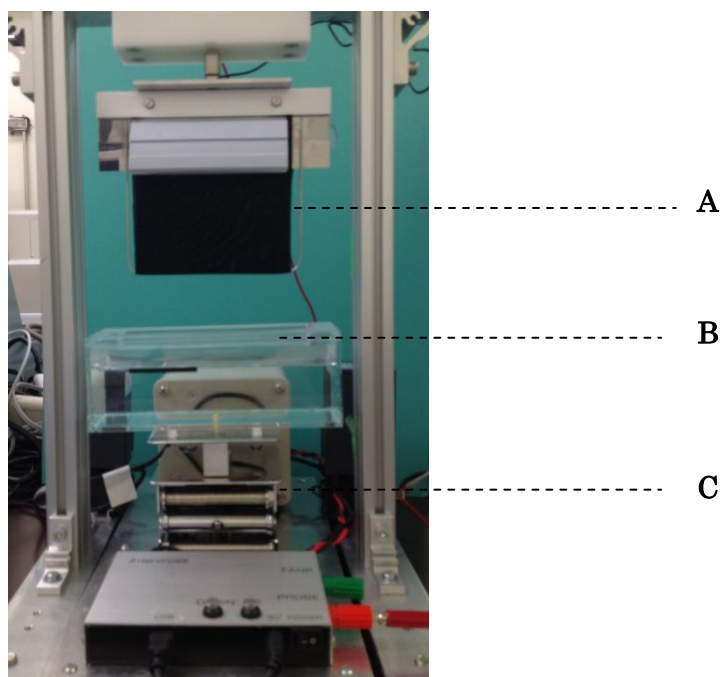


Fig.5-1 Construction of an absorbent system.

A: sample, B: water tank, C: stage system

5.2.2 スキンモデル

スキンモデルについては前述した田村らが開発した熱・水分共存系装置スキンモデルにより実験を実施した。スキンモデルの構造及び実験方法は、第4章の4.2.3節に掲げた。

5.3 結果

5.3.1 物性実験

フィルム試料の通気度、保温率及び透湿率の結果を Table 4.2 に示した、参考として、フィルム試料の結果を併記した。

Fig. 5-2 に通気度の結果を示す、フィルムの気孔率が大きいほど通気度が大きくなり、それぞれ 0、17.71、65.13、108.7 $\text{cm}^3\text{cm}^2/\text{sec}$ であった。布地である C1、C2、C3 また P1、P2、P3 より、フィルムの方が通気度が大きい結果を示した。P5 が 443 $\text{cm}^3\text{cm}^2/\text{sec}$ と最も高く、次に P6 が 285 $\text{cm}^3\text{cm}^2/\text{sec}$ 、孔なしの試料布を除いて、最も低いのは試料布 C1 の 7.68 $\text{cm}^3\text{cm}^2/\text{sec}$ であった。

Fig. 5-3 に保温性の結果を示す、フィルム孔径による保温性の違いが小さく、ほぼ 8.5~10%であったのに対し、布地の場合は、フィルムより大きな値を示し、試料布間でも大きな差が示された。保温性の最も高いものは綿の C4 であり、最も低いものはポリエステルの P5、8.4 であり、フィルムとほぼ同様な保温率を示した。

透湿率は Fig. 5-4 に示すように、通気度と同様にフィルムの気孔率が大きいほど透湿率が大きくなり、0mm、3mm、6mm、7.5mm で各々 0、10、23、25%であった。布地と比べると最も大きい 7.5mm でも、布地の 1/2 しか及ばなかった。布地では、綿とポリエステルでは大きな差がみられず、40~50%の範囲内に分布した。

含気率は 60~80%の間の値が示された。試料布 C4 が 82%で最も高く、P3 が 60%で最も低い値を示した。

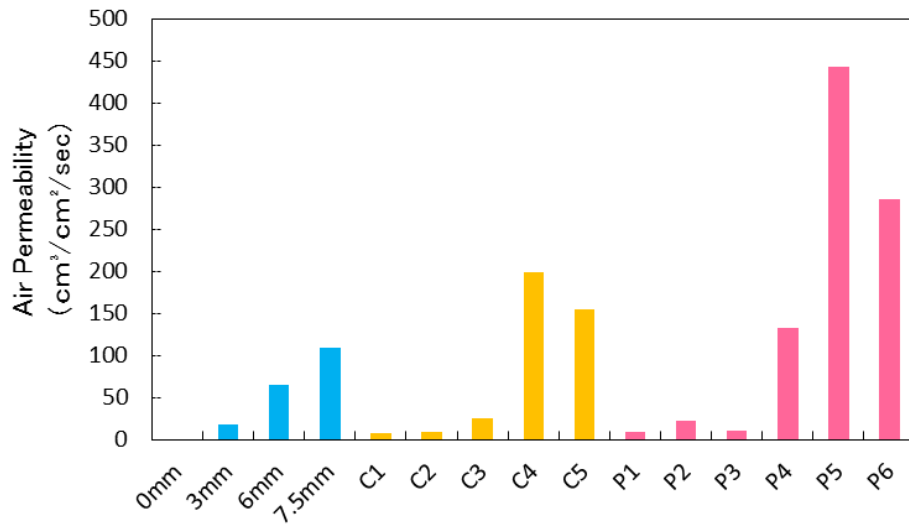


Fig.5-2 Result of air permeability of each sample.

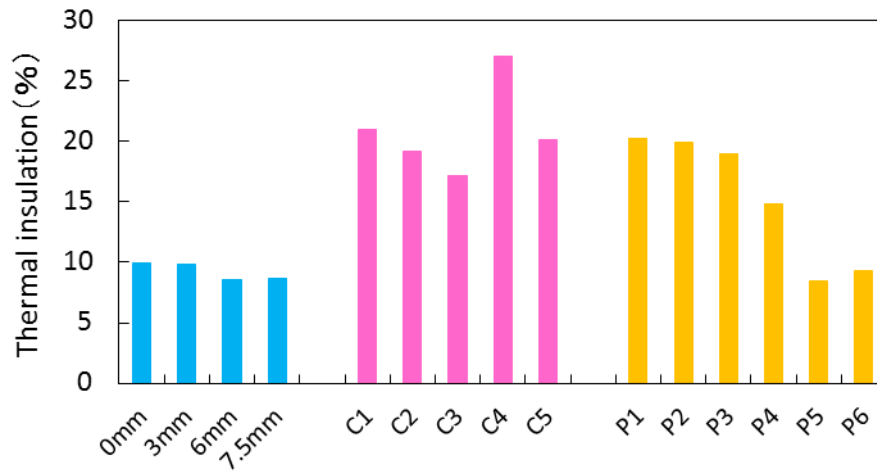


Fig.5-3 Result of thermal insulation of each sample.

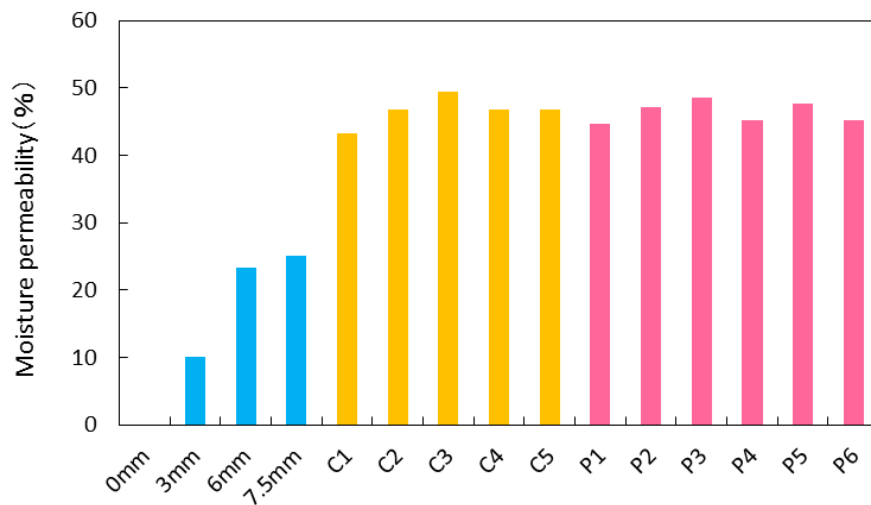


Fig.5-4 Result of moisture permeability of each sample.

布帛の吸湿性(水分率)を Fig.5-5 に示す。綿 100%の水分率については、20℃ 65%条件下で、C1 が 2.5 で最も小さく、他の 4 試料はほぼ 7.0 内外であった。また、高湿 95%になると、湿度の上昇に伴い水分率が 2 倍ほど大きくなった。親水性の綿と比べると、疎水性のポリエステルは湿度の影響によらず 0.6~1 の小さい値が示された。図に示す通り、高湿環境程、綿が吸湿に優れていることが示された。

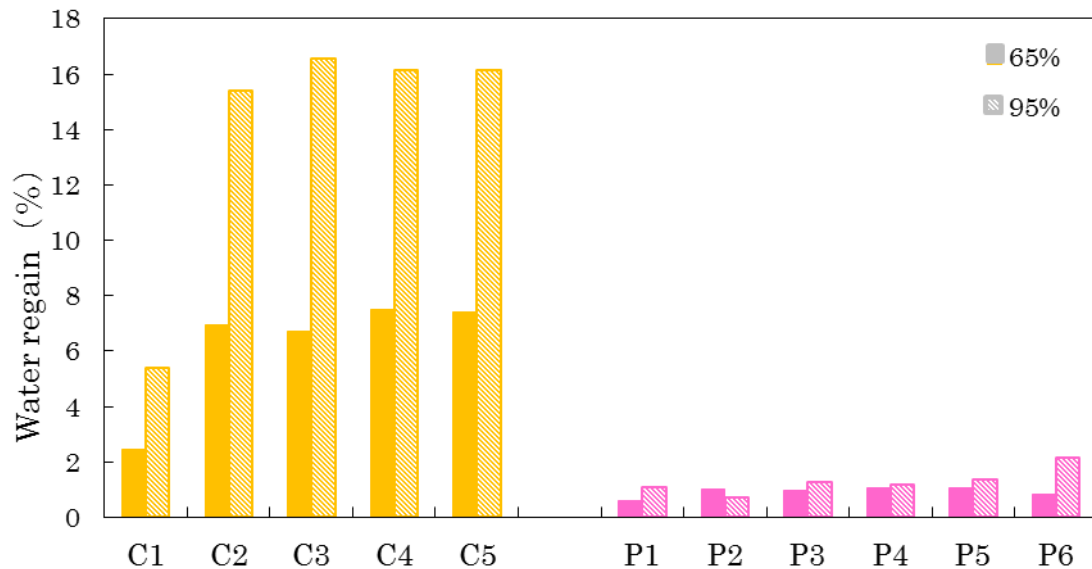


Fig.5-5 The result of water regain of fabric sample.

布地の吸水性の結果を Fig.5-6~Fig.5-7 に示す。すべての試料において、水と接する瞬時に、水の表面張力の影響を受けて急激に下がった後、吸水により急激に上昇する挙動を示した。親水性の綿試料では、吸水量の最も多いもの C1 で、2g であり、最も少ないもの C5 では、1g 程度の吸水量を示した。綿と比べると、疎水性のポリエステルでは、異なる挙動を示した。P1、P2 では、急激に下がった後、殆ど吸水せずに、恒定状態に達し。他の 4 試料では、張力の影響を受けず、そのまま吸水し、P3、P6 が最も多く、2.4g に達し、P4 及び P5 では、ほぼ 2g の吸水量を示した。

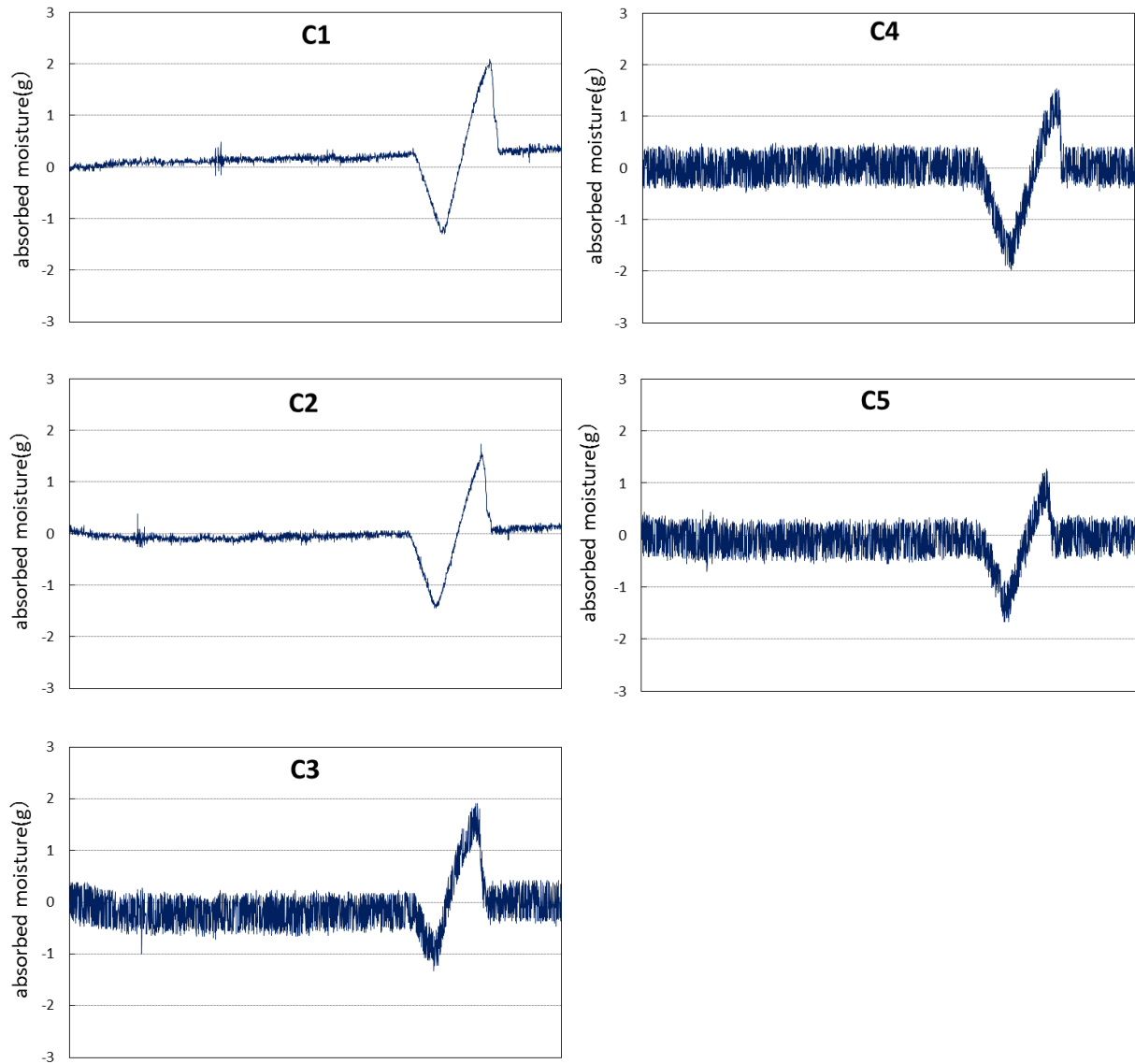


Fig.5-6 Result of water absorbed moisture of cotton samples.

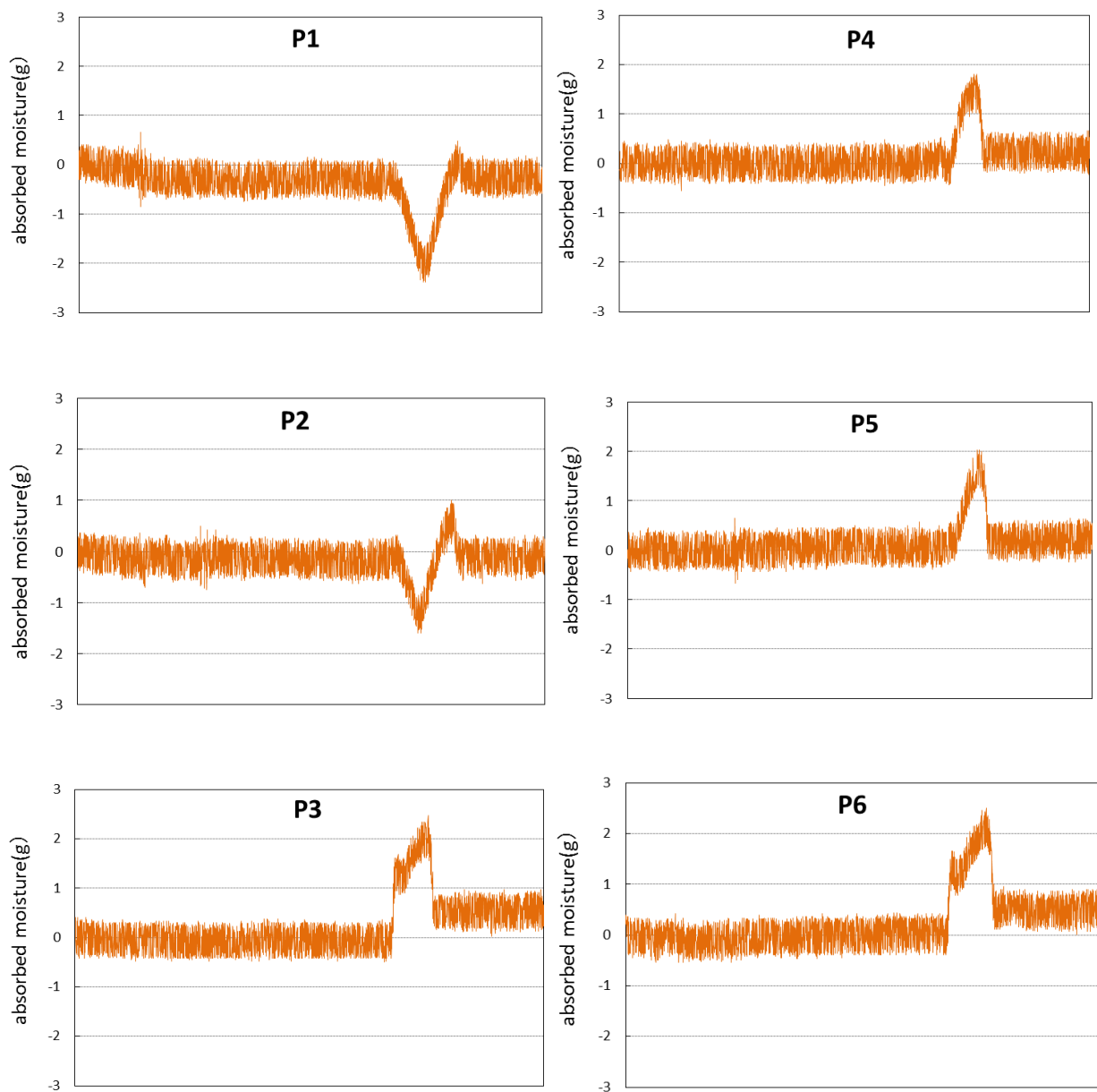


Fig.5-7 Result of water absorbed of polyester samples.

5.3.2 スキンモデル実験

スキンモデル実験結果を、試料布と模擬皮膚の間の空気層を 0mm と 7mm に分けて述べる。

(1) 空気層 0mm の結果について

測定 60 分間における模擬皮膚と試料間の湿度（衣服内湿度）の経時変化について、フィルム試料布、綿布、ポリエステル布の結果を Fig. 5-8、Fig. 5-9、Fig. 5-10 に示す。全体的な変化を見ると、測定開始 10 分間経過後の吐水開始により衣服内湿度は急激に上昇し、一定時間の恒定状態の後、やがて低下し始めた。試料布の種類によって異なる特徴が示された。

フィルム試料布では、孔径によりその挙動の差きわめて大きかった。恒定状態時湿度値は $0\text{mm} > 3\text{mm} > 6\text{mm} > 7.5\text{mm}$ の順に、それぞれ 32 、 30 、 28 、 $21\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ であった。またその維持時間は 7.5mm で最も早く、 3mm は下降する傾向を示したが吐水前に戻らず、また 0mm は実験を通して下降する傾向がみられなかった。

これに対して綿 100% 試料布では、5 試料の間に大きな差がみられず、恒定状態時の湿度は C1 が $28\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ と最も高く、C3 が最も低く $24\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ であった。恒定衣服内湿度維持時間はほぼ 15 分間であった。

ポリエステル試料布についても、綿試料とほぼ近似した値を示したが、綿より恒定衣服内湿度の維持時間は短く、蒸発しやすいことが示された。

Fig. 5-11～5-13 に熱流束の結果を示す。熱流束は湿度と連動して変化した。吐水後の最大値については、布地の綿とポリエステルはほぼ同値で、 $1500 \sim 2000\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ 範囲内に示された。それに対して、フィルムの最大値は 7.5mm の $1105\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ で、最も低い値を示したのは 0mm の $739\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ であった。布帛の試料の方がフィルム試料より水分蒸発が大きいいため、一定の表面温度を維持するための熱供給量は高い結果となった。極大値を示した後の挙動を見ると、いずれも波状を繰り返した後、収束する傾向を示した。

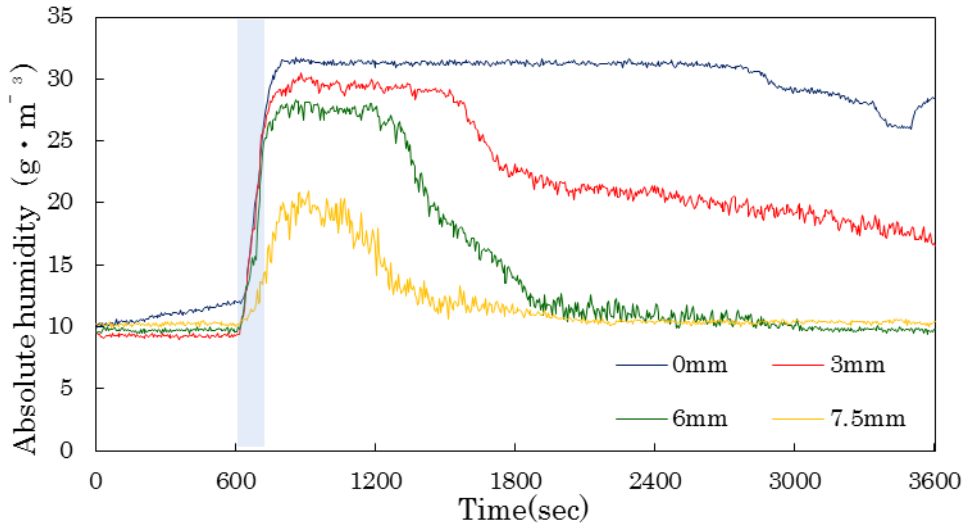


Fig.5-8 Absolute humidity between heat plate and film samples.

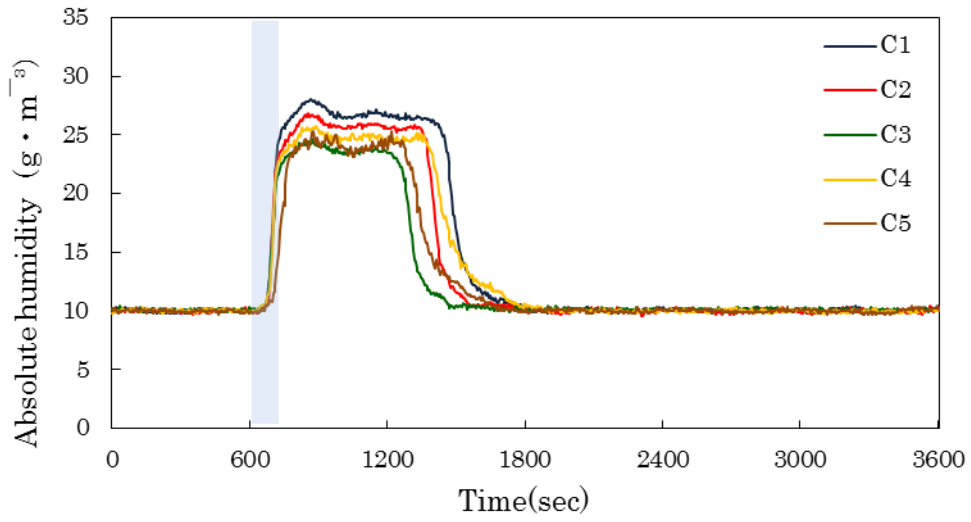


Fig.5-9 Absolute humidity between heat plate and cotton samples.

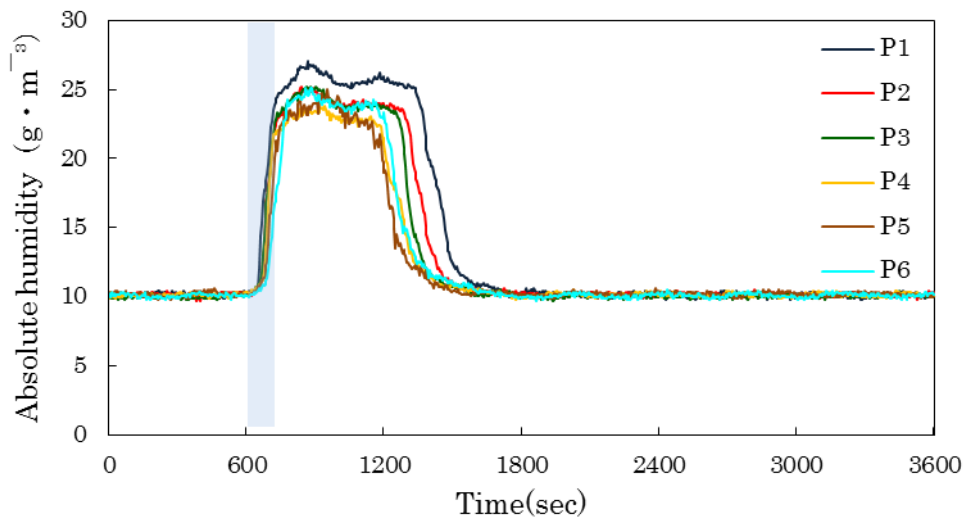


Fig.5-10 Absolute humidity between heat plate and polyester samples.

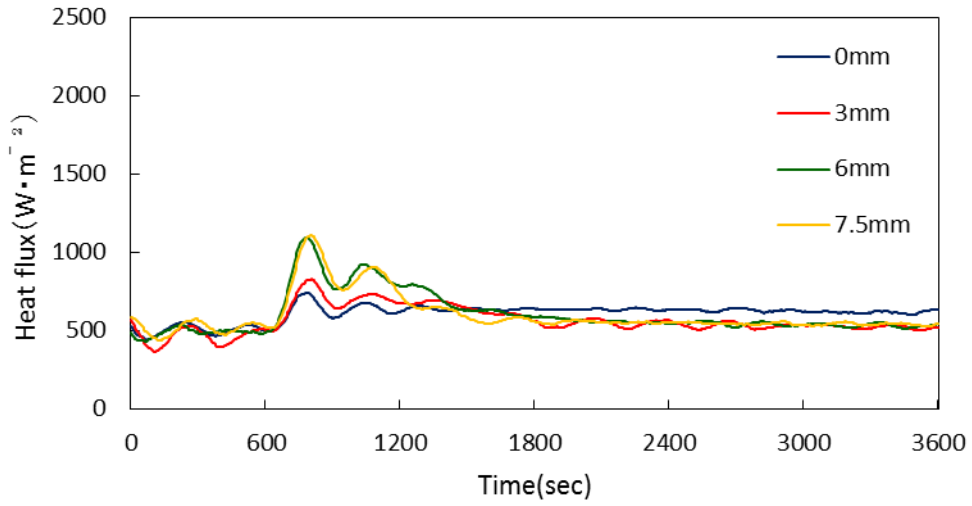


Fig.5-11 Heat flux between heat plate and film samples.

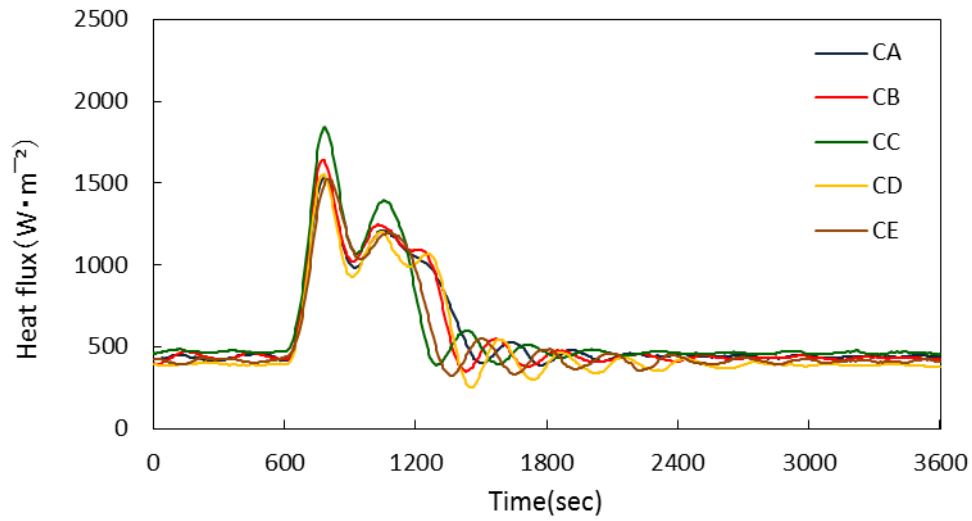


Fig.5-12 Heat flux between heat plate and cotton samples.

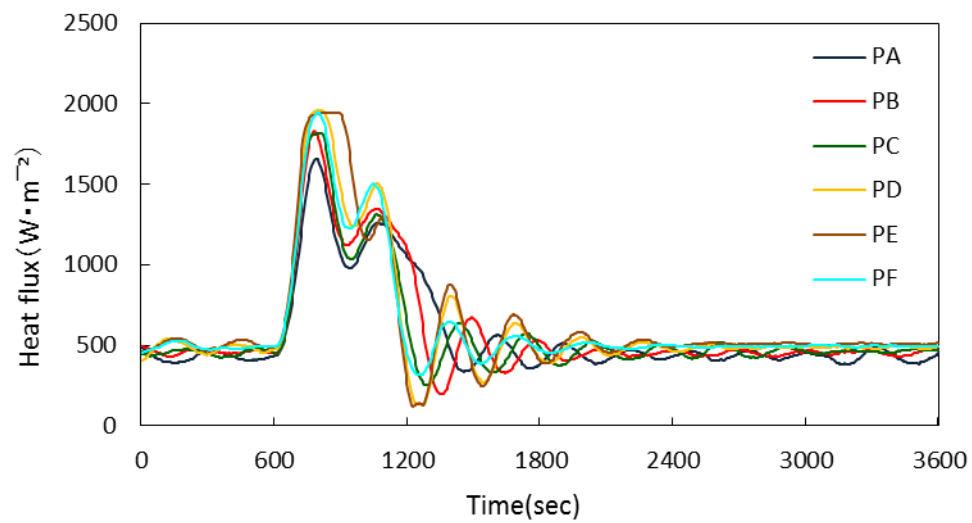


Fig.5-13 Heat flux between heat plate and polyester samples.

空気層 0mm における各試料布の熱抵抗(Rd)を Fig. 5-14 に、蒸発熱抵抗(Re)を Fig. 5-15 に示す。Fig. 5-14 に示す通り、フィルムの熱抵抗(Rd)は若干小さいが、綿や、ポリエステルとの間に大きな違いが見られなかった。それに対して、蒸発熱抵抗(Re)はフィルムと布地との間で大きな差がみられた。フィルムの蒸発熱抵抗は 0mm>3mm>6mm>7.5mm の順に、0mm が 1.48kPa・m²・w⁻¹で最も大きく、最も小さかったのは 7.5mm(0.21kPa・m²・w⁻¹)であった。いずれも布地の蒸発熱抵抗はフィルム 7.5mm より下回っている。綿においては、C1 が最も大きく、C3 が最も小さかった。ポリエステルでは、P1 が大きく、P4 が最も小さい結果を示した。

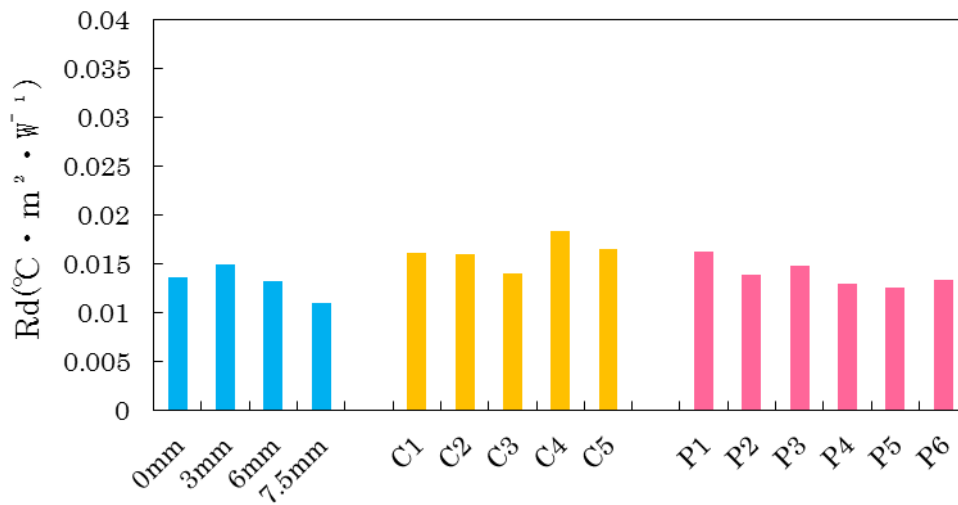


Fig.5-14 Rd of each sample measured by skin model.

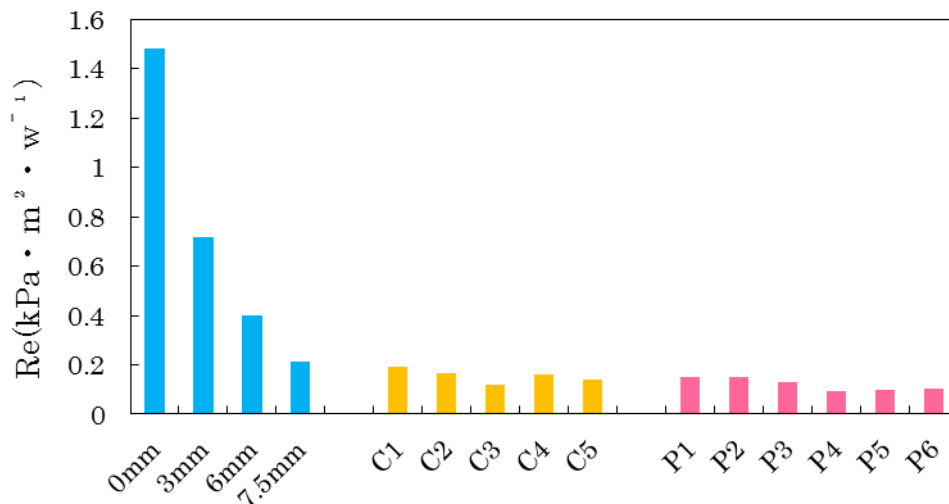


Fig.5-15 Re of each samples measured by skin model.

(2) 空気層 7mm の結果について

模擬皮膚と試料間の湿度変化を Fig. 5-16～Fig. 5-18 に、熱流束の結果を Fig. 5-19～Fig. 5-21 に示す。全体的に見ると、空気層 0mm と同様な経時変化を示した。衣服内湿度においては、フィルムの場合は孔径による差が明らかに見られ、綿とポリエステルでは試料間の差が殆どみられなかった。しかし吐水後の極大値では、フィルムまた布地いずれも $30 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ 程度に達した。また、綿及びポリエステルにおける恒定湿度の維持時間はほぼ 25 分間程度であった。熱流束においては、湿度と同様に、フィルム $0\text{mm} < 3\text{mm} < 6\text{mm} < 7.5\text{mm}$ の順に差がみられたが、布地の場合はほぼ同値を示した。

各試料の熱抵抗及び蒸発熱抵抗の結果を Fig. 5-22、Fig. 5-23 に示す。熱抵抗 R_d では、フィルムより綿及びポリエステルの値が大きく、綿試料間の差は認められず、ポリエステルでは P5、P6 が小さい値を示した。蒸発熱抵抗 R_e では、フィルムの孔径による R_d の違いが明らかに示され、フィルム 0mm が $1.2 \text{ Pa} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{w}^{-1}$ で最も大きく、7.5mm が $0.1 \text{ Pa} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{w}^{-1}$ 最も小さく、綿、ポリエステル及びフィルム 3mm では $0.5 \text{ Pa} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{w}^{-1}$ 程度の値を示した。

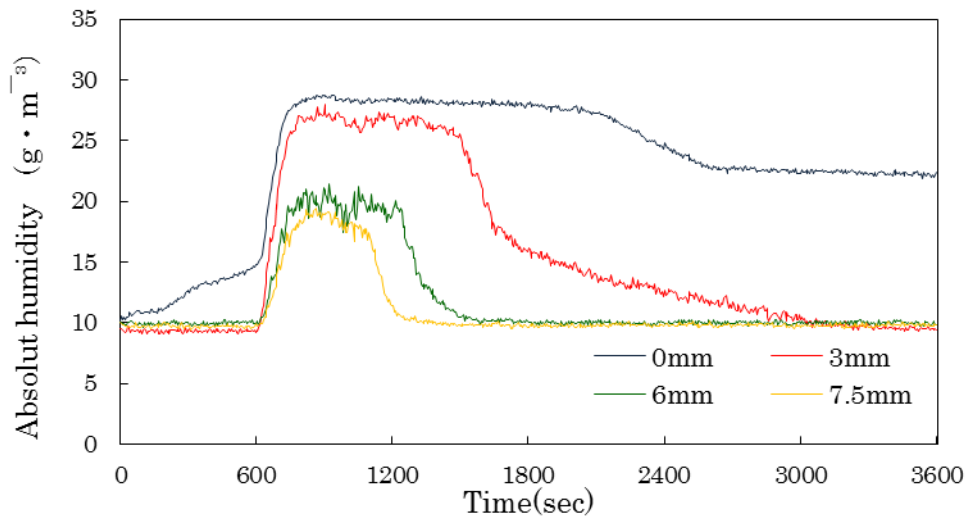


Fig.5-16 Absolute humidity between heat plate and film samples.

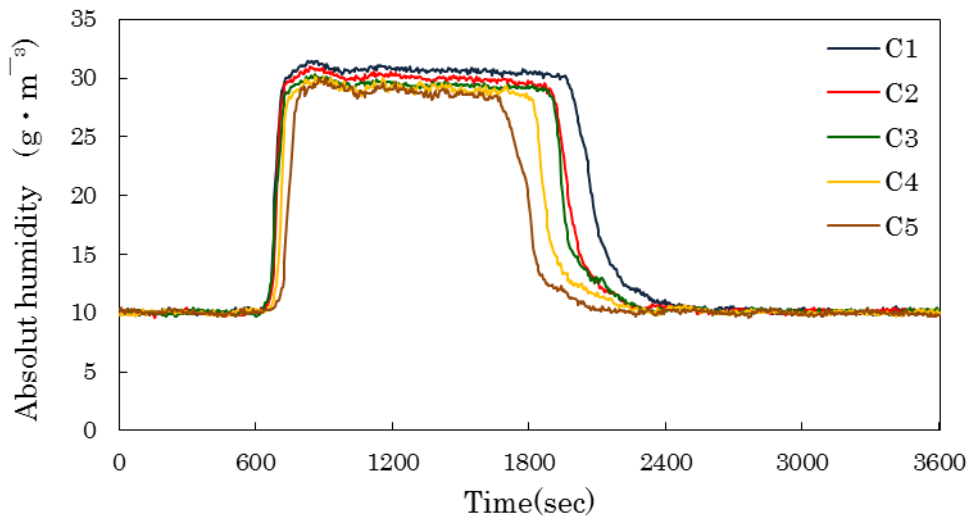


Fig.5-17 Absolute humidity between heat plate and cotton samples.

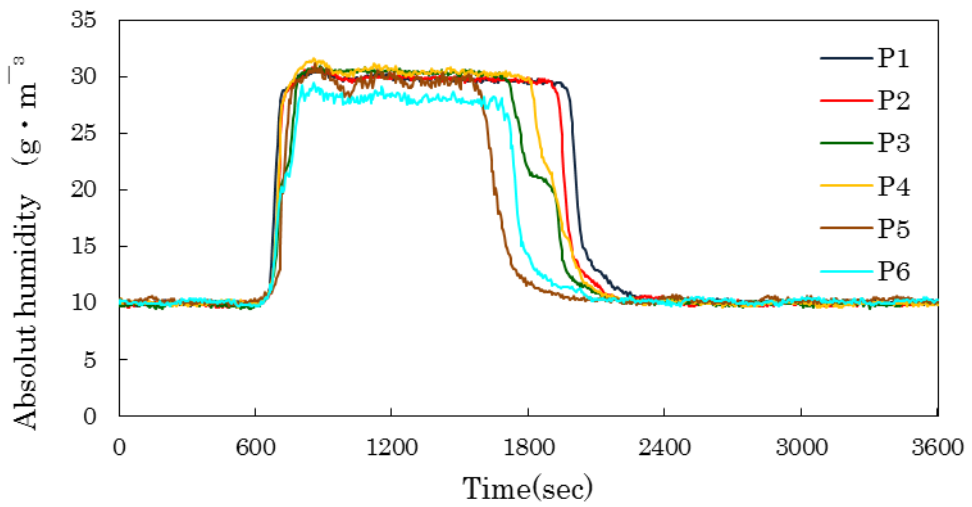


Fig.5-18 Absolute humidity between heat plate and polyester samples.

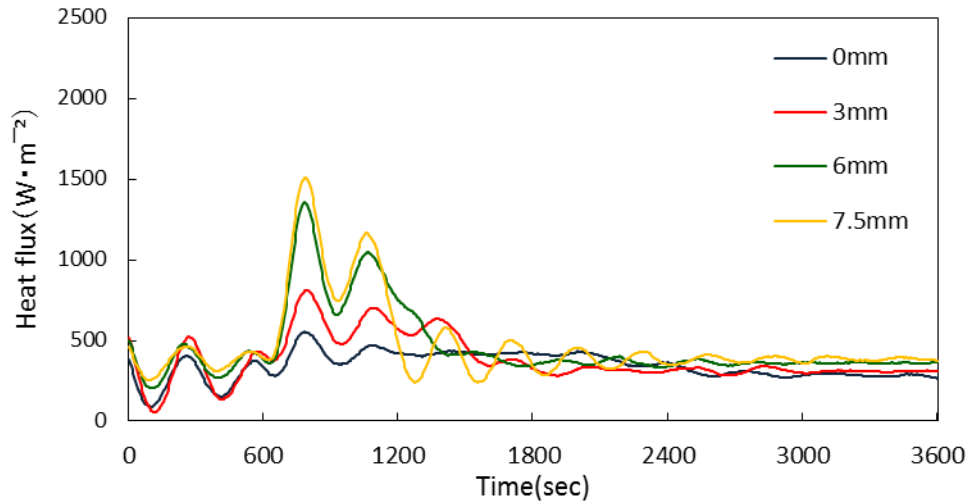


Fig.5-19 Heat flux between heat plate and film samples.

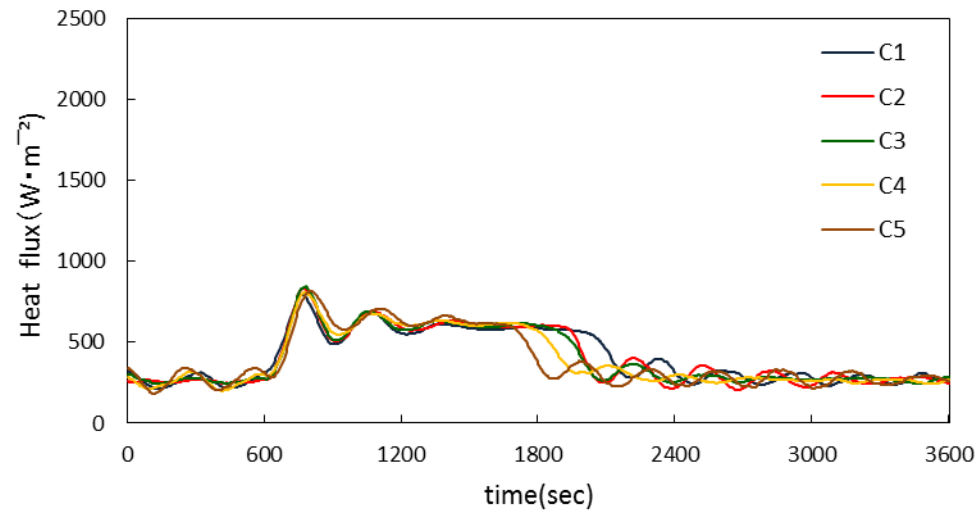


Fig.5-20 Heat flux between heat plate and cotton samples.

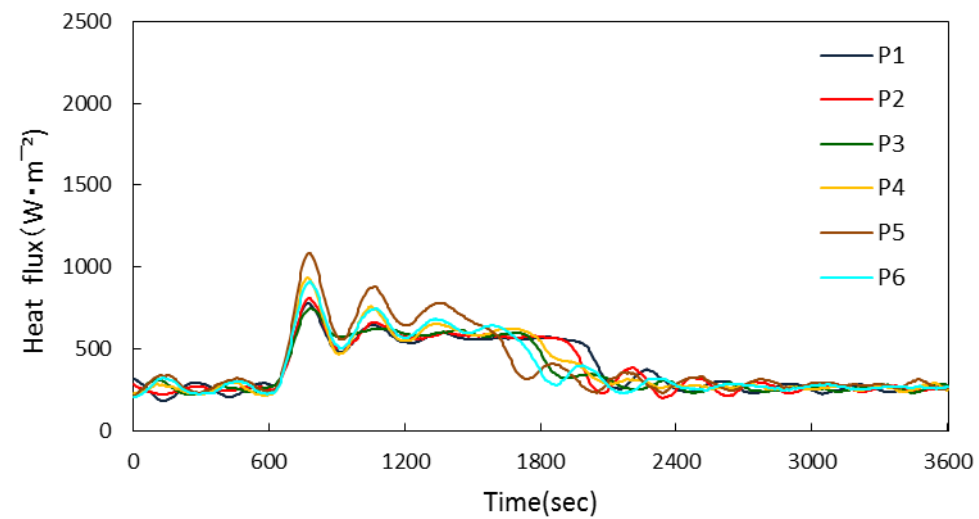


Fig.5-21 Heat flux between heat plate and polyester samples.

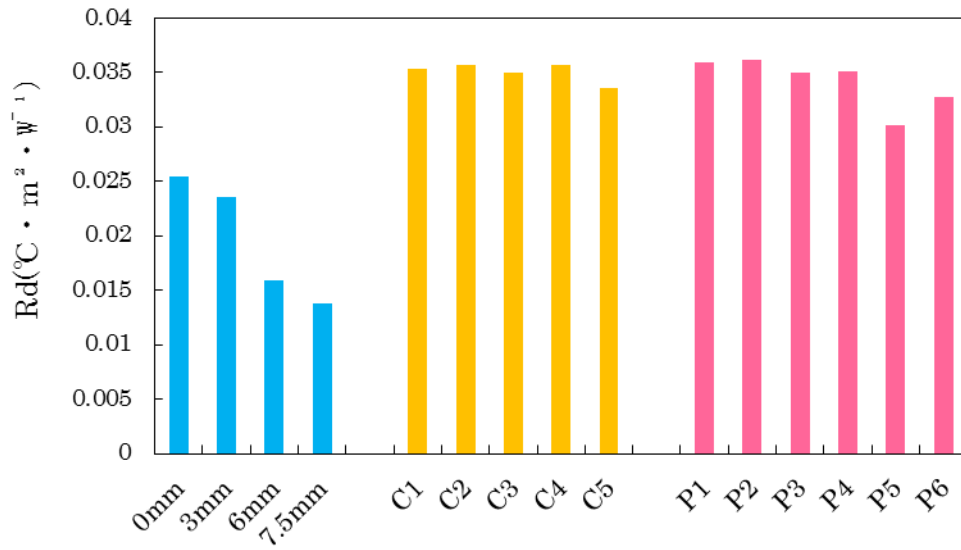


Fig.5-22 Rd of each samples measured by skin model.

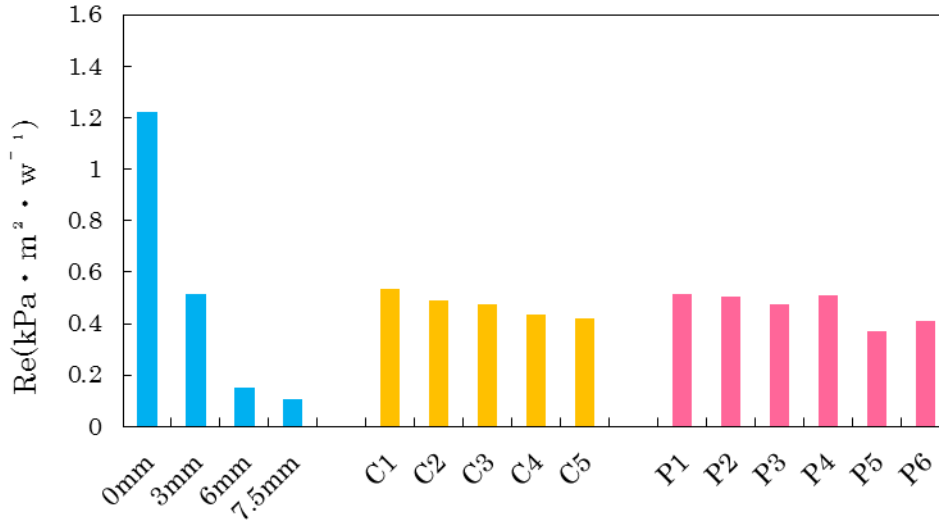


Fig.5-23 Re of each samples measured by skin model.

5.4 考 察

第 4 章のフィルム衣服の着用実験において透湿率と衣服内湿度の関連、スキンモデルによって求められた熱抵抗と蒸発熱抵抗の衣服内湿度予測への有効性等を明らかにすることができた。それらの結果はそのまま不透湿または難透過性を要する各種防護服の設計上に有効な指針を提供すると考えるが、繊維布帛と不透湿膜フィルムの違いも考慮すべきである。ここでは、繊維総合体である布地の物性特性並びにスキンモデルによるシミュレーション実験の結果と、不透湿膜に穿孔を施したフィルム素材との違いについて検討することとした。

Table 5.2 に、フィルム（上）、綿（中）及びポリエステル（下）における各物性値、及びスキンモデルにより求められた空気層有無時の $R_d \cdot R_e$ の相関行列を示す。第 4 章で述べたように、フィルムの通気度、透湿率は孔径が大きいほど大きくなり、気孔率と高い相関を示し、気孔面積に依存することが分かった。フィルムと比べ、綿及びポリエステルの透湿率は通気度が異なるにもかかわらずおよそ 45 から 55% に分布している。穿孔フィルムの透湿率は 0 から 25.2% であるから、繊維試料に比べてフィルムは半分以下の透湿率である。これに関連して Margaret E. Whelan. ら¹⁶⁾ は、厚さが一定で、透湿面積に対する孔の総面積の比が同じならば、孔が大きくて数が少ない方が、孔が小さくて数が多い場合より透湿抵抗が大きい、つまり透湿しにくいことを報告している。すなわちきわめて細い繊維によって構成される気孔は微小であり、気孔率が同様であるとするならば繊維試料の方が高い透湿率を示すことが予測できる。丹羽⁵⁾ や Fourt¹⁸⁾ は繊維の実質体積が 30~40% 以下の織物、すなわち繊維の含気率が 60~70% であるものは透湿率の相違が認められないと指摘している。もしフィルム衣服において繊維試料と同様の含気率例えば 60% にしようとするならば、孔径は直径約 172mm にもなる。繊維がいかに優れた透湿機構を有するかが改めて実感される。また 3 種の試料間に一元配置分散分析を行ったところ、不透湿膜は綿とポリエステルとの間にいずれも 1% の有意差を示したが、綿とポリエステルの間では有意差が認められなかった。定常状態の透湿性の実験の場合について、丹羽ら²⁾ また金綱ら¹⁷⁾ により繊維素材の間に透湿性の差が認められないとした結果と一致する。物性間の相関をみてみると、フィルム物性値の間は高い相関係数が示され、相互影響を受けることが分かった一方、布地は複雑性を有するため、物性間により高い係数が認められず、ほぼ 0.7~0.9 の間に示された。

スキンモデルによる R_d について、三者間の相違を見たところ、空気層無における試料布別の相関については、フィルム及びポリエステルのいずれも R_d は物性値との間に 0.9 以上の相関係数を示さなかったが、綿の場合、 R_d が布地の厚さ及び

保温率と各々0.955、0.932の高い相関係数を示し、これはFig.5-3の保温率結果と一致した。ところが空気層有の場合は、Rdとフィルムの気孔率間で0.99、ポリエステルを通気度及び保温率と-0.965、0.915の高い相関係数が得られた。Fig.5-14、Fig.5-22に示すように、いずれの試料布でも空気層無より空気層有の方はRdが明らかに大きくなったが、空気層によるRdへの影響は試料布によりそのメカニズムが異なることがうかがわれる。つまり、空気層無の場合は、綿試料布は厚さ及び保温性に大きな影響を受け、厚いほどRdが大きくなる傾向を示し、薄いフィルムでは模擬皮膚表面の空気境界層の中に入るため、気孔の大きさによるRdの差が認められず、ポリエステルは通気度及び保温性共に影響を受けた。空気層が大きくなるにつれて、空気層内に静止空気の体積が大きくなり、熱抵抗が高まったと考えられ、すなわち静止空気の熱抵抗が主要な役割を果たしていることを示唆している。模擬皮膚と試料布の間の熱移動機序は対流であると考えられる。従って、孔径0mmのフィルムは1.79倍Rdが増加し、孔径の大きいほど対流が生じやすく、孔径に伴いRdの減少を招いたと考えられる。布地の場合は静止空気による影響が大きくなり約2.2倍上昇し、特に綿試料はいずれの物性とも低い相関を示し、Rdは0.033~0.036の狭い範囲に入り、静止空気によるRdの上昇のみと考えられる、一方、ポリエステルは空気層に依存しながら対流により通気度のよい保温性に優れないP5及びP6はRdがより小であり、P1及びP2は大である結果が示された。藤本ら¹⁹⁾は厚い防寒材料(厚さ>3cm)では、空気層の厚さによる熱損失率の差が、あまりないのに対して、薄い材料(厚さ≤0.3cm)では、空気層の厚さが増加すると大きく減少する、換言すれば、熱抵抗大きくなることを報告した。また、諸岡ら²⁰⁾は、熱損失量と気孔率との関係を調べたところ、空気層のない時の熱損失量は気孔率による影響を殆ど受けませんが、空気層の増加に伴う気孔率の影響が大きいことを報告した。本研究は上記の研究結果と一致した。

一方、蒸発熱抵抗Reについては、空気層無では、綿は透湿率と-0.901、ポリエステルは通気度と-0.760の相関を持つことにより、空気層無時の水蒸気の拡散は主に試料の透湿率また通気度によるものと考え、布地よりフィルムの透湿率が小さくて、その結果、Reは著しく大きかったことが示された。しかしながら、空気層の増加に伴う綿及びポリエステルのReが大きく増加したのに対して、フィルムは反対の結果であることが注目される。空気層の有無にかかわらずフィルムの場合Reと透湿率と-0.95、-0.96の極めて高い負の相関係数を示した、これは第4章に論じたように、空気層の影響はRdと反対に、衣服下空気層有の方がなしに比べてReが小となり、フィルムと模擬皮膚間の空気層の存在によって拡散・対流による孔を通じて水分移動が促進されることがわかった。比べて、気相水分は布

地を構成する繊維と繊維の隙間を通過して外界へ出ると、繊維に吸収されるもの、いったん繊維に吸収された後、再び放出するという経路に分けられる。空気層有の相関は、綿試料の含気率、通気度、吸湿は Re と共に高い相関を有し、ポリエステルは通気度、保温率、 Rd (7mm) と高い相関を示した。従って、空気層がある時の布地の水分移動は透湿性のみならず、むしろ吸湿・放湿等の要因が寄与していると考えられる。中西ら²¹⁾は、熱板に密着した湿潤ろ紙の上に布を置いて、熱移動量 Q_w を調べたところを、吸湿による布の伸びと、ろ紙と一枚の布を介して環境空気との間高い水蒸気圧差が生じるために布が伸張して膨らみ、ろ紙と布の間に空気層による熱抵抗と水分移動熱抵抗が増大したことを報告した。また、Fig. 5-17、Fig. 5-18 に示すように、衣服内湿度が最大値に達した後の飽和時間をみると、空気層無より空気層有は約 10 分長かったことから、布地の吸湿また放湿はその一因と考えられる。またフィルムより、繊維は毛羽を生じることにより、気相水分が通りにくくなることも考えられる。

フィルム、綿及びポリエステルにおける物性、スキンモデルによる Rd 及び Re の相関により、不透湿膜、親水性繊維、疎水性繊維の熱・水分移動の機序が異なることが示唆された。衣服設計において、繊維の構成、また空気層による熱抵抗、蒸発熱抵抗の違いが衣服内気候に与える影響に関する研究上に有効な基礎データを提供すると考えられる。

Table 5.2 Correlation coefficient among physical characteristics, Rd and Re .

P : porosity A : air permeability Tm : thermal insulation
M : moisture permeability Wr : water regain T : thickness

Film	P	A	Tm	M	Rd(0mm)	Rd(7mm)	Re(0mm)	Re(7mm)
P	1.000							
A	0.998	1.000						
Tm	-0.933	-0.905	1.000					
M	0.954	0.936	-0.972	1.000				
Rd(0mm)	-0.840	-0.859	0.752	-0.674	1.000			
Rd(7mm)	-0.990	-0.977	0.987	-0.983	0.796	1.000		
Re(0mm)	-0.895	-0.884	0.855	-0.953	0.521	0.896	1.000	
Re(7mm)	-0.874	-0.856	0.863	-0.956	0.473	0.889	0.995	1.000

Cotton	T	Ap	A	Tm	M	Wr(65%)	Wr(95%)	Rd(0mm)	Rd(7mm)	Re(0mm)	Re(7mm)
T	1.000										
Ap	0.517	1.000									
A	0.585	0.942	1.000								
Tm	0.933	0.701	0.802	1.000							
M	-0.491	0.261	0.128	-0.314	1.000						
Wr(65%)	-0.016	0.756	0.562	0.104	0.786	1.000					
Wr(95%)	-0.164	0.644	0.457	-0.024	0.883	0.984	1.000				
Rd(0mm)	0.955	0.713	0.752	0.932	-0.408	0.162	-0.002	1.000			
Rd(7mm)	0.412	-0.256	-0.272	0.340	-0.093	-0.180	-0.174	0.153	1.000		
Re(0mm)	0.628	-0.268	-0.199	0.421	-0.907	-0.688	-0.786	0.469	0.479	1.000	
Re(7mm)	-0.158	-0.921	-0.860	-0.323	-0.519	-0.850	-0.793	-0.398	0.489	0.606	1.000

Polyester	T	Ap	A	Tm	M	Wr(65%)	Wr(95%)	Rd(0mm)	Rd(7mm)	Re(0mm)	Re(7mm)
T	1.000										
Ap	-0.024	1.000									
A	-0.280	0.717	1.000								
Tm	0.243	-0.712	-0.974	1.000							
M	-0.640	-0.366	0.079	0.017	1.000						
Wr(65%)	-0.958	0.219	0.374	-0.350	0.645	1.000					
Wr(95%)	0.024	0.165	0.558	-0.723	-0.224	-0.102	1.000				
Rd(0mm)	0.780	-0.585	-0.727	0.753	-0.198	-0.807	-0.294	1.000			
Rd(7mm)	0.267	-0.582	-0.965	0.915	-0.258	-0.371	-0.553	0.618	1.000		
Re(0mm)	0.428	-0.716	-0.760	0.839	0.054	-0.532	-0.576	0.800	0.694	1.000	
Re(7mm)	0.299	-0.391	-0.917	0.890	-0.324	-0.335	-0.633	0.576	0.967	0.589	1.000

5.5 要 約

不透湿膜及び親水性繊維の綿 100%及び疎水性繊維のポリエステル 100%の布帛熱・水分移動特性を調べるために、通気度、保温性、透湿率、また布地の吸湿率及びスキンモデルによる熱抵抗・蒸発熱抵抗を測定した。主たる結果は以下の通りである。

- 1) 不透湿フィルムの通気度、透湿率は孔径が大きいほど大きくなり、気孔の面積に依存することが示された。一方、綿及びポリエステルの透湿率は通気度が異なるにもかかわらず、ほぼ 45～55%に分布した。
- 2) 不透湿フィルムにより、布帛の方が高い透湿率を示し、これは、繊維で構成された微小かつ多孔の優れた透湿機構によるものと考えられる。
- 3) スキンモデルにおける吐水後の恒定衣服内湿度については、不透湿フィルムでは空気層有無にもかかわらず、孔径が大きいほど低く、維持時間も短縮された。布帛では、試料間で大きな差が認められなかったが、空気層無より空気層有の方が維持時間が 10 分ほど長かった。
- 4) スキンモデルで求められた R_d については、いずれの試料においても、空気層の有無の影響を受け、空気層無より空気層有の方が高い値が示された。
- 5) 三者の R_d の相違をみたところ、空気層無の場合、 R_d は綿試料の厚さ及び保温性と高い相関性を示したが、フィルム及びポリエステルでは、いずれの物性値とも無相関であった。空気層ありの場合、フィルム試料は孔径の影響を受け、ポリエステル試料では通気度及び保温性に影響された。
- 6) スキンモデルで求められた R_e については、空気層無では、透湿率また通気度が寄与することにより、フィルムの R_e が大きい値を示したが、空気層の増加に伴い、布帛の R_e が大きく増加した。これは、空気層の増加により、布帛の水分移動特性が透湿性、吸湿・吸水に影響され、そのメカニズムが複雑になるためと考えられた。

引用・参考文献

- 1) 丹羽雅子；被服材料の透湿性に関する研究，第 1 報，家政学研究，8(2)：113－118 (1961)
- 2) 丹羽雅子；被服材料の透湿性に関する研究，第 2 報，家政学研究，10(1)：10－15 (1963)
- 3) 丹羽雅子；被服材料の透湿性に関する研究，第 4 報，家政学研究，11(1. 2)：33－42 (1964)
- 4) 丹羽雅子；被服材料の透湿性に関する研究，第 5 報，家政学研究，11(1. 2)：43－49 (1964)
- 5) 丹羽雅子，今井律子，高力紀子；被服材料の透湿性に関する研究，第 6 報，家政学研究，11(1. 2)：43－49 (1964)
- 6) 丹羽雅子；被服材料の透湿性に関する研究，第 7 報，家政学研究，12(2)：101－109 (1965)
- 7) 丹羽雅子，高力紀子；被服材料の透湿性に関する研究，第 8 報，家政学研究，14(2)：155－161 (1967)
- 8) 中西正恵，丹羽雅子；被服材料の通気性に関する研究(第一報)，日本家政学会誌，40(9)：797－804(1989)
- 9) 中西正恵，丹羽雅子；被服材料の通気性に関する研究(第に報)，日本家政学会誌，41(9)：797－804(1990)
- 10) 原田隆司，土田和義，山内生；衣服素材の水分と熱移動特性-1-衣服内気候シミュレーション装置の開発，繊維機械学会誌，35(5)：203－209 (1982)
- 11) 原田隆司，土田和義，山内生；衣服素材の水分と熱移動特性-1-ソックスの着用感と衣服内気候シミュレーション装置による解析，繊維機械学会誌，35(5)：210－218 (1982)
- 12) 田村照子，岩崎房子；サーマルマネキンによる被服の熱抵抗に関する研究(第一報) 温風循環方式サーマルマネキンの構造と特性，文化研究紀要，16:221-229 (1985)
- 13) 田村照子，岩崎房子；サーマルマネキンによる被服の熱抵抗に関する研究(第二報) 被覆面積と熱抵抗との関係，文化研究紀要，16:231-239 (1985)
- 14) 岩崎房子，丸山康子，笠原さつき，田村照子；サーマルマネキンによる被服の熱抵抗に関する研究(第三報) 被服下空気層と熱抵抗との関係，文化研究紀要，18:22-33 (1987)

- 15) 薩本弥生, 村山周子, 竹内正顕 ; 暑熱環境下の衣服内気候への肌着の吸湿性の効果, *Netsu Bussei*, 21 (4) : 200-206 (2007)
- 16) Margaret, E., Whelan, Lloyd, E., MacHattie, Goodings, A. C., and Turl, L. H. ; A Study of the Trans-mission of Water Vapor by Diffusion through Perforated Metal Plates, *Textile. Research. Journal*, 25:205-211(1955)
- 17) 金網久明, 柏原洋子, 川村綾 ; 織り布の透湿性及び通気性に及ぼす糸間隙の孔の影響, *繊維学会誌*, 50(3) : 129-135(1994)
- 18) Fourt, L. and Harris, M. ; Diffusion of Water Vapor Through Textiles, *Textile. Research. Journal*, 17 : 256-263(1947)
- 19) 藤本尊子, 丹羽雅子, 関信弘 ; 被服材料の熱輸送特性に及ぼす空気層の効果, *繊維機械学会誌*, 42(12) : 65-75(1989)
- 20) 諸岡晴美, 長岡千沙, 諸岡英雄 ; 布の気孔率が熱損失量及び湿熱損失量に及ぼす影響, *The 29th Japan Symposium on Thermophysical Properties*, (2008)
- 21) 中西正恵, 丹羽雅子 ; 衣服材料を通しての定常状態下での熱・水分移動の解析(第2報) - 発汗に伴う熱移動モデル -, *日本家政学会誌*, 46(6) : 567-575(1995)

第 6 章

総 括

近年、地球温暖化やヒートアイランド現象の拡大、特に日本のみならず東アジア、東南アジアのモンスーン気候の影響により、高温かつ多湿な環境下での衣環境・住環境・食環境の快適性に関心が寄せられている。特に、暑熱環境における快適感や熱ストレスに関連して、衣服の在り方が問われている。着衣の快適性を左右する要因としては、人間を取り巻く外環境や、人体を覆う衣服により形成された衣服内気候及びこれに応じた人体の生理反応が関与する。つまり、環境要因、衣服の機能特性及び生体のメカニズム三者間の相互作用、相互影響を明らかにすることが今後の重要な課題と考えられる。しかし、快適な着衣を評価するに際して、環境、衣服素材、生体反応などの要因を総合的かつ定性的に捉えている現状から人体実験や物性実験を組合せて、より基本的かつ定量的に検討した結果は殆ど見当たらない。

本研究は、暑熱下における快適な衣服設計のための基礎研究として、環境温熱条件が人体に与える影響、衣服を介して形成された微気候が人体に与える影響、また衣服素材の熱・水分特性が衣服内気候に及ぼす影響を明らかにすることを目的とした。生理学的実験及び物理的評価実験を併せて、快適な衣服設計上に有効な指針を確立しようと考えた。

各章の概要は以下の通りである。

第1章「序論」では、本研究の目的、文献の背景及び論文の構成について記述した。地球温暖化やヒートアイランド現象の拡大に伴い熱中症が増大し、暑熱環境下における衣服の在り方が問われている。しかし、快適な衣服設計に向けた研究の多くは気温の影響を中心とするものであり、暑熱環境下の体温調節反応にとしてより重要と考えられる蒸散放熱を左右する環境湿度の影響に関する研究はより少ない。また、近年、心拍変動の測定により自律神経活動レベルを評価し、ストレス指標とする方法、あるいは唾液中のアミラーゼ活性を測定し、精神ストレスの定量評価法として用いる方法等が提案され定着しつつある。環境評価や熱的快適性の評価への応用事例も散見されるが、環境湿度と関連づけて検討した報告はほとんど見当たらない。そこで本論文では、まず最小限の着衣条件における人体に及ぼす暑熱環境特に湿度の影響を、温熱生理反応、心理反応、さらに暑熱ストレスの各側面から検討し、それら相互の関係を総合的に把握しようと考えた。次に、不透湿穿孔フィルム衣服の着用により形成される衣服

内気候が人体に及ぼす影響を、人体実験と物理的評価実験を通じて検討し、快適な衣服設計上の指針確立を試みた。

第2章「高温環境下の湿度条件が人体の体温調節反応・心理反応に及ぼす影響」では、暑熱環境下の温度と湿度が人体に及ぼす影響を明らかにするため、気温 28℃、31℃、34℃、湿度 30%、60%、90%を組み合わせた計 9 条件の人工気候室内に、着衣の影響を最小限にした状態のブラジャーとショーツのみ着用の成人女子 6 名を 60 分間滞在させ、その生理反応について直腸温、皮膚温、局所発汗量、全身蒸散量(体重減少量)、及び皮膚水分量の 5 項目と、心理反応について温冷感、湿潤感、快適感の 3 項目を測定した。結果について温・湿度を要因とする分散分析並びに多重比較を行い、以下の結果を得た。

- 1) 平均皮膚温、発汗量、皮膚水分量、温冷感、湿潤感、快適感はいずれも温湿度の上昇とともに有意に上昇した。
- 2) 体重減少量については温度の影響のみに有意差が認められた。
- 3) 各生理反応・心理反応の相関性を考察したところ、発汗量と皮膚水分量との間に高い相関係数を、発汗量及び皮膚水分量はいずれも温冷感、湿潤感、快適感と高い相関係数を得られ、皮膚に残留した水分が人体に不快を招いた要因の一つであることが示唆された。
- 4) 湿潤による不快感指標として提案されている、田村らの湿潤快適指数と Gagge ら皮膚濡れ率を算出したところ、湿潤快適指数が 1.0 以下の条件では、被験者が不快と回答した、また皮膚濡れ率は不快感と高い相関を示し、0.27 以上で不快となることが示され、従来の結果とよく一致した。
- 5) 湿り空気線図上に、本研究結果および従来報告されている研究結果から導き出された快適線と不快境界線を記入し、比較するとともに、着衣による影響を検討した。いずれの着衣条件でも、不快境界線より快適線は 2.5~4℃低温側に移動し、快適線・不快境界線ともに着衣のクロ値が増加するほど低温側に移動した。

第3章「高温環境下の湿度条件が人体の自律神経系・唾液アミラーゼホルモンに及ぼす影響」では、第2章の結果を受けて、自律神経系及び内分泌系の視点か

ら、暑熱環境下の湿度が人体に与えるストレスを定量的に測定した。自律神経反応としては心拍変動分析、また内分泌反応としては唾液アミラーゼ活性の測定を実施し、これら非侵襲性の生体測定法、評価方法が温熱環境の評価に適応可能であるか否かについても検討した。被験者、着衣及び環境条件は第2章と同様の条件で、心拍数、心拍変動分析(交感神経活動：低周波数成分 LF/高周波数成分 HF、以下 LF/HF；副交感神経活動：HF)と共に、唾液アミラーゼ活性を測定した。結果は以下の通りである。

- 1) 心拍数については温湿度の上昇に伴い有意に増加した。
- 2) 滞在30分時の交感神経活動は温湿度上昇とともに有意に上昇し、副交感神経活動は減少する傾向を示した。
- 3) 滞在30分時の唾液アミラーゼ活性は、湿度の上昇に伴い有意に上昇した。
- 4) 体温調節反応と自律神経・唾液アミラーゼ活性反応の相関性を調べたところ、皮膚水分量は唾液アミラーゼ活性、交感神経活動とそれぞれ0.95、0.910の高い相関を示した。また、唾液アミラーゼ活性は温冷感と0.842、湿潤感と0.965、不快感と0.862の高い相関性を示した。非侵襲のストレス測定法は精神ストレスのみならず、環境によるストレスの評価に対しても有効であることが示された。
- 5) 曝露30分のLF/HF、唾液アミラーゼ活性は環境温湿度の影響を受けて有意に上昇したが、55分においてはその変化が明確ではなかった。これらのストレス指標は比較的速い反応をとらえるのに有効であること、また、長時間の暑熱曝露においては、環境への順化、疲労感また覚醒水準の低下などが生じる可能性があると考えられ、その生理機序は今後の課題である。

第4章「衣服の気孔率が衣服内気候並びに人体の生理・心理反応に及ぼす影響—赤外線透過フィルム衣服を用いて—」では、着衣状態における衣服内気候、人体の生理・心理反応及び衣服素材特性間の相互関係を明らかにするために、各種サイズ穿孔フィルムを用いた衣服を作成し、気孔率のみを変化させた衣服が、暑熱時の衣服内気候あるいはこれを着用した被験者の生理・心理反応に及ぼす影響を検討した。また、これとスキンモデルにより求められた物理的データとの比較

検討を試みた。測定項目は、フィルム衣服の通気度、保温率、透湿率等の基本特性と、熱・水分共存系シミュレーション装置スキンモデルにより測定した衣服内温湿度、供給熱流量及び熱抵抗 (Rd)・蒸発熱抵抗 (Re)、加えて、着用実験における衣服内温湿度、皮膚温、サーモグラフィによる皮膚温分布、発汗量、心拍数並びに官能評価であった。着用実験は 34℃、50%の条件下で、7名の成人女性を用いた。主たる結果は以下の通りである。

- 1) 試料の通気度、透湿率は気孔率の増大とともに増加し、保温率は減少した。
- 2) スキンモデルにおける発汗後の恒定衣服内湿度は孔径が大きいほど低く、維持時間は孔径と共に短縮された。
- 3) 乾燥時の熱抵抗 (Rd)は空気層なしでは孔径の影響が僅少であり、空気層有では孔径の増加とともに低下した、一方、蒸発熱抵抗 (Re)は孔径によらず空気層無の方が大で、また空気層の有無によらず孔径が大なるほど Re が低下した。
- 4) 衣服内温・湿度、前額発汗量、心拍数に対し、フィルム衣服の孔径 (A) 並びに安静・送風・回復の実験段階 (B) を要因とする二元配置分散分析を実施した結果、衣服内温度、湿度については要因 A・B ともに危険率 1%の有意差を、発汗量については要因 A が 1%の有意差を示し、心拍数については有意差が認められなかった。
- 5) 衣服内湿度は、スキンモデルで求められた蒸発熱抵抗 (Re) と高い相関を示し、蒸発熱抵抗 (Re) が衣服内湿度の形成に強く関わっていることが示された。また、Re は発汗率とも高い相関を示し、Re の大きい衣服は衣服内湿度を上昇させ、これがストレスとなって人体の発汗反応を促し、さらに衣服内湿度の上昇をきたすというフィードバックを引き起こしているであろうことが予測された。
- 6) 着用実験における送風は、衣服内温湿度及びすべての感覚量に大きい効果を及ぼした。

第5章「不透湿膜と布地の熱・水分移動特性の比較に関する検討」では、不透湿フィルム試料の特性が一般布帛試料とどの程度類似するか、どの程度乖離するかを明らかにするために、親水性繊維の綿100% 5試料と、疎水性繊維のポリエステル100% 6試料を用いて、三者の物性値を比較した。また、スキンモデルを用いて衣服気候を評価し、繊維布帛と不透湿穿孔フィルムの相違について検討した。結果は以下の通りである。

- 1) 不透湿フィルムの通気度、透湿率は孔径が大きいほど大きくなり、気孔の面積に依存することが示された。一方、布帛の透湿率は通気度が異なるにもかかわらず、ほぼ45～55%に分布した。
- 2) 不透湿フィルムより、布帛の方が高い透湿率を示し、これは、繊維で構成された微小かつ多孔の優れた透湿機構によると考えられる。
- 3) スキンモデルにおける吐水後の恒定衣服内湿度については、不透湿フィルムでは空気層の有無にかかわらず、孔径が大きいほど低く、維持時間も短縮された。布帛では、試料間で大きな差が認められなかったが、空気層無より空気層有の方が維持時間が10分ほど長かった。
- 4) スキンモデルで求められた熱抵抗(Rd)については、いずれの試料においても、空気層の有無の影響を受け、空気層無より空気層有の方が高い値が示された。
- 5) スキンモデルで求められた蒸発熱抵抗(Re)については、空気層無では、透湿率また通気度が寄与することにより、フィルムのReが大きい値を示したが、空気層の増加に伴い、布帛のReが大きく増加した。これは、空気層の増加により、布帛の水分移動特性が透湿性、吸湿・吸水に影響され、そのメカニズムが複雑になるためと考えられた。

第6章「総括」では、各章で得られた結果をまとめ、将来への課題・展望について述べた。

本論文は、現今の地球温暖化及びそれによって引き起こされた熱中症問題背景にし、快適な衣服の設計への応用という視点から、環境因子、衣服素材特性及び人体の生理・心理反応の三つの視点から総合的に、人体実験、物理的評価

実験を併せて検討した。その結果、暑熱環境の温湿度、特に湿度が人体の発汗を促進する一方、皮膚表面の蒸汗放熱を抑制することにより、無効発汗及び皮膚表面の水分量の増加に伴う熱ストレスと不快感を招くことが示された。この皮膚の水分量の増加によって、交感神経活動が促進され、ストレス指標である唾液アミラーゼ活性が増加し、暑熱環境下の熱ストレスが自律神経系及び内分泌反応としても確認された。さらに、衣服素材の複雑性を排除し気孔率に特定した不透湿性フィルム実験服の着用により、フィルム衣服の透湿率また蒸発熱抵抗が衣服内温度より衣服内湿度及び発汗に大きく影響を与えることを明らかにした。また、不透湿フィルム試料と繊維素材の布帛と比較したところ、大きな相違が示され、繊維素材の優れた透湿機構が明らかにされた。今後は、本研究でえられた生理・心理反応結果を基礎とし、熱中症対応の機能的・快適繊維素材の開発及び衣服設計に向けた研究が求められる。

謝 辞

本論文の終わりに際して、研究の遂行及び本論文の作成において終始懇切丁寧な御指導及び校閲を賜りました文化学園大学大学院生活環境学研究科名誉教授田村照子先生に、心より深く感謝の意を表します。研究に無学また留学生である私に、日本語の教育は勿論、研究の基礎知識からアプローチまでをご指導していただきながら、有意義なディスカッションもして下さいました。先生のもとで、研究の意義・考え方及び楽しさを味わうことができ、学問・研究への道を導いて下さいました。また、本研究以外にも、いろいろな相談に乗っていただきまして、私にとって元気の源である先生でした。本当に本当に有難うございました。

論文作成にあたり、有益なる御助言を賜りました、機能デザイン学研究室斎藤嘉代教授、小柴朋子教授、永井伸夫教授、佐藤真理子教授、須田理恵准教授、高野祐里副手、松井有子副手、石田聡美元副手に感謝の意を表します。特に、小柴朋子先生からは、研究の方法や測定機器の使用方法など多大なる援助をいただきまして、厚くお礼申し上げます。そして、当時機能デザイン学研究室、有泉知英子助教にも心より感謝を申し上げます。また、元文化ファッション大学院大学、現共立女子大学、丸田直美教授には、貴重な御意見と暖かい励ましをいただきました。厚くお礼申し上げます。

また、大学院生活を共に過ごし、支えていただいた、李恩真さん、朴敬淳さん、傳法谷郁乃さん、宋セイさん、青木識子さん、博士号を修得終了した朴暲熙さんに対して、また、研究室の院生達に心より感謝申し上げます。特に、いつも研究に関して討論したり一緒に学会に参加したりして下さいました傳法谷郁乃さんに心より感謝いたします。皆様のお陰で、暖かい、楽しい学生生活を過ごすことができ、改めて感謝の気持ちでいっぱいです。有難うございました。

さらに、本研究の被験者を引き受けていただいた大学院の皆様にも感謝いたします。

加えて、留学生活を支え、暖かく見守り続けてくれた両親・妹と、心に強く支えてくれた友人達に対して、深い感謝の意を表します。