

運動に伴う人体の蓄熱管理に関する研究

－ 消防服着用時の体温上昇の予測と水冷による体温制御の可能性 －

物部 博文*¹・村山 雅己*²・生野 晴美*³

A study of thermal storage management and control in the human body associated with physical exercise

-Possibility of predicting the elevation in body temperature by ergometer exercise and controlling of the body temperature regulation by using water-cooling systems when wearing firefighter suits-

Hirofumi MONOBE, Masaki MURAYAMA, Harumi IKUNO

Abstract

Firefighter suits are air-tight clothes resistant to flame and radiant heat. It is therefore important to release the metabolic heat of the human body when wearing them. In this study, we attempted to control the body temperature by using water-cooling systems, and to predict the rise in body temperature while exercising wearing firefighter suits. As a result,

With the bicycle ergometer exercise experiments wearing firefighter suits under high temperature(30℃), it was possible to estimate the degree of body-temperature elevation of the subject from his metabolic rate during the exercise.

In controlling the body temperature using water-cooling systems, we recognized the need to ensure sufficient cooling capacity in relation to the amount of heat loss.

Since it was estimated from past studies that the subject's comfort would be impaired if the refrigerant is uncontrollable, we found it important to control the body temperature with skin temperature sensor feedback and computer control.

要旨：消防員装具は、炎や輻射熱に対応するので密閉衣服となる。従って、人体の代謝熱を放出することが重要である。本研究において、我々は消防員装具着用時の運動負荷に伴う体温上昇を予測するとともに、水冷却システムで体温上昇を制御しようと試みた。その結果、高温条件下（30℃）、消防員装具着用時における自転車エルゴ・メーター運動の実験では、運動時の代謝量から被験者の体温度上昇が推定可能であった。また、水冷による体温コントロールでは、熱損失の関係から十分な冷却能力を確保する必要性を認識した。

さらに過去の研究結果から、総合的に考えると冷媒を制御できない場合には、対象者の快適性を損なうと

*¹ 横浜国立大学 教育人間科学部 准教授 Yokohama National University

*² 社団法人 日本船舶品質管理協会 製品安全評価センター Research Institute of Marine Engineering

*³ 東京学芸大学 教育学部 教授 Tokyo Gakugei University

推定されたので、皮膚温度センサーからのフィードバックやコンピュータによる体温制御が重要と考えた。

Keywords:

1. fire-fighting operation
2. heatstroke
3. countermeasure to heat stress
4. water-cooling clothes

キーワード:

1. 消防活動
2. 熱中症
3. ヒートストレスの対処
4. 水冷服

1. はじめに

消防員が火災時に着用する装具は、必然的に衣服熱抵抗の高い密閉性の衣服となるので、夏季の炎天下の作業等、消火活動に伴うヒート・ストレスが発生しやすい¹⁾。これらの暑熱への対策に関する研究として、我々は消防員装具の種類によるヒート・ストレスの出現傾向の差異²⁾、保冷剤による冷却システムの再検討³⁾、人間の生理的な特徴を利用した頭部冷却方法⁴⁾、発汗の効果を促すような換気システムの開発⁵⁾、運動に伴う代謝量から消防士の負担の推測^{6) 7)}等、様々な検討してきたものの、未だに実用的な段階には至っていない。これは、火災という極限環境下における消防員の安全や保護という観点から、消防員装具は穴をあけたり加工したりできないといった制約が大きいのが一つの要因である。

しかし、その一方で他分野を参照すると、米国陸軍では高機動多目的装輪車からの液体を複数の兵士の冷却ベストに循環する冷却方法を Tank Automotive Research, Development & Engineering Center (TARDEC) と Natick Soldier Center とで共同開発している。これは砂漠での作戦時には、多目的装輪車内の温度が 54℃にも達するためである。また、自動車レースの全日本 GT 選手権においては、同様な理由によりクーラーボックス内の氷水を電動ポンプの動力を利用して冷却ベストに循環する方法で、夏季レース時におけるドライバーの体温コントロールを実施している。

この様に、ある程度大がかりな冷却システムを車内等に設置できる場合については、水冷式の冷却システムは効果を上げている。しかし、今後、環境技術の進歩に伴って、燃料電池の小型化・高出力化、冷媒や冷却システムの小型化・高性能化が進めば、消防員の安全を損なわず、なおかつ安全性を確保したうえでの冷却システムを開発できる可能性がある。

従って、本研究では熱的に閉鎖された環境として消防員装具をとらえ、自転車エルゴ・メーター運動に伴う体温上昇の予測を試みるとともに、水冷服を活用した場合の人体の温度抑制の可能性と問題点について検討した。

2. 研究方法

2.1. 自転車エルゴ・メーター運動に伴う体温上昇の把握

2.1.1. 自転車エルゴ・メーター運動に伴う代謝量の推測と確認

まず、METに関する文献⁸⁾により自転車エルゴ・メーター運動による代謝量を求め、エルゴ・メーター負荷値 (W) と代謝量との関係を求めた。

次に、被験者 1 名 (M1; 表 1) に対して、30℃, Rh60%, 消防員装具の着用条件下で安静時代謝量、自転車エルゴ・メーター負荷 50W, 100W, 150W と漸増負荷を与えたときの代謝量を呼気ガス代謝モニタ (メータマックス 2) により測定した。

2.1.2. 自転車エルゴ・メーター運動に伴う体温上昇の予測と確認

まず、熱平衡方程式 (式1)^{9,13)} を参考に、仕事と代謝量を手がかりにして自転車エルゴ・メーター運動時における蓄熱量を推測した。なお、呼吸による対流放熱と潜熱放熱は計算上およそ数パーセント程度で小さい。また、密閉衣服という観点から、皮膚からの輻射と対流放熱、潜熱放熱、皮膚からの伝熱放散について、透湿抑制係数を約50%と想定して計算した¹⁰⁾。

$$S = M - W - C_{res} - E_{res} - K - C - R - E_{sk} \quad (\text{式1})$$

S: 体内蓄熱量 (body heat storage) (W/ m²)

M: 代謝量 (metabolic rate) (W/ m²)

W: 外へなす仕事 (effective mechanical power) (W/ m²)

C_{res}: 呼吸による対流熱伝達 (respiratory convective heat flow) (W/ m²)

E_{res}: 呼吸による蒸発潜熱 (respiratory evaporative heat flow) (W/ m²)

K: 伝導熱流 (conductive heat flow) (W/ m²)

C: 対流熱流 (convective heat flow) (W/ m²)

R: 輻射熱流 (radiative heat flow) (W/ m²)

E_{sk}: 皮膚表面からの蒸発潜熱 (evaporative heat flow) (W/ m²)

次に、被験者を対象に自転車エルゴ・メーター運動に伴う体温上昇の予測と確認を行った。

被験者1名 (M1) に対して、30℃・Rh60%の環境条件下で消防員装具を着用させ120Wの運動を20分間与えたときの直腸温を、運動終了後に低下するまで測定した。2.1.1. で確認した代謝量と上記式から導き出した体温上昇の予測とM1の体温上昇 (実測値) との整合性を確認した。

さらに、被験者4名 (表1) に対して、実際の消火活動の聞き取り調査から作成した自転車エルゴ・メーター運動 (表2) を30℃・Rh60%の環境条件下において30分間加えて被験者間で違いが現れるかを検討した。

表1 被験者の特性

Subject	Age	HT(cm)	WT(kg)	Surface(m ²) ※
M1	32	170	67	1.73
M2	22	178	71	1.83
M3	22	160	48	1.43
M4	21	166	58	1.60

※藤本式により算出 $BSA = W^{0.444} \times H^{0.663} \times 0.008883$

表2 自転車エルゴメーターによる運動負荷

	時間(分)	METs	総代謝量(W/m ²)	仕事(W/m ²)	エルゴメーター負荷(W)
水利確保	1	11	661	132	225
放水開始	13	5	325	65	111
ポンベ交換	2	8	502	100	171
少し休憩	1	2	184	37	63
放水再開	13	5	325	65	111

2.1.3. 水冷服による体温抑制の予測と確認

水冷服（重松製作所）の仕様を写真1に示した。

これは、冷媒容器で冷却された水をポンプにより体幹部、頭部および脚部に循環し、衣服表面を冷却するシステムである。これを2.1.2の被験者1名（M1）に作業衣と消防員装具間に着用させた。さらに30℃・Rh60%環境下で120W・20分の自転車エルゴ・メーター運動を加えた。

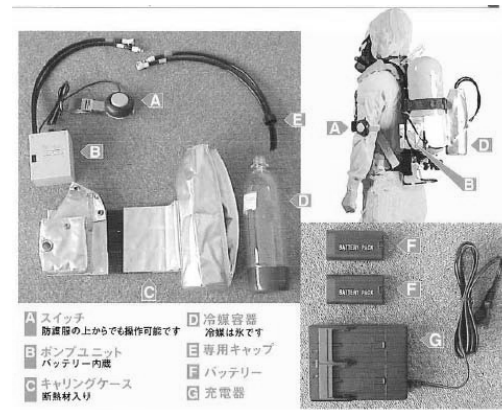


写真1 水冷服の仕様

2.2. 倫理面の配慮

ヘルシンキ宣言に基づき倫理面に配慮して実験を行った。また、被験者は、運動歴のある健康な男子を選び、同意を得て実験を行った。また、実験前には健康チェックを行うとともに、実験中には安全面について配慮した。

3. 結果

3.1. 運動に伴う人体への蓄熱量の推定

運動負荷による人体あたりの代謝量は、安静時代謝量と運動負荷による代謝量の総和であると考えた。そして運動の際のエネルギー効率を考えると、運動に利用されるエネルギー量は、全エネルギー消費量（ここでは代謝量の総和として考える）の約20-25%程度¹⁴⁾のみで、その他は、熱損失として体温上昇に寄与すると考えた。

メッツの考え方を参照すると、1METは、安静時代謝量を示すので、代謝量はおよそ58.2W/㎡となる。また、自転車エルゴ・メーターの50W負荷（非常に軽度）は、3.0METsであるので代謝量はおよそ174.6W/㎡、自転車エルゴ・メーター100W負荷（軽度）は、5.5METsで320.1W/㎡、自転車エルゴ・メーター150W負荷（ややきつい）は、7.0METsで代謝量は407.4W/㎡であると予測される⁸⁾。

これに関して、被験者1名（M1）に自転車エルゴ・メーターによる運動負荷を①安静座位、②50W、③75W、④100W、⑤125Wと漸増負荷を加えたときの代謝量を呼気ガス代謝モニタ（メータマックス2）により算出した。この測定値は1分ごとの平均値であるが負荷を増加させた直後の1分間の値は、変動した後の負荷量を反映しないので値をあらかじめ除いて解析を行った。

上記METによる推測値と実際の被験者による実測値について、x軸に自転車エルゴ・メーターの負荷量（W）を、y軸に代謝量（w/㎡）を散布図として示した（図1）。次に、散布図より回帰式を求めたところ、 $y=2.78x+61.1$ となった。

この式に普段我々が実験で用いている自転車エルゴ・メーターの負荷量（120W）を代入すると、同一被験者の代謝量は、398.8W/㎡となり約400W/㎡近い代謝量であると考えられた。

一方、先述のMETsによる計算式は $y=2.69x+49.8$ となり、実際の被験者実験で若干高い代謝量が得られるものの、高温環境お

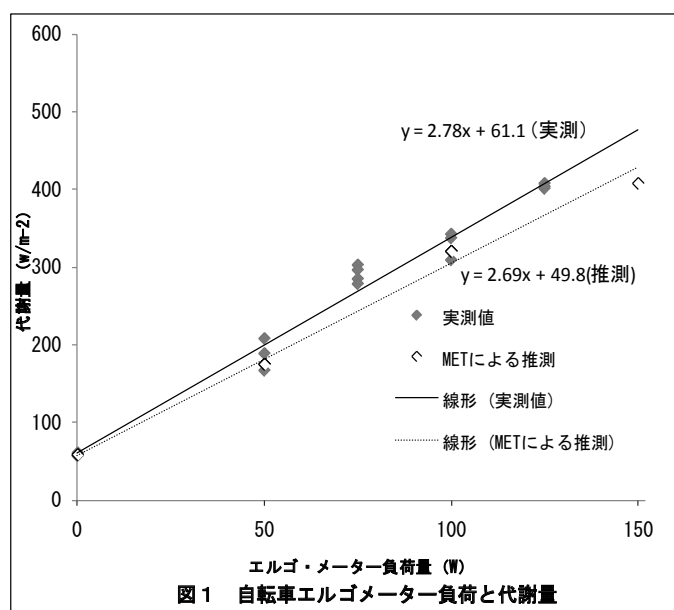


図1 自転車エルゴメーター負荷と代謝量

よび消防員装具を着用している点で若干代謝量が高めになった結果であると推測された。しかし、自転車エルゴ・メーターの運動負荷値 (W) と総代謝量の関係性は、METS による推測値と実験による推測値に整合性があった。この実測データによる式を活用すると、約 61W/ m² が安静時代謝として利用され、仕事として 71W/ m² (120W/1.7 m²) が消費される分をさし引くと、259W/ m² が熱として損失すると考えられた。この熱損失分の熱量を体重 65kg、身長 1.7 m の被験者の体温上昇に換算すると、熱放散が全く行われなかった場合には、約 2.3℃ 体温を上昇させる熱量であると推測された。すなわち、259W/ m² を 1 人体あたりに換算すると 440W / 人体。20 分の運動負荷を加えているので、440W × 20 分 × 60 秒で 528kJ となる。体重が 65kg で、528000J / 65000g として、約 8J / g。人体比熱を 3.47J/K·g として考え、8J/g × 3.27 = 2.51℃ となる。ただし、衣服の透湿係数が 5 割程度抑制された結果として、約 5 割の潜熱放熱が行われると推測されるので、約 1℃ 体温が下降する。従って、体温上昇の予測値としては約 1.3℃ の上昇と推測された。

3.2. 被験者実験による体温上昇の確認

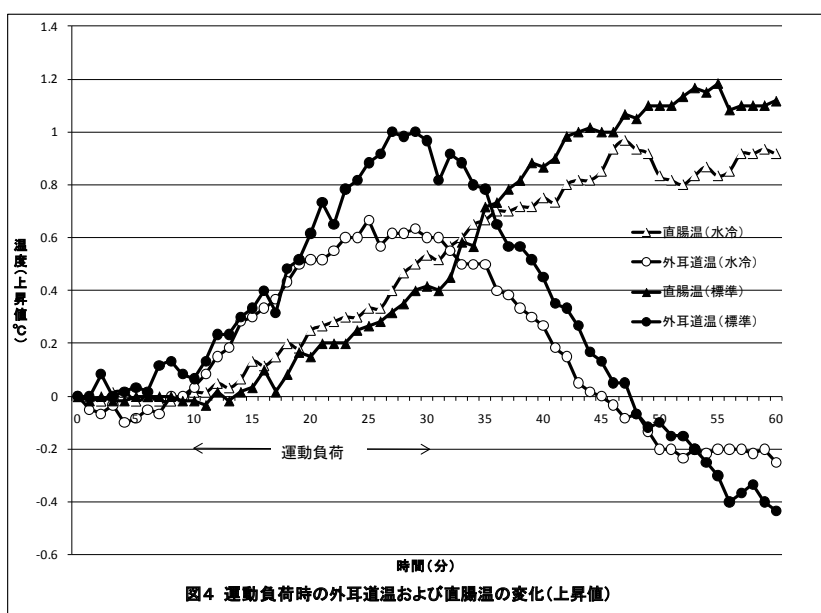
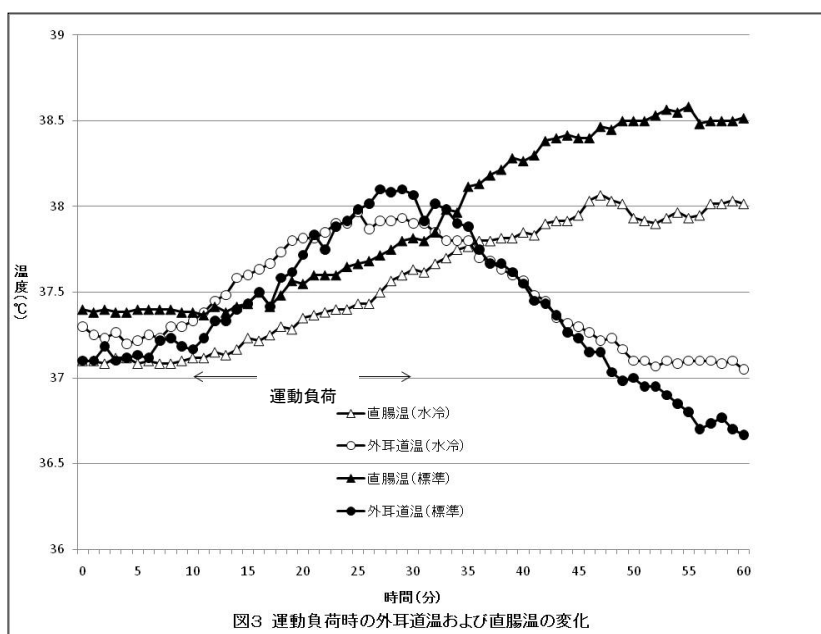
そこで、実際に 30℃、Rh60% に制御された人工気候室で、自転車エルゴ・メーターによる 120W の負荷；約 400W/ m² の負荷を 20 分間、被験者 3 名に与えた。

そのうち先述の被験者 (M1) の結果を外耳道温および直腸温の変動 (図 3) と上昇値 (図 4) に示した。

上記 2 で予測した体温上昇 1.3℃ に対して運動終了時の体温上昇 (直腸温ベース) は、0.4℃ であったが、運動終了後も直腸温は上昇し、最終的には 1.2℃ 上昇した。これは予測値が 1.3℃ であることと比較すると 0.1℃ の誤差であり、比較的高い整合性が認められた。

また、被験者 4 名に対して、表 2 の負荷を加えたときの直腸温変化 (上昇値) を図 5 に示した。

30 分の運動負荷終了時には、それぞれの被験者の直腸温が 0.9℃ から 1.7℃ 上昇した。すなわち、自転車エルゴ・メーターの仕事量は等しくとも体重あるいは体表面積の大きい被験者ほど体温上昇が低く抑えられる傾



向が認められていた。すなわち、蓄熱量はキャパシティ；体格にも依存し、同じ負荷量であれば体格の大きな被験者の方が、体温への影響が少ないと考えられた。

3.2. 水冷服着用に伴う体温抑制の予測と確認

利用した水冷服のクーラーユニットの容量は、1Lであり、この容量分の氷の融解熱は、約33KJであるので、体重65kgの

人体の体温を約1.5℃下降させる熱量を有していると考えられる。実験終了時で930gが水に融解していたので1.4℃体温が下降すると考えられた。

また、このクーラーユニットは、自動車内での活動等の場合ではタンク容量を増やすことは可能であり、事実上無限大の融解熱を有しているといえる。ただし、今回の実験では作業衣服上に装着しているので、皮膚と水冷服の間に作業服および下着を介する。従って、暖められた血液と熱交換する皮膚表面の段階では、チューブ内を通る冷水の温度が直接作用するわけではない。すなわち、皮膚表面温度が約33℃、衣服側も同程度の温度であるので両面で熱吸収が行われる（両方に5割程度）。さらに水冷服の被覆率を全身の5割と考えると、あわせて熱吸収が1/4程度に抑制されるので、皮膚表面から吸収される熱量は65kgの人体の体温を約0.4℃程度下降させる値であると考えられた。この様に皮膚表面に至るまでの熱損失が大きいと予測されるので、皮膚表面への直接的な影響は、それほど大きくないと推測された。

事実、被験者M1が同条件の消防員装具着用実験に水冷服；重松製作所製「TC100K」を着用した場合の体温変化は、水冷服未着用時の1.2℃上昇に対して、着用時で1.0℃の上昇であった。すなわち、直腸温の上昇抑制は若干認められた（図3）ものの、その体温上昇の抑制の程度はあまり大きくなかった。

一方で外耳道温については、水冷服未着用時は、運動終了後も温度上昇が認められたのに対して、水冷服着用時では運動終了とともに温度が下降する傾向が認められた。また、ピーク時で外耳道温が0.4℃低く抑えられる結果となった。

この実験終了時には、930gの水が水に変化しており、この融解熱がすべて体温上昇に寄与したと考えると約1.4℃体温を抑制するはずである。しかし、水冷服未装着と比較して実際には、呼吸器着用時の直腸温1.2℃上昇、水冷服の場合1.0℃上昇で0.2℃程度の体温上昇が抑制されたのみである。予測値とのズレについては、先述の様に水冷服内チューブを通る冷水の作用が直接的に皮膚表面へ作用するわけではないこと、すなわち、熱損失が大きいと考えられるが、これは氷塊質量を変えることで十分な熱量を確保し制御すれば、十分に体温のコントロールができると考えられた。

4. 考 察

今回、消防服着用時における自転車エルゴ・メーターの代謝熱による体温上昇を予測可能であるか否か、また、水冷服によりどの程度、体温を制御できるかについて計算と実験により検討した。その結果、温度30℃・Rh60%の環境条件下における消防服着用時の発汗による体温抑制の程度は非常に小さいので、自転車エルゴ・メーターによる負荷量と発熱量から被験者の体温上昇は、ある程度の誤差を伴うものの予測

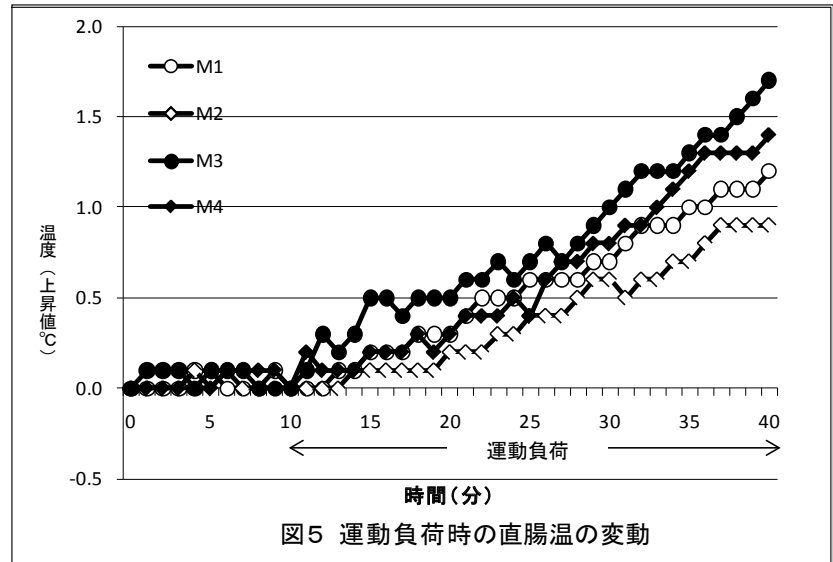


図5 運動負荷時の直腸温の変動

可能であると考えられた。

一方、水冷服による冷却能力については、潜在的に十分な冷却能力を持っていると考えられたものの、熱損失も大きく、冷却システムの制御方法が難しいと予測された。過去に我々は、冷却剤を体幹部に装着して運動負荷時の体温制御を試みたところ、頭部の体温上昇が認められるとともに、被験者の不快感が深刻化する結果となった。これに関しては、冷却剤により冷却された体幹部表面の血管が収縮した結果、放熱が抑制され、他の部位；特に頭部に蓄熱した結果であると解釈した³⁾。

すなわち、活動によって予想される蓄熱量に見合った容量の冷媒を用意できても、皮膚表面での熱交換の効率を考慮しなければ、効果的に蓄熱量分の熱を取り除けないという問題をかかえているのである。しかし、これに関しては、水冷服の熱伝達モデルを解析した研究¹⁵⁾等をもとに、別途実験を積み重ねて人体にとって適切な冷媒と流量を検討していきたい。

これに関連して、我々は別途ヒートストレス・アラームを開発しており¹⁶⁾、このコントロールユニットを体温管理に利用できると考えている。すなわち、皮膚の表面温度をセンサーにより生体情報をモニタリングし、その情報をもとに小型コンピュータを介して水流を制御することで、血流を阻害しない形で最適な体温制御が可能であると考えられる。しかし、この制御方法やシステムの構築に関しては、今後の研究課題としたい。

5. まとめ

高温環境下で消防員装具を着用した場合の蓄熱に関連して、自転車エルゴ・メーターによる運動負荷実験では、運動負荷量 (W) から被験者の体温上昇の予測が可能であると考えられた。

一方、水冷による体温制御については、体温を冷却するまでに熱損失が大きいという観点から発熱量以上の十分な熱量を確保する必要性が認められた。

また、過去の研究から、制御できない冷媒は被験者の快適性を損なうと考えられるので、皮膚温センサーおよびコンピュータによる制御が必要であると考えられた。

現在、小型皮膚温計と心拍センサーを組み込んだ消防員のヒートストレスアラームシステムを開発しており、これらの制御システムと水冷循環システムとを組み合わせることで、高温環境下での体温管理が十分に可能であると考えられた。

謝辞等

本研究を実施するに当たり、密閉型衣服の共同研究プロジェクトのメンバーとしてご協力をいただいた中橋 美智子先生および小林防火服株式会社の皆様、自給式呼吸器のご手配および実験に協力していただきました株式会社 重松製作所の皆様に御礼を申し上げます。なお本研究は、文部科学省科学研究費基盤研究 (C) の支援を受けた。

参考文献

- 1) 消防科学研究所：濃煙・熱気内で活動する消防隊員の労働負担について，消防科学研究所報，26，33-139,1989.
- 2) 生野晴美，塚田恭子，中橋美智子，物部博文，村山雅己：着用実験による消防員装具のヒートストレス評価，日本衣服学会誌，46(1)，11-17，2002.
- 3) 物部博文，村山雅己，生野晴美，塚田恭子，中橋美智子：消防員装具のヒートストレス改善に関する研究，日本生理人類学会誌，7(1)，43-47，2002.
- 4) 物部博文，村山雅己，生野晴美，中橋美智子：頭部冷却による消防員装具のヒートストレス改善，日本生理人類学会誌，7(3)，9-13，2002.

- 5) 物部博文, 村山雅己, 生野晴美, 中橋美智子: 消防服のヒートストレスに対する予防策, 横浜国立大学教育人間科学部紀要Ⅳ, 9, 57-65, 2007.
- 6) 中橋美智子, 村山雅己, 物部博文, 生野晴美: 火災シナリオによる消防員装具の着用時間と運動量, 日本生理人類学会誌, 8(2), 39-45, 2003.
- 7) 中橋美智子, 村山雅己, 物部博文, 生野晴美: 林野火災時におけるヒートストレス, 横浜国立大学教育人間科学部紀要Ⅳ, 7, 9-22, 2004.
- 8) Ainsworth BE, Haskell WL, Whitt MC, Irwin ML, Swartz AM, Strath SJ, O' Brien WL, Bassett DR Jr, Schmitz KH, Emplaincourt PO, Jacobs DR Jr, Leon AS: Compendium of physical activities: an update of activity codes and MET intensities, Medical Science Sports Exercise. 32(9), S498-504, 2000.
- 9) ISO7933, Ergonomics of the thermal environment - Analytical determination and interpretation of heat stress using calculation of the predicted heat strain, 2004
- 10) 村山雅己, 福地信義, 中橋美智子: 海洋暴露環境における人体の温熱制御に関する基礎的研究 (第3報), 日本造船学会論文集, 第178号, 1995.
- 11) 村山雅己, 福地信義, 中橋美智子: 暑熱環境下の海洋作業における熱的限界と温熱対策に関する研究 - (その1) 熱収支モデルと温熱指数 -, 日本造船学会論文集, 第179号, 1996.
- 12) 村山雅己, 福地信義, 中橋美智子: 暑熱環境下の海洋作業における熱的限界と温熱対策に関する研究 - (その2) 温熱対策区分 -, 日本造船学会論文集, 第182号, 1997.
- 13) 村山雅己, 福地信義, 中橋美智子: 海洋暴露作業における人体への熱的影響と温熱対策の評価, 日本造船学会論文集, 第183号, 1998.
- 14) 物部博文: エネルギー代謝量の測定, 日本衣服学会誌, 日本衣服学会誌, 49(2), 29-32, 2006.
- 15) 城島栄一郎, 井上龍夫: 水冷服の熱伝達モデル, 実践女子大学生活科学部紀要, 32, 41-46, 1995.
- 16) 村山雅己, 物部博文, 生野晴美: 消防活動におけるヒートストレス対処に関する研究 - 衣服内温度モニターによるヒートストレス予測と警報指標値の設定 -, 東京学芸大学紀要総合教育科学系Ⅰ, 63, 187-195, 2012.