

密閉型衣服—消防員装具の

ヒートストレス対処に関する研究と開発



村山 雅己

(社)日本船舶品質管理協会
製品安全評価センター
(船舶機装品研究所)

中橋美智子

元東京学芸大学教育

生野 晴美

東京学芸大学

物部 博文

横浜国立大学教育人間科学



密閉型衣服の種類

■ 消防員装具

- ・一般消防員装具
- ・化学薬品消防員装具
- ・船舶油火災用消防員装具

■ ガス防護服

■ 細菌防護服

■ 農薬防護服

■ 合羽類



ヒートストレスによる傷害事故 —消防士の場合—

「National Fire Protection Association」 (1998)
消防士の死亡原因 傷害の種類

Cause of Injury	死亡 (人)	%
Stress (ストレス)	42	46.2%
Struck by / contact with object (物体との 衝突、接触)	24	26.4%
Caught or trapped (下敷きなど)	21	23.1%
Electrocuted (感電死)	2	2.2%
Fell (落下)	1	1.1%
Other (その他)	1	1.1%
Total	91	100.0%

Nature of Injury	死亡 (人)	%
Heart attack (心臓病)	39	42.9%
Internal trauma (外 傷)	21	23.1%
Asphyxiation (窒息)	9	9.9%
Crushing (衝 突)	8	6.8%
Burns (やけど)	6	6.6%
Electrocution (感電死)	2	2.2%
Drowning (溺 死)	1	1.1%
Stroke (脳卒中)	1	1.1%





米軍訓練でのヒートストレス記事

- 米陸軍の最新式防護服を着用した兵士、記者会見で倒れる
- **2002年11月12日 3:04pm PT** ワシントン発——米陸軍は12日(米国時間)、生物・化学兵器を検知し種類を特定する装備のデモンストレーションを行なった。この最中、息苦しい防護服に身を包んだ兵士がテレビカメラ用ライトの熱に耐えきれず倒れるというハプニングが起き、思わぬ教訓を提示した。





密閉型衣服のヒートストレスとは？

- **ヒートストレス**とは人体からの放熱が抑制され、運動による代謝熱が蓄積し体温が上昇する状態

密閉型衣服による弊害

- 衣服内の換気が抑制
- 発汗による気化熱放熱が抑制
- 作業による代謝熱の蓄積



ヒートストレス



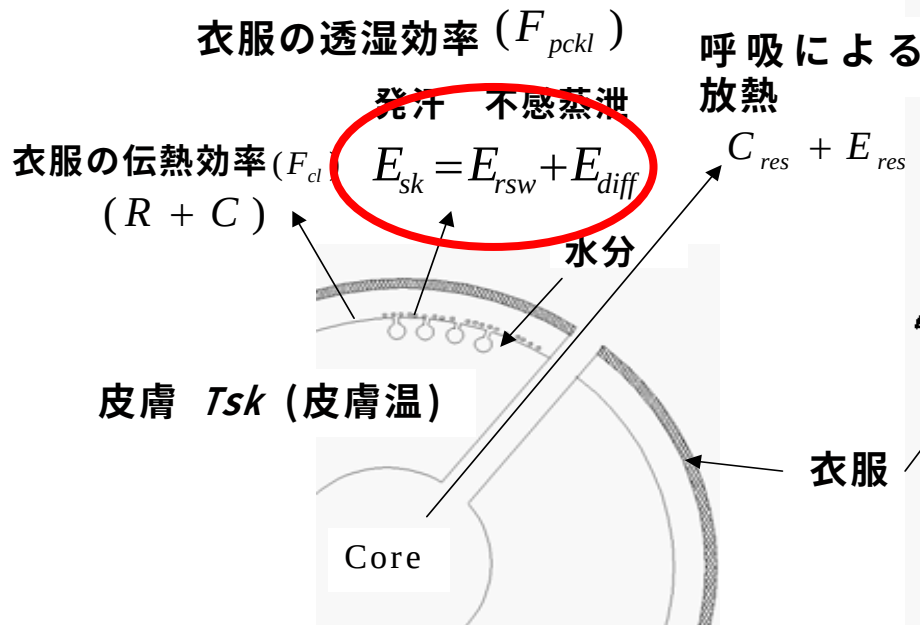
火炎輻射による影響はあまり関係がない！（影響が小さい）

密閉型衣服によるヒートストレスとは

- 人体の冷却要因 -

蓄熱量 代謝量 仕事 対流放熱 呼吸による
 潜熱放熱 皮膚からの
 輻射と対流放熱 潜熱放熱

$$S = M - W - C_{res} - E_{res} - (R + C) - E_{sk}$$



皮膚から衣服を通しての放熱

$$E_{sk} (R + C)$$

環境温度 30℃前後の人体蓄熱

熱平衡方程式を構成する各要因の構成比

- 代謝量 120 W/m²
- 風速 0.25 m/s
- 相対湿度 50%
- 皮膚の濡率 85%
- 衣服の熱抵抗 0.8clo

(1) 呼吸による放熱

$$E_{res} = 1.73 \times 10^{-5} M(5867 - P_{da}) \quad [W/m^2]$$

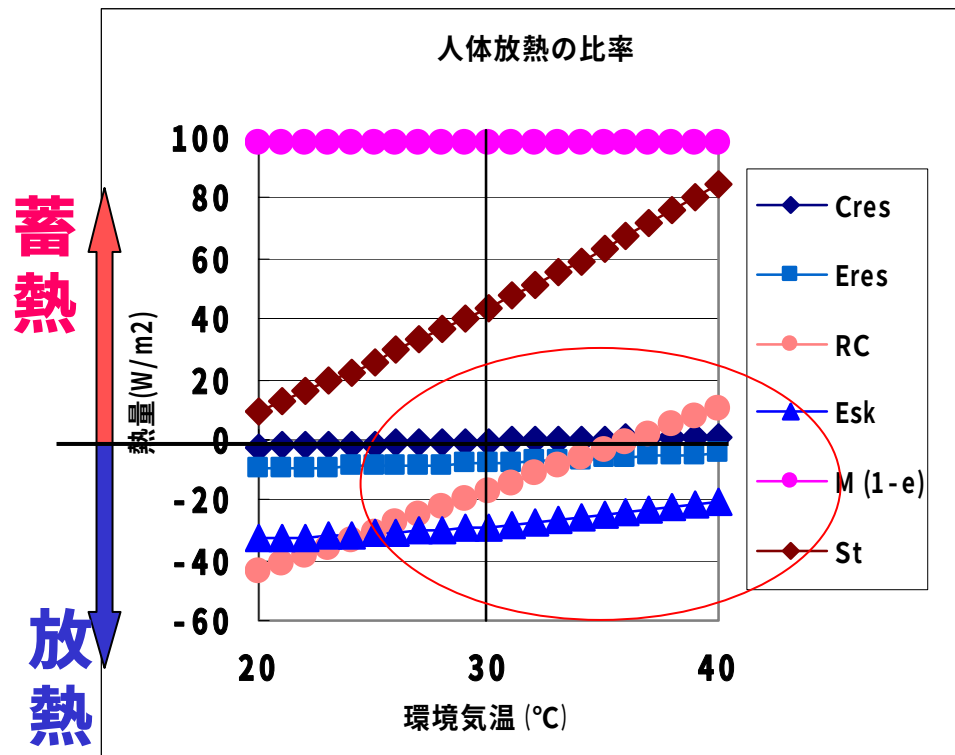
$$C_{res} = 0.0014 M(34.0 - \theta_a) \quad [W/m^2]$$

(2) 皮膚表面 (衣服表面) からの対流と放射

$$R + C = h F_{cl}(\theta_{sk} - \theta_o) \quad [W/m^2]$$

(3) 皮膚表面から衣服を通しての潜熱 (気化熱) 放熱

$$E_{sk} = b(0.06 + 0.94 W_{rsw}) h_e F_{pcl}(P_{sk} - P_{da}) \quad [W/m^2]$$



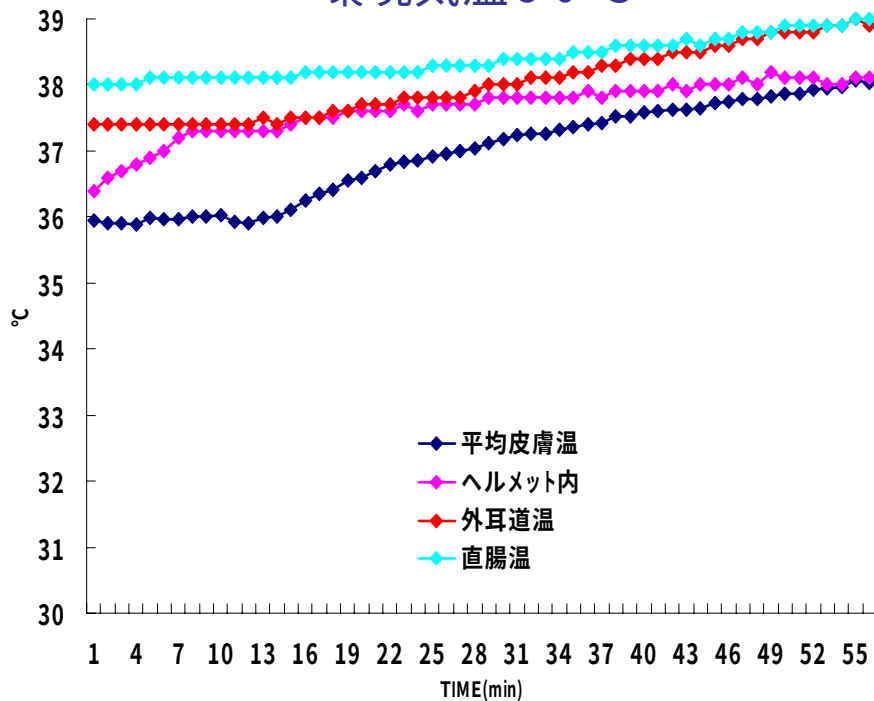
環境条件としては、気温が大きな要因



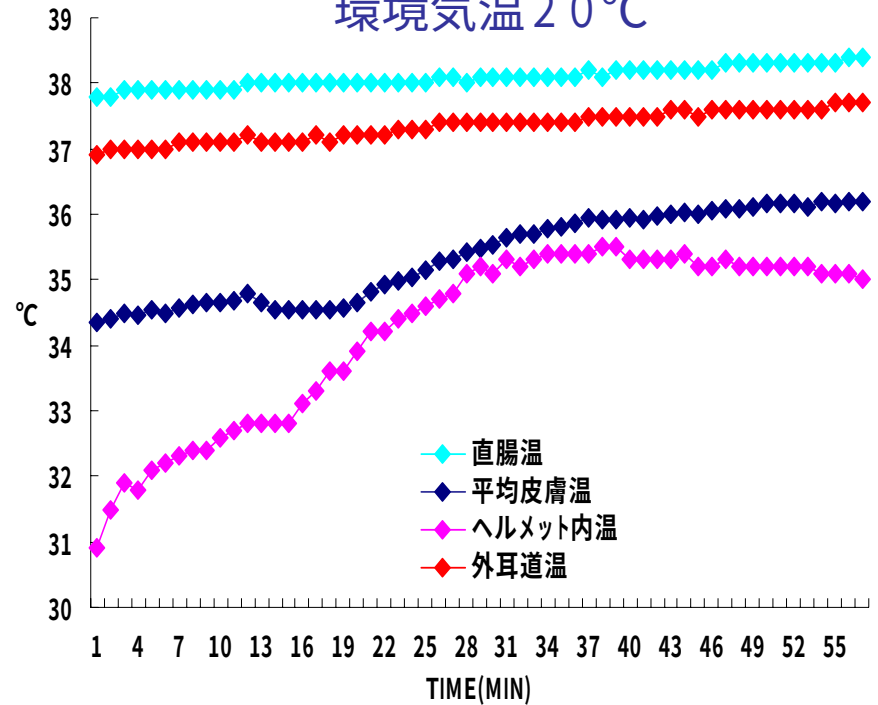
環境温度の影響

環境気温以外は同じ条件

環境気温 30℃



環境気温 20℃



消防作業による作業量調査

小規模林野火災

1時間35分

0:00		出場		
0:05				
0:10	}	現場到着、放水作業準備		
0:15		放水作業開始		
0:20	}		相当な運動量（代謝）と思われる。 時間が長くなる場合には撤退、休息が必要	
0:25				
0:30	}	0.5		
0:35				
0:40	}			
0:45		鎮圧		
0:50	}	残火処理		
0:55				
1:00	}	0.5		
1:05				
1:10	}			
1:15		鎮火		
1:20	}	撤収作業		
1:25				
1:30		0.5		



活動が長時間にわたる山林火災では消防員装具を着用していない

木造家屋火災

1時間5分

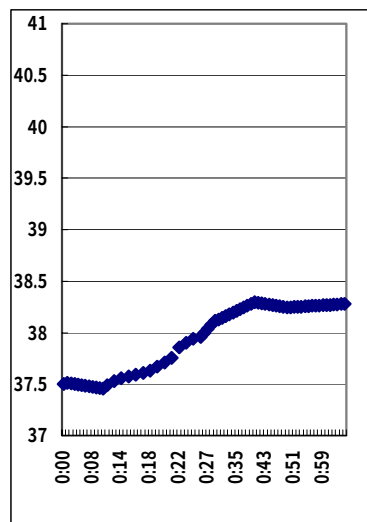
0:00		出場	
0:05			
0:10	}	現場到着	
0:15		消火準備、救助確認	
0:20		0:15 救助作業	
0:25	消火活動		
0:30	鎮圧		
0:35		0:25 残火作業	
0:40			
0:45			
0:50	}	鎮火	
0:55		0:10 撤収作業	
1:00			
1:05	退場		

火炎の中に入ることから、完全防御でないといけない。また、階段、はしごの上り下りがあり、瞬時的にかなりの運動量



シナリオ解析による作業量と熱平衡方程式による体温上昇計算（環境温度 20℃の場合）

代謝量 M	W/m ²
環境気温 Ta	20 °C
環境湿度 Fa	0.8 %
風速1 Vfw	0.25 m
風速2 Va	0.3 m
衣服熱抵抗 Iclo	
日射量 Sun	0
身長	172 cm
体重 Wman	60 kg
体表面積 Sface	1.72 m ²
濡れ率 Wrs	0.85
皮膚温 Tsk	33 °C
α α	0.25
合羽抑制率 Ka	

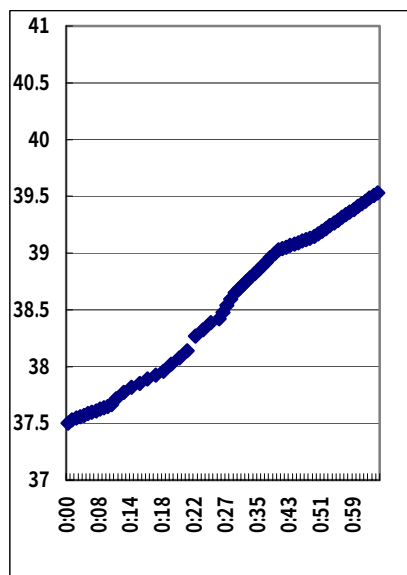


人体比熱を
3.47[J/kgK] で計算

計算値				計算値			
衣服の熱抵抗 透湿抑制率		1.14 代謝量 (W/m ²)	ポンプ車 1 号 1 番員	衣服の熱抵抗 透湿抑制率		1.14 代謝量 (W/m ²)	ポンプ車 2 号 小隊長
時:分				気温			
0:00	出場命令	1	37.5 120 車庫へ、車庫到着	20	1	37.5 120	車庫へ、車庫到着
0:01		0.5	37.5 120 消防員装具の着装	20	0.5	37.5 120	消防員装具の着装
0:02	出 場	0.5	37.5 73 消防服着装終了、車に搭乗	20	0.5	37.5 73	消防服着装終了、車に搭乗
0:03		0.5	37.5 73 車中にて、情報の収集確認等	20	0.5	37.5 73	車中にて、情報の収集確認等
0:04		0.5	37.5 73	20	0.5	37.5 73	
0:05		0.5	37.5 73	20	0.5	37.5 73	
0:06		0.5	37.5 73	20	0.5	37.5 73	
0:07		0.5	37.5 73	20	0.5	37.5 73	
0:08		0.5	37.5 73	20	0.5	37.5 73	
0:09		0.5	37.5 73	20	0.5	37.5 73	
0:10		0.5	37.5 73	20	0.5	37.5 73	
0:11		0.5	37.5 73	20	0.5	37.5 73	
0:12	現 着	0.2	37.5 172 梯子をポンプ車から下ろす	20	0.2	37.5 224	資機材を降ろす。
			172 梯子を二階東欄干まで運ぶ				224 ロープの接続
0:13	避難者の確	0.2	37.5 172 欄干に梯子を設置する	20	0.2	37.6 224	ポンプ車よりエンジンカッターをおろ
			353 梯子をかけあがる				224 玄関までエンジンカッターを運ぶ
0:14	3名の救助	0	37.6 146 欄干の救助者を救助	20	0	37.6 267	エンジンカッターで玄関ドア破壊
			146 下へ下ろし安全な場所へ誘導する				267 エンジンカッターで玄関ドア破壊
0:15		0	37.6 116 梯子操作補助	40	0	37.8 267	エンジンカッターで玄関ドア破壊
			116 梯子操作補助				267 エンジンカッターで玄関ドア破壊
0:16		0	37.6 116 梯子操作補助	40	0	37.8 146	面体をつけ内部侵入
			116 梯子操作補助				146 内部での救助作業
0:17		0	37.6 116 梯子操作補助	40	0	37.9 146	内部での救助作業
			116 梯子操作補助				146 内部での救助作業
0:18		0	37.6 116 梯子操作補助	40	0	37.9 146	内部での救助作業
			353 梯子設定後、駆け上がる。				146 内部での救助作業
0:19		0	37.7 181 救助者を室内から運び出す為の補	40	0	38.0 224	救助者1名を室外へ運び出す
			181 救助者にロープをまく				181 救助者の介助
0:20		0	37.7 116 救助者をバスケットに収納	40	0	38.1 146	内部へ再度侵入
			116 バスケットにのり下へ運ぶ				146 内部へ侵入
0:21		0	37.8 181 救助者を安全な場所へ運ぶ	40	0	38.2 146	搜索
			126 木陰に救助者を下ろしポンプ車				224 2人目の救助者を外へ運び出す
0:22		0	37.9 353 再度梯子をかけ上げる	40	0	38.3 181	救助者の介助

シナリオ解析による作業量と熱平衡方程式による体温上昇計算（環境温度 30℃の場合）

代謝量 M	W/m ²
環境気温 Ta	30 °C
環境湿度 Fa	0.8 %
風速1 Vfw	0.25 m
風速2 Va	0.3 m
衣服熱抵抗 Iclo	
日射量 Sun	0
身長	172 cm
体重 Wman	60 kg
体表面積 Sface	1.72 m ²
濡れ率 Wrs	0.85
皮膚温 Tsk	33 °C
α	0.25
合羽抑制率 Ka	



計算値				計算値			
時:分	衣服の熱抵抗 透湿抑制率	1.14 代謝量 (W/m ²)	ポンプ車 1 号 1 番員	気温	衣服の熱抵抗 透湿抑制率	1.14 代謝量 (W/m ²)	ポンプ車 2 号 小隊長
0:00 出場命令	1	37.5	120 車庫へ、車庫到着	30	1	37.5	120 車庫へ、車庫到着
0:01	0.5	37.5	120 消防員装具の着装	30	0.5	37.5	120 消防員装具の着装
0:02 出 場	0.5	37.5	73 消防服着装終了、車に搭乗	30	0.5	37.5	73 消防服着装終了、車に搭乗
0:03	0.5	37.6	73 車中にて、情報の収集確認等	30	0.5	37.6	73 車中にて、情報の収集確認等
0:04	0.5	37.6	73	30	0.5	37.6	73
0:05	0.5	37.6	73	30	0.5	37.6	73
0:06	0.5	37.6	73	30	0.5	37.6	73
0:07	0.5	37.6	73	30	0.5	37.6	73
0:08	0.5	37.6	73	30	0.5	37.6	73
0:09	0.5	37.6	73	30	0.5	37.6	73
0:10	0.5	37.6	73	30	0.5	37.6	73
0:11	0.5	37.7	73	30	0.5	37.7	73
0:12 現 着	0.2	37.7	172 梯子をポンプ車から下ろす	30	0.2	37.7	224 資機材を降ろす。
			172 梯子を二階東欄干まで運ぶ				224 ロープの接続
0:13 避難者の確	0.2	37.8	172 欄干に梯子を設置する	30	0.2	37.8	224 ポンプ車よりエンジンカッターをおろす
			353 梯子をかけあがる				224 玄関までエンジンカッターを運ぶ
0:14 3名の救助	0	37.8	146 欄干の救助者を救助	30	0	37.9	267 エンジンカッターで玄関ドア破壊
			146 下へ下ろし安全な場所へ誘導する				267 エンジンカッターで玄関ドア破壊
0:15	0	37.9	116 梯子操作補助	40	0	38.0	267 エンジンカッターで玄関ドア破壊
			116 梯子操作補助				267 エンジンカッターで玄関ドア破壊
0:16	0	37.9	116 梯子操作補助	40	0	38.1	146 面体をつけ内部侵入
			116 梯子操作補助				146 内部での救助作業
0:17	0	37.9	116 梯子操作補助	40	0	38.2	146 内部での救助作業
			116 梯子操作補助				146 内部での救助作業
0:18	0	38.0	116 梯子操作補助	40	0	38.2	146 内部での救助作業
			353 梯子設定後、駆け上がる。				146 内部での救助作業
0:19	0	38.0	181 救助者を室内から運び出す為の補	40	0	38.3	224 救助者 1 名を室外へ運び出す
			181 救助者にロープをまく				181 救助者の介助
0:20	0	38.1	181 救助者をバスケットに収納	40	0	38.4	146 内部へ再度侵入
			116 バスケットにのり下へ運ぶ				146 内部へ侵入
0:21	0	38.1	181 救助者を安全な場所へ運ぶ	40	0	38.4	146 捜索
			126 木陰に救助者を下ろしポンプ車				224 2 人目の救助者を外へ運び出す
0:22	0	38.3	353 再度梯子をかけ上る	40	0	38.5	181 救助者の介助



ヒートストレスに関する研究計画

■ ヒートストレスの評価方法

- ・サーマルマネキンによる方法
- ・人体着用実験による方法

■ ヒートストレスの対処方法

- ・冷却材による方法
- ・衣服内換気による方法
- ・ヘルメット内送風による方法

■ ヒートストレスの予防法

- ・アラームによる事前予測

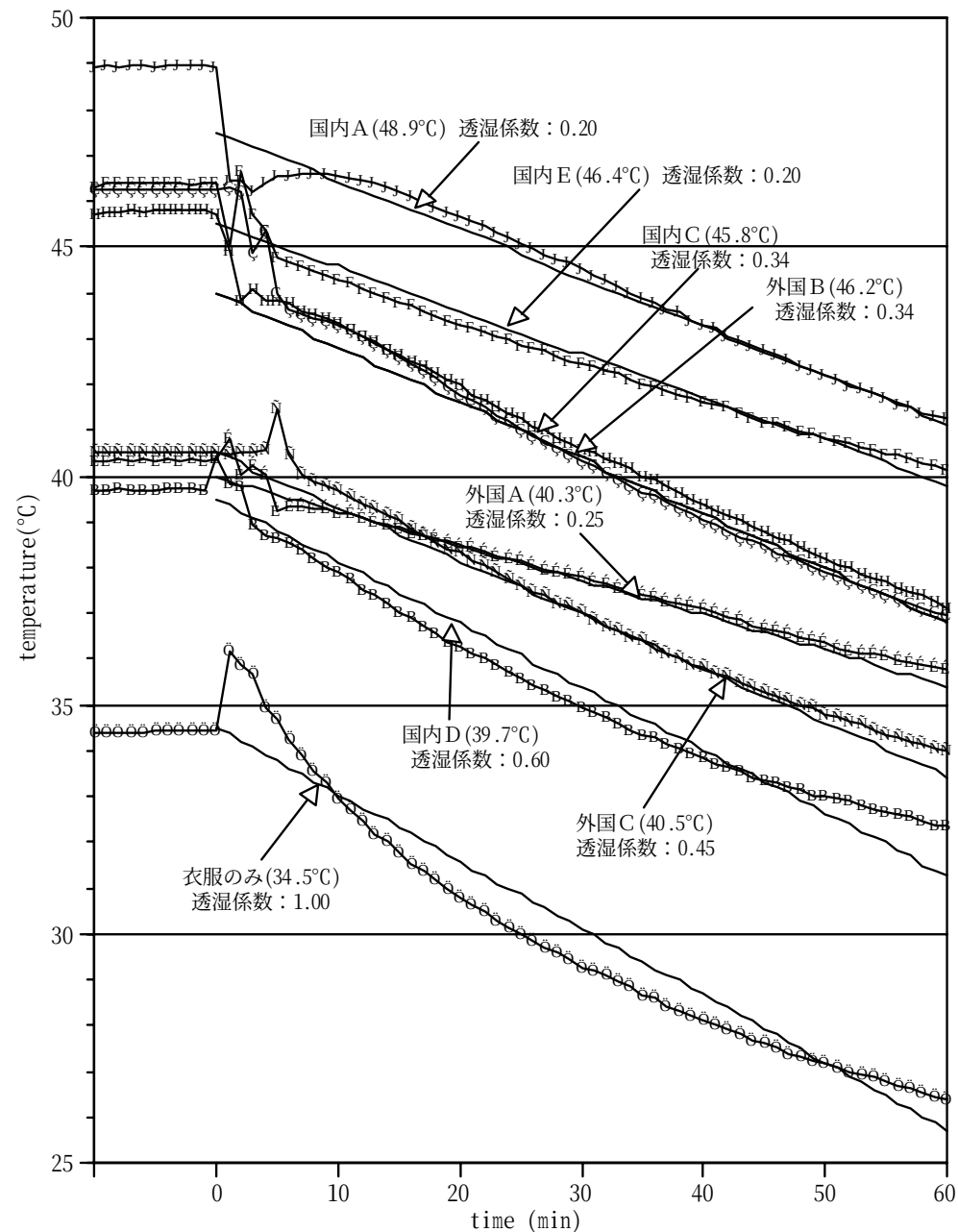


消防員装具のサーマルマネキンによる熱的性能

項 目		単位	消防員装具（国内製品）				
			衣服のみ	国内A	国内C	国内D	国内E
乾燥時	全平均表面温度	℃	32.2	44.2	41.1	37.2	41.6
	胸部及び臀部の平均表面温度	℃	34.5	48.9	45.8	39.7	46.4
	乾燥時の熱抵抗値	m ² K/W	0.254	0.475	0.435	0.345	0.410
	表面空気熱抵抗を除く (clo値)	clo	0.63	1.86	1.63	1.14	1.53
計算における初期皮膚温度		℃	34.5	47.5	44.0	39.5	45.5
計算における透湿係数		N.D	1.00	0.20	0.34	0.60	0.20



サーマルマネキンの平均温度降下と計算による温度降下曲線



着用衣服: 上下肌着、ステテコ、木綿シャツ、上下作業着

環境温度 20°C、相対湿度 50%

サーマルマネキン発熱量(代謝量) 58W/m²

Masaki Murayama

消防員装具のサーマルマネキンによる熱的性能

項 目		単位	消防員装具（国内製品）				
			衣服のみ	国内A	国内C	国内D	国内E
乾燥時	全平均表面温度	℃	32.2	44.2	41.1	37.2	41.6
	胸部及び臀部の平均表面温度	℃	34.5	48.9	45.8	39.7	46.4
	乾燥時の熱抵抗値	m ² K/W	0.254	0.475	0.435	0.345	0.410
	表面空気熱抵抗を除く (clo値)	clo	0.63	1.86	1.63	1.14	1.53
計算における初期皮膚温度		℃	34.5	47.5	44.0	39.5	45.5
計算における透湿係数		N.D	1.00	0.20	0.34	0.60	0.20





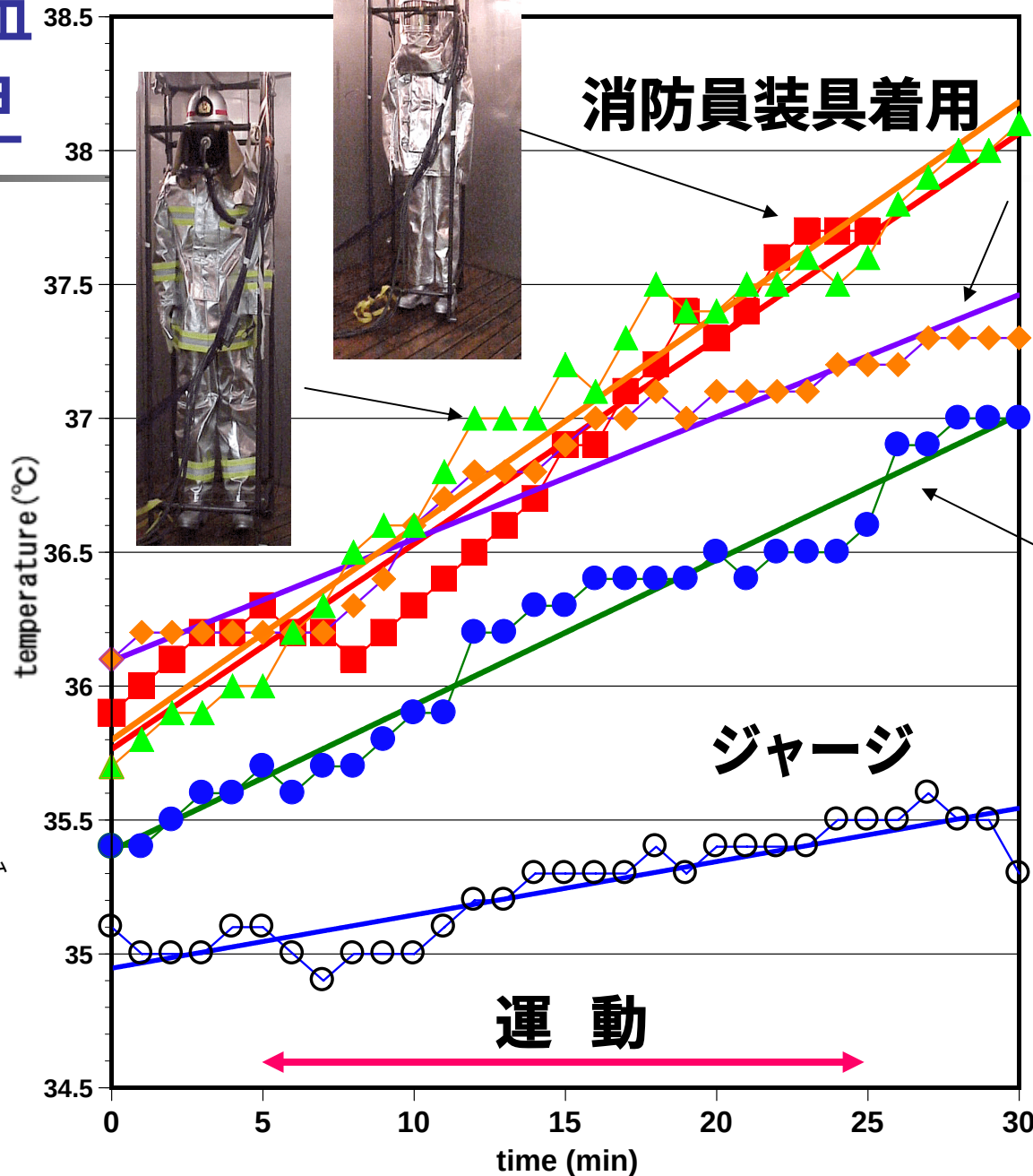
消防員装具の人体着用実験



皮膚温 の上昇

- 気温 30℃
- 湿度 50%
- 120 W/m²
- 作業 20分間

- 被験者の体調調整 (サーカディアンリズムなど)
- 恒温室内にて環境気温、湿度一定
- 壁面の輻射影響、気流の影響の配慮
- サーマルマネキン実験と同じ結果
- ヒートストレス評価の方法として確定



問題となる暑熱下において 現場ではヒートストレス にどの様に対処しているのか

- エアコンの利いた消防車内での休息
- ヘルメットの脱帽、襟元の開放
- 個人判断による休息 (マニュアル化されていないと難しい)





消防員装具におけるヒートストレスに対する対処

消防員装具の主要な要件

- 耐炎性
- 耐熱性
- 防水性



- 冷却剤の使用
- 襟元開放による煙突効果

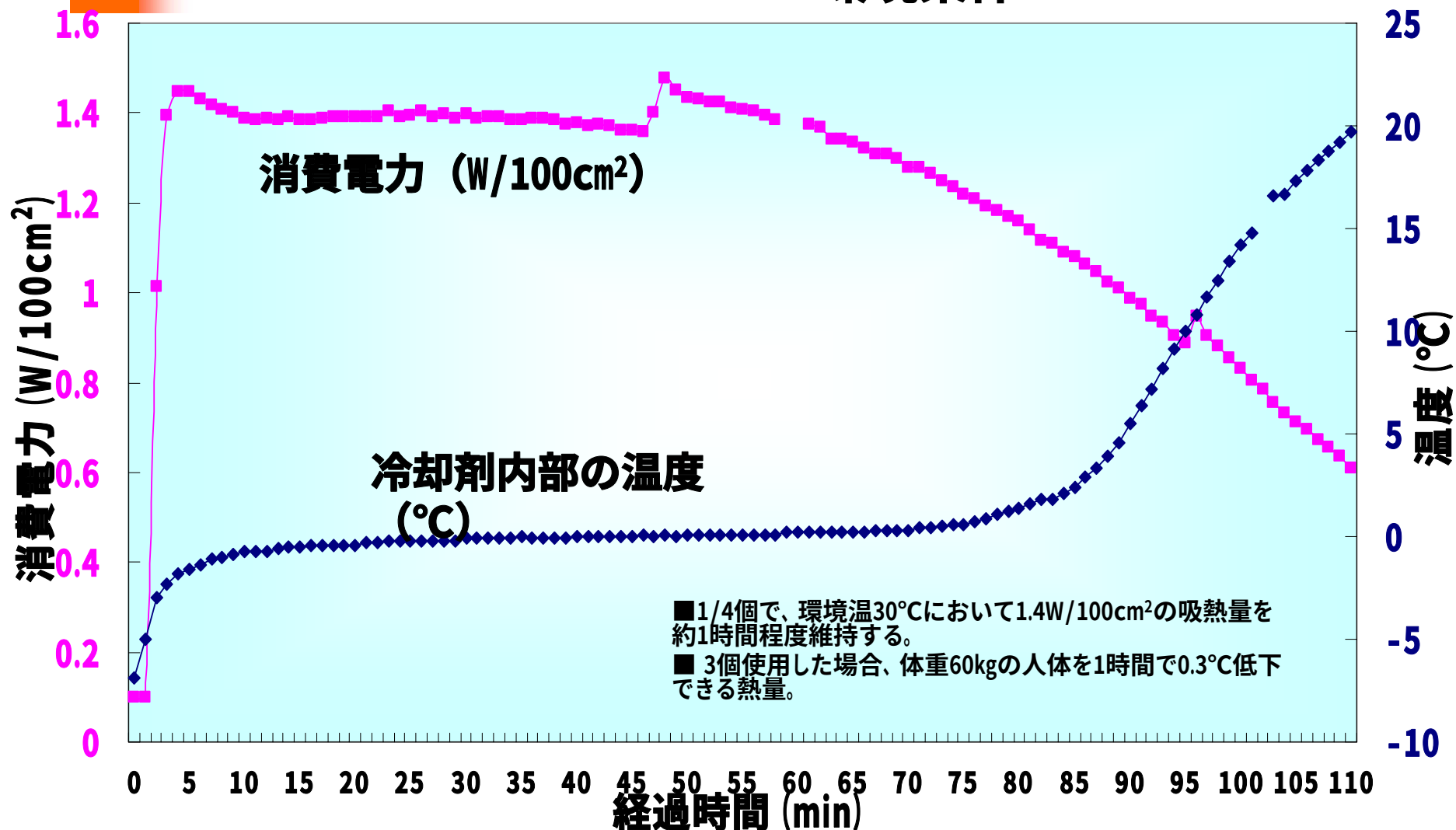


- その他素材による対処
 - (1) 透湿性のある素材の使用
 - (2) 耐熱性があり、衣服熱抵抗が低い素材の使用

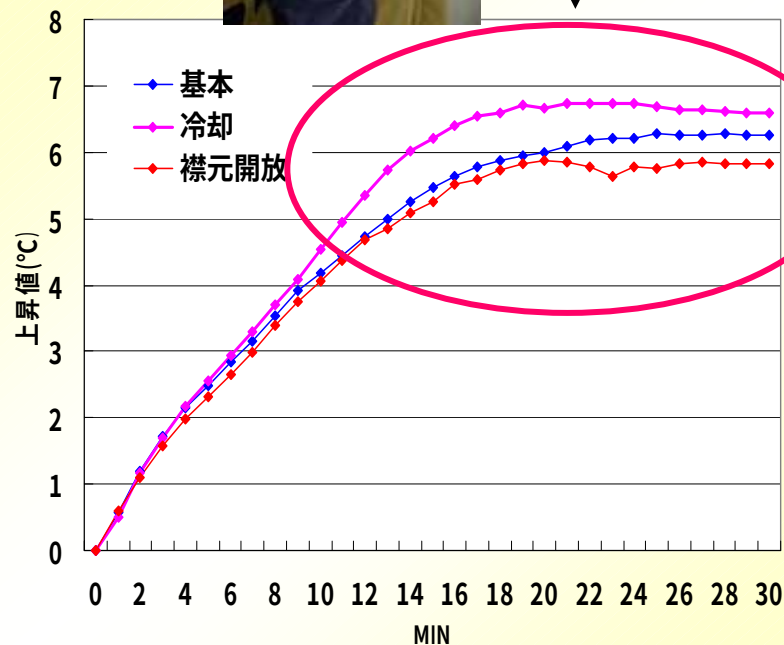


冷却材の使用可能時間と消費電力 の経時変化

環境条件 30℃ 50%RH

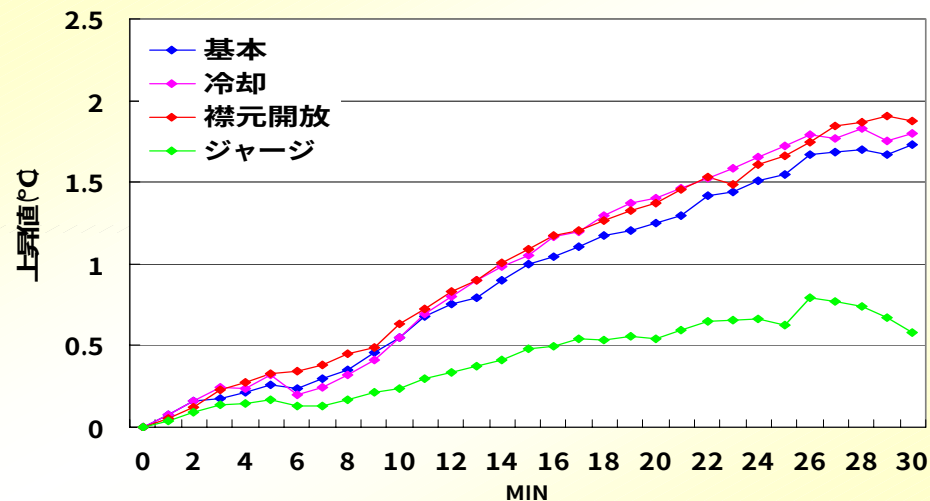


局所冷却の問題

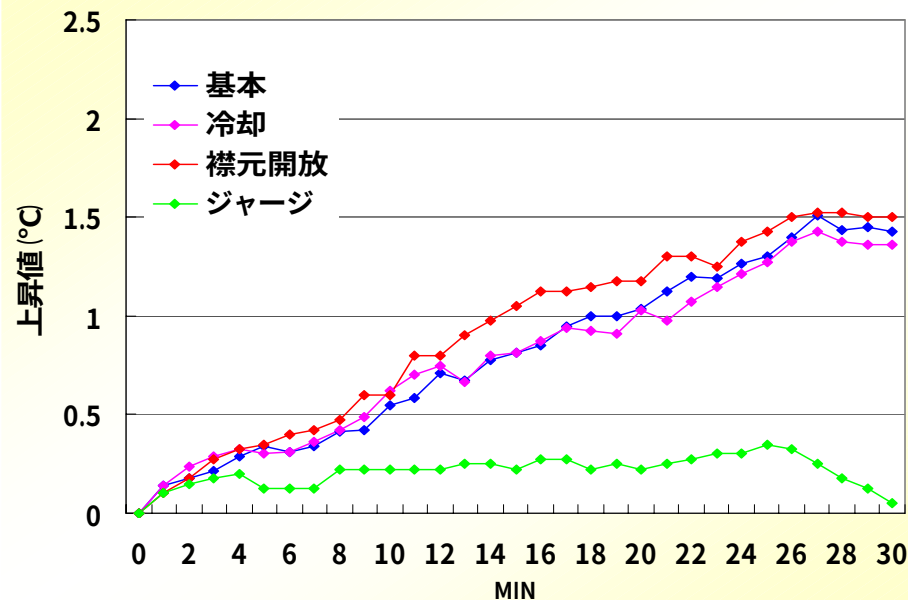


ヘルメット内温度

局所冷却、襟元開放その他衣服の形態での対処は限界がある



平均皮膚温



鼓膜温

ヒートストレス対処のポイントは 発汗による潜熱放熱の重要性と換気

熱平衡方程式を構成する各要因の構成比

- 代謝量 120 W/m^2
- 風速 0.25 m/s
- 相対湿度 50%
- 皮膚の濡率 85%
- 衣服の熱抵抗 0.8clo

(1) 呼吸による放熱

$$E_{\text{res}} = 1.73 \times 10^{-5} M(5867 - P_{\text{da}}) \quad [\text{W/m}^2]$$

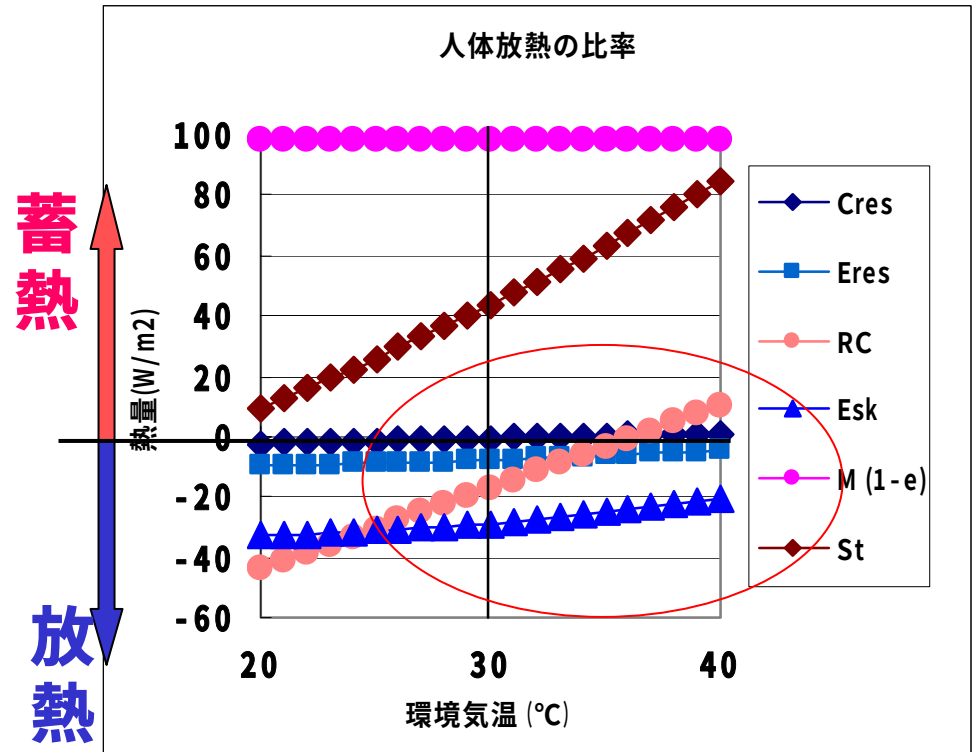
$$C_{\text{res}} = 0.0014 M(34.0 - \theta_a) \quad [\text{W/m}^2]$$

(2) 皮膚表面 (衣服表面) からの対流と放射

$$R + C = h F_{\text{cl}} (\theta_{\text{sk}} - \theta_o) \quad [\text{W/m}^2]$$

(3) 皮膚表面から衣服を通しての潜熱 (気化熱) 放熱

$$E_{\text{sk}} = b (0.06 + 0.94 W_{\text{rsw}}) h_e F_{\text{pcl}} (P_{\text{sk}} - P_{\text{da}}) \quad [\text{W/m}^2]$$



換気を促す強制的な方法を検討

換気にどの程度の効果があるか

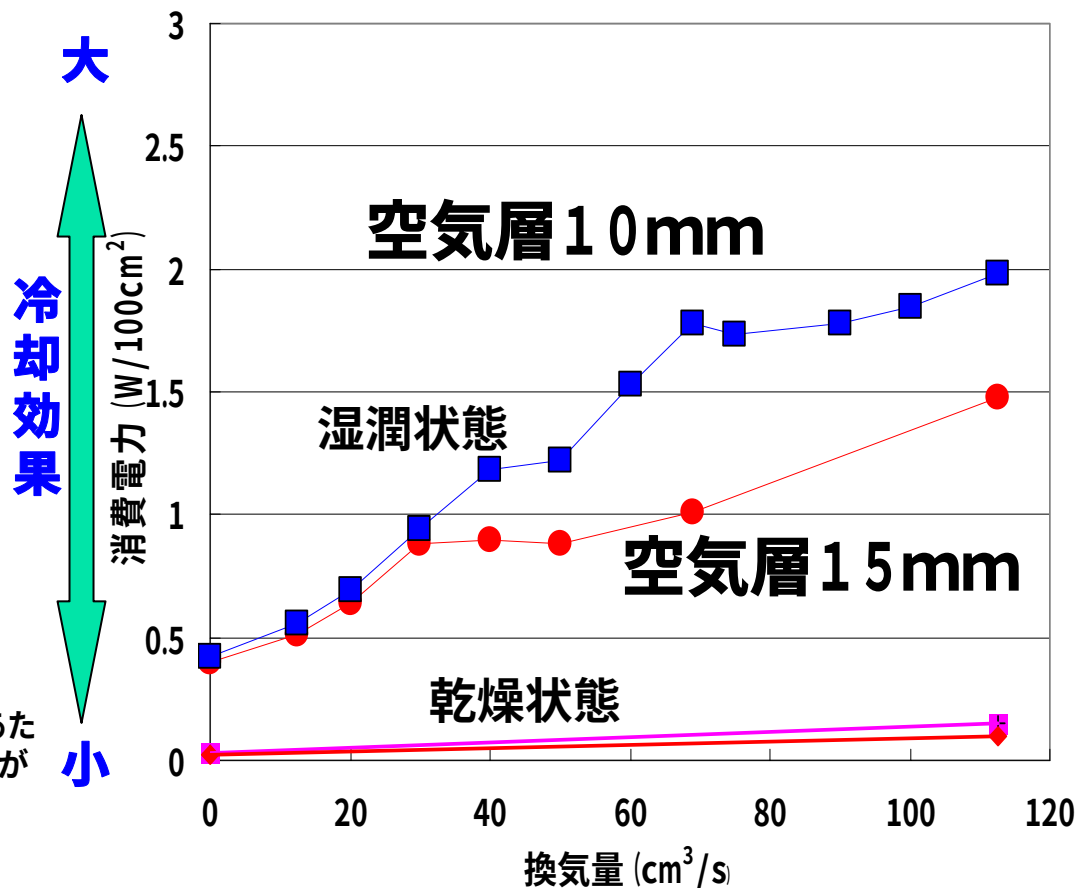
ーサーモラボによる換気実験ー



発汗による肌着の湿潤を想定した実験

■ 湿潤状態では、気温30℃湿度50%の環境で1m²あたり5ℓ/sの換気を行なうと、100～150W/m²の冷却効果がある。

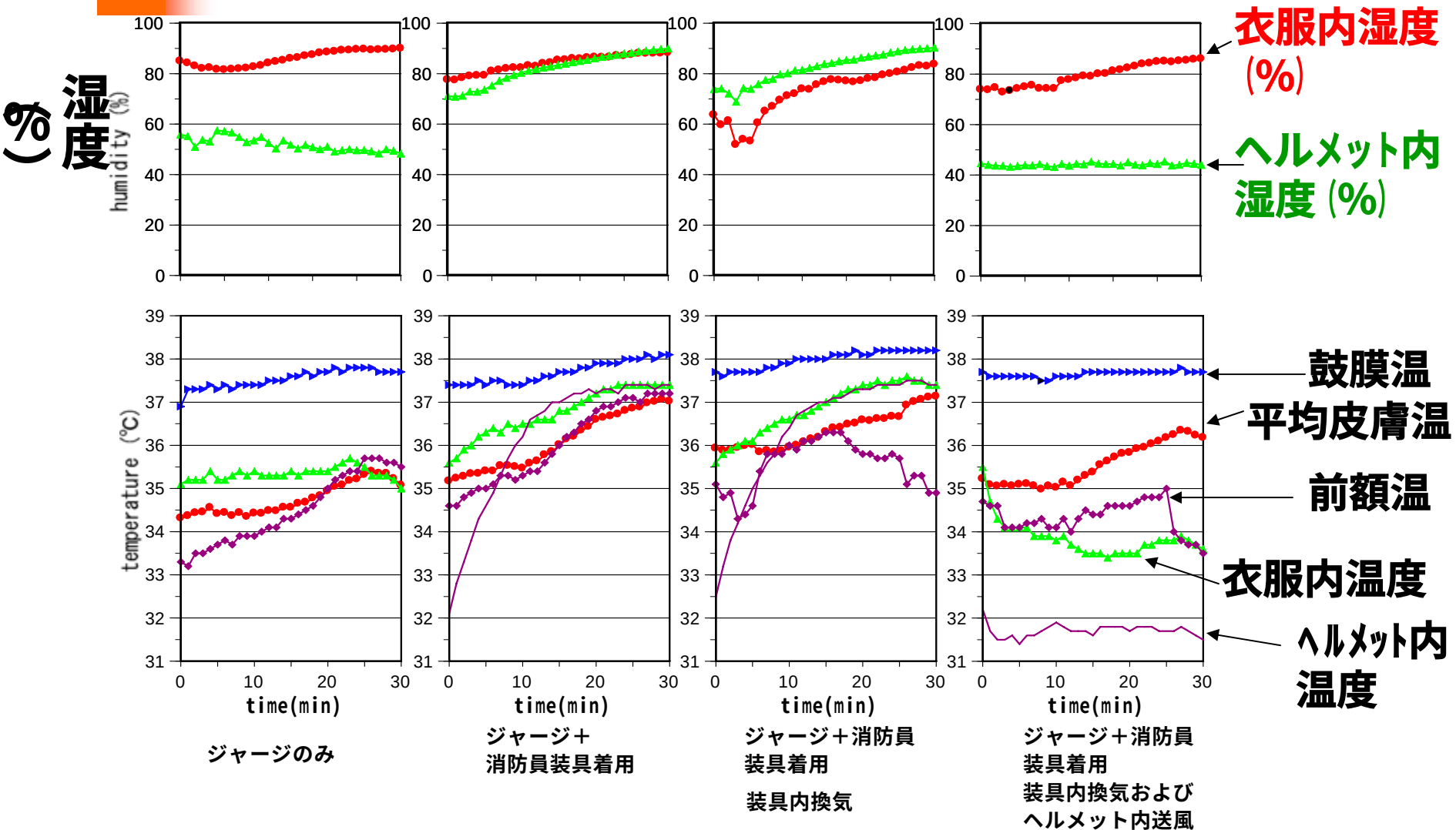
環境条件 30℃ 50%RH



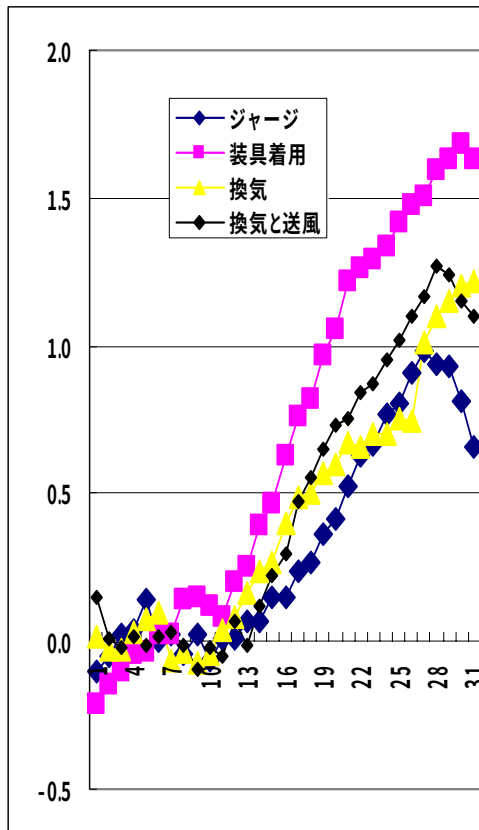
衣服内換気装置と頭部送風装置



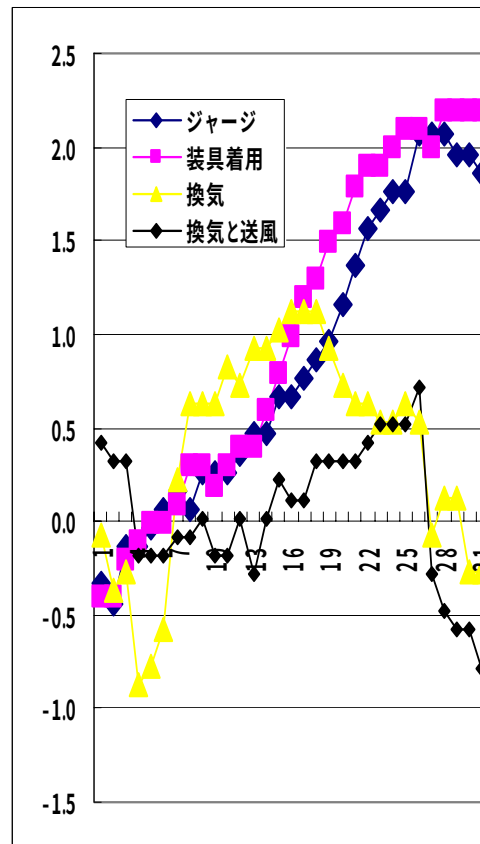
衣服内換気と頭部送風の効果(1)



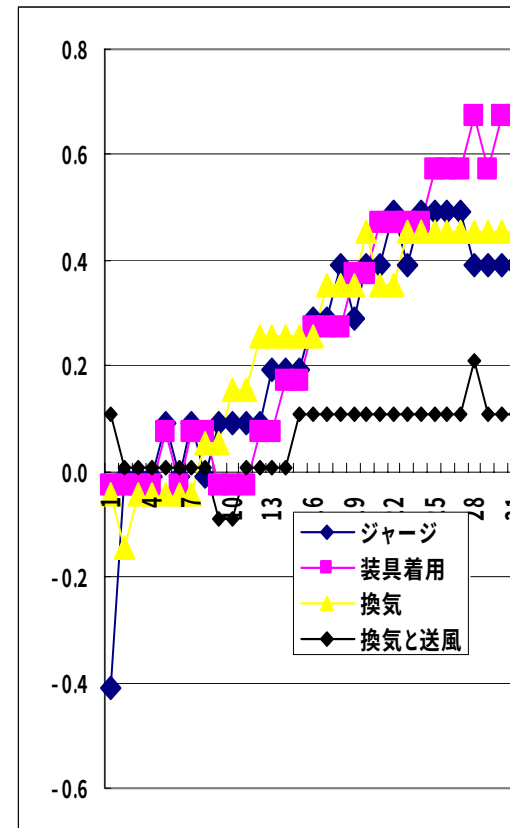
衣服内換気と頭部送風の効果(2)



平均皮膚温



衣服内温度



鼓膜温

装具着用
換気のみ
ジャージ
換気と送風



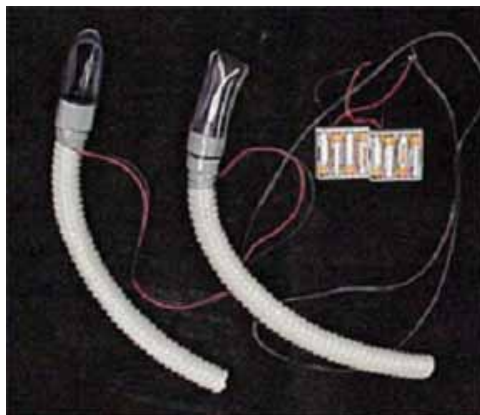


強制換気法のまとめ

サーモラボ実験の結果から、30℃、50%環境下において、衣服内が湿潤していれば体表面積1m²辺り5 リットル/sの換気で約100 W/m²の冷却効果

人体着用実験では、約5 リットル/sのファン2本を使用した結果、30℃、50%環境下において、約30 Wの冷却効果 (衣服内気候の置換率による)

ヒートストレス抑制に大きな効果



消防作業においてもっと効果のある方法は.

消防活動限界アラームの試作



■ ヒートストレスの評価方法

- ・サーマルマネキンによる方法
- ・人体着用実験による方法

■ ヒートストレスの対処方法

- ・冷却材による方法
- ・衣服内換気による方法
- ・ヘルメット内送風による方法

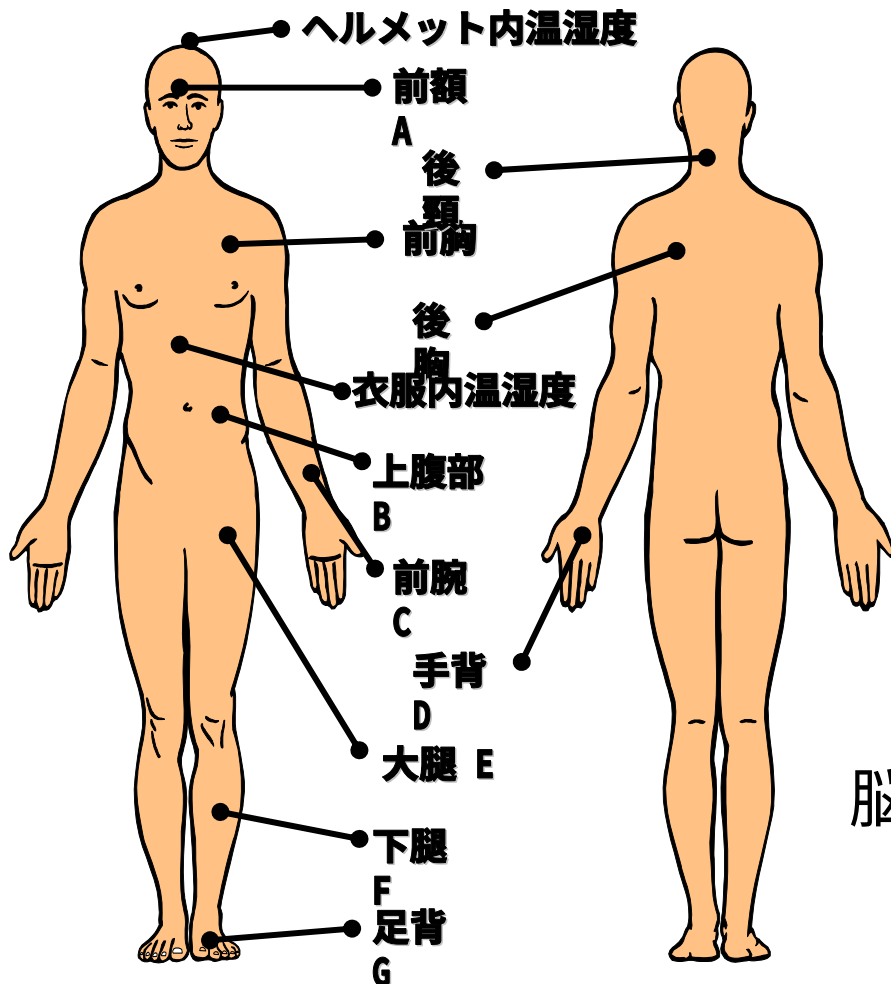
■ ヒートストレスの予防法

- ・アラームによる事前予測



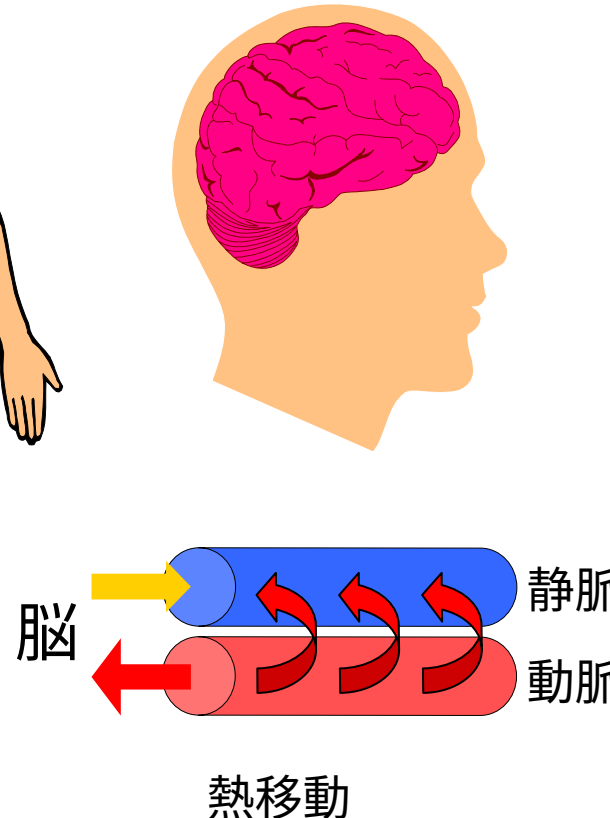


ヒートストレス警報器の開発 —体温のモニタリングをすればよい—



脳温の重要性

選択的脳冷却 (Selective Brain Cooling)



脳温の上昇

顔面および頭部
表面での熱放散

導出静脈 (血管
収縮神経欠如)

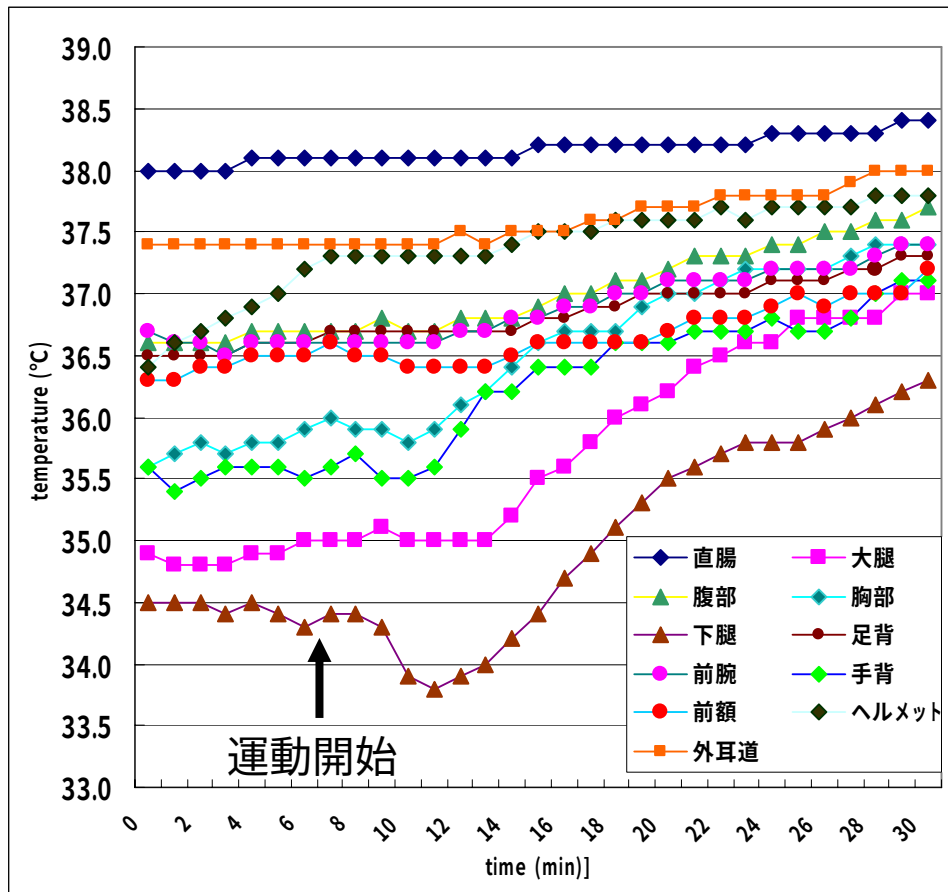
対向流熱交換

脳への動脈

脳表面の
直接冷却

モニター点の検討

運動時における各部の皮膚温と耳道温 (鼓膜温)、直腸温



環境気温30°C 相対湿度50%RH
代謝量120W/m²相当

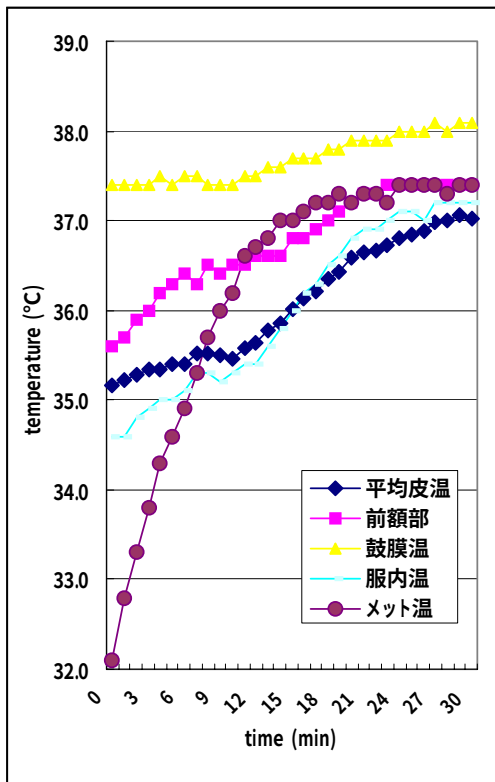


- モニター点としては、直腸温か鼓膜温であるが、現実的ではないので、各部の皮膚温を検討。

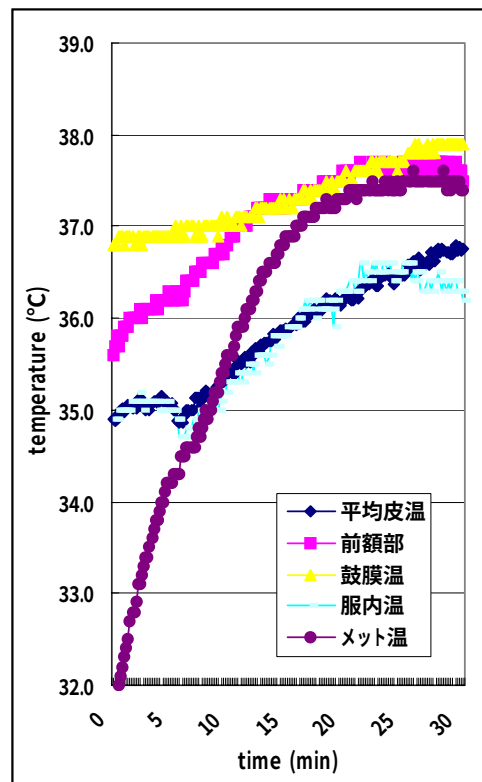
基本的には頭部温度

ヘルメット内気候と外耳道温

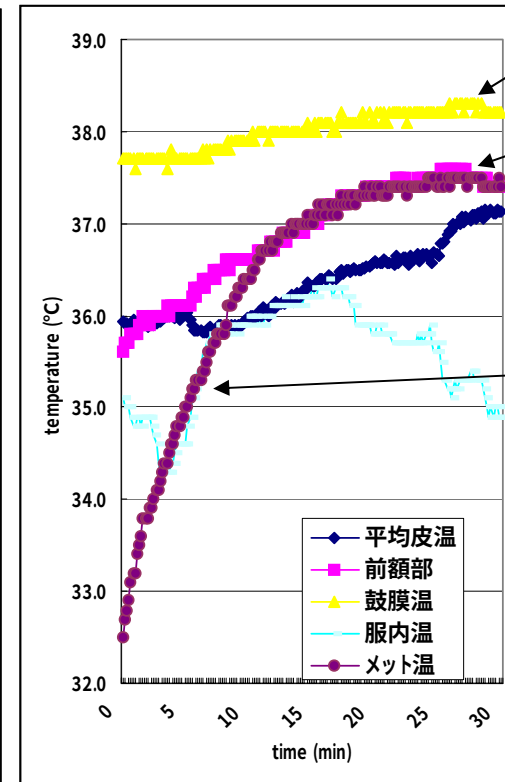
被験者A



被験者B



被験者C



鼓膜温

前額温

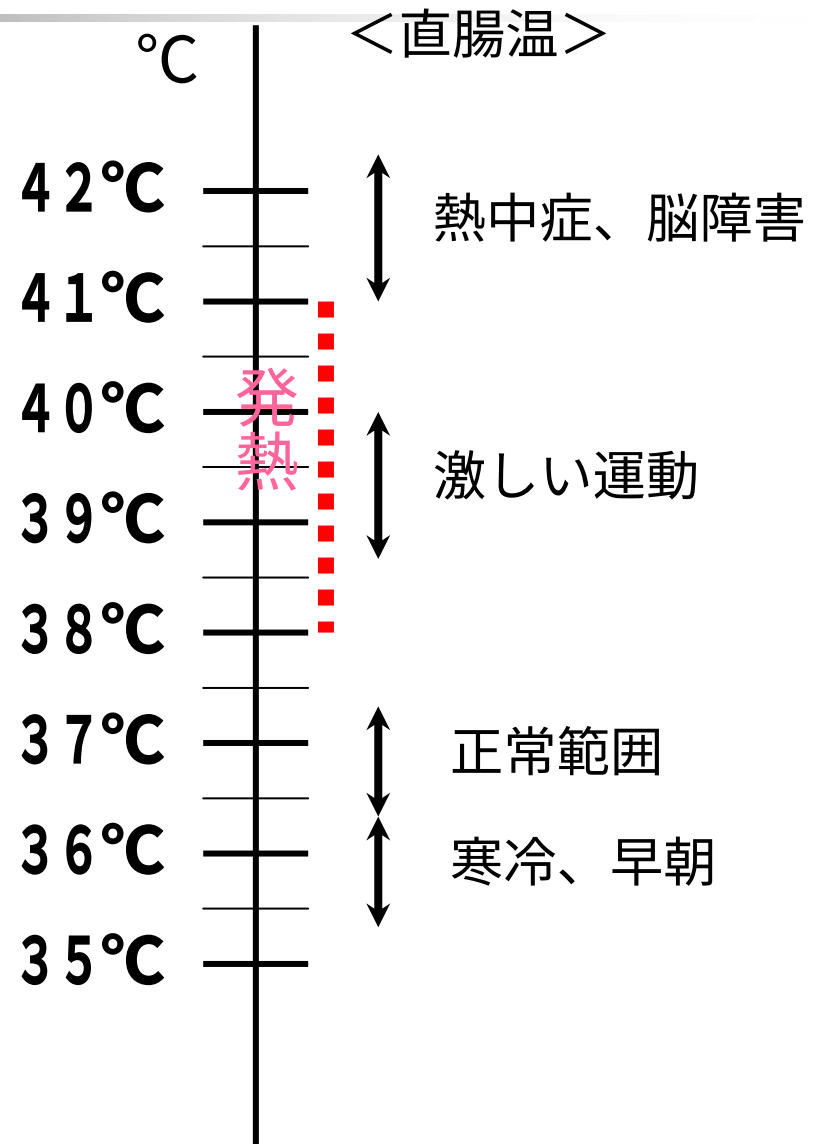
平均皮膚温

ヘルメット内
温度

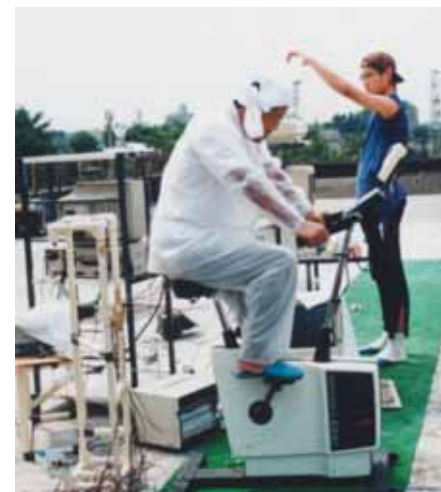
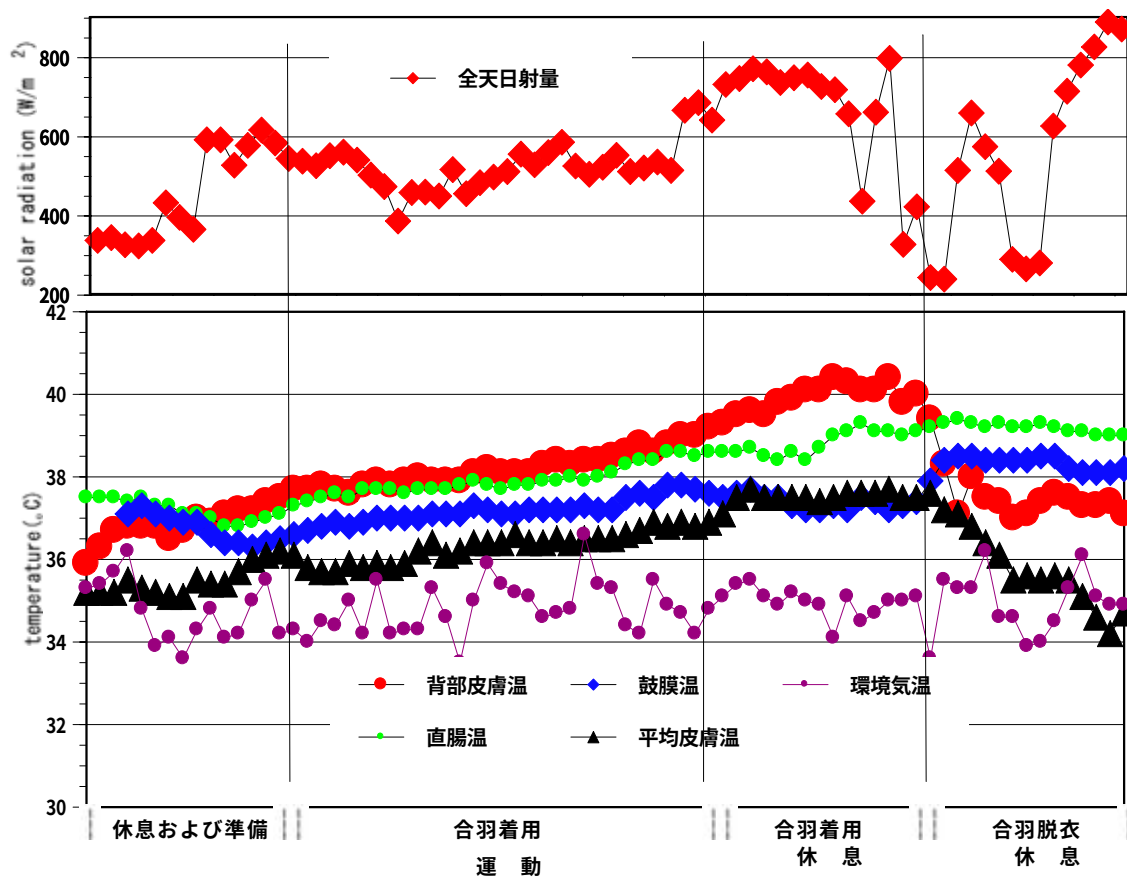
20分運動ベースの温度上昇データ

警報を鳴らす温度は？

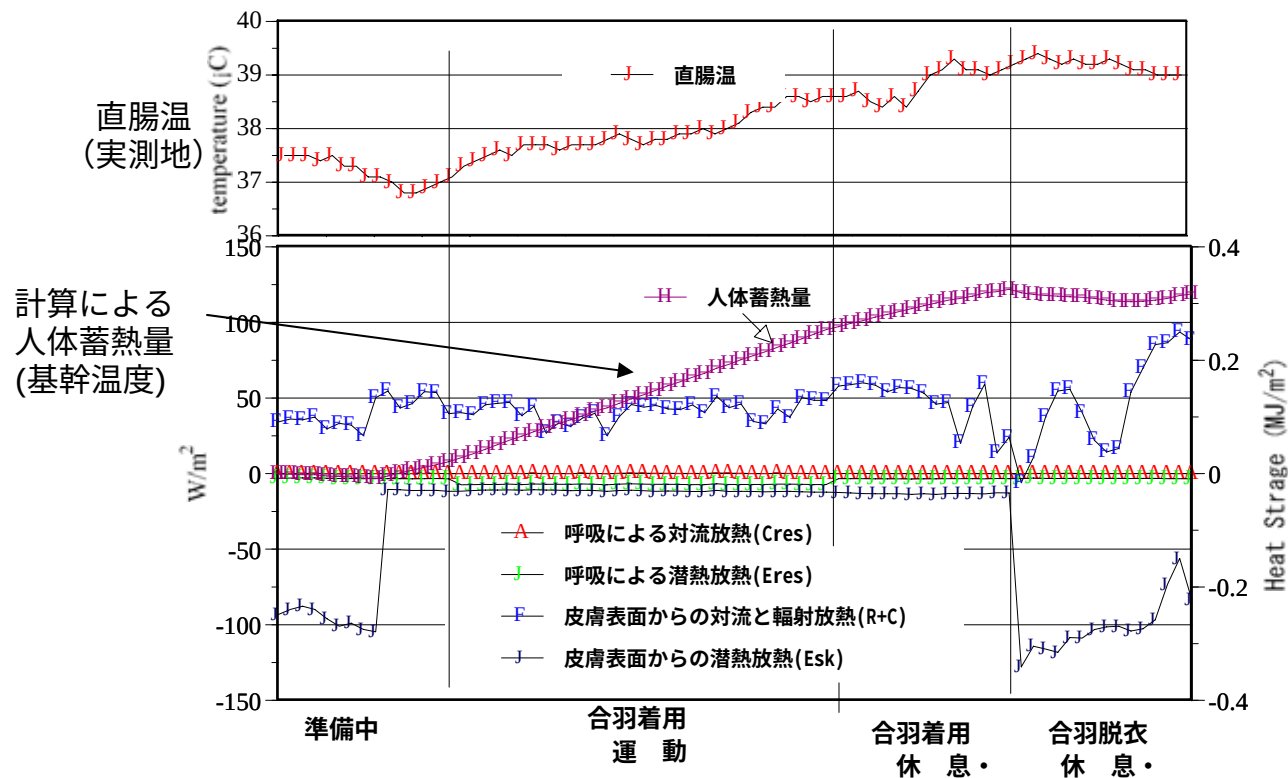
ヒートストレス (基幹温度:直腸温) のクライテリア



日射環境下における密閉型衣服 (合羽) 着用実験 (1)



日射環境下における密閉型衣服 (合羽) 着用実験 (2)

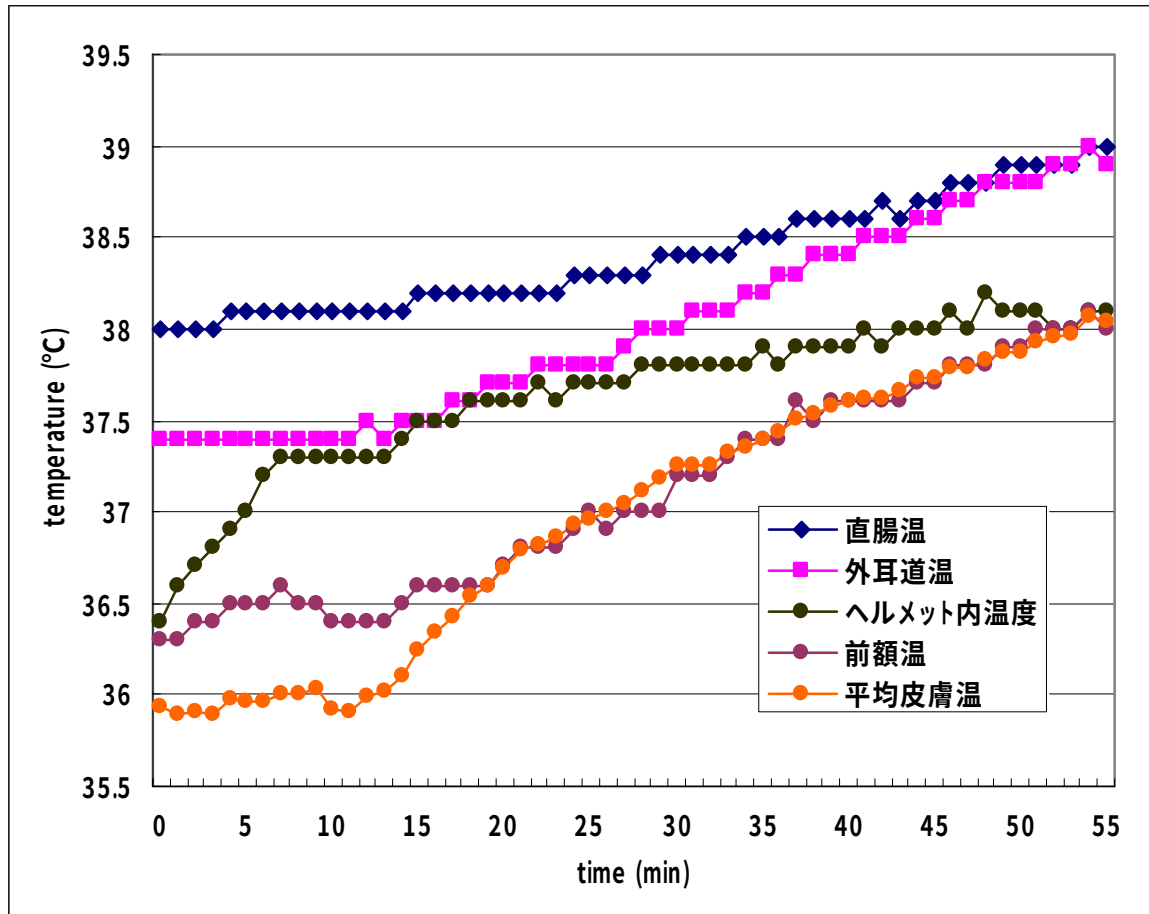


人体熱平衡式に測定値を代入した計算結果

直腸温 2℃上昇、のぼせた状態
被験者は暑熱下でのトレーニングをしている学生
感想として限界実験であった



消防員装具着用による限界実験データ (1時間)



環境気温30℃ 相対湿度50%RH
代謝量120W/m²相当

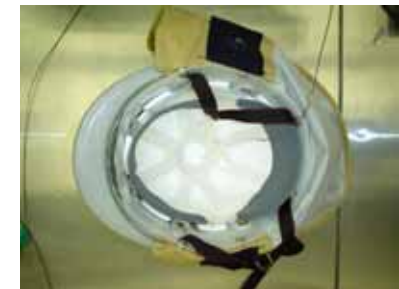


直腸温 1.0℃上昇
外耳道温 1.5℃上昇
平均皮膚温 2.0℃上昇



ヒートストレスアラームのまとめ

- ヒートストレスを把握するための温度測定点は、額皮膚温1点でよい。
- ヘルメット等を着脱しても使用可能
- 人によって基礎体温が相違するが、絶対温度でのアラームは額温度で 38°C 程度
- 現実的には、警報温度は個人により調節する。 常態における温度より
 - 1.0°C 上昇で第1アラーム
 - 1.5°C 上昇で第2アラーム
 - 2.0°C 上昇では撤退勧告アラーム





- ①冷却剤の効果
 - 1/4個で、環境温30℃において1.4W/100cm²の吸熱量を約1時間 程度維持する。
 - 3個使用した場合、体重60kgの人体を1時間で0.3℃低下できる。
- ②強制換気の冷却効果
 - 湿潤状態では、気温23℃湿度55%の環境で1m²あたり4リットル/sの換 気を行なうと、150～200W/m²の冷却効果がある。
 - 乾燥状態では、放熱に及ぼす換気量の影響が小さく、湿潤状態では換気量が大きくなるにしたがって3倍程度増大した。
- ③頭部送風の冷却効果
 - 気温30℃ 湿度50%の環境において、0.3～1m/sの風速により、100～240W/m²の冷却効果がある。
 - 冷却効果は、頭髪が少ない場合により大きい。

総まとめ

- 密閉型衣服の場合、発汗による潜熱放熱を促す排気式換気法は効果がある。
(ただし、外環境条件による)
- 消防員用の場合、現実的に効果的だと思うのは、．．．額温度をモニター点としたヒートストレス警報器が有効

