

気流暴露を考慮した人体熱モデルによる夏期入館時の人体の蓄熱除去の検証

環境都市専攻 建築都市デザインコース 6143120026-0 福嶋 康旗
(指導教員 近本智行)

1. はじめに

1.1 研究背景

夏期、外回りから帰社した外勤者が社内に入り空調設定温度を下げる光景がしばしば見られる。これは屋外環境での日射や、歩行などによって体内に熱を蓄積していることが原因と考えられる。この体内蓄熱の解消を目的として、執務室に入る前に蓄熱を除去するための冷涼な環境を提供するクーリングルームを提案する。クーリングルームでは、特に気流に暴露させることで短時間での蓄熱の除去に大きな効果があると期待しているが、最適な環境設定値を決めるにはデータベースが得られていない。既往研究では、クーリングルームの環境設定値をパラメータとし、ケース分けをした被験者実験を行なった¹⁾。生理量・心理量への影響から気流に暴露させることが最も効果的であることが確認された。ただし、体内蓄熱の定量的な評価には至っておらず、また、被験者の個人差による影響から最適な環境設定値を決定することはできていない。

本研究では標準的な効果の算出を目的とし、人体熱モデルを用いたシミュレーションによるクーリングルームの効果検証および最適な環境設定値の検討を行う。

1.2 研究手法

人体熱モデルには田辺らによる 65 分割体温調節モデル(以下、65MN)を用いる²⁾。65MN では、人体を 16 部位に分割し、さらに各部位を 4 層(コア層、筋肉層、脂肪層、皮膚層)に分割した計 64 質点においてそれぞれの熱交換を行うことで非定常状態の人体をシミュレーションしている。田辺らは 65MN の計算結果と被験者実験の比較から定常・非定常状態において平均皮膚温度で良い一致となることを確認している。さらに 65MN では 65 番目の質点として中央血液プールを与えている。全 64 質点と血流によってのみ熱交換を行っており、人体の総合的な温熱指標として考えることが出来る。本研究では、人体蓄熱の評価として中央血液プールの熱量変化から検証を行う。

また、65MN では裸体条件や静穏気流時の検証はされているが、着衣条件や気流時の評価はされていない。着衣による発汗への影響や、気流による着衣の熱抵抗の減少を新しく境界条件として与え、被験者実験との平均皮膚温度での比較を行うことでモデルのチューニングおよび精度検証を行う。

2. 皮膚まわりの境界条件

2.1 無効発汗の考慮

着衣による蒸発熱損失量への影響は非定常を扱う際には重要な要素であるが、着衣を含む人体周辺のモデル化については検証されていない。65MN の文献中では、着衣による影響は式(1)、式(2)で扱われている。clo 値が高まると潜熱伝達率が下がり、最大熱損失量が下がるものの、体温調節として機能している発汗による熱損失量には影響を与えてはいない。

$$h_e = LR \times i_{cl} / \left(0.155 I_{cl} + \frac{i_{cl}}{h_c \times f_{cl}} \right) \quad \dots\dots (1)$$

$$E_{max} = h_e \times (p_{sk} - p_a) \times A_{Du} \quad \dots\dots (2)$$

h_e : 潜熱伝達率[W/m²kPa] LR : ルイス数[K/kPa]
 i_{cl} : 着衣の透湿係数[-] I_{cl} : 着衣熱抵抗[clo]
 h_c : 対流熱伝達率[W/m²K] f_{cl} : 着衣面積率[-]
 E_{max} : 最大蒸発熱損失量[W] A_{Du} : 各部位表面積[m²]
 p_{sk} 、 p_a : 皮膚・環境の水蒸気圧[kPa]

着衣による発汗への影響として、発汗した汗の一部が皮膚表面で蒸発しないで滴り落ち、人体を冷やす役割を果たさない無効発汗が発生しやすくなることが考えられる³⁾。無効発汗は最大蒸発熱損失量に対して発汗による熱損失量が臨界ぬれ率を越えると発生する。ぬれ率は式(3)で算出され、臨界ぬれ率である 0.485 を越えると式(5)のような有効発汗熱損失量に抑制される。clo 値が高いほど最大蒸発熱損失量が下がり、無効発汗が生じやすい。

$$w_{sw} = E_{sw} / E_{max} \quad \dots\dots (3)$$

$w_{sw} < 0.485$ のとき

$$E = E_{sw} \quad \dots\dots (4)$$

$w_{sw} \geq 0.485$ のとき

$$E = (0.371 + 0.305/w_{sw}) \times E_{sw} \quad \dots\dots (5)$$

E : 有効発汗熱損失量[W] w_{sw} : ぬれ率[-]
 E_{sw} : 発汗による熱損失量[W]

2.2 気流による着衣量の減少

着衣量は対流熱伝達率に影響を及ぼさない。一方で風速が増加するにつれて clo 値は低下し、着衣量が高いほどその影響を受けやすい⁴⁾。堀越らはサーマルマネキンを用いた実験から着衣に対する風速によるクロ風速補正係数の式を提案している⁵⁾。式(6)によって気流下のクロ風速補正係数を算出し、式(7)でその気流下での着衣熱抵抗を求める。風速が強くなるにしたがって clo 値が低下する

原因として、着衣下の空気層が薄層化したことによる熱抵抗の減少や空気の透過や侵入、漏気などの空隙の換気によると考えられている。

$$(I_{cl} = 0.78clo, 0.09 \leq V \leq 4.3 \text{ m/s})$$

$$CFV_{cl} = e^{(-0.143(V-0.09))} \dots\dots (6)$$

$$I_{clv} = CFV_{cl} \times I_{cl} \dots\dots (7)$$

CFV_{cl} :クロ風速補正係数[-] V :風速[m/s]
 I_{clv} :気流下の着衣熱抵抗[clo]

3. モデルのチューニングと精度検証

人体熱モデルによる検討を行うにあたって、人体の非定常状態におけるモデルの再現性を確認する必要がある。既往研究における被験者実験の実験値とモデルによる計算値を比較し、環境を移動した時の精度検証を行う。

3.1 実験値と計算値の比較

モデルにおける着衣の境界条件として、〈①衣服内気候との熱交換、②着衣量による熱抵抗〉の2通りで検証する。条件①は着衣による熱抵抗は与えず、衣服内気候の温度と皮膚温度との熱交換として扱う。衣服内気候の検証として表1に示す実験環境で被験者実験を行ない、図1に示す実験値を得た。得られたデータから式(6)の衣服内気候の簡易計算式を設定し、境界条件として用いる^{注3)}。

$$T_{cl} = 0.5 \times T_{sk} + 0.5 \times T_a \dots\dots (6)$$

T_{cl} :衣服内気候[°C] T_{sk} :皮膚温度[°C] T_a :室温[°C]

表1 実験環境

	執務室	外部環境	執務室
暴露時間	30min (0~30min)	30min (30~60min)	30min (60~90min)
代謝量	1.0met(椅座安静)	1.0met(椅座安静)	1.0met(椅座安静)
温度	27.5°C	34°C	27.5°C
相対湿度	80%	60%	80%
気流速度	0.1m/s	0.1m/s	0.1m/s

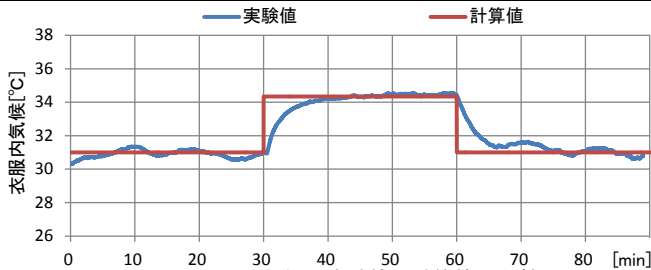


図1 衣服内気候の実験値と計算値の比較

モデルに与えた計算条件を表2に、条件②における各部位の着衣による熱抵抗を表3に示す。温度・相対湿度は実験での測定値を用い、対流熱伝達率は静穏気流として扱っている。図2に平均皮膚温度の実験値と計算値の比較を示す。着衣による熱抵抗を与えた条件②では実験値に比べて常に高い値が算出され、0.5~1.0°Cのずれが確認された。条件①はこれまでに0cloでの検証が数多くされているために再現性が高いと考えられるが、気流下における境界条件の設定が困難である。簡易な検証を行うにあたり条件②をチューニングすることで解決を図る。

表2 計算条件

	執務室	外部環境	
暴露時間	30min (0~30min)	30min (30~60min)	5min (60~65min)
代謝量	1.0met(椅座安静)	1.0met(椅座安静)	2.6met(踏台昇降)
温度	27.5°C	32.5°C	
相対湿度	80%	50%	
気流速度	0.1m/s	0.1m/s	

表3 各部位の着衣量

Segment	I _{cl} [clo]
1 Head	0.0
2 Chest	1.0
3 Back	1.0
4 Pelvis	1.0
5 L-Shoulder	1.0
6 R-Shoulder	1.0
7 L-Arm	1.0
8 R-Arm	1.0
9 L-Hand	0.0
10 R-Hand	0.0
11 L-Thigh	1.0
12 R-Thigh	1.0
13 L-Leg	1.0
14 R-Leg	1.0
15 L-Foot	1.0
16 R-Foot	1.0

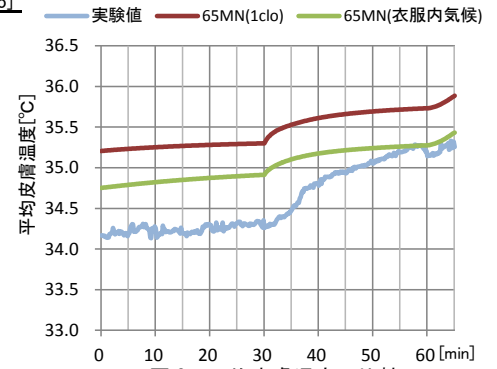


図2 平均皮膚温度の比較

3.2 65MNと修正65MN

65MNでは全体的に平均皮膚温度が高くなる傾向が見られた。これは体温調節として機能している発汗による影響が考えられる。本研究では、発汗点となるセットポイント温度の修正として、PMV=0における非制御系モデルでの定常計算をし、平均皮膚温度が33.7°Cとなる各部温度をセットポイント温度とした^{注1)注2)文6)}。特に、発汗に影響されるHead部位Core層のセットポイント温度は文献値の36.9°Cから36.3°Cとなった。

65MNとセットポイント温度を変更した65MN(以下、修正65MN)を比較する。65MNと修正65MNについて表4に示す計算条件で定常計算を0cloと1cloの2通りで行う。表5のようにPMV=0の環境において65MNでは33.7°C~34.0°Cから外れているが、修正65MNではこの温度域に収まっている。図3に定常時の平均皮膚温度と室温の比較を示す。0cloでは65MNと修正65MNに大きな差異は見られないが、1cloのときには修正65MNのほうが0.5°C程度低くなっている。

表4 計算条件

室温	10~40°C(2°Cきざみ)
相対湿度	50%
気流速度	0.1m/s
代謝量	1.0met

表5 中立状態での平均皮膚温度

	PMV=0	
	28.8°C(0clo)	23.3°C(1clo)
65MN	34.25°C	34.31°C
修正65MN	33.93°C	33.91°C

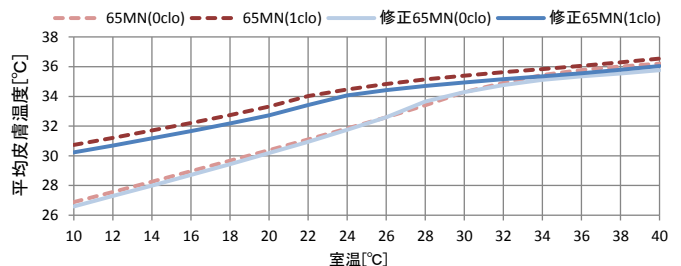


図3 室温と平均皮膚温度の関係

クーリングルームの実運用を想定した実験スケジュールによる被験者実験の結果と人体熱モデルによる計算値の比較を行う。クーリングルームにおける気流速度は、人体の無い状態の胸付近で 2.0m/s となる風量であり、各部位の気流速度は、この風量で人体を立たせたときに風速計で測定したデータを用いる。また、立位有風時の各部位の対流熱伝達率には田辺らのサーマルマネキンによる実験から得られた回帰曲線を用いる⁷⁾。表 6 に各部位の気流速度 v [m/s]、静穏気流時と気流時の対流熱伝達率 hc [m/s]、気流下の着衣熱抵抗 I_{clv} [clo]を示す。

表 6 各部位の気流速度、対流熱伝達率、着衣熱抵抗

Segment	v [m/s]	hc [W/m ² °C]	hc [W/m ² °C]	I_{clv} [clo]
1 Head	0.50	4.50	9.76	0.00
2 Chest	0.60	3.00	7.81	0.93
3 Back	0.20	2.90	7.73	0.98
4 Pelvis	0.50	2.90	8.58	0.94
5 L-Shoulder	2.00	3.60	25.59	0.76
6 R-Shoulder	2.00	3.60	25.59	0.76
7 L-Arm	1.70	3.60	23.50	0.79
8 R-Arm	1.70	3.60	23.50	0.79
9 L-Hand	0.80	3.70	17.49	0.00
10 R-Hand	0.80	3.70	17.49	0.00
11 L-Thigh	0.70	2.80	11.26	0.92
12 R-Thigh	0.70	2.80	11.26	0.92
13 L-Leg	0.20	2.00	4.80	0.98
14 R-Leg	0.20	2.00	4.80	0.98
15 L-Foot	0.20	2.00	5.57	0.98
16 R-Foot	0.20	2.00	5.57	0.98

モデルの計算条件を表 7 に示す。それぞれの環境の温度、相対湿度、気流速度は被験者実験における測定の実験値であり、クーリングルームにおける 1.2met は立位安静時の代謝量である。定常状態での平均皮膚温度は実験値よりも 0.5°C程度高いが、全体的な推移としては概ね再現することが出来ている。また、65MN と比べても修正 65MN は全体的に平均皮膚温度が下にシフトしており、実験値との大きな乖離は見られない。

表 7 計算条件

	執務室	外部環境	クーリングルーム	執務室	
暴露時間	30min (0~30min)	30min (30~60min)	5min (60~65min)	5min (65~70min)	30min (70~100min)
代謝量	1.0met	1.0met	2.6met	1.2met	1.0met
温度	27.5°C	32.5°C	21.5°C	27.5°C	27.5°C
相対湿度	80%	50%	80%	80%	80%
気流速度	0.1m/s	0.1m/s	2.0m/s	0.1m/s	0.1m/s

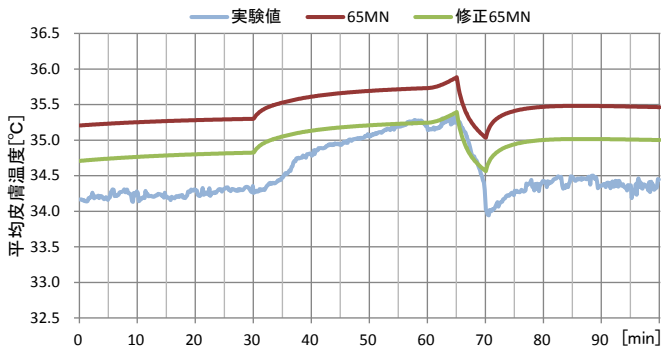


図 4 計算条件

3.3 部位ごとの皮膚温度の比較

実験値の平均皮膚温度の算出には Burton の 3 点式(胸、上腕、大腿)を用いている。この 3 点について執務室と外部環境での値を比較する。胸と上腕は被験者実験と近い値であるが、下腿の温度が執務室・外部環境のどちらにおいても大きくずれており、これが平均皮膚温度のずれになっている。この下腿のずれの要因として、椅座安静時による椅子との接触部の熱交換や、椅子との圧迫による血流量の低下などが考えられる。

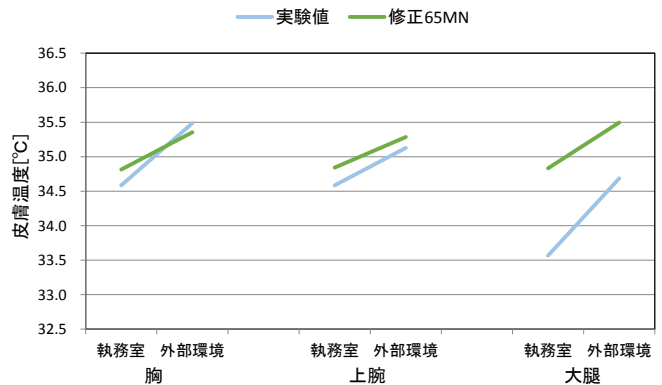


図 5 各部位での皮膚温度の比較

4. 最適な環境設定値の検討

前章における修正 65MN からクーリングルームの最適な環境設定値を検討する。執務室(温度 27.5°C、相対湿度 50%、気流速度 0.1m/s、着衣量 1.0clo、代謝量 1.2met)における中央血液プールの定常値は 338.5kJ 程度である。また、低蓄熱時と高蓄熱時に分けて検討を行う。低蓄熱時では、代謝量は変化させず屋外での高温多湿環境による影響のみを考慮する。高蓄熱時は屋外環境における歩行運動を想定して検討を行う。表 8 に計算条件を、表 9 にクーリングルームの検討ケースを示す。

表 8 計算条件

	執務室	外部環境	クーリングルーム	執務室
暴露時間	30min	30min	計12case	30min
気流速度	0.1m/s	0.1m/s		0.1m/s
温度	27.5°C	35°C		27.5°C
相対湿度	50%	80%		50%
代謝量	1.2met	1.2met		1.2met or 2.0met

表 9 クーリングルーム検討ケース

	暴露時間	気流速度	温度
case0	-	-	-
case1.1.1	5min	-	25.5°C
case1.1.2	5min	-	23.5°C
case1.1.3	5min	-	21.5°C
case1.2.1	5min	2.0m/s	25.5°C
case1.2.2	5min	2.0m/s	23.5°C
case1.2.3	5min	2.0m/s	21.5°C
case2.1.1	10min	-	25.5°C
case2.1.2	10min	-	23.5°C
case2.1.3	10min	-	21.5°C
case2.2.1	10min	2.0m/s	25.5°C
case2.2.2	10min	2.0m/s	23.5°C
case2.2.3	10min	2.0m/s	21.5°C

表 10 無効発汗の継続時間

	低蓄熱	高蓄熱
case0	13min	39min
case1.1.1	7min	33min
case1.1.2	5min	33min
case1.1.3	3min	32min
case1.2.1	0min	29min
case1.2.2	0min	28min
case1.2.3	0min	27min
case2.1.1	0min	28min
case2.1.2	0min	26min
case2.1.3	0min	25min
case2.2.1	0min	20min
case2.2.2	0min	18min
case2.2.3	0min	14min

4.1 低蓄熱状態におけるクーリングルーム

図6、図7にクーリングルームの5分間の利用による中央血液プールの熱量変化と執務室に入ってからぬれ率を示す。中央血液プールは外部環境で3.5kJ程度の蓄熱がある。case1.1.1~case1.1.3の温度変化だけのケースではあまり影響が見られず、case1.2.1~case1.2.3の気流にも暴露させることケースでクーリングルーム内での大きな効果が得られる。ぬれ率は、気流に暴露させることで室温によらず執務室入室の時点で無効発汗が起っていない。また、表10に執務室入室後から無効発汗が継続している時間を示す。クーリングルームを用いない場合は13分間継続無効発汗がcase1.1.1~case1.1.3を除くすべてのケースにおいて執務室入室時点で既に抑えることが出来ている。

4.2 高蓄熱状態におけるクーリングルーム

図8、図9にクーリングルームの5分間の利用による中央血液プールの熱量変化と執務室に入ってからぬれ率を示す。中央血液プールへの気流による効果は大きく、執務室に入ってからぬれ率についても入室後から5分までの効果が特に大きい。図10、図11にクーリングルームの10分間の利用による中央血液プールの熱量変化と執務室に入ってからぬれ率を示す。中央血液プールは5分を過ぎてからは血管の収縮によって効率が落ちている。ぬれ率については入室時点では無効発汗はないものの、入室後に再び臨界ぬれ率を越える。快適性の観点から好ましいとはいえない。表10に示す無効発汗の継続時間では、5分間の気流に暴露させることで気流に暴露させていない10分と同等の効果を得ることが出来ている。

クーリングルームの最適な環境設定値として、気流環境下において25.5°Cの設定で5分程度の利用が好ましい。

5. まとめ

65MNに無効発汗と気流による着衣熱抵抗の減少を境界条件として与えたモデルを用いて被験者実験との比較を行った。セットポイントと変更することで実験値をある程度再現することが出来た。

低蓄熱状態と高蓄熱状態に分けて中央血液プールの熱量・人体のぬれ率の推移を確認し、クーリングルームの最適な環境設定値を検討した。どちらの蓄熱状態においても気流環境下で25.5°Cの設定で5分程度の利用をすることが好ましい。高蓄熱状態では、気流環境下における10分利用の効果は大きい、一度引いた無効発汗が執務室入室後に再び発生するため、好ましいとは言えない。

注釈

- 1) 田辺らは非制御系のモデルを用いて、PMV=0での定常計算により得られた各部温度をセットポイント温度としている。
- 2) 温熱生理的な中立状態では平均皮膚温度は33.7°C~34.0°Cに保たれるのが一般的である。空気調和・衛生工学会、快適な温熱環境のメカニズム、p.50
- 3) 得られた衣服内気候の算出式は被験者実験で用いた衣服でのみ用いられるものである。

参考文献

- 1) 福嶋, 近本, 水島, 植田, 中嶋, 福井, 高山, 宮崎: O社H事業所の低炭素化改修工事(第5報)夏期外勤者の帰社時における体内蓄熱の除去を目指したクーリングルーム運用の最適化検討、空気調和・衛生工学会大会、p.433-436、2013年9月
- 2) 田辺, 中野, 小林: 温熱環境評価のための65分割体温調節モデルに関する研究、日本建築学会計画系論文集、第541号、p.9-16、2001年3月
- 3) 窪田, 栗原, 濱田, 中村, 中谷, 雨宮: 無効発汗と着衣のぬれを考慮した人体皮膚表面温度の予測、空気調和・衛生工学会論文集、No.137、p.9-17、2008年8月
- 4) 桑原, 持田, 近藤, 松永: サーマルマネキンを用いた中風速域における人体対流熱伝達率の測定、人間と生活環境、No.8、p.27-32、2001年6月
- 5) 渡邊, 堀越, 兼子, 宇野, 石井, 富田: サーマルマネキンを用いた風速と風向が着衣熱抵抗に及ぼす影響に関する研究、日本建築学会環境系論文集、第621号、p.23-28、2007年11月
- 6) 田辺, 小林, 小川: 温熱環境評価のための人体熱数値計算モデルCOMの開発、日本建築学会環境系論文集、第599号、p.31-38、2006年1月
- 7) 市原, 齋藤, 西村, 田辺: サーマルマネキンを用いた立位・座位人体各部位の放射・対流熱伝達率の測定、日本建築学会計画系論文集、第501号、p.45-51、1997年11月

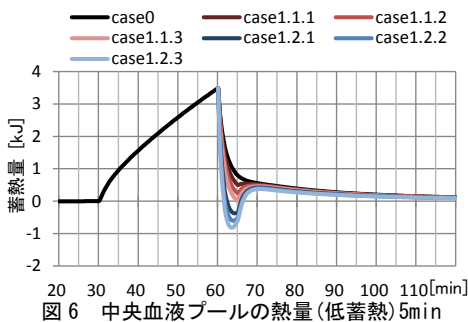


図6 中央血液プールの熱量(低蓄熱)5min

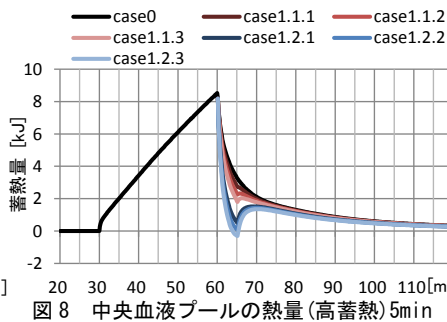


図8 中央血液プールの熱量(高蓄熱)5min

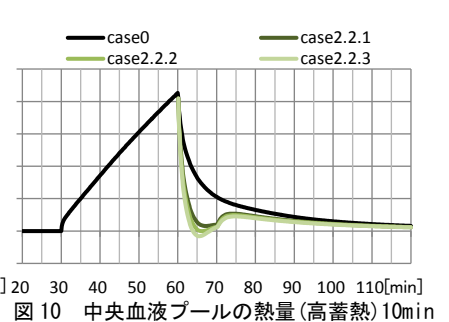


図10 中央血液プールの熱量(高蓄熱)10min

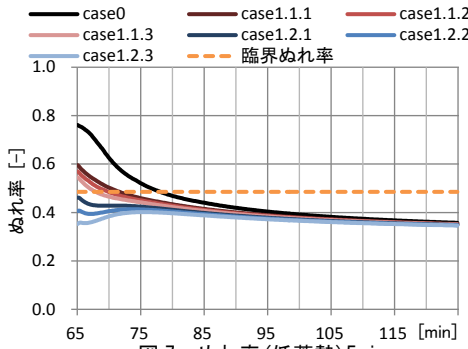


図7 ぬれ率(低蓄熱)5min

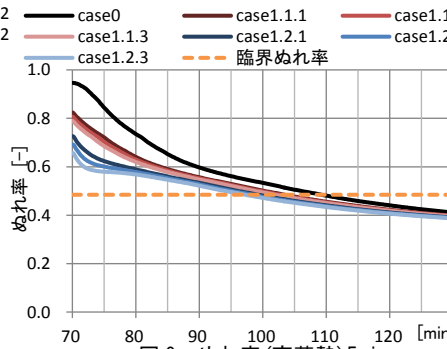


図9 ぬれ率(高蓄熱)5min

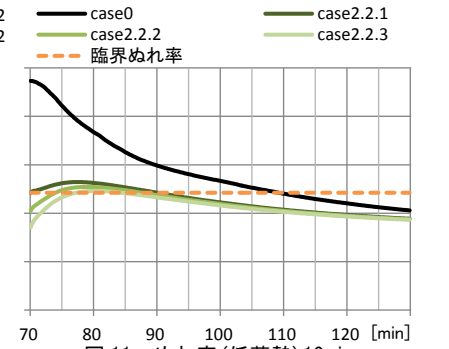


図11 ぬれ率(低蓄熱)10min