住戸向け細霧冷房の設計手法に関する研究

辻本研究室　　4108605　石井　智洋

1.研究概要

家庭用細霧冷房の研究は 2006 年より始まり、徐々にではあるが、実際に一般家庭への普及[註 1)]も進んでいる。しかし、設置方法によっては、冷却効果を十分に発揮されない状態で利用されていることが、現状の問題点として挙げられている。以上のような経緯から本研究では家庭で細霧冷房装置を導入する際の取付設置に関する設計手法について検討を行っている。本設計手法の構築にあたっては、地域気象条件による判定(噴霧可否)と施工可否判定(取付可否)、この 2 項目を満たすことを前提とした上で、噴霧高さ、噴霧角度、噴霧水量、噴霧間隔の 4 項目の検討を行い、設置想定箇所の最適な設計手法を見出すこととしている。本研究では、特に後者の 4 項目に重点を置き、実測実験と数値計算をもとに住戸で利用する際の最適な設計手法の検討を進めている。

2.住宅での細霧冷房の実測実験

2.1 実験概要

本実験は、実際の家庭での使用を想定した噴霧を行い、ベランダで細霧冷房(以下,ミスト)噴霧時の室内空間にもたらす冷却効果を、噴霧条件毎に比較検討を行っている。

実験は 2 階建て住宅のベランダに接した一室(8 畳間)で実施し、図 1 に示すように、細霧冷房装置を子供部屋に面したベランダ、過加湿を防ぐための床濡れ検知センサー(以下,センサー)を開口 1 近傍の床から高さ 500 mmの位置に等間隔に 3 基配置した。センサーの反応精度と設置位置に関しては事前に実験を行い、床高さよりも高い位置に置くように設定している。また測定は主に熱電対を利用し、図 2 に示すように,室内 A～E 点の 5 箇所にポールを立て垂直方向各 11 点と室内側壁面 5 箇所の合計 60 点で温度測定を行い、相対湿度は PMV 計に付帯された湿度計で室中央の高さ 1400mm 地点で測定を行った。実験条件は、表 1 に示すように噴霧高さ、噴霧角度、開口 2 の開閉、濡れ検知センサーの有無を組み合わせて設定した。また、測定条件は、ドライミスト噴霧開始 5 分前より計測を開始し、ミスト噴霧時にセンサー3 基のうち、いずれかが濡れを検知した時点で噴霧を停止し、その発停を 4 回繰り返した後に噴霧終了として、その後 5 分経過するまで測定を行った。

2.2 測定結果

結果を評価するにあたり、表 1 に本実験結果より算出した各点における垂直高さ方向の平均温度降下量及び垂直温度分布に対するバラつきを評価する標準偏差の値を示す。まず、2 つ値より効果的な噴霧とされる軒下からの噴霧を想定した実験 3 の室内各点の垂直温度分布を示したグラフを見ると、センサーにより一回目のミスト停止(噴霧後約 4 分)された時点の値が、各点で約－1.5℃降下している。また標準偏差の値からも確認できるように、垂直方向で温度のバラつきがなく、室内全体が一様に冷却されていると判断できる。次に、床濡れ及び過加湿についての評価は、図 4 や実験時の目視から床濡れや熱電対の濡れが確認されず、室中央の相対湿度の値は、限界条件とする 75%を超え

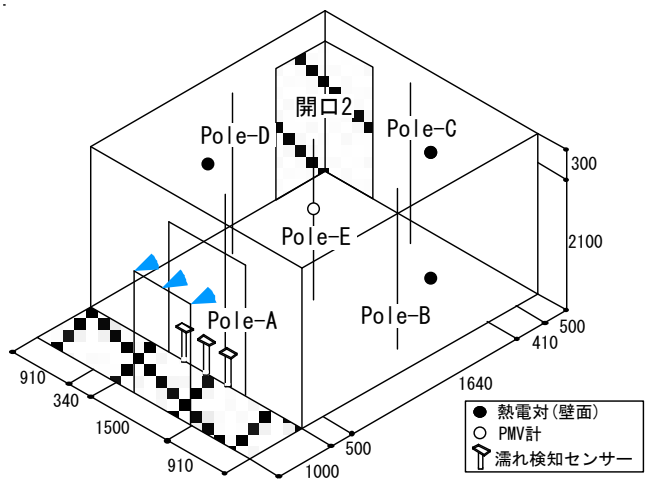


図 1. 計測機器配置図(子供部屋)

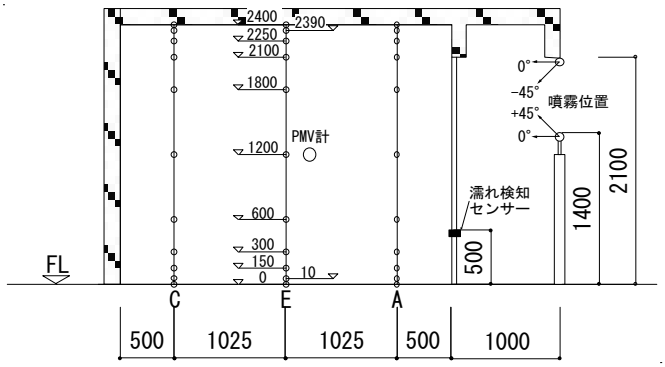


図 2. 計測機器配置断面図

表 1.実験条件一覧

	噴霧高さ(mm)	噴霧角度	開口2	温度降下量	標準偏差
実験1	1400	0°	開	-1.16	1.17
実験2	1400	45°	開	-1.22	1.12
実験3	2100	0°	開	-1.57	0.39
実験4	2100	-45°	開	-1.71	0.68
実験5	1400	0°	閉	-1.09	0.57
実験6	1400	45°	閉	-1.26	0.41

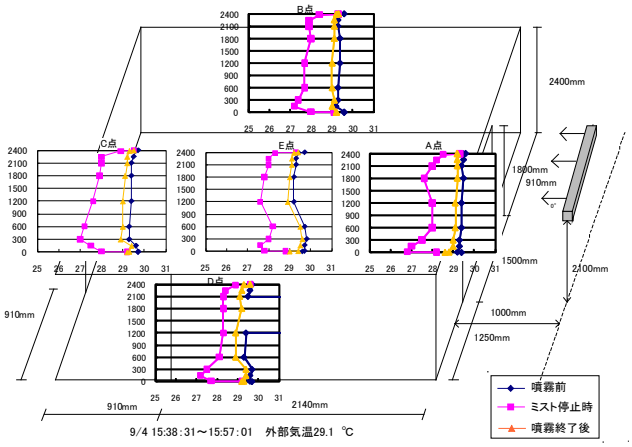


図 3. 各点における垂直温度分布の時間変化(実験 3)

ることはなかった。同様の検討を条件毎に行った結果、手擦り高さを想定した 1400mm の位置からの室内側 0° 水平方向噴霧(実験 1)では、噴霧高さより高い領域を十分に冷やすことが難しい反面、同位置上向き 45° 噴霧(実験 2)では、中～低層部での冷却効果は実験 3 を上回る結果となった。また、同条件で開口 2 を閉めた実験 5･6 では、室内にミストが入り込まず開口 1 の床付近が濡れる時間帯があったため、室内側の開口をとる必要があると考えられる。
以上より、本実験では、噴霧高さと噴霧角度について検討を行い、適用する住戸のライフスタイルに合わせて、接する居室がリビングダイニング等では高い位置からの噴霧、寝室や和室のような場所では、高さ 1400mm 前後から上向き 45° で噴霧することで効果的な噴霧が行えるとした。

3.無風室における細霧冷房の実測実験

3.1 実験概要

次に、適用住戸において外部風及び日射のない条件での評価を行うために無風室を利用して噴霧効果の検討を行った。本実験は図 5 に示すように前項の住宅で行われた実験の噴霧方法、噴霧条件を模擬して実験を行った。実験条件については表 2 に示す。本実験においては、センサーを利用しない場合の連続噴霧による測定も行うことで、噴霧高さ、噴霧角度に加えて噴霧間隔の検討も行った。

3.2 測定結果

表 2 には、前実験同様に各実験における室内温度降下量と標準偏差の値を示す。この 2 項目より、実験 7 が効果的な噴霧であると判断したが、前実験とは異なり、実験 7 の標準偏差が大きく、中～低層部での冷却効果が目立つ結果となった。温度降下量だけで評価を行った場合、実験 1-3 は、著しい温度降下が見受けられるが、図 6 の実験 3 と実験 7 のグラフを見ると、センサーを利用していない実験 3 では、噴霧開始と共に温度が降下する一方、相対湿度も上がり続け、噴霧 5 分後には限界条件である 75%を超えている。また、センサーを設置した実験 7 では、約 1 分間隔でセンサーよる制御が行われ、平均して-2℃程度の温度降下をもたらしているにもかかわらず、相対湿度は 65%前後と非常に安定した噴霧であることが確認できた。実験 1-2 においても同様で最大相対湿度は 80%を超えている。以上のように、無風室実験でも、前実験同様、高い位置での水平方向噴霧は、効果的であるのに対し、無風条件のために低い位置からの噴霧では、ミスト粒子が低層域に滞留し、室内を冷却するのには不十分であった。また噴霧間隔は、センサーの利用または、間欠運転が必要であると判断した。

4.数値解析と実測結果の整合性の検討

4.1 解析概要

本項では、無風室での実測結果をもとに、細霧冷房の蒸発冷却の数値モデル化を行い、実測結果との整合性の検討を行ったが、目的は解析によって事前に噴霧対象居室におけるミストの冷却効果を設計の段階で、予測・検討することとしている。本解析には数値解析ソフト Fluent6.3 を用い、解析領域内ではミスト粒子と空気相の間で運動量、熱移動、蒸発に伴う質量変化を考慮している。図 7 に検討モデルの対象領域を示す。与条件として、表 3 に示すように天井面、壁面、床面は実測した各表面温度、大気圧境界面と領域内初期条件は、室外測定点で測定した温度、湿度を与え、乱流モデルは標準 k-ε モデルとした。解析は噴霧高さ、噴霧角度が異なる無風室での実験 5、実験 7、実験 8 を対象とし、無噴霧状態で 5 分間の前計算を行った後、各々の実測から得た噴霧間隔でミスト噴霧を行った。

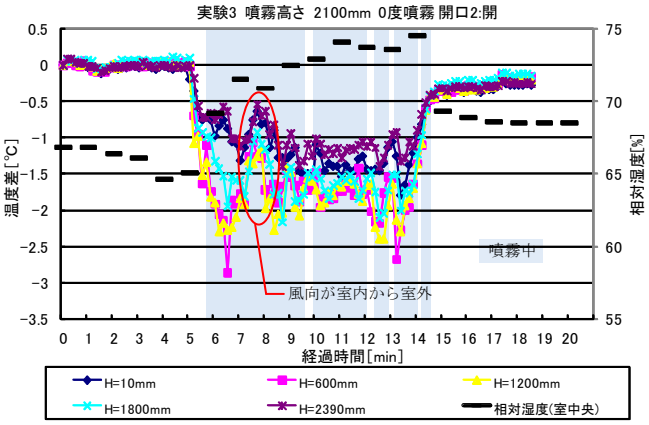


図 4. 各点における噴霧前後の温度差と湿度の時間変化

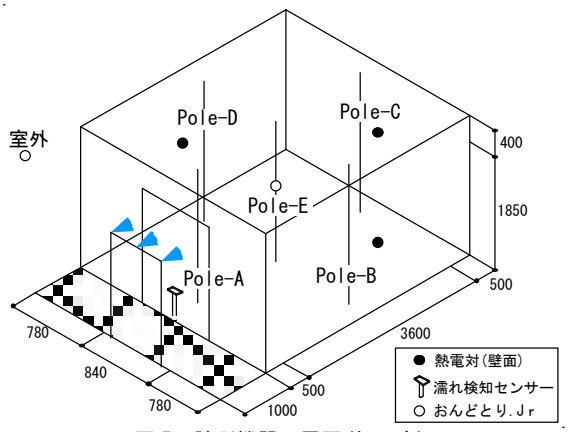


図 5. 計測機器配置図(無風室)

表 2. 実験条件一覧

	噴霧高さ	噴霧角度	噴霧時間	センサ	温度降下量	標準偏差	最大相対湿度
実験1	1200mm	0°	5分	なし	-1.53	1.45	66%
実験2	1200mm	+45°	7分		-2.04	1.26	82%
実験3	1800mm	0°	10分		-1.89	1.3	82%
実験4	1800mm	-45°	5分		-0.49	0.75	59%
実験5	1400mm	0°	4分43秒	あり	-0.98	0.92	63%
実験6	1400mm	+45°	6分28秒		-0.47	0.36	70%
実験7	1800mm	0°	5分34秒		-1.37	1.09	67%
実験8	1800mm	-45°	4分19秒		-0.57	0.79	65%

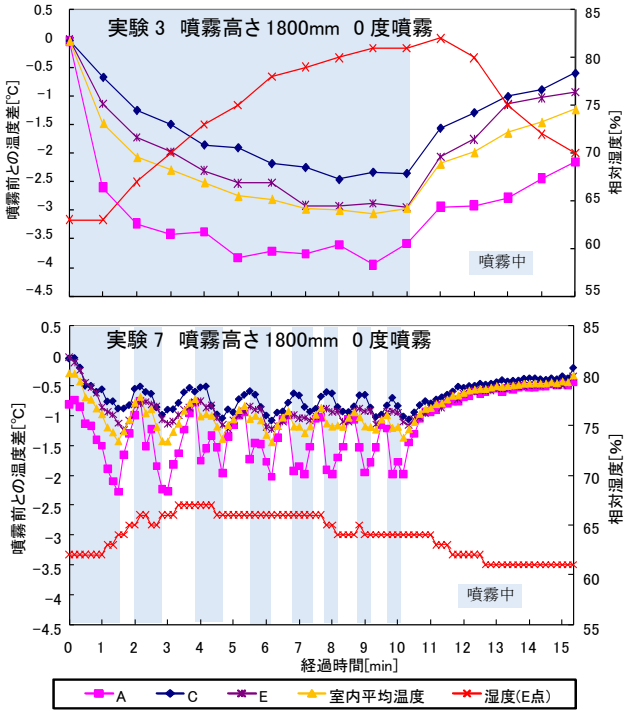


図 6. 各点における噴霧前後の温度差と湿度の時間変化

4. 2 解析結果

解析結果と実測結果の垂直温度成分の傾向を比較するために本解析で算出した各実験の E 点における垂直温度分布データと、実測における同データを図 8 に示した。実測結果では、前述通り実験 7 のデータが最も温度降下が大きく、続いて実験 5、実験 8 の順に中層域での温度降下が大きいことが確認できる。一方、解析結果においても同様な推移が見られることから、本解析を利用することで、異なる噴霧条件での冷却効果に対する優劣判定が出来ることが推察される。次に、実験 7 の A・E・C 点で熱電対により計測された温度データを用いて両結果の温度推移の比較を行ったものが図 9 である。両データともに各点の温度推移に関しては噴霧直後からほぼ同様の推移をしており、最初の温度降下のピーク地点での温度も一致している。特に、どの点においても垂直高さ 562mm 地点での値は、近似した推移を示しており、噴霧前と噴霧時の平均温度差も近い値を示している。しかし、E 点の 1125mm のデータを比較すると、実測値よりも数値解析の結果の方が温度降下は大きく、温度推移が数値解析によるデータの方が 1℃程低い位置で推移している結果となった。実験 5、実験 8 においても同様で、傾向として室内の高い位置では数値解析によるデータの方が温度降下は大きく、一方で床近傍のデータについては、実測データの方が低い温度で推移していることが確認できた。しかし、図 10 で示すように、室全体として非常に高い整合性を持つデータもあり、解析パラメーターの設定次第ではより高い精度が期待できることが予想される。以上のように、整合性の検討の結果、現状での数値解析の利用は、異なる噴霧条件での冷却効果の優劣の評価に対し、特に着目し利用することとした。

5. 数値解析による家庭用細霧冷房の冷却効果の検討

5.1 解析概要

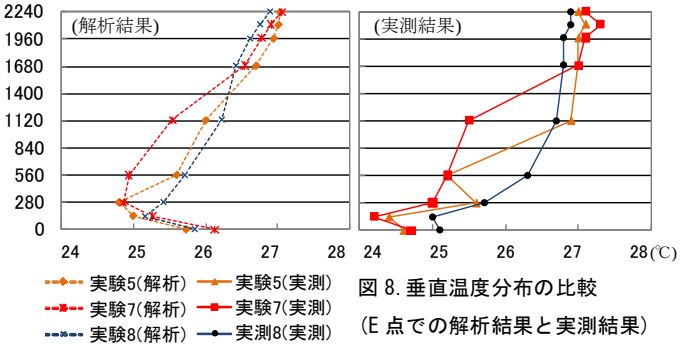


図 8. 垂直温度分布の比較

(E 点での解析結果と実測結果)

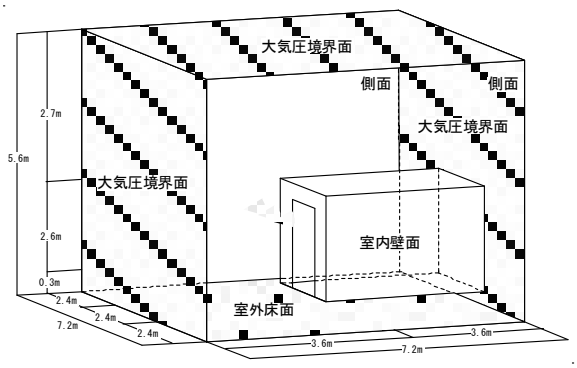


図 7. 検討モデルの概要

表 3. 解析における境界条件

部位		流体境界条件	熱境界条件	その他条件
室内壁面	天井面	no-slip	壁面温度:27.25℃	壁厚:50mm(木造) 室内湿度:62%RH
	床面		壁面温度:26.85℃	
	壁面		壁面温度:26.75℃	
室外床面		no-slip	表面温度:27.15℃	コンクリート
側面		大気圧境界	外気温度:27.15℃	
大気圧境界面		大気圧境界	外気温度:27.15℃	
			外気湿度:62% RH	

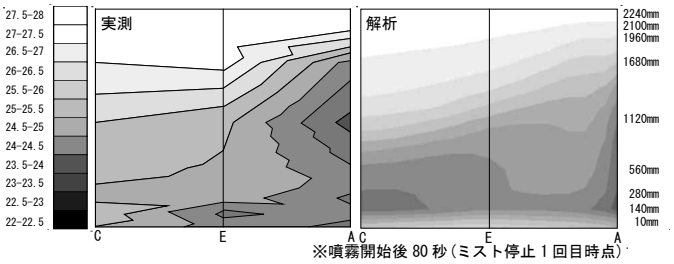


図 10. 実験 7 における実測結果と解析結果の温度コンタ図

整合性の結果を受けて、実際に図 11 に示すようなベランダに面する仮想居室空間(東京-RC 造-48m³)に対し、表 4 のような 3 つの与条件を組み合わせた全 12case について検討を行った。本解析では特に、実験では再現することが困難な湿度条件に対し、有効な評価が行えるものとしている。解析及び噴霧条件は、各々表 5、表 6 に示す。ミスト噴霧は、1 分 OFF/1 分 ON の発停運転を 3 回行った後、続けて無噴霧状態で 5 分間行った。またその他の乱流モデル等の解析設定項目に関しては、前解析と同様とした。

5. 2 解析結果

図 12 に示す与条件毎にまとめた室内温度分布を湿度条件のみで比較した場合、初期の室内湿度が 40%RH または 60%RH の条件下において温度降下が-2℃～-3℃の割合が大

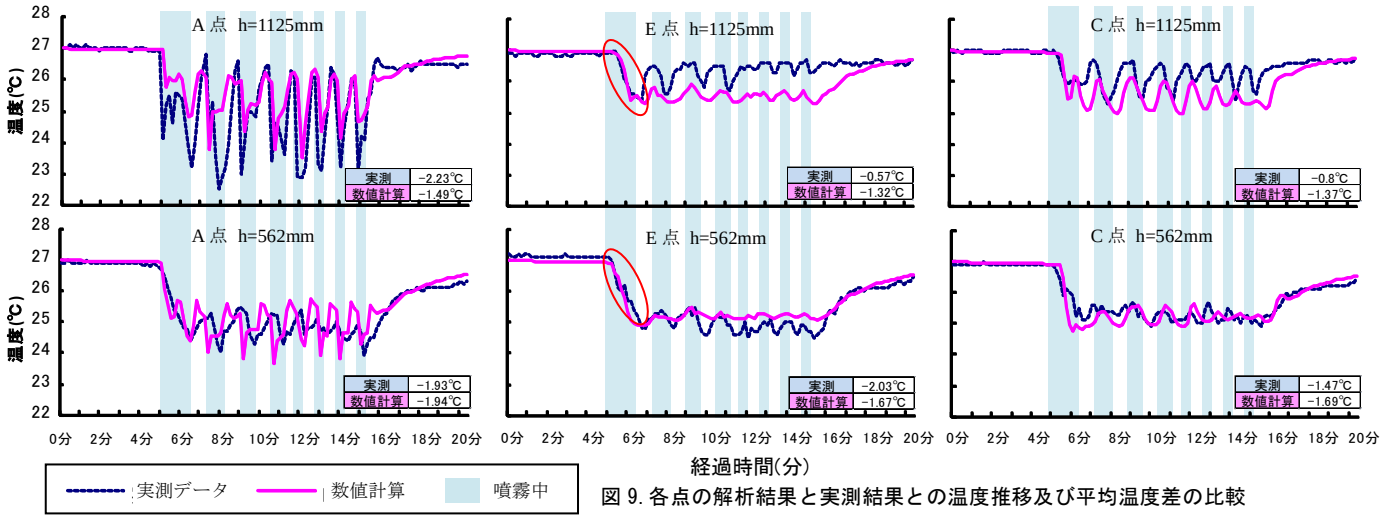
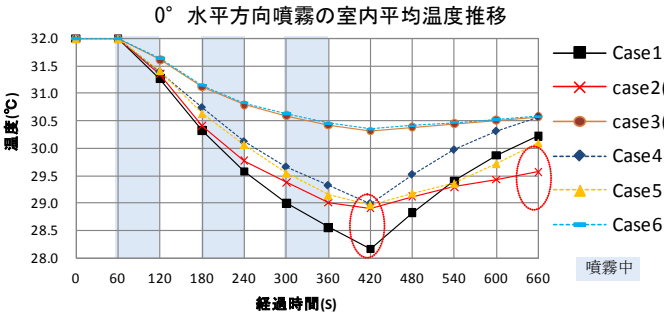


図 9. 各点の解析結果と実測結果との温度推移及び平均温度差の比較

きい。また、図 13 では 80%RH を条件とするケースの室内温度推移が他条件と比較して高く、ミスト噴霧によって室内が飽和状態となり、気化が十分に行われずに床濡れの可能性も懸念される。以上のように噴霧環境として 80%RH でのミスト噴霧は、適しているとは言えない。一方で、表 7 に示す東京の過去 3 年分の夏季気象データ[註 2)]より、日中を対象とした 70%RH 以下の時間が占める割合は、8 割以上(1882h/2248h)と、湿度条件につては噴霧条件を十分に満たしていると結論付けられる。この結果を受けて、実際に噴霧角度と噴霧水量の冷却効果の検討を行い、最適な噴霧方法を検討する。表 4 に示した 60%RH 条件下での各 case の室内平均温度降下量を見ると、もっとも温度降下量の大きい case2 が効果的な噴霧だと考えられるが、図 13 の噴霧水量の異なる case2、case5 の室内温度推移を比較した場合、2 つのケースは異なる噴霧量であるのに対して、最大温度降下の見られる 420 秒後の平均室温が同値を示している。また、660 秒後の平均室温の戻りが、case5 の方が速いことが分かる。この結果から case5 が噴霧量に対して十分な気化が行われたと捉え、80ml/min で噴霧を行う case5 が、仮想居室における噴霧水量の適量値であり、本設計手法より導き出した最適な設置条件であると判断した。

6.まとめ

本研究で提案する設計手法は、気象条件及び施工可否の条件を満たした上での、実際の噴霧条件に対する設計手法としている。実際の適用に当たっては、住宅での実測結果及び無風室での実験結果より決定した、ベランダの軒下を想定した高さからの室内側 0° 水平方向噴霧もしくは、ベランダ手擦り壁を想定した高さからの室内側+45° 噴霧を対象居室の用途によって使い分けることが最適であると考えられるが、適用地域の気象条件、設置可能箇所、対象居室のサイズによっては、異なる噴霧水量や角度、湿度条件での検討も行う必要がある。この場合、数値解析によって噴霧条件毎の冷却効果に対しての優劣の評価を行うことで様々な条件での細霧冷房設置の設計を行うことが可能である。現状では、数値解析の利用により、あらゆるケースでの正確な室内温度分布を算出することは困難であるが、今後、解析精度を高めることで、各解析結果を相対的に評価できるよう仕組みを構築する必要があると考えられる。



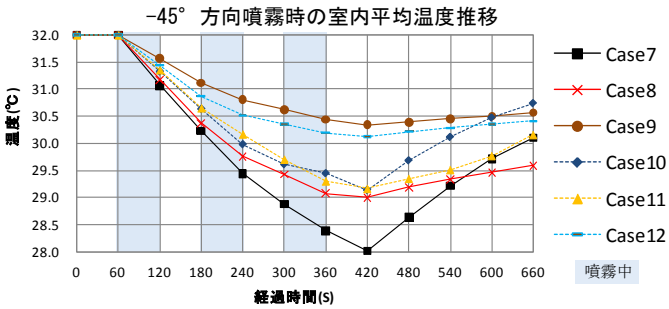


図 13. 全 case の室内平均温度推移

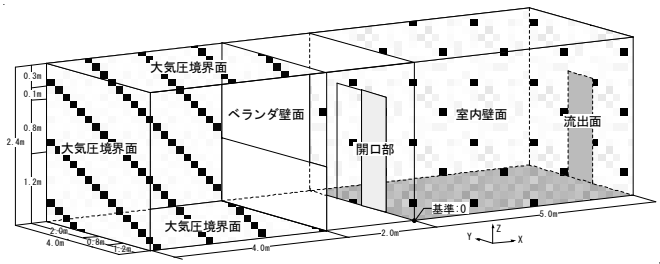


図 11. 検討モデルの概要

表 4. ケーススタディー覧

case No.	噴霧角度	水量(ml/min)	相対湿度(%)	平均温度降下量	優劣評価	最適条件
case1	0°	100	40	2.06℃		
case2	0°	100	60	2.00℃	①	
case3	0°	100	80	1.10℃		
case4	0°	80	40	1.61℃		
case5	0°	80	60	1.82℃	③	○
case6	0°	80	80	1.08℃		
case7	(−)45°	100	40	2.19℃		
case8	(−)45°	100	60	1.97℃	②	
case9	(−)45°	100	80	1.10℃		
case10	(−)45°	80	40	1.57℃		
case11	(−)45°	80	60	1.74℃	④	
case12	(−)45°	80	80	1.27℃		

表 5. 解析における境界条件

部位	流体の境界条件	熱境界条件
室内壁面	no-slipの壁面	壁面温度:32℃,壁厚:100mm 熱伝達率:23W/㎡・K
ベランダ壁面	no-slipの壁面	壁面温度:32℃,壁厚:100mm 熱伝達率:23W/㎡・K 壁外気温:32℃
室内排気口	換気回数0.5回/h	空気温度:32℃
大気圧境界面	大気圧境界	外気温度:32℃ 湿度:40/60/80%RH

表 6. 解析における噴霧条件

ノズルタイプ	Pressure-Swirl-Atomizer Model
噴霧圧力	5MPa
水温	28℃
ノズル口径	0.16mm
噴霧位置	X=-2.0,Y=3.3,Z=2.1
	X=-2.0,Y=3.9,Z=2.1
噴霧方向	X軸正方向からY軸負方向へ-45°,Z軸方向0°
	X軸正方向からY軸負方向へ-45°,Z軸方向-45°
噴霧角度	60°
分裂広がり角度	6°
sheet constant	12
ligament constant	0.5

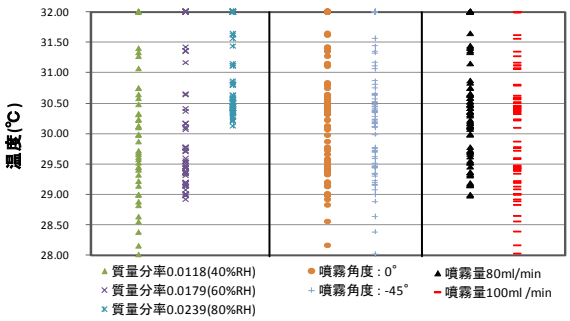


図 12. 噴霧条件毎の室温比較

表 7. 06-08 年夏季の温湿度時間数(7-9 月 AM8:00-PM8:00)

℃/%	80-	70-80	60-70	50-60	-50
26-28	44h	248h	247h	135h	41h
28-30	8h	119h	376h	168h	41h
30-32	0h	9h	214h	292h	60h
32-34	0h	0h	7h	130h	55h
34-36	0h	0h	0h	13h	41h

脚注：註 1)2009 年 12 月時点 45 基販売　註 2)気象庁過去気象データ 06-08 年

参考文献：1) 山田英貴他:ウォーターミスト噴霧を用いた採涼システムに関する研究その 1,日本建築学会梗概集 2007 .D-1.pp.773-774, 2) 伊他:ドライミストの冷却効果と CFD 解析,日本建築学会環境系論文集,vol.63,No.733.2008.11,3)AncysJapan:Fluent6.3 User Manual