

# 都市におけるドライミストの普及促進に関する研究

## —ドライミストによる都市の暑熱環境の改善効果と空調エネルギー削減効果—

### Study on Promotion of Dry Mist in Urban Area

#### -Cooling Effect on Urban Heat Island and Air Conditioning Energy Redaction by Using Dry Mist-

原田 雅教      尹 奎英

本研究では、都市高温化に対する改善策の一つであるドライミストシステムの都市における普及促進を図ることを目的としている。そこで、都市域の高温化緩和対策としての位置付けを明確にするために、仮想街区を対象にドライミストを大規模導入した場合の暑熱環境改善効果及び空調エネルギー削減量を CFD 解析により定量化し、また都市におけるドライミストシステムの評価方法を提示しその効果の評価を行った。さらに、ドライミストによる環境負荷の低減効果を把握するため、ドライミストシステム稼働に伴う二酸化炭素排出量を算出した。CFD 解析結果より仮想街区モデルにおいてドライミストを大規模噴霧した場合の暑熱環境改善効果及び空調エネルギー削減効果を確認した。また、都市におけるドライミストの評価方法を提示し、建物密度及び噴霧水量の異なるケースにおけるドライミストの効果の評価した。建物密度が高く、噴霧水量が多いほど都市におけるドライミストの暑熱環境改善と空調エネルギー削減効果が大きくなる結果を得た。また、ドライミスト稼働に伴う二酸化炭素排出量の算出結果より、ドライミストは少ない投入エネルギー及び二酸化炭素排出量で大きな冷熱を得られ、一般的なエアコンと比べ環境負荷の少ない冷房方式といえる。

キーワード：ドライミスト／ヒートアイランド／暑熱環境／空調エネルギー／CFD

#### 1. はじめに

都市域では人工排熱の増加や建物の高密度化などの都市化が進み、夏期の屋外暑熱環境の悪化が深刻な問題となっている。都市の暑熱環境は年々悪化しており、市民への健康被害、空調エネルギーの増大に影響をもたらしている<sup>1)</sup>。都市の高温化は、建物の空調排熱、車などの排熱、日射の建物への多重反射が主な原因として考えられる。また、緑の減少、道路の舗装などによる乾燥化も一因といわれている。このような都市高温化に対する改善策の一つとして蒸発潜熱を利用するドライミストシステムが注目されており、その利用価値は広く評価されつつある<sup>2)3)</sup>。

しかしながら、このようなドライミストシステムは比較的小規模の導入例が殆どであり局所的な暑熱環境の緩和には実績を上げているが、都市の高温化対策として位置づけられる

までの普及にはまだ課題が多い。また都市域において大規模導入した場合、ドライミストによる気化熱がどの程度居住域の暑熱環境改善及び空調エネルギー削減に寄与するのか正確に把握されていない。

本研究では、ドライミストシステムの都市における普及促進を図ることを目的としている。そこで、都市域の高温化緩和対策としての位置付けを明確にするために、仮想街区を対象にドライミストを大規模導入した場合の暑熱環境改善効果及び空調エネルギー削減量を CFD 解析により定量化し、また都市におけるドライミストシステムの評価方法を提示しその効果の評価を行った。さらに、ドライミストによる環境負荷の低減効果を把握するため、ドライミストシステム稼働に伴う二酸化炭素排出量の算出を行い、一般的なエアコンの二酸化炭素排出量との比較を行った。

2. 仮想街区における CFD 解析概要

(1) 仮想街区モデル

ドライミストによる暑熱環境改善効果及び空調エネルギーの削減効果を評価するため、建物密度の異なる低層密集市街地を模擬した仮想街区（10×10 棟）を対象に CFD 解析を行った。図 1 に解析対象の仮想街区モデルを示す。建物密度についてはグロス建蔽率 30%、40%、50%の 3 ケースとし、表 1 に示すグロス建蔽率ごとの隣棟間隔を与えた。建物モデルについては日本建築学会の住宅標準モデル<sup>4)</sup>を参考に図 2 に示す幅 7.5m×奥行 8.9m×高さ 7.4m の箱型モデルとした。

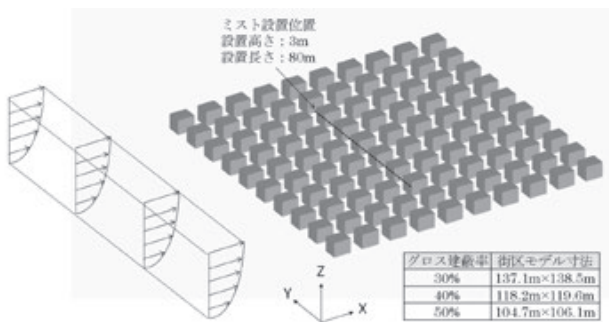


図 1. 仮想街区モデル

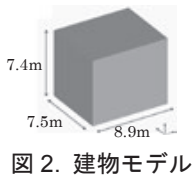


図 2. 建物モデル

表 1. 隣棟間隔

グロス建蔽率	X 軸方向隣棟間隔	Y 軸方向隣棟間隔
30%	6.9m	5.5m
40%	4.8m	3.4m
50%	3.3m	1.9m

(2) 解析条件

解析条件を表 2 に示す。日射条件については、名古屋における夏期日中の晴天時を想定し与えた<sup>注1)</sup>。

流体境界条件、熱境界条件を表 3、表 4 にそれぞれ示す。流入条件はべき乗則で規定し、べき指数を 0.25<sup>注2)</sup>、基準高さは名古屋市気象台の観測高さ、基準風速は夏期における平均風速、風向は夏期卓越風向である南風とした。天空面の放射条件は、仮想天空温度  $T_{sky}=16.1^{\circ}C$ <sup>注3)</sup>、放射率  $\epsilon=1.0$  を与え大気放射を想定した。地中温度  $T_{ug}$  については地中温度計算プログラム  $GT_{win}$ <sup>注4)</sup> を用いて算出し、土壌熱伝導率は  $\lambda=1.16W/m\cdot K$  を与えた。建物外壁面及び地表面にはコンクリート舗装を想定した物性を与えた。

建物内部は解析領域外とし、室内側壁面温度として室内設定温度  $26^{\circ}C$  を与え、壁厚 0.2m、熱伝導率  $\lambda=0.24W/m\cdot K$  を設定し、解析を行った。

表 2. 解析条件

解析ツール	STREAM ver.11
時間項	定常解析
乱流モデル	高レイノルズ数型 $k-\epsilon$ モデル
差分スキーム	風上差分法

表 3. 流体境界条件

流入面( $X_{min}$ 面)	$U=U_0(\frac{Z}{Z_0})^{\alpha}$	基準高さ $Z_0=17.9m$ 基準風速 $U_0=2.8m/s$ べき指数 $\alpha=0.25$
流出面( $X_{max}$ 面)	自然流出境界	
上空面( $Z_{max}$ 面)	対称境界	
側面( $Y_{min,max}$ 面)	対称境界	
地表面( $Z=0m$ 面)	一般化対数則	
建物外壁面	一般化対数則	

表 4. 熱境界条件

天空面 (流入出面・上空面・側面)	断熱境界	
	大気放射	仮想天空温度 $T_{sky}=16.1^{\circ}C$ 放射率 $\epsilon=1.0$
地中面 ( $Z_{min}=-0.5m$ 面)	地中温度 $T_{ug}=26.22^{\circ}C$	
地表面	対流熱伝達率 $\alpha_c=11.6W/(m^2\cdot K)$ 放射率 $\epsilon=0.9$	
建物室外側壁面	アルベド (日射反射率) 0.2	
建物室内側壁面	室内側壁面温度 $26^{\circ}C$	

(3) ミスト解析条件

ミストの解析条件として、噴霧したミストが空気中で全て蒸発すると仮定し、1 ノズル当たり 2,083W の冷熱量及び 0.083g/s の加湿量を与えた。ミスト設置高さは 3m とし、図 1 に示す気流の乱れが和らいだ街区の中央部に設置長さ 80m に渡りライン上に設置した。表 5 に検討ケースを示す。グロス建蔽率とミスト噴霧水量をそれぞれ変化させた 12 ケースを検討した。噴霧水量 4L/min, 6L/min, 8L/min はミストノズルの間隔を 1m, 0.75m, 0.5m とした場合の噴霧水量である。

表 5. 解析ケース

ケース名	グロス建蔽率	噴霧水量 [L/min]	蒸発潜熱量 [kW]	加湿量 [kg/s]
30%-N	30%	ミスト無	-	-
30%-4L		4	167	0.067
30%-6L		6	250	0.1
30%-8L		8	334	0.134
40%-N	40%	ミスト無	-	-
40%-4L		4	167	0.067
40%-6L		6	250	0.1
40%-8L		8	334	0.134
50%-N	50%	ミスト無	-	-
50%-4L		4	167	0.067
50%-6L		6	250	0.1
50%-8L		8	334	0.134

### 3. CFD 解析結果

#### 3-1. ドライミストによる暑熱環境の改善効果検証

##### (1) ドライミスト近傍の暑熱環境改善効果

ドライミスト近傍 500m<sup>2</sup> 範囲におけるミスト無のケースと比較した場合のミストによる温度降下を図 3(a)に、相対湿度上昇を図 3(b)に、MRT 降下を図 3(c)に、SET\*降下を図 3(d)にそれぞれ示す。SET\*の算出については、温度・相対湿度・MRT・風速は解析結果を用い、着衣量は半袖シャツとズボンの着衣状態を想定し 0.5clo、代謝量はゆっくりとした歩行を想定し 1.5Met を与えた。解析結果より、ミストにより相対湿度は上昇するものの、温度、MRT の降下により SET\*が降下し暑熱環境の改善が確認できる。

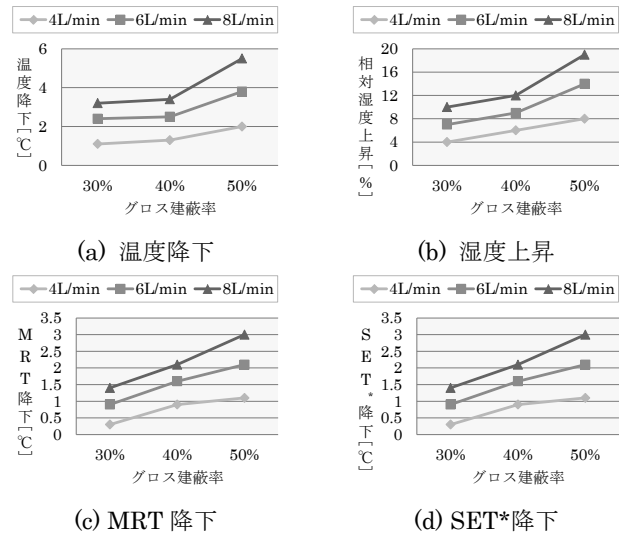


図 3. ドライミスト近傍 (500m<sup>2</sup> 範囲) の環境変化

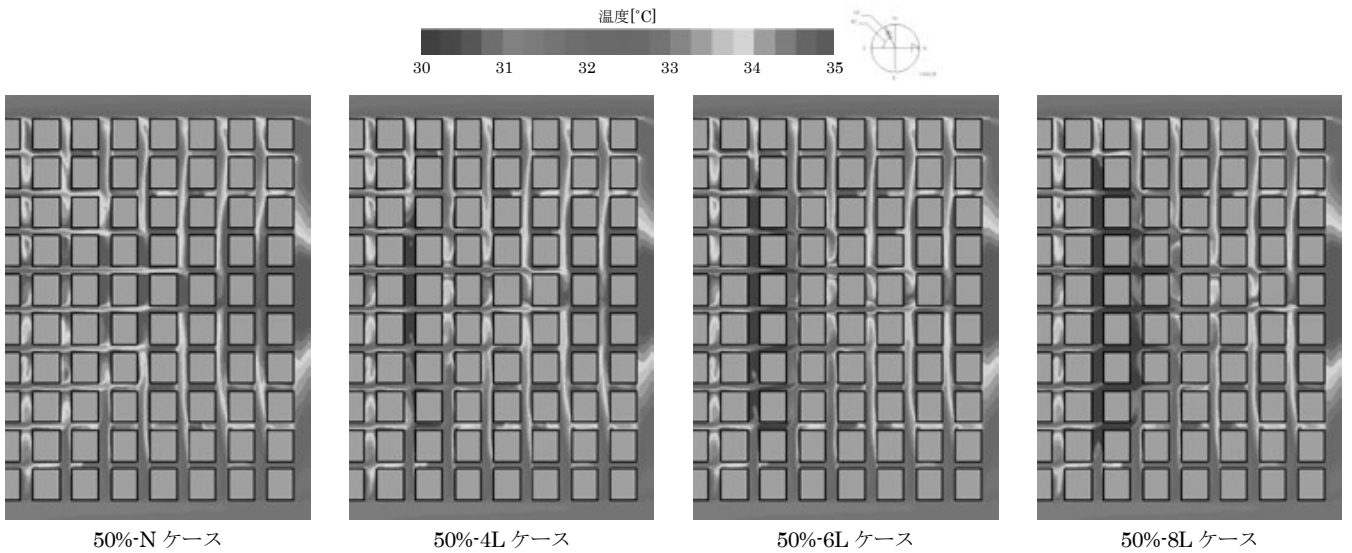


図 4. グロス建蔽率 50%における温度分布 (Z=1.6m)

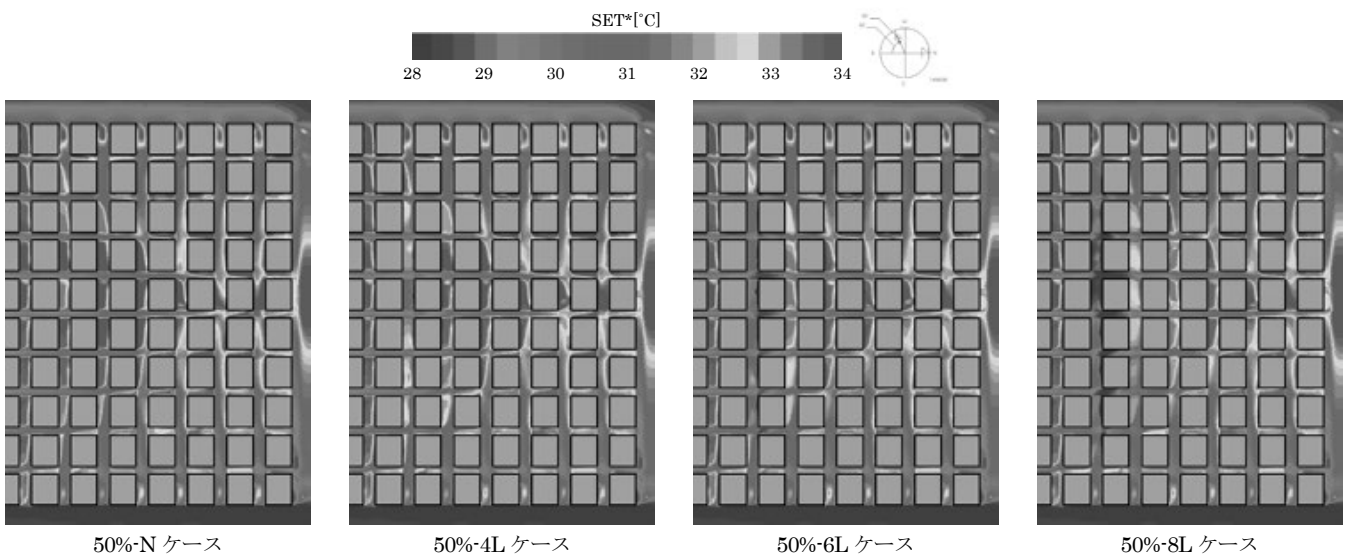


図 5. グロス建蔽率 50%における SET\* 分布 (Z=1.6m)

ドライミストの効果が顕著にみられたグロス建蔽率 50% ケースにおける温度分布及び SET\*分布 (Z=1.6m 平面) を図 4, 図 5 に示す。解析結果より, ドライミスト近傍において 2~3°C 程度の温度降下, 1~2°C 程度の SET\*降下がみられ, 暑熱環境の改善が確認できる。

(2) ドライミストの冷却範囲検討

ドライミストによる冷却範囲の検討のため, 500m<sup>2</sup>, 1,000m<sup>2</sup>, 1,500m<sup>2</sup>, 2,000m<sup>2</sup> 範囲におけるミストによる温度降下を図 6(a)に, 相対湿度上昇を図 6(b)に, MRT 降下を図 6(c)に, SET\*降下を図 6(d)に示す。広い範囲に渡りミストの効果が得られ, 暑熱環境が改善されていることが確認できる。

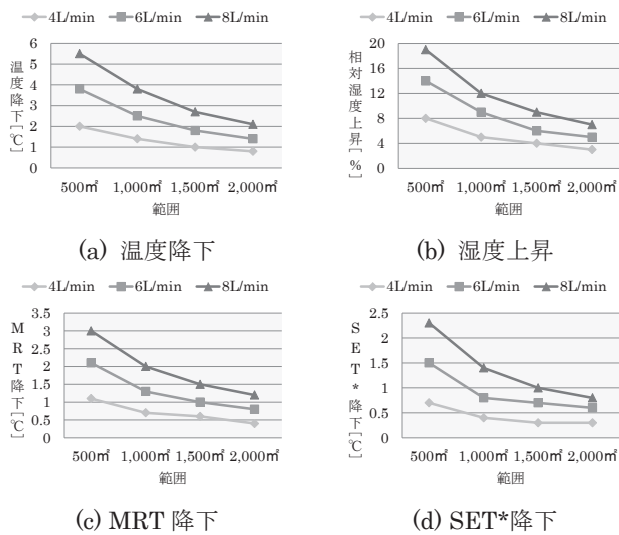


図 6. ドライミストによる冷却範囲検証

3-2. ドライミストによる空調エネルギー削減効果

(1) ミスト近傍の建物表面温度

ミストを噴霧していない 50%-N ケースと冷却効果が大きく得られた 50%-8L ケースとのドライミスト近傍建物の表面温度分布の比較を図 7 に示す。ミストにより建物表面温度が冷却されていることが確認でき, 建物貫流熱負荷の低減が期待できる。

図 7 に示す建物 A~H における平均表面温度とミストによる冷却温度を図 8 示す。噴霧水量が多くなるにつれ, 表面温度の大きな冷却がみられた。

(2) 街区全体における空調エネルギー削減量

街区全体における貫流熱負荷の削減量<sup>注5)</sup>を図 9 に示す。建物密度を高めることで貫流熱負荷の大きな削減がみられた。

建物密度が高い街区でドライミストを効率的に噴霧することで街区全体の建物の貫流熱負荷を低減し, 空調エネルギーの大きな削減が可能である。

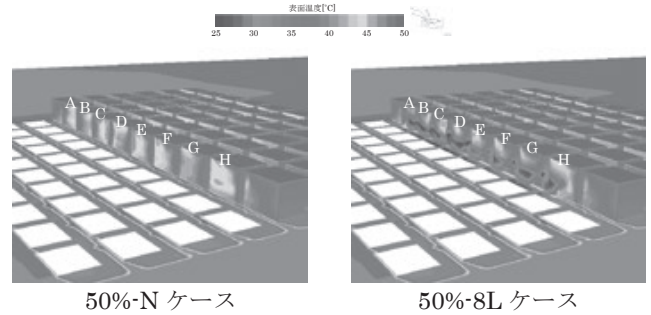


図 7 ドライミスト近傍建物の表面温度分布図

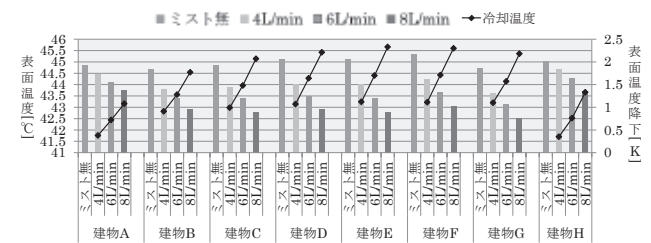


図 8 ドライミスト近傍建物の表面温度の冷却

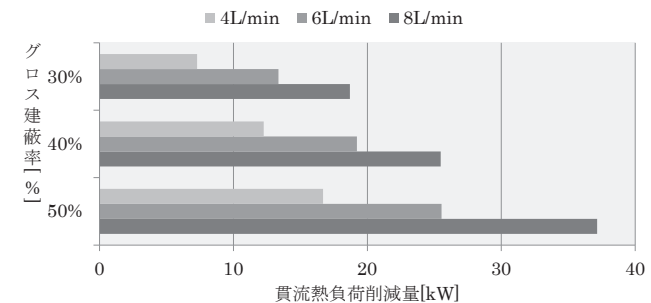


図 9 街区全体における貫流熱負荷削減量

4. 都市におけるドライミストの評価

(1) 評価方法

都市域においてドライミストを大規模実施した場合, ミストの気化熱が及ぼす影響として, ヒートアイランド現象の緩和効果, そして暑熱環境改善効果・建物空調エネルギーの削減効果が挙げられる。ヒートアイランド現象の緩和効果については, ミストによる気化熱の全量が効果を果たすと考えられる。しかし, 暑熱環境改善効果及び建物空調エネルギーの削減効果については, ドライミストによる気化熱がどの程度影響を与えているか正確に把握されていない。

そこで、図10に示すようにミストの蒸発潜熱による冷熱量を  $Q_{mist}$  とした場合の暑熱環境改善  $Q_{hum}$ 、建物空調エネルギーの削減を  $Q_{bld}$ 、それ以外の領域に与える影響を  $Q_{sky}$  とし、式(1)に示す関係式を用い、前章の CFD 解析結果よりそれぞれを定量化した。

$$Q_{mist}(=Q_{HI})=Q_{hum}+Q_{bld}+Q_{sky} \quad (1)$$

ここで、 $Q_{mist}$ :ミストの蒸発潜熱による冷熱量[kW],  $Q_{hum}$ :ミストが居住域(街区内の高さ 0~1.8m 領域)を冷やす冷熱量[kW],  $Q_{bld}$ :ミストが建物外皮を冷やす冷熱量[kW],  $Q_{sky}$ :ミストが居住域及び建物外皮を除く領域を冷やす冷熱量[kW],  $Q_{HI}$ :ミストがヒートアイランド現象の緩和へ影響を与える冷熱量[kW]である。

ミストによる冷熱  $Q_{mist}$  が暑熱環境改善  $Q_{hum}$  及び建物空調エネルギーの削減  $Q_{bld}$  へ影響する割合が多いほど効率的にミストの効果が得られていると評価できる。

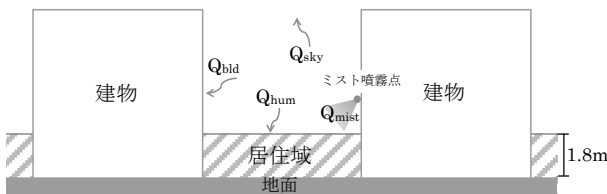


図10 ドライミストの冷熱が及ぼす効果

(2) 建物密度・噴霧水量による検討結果

ドライミストの冷熱量が暑熱環境改善及び空調エネルギー削減に与える影響の割合をケースごとに示したものを表6と図11に示す。建物密度が高まると、ミストの気化熱が暑熱環境改善、建物空調エネルギー削減に影響を与える割合は大きくなり、効率的にミストの効果が得られている。また、暑熱環境改善効果  $Q_{hum}$  の割合については噴霧水量が大きく影響している。これは、図12に示すように噴霧水量が多いほど冷熱が大きくより強い下降気流が生じ、居住域へ冷気が多く流れることが要因といえる。

表6. ドライミストによる冷熱割合

ケース名	$Q_{mist}$		$Q_{hum}$		$Q_{bld}$		$Q_{sky}$	
	冷熱 [kW]	割合	冷熱 [kW]	割合	冷熱 [kW]	割合	冷熱 [kW]	割合
30%-4L	167	1%	2.1	2%	7.3	4%	157.6	94%
30%-6L	250	2%	5.3	2%	13.4	5%	231.3	93%
30%-8L	334	2%	6.5	2%	18.7	6%	308.8	92%
40%-4L	167	5%	8.9	5%	12.2	7%	145.9	87%
40%-6L	250	10%	23.9	10%	19.2	8%	206.9	83%
40%-8L	334	12%	39.7	12%	25.5	8%	268.8	80%
50%-4L	167	9%	14.2	9%	16.7	10%	136.1	81%
50%-6L	250	14%	35.5	14%	25.6	10%	188.9	76%
50%-8L	334	17%	57.7	17%	37.2	11%	239.1	72%

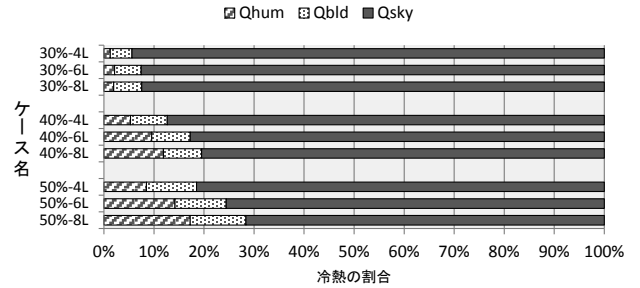


図11 ドライミストの冷熱が影響を及ぼす割合

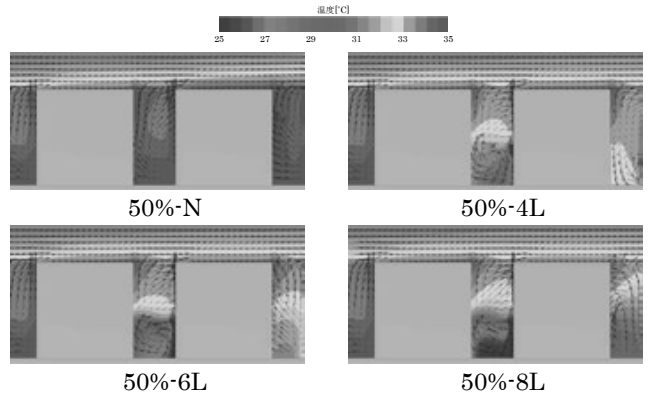


図12 断面気流ベクトル・温度分布図

5. ドライミストによる環境負荷の低減

ドライミストシステムは、水の大きな蒸発潜熱により冷熱を得るため、必要とするエネルギーは水道水及び圧水ポンプを稼働させるための少量の電力のみである。(蒸発により奪う熱量) / (ミストを作る際の投入エネルギー) = COP とした場合、愛・地球博グローバルループで導入されたドライミストシステムの COP は約 150 となり、一般的なエアコン (COP=5) の 30 倍であり、少ない投入エネルギーで大きな冷熱が得ることが可能である<sup>5)</sup>。

ここでは、ドライミストから 1kW の冷熱を得る際の二酸化炭素排出量と一般的なエアコン (COP=5) から 1kW の冷熱を得る際の二酸化炭素排出量を比較することでドライミストによる二酸化炭素排出量の低減効果を示す。二酸化炭素排出量は、エネルギー使用量に二酸化炭素排出係数を乗じることで算定した。二酸化炭素排出係数は環境省が公表する値である水道 0.36kg-CO<sub>2</sub>/m<sup>3</sup>、電力 0.513kg-CO<sub>2</sub>/kWh (中部電力) を用いた<sup>7)</sup>。

表7に二酸化炭素排出量の比較を示す。圧水ポンプ1台の稼働を想定した場合、必要とするエネルギーは水道水 4L/min 及び使用電力 750W であり、得られる冷熱は 167kW、

二酸化炭素排出量は 471.2g-CO<sub>2</sub>/h である。得られる冷熱を 1kW に換算すると二酸化炭素排出量 2.82 g-CO<sub>2</sub>/h となり少ない二酸化炭素排出量であった。一般的なエアコンを用いた場合は 1kW の冷熱を得るための二酸化炭素排出量は 102.6 g-CO<sub>2</sub>/h であり、ドライミストは一般的なエアコンと比べ約 1/35 の二酸化炭素排出量であり、少ない二酸化炭素排出量で大きな冷熱を得ることが可能である。

6. 総括

(1) まとめ

CFD 解析により仮想街区モデルにおいてドライミストを大規模噴霧した場合の暑熱環境改善効果及び空調エネルギー削減効果を確認した。また、都市におけるドライミストの評価方法を提示し、建物密度及び噴霧水量の異なるケースにおけるドライミストの効果を評価した。建物密度が高く、噴霧水量が多いほど都市におけるドライミストの暑熱環境改善と空調エネルギー削減効果が大きくなることが確認できた。また、ドライミスト稼働に伴う二酸化炭素排出量の算出結果より、ドライミストは少ない投入エネルギー及び二酸化炭素排出量で大きな冷熱を得られ、一般的なエアコンと比べ環境負荷の少ない冷房方式といえる。

(2) 今後の展望

今後、名古屋のアーケード商店街を対象にドライミストシステムの試験的導入を実施する。アンケート調査にてドライミストに対する住民の認識、システム導入に関する課題を明確にし、システムの普及促進につながる情報提供を行う。

【脚注】

注 1) 日射量については、太陽位置を 8 月 1 日 14:00、地理情報を名古屋とし、ASHRAE2009 による日射量計算の式を用いて算出した。

注 2) べき指数  $\alpha$  は風速分布の形状を決定する指数であり、その数値は地表面の状態に応じて決定される。本研究では都市域の市街地におけるべき指数として  $\alpha=0.25$  を用いた。

注 3) 仮想天空温度の算出は次式を用いた。

$$T_{sky} = T_a (0.526 + 0.208 \sqrt{f_a})^{1/4}$$

$T_a$ : 大気温度 [K],  $f_a$ : 水蒸気圧 [kPa]

注 4) 地中温度計算プログラム GT<sub>win</sub> は気象データより、任意のメダス観測地点における任意の深さの温度を 1 時間刻みで年間計算する機能を持つ有限要素法に基づくプログラムである。算出条件は、名古屋における地中深さ 0.5m 地点での夏期 (7,8 月) 平均地中温度とした。

注 5) 貫流熱負荷について、本研究では (熱貫流率×内外温度差) より与えられるものとし、外表面温度と室内設定温度 26°C との差から夏期の冷房時における貫流熱負荷を算出した。貫流熱負荷の削減量の算出はミスト無のケースと比較した場合の差とした。

【参考文献】

- 1) 環境省:平成 22 年度 ヒートアイランド現象による環境影響等に関する調査業務報告書, 2010
- 2) 尹奎英ら:ドライミスト冷却効果の検証と CFD 解析, 日本建築学会環境系論文集第 73 巻第 633 号 1313-1320, 2008
- 3) 原田雅教ら:ドライミストによる都市の温熱環境改善効果と CFD による予測に関する研究, 日本建築学会学術講演梗概集, 831-832, 2014
- 4) 宇田川光弘:標準問題の提案(住宅標準問題), 日本建築学会環境工学委員会熱分科会第 15 回シンポジウム, 1985
- 5) 辻本誠ら:ドライミスト奮戦記, 日本機械学会誌第 112 巻 1084 号, 192-193, 2009
- 6) 原田昌幸ら:ドライミストの蒸散効果を用いた夏季の暑さ対策, 空気調和・衛生工学第 82 巻 9 号, 787-791, 2008
- 7) 環境省:温室効果ガス算定・報告・公表制度における算定方法・排出係数一覧, 2014
- 8) 環境省:電気事業者別二酸化炭素排出係数一覧, 2014

表 7. ドライミストと一般的なエアコン (COP=5) の二酸化炭素排出量の比較

	ドライミスト				一般的なエアコン (COP=5)	
	得られる冷熱 167kW (ポンプ 1 台稼働の場合)		得られる冷熱 1kW		得られる冷熱 1kW	
	エネルギー使用量	CO <sub>2</sub> 排出量	エネルギー使用量	CO <sub>2</sub> 排出量	エネルギー使用量	CO <sub>2</sub> 排出量
電力	750W	384.8g-CO <sub>2</sub> /h	4.5W	2.3g-CO <sub>2</sub> /h	200W	102.6g-CO <sub>2</sub> /h
水道	4L/min	86.4g-CO <sub>2</sub> /h	24ml/min	0.5g-CO <sub>2</sub> /h	-	-
合計	-	471.2g-CO <sub>2</sub> /h	-	2.8g-CO <sub>2</sub> /h	-	102.6g-CO <sub>2</sub> /h