

# ドライ型ミストにおける導入効果評価の考え方と評価指標

尹 奎 英\*<sup>1</sup>

原 田 雅 教\*<sup>2</sup>

本研究は、細霧冷房システムのひとつであるドライ型ミストを対象とし、その導入効果の評価方法の考え方を検討したものである。本報では、既往の評価方法を踏襲しつつ、投入されたミスト気化熱の総量に着目して導入効果評価の考え方を検討した。CFDを用いて仮想街区に導入されたドライ型ミストシステムをモデル化し、投入されたミストの気化熱の総量に対して導入効果の寄与先ごとに定量化して示した。温熱環境改善、空調熱負荷低減に寄与できた気化熱はドライ型ミストの明示的な導入目的に適うものであり、投入されたミストの気化熱の総量に対するこれら気化熱の割合は、システムの設計・運用指標として有用なものと考えられる。

キーワード：シミュレーション・ドライ型ミスト・設計・性能評価・暑熱環境緩和・省エネルギー

## 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。また、都市の暑熱環境は、市民への健康被害、空調エネルギー増大の原因となっている<sup>1)2)</sup>。このような都市暑熱環境に対する改善策の一つとしてミスト散布による細霧冷房システムが注目されている<sup>3)</sup>。細霧冷房システムは、水の大きな気化熱を利用するシステムであり、粒径の小さいミストを作り出し空間中に放出させてその気化熱により気温降下を得るシステムである。細霧冷房システムについて、深堀<sup>4)</sup>は1993年に都市空間の快適性を向上できる可能性を指摘しており、その後の2005年の愛知万博にて大規模導入を皮切りに、一般への普及が広まっている<sup>5)6)</sup>。

細霧冷房システムの導入効果は、半屋外空間での夏期の暑熱環境緩和、そして屋外空間の環境改善を実現しつつ、地域全体のエネルギー使用量の軽減を図る<sup>5)</sup>ことであろう。前者に関しては、林ら<sup>7)</sup>、金田ら<sup>8)</sup>、三坂ら<sup>9)10)</sup>により、夏期においてミスト散布を行った際の気温降下、温熱快適性向上等の効果が示された。また、児玉ら<sup>11)12)13)</sup>はアンケート調査を行うことで、ミスト散布下での温熱感覚の改善効果を示している。これに対して、後者に関しては、その測定や評価の難しさゆえに、まだその検証例は少ないが、CFDなどのシミュレーション手法を用いてミスト技術導入による省エネ効果

を示した例が見受けられる<sup>14)</sup>。

つぎに、ヒートアイランド現象に視点を移して細霧冷房システムの導入効果を考える。ヒートアイランド形成要因を敷地スケール・街区空間の視点による気温上昇メカニズムから考えた場合、樹木の伐採等による蒸発冷却能力の減少をひとつの要因として指摘している<sup>15)</sup>。また、この要因の対抗策として、緑化や水辺空間を増やすなどの蒸発冷却能力の増強が挙げられている。これに対して、細霧冷房システムは空間中にミストを放出することから、蒸発冷却能力の増強という手段として捉えることができると考えられる。また、真夏のクスノキ林の蒸散量は $7.5\text{cc}/(\text{min}\cdot\text{m}^2)$ とされており<sup>5)16)</sup>、 $7\text{m}^2$ の蒸散量は一般的にミストノズル約1個分に匹敵する。空間中に放出されたミストがヒートアイランド現象の緩和に寄与できているかを示す学術的な検証例はまだ存在しないが、空間中に放出する水分量をもって緑化や水辺空間のようにヒートアイランド現象の緩和に寄与すると考えるのは合理性があるといえる。さらに細霧冷房システムは、緑化や水辺空間に比べて設置や運用が比較的容易であり、設置に要する時間も短く設置場所の制約も比較的少ないことから緑化や水辺空間に比べて短時間でヒートアイランド現象の緩和策を講じる手段として期待できると考えられる。

以上のように、細霧冷房システムは半屋外空間の暑熱環境の改善・緩和、空調用エネルギー使用量の軽減に効果が期待できるといえる。また、上記の考え方にもとづけば、ヒート

\*1 名古屋市立大学芸術工学研究科 正会員

\*2 ㈱松田平田設計

アイランド現象の緩和に寄与できるものとして評価できる。細霧冷房システムの普及促進を考えれば、暑熱環境の改善・緩和効果のみならず、省エネルギー効果ならびにヒートアイランド現象緩和への寄与に関しても適切に評価を行い、システムの導入を検討することが望ましい。

表-1 に既往の研究にみられる細霧冷房システムの評価指標をまとめて示す。気温低下や快適性向上など暑熱環境改善・緩和に関する評価事例がみられる。また、エネルギー関連ほかについては、空調エネルギーや効率ほかエネルギーコストなどに関して細霧冷房システムの効果を評価している。さらに、歩行人の心理と行動への影響について、再び訪れる期待度、歩行速度や行動誘発について調査・観察して評価している。これらの評価は、制御したい空間やエリアにおいて、ミストの気化熱がもたらす各指標の変化量に着目して評価を行っており、当該空間以外の空間や上空に拡散されてしまうミストに対してはあまり議論されていない。

暑熱環境緩和や省エネ・省CO<sub>2</sub>など細霧冷房システムの明示的な効果のみを評価するならば、既往研究の方法で十分である。しかしながら、前述のヒートアイランド現象緩和への期待を認めるのであれば、大気中に拡散されてしまい明示的な効果に結びつかないミストについても議論が必要となる。

さらに、細霧冷房システムの設計・運用を考えると、投入されたミスト気化熱の総量に着目して、明示的な効果に寄与した分とそれ以外に寄与した分を明確にしたうえで、システム導入の効果を評価する考え方が望ましいと考えられる。

細霧冷房システムの導入効果を定量化する際、制御したい空間やエリアに限定して物理量を測定することで評価できるが、投入されたミスト気化熱の総量に着目して定量化を行う場合はCFDを用いた評価がより現実的といえる。既往研究例では、J. Wangら<sup>17)18)</sup>、尹ら<sup>19)</sup>がCFD解析により細霧冷房システムの挙動をシミュレーションし、その再現性を確認している。

以上のことから、本研究ではCFDを用いてシステムの導入効果を検討し、表-1に示す既往の評価指標を踏襲しつつ、投入されたミスト気化熱の総量に着目したシステムの評価を試みる。最終的には、細霧冷房システム、とりわけドライ型ミストを用いる採涼システムの設計・運用のための性能評価指標の提案を目指す。

## 1. 仮想街区におけるCFD解析概要

ドライ型ミストによる暑熱環境緩和効果および省エネルギー・省CO<sub>2</sub>効果を評価するため、建物密度の異なる簡易的な仮想街区(10×10棟)を対象にCFD解析を行った<sup>注1)</sup>。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ケースとした。表-2にそれぞれのグロス建蔽率における街区寸法および解析領域を示す。建物モデルは日本建築学会の住宅標準モデル<sup>22)</sup>を参考に幅7.5m×奥行8.9m×高さ7.4mの箱型モデルとした。メッシュ分割は街区部分を0.5m角の等分割とし、街区部分から境界面に近づくにつれて等比率1.2を与えて分割した。

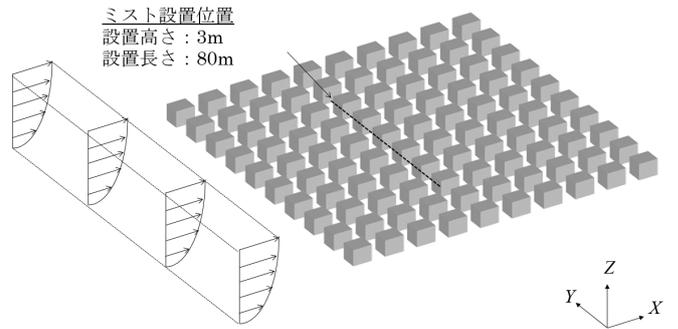


図-1 仮想街区モデル

表-1 性能評価項目と指標

評価項目	評価指標	既往研究
暑熱環境の改善・緩和関連	気温	林ら <sup>7)</sup> 、金田ら <sup>8)</sup> 三坂ら <sup>9)10)</sup> 、尹ら <sup>19)</sup> J. Wangら <sup>17)18)</sup>
	SET*・PMV	
エネルギー関連 他	空調エネルギー削減量	鳴海ら <sup>14)</sup>
	冷房エネルギー効率(COP)	辻本ら <sup>16)</sup>
	エネルギーコスト	大手山ら <sup>20)</sup>
歩行人の心理と 行動への影響	再び訪れる期待度	渡邊ら <sup>21)</sup>
	歩行速度・行動の誘発	

表-2 街区寸法及び解析領域

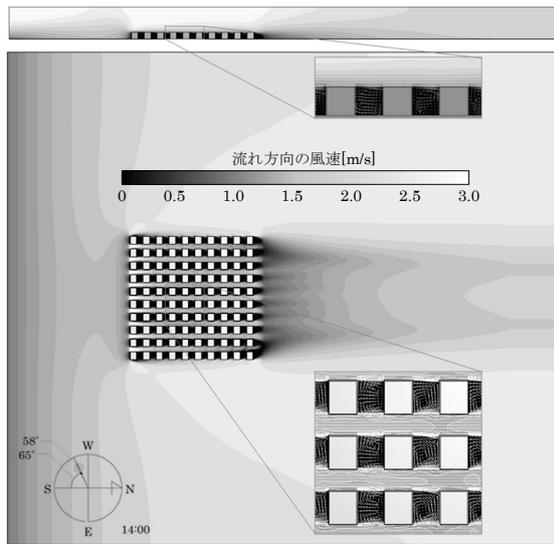
グロス建蔽率	街区寸法	解析領域
30%	137.1m×138.5m	686m×554m×50.5m
40%	118.2m×119.6m	591m×479m×50.5m
50%	104.7m×106.1m	524m×425m×50.5m

表-3 流体境界条件

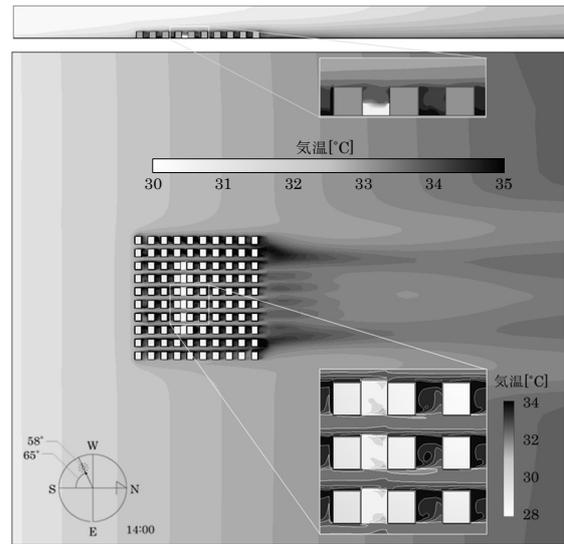
流入面 ( $X_{min}$ )	$U=U_0\left(\frac{Z}{Z_0}\right)^\alpha$ $k(z)=l(z)\cdot(u_1(z))^2$ $\varepsilon(z)=C_\mu^{1/2}k(z)\frac{\partial u_1}{\partial z}$	基準高さ $Z_0=17.9m$ 基準風速 $U_0=2.8m/s$ べき指数 $\alpha=0.25$ 乱れ強さ $I=0.1\left(\frac{Z}{Z_0}\right)^{-\alpha-0.05}$ $Z_G=550m$ $C_\mu=0.09$ 流入温度湿度 $30^\circ C, 40\%rh$
流出面 ( $X_{max}$ )	自然流出境界	
上空面 ( $Z_{max}$ )	フリースリップ	
側面 ( $Y_{min}, Y_{max}$ )	フリースリップ	
地面 ( $Z=0m$ )	一般化対数則	
建物外壁面	一般化対数則	

表-4 熱境界条件

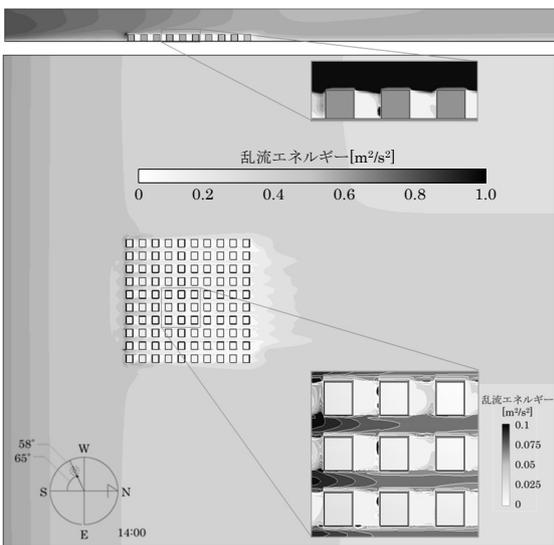
面	断熱境界	
	天空面 (流入出面・上空面・側面)	大気放射
地中面 ( $Z_{min}=-0.5m$ )	地中温度 $T_{ug}=26.2^\circ C$	
地面	対流熱伝達率 $\alpha_c=11.6W/(m^2\cdot K)$ 放射率 $\varepsilon=0.9$	
建物外壁面	アルベド (日射反射率) 0.2	
建物内壁面	室内側壁面温度 $T_w=26^\circ C$	



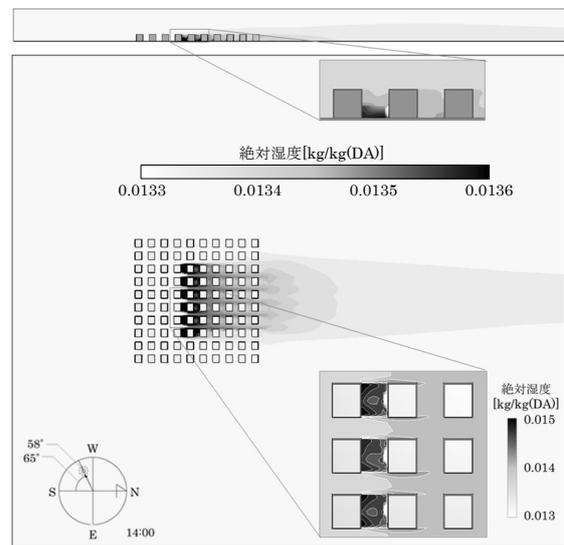
(a) 流れ方向の風速分布 (上図：断面図, 下図：高さ 1.6m における平面図)



(b) 気温分布 (上図：断面図, 下図：高さ 1.6m における平面図)



(c) 乱流エネルギー分布 (上図：断面図, 下図：高さ 1.6m における平面図)



(d) 絶対湿度分布 (上図：断面図, 下図：高さ 1.6m における平面図)

図-2 CFD 解析結果 (30%-8L ケース)

メッシュ数については約 150 万メッシュとした。なお、本解析は STREAM Ver.16 を用い、乱流モデルは標準  $k-\epsilon$  モデルを採用した<sup>注2)</sup>。

表-3、表-4 に流体境界条件、熱境界条件をそれぞれ示す。日射条件については、夏期日中の晴天時を想定し与えた<sup>注3)</sup>。流入条件はべき乗則で規定し、べき指数を 0.25、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。流入条件の乱流エネルギーは日本建築学会建築物荷重指針の乱れ強さの鉛直分布の推定式<sup>23)</sup>を参考に与え、散逸率は乱流エネルギーの生産と散逸の局所平衡の仮定より与えた。天空面には、仮想天空温度<sup>注4)</sup>、放射率を与え大気放射を想定した。地中温度については、地中温度計算プログラム GTwin を用いて名古屋における地中深さ 0.5m 地点での夏期 (7, 8 月) 平均地中温度を算出して与えた。建物内部は解析領域外とし、室内側壁面温度として 26°C を与え、壁厚は 0.2m、熱伝達率は 0.24W/(m²·K)を設定し、解析を行った。

表-5 解析ケース

ケース名	グロス建蔽率	噴霧水量	蒸発潜熱量	加湿量
30%-N	30%	No mist	-	-
30%-4L		4L/min	167kW	0.067kg/s
30%-6L		6L/min	250kW	0.1kg/s
30%-8L		8L/min	334kW	0.134kg/s
40%-N	40%	No mist	-	-
40%-4L		4L/min	167kW	0.067kg/s
40%-6L		6L/min	250kW	0.1kg/s
40%-8L		8L/min	334kW	0.134kg/s
50%-N	50%	No mist	-	-
50%-4L		4L/min	167kW	0.067kg/s
50%-6L		6L/min	250kW	0.1kg/s
50%-8L		8L/min	334kW	0.134kg/s

検討ケースを表-5 に示す。グロス建蔽率とミスト噴霧水量を変化させた 12 ケースを検討した。ミストの解析条件については、ミスト設置高さを 3m とし、設置長さは図-1 に示すライン上の 80m に渡り設置した。また、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(噴霧水量 50ml/min) 当たり 2,083W の冷熱量および 0.83g/s の加湿量をノズル前

方に与えた<sup>注5)</sup>。

街区への総噴霧水量 4L/min, 6L/min, 8L/min は、ノズル間隔を 1m, 0.75m, 0.5m としてノズル数を 80 個, 120 個, 160 個と変化させた場合を想定した噴霧水量となる。

## 2. CFD 解析結果によるドライ型ミスト導入効果の評価

### 2.1 CFD 解析結果の妥当性検証

ドライ型ミスト導入効果の評価に先立って、CFD 解析結果の妥当性検証を行った。その一例として、図-2 に 30%-8L ケースにおける解析領域内の流れ方向の風速・乱流エネルギー・気温・絶対湿度の高さ 1.6m における平面分布図および街区中央部断面分布図を示す。まず、乱流エネルギーに着目すると、街区のキャニオン内外における LES と標準  $k-\epsilon$  モデルを比較した文献<sup>24)</sup>が指摘するように、図-2(c) 中に示す建物間(キャニオン内)の乱流エネルギーは比較的小さい値を示しており、標準  $k-\epsilon$  モデルを採用したことが一因として考えられる。一方で、流れ方向の風速および気温の断面分布では街区より風下側領域にて境界層の発達が見られ、また絶対湿度の断面分布においてはミスト発生部より風下側のキャノピー上空の建物高さの 2 倍程度までミストによる影響がみられた。これらの挙動は既往研究にみられる直交規則配列の街区における風洞実験および LES の結果<sup>25)-27)</sup>と概ね同様である。加えて、街区キャニオン内の挙動についても乱流エネルギーを除いて似た分布を示しており、ドライ型ミストの導入効果の評価するうえで妥当性のある解析結果であることを確認した。

### 2.2 ドライ型ミストによる暑熱環境緩和効果の評価

図-3 にドライ型ミストによる環境変化をミストなしのケースと比較して示す。まず、ここでは文献<sup>28)</sup>に記載されているドライ型ミストの冷却対象範囲を参考にミスト近傍 500m<sup>2</sup> 範囲に限定した高さ 1.6m 平面の平均値で示す。なお、ミスト近傍 500m<sup>2</sup> 範囲は図-4 中の 50%-N ケースに破線で示したミスト直下 6m 程度の範囲である。SET\*の算出については、気温・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。解析結果より湿度は上昇するものの、温度、MRTの降下により SET\*の降下が確認でき、 gross 建蔽率の高い街区ほど大きな効果が得られた。また、図-4 に示すミストの効果が発著にみられた gross 建蔽率 50% ケースにおける SET\*平面分布よりミスト近傍において 1~3°C 程度の SET\*降下がみられ、ミスト近傍の暑熱環境緩和が確認できる。

つぎに、ドライ型ミストによる暑熱環境緩和を広範囲に検討するため、ミストを設置した街路部分から離れた距離ごとに高さ 1.6m 平面における気温降下および SET\*降下を算出した。図-5 に算出結果を示す。ドライ型ミストの気化熱によってミスト噴霧エリア近傍においては暑熱環境の緩和効果がみられた。また、広域には熱的快適性向上に有意なレベルとはいえないものの気温降下をもたらしている。

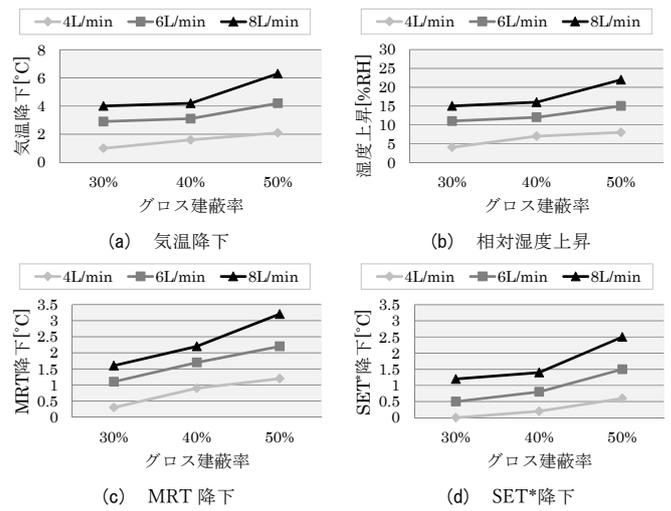


図-3 ドライ型ミストによる環境変化 (500m<sup>2</sup> 範囲)

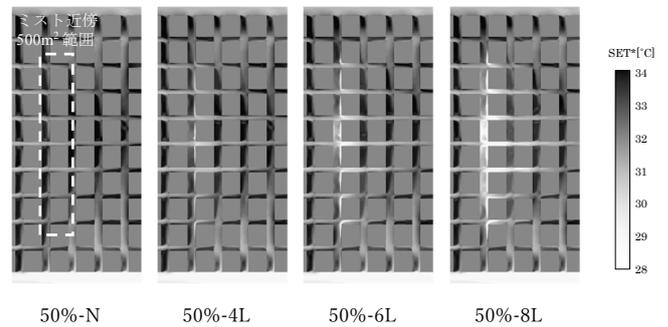


図-4 gross 建蔽率 50%における SET\*分布 (Z=1.6m 平面)

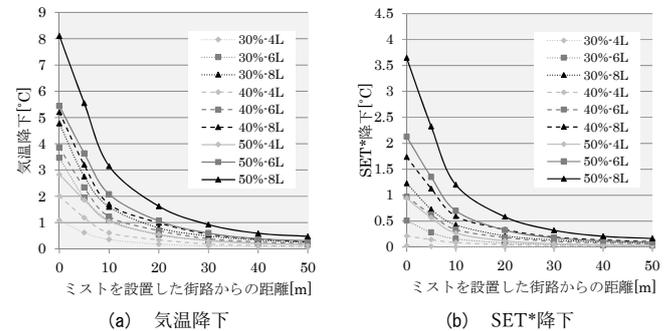


図-5 ドライ型ミストによる冷却範囲

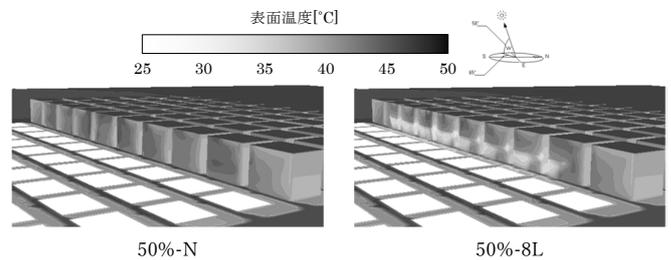


図-6 ドライ型ミスト近傍建物の表面温度分布

## 2.3 街区全域におけるドライ型ミストによる省エネルギー・省 CO<sub>2</sub> 効果の評価

### (1) 空調エネルギー

前述のとおり、ドライ型ミストの気化熱は街区の広い範囲に気温降下をもたらしており、これにより建物の表面温度に

も影響を与えていると考えられる。図-6 にミスト噴霧なしの 50%-N ケースと暑熱環境緩和効果が大きく得られた 50%-8L ケースとのミスト近傍建物における表面温度分布の比較を示す。建物表面温度が低下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 にミストなしケースと比較した場合の街区全体における建物の貫流熱負荷削減量を示す。貫流熱負荷削減量の最も多い 50%-8L ケースでは、3.8kW の削減が得られており街区全建物の床面積当たりの削減量は約 0.2W/m<sup>2</sup> (対象街区全建物延床面積：13,350m<sup>2</sup>) となった。

ドライ型ミストによる温度降下および湿度上昇が建物空調エネルギーに与える影響として、仮想街区全域における建物貫流熱負荷の減少 (図-7)、換気負荷の増減および空調機 (以下、ルームエアコン) の COP 向上が考えられる。そこで、CFD 解析対象街区の建物に定格 COP が 5 となるルームエアコンが設置されていると仮定し、解析条件 (夏期日中晴天時の定常解析) 下におけるドライ型ミストによる街区全体の建物空調エネルギー消費削減量を式(1)により算出する。

$$E_{red, mist} = \sum_{i=1}^n \left( \frac{Q_{k,i} (+Q_{v,i})}{COP \times CF_i} \right) - \sum_{i=1}^n \left( \frac{Q_{k,i}' (+Q_{v,i}')}{COP \times CF_i'} \right) + E_{pump} \quad (1)$$

換気負荷については、ミストによる蒸発現象は等エンタルピー上の変化のためミストによる換気負荷の増減はないものとした。ルームエアコンの COP については、定格 COP に図-8 に示す文献 (29) による外気温別 COP (相対値) を乗じることで、ルームエアコンの外気温による COP 特性を考慮した。なお、外気温は各建物において南側壁面の近傍から取得した。

表-6 にドライ型ミストによる街区全体の建物空調エネルギー消費関連の削減量を示す。ドライ型ミストによる建物空調エネルギーの削減量は外気温特性反映後の COP が大きく影響し、30%-8L の削減量が最も大きくなった。また、総空調エネルギー消費量<sup>注6)</sup>に占める削減の割合としては最も削減割合の大きい 30%-8L ケースにおいても 2.6% と少ないが、ミストにより外気温を冷やし、ルームエアコンの COP が高まることで空調エネルギーが削減されることが確認された。

## (2) 二酸化炭素排出量

ドライ型ミストは 1 流体式ノズル (空気圧縮はせず水圧送のみ) により噴霧されるため、必要なエネルギー等は水圧送

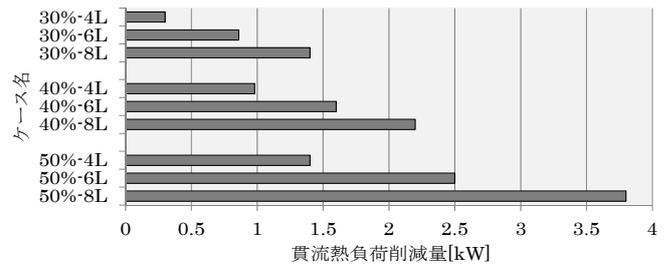


図-7 街区全体における建物貫流熱負荷の削減量

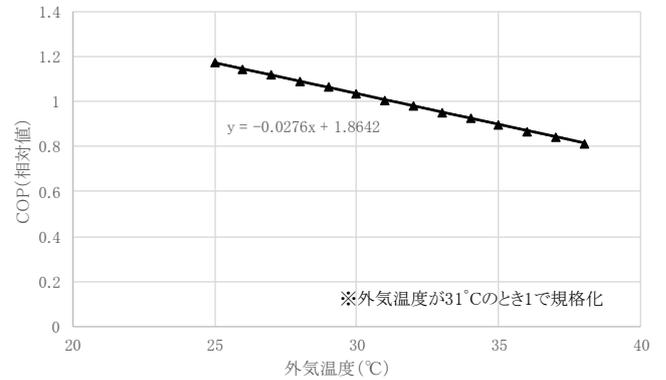


図-8 外気温別 COP

ポンプ駆動のための電力と水道水であり環境負荷の小さい採涼方式といえる。表-6 にドライ型ミストによる消費エネルギー削減量に加え、二酸化炭素削減量ならびにミストの蒸散量に相当する緑化面積を算出して示す。二酸化炭素排出量は、エネルギー使用量と水使用量を考慮して算出した<sup>注7)</sup>。

ドライ型ミストの蒸散量に相当する緑化面積については、クスノキ林と同等の蒸散量の空間を作り出すとされる 7.5cc/(min・m<sup>2</sup>) を用いて算出した<sup>16)</sup>。ドライ型ミストによる消費エネルギーの削減により二酸化炭素排出量の削減が確認できた。

以上のように、ドライ型ミストの気化熱は街区の広範囲に行きわたり、気温と建物の表面温度の降下に寄与している。さらに、気温および建物表面温度の降下は空調機器の運転効率の向上や建物貫流負荷削減をもたらすと考えることができる。このことから、ミストにより制御したい空間に限定することなく、広範囲にわたってシステムの効果を評価することが望ましいと考えられる。

表-6 ドライ型ミストによる空調エネルギー削減量および環境負荷の低減

ケース名	外気温特性反映後 COP (全参照点平均値)	貫流熱負荷削減によるエネルギー消費量の削減量 $\sum \left( \frac{Q_{k,i} (+Q_{v,i})}{COP \times CF_i} \right) - \sum \left( \frac{Q_{k,i}' (+Q_{v,i}')}{COP \times CF_i'} \right)$	ポンプによるエネルギー消費量 $E_{pump}$	ミストによる空調エネルギー削減量 $E_{red, mist}$ (総空調エネルギー消費量に占める削減割合)	CO <sub>2</sub> 削減量	相当緑化面積
30%-4L	4.61	2,446W	750W	1,696W (0.45%)	870g・CO <sub>2</sub> /h	533m <sup>2</sup>
30%-6L	4.67	7,737W	1,125W	6,612W (1.76%)	3,392g・CO <sub>2</sub> /h	800m <sup>2</sup>
30%-8L	4.71	11,349W	1,500W	9,849W (2.62%)	5,053g・CO <sub>2</sub> /h	1,066m <sup>2</sup>
40%-4L	4.65	2,543W	750W	1,793W (0.49%)	920g・CO <sub>2</sub> /h	533m <sup>2</sup>
40%-6L	4.67	4,618W	1,125W	3,493W (0.95%)	1,792g・CO <sub>2</sub> /h	800m <sup>2</sup>
40%-8L	4.69	6,680W	1,500W	5,180W (1.41%)	2,657g・CO <sub>2</sub> /h	1,066m <sup>2</sup>
50%-4L	4.68	3,368W	750W	2,618W (0.72%)	1,343g・CO <sub>2</sub> /h	533m <sup>2</sup>
50%-6L	4.71	6,256W	1,125W	5,131W (1.42%)	2,632g・CO <sub>2</sub> /h	800m <sup>2</sup>
50%-8L	4.74	9,165W	1,500W	7,665W (2.12%)	3,932g・CO <sub>2</sub> /h	1,066m <sup>2</sup>

※ミストなしの場合の外気温特性反映後 COP の平均値は 30%-N ケースで 4.59、40%-N ケースで 4.63、50%-N ケースで 4.65 であった。また、ミストなしの場合の総空調エネルギー消費量は 30%-N ケースで 37.5kW、40%-N ケースで 36.7kW、50%-N ケースで 36.2kW であった。

### 3. ドライ型ミストにおける明示的効果量の定量化

図-9 にミストの全気化熱量を、暑熱環境緩和への寄与分と建物熱負荷の削減への寄与分、そして、それ以外とで分けて示す。ここで、暑熱環境改善への寄与分は居住域（街区内の高さ 0~1.8m 領域）の気温降下に寄与した熱量であり、建物熱負荷の削減への寄与分は建物表面温度の降下に寄与した熱量を示す。これらの熱量は、ドライ型ミストシステムの明示的効果として評価できる。

図-10 に上記の考え方に基づいてドライ型ミストの全気化熱の内訳をケース別に示す。建物密度が高く、噴霧水量が多くなることで、システムの明示的効果に働いた熱量の比率はより多くなっており 50%-8L ケースでその割合が約 3 割となった。しかし、建物密度 30% のケースでは 1 割にも満たないことが分かる。また、暑熱環境改善への寄与分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-11 に示すように噴霧水量が多いほど高温な地面からの上昇気流を抑え、気化熱による下降気流がより強く生じることが要因と考えられる。以上のように、ドライ型ミストの全気化熱に対して、システムの明示的効果に供した気化熱量の割合を示した。この割合はシステム的设计・運用時において可能な限り大きくなることを望ましいといえ、設計・運用時の有用な指標になると考えられる。

一方で、ミストシステムの明示的な効果に結びつかなかった気化熱量の割合は、もっとも大きいケースで 9 割を上回り、ほとんどの気化熱がミストの制御したい空間以外や上空へ拡散された。これは、システムの明示的な効果にだけ着目すれば、望ましい性能とは言いがたい。しかしながら、大気中に水分を放出したことには変わりはなく、緑化や水辺空間に代わる役割を果たしたといえる。

以上のことから、ミストシステムにおいて、投入された全気化熱に対する、明示的効果に働いた熱量の割合は、有用な設計・運用指標となりうる。また、明示的な効果に結びつかなかった気化熱量は、できるだけ少なくなることが望ましいが、緑化や水辺空間に代わる効果をもたらすものとして評価するなど適切に評価されることが望ましい。

### 4. 結論

本研究では、ドライ型ミストシステムの性能評価指標について検討した。検討結果より以下の知見が得られた。

街区規模に導入したドライ型ミストの気化熱による気温降下は対象街区の広範囲に及ぶことが確認できた。また、気化熱による気温降下はミスト近傍エリアを除けば、熱的快適性向上に有意なレベルとはいえないが、対象街区の省エネルギー・省 CO<sub>2</sub> に資するものと考えられる。このことから、ドライ型ミストの明示的な効果を評価する際、対象空間を限定せず、広範囲にわたって評価することが望ましいと考えられる。

ドライ型ミストの全気化熱のうち、暑熱環境改善と建物熱負荷削減に寄与できた気化熱の割合はミストや街区の諸条件に影響を受けて変動することがわかった。この割合はミストシステムの明示的効果に供した気化熱量の割合であり、シ



図-9 ドライ型ミストの気化熱が及ぼす効果

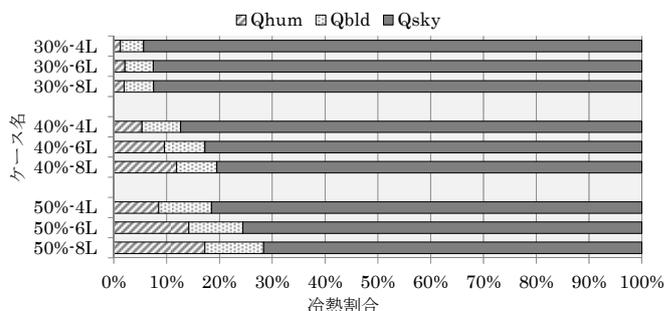


図-10 ドライ型ミストの気化熱が及ぼす効果の割合

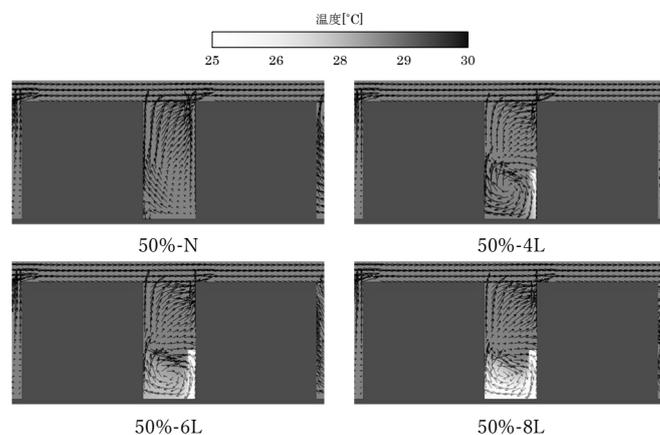


図-11 断面気流ベクトル・温度分布図

ステム的设计・運用時に有用な指標となりうる。また、明示的な効果に結びつかなかった気化熱量は、緑化や水辺空間に代わる効果をもたらすものとして評価されるべきと考えられる。

#### 記号表

n	: 棟数	[棟]
$E_{red, mist}$	: ミストによる街区全体建物空調エネルギー消費削減量	[W]
$Q_{K, i}$	: ミストなしケースにおける建物 <i>i</i> の貫流熱負荷	[W]
$Q_{K, i}'$	: ミストありケースの $Q_{K, i}$	[W]
$Q_{V, i}$	: ミストなしケースにおける建物 <i>i</i> の換気負荷	[W]
COP	: ルームエアコンの定格 COP (=5)	[-]
$CF_i$	: ミストなしケースにおける建物の外気温による COP 特性係数	[-]
$CF_i'$	: ミストありケースの $CF_i$	[-]
$E_{pump}$	: ポンプによるエネルギー消費量	[W]
$Q_{mist}$	: 投入されたミスト気化熱の総量	[W]

$Q_{hum}$  : ミスト気化熱のうち、暑熱環境緩和に寄与した熱量 [W]

$Q_{bid}$  : ミスト気化熱のうち、建物熱負荷削減に寄与した熱量 [W]

$Q_{sky}$  : ミスト気化熱のうち、上空へ拡散された熱量 [W]

### 注 釈

注1) 今回はドライ型ミスト導入効果の評価指標の検討が目的であり、計算負荷を低減させるため定常解析を行った。本来は日周期を考慮したシミュレーションを行うことが望ましく、人工排熱を考慮した検討についても今後の課題である。

注2) CFDにより屋外温熱環境を解析した例として文献30)~32)では、標準k-εモデルを用いて検討がなされており、今回の検討においても標準k-εモデルを採用した。本研究では計算負荷の制約上、RANSモデルを用いたが、より高精度な予測のためにLES (Large Eddy Simulation) による検討も今後行う必要があるといえる<sup>24)33)</sup>。なお、浮力の影響が強く現れることが多く、非等方性の強い夏期の屋外温熱環境場をRANSモデルにより解く場合、標準k-εモデルは等方的な渦粘性近似に基づくため、乱流熱フラックスおよび乱流水蒸気フラックスの評価への浮力効果の組み込みを施した改良モデル<sup>34)</sup>を用いることが望ましい。

注3) 太陽位置は8月1日14:00(太陽高度:58度, 方位:68度), 地理情報をも古屋とし、ASHRAE2009による日射量計算の式を用いて算出した。直達日射に加え、天空日射についてもBerlageの式より算出し考慮している。

注4) 仮想天空温度の算出は次式を用いた<sup>35)</sup>。空気状態は表3に示す流入空気の温湿度とした。

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

$T_a$ : 大気温度 (303.15[K]),  $f_a$ : 水蒸気圧 (1.7[kPa])

注5) ミストの噴霧水量やミスト粒径(ザウター平均粒径24.5μmを想定)、ノズルの設置位置、制御により空気中ですべてのミストが蒸発するように設計・運用されることを想定している。なお、既往文献21), 42)において連続相と分散相(ミスト)の混相流を考慮した数値解析によりミストの蒸発と気化熱の拡散を再現している。これらの解析結果を参考にし、ノズル前方にミストの気化熱を模擬した冷熱量と加湿量を与えることで解析の簡易化を図った。

注6) 空調エネルギー消費量算出の計算条件について、CFD解析(夏期日中晴天時を想定した定常解析)結果より貫流熱負荷を算出し、その他熱負荷計算条件は文献5)を参考に付表-1に示すとおりとした。CFD解析に用いた建物モデルは全館空調すると仮定した。なお、窓面は考慮せず透過日射熱取得は貫流熱負荷に含めて評価した。

注7) 二酸化炭素排出量の算出については、エネルギー消費量および水消費量に二酸化炭素排出係数を乗じた。なお、二酸化炭素排出係数は環境省が公表する電気事業者別二酸化炭素排出係数一覧<sup>37)</sup>を参考に、電力については中部電力の二酸化炭素排出係数0.513kg-CO<sub>2</sub>/kWh、水道水については0.36kg-CO<sub>2</sub>/m<sup>3</sup>を用いて算出した。

付表-1 熱負荷計算条件

建物概要	2階建て戸建て住宅 (延床面積133.5m <sup>2</sup> , 階高2.4m)
設定温湿度	26°C, 50%RH
外気導入量	0.5回/h, 160.2m <sup>3</sup> /h (外気温湿度はCFD解析結果より与えた。)
照明発熱	20W/m <sup>2</sup>
機器発熱	20W/m <sup>2</sup>
人体発熱	117W/人 (1棟当たり4人)

### 参 考 文 献

- 気象庁: ヒートアイランド監視報告(平成25年), 2014.7
- 環境省: 平成21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, 2010.3
- 原田雅教, 倉淵隆, 辻本誠, 李時恒, 織田貴之: ドライミストによる都市の温熱環境の改善効果とCFDによる予測に関する研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 831-832, 2014.9
- 深堀賢久: 霧発生システム, 産業機械, 32-35, 1993.7
- 空気調和・衛生工学会: 第14版空気調和・衛生工学便覧 3. 空気調和設備編, 2010.2

- 東京都環境局: 平成27年度 東京都暑熱対応設備整備費補助金交付要綱, 2015.5
- 林啓紀, 児玉奈緒子, 辻本誠, 奥宮正哉, 原田昌幸, 一瀬茂弘, 奥山博康, 進藤義一: ドライミスト散布によるヒートアイランド抑制システムの開発(その1) ミスト散布条件, 気象条件と気温降下の関係, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 805-806, 2004.7
- 金田匡彦, 鳴海大典, 下田吉之, 水野稔: 都市街路空間内でのミスト噴霧による熱環境改善効果に関する実証実験, 空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集, 2049-2052, 2007.8
- 三坂育正, 安藤郁明, 野崎尚子: 微細ミストによる暑熱環境緩和に関する研究(第1報) ミストの最適噴霧量に関する検討, 空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集, 1083-1086, 2010.9
- 三坂育正, 黒木友裕, 野崎尚子, 瀬川淳, 井田寛, 阿久津太一: 微細ミストによる暑熱環境緩和に関する研究(第2報) 半屋外の実空間への適用と効果評価, 空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集, 1063-1066, 2011.9
- 児玉奈緒子, 林啓紀, 辻本誠, 奥宮正哉, 原田昌幸, 加藤伯彦, 奥山博康, 進藤義一: ドライミスト散布によるヒートアイランド抑制システムの開発(その2) 一卵性双生児による温熱快適性の検討, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 807-808, 2004.7
- 児玉奈緒子, 林啓紀, 辻本誠, 奥宮正哉, 原田昌幸, 加藤伯彦, 奥山博康, 進藤義一: ドライミスト散布によるヒートアイランド抑制システムの開発(その4) 半屋外空間における温熱快適性の検討, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 631-632, 2005.7
- 児玉奈緒子, 林啓紀, 辻本誠, 奥宮正哉, 原田昌幸, 佐藤治朗, 山田英貴: ドライミスト散布によるヒートアイランド抑制システムの開発(その5) 万博ビブリオンにおける温熱快適性に関するアンケート調査, 日本建築学会東海支部研究報告集, No.44, 429-432, 2006.2
- 鳴海大典, 繁松健太郎, 下田吉之: ミスト散布技術によるエネルギー消費削減ならびにヒートアイランド緩和効果に関する研究, 第32回人間-生活環境系シンポジウム, 23-26, 2008.11
- 一般社団法人日本建築学会: ヒートアイランドと建築・都市-対策のビジョンと課題, 丸善, 2007.10
- 辻本誠, 大手山亮: ドライミスト技術とその応用, 建築設備 & 昇降機, No.66, 30-35, 2007.3
- Wang, J., Tu, X.: Experimental Study and Numerical Simulation on Evaporative Cooling of Fine Water Mist in Outdoor Environment, International Conference on Energy and Environment Technology, Vol.1, 156-159, 2009.10
- Wang, J., Tu, X., Wang, Z., Huang, J.: Application and Numerical Simulation on Water Mist Cooling for Urban Environment Regulation, Life System Modeling and Intelligent Computing Lecture Notes in Computer Science, Vol.6330, Part.3, 469-480, 2010.9
- 尹奎英, 山田英貴, 奥宮正哉, 辻本誠: ドライミスト冷却効果の検証とCFD解析 ドライミストを用いる採涼システムに関する研究, 日本建築学会環境系論文集, Vol.73, No.633, 1313-1320, 2008.11
- 大手山亮, 辻本誠, 石井智洋: ドライミスト装置の開発と環境勘定, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 559-560, 2007.7
- 渡邊裕美子, 倉淵隆, 辻本誠, 李時恒, 上岡弘明: 街区におけるドライミストの冷却効果とその予測法に関する研究 その1 実測・アンケート調査による熱環境改善効果の検証, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 613-614, 2015.9
- 宇田川光弘: 標準問題の提案 住宅用標準問題, 日本建築学会環境工学委員会熱分科会 第15回熱シンポジウム, 23-33, 1985.9
- 一般社団法人日本建築学会: 建築物荷重指針・同解説(2015), 日本建築学会, 2015.2
- 中島慶徳, 大岡龍三, 菊本英紀: 様々な温度成層条件下の都市キャニオン内におけるLESと標準k-εモデルの比較, 生産研究, Vol.68, No.1, 35-41, 2016.1
- 栗田剛, 大場正昭: 一様建物高さ分布で直交配列された街区におけるグロス建蔽率が熱輸送と運動量輸送に及ぼす影響について 暑熱化都市キャニオン層の熱輸送特性に関する実験的研究(その1), 日本建築学会環境系論文集, Vol.75, No.652, 509-515, 2010.6
- 池谷直樹, 萩島理, 谷本潤: 立方体粗度群床面-大気間のスカラー輸送現象に関するLARGE-EDDY SIMULATION, 日本建築学会環境系論文集, Vol.76, No.668, 913-951, 2011.10
- Kanda, M., Moriizumi, T.: Momentum and heat transfer over urban-like surfaces, Boundary-Layer Meteorology, Vol.131, 385-401, 2009.4
- なごミスト設計有限公司: なごミスト設計有限公司社パンフレット, <http://nagomist.co.jp/pdf/NagomistPR.pdf>, 2014.4

- 29)株式会社三菱総合研究所 環境・エネルギー研究本部：平成24年度エネルギー消費状況調査（民生部門エネルギー消費実態調査）報告書，2013.3
- 30)土屋貴史，大岡龍三，陳宏，黄弘：数値シミュレーションを用いた実在街区における各種ヒートアイランド対策が屋外温熱環境に与える影響の把握，日本建築学会環境系論文集，Vol.73，No.630，1021-1027，2008.8
- 31)加藤隆矢，飯塚悟：鉛直方向の風の道が導入領域およびその風下領域の温熱環境・風環境に及ぼす影響評価 鉛直方向の風の道を活用する街区形態のシミュレーション検討（その1），日本建築学会環境系論文集，Vol.78，No.689，569-577，2013.7
- 32)橋本一輝，飯塚悟，玄英麗：鉛直方向の風の道が導入領域およびその風下領域の温熱環境・風環境に及ぼす影響評価 鉛直方向の風の道を活用する街区形態のシミュレーション検討（その2），日本建築学会環境系論文集，Vol.80，No.711，415-424，2015.5
- 33)中島慶悟，大岡龍三，菊本英紀：LESデータベースを用いた都市キャニオン内外におけるレイノルズストレスの勾配拡散近似に関する検討，日本建築学会環境系論文集，Vol.80，No.717，1083-1093，2015.11
- 34)野口康仁，村上周三，持田灯，富永禎秀：都市の温熱環境の数値シミュレーション（その3）k-εモデルの乱流熱フラックスの評価への浮力効果の組み込み，日本建築学会学術講演梗概集，65-66，1994.735)村上周三：CFDによる建築・都市の環境設計工学，東京大学出版会，2000.9
- 36)H. Yamada, G. Yoon, M. Okumiya, H. Okuyama: STUDY OF COOLING SYSTEM WITH WATER MIST SPRAYERS - FUNDAMENTAL EXAMINATION OF PARTICLE SIZE DISTRIBUTION AND COOLING EFFECTS, International Journal of Building simulation, 1(3), pp.214-222, 2008.9
- 37)環境省：電気事業者別二酸化炭素排出係数一覧-2013年度実績-，2014.12  
(平成29.2.10 原稿受付)

## Proposal of Performance Evaluation Indicator for Evaporation Cooling System

by Gyuyoung YOON<sup>\*1</sup>, Masanori HARADA<sup>\*2</sup>

**Key Words:** Simulation, Dry-mist, Design & Operation Indicator, Mitigation of hot-environment, Energy-saving

**Synopsis :** In this research, we focused on dry mist, which is an evaporative cooling system, and examined how to evaluate the effect of the system. The system effect seen in past research focused on the amount of change that the vaporization heat of mist brings to these effects, mainly because of factors such as improvement of thermal environment, energy saving, and influence on the behavior of passersby. In this study, we considered the concept of evaluation the system effect based on the total amount of heat of vaporization obtained from the released mist, while following the evaluation indexes shown in the previous research. We modeled the dry mist

system introduced in the virtual block by using computational fluid dynamics and quantified it for each contributor of the effect on the total amount of vaporization heat of the released mist into the virtual block. The vaporization heat which contributed to the mitigation of hot weather environment and reduction of air conditioning heat load is suitable for the explicit installation effect of dry mist. In addition, the ratio of vaporization heat to the total amount is a useful index for determining system performance on the design and operation phases of this system.

(Received February 10, 2017)

<sup>\*1</sup> Graduate School of Design and Architecture, Nagoya City University, Member

<sup>\*2</sup> MHS Planners, Architects & Engineers Ltd.