

建築・設備から見たヒートアイランド対策技術とその評価

大黒 雅之^{*1}・森川 泰成^{*2}・梅田 和彦^{*1}・屋根下 亮^{*1}・深尾 仁^{*1}

Keywords : heat island, CFD analysis, coupled CFD, thermal environment, roof planting, water retain pavement

ヒートアイランド, CFD解析, 連成解析, 熱環境, 屋上緑化, 保水性舗装

1. はじめに

都市冷却の観点からは、個別の開発計画において、周辺の森や河川の持つ有益な効果を屋外環境計画に積極的に取り入れながら、緑化や保水性材料の利用等の対策を効果的に施すことが重要と考えられる。本報告では、「屋外温熱環境シミュレータを用いた設計支援技術研究会（代表：村上周三教授）」で実施した緑化や保水性材料の効果についての具体的な解析事例を紹介する。

2. 屋上緑化および保水性舗装の効果に関する数値解析

2.1 検討対象領域

対象計画地（以下、計画地とする）は図-1 に示す通り、2つの河川に挟まれた島状の地区にあり、住宅団地が計画されている。計算にあたり、建物の再現範囲は敷地を中心とした1.2km四方とした。図-2 に計画地の建物再現状況を示す。図に示すように計画地中央には、東西に風が吹き抜けるよう「風の道」が計画されている。

2.2 解析領域

図-3 に解析領域を示す。図に示すように水平方向は検討対象領域（1.2km×1.2km）を含む2.2km×2.2kmとしている。総格子数は約240万である。

2.3 計算手法および境界条件

乱流モデルは標準 k-ε モデルを使用した。また、街区の複雑形状に対応するため、非構造格子を利用することにより、建物近傍での予測精度の向上を図った。主な境界条件を表-1 に示す。



図-1 検討対象領域
Targeted Area



図-2 計画地の再現状況
Model for CFD Analyses

*1 技術センター建築技術研究所環境研究室
*2 技術センター建築技術開発部ニューフロンティア技術開発室

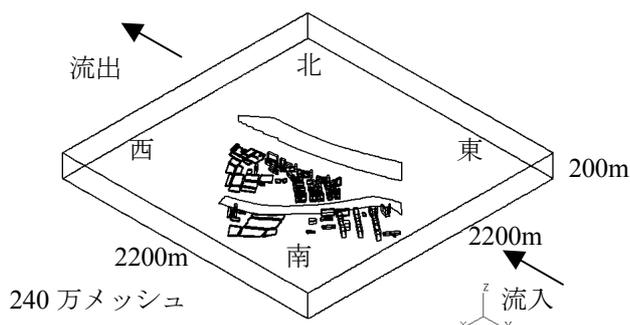


図-3 解析領域
Boundary of Analyses

表-1 境界条件
Boundary Conditions

流入面	$u_1/u_d=(x_3/x_d)^\alpha, k=(I \cdot u_1)^2, I=0.1(x_3/x_d)^{(-\alpha-0.05)}$ $\varepsilon=k \alpha C_\mu^{1/2} (u_d/x_d)(x_3/x_d)^{(\alpha-1)}$, 温度固定 x_3 : 高さ, x_d : 観測高さ, x_g : 上空風高度, u_d : 高さ x_d での接近流速, $\alpha=0.25, C_\mu=0.09$
流出面	諸量の法線方向の勾配ゼロ
上空面	対称境界条件
側面	対称境界条件
地表面	風速 (一般化対数則), 温度 (固定: $\alpha=11.6W/m^2$)
建物表面	風速 (一般化対数則), 温度 (固定: $\alpha=11.6W/m^2$)
メッシュ分割数: 240万, 移流項差分: 一次風上	

2.4 解析ケースと気象条件

解析は、夏期（7月 23 日）快晴日の 14 時を対象として、屋上緑化および保水性舗装の有無に関して行った。表-2 に計算ケースと表-3 に気象条件を示す。case1 と case2 は夏期日中で平均的な風向・風速を想定している。一方、case3~case5 は同じ夏期日中であるが、比較的風の弱い日を想定した。屋上緑化の範囲はすべての住棟の屋上全面とした。また、保水性舗装の範囲は「風の道」と住棟周辺の通路前面とした。

表-2 計算ケース
Calculation Cases

検討内容	ケース	対象日時	風速	屋上緑化	保水性舗装
屋上緑化と保水性材料の効果検討 (平均風速想定)	case1	夏期14時	平均風速 想定	×	×
	case2			○	○
屋上緑化と保水性材料の効果検討 (弱風想定)	case3		弱風想定	×	×
	case4			○	○
	case5			○	×

表-3 気象条件
Climate Conditions

	(case 1~case2)	(case 3~case5)
流入風条件	風向: S E 風速: 5.95m/s (高さ54m) 温度: 31.8℃	風向: S E 風速: 3.5m/s (高さ54m) 温度: 31.8℃
表面温度条件	水面温度: 28.8℃ アスファルト: 日向58.8℃、日影34.1℃ 草地: 日向41.2℃、日影30.3℃ 保水性舗装・屋上緑化: 草地と同じ	

2.5 日射解析および地表面温度の設定

図-4 に日射の解析結果を示す。太陽高度が高いため、日向が大部分を占めていることが解る。地表面温度は別途一次元解析を実施して定めた。また、水面温度は観測値を参考にして与えた。

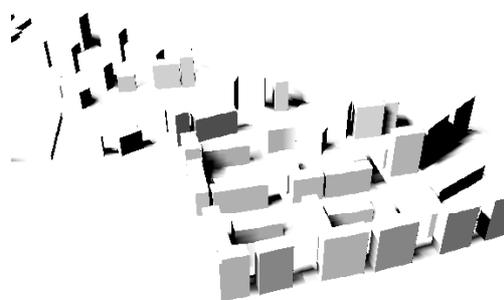


図-4 日射解析結果 (南からの鳥瞰)
Results of Solar Radiation

2.6 夏期平均風速時の計算結果

2.6.1 屋上緑化及び保水性舗装が無い場合

図-5 に屋上緑化及び保水性舗装が無い場合(case1)の高さ 2m における全検討対象領域の気流分布を示す。南東からの流入風が計画地の風上にある高層建物群の影響を受けており、計画地はこの高層建物群の後流域にある。このため、計画地の風速は 1~2m/s 程度にまで低下している。また、高層建物群と計画地の間の河川 A を含むオープンスペースは流入風と反対方向の流れとなるなど複雑な流れ場となっている。一方、高層建物群で左右に分離された流れ場は 4~5m/s とかなり早い風速を保っている。図-6 に高さ 2m における計画地の気温分布を示す。計画地の半分程度が 33℃以上となり、建物近傍で風通しの悪い部分では 34℃を超える領域が若干見られる。

2.6.2 屋上緑化及び保水性舗装を行った場合

図-7 に屋上緑化及び保水性舗装を行った場合(case2)の高さ 2m における気温分布を示す。保水性舗

装を行った「風の道」の周辺で気温の低下が見られ、33℃以上の領域が減少している。また、「風の道」の南側のブロックでは、34℃を超える領域が大幅に減少しており、屋上緑化および保水性舗装の効果がみられる。

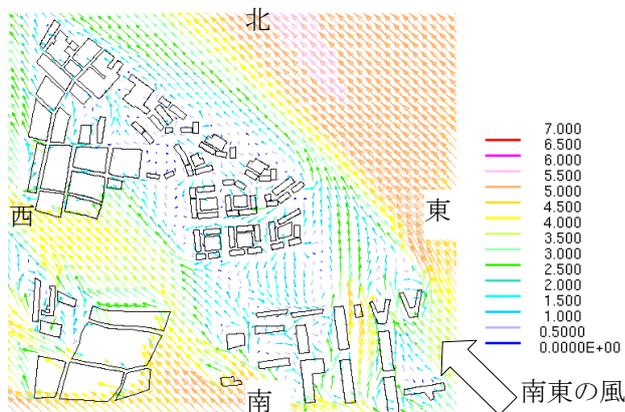


図-5 気流計算の結果 (case1, 全体, 地上 2m)
Results of Air Flow at 2m above the Ground

2.6.3 気温低減効果の定量化

屋上緑化および保水性舗装の効果を明確に示すため、

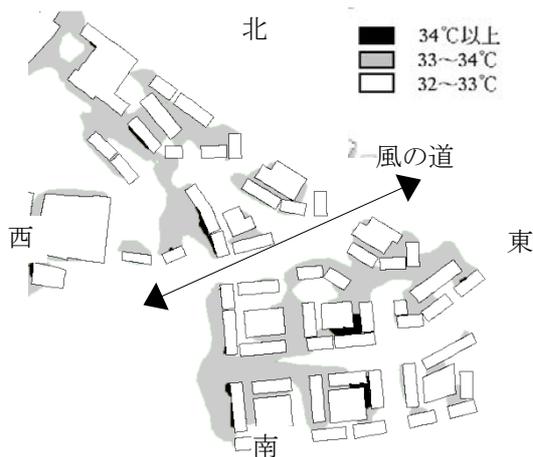


図-6 case1 の気温分布 (地上 2m)
Air Temperature Distribution for Case 1 at 2m

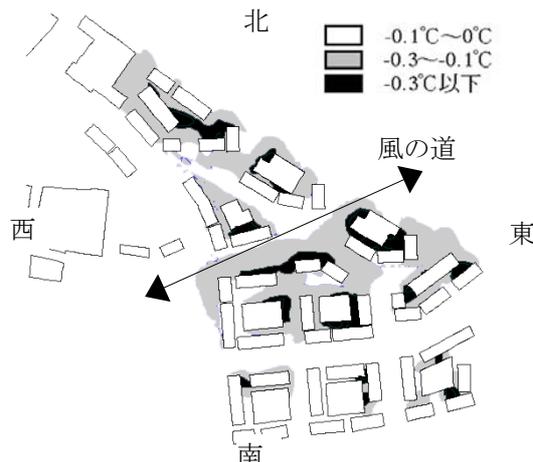


図-8 気温差 (地上 2m, case2-case1)
Air Temperature Difference (at 2m, case2-case1)

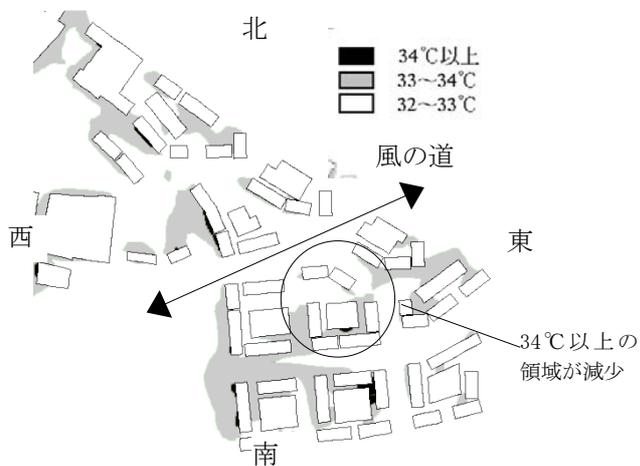


図-7 case2 の気温分布 (地上 2m)
Air Temperature Distribution for Case 2 at 2m

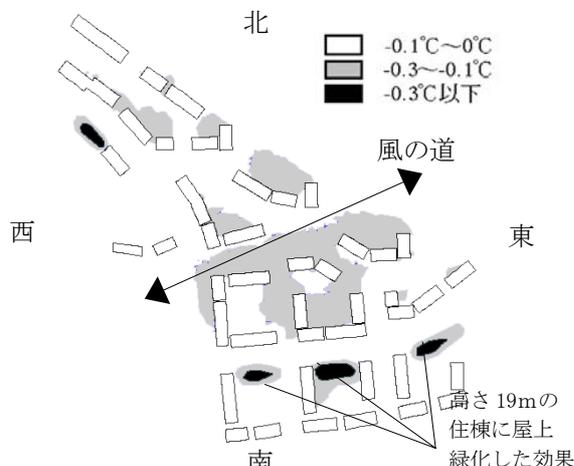


図-9 気温差 (地上 20m, case2-case1)
Air Temperature Difference (at 20m, case2-case1)

case1 を基準とした気温差 (case2-case1) を算出した。図-8~図-9 に高さ 2m と 20m における気温差を示す。高さ 2m では、屋上緑化と保水性舗装により、「風の道」を中心として計画地の半分近い領域で、0.1℃以上の温度低下がみられ、一部の建物近傍では 0.3℃以上の効果が見られる。また、図には示されていないが、最大では 0.7℃程度の温度の低下がみられた。高さ 20m においても広い範囲で効果がみられる。また、高さ 19m の建物の屋上緑化の効果が顕著に現れている。

さらに、3 次元的な効果を確認するため、鉛直断面での気温差 (case2-case1) を算出した。図-10~図-12 に 3 つの代表断面における気温差を示す。隣接する住棟の間のキャニオン空間のかなりの範囲で、気温が 0.1~0.3℃低下している。屋上緑化や保水性舗装が地表面付近だけでなくキャニオン空間全体の温度を低下させることが解る。但し、0.3℃以上の効果が得られるのは地上付近と屋上の極近傍に限られている。

2.7 夏期弱風時の解析結果

2.7.1 屋上緑化及び保水性舗装の総合効果

弱風時の鉛直断面での気温差 (case4-case3) を図-13～図-15 に示す。弱風時は隣接する住棟の間の空間の大半で、気温が 0.1℃以上低下していることが解る。また、平均風速時と比較して 0.1℃以上の効果が得られる範囲が広がっている。

2.7.2 屋上緑化単独の効果

屋上緑化単独の効果を明確に示すため、屋上緑化も保水性舗装もしていない case3 と屋上緑化のみを施した case5 の気温差 (case5-case3) 算出した。鉛直断面での気温差を図-16～図-18 に示す。0.1℃以上の効果が得られる範囲は屋上近傍に限られるが、図-18 の断面に示すように建物後方にウェイクが発達するような場合には、0.1℃を超える範囲が隣接する住棟まで達していることが解る。

2.7.3 保水性舗装単独の効果

保水性舗装のみを行った場の効果を推定するため、屋上緑化と保水性舗装の両方を行った case4 と、屋上緑化のみを行った case5 の気温差 (case4-case5) を算出した。鉛直断面における気温差 (case4-case5) を図-19～図-21 に示す。屋上緑化と保水性舗装の両方を施した case4 の場合 (図-13～図-15) と比較すると、0.1℃を超える効果の範囲は非常に小さくなっている。これらの傾向は、屋上緑化の効果は比較的小さいがキャニオン空間の温度に広く影響していること、また、保水性舗装の効果は非常に大きい、顕著にその効果が生ずる部分は地上付近にほぼ限られることを示している。

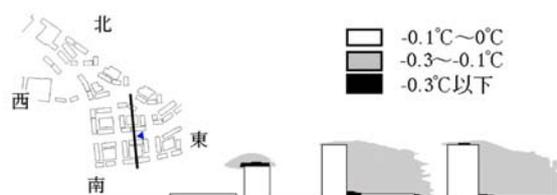


図-10 鉛直断面の気温差 (縦断面-1, case2-case1)
Air Temperature Difference under Average Wind
(Vertical Section 1, case2-case1)

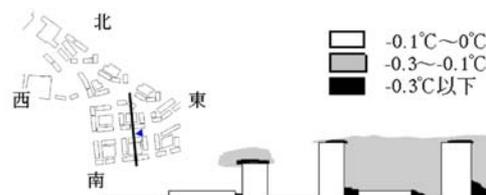


図-13 弱風時の気温差 (縦断面-1, case4-case3)
Air Temperature Difference under Weak Wind
(Vertical Section 1, case4-case3)

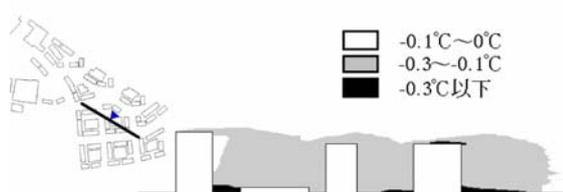


図-11 鉛直断面の気温差 (縦断面-2, case2-case1)
Air Temperature Difference under Average Wind
(Vertical Section 2, case2-case1)

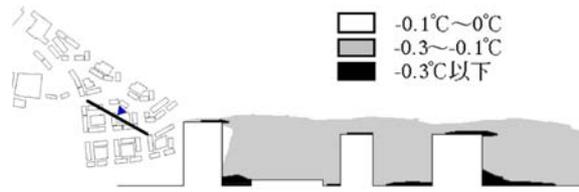


図-14 弱風時の気温差 (縦断面-2, case4-case3)
Air Temperature Difference under Weak Wind
(Vertical Section 2, case4-case3)

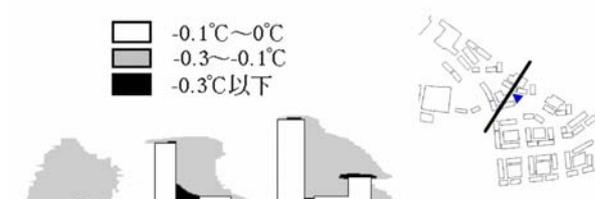


図-12 鉛直断面の気温差 (縦断面-3, case2-case1)
Air Temperature Difference under Average Wind
(Vertical Section 3, case2-case1)



図-15 弱風時の気温差 (縦断面-3, case4-case3)
Air Temperature Difference under Weak Wind
(Vertical Section 3, case4-case3)

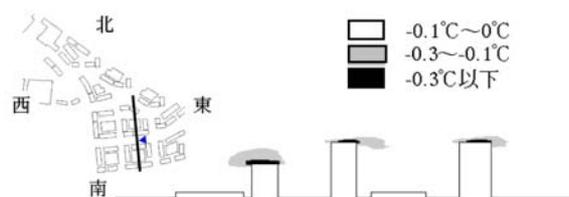


図-16 屋上緑化の効果 (縦断面-1, case5-case3)
Effects of Roof Planting under Weak Wind
(Vertical Section 1, case5-case3)

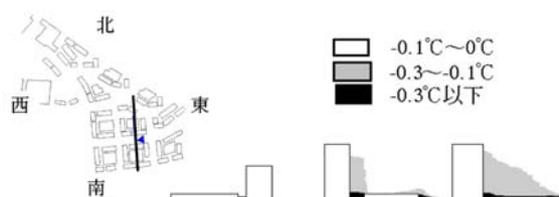


図-19 保水性舗装の効果 (縦断面-1, case4-case5)
Effects of Water Retain Pavement under Weak Wind
(Vertical Section 1, case4-case5)

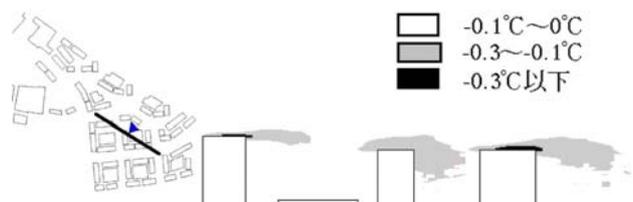


図-17 屋上緑化の効果 (縦断面-2, case5-case3)
Effects of Roof Planting under Weak Wind
(Vertical Section 2, case5-case3)

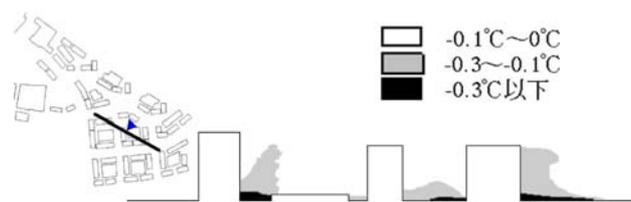


図-20 保水性舗装の効果 (縦断面-2, case4-case5)
Effects of Water Retain Pavement under Weak Wind
(Vertical Section 2, case4-case5)

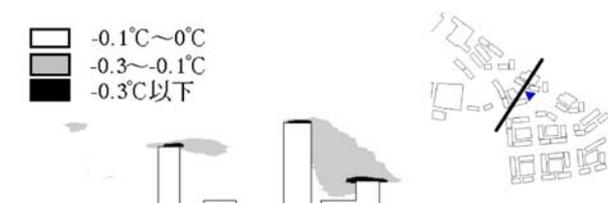


図-18 屋上緑化の効果 (縦断面-3, case5-case3)
Effects of Roof Planting under Weak Wind
(Vertical Section 3, case5-case3)

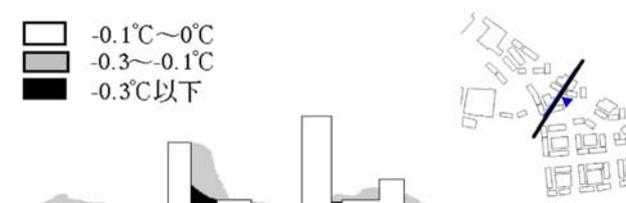


図-21 保水性舗装の効果 (縦断面-3, case4-case5)
Effects of Water Retain Pavement under Weak Wind
(Vertical Section 3, case4-case5)

3. 壁面緑化と高反射舗装に関する数値解析例

3.1 連成解析

図-22 に示すように計画地中央の1ブロックを放射・対流・湿気連成解析の計算対象とした。2.2km 四方の流れ場解析結果を固定条件として用い、地表面・壁面・屋根面の熱収支解析を行った。日射および長波の解析にはラジオシティ法⁴⁾を用いた。また、対流熱伝達率はユルゲスの式を用い、物質伝達率はルイスの関係を仮定した。

3.2 気象条件および解析ケース

解析は、7月23日夏期14時の快晴時を対象として行った。気流解析の流入条件は南東の風 5.95m/s (高さ54m)、1/4 乗則とした。連成解析における周辺の気温は 31.8°C、絶対湿度を 17.7g/kg (相対湿度約 60%) とした。表-4 に解析ケースを示す。case1 は比較基準とするケースである。

case2 は屋根と壁面を高反射塗装 (短波反射率 0.7) と

して、温熱環境の改善を試みたものである。また、case3

は舗装面を高反射塗装 (短波反射率 0.7) としている。また、case4 は他の手法との比較検討のため壁面を緑化したケースである。表 5 に材質毎の熱特性条件を示す。建物はコンクリート、道路はアスファルト、建物周囲の緑地部分は芝を想定した。

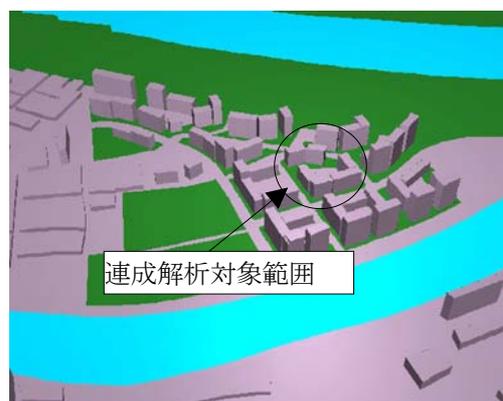


図-22 連成解析対象範囲 (南側からの鳥瞰)
Area for Coupled CFD analyses

表-4 計算ケース
Calculation Cases

ケース	対策	主な変更
case1	無し (比較基準)	-
case2	高反射塗装 (屋上・壁)	屋上・壁の短波反射率0.7
case3	高反射塗装 (舗装面)	舗装面の短波反射率0.7
case4	壁面緑化 (壁)	壁の蒸発効率0.3

表-5 熱物性値等
Thermal Properties

	単位	コンクリート	アスファルト	芝	壁面緑化
短波反射率	-	基準ケース0.3 高反射塗装0.7	基準ケース0.2 高反射塗装0.7	0.2	0.2
長波放射率	-	0.9	0.9	0.95	0.95
蒸発効率	-	0	0	0.3	0.3
貫流率	W/m ² K	4.3	2.0	3.0	3.3
内部温度	℃	26	26	26	26
備考		コンクリート0.2m +空気層	アスファルト0.1m +砂利0.1m +±0.3m	±0.5m	±0.1m +コンクリート0.2m +空気層

3.3 解析結果

3.3.1 基準ケースの解析結果

図-23 に標準ケースとしての case1 の高さ 1.5m における気温の計算結果を示す。気温は日陰の低いところで 30~33℃であり、中庭立体駐車場の東側、西側住棟の南西部分等、南西からの日射が当たり、かつ南東からの風が通り難い部分で 36℃以上となっている。図は省略するが表面温度は日向では緑地部分が 40~50℃、その他のアスファルト部分は 50℃以上となっている。

3.3.2 高反射塗装 (壁面・屋根面) の効果

図-24 に case2 の結果を case1 を基準とした差として示す。図-24 では、中庭の東側とその北側にかけての部分で 0.4℃以上の気温の低下が見られる。

3.3.3 高反射塗装 (舗装面) の効果

case3 の解析結果を図-25 に示す。基準ケース (case1) との差で示す。気温は、中庭の東側や対象ブロックの西側住棟の西で最大 2℃以上の低下が見られる。

3.3.4 壁面緑化の効果

case4 の解析結果を図-26 に示す。気温については、中庭の西側や西側住棟の西では最大 0.6℃以上の気温の緩和が見られるが、case3 のアスファルト面の高反射塗装と比べると効果は小さい。しかし、case2 (壁面・屋根面の高反射塗装) に比べると気温の低下はやや大きい。また、この気温の低下は壁面の蒸発効果により壁面温度が低下することに起因するため、case3 とは異なり、主に住棟の周辺が改善される傾向にある。

図-27 に case1 の絶対湿度の分布を示す。case1 (図-27) の結果をみると、住棟周りが緑地となっているため、ここから湿気が発生しており、周辺の道路部分より住棟周辺の湿度が若干高くなっている。図-28 に case4 の

case1 に対する絶対湿度の変化を示す。壁面緑化を行っているため case4 では、壁面からの湿度発生が加わり、全体の絶対湿度が上昇している。

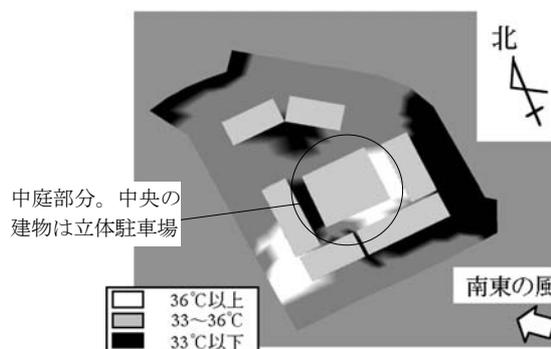


図-23 気温分布 (case1, 地上 1.5m)
Air Temperature Distribution for Case 1 at 1.5m

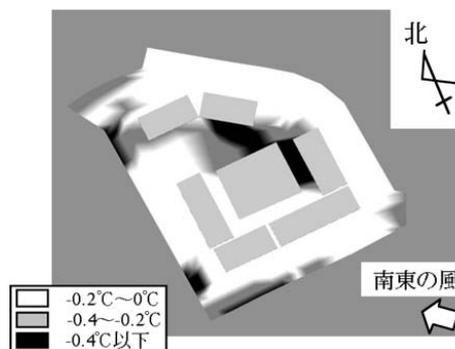


図-24 気温の差 (case2-case1, 地上 1.5m)
Air Temperature Difference (case2-case1, at 1.5m)

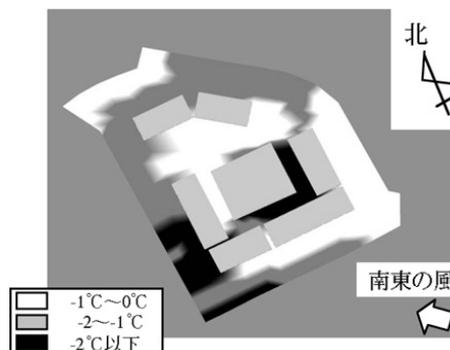


図-25 気温の差 (case3-case1, 地上 1.5m)
Air Temperature Difference (case3-case1, at 1.5m)

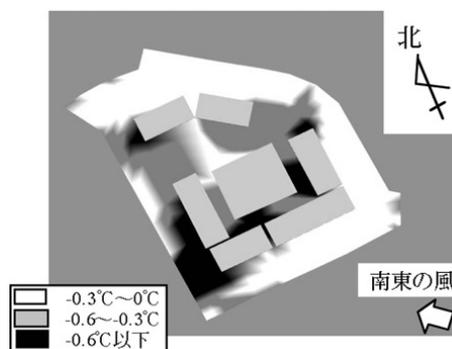


図-26 気温の差 (case4-case1, 地上 1.5m)
Air Temperature Difference (case4-case1, at 1.5m)

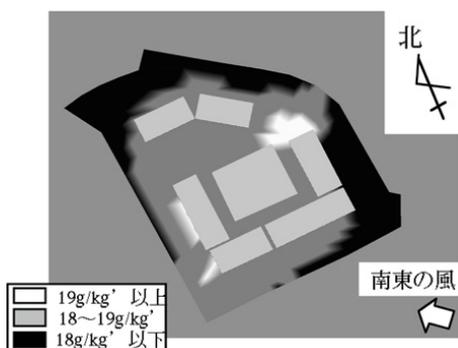


図-27 基準ケースの絶対湿度分布 (case1, 地上 1.5m)
Absolute Humidity Distribution (case1, at 1.5m)

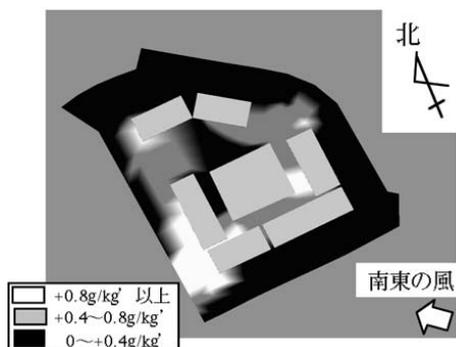


図-28 絶対湿度の変化 (case4-case1, 地上 1.5m)
Absolute Humidity Difference (case4-case1, at 1.5m)

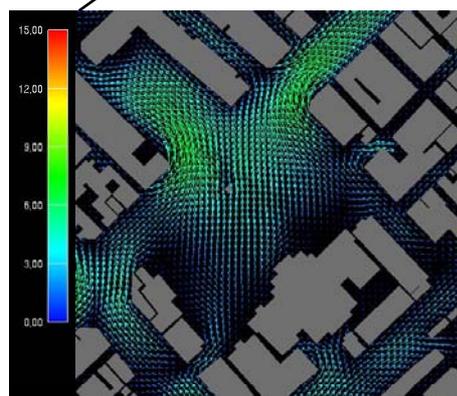
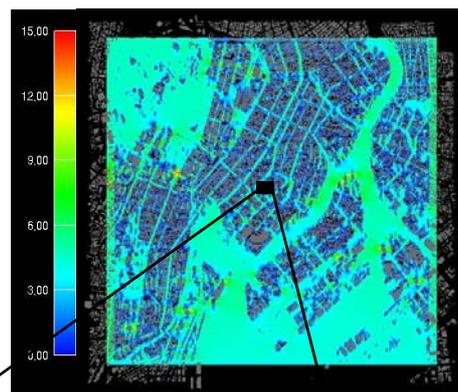


図-29 大規模 CFD 解析例 (5km×5km)
Example of Large Scale CFD Analyses

4. まとめ

建築・設備から見たヒートアイランド対策技術とその評価という観点から、建築計画におけるヒートアイランド対策の効果を数値解析により検討した例を示した。

最後に最新の解析例として、築地を中心とする 5km×5km の範囲の風環境を解析した例を図-29 に示す。1250×1250×64=約 1 億メッシュである。風だけであればこの規模の解析が可能となっている。また、放射連成でも 1km×1km といった大規模な解析が可能となってきた。今後は、大規模な対策の効果の効果等についての解析を行うと同時に、建物内部との熱の授受も含めてより詳細で精緻な解析モデルを構築していきたい。

参考文献

- 1) 大黒, 村上他: CFD による川風の熱空気環境改善効果の解析 その 1, その 2, 日本建築学会大会学術講演会, 2002
- 2) 大黒, 村上他: CFD 河川岸に建つ住宅団地の屋外温熱環境に関する屋上緑化および保水性舗装の効果に関する数値解析 その 1, その 2, 空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集, 2002
- 3) 大黒, 村上他: VFD を利用した屋外温熱空気環境設計手法に関する研究, 日本建築学会技術報告集, 第 16 号, 2002 年 12 月
- 4) 浦野, 森川他: 都市温熱環境の予測技術の開発 (その 2) 放射環境シミュレーション, 大成建設技術研究所報第 26 号, pp, 339-342, 1993