

数値解析に基づく街路樹がストリートキャニオン内の熱空気環境に及ぼす影響の検討

佐々木 澄
(技術研究所)

Numerical Analyses of the Influence of Roadside Trees on Thermal Environments and Air Quality Within Street Canyon

by Kiyoshi Sasaki

Abstract

The effects of roadside trees on outdoor thermal environment and air quality within the street canyons in the central part of Sendai City were numerically investigated using CFD analyses coupled with calculations of radiation and conduction. Five equations were solved: (a) transport equation of momentum, (b) transport equation of heat, (c) transport equation of moisture, (d) transport equation of contaminant gas and (e) heat transfer equation by radiation. Several cases of analyses were performed in order to clarify the effects of tree arrangement, density of trees, elevations and the shapes of tree crowns. The tree canopy model optimized by Mochida, et. al., was used to reproduce the aerodynamic and thermal effects of trees. For comparison, a tree-less environment was also simulated.

概 要

街路樹がストリートキャニオン内の熱空気環境に及ぼす影響を検討するために、放射伝導計算に基づく非定常熱収支解析とCFDの連成解析を行った。解析では、(a)運動量輸送方程式、(b)温度輸送方程式、(c)水蒸気輸送方程式、(d)汚染物質輸送方程式、(e)放射熱伝達、を解いている。樹木の影響を再現するために、流体力学的効果と熱的效果に関して持田らにより最適化された樹木Canopyモデルを用いた。街路樹の配置や密度、および樹冠の形状を変更したいいくつかのケースの解析を実施した。また、比較のために樹木の無いケースも実施している。

§ 1 . はじめに

近年のヒートアイランド問題の関心の高まり等から、街路樹の暑熱環境緩和効果を利用した屋外環境計画が注目されている。街路樹の存在は日射遮蔽や蒸発散の効果により、地表付近の歩行者空間の温熱環境に大きな影響を及ぼすとともに、ストリートキャニオン内の移流、拡散のメカニズムも大きく変化させる。これに伴い、路上で発生する自動車排ガス等の濃度分布にも大きな影響を与えるものと考えられる。

本稿では、持田らにより最適化された樹木Canopyモデルを用い、樹木の流体力学的効果¹⁾、熱的效果²⁾を組み込んだ放射伝導計算に基づく非定常熱収支解析とCFDの連成解析¹⁾⁻³⁾により街路空間の微気候を解析し、街路樹の有無や疎密、樹冠高さ、形状の違いおよび街路の向きが街路空間内の温熱環境と空気汚染構造の両面に及ぼす影響について、特に歩行者空間の環境との関係に焦点を絞って詳しく検討した結果を報告する。

§ 2 . 解析の概要

2.1 解析フロー

解析領域を表-1、図-1に、解析の流れを以下に示す。本解析では、以下の2段階に分けて解析を行った。

1) 仙台市およびその周辺の領域の海陸風の顕著な典型的夏季晴天日をよく再現したメソスケールの気候解析⁴⁾の結果を流入境界条件として、仙台市中心部500m四方(図-1中1次領域)を対象とした流体解析を実施。2) 東二番丁通(写真-1)をモデル化した街区(図-1中2次領域、図-2)を対象に、街路樹の植栽状況を変更した各条件で非定常熱収支解析を行い、この解析より得られる地表および建物の表面温度と、上記の1)の解析より得られる風速を境界条件として、モデル街区を対象にCFD解析を実施。

街路樹の密度や樹冠高さ、形状の違いが街区内の温熱空気環境に及ぼす影響の検討は、2)の領域内の解析結果を用いて行った。

表 - 1 解析領域、メッシュ分割数、乱流モデル

	領域 (X×Y×Z) [m]	メッシュ分割数	乱流モデル
1次領域	500×500×400	106×106×30	改良型 Launder-Kato モデル ⁹⁾
2次領域	100×100×100	49×26×30	

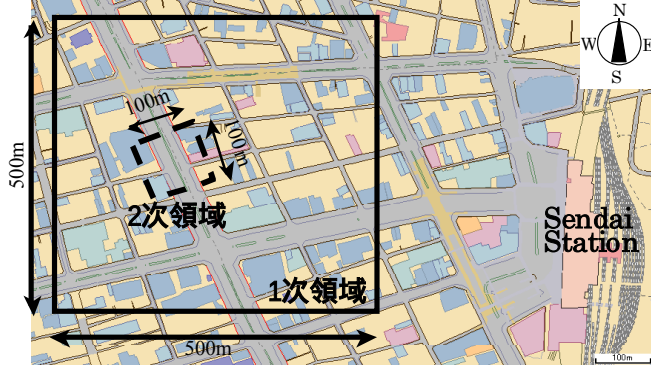


図 - 1 解析領域 (1次領域、2次領域)

2.2 解析ケース

解析ケースを表 - 2、図 - 3 に示す。ここでは、樹種は全てケヤキを想定しているが、樹冠形状は剪定や発育の程度によって仙台市内の各街路で異なっているため、これを考慮して表 - 2 中の 7 ケースの解析を行った。この中で Case2-1 が現状の街区内の樹木の密度、樹冠の高さをモデル化したケースであり、街路の向きの体感気候への影響を検討するために、90°回転させた東西軸の場合を Case2-2 としている。Case1 は街区内に街路樹が無いケース、Case3 は街路樹が道路の主軸方向(南北方向)に隙間無く植えられているケース、Case4 は樹木の密度は現状のままで、地表から樹冠の下端までの高さを現状 (Case2-1) の 1.7m から 2.7m に変更したケースである。Case5 は Case4 と同じ樹冠の高さ (2.7m) で、形状を球形から仙台市中心部を走る定禅寺通の街路樹の形状をモデル化した逆四角錐 (最大樹冠横幅は球形と同様) にしたケース (図 - 3 (5))、Case6 は Case5 の樹木を中央歩道上にも植樹し街区上方を覆ったケース (仙台市の中心市街地を走る定禅寺通の街路樹配置を想定) である。樹冠部の容積は Case2 ~ Case4 で 580m³、Case5 と Case6 では 686m³ となっている。

2.3 500m四方領域の解析 (1次領域)

風速、温度の初期条件および流入境界条件には、仙台市周辺を対象としたメソスケール解析⁴⁾の結果を用い、高さ 10m の結果より風速に関してはべき乗則 (べき指数 0.25) で、気温に関しては高さ一様に与えた。また、建物の形状は文献 5) の GIS データを用い、放射解析は連成せず、各土地利用の地表面温度および建物壁面温度は過去の測定例を参考に与えた⁶⁾。実際に設定した表面温度を表 - 3 に示す。



写真 - 1 東二番丁通 (宮城県仙台市)

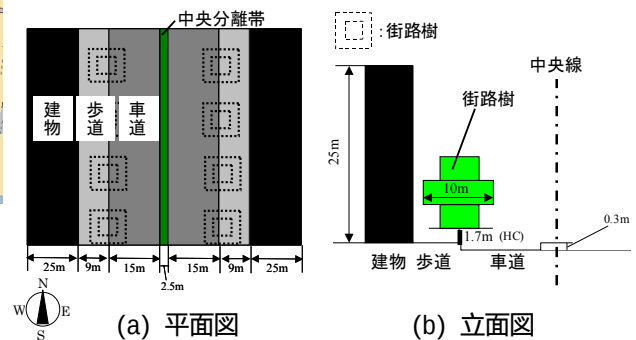


図 - 2 解析領域 (2次領域、モデル街区)

表 - 2 解析ケース

	密度と配置	樹冠高さ (Hc: 図 - 2 参照)	樹冠形状	樹冠容積 [m ³]	街区の 向き
Case1	樹木無	-	-	-	南北軸
Case2-1	現状	1.7m	現状 (球形)	580	南北軸
Case2-2					東西軸
Case3	南北方向に密に植樹	1.7m	現状 (球形)	580	南北軸
Case4	現状	2.7m	現状 (球形)	580	南北軸
Case5	現状	2.7m	逆四角錐型	686	南北軸
Case6	中央分離帯に植樹 上空を樹冠で覆う	2.7m	逆四角錐型	686	南北軸

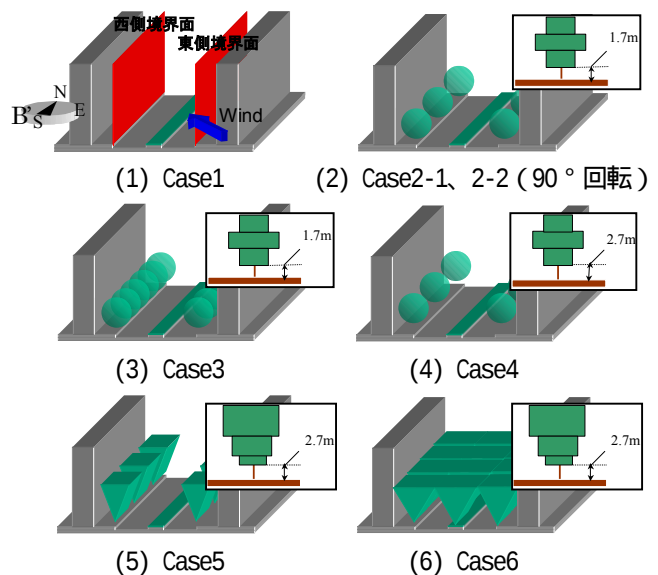


図 - 3 解析ケース

表 - 3 各土地利用および建物の表面温度⁶⁾

表面素材分類	表面温度 [°C]
アスファルト	50
裸地	43
コンクリート (空き地等)	44
樹木・草地 (公園)	34
コンクリート (建物表面)	37

2.4 モデル化した街区の解析（2次領域）

2次領域においては、放射伝導計算に基づく非定常熱収支解析²⁾³⁾と流体解析を連成させた解析を行った。また、道路幅、樹木密度については現地調査に基づき設定した。建物高さはGISデータより算定された通りに面する建物の平均階数（約6.7階）から25mと設定した。

2.4.1 都市表面の非定常熱収支解析の概要

解析領域内の建物は日本建築学会のオフィス標準問題の建物とした⁷⁾。地表面被覆材料は文献8)を基に設定した。各種熱物性値は文献9)を参考に与えている。また、道路に面する建物壁面では、その面積の50%を窓面と設定し、窓ガラスは25mmの単層ガラスとした。その他、詳細については文献10)を参照されたい。

本解析では8月3日0時～4日24時の48時間を対象とした。ここでは快晴時を想定し、日射量は文献11)を参考に与えた。気温は、1993～1995年の7、8月の拡張AMeDASデータから宮城県内のAMeDAS測定点の日射量（ $20\text{MJ}/\text{m}^2$ 以上）および風向（南東よりの日）の条件により典型的夏日（全16日）を抽出し、各時刻別に平均した値を用いた。大気中の水蒸気分圧は 2.8kPa （絶対湿度 $17.7\text{g}/\text{kg}$ に相当）一定とし、相対湿度は気温の時間変化に従って変化するものとした。室内側境界は熱伝達のための熱移動とする。室内、室外側の対流熱伝達率 α_c をそれぞれ $5\text{W}/\text{m}^2\cdot\text{K}$ 、 $12\text{W}/\text{m}^2\cdot\text{K}$ とした。また、地中については地中50cmで伝導熱フラックスを0、すなわちその深さにおいて土壌から更に地中下向きの熱の流出が無い断熱条件とした。樹木の放射環境への影響は、文献2)のCanopyモデルにより再現した。葉面積密度は文献12)を参考に、仙台市中心部に多数植栽されているケヤキの葉面積密度を与え（ $a=0.73$ ）、葉群における放射の消散係数 $k'=0.6$ とした。

2.4.2 CFDに基づく対流解析の概要

8月4日13時の気候を対象としてCFD解析を行った。2次領域の風向、風速に関する初期条件、境界条件は2.3節で概要を示した500m四方領域（1次領域）の解析結果を用いた。表面温度については、2.4.1で概要を示した非定常熱収支解析の結果のうち、当該時刻（8月4日13時）の結果を与えた。解析領域中の人工排熱は、自動車からの排熱と空調排熱を考慮した。建物排熱は冷房用エネルギー消費として算出し、建物用途別延べ床面積に時刻別冷房用エネルギー消費原単位を乗じた。自動車の排熱は、仙台市道路交通等現況調査¹³⁾に基づく交差点における交通量データを対象道路区間毎に時刻別交通量データに集計した。詳細は文献14)参照。実際に与えた人工排熱量を

表-4に示す。自動車の排熱については解析領域中の道路路面から一様に排出し、空調排熱については全て建物の屋根面から排出した。なお、全ての人工排熱は大気中に排出している。また、樹木の流体力学的効果を再現するために文献1)のCanopyモデルを付加している。ここで、モデル係数 C_{pe} は文献1)で最適化された値を与えた（ $C_{pe}=1.8$ ）。また、樹木の抵抗係数 $C_f=0.2$ とした。葉面積密度は2.4.1と同様に $a=0.73$ とした。

§3. 解析結果

3.1 仙台市中心部500m四方領域の解析結果

高さ1.5mの風速ベクトルの水平分布を図-4(1)に、水平分布内に示すA-A'断面の鉛直分布を図-4(2)に示す。

3.2 モデル化した街区の解析結果

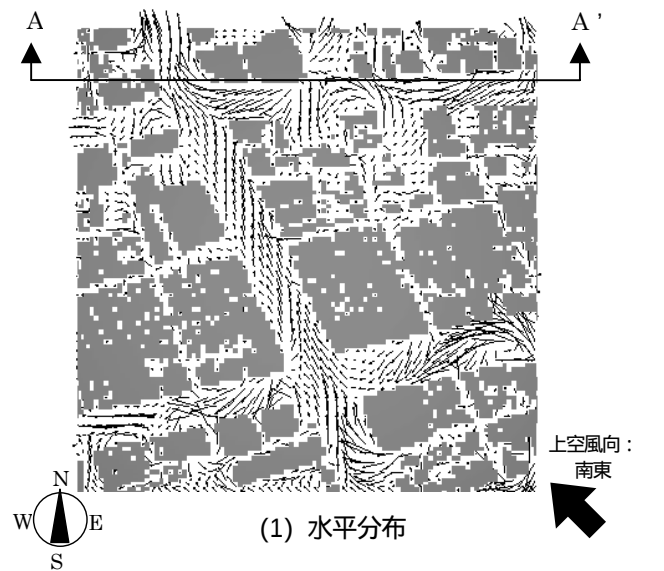
3.2.1 非定常熱収支解析

地表面温度分布の一例（8月4日13時）を図-5に示す。緑陰部では日向部に比べ、約25～30℃温度が低下している。以下では、熱収支解析より得られた表面温度を境界条件として与えたCFD解析の結果を示す。

3.2.2 CFDに基づく対流解析

(a) 風速

歩道面から高さ1.5mにおける風速ベクトルの水平分布



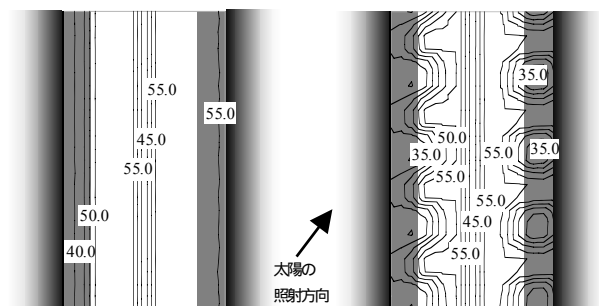
(2) 鉛直分布 (A-A'断面)

図-4 風速ベクトル
(1次領域の解析結果、8月4日13時)

表-4 人工排熱一覧 [W/m^2]

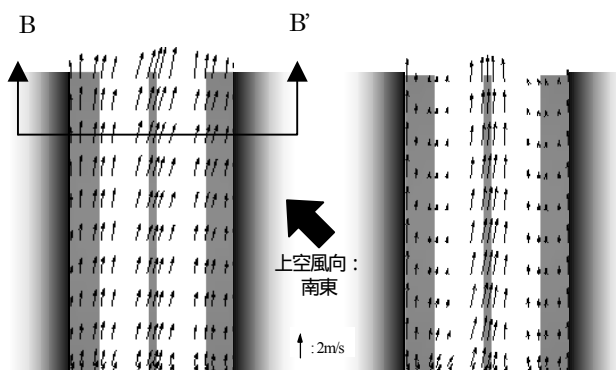
建物排熱 (冷房分)	解析領域中の全建築物一律	106
交差排熱	東側車線	139
	西側車線	117

を図 - 6 に、図 - 6 中の B-B' 断面の風速ベクトルの鉛直分布を図 - 7 に示す。水平分布より、街路樹の有る場合 (Case2) では樹木の無い場合 (Case1) に比べ、樹木による風速低減効果が明確に確認される (図 - 6)。鉛直分布を見ると、樹木の無い Case1 では街区空間内において循環流が形成されている (図 - 7 (1))。樹冠の形状により流れの傾向は類似しており、球形の樹冠の Case2 ~



(1) Case1 (樹木無) (2) Case2-1 (樹木有)

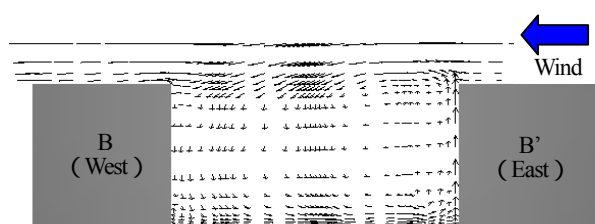
図 - 5 地表面温度分布 (気温: 29.2)
(2 次領域の解析結果、8 月 4 日 13 時) []



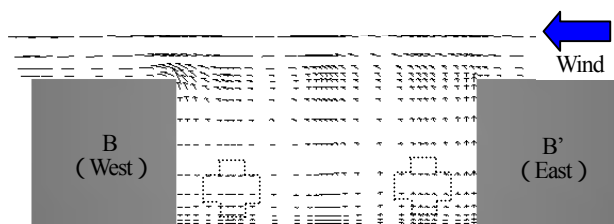
(1) Case1 (樹木無) (2) Case2-1 (樹木有)

図 - 6 風速ベクトルの水平分布

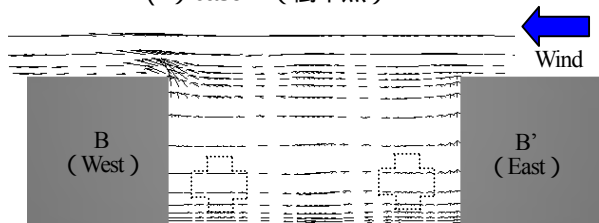
(2 次領域の解析結果: 高さ 1.5m、8 月 4 日 13 時)



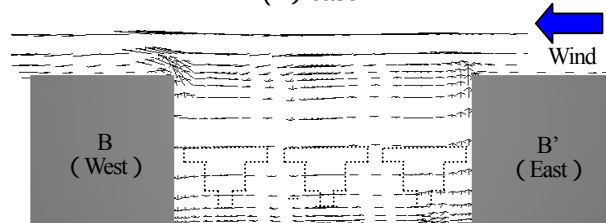
(1) Case 1 (樹木無)



(2) Case 2-1



(3) Case 4



(4) Case 6

図 - 7 風速ベクトルの鉛直分布 (B-B' 断面: 図 - 6 参照、8 月 4 日 13 時)

Case4 では樹木の流体力学的効果により循環流は明確には生じていない (図 - 7 (2)、(3))。一方、樹冠が逆四角錐型の場合 (Case5、Case6) 樹冠下部の体積が小さくなり、風が流れ易くなったため球形の樹冠のケースに比べ街路空間内において循環流が見られる (図 - 7 (4))。

(b) 気温

図 - 7 と同じ断面内の気温の鉛直分布を図 - 8 に示す。樹木が無い場合では、建物壁面と地表からの発熱により加熱された空気が循環流 (図 - 7 (1)) によって輸送されるため、街路空間の東側歩道付近の気温が高くなっている (図 - 8 (1))。球形の樹冠の樹木を植えたケース、特にここで示す Case2、Case4 では、前述したように循環流が生じなくなったことに加え、樹木の影響で歩道および建物表面の温度が低下したため、樹木無に比べて歩道上における気温低下が顕著である。また、樹冠を逆四角錐としたケース、特にここで示す Case6 では、樹木が街路上空を覆っているため表面温度の上昇が抑制されることにより、循環流が生じるにもかかわらず歩道上の気温はそれほど上昇していない (図 - 8 (4))。

3.2.3 体感気候

(a) 平均放射温度 MRT

非定常熱収支解析結果より算出した歩道面から高さ 1.5m の MRT の水平分布を図 - 9 に示す。MRT については、文献 15) を参考に微小立方体の各面へ入射する短波 (直達 + 天空 + 反射) および長波放射を各面ごとに算出し、これに微小立方体各面に対する人体に関わる重み係数¹⁶⁾を乗じて微小立方体が吸収する全放射量 (入射、反射) を求め、算出した。

樹木無の場合、MRT が非常に高くなっている (図 - 9 (1))。街路の向きが南北軸の各ケースでは日の当たる東側で MRT が高くなっているが、この領域で樹木の有

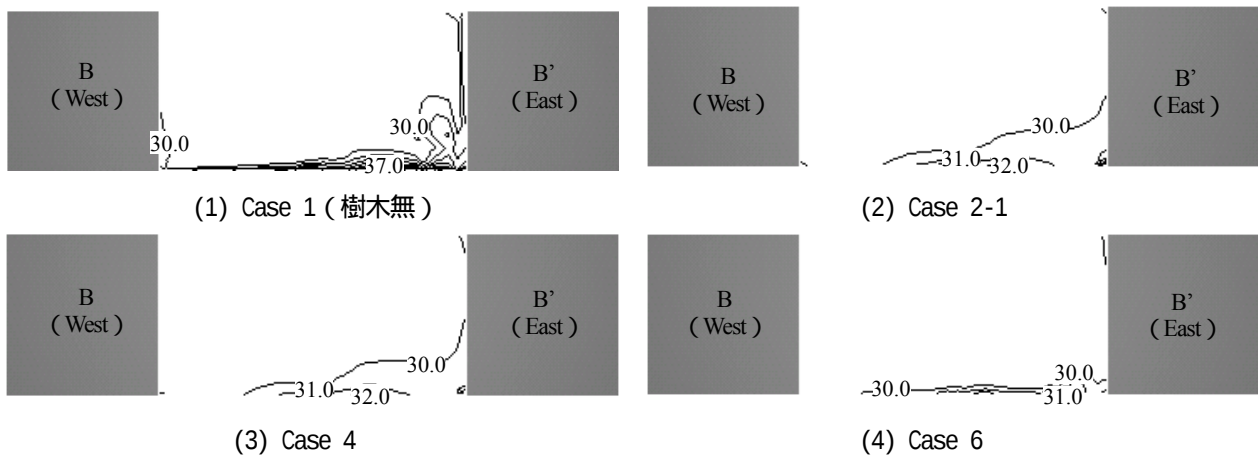


図 - 8 気温の鉛直分布 (B-B' 断面: 図 - 6 参照、8 月 4 日 13 時) []

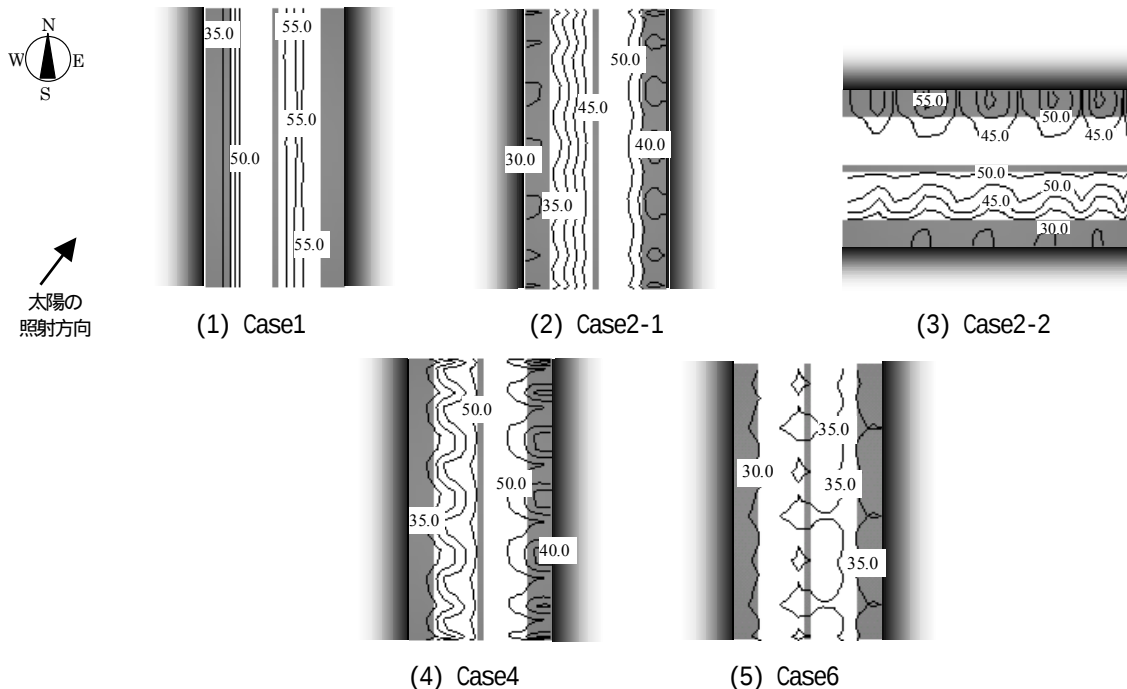


図 - 9 MRT の水平分布 (高さ 1.5m、8 月 4 日 13 時) []

無による差も大きくなっており、緑陰部において 15 ~ 20 程度低下している。樹木で街路上空を覆った Case6 では、他のケースに比べ東側の MRT の値が 5 ~ 15 程度低くなっている (図 - 9 (5))。また、街路の向きを比較すると、南北軸の街区 (Case2-1、図 - 9 (2)) では東側歩道上の MRT が 40 程度となっているのに対し、東西軸 (Case2-2、図 - 9 (3)) では北側の樹木間を日射が透過するため、東西方向に等間隔に MRT が 55 以上の高温となる領域が現れている。

(b) 新標準有効温度 SET^*

歩道面から高さ 1.5m における全ケースの SET^* (新標準有効温度) の水平分布を図 - 10 に示す。 SET^* は、2 次領域における風速、気温、湿度、MRT の解析結果の空間分布を用い、着衣量を 0.5clo、代謝量を 1.5Met として算出した。また、人体表面の対流熱伝達率 α_c は Mitchel の式¹⁷⁾を用いた。

街路の向きが南北軸である全てのケースにおいて日射の当たる東側の歩道上で SET^* が高くなっているが、樹木を植えたケースでは東西の歩道上での温度差が小さくなる傾向が見られる。樹木無の場合 (Case1) 風通しは良いものの、気温上昇 (図 - 8) や MRT の上昇 (図 - 9) の影響により SET^* が 32 以上となる領域が東側歩道上付近から広がっている。一方、樹木の有るケースでは気温低減や日射遮蔽の効果はあるものの、樹木の有る部分では風通しが悪化し、風下側 (北側) で SET^* が周辺の領域よりも高い値を示している。その中で、樹冠を高くしたケース (Case4) や樹冠の形状を逆四角錐としたケース (Case5、Case6) では、気温、MRT の低下に加え、風通しもそれほど阻害しないため SET^* が下がる結果となった。特に、Case6 では上空を樹木で覆われているため、MRT が他のケースに比べかなり低くなることにより SET^* の値も大幅に低下し、街路空

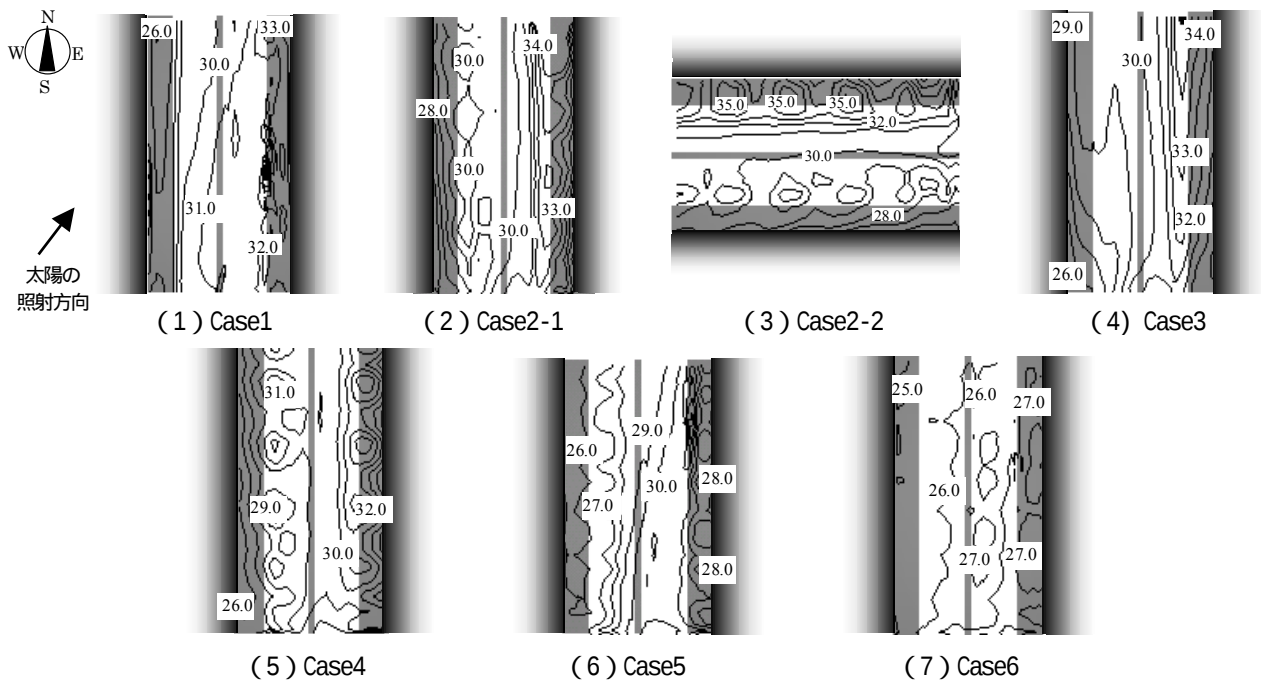


図 - 10 SET*の水平分布（高さ1.5m、8月4日13時）[]

間内の分布に2程度の差しかなくなっている。また、街路の向きの違いを見ると、南北軸の街区（Case2-1、図 - 10 (2)）では東側歩道上のSET*が33程度であるが、東西軸（Case2-2、図 - 10(3)）では北側歩道上においてMRTの上昇（図 - 9 (3)）により、樹木間の日の射す領域では、SET*が35程度となっている。

3.2.4 濃度解析

次に、自動車排気ガスによる汚染を想定した濃度場解析を行った結果を示す。本解析では、図 - 2 に示した領域内の車道面大気側第一グリッド（高さ0.15m）より大気中へ一様に空気と等密度のガスを発生させている。また、流入する空気は全て新鮮空気として扱われており、風上側からのガスの流入は考慮していない。ガス発生量は各ケースで同一とした。建物間の建物高さまでの空間を評価のためのControl Volume (CV)として設定した。CVの体積は約125,000m³である。以下の結果は、Case2-1の場合のCV内の瞬時一様拡散濃度（ $C_{0-Case2-1}$ ）で基準化している。なお、以下の図中で<>は時間平均値を示している。なお、検討は街区の向きが南北軸の6ケースを対象に行っている。

(a) 通過風量

各ケースのCVを通過する風量 Q_{CV} 、および現状の植栽状況に対応するケース（Case2-1）の値に対する比率を表 - 5 に示す。街路樹が有る場合（Case2-1～Case6）には大きな差が見られず、樹木の無い場合（Case1）に比べて15%程度小さくなっている。街路樹が有る場合（Case2-1～Case6）を比較すると、若干ではあるが樹冠が逆四角錐型の場合（Case5、Case6）に通過する風量 Q_{CV} が大きい傾向にある。これは、街路上空が樹冠で

表 - 5 各ケースのCVの通過風量と平均濃度

解析ケース	CVを通過する風量 Q_{CV} [m ³ /s]	各ケースの Q_{CV} の 現状の植栽状況に 対する比率 (各ケース/現状)	CV内の 空間平均 無次元濃度[-]
Case1	4882	1.17	0.43
Case2-1	4177	1.00	0.54
Case3	4096	0.98	0.73
Case4	4087	0.98	0.60
Case5	4395	1.05	0.41
Case6	4216	1.01	0.36

CV：街区内の建物高さまでの空間

覆われている場合（Case6）においても下窄まりな樹冠形状のために、球形と比較して地表付近から樹冠下半分にかけての通過風量が増加しているためである。

(b) 濃度の鉛直分布

図 - 7 と同じ断面内の濃度の鉛直分布を図 - 11 に示す。街路樹が無い場合（Case1、図 - 11(1)）、街路空間内に形成される循環流（図 - 7 (1)）の影響により車道で発生したガスが移流され、東側建物付近の歩道上に高濃度域が生じている。また、鉛直方向の拡散が小さく、地表面付近に高濃度域が存在している。

一方、球形の樹冠とした場合（Case2-1～Case4）には鉛直方向の拡散が大きく、東西方向への移流の効果が小さいため、主として車道上に高濃度域が現れている（図 - 11(2)、(3)）。

これに対し、樹冠の形状を逆四角錐型としたCase5、Case6では、樹冠の下が窄まっているため、地表付近では樹木による風速低減が小さく、車道で発生したガスが気流によって運ばれ、東側建物付近の歩道上の濃度が高い（図 - 11(4)）。しかし、CV内の空間平均濃度は街路樹が無い場合（Case1）より小さい。これは街路樹

が無い場合に比べ、循環流の風速成分（風向と直交方向の成分）が街路に沿った方向の成分より相対的に小さく、風下側への移流量が増えたためである（表 - 5）。

3.3 仮想閉空間内の平均気温、平均濃度（2次領域）

街路空間を 3（鉛直方向）×4（東西方向）= 12 の

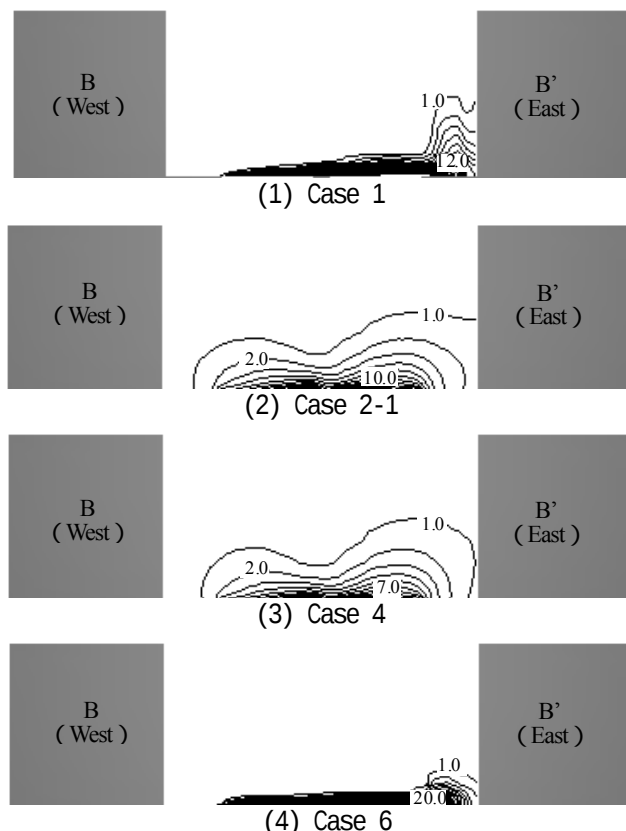


図 - 11 無次元濃度の鉛直分布
(B-B'断面:図 - 6 参照、8月4日13時)($\langle C \rangle / \langle C_{0-Case2} \rangle$)[-]

West	29.3	29.3	29.3	29.5	East
	29.4	29.3	29.4	30.0	
	30.1	30.9	32.3	33.7	
(1) Case1					

29.3	29.3	29.3	29.4
29.3	29.4	29.6	29.8
29.5	30.2	30.8	30.6
(2) Case2-1			

29.3	29.3	29.3	29.4
29.2	29.4	29.5	29.5
29.3	29.7	30.0	29.8
(3) Case3			

29.3	29.3	29.3	29.5
29.3	29.4	29.6	29.7
29.5	30.1	30.8	30.4
(4) Case4			

29.3	29.3	29.3	29.4
29.3	29.3	29.3	29.6
29.6	30.1	31.9	31.5
(5) Case5			

29.3	29.3	29.3	29.3
29.3	29.3	29.3	29.4
29.4	29.9	30.3	30.7
(6) Case6			

図 - 12 各仮想閉空間内の平均気温
(8月4日13時) []

仮想閉空間に分割し、各仮想閉空間内の平均気温、平均濃度の比較を行った。なお、全てのケースにおいて鉛直方向は Case2-1 の樹冠下高さ（1.7m）および樹冠上部（11.2m）で分割し、東西方向は歩道と車道の東西各境界面および中央において分割している。

3.3.1 仮想閉空間内の平均気温の分布

図 - 12 に各ケースの仮想閉空間内の平均気温を示す。樹木無（Case1）の場合、建物壁面と地表からの発熱および自動車からの排熱により加熱された空気が循環流により東側へ輸送され、東側の歩道上で特に平均気温が高くなっている（図 - 12(1)）。一方、樹冠が球形の場合（Case2-1～Case4）東側歩道上の平均気温はそれほど高くない（図 - 12(2)～(4)）。また、樹冠が逆四角錐の場合、Case5 では東側の気温が高くなっているが、街路上空が樹冠で覆った Case6 では、Case5 に比べ東側の平均気温がやや低くなっている（図 - 12(5)、(6)）。

3.3.2 仮想閉空間内の平均無次元濃度の分布

図 - 13 に各ケースの仮想閉空間内の平均無次元濃度を示す。東側歩道上においては、樹木無（Case1）の場合の平均濃度が最も高く、次いで樹冠を逆四角錐としたケース（Case5、Case6）そして樹冠を球形としたケース（Case2-1～Case4）の順に低くなっている。

図 - 12、13 より、温熱環境、空気環境ともに循環流の影響により、東側歩道上において問題が生じていることが分かる。

3.4 歩行者空間と車道の境界面の鉛直構造

3.4.1 風速u

図 - 14 に歩行者空間（歩道上）と車道上の境界面（図 - 3(1)参照）における各ケースの風速のu成分（車道直交成分）を示す。u成分は西から東に向かう流れ

0.00	0.00	0.00	0.11
0.00	0.05	0.34	1.39
0.00	4.86	9.22	7.42
(1) Case1			
0.07	0.06	0.12	0.20
0.40	0.95	1.41	1.11
0.60	4.62	6.11	1.80
(2) Case2-1			
0.30	0.33	0.34	0.32
0.75	1.18	1.37	0.94
0.87	2.72	3.28	1.16
(3) Case3			
0.09	0.06	0.14	0.23
0.35	0.85	1.39	0.91
0.43	4.29	6.05	1.35
(4) Case4			
0.00	0.00	0.02	0.05
0.00	0.05	0.39	1.03
0.00	5.02	10.26	5.37
(5) Case5			
0.00	0.00	0.01	0.02
0.00	0.06	0.20	0.74
0.01	5.66	8.68	6.60
(6) Case6			

図 - 13 各仮想閉空間内の平均無次元濃度
(8月4日13時) [-]

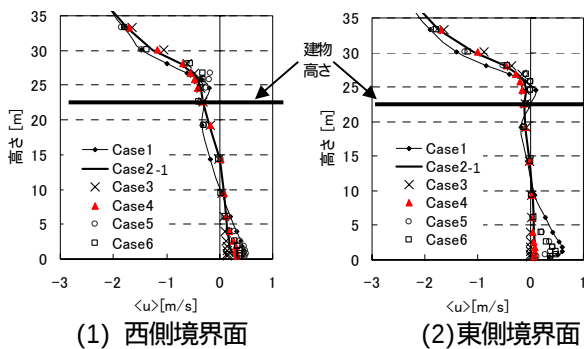


図 - 14 <u>の鉛直分布 (+が東側への流れ)
(歩行者空間と車道の境界面の各高さにおける平均値)

(西風)を正と定義している。なお、図の値は境界面上の各高さにおいて道路平行方向に平均した値である。

図を見ると、全ケースで南東である上空風(負値)が街路内で循環流となり、地表付近では正值を示している(西風)。東側境界面(図 - 14(2))に着目すると、樹木の無い場合(Case1)において地表付近において風速の正值、すなわち車道から東側歩道に流入する速度成分が大きくなっている。一方、樹冠が球形の場合(Case2-1~Case4)は樹冠部および樹冠下で風速が減衰し、その値が小さくなっているが、Case4(球形)と同じ樹冠高さ(2.7m)としたCase5(逆四角錐型)においては樹冠下の風速が球形の場合に比べて格段に大きくなっている。街路上方を覆ったCase6においてもCase5と同様である。これは樹冠の形状を逆四角錐としたことで、樹冠下部において風の障害となる樹木の体積が小さくなることにより、風速の低減が球形とした場合に比べ小さくなったためと考えられる。

3.4.2 歩行者空間と車道の境界面の顕熱 flux

図 - 15 に歩行者空間と車道の境界面における東西各境界面(図 - 3(1)参照)を通過し、歩行者空間に影響を与える顕熱量の移流、乱流 flux の各成分、およびこれらを足し合わせた正味の顕熱 flux を示す(横軸の目盛が各々異なっていることに注意されたい)。移流 flux を算出する基準値として、各ケースの東西それぞれ歩道上の建物高さまでの空間平均気温を用いた。なお、示している値は+が東側へ流れる向きである。樹木無(Case1)の場合、移流により東側の地表付近の歩行者空間に流入する顕熱の値が大きくなっており、循環流による影響が強く出ている。また、球形樹木とした場合(Case2-1~Case4)は移流による熱の移動が小さく、乱流拡散による熱の移動の増加が顕著に見られ、特に西側歩行者空間に流入する正味の熱量については樹木無(Case1)と比較しても大きくなっている。また、逆四角錐とした場合(Case5、Case6)東側の地表付近では他の樹木の有るケース(Case2-1~Case4)に比べて東側歩行者空間への移流による熱の流入が大きくなっ

ている。

3.4.3 歩行者空間と車道の境界面のガス flux

図 - 16 に歩行者空間と車道の境界面における東西各境界面を通過するガスの移流、乱流 flux の各成分、およびこれらを足し合わせたガス flux を示す(横軸の目盛が各々異なっていることに注意されたい)。移流 flux を算出する基準値として、各ケースの東西それぞれ歩道上の建物高さまでの空間平均濃度を用いた。西側では、東側境界面に比べ移流による輸送量が小さくなっている。また、球形樹木の有る場合(Case2-1~Case4)では地表付近の乱流拡散によるガスの輸送量が大きくなっている。一方、東側境界面では地表付近の<u>の値が大きいCase1(樹木無)、Case5(逆四角錐型)、Case6(逆四角錐、上空覆)の移流によるガスの輸送量が特に大きくなっており、正味の輸送量の大半を占めている。球形の場合(Case2-1~Case4)は西側と同様に乱流拡散による輸送量が多くなっている。

§ 4. 東側歩行者空間の温熱空気環境の変化

表 - 6 に温熱環境、空気環境で問題となっている東側歩道上の高さ1.7mまでの空間におけるSET*および濃度の各ケースの空間平均値を示す。樹木の無い場合(Case1)に比べ、樹木の有る場合(Case2-1~Case6)では樹木による日射遮蔽効果(図 - 10)によりSET*の値が小さくなっている。ただし、樹冠下の高さを1.7mとしたCase2-1、Case3では、樹木による風速低減効果が顕著に現れ、風速が小さくなることによりSET*の値が他の樹木の有るケースに比べて大きくなっている。空間平均濃度について見ると、樹冠の形状を球形としたCase2-1~Case4では小さくなっている。これに対し、樹冠の形状を逆四角錐としたケース(Case5、Case6)では球形としたケースに比べて、移流によるガスの輸送量が大きくなるため(図 - 16(1)(b))、その値が大きくなっている。特にCase6では、建物と街路樹により閉鎖的な空間が形成されるため(図 - 3(6))、汚染ガスが街区内の東側歩行者空間に滞留しやすくなっている。一方、街路樹の日射遮蔽効果によりSET*の空間平均値はCase6が最も小さくなっている。

樹冠の高さの影響に関して、Case2-1(樹冠高さ: 1.7m)とCase4(樹冠高さ: 2.7m)を比較すると、樹冠を高くすることで風通しが良くなり、Case4の方がSET*および濃度の空間平均値が小さくなっている。同様に樹冠の形状については、Case4(球形)とCase5(逆四角錐型)を比較すると、SET*は殆ど変化しないが、濃度が大きく変化しており、逆四角錐にすることにより

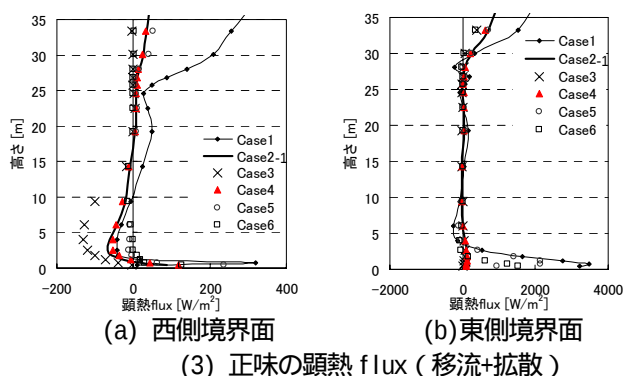
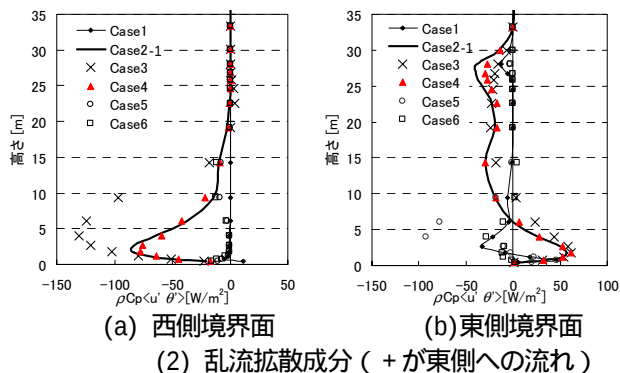
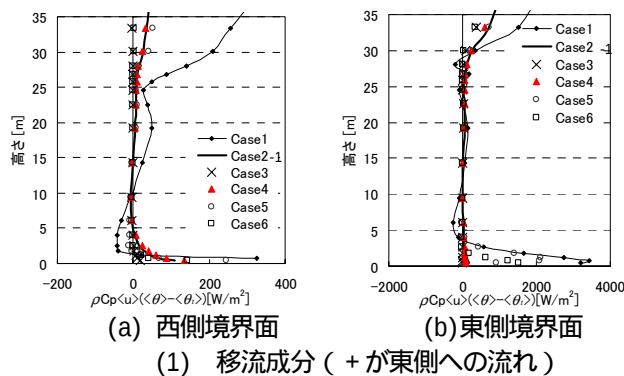


図 - 15 各面を通過する顕熱量の鉛直分布
(歩行者空間と車道の境界面の各高さにおける平均値)
空気環境が悪化している。

§ 5. まとめ

- (1) 仙台市の中心市街地にある東二番丁通をモデル化した街区を対象に、対流熱収支連成解析、濃度場解析を行い、海陸風の顕著な夏季晴天日における植栽状況の違いによる風環境および温熱空気環境の変化について検討した。
- (2) 樹木が無いケースでは、街路空間内で形成される循環流の影響により、温められた空気および車道で発生したガスが歩道上に輸送され、歩行者空間に高温、高濃度の環境が形成された。
- (3) 球形の街路樹を植えたケースでは、循環流の影響が小さくなり、これにより東西方向の流れが抑制され、車道上で温められた空気および車道

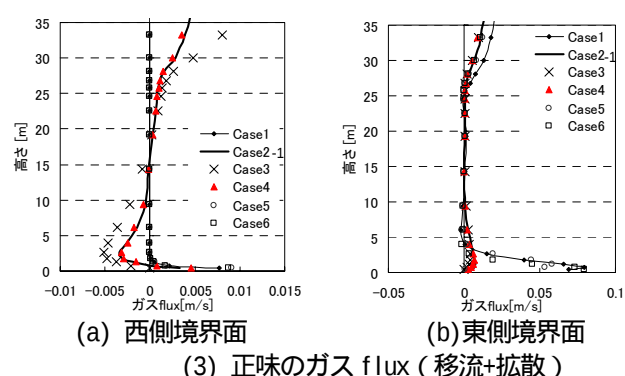
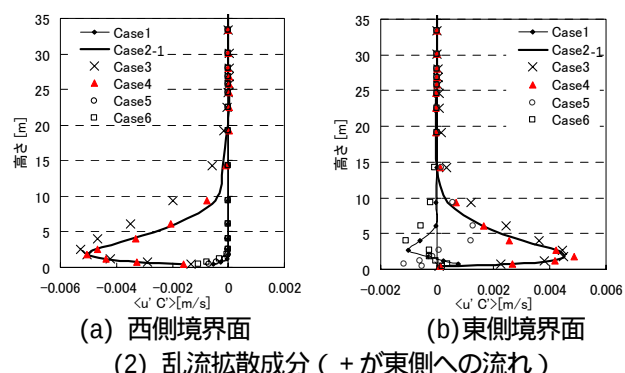
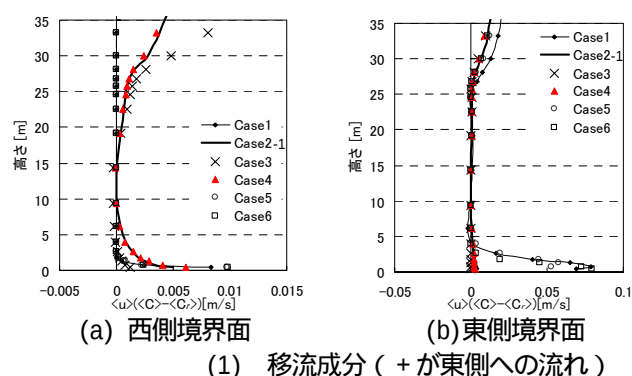


図 - 16 各面を通過するガス輸送量の鉛直分布
(歩行者空間と車道の境界面の各高さにおける平均値)

表 - 6 東側歩行者空間における SET*、無次元濃度の空間平均値

解析 ケース	SET*の 空間平均値 []	無次元濃度の 空間平均値 <C>/<C> _{base}
Case1	33.9	7.42
Case2-1	32.8	1.80
Case3	31.0	1.16
Case4	29.9	1.35
Case5	29.8	5.37
Case6	28.1	6.60

- から発生したガスの歩行者空間への流入が大幅に減少する。特に樹冠を高くした場合は風通しも良くなるため、SET*、濃度の値が低くなる。
- (4) 一方、樹冠の形状を逆四角錐とした場合は、東側歩行者空間の SET* の値は低くなる。しかし、球形の樹冠のケースに比べて、東側の歩道に吹き込む風速が高くなるため濃度は増加する。
- (5) また、街区の向きが東西軸の場合、樹木間を日射が透過するため MRT が高くなり、北側の歩行

者空間で SET^{*}が高くなる領域がみられた。

§ 6. おわりに

(6) 以上の結果から、植栽計画に際しては樹冠の高さ、樹冠形状の考慮が必要であることが指摘される。今後は、高木と低木とを組み合わせたケース等についても検討を加え、温熱環境と空気環境の両面からみて望ましい街路樹配置の検討を行っていきたい。

本報告は、東北大学大学院 持田灯教授、吉野博教授、東北工業大学 渡辺浩文助教授との共同研究で得られた成果をまとめたものであり、文献 18)において既発表したものに加筆したものである。

<参考文献>

- 1) 岩田達明, 木村敦子, 持田灯, 吉野博: 歩行者レベルの風環境予測のための植生キャノピーモデルの最適化, 第 18 回風工学シンポジウム論文集, pp.69-74, 2004.12
- 2) 吉田伸治, 大岡龍三, 持田灯, 富永禎秀, 村上周三: 樹木モデルを組み込んだ対流・放射・湿気輸送連成解析による樹木の屋外温熱環境緩和効果の検討, 日本建築学会計画系論文集, No.536, pp.87-94, 2000.10
- 3) 原山和也, 吉田伸治, 大岡龍三, 持田灯, 村上周三: 非定常放射・伝導解析による数値解析と精度検証 - 非定常な対流・放射・伝導を考慮した 3 次元の屋外温熱環境予測評価手法の開発第 1 報 -, 日本建築学会計画系論文集, No.556, pp.99-106, 2002.6
- 4) 佐々木澄, 持田灯, 吉野博, 渡辺浩文, 吉田知弘: 海風が卓越する夏季晴天日における規模の異なる 3 つの太平洋沿岸都市・東京、仙台、原町の中心部の大気部熱収支構造の比較 - 気候数値解析に基づく都市気候の地域特性の定量化 (その 1) -, 日本建築学会環境系論文集, No.595, pp.121-128, 2005.9
- 5) 菅野陽介, 岩坂諭, 十二村佳樹, 渡辺浩文, 鈴木博司, 持田灯: 実測・数値解析に基づく仙台市の都市環境気候図作成 (その 6) 冷房排熱量の算定, 日本建築学会大会学術講演梗概集, D-1, pp.671-672, 2003.9
- 6) 大山直樹, 久保田徹, 三浦昌生, 持田灯, 富永禎秀: 建物外部空間における表面温度の実測値に関する文献調査 - 自治会との協調に基づく地区スケールの住環境マップの作成方法と利用可能性に関する研究 その 5 -, 日本建築学会大会学術講演梗概集, D-1, pp.899-900, 2002.8
- 7) 滝沢博: 標準問題の提案 (オフィス用標準問題), 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「伝熱解析の現状と課題」, pp.35-42, 1985.9
- 8) 東北地方整備局: 高規格幹線道路設計マニュアル (案), 幾何学構造・設計編, 1991.4
- 9) 日本熱物性学会編: 熱物性ハンドブック, 養賢堂
- 10) 佐々木澄, 持田灯, 渡辺浩文, 吉野博, 岩田達明, 池澤紀幸: 仙台市東二番丁通・定禅寺通を対象とした街路樹植栽計画のための放射・対流連成解析 - その 1 放射環境に及ぼす街路樹の効果についての検討 -, 日本建築学会東北支部研究報告集, pp.69-72, 2004.6
- 11) 宿谷昌則: 数値解析で学ぶ光と熱の建築環境学, 丸善, 1993.7
- 12) 下條正貴, 吉田伸治, 大岡龍三: 街路樹による市街地の暑熱環境緩和効果に関する研究 (その 3) 街路樹の樹冠についての光学的深さ, 葉面積密度, 入射角特性の実測, 日本建築学会大会学術講演梗概集, D-1, pp.609-610, 2003.9
- 13) 仙台市都市整備局総合交通政策部交通計画課: 仙台市道路交通等現況調査報告書, 仙台市, 2003
- 14) 渡辺浩文, 十二村佳樹, 持田灯, 池澤紀幸: 仙台市中心部の街路樹植栽計画のための熱・空気環境の検討, (その 1) 街路空間の人工排熱量の算定, 日本建築学会大会学術講演梗概集, D-1, pp.737-738, 2004.8
- 15) 吉田伸治, 村上周三, 持田灯, 大岡龍三, 富永禎秀, 金相璠: 対流・放射・湿気輸送を連成した屋外環境解析に基づく緑化の効果の分析, 日本建築学会計画系論文集, No.529, pp.77-84, 2000.3
- 16) 中村泰人: 建築都市空間内の人体に対する熱放射場の表現方法について, 日本建築学会計画系論文報告集, No.376, pp.29-35, 1987
- 17) Mitchel, D.: Convective heat transfer in man and other animals, heat loss from animals and man, Butterworth publishing Inc., London, 59, 1974
- 18) 佐々木澄, 岩田達明, 持田灯, 渡辺浩文, 吉野博: 街路樹がストリートキャニオン内の温熱空気環境に及ぼす影響に関する数値解析, 日本建築学会環境系論文集, No.605, pp.139-146, 2006.7