

社団法人 労働部における流れと拡散に及ぼす
大気汚染度の影響に関する実験的研究

平成 10 年

上 原 清

①

市街地低層部における流れと拡散に及ぼす
大気安定度の影響に関する実験的研究

平成10年

上原 清

論文要旨

近年の大都市部における窒素酸化物(Nox)や粒子状物質(SPM)による沿道の大気汚染は、自動車排ガス規制など種々の施策にもかかわらず、昭和60年度以降はむしろ悪化の傾向を示している。大都市における大気汚染の特徴は、市街地の高層化や道路の複層化など、高密度な空間利用による風通しの悪さによって自動車排ガスが滞留し、沿道大気汚染濃度が周辺市街地の濃度より数倍高くなる点にある。更に、大気安定度が市街地の地形影響を増幅し、あるいは弱めて現象を複雑化する。最適な都市計画のためには、市街地低層部の高濃度大気汚染発生メカニズムに対する地形および大気安定度の影響を明らかにする必要がある。

しかしながら、市街地低層部の凹凸内部の流れ場、汚染濃度場を大気安定度の影響を含め、風洞実験等で詳細に調べた例はほとんどない。このような背景から、測定部内に任意の大気安定度を再現できる温度成層風洞においてレーザー流速計等を用い、自動車排ガスによる市街地沿道の大気汚染濃度と沿道建物や周辺市街地の空間構造との関連、大気安定度との関連、およびストリートキャニオン内部の流れと大気汚染物質の拡散の関連を詳細に調べた。本論文ではこれらの実験結果を中心に述べ、更にストリートキャニオン内部の濃度分布や平均濃度の簡易な推定法に関する提案を行った。本論文の結果は大気安定度の異なるストリートキャニオンにおける汚染物拡散の測定データベースとして、また、汚染物濃度の推定法は今後の都市環境計画の基礎資料として整備されるものである。

本論文の主な内容と構成は以下の通りである。

第1章では「沿道大気汚染と市街地気流および大気安定度との関連」に関する研究の必要性と、既往の研究について概観した。

第2章では、従来の風洞実験では経験しなかった、温度成層風洞を用いる際の問題、たとえば測定部内外の温度差、高温の気流による障害をはじめとして、高温環境下での可視化実験、拡散実験におけるトレーサーガスの排出方法、濃度分布の測定方法、レーザー流速計を用いる際の流れ場・温度場を乱さないシーディング手法等に関する検討結果を述べた。

第3章では、市街地低層部における沿道大気汚染濃度分布の概略を把握する

ためにおこなった拡散実験の結果を示す。通常の幹線道路沿道よりも高濃度が予想される交差点を中心に、数ブロックの街区全体を含む比較的広い範囲の濃度分布と、交差点近傍の建物に囲まれた道路内部の濃度分布を細かく調べる実験の2段階に分け、それぞれに対する街区の高さ、風向、近傍の建物の影響などを調べた。その結果、道路を中心とした広い範囲における平均的な市街地の濃度分布に対しては、第1に建物による凹凸よりも横の広がりが大きいため濃度分布は全体として単調であること。第2に高濃度は交差点など、汚染の発生源を中心とした比較的狭い範囲に発生し、交差点や幹線道路からの距離に反比例して濃度が減少することがわかった。これに対し、交差点や沿道の濃度分布は場所による濃度の差が大きく、近傍の建物のつくりだす複雑な気流分布の影響を受け、交差点内部とほぼ同じ程度の高濃度が一般の幹線沿道の建物周辺にも生じることがわかった。

こうした濃度の分布はストリートキャニオン内部の流れによる汚染の移流拡散の結果生じるものである。しかし従来から用いられてきた計測手法によってはストリートキャニオン内部の複雑な流れ場の測定は非常に難しく、さらにそれが温度成層流である場合にはほとんど不可能であった。

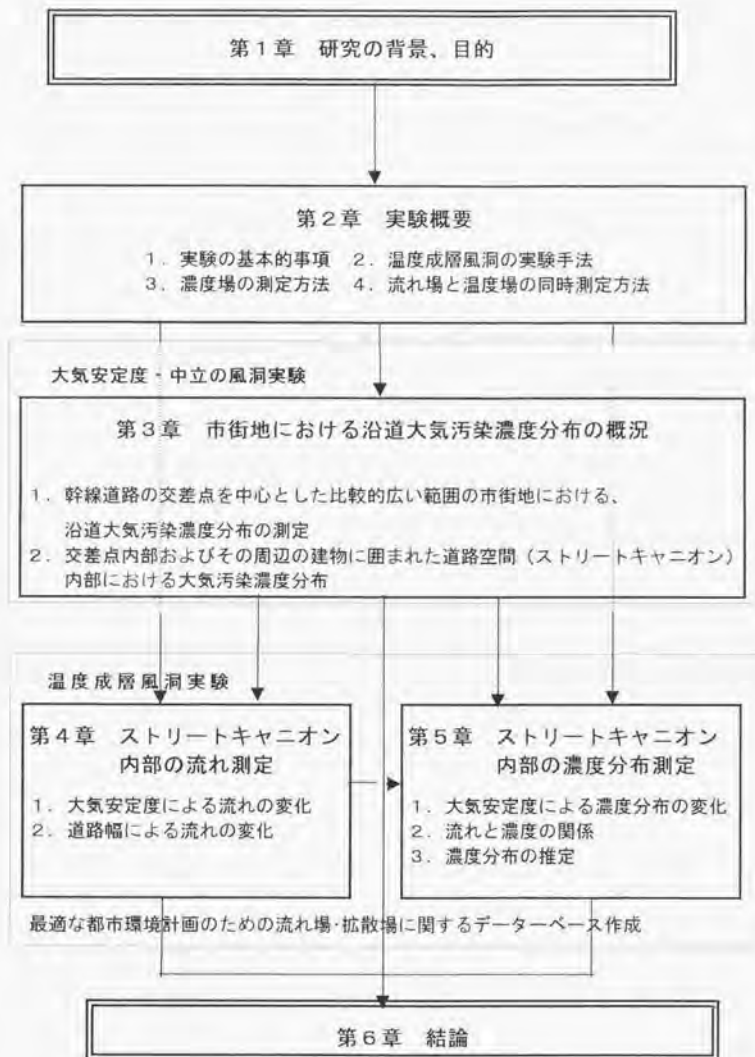
第4章では、こうした複雑なストリートキャニオン内部の流れ場と温度場を、レーザードップラー流速計(LDV)と冷線温度計(コールドワイヤ)によって測定した結果を示す。実験には温度成層風洞を用い、大気安定度や道路幅による流れ場の変化を調べた。その結果、ストリートキャニオン内部には地上で逆流する向きの大きな渦を生じ、風速や乱流統計量の分布は大気安定度の影響を強く受けること。建物高さや道路幅の比が、一般の市街地におけるそれとほぼ等しい1:1~1:2のときに最も強い渦が形成されることなどがわかり、こうしたストリートキャニオン内部の流れが汚染物質の拡散に大きな影響を与えていることが明らかになった。

第5章では前章の結果を受け、トレーサー実験によってストリートキャニオン内部における濃度分布を種々の大気安定条件の下で調べ、流れ場や大気安定度と汚染の拡散構造の関連を明らかにした。その結果ストリートキャニオン内の濃度は大気の温度成層条件が安定ほど高く、不安定で低くなること。その増減は大気安定度によらずストリートキャニオン上端の風速の変化に対応していること。Jonssonらによって提案されたストリートキャニオンモデル中で、経験常数として用いられている係数を、流れ場の測定値から得られる風速比や、乱

れ強さから推定し、それらを用いることによって種々の大気安定度におけるストリートキャニオン内部の濃度分布が実用精度で予測可能なことを示した。

第6章では、各章で得られた知見をまとめ総括的な結論を述べた。

以下に本論文の構成をフローで示す。



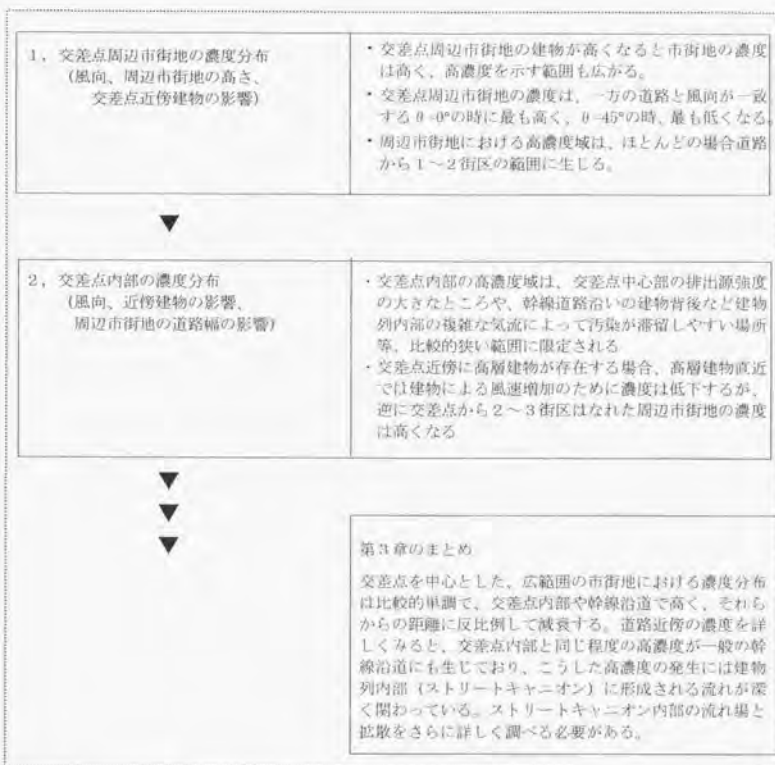
内容梗概

各章における実験内容・検討事項	得られた知見・問題点
-----------------	------------

第2章 実験概要

1. 温度成層風洞の概要	
▼	
2. 温度成層風洞の実験手法	<ul style="list-style-type: none"> 測定部を加熱したときに生じる2次流れの悪影響を、断熱フェンスを2重にすることによって除去した。 模型の伝熱性は、風速・乱れ強さの分布にはほとんど影響しない。
▼	
3. 濃度場の測定方法	<ul style="list-style-type: none"> 温度成層の影響で地上風速が極端に低下する場合、トレーザーガスの排出には特別の配慮を要する。 交差点の風上側に延びる道路の交差点濃度に対する汚染寄与は、直近の道路のものが支配的である。 地上の複雑な濃度分布を測定するためにはなるべく低く、平均的な濃度を荒く測定するためには模型高さの1/2程度の測定高さが適当である。
▼	
4. 流れ場の測定方法	<ul style="list-style-type: none"> 音響スピーカーを用いた（流れ場と温度場を乱さない）、レーザー流速計のシーディング方法を開発した。 データーレートが極端に低いときでも、十分な測定時間が確保されれば、誤差なく乱れを測定できることを確認した。
▼	
▼	
▼	

第3章 市街地における
沿道大気汚染濃度分布の概況



第4章 ストリートキャニオン

内部の流れ

1. ストリートキャニオン内部流れに対する大気安定度の影響

- ・ ストリートキャニオン内部には地上で逆流する向きの大きな渦を生じ、その強さは大気安定度によって大きく変化する。
- ・ ストリートキャニオン（幅と高さの寸法比 (L/H) が 1:1) の上端と低層の逆流の風速比は、中立で 0.61 であるのに対し、不安定では -0.59、強安定の時にはほとんど 0 近くまで低下する。
- ・ ストリートキャニオン内の乱れも大気安定度の影響を強く受け、強安定と強不安定の乱流エネルギーには約 30 倍の差がある。（寸法比 $(L/H)=1:1$ ）



2. ストリートキャニオン内部流れに対する道路幅の影響

- ・ ストリートキャニオンの寸法比によって内部の平均流れ場は大きく異なる。
- ・ 道路幅 L が建物高さ H の 4 倍以上のとき ($4 < L/H$)、キャニオン内部で流れが再付着し、風上側建物背後と風上側建物前面それぞれの位置に渦が生じる。
- ・ 道路幅が建物高さの 2 倍以上のとき ($2 < L/H < 4$)、キャニオン内部に横長の渦ができるが、流れは不安定で風速は低い。
- ・ 道路幅が建物高さの 2 倍以下の時 ($L/H < 2$)、キャニオン内部に強い渦が一つできる。寸法比が $1 < L/H < 2$ のとき渦は最も強くなる。
- ・ ストリートキャニオン内部の乱流統計量に対しては道路幅よりも大気安定度の方が強く影響する。



第4章のまとめ

ストリートキャニオン内部には地上で逆流する向きの大きな渦を生じ、風速や乱流統計量は大気安定度の影響を強く受けること。建物高さと道路幅の比が、一般の市街地におけるそれとほぼ等しい 1:1~1:2 のときに最も強い渦が形成されることなどがわかり、こうしたストリートキャニオン内部の流れが汚染物質の拡散に大きな影響を与えていることが示唆された。



第5章 ストリートキャニオン
内部の汚染物の拡散に及ぼす
大気安定度の影響

<p>1. 大気安定度によるストリートキャニオン内部における濃度分布の差</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・ストリートキャニオン内部の濃度は、大気安定の時に高く、不安定で低くなる。 ・安定が非常に強いときには汚染質の拡散構造が変わるため、キャニオン内外の濃度分布は他の条件の時と全く異なり、鉛直方向への濃度勾配が大きく、上下に圧縮された分布を示す。 ・風が通り抜ける街区間の隙間の道路にも、キャニオン内と同じような逆流が生じることがあり、そのために道路中央から排出されたトレーサーガスは風上側にも運ばれ、キャニオン内の鉛直断面と類似の濃度分布を示す。この傾向は中立から不安定の条件で強く強安定では弱くなる。
--	--



<p>2. ストリートキャニオン内外の流れと濃度の関係</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・ストリートキャニオン内の平均濃度は、キャニオン内の換気量Qcとトレーサーガス排出量qから求まる濃度(q/Qc)より、キャニオン上端から内部に再び戻ってくる再循環の濃度分だけ高くなる。この再循環の割合は不安定で低く、安定で高くなる
---------------------------------	--



<p>3. ストリートキャニオンモデルによる濃度分布の予測</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・キャニオン上端の風速U_sとキャニオン内の逆流風速U_rの関係、トレーサーガス排出量qおよび再循環率Rからキャニオン内の平均濃度を予測することができる。 ・Johnson らのストリートキャニオンモデルによる濃度予測値は流れ場の測定から求まる係数を用いた時、風洞における拡散実験の値と比較的近い値を示す。
-----------------------------------	--



第5章のまとめ

ストリートキャニオン内の濃度は大気安定ほど高く、不安定で低くなる。その増減は大気安定度によらずキャニオン上端の風速の変化に対応している。Johnson らによって提案されたストリートキャニオンモデル中で経験常数として用いられている係数を、流れ場の測定値から得られる風速比や乱れ強さから推定し、それらを用いることによって種々の大気安定度におけるストリートキャニオン内部の濃度分布を実用精度で予測できる。



結論

- ・市街地低層部における大気汚染物質の拡散構造を明らかにするために風洞実験を行った。
- ・第2章では温度成層風洞における実験手法、濃度場・流れ場の計測手法について検討した。それらをふまえて、
- ・第3章では市街地における沿道大気汚染の概況を調べ、交差点中央部と同程度の高濃度が一般幹線沿道の建物に囲まれたいわゆるストリートキャニオン内部でも生じることがわかった。
- ・第4章では、ストリートキャニオン内部の流れをレーザー流速計によって計測した。その結果、ストリートキャニオン内部には地上で逆流する向きの強い渦が生じ、風速や乱流統計量は大気安定度の影響を強く受けることがわかった。
- ・第5章ではストリートキャニオン内部の濃度場を詳しく調べ、大気が安定なほど濃度が高く、不安定なほど濃度が低いこと、流れ場の情報から、キャニオン内の平均濃度や濃度分布をある程度予測できることを示した。
- ・第4、5章を通じ、ストリートキャニオン内部の流れ場と濃度場に関して、数値シミュレーション結果を検証するための、詳細なデータベースを得ることができた。
- ・今後は、ストリートキャニオン前後の建物高さ・接近流の条件などの影響を調べ、より一般的な条件での流れと拡散について調べる必要がある。

記号

C	濃度、ppm
C_0	q / Q_c で定義される再循環率: R が 0 のときの ストリートキャニオン内の仮想的濃度、ppm
C_1	C_0 より再循環の分だけ高くなった ストリートキャニオン内部における実質の平均濃度、ppm
Cave	風洞実験から得られたストリートキャニオン内部の 平均濃度、ppm
Cd	抵抗係数
Cest	トレーサーガス排出量とキャニオン上端の風速から予測された ストリートキャニオン内平均濃度 = $q / (Q \times (1 - R))$ 、ppm
Cn	無次元濃度 = $CL / (q / U_{100})$ 、ppm/ppm
Cpb	建物風下側壁面における圧力係数
Cpw	建物風上側壁面における圧力係数
e	乱流エネルギー = $1/2 (\sigma u^2 + \sigma v^2 + \sigma w^2)$
H	模型街区の高さ = 100 mm
Hst	ストリートキャニオン風下建物前面における淀み点の高さ、mm
Hs	第 3 章における交差点周辺街区の高さ = 50mm
K	ストリートキャニオンモデル中で用いられる無次元定数 = $k_1 \times k_2 \times (1 / (1 - R))$
k_1	ストリートキャニオン内の逆流による汚染ガスの輸送距離と 鉛直方向の拡散幅の比
k_2	ストリートキャニオン上端と地上 ($Z = 10$ mm) における風速の比 = U_{10} / U_H
L	ストリートキャニオンの幅、または代表長さ、mm
Q_c	ストリートキャニオン内における循環流量、 $U_r \times 0.5H$ で定義する、cc/sec•m
q	ストリートキャニオン内に排出される トレーサーガス流量、cc/sec•m
Q	線源からのトレーサーガス排出量 = 400cc/min. / m
θ	風向、°
R	ストリートキャニオン内で発生した汚染ガスが キャニオン上面から再度内部に戻る割合: 再循環率
Rb	バルクリチャードソン数 = $gH(T_H - T_0) / \{ (T_{AVE} + 273) (U_H)^2 \}$
Ri	局所リチャードソン数 = $(g\partial T / \partial Z) / \{ (T + 273) (\partial U / \partial Z)^2 \}$

S	街区模型中心間の距離 = $l_i + 1$
$\sigma_u, \sigma_v, \sigma_w$	u, v, w の標準偏差、m/s
Sx	交差点風上側におかれた線源の長さ = 1~12m
T	平均温度、°C
t	温度の標準偏差、°C
T_0	Z = 0 における温度 °C、 床面近傍の温度の鉛直分布より外挿して求める
T_{AVE}	対象としている範囲における平均温度、°C
T_a	気流温度、°C
T_f	床面温度、°C
T_m	模型の表面温度、°C
$\bar{U}, \bar{V}, \bar{W}$	X, Y, Z 方向の平均風速成分、m/s
u, v, w	X, Y, Z 方向の風速成分、m/s
U_w	風洞基準風速 = 1.5m/s
U_{700}	ストリートキャニオンの上層 Z = 700 mm における風速、 ≡ 風洞基準風速、m/s
U_b	ストリートキャニオン低層における逆流の速度、m/s
U_{bmax}	ストリートキャニオン内の逆流の最大風速、m/s
U_{\uparrow}	ストリートキャニオン上端の風速、m/s
U_r	ストリートキャニオン内部の循環流の平均風速、 ストリートキャニオン中央における風速分布から求める、m/s
W	第3章における周辺街区の道路幅 = 100 または 50m
X, Y, Z	平均風向方向、水平直角方向、鉛直方向の空間座標、m 交差点中央またはストリートキャニオン先端、 風洞スパン方向中央および風洞床面を原点とする
() _H	床面からの高さ H における値であることを示す：

市街地低層部における流れと拡散に及ぼす
大気安定度の影響に関する実験的研究

目 次

第1章 序論

1. 1 研究の背景	1
1. 2 市街地低層部における流れと拡散に関する既往の研究	2
1. 2. 1 中立大気における大気汚染物質の拡散について	2
1. 2. 2 大気汚染物質の拡散に及ぼす大気安定度の影響について	4
1. 2. 3 市街地低層部の流れに及ぼす大気安定度の影響について	5
1. 3 本研究の目的	7

第2章 風洞実験の概要

2. 1 温度成層風洞と測定部の状況	8
2. 1. 1 大気拡散風洞	8
2. 1. 2 測定部の状況	12
2. 2 相似条件	15
2. 3 実験風速	17
2. 4 可視化実験の方法	17
2. 5 濃度場の測定方法	18
2. 5. 1 トレーサーガスの排出	18
2. 5. 2 試料ガスのサンプリングと濃度の測定	21
2. 5. 3 炭化水素分析計の校正	21
2. 5. 4 交差点周辺の濃度に対する 風上側道路汚染源寄与に関する検討	22
2. 5. 5 測定高さの検討	25
2. 6 レーザ流速計とコールドワイヤによる 流れ場と温度場の測定	28
2. 6. 1 測定の概要	28

2. 6. 2	粒子の供給	29
2. 6. 3	シーディング粒子の沈降速度とその補正	32
2. 6. 4	データ処理	35
2. 7	模型の熱伝導性が流れ場に及ぼす影響	36
第3章	市街地における沿道周辺の大気汚染濃度分布の概況	39
3. 0	実市街地における沿道濃度観測と縮尺模型を用いた風洞実験	39
3. 1	交差点周辺市街地の濃度分布	39-3
3. 1. 1	周辺市街地の高さの影響	39-3
3. 1. 2	交差点近傍の単独または複数の建物の影響	43
3. 2	交差点内部の濃度分布	46
3. 2. 1	風向の影響	46
3. 2. 2	鉛直面内の濃度分布	48
3. 2. 3	近傍建物の影響	50
3. 2. 4	周辺市街地の道路幅の影響	51
3. 3	第3章のまとめ	52
第4章	ストリートキャニオン内部の流れの測定	53
4. 1	大気安定度の影響	53
4. 1. 1	実験の概要	53
4. 1. 2	風速と温度の乱流統計量の鉛直プロファイル	56
4. 1. 3	大気安定度による流れの変化	64
4. 2	道路幅の影響	84
4. 2. 1	実験の概要	84
4. 2. 2	道路幅による内部流れの変化	85
4. 2. 3	ストリートキャニオン内の流れパターン	88
4. 2. 4	道路幅が広いストリートキャニオン内の 流れに対する大気安定度の影響	94
4. 2. 5	乱れの分布に対する道路幅および大気安定度の影響	98
4. 3	4章のまとめ	101

第5章	ストリートキャニオン内部の大気汚染物質拡散 に及ぼす大気安定度の影響	103
5.1	実験の概要	103
5.1.1	街区模型	103
5.1.2	測定点および実験条件	103
5.1.3	トレーサーガスの排出と濃度の測定	104
5.2	濃度分布に及ぼす大気安定度の影響	104
5.3	ストリートキャニオン内外の流れと濃度の関係	111
5.4	ストリートキャニオンモデルによる濃度分布予測	118
5.5	第5章のまとめ	121
第6章	結論	123
引用文献		128
本論文関連の既発表文献		135
あとがき		139

第1章 序論

1. 1 研究の背景

我が国の高度経済成長期に発生した顕著な環境汚染の一つとして、四日市ぜん息等に代表される大気汚染がある^{5,6)}。当時の大気汚染による健康被害の原因物質は、主として大規模固定発生源からの二酸化硫黄(SO₂)であり、燃料の改質や脱硫装置の導入など国をあげての大気汚染防止努力により大幅な改善を見た。昭和50年代に入ると、大都市部では二酸化窒素(NO₂)と浮遊粒子状物質(SPM)を中心とする自動車排ガスによる大気汚染が深刻になってきたが、これに対してはガソリンの無鉛化や自動車排ガス規制^{7,8)}、触媒装置などの技術的対応が効果をあらわし一酸化炭素(CO)、炭化水素(HC)、窒素酸化物(NO_x)濃度は大幅に削減された。

しかし、昭和50年代後半からは自動車台数の増加、特に、技術的対応が困難な大型ディーゼル車の増加に施策の効果が追いつかず、窒素酸化物(NO_x)や浮遊粒子状物質(SPM)による汚染は改善されず、むしろ昭和60年代以降は悪化の傾向を示している^{9,10)}。自動車排ガスによる都市大気汚染の特徴は、道路近傍の汚染濃度が後背地に比べ数倍高い¹¹⁾ことであり、加えて都市の高層化、道路の複層化など都市の高密度な空間利用による風通しの悪さが沿道の高濃度汚染に拍車をかけている点にある。

沿道の大気汚染による沿道周辺住民の健康被害については呼吸器等の疾患^{12,13)}のみならず、排ガス中の多環芳香族の発癌性¹⁴⁾やディーゼル排ガスの雄生殖生殖器系への影響¹⁵⁾が報告されるなど、ますます広がりを見せている。

こうした状況を背景として、本研究は温度成層風洞を用いて、道路構造や周辺市街地の構造あるいは大気安定度が沿道における風の流れや排ガス拡散に与える影響を調べ、市街地最下層における風の流れと汚染濃度の微細な分布構造を解明することによって風通しが良く、汚染の少ない都市の実現に資することを目的としている。

1. 2 市街地低層部における流れと拡散に関する既往の研究

市街地における汚染物の拡散に関連したこれまでの研究を、1)自動車排ガスによる沿道大気汚染濃度分布に関する研究、2)大気汚染物質の拡散に及ぼす大気安定度の影響に関する研究、3)市街地低層部の気流に及ぼす大気安定度の影響に関する研究の3分野に分け、それぞれについて概観する。

1. 2. 1 自動車排ガスによる沿道大気汚染濃度分布に関する研究

自動車排ガスによる都市大気汚染の現状を把握するためのフィールド観測は比較的多く行われてきた。Menachem et al.(1990)²⁶⁾、Y.Qin et al.(1993)⁴⁶⁾は汚染濃度に対して道路形状が交通量と同様に重要であることを指摘し、河野ら(1987)^{47,48)}、飯田ら(1987)⁷⁸⁾、佐藤ら(1987)⁶⁶⁾、大西ら(1990)⁷¹⁾、皆川ら(1991)⁴⁰⁾、新藤ら(1991)⁶⁶⁾、今野ら(1994)⁶⁴⁾、Janssen et al.(1997)²⁷⁾は道路の近傍、数十メートルの間で濃度が急激に低下すること、池沢ら(1991)⁷⁰⁾、大野ら(1994)⁷⁵⁾は風向や沿道の家屋、道路構造の違いによって濃度分布が大きく異なること、また、飯田ら(1987)⁷⁸⁾、新藤ら(1991)⁶⁶⁾は交差点付近で一般の沿道より高い濃度を示すことなどを指摘してきた。

道路及び、沿道市街地の構造のいくつかの要素の影響に対しては、風洞実験による研究がなされている。Kennedy et al.(1977)²⁰⁾、Bachlin et al.(1991)⁶⁾はそれぞれ実在市街地の縮尺模型を用いて拡散実験を行い、局所的地形地物の汚染物拡散に与える影響が大きいことを示し、さらに実測値と風洞実験値との比較も試み良好な一致を見た。Wedding et al.(1977)⁴¹⁾は単純な形状の街区模型を用いて沿道近傍の建物の影響を調べた。鎌田(1979)⁶¹⁾は建物近傍での汚染物拡散に関連して、2枚の板状模型間の拡散を模型形状や接近流などの条件を変えて詳細に調べた。北林(1988)²⁰⁾は単純化した市街地模型による拡散実験から、建物の高層化によって沿道濃度が高く、後背地の濃度が低下することを指摘した。Hoydysh and Dabberdt(1974)¹²⁾、(1988)¹⁰⁾、(1991)⁹⁾、(1994)¹¹⁾は同じく単純な街区模型を用いて一連の研究を行い、街区の形状、道路幅、ストリートキャニオン前後の街区形状などの影響を調べており、最近の研究では交差点周辺の濃度分布の重要性を指摘している。

上述した実験の多くは比較的狭い沿道周辺の濃度分布を取り扱ったものがほとんどで、後背地を含む広い範囲の平面的、立体的な濃度場まで調べた例は見

あたらない。また交差点及びその周辺の濃度にたいしてはその重要性が指摘されているにも関わらず、Hoydysh(1994)¹¹⁾以外に風洞実験によってこの問題に取り組んだ例がない。Dabberdt (1991)¹²⁾が指摘しているとおりに、風上側にのびる道路からの交差点に対する汚染寄与をどう取り扱うかが難しいからである。

Hoydysh(1994)¹¹⁾は交差点の濃度分布を調べるために交差点の横と風上側の2ヶ所に設置した点源からトレーサーを出して実験しているが、風上側道路からの汚染寄与を考慮しておらず、十分な条件設定とはいえない。

以上、既往の研究においては沿道建物や街区の形状、道路幅などの沿道大気汚染濃度分布に対する影響などに関する研究は多いが、後背地を含めた比較的広い範囲に及ぼす道路汚染の影響や、高濃度が予想される交差点近傍の濃度分布などについては十分な知見が得られていない。

1. 2. 2 大気汚染物質の拡散に及ぼす

大気安定度の影響に関する研究

大気汚染物質の拡散が大気安定度の影響を強く受けることはよく知られており²⁸⁾ これらの影響を調べた風洞実験は、少ないながらも比較的はやくから行われてきた。Ogawa (1975)⁴⁰⁾、Meroney (1975)³⁰⁾、Sethuraman (1974)³⁴⁾らは海風や都市のヒートアイランドにみられるような、上層の安定に抑えられた下層の不安定成層流(Convective Boundary Layer:CBL)中の拡散を、Cermak (1984)¹⁹⁾らは複雑地形上の安定成層流中の拡散を風洞実験によって調べた。これらはいずれも工場、発電所などの立地に関連した影響評価をするために、大気安定度と地形の影響とが複合した場合における郊外での拡散を調べたものである。

これに対して、建物周辺や市街地内部における拡散に対する安定度の影響を調べた例はきわめて少なくYang (1970)⁹⁾ら、磯村 (1976)⁴¹⁾らの研究があるのみである。Yang らは原子力発電所建物からの汚染漏洩に関連して安定成層流中におかれた孤立建物模型背後の拡散を調べた。磯村らは温度成層風洞に実在市街地の模型を設置して自動車排ガスの裕道大気汚染濃度に対する安定度の影響を調べたが、その実験結果には安定と中立の濃度に有意な差が認められず、また接近流の相似に対する考慮がなされていない。

このように市街地低層部とくにストリートキャニオン内部における拡散と、それに対する安定度の影響を調べた例はほとんどなく、市街地低層部の拡散場とそれに対する流れ場と大気安定度の影響に関する知見はほとんど得られていない。

1. 2. 3 市街地低層部の気流に及ぼす

大気安定度の影響に関する研究

市街地における大気汚染物質の拡散は、大小の建物や道路によって形成される、都市最下層の凹凸内外の流れと深く関係している。特に、自動車排ガスは道路面から排出されるので、その拡散を理解するためには市街地最下層の建物によって仕切られた道路（ストリートキャニオン）内部の流れを明らかにすることが必須である。

ストリートキャニオン内の流れに関する研究はフィールドおよび風洞実験ともに比較的少ない。フィールド観測には、キャニオン内外の風速比や乱れの関係を調べた DePaul et al.(1986)⁹⁾、Yamartino et al.(1986)³²⁾の研究、キャニオン内の温度分布を外周風や大気安定度との関連において調べた Nakamura et al.(1988)⁴⁰⁾の研究、Rotach (1995)²⁰⁾のキャニオン内外の乱れのプロファイルに関する長期の観測などがある。

風洞においては、Lee(1977)²⁾が建物群の建築密度と群内部の建物壁面圧力分布の関連を調べ、その結果を、Morris(1955)⁹⁾が管内の摩擦損失に関連して導入した3つの流れパターン分類と関連づけ、建物間の流れ場の変化と隣棟間隔との関係を推定している。そしてOke(1988)³⁰⁾がその流れパターンを概念図で示した。しかし、この流れパターンは流れ場の測定によって確認されたものではない。これに対して、鎌田(1979)⁹⁰⁾は熱線風速計による測定と可視化実験、圧力測定などによって二つの建物模型間の流れを調べたが、実験は街区を想定しない単独模型によるものであった。Hoydysh et al.(1988)⁴⁰⁾はビデオ撮影した bubble の軌跡からキャニオン内の風速を見積もった。また、村上ら(1990)⁷⁰⁾は規則的に配置された建物模型群内部の流れ場を風洞実験においてタンデム風速計を用いて測定している。孟ら(1997)⁸¹⁾は千鳥に配列した種々の建築密度の建物群模型内部の流れをスプリットファイバークローブを用いて測定し、その結果と Lee の3つの流れパターンを対応させ、建築密度と建物間の風速や乱れ強さについて検討した。しかし孟らの扱った流れ場は千鳥配置の粗度要素内部の流れであり、通常の意味でのストリートキャニオン内の流れとは異なる。

このように、風洞実験においてはタンデム風速計やスプリットファイバークローブなど熱線風速計の原理を応用した新しい計測技術の導入によって、市街地低層部の複雑な流れ場が測定されるようになりつつあるが、ストリートキャ

ニオン内の流れに着目し平均の風向風速や乱れの分布、およびそれらに対する
大気安定度の影響を調べた例は皆無である。

1. 3 本研究の目的

本研究は、都市大気最下層における気流と大気汚染物質の拡散との関連を明らかにし、さらに、それらに対する大気安定度の影響を、温度成層風洞を用いた実験によって明らかにすることを目的としている。

このため本章（第1章）では本研究の必要性と既往の研究について概観する。

第2章では、実験装置としての歴史が浅く実験手法が十分に確立されていない、温度成層風洞による実験上の問題点をはじめとして、可視化実験、拡散実験におけるトレーサーガスの排出方法や濃度分布の測定方法、レーザー流速計を用いる際の実験手法等に関する検討結果を示す。

第3章では、中立時の市街地低層部における沿道大気汚染濃度分布の概況を把握するための拡散実験をおこなう。この結果から沿道大気汚染の濃度分布の特徴を明らかにし、さらに詳しく汚染の拡散構造を調べるための問題点を抽出する。

第4章では、高濃度の局所大気汚染が生じやすいストリートキャニオン（建物に仕切られた道路）内部における汚染物拡散機構を明らかにするために、温度成層条件下のキャニオン内部の流れ場と温度場をレーザー流速計と冷線温度計によって測定し、1) キャニオン内の流れ場と、それに対する温度成層の影響 2) キャニオン内の流れの成り立ちとそれに対する道路幅の影響 3) キャニオン内部の乱流統計量の分布とそれに対する温度成層や道路幅の影響 などについて調べる。

第5章では、キャニオン内の詳細な濃度分布を調べるための拡散実験を行い、流れ場および大気安定度と濃度分布の関連を明らかにする。さらに、ストリートキャニオン内部の平均濃度や濃度分布を風速や汚染物の排出量などから簡易に推定する方法について検討する。

第6章では、本研究の成果を総括し今後の課題を検討する。

第2章 風洞実験の概要

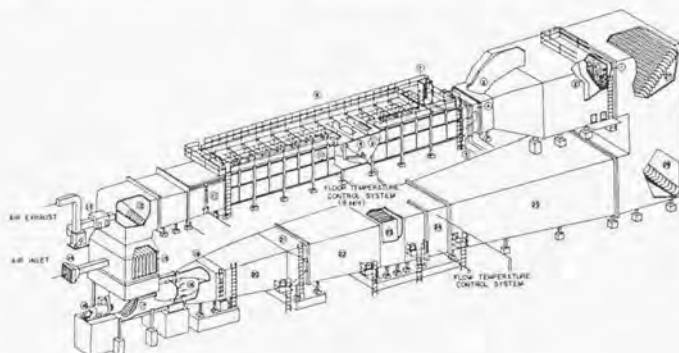
本章では、実験に用いた温度成層風洞の概要について述べた後、温度成層風洞の実験手法、可視化実験、拡散実験、レーザー流速計と冷線温度計を用いた流れ場・温度場の測定方法等についての検討を行う。

2. 1 温度成層風洞と測定部の状況

2. 1. 1 大気拡散風洞

1) 本体

実験に使用した国立環境研究所の大気拡散風洞^{4,2)}を図2.1.1.に示す。風洞型式は縦型の密閉回流式であり、送風機は建物の地階に、測定部は2階に設置されている。測定部の寸法は高さ2m、幅3m、長さ24mであり、天井は40cmの範囲で高さ可変となっている。風速範囲は0.2~10 m/sである。



1 ハニカム	10 加熱冷却床パネル	19 ダンパ
2 スクリーン	11 搬入台車	20 拡散胴
3 縮流部	12 第1コーナー	21 攪拌胴
4 温度成層装置	13 排ガス処理フィルタ	22 拡散胴
5 速度成層装置	14 フィルタ	23 消音胴
6 測定胴	15 消音胴	24 空調胴
7 プロープ支持装置	16 電動機	25 拡散胴
8 トラバース装置	17 第2コーナー	26 第3コーナー
9 可変天井	18 送風機	27 第4コーナー

図2.1.1 国立環境研究所 大気拡散風洞の概要

2) 温度調節機能

測定部に温度成層を生成するために二種類の温度調節機能を持っている。その第一は風洞の気流温度と床面温度の差によって測定部の床面上に温度境界層を発達させるものである。気流温度は送風機と測定部の中間に設置された熱交換機によって $10^{\circ}\text{C} \sim 90^{\circ}\text{C}$ の範囲で、また風洞床面は内部に冷温水を流すことで $0^{\circ}\text{C} \sim 110^{\circ}\text{C}$ の範囲で温度制御される。

第2の温度調節機能は測定部の入り口に設けた電気ヒーター（温度成層装置）によるものである。2 m 高さの測定部を鉛直方向に各 10 cm、20 層に水平分割し、一層あたり 40 本のシーズヒーター（1層あたり 70 kw、全段で 1400kw）が設置され、各層独立に最大 30°C （風速 5 m/s 時）の範囲で加熱される。電気ヒーターの加熱を各層ごとに調節することで、測定部に任意形状の温度分布を形成することができる。

風洞を加熱したときに、熱交換器から測定部に至る風路部分での熱損失のため、壁面近傍での気流温度は熱交換機直後の温度より 10°C 以上低下する。このため本実験では、測定部入り口における温度分布の不均一を温度成層装置の電気ヒーターによって一様になるように補正し、実験条件としての温度成層は気流と床面の温度差によって発達する温度境界層のみを用いた。

写真 2.1.1 a) - d)、2.1.2 e) - h) に各温度設定条件における、風速 1.5 m/s、測定部入り口から 12 m 風下における境界層の発達と乱れを示す可視化写真を示す。写真より、最も強い安定の時には全層にわたって乱れが非常に小さいが、安定が弱くなるにつれて床面近くの乱れの強い層が厚みを増し、中立から不安定でその傾向が強まり、さらに不安定が強くなると境界層全域に大きなうねりを生じているのがわかる。



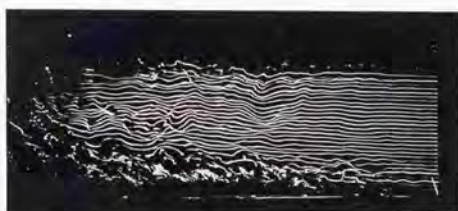
a) 安定 $T_a = 86.7$, $T_f = 11.0$ の場合

風
←



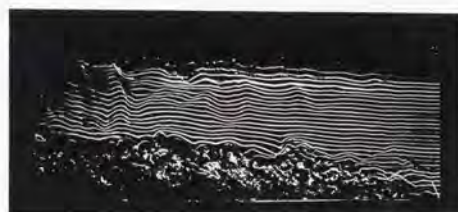
b) 安定 $T_a = 76.8$, $T_f = 20.4$ の場合

風
←



c) 安定 $T_a = 57.6$, $T_f = 20.3$ の場合

風
←



d) 安定 $T_a = 38.0$, $T_f = 19.9$ の場合

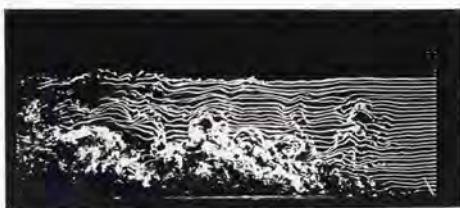
風
←

写真 2.1.1 各温度設定条件における流れの様子



e) 中立 $T_a = 19.8$, $T_f = 20.0$ の場合

風
←



f) 不安定 $T_a = 20.1$, $T_f = 39.5$ の場合

風
←



g) 不安定 $T_a = 20.0$, $T_f = 59.1$ の場合

風
←



h) 不安定 $T_a = 20.7$, $T_f = 78.7$ の場合

風
←

写真 2.1.2 各温度設定条件における流れの様子

2. 1. 2 測定部の状況

1) 粗度の設置状況

粗度および街区模型の設置方法を図 2.1.2 に示す。測定部入り口から 2 m の位置に高さ 100 mm のトリッピングフェンスを置き、2 m から 12 m までは粗度として縦横 100 × 100 mm、高さ 50 mm のスタイロフォーム製のブロックを前後左右とも 100 mm の間隔で千鳥に並べた。12 m 以降は街区を想定し、それぞれの実験条件によって配列、寸法ともに異なるブロックを整型に配置した。

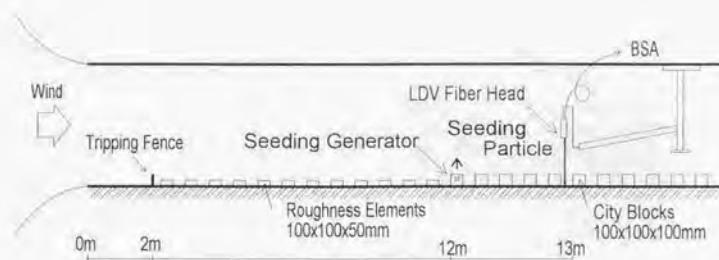


図 2.1.2 粗度および街区模型の設置状況

2) 断熱壁の設置状況とその効果

風洞の気流を加熱したとき風洞内外の温度差により、測定部の風洞主流に対して垂直の面内に2次流れが生じる。天井面や側壁で冷却された流れは側壁に沿って下降し測定部床面の中央付近で収束する。このため測定断面全体にわたって風速や温度分布の一様性が悪化する。

これを回避するため、測定部の側壁から内側に30cmと60cmの位置にそれぞれ高さ1.3mと0.45mのフェンスを2重に設置した。断熱フェンスの効果を確認するため風洞側壁に沿ってトレーサーガスを排出し、トレーサーガス主軸の下降の有無によって2次流れの影響を確認した。二重断熱壁の設置状況を写真2.1.2に示す。



写真 2.1.3 二重断熱壁の設置状況

図 2.1.3 はトレーサーガス排出の高さを $Z=0$ としたとき、その 1m 下流における断熱壁に沿った濃度の鉛直分布である。図より、外側の断熱壁に沿ってはトレーサーガスの主軸が約 200mm 降下し、依然として下降流を取り除けていないのに対し、内側の断熱壁に沿ってはトレーサーガスの主軸高さはほとんど低下せず、2次流れの影響をほぼ完全に取り除けていることが確認された。

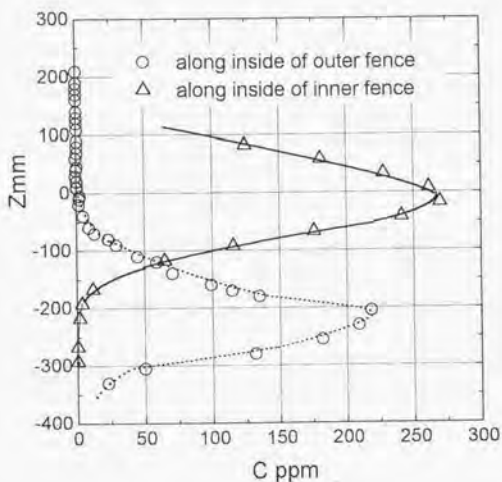


図 2.1.3 トレーサーガスを用いた2重断熱壁に沿う下降流の測定

2. 2 相似条件

中立温度成層の実験では、模型の幾何学的相似、流れ場の相似、排出条件の相似を考慮した^(60, 62)。風洞測定部の風上粗度を並べ指数法則で 1/3 になる鉛直分布を作成した。模型設置位置における風速と乱れ強さの分布を図 2.2.1 に示す。

中立時の風洞実験の再現性については過去にいくつかの研究例があり、所要の相似則を満足した場合に風洞実験は市街地の流れをよく再現することが示されている。例えば流れ場については勝田(1975)⁽⁶⁰⁾、点源からの汚染排出に関しては Bachlin ら(1991)⁽⁶⁾、線源からの汚染排出に関しては Kenndy ら(1977)⁽²⁰⁾、上原ら(1994)⁽⁶³⁾の研究がありいずれも良好な結果を得ている。

大気安定度に関しては Ri 数プロファイルの一致を温度成層流の相似条件^{1(6-38, 40, 44)}と考えた。都市内部における Ri 数のプロファイル実測例は非常に少なく、わずかに Uno ら(1988)⁽¹⁴⁾の観測があるのみである。観測は冬季の札幌市における比較的安定の強い気象条件の時のものであり、本実験における Ri 数プロファイル¹と比較すると図 2.2.2 のようになる。図において、フィールド観測における地上高 Z は、市街地の平均階高と風洞における街区高さを等しいとにおいて、風洞内の高さに換算している。またフィールド観測の Ri 数は局所リチャードソン数 $Ri = (g\partial T/\partial Z)/((T + 273)(\partial U/\partial Z)^2)$ であるが、風洞実験における街区高さよりも上 ($Z > H$; 街区高さ=100 mm) ではおなじ局所リチャードソン数を用い、街区の高さ以下 ($Z < H$; キャニオンの内部) では風速や温度が大きくばらつくため、バルクリチャードソン数 $Rb = gH(T_H - T_0)/((T_M + 273)(U_H)^2)$ によって表示している。

本研究における拡散実験は $-0.21 < Rb < 0.79$ の範囲で行っているが、安定時 ($0.1 < Rb < 0.79$) のキャニオン上端付近の Ri 数プロファイルは、Uno らの観測に近い分布を示していることから、本実験の安定成層条件は都市における冬季の成層条件に近いものを再現していると考えられる。

¹「大気における Ri 数は直位勾配で定義されるが、風洞では高度差が高々 2m と小さいので温度をそのまま用いている。また、風洞内においても大気境界層内と同じくブシネスク近似が成り立つと考え、鉛直に密度成層した流体のゆっくりした（音速に比べて）運動を考慮する場合、流体を非圧縮性に見なすが、深力と成層の影響は考慮する。

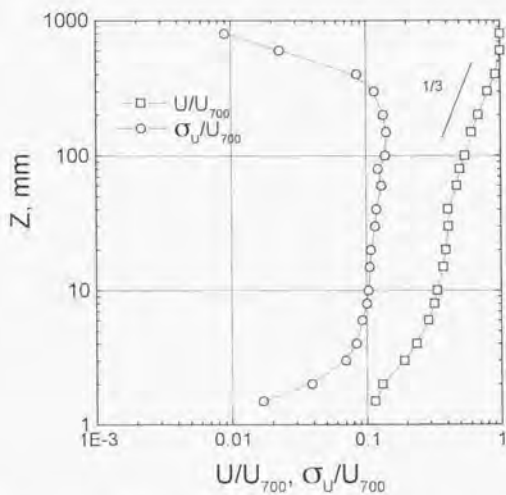


図 2.2.1 模型設置位置における風速と乱れのプロファイル

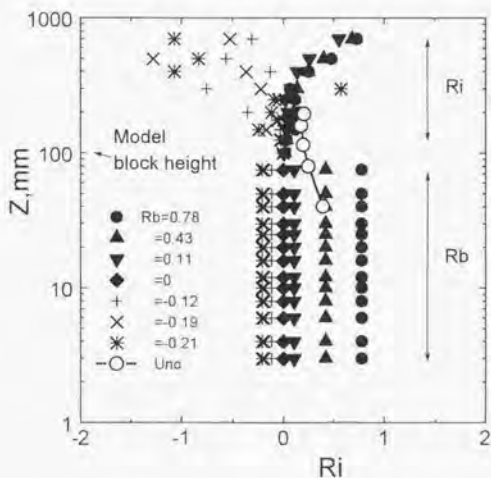


図 2.2.2 測定位置における Ri 数のプロファイル

2. 3 実験風速

一般に風洞基準風速がある程度以上になると流れのパターンは風速（レイノルズ数）によらず、大きく変化しなくなるといわれている。しかし、風速をどれくらいに設定すれば十分かについては扱うべき模型の形状や、模型表面の粗さ、要求される精度等によって異なる³⁷⁾。Hoydish(1974)¹⁴⁾らは本実験とよく似た条件設定において風速と街区模型風下における濃度分布の関係を調べた。その結果、模型高さを代表長さにとったレイノルズ数で3400（風速1m/s、模型高さ5cm）以上であればストリートキャニオン内部における無次元濃度の鉛直分布にレイノルズ数による差がなくなることを明らかにしている。

この例に倣えば、本実験でも基準風速を1m/s以上に設定すればよいと考えられる。一方、大気安定度の影響を調べるためには風速が低いほど浮力の影響が強く現れるので有利である。以上を考慮して風洞基準風速を1.5m/sとした。

2. 4 可視化実験の方法

可視化実験には、煙源として0.5mmφのニクロム線に0.8mmφ、長さ5mmのステンレスパイプを20mm間隔で多数個固定したスモークワイアを用いた。鉛直に張ったワイアの上端から滴下した油はステンレスパイプにたまり、ニクロム線を加熱したときにはその部分からのみ発煙するので煙は流線状になる。発煙油として通常用いる流動パラフィンが高温(60°C以上)の雰囲気の中での発煙が悪くなるため、オレイン酸を用いた。

撮影データ：トプコーンホースマン 105mm-f4.5 解放、t=1/250sec、ボラロイド T67、ASA20000

2. 5 濃度場の測定方法

2. 5. 1 トレーサーガスの排出

自動車排ガスの吐出速度や密度の影響については、それらに比べて自動車の走行に伴う機械的攪拌の影響が大きいと予想されること、また Gronskei(1988)¹⁰⁾によれば、ある程度の風があるときには自動車の走行風の影響は小さいこと、街区そのものの存在影響が自動車のスケールより一桁大きいことなどを考慮し、自動車排ガスを単純な線源からの排出で置き換えた。また実際の交差点では場所によって排ガスの排出強度が変化するが、今回の実験では一様な排出強度とした。

トレーサーガスとしてエタン(C_2H_6)を窒素(N_2)で 20%に希釈したものを線源から排出した。線源からの長手方向のトレーサーガス排出一様性は実験の精度に直接影響するので、一様性確保のための様々な工夫がなされているが、十分に小さく一様性のよい線源は今のところ無い²³⁾。

第3章の実験には長さ 1m、直径 5mm のステンレスパイプに 0.5mm の穴を 10mm 間隔で開け、適当な場所に目張りをしたり、穴の径を広げるなどしてトレーサーガスが線源の長手方向に一様に排出されるよう加工したものをを用いた。第5章の実験では第3章で用いた線源を改良し、もとの線源をそれより一回り大きなパイプの中に入れて2重管とし、外側のパイプに小径の穴を 10mm 間隔で開けたものをを用いた。内側のパイプは外径 5mm のステンレスで、外側のパイプは外径 8mm、内径 6mm 真鍮製である。うちそとのパイプ間隙内のトレーサーガス圧力がパイプの長手方向に一様であれば、外側のパイプに開けた穴からの吹き出しも一様になる。この線源の利点はトレーサーガス排出のための外側のパイプの穴の間隔が短く・均一になるため長手方向の濃度のばらつきをより小さくすることができる点にある。本実験で使用した線源の排出特性を図 2.5.1 に示す。図より線源の端部を除いて最大でも 10%、ほとんどは 5%以内のばらつきに収まり良好な分布をしている。

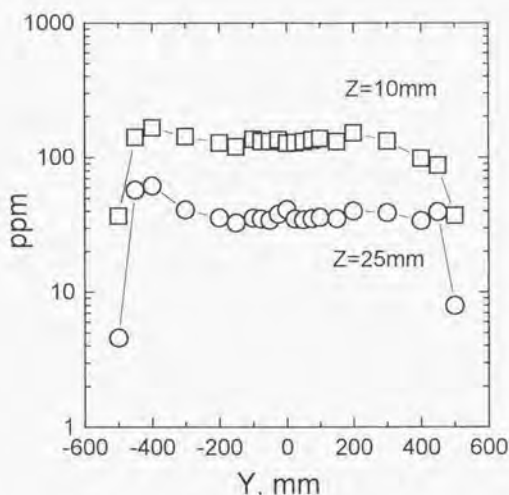


図 2.5.1 2重管を用いた線源の一様性

トレーサーガスは排出速度の影響を避けるため下向きに出した。第5章における強い安定成層条件下では、キャニオン内の風速がほとんど無風近くまで低下するので、線源の穴の周方向の位置のずれによるトレーサーガス排出の偏りの影響が強くなる。それを防ぐため、まず図 2.5.2 に示すように 0.5mmφ のガラスビーズを満たした C チャンネルの中に線源を入れた。そして周方向の排出の偏りを調整するために、フラットな風洞床面に気流と並行に線源を置いてトレーサーガスを排出し、線源の風下端から 200mm 下流における濃度分布が左右対称になるよう線源の傾きを調整した。トレーサーガス排出の対称性を調整した後の濃度分布を図 2.5.3 に示す。

以上に述べたような細工のために線源は全体として高さ 9mm、幅 25mm とかなり大きくなったが、加熱冷却パネルである床面に線源を埋め込むことができなかったのでそのまま床面においた。線源の存在影響は床面近くの流れに対してはかなり大きいと思われるが、キャニオン全体の流れに対しては、それが街区高さの約 1/10 程度でもありほぼ無視しうるものと考えた。

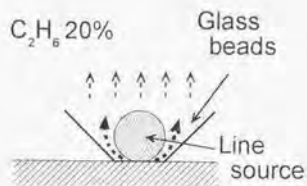


図 2.5.2 線源の設置方法

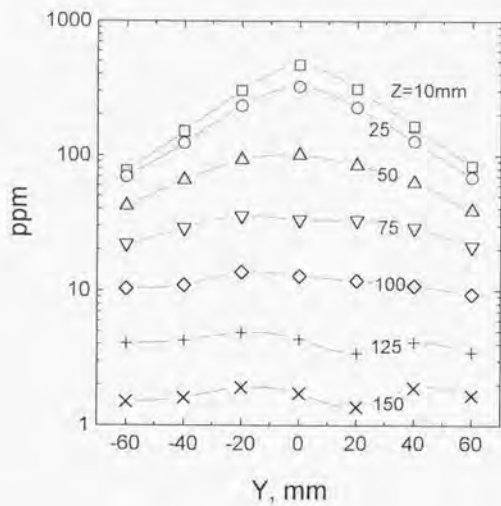


図 2.5.3 線源からのトレーサガス排出の対称性

2. 5. 2 試料ガスのサンプリングと濃度の測定

試料ガスは実験の内容に応じて、適当な間隔に配置した 8 本のステンレスパイプ (3 mmφ) を組み合わせたレイクを用いてサンプリングし、テフロンチューブによって 9ch 炭化水素分析計 (紀本電子) に導き 8 点同時測定を行った。風洞が回流式であるためバックグラウンド濃度も同時に測定している。バックグラウンド濃度の測定位置は模型設置位置のおよそ 2m 風上の風洞側壁と断熱壁に挟まれた位置であり、実験に先立って測定場所による濃度差がないことを確認した。濃度の測定系統図を図 2.5.4 に示す。

2. 5. 3 炭化水素分析計の較正

実験に用いた 9ch 炭化水素分析計は 10, 30, 100, 300, 1000, 5000 ppm の標準濃度エタンガス (空気によって希釈したもの) を、さらに標準空気によって 5 段階に希釈混合した各濃度の標準濃度ガスを用いて較正した。

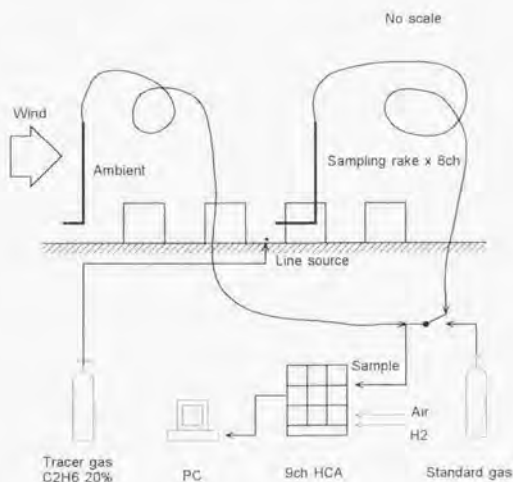


図 2.5.4 濃度の測定系統図

2. 5. 4 交差点周辺の濃度に対する

風上側道路汚染源寄与に関する検討

風洞実験に用いる模型は、通常、実験風向を変えるために模型そのものを回転させる。このために模型全体の形状は円形またはそれに近い多角形になっており、その大きさは風洞測定部の横幅以上にはならない。しかし交差点周辺における自動車起源の大気汚染を問題にするとき、模型として再現できる範囲を超えて風上に長く伸びる道路からの汚染寄与を、現実問題としてどう取り扱えばよいか問題となる。

本節では交差点周辺の濃度分布に及ぼす風上側道路汚染の寄与が、どの程度の強さと広がりを持っているかを実験的に調べ、風上側の道路として再現すべき妥当な長さについて検討する。

実験は2本の道路が直行する交差点で、一方の道路と風向が一致する場合を想定する。交差点風上側の、風洞主流と平行な道路に置く線源の長さを1mから12mまで変化させ、それぞれのときの交差点周辺における道路上の濃度分布を比較する。模型および風上側線源の設置状況は図2.5.5に示すとおりであり、交差点周辺の街区模型はラフネスエレメントと同じ大きさで、模型の縦横寸法100mm、高さ50mm、道路幅100mmとし、粗度要素の後端より2mの範囲に設置した。

風上側汚染源の長さによる交差点周辺の濃度の差を図2.5.6と図2.5.7に示す。図は交差点の前後左右1mの道路中心軸上においた線源とその風上側12mにわたって設置した線源の両方からトレーサーを出したときの、交差点の風洞主流と直交する道路における水平濃度分布の測定結果であり、風上側汚染源の長さ S_x による交差点での濃度分布の差をあらわしている。図2.5.6より地表面付近($Z=10\text{mm}$)の濃度分布は、風上側の汚染源の長さ $S_x=0$ の場合の除いて、 $S_x=1\sim 12\text{m}$ における濃度分布にはほとんど差がない。即ち地上付近の濃度に対しては風上側長さ $S_x=1\text{m}$ までの直近の道路からの汚染寄与が支配的で、それより遠い汚染源の寄与は非常に小さいことがわかる。逆に、街区の上部(粗度高さの2倍、床面から100mm)の濃度分布は図2.5.7に示すとおりで直近の風洞主流と直交する道路からの汚染の影響は全く現れず、風上側道路の影響のみがその長さ S_x に比例して現れ、汚染の左右の道路周辺への広がりも増加している。しかし濃度の絶対値は地表の1/7程度と小さい。

以上より、風上側の道路污染源は厳密には長いほど良いが、地表面の濃度に対しては交差点の中心から 1m 以内の污染源からの寄与が 9 割程度を占めていることがわかった。今後の実験では、多数の線源を用いる場合の流量管理の煩わしさや、線源の長さ按比例して増加するトレーサーガス量のことなど、線源の長さの増加に伴う不利を考えあわせ、交差点中央から風上側の污染源の長さを 1m とする。

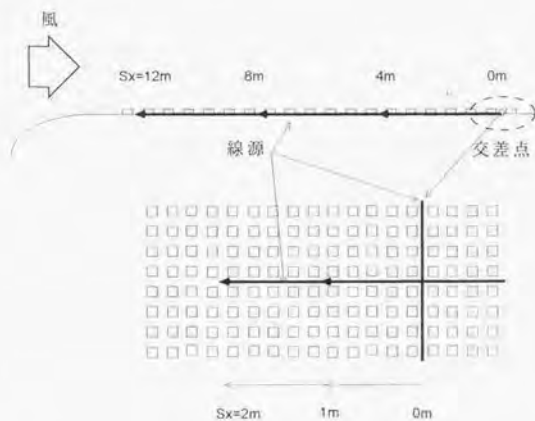


図 2.5.5 模型および風上側線源の設置状況

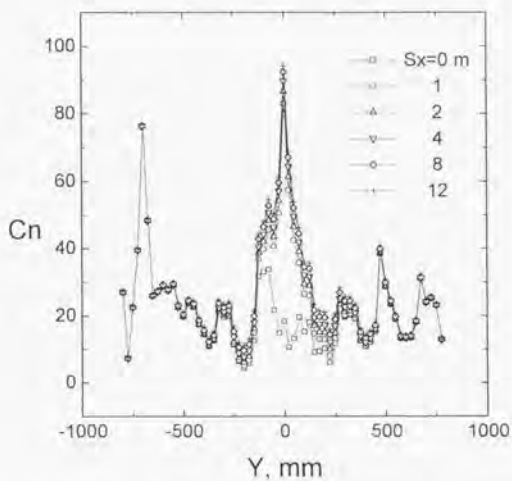


図 2.5.6 地表面($Z = 10$ mm)の濃度に対する風上側汚染源長さの影響

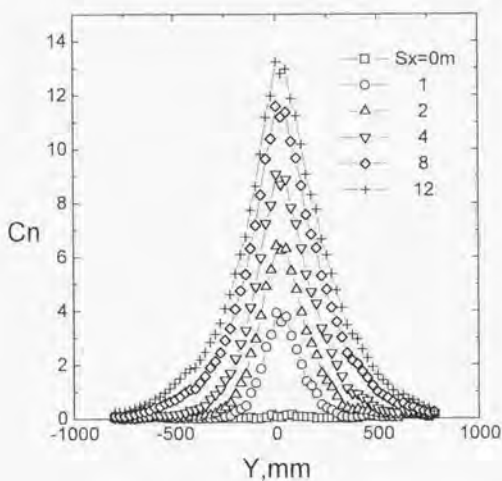


図 2.5.7 街区上部($Z = 100$ mm)の濃度に対する風上側汚染源長さの影響

2. 5. 5 測定高さの検討

本節では交差点内部の濃度分布を3次元的に詳しく測定し、地上付近の複雑な濃度分布を測定するための測定高さに関する検討を行う。排出状況をできるだけ実物に近くするため、図2.5.8のように上り・下り二車線分の線源を道路幅を三等分する位置に設置した。交差点周辺の模型は一辺の長さ100mm、高さ $H = 100\text{mm}$ 、道路幅を100mmとし、測定高さを街区高さの1/10, 1/4, 2/4, 3/4, 1倍まで($Z = 1/10, 1/4, 2/4, 3/4, 1H$)5段階に変えてそれぞれの水平面内の濃度分布を測定した。

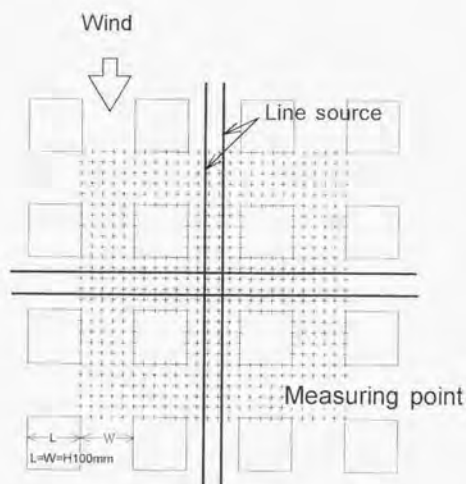


図 2.5.8 模型と線源の設置状況

測定高さ $Z=(1/10)H$ と $(1/4)H$ の濃度分布を図 2.5.9 に比較する。図より、 $Z=(1/10)H$ では地表面付近の複雑な濃度の変化がとらえられているのに対し、 $Z=(1/4)H$ では交差点中心部や、左右の街区に挟まれた道路中央の高濃度が現れていない。測定高さ Z が増すにつれて分布はさらに単調になる。

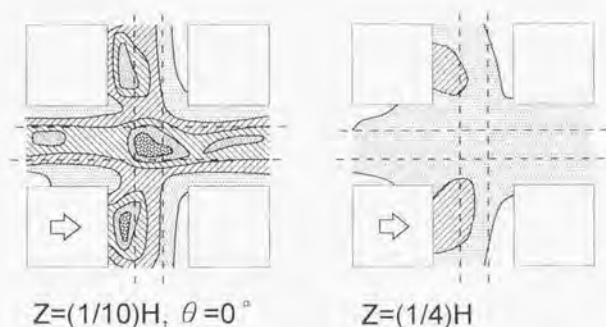


図 2.5.9 $Z=(1/10)H$ と $(1/4)H$ における濃度分布の比較、風向 0°

図 2.5.10 にそれぞれの高さで得られた濃度測定値の出現頻度を比較する。図より測定高さが低いほど高濃度の頻度が高く、場所毎の濃度のばらつきも大きいことがわかる。図 2.5.11 にはそれぞれの測定高さにおける濃度の平均値 C_{ave} を示したが、交差点内の空間の平均値 (図 2.5.8 で示した範囲の、すべての測定高さ: $Z=(1/10)H \sim H$ で得られた測定値の平均) 30.2 に対して $Z=(1/4)H$ では 36.8、 $(1/2)H$ では 24.4 と比較的平均に近い値を示すことがわかる。以上のことから、地表付近の詳細な濃度の分布が必要なときには、測定高さはなるべく低く密な方がよいこと、逆に $(1/4)H$ から $(1/2)H$ 程度の高さで測定すると、少ない測定点から全体の平均に近い濃度を推定するのに都合よいことがわかった。

この結果より、市街地の平均的な濃度分布を測定する実験では測定高さを $(1/4)H$ から $(1/2)H$ に、地上の濃度を詳しく測定する実験においては測定高さを $(1/10)H$ あるいはそれ以下とした。

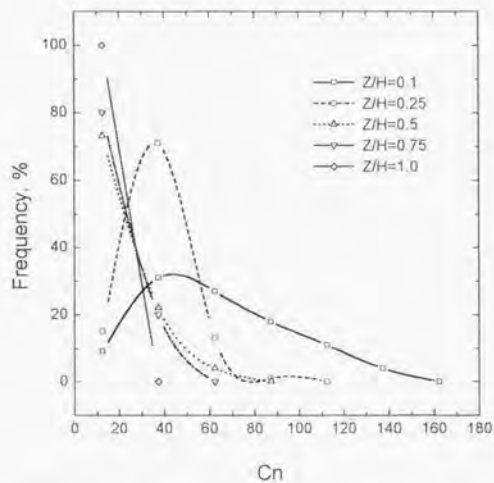


図 2.5.10 測定高さによる濃度測定値の違い

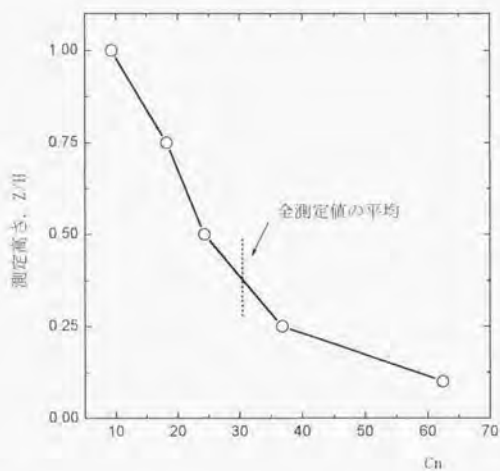


図 2.5.11 各測定高さにおける濃度測定値の平均値

2. 6 レーザー流速計とコールドワイヤによる

流れ場と温度場の測定

2. 6. 1 測定の概要

レーザー流速計の測定系統を図 2.6.1 に示す。風洞測定部天井の上に設置したレーザー発信器よりトランスミッタ（カラーセパレータ、ビームスプリッタ、ブラッグセル）を通してレーザー光は緑、青、紫、各色2本に分けられる。各2本のレーザー光は光ファイバケーブルによって風洞内のトラバース装置に取り付けたヘッドに導かれる。ヘッドから照射されたそれぞれのビームは測定位置で交差し干渉縞を生じる。そこを通過する粒子の散乱光が同じヘッド内の受光部によってバックスキヤッタリングモードで受信されフォトマルへと導かれ、BSAによってノイズ処理された後、散乱光の周期から風速が求められる。

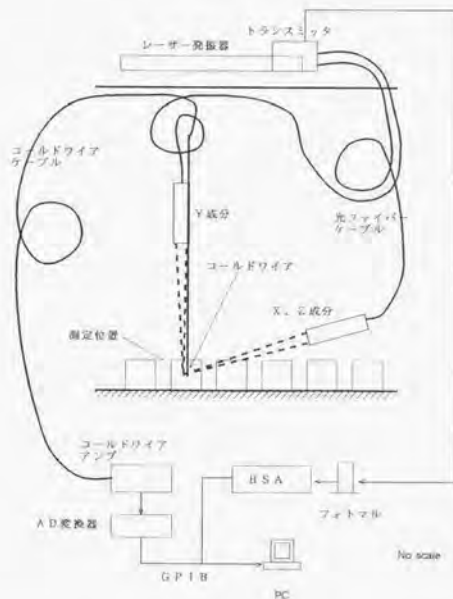


図 2.6.1 レーザー流速計とコールドワイヤの測定系統

写真 2.6.1 に粒子に当たって散乱するレーザー光を示す。写真において斜め横から下向きに u 成分、w 成分測定用の緑と青、鉛直上方から紫のビームが出され測定点で交差している。

レーザー流速計のヘッドの部分は風洞測定部内に置かれるので、気流が加熱されるときには保護冷却のためにビニルチューブをヘッドに巻きつけ、水道水を通じて冷却した。夏期に行った実験では水道水温度は 29°C と高かったが、それでも 84°C に加熱されたヘッド温度は通水によって 39°C まで低下した。

ゴールドワイアは流れ場を乱さないよう、レーザー光の交点より 1~1.5 mm 風下にワイアが流れと平行になるように設置した。

2. 6. 2 粒子の供給

レーザー流速計は場の温度影響を受けず、しかもレーザー光に変調をかけることによって、平均風速がゼロになる乱れ場においても平均風速や乱れを正確に測定できる。その反面、測定すべき流れ場にレーザー光を反射するためのシーディング粒子が必要である。とくに、流体が空気の場合には水と比べるとシーディング粒子の供給が難しく、その成否が計測の結果を左右する。

シーディング粒子を風洞内に注入する方法はいくつか考えられる。最も簡易な方法としては可視化用の発煙装置から発生させる流動パラフィン等の煙を用いる。この方法は煙を注入することで温度と流れ場の両方を乱す可能性がある。また、本実験のように温度の乱れを測定するための冷線を同時に用いる場合には、ミストが冷線に付着してその応答を著しく阻害する。

この 2 つの理由から、本実験ではこの方法を採らずに粉体を用いることを考えた。小径の音響スピーカー前面に 3~4mm のガラスビーズと炭酸マグネシウムの粉末 (粒径 5 μ m) を入れ 20~30 μ m の目開きのナイロンメッシュを張り付け、コーン紙を低周波で加震しガラスビーズでナイロンメッシュをたたき事によって粉末を飛散させた。この方法は流れ場に外からの流体を注入しないので、流れ場・温度場に対する外乱が少ない。粉に混入するガラスビーズはメッシュの目詰まりを防ぎ、内部の粉を攪拌することにも役立っていると思われる。スピーカーの加震周波数はおよそ 100Hz の矩形波で、ファンクションジェネレーターの出力をオーディオアンプに入力し 30W 程度の電力で駆動した。スピーカーを用いた粒子発生器の駆動系統を図 2.6.2 に示す。

スピーカーの設置位置はプロファイルを測定するときのように鉛直方向に広い範囲を測定する場合には粗度要素の風上側に設置したトリッピングフェンス直前に、ストリートキャニオン内部の流れを測定する場合には市街地模型最前列（測定位置の約1m風上）中央の模型に上向きに埋め込んだ。これらの位置ではトリッピングフェンスによって、あるいは5cm高さの粗度要素から10cmの市街地模型に高さが変わることによって、上向きの流れが生じるため粒子の鉛直方向の拡散が良好に行われた。粒子発生器の設置状況を写真2.6.2に示す。

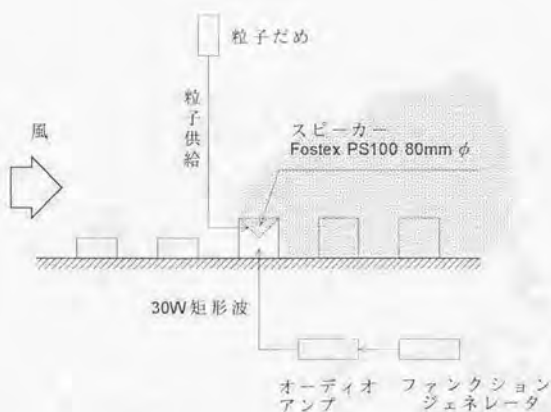


図 2.6.2 粒子発生器の駆動系統



写真 2.6.1 レーザー流速計による測定状況



写真 2.6.2 粒子発生器の設置状況

2. 6. 3 シーディング粒子の沈降速度とその補正

シーディング粒子として用いた炭酸マグネシウム（塩基性炭酸マグネシウム）の密度は約 2.2~2.3 であり、風速の鉛直方向成分の測定値に対してはその沈降速度を補正する必要がある。20 と 80°C の気流温度中を 5~20 μm の粒径の炭酸マグネシウム末が自由落下するときの終端速度をストークスの法則より求めると図 2.6.3 のようになり、粒径 5 μm に対しては気流温度 20°C のとき 0.67cm/sec、80°C のとき 0.56cm/sec であることがわかる。

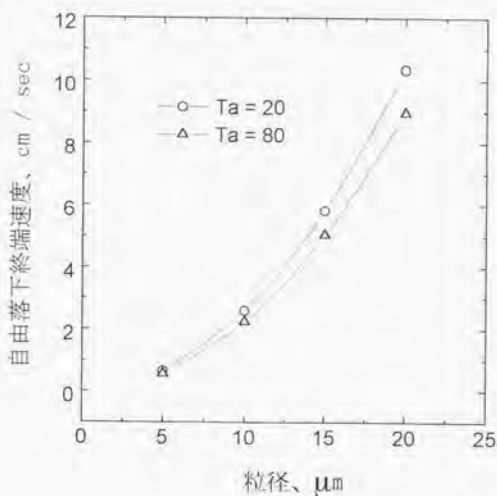


図 2.6.3 シーディング粒子の自由落下 終端速度

一方、市街地模型が置かれないうフラットな床面上の、各温度成層条件における風速の鉛直成分、Wのプロファイルは図 2.6.4 に示すとおりである。平板上の流れであるから風速の鉛直成分はなく、W 成分の測定値は自由落下の終端速度とほぼ同じであるはずであるが、実際の W 成分は全般に落下終端速度よりもおおきく、高さによっても、温度成層条件によっても大きく変わっている。

この理由の一つとして炭酸マグネシウムが凝集して大きな塊になっていることが考えられる。粒子の大きさを中立時の W 成分 (-2 ~ -6 cm/sec) から逆に推定すると、およそ 10 μ m から 15 μ m ほどになっている可能性がある。

風速の鉛直成分、W は温度成層条件によっても変わっている。この理由は、2. 1. 2 1) 項で述べたのと同様に、風洞内外の温度差による 2 次流れのためと考えられる。図 2.6.4 の各成層条件における W 成分を中立時の値からの相対値として表すと図 2.6.5 のようになる。図より安定成層条件下の W は正で、即ち上昇成分を生じており、不安定では逆に下降成分が生じていることを示している。これは、安定成層条件を作るために風洞を加熱したときには両側壁からの下降流が測定部床面の中央部分で収束しそこに上昇成分が生じること、不安定時にはそれとは逆に壁面に沿って上昇する流れが生じ、それを補償する流れとして測定部中央付近に下降流が生じるといった測定部断面全体に及ぶ対流に起因するものと考えられる。2. 1. 2 2) で述べた断熱壁は風洞の測定部全体に及ぶ対流に対しては効果が少ないものと思われる。

現時点ではこのような複雑な成層からなる W 成分を厳密に補正することは難しいため、第 4 章、第 5 章における実験では次のような方法で W 成分の補正を行った。可視化実験 (写真 4.3.1) より、ストリートキャニオン前後の街区高さの 1.5 倍の位置では W 成分は無くほとんどゼロであると考えられるので、この位置における W がゼロになるよう全体を補正するが、一律に全測定値を補正すると床面近くでは補正が強すぎて不自然な分布になる。このため、W の補正量を

街区高さよりも上については

$$W_{(測定値)} = W_{150\%} \quad (H \text{ (街区高さ)} < Z)$$

街区高さよりも下の部分については

$$W_{(測定値)} = W_{150\%} \times (Z / 100) \quad (0 < Z < H)$$

とした。

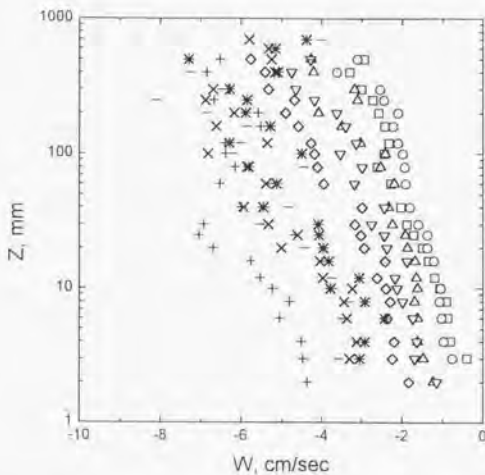


図 2.6.4 市街地模型を置いていない床面上の W 成分の分布

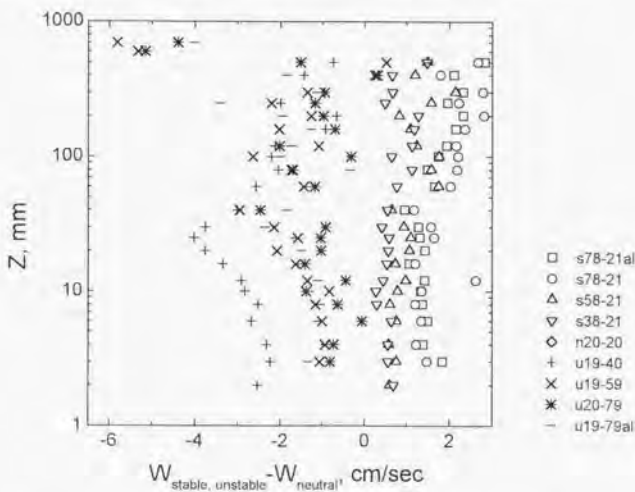


図 2.6.5 各温度成層条件における W 成分の、中立時との差

2. 6. 4 データ処理

LDV の信号処理には Dantec 社バーストスペクトラムアナライザ(BSA)を用いた。パソコンで BSA を GPIB 制御し、3 成分の瞬時風速データを収録した。冷線温度計データも同じく GPIB 制御された AD 変換器によって、200Hz のサンプリングレートで収録した。LDV のサンプリングレートはシーディングの状態によって変化する。測定時間は原則として 3~4 分以上とした。各風速成分とも毎秒数 10~100 以上のデータ数を確保するように努力したがストリートキャニオン低層部の風速が極端に低い位置では毎秒 10~20 以下に落ちることもあった。サンプリングレートによる乱れの測定値に系統的な誤差がないことをあらかじめ確認した。データレートによる乱れの測定値の変化を図 2.6.6 に示す。図において、データレートが毎秒 10 以下の極端に低い場合でも測定時間が十分長く確保されれば正しく測定されることが確認された。

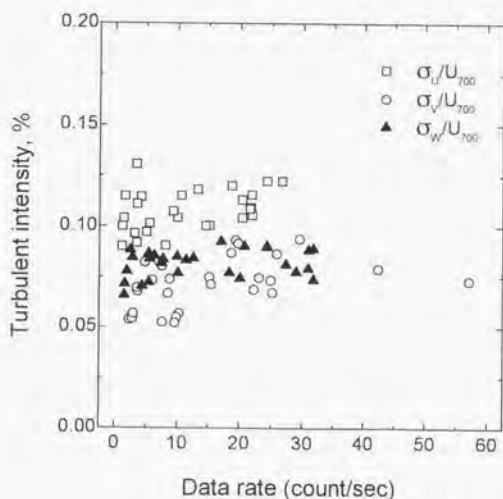


図 2.6.6 乱れの測定値に対するデータレートの影響

2. 7 模型の熱伝導性が流れ場に及ぼす影響

本節では模型の熱伝導性の影響について検討する。第4章で扱う街区模型の材質をスタイロフォームとアルミニウムとしたときの気流温度、床パネル温度、模型表面温度を表2.7.1に示す。表より街区模型としてアルミブロックを用いた場合にはスタイロフォームの時に比べて、模型表面の温度は安定時には低く、不安定時には高くより床面温度に近くなる。このためキャニオン内の温度分布は図2.7.1に示すように強く床面温度を反映したものになるが、図2.7.2および2.7.3に示すように風速や乱れの分布には大きな差を生じないことがわかる。

この結果よりキャニオン内の温度分布は模型の断熱性によって若干異なることが明らかになったが、本実験では実験条件の簡明さ、模型の取り扱いの良さ等を考慮して、スタイロフォーム模型を用いる。

表2.7.1 材質による模型表面温度の差

模型材質	安定度	Ta °C	Tf °C	Rb	Tm °C
スタイロフォーム	安定	77.6	20.5	0.785	48.4
アルミニウム	安定	77.7	20.7	0.673	26.8
スタイロフォーム	不安定	19.8	78.9	-0.208	39.3
アルミニウム	不安定	9.3	78.6	-0.190	66.2

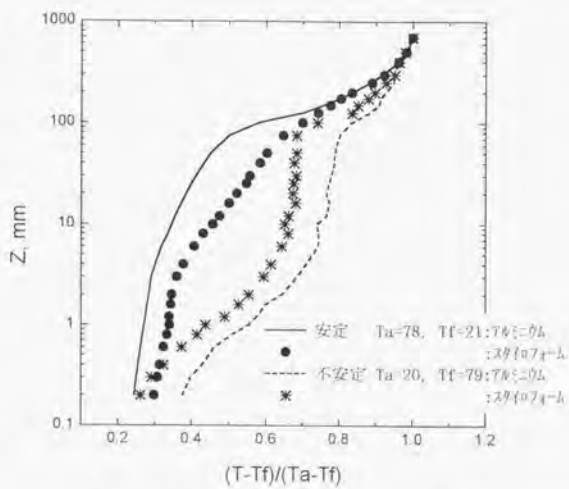


図 2.7.1 模型材質による温度分布の差

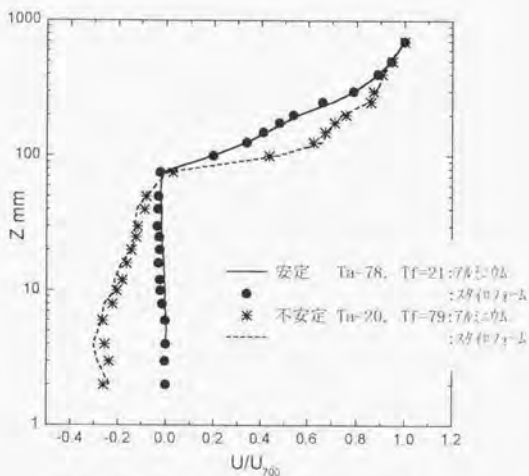


図 2.7.2 模型材質による風速分布の差

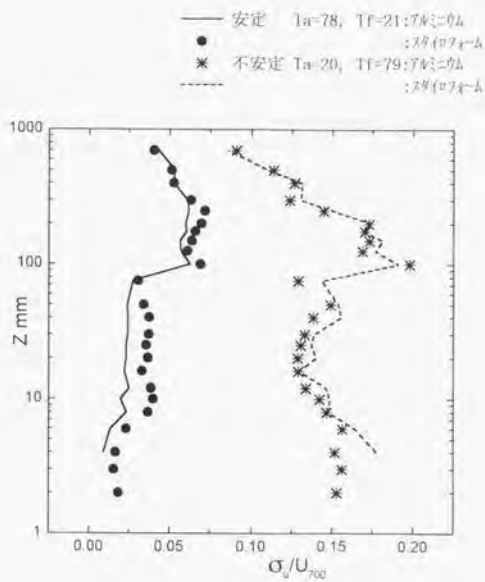


図 2.7.3 模型材質による乱れ強さ分布の差

第3章 市街地における沿道周辺大気汚染濃度分布の概況

本章では道路近傍の大気汚染濃度分布を、実市街地における濃度観測及び実市街地の縮尺模型や単純形状の市街地模型を用いた風洞実験によって調べ、沿道大気汚染の特徴を明らかにし、さらに汚染の拡散構造を詳しく調べるための問題点を抽出する。

3.0 実市街地における沿道濃度観測と

1/250 縮尺模型を用いた風洞実験

実市街地における沿道大気汚染濃度の観測データとしては、N¹市役所屋上の一般環境測定局及びその前面の国道沿道に設置されたR²自動車排ガス測定局のもの、気象観測データとしてはN一般局(地上44m)で常時観測されたものを使わせて頂いた。各測定点の配置を図3.0.1に、観測結果を図3.0.2に示す。図3.0.1にはN市役所周辺の1/250市街地模型による風洞実験で得られた濃度分布も記載している。図3.0.2において横軸の無次元濃度は沿道のR測定局におけるNoxの1時間値から、N一般環境局の同時刻の値を差し引き、さらに同時刻の風速値と交通量調査によるNox排出強度をもちいて規準化したものである。縦軸はN一般環境局で観測されたバスキル安定度である。図より、沿道の大気汚染濃度は大気安定度によって2~4倍程度の差を生じ大気安定度が沿道濃度に与える影響の大きい事を示している。図には同じ測定点で得られた風洞実験値が示されているが、風洞実験と観測値はよく対応している。

図3.0.1に示した沿道大気汚染濃度分布図より、濃度分布は沿道建物の影響を強く受け、特に道路両側の建物に挟まれた部分における濃度が高くなる事がわかる。

¹ 兵庫県西宮市役所

² 六湛寺自動車排ガス測定局



図 3.0.1 観測点の配置およびN市役所周辺の無次元濃度分布 風向SSW

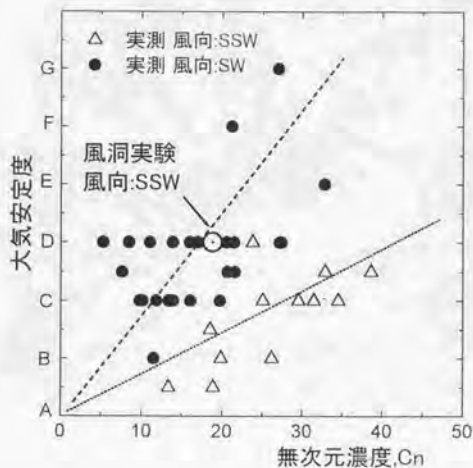


図 3.0.2 沿道大気汚染濃度の大气安定度による変化および
風洞実験値と観測値の対応

3. 1 交差点周辺市街地の濃度分布

3. 1. 1 周辺市街地の高さの影響

粗度、街区模型の設置状況および測定点は2. 5. 4節と同様である。街区模型一辺の長さ L と道路幅を100 mm一定とし、街区の高さ H を $0 \sim 1.5L$ ($0 \sim 150$ mm)まで25 mmきざみに、また、風向は一方の道路と一致する場合を $\theta = 0^\circ$ として $0^\circ \sim 45^\circ$ まで 11.25° きざみに変化させ、それぞれの条件での交差点周辺の濃度分布の変化を調べた。測定点は交差点を中心として前後左右800mmの範囲の道路中心軸上に50mmまたは100mm間隔に約300点設けた。周辺市街地の平均的な濃度を測定するため、測定高さは地表面より少し高い25mmとした。模型の設置状況の一例を写真3.1.1に示す。



写真3.1.1 模型の設置状況 (街区高さ $H = 1.25L$ 、風向 $\theta = 33.75^\circ$)

図 3.1.1 に風向 $\theta = 0^\circ$ の結果を、図 3.1.2 に $\theta = 45^\circ$ の結果を示す。図より周辺街区の高さが増すほど幹線道路風下の市街地の濃度は高く、高濃度を示す範囲も広がる。また、街区高さが道路幅より大きくなると風上側の街区にも濃度の増加する領域が生じている。

風向 $0, 11.25, 22.5, 33.75, 45$ 度の高濃度域 ($H=L, C_n > 10$) をすべて重ねあわせると、図 3.1.3 のようになる。図より周辺市街地における高濃度域はほとんどの場合交差点より 1～2 街区の範囲に限定されており、フィールド視測の結果^{10), 11)}と一致している。

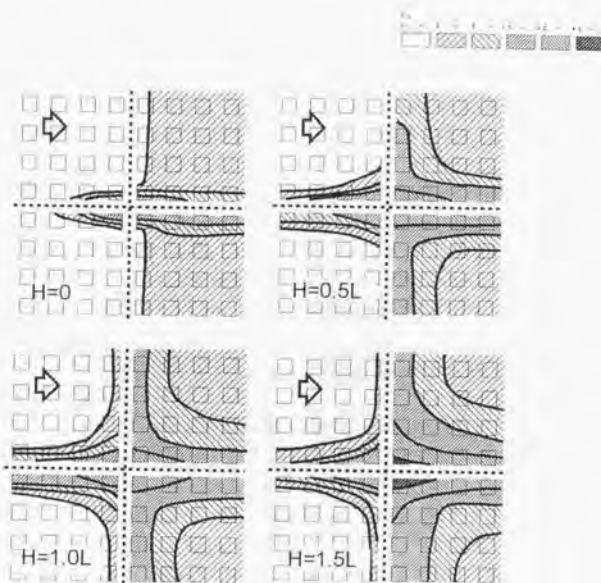


図 3.1.1 交差点周辺の濃度分布に対する周辺市街地高さの影響 風向 $\theta = 0^\circ$

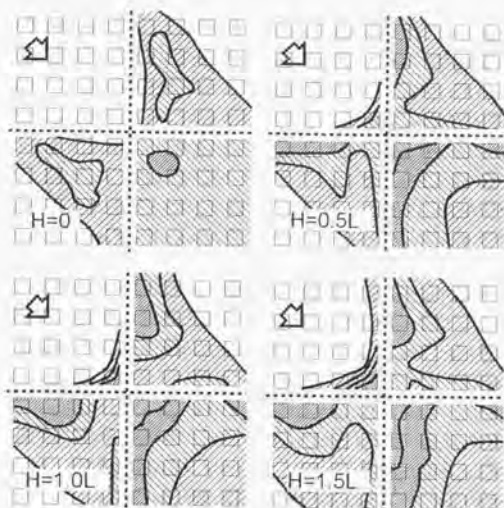


図 3.1.2 交差点周辺の濃度分布に対する周辺市街地高さの影響 風向 $\theta = 45^\circ$

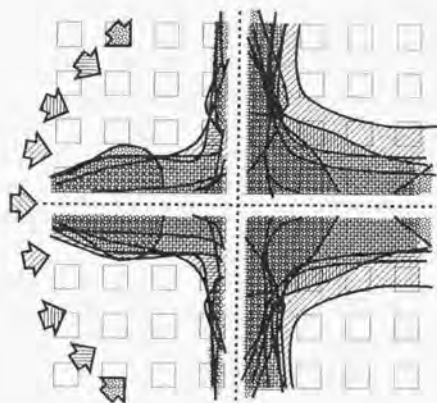


図 3.1.3 すべての風向のときに高濃度になる範囲

図 3.1.4 にそれぞれの風向のときに得られた、全測定範囲における濃度平均値の街区高さによる変化を示す。図より、街区高さが増すと平均濃度が高くなるが、それぞれの街区高さでの濃度は $\theta=0^\circ$ の時にもっとも高く、風向角がますにつれて低下している。これは風向角が増すことによって街区の風下にできる淀みが小さくなり、市街地全体として風通しがよくなるためと考える。

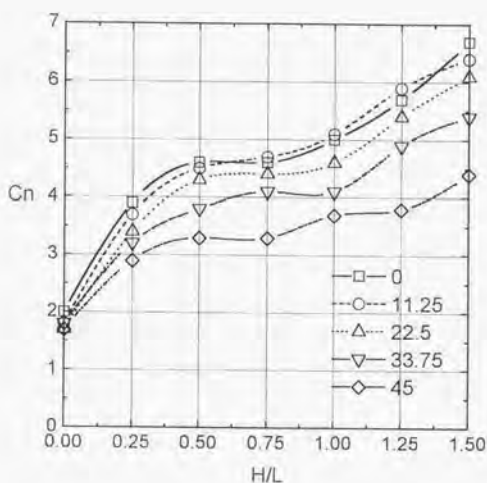


図 3.1.4 交差点周辺の平均濃度と周辺市街地高さの関係
風向 $\theta = 0 \sim 45^\circ$

3. 1. 2 交差点近傍の単独または複数の建物の影響

図 3.1.5 に一様な高さの街区からなる交差点の一角が、周辺街区高さ H_s の 2.48 倍になったときの濃度分布の変化を示す。一様な高さの市街地($H=H_s$)に比べて、建物の高さが増すほど周辺街区の高濃度域の広がりは大くなる。

図 3.1.6 に複数の高層建物($H=8H_s$)が存在する場合の濃度分布を示すが、周辺街区の高濃度域はさらに広がる。

周辺市街地の濃度が増加する理由として次の 2 つが考えられる。第一には市街地上空の流れが、大きな建物によってせき止められて生じる弱風領域に汚染が排出され、滞留することによる濃度増加であり、第二には建物にせき止められ左右にあふれた流れによって、交差点付近の高濃度が周辺街区に流れ出すための濃度増加である。図において高層建物の風上、風下街区の高濃度域が広がっているのは第一の理由からであり、建物の側面の街区における濃度増加は主に第二の理由によるものと考えられる。

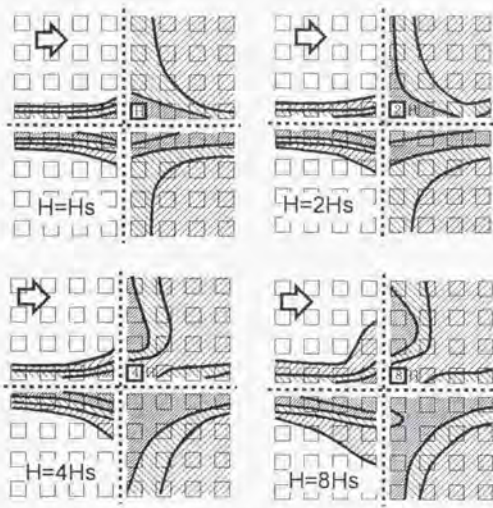


図 3.1.5 交差点周辺に高層建物が建設されることによる
周辺市街地における濃度分布の変化

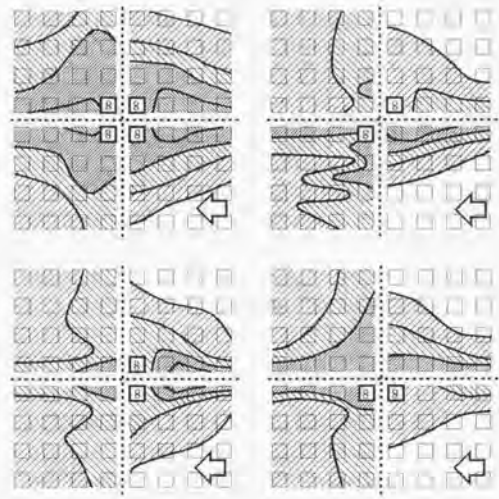


図 3.1.6 交差点周辺に複数の高層建物が建設されることによる
周辺市街地における濃度分布の変化

図 3.1.7 に幹線道路（トレーサーガスが排出されている中央の交差道路）における平均濃度と、幹線道路以外の周辺市街地（後背地）における平均濃度が、交差点周辺の建築状況によって変化する様子を示す。図中 $8H^*2$ の濃度は図 3.1.6 右上の配置のときの値を用いている。図より交差点近くの建物が高く、こみ合うほど後背地の濃度は増加するが、高層建物直近の幹線道路では逆に低下している。これは高層建物による市街地気流の変化が汚染濃度分布の形で現れたものであり、建物の存在によって風速が増加するときには濃度が低く、流れが停滞する場所に汚染の排出源がある場合には高濃度が生じることを示している。

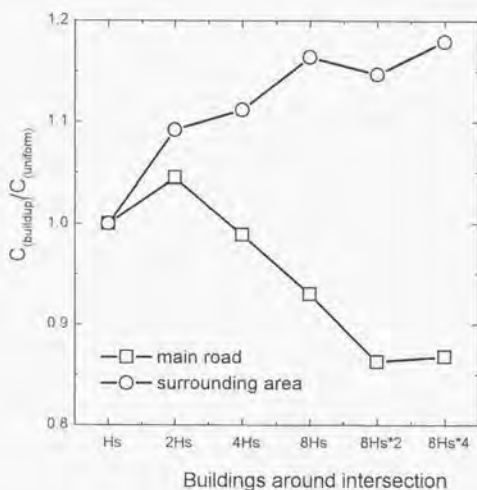


図 3.1.7 交差点および幹線道路上の濃度に対する
交差点近傍の建物の影響

3. 2 交差点内部の濃度分布

3. 2. 1 風向の影響

図 3.2.1 に風向が $\theta = 0^\circ \sim 45^\circ$ の範囲で変わった時の、交差点内部における濃度分布の変化を示す。測定高さは街区高さの $1/10$ ($Z = 1/10 H$) である。図より交差点内部の濃度分布は大変複雑であるが、高濃度はどの風向のときにも交差点中心部および街区背後の淀み域など、比較的限られた範囲に生じることがわかる。

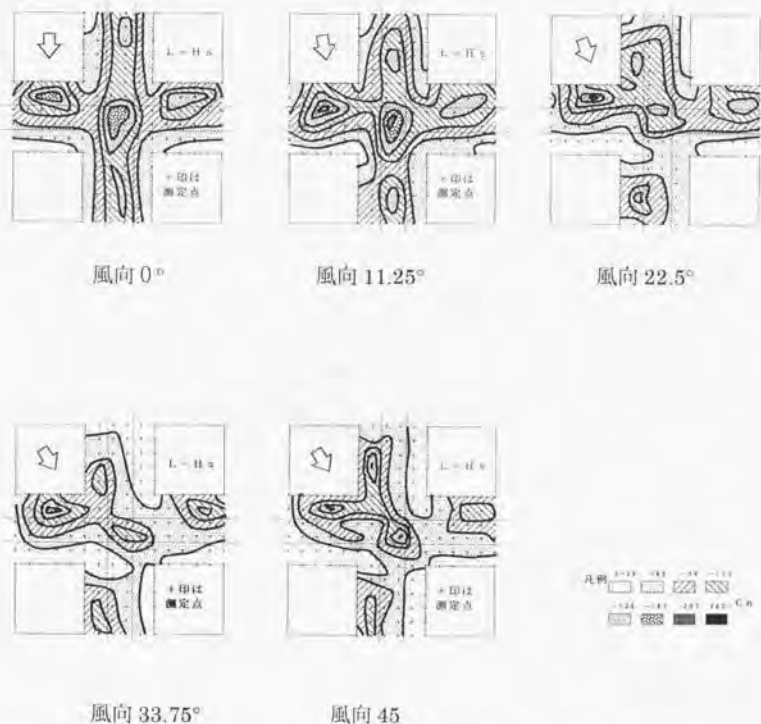


図 3.2.1 風向 $0 \sim 45$ 度における交差点内部の濃度分布

風向： $-45^\circ < \theta < 45^\circ$ の時の高濃度域($C_n > 75$)をすべて重ねあわせると 図 3.2.2 のようになる。図において、高濃度域は、1. 交差点中心部 2. 主風向と平行な、あるいは主風向となす角度の小さな道路の中央部 3. 主風向と直角な、あるいは主風向となす角度の大きな道路の、風上街区の風下淀み域 の3つの部分に分けられる。このうち1と2は汚染排出源に間近であったり、交差点中心部の汚染排出量そのものが多いための高濃度であるが、3の部分は周囲の建物に囲まれた道路、いわゆるストリートキャニオン内部の特殊な流れ場によって生じる高濃度であり、交差点に近いとはいえ、それと同程度の高濃度が生じていることは注目に値する。

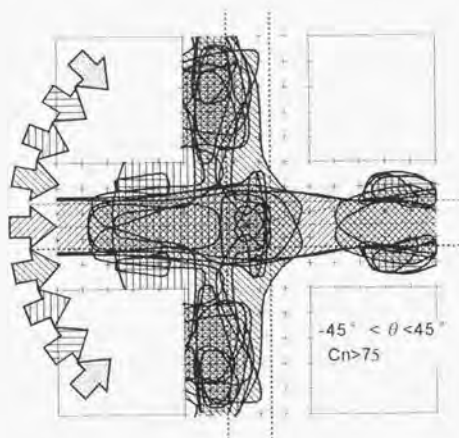


図 3.2.2 交差点内において常に濃度の高い位置
測定高さ($Z = 1/10 H$)、風向 $-45^\circ < \theta < +45^\circ$

3. 2. 2 鉛直面内の濃度分布

交差点中央と交差点横の街区中央の鉛直断面における濃度分布を図 3.2.3 に示す。図において、交差点中央の鉛直断面における濃度は地面に近いほど高く、位置が高いほど低く、地面付近で発生した汚染は大きく乱されことなく風下に流されている。街区中央の鉛直断面では、ストリートキャニオン内の分布についてよく言われるように、地上の逆流によって、道路から発生した汚染が風上街区の背面に吹き寄せられている。この分布の様子は風向が $\theta=0^\circ$ 、 22.5° 、 45° と変化しても、大きく変化していない。また、前節でも述べたようにストリートキャニオン内では、交差点中央と大差ない高濃度を示している。

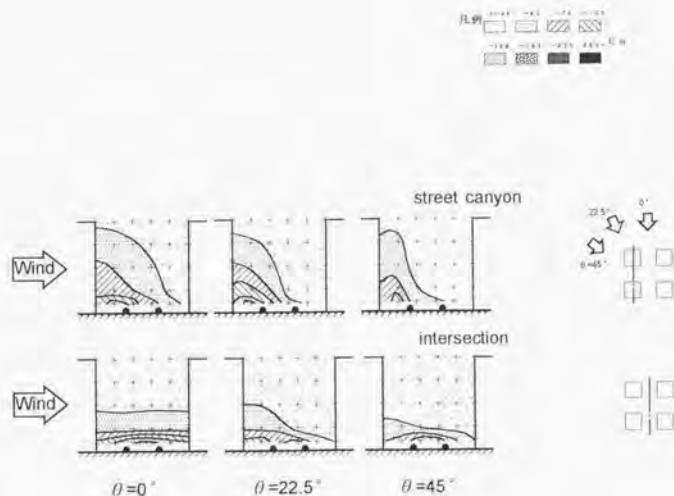


図 3.2.3 交差点周辺道路の鉛直断面内の濃度分布
風向 $\theta=0^\circ$ 、 22.5° 、 45°

交差点をとり、風と垂直な鉛直断面（図 3.2.3 と直交する断面）の濃度分布を図 3.2.4 に示す。図において、主風向と平行な道路では地面に近い部分の濃度が全般に濃度が高い。風側の街区に近い鉛直断面では、街区の背面で主風向と平行な道路の中央部分と同程度の高濃度を示している。

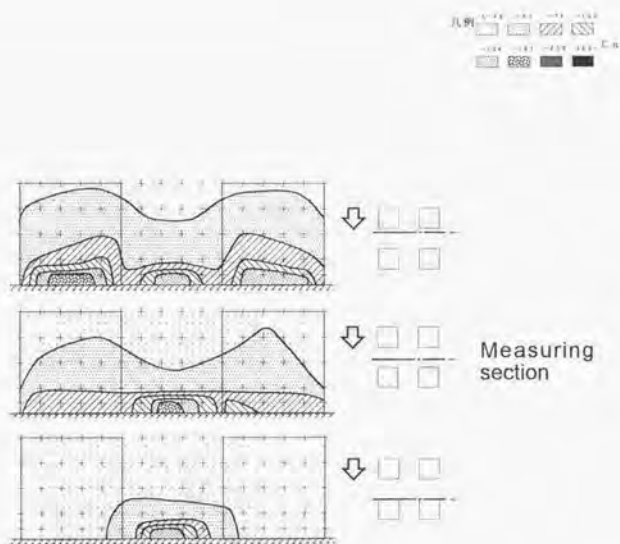


図 3.2.4 交差点周辺道路の鉛直断面内の濃度分布
風向 $\theta = 0^\circ, 22.5^\circ, 45^\circ$

3. 2. 3 近傍建物の影響

図 3.2.5 に単独の高層建物が道路の前後にある場合、高層建物が 2 棟交差点の対角上にある場合、2 棟前後に道路を挟んでいる場合の交差点内部の濃度分布を示す。模型および線源の設置方法は 3. 2 節と同様である。図より高層建物が存在する場合には交差点内部の建物直近の濃度が低下することがわかる。これは建物の周辺に生じる強風のため^{*)}であるが、強風の影響が遠くへ及ばないのと同様、濃度低下も高層建物のごく近くに限定されている。

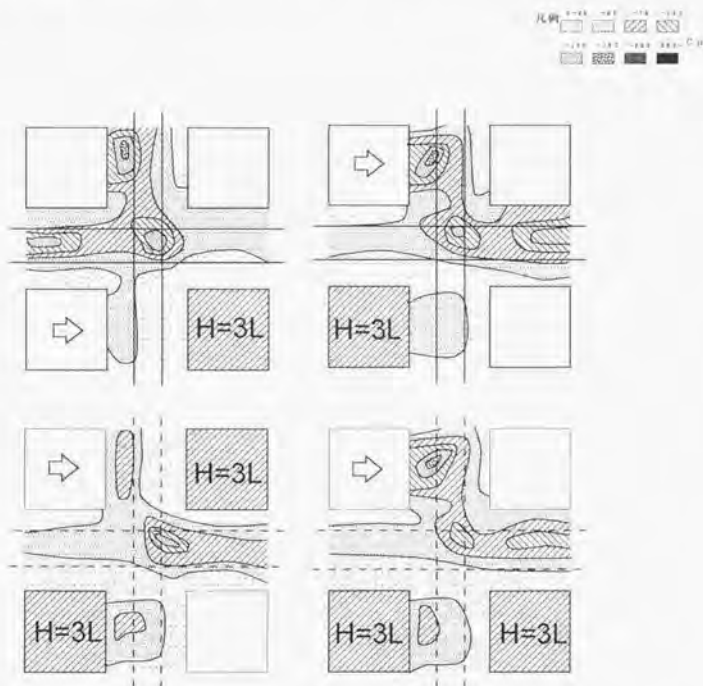


図 3.2.5 交差点内部の濃度に対する近傍高層建物の影響

3. 2. 4 周辺市街地の道路幅の影響

図 3.2.6 に交差点をなす幹線道路の幅は同じで、周辺街区内部の道路幅が 1/2 と狭くなったときの濃度分布を示す。左図は図 3.2.5 の左上の図に対応するものである。図より周辺街区内部の道路幅が狭まることによって全体の濃度は高くなるが、分布の形にはほとんど変化のないことがわかる。

右図は交差点の一角が空地になった場合の濃度分布である。この場合には一様な高さの街区の場合および高層建物がある場合よりも空地風上側の濃度が高くなっている。空き地が広がれば風通しが良くなり、濃度は下がると考えるのは逆の傾向である。これについては 4. 2. 2 節 道路幅によるストリートキャニオン内部流れの変化 で詳しく述べるが、空き地によって街区前後の道路がつながり、部分的にはあるが、道路幅が街区高さの 3 倍になったのと同様の配置条件になる。このとき、ストリートキャニオン内部の風速は道路幅が狭いときよりむしろ低下する。空き地の存在による濃度の増加は、空き地を含めた道路内部の風速低下によるものと思われる。

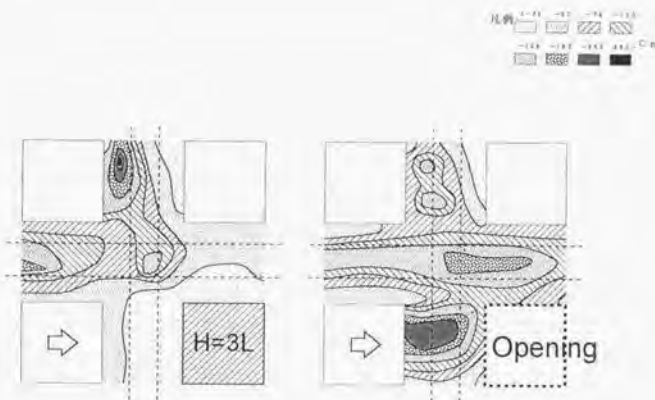


図 3.2.6 交差点内部の濃度に対する周辺市街地の道路幅の影響

3. 3 第3章のまとめ

本章では、市街地低層部における沿道大気汚染濃度分布の概略を把握するために拡散実験を行った。高濃度が予想される交差点を中心に、数ブロックの街区全体を含む比較的広い範囲の濃度分布を調べる実験と、交差点近傍の建物に囲まれた道路内部の濃度分布を細かく調べる実験の2段階に分け、それぞれに対する街区の高さ、風向、近傍の建物の影響などを調べた。その結果、道路を中心とした広い範囲における平均的な市街地の濃度分布に対しては、建物による凹凸よりも横の広がりの方が大きいために濃度分布は全体として単調で、高濃度は交差点などの汚染の発生源を中心とした比較的狭い範囲に発生し、交差点や幹線道路からの距離に反比例して濃度が減少することがわかった。これに対し、交差点や道路近傍の濃度分布は場所による濃度の差が大きく、周囲の建物の複雑に影響しあった気流分布の影響を直接受けていることや、交差点内部の高濃度とほぼ同じ程度の高濃度が幹線道路沿道にも生じる可能性のあることがわかった。以下にその結果を要約する。

- 1) 交差点周辺の街区が高くなると、市街地の濃度は高く、高濃度を示す範囲も広がる。
- 2) 交差点周辺市街地の濃度は、本実験の範囲内では、一方の道路と風向が一致する $\theta=0^\circ$ の時が最も高く、 $\theta=45^\circ$ の時に最も低くなる。
- 3) 周辺市街地における高濃度域はほとんどの場合、道路から1~2街区の範囲に生る。
- 4) 交差点内部の高濃度域は交差点中心部や、幹線道路沿いの風上側街区背後など比較的狭い範囲に限定されることが多い。
- 5) 交差点近傍に高層建物が存在する場合、高層建物直近では建物による風速増加のために濃度は低下するが、逆に交差点から2~3街区はなれた周辺市街地の濃度は高くなる。
- 6) 全実験を通じて、高濃度が生じるのは、交差点の中央など汚染排出量の大きい場所、あるいは、幹線道路沿いの街区に囲まれたストリートキャニオン内部で風がよどむ地点であった。

第4章 ストリートキャニオン内部流れの測定

本章では、ストリートキャニオン内外の流れ場およびそれに対する大気安定度やストリートキャニオンの道路幅の影響を調べるため、レーザー流速計及び冷線温度計による乱流測定を行った結果を述べる。実験は2段階に分けて行った。最初にストリートキャニオンの寸法比が1:1(街区高さと道路幅が同じ)ときの流れ場と大気安定度の影響を調べ、次に、ストリートキャニオンの道路幅を街区高さの1/2倍から6倍まで変化させたときの流れ場の変化を調べた。

4.1 大気安定度の影響

4.1.1 実験の概要

1) 粗度、街区模型および測定点

粗度および街区模型の設置状況を図4.1.1に示す。測定部入り口から2m風下に高さ100mmのトリッピングフェンスを置いた。そこから12mまでは粗度として縦横100×100mm、高さ50mmのスタイロフォーム製のブロックを前後左右とも100mmの間隔で千鳥に並べた。

12m以降は街区を想定し、縦横高さとも100mmの立方体のブロックを整型に配置した。2.7節でも述べたように、本章では模型材質の熱伝導性の違いによる差を調べるために、アルミニウムのブロックを街区模型として使用した実験も行った。道路の幅は横方向には50mm、前後方向には100mmである。

5列目と6列目の間の道路を測定対象とし、図4.1.2で示したキャニオン中央鉛直断面の各点で風速と温度を測定した。また、キャニオン中央では上空の流れを知るために、道路中央での高さ700mmまでの鉛直プロファイルの測定も行っている。

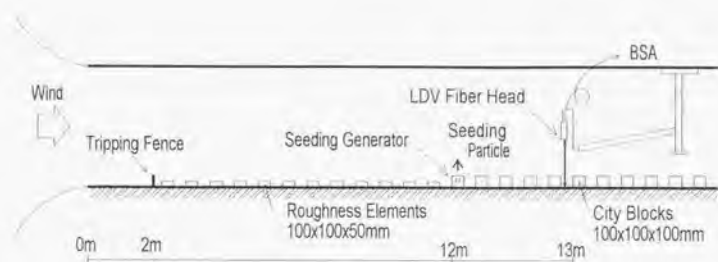


図 4.1.1 粗度および街区模型の設置状況

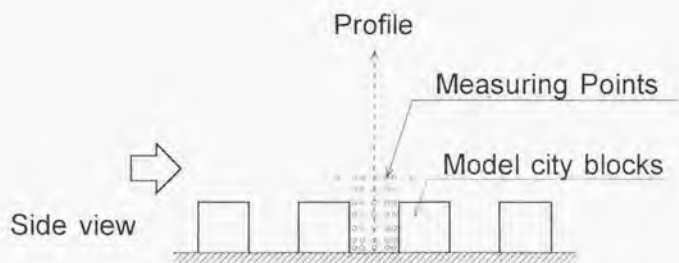


図 4.1.2 風速および温度の測定点

2) 気流と床パネル温度の設定

風洞の気流温度 T_a と床パネル温度 T_f を表 4.1.1 に示すように設定した。模型高さ H を代表長さとしたバルクリチャードソン数 R_b と、模型表面温度 T_m も併せて示した。

実験は境界層全域にわたって一様な安定・不安定成層の他に、海風の進入時や日中混合層の発達時にみられるような、下層不安定・上層安定の成層(Convective boundary layer:CBL)¹⁰⁾を再現するために風上と風下の床面温度を変化させた実験も行っている。表 4.1.1 の最下段の CBL の行において T_f 列の r : は郊外、または海上に相当する風上側($X=0-12m$)の冷却された床パネルの温度を表し、 u : は都心地域、または陸地に相当する加熱された風下側($X=12-24m$)床パネルの温度を示している。

表 4.1.1 実験条件、気流・床パネル温度の設定値

Stability	T_a °C	T_f °C	R_b	Material of models	T_m °C
Stable	77.6	20.5	0.785	Polystyrene	48.4
Stable	57.9	20.8	0.426	Polystyrene	38.6
Stable	38.4	20.6	0.106	Polystyrene	30.0
Neutral	20.0	20.0	0	Polystyrene	20.4
Unstable	19.0	39.7	-0.118	Polystyrene	26.8
Unstable	19.1	59.4	-0.193	Polystyrene	33.2
Unstable	19.8	78.9	-0.208	Polystyrene	39.3
Stable	77.7	20.7	0.673	Aluminum	26.8
Unstable	9.3	78.6	-0.190	Aluminum	66.2
CBL	77.7	$r:20.4$ $u:98.9$	-0.284	Polystyrene	77.7

4. 1. 2 風速と温度の乱流統計量の鉛直プロファイルの変化

ストリートキャニオン中央で測定した風速及び温度の平均値のプロファイル、局所リチャードソン数 Ri の分布を図 4.1.3～ 4.1.5 に示す。各風速成分の乱れ強度および乱流エネルギーの分布を図 4.1.6～ 4.1.9 に、温度の乱れ強度を図 4.1.10 に示す。剪断応力および鉛直方向のヒートフラックスの分布を図 4.1.11、4.1.12 に示す。図中の凡例で s,n,u はそれぞれ安定・中立・不安定を、続く数字は気流と床パネルの温度 (T_a, T_f) を表している。最後の al は街区模型の材質をアルミニウムとしたときの結果であること、記載なしはスタイロフォームであることを示す。他の成層条件と区別するために al の場合と CBL (Convective boundary layer) は記号なしの (実線: アルミ・安定)、(破線: アルミ・不安定)、(点線: CBL) で表示している。また図 4.1.5 Ri の分布ではキャニオン内の値を R_b で代表させている。

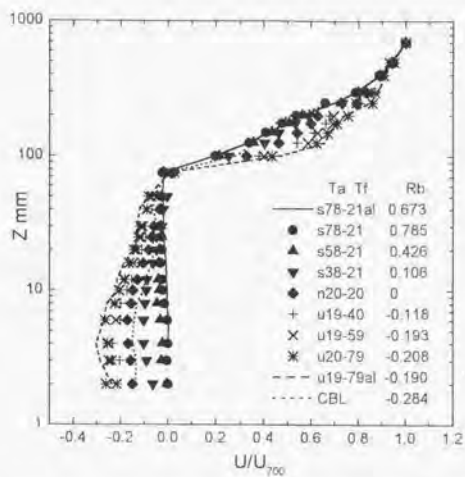


図 4.1.3 ストリートキャニオン中央における風速分布

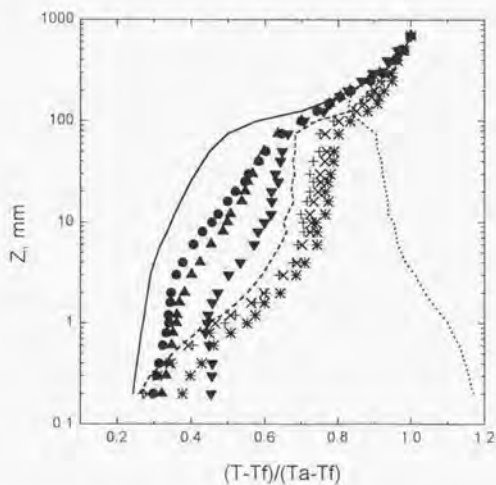


図 4.1.4 ストリートキャニオン中央における温度分布

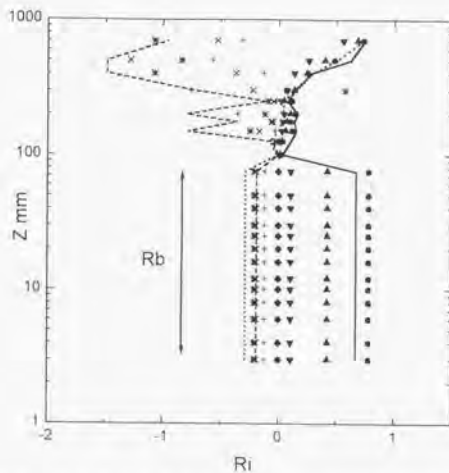


図 4.1.5 ストリートキャニオン中央における Ri の分布

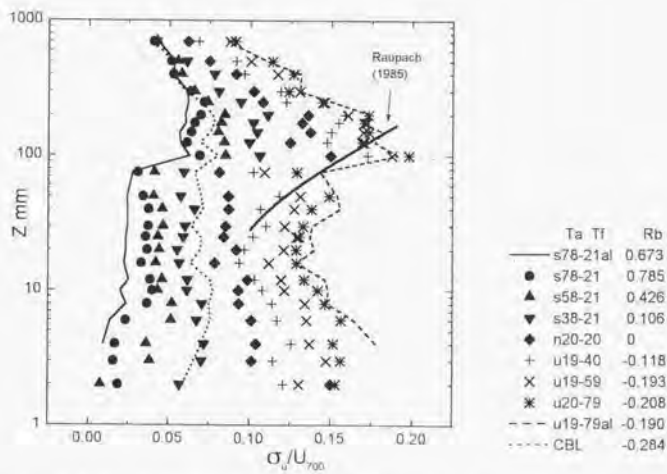


図 4.1.6 ストリートキャニオン中央における σ_u の分布

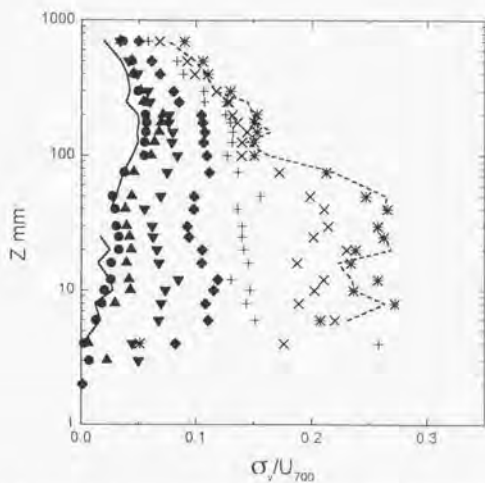


図 4.1.7 ストリートキャニオン中央における σ_v の分布

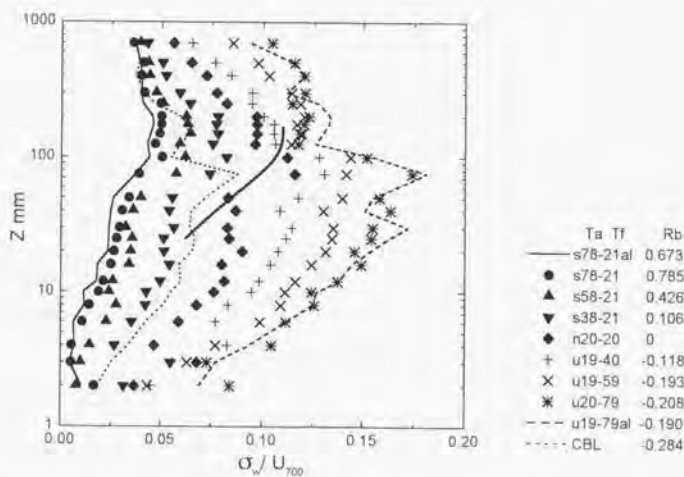


図 4.1.8 ストリートキャニオン中央における σ_w の分布

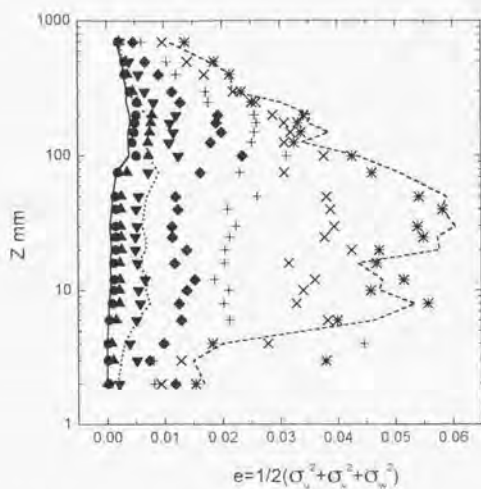


図 4.1.9 ストリートキャニオン中央における乱流エネルギー
 $e = 1/2 (\sigma_v^2 + \sigma_w^2 + \sigma_u^2)$ の分布

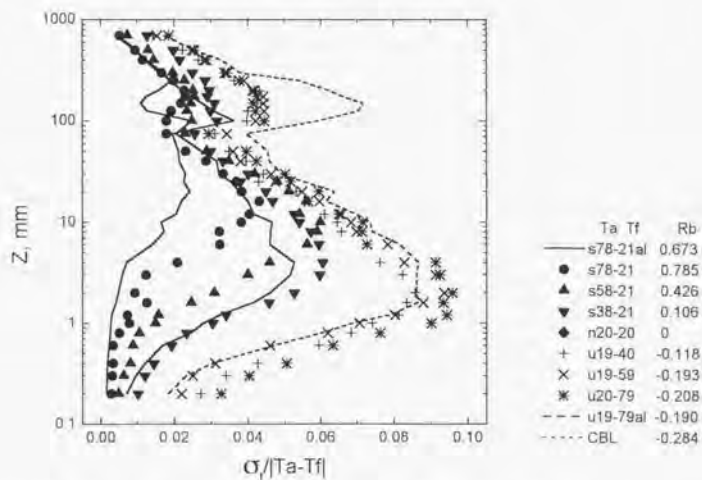


図 4.1.10 ストリートキャニオン中央における $\sigma_T / (Ta - Tf)$ の分布

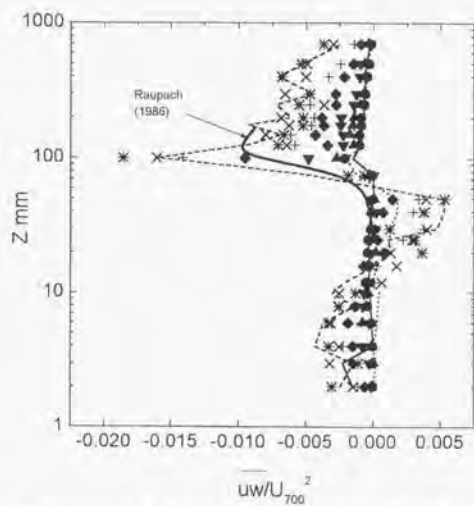


図 4.1.11 ストリートキャニオン中央における
剪断応力 \overline{uw}/U_{700}^2 の分布

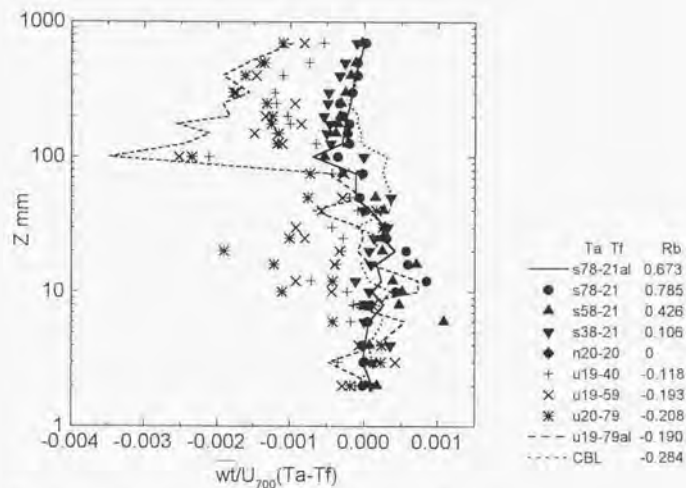


図 4.1.12 ストリートキャニオン中央における
ヒートフラックス $\overline{wT}/(U_{700} \times (Ta - Tf))$ の分布

1) 植物キャノピーモデル内の流れとの比較

図 4.1.6、4.1.8、4.1.11 には Raupach(1986)²⁰ が植物キャノピーモデル ($H=60\text{mm}$)層内の乱れを熱線風速計によって測定した結果も併せて記載している。図より σ_u は本実験 中立のそれより大きく、 σ_w はほぼ同程度の値を示す。模型形状や粗度要素からの距離などが異なるので同等に比較できないが、大きな差はないと考えられる。

2) 風速分布に対する大気安定度の影響

図 4.1.3 より、ストリートキャニオン内外の風速 U/U_{70m} は安定成層ほど低く、成層不安定ほど高くなる。(キャニオン内では不安定で逆流が強くなる) 特に安定が強い場合にキャニオン低層部の風速は非常に低く、風洞基準風速の 1~2%以下まで低下する。これはキャニオン上層における乱れ強度や剪断応力等が安定成層の時に低く抑えられ、不安定の時に高くなることに対応しており、鉛直方向のエネルギー輸送が大気安定度によって大きく変化することを明瞭に示している。

ビル風に関連して行った真田ら(1980)²¹の市街地風の観測によれば、新宿副都心地域における高層建物屋上の風速が 5~9.9m/s と比較的風速の高い時にも、上空と地上の風速比(風向 S の時)は中立で 0.22、安定で 0.18、不安定で 0.31 と大きな差を示している。大気安定度に関する詳しい記述がないため本実験と数量的な比較はできないが、実市街地の比較的風速の高い状況においても大気安定度による差が顕著に現れており、安定で地上の風速が弱く不安定で高い傾向は本実験の結果と対応している。

3) 都市境界層との対応

風速および乱れのプロファイルよりキャニオン内外の流れは、大まかに、I) キャニオン内部、II) キャニオン上端の境界付近から対数分布に変わるまでの遷移域、III) 対数分布に従う部分、の3つに分けることができ、それぞれは Oke(1988)²⁶の都市境界層の分類 I) Urban canopy layer、II) Roughness layer、III) Surface layer に対応するものと考えられる。実験結果より、キャニオン内部では各統計量は地上高さ Z によっても変化するが大気安定度による差が大きく現れ、遷移域ではキャニオン内部と同じく安定度による差が大きく、かつ高

さ方向にほぼ一定、対数域では成層による差が徐々に小さくなり各統計量は高さが増すにつれて減少する。特に平均風速と温度については対数域で成層による差がほとんどなくなる。キャニオン内部や遷移域では乱流エネルギーの生成に対して大気安定度の寄与が大きい。例えば図 4.1.9 においてキャニオン中ほどの乱流エネルギーは、不安定で中立の約 4 倍と大きく、安定では逆に 1/8 に減少している。

4) C B L (Convective boundary layer) の場合

CBL の場合キャニオン内の Rb は -0.284 (表 4.1.1) と非常に強い不安定になっているが、平均風速や乱れ強さおよび剪断応力(図 4.1.3、4.1.6~4.1.10、4.1.11、4.2.12) などはいずれも中立もしくは弱安定の成層に近い低い値を示し、前述した安定・不安定成層内の乱れの傾向と異なっている。これは上層の安定成層がキャニオン内部の不安定に蓋をするように上層からの運動量が伝わりにくくしているためと、もともと上層の風速が安定成層によって低くなっていることの 2 つの理由によると考える。即ち、キャニオン内部では床面で加熱され不安定になり、しかも風速は上層の安定に阻まれて低い(図 4.1.3) ために Rb は上下一様な不安定成層の時よりさらに負側に大きくなる。しかし、キャニオン上層にはまだ上流側の成層が保存され、依然として風速も乱れも低く抑えられているため運動量の輸送が少なく、その結果キャニオン内部の風速や乱れも低く抑えられるためと考える。

4. 1. 3 ストリートキャニオン内部流れの変化

写真 4.1.1a) ~ c) に安定、中立、不安定時のキャニオン内の流れの可視化写真を示す。写真より、安定時にはキャニオン内の風速がきわめて低いために煙はほとんど拡散せずに、それ自体の持つ浮力によって外に流れ出る。キャニオンの上部でも風速が低く拡散しにくいいため、風下街区上部での煙が濃い。不安定ではキャニオン内部の回転流の勢いが強くスモークワイヤから発生した煙は直ちに拡散しキャニオン上部にあふれ出すことはない。このためキャニオンの風下側でも煙は薄く拡散の良いことを示している。中立ではそれらの中間の様子が観察される。

図 4.1.13(a) ~ (i) に安定、中立、不安定時の主流方向の風速成分 U/U_{700} のキャニオン内の分布を、図 4.1.14(a) ~ (i) に鉛直成分 W/U_{700} を、図 4.1.15(a) ~ (i) に U と W の合成速度 $(U^2+W^2)^{1/2}/U_{700}$ を速度ベクトルと重ね合わせて、図 4.1.16(a) ~ (h) に無次元温度 $(T-T_f)/(T_a-T_f)$ を示す。図 4.1.15 からわかるようにキャニオン内部には大きな回転流（キャビティ渦・cavity eddy）が生じており、その勢いは安定成層が強いほど弱く、不安定ほど強くなる。これは従来からの市街地における大気汚染濃度観測において、ストリートキャニオン内の汚染が風上側に吹き寄せられていることや、沿道大気汚染濃度が大気安定度によって大きく変化することを裏付ける結果である。図 4.1.14 からわかるようにキャニオン内部に向かう下降流は風下側街区の直前のごく狭い部分で強く、キャビティ渦を形成するきっかけとなる下降流が風下側街区前面の非常に狭い範囲に生じていることがわかる。

図 4.1.17(a) ~ (i) に主流方向の乱れ強さ σ_u/U_{700} を、図 4.1.18(a) ~ (i) にスパン方向の乱れ強さ σ_v/U_{700} を、図 4.1.19(a) ~ (i) に鉛直方向の乱れ強さ σ_w/U_{700} を、図 4.1.20(a) ~ (i) に乱流エネルギー $e = 1/2 (\sigma_u^2 + \sigma_v^2 + \sigma_w^2)$ を、図 4.1.21(a) ~ (h) に温度の乱れ $\sigma_T / (T_a - T_f)$ を示す。図 4.1.17 より、 U 成分の乱れは、同じ U 成分の速度勾配が大きいキャニオンの上部からキャビティ渦の中心部にかけて大きくなる。図 4.1.18, 4.1.19 より V, W 成分の乱れは U 成分が下降流に方向を変えたるキャニオン風下側の壁面近くで大きくなる。

図 4.1.22(a) ~ (i) に剪断応力 $\overline{uw} / U_{700}^2$ の分布を示す。図において、剪断応力は U 成分と W 成分の乱れの分布を足しあわせたような分布を示す。図 4.1.23(a) ~ (h) に鉛直方向のヒートフラックス $wT / \{ (U_{700} \times (T_a - T_f)) \}$ の分布をそれぞれ示す。図より、安定、不安定ともキャニオン風下で上空からの流入、風下ではキャニオン内部からの流出が顕著である。

風
→



a) 安定、 $Rb = 0.785$ の場合

風
→



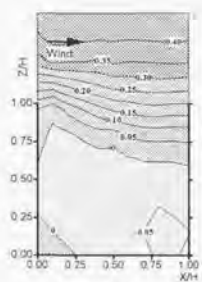
b) 中立、 $Rb = 0$ の場合

風
→

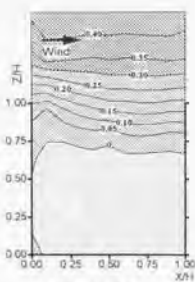


c) 不安定、 $Rb = -0.208$ の場合

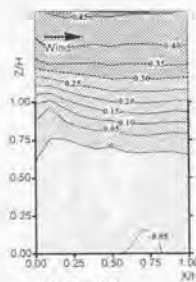
写真 4.1.1 大気安定度によるストリートキャニオン内外の流れの差



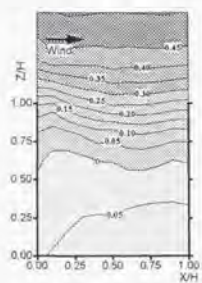
Rb=0.673
アルミニウム模型



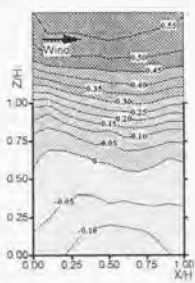
Rb=0.785



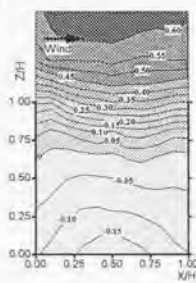
Rb=0.426



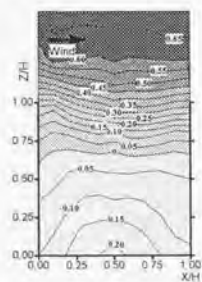
Rb=0.106



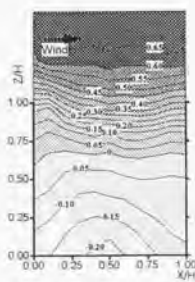
Rb=0



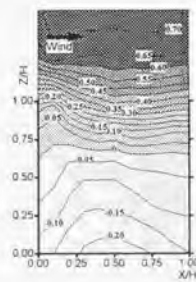
Rb=-0.118



Rb=-0.193

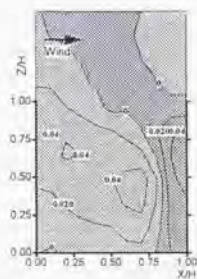


Rb=-0.208



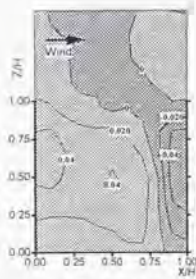
Rb=-0.190
アルミニウム模型

図 4.1.13 U/U_{700} 分布の大気安定度による差

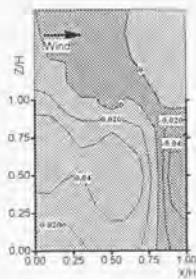


Rb=0.673

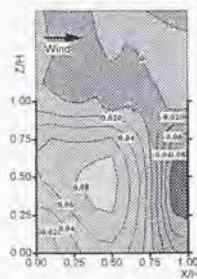
アルミニウム模型



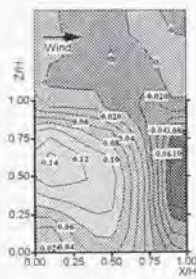
Rb=0.785



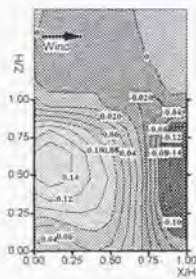
Rb=0.426



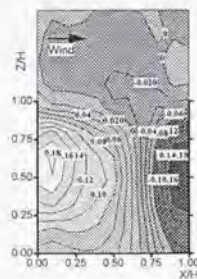
Rb=0.106



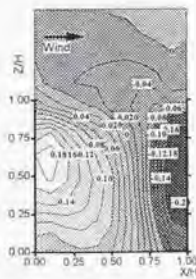
Rb=0



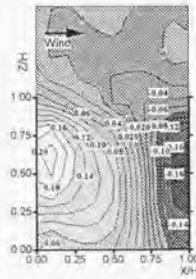
Rb=-0.118



Rb=-0.193



Rb=-0.208



Rb=-0.190

アルミニウム模型

図 4.1.14 W/U₇₀₀ 分布の大気安定度による差

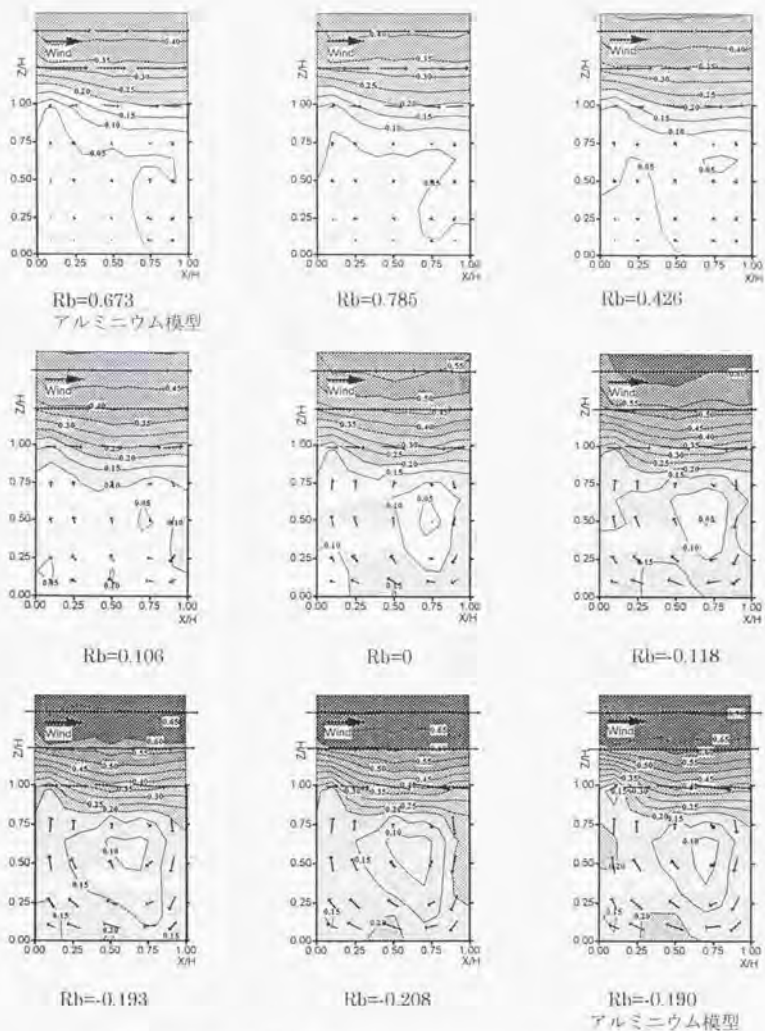
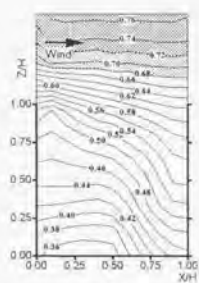
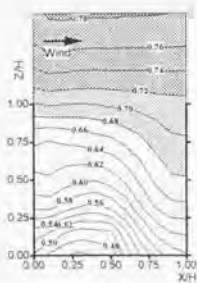


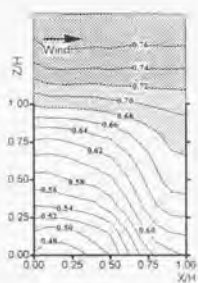
図 4.1.15 合成速度 $(U^2+W^2)^{1/2}$ 分布の大気安定度による差



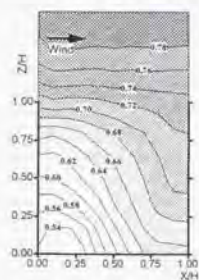
Rb=0.673
アルミニウム模型



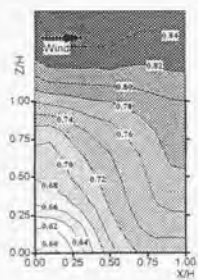
Rb=0.785



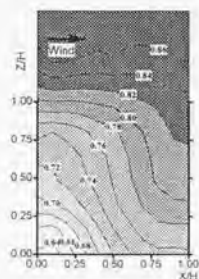
Rb=0.426



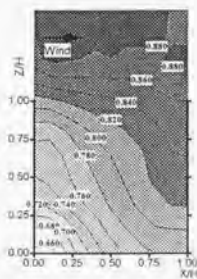
Rb=0.106



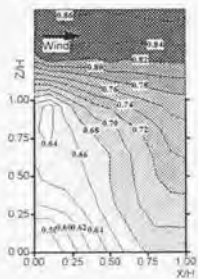
Rb=-0.118



Rb=-0.193

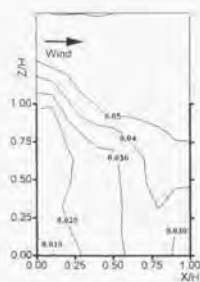


Rb=-0.208

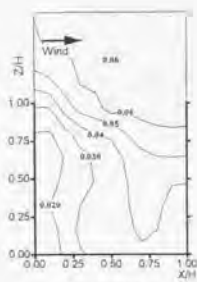


Rb=-0.190
アルミニウム模型

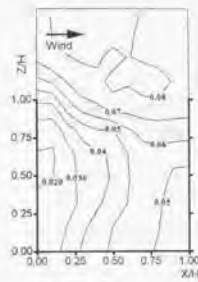
図 4.1.16 無次元温度 $(T-T_f)/(T_{700}-T_f)$ 分布の大気安定度による差



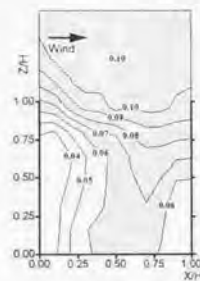
Rb=0.673
アルミニウム模型



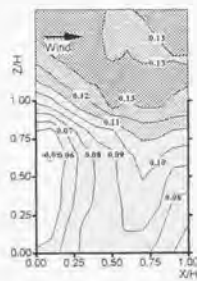
Rb=0.785



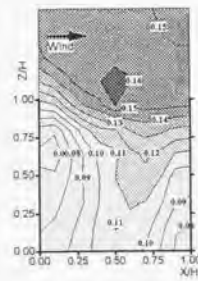
Rb=0.426



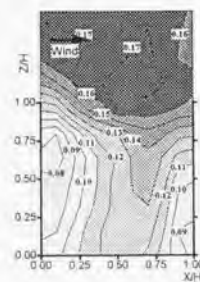
Rb=0.106



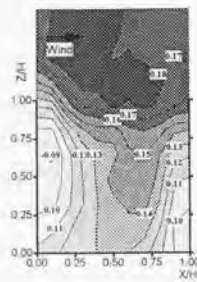
Rb=0



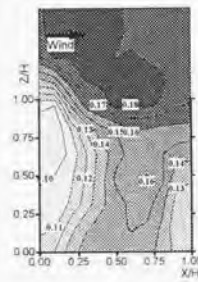
Rb=-0.118



Rb=-0.193

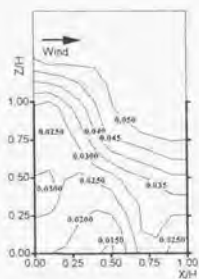


Rb=-0.208



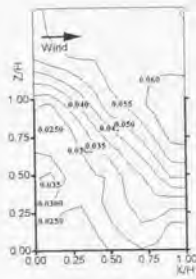
Rb=-0.190
アルミニウム模型

図 4.1.17 主流方向の乱れ強さ $\sigma u/U_{700}$ 分布の大気安定度による差

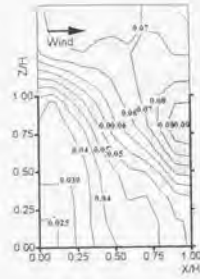


Rb=0.673

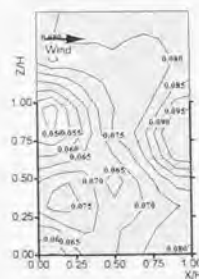
アルミニウム模型



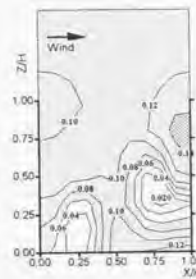
Rb=0.785



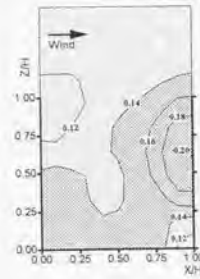
Rb=0.426



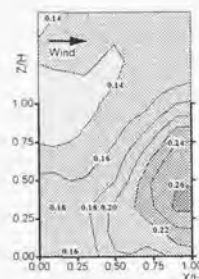
Rb=0.106



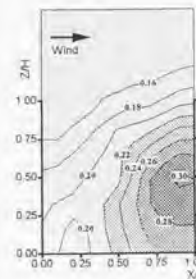
Rb=0



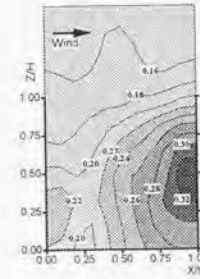
Rb=-0.118



Rb=-0.193



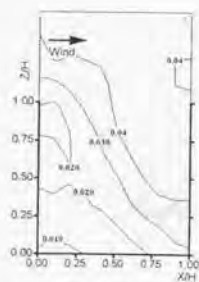
Rb=-0.208



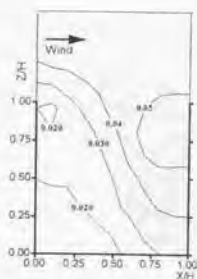
Rb=-0.190

アルミニウム模型

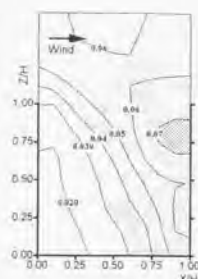
図 4.1.18 スパン方向の乱れ強さ σ_v/U_{700} 分布の大気安定度による差



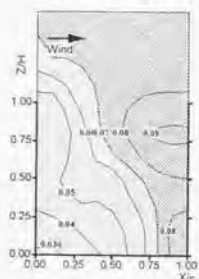
Rb=0.673
アルミニウム模型



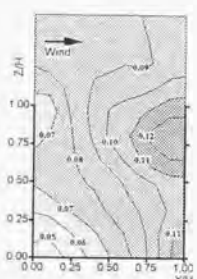
Rb=0.785



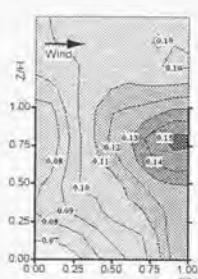
Rb=0.426



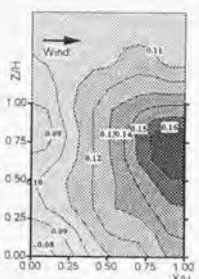
Rb=0.106



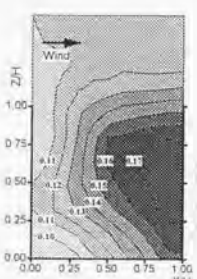
Rb=0



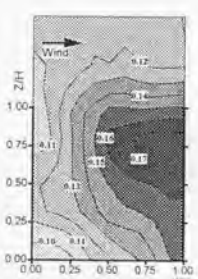
Rb=-0.118



Rb=-0.193

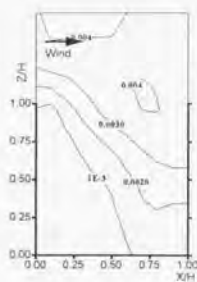


Rb=-0.208

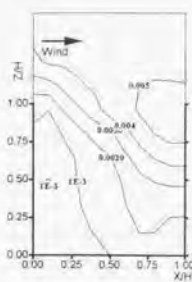


Rb=-0.190
アルミニウム模型

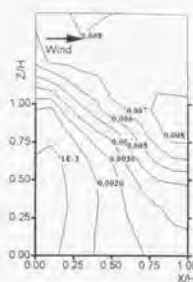
図 4.1.19 鉛直方向の乱れ強さ σ_w/U_{700} 分布の気象安定度による差



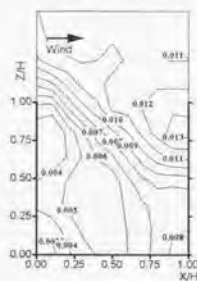
Rb=0.673
アルミニウム模型



Rb=0.785



Rb=0.426



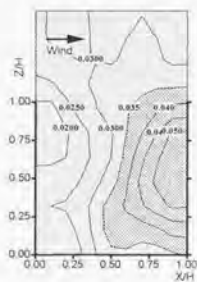
Rb=0.106



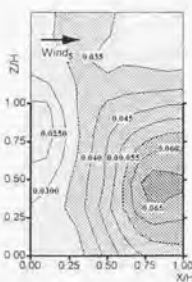
Rb=0



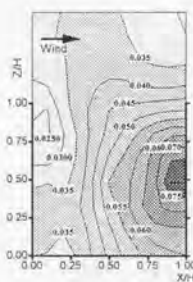
Rb=-0.118



Rb=-0.193



Rb=0.208



Rb=-0.190
アルミニウム模型

図 4.1.20 乱流エネルギー $e = 1/2 (\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2)$ 分布の気安定度による差

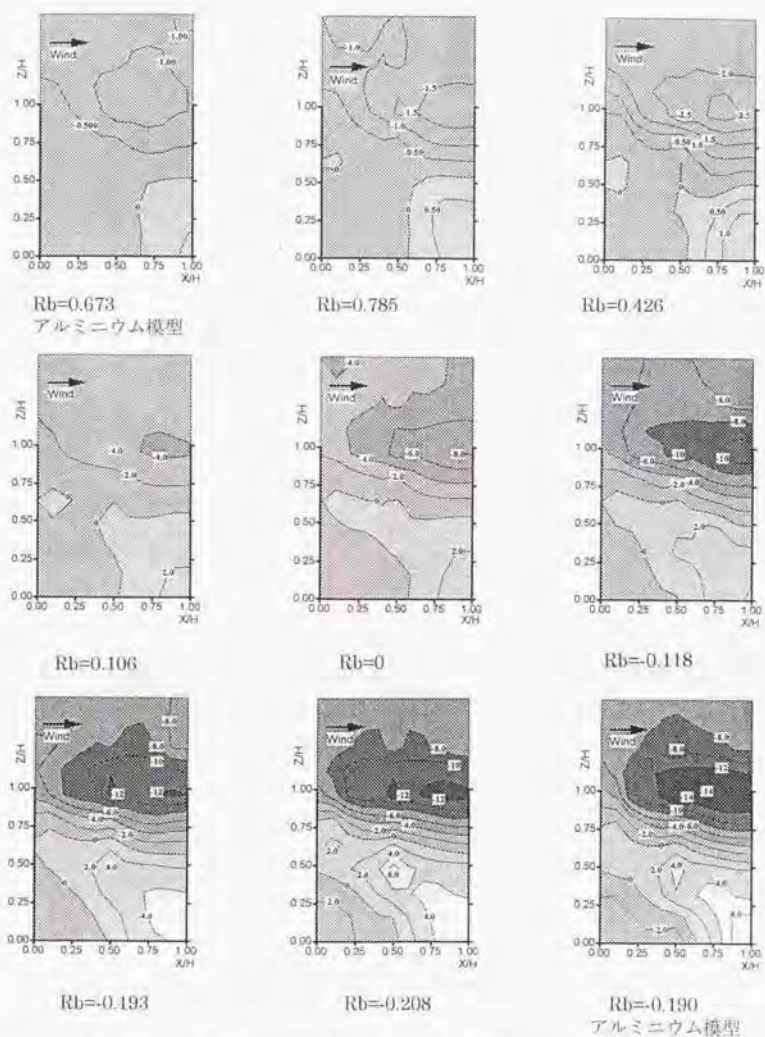
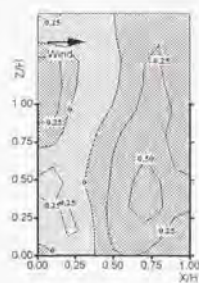
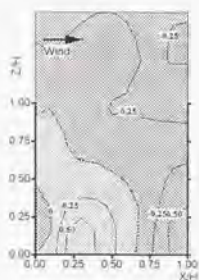


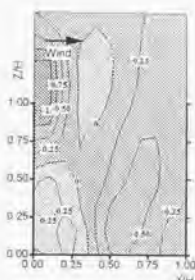
図 4.1.22 剪断応力 $\overline{uw} / U_{700}^2$ 分布の大気安定度による差



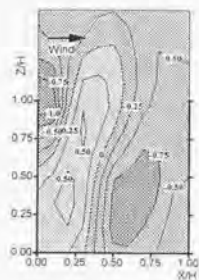
Rb=0.673
アルミニウム模型



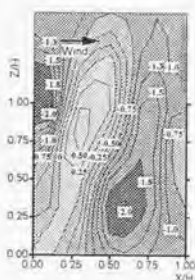
Rb=0.785



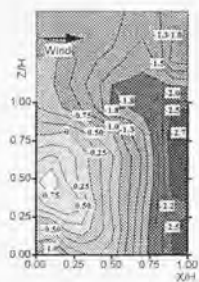
Rb=0.426



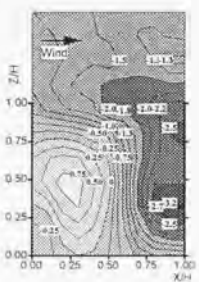
Rb=0.106



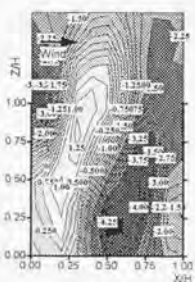
Rb=0.118



Rb=-0.193



Rb=-0.208



Rb=-0.190
アルミニウム模型

図 4.1.23 鉛直方向のヒートフラックス $\overline{wT} / (U_{700} \times (T_a - T_f))$ 分布の
大気安定度による差

1) キャンيون内の流れの成り立ち

ストリートキャンيون上部境界付近の流れと、キャンيونの内部流れの成り立ちについて考察する。佐々木ら(1989)²⁰⁾は地下空洞内の有害ガス漏洩時の換気を調べるため、流路に接した種々のアスペクト比の長方形空洞内の流れを水槽実験により可視化した。それらは本実験とは異なる条件で得られたものではあるが、ストリートキャンيون上部境界付近における流れについての重要な示唆を与える。

彼らの行った実験と本実験のベクトル図をもとにキャンيون内外の流れを模式化して図 4.1.24 に示す。図において主流とキャビティ流れの界面には、強い速度勾配のために小さな渦が連続して発生している。この渦はキャビティ流れにエネルギーを伝達しながら風下に流され、風下建物の上端に当たる。渦の一部は壊れながらキャンيون内部に鉛直下方に入り、残りはキャンيون上部に流出する。風下建物に当たりキャンيون内部へ流入し、地表付近に達した流れは、キャンيون上部で一般流に連行される流れの補償流として風上建物の背後に向かう。これらの過程が繰り返されることでキャビティ渦が形成されるものと考えられる。

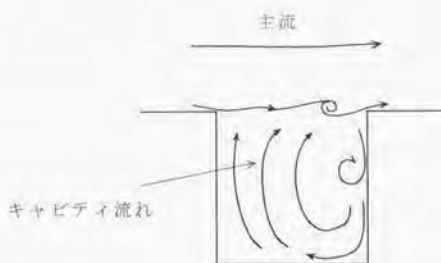


図 4.1.24 ストリートキャンيون内外の流れ

図 4.1.25 にキャニオン上端における風速 U_n が剪断応力に比例して増加する様子を、図 4.1.26 にキャニオン上部の剪断応力が大気安定度によって大きく変化する様子を示す。図 4.1.27 は風下建物直前の位置（キャニオンの上端、風上街区の前方 1cm）における安定、中立、不安定時の風速鉛直成分 W の確率密度分布である。図 4.1.27 より、鉛直方向の平均風速が安定成層時にゼロであってもおよそその半分が下向きの成分を持つこと、中立から不安定になるほど下向き成分の頻度が高くなり、キャニオン内部に向かう流れが増すことが分かる。図 4.1.22 では対応する場所での剪断応力が最大値をとる。

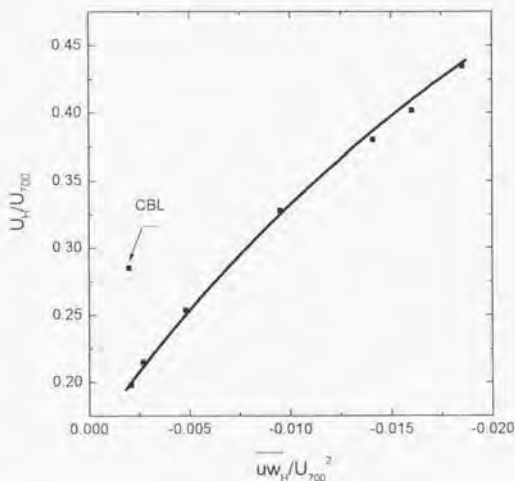


図 4.1.25 キャニオン上端における風速 U_n と剪断応力の関係

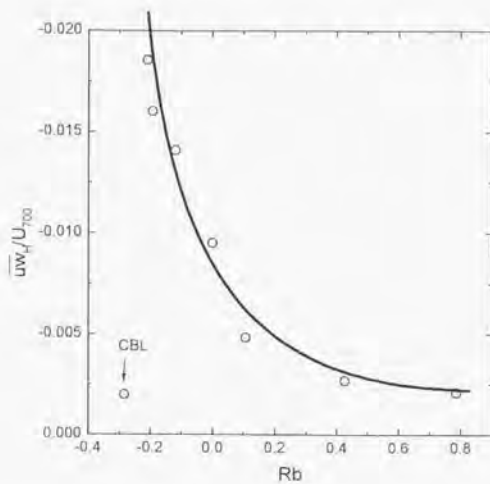


図 4.1.26 キャニオン上端における剪断応力の大気安定度による変化

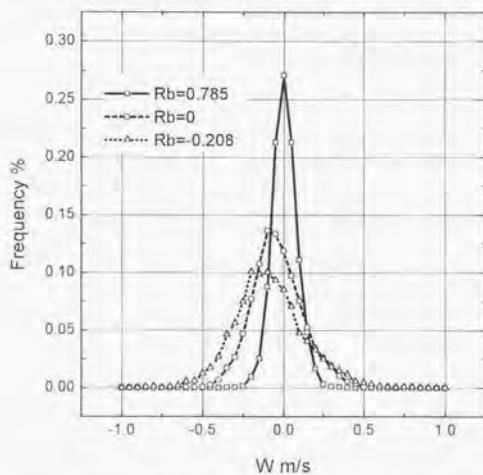


図 4.1.27 風下建物直前の位置における安定、中立、不安定時の
風速鉛直成分 W の確率密度分布($X/H=0.75$, $Z/H=1.0$)

2) キャニオン内の流れに及ぼす大気安定度の影響

図 4.1.28 はキャニオン上端の風速(U_{in})とキャニオン内の逆流の最大値(U_{bmax})の比の大気安定度 R_b による変化を示したものである。中立時にこの比は 0.51 と逆流はキャニオン上空風速の約 5 割程度であり、強不安定るときは上空風の約 6 割に増加する。逆に強安定のときにはほとんどゼロ近くまで減少し、キャビティ渦の速度が大気安定度によって大きく変化し、その変化は不安定側で小さく安定側で非常に大きいことがわかる。これは前節に述べたようにキャビティ渦を駆動する下降流が、キャニオン内の温度成層による浮力の影響を受けて大きく加減速されるためと考えられる。安定の場合、キャニオン内では風速が弱いわりに温度差が大きいため、浮力の影響が強まる。安定の場合にはもと U_{in} が小さく抑えられているうえに、キャニオン内部に進入する下降流が浮力に阻まれるため、キャニオン内の風速はさらに減じる。その結果として浮力の影響がさらに強まるといった正のフィードバックがかかるため、安定成層の影響がより強く、極端な風速低下につながると考えられる。

不安定の場合にはキャニオン内の温度勾配のため下降流が進入しやすく、キャビティ渦の勢いは中立の時より増す。その結果として鉛直方向の攪拌が進み上下の温度差が小さくなり浮力の影響はそれほど強くならない。このために不安定の強弱による風速の差は、安定の時のそれと比べると小さくなっている。

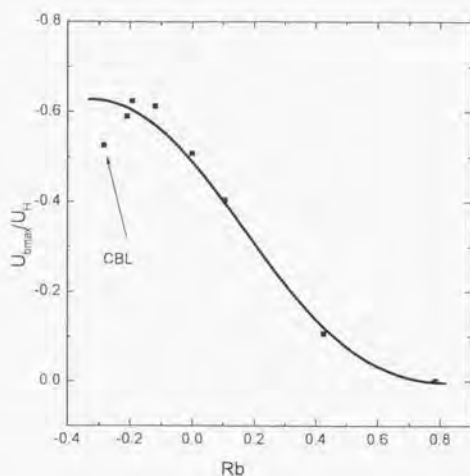


図 4.1.28 キャニオン上端の風速とキャニオン内の
逆流の最大値の比(U_{bmax}/U_H)の Rb による変化

3) キャニオン内の風速と乱れの大気安定度による変化

図 4.1.29 および図 4.1.30 にキャニオン内の風速と乱流エネルギーの安定度による変化を示す。図はキャニオン内の 50%値を○印で 75%,25%値をエラーバーで示したものであるが、いずれも安定側では低く変化が小さく、不安定側で高い。強安定と不安定の差は大きく、乱流エネルギーでは約 30 倍、速度ベクトルでは約 3 倍の違いがある。

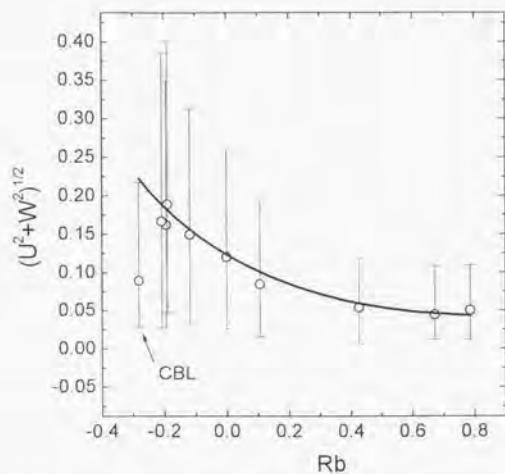


図 4.1.29 キャニオン内の風速の安定度による変化

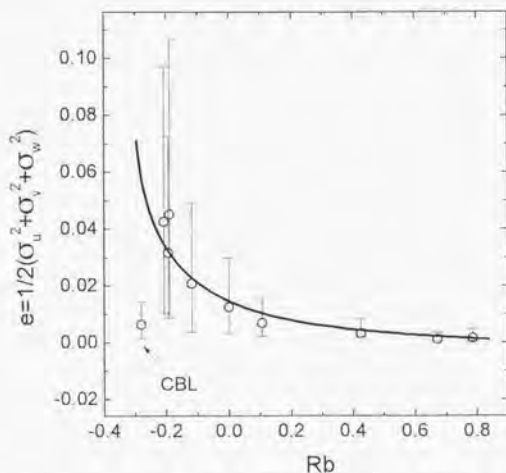


図 4.1.30 キャニオン内の乱流エネルギーの安定度による変化

4) CBLの場合の流れについて

CBLの場合、4. 2. 4節で述べたのと同様にキャニオン内部では上層の安定に阻まれて風速は低く、そのため床面の加熱による不安定はより強くなる。しかし、キャニオン上層の安定成層によってキャニオン内部への運動量の伝達が低く抑えられている。このため、キャニオン内部の安定度が部分的に不安定ではあっても、キャニオン内の平均風速や乱れ強さなどは低く、いずれも中立もしくは弱安定の成層のときの値に近い。

4. 2 道路幅の影響

4. 2. 1 実験の概要

1) 粗度および街区模型・ストリートキャニオン模型

粗度および街区模型の設置状況は4. 1節とほぼ同じである。測定部の入り口から12m以降に街区模型を設置した。その5列目と6列目の道路幅を街区高さ $H (= 100 \text{ mm})$ の1/2から6倍まで変え、ストリートキャニオン内の流れを測定した。

2) ストリートキャニオンの寸法、

気流・床パネル温度の設定

風洞の気流温度と床パネル温度は基本的には中立としたが、道路幅が、街区高さの等倍、2倍、4倍のときは安定と不安定の温度設定でも実験した。キャニオン寸法と温度成層の設定を表4.2.1に示す。

表 4.2.1 キャニオン寸法と温度成層の設定

L/H		0.5	1.0	1.5	2.0	3.0	4.0	6.0
Stable (Rb=0.79)	Ta	-	77.8	-	77.7	-	77.7	-
	Tf	-	20.5	-	20.5	-	20.6	-
Neutral (Rb=0)	Ta	19.2	18.7	18.9	18.9	19.2	18.8	19.0
	Tf	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0
Unstable (Rb=-0.21)	Ta	-	19.8	-	19.4	-	19.7	-
	Tf	-	78.9	-	78.4	-	78.6	-

4. 2. 2 道路巾によるストリートキャニオン内部流れの変化

道路幅 L が街区高さ H の 0.5 倍 ~ 6 倍まで変化したときの、中立時におけるストリートキャニオン内部の流れを Fig.4.2.1(a)~(g) に示す。図中、矢印はその位置における風速ベクトルを表し、等高線の数値は上空の風速で無次元化した合成風速値 $(U^2 + W^2)^{1/2} / U_{700}$ を表している。図において、道路幅が街区高さの 1/2 ($L/H = 0.5$) と最も狭い場合には、キャニオン内部に地上で逆流する向きの弱い渦が生じている。道路幅が街区高さの等倍から 2 倍 ($L/H = 1 \sim 2$) になると渦はキャニオンの幅一杯に広がり、勢いも強くなる。道路幅が街区高さの 3 倍 ($L/H = 3$) になると渦は横に長く伸び、キャニオン内部の風速は全般に低下し、地上の逆流も弱くなる。道路幅がさらに街区高さの 4 倍 ($L/H = 4$) まで広がると、キャニオン内部の大きな渦はなくなり、風上街区背後と風下街区前面に 2 つの渦 (それぞれ背面渦・lee eddy と前面渦・frontal eddy) ができはじめる。道路幅が街区高さの 6 倍 ($L/H = 6$) になると、前後の街区の相互影響は小さくなり、ストリートキャニオンというよりむしろ孤立建物前後の流れに近くなる。

すべての道路幅における流れに共通して、キャニオンの風上側街区背後には、つねに壁面に向かって斜めに上昇する流れが存在し、キャニオン風下側の街区前面には、壁に沿って下降する渦 (前面渦) が生じている。この特徴は道路幅が小さいほど強調される。すなわち道路幅が狭いほど前面渦は大きく・強くなる。道路幅が街区高さの 2 倍以下 ($L/H < 2$) のときには、街区風上にできる前面渦が大きく発達して街区風下の背面渦を吸収するために、キャニオン内に一つの大きな渦 (キャビティ渦・cavity eddy) ができる。特に道路幅が街区高さの等倍から 2 倍の範囲では、キャビティ渦が最も強くなる。これがストリートキャニオン内部流れの最大の特徴である。

一方、道路幅が街区高さの 2 倍以上 ($L/H > 2$) に広がると、キャビティ渦は弱くなり (図 4.2.1(e))、キャニオン上部に上空の風が流れ込むようになる。さらに道路幅が広がると上空の風はキャニオンの、より深い位置まで達し (図 4.2.1(f))、キャビティ渦が消滅し、前面渦と背面渦が生じる。

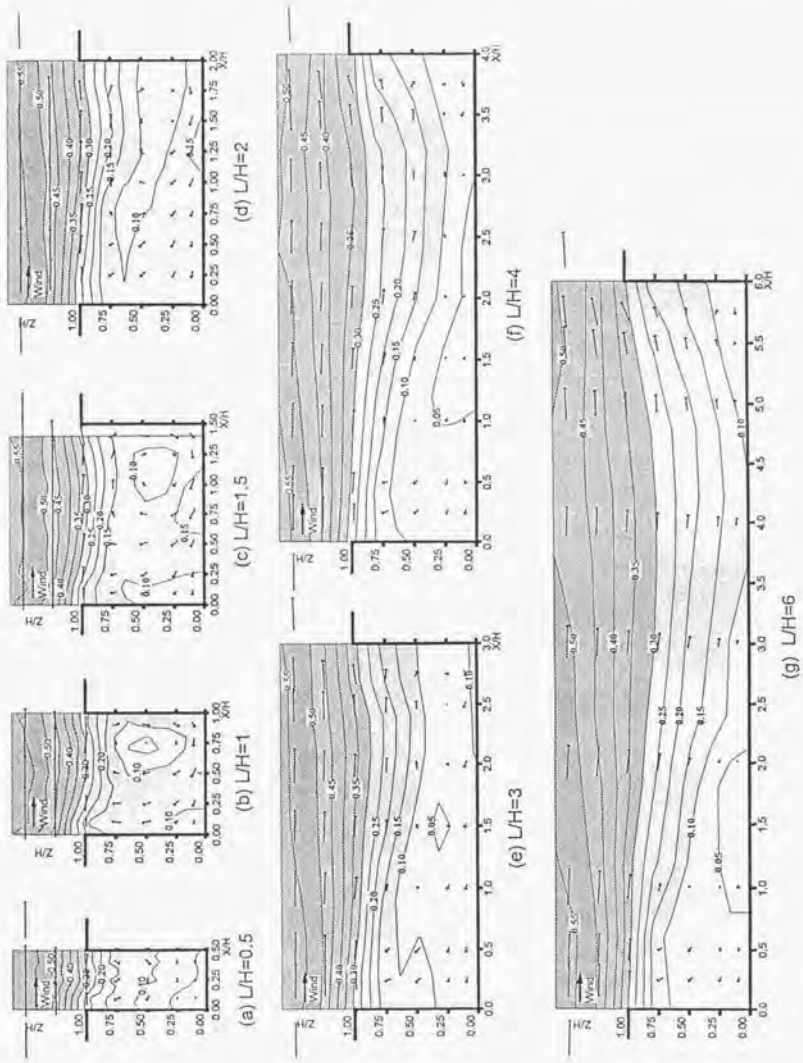


図 4.2.1 道路幅によるストリートキャニオン内部の流れの流の変化

この様子はキャニオン最下層($Z = 10 \text{ mm}$, 街区高さ H の $1/10$)における風速分布の変化(図 4.2.2)に顕著である。図においてキャビティ渦による逆流が最も強いのは、道路幅が街区高さの 1.5 倍($L/H = 1.5$)の時である。道路幅が広がると逆流は徐々に弱くなり、街区高さの 4 倍($L/H = 4$)でキャニオン中央部の風速はほとんどゼロに、6 倍($L/H = 6$)まで広がると中央部の逆流はなくなり、風上街区を越えた流れが地面に付着する。

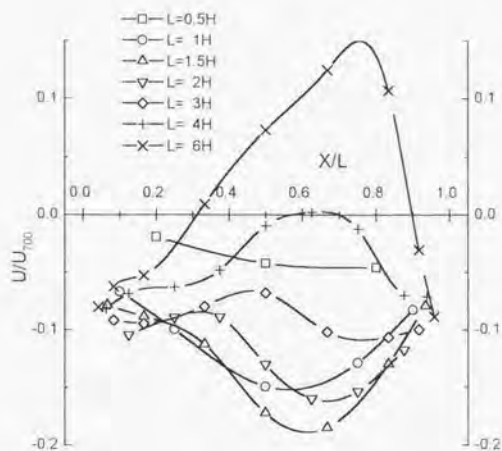


図 4.2.2 道路幅 L による地上の風速分布の変化

4. 2. 3 ストリートキャニオン内の流れパターン分類

Lee(1977)²⁹⁾および、Hussain(1980)³⁰⁾らは建物群内部の建物壁面圧力を建築密度や隣棟間隔との関連において測定し、さらにMorris(1955)⁹⁾が管内の摩擦損失に関連して導入した3つの流れパターン分類と壁面圧力分布の変化を関連づけた。

彼らが分類した流れパターンはI) Isolated Roughness Flow (IRF): それぞれの粗度要素が孤立しているかのように十分に間隔を置いて配置され、その後流や剥離渦が十分に発達し、次の粗度との間で流れが地上に再付着する、II) Wake Interference Flow (WIF): 粗度間隔が狭く、それぞれの粗度の後流や剥離渦が、隣り合う粗度同士の影響で十分に発達しない、III) Skimming Flow (SF): 粗度要素の間隔がさらに狭く、定常な渦が粗度の間に形成される。そして流れは粗度内部に侵入することなく粗度の頂点をかすめるように流れる、の3つである。これらの定義は建物群内部の流れの特徴を的確に説明しているものと思われる。

本章の実験で得られたストリートキャニオン内の流れ場を、これらの3つの流れパターンに分類し、それぞれの流れ場について検討する。但し、本実験における模型配置はストリートキャニオンの幅だけが変化し他は一定であり、この点でLeeやHussainらの模型配置と異なっている。この相違は、道路幅が広い場合の実験で、ストリートキャニオンに接近するプロファイルの差となって現れ、厳密には、街区前縁における流れの剥離のしかたや、キャニオン内部の流れに影響すると予想されるが、後述するSFやWIFの遷移点については影響は小さいものと思われる。

ストリートキャニオン内部の流れを観察し、それぞれの流れパターンにおける動的な流れの様子を把握するために、2次元のストリートキャニオン模型を用いて可視化実験を行った。長時間の観察結果より、頻度高く現れ、それぞれの分類を代表すると思われる流れパターンをスケッチし図4.2.3(a)~(c)に示す。また、キャニオン中央の地上における逆流風速 U_b と道路幅 L の関係、およびキャニオン風下側街区壁面における淀み点高さ H_{st} (建物近傍の平均風速ベクトルの分布より推定した) と道路幅 L の関係を図4.2.4に、Lee、Hussainらの求めた建物壁面の圧力と道路幅 L の関係を図4.2.5にそれぞれ示す。Lee、Hussainらの建物間隔 S/H は本実験との比較のため道路幅 L/H ($L = S - H$) に換算した。

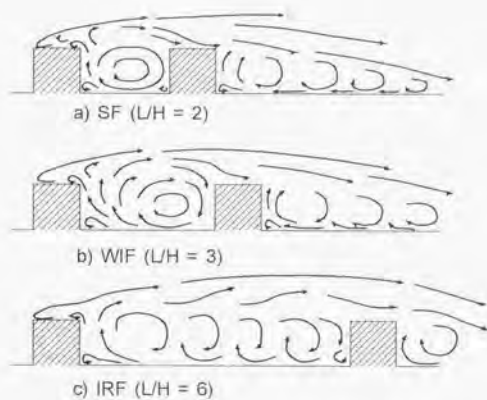


図 4.2.3 可視化によるストリートキャニオン内外の流れパターン

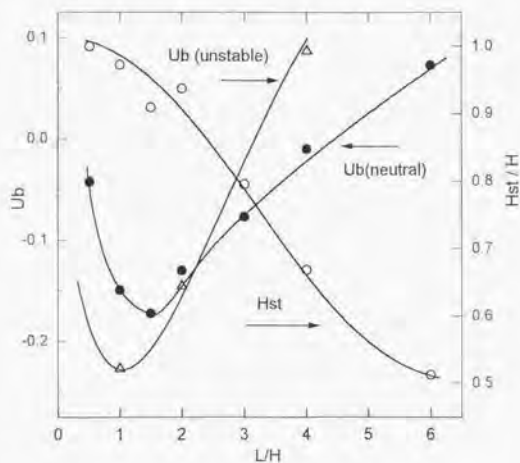


図 4.2.4 ストリートキャニオン中央における逆流の風速と
風下側建物前面における淀み点の建物間隔による変化

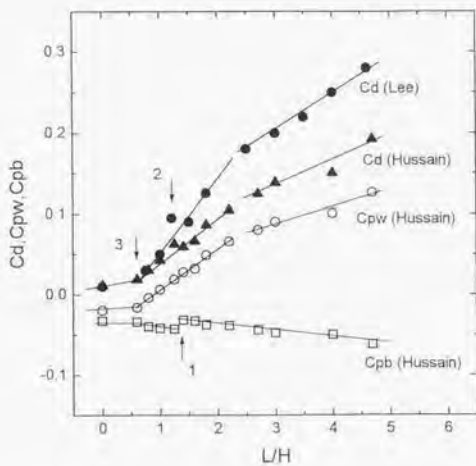


図 4.2.5 建物群模型内部の壁面圧力分布の建物間隔による変化
(Lee(1977), Hussain(1980)より)

1) Isolated Roughness Flow (IRF)について

図 4.2.1(f-g)に示されるように、道路幅が街区高さの4倍以上($4 < L/H$)のとき、キャニオン中央部で流れが再付着し、風上側街区の背後には背面渦・Lee eddy、風下側街区前面に前面渦・Frontal eddyが生じており流れはIRFに分類される。

可視化実験の結果(図 4.2.3(c))では、道路幅が街区高さの6倍($L/H = 6$)のとき、模型高さHと同程度の大きさの渦が風上街区背後に次々と発生し、それらが転がるようにして風下に流される様子が頻繁に観察された。これと同様の渦の流れはTani(1961)¹³⁾の2次元ステップ後方流れの短時間露光可視化写真で観察され、勝田(1981)¹⁴⁾らの2次元フェンスの背後の平均渦の大きさにも現れている。このことからステッやフェンスの背後、あるいは幅の広いストリートキャニオンの風上街区背後には、総じて、その高さの1~1.5倍程度の渦が連続して発生し、それらが一般流によって風下に流されるものと考えられる。以上より、Isolated Roughness Flow (IRF)の流れのもう一つの特徴は、風上側街区背後における渦の発生と下流への輸送が、風下街区の影響を強く受けないことであると思われる。

2) Wake Interference Flow (WIF)について

道路幅が街区高さの2倍から4倍($2 < L/H < 4$)の、Isolated Roughness Flow (IRF)とSkimming Flow (SF)の間でどちらにも当てはまらない流れが、WIFに相当すると考えられる。

可視化実験(図 4.2.3(b))の結果より、Wake Interference Flow (WIF)においてはキャニオン内に一つの大きな渦ができる。この渦は風下側の街区直前で前後に動いたり、崩れてまた新しい渦ができたりして、安定しない。WIFの場合、道路幅がIRFより狭いため、風上街区の背後に生じた渦は風下に運ばれるがすぐに下流の街区にぶつかる。短時間そこにとどまるものの、多くはすぐに壊れ、一部が上向きにキャニオンの外に流れ出、残りはキャニオン内部に向かいキャピティ渦を形成する。しかし、平均風速の流れ場ではこうしたすべての動きが時間的にならされるために、キャニオン全体に及ぶ横に長い渦があるように見える。

図 4.2.4において、風下側街区前面の淀み点高さ H_{st} は道路幅が狭いときには高い位置に生じ、道路幅が広がるにつれて徐々に低下し、道路幅が街区高さの

6倍($L/H=6$)になると街区高さの1/2付近に落ち着くように見える。Taniの2次元溝内部の圧力分布測定によれば、深い溝(道路幅が小さいSFに相当する)では風下側ステップの上端に最大圧力を生じ、浅い溝(道路幅が少し広いWIFに相当する)においては最大圧力(淀み点)は少し低い位置に生じている。このことより、WIFにおける風下街区前面の淀み点高さ H_{st} は、道路幅が狭い(SFに近い)場合には街区上端付近に生じ、道路幅 L の増加とともに低下し、IRFに近づくと孤立建物における高さに落ち着くものと考えられる。

3) Skimming Flow (SF)について

可視化実験(図4.2.3(a))において、道路幅が街区高さの2倍($L/H=2$)のときには、大きさや位置がほとんど変化しない安定な渦がキャニオンの幅いっぱいには広がっているのが観察される。これはIsolated Roughness Flow (IRF)の項で述べた、溝やフェンス背後にできる渦の大きさがその高さのおよそ1~1.5倍であることと深く関係しているものと推察される。すなわち、風上街区の背後に生じた渦がキャニオン内で移動せず、壊れもせずに持続し、キャニオン上方の一般流からエネルギーを供給され続けるため、特に勢いの強い渦が発達するものと思われる。

Leeは建物の抵抗係数 C_d の増加傾向の変化(図4.2.5)や可視化の結果から、Skimming Flow (SF)が生じる道路幅の上限を建物高さの1/2以下($L/H < 0.5$)と推定した。これに対しHussainは建物風下面における圧力変化(C_{pb})の不連続から道路幅が建物高さの1.2から1.6倍をSFの上限と考えた。Hussainは、SFからWake Interference Flow (WIF)への流れの変化が、Taniの2次元溝内外の流れに関する実験において、溝の中に定常な渦ができる安定な流れから不安定な流れに変わる($L/H=1.4$ で生じる)現象と同じであると考えた。本実験においては道路幅が街区高さの1.5倍($L/H=1.5$)のときにキャピティ渦が最も強く、安定し、2倍以上($2.0 < L/H$)になるとキャピティ渦が不安定で弱くなる。

このことより本実験では、道路幅が街区高さの2倍より狭く($L/H < 2$)、ストリートキャニオン内に安定した渦が生じる流れがSFに分類されると考える。

但し、道路幅が建物高さの1/2の可視化実験においては、キャピティ渦は若干不安定である。渦は道路幅が広いときのように前後には動かないものの、ときに壊れ、上下に2つ重なる。また、図4.2.4に示すようにキャニオン内の逆流の

強さ $U_b(\text{neutral})$ も $L/H=0.5$ では低下する。Lee と Hussain の SF 上限の値の差は、キャビティ渦が特に強くなる流れの、取り扱い方の違いによって生じたものと考えられる。本論文ではキャビティ渦が非常に強くなる、道路幅が街区高さと同倍から2倍まで ($1 < L/H < 2$) の範囲の流れを特に Canyon Flow (CF) として SF の中でも特殊な流れとして区別する。

4) 平均流れ場の概念図

各流れパターンにおける平均流れ場の概念図を図 4.2.6 に示す。それぞれのパターンの特徴は次の通りである。

- I) Isolated Roughness Flow (IRF): キャニオン内で、流れが地上に再付着し、風上側街区背後に背面渦・lee eddy、風下側街区前面に前面渦・frontal eddy 2 つの渦ができる。
- II) Wake Interference Flow (WIF): 平均の流れ場としては、キャニオンの幅いっぴいの横長の渦ができるが、キャニオン内部の乱れが強く、風速は低い。
- III) Skimming Flow (SF): キャニオン内には安定した渦ができる。また道路幅が街区高さの等倍から2倍 ($1 < L/H < 2$) の範囲では特に強い渦が生じるためこの範囲の流れを Canyon Flow (CF) として区別する。

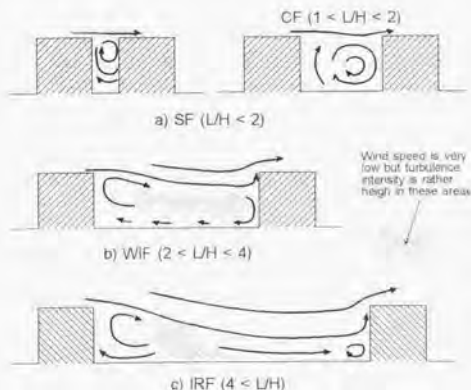


図 4.2.6 ストリートキャニオン内における平均流れ場の概念図

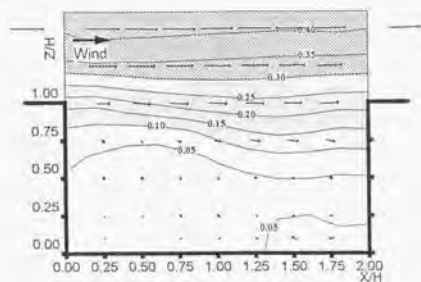
4. 2. 4 道路幅が広いストリートキャニオン内の 流れに対する大気安定度の影響

道路幅 L が街区高さの 2 倍と 4 倍 ($L = 2H, 4H$) のときの安定と不安定成層条件におけるキャニオン内の風速分布を図 4.2.7 と図 4.2.8 に示す。図 4.2.8 において、不安定の時にはキャニオン内の風速は全般に高い。キャニオン中央付近における地表の逆流はみられず、流れパターンは中立の時よりもせまい道路幅から IRF に移行している。一方、安定の時には非常に弱いながらもキャビティ渦が存在し、流れパターンとしては WIF のように見える。しかし、キャニオンの下半分の風速は非常に弱く、よどんで、安定成層時においては道路幅が広いときにも、地上付近の風速低下が大きい。

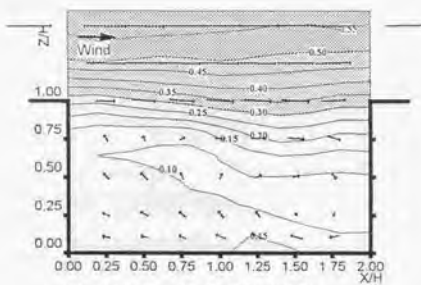
キャニオン中央の地上付近 ($Z = 100 \text{ mm}$) における風速は、道路幅によっても、温度成層条件によっても大きく変化する。不安定の条件において、道路幅が小さいときの逆流は中立の時よりも強い。道路幅が広がったときにはキャニオン内部の風速回復が早いので、より狭い道路幅でキャニオン内部の逆流がなくなる。また、安定成層条件の時には、道路幅によらずキャニオン低層部の風速は全般に低い。

図 4.2.9 に道路幅 $L/H = 1, 2, 4$ における地上風速分布の安定度による差を示す。この図からもキャニオン低層部の逆流風速は安定で低く、不安定で高いことがわかる。特に安定のときには道路幅 L によらず、常に風速が低い。

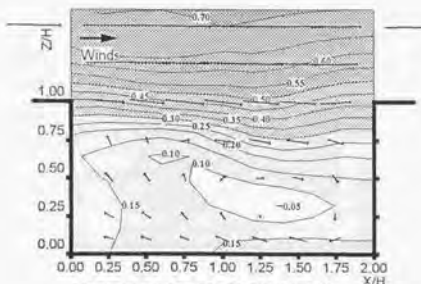
キャニオンの幅による地上風速の差は安定のときに小さく、中立・不安定で大きくなる。特に不安定の時にはキャニオン内部の風速の回復が早く、地上風速は安定、中立より狭い道路幅 L で順流になっている。図 4.2.4 の $U_b(\text{unstable})$, $U_b(\text{neutral})$ の変化より、道路幅が狭いとき ($L/H < 2$) にはキャニオン内部の逆流風速 $U_b(\text{unstable})$ は中立の時よりも強いが、道路が広がる ($L/H > 2$) と上層の影響が中立の時よりキャニオン深くまでおよぶためにキャビティ渦の消滅が早い。その結果として、より小さな道路幅 L で IRF に移行するものと思われる。



Stable ($T_a=78, T_f=21, L/H=2$)



Neutral ($T_a=19, T_f=20, L/H=2$)



Unstable ($T_a=19, T_f=78, L/H=2$)

図 4.2.7 安定・不安定時のキャニオン内の流れ $L=2H$ のとき

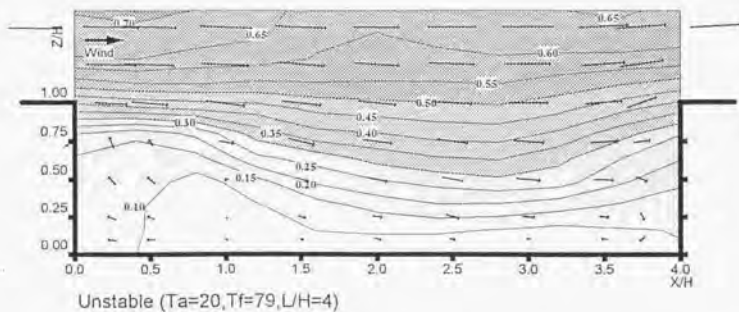
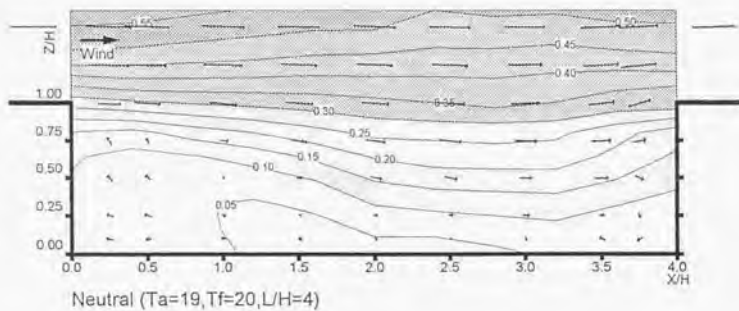
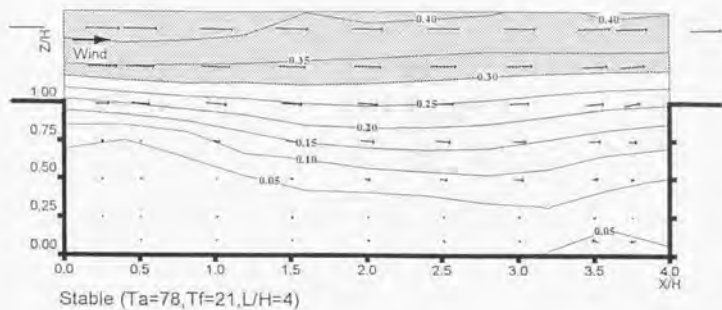


図 4.2.8 安定・不安定時のキャニオン内の流れ $L=4H$ のとき

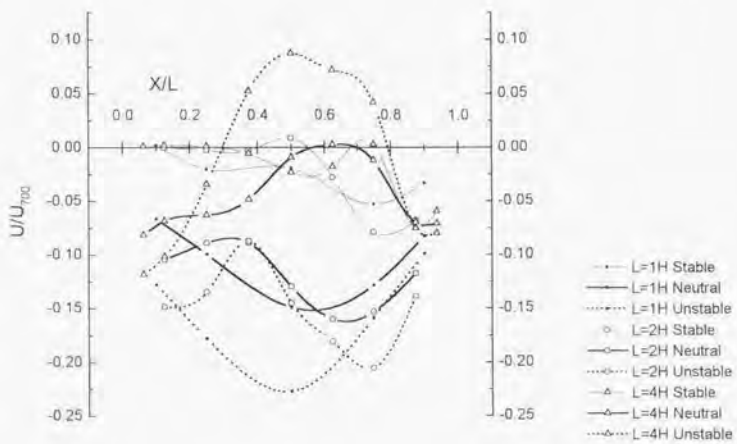


図 4.2.9 地上の風速に対する道路幅 L と大気安定度の影響

4. 2. 5 乱れの分布に対する道路幅と大気安定度の影響

ストリートキャニオン内部の各乱流統計量は、道路幅 L によっても大気安定度 R_b によっても変化するが、分布の形状などは 4. 1 節における道路幅と街区高さが等しい ($L/H=1$) の時の分布に似ている。

キャニオン内部の全風速測定値 $(U^2+W^2)^{1/2}/U_{700}$ の四分位値と道路幅 L および大気安定度 R_b の関係をそれぞれ図 4.2.10 および図 4.2.11 に示す。図 4.2.10 よりキャニオン内の風速は道路幅 L によっては大きく変化しないが、大気安定度 R_b による差は大きいことがわかる (図 4.2.11)。

風速と同様に、乱れ強さ σ_U/U_{700} の四分位値と道路幅 L および大気安定度 R_b の関係をそれぞれ図 4.2.12、図 4.2.13 に示す。図 4.2.12 において、キャニオン内の乱れ強さは道路幅が街区高さの 3 倍以上 ($L/H < 3$) では道路幅 L によって若干増加し、それ以上の L ではほとんど変わらない。しかし、大気安定度 R_b による乱れ強さの差は大きい (図 4.2.13)。そして、この傾向は他の乱流統計量についてもほぼ同様であり、キャニオン内の平均風速や乱流統計量に対しては道路幅 L よりも大気安定度の影響の方が強いことがわかった。

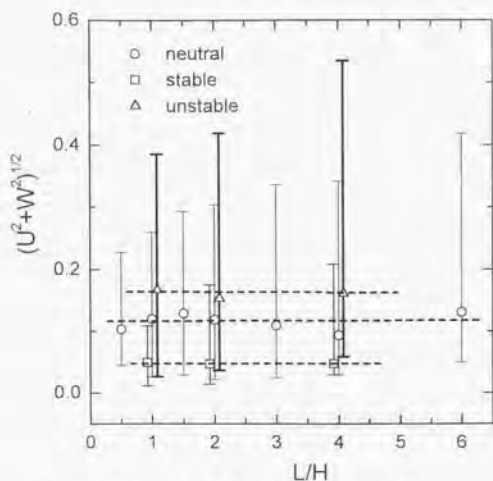


図 4.2.10 道路幅 L によるキャニオン内の風速
 $(U^2+W^2)^{1/2}$ の四分位値の変化

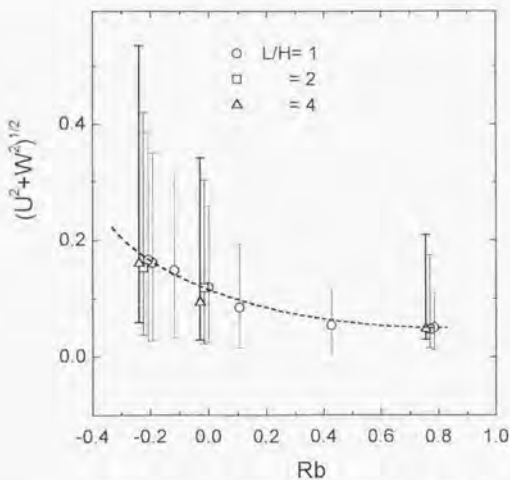


図 4.2.11 大気安定度 Rb によるキャニオン内の風速
 $(U^2+W^2)^{1/2}$ の四分位値の変化

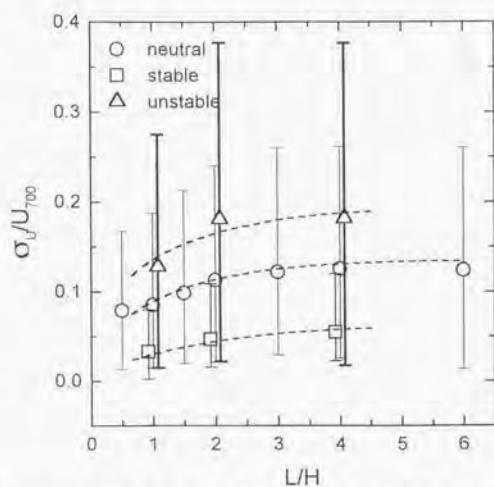


図 4.2.12 道路幅 L によるキャニオン内の乱れ強さ σ_u/U_{700} の四分位値の変化

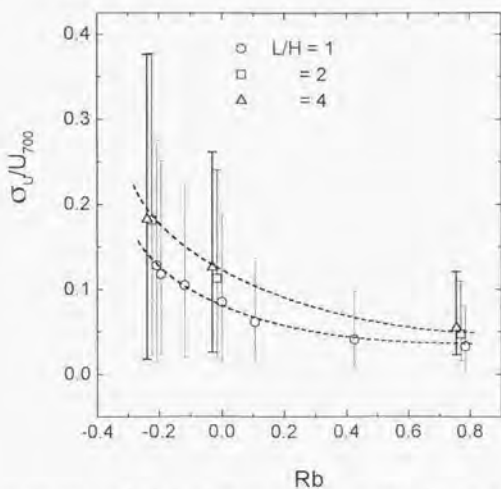


図 4.2.13 大気安定度 Rb によるキャニオン内の乱れ強さ σ_u/U_{700} の四分位値の変化

4. 3 第4章のまとめ

本章ではストリートキャニオン内外の流れ場およびそれに対する大気安定度やストリートキャニオンの道路幅の影響を調べるため、レーザー流速計による乱流測定を行った。実験は2段階に分けて行った。最初にストリートキャニオンの寸法比が1:1(街区高さと道路幅が同じ)ときの流れ場と大気安定度の影響を調べ、次に、ストリートキャニオンの道路幅を街区高さの1/2倍から6倍まで変化させたときの流れ場の変化を調べた。その結果、大気安定度の影響に対しては、道路幅と街区高さが等しいときストリートキャニオン内部に大きな一つの渦(キャビティ渦)ができ、その勢いは安定成層で弱く、不安定成層で強くなる。ストリートキャニオン道路幅の影響に対しては、道路幅によってLee(1977)が提案した3つの流れパターンに分類できるが、道路幅が建物高さと同倍から2倍の間では、キャビティ渦が特に強く発達する、などのことが明らかになった。以下にその結果を要約する。

大気安定度の影響について

- 1) ストリートキャニオン内外の風速は安定成層ほど低く、不安定成層ほど高い。またキャニオン内では不安定で逆流が強くなる。
- 2) キャニオン内外における流れの各統計量はOkeの都市境界層の分類と対応しており、I) キャニオン内部では成層による差おおきく、高さによる変化は小さい。II) キャニオン上端から対数分布に変わるまでの遷移域では高さによる差は安定度によって大きく変わるが高さ方向にほぼ一定である。III) 対数分布に従う部分では成層による差が徐々に小さくなり、高さが増すにつれて減少する。
の3つの成層部分に分けられる。
- 3) キャニオン内部、風下側街区直前の中央より少し高い位置に回転流(キャビティ渦)が生じている。キャビティ渦は安定成層が強いほど弱く、不安定ほど強くなり、その位置は成層状態によって大きく変化しない。
- 4) キャニオン上端の風速とキャニオン内の逆流の最大値の比(U_{bmax}/U_H)は中立時で-0.51であるのに対し、不安定時には-0.59、安定時には0近くまで変化し、キャニオン内の流れが温度成層状態によって大きく変化することが分かった。

- 5) キャンيون内の風速と乱れのばらつきは安定で小さく、不安定で高い。強安定と強不安定の差は乱流エネルギーでは約 30 倍、速度ベクトルでは約 3 倍になる。

道路幅の影響について

- 1) ストリートキャンيون内の流れは、道路幅によって Lee(1977)が提案した3つの流れパターン (1. Isolated Roughness Flow(IRF), 2. Wake Interference Flow(WIF), 3. Skimming Flow(SF))に分類できる。
 - 2) 道路幅が非常に広いとき (本実験では道路幅が街区高さの4倍以上、 $4 < L/H$) には、キャンيون中央部で流れが再付着し、風上側街区背後に背面渦・lee eddy、風下側街区前面に前面渦・frontal eddy 2つの渦ができる。流れは全体に独立建物周辺の流れと似ており、流れは Isolated Roughness Flow(IRF)に分類される。
 - 3) 道路幅がやや広いとき (本実験では道路幅が街区高さの2倍以上4倍以下、 $2 < L/H < 4$) には、平均の流れ場においてはキャンيون内に横長の渦が一つでき、流れは不安定でキャンيون内の平均風速は低い。可視化実験では、キャンيون内部に一つの大きな渦 (キャビティ渦) ができるが、前後に動いたり、壊れてまた新しい渦ができたりして不安定である。流れは Wake Interference Flow (WIF)に分類される。
 - 4) 道路幅が狭いとき (本実験では道路幅が街区高さの2倍以下、 $L/H < 2$) には、キャンيون内部に WIF のときよりも安定したキャビティ渦ができ、流れは Skimming Flow(SF)に分類される。しかし、キャビティ渦の強さは、道路幅が街区高さと同じになるあたりを境に大きく変化する。道路幅が街区高さと同倍から2倍までの範囲($1 < L/H < 2$)ではキャビティ渦が非常に強くなり、これがストリートキャンيون内の流れの最大の特徴といえる。この範囲を特に Canyon Flow(CF)として区別すべきと考える。
 - 5) 不安定の条件において、道路幅が小さいとき(SF)の逆流は中立の時よりも強いが、道路幅が広がると(WIF)キャンيون内部の風速回復が早いいため、より狭い道路幅からキャンيون内部の逆流がなくなる。また、安定成層条件の時には、道路幅によらずキャンيون低層部の風速は全般に低い。
- キャンيون内の乱流統計量は道路幅によっては大きく変化しないが、大気安定度の影響を強く受け、不安定では大きく、安定成層で小さくなる。

第5章 ストリートキャニオン内部の大気汚染物質拡散

に及ぼす大気安定度の影響

本章ではストリートキャニオン内部の濃度分布と流れ場および大気安定度との関連を調べるために行った拡散実験の結果について述べる。

5.1 実験の概要

5.1.1 街区模型

粗度および街区模型の設置状況は第4章とほぼ同じである。測定部の入り口から12m以降に設置した街区模型の、5列目と6列目の間の道路を対象とし、ストリートキャニオン内の濃度分布に対する大気安定度の影響を調べた。

5.1.2 測定点および実験条件

測定位置および線源の設置位置を図5.1.1に示す。高さ方向には3~125mmの範囲に7点、水平方向には25mm間隔に、流れ方向に5点、横方向に9点、1ケースの実験で合計315点の測定を行った。但し、道路中央では線源をよけるために、測定高さをほかより15mm高くしている。

気流と床パネルの温度設定は第4章の実験と同じである。

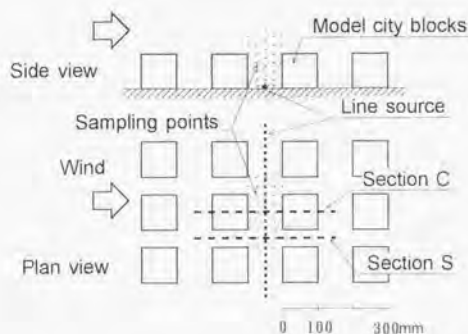


図 5.1.1 濃度の測定位置

5. 1. 3 トレーサーガスの排出と濃度の測定

トレーサーガス排出用のパイプ（以下線源）を街区模型先端の風下1m（先端から5列目）の道路中央床面に設置し、濃度20%のエタン（ N_2 希釈）を1mあたり400 cc / (min・m)の割合で排出した。線源としては第3章の実験で使用したものを改良し、長さ1m、直径8mmの2重管の線源を用いた。

線源は排出速度の影響を避けるため下向きにし、またパイプの傾きによってガスの出方に偏りがないうように0.5mmφのガラスビーズで満たしたCチャンネルに埋め込み、床面に設置した。

濃度の測定には8ch炭化水素分析計を用い8点の同時測定を行った。風洞が回流式であるため1chは時間とともに増加するバックグラウンド濃度の測定にあてている。

5. 2 濃度分布に及ぼす大気安定度の影響

図5.2.1(a)~(g)にストリートキャニオン中央の鉛直断面（図5.1.1のSection C）での無次元濃度 C_n の分布を示す。図よりキャニオン内の濃度は全般に、安定ほど高く、不安定ほど低い傾向を示すことがわかる。また濃度分布より、風下街区壁面に沿った下降流がキャニオン内部に進入し、キャニオン低層では逆流によって道路中央から排出されたトレーサーガスが風上側に運ばれる様子が分かる。強安定($R_b = 0.785$)、図5.2.1(a)の濃度分布は他と異なり、キャニオン1/4の高さ以下の地表付近の高濃度が風下側にも拡がり上下に圧縮されているように見える。これは第4章の流れの測定で明らかになったように、強い安定の場合ストリートキャニオン低層部の風速がほとんどゼロ近くまで低下するため、ほかの条件のように逆流によってトレーサーガスが風上に運ばれることなく地表付近に滞留するためと考えられる。

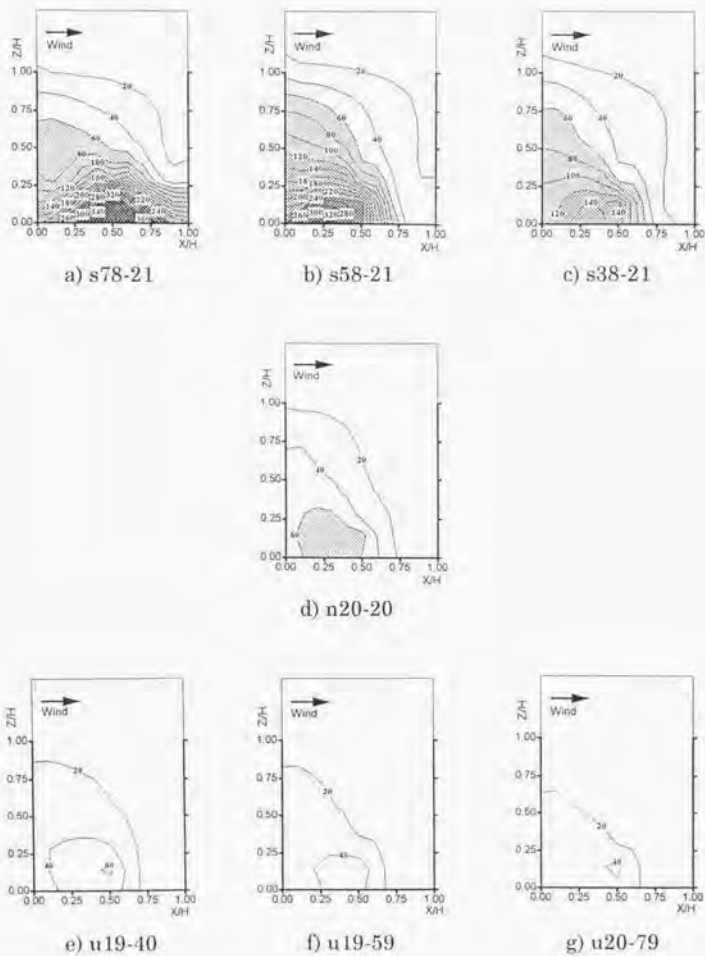


図 5.2.1 ストリートキャニオン中央断面(Position C)における
濃度分布の大気安定度による変化

ストリートキャニオンの中央断面における濃度測定値の4分位数(25,50,75%値)の大気安定度による変化を図 5.2.2 に示す。この図からも安定が強いほど濃度が高く不安定ほど低い様子がわかるが、その差は安定側で大きく不安定側で小さい。これは第3章の結果において安定側での風速の低下が大きく不安定側での増加が小さいことと対応しており、大気安定度によるキャニオン内の風速の変化が濃度の差となって現れたものと考えられる。ただし、もっとも強い安定の時に50%値は若干低下しておりほかの成層条件の時の結果と異なる傾向を示している。

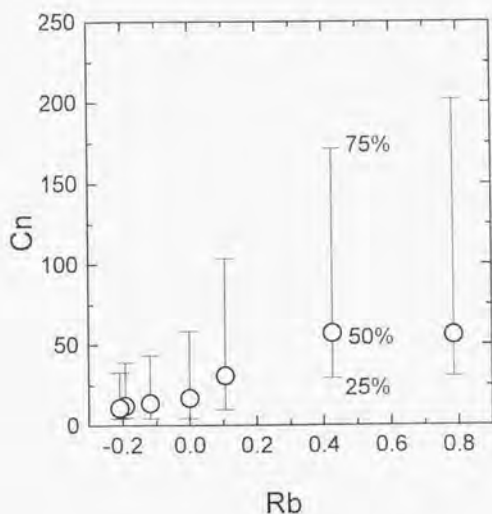
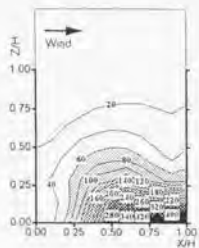


図 5.2.2 ストリートキャニオンの中央断面における濃度測定値の4分位数(25,50,75%値)の大気安定度による変化

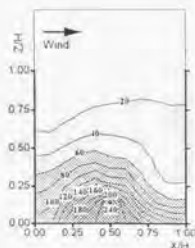
図 5.2.3(a)~(d)に風洞主流と平行な道路中央(図 5.1.1 の Section S)における濃度分布を示す。図より、道路上では前後に街区がない分だけ風の通りがよくキャニオン内の濃度よりも低いことが分かる。しかし、弱安定から不安定の条件では風が通り抜けるはずの道路上ではあっても風上側にトレーサーガスが拡がり、街区背後と同様に逆流の生じている様子が窺われる。この逆流の頻度は安定が強くなると低くなり、強安定($Rb = 0.785$)、図 5.2.3(a)ではトレーサーガスの多くは逆流せずに風下方向に流されている。

図 5.2.4 (a)~(d)にストリートキャニオンを中心として左右の道路を含む地表面($Z = 3mm$)の水平濃度分布を示す。図より、安定・中立から不安定の条件(図 6.2.4(b)~(d))では図 5.2.3 について述べたのと同様に道路上であっても弱い逆流が生じており、トレーサーガスが風上側に吹き寄せられるが、強安定(図 5.2.4(a))では道路の風上から新鮮な空気が流入して濃度が低下し、道路中央から発生したトレーサーが下流に流され道路風下に高濃度の拡がる様子が見える。

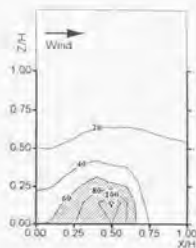
街区に挟まれた道路を通り抜ける流れについて考える。道路を挟む左右の街区の角で剥離した流線は道路側にふくらむため、風が通り抜ける隙間の巾は実際の街区間隔よりも狭まる。隙間を通り抜けるか、その上を乗り越えて流れるかはそれらの抵抗によって変わる。本実験で用いた模型配置の場合には弱安定から中立・不安定では隙間の抵抗が相対的に大きく街区の隙間を通りにくいために模型を乗り越える流れが多くなり、キャニオン内部と同様の逆流を生じやすいが、安定が強まると流れは負の浮力に打ち勝って模型を乗り越えられずに、隙間を押し通ることが多くなる。このような理由によって安定の時には道路上の逆流の頻度が減少し、トレーサーガスの多くが風下に流されるものと考えられる。



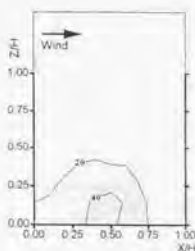
a) s78-21



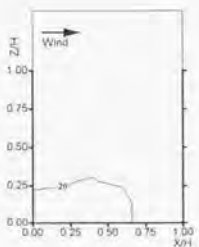
b) s58-21



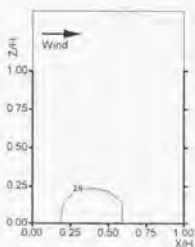
c) s38-21



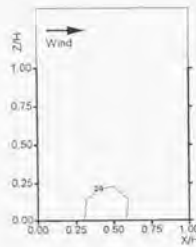
d) n20-20



e) u19-40



f) u19-59



g) u20-79

図 5.2.3 ストリートキャニオンと直交する道路断面(Position S)における濃度分布の大気安定度による変化

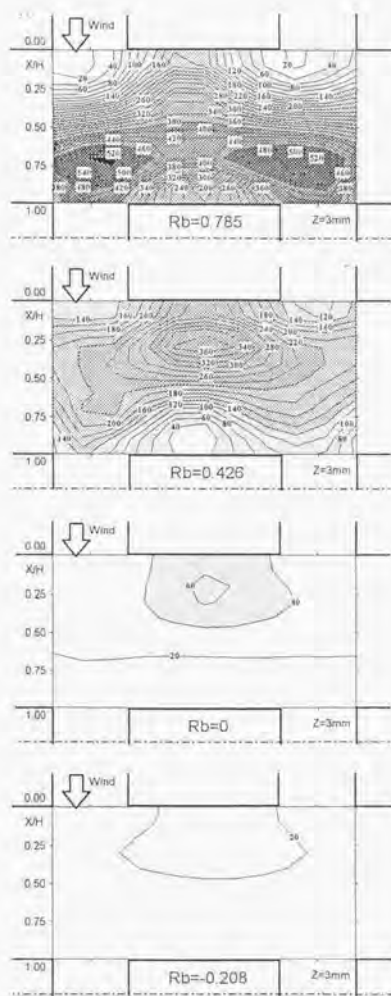


図 5.2.4 ストリートキャニオンを中心とした左右の道路を含む
地表面($Z = 3\text{mm}$)の水平濃度分布

図 5.2.5 にキャニオン内部(canyon)、道路の中央(street)における濃度の平均値と大気安定度の関係を示す。図より、道路中央部分の濃度は断面内に生じる逆流のためそれほど低下せず、キャニオン内部の 3/4 ~ 1/2 程度になっている。

図 5.2.2、図 5.2.5 において強安定の時の濃度が、それより弱い安定の時とはほぼ同じで、不安定-中立-安定の範囲における濃度変化の傾向から予想されるものよりずっと低くなっている。この理由について考察する。

強安定の時、ストリートキャニオン内部では風下街区に沿ってキャニオン内部に侵入する流れが浮力によって妨げられるので風速が極端に低下することを第 4 章で述べた。これに対して、道路部分では濃度分布から考えて、強安定の時には逆流が少なく流れは停滞しなように見受けられる。従ってキャニオン内部では、道路部分よりも流れが停滞する分だけ圧力が高くなり、地表付近にキャニオン内部から道路に向かう流れが生起される。そして、この流れはキャニオン内部の高濃度を拡散しないままキャニオン外に運び去るので、その結果としてキャニオン内の平均濃度が低下するものと思われる。

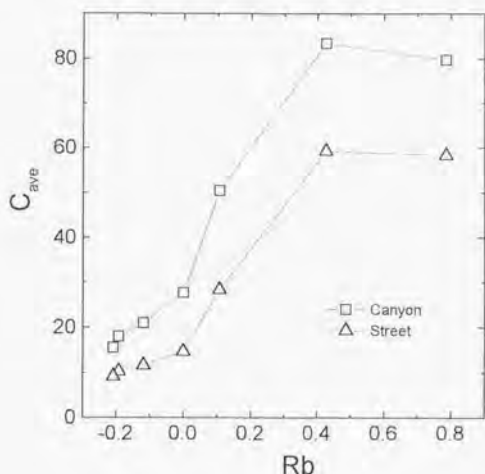


図 5.2.5 キャニオンの内部(canyon)と道路中央(street)における濃度の平均値と大気安定度の関係

5. 3 ストリートキャニオン内外の流れと濃度の関係

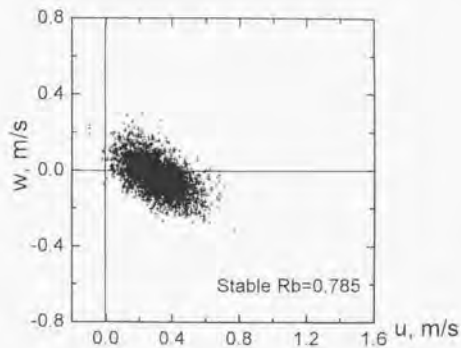
前節でも述べたように、前後の街区に挟まれていない道路上とキャニオン内部の濃度には極端な差がない(図 5.2.5)ことから、強安定($Rb = 0.785$)の条件を除いてはキャニオン内に発生したトレーサーガスの多くは、街区の隙間から地表に沿って風下に流されるよりも、キャニオン上端から外部に排出される方が多いと考えられる。

キャニオン上端における空気の出入りは4. 1. 3 節1) で述べたように、上端の境界面における強い速度勾配によって生じる小さな渦と、この渦が風下街区前面にぶつかってキャニオン内部に侵入する事によって行われるものと思われる。キャニオン上端の小さな渦が関与する換気のおおよその大きさについては、主流方向と鉛直方向の瞬時風速の相関から推定できる。

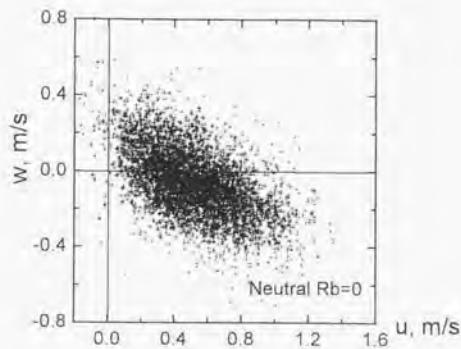
図 5.3.1(a)~(c)にキャニオン中央上端における主流方向、鉛直方向の瞬時風速 u と w の相関を示す。図は $u = w = 0$ を起点とした各プロットまでの大きさを持つ瞬時風速ベクトルの集まりと見ることもできる。図より w の平均値はほぼゼロに近く、上下に向かう平均流はほとんどないものの、上向き・下向きの流れが激しく交錯している。また、上向きよりも下向きのベクトルが長くキャニオン内部に強い流れが入り込み運動量の伝達が盛んなことを示している。

キャニオン上端の水平断面を通過する流れについて考える。 u と w の積、 $u \times w$ は単位時間当たり水平方向に u の中で鉛直方向に w だけ移動したときの流体の体積である。キャニオン中央上端では u はほとんどの場合正の値を持つから $u \times w$ は上向き、 $-u \times w$ は下向きの流量と考えられる。各安定度における $u \times w$ の傾度分布を図 5.3.2 に示す。図より不安定では $u \times w$ は負側に大きく偏り、この場所では乱れによる下向きの流れが卓越していることがわかる。このように w の平均値がゼロに近くてもキャニオン上端面を上向きまたは、下向きに通過する流れが少なからず存在している事がわかる。

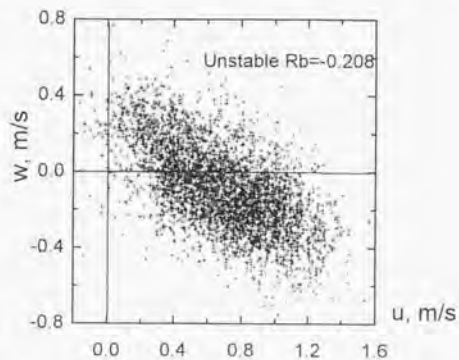
これらの情報から、ストリートキャニオンの換気量を定量的に把握するのは難しいが、換気量がキャニオン上端の風速 U_H とほぼ比例する量であることは容易に推定できる。そして実、図 5.3.3 に示すように、キャニオン内の濃度平均値 $Cave$ は、キャニオン上端の風速 U_H に反比例して減少している。



a) 安定



b) 中立



c) 不安定

図 5.3.1 キャニオン中央上端における u と w の相関

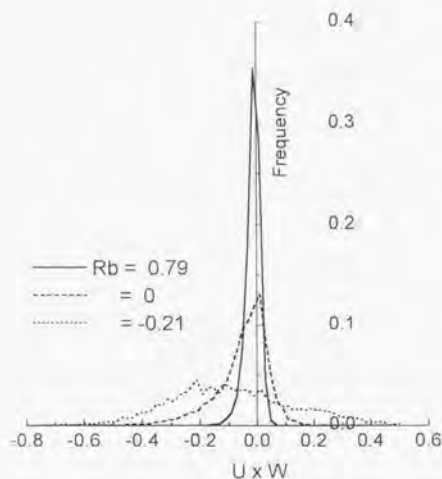


図 5.3.2 キヤニオン中央上端における $u \times w$ の頻度分布

キヤニオン内でのトレーサーガスの流れは模式的に図 5.3.4 のようになると考えられる。道路中央から排出されたトレーサーガスはキヤニオン内のキャビティ渦に運ばれながら希釈される。この流量すなわちキヤニオン内の循環流量 Q_c は中央断面を通過する流れとしてプロファイルの測定結果より推定できる。トレーサーガスの排出量を q とすれば Q_c によって瞬時に希釈されたときの濃度は $C_0 (= q/Q_c)$ であるが、現実のキヤニオン内の濃度はこれよりも高い値 C_1 になる。キヤニオン上端の乱れによって希釈されたトレーサーガスが、再度キヤニオン内に戻ってくる再循環の分だけ高くなるからである。

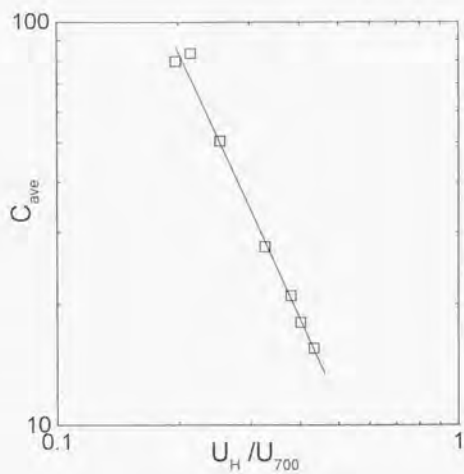


図 5.3.3 キャニオン内の平均濃度と上部風速 U_H の関係

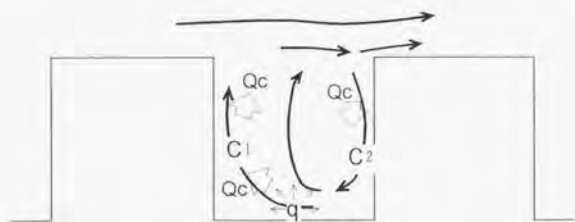


図 5.3.4 キャニオン内部における汚染物の流れ

キャニオン内の平均濃度 C_1 をトレーサーガスの流量バランスから考えると、キャニオン外に排出されたトレーサーガスがキャニオン内へ再び戻ってくる割合を再循環率 R として、定常状態のトレーサーガスの流入・流出は図 5.3.4 に示したとおり

$$\langle \text{流入分} \rangle \quad Qc \times C_1 \times R + q \quad (5.1)$$

$$\langle \text{流出分} \rangle \quad Qc \times C_1 \quad (5.2)$$

であり、流入・流出量が等しいことから

$$\langle \text{キャニオン内平均濃度} \rangle \quad C_1 = q / Qc (1 - R) = C_0 / (1 - R) \quad (5.3)$$

となり、キャニオン内の平均濃度 C_1 は C_0 より再循環した汚染物の分だけ高くなる。表 5.3.1 に各安定度におけるキャニオン内の平均濃度 C_{ave} と風速分布から求めた逆流の流量 Qc 、再循環率 R を示す。表より強安定 ($R_b = 0.785$) の場合を除けば R は安定成層ほど高く、例えば $R_b = 0.426$ ではキャニオン内の流れの 4 割以上が再循環していることになる。

キャニオン内部の循環の平均流速 U_r と上端の風速 U_H の関係を図 5.3.5 に示す。本実験では $U_r = 0.8 \times U_H - 0.1$ で表される関係が得られた。 U_r と U_H の関係や、再循環率 R はキャニオンの寸法や周囲の条件によって変化すると考えられるが、その両方がわかればトレーサーガス排出量 q からキャニオン内の平均濃度を推定することができる。本実験の U_H と q より推定したキャニオン内の平均濃度 C_{est} を表 5.3.1 の最終列に、風洞実験より得られる濃度 C_{ave} と比較して図 5.3.6 に示す。図より、流れのパターンが他と大きく異なる強安定 ($R_b = 0.785$) の条件を除いては濃度推定値は実験値に近いことが分かる。

第4章で測定したキャニオン内のベクトル分布図より、循環流の半径 r 成層条件によらずキャニオン高さの1/2程度と考え、

$$U_r = (\text{逆流の流量} : Q_c / \pi r^2) / (2\pi r H) \quad (\text{循環流の半径} : H/2)$$

として求めた。

表 5.3.1 各安定度におけるキャニオン内の
平均濃度 C_{ave} 、逆流の流量 Q_c 、再循環率 R

Rb	C_{ave}	Q_c	R	C_{est}
0.785	79.7	22	0.145	60.5
0.426	83.4	31	0.420	72.0
0.106	50.5	46	0.354	45.2
0	27.7	77	0.297	26.3
-0.118	21.0	99	0.278	20.4
-0.193	18.0	109	0.235	17.7
-0.208	15.5	121	0.200	15.1

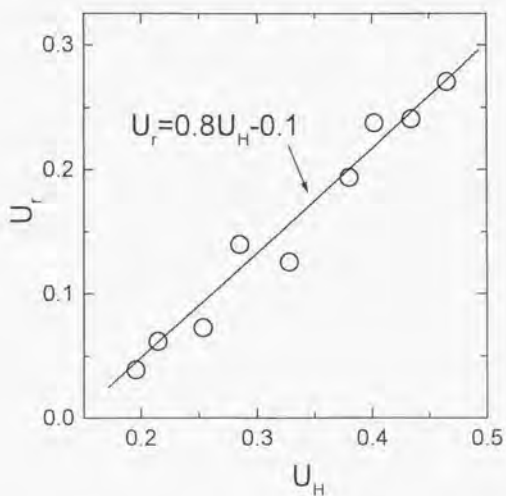


図 5.3.5 キャニオン上部風速 U_H と循環流の平均風速 U_r の関係

平均濃度と風速や排出量の関係を逆に用いれば、沿道における濃度測定値から U_r と U_{ii} の関係や、再循環率 R を用いて、従来非常に困難であった実市街地幹線道路からの汚染物排出総量を推定することができる。今後は風洞実験による種々の市街地構造における U_r と U_{ii} の関係や、再循環率 R に関する資料を整備していきたい。

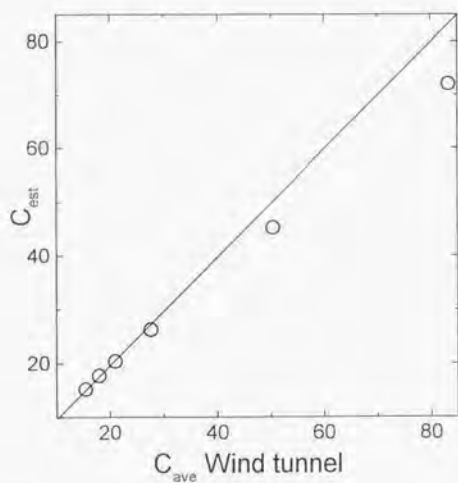


図 5.3.6 キヤニオン内部の平均濃度の実験値と予測値の比較

5. 4 SRI ストリートキャニオンモデルによる濃度分布予測

Johnson et al.(1973)¹⁸⁾は交通量の多い市街地中心部における大規模な気象観測と CO 濃度分布測定を行い、その結果から以下に示す自動車排ガスによる汚染ガス濃度の予測式を提案した。国内ではこれを慣例的に SRI ストリートキャニオンモデルと称している。

$$\Delta C_L = q / \{k_2 (U + 0.5) k_1 ((x^2 + z^2)^{1/2} + 2)\} \quad (5.4)$$

$$\Delta C_W = q / \{k_2 (U + 0.5) k_1 L\} \quad (5.5)$$

$$\Delta C_I = (\Delta C_L + \Delta C_W) / 2 \quad (5.6)$$

ここに、 $\Delta C_L, \Delta C_W, \Delta C_I$ はそれぞれキャニオン風下、風上側、並行風時における濃度増加、 q は汚染ガス排出量、 k_2 はキャニオン上端の風速と地上風速の比、 k_1 は原典には明確な定義はないが、乱れによる拡散巾の移流距離に対する比と考えられる。また、式(5.4)、(5.5)の定数 0.5 は自動車による機械的攪拌による風速、式(5.4)の 2 は自動車の大きさに相当する初期拡散巾である。Johnson はこの式による予測値と観測値を合わせるため k_1 と k_2 をまとめて $K = k_1 \times k_2 = 1/7$ としている。

この予測式は濃度が移流距離と拡散巾、および移流速度に反比例して減少することを数式化したもので、単純で拡散の本質をとらえた予測式としてその有効性がいくつかの実測^{17), 18)}によって検証されているが、係数 K は大気安定度及び道路の幾何学的形状などによって変化するものである事がそれぞれ藤谷(1976)と岡本(1991)によって示唆されている。

ここでは k_1 と k_2 を、一例として中立の時の流れの測定結果から推定する。 k_2 は k_2 はキャニオン上端の風速と地上風速の比であるから

$$k_2 = U_{10} / U_{11} = 1/2.22 \quad (5.7)$$

k_1 は移動距離 $(x^2 + z^2)^{1/2}$ に対する乱れによる鉛直方向への広がり巾の比なので、

$$k_1 = \sigma_w / U_{10} = 1/1.94 \quad (5.8)$$

さらに、再循環による割り増し $\{1 / (1 - R) = 1.42\}$ を考慮すると

$$k_1 \times k_2 \times \{1 / (1 - R)\} = 1/6.11 \quad (5.9)$$

となり、Johnson らが実測値とあうように定めた値 $K=1/7$ にほぼ近い値となる。

各安定度における R_b と $K[= k_1 \times k_2 \times \{1/(1-R)\}]$ の関係を図示すると図 5.4.1 のようになる。この K を用いてトレーサーガス排出量 q から式(5.4)~(5.6)によって各測定点の C_n を予測し、実験を行ったすべての大気安定度における風洞実験値と比較すると図 5.4.2 のようになる。図中大きな□印は(5.4)より求めたキャニオン風上側、小さな□印は(5.5)より求めたキャニオン風下側、中くらいの■印は(5.4)より求めたキャニオン中央での濃度値である。

図よりキャニオン中央付近における予測値は実験値より数倍高く、キャニオン風下では 1/2~3 程度過小に予測されるなど場所によっては誤差の大きな場合があるが、通常高濃度が発生して問題となるキャニオン風上側に限って言えばモデルによる予測値と風洞実験値は比較的良好に一致している。以上より風洞実験値は、SRI ストリートキャニオンモデルを介して間接的にはあるが、現地観測値とほぼ近い事が確認されたと考える。

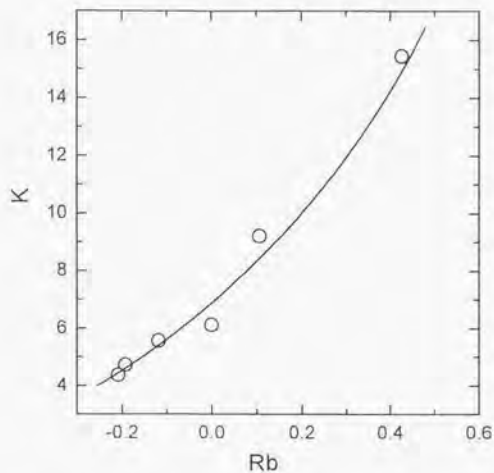


図 5.4.1 SRI モデルにおける係数 K の大気安定度による変化

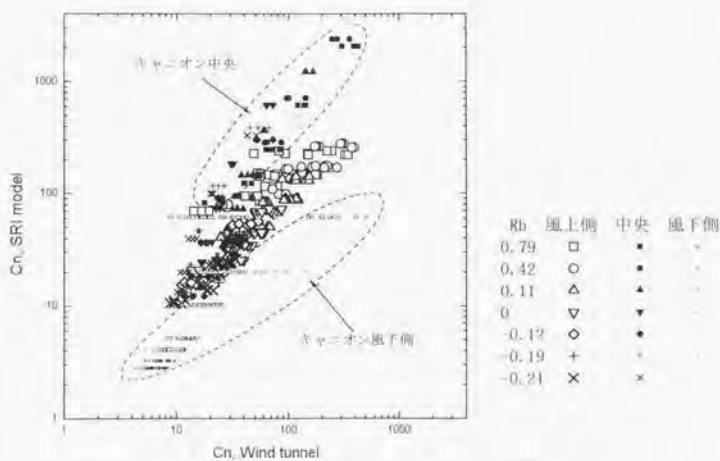


図 5.4.2 SRI モデルによる濃度推定値と風洞実験値の比較

5. 5 第5章のまとめ

第5章では前章の結果を受け、トレーサー実験によってキャニオン内部における濃度分布を種々の大気安定条件の下で調べ、流れ場や大気安定度と汚染の拡散構造の関連を明らかにした。その結果ストリートキャニオン内の濃度は大気安定ほど高く、不安定で低くなること。その増減は大気安定度によらずキャニオン上端の風速の変化に対応していること。Jonsson らによって提案されたストリートキャニオンモデル中で、経験常数として用いられている係数を、流れ場の測定値から得られる風速比や、乱れ強さから推定し、それらを用いることによって種々の大気安定度におけるストリートキャニオン内部の濃度分布が実用精度で予測可能なことを示した。以下にその結果を要約する。

- 1) ストリートキャニオン内の濃度は大気が不安定の時に低く、安定の時に高くなる。
- 2) 安定が非常に強いときには汚染質の拡散構造が変わるため、キャニオン内外の濃度分布は他の条件の時と全く異なり、鉛直方向への濃度勾配が大きく、上下に圧縮された分布を示す。
- 3) 本実験のような街区配置の場合、風が通り抜ける街区間の隙間の道路にも、キャニオン内と同じような逆流が生じることがあり、そのために道路中央から排出されたトレーサーガスは風上側にも運ばれ、キャニオン内の鉛直断面と類似の濃度分布を示す。この傾向は中立から不安定の条件で強く強安定では弱くなる。
- 4) 道路の逆流は強安定の成層条件の時には無くなり、キャニオン低層部に滞留した高濃度が鉛直方向には拡散せず、道路から風下に運び出される。このためにキャニオン全体としての濃度が低下すると考えられる。
- 5) ストリートキャニオン内の平均濃度は、キャニオン内の換気量 Q_c とトレーサーガス排出量 q から求まる濃度 (q/Q_c) より、キャニオン上端から内部に再び戻ってくる再循環の濃度分だけ高くなる。この再循環率は不安定で低く、安定で高くなる。
- 6) キャニオン上端の風速 U_H とキャニオン内の逆流風速 U_r の関係、トレーサーガス排出量 q および再循環率 R からキャニオン内の平均濃度を予測することができる。

7) Johnson らのストリートキャニオンモデルによる濃度予測値は強安定($Rb = 0.785$)の時を除いて、キャニオン風下側では2倍程度のばらつきはあるものの、風洞実験値と比較的近い値を示している。また、予測式中の係数 K は風洞実験から求まるキャニオン上端の風速と逆流の風速の比 U_{10}/U_H 、逆流する流れの鉛直方向の乱れ強さ σ_w 、および再循環率 R などから求めることができ、大気安定度によって大きく変化する。

第6章 結論

大都市における大気汚染の特徴は、市街地の高層化や道路の複層化など、高密度な空間利用による風通しの悪さによって大気汚染物質が滞留し、沿道の大気汚染濃度が広闊地におけるそれより数倍以上も高くなる点にある。

沿道の高濃度大気汚染の発生機構を明らかにし、その対策を立案するためには、市街地の凹凸内部（ストリートキャニオン）における風の流れと、汚染濃度の微細な分布構造を明らかにする必要がある。

第1章では以上のような本研究の背景と、既往の研究について概観した。

第2章では、歴史が浅くまだ実験手法が確立していない、温度成層風洞による実験上の問題点をはじめとして、可視化実験、拡散実験におけるトレーサーガスの排出方法や濃度分布の測定方法、レーザー流速計を用いる際の実験手法等に関する検討結果を行った。

第3章では、市街地低層部における沿道大気汚染濃度分布の概略を把握するために拡散実験を行った。通常の幹線道路沿道よりも高濃度が予想される交差点を中心に、数ブロックの街区全体を含む比較的広い範囲の濃度分布と、交差点近傍の建物に囲まれた道路内部の濃度分布を細かく調べる実験の2段階に分け、それぞれに対する街区の高さ、風向、近傍の建物の影響などを調べた。その結果、道路を中心とした広い範囲における平均的な市街地の濃度分布に対しては、建物による凹凸よりも横の広がりが大きいため濃度分布は全体として単調で、高濃度は交差点など、汚染の発生源を中心とした比較的狭い範囲に発生し、交差点や幹線道路からの距離に反比例して濃度が減少することがわかった。これに対し、交差点や沿道の濃度分布は場所による濃度の差が大きく、近傍の建物による複雑な気流分布の影響を受け、交差点内部の高濃度とほぼ同じ程度の高濃度が一般の幹線沿道の建物周辺にも生じていることがわかった。以下にその結果を要約する。

- 1) 交差点周辺の街区の密度が高くなると、市街地の濃度は高く、高濃度を示す範囲も広がる。
- 2) 交差点周辺市街地の濃度は、本実験の範囲内では、一方の道路と風向が一致する $\theta=0^\circ$ の時が最も高く、 $\theta=45^\circ$ の時に最も低くなる。

- 3) 周辺市街地における高濃度域はほとんどの場合道路から1~2街区の範囲に生じる。
- 4) 交差点内部の高濃度域は交差点中心部や、幹線道路沿いの風上側街区背後など比較的狭い範囲に限定されることが多い。
- 5) 交差点近傍に高層建物が存在する場合、高層建物直近では建物による風速増加のために濃度は低下するが、逆に交差点から2~3街区はなれた周辺市街地の濃度は高くなる。
- 6) 全実験を通じて高濃度が生じるのは、交差点の中央など交通量が大きい場所、あるいは、幹線道路沿いの建物に囲まれたストリートキャニオン内部で風がよどむ地点であった。

第4章ではストリートキャニオン内外の流れ場およびそれに対する大気安定度やストリートキャニオンの道路幅の影響を調べるため、レーザー流速計による乱流測定を行った。実験は2段階に分けて行った。最初にストリートキャニオンの寸法比が1:1(街区高さと同様)ときの流れ場と大気安定度の影響を調べ、次に、ストリートキャニオンの道路幅を街区高さの1/2倍から6倍まで変化させたときの流れ場の変化を調べた。その結果、大気安定度の影響に対しては、道路幅と街区高さが等しいときストリートキャニオン内部に大きな一つの渦(キャピティ渦)ができ、その勢いは安定成層で弱く、不安定成層で強くなる。ストリートキャニオン道路幅の影響に対しては、道路幅によってLee(1977)²⁾が提案した3つの流れパターンに分類できるが、道路幅が建物高さと同様から2倍の間では、キャピティ渦が特に強く発達する、などのことが明らかになった。以下にその結果を要約する。

大気安定度の影響について

- 1) ストリートキャニオン内外の風速は安定成層ほど低く、不安定成層ほど高い。またキャニオン内では不安定で逆流が強くなる。
- 2) キャニオン内外における流れの各統計量はOkeの都市境界層の分類と対応しており、I) キャニオン内部では成層による差おおきく、高さによる変化は小さい。II) キャニオン上端から対数分布に変わるまでの遷移域では高さによる差は安定度によって大きく変わるが高さ方向にほぼ一定である。III) 対数分布に従う部分では成層による差が徐々に小さくなり、高さが増すにつれて減少する。

の3つの成層部分に分けられる。

- 3) キャニオン内部、風下側街区直前の中央より少し高い位置に回転流(キャビティ渦)が生じている。キャビティ渦は安定成層が強いほど弱く、不安定ほど強くなり、その位置は成層状態によって大きく変化しない。
- 4) キャニオン上端の風速とキャニオン内の逆流の最大値の比(U_{bmax}/U_{10})は中立時で-0.51であるのに対し、不安定時には-0.59、安定時には0近くまで変化し、キャニオン内の流れが温度成層状態によって大きく変化することが分かった。
- 5) キャニオン内の風速と乱れのばらつきは安定で小さく、不安定で高い。強安定と強不安定の差は乱流エネルギーでは約30倍、速度ベクトルでは約3倍になる。

道路幅の影響について

- 1) ストリートキャニオン内の流れは、道路幅によってLee(1977)が提案した3つの流れパターン (1. Isolated Roughness Flow (IRF), 2. Wake Interference Flow (WIF), 3. Skimming Flow (SF)) に分類できる。
- 2) 道路幅が非常に広いとき (本実験では道路幅が街区高さの4倍以上、 $4 < L/H$) には、キャニオン中央部で流れが再付着し、風上側街区背後に背面渦・lee eddy、風下側街区前面に前面渦・frontal eddy 2つの渦ができる。流れは全体に独立建物周辺の流れと類似しており、流れは Isolated Roughness Flow (IRF) に分類される。
- 3) 道路幅がやや広いとき (本実験では道路幅が街区高さの2倍以上4倍以下、 $2 < L/H < 4$) には、平均の流れ場においてはキャニオン内に横長の渦が一つでき、流れは不安定でキャニオン内の平均風速は低い。可視化実験では、キャニオン内部に一つの大きな渦(キャビティ渦)ができるが、前後に動いたり、壊れてまた新しい渦ができたりして不安定である。流れは Wake Interference Flow (WIF) に分類される。
- 4) 道路幅が狭いとき (本実験では道路幅が街区高さの2倍以下、 $L/H < 2$) には、キャニオン内部に WIF のときよりも安定したキャビティ渦ができ、流れは Skimming Flow (SF) に分類される。しかし、キャビティ渦の強さは、道路幅が街区高さと同じになるあたりを境に大きく変化する。道路幅が街区高さと同倍から2倍までの範囲($1 < L/H < 2$)ではキャビティ渦が非常に強くなり、これが

ストリートキャニオン内の流れの最大の特徴といえる。この範囲を特に Canyon Flow(CF)として区別すべきと考える。

- 5)不安定の条件において、道路幅が小さいとき(SF)の逆流は中立の時よりも強いが、道路幅が広がると(WIF)キャニオン内部の風速回復が早いいため、より狭い道路幅からキャニオン内部の逆流がなくなる。また、安定成層条件の時には、道路幅によらずキャニオン低層部の風速は全般に低い。

キャニオン内の乱流統計量は道路幅によつては大きく変化しないが、大気安定度の影響を強く受け、不安定では大きく、安定成層で小さくなる。

第5章では前章の結果を受け、トレーサー実験によつてキャニオン内部における濃度分布を種々の大気安定条件の下で調べ、流れ場や大気安定度と汚染の拡散構造の関連を明らかにした。その結果ストリートキャニオン内の濃度は大気安定ほど高く、不安定で低くなること。その増減は大気安定度によらずキャニオン上端の風速の変化に対応していること。Jonssonらによつて提案されたストリートキャニオンモデル中で、経験常数として用いられている係数を、流れ場の測定値から得られる風速比や、乱れ強さから推定し、それらを用いることによつて種々の大気安定度におけるストリートキャニオン内部の濃度分布が実用精度で予測可能なことを示した。以下にその結果を要約する。

- 1) ストリートキャニオン内の濃度は大気が不安定の時に低く、安定の時に高くなる。
- 2) 安定が非常に強いときには汚染質の拡散構造が変わるため、キャニオン内外の濃度分布は他の条件の時と全く異なり、鉛直方向への濃度勾配が大きく、上下に圧縮された分布を示す。
- 3) 本実験のような街区配置の場合、風が通り抜ける街区間の隙間の道路にも、キャニオン内と同じような逆流が生じることがあり、そのために道路中央から排出されたトレーサーガスは風上側にも運ばれ、キャニオン内の鉛直断面と類似の濃度分布を示す。この傾向は中立から不安定の条件で強く強安定では弱くなる。
- 4) 道路の逆流は強安定の成層条件の時には無くなり、キャニオン低層部に滞留した高濃度が鉛直方向には拡散せず、道路から風下に運び出される。このためにキャニオン全体としての濃度が低下すると考えられる。
- 5) ストリートキャニオン内の平均濃度は、キャニオン内の換気量 Q_c とトレー

サーガス排出量 q から求まる濃度 (q/Qc) より、キャニオン上端から内部に再び戻ってくる再循環の濃度分だけ高くなる。この再循環率は不安定で低く、安定で高くなる。

- 6) キャニオン上端の風速 U_H とキャニオン内の逆流風速 U_r の関係、トレーサーガス排出量 q および再循環率 R からキャニオン内の平均濃度を予測することができる。
- 7) Johnson らのストリートキャニオンモデルによる濃度予測値は強安定 ($R_b = 0.785$) の時を除いて、キャニオン風下側では2倍程度のばらつきはあるものの、風洞実験値と比較的近い値を示している。また、予測式中の係数 K は風洞実験から求まるキャニオン上端の風速と逆流の風速の比 U_{10}/U_H 、逆流する流れの鉛直方向の乱れ強さ σ_w 、および再循環率 R などから求めることができ、大気安定度によって大きく変化する。

本論文では、今まで正確な情報の非常に少なかった都市最下層の凹凸内部における流れ場と大気汚染物質の拡散、および、それらに対する大気安定度の影響を調べることによって、沿道大気汚染物質の拡散構造を明らかにし、汚染予測のための有効な手がかりを得ることができた。

また、第4章、第5章で行った実験では、温度成層流中のストリートキャニオン内部の流れ場、温度場ならびに濃度場に関して、最適な都市環境計画並びに数値シミュレーション結果を検証するための、詳細なデータベースを得ることができた。

今後は沿道建物の条件、接近流の条件、気象条件、等の影響を調べ、より一般的な沿道大気汚染予測に関する資料を整備する必要があると考える。

最後に、本論文で述べた結果が、市街地低層部の流れや拡散を取り扱う方々、ならびにそれらを数値シミュレーションによって解こうとする方々のお役に立つことを願って結びとしたい。

引用文献

- 1) A. F. Stein and B. M. Toselli: Street level air pollution in Cordoba city, Argentina. *Atmospheric Environment*, Vol.30, No.20, 3491-3495, 1996
- 2) B.E.Lee and B.F.Soliman: An Investigation of the Forces on Three Dimensional Bluff Bodies in Rough Wall Turbulent Boundary Layers, *Trans. A.S.M.E. J. Fluid Eng.*, 99, 503-510, 1977
- 3) B.J.Legg : A three-hot-wire anemometer for measuring two velocity components in high intensity turbulent boundary layers. *J.Phys. E.Sci. Instrum.*, Vol.17, pp970-976, 1984
- 4) B.T.Yang and R.N.Meroney: Gaseous dispersion into stratified building wakes. AEC Rept. No. C00-2053-3
- 5) Bachlin W. Theuper W. and Plate E.J: Wind field and dispersion in a built-up area: a comparison between field measurement and wind tunnel data *Atmospheric Environment* 25A, 1135-1142, 1991
- 6) Dabberdt W.F., and Hoydysh W.G.: Street canyon dispersion: sensitivity to block shape and entrainment. *Atmospheric Environment* 25A, 1143-1153, 1991
- 7) F.T. Depaul and C.M. Sheih: A tracer study of dispersion in an urban street canyon, *Atmospheric Environment* 19, NO.4, 555-559, 1985
- 8) F.T. Depaul and C.M. Sheih: Measurements of wind velocities in a street canyon. *Atmospheric Environment* Vol.20, No.3, pp455-459, 1986
- 9) H. M. Morris: Flow in Rough Conduits, *Trans., A.S.M.E.*, 120, 373-398, 1955
- 10) Hoydysh W.G., and Dabberdt W.F.: Kinematics and dispersion characteristics of flows in asymmetric street canyons. *Atmospheric Environment* 22, 2677-2689, 1988
- 11) Hoydysh W.G., and Dabberdt W.F.: Concentration fields at urban intersections: fluid modeling studies. *Atmospheric Environment* 28, 1849-1860, 1994
- 12) Hoydysh W.G., Ogawa Y. and Griffiths R.A.: A scale model study of dispersion of pollution in street canyons. APCA Paper No. 74-157, 67th Annual Meeting of the Air Pollution Control Association, Denver, Colorado, June 9-13, 1974
- 13) I. Tani, M. Iuchi and H. Komoda: Experimental Investigation of Flow

- Separation Associated with a Step or a Groove, Aeronautical Research Institute, University of Tokyo, Report No. 364, April 1961
- 14) I. Uno, S. Wakamatsu, H. Ueda, A. Nakamura: An observational study of the structure of the nocturnal urban boundary layer. *Boundary Layer Meteorology*, 45, 59-82, 1988
 - 15) J.E.Cermak et al.(eds), *Wind Climate in Cities*, Kluwer Academic Publishers, pp431-456, 1995
 - 16) J.E.Cermak: Physical modeling of flow and dispersion over complex terrain. *Boundary-Layer Meteorology*, 30, 261-292, 1984
 - 17) J.F.Sini, Sandrine Anquetin and Patrice G. Mestayer: Pollutant dispersion and thermal effects in urban street canyons. *Atmospheric Environment* Vol.30, No.15, 2659-2677, 1996
 - 18) Johnson W.B., Ludwig F.L., Dabberdt W.F., and Allen R.J.: An urban diffusion simulation model for carbon monoxide. *JAPCA* 23, 490-498, 1973
 - 19) K.E. Gronskei: The influence of car speed on dispersion of exhaust gases, *Atmospheric Environment* 22, NO.2, 273-281, 1988
 - 20) Kennedy I.M. and Kent J.H.: Wind tunnel modeling of CO dispersal in city streets. *Atmospheric Environment* 11, 541-547, 1977
 - 21) L.J.Hunter, G.T.Johnson and I.D.Watson: An investigation of three-dimensional characteristics of flow regimes within the urban canyon. *Atmospheric Environment* Vol.26B, No.4, 425-432, 1992
 - 22) L.J.Hunter, I.D.Watson and G.T.Johnson: Modeling air flow regimes in urban canyons. *Energy and Buildings*, 15-16, 315-324, 1990/91
 - 23) M. Hussain and B.E.Lee: A Wind Tunnel Study of the Mean Pressure Forces Acting on Large Groups of Low-rise Buildings, *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, 6, 207-225, 1980
 - 24) M.R.Raupach, P.A.Coppin, and B.J.Legg: Experiments on scalar dispersion within a model plant canopy Part 1: The turbulence structure. *Boundary-Layer Meteorology* 35 pp21-52, 1986
 - 25) M.W.Rotach: Profiles of turbulence statistics in and above an urban street canyon. *Atmospheric Environment* Vol.29, No.13, pp1473-1486, 1995
 - 26) Menachem Luria, Roni Weisinger and Mordechai Peleg : Co and NOx levels at the center of city roads in Jerusalem. *Atmospheric Environment* 24B, NO.1, 93-99, 1990
 - 27) N. H. Jannssen, D. Mansom, K. Derjagt, H. Harssema and G. Hoek: Mass

- concentration and elemental composition of air borne particulate matter at street and background locations, *Atmospheric Environment* 31, NO. 8, 1185 - 1193, 1997
- 28) Pasquill: *Atmospheric Diffusion*, D.VAN NOSTRAND COMPANY, 1962
- 29) R. N. Meroney, M. Pavegeau, S. Rafailidis, M. Schatzmann: Study of line source characteristics for 2-D physical modeling of pollutant dispersion in street canyons, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 62, 37- 56, 1996
- 30) R.N.Meroney, J.E.Cermak and B.T.Yang: Modeling of atmospheric transport and fumigation at shoreline sites. *Boundary-Layer Meteorology* , 9, 1975, 69-90
- 31) R.Zegadi, M.Ayarault and P.Mejean : Effects of a two-dimensional low hill in a thermally neutral and stably stratified turbulent boundary layer. *Atmospheric Environment* Vol.28, No.11, pp1871-1878,1994
- 32) Robert J. Yamartino: Development and evaluation of simple models for the flow, turbulence and pollutant concentration fields within an urban street canyon. *Atmospheric Environment* Vol.20, No.11, pp2137-2156,1986
- 33) S.P.S.Arya : Buoyancy effects in a horizontal flat-plate boundary layer. *J.Fluid Mech.*, Vol.68, part 2, pp.321-343,1975
- 34) S.SethuRaman and J.E.Cermak: Physical modeling of flow and diffusion over an urban heat island. *Advance in Geophysics* 18B, 223-240, 1974
- 35) T.R.Oke : The urban heat balance. *Prog. Phys. Geogr.* 19, pp471-508,1988
- 36) T.R.Oke: *Street Design and Urban Canopy Layer Climate*. *Energy and Buildings*,11, pp103-113,1988
- 37) U.S. EPA: *Guideline for Fluid Modeling of Atmospheric Diffusion*. EPA-600/8-81-009, EPA, Office of Air Quality Planning and Standards, Research Triangle Park, North Carolina., 1981
- 38) van den Hout K.D., Baars H.P. and Dujim N.J.: Effects of buildings and trees on air pollution by road traffic. *Proc. 8th World Clean Air Congress* (edited by Brassier L.J. and Mulder W.C.) Vol.4, Elsevier, Amsterdam, 1989
- 39) W. H. Snyder: Similarity criteria for the application of fluid models to the study of air pollution meteorology, *Boundary-Layer Meteorology* ,3, 113-134, 1972
- 40) W.B.Johnson, F.L.Ludwig, W.F.Dabberdt and R.J.Allen: An urban

- simulation model for carbon monoxide, Journal of the Air Pollution Control Association Vol.23, No.6, 490-498, June 1973
- 41)Wedding J.B., Lombardi D.J, and Cermak J.E.: A wind tunnel study of gaseous pollutants in city street canyons. J.Air Pollut. Control Ass. 27(6),557-566, 1977
 - 42)Y.Ogawa, P.G.Diosey, K.Uehara, and H.Ueda: A wind tunnel for studying the effects of thermal stratification in the atmosphere. Atmospheric Environment Vol.15,No.5, pp807-821,1981
 - 43)Y. Ogawa,R. Griffiths, and W. G. Hoydysh: A wind tunnel study of sea breeze effects. Boundary-Layer Meteorology 8, 141-161, 1975
 - 44)Y.Nakamura and T.R.Oke: Wind, Temperature and stability condition in an East-West oriented urban canyon. Atmospheric Environment Vol.22,No.12, pp2691-2700,1988
 - 45)Y.Qin, L.Y.Chan (1993) Traffic source emission and street level air pollution in urban areas of Guangzhou, south China(P.R.C.), Atmospheric Environment 27B,NO.3,275-282
 - 46)磯村、北林、菅原：市街地における自動車排ガス拡散の風洞実験 公害 11-4, 1976, 38-52
 - 47)河野、伊藤：住宅地域における道路からの近距離拡散 大気汚染学会誌 20,6,429-437、1987
 - 48)河野、中野、増田、山根：建物密集地の道路端のNO₂濃度推定経験式 大気汚染学会誌 22,3,244-250、1987
 - 49)皆川：分子拡散法によるNO₂濃度分布 第32回大気汚染学会講演要旨集 215, 1991
 - 50)鎌田：建物近傍における汚染物拡散に関する実験的研究(1)日本建築学会論文報告集、第279号、117-126、1979年5月
 - 51)鎌田：建物近傍における汚染物拡散に関する実験的研究(2)日本建築学会論文報告集、第281号、109-119、1979年7月
 - 52)吉田：ディーゼル排気ガスの雄生殖生殖器系への影響、ディーゼル排気微粒子(DEP)汚染の実態とその測定法に関するワークショップ資料(国立環境研究所、1997年2月)
 - 53)宮崎正信：二酸化窒素環境基準達成のための施策とその評価、大気汚染学会誌、28(5)、253-265, 1993

- 54)今野、中明 相模原北部幹線道路沿道における NOx 汚染調査 第35回大気汚染学会講演要旨集 254, 1994
- 55)佐々木、宮腰、伊藤：流路に接した長方形空洞内における漏えい物質の対流拡散およびレイヤ形成挙動の水槽可視化実験、空気調和・衛生工学会論文集、No.39、121-131、1989年2月
- 56)佐藤：NOx サンプラーによる道路周辺濃度分布調査 第28回大気汚染学会講演要旨集 309, 1987
- 57)嵯峨井：ディーゼル排気微粒子 (DEP) による喘息様病態の発症に関する実験的研究、大気汚染学会誌、30(2)、81-93, 1995
- 58)寺部：現代公害・環境年史、1992年3月
- 59)勝田、後藤：建物周囲条件の換気通風に及ぼす影響 日本建築学会論文報告集、第53号、pp80-87、1956
- 60)勝田、村上、上原：建物周辺気流に関する風洞実験の測定器、模型寸法、及び再現性について、日本建築学会論文報告集第232号、昭和50年6月
- 61)勝田、村上、上原、小峯：街区の中に建つ高層建物周辺の気流分布に関する風洞実験—建物周辺気流に関する実験的研究(9)—、日本建築学会論文報告集 第256号、67-78、1977年6月
- 62)勝田、村上、上原、大場：地域冷暖房プラントの煙突排ガスによる熱汚染に関する風洞実験、生産研究、23巻10号、1976年10月
- 63)勝田、村上、正田：建物周辺気流に関する実験的研究(IV)—外壁面突起物周辺における気流の性状に関する風洞実験—、日本建築学会論文報告集、第180号、29-37、1971年2月
- 64)常俊：疫学からみた自動車汚染と健康被害、ディーゼル排気微粒子(DEP)汚染の実態とその測定法に関するワークショップ資料(国立環境研究所、1997年2月)
- 65)常磐：芳香族炭化水素ニトロ誘導体の変異原性、発がん性とその危険度、大気汚染学会誌、27(2)、73-84、1992
- 66)新藤、松本：二酸化窒素日平均濃度の交差点周辺における変動構造の解析、大気汚染学会誌、26(6)、417-426、1991
- 67)真田、浅見、藤井、吉田：新宿副都心地域の風—市街地風の昼夜の差について— 風工学シンポジウム予稿集 pp75-81,1980
- 68)石井、吉野、岡本：エアトレーサー実験によるストリートキャニオンでの大

- 気拡散に関する検討(1) 大気汚染学会誌 30,1,38-52,1995
- 69)村上、小峰：カンデム型熱線風速計による変動風速の3次元的な測定—建物周辺気流に関する実験的研究(11)—日本建築学会論文報告集第297号、pp59-69、1980年11月
- 70)村上、日比、持田：Large Eddy Simulationによる街区周辺の乱流場の3次元解析(その1)—隣棟間隔の変化が流れ場に与える影響と風洞実験の比較—日本建築学会計画系論文報告集、第412号、1-10、1990年6月
- 71)大西、橋本、藤平蔵、中島：自動車排ガスによる環境影響 第31回大気汚染学会講演要旨集241,1990
- 72)大蔵省印刷局：環境白書 1997年版
- 73)大野、大場、古賀：幹線道路沿道でのNOx高濃度現象に関わる建築物の影響 第35回大気汚染学会講演要旨集255,1994
- 74)池沢、森口：道路沿道の建築物の影響によるNO2高濃度出現現象について 第32回大気汚染学会講演要旨集214,1991
- 75)田中：主要幹線道路沿道部における大気汚染が学童の呼吸気象上に及ぼす影響、大気環境学会誌、31(4)、166-174、1996
- 76)藤谷、水野、伊藤、伊豆原：ストリートキャニオンにおけるCO濃度測定および拡散モデル、大気汚染研究協議会大会講演要旨集、168、1976
- 77)日本建築学会設計計画パンフレット18、換気設計
- 78)飯田、二瓶：局地高濃度汚染地域(交差点周辺)のNO2濃度分布状況 第28回大気汚染学会講演要旨集308,1987
- 79)北林：市街地交差点における大気環境改善のための風洞実験の利用、公害23,1,71-79、1988
- 80)孟、老川：Split-fiber Probeの基本特性とその較正 第35回大気汚染学会講演要旨集,p284,1994
- 81)孟、老川：建物群内における流れと拡散に関する実験的研究 その1流れ場の測定、大気環境学会、32(2)、136-147、1997
- 82)林、岡本、山田、小林、北林、塩沢：都市内道路でのエアトレーサー拡散実験とSRIストリートキャニオンモデルの検証、大気汚染学会誌、26、(4)、235-245、1991
- 83)上原、森口、若松、小林：沿道大気汚染濃度分布に関する風洞実験—事例研究N市役所周辺の場合—日本建築学会大会学術講演梗概集、P101,1994

年 9 月

84) 竹内清秀、近藤純正：大気科学講座 1 地表に近い大気、東京大学出版会、
1981 年 7 月

85) 木村竜治：地球流体力学入門、東京堂出版、昭和 58 年 4 月

86) 菊池勝弘、瓜生道也、北林興二：実験気象学入門、東京堂出版、昭和 63 年 9
月

本論文関連の既発表文献

1、日本建築学会計画系論文集

- 1) 上原：交差点周辺の大気汚染濃度分布に関する風洞実験 市街地における汚染物の拡散に関する実験的研究 その1、日本建築学会計画系論文集 第485号、25-34、1996年7月
- 2) 上原、村上、老川、若松：温度成層流中のストリートキャニオン内の流れに関するLDVを用いた風洞実験 市街地における汚染物の拡散に関する実験的研究 その2、日本建築学会論文報告集 第492号、39-46、1997年2月
- 3) 上原、村上、老川、若松：温度成層流中のストリートキャニオン内の濃度分布に関する風洞実験 市街地における汚染物の拡散に関する実験的研究 その3、日本建築学会論文報告集 第499号、9-16、1997年9月
- 4) 上原、村上、老川、若松：温度成層下のストリートキャニオン内部流れに対する道路幅の影響に関する風洞実験 市街地における汚染物の拡散に関する実験的研究 その4、日本建築学会論文報告集 第510号、37-44、1998年8月

2、日本風工学会誌

- 1) 上原：ストリートキャニオン内の流れと拡散に関する温度成層風洞実験 日本風工学会誌 第75号、37-42、1998年4月

3、国立環境研究所刊行物

- 1) 上原、若松、森口：市街地における排ガス拡散に関する風洞実験、国立環境研究所資料 F-47-'93/NIES、1993年2月
- 2) 上原、若松、村上：温度成層化した乱流境界層内の流れ場に関するLDVを用いた風洞実験、国立環境研究所資料 F-100-'97/NIES、1997年3月

4、日本建築学会大会学術講演梗概集

- 1) 上原、森口、若松、小林：沿道大気汚染濃度分布に関する風洞実験 一事例研究N市役所周辺の場合一 日本建築学会大会学術講演梗概集、P101、1994年9月

- 2) 上原、若松、村上：市街地における汚染物拡散に関する風洞実験 その4 LDVによる安定・不安定境界層流中の乱れの計測 日本建築学会大会学術講演梗概集、p639、1995
- 3) 上原、老川、若松、村上：市街地における汚染物拡散に関する風洞実験 その6 LDVによるストリートキャニオン内外の流れの測定 日本建築学会大会学術講演梗概集、p583、1996
- 4) 上原、村上、老川、若松：温度成層下のストリートキャニオン内流れに対する道路幅の影響に関する風洞実験、p521、1997

5、日本建築学会関東支部研究発表会

- 1) 上原：市街地における汚染物の拡散に関する風洞実験（その1） 風上側道路の汚染寄与、測定高さの検討、日本建築学会関東支部1993年度研究報告集、p189-192、1994年3月
- 2) 上原：市街地における汚染物の拡散に関する風洞実験（その2） 市街地密度（街区高さ）と沿道周辺の建物の影響、日本建築学会関東支部1993年度研究報告集、p189-192、1994年3月
- 3) 上原、老川：市街地における汚染物の拡散に関する風洞実験（その3） 温度成層の拡散に及ぼす影響、日本建築学会関東支部1994年度研究報告集、p89-92、1995年3月
- 4) 上原、村上：市街地における汚染物拡散に関する風洞実験（その5） LDVによる温度成層流中の2次元フェンス周辺流れの測定 日本建築学会関東支部1995年度研究報告集、p1-4、1996年3月

6、大気環境学会

- 1) 上原、森口、若松、清水、内藤：市街地の汚染物拡散に関する風洞実験 その1 交差点周辺濃度にたいする風上側道路汚染源の寄与、第31回大気汚染学会講演要旨集、p374、1990年10月、金沢
- 2) 上原、森口、若松、清水、内藤：市街地の汚染物拡散に関する風洞実験 その2 交差点近傍の建物の影響と自然換気塔の効果、第31回大気汚染学会講演要旨集、p375、1990年10月、金沢
- 3) 上原、若松、森口：市街地の汚染物拡散に関する風洞実験 その3 交差点周辺の街区高さと同向による濃度の差、第32回大気汚染学会講演要旨集、p430、

1991年10月、北九州

- 4) 上原、若松、森口：市街地の汚染物拡散に関する風洞実験 その4 交差点内部における地表面濃度分布について、第33回大気汚染学会講演要旨集、p435、1992年12月、大阪
- 5) 上原、若松、森口：市街地の汚染物拡散に関する風洞実験 その5 交差点内部における濃度の鉛直分布について、第33回大気汚染学会講演要旨集、p436、1992年12月、大阪
- 6) 上原、若松：市街地の汚染物拡散に関する風洞実験 その6 周辺市街地の容積率と建蔽率による濃度の差、第34回大気汚染学会講演要旨集、p383、1993年12月、千葉
- 7) 上原、老川、若松、山尾、大川：市街地における汚染物の拡散に関する風洞実験 その7 一安定・不安定成層の生成一、第35回大気汚染学会講演要旨集、p272、1994年11月、盛岡
- 8) 上原、老川、若松、山尾、大川：市街地における汚染物の拡散に関する風洞実験 その8 一安定・不安定成層時の濃度分布について一、第35回大気汚染学会講演要旨集、p273、1994年11月、盛岡
- 9) 上原、老川、若松、山尾、大川：市街地における汚染物の拡散に関する風洞実験 その9 一上層安定・下層不安定成層時の濃度分布について一、第35回大気汚染学会講演要旨集、p274、1994年11月、盛岡
- 10) 上原、山尾、大川、若松：市街地における汚染物の拡散に関する風洞実験 その10 一LDVによる安定・不安定境界層流中の乱れの計測一、第36回大気環境学会講演要旨集、p404、1995年11月、東京
- 11) 上原、山尾、河田、若松：市街地における汚染物の拡散に関する風洞実験 その11 一LDVによる2次元フェンス周辺の流れの計測一、第36回大気環境学会講演要旨集、p405、1995年11月、東京
- 12) 上原、若松、老川、山尾、河田：LDVによる温度成層流中のストリートキャニオン内外の流れの測定 その1 乱れとブラックスの鉛直分布、第37回大気環境学会、p605、1996年9月、滋賀
- 13) 上原、若松、老川、山尾、河田：LDVによる温度成層流中のストリートキャニオン内外の流れの測定 その2 キャニオン内の流れ場、第37回大気環境学会、p606、1996年9月、滋賀
- 14) 上原、若松、老川、山尾、河田：LDVによる温度成層流中のストリートキ

ヤニオン内外の流れの測定 その3 道路幅による流れの変化、第38回大気環境学会、p324、1997年9月、茨城

15)上原、若松、老川、山尾、河田：LDVによる温度成層流中のストリートキヤニオン内外の流れの測定 その4 流れパターンの分類・温度成層の影響、第38回大気環境学会、p325、1997年9月、茨城

7、土木学会衛生工学研究討論会

1)上原、若松、森口：風洞を用いた市街地拡散実験 その1 第27回衛生工学研究討論会講演集、p43-45、1991年1月、東京

2)上原、森口、若松：風洞を用いた市街地拡散実験 その2 第28回衛生工学研究討論会講演集、p19-21、1992年1月、仙台

8、Atmospheric Environment

1)Y. Ogawa, P. G. Diosey, K. Uehara and H. Ueda: A wind tunnel for studying the effects of thermal stratification in the atmosphere, *Atmospheric Environment vol. 15, No.5, pp. 807-821, 1981*

2)Y. Ogawa, S. Oikawa and K. Uehara: Field and wind tunnel study of the flow and diffusion around a model cube - 1. Flow measurements, *Atmospheric Environment vol. 17, No.6, pp. 1145-1159, 1983*

3)Y. Ogawa, S. Oikawa and K. Uehara: Field and wind tunnel study of the flow and diffusion around a model cube - 2. Nearfield and cube surface flow and concentration patterns, *Atmospheric Environment vol. 17, No.6, pp. 1161-1171, 1983*

4)Y. Ogawa, P. G. Diosey, K. Uehara and H. Ueda: A wind tunnel observation of flow and diffusion under stable stratification, *Atmospheric Environment vol. 19, No.1, pp. 65-74, 1985*

5)K. Fukui, H. Ueda, W. Sha and K. Uehara: Transient turbulence structure in the unstable boundary layer under the condition of step cooling from below, *Atmospheric Environment vol. 30, No.16, pp. 2811-2819, 1996*

6)K. Uehara, S. Murakami, S. Oikawa, S. Wakamatsu: Wind tunnel experiments on how thermal stratification affects on flow and dispersion in and above urban street canyons., *Atmospheric Environment*, 投稿中

9、Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics

1)Y. Moriguchi, K. Uehara: Numerical and experimental simulation of vehicle exhaust gas dispersion for complex urban roadways and their surroundings, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 46 & 47, pp. 689 – 695, 1993

あとがき

本論文は著者が1990年以来、国立環境研究所の大気拡散風洞を用いて行ってきた、沿道大気汚染に関する研究を取りまとめたものである。

本論文をまとめる機会を与えてくださり、懇切なご指導を賜るとともに論文の主査をしてくださった、東京大学生産技術研究所教授 村上周三先生に深甚なる感謝の意を表します。

東京大学生産技術研究所教授 小林敏雄先生、東京大学教授 鎌田元康先生、東京大学教授 坂本雄三先生、東京大学生産技術研究所助教授 加藤信介先生には論文の審査をしていただくとともに、懇切なご指導・ご配慮を賜りました。

東京大学生産技術研究所教授 吉沢徹先生、助教授 半場藤弘先生、新潟工科大学助教授 持田灯先生、福井大学講師（当時、東京大学生産技術研究所助手）大岡先生を始めとする都市気候モデリング小委員会の方々からも貴重なご意見を賜りました。

東京大学生産技術研究所 大学院博士過程 飯塚悟氏をはじめ、村上研究室の皆様には種々ご援助・ご助力いただきました。

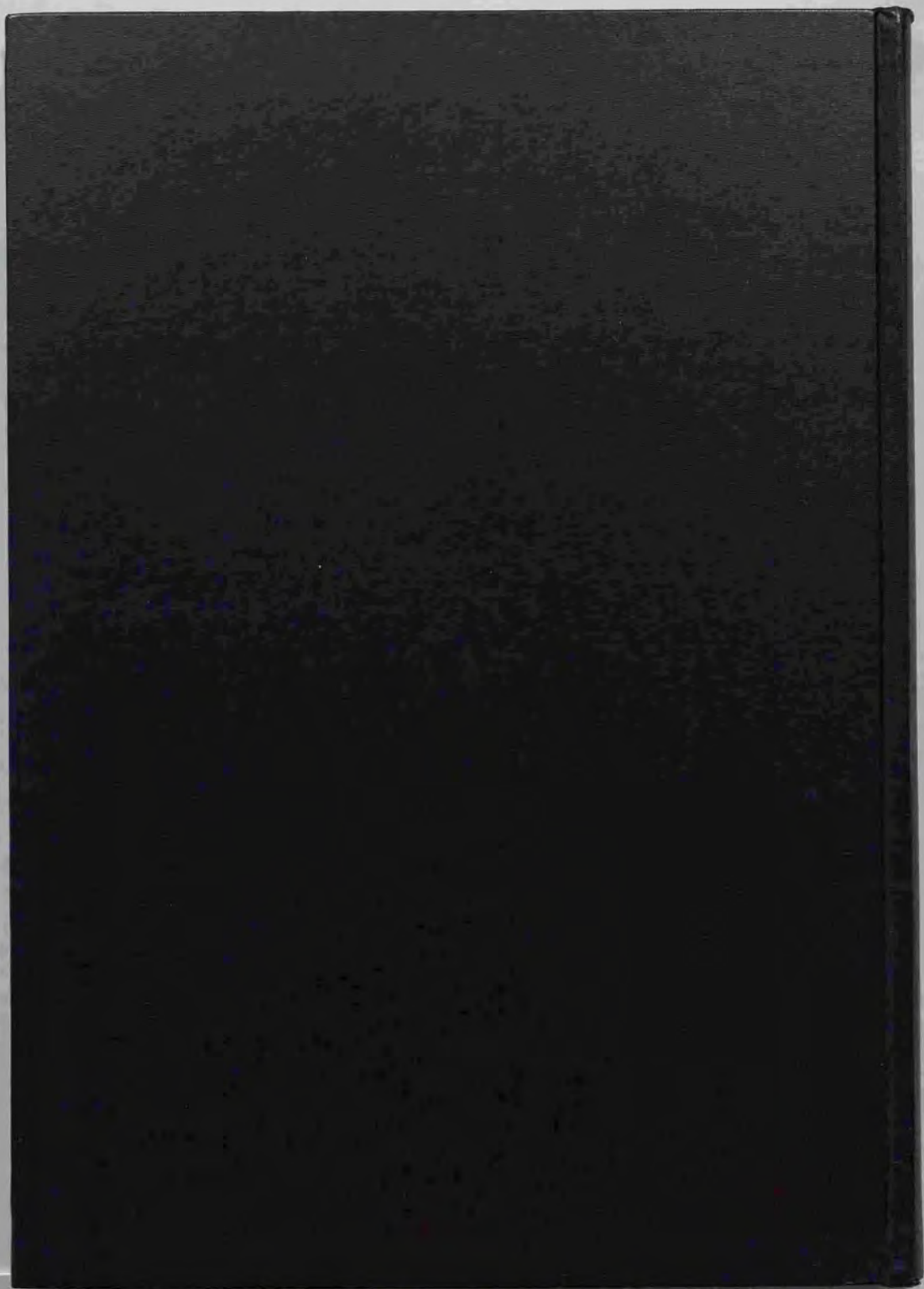
東京電力株式会社空調システム部 課長 田中俊彦博士（当時、東京電力技術研究所）にはレーザー流速計システムを使用させていただきました。

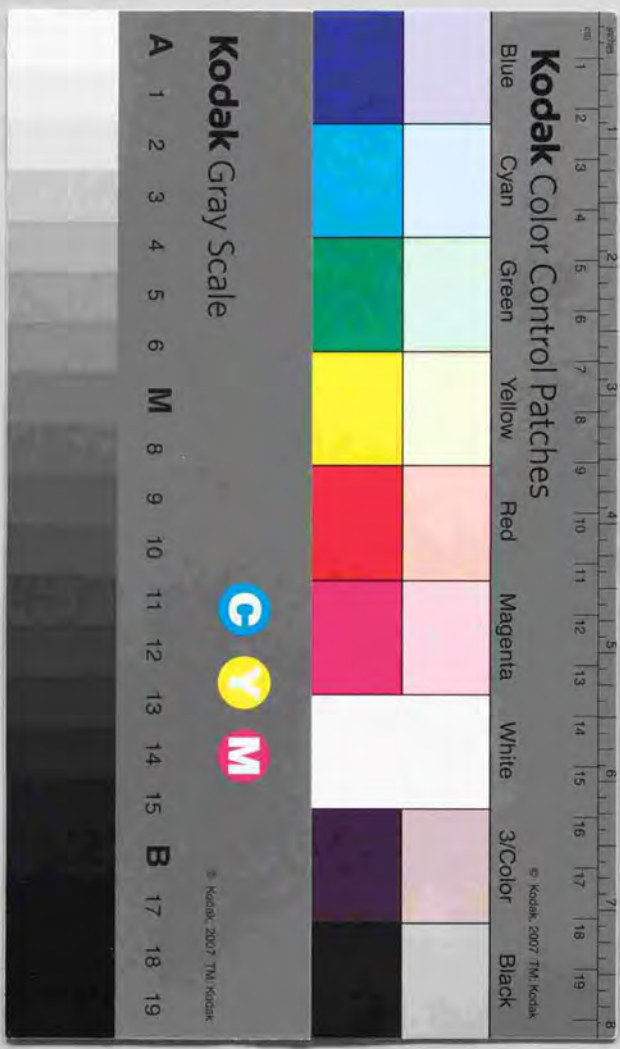
研究活動全般を通じ、直属の上司であった国立環境研究所 都市大気保全研究チーム総合研究官 若松伸司博士には、常に暖かなご配慮をいただきました。また、実験にあたっては株式会社メテオリサーチ（当時、株式会社フォーラムエンジニアリング）山尾幸夫氏の全面的なご助力をいただきました。

株式会社清水建設 技術研究所 老川進博士には本研究の様々な場面でご助力と励ましをいただき、また論文の執筆について貴重なご意見をいただきました。

国立環境研究所 水改善手法研究チーム総合研究官 森口祐一博士には本研究の開始当初より、沿道大気汚染の研究動向に関する広範な情報と、種々のご援助・ご助言をいただきました。

お世話になった方々に、ここに記して感謝の意を表します。





Kodak Color Control Patches

Blue Cyan Green Yellow Red Magenta White 3/Color Black

Kodak Gray Scale

A 1 2 3 4 5 6 M 8 9 10 11 12 13 14 15 B 17 18 19



© Kodak, 2007 TM, Kodak