

通過交通の影響を含めたストリートキャニオンにおける熱収支の実測

神田学¹・鈴木譲²・森脇亮³

¹正会員 工博 東京工業大学 工学部開発システム工学科(〒152 目黒区大岡山2-12-1)

²学生会員 東京工業大学大学院 土木工学専攻修士課程

³正会員 東京工業大学 工学部土木工学科助手

通過交通のあるストリートキャニオンにおける熱収支の実態を把握するために国道246号線において集中観測を行った。また、通過交通が鉛直乱流混合に与える影響を検討した。その結果、1)自動車排熱量は乗用車と普通貨物車に依存しており、最大で $200W/m^2$ に及び、日平均では日射量を卓越する事、2)顕熱の時間変動挙動は純放射量だけでなく、自動車排熱量にも強く依存している事、3)潜熱量が無視し得ない事、4)シンチレーション法がストリートキャニオンでの顕熱測定に有効である事、5)混雑車線が周囲大気に運動量を与えることにより、鉛直乱流混合に影響を与えていている事が明らかになった。

Key Words: street canyon, energy balance, transportation, scintillation meter

1. はじめに

ヒートアイランド現象の主因である人工排熱量の時空間分布は解析上きわめて重要な物理情報である。従来の人工排熱量の推定は都市単位、年平均など時空間的にラフなものが多かったが、最近ではメソスケールモデルへの導入を前提とした時空間的に高解像度の人工排熱マップも提案されている(一ノ瀬ら, 1994¹⁾)。しかしながら、人工排熱の中でも自動車排熱は工場などの固定熱源と比べてその把握が著しく難しく、定量的に明らかになっていとは言い難い。

著者ら²⁾は数値シミュレーションにより都市道路網で強いサーマルとそれに伴う周辺部の下降流の存在を指摘しているが、このように通過交通の排熱を含む都市道路は周辺の微気象に強い影響を及ぼしている可能性があり、その実態把握は重要である。

Yoshida et al.³⁾によれば、ストリートキャニオンとは向かい合う2つの壁面とそれらに挟まれた舗装道路で構成されている空間と定義されている。ストリートキャニオンでの熱収支の実測例は非常に少なく、著者の知る限り、Yoshida et al., 池田ら⁴⁾の2例しかない。さらに通過交通の排熱等の影響を含めた実測例は今のところない。



写真-1 歩道橋上からストリートキャニオンを見下ろした風景

本研究では最新の顕熱測定手法の1つであるシンチレーション法を適用し、測定上の不確定性の排除につとめ、通過交通の影響を含めたストリートキャニオンにおける熱収支の実態把握を行った。

また、通過交通の存在は、熱、汚染物質などの収支のみならず、運動学的に強制的な鉛直乱流混合を引き起こしている可能性がある。このような通過交通に伴う強制

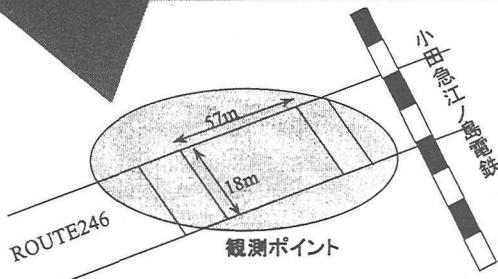


図-1 観測地点

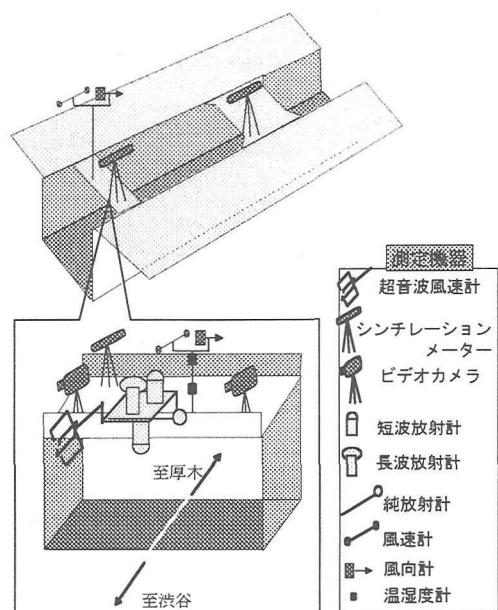


図-2 観測機器の設置場所の概念図

表-1 観測項目、使用機器、測定高さ、測定時間及びデータ処理方法

観測項目	使用機器	測定高さ(m)	測定時間	データ処理方法
上向き短波放射量	ソーラーエース	2.0(歩道橋から)	連続測定(1分)	30分平均値
下向き短波放射量	ネオ日射計	同上	連続測定(1分)	30分平均値
下向き長波放射量	精密赤外放射計	同上	連続測定(1分)	30分平均値
純放射量	純放射計	同上	連続測定(1分)	30分平均値
顕熱フラックス	シンチレーションメーター	2.25(歩道橋から)	連続測定(1分)	30分平均値
風速	超音波風速計	2.0(歩道橋から)	連続測定(8Hz)	30分平均値
風速	三杯式風速計	4.0(歩道橋から)	連続測定(1分)	30分平均値
風向	矢羽式風向計	同上	連続測定(1分)	30分平均値
気温	超音波風速計	2.0(歩道橋から)	連続測定(8Hz)	30分平均値
気温、湿度	温湿度計	2.0, 4.0(歩道橋から)	連続測定(1分)	30分平均値
走行速度	ビデオカメラ	道路上	5分ごとに測定	15分平均値
走行台数	ビデオカメラ	道路上	15分ごとに集計	15分間の累計値
顕熱フラックス	超音波風速計(満相関法)	2.0(歩道橋から)	連続測定(8Hz)	30分平均値

乱流混合は、車から排出される排熱や汚染物質などの大気への拡散過程に大きな影響を及ぼすことが考えられるが、現在のところ実測例はない。以上を踏まえた上で、熱収支と同時に通過交通が鉛直乱流混合に与える影響を把握することも試みた。

2. 観測概要

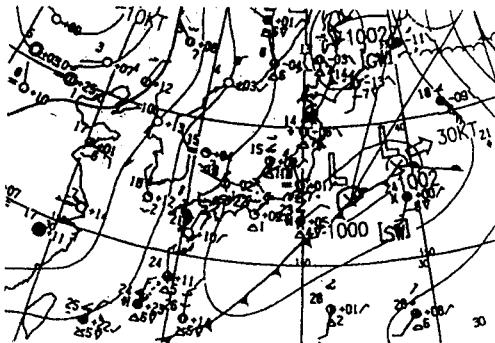
(1) 観測概要

本観測は1996年10月15日13:00から同16日17:00にかけて、神奈川県大和市、国道246号線に架かる2本

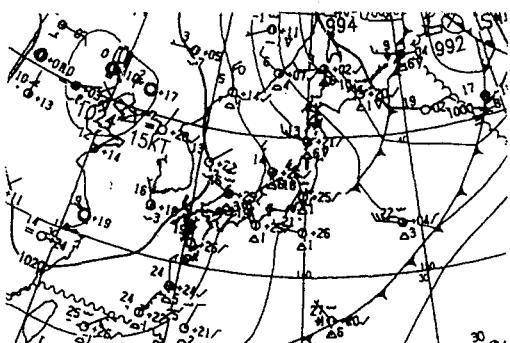
の歩道橋上で行った。観測地点を図-1に示す。道路は東北東-西南西方向に長さ1kmにわたって両側をコンクリート製の壁に囲まれた一種のストリートキャニオンである。歩道橋上から道路を見た風景を写真-1に示す。

(2) 観測機器の設置方法

観測機器の設置場所の概念図を図-2に示す。歩道橋上にポールを設置し、温湿度計、風向計、三杯式風速計を取り付けた。キャニオン上端面での放射收支を測定するために純放射計、短波放射計、長波放射計を歩道橋から道路上に設置した。また、顕熱を測定するためにシンチ



10月15日 9:00JST



10月16日 9:00JST

図-3 天気図

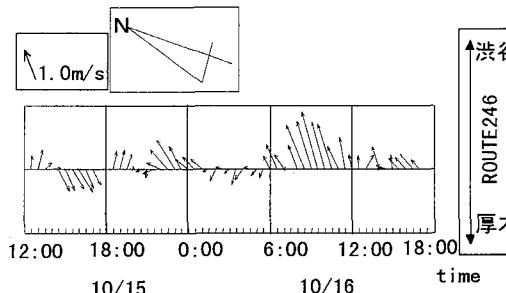


図-4-A 風速ベクトルの日変化(本観測地)

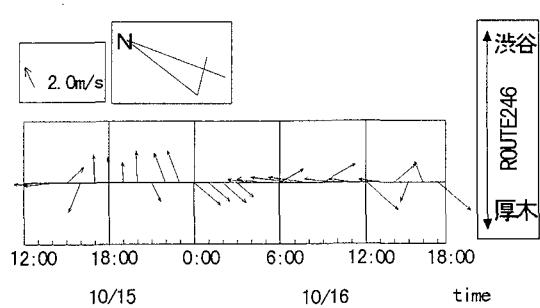


図-4-B 風速ベクトルの日変化(横浜地方気象台)

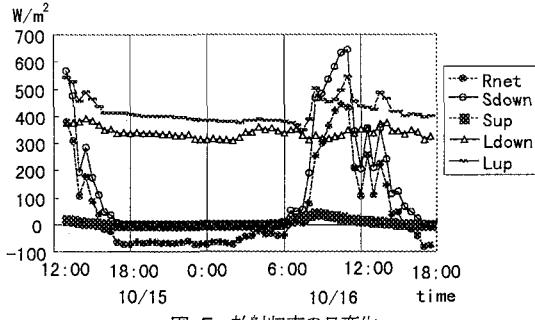


図-5 放射収支の日変化

レーションメーターを2本の歩道橋上に、超音波風速計を歩道橋から道路上に設置した。さらにビデオカメラを2台用いて上下車線の交通状況を撮影した。表-1に観測項目、使用機器、測定高さ、測定時間及びデータ処理方法の一覧を示す。

3. 観測結果と考察

(1) キャニオン上の風向・風速

図-3に両日の天気図を示す。15日は低気圧の前線の通過が、16日は高気圧の張り出しが見られたが、両日とも晴天であった。図-4-Aに本観測地において、図-4-B

に横浜地方気象台において測定された風速ベクトルの日変化をそれぞれ示す。本観測地の風速は、16日の午前中に最大で2.5m/sを示した。よく言われるように夜間の風速は小さかったが、日中の風速も弱い傾向にあった。横浜地方気象台の風向と比べると本観測地のデータは道路と平行に風が吹きやすい傾向にあり、局所的な道路の風道効果の影響が現れている。

(2) 放射収支

a) 放射収支式

放射エネルギーの収支式を次式に示す。

$$R_{net} = S_{down} - S_{up} + L_{down} - L_{up}$$

ここで R_{net} は純放射量、 S_{up} は道路及び壁面で反射された短波放射量、 S_{down} は日射量、 L_{up} は道路及び壁面からの長波放射量、 L_{down} は上空大気からの長波放射量である。 L_{up} は上述した収支式の残差から求めた。

b) 実測放射収支

図-5は各放射量の日変化である。日射量 S_{down} は最大約 680W/m²、上向き短波放射量 S_{up} は最大約 40W/m²に達していた。大気からの長波放射量 L_{down} は観測期間を通じて約 350W/m²前後でほとんど変化しなかった。それに対し道路

表-2 自動車排熱係数(出典:(財)計量計画研究所(東京)資料(私信)), 単位(Mcal/km/台)

旅行速度 (km/h)	軽乗用車	乗用車	バス	軽貨物車	小型貨物車	貨客車	普通貨物車	特殊車
5	1.217	1.623	3.779	1.113	1.426	1.665	2.683	2.425
10	0.975	1.293	3.263	0.904	1.171	1.331	2.312	2.075
15	0.766	1.023	2.835	0.733	0.962	1.058	2.005	1.784
20	0.621	0.814	2.495	0.601	0.798	0.845	1.761	1.552
25	0.51	0.665	2.243	0.508	0.679	0.694	1.581	1.381
30	0.444	0.577	2.079	0.454	0.606	0.604	1.463	1.269
35	0.421	0.549	2.003	0.439	0.578	0.575	1.408	1.217
40	0.443	0.582	2.015	0.462	0.596	0.607	1.417	1.225
45	0.508	0.675	2.115	0.524	0.659	0.7	1.489	1.292
80	0.413	0.607	1.918	0.66	0.625	0.667	1.351	1.179

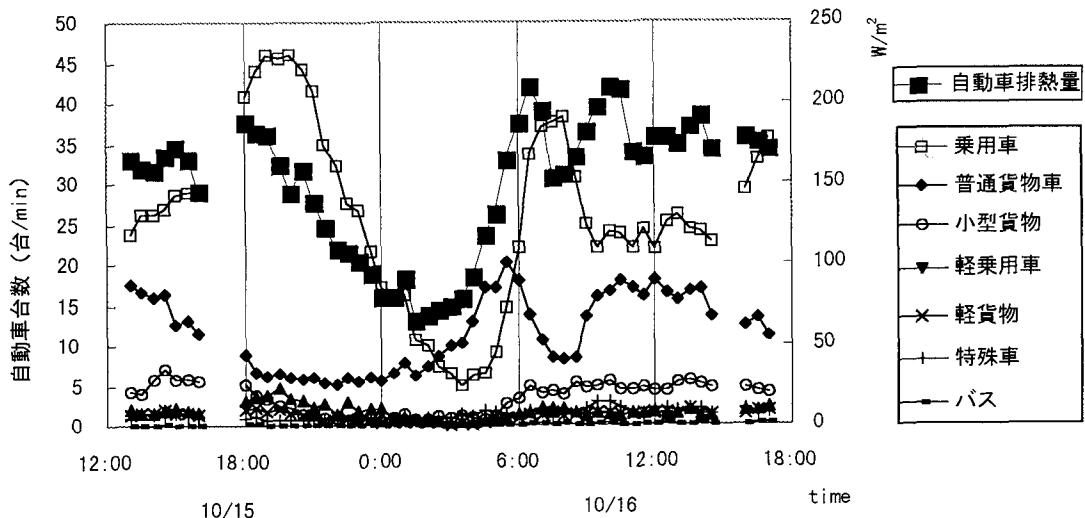


図-6 自動車排熱量と自動車台数の日変化

及び壁面からの長波放射量 L_{sp} は、日射量が強くなり道路の表面温度が高くなる日中には約 $500\text{W}/\text{m}^2$ に達し、表面温度が低くなるとともに長波放射量も減少し夜間は約 $400\text{W}/\text{m}^2$ まで下がる。日中は長波放射量 L_{sp} の値が $500\text{W}/\text{m}^2$ に達しているため、純放射量 R_{net} は既往の都市キャニオンの研究と同じく、 $400\text{W}/\text{m}^2$ 程度と小さい値を示した。また、夜間に純放射量 R_{net} が負になったのは、大気からの長波放射量 L_{down} より道路及び壁面からの長波放射量 L_{sp} が大きな値を示すためであり、これも既往の研究と同じ傾向を示していた(例えば、浅枝、藤野, 1992⁹⁾。夜間の L_{sp} の値が大きいのは日中にキャニオン内に蓄えられた熱が長波として放出されるためである。

(3) 自動車排熱

a) 自動車排熱量の算定

自動車排熱量は原単位法により求めた。原単位法とは、

自動車 1 台当たりの排熱量に通過台数を掛けて全体の自動車排熱量を求める方法である。排熱原単位法としては(財)計量計画研究所(私信)のデータを用いた。これは車種別(軽乗用車、乗用車、バス、軽貨物車、小型貨物車、貨客車、普通貨物車、特殊車)、速度別(10段階)に排熱係数を設定している。車種別に車の台数をカウントし、またその速度を計測することにより原単位法を適用した。(財)計量計画研究所(東京)の自動車排熱係数を表-2に示す。

b) 自動車排熱量

図-6に自動車排熱量と車種別の自動車台数の日変化を示す。自動車排熱量の特徴を決めているのは 7 車種の中で乗用車と普通貨物車である。それらの台数の影響を受け、自動車排熱量は、日中は $150\sim200\text{W}/\text{m}^2$ 、夜間から朝方にかけて平均すると $80\text{W}/\text{m}^2$ の値を示した。自動車排熱量の日平均値を概算すると $150\text{W}/\text{m}^2$ 程度であり、日射量の

W/m^2

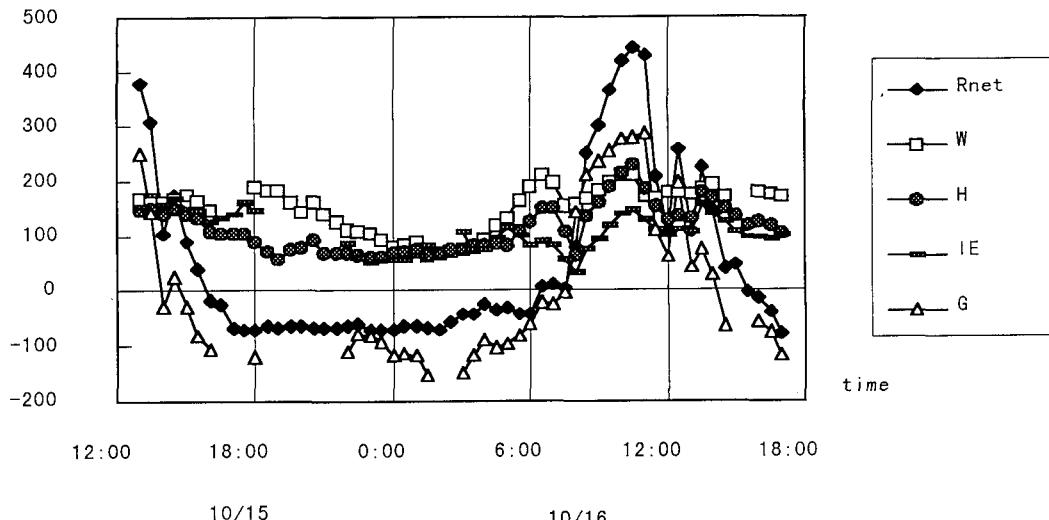


図-8 热收支の日変化

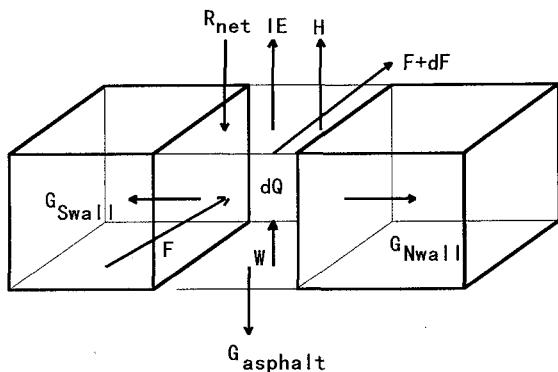


図-7 ストリートキャニオン境界面の熱收支の概念図

日平均値が 90W/m^2 前後であることを考慮すると日射量以上の人工的な熱源が道路内に局所的に存在することが分かる。

c) 自動車台数

乗用車のピーク時間帯は7時前後と19時前後、また普通貨物車は5時前後であった。朝方において、非常に台数の多い乗用車と普通貨物車のピーク時間帯がずれており、通過台数が平滑化される傾向が分かる。

(4) 热收支

a) 热收支式

図-7 はキャニオン空間に入り出す熱收支の概念図である。キャニオン上端では純放射量 R_{net} 、また潜熱 IE 、

顯熱 H が、キャニオン側面から地中伝導熱 G_{Swall} , G_{Nwall} が、キャニオン底面から地中伝導熱 $G_{asphalt}$ が出入りする。添え字 $Nwall$, $Swall$, $asphalt$ はそれぞれ北向きの壁、南向きの壁、路面を示す。また、通過交通による自動車排熱 W 、キャニオン空間に蓄積される熱量 dQ 、さらにキャニオンに沿って、流入してくる熱量 F 、流出する熱量 $F+dF$ がある。 dF は熱の移流の効果を表すが、観測地点は1kmに渡るストリートキャニオンの中央に位置し、道路に平行して境界層が十分に発達しているものと仮定し、 $dF=0$ とした。

以上から、熱收支式を次式に示す。

$$R_{net} + W = H + IE + G + dQ \quad (1)$$

また

$$G = G_{asphalt} + G_{Nwall} + G_{Swall}$$

である。

熱收支の各項の日変化を示したのが図-8である。 R_{net} は純放射計、 H はシンチレーション法、 IE はボーエン比法、 W は原単位法をそれぞれ用いて算定した値である。ボーエン比法の精度はあまり良くないため、 IE は数 10W/m^2 の誤差を生じると思われる。 dQ は数 W/m^2 と十分小さく無視した。 G は式(1)の残差の値を用いた。

b) 顯熱、地中伝導熱

キャニオン内からは、日中はもちろん、夜間においても顯熱が上空へ輸送されており、夜間は常に約 70W/m^2 、日中は $150\sim210\text{W/m}^2$ の値で凹凸を繰り返した。このよう

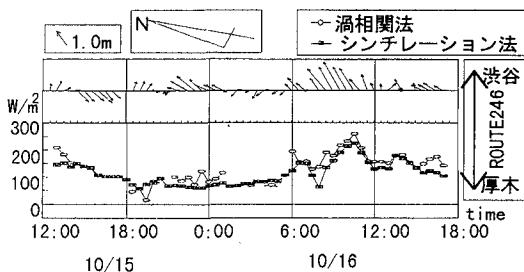


図-9 漩相関法とシンチレーション法により算定された顯熱と風速ベクトルの日変化

な顯熱の時間変動挙動は、11:00 前後の大きなピークと7:00, 14:00 前後の小さな2つのピークによって特徴づけられる。通常、顯熱は日射に依存しており、前者の大きなピークがそれに当たる。後者の小さな2つのピークは自動車排熱の影響を強く受け、生じたと考えられる。また夜間と異なり、日中は日射と自動車排熱の2つの熱源があるにも関わらず、顯熱はそれほど増加しない。これは壁、路面を通してキャニオン内から構造物に最大 $250\text{W}/\text{m}^2$ の熱輸送があり、顯熱の増加が抑制されるためであると考えられる。また、夜間においては負の純放射量による放射冷却があるにも関わらず、自動車排熱や日中に構造物に蓄えられた熱のキャニオン内への輸送があるため、顯熱が依然として $70\text{W}/\text{m}^2$ 程度の高い値を示している。

また、渦相関法により求めた顯熱との比較については(5)で述べる。

c) 潜熱

潜熱は観測期間を通して常に上向きに生じていた。通常、アスファルト、コンクリートからの潜熱はないと仮定されるが、このような有意な潜熱が生じた原因として1)自動車交通の排ガスからの潜熱、2)観測前日(14日)の雨の影響が考えられる。1)はガソリンの燃焼式(次式)より推定可能であり、この式は潜熱が最大でも燃焼熱の7%程度しか生じないことを示している。燃焼熱 H_u に、原単位法により算定した自動車排熱量を代入すると、排ガスからの潜熱は最大でも $20\text{W}/\text{m}^2$ にも満たないので、2)の影響の可能性が強いと考えられる。

$$C_n H_m + (n + m/4)O_2 \rightarrow nCO_2 + m/2H_2O + H_u$$

$$H_u \cdots \text{燃焼熱} (10430\text{kcal/kg}), n=8, m=15.5$$

(5) シンチレーション法と渦相関法による顯熱の比較

a) シンチレーション法と渦相関法の測定原理について

渦相関法は超音波風速計による点計測であるため、そ

の観測点の局所性をとらえる可能性が高く、一点での測定値をその場全体の代表値として用いることに若干の問題がある。それに対しシンチレーションメーターは、50~250m 離した機器の間でレーザー光を送受信し、そのレーザーのゆらぎ(シンチレーション)により、その間の乱流統計量を測定している。そのため領域平均的な乱れを測定する事が可能であり、ストリートキャニオンという本観測地のような局所性が強い場所での乱流計測は、シンチレーション法による測定が原理的には有効である。

ただし、シンチレーション法は著者ら⁹⁾が指摘しているように、ゼロ面変位 d を前もって与える必要がある。本観測では道路面から歩道橋までの高さをゼロ面変位と仮定し解析を行った。

b) シンチレーション法と渦相関法によるデータ比較

図-9は渦相関法による顯熱とシンチレーション法による顯熱を比較し、風速ベクトルと共に示したものである。超音波風速計の死角となる北寄りの風の時間帯(10/16 1:00~6:00)を除き、それ以外の時間では風向に関係なく両者の顯熱は定量的に良く一致している。また、シンチレーション法による顯熱はバス平均値を出力しているため、点計測値である渦相関法の顯熱よりもなめらかな運動を示している。以上より本観測の範囲内に限ればシンチレーション法は風向に依存せず、安定した顯熱測定手法として有効であるといえる。

しかしながらゼロ面変位の設定の問題も含め、ストリートキャニオンのような不均一な境界層場にシンチレーション法が適用可能である理論的保証はなく、今後さらに様々な状況下におけるデータの蓄積が必要なことは言うまでもない。

(6) 鉛直乱流混合

a) 解析方法

通過交通が鉛直乱流混合に与える影響を解析するためには、通過交通フラックス、鉛直乱流混合(鉛直運動量フラックス)、風速との間での対応関係を調べた。交通量が少ないときにはこれらの諸量に相関関係はなかったが、混雑時には顕著な傾向が見られたので、ここでは混雑を生じている時間帯A(10/16 6:00~11:00 風向と逆方向車線が混雑)、B(10/16 13:45~16:15 風向と順方向車線が混雑)に注目し、結果を議論することにする。両時間帯は図-4-Aの風速ベクトルの日変化からも分かるように、一般風速は一定していたと考えられる。ここで通過交通フラックスとは通過台数と通過速度を掛け合わせた値である。

b) 通過交通が鉛直乱流混合に与える影響

まず、鉛直運動量フラックスと風速の関係を図-10に示す。時間帯A、Bいずれの場合においても、一般的に言われるようく鉛直運動量フラックスと風速は正の相関を

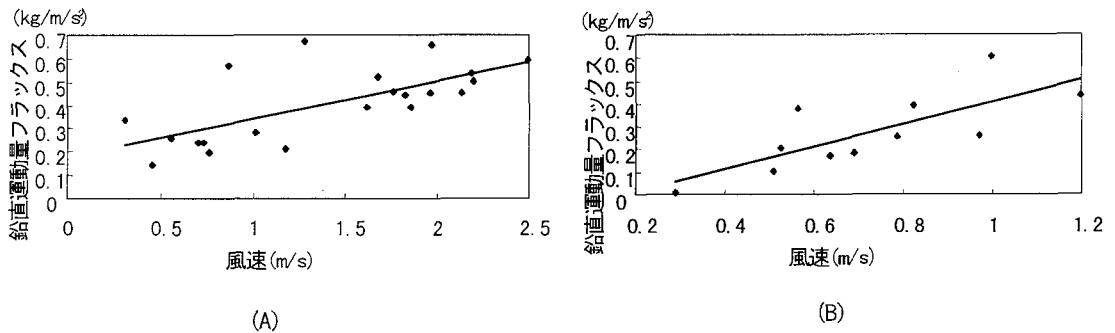


図-10 鉛直運動量フラックス、風速の間での相関図
 (A) 時間帯Aにおける鉛直運動量フラックスと風速の相関図
 (B) 時間帯Bにおける鉛直運動量フラックスと風速の相関図

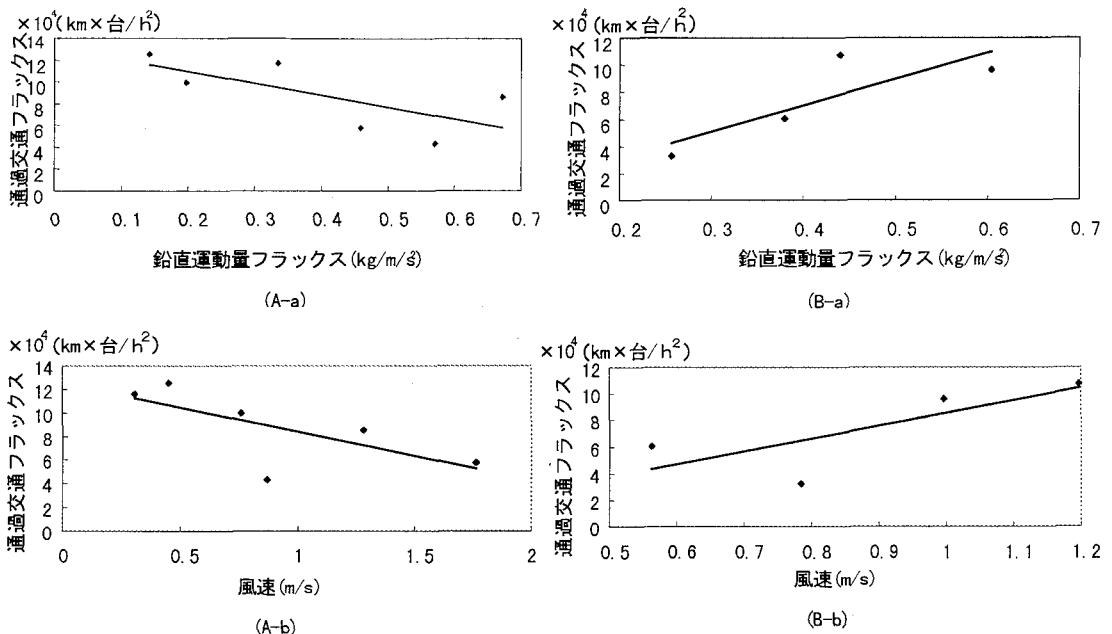


図-11 通過交通フラックスと鉛直運動量フラックス及び風速の間での相関図
 (A-a) 時間帯Aにおける通過交通フラックスと鉛直運動量フラックスの相関図
 (A-b) 時間帯Aにおける通過交通フラックスと風速の相関図
 (B-a) 時間帯Bにおける通過交通フラックスと鉛直運動量フラックスの相関図
 (B-b) 時間帯Bにおける通過交通フラックスと風速の相関図

示し、水平風速が鉛直乱流混合を支配していることを示している。

次に通過交通フラックスと鉛直運動量フラックス及び風速の相関を図-11に示す。通過交通フラックスと鉛直運動量フラックス及び風速の関係は風向と混雑車線の進行方向との関係で大きく異なる。混雑車線が風向と逆方向である時間帯Aにおいては、通過交通フラックスは風速及び鉛直運動量フラックスと負の相関を持った(図-11(A-

-a), (A-b)). これは、混雑車線の通過交通フラックスが、周囲の空気に通過交通と同方向の運動量を与え、その結果として風速を弱め、鉛直運動量フラックスを減少させていると考えられる。

また、時間帯Bにおいては、通過交通フラックスは鉛直運動量フラックス及び風速と正の相関を持った(図-11(B-a), (B-b)). 時間帯Aとは逆に混雑車線は風向と同方向であるので、通過交通の運動量により主風向の

風速は上昇し、その結果として鉛直運動量フラックスを促進させていると考えられる。つまり、混雑が生じている時に通過交通が周囲の大気に運動量を与えることより、鉛直乱流混合に影響を及ぼしていると考えられる。

4. 結論

1996年10月15日から16日にかけて熱収支観測を行った結果、本観測地において以下の諸点が明らかになった。

- ・自動車排熱量は主に乗用車と普通貨物車の台数に強く影響を受けており、日中は $150\sim200W/m^2$ 、夜間から朝方にかけて $80W/m^2$ の値を示した。また、その日平均値は非常に大きく日射量を卓越していた。
- ・顕熱の時間変動挙動は、純放射量だけでなく自動車排熱量の影響も強く受けている。
- ・潜熱は観測期間を通じて有意な値であったがガソリンの燃焼式から推定すると車の排ガスからはほとんど生じておらず、前日の雨の影響が強い。
- ・局所性の強い場所においてのシンチレーション法の有効性が確かめられた。
- ・混雑車線が周囲大気に運動量を与えることにより、鉛直乱流混合に影響を与えている。

謝辞：本研究を遂行するにあたって、大和警察署、建設省横浜国道工事事務所及び気象庁には観測許可の面でお世話になりました。気象庁からは天気図を借用いたしま

した。また、(財)計量計画研究所(東京)の神成氏、大原氏には貴重な自動車排熱係数表を提供して頂きました。あわせてここに感謝いたします。

参考文献

- 1) 一ノ瀬俊明、花木啓祐、松尾友矩：細密地理情報にもとづく都市人工排熱の時空間分布の構造解析、環境工学研究論文集、Vol. 31, pp. 263-273, 1994.
- 2) 神田学、日野幹雄、稻垣聰：都市道路網上の熱対流混合層のLarge Eddy Simulation、水工学論文集、Vol. 37, pp. 177-182, 1993.
- 3) Atsumasa Yoshida, Kazuhide Tominaga, and Shigeru Watatani : Field Measurements on Energy Balance of an Urban Canyon in the Summer Season, *Energy and Buildings*, Vol. 15-16, pp. 417-423, 1990/91.
- 4) 池田駿介、財津知亨、池谷昌史：都市キャノピーの夏期の熱構造に関する現地観測、土木学会論文集、No. 539/II-35, pp. 167-175, 1996.
- 5) 浅枝隆、藤野毅：舗装面の熱収支と蓄熱特性について、水文・水資源学会誌、Vol. 5(4), pp. 3-7, 1992.
- 6) 神田学、高柳百合子、横山仁、森脇亮：銀座オフィスビル街における熱収支の特性、水文・水資源学会誌、Vol. 10, No4, pp. 329-336, 1997.

(1997. 5. 8 受付)

FIELD OBSERVATION OF ENERGY BALANCE WITHIN A STREET CANYON INCLUDING EFFECT OF TRANSPORTATION

Manabu KANDA, Jo SUZUKI and Ryo MORIWAKI

A field observation was performed within and above a street canyon along a route 246 in summer 1996, to investigate the characteristics of heat balance of street canyon including the effect of transportation, and also to verify the forcing effect of vertical momentum exchange due to transportation. The following results were obtained; 1) anthropogenic heat due to transportation reached more than $200(W/m^2)$, 2) temporal change of sensible heat was strongly affected by not only net radiation but also anthropogenic heat due to transportation, 3) latent heat was not negligible, 4) scintillation meter was available for measuring the sensible heat from street canyon, and 5) transportation gave the horizontal momentum to the surrounding atmosphere in the same direction as the traffic, so that the wind velocity and the vertical momentum exchange were modified by transportation especially in rush hours.