

機関番号：32407

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2008～2010

課題番号：20560554

研究課題名（和文） 渦相関法とシンチレーション法を併用した
街区スケールの熱収支実測と数値モデル評価研究課題名（英文） Observations of area averaged heat balance in a highly built-up area
using eddy correlation method and scintillation method and its
validation by numerical simulation model

研究代表者

成田 健一（NARITA KEN-ICHI）

日本工業大学・工学部・教授

研究者番号：20189210

研究成果の概要（和文）：光のゆらぎから都市の広域的な大気加熱量（顕熱フラックス）を求めることができるシンチレーション法の確立のため、東京都心部を対象とした長期観測を行った。フラックスの算定にとって重要な都市域の建物凹凸による見かけ上の地面上昇量（ゼロ面変位）を実測し、欧州の都市に比べ建物高さのバラツキが大きい東京のような都市では、平均建物高さよりもゼロ面変位がかなり大きくなることを示した。また、街区レベルの熱環境シミュレーションプログラムを開発し、対象地域の熱収支構造の変化を検討した。

研究成果の概要（英文）：To establish the scintillation method for built-up area, long term observations were performed in downtown Tokyo. The evaluated zero-plane displacement height, which is very important parameter of scintillation method, was exceeds the area averaged building height. The numerical simulation model for area averaged heat balance was developed.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	2,700,000	810,000	3,510,000
2009年度	500,000	150,000	650,000
2010年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
総計	3,700,000	1,110,000	4,810,000

研究分野：都市環境工学

科研費の分科・細目：建築学 建築環境・設備

キーワード：顕熱フラックス，ヒートアイランド，大気安定度

1. 研究開始当初の背景

2004年の「ヒートアイランド対策大綱」の発表以来、多くの省庁・地方自治体で様々なヒートアイランド対策が推進されている。しかしながら、このような街区レベルでの対策が実際にどのような効果を有するのかを把握する方法が確立されていない。現在の政策

推進の根拠とされているのは、近年目覚ましい進歩を遂げている数値シミュレーションによる予測結果であるが、このような数 km²程度の街区スケールのモデリングには残されている課題も多く、その予測精度にはまだまだ疑問がある。そのため、実街区において対策導入による大気加熱量（顕熱輸送量）の変

化等を直接評価できる実測法の確立が急務となっている。

2. 研究の目的

現在この種の広域的な熱輸送量の実測方法として用いられているのは、市街地内に建てられた観測タワーにおける渦相関法による評価である。この超音波風速温度計を用いた渦相関法は、乱流輸送量を計測する最も確実な手法として世界的に統一されたものであるが、タワー上1点での計測であるため、計測対象となるエリア（センサーが感知する通過熱フラックスの起源となっている地上の場所：ソースエリアと呼ばれる）が、風向や大気安定度により、その場所や広さが大きく変わるため、空間的な代表性に乏しいという欠点がある。従って、市街地のように凹凸があり不均質な地表面には必ずしも適していない。そこで本研究ではシンチレーション法を用いた、より広域での顕熱輸送量の測定を試みる。シンチレーション法で使用する境界層シンチロメータ (Large Aperture Scintillometer : LAS) は大気中での光の揺らぎを用いることで、発光機と受光機の間（最大5 km）での顕熱輸送量を計測することができる。一方、境界層シンチロメータは、日中の大気不安定な状態でしか使えないという欠点もある。

境界層シンチロメータは、広域熱フラックスの測定法として大変魅力的な測器ではあるが、これまでは砂漠や草原地帯など広大かつ均一な地表面を対象とした研究例しか存在せず、都市域を対象とした報告例は世界的にも皆無といえる。その大きな理由の一つは、光の揺らぎ情報から得られる温度変動の構造関数の係数 C_T^2 から顕熱輸送量に変換する際に、有効高度 (effective height) が必要になるという点で、都市域では複雑な地表面構造を有するため、この値をどのように決めるかが問題となる。

本研究では、シンチレーション法と渦相関法の同時長期観測を行うことにより、それぞれの測定法のソースエリアを注意深く解析し、渦相関法の値を援用しながらシンチレーション法における有効高さの算定を行う。これにより、有効高度の一般的な算出方法が導かれれば、シンチレーション法による都市域での顕熱輸送量実測法の確立に大きく貢献できる。

一方、都市規模の熱環境シミュレーションなどは多く実施されているものの、実際にヒートアイランド対策技術を導入・評価していくためには、建物単位～街区単位での評価を行うことが非常に重要である。このため街区レベルの熱環境シミュレーションプログラムを開発した。これは、地区再開発などにおいて、簡単な条件を入力することにより、開

発後の被覆面の熱収支の変化などを予測することができるものである。また、環境アセスメントの実施において、都市熱環境の観点から、開発対象地区の熱収支変化を具体的に予測、評価するツールとしても用いることが可能であると考えられる。

3. 研究の方法

(1) シンチロメータによる顕熱フラックス測定

まずシンチロメータの原理を概説する。シンチロメータは送受信機間での光のゆらぎを測定する。ゆらぎ、すなわち光強度の時間変動は、主に気温変動に伴う大気の密度変動が原因で生じる。このため、光強度を連続的に測定することで気温変動に関する情報（気温構造関数の係数 C_T^2 ）が得られる。

大気不安定な状態での C_T^2 に関する Monin-Obukhov 相似則から以下の式が導かれ、この式と計測された C_T^2 より顕熱フラックス Q_H が得られる。

$$Q_H = 1.05 \frac{1}{\beta} k (z-d) \left(\frac{g}{T_a} \right)^{1/2} (C_T^2)^{3/4} \quad (1)$$

ここで、 β と k と g は定数、 T_a は気温、 z は測定高度、 d はゼロ面変位である。都市域や森林では、建物や樹木により地面が高度ゼロの位置よりも上方に存在するように見える（図1）。 $z-d$ はこれを考慮した、実質的な測定高度である。

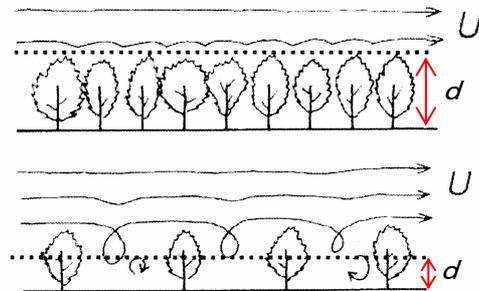


図1 ゼロ面変位 d の概念図。近藤(1994)をもとに作成。

式(1)より、顕熱フラックス Q_H は $z-d$ に比例する。従って、 d として適切な値を使用することが、シンチロメータによる顕熱フラックス測定の精度に強く影響する。市街地におけるゼロ面変位 d を求める方法として形態法(例えば Macdonald et al., 1998)がある。しかし、この方法は必ずしも適切な値を算出しない(Grimmond and Oke, 1999)。そこで銀座街区における d を実測し、形態法を改良することを検討する。

① 観測

銀座街区での計測は2009年夏期に約2ヶ月間行った。観測地点の配置を図2に示す。

MRC ではタワーを利用して高度 110 m に超音波風速計(Kaijo SAT-550)を設置し、また高度 100 m と 50 m にシンチロメータ(Scintec BLS-900)の送信機と受信機をそれぞれ設置した。KBP にはシンチロメータの送信機を、COK には受信機を設置し、MRC との間で光を送受信しシンチレーション測定を行った。解析は銀座街区を MRC を中心として風向により 4 つのエリアに分けて行った。MRC より北西側のエリア側からの風は夏期にはほとんど吹かないこと、タワーによる風の乱れで超音波風速計による測定に誤差が生じることから解析対象外とした。



図2 観測エリア。図中の丸印が観測地点。

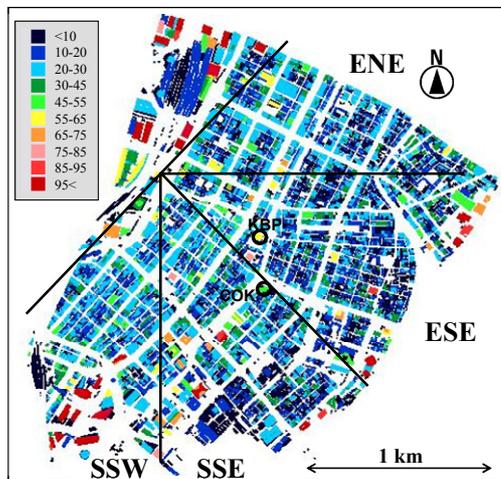


図3 観測エリアの建物高さ分布(カラー, 単位 m)と解析エリア。

なお、同様の測定を野外スケールモデルサイト(Kanda et al., 2007)においても行い、手法の検証を行った。スケールモデルサイトはビル街を模擬したものである。一辺が 1.5 m の立方体コンクリートブロックが 100 m × 50 m の敷地に建蔽率 0.25 で配置されている。このモデルサイトにおける d は Inagaki and Kanda (2008) の風速プロファイル測定により

既知である。以下に述べる温度分散法および 2 高度シンチレーション法が、このような凹凸の激しい地表面でも適用可能で、 d を正しく推定できることを確認してある。

②温度分散法

温度分散法(TVM, Rotach, 1994)は計測された温度分散量 σ_T を Monin-Obukhov 相似則に代入し、未知数となる d を最少二乗法で求める方法である。ここでは温度の分散量として超音波風速計で計測された 30 分ごとの値を使用する。計測では音仮温度補正、風速計の傾き補正などを行い、さらに計測された温度変動のスペクトルが適切なものとなっているかどうかをチェックした。銀座街区での測定では計測高度が地上 110 m と比較的高いため、大気が安定な時は、計測位置が大気境界層よりも上に出ている可能性がある。大気境界層外では Monin-Obukhov 相似則が成立するかどうかは定かではない。そこで、顕熱フラックスが 200 Wm^{-2} 以上かつ安定度スケール z/L が -0.3 以下の場合のみ解析対象とした。

図 4 は Monin-Obukhov 相似則に計測値を代入した際の残差である。残差が最少となる時の d が採用される。 d はエリアにより 30 から 60 m の範囲にある。残差の最小値から今回の d の推定誤差は 15 m 程度と見積もられる。また、エリア SSW では最少残差は他のエリアよりも小さいが、下に凸の曲線形状が鈍くなっており、推定の信頼度が低い。

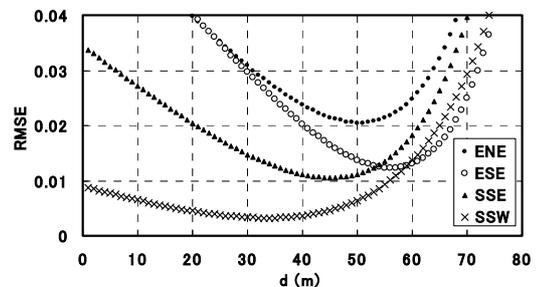


図4 温度分散法における d と残差との関係。

③2 高度シンチレーション法

この手法は Kanda et al. (2002) によって提案され scintillometer heat flux method (SHM) とも呼ばれている。2 台のシンチロメータを用い、2 高度で同時に測定を行えば、未知数である d を決定することができる。

$Q_H(z_1-d) = Q_H(z_2-d) + Q_a$ (2)
 z_1, z_2 は高度、 Q_H は顕熱フラックス、 Q_a は 2 高度間での貯熱量である。なお、測定データの精度を確保するため、同時に測定された超音波風速計を用いた渦相関法による顕熱フラックスと式(1)の Q_H が誤差 20 Wm^{-2} の範囲内で一致するデータのみを使用した。

(2) シミュレーションシステムの構築

本システムは、ある時刻において、建物の外の気象条件が一定の場合で、それによる建物表面におけるエネルギー収支、建物内部の空調負荷も一定に定まるとした場合の定常熱収支計算モデルである。図5に簡易熱環境シミュレーションシステム全体の構成を示す。建物概要データや、対策の状況、気象データなど、評価の前提となる入力条件の設定を行い、空調負荷、エネルギー消費量の計算を行い、大気への熱負荷量（潜熱及び顕熱）を算定するものである。また、建物周りの風速分布については、流体数値計算（CFD）により求めた結果を壁面の熱伝達の相違に反映させている。

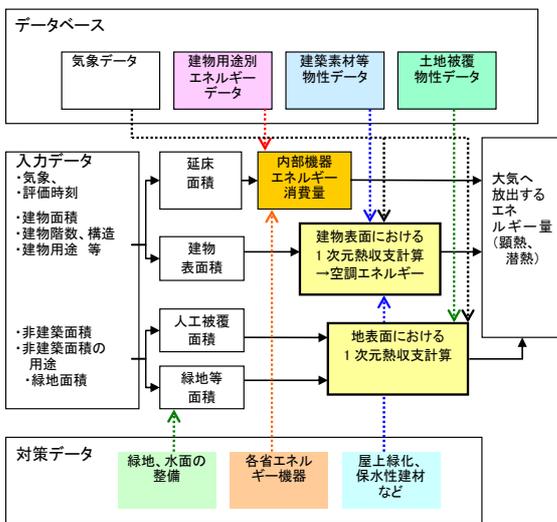


図5 熱収支シミュレーション計算の構成

4. 研究成果

(1) シンチロメータ計測のためのゼロ面変位推定と形態法の改良

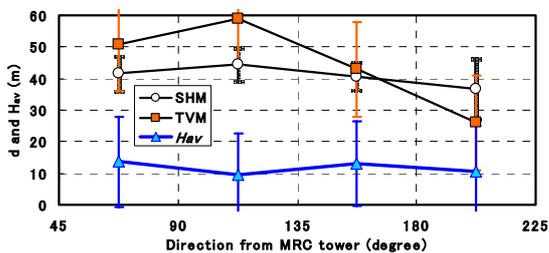


図6 推定したゼロ面変位と平均建物高さ。
SHM:2高度シンチレーション法, TVM:温度分散法。
Havは平均建物高さ。

図6に銀座街区において測定されたゼロ面変位 d を示す。温度分散法 (TVM) と2高度シンチレーション法 (SHM) は全く独立な方法であるにもかかわらず、その結果はおおよ

そ一致しており、いずれの測定も妥当であることがわかる。2高度シンチレーション法の方がエリア間の差が小さいのは、シンチロメータによる計測エリア (ソースエリア) が超音波風速計のそれよりも広いためであると考えられる。エリア SSE や SSW で小さな値となっているのは凹凸の小さい海面の影響であろう。

いずれのエリアについても d の値は平均ビル高さを超えている。これは図1に示したように樹木 (建物) 高さが均一の場合にはあり得ない。現実の市街地では個々の建物高さにばらつきがあることが、 d が平均建物高さを超えた原因であると考えられる。すなわち、周辺の建物よりも特別に高い高層ビルが、たとえそれらの底面積は小さくかつ数棟であっても、エリア全体としてのゼロ面変位を持ち上げていると考えられる。ゼロ面変位はビル街に対する風応力の力点である (Jackson, 1981) ことから、この仮説は十分妥当性がある。Grimmond and Oke (1999) は形態法が現実の都市において必ずしも適切な d を推定しないことを述べたが、これは形態法が均一高さのキャノピーを想定していることが原因とも考えられる。

シンチロメータを用いた顕熱測定には d の高精度の推定が必須である。そこで本研究では、今後、銀座街区以外の市街地においてもシンチロメータを用いた顕熱測定が行えるよう、形態法の改良を試みる。日本の都市は外国の諸都市と比べて建物高さのバラツキが大きいことから (図7)、不均一高さキャノピーに対して適用可能な形態法は非常に有用であることがわかる。

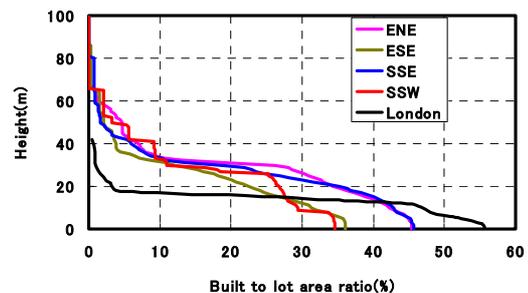


図7 高度ごとの屋根面積割合。図3の各エリアごとに示した。ロンドンの値は Ratti et al. (2002) による。

形態法では建物の建蔽率とキャノピー高さから d が算出される。キャノピー高さとして、通常は平均建物高さが使われるが、図6に示すように平均建物高さは d よりもかなり小さい。建物高さのバラツキが大きい市街地では、平均建物高さはキャノピー高さとしては不適切である。

表1は銀座街区で測定されたゼロ面変位を真値として、形態法からキャノピー高さを逆

算したものである。ゼロ面変位として温度分散法(TVM)と2高度シンチレーション法(SHM)のそれぞれの値を用いた場合を示している。キャノピー高さはエリア内の建物最大高さと同程度となっている。したがって形態法により d を推定する際、キャノピー高さとして建物の平均高さではなく、最大高さを用いれば、 d は本研究での実測値と近い値となる。

表1 キャノピー高さの推定値と建物最大高さ。
いずれも単位は m.

	ENE	ESE	SSE	SSW
キャノピー高さ (TVM)	71	94	59	43
キャノピー高さ (SHM)	58	71	56	61
建物最大高さ	68	87	81	66

(2) シミュレーションモデルによる都市街区の計算事例

実際の都内の街区における建物条件を適用して、街区全体における熱収支の状況を推計した。さらに被覆面の構成比や、空調熱源システムを変化させ、街区の熱収支の変化を算定した結果を図8に示す。

【計算条件】

① 対策前

- ・ 地表面被覆：舗装：90%，緑地：10%
- ・ 空調熱源システム：電動ターボ冷凍機＋ボイラー
- ・ 屋上緑化率：0%

② 対策後

- ・ 地表面被覆：舗装：10%，緑地：90%
- ・ 空調熱源システム：吸収式冷凍機・冷却塔＋ボイラー
- ・ 屋上緑化率：80%

図8をみると、地表面の緑化率の向上により、地表面の熱は顕熱主体から潜熱主体に切り替わることがわかる（本報ではシステムの動作が明示的にわかるように被覆率を極端に変化させてみた）。また、屋上緑化率の向上は、屋上緑化率を80%と高く設定しても、建物表面の潜熱が若干増加するものの、全体の効果として大きくないという結果が出た。また、空調システムにおいては、機器の発熱がほとんど顕熱として排出されるターボ冷凍機から、冷却塔により、潜熱主体で大気へ熱が放出される吸収式冷凍機・冷却塔にシステムを変えることにより、潜熱と顕熱の比率を大きく変えることができることがわかる。これらより、顕熱を削減させる効果としては、屋上緑化よりも地表面の緑化率の向上や、空調システムの対策がより効果がある。実際上

の緑化率は短期間で大きく変化させることは困難であるため、短期的に対応可能な対策としては空調システムの変更とであると考えられる。

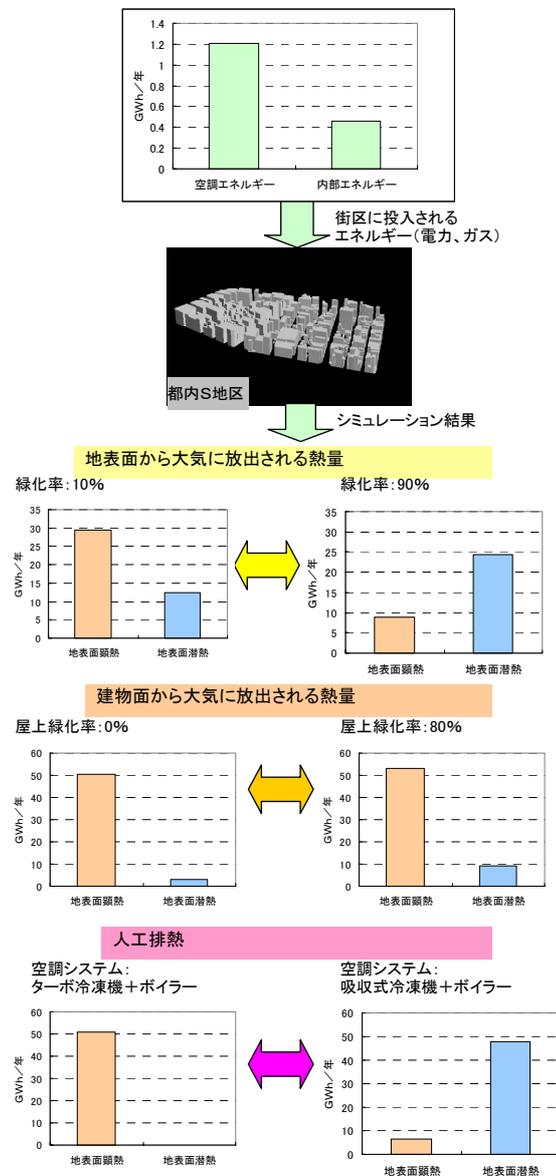


図8 実在街区における熱収支算定結果

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計1件)

- ① Shinya Tanaka, Hirofumi Sugawara, Ken-ichi Narita, Hitoshi Yokoyama, Ikusei Misaka, and Dai Matsushima, Zero-Plane Displacement Height in a Highly Built-Up Area of Tokyo, SOLA, 査読有, (in press).

〔学会発表〕(計3件)

- ① 田中真也, 菅原広史, 成田健一, スケールモデルサイトにおける温度分散法を用いたゼロ面変位の推定, 日本気象学会 2010 年秋季大会, 2010 年 10 月 27 日, 京都
- ② 菅原広史, 成田健一, 横山仁, 松島大, 三坂育正, 田中真也, 2 高度シンチロメータによる都市域のゼロ面変位推定, 日本気象学会 2010 年春季大会, 2010 年 5 月 26 日, 東京
- ③ 田中真也, 菅原広史, 横山仁, 成田健一, 三坂育正, 松島大, 分散法を用いた銀座街区周辺におけるゼロ面変位の推定, 日本気象学会 2010 年春季大会, 2010 年 5 月 26 日, 東京

6. 研究組織

(1) 研究代表者

成田 健一 (NARITA KEN-ICHI)

日本工業大学・工学部・教授

研究者番号: 20189210

(2) 研究分担者

菅原 広史 (SUGAWARA HIROFUMI)

防衛大学校・地球海洋学科・准教授

研究者番号: 60531788

石田 武志 (ISHIDA TAKESHI)

日本工業大学・工学部・講師

研究者番号: 50438818