水文・水資源学会誌
J. Japan Soc. Hydrol. & Water Resour.
Vol. 10, No. 4 (1997) pp. 329-336

銀座オフィスビル街における熱収支特性

Field Observation of the Heat Balance in an Urban Area

神田 学*	(東京工業大学工学部)
Manabu KANDA	<i>Tokyo Institute of Technology</i>
高柳百合子*	(東京工業大学工学部)
Yuriko TAKAYANAGI	<i>Tokyo Institute of Technology</i>
横山 仁**	(東京都農業試験場)
Hitoshi YOKOYAMA	<i>Tokyo Metropolitan Agricultural Experiment Station</i>
森脇 亮*	(東京工業大学工学部)
Ryo MORIWAKI	<i>Tokyo Institute of Technology</i>

The field observations were performed in Ginza office area in summer 1996, to investigate the characteristics of heat balance in complicated urban canopies. The sensible heat was measured by two methods, one was "eddy correlation method" and another was "scintillation method". The following results were obtained; 1) The observed latent heat flux was very large and comparable to the sensible heat flux. This was proved to be caused by cooling systems introduced to office buildings. 2) The artificial and latent heat on a holiday were less than those on a weekday. 3) The sensible heat observed by scintillation technique agreed well with that by the eddy correlation method. And also, the longer measurement path of scintillation meter (130m in this case) compared to that of sonic anemometer (only 15cm) could make the fluctuations smaller. 4) The displacement height (d) was found to be very sensitive to the results of scintillation methods and the way how to determine it was discussed.

Key words: The artificial energy flux, The artificial latent heat flux, Cooling systems, Scintillometer

1996年8月に銀座オフィス街において、都市上空の熱収支特性に関する観測を行った。渦相関法とシンチレーション法を併用した計測により、以下の結果を得た。1) 銀座オフィス街での熱収支の実態を明らかにし、顕熱・潜熱・蓄熱が同程度の割合で寄与していることを明らかにした。2) 都市は顕熱に匹敵する「人工的な潜熱」を出しており、原因として冷房による潜熱放出が有力な候補であることを示した。3) 建物側面の窓などからの蓄熱量は無視できない大きさであり、休日の人工熱及び潜熱は平日より少なかった。4) シンチレーション法によるキャノピー上端の顕熱量は、渦相関法によるビル屋上の顕熱とほぼ一致し、ビル屋上での計測の代表性が確認された。4) 都市キャノピーにおけるシンチロメータの利用に際しては、ゼロ面変位の算定が重要であることを示し、その決定手法を提案した。

キーワード：人工熱、人工的な潜熱、冷房、シンチロメータ

I. はじめに

都市大気環境の特徴として、郊外に比べて気温が

高く相対湿度が低いことは早くから知られ、東京は都市砂漠とも呼ばれてきた。そのためヒートアイランド現象に代表される熱環境の研究の多くは、郊外

*東京工業大学工学部 〒152 東京都目黒区大岡山2-12-1

Faculty of Engineering, Tokyo Institute of Technology, Tokyo 2-12-1 Ookayama, Meguro 152

**東京都農業試験場

Tokyo Metropolitan Agricultural Experiment Station

と対比させて、都市の顕熱は大きく、潜熱は小さいか、あるいは無いものと仮定される場合が殆どである。しかし近年、アメダス資料による東京都市域の夏の午後の降雨量の増加(藤部, 1996)や、空調機器などの冷却水に伴う水蒸気量増加の可能性が定性的に報告(小元ら, 1994)されるなど、都市の潜熱量や水蒸気量にはまだ不明な点が見られる。また、気温上昇の原因の1つとされる人工熱や建造物への蓄熱量に関しては、直接測定することは難しく、信頼できるデータを用いて定量的に論じた研究は意外に少ない(例えばYoshidaら, 1990/池田ら, 1996)。

そこで本論文では、都市の熱収支の実体(特に潜熱量が本当に無視しうるものなのかどうか)を明らかにする事を目的として、実際に都心のオフィスビルの屋上で1996年夏に測定した観測結果を検討する。顕熱・潜熱の算定にあたっては既存の測定手法の中で最も信頼性の高い渦相関法による結果を基本的に用いた。しかしながら都市キャノピーのような複雑面では点計測の代表性が大きな問題として考えられている。そこで、計測スパン長が数百mにも及び(超音波風速計などはスパン長が数10cmに過ぎない)、広域にわたる平均的な顕熱量を直接計測し得る新しい手法として注目されているシンチロメータを利用した顕熱算定も併せて行い、その利用可能性についても検討を試みた。

II. 観測の概要

観測は、東京都千代田区丸の内(図-1参照)の東京都庁丸の内庁舎の屋上で、平成8年8月6日から8

図-1 観測地の位置図

図-2 計器設置の概略図

(a) 道路と垂直に切断した立面図

(b) 上から見た平面図

月8日の前半3日間と、8月18日から8月22日までのお盆を挟んだ後半5日間に行った。周辺はオフィスや百貨店など法定容積率が400%以上のビルが林立する、都内でも特に電力需要の高い地域となっている。

観測項目は、放射収支計による正味放射量、超音波風速温度計((株)カイジョー, DA600型)による風向・風速・温度データと、熱流版による屋上面の伝熱量の計測を基本とする。それに加えて、前半の3日間にはシンチロメータ(Sintec, SLS20)によるビル間道路上空の顕熱計測を、また後半の5日間には赤外線 $H_2O \cdot CO_2$ 計((株)アドバネット, E009A)による潜熱計測を併せて行った。計器はビル屋上に立っている鉄塔に、図-2のように設置した。ビルは15階建て、コンクリート製で灰色、側壁は4面とも面積の約3割程が窓となっている。

Ⅲ. 観測の結果と考察

1. 都市上空の熱収支

1) 熱収支式

ここでの熱収支は、図-3のようにキャノピー層を含めたコントロールボリュームを設定して考える。観測地点の風上周囲数km四方程度は、銀座の中心に位置し、規則正しい碁盤目状の区画網に50m以下の建築物が密集しており(後述図-6参照)、グロスな視点からビル群を立体的粗度と見なした場合、それらは水平数km程度のスケールにおいてほぼ同様であると考えられる。従って、森林熱収支などの場合と同様、観測ポイントは熱内部境界層内にあるものと見なし、移流の影響は考えないことにする。海陸風フロントの通過時などに移流の影響が熱収支に現れることは著者らも別の観測で確かめているが(神田他, 1996)、それはあくまで瞬時的なものである。

以上の仮定に基づき、図-3における都市キャノピー層内の熱収支式は次式のように表せる。

$$R_n + M = H + IE + G + G' + Q \quad (1)$$

ここで、 R_n ：正味放射、 M ：人工熱、 H ：顕熱、 IE ：潜熱、 G ：屋根面への蓄熱、 G' ：側面・窓・道路等への蓄熱、 Q ：大気蓄熱、であり、 Q は十分小さく無視できると考える。例えば、冷房駆動のための電力消費は M 、冷却水への蓄熱は G または G' 、冷却水の蒸発は IE の中に含まれることになる。

顕熱・潜熱は、超音波風速温度計で計測した温度・風速の変動量と、赤外線 $H_2O \cdot CO_2$ 計で計測した水蒸気量の変動量(どちらも10Hzで記録)から渦相関法により求めた値を用いる。計測していない M 、 G' については、 R_n 、 G 、 H 、 IE の計測値と式(1)から、次式により推定する。今回の観測範囲では、 M と G' を分離して評価する事はできない。

$$M - G' = (H + IE + G) - R_n \quad (2)$$

都市キャノピーの熱収支で問題となるのが、観測点の代表性の問題である。顕熱については、後章でシンチロメーター計測値によりその空間代表性が議

論される。純放射はキャノピー高さの約2倍に相当する90m地点での点計測値であり、また地熱流は屋上面5点の平均値であるが、いずれも厳密な意味でその代表性をここで議論することはできない(多くのデパート・ホテルなどでは基本的に観測許可はおりず、そういった観測遂行上の障害が少なからず関与している)。ただし、著者らは、既にサーモグラフィー熱画像から領域平均的な地面の蓄熱と純放射を逆推定する方法(サーモG)を提案し、フラットな場でその有効性を検証しており(森脇・神田, 1997)、今後サーモGを都市キャノピーに適用していくことを課題としたい。

2) 実測熱収支

熱収支の結果例を、超音波風速温度計による風・温度のデータと併せて示す(図-4、図-5)。ここでは潜熱計測を行った後半5日間の内、平日と休日の代表としてそれぞれ21日(水曜日)と、18日(日曜日)の2日間を取り上げた。全般的傾向として、都市キャノピーでは、顕熱・潜熱・蓄熱の3項が定量的に同程度の寄与を行っていると言える。以下に詳しく考察する。

図-4 8月21日(水曜日)の時系列データ

- (a) 風向、風速の時間変化(10分平均)
- (b) 熱収支の時間変化(30分平均)
- (c) 温度の時間変化(10分平均)

図-3 熱収支の取り方の概念図

図一 5 8月18日(日曜日)の時系列データ

(a), (b), (c) 図一 4 に同じ。

(a) IEについて

注目すべきことに、今までほとんど無いと仮定されてきたのに反してIEはHにほぼ等しい、時には上回る値を示した。両日とも日中海風による南風が3～4 m/sで吹いており、図一 2 の(b)平面図を見ると観測を行ったビル屋上の冷却塔は観測鉄塔の風下になるため、ローカルな影響によるものでは無からう。また、このような現象は風向に関係なく観測期間5日間のデータ全てに共通して見られたことなどからも、都市では人工排熱と並ぶ『人工的な潜熱』が引き起こされていることが考えられる。

人工熱源として扱われる自動車が、排ガスに含まれる水蒸気によって人工の潜熱源にもなっているということも考えられるので試算してみた。

ここで、 H_u : ガソリンの燃焼熱(10,430 kcal/kg)
 $n=8$, $m=15.5$ (定数)を表す。

化学式(3)から求めると、潜熱は自動車の全燃焼熱のおよそ7%である。例えば、国道246号線における激しい渋滞時に、通過交通による燃焼熱(人工排熱)は200～300 W/m²程度に及ぶことが実測により示さ

れているが(神田他, 1997), そのような場合を想定しても自動車による潜熱は高々数十 W/m²にすぎず、数百 W/m²の潜熱量を説明することはできない。

そこでその他の原因として、冷房を検討してみた。大型ビル用の冷房は普通住宅用の冷房とは異なり、ビル内の熱を最終的に屋上の冷却塔で蒸発による潜熱の形で消費する冷水の循環方式を採用している。冷却塔とは、噴霧器によって水と空氣の接触面積を大きくし、かつ充填材に染み込んでいく水滴の下から空氣を送りこむことによって、効率よく強制的に蒸発を促進するものである。密閉性の高いビル内においては夏期の冷房は不可欠で、観測を行ったビルの屋上には合計で5つの冷却塔が設置して有り、合計で毎分18,054リットルもの冷却水が循環していた。観測地周辺にはこのビルのように個別に冷却塔を設置するものの他に、地域冷暖房に加入しているビルも多い。地域冷暖房とは、指定地域内の一つのプラントに冷暖房用の熱源機器を集約し冷却塔等を設置し、他の加入ビルには熱媒体のみを配管供給するものである。地域冷暖房は東京都の都市計画として進められているためデータが整っており、提供して頂いた8月の1ヶ月間の冷房用使用水量(=入れ替え水及び機械損失などを差し引いた使用水量で、ほぼ蒸発による損失に対応すると思われる)と地域内のべ床面積から、算定した指定地域内の潜熱量を示す。この両日とも日中は海風により南風が卓越しており、データは風上の影響を受けていると考えられるため、観測地点のすぐ南側の2つの地域冷暖房指定地域をとりあげた。図一 6 に観測地との位置関係を示す。

銀座二・三丁目地区……………175.3 W/m²(平成 7 年)
 銀座四丁目……………372.4 W/m²(平成 8 年)

これは夜間を含めた平均値なので昼間のピーク時

図一 6 観測地周辺の地図

の値はこの倍に近い値になりうるが、指定地域はビル街区を単位とし道路部分などを含まないため、都市全体で平均すると $200\sim 600\text{ W/m}^2$ ぐらいになると推定される。この値は21日、18日のピーク時の潜熱量 $200\sim 300\text{ W/m}^2$ と比較しても妥当な範囲にある。以上より、冷却塔からの水蒸気は、都市における潜熱源として有力な候補であると考えられる。

(b) M と G' について

平日の熱収支を21日(水曜日)を例にとって説明する。(図-4) G が R_n に占める割合が大きく午前中にピークを持ち、次に大気が熱せられ H が上昇する都市の特徴的な日変化のパターンが見られる。 G は日が差し始めると共に増加し、10時頃に 130 W/m^2 を示した後は単調に減少する。その後 H は14時頃まで増加し、16時頃に気温が最高となる一方で G が負に転じている。気温は日没後もなかなか下がらず、日中建物に蓄熱されたエネルギーが主に長波放射によって放熱され、ヒートアイランド現象が起きていると考えられる。

顕熱だけでなく潜熱も前述の冷房の効果によって気温の上昇と共に増加しているが、9時から10時頃に風向の変わり目で風速が小さくなっている時に、計器を設置したビル鉄塔の足下にある冷却塔の局所的な影響を受け、小さなピークをもっている。それと G のピークが重なり、 $H+IE+G$ は午前と午後2つのピークを持つ形になっている。

グラフ中の $H+IE+G$ と R_n の差は、式(2)より M と G の差として捉えることができ、正午付近を除いて $M>G'$ であり、人工熱が G' を上回る量を出していることがわかる。夕方以降に R_n との差が大きく開くのは、 M が増大していると言うよりも、 G' が負に転じることによるものであると推察される。正午付近で $M<G'$ に逆転しているのは、日射の差込によるビル側面の窓から建物への蓄熱、あるいは建物のコンクリートに比べて日射に鋭敏に反応するアスファルト道路への蓄熱量が増大する事(Vu Thanh Caら、1994)に対応していると思われる。晴天日の日中にビル側面に電流板を張り付けて計測した G' について、 G の1.5倍を示すという報告(Yoshidaら、1990)も合わせ考えると、 G' は無視できない大きさであり、建物への蓄熱量を G のみで代表することは危険であることを示唆している。

ここで図-5に示す18日(日曜日)と比較すると、曜日による人間活動の差異から人工熱に違いがでているのがわかる。18日は21日に比べて顕熱は全体的

にやや小さめで、潜熱は明らかに小さくなっている。冷房冷却水は休日とも休まず冷水を循環し続けているが、人間活動による負荷がかからない休日は、冷水の温度変化が少ないため排出される潜熱量は減少する。そのため潜熱に平日のような日変化は見られない。両日は日射や風などの気象条件は類似しているため、平日の21日が正午以外 $M>G'$ であったのに対して休日の18日は日中を通じて $M<G'$ であるという違いは、これら顕熱・潜熱の減少によって生じていると考えられる。これは人間活動による人工排熱 M が休日は少なく平日に多いという予測を裏付ける結果である。

2. シンチロメーターの利用可能性について

一般に超音波風速温度計のスパン長は、数10cmにすぎないので、その計測値より算定される渦相関法による顕熱は、10数cm四方の空間平均値と言うことになり、複雑な都市大気の熱収支を論じる上で、その空間代表性が問題となる。

シンチロメーターはレーザー光の揺らぎにより広域の空間平均的な顕熱を算定しうる新しい計測技術でスパン長は数100mに及ぶ。本章では、シンチロメーター法と渦相関法による顕熱算定結果を比較することにより、点計測の空間代表性を検証すると同時に、シンチロメーターの利用可能性と問題点について論じる。

1) シンチロメータの原理

シンチロメータはレーザー光を用いた乱流計測計で、超音波計等の1地点での計測とは異なり、レーザーの発信器・受信器間の光線の軌跡で空間平均化された乱流変動値を求める点が大きな特徴である。その原理を以下に簡単に述べる。発信される平行した2本のレーザーが、光路中の乱流により屈折率の変動を起こすのを光の強度変動としてとらえ、その2本の相関および光路距離などからまず、温度の構造関数： C_T とエネルギー消散率： ε を求める。ここで、接地境界層の相似理論が適用できると仮定すると、 C_T と ε は、モニン・オブコフの相似則による3つの基本スケール(L :モニン・オブコフ長さ、 T_ν :摩擦温度、 u_ν :摩擦速度)と以下の式(4)~(6)の関係を有する(我々の観測では、大気は常時不安定状態にあったので、ここでは不安定条件の式のみを示す)。実質的な測定高度($z-d$)が与えられれば以下の3式より3つの基本スケールが求まり、顕熱、運動量フラックスなどが算定される。

$$L = Tu_*^2 / kgT_* \quad (4)$$

$$C\tau^2[k(z-d)]^{2/3}T_*^{-2}$$

$$= 4\beta_1 \left(1 - 7\frac{z-d}{L} + 75\left(\frac{z-d}{L}\right)^2\right)^{-1/3} \quad (5)$$

ここで、

$$\varepsilon k(z-d)u^{-3} = \left(1 - 3\frac{z-d}{L}\right)^{-1} - \frac{z-d}{L} \quad (6)$$

T : 設定温度, z : 地上高, d : ゼロ面変位

k : カルマン定数0.4, g : 重力加速度9.81m/s², β_1 : Obukhov-Corrsin定数0.86である。

平地における試験実験で、シンチレーション法は渦相関法と比較してその有効性が確かめられているだけでなく、領域平均値を算出しているため渦相関に比べ時間変動の少ないきわめて安定した結果が得られることが指摘されている。測定原理の詳細などについては(Thiermann, 1992)を参照されたい。

従って、点計測の代表性が大きな問題となる都市や植物キャノピー、混在土地利用地域などからの平均的な顕熱の算定に利用することが期待されるが、それらに応用した報告例は今のところなく、これが初めての試みとなる(Thiermann, 私信)。

2) 渦相関法との比較

シンチロメータをキャノピー上端に設置した3日間の内、天気が悪かった8日を除く2日間の測定結果を、超音波風速温度計による風・温度のデータと併せて示す(図-7, 図-8)。気象条件は、6日は晴れ、7日は曇りで午後から夕方にかけて雨模様であった。6日の12時過ぎ頃から海風による南風が吹いた以外は、全体的に東海上の高気圧の影響で北北東風が卓越している。当初、風向によって、建物粗度の異方性からキャノピー上端の境界形成の度合いに違いが出る、あるいはレーザー光路の軌跡との方向性から光路平均値に違いが出る事などが予想されたが、意外にも風向に対応した明確な違いは見られない。高さや場所の違いがあるにも関わらず、渦相関法とシンチレーション法による顕熱量は全体的なトレンドやレベルが非常に良く一致していると言える。ただし、細かい時間変動を比較すると、渦相関法の方がより大きな変動を示している。これは渦相関法が高々15cmスパンの空間平均値であるのに対し、シンチロメータは約130mスパン(約100倍)の空間平均値となっていることの影響が現れたものと考えられる。

1節では屋上での計測を基にキャノピーを含めた都市大気熱収支を議論したが、屋上1箇所のみの

図-7 8月6日の時系列データ

(a) 風向、風速の時間変化(30分平均)

(b) 渦相関法、シンチレーション法による顕熱の時間変化(30分平均)

(c) 温度の時間変化(110分平均)

図-8 8月7日の時系列データ

(a), (b), (c) 図-7に同じ。

点計測値がどれだけの代表性を持つかは定かではなかった。ここでシンチロメータによる領域平均的な線計測値と比較することによって、顕熱に関しては一応の代表性を確認することができたといえる。

3) 高さの問題

シンチレーション法は1)項で示したように、レーザー光の実質的な地上高($z-d$)の情報を必要とする。平地とは異なる我々の観測のような場合には、ビルの影響を考慮したゼロ面変位 d をあらかじめ与えなければならず、これをいかにして決めるかということ自体が大きな問題点となる。2)項での解析では東京などのようにビルが密に詰まっている場合には建物の平均高さ h がゼロ面変位 d にほぼ一致する(Kondoら, 1986)こと、及びシンチロメータの設置高度がビルの屋上面から5mであることを考慮して、 $z-d=5\text{m}$ としていた。ここで d が顕熱の算定にどの程度影響するか感度分析を行ってみた。建物高さ50mの1割程度以内で d をわずかに変化させて再計算させたところ、高さの増減は無視できない割合で顕熱の算定に効いていることがわかった(図-9)。従って、別途、 d を何らかの方法で決定させてやることが不可欠となる。ここでは2つのアイデアを提案してみよう。

(a) シンチロメータを2セット用いる方法

同じパス間に接地高度を変えた2セットのシンチロメータ計測を行う。接地境界層内の基本スケールは2高度で変わらないから、2セットのシンチロメータの出力信号から式(4)~(6)内の d を未知変数として、直接求めることが原理的には可能である。この手法の有効性については今後の課題としたい。

(b) 超音波風速計を併用する方法

上記と同じ原理で、もう1セットのシンチロメータ

の代わりに、超音波風速計を使う手法である。

1)項の原理で説明した式(5)に、シンチロメータによる温度の構造関数 C_T と併せて超音波風速温度計による L 、 T_s を代入する事によって $z-d$ を求めることができる。この手法を今回の観測結果に適用してみた。その結果、大気安定度の変化が小さい日中10時~14時の平均で6日: $z-d=5.17\text{m}$ (標準偏差 $\alpha=2.03$), 7日: 5.96m ($\alpha=2.73$)を示し、2)項で採用した屋上面を基準とする5mに非常良く一致示ることが示された。しかし、超音波の出力は点計測値で有ることには変わりなく、また、標準偏差の値からもわかるように時間変動が大きいことから、本来、(a)の方法が好ましいことは言うまでもない

以上から、今後、複雑な地形でのシンチロメータ計測にあたっては、ゼロ面変位を考慮した高さの処理が重要なポイントになると思われる。しかしながら、現在のところシンチレーション法は領域平均顕熱が算定可能な唯一の測定手法であり、また複雑な地形上では座標の取り方が難しく、McMillenによる座標変換によってもまだ矛盾が生じる(J.C.カイル, 1993)という超音波風速温度計の欠点を補佐できる可能性もあるため、今後の発展が期待される。

IV. まとめ

1996年8月の観測から、都市上空の熱収支について以下の諸点を結論として得た。

1. 銀座オフィスビル街での熱収支の実体を観測より明らかにし、顕熱・潜熱・蓄熱が同程度に寄与していることを示した。
2. 都市は顕熱に匹敵する『人工的な潜熱』を出しており、原因として冷房による潜熱放出が有力な候補であることを示した。
3. 熱収支式から人工熱と、建物側面や窓などからの蓄熱量を算定し、休日と平日で異なる日変化パターンを示した。
4. 渦相関法によるビル屋上の顕熱は、シンチレーション法によるキャノピー上端の顕熱のトレンドとほぼ一致し、屋上面での計測値が持つ代表性を確認した。
5. 複雑な都市キャノピーにおけるシンチロメータ計測では、ゼロ面変位の算定がポイントとなることを示し、その決定手法を提案した。

引用文献

池田駿介・財津知享・渋谷昌史(1996):都市キャノ

図-9 高さ $z-d$ を2m, 5m, 8mに変化させた顕熱の時間変化

- ピーの夏期の熱構造に関する現地観測, 土木学会論文集, 35(539), pp. 167-175.
- 小元敬男・鯉谷 憲・巖 香 姫(1994): わが国の都市の近年の湿度変化, 水文学会誌, 7(2), pp. 106-113.
- 藤部文昭(1996): 東京都市域における降水量・降水頻度の増加傾向, 日本気象学会春季大会, 69, pp. 43.
- Yoshida, A. Tominaga, K. and Watatani, S (1990/91): Field measurements on energy balance of an urban canyon in the summer season, *Energy and Buildings*, 15-16, pp. 417-423.
- J.C.カイマル(1993): 微細気象学—大気境界層の構造と観測—, 技報堂出版.
- 神田学・西村修・福田忠弘・竹内邦良・清水源治(1996): 河川に沿った海風フロントの進入挙動, 水工学論文集, Vol. 40, pp. 243-248.
- 神田 学・鈴木 譲・森脇 亮(1997): 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, 土木学会論文集(投稿中).
- Kondo, J. and Yamazawa, H. (1986): Aerodynamic roughness over an inhomogeneous ground surface, *Boundary-Layer Meteorol.*, 35, pp. 331-348.
- Thiermann, V. (1992): A displaced-beam scintillometer for line-averaged measurements of surface layer turbulence, the preprint volume of Tenth Symposium on Turbulence and Diffusion, 29 Sept-2 Oct 1992, Portland, pp. 244-247.
- Vu Thanh Ca・浅枝 隆・柴原千造・藤野 毅・中村孝一・村上雅弘(1994): ストリートキャニオン内の壁・道路の温度分布, 土木学会水工学論文集, 38, pp. 413-419.
- 森脇 亮・神田 学・横山 仁(1997): 地表面温度を用いた土壌熱物性値および地中熱流量の逆推定法の提案, 水工学論文集, Vol. 41, pp. 1097-1100.

(1997年2月17日受付, 1997年4月25日受理)