

シンチレーション法を用いた多高度計測による 都市域の顕熱フラックス算出アルゴリズムの提案

飯野 秋成*, 塚本 健二**, 片野 広輝***

(平成14年10月31日受理)

A proposal of algorithm for estimation of sensible heat flux from urban area
by multi-altitudes measurement using scintillation method

Akinaru IINO*, Kenji TSUKAMOTO** and Hiroki KATANO***

The purpose of this study is to propose a method to measure sensible heat flux from urban surface by using mirrors with scintillation method in order to actualize for setting scintillometers in free place of urban areas. First, we proposed an algorithm for estimation of sensible heat flux from measured values by multi-altitudes measurement. Next, to evaluate the application of this Algorithm, system for multi-altitudes measurement is constructed and a measurement of sensible heat flux was performed on the paddy field. The measured values of sensible heat flux by gradient method and scintillation method almost agree, and this algorithm is showed to apply estimation of sensible heat flux. As a future prospect, we will evaluate the application of this algorithm on urban area and develop the method to determine constant flux layer.

Key words: sensible heat flux, scintillation method, multi-altitudes

1. はじめに

近年都市熱環境の分野では、都市域のヒートアイランドの実態把握に関する研究が盛んに行われている。都市域における気温の分布の実態を把握するだけでなく、都市計画的な手法や建築計画的な方法とヒートアイランドの因果関係を明らかにしようとする立場に立てば、都市地表面からの発生熱量、特に顕熱フラックスを高精度で計測する方法の開発は重要な課題の1つである。

都市域からの発生する顕熱フラックスを計測する手法として、建物屋上などに設置した超音波風速温度計による風速の時間変動から、渦相関法を用いて求める方法がしばしば用いられている^{1)~3)}。設置点における顕熱フラックスは高精度で計測することは可能であるが、都市計画的な手法と顕熱フラックスの関係を解析するという観点からは、計測値の空間代表性を確保できる設置場所の選定など解決すべき課題は多い。

このようなことから、レーザ光の屈折率の変動を用いて空間平均的な発生熱量を計測するシンチレーション法が注目されつつある⁴⁾。しかし、シンチレーション法では修正粗度高さを表すゼロ面変位(d)をパラメータとしてあらかじめ入力する必要性が生じ、dの設定に

* 建築学科 助教授

** 大学院工学研究科 大学院生

*** 工学部 建築学科

よっては顕熱フラックスの値が大きく変化することが指摘されている⁵⁾。また、 d を求めるには接地境界層付近で2高度以上の計測データを得る必要があるが⁵⁾、シンチロメータの送信機と受信機を市街地上空で同一高さに設置しなければならず、シンチロメータの設置場所の確保も問題になる。

筆者らは、多層銀薄膜ミラーを用いることによってレーザー光のパスを偏光のずれがないまま任意の方向に設定できることに着目した。既に、レーザー光を反射させるときのミラーへの入射角度の問題に注目して、レーザー光の入射角度のずれによる顕熱フラックスの影響を評価し、レーザー光の入射角度のずれが小さい場合は顕熱フラックスの値に影響がないことを確認している⁶⁾。

本研究は、シンチレーション法において市街地からの顕熱フラックスを計測する方法を提案し、その可能性を考察することを目的とする。本報では、多高度計測から顕熱フラックスを算出するアルゴリズムを提案する。さらに、顕熱フラックス計測のための高度切り替えシステムを製作し、水田域で実測を行い提案した顕熱フラックスを算出するアルゴリズムの検証を行う。

2. 多高度計測から顕熱フラックスを算出するアルゴリズムの提案

接地境界層内部では、地表のごく近傍を除いて鉛直方向のフラックスが一定な「コンスタントフラックス層 (CFL)」が存在すると仮定できる。したがって、CFL内の2高度で計測したフラックスは一致すると仮定することで、この条件を満たす顕熱フラックスとゼロ面変位 d を決定することができる。

森脇らは、2高度計測から顕熱フラックスとゼロ面変位を算出するアルゴリズム⁵⁾を提案している。森脇らはこのアルゴリズムを適用する条件としてシンチロメータを2台用いて同時計測で行うこととしているが、市街地にシンチロメータを複数台設置することは困難であり、またコストの面でも問題になる。

本研究では、1台のシンチロメータの高度を切り替えながら計測し、高度を切り替える前後の計測データを、①2高度を同時に計測した、②顕熱フラックスが一定である、と仮定して、 d を変えていきながら2高度の顕熱フラックスが一定になるまで計算を行い、顕熱フラックスと d を求める方法を提案する。本手法のアルゴリズムを Fig.1 に示す。

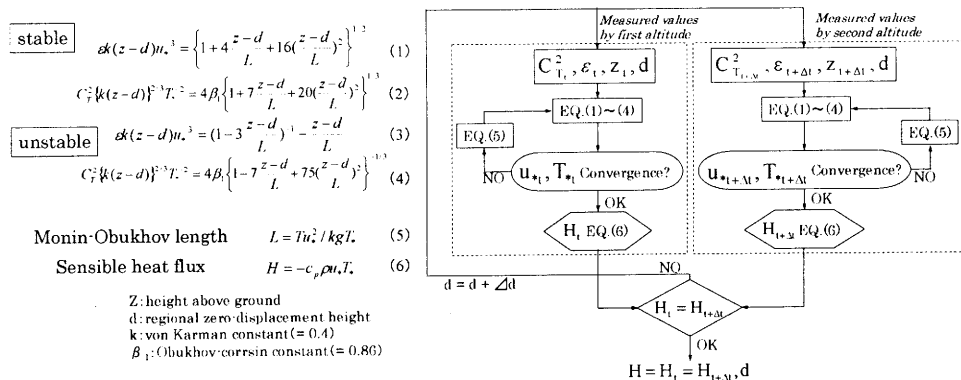


Fig.1 Algorithm for estimation of sensible heat flux from multi-altitudes measurement.

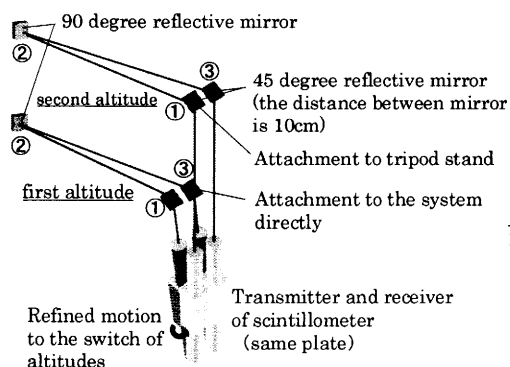


Fig.2 Method of multi-altitude measurement.

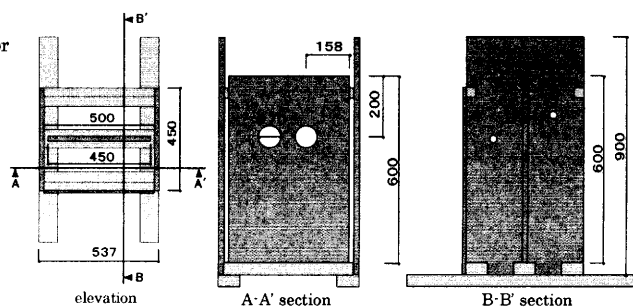


Fig.3 Design for multi-altitude measurement.

3. 顕熱フラックス計測システムの製作と検証実験

3.1 顕熱フラックス計測システムの製作

1台のシンチロメータで、高度を切り替えながら計測するため、レーザ光の軸合わせを容易に、且つ高度切り替えを効率よく行わなければならない。そこで計測システム製作にあたりシンチロメータを縦に設置することにより微細な動作でダイナミックな高度の変更が可能な方法を考えた。また、クロストークによる計測値への影響評価の結果⁶⁾を踏まえ、クロストークの影響が最小限であった45°反射ミラーの距離が10cmになるようなミラーの設置方法を考え、計測システムの製作を行った。Fig.2に設計システムにおける基本的なシンチロメータおよび反射ミラーの設置と高度切り替え方法、Fig.3に設計した計測システムの設計図を示す。

1高度目と2高度目の切り替え時にレーザ光の受信量に変動がないか動作確認を行ったところ、高度切り替えは1~2秒で完了し、くり返し切り替えを続けてもレーザ光の軸ずれなどの問題は全くおきなかった。

3.2 検証実験の概要

第2章で提案した顕熱フラックスを算出するアルゴリズムを検証するため、平成14年5月2日の13:30~20:30に新潟工科大学近くの水田で顕熱フラックス計測システムを用いて1mと2mの2高度の計測を行った。計測状況をFig.4に示す。計測地点では、無灌水状態の水田は1つで、周りは灌水状態の水田であった。また、水田全体では75%が灌水状態で、25%が無灌水状態であった。

計測中の気象観測として異なる5高度(0.3m, 0.6m, 1.0m, 1.5m, 2.1m)に小型温湿度計、放射温度計を用いて気温、相対湿度、地表面放射温度を計測し、目視により雲量を計測した。また日射計、熱流計を用いて日射量、地表面に入射する日射量、地表面反射日射量、地中熱伝導量の計測を行った。顕熱フラックスは、1) 3次元超音波風速温度計を用いて計測したデータから渦相関法により求める方法、2) 小型温湿度計

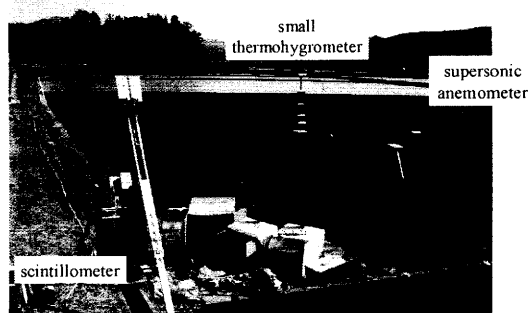


Fig.4 Configuration of the paddy field.

による5高度の気温、3次元超音波風速温度計による風速から傾度法で求める方法、3) 前項で製作したシステムを用いて第2章で提案した多高度計測から求める方法、の3通りで計測した。なお、超音波風速温度計は土面がぬかるんだ状態で、1m以上の高さでは安定しなかったため、1mとした。

計測日の気象条件をFig.5に、計測日の風向・風速をFig.6に示す。快晴で、日射量は計測開始直後が一番高く850W/m²を超え、水面の放射温度は外気温と土面の放射温度より2~4℃高い値を示した。風は17時まで3m/s以上と強い南風が吹いていたが、17時以降は弱くなった。

3.3 水田の熱収支と各計測法による顕熱フラックスの関係

Fig.7に無灌水状態の水田の熱収支を10分ごとの平均値で示した。ここで、顕熱フラックスは渦相関法、地中熱伝導率は熱流計で計測した値を用いている。日中における潜熱フラックスは大きく、顕熱フラックスの約3倍になっている。これは灌水状態の水田からの蒸発散により大きくなっていると考えられる。

傾度法で、普遍関数が適用できる平均時間を割り出すため、Fig.8に渦相関法との顕熱フラックスの対応をとった。各平均化時間とも渦相関法より傾度法のほうが30W/m²以上大きい。これは、傾度法では計測機器の設置方法により広範囲の影響を受けやすいため、顕熱フラックスが大きくなっていると考えられる。関数式に当てはめてみると、式は各平均時間ともほぼ一致していて、相関係数は平均化時間が長くなるほど大きくなっている。

次に、相関係数と渦相関法による顕熱フラックスの平均時間内の変動幅の関係をFig.9に示す。まず、相関係数だけを見ると、平均時間が10分以上では相関係数は高くなり、平均時間が5分未満では相関係数は低い。このことから、顕熱フラックスの平均時間が長いほうが渦相関法

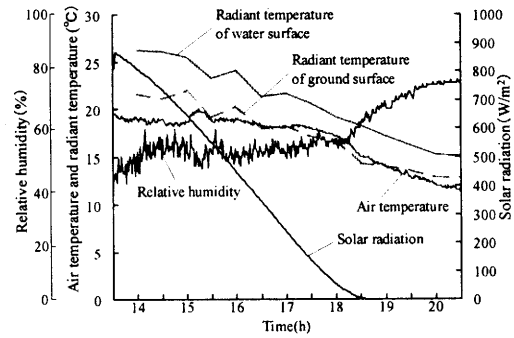


Fig.5 Weather conditions.

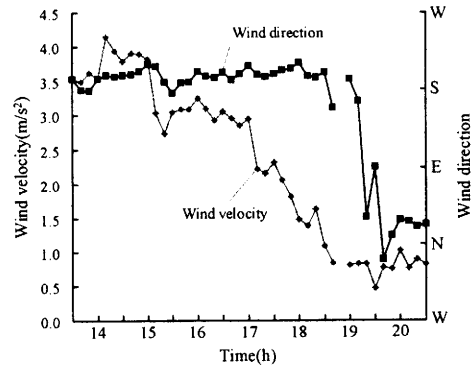


Fig.6 Wind velocity and wind direction.

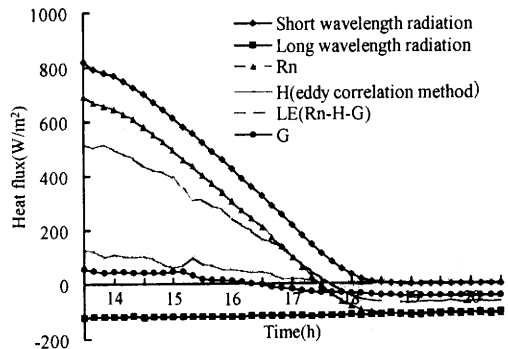


Fig.7 Heat balance on the paddy field.

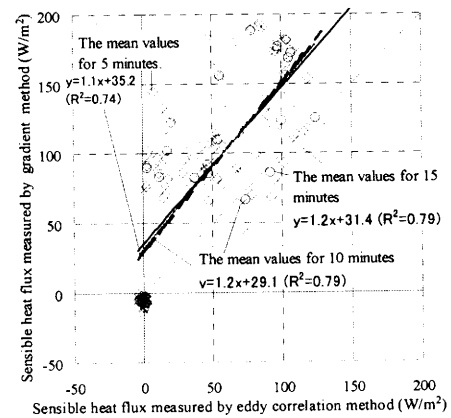


Fig.8 Comparison of some calculated values of sensible heat flux measured by eddy correlation method and gradient method.

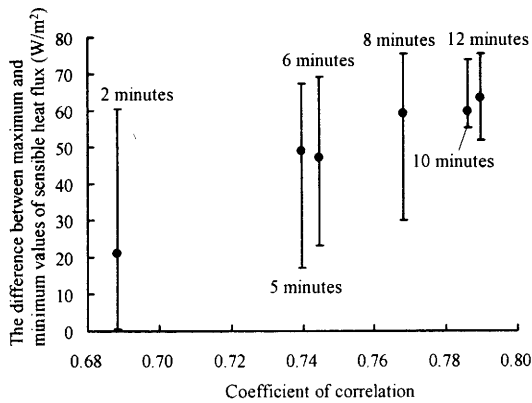


Fig.9 Relation between coefficient of correlation and the difference between maximum and minimum values of sensible heat flux .

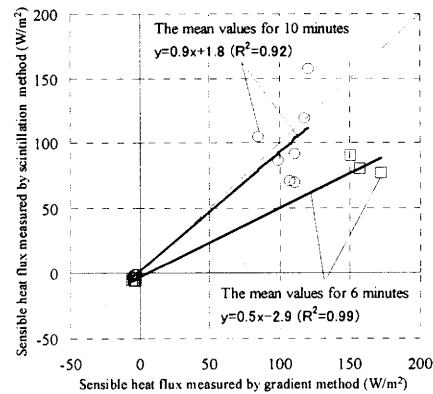


Fig.10 Comparison of some calculated values of sensible heat flux measured by gradient method and scintillation method.

と傾度法の対応がよくなることがわかる。しかし、シンチレーション法では、平均時間が長くなるほどシンチロメータの高度を切り替えた前後で顕熱フラックスを同じとみなすことができなくなる可能性があるため、渦相関法による平均時間内における顕熱フラックスの変動の最大と最小の差を Fig.9 で見た。顕熱フラックスの大きい変動は平均時間を長くしてもほとんど変わらない。顕熱フラックスの小さい変動は平均時間が6分以内のときは抑えられているが、平均時間が長くなると大きくなり、シンチロメータに不利に働くと考えられる。

そのため、相関係数が高く、かつ顕熱フラックスの小さい変動の影響が小さくなるように、シンチロメータの平均時間を6分と10分として、傾度法による顕熱フラックスとシンチレーション法による顕熱フラックスを比較した結果を Fig.10 に示す。傾度法の精度が確保されている10分ごとの平均値で、傾度法で求めた顕熱フラックスとシンチレーション法で求めた顕熱フラックスはほぼ一致し、本研究で提案した顕熱フラックスを算出するアルゴリズムを適用できることを示した^{注)}。

4. 今後の課題と展望

今後の展望としては、提案したアルゴリズムの都市域への応用や計測中のデータを用いたリアルタイムで確認できる方法の考案などの可能性が考えられる。具体的な内容と実現までの課題を以下に示す。

4.1 リモートコントロールシステムの開発

水田域の計測では、気象条件の変化によりレーザー光の軸ずれは不可避で完全に排除できないことも明らかになった。都市域での計測を考えると、レーザー光の軸がずれたときに任意の位置で速やかに軸の修正が可能な方法が求められる。現在、リモートコントロールを用いてミラーの角度を微調整し、軸の修正が短時間でできるようなシステムを Fig.11 に示す試作品を製作して検討中である。リモートコントロールシステムが実用化すれば、システムの1km以内であれば、1人で任意の位置で微調整が可能になる。

4.2 リアルタイムデータ処理システムの開発

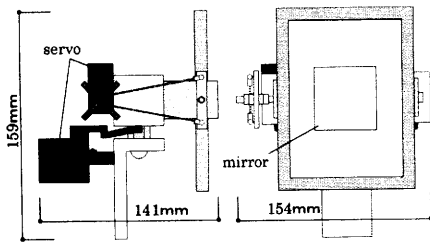


Fig.11 Prototype of adjusting system of mirror

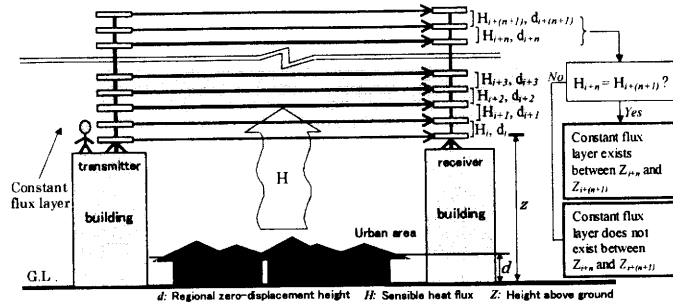


Fig.12 Concept of multi-altitude measurement

第2章で提案した多高度計測から顕熱フラックスを求めるアルゴリズムは、時間・空間的に安定した CFL の存在が前提となる。しかし、比較的不均一な粗面である都市域では、CFL の仮定が成立する高度の決定が難しく、条件によって成立しないこともありうる。このような場所で、精度の高い顕熱フラックスの値を得るためには、CFL の仮定が成立するかどうかを、シンチロメータの計測データの処理によってリアルタイムに確認できる方法が必要となる。

筆者らは、CFLを確認する方法は、Fig.12のように多高度を計測することによって行う方法を構想している。具体的には、1～n高度まで高度を切り替えながら測定し、高度を切り替える前後の2高度をそれぞれ多高度計測から顕熱フラックスを算出するアルゴリズムをもとに顕熱フラックスとゼロ面変位の算出を行う。この結果から各高度における顕熱フラックスをグラフ化し、ある高さと領域において顕熱フラックスが等しくなるとすると、その領域をコンスタントフラックス層の領域として断定できると考える。この結果をもとに実測現場での測定方法へフィードバックすることによって、適切な条件で測定を行うことができるため、より信頼度の高いデータを得ることができると考えている。

本研究は、平成13年度科学研究費奨励研究(A)(課題番号12750535)、および平成13年度内田エネルギー科学振興財団研究助成費(No.13-1-27)の補助を受けて行ったものである。

注) 平均時間が6分の顕熱フラックスに対して平均時間が10分の顕熱フラックスのほうがばらつきは大きくなっている。平均時間が10分の場合、1mと2mで計測した各5分間の顕熱フラックスを一致しているものと仮定しているため、10分間の計測時間内に気温および顕熱の下降トレンドが影響していることも考えられたが、今回の実験データでは判断できなかった。測定値のばらつきについては今後の課題である。

引用文献

- 1) 大塚順基, 中村泰人, 梅宮典子: 大気乱流測定に基づいた建物屋上における気流性状, 日本建築学会計画系論文集, 第514号, pp.27-34, 1998年12月
- 2) 吉田伸治, 村上周三, 成田健一他: 団地内キャニオン空間内における夏期の屋外温熱環境の実測, 日本建築学会計画系論文集, 第552号, pp.69-76, 2002年2月
- 3) 宮田敏雄, 石野久彌: 渦相関法とシンチレーション法を用いた都市空間の熱流特性に関する研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 環境工学I, pp.931-932, 2002年8月
- 4) Thiermann, V., The measurement of turbulent surface-layer fluxes by use of bichromatic scintillation, Boundary-Layer Meteorology, Vol.58, pp.367-389, 1992.
- 5) 森脇 亮, 鈴木 謙, 神田 学, 三上正男, 岩倉 晋: シンチロメータによる空間平均熱フラックス測定に関する基礎的実験, 水工学論文集, 第43巻, pp.91-96, 1999年2月
- 6) Akinaru Iino and Kenji Tsukamoto: Measurement of sensible heat flux from rough surface with scintillation method, SICE2002 proceedings, Osaka, Japan, WA-06, pp.2477-2480, 2002.8.