

市街地上空における多高度計測のための レーザ光反射システムの製作 —シンチレーション法の応用による市街地の顕熱 フラックスの計測方法の開発に関する研究—

飯野 秋成*, 藤縄 敦**, 石田 浩之***

(平成 13 年 10 月 31 日受理)

Construction of laser beam reflecting system for measurement of two or more
altitudes over urban area
—Study on development of measurement method of sensible heat flux from
urban area with scintillation method—

Akinaru IINO*, Atsushi FUJINAWA** and Hiroyuki ISHIDA***

The purpose of this study is to propose a method to measure sensible heat flux from urban area by using mirrors in the scintillation method. It is thought that arbitrary measurement paths can be made by reflecting laser beam in measurement of urban area. In this paper, measurement in which laser beam was reflected 3 times was performed in the field. Consequently, crosstalk becomes large as an incidence angle shifts, and influence appeared with the measurement result of sensible heat flux. In this case, the path of the laser beam of the perpendicular direction cannot be disregarded, either. Keyword: scintillation method, sensible heat flux, regional zero-displacement height, measurement of two or more altitudes, laser beam

1. はじめに

市街地におけるヒートアイランド現象を理解するうえで、市街地からの熱フラックスを計測することは重要である。特に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が¹⁾、現状では平均的な地表面からの高さをパラメータとして入力する必要がある。すなわち、信頼性の高い顕熱フラックスの値を得る面で、地表面の粗度であるゼロ面変位の与え方が問題となる。市街地において修正粗度高さをあらかじめ与えなければならないことはきわめて不利である。また、市街地において顕熱フラックスを計測するには、土地被覆もさまざまであり、建物形状も複雑となり、シンチロメータの設置場所が制約されてしまうことが問題になる。

本研究は、シンチレーション法においてミラーを利用することにより市街地からの顕熱フラックスを計測する方法を提案し^{2) 3) 4)}、その可能性を考察することを目的とする。コンスタントフラックス層内の2高度の計測結果が得られれば、顕熱フラックス H とゼロ面変位 d を同時に算定できる可能性があることがすでに報告されているが^{5) 6)}、レーザ光を

*工学部建築学科 助教授

**大学院工学研究科 大学院生

***工学部建築学科

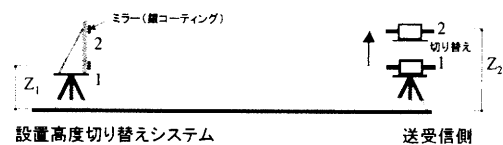
反射することができれば、さらに、市街地において任意の計測パスを作り出せる。本報では、シンチロメータの計測に最大3枚のミラーを用いて顕熱フラックスを計測するシステムを製作し、シンチロメータは2本のレーザ光を発信して顕熱フラックスを求めることから、レーザ光を反射させるときのミラーの入射角度の問題に注目し、これを評価した結果を報告する。

2. 研究の基本的考え方

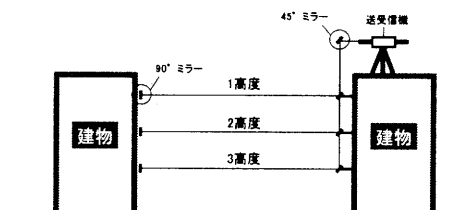
レーザ光を反射させて多高度計測を行う方法 (Fig. 1) として、まずシンチロメータの送信機と受信機を同一のプレートに取り付け、プレートの高さを切り替え、複数高度に貼り付けた 90° 反射のミラーで反射させて計測する方法が考えられる (a)。しかし、この方法はシンチロメータそのものを動かすことになるので、高さの切り替えも容易ではなく、レーザ光の軸を合わせるのが非常に難しい。他には、シンチロメータの送受信機は固定で、 45° 反射ミラーと 90° 反射ミラーを組み合わせ、レーザ光を高さ方向に反射させて複数高度の計測を行う方法が考えられる。これは 45° 反射ミラーで高さ方向および水平方向の反射を行い、複数高度に貼り付けた 90° 反射ミラーで反射させて計測を行う方法である (b)。この方法は市街地において計測を行うに当たり、適用が可能であると考え、合計5回反射させることによりレーザ光の軸を合わせるのが難しくなる。

上記のような方法を踏まえ、本研究では 45° 反射ミラーと 90° 反射ミラーの組み合わせを使い、シンチロメータの送受信機は同一の三脚に取り付け、レーザ光を① 45° 、② 90° 、③ 45° の順に3回反射させて計測する方法 (Fig. 2) を用い、この方法が実用的であり、基本的な方法であると考えた。 45° および 90° の反射であるので楕円偏光になりやすく、微調整も容易である。ここで考慮しなければならないのは、 45° ミラーを2枚用いることである。これは、送信機から発信されるレーザ光の反射と受信機に返す反射が 45° ミラー1枚で行う場合、軸が重なり合わせずらく、レーザ光の確認もしづらいためである。

このことから、ミラーを用いて市街地において計測を行うにあたり、レーザ光の 90° ミラーの入射角度が多少変わってしまうこと、つまり2本のレーザ光の crosstalk は避けられないものと考え、本報では、この crosstalk に注目して計測を行った。



(a) Method to reflect by the upper and lower sides of scintillometer.



(b) Method to make reflect in the height direction and carry out two or more advanced measurement.

Fig.1 Example of the survey concept of the measurement of two or more altitudes in the urban area using the mirror.

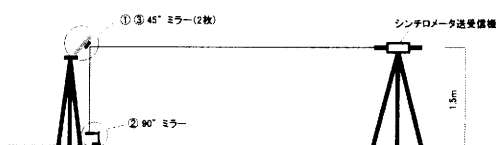


Fig.2 Specification pattern of a fundamental mirror.

3. crosstalk による計測値への影響に関する実験の方法

3. 1 ミラーの仕様と固定の方法

本研究では、ミラーは面精度の高い多層銀薄膜で 45° 反射と 90° 反射のものを用いた。 45° 反射のミラーは多層膜を付けて無偏光ミラーとしての反射率がレーザ光波長 $0.68\mu\text{m}$ で 99.5% となり、基本的に 45° の入射角の場合に楕円偏光にならないようにチューニングされている。 45° および 90° 反射ミラーは板枠で固定されたガラスに貼り付け、裏側から調節ねじで前後左右に角度を微調整できるようにした。三脚には万力で取り付け、固定できるようにした。

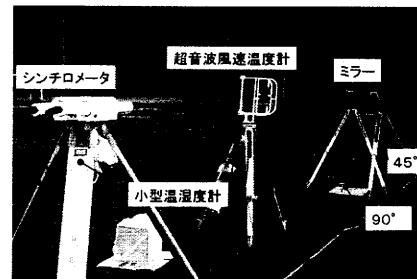
3. 2 機器設置場所及び気象条件

2001 年 10 月 3 日深夜から翌 4 日早朝にかけて、本研究で製作したミラーを用いたレーザ光反射システムを使って、フェッチが十分と考えられる新潟工科大学グラウンド（新潟県柏崎市）において Fig. 2 および Fig. 3 で示した方法でレーザ光を 3 回反射させた計測の検証実験を行った。Picture. 1 に計測場所の様子を示す。レーザ光を反射させるにあたり、本報では、レーザ光の確認のしやすさおよびレーザ光の軸の合わせやすさを考慮して夜間に検証実験を行った。この時間帯は、日中から引き続き雲は少なく、晴れの天候であった。

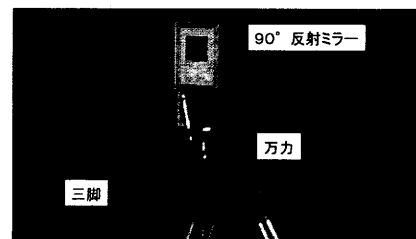
ミラーを用いた計測と平行して、3 日の 19:00 から翌 4 日 6:00 まで小型温湿度計を用いて、気温および相対湿度を計測した。気温は 10°C 弱、相対湿度は 90% 以上という条件下であった。また、3 日の 22:00 から 15 分間隔で放射温度計を用いてグラウンドの地表面放射温度を計測し、雲量は目視により確認した。

3. 3 通常計測と 1 回 (90°) 反射計測の方法

3 日の 21:28 から 21:54 までシンチロメータの通常計測を行った。シンチロメータの設置高さは 1.5m とし、送受信機間のパスは 50m で計測を行った。顕熱フラックスの計測を行う前に、バックグラウンド計測を行い、2 本のレーザ光の crosstalk を求めた。通常計測終了後、 90° 反射ミラーを 1 枚用いて（設置高さ 1.5m）、23:16 から 23:46 まで 1 回反射計測を行った（Fig. 4）。シンチロメータの送受信機は同一の三脚に取り付け、送受信機から 90° 反射ミラーまでの距離は 25m、トータルパスは 50m で計測を行った。



Picture.1 Situation of a measurement place.



Picture.2 Laser beam (90 degrees) reflecting system.



Picture.3 Situation of scintillometer.

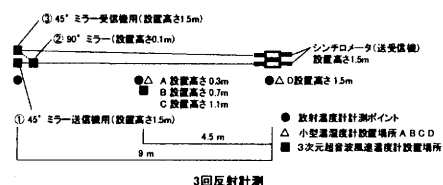


Fig.3 Plan of scintillometer and a mirror (plane view).

(Picture. 2, Picture. 3). 計測を行う前に、同様にバックグラウンド計測を行い、crosstalk を求めた。90° 反射計測は、入射および反射角度が垂直なので crosstalk による影響がほとんどないと考え、通常計測とほぼ変わらないことを確認するために行った。また、シンチロメータから得られた結果を検証するために超音波風速温度計による計測（設置高さ 1.5 m）を同時に行った。

3. 4 3回反射計測の方法

4 日の 2:28 以降に、45° 反射ミラー 2 枚と 90° 反射ミラー 1 枚を用いて、45° 反射、90° 反射、45° 反射の順でレーザ光を 3 回反射させた計測を 5:42 まで行った。1 回反射計測と同様にシンチロメータの送受信機は同一の三脚に取り付け、高さは 1.5m、送受信機から 45° 反射ミラーまでの距離は 9m、トータルパスは 18m で計測を行った。地面上に置く 90° 反射ミラーまでの高さは 10cm で、45° 反射ミラーから 90° 反射ミラーまでの高さ方向の距離は 1.4m であった。

3 回反射計測は、レーザ光反射システムの 2 枚の 45° 反射ミラー間の距離 h (Picture. 4) を 10cm から 60cm (Picture. 5) まで 10cm ずつ距離を広げて、90° 反射ミラー (Picture. 6) のレーザ光の入射および反射角度を変えて計測を行った。それぞれのミラー間の距離で計測を行う前に、バックグラウンド計測を行い、crosstalk を求め、顕熱フラックスの計測はそれぞれ約 6 分ずつ行った。また、同様にシンチロメータから得られた結果を検証するために超音波風速温度計による計測（設置高さ 1.5m）を同時に行った。crosstalk を求める手順を Fig. 5 に示す。

4. 結果と考察

4. 1 顕熱フラックスの状況

Fig. 6 によると、グラウンドの気温は最高で 15°C 程度、計測中はほぼ 10°C に近い状態で、相対湿度はほぼ 90% を超え、計測中は 95% に近い状態であった。気温と比較して、地表面放射温度は計測を開始した 3 日の 22:00 から 4 日の 2:00 ごろまでは気温より平均約 1.4°C 高い値を示し、若干顕熱フラックスは上向きであった。2:00 から 4:30 ごろまでは地表面は気温より平均約 0.5°C 低く、下向きの顕熱フラックスで

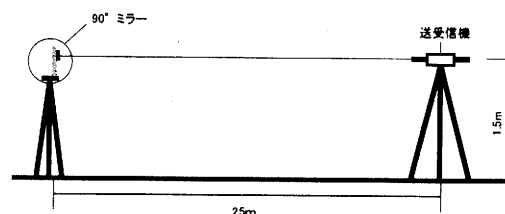
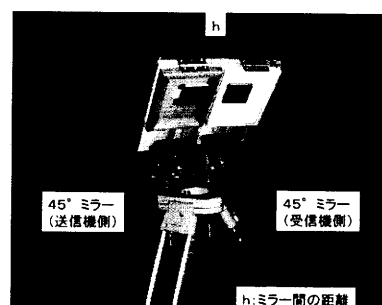
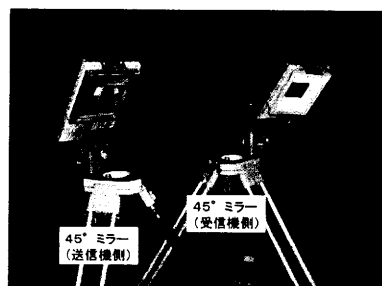


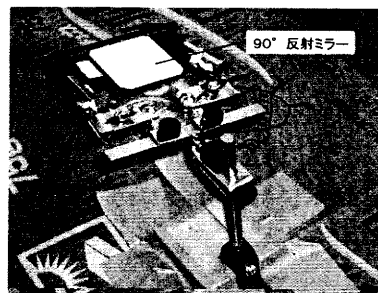
Fig.4 1 time (90 degrees) reflection.



Picture.4 Laser beam (45 degrees) reflecting system.



Picture.5 Situation at the time of 60 cm of the distance between 45 degree reflective mirrors.



Picture.6 90 degree reflective mirror (perpendicular direction).

あった。

4. 2 入射角度と crosstalk の関係

Fig. 7 の入射角度と各 channel の crosstalk の関係によると、シンチロメータの通常計測と 90° 反射ミラーによる 1 回反射計測の crosstalk はほとんどなく、channel<1>および channel<2>共に 1% に満たない。両者の計測にほとんど違いはなかった。すなわち、入射角度がずれなければ、crosstalk の影響はないといえる。 45° 反射ミラー間の距離が 10cm のとき、crosstalk は channel<1>で 0.8%，channel<2>で 1.1% になる。 90° 反射ミラーの入射角度が 2° ずれても crosstalk に大きな変化はみられなかった。しかし、 45° 反射ミラー間の距離を広げていくと crosstalk は大きくなり、例えば 90° 反射ミラーの入射角度が約 10° ずれたとき他の channel に 20% 影響を及ぼしていた。

4. 3 crosstalk による顕熱フラックスへの影響

Fig. 8 に、シンチレーション法と渦相関法による顕熱フラックスを、それぞれ 2 分平均で比較した。通常計測と 90° 反射ミラーによる 1 回反射計測で計測した顕熱フラックスは計測時間中の平均値と標準偏差の差で示している。

まず、渦相関法の顕熱フラックスでみると、通常計測時と 1 回反射時には上向き 1.2W/m^2 、3 回反射時には下向き -1.2W/m^2 程度でありほぼ中立に近い状態であるといえる。シンチレーション法では、上向きの顕熱フラックスと下向きの顕熱フラックスの両方の値で示している。通常計測の顕熱フラックスと 1 回反射計測の顕熱フラックスに大きな差はなかった。

次に、3 回反射計測の 45° 反射ミラー間の距離が 10cm のとき、シンチレーション法による顕熱フラックスの指示値は上向きで 12.9W/m^2 、下向きで -12.8W/m^2 あり、絶対値に差はほとんどなかった。 45° 反射ミラー間の距離が 20cm のとき、6 分の計測の間、上向きの顕熱で 9W/m^2 前後、下向きの顕熱で -9W/m^2 前後であり、10cm のときに比べ、0 に近づいている。 45° 反射ミラー間の距離が 30cm のとき、渦相関法の結果に一番近くなっている。

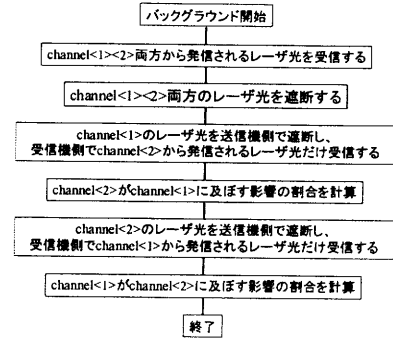


Fig.5 Procedure of calculating crosstalk by the background.

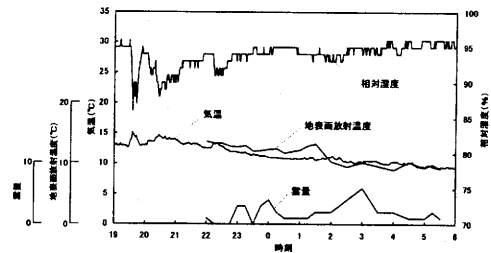


Fig.6 Weather condition.

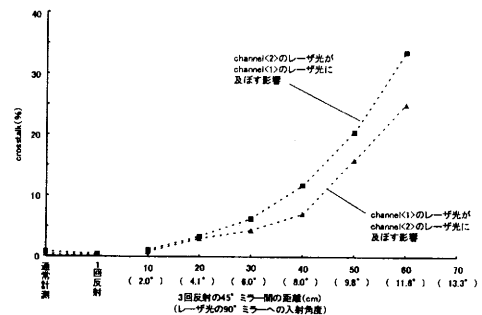


Fig.7 Crosstalk of each channel of each step of incidence angle.

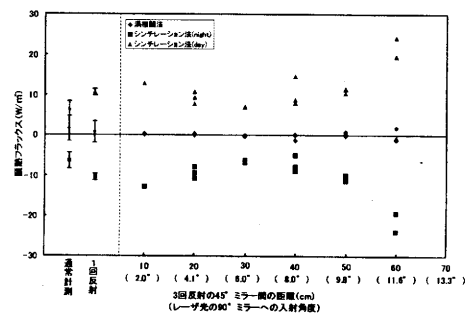


Fig.8 Influence on the sensible heat flux by crosstalk.

45° 反射ミラー間の距離が 10~50cm のときに比較して、60cm のときは上向きの顕熱フラックスで $20\text{W}/\text{m}^2$ 、下向きの顕熱フラックスで $-20\text{W}/\text{m}^2$ より絶対値が大きくなっている。これは、45° ミラー間が 50cm 以上で計測を行った場合、入射角度が大きくなり、楕円偏光になって顕熱フラックスの値に影響を及ぼしてしまったと考えられる。例えば、入射角度が 11.6° ずれたとき crosstalk が 20% 以上と顕著になり、顕熱フラックスの結果に影響を及ぼしてしまう。

45° 反射ミラー間の距離が 30cm (入射角度 6.0°) のときよりも、距離が 10cm (同 2.0°) のときの方が顕熱フラックスの絶対値が大きくなっている。距離が 10cm の場合、45° 反射ミラーから 90° 反射ミラーには鉛直方向にレーザ光を反射させているため、鉛直方向のレーザ光のパスの影響があるためであり、また距離が 30cm の場合、crosstalk による影響と鉛直方向のレーザ光のパスの影響が相殺したため、顕熱フラックスの絶対値が小さくなったとも考えられる。

5. まとめ

本報では、シンチレーション法にミラーを利用して、レーザ光を 3 回反射させたときの入射角度の違いによる顕熱フラックス計測への影響評価を行って、以下の知見を得た。

- 1) 45° 反射ミラー間の距離が 50cm 以上のとき (90° 反射ミラーの入射角度が 9.8° 以上のとき) crosstalk が顕著に大きくなり、顕熱フラックスの値に大きく影響した。
- 2) 本実験における機器の配置では、鉛直方向のレーザ光のパスも crosstalk 同様に、計測値に影響する要素として無視できなかった。

今後は、顕熱フラックスの絶対値が大きいと考えられる時間帯に、一定の計測パスに対して、鉛直方向にレーザ光を反射させたときのパスを変えながら計測を行い、顕熱フラックスの計測結果への影響を定量的に評価する予定である。

本実験は、平成 13 年度科学研究費奨励研究 (A) (課題番号 12750535) の補助を受けて行った。

引用・参考文献

- 1) 神田 学, 森脇 亮ら: 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, 1999 年 2 月
- 2) 藤縄 敦, 飯野 秋成, 富田裕章: シンチレーション法におけるレーザ光の反射を利用した地表面熱フラックスの計測, 日本建築学会北陸支部研究報告集, 第 43 号, pp. 271-274, 2000 年 7 月
- 3) 藤縄 敦, 飯野 秋成, 富田裕章: 都市地表面熱フラックスの計測におけるシンチレーション法の応用に関する研究その 1 ミラーを利用した計測システムの開発のための基礎的検討, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 環境工学 II, pp. 13-14, 2000 年
- 4) 藤縄 敦, 飯野 秋成: 市街地の顕熱フラックスの計測のためのシンチレーション法におけるレーザ光反射システムの製作, 日本建築学会第 24 回情報・利用・技術シンポジウム論文集, 2001 年 12 月
- 5) 富田 裕章, 飯野 秋成: 住宅地における熱フラックスの測定に関する研究, 日本建築学会北陸支部研究報告集, 第 42 号, pp. 157-158, 1999 年 7 月
- 6) 富田 裕章, 飯野 秋成: 実測調査に基づく市街地からの発生熱量のデータベース化に関する研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 環境工学 I, pp. 739-740, 1999 年