

非一様な地表面上における 分散法を用いた顕熱フラックスの推定

Estimation of Sensible Heat Flux with a Variance Method Over an Inhomogeneous Surface

川久保典昭*・杉田倫明**

Noriaki KAWAKUBO and Michiaki SUGITA

I はじめに

1) 従来の研究

地表面からの正確な蒸発散量を算出することは水循環を研究する上で重要な項目の一つである。蒸発散量は顕熱フラックスから熱収支法を用いることにより算出できる。分散法は標準偏差の観測値からモーン=オブコフ相似則を用いて地表面フラックスを算定する方法で、スカラー量の分散を求めれば良いので渦相関法に比べて測定装置の配置の正確さが要求されない、測定装置の設置が容易であるなど様々な利点を持つ。また、分散法が確立されれば分散法により潜熱を求めることが可能で、そこから直接蒸発量を求めることもできる。

Tillman(1972)は顕熱フラックスを気温の標準偏差から算出する分散法を導き出した。そして塩湖と海岸の2地点で大気の安定度が $0.5 < -z/L < 60$ (ここで z は高さ、 L はオブコフ長である)の範囲において分散法が成り立つことを示している。Wesely(1987)は様々な分散法を用いたフラックスの算定を行い非一様な地表面上での分散法の適用には疑問があるとしている。Lloyd et al.(1991)は西アフリカの4つの異なる地表面上で渦相関法と分散法から求められた顕熱フラックスを比較し、それらが良い相

関を示していることからすべての地表面上において分散法が適用できると結論づけている。浅沼ほか(1997)は平坦な松林上で航空機からの顕熱フラックスの算出を試み、それが風速の鉛直成分と温位に関して成り立つことを示した。

以上のように様々な研究報告から分散法の顕熱フラックスへの適用が示されているが、多くは均一な地表面上で行われた観測であり、複雑な地表被覆を有する広域陸地面での研究例は少ない。

2) 研究の目的

茨城県つくば市において1992年の夏に地表面から大気へのフラックスと表層土壌水分の測定を目的とした観測が行われた(杉田ほか、1993)。本研究ではこの観測時に得られたデータの一つである気象研究所気象観測鉄塔に設置されている超音波風速計による観測値を分散法を用いて解析する。つくば市周辺は都市化が進み、住宅や田畑、林などの様々な地表被覆が混在しており、非一様な地表面上での分散法の適用を比較・確立することを目的とする。

II 研究地域の概要

研究対象地域は茨城県つくば市周辺のおよそ20 km四方の地域である。地形は概して平坦であり、

*筑波大学第一学群自然科学類(現筑波大学教育研究科)

**筑波大学地球科学系・水理実験センター

北東部に桜川低地、南西部に小貝川低地が位置する。また、東部には霞ヶ浦がある。中央部には筑波台地が存在するがいくつかの小河川によって形成された低地もある。低地と台地の標高差はおよそ20mである。低地は主に水田に利用されているが、台地上には林、荒地、人口建造物等が混在する。

III 観測とデータ

観測データは1992年8月12日から24日のものを用いる。これは1992年8月4日から24日にかけて茨城県つくば市において行われたIGBP (International Geosphere - Biosphere Programme) /BAHC (Biospheric Aspects of the Hydrological Cycle) のプログラムの一つとして、大気・陸地面集中観測、TABLE (Tsukuba Atmospheric Boundary Layer Experiment) 92の観測で得られたデータである。本研究で主に用いるデータは気象研究所が所有する高さ213mの気象観測鉄塔に設置してある6高度(10,25,50,100,150,200m)の超音波風速計(Kaijo, DAT-300)から得られた観測データであり、風速の3成分と温度が0.1秒間隔で収録されたものである。また、それぞれの高度に取り付けられた温度計、湿度計の1分間隔で得られたデータの1時間平均値も用いた。さらに気圧のデータとして、気象研究所から約8km離れたところにある水理実験センターの高度5mで計られた値も用いている。これは1時間平均値であるが、本研究では8時から9時の平均気圧を9時の値として扱っている。ただし、超音波風速計の100mの高度については異常な値が見られたため使用しなかった。データは気象観測鉄塔に3本あるブーム(南、北東、北西の3方向)のうち、主風向に向いた1本のブーム上の超音波風速計によって測定されたものである(Hanafusa, et al., 1980)。主風向の変化に伴って使用される測器が変わるので、そのようなときのデータは省いた。また、分散法では定常状態において成り立つので、朝夕の昇温時、降温時のデータも省いた。さらに気温と鉛直風速のグラフを作り、明らかにおかしなものも省いた。最終的にある時刻の前後30分が使用可能なデータだけを選別して解析を行った。

また、データの一部はHiyama(1995)のものを用いている。

IV 研究方法

1) 1/3乗則

モーニン=オブコフ相似則 (Obukhov, 1946; Monin and Obukhov, 1954) は定常で水平一様な接地層における乱流場を表現する手段である。分散に関するモーニン=オブコフ相似則では、気温の標準偏差は、以下のように無次元化された z/L の普遍的な関数として表される。

$$\frac{\sigma_\theta}{T} = \phi\left(\frac{z}{L}\right) \quad (1)$$

ここで、 z :高度、 T : $T = -H/pC_p u_*$ 、気温のスケール、 u_* :摩擦速度、 H :顕熱フラックス、 p :空気密度、 C_p :オブコフ長であり、また L は、

$$L = \frac{-pC_p T u_*^3}{kgH} \quad (2)$$

で表され、

k :カルマン定数(=0.4)、 g :重力加速度である。

そして、大気の安定度($-z/L$)の状態によって(1)式の普遍関数が以下ようになる。

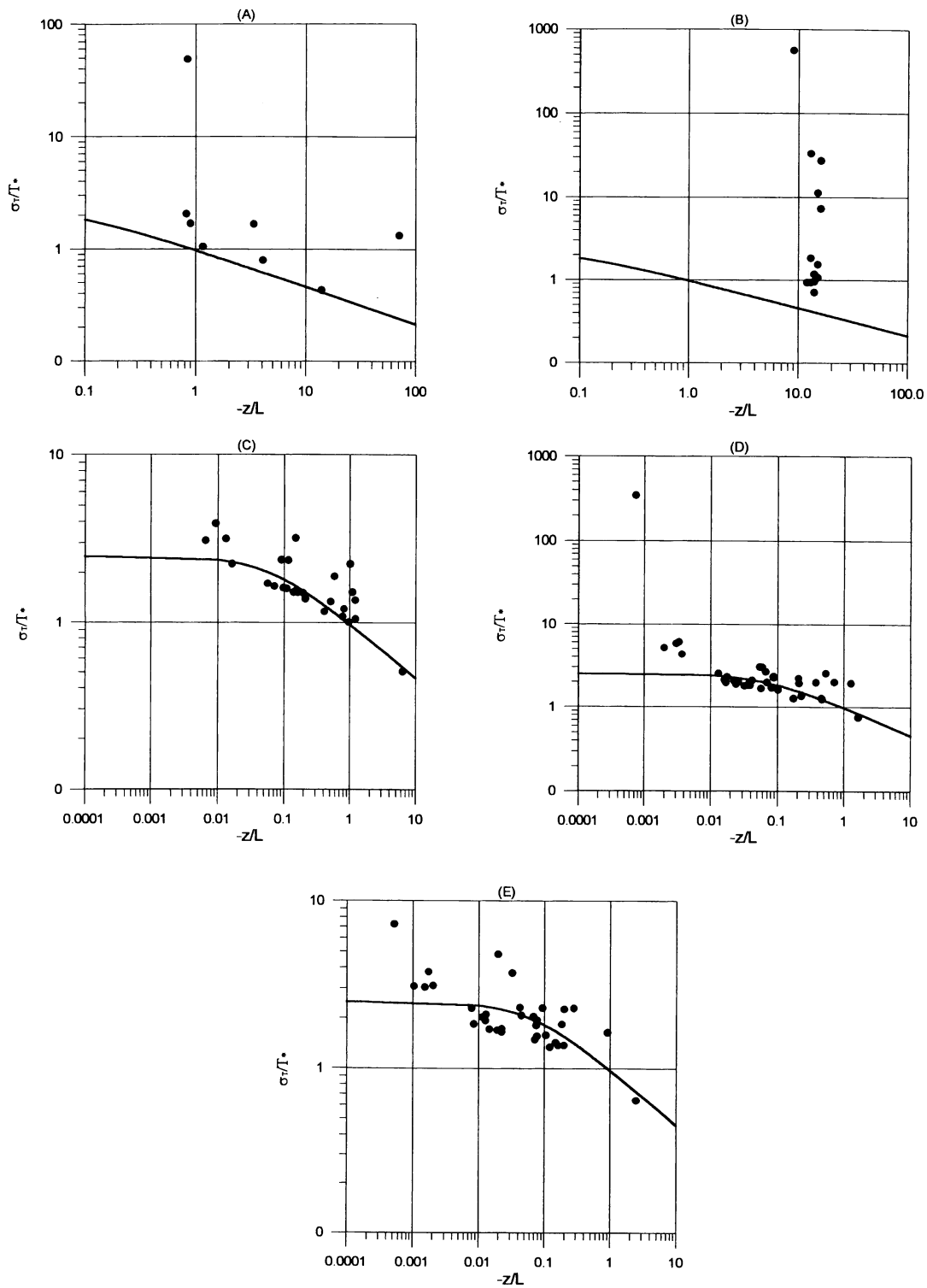
$$\phi = C_1 \left(\frac{z}{L}\right)^{\frac{1}{3}} \quad (-z/L > 0.04) \quad (3)$$

$$\phi = C_1 \left(C_2 - \frac{z}{L}\right)^{\frac{1}{3}} \quad (0.01 < -z/L < 0.04) \quad (4)$$

$$\phi = C_3 \quad (-z/L < 0.01) \quad (5)$$

$$C_2 = \left(\frac{C_1}{C_3}\right)^3 \quad (6)$$

ここで C_1 、 C_2 、 C_3 は普遍的な定数であり、安定度や地表面状態には依存しない。式(3)~(4)がいわゆる乗則である。また、本研究においては、 $-z/L > 0.04$ のときを自由対流状態 (Free Convection Case)、 $0.01 < -z/L < 0.04$ のときを動的不安定状態 (Dynamic Unstable Case)、 $-z/L < 0.01$ のときを中立状態 (Neutral Case) と大気



第1図 大気の安定度と ϕ_T/T との関係. 実践は $C_1(C_2 - z/L)^{-1/3}$ を表す. (A) : 200m, (B) : 150m, (C) : 50m, (D) : 25m, (E) : 10m.

の状態を分けることにする。以後図中においては、自由対流状態をF、動的不安定状態をD、中立状態をNと略す。

図1は平均化時間1時間で200, 150, 100, 50, 25, 10mの各高度について横軸に大気不安定度、縦軸に σ_T/T の値をプロットしたものである。また、以下の解析についても平均化時間は1時間とする。200mと150mに関しては実線から大きく離れていることがわかる。これは観測期間中の接地層の上端が95~98mであった(Hiyama, 1995)ため1/3乗則が成り立っていないためであると考えられる。

2) 分散法

Tillman (1972) によって顕熱フラックスに関する以下の式が導かれた。

$$Hv = pC_p \left(\frac{\sigma_T}{C_1} \right)^{\frac{3}{2}} \left(\frac{kgz_m}{T} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (-z/L > 0.04) \quad (7)$$

$$Hv = pC_p \left[\left(\frac{\sigma_T}{C_1} \right)^3 \left(\frac{kgz_m}{T} \right) \frac{C_2 - z/L}{-z/L} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (0.01 < -z/L < 0.04) \quad (8)$$

$$Hv = pC_p \mu \frac{\sigma_T}{C_3} \quad (-z/L < 0.01) \quad (9)$$

ここで、 $z_m = z - d$ で、 d は地面修正量、下付き文字 v は分散法で求めた値であることを示し、地面修正量 d は東風のときには6.7、南風のときには6.3を用いている(Hiyama, et al, 1995)。

(7)、(8)、(9)式の中でも(7)式は大気不安定度や摩擦速度を考慮する必要がなく最も実用面への可能性が高い。

3) 渦相関法

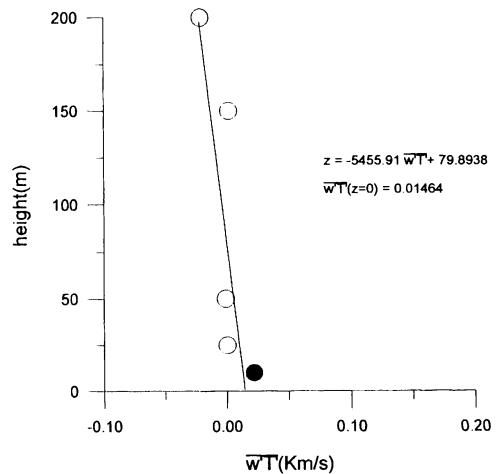
渦相関法で、顕熱フラックス H は以下のように定義される。

$$He = pC_{p0}(w'T') \quad (10)$$

ここで w は風速の鉛直成分を、気温を示し、下付き文字 e は渦相関法によって求められた値であるこ

とを示す。また、プライムは平均からの偏差を、バーは平均を示す。

また、顕熱は大気を暖めることに使われるために、高度が上がるにつれて小さくなるため、渦相関法で求めた顕熱フラックスも高度が上がるに連れて過小評価される傾向にある。そのため、分散法で求めた顕熱フラックスと比較する際には、各高度で求められた共分散 $\overline{w'T'}$ をx軸に、高度をy軸にとり一回帰をして地表面の $\overline{w'T'}$ を求め、 He を求めた。図2は、8月13日午後1時の $\overline{w'T'}$ と高度の関係を示したものである。ここで●は高度10mの値を示しているが、この値は計算に使用していない。



第2図 $\overline{w'T'}$ と高度の関係。実線は回帰直線を表す。

4) 超音波風速計における気温の計測の誤差

超音波風速計で計られた気温は水平方向の風速の影響を考慮していないため、誤差を含んでいる。そのため、気温の標準偏差 σ_T と渦相関法で用いる気温と垂直風速の共分散 $\overline{w'T'}$ については以下の補正を加えた(Kaimal et al., 1990)。

$$\sigma_T(\text{correct}) = \sigma_T + 4\overline{uu'T'}/403 \quad (11)$$

$$\overline{w'T'}(\text{correct}) = \overline{w'T'} + 2\overline{uu'w'}/403 \quad (12)$$

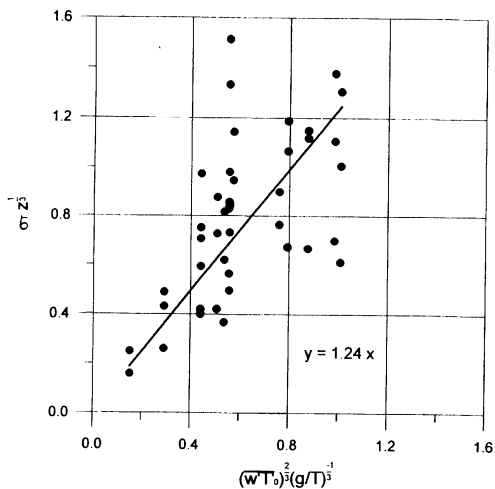
V 解析結果

上述した分散法の検証を行うにあたり、本論文で経験定数 C_1 はAsanuma (1996) による方法を用い

て算出したTABLEのデータに対するキャリブレーション値を用いた。Asanuma (1996) によると、

$$C_1 = \frac{\sigma_{Tz}^{\frac{1}{3}}}{(\overline{w'T'_{0z}})^{\frac{3}{2}}(g/T_0)^{-\frac{1}{3}}} k^{\frac{1}{3}}$$

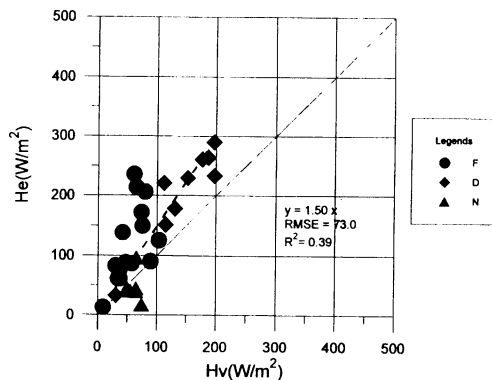
であり、下付き文字0は地表面の値であることを示している。その値は図3の傾きから C_1 を求めると $C_1=0.94$ となった。また、(13)を適用して、 C_1 の値を10m、25m、50mの全データについて求め、その平均を求めたところ、Asanuma (1996) の $C_1=0.99$ と一致した。本研究では以降 $C_1=0.99$ を用いる。 C_3 については大気の状態が中立である場合が少ないため、Tillman (1972) の $C_3 = -2.5$ を用いた。



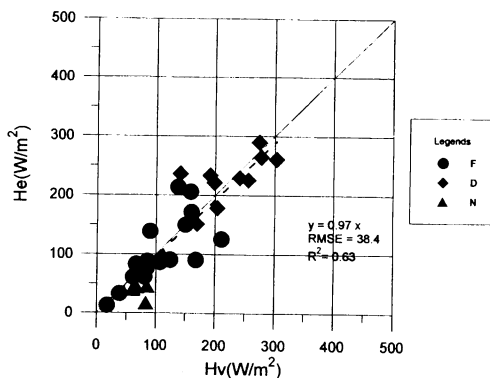
第3図 $(\overline{w'T'_{0z}})^{\frac{2}{3}}(g/T_0)^{-\frac{1}{3}}$ と $\sigma_{Tz}^{\frac{1}{3}}$ の関係。実線は回帰直線を表す。

分散法で算出した顕熱フラックスをx軸に、渦相関法で算出した顕熱フラックスをy軸にとってグラフに描いた。グラフは超音波風速計の高度によって分けている。それらのグラフを図4～図8に示した。分散法で算出された顕熱フラックスは高度10mで過小評価されており、高度50mではばらつきが大きい。また、150mと200mにおいては混合層に入っているため分散法が成り立っていないことがわかる。また全体的に顕熱フラックスの値が大きくなるほど散らばりの度合いが大きくなる傾向にある。そして平方根平均二乗誤差 (RMSE) や決定係数 (R^2) の値

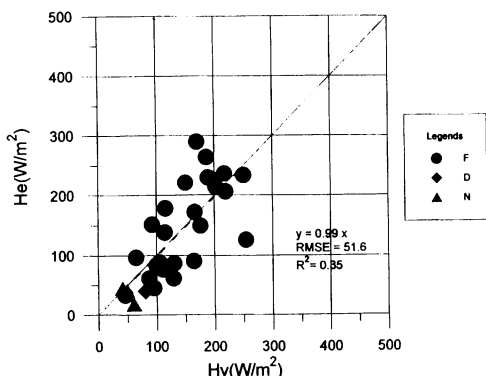
から考えて、高度25mにおいて H_v と H_e の対応が最も良いと判断した。



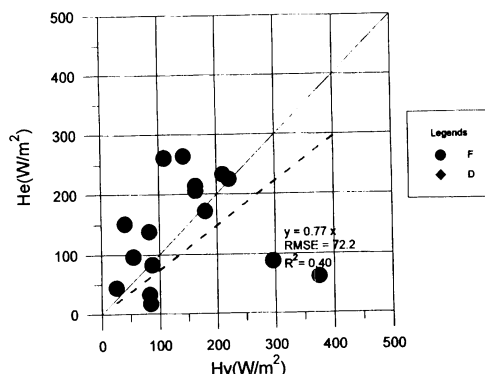
第4図 10m高度における H_v と H_e との比較。実線は1対1を表し、点線は回帰直線を表している。



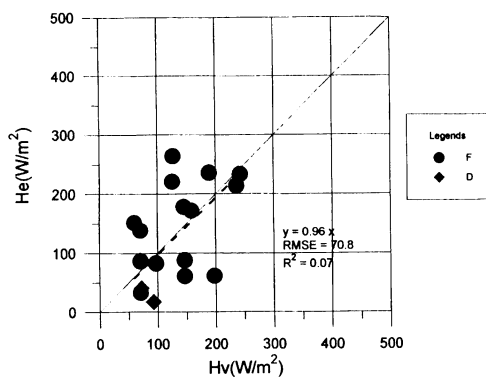
第5図 25m高度における H_v と H_e との比較。実線は1対1を表し、点線は回帰直線を表している。



第6図 50m高度におけるHvとHeとの比較. 実線は1対1を表し、点線は回帰直線を表している.



第8図 200m高度におけるHvとHeとの比較. 実線は1対1を表し、点線は回帰直線を表している.



第7図 150m高度におけるHvとHeとの比較. 実線は1対1を表し、点線は回帰直線を表している.

VI 考察

以上の結果から、非一様な地表面上においても分散法を用いた顕熱フラックスの算定は測定の高さを適切に選ぶことで良い精度が得られることがわかった。高度10mに関しては、分散法の値が過小評価されているという点で他の高度の観測値と傾向を異にしており、他の高度とは違う領域の顕熱フラックスを代表していると考えられる。

本研究では、地面修正量 d を決定する際に風向きによって2つの値を選択したが、これは観測期間中の平均値の値であり、実際には東風においては0～

7.9、南風では0～8.9まで変化している (Hiyama, et al., 1995)。そして地面修正量の値が分散法での顕熱フラックスの算出の際に大きな影響を与えることも示されている (Lloyd et al., 1991)。

また、以上の結果では大気不安定度を求める際に(2)式の顕熱フラックスはHiyama (1995)のデータを用いたが、それらを使わない収束計算で算出した分散法の顕熱フラックスとの比較においても同様の結果が得られた。

VII まとめ

本研究では、気温の標準偏差に関する分散法の検証を行った。その際、渦相関法の補正や超音波風速計の誤差などを考慮に入れた結果、高度25mにおける分散法の顕熱フラックスが渦相関法のそれと最も良い対応を示していた。

本研究では顕熱フラックスの算出に正確性を持たせるため、観測とデータの章で述べたようにして利用可能なデータを選別した。その結果全データ数が39個と非常に少ない数になってしまった。そのため、動的不安定状態、中立状態の数が少なく、これらの結果から正しい結論を導き出すことは難しい。統計的に分散法を確立するためにも、さらなる観測が必要であろう。

謝 辞

本稿は筆者の一人である川久保の卒業研究である。この論文をまとめるにあたり、筑波大学の水文分野の先生方から指導・助言を受けた。筑波大学地球科学系の遠藤伸彦助手、筑波大学地球科学研究科の樋口篤志氏、宮崎真氏には、計算機やワークステーションの適切な使用方法などを教えていただいた。また、気象観測鉄塔のデータの扱いについては(株)WNIの坂井薫氏に教えていただいた。

また、気象研究所の所有する気象観測鉄塔からは本研究の主要なデータをいただいた。実際の作業の場所や、計算機は水理実験センターのものを使わせていただいた。

これらの方々に深く感謝致します。

参考文献

- 浅沼順・W. ブルッツァート(1997) : 平坦で非一様な森林上の接地層内における乱流分散値の特性と分散法を用いた地表面フラックスの算定. 水文・水資源学会誌、**10**, 515-523.
- 杉田倫明・上田真也・遠藤伸彦・大手信人・沖大幹・甲斐憲次・浅沼順・榎根勇・小池俊雄・近藤昭彦・嶋田純・田中正・辻村真貴・田少奮・菲沢浩・原蘭芳信・檜山哲哉・深見和彦・安成哲三(1993) : Tsukuba 92 : 水文学・境界層気象学における異なるスケール間の関係解明のための共同観測計画(1) 地表面からの自由大気へのフラックス. ハイドロロジー、**23**, 27-137.
- Hanafusa, T., Fujinami, T. and Bnnno, N. (1980): Behavior of winds in the lowest 200m in central Tsukuba Science City. Papers in Meteorology And Geographics, **31**, 125-152.
- Hiyama, T. (1995) : A Study on the Surface Fluxes Over a Heterogeneous Land Cover. Ph.D Thesis, Institute of Geoscience, University of Tsukuba, 191p.
- Hiyama, T., Sugita, M. and Kotoda, K. (1995): Regional Roughness Parameters and Momentum Fluxes over a Complex Area. Journal of Applied Meteorology. **35**, 2179-2190.
- Kaimal, J. C. and Gaynor, J. E. (1990): Another Look at Sonic Thermometry, Boundary-Layer Meteorol. **56**, 311-322.
- Lloyd, C. R., CulF, A. D., Dolman, A. J., and Gash, J. H. C. (1991) : Estimates of Sensible Heat Flux from Observations of Temperature Fluctuations. Boundary-Layer Meteorol. **57**, 311-322.
- Tillman, J. E. (1972): The Indirect Determination of Stability, Heat and Momentum Fluxes in the Atmospheric Boundary from Simple Scalar Variables During Dry Unstable Conditions. J. Appl. Meteorol. **11**, 783-792.
- Wasely, M. L. (1987): Use of Variance Techniques to Measure Dry Air-Surface Exchange Rates. Boundary-Layer Meteorol. **44**, 13-31.