

## II-401

## 不安定接地層内における分散法による地表面フラックスの算定

コーネル大学土木環境工学科 正会員 浅沼 順\*

コーネル大学土木環境工学科 W. Brutsaert

## はじめに

顕熱交換量や蒸発量などの乱流フラックスの算定手法の一つとして、乱流の変動値である分散を計測し、分散とフラックスの関係からフラックスを求める手法があり、これを分散法（Variance Method）と呼ぶ。この手法は、Tillman(1972)によって提案され、Wesely(1988)によりその重要性が見直された。分散法の実用面での利点としては、 $\overline{w\theta}$ や $\overline{wq}$ のような共分散ではなく分散（ $\overline{w^2}$ や $\overline{\theta^2}$ など）の測定よりフラックスを求めることから、乱流計測用のセンサーを減らすことができ、またセンサーどうしの配置などを気にする必要がない。その反面、経験的な分散—フラックス関係を用いることから、フラックスの算定値が経験的な定数（あるいは式）に依存することになる。ここでは、モニニーオブコフ相似則の極値として高高度あるいは超不安定時に成立する、3分の1乗則を用いた分散法を航空機による乱流観測に用いた事例を紹介する。

## データ

1986年の初夏、南西フランス地方の100km×100kmの領域において、総観規模スケールでの地表面と大気の相互作用のモデリングを目的として、大規模な屋外実験、HAPEX-Mobilhyが行われた。この中で、NCARの乱流観測用航空機によって、「ランデスの森」(Landes Forest)と呼ばれる平らな森林上で観測された乱流分散値およびフラックスを解析対象とする。航空機の飛行高度は約100m、平均化時間は180秒であり、これは航空機の平均飛行速度約80m/sから、ここで解析された乱流の特性値は約14.4kmの平均値ということになる。また、「ランデスの森」上の微気象観測による地表面フラックスも比較の対象として用いる。

## 分散法

モニニーオブコフ相似則によると、高高度あるいは超不安定時（ $z/L \rightarrow \infty$ 、 $L$ は安定度長さ）は、乱流がシアに依存しないことから、温位 $\theta$ 、絶対湿度 $q$ 、および鉛直方向の速度成分 $w$ の乱流分散値は、フラックス、 $\overline{w\theta} = H/\rho C_p$ 、 $\overline{wq} = E/\rho$ によって、以下のよ

うに表される。

$$\begin{aligned}\sigma_w &= C_w (\beta \overline{w\theta z})^{1/3}, & \sigma_\theta &= C_\theta \overline{w\theta^2}^{2/3} (\beta z)^{-1/3}, \\ \sigma_q &= C_q \overline{wq} (\beta \overline{w\theta z})^{-1/3}\end{aligned}\quad (1)$$

ここで、 $\sigma$ は標準偏差を表し、分散の平方根であり、 $\beta \equiv g/T$ は浮力係数、 $C$ は経験定数、 $H$ は顕熱、 $E$ は蒸発量である。式(1)の各式にある1/3あるいは-1/3乗則から、3通りの分散法が考えられる。

## (1)べき乗法

式(1)を変形することにより、

$$H = \rho C_p (\sigma_w / C_w)^3 \beta k z, \quad H = \rho C_p (\sigma_\theta / C_\theta)^{3/2} (\beta k z)^{1/2} \quad (2)$$

## (2)相関法

式(1)のうち二つの式を組み合わせることにより、

$$H = \rho C_p \sigma_w \sigma_\theta / C_w C_\theta, \quad E = \rho C_p \sigma_w \sigma_q / C_w C_q \quad (3)$$

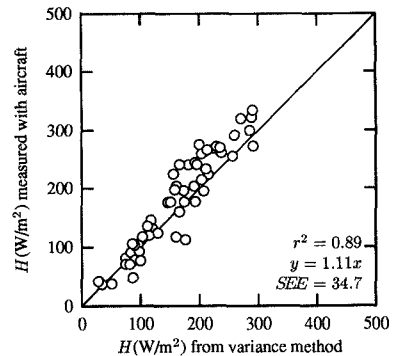


図1 べき乗法による顕熱交換量の算定 (式(2)第二式)

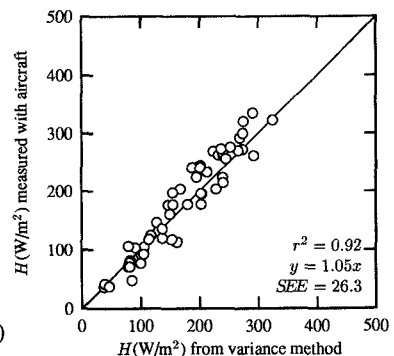


図2 相関法による顕熱交換量の算定 (式(3)第一式)

## (3) 標準偏差比法

式(1)の両式より、 $\theta$ と $q$ の標準偏差の比からボーエン比が求まる。

$$Bo \equiv H/E = C_p / \ell \cdot (\sigma_\theta / C_\theta) / (\sigma_q / C_q) \quad (4)$$

式(4)は熱収支式、あるいは他の分散法と組み合わせることによって、 $E$ を求めることができる。これは、いわば分散を用いたボーエン比法である。

## 考察

式(2)~(4)の実際の応用には、普遍的な定数である $C_\theta$ 、 $C_q$ 、 $C_w$ の値が必要となる。ここではまず、現データに式(1)をフィットさせることによって得た値を用いた。また変動法を用いるにあたっては、式(1)の適用できる高度範囲を定める必要があるが、これは同じく「ランデスの森」でのラジオゾンデによる観測から、モニナーオブコフ相似則の適用範囲を求めたものを用い、 $49 \leq z \leq 156(\text{m})$ とした。図1、2は、それぞれ式(2)第二式、(3)の第一式による顕熱交換量 $H$ の算定値を、航空機による顕熱フラックスの測定値から地表面フラックスを線形外挿により推定したものを比較した図である。また、図3は式(3)の第二式により潜熱交換量 $E$ を求めたもので、潜熱の結果よりばらつきが大きいことが認められる。図4は、図2と同様に式(2)第二式より求めた $H$ を地上での観測値と比較したものである。地上での計測値が系統的に大きいのは、分散法の問題ではなく、航空機による広域フラックス算定上の問題である。これは、航空機によるフラックス算定上のサンプリング距離の問題か、あるいは広域計測である航空機による観測値とローカルな計測である地上観測の根本的な違いによるものかは、現時点では不明である。図5は、式(4)によって求められたボーエン比と地上観測によるエネルギー収支によって、潜熱交換量 $E$ を求めたものである。図4とは異なり、航空機と地上観測の観測値の間に上記のような問題があっても、両者のボーエン比は一致することを示している。

$C_\theta$ 、 $C_q$ 、 $C_w$ の値として、既往の研究によって得られた一般的な値を用いると、主に潜熱交換量の算定値が大きく変わる(図6)。これは、HAPEXにおける $C_q$ の値が、一般値と大きく異なることに由来するが、これは、対象となる森林の不均一性によるものと考えられる。

## 参考文献

J. Tillman(1972), J. Appl. Met., 11, 783-792.

M. Wesely(1988), J. Atmos. Sci., 44, 13-31.

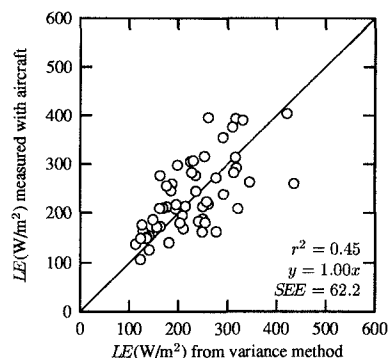


図3 相関法による潜熱交換量の算定 (式(3)第二式)

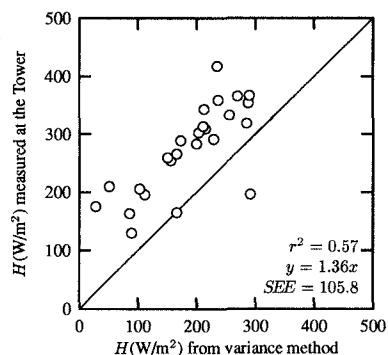


図4 べき乗法による顕熱交換量の算定 (式(2)第二式)

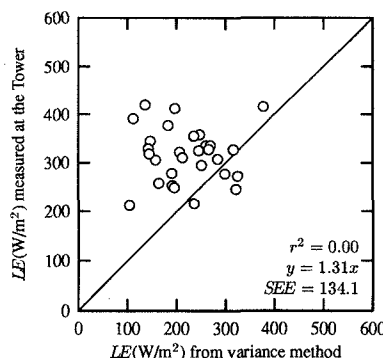


図5 標準偏差比法による潜熱交換量の算定 (式(4))

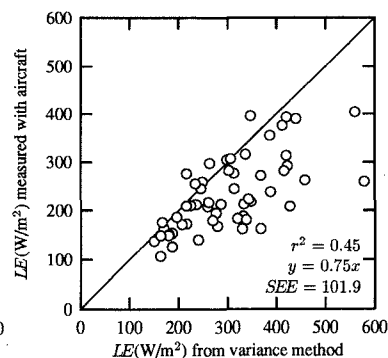


図6 相関法による潜熱交換量の算定 (一般的な定数を用いた場合)

\* 現 日本工営中央研究所