

超音波風速温度計と熱電対温度計による 潜熱輸送量の簡単な評価方法

A Simple Method to Estimate the Latent Heat Flux
by a Sonic Anemometer-thermometer
with a Fine Thermometer

花房 龍男*・青島 武*・渡来 靖**

Tatsuo HANAFUSA*, Takeshi AOSHIMA* and Yasushi WATARAI**

Abstract

A simple method to estimate the vertical latent heat flux by a sonic anemometer-thermometer together with a fine thermometer is presented.

An experimental result comparing with the lysimeter's result is proved to be useful for the estimation of the vertical latent heat flux.

I はじめに

接地気層における潜熱の鉛直輸送量を正確に評価するためには、精度の良い安定性のある湿度計の開発が必要不可欠である。赤外線湿度計の開発が進み、成果は挙げられているが、保守管理や検定に多くの手間と困難性があり、必ずしも長期の環境監視には適していない。従って、環境に大きく影響を与える湿度の鉛直輸送量の評価は、間接的に熱収支法や傾度法が採用されている。一方、ライシメータ等を使用して直接蒸発量を得る方法もあるが、装置が複雑で観測場所の移動が容易ではない。

超音波風速温度計で測定される温度は良く知られているように音仮温度 (sound virtual

temperature) と呼ばれ、通常の温度とは異なる。しかし、一般的には両者の差は小さいとして無視している。今回は湿度の影響を考慮し、一般の温度変動と音仮温度の変動から潜熱の鉛直輸送量の評価を行う原理的な方法を示し、その理論式から求めた値とライシメータで評価された蒸発量の比較を行った。

II 音仮温度

超音波風速温度計で測定される温度は湿度の影響を受けた音仮温度を測定する。音仮温度 T_{sv} は次のように定義されている。音速 C は物理法則から次式で与えられる。

* 英弘精機株式会社

** 筑波大学陸域環境研究センター

$$C = \{\gamma RT(1 + 0.51q)\}^{1/2} = (\gamma RT_{sv})^{1/2} \quad (1)$$

q は比湿で、 γR は定数で空気では $403 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-2} \text{ K}^{-1}$ である。

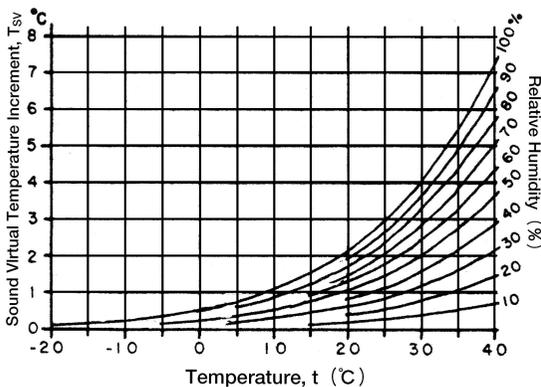
ここで、

$$T_{sv} = T \left(1 + 0.622 \frac{e}{p} \right) = T(1 + 0.51q) \quad (2)$$

従って、超音波温度計で音速の測定から温度を算定しているの、厳密な温度とは区別して、 T_{sv} は仮温度 $\{= T_v = T(1 + 0.61q)\}$ と類似しているの、音仮温度と呼ばれている。(2) 式で大気圧を 1 気圧として、気温と相対湿度がそれぞれ変化した場合に気温 T と音仮温度 T_{sv} の差の変化を示したのが第 1 図である。気温と湿度が小さい場合はその差はほとんど認められないが、気温、湿度が大きくなるにつれてその差も大きくなり、気温 30°C 、相対湿度 50% で約 2°C の差が検出される。この差は通常の温度計で充分検知可能である。

III 超音波風速温度計と細密温度計による潜熱輸送量の測定

(2) 式において $T_{sv} = (1 + aq)$ とおくと、



第 1 図 音仮温度 (T_{sv}) と温度 (T) の差の気温・湿度依存性

$$T_{sv} + T'_{sv} = (\bar{T} + T') (1 + a(\bar{q} + q')) \quad (3)$$

これを展開すると、

$$\bar{T}_{sv} + T'_{sv} = \bar{T} + \bar{T}a\bar{q} + \bar{T}aq' + T' + T'a\bar{q} + T'aq' \quad (3')$$

上式を平均すると、

$$\bar{T}_{sv} = \bar{T} + \bar{T}a\bar{q} + a\bar{q}\bar{T}' \quad (\because \bar{T}' = \bar{q}' = 0) \quad (4)$$

(3)' 式から (4) 式を引き、高次項を無視すると、

$$T'_{sv} = T' + a\bar{q}T' + aq\bar{T}$$

両辺に鉛直風速変動 w' を掛けて平均し $a = 0.51$ を代入して整理すると、

$$\overline{w'q'} = 1/\bar{T}_{sv} * (\overline{w'T'_{sv}} - \overline{w'T'} - 0.51\bar{q}\overline{w'T'}) \quad (5)$$

右辺第一項：超音波風速温度計から求めた鉛直風速と温度変動から算定する。

右辺第二項：熱電対温度計と超音波風速計から算定する。

右辺第三項：熱電対温度計と超音波風速計から求めた値に平均比湿を乗ずる。

以上から残差項として左辺の潜熱の鉛直輸送量が求められることになる。この方法をとれば湿度計無しで簡単に潜熱の鉛直輸送量を求めることが出来る。このような考え方や基礎的実験結果は既に Hignett (1992) や塚本 (1994), 花房 (2001) 等によって報告されている。

IV 評価実験

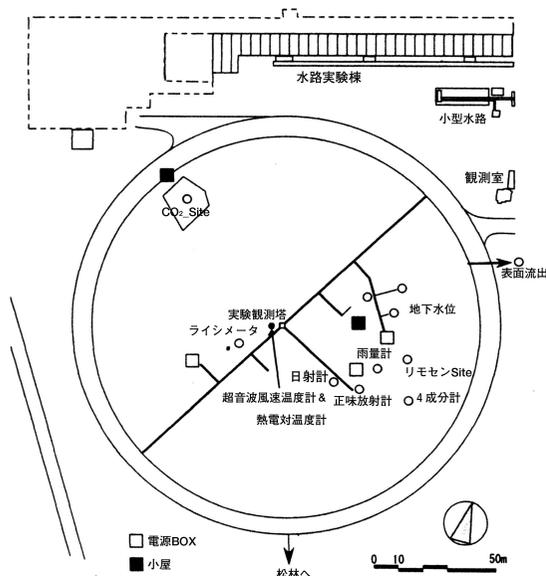
(5) 式の妥当性を評価するための野外実験を筑波大学陸域環境研究センター圃場で実施した。直

径 40 μ の銅と直径 100 μ のコンスタンタン熱電対温度計を超音波風速計の感部のほぼ中央に設置し、1 秒ごとにサンプリングした。測器の設置高度は 1.5 m で塔から約 1.5 m 離れた位置である。圃場の観測の設置概況を第 2 図に示す。

1. 使用測器

Metek 社製 3 次元超音波風速温度計 (USA-1) を使用した。スパンは 18 cm で仕様を第 1 表に示す。直径 40 μ の銅と直径 100 μ のコンスタン

タン熱電対温度計を使用した。零接点は魔法瓶に水を入れ、その温度は別の温度計で監視をした。出力はアンプで 2,000 倍に増幅した。比較するための蒸発量の算出には直径 2 m、深さ 2 m の円筒型容器に不攪乱の土 (関東ローム) を詰めたウエイングライシメータを使用した。総重量は約 9 トンであり、蒸発あるいは降水による重量変化を ± 250 kg (水深概算約 80 mm) の範囲で測定でき秤量感度は 100 g (水深概算 0.032 mm) である。30 分ごとに蒸発量が算定されるシステムになっている (古藤田ほか, 1978)。



第 2 図 圃場概況

2. 実験結果

熱電対温度計、超音波温度計の変動を第 3 図に、フラックスの時間変化の例を第 4 図に示す。第 3 図から、仮温度の変動が湿度の影響を受けて熱電対で測定された温度変動に比較して大きいことが一見して認められる。平均相対湿度が約 45% で平均気温が約 15°C であるから、第 1 図から推定するとその差は約 0.8°C あることになる。1 分間の標準偏差も 2 倍程度大きい。第 4 図に示されたフラックスの時間変化も非常に類似しているが、変動の大きさには殆ど差は認められない。比較観測中のデータを第 2 表に示す。1 例であるが両者の一致は非常に良い。したがってこの方法で簡単に潜熱の鉛直輸送量が求められることが実験的に示された。

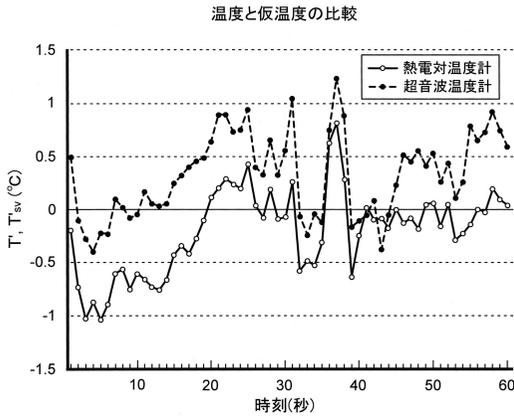
第 1 表 超音波風速温度計 (USA-1) の仕様

基本仕様		
測定範囲/分解能	風速:	0 ~ 45 m/s (オプション 0 ~ 60 m/s) ± 0.01 m/s
	X, Y, Z 風速:	-45 ~ +45 m/s (オプション -60 ~ +60 m/s) ± 0.01 m/s
	風向:	0 ~ 360° 又は 0 ~ 540° (ユーザーセレクトラブル) $\pm 0.4^\circ$
	温度:	-30 ~ +50°C ± 0.01 K
サンプリングレート	0.004 ~ 30Hz	
アナログ出力 4 成分	0 ~ 10 VDC (オプション 4 ~ 20 mA)	
シリアルポート出力	RS232C (オプション RS422)	
超音波パス長	180 mm	
同左温度	-30 ~ +50°C	
電源	18 ~ 36 VDC 2.5 W (ヒーターオプション 55 W)	
重量	4.0 kg	

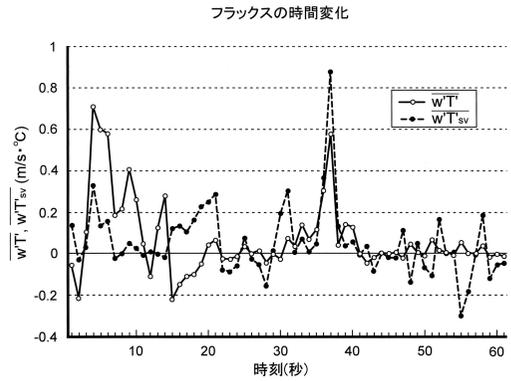
V システム化

前節までの結果から、潜熱の鉛直輸送量が保守管理の難しい湿度計を使用しないで、簡単に求められることが実験的に示された。これを連続的に

算出するシステムの例を第5図に示す。フラックス等の評価時間は、場の定常性などから決定されるもので、結果を見ながら最終的に決定されるものであるが、10分程度が適切と考えられる。



第3図 T_{sv} と T の時間変化の例

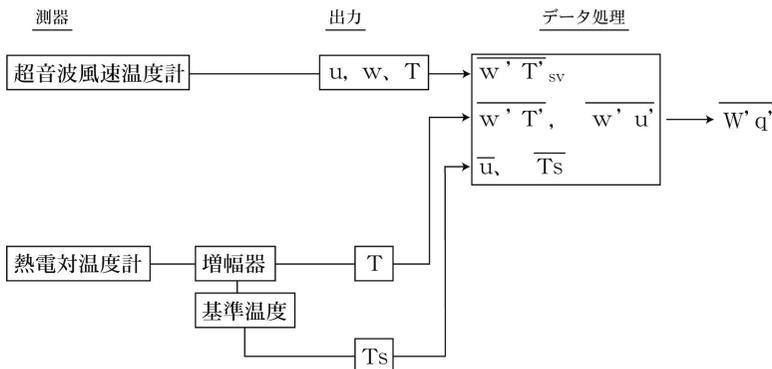


第4図 $\overline{w'T_{sv}}$ (1分間平均値) と $\overline{w'T}$ (1分間平均値) の時間変化

第2表 実験結果

日付	超音波・熱電対	ライシメーター	σT (°C)	σT_{sv} (°C)
04.10.27 11:00 ~ 11:10	0.08		0.63	0.69
11:10 ~ 11:20	0.036		0.26	0.27
11:20 ~ 11:30	0.081		0.10	0.16
合計 (mm/30分)	0.197	0.194		

気象条件 (11:00 ~ 11:30 平均)
 平均風速: 1.25 m/s、気温: 14.4°C、湿度: 53%
 運動量輸送量: $0.054 \text{ m}^2 \text{ s}^{-2}$



第5図 潜熱輸送量を求めるためのシステム図

VI 結論

湿度計を使用しないで，潜熱の鉛直輸送量が簡単に算出できることが，実験的に示された．超音波風速温度計も熱電対温度計も，原理的には風洞や恒温槽などを使った検定が不必要なことは，野外観測では非常に大きな利点である．今後，いろいろの気象条件下で実験を行い，問題点などを調整して長期的な観測が可能なシステムの構築を行いたい．

文献

古籾田一雄・佐倉保夫・林陽生・甲斐憲次

(1978)：水理実験センターにおける熱収支・水収支観測システムとデータ集録・処理について．筑波大学水理実験センター報告，**2**，65-89．

塚本修 (1994)：超音波風速温度計で測定された顕熱フラックスについて．日本農業気象学会講演概要集，240-241．

花房龍男 (2001)：超音波による温度計測．超音波テクノ，**13**，2-7．

Hignett, P. (1992): Correction to temperature measurements with sonic anemometer. *Boundary - Layer Meteorology*, **61**, 175-187.

(2005年5月31日受付，2005年8月31日受理)

