

# 地球での 接地境界層の乱流観測から 分かったこと

玉川一郎

(岐阜大学流域圏科学研究センター)

# 超音波風速計

- 音波を往復させ、その音速の差から媒体である大気等の流速を計測する装置
- 超音波パルスを使った実用システムは、光田 & 海上電機(現 株式会社ソニック)の開発である。
- Mitsuta, Y.: 1966, Sonic Anemometer for General Use, *J. Meteorol. Soc. Jap.* 44, 12-24.

# First Commercial Sonic Anemometer

ファイル(E) 編集(E) 表示(V) 履歴(S) ブックマーク(B) ツール(I) ヘルプ(H)

http://sts.kahaku.go.jp/sts/detail.php?key=103610411150&APag

よく見るページ Firefox を使ってみよう 最新ニュース

超音波風速計... x Bookmark of ... x 超音波微風速... x 国立科学博物... x yc

## 超音波微風速計 F-PT-1型



資料番号: 103610411150  
所在等: 株式会社カイジョーソニック  
所在地: 東京都羽村市  
製作(製造)年等: 1963  
種類: カイジョー50年史  
製作者(社)等: 海上電機株式会社(現株式会社カイジョーソニック)  
調査機関団体: 日本計量機器工業連合会

**特徴:**  
実用化世界初の国産1号機。超音波の伝播速度が風速により変化することを利用した風速計。垂直方向成分の風速を測定し、水の蒸発量の測定に利用できる3次元風速計として開発。プロベラ式や風杯式風速計のような機械的可動部がなく微風速観測に優れた風向風速計。微細気象、接置気象などの気象分野だけでなく、大気汚染などの環境問題や海洋科学、建築技術の研究にかかせない測定器となった。1969年全国発明賞、オーム技術賞受賞。開発当時は世界でも垂直成分を高速サンプリングで計測出来る唯一の機械であったため、乱流観測に欠かせない測定器として、国内のみならず米国、欧州の研究者に好評を博し多数の研究論文が発表され今日の気象学の発展に寄与した。

◀ サムネール

# 超音波風速計

- 応答に優れることから、乱流観測に使用
- 可動部がないので、メンテナンスフリーの風速計として
- 原理的に直接風速をはかるので高精度
- 近年、非常に安価なタイプが出現
- 2次元タイプのもものは、既存の風速計を置き換えつつある。
- 分解能と強風対応はトレードオフ

# 製品例

## 風と雪を測る

### ▼ トンネルの風を測る

トンネル内の風を測定するために専用設計された風速です。

#### トンネル用風速計

TA-200

トンネル内の換気や火災等、異常事態時の風速計測に



### Vaisala ウェザートランスミッターWXT520



6つの基本要素(風向、風速、降水、気圧、温度、湿度)を同時観測、小型軽量、イージーメンテナンス。

[Vaisala のWWWページより](#)

### ▼ 風を測る

微風(0m/s)から強風域(90m/s)の風を3次元にハイレスポンスで測定します。

#### 三次元超音波風向風速計

SATシリーズ

乱流・熱収支・水収支観測や風洞・ビル・橋梁風等の観測に



#### 超音波風速温度計

DA-600/650

乱流・熱収支・水収支観測や風洞・ビル・橋梁風等の観測に



[Davis のWWWページより](#)



[ソニックのwwwページより](#)

# 超音波風速計の使用例

- トンネル, 橋, タワーなどの風速監視
- 室内, スポーツ競技場の風速
- パイプの流速
- 通常気象観測

## 大気乱流の観測

- 地上／船舶上のポール, あるいはタワー
- 航空機

# 他の大気乱流観測用風速計

- 熱線風速計（主に実験室）
- ピトー管 5孔ピトー管なら3次元で、乱流変動まで計測可能。航空機に使われるが、地上用に販売していたこともある。Rosemount aerospace社（ピトー管と圧力センサーの間に水滴受けをつけるなどの工夫が必要）

Air Data Probes and Air Data Sensors



Air data probes and air data sensors obtain aircraft angle of attack (AOA, alpha), sideslip (AOS, beta), static pressure, total pressure (pitot static), outside air temperature (OAT), and total air temperature (TAT). Typical names for these devices are nose booms, wing booms, nosebooms, air data probes, pitot probes (pitot tubes), pitot-static probes (pitot-static tubes), trailing cones, and trailing bombs. These products provide pressure and airflow direction data to data acquisition and air data computers for computation of aircraft orientation, airspeed, altitude, and related information.



Miniature pitot-static probe  
Insitu Integrator

<http://www.spaceagecontrol.com/Main/Home> より

# 大気境界層乱流の話に戻る

- 超音波風速温度計の開発以降，接地境界層乱流の直接観測が盛んに行われた。
- 乱流の統計力学としての中心的な理論である Monin-Obukhov の相似則は，それ以前，第2次大戦中に提唱されていた。
- 壁面乱流の対数則は，もっと前  
von Kármán, Th. (1930), “Mechanische Ähnlichkeit und Turbulenz”, *Nachrichten von der Gesellschaft der Wissenschaften zu Göttingen, Fachgruppe 1 (Mathematik)* 5: 58–76 (also as: [“Mechanical Similitude and Turbulence”](#), Tech. Mem. NACA, no. 611, 1931).  
From [Wikipedia](#)



# Monin-Obukhov の相似則

- Turbulence in atmosphere with a non-uniform temperature, A.M. Obukhov, *Boundary-Layer Meteorology*, 2, 7-29, 1971 (Orig. 1946)  
(<http://www.springerlink.com/content/p21902m3p8106311/>)
- Basic laws of turbulent mixing in the surface layer of the atmosphere, A.S.Monin&A.M.Obukhov, *Tr. Akad. Nauk SSSR Geiphiz. Inst.* 24(151):163-187,1954  
([http://mcnaughty.com/keith/papers/Monin\\_and\\_Obukhov\\_1954.pdf](http://mcnaughty.com/keith/papers/Monin_and_Obukhov_1954.pdf)) 最初の実験的証拠

渦粘性係数  $\nu_t = u^*(kz)$  の対数則の拡張を考えた

# Monin-Obukhovの相似則

M-Oの安定度

$$L = -\frac{u^{*3}}{k \left( \frac{g}{\theta_v} \right) \overline{w' \theta_v'}}$$

$$\frac{z}{L} = -\frac{kz \left( \frac{g}{\theta_v} \right) \overline{w' \theta_v'}}{u^{*3}}$$

スケールリングパラメタ

uは主流方向, wは鉛直  
T<sub>v</sub>は仮温度, qは比湿 (CO<sub>2</sub>等でも同様)  
フラックスは一定とみなせる  
水平一様定常の仮定

$$u^* u^* = -\overline{u' w'}$$

$$u^* T^* = -\overline{w' \theta'}$$

$$u^* T_v^* = -\overline{w' \theta_v'}$$

$$u^* q^* = -\overline{w' q'}$$

境界層近似  $\frac{\partial}{\partial z} \gg \frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y}, \frac{\partial}{\partial t}$

# Monin-Obukhovの相似則

- フラックス—勾配関係

$$\frac{kz}{u^*} \frac{\partial U}{\partial z} = \phi_m \left( \frac{z}{L} \right) \quad \frac{kz}{T^*} \frac{\partial \theta}{\partial z} = \phi_h \left( \frac{z}{L} \right) \quad \frac{kz}{q^*} \frac{\partial U}{\partial z} = \phi_h \left( \frac{z}{L} \right)$$

- 変動量

$$\frac{\sigma_w}{u^*} = \phi_w \left( \frac{z}{L} \right) \quad \frac{\sigma_T}{T^*} = \phi_T \left( \frac{z}{L} \right)$$

この関係は、観測や(主に極限での)理論的考察によって確かめられ、広く気象モデルの下端境界条件に使われている。

- 他 消散率, リチャードソン数, スペクトルも

$$\phi_\varepsilon = kz\varepsilon / u^{*3} \quad Ri = \left( \frac{z}{L} \right) \left( \frac{\phi_h}{\phi_m^2} \right)$$

# z/L は

- MOの安定度(z/L)は, 水平一様定常のもとでの, 乱流運動エネルギー方程式の  
浮力消滅項 / シアー生成項

$$e' = \frac{1}{2} u'_i u'_i = \frac{1}{2} (u'^2 + v'^2 + w'^2) \quad (1.110)$$

と置けば, 水平方向に一様な場に対して

$$\frac{\partial}{\partial t} \bar{e} = \underbrace{-\overline{u'w'}}_{(I)} \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} + \underbrace{\frac{g}{T} \overline{w'\theta'}}_{(II)} - \underbrace{\frac{1}{\rho} \frac{\partial \overline{w'p'}}{\partial z}}_{(III)} - \underbrace{\frac{\partial}{\partial z} \overline{w'e'}}_{(IV)} - \underbrace{\varepsilon}_{(V)} \quad (1.111)$$

と書ける. ここで

$$\varepsilon = \nu \overline{\frac{\partial u'_i}{\partial x_j} \left( \frac{\partial u'_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u'_j}{\partial x_i} \right)} \quad (1.112)$$

である.

植物と微気象(文字2003)より

$$\frac{z}{L} = - \frac{kz \left( \frac{g}{\theta_v} \right) \overline{w'\theta'_v}}{u_*'^3}$$

$$\frac{kz}{u_*'} \frac{\partial U}{\partial z} = \phi_m \left( \frac{z}{L} \right) \quad \text{(中立 [対数則] 時には右辺=1)}$$

を考えると, 上式が分かりやすい

# 超音波風速温度計

## Sonic Anemometer Thermometer



- Send and receive sonic pulse between two probes
- Count the time
- Calculate average sound speed and the difference of the speed
- Calc. wind speed of sound path direction
- Calc. temperature from average speed (sonic virtual temperature)

Developed in 1960s

• Kaimal, J. C. and Businger, J. A.: 1963, A Continuous Wave Sonic Anemometer-Thermometer, *J. Appl. Meteorol.* 2, 156–164.

ATI

• Mitsuta, Y.: 1966, Sonic Anemometer for General Use, *J. Meteorol. Soc. Jap.* 44, 12–24.

Kaijo

今や トラ技に制作記事, 高校生が作って観測。  
極寒冷地では, ヒーターをつける。降水くらいなら観測可

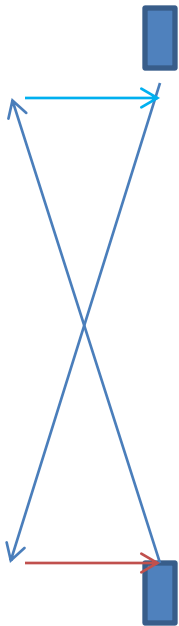
長期安定は難しい

# Flux measurement

## Sonic Anemometer Thermometer



Sonic temperature includes cross wind effect and water vapor effect.



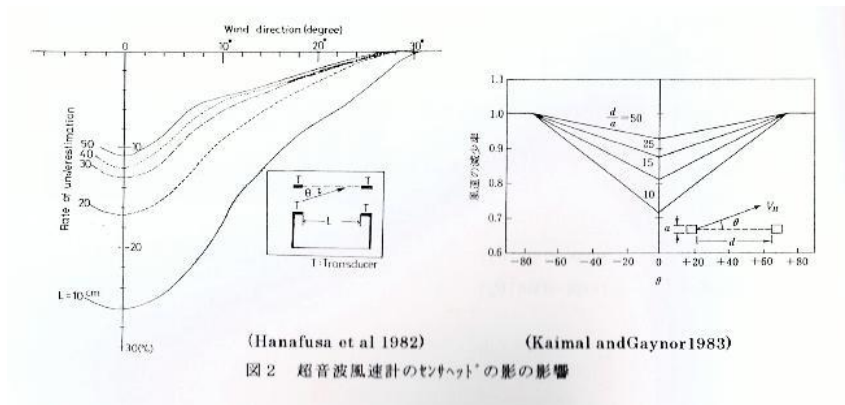
$$T = \frac{T_s + \frac{V_n^2}{A}}{1 + 0.32 \frac{e}{P}}$$

where  $V_n$  cross wind speed,  $A = 403$  units (temperature in K, wind in  $\text{m/s}^2$ ). (Kaimal and Finnigan 1994)

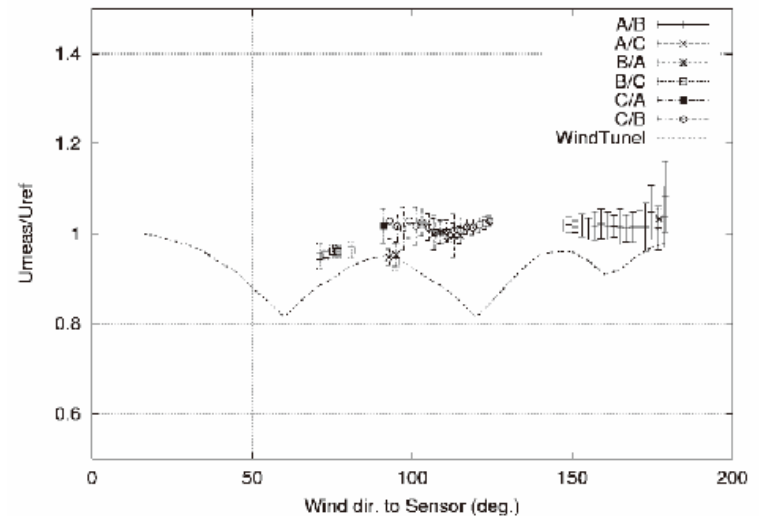
# 風速計自身の影響

## Sonic Anemometer Thermometer

Also the effect of probes and other structure are also the source of errors



In wind tunnel

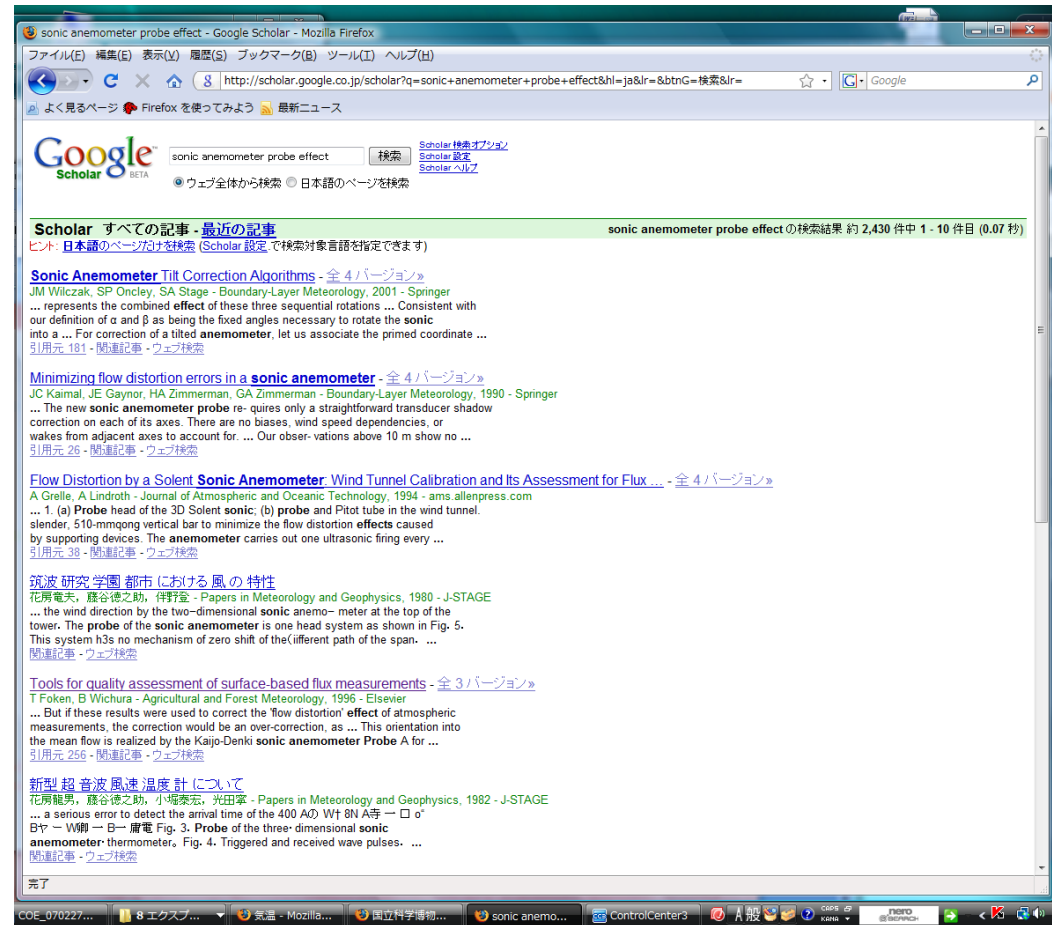


In natural turbulent wind  
( unpub.)

# つづき

Also the effect of probes and other structure are also the source of errors

The amount of these effects is different for each probe design, so please find suitable articles or make tests by yourself.



=> Deep world of measurement



# 大規模な野外実験

Kansas 実験 (Haugen et. al. 1971, QJRMS)

- Flux-Profile 関係 (Businger, Wyngaard, Izumi and Bradley 1971, JAS)

32mタワー, 18cmの wheat stubble, 2400mのフェッチ

風速の鉛直分布は, 23, 36, 50, 70, 100cm, 2, 4, 5.66, 8, 11.3, 16, 22.6, 32m

温度は, 0.5, 1, 2, 4, 8, 16, 22.6, 32m

**現在使われている主なMOS式はこのデータから、と言ってもよい**

# Flux-Profile

Businger et. al. 1971 の解析では、無次元シアー関数が中立に近い範囲 ( $-2 < z/L < 2$ ) で、実験的に求められた。ただ、カルマン定数が  $k=0.35$  であるなどその後の議論を呼んだ

Businger et. al. 1971 より

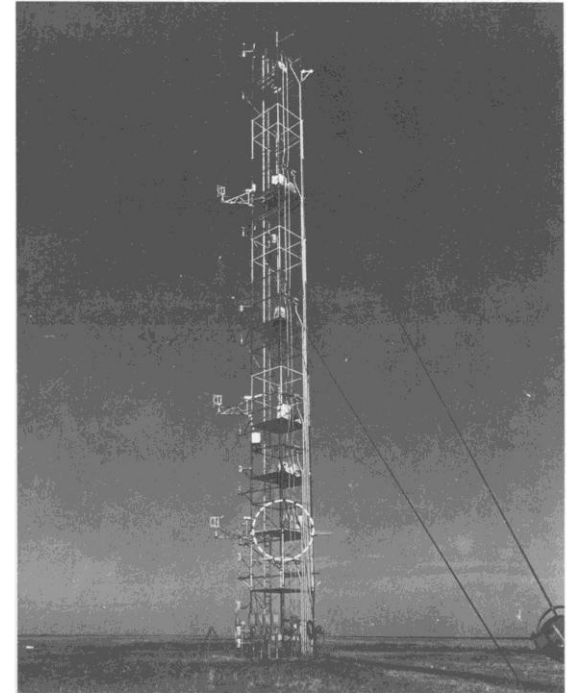
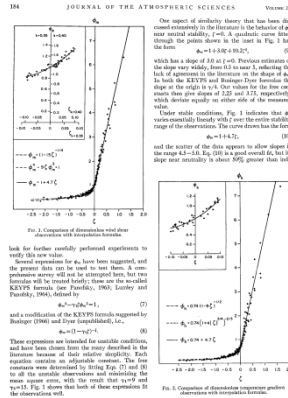


Fig. 2. The 32-m tower viewed from the east during the 1968 Kansas experiments. The dashed circle represents Wieringa's 2.4 m sphere at the 5.66 m level.

Mast の影響、風杯の回りすぎなどが懸念された。

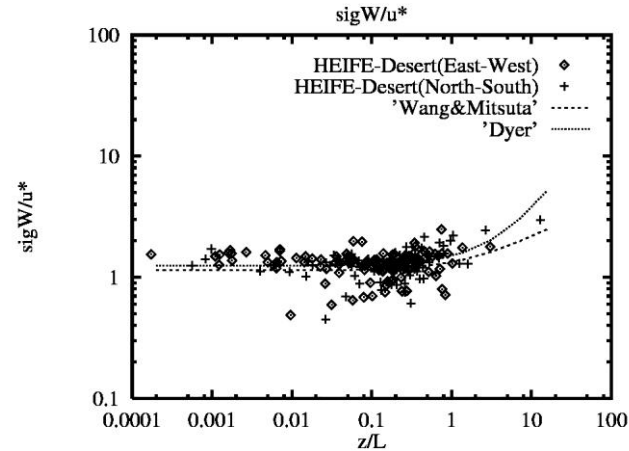
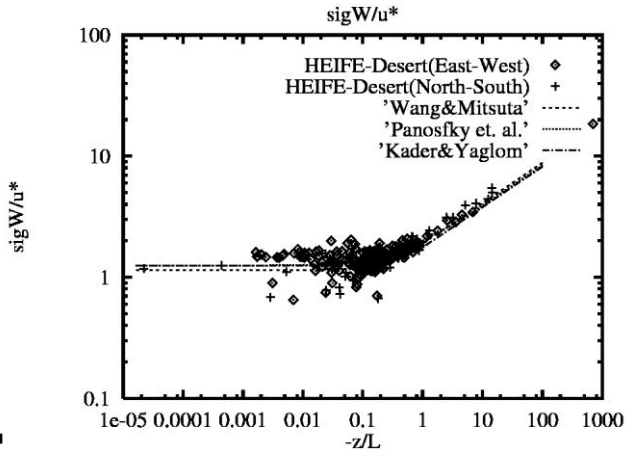
近年は、 $k=0.4$ で整理された無次元シアー関数を使うことが多い。(水理学では、0.41が普通)

Wyngaard, Businger, Kaimal and Larsen, Comments on 'A revaluation of the Kansas Mast Influence on Measurements of stress and cup anemometer overspeeding', Boundary Layer Meteorology, 22, 245-250, 1982 より

# 変動に関して

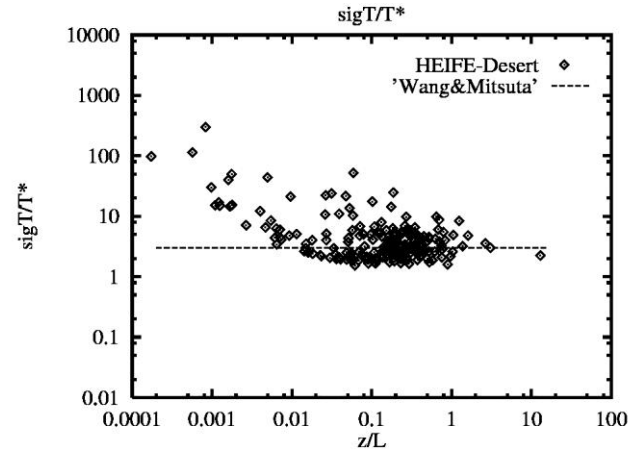
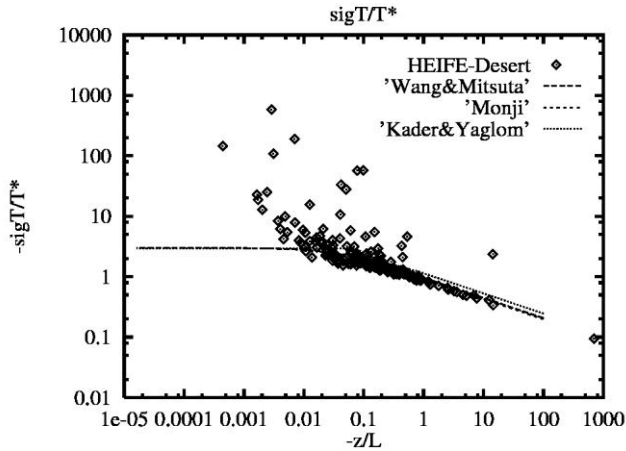
- 不安定の極限で,  $u^*$ によらない形で, 無次元化された標準偏差が $z/L$ の関数になる。(手元のデータを紹介する)

W



不安定

T

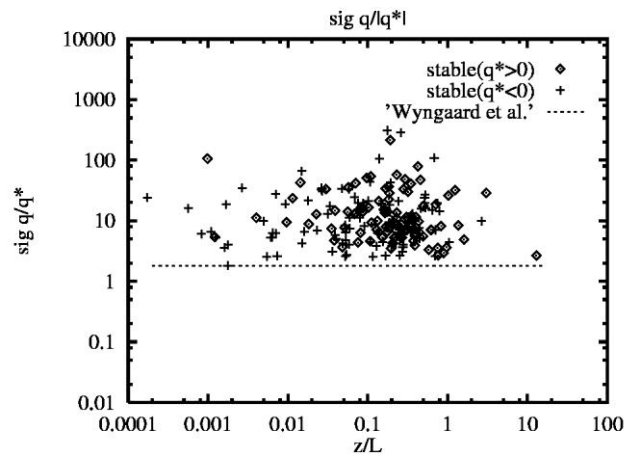
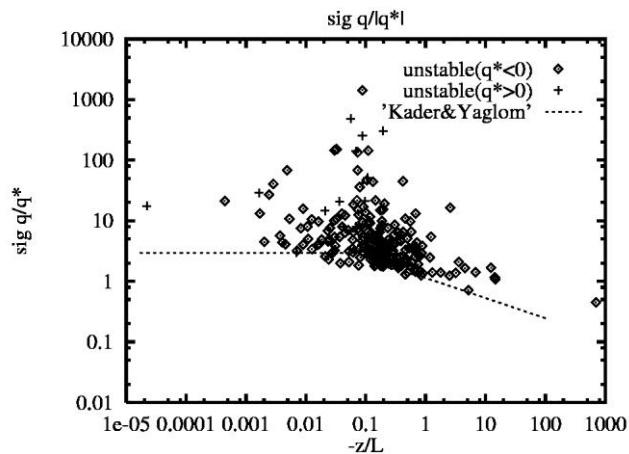


安定

Tamagawa 1996

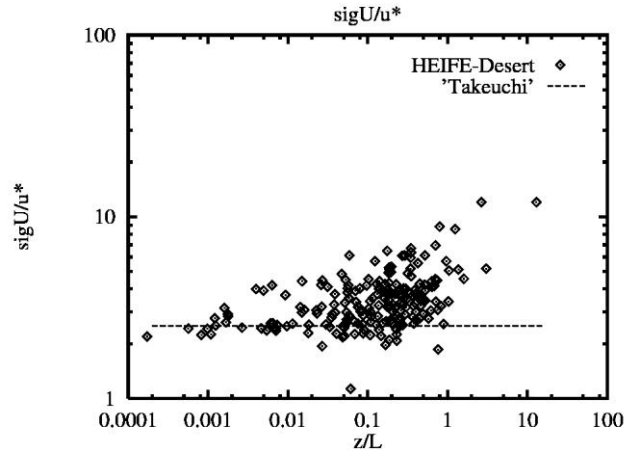
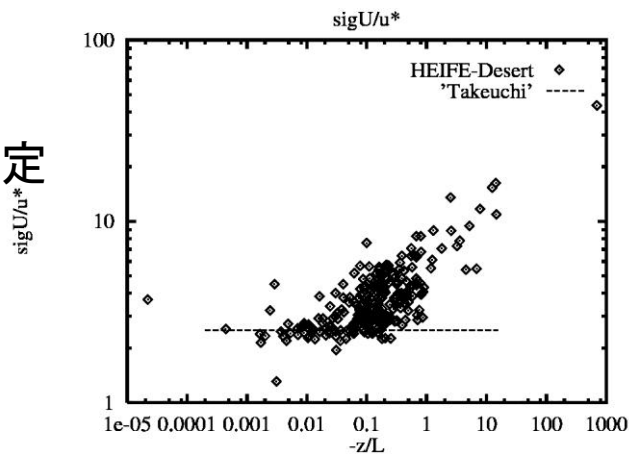
# 変動 (U q), 怪しくなってくる

Q



不安定

U



安定

# あやしくなるのは、

- 仮定の水平一様定常が崩れていく

砂漠上での観測 -> 水蒸気の鉛直微分が小さい＝相対的に水平方向の影響を受けやすい

U は、境界層全体に及ぶような循環の影響を受ける（ $Z_i$  の影響を受けるという解析結果：だれだっけ？ 乱流として解析する周波数帯に依存）

メソスケール循環との重ね合わせとして理解しようとする方法もある。

もとに戻って、どういう変動が乱流変動か？ → スペクトル

# Power Spectrum

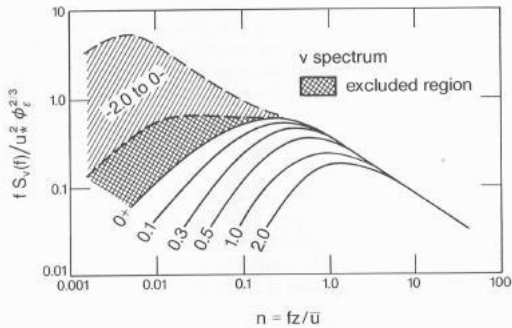


Fig. 2.6. Normalized surface layer  $v$  spectrum shown varying with  $z/L$ .

only in the range  $-0.3 > z/L > -2$  (shown as a hatched area in Fig. 2.7) does the spectrum exhibit an insensitivity to  $z/L$ . This happens because the normalized spectral peak  $n_m$  stops shifting to lower frequencies with increasing  $z/L$  (see Fig. 2.9), an indication that the peak wavelength  $\lambda_m$  scales only with  $z$ . The  $u$ ,  $v$ , and  $\theta$  stable spectra also progress systematically, but their unstable spectra spread over a

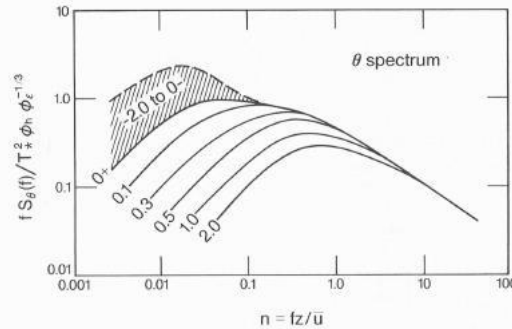
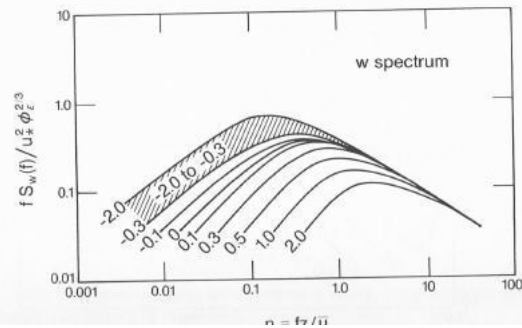


Fig. 2.8. Normalized surface layer  $\theta$  spectrum shown varying with  $z/L$ .

larger area (hatched; in  $u$  and  $v$ , an "excluded" region (crosshatched) can be seen separating the stable and unstable spectra. The limiting curves for stability regimes approaching neutral from both sides are indicated by notations  $z/L = 0+$  and  $0-$  in the figures. Clearly, the unstable  $u$  and  $v$  spectra do not follow M-O similarity, and since no measurements of the boundary layer depth  $z_i$  were made in Kansas, it was not known at the time that their  $\lambda_m$ 's scaled with  $z_i$ . Later, the Minnesota

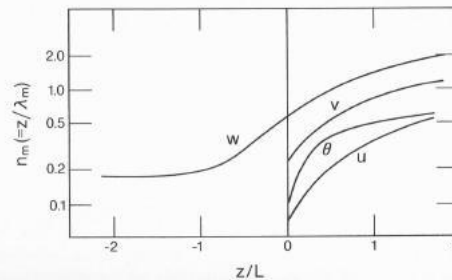


Fig. 2.9. Nondimensional frequency at spectral maxima shown as functions of  $z/L$ .

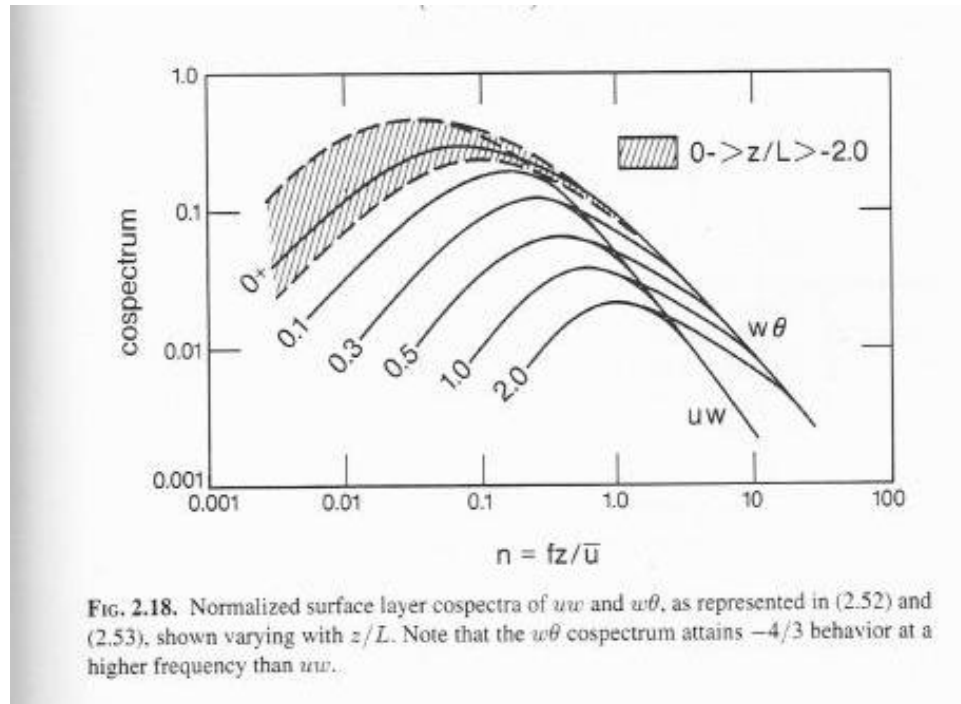
慣性小領域も見える

Kansas実験の結果

Kaimal and Finnigan 1994

教科書 Atmospheric Boundary Layer Flowsより

# Co spectrum



Kaimal and Finnigan 1994

# この頃

- MO相似則は、確かに成立  $\Rightarrow$  密度成層流体の乱流統計理論,  
でも、安定成層時は、今でも難しい。  
(z less profile, wave, intermittent turbulence)
- 水平一様定常仮定を極力満たすように観測条件を設定。観測場所のみならず、時間も、たとえば、朝夕は観測せず日中、夜間のみ観測して統計するなど。
- 他に、粗度高など地面の空気力学的条件
- もちろん、レイノルズ応力や顕熱フラックスは計測された。熱収支の直接観測はまだ。潜熱は残差
- 他に、乱流の中に組織的運動があることも、当時から指摘されていた。立体的な理解はLESまで待つ必要がある。
- 慣性小領域でのコルモゴロフの $-5/3$ 乗則の観測、コルモゴロフ定数からLESのスマゴリンスキー定数。対数則から $k-\epsilon$ のモデル定数など、基礎的な定数を大気でも確認した（と思う）。風洞とはレイノルズ数が違う。



# 粗度高

- 対数則 (= 中立時のMO則) を積分  
(MO則でも同様)

$$u_2 - u_1 = \frac{u^*}{k} \log(z_2 / z_1)$$

あてはめて、 $u_1 = 0$  となる高度  $z_1$  を  $z_0$  とする。  
地面の特性量になる。

- 温度に対しても同様にする。地面の温度を放射  
温度計で計測したもの等に置き換えて処理 (圧力  
による抵抗, ソースの位置の違い, 表面値の定義の相違等でかなり違う値になる)
- キャンピーモデルを使う現在でも、キャンピー直上で  
この値が使われている。

# 粗度高ほか

表 3.9 土地利用別地表面パラメータ (夏用)

土地分類	アルベド	ポーエン比	粗度長 (m)	熱拡散係数 ( $\times 10^{-6} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ )	熱容量 ( $\times 10^6 \text{ J m}^{-3} \text{ K}^{-1}$ )
田	0.10	0.3	0.10	0.67	3.0
畑	0.20	1.0	0.02	0.40	2.0
果樹園	0.15	1.0	0.30	0.30	1.8
他の樹木畑	0.15	1.0	0.20	0.30	1.8
森林	0.10	0.5	2.00	0.15	2.0
荒地	0.25	2.0	0.10	1.40	1.9
建物用地 A	0.13	3.0	1.00	2.30	2.1
建物用地 B	0.15	2.0	0.50	1.00	2.0
幹線交通用	0.25	3.0	0.10	2.00	2.0
その他	0.25	3.0	0.10	1.00	2.0
湖沼	0.07	0.2	0.001	0.15	4.2
河川地 A	0.10	0.2	0.001	0.15	4.2
河川地 B	0.20	1.0	0.01	0.80	2.0
海浜	0.20	0.5	0.001	0.74	2.9
不明	0.20	1.0	0.01	0.70	2.5

木村<sup>117)</sup>, Pielke<sup>76)</sup>, オーク<sup>118)</sup>, 田中ら<sup>84)</sup>を参考に設定.

表 2.1 種々の地球表面のアルベド

(Sellers, 1965 ; List, 1966 ; Paterson, 1969 ; Monteith, 1973)

地表面	備考	アルベド
土壌	暗黒, 湿潤, 明るい, 乾燥	0.05~0.40
砂漠		0.20~0.45
草地	長い (1.0 m) 短い (0.02 m)	0.16~ 0.26
農作地, ツンドラ		0.18~0.25
果樹園		0.15~0.20
森林		
落葉性	裸の 葉のついた	0.15~ 0.20
松柏類		0.05~0.15
水	小天頂角 大天頂角	0.03~0.10 0.10~1.00
雪	古い 新鮮な	0.40~ 0.95
氷	海 氷河	0.30~0.45 0.20~0.40

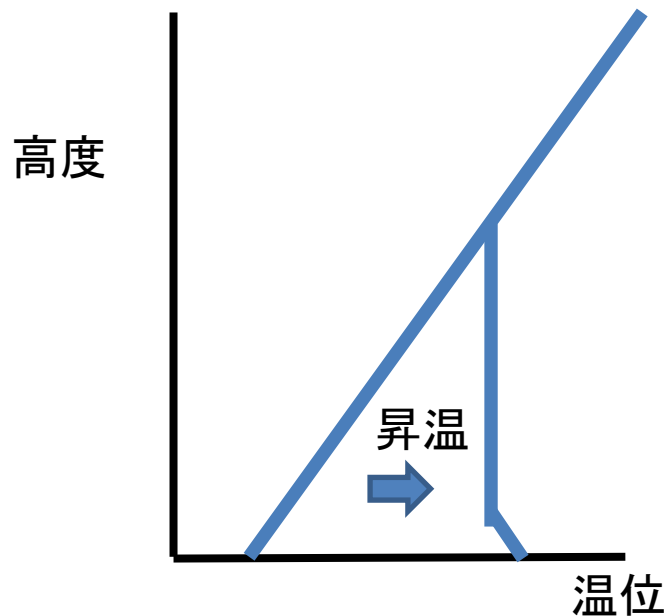
上、人間環境の気象学 近藤裕昭著より  
数値計算に使用したパラメータ

右、基礎気象学 浅井富雄、新田尚、松野太郎著  
より

ちょっと火星を意識して

多分，顕熱フラックスから推定できること

日中の混合層上端の交換率や放射冷却など，さまざまな仮定が必要であるが，温位プロファイルと下端からの熱供給で，混合層高度が推定できるかも。境界層の変化に関する情報



気圧と放射冷却の推定が必要か

# 地表面熱収支

$$(1 - \alpha)Q_{s\downarrow} + Q_{l\downarrow} - Q_{l\uparrow} = Q_n = H + LE + G$$

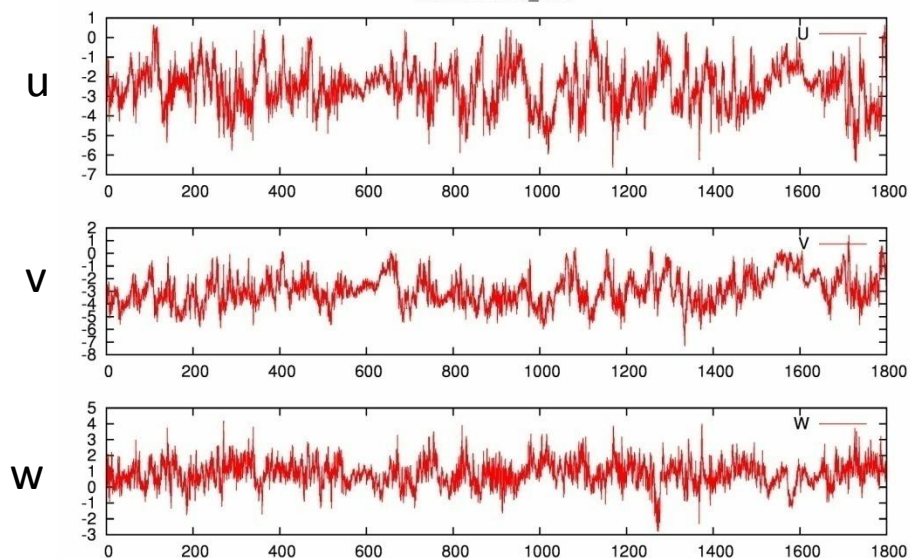
$\alpha$	アルベド	$Q_{s\downarrow}$	日射量
$Q_{l\downarrow}$	上空から地面への長波放射量	$Q_{l\uparrow}$	地面から上空への長波放射量
$Q_n$	放射収支量	$H$	顕熱輸送量
$LE$	潜熱輸送量	$G$	地中熱流量

ここで、 $E$  が蒸発量である。

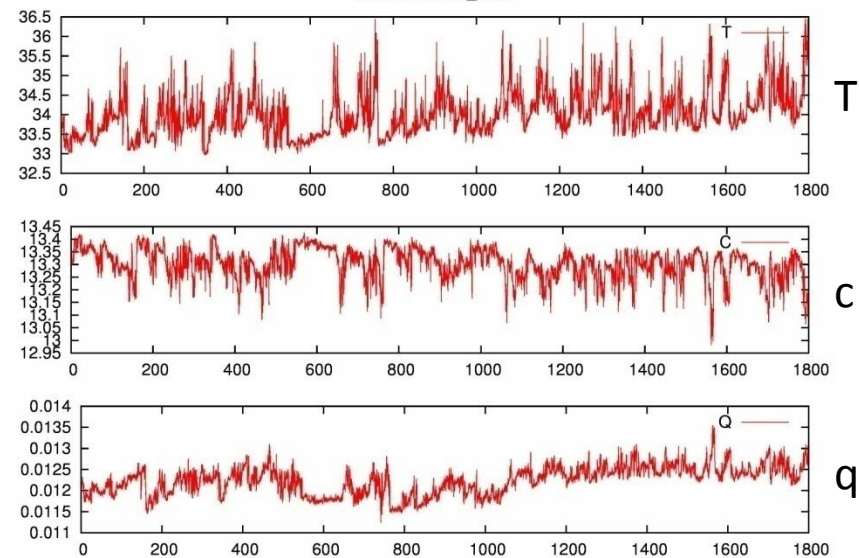
**粗度高等は、 $H$   $LE$  のモデル化に影響**

# Observed data (daytime)

200807221230\_1800



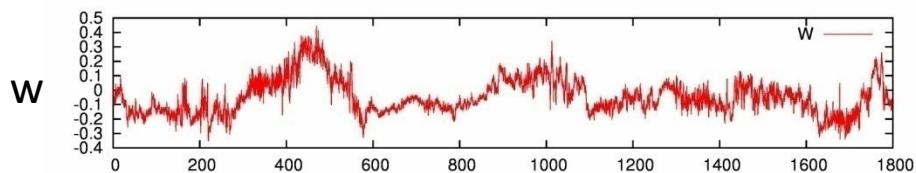
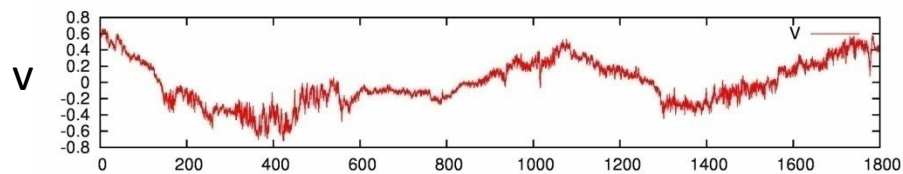
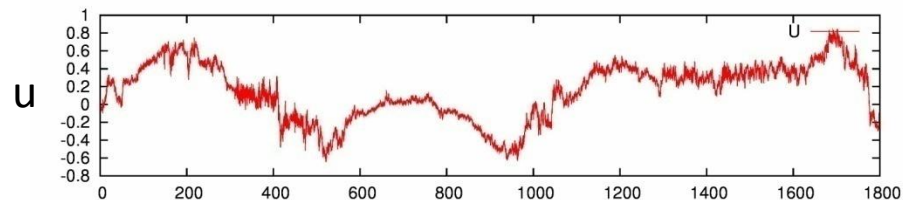
200807221230\_1800



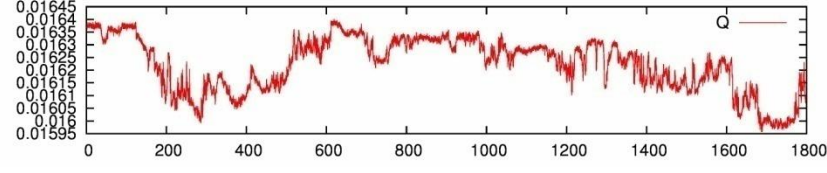
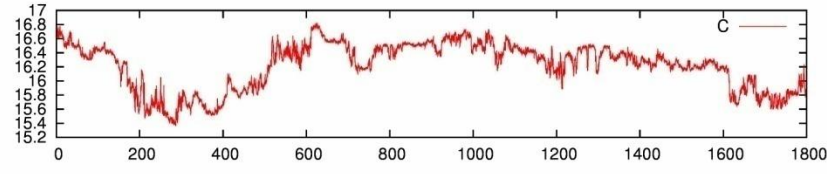
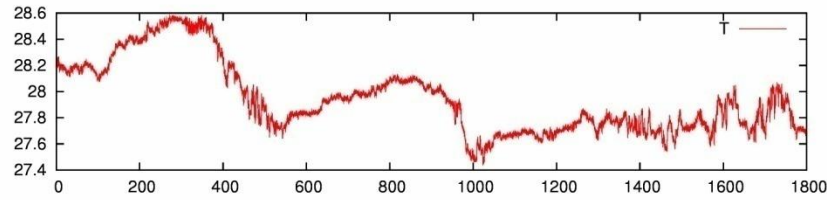
TKC での観測値の例

# Observed data (nighttime)

200807220330\_1800



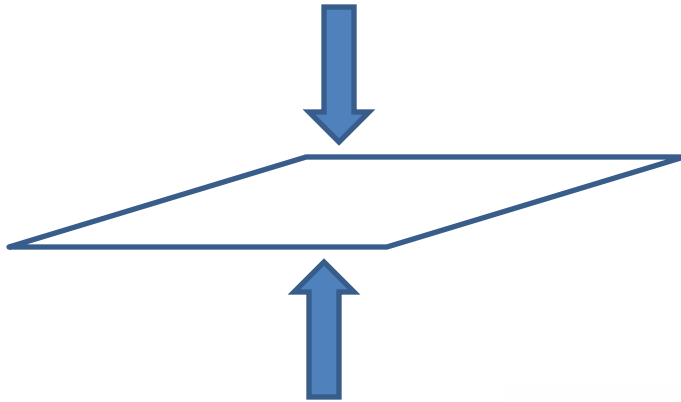
200807220330\_1800



TKCでの観測値の例

# 渦相関法による乱流輸送量推定

Eddy covariance:



$$F = \overline{xw}$$
$$= \cancel{\overline{xw}} + \overline{x'w'}$$

$$x = \bar{x} + x'$$

$$w = \bar{w} + w'$$

$$\bar{w} = 0$$

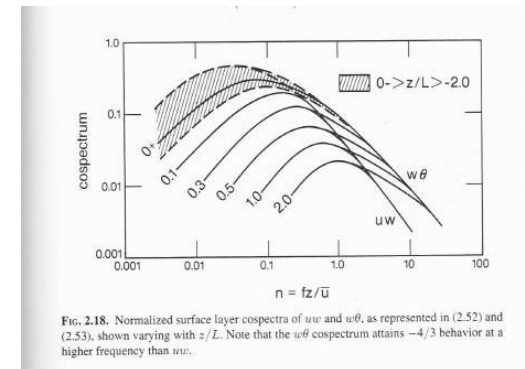
Then assume horizontal homogeneity →

using continuity equation of incompressible fluid:

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} + \frac{\partial \bar{w}}{\partial z} = 0$$

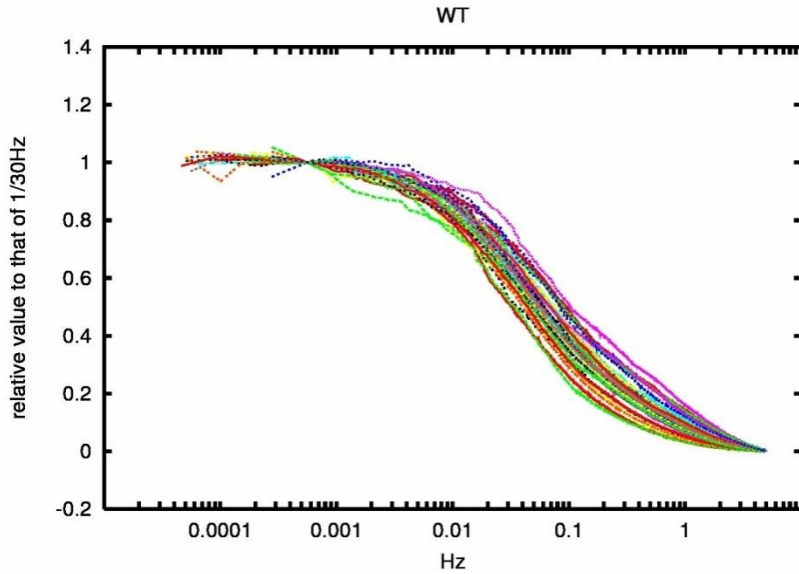
# 平均

- コスペクトルを考慮して，適切な時間で平均処理。
- 乱流（特に，不安定時のプリューム）が十分平均されて統計的に安定する程度に長く，日変化等の影響を受けない程度に短く[wには影響しないはずなので，大丈夫？]
- 高周波側も十分取得する必要

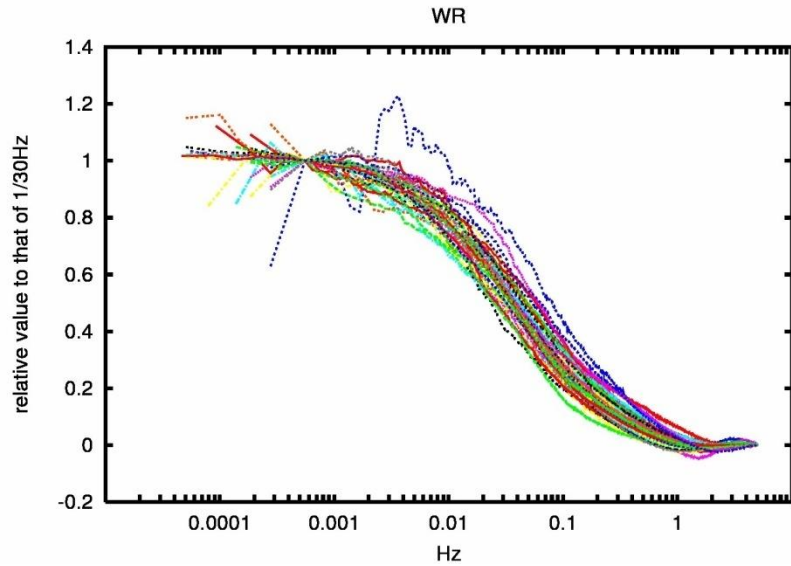




# From GAME-Tibet 1998



Covariance w and T



Covariance w and mixing ratio of water vapor

30分以上なら、あまり問題はないが、水蒸気が雲活動の影響が見える

# 精度良く計測するには

- W の方向 (double rotation, planer fitting)
- WPL 補正 (密度変動による乾燥空気の質量輸送の補償平均風を考慮) CO<sub>2</sub>等では輸送の正負まで変わることもある。
- 風速計自身の影響
- 森林等では, 計測高度以下の貯留や非一様性による鉛直風の考慮

それでも, 森林の場合  $(R_n - G)/(H + LE)$  は 0.7 – 0.9 程度。たとえば Foken, T. 2008. The energy balance closure problem: an overview. *Ecol. Appl.* **18**, 1351-1367.

# そもそも1点では。。。話も

- 神田 学, 渡辺 力, マルコス オリバー レッツェル, ジークフリード ラッシュュ: LESによるインバランス問題に対する検討(第1報)大気境界層スケールの対流構造の影響, 水文・水資源学会誌, 15, 243-252, 2002.

点計測の時系列データに基礎を置く限り,測定点数を増やして厳密に空間平均をとっても,その乱流フラックスは真の水平平均乱流フラックスを過小評価する(負のインバランスが生じる).これは,計測点に於けるローカルな平均鉛直流の熱輸送寄与によるものである

## 境界層内の準定常的循環の影響

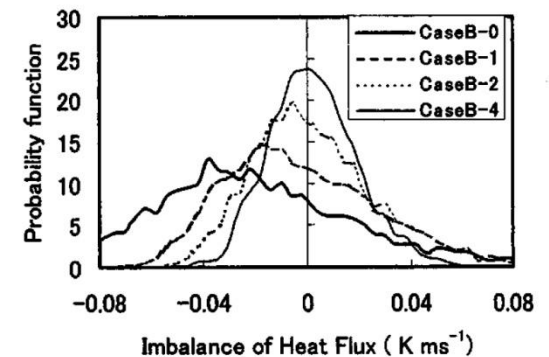
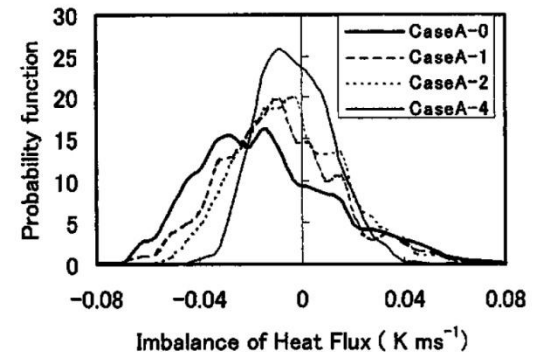


図-3 各格子点におけるインバランス量 $lb$ の確率密度関数 上図が実験A, 下図が実験B. 縦軸は確率密度でインバランス量と逆次元を( $K^{-1}m^{-1}s$ )をもつ.

# 話を戻して，顕熱等の推定

- 1980年代，水蒸気の乱流変動観測が可能になってきた。
- 細線熱電対乾湿球温度計が使われたが，その後，赤外線あるいは紫外線の吸収を利用したGas Analyzer が使われるようになった。

(Ohtaki and Matsui 1998 BLM 24, 109-119)

現在，LI-COR社の製品(LI-7000, LI-7500)が定番

結果，顕熱と潜熱のフラックスが測れるようになったので，熱収支観測が盛んに行われるようになった。

# Field Projects

- 多分, FIFE (The First ISLSCP Field Experiment) あたりが最初(1987-1989)。  
<http://daac.ornl.gov/FIFE/fife.shtml>
- 他に, TOFA-CORE, HEIFE 1991,92に集中観測  
(<http://ssrs.dpri.kyoto-u.ac.jp/~heife/>), BOREAS 1994,96に集中観測  
([http://daac.ornl.gov/BOREAS/bhs/BOREAS\\_Home.html](http://daac.ornl.gov/BOREAS/bhs/BOREAS_Home.html)) など多数
- GEWEX/GAMEでも, 多数の地点で乱流観測が行われた。

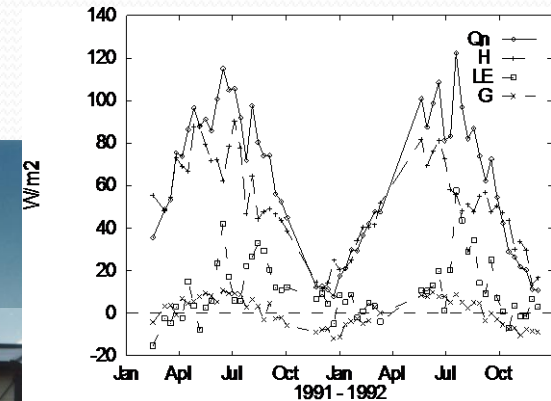
## HEIFE

<http://ssrs.dpri.kyoto-u.ac.jp/~heife/>

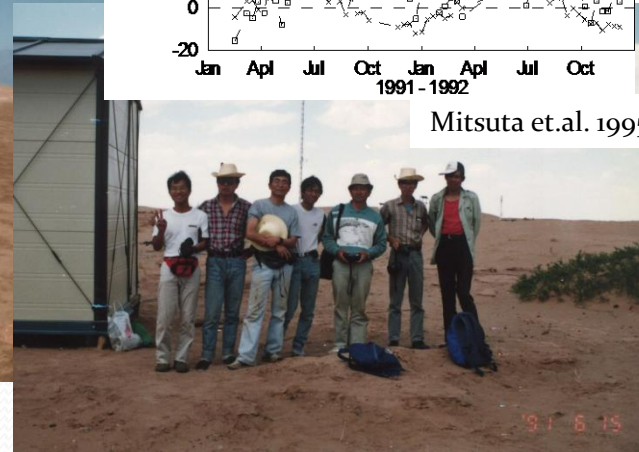
### (Heihe River Basin Field Experiment)



Observation of heat and water exchange over desert.



Mitsuta et.al. 1995



1991 Jun, Aug, Oct, Dec

I was a student!

# HEIFE 1989-1993の乱流観測の様子





# GAME/Tibet

1998 Intensive Observation

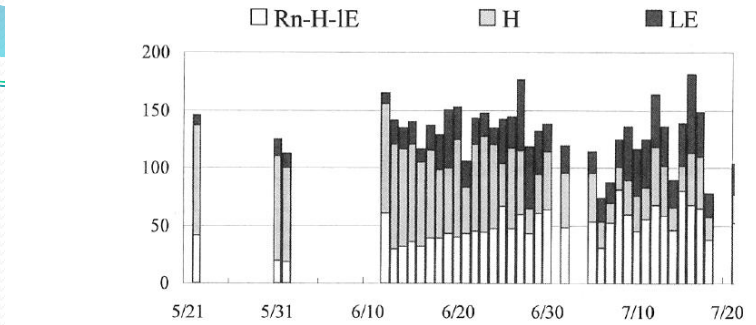


Fig. 11. Surface energy fluxes in daily average.  $100 \text{ W/m}^2$  is equivalent to  $8.64 \text{ MJ/m}^2\text{day}$   $Rn-H-IE$ : the residual flux from SEB equation.  $H$ : the sensible heat flux,  $LE$ : the latent heat flux. The total height of three bars show the net radiation flux ( $Rn$ ).

Tanaka et.al. 2001



I belonged to Nagoya univ.



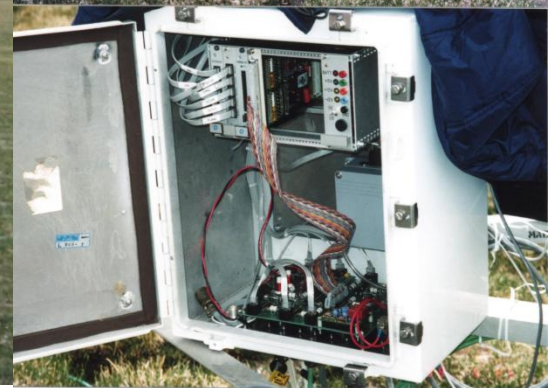
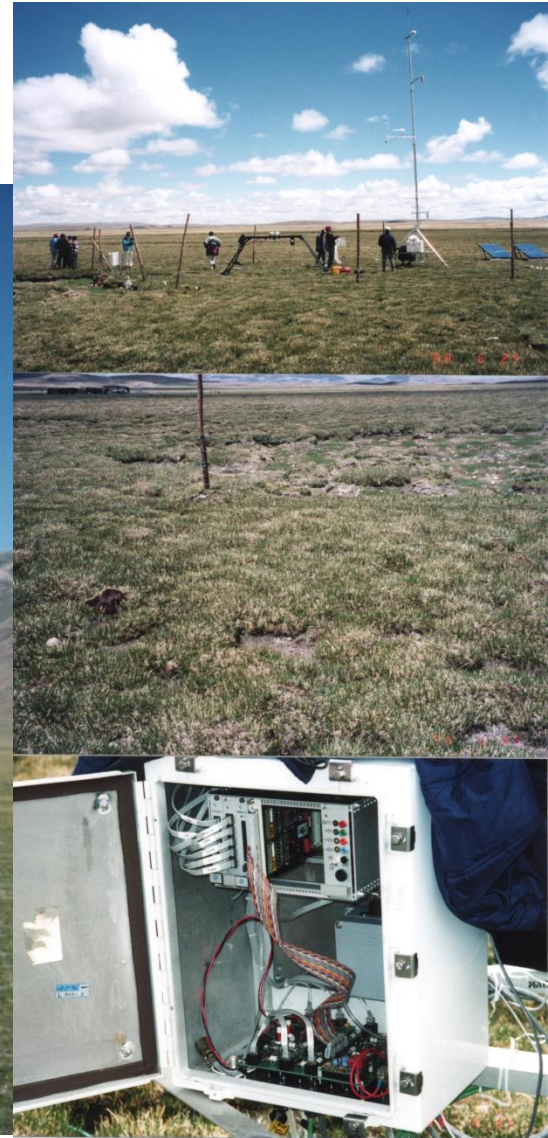
# 観測装置

- 超音波風速温度計 (昔は, ほとんど Kaijo だった。最近は, Gill が多いが, いろいろなメーカーが使われる)
- 赤外線 Gas Analyzer (LI\_COR LI-7500 オープンパス, あるいは同 LI-7000 クローズドパス)
- 昔は, ここに細線抵抗 (あるいは熱電対) 温度計を付けたが最近は付けない。
- 必要に応じて, 傾斜計, 加速度センサー
- 共分散のみが目的なら不要だが, スペクトル解析のためには, ローパスフィルターも必要。(電源ノイズ対策でもある) 今時ならオーバーサンプリングして演算処理か。

# 記録

- 1990年代以前は，統計値のみを保存。あるいは30分前後の期間の乱流データを保存。
- それ以降は，連続的にデータを保存するのが普通。
- サンプリングは，10Hz 程度
- 90年代のFlux-PAMは，10分毎に平均値と共分散を記録。

# Flux-PAM



NCARとGAME(筑波大学)共同開発。太陽電池で動作。  
残念ながら当時とてもよく壊れた。記録制御部の問題

# データ処理の流れ

- データを保存 (1 run = 30分程度)
  - 不良データ, ノイズ除去
  - 座標回転, 補正
  - 平均, 共分散等計算
  - 運動量, 顕熱, 潜熱, CO<sub>2</sub>交換量など算出
- この検討のために  
全データ保存
- 逆にすることも多い
- 

この後, 目的に応じてデータを選別, 欠けているところを実験式で補って, 年間の熱収支, 水収支, 炭素収支の解析へ



# 最近の観測例として 岐阜大学高山常緑針葉樹林サイト

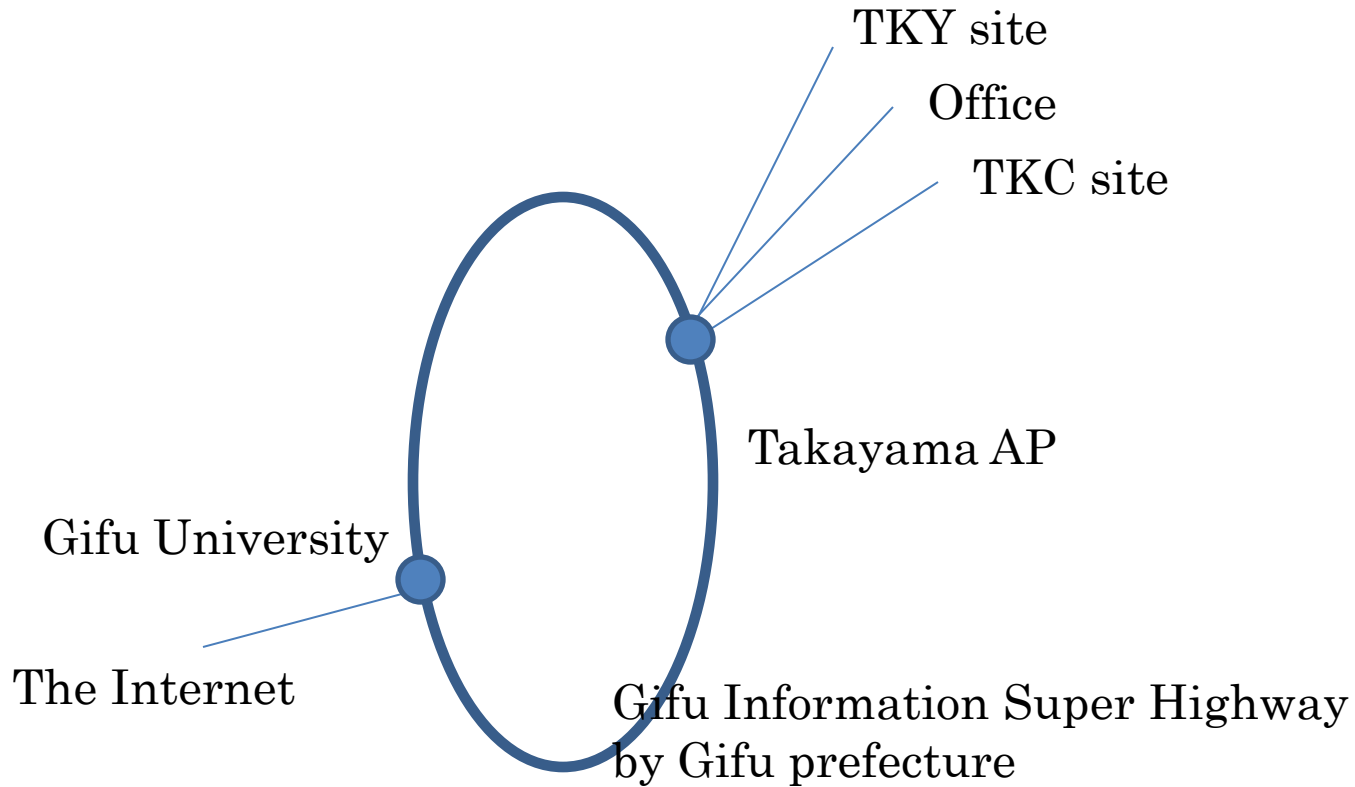


# TKC Tower

- Electric power supply
- Information network



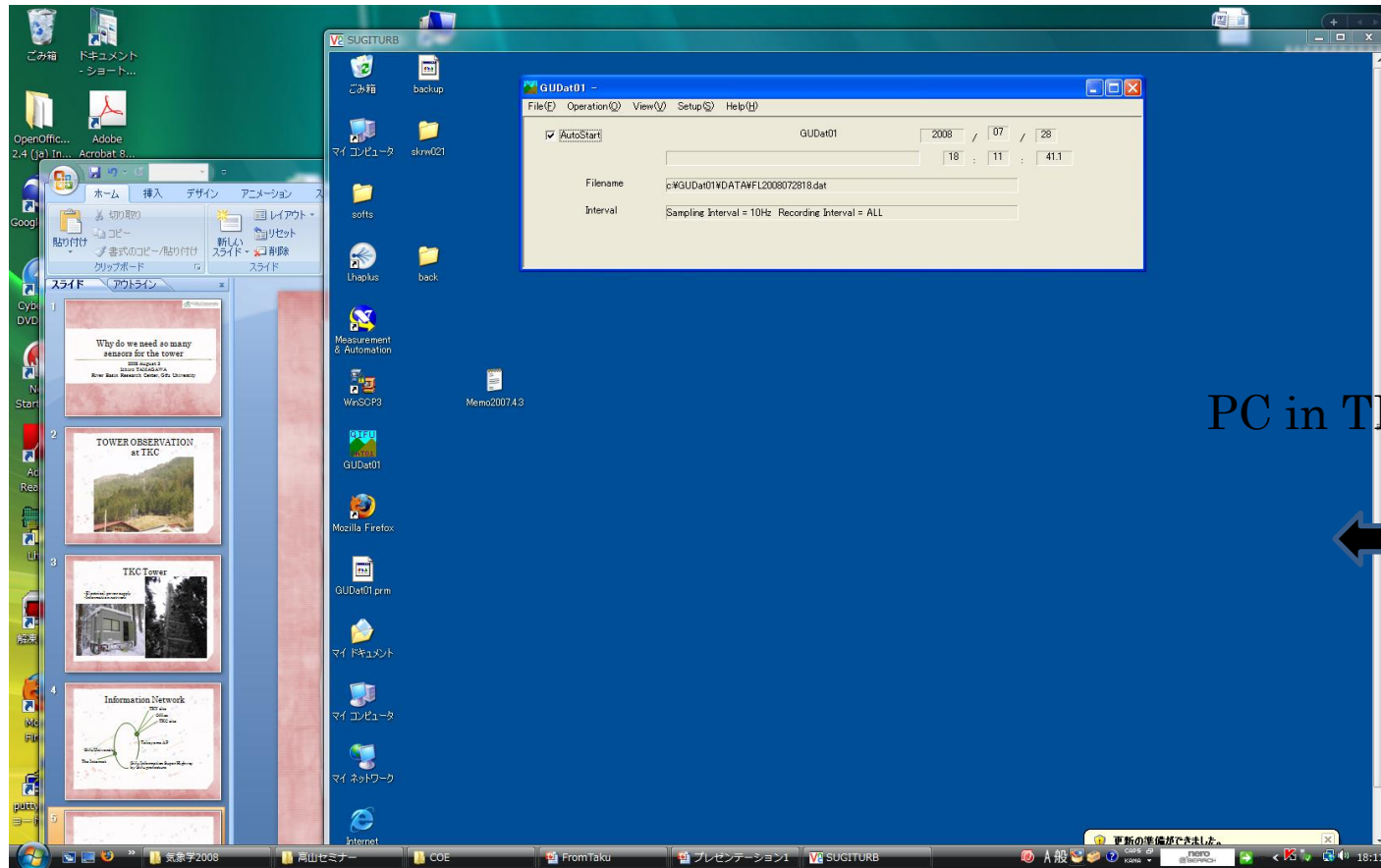
# Information Network





# Use PC at TKC from my laboratory in University

PC in university



PC in TKC site



VNC server and viewer




# WWW camera & PEN

C50 Site in Takayama - Mozilla Firefox

ファイル(E) 編集(E) 表示(V) 履歴(S) ブックマーク(B) ツール(I) ヘルプ(H)

http://sateco-archive.green.gifu-u.ac.jp/C50/

よく見るページ Firefox を使ってみよう 最新ニュース

21世紀COEプログラム「衛星生態学創生拠点」  Gifu University  
Graduate School of Science and Technology


[sateco-archive トップへ](#)

人工衛星による観測を活用した流域における生態系の機能評価のために、その生態系機能の詳細な観測を高山地区で行っています。その集中観測点の一つとして、市東部の標高800mの杉の人工林に観測タワーを設置し、森林観測を行っています。

高山杉林観測タワー

- 観測場所
- タワー、観測小屋
- 観測装置
  - 気象観測
  - CO<sub>2</sub>濃度分布
  - 乱流変動
- 観測データ
- 観測の様子



-  [観測小屋内wwwカメラ](#)  
(現在の様子 10分毎更新)  
2008/07/28 18:07
-  [森林内wwwカメラ](#)  
(現在の様子 10分毎更新)  
2008/07/28 18:14

完了

Mozilla Firefox

ファイル(E) 編集(E) 表示(V) 履歴(S) ブックマーク(B) ツール(I) ヘルプ(H)

http://www.pheno-eye.org/

よく見るページ Firefox を使ってみよう 最新ニュース

PEN TKC\_

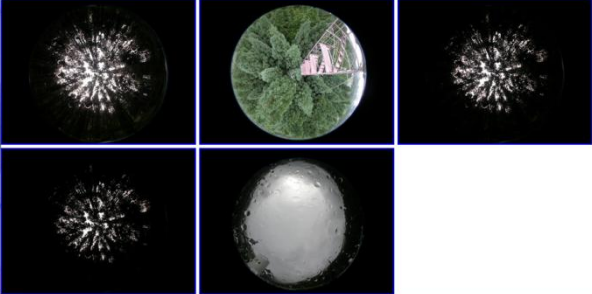
[summary\\_observation\\_log](#)

[original\\_data](#)

[summary\\_data](#)

[PEN\\_mother\\_server](#)

Mon Jul 28 17:46:01 JST 2008 DOY: 210



完了

# Sensors on Tower (1/2)

Table. 1(Part1) Instruments for measuring meteorological elements

Parameter	Position	Symbol	LI Data number	Instrument	Model, Manufacturer	Data logger
Downward shortwave radiation	30.5 m	SWin	45	Pyrheliometer	CM-6B, Kipp&Zonen, Delft, Netherlands	
Upward shortwave radiation	29.7 m	SWout	46			
Downward longwave radiation	30.5 m	LWRin	49	Pyrgometer	CG3, Kipp&Zonen, Delft, Netherlands	
Upward longwave radiation	29.7 m	LWRout	50			
Downward PPFd*	30.5 m	PARin	47	Quantum Sensor	LI-190SZ, Li-Cor, Lincoln, NE, USA	
Upward PPFd	29.7 m	PARout	48			
Rainfall	30.9 m	Rain	51	Tipping bucket rain gauge	RH-5A, Ikeda Keiki, Tokyo, Japan	
Wind Speed	31.0 m	Winds31	14 or 17	Cup-anemometer	A100L2, Vector, LHYL, UK	
	23.4 m	Winds23	15 or 18			
	2.0 m	WindS1	16 or 19			
	2.0m	WindS2	59	Sonic anemometer	WindSonic, Gill instruments, Hampshire, UK	
	6.5 m	WindS6	60			
Wind Direction	30.9 m	WindD30	12 or 13	Potentiometer Windvane	W200P, Vector, LHYL, UK	
	2.0 m	WindD2	61	Sonic anemometer	WindSonic, Gill instruments, Hampshire, UK	
	6.5 m	WindD6	62			
Air temperature	30.2 m	Temp30	27	Humidity and temperature probe	HMP45A, VAISALA, Vantaa, Finland	CR23X, Campbell Scientific, Logan, UT, USA
	22.8 m	Temp22	26			
	18.4 m	Temp18	25			
	14.7 m	Temp14	24			
	10.6 m	Temp10	23			
	6.5 m	Temp7	22			
	3.6 m	Temp4	21			
	1.3 m	Temp1	20			
	29.3 m	Tempcal	29			
1.5 m	Temp2	28				
Relative Humidity	30.2 m	RH30	37	Humidity and temperature probe	HMP45A, VAISALA, Vantaa, Finland	
	22.8 m	RH22	36			
	18.4 m	RH18	35			
	14.7 m	RH14	34			
	10.6 m	RH10	33			
	6.5 m	RH7	32			
	3.6 m	RH4	31			
	1.3 m	RH1	30			
	29.3 m	RHcal	39			
1.5 m	RH2	38				

# Sensors on Tower (2/2)

Table. 1(part2) Instruments for measuring meteorological elements

Parameter	Position	Symbol	LI Data number	Instrument	Model, Manufacturer	Data logger
CO2 concentration	30.2 m	C30		Closed-path CO2 IRGA (Infrared Gas Analyzer)	LI-820, Li-Cor, Lincoln, NE, USA	CR10X, Campbell Scientific, Logan, UT, USA
	22.8 m	C22				
	18.4 m	C18				
	14.7 m	C14				
	10.6 m	C10				
	6.5 m	C7				
	3.6 m	C4				
Surface Temperature	30.0 m	SufT30	40	Infrared Thermometer	MI-710, OPTEX, Siga, Japan	
	22.0 m	SufT22	41			
	2.0 m	SufT2	42			
Li7500 Body temperature	30.2 m	TC_T1	63	Thermocouple (Type K)	KFT-25-200-200(P), ANBE SMT, Kanagawa, Japan	
Air Pressure	1.5 m	Pre	43	Digital Barometer	PTB220, VAISALA, Vantaa, Finland	
Snow Depth	3.32 m	SnowD	44	Sonic Ranging Sensor	SR50, Campbell Scientific, Logan, UT, USA	
PPFD on the forest floor		PAR1	52	Quantum Sensor	LI-190SB, Li-Cor, Lincoln, NE, USA	CR23X, Campbell Scientific, Logan, UT, USA
		PAR2	53		IKS-27, Koito, Tokyo, Japan	
		PAR3	54		IKS-27, Koito, Tokyo, Japan	
		PAR4	55		IKS-25, Koito, Tokyo, Japan	
		PAR5	56		IKS-25, Koito, Tokyo, Japan	
		PAR6	57		IKS-25, Koito, Tokyo, Japan	
		PAR7	58			
soil temperature	-5 cm	SoiT5	2	Temperature Probe	Model 107, Campbell Scientific, Logan, UT, USA	
	-10 cm	SoiT10	3			
	-15 cm	SoiT15	4			
	-20 cm	SoiT20	5			
	-40 cm	SoiT40	6			
Volumetric water content	-5 cm	SWC5	7	TDR (Water Content Reflectometer)	CS616, Campbell Scientific, Logan, UT, USA	
	-10 cm	SWC10	8			
	-15 cm	SWC15	9			
	-20 cm	SWC20	10			
	-40 cm	SWC40	11			

\*PPFD (Photosynthetically photon flux density)

updated on December 22, 2006

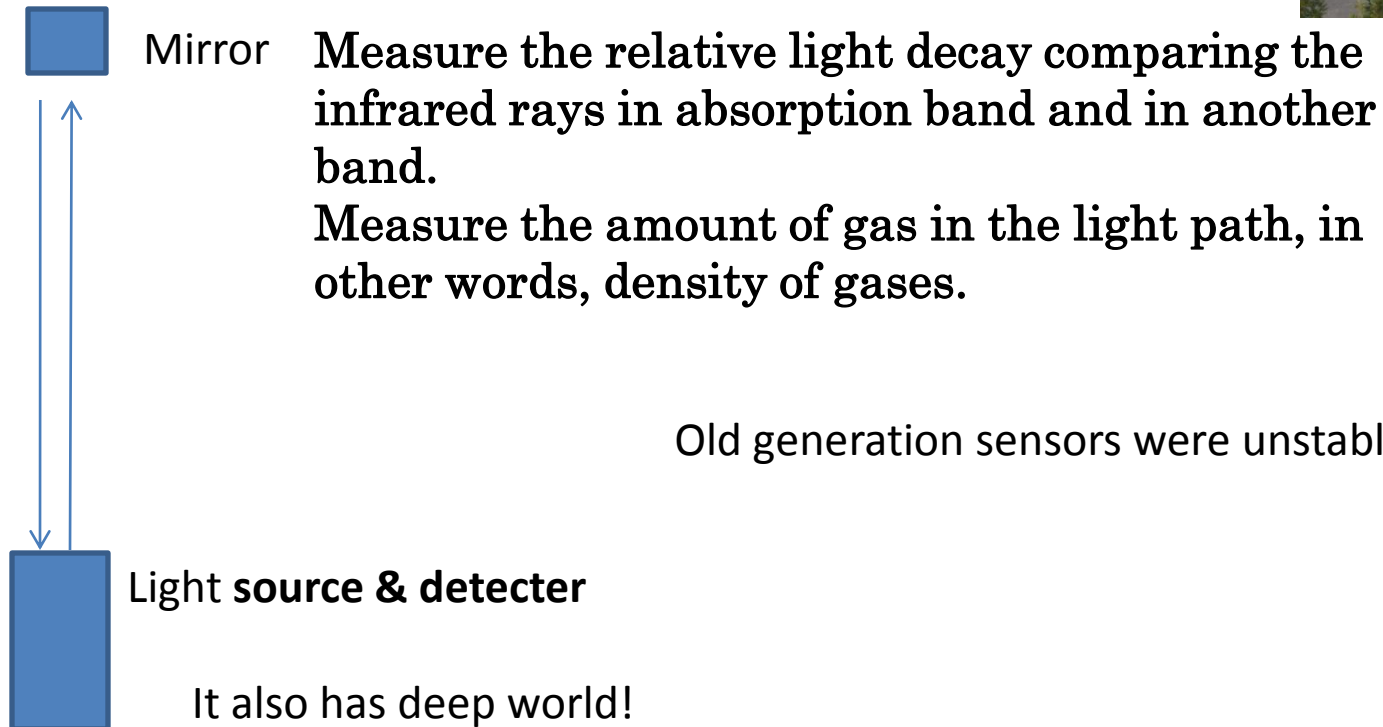
# Also flux measuring system

- Sonic anemometer and thermometer (R3-50, Gill)
- Infrared  $\text{H}_2\text{O}$  and  $\text{CO}_2$  analyzer LI-7500(LI-COR)



# Flux measurement

## Infrared H<sub>2</sub>O CO<sub>2</sub> analyzer



# Flux measurement

## Infrared H<sub>2</sub>O CO<sub>2</sub> analyzer



Mirror

It also has deep world! Ex. Heating by sensor itself



ELSEVIER

Available online at [www.sciencedirect.com](http://www.sciencedirect.com)

 ScienceDirect

Agricultural and Forest Meteorology 147 (2007) 48–57

AGRICULTURAL  
AND  
FOREST  
METEOROLOGY

[www.elsevier.com/locate/agrformet](http://www.elsevier.com/locate/agrformet)

Fine-wire thermometer to correct CO<sub>2</sub> fluxes by  
open-path analyzers for artificial density fluctuations

Achim Grelle<sup>a,\*</sup>, George Burba<sup>b</sup>

<sup>a</sup> Swedish University of Agricultural Sciences, Department of Ecology, Sweden

<sup>b</sup> LI-COR Biosciences, Lincoln, NE, USA

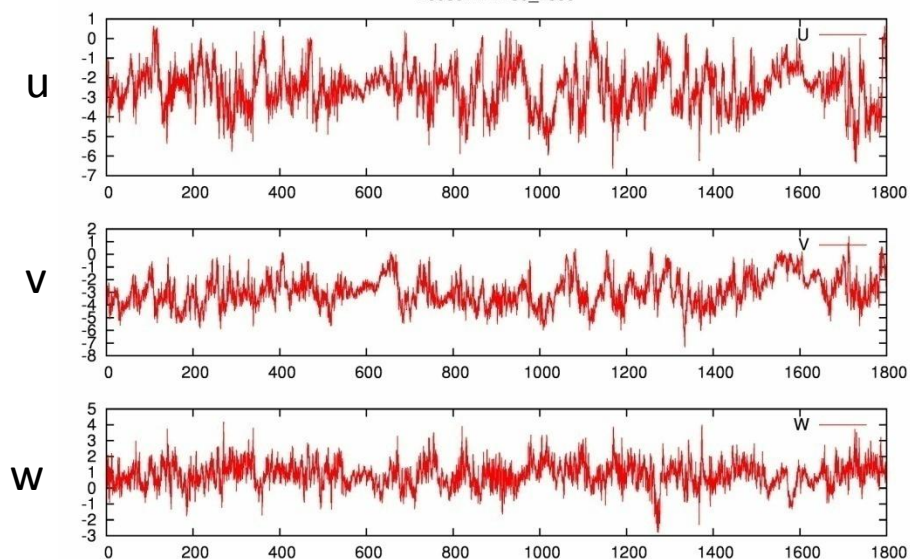
Received 27 April 2007; received in revised form 13 June 2007; accepted 19 June 2007



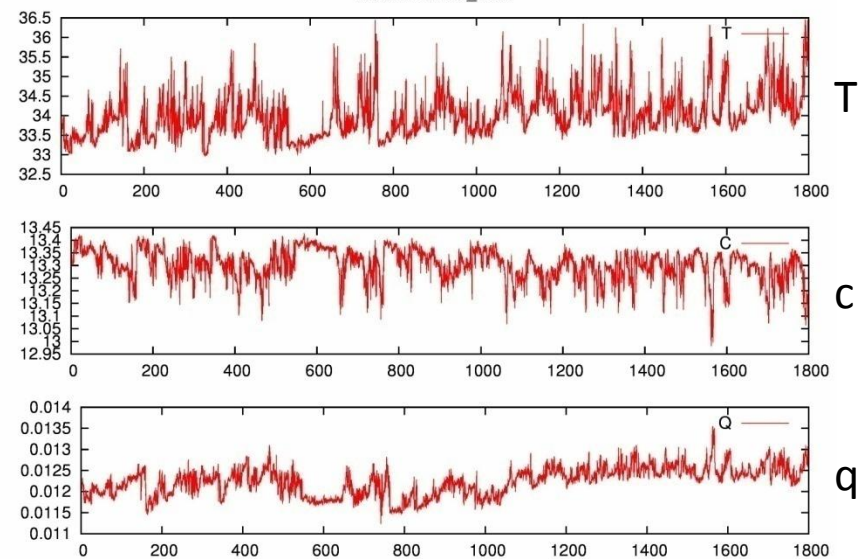
筐体の熱の影響の補正

# Observed data (daytime)

200807221230\_1800



200807221230\_1800

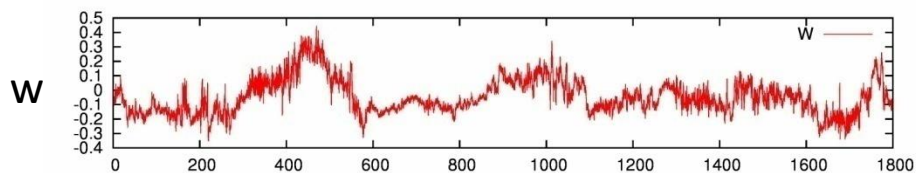
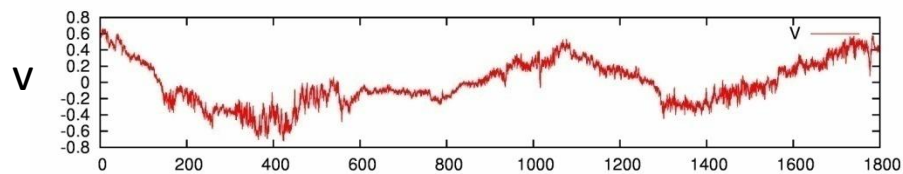
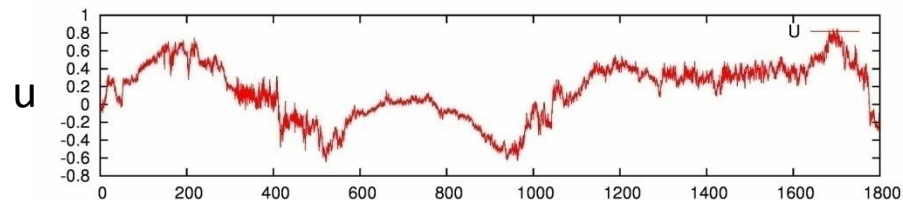


TKC での観測値の例

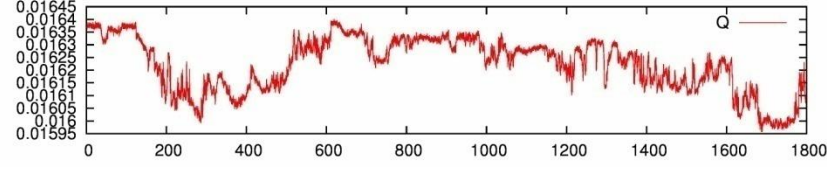
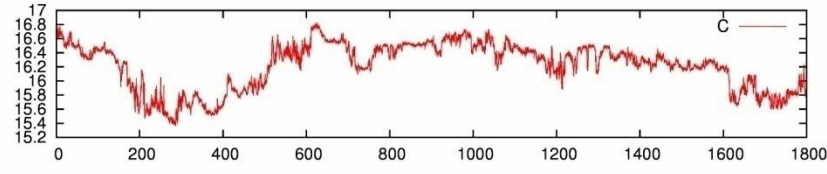
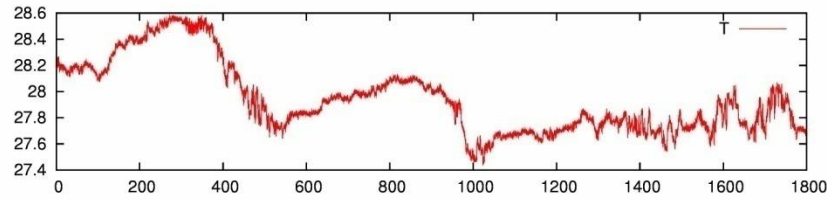


# Observed data (nighttime)

200807220330\_1800



200807220330\_1800



TKCでの観測値の例



# Eddy Covariance

- Horizontally homogeneous condition
  - ➔ EC is direct measurement of flux at the measuring point
- Perfectly Steady condition
  - ➔ Storage between measuring point and surface can be neglected.



**REAL FLUX from surface**

# Eddy Covariance

AVERAGE:

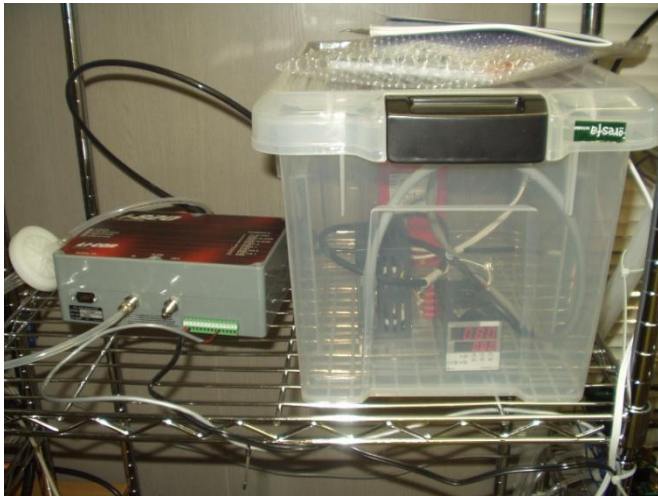
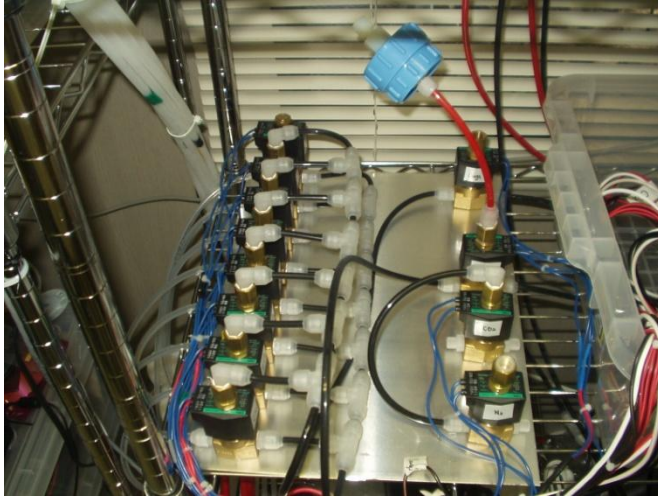
We must choose it to obtain

**statistically stable covariance!**

**Representativeness of the area**

**We want assume that convective plumes  
and other circulations pass through the  
observation point**

# CO2 profile measuring system



# Heat budget (1 dim.)

$$(1 - \alpha)Q_s + Q_{l\downarrow} - Q_{l\uparrow} = Q_n$$

$$Q_n = H + LE + G + S$$

where  $\alpha$ : albedo,  $Q_s$ : solar radiation,  $Q_{l\downarrow}$ : long wave radiation from atmosphere,  $Q_{l\uparrow}$ : long wave radiation to atmosphere,  $Q_n$ : net radiation,  $H$ : sensible heat flux,  $LE$ : latent heat flux,  $G$ : heat into ground,  $S$ : storage by canopy

- Heat budget must be satisfied by energy conservation (if horizontally homogeneous).

# Radiation observation



# Ground observation



# So many sensors for profiles

Table. 1(Part1) Instruments for measuring meteorological elements

Parameter	Position	Symbol	LT Data number	Instrument	Model, Manufacturer
Downward shortwave radiation	30.5 m	SWin	45	Pyheliometer	CM-6B, Kipp&Zonen
Upward shortwave radiation	29.7 m	SWout	46		
Downward longwave radiation	30.5 m	LWRin	49	Pyrometer	CG3, Kipp&Zonen, I
Upward longwave radiation	29.7 m	LWRout	50		
Downward PPFDF*	30.5 m	PARin	47	Quantum Sensor	LI-190SZ, Li-Cor, Li
Upward PPFDF*	29.7 m	PARout	48		
Rainfall	30.9 m	Rain	51	Tipping bucket rain gauge	RH-5A, Ikeda Keiki,
Wind Speed	31.0 m	Winds31	14 or 17	Cup-anemometer	A100L2, Vector, LH
	23.4 m	Winds23	15 or 18		
	2.0 m	Winds1	16 or 19		
	2.0m	Winds2	59	Sonic anemometer	WindSonic, Gill instr
	6.5 m	Winds6	60		UK
Wind Direction	30.9 m	WindD30	12 or 13	Potentiometer Windvane	W200P, Vector, LH
	2.0 m	WindD2	61	Sonic anemometer	WindSonic, Gill instr
	6.5 m	WindD6	62		
Air temperature	30.2 m	Temp30	27	Humidity and temperature probe	HMP45A, VAISALA
	22.8 m	Temp22	26		
	18.4 m	Temp18	25		
	14.7 m	Temp14	24		
	10.6 m	Temp10	23		
	6.5 m	Temp7	22		
	3.6 m	Temp4	21		
	1.3 m	Temp1	20		
	29.3 m	Tempcal	29		
	1.5 m	Temp2	28		
Relative Humidity	30.2 m	RH30	37	Humidity and temperature probe	HMP45A, VAISALA
	22.8 m	RH22	36		
	18.4 m	RH18	35		
	14.7 m	RH14	34		
	10.6 m	RH10	33		
	6.5 m	RH7	32		
	3.6 m	RH4	31		
	1.3 m	RH1	30		
29.3 m	RHcal	39			
1.5 m	RH2	38			

Table. 1(part2) Instruments for measuring meteorological elements

Parameter	Position	Symbol	LT Data number	Instrument
CO2 concentration	30.2 m	C30		Closed-path CC (Infrared Gas A
	22.8 m	C22		
	18.4 m	C18		
	14.7 m	C14		
	10.6 m	C10		
	6.5 m	C7		
Surface Temperature	3.6 m	C4		Infrared Therm
	1.3 m	C1		
	30.0 m	SuT30	40	
	22.0 m	SuT22	41	
Li7500 Body temperature	2.0 m	SuT2	42	Thermocouple (
	30.2 m	TC_T1	63	
Air Pressure	1.5 m	Pre	43	Digital Baromet
Snow Depth	3.32 m	SnowD	44	Sonic Ranging
PPFD on the forest floor		PAR1	52	Quantum Senso
		PAR2	53	
		PAR3	54	
		PAR4	55	
		PAR5	56	
		PAR6	57	
		PAR7	58	
soil temperature	-5 cm	Soil15	2	Temperature Pr
	-10 cm	Soil10	3	
	-15 cm	Soil15	4	
	-20 cm	Soil20	5	
	-40 cm	Soil40	6	
Volumetric water content	-5 cm	SWC5	7	TDR (Water Cc Reflectometer)
	-10 cm	SWC10	8	
	-15 cm	SWC15	9	
	-20 cm	SWC20	10	
	-40 cm	SWC40	11	

\*PPFD (Photosynthetically photon flux density)



# 近年の観測

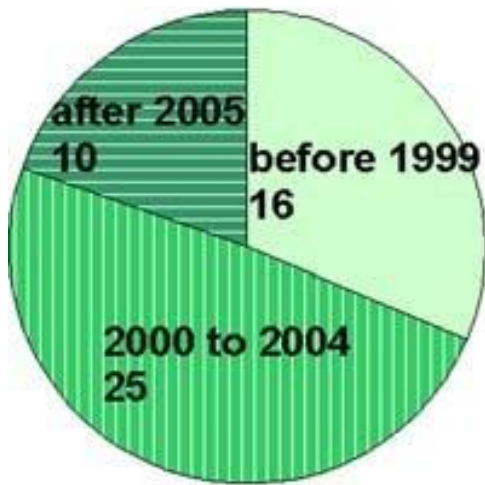
- 近年の乱流観測は、おもに大気と地面との間の交換量の観測を目的としている。
- 風速, 気温, 湿度, CO<sub>2</sub>濃度等の鉛直分布と, その交換に関わる, 放射量, 地温, 水分量など多くの観測とともに行われる。
- 観測したということ自身が重要な未知の場所は, 地球では多分もうない。(極域, チベット, ヒマラヤ, 砂漠, 海洋上, 森林, 都市)
- 多数地点の観測もすでに CASES-97, 99 (<http://www.cora.nwra.com/cases/CASES-99.html>), CAPS2002, 03 (<http://tama.green.gifu-u.ac.jp/~tama/flux/>), Aubinet
- FLUXNETによる陸面モニター (炭素が中心的話題)

# Asia Flux FLUXNETのアジア版

- Mizuguchi et. al. 2009, J. For Res.

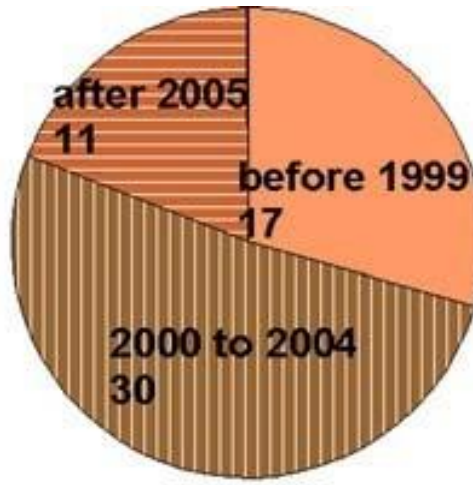
各サイトの計測開始時期

合計109サイト



Forest

森林サイト



Un-forested

森林以外のサイト

ただし、すでに論文化されているサイトは少ない!!

年積算NEE(またはNEP)の報告があるサイトは

森林サイトで 23

非森林サイトで 8

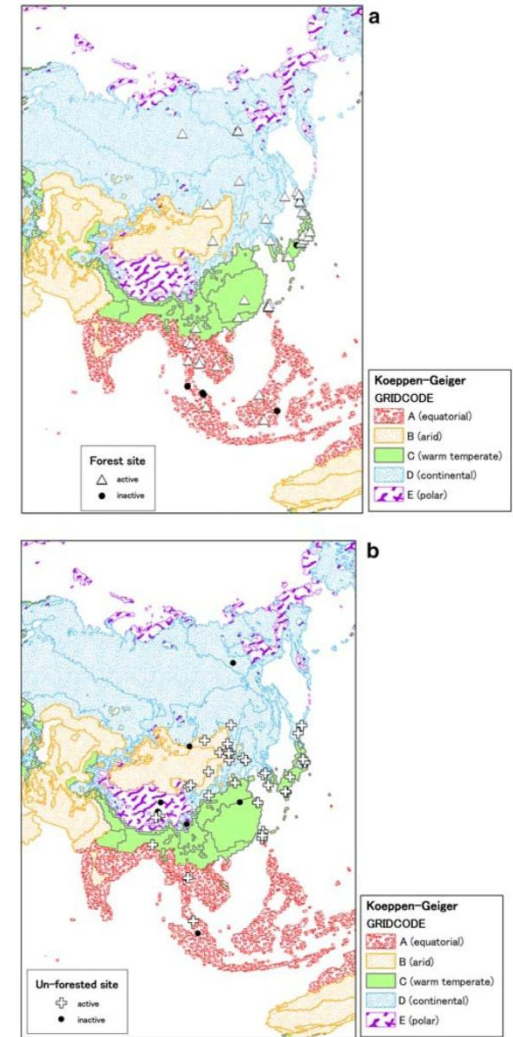


Fig. 3 Tower flux observation sites on the Koeppen-Geiger climate classification map (Kottek et al. 2006). GIS format data for climate classification were downloaded from the Internet (URL: <http://koeppen-geiger.vu-wien.ac.at/>). (a) forest sites, (b) un-forested (grassland, cropland, and other land cover) sites



# タワーフラックス観測マニュアル



環境省地球環境保全試験研究プロジェクト「アジア陸域炭素循環観測のための長期生態系モニタリングとデータのネットワーク化促進に関する研究」

森林総合研究所、農業環境技術研究所、産業技術総合研究所、国立環境研究所の四機関合同

## 内容

### 1. 観測計画とフラックス観測サイトの選定

- 1.1 観測サイトの選定
- 1.2 インフラの整備
- 1.3 観測項目の選定

### 2. 乱流系観測

- 2.1 超音波風速温度計
- 2.2 オープンパス型CO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>O分析計
- 2.3 クローズドパス型CO<sub>2</sub>分析計
- 2.4 貯留変化量
- 2.5 簡易渦集積法
- 2.6 データロガー
- 2.7 ノイズのチェックと対策

### 3. 微気象観測

- 3.1 放射
- 3.2 風向・風速
- 3.3 気温
- 3.4 湿度
- 3.5 地温・地中熱流量
- 3.6 土壌水分
- 3.7 降水量・積雪調査
- 3.8 水位・水温・灌漑・排水量
- 3.9 データロガー

# 内容例（ノイズ対策）

ノイズの問題は対策を施そうとしても、一体どこをどのように対策してよいか非常に難しい問題となる場合が多くある。ノイズに強い観測システムの設計のためには以下の点に注意すべきである。

- 1) 計測器の電源には、電力機器用の電源とは別系統の電源を用いる。ノイズカットトランスなどを用いて分離することが有効である。
- 2) トランスやフィルタを使用した時は、1次側と2次側のラインは接近しないように分離して配線する。
- 3) 電力ラインと信号ラインをなるべく離す。やむを得ず交叉する場合は直交させる。観測小屋や観測タワーの配線では違う取り入れ口や鉛直パイプを使い、両者の配線位置を明確に分離する。
- 4) 信号線はできるだけ短くし、余りの部分をループ状にしない。
- 5) 測器やデータロガー、信号線などを、ノイズを発生していると思われる機器からなるべく離す。
- 6) アースの取り方には充分注意する。計測器同士のアースをつないで、しっかりしたアース端子に接続する。

### Tips!

温度センサと一体となった防水型のデータロガーの内部にシリカゲルを入れてしっかりと密閉すると、基盤の結露による不具合を防ぐことが出来る。シリカゲルは適時、交換する。

### Tips!

スパイラルチューブあるいは樹脂製の保護管でケーブルを保護することにより、ネズミなどに噛み切られることを防ぐことが出来る。

Tips 3.5-2

### Tips!

1ヶ所で複数の深度の地温を測定する場合、センサを埋設した後は、どのケーブルがどの深度のセンサのものが解らなくなる。そのため地表面付近やロガー結線部などに、測定深度を記したタグをつけておくと、その後のメンテナンス時に便利である。

Tips 3.5-1

# 近年の観測まとめ

- 乱流と通常気象観測だけではなく、総合的観測が求められている
- マニュアル化、標準化が進んで、多くの研究者が参入できるようになっている。
- 観測目的は、地面（植生）の活動のモニター
- モデル化および検証のためのデータ、衛星観測の地上検証データに使われる。
- 多地点を集めて、地球のモニター

# 火星

- 6hPa, 180 ± 30K, 自転周期 24時間37分, 公転周期 687日, 重力  $0.38 * 9.8 \text{ m/s}^2$  大気成分CO<sub>2</sub> (一般気象学 小倉1984より)
- 乱流の統計理論には, 一応, 密度や組成は出てこない。
- 非圧縮仮定が崩れたら未知の世界 (航空力学にある?)
- 地上のモニターとしては, 地表面状態(粗度)。放射観測と地温観測があれば, 熱収支。CO<sub>2</sub>の潜熱輸送?
- 顕熱から境界層高度?
- 温室効果気体なので, 放射冷却も多そう。
- ダストを巻き上げるシア一応力のモニター (地球では, 風送ダストのプロジェクトがあった。三上正男ら, 風速の3乗でダストが飛ぶ)
- そもそも風速, 風向のモニター。大気擾乱。日変化, 年変化。