

# 大気－地表相互作用の観測

環境学研究科  
田中広樹

## 本日の講義内容

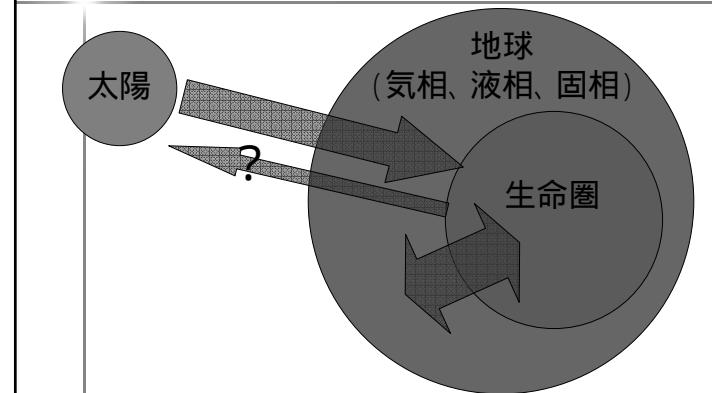
- はじめに
  - 地球学とは？
  - 大気－地表相互作用の観測とは？
- 方法
  - 状態量(温度、湿度)を測る
  - 放射エネルギー(放射フラックス)を測る
  - 移動速度(乱流フラックス)を測る

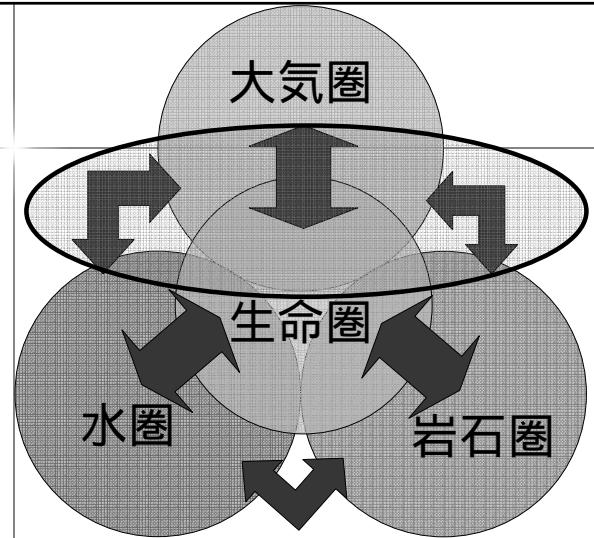
## 地球学とは？

太陽・地球・生命圏相互作用系の変動学

- **太陽**: 地球の(唯一の)駆動力・エネルギー源として作用する。
- **地球**: 大気圏、水圏、岩石圏(、生命圏)から構成され、それぞれが相互に作用しあう
- **生命圏**: 水圏、大気圏、岩石圏にまたがって、それぞれの場と相互に作用しあう
- 地球学とは、これらの相互作用系全体の姿を認識した上で、個別の諸過程を理解する科学
- 個別の諸過程を認識し、システム全体の姿を理解する科学

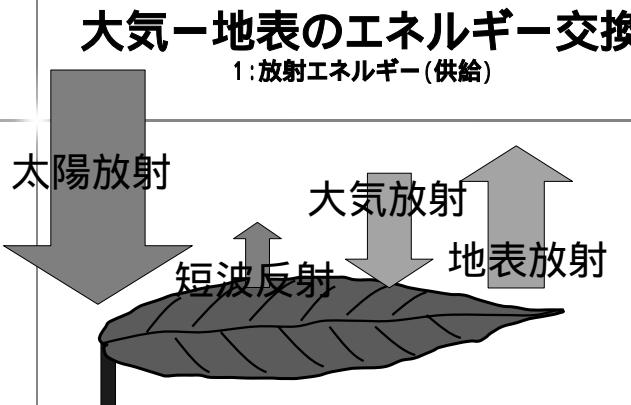
## 太陽・地球・生命圏相互作用系の変動学



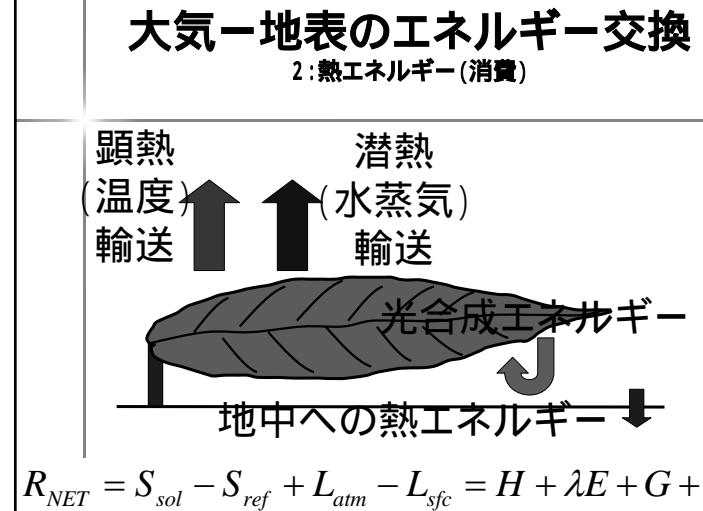


## 大気-地表相互作用とは？ 主に、(熱)力学的側面に着目して

- 大気から地表への作用
  - 大気からの熱放射
  - 乱流によるエネルギー・物質輸送
  - 降水による水の供給
  - 太陽放射の大気・雲による吸収・散乱
- 地表から大気への作用
  - 地表からの熱放射
  - 地表からのエネルギー・物質供給(蒸発散など)
  - 地表面粗度による運動エネルギーの吸収
  - 地表面による短波放射の反射



$$R_{NET} = S_{sol} - S_{ref} + L_{atm} - L_{sfc}$$



$$R_{NET} = S_{sol} - S_{ref} + L_{atm} - L_{sfc} = H + \lambda E + G + P$$

## 大気－地表相互作用の観測

- 作用の生じる状況(状態量)を測る
- 作用自体(移動速度、フラックス)を測る
- 作用の結果(状態量の変化)を測る
- 状況と作用と結果の諸現象を理解する
- 状況と作用と結果の関係を解明する  
= 相互作用のメカニズムを解明する

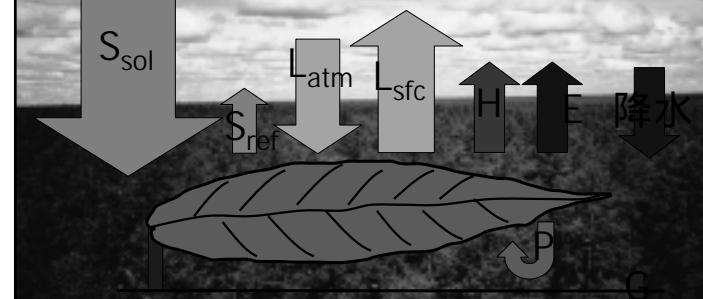
## 観測研究の位置付け

- 真の現象理解
  - 自然現象は複雑、測らなければ分からぬ。
  - 観測(測器)の進化が、現象理解を促進する。
- メカニズムの解明、一般化、モデル化
  - モデルの基礎(式)を導く。
  - モデル(出力)の検証を行う。
  - 観測結果と合わなければ(検証しなければ)、モデル計算は、机上の空論。

## 私のキャッチフレーズ

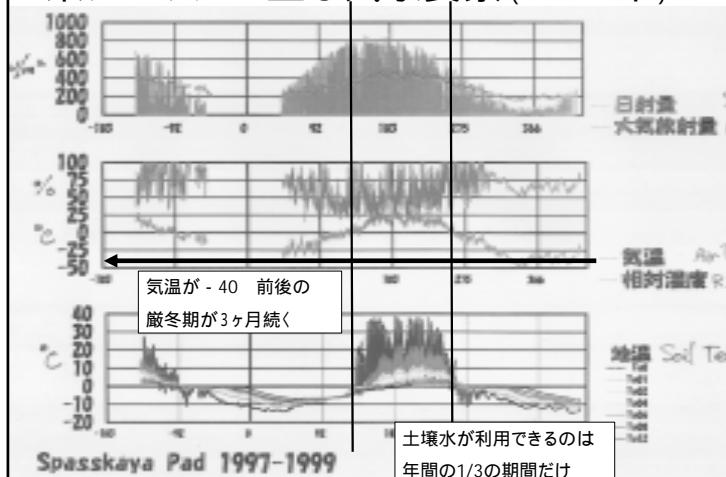
- モデル計算結果がひとり歩きしだす前に！
- 観測事実こそが、唯一の真実！
- 地球学は地道なフィールド観測が支える！

## 大気－地表のエネルギー交換



$$R_{NET} = S_{sol} - S_{ref} + L_{atm} - L_{sfc} = H + \lambda E + G + P$$

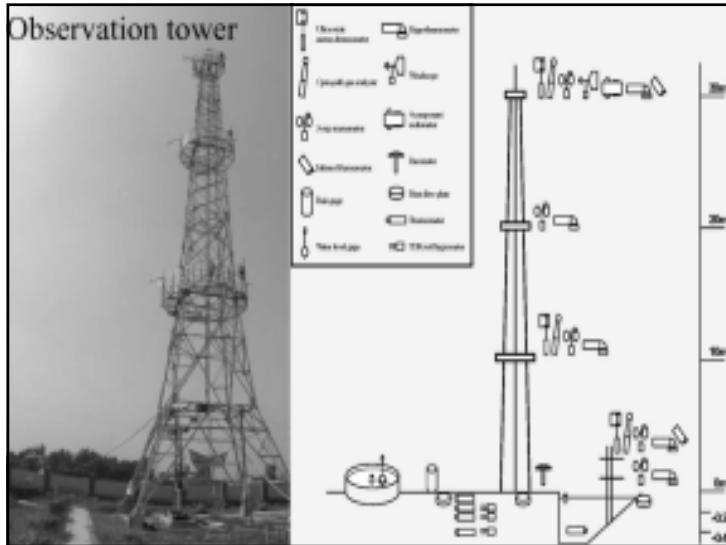
## 東シベリアの主な気象要素(1998年)

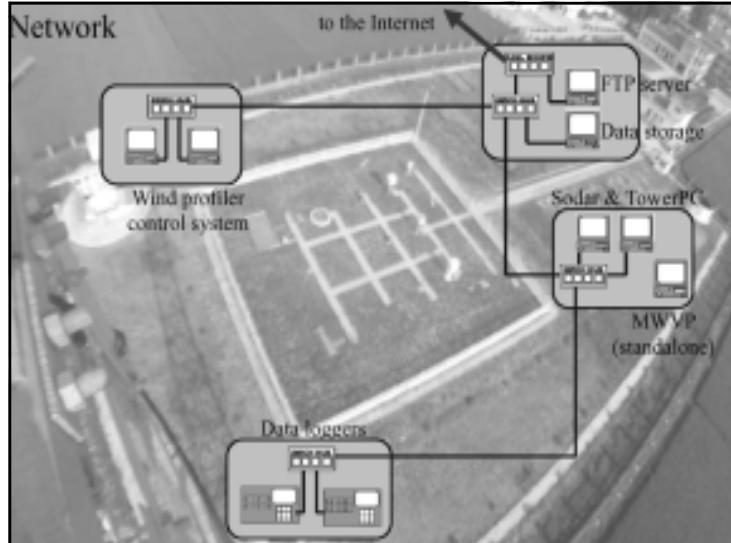


## すこし脱線して、 シベリア・タイガの不思議

- 年降水量200mm前後で森林が成立する
    - 生长期が年間の1/3、実質は600mmに相当？
    - 特に乾燥する年は、凍土から水を得る？  
(湿潤な年に凍土に水を蓄える？)
  - マイナス40℃以下の環境で森林が生存する
    - 耐凍性の獲得  
浸透圧調節？ 器官外凍結？

### Observation tower



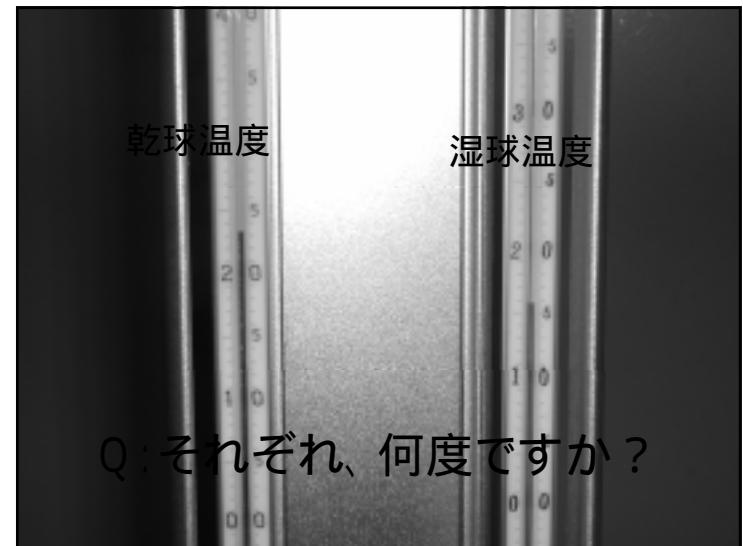


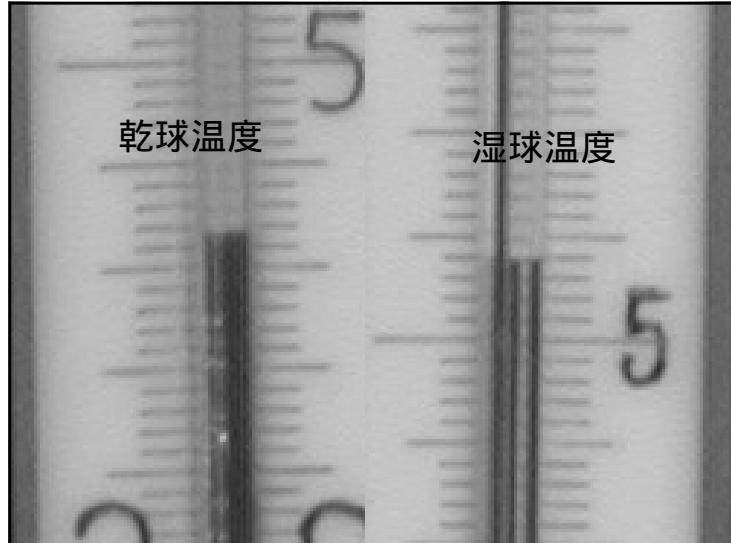
## 温度を測る

- ガラス製温度計(水銀、アルコール)
- 金属製温度計(バイメタル)
- 電気式温度計(白金抵抗体、サミスタ)
- 熱電対(温度差)
- 放射温度計(表面温度)
- 超音波風速温度計(音速仮温位)

### 通風乾湿球温度計使用の心得

- 壊さない
- 持っていいのは、ファンより上だけ
- なるべく身体から離して測る
- 温度が定まるまで、じっと我慢
- 温度を読むときは息を止める
- 真正面、直角の方向から読む
- 心の眼を磨く





乾球温度  $T_{dry}$  = ないしょ  
湿球温度  $T_{wet}$  = ないしょ とすれば

水蒸気圧

$$e_a = e_{SAT}(T_{wet}) - \gamma[T_{dry} - T_{wet}] = 13.0 \text{ hPa}$$

相対湿度

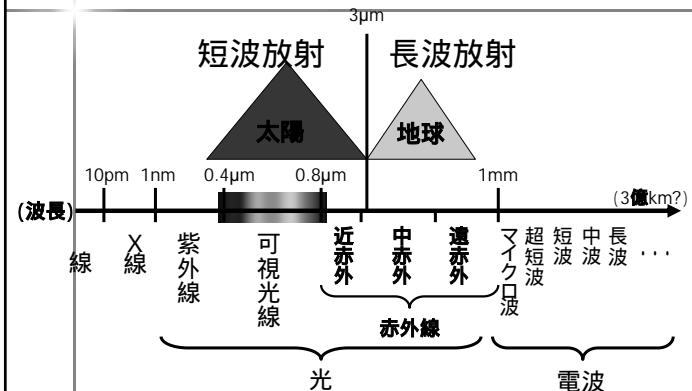
$$\frac{e_a}{e_{SAT}(T_{dry})} \times 100 = \frac{12.95}{28.63} \times 100 = 45\%$$

$$(e_{SAT}(T) \approx 6.1078 \exp[17.269T / (T + 237.3)], \gamma \approx 0.66)$$

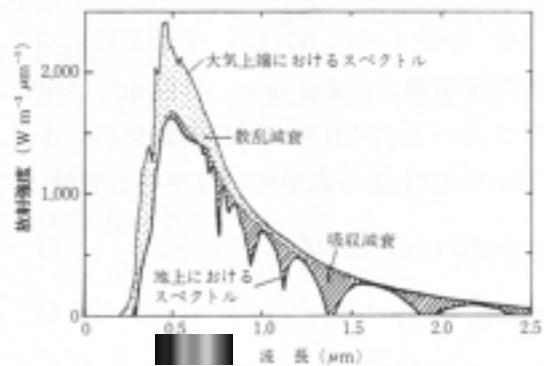
## 放射エネルギーを測る

- 量子型放射計
  - 原理: 光電効果による起電力を測定
  - センサ: 光電素子、シリコンフォトダイオード
  - 長所: 変換効率が良い、比較的小型
- 热型放射計
  - 原理: 热変換による昇温(温度差)を測定
  - センサ: 热電対、サーモパイル(热電堆)
  - 長所: 波長依存性が小さい

## 放射(電磁波)の波長帯 (数値は目安)

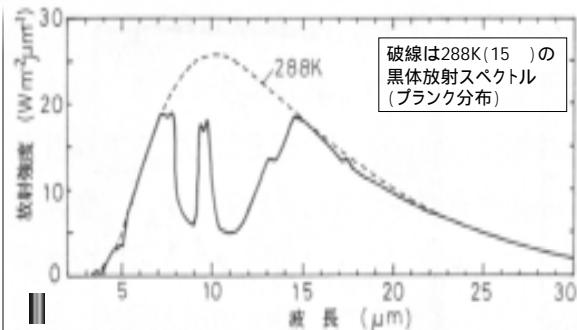


## 太陽の放射エネルギー



近藤(1994) 水環境の気象学, 図4.1より

## 大気の放射エネルギー



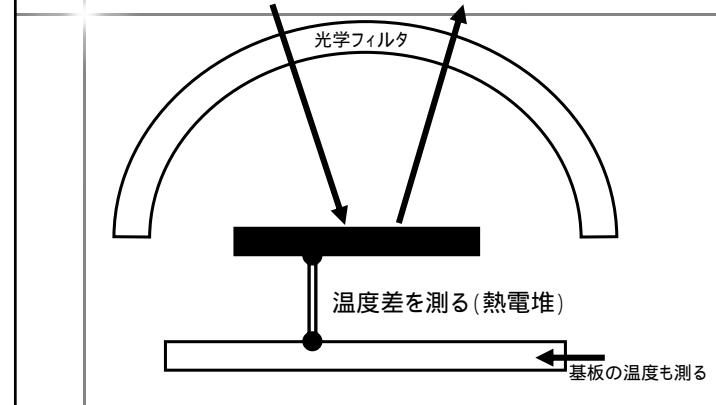
近藤(1994) 水環境の気象学, 図4.6aより

## 2種類の放射計の用途

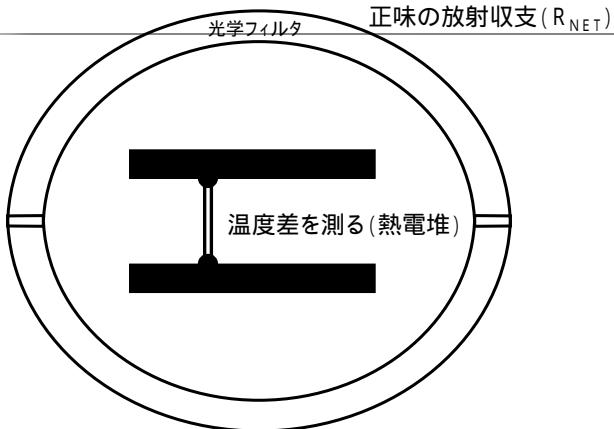
- 広い波長領域にわたる放射エネルギーの測定には、波長依存性の少ない熱型放射測器が適している。
- 量子型のセンサーは分光測定や、簡易型の測器に用いられる。

ウィキペディア(<http://ja.wikipedia.org/wiki/日射計>)の記述は誤り(2007年4月現在)

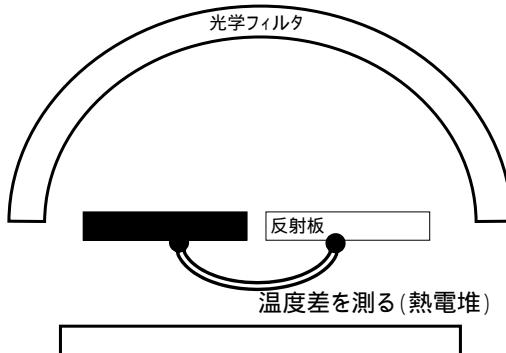
## 放射計の測定原理その1



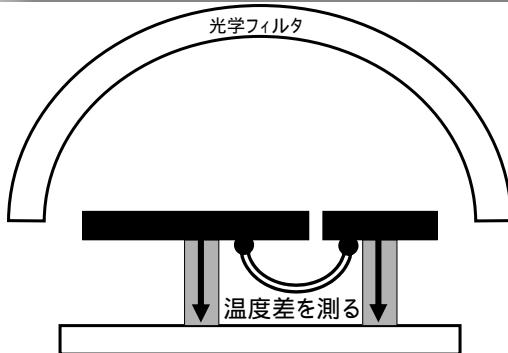
## 放射計の測定原理その2



## 放射計の測定原理その3



## 放射計の測定原理その4



## 輸送速度(乱流フラックス)を測る

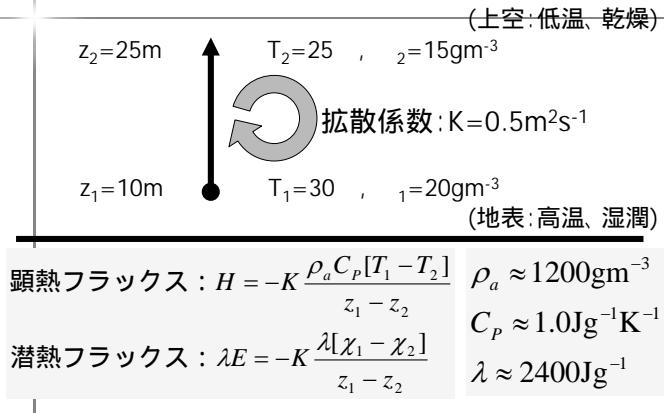
- 傾度法(プロファイル法)
  - 物理量勾配
  - 乱流拡散係数
- ボーエン比熱収支法
  - 物理量勾配
  - エネルギー収支
- 渦相関法(共分散法、乱流変動法)
  - 直接的な測定

## 大気-地表間の熱・物質輸送

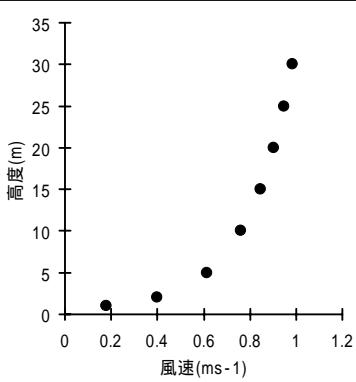
- 乱流による拡散である。
- 主に鉛直方向の輸送を考える。
- 物理量の鉛直勾配に従う。
- 乱流の強さに依存する。
- 一般的なフラックスの単位は、  $m^{-2}s^{-1}$ 
  - 例えは、熱なら  $Wm^{-2}$  ( $= J m^{-2}s^{-1}$ )
  - $CO_2$  の場合は、  $mgCO_2 m^{-2}s^{-1}$ 、  $\mu mol m^{-2}s^{-1}$  など
  - 水(水蒸気)は、  $Wm^{-2}$ 、  $mm hr^{-1}$ 、  $gH_2O m^{-2}s^{-1}$  など

## 熱・水蒸気フラックス

その1: 傾度法による見積り



## 拡散係数の導出



風速の対数則:

$$U = u_* / k \ln[(z-d)/z_0]$$

$k$ : カルマン定数 0.4

$d$ : 地面修正量(m)

$z_0$ : 粗度長(m)

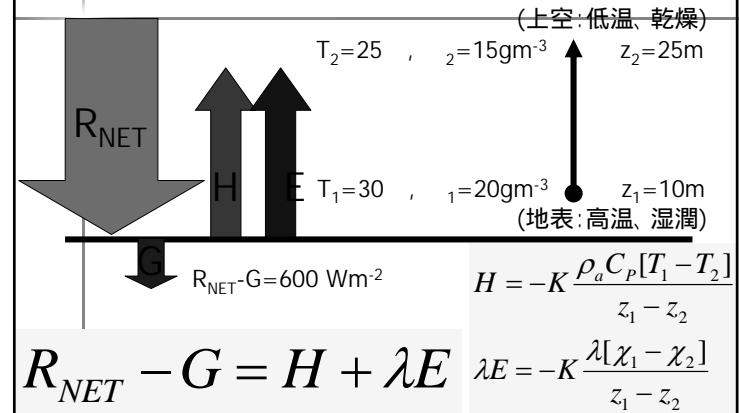
$u_*$ : 摩擦速度(ms<sup>-1</sup>)

運動量フラックス:

$$u_*^2 = K dU/dz$$

## 熱・水蒸気フラックス

その2: ポーエン比熱収支法



## メモ: ボーエン比とは?

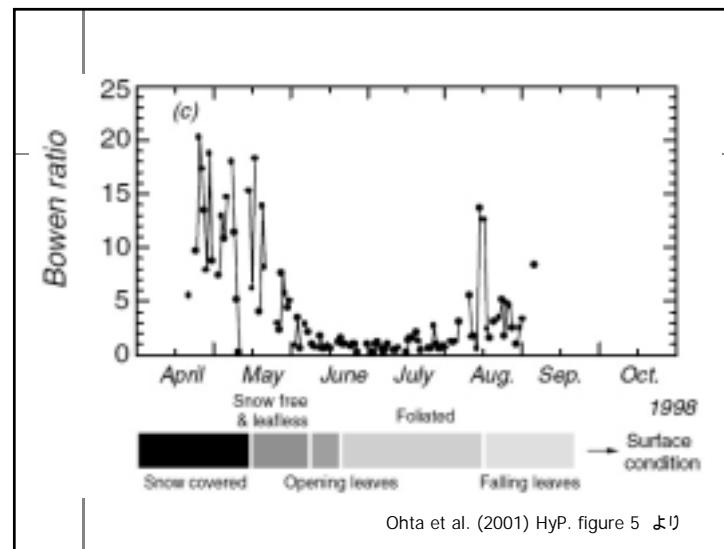
- 顯熱フラックスと潜熱フラックスの比

$$Bo = \frac{H}{\lambda E} \approx \frac{\rho_a C_p [T_1 - T_2]}{\lambda [\chi_1 - \chi_2]}$$

- 有効エネルギー( $R_{NET}$ -G)の分配比

$$R_{NET} - G = H + \lambda E$$

- 地表面の特性(湿潤度、植物活性など)を表す。



## 熱・水蒸気フラックス その3: 湍相関法

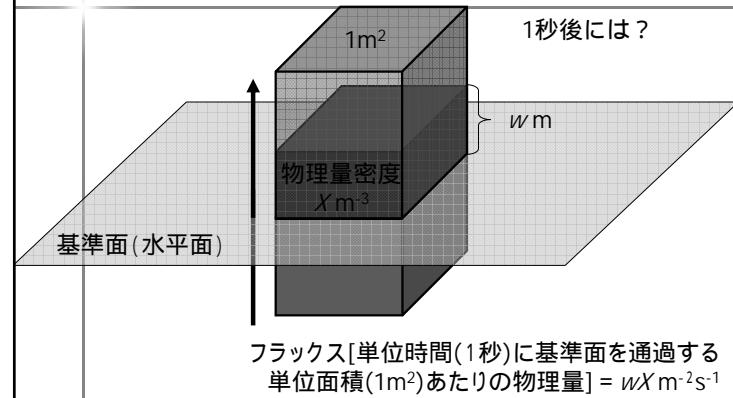
- 鉛直風速を測る。
- 熱量(気温)と水蒸気量(湿度)を測る。
- 鉛直風速とそれぞれの積の時間平均が  
鉛直輸送速度(フラックス)

$$H = \rho_a C_p \overline{wT}$$

$$\lambda E = \lambda \overline{w\chi}$$

## フラックスの直接測定

$w \text{ ms}^{-1}$ で上昇



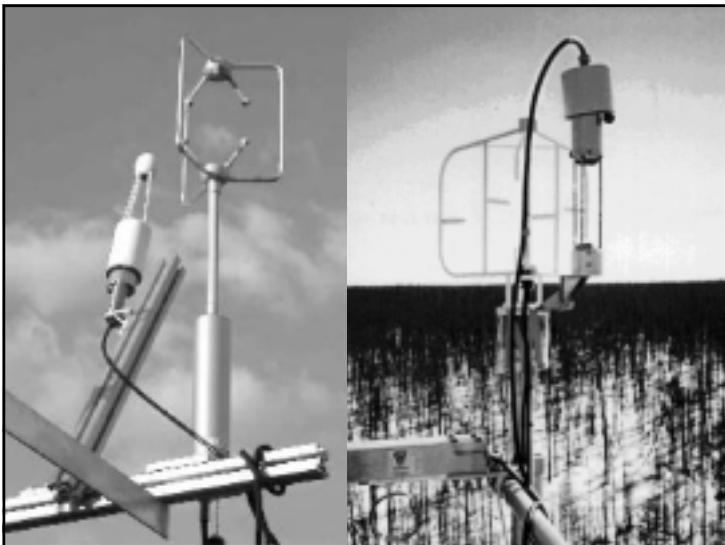
## フラックスの直接測定

### ■ フラックス

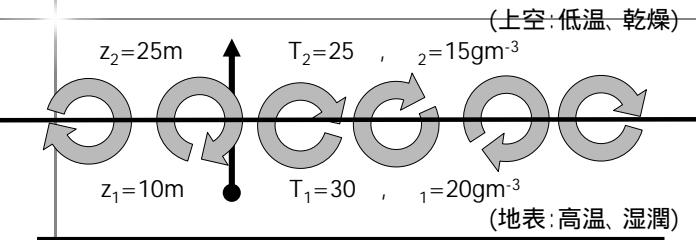
[単位時間(1秒)に基準面を通過する  
単位面積( $1\text{m}^2$ )あたりの物理量]

$$\overline{W} X \quad [\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}]$$

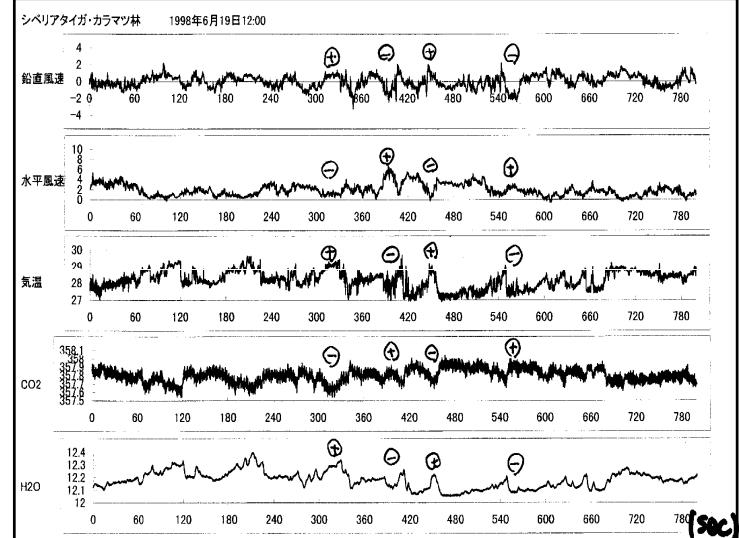
$$(\overline{W} = 0 \text{ ms}^{-1})$$



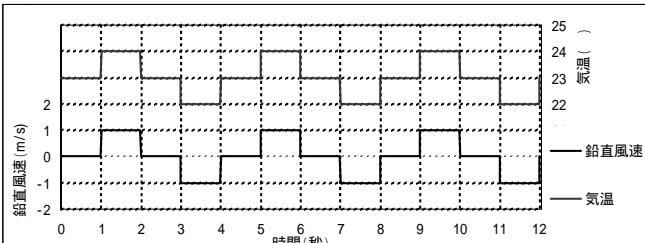
## 乱流(乱渦)による鉛直輸送



高温・湿潤な気塊が上昇流で運ばれ、低温・乾燥な気塊が下降流で運ばれる。 上向きのフラックス  
乱渦は風に流される。 時間変化 水平分布



## 渦相関法によるフラックス算出の例 例えば、こんなデータ：



$$wT = (0 + 24 + 0 - 22 + 0 + 24 + 0 - 22 + 0 + 24 + 0 - 22) / 12 = ?$$

$$H = C_p wT = (\text{来週までの宿題}) \text{ Wm}^{-2}$$

## まとめ

- 本日の講義で伝えたかったこと
  - 観測研究の重要性
  - 観測というものについて
    - 何をどうやって測るか？測っているものは何か？
    - 新たな観測法(機器)が新たな局面に導く
  - 地表と大気間のエネルギー交換の概要
  - 地表面フラックスの現在の観測方法

## 次回の講義内容(予定)

- 今回の復習
  - 地表面エネルギー収支
  - 渦相関法フラックス測定
- 熱フラックスから抽出する地表植生の特性
- エネルギー収支インバランスの問題
- 大気境界層の観測

## コラム: 単位について

- 長さの単位(メートル)
  - 1メートルの定義(昔):子午線(しごせん・北極と南極を通る大きな円)の長さの1/40,000,000
  - 1メートルの定義(今):光が真空中の1/299,792,458秒に進む距離
- 時間の単位(秒)
  - 1秒の定義(大昔):平均太陽日の1/86400の時間
  - 1秒の定義(昔):1900年1月0日の暦表時12時(日本時間で1899年12月31日21時)での地球が公転する速度を用いて計算した太陽年の1/31,556,925.9747
  - 1秒の定義(今):ケルビン(K)におけるセシウム133(133Cs)の原子の基底状態の2つの超微細準位の間の遷移に対応する放射の周期の9,192,631,770倍に等しい時間
- 質量の単位(キログラム)
  - 1キログラムの定義(昔):最大密度(=液温摂氏四度)における蒸留水1立方デシメートル(1リットル)の質量
  - 1キログラムの定義(今):「国際キログラム原器の質量」
  - 1キログラムの定義(将来):(1キログラム中に含まれる原子の数=測定中の原子数)のケイ素の質量

<http://ja.wikipedia.org/wiki/> より抜粋

## 尺度と目的

- モノゴトを正確に捉える尺度というものは存在しません。
- 物理的に正確なモノサシというものは存在しません。「目的」に応じた「モノサシ」があるのみです。
  - 例:いわゆるモノサシ(JIS B7516(2005) 金属製直尺)
  - 長さとしては、±0.1mm以上(長さによる)の誤差が許容されている。
  - 目盛線の太さは、0.1~0.3mmとされている。  
**0.5mm以上ぐらゐの(日常生活のモノサシとしては十分な)精度で長さを測る器具である。**
  - (0.01mm以下が測れる測微鏡で性能を確認する。)

## 見せ方と先入観

- 人間の判断・客觀性は最もあてにならない尺度のひとつである。
- 全ての表現物(講義)は、表現者(講師)の主觀が含まれます。
  - 嘘は含まれないはずですが、本当のことを包み隠さず話しているわけではありません。

### 結論: 見せる目的が重要

- 講義の目的を理解することが、講義を聞くことの本質である。

## (講師紹介)

- 田中広樹・環境学研究科COE特任准教授
- 博士(農学)
- 境界層水文学・森林水文学(観測研究)  
 $Y = F(X)$ という関係のある現象について、  
XとYを観測して現象関数Fを導き、現象を理解する。
- コンタクト: [hiroki@hyarc.nagoya-u.ac.jp](mailto:hiroki@hyarc.nagoya-u.ac.jp)  
URL: <http://spring.hyarc.nagoya-u.ac.jp/>