

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

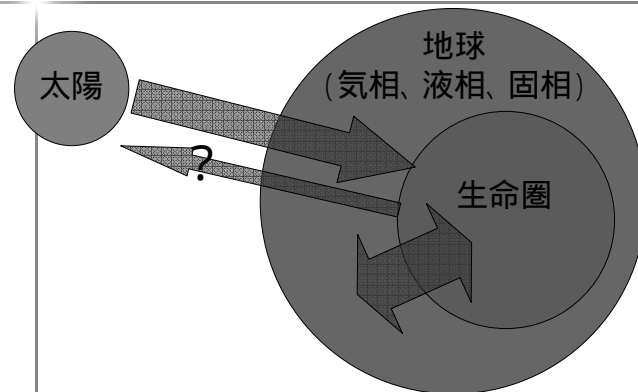
- はじめに
 - － 地球学とは？
 - － 大気－地表相互作用の観測とは？
- 方法
 - － 状態量 (温度、湿度) を測る
 - － 放射エネルギー (放射フラックス) を測る
 - － 移動速度 (乱流フラックス) を測る

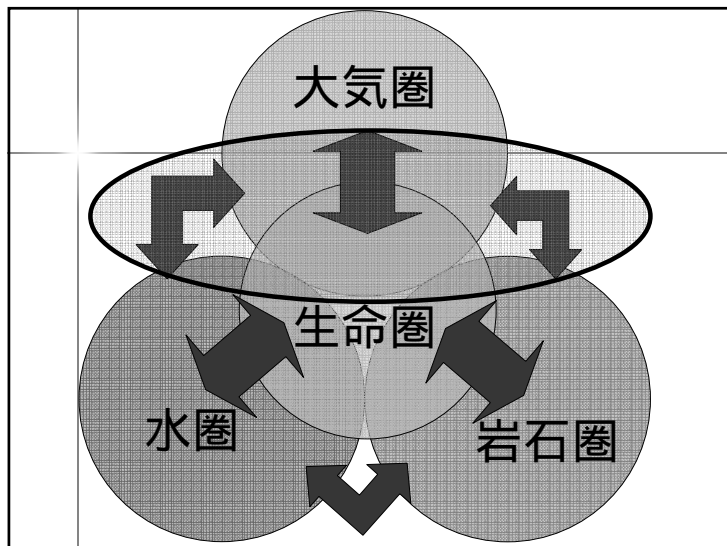
地球学とは？

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





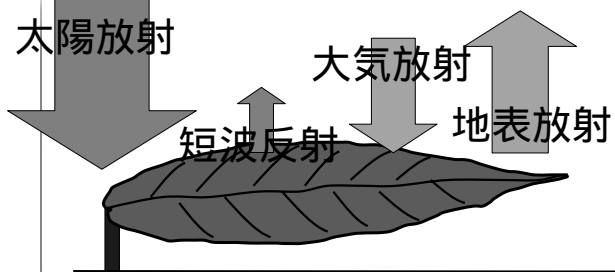
大気－地表相互作用とは？

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

大気－地表のエネルギー交換

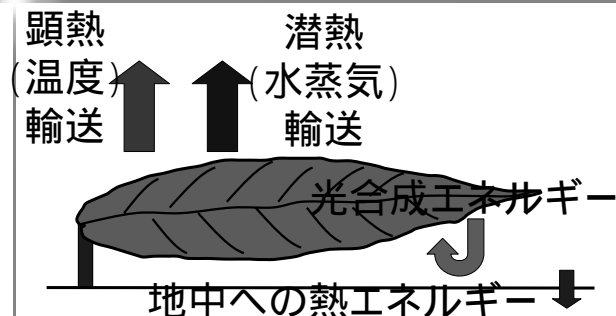
1:放射エネルギー(供給)



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

大気－地表のエネルギー交換

2:熱エネルギー(消費)



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

大気－地表相互作用の観測

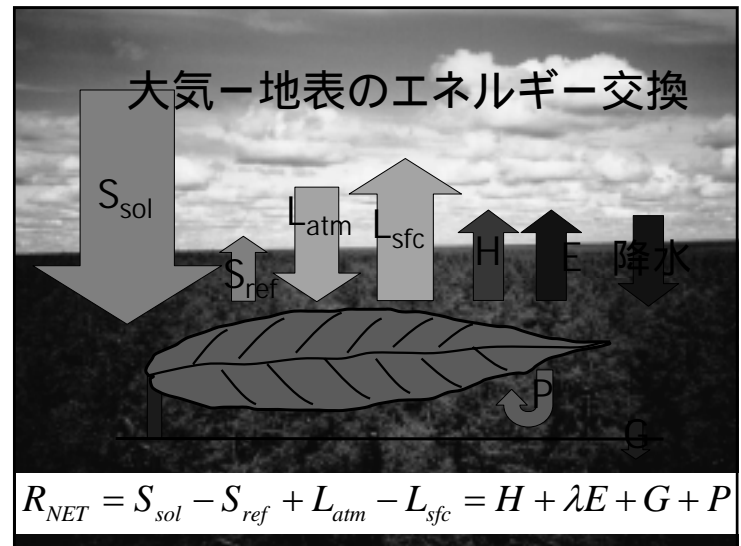
- 作用の生じる状況(状態量)を測る
- 作用自体(移動速度、フラックス)を測る
- 作用の結果(状態量の変化)を測る
- 状況と作用と結果の諸現象を理解する
- 状況と作用と結果の関係を解明する
= 相互作用のメカニズムを解明する

観測研究の位置付け

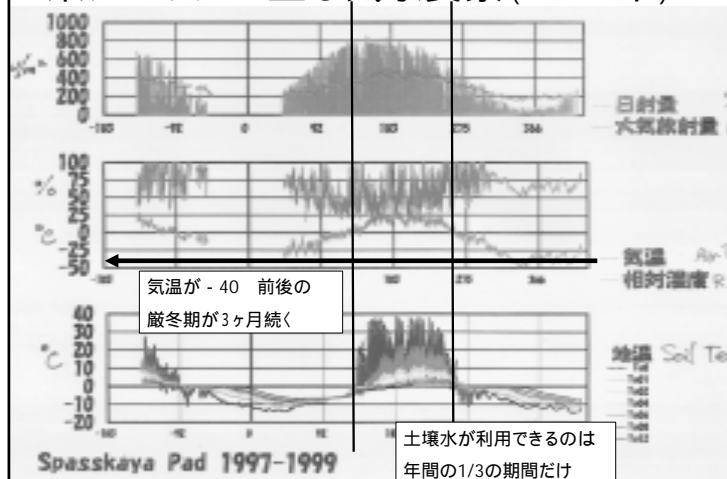
- 真の現象理解
 - － 自然現象は複雑、測らなければ分からない。
 - － 観測(測器)の進化が、現象理解を促進する。
- メカニズムの解明、一般化、モデル化
 - － モデルの基礎(式)を導く。
 - － モデル(出力)の検証を行う。
 - － 観測結果と合わなければ(検証しなければ)、モデル計算は、机上の空論。

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！



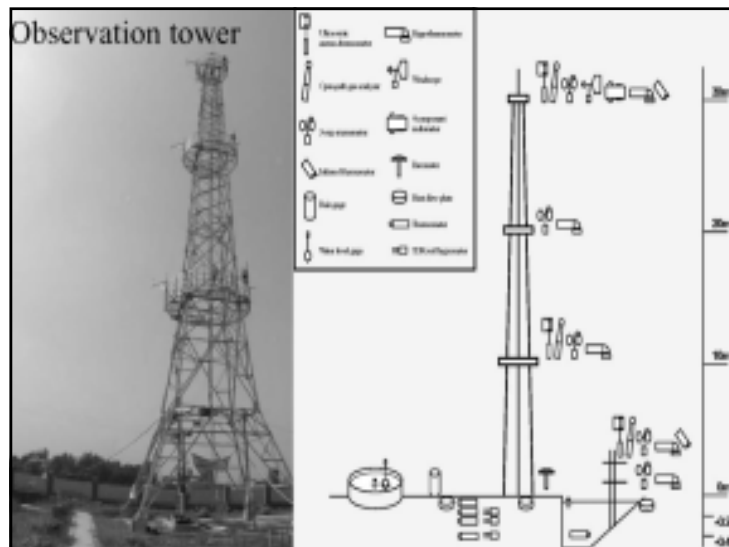
東シベリアの主な気象要素(1998年)

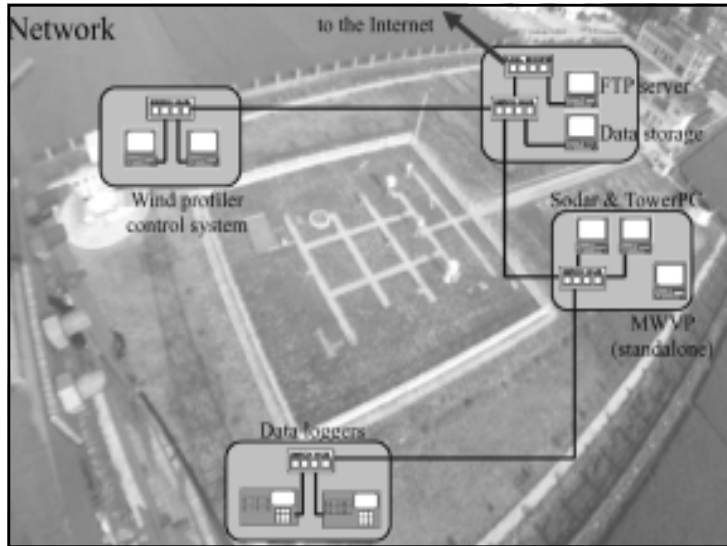


すこし脱線して、

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
 - 生長期が年間の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 °C 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？





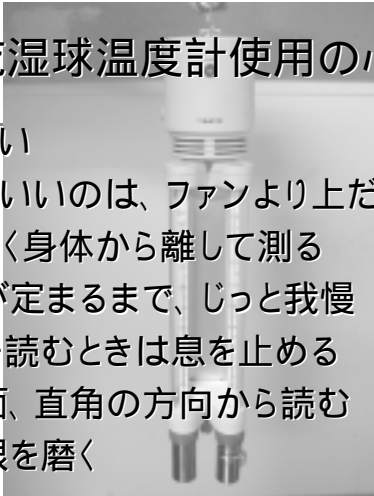
温度を測る

- 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

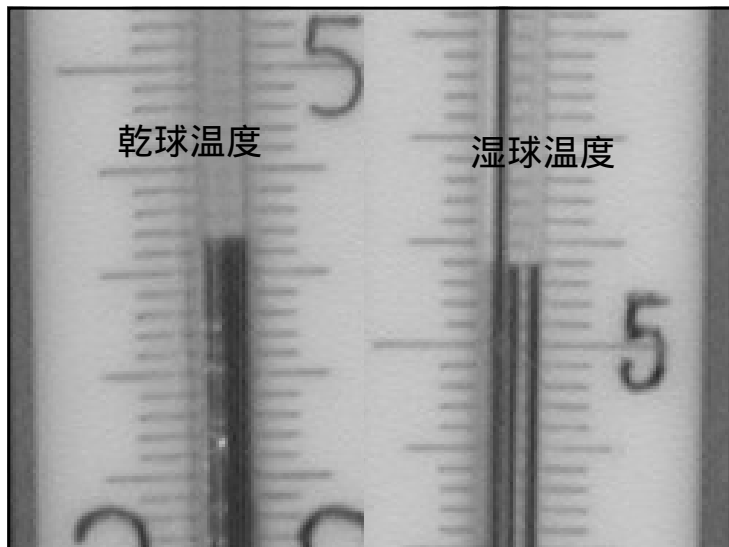
- 壊さない
- 持ていいのは、ファンより上だけ
- なるべく身体から離して測る
- 温度が定まるまで、じっと我慢
- 温度を読むときは息を止める
- 真正面、直角の方向から読む
- 心の眼を磨く



乾球温度

湿球温度

Q: それぞれ、何度ですか？



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

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

相対湿度

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

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

放射エネルギーを測る

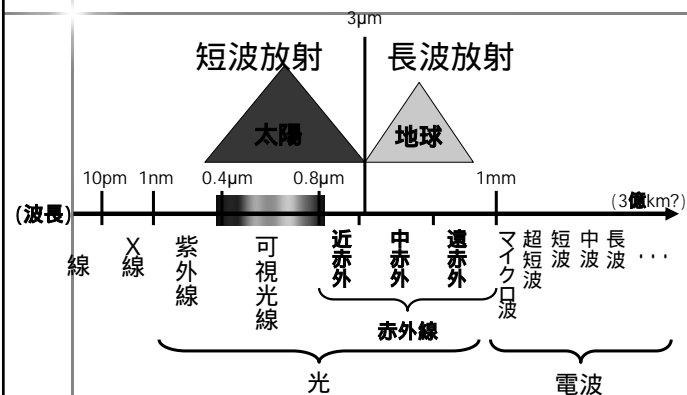
■ 量子型放射計

- 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

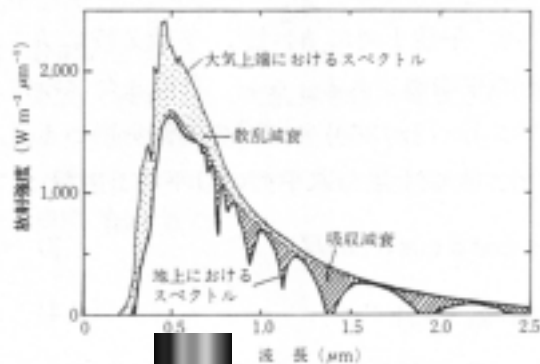
■ 熱型放射計

- 原理: 熱変換による昇温(温度差)を測定
- センサ: 熱電対、サーモパイル(熱電堆)
- 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)

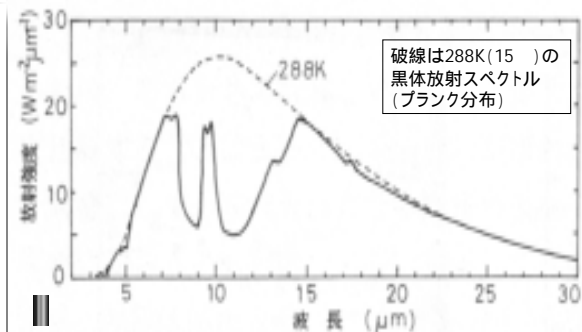


太陽の放射エネルギー



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



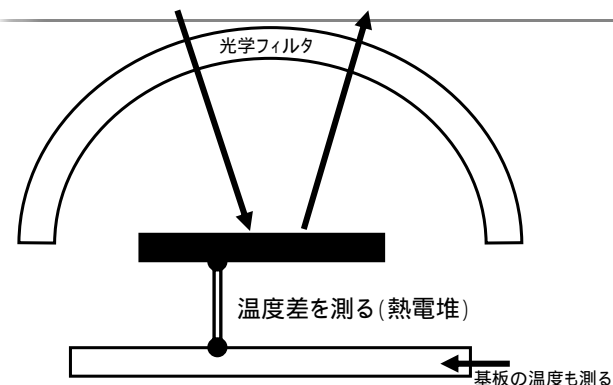
近藤(1994) 水環境の気象学, 図4.6aより

2種類の放射計の用途

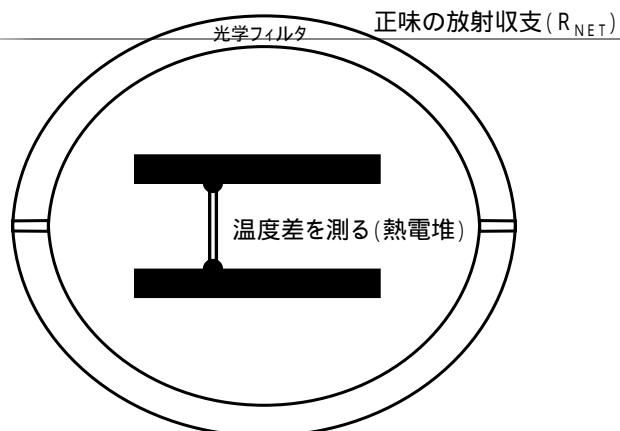
- 広い波長領域にわたる放射エネルギーの測定には、波長依存性の少ない熱型放射測器が適している。
- 量子型のセンサーは分光測定や、簡易型の測器に用いられる。

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)

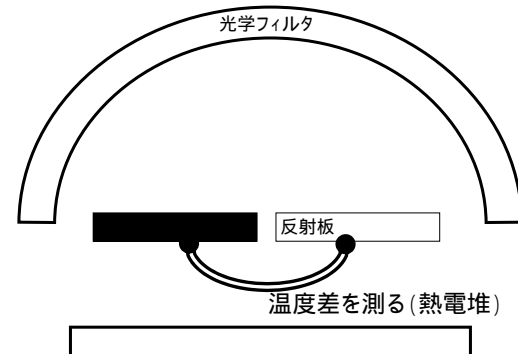
放射計の測定原理その1



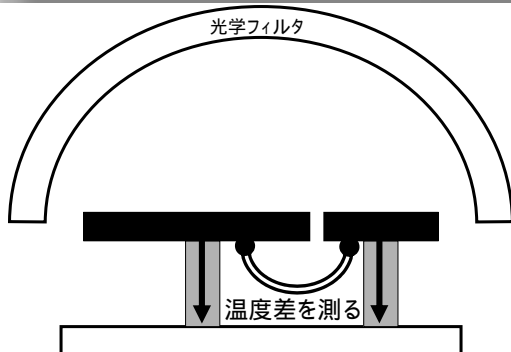
放射計の測定原理その2



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

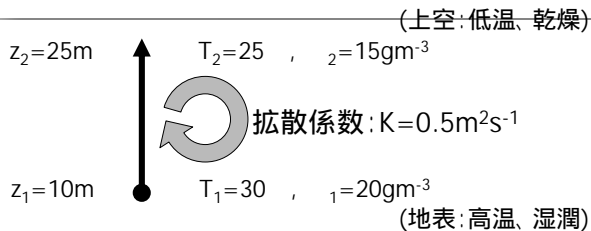
- 傾度法 (プロファイル法)
 - － 物理量勾配
 - － 乱流拡散係数
- ボーエン比熱収支法
 - － 物理量勾配
 - － エネルギー収支
- 渦相関法 (共分散法、乱流変動法)
 - － 直接的な測定

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、 $\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$
 - 例えば、熱なら Wm^{-2} ($= \text{J m}^{-2}\text{s}^{-1}$)
 - CO_2 の場合は、 $\text{mgCO}_2 \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 、 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ など
 - 水(水蒸気)は、 Wm^{-2} 、 mm hr^{-1} 、 $\text{gH}_2\text{O m}^{-2}\text{s}^{-1}$ など

熱・水蒸気フラックス

その1:傾度法による見積り

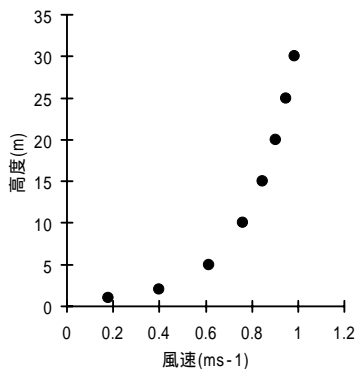


$$\text{顕熱フラックス: } H = -K \frac{\rho_a C_p [T_1 - T_2]}{z_1 - z_2} \quad \rho_a \approx 1200\text{gm}^{-3}$$

$$\text{潜熱フラックス: } \lambda E = -K \frac{\lambda [\chi_1 - \chi_2]}{z_1 - z_2} \quad C_p \approx 1.0\text{Jg}^{-1}\text{K}^{-1}$$

$$\lambda \approx 2400\text{Jg}^{-1}$$

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)

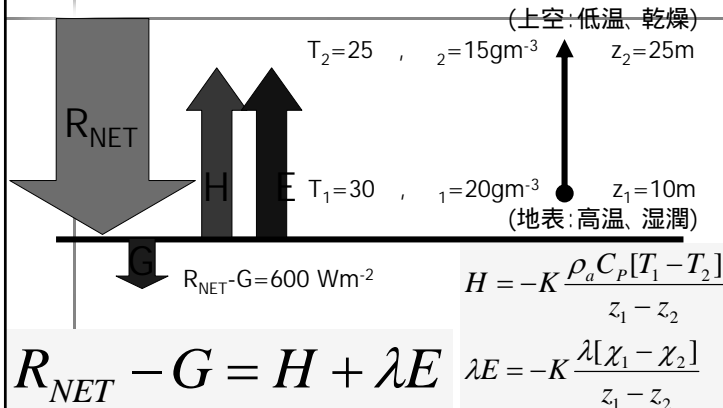
u_* : 摩擦速度(ms^{-1})

運動量フラックス:

$$u_*^2 = K \text{ d}U/\text{d}z$$

熱・水蒸気フラックス

その2:ボア-エン比熱収支法



メモ：ボーエン比とは？

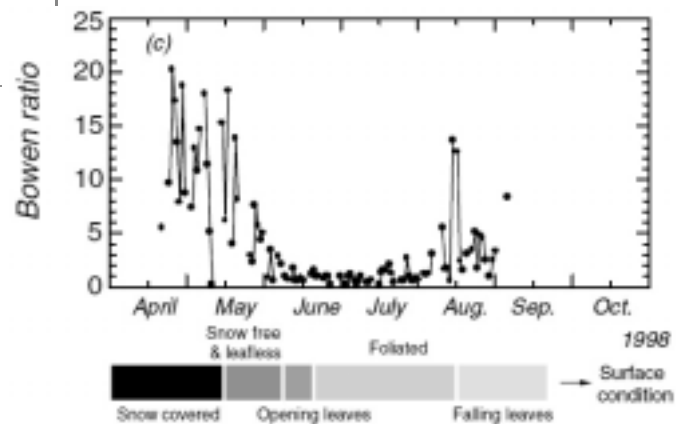
- 顕熱フラックスと潜熱フラックスの比

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

- 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。



Ohta et al. (2001) HyP. figure 5 より

熱・水蒸気フラックス

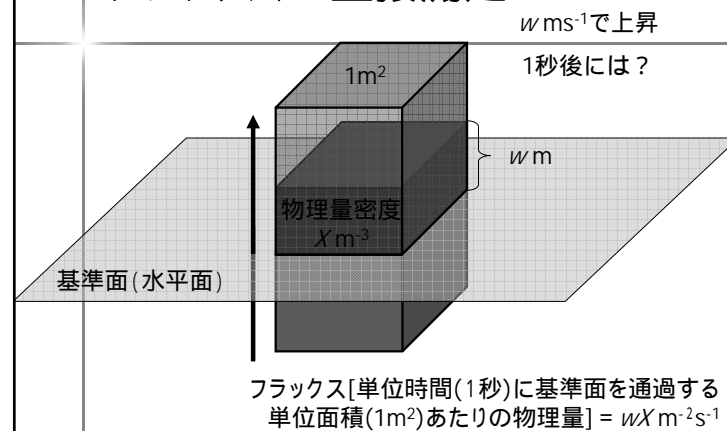
その3：渦相関法

- 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



フラックスの直接測定

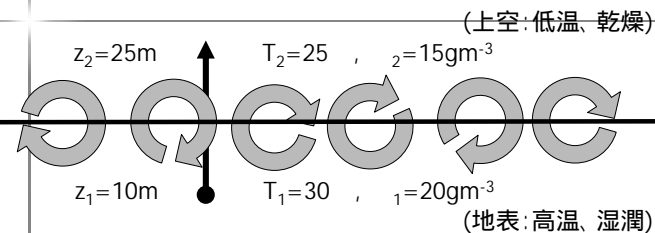
■ フラックス

[単位時間(1秒)に基準面を通過する
単位面積(1m²)あたりの物理量]

$$\overline{wX} \text{ [m}^{-2}\text{s}^{-1}\text{]}$$

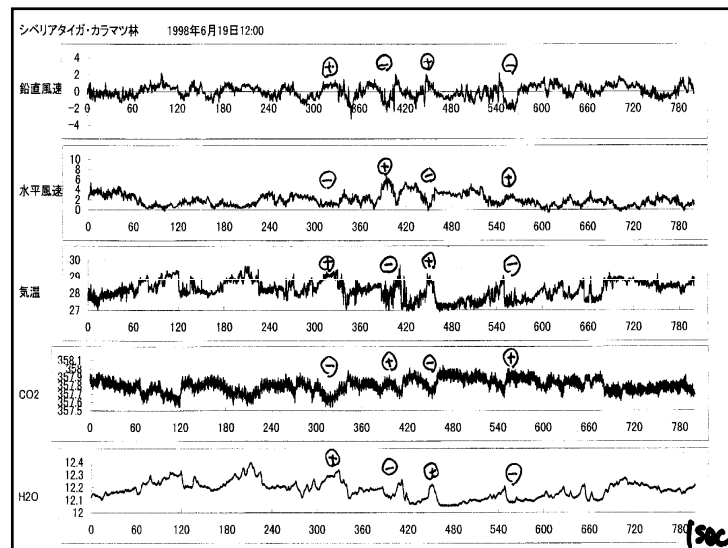
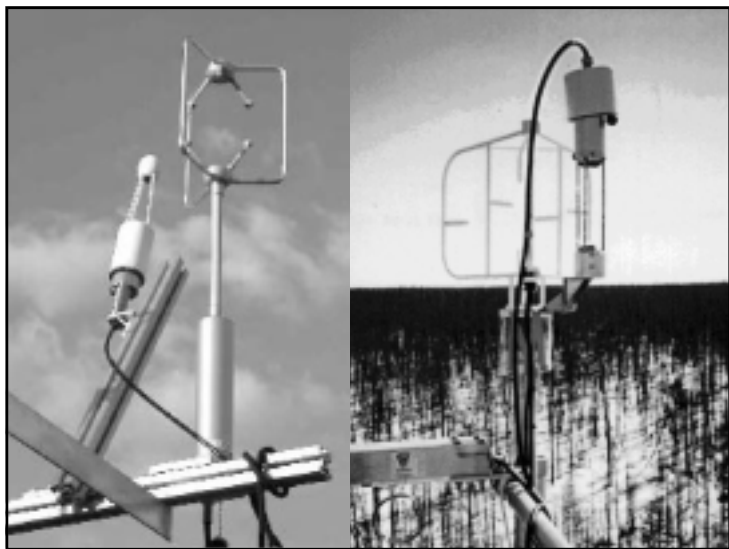
$$(\overline{w} = 0 \text{ ms}^{-1})$$

乱流(乱渦)による鉛直輸送

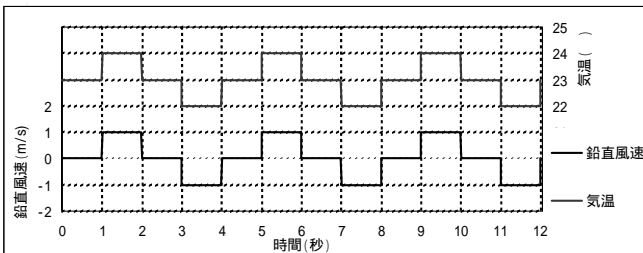


高温・湿潤な気塊が上昇流で運ばれ、低温・乾燥な気塊が下降流で運ばれる。 上向きのフラックス

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:



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

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

まとめ

- 本日の講義で伝えなかったこと
 - 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):光が真空の中を1/299,792,458秒に進む距離
- 時間の単位(秒)
 - 1秒の定義(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):0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、 $\pm 0.1\text{mm}$ 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、 $0.1 \sim 0.3\text{mm}$ とされている。
0.5mm以上ぐらいの(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・客観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)の主観が含まれます。
 - 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、講義を聴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
URL: <http://spring.hyarc.nagoya-u.ac.jp/>