

# 桐生試験地ヒノキ林における蒸発散量の評価

2003.11.29

京大農・森林水文学研究室 小杉緑子



平安時代からの伐採の結果はげ山に・・・



昭和8(1933)年の田上山の様子



「緑のダム」としての山腹工が施工される



昭和45(1970)年の田上山の様子

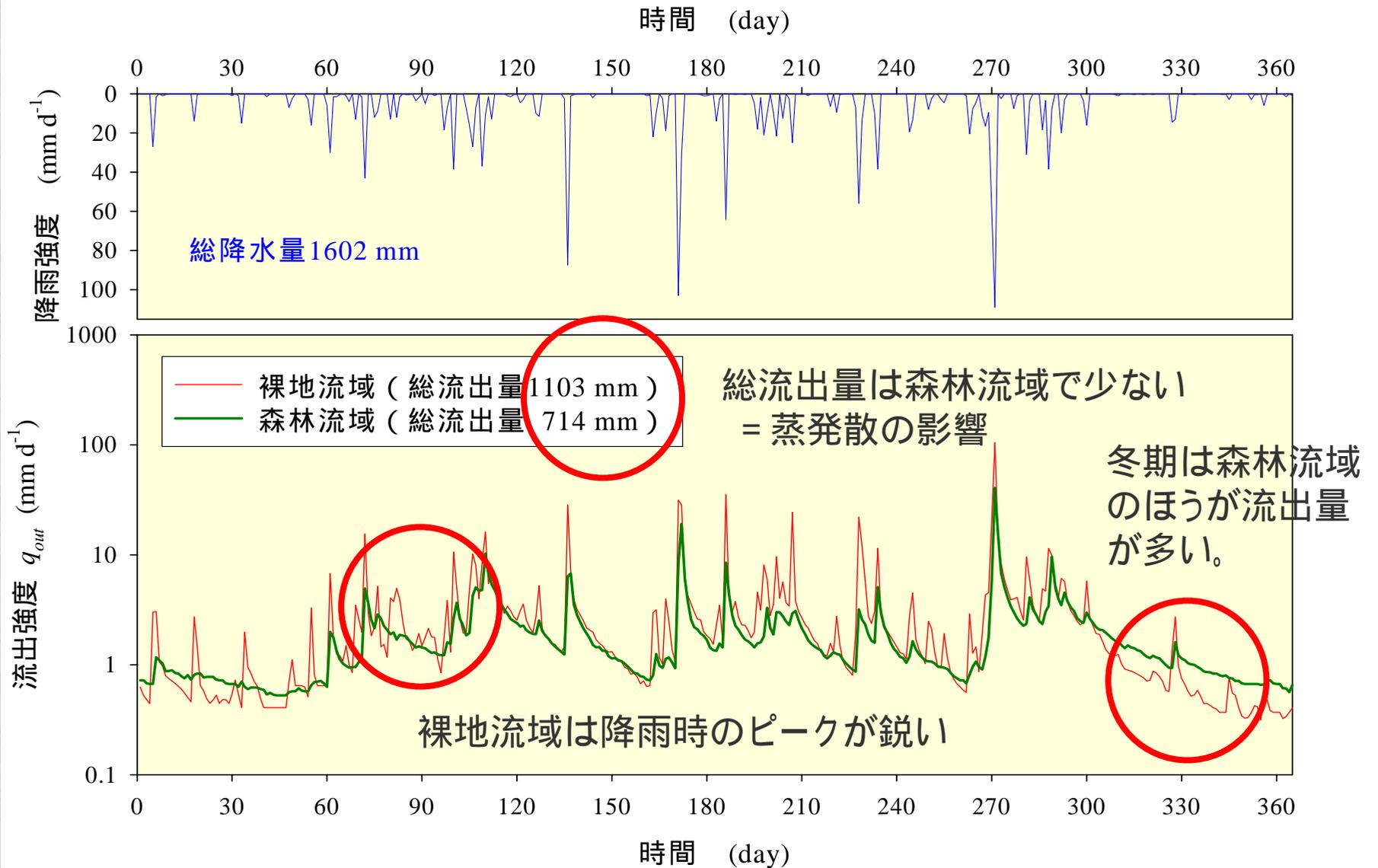


現在ではほとんどの場所で森林が回復



平成5(1993)年の田上山の様子

# 裸地流域と森林流域の流出特性の違い





## 森林の水源涵養機能と洪水緩和機能

### イメージは？

森林は「緑のダム」であり、豊かな天然林はたくさんの水を蓄え、我々に飲み水を供給してくれる。また水をためてゆっくり流すので洪水を緩和してくれる。

### でも実際は??

イメージのみ先行しており、科学的な評価は十分ではない。  
田上山系：はげ山から植林によって森林が回復  
「緑のダム」としての機能はどうか？



## なぜ蒸発散量評価が必要かー

$$\text{流出量} = \text{降雨量} - \text{蒸発散量} (- \text{貯留変化量})$$

蒸発散量は、降雨がどのように流出してくるか、その応答を科学的に評価する上で、無視できない成分である。

# 試験地の概要

試験地: 桐生水文試験地(滋賀県南部、34.96°N、135.99°E)

流域面積: 5.99 ha 母材: 風化花崗岩

年平均気温: 14 降水量: 1633.4mm 流出量: 850.6mm (1997-2001)

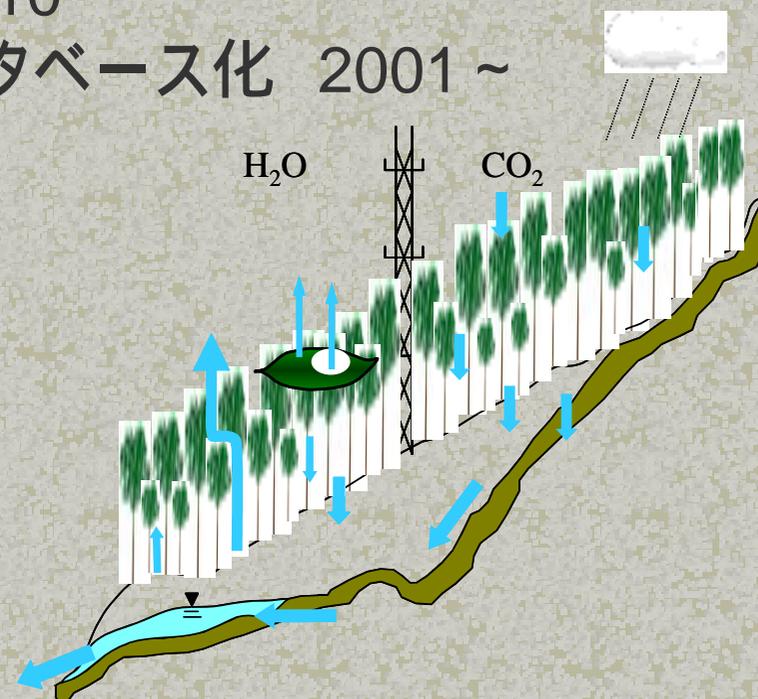
観測タワー周辺はヒノキ(*Chamaecyparis Obtusa*)の閉鎖した樹冠をもつ森林。アカマツおよび落葉樹が点在。傾斜は北にむかって平均9.2度下降。



## これまでの研究の流れ

桐生試験地ヒノキ林における蒸発散研究  
最初の量水堰の設置 1967  
量水堰での安定した流出量の観測 1972 ~  
水収支法および微気象法による蒸発散研究  
ハイサイモデルモデルによる降雨・流出応答研究 1980年代 ~  
乱流フラックス観測 1990 ~  
乱流フラックス連続観測 1998.10 ~  
微気象観測システム改良・データベース化 2001 ~

各種素過程観測  
(いろいろやっています..)



# 今日の話

1. 本流の堰で流量観測 + 雨量観測  
(since 1972)

水収支法による蒸発散量の算定  
年単位での水収支法  
短期水収支法

- 2.

タワー上での微気象 & フラックス観測  
乱流変動法による潜熱フラックスの算定



1. 長期(年間)および短期水収支法による  
桐生ヒノキ林30年間の蒸発散量





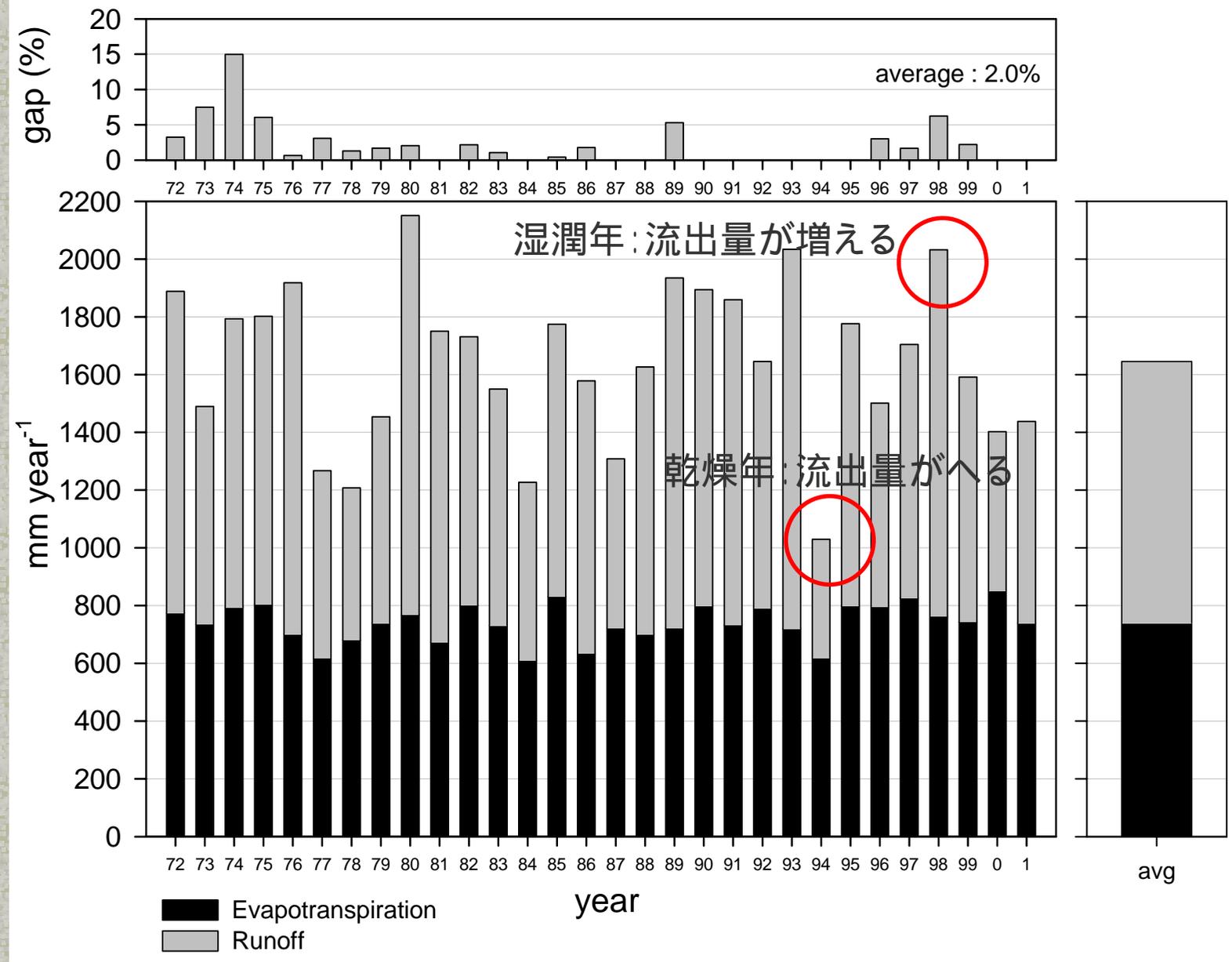
## 量水堰での流出量測定

- 桐生水文試験流域:5.99ha Vノッチ式三角堰を設置
- 水位の変動をフロート式水位計で記録する
- 水位-流量の関係を使って水位を流量( $\text{m}^3/\text{sec}$ )に換算する
- 流量を流域面積で割り、水高(mm)の単位とする。

1972～現在にいたるまで32年間のデータが蓄積中



# 年単位水収支結果





## 30年(1972-2001)平均值

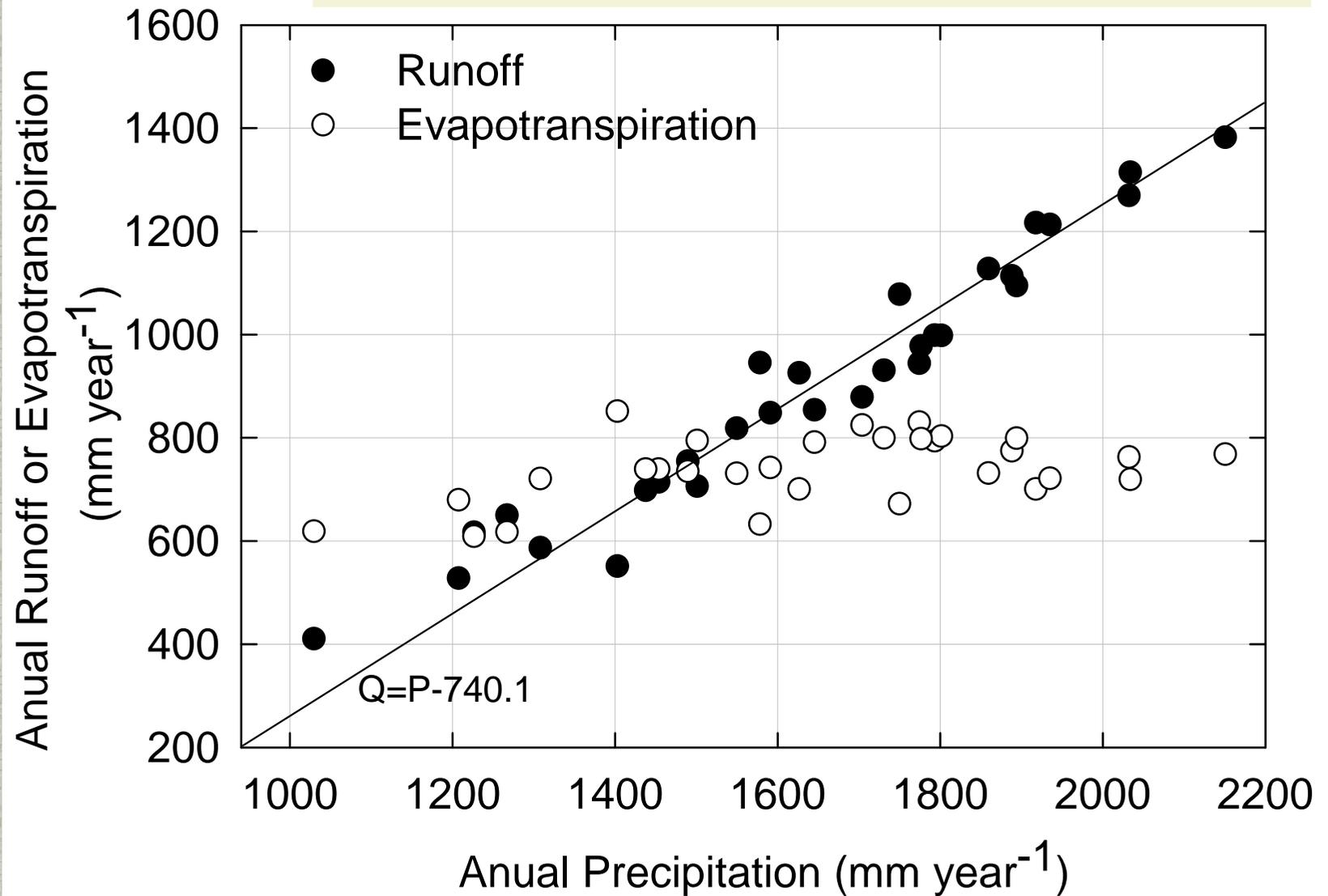
降雨量：1645.1mm

流出量：905.0mm

損失量(蒸發散量)：740.1mm

# 流出量・損失量と年降水量の関係

乾燥年には若干蒸発散量が減る。  
蒸発散量の年々変動は僅かで、30年間での違いもみえず。





**季節変化の特性も知りたい**

**短期水収支法の適用**



## 短期水収支による蒸発散量算定

鈴木(1985, J. Jap. For. Soc. 67)の方法による

$$E = \int_{t_1}^{t_2} p(t)dt - \int_{t_1}^{t_2} q(t)dt$$

ここで $p(t)$ は降雨強度、 $q(t)$ は流出強度  
 $t_1, t_2$ は水収支期間の起点と終点で、この両時刻において  
流域貯留量は等しくなくてはならない。

$t_1, t_2$ の決定方法

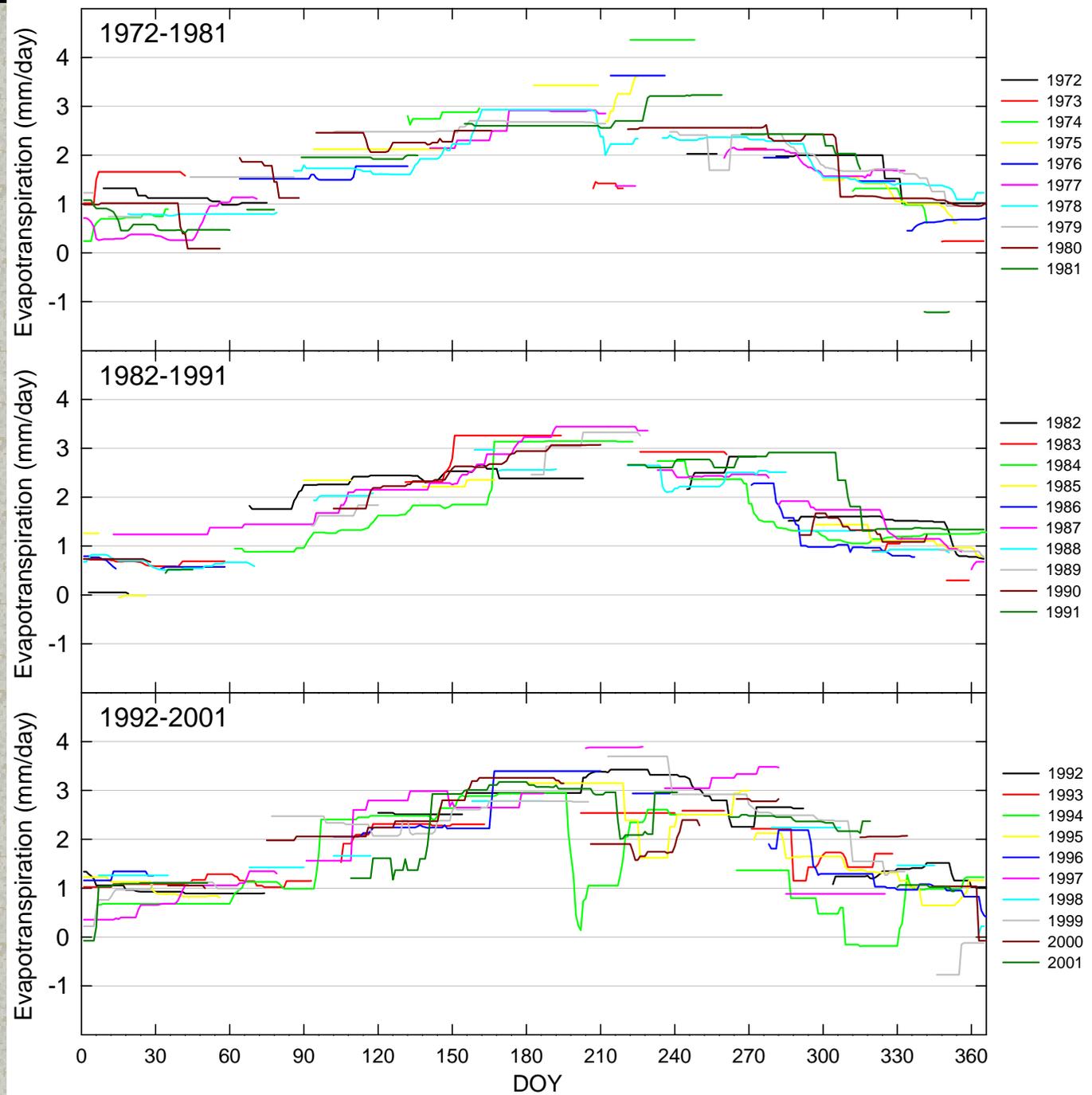
1. 先行する2日間に降雨がなく当日も無降雨である日を水収支の起点、終点の候補とする。
2. この候補間で、日流出量の差が日流出量の2%以内である日の組を $t_1, t_2$ とする。
3. この組のうち、期間が8日以内のもの、60日以上のものを除く



1972-1981

1982-1991

1992-2001  
1994は渇水年





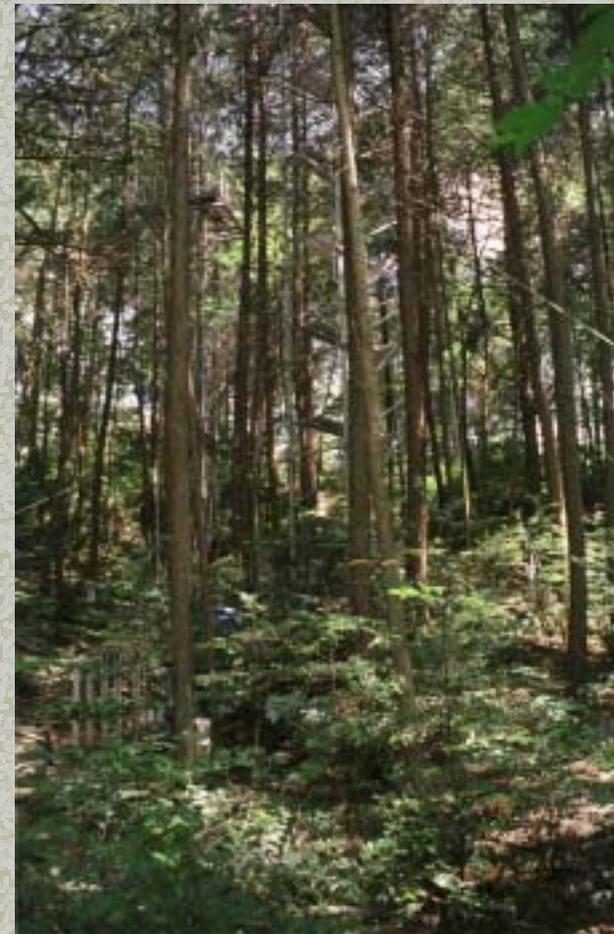
蒸発散量はどうやって決めるの？  
日変動を含むもっと細かい応答の特性  
も知りたい

微気象観測  
乱流変動法の適用



## 2. 複雑地形のヒノキ林における乱流変動法による顕熱・潜熱フラックスの特性

-2001年および2002年観測結果の報告と若干の解析





## 乱流変動法とは -

地表面付近の大気中の気流はほとんどが乱流状態。  
物理量の輸送も「乱れ」により行われる。

「乱流変動法」 = 「乱れ」を直接測定し輸送量を求める方法。  
フラックスを求める方法として、用いる仮定が少なくもっとも直接的な方法であると考えられている。

$$F = \overline{(w - \bar{w})(A - \bar{A})} = \overline{w' A'}$$

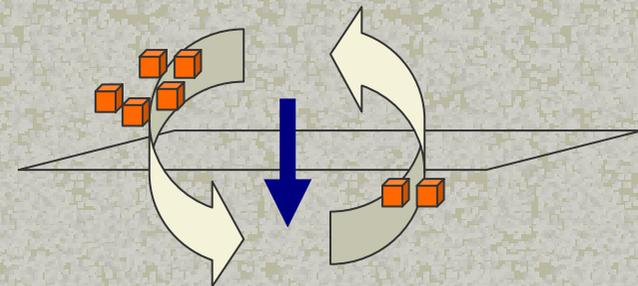
鉛直風速と物理量の  
変動成分の掛け合わせ

## この式のイメージはー

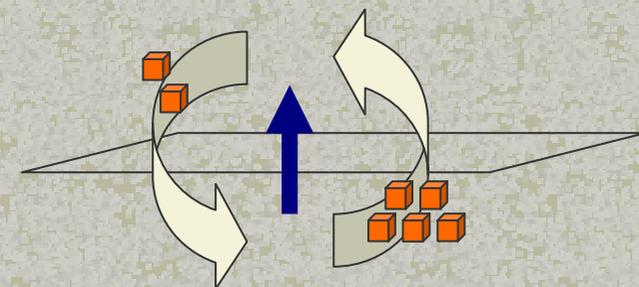
■ 風によって運ばれる $\text{H}_2\text{O}$ 分子

↻ 鉛直風速の向き

鉛直風速が下向きするとき $\text{H}_2\text{O}$ 濃度が高く、  
鉛直風速が上向きするとき $\text{H}_2\text{O}$ 濃度が低ければ、  
 $\text{H}_2\text{O}$ は下向きに輸送される ( $\text{H}_2\text{O}$ 吸収 = 凝結)



鉛直風速が下向きするとき $\text{H}_2\text{O}$ 濃度が低く、  
鉛直風速が上向きするとき $\text{H}_2\text{O}$ 濃度が高ければ、  
 $\text{H}_2\text{O}$ は上向きに輸送される ( $\text{H}_2\text{O}$ 放出 = 蒸発散)



## w'A'を知る方法

樹冠上のある高度で、応答のよい測器を使い0.1 ~ 0.2秒間隔程度でx,y,z方向の風速、温度、CO<sub>2</sub>濃度、H<sub>2</sub>O濃度を連続測定する。



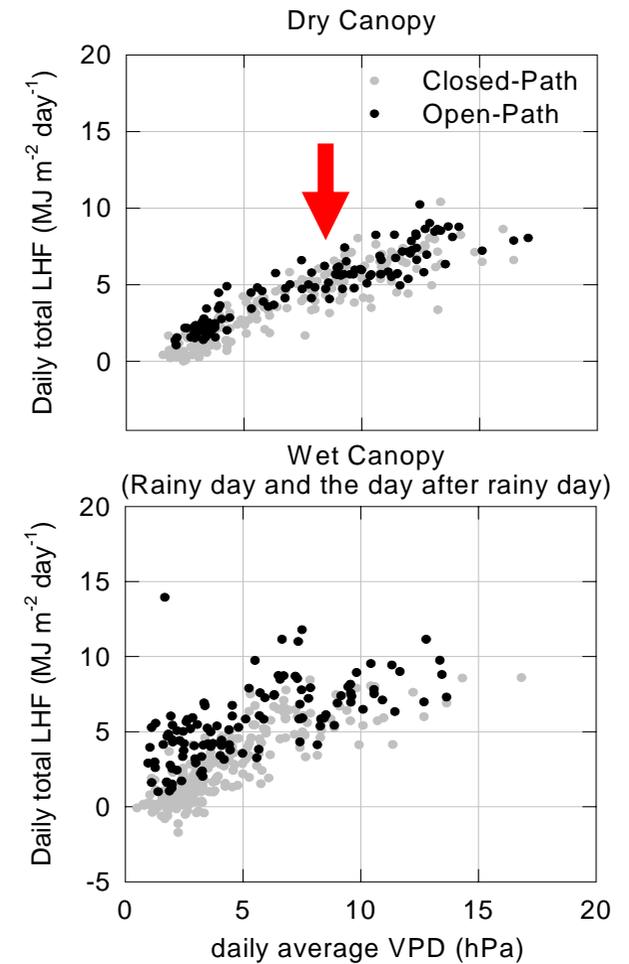
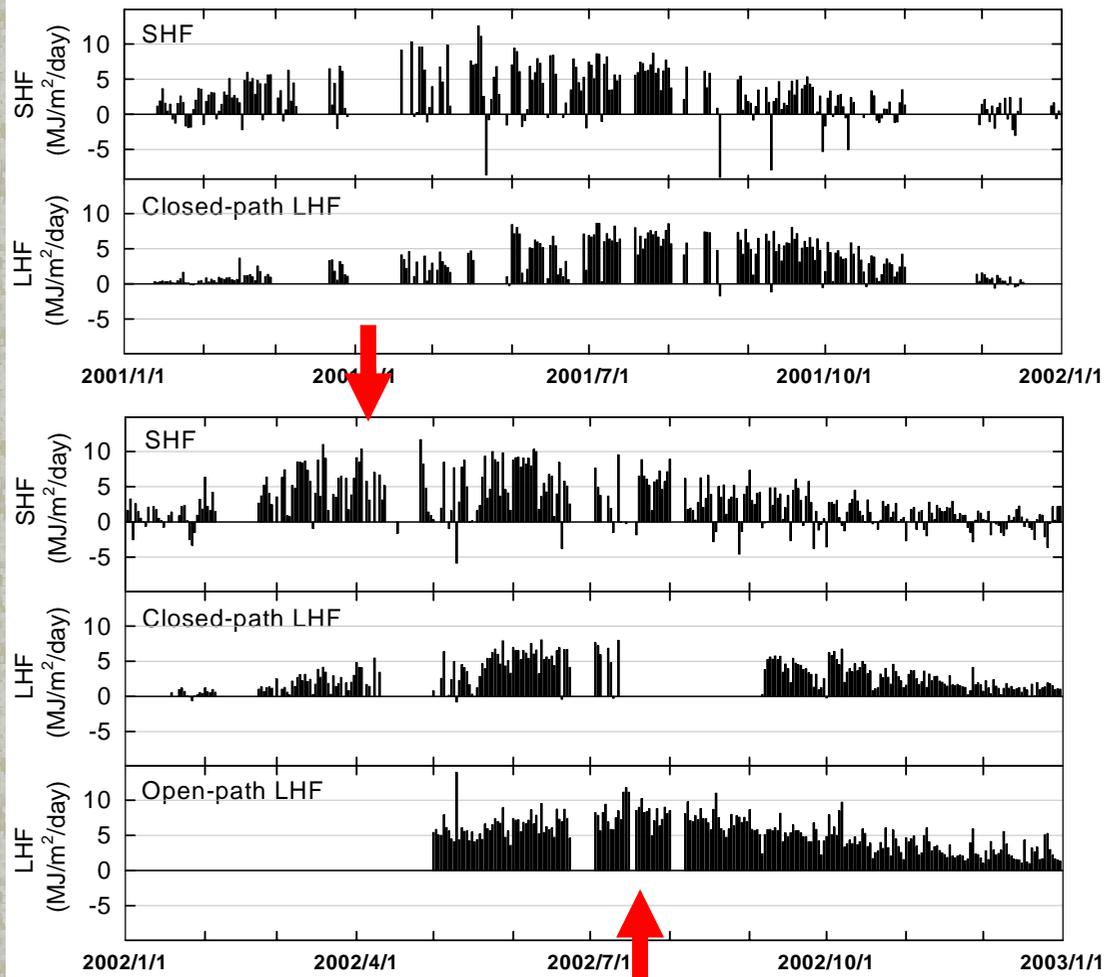
x,y,z方向の風速と温度の変動  
を測定する超音波風速温度計

CO<sub>2</sub>,H<sub>2</sub>O濃度の変動を測定する  
オープンパス式ガスアナライザー

チューブで吸引して測るのは  
クローズドパス式ガスアナライザー

# 顕熱・潜熱フラックスの季節変動特性

## 1. 日積算顕熱・潜熱



潜熱は夏にピーク(飽差とほぼ同期)、顕熱は春にピーク(熱収支を補完)



もし潜熱(つまり蒸発散量)が飽差でのみ決っている場合—  
群落としての調整機能ナシ

しかし、実際の蒸発散量は「可能蒸発散量」よりも小さい。  
(このことはDryとWetCanopyを比較してもわかる)  
また飽差が大きいときには蒸発散量が頭打ちになる。

これらは森林(樹木)が気孔開閉によって蒸発散量を調整しているから。この調整によって、DryCanopyでの森林群落の蒸発散量が決定されている。また、WetCanopy(遮断蒸発)の場合には群落構造なども大きな決定要因となる。

どの程度に制御されているかを評価する便利な指標が3つ

1. ボーエン比
2. 群落コンダクタンス
3. (オメガ)



## 1. ボーエン比

$$\text{Bowen} = \text{SHF}/\text{LHF}$$

潜熱と顕熱の比で、エネルギーの配分を表しており、蒸散しやすさの指標となる。

## 2. 群落コンダクタンス

$$\lambda E = \frac{\Delta(Rn - G) + \rho C_p (e_s(T_a) - e_a) / r_c}{\Delta + \gamma(1 + r_c / r_a)}$$

上記Penman-Monteith式(Monteith1973)中の $r_c$ の逆数が群落コンダクタンス $g_c$ で、群落全体を一枚の葉と考えた場合(Big-Leaf model)の、気孔の開き具合を表す指標となる

## 3. ファクター

$$\lambda E = \Omega \lambda E_{eq.} + (1 - \Omega) \lambda E_{imp.}$$

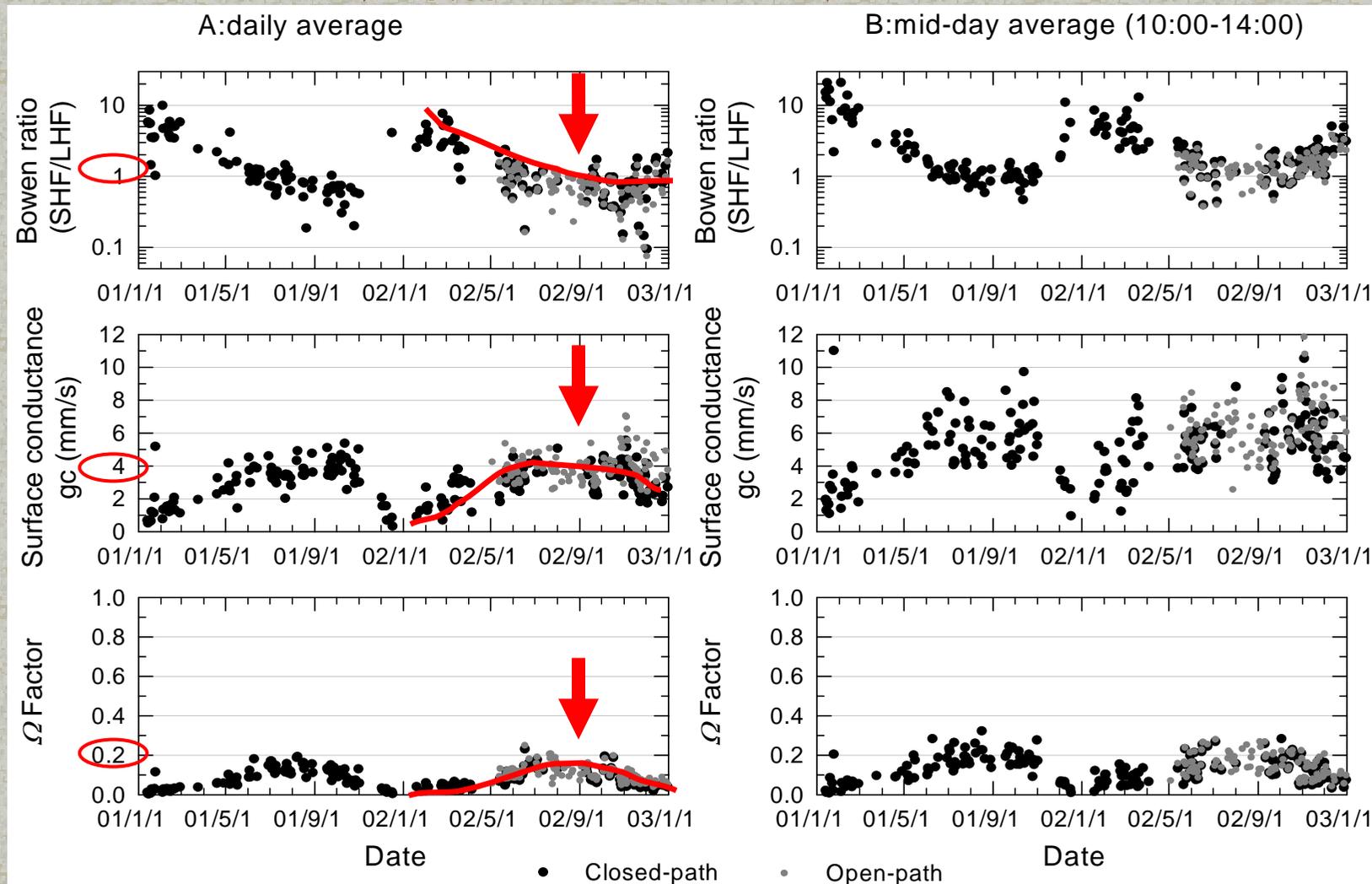
$$\Omega = \left( \frac{\Delta/\gamma + 1}{\Delta/\gamma + 1 + g_a / g_c} \right)$$

空気力学的抵抗 $r_a$ ( $1/g_a$ )と群落抵抗 $r_c$ ( $1/g_c$ )の寄与の度合いを示す指標となる。



# 顕熱・潜熱フラックスの季節変動特性

## 2. ボーエン比、群落コンダクタンス、 factor



ボーエン比    成長期(6月～10月): 日平均0.9、midday平均1.2    冬期: 増大  
 群落コンダクタンス    成長期: 日平均3.6mm/s、midday平均5.6    冬期: 低下  
 factor    成長期: 日平均0.12、midday平均0.18    冬期: 低下



## まとめ

- 全体的な結論としては一桐生ヒノキ林のような山地複雑地形でも、乱流観測による顕熱・潜熱フラックスの評価はますます可能のようである。
- ボーエン比は成長期(6月～10月)で日平均0.9、midday平均1.2 冬期は増大。他の針葉樹林でも同程度の値が報告されている。落葉広葉樹林や熱帯雨林ではもっと小さい(潜熱の割合がもっと多い)。
- 群落コンダクタンスは成長期で日平均3.6mm/s、midday平均5.6 冬期は低下。落葉広葉樹林や熱帯雨林、作物畑などより小さく、気孔が閉じ気味で蒸散しにくい様子を表している。
- factorは成長期で日平均0.12、midday平均0.18 冬期は低下  
このことは、桐生ヒノキ林のDryCanopy蒸発散量が、群落コンダクタンスすなわち樹木葉による気孔開閉によってほとんど決っていることを示している。冬はさらにこの傾向が強くなる。



## さらなる疑問

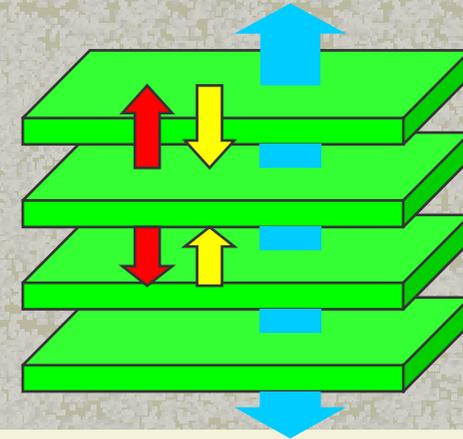
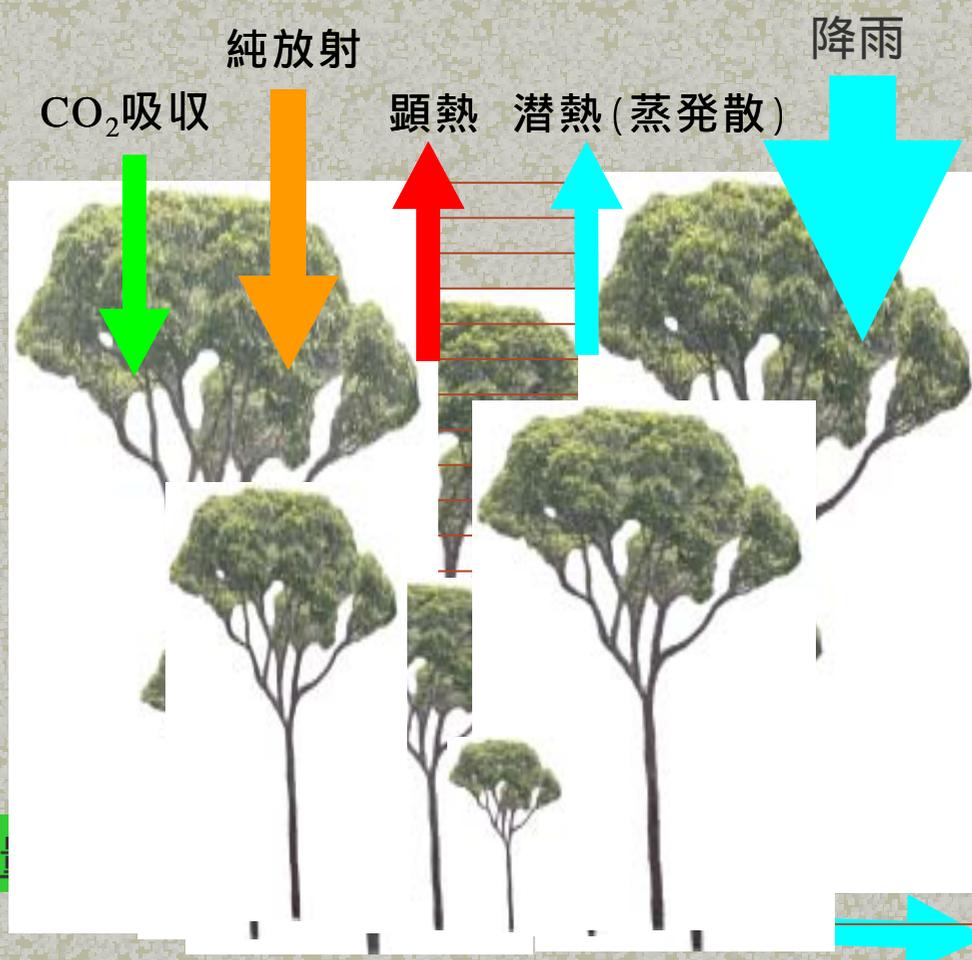
- 違うタイプの植生(たとえば常緑広葉樹、落葉広葉樹、混交林など)ではどうなるか？
- 管理手法(間伐、皆伐、植林など)の違いはどう影響するか？
- 同じヒノキ林でも気象条件などが違うとどうなるか？

このような疑問には、「多層モデル」を用いた解析が有効

## 多層モデルの概要

単に森林ブラックボックスの炭素固定量・蒸発散量等が知りたいのではなく、熱・水・二酸化炭素交換過程のメカニズムが知りたい。

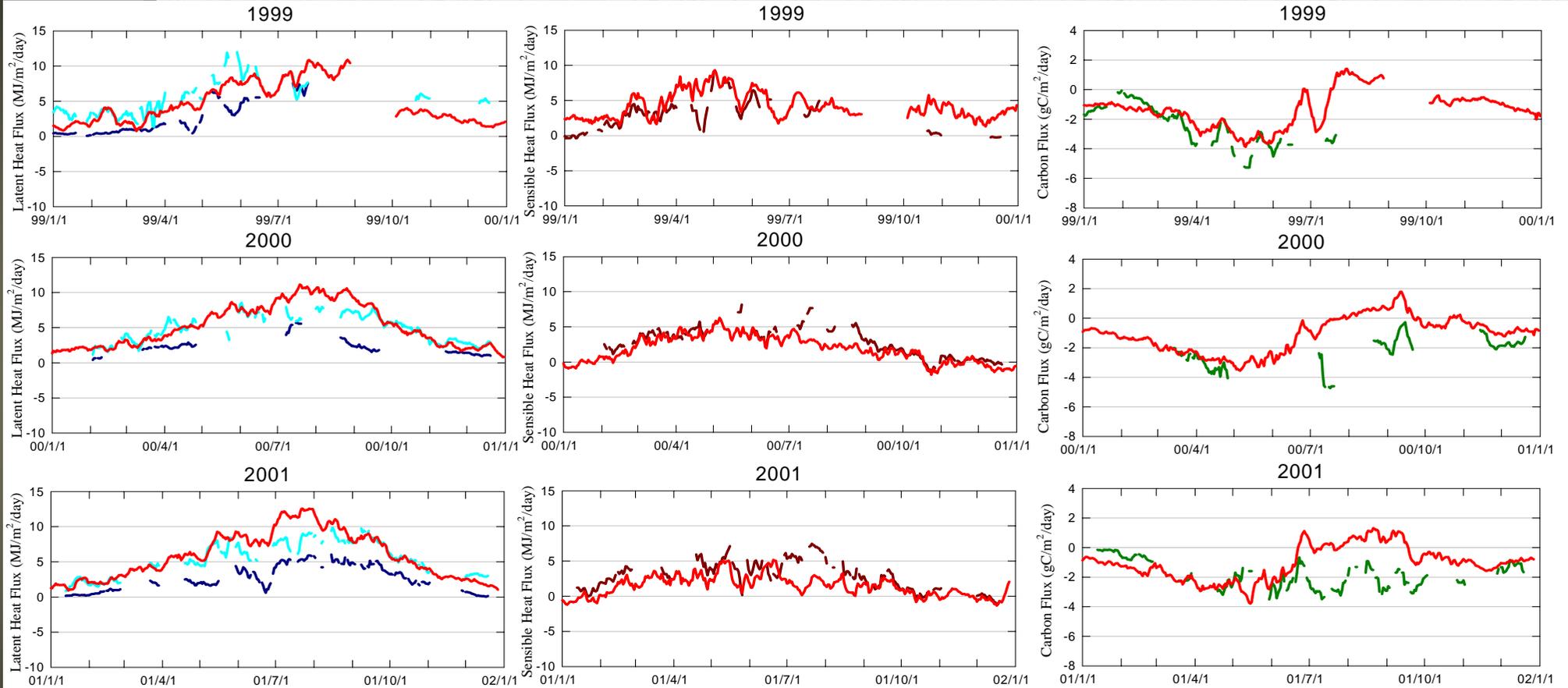
= 樹冠上フラックス観測 + 気象観測 + 素過程観測 + 多層モデルによる解析を組み合わせる意義



- 乱流拡散
- 放射伝達
- エネルギーの再分配(熱収支)
- 植物個葉による蒸散・光合成活動
- 吸水過程
- 土壌呼吸
- 土壌面蒸発
- 樹冠遮断
- 各植生の特性を24のパラメータで表現

現存

# 多層モデルでの推定値と観測値の比較の例



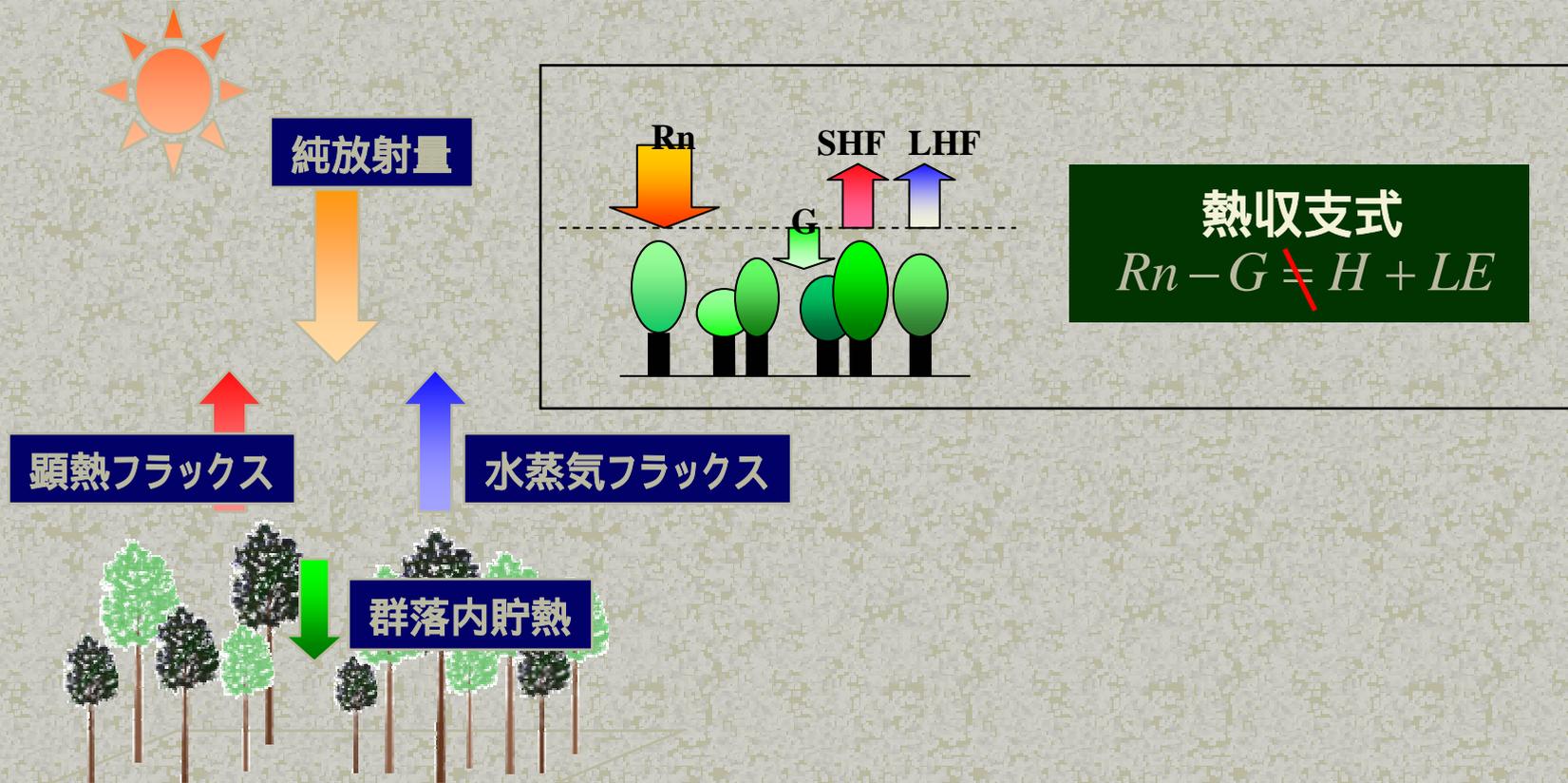
青：潜熱、水色：有効放射－顕熱、エンジ：顕熱、緑：CO<sub>2</sub>フラックス、赤：多層モデル推定値



## 今後の展開

「緑のダム」機能の評価に繋げていくためには、多層モデルを用いて様々な森林の特性を抽出し、植生タイプの違いによる蒸発散量の違いを説明すると共に、多層モデルを土壌中の浸透過程などと連動させたモデル「森林シミュレータ」の構想が必要である。

# 付録: エネルギー収支インバランス問題



## インバランスの生じる理由

1. 純放射や貯熱項の観測誤差 (特に群落内貯熱)
2. 測器の精度や応答性 (特にクローズドパスの高周波減衰)
3. 場の空間不均一性、地形の問題
4.  $wA$ 成分の存在 (平均鉛直流や夜間のDrainageFlowなど)

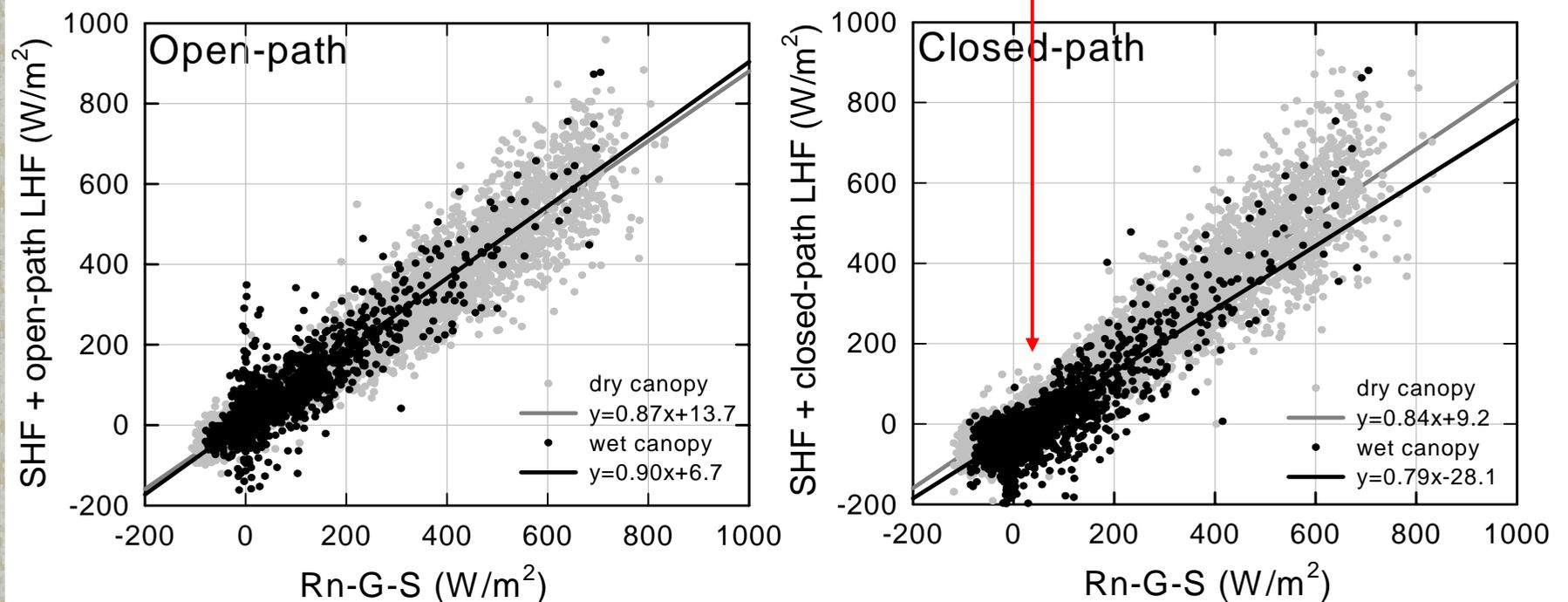


# エネルギー収支インバランスの実態

## 1. Rn-G-S vs. SHF+LHF

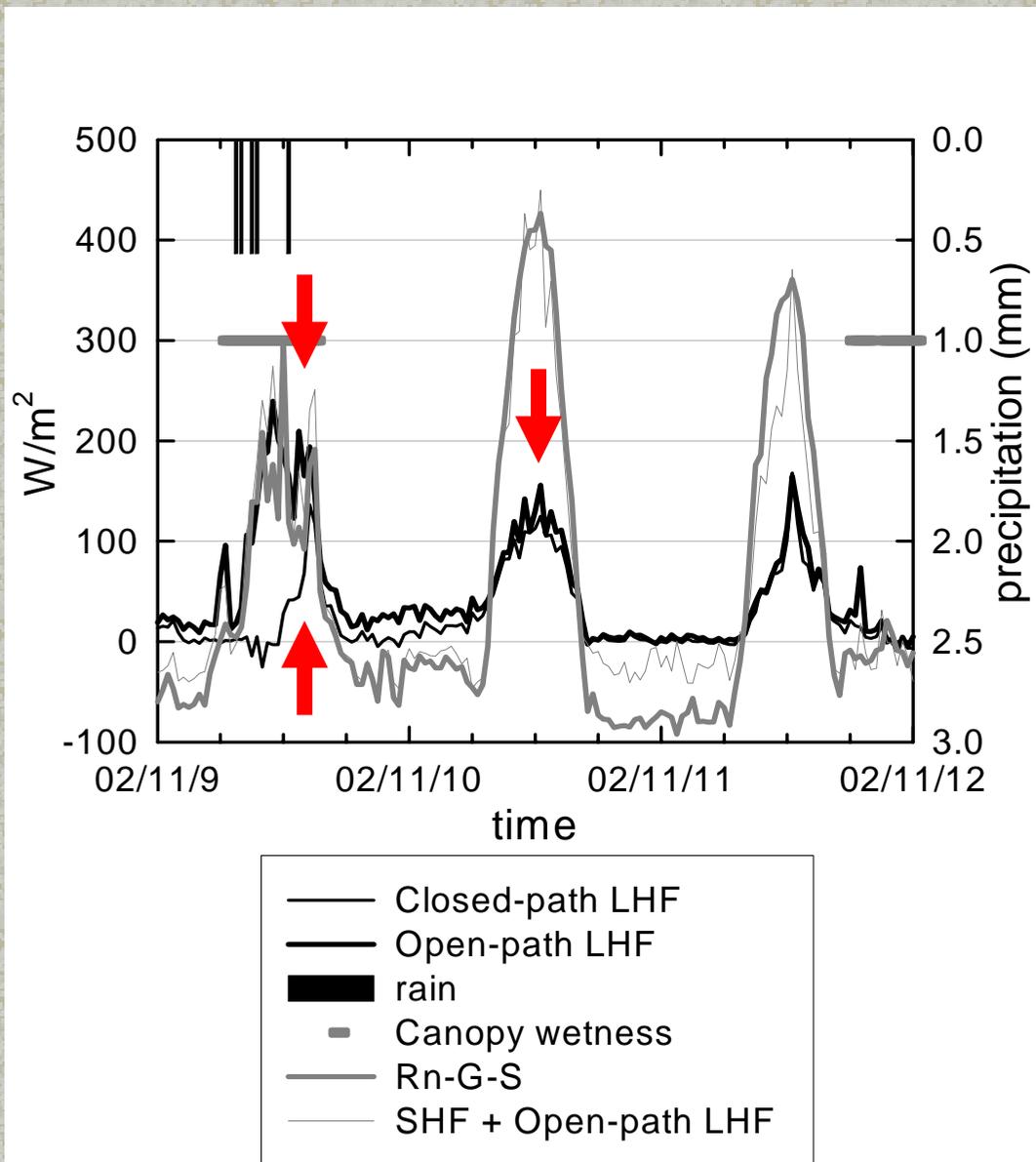
(データ: 2001-2002全期間、濡れセンサーの判定に基づきdryとwetに分ける)

降雨中および降雨後のクローズドパス法で負のインバランス大きい



降雨中および降雨後以外は、両方法とも84%から90%の閉じ具合

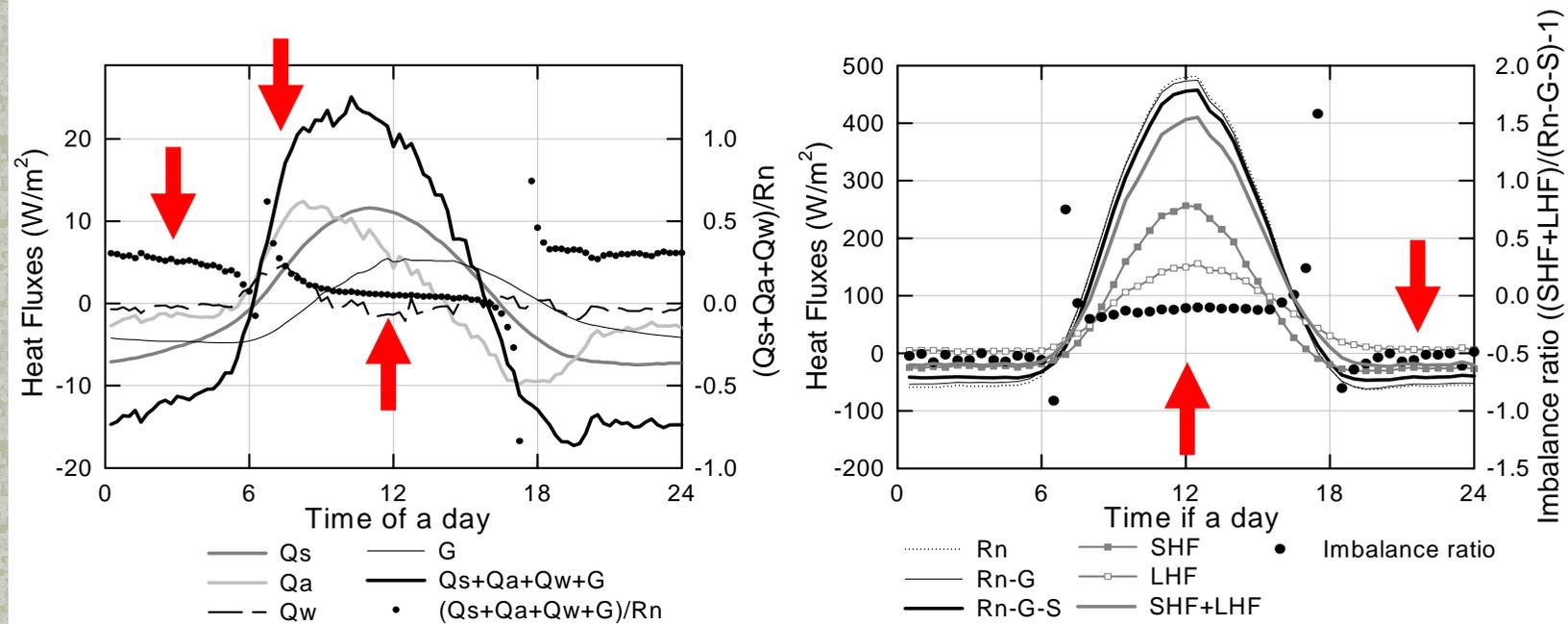
## エネルギー収支インバランスの実態 2. 降雨中および降雨後の様子



クローズドパス法では降雨中および降雨後の遮断蒸発はほとんど測れていない。翌日には改善される。オープンパスでは概ねエネルギー収支と矛盾なく、結構測れているよう。

## エネルギー収支インバランスの実態

### 3. 日変化を時系列でみた場合

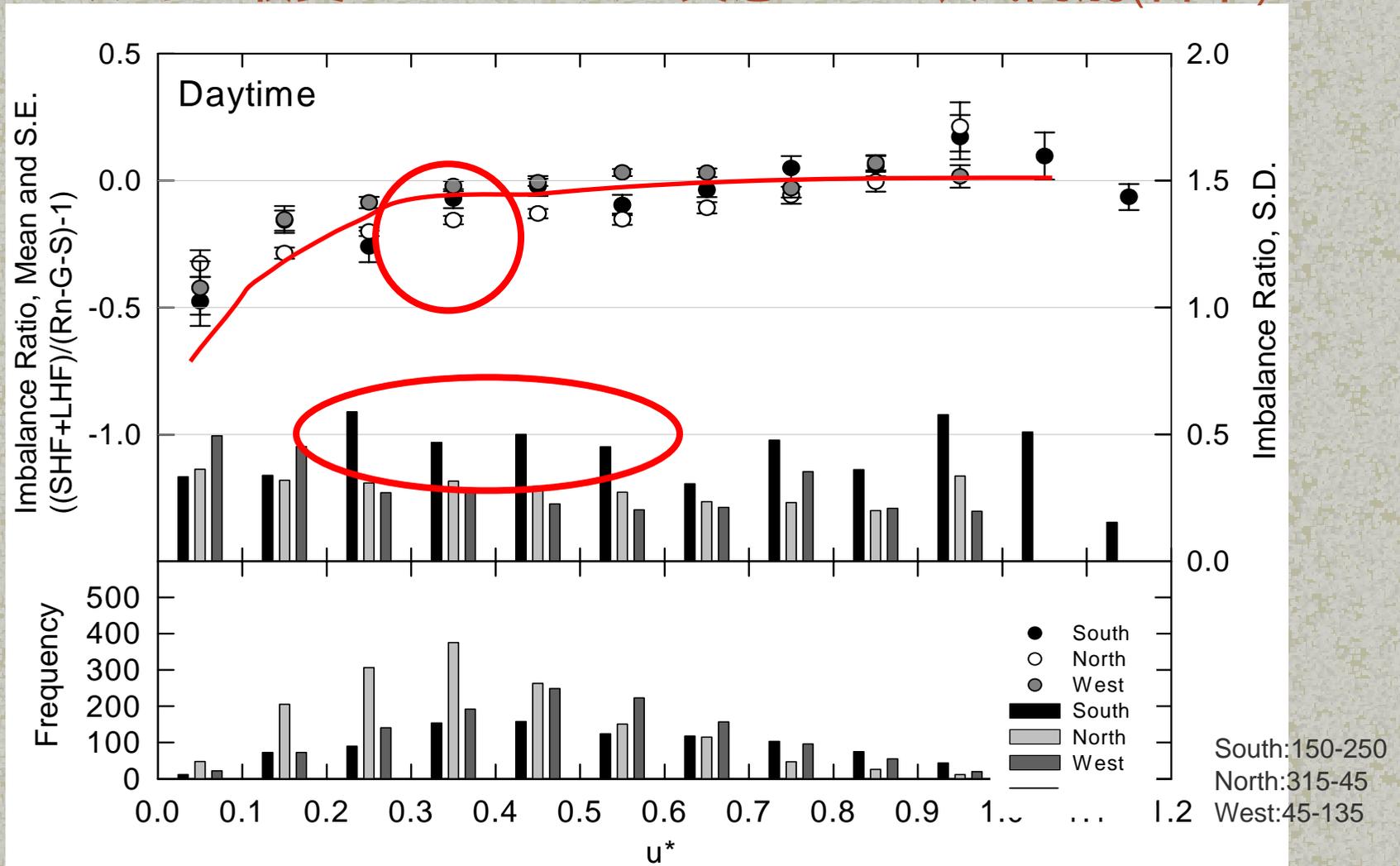


右: 群落内貯熱S各項(幹貯熱 $Q_s$ ・顕熱貯熱 $Q_a$ ・潜熱貯熱 $Q_w$ )、 $G$ 、  
および貯熱全項の $R_n$ に占める割合(2002年一年間の平均)

左: エネルギー収支各項( $R_n$ 、 $R_n-G-S$ 、 $SHF$ 、 $LHF$ 等)およびインバランス率  
(2002年一年間の平均、Open-pathデータの無い部分をClosed-pathで埋める)

貯熱各項トータルは、夜間で純放射の20-30%、午前中は5-60%、午後は2-5%  
これを考慮することで午前中および夜間のインバランスが若干改善される  
全体的なインバランス率は日中で-0.1(90%)、夜間で-0.5(50%)

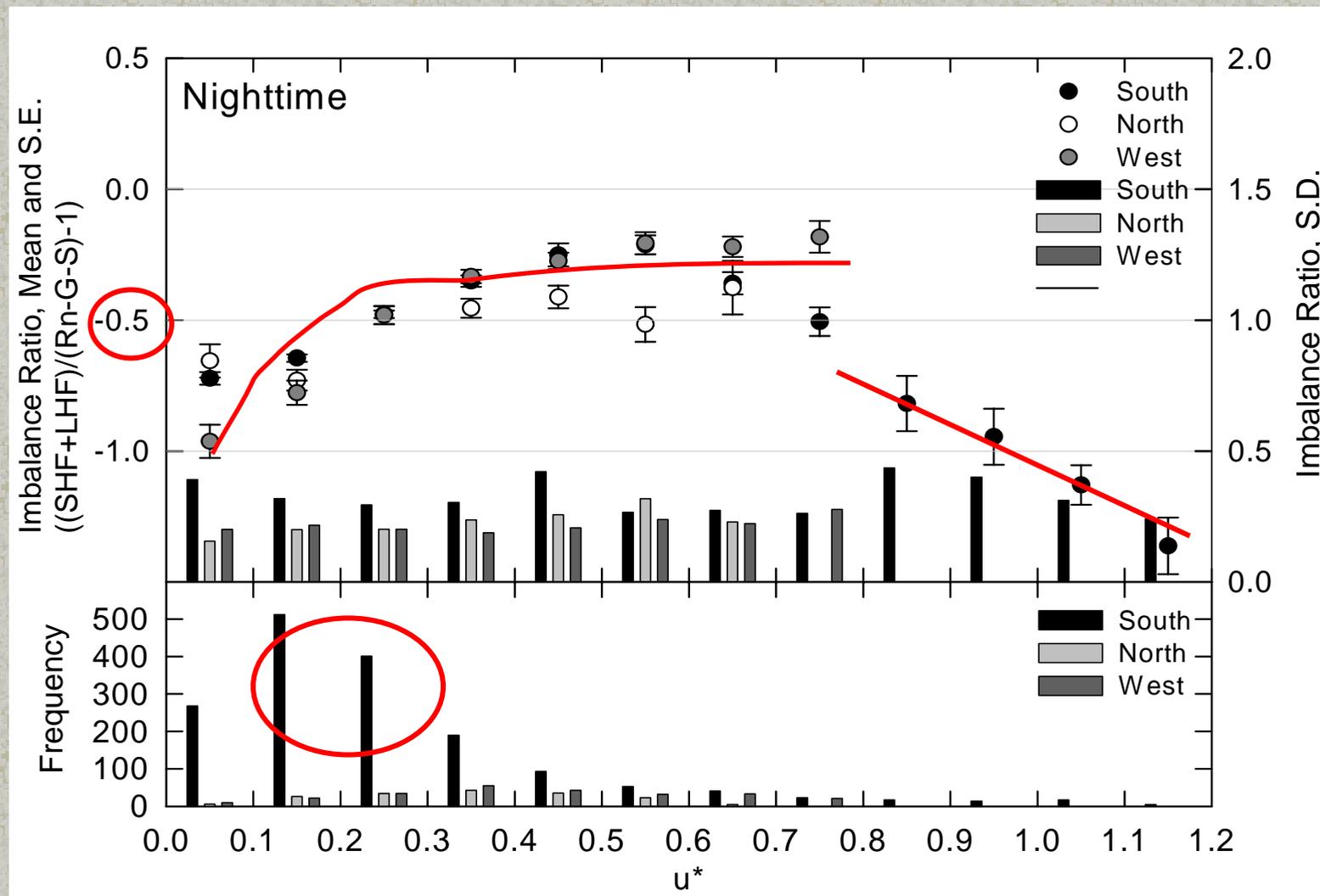
## エネルギー収支インバランスの実態 4. $u^*$ 、風向別(日中)



$u^*$ 小で負lbr大 フラックス全体に対する乱流成分の寄与が減るから  
 $u^*$ 大でもインバランスは存在(昼、夜とも) 平均鉛直流の存在あり(特に北風の時)  
 $u^*$ 小および南風の場合にS.D.が大きい 空間一様性に問題あり  
 複雑地形に起因する空間一様性の問題はS.D.に現れ、lbrの大きさとはあまり関係ない。



## エネルギー収支インバランスの実態 4. $u^*$ 、風向別(夜間)



夜間は日中より負lbr大 nocturnal drainage flowの存在を示唆  
 $u^*$ 極大で負lbr大 SATでの $t^*$ 検出限界 (Turnipseedら2002指摘)