

Energy balance closure at FLUXNET sites, Agricultural and Forest Meteorology 113 (2002) 223-243

Wilson, K., Goldstein, A., Falge, E., Aubinet, M., Baldocchi, D., Berbigier, P., Bernhofer, C., Ceulenmans, R., Dolman, H., Field, C., Grelle, A., Ibrom, A., Law, B.E., Kowalski, A., Meyers, T., Moncrieff, J., Monson, R., Oechel, W., Tenhunen, J., Valentini, R., Verma, S.

1. Introduction (この論文 = エネルギーインバランス問題をまとめた)

FLUXNET (主に CO₂ フラックスの観測網) の成果、集成。

エネルギーインバランス問題 水・熱フラックスが直接関与。CO₂ フラックスは直接関与しない。

(1) 渦相関で測定される輸送メカニズム(dとか z₀ とか ϕ とか)が全てのスカラーで似通っている。

(2) 同様の理論的仮定(保存則)に基づく。

(3) $LE + H = R_n - G - S - Q$ 各項のデータが概ね揃っている (Qは無視)。

(4) 生物物理学的なカップリングの観点から水・エネルギー移動も重要。

観測事実 : $LE + H \approx (R_n - G - S) \times (70 \sim 90\%)$ が多い。常にという訳ではない。

原因として考えられる仮説 :

(1) エネルギー収支式各項測定値が参照しているソース域の差 CO₂ フラックスはOK

(2) 測器の系統的な誤差 右辺の誤差なら CO₂ フラックスはOK

(3) 無視しているエネルギー吸収源(Q)の存在 CO₂ フラックスはOK

(4) 乱流フラックスの高周波 / 低周波成分の寄与分の欠如 CO₂ フラックスもNG

(5) 無視している移流項の存在 CO₂ フラックスもNG

本論文の目的 :

(1) 全ての FLUXNET サイトでのエネルギー収支の閉じ具合を評価する。

(2) それぞれのサイトでのインバランスの相違の潜在的な原因を評価する。

(3) エネルギー収支の閉じ具合に基づいた測定された CO₂ フラックスの解釈を行う。

2. Materials and methods

FLUXNET のサイト数 : 22 サイト、全データ : 90 サイト年 50 サイト年分のデータを使用。

データ間隔は 30 分。クオリティーチェックの結果、その内の 48% を使用。(表 1 : 各サイト概要)

3. Results

3.1 Overall energy balance closure (表 2)

直線回帰結果 : 傾きは 0.55 ~ 0.99、平均 0.79 ± 0.0 、切片 $-32.0 \sim 36.9 \text{ W m}^{-2}$ 、平均 3.7 ± 2.0

軸を逆にすると、相関が悪くなる。

有効エネルギーのランダム誤差を 20% 以上と仮定すると閉じ具合が改善する。40% だと 0.99
ランダム誤差を 20% 以上に仮定すると、切片がどんどん負にずれていく。(20% 程度が妥当?)

$$\text{エネルギーバランス率 : } EBR = \frac{\sum (LE + H)}{\sum (R_n - G - S)} = 0.34 \sim 1.69, \text{ 平均は } 0.84. (\text{ノイズ?})$$

3.2 Role of canopy and ground heat storage

高植生サイト (26 サイト) : Sがないと 7% 傾きが変わる。森林では S の評価は必要。G は 3%

低植生サイト : G の効果は 20%。(S の記述なし。データのなく無視しているサイトもある)

3.3 Vegetation type, vegetation height and IRGA type (図 1 : 影響なし)

3.4 Diurnal variation in closure (図 2)

日中の傾き : 0.80 ± 0.02 、夜間の傾き : 0.35 ± 0.03 (相関が弱い $r^2=0.11$)

全データの無理矢理結合平均日変化 : 午前中に EBR 小、午後に EBR 大 (季節やサイトに寄らない)

3.5 Effect of turbulent mixing (図 3, 4, 5)

摩擦速度と傾き、日中はわずかに傾向あり。夜間は明らかな傾向あり。

3.6 Effect of seasonality and the Bowen ratio (図 7, 8)

季節変化あり : 夏に傾き大、冬に傾き小。ボーエン比とは関係なし。H₂O センサーのせいでもない。

3.7 Link between energy balance closure and CO₂ fluxes

エネルギー残差率 $\delta_e = \frac{R_n - G - S - LE - H}{R_n - G - S}$ で判定。±0.1 を境に OK(AC)、過少(LF)、過大(HF)に

データを分類した後に、光合成有効放射量(PAR)と CO₂ フラックスの関係を見る (図 9、表 3)

LF の CO₂ フラックスは AC に比べて約 15% 小さい。t 検定すると 42 ~ 48% が有意に小さい。

夜間は摩擦速度と関係あり。畑では閾値がありそう。森林にはなさそう。

エネルギーバランスの勾配と摩擦速度の関係と明らかな関連はないようだ。

裏につづく

4. Discussion

全 FLUXNET サイトで、エネルギー収支が完全に閉じない何らかの一般的欠如があるようだ。(表 4)

4.1 Sampling errors (概ね否定)

エネルギー収支式右辺の誤差 : 40% 程度で説明可能。S,G ではあり得るが、Rn では非現実的。

フットプリントの差 : Rn は十分広域を見て、水平分布は少ない。正のバイアスの原因とはならず。

4.2 Instrument biases (概ね否定)

熱流板 G の値には、誤差は含まれうる。土壤と熱流板の熱特性の違いなどが原因。

Rn の測定は各サイトばらばら。Rn バイアスがサイト間相違の原因の可能性もある。

でも、最新の Rn 計、注意深い校正をしてもインバランスはなくならない。

全方位の風向でインバランスあり SAT 形状、IRGA 配置が原因とはならず。

高周波 / 低周波の変動を取りのがしは、渦相関法の問題として後述する。

4.3 Other energy sinks (いろいろある)

熱流板の直上から土壤面までの土壤の貯熱変化分だけ G を取り逃している。開地で問題大。

開地では、土壤中の isothermal 潜熱フラックスが重要。(森林では Rn の 5% 以下)

土壤面からフラックス測定面までの間の貯熱変化 S の精密な測定が困難。バイオマス分が困難。

精密に測れば、傾きが 1 に近づくとの報告もある。しかし背の低い植生でもインバランスはある。

光合成のエネルギーは有効放射の 1~2% 程度。畑ではもっと大きい可能性もある。

Webb et al.(1980) の密度補正をかけると、PawU et al.(2000) の定圧下の蒸発における膨張が問題となる。

これは、LE の 7~8% の規模だから、Rn の 5% の規模ぐらいになりうる。

4.4 Low and high pass filtering (概ね否定、特に高周波側のロスは否定)

補正方法がいろいろ提案されている。各自データを FLUXNET 提出前に補正している。

平均化時間を延ばしても、インバランスはほとんど改善されない。open と closed の差もない。

4.5 Advection (夜間は大部分がこれでしょう)

水平不均一が局地循環を生み、鉛直風速 = ゼロの仮定を覆す。

地形に傾斜があれば、夜間の排出流など安定時に地面付近で移流が起こる。

夜間には、平均鉛直移流もある。

地形が引き起こす移流が主要因なら、平らなサイトではインバランスは小のはず。そんなこともない。

もっと大きなスケールでの地形・勾配が効いているのかもしれない。

夜間の説明はつくが、日中もインバランスはあるので、それだけではない。

フラックスを過少にする小さな原因の積み重ねでインバランスが生じているに違いない！！

(ラーン、それを言われちゃあねえ ~ ;+_-+)

4.6 Implications for CO₂ flux (表 4)

SAT が IRGA のバイアスがあれば、CO₂ フラックスにも関連する。

移流が影響する場合も CO₂ フラックスに効く。スカラー毎に発生源 / 吸収源が違い、効き方が違う。

CO₂ は夜間の呼吸で放出されるので、夜間の移流が水収支には効かなくて炭素収支には効果大。

同じ PAR で LF の場合に AC より CO₂ フラックスが 15% 小さい。日中も関連している疑いあり。

摩擦速度が大きいときには、土壤呼吸と CO₂ フラックスが一致するとの報告もある。

エネルギーインバランスも、同様に摩擦速度で補正した報告もある。全てのサイトでは出来ない。

5. Conclusions

(1) FLUXNET サイト全てで一般的に、エネルギー収支の閉じ具合に欠如があり、潜熱・顕熱フラックスを過少に、かつ / または有効エネルギーを過大に見積もっている。インバランス率は 20% 程度。

(2) 乱流混合の弱い時、夜間にエネルギー収支の閉じ具合が乏しい。平均的に午前中より午後の方がエネルギー収支が良く閉じる。貯留項の過小評価が示唆される。

(3) open と closed パスの IRGA の間に差はなく、平らなサイトと傾斜のあるサイト間でも差はない。

(4) 全ての季節、あらゆるボーエン比でインバランスは見られる。暖かい季節に 1 に近づく。

(5) PAR と CO₂ フラックスの関係、および、夜間の呼吸フラックスは、エネルギー収支の閉じ具合と関連して振舞う。CO₂ フラックスとエネルギー収支閉じ具合はリンクしているが、それぞれを生み出すメカニズムが同様のものであるかどうかは、定かではない。(辛い)