

## 熱収支インバランス研究会報告\*

宮 崎 真\*\*・山 本 晋\*\*\*

## 1. はじめに

近年、顕熱フラックスや潜熱フラックスを直接測定する渦相関法等による観測が盛んになっている。それらの観測結果において地表面熱収支の不均衡（インバランス：顕熱フラックス ( $H$ ) + 潜熱フラックス ( $LE$ ) + 地中熱流量 ( $G$ ) の合計が正味放射量 ( $R_n$ ) と合わない) が多数報告されている (例えば Tsukamoto *et al.*, 1995; Miyazaki *et al.*, 2000; Wang *et al.*, 1999など)。元来、地表面熱収支は不均衡が起こらない、即ち、閉じるという事を前提として理論が作られており、モデルなどの検証データとして観測値を用いる場合に、閉じていないデータは適さない。さらに観測値そのものを定量的に議論する際にも、大きな障害となる。熱収支の不均衡に関しては、後述する様に多くの研究者がその要因について議論したり、それを明らかにする為の取り組みを行ったりしている。本研究会の目的は、AsiaFlux ネットワーク、GAME プロジェクトなどで行われている、いろいろな地表面での観測結果を報告し、話し合う中で、フラックス測定の実誤差の評価、熱収支の閉じない原因を探る事である。日本気象学会2001年度春季大会の第一日目(2001年5月8日)の研究発表が終わった後に、夕方5時半から行われたにもかかわらず、約70名の参加があり、このテーマに対する関心の深さがうかがわれた。本研究会が行われた場所は東京大学(本郷キャンパス)山上会館大会議室である。なお、本研究会は文字信貴(大阪府立大学)、杉田倫明(筑波大学)、太田岳史(名古屋大学)、山本

晋(産業技術総合研究所)を世話人として開かれた。

## 2. 森林での熱収支

従来から、森林での熱収支においてインバランスが見られるという報告例はあったが、ここでもまず、森林で行われた観測における状況についての発表がなされた。森林総合研究所の中井・北村は、札幌の常緑針葉樹林における結果を報告した。樹冠積雪の有無に関わらず典型的な厳冬期では熱収支のインバランスは比較的小さく、かつその系統的傾向も比較的偏りが小さいが、やはり乱流フラックス ( $H + LE$ ) が  $R_n$  に比べて小さかった(14%程度)。無雪期には、積雪期に比べて乱流フラックス ( $H + LE$ ) の  $R_n$  に対する過小度合いがより大きく(33%程度)、日変化では、日中の放射量のピーク時に特に乱流フラックスが過小側に見られる事が顕著であった。この結果では、 $G$ (地中熱流量、貯熱量)が考慮されていないのと、バンドパスコバリアンス法によって  $LE$  を評価しているの、その分が過小評価につながっている事が考えられるが、それにしても3割以上の過小評価分を説明できないとの事だった。

京都大学の谷ほかは、桐生試験地ヒノキ林において、3つの方法(渦相関法、ポーエン比法、流域水収支法)を用いて蒸発散量を推定した結果について報告した。渦相関法によって推定された1996年10月から1997年9月までの蒸発散量は、冬を除いて水収支推定値に比べてかなり小さく、年量で66%にしかならなかった。彼らはさらに、2000年8月29日から9月11日の無降水日に、ポーエン法との比較を行ったところ、日中平均顕熱/有効放射量比は、渦相関法が0.40、ポーエン比法が0.62とかなりの違いになった。水収支法と渦相関法の比較の結果から、潜熱の過小評価が顕熱よりも大きそうだという事であった。

マングローブ林における熱収支について大阪府立大

\* Summary of a meeting for the study of the energy imbalance.

\*\* Shin MIYAZAKI, 筑波大学地球科学系・陸域環境研究センター。

\*\*\* Susumu YAMAMOTO, 産業技術総合研究所・環境管理研究部門。

学の文字ほか報告をした。晴天日に求めた渦相関法による  $H$ ,  $LE$  の合計は,  $Rn$  の50%程度にしか達しなかった。インバランスの割合と風速との関係を見ると, インバランスは風速が大きくなるにつれて小さくなる傾向が見られたという事だった。

夜間の  $CO_2$  フラックス観測に及ぼす斜面下降流の影響について, 産業技術総合研究所の三枝ほか報告した。観測場所は岐阜県高山市の山岳地の複雑地形上にある冷温帯林である。大気が中立に近い時は,  $CO_2$  フラックスは気温とともに増加するが, 安定の場合は気温によらず小さい。しかし, 一般に土壤微生物による  $CO_2$  放出量と植物の呼吸は温度上昇に伴い急速に増加する性質を持つ。尾根上と斜面上の2地点での観測結果から, 夜間冷却によって斜面下降流が発生している可能性があり, これが安定時におけるフラックス過小評価の要因の1つではないかという指摘をしていた。

### 3. モンゴル/チベットにおける地表面熱収支の不均衡について

筑波大学の宮崎ほかは, モンゴルとチベットにおける熱収支の不均衡の度合いについて調べた結果を報告した。モンゴル高原のステップ草原地帯において熱収支の合計 ( $H+LE+G$ ) が日平均値では, 正味放射量 ( $Rn$ ) の8割程度しか測定されなかったが, 日中のみならず9割程度測定する事ができた。一方チベット高原の永久凍土地形の上では, 日平均値及び日中平均値ともに熱配分の総量 ( $H+LE+G$ ) は  $Rn$  の6割程度でしかなかった。また, それぞれの季節的な差異についてモンゴルでは, 残差項の  $Rn$  に対する割合は春季・夏季ともにほとんどが0.15以下であった。チベットでは残差項の大きさは, ほとんどが0.4以上であったという事であった。

宮崎ほか報告した地点より南側で, ステップ草原地帯のチベット高原東部における地表面エネルギー収支について, 熊本大学の田中ほか報告した。水蒸気データの測定値が芳しくない7・8月のモンスーン期には,  $(H+LE)/(Rn-G)$  は0.6から0.7ぐらいと, インバランスがかなり大きくなっていったが, 彼らが Golden Day として選んだ1998年9月4日から5日までのデータの解析結果では0.924と, ほぼインバランスがない結果が得られた。彼らは単に水蒸気のデータが悪いだけでなく, 土壤への熱移動について, 土壤サンプルに基づく熱特性データを用いて, 熱流板の値の補正と蓄熱量を計算することによってほぼ熱収支が閉じ

るという事を指摘した。

東京大学の Yang と小池は, 田中ほかと同じ場所において SiB2 によるシミュレーションを行った結果を報告した。熱拡散方程式を用いて,  $G$  を評価し, 潜熱フラックスを SiB2 で計算をすると, 熱収支はほぼ閉じるようになった。このことから, 観測値では,  $G$  と  $LE$  を過小評価しているのではないかという指摘をした。

### 4. 総合討論

総合討論では, 熱収支の不均衡の要因について以下のような点を中心に議論が行われた。

1) 熱収支が閉じないときと閉じる時が同じサイトでもある。

- ・季節, 葉の有無による差異

- ・昼夜, 安定度による差異

2) 水収支的アプローチは  $LE$  を過小評価している。

3) 地形 (山谷, 小さな凹凸) の影響によるシステムティックな熱移動 (移流; 山谷風等) がある。

4) 地表面過程が場所的に均一でない。

- ・凍結の影響

- ・ $G$  の見積りに土壤水分の水平方向不均一性が影響

上記の考えられ得る要因を踏まえて, 不均衡の問題を解決する方法を明らかにするためには, 従来通りの観測だけでなく, 特別強化観測を行ったり, モデルなどを用いて検証するのが有効な手段であるという意見が出された。

熱収支の不均衡の問題については, 最近急に起こったものではなく, 1970年代頃から指摘はあった。しかし, 近年は特に  $H$  と  $LE$  の測定に渦相関法が用いられる事が一般的となり, この問題への関心が高まってきており, 日本の研究者同士でも様々な場で話し合いが行われてきた(例えば, GAME-AAN サイエンスワークショップ (URL: [http://www.suiri.tsukuba.ac.jp/Project/aan/meeting-ws/Ws/Rs/proc\\_aanws\\_99.html](http://www.suiri.tsukuba.ac.jp/Project/aan/meeting-ws/Ws/Rs/proc_aanws_99.html)), GEWEX 北京会議・熱収支ミニワークショップ(石川・玉川, 2000など)。これは日本だけでなく, ヨーロッパやアメリカでも注目されており, それを解決する為の特別観測計画として EBEX (Energy Balance Experiment) がヨーロッパとアメリカの共同で行われている (Foken *et al.*, 1997)。EBEX に関しては戸田ほか (2000) でも紹介しているが詳細は (URL: <http://www.geo.unibayreuth.de/mikrometeorologie/EBEX2000/EBEX.html>) を参照されたい。戸田ほか

(2000)は、筑波大学陸域環境研究センターにおいて行われた、乱流フラックスの集中観測について紹介している。同様の観測は今年も行われた。これに関する詳細は (URL : <http://tama.cive.gifu-u.ac.jp/~tama/CompTURB/>) を参照されたい。今後も多く研究者によってこの問題を解決する為の強化観測や、モデリングによる検証が行われると考えられるが、今回の研究会は単に議論を深めるだけでなく情報交換の場としても有意義だったと思われる。今後、さらに不均衡の原因究明をするためには、同様の研究会を行って議論をする必要があるという意見は出されたが、具体的な日程等は決まっていない。

#### 参 考 文 献

- Foken, Th., S. P. Oncley, A. C. Delany, L. R. Tsvang, F. Cropley, R. Dlugi and S. Halldin, 1997 : Proposal for an Energy Balance Experiment EBEX-99, Bayreuth/Boulder, October 1, 15pp.
- 石川裕彦, 玉川一郎, 2000 : 第3回 GEWEX 国際会議及び第4回 GAME 国際会議報告, 6. 熱収支ミニワークショップ, 天気, 47, 192.
- Miyazaki, S., O. Tsukamoto, I. Kaihotsu, T. Miyamoto and T. Yasunari, 2000 : The energy imbalances observed in Tibetan Plateau and Mongolian Plateau, Proceedings of the 2nd International Workshop on TIPEX/GAME-Tibet, 1-3.
- 戸田 求, 玉川一郎, 宮崎 真, 松島 大, 後藤順也, 宮本 格, 2000 : シリーズ「水文・水資源観測最前線」乱流フラックス集中観測—フラックス野郎の会—, 水文水資源学会誌, 13, 396-405.
- Tsukamoto, O., K. Sahashi and J. Wang, 1995 : Heat budget and evapotranspiration at an oasis surface surrounded by desert, J. Meteor. Soc. Japan, 73, 925-935.
- Wang J., J. Kim, Y. Liou, Z. Gao, Y. Yan, T. Choi and H. Lee, 1999 : Energy balance analysis and one-dimensional simulation of land surface processes in a short-grass site of Central Tibetan Plateau, Proceedings of the 1st International Workshop on GAME-Tibet, 73-76.

#### 略語一覧

- AAN : GAME Asian Automatic Weather Station Network : アジア自動気象観測装置ネットワーク
- EBEX : Energy Balance Experiment : 熱収支研究観測計画
- GAME : GEWEX Asian Monsoon Experiment : アジアモンスーンエネルギー・水循環研究観測計画
- SiB2 : Simple Biosphere Model 2 : 簡素な生物圏モデル, バージョン 2

## 訂 正

「本誌」48巻8月号に以下の誤りがありましたので訂正いたします。

巻号	頁	行	誤	正
48.8	523	左下18行目	「深 (Shen-」	「深圳 (Shen-」
	527	左上2行目	「深の」	「深圳の」
	528	左上7, 15行目	「深に」	「深圳に」
	546	左上3行目	「成文堂書店」	「成山堂書店」
左上4行目		「168頁」	「186頁」	