

B-3 アジアフラックスネットワークの確立による東アジア生態系の炭素固定量把握に関する研究

(5) 東アジア生態系に関する炭素収支観測データの品質の管理及び解析に関する研究

独立行政法人農業環境技術研究所

地球環境部フラックス変動評価チーム

Edmond R. Ranatunge (EF-Fellow)

地球環境部

林 陽生

平成 12～14 年度合計予算額 1, 898 千円

(うち、平成 14 年度予算額 1, 898 千円)

[要旨]

茨城県つくば市近郊の真瀬地区の水田で、約 3 メートルの高度で顕熱と潜熱フラックスを測定した。測定には、FLUXNET (世界の主な生態系を対象として温室効果ガスおよびエネルギーフラックスを測定し、データベースを管理・利用する国際的なフラックスデータ管理システム) において基準的な測定法である渦相関法を用いた。渦相関法による顕熱と潜熱フラックスは、生態系の炭素固定量の算定の際に重要である。本報告では、2001 年を通じた長期観測データを対象として、欠測値の補間に関する解析を行った。長期観測データに質的な管理を施した結果、顕熱については全体の 18.6%、潜熱については 51.8% が補間の対象であることが明らかになった。これらの欠測期間のデータを補間するため、ルックアップテーブルをいくつかの補間手法に応じて複数作成した。両フラックスについて、意図的に欠測期間を設定したデータセットを使い、線形補間したデータを元データと比較したところ、両者はよく一致した。同時に、ルックアップテーブルを作成する際に最適な環境要因を考慮して作成しておくことの重要性が明らかになった。これらの手法を活用することにより、水田生態系における顕熱および潜熱フラックスの欠測補間が可能となった。

[キーワード] 炭素収支、顕熱フラックス、潜熱フラックス、ルックアップテーブル、欠測値の補間

1. はじめに

アジア諸国のなかで、水田は最も典型的な農業生態系である。水田圃場と大気間における炭素、熱、水のフラックスを理解することは、地球規模の環境変化を考えるうえで非常に重要である。

近年では、大気中の二酸化炭素濃度が上昇しており、この状況との関係が特に重要な問題となっている。二酸化炭素などのガスフラックスの観測を行うことで炭素収支を求めることができる。この研究では、つくば市近郊の真瀬地域の水田圃場で1999年の7月にフラックス観測を開始したデータを用いて解析を行った。

2. 真瀬水田圃場

観測を行った真瀬水田圃場の位置を図1に示す。この観測地点(北緯 $36^{\circ} 03'$, 東経 $140^{\circ} 01'$, 標高15 m)は、東京から約50km北東に位置する。灌漑施設が整備され、南北約1.5km、東西約1.0kmの広さがある。観測タワーの高さは6.2mである。

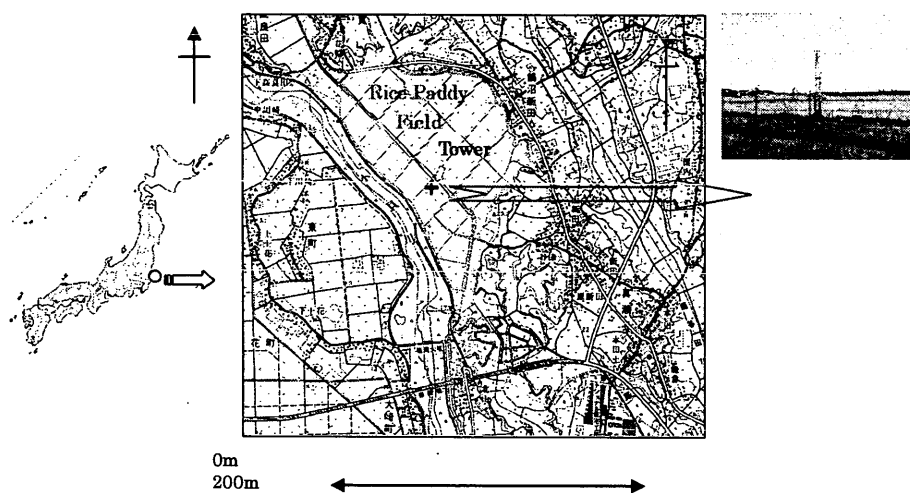


図1 真瀬圃場の地理的位置の概略

観測タワー周辺の水田では、この地域で一般的な方法で栽培管理されていた。4月下旬から湛水状態となり、その後間断的に水を落とした状態であった。8月下旬には水を落とした乾燥した状態であった。収穫後の9月から翌年4月までは、乾燥した状態であった。

3. 渦共分散とそのほかの気象要素の計測

顕熱フラックス (H) と潜熱フラックス (λE) を高度2.97mで測定した。国際的に、フラックスネットワークで広く利用されている渦共分散測定法を利用した。3次元の超音波風速温度計 (DA-600; Kaijo, Tokyo) で、風速3成分と気温の変動を測定した。また、水蒸気圧の変動をオープンパス型の赤外線分析装置 (IRGA -LI-7500, LI-COR) で測定した。風速の鉛直成分と気温変動の共分散から H を、前者と水蒸気圧変動の共分散から λE を求めた。共分散の計算に先立ち、鉛直風速の平均場がゼロになるように前処理した (Tanner and Thurtell, 1969)⁸⁾。湿度の影響と横方向の温度変動の影響は、Kaimal and Gaynor (1991)⁵⁾ および Hignett (1992)⁴⁾ の

方法によって除去した。高周波成分が捕捉できない点と、風速計と赤外線センサーの補正については Moore (1986)⁷⁾にしたがって処理した。大気密度の変動が λE に及ぼす影響は Webb et al. (1980)¹⁰⁾で計算した。 H と λE の質的管理は FLUXNET (Aubinet et al., 2000)¹⁾で利用されている標準的な手法を利用した。測定値の安定特性と乱流積算特性を条件として、2001 年の観測結果から解析対象を選んで解析した。

以上のほか、一般的な気象要素を測定した。また、短波放射および長波放射それぞれの上下成分、反射日射、群落内への日射透過率、気温、放射温度、相対湿度を 1.1m と 3.8m の 2 高度で測定した。風速、風向、大気圧、降水量、群落表面温度、水温、地温勾配、土壌水分も測定した。気温と相対湿度から、飽差 (VPD) を計算した。

4. 渦共分散に関する概要

年間を通した長期観測からフラックスを求めるには、乱流測定は有利である。渦共分散法の詳細は Massman and Lee (2002)⁶⁾に詳しい。30 分ごとという短時間間隔のデータを用いる場合、利用できるのは 65% に過ぎないという報告がある (Falge et al., 2001a and b)²⁾³⁾。また、渦共分散法でフラックスを求める際の不確実性が報告されている (Massman and Lee 2002)⁶⁾。渦共分散法によるフラックス評価では、元データに欠測が生じるのは普通であるため、解析に耐えうる一連のデータを作るには、欠測値の補間が非常に重要である。この重要性は、どんな生態系を対象とした場合でも同じだが、これまで一般に推奨される補間法は開発されていない (Falge et al. 2001 a and b)²⁾³⁾。また、渦共分散法によるフラックス値のギャップはランダムに現れず、観測システムの不具合などによって発生する (Twine et al. 2000)⁹⁾。このように、質的管理では、フラックス値が過大評価か過小評価を明らかにしなければならない。特筆すべきは、いかなる群落を対象とした場合でも、長期間データを使って 30 分間隔のフラックス特性を明らかにするには、渦共分散による方法、すなわち直接測定法が必要不可欠であることである。

5. 研究目的

主な目的は、2001 年の真瀬水田圃場のデータに対して、 H と λE 欠測値のギャップを補間し、完全な一連のフラックスデータを作る点にある。

6. 結果と考察

(1) 補間法

これまで、標準的な補間法は確立されていない。しかし、Falge et al. (2001a and b)²⁾³⁾によると、AMERIFLUX と EUROFLUX では最近、補間法について議論されている。それによると、

1) ルックアップテーブル、2) 平均日分散、3) 非線形関数、などを利用する方法がある。こ

ここでは、半経験的なルックアップテーブル法を利用して H と λE 欠測値のギャップを補間することとした。この方法では、対象となる群落に関係して決まる環境条件に基づいて個別のテーブルを準備することになる。

Fagal et al. (2001a and b)²⁾³⁾の議論にもあるように、本研究では VPD と光合成光量子密度 (Q_{PPFD}) を環境変化に対応した変数として使用し、ルックアップテーブルを作った。これらの変数は、水稻の生育ステージによって異なるため、作物がある季節と収穫後のない季節を含め年間を通した全期間を、栽培管理に応じて 12 の時期に区分し解析した。それらの期間は、fallow-I、ponding、irrigate-I、drainage-I、irrigate-II、drainage-II、irrigate-III、drainage-III、irrigate-IV、drainage-IV、ratoon、fallow-II である。これらの区分は、Falge et al. (2001a and b)²⁾³⁾の区分に基づいている。線形回帰を適用して、こうして求めたルックアップテーブルの検証を行った。

表1 H -flux および λE -Fluxのギャップの特性 (2001年)

Duration			Total number of data	Recorded number of data	Gap percentage (%)	Total number of data	Recorded number of data	Gap percentage (%)
DOY	Period	Name	Original H -flux data			Original λE -Flux data		
1	01/01/2001	Fallow-I	5376	4487	16.5	5376	4487	16.5
113	23/04/2001	Ponding	552	550	0.4	552	550	0.4
124	04/05/2001	Irrigate-I	2424	2238	7.7	2424	2152	11.2
175	24/06/2001	Drainage-I	576	576	0.0	576	576	0.0
187	06/07/2001	Irrigate-II	576	523	9.2	576	523	9.2
199	18/07/2001	Drainage-II	337	336	0.3	337	336	0.3
206	25/07/2001	Irrigate-III	529	524	0.9	529	524	0.9
217	05/08/2001	Drainage-II I	432	432	0.0	432	432	0.0
226	14/08/2001	Irrigate-IV	192	150	21.9	192	150	21.9
230	18/08/2001	Drainage-I V	600	600	0.0	600	600	0.0
243	30/08/2001	Ratoon	4392	4292	2.3	4392	4292	2.3
334	30/11/2001	Fallow	1536	1536	0.0	1536	1536	0.0
Through the year			17520	16242	7.3	17520	16156	7.8
DOY	Date	Period	Quality-controlled H -flux data			Quality-controlled λE -flux data		
1	01/01/2001	Fallow-I	5376	3762	30.0	5376	2238	58.4
113	23/04/2001	Ponding	552	526	4.7	552	352	36.2
124	04/05/2001	Irrigate-I	2424	1967	18.9	2424	1240	48.8
175	24/06/2001	Drainage-I	576	556	3.5	576	352	38.9
187	06/07/2001	Irrigate-II	576	496	13.9	576	407	29.3
199	18/07/2001	Drainage-II	337	328	2.7	337	240	28.8
206	25/07/2001	Irrigate-III	529	501	5.3	529	422	20.2
217	05/08/2001	Drainage-II I	432	419	3.0	432	365	15.5
226	14/08/2001	Irrigate-IV	192	147	23.4	192	128	33.3
230	18/08/2001	Drainage-I V	600	565	5.8	600	374	37.7
243	30/08/2001	Ratoon	4392	3844	12.5	4392	1773	59.6
334	30/11/2001	Fallow	1536	1156	24.7	1536	552	64.1

(DOY= day of the year)

(2) 渦共分散法で求めた真瀬圃場における H と λE フラックスの補間の特徴

2001年の真瀬圃場における顕熱と潜熱フラックスについて、データと質的管理を施したデータを表1に示す。この期間に測定されるべきフラックス値の合計数は、17,520回（30分データ1日分48回×365日）である。しかし、実際に渦共分散法で求めた H と λE フラックスは、それぞれ16,242回と16,156回であり、データが欠測するギャップの発生率は7.3%と7.8%であった。それぞれの期間でギャップの起こる数は異なったが、どちらのフラックスとも follow-I と irrigate-IV で大きかった。また、irrigate-II の期間では、両フラックスも同程度でギャップ率としては21.9%以上となった。表の下半分は質的管理の対象になったデータについて示してある。予想したとおり、元データと比較し、質的管理の対象とすべきギャップは拡大し、全期間を通してその率は H フラックスでは18.6%、 λE フラックスでは51.8%となった。この質的管理で、過大評価と過小評価を除去した結果の年間フラックスの値を図2に示す。これより、 H フラックスの場合には follow-I で30%、irrigate-I で23.4%、follow-II で24.7%であった。 λE フラックスは、follow-I では58.5%、ratoon では59.6%、follow-II では64.1%というように、 H フラックスと比較していずれの期間でも大きなギャップ率となった。

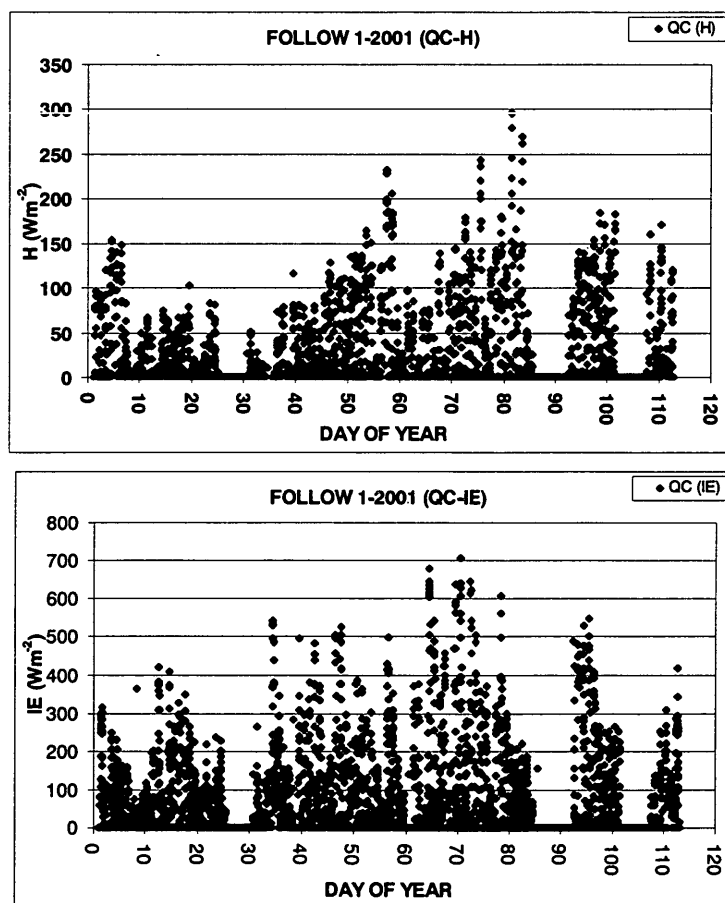


図2 質的管理後の顕熱 (H) および潜熱 (λE) フラックスの年間データ
 H は上図、 λE は下図

(3) VPD と Q_{PPFD} を使ったルックアップテーブルの計算

全12区分した期間のうち、irrigate と drainage の4つの期間をそれぞれ統合して8期間とし、ルックアップテーブル作成の前に最も少ない間隔に整理した(Falge et al. 2001a)²⁾³⁾。この結果、環境に依存した変数を各期間を対象として、Falge et al. (2001a and b)²⁾³⁾により H と λE フラックスとの欠測値を補うデータを求めた。続いて、期間ごとに H と λE フラックスの平均値と VPD と Q_{PPFD} との関係性を求め、ルックアップテーブルのパラメータを決めた。次に、ギャップが存在する場合には、ルックアップテーブルから判定した数値をもとに線形回帰を利用して補間値を決定した。こうして必要な全期間に適用できるルックアップテーブルを完成させた。

(4) 計算値の検証

H と λE フラックスそれぞれについて、線形回帰モデルを利用して計算値の検証を行った。図3に一例として、fallow-I における比較の結果を示す。ほぼ良い関係が得られたことが示されている。

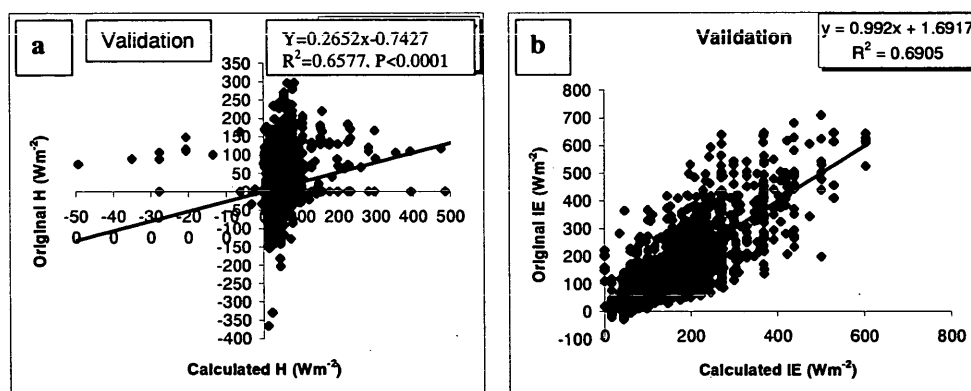


図3 H フラックス (a) と λE フラックス (b) の計算値の検証
線形回帰モデルを利用し計算値と元データを比較した

(5) 元の計算値と質的管理後のデータの比較

例として、最も長く継続する fallow-I の期間について、 H フラックスと λE フラックスにつき、元の計算値と質的管理後のデータの比較を行った結果を図4と図5に示す。変動のトレンドの比較から、欠測の間隔が短くても長くても元の計算値と補間値は比較的よく一致した。これより、ルックアップテーブルによる方法は、渦共分散法を用いた水田生態系のフラックス評価に有効であること、ルックアップテーブルを作成するには VPD と Q_{PPFD} を利用すればよいことが示された。しかし、さらに精度良く補間するには、日射量、気温、風速の要素を説明変数として引用する必要がある。特に年間の収支を正確に求めるには、それらの試みが効果的と考えられる。その場合、説明変数の組み合わせには、最適な組み合わせが存在する(Falge et al. 2001a and b)²⁾³⁾。

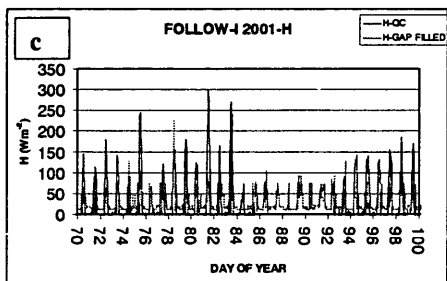
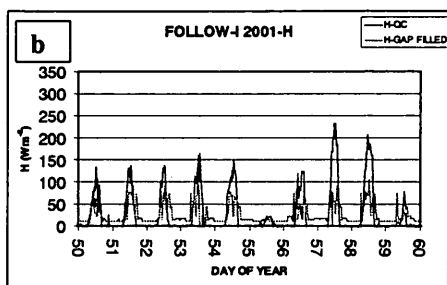
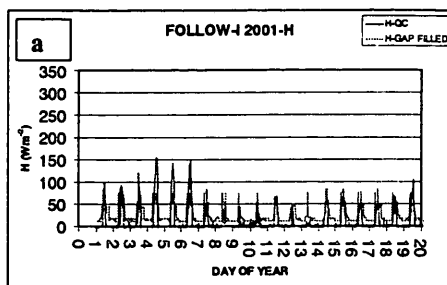


図4 顕熱フラックスに関する元の計算値と質的管理後のデータの比較
 H-QCは元の計算値を
 H-GAP FILLED は質的管理後のデータを示す
 上から下へ時間経過に伴う比較を示す

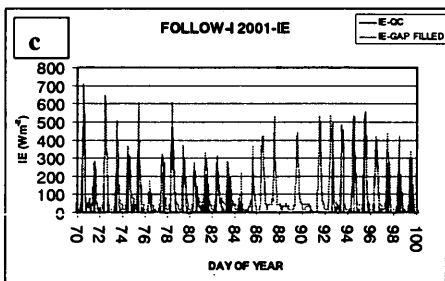
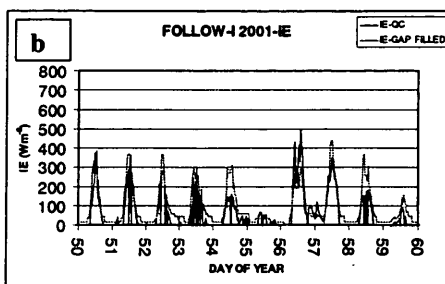
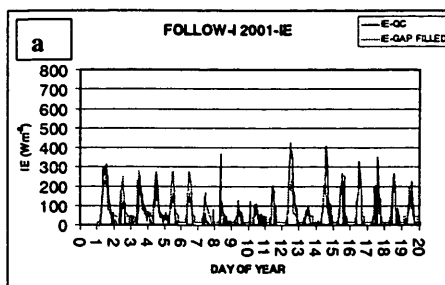


図5 潜熱フラックスに関する元の計算値と質的管理後のデータの比較
 LE-QCは元の計算値を
 LE-GAP FILLED は質的管理後のデータを示す
 上から下へ時間経過に伴う比較を示す

7. まとめ

- 1) 渦共分散法で観測した値に対する質的管理の対象となるデータにはギャップが多く含まれる。それらは、 H フラックスの場合には fallow-I で 30%、irrigate-I で 23.4%、follow-II で 24.7% であった。 λE フラックスは、fallow-I では 58.5%、ratoon では 59.6%、follow-II では 64.1% であった。
- 2) H フラックスと λE フラックスともギャップが生じる時期は不規則であった。
- 3) H フラックスと λE フラックスの元の計算値は、それぞれ線形回帰モデルで補間値を求めることができた。
- 4) 環境変化に関わる変数を導入したルックアップテーブル法は、 H フラックスと λE フラックスの質的管理を行うのに適した方法であることが明らかになった。

8. 参考文献

- ① Aubinet, M., Grelle, A., Ibrom, A., Rannik, U., Moncrieff, J., Foken, T., Kowalski, A.S., Martin, P.H., Berbigier, P., Bernhofer, Ch., Clement, R., Elbers, J., Granier, A., Grundwald, T., Morgenstern, K., Pilegaard, K., Rebmann, C., Snijders, W., Valentini, R., Vesala, T., 2000. Estimates of the annual net carbon and water exchange of forests: the EUROFLUX methodology. *Adv. Ecol. Res.* 30, 113-175.
- ② Falge, E., Baldocchi, D., Olson, R. et al., 2001a. Gap filling strategies for defensible annual sums of net ecosystem exchange. *Agric. For. Meteorol.* 107, 43-69.
- ③ Falge, E., Baldocchi, D., Olson, R. et al., 2001b. Gap filling strategies for long term energy flux data sets. *Agric. For. Meteorol.*, 107, 71-77.
- ④ Hignett, P., 1992: Corrections to temperature measurements with a sonic anemometer. *Boundary Layer Meteorol.* 61, 175-187.
- ⑤ Kaimal, J.C. and Gaynor, J.E., 1991. Another look at sonic thermometry. *Boundary Layer Meteorol.* 56, 401-410.
- ⑥ Massman, W.J., and Lee, X., 2002. Eddy covariance flux corrections and uncertainties in long-term studies of carbon and energy exchanges. *Agric. For. Meteorol.*, 113, 121-144.
- ⑦ Moore, C.J., 1986. Frequency response correction for eddy correlation systems. *Boundary Layer Meteorol.*, 37, 14-26.
- ⑧ Tanner, C.B. and Thurtell, G.W., 1969. Anemoclinometer Measurements of Reynolds Stress and Heat Transport in the Atmospheric Surface Layer. Department of Soil Science, University of Wisconsin, Madison, WI, Research and Development Technical Report ECOM 66-G22-F to the US Army Electronics Command.
- ⑨ Twine, T.K., Kaustas, W.P., Prueger, J.H., Starks, P.J., Wesely, M.L., 2000. Correcting eddy-covariance flux underestimates over grassland. *Agric. For. Meteorol.* 103, 279-300.
- ⑩ Webb, E.K., Pearman, G.I., Leuning, R., 1980. Correlation of flux measurements for density effects due to heat and water vapor transfer. *Quarterly J. Royal Meteorol. Soc.* 106, 80-91.

9. 国際共同研究等の状況

なし

10. 研究成果の発表状況

なし

1.1. 成果の政策的な寄与・貢献について

全球的な炭素収支の評価のため、国際的にフラックス観測を主体とした観測ネットワークの構築が進みつつあるなかで、東アジアの生態系におけるフラックス観測値の質的管理については未着手であった。本研究によって質的管理方法が提案された結果、アジア固有の生態系における炭素収支の動態が客観的かつ高精度で解明される。