

平成 27 年度 卒業論文

密閉式チャンバー法を用いた
冬季夜間の水蒸気フラックスの規定要因の解明

筑波大学生命環境学群地球学類

地球環境学主専攻

201210739

池田翼

2016 年 1 月

目次

要旨.....	iii
表目次.....	vi
図目次.....	vii
1. はじめに.....	- 1 -
1.1. 先行研究.....	- 1 -
1.1.1. 夜間の水蒸気フラックス.....	- 1 -
1.1.2. 夜間の水蒸気フラックスの測定方法.....	- 2 -
1.2. 研究目的.....	- 2 -
2. 方法.....	- 3 -
2.1. 観測地点.....	- 3 -
2.2. 観測方法.....	- 3 -
2.2.1. 密閉式チャンバー.....	- 3 -
2.2.2. 放射温度計.....	- 4 -
2.2.3. 温湿度測定器.....	- 5 -
2.2.4. 通風温湿度計.....	- 6 -
2.2.5. 4成分放射計.....	- 7 -
2.2.6. 濡れセンサー.....	- 7 -
2.3. データ処理.....	- 7 -
2.3.1. 水蒸気フラックス.....	- 7 -
2.3.2. 摩擦速度.....	- 8 -
2.3.3. 比湿.....	- 8 -
2.3.4. 熱収支.....	- 9 -
2.3.5. データ選択.....	- 10 -
2.4. 吸着と結露の判別.....	- 10 -
3. 結果・考察.....	- 10 -

3.1. 各メカニズムの割合	- 10 -
3.2. 水蒸気フラックスの変化パターンの分類	- 11 -
3.3. 熱収支との比較	- 11 -
3.4. 比湿差との比較	- 11 -
3.5. 摩擦速度との比較.....	- 12 -
3.6. 土壌水分との比較.....	- 12 -
3.7. プロファイル式からの地表面相対湿度の導出	- 12 -
3.8. 水蒸気フラックスの通年変化.....	- 13 -
4. 結論.....	- 15 -
謝辞.....	- 16 -
参考文献.....	- 17 -

密閉式チャンバー法を用いた
冬季夜間の水蒸気フラックスの規定要因の解明

池田翼

要旨

降水がないときの地表付近の鉛直方向の水蒸気輸送は 3 つのメカニズムによって分類される。大気への輸送である「蒸発」と地表面への輸送である「吸着」、「結露」である。これらの水蒸気輸送の絶対値は小さいが、乾燥、半乾燥地域の動植物にとっては重要な水分供給源となることや水収支や熱収支に影響を与える可能性がある。夜間の水蒸気フラックスは測定が困難であり、無視されることもある。本研究では密閉式チャンバーを用いて夜間の水蒸気フラックスの短時間での変化を計測し、その特徴を明らかにすることと水蒸気輸送量の時間変化と各気象要素・土壌水分量を測定することで水蒸気輸送の各メカニズムがそれぞれ何に起因しているのかを明らかにすることを目的とする。

観測地点は筑波大学アイソトープ環境動態研究センター熱収支・水収支観測圃場である。観測は 2015 年 12 月 11 日~2016 年 1 月 25 日の夜間 18:00~6:00 を対象として行った。気象観測項目は、温湿度測定器による地表面温度と地表面相対湿度、通風温湿度計による気温と相対湿度、土壌水分センサーによる土壌水分、4 成分放射計による放射、土壌温度センサーによる地温、地中熱流板による地中熱流量、密閉式チャンバーによる水蒸気濃度、濡れセンサーによる濡れ度である。現地観測したデータと圃場で自動観測されている気圧、気温、風速のデータを合わせて水蒸気フラックスと気象要素、土壌水分の時間変化から考察を行った。

比湿勾配によって夜間水蒸気フラックスを分類したところ観測期間中の夜間のおよそ 64%において蒸発がおきているという結果となり、下向きフラックスは全て吸着であった。また、水蒸気フラックスの時間変化は 5 つのパターンに分けることができた。蒸発が起きていたがある時間を境に水蒸気フラックスが 0 に近い値となり、ほとんど変化しなくなるパターン A、一晩中水蒸気フラックスがほとんど変化せず 0 に近い値をとりつづけるパターン B、水蒸気フラックスが一晩中変化し続けるパターン C、パターン A のように水蒸気フラックスの変化がほとんどなくなった後、再び変化が起こるパターン D、はじめは水蒸気フラックスがほとんど変化していないが、その後変化が起こり、また変化がなくなるパターン E があり、それぞれのパターンは気温、地表面温度、比湿、摩擦速度の影響によって変化していることが分かった。気温、地表面温度、比湿、摩擦速度、顕熱フラックス、土壌水分と水蒸気フラックスとの相関関係を調べたところ、比湿勾配が最も水蒸気フラックスに対して影響力があることが分かった。観測した水蒸気フラックスから地表面比湿をした逆算したところ、深度 0.03 m で観測した地表面比湿よりも小さい値を示し、これを用いて再計算した比湿勾配と水蒸気フラックスの相関はより強かった。通年の水蒸気フラックスの変化を見るために 1993 年の土壌水分データを用いて水蒸気フラックスの向きを算出したところ、冬季は下向き水蒸気フラックスが多く、夏季になるにつれ下向きフラックスが減少する傾向がみられた。

キーワード:吸着、結露、蒸発、夜間、密閉式チャンバー

Elucidation of the Regulating Factor of Nighttime Water Vapor Flux in Winter Using a Closed Chamber Technique

Ikeda Tsubasa

Abstract

When there is no rain, the water vapor transportation near the surface is classified into three. “Evaporation” is transportation to the atmosphere and “the adsorption” and “the dew” are the transportation to the surface. The magnitude of such vapor transportation during nighttime is usually small. However, they can be important water resources in the semi-arid area and arid areas, and they could affect the water and the heat balance. The measurement of vapor transportation during nighttime is difficult, and it is sometimes ignored. There are two purposes. One of the present studies is to measure the change of the nighttime vapor flux on hourly scale using closed chamber technique and to clarify its characteristic, and another is to measure time change of water vapor transportation and various meteorological elements and soil moisture content to reveal which variables affect each mechanism of nighttime vapor transportation.

The observation area is Center for Research in Isotopes and Environmental Dynamics of University of Tsukuba. The observation was carried out in 18:00~6:00 JST from 12/11, 2015 to 1/25, 2016. Surface temperature and surface relative humidity were measured by portable humidity and temperature indicator, temperature and relative humidity were measured by temperature and relative humidity probe, soil moisture was measured by soil moisture probe, radiation was measured by 4-component net-radiation sensor, soil temperature was measured by soil temperature thermistor probe, soil heat flux was measured by heat flux sensor, water vapor concentration was measured by closed chamber and surface wetness was measured by dielectric leaf wetness sensor.

It was found that about 64% of nighttime water vapor flux was evaporation, 36% by adsorption and 0% by dew. In addition, the time change of the water vapor flux was classified into five patterns. First pattern (A) was that evaporation stop at certain time and the value of water vapor flux decrease near 0, Second pattern (B) was the value of water vapor flux is near 0 and does not almost change, Third pattern (C) was water vapor flux is changing all night, Forth pattern (D) was like pattern (A), but water vapor flux increases again, Fifth pattern (E) was water vapor flux does not change at first, but it increases, after that it decreases and does not change again. In each pattern, vapor flux changed under the influence of temperature, surface temperature, specific humidity and friction velocity. Strong correlation between specific humidity difference between surface and atmosphere and nighttime water vapor flux was found. In addition, the downward flux occurred under the low temperature condition.

Surface specific humidity was recalculated from the observed water vapor flux, and the correlation with the water vapor flux was stronger. The direction of the water vapor flux was estimated based on soil moisture data of 1993, and it revealed that downward fluxes were dominant in winter, and they tend to decrease in summer.

Key Word : adsorption, dew, evaporation, nighttime, closed chamber technique

表目次

表 1 夜間水蒸気フラックスの測定方法とそれぞれの長所と短所.....	- 19 -
表 2 観測項目	- 20 -
表 3 圃場利用データ.....	- 21 -
表 4 水蒸気フラックスの変化パターンと起った日.....	- 21 -

図目次

図 1 観測地点(赤星印)(アイソトープ環境動態研究センターホームページの図に加筆修正)	- 22 -
図 2 形成した裸地面(2015年12月5日撮影)	- 23 -
図 3 測器の設置概況(2015年12月18日撮影)	- 24 -
図 4 地中熱流板、土壌水分計、地温計の埋設地点(2015年12月10日撮影)	- 25 -
図 5 密閉式チャンバー(チャンバーが開いている状態)(2015年12月10日撮影)	- 26 -
図 6 チャンバーが閉じているときの密閉式チャンバー(2015年12月10日撮影)	- 27 -
図 7 埋設前の地温計(写真赤枠内)(2015年12月10日撮影)	- 28 -
図 8 埋設前の土壌水分計(2015年12月10日撮影)	- 29 -
図 9 LI-8100のCO ₂ キャリブレーション結果(赤線: $y = x$)	- 30 -
図 10 LI-8100のH ₂ Oキャリブレーション結果(赤線: $y = x$)	- 30 -
図 11 ケースに入れた放射温度計(2015年12月5日撮影)	- 31 -
図 12 ケースに入れた放射温度計のレンズ部分(2015年12月5日撮影)	- 31 -
図 13 横から見た雨よけをかぶせた後の放射温度計(2015年12月5日撮影)	- 32 -
図 14 正面から見た雨よけをかぶせた後の放射温度計(2015年12月5日撮影)	- 32 -
図 15 放射温度計の設置概況(高さ3mのポール先端部)(2015年12月5日撮影)	- 33 -
図 16 放射温度計(505)のキャリブレーション結果(赤線: $y = x$)	- 34 -
図 17 温湿度測定器(HMP46)の設置状況(2015年12月10日撮影)	- 35 -
図 18 温湿度測定器(HMP155)の設置状況(2016年1月21日撮影)	- 35 -
図 19 温湿度測定器(HMI41)のキャリブレーションの様子(2015年11月24日撮影)	- 36 -
図 20 温湿度測定器(HMI41)のキャリブレーション結果(温度)(赤線: $y = x$)	- 37 -
図 21 温湿度測定器(HMI41)のキャリブレーション結果(相対湿度)(赤線: $y = x$)	- 37 -
図 22 通風温湿度計の設置状況(2015年12月10日撮影)	- 38 -
図 23 通風温湿度測定器センサー(HMPC45C)の 湿度キャリブレーションの様子(2015年11月19日撮影)	- 39 -
図 24 通風温湿度計センサー(HMPC45C)のキャリブレーション結果(温度)(赤線: $y = x$)	- 40 -
図 25 通風温湿度計センサー(HMPC45C)の キャリブレーション結果(相対湿度)(赤線: $y = x$)	- 40 -
図 26 設置された4成分放射計(赤枠内)(2015年12月10日撮影)	- 41 -
図 27 設置された濡れセンサー(2015年12月10日撮影)	- 42 -
図 28 濡れセンサーテスト時の誘電率の時間変化	- 42 -
図 29 2015年1/12 18:40~50の水蒸気の濃度変化	- 43 -
図 30 地表面比湿と大気比湿の差($q_s - q$)から求めた 2015年12/11~2016年1/25の夜間水蒸気フラックスの方向の割合	- 44 -
図 31 チャンバーの測定結果から求めた 2015年12/11~2016年1/25の夜間水蒸気フラックスの方向の割合	- 44 -
図 32 水蒸気フラックス変化パターンAの模式図	- 45 -
図 33 水蒸気フラックス変化パターンBの模式図	- 45 -

図 34 水蒸気フラックス変化パターン C の模式図.....	- 46 -
図 35 水蒸気フラックス変化パターン D の模式図.....	- 46 -
図 36 水蒸気フラックス変化パターン E の模式図.....	- 47 -
図 37 2015 年 12/11~12 における水蒸気フラックスと各気象要素の時系列変化.....	- 48 -
図 38 2015 年 12/14~15 における水蒸気フラックスと各気象要素の時系列変化.....	- 49 -
図 39 2015 年 12/15~16 における水蒸気フラックスと各気象要素の時系列変化.....	- 50 -
図 40 2015 年 12/16~17 における水蒸気フラックスと各気象要素の時系列変化.....	- 51 -
図 41 2015 年 12/18~19 における水蒸気フラックスと各気象要素の時系列変化.....	- 52 -
図 42 2015 年 12/21~22 における水蒸気フラックスと各気象要素の時系列変化.....	- 53 -
図 43 2015 年 12/22~23 における水蒸気フラックスと各気象要素の時系列変化.....	- 54 -
図 44 2015 年 12/24~25 における水蒸気フラックスと各気象要素の時系列変化.....	- 55 -
図 45 2015 年 12/25~26 における水蒸気フラックスと各気象要素の時系列変化.....	- 56 -
図 46 2015 年 12/26~27 における水蒸気フラックスと各気象要素の時系列変化.....	- 57 -
図 47 2015 年 12/27~28 における水蒸気フラックスと各気象要素の時系列変化.....	- 58 -
図 48 2015 年 12/29~30 における水蒸気フラックスと各気象要素の時系列変化.....	- 59 -
図 49 2015 年 12/30~31 における水蒸気フラックスと各気象要素の時系列変化.....	- 60 -
図 50 2015 年 12/31~2016 年 1/1 における水蒸気フラックスと各気象要素の時系列変化...	- 61 -
図 51 2016 年 1/1~1/2 における水蒸気フラックスと各気象要素の時系列変化.....	- 62 -
図 52 2016 年 1/2~1/3 における水蒸気フラックスと各気象要素の時系列変化.....	- 63 -
図 53 2016 年 1/3~1/4 における水蒸気フラックスと各気象要素の時系列変化.....	- 64 -
図 54 2016 年 1/4~1/5 における水蒸気フラックスと各気象要素の時系列変化.....	- 65 -
図 55 2016 年 1/7~1/8 における水蒸気フラックスと各気象要素の時系列変化.....	- 66 -
図 56 2016 年 1/8~1/9 における水蒸気フラックスと各気象要素の時系列変化.....	- 67 -
図 57 2016 年 1/9~1/10 における水蒸気フラックスと各気象要素の時系列変化.....	- 68 -
図 58 2016 年 1/10~1/11 における水蒸気フラックスと各気象要素の時系列変化.....	- 69 -
図 59 2016 年 1/11~1/12 における水蒸気フラックスと各気象要素の時系列変化.....	- 70 -
図 60 2016 年 1/12~1/13 における水蒸気フラックスと各気象要素の時系列変化.....	- 71 -
図 61 2016 年 1/14~1/15 における水蒸気フラックスと各気象要素の時系列変化.....	- 72 -
図 62 2016 年 1/15~1/16 における水蒸気フラックスと各気象要素の時系列変化.....	- 73 -
図 63 2016 年 1/16~1/17 における水蒸気フラックスと各気象要素の時系列変化.....	- 74 -
図 64 2016 年 1/19~1/20 における水蒸気フラックスと各気象要素の時系列変化.....	- 75 -
図 65 2016 年 1/24~1/25 における水蒸気フラックスと各気象要素の時系列変化.....	- 76 -
図 66 2016 年 1/25~1/26 における水蒸気フラックスと各気象要素の時系列変化.....	- 77 -
図 67 パターンによって分類された夜間水蒸気フラックスと 地表面比湿ー比湿の相関図(10 分値).....	- 78 -
図 68 パターンによって分類された夜間水蒸気フラックスと摩擦速度の相関図(10 分値)....	- 78 -
図 69 パターンによって分類された夜間水蒸気フラックスと土壌水分の相関図(10 分値)....	- 79 -
図 70 パターンによって分類された夜間水蒸気フラックスと 顕熱フラックスの相関図(10 分値).....	- 79 -

図 71	パターンによって分類された夜間水蒸気フラックスと地表面温度の相関図(10 分値)	- 80 -
図 72	パターンによって分類された夜間水蒸気フラックスと気温の相関図(10 分値)	- 80 -
図 73	パターンによって分類された土壌水分量と地表面比湿の相関図(10 分値)	- 81 -
図 74	パターンによって分類された土壌水分量と比湿の相関図(10 分値)	- 81 -
図 75	パターンによって分類された土壌水分量と地表面比湿－比湿の相関図(10 分値)	- 82 -
図 76	パターンによって分類された土壌水分量と地表面比湿の相関図(10 分値)	- 82 -
図 77	計算された地表面比湿と観測された地表面比湿の時間変化	- 83 -
図 78	地表面比湿(計算値)－比湿から求めた 2015 年 12/11~2016 年 1/25 の夜間水蒸気フラックスの方向の割合	- 84 -
図 79	パターンによって分類された水蒸気フラックスの分類図 (10 分値)	- 85 -
図 80	計算された地表面比湿を用いたパターンによって分類された 水蒸気フラックスの分類図 (10 分値)	- 85 -
図 81	パターンによって分類された 夜間水蒸気フラックスと地表面比湿(計算値)－比湿の相関図(10 分値)	- 86 -
図 82	土壌-大気間の比湿のプロファイルの模式図	- 87 -
図 83	1993 年 1 月の夜間水蒸気フラックスの方向の割合	- 88 -
図 84	1993 年 2 月の夜間水蒸気フラックスの方向の割合	- 88 -
図 85	1993 年 3 月の夜間水蒸気フラックスの方向の割合	- 89 -
図 86	1993 年 4 月の夜間水蒸気フラックスの方向の割合	- 89 -
図 87	1993 年 5 月の夜間水蒸気フラックスの方向の割合	- 89 -
図 88	1993 年 6 月の夜間水蒸気フラックスの方向の割合	- 90 -
図 89	1993 年 7 月の夜間水蒸気フラックスの方向の割合	- 90 -
図 90	1993 年 8 月の夜間水蒸気フラックスの方向の割合	- 91 -
図 91	1993 年 9 月の夜間水蒸気フラックスの方向の割合	- 91 -
図 92	1993 年 10 月の夜間水蒸気フラックスの方向の割合	- 91 -
図 93	1993 年 11 月の夜間水蒸気フラックスの方向の割合	- 92 -
図 94	1993 年 12 月の夜間水蒸気フラックスの方向の割合	- 92 -

1. はじめに

1.1. 先行研究

1.1.1. 夜間の水蒸気フラックス

降水がないときの地表付近の水分は3つのメカニズムによって分類される。大気への輸送である「蒸発」と地表面への輸送である「吸着」、「結露」である。

「蒸発」は地表面の水分が水蒸気となる現象である。「吸着」は水分子が土粒子や葉面に分子間力により引っ張られることで起こる現象である。吸着の大小は地表面に影響され、地表面が広く、土壌が粘土質であるほど吸着は起こりやすい。「結露」は寒冷な地表面に接した水蒸気が水滴となる現象である。大気中で作られた水滴が毛管現象により地表面につき、その水滴が成長することによって地表面温度が低下し、結露は促進される。また、水蒸気濃度が低く、放射冷却が促進されるときや、水蒸気濃度が高いときに結露率は高くなる。(Agam and Berliner, 2006)

これらの水蒸気輸送の方向は次の式で決定される。

$$\overline{w'q'} = \frac{ku_*}{\{\ln(\frac{z}{z_{ov}}) - \psi\}} (\bar{q}_s - \bar{q}) \quad (1)$$

ここで q_s は地表面の比湿、 q はある高度 z での比湿、 w は鉛直風速、 k はカルマン定数(=0.4)、 u_* は摩擦速度、 z_{ov} は水蒸気輸送に対する粗度長、 ψ は安定度補正関数である。また、 $\bar{\quad}$ は平均値、 $'$ は平均からの偏差を表す。

次に、水蒸気輸送を表す潜熱フラックスは以下の式で決定される。

$$L_e E = \rho L_e \overline{w'q'} \quad (2)$$

$L_e E$ は潜熱フラックス、 ρ は空気密度、 L_e は潜熱、 E は蒸発量である。(1)式において k 、 u_* 、 $\ln\{\frac{z}{z_{ov}} - \psi\}$

の符号は正である。したがって(1)式の $\bar{q}_s - \bar{q}$ の正負によって潜熱フラックスの方向は決定される。また、フラックスは正を上向き(蒸発)とする。

夜間の水蒸気輸送量は小さいが、降水の少ない乾燥、半乾燥地域の動植物にとっては重要な水分供給源となることが明らかとなっている(Jacobs et al., 1999)。また、Sugita and Brutsaert(1991)ではプレーリー地域の夏季夜間の蒸発散は1日の蒸発散の約7%を占めていた。しかし夜間蒸発は無視されることが多く、結果として日蒸発量の過小評価となるため、夜間の水蒸気輸送を考慮する必要があることが報告されている。一方、夜間の水蒸気輸送が水収支や熱収支に影響を与える可能性が高いことがいわれており(Agam et al., 2004)、乾燥、半乾燥地域のみでなく湿潤な環境においても夜間の水蒸気フラックスを測定することは重要であると考えられる。

1.1.2. 夜間の水蒸気フラックスの測定方法

夜間の水蒸気フラックスは非常に小さいため測定が困難である。いくつかの測定方法が確立されているが、それぞれに長所と短所がある(表 1)。

凝結板を用いる方法(Zangvil, 1996)は、様々な位置や高度での観測が可能である一方、凝結板の性質が土壌と異なることや、水蒸気の吸着が測定できないことが指摘されている。

マイクロライシメータ法(Ninari and Berliner, 2002)は精度の高い蒸発散量を測定することができるが、高い精度での測定が必要であり、測定が困難であることや、凝結の過小評価が起こりやすい(Hao, 2012)ということが指摘されている。

渦相関法を用いた方法(Jacobs et al. 2000)は仮定を必要としない直接観測法として最も信頼できるが、広く一様な観測地が必要であることや夜間の水蒸気フラックスが微小であることから水蒸気フラックスが誤差と同程度になってしまうといった問題点がある。

密閉式チャンバー法(中野, 2007)は測定が簡便であり、狭い場所でも観測が可能であることから野外での観測に適しているが、チャンバー内の風速が外部と異なることで誤差が生じることが指摘されている。

1.2. 研究目的

先行研究で述べたとおり、夜間の水蒸気フラックスを測定することは重要である。しかし、夜間の水蒸気フラックスに関する研究の多くは乾燥、半乾燥地域で行われており、湿潤地域における研究事例は少ない。また、中野(2007)では水蒸気フラックスのメカニズムの分類を一晩ごとに行っていたが、夜間の水蒸気フラックスのメカニズムは短い時間間隔で変化している可能性が高いと考えられる。

以上より、夜間の水蒸気フラックスの時間スケールでの変化を計測し、その特徴を明らかにすること、水蒸気輸送量の時系列変化と各微気象要素・土壌水分量などを同時に測定することで水蒸気輸送の特徴とそれぞれのプロセスが何に起因しているのかを明らかにすることを本研究の目的とする。

短い時間間隔での夜間水蒸気フラックスの測定においては、測定が簡便であり、夜間の風速が小さいため誤差が生じにくい密閉式チャンバー法が適していると考えられる。よって本研究では夜間の水蒸気フラックスの測定方法として密閉式チャンバー法を用いた。

2. 方法

2.1. 観測地点

本研究の対象地域は筑波大学アイソトープ環境動態研究センター熱収支・水収支観測圃場(以降、圃場) (36°06'49"N, 140°05'42"E)である(図 1)。圃場は半径 80 m、面積約 0.02 km²の円形の草地であり、クリーピンググラスと多種の雑草が混じる草地になっている(劉厦・及川, 1993)

また、年平均気温 13.3°C、年降水量 1200~1600 mm であり、深度 10~25 cm に明褐色の粘質な土壌、40~80 cm に暗褐色のシルト質土壌が認められた(濱田ほか, 1998)。

図 1 の赤星印が観測地点である。観測地点を 3 m 四方に区切り、土壌を掘りおこし植生を取り除き、裸地面(図 2)を形成した後、測器を設置した。

圃場中心にある、実験観測塔では各種気象データが観測されており、本研究では解析にあたり一部を利用した。

2.2. 観測方法

観測は 2015 年 12 月 11 日~2016 年 1 月 25 日の夜間 18:00~6:00 を対象として行った。観測項目、使用機材については表 2、測器の設置概況については図 3, 図 4 に示した。

2.2.1. 密閉式チャンバー

密閉式チャンバーは水蒸気濃度 W_f [ppt]を測定するために利用した。密閉式チャンバーは地表面から出るまたは地表面が吸収するガスフラックスを測定する機械である。図 5 のように開いている状態のチャンバーが図 6 のように閉じることにより、閉じている間のガスフラックスの濃度変化を測定する。本研究ではチャンバーが 10 分に 1 回 3 分間閉じるよう設定を行った。

また、チャンバーは同時に土壌温度センサー(図 7)と土壌水分センサー(図 8)により地温 T_g [°C]と土壌水分 W_g [%]の計測も行っている。土壌水分は生データの単位が mV で表示されるため、以下の式によって%へと補正した(LI-COR Environmental News Line, 2014)。

$$VWC = (-3.14 \times 10^{-7} \times mV^2) + (1.16 \times 10^{-3} \times mV) - 6.12 \times 10^{-1} \quad (3)$$

ここで VWC は土壌水分量、mV はチャンバー測定される土壌水分の値である。

キャリブレーションは以下の手順で行った。(図 9, 図 10)

・ CO₂

①N₂のガスボンベに圧力調整器(FR-IS-P 形, ユタカ)を取り付け、アクリルチューブで LI-8100 と接続し、LI-8100 の電源を入れポンプをオフにする。

②N₂ガスを 2.5 L/min の流量で流し、値が安定するまで 2 分待つ。

③値が安定したことが確認できたら、キャリブレーション前の値を 1 分間記録し、その後 PC 上で Zero CO₂をクリックし、再び値を 1 分間記録する。

④600 ppm の CO₂のガスボンベに圧力調整器を取り付け、アクリルチューブで LI-8100 と接続する。

- ⑤CO₂ ガスを 2.5 L/min の流量で流し値が安定するまで 2 分待つ。
- ⑥値が安定したことが確認できたら、キャリブレーション前の値を 1 分間記録し、その後 PC 上で Span CO₂ をクリックし、再び値を 1 分間記録する。
- ⑦446 ppm の CO₂ のガスボンベに圧力調整器を取り付け、アクリルチューブで LI-8100 と接続する。
- ⑧CO₂ ガスを 2.5L/min の流量で流し、値が安定するまで 2 分待つ。
- ⑨値が安定したことが確認できたら、値を 1 分間記録する。
- ⑩⑦,⑧,⑨の操作を 299 ppm の CO₂ と N₂ についても行い、平均値をキャリブレーション後の値として用いた。

・ H₂O

- ①N₂ のガスボンベに圧力調整器を取り付け、アクリルチューブで LI-8100 と接続し、LI-8100 の電源を入れポンプをオフにする。
- ②N₂ ガスを 2.5 L/min の流量で流し、値が安定するまで 20 分待つ。
- ③値が安定したことが確認できたら、キャリブレーション前の値を 1 分間記録し、その後 PC 上で Zero H₂O をクリックし、再び値を 1 分間記録する。
- ④高精度露点発生器(LI-610, LI-COR)と LI-8100 をアクリルチューブで接続する。
- ⑤高精度露点発生器と LI-8100 を 40°C に設定した定温恒温乾燥器(ND-50 型, EYELA)に入れ、露点温度を 30°C に設定し、2.5 L/min の流量で流す。
- ⑥20 分待ち、値が安定したことが確認できたら、1 分間値を記録し、PC 上で Span H₂O をクリックし再び値を 1 分間記録する。
- ⑦高精度露点発生器と LI-8100 を定温恒温乾燥器から取り出し、露点温度を 20°C に設定し 2.5 L/min の流量で流す。20 分待ち値が安定したことが確認できたら、1 分間値を記録する。
- ⑧露点温度 10°C においても⑦と同様の操作を行い、平均値をキャリブレーション後の値として用いた。

2.2.2. 放射温度計

放射温度計は地表面温度 T_s [°C]を測定するために利用した。雨によって濡れるのを防止するため、放射温度計を密閉ケースに入れて使用した(図 11,12)。また、レンズ部分に水がつくことを防ぐために雨よけを取り付けた(図 13,14)。

放射温度計はキャリブレーション結果より値の補正を行った(図 16)。

キャリブレーションは以下の手順で行った。

- ①定温攪拌水槽(TR-2A, アズワン)に水と氷、食塩を入れ電源を入れ攪拌を行う。
- ②棒状温度計を入れ水温が 0°C となったことを確認し、放射温度計で水面の温度を測定する。
- ③測定値を 10 秒ごとに記録し、100 秒間記録を行う。この 10 個の測定値の平均値を放射温度計の 0°C の測定値とした。
- ④定温攪拌水槽のヒーターの電源を入れ、10°C になるよう水温を上げる。
- ⑤棒状温度計を入れ 10°C であることが確認できたら③と同様の操作を行う。
- ⑥以下 20°C、30°C、40°C について④、⑤と同様の手順で測定を行った。

補正式は以下のようになった。

$$y = 1.0868x - 2.5011 \quad (4)$$

2.2.3. 温湿度測定器

温湿度測定器は地表面温度 T_{RS} [°C]と地表面相対湿度 R_s [%]を測定するために利用した。センサー部分に軽く土がかぶるように土壤に埋め測定を行った。埋設深度は0.02 m程度である。また、温湿度測定器は12月17日に使用機材をHMP46(図17)からHMP155(図18)に変更した。HMP155はVAISALAのCALIBRATION CERTIFICATEを利用して湿度と温度の値を補正した。

$$y = 0.09989x + 0.0852 \text{ (湿度)} \quad (5)$$

ここで x は補正前の地表面相対湿度[%]、 y は補正後の地表面相対湿度[%]である。

$$y = x + 0.05 \text{ (温度)} \quad (6)$$

ここで x は補正前の地表面温度[°C]、 y は補正後の地表面温度[°C]である。

HMP46のキャリブレーションは以下の手順で行った(図20, 21)

・温度

- ①定温攪拌水槽に水を入れ、電源を入れ攪拌を行う。
- ②定温攪拌水槽のヒーターの電源を入れ、40°Cになるよう水温を上げる。
- ③棒状温度計を入れ水温が40°Cとなったことを確認し、センサー部分をビニール袋で覆った温湿度測定器を入れ、値を記録、その後温度一点校正を行い、値を40°Cに設定した。
- ④定温攪拌水槽の水を取り替え、氷と塩を入れる。
- ④棒状温度計を入れ0°Cであることが確認できたら温湿度測定器を入れ、測定値を10秒ごとに記録し、100秒間記録を行う。この10個の測定値の平均値を放射温度計の0°Cの測定値とした。
- ⑤ヒーターの電源を入れ、20°C, 30°C, 40°Cにおいても④と同様の操作を行った。

補正式は以下のようになった。

$$y = 1.0266x - 0.9023 \quad (7)$$

・湿度

- ①センサー部分を図19のように覆い、アクリルチューブを取り付け、高精度露点発生器に接続する。
- ②棒状温度計で覆いの中の温度を測定し、相対湿度が70%となるような露点温度の値を次の式から逆算する。

$$RH = \frac{\exp\left(\frac{aT_d}{T_d+b}\right)}{\exp\left(\frac{aT}{T+b}\right)} \quad (8)$$

ここで RH は相対湿度、 T_d は露点温度、 T は棒状温度計で測定した気温、 $a = 17.502$ 、 $b = 240.97$ であ

る。この式で求めた露点温度に高精度露点発生器を設定し、2.5 L/min の流量で流した。
20 分待ち、値が安定した後に現在の測定値を記録し、その後一点校正を行い、値を 70% に設定した。
③同様に式(6)から相対湿度が 30%, 50%, 70%, 90% となるような露点温度を設定し、それぞれについて測定値を 10 秒ごとに記録し、100 秒間記録を行った。
④アクリルチューブを圧力調整器の付いた N₂ のガスボンベにつなぎ、2.5 L/min の流量で流した。
20 分待ち、値が安定したら相対湿度 0% として 10 秒ごとに記録し、100 秒間記録を行った。
補正式は以下ようになった。

$$y = 1.0095x - 0.0499 \quad (9)$$

2.2.4. 通風温湿度計

通風温湿度計は気温 T_R [°C]、相対湿度 R [%] を測定するために利用した。地上 0.3 m の位置に設置した(図 20)。また、キャリブレーション結果より、値の補正を行った(図 24, 図 25)。

キャリブレーションは以下の手順で行った。

・温度

- ①定温攪拌水槽に水と氷、食塩を入れ電源を入れ攪拌を行う。
 - ②棒状温度計を入れ水温が 0°C となったことを確認し、センサー部分をビニール袋で覆った通風温湿度計を入れ、温度を測定した。
 - ③測定値を 10 秒ごとに記録し、100 秒間記録を行う。この 10 個の測定値の平均値を通風温湿度計の 0°C の測定値とした
 - ④定温攪拌水槽のヒーターの電源を入れ、10°C になるよう水温を上げる。
 - ⑤棒状温度計を入れ 10°C であることが確認できたら③と同様の操作を行う。
 - ⑥以下 20°C, 30°C, 40°C について④、⑤と同様の手順で測定を行った。
- 補正式は以下ようになった。

$$y = 1.0832x - 1.7299 \quad (10)$$

・湿度

- ①センサー部分を図のように覆い、アクリルチューブを取り付け、高精度露点発生器に接続する。(図 23)
- ②棒状温度計で覆いの中の温度を測定し、露点温度を 0°C に設定し、2.5 L/min の流量で流した。
20 分待ち、値が安定したら 10 秒ごとに記録し、100 秒間記録を行った。
- ③露点温度 10°C, 20°C についても②と同様の操作を行った。
- ④高精度露点発生器と通風温湿度計を 40°C に設定した定温恒温乾燥器に入れ、露点温度を 30°C に設定し、2.5 L/min の流量で流す。20 分待ち、値が安定したら 10 秒ごとに記録し、100 秒間記録を行った。
- ⑤アクリルチューブを圧力調整器の付いた N₂ のガスボンベにつなぎ、2.5 L/min の流量で流した。
20 分待ち、値が安定したら相対湿度 0% として 10 秒ごとに記録し、100 秒間記録を行った。

補正式は以下のようになった。

$$y = 1.0221x - 0.121 \quad (11)$$

2.2.5. 4成分放射計

4成分放射計は上向き長波 L_u [W/m²]、下向き長波 L_d [W/m²]、上向き短波 S_u [W/m²]、下向き短波 S_d [W/m²]を測定するために利用した。4成分放射計の設置位置は Schmid(1997)の以下の式から求めた。

$$P_R = \frac{r(\Omega_{P,R})^2}{r(\Omega_{P,R})^2 + Z_m^2} \quad (12)$$

P_R は実際に測器が観測している面積の割合、 $r(\Omega_{P,R})$ は測器が観測している面積の半径、 Z_m は測定高度である。本研究では約 100 cm²の範囲を観測するために 60 cm の高さの位置に測器を設置した。

(図 26)

2.2.6. 濡れセンサー

濡れセンサーはセンサー表面の誘電率を測定することにより、地表面や葉面の濡れを測定する測器である(図 27)。本研究では濡れを判別するために以下の操作を行った。

操作 1 濡らしたティッシュでセンサーの片面を覆う

操作 2 濡らしたティッシュでセンサーの両面を覆う

操作 3 センサーの表面を乾かす

結果は図 28 のようになった。操作 1 では誘電率はおおよそ 600mV、操作 2 ではおおよそ 650mV、操作 3 ではおおよそ 250mV となった。よって本研究では誘電率が 600mV 以上の時を濡れとして取り扱うこととする。

2.3. データ処理

データ処理にあたり圃場の実験観測塔で観測されているデータを利用した。利用データは表 3 に示す。

2.3.1. 水蒸気フラックス

密閉式チャンバーで得られる値は水蒸気濃度 W_f [ppt]であるので、水蒸気フラックス E [mm/h]に変換する必要がある。変換には Matsuno(2011)で用いられた以下の式を利用した。

$$E = \Delta W_f \times \frac{V}{a} \times \frac{PM}{RT} \times \frac{1}{\rho_w} \times 60 \times 60 \quad (13)$$

E は水蒸気フラックス[mm/h]、 ΔW_f はチャンバー閉鎖後の水蒸気濃度の変化率[ppt/s]、 V はチャン

バーの体積(=4073.5 cm³)、 a はチャンバーの底面積(=317.8 cm²)、 P は大気圧[Pa]、 M は水の分子量 18[g/mol]、 R は気体定数 8.31[Pa m³/(mol K)]、 T は気温[K]、 ρ_w は水の密度 1000[g/m³]である。大気圧は圃場観測データ、気温はチャンバー内温度をそれぞれ用いた。

水蒸気濃度の変化率 ΔW_f の導出では Matsuno(2011)では一次回帰線を用いた方法が使われている。この方法は、チャンバーが閉じてから 10 秒間の水蒸気濃度の変化を回帰線にあてはめその傾きから変化率を求める方法である。しかし、今回の観測では水蒸気濃度がバラバラな値を示しながら変化することが多く、うまく回帰線にあてはめることができなかつたので、Hutchinson and Mosier(1981)で用いられている以下の式を利用した。この式は、土壌中のガスの物理特性から導出された理論式であり、回帰線を用いる方法と違い短い時間のデータでなくとも水蒸気濃度の変化率を導出することができることから、今回のデータに適していると考えた。

$$\Delta W_f = \frac{V(C_1 - C_0)^2}{At_1(2C_1 - C_2 - C_0)} \ln \left[\frac{C_1 - C_0}{C_2 - C_1} \right], \quad \text{if } \frac{C_1 - C_0}{C_2 - C_1} > 1 \quad (14)$$

ΔW_f は水蒸気濃度の変化率[ppt/s]、 t_0 はチャンバーを閉鎖した時刻[s]、 t_2 は変化の終わりの時刻[s]、 t_1 は t_0 と t_2 の中間の時刻[s]、 C_0 は時刻 t_0 における水蒸気濃度[ppt]、 C_1 は時刻 t_1 における水蒸気濃度[ppt]、 C_2 は時刻 t_2 における水蒸気濃度[ppt]である。

t_2 は上に凸のグラフにおいてできるだけ時間が長くなるような点に設定し、 $\frac{C_1 - C_0}{C_2 - C_1} > 1$ を満たさなかつた場合には時刻を一秒ずつ減らしていき、 $\frac{C_1 - C_0}{C_2 - C_1} > 1$ を満たす値を用いた。

例えば図 29 では矢印の地点を t_2 とし $t_2 = 90$ [s]とした。このとき $\frac{C_1 - C_0}{C_2 - C_1} > 1$ が満たされなかつた場合、次に $t_2 = 89$ [s]とし再び ΔW_f の計算を行った。

2.3.2. 摩擦速度

摩擦速度 u_* [m/s]は風速プロファイルした風の強さの指標であり、式(1)で示されるように蒸発量に影響する。摩擦速度は以下の式を用いて計算される。

$$u_* = \frac{k\bar{u}}{\ln\left(\frac{z}{z_0}\right)} \quad (15)$$

\bar{u} は水平方向の風速[m/s]、 z は風速 u の高度[m]、 z_0 は粗度長であり本研究では裸地面の値である 10⁻⁴ m(杉田・田中, 2009)を用いた。

2.3.3. 比湿

比湿是水蒸気フラックスの方向を決定する際に利用される。大気中の比湿は以下の式によって求められる。(杉田・田中, 2009)

$$q = \frac{0.622(e^* \times R)}{P} \quad (16)$$

ここで、 q は比湿[kg/kg]、 e^* は飽和水蒸気圧[hPa]、 R は相対湿度、 P は大気圧[hPa]である。
一方、地表面の比湿は以下の式によって求められる。

$$q_s = \frac{0.622(e_s^* \times R_s)}{P} \quad (17)$$

ここで、 q_s は地表面の比湿[kg/kg]、 e_s^* は地表面の飽和水蒸気圧[hPa]、 R_s は地表面の相対湿度、 P は大気圧[hPa]である。また $R = 1$ 、 $R_s = 1$ であるとき比湿はそれぞれ飽和比湿 q^* [kg/kg]、地表面飽和比湿 q_s^* [kg/kg]となる。なお、飽和水蒸気圧は以下の式(Tetens, 1930)で計算される。

①大気中の飽和水蒸気圧

$$e^* = c \exp\left(\frac{aT_R}{T_R + b}\right) \quad (18)$$

ここで、 e^* は飽和水蒸気圧[hPa]、 $a=7.5$ 、 $b=237.3$ 、 $c=6.1078$ 、 T_R は気温[°C]である。

②地表面の飽和水蒸気圧

$$e_s^* = c \exp\left(\frac{aT_{RS}}{T_{RS} + b}\right) \quad (19)$$

ここで、 e_s^* は地表面の飽和水蒸気圧、 $a=7.5$ 、 $b=237.3$ 、 $c=6.1078$ 、 T_{RS} は地表面温度[°C]である。

2.3.4. 熱収支

地表面の熱収支は正味放射量 R_n 、顕熱フラックス H 、潜熱フラックス LE 、地中熱流量 G を用いて以下のように示す。

$$R_n = H + LE + G \quad (20)$$

各項目は以下のように計算される。

①正味放射量 R_n

正味放射量 R_n [W/m²]は上向き長波 L_u [W/m²]、下向き長波 L_d [W/m²]、上向き短波 S_u [W/m²]、下向き短波 S_d [W/m²]を用いて以下の放射収支によって計算される。

$$R_n = L_d - L_u + S_d - S_u \quad (21)$$

②潜熱フラックス

潜熱フラックス LE [W/m^2]は蒸発潜熱 L_e [$J \cdot kg^{-1}$]と水蒸気フラックス E [mm/h]と水の密度 ρ_w [kg/m^3]を用いて以下のように計算した。

$$LE = L_e \times E \times \rho_w \times 10^{-6} \times \frac{1}{3.6} \quad (22)$$

また、蒸発潜熱は杉田・田中(2009)を利用し、以下のように計算した。

$$L_e = a + bT_s \quad (23)$$

ここで $a=2.50025 \times 10^{-6}$, $b = -2.365 \times 10^3$, T_s は地表面温度 [$^{\circ}C$]である。

③ 顕熱フラックス

顕熱フラックス H [W/m^2]は式(15)で求められた正味放射量 R_n [W/m^2]と式(16)で求められた潜熱フラックス LE [W/m^2]、地中熱流板によって測定された地中熱流量 G [W/m^2]を用いて以下のように計算した。

$$H = R_n - LE - G \quad (24)$$

2.3.5. データ選択

データは夜間 18:00~6:00 の間に降水があった場合と停電等でチャンバーが欠測となった場合を除いた。

結果として2015年12月11日~2016年1月25日の観測期間のうち30日分のデータを利用した。

2.4. 吸着と結露の判別

吸着と結露の判別は比湿の大小によって行う。まず、地表面の比湿 q_s と大気比湿 q を比較し、大気比湿 q が大きかった場合には下向きのフラックスが生じているとした、そして地表面の比湿 q_s が地表面飽和比湿 q_s^* より大きい場合には結露が起きているとする。以上を式にまとめると、次のように示される。

吸着

$$q > q_s \text{かつ} q_s < q_s^* \quad (25)$$

結露

$$q > q_s \text{かつ} q_s \geq q_s^* \quad (26)$$

3. 結果・考察

3.1. 各メカニズムの割合

観測期間である2015年12月11日から2016年1月25日の夜間について、 $q_s - q$ を計算した。結果は90%の時間において上向きとなった(図30)。このことから冬季夜間の水蒸気フラックスは蒸発

のメカニズムが卓越していると考えられる。また、チャンバーから求められた水蒸気フラックスでは64%が上向きであり、下向き36%のうち36%が吸着、0%が結露であり、蒸発が卓越していることが確認できる(図31)。

3.2. 水蒸気フラックスの変化パターンの分類

夜間の水蒸気フラックスの時間変化はその傾向により5つのパターンに分類することができた(図32~36)。

蒸発が起きていたがある時間を境に水蒸気フラックスが0に近い値となり、ほとんど変化しなくなるパターンA、一晩中水蒸気フラックスがほとんど変化せず0に近い値をとりつづけるパターンB、水蒸気フラックスが一晩中変化し続けるパターンC、パターンAのように水蒸気フラックスの変化がほとんどなくなった後、再び変化が起こるパターンD、はじめは水蒸気フラックスがほとんど変化していないが、その後変化が起こり、また変化がなくなるパターンEがあり、それぞれの事例の数はAが11件、Bが12件、Cが3件、Dが1件、Eが3件であった(表4, 図37~66)。

3.3. 熱収支との比較

水蒸気フラックスの変化の要因の一つとして顕熱フラックスの影響が考えられる。顕熱フラックスは気温の上昇下降とかかわるフラックスであり、地表面温度や気温と関係している。パターンAやパターンCのグラフを見てみると地表面温度-気温が負であるときに水蒸気フラックスが生じている傾向がみられる。これは下向きの顕熱フラックスが生じたことで顕熱フラックスが生じたからであると考えられる。一方でパターンBでは顕熱フラックスはほぼ一定であり、蒸発が生じていない。このことから水蒸気フラックスが生じることによって顕熱フラックスは変化するとも考えられ、二つは相互的關係にある。

次に、図71,72を見ると地表面温度、気温ともに温度が高いほど水蒸気フラックスの値が大きい傾向がみられ、パターンAやパターンCがこれに当てはまる。一方で、パターンBやパターンEは地表面温度、気温ともに低く水蒸気フラックスの値も小さい。しかし、図69を見てみると顕熱フラックスの大小と水蒸気フラックスの大小はあまり関係していない。このことから、熱収支は水蒸気フラックスの発生原因となるが、その大小に関しては顕熱フラックスの大きさよりも気温や地表面温度の高さが影響していると考えられる。

3.4. 比湿差との比較

フラックスをあらわす式(1)からも分かる通り地表面と大気の比湿の差が大きいほど、水蒸気の輸送量は大きくなる。図67を見てみると比湿の差が大きいパターンAやパターンDでは水蒸気フラックスの値が大きく、比湿の差が小さいパターンBでは水蒸気フラックスの値も小さい。また一晩のスケールで見るとパターンAでは夜間の比湿の差が小さくなることで水蒸気フラックスの変化が抑制されていることがわかる。これは蒸発が起きることにより地表面比湿の減少や比湿の増加が起き、その差が小さくなることで起こっていると考えられる。また、比湿の差が大きいにもかかわらず蒸発量が少ない日があることがわかる。このような日は気温と地表面温度が低い。この要因としては気温が低く0℃を下回った場合、地表面の水分が蒸発するためには蒸発熱だけでなく融解熱も必要となることが一因だと考えられる。

3.5. 摩擦速度との比較

摩擦速度も式(1)に含まれる水蒸気輸送に関わるパラメータの一つである。しかし、図 68 を見てみるとパターン C のような摩擦速度の増加とともに水蒸気フラックスの増加傾向がみられる一方で、多くの夜間において、摩擦速度は 0.06 m/s 以下であり、摩擦速度が水蒸気輸送に大きく影響しているようには見えない。

このことから冬季夜夜間の水蒸気フラックスについては摩擦速度の絶対値が小さいため、他の要因の影響がより大きいと考えられる。

3.6. 土壌水分との比較

土壌水分は水蒸気フラックスの量に影響する指標であると考えられる。しかし、図 77 を見てみると土壌水分量の大きさと水蒸気フラックスの量には関係性がなく、同じ土壌水分量においても水蒸気フラックスの量が様々であることがわかる。そこで土壌水分と他の気象要素との相関図を作成した(図 73~76)。

すると、土壌水分量が 15%以下である時には、地表面比湿と地表面温度が土壌水分と比例関係にあることがわかる。また、図 69 を見てみると土壌水分量がおおよそ 15%以下であるときには、土壌水分量の増加に伴い、水蒸気フラックスが指数関数的に増加していることが確認できる。

3.7. プロファイル式からの地表面相対湿度の導出

図 29, 30 からわかるように比湿の差から求めた水蒸気フラックスと実際の水蒸気フラックスではかなりの差がある。そこで式(1),(2)を用いてチャンバーで観測した水蒸気フラックスから地表面比湿を求める。式(1),(2)を変形すると以下ようになる。

$$q_s = q + \frac{E \left\{ \ln \left(\frac{z}{z_{0v}} \right) - \psi \right\}}{k \rho u_*} \quad (27)$$

ここで q , E , k , z , u_* は既知の値であるので ψ , z_{0v} , ρ を求める必要がある。

①安定度補正関数 ψ

安定度補正関数 ψ はオブコフ長 L を用いた z/L の関数である。オブコフ長 L は次の式であらわされる。

$$L = \frac{-\rho C_p T_a u_*}{kg(H+0.61C_p T_a E)} \quad (28)$$

ここで T_a は空気温度[K]、 C_p は定圧比熱 1004[J/K·kg]である。また、 z/L は安定時に正、不安定時に負、中立時で 0 となり、それぞれによって安定度補正関数 ψ は異なる(Brutsaert, 2008)。

安定時

$$\psi = -5 \frac{z}{L}, \quad \left(0 \leq \frac{z}{L} \leq 1 \right)$$
$$\psi = -5 - 5 \ln \left(\frac{z}{L} \right), \quad \left(\frac{z}{L} > 1 \right) \quad (29)$$

不安定時

$$\psi = \left[(1-d)/n \right] \ln \left[\left(c - \left(\frac{z}{L} \right)^n \right) / c \right] \quad (30)$$

ここで $c=0.33$, $d=0.057$, $n=0.78$ である。

②粗度長 z_{0v}

粗度長 z_{0v} は Brutsaert (1982)の z_{0+} と $\ln\left(\frac{z}{z_{0v}}\right)$ の関係を表す Fig. 4.24.を用いて以下の値となった。

$$\ln\left(\frac{z_0}{z_{0v}}\right) = 1 \quad (31)$$

また z_{0+} は以下の式で表される。

$$z_{0+} = (u_* z_0 / \nu) \quad (32)$$

ここで ν は粘性係数であり期間中は 1.328 程度であった。

③空気密度 ρ

空気密度は以下の式より導出した(杉田・田中, 2009)。

$$\rho = \rho_d \frac{T_0}{(T+T_0)} \frac{P}{P_s} \left(1 - 0.378 \frac{e}{p} \right) \quad (33)$$

ここで P_s は地上気圧[hPa]、 ρ_d は乾燥空気密度 1.293[kg/m³]、 T_0 は 273.15[K]である。

結果は図 77 のようになり、計算した地表面比湿よりも小さい値を示した。また、この地表面比湿を用いて水蒸気フラックスの方向を分類したところ図 78 のようになり、水蒸気フラックスから求めた割合とおおよそ同じになった。また、図 79 のように吸着・結露・蒸発の場合分けを行ったところ、夜間の下向きのフラックスはすべて吸着であり、パターン B に含まれることがわかった。一方で計算された地表面比湿を用いたところ下向きのフラックスはすべて吸着であったがパターン A やパターン C においても吸着を確認することができた(図 80)。また図 81 のように水蒸気フラックスとの相関を調べたところ計算された地表面比湿を用いたほうが相関は強くなった。以上より本研究で測定された地表面相対湿度は値が過小評価されていることが考えられ、夜間の比湿のプロファイルは図 82 のようになっている可能性が高いと考えられる。

3.8. 水蒸気フラックスの通年変化

今回の観測では冬季のみを対象に観測を行ったが、今後の観測のために水蒸気フラックスの通年の変化の計算を行った。1993 年の深度 5 cm の土壌水分データセットと気象観測データを用いて以下

の式(近藤, 1994)を利用することで土壌相対湿度 R_s を計算した。

$$R_s = \exp\left(\frac{\varphi_v g}{R_w T}\right) \quad (34)$$

ここで R_s は土壌相対湿度、 φ_v は土壌水分ポテンシャル、 g は重力加速度、 R_w は水蒸気の気体定数 ($461.5 \text{ Jkg}^{-1} \text{ K}^{-1}$)、 T は温度である。また、相対湿度から比湿を求めるために式(10),(11)を用いた。結果は図 83~94 のようになった。水蒸気フラックスは夏季になるにつれ下向きのフラックスがだんだんと減少していく傾向が見られた。

4. 結論

冬季夜間の裸地面上の水蒸気輸送は上向きが 64 %であり、蒸発が卓越していると考えられる。下向きは 36%であり吸着が 36%、結露が 0%であった。また、夜間の水蒸気輸送は 5つのパターンに分類することができ、蒸発が起きていたがある時間を境に水蒸気フラックスが 0に近い値となり、ほとんど変化しなくなるパターン A、一晩中水蒸気フラックスがほとんど変化せず 0に近い値をとりつづけるパターン B、水蒸気フラックスが一晩中変化し続けるパターン C、パターン A のように水蒸気フラックスの変化がほとんどなくなった後、再び変化が起こるパターン D、はじめは水蒸気フラックスがほとんど変化していないが、その後変化が起こり、また変化がなくなるパターン E があり、パターン B を除く 4つのパターンにおいては短時間での変化がみられた。また、蒸発の起こる要因は地表面温度と気温の差や地表面の比湿と大気中の比湿の差が生じることであった。水蒸気フラックスの値を大きくする要因としては比湿勾配の影響が最も大きかった。摩擦速度は大きくなることで水蒸気輸送量を増加させるが、冬季夜間において、摩擦速度は小さく影響は小さかった。また、土壌水分量が 15%以下であるときには土壌水分量が大きくなることで、地表面比湿と地表面温度の増加がみられ、水蒸気フラックスも指数関数的に増加している。一方 15%以上の時は目立った傾向が見られなかった。

パターン A、D、E においては夜間の蒸発がすすむことにより、大気中の比湿の増加や地表面の比湿の減少が起き、蒸発が抑制される傾向がみられた。また、水蒸気輸送の変化がないときには顕熱が一定であることが確認され、地表面温度と気温の差によって水蒸気輸送が変化するだけでなく、水蒸気輸送が変化することによって顕熱が変化する相互作用的な変化により水蒸気フラックスは変化していた。

一方で、比湿の差にかかわらず気温が低い場合には水蒸気輸送量が非常に小さくなる傾向が確認できた。

水蒸気フラックスから地表面比湿を計算したところ、観測した地表面比湿よりも低くなり、水蒸気フラックスとの相関は強くなった。このことから、観測していた地表面比湿は過小評価されていた可能性が高い。

本研究は冬季短期間の解析による結果であり、今後観測を続けることでより詳細な水蒸気輸送のパターンをとらえることができると考えられる。より正確な地表面比湿を測定することが今後の課題である。

謝辞

本研究を行うにあたり、筑波大学生命環境系の杉田倫明先生には、現地観測をはじめ、研究方法における丁寧なご指導など、数多くの面で大変お世話になりました。大変感謝申し上げます。また、筑波大学水文科学分野の諸先生方には、発表など機会のある度に貴重なご助言をいただきました。

杉田研究室の院生の方々にはゼミでの貴重なご助言やご意見のほか本研究に関する励ましもいただきました。特に松野さんには密閉式チャンバーの使い方や水蒸気フラックスの計算方法について丁寧にご指導いただき、宝音朝格拉さんには測器の設置の際に大変お世話になりました。

筑波大学アイソトープ環境動態研究センターの飯島さんには施設の利用やデータの利用の際には丁寧に対応していただき、大変感謝しております。

また、私のことを温かく見守ってくださった筑波大学生命環境学群地球学類の荒川洋二先生、日下博幸先生、角替敏昭先生には大変感謝しております。

最後に私のことをずっと応援してくださった両親には心から感謝いたします。

参考文献

- 中野 智子, 根本 学, 篠田 雅人, 2007: 密閉式チャンバー法を用いた夜間の水蒸気フラックスの測定. *農業気象*, 63, 103-107
- 濱田 洋平, A.R. インドラ F., 田中正, 1998: 筑波大学水理実験センター内アカマツ林および熱収支・水収支観測圃場における土壌の物理特性. *筑波大学水理実験センター報告*, 23, 1-10
- 松野 晃大, 2011: 灌漑方法が異なる耕作地における安定同位体比とチャンバー法を用いた蒸発散の地面蒸発と蒸散への分離. *筑波大学生命科学環境研究科環境科学専攻修士論文*, 34p
- 劉厦, 及川 武久, 1993: 水理実験センター草原生態系の現存量と種別の季節変化と環境条件. *水理実験センター報告*, 18, 69-75
- 近藤 純正, 1994: 水環境の気象学-地表面の水収支・熱収支-. 朝倉書店, pp.186-192
- 杉田 倫明, 田中 正, 2009: 水文学. 共立出版, pp. 57
- 気象庁, “気象データ”, インターネット: <http://www.jma.go.jp/jma/index.html>(最終閲覧日 2016年1月28日)
- 筑波大学アイソトープ環境動態研究センター環境動態予測部門, “気象・水文観測データ”, インターネット: <http://www.ied.tsukuba.ac.jp/yosoku/>(最終閲覧日 2016年1月28日)
- Agam, N., Berliner, P., R., 2006: Dew formation and water vapor adsorption in semi-arid environments-A review. *Journal of Arid Environments*, 65, 572-590
- Brutsaert, W., 1982: Evaporation into the atmosphere Theory, History, and Applications. *Environmental Fluid Mechanics*, 1
- Hao, X., Li, C., Guo, B., Ma, J., 2012: Dew formation and its long-term trend in a desert riparian forest ecosystem on the eastern edge of the Taklimakan Desert in China. *Journal of Hydrology*, 472-473, 90-98
- Hutchinson, G.L., Moision, A.R., 1981: Improved soil cover method for field measurement of nitrous oxide fluxes. *SOIL SCI. SOC. AM. J.*, 45, 311-316
- Jacobs, A.F.G., Heusinkveld, B.G., and Berkowicz, S. M., 2000: Dew measurements along a longitudinal sand dune transect, Negev Desert, Israel. *Int. J. Biometeor.*, 43, 184-190.
- Ninari, N., and Berliner, P. R., 2002: The role of dew in the water and heat balance of bare loess soil in the Negev Desert: quantifying the actual dew deposition on the soil surface. *Atmos. Res.*, 64, 323-334.
- Pan, Y., Wang, X., Zhang, Y., 2010: Dew formation characteristics in a revegetation-stabilized desert ecosystem in Shapotou area, Northern China. *Journal of Hydrology*, 387, 265-272
- Sugita, M., Brutsaert, W., 1991: Daily evaporation over a region from lower boundary layer profiles measured with radiosondes. *WATER RESOURCES RESEARCH*, 27, 747-752
- Schmid, H.P., 1997: Experimental design for flux measurements: matching scales of observations and fluxes. *Agricultural and Forest Meteorology*, 87, 179-200
- Zangvil, A., 1996: Six years of dew observations in the Negev Desert, Israel. *J Arid Environ.*, 32, 361-371

LI-COR Environmental News Line, 2014: Connecting and Programming Soil Moisture Probes with the LI-8100A

表 1 夜間水蒸気フラックスの測定方法と長所、短所

方法名	長所	短所
凝結版を用いる方法 (Zangvil, 1996)	・様々な位置や高度で観測が可能	・凝結版の性質は土壌と異なる ・水蒸気の吸着が測定できない
マイクロライシメータ法 (Ninari and Berliner, 2002)	・精度の高い蒸発散量を測定できる	・裸地において土壌表面が水蒸気を直接吸収するため結露量が高くなりやすい ・植生への凝結を考慮しないと凝結の過小評価につながりやすい(Hao, 2012)
渦相関法を用いた方法 (Jacobs et al. 2000)	・仮定を必要としない直接観測法として最も信頼できる	・広く一様な観測地が必要 ・夜間のフラックスが誤差と同程度になってしまう
密閉式チャンバー法 (中野, 2007)	・測定が簡便 ・狭い場所でも測定が可能 ・野外実験や攪乱を受けた場所での観測に最適	・チャンバー内の風速が外部と異なることで誤差が生じる。

表 2 観測項目

観測項目	使用機材	データ形式	測定地点	文字
水蒸気濃度	密閉式チャンバー(LI-COR, LI-8100A, 8100-104)	1 秒ごと 瞬間値	高度 0.0 m	W_f
地表面温度	放射温度計(MINOLTA, 505)	10 分平均値	高度 0.0 m	T_s
相対湿度(地表 面), 地表面温度	温湿度測定器(VAISALA, HMI41 INDICATOR, HMP46) 12 月 17 日まで使用	10 分ごと 瞬間値	深度 0.03 m	R_s T_{RS}
相対湿度(地表 面), 地表面温度	温湿度測定器(VAISALA, HMP155) 12 月 17 日から使用	10 分平均値	深度 0.03 m	R_s T_{RS}
相対湿度(大気), 気温	通風温湿度計(Campbell, HMPC45AC)	10 分平均値	高度 0.3 m	R T_R
土壌水分	土壌水分センサー(DECAGON, EC-5)	1 秒ごと 瞬間値	深度 0.03 m	W_G
放射	4 成分放射計(Hukseflux, NR01)	10 分平均値	高度 0.0 m	L_u, L_d, S_u, S_d
地温	土壌温度センサー(LI-COR, 8100-203)	1 秒ごと 瞬間値	深度 0.03 m	T_G
地中熱流量	地中熱流板(Hukseflux HFP-01)	10 分平均値	深度 0.03 m	G
濡れ度	濡れセンサー(DECAGON, LWS)	10 分平均値	高度 0.01 m	V

表 3 圃場利用データ

名称	データ形式	高度	文字
気温	10 秒瞬間値	1.6 m	<i>T</i>
気圧	10 秒瞬間値	1.6 m	<i>P</i>
風速	10 秒瞬間値	1.6 m	<i>U</i>
鉛直風速	10 秒瞬間値	1.6 m	<i>W</i>

表 4 水蒸気フラックスの変化パターンと起った日(2015 年～2016 年)

A	2015 年 12/11,12/15,12/16,12/22,12/25,2016 年 1/7,1/9,1/16,1/19,1/24,1/25
B	2015 年 12/18,12/21,12/26,12/29,12/31, 2016 年 1/2,1/3,1/4,1/8,1/10,1/12,1/14
C	2015 年 12/14, 2016 年 1/11,1/15
D	2015 年 12/27
E	2015 年 12/24,12/30, 2016 年 1/1

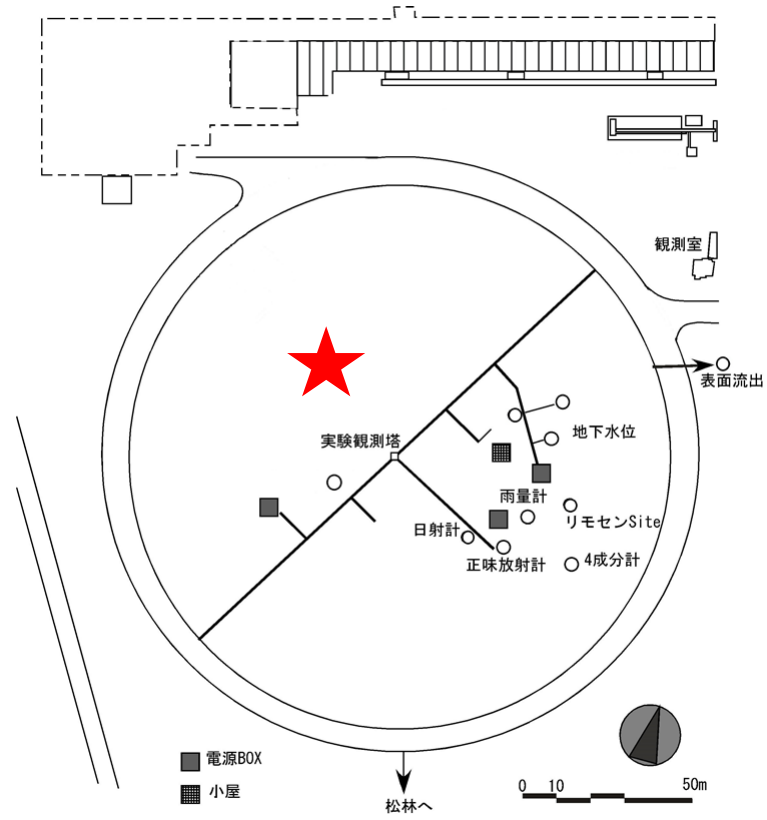


図 1 観測地点(赤星印)(アイソトープ環境動態研究センターホームページの図に加筆修正)



図 2 形成した裸地面(2015年12月5日撮影)

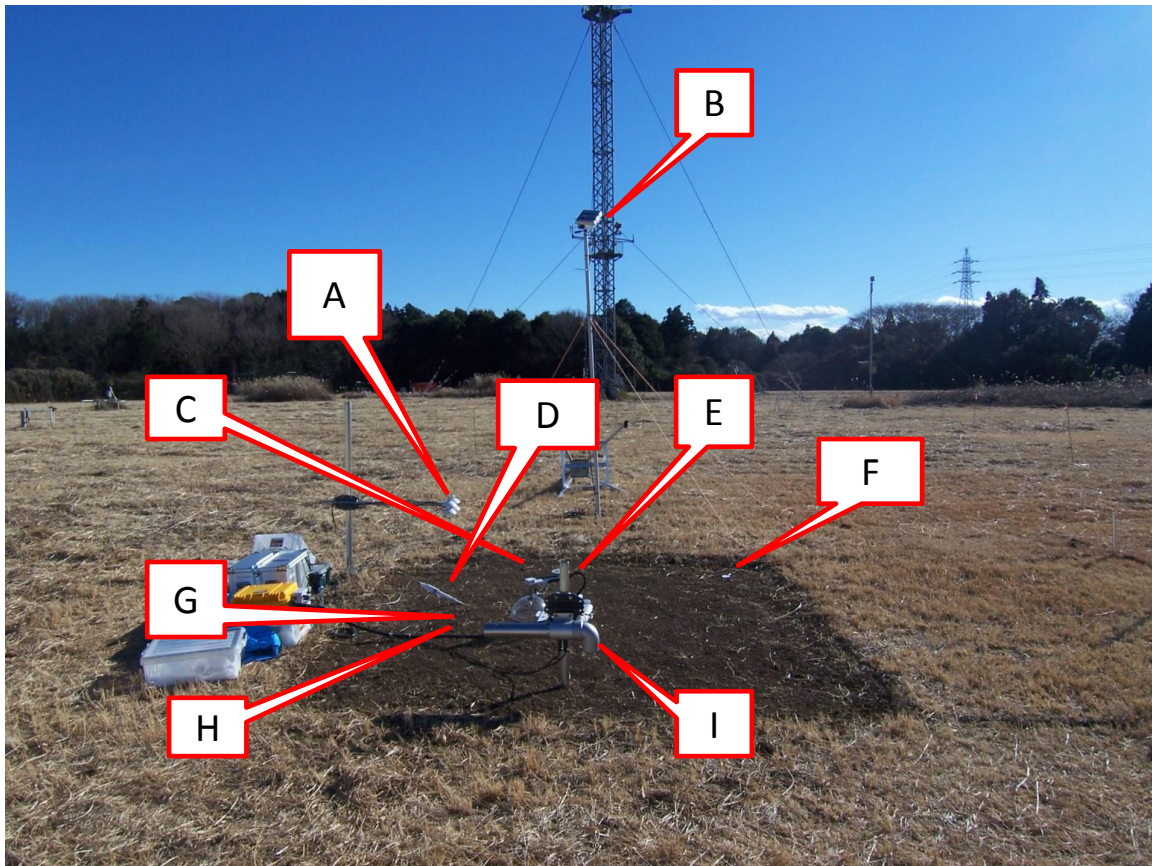


図 3 測器の設置概況(2015年12月18日撮影)

- A) 4成分放射計, B) 放射温度計, C) 地中熱流板(地中に埋設), D) 温湿度測定器
E) 密閉式チャンバー, F) 濡れセンサー, G) 土壌水分計(地中に埋設), H) 地温計(地中に埋設)
I) 通風温湿度計



図 4 地中熱流板、土壤水分計、地温計の埋設地点(2015年12月10日撮影)



図 5 密閉式チャンバー(チャンバーが開いている状態)(2015年12月10日撮影)



図 6 チャンバーが閉じているときの密閉式チャンバー(2015年12月10日撮影)



図 7 埋設前の地温計(写真赤枠内) (2015年12月10日撮影)



図 8 埋設前の土壤水分計(2015年12月10日撮影)

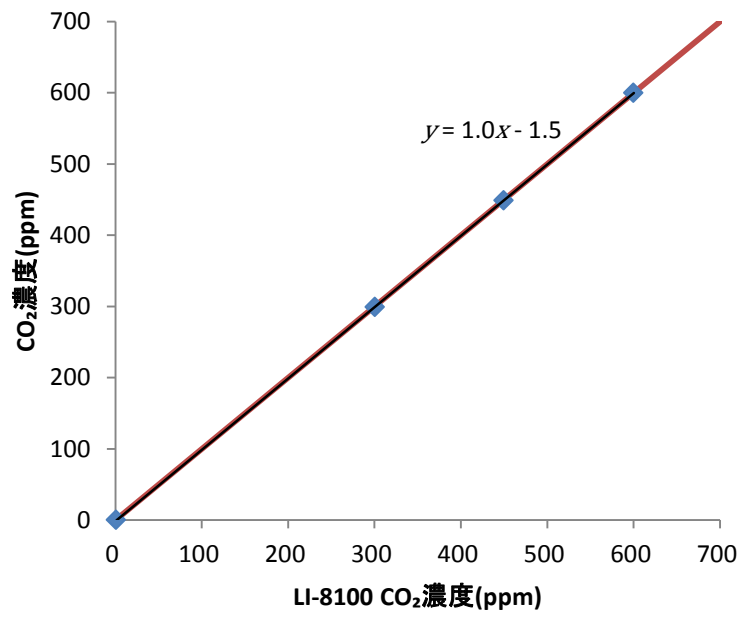


図 9 LI-8100 の CO₂ キャリブレーション結果(赤線: $y = x$)

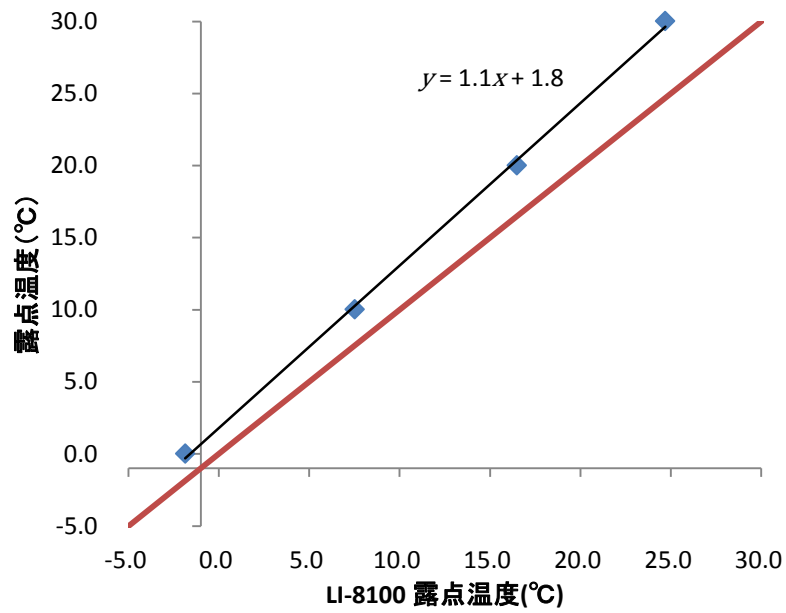


図 10 LI-8100 の H₂O キャリブレーション結果(赤線: $y = x$)



図 11 ケースに入れた放射温度計(2015年12月5日撮影)



図 12 ケースに入れた放射温度計のレンズ部分(2015年12月5日撮影)



図 13 横から見た雨よけをかぶせた後の放射温度計(2015年12月5日撮影)



図 14 正面から見た雨よけをかぶせた後の放射温度計(2015年12月5日撮影)

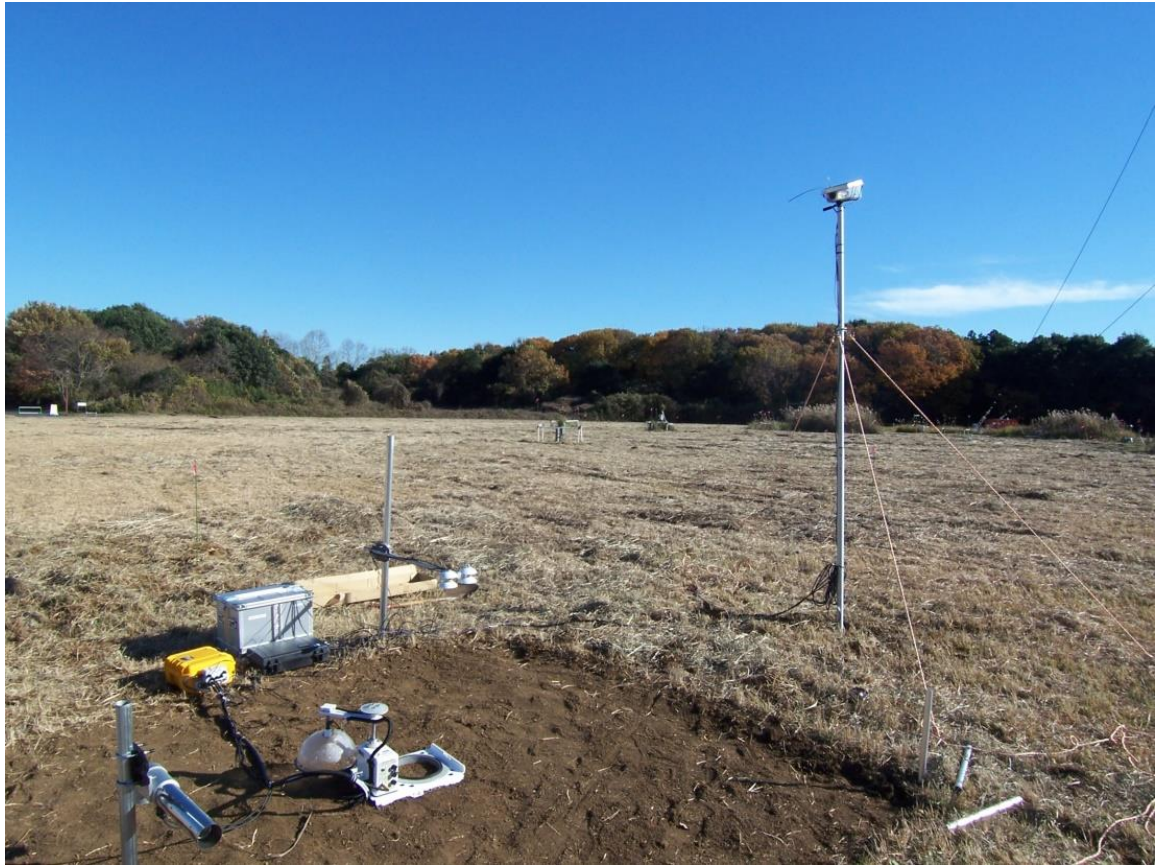


図 15 放射温度計の設置概況(高さ 3 m のポール先端部)(2015 年 12 月 5 日撮影)

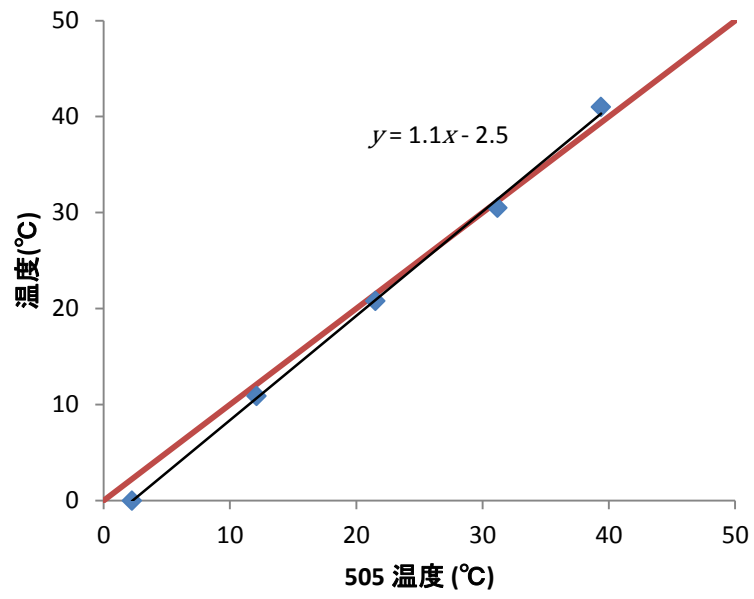


図 16 放射温度計(505)のキャリブレーション結果(赤線: $y = x$)



図 17 温湿度測定器(HMP46) の設置状況(2015年12月10日撮影)



図 18 温湿度測定器(HMP155)の設置状況 (2016年1月21日撮影)



図 19 温湿度測定器(HMI41)のキャリブレーションの様子(2015年11月24日撮影)

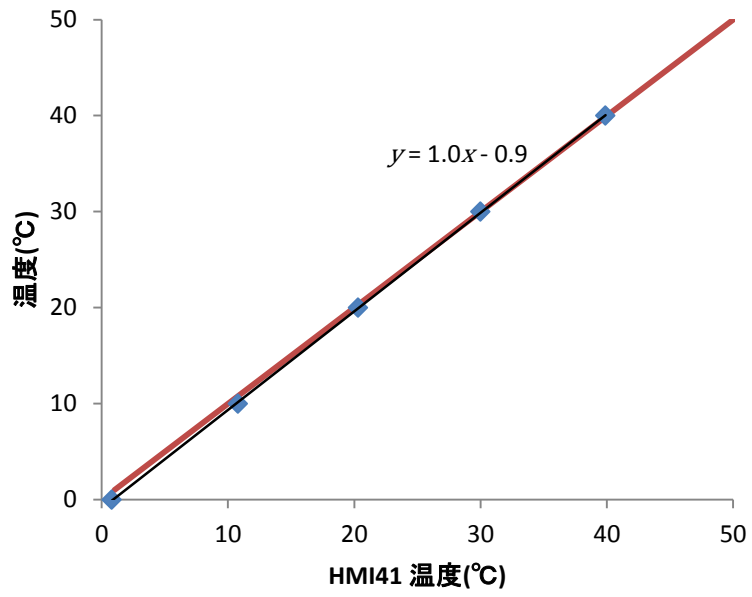


図 20 温湿度測定器(HMI41)のキャリブレーション結果(温度) (赤線: $y = x$)

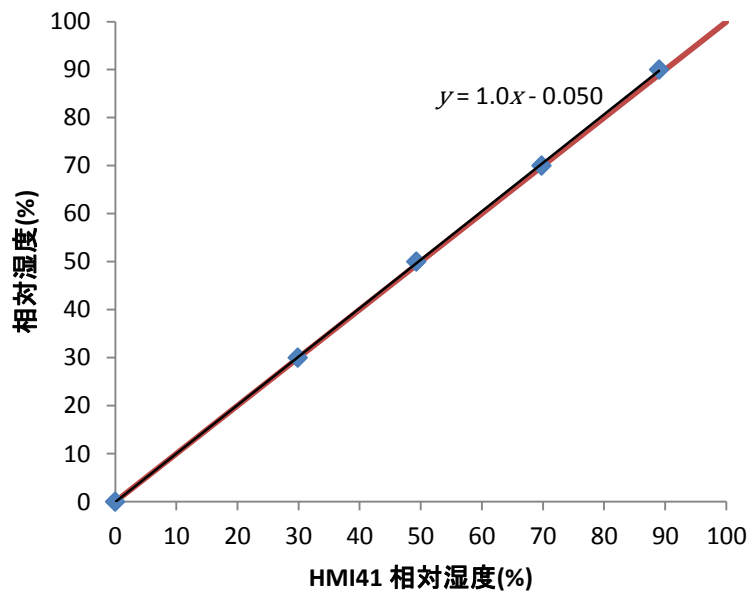


図 21 温湿度測定器(HMI41)のキャリブレーション結果(相对湿度) (赤線: $y = x$)



図 22 通風温湿度計の設置状況(2015年12月10日撮影)

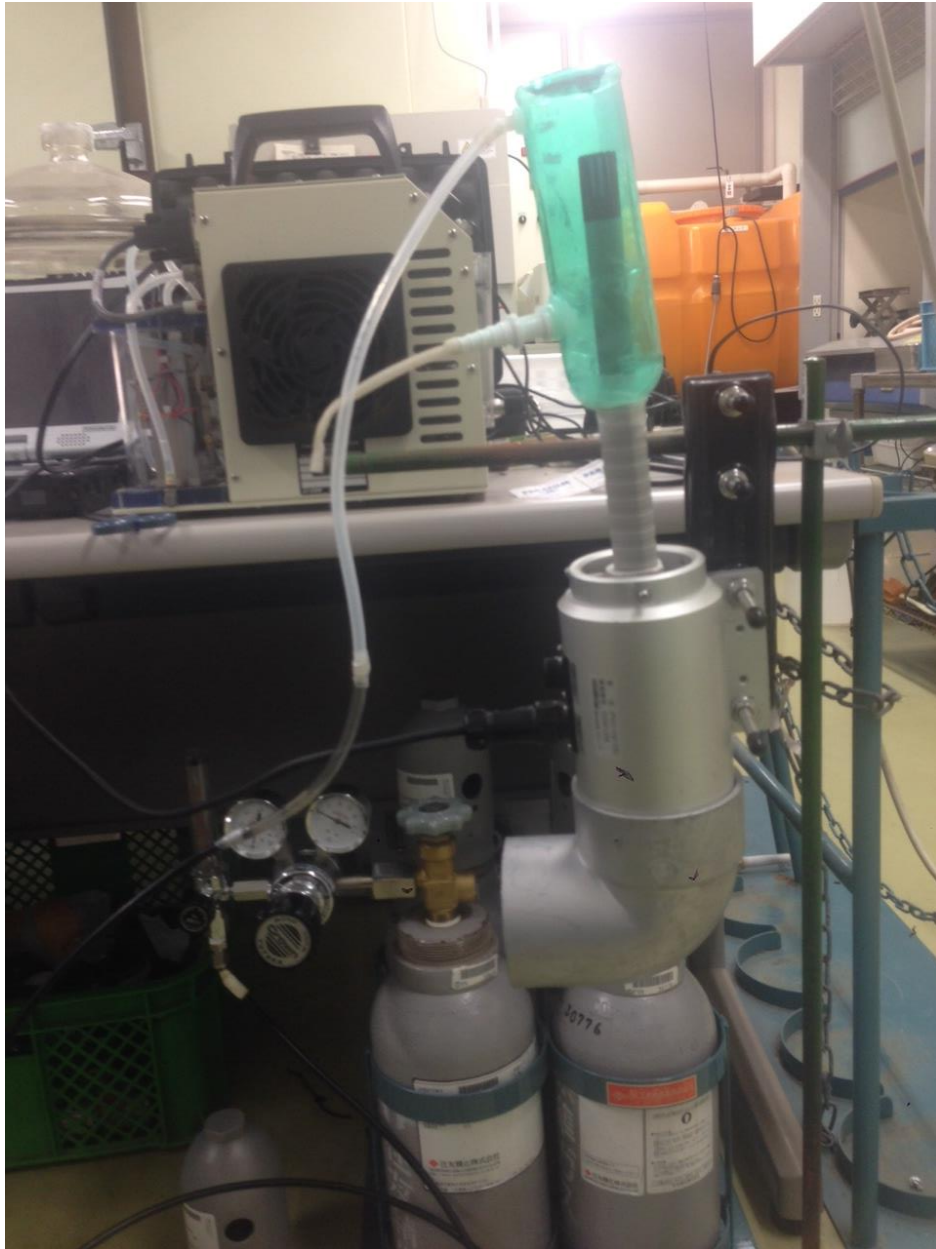


図 23 通風温湿度測定器センサー(HMPC45C)の湿度キャリブレーションの様子(2015年11月19日撮影)

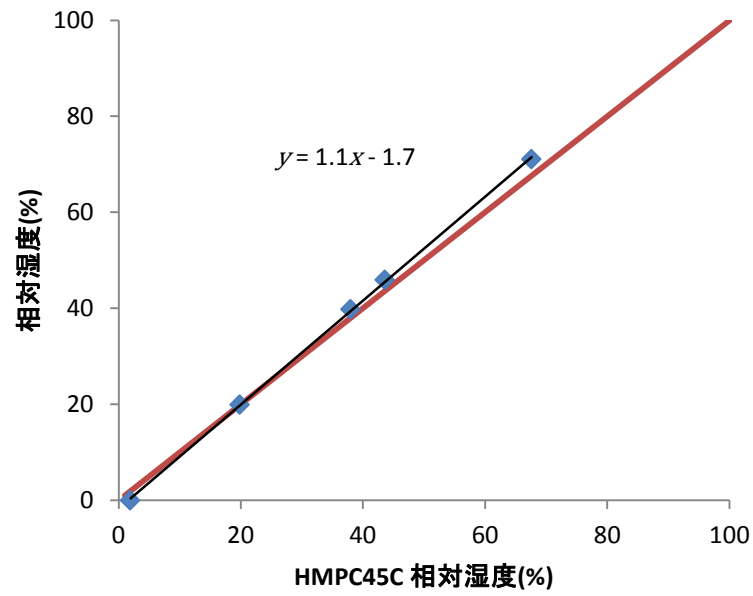


図 24 通風温湿度計センサー(HMPC45C)のキャリブレーション結果(湿度) (赤線: $y = x$)

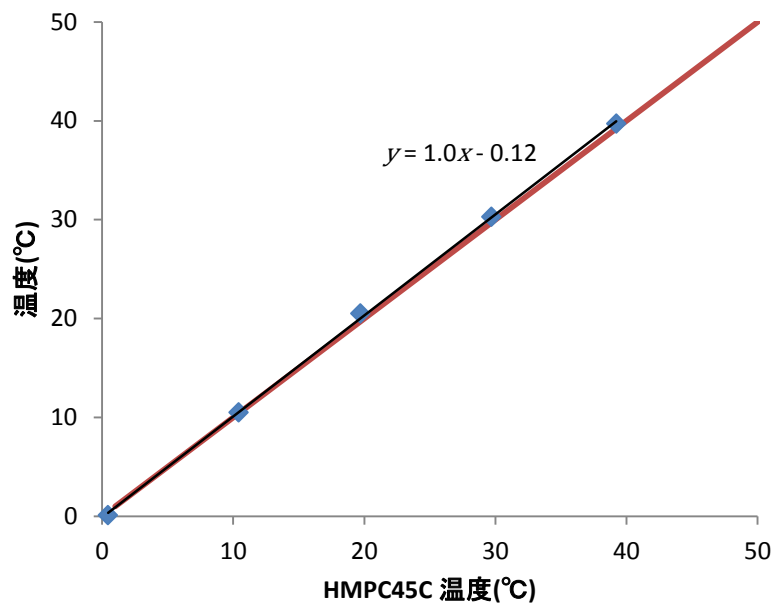


図 25 通風温湿度計センサー(HMPC45C)のキャリブレーション結果(温度) (赤線: $y = x$)



図 26 設置された 4 成分放射計(赤枠内)(2015 年 12 月 10 日撮影)



図 27 設置された濡れセンサー(2015年12月10日撮影)

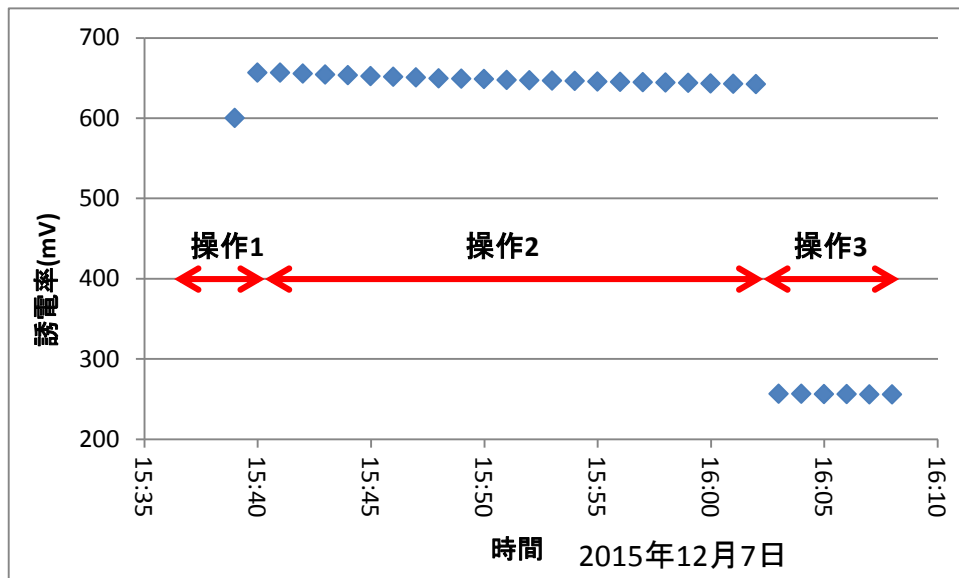


図 28 濡れセンサーテスト時の誘電率の時間変化

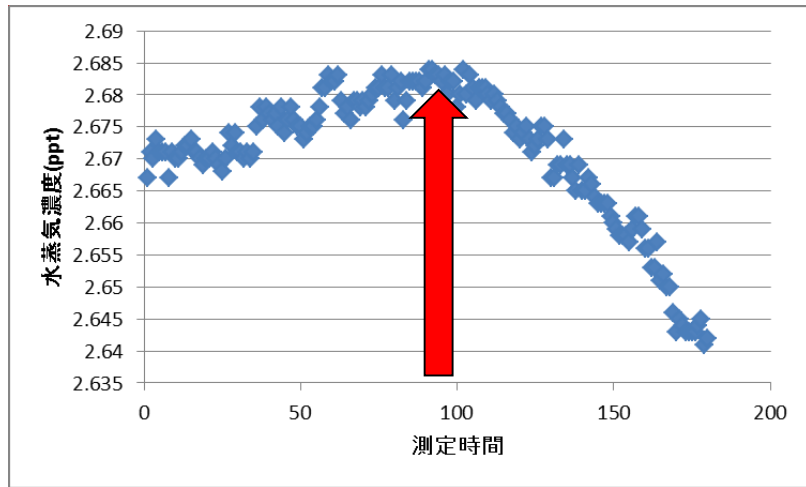


図 29 2015 年 1/12 18:40~50 の水蒸気の濃度変化

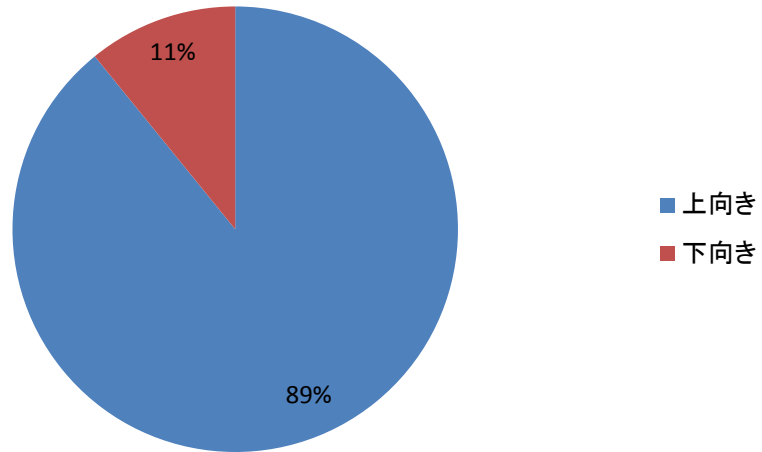


図 30 地表面比湿と大気比湿の差($q_s - q$)から求めた
2015年12/11~2016年1/25の夜間水蒸気フラックスの方向の割合

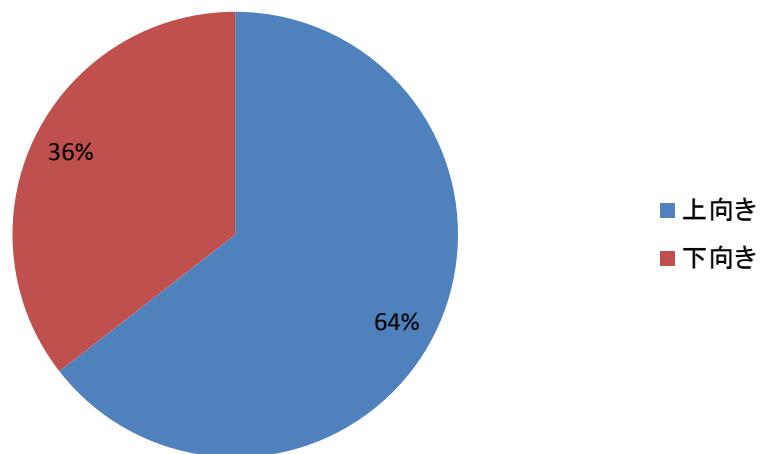


図 31 チャンバーの測定結果から求めた
2015年12/11~2016年1/25の夜間水蒸気フラックスの方向の割合

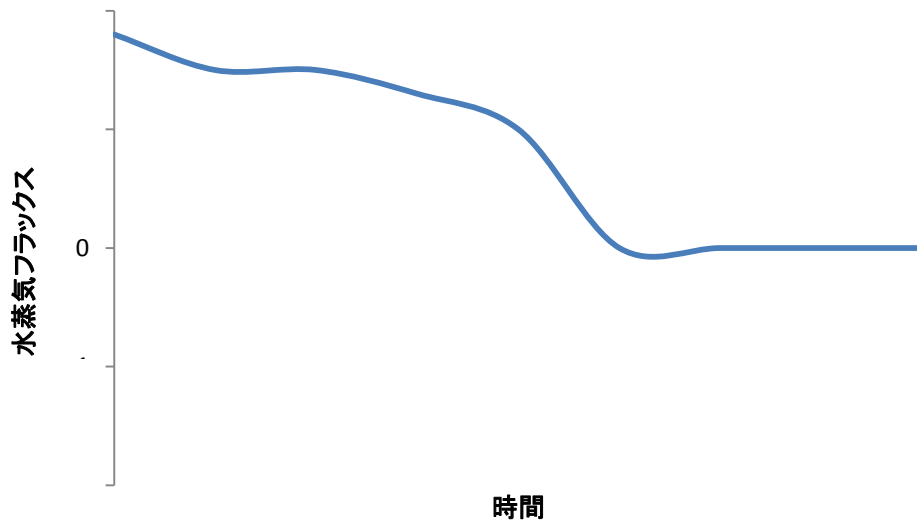


図 32 水蒸気フラックス変化パターン A の模式図

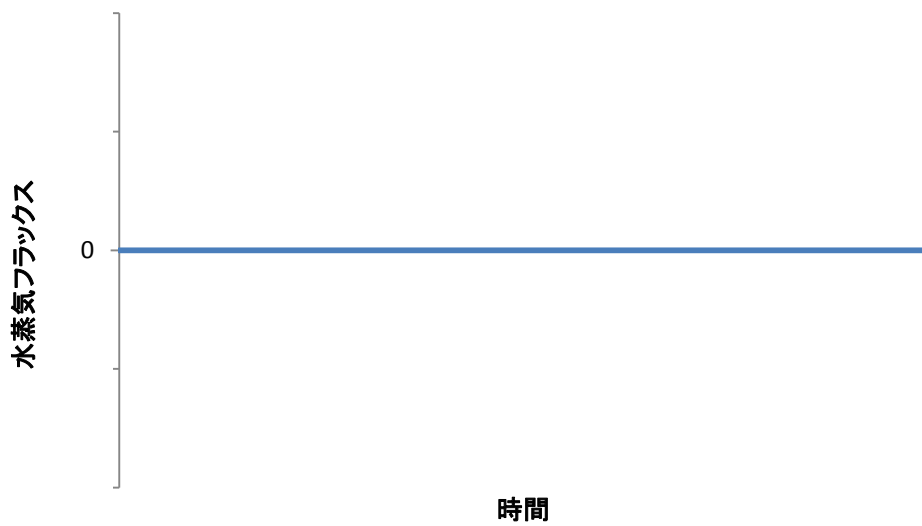


図 33 水蒸気フラックス変化パターン B の模式図

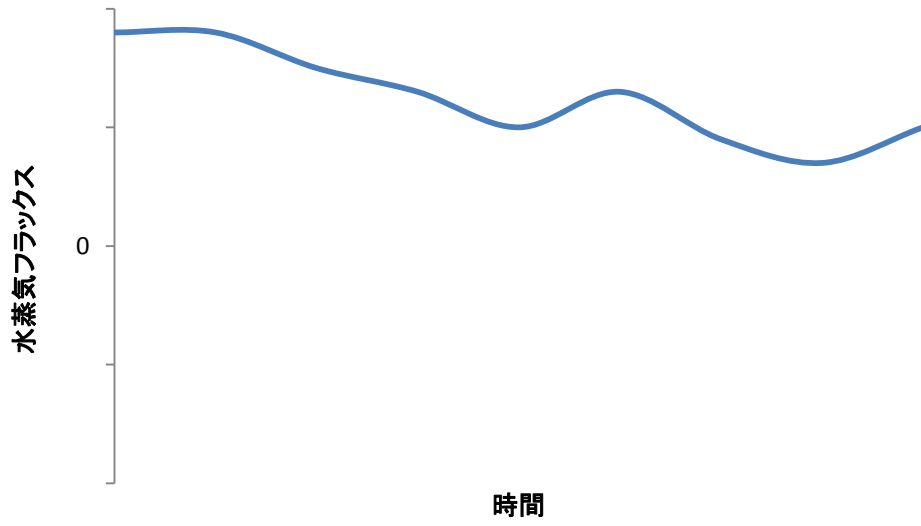


図 34 水蒸気フラックス変化パターン C の模式図

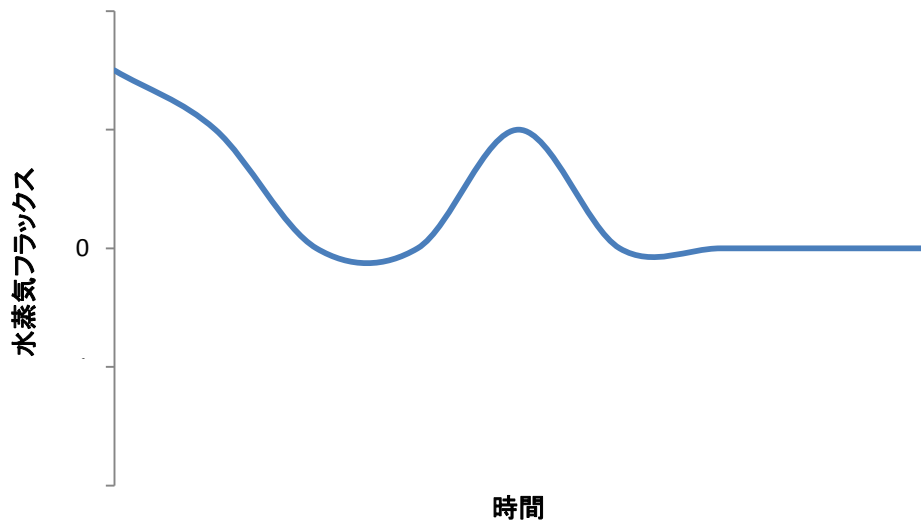


図 35 水蒸気フラックス変化パターン D の模式図

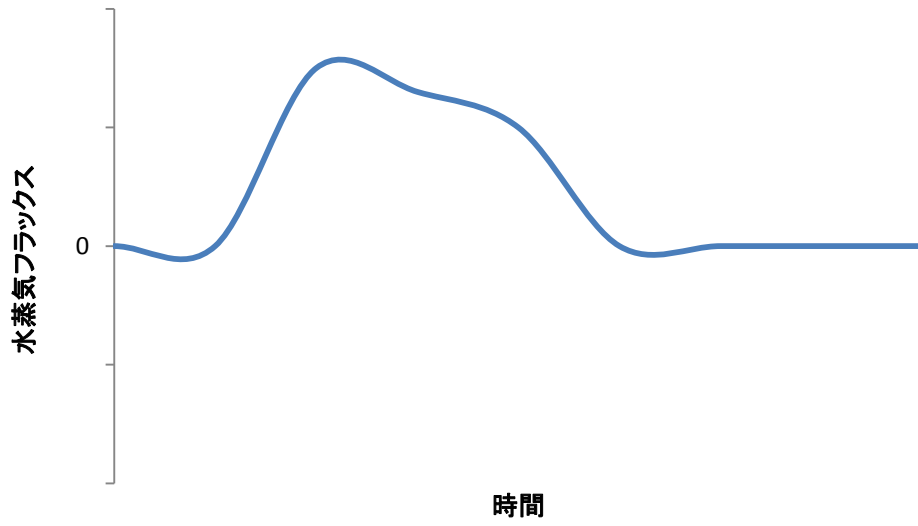


図 36 水蒸気フラックス変化パターン E の模式図

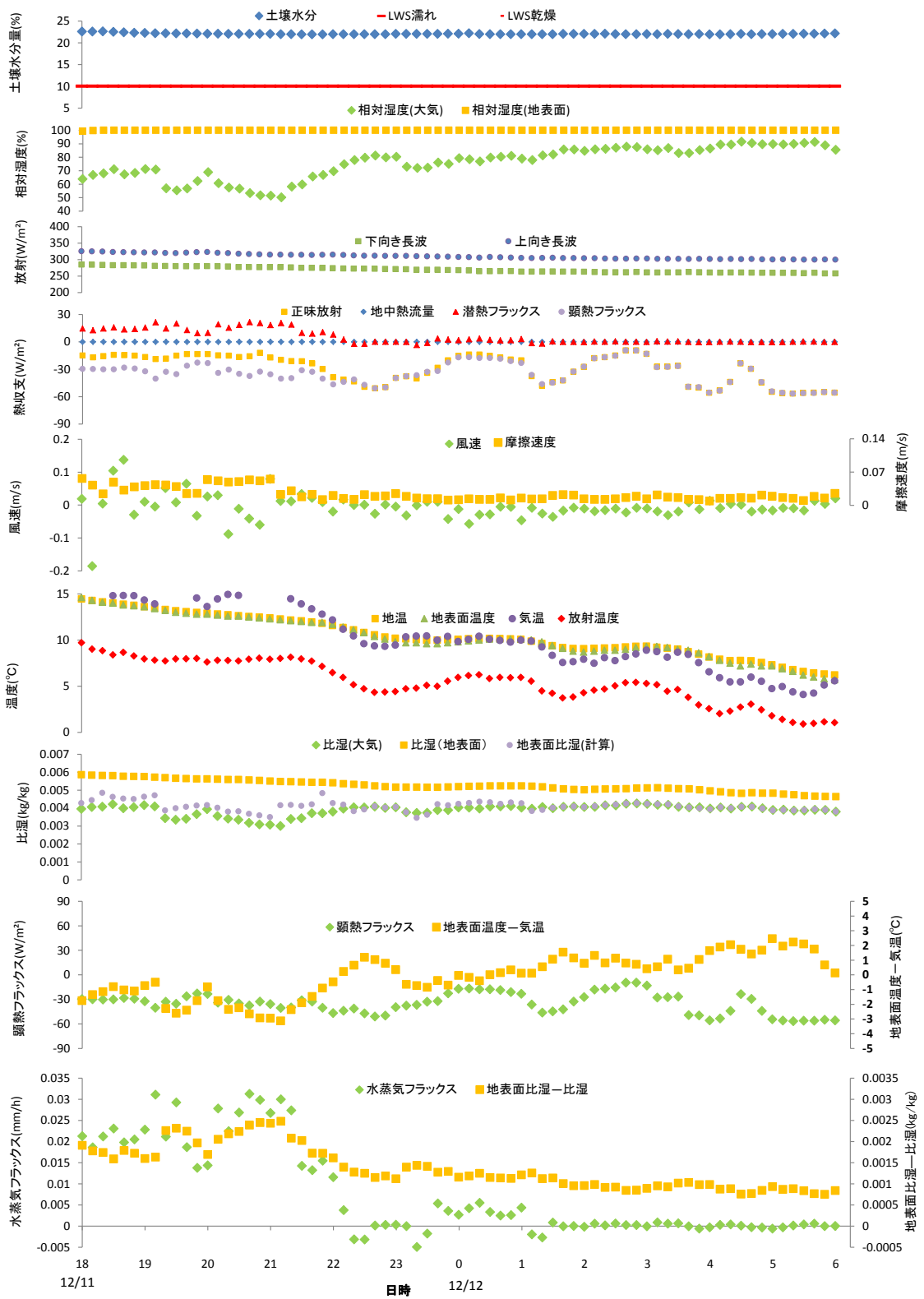


図 37 2015 年 12/11~12 における水蒸気フラックスと各気象要素の時系列変化

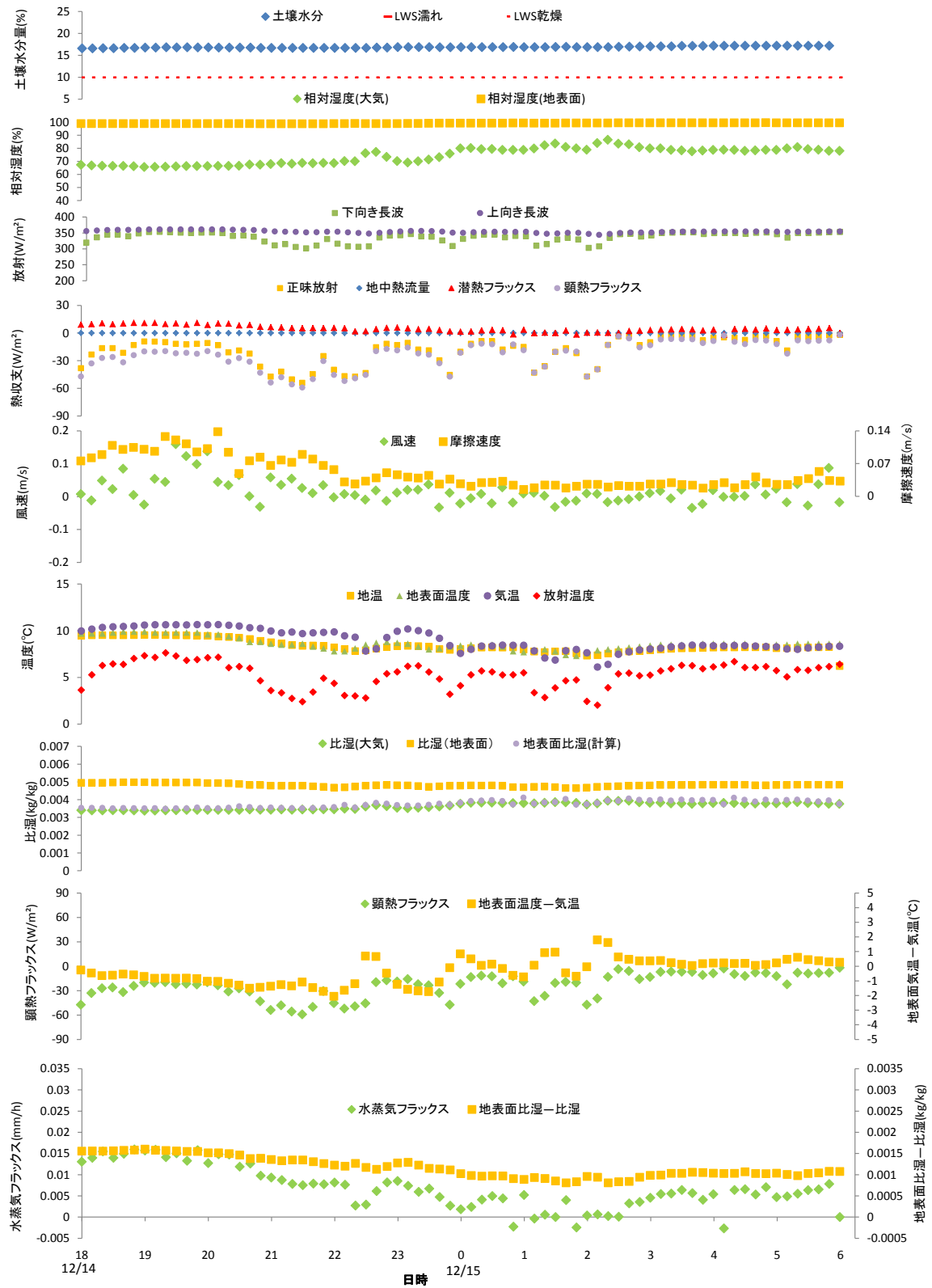


図 38 2015 年 12/14~15 における水蒸気フラックスと各気象要素の時系列変化

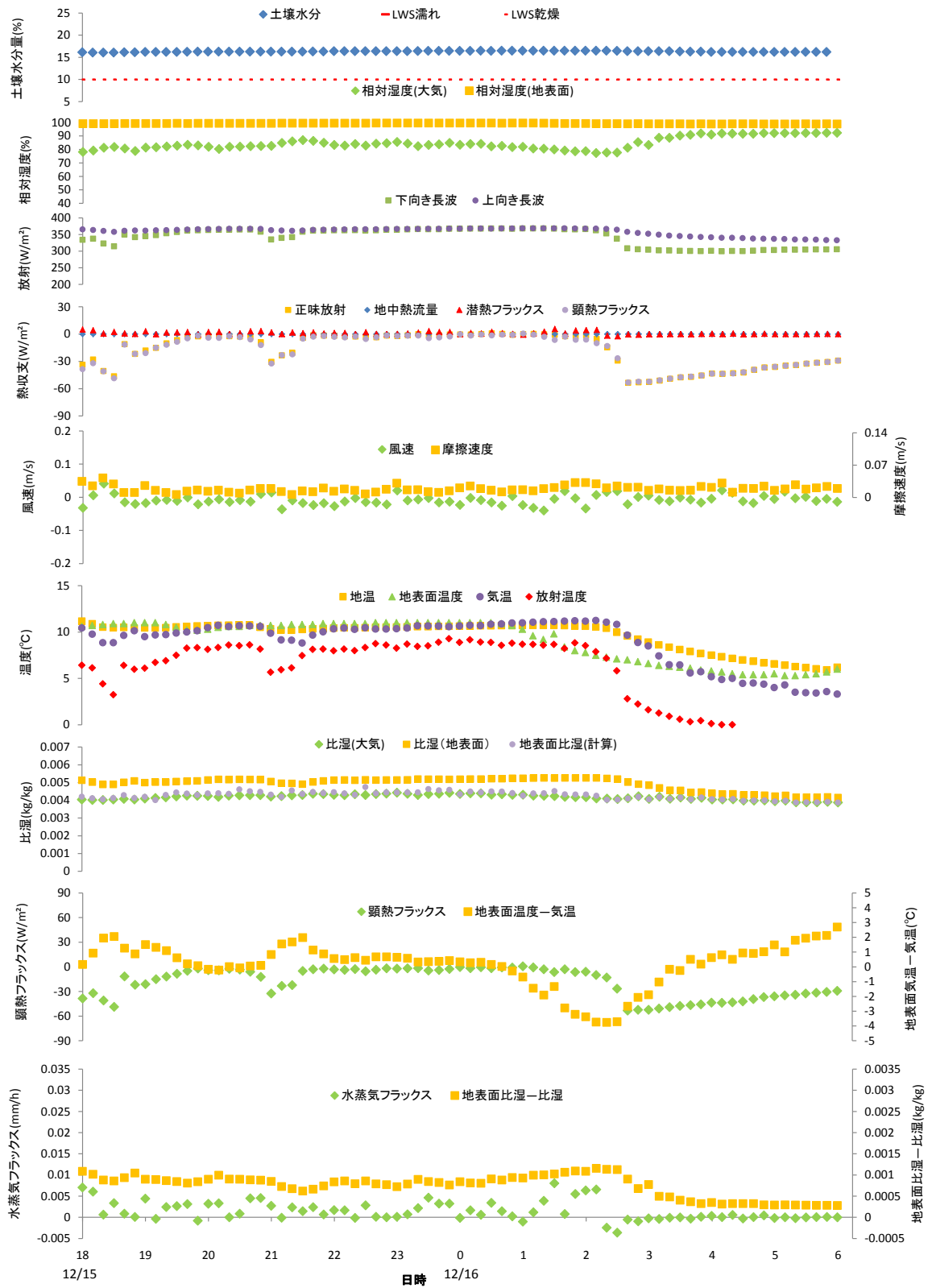


図 39 2015 年 12/15~16 における水蒸気フラックスと各気象要素の時系列変化

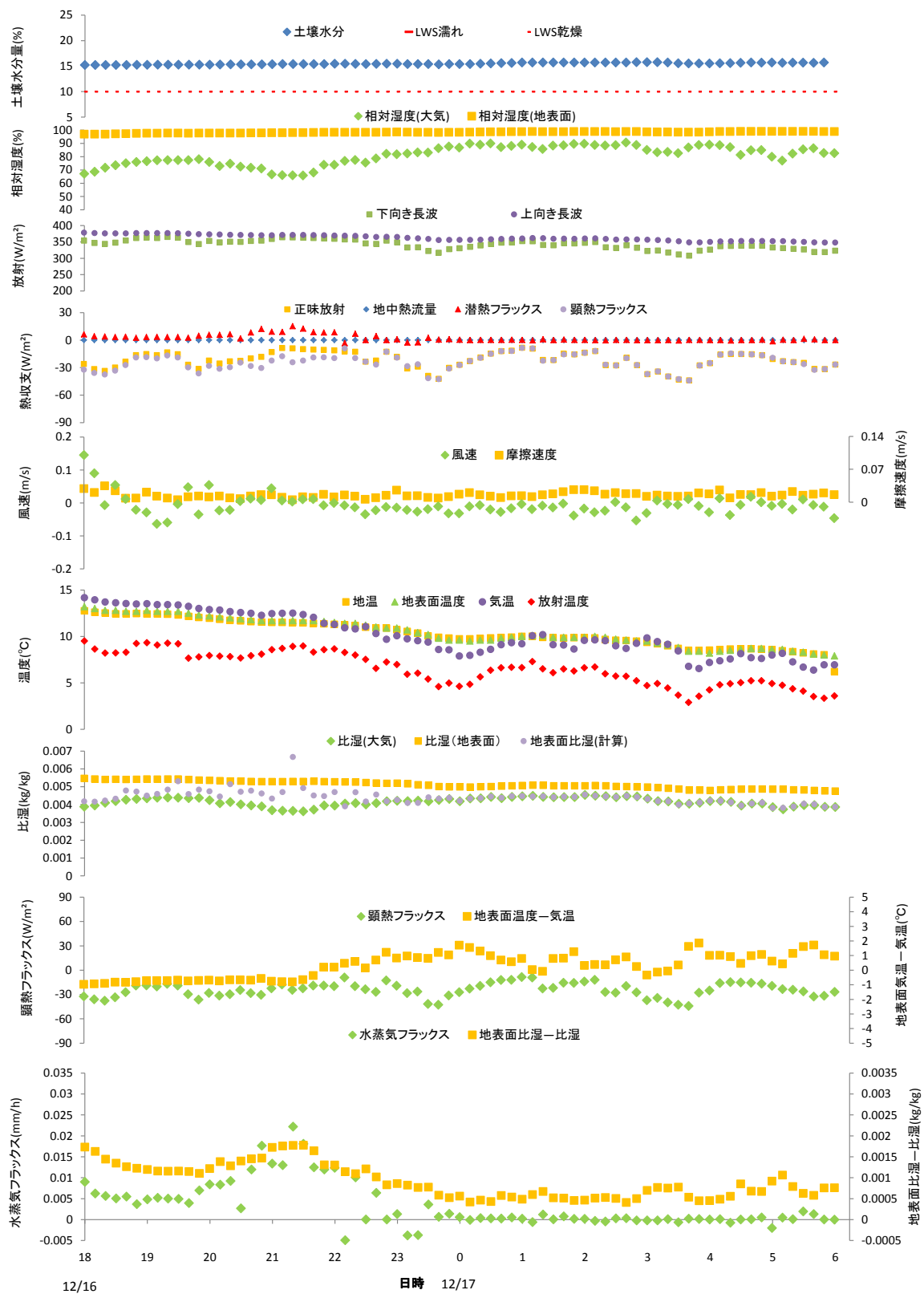


図 40 2015 年 12/16~17 における水蒸気フラックスと各気象要素の時系列変化

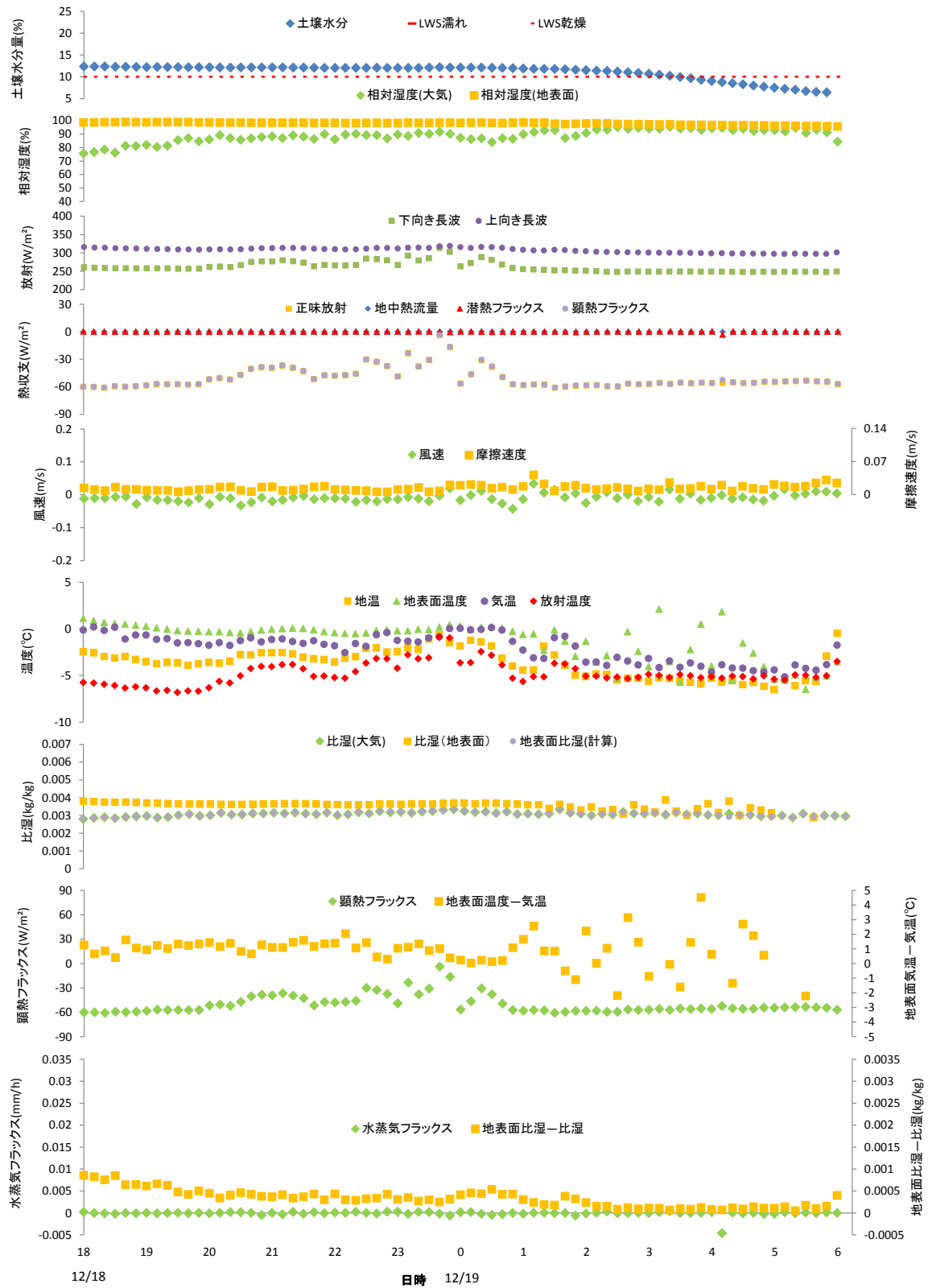


図 41 2015 年 12/18~19 における水蒸気フラックスと各気象要素の時系列変化

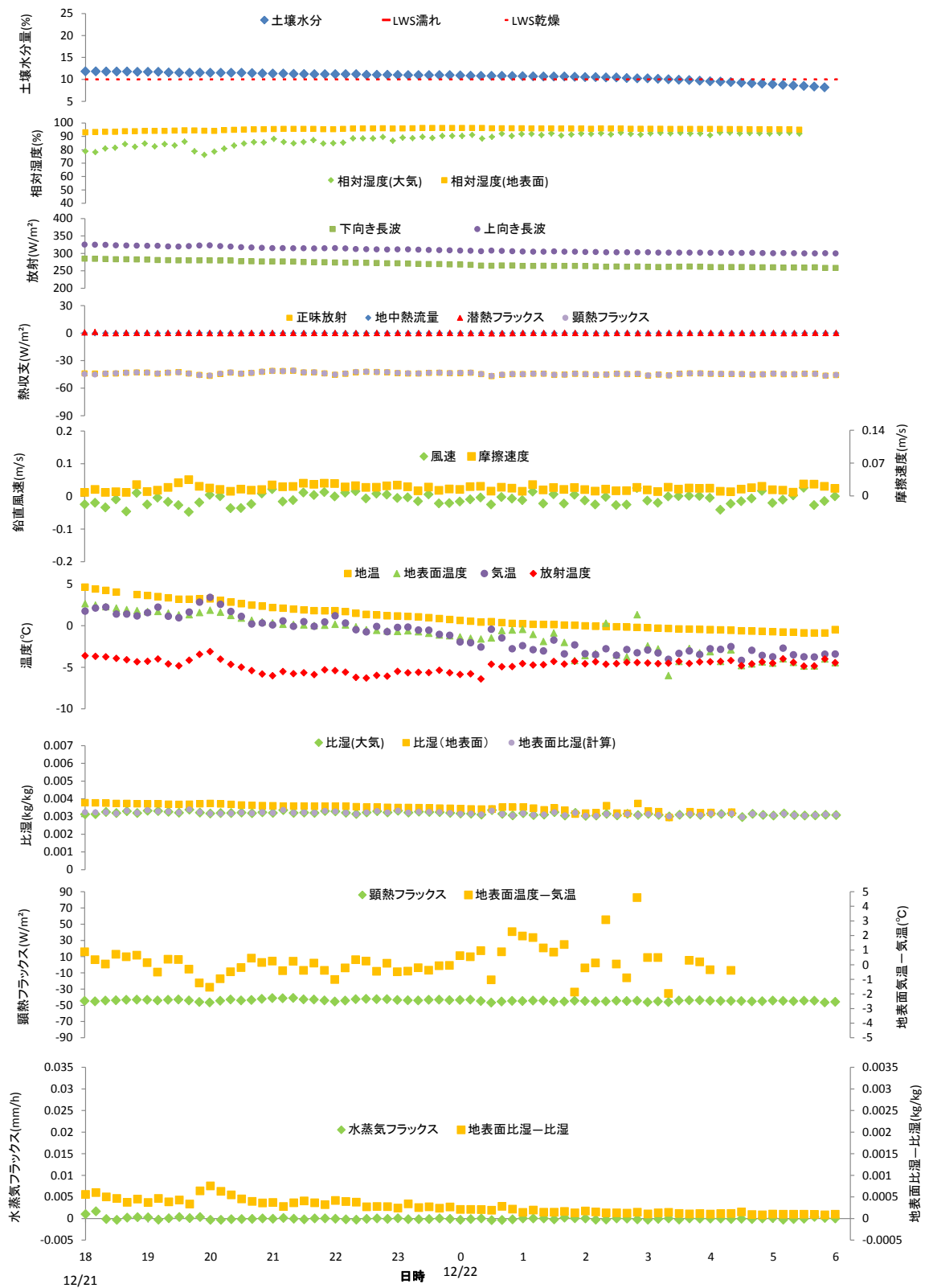


図 42 2015 年 12/21~22 における水蒸気フラックスと各気象要素の時系列変化

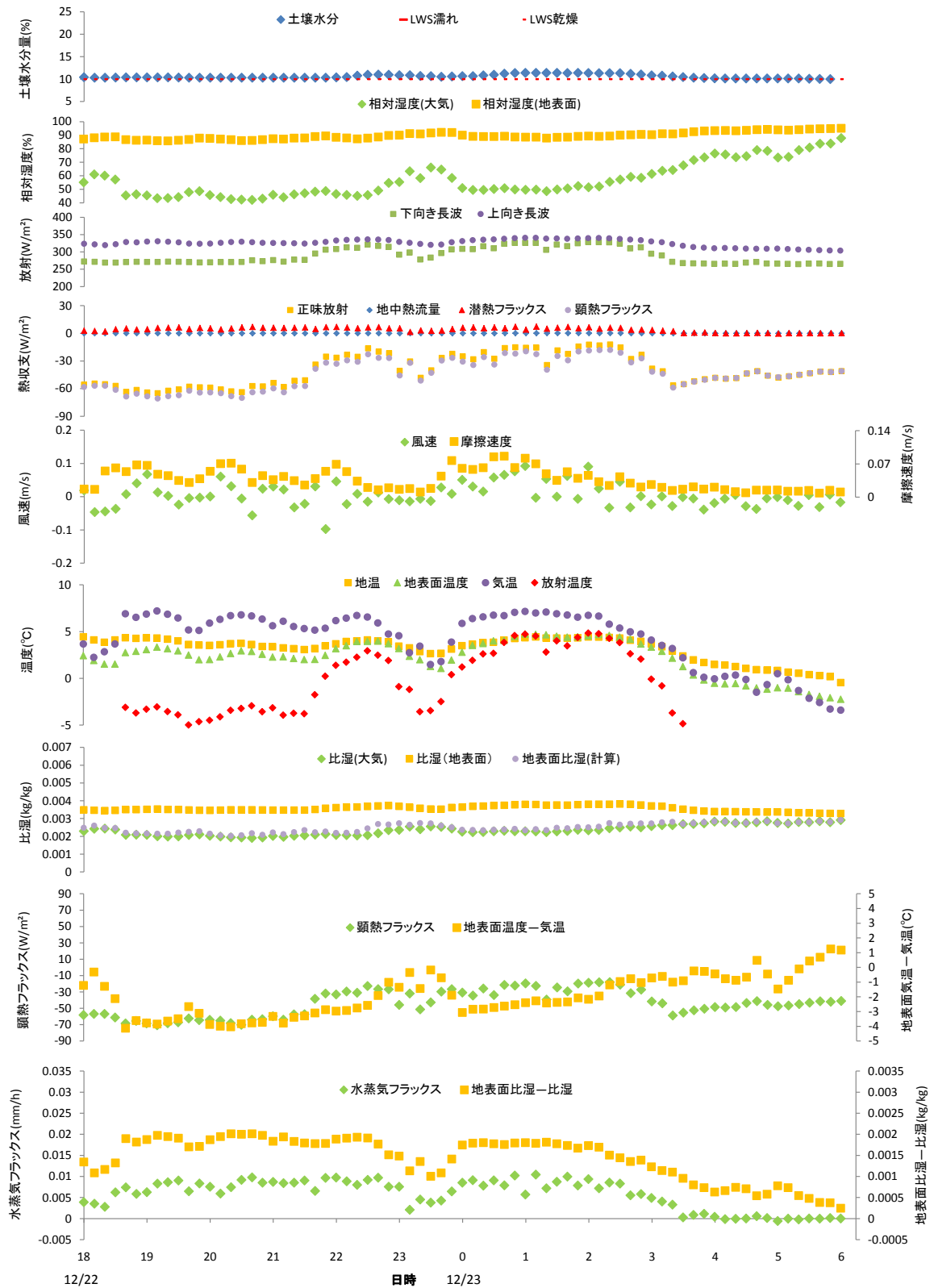


図 43 2015 年 12/22~23 における水蒸気フラックスと各気象要素の時系列変化

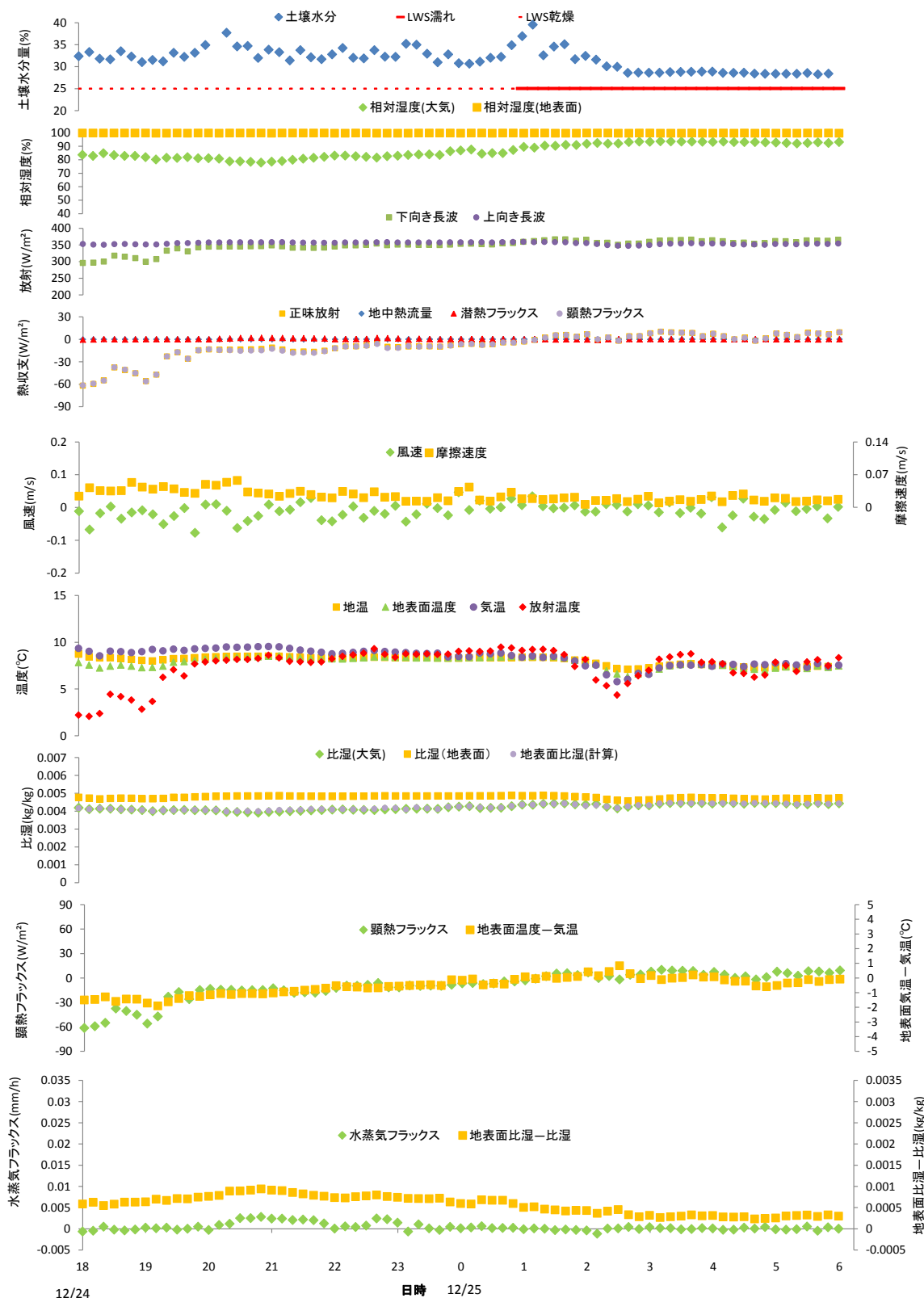


図 44 2015 年 12/24~25 における水蒸気フラックスと各気象要素の時系列変化

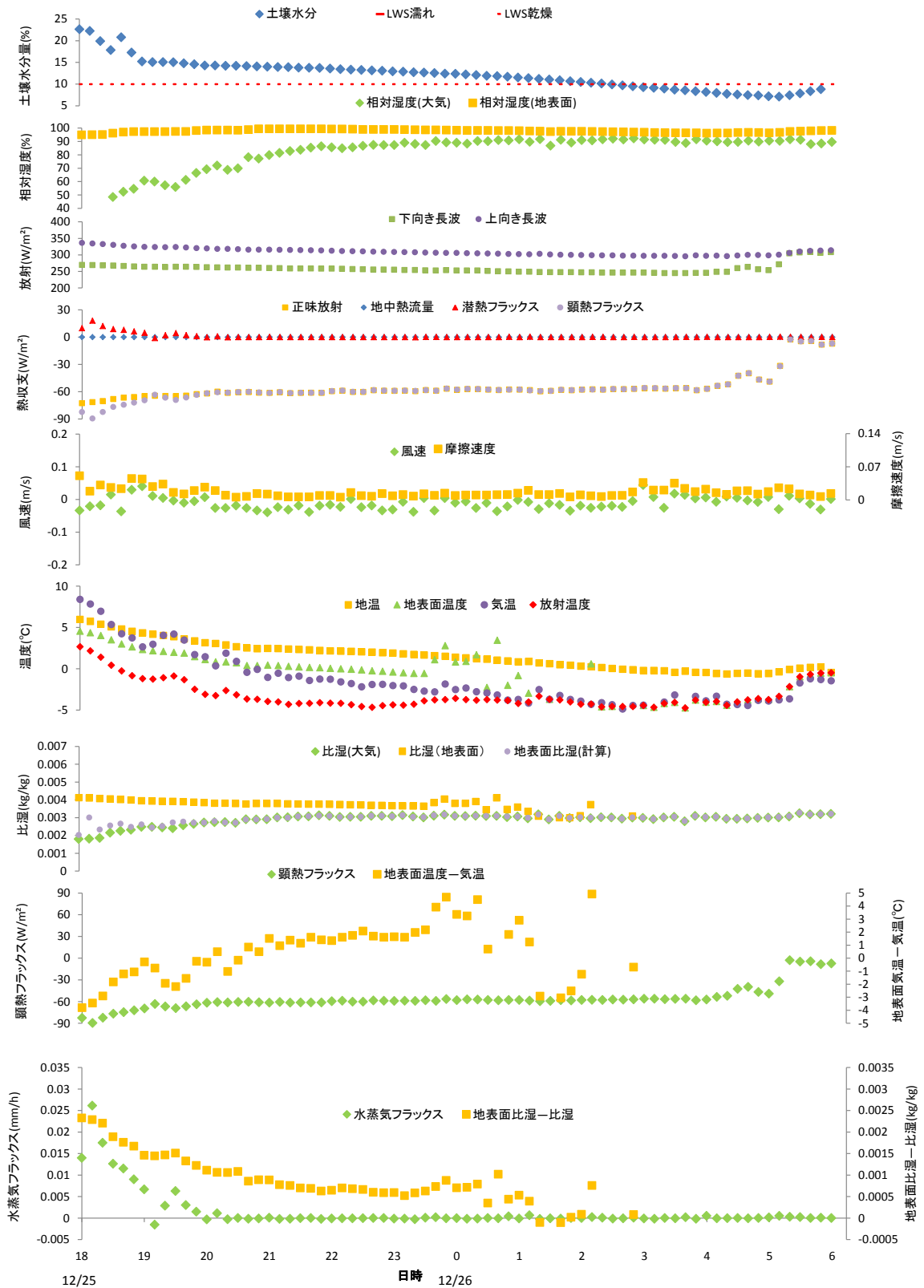


図 45 2015 年 12/25~26 における水蒸気フラックスと各気象要素の時系列変化

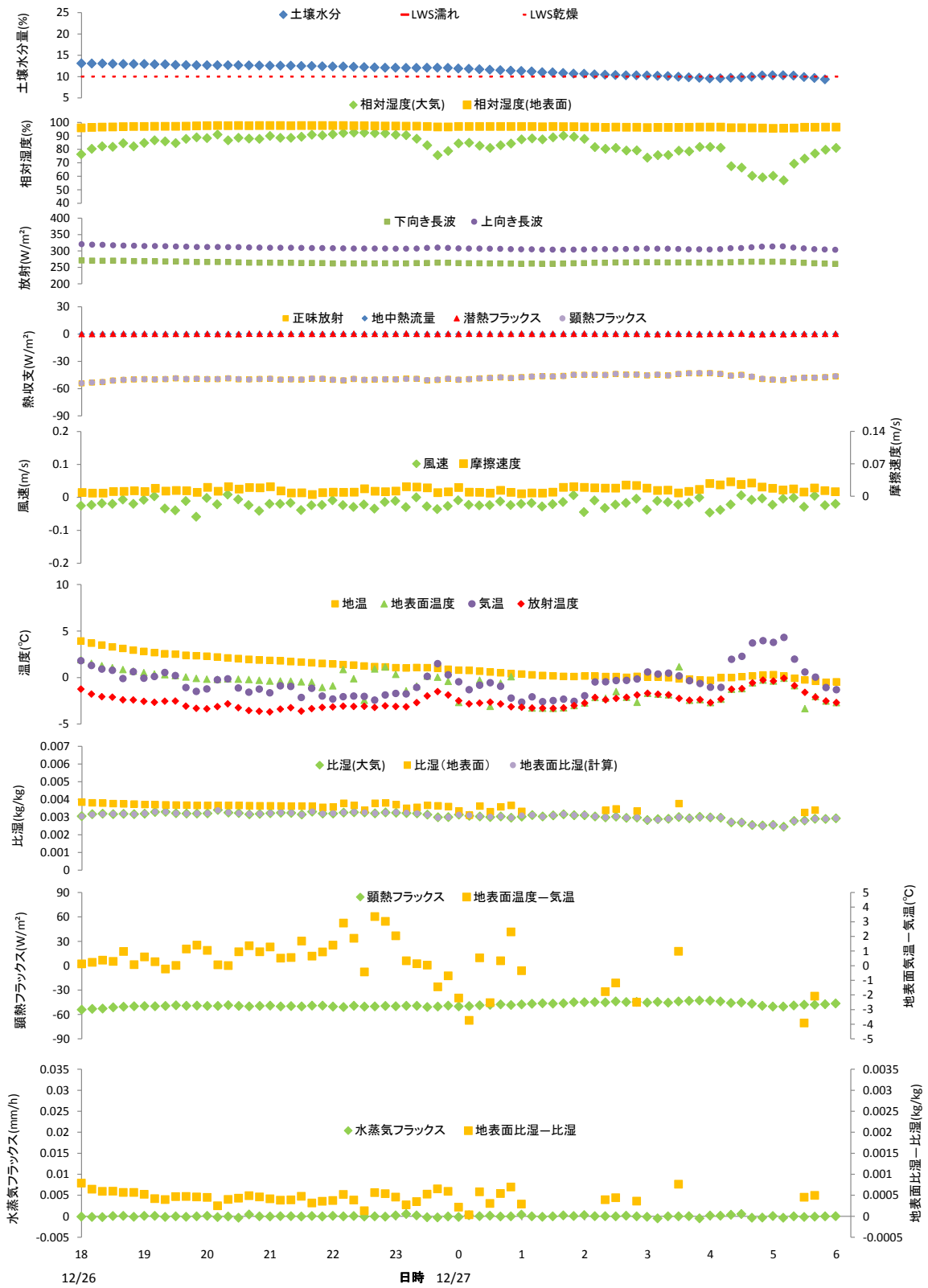


図 46 2015 年 12/26~27 における水蒸気フラックスと各気象要素の時系列変化

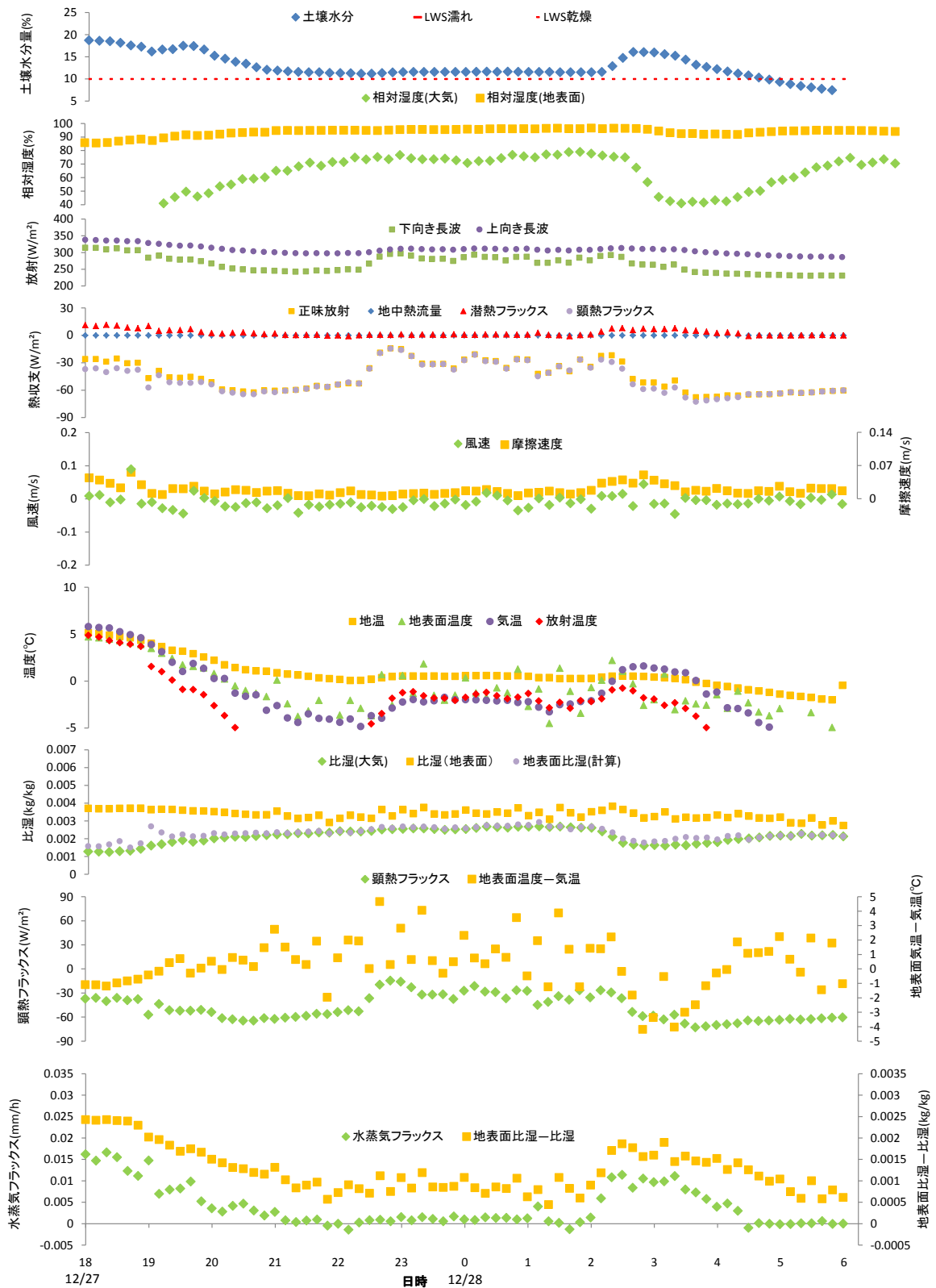


図 47 2015 年 12/27~28 における水蒸気フラックスと各気象要素の時系列変化

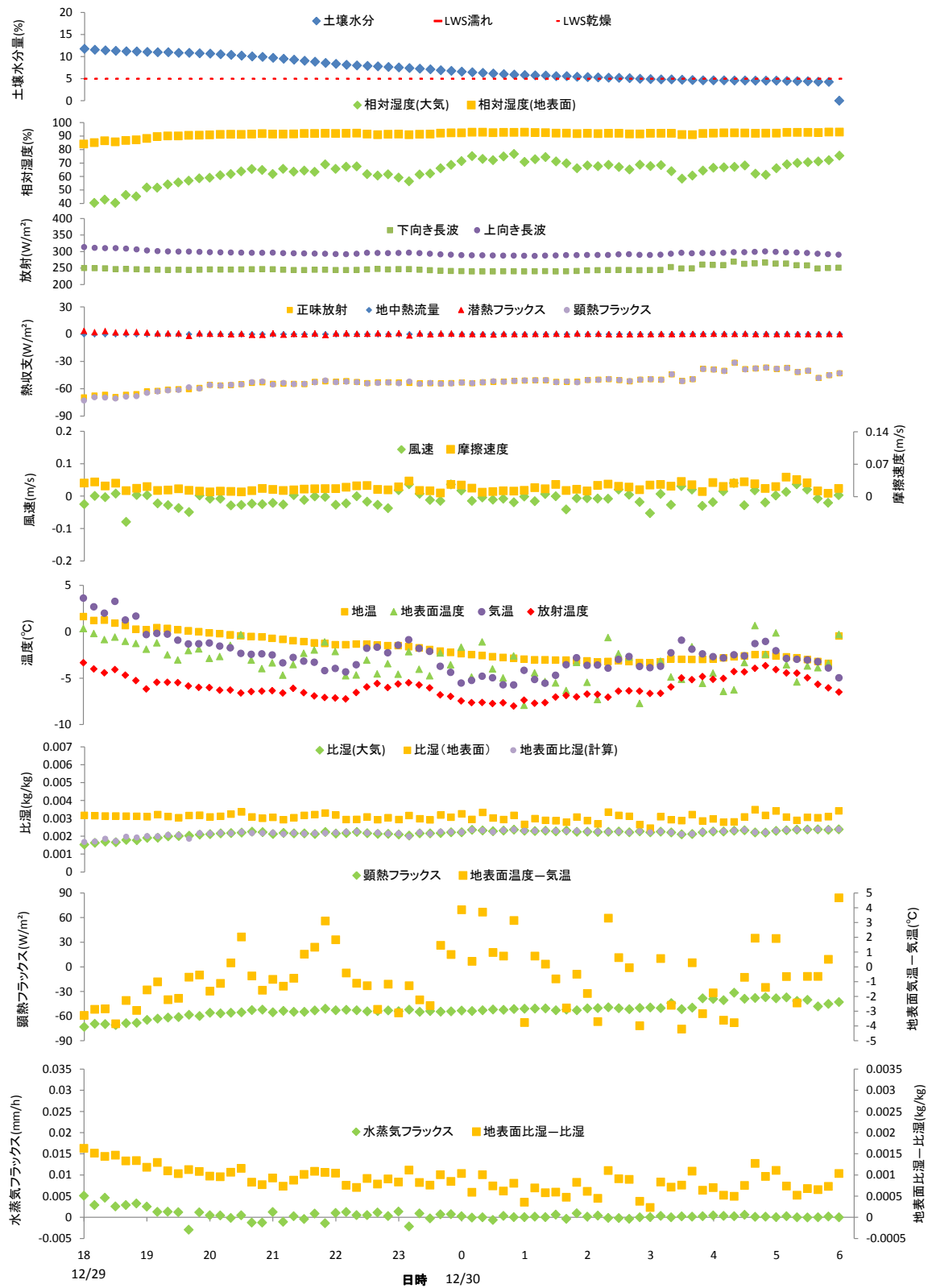


図 48 2015 年 12/29~30 における水蒸気フラックスと各気象要素の時系列変化

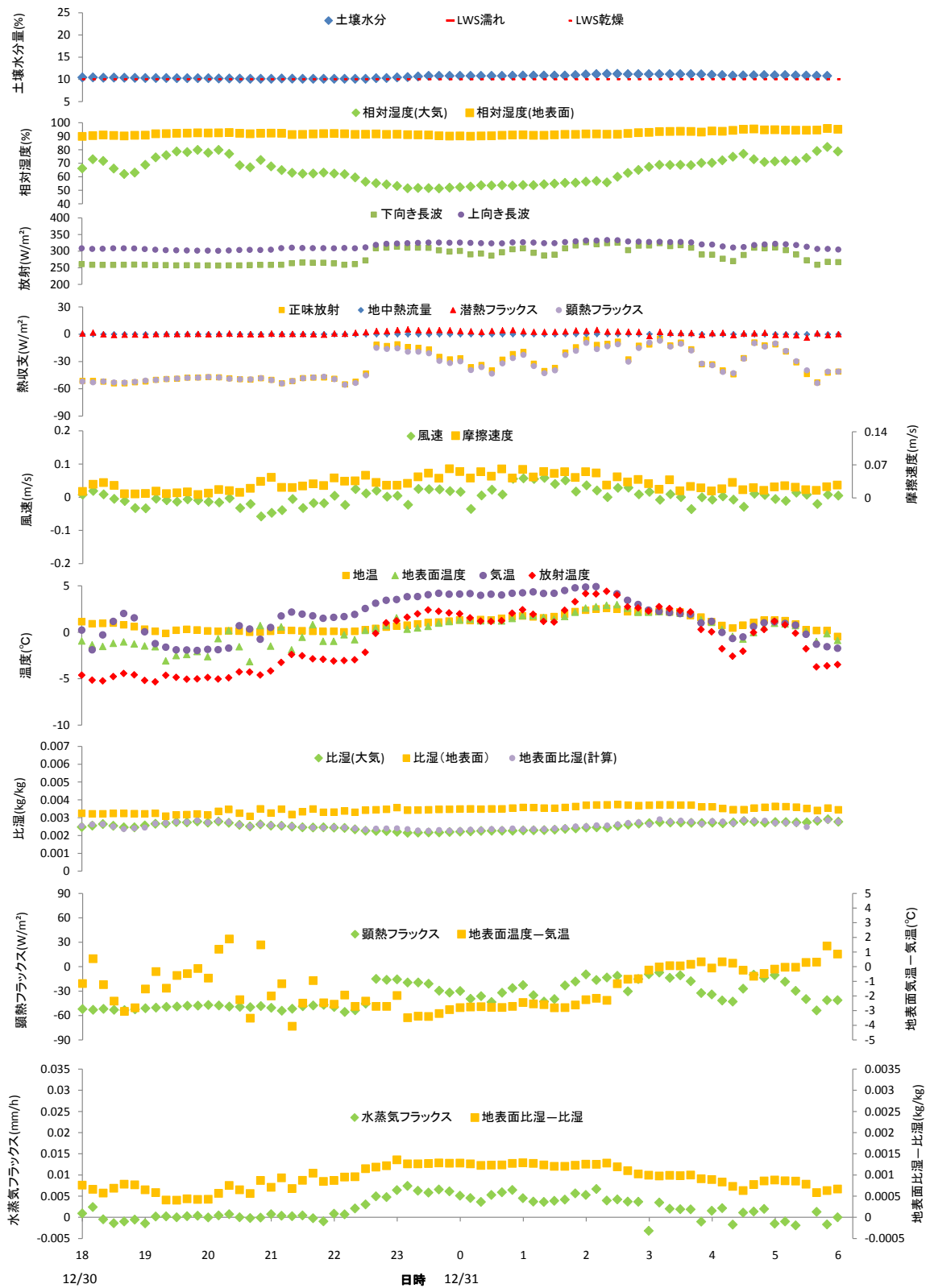


図 49 2015 年 12/30~31 における水蒸気フラックスと各気象要素の時系列変化

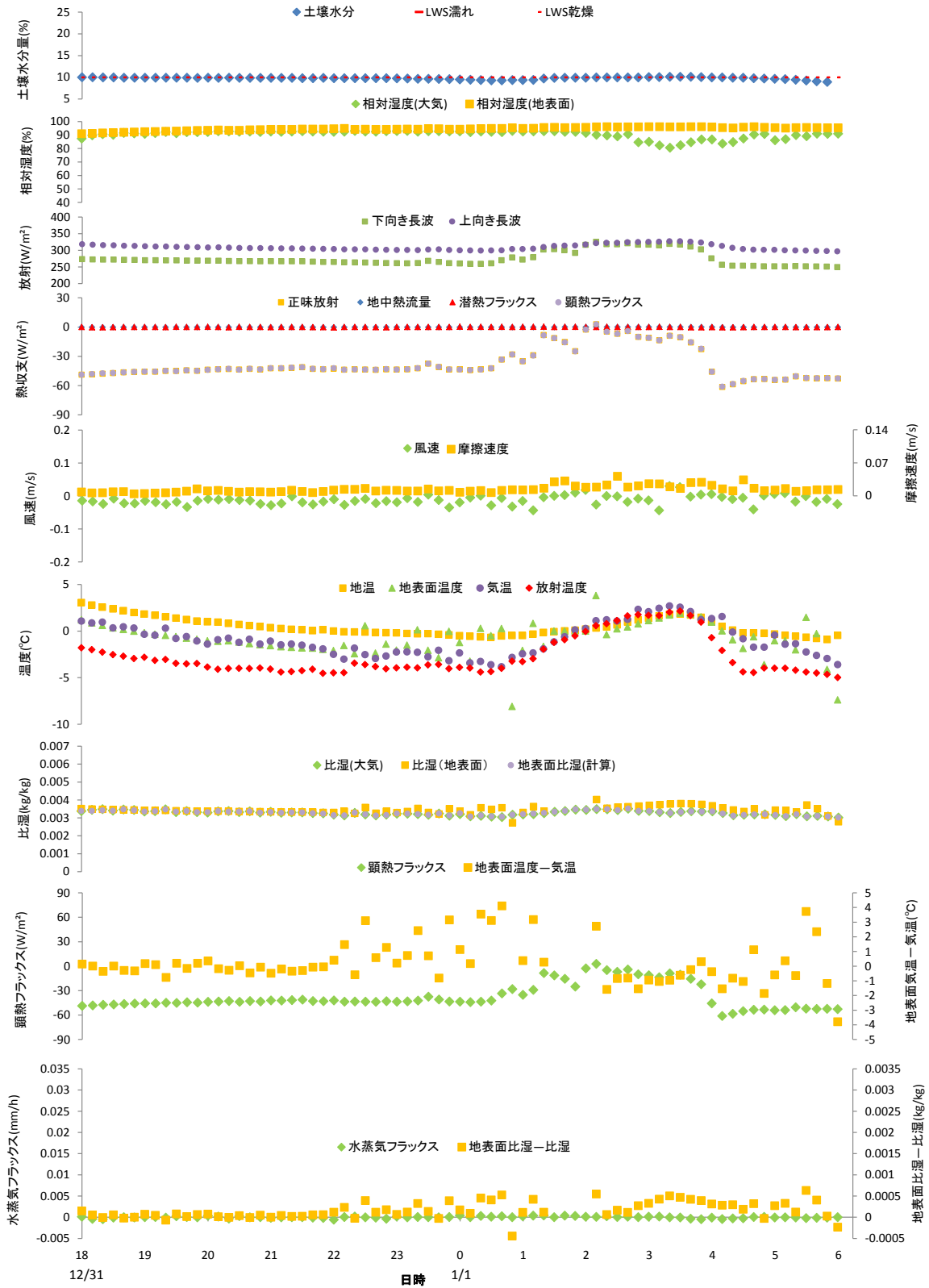


図 50 2015 年 12/31~2016 年 1/1 における水蒸気フラックスと各気象要素の時系列変化

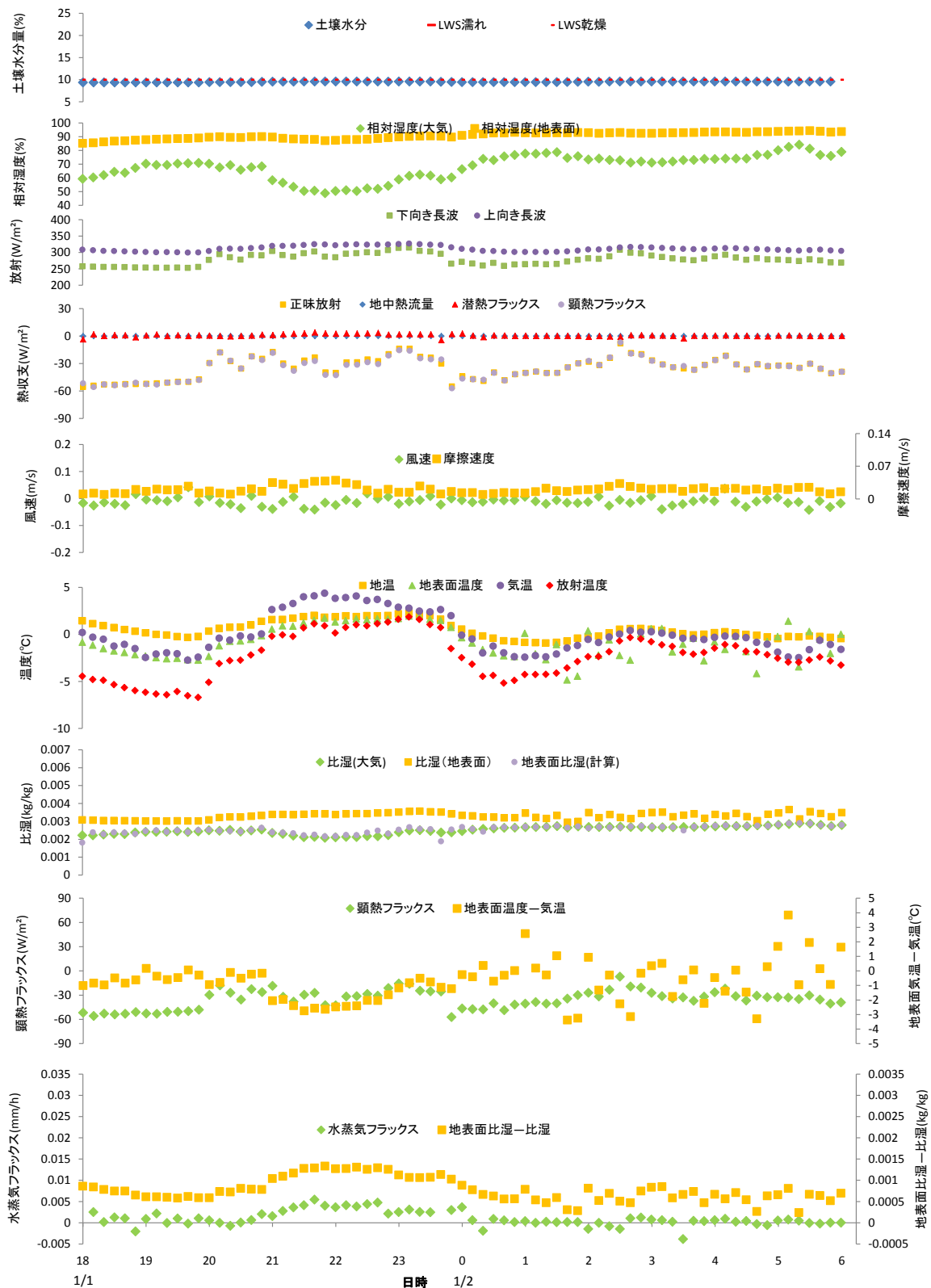


図 51 2016 年 1/1~1/2 における水蒸気フラックスと各気象要素の時系列変化

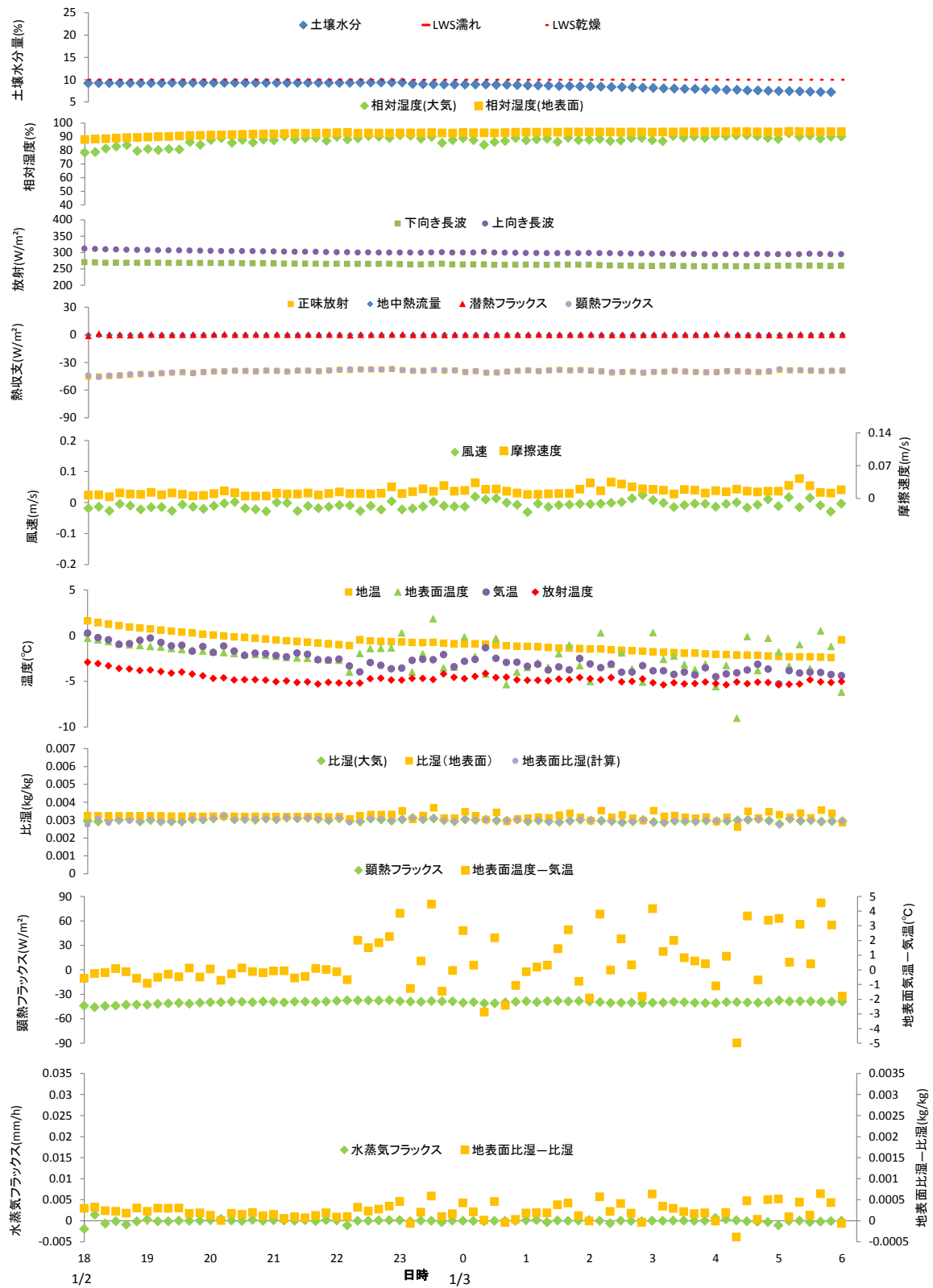


図 52 2016 年 1/2~1/3 における水蒸気フラックスと各気象要素の時系列変化

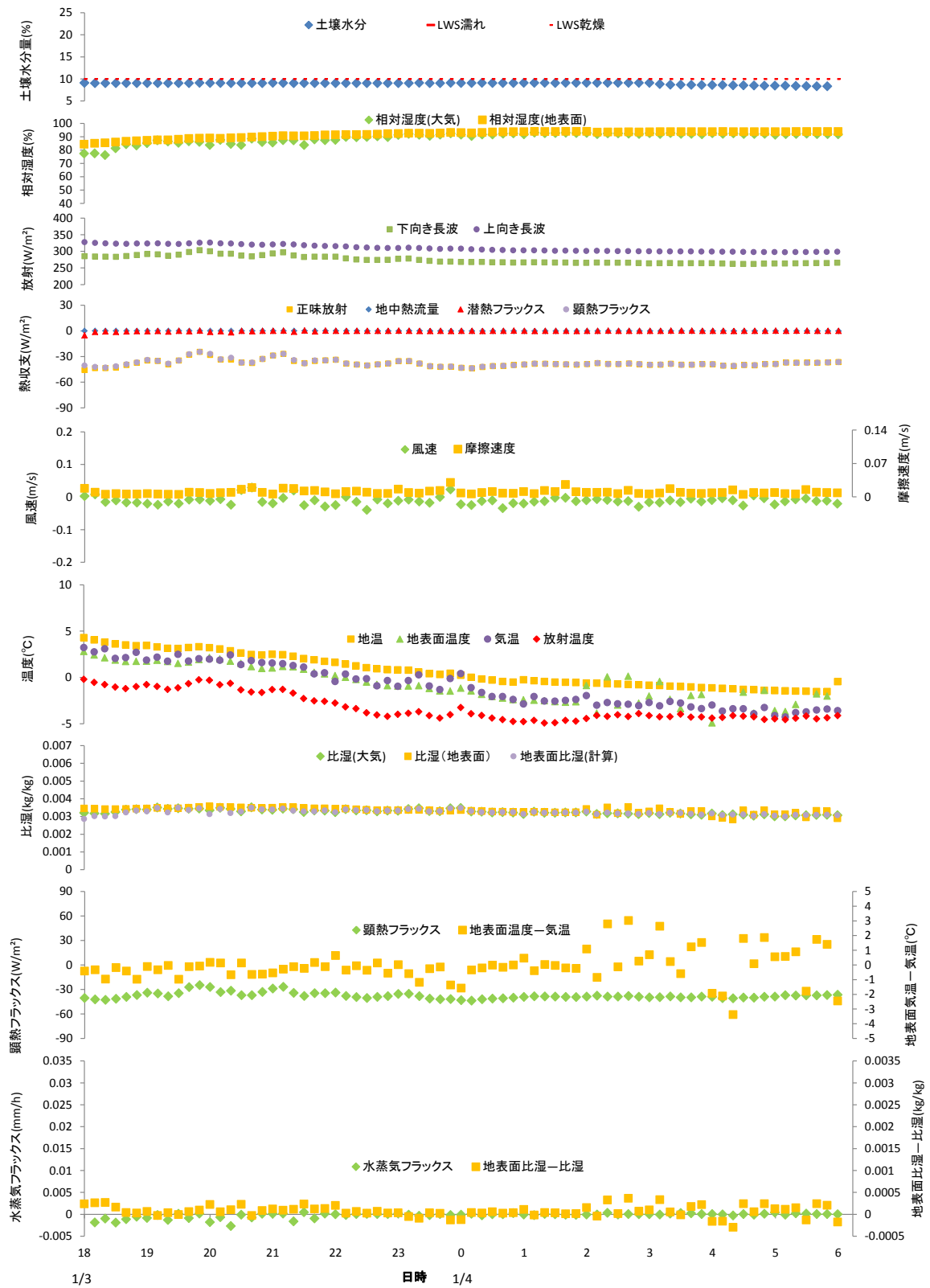


図 53 2016 年 1/3~1/4 における水蒸気フラックスと各気象要素の時系列変化

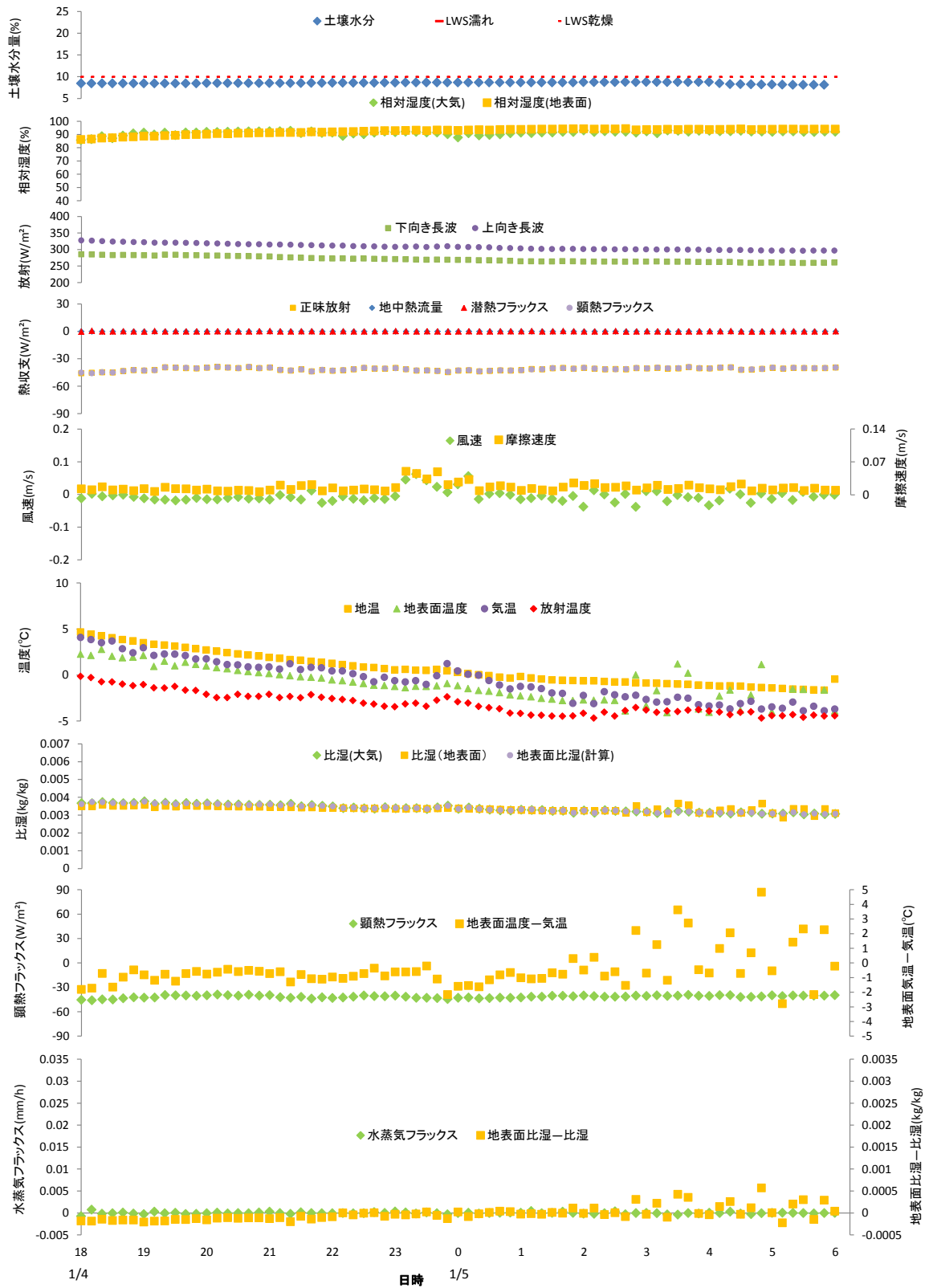


図 54 2016 年 1/4~1/5 における水蒸気フラックスと各気象要素の時系列変化

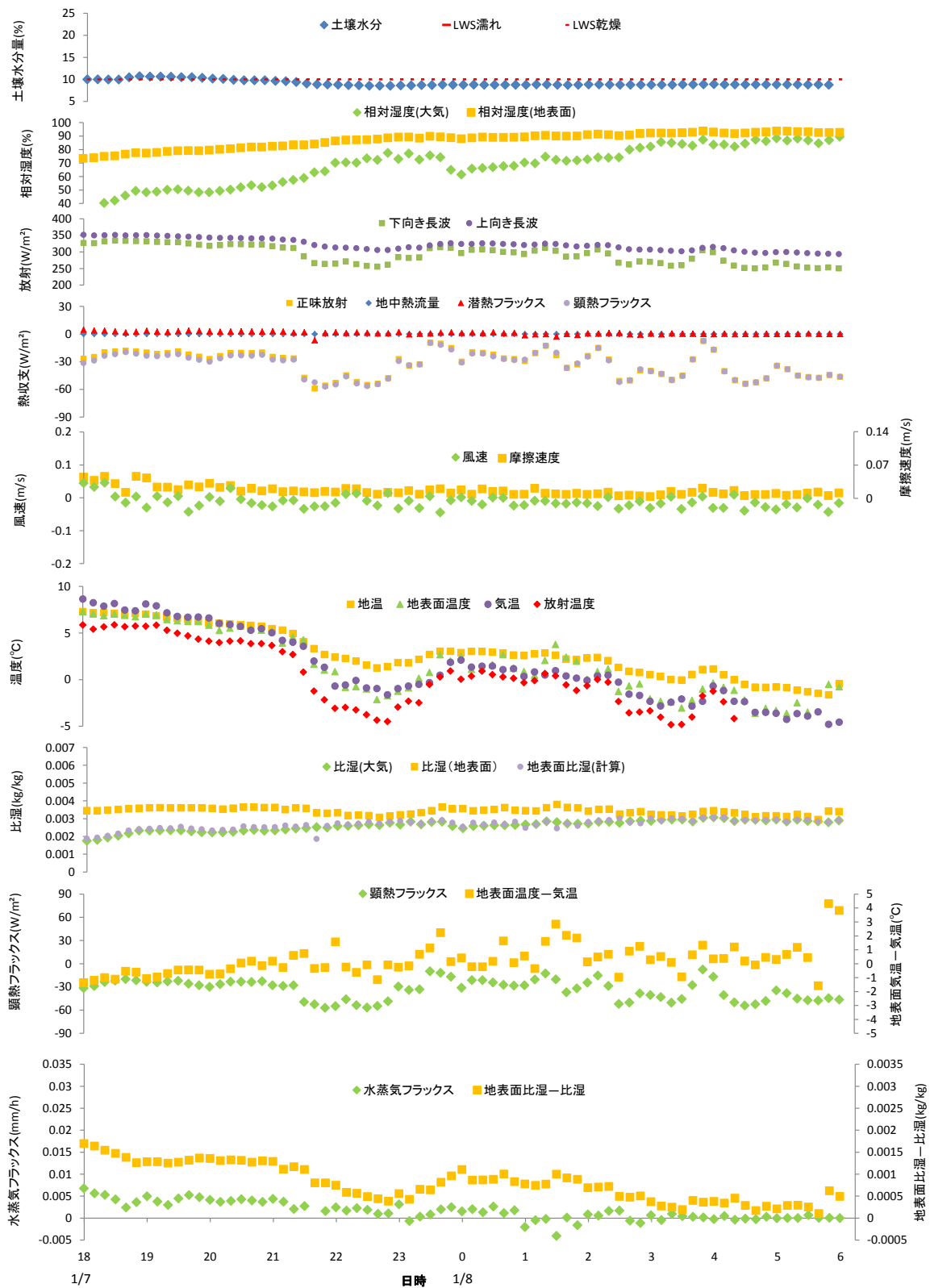


図 55 2016 年 1/7~1/8 における水蒸気フラックスと各気象要素の時系列変化

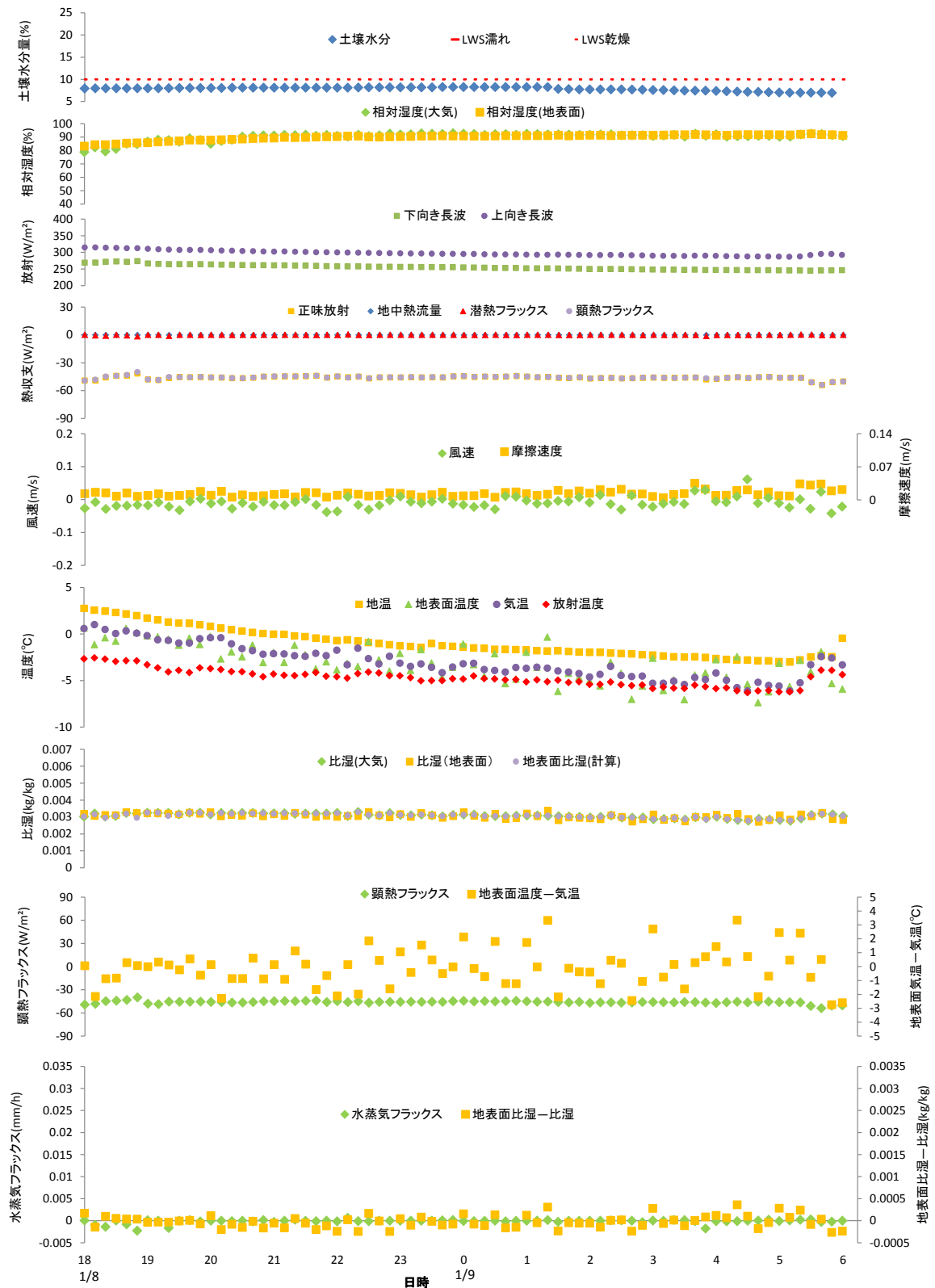


図 56 2016 年 1/8~1/9 における水蒸気フラックスと各気象要素の時系列変化

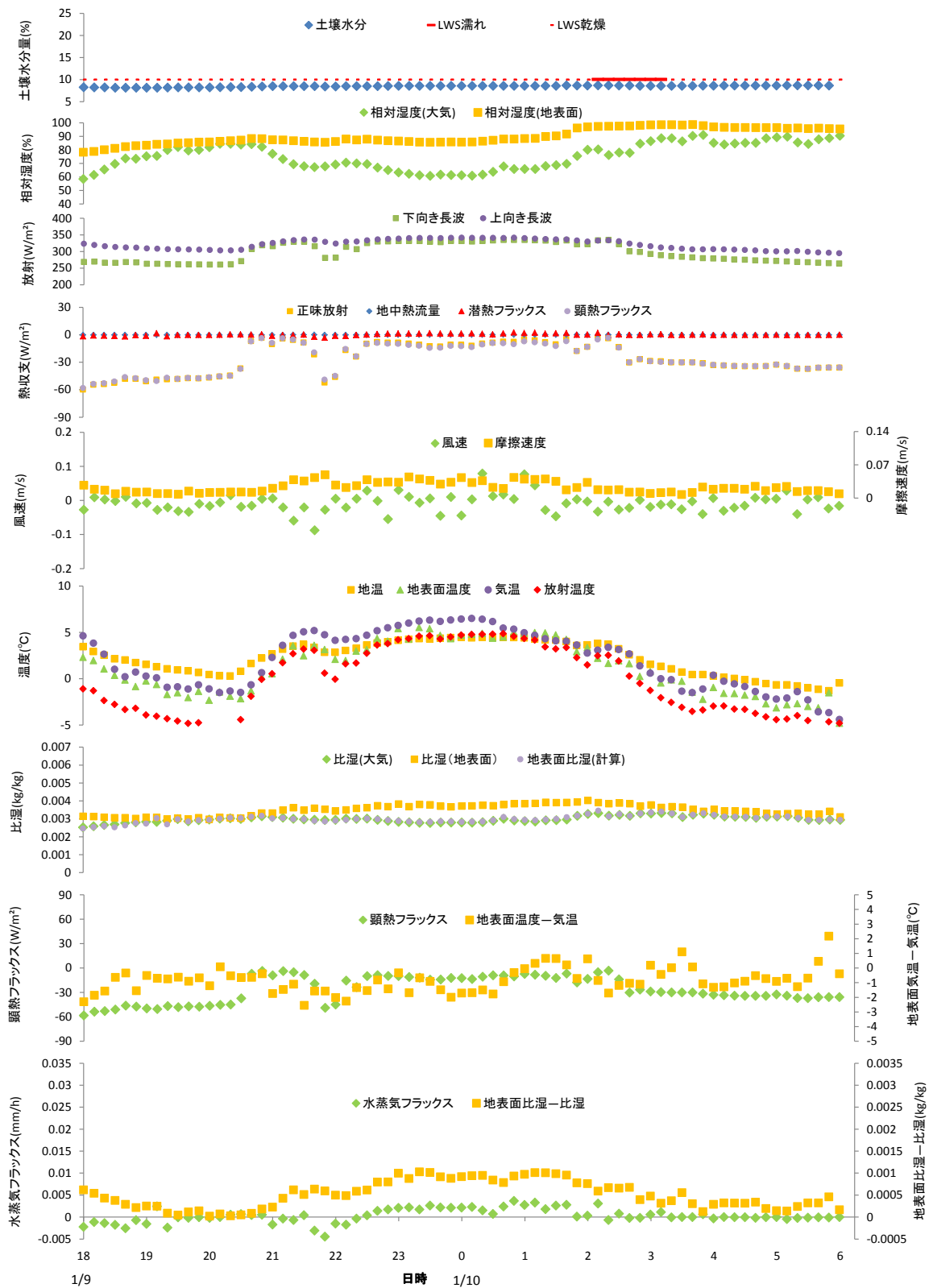


図 57 2016 年 1/9~1/10 における水蒸気フラックスと各気象要素の時系列変化

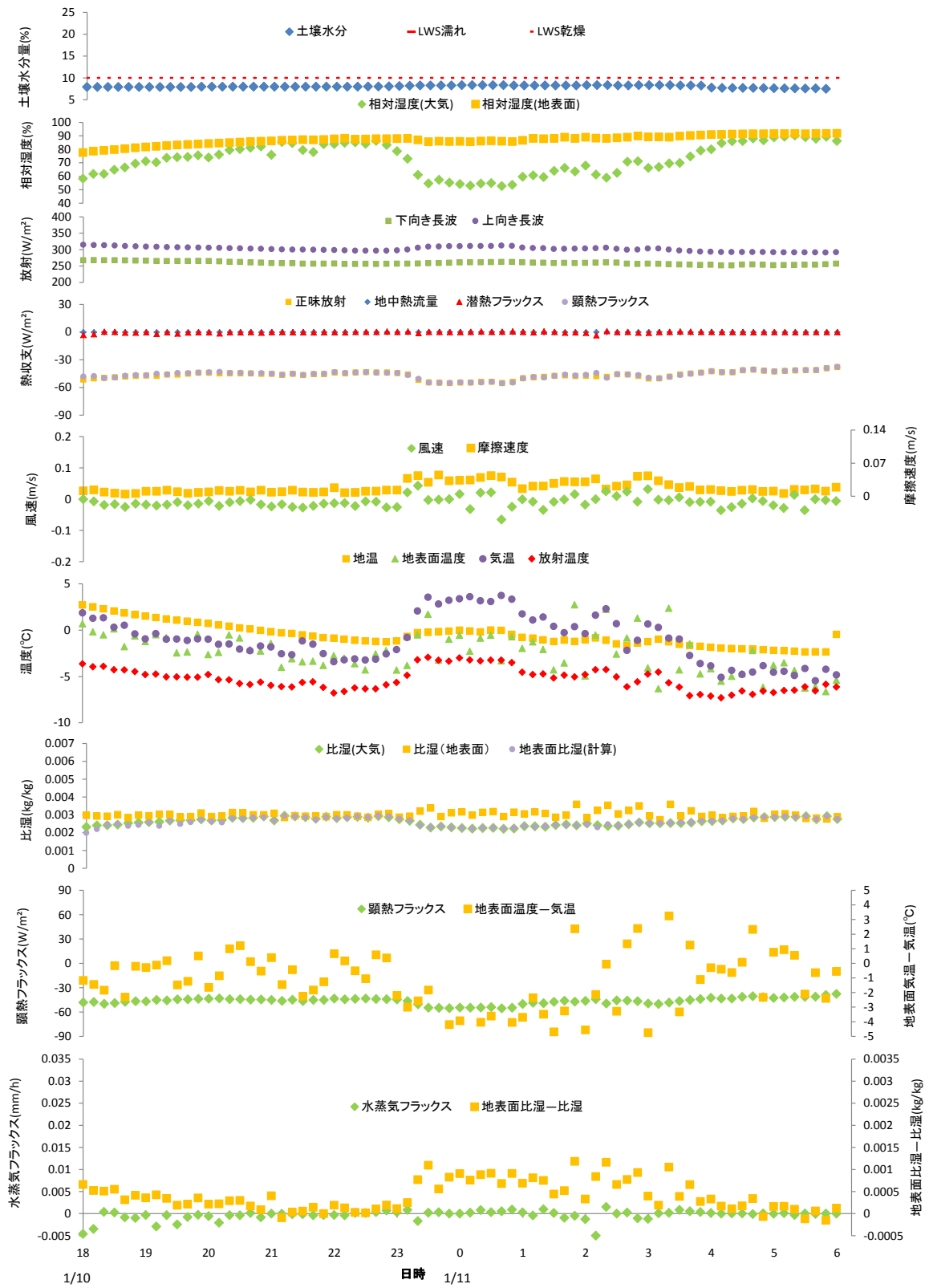


図 58 2016 年 1/10~1/11 における水蒸気フラックスと各気象要素の時系列変化

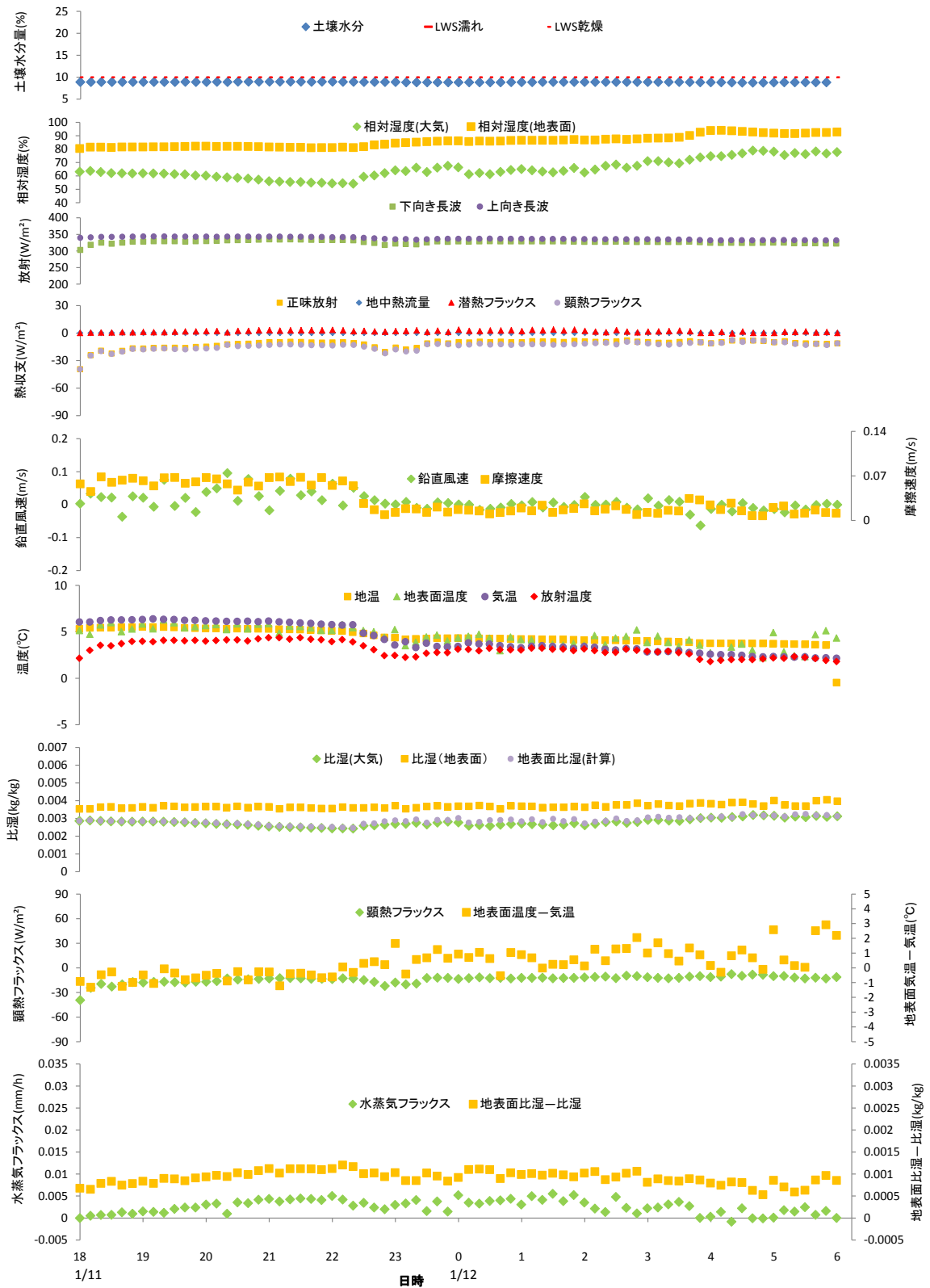


図 59 2016 年 1/11~1/12 における水蒸気フラックスと各気象要素の時系列変化

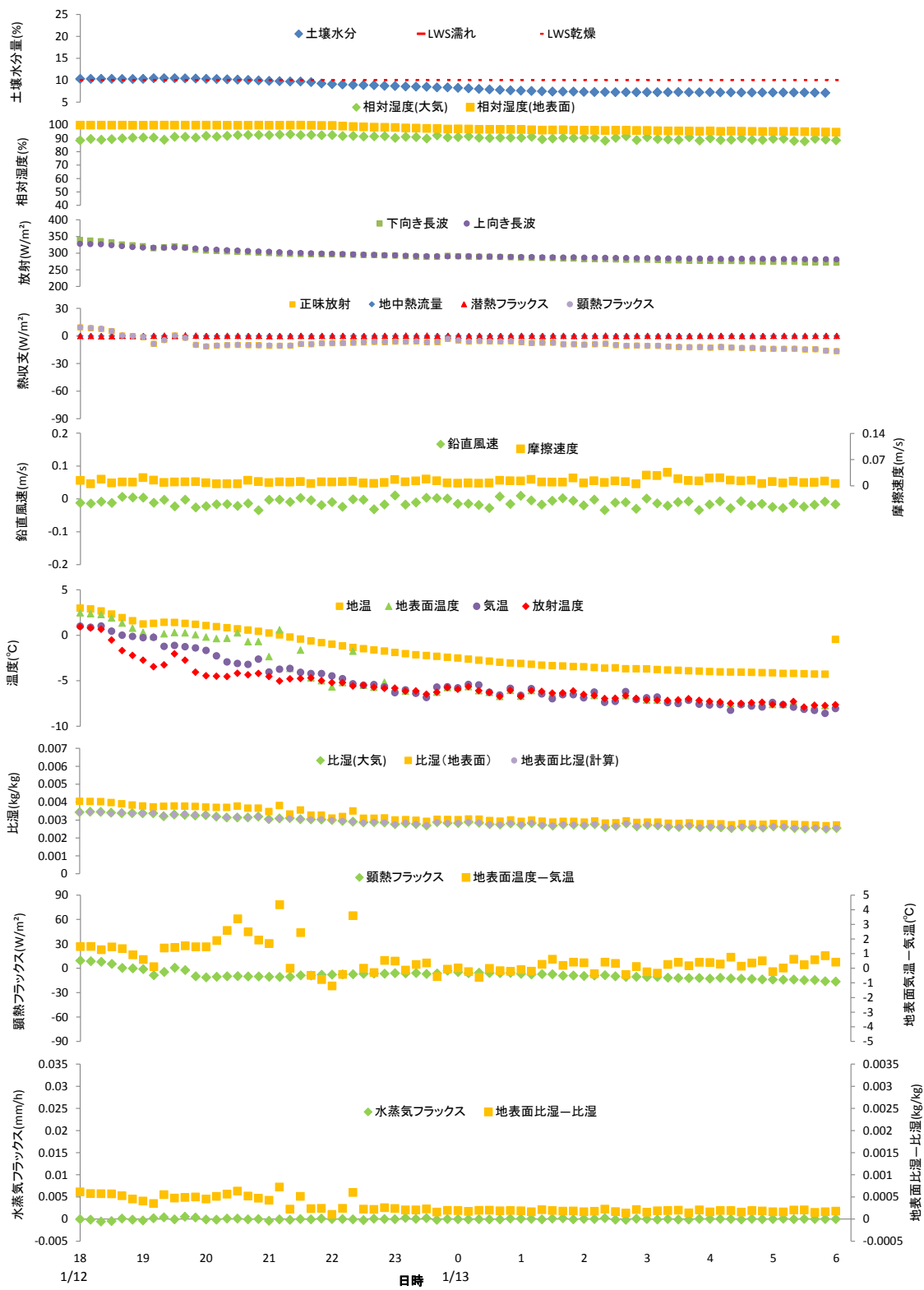


図 60 2016 年 1/12~1/13 における水蒸気フラックスと各気象要素の時系列変化

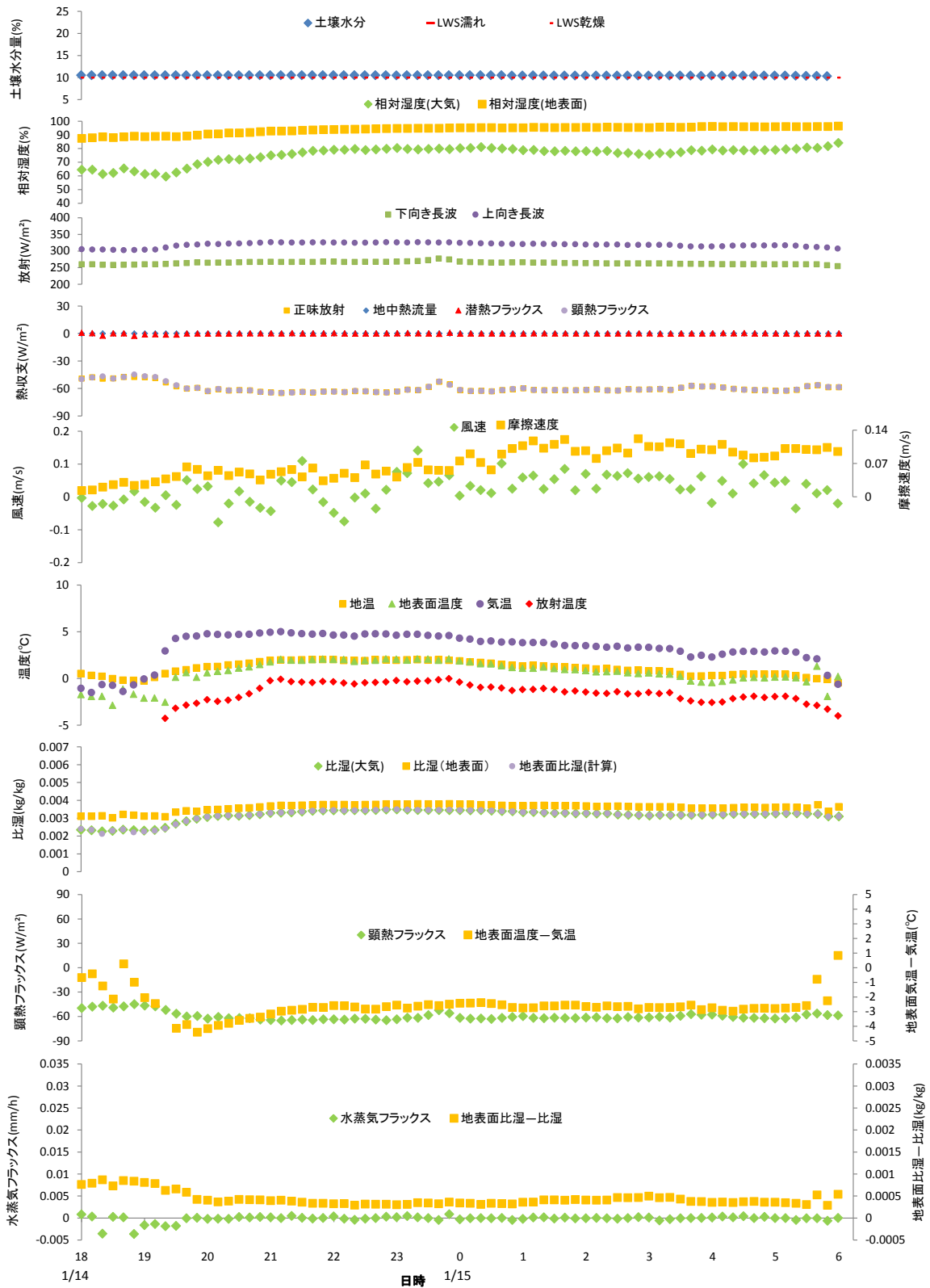


図 61 2016 年 1/14~1/15 における水蒸気フラックスと各気象要素の時系列変化

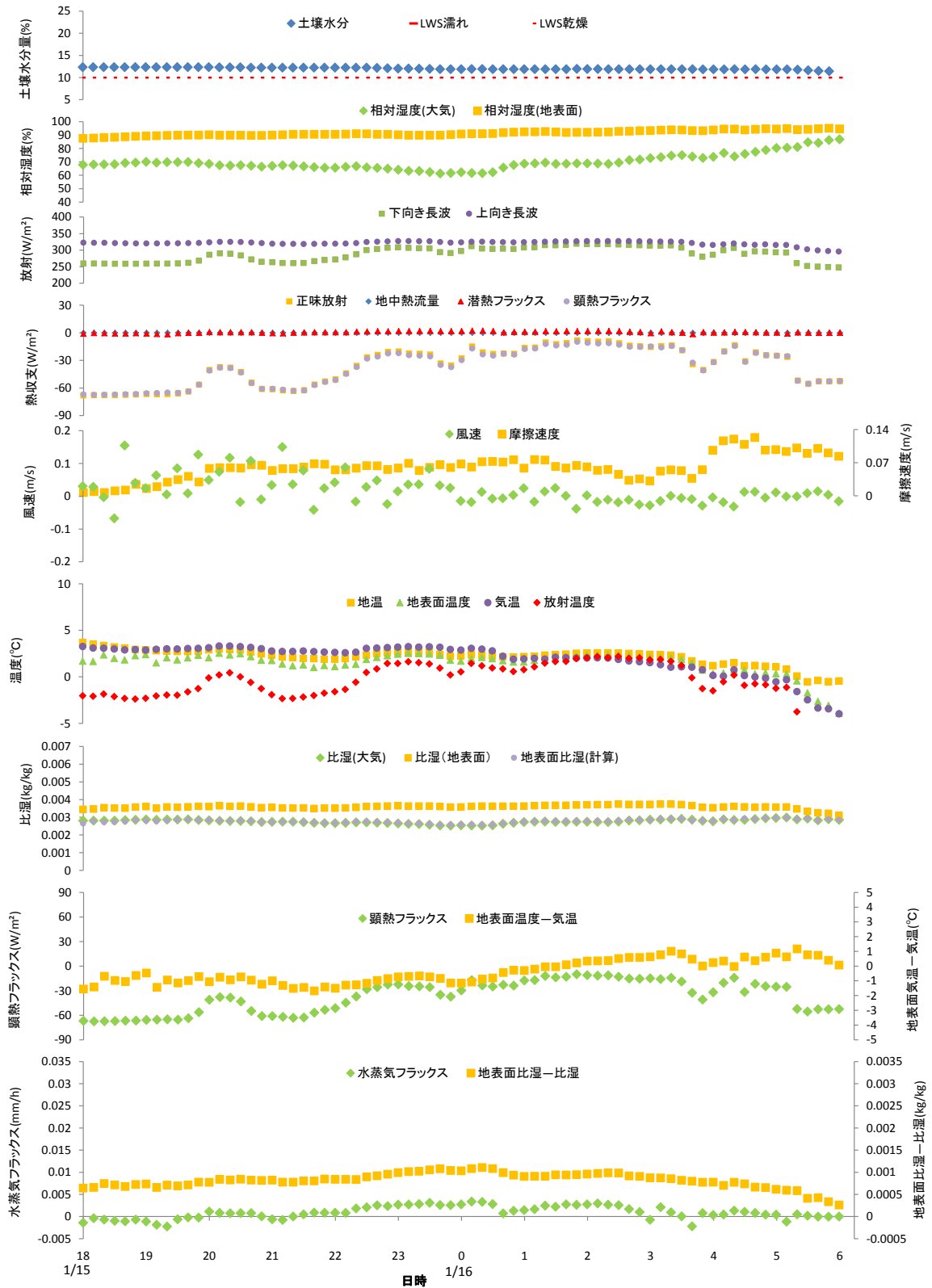


図 62 2016 年 1/15~1/16 における水蒸気フラックスと各気象要素の時系列変化

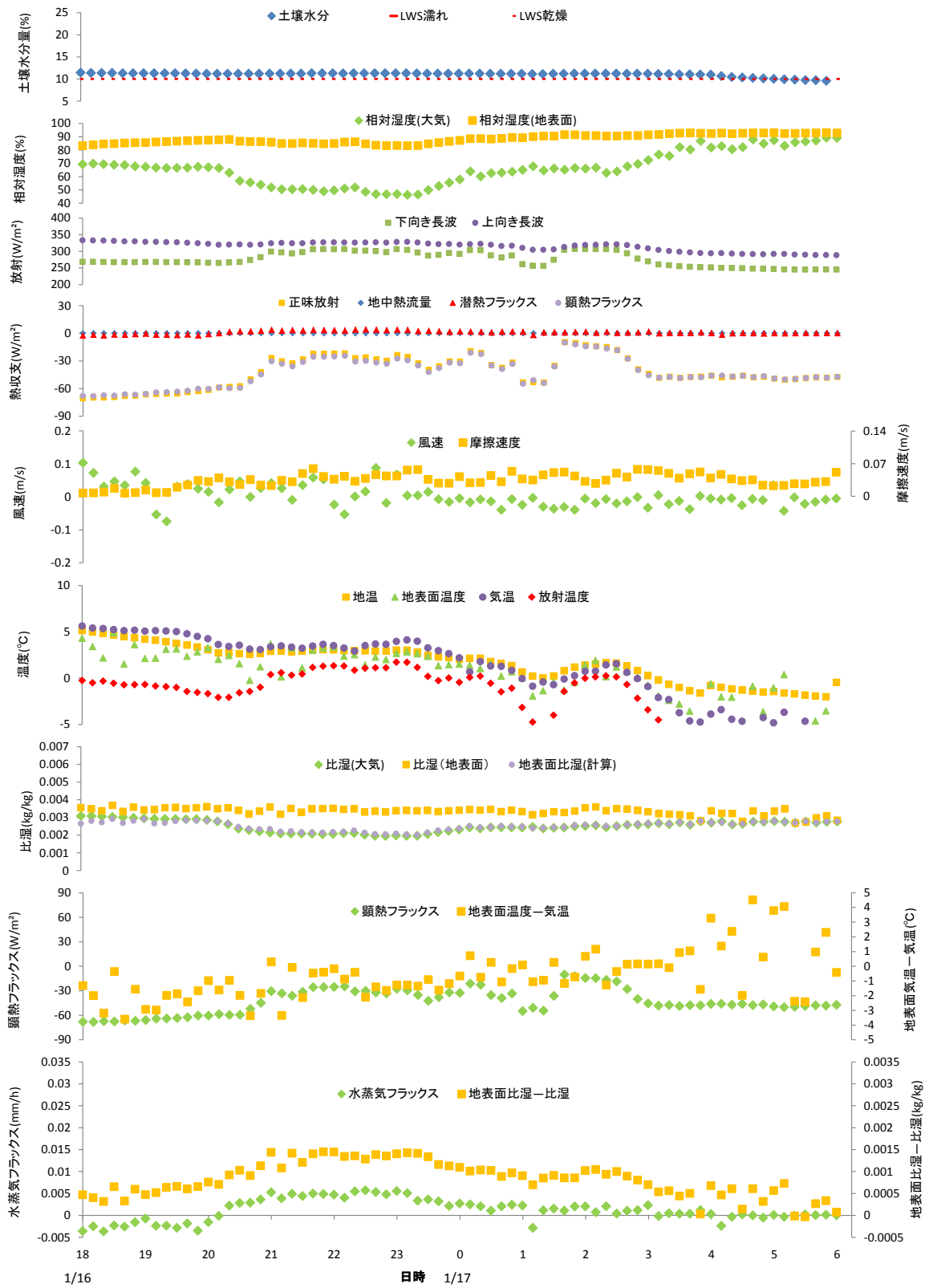


図 63 2016 年 1/16~1/17 における水蒸気フラックスと各気象要素の時系列変化

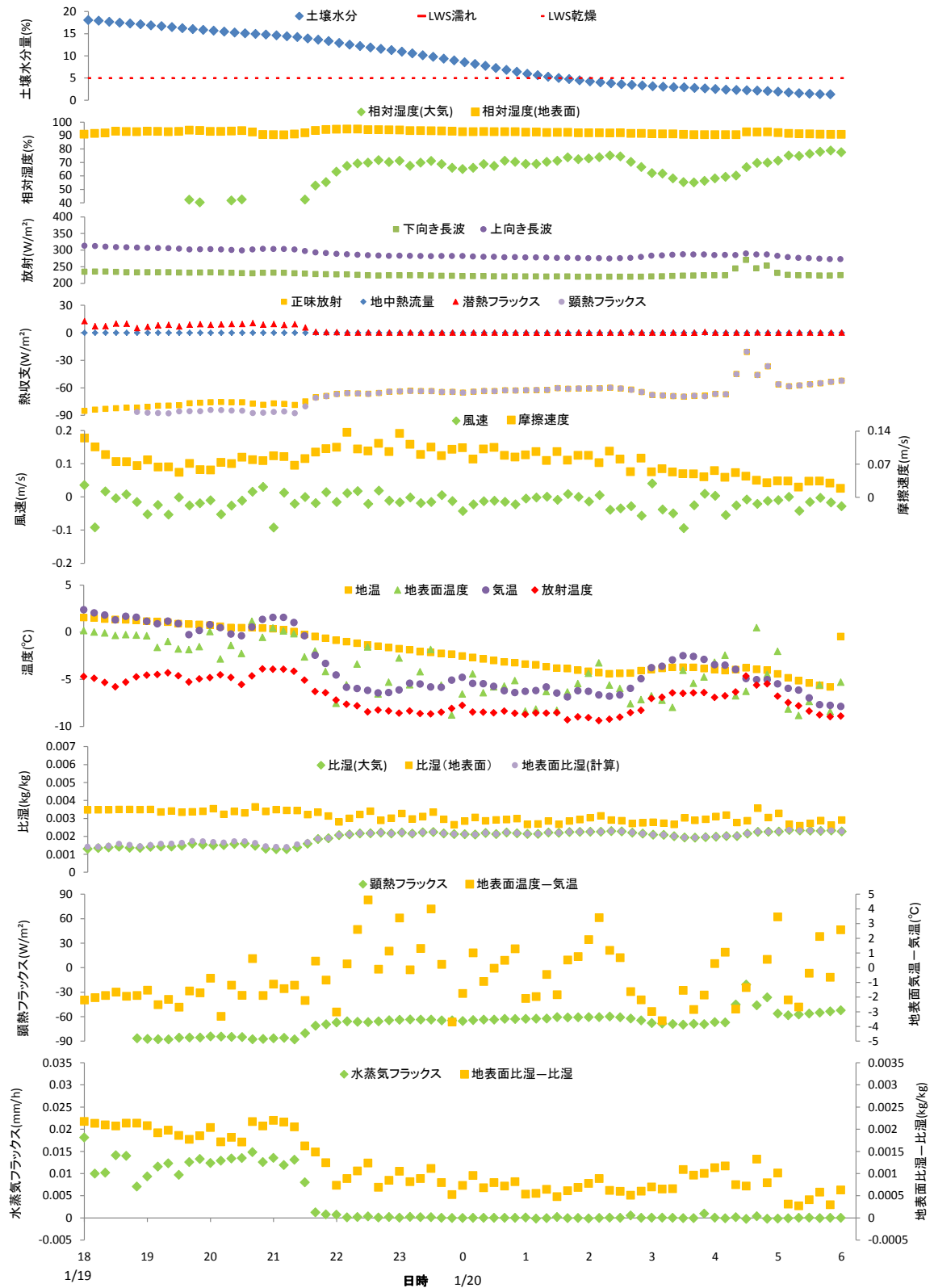


図 64 2016 年 1/19~1/20 における水蒸気フラックスと各気象要素の時系列変化

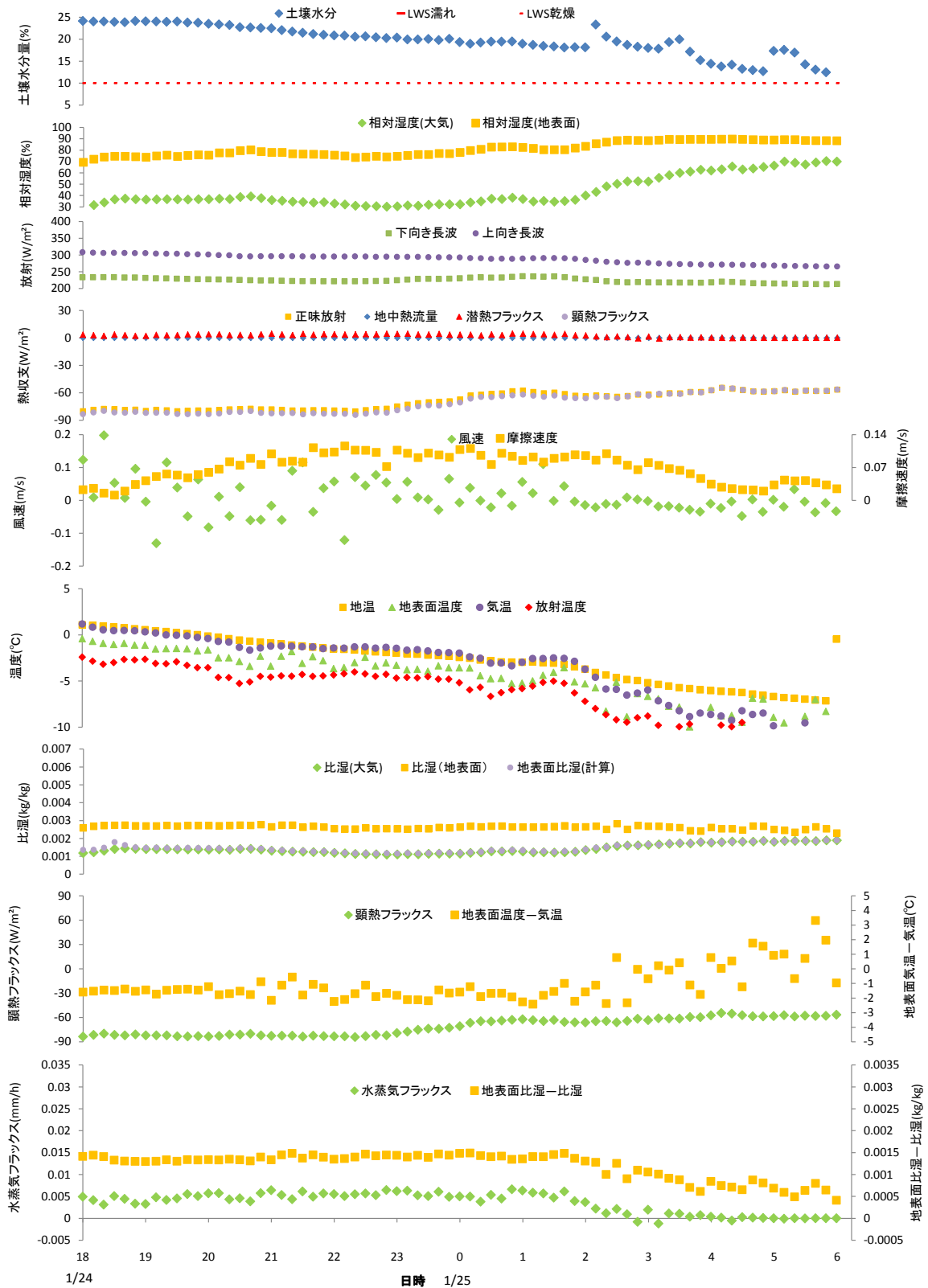


図 65 2016 年 1/24~1/25 における水蒸気フラックスと各気象要素の時系列変化

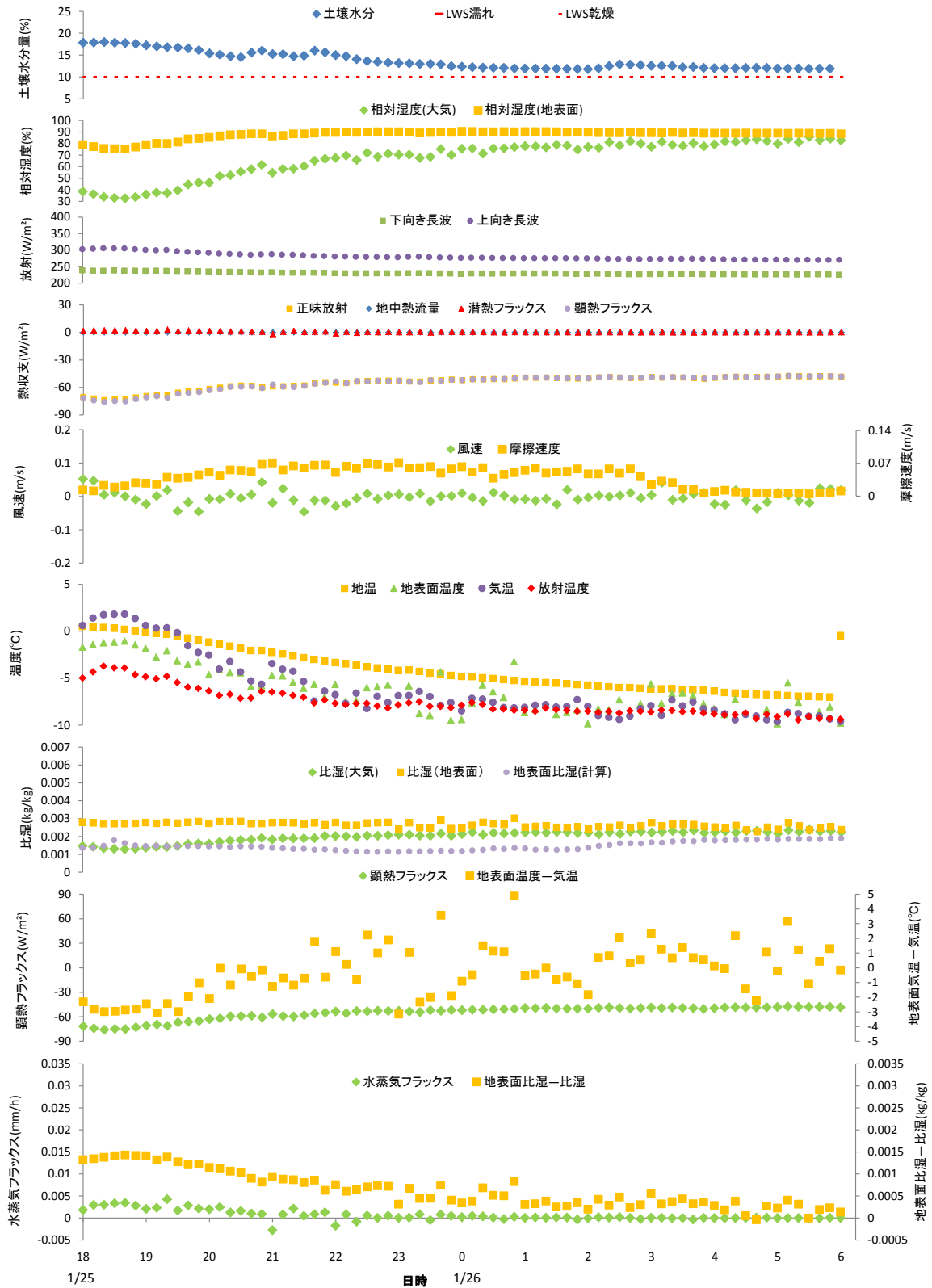


図 66 2016 年 1/25~1/26 における水蒸気フラックスと各気象要素の時系列変化

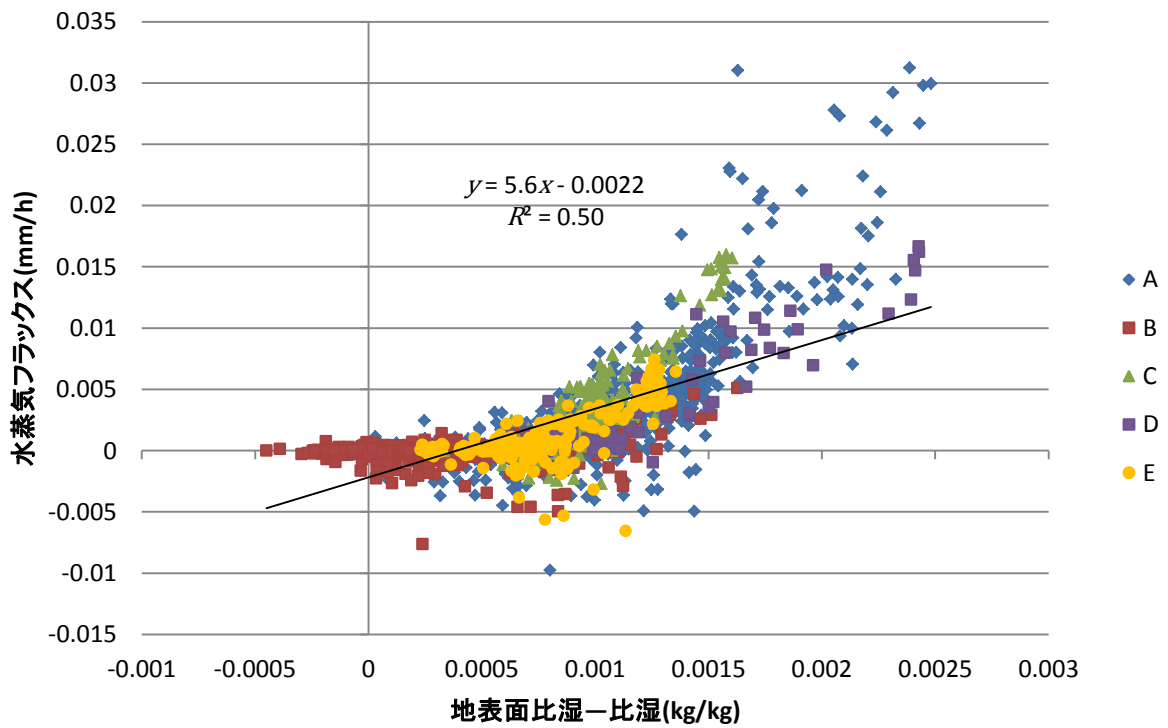


図 67 パターンによって分類された夜間水蒸気フラックスと地表面比湿-比湿の相関図(10分値)

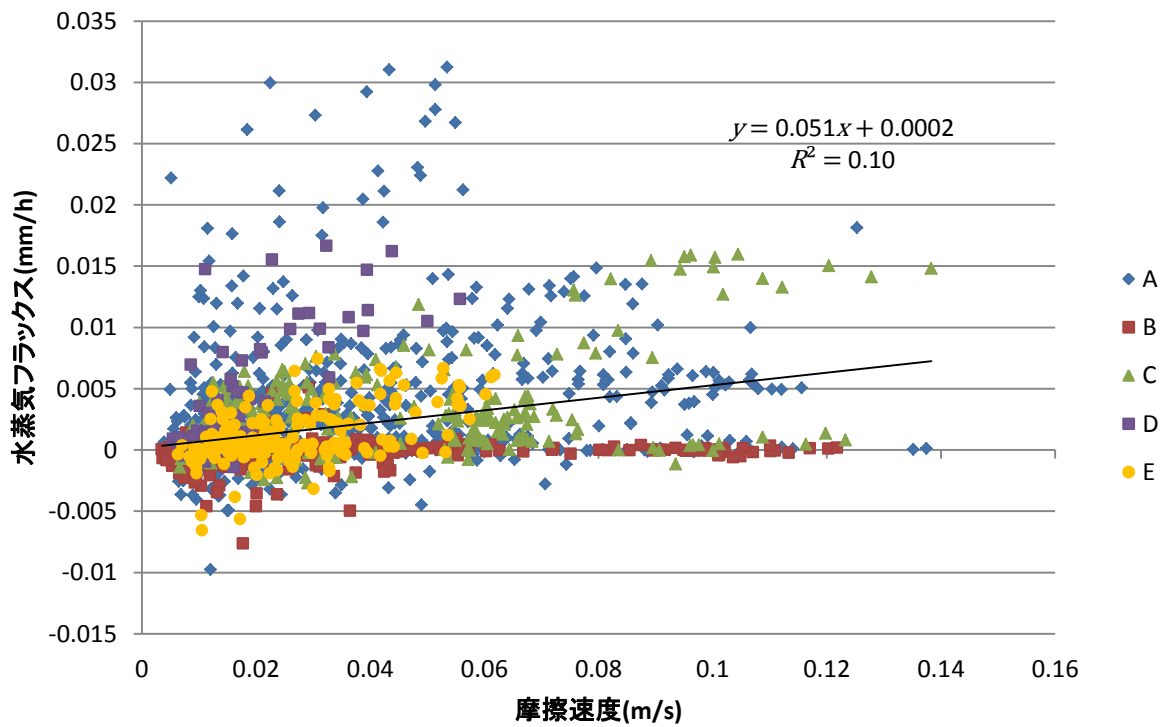


図 68 パターンによって分類された夜間水蒸気フラックスと摩擦速度の相関図(10分値)

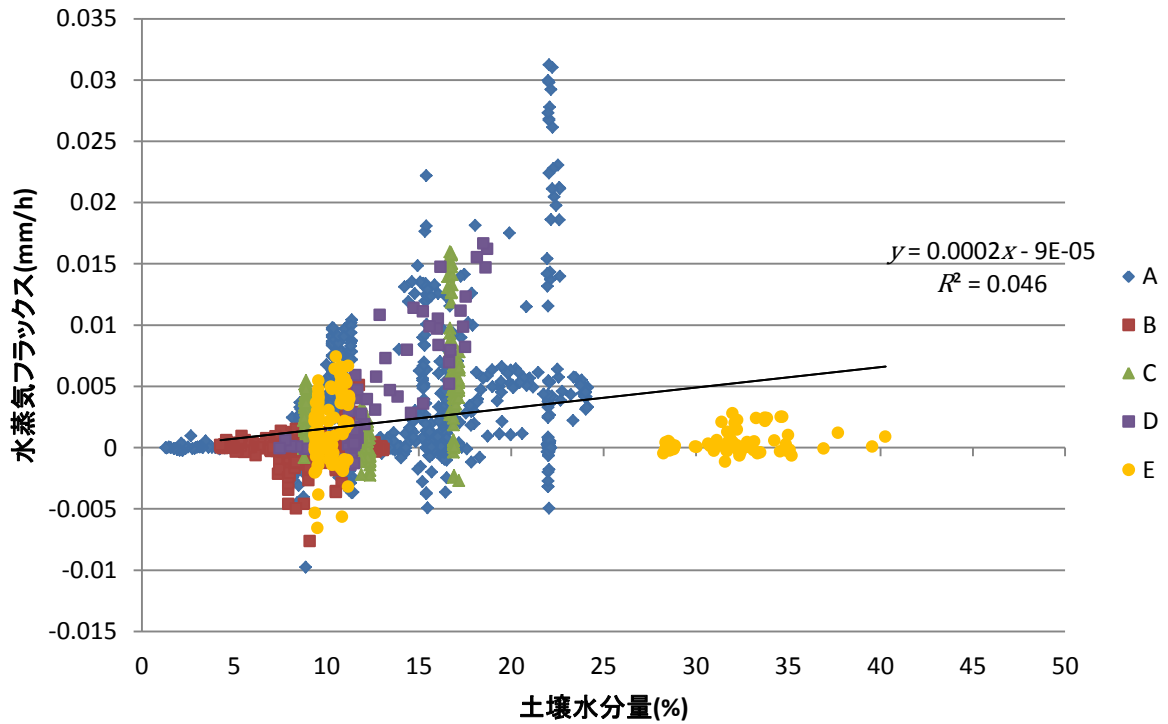


図 69 パターンによって分類された夜間水蒸気フラックスと土壌水分の相関図(10 分値)

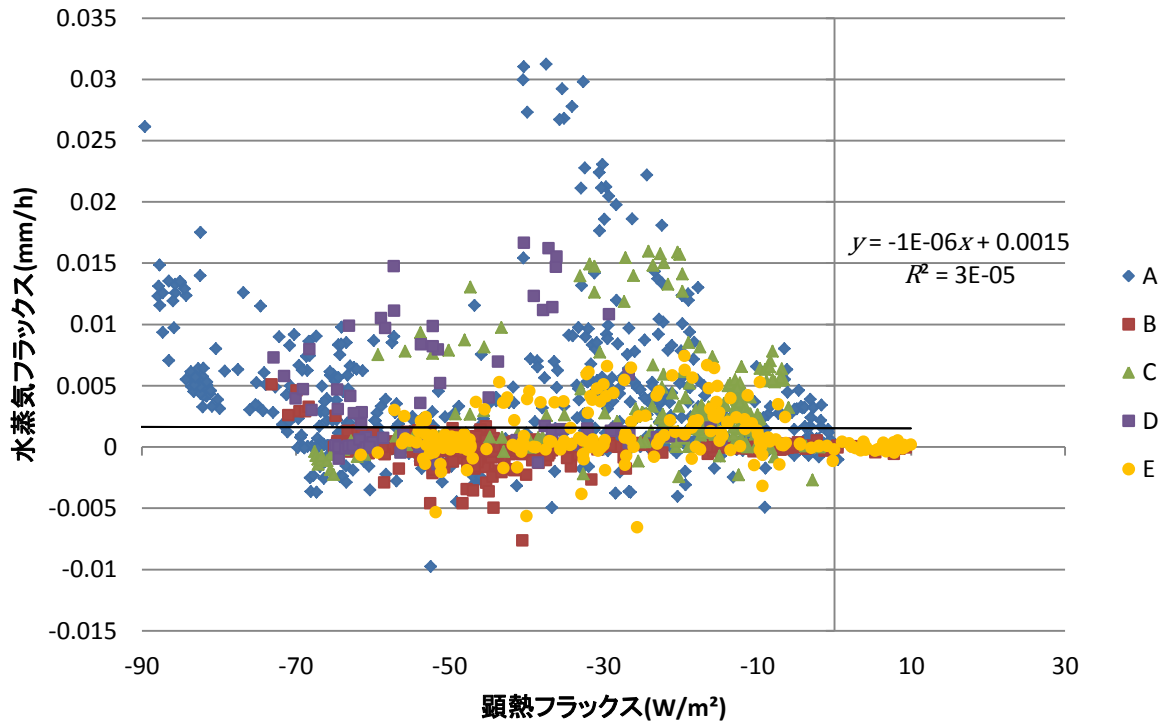


図 70 パターンによって分類された夜間水蒸気フラックスと顕熱フラックスの相関図(10 分値)

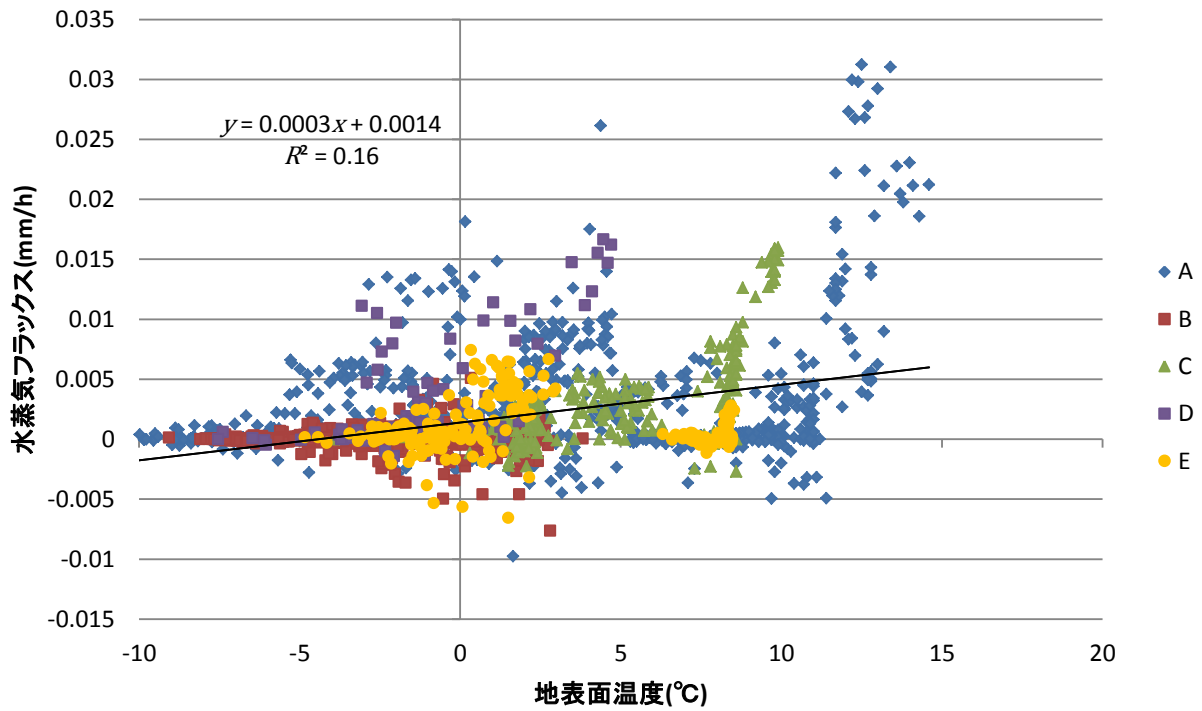


図 71 パターンによって分類された夜間水蒸気フラックスと地表面温度の相関図(10 分値)

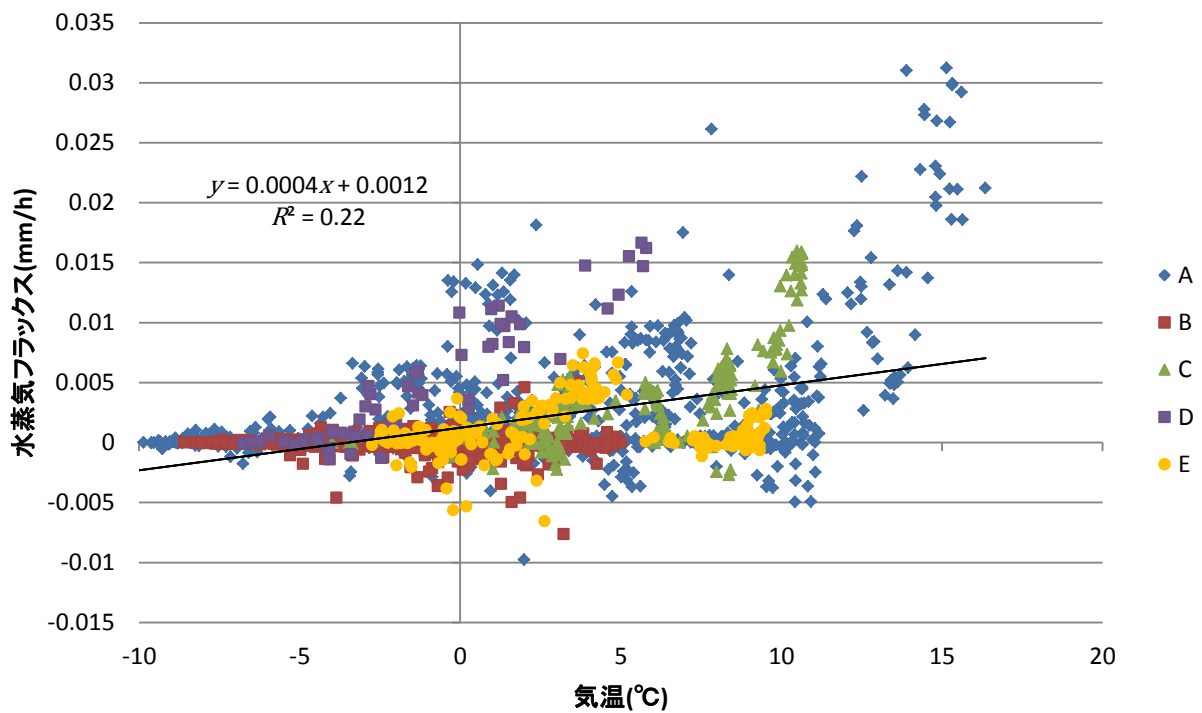


図 72 パターンによって分類された夜間水蒸気フラックスと気温の相関図(10 分値)

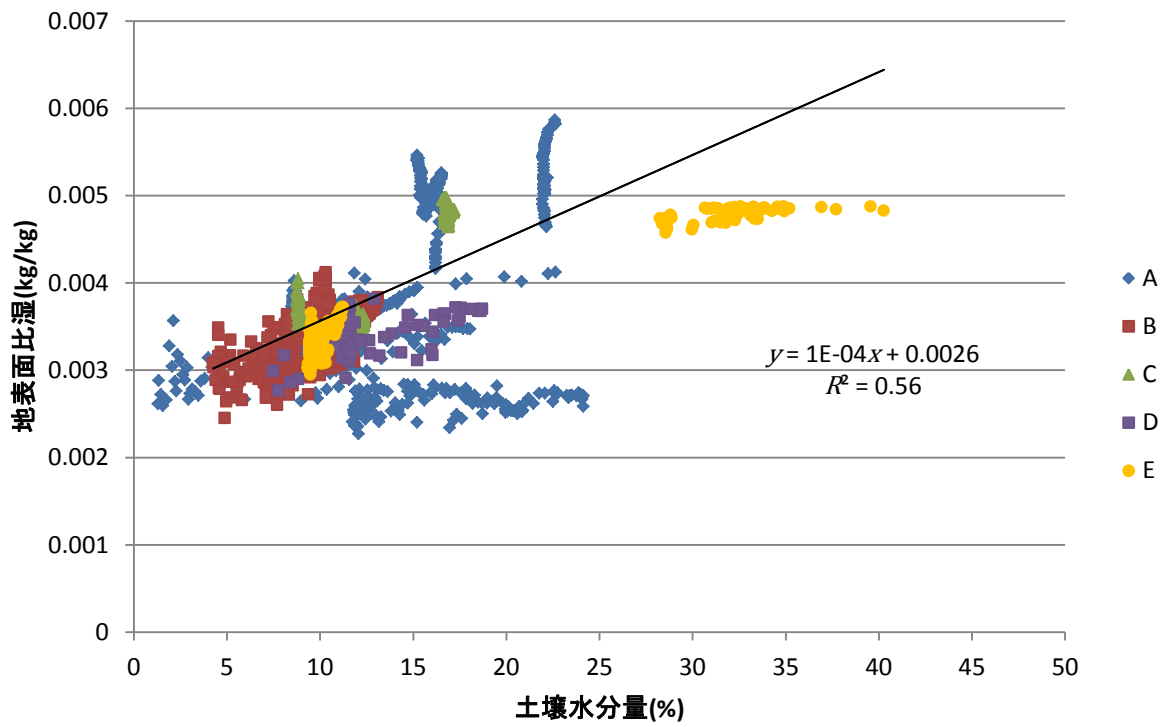


図 73 パターンによって分類された土壌水分量と地表面比湿の相関図(10 分値)

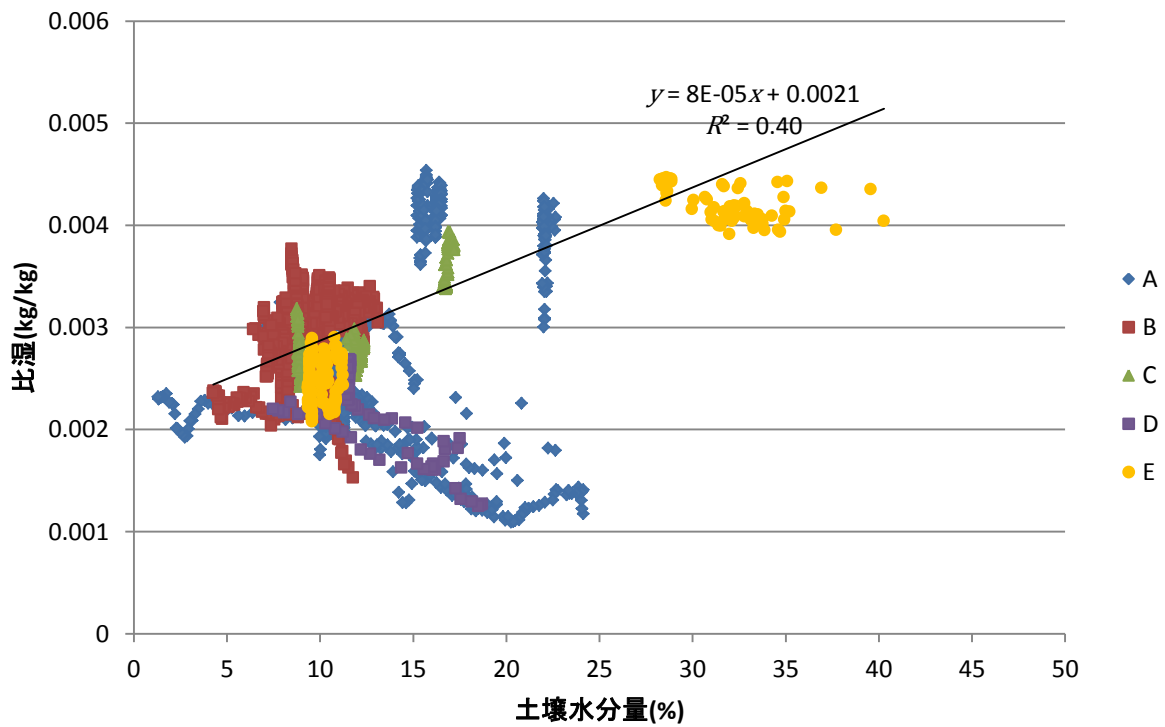


図 74 パターンによって分類された土壌水分量と比湿の相関図(10 分値)

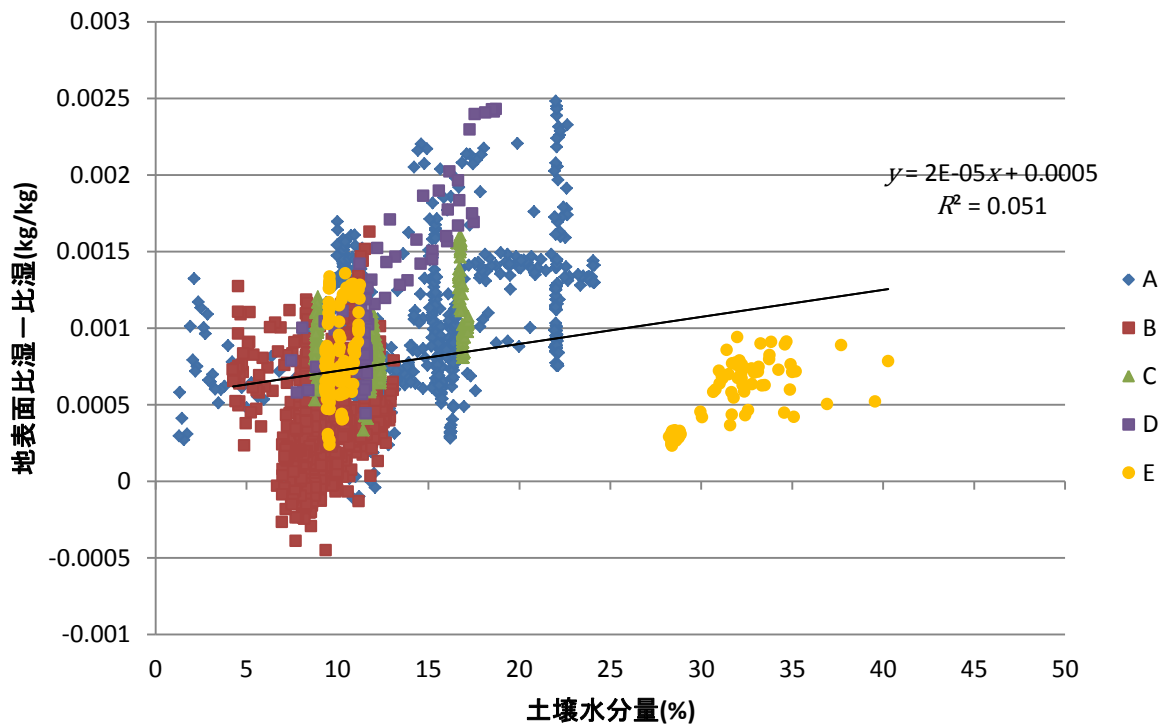


図 75 パターンによって分類された土壌水分量と地表面比湿ー比湿の相関図(10 分値)

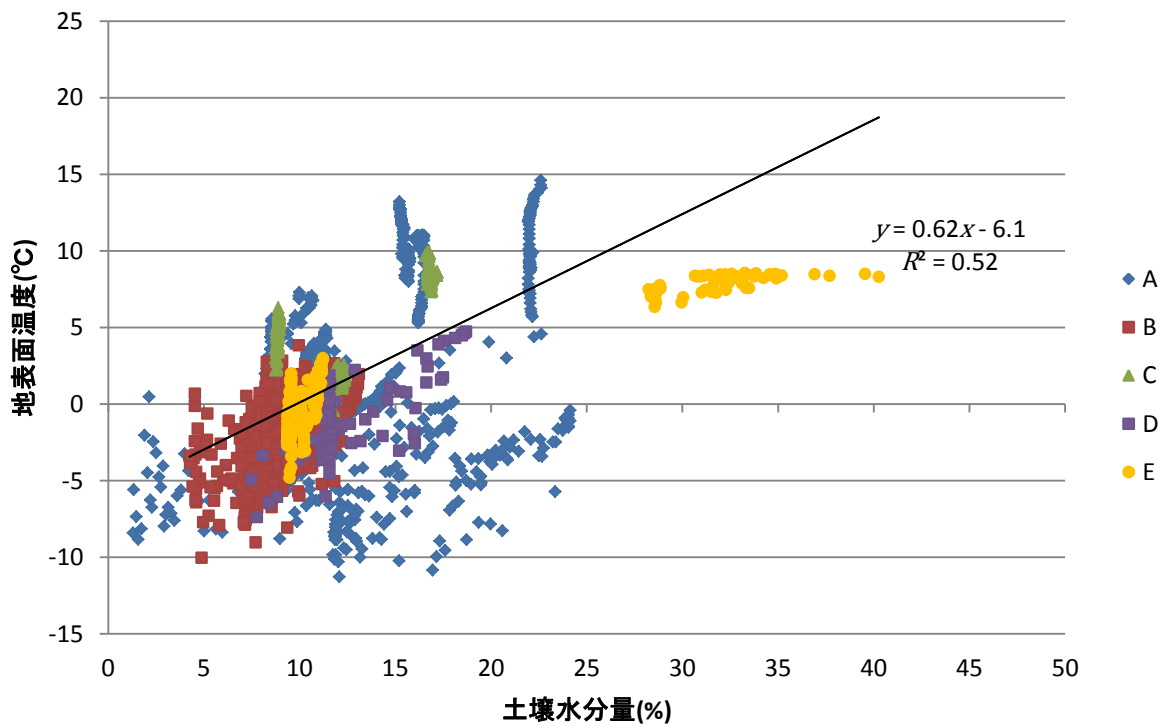


図 76 パターンによって分類された土壌水分量と地表面比湿の相関図(10 分値)

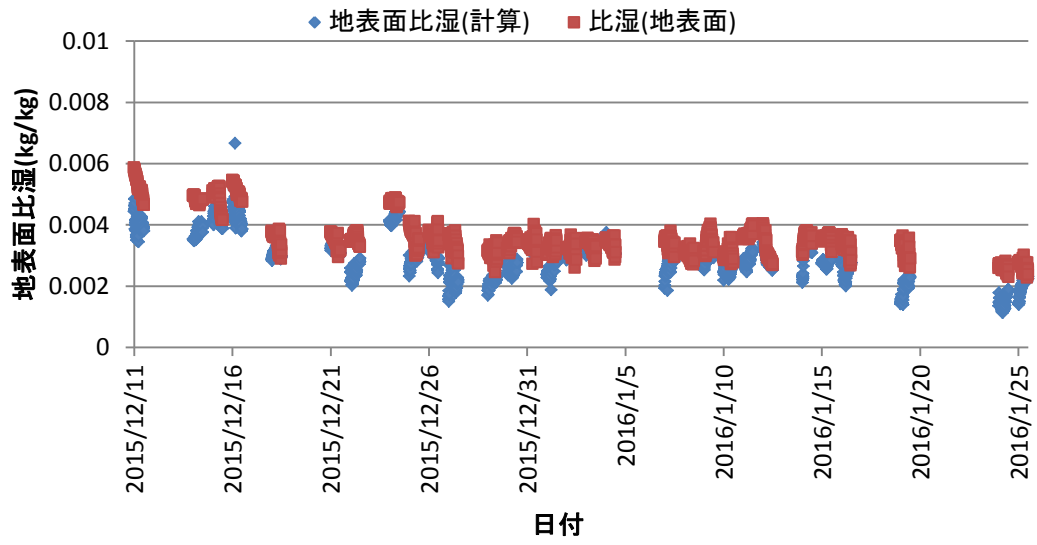


図 77 計算された地表面比湿と観測された地表面比湿の時間変化

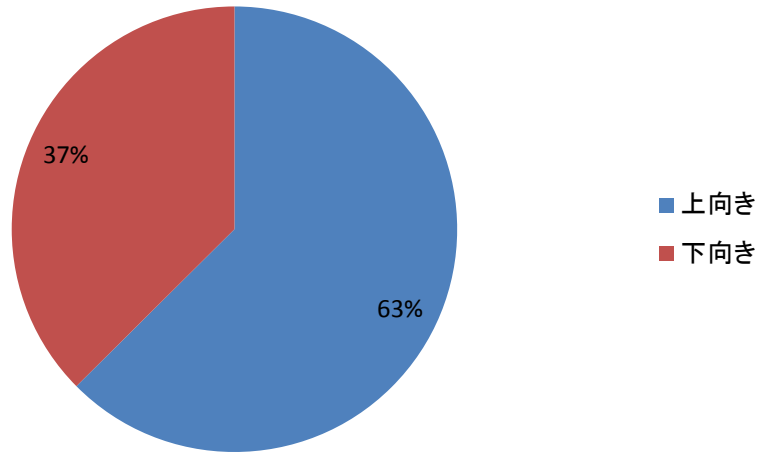


図 78 地表面比湿(計算値)-比湿から求めた
2015年12/11~2016年1/25の夜間水蒸気フラックスの方向の割合

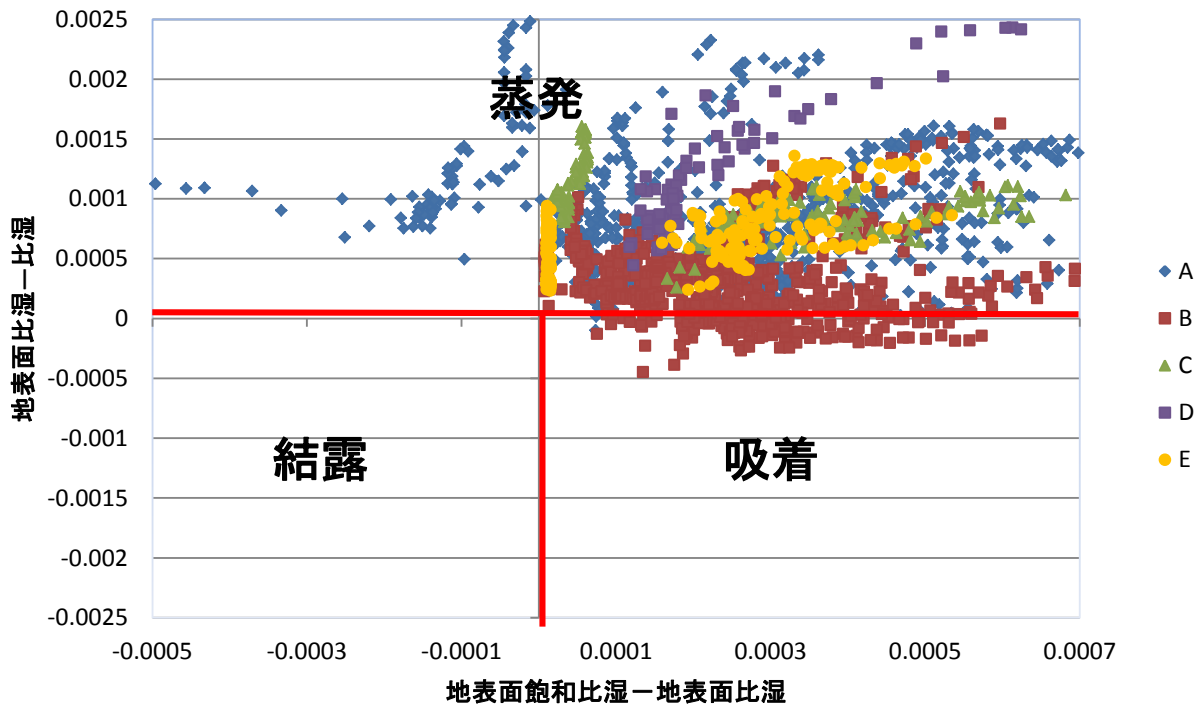


図 79 パターンによって分類された水蒸気フラックスの分類図 (10 分値)

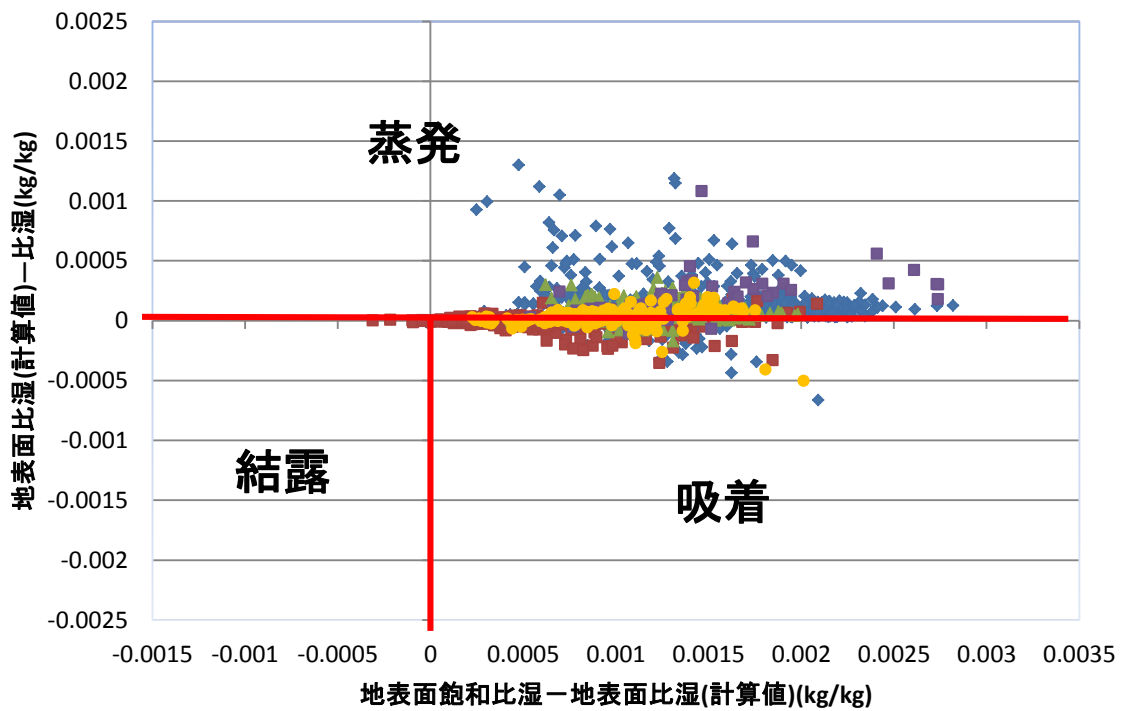


図 80 計算された地表面比湿を用いたパターンによって分類された水蒸気フラックスの分類図 (10 分値)

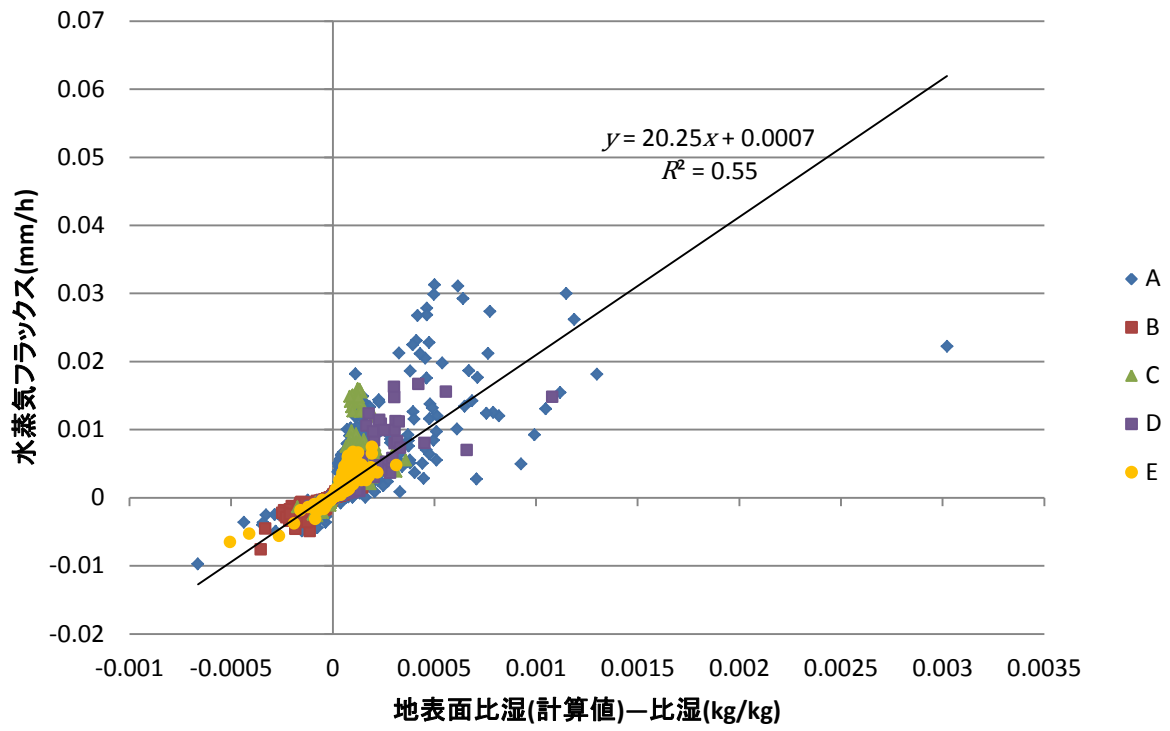


図 81 パターンによって分類された
夜間水蒸気フラックスと地表面比湿(計算値)-比湿の相関図(10 分値)

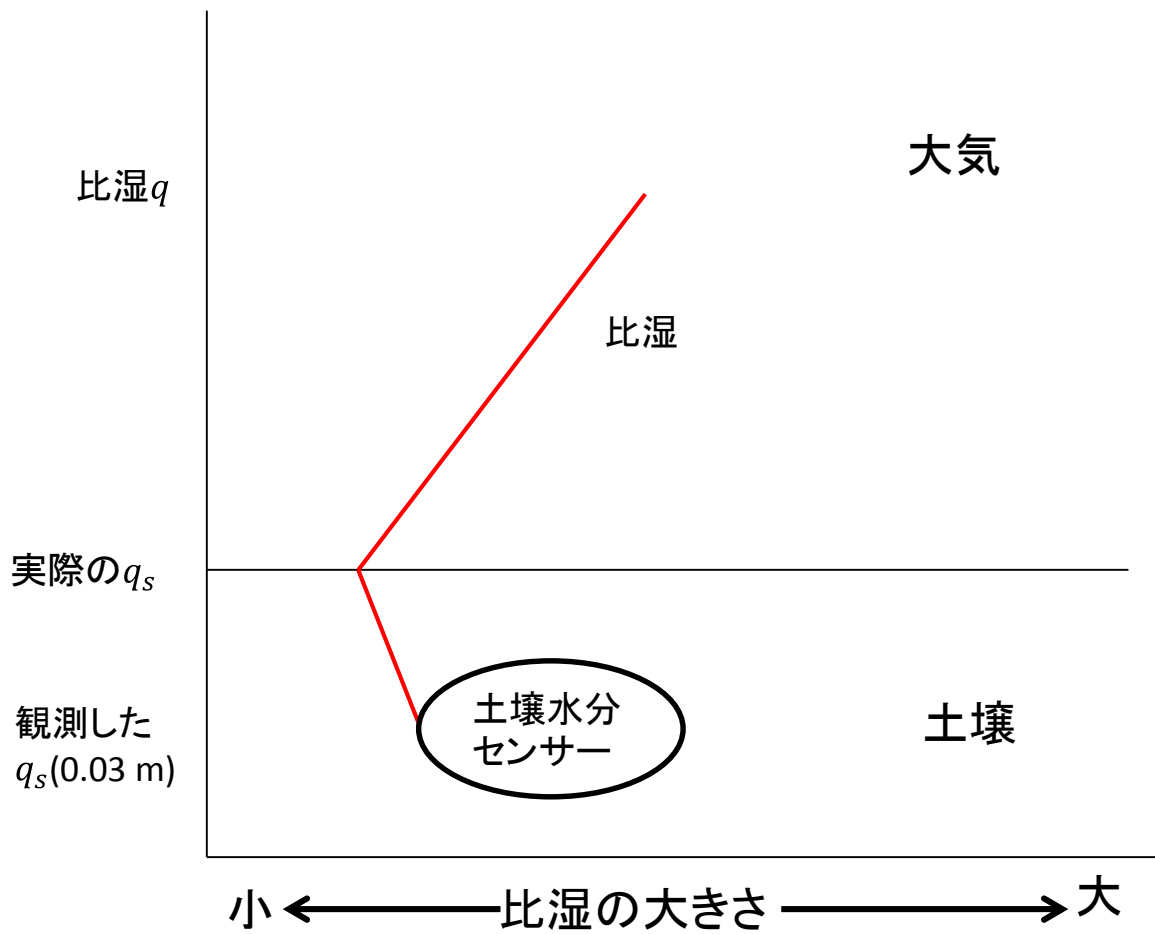


図 82 土壌-大気間の比湿のプロファイルの模式図

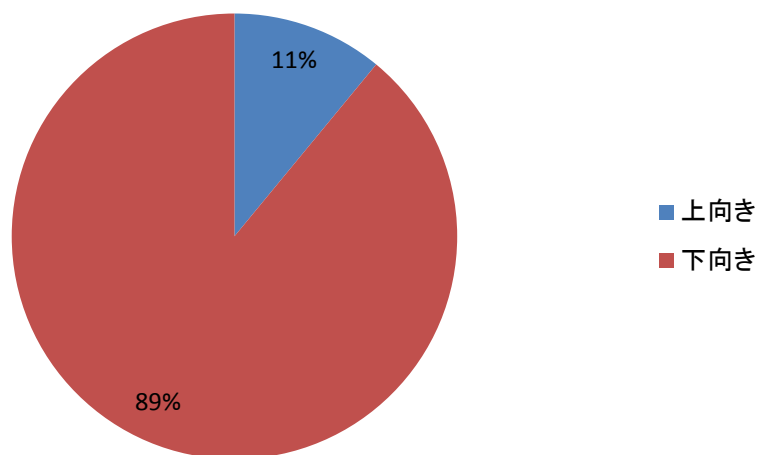


図 83 1993 年 1 月の夜間水蒸気フラックスの方向の割合

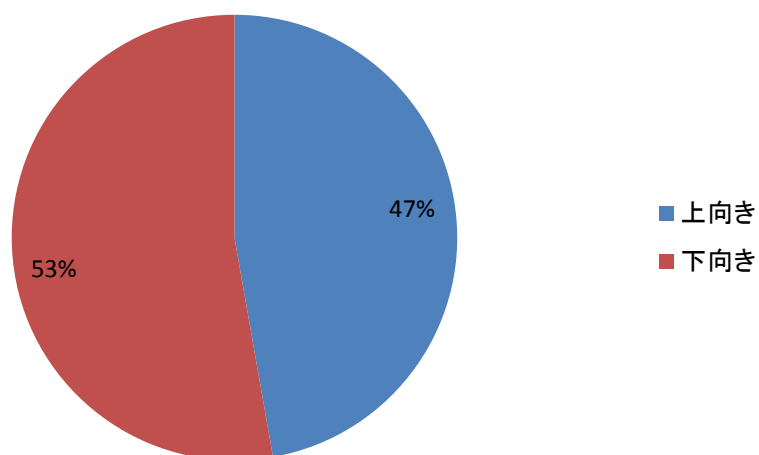


図 84 1993 年 2 月の夜間水蒸気フラックスの方向の割合

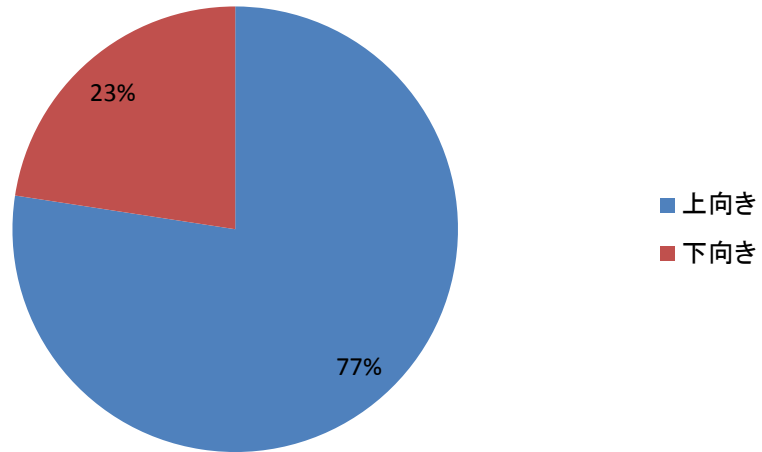


図 85 1993 年 3 月の夜間水蒸気フラックスの方向の割合

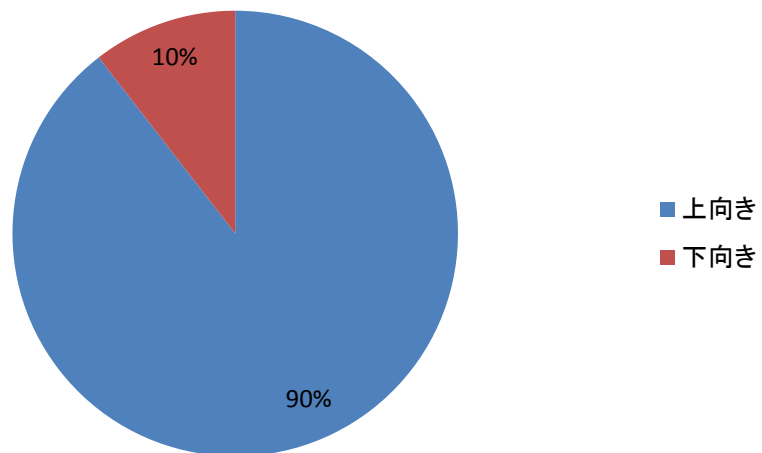


図 86 1993 年 4 月の夜間水蒸気フラックスの方向の割合

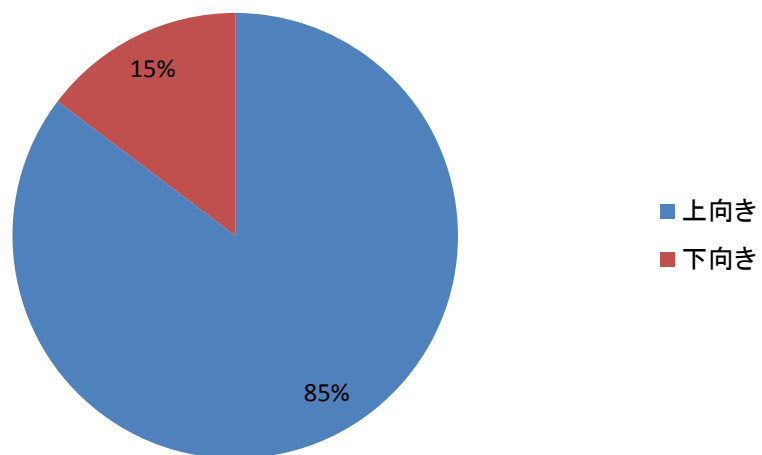


図 87 1993 年 5 月の夜間水蒸気フラックスの方向の割合

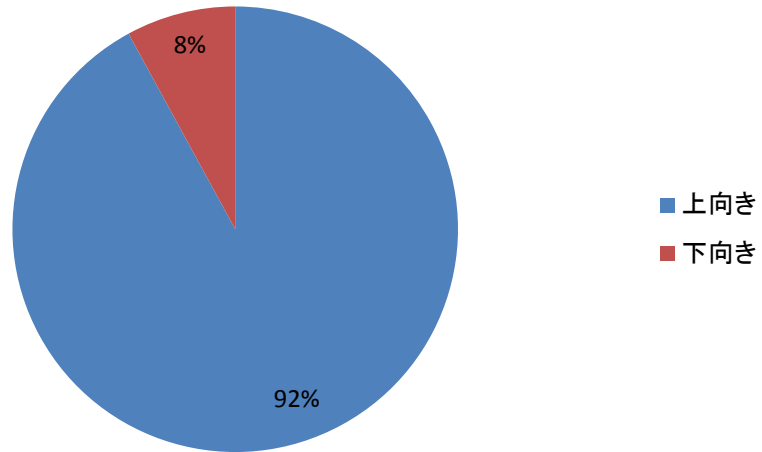


図 88 1993 年 6 月の夜間水蒸気フラックスの方向の割合

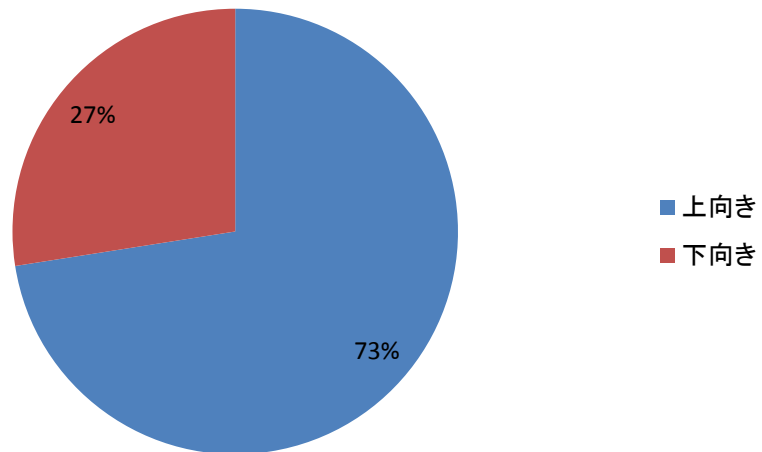


図 89 1993 年 7 月の夜間水蒸気フラックスの方向の割合

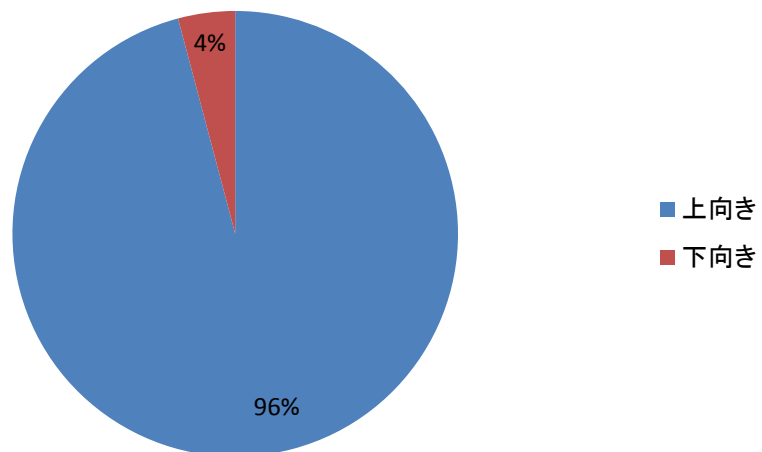


図 90 1993 年 8 月の夜間水蒸気フラックスの方向の割合

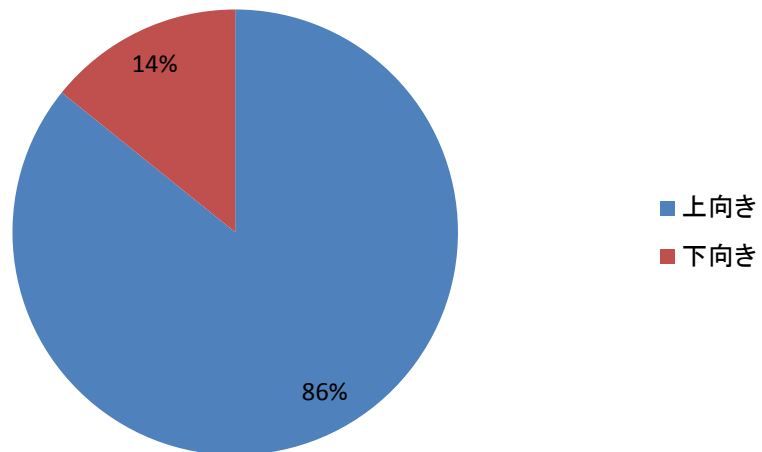


図 91 1993 年 9 月の夜間水蒸気フラックスの方向の割合

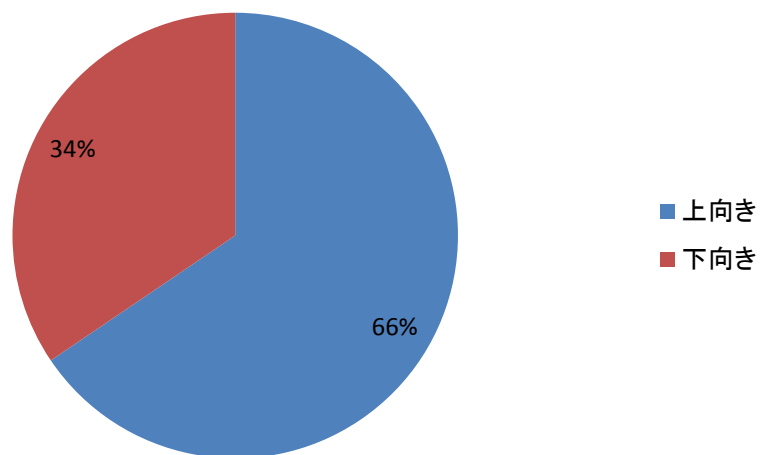


図 92 1993 年 10 月の夜間水蒸気フラックスの方向の割合

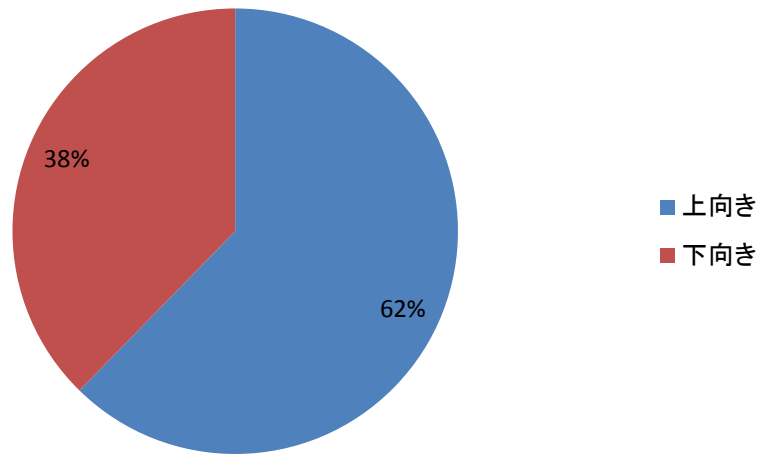


図 93 1993 年 11 月の夜間水蒸気フラックスの方向の割合

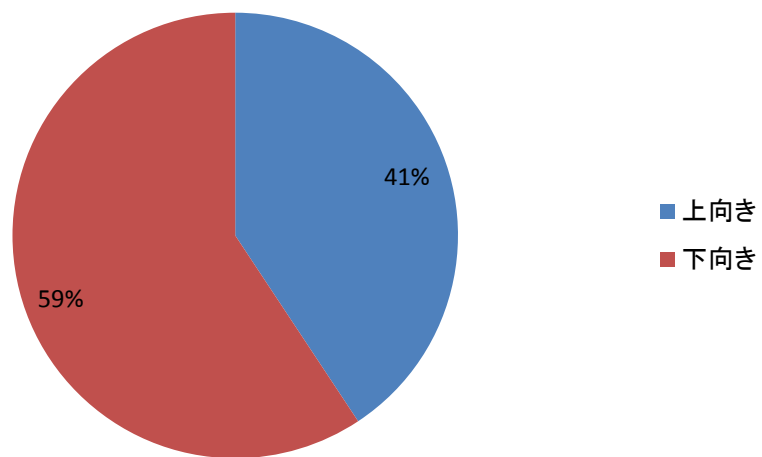


図 94 1993 年 12 月の夜間水蒸気フラックスの方向の割合