

平成 28 年度 卒業論文

リモートセンシングによる水面温度を用いた
ナイル川の蒸発量の推定

筑波大学生命環境学群地球学類

地球環境学主専攻

201310765

黒江 彩萌

2017年1月

目次

要旨	iii
Abstract.....	iv
表目次	v
図目次	vi
第1章 序論	1
1.1 研究背景	1
1.2 研究目的	1
第2章 研究方法	2
2.1 研究対象地域	2
2.2 データ	2
2.2.1 周辺気象観測所データ	2
2.2.2 衛星データ	2
2.3 蒸発量算出方法	4
2.3.1 バルク法	4
2.3.2 バルク輸送係数	5
2.3.3 気象データの空間内挿とラスタ演算	5
2.4 ナイル川部分の抽出	6
第3章 結果と考察	7
3.1 河川横断面に沿った水面温度の分布	7
3.1.1 河川横断面に沿った水面温度の水平分布	7
3.1.2 河川横断面に沿った水面温度の水平分布の地点変化	7
3.1.3 河川横断面に沿った水面温度の時間変化	7
3.1.4 河川横断面に沿った水面温度の季節変化	8
3.1.5 河川横断面の水面温度分布の要因	8
3.2 河川横断面に沿ったバルク係数の分布	8
3.2.1 バルク係数の空間断面分布	8
3.3 気象データの空間分布	8
3.3.1 河川横断面に沿った気象データの水平分布	8
3.3.2 河川横断面に沿った気象データの水平分布の地点変化	8
3.3.3 河川横断面に沿った気象データの時間変化	9
3.3.4 河川横断面に沿った気象データの季節変化	9
3.3.5 エジプト国内の気象データの空間分布	9
3.3.6 上流地点, 中流地点, 下流地点の気象データの月平均の変化	9
3.4 河川蒸発の空間分布	10
3.4.1 河川横断面に沿った蒸発の水平分布	10
3.4.2 河川横断面に沿った蒸発の水平分布の地点変化	10
3.4.3 河川横断面に沿った蒸発の水平分布の時間変化	10
3.4.4 河川横断面に沿った蒸発の水平分布の季節変化	10

3.4.5 河川横断面に沿った蒸発の水平分布の要因.....	10
第4章 まとめ.....	11
4.1 結論	11
4.2 今後の課題	11
謝辞.....	11
参考文献.....	12

リモートセンシングによる水面温度を用いた ナイル川の蒸発量の推定

黒江彩萌

要旨

ナイル川は世界最長の河川であり、エジプト国内の水資源供給源の 96%を占めることから、ナイル川はエジプトにおいて重要な役割を果たしている。特にアスワンハイダムからナイルデルタ入口までの上ナイルでの水収支上の自然的な損失を把握することが水資源にとって重要である。水収支における自然的な損失として地下水流出や蒸発が挙げられるが、蒸発量は十分な研究が行われていない。

本研究では衛星画像から水面温度分布を算出し、気象データからその空間分布を算出し、バルク法を適用してナイル川の蒸発量分布の推定を行った。また、異なる衛星飛来時刻の解析から、水面温度や蒸発量の昼夜の違い、季節変化、地点変化を解明することを目的とした。

衛星画像は ASTER(地表面分解 90 m)の熱赤外画像、Landsat-8TRIS(地表面分解能 30 m)の画像を使用した。エジプト国内で Egyptian Meteorological Authority が測定している気温、露点温度、風速、風向、気圧を解析に用いた。解析にあたり、気象データにクリギング法を適用することで空間内挿し、衛星画像から得られる地表面温度と同サイズのグリッドデータに変換し、グリッドごとの各データをバルク式に入力して蒸発量を算出した。

衛星データから算出された水面温度は、河川横断面においては沿岸部が高く、河川中央部が低い傾向が見られ、蒸発量推定で重要な気象要因としての水面温度分布の影響が大きいことが示唆された。河川横断面の水面温度は昼夜差や季節差が見られた。気象データは河川横断面に沿った水平分布では一定値とほぼ同じ状態であった。気象データの中で蒸発の量をコントロールするものは風速である。蒸発量は、昼夜にかかわらず夏季に最大、冬季に最小値を示し、季節変化が見られた。蒸発量に地域差異は見られ、Aswan, Cairo, Asyut の順に蒸発量が大きくなっていき、先行研究の蒸発量が Aswan, Asyut, Cairo の順に大きくなる傾向から外れた結果となった。先行研究の結果と異なる要因の1つに、風速が考えられる。今後の展開として風速を中心とする気象データをどのように得るか、計算するかが重要となるだろう。

Key words: ナイル川, 蒸発量, 接地気象学, バルク法, 衛星データ, 空間内挿

The estimation of evaporation from the Nile River through remote sensing of water surface temperature

Ayame KUROE

Abstract

The Nile River provides 96% of water resources in Egypt, and is the longest river over the world. It is therefore important to make clear the losses from the river water, especially from the Aswan High Dam to the Nile Delta. Possible sources of losses are groundwater, evaporation and so on. However, there has been no studies on the losses especially by evaporation from the Nile River in Egypt. The purpose of this study is to make clear the diurnal, seasonal, and regional changes of evaporation from the Nile River.

This study estimates evaporation with remote sensing and meteorological station data. Remote sensing images and meteorological station data have shown spatial variation of surface temperatures and the meteorological data show a meteorological spatial variation. The evaporation is estimated by bulk method. Remote sensing data are thermal images of ASTER whose horizontal resolution is 90 meter and the near infrared images of Landsat-8 TRIS whose resolution is 30 meter. Meteorological Data from the Egyptian Meteorological Authority (temperature, dew point, wind speed, wind direction, pressure) were used to estimate spatial distribution of them by the method of Kriging.

Water surface temperatures across the river, along the river coast was found higher than those at the center of the river. The distribution of water surface temperature mainly affects evaporation distribution. Meteorological data, on the other hand, do not affect the evaporation of distribution too much. The difference of evaporation between seasons were also clearly demonstrated. The amount of evaporation is controlled mainly by wind speed. The maximum evaporation is observed in summer and the minimum in winter in both day and night. Spatial distribution of evaporation is not same as previous work, which reported is lower evaporation in the Aswan and more in Asyut and Cairo in this order. This work, on the other hand, shows different order, i.e., lower in Aswan, followed by Cairo and Asyut. One of the reasons of difference is wind speed. In future work, it is important to consider how to get or accurate wind speed and other meteorological data for bulk method.

Key words: Nile river, evaporation, surface layer meteorology, bulk method, satellite data, interpretation

表目次

表 1	衛星画像毎のナイル川の水面温度の平均値	13
表 2	気象観測所による観測項目	14
表 3	衛星とセンサーおよびプロダクトの概要	14
表 4	衛星画像の水面温度のヒストグラムのモーメント	14
表 5	衛星画像毎のナイル川の蒸発量の平均値	15

図目次

図 1	エジプトナイル川流域概要.....	16
図 2	研究手順.....	17
図 3	気象観測所概要.....	18
図 4	夏季・日中・上流地点での蒸発空間分布.....	19
図 5	夏季・日中・中流地点での蒸発空間分布.....	19
図 6	夏季・日中・下流地点での蒸発空間分布.....	20
図 7	上流地点・春季・日中における蒸発量および気象データ.....	21
図 8	上流地点・夏季・日中における蒸発量および気象データ.....	22
図 9	上流地点・秋季・日中における蒸発量および気象データ.....	23
図 10	上流地点・冬季・日中における蒸発量および気象データ.....	24
図 11	上流地点・春季・夜間における蒸発量および気象データ.....	25
図 12	上流地点・夏季・夜間における蒸発量および気象データ.....	26
図 13	上流地点・秋季・夜間における蒸発量および気象データ.....	27
図 14	上流地点・冬季・夜間における蒸発量および気象データ.....	28
図 15	中流地点・春季・日中における蒸発量および気象データ.....	29
図 16	中流地点・夏季・日中における蒸発量および気象データ.....	30
図 17	中流地点・秋季・日中における蒸発量および気象データ.....	31
図 18	中流地点・冬季・日中における蒸発量および気象データ.....	32
図 19	中流地点・春季・夜間における蒸発量および気象データ.....	33
図 20	中流地点・夏季・夜間における蒸発量および気象データ.....	34
図 21	中流地点・秋季・夜間における蒸発量および気象データ.....	35
図 22	中流地点・冬季・日中における蒸発量および気象データ.....	36
図 23	下流地点・春季・日中における蒸発量および気象データ.....	37
図 24	下流地点・夏季・日中における蒸発量および気象データ.....	38
図 25	下流地点・秋季・日中における蒸発量および気象データ.....	39
図 26	下流地点・冬季・日中における蒸発量および気象データ.....	40
図 27	下流地点・春季・夜間における蒸発量および気象データ.....	41
図 28	下流地点・夏季・夜間における蒸発量および気象データ.....	42
図 29	下流地点・秋季・夜間における蒸発量および気象データ.....	43
図 30	下流地点・冬季・夜間における蒸発量および気象データ.....	44
図 31	赤星地点(図 1)における夏季・日中の地表面温度分布.....	45
図 32	赤星地点(図 1)における夏季・夜間の地表面温度分布.....	46
図 33	赤星地点(図 1)における冬季・日中の地表面温度分布.....	47
図 34	赤星地点(図 1)における冬季・夜間の地表面温度分布.....	48
図 35	赤星地点(図 1)における夏季・日中の地表面温度のヒストグラム.....	49
図 36	赤星地点(図 1)における夏季・夜間の地表面温度のヒストグラム.....	49
図 37	赤星地点(図 1)における冬季・日中の地表面温度のヒストグラム.....	50
図 38	赤星地点(図 1)における冬季・夜間の地表面温度のヒストグラム.....	50

図 39	上流地点におけるナイル川周辺土地利用.....	51
図 40	エジプト全域における気象データの空間分布 (2006/3/26 10:36).....	52
図 41	エジプト全域における気象データの空間分布 (2014/4/4 22:04).....	53
図 42	エジプト全域における気象データの空間分布 (2014/7/15 10:30).....	54
図 43	エジプト全域における気象データの空間分布 (2015/7/12 22:05).....	55
図 44	エジプト全域における気象データの空間分布 (2001/10/6 10:42).....	56
図 45	エジプト全域における気象データの空間分布 (2013/ 9/24 22:04).....	57
図 46	エジプト全域における気象データの空間分布 (2015/12/16 10:37).....	58
図 47	エジプト全域における気象データの空間分布 (2016/1/4 22:04).....	59
図 48	エジプト全域における気象データの空間分布 (2015/4/27 10:42).....	60
図 49	エジプト全域における気象データの空間分布 (2015/5/9 22:05).....	61
図 50	エジプト全域における気象データの空間分布 (2010/6/16 10:42).....	62
図 51	エジプト全域における気象データの空間分布 (2013/8/7 22:04).....	63
図 52	エジプト全域における気象データの空間分布 (2010/10/6 10:41).....	64
図 53	エジプト全域における気象データの空間分布 (2012/10/7 22:04).....	65
図 54	エジプト全域における気象データの空間分布 (2002/2/2 10:44).....	66
図 55	エジプト全域における気象データの空間分布 (2016/2/5 22:05).....	67
図 56	エジプト全域における気象データの空間分布 (2003/4/1 10:48).....	68
図 57	エジプト全域における気象データの空間分布 (2015/4/30 22:11).....	69
図 58	エジプト全域における気象データの空間分布 (2007/6/15 10:47).....	70
図 59	エジプト全域における気象データの空間分布 (2007/7/22 22:05).....	71
図 60	エジプト全域における気象データの空間分布 (2014/10/1 10:41).....	72
図 61	エジプト全域における気象データの空間分布 (2012/9/21 22:05).....	73
図 62	エジプト全域における気象データの空間分布 (2012/12/30 10:44).....	74
図 63	3 地点における気象データの 2013 年 10 時における月平均の変化.....	75
図 64	3 地点における気象データの 2013 年 22 時における月平均の変化.....	76
図 65	上流地点の河川横断面に沿った水面温度の水平断面分布の季節変化.....	77
図 66	中流地点の河川横断面に沿った水面温度の水平断面分布の季節変化.....	78
図 67	下流地点の河川横断面に沿った水面温度の水平断面分布の季節変化.....	79
図 68	上流地点の河川横断面に沿った蒸発の水平断面分布の季節変化.....	80
図 69	中流地点の河川横断面に沿った蒸発の水平断面分布の季節変化.....	81
図 70	下流地点の河川横断面に沿った蒸発の水平断面分布の季節変化.....	82
図 71	上流, 中流, 下流における現地時刻 10 時に取得した衛星画像での 平均蒸発量の季節変化.....	83
図 72	上流, 中流, 下流における現地時刻 22 時に取得した衛星画像での 平均蒸発量の季節変化.....	83

第1章 序論

1.1 研究背景

ナイル川は世界最長(約6,700 km)の河川であり、流域内の11カ国に共有されている。源流は面積世界第3位(約68,000 km²)のビクトリア湖とタナ湖であり、ケニア、ウガンダ、タンザニアの3カ国に囲まれている(安部, 2012)。ビクトリア湖からサハラ砂漠を通過して地中海に到達する。エジプトはナイル川下流域国にあたり、ナイル川への水資源依存度は高い。エジプト国内の水資源の約96%がナイル川由来である。ナイル川はエジプトの水資源を支える要ともいえ、ナイル川の水収支を把握することは社会的意義がある。

また、NWRP(*National Water Resource Plan*)によるとエジプトの人口の半数以上がナイルデルタで生活をしている(Mahmoud, 2005)。さらに、ナイルデルタでは灌漑農業が盛んにおこなわれている。これよりナイルデルタで利用できる水資源量の推定が重要である。

ナイル川の水収支を把握することでナイルデルタでの水資源量を正確にできる。ナイル川の供給源はアスワンハイダムのあるナセル湖である。隣国スーダンとの協定により、年平均流入量は $55.5 \times 10^9 \text{ m}^3$ と定められている。NWRPによるとナセル湖からの供給量やナイルデルタまでの途中の灌漑地の地下水ポンプから流出量や地下水流出や再利用地下水量は明らかになる(Mahmoud, 2005)。しかし、蒸発量に関しては水収支の差として扱うのみである。

Mahmoud (2005)によるとナイル川の蒸発量は $2.3 \times 10^3 \text{ mm/year}$ とされている。これは日平均パン蒸発量から算出されたものである。これは季節変化や空間変化を考慮していない蒸発量といえ、ナイル川全体からの正確な蒸発量とはいいきれない。また正確な蒸発量を算出することでナイル川の水収支がより明らかとなり、人為的に使える水資源量がより正確になる可能性がある。

また、ナイル川沿いで計測されたパン蒸発量を比較すると、上流から下流に向かい蒸発量が増えることが分かった。ただし、同じ地域でペンマン蒸発量を算出すると、地域差は見られなくなった(International Institute for Hydraulic and Environmental Engineering, 1985)。

衛星データを用いた広域での蒸発量の推定に関する研究が多く行われている(Bastawesy, et al. 2008)。リモートセンシングとは、人工衛星や航空機等のプラットフォームに搭載されたセンサーによって地表にある物体や空間・流体などの様々な現象を電磁波の特性を利用して、遠く隔てられたところから間接的に対象物の性質等を広範囲に計測する手段である(新井, 2000)。面的な情報を短時間に、反復して観測することが可能であることから、全球規模で起こる地球環境破壊現象、気象、気候変動のメカニズムの解明をはじめ、資源の有効活用や環境保全のために重要な情報を提供している(新井, 2000)。厳密な現地観測で求められる蒸発散量の精度をリモートセンシングに求めることはできないが、地上観測網を高密度に展開することも実質的に不可能である。リモートセンシングの利点として、リモートセンシング画像の中に含まれる空間情報を利用して蒸発散量の空間分布を推定できる可能性があげられる(近藤, 2003)。

1.2 研究目的

本研究では、リモートセンシングにより得られるナイル川の水面温度にバルク法を適用し、蒸発量を推定する。また、得られた結果を基にリモートセンシングの利点である空間分布、時間分布を利用し蒸発量の時空間変化を解明する。

第2章 研究方法

2.1 研究対象地域

本研究の対象地域はエジプト中央部に位置するアスワンハイダムからナイルデルタ入口までのナイル川である。本研究ではエジプト部分を対象とする。エジプト流域を北上したナイル川は、カイロで支流に分かれるが、この支流による沖積土がデルタを形成されている。古代エジプトの時代から、デルタとそれまでのナイル流域とは異なる文化空間と意識され、通常、デルタ地域は「下エジプト」、それまでのナイル流域は「上エジプト」と呼ばれてきた(加藤, 2008)。今回は上エジプト部分を流れるナイル川を対象とする。

今回、図1における星部分を北から上流地点、中流地点、下流地点とし、水面温度や蒸発量の空間変化や時間変化を比較した。また赤星を赤星地点とし地表面温度の季節変化を比較した。

2.2 データ

バルク法では、気象データ(気温、風速、風向、露点温度、気圧)、衛星データ(水面温度)を用いることで蒸発量を算出する。気象データはクリギング法を適用することで衛星データの地表面温度と同等のグリッドに空間内挿する。バルク係数という変数は、内挿された河川内グリッド上の風向データから岸までの距離を算出し計算する。内挿された気象データおよびバルク係数、衛星データからバルク法を用い、各グリッドの蒸発量を算出する。図2に本研究の方法が図示されている。なお、今回、蒸発量を算出した衛星画像は、衛星飛来時刻が近くかつ、上流地点、中流地点、下流地点を通った画像を選び、1年の中で4回蒸発量の変化を比較しようとした。つまり2回の衛星飛来時刻×3地点×4回の計24画像の蒸発量を算出した。用いた画像のリストは表1に示されている。

2.2.1 周辺気象観測所データ

バルク法を用いる際に、衛星データでは得られない気象データ(気温、風速、風向、露点温度、気圧)が必要となる。本研究では現地気象官署である Egyptian Meteorological Authority で観測されたデータを用いた(Egyptian Meteorological Authority, 「Integrated Surface Global Hour Data」<<https://gis.ncdc.noaa.gov/all-records/catalog/search/resource/details.page?id=gov.noaa.ncdc:C00532>>)。表2にデータについての詳細を記載した。図3は観測時間間隔別に凡例分けをした測定地点である。衛星飛来時の気象データは線型に時間内挿をすることで求めた。

2.2.2 衛星データ

地球観測衛星の中には、分解能は低いですが常時観測が可能な静止軌道上から観測するもの(静止地球観測衛星)、分解能は比較的高く地球上の任意の地点を1日に数回の観測が可能なもの(中分解能地球観測衛星)、分解能は高いが任意の地点を観測するのに数日から数10日かかるもの(高分解能地球観測衛星)、ある決められた緯度の範囲に限り観測が可能なもの(低軌道傾斜角地球観測衛星)等がある(新井, 2000)。今回は高分解地球観測衛星を対象とした。

対象地域で使用できる衛星画像として、ASTER, Landsat-8 OLI(Operational Land Imager), Landsat-8 TRIS(Thermal Infrared Sensor)などが挙げられる。表3に各衛星のデータを比較したものを挙げた。ナイル川の平均的な河川幅が300~400mであることから分解能が90m以上である

こと、TRIS には熱赤外波長域における衛星画像に問題点が現段階で含まれていることから本研究で使用する衛星データは ASTER / Terra に決定した。

ASTER (Advanced Spaceborn Thermal Emission and Reflection Radiometer)は 1999 年 12 月に打ち上げられたアメリカ航空宇宙局(NASA: National Aeronautics and Space Administration)の人工衛星 EOS-Terra に搭載された地球観測用センサーである。EOS-Terra は平均軌道半径が 705 km の極軌道衛星であり、ASTER には可視近赤外、短波長赤外、熱赤外の 3 つのサブシステムから 0.53~11.65 μm の波長域で 14 バンドの波長帯がある。本研究では熱赤外放射計(TIR: Thermal Infrared Radiometer)のデータを用いて地表面温度画像の解析に用いた。観測した放射データに幾何補正を施したプロダクト(AST_L1A)から放射量補正処理を施したプロダクト(AST_L1B)を経て、地表面放射輝度(AST_08)が作成される。TIR の大気補正アルゴリズムについては、アメリカ空軍地球物理学研究所によって開発された放射伝達コード(MODTRAN)を用いて、大気条件、観測幾何条件をもとに地表面放射輝度を算出している(AST_08)。

大気補正処理により晴天シーンについては地表面放射輝度を計算し、衛星・太陽間の位置的及び大気の状態を補正することで地表面の識別が改善されている。また、熱赤外域(TIR)データの 5 バンドについて、大気補正後の地表面放射輝度(AST_09T)のプロダクトに基づいて熱赤外センサー(TIR)に入射する熱赤外放射量から温度、放射率分離処理により地表面温度(AST_08_V003)を求めたプロダクトを使用する。ASTER による地表面温度画像の空間分解能は衛星直下 90 m である。現地衛星飛来時刻は午前 10 時 40 分、午後 10 時 10 分を中心にその前後 10 分である。また、使用した衛星画像は雲量 20%以下のみを選んだ。選択した画像のリストを表 1 に示す。

TRIS は 2017 年 1 月時点において、熱赤外領域では不具合が生じるため、使用することが推奨されていない(USGS: United States Geological Survey, 「Project documentation」<<https://landsat.usgs.gov/project-documentation>>)。そこでOLIの画像データを用い水域の自動画像分類を ERDAS IMAGINE 2011 の教師なし分類より行い、ナイル川の抽出を試みた。

OLI は 2013 年 2 月に打ち上げられた NASA の人工衛星 Landsat-8 に搭載されたイメージマルチスペクトル放射計である。Landsat-8 は太陽同期準回軌道であり、OLI, TRIS の 2 つの放射計が搭載されている。ERDAS IMAGINE 2011(ESRI ジャパン株式会社)を用い、Landsat-8 の可視近赤外面像のデジタルナンバーから TOA(Top of Atmosphere) radiance に換算し、太陽高度の補正を行う。換算後は ERDAS IMAGINE 2011 を用い True Color Image を作成し自動画像分類を行い、水域を抽出した。Arc GIS ver. 10.2 よりナイル川ポリゴンを作成した。

デジタルナンバーから TOA radiance に換算する際には以下の式を用いる、

$$L(\lambda)' = \frac{L_{max}(\lambda) - L_{min}(\lambda)}{Q_{calmax} - Q_{calmin}} \times (Q_{cal} - Q_{calmin}) + L_{min}(\lambda) \quad (1)$$

ただし、 $L(\lambda)'$: 太陽高度補正を除いた波長 λ におけるスペクトル放射、 $L_{max}(\lambda)$: スペクトル放射最大値、 $L_{min}(\lambda)$: スペクトル放射最小値、 Q_{calmax} : デジタルナンバー最大値、 Q_{calmin} : デジタルナンバー最小値とする。

TOA radiance から太陽高度を考慮する場合には以下の式を用いる

$$L(\lambda) = \frac{L(\lambda)'}{\sin \theta_{SZ}} = \frac{L(\lambda)'}{\cos \theta_{SE}} \quad (2)$$

ただし, $L(\lambda)$: 太陽高度補正をされた波長 λ におけるスペクトル放射, θ_{SZ} : 太陽天頂角, θ_{SE} : 太陽天頂角($=90 - \theta_{SE}$)とする.

Natural Color Image とは可視状態と同様の配色状態の画像を作成し, 色の種類から画像分類を行う. 本研究では Landsat-8 の TRIS の Channel4 の画像を赤, Channel3 の画像を青, Channel2 の画像を緑に当てはめ合成表示し, True Color Image を作成した.

2.3 蒸発量算出方法

2.3.1 バルク法

バルク式は 1 高度の気象データを用いることで蒸発量を算出できる式であり,

$$E = \rho_a \cdot C_e \cdot U \cdot (q_s - q) \quad (3)$$

と表される. ここで ρ_a : 大気密度 [kg/m^3], C_e : バルク輸送係数, U : 水平風速 [m/s], q_s : 水面の飽和比湿 [kg/kg], q : 大気中の比湿 [kg/kg] で, それぞれ近藤(1994), 宮野(2008) より,

$$\rho_a = 1.293 \cdot \frac{273.15}{273.15 + T_a} \cdot \frac{AP}{1013.25} \cdot \left(1 - 0.378 \cdot \frac{e}{AP}\right) \quad (4)$$

$$q_s = \frac{0.622 \cdot e_s}{AP} \quad (5)$$

$$q = \frac{0.622 \cdot e}{AP} \quad (6)$$

と表される. ここで T_a : 高度 10m での気温, AP : 気圧 [hPa], e_s : 飽和水蒸気圧 [hPa], e : 水蒸気圧 [hPa]を表し, Sonntag(1990)より,

$$e_s = \exp\left(19.482 - \frac{4303.4}{T_s + 243.5}\right) \quad (7)$$

$$e = \exp\left(19.482 - \frac{4303.4}{T_{dew} + 243.5}\right) \quad (8)$$

と表される. ここで T_s : 水面温度 [$^{\circ}\text{C}$], T_{dew} : 露点温度 [$^{\circ}\text{C}$]を示す.

2.3.2 バルク輸送係数

バルク係数 C_e は、近藤(1994)より水域内部沿岸までの風上距離 X から、有限な水域に対する変数と無限な水域に対する係数分類される。

近藤 (1994)より有限な水域のバルク係数 C_e は

$$\frac{\partial C_e}{\partial x} = 0.189k \left[\ln \left(\frac{z}{z_0} \right) \right]^{-1} \left(\frac{X}{z_0} \right)^{-0.1} \frac{\partial X}{\partial x} \quad (9)$$

と表される。ここで $k (= 0.4)$: カルマン定数, z :風速観測高度[m], z_0 : 粗度長(= 10^{-4})を示す。

また近藤(1994)より、各グリッドのバルク係数は上式から計算できる。衛星データと同じ90 mグリッドごとにバルク係数を算出し、各グリッドにて蒸発量を算出する。

また、近藤(1994)より無限な水域のバルク係数 C_e は

$$C_e = (1.1 \sim 1.3) \times 10^{-3} \quad (10)$$

と表される。

有限な水域、無限な水域を判断するには風下距離 X 風上の沿岸から河川の任意の地点までの距離を用いる。次式は高度 z m での観測の場合の有限と無限の境界を与える X の閾値を示す。

$$\frac{z}{X} = \frac{1}{100} \quad (11)$$

近藤 (1994)より、 X が十分大きくなると $z \leq 10$ では実質上広い水面上の比湿の鉛直分布と同じになることによる。また、内部境界層の厚さの風下距離に対する比 z/X は概略 $1/100$ であり、 $X=200$ mのとき内部境界層の厚さは2 m程度になる。今回は風向によっては X が閾値を超えない場合が考えられるため、有限な水域としてバルク係数を算出した。

2.3.3 気象データの空間内挿とラスタ演算

気象データ (気温, 露点温度, 風速, 気圧) を空間内挿によってラスタ化することで補間している。空間内挿には Arc GIS ver10.2, ERDAS IMAGINE 2011 を使用した。GIS とは、コンピュータ上で地図を作成するだけでなく、地理的に分布する情報を、「位置を表す空間情報」と「性質を表す属性情報」として管理・利用するためのシステムである。空間における様々な問題を取り扱うことができる。

空間的補間に対する方法は、IDW (逆距離加重法), Natural Neighbor 内挿法や傾向面など様々な方法がある(高坂, 1999)。本研究ではクリギング法によって内挿を行う。クリギングは散在ポイントから推定内挿を行う地球統計学的手法による空間予測の総称である。式(10)のように未観測位置 x における確率場の値 $Z(x)$ を予測する方法である。

$$Z(x_0) = \sum_{i=1}^n \omega_i \cdot Z(x_i) \quad (12)$$

本研究では Arc GIS ver10.2 のクリギング法のデフォルトの設定を用いた。気象データは衛星データと同等のサイズ(90m 四方)のグリッドに変換した。空間内挿を行う範囲はエジプト気象観測所の分布範囲(図 1, 3 参照)と一致させて行った。

2.4 ナイル川部分の抽出

本研究ではナイル川のみを対象としているため、不要な陸面部分を除外する。ナイル川のポリゴンを作成し、算出結果からナイル川部分を切り出した。

自動画像分類では ERDAS IMAGINE 2011 の教師なし分類という機能を用いた。教師なし分類では 4 つの段階を経て水域を抽出する。Step1 ではクラス数の設定、クラスタリングの実行を行う。True Color Image から分類するクラス数を 10 に決定し、操作を行う。Step2 ではクラスの解釈、グループ化を行う。Google map や 現地地図などからナイル川と目視判読できる部分を水域と解釈し、クラスの色を統一しグループ化を行った。Step3 ではクラスの統合を行う。グループ化したクラスを主題図の値を振り直し、同じグループが同一の値を持つ主題図を作成した。Step4 では属性の編集よりグループ名や表示カラーを編集する。

Arc GIS ver. 10.2 でポリゴン化を行う前に ERDAS IMAGINE 2011 の判読時点では、ナイル川ではない細い水路や灌漑地などの微小な水域が含まれるため、Arc GIS ver10.2 のラスタエディタ機能を用い、目視判読で、ナイル川に当てはまらない部分を手作業で修正した。

ナイル川以外の微小な水域が無くなった時点でポリゴン化を行った。今回、ナイル川は複数の画像に渡っていたため、Arc GIS ver10.2 の marge 機能より複数のポリゴンから 1 つのポリゴンを作成し、dissolve 機能からポリゴン内の継ぎ目を無くした。

作成したナイル川ポリゴンは、蒸発量の計算が終わった画像に、Arc GIS ver10.2 のクリップ機能に用いられ、ナイル川のみ蒸発量を抽出した。

第3章 結果と考察

3.1 河川横断面に沿った水面温度の分布

放射輝度温度から水面温度を算出する。今回は1年を4季(3~5月, 6~8月, 9~11月, 12~2月)に分け、現地時刻10時40分の前後10分以内に衛星が飛来した画像を日中、現地時刻22時10分の前後10分以内に衛星が飛来した場合を夜間と考えた。これより時間変化や季節変化、地点変化の状況について考察をする。図4~6は夏季・日中における本研究によって算出した蒸発空間分布である。それぞれの図には黒点線がひかれており、上流地点、中流地点、下流地点での河川横断面に沿った断面部分を示している。図7~30では上流地点、中流地点、下流地点の3地点における河川横断面に沿った水面温度、蒸発量、気象データ、バルク係数の水平分布が示されている。第1縦軸は対象要素、第2縦軸は蒸発量、横軸は河川断面部分である。グラフ内では蒸発量と気温、風速、気圧、露点温度、水面温度、バルク係数の比較を行っている。第3章の河川横断面沿いの水平分布での比較は図7~30の該当する要素を比較することで行った。また、水面温度の衛星画像毎のデータを表3に示す。

3.1.1 河川横断面に沿った水面温度の水平分布

春季・夏季における水平温度差は、どの季節・時刻・地点でも比較的小さく5°C以内に収まっていた。冬季・秋季は温度幅が大きく10°C近く幅があった。また、河川中央部は沿岸部分に比べ温度が低い。日中では沿岸部分または沿岸近くに温度のピークが見られる傾向が多く、夜間では一定値に見られる。

3.1.2 河川横断面に沿った水面温度の水平分布の地点変化

中流地点では水平温度差がどの時刻・季節においても3°C以内におおよそ収まっていた。上流・下流は時刻・季節の違いにより温度差は3°C以上になる。200 km近く離れた異なる地点で同日・同時刻に観測された場合(2016/1/4 22:04)、水面温度は横断面の空間分布に差はあるものの、平均値の差は0.5°Cと小さかった。これは同日かつ衛星画像が撮影できる天候であれば水面温度の地域差が明確には見られないことを示していると考えられる。

3.1.3 河川横断面に沿った水面温度の時間変化

上流地点の場合、冬季・春季は水面温度の昼夜差が大きく、同季節の昼夜の平均水面温度を比べるとそれぞれ10°C以上の差みられる。夏季・秋季は水面温度の昼夜差が小さく、同季節の昼夜平均温度を昼夜で比べると2°C未満の差である。中流地点の場合、どの季節でも水面温度の昼夜差が小さい。昼夜の平均水面温度の最大差は秋季の3°C未満であった。下流地点の場合、冬季は水面温度の昼夜差が大きく、昼夜の平均水面温度を比べると7°C近くの差が見られる。他の季節は昼夜差が小さく、昼夜の平均水面温度差は3°C未満であった。

図31~34より図1に示す赤星の地点での地表面温度の比較も用いる。これらの図は同地点での異なる日時の陸面を含んだ地表面温度である。図35~38夏季・冬季での昼夜の地表面温度を画像および水域と陸域に分けヒストグラムを作成した。地表面温度画像を比較すると、季節・時間にかかわらず河川横断面中央部分の水面温度は30°C付近であった。陸域のヒストグラムは、冬季・夜間のみ水域より低い値を示している。表4は水域のヒストグラムのモーメントを示している。冬季・夜間

(2016/1/4 22:04)の歪度のみ負の値を示し、他の場合は正の値を示している。これは水面ヒストグラム裾部分が陸域側の影響を受けているとわかる。さらに水域の最頻値は時刻、季節にかかわらず28~31°Cまでの3°Cに収まっていた。これより、同地点であれば水面温度の最頻値である河川中央部の温度は3°Cに収まり、沿岸部分が周囲の陸域の影響をうけ空間分布が生じると考えられる。

3.1.4 河川横断面に沿った水面温度の季節変化

図 7~30(b)において上流、中流、下流における河川横断面に沿った水面温度の季節変化が示されている。どの断面においても夏季・秋季(7~10月)の水面温度が高く、冬季の水面温度が最も低い傾向が見られる。また季節が同じであっても、昼夜が異なれば平均温度も大きく異なる。

3.1.5 河川横断面の水面温度分布の要因

3.1.3 より河川周辺の陸面の比熱が河川沿岸の水面温度に影響を与えていると考えられる。ここで図 39 に上流地点の土地利用図を示した。左岸側の沿岸部分にて水面温度が高くなる傾向が見られたが、左岸には畑部分が右岸側に比べ少なく、砂漠との距離が近い。ナイル川が砂漠または裸地面などは糧や灌漑地などに比べ、アルベドの低い地表面に近接するほど、周囲の陸域の影響を受け熱された暖かいした空気河川沿岸に流れ込みやすい可能性がある。また、風向が南西方向になりやすいことも原因の1つと考えられる。

なお土地利用図は、国土地理院ホームページにてダウンロード可能な地球地図(国土交通省国土地理院、「地球地図トップページ」<<http://www.gsi.go.jp/kankyochiri/globalmap.html>>)の土地被覆データを用いた。

3.2 河川横断面に沿ったバルク係数の分布

3.2.1 バルク係数の空間断面分布

図 7~30 に含まれている河川横断面に沿った気象データおよびバルク係数、蒸発量を含んだ図を用いる。どの断面においてもバルク係数はおよそ $1.6\sim 1.4 \times 10^{-3}$ であった。風下距離がバルク係数算出に用いられているため、バルク係数は風上側の片岸にのみ高値をとる傾向がみられた。

3.3 気象データの空間分布

3.3.1 河川横断面に沿った気象データの水平分布

クリギング法を用いて内挿した気象データはなめらかに変化をしており、明白な空間分布があまり見られない。河川横断面において各気象要素の空間分布差は小数点以下第3位に収まるほど小さい。

3.3.2 河川横断面に沿った気象データの水平分布の地点変化

気温は上流地点から下流地点に向けて低くなっていく。風速は上流から下流に向けて高くなっていく。気圧は上流から下流に向けて高くなっていく。

3.3.3 河川横断面に沿った気象データの時間変化

気温は、日中が高く、夜間が低い。春季・夏季では昼夜差が大きく 7°C 近く変化するが、秋季・冬季では 4°C 近く変化する。風速は、どの地点・季節においても夜間に比べ、日中の値が大きい。気温、風速は、日中の値が大きくなる傾向は太陽放射による熱収支式への入力に影響している可能性がある。気圧は、昼夜での大きな変化が見られなかった。

3.3.4 河川横断面に沿った気象データの季節変化

気温は夏季に昼夜かわらず最高気温が 33°C 前後に到達し、冬季に最低気温は 12°C 前後となる。春季・秋季は日時によりばらつきはあるものの、夏季と冬季の気温差内に収まる。また、冬季では 20°C を超えることはなかった。風速は、夏季に風速が小さくなる傾向はみられるが、明確な季節変化が見られない。気圧は、夏季に低く、冬季高い傾向がみられる。

3.3.5 エジプト国内の気象データの空間分布

図 40~62 は気象データ(気温、風速、気圧、露点温度)のエジプト国内の空間分布を比較する。河川横断面に沿った気象データ同様に、現地気象官署データにクリギング法を適用することで空間分布を求めた。

気温は南東が高く北西が低い。風速は南東が低く北西が高い。また、風速は全域で弱い場合(5m/s 未満)、空間分布があまり見られず一様に見られる。気圧は南東が低く北西が高い傾向がある。

気温、気圧は地形要因が影響している可能性がある。エジプトは北部に海、南部には陸地が広がっている。水面と陸地の比熱により陸地側が太陽放射により温まりやすく、周囲の大気ないしは河川も温まりやすい。そのため気温は南部が陸域により温まりやすいため、高くなる傾向がみられると考えられる。また、気圧も同様に陸域から温められた空気塊が上昇することにより上昇気流が生まれることにより、南部において高気圧になりやすい傾向がみられると考えられる。

3.3.6 上流地点、中流地点、下流地点の気象データの月平均の変化

図 63, 64 は気象データ(気温、風速、気圧、露点温度)の月平均値の変化を示す。上流地点は Aswan, 中流地点は Asyut, 下流地点は Cairo の気象データを用いた。2013 年における現地衛星飛来時刻の 10 時, 22 時での観測データを用いた。ただし, Aswan, Asyut では気圧は 10 時, 22 時に観測されていないため 9 時, 21 時での観測データをもちいた。得られたデータから月別の平均を算出し、月変化をみる。

各気象データの月平均の変化の傾向をみる。昼夜にかかわらず風速、気温、露点温度は 8 月, 9 月の夏季に増加し, 12 月, 1 月の冬季に減少する。気圧のみ夏季に減少, 冬季に増加する。

各気象データの地域差異の傾向をみる。昼夜にかかわらず気温は上流から下流に向かい低くなる傾向がみられる。気圧、露点温度は上流から下流に向かい増加する傾向が見られる。風速のみ地域間の傾向があまりみられない。

また、同じく図 63, 64 に蒸発量を算出した際の気象データをシンボルマークで示す。蒸発量算出に用いられた上流地点、下流地点の風速データが、全体として月平均の値より約 3 分の 2 程度の大きさとなることが分かった。つまり今回算出した上流地点、下流地点での蒸発量は風速が月平均より小さいために、蒸発量の過小評価が起きていると考えられる。

3.4 河川蒸発の空間分布

3.4.1 河川横断面に沿った蒸発の水平分布

図 7~30 の(c)~(h)では河川横断面に沿った蒸発量と気象データの比較をしている。横断面において蒸発の空間的にみた差は、およそ 10 mm/day である。また蒸発量は地点を問わず日中に横断面中央部分が低くなる傾向が見られる。これは水面温度の空間分布と蒸発の空間分布が類似している可能性がある。

3.4.2 河川横断面に沿った蒸発の水平分布の地点変化

季節にかかわらず、日中では中流地点での蒸発量が多い。平均蒸発量は中流地点では 10 mm/day を超えている。夜間では地点変化があまり見られなかった。先行研究(International Institute for Hydraulic and Environmental Engineering, 1985)の蒸発量は上流が少なく下流が多いという傾向と異なっていた。これは中流地点での対象の水面温度がほかの地域に比べ高いことが影響しているのではないか。

3.4.3 河川横断面に沿った蒸発の水平分布の時間変化

上流の場合、冬季・春季・秋季は蒸発量の昼夜差が大きく、同季節の昼夜の平均蒸発量を比べるとそれぞれ 5 mm/day 以上の差みられる。夏季は蒸発量の昼夜差が小さく、同季節の昼夜の平均蒸発量を比べると 1 mm/day の差である。中流の場合、どの季節でも水面温度昼夜差が大きい。昼夜の平均水面温度の最大差は秋季の 13 mm/day、最小差は 7mm/day であった。下流の場合、秋季は蒸発量の昼夜差が大きく、昼夜の平均蒸発量を比べると 7 mm/day 近くの差が見られる。他の季節は昼夜差が小さく、昼夜の平均蒸発量の差は 3 mm/day 未満であった。

3.4.4 河川横断面に沿った蒸発の水平分布の季節変化

図 68~70 は 3 地点における河川横断面に沿った蒸発の水平分布の季節変動を示す。上流地点の日中の場合、季節変化を通じて左岸が高くなる傾向が見られた。中流地点の日中の蒸発量の場合は右岸が高くなる傾向、下流地点の日中の場合は右岸側が高くなる傾向が見られた。夜間の場合空間分布の季節変化はあまり見られなかった。日中の場合、夏季に近い春季または夏季に蒸発量が高くなり、冬季に低くなる傾向が見られた。水面温度は年間を通じて同様の空間分布は常に見られるわけではない。これはバルク係数の分布、つまり風速・風向の傾向からみられることが示唆される。大気が安定状態になりやすい夜間においては風速は小さくなるため、風向の変化も大きくなりやすい。そのため、夜間における蒸発の季節変化は明確にあまりみられない。これに対して日中は大気が不安定な状態になりやすく、夜間に比べ風速が強い状態になりやすい。風速が強くなると風向の変化も減り、風向が傾向を持ちやすくなる。現段階で風向の考察を行っていないため、今後の課題であるが、日中における風向の傾向や風速、夜間における風向や風速の傾向をより調べることにより、バルク係数の分布傾向が明らかになると考えられる。

3.4.5 河川横断面に沿った蒸発の水平分布の要因

空間分布の大きな要因は水面温度と考えられる。気象データ(特に風速)も蒸発の量に影響を与えるが、空間分布には大きく影響をない。バルク係数は水温や気象要素の空間分布が見られないときにのみ空間分布に影響を与える。

第4章 まとめ

4.1 結論

水面温度は河川横断面沿いの水平分布は、沿岸部が高くなり、河川中央部が低くなる傾向が見られた。ただし冬季夜間には空間分布があまり見られなくなる。空間分布の原因としては周囲の陸域の土地被覆が影響していると考えられる。

気象要素の面的分布は、気温は上流から下流に向かい低くなり、風速は上流から下流に向かい大きくなる。露点温度は上流から下流に向かい大きくなる。日中において気温や風速は大きくなる傾向が見られた。季節変化は夏季に向かい気温風速は大きくなる傾向が見られた。気象要素の2013年における月平均変化では、風速・気温・露点温度は夏季に増加し、冬季に減少傾向、気圧は夏季に減少、冬季に増加傾向が見られた。また、気象要素の2013年における月平均変化から地点を比較すると、風速以外の気象データで地点差異が見られた。それぞれの差異の傾向は面的分布と同様である。

蒸発量の面的分布の大きな要因は水面温度であった。地域差異は先行研究で見られた上流から下流に向かい蒸発量が大きくなる傾向とは異なり、中流が最も蒸発量が多くなっていた。しかし、上流と下流の蒸発量を比較すると、下流の蒸発量が多くなる傾向から、今回算出した中流地点が例外である可能性考えられる。気象データの地域差異を検討すると、風速が上流から下流にかけて連続した傾向が見られないため、中流の蒸発量が大きくなる原因の1つとなっていると考えられる。蒸発量の時間変化は日中が多く、夜間が少ない傾向が見られた。蒸発量の季節変動は夏季増加、冬季減少傾向は見られたが、地域差異はあまり見られなかった。

4.2 今後の課題

現時点において、蒸発量や気象データの空間分布図をさらに増やし、ナイル川対象部分の年間における蒸発量を算出したい。また、現地観測が行えるのであれば観測値との比較や気象データの観測を行いたい。中でも気象データの中でも風向は地形等を考慮するとクリギング法での再現性が低いと考えられるため、得たいデータである。衛星飛来時の瞬間的な風向データを得たい。また、現段階においても風向や風速の日中夜間の傾向を算出することでバルク係数の空間分布を得たい。

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、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。

筑波大学水文科学分野の諸先生方には、中間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。また、杉田研究室の院生の方々には研究室ゼミでの貴重なご助言・ご意見などお世話になりました。

以上の方々と、本研究に対して応援・励ましをいただいた家族、友人をはじめとするすべての方々に、この場を借りて心から御礼申し上げます。

参考文献

- Bastawesy M., Khalaf F., Arafat S. (2008) : The use of remote sensing and GIS for the estimation of water loss from Tushka lakes, southwestern desert, Egypt”. 52, 73 - 80.
- Egyptian Meteorological Authority, 「 Integrated Surface Global Hour Data 」
<https://gis.ncdc.noaa.gov/all-records/catalog/search/resource/details.page?id=gov.noaa.ncdc:C00532> (最終閲覧日: 2017年2月17日)
- International Institute for Hydraulic and Environmental Engineering (1985) : Hydrogy of the Nile Basin. Elsever, 575p.
- Mahmoud A.Z., (2005) : Water for the Future – National Water Resource Plan –. Ministry of Water Resources and Irrigation Planning Sector, 1 - 61.
- Sonntag D. (1990) : Important new values of the physical constants of 1986, vapor pressure formulations based on the ITS-90, and psychrometer formulae, Z. Meteorol. 70, 340-344.
- United States Geological Survey, 「 Project documentation 」
<https://landsat.usgs.gov/project-documentation> (最終閲覧日: 2017年2月17日)
- 新井康平 (2000) : 地球観測衛星データの利用方法. 森北出版株式会社, 131p.
- 加藤博 (2008) : ナイル –地域をつむぐ川–. 刀水書房, 163p.
- 国土交通省国土地理院, 「地球地図トップページ」
<http://www.gsi.go.jp/kankyochiri/globalmap.html> (最終閲覧日: 2017年2月17日)
- 近藤昭彦 (2003) : 水文学へのリモートセンシングと GIS 技術の応用 (総説). 地理学評論, 76, 788-799.
- 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, 324p.
- 高坂宏行 (1999) : クリギング法とその地理的応用. 日本大学文理学部自然科学研究研究所研究紀要, 34, 27 - 35.
- 安部雅宏・田中賢治・小尻利治・浜口俊雄 (2012) : ナイル川流域における多国間水資源開発コンフリクトに関する研究. 京都大学防災研究所年報, 55-b, 579 - 591.

表 1 衛星画像毎のナイル川の水面温度の平均値

衛星飛来時刻	最小値 (°C)	最大値 (°C)	範囲 (°C)	平均値 (°C)
2014/4/26 10:30	20.5	31.4	10.9	23.6
2014/7/15 10:30	26.1	34.2	8.1	27.7
2001/10/6 10:42	24.9	28.0	3.1	25.6
2015/12/16 10:37	20.6	33.2	12.7	26.3
2014/4/4 22:04	7.4	8.3	0.9	7.9
2015/7/12 22:05	24.6	27.1	2.4	25.3
2013/9/24 22:04	25.6	28.1	2.5	26.5
2016/1/4 22:04	7.3	18.1	10.8	13.5
2015/4/27 10:42	24.1	34.1	10.0	26.0
2010/6/16 10:42	29.2	31.0	1.8	29.7
2010/10/6 10:41	28.8	31.3	2.5	29.5
2002/2/2 10:44	17.1	21.4	4.3	18.3
2015/5/9 22:05	24.8	26.3	1.5	25.5
2013/8/7 22:04	27.2	29.6	2.4	28.8
2012/10/7 22:04	23.4	25.6	2.2	24.8
2016/2/5 22:05	15.8	17.9	2.1	17.3
2003/4/1 10:48	21.5	33.9	12.4	25.7
2007/6/15 10:47	25.8	30.9	5.1	27.3
2014/10/1 10:42	27.0	32.3	5.3	28.4
2012/12/30 10:41	18.1	21.8	3.7	19.3
2015/4/30 22:11	22.6	24.5	1.8	23.7
2007/7/22 22:05	29.6	30.9	1.2	30.3
2012/9/21 22:05	23.6	27.8	4.1	26.4
2016/1/4 22:05	10.6	16.9	6.3	13.9

対象画像は図 7～30 の蒸発量算出の際に用いられた画像である。

表 2 気象観測所による観測項目

観測項目	観測高度
風速	2 m
風向	2 m
気温	2 m
露点温度	2 m
気圧	2 m

表 3 衛星とセンサーおよびプロダクトの概要

センサー名	ASTER	TRIS
搭載衛星	Terra	Landsat-8
高度	705 km	705 km
交点通過地方時刻	10 時 40 分, 22 時 10 分	10 時 30 分
周期	約 99 分	約 99 分
回帰日数	16 日	16 日
地表面分解能	90 m	30 m
観測幅	60 km	185 km
使用プロダクト	ASTER_08 (熱赤外面像)	レベル 1 プロダクト
補正処理	幾何補正 大気補正	幾何補正

表 4 衛星画像の水面温度のヒストグラムのモーメント

衛星飛来時刻	2014/7/15 10:30	2015/7/15 10:30	2015/12/16 22:05	2016/1/4 22:04
平均	29.0	26.2	22.1	14.9
標準偏差	10.5	1.66	2.48	3.6
分散	21.0	2.78	6.19	13.5
尖度	1.65	1.04	1.68	-0.87
歪度	2.58	0.24	2.93	0.40

対象画像は図 31~34 である。

表 5 衛星画像毎のナイル川の蒸発量の平均値

衛星飛来時刻	最小値 (mm/day)	最大値 (mm/day)	範囲 (mm/day)	平均値 (mm/day)
2014/4/26 10:30	7.4	18.9	11.5	11.3
2014/7/15 10:30	5.6	8.0	2.4	6.5
2001/10/6 10:42	9.5	12.9	3.3	10.3
2015/12/16 10:37	4.0	11.2	7.2	6.9
2014/4/4 22:04	2.5	4.3	1.8	3.4
2015/7/12 22:05	7.4	8.3	0.9	7.9
2013/9/24 22:04	4.9	6.7	1.8	5.4
2016/1/4 22:04	0.8	3.0	2.2	1.7
2015/4/27 10:42	9.9	21.5	11.6	12.0
2010/6/16 10:42	11.3	15.8	4.6	12.5
2010/10/6 10:41	14.0	19.5	5.4	15.7
2002/2/2 10:44	8.9	13.9	5.0	10.5
2015/5/9 22:05	5.0	6.5	1.4	5.9
2013/8/7 22:04	1.5	1.9	0.4	1.7
2012/10/7 22:04	1.8	2.4	0.6	2.2
2016/2/5 22:05	1.6	4.0	2.4	3.5
2003/4/1 10:48	4.2	11.4	7.2	6.3
2007/6/15 10:47	8.6	11.7	3.1	9.9
2014/10/1 10:42	7.1	13.3	6.3	9.0
2012/12/30 10:41	2.6	3.9	1.3	3.2
2015/4/30 22:11	3.6	5.9	2.4	4.1
2007/7/22 22:05	8.3	11.1	2.8	9.3
2012/9/21 22:05	1.9	3.6	1.6	2.8
2016/1/4 22:05	4.7	5.5	0.8	5.1

対象画像は図 7~30 の(a)である.

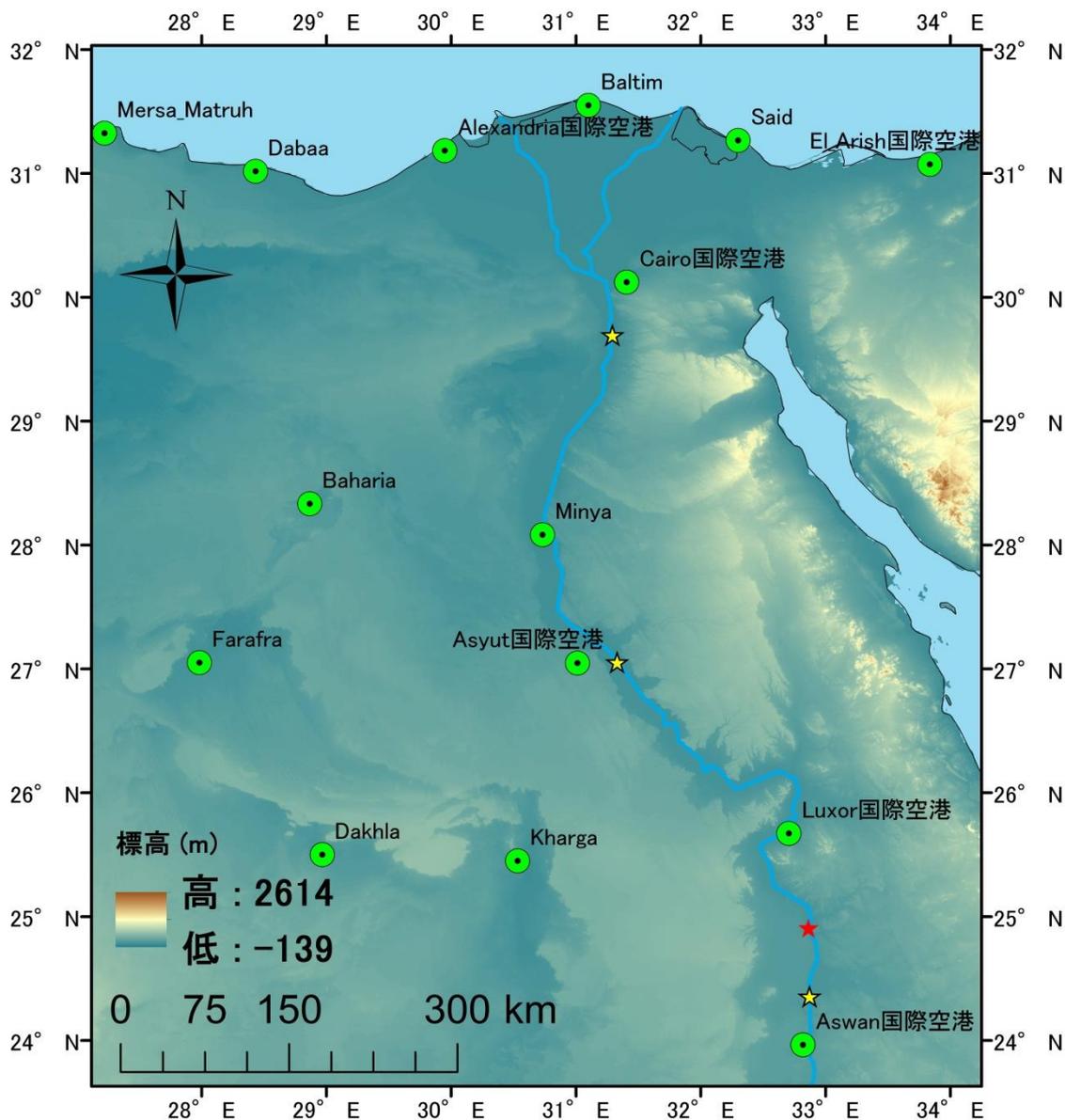


図 1 エジプトナイル川流域概要

本研究では☆部分を南から上流地点，中流地点，下流地点とし河川や河川水平横断面での蒸発量および気象データ分布を検討する

★部分を赤星地点とし陸面及びナイル川水面温度の時刻や季節変化を検討する

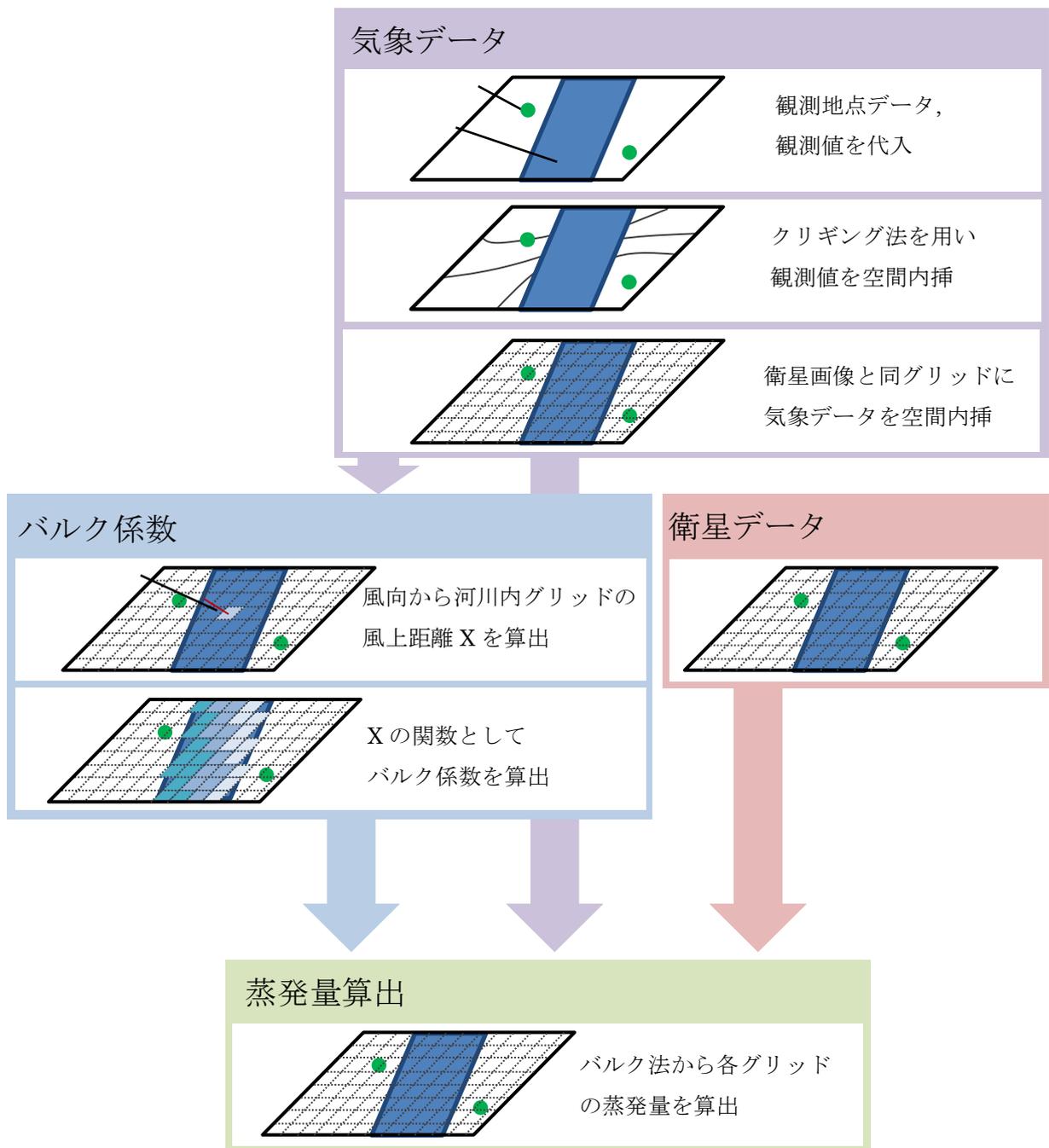


図 2 研究手順

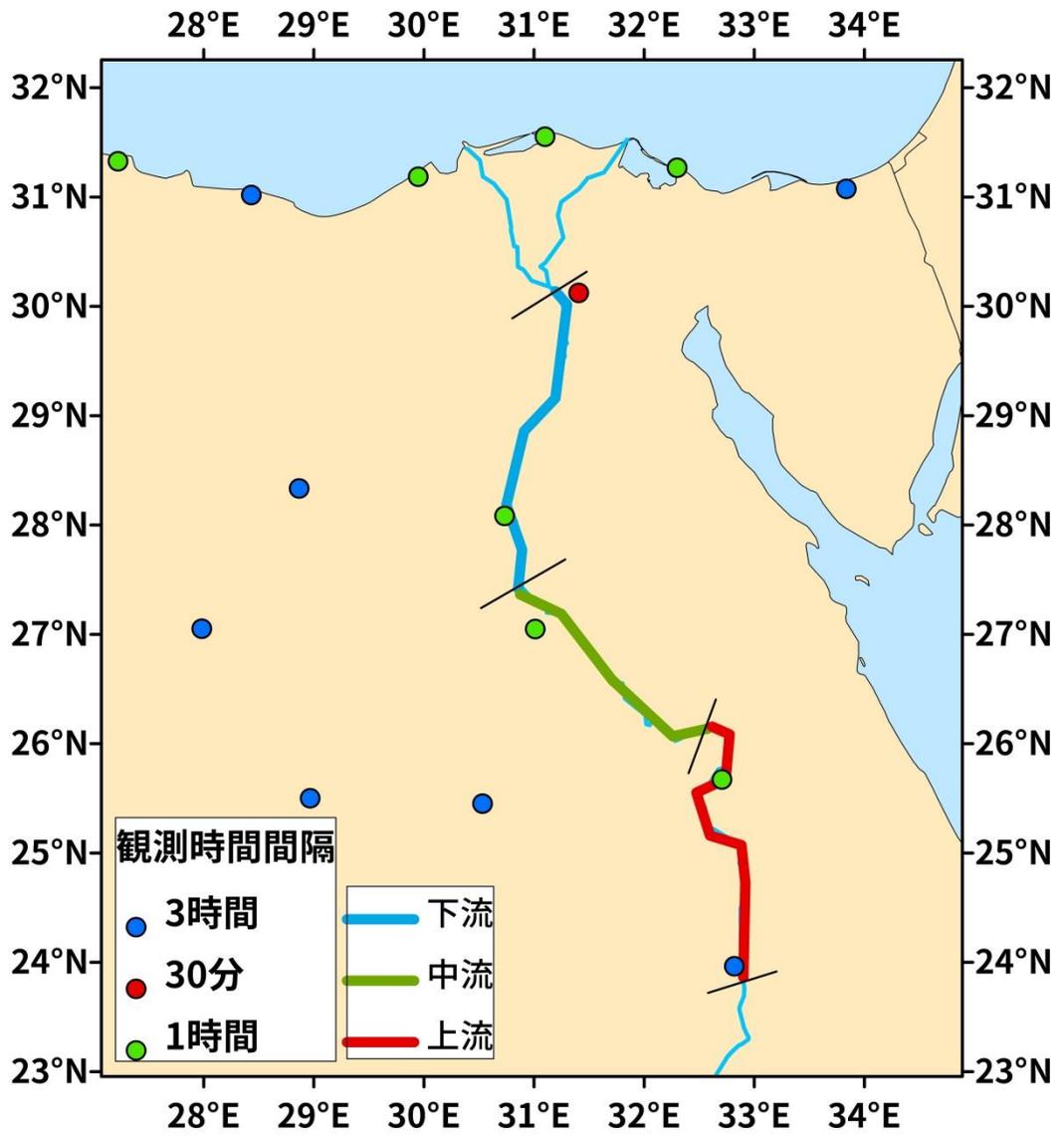


図 3 気象観測所概要

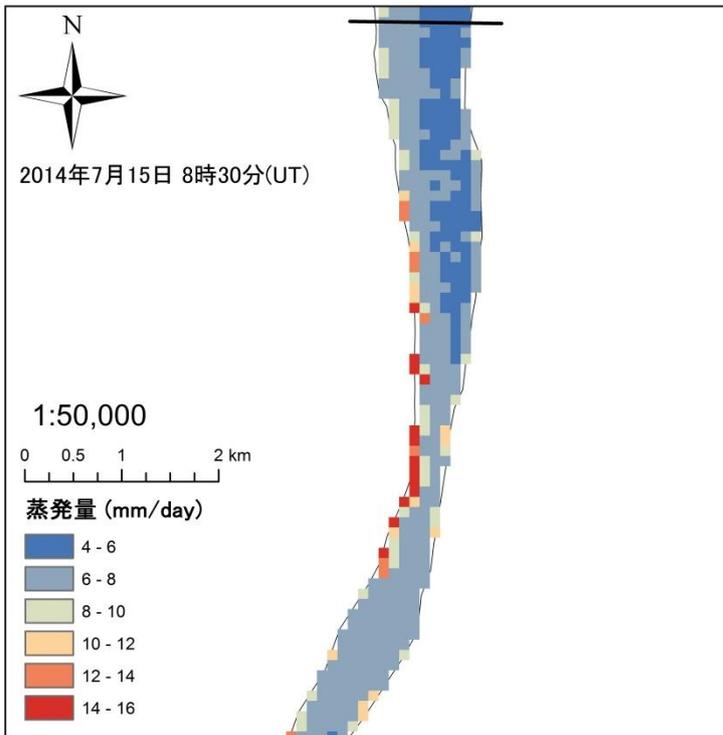


図 4 夏季・日中・上流地点での蒸発空間分布
黒線が河川横断面の水平分布部分を示している

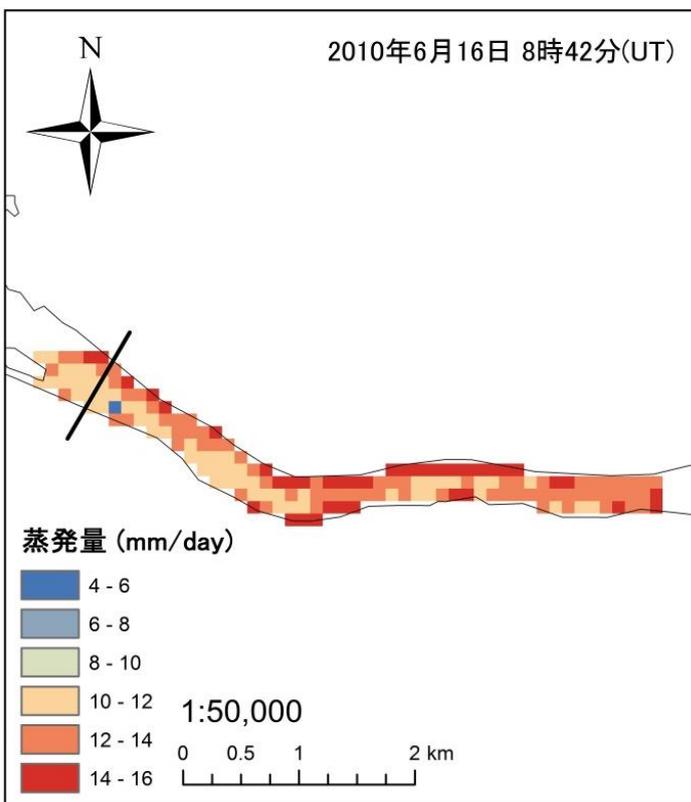


図 5 夏季・日中・中流地点での蒸発空間分布
黒線が河川横断面の水平分布部分を示している

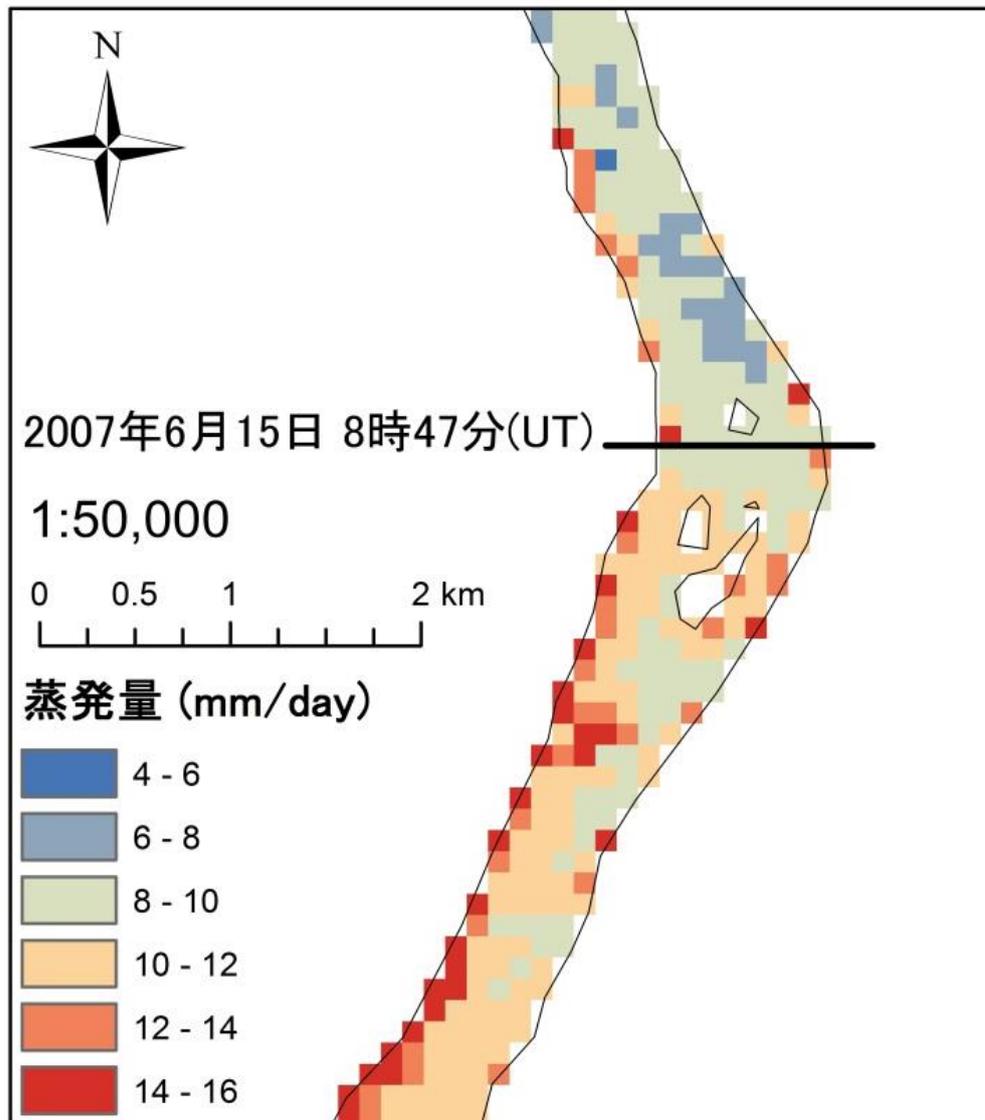


図 6 夏季・日中・下流地点での蒸発空間分布
黒線が河川横断面の水平分布部分を示している

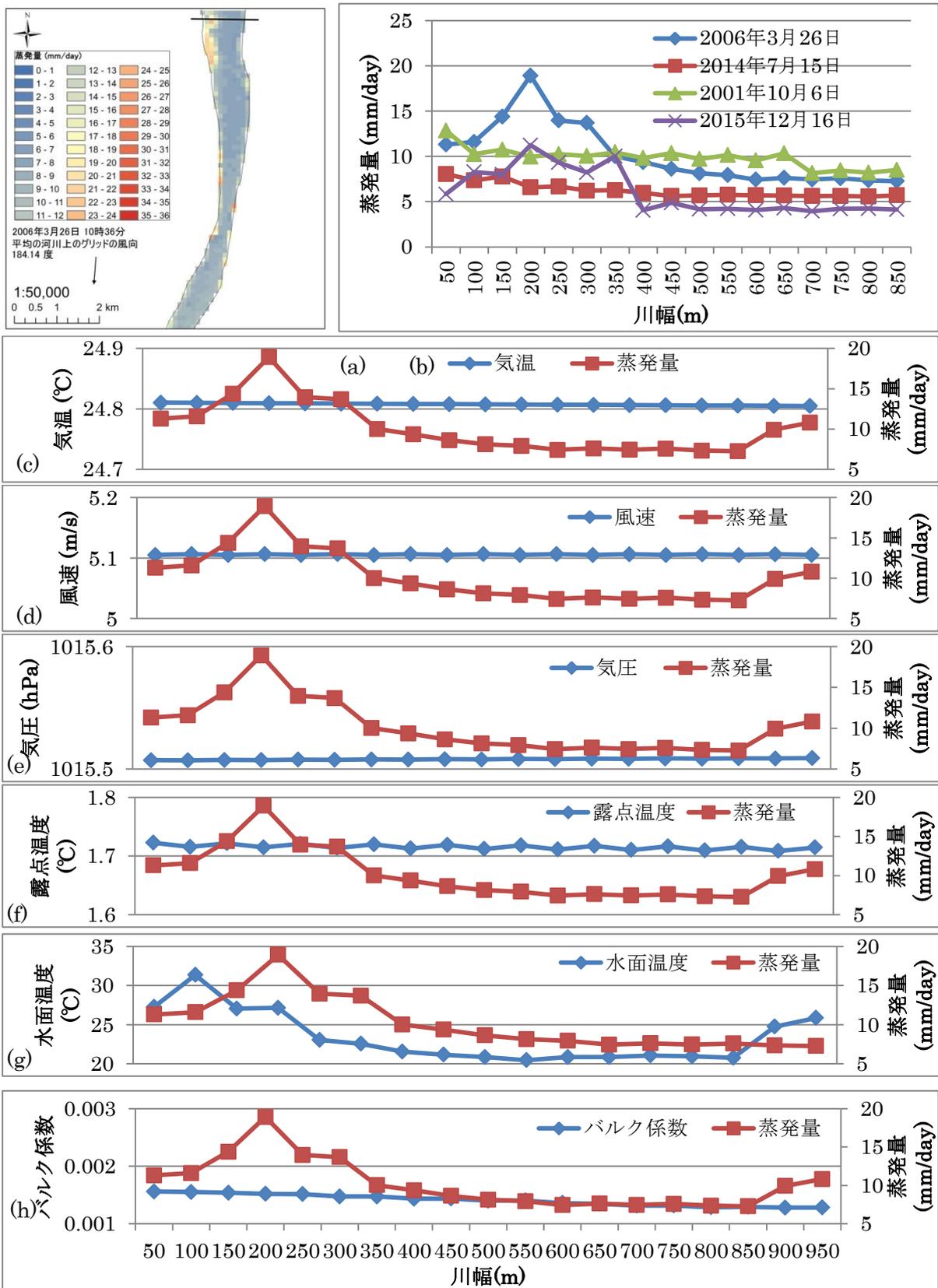


図 7 上流地点・春季・日中における蒸発量および気象データ

(a)蒸発量の空間分布, (b)河川の水平断面における蒸発量の季節変動, (c)~(h)は河川断面における蒸発量と気象データの比較, 比べる気象データは(c)気温, (d)風速, (e)気圧, (f)露点温度, (g)水面温度, (h)バルク係数である。

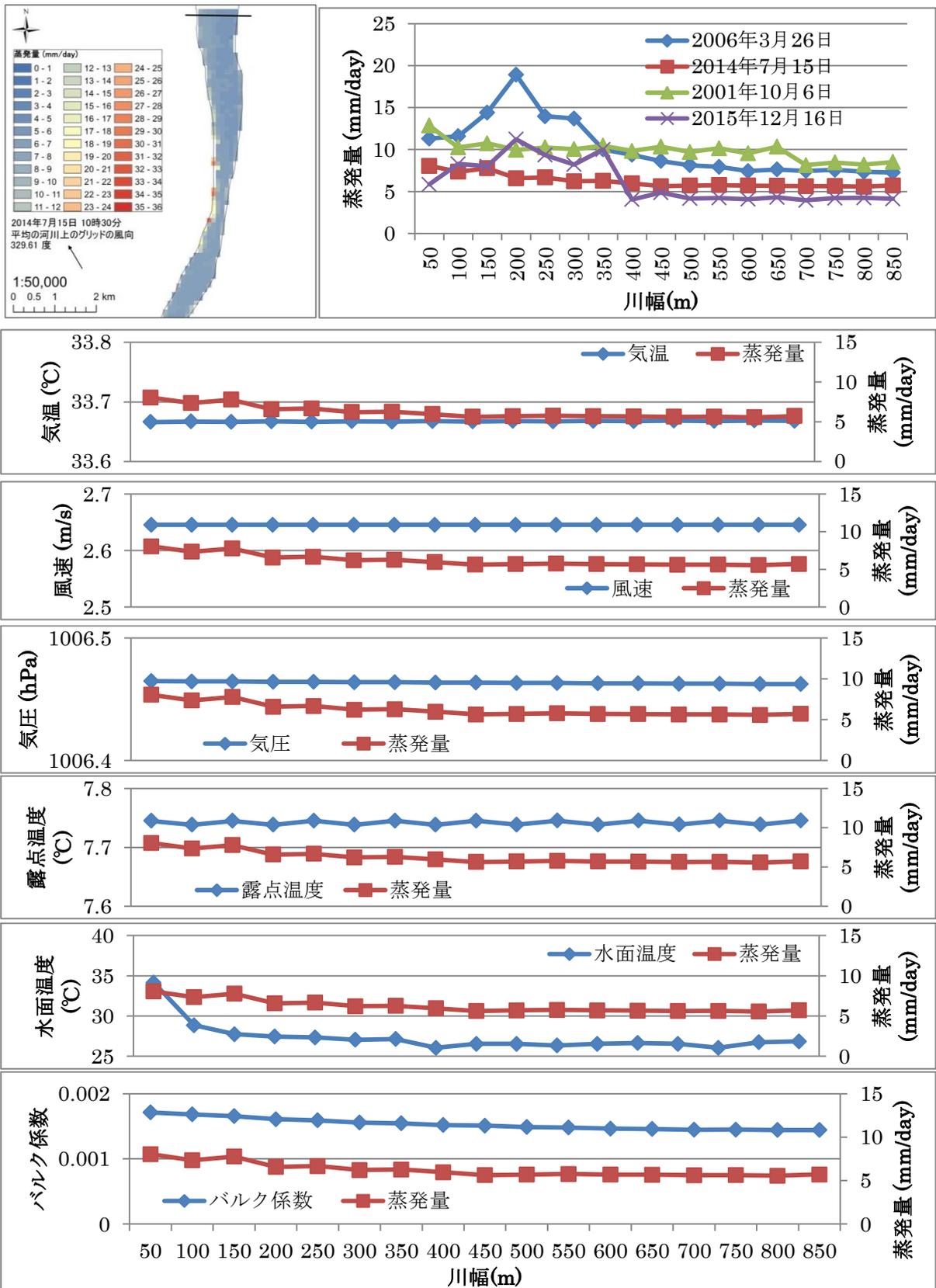


図 8 上流地点・夏季・日中における蒸発量および気象データ

(a)蒸発量の空間分布, (b)河川の水平断面における蒸発量の季節変動, (c)~(d)は河川断面における蒸発量と気象データの比較, 比べる気象データは(c)気温, (d)風速, (e)気圧, (f)露点温度, (g)水面温度, (h)バルク係数である。

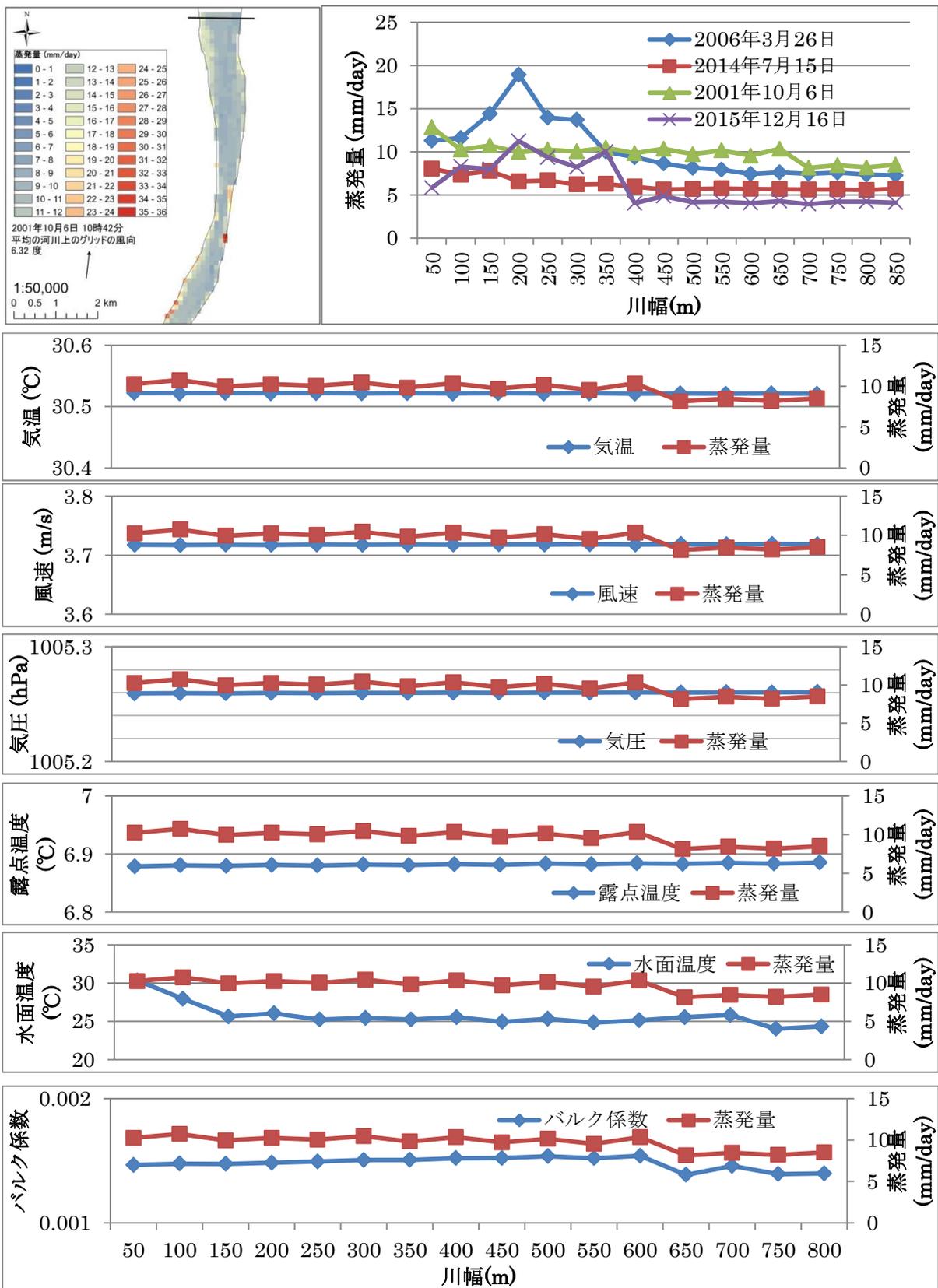


図 9 上流地点・秋季・日中における蒸発量および気象データ

(a)蒸発量の空間分布, (b)河川の水平断面における蒸発量の季節変動, (c)~(d)は河川断面における蒸発量と気象データの比較, 比べる気象データは(c)気温, (d)風速, (e)気圧, (f)露点温度, (g)水面温度, (h)バルク係数である。

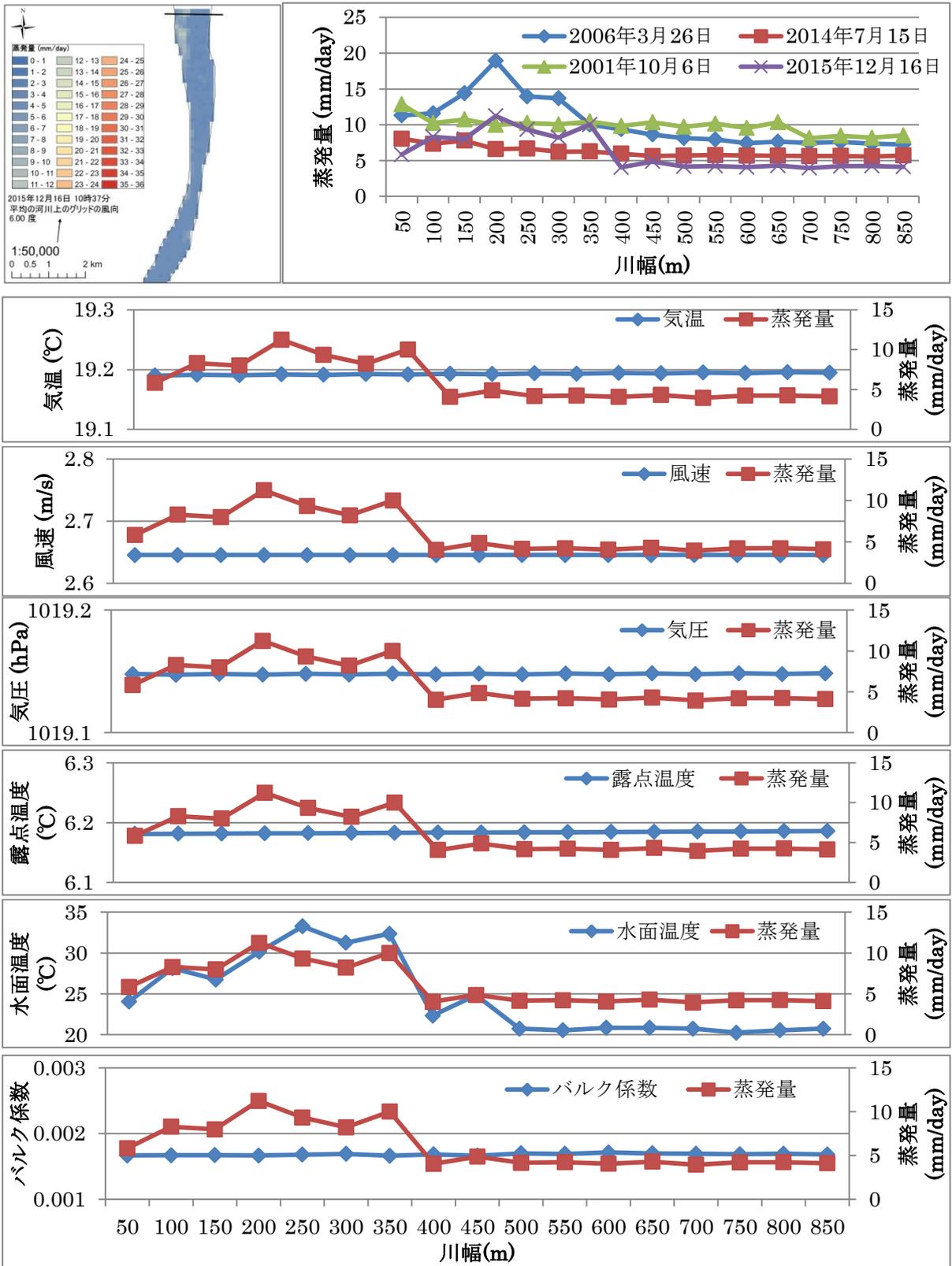


図 10 上流地点・冬季・日中における蒸発量および気象データ

(a)蒸発量の空間分布, (b)河川の水平断面における蒸発量の季節変動, (c)~(d)は河川断面における蒸発量と気象データの比較, 比べる気象データは(c)気温, (d)風速, (e)気圧, (f)露点温度, (g)水面温度, (h)バルク係数である.

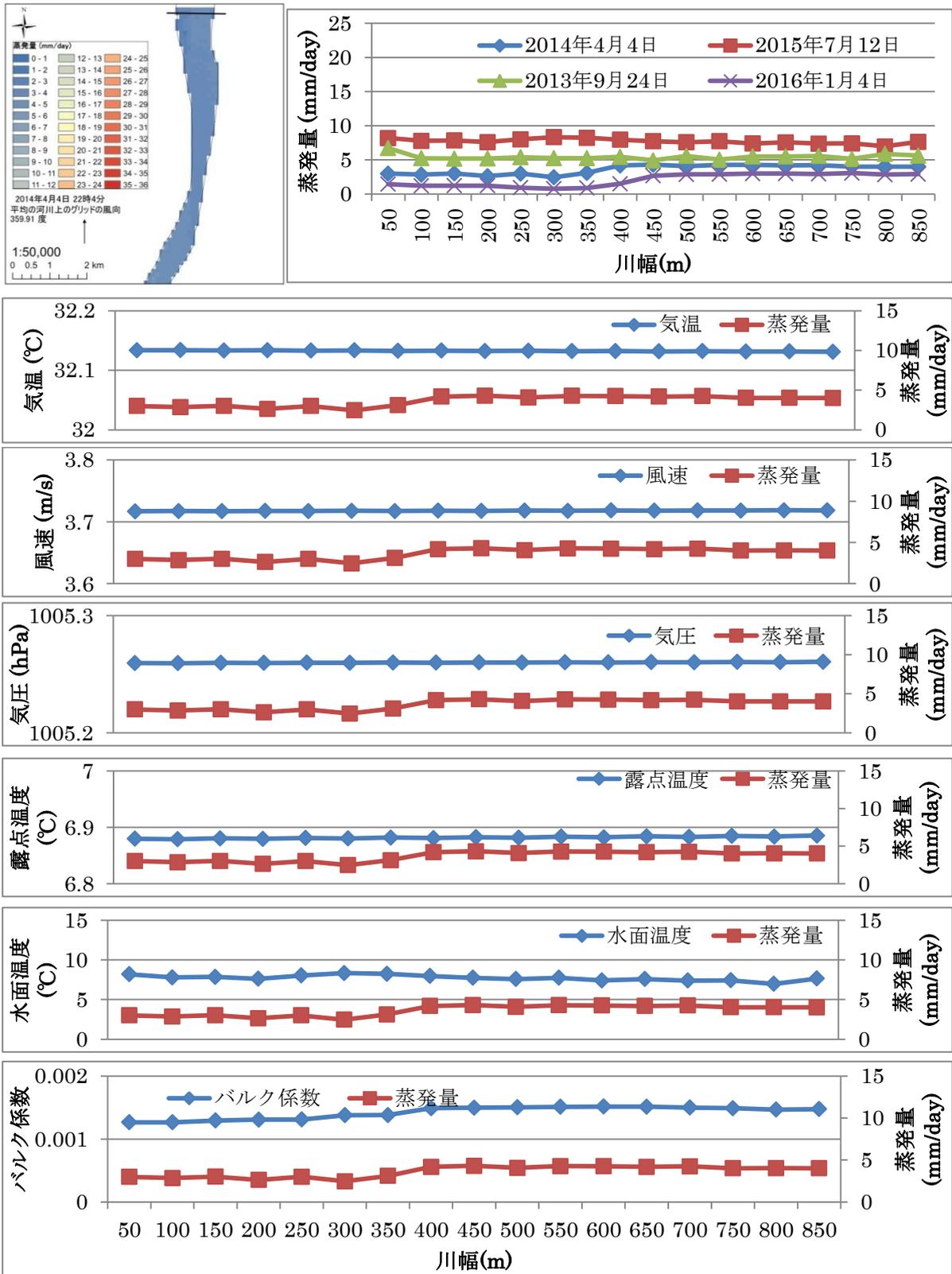


図 11 上流地点・春季・夜間における蒸発量および気象データ

(a)蒸発量の空間分布, (b)河川の水平断面における蒸発量の季節変動, (c)~(d)は河川断面における蒸発量と気象データの比較, 比べる気象データは(c)気温, (d)風速, (e)気圧, (f)露点温度, (g)水面温度, (h)バルク係数である。

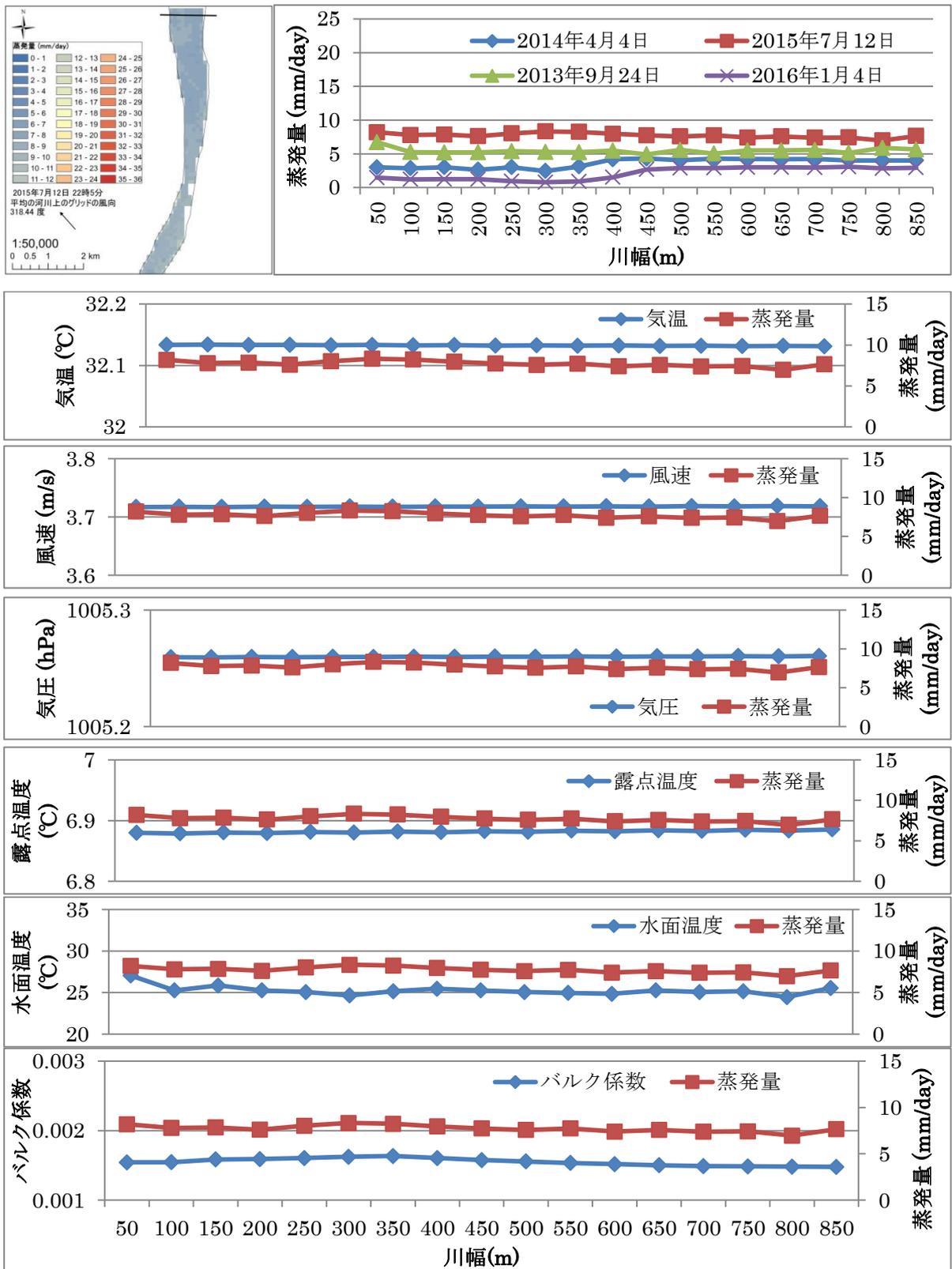


図 12 上流地点・夏季・夜間における蒸発量および気象データ

(a)蒸発量の空間分布, (b)河川の水平断面における蒸発量の季節変動, (c)~(d)は河川断面における蒸発量と気象データの比較, 比べる気象データは(c)気温, (d)風速, (e)気圧, (f)露点温度, (g)水面温度, (h)バルク係数である.

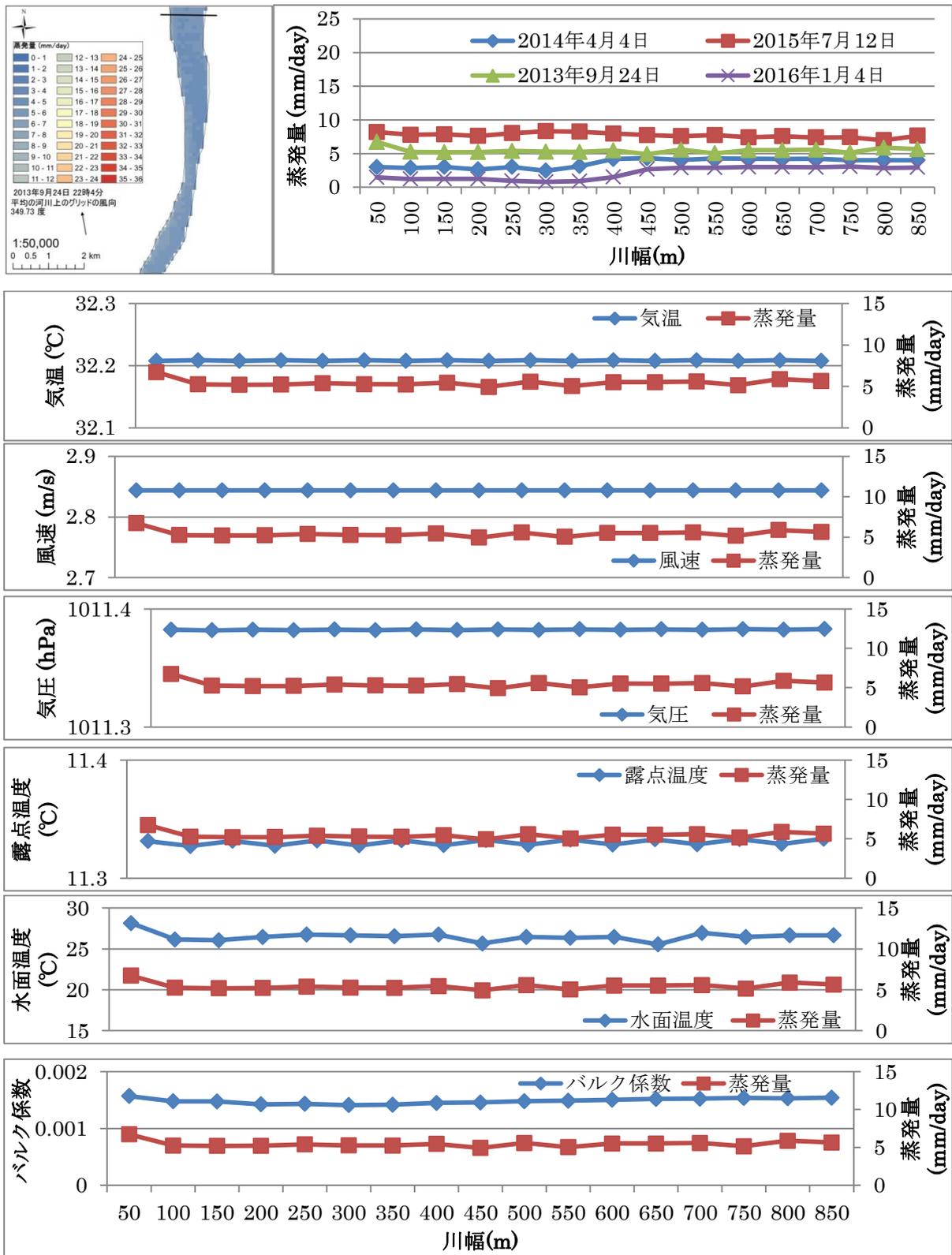


図 13 上流地点・秋季・夜間における蒸発量および気象データ

(a)蒸発量の空間分布, (b)河川の水平断面における蒸発量の季節変動, (c)~(d)は河川断面における蒸発量と気象データの比較, 比べる気象データは(c)気温, (d)風速, (e)気圧, (f)露点温度, (g)水面温度, (h)バルク係数である.

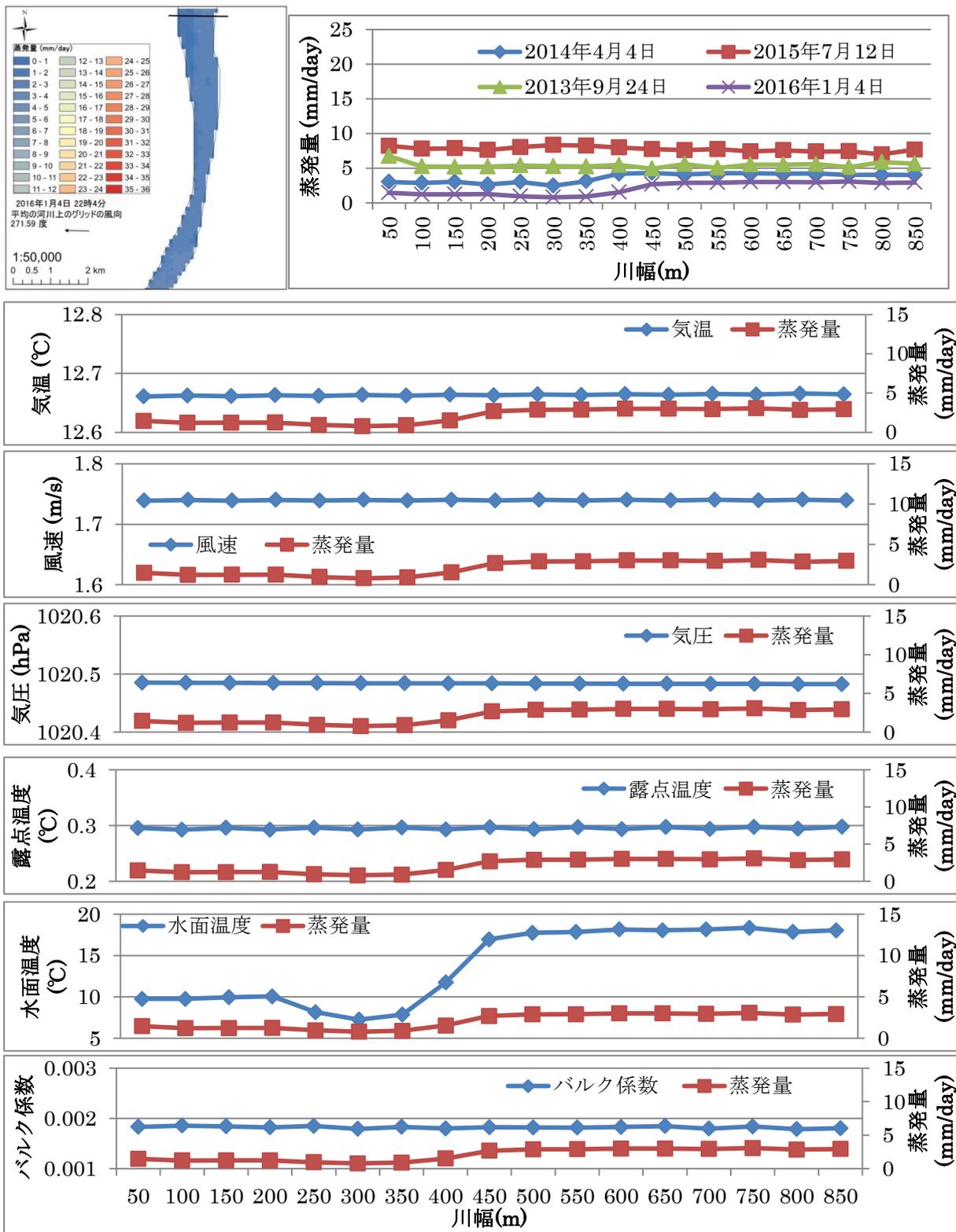


図 14 上流地点・冬季・夜間における蒸発量および気象データ

(a)蒸発量の空間分布, (b)河川の水平断面における蒸発量の季節変動, (c)~(d)は河川断面における蒸発量と気象データの比較, 比べる気象データは(c)気温, (d)風速, (e)気圧, (f)露点温度, (g)水面温度, (h)バルク係数である。

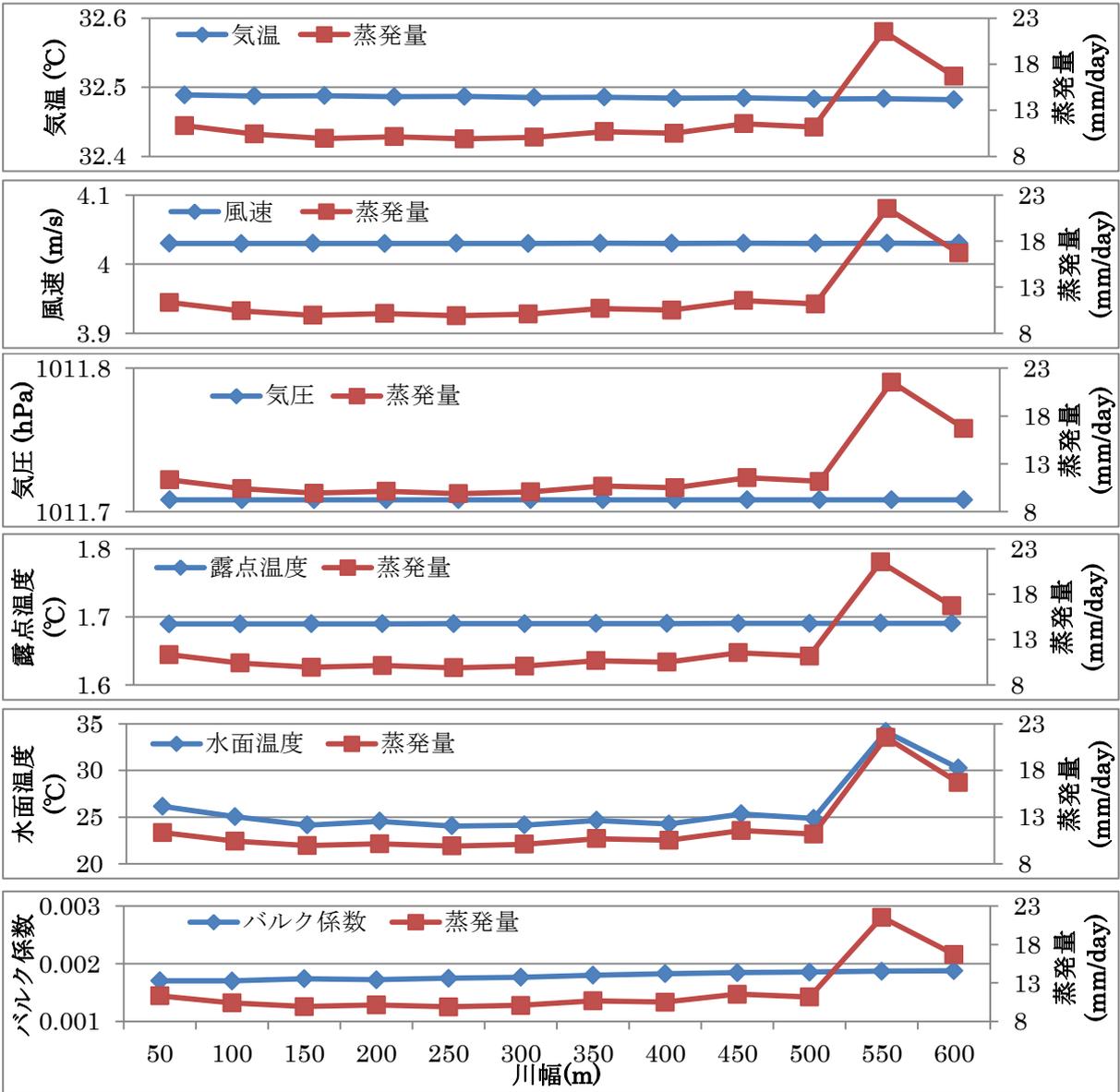
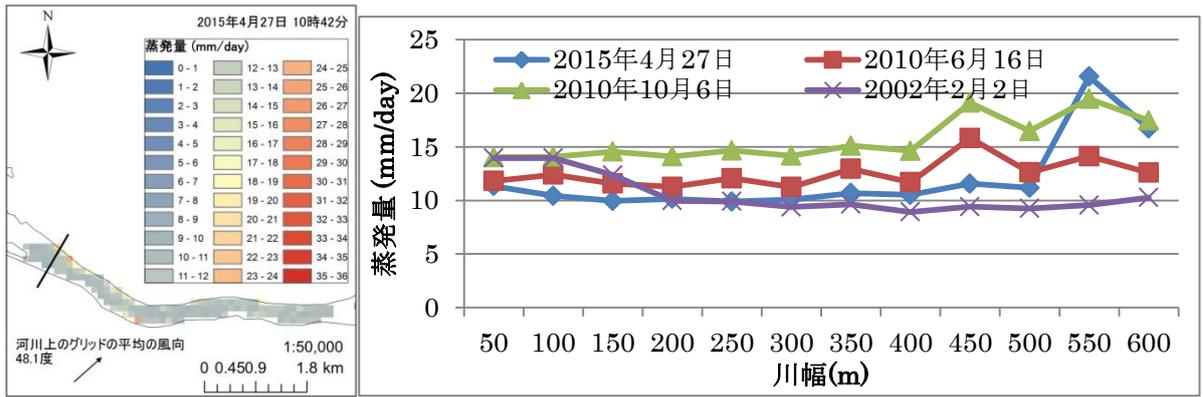


図 15 中流地点・春季・日中における蒸発量および気象データ

(a)蒸発量の空間分布, (b)河川の水平断面における蒸発量の季節変動, (c)~(d)は河川断面における蒸発量と気象データの比較, 比べる気象データは(c)気温, (d)風速, (e)気圧, (f)露点温度, (g)水面温度, (h)バルク係数である。

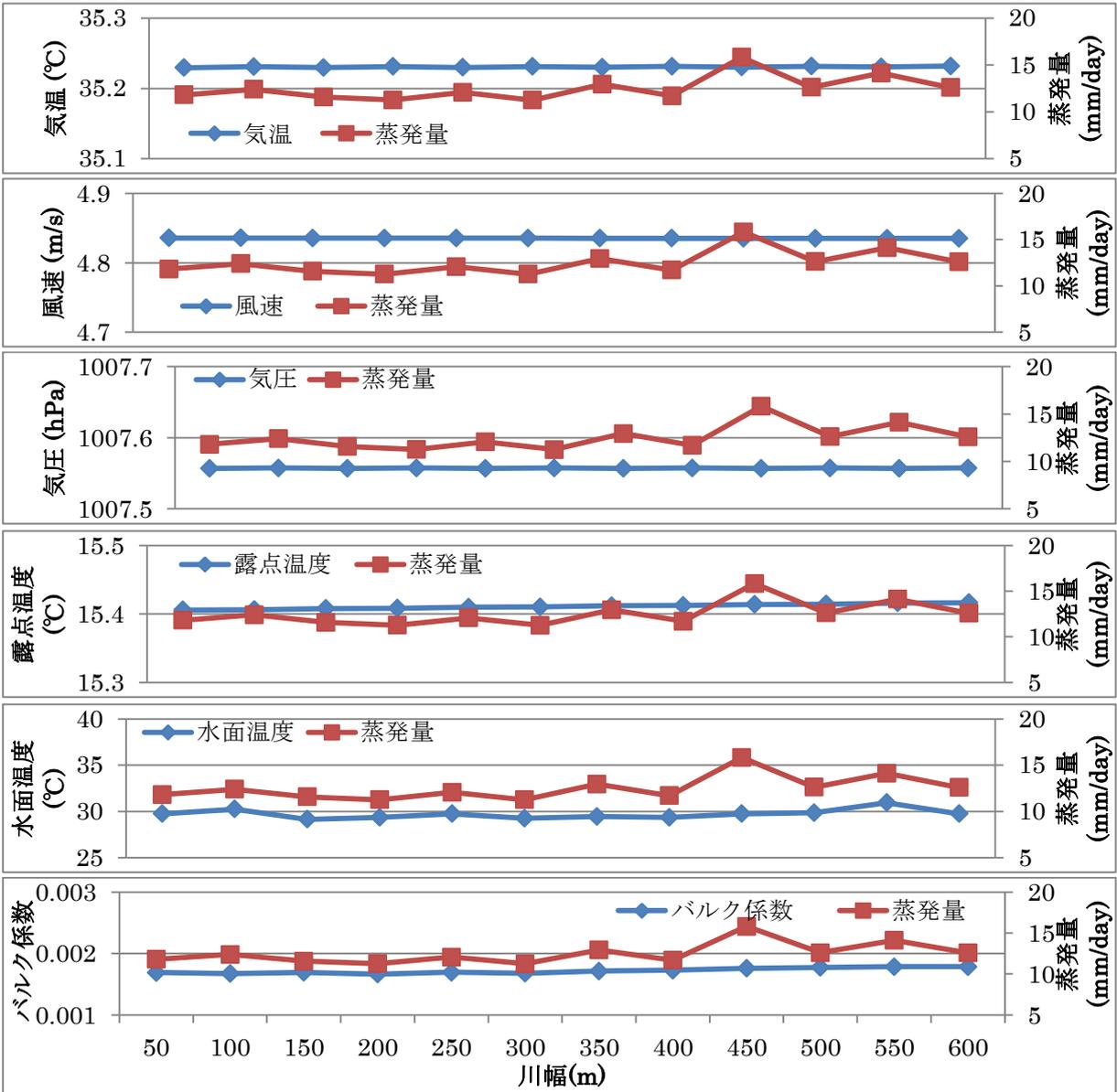
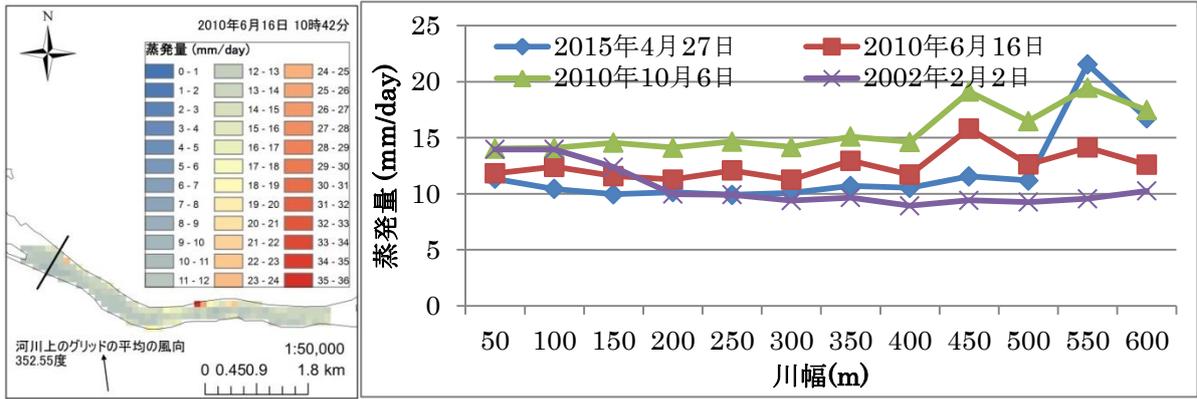


図 16 中流地点・夏季・日中における蒸発量および気象データ

(a)蒸発量の空間分布, (b)河川の水平断面における蒸発量の季節変動, (c)~(d)は河川断面における蒸発量と気象データの比較, 比べる気象データは(c)気温, (d)風速, (e)気圧, (f)露点温度, (g)水面温度, (h)バルク係数である。

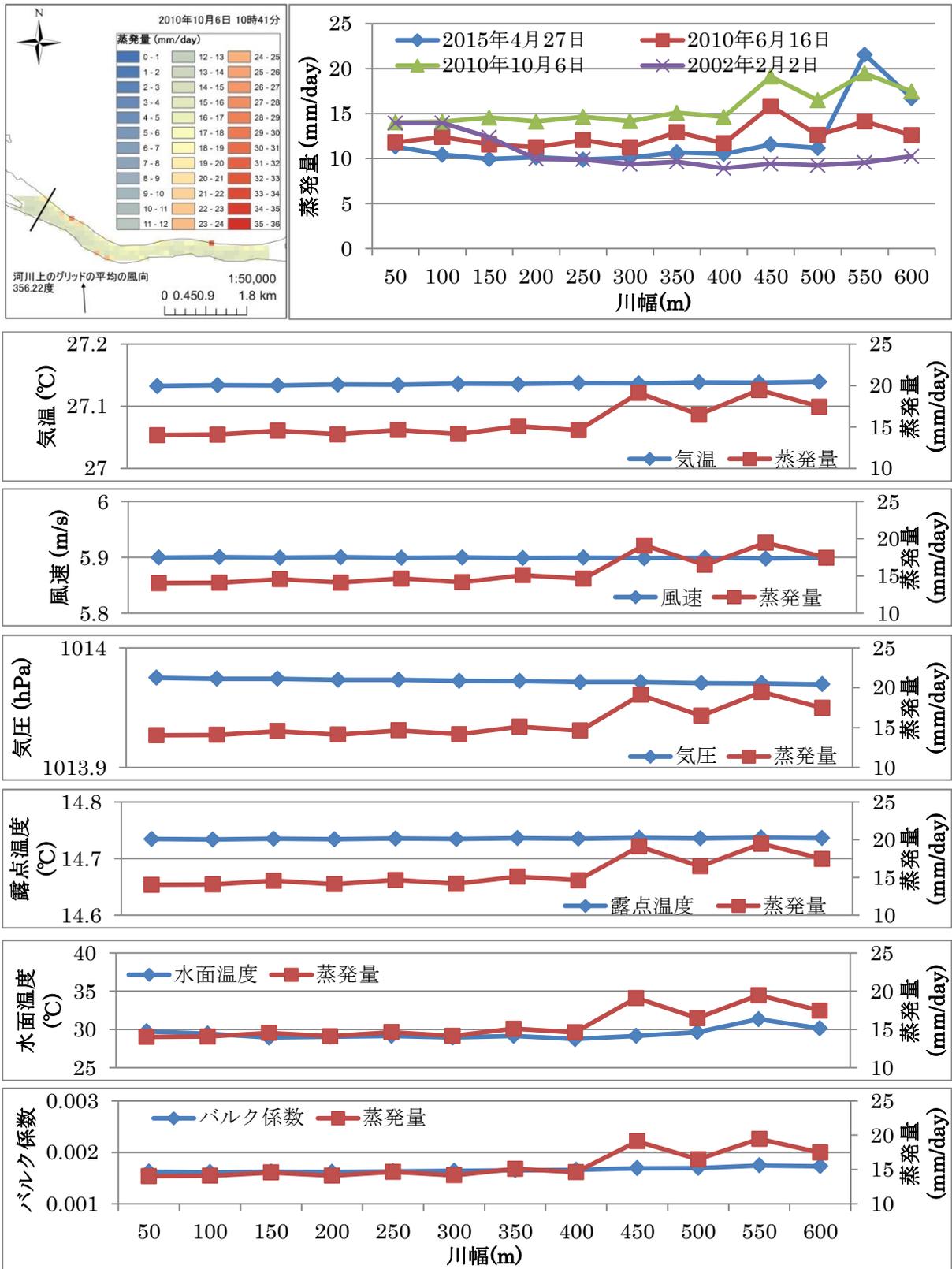


図 17 中流地点・秋季・日中における蒸発量および気象データ

(a)蒸発量の空間分布, (b)河川の水平断面における蒸発量の季節変動, (c)~(d)は河川断面における蒸発量と気象データの比較, 比べる気象データは(c)気温, (d)風速, (e)気圧, (f)露点温度, (g)水面温度, (h)バルク係数である。

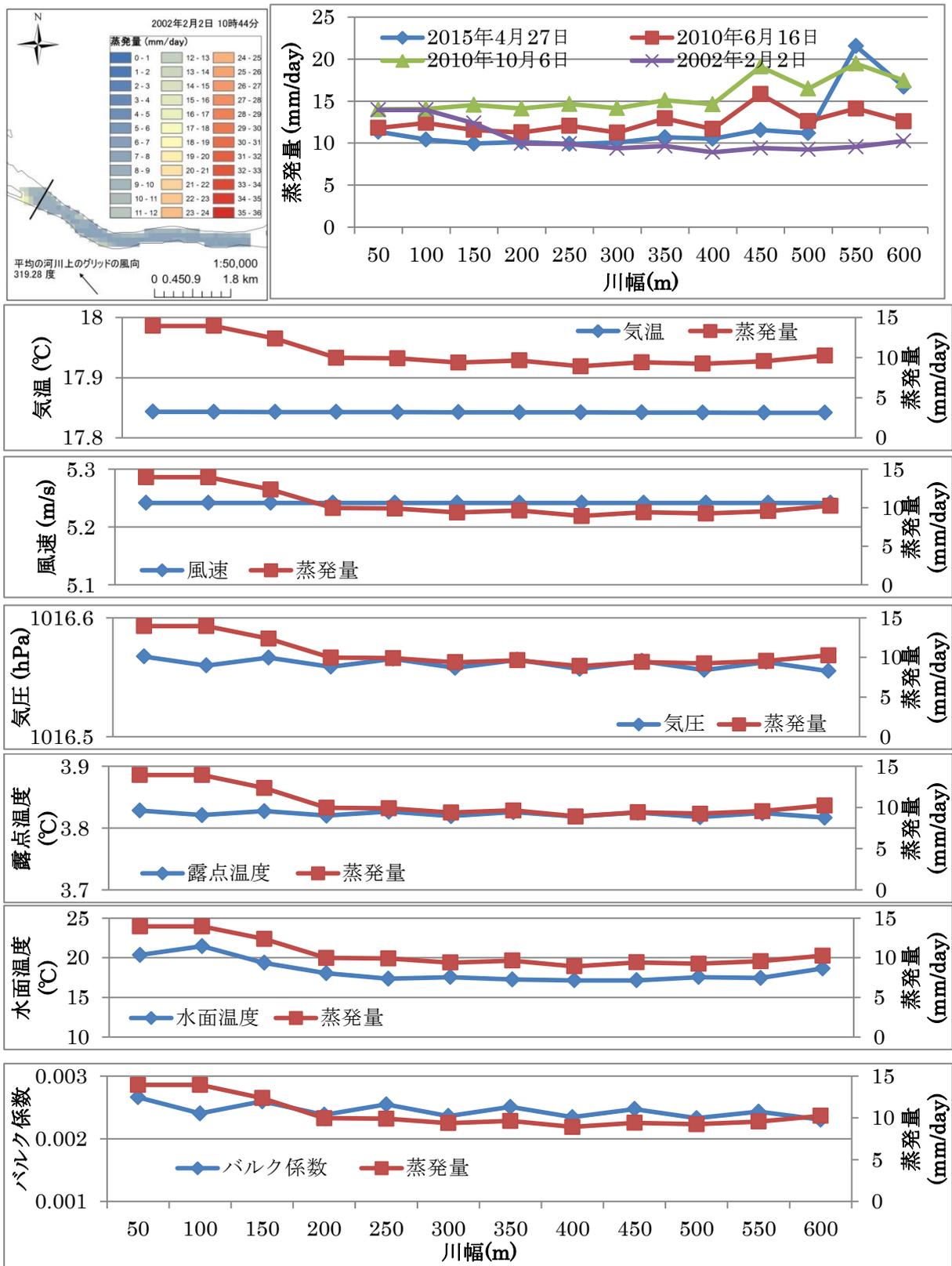


図 18 中流地点・冬季・日中における蒸発量および気象データ

(a)蒸発量の空間分布, (b)河川の水平断面における蒸発量の季節変動, (c)~(d)は河川断面における蒸発量と気象データの比較, 比べる気象データは(c)気温, (d)風速, (e)気圧, (f)露点温度, (g)水面温度, (h)バルク係数である.

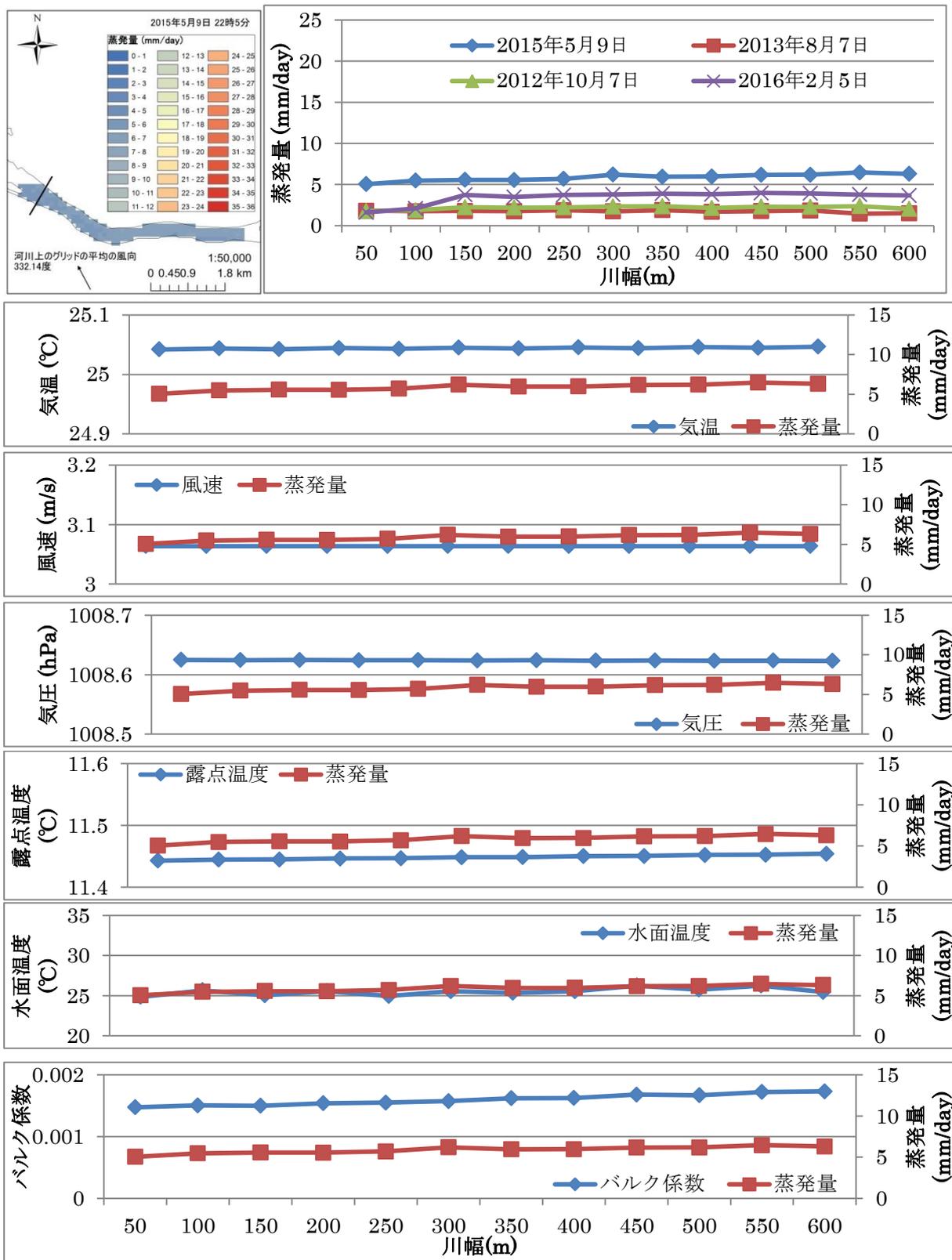


図 19 中流地点・春季・夜間における蒸発量および気象データ

(a)蒸発量の空間分布, (b)河川の水平断面における蒸発量の季節変動, (c)~(d)は河川断面における蒸発量と気象データの比較, 比べる気象データは(c)気温, (d)風速, (e)気圧, (f)露点温度, (g)水面温度, (h)バルク係数である。

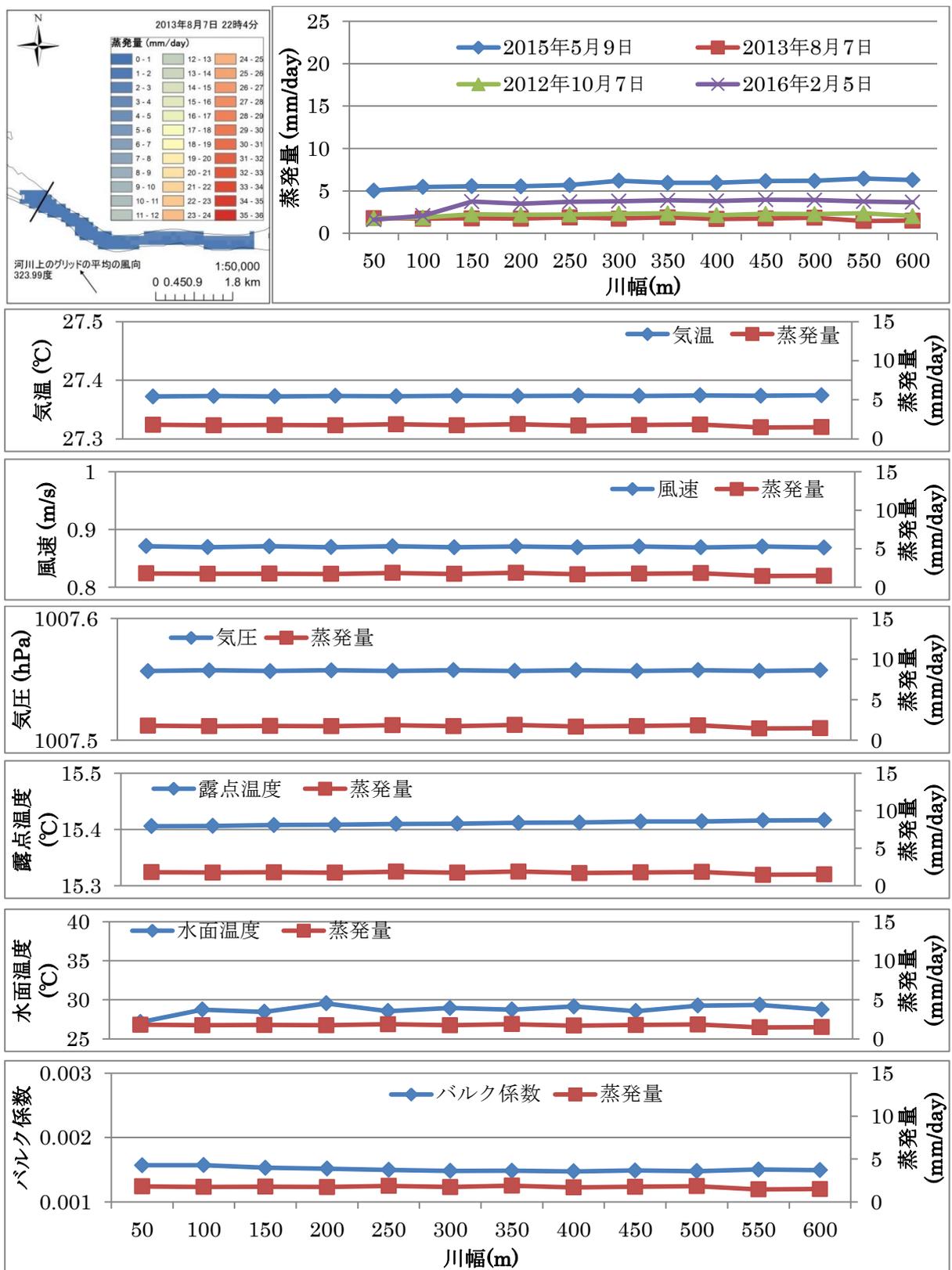


図 20 中流地点・夏季・夜間における蒸発量および気象データ

(a)蒸発量の空間分布, (b)河川の水平断面における蒸発量の季節変動, (c)~(d)は河川断面における蒸発量と気象データの比較, 比べる気象データは(c)気温, (d)風速, (e)気圧, (f)露点温度, (g)水面温度, (h)バルク係数である。

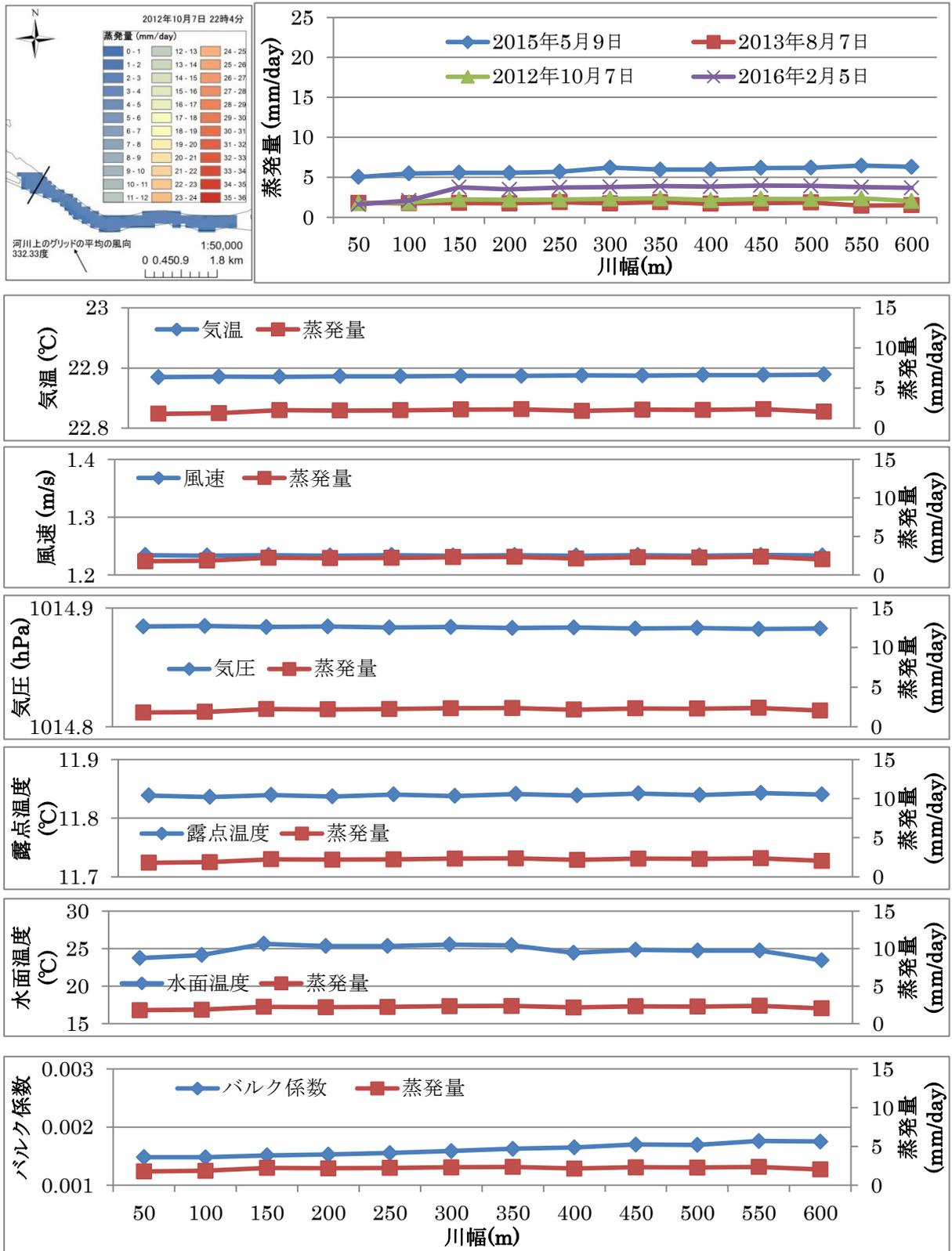


図 21 中流地点・秋季・夜間における蒸発量および気象データ

(a)蒸発量の空間分布, (b)河川の水平断面における蒸発量の季節変動, (c)~(d)は河川断面における蒸発量と気象データの比較, 比べる気象データは(c)気温, (d)風速, (e)気圧, (f)露点温度, (g)水面温度, (h)バルク係数である。

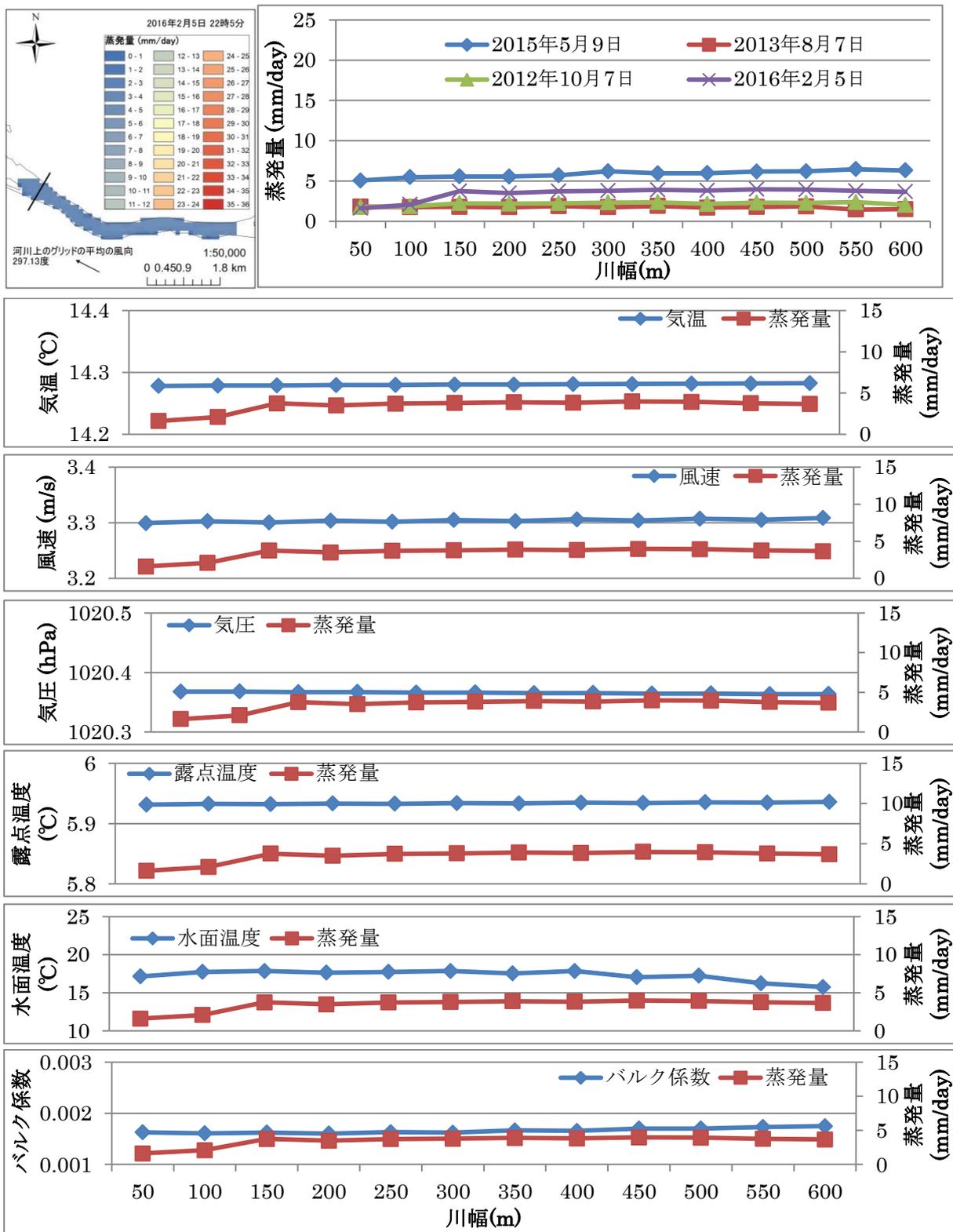


図 22 中流地点・冬季・日中における蒸発量および気象データ

(a)蒸発量の空間分布, (b)河川の水平断面における蒸発量の季節変動, (c)~(h)は河川断面における蒸発量と気象データの比較, 比べる気象データは(c)気温, (d)風速, (e)気圧, (f)露点温度, (g)水面温度, (h)バルク係数である。

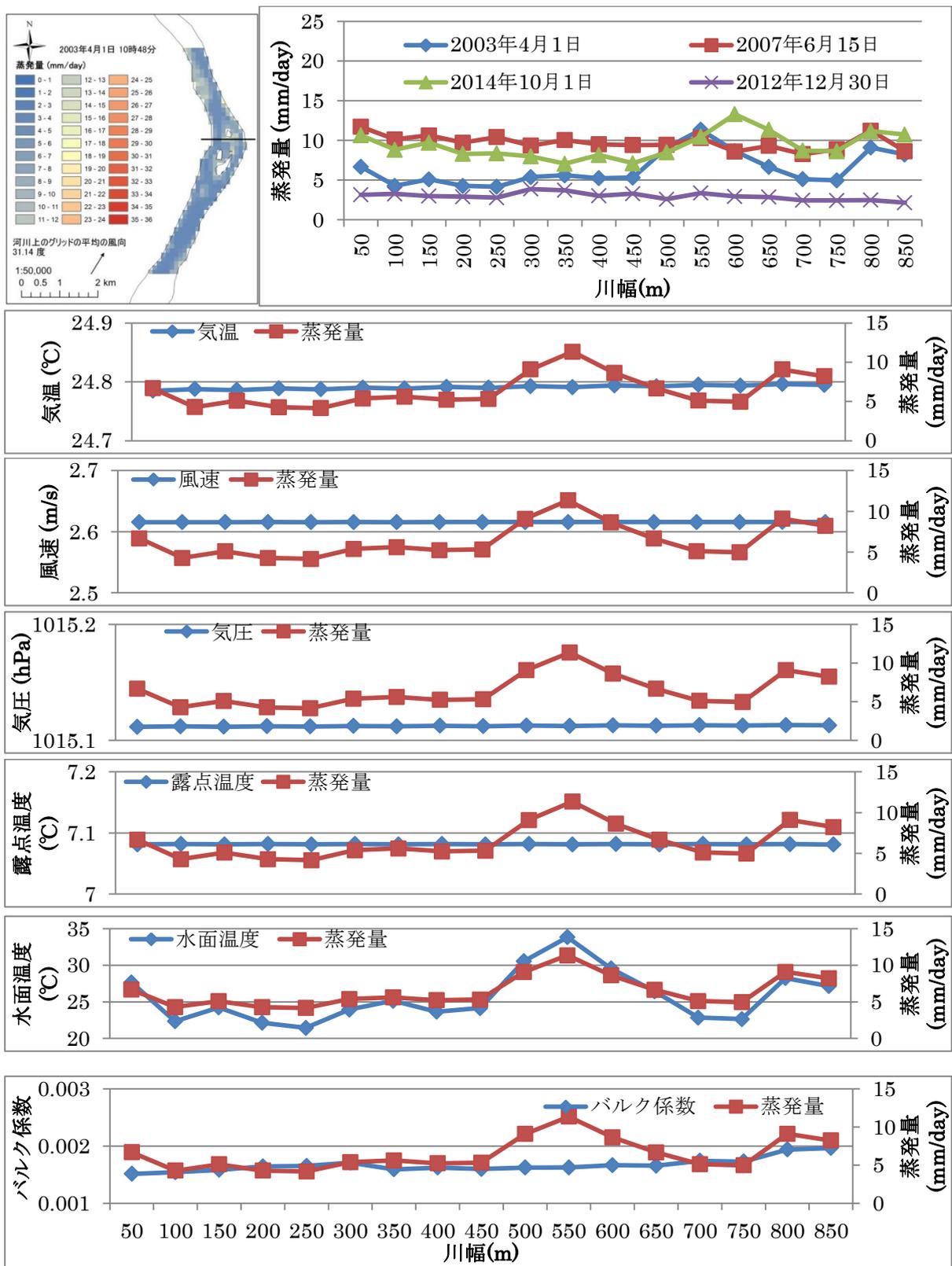


図 23 下流地点・春季・日中における蒸発量および気象データ

(a)蒸発量の空間分布, (b)河川の水平断面における蒸発量の季節変動, (c)~(d)は河川断面における蒸発量と気象データの比較, 比べる気象データは(c)気温, (d)風速, (e)気圧, (f)露点温度, (g)水面温度, (h)バルク係数である。

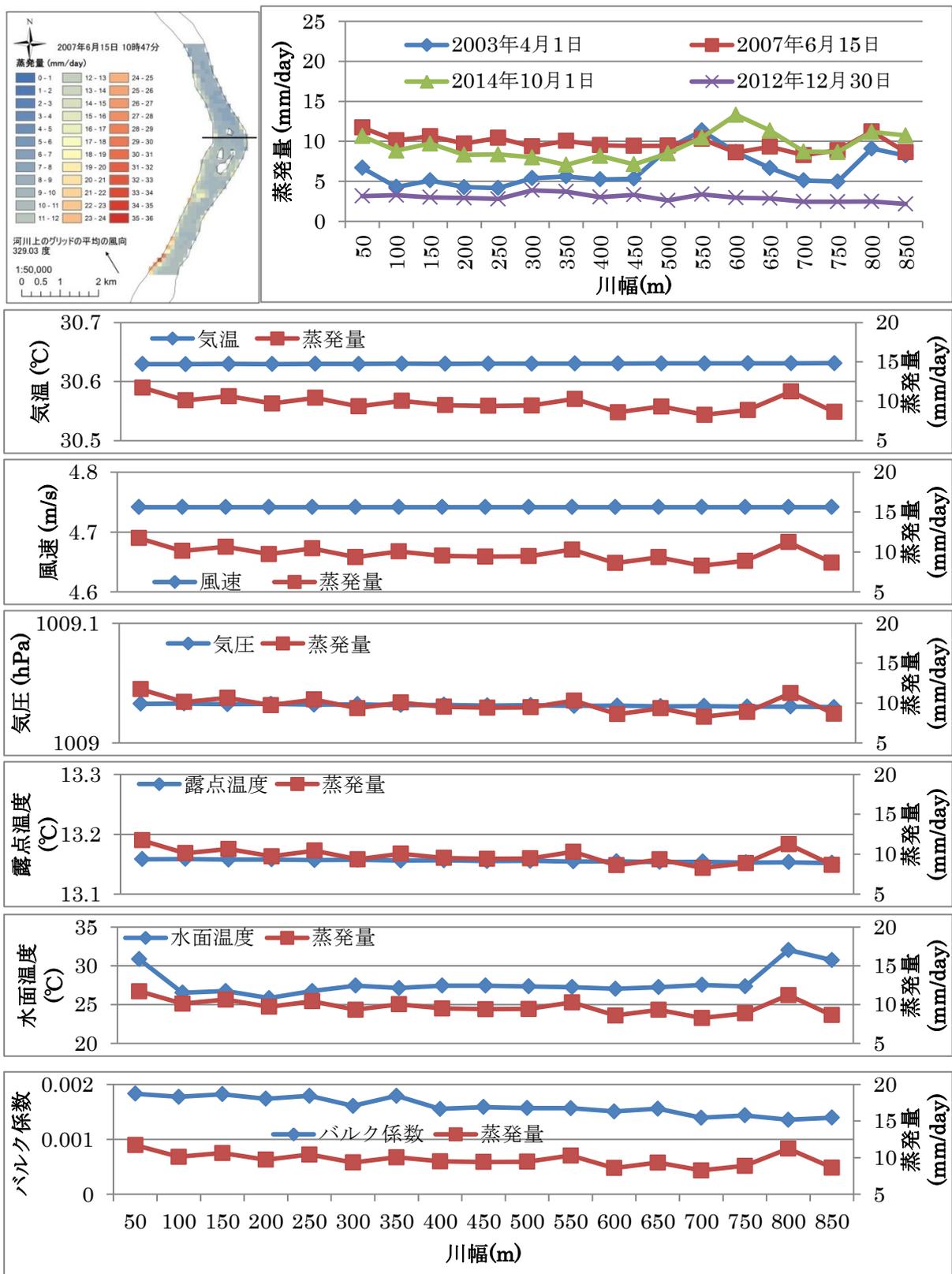


図 24 下流地点・夏季・日中における蒸発量および気象データ

(a)蒸発量の空間分布, (b)河川の水平断面における蒸発量の季節変動, (c)~(d)は河川断面における蒸発量と気象データの比較, 比べる気象データは(c)気温, (d)風速, (e)気圧, (f)露点温度, (g)水面温度, (h)バルク係数である。

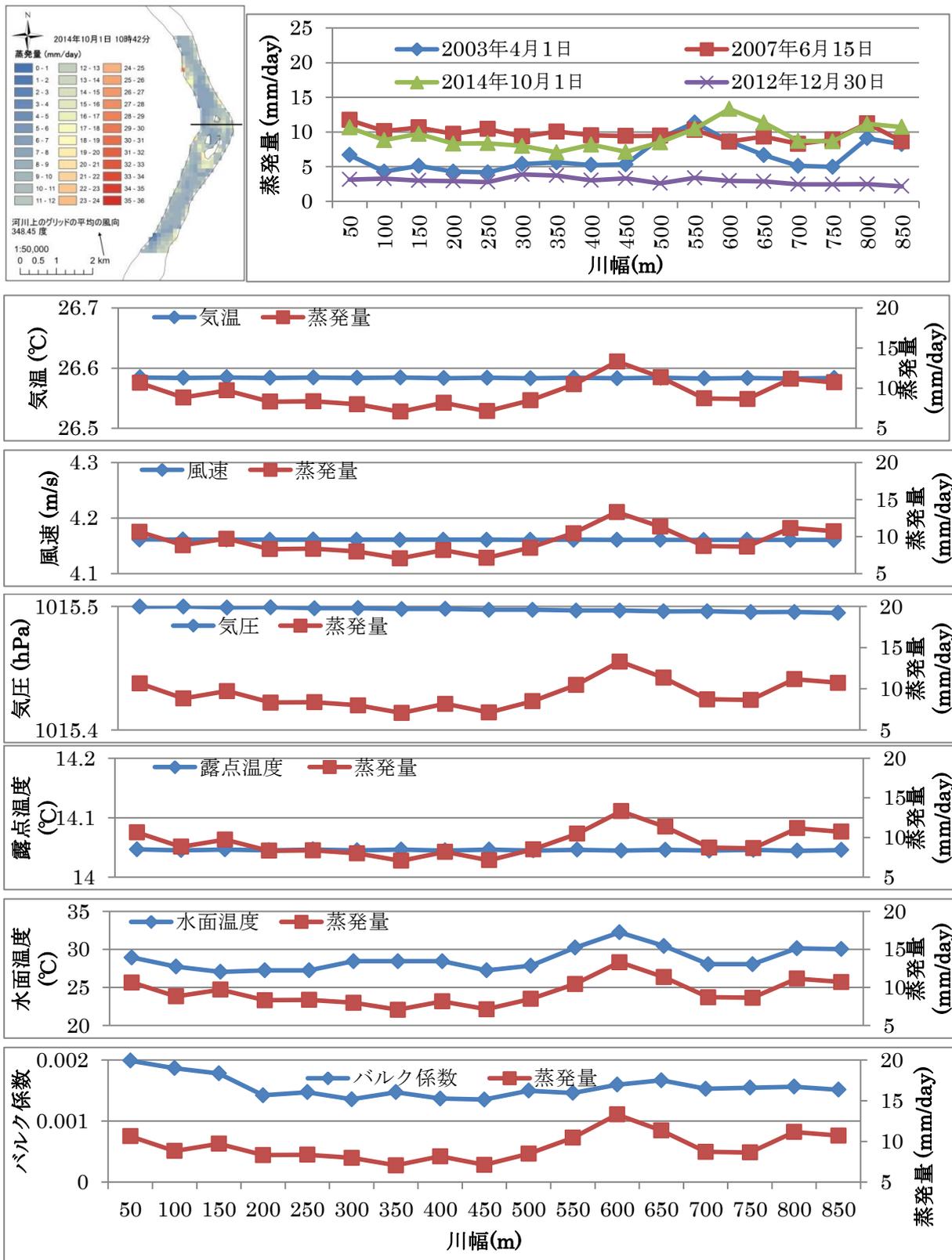


図 25 下流地点・秋季・日中における蒸発量および気象データ

(a)蒸発量の空間分布, (b)河川の水平断面における蒸発量の季節変動, (c)~(d)は河川断面における蒸発量と気象データの比較, 比べる気象データは(c)気温, (d)風速, (e)気圧, (f)露点温度, (g)水面温度, (h)バルク係数である。

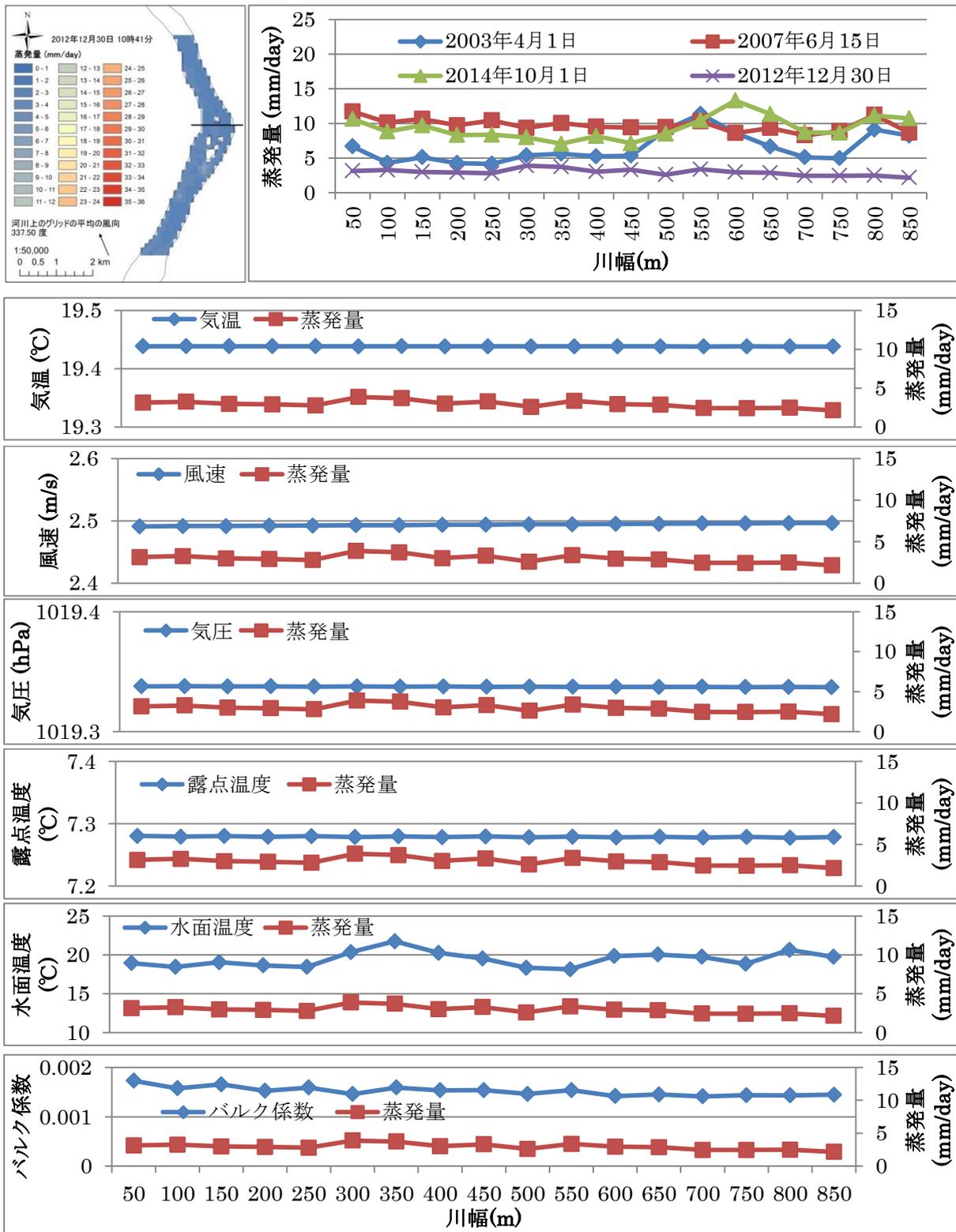


図 26 下流地点・冬季・日中における蒸発量および気象データ

(a)蒸発量の空間分布, (b)河川の水平断面における蒸発量の季節変動, (c)~(h)は河川断面における蒸発量と気象データの比較, 比べる気象データは(c)気温, (d)風速, (e)気圧, (f)露点温度, (g)水面温度, (h)バルク係数である。

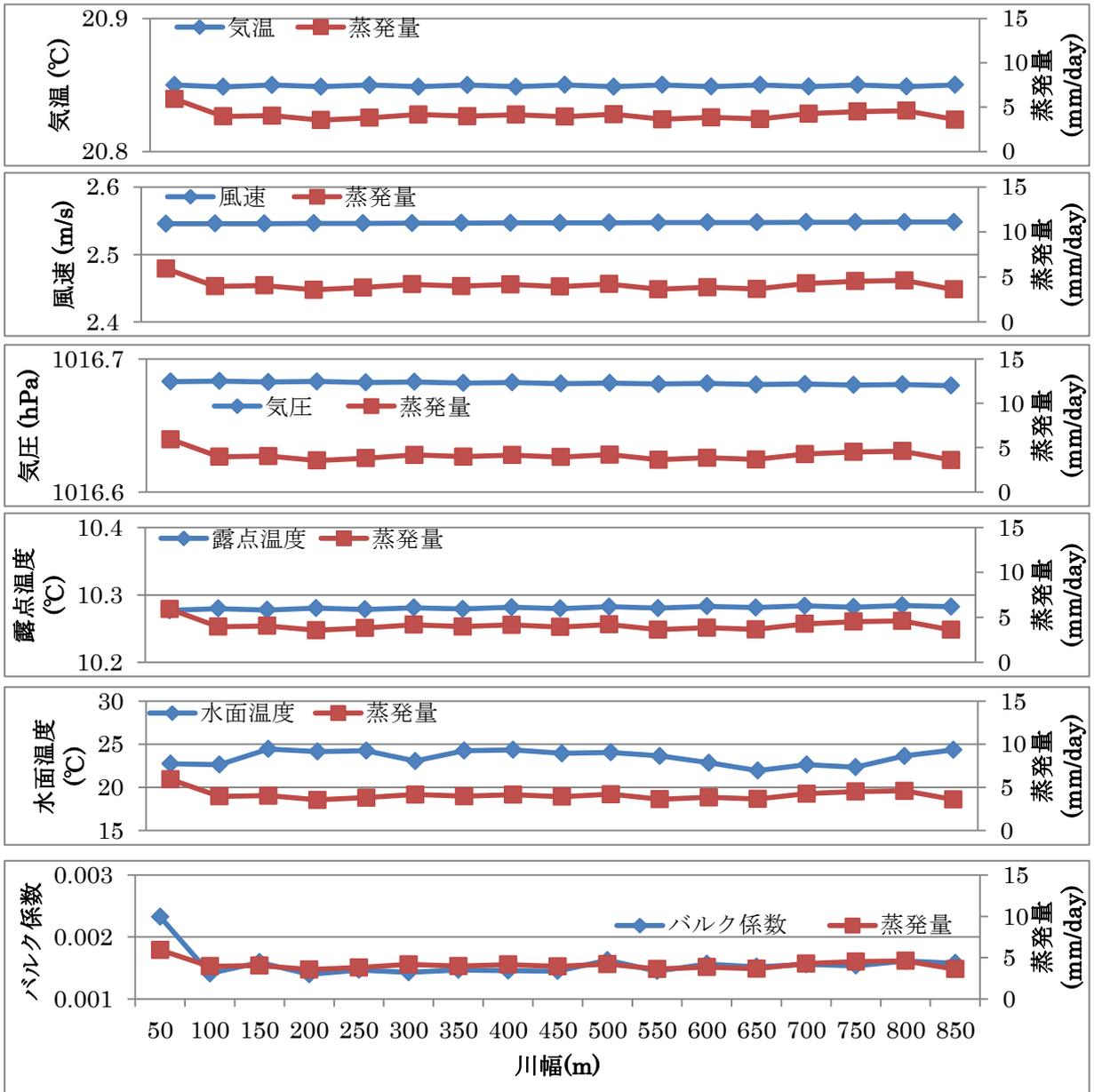
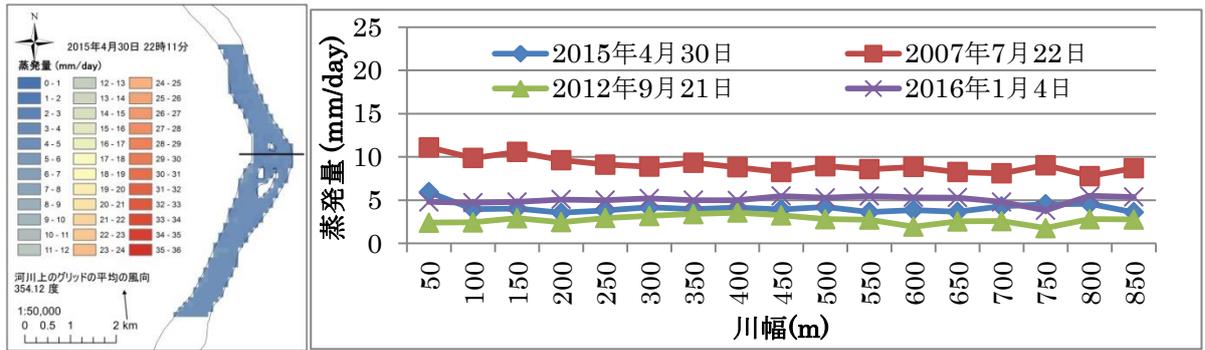


図 27 下流地点・春季・夜間における蒸発量および気象データ

(a)蒸発量の空間分布, (b)河川の水平断面における蒸発量の季節変動, (c)~(d)は河川断面における蒸発量と気象データの比較, 比べる気象データは(c)気温, (d)風速, (e)気圧, (f)露点温度, (g)水面温度, (h)バルク係数である。

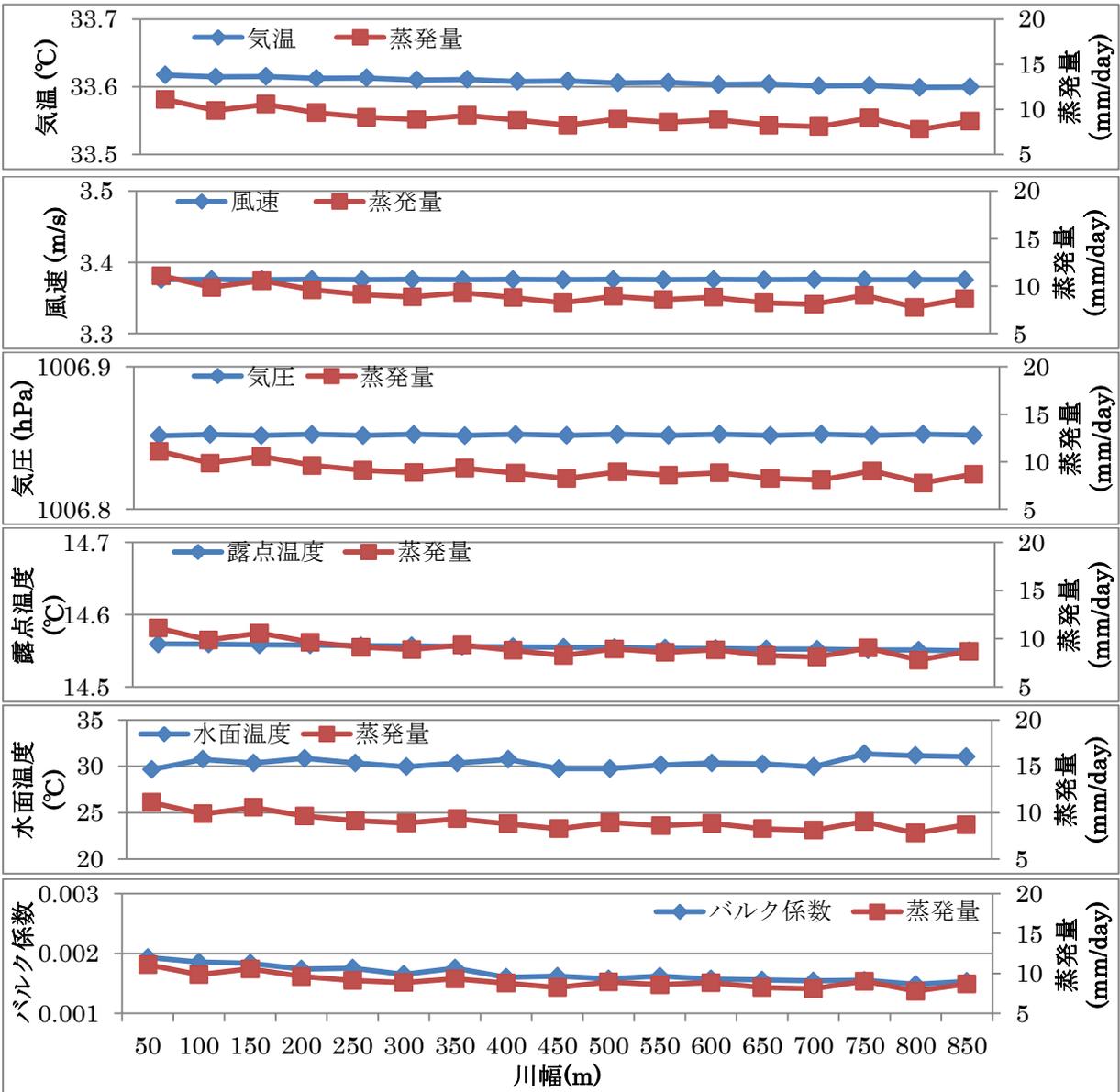
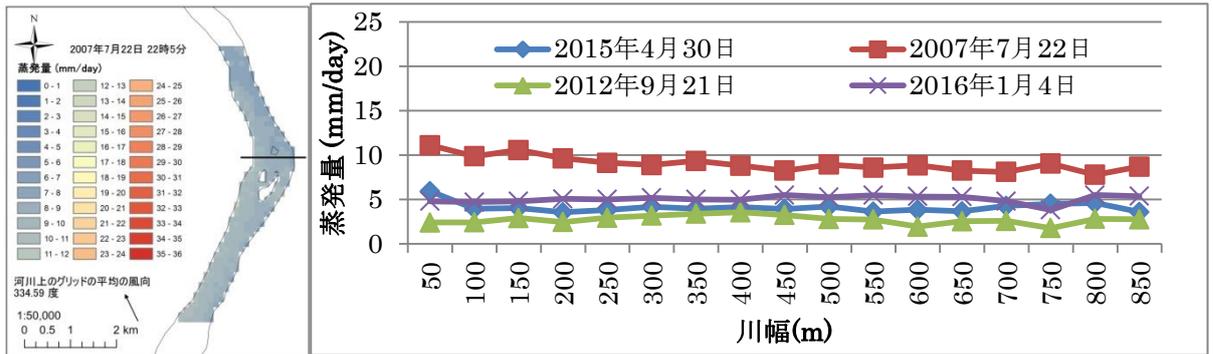


図 28 下流地点・夏季・夜間における蒸発量および気象データ

(a)蒸発量の空間分布, (b)河川の水平断面における蒸発量の季節変動, (c)~(d)は河川断面における蒸発量と気象データの比較, 比べる気象データは(c)気温, (d)風速, (e)気圧, (f)露点温度, (g)水面温度, (h)バルク係数である。

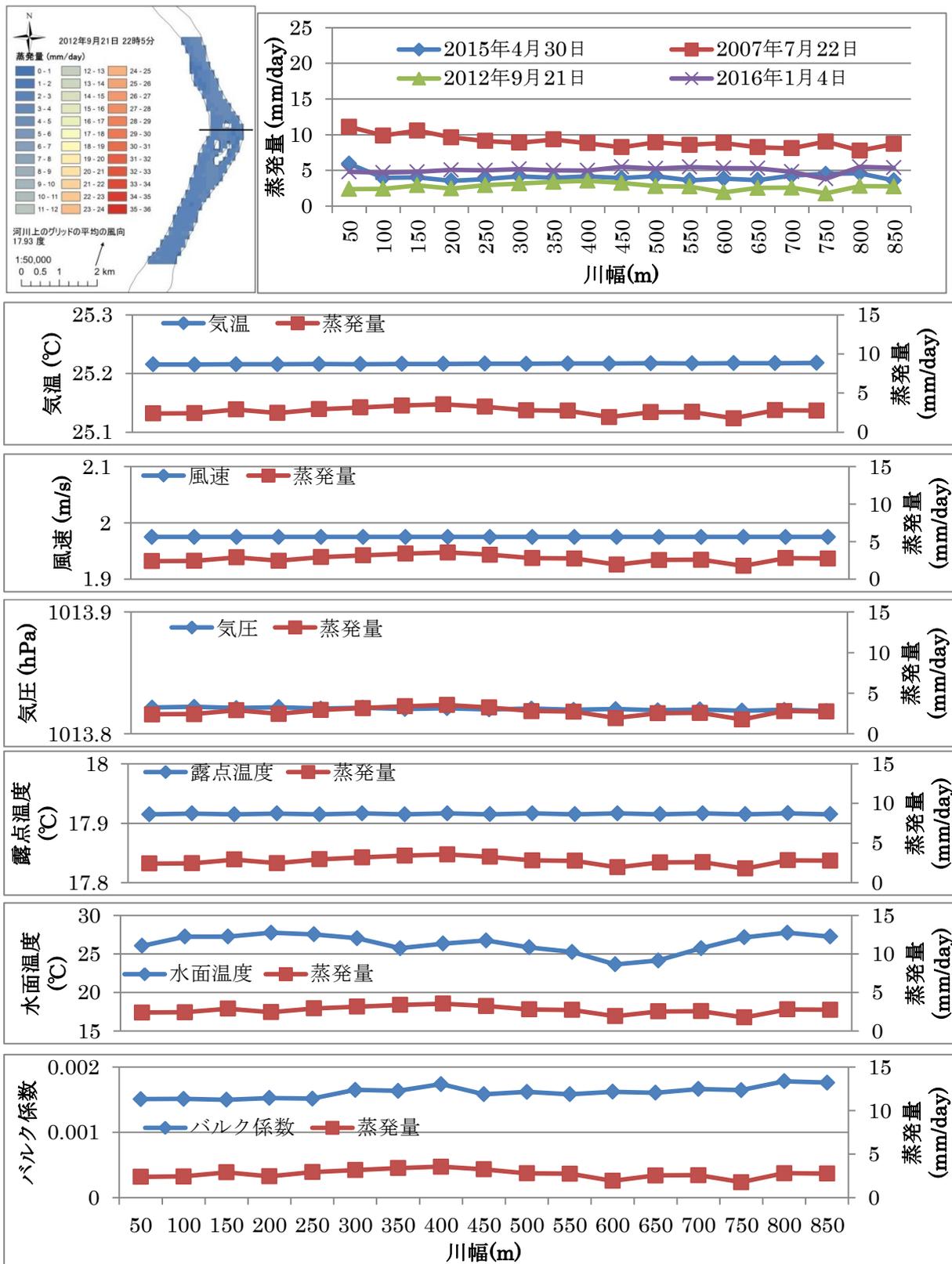


図 29 下流地点・秋季・夜間における蒸発量および気象データ

(a)蒸発量の空間分布, (b)河川の水平断面における蒸発量の季節変動, (c)~(d)は河川断面における蒸発量と気象データの比較, 比べる気象データは(c)気温, (d)風速, (e)気圧, (f)露点温度, (g)水面温度, (h)バルク係数である。

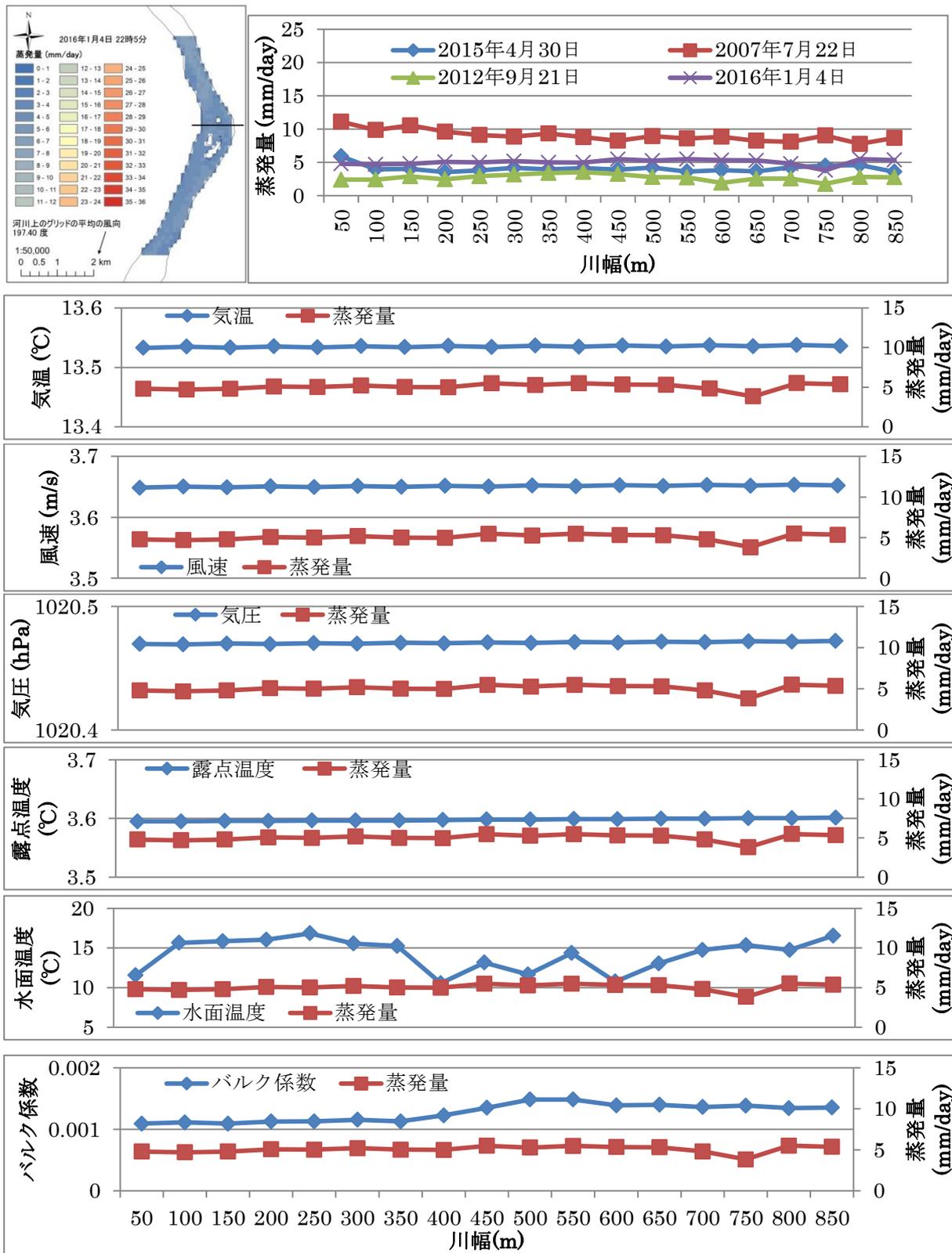


図 30 下流地点・冬季・夜間における蒸発量および気象データ

(a)蒸発量の空間分布, (b)河川の水平断面における蒸発量の季節変動, (c)~(d)は河川断面における蒸発量と気象データの比較, 比べる気象データは(c)気温, (d)風速, (e)気圧, (f)露点温度, (g)水面温度, (h)バルク係数である。

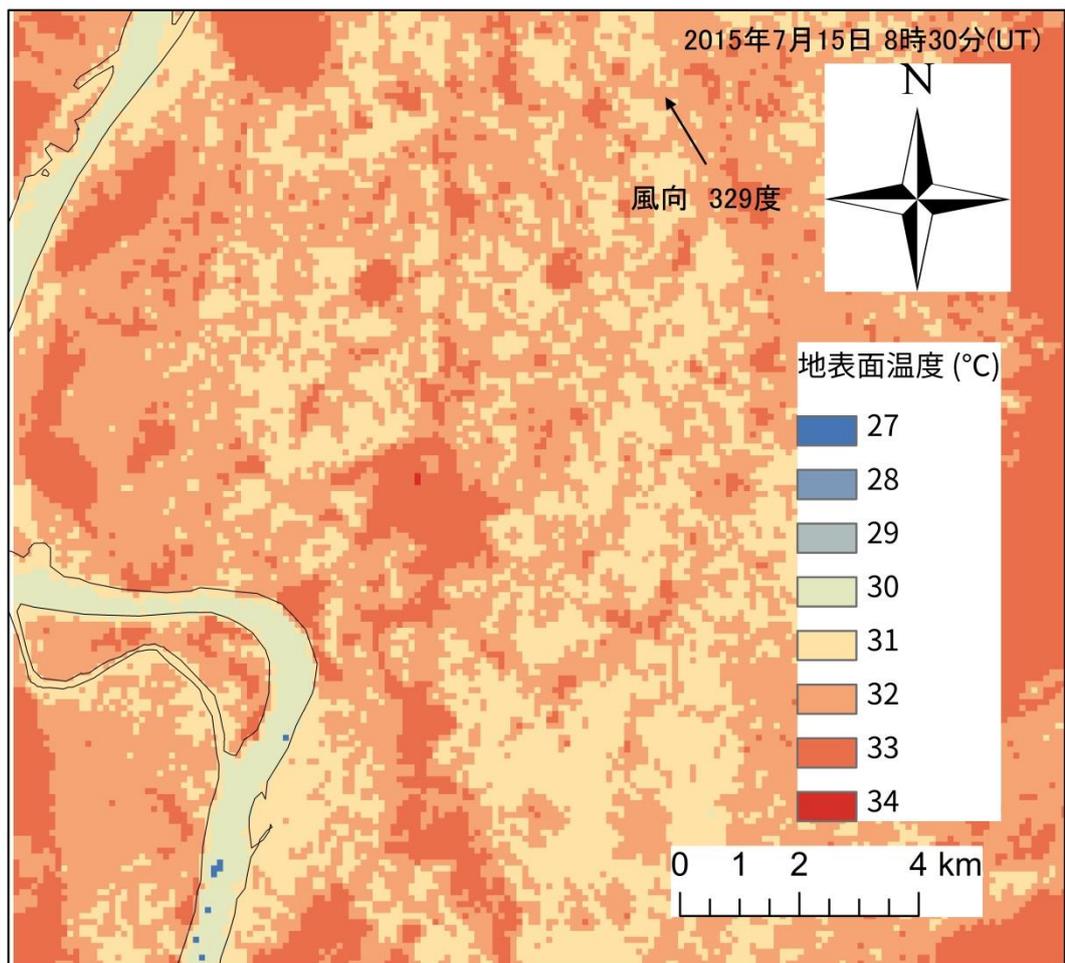


図 31 赤星地点(図 1)における夏季・日中の地表面温度分布

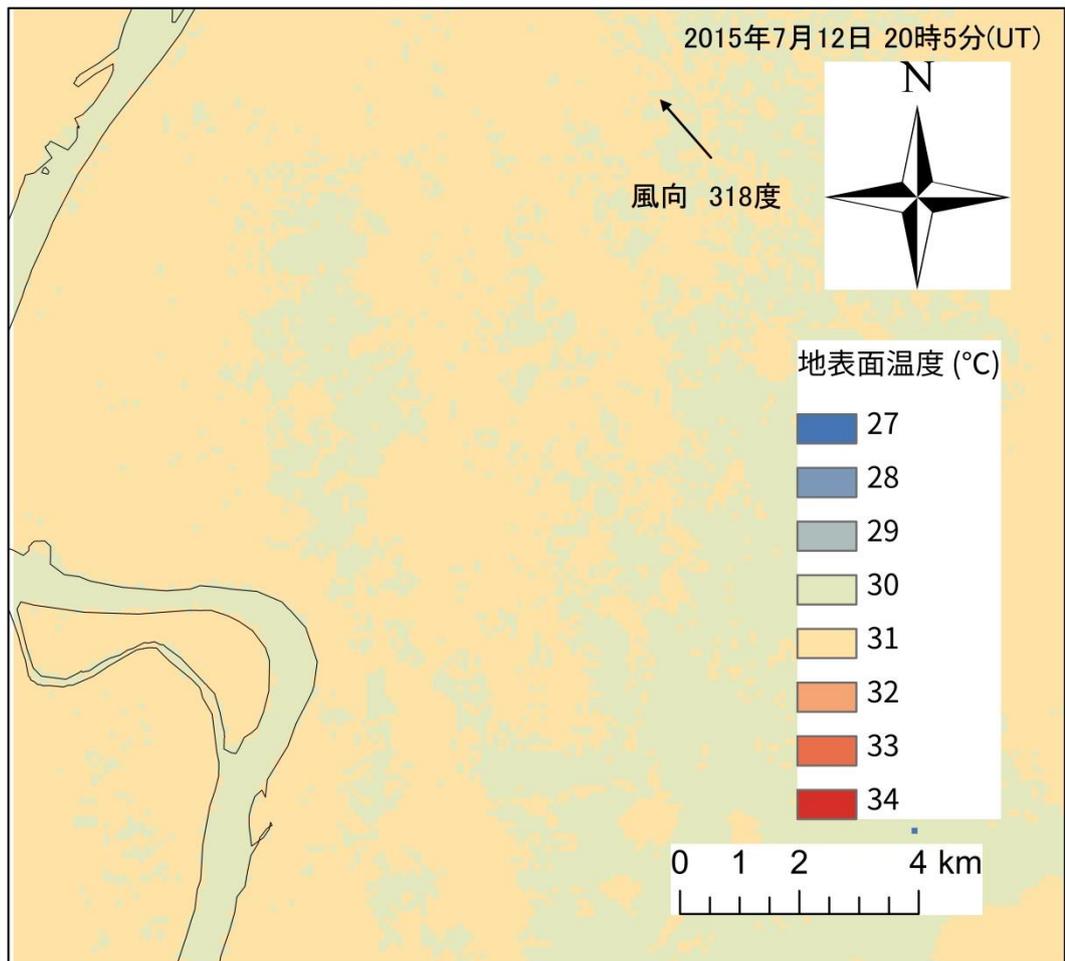


図 32 赤星地点(図 1)における夏季・夜間の地表面温度分布

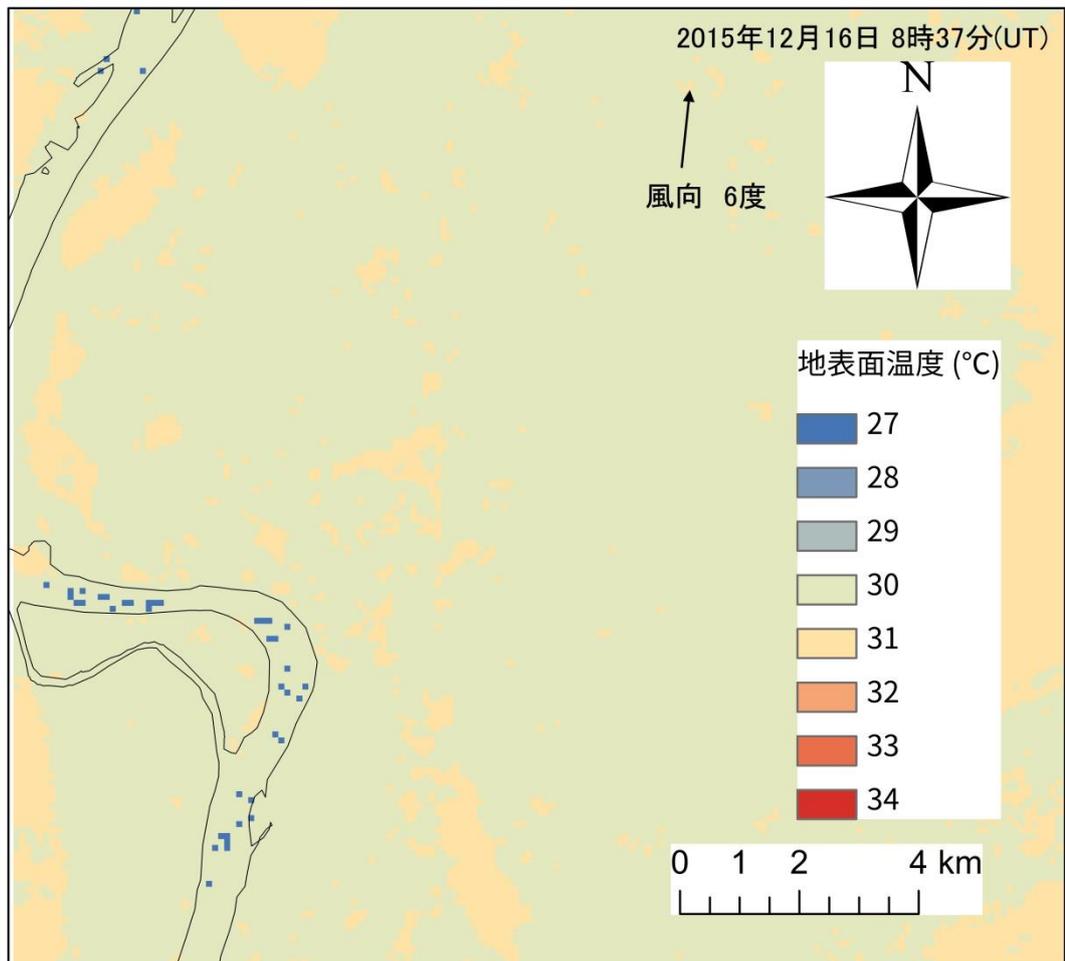


図 33 赤星地点(図 1)における冬季・日中の地表面温度分布

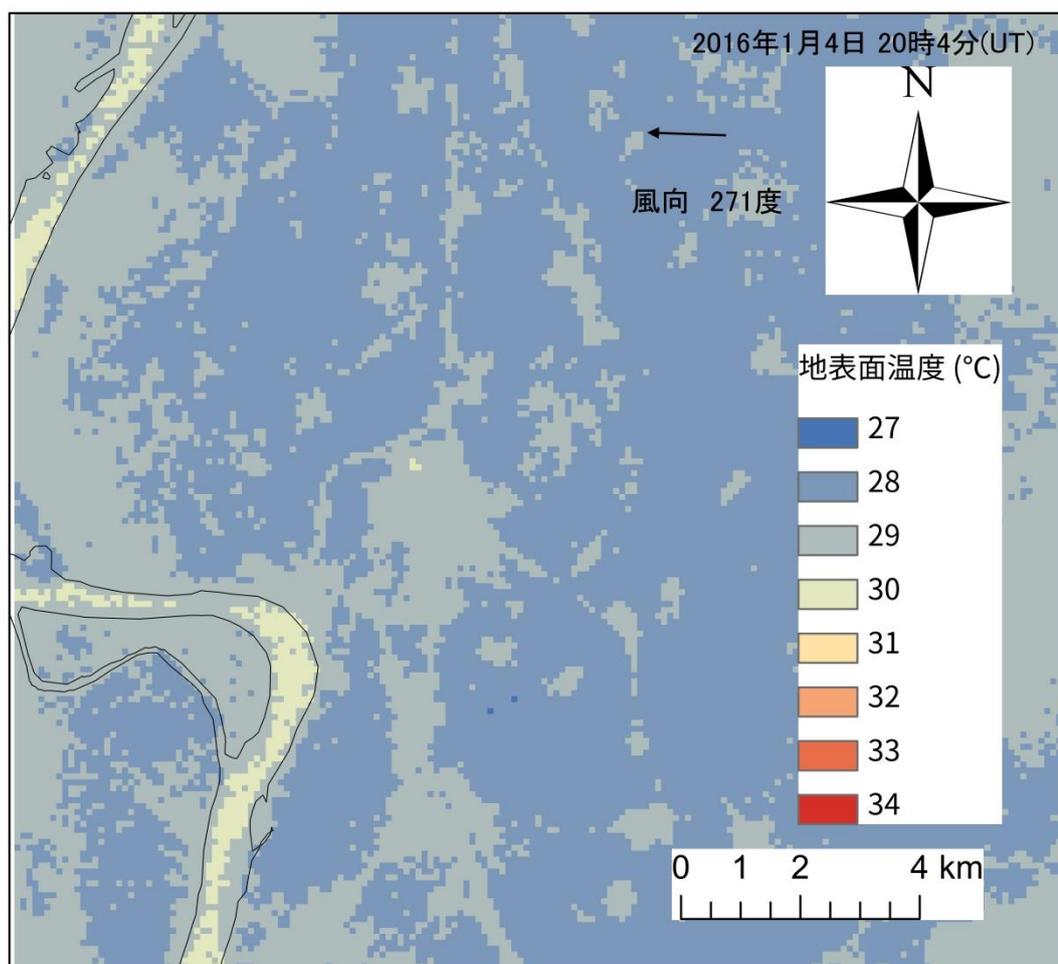


図 34 赤星地点(図 1)における冬季・夜間の地表面温度分布

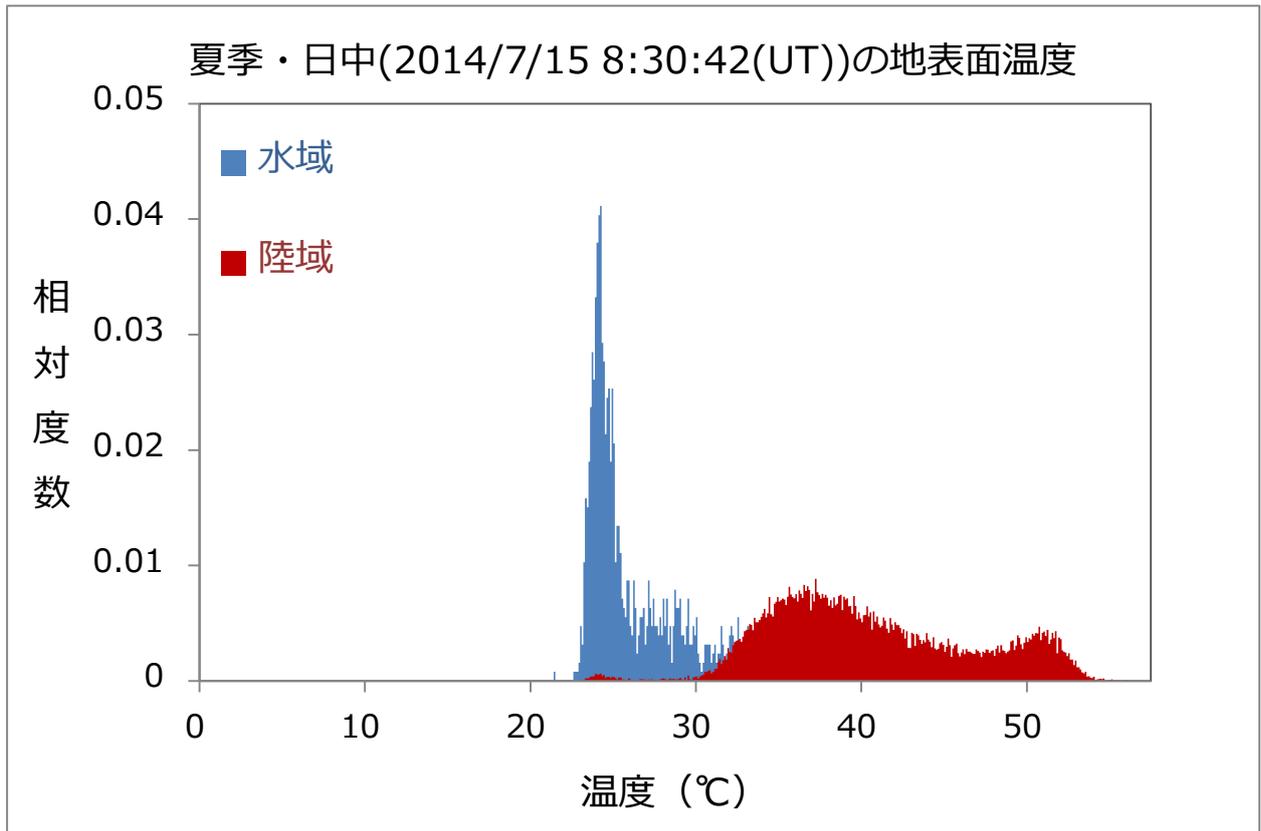


図 35 赤星地点(図 1)における夏季・日中の地表面温度のヒストグラム
対象画像は図 31 である.

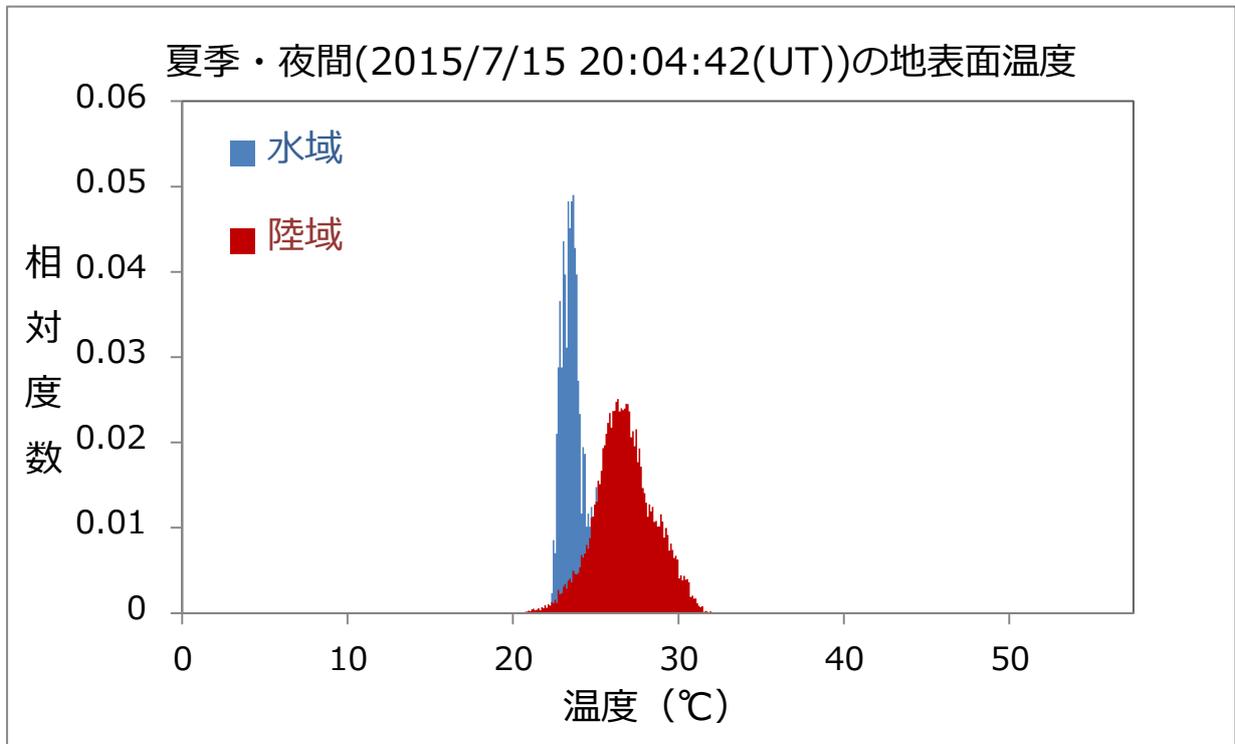


図 36 赤星地点(図 1)における夏季・夜間の地表面温度のヒストグラム
対象画像は図 32 である.

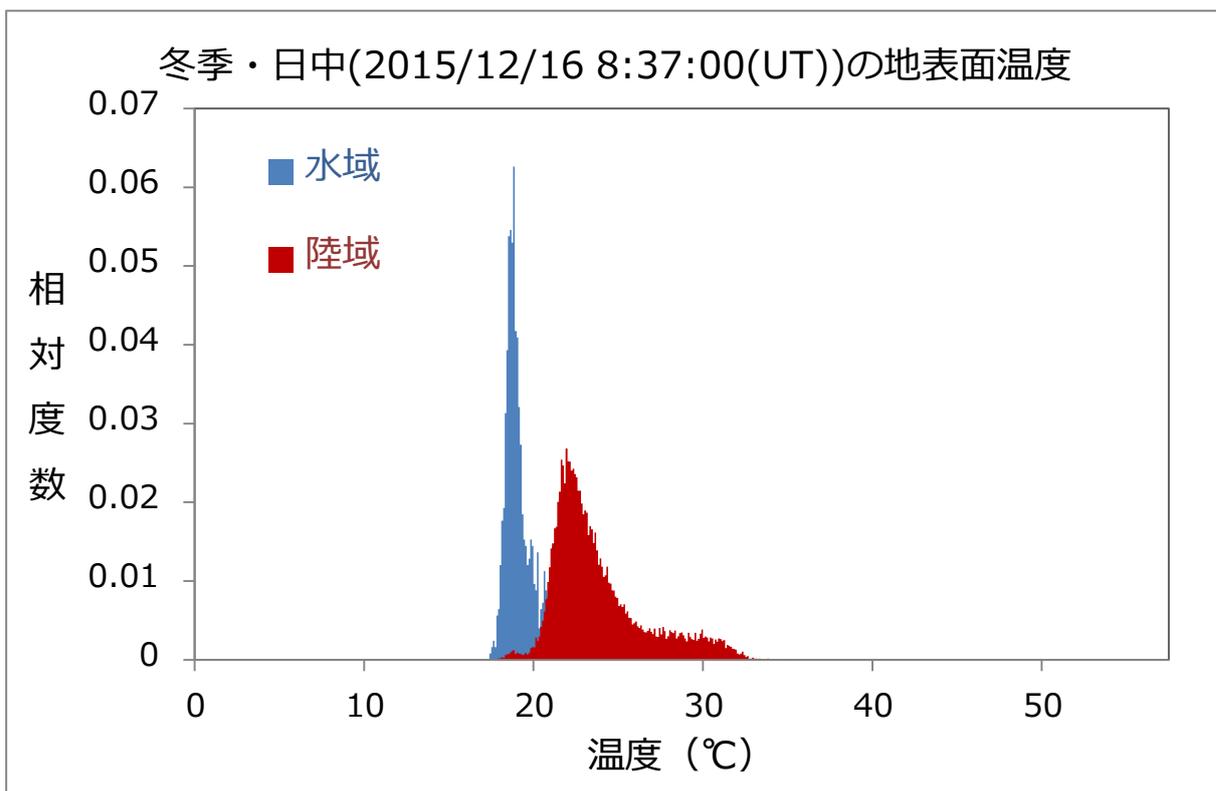


図 37 赤星地点(図 1)における冬季・日中の地表面温度のヒストグラム
対象画像は図 33 である.

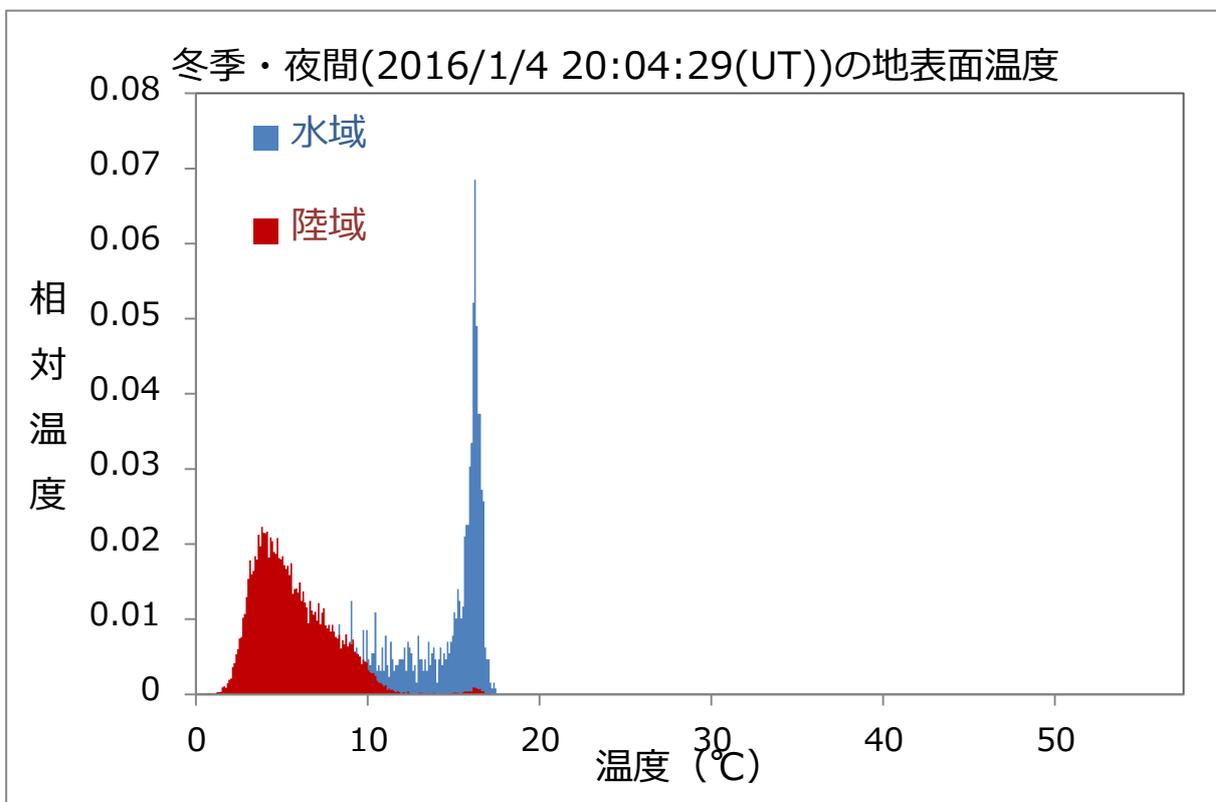


図 38 赤星地点(図 1)における冬季・夜間の地表面温度のヒストグラム
対象画像は図 34 である.

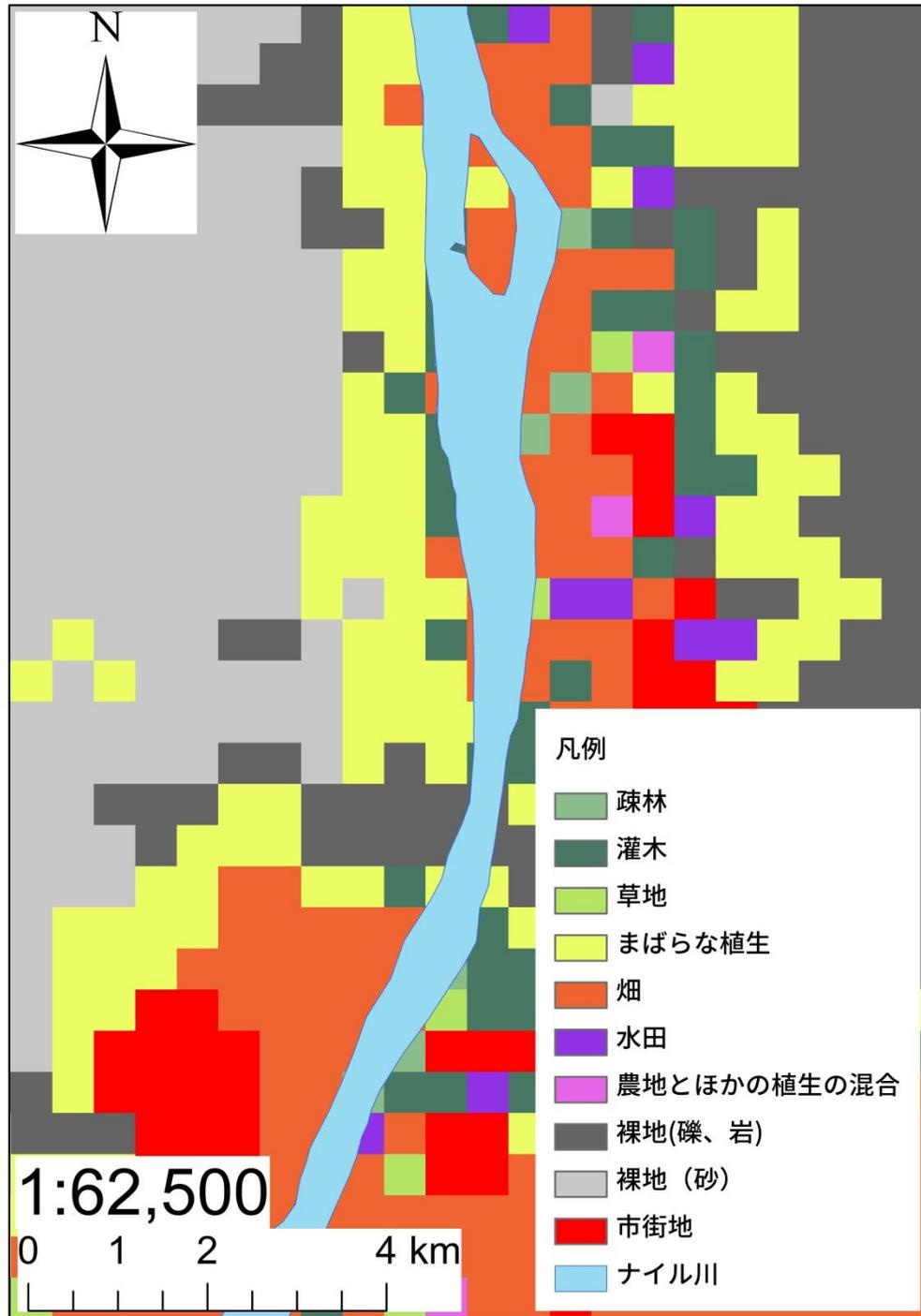


図 39 上流地点におけるナイル川周辺土地利用
 図 1 の上流地点をもとに作成.

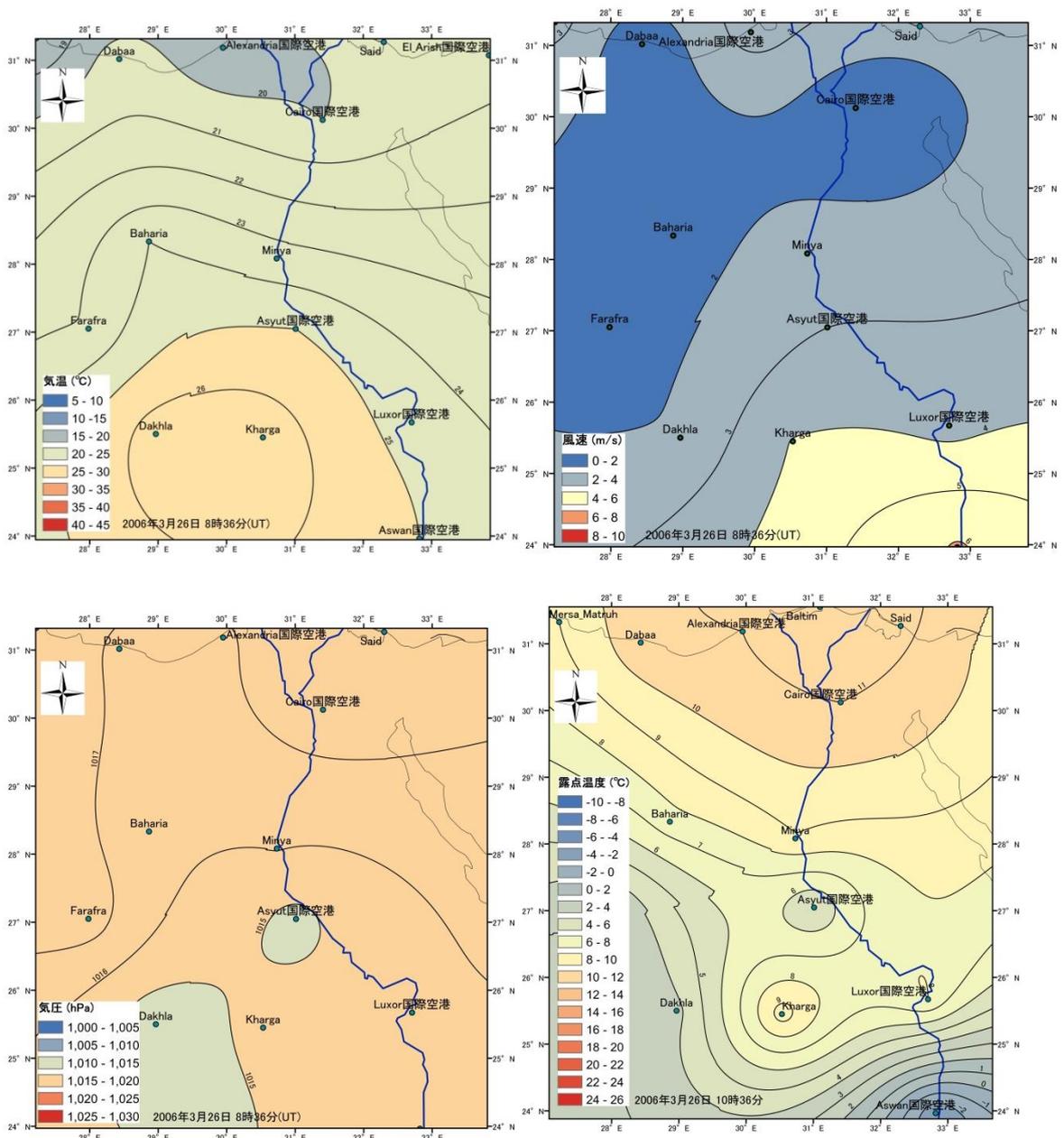


図 40 エジプト全域における気象データの空間分布 (2006/3/26 10:36)

左上：気温, 右上：風速, 左下：気圧, 右下：露点温度

風向 約 180 度

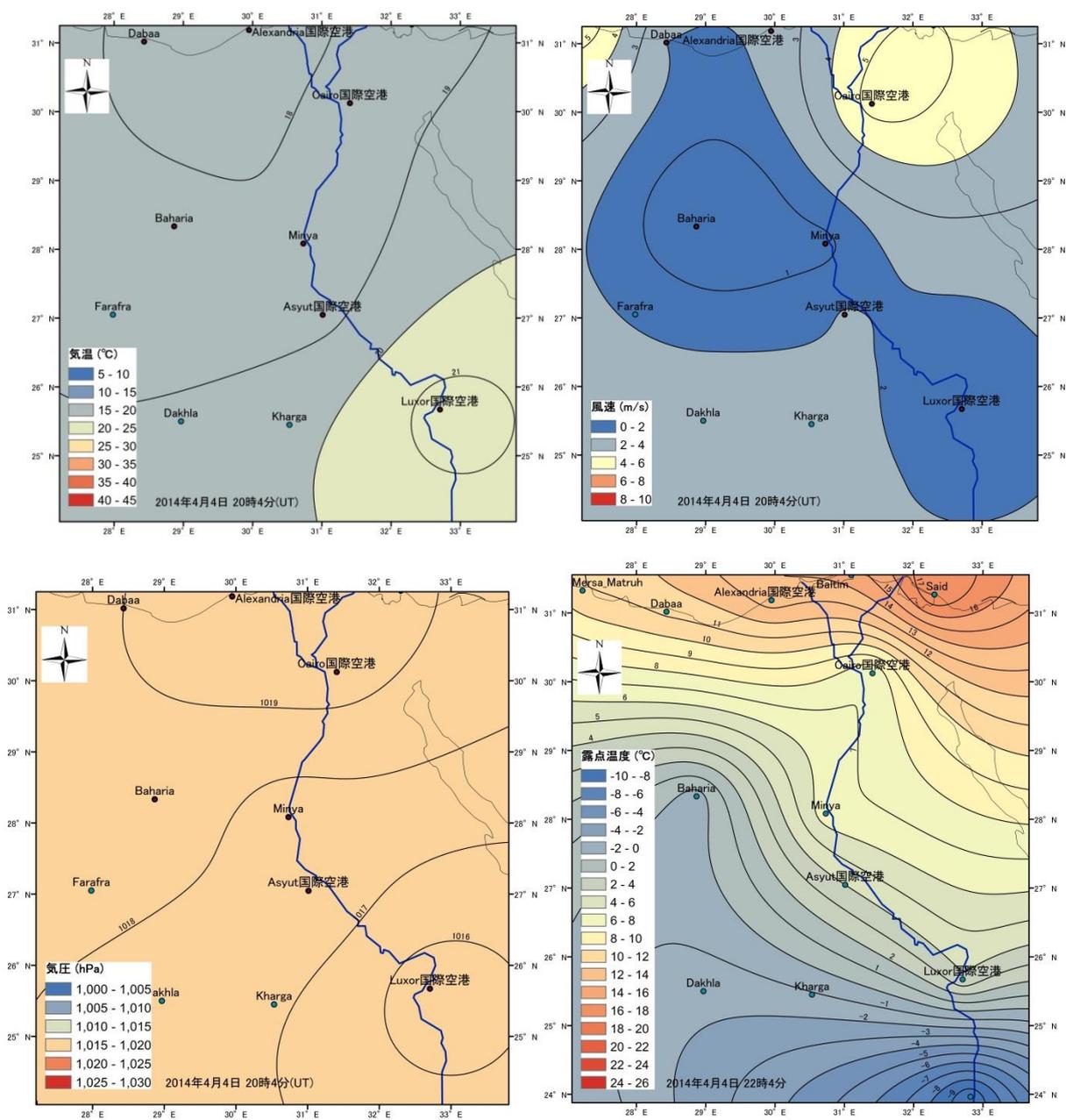


図 41 エジプト全域における気象データの空間分布 (2014/4/4 22:04)

左上：気温, 右上：風速, 左下：気圧, 右下：露点温度
 風向 約0度

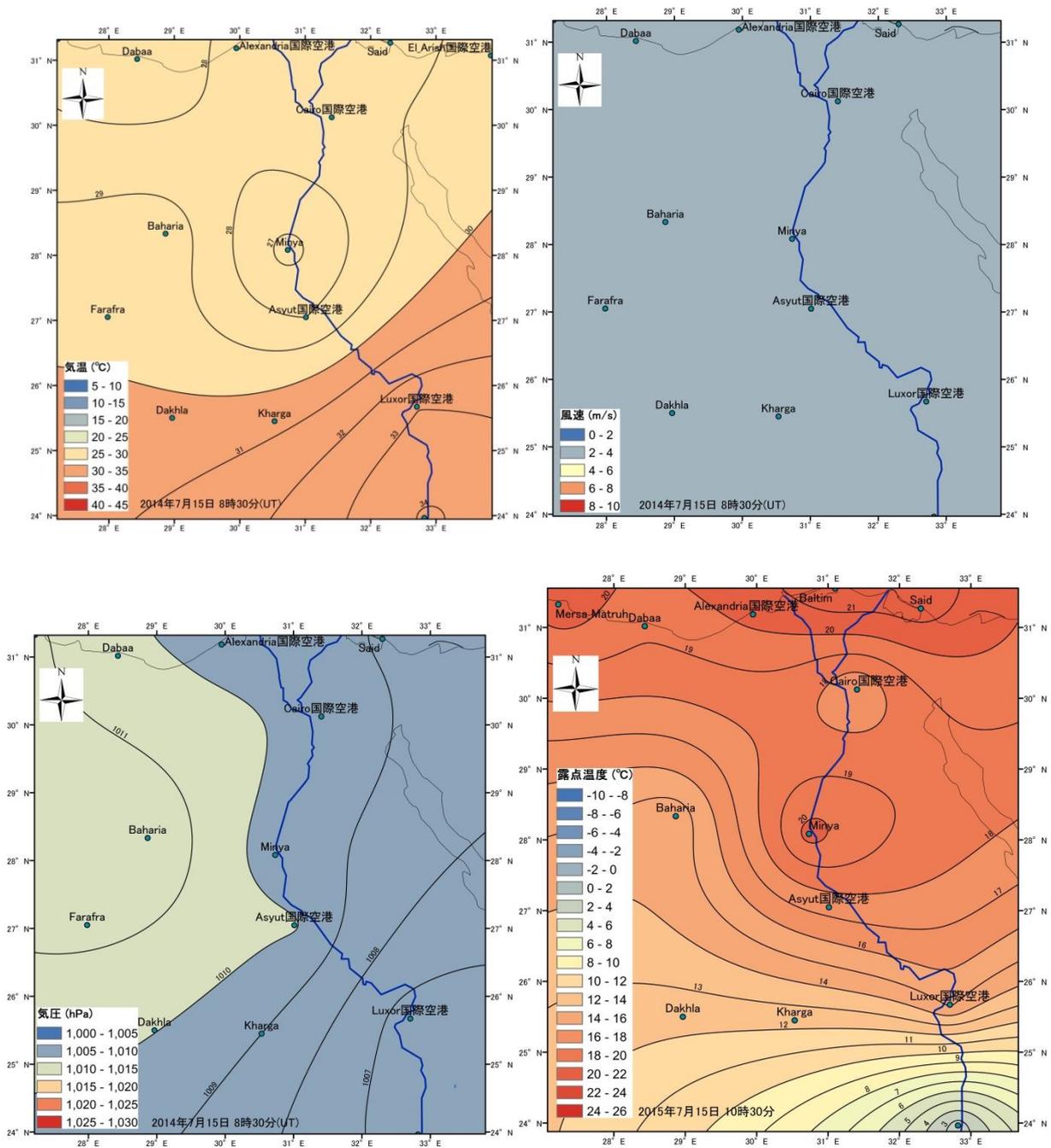


図 42 エジプト全域における気象データの空間分布 (2014/7/15 10:30)

左上：気温，右上：風速，左下：気圧，右下：露点温度

風向 約 330 度

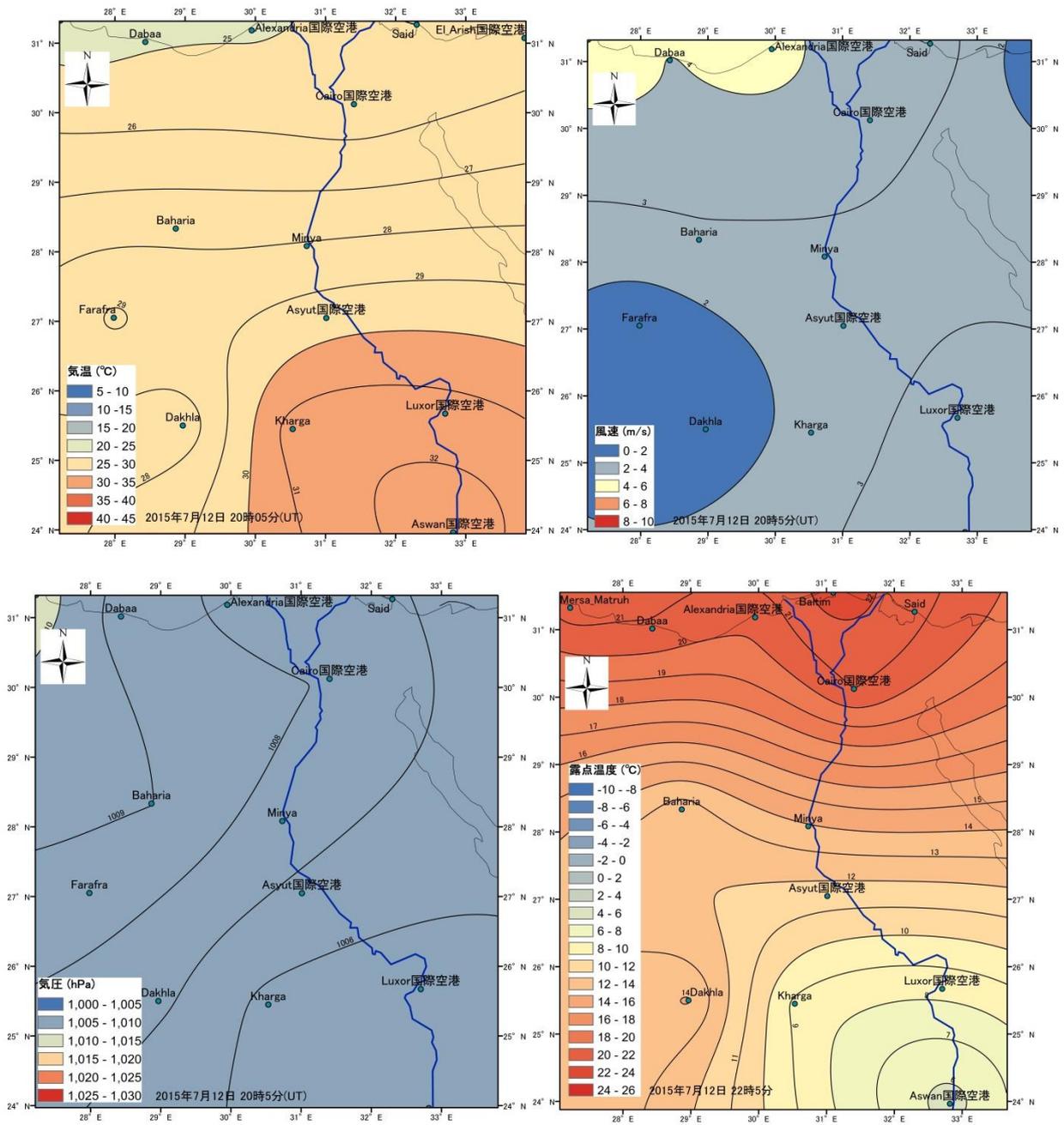


図 43 エジプト全域における気象データの空間分布 (2015/7/12 22:05)

左上：気温, 右上：風速, 左下：気圧, 右下：露点温度

風向 約 320 度

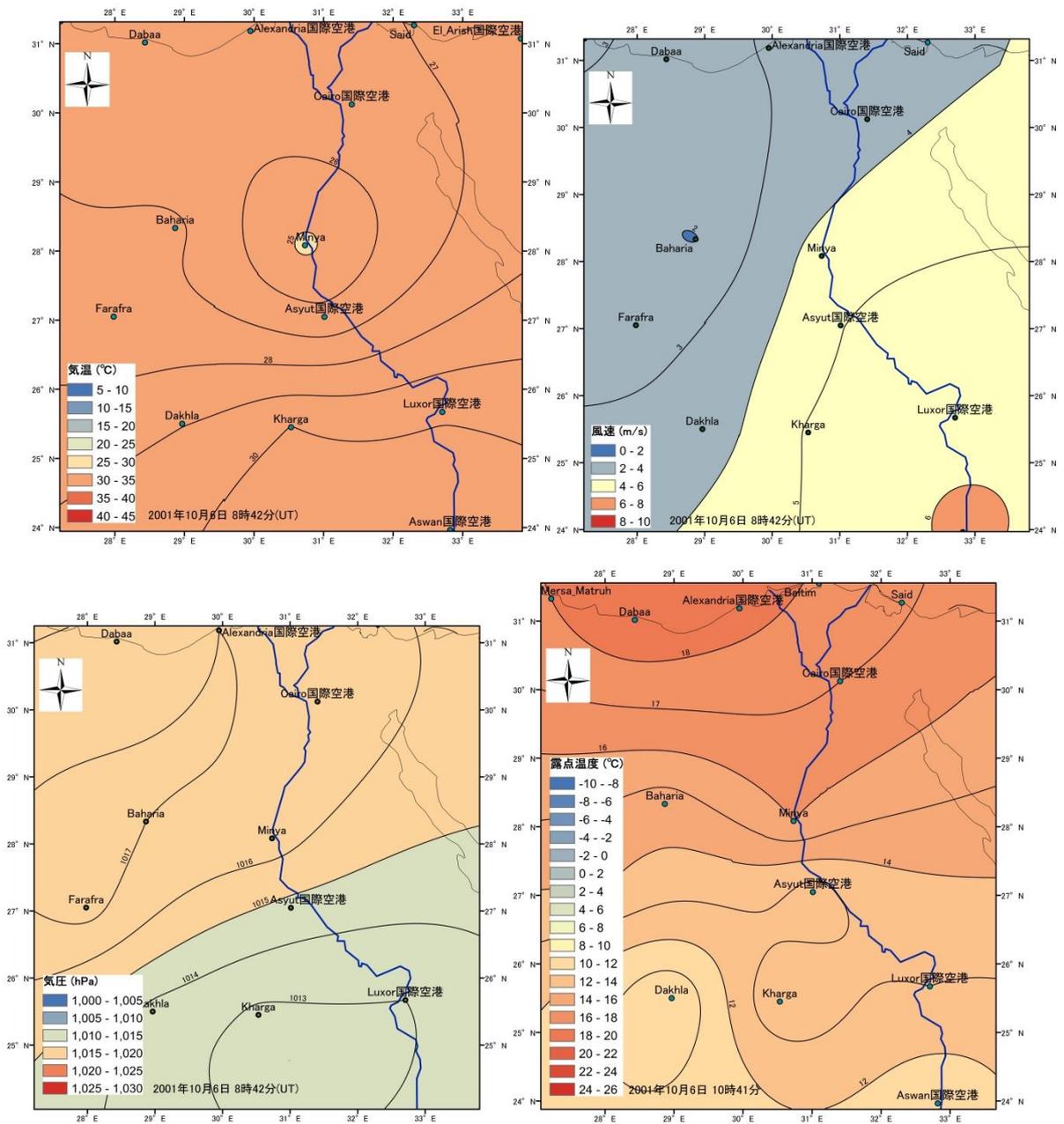


図 44 エジプト全域における気象データの空間分布 (2001/10/6 10:42)

左上：気温，右上：風速，左下：気圧，右下：露点温度
 風向 約 10度

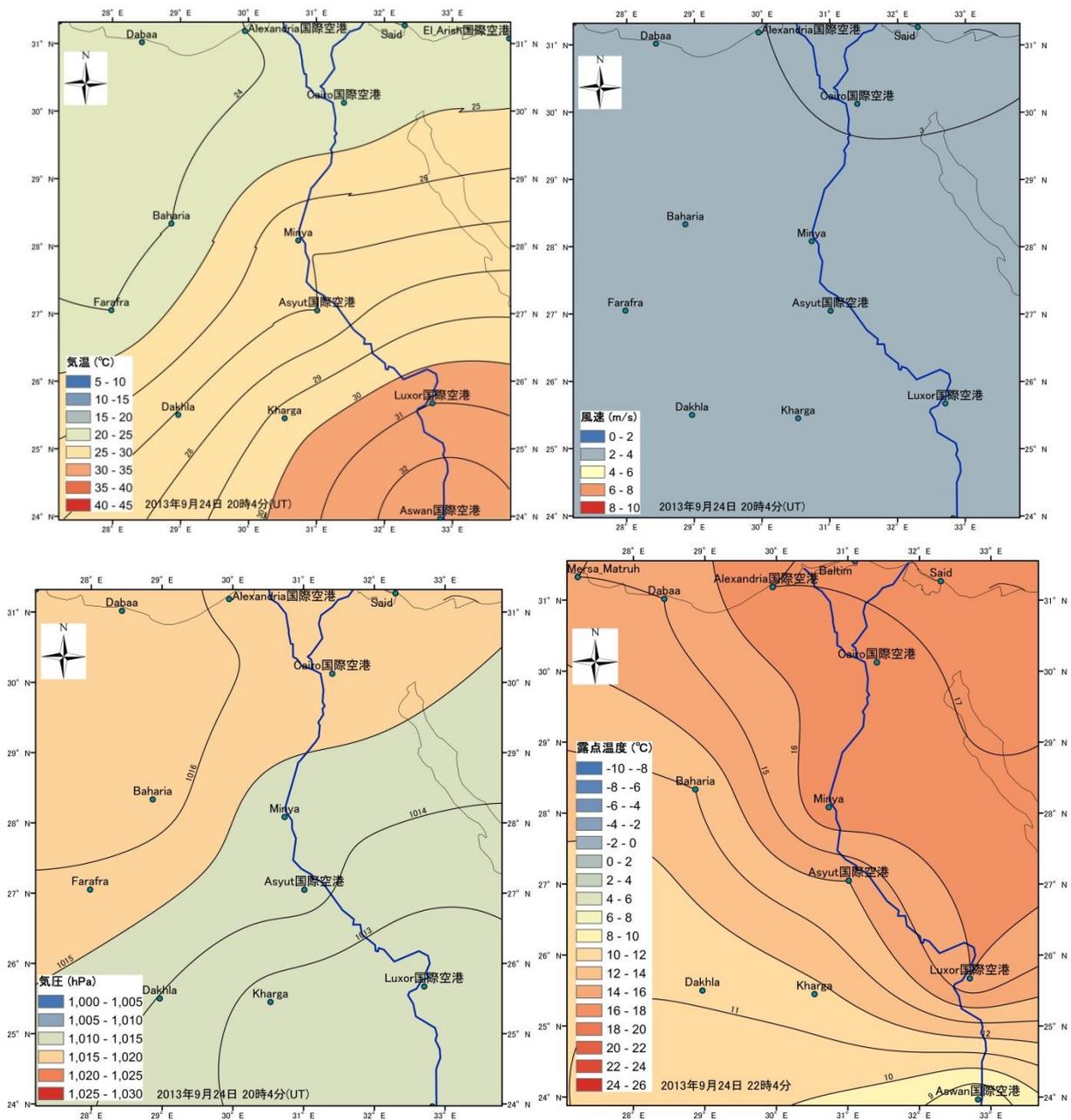


図 45 エジプト全域における気象データの空間分布 (2013/ 9/24 22:04)

左上：気温，右上：風速，左下：気圧，右下：露点温度

風向 約 350 度

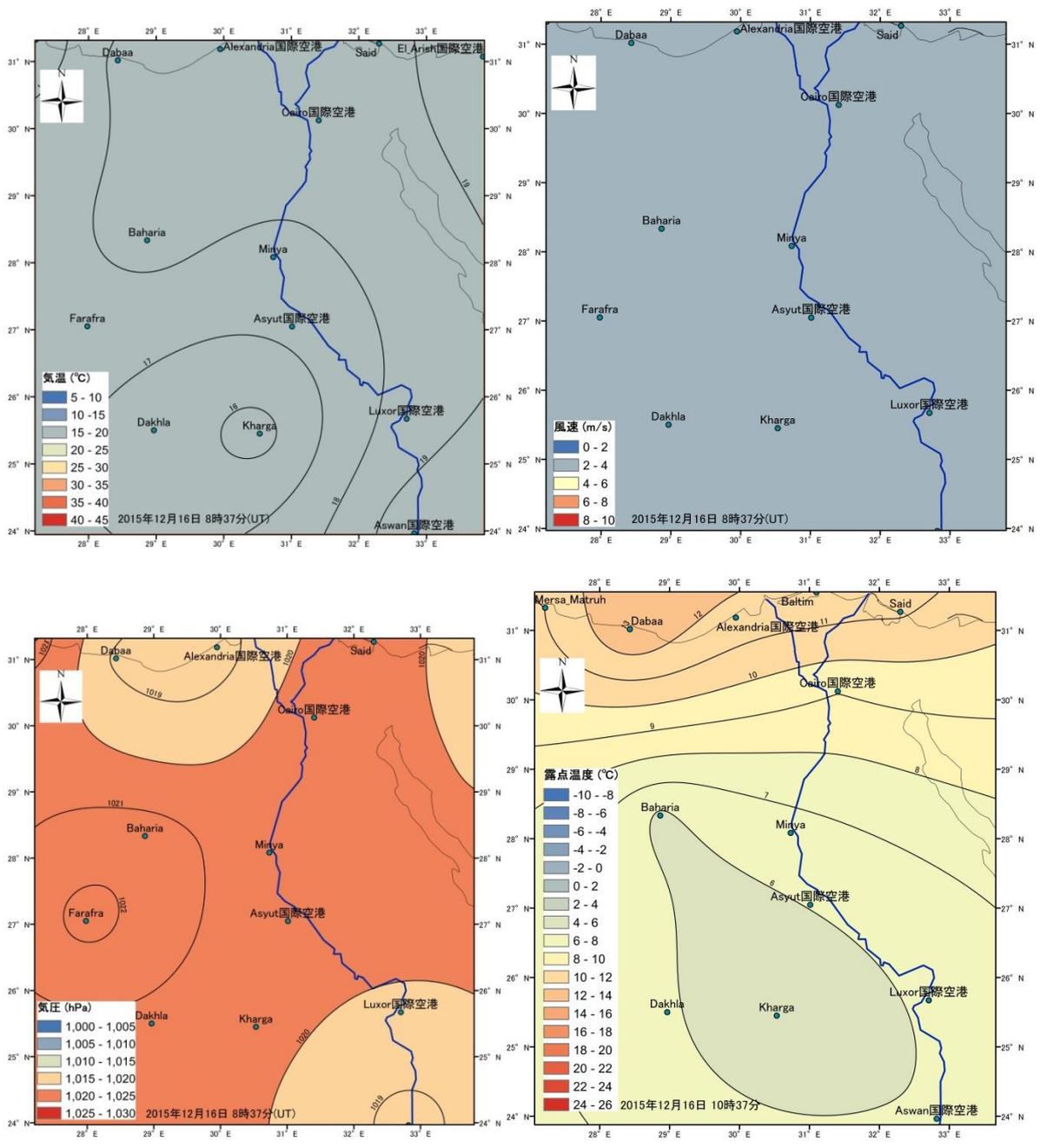


図 46 エジプト全域における気象データの空間分布 (2015/12/16 10:37)

左上：気温，右上：風速，左下：気圧，右下：露点温度

風向 約 10度

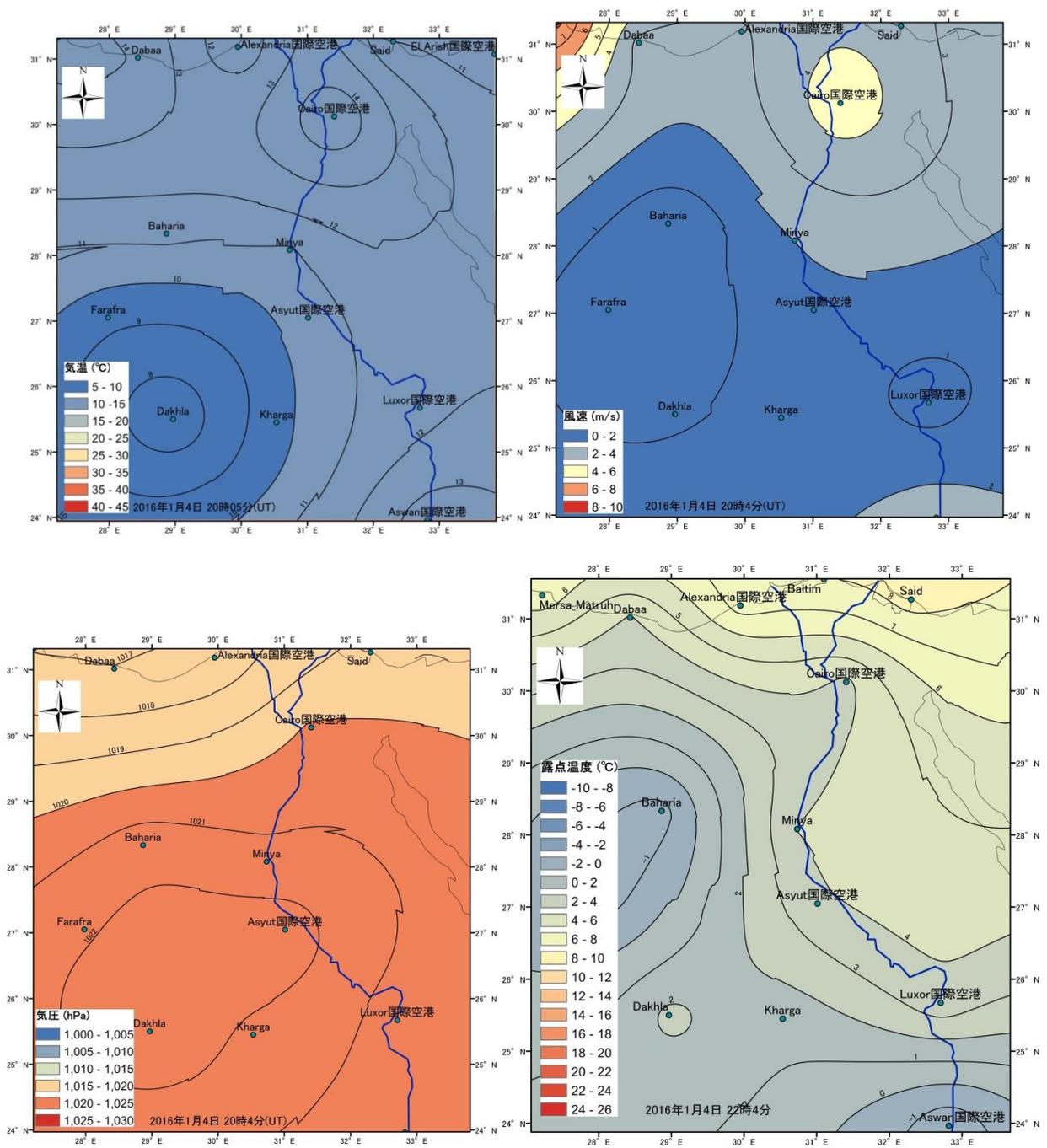


図 47 エジプト全域における気象データの空間分布 (2016/1/4 22:04)

左上：気温, 右上：風速, 左下：気圧, 右下：露点温度

風向 約 270 度

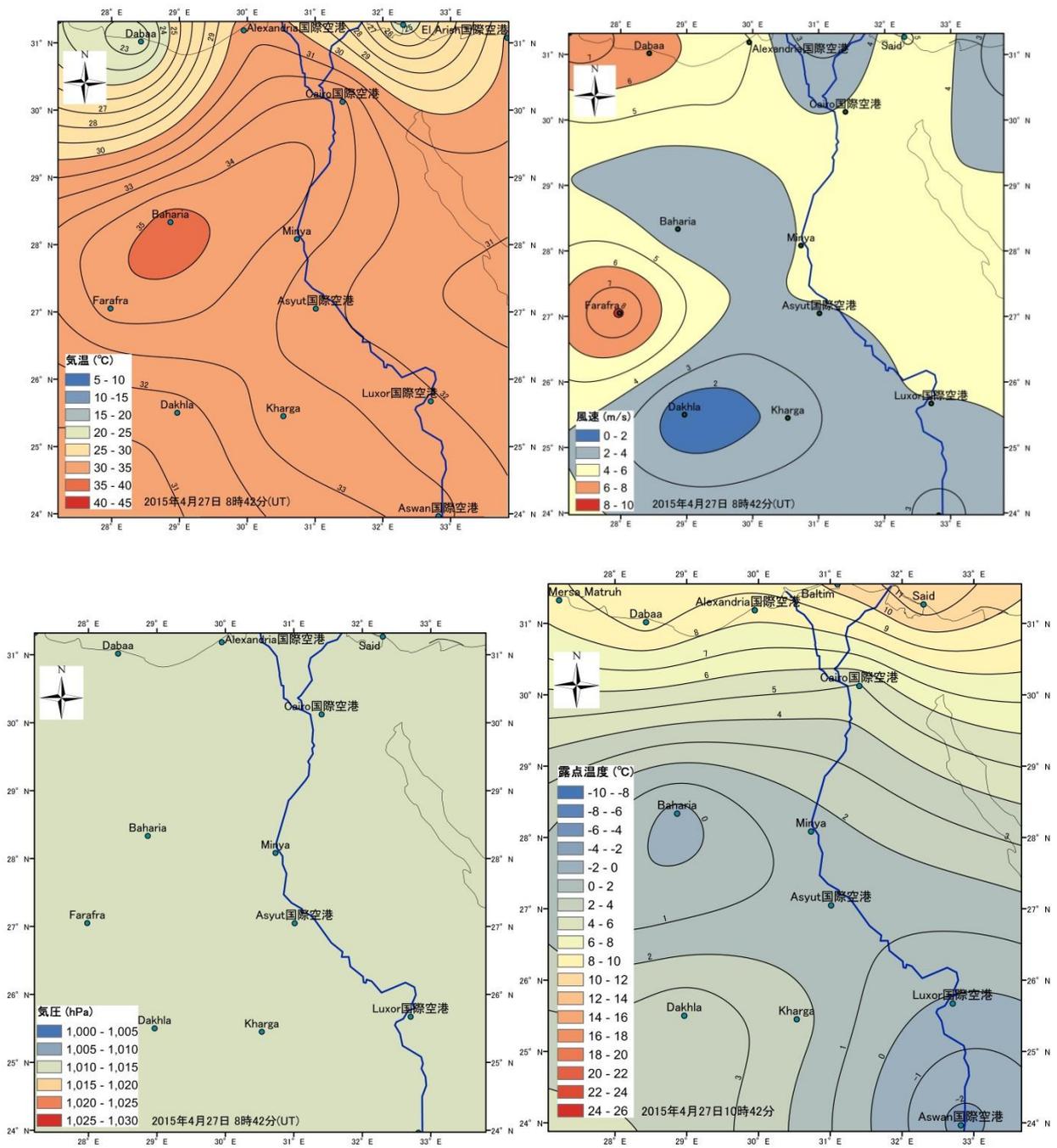


図 48 エジプト全域における気象データの空間分布 (2015/4/27 10:42)

左上：気温, 右上：風速, 左下：気圧, 右下：露点温度
 風向 約 50 度

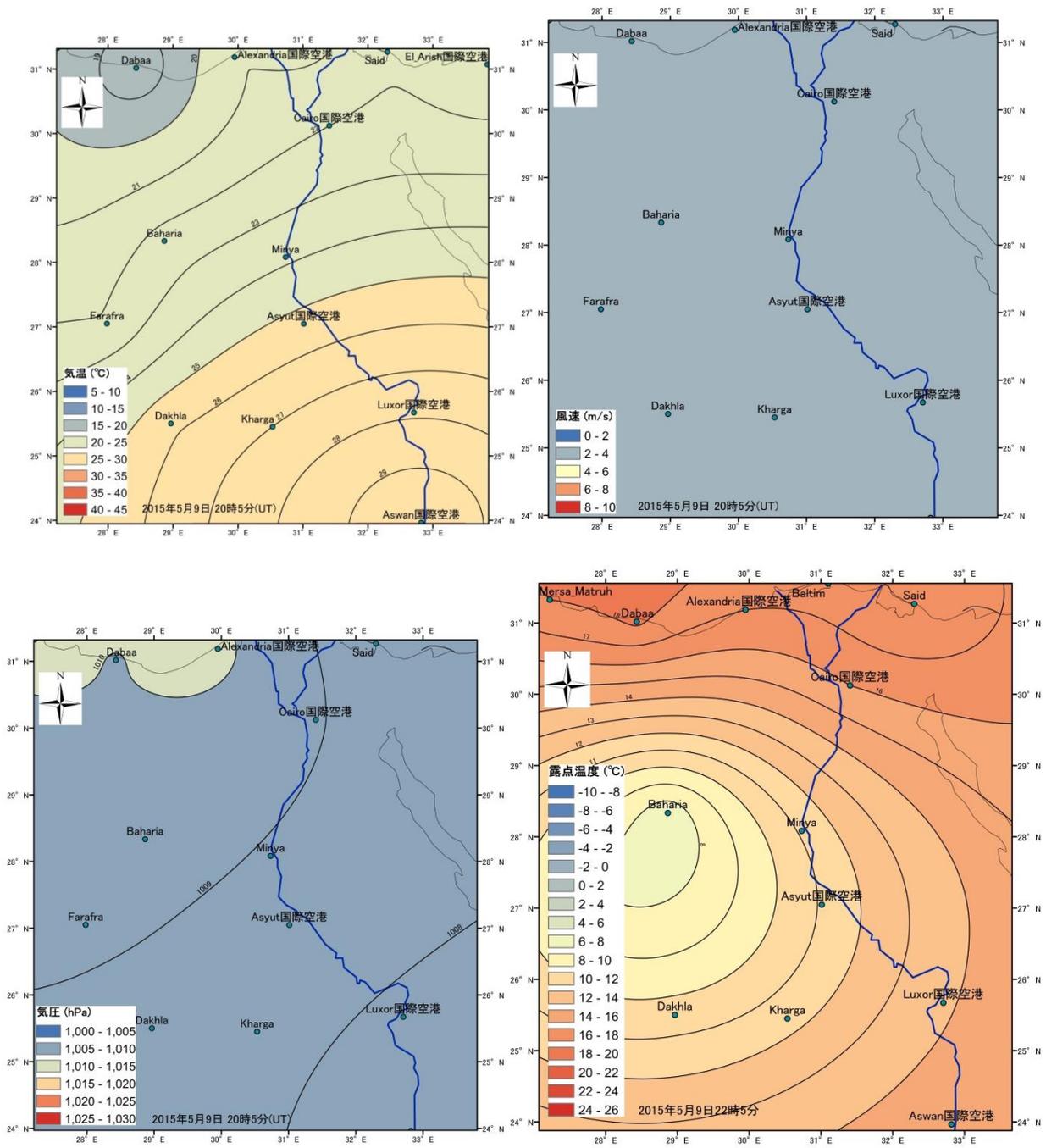


図 49 エジプト全域における気象データの空間分布 (2015/5/9 22:05)

左上：気温, 右上：風速, 左下：気圧, 右下：露点温度

風向 約 330 度

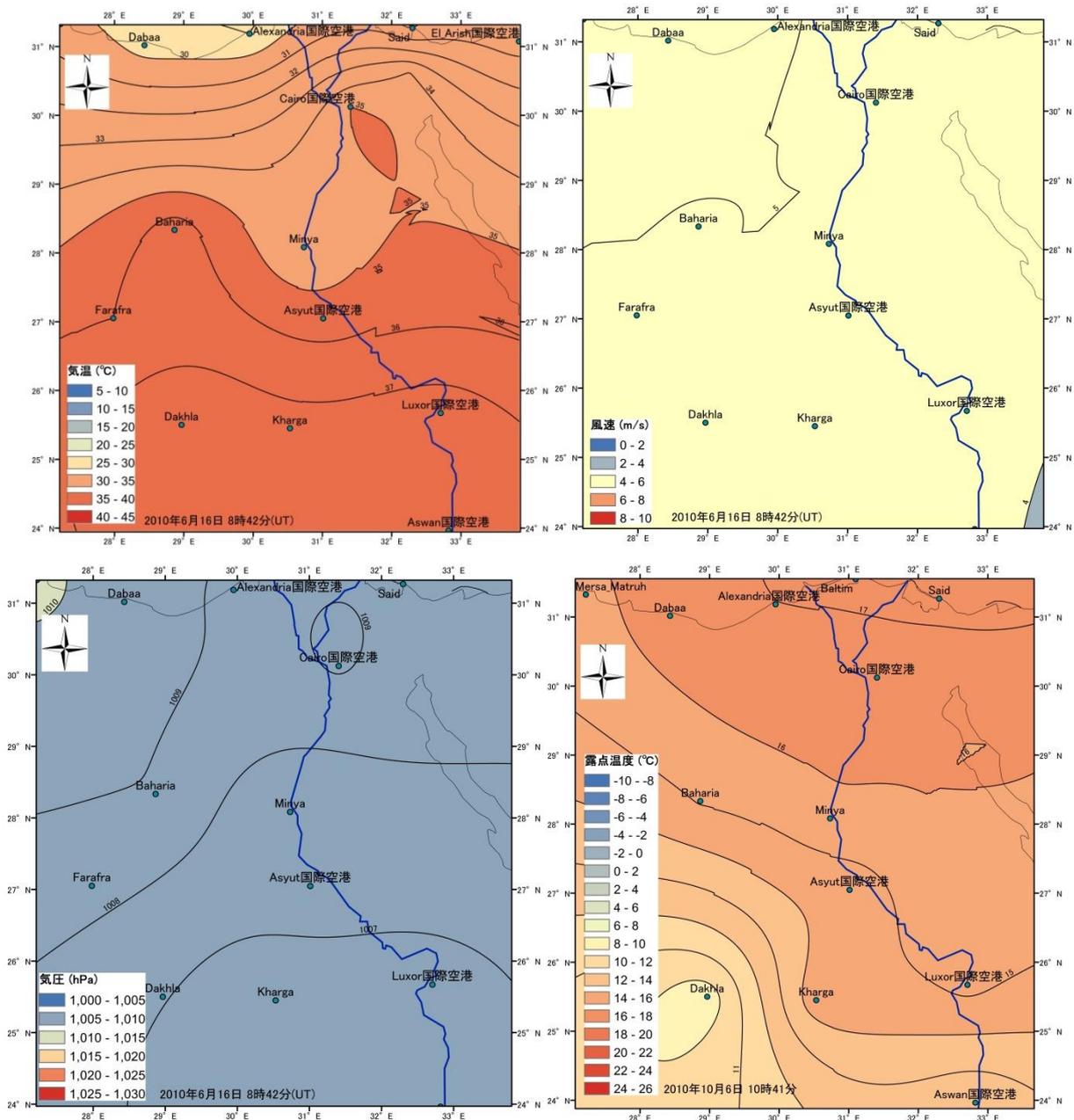


図 50 エジプト全域における気象データの空間分布 (2010/6/16 10:42)

左上：気温，右上：風速，左下：気圧，右下：露点温度

風向 約 350 度

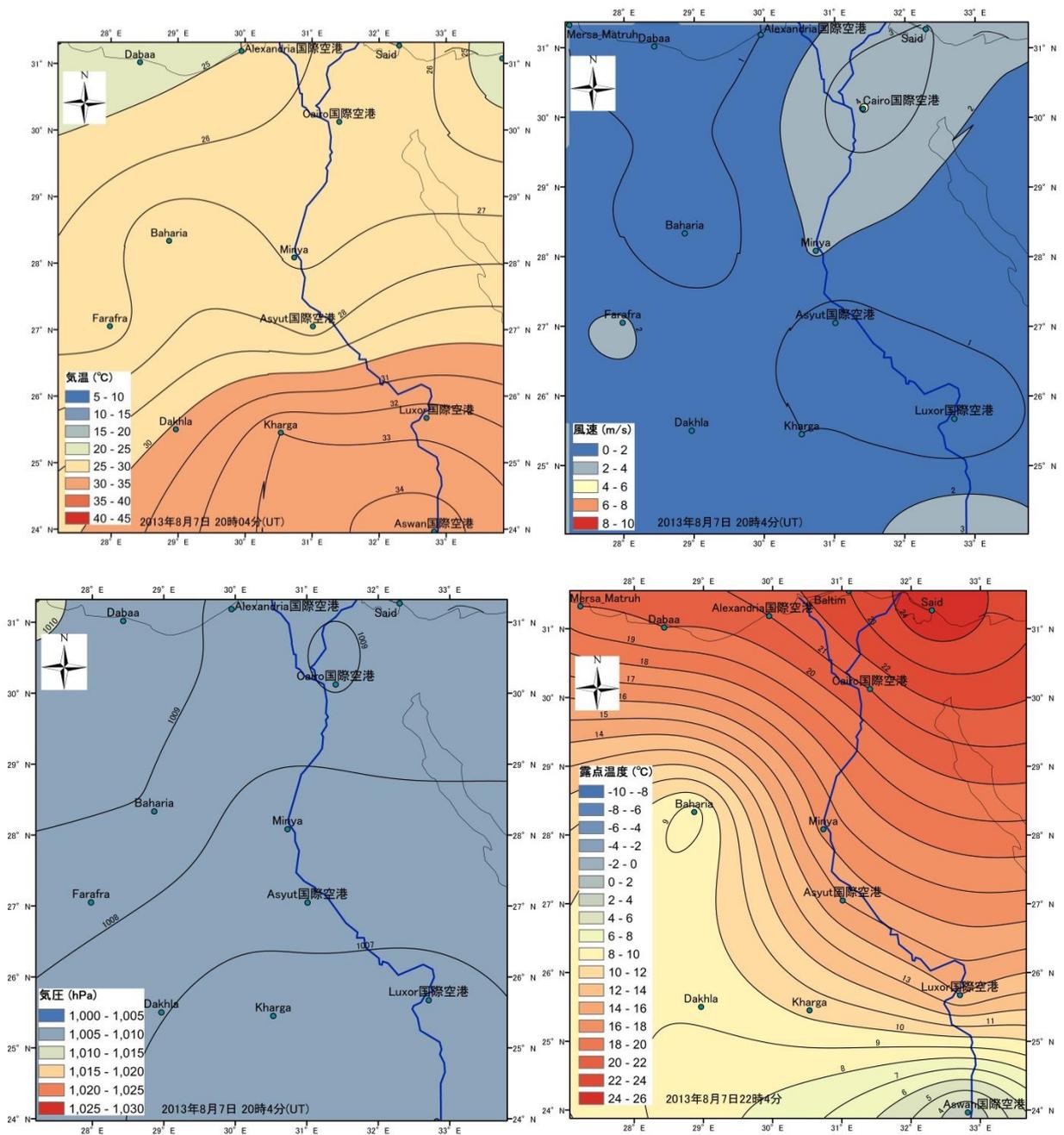


図 51 エジプト全域における気象データの空間分布 (2013/8/7 22:04)

左上：気温，右上：風速，左下：気圧，右下：露点温度

風向 約 320 度

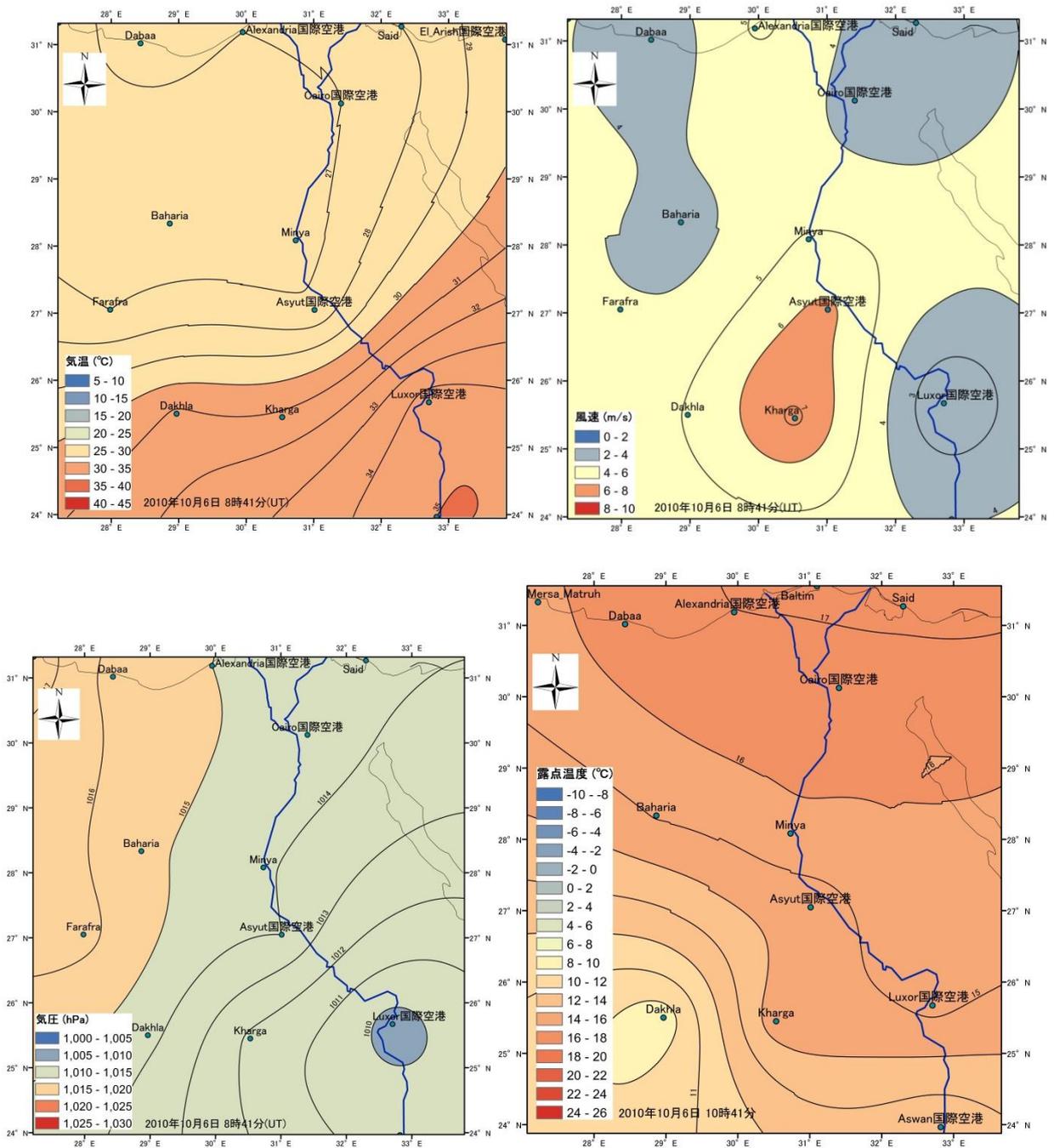


図 52 エジプト全域における気象データの空間分布 (2010/10/6 10:41)

左上：気温, 右上：風速, 左下：気圧, 右下：露点温度

風向 約 355 度

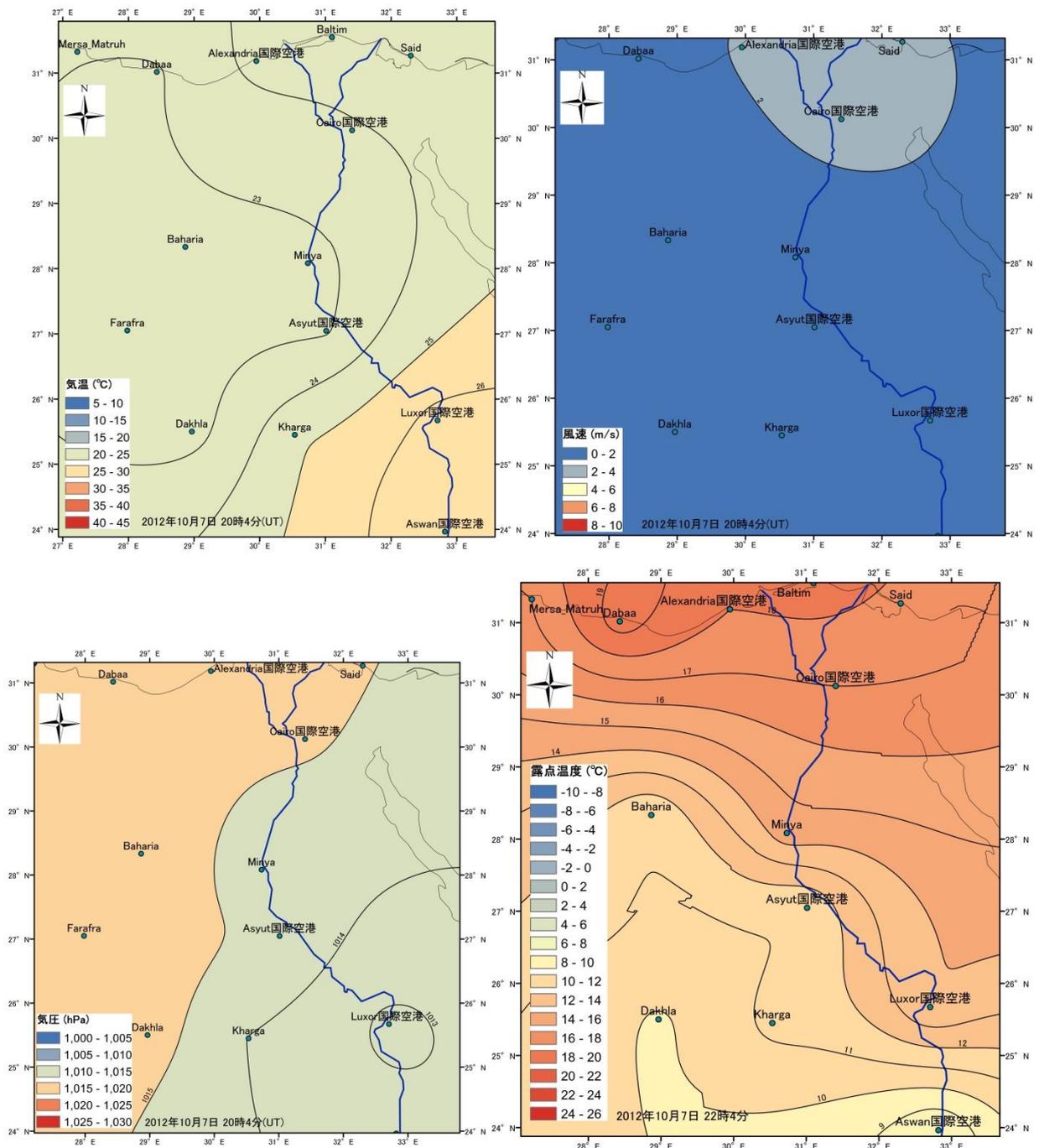


図 53 エジプト全域における気象データの空間分布 (2012/10/7 22:04)

左上：気温，右上：風速，左下：気圧，右下：露点温度

風向 約 330 度

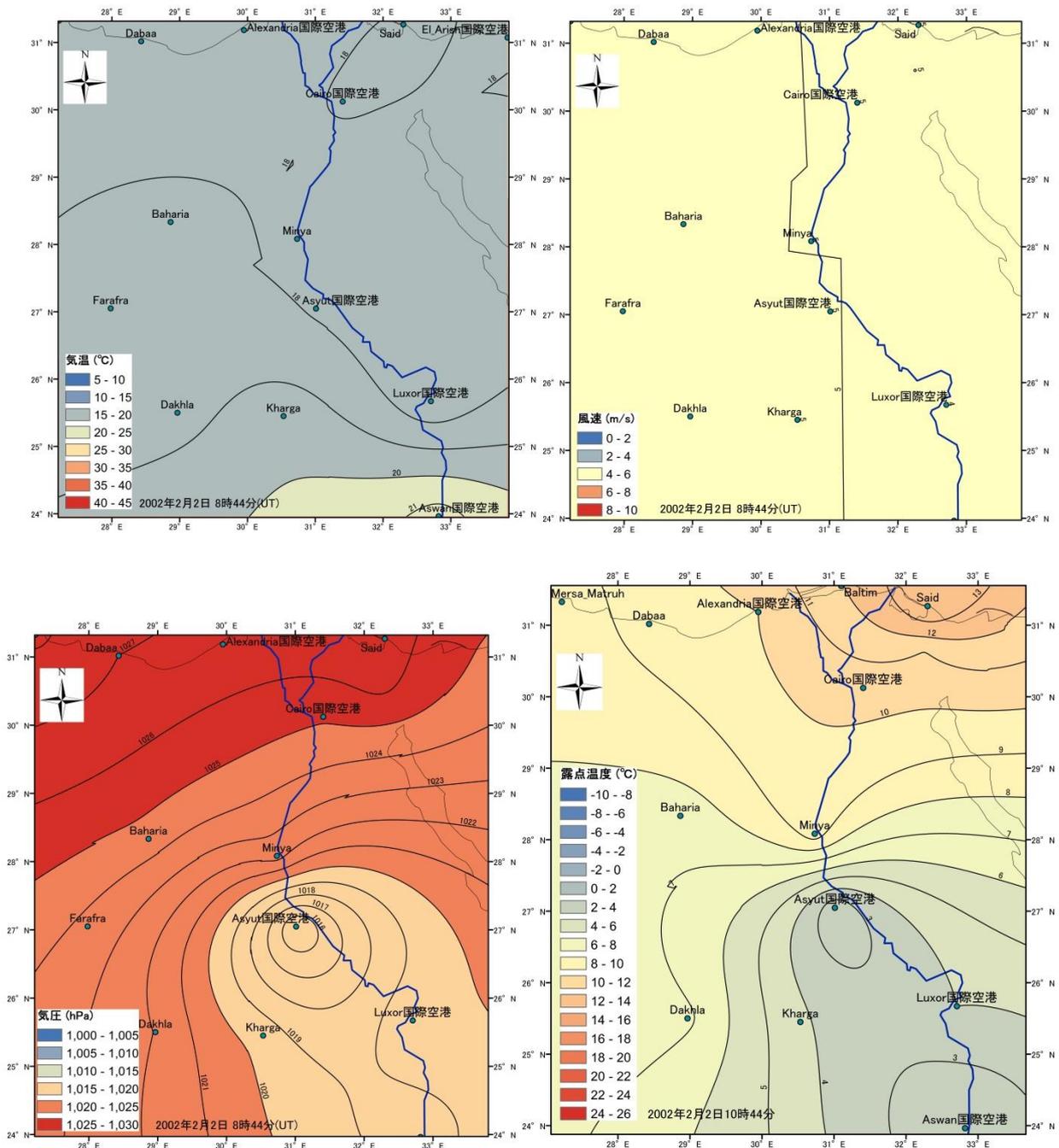


図 54 エジプト全域における気象データの空間分布 (2002/2/2 10:44)

左上：気温, 右上：風速, 左下：気圧, 右下：露点温度

風向 約 320 度

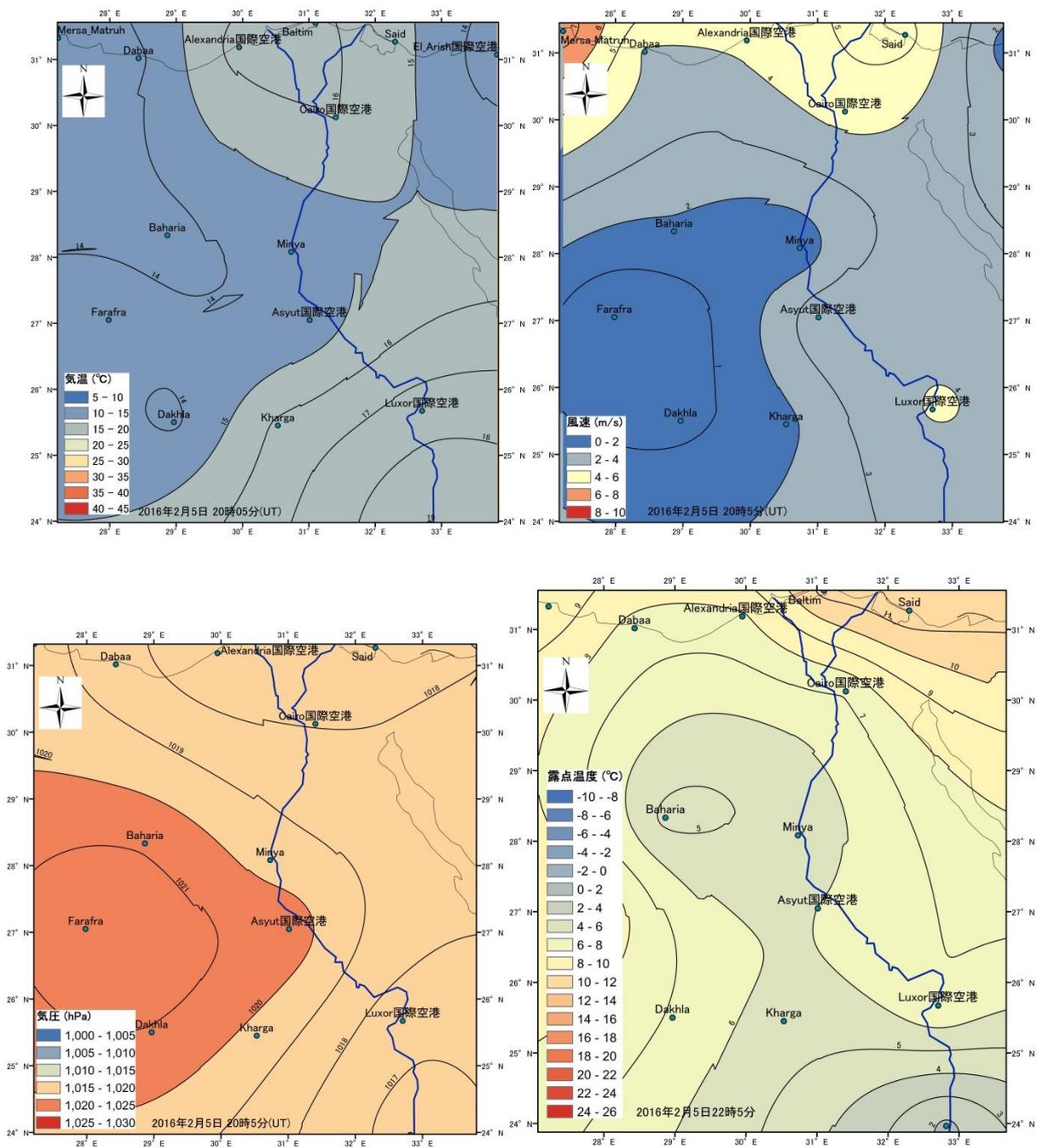


図 55 エジプト全域における気象データの空間分布 (2016/2/5 22:05)

左上：気温, 右上：風速, 左下：気圧, 右下：露点温度
 風向 約 300 度

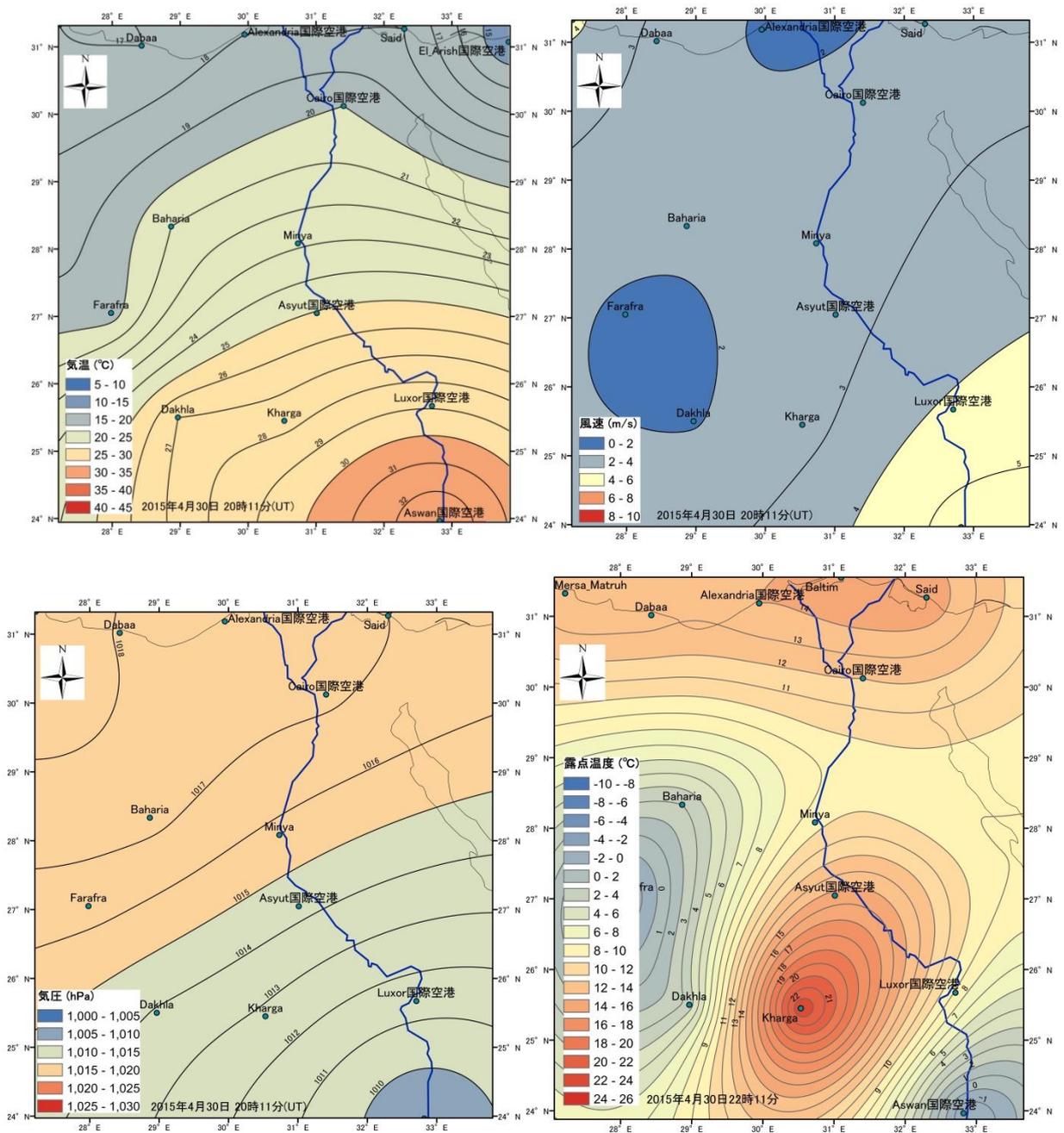


図 57 エジプト全域における気象データの空間分布 (2015/4/30 22:11)

左上：気温，右上：風速，左下：気圧，右下：露点温度

風向 約 355 度

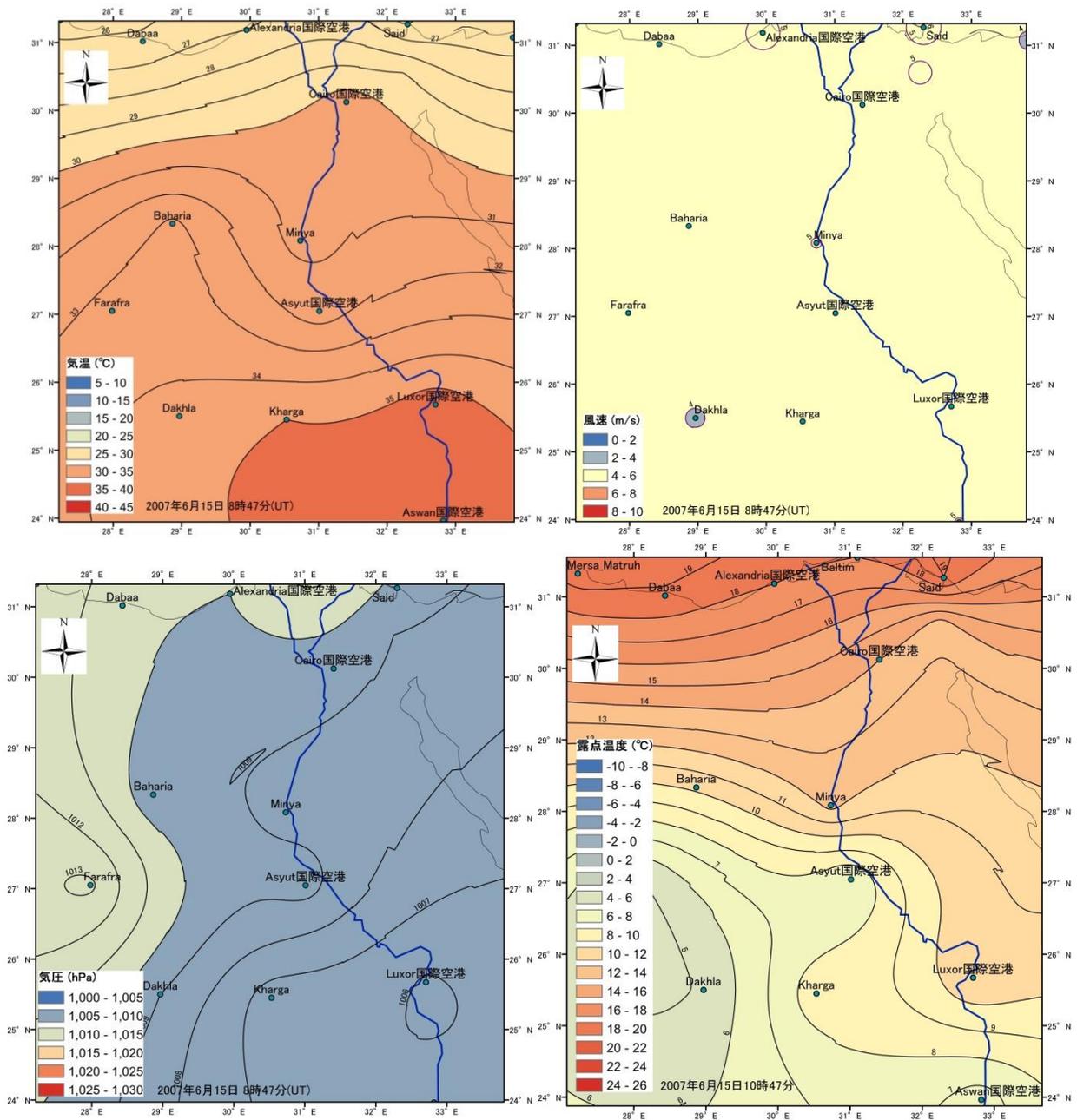


図 58 エジプト全域における気象データの空間分布 (2007/6/15 10:47)

左上：気温, 右上：風速, 左下：気圧, 右下：露点温度

風向 約 330 度

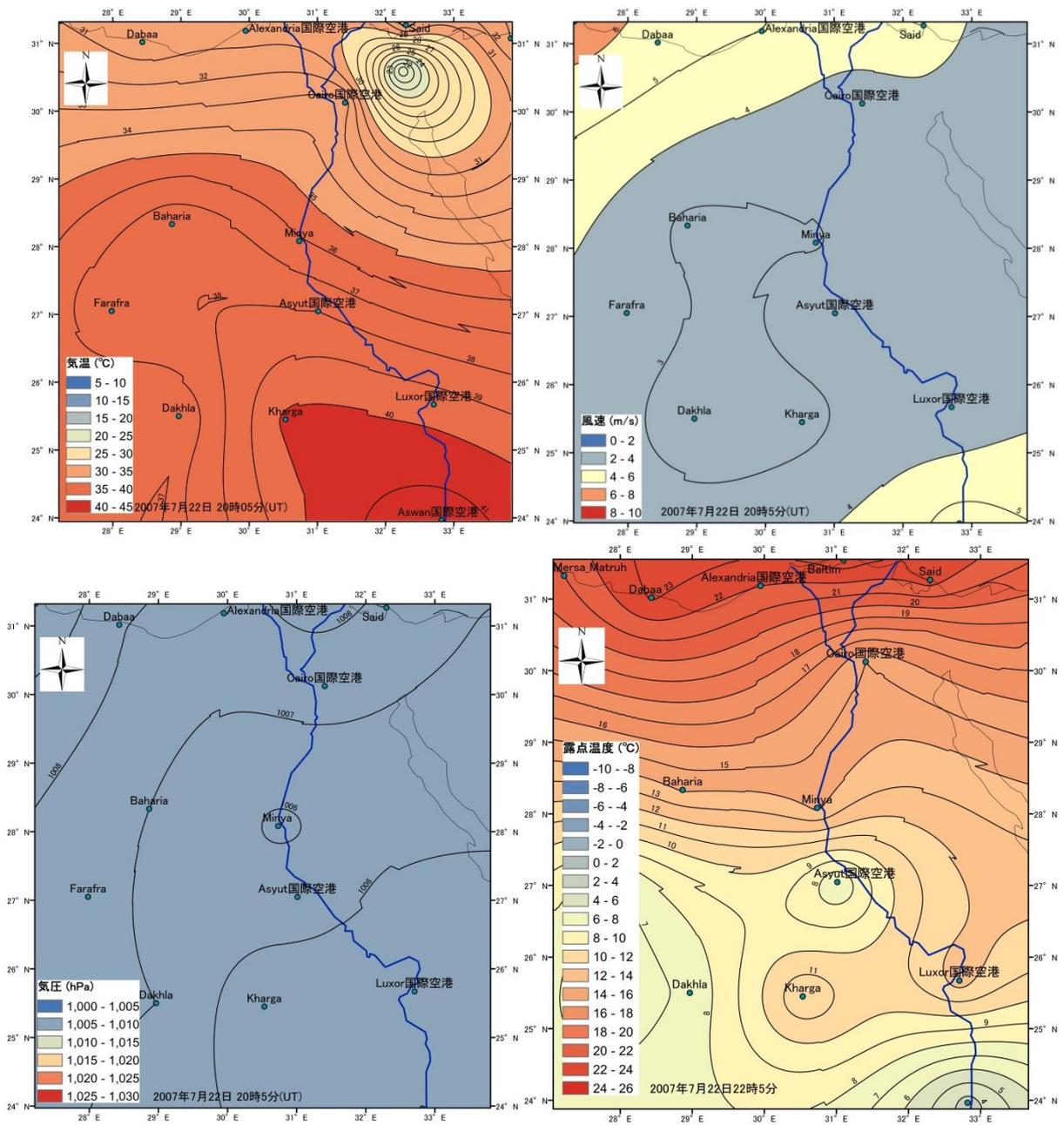


図 59 エジプト全域における気象データの空間分布 (2007/7/22 22:05)

左上：気温, 右上：風速, 左下：気圧, 右下：露点温度

風向 約 335 度

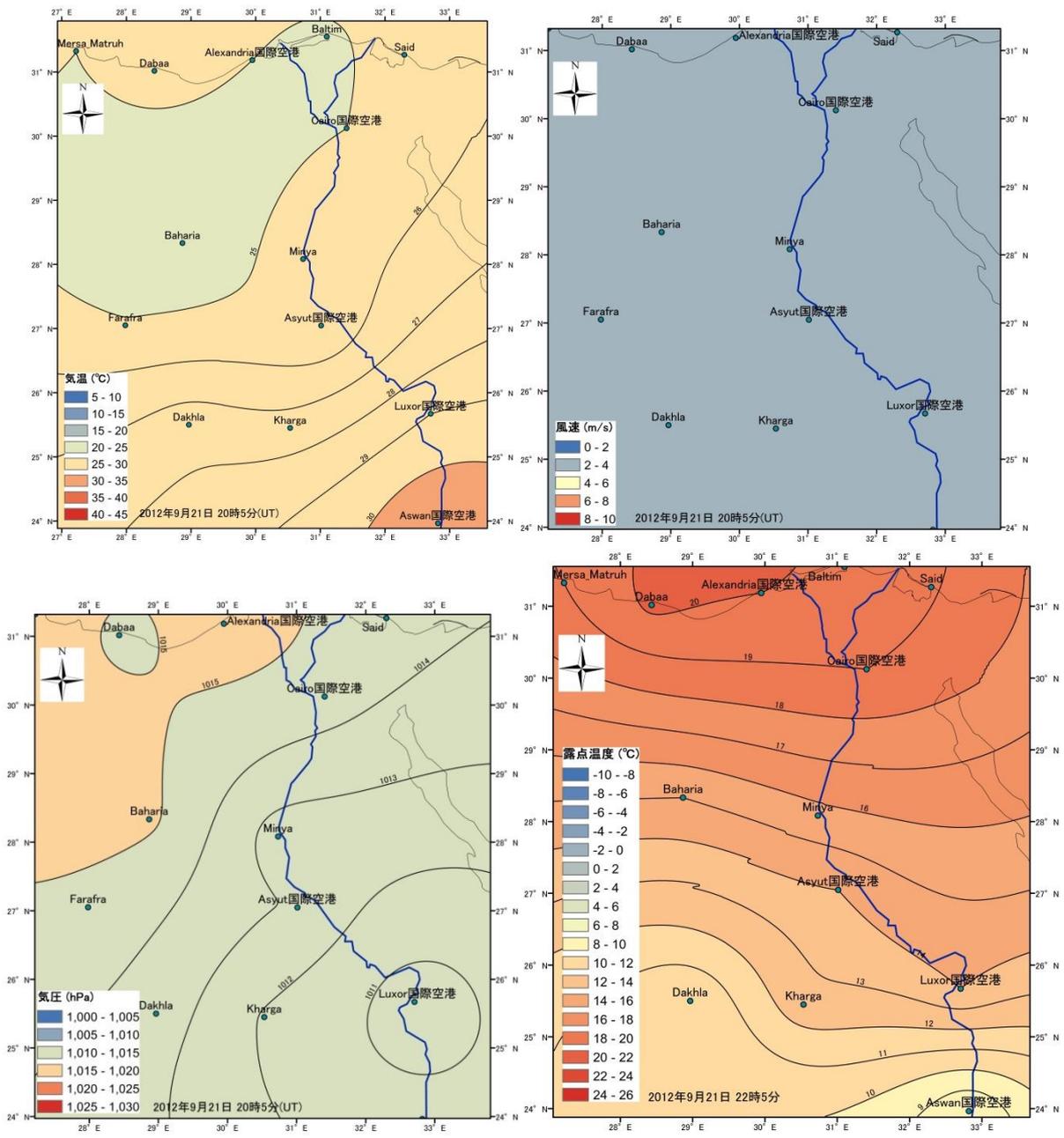


図 61 エジプト全域における気象データの空間分布 (2012/9/21 22:05)

左上：気温, 右上：風速, 左下：気圧, 右下：露点温度
 風向 約 20 度

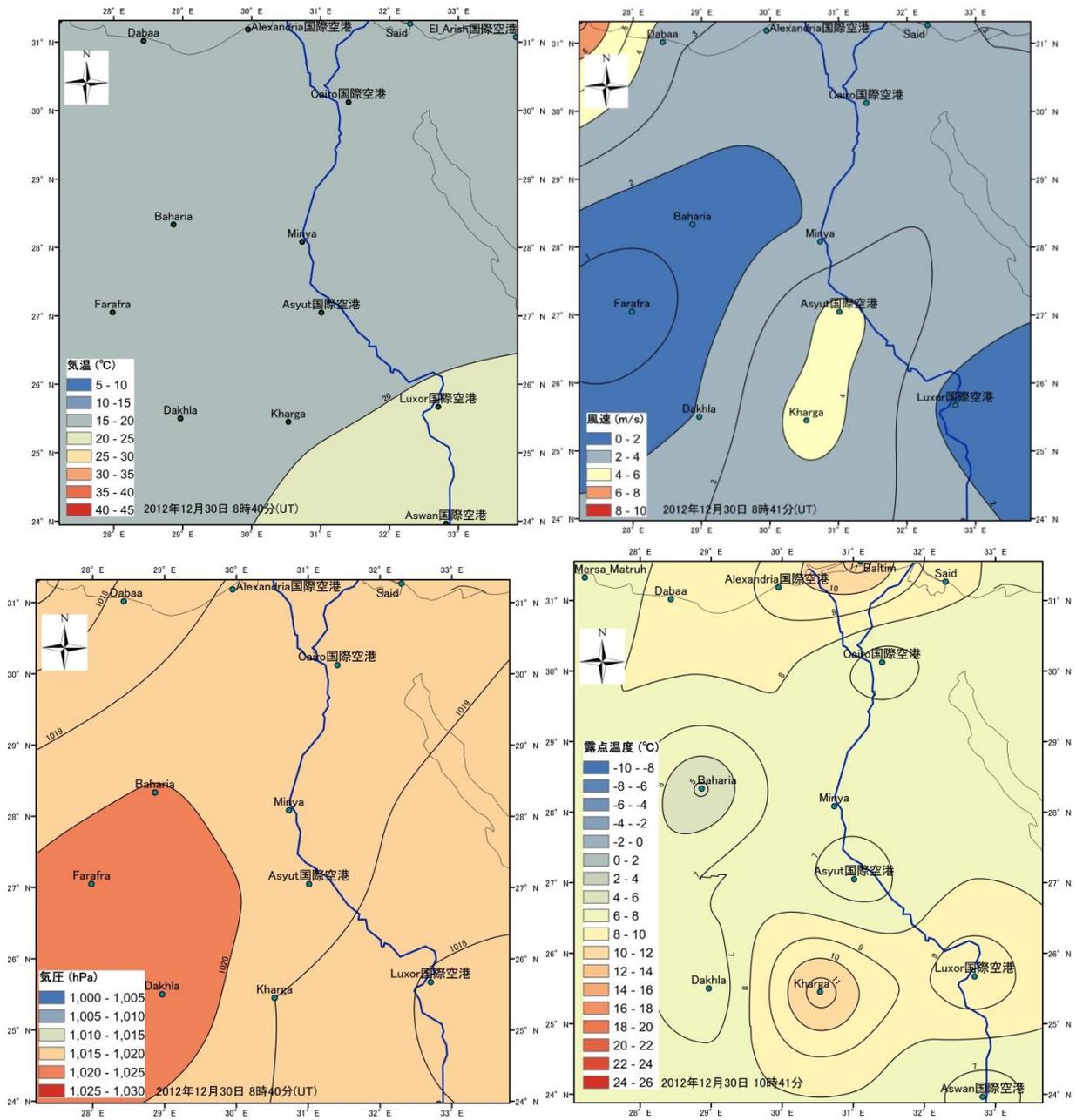


図 62 エジプト全域における気象データの空間分布 (2012/12/30 10:44)

左上：気温, 右上：風速, 左下：気圧, 右下：露点温度

風向 約 200 度

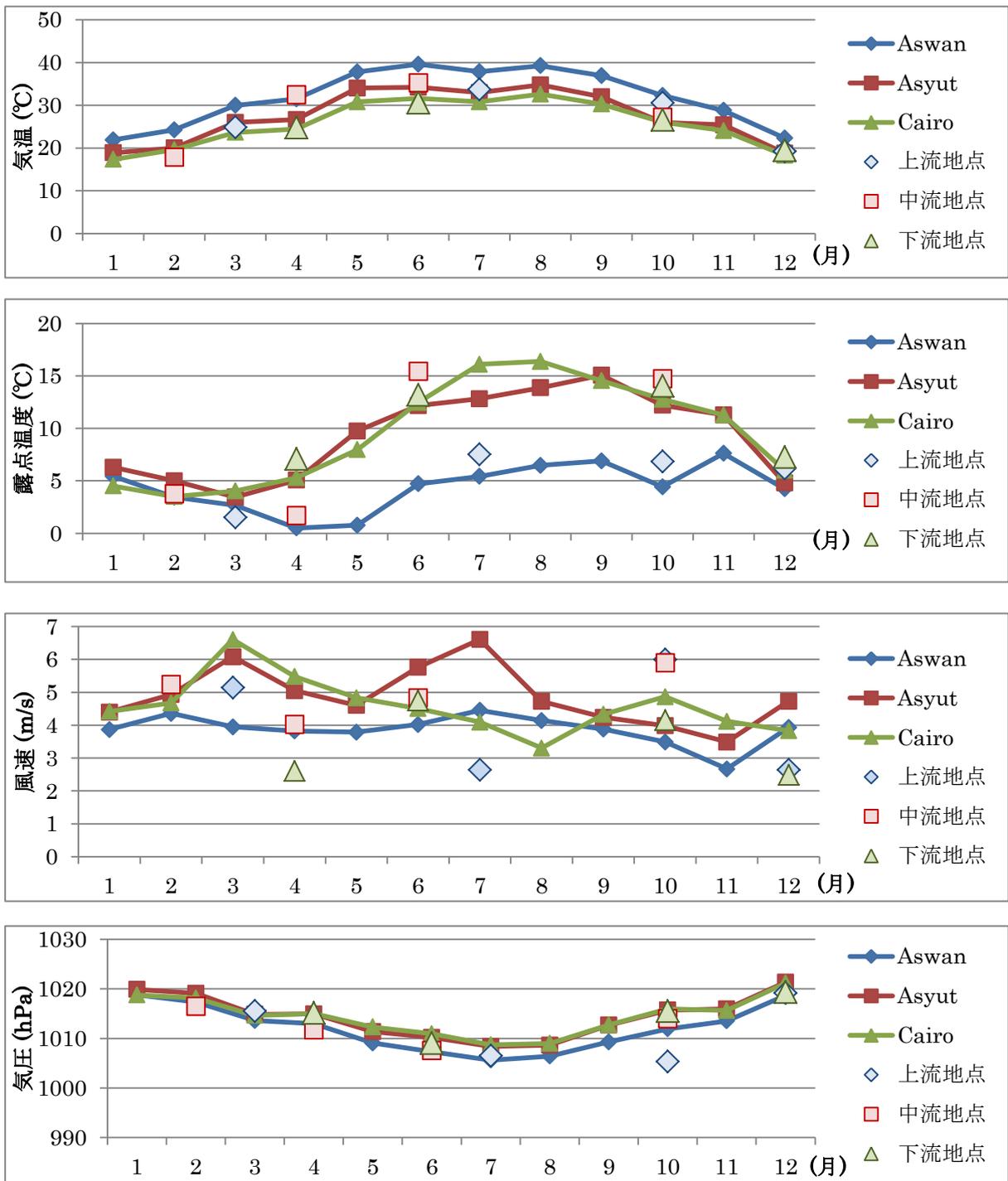


図 63 3 地点における気象データの 2013 年 10 時における月平均の変化

図 1 に示す上流地点, 中流地点, 下流地点における蒸発量算出時の気象データ(シンボル). 各地点の近くの観測所(Aswan, Asyut, Cairo)の 2013 年現地時刻 10 時における月平均変化(実線). 次の図も同じ.

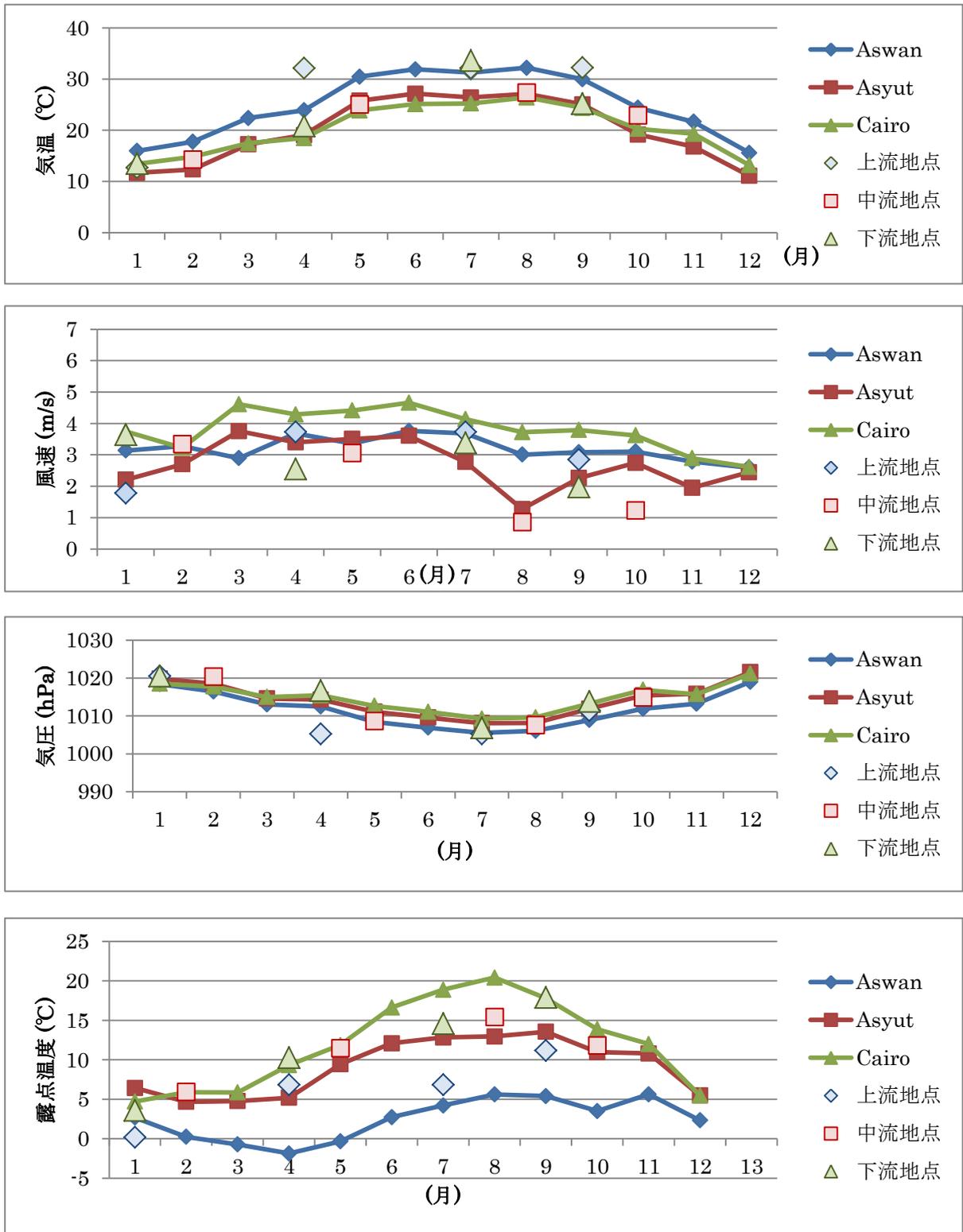


図 64 3 地点における気象データの 2013 年 22 時における月平均の変化

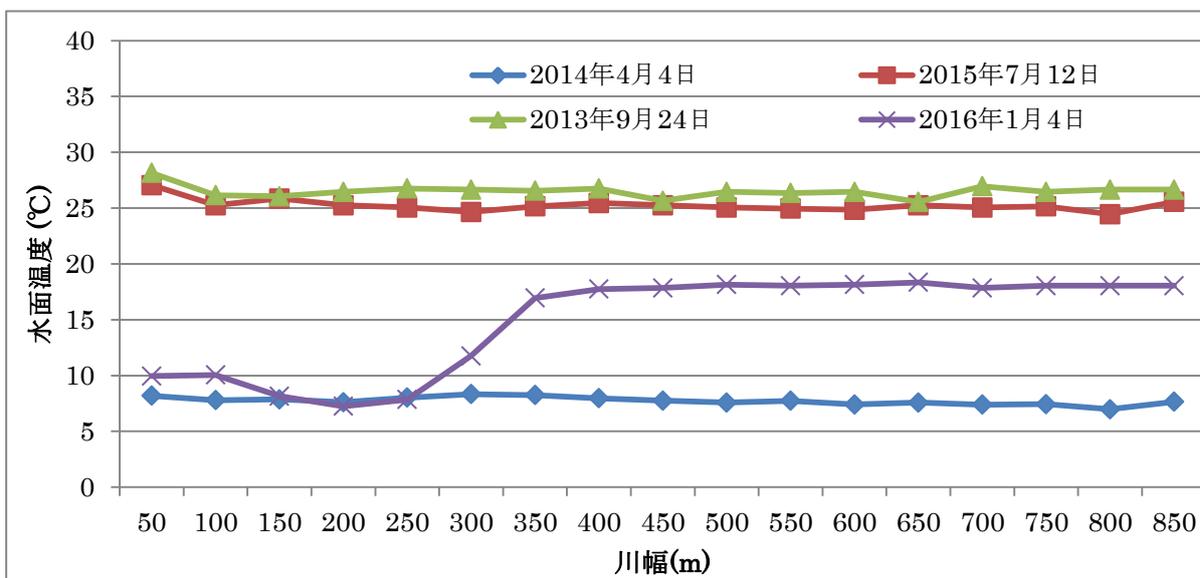
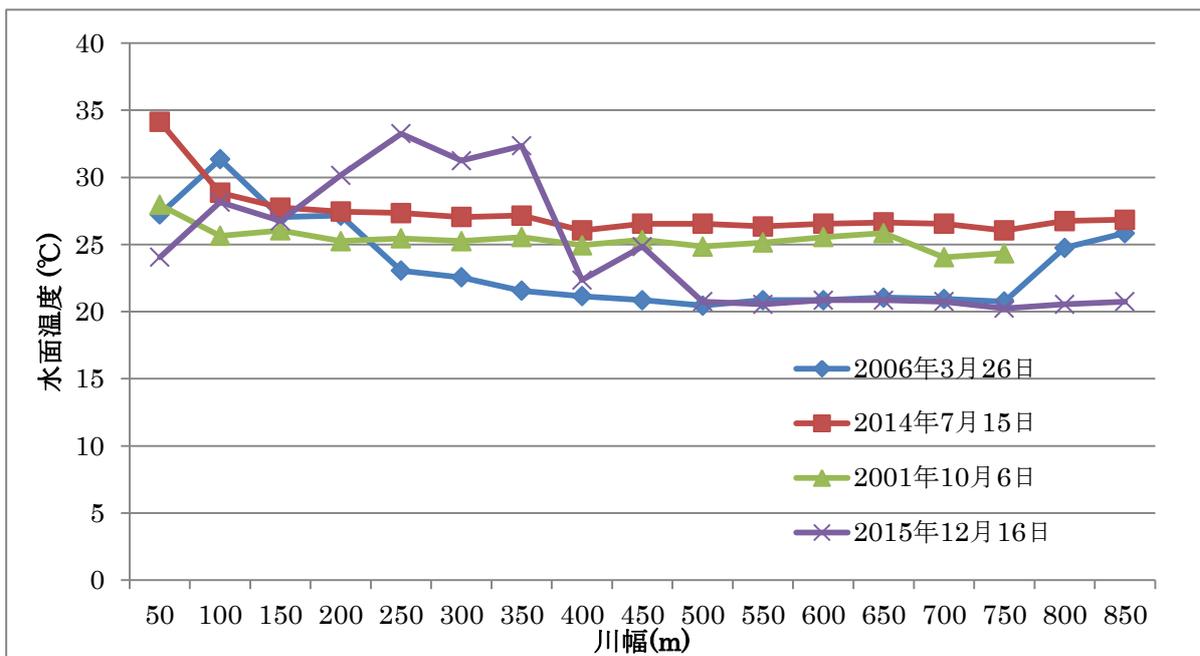


図 65 上流地点の河川横断面に沿った水面温度の水平断面分布の季節変化

上図 日中(10時30分前後)における河川横断面の水面温度の季節変化

下図 夜間(22時40分前後)における河川横断面の水面温度の季節変化

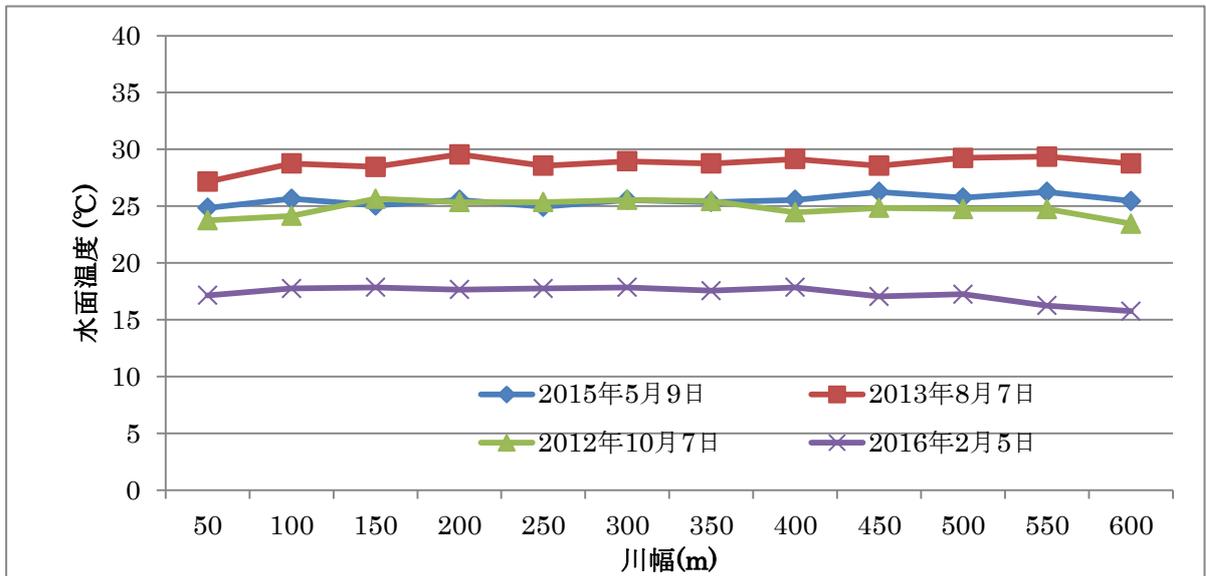
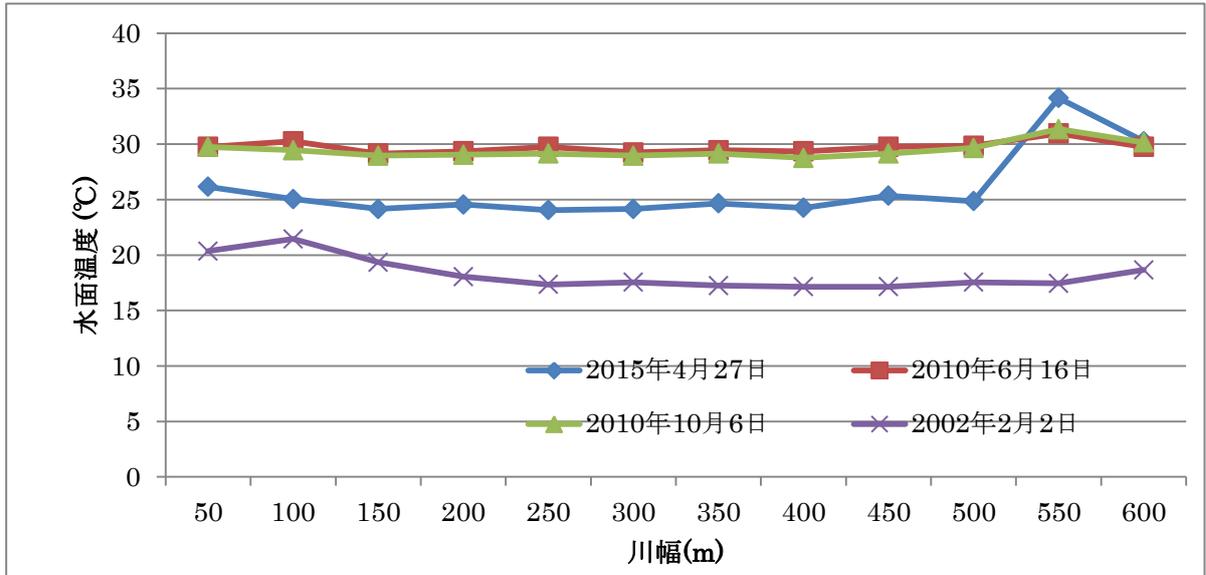


図 66 中流地点の河川横断面に沿った水面温度の水平断面分布の季節変化

上図 日中(10時30分前後)における河川横断面の水面温度の季節変化

下図 夜間(22時40分前後)における河川横断面の水面温度の季節変化

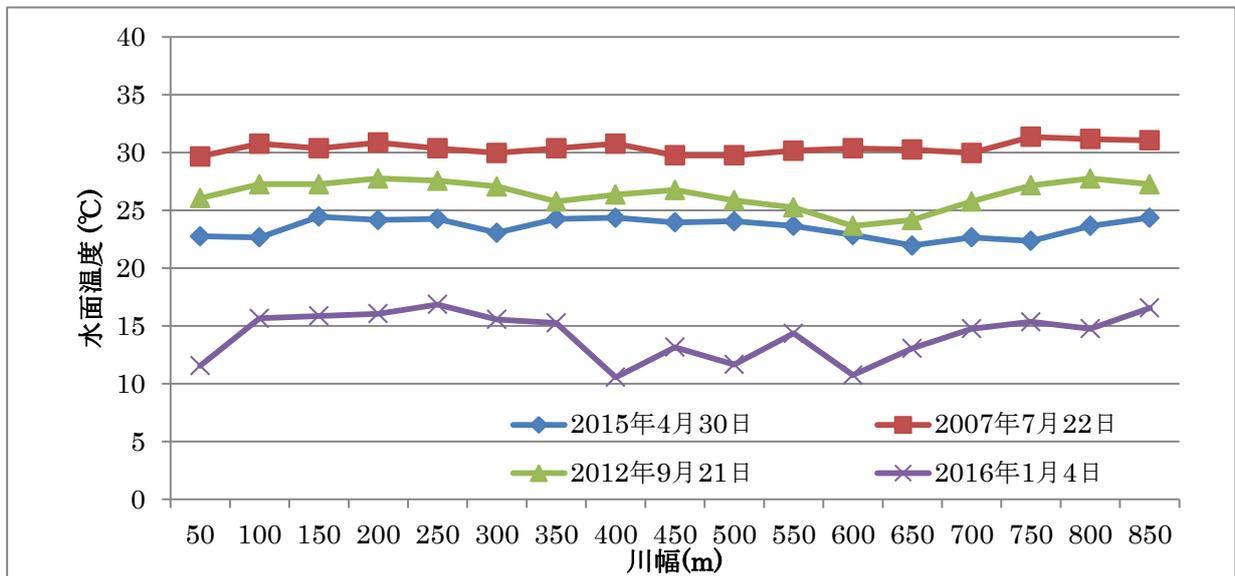
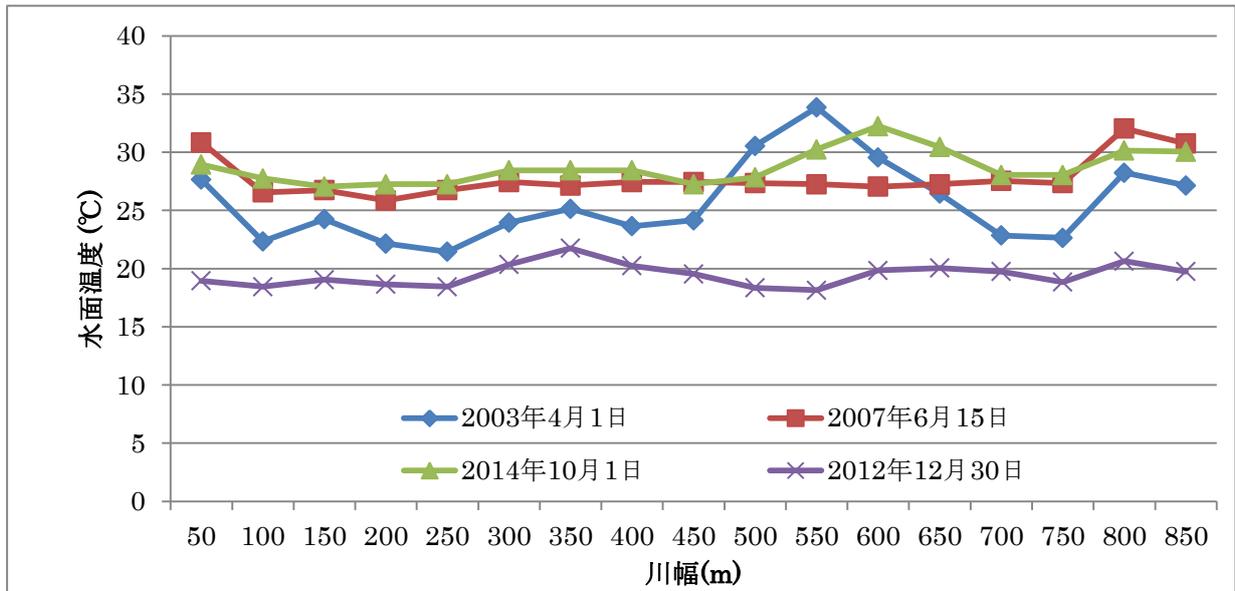


図 67 下流地点の河川横断面に沿った水面温度の水平断面分布の季節変化

上図 日中(10時30分前後)における河川横断面の水面温度の季節変化

下図 夜間(22時40分前後)における河川横断面の水面温度の季節変化

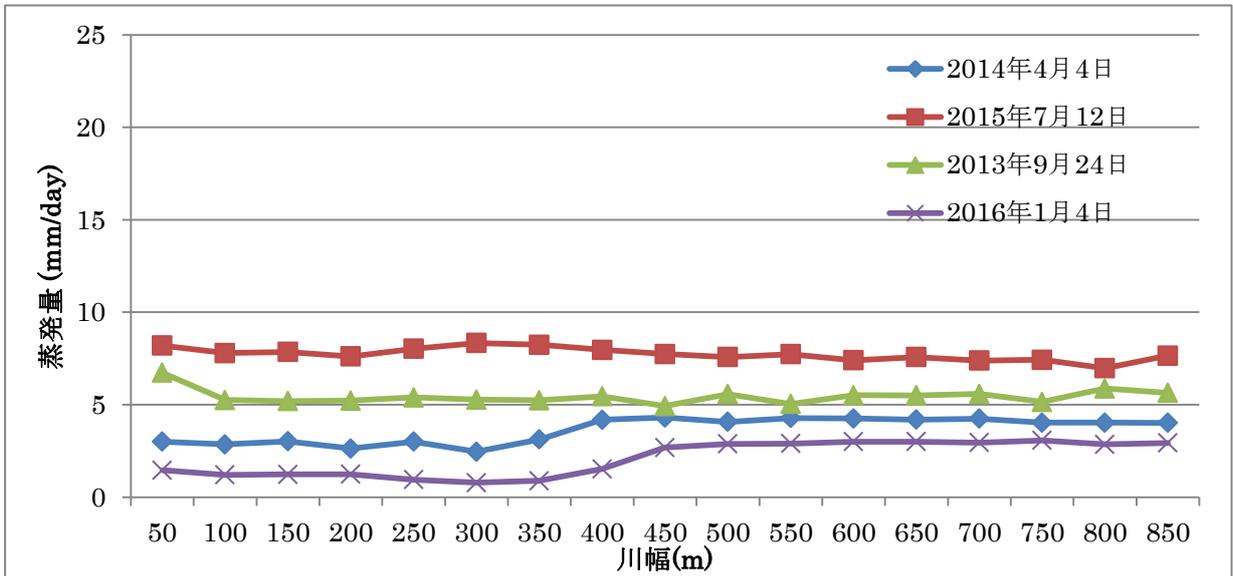
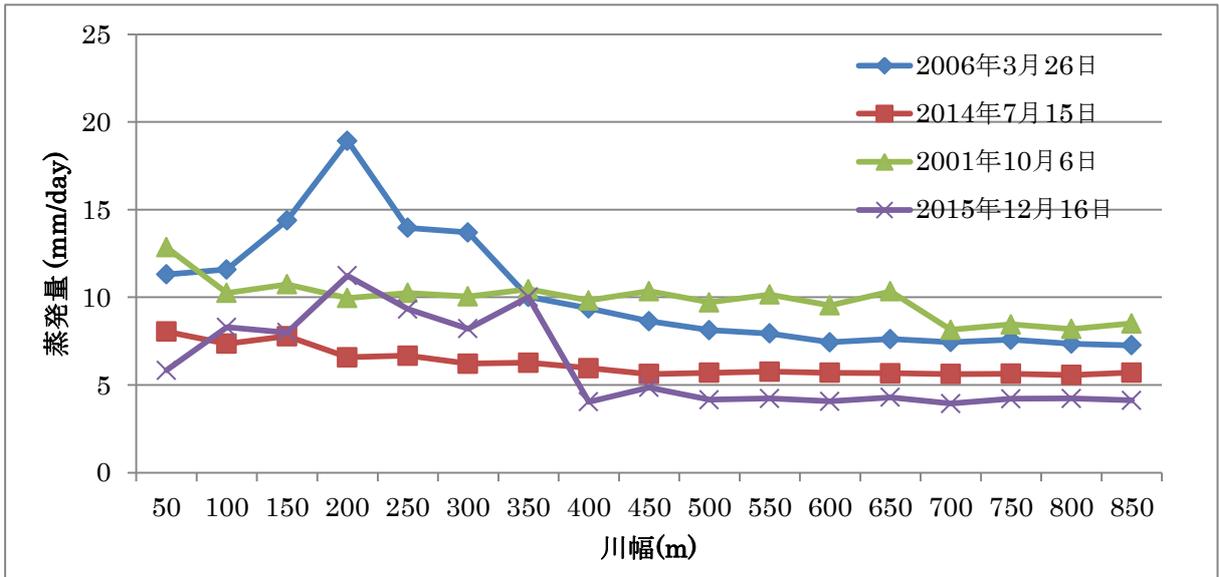


図 68 上流地点の河川横断面に沿った蒸発の水平断面分布の季節変化

上図 日中(10時30分前後)における河川横断面の蒸発量の季節変化

下図 夜間(22時40分前後)における河川横断面の蒸発量の季節変化

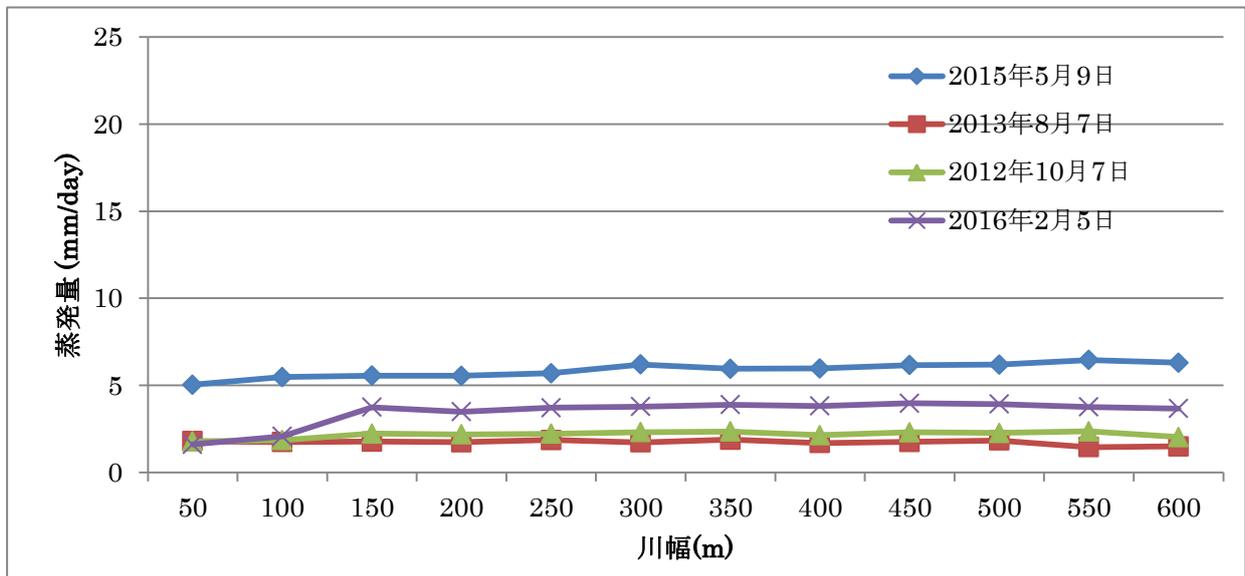
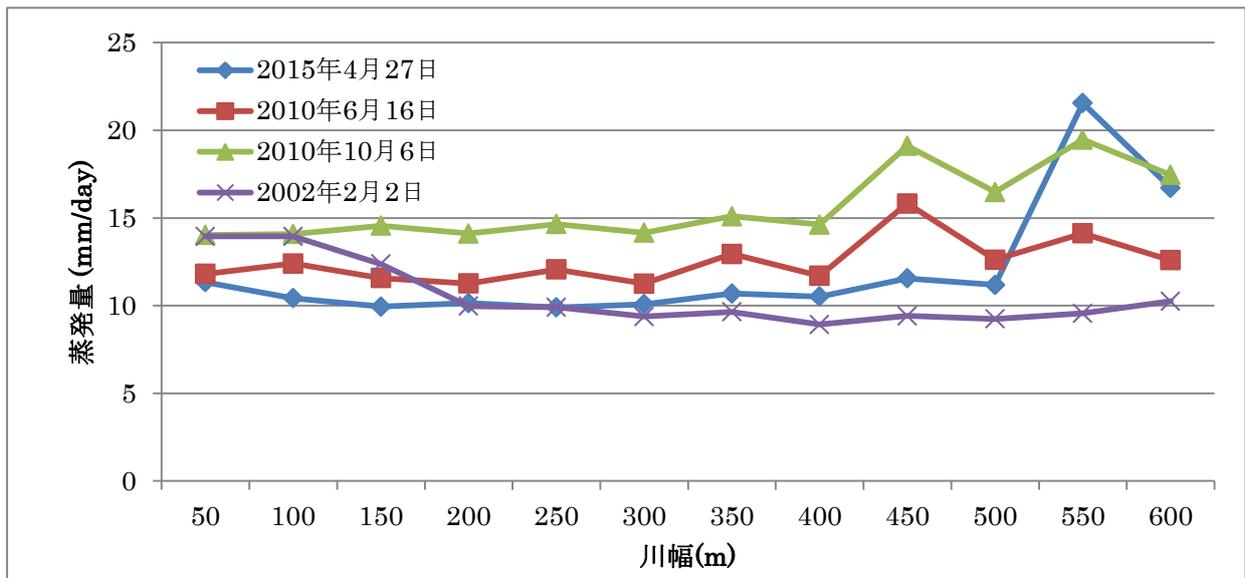


図 69 中流地点の河川横断面に沿った蒸発の水平断面分布の季節変化

上図 日中(10時30分前後)における河川横断面の蒸発量の季節変化

下図 夜間(22時40分前後)における河川横断面の蒸発量の季節変化

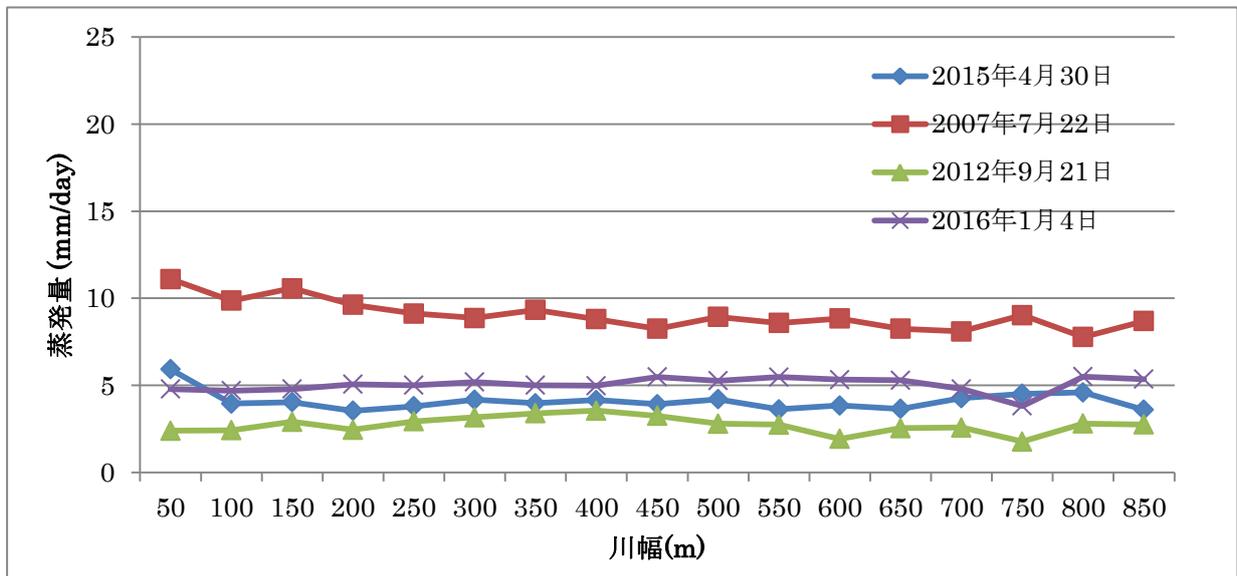
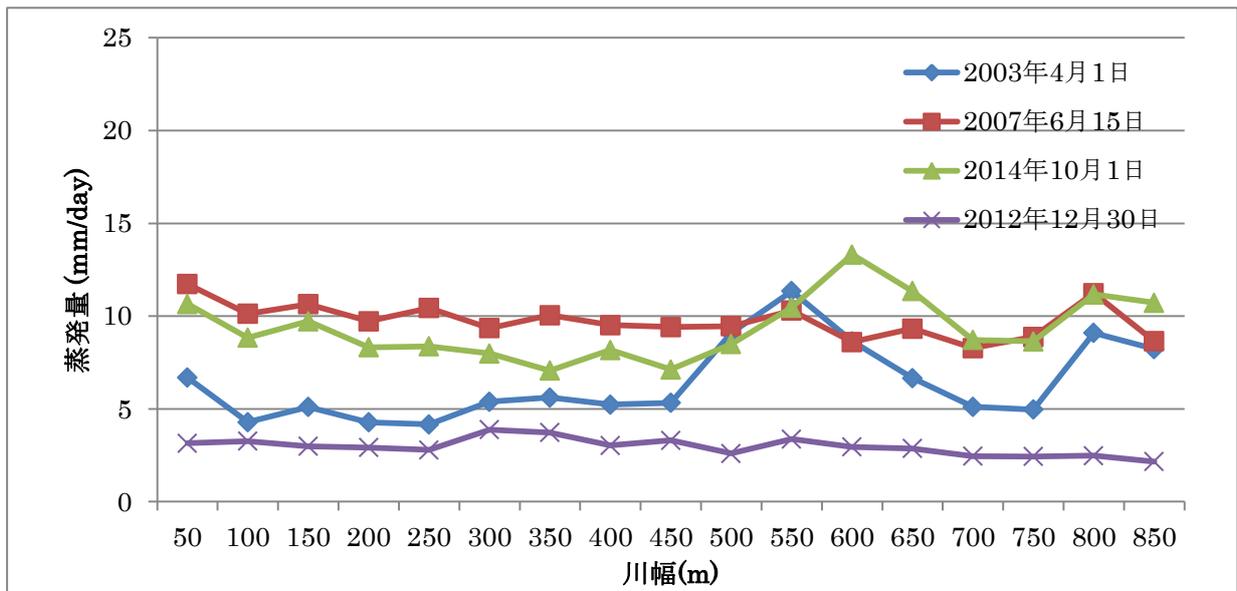


図 70 下流地点の河川横断面に沿った蒸発の水平断面分布の季節変化

上図 日中(10時30分前後)における河川横断面の蒸発量の季節変化

下図 夜間(22時40分前後)における河川横断面の蒸発量の季節変化

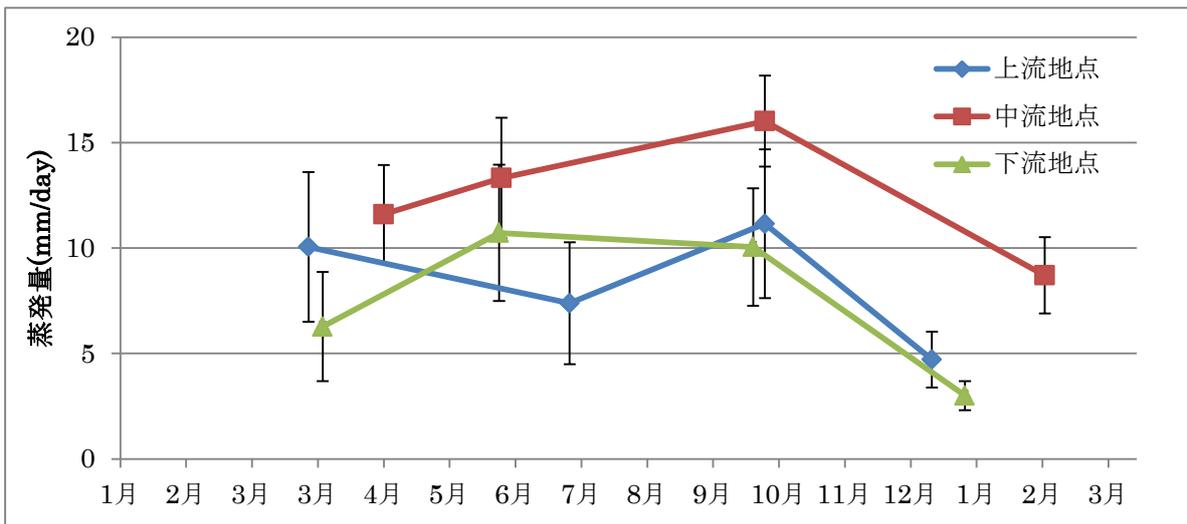


図 71 上流, 中流, 下流における現地時刻 10 時に取得した衛星画像での平均蒸発量の季節変化
エラーバーは標準偏差を示す.

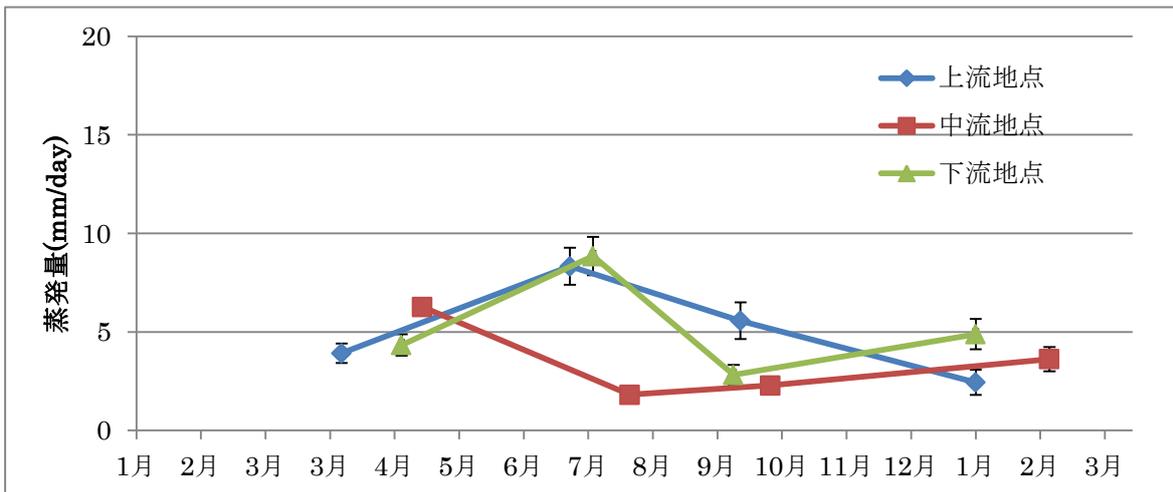


図 72 上流, 中流, 下流における現地時刻 22 時に取得した衛星画像での平均蒸発量の季節変化
エラーバーは標準偏差を示す.