

衛星情報を用いた地表面温度の年々変動の分析

萬和明*・児玉隆敏*・Sunmin KIM*・立川康人*・椎葉充晴*

*京都大学大学院工学研究科

要 旨

局地的あるいは広域の水循環において地表面水文量が果たす役割は大いが、地表面状態の広範囲かつ長期間にわたる現地直接観測を実施するのは困難である。そこで本研究では、衛星 Terra および衛星 Aqua に搭載された MODIS センサによって観測される地表面温度に着目し、地表面状態の時間的な変動を分析した。本研究で使用したプロダクトは MOD11C1 および MYD11C1 の 2 種類のグローバルデータであり、空間解像度は 6km、対象期間は 2001 年から 2010 年までの 10 年間である。本研究では、1 年を 8 日毎の 46 期間にわけた各期間における地表面温度の年々変動を分析した。その結果、各期間における地表面温度の年々変動の大きさは空間的・季節的に変化することが推定された。また、各期間における地表面温度の平年値からの偏差の標準変量を指標として、年々の偏差が大きい領域や時期が抽出された。

キーワード： 地表面状態、衛星観測情報、地表面温度、年々変動、標準変量

1. 序論

局地的あるいは広域の水循環において地表面水文量が果たす役割は大きく、地表面温度や土壌水分量が夏季の降水量に寄与すると指摘されている (Koster et al., 2004)。また、森林伐採などの土地利用変化や植生状態の変化が降水量に影響することが示唆されている。しかしながら、地表面状態の広範囲かつ長期間にわたる現地直接観測を実施するのは困難であるため、地表面状態がどのように時間・空間的に変動するかについてはあまり議論されていない。

地表面水文量のなかでも地表面温度に着目すると、その観測には赤外線放射温度計を使うのが一般的であり、地上に設置した放射温度計を用いる方法と、衛星に搭載されたセンサを用いる方法とがある。地上で測定するときには観測点の記録しか得られないのに対し、衛星に搭載されたセンサを用いるときには、空間分布が得られる。特に、地上では計測困難な場所のデータが得られることが、衛星に搭載されているセンサを用いる大きな利点といえる。

そこで本稿では、地表面状態の時間的および空間

的な変化を把握するため、衛星に搭載されたセンサから得られる地表面温度に着目する。本稿で用いる衛星情報は、地球観測衛星に搭載されている MODIS センサで観測される情報である。この衛星情報から推定される地表面温度を分析対象とする。MODIS センサから得られる地表面温度は、2000 年以降からの蓄積があり、年ごとの特色がつかめる情報量になったといえる。

そこで本稿では、衛星に搭載されたセンサによって観測される地表面温度の時間的な変動に着目し、年々変動や年々の偏差が大きい領域・時期を抽出することを目的とする。

2. 衛星情報から推定される地表面温度

本稿では、衛星 Terra および衛星 Aqua に搭載された中分解能撮像分光放射計 MODIS (MODerate resolution Imaging Spectroradiometer) による観測情報から得られる地表面温度プロダクトを用いる。使用したプロダクトは MOD11C1 および MYD11C1 の 2 種類のグローバル地表面温度プロダクトである。MOD11C1 と MYD11C1

は陸域を対象にした地表面温度プロダクトであり、MOD11C1は衛星 Terra に搭載された MODIS センサから、MYD11C1は衛星 Aqua に搭載された MODIS センサから、それぞれ推定された地表面温度のデータがアーカイブされたものである。

2.1 衛星情報

MOD11C1 と MYD11C1 には、緯度経度 0.05° 格子で値が収納されている。それぞれのプロダクトでは、格子内で観測された複数の値のうち、観測時の MODIS センサの天頂角や青色光の弱さなどの基準をもとに、最良と判断された1点の値がその格子全体の値として出力されている (Wan, 2008)。出力されている主たるデータは、band31 および band32 の観測値を用いて推定された地表面温度である。band31 および band32 の観測波長帯はそれぞれ $10.78\text{--}11.28\ \mu\text{m}$ および $11.77\text{--}12.27\ \mu\text{m}$ であり、赤外線に分類される電磁波の領域である。そのため、太陽の当たらない領域も観測値が得られる。ただし、陸域を想定したプロダクトであるため海洋のデータは存在しない。

衛星 Terra は南中時刻に対し10時30分に赤道を北から南に通過し、南中時刻に対し22時30分に南から北へ通過する。一方、衛星 Aqua は南中時刻に対し13時30分に赤道を南から北へ通過し、南中時刻に対し1時30分に北から南へ通過する。これ以降、本稿では MOD11C1 について、南中時刻に対して10時30分頃に観測されたデータを昼のデータ、22時30分頃に観測されたデータを夜のデータと表し、同様に MYD11C1 について、南中時刻に対して13時30分頃に観測されたデータを昼のデータ、1時30分頃に観測されたデータを夜のデータとそれぞれ表すことにする。

MOD11C1 および MYD11C1 プロダクトでは幾何補正と大気補正が施された地表面温度が提供されるが、完全には補正し切れていないため、各メッシュ毎に8日毎のコンポジットデータを作成し、1年を46期間とした時系列データを分析対象とする。MOD11C1 は2001年から現在までのデータが、MYD11C1 は2003年から現在までのデータがそれぞれ蓄積されているが、本稿で分析対象とする期間は2001年から2009年までとする。

2.2 地表面温度

MOD11C1 および MYD11C1 で公開されている地表面温度は、generalized split window 法 (Wan, 1996) を陸域に適用し推定された地表面温度である。Generalized split window 法とは split window 法 (McMillin, 1975) の1つで、以下の式を用いて地表面温度 T_s を推定する手

法である。

$$T_s = C + \left(A_1 + A_2 \frac{1-\varepsilon}{\varepsilon} + A_3 \frac{\Delta\varepsilon}{\varepsilon^2} \right) \frac{T_{31} + T_{32}}{2} + \left(B_1 + B_2 \frac{1-\varepsilon}{\varepsilon} + B_3 \frac{\Delta\varepsilon}{\varepsilon^2} \right) \frac{T_{31} - T_{32}}{2}$$

ここで、 A_i , B_i ($i=1, 2, 3$) および C は大気中の積算水蒸気量によって定まる係数を、 T_{31} と T_{32} は band31 と band32 で観測された輝度温度 (K) を表している。また ε は $0.5(\overline{\varepsilon}_{31} + \overline{\varepsilon}_{32})$, $\Delta\varepsilon$ は $(\overline{\varepsilon}_{31} - \overline{\varepsilon}_{32})$ であり、 $\overline{\varepsilon}_{31}$ と $\overline{\varepsilon}_{32}$ は band31 と band32 の波長帯における平均放射率をそれぞれ表している。

3. 分析対象とする地表面温度

本稿では、地表面温度の推定値のコンポジットデータをもとに年々変動を分析する。年々変動とは1年間のある時期に着目し、その時期の年ごとの変動のことである。例えば、12期(3月30日–4月7日)を対象としたときには、2001年から2009年までの9年分の12期のデータを取り出して、その変動を調べることになる。

3.1 昼と夜の地表面温度と昼夜の温度差

MOD11C1 には昼と夜の2種類の地表面温度データが存在する。本稿では昼と夜の2つの地表面温度に加え、日中の温度上昇を表した地表面温度の昼夜差を分析の対象とする。

地表面温度の昼夜差は1日毎に昼夜差をとり、その平均もしくは最大値をコンポジットする方法が考えられる。しかし、昼に地表面温度の推定値が得られた領域において、同日に夜も地表面温度の推定値が得られるとは限らない。そこで、地表面温度の昼夜差は、コンポジットデータである昼の地表面温度の値から夜の地表面温度の値を減算して作成する。ただし、昼と夜のどちらか一方でも地表面温度が得られない領域では、昼夜差の値は出力していない。例として、Fig. 1 に MOD11C1 から得られる2009年12期(3月30日–4月7日)の昼と夜の地表面温度とそれらの差を示す。同図において、(a) 昼の地表面温度から (b) 夜の地表面温度を引いたものが (c) 地表面温度の昼夜差である。

3.2 平均と標準偏差

2001年から2009年までの9年分の地表面温度をもとに、各期ごとに地表面温度の平均と標準偏差を求める。例として、Fig. 2 に MOD11C1 から得られる12期(3月30日–4月7日(2004年と2008年は3月29日–4月6日))における9年分の昼の地表面温度の平均(a)、と標準偏差(b)を示す。同様に MYD11C1 から得られる

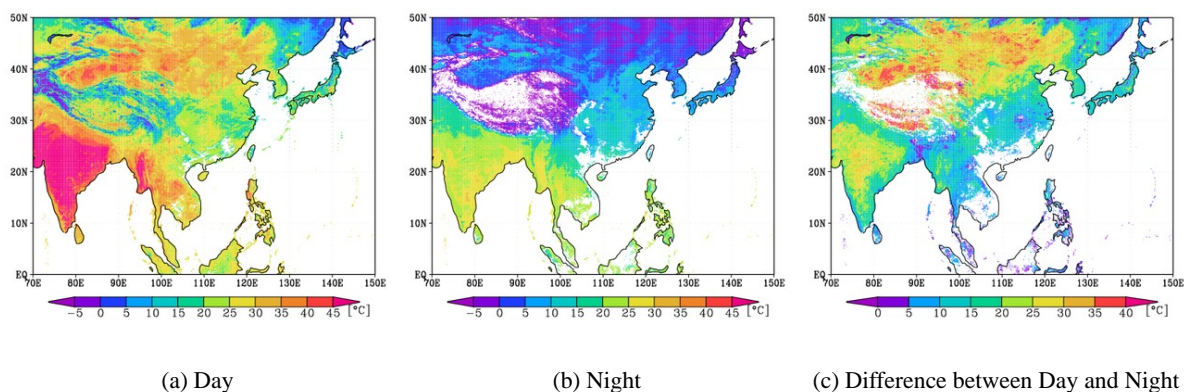


Fig. 1 Land surface temperature on 12th term 2009 derived from MOD11C1.

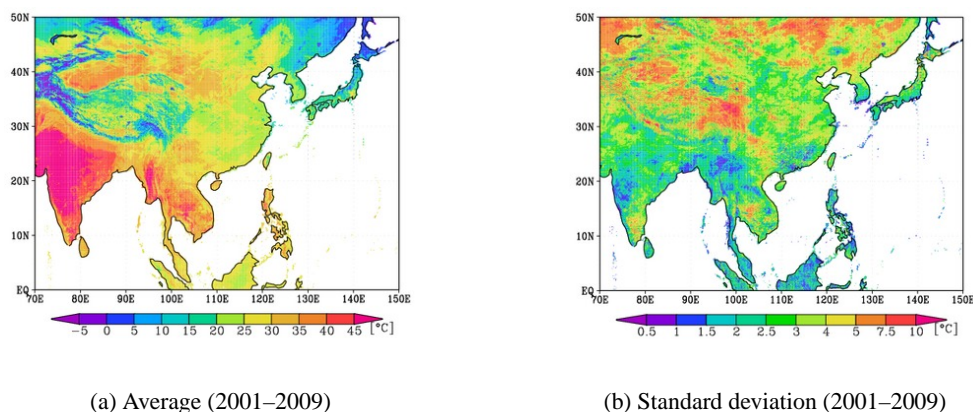


Fig. 2 Daily land surface temperature on 12th term.

地表面温度の推定値のコンポジットデータについても7年分の平均と標準偏差を算出している。これ以降、平年とは、MOD11C1から得られる9年分の地表面温度の平均、または、MYD11C1から得られる7年分のコンポジットデータの平均を表すことにする。

ただし、同じ平均、標準偏差であっても、9年分の地表面温度の値が得られる場所での標準偏差と、例えば3年分しか値が得られない場所での標準偏差では意味合いが異なることに注意すべきである。そこで、各メッシュにおいて、9年間で得られる地表面温度の値の個数を求めたところ、9-18期(3月6日-5月25日)ではほとんどの領域で6年分以上の地表面温度の値が得られる。したがって、本稿では観測値が多く得られる9-18期を対象に地表面温度の年々変動を分析する。

4. 標準変量による分析

昼と夜の地表面温度と昼夜の地表面温度差について、各年各期における値が平年からどのくらい差があるか、という観点から地表面温度の年々変動の分

析を行う。Fig. 3に2009年12期(3月30日-4月7日)における昼と夜の地表面温度と昼夜の地表面温度差について、それぞれの平年との差を示す。Fig. 2(b)とFig. 3(a)を比較すると、平年からの差が大きい領域は、地表面温度の標準偏差が大きい領域と概ね一致することがわかる。

そこで、各年における地表面温度の平年からの差を標準偏差で除した標準変量を指標に年々変動の分析を行うこととする。標準変量を数式で表すと、 i 年 j 期の標準変量 s_{ij} は

$$s_{ij} = (T_{ij} - \bar{T}_j) / \sigma_j$$

と表せる。ここで、 T_{ij} は i 年 j 期の地表面温度、 \bar{T}_j は9年間の j 期の地表面温度の平均、 σ_j は9年間の j 期の地表面温度の標準偏差である。

地表面温度の標準変量 s_{ij} の絶対値が大きいほど、その年の地表面温度の平年からのずれが大きいことを示す。ただし、標準変量 s_{ij} は、分母である標準偏差 σ_j が小さいと極端に大きな値になってしまうため、地表面温度の標準偏差の値によって年々変動の分析に用いる指標を次のように場合分けする。

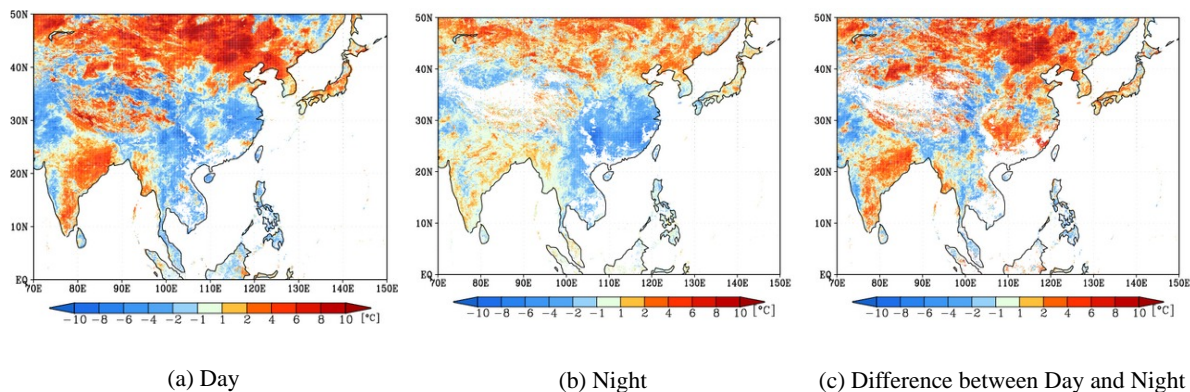


Fig. 3 Deviation of land surface temperature from 9 years average on 12th 2009 derived from MOD11C1.

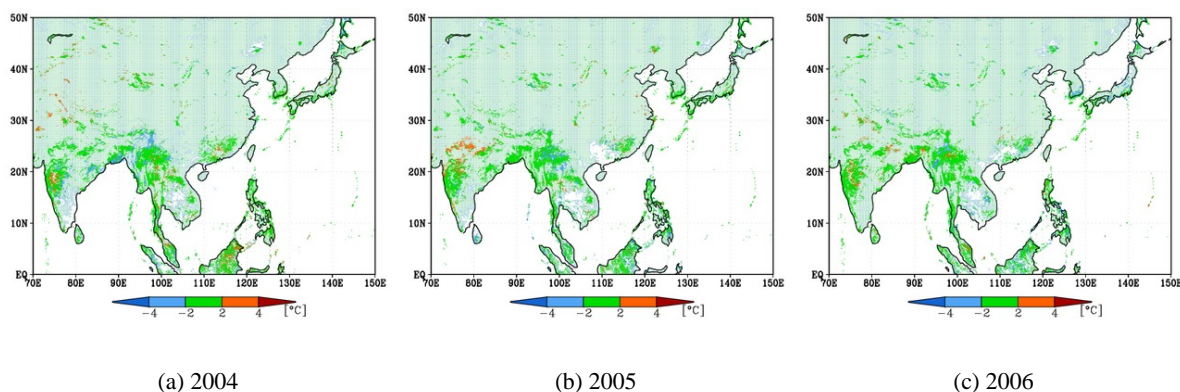


Fig. 4 Deviation of daily land surface temperature from 9 years average on 12th 2009 derived from MOD11C1. In this figure, the region which has less than 2 degree standard deviation is vivid colored.

4.1 標準偏差が 2°C 以下の領域

まず、標準偏差が小さい領域において、ある年に平年とは大きく異なる地表面温度が推定されているような領域を抽出する。対象とする領域は、地表面温度の標準偏差が 2°C 以下の領域とする。標準偏差が小さいため、標準変量ではなく平年からの差($T_{ij} - \bar{T}_j$)を指標に分析する。

標準偏差が 2°C 以下である領域を対象とした分析の例として、Fig. 4に2004–2006年の12期(3月30日–4月7日)において、MOD11C1より得られた昼の地表面温度の平年からの差を示す。同図では、地表面温度の標準偏差が 2°C 以上の領域は薄緑色で着色している。同図からは、地表面温度が平年から大きく外れた値を示す領域はみられない。図は省略するが、夜の地表面温度やMYD11C1プロダクトについても同様であった。地表面温度のデータが9年分しかないので、その1つが極端な値となると、地表面温度の平均・標準偏差に大きな影響を与えるため、標準偏差が小さい領域では、ある年だけ平年からずれた

地表面温度を記録している領域を見つけ出すことはできないと考えられる。

4.2 標準偏差が 2°C 以上の領域

次に、標準偏差が大きい領域において、ある年に平年とは大きく異なる地表面温度が推定されているような領域を抽出する。本項では、地表面温度の標準偏差が 2°C 以上の領域を対象に、標準変量 $s_{ij} = (T_{ij} - \bar{T}_j) / \sigma_j$ を用いて年々変動の分析をする。

Fig. 5は、MOD11C1から得られた9年分の昼の地表面温度の標準変量を12期(3月30日–4月7日)を対象に示した図である。同図では、地表面温度の標準偏差が 2°C 以下の領域は薄緑色で着色している。同図(e)から、2005年における上海付近に地表面温度の標準変量が2以上となる広い領域が見られ、また、同図(h)から、2008年におけるインド周辺に地表面温度の標準変量が-2以下となる広い領域があることがわかる。このように、地表面温度の標準変量を用いて、ある年の地表面温度の値が平年に比べ著しく

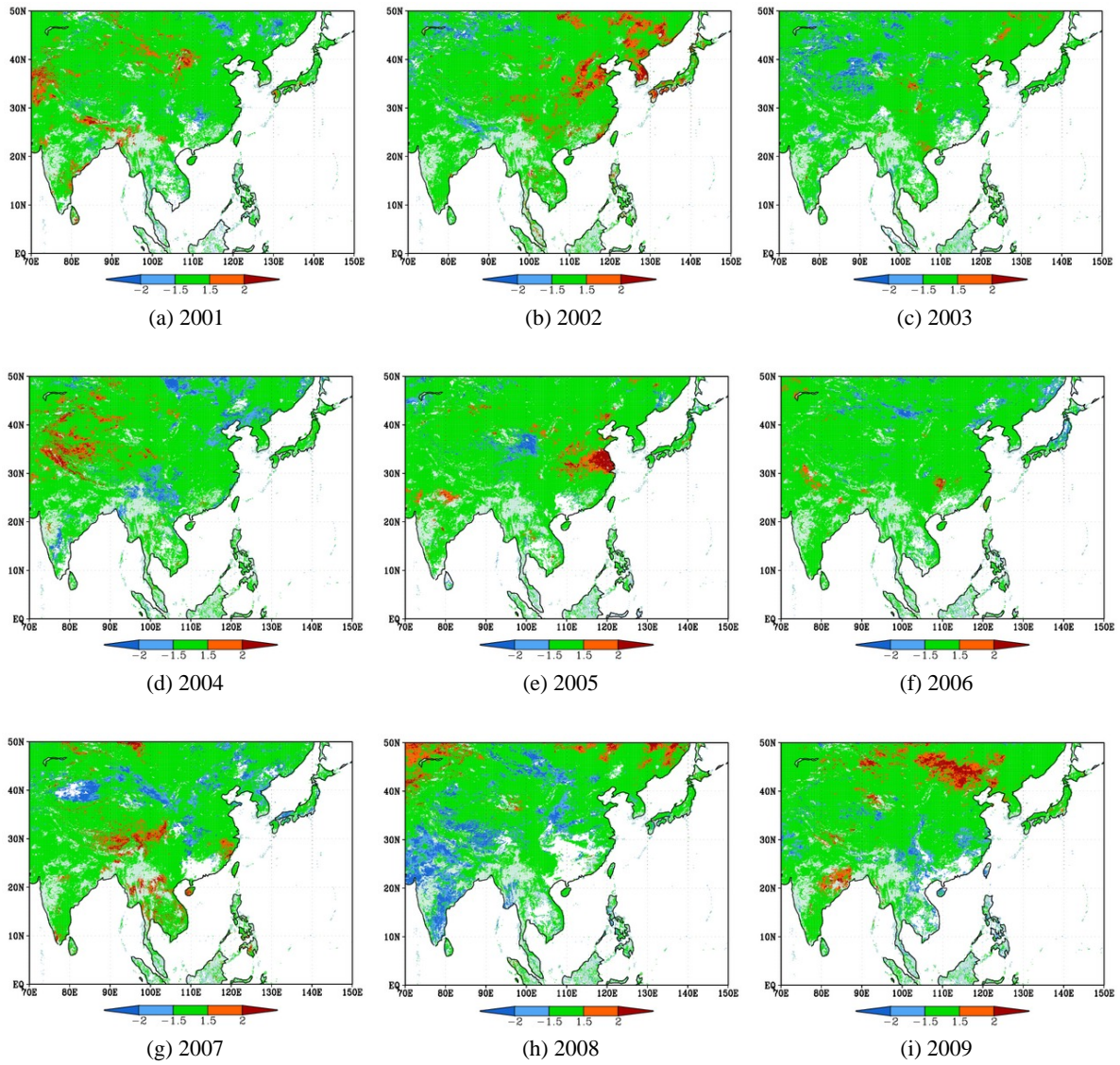


Fig. 5 Standard error of daily land surface temperature on 12th term derived from MOD11C1. In this figure, the region which has more than 2 degree standard deviation is vivid colored.

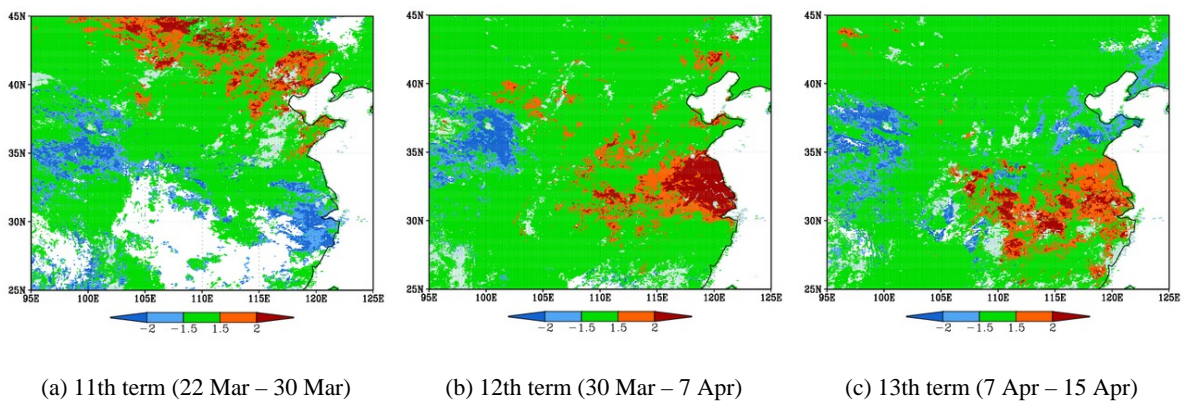


Fig. 6 Standard error of daily land surface temperature from 11th to 13th term derived from MOD11C1. In this figure, the region which has more than 2 degree standard deviation is vivid colored.

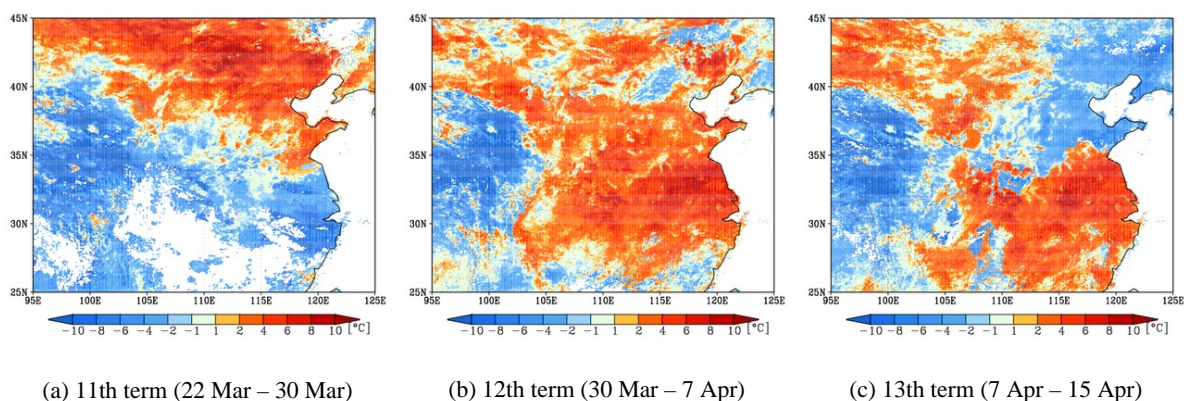


Fig. 7 Deviation of daily land surface temperature from 9 years average from 11th to 13th 2005 derived from MOD11C1

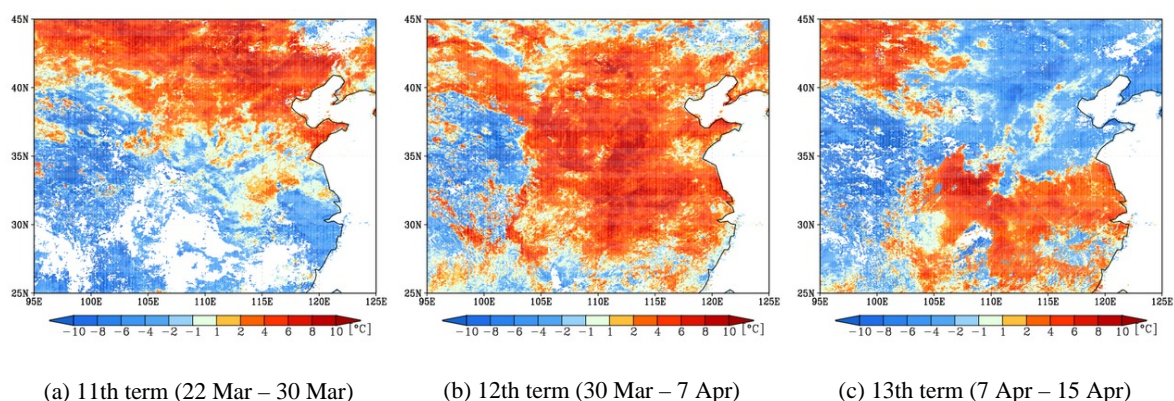


Fig. 8 Deviation of daily land surface temperature from 9 years average from 11th to 13th 2005 derived from MYD11C1

異なる領域を抽出することができる。

5. 年々変動の分析

本節では、前節で述べた方法を用いて抽出された、標準変量 $s_{ij} = (T_{ij} - \bar{T}_j) / \sigma_j$ の絶対値が大きい領域の中から、特徴的な2つの領域について詳細に年々変動を分析する。

5.1 2005年における上海付近

Fig. 6は2005年の11–13期(3月22日–4月15日)においてMOD11C1から得られた上海付近の昼の地表面温度の標準変量を示した図である。同図(a)から、11期(3月22–30日)において上海付近では地表面温度の標準変量は低い値を示している。しかし、同図(b)、(c)から、12期(3月30日–4月7日)、13期(4月7–15日)における上海付近では昼の地表面温度の標準変量は高い値を記録している。このことより、2005年における上海付近では、12期に急激に地表面温度が高くなったことが推定される。

次に、Fig. 7に11–13期においてMOD11C1から得ら

れる昼の地表面温度の平年からの差を示す。Fig. 6と同じように、2005年11期における上海の昼の地表面温度は平年と比べて著しく低い、12期および13期の地表面温度は平年よりも著しく高い値を示すことがわかる。

加えて、衛星Aquaによって観測されたMYD11C1から地表面温度の推定値をコンポジットしたデータを考察する。MYD11C1での地表面温度の推定値は標準偏差が小さいために、標準変量を指標にすることは適切ではない。そこで、MYD11C1による分析には平年からの差を指標に用いることにする。Fig. 8に、11–13期においてMYD11C1から得られる上海付近の昼の地表面温度の推定値と平年との差を出力した図を示す。観測時刻が10時30分頃のTerraによるMOD11C1の地表面温度の推定値同様、観測時刻が13時30分頃のAquaによるMYD11C1の地表面温度の推定値でも、上海付近では12期に急激に地表面温度が高い値になったことが確認される。

また、昼の地表面温度だけでなく、夜の地表面温度と昼夜の地表面温度差についても同様に分析する。Fig. 9は、2005年11–13期においてMOD11C1か

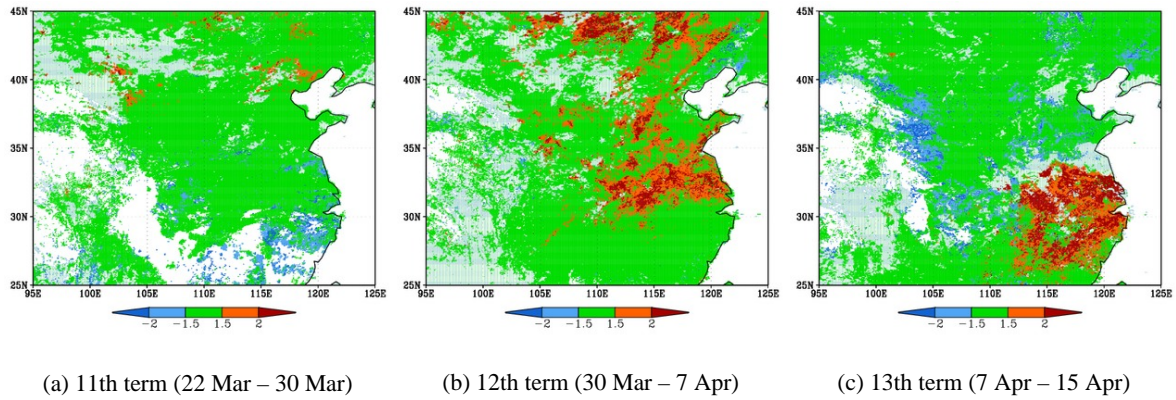


Fig. 9 Standard error of land surface temperature at night from 11th to 13th term derived from MOD11C1. In this figure, the region which has more than 2 degree standard deviation is vivid colored.

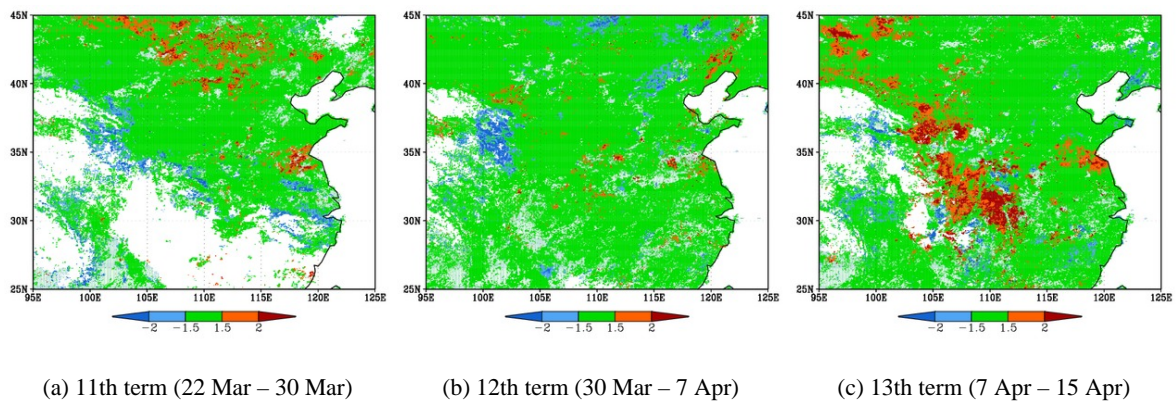


Fig. 10 Standard error of land surface temperature difference between at day and at night from 11th to 13th term derived from MOD11C1. In this figure, the region which has more than 2 degree standard deviation is vivid colored.

ら得られる上海付近の夜の地表面温度の標準変量である。同図より、11期から13期にかけて夜の地表面温度の標準変量が徐々に増大していることがわかる。Fig. 10は、11-13期においてMOD11C1から得られる地表面温度の昼夜差の標準変量であり、同図から昼夜差については、特に平年と変わらない値を示していることがわかる。

したがって、2005年12期頃の上海付近では、日中および夜間ともに地表面温度が平年と比べ高い状態であったことが推測される。

5.2 2009年におけるバングラディッシュ近辺

Fig. 11は、2009年15-17期(4月23日-5月17日)においてMOD11C1から得られるバングラディッシュ近辺を対象に図示した昼の地表面温度の標準変量である。同図から、16期(5月1-9日)、17期(5月9-17日)におけるバングラディッシュ近辺の昼の地表面温度は、標準変量が2以上となることから、平年と比べると異常に高い地表面温度を記録しているといえる。図

は省略するが、2009年は12期(3月30日-4月7日)から昼の地表面温度の標準変量が高い値を示すようになり、17期に標準変量が2以上を示す範囲が最大となっている。

次に、夜の地表面温度について考察する。Fig. 12は、2009年15-17期においてMOD11C1から得られるバングラディッシュ近辺を図示した夜の地表面温度の標準変量である。広い範囲で標準偏差が 2°C 以下であることから、日中とは異なり夜間については2009年15-17期の期間中、平年並の地表面温度であったことが推定される。

一方、MOD11C1から得られる同期間の地表面温度の昼夜差の標準変量をFig. 13に図示すると、昼の地表面温度の標準変量と同じように高い値を示していることが分かる。

以上より、2009年の4月初めから5月中旬におけるバングラディッシュ近辺では、夜間は平年並みの地表面温度であったが、日中は平年と比べ地表面温度が高い状態が続いていたと推定される。

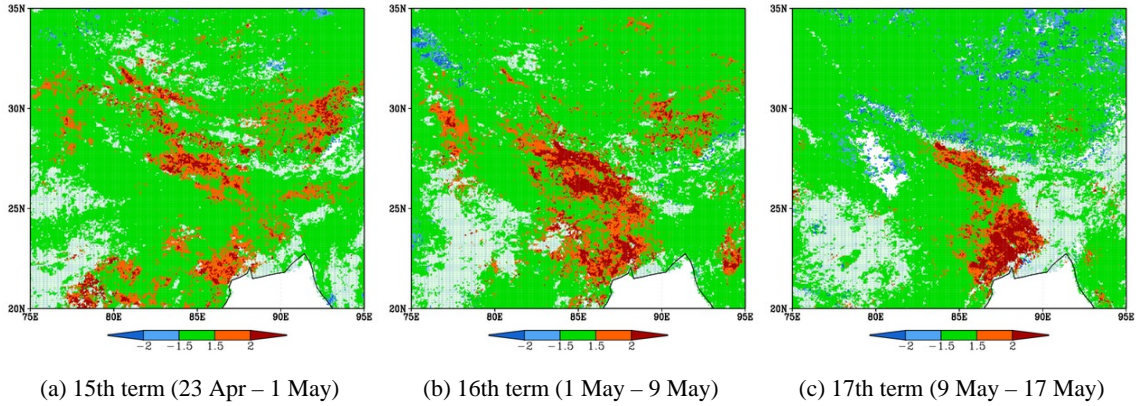


Fig. 11 Standard error of daily land surface temperature from 15th to 17th term derived from MOD11C1. In this figure, the region which has more than 2 degree standard deviation is vivid colored.

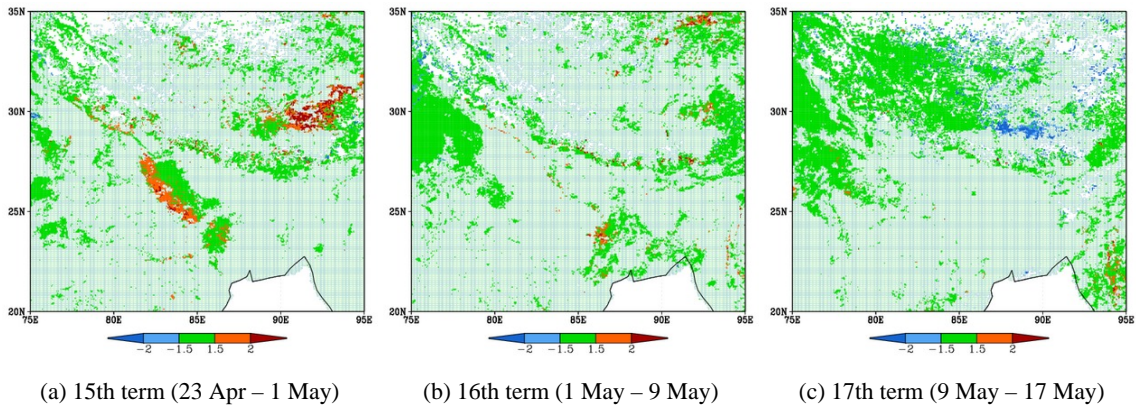


Fig. 12 Standard error of land surface temperature at night from 15th to 17th term derived from MOD11C1. In this figure, the region which has more than 2 degree standard deviation is vivid colored.

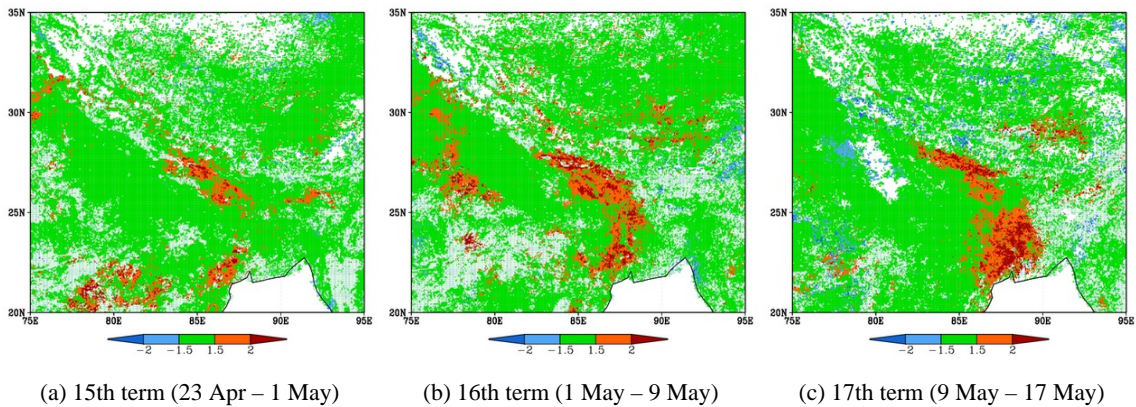


Fig. 13 Standard error of land surface temperature difference between at day and at night from 15th to 17th term derived from MOD11C1. In this figure, the region which has more than 2 degree standard deviation is vivid colored.

6. 結論

本稿では、衛星から得られた地表面温度の推定値から年々変動の分析を行った。

地表面温度の情報として、地球観測衛星 Terra および Aqua に搭載された MODIS センサから generalized split window 法を用いて推定された。MOD11C1 および MYD11C1 プロダクトの地表面温度の推定値を用いた。プロダクトの推定値から、9日間を1期とする1年46期の地表面温度のコンポジットデータを作成し、各期ごとの年々変動を分析した。

MOD11C1 プロダクトについては2001年から2009年までの9年間の昼と夜の地表面温度の推定値のデータを対象とし、新たに昼夜差の地表面温度のコンポジットデータを作成した。9年間のコンポジットデータから、各期の9年間の地表面温度の平均と標準偏差を求め、各々のコンポジットデータと平年との差を求めた。同様に MYD11C1 プロダクトについては2003年から2009年までの7年間の昼と夜の地表面温度の推定値データのデータを対象とし、各期の7年間の地表面温度の平均と標準偏差を求め、各々のコンポジットデータと平年との差を求めた。コンポジットデータと平年との差は、標準偏差の大きさに強く左右されるため、標準偏差が 2°C 以下の領域では平均からの差を、標準偏差が 2°C 以上となる領域では標準変量をそれぞれ指標として、平年と比べ著しく地表面温度が変動する領域を抽出した。

以上のような手法で年々変動を分析した結果、2005年11期-13期(3月22日-4月15日)の上海付近、2009年15-17期(4月23日-5月17日)のバングラディッシュ近辺では、平年に比べて地表面温度が極端に高い領域の抽出することができた。今後の課題としては、これら地表面温度が平年と比べ極端に異なる原因の追究と、このことがもたらす水文・気象・気候学的インパクトに関するさらなる分析が挙げられる。

最後に、本稿では9年分のデータをもとに分析を行ったが、今後データが蓄積されるに伴い地表面温度の平均や標準偏差が変化し、今回の結果とは異なる結果が得られることが予測される。継続的に衛星情報を蓄積し、それらを分析することで、地表面状態の推定研究の発展が期待できる。特に本稿で地表面温度の変動が大きいと抽出された上海とバングラディッシュは、ともに Koster et al. (2004) において降水量に地表面温度が深くかかわる可能性が高い場所として挙げられた領域である。また、2005年の上海では、猛暑や暴風、寒波などで年間を通じて56回の天災予報警報が出されたような、異常気象に見舞われた年だったという。一方、バングラディッシュでは

2007年6月に70人以上の死者を出した集中豪雨が起きている。本稿では、地表面温度と異常気象との関連まで分析はできなかったが、今後はこれら課題に取り組む予定である。

謝 辞

本稿を執筆するにあたり、千葉大学環境リモートセンシング研究センター樋口篤志准教授には、有益なコメントをいただきました。また、分析に使用した衛星観測情報は同センターより提供をいただきました。ここに記して謝意を示します。

参考文献

- Koster, R. D. and co-authors: Regions of strong coupling between soil moisture and precipitation, *science*, Vol.305, pp.1138-1140, 2004.
- McMillin, L. M.: Estimation of sea surface temperatures from two infrared window measurements with different absorption, *J. Geophys. Res.*, Vol.80, No.36, pp.5113-5117 1975.
- Wan, Z.: New refinements and validation of the MODIS Land-Surface Temperature/Emissivity products, *Remote Sens. Environ.*, Vol. 112, pp.59-74, 2008.
- Wan, Z. and Dozier, J.: A Generalized Split-Window Algorithm for Retrieving Land-Surface Temperature from Space. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, Vol.34, pp.892-905. 1996.

Analyzing Interannual Variability of Land Surface Temperature Derived from Satellite Data

Kazuaki YOROZU*, Takatoshi KODAMA*, Sunmin KIM*, Yasuto TACHIKAWA* and Michiharu SHIIBA*

*Graduate school of engineering, Kyoto University

Synopsis

Atmosphere-land surface interaction plays a dominant role on the hydrologic cycle. To get much deeper knowledge of hydrologic cycle, land surface hydrologic variables observed by satellite were analyzed. In this study, land surface hydrologic products derived from MODIS sensor, which have 6 km spatial resolution, are daily data sets and are available from 2001 to 2010, are used for time series analysis. Firstly, daily data is composited into 8-days data to remove unrealistic values even if daily product was already calibrated or corrected. It was found that there are spatial and temporal distribution of 10-years average and standard deviation for each 8-days term. The areas which have extreme interannual variability were pointed out from the analysis of standard score for each term.

Keywords: land surface state, satellite obserbation, land surface temperature, interannual variability, standard score