衛星画像を用いた干ばつ指標の開発

DEVELOPMENT OF DROUGHT INDEX USING SATELLITE IMAGES

濱田 準哉¹・乃田 啓吾²・木口 雅司³・沖 一雄⁴・Somchai BAIMOUNG⁵・
Porrames AMATAYAKUL⁶・Aphantree YUTTAPHAN⁶・沖 大幹⁷
Junya HAMADA, Keigo NODA, Masashi KIGUCHI, Kazuo OKI, Somchai BAIMOUNG,
Porrames AMATAYAKUL and Aphantree YUTTAPHAN, Taikan OKI

¹学生会員 東京大学大学院工学系研究科社会基盤学専攻 修士課程学生 (〒113-8656 東京都文京区本郷
7-3-1)

²非会員 博士 (農学) 東京大学生産技術研究所 (〒153-8505 東京都目黒区駒場4-6-1)

³正会員 博士 (理学) 東京大学生産技術研究所 (〒153-8505 東京都目黒区駒場4-6-1)

⁴非会員 博士 (都市・地域計画) 東京大学生産技術研究所 (〒153-8505 東京都目黒区駒場4-6-1)

⁵非会員 博士 (工学) Ministry of Information and Communication Technology (120 Moo 3, 6-9 floor The
Government Complex Commemorating His Majesty Chaeng Watthana Road, Thung Song Hong, Khet Laksi
Bangkok 10210 Thailand)

⁶非会員 Thai Meteorological Department (4353 Sukhumvit Road, Bangna, Bangkok 10260 Thailand)

⁷正会員 博士 (工学) 東京大学生産技術研究所 (〒153-8505 東京都目黒区駒場4-6-1)

Droughts cause severe human and economic damage and appropriate drought monitoring is important to reduce damage. Drought indices are one of the effective methods for drought monitoring. Drought indices which can evaluate drought spatially are required for detailed drought monitoring. The objective of this study was to develop a drought index, SDT (Standardized Difference Temperature), and show the usefulness of SDT. SDT focuses on the diurnal range of land surface temperature, using satellite images for spatial evaluation. SPI (Standardized Precipitation Index) was used to evaluate the usefulness of SDT. The results showed that SDT and SPI have good correlation in the beginning of the dry season and that SDT is valid for drought monitoring in these periods.

Key Words : *drought index, satellite images, diurnal range of land surface temperature,
Standardized Precipitation Index, north Thailand*

1. 背景

国際連合食糧農業機関 (FAO) の推定では、干ばつは毎年60～80億ドルの被害を引き起こしており、1900年以降、1100万人が死亡し、20億人以上が影響を受けていることから、非常に多数の人々に影響を与える災害であると言える。気候変動により今後、干ばつの頻度、影響度および期間は増大し、人的・経済的被害も拡大すると推測される。干ばつに対応し、被害を軽減するためには、適切な干ばつモニタリングが必要となる。

干ばつの察知・現状把握・分析の手法の一つとして、干ばつ指標 (Drought Index) が用いられる。WMO (1992) によって干ばつ指標は「長期的でかつ異常な水不足の積算結果に関する指標」と定義されるが、異常な水不足の定義は地域毎に異なるため、個々の地域の気候

条件を考慮することが極めて重要である。例えば、降水量の少ない乾燥地帯では、水不足が連続して発生しているが、干ばつの深刻度は必ずしも大きくない。なぜなら、降水量が少量である地域では、それに適応した生態系や社会システムが既に形成されているためである。干ばつ指標には、時間偏差や累積状況を考慮し、個々の地域の気候条件を反映した干ばつの評価を行うことが必要である。

代表的な干ばつ指標として、SPI (Standardized Precipitation Index) があげられる。SPIは降水量だけで表現される干ばつ指標であり、気象台等の降水量観測データを使用して簡単に算出することができる。また標準化により、時間偏差の考慮を行い、個々の地域の気候条件を反映するとともに、容易に地域間を比較することを可能にしている。SPIの他にも広く使用されている干ばつ指標は多数存在するが、多くの干ばつ指標はSPIと同様

に空間的に不連続な地上観測データを使用するため、数値化できる場所は限定され、空間偏差の評価が不十分であると言える。

従って、より詳細な干ばつモニタリングのためには、干ばつの面的な評価が可能であることが求められる。本研究では、衛星画像を使用することで、面的に干ばつを評価することを目指す。具体的には、地表面温度の昼夜の差に着目することで、面的評価が可能な干ばつ指標を提案し、その有用性を示すことを目的とする。

2. 昼夜の地表面温度差に着目した干ばつ指標の提案

(1) SPIの概要

新たな干ばつ指標の定式化において、既存の干ばつ指標であるSPIを参照した。SPIは以下の式で表される。

$$SPI = (X_{ij} - \overline{X_{ijk}}) / \sigma_{ijk} \quad (1)$$

X_{ij} = i地点におけるj月日の降水量

$\overline{X_{ijk}}$ = i地点におけるj月日の降水量のk年間の平均

σ_{ijk} = i地点におけるj月日の降水量のk年間の標準偏差

SPIの主な特徴は、降水量だけで表されているため簡単に算出できると、標準化しているため異なる場所と比較可能なことである。Sergio M, Vicente-Serrano¹⁾はこのSPIの特徴を活かし、多くの地域の干ばつの程度をまとめて評価している。またSPIは値が正であるほど湿潤傾向、負であるほど渇水傾向であることを示している。

(2) 提案する干ばつ指標の概要

本研究で提案するSDT (Standardized Difference Temperature) は、地表面温度の昼夜の差を使用して、SPIと同様の定式化を行った。SDTは以下の式で表される。

$$SDT = (\Delta T_{ij} - \overline{\Delta T_{ijk}}) / \sigma_{ijk} \quad (2)$$

ΔT_{ij} = i地点におけるj月日の昼と夜の地表面温度差

$\overline{\Delta T_{ijk}}$ = i地点におけるj月日の昼と夜の地表面温度差のk年間の平均

σ_{ijk} = i地点におけるj月日の昼と夜の地表面温度差のk年間の標準偏差

SDTは昼夜の地表面温度差のみで表現されることが特徴である。昼夜の地表面温度差によって土壌水分量の大

小を間接的に表し、干ばつの程度を評価する。SDTの値が正に大きいほど、昼夜の地表面温度差は大きく、土壌水分量が少量であることを意味し、干ばつの程度は大きいと考えられる。逆にSDTの値が負に大きい場合は、昼夜の地表面温度差は小さく、土壌水分が多量であることを示唆し、干ばつの程度は小さいと推定できる。Inge Sandholt et al.²⁾やZ Wan et al.³⁾は地表面温度と土壌水分量や干ばつの関係性の評価を行っている。しかしながら、地表面温度の昼夜の差には着目していない。また衛星を用いた土壌水分量の計測は、土地利用の違いによる影響を大きく受けるため、様々な土地利用が混在する広域の干ばつ評価には適さない。そのため本研究では土壌水分量ではなく、地表面温度の昼夜の差を指標として用いた。

SDTの利点は3つ挙げられる。1つ目は地表面温度のデータは衛星から取得するため、あらゆる場所で数値化でき、面的な評価が可能なことである。2つ目は算出が容易であること、3つ目は標準化しているため異なる場所の値と比較可能なことが挙げられ、これらは同様の定式化を行ったSPIの特徴と共通している。一方で、対象期間中に土地利用が変わった場合、昼夜の地表面温度差の平均値に変化が生じ、正確な評価ができないことが懸念される。

3. 研究手法

(1) 対象地域

図-1に示す北部タイの10都市 (Mae Hong Son, Chiang Rai, Mae Sariang, Chiang Mai, Lampang, Nan, Uttaradit, Mae Sot, Phitsanulok, Phetchabun) を対象とする。タイでは干ばつの発生が問題となっており、タイの干ばつに関する研究は数多く存在する。

また北部タイでは、他の地域と同様に農業が盛んであり、干ばつの被害は農作物の生産量に大きな影響を与える。特に稲作を行う農家が多く、かつタイは世界有数のコメの輸出国であるため、干ばつによりタイのコメの生産量が大幅に減少した場合、その影響は世界各地に波及する。よってタイは干ばつ被害を評価する上で、非常に重要な地域であると言える。

(2) SDTの算出

本研究では、地表面温度はTerra/MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectrometer) のデータを使用し、そのメッシュサイズは1kmである。なお、昼の地表面温度は10:30に、夜の地表面温度は22:30に観測されている。

図-2は2011年4月1日～2011年4月10日におけるタイ周辺での地表面温度の昼夜の差の空間分布図である。2002年～2011年の10年分の地表面温度のデータを使用してSDTを算出した。

図-1 対象地域

図-2 昼夜の地表面温度差の空間分布

本研究で用いた具体的なSDT値の計算方法は以下の通りである。例えば4月のSDTを求める場合は、1日毎のSDTを算出し、その値を1ヵ月間で平均する。4月1日を例とすると、1日毎のSDTは、 ΔT_{ij} を*i*地点における4月1日の地表面温度差、 $\overline{\Delta T_{ijk}}$ を*i*地点における4月1日の地表面温度差の2002年から2011年の平均値、 σ_{ijk} を*i*地点における4月1日の地表面温度差の2002年から2011年の標準偏差として、上記の式より求める。以下では、4月1ヶ月間のSDTを4月SDTと表記する。

月間のSDTを4月SDTと表記する。

(3) 検証方法

本研究では、干ばつ指標としてSDTが有効であることを示すために、SPIとの関係性を評価する。Kalyanee et al.⁴⁾は、SPIを使用したタイの干ばつモニタリングを行い、SPIがタイの農作物の生産量の増減をうまく表していることを明らかにした。また白岩ら⁵⁾は過去20年間の稲生産統計および降雨データを使用して、タイにおいて降水量が稲作の生産変動を左右することを示した。このようにタイではSPIや降水量によって農作物の生産量が説明できることが先行研究から判明している。そこで、本研究ではSPIとの関係性を検証することで、SDTが干ばつを表すことを示す。

SPIの値による干ばつの程度の区分に関してはC.T.Agnew⁶⁾が提示するものなど複数の分類方法が存在するが、本研究ではU.S. Drought Monitor standardが使用している干ばつの深刻さの分類を参考とした(表-1)。SPIの算出にはタイ国気象局による2002年から2011年の日別降水量計測値を使用した。比較に用いるSDTは、SPIの算出に使用される降水量を測定している気象台が含まれるピクセルの値とした。

(4) 対象時期

本研究の対象時期は4月と11月とした。北部タイの気候は雨季と乾季に二分され、4月と11月はそれぞれ雨季の始まりと乾季の始まりに該当する。本研究ではその雨季の始まりと乾季の始まりに対するSDTの適用可能性を評価する。以下に本研究で対象時期として雨季の始まりと乾季の始まりを選択した具体的な理由を挙げる。

まず気候的要因が挙げられる。タイにおいて降水量の大小の影響が最も顕著である時期は、雨季と乾季の境界であると言える。図-3に1951年～2011年の10都市の降水量データの月毎の平均値および標準偏差を、表-2に各月の変動係数をそれぞれ示す。乾季は月降水量が0mmの場合も数多く存在し、多量の降水量は期待されていない。そのため少量の降水量に適応した社会システムが形成されており、降水量が不十分であることによる干ばつの被害は小さい。雨季は十分な降水量が確保されているため、例年と比較して降水量が不足した場合であっても干ばつ被害は発生しにくい。また雨季は月降水量の変動係数が

表-1 SPI 値を用いた干ばつの分類

Description	SPI value
No drought	-0.5 and above
Abnormally dry	-0.5 to -0.7
Moderate drought	-0.8 to -1.2
Extreme drought	-1.3 to -1.5
Severe drought	-1.6 to -1.9
Exceptional drought	-2.0 or less

図-3 対象地域における月降水量の平均値と標準偏差

表-2 対象地域における月降水量の変動係数

1月	2月	3月	4月	5月	6月
1.05	0.83	0.65	0.38	0.24	0.22

7月	8月	9月	10月	11月	12月
0.21	0.19	0.26	0.27	0.58	0.97

小さく、降水量の大小の影響が小さい。

次に農業的要因が挙げられる。白岩ら⁵⁾はタイの稲作において、雨季では植え付け期から生育前期に当たる雨季前半において降水量と生産量年平偏差に正の相関が見られる地域の存在を示し、乾季では乾季作付け期間前の降水量と生産量に直接的な関係を示す地域が存在することを明らかにした。雨季の始まりと乾季の始まりはそれぞれ上記の雨季作の植え付け期から生育前期と乾季作付け期間前に該当し、この期間における干ばつの程度が生産量と結びつくことが示唆されている。

4. 結果および考察

(1) 4月におけるSDTの有用性の検討

4月SDTと比較検討するSPIの期間として1ヶ月（4月SPI）、2ヶ月（3月4月SPI）、3ヶ月（2月3月4月SPI）を候補とする。例えば、3月4月SPIは3月1日～4月30日の降水量データを使用してSPIを算出したものである。3月4月SPIと2月3月4月SPIのように、SDT計測時期以前の降水量を含めて考慮することで、降水がSDTに与える影響にタイムラグが生じる可能性を検討した。4月SDTと4月SPI、3月4月SPI、2月3月4月SPIのそれぞれの相関係数を表-3に示す。

表-3より4月SDTと3月4月SPIの相関が最も高いことがわかる。同月1ヶ月の降水量よりも前月から2ヶ月間の降水累積状況が4月SDT、つまり4月における昼夜の地表面温度差と関連が大きいことがわかる。また2月の降水量は極めて少量であるため、2月3月4月SPIと3月4月SPIの値がほぼ等しくなり、その結果2月3月4月SPIの相関が、3月4月SPIと同様に比較的高い値となった。

ここでは、最も相関が高い4月SDTと3月4月SPIの関係を評価する。図-4は対象地域における2002年～2011年の4月SDTを示している。また図-5は対象地域における2002年～2011年の3月4月SPIを示している。4月SDT・3月4月SPIともに、10地点において共通する傾向が年毎に見られる一方で、各地点で差異が多少存在することがわかる。また渇水年や洪水年がはっきりとわかれていることが確認できる。

表-3 各SPIと4月SDTとの相関係数

4月SPI	3月4月SPI	2月3月4月SPI
-0.38	-0.55	-0.53

図-4 対象地域における2002年～2011年の4月SDT

図-5 対象地域における2002年～2011年の3月4月SPI

図-6 4月SDTと3月4月SPIの関係

図-6に4月SDTと3月4月SPIの関係を示す。4月SDTと3月4月SPIは負の相関（相関係数：-0.55）を示し、相関係数は有意水準1%を満たす。4月SDTと3月4月SPIが負の相関を示すことは仮説と合致している。しかしながら、表-1で乾燥状態と定義される-0.5以下では4月SDTと3月4月SPIの相関は低く、分布にばらつきがある。そのため4月においては、SDTは干ばつ指標として有用ではないと結論付けられる。

(2) 11月におけるSDTの有用性の検討

11月SDTと比較検討するSPIの期間として、4月の場合と同様に、1ヶ月（11月SPI）、2ヶ月（10月11月SPI）、3ヶ月（9月10月11月SPI）を候補とする。11月SDTと11月SPI、10月11月SPI、9月10月11月SPIのそれぞれの相関係数を表-4に示す。

表-4より11月SDTと10月11月SPIが最も相関が高いことがわかる。これは、11月の月降水量より10月から2ヶ月間の累積降雨の方が、11月SDTと深く関連していることを表している。また9月の降水量が10月11月と比較して多いため、9月10月11月SPIの値に10月と11月の降水量の大小が反映されにくくなったことが、9月10月11月SPIの相関が低くなった理由であると考えられる。

ここでは、最も相関が高い11月SDTと10月11月SPIの関係を評価する。図-7は対象地域における2002年～2011年の11月SDTを示している。また図-8は対象地域における2002年～2011年の10月11月SPIを示している。

11月SDTと10月11月SPIの関係を図-9に示す。11月SDTと10月11月SPIは負の相関を示し、相関係数は-0.46である。この相関係数は有意水準1%を満たす。11月SDTと10月11月SPIが負の相関を示すことは仮説と一致している。特に、10月11月SPIの値が、表-1で乾燥状態と定義される-0.5以下では11月SDTと10月11月SPIの相関が高く、-0.5以上では相関が低いことがわかる。SDTによる評価が必要とされるのは、降水量が不十分な場合であり、SPIの値が-0.5以下において相関が高いことは望ましい結果であり、SPIの値が-0.5以上において相関が低い

ことは実用上問題ではない、と考えられる。したがって、雨季の終わりである11月においてSDTが干ばつ指標として有効であると解釈できる。

また図-9にPhitsanulokにおける2002年～2011年の11月SDTと10月11月SPIの関係を示した。11月SDTと10月11

表-4 各SPIと11月SDTとの相関係数

11月SPI	10月11月SPI	9月10月11月SPI
-0.42	-0.46	-0.34

図-7 対象地域における2002年～2011年の11月SDT

図-8 対象地域における2002年～2011年の10月11月SPI

図-9 11月SDTと10月11月SPIの関係

図-10 2004年11月と2010年11月におけるSDTの空間分布

月SPIは負の相関が見られ、同一地点における年変動がうまく表されていることが確認できる。

(3) SDTマップ

2004年11月および2010年11月において算出したSDTマップを図-10に示す。なおSDTの算出に当たっては、全ての地域に土地利用変化がないと仮定して数値化している。例年と比較して、2004年の11月は降水量が不足しており、2010年の11月は降水量が豊富な地域が多かった。図-10から降水量が多い場合はSDTの値が小さい地域が多く、降水量が少ない場合はSDTの値が大きい地域が多いことが確認できる。また2010年11月の図より、SPIが-0.5以下であるNanとLampangではSDTの値が大きいことが確認でき、空間変動がうまく表されていることがわかる。

5. まとめ

本研究では、昼夜の地表面温度差に着目した干ばつ指標（SDT）を提案した。さらにSDTの有用性を示すために、タイ北部の10都市を対象として、既存の干ばつ指標であるSPIとの関係性を評価した。その結果、乾季の始まりである11月において、SDTはSPI同様の傾向を示し、干ばつ指標として利用可能であることを提示できた。またSDTの特徴である面的な評価が可能であることを活かし、SDTマップを作成し、空間変動がうまく表されていることを示した。

一方で、雨季の始まりである4月においては、SPI値から乾燥状態とされる場合に、SDTとSPIの相関が低く、SDTをSPIの代替指標として適用できないことが明らかとなった。今後、SPIに限らず、土壌水分や農業生産量への影響等との比較を行うことで、より実用的な干ばつ指標としての改良が期待される。

謝辞：本研究で使用した地表面温度のデータは東京大学生産技術研究所澤田義人特任研究員から提供された。本研究は、国際協力機構と科学技術振興機構による「地球規模課題対応国際科学技術協力プロジェクト」に採択された「気候変動による水分野の適応策立案・実施支援システムの構築」および環境省地球環境総合推進費（IE-1104）の支援を受けて実施された。また本研究は科学研究費補助金基盤研究(S)23226012の成果の一部である。

参考文献

- 1) Sergio M. Vicente-Serrano: Evaluating the Impact of Drought Using Remote Sensing in a Mediterranean, semi-arid Region, Natural Hazards, Volume 40, Issue 1, pp.173-208, 2007
- 2) Inge Sandholt, Kjeld Rasmussen, Jens Anderson: A simple interpretation of the surface temperature/vegetation index space for assessment of surface moisture status, Remote sensing of Environment 79, pp.213-224, 2002
- 3) Z.Wan, P.Wang, X.Li: Using MODIS Land Surface Temperature and Normalized Difference Vegetation Index products for monitoring drought in the southern Great Plains, USA, International Journal of Remote Sensing, Vol.25, No.1, pp.61-72, 2004
- 4) Kalyanee Suwanprasert, Shinta Seto, Sudsaisin Kaewrueng: Integrated Drought Risk Indices from Climate Based and Satellite Based Observation for Agriculture Drought Monitoring in Thailand, Annual Journal of Hydraulic Engineering, Vol.57, 2013
- 5) 白岩立彦, 中川博視, 堀江武, 松井勤, 本間香貴: タイ稲作の生産変動実態ならびに降雨量が生産変動に及ぼす影響, 地球環境, Vol.6, No.2, pp.207-215, 2002
- 6) C.T.Agnew: Using the SPI to Identify Drought, Drought Network News, Vol.12, No.1, 2000

(2013.9.30受付)