

時系列 Landsat 画像上での森林からの反射の一貫性の検証

鷹尾元 (森林総研)

要旨：過去から現在に至る時系列 Landsat 画像から土地被覆の動態を明らかにできる。特に、過去に地上での観測データがない場合には、衛星画像は土地被覆を過去に遡れる唯一の情報である。しかし、衛星画像には雲やその影に覆われた部分以外にも、土地被覆からの反射以外に大気など多くの不要な情報が含まれており、それらの影響を取り除かなければ画像間の比較は困難である。そこで、大量の画像の雲のない部分を継ぎ合せて活用する技術を開発するために、Landsat 画像上の森林部分につき、大気補正および地形補正の有無により推定される分光反射率の一貫性向上の効果を比較した。その結果、局地的な大気の変動を考慮した大気補正を行うと一貫性が向上した。一方、地形補正はさほど一貫性の向上に貢献しない場合もあった。

キーワード：熱帯雨林、光学センサー、雲、霞、REDD+

Abstract: Landsat images have a long history of observation of the earth since 1970s, which allows the users to estimate the landcover/ land use dynamics from the past until today. They are especially useful when no other observations have been accumulated on the ground. However, satellite images usually contain not only reflectance from the earth surface but also unnecessary information on the atmosphere and/or the topography. To compare images of different acquisition dates and conditions and analyze them as a time series, such unnecessary information should be removed in advance. In this study, I demonstrated improvements of consistency of the estimated reflectance of unchanged ground surfaces by applying atmospheric and topographic corrections. I found an empirical, space-variant atmospheric correction contributed to improve the consistency, while a topographic correction presented limited evidences.

Key words: Tropical rain forest, Optical sensor, Cloud, Haze, REDD+

I はじめに

森林の分布とその変化を正確に観測することは、信頼できる森林管理計画樹立に不可欠である。特に、REDD+を実施する途上国は参照排出レベルを過去の森林減少・劣化のトレンドから推定することが求められており、そのためにリモートセンシングを地上調査と組み合わせて用いることが推奨されている(5)。

Landsat TM/ETM+に代表される衛星光学センサーは40年以上にわたる地球観測の歴史を持ち、森林の変化を遡って観測するのに適している。しかし、湿潤な熱帯地域では、雲が全くない画像を得るのは非常に難しく、大量の画像の雲のない部分を継ぎ合せて活用する新たな技術が求められている。雲がない部分でも霞や地形と太陽方位による見掛けの反射率への影響が時や場所により異なるため、実際の地表の反射率を画像間で直接比較するのは困難である。実用的な森林モニタリングを実現するために、これらの影響を自動的かつ効果的に除去できる手法が求められている。

そこで本研究では、マレー半島の19年間にわたる時系列 Landsat TM/ETM+画像に自動的な雲除去、大気補正、地形補正を加えて、それによる反射率の一貫性向上の効果を評価した。

II 対象地およびデータ

マレーシア、マレー半島の中央部で、Landsat 画像4シーン(パス126-127, ロウ027-028)に覆われる約300km四方が対象地である(おおよそE101-104, N2-5)。海岸から2000m級の高山までを含み、森林植生もマングローブ林や泥炭湿地林、低地フタバガキ林や丘陵フタバガキ林、さらには山岳林まで含まれる(図-1)。非常に湿潤な地域であり、季節に関わらず雲の発生頻度が高い。一方、明確な乾季がないため、季節による完全な落葉は起きない。

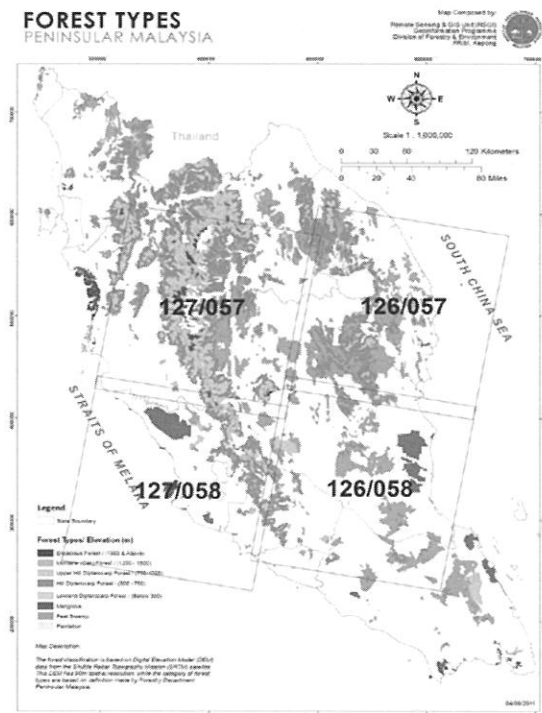
使用した衛星画像は、1994年から2012年までに撮影されたLandsat 4/5/7によるTM, ETM+画像472枚である。雲被覆率60%以下の画像の中から目視で条件がよいと判断したものをすべて選び、米国地質調査所 Earth Explorerよりダウンロードした(<http://earthexplorer.usgs.gov>)。

土地利用の参照データは、Google Earth上の高分解能画像の判読により約500点で行った。ここで、土地利用区分として、内地林、泥炭湿地林、アブラヤシ林、ゴム林、草地、水田、都市などに分けた。

III 方法

各画像から不要な情報を取り除く。その過程で、異なる

GEN TAKAO (Forestry and Forest Products Research Institute, Tsukuba 305-8687) An evaluation of improvement of the consistency in the estimated reflectance from forests through time series of Landsat images



図一1. 研究対象地とその森林分布
Fig. 1 Study area and forest type distribution
(Courtesy: FRIM)

補正段階の画像を準備する。まず、雲の除去を行い、その結果に対して1. 大気補正その1, 2. 大気補正その2, そして3. 地形補正を当てはめる。

雲の除去には Landsat 画像から雲とその影を自動的に取り除くアルゴリズム, Fmask(7)を利用した。これは、反射スペクトルと温度から雲を抽出し、さらにその形状と太陽方位から影の範囲を推定するものである。Fmask の実行形式は公開されている(<https://code.google.com/p/fmask/>)。

1. 大気補正1 画像に記録されている反射輝度をまず大気外反射率 (Top of atmosphere reflectance)に変換する。この反射率には地表からの反射と光路上の大気散乱とが混じり合っており、その影響を取り除かなければならない。よく用いられる簡単な大気補正は Dark Object Subtraction (DOS)(8)であり、画像の各バンドの最小値をそのバンドから引いて求める。画像中の最も暗いところでは輝いているのは大気散乱だけという仮定に基づいている。画像全体で1つの定数を引くため、画像上の位置により異なる大気散乱を補正できない欠点がある。

2. 大気補正2 Liang ら(9)は暗い植生の分光反射率に仮定を置き、それからのかみ離により各バンドの大気散乱を推定する手法を開発した。この手法では、画像上に暗い植生が分布していれば局地的な大気散乱を推定できる。ここではこの大気補正法を Local Atmosphere Thickness correction (LAT)と呼ぶ。

3. 地形補正 斜面の方位・傾斜角と太陽との関係から斜面の輝度が変わる。これを半経験的に修正するのが修正ミンナート法(MM)である(4)。斜面方位はSRTMを用いて算出した。ここでは、LAT 画像にMMを適用した(LAT-MM)。

補正済み画像を用い、土地利用が既知の参照点において撮影年月日の異なる時系列画像を比較する。そのためには、観測された19年間に土地利用が変化していないことが必要である。そこで、時系列の画素値からトレンドの変化点を自動的に抽出し(1), 変化点が検出されなかった参照点のみを用いた。上述の補正により推定反射率が全体的にどれだけ変化するか、参照点ごとの時系列平均値を補正間で比較する。一方、補正により地表の反射率がどれだけ安定して推定されるか、その時系列標準偏差を補正間で比較する。

補正間の比較は、各画像のバンド5, 4, 3について、土地利用ごとに、参照点の時系列平均値と時系列標準偏差を集計し、ノンパラメトリック手法である Friedman 検定と Scheffe 検定により補正の効果の違いを検証した。

IV 結果と考察

雲の除去および大気補正の結果の一部を図一2に示す。Fmaskにより雲はほぼ取り除かれ、DORでは取り除けなかった標高差による大気散乱の違いが、LATでは取り除かれ、さらにMMにより斜面による陰陽が平滑化されていることが目視により分かる。

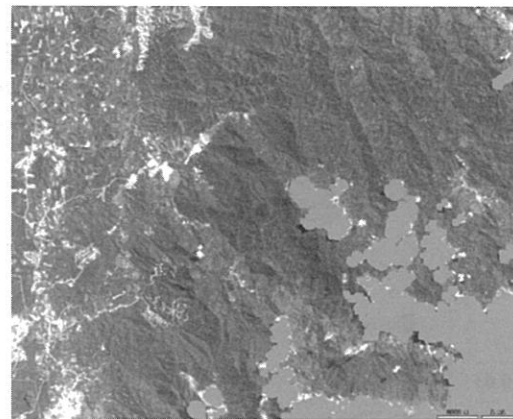
この期間に変化が起きなかったと考えられる各参照点(363点)において、DOS, LAT, LAT-MMの3補正それぞれの期間平均値および期間標準偏差を求めた(図-3)。バンド3の期間平均値はDOSと比べLAT, LAT-MMは低くなる傾向を示す。バンド4, 5の平均値では明らかではない。期間標準偏差でも同様の傾向がある。

期間平均値と期間標準偏差のそれぞれについて、バンドごと、土地被覆ごとに、まずFriedman検定により補正による平均値の差の有無の検定を行い、危険率5%未満で有意差が認められた組合せについてScheffe検定により対比較を行った(表-1)。バンド3ではすべての期間平均値およびほぼすべての期間標準偏差の組み合わせにおいてDOSとLATおよびLAT-MMとの間に有意差が認められたが、LATとLAT-MMの間には認められなかった。LATが地域差の大きい大気散乱を効果的に取り除き、一貫性が向上したと考えられる。地形効果の減少は図一2(d)に表れており、参照点で明らかにならなかったのは参照点の偏った配置による可能性もあり、今後検証を要す。

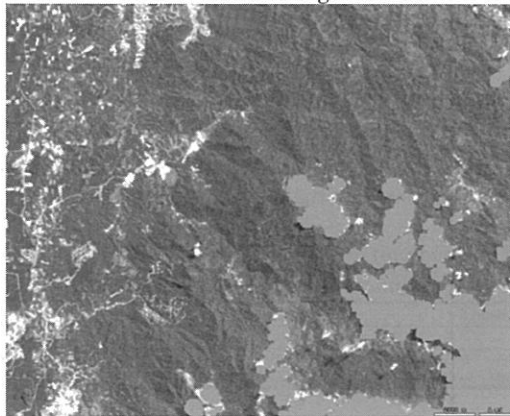
バンド4でも全体的にバンド3と同じ傾向があるがバンド3ほど明瞭に表れていない。バンド4はバンド3よりも波長が長く大気散乱は少ない一方、バンド4での地表反射



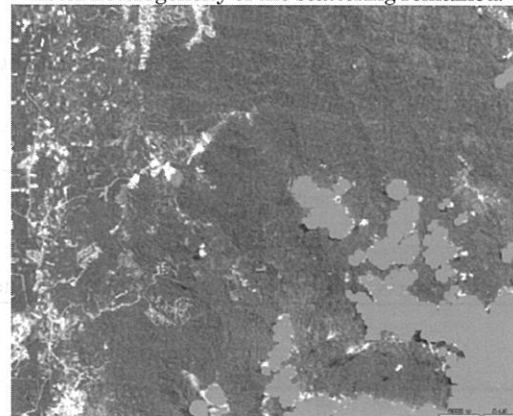
(a) 未処理画像
大気散乱のため全体的に明るい。右下に雲。
(a) Unprocessed image: Illuminated by the scattering.
Clouds at the lower right corner.



(b) 雲除去・DOS画像
雲はほぼ除去。標高・場所による散乱の差残る。
(b) Fmask & DOS applied: Clouds almost removed.
Local heterogeneity of the scattering remained.



(c) LAT画像
標高・場所による散乱の差も除去される。
(c) LAT applied: Local heterogeneity removed.



(d) LAT-MM画像
地形による影の影響が軽減される。
(d) MM applied over LAT: Slope effect fairly removed.

図-2. Landsat 画像の処理結果

Fig. 2 Visual appearance of the processing results
Band 3, Landsat 5 TM, 1 JUN 2010, path: 127, row: 057 (part)

率はバンド3よりも一般的に大きく、相対的に大気散乱の影響はより少なかったと考えられる。

バンド5では全体として期間平均値の平均値には処理の効果は表れなかったが、局地的大気補正と地形補正の組み合わせにより一貫性が上昇した。バンド5は大気散乱の影響は少ない。地形補正は斜面と太陽の位置関係により反射率減少にも増加にも働くため平均的な効果は明白ではないが、標準偏差は減少し一貫性が増大したものと考えられる。

土地利用別では、バンド3ではどの土地利用もほぼ一様に効果が表れている。バンド4では効果の有無の違いは不明である。バンド5では一貫性の向上した森林、人工林、ゴム林などは他の土地利用に比べ傾斜地にあることが多く地形補正の効果が表れたが、他の土地利用は平地に多いためにその効果は明瞭ではなかったと考えられる。

V おわりに

本研究では衛星画像にそれ自体と地形情報のみから経験的に大気および地形補正を加えることにより推定反射率の一貫性が増大し、異なる画像同士比較がしやすくなることを示した。特に可視域(バンド3)ではその効果が大きく、その影響は植生指数などの算出にも及ぶ。

本研究ではフェノロジーが明瞭ではない熱帯雨林のため季節変化は考慮していないが、熱帯季節林などの落葉樹林に適用する場合には適切な季節調整を行う必要がある(6)。

このような処理により、過去の大量の衛星画像のアーカイブを活用し、一貫性がありより信頼性の高い長期森林モニタリングシステムを開発する必要がある。

本研究は林野庁補助事業「REDD 推進体制緊急整備事業」により実施した。マレーシア森林研究所のご協力に感謝します。

引用文献

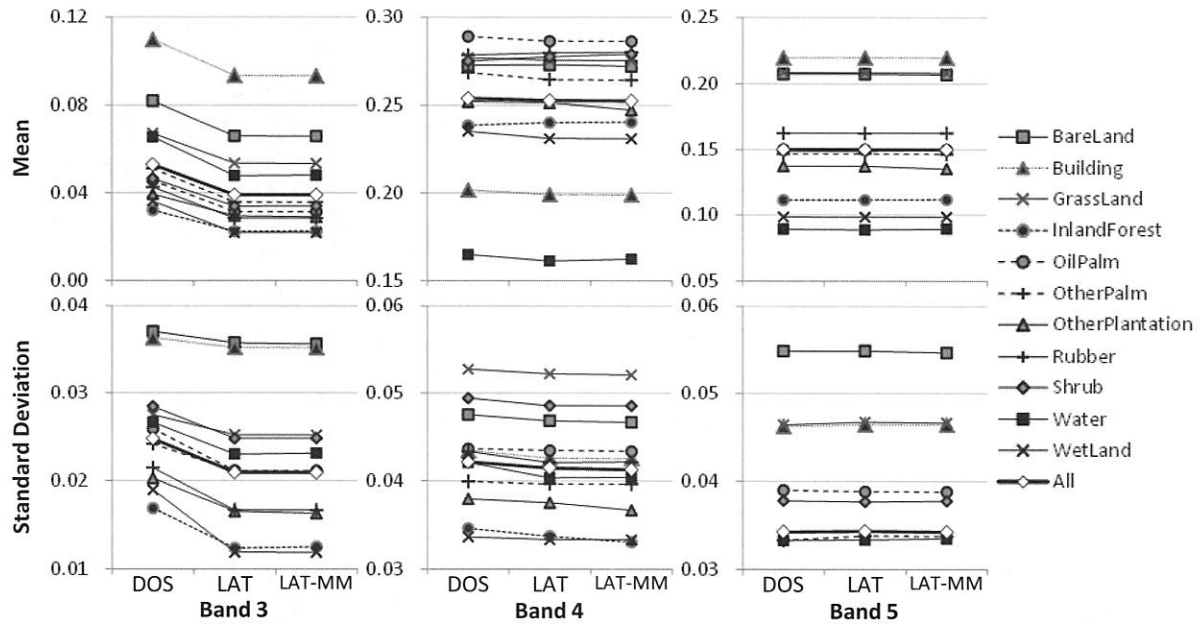


図-3. 補正によるバンドごと、土地被覆ごとの効果と一貫性の向上
 上段：効果(反射率の期間平均値)、下段：一貫性(反射率の期間標準偏差)

Fig. 3 Effects and consistencies of the processing through the duration by band and land use: (Upper) Effects: mean of the reflectance, (Lower) Consistencies: standard deviation of the reflectance

表-1. 補正間のバンドごと、土地被覆ごとの効果と一貫性の比較 (Friedman 検定および Scheffe 検定の結果)

Table 1 Comparisons between the processing by band and land use –Friedman’s test followed by the Scheffe’s test

n	Band 3						Band 4						Band 5					
	Mean			S.D.			Mean			S.D.			Mean			S.D.		
	DOS/ LAT	DOS/ LAT-MM	LAT/ LAT-MM	DOS/ LAT	DOS/ LAT-MM	LAT/ LAT-MM	DOS/ LAT	DOS/ LAT-MM	LAT/ LAT-MM	DOS/ LAT	DOS/ LAT-MM	LAT/ LAT-MM	DOS/ LAT	DOS/ LAT-MM	LAT/ LAT-MM	DOS/ LAT	DOS/ LAT-MM	LAT/ LAT-MM
BareLand	25	XX	XX	-						X	XX	-						
Building	22	XX	XX	-				X										
GrassLand	38	XX	XX	-	XX	XX	-	X	X		XX	X	-					
InlandForest	43	XX	XX	-	XX	XX	-	XX	XX		X	XX	-					X
OilPalm	37	XX	XX	-	XX	XX	-	XX	XX									
OtherPalm	39	XX	XX	-	XX	XX	-	XX	XX									
OtherPlantation	29	XX	XX	-	XX	XX	-								X	-	-	X
Rubber	41	XX	XX	-	XX	XX	-	X	X		XX	XX	-					X
Shrub	26	XX	XX	-	XX	XX	-		X						XX	XX		
Water	25	XX	XX	-	XX	XX	-				XX	XX	-	X				
WetLand	38	XX	XX	-	XX	XX	-	XX	XX									
All	363	XX	XX	-	XX	XX	-	XX	XX		XX	XX	-					XX

Friedman 検定で $p < .01$ の組合せは太字、 $p < .05$ は標準字体、 $p \geq .05$ は空欄。Scheffe 検定で、 $p < .01$ の対は“XX”、 $p < .05$ は“X”、 $p \geq .05$ は“-”でそれぞれ示す。 n は標本数、S.D.は標準偏差。

For the Friedman’s test, **Bold** and Normal fonts indicate the combinations with ‘ $p < .01$ ’ and ‘ $p < .05$,’ respectively, while those with ‘ $p \geq .05$ ’ are left empty. For the Scheffe’s test, ‘XX’, ‘X’, and ‘-’ indicate ‘ $p < .01$ ’, ‘ $p < .05$,’ and ‘ $p \geq .05$,’ respectively. n : number of samples, S.D.: standard deviation.

- Bai, J. and Perron, P. (2003) Computation and analysis of multiple structural change models. J. Appl. Econometrics 18: pp 1-22
- Chavez, P.S., Jr., 1988, An improved dark-object subtraction technique for atmospheric scattering correction of multispectral data: Rem. Sens. Env. 24: pp 459-479
- Liang, S.L. et al. (1997) An operational atmospheric correction algorithm for Landsat Thematic Mapper imagery over the land: J. Geophys. Res.-Atmos. 102 : pp 17173-17186
- Richter, R. et al. (2009) Comparison of Topographic Correction Methods: Rem. Sens. 1: pp 184-196
- UNFCCC (2009) Decision 4/CP.15.
- Verbesselt, J. et al (2010) Detecting trend and seasonal changes in satellite image time series: Rem. Sens. Env. 114: pp 106-115
- Zhu, Z., and Woodcock, C.E. (2012) Object-based cloud and cloud shadow detection in Landsat imagery: Rem. Sens. Env. 118: pp 83-94