

中分解能衛星データによる緑地の変遷解析手法に関する研究

A study on the change analysis method of urban green coverage using middle-resolution satellite data

(研究期間 平成 17 年～18 年度)

環境研究部 緑化生態研究室
Environment Department
Landscape and Ecology Division

室 長
Head

松江 正彦
Masahiko MATSUE

In this study, we developed and arranged the technique which efficiently and effectively grasped the urban green change while accuracy and workload are confirmed. For this purpose, we used middle resolution satellite data, when the data procurement in the national scale is possible. In 2006, the study was carried out for the purpose of developing technology in order to raise the accuracy and raise the generality. As the result, it became possible that increase and decrease of urban green were grasped by detail geometric correction and removal of the shadow at the error within 30%.

【研究の目的及び経緯】

地球温暖化問題は現代社会が直面する最も深刻な環境問題の一つである。2005年2月16日には京都議定書が発効し、第一約束期間（2008年～2012年）に向けて各国が温室効果ガス削減に取り組んでいる。

京都議定書では森林等の吸収源による温室効果ガスの吸収量を削減目標の達成に用いることが認められており、都市緑地にも吸収源としての期待が寄せられている。

都市緑地は、2001年のCOP7（マラケシュ）で国際的に合意された京都議定書の運用細則において、3条4項に示された「追加的人為的活動」の一つの「植生回復（revegetation）」に位置づけられる。植生回復は、「0.05ha以上の植生回復を行うことによって炭素蓄積量を増加させる直接人為的な活動。ただし当該活動は、1990年1月1日以降に開始され、新規植林、再植林の定義に当てはまらないもののみ限定される」と定義されている。

また、第一約束期間に提出する温室効果ガス排出・吸収目録（以下、「インベントリ」）を作成するためには、IPCCガイドライン及び「土地利用、土地利用変化及び林業に係るグッドプラクティスガイダンス」（以下、「LULUCF-GPG」）で定められた方法に従う必要があり、透明で検証性のある算定方法やデータが要求されている。また、LULUCF-GPGでは、森林（Forest land）、農地（Cropland）、草地（Grassland）、湿地（Wetland）、開発地（Settlements）、その他の土地（other land）の6つの土地利用カテゴリーが定義されており、都市緑地は開発地に属している。

植生回復の基準年が1990年であること、透明で検証性のある算定方法やデータが求められていることなどを鑑みると、地球観測衛星データや各種地理情報の利用性は高いと考えられる。しかしながら、具体的な算定方法や

データの解析方法については現在検討段階であり、早急にとりまとめていく必要がある。

以上のような背景のもと、平成17年度には全国規模でのデータ入手が可能な中分解能衛星データに着目し、効率的・効果的に緑地の変遷を把握する技術手法を精度、作業量を確認しながら開発・整理することを目的として研究を実施した。その結果、神奈川県を調査地とした中分解能衛星データにより、期初（1990年）、最新（2004年）それぞれの時期の樹林地は、概ね良好な制度（95～110%程度）で抽出でき、樹林地の増減についても、増加と減少を差し引きした総量（ネット）では概ね良好な制度（100～120%程度）で把握できた。しかし、増加、減少それぞれの面積は誤差が最大で約6倍ときわめて大きい結果となった。

そこで18年度は、都市域において、緑化等により増加した個々の樹林地の変遷が確実に把握できるよう精度を高めるとともに、調査の対象とした神奈川県以外の都市域でも活用できるよう、汎用性を高めるための技術開発を行うことを目的として研究を実施した。

【研究の内容】

18年度は、17年度の成果を踏まえて、中分解能衛星データを用いた緑地の変遷を把握する技術の精度高めるために、①精密幾何補正の検討、②影の除去に関する検討、③樹林地増加面積把握手法の開発の3項目を進めた。さらにこれまでのLANDSATとASTERに加えて、新しく入手が可能となった④ALOSデータの活用可能性の検討と、⑤構築した手法の適用性の確認を行った。

なお、本報ではこのうち①②③を中心に、その結果概要を報告することとする。

研究対象地域は、①②③④については神奈川県全域を対象とし、⑤に関しては、名古屋市、長野市、札幌市、

鹿児島市の4都市を選定し検証を行った。

[研究の成果]

1. 精密幾何補正

(1) 従来手法の整理

中分解能衛星画像には、下記の4つの要因によって幾何学的歪みが生じることが指摘されている。

- ① センサの内部歪み：センサの機構に起因する歪み。
- ② センサの外部歪み：画像の投影方式の幾何学に起因する歪み。これは、プラットフォームに起因する歪み、対象物（地球の自転など）に起因する歪みに分けられる。
- ③ 画像投影面の取り方に起因する歪み：画像投影面の取り方（画像座標系の定義の仕方）によって幾何学的な歪みの表現が異なる。
- ④ 地図投影法の幾何学に起因する歪み：利用する地図投影法によって幾何学的歪みの表現が異なる。

幾何補正 (geometric correction) とは、これらの幾何学的歪みを除去することであり、画像上のピクセルの座標 (画像座標) と対象物の地理座標 (地図座標など) との対応関係 (座標変換式) を定量的に明確化することである。

幾何補正のうち、補正方法、補正式の決定については、下記の3とおりの方法が知られている。

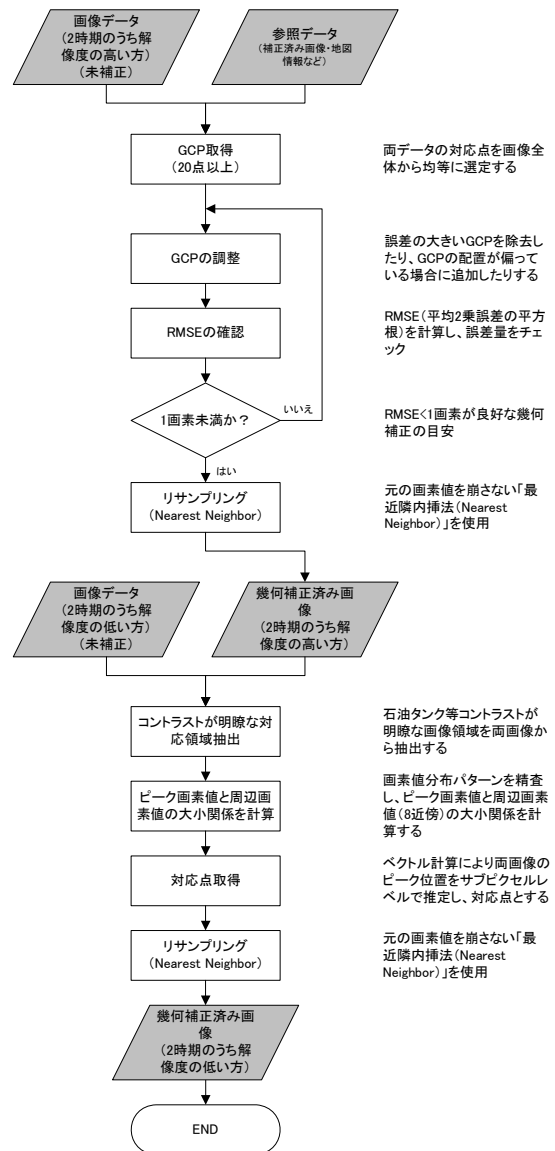
- a) 系統的補正：画像の幾何学的歪みを除去するための理論的補正式がわかっている場合に、その式に含まれるキャリブレーションデータ (焦点距離など) やセンサの位置や姿勢などの計測値を理論的な補正式に与え、幾何補正を行うもの。センサの内部歪みの多くはこの方法が有効であるが、センサ位置や姿勢の計測精度は十分でないことが多く、外部歪みの補正精度は高くない。
- b) 非系統的補正：与えられた画像座標系と出力すべき地図座標系との座標変換式を、基準点における画像座標と地図座標の対応関係を用いて近似的に決定する方法。座標変換式の係数は、基準点の画像座標値と地図座標値から最小2乗法によって求められる。
- c) 併用補正：理論的補正式と基準点を用いて決定する補正式とを組み合わせる幾何補正。

航空機搭載センサや高分解能衛星画像の場合、系統的補正のみで十分な幾何補正精度が得られることもあるが、中分解能衛星画像の場合、センサ位置や姿勢の計測精度が十分高くないため、通常は基準点 (GCP: Ground Control Point) を取得して座標変換式を求める非系統的補正を行う。

画像座標から地図座標への変換式を構築するための参照画像 (幾何補正済み画像) は、地図画像を用いることが多い。GCP は、画像全体から均質に20点以上取得することが一つの目安とされ、季節変化や経年変化が無視でき、衛星画像と地図画像で特定可能な点 (橋梁、埠頭、交差点など) を取得する。幾何補正精度はGCPのRMSE*1.0画素未満が一つの目安となる。この精度は、複数の画像を重ね合わせたり他の地図データを重ね合わせたりする際に、特徴画素が二重に表れることがないことを意味している。

17年度の研究では、これらの従来手法の原則に則り、LANDSATおよびASTER画像のRMSEが1.0画素未満になるように実施した。この誤差は、通常の中分解能衛星データ処理においては許容される誤差であるが、都市の樹林地の増減を考えた場合、1画素のずれはLANDSATで30m、ASTERで15mとなり、増加、減少それぞれの面積誤差に大きく影響しているものと考えられた。

(2) 改良手法の検討



図—1 精密幾何補正手法の手順

従来の幾何補正精度を超えるためには、対象地物の画素内の位置まで踏み込んだサブピクセルレベルの幾何補正が必要となる。そこで本研究では、図-1に示す精密幾何補正手法を考案した。

このうち、2画像のずれを最小限にするための対応点の取得について、具体例を図-2に示す。ここでは、石油タンクのような小さくて周辺とのコントラストが明瞭な地物を GCP として両画像から抽出し、画素値分布パターンを精査し、ピーク画素値と周辺画素値(8近傍)の大小関係を計算し、ベクトル計算により両画像のピーク位置をサブピクセルで推定し対応点とした。

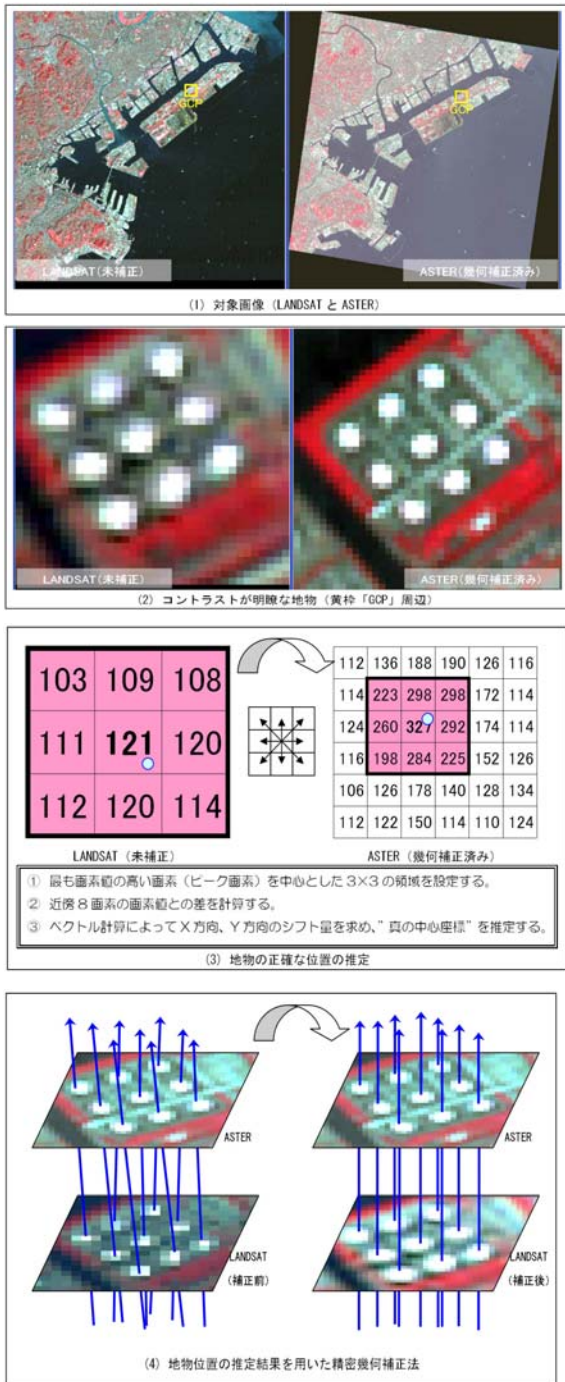


図-2 近傍画素との色調差から地物の位置をサブピクセルレベルで推定する方法

精密幾何補正による理論上の誤差と実際の誤差の比較を図-3に示す。ある地物を含む LANDSAT と ASTER の画素において真位置が画素の対局の位置関係にある場合、LANDSAT と ASTER の相対的なズレは最大 31.82m となる (理論上の誤差)。これに対し、従来の幾何補正では参照画像 (幾何補正済み地図画像) に対する RMSE が LANDSAT で 0.8385 画素、ASTER で 0.7023 画素であった。LANDSAT と ASTER を重ね合わせる際に、これらの理論上の誤差が逆方向に働いた場合、想定される最大誤差は 17.85m となり ASTER の 1 画素を超えてしまう。

一方、精密幾何補正では、幾何補正済みの ASTER に対する LANDSAT の RMSE は 0.402 画素である。精密幾何補正では、幾何補正済みの ASTER 画像を参照画像とするため、LANDSAT と ASTER を重ね合わせる際に想定される最大誤差は LANDSAT の RMSE のみである。したがって、想定される最大誤差は 6.03m となり従来の幾何補正の約 1/3 に抑えることができる。

以上より、本調査で考案した精密幾何補正手法により、2 時期の中分解能衛星画像を重ね合わせる時に発生する位置ずれを軽減させることが可能となった。

従来の幾何補正

| 対象画像 | 点数 | RMSE (単位: 画素) |
|-----------------------|----|---------------|
| ASTER (20050428) | 22 | 0.7023 |
| LANDSAT/TM (19901105) | 34 | 0.8385 |

精密幾何補正

| 対象画像 | 点数 | RMSE (単位: 画素) |
|-----------------------|------|---------------|
| ASTER (20050428) | 基準画像 | |
| LANDSAT/TM (19901105) | 25 | 0.402 |

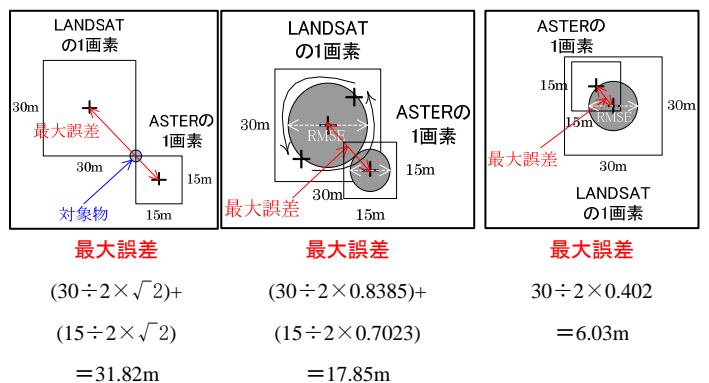


図-3 精密幾何補正による理論上の誤差の改善効果

*RMSE (Root Mean Square Error : RMS 誤差)

真値を x_0 、n 回の観測値を x_i ($i=1 \sim n$) とするとき、RMSE は次式で与えられる。

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - x_0)^2}$$

2. 影の除去に関する検討

(1) 従来手法の整理

LANDSAT 等の受動型光学センサで観測されたデータにおいては、対象物の斜面（傾斜角、斜面方位）と太陽（太陽高度、太陽方位）との相対的な位置関係に応じて、地形的な影が変動するため、観測値に影響を受ける。このような斜面と太陽の位置関係に由来する観測値のばらつき（「地形効果」）は、多時期の衛星データを用いた解析を行う場合には補正することが望ましいとされている。

地形効果の補正の手法は、バンド間演算による非幾何学的手法と太陽－地表面－センサの位置関係を考慮した幾何学的手法に大別されているが、17年度の研究では、実用的な地形効果補正モデルとして評価されている幾何学的手法の一つである Minnaert 法を適用して地形補正を行った。

この Minnaert 法による地形補正では、山岳部などの地形の急峻な場所では地形的な影の除去に一定の効果があることが認められたが、補正に DEM を用いているために、建物に伴う影の影響は補正できなかった。通常の中分解能衛星データの処理では、建物の影響は無視することができるが、高層建物が多く存在する場合、建物の影は画素値に影響を及ぼしており、都市の樹林地の増加、減少それぞれの面積誤差に大きく影響しているものと考えられた。

(2) 改良手法の検討

一般に非幾何学的手法は、幾何学的手法と比較して補正効果が低いとされているが、DEM データを必要とせず観測値を相対化するため理論上地形的な影と建物による影を同時に補正することができると考えられる。また、非幾何学的手法の中では、正規化法は、反射率または画素値を全バンドの相加平均で正規化することで、反射スペクトルの形状は地形や建物の影によって変化せず、ほぼ相似形と見なすことができる特性を利用しており、地形効果、大気効果、影の影響を除去することができるとされている。そこで本研究では、正規化法を適用して建物の影の除去を試みた。

※ 正規化法

… 反射率または画素値を全バンドの相加平均で正規化すること。地形効果の補正、影の抑制に効果があると報告されている。

$$R0 = \frac{n \times R}{\sum_{i=1}^n (R1 + R2 + \dots + Rn)}$$

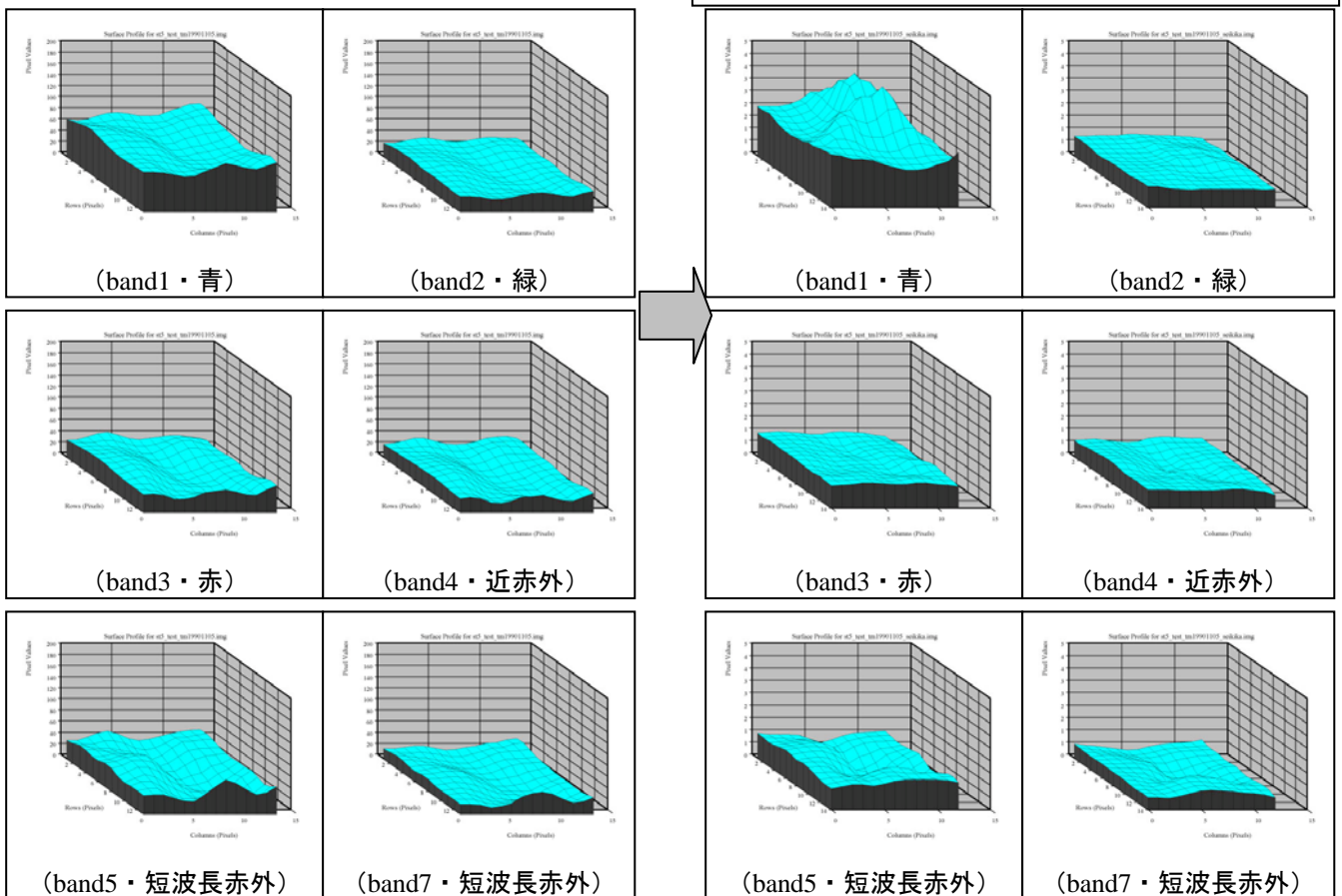
R0：正規化後の反射率

R：補正対象バンドの正規化前反射率

R1：band 1 の正規化前反射率

R2：band 2 の正規化前反射率

Rn：band n の正規化前反射率



図—4 正規化法適用画像と未補正画像の比較(LANDSAT データ) 左側が未補正、右側が補正後

神奈川県検証エリアのうち高層建築が立ち並ぶ「みなとみらい地区」にある国立横浜国際会議場周辺約 200m×200m における正規化法適用画像と未補正画像の比較した結果を図-4に示す。

未補正の状態では、全てのバンドにおいて日向が高い画素値、日陰が低い画素値を示しており、影の影響を受けていることがわかる（図-4の凹部が日向、凸部が日陰）。一方、正規化法適用画像の band2～band7 では、図-4の凹凸が平滑化されており、バンド間の相対関係を保持した状態で日向と日陰の画素値の差が少なくなり、影の影響が軽減されていることがわかる。ただし、band1（青色の波長域）については、影の中が高い画素値を示しており、過剰に補正されていると解釈される。これは、影の中ではband2～band7まで一様に低い画素値を示すのに対して band1 が相対的に高い画素値を示すために、正規化によってその特徴が際立ったことによると考えられる。また、ASTER 画像は青色波長域のバンドを持たないため、全バンドで高層建物の影が正規化によって軽減された（結果は未掲載）。

以上より、正規化法の適用によって LANDSAT の band1 は海面および影領域で過剰補正される傾向があるものの、それ以外は建物等の影の影響が軽減されることが確認され、本手法が有効であることがわかった。

3. 樹林地の増加面積把握手法の開発

17年度調査で実施した2時期の樹林地抽出結果に基づく樹林地の増減は、それぞれの時期の誤差が掛け合わされ「誤差の伝播」により精度が低下したと考えられた。

そこで、例えば京都議定書第一約束期間に報告する開発地内の植生回復活動のように、1990年以降に新たに増えた樹林地のみを正確に把握することを目的とした場合を想定し、期初と最新の衛星データから樹林地の増加面積を直接把握する手法の開発を行った。

(1) 17年度手法の整理

17年度研究では、まず、最新の LANDSAT データを用いて、最新時期の樹林地、草地を精度良く抽出する手法を検討した。この検討に先立ち、文献、書籍等を参考に代表的な画像分類手法を精査し、樹林地、草地の抽出可能性の高いと思われる8手法を選定した。

次に、選定された8手法を実画像に適用し、緑地、樹林地の抽出を行い、抽出結果は12箇所の検証エリアにおける最新の空中写真判読結果と比較・照合し、精度評価を行った。

精度評価の結果、効果的な手法として、ミク

セルベースでは「TGR-W 分解」、ピクセルベースでは「NDVI+最尤法」が良好な結果を示した。「TGR-W 分解」は、樹木 (T)・草地 (G)・道路 (R) をエンドメンバーとした線形ミクセル分解と植生 (V)・道路 (R)・水面 (W) をエンドメンバーとした線形ミクセル分解の結果を組み合わせた手法である。「NDVI+最尤法」は、NDVI に基づく植生・非植生区分と最尤法分類を組み合わせた手法である。

次に、採用された2手法を期初の LANDSAT データに適用して期初の樹林地、草地を抽出した。その後、期初、最新それぞれの時期の樹林地抽出結果の差分処理によって、樹林地の増減把握を試みた。ASTER データについても同様に、期初、最新それぞれの時期の樹林地抽出結果の差分処理によって、樹林地の増減把握を試みた。

以上の17年度手法の結果は、以下のように要約された。

- ・ 期初 (1990 年)、最新 (2004 年) それぞれの時期の樹林地は、概ね良好な精度 (95~110%程度) で抽出できた。
- ・ 樹林地の増減については、ネットでの増減面積は概ね良好な精度 (100~120%程度) で把握できたが、増加箇所は TGR-W 分解が約 6 倍、NDVI+最尤法が約 4 倍の過大抽出、減少箇所は TGR-W 分解、NDVI+最尤法とも約 1.8 倍の過大抽出となった。
- ・ ASTER と LANDSAT の間に精度面の大きな違いは認められなかった。

(2) 改良手法の検討

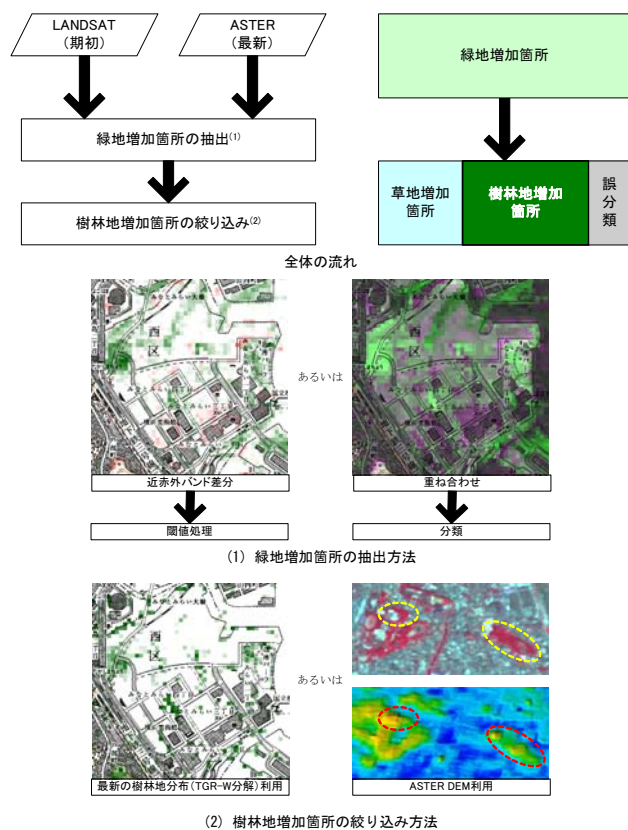


図-5 樹林地増加面積把握手法の流れ

18年度研究では、17年度の課題を踏まえて、以下の2点に着目し、図-5に示す流れで精度向上を図った。

- ① 緑地増加箇所を求めてから樹林地増加箇所を絞り込むアプローチで誤差の伝播を軽減する。
- ② 樹林地増加箇所を絞り込む際に、高さ情報の利用可能性を検討する。

さらに、緑地増加箇所の抽出手法として、以下の2手法を検討手法として設定した。

- ③ 近赤外バンドの差分&閾値処理
- ④ 2時期データの全バンド重ね合わせ&分類処理
また、緑地増加箇所から樹林地増加箇所を絞り込む手法として、以下の2手法を検討手法として設定した。
- ⑤ ミクセル分解 (TGR-W 分解) による最新の樹林地分布の併用
- ⑥ ASTER DEM の利用

次に、③又は④と⑤又は⑥の組み合わせと、先に示した精密幾何補正と正規化手法による影の除去を含め、さらに昨年度の選定された抽出法も組み合わせた18通りの手法で検証を行った。

その結果、次の2つの手法が高い手法であると考察された。

手法 01：精密幾何補正有、影の補正有、近赤外差分+最新の樹林地抽出 (TGR-W 分解)

手法 03：精密幾何補正有、影の補正有、重ね合わせ+最新の樹林地抽出 (TGR-W 分解)

4. ALOS データの利用可能性

2006年1月24日に打ち上げられたALOSデータの利用可能性を検討した。ALOSデータは、本調査においてはASTERデータの代替として利用される。そこで、最新の衛星データとしてALOS/AVNIR-2を使用した場合の樹林地増加面積把握精度を確認した。なお、解析手法、精度評価の考え方は、ASTERを使用した場合の手法に準じた。その結果、ASTERとALOSは同じように扱うことができ、両者

の間はややALOSの方が高精度の成果が得られた。

また3と同様にALOSデータを用いて各種の手法を比較した結果、ASTERと同じく次の2つの手法が高い手法であると考察された。

手法 05：精密幾何補正有、影の補正有、近赤外差分+最新の樹林地抽出 (TGR-W 分解)

手法 06：精密幾何補正有、影の補正有、重ね合わせ+最新の樹林地抽出 (TGR-W 分解)

なお図-6はASTERとALOSのそれぞれ最適と判断された手法を適用して、樹林地の増加、減少、総量(ネット)面積を求め、航空写真より求めた検証用データとの比較を示したものである。

手法01が樹林を少なめに判定しているがその他は誤差が15%以内に収まっており、昨年度の最大約6倍という誤差に対して大きく改善された。

5. 構築した手法の適用性評価

本調査で最適と判断された手法を他の都市へ適用し、手法の汎用性を検討した。適用性評価の対象都市は、立地条件の観点から臨海部と内陸部、気候条件の観点から寒冷地と温暖地を想定して選定を行い、名古屋市(臨海部)、長野市(内陸部)、札幌市(寒冷地)、鹿児島市(温暖地)を対象都市として、同様の樹林地の増減の検証を行い、全国の都市域における汎用性を検討した結果、以下のように結論づけることができた。

- ①増加・減少・総量(ネット)の推定精度は、各手法とも概ね±30%以内の誤差範囲に収まる。
- ②重ね合わせ画像によって緑地増減を抽出する手法の精度が安定していた。
- ③対象都市間に特筆すべき精度差はなく、立地条件、気候条件などによる緑の性質の違いは特に考慮する必要がないと考えられる。

【成果の活用】 今回開発した手法については、全国ベースのデータ作成や、各自治体とで統一的に作業を行えるよう、作業手順を示した衛星データ処理マニュアルとして別途整理した。

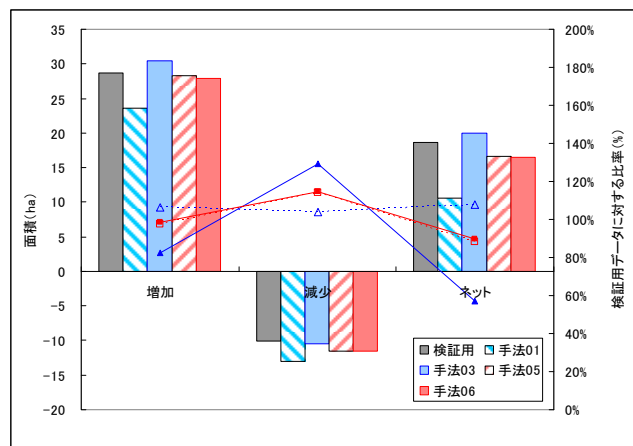


図-6 神奈川県における樹林地増加・減少・総量の比較