

戦略的創造研究推進事業
発展研究 (SORST)

研究終了報告書

研究課題「全球高精度植生バイオマス推定の実用化-衛星による多方向観測を利用した高精度バイオマス推定の実用化-」

研究期間：平成 14 年 1 月 1 日～
平成 20 年 3 月 31 日

本多嘉明
(千葉大学環境リモートセンシング
研究センター、准教授)

1. 研究課題名

全球高精度植生バイオマス推定の実用化
-衛星による多方向観測を利用した高精度バイオマス推定の実用化-

2. 研究実施の概要

1850 年から 1990 年の間に 121GtC が大気中に放出されたという試算がある。これは化石燃料の使用や土地利用の変化などの人間活動によって地球生態系における炭素循環が変化していることを意味する。人間活動が自然界の炭素循環を変化させている以上、地球生態系における炭素循環を詳細に理解することが急務である。京都議定書でも注目された陸上植生を介した炭素循環の変動を知るために植生バイオマスや土地被覆がどのような変動を遂げてきたかを知る必要がある。

人間活動の影響は、化石燃料の使用による二酸化炭素の大気中への放出や土地利用による土地被覆の改変などによって地球生態系に及んでいる。特に、土地被覆の改変は、陸上植生の変化により二酸化炭素を大気中に放出・吸収を変化させ炭素循環のバランスを変えている。この変動は、植生バイオマスの長期変動を調べることによって知ることができる。また、植生バイオマスのリアルタイムモニタリングは、食料生産モニタリングに繋がり食料安全保障の面から人類社会の安定に貢献できる。最終的な目標は、バイオマス推定の時間差分を用いてバイオマス変動量を把握し、陸上植生を介して大気とやり取りされる炭素量推定に役立てることにある。そのためには、一般的な植生指数によるバイオマス推定の精度では不十分である。

植生のバイオマスは、植生体の乾燥重量として扱われる。林学や植物生態学では、草本植生に対してはサンプルを採取し、乾燥し、重さを量る方法が一般的である。木本に対しては体積（材積量）を求め、比重を乗算することにより求めるのが一般的である。本研究は、後者の応用を広域に衛星による多方向観測データを利用することで実現することを目指した。

研究開始時の本研究プロジェクトの目標は、以下の 4 つであった。

- (1) 全球バイオマスの 20 年時系列変動
- (2) バイオマスの変化と気候変動などの地球環境変動との関連
- (3) 多角温度観測による水環境の把握
- (4) 新しい衛星プロダクトの創出

- 1) 植生バイオマス推定
- 2) 植生活動に対する水充足判定

これらを実現するために本研究では、研究開始当時、図 1 に示すように研究ブロック 1 ~ 4 (1 : 現地観測とアルゴリズム開発、2 : 全球処理と時系列解析、3 : 市民参加型大規模処理システムの構築、4 : 普及と実利用) に区切って研究を進めた。(3) 温度観測には熱赤外の知識がいるため千葉大学チームのみの実施は困難であり、この目標を達成するために長崎大学チームの協力を得ることになった。

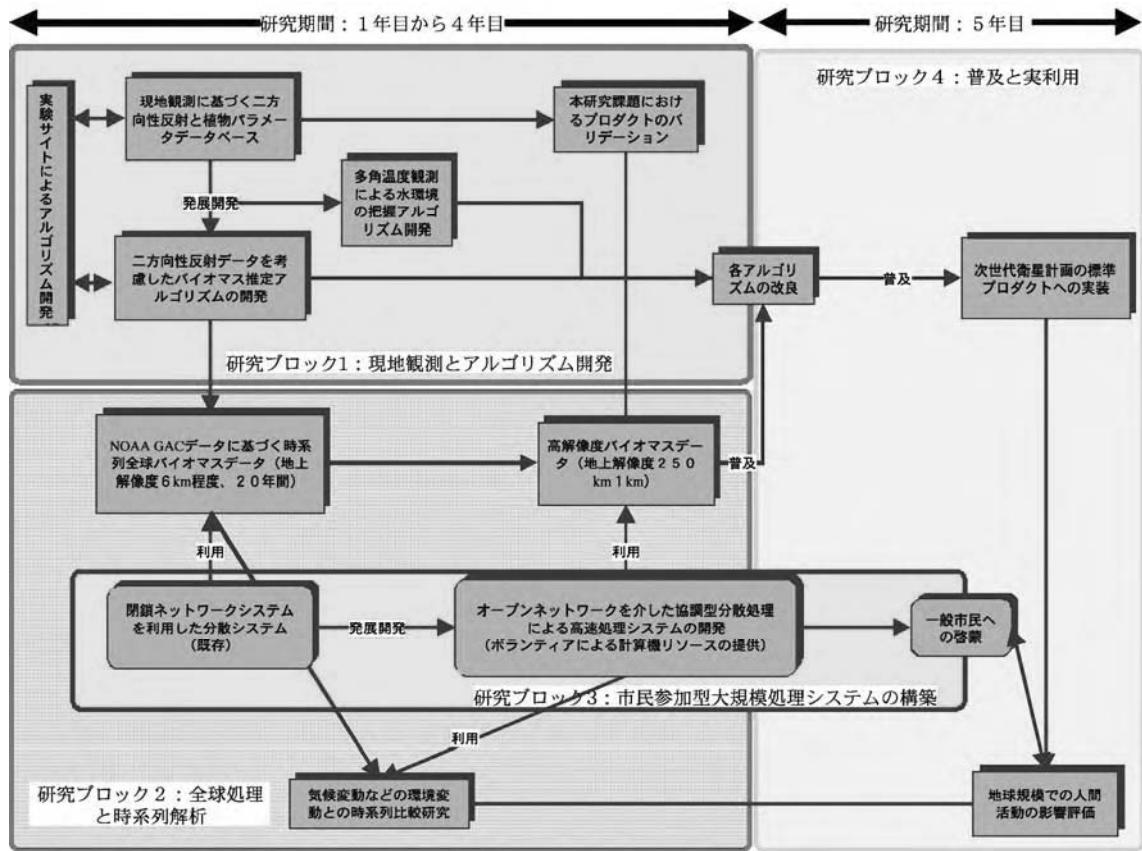


図1 研究開始当時の研究体制と年次計画

しかし、研究ブロック2と3は研究に進捗にあわせて一つにまとめた。また、研究ブロック1は、中間評価を経てシミュレーションを活用したバイオマス推定アルゴリズム開発を中心とするようになり最終年度まで続けることになった。

以下に目標ごとに成果を簡単にまとめる。

(1) 全球バイオマスの20年時系列変動

20年に渡る人間活動が直接陸上植生におよぼした影響を定量的に見積もることができ、今後の陸上植生への影響予測に役立てることができると考えたが、存在する20年間のNOAA衛星データでは、全球バイオマス導出には不可能な部分があることが分かり、新しい観測手法を日本の新しい衛星計画に提案するに至った。

(2) バイオマスの変化と気候変動などの地球環境変動との関連

長期のバイオマス変動と気候変動などの環境変動との時系列解析を通して、異常気象とバイオマス変動の時系列解析は、異常気象と植物生産量の関係を明らかにすると考えたが、存在する20年間のNOAA衛星データでは、全球バイオマス導出には不可能な部分があることが分かり、新しい観測手法を日本の新しい衛星計画に提案するに至った。

(3) 多角温度観測による水環境の把握

多角温度観測より植生活動に必要な水分が充足しているかの判定に利用することができると考えたが、多角温度観測が衛星観測では事実上不可能であり、二時期以上の温度データを用い、温度の変化量が水ストレスの把握に役立つことがわかった。

(4) 新しい衛星プロダクトの創出

1) 植生バイオマス推定

従来の植生指数から求められる植生バイオマスよりも植生の高さ方向の情報が加味した高精度なバイオマス推定アルゴリズムを開発した。衛星データからもカラマツ林で高精度の推定を可能にした。また、全球対応のため新しい観測手法を日本の新しい衛星計画に提案し、そのプロダクトとして提案するに至った。

2) 植生活動に対する水充足判定

二時期以上の温度データを用い、温度の変化量をパラメータにとれば水ストレスの傾向が把握できることがわかり、オーストラリアの旱魃と比較検討した。また、日本の新しい衛星計画に研究プロダクトとして提案するに至った。

2. 1 全球高精度植生バイオマス推定の実用化-衛星による多方向観測を利用した高精度バイオマス推定の実用化-（千葉大学グループ）

本研究では多方向観測を利用した森林のバイオマス推定アルゴリズム構築とアルゴリズム構築に必須である観測手法及び観測システムの開発、バイオマス推定を全球展開する際に有用なカゲ指数の開発、および植生活動に対する水充足判定のアルゴリズム構築、大量衛星データ処理を可能とする高速処理システムの開発を行った。

多方向観測による森林のバイオマス推定アルゴリズム構築においては、実際の森林を多方向観測するための観測システムを開発し、そのシステムによる観測データから二方向反射特性のモデル化を行った。また、実測データをもとに任意の観測条件における衛星観測値をシミュレートするシミュレータを開発し、異なる観測条件における観測値を一定の観測条件に揃えたデータを生成することにより、バイオマス推定をより高精度に行うアルゴリズムを構築した。バイオマス推定については、実際の森林におけるバイオマスとの比較を行うことで精度検証を行い、これまでよりも高精度な推定が可能であることを実証した。また、さらに高精度な推定を行うために、二方向反射モデルで使用する森林構造モデルを高度化するため、樹冠形状を3次元空間データ（サーフェスマodel）として計測するためのシステム開発を行い、実際の森林における樹冠形状の計測を可能とした。

バイオマス推定アルゴリズムを全球展開するためには森林と草本をあらかじめ分類し、それぞれに対して最適なバイオマス推定アルゴリズムを適用する必要があるが、これを可能とするためには従来の植生指標を用いた分類では不十分であることを示し、新たにカゲ指数を提案した。

また、当初予定していた多角温度観測による水環境の把握は、衛星における多角観測熱センサの実装が事実上不可能であることが分かり、二時期以上の温度データを用いる手法に変更したが、温度変化量の比較を行うことによって短波長域のスペクトルを用いる指標に比べて早期に水ストレスの検知が可能であることを地上実験および衛星データ解析で明らかにした。

衛星データの高速処理システムの開発では、当初15日程度を必要としていた衛星データのマッピング処理を1.5時間まで短縮することのできる分散型処理システムを開発した。

2. 2 温度センサの校正ならびに実温度推定アルゴリズム開発（長崎大学グループ）

本研究は衛星からの地表面温度推定法の開発と、その地上検証、校正法の開発の二つからなる。地表面温度推定は、すでにASTER、MODIS、ATSRで定常に実施されており、準解析的なアルゴリズム(ASTER)と、統計的なアルゴリズム(MODIS, ATSR)の2種が運用されている。両者とも地表面温度推定の困難さである大気補正と地表面放射率補正を行うものであるが、準解析的アルゴリズムは、大気補正の必要性があるものの地表面温度と放射率を同時に推定できるが、非線型連立方程式の求解が必要であるため、安定性の不足および、計算コストの増加が問題である。一方、統計的手法は大気補正が不要で、線形式であるため計算コストが少ない利点を有するが、地表面放射率を外部から既知量として与える必要があり、推定精度に問題を残している。

本研究はまず統計的手法の誤差解析を実施し、放射率を正しく与えることで推定誤差標準偏差が2[K]以下で地表面温度が推定可能であることを示した。次に、準解析的手法として10.8[μm]、12.0[μm]の2つの分光チャンネルの地表面放射率の関係を複数の関係式で表現し、関係式毎に観測値を用いて地表面温度、放射率推定を実施し、それから計算された輝度と衛星観測値の残差が最小となる放射率関係式を採用するアルゴリズムを開発した。数値シミュレーションから、本手法での地表面推定誤差は、大気補正誤差が1.5%であれば1.3[K]の誤差標準偏差で推定できることを確認した。また、2種のアルゴリズムの運用法と

して、ある期間毎に準解析的手法で放射率を推定し、定常的にはその放射率をもとに統計的手法で地表面温度を推定する組み合わせが精度、速度の面から有効であることを提案した。

地表面温度の地上検証法として、黒体と仮定できない裸地での検証手法を開発した。また、地表面放射率の影響をなくすため、凹面鏡を用いた放射温度計による地表面温度計測法を開発した。次に、裸地において、対象領域を歩きながら温度計測する移動観測と、高時間分解能で同一地点の温度を固定観測する観測法を組み合わせ、任意時刻での移動観測点の観測値から、衛星通過時刻での観測値を推定する時間ずらし処理を開発し、対象領域の面平均温度を得る方法を開発した。この方法を用いて、米国ネバダ州 Railroad playa での MODIS LST プロダクトを検証したところ、大きな誤差が見られたが、現地の地表面放射率と MODIS での設定値の差がその原因であることが明らかとなり、本検証法の有効性が示された。

3. 研究構想

○当初の目標

申請当時、本研究プロジェクトの目標は以下の 4 つであった。

- (1) 全球バイオマスの 20 年時系列変動解析
- (2) バイオマスの変化と気候変動などの地球環境変動との関連把握
- (3) 多角温度観測による水環境の把握
- (4) 新しい衛星プロダクトの創出
 - 1) 植生バイオマス推定
 - 2) 植生活動に対する水充足判定

○研究計画

以上の目標達成のため研究ブロック 1～4（1：現地観測とアルゴリズム開発、2：全球処理と時系列解析、3：市民参加型大規模処理システムの構築、4：普及と実利用）に区分切って研究を進めることにした。可視・近赤外観測に実績がある千葉大学チーム（研究ブロック 1～4 を担当）と熱赤外観測に実績がある長崎大学チーム（研究ブロック 1 の一部を担当）を構成メンバーとした。研究ブロック 1～3 を最初の 4 年で行い、最終年度は研究ブロック 4 を行う予定であった。

○ 進め方の概要

アルゴリズム開発に当たっては、実際の植生の観測値をなるべく多く集めるため機材開発、観測サイト運用などに努め、そこから得られたデータを精査することにより経験的なアルゴリズムを構築して、当初の成果とした。その後、中間評価を経て二方向性反射とバイオマスの関係をより明らかにするために植生 3 次元モデルから二方向性反射シミュレーションを行えるモデル開発を行うことで、より柔軟なアルゴリズム開発を可能にした。この方向性は本プロジェクトの成果を将来衛星計画に反映させるために重要なことである。

○ 新展開から生まれた目標等

研究ブロック 3 と 4 はオープンなネットワークを介した分散型データ処理システムの開発を目指して進めてきたが、主に①オープンなネットワーク上のセキュリティの問題、②大量のデータが一般のネットワークに高負荷になる悪影響、③計算機資源の予想外の性能向上と廉価化の理由で分散型衛星データ高速処理システムとしてクローズドネットワーク環境で開発を行った。

現地観測データを元にして考案した初期のバイオマス推定式に衛星データを適用して判明したことは、衛星の観測幅の重なりを利用して多角観測情報を得る方法ではバイオマス推定に十分満足できる観測の組み合わせを得ることが被雲率（複数の観測機会に同時に雲なしと言う確率の低さ）や低緯度地域の観測幅の重なりが小さいことなどから困難であると言うことが判明した。

衛星軌道方向に多角観測することで、被雲率や低緯度地域の観測幅の重なりが小さいことによる悪影響を解決できる。しかしながら、全球観測対応の地球観測衛星は存在しない。

そこで、日本の新しい地球観測衛星に前述の衛星軌道方向に多角観測を加える活動を開始した。現在、同等の機能を有する地球観測衛星が日本の宇宙開発計画にあがる段階に至った。

目標（1）全球バイオマスの20年時系列変動の解析と（2）バイオマスの変化と気候変動などの地球環境変動との関連把握を実現するためには新たな地球観測衛星データを待つことになる。当該衛星計画は、今までの日本の衛星と違い3機連続運用で長期間継続観測が計画されていることは特記に値する。

目標（3）多角温度観測による水環境の把握は、衛星の熱赤外観測条件では多角観測が不適当であることが分かり、二時期以上の温度変化量の観測という形でアルゴリズム上の変更で対応した。

目標（4）新しい衛星プロダクトの創出は、日本の新しい衛星計画で標準プロダクトと研究プロダクトとして提案するに至った。

4. 研究実施内容

4.1 全球高精度植生バイオマス推定の実用化-衛星による多方向観測を利用した高精度バイオマス推定の実用化-（千葉大学グループ）

(1) 実施の内容

I. バイオマス推定アルゴリズム

本節（4.1.I）では、森林バイオマスの推定手法構築について述べる。本課題におけるバイオマス推定手法は、二方向性反射特性を利用したものであり、これまでのバイオマス推定手法とは著しく異なる手法である。そのため、まずその基本的な考え方と、二方向反射特性に関する専門用語についてI.1で簡単な説明を行なう。I.2では二方向性反射特性を計測するために開発したリモートコントロールRCヘリコプター（以後は「RCヘリコプター」と呼称する）による観測システムと、その観測結果及び得られた知見について述べる。I.3ではRCヘリコプターによる実測だけではカバーできない詳細な二方向反射特性をシミュレートし、かつ樹木のバイオマス推定に直結する樹冠構造パラメータを取り込んだBRFシミュレーションとシミュレーションを併用した衛星データによるバイオマス推定について述べる。I.4において、より高精度な推定手法開発に向けた樹冠形状実測システムの開発について述べる。

I.1 二方向性反射特性を用いたバイオマス推定の概要

I.1.1 はじめに

二方向性反射特性は、物体を照射する光の入射方向と、物体によって反射された光の向かう方向を考慮した場合の反射特性である。一般には反射率を入射方位角、入射天頂角、反射方位角、反射天頂角の関数として表現する。この関数をBRDF(Bi-directional Reflectance Distribution Function)と呼び、この関数をもって二方向性反射特性とすることが多い。しかしながら、BRDFは解析的に与えられる関数であるという印象があり、現実の反射特性ではそうでない場合も多いため、本報告書では二方向性反射特性という言葉に対応する略語としてBRF(Bi-directional Reflectance Factor)を用いる。

これまで一般的に試みられてきた衛星データによるバイオマス推定手法は、植生被覆率と相関のあるNDVI(Normalized difference Vegetation Index: 正規化植生指標)などの植生指標とバイオマスを関係付けようとするものであった。しかし、森林における樹木は言うまでもなく3次元の構造を有し、森林の植生被覆率とバイオマスの関係はごく限られた条件下でのみ成立するものであって、閉鎖林のような被覆率が100%もしくはそれに近いような森林に対しては推定が困難であることがわかっている。また、閉鎖林でない場合においても、多方向観測(複数の方向からの観測データを利用する)によって、森林の3次元構造に起因するBRFを捉える方が、バイオマスとの関連付けを行なうのは容易になるはずであ

る。図 4.1.1 に多方向観測の概念図を示した。この図にあるように、同等な被覆率をもった森林の場合、植生被覆率のみを用いる手法ではバイオマスの違いを検知できない。それに対し多方向観測ではセンサ視野内の被覆率の変化を見ることが出来、その被覆率の変化をバイオマスと結びつけることで、高精度バイオマス推定が可能であることを示唆している（後述するが、本課題で開発した手法は被覆率変化のみを捉えるものではない。図 4.1.1 はあくまで多方向観測の有利さを示すための概念図である）。

森林樹冠の BRF は樹冠の 3 次元構造と太陽光の入射方向に大きく依存して決定されるものであり、人工衛星の観測データはその BRF をある方向から観測したものと言える。したがって、森林樹冠の 3 次元構造と BRF の関係を明らかにし、3 次元構造とバイオマスの関係を明らかにすれば、衛星の多方向観測データを用いた森林のバイオマス推定が可能になる。

そこでまず現実の樹冠の BRF 計測を行い、構造の大きく異なる樹冠では、BRF の示す特徴も異なることを実証した。また、実測ではカバーしきれない観測角度条件や太陽入射角の条件をすべて計算可能にする BRF シミュレーションを行なった。この BRF シミュレーションは「実測に基づく」パラメータ設定を行なって実行した。BRF シミュレーションの樹木の設定において、実測に基づく樹冠形状とバイオマスに直結する樹高および胸高直径の関係を導入し、異なるバイオマスの森林がもつ樹冠構造における BRF をシミュレートすることによって、多方向観測データによってバイオマスが推定可能であることを実証した。

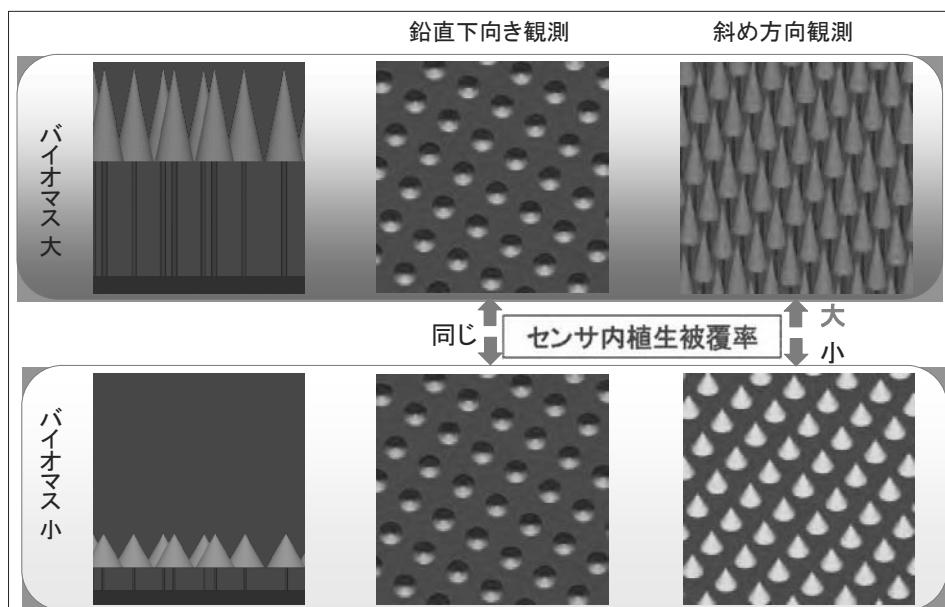


図 4.1.1 多方向観測の優位性

I.1.2 二方向反射特性に関する用語の整理

I.1.2-1 観測ジオメトリ

人工衛星が地上のある点（観測対象：Target）を観測するときの「太陽-観測対象-衛星」の位置関係を Sun-Target-Sensor Geometry と呼ぶ。正確に対応する日本語はないが、しばしば「観測ジオメトリ」と呼ばれることがある。「観測ジオメトリ」は本来人工衛星と観測対象との位置関係を指す言葉であるが、Sun-Target-Sensor Geometry に対する適当な訳語がないため、太陽との位置関係を含めたものとして使用されることが多い。本報告書においても、同様に Sun-Target-Sensor Geometry に対応する概念を示す用語として「観測ジオメトリ」を用いることとする。

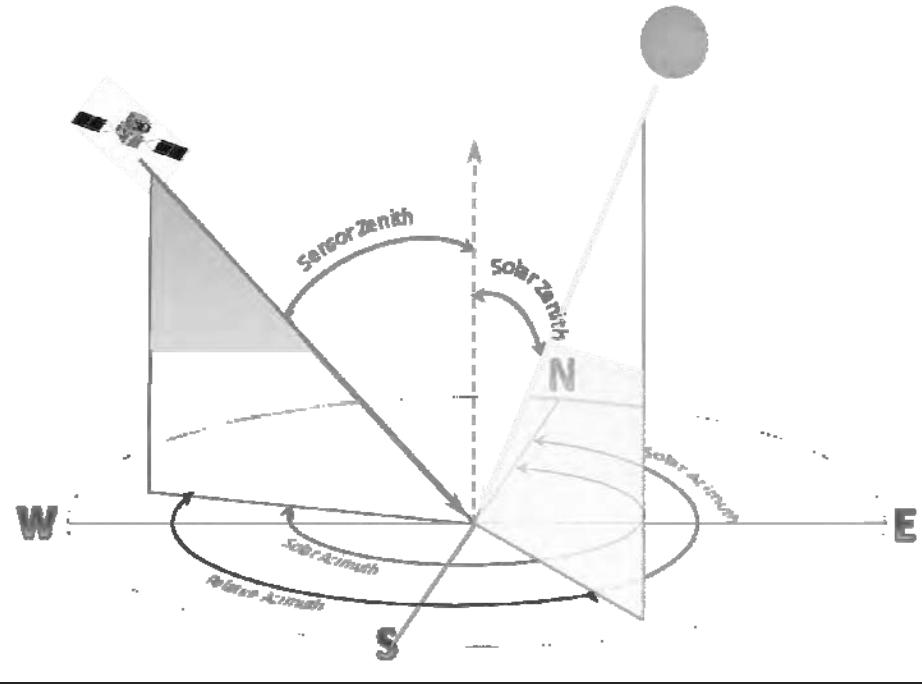


図 4.1.2 観測ジオメトリ

I.1.2-2 観測ジオメトリに関する角度の定義

一般的なイメージヤを搭載した衛星が観測対象を観測するときの観測ジオメトリを図 4.1.2 に示す。黄色の太い矢印が太陽の入射方向、青の太い矢印が衛星の観測方向を示している。点線で示した円は観測対象点における接平面（地表面）を示している（方位角を示しやすいように便宜上円を描いているにすぎない）。図中の破線矢印は、この接平面の法線ベクトルで、観測対象地点における天頂方向を指している。ここで、観測ジオメトリで使用される角度の呼称と定義を図 4.1.2 と対応させて以下に示す。

Solar Zenith Angle

太陽天頂角。天頂方向ベクトルと太陽光入射ベクトルのなす角。

「 $90^\circ - \text{太陽高度}$ 」である。

Sensor Zenith Angle

センサ天頂角。天頂方向ベクトルと人工衛星（センサ）の観測方向ベクトルとのなす角。

Solar Azimuth Angle

太陽方位角。真北から時計回りにみた太陽の方位角。

Sensor Azimuth Angle

センサ方位角。真北から時計回りにみた観測方位角。

Relative Azimuth Angle

相対方位角。センサ方位角と太陽方位角の差。BRF を考える場合、衛星観測時の太陽方位角やセンサ方位角を個別にパラメータとすることは少なく、この相対方位角を用いるのが一般的である。相対方位角を用いれば様々な太陽方位角とセンサ方位角の組み合わせをひとつのパラメータとして扱うことができる¹。

¹ ただし、BRDF が天頂方向ベクトルを軸とする回転に依存しないと仮定できる場合にかぎる。

方位角は北を 0° とし、天頂方向から見て時計回りの角度で表す。わかりやすさのため、図 4.1.3 に天頂方向から観測対象をみたときの平面図上に 3 つの方位角を示す。

BRDF や入射・散乱を表す式においては、天頂角を θ 、方位角を ϕ と表す慣習がある。

本報告書でもそれらを踏襲する。ただし、個々の天頂角、方位角を示すために使われる添字 (Suffix) にはあまり統一性がないため、ここでは論文等で目につくことが多い添え字を採用することにする。また、各角度を略字で表現することも多いが、これもとくに決まった表記法があるので、これではないので、本報告書で使用する略語も決めておく必要がある。表 4.1.1 にこれらの対応表を示しておく。

表 4.1.1 観測ジオメトリの各角度の呼称・略語および変数表記

	対応する訳語	略語	変数文字
Solar Zenith Angle	太陽天頂角	SOZ	θ_s
Sensor Zenith Angle	センサ天頂角	SEZ	θ_o
Solar Azimuth Angle	太陽方位角	SOA	ϕ_s
Sensor Azimuth Angle	センサ方位角	SEA	ϕ_o
Relative Azimuth Angle	相対方位角	RA	ϕ_r

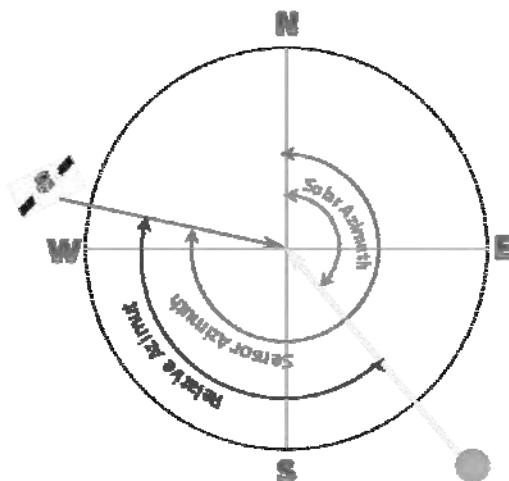


図 4.1.3 観測ジオメトリの平面図

I.1.2-3 主平面と直交面

太陽光入射ベクトルと天頂方向ベクトルをともに含む平面を Principal Plane (主平面) と呼ぶ (図 4.1.4)。観測方向ベクトルと天頂方向ベクトルを含む面はとくに決まった呼称はないが、仮に観測面と呼ぶことにすれば、観測面と主平面のなす角が相対方位角である。また、主平面と直交する平面は Cross-Principal Plane、Perpendicular Plane、Vertical Plane など様々な呼び方がある。

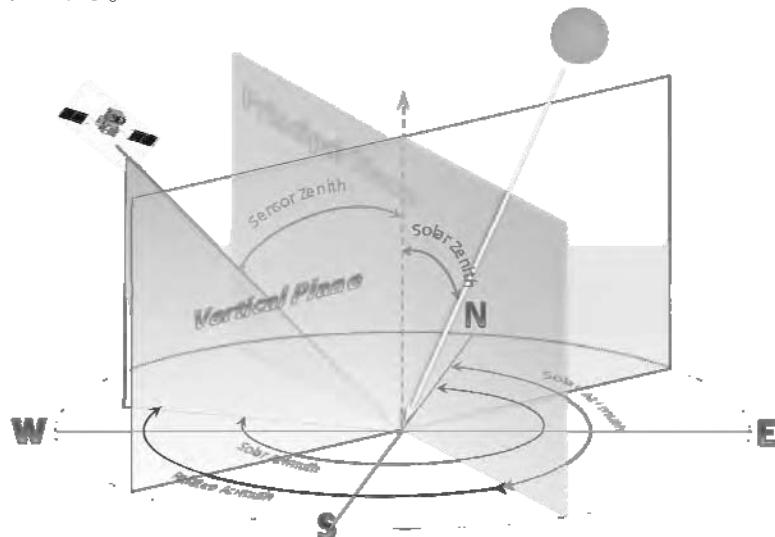


図 4.1.4. 主平面と直交面

本報告書では Cross-Principal Plane に統一する。日本語表記に関しては「主平面との直交面」と呼ぶのが正確であるが、誤解を生じるおそれのない限り、単に「直交面」と呼ぶことにする（図 4.1.4 参照）。

I .1.2-4 前方散乱および後方散乱

電磁波の反射（散乱）方向を示す言葉として、「前方散乱」（Forward Scatter）、「後方散乱」（Back Scatter）という用語がよく使用される。図 4.1.5 に示すように入射した太陽光が対象によって反射したとき、直交面を境として太陽と反対側への反射を「前方散乱」（Forward Scatter）、太陽側への反射を「後方散乱」（Back Scatter）と呼ぶ。

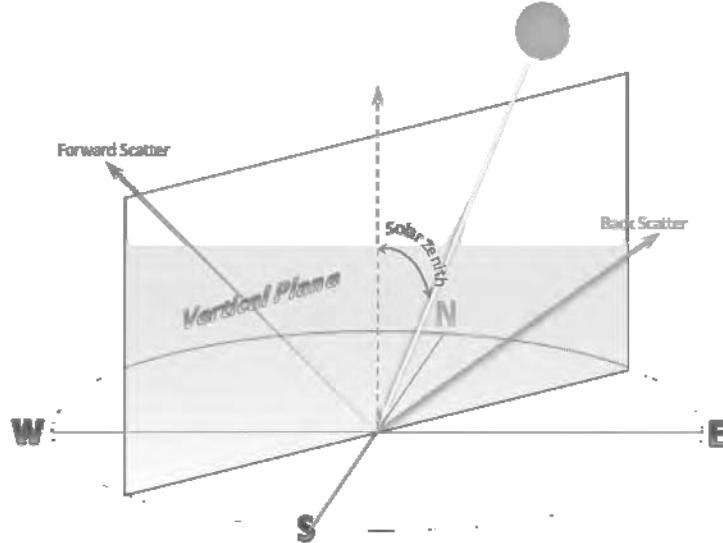


図 4.1.5 前方散乱と後方散乱

また、前方散乱光が観察される空間を指して「前方散乱側」、後方散乱光が観察される空間を「後方散乱側」と呼ぶこととする（図 4.1.6）。

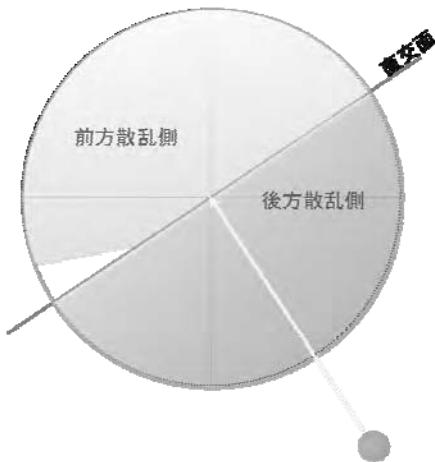


図 4.1.6 前方散乱側と後方散乱側（天頂方向からみた平面図）

I .2 リモートコントロール RC ヘリコプターによる BRF 計測

本小節では、二方向性反射特性の計測を行うためのシステム開発と、これを用いて計測を行なった結果得られた知見について述べる。

I .2.1 樹冠 BRF 計測

I .2.1-1 計測システム

CREST における「衛星観測による植物生産量推定手法の開発」当時に開発した RC ヘリコプタースペクトル計測システムを改良し、樹冠の BRF 計測を行なった。なお、バイオマス推定アルゴリズムを構築する上で使用した BRF 計測データは CREST 当時のものも含んでいる。図 4.1.7 は RC ヘリコプター計測システムの概観を、図 4.1.8 に BRF 計測システムを示す。また、図 4.1.9 に計測システムのシステムブロック図を示す。



図 4.1.7 RC ヘリコプター概観

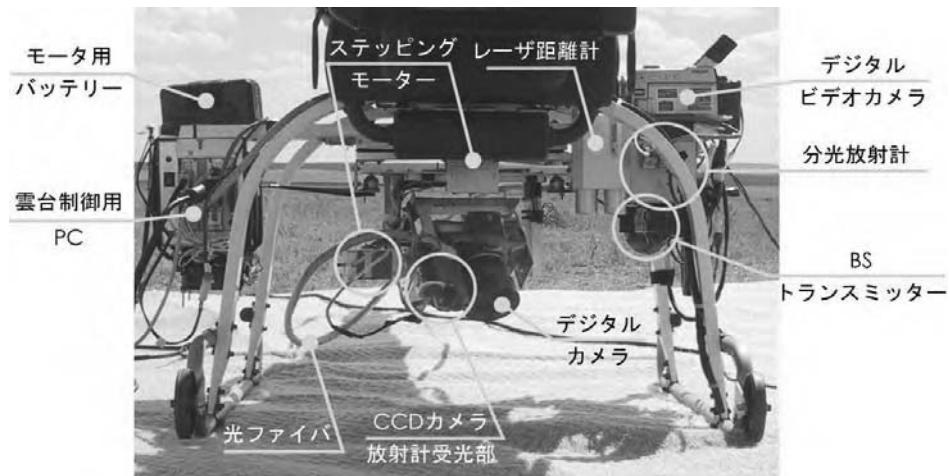


図 4.1.8 BRF 計測システム

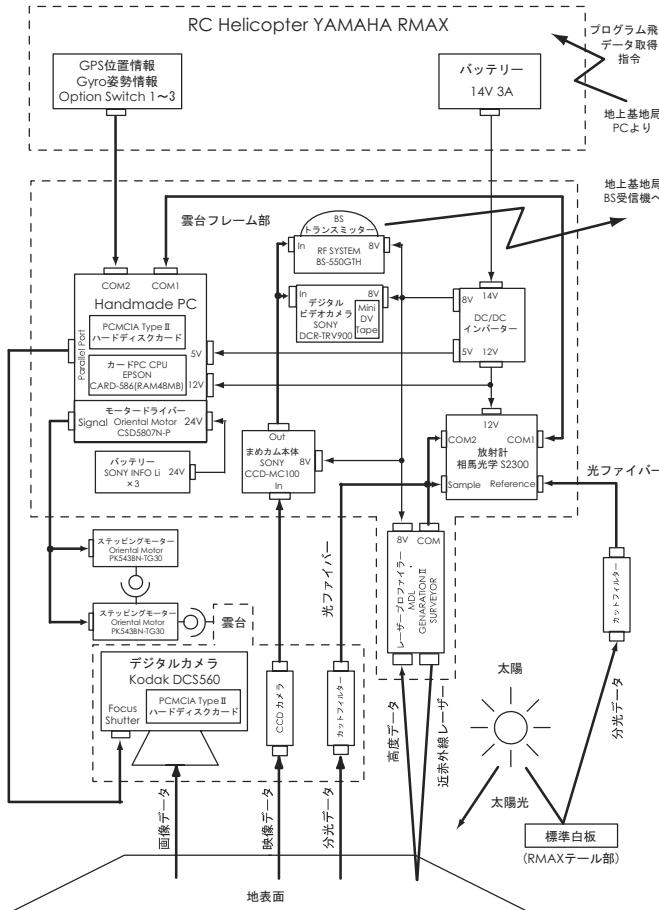


図 4.1.9 BRF 計測システム ブロック図

この観測システムを用いて図 4.1.10 に示すようなフライトを行い、主平面、直交面内で異なる角度から同一観測対象のスペクトルを計測することにより、BRF 観測を行う。

観測されたデータの例（広葉樹林の BRF）を図 4.1.11 に示す。

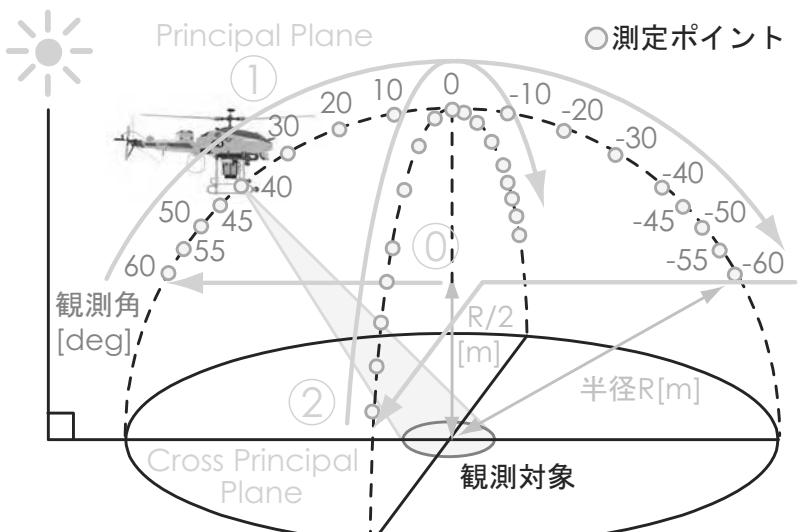
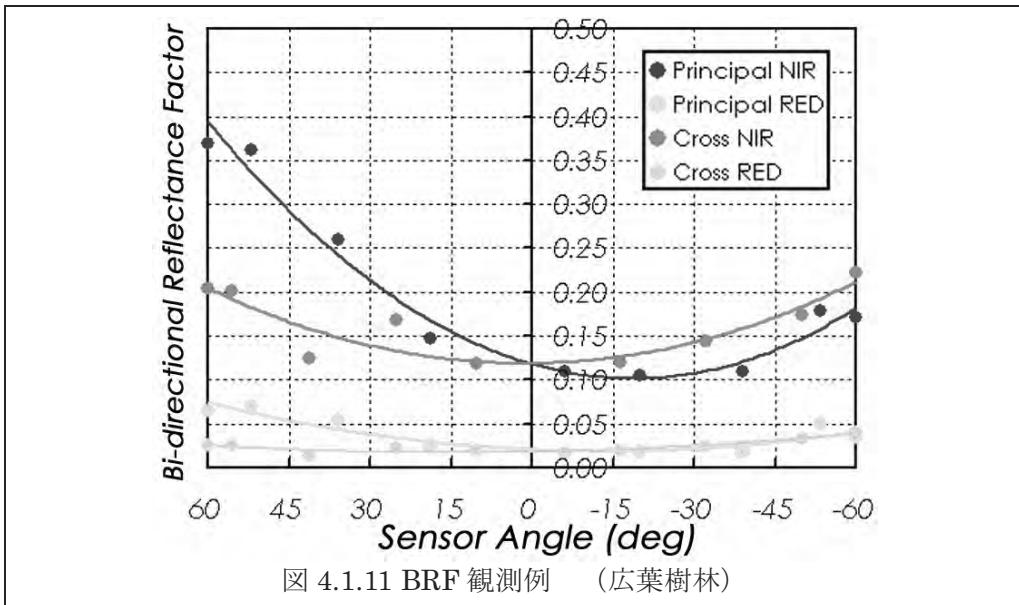


図 4.1.10 BRF 計測のフライトパターン



この図は主平面と直交面における赤領域および近赤外領域における BRF を表している。横軸はセンサ天頂角で、正が後方散乱、負が前方散乱を意味する。

I .2.1-2 樹冠構造の違いを反映する BRF

RC ヘリコプターによる BRF 計測の結果を検討した結果、赤領域と近赤外領域の反射率を 2 次元直交平面にプロットしたときの観測角（センサ天頂角）による観測プロットの遷移（図 4.1.12 参照）が、樹冠構造の特徴を現していることを見出した。

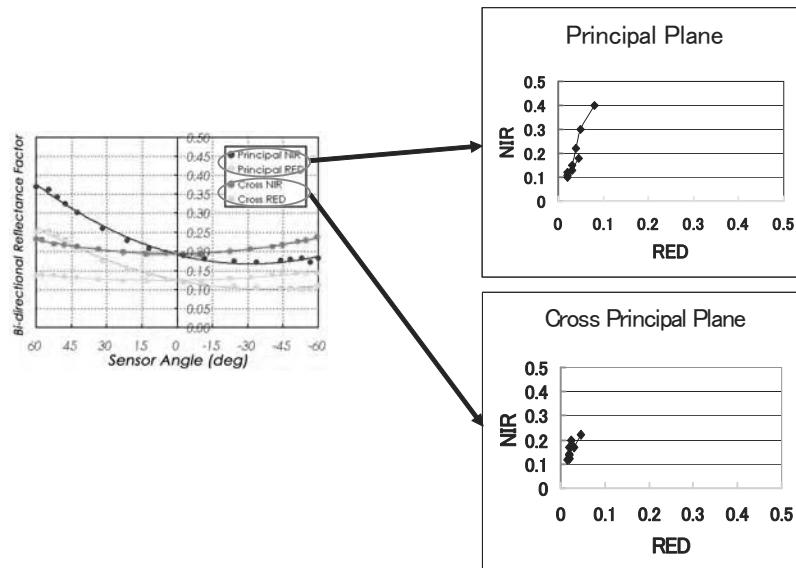
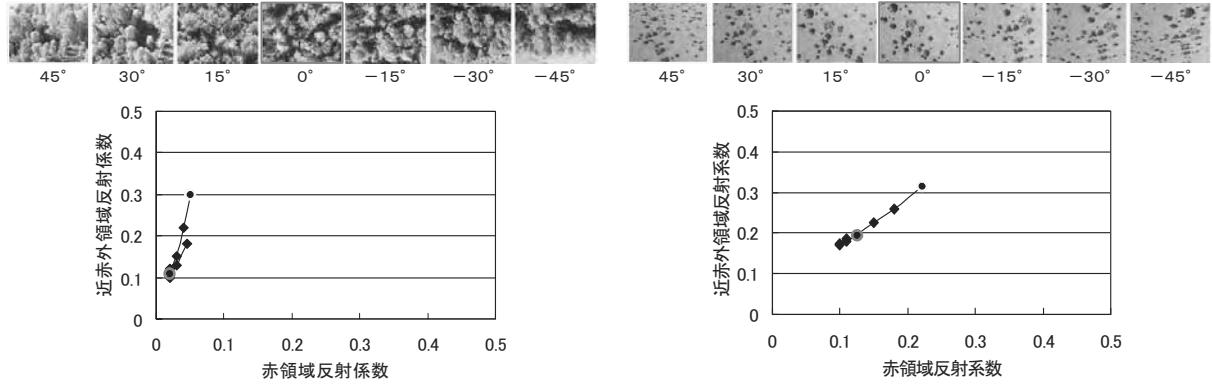


図 4.1.12 赤領域—近赤外領域 2 次元空間への BRF プロット



(a) 広葉樹

(b) 疎な灌木

図 4.1.13 異なる樹冠における直下観測 (○) と斜め観測時 (△) の遷移の違い

例えば、構造の大きな広葉樹林と、植被率の小さな疎な灌木について、観測された BRF を比較すると図 4.1.13 のようになる。この図で、角度の数値を付した写真はそれぞれのセンサ角における対象を写した写真である。また、2 次元プロットにおいて赤丸で示した点が直下観測時のデータであり、黄色の丸で示した点が主平面 45 度の後方散乱を観測したデータであることを示している。ここで、原点と赤丸（直下観測）を結ぶ直線の大きさは灌木の方が大きく、その傾きは広葉樹の方が大きい。また、赤丸と黄色の丸を結ぶ直線の大きさは広葉樹の方が大きい。両者を同時にプロットして比較すると図 4.1.14 のようになる。

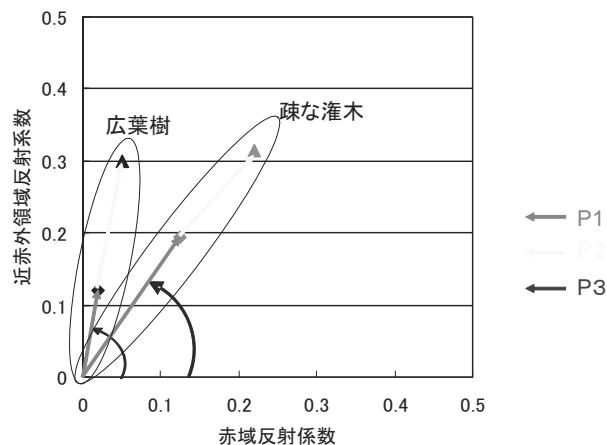


図 4.1.14 広葉樹と疎な灌木における遷移の比較

RC ヘリコプター観測から得られた BRF の検討から、図 4.1.14 の P1、P2、P3 がバイオマスと密接に関連したパラメータであるとの知見が得られた。この結果から、中間報告の時点でのバイオマス推定式の試案を提示し、人工衛星 NOAA の AVHRR センサデータを用いた相対バイオマス変化マップを作成した（図 4.1.15）。しかし、バイオマスの絶対値推定において衛星データの観測値を直接使用すると P1、P2、P3 がもつ観測天頂角および相対角依存性により、観測データによっては推定誤差が極めて大きくなることが判明した。そこで、観測データをもとに、任意の観測ジオメトリにおける観測値の推定が必要なり、それらは BRF シミュレーションによって得ることとした。

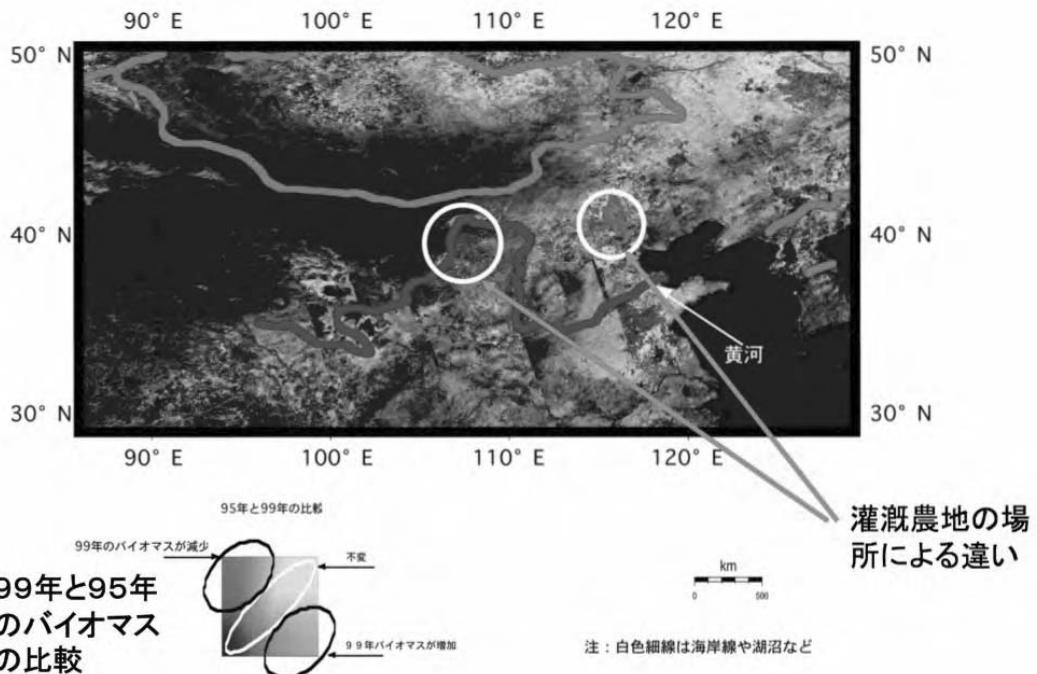


図 4.1.15 衛星データ解析による相対バイオマス変化画像

I.3 BRF シミュレーション

I.3.1 はじめに

RCヘリコプターによる樹冠スペクトル計測で主平面および直交面におけるBRFを取得することが可能になった。しかし、実際の人工衛星観測は主平面内もしくは直交面内のジオメトリで観測されることはむしろ例外的である。また、様々な緯度における衛星観測データを使用することを考えると、特定の太陽天頂角における主平面内もしくは直交面内のBRFのみが明らかになっただけでは不十分と言える。とくに、衛星観測幅の重なりを利用する方法では、異なる衛星軌道からの多角観測データを利用するため、相対方位角が一定でないことを想定しておかなければならない。さらに重要なことは、ヘリ観測の項で示したパラメータ P1,P2,P3 は衛星観測時の太陽天頂角や相対方位角に対する依存性を有するということである。したがって、バイオマス推定をこの 3 つのパラメータを用いて行なうためには、太陽天頂角、相対方位角を固定する必要がある。しかしながら、人工衛星観測においてはこれらの角度は変動するものであるため、実際の観測値をある特定の角度条件下の観測値に変換する必要がある。

そこで計算機による BRF のシミュレーションを行なうことによって、任意の角度条件における反射率を求める手法を確立する必要がある。

BRF をシミュレートするためには、一般に BRF モデルを記述する。これまで多数の BRF モデルが提案してきたが、それらを現実の衛星データに適用するためにはいくつかの致命的な問題点があった。例えば、計測が極めて困難な（針葉樹では不可能に近い）、樹冠を構成する葉の傾き分布等のパラメータを用いることや、モデルに与える葉の分光反射特性が单葉の分光反射特性であるなどの点である。樹冠の分光反射率を実際に計測してみれば明らかなことだが、单葉の反射率とは著しく異なった値となる。これは、センサの視野内にある微小な陰影を反映した値となるからである。太陽光が照射している側の反射率であっても、その値は单葉の反射率より小さくなる。したがって、单葉の反射率をパラメータとするようなモデルでは、葉の分布状態によってできる陰影の微細構造を導入すべきだが、現実にはこれに必要なパラメータを収集するのは不可能に近い。

そこで本課題では、実際に RC ヘリコプターによって取得した樹冠の反射率を用い、樹

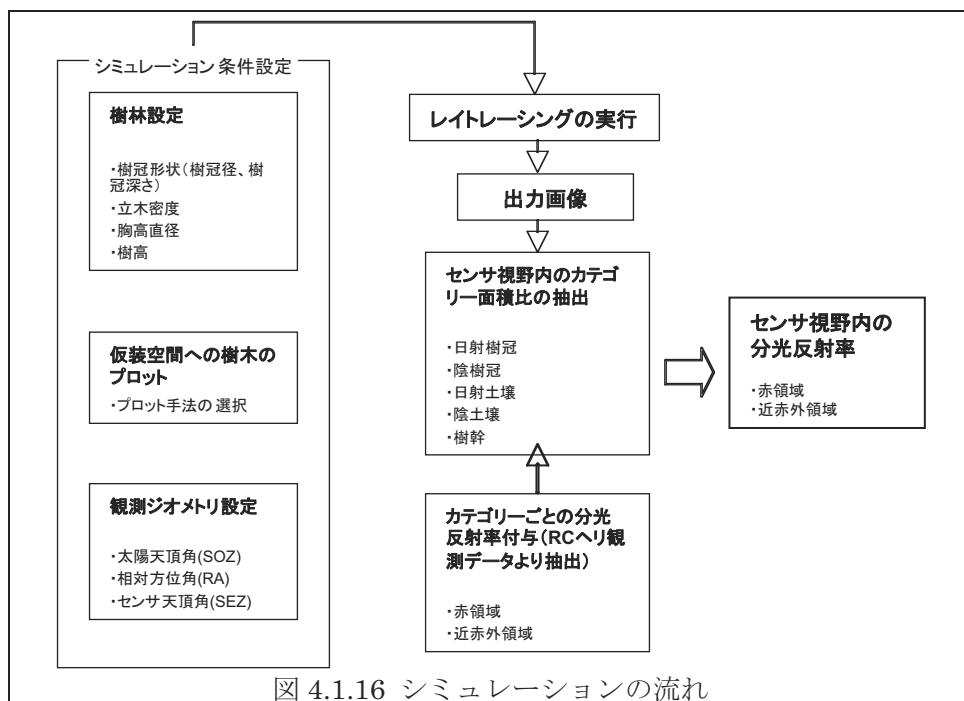
冠の形状を単純化した上でレイトレーシングを行い、その BRF を抽出することとした。RC ヘリコプターによる計測ではセンサ視野内の微細な陰影も同時に計測していることになり、これらが主平面と直交面でそれぞれ複数観測される。この情報を用いれば、葉の微細構造の記述を行なわなくてもセンサ視野内の反射率を計算することが可能である。そして BRF モデルを、太陽光の照射している樹冠、陰になった樹冠、土壌などのカテゴリの視野内面積比とそれぞれの分光反射率をパラメータとする単純な形で記述することを可能にする。

また、モデル樹木を計算機上に配置するに際して、現実の森林のプロット情報をもとにした (I.3.4において詳述)。こうすることで、RC ヘリコプターで実際に計測したある観測ジオメトリ (主平面と直交面内の) における反射率をあらゆる観測ジオメトリの観測反射率へと拡張することができ、人工衛星データへ適用する際に、実際の観測ジオメトリにおける計測反射率と対応させることができ可能となる。このような手法は、これまで試みられたことのないものである。

本節ではこれ以降、I.3.2においてシミュレーションの流れについて、I.3.3において RC ヘリコプター観測データを用いた BRF モデル構築、I.3.4においてシミュレーションの樹木配置について述べる。I.3.5では BRF をバイオマス推定に利用するアルゴリズムとそれをカラマツ林のバイオマス推定に適用した結果について述べる。

I.3.2 シミュレーションの概要と流れ

図 4.1.16 にシミュレーションの概要を示した。



なお、シミュレーションの角度設定では以下の点に注意する。

地表面の BRF が天頂方向ベクトルを軸とする回転に対して依存性を持たない場合のシミュレーションでは、太陽方位角を固定し、相対方位角のみを変化させることで方位角に対するすべての条件をシミュレートすることができる。太陽方向を真北 ($SOA = 0^\circ$) に固定してセンサ方位角を変化させると、常に $SEA = RA$ となるためである。BRF に回転依存性がないときには、反射特性の方位角依存性は相対方位角のみに依存する。したがって、実際の太陽方位角は反射特性を記述するためのパラメータとして用いる必要はなく、シミュレーションの角度条件としては相対方位角、太陽天頂角、センサ天頂角の 3 つを変化させることで全ての角度条件をシミュレートすることができる。

I .3.3 RC ヘリコプター観測データからのカテゴリ被覆率抽出と BRF モデル

目視判別によっていくつかのカテゴリに分類された教師データをもとに、観測によって得られたデジタル画像のピクセルを、多変量距離を用いてカテゴリ分類し、その面積比により算出する。

- (1) 目視判別によって次の教師データが与えられるものとする。

$$\begin{aligned}
 \text{カテゴリ1(植生)} &: ((r_{1,1}, g_{1,1}, b_{1,1}), \dots, (r_{1,j}, g_{1,j}, b_{1,j}), \dots, (r_{1,n1}, g_{1,n1}, b_{1,n1})) \\
 &\vdots \qquad \qquad \qquad \vdots \\
 \text{カテゴリ} i (\text{土}) &: ((r_{i,1}, g_{i,1}, b_{i,1}), \dots, (r_{i,j}, g_{i,j}, b_{i,j}), \dots, (r_{i,ni}, g_{i,ni}, b_{i,ni})) \\
 &\vdots \qquad \qquad \qquad \vdots \\
 \text{カテゴリ} N (\text{影}) &: ((r_{N,1}, g_{N,1}, b_{N,1}), \dots, (r_{N,j}, g_{N,j}, b_{N,j}), \dots, (r_{N,nN}, g_{N,nN}, b_{N,nN}))
 \end{aligned}$$

分類されたカテゴリ数を N とし、 i 番目のカテゴリに分類されたピクセルの総数を ni とする。ここで $(r_{i,j}, g_{i,j}, b_{i,j})$ は目視によって i 番目のカテゴリに分類された j 個目のピクセルの RGB 値を示し、カテゴリにおける平均値を $(\bar{r}_i, \bar{g}_i, \bar{b}_i)$ と表す。また、分散を $(\sigma_{i,r}^2, \sigma_{i,g}^2, \sigma_{i,b}^2)$ と表す。

- (2) このとき、観測によって得られたデジタル画像のあるピクセルを (R, G, B) とすると、このピクセルから i 番目のカテゴリまでの距離 D_i はそれぞれ次の式で表される。

$$D(\text{ユークリッド})_i^2 = (R - \bar{r}_i)^2 + (G - \bar{g}_i)^2 + (B - \bar{b}_i)^2 \quad \dots \quad (4.1.1)$$

$$D(\text{標準化ユークリッド})_i^2 = \frac{(R - \bar{r}_i)^2}{\sigma_{i,r}^2} + \frac{(G - \bar{g}_i)^2}{\sigma_{i,g}^2} + \frac{(B - \bar{b}_i)^2}{\sigma_{i,b}^2} \dots \quad (4.1.2)$$

$$D(\text{マハラノビス})_i^2 = (R - \bar{r}_i \quad G - \bar{g}_i \quad B - \bar{b}_i) S_i^{-1} (R - \bar{r}_i \quad G - \bar{g}_i \quad B - \bar{b}_i)^T \dots \quad (4.1.3)$$

ただし、 $(R - \bar{r}_i \quad G - \bar{g}_i \quad B - \bar{b}_i)^T$ は行列 $(R - \bar{r}_i \quad G - \bar{g}_i \quad B - \bar{b}_i)$ の転置行列を表す。また、 S_i^{-1} は次の式から求められる共分散行列 S_i の逆行列である。

$$\text{共分散行列 } S_i = \begin{matrix} S_{i,rr} & S_{i,rg} & S_{i,rb} \\ S_{i,gr} & S_{i,gg} & S_{i,gb} \\ S_{i,br} & S_{i,bg} & S_{i,bb} \end{matrix} \dots \quad (4.1.4)$$

$$\text{分散 } S_{i,rr} = \frac{1}{ni} \sum_{j=0}^{ni} (r_{i,j} - \bar{r}_i)(r_{i,j} - \bar{r}_i) \dots \quad (4.1.5)$$

$$\text{共分散 } S_{i,rg} = \frac{1}{ni} \sum_{j=0}^{ni} (r_{i,j} - \bar{r}_i)(g_{i,j} - \bar{g}_i) \dots \quad (4.1.6)$$

: :

- (3) ピクセル (R, G, B) は、算出された距離が最も近い値となったカテゴリに属するものとする。
- (4) (1)～(3)までの手順を、画像中の分光放射計の視野範囲と一致する領域において行う。

以上の手順で視野内のカテゴリの面積比を抽出する。主平面と直交面における複数の観測データから、複数の異なったカテゴリ被覆率をもつ画像が取得されているため、各カテゴリの分光反射率を最小二乗法で求めることが出来る。こうして得られた分光反射率をレイトレーシング出力画像から求めたカテゴリ面積比に適用することにより、シミュレーションによる BRF を取得することが出来る。

すなわち、ここで行なうシミュレーションでは以下の BRF モデルを用いていることになる。

$$BRF_{\lambda}(\theta_s, \phi_s, \theta_o, \phi_o) = \sum_{i=1}^n Cover_i(\theta_s, \phi_s, \theta_o, \phi_o) \times RF_{\lambda,i} \quad \cdots \quad (4.1.7)$$

$BRF_{\lambda}(\theta_s, \phi_s, \theta_o, \phi_o)$ は、太陽天頂角 θ_s 、太陽方位角 ϕ_s 、センサ天頂角 θ_o 、センサ方位角 ϕ_o のときに観測された波長 λ の BRF である。 $Cover_i(\theta_s, \phi_s, \theta_o, \phi_o)$ は、 $(\theta_s, \phi_s, \theta_o, \phi_o)$ のときにカテゴリ i がセンサ視野内に占める割合である。 $RF_{\lambda,i}$ はカテゴリ i の波長 λ における反射係数を表す。

つまり、各センサ角において観測された BRF は、センサ視野内に含まれる各カテゴリの反射係数と、センサ視野内において各カテゴリが占める割合を掛け合わせたものを合計した値で表現される。

また、本モデルでは各カテゴリは均等拡散面（Lambert 面）で、入射と反射の角度 $(\theta_s, \phi_s, \theta_o, \phi_o)$ に関わらず反射特性は一定であるものとして扱っている。そのため、本モデルにおける二方向性反射特性は、専ら入射と反射の角度 $(\theta_s, \phi_s, \theta_o, \phi_o)$ によるセンサ視野内における各カテゴリの割合の変化に起因するものとしている。

I .3.4 シミュレーションの樹木配置について

本節では BRF シミュレータ内の仮想空間に樹木を配置する方法について検討した結果について述べる。森林の 3 次元構造を反映した太陽光の散乱特性をシミュレートする際に、仮想空間内にどのような樹木をどう配置するかによって、当然ながらシミュレーションの結果は異なってくる。

一定の立木密度の閉鎖樹冠林を構成するとしても、格子状に樹木配置する方法、現実の森林のプロットに従って配置する方法などが考えられる。本節ではこれらについて検討した結果について述べる。

(1) 格子点配置の検討

もっとも簡単な方法は格子状に配置する方法であるが、これにはセンサ観測方向から見た場合の樹冠、林床の面積比が連続的に変化しないという欠点がある。図 4.1.17 は南北・東西方向に格子状に配置した樹木を太陽天頂角 30° 、センサ方位角 0° (a)、 30° (b)、から見た場合のシミュレータの出力画像である。なお、ここで示すシミュレーションの例は先に説明したとおり太陽方位角は 0° 固定である。従って常に相対方位角とセンサ方位角は等しい (RA=SEA)。

この図の(a)の青い部分は林床を示している。ここで見えている林床は(b)に示すようにセンサ方位角が 30° になると完全に見えなくなる。実際の森林ではこのような現象は一般に起

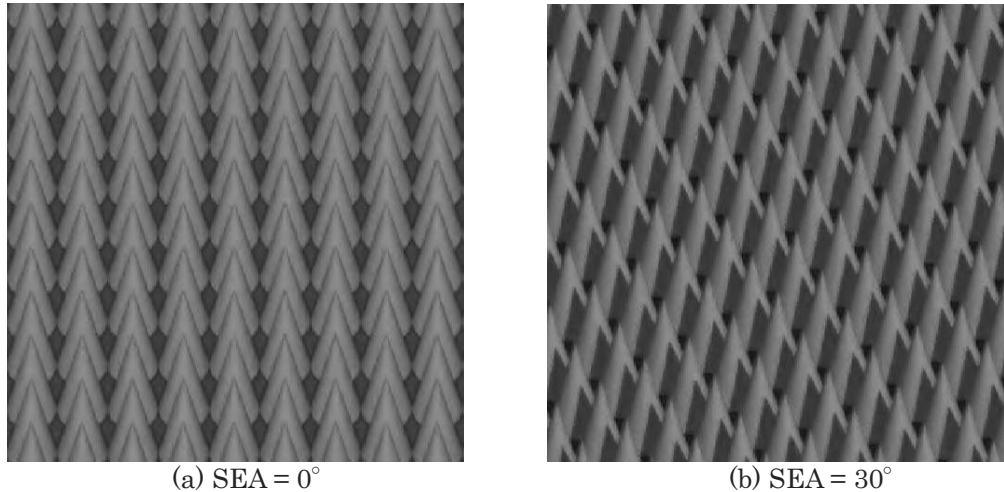


図 4.1.17 格子状配列で樹木を配置した例。

こらないと考えられるため、反射特性の方方位角依存性を検討するためには不適切であることが予想される。実際に格子点配置のシミュレーションを行った場合の結果を図 4.1.18 に示す。太陽天頂角(SOZ) 30° 、センサ観測角(SEZ) 0° 、 20° 、 40° 、 60° のときの近赤外反射率のセンサ方位角(SEA=RA)による反射率の変化を示している。この図から、センサ天頂角が大きくなるにつれて、センサ方位角による反射率変化に不連続なところが見られるようになることが分かる。このとき、直達光の当たっている樹冠の画像中における面積比を調べると図 4.1.19 のようになる。この図から、樹冠の面積比の不連続な変化が、反射率の変化にそのまま反映していることが分かる。以上のことから、仮想空間に対して樹木を整列配置することは、BRF シミュレーションの結果に非現実的な効果を与えることがわかる。従って樹木の配置手法として整列配置は適切ではないと言える。

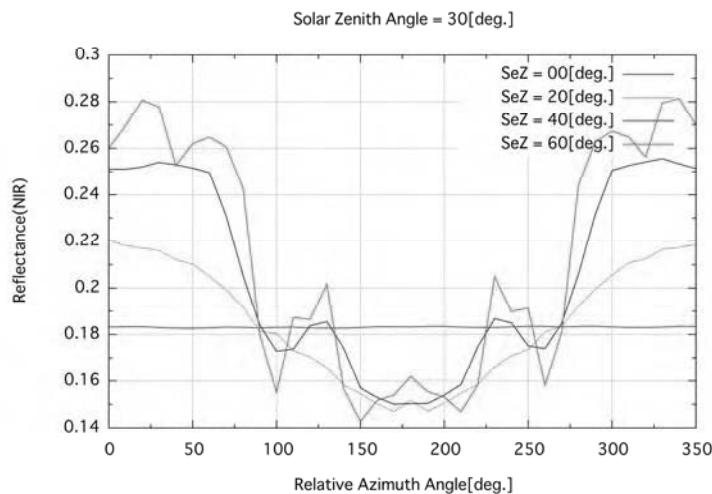


図 4.1.18 樹木を整列配置した場合の BRF シミュレーション結果（センサ天頂角、センサ方位角による近赤外の反射率変化。）

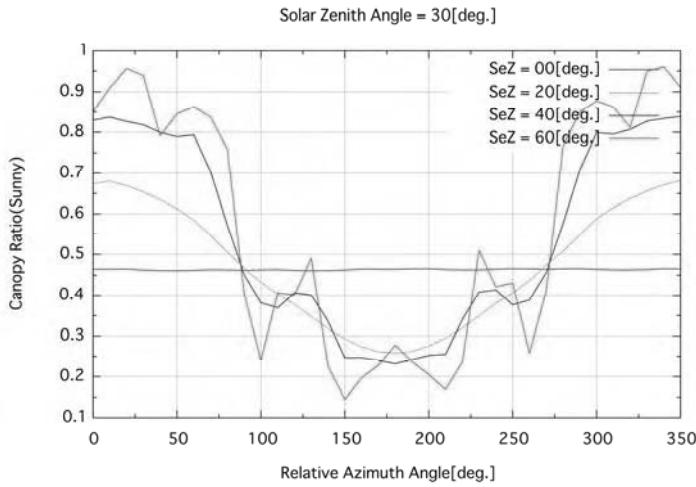
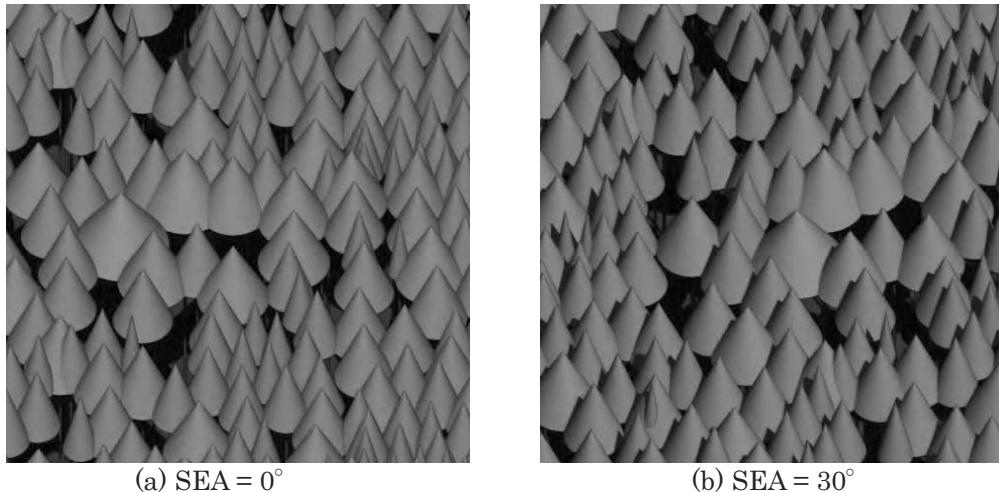


図 4.1.19 センサ天頂角、センサ方位角による直達光照射樹冠の面積比変化

(2) 現実の森林プロットによる配置の検討

RC ヘリコプター観測によって取得した森林の画像から実際の森林の樹木プロットを作成し、それを仮想空間内に配置する方法が現状でもっとも現実的な手法と考えられる。ここでは、2002 年 7 月 18 日に奈良県吉野の杉林で取得したヘリ取得画像から得た樹木配置でシミュレーションを行った結果について述べる。



(a) SEA = 0°

(b) SEA = 30°

図 4.1.20. 格子状配列で樹木を配置した例

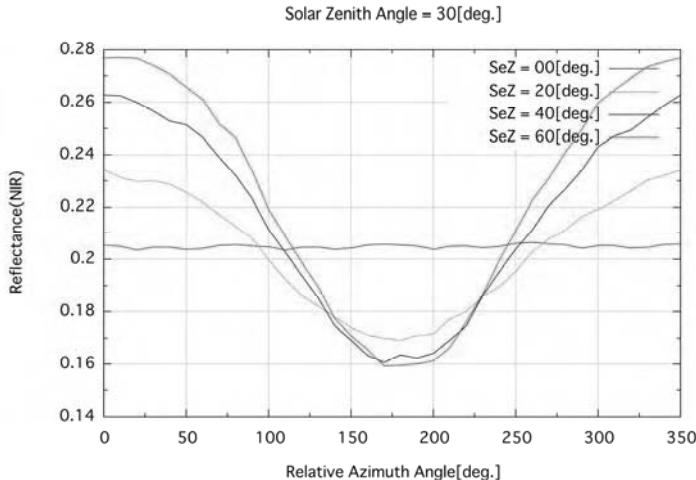


図 4.1.21 現実の森林プロットにから樹木を配置した場合の BRF シミュレーション結果（センサ天頂角、センサ方位角による近赤外の反射率変化。）

図 4.1.20 は上述の樹木配置を仮想空間上に再現したときのシミュレータの出力画像である。この図では林床の一部が影になっているため、青と黒（樹冠に投影された影を除く）の部分が林床を示している。図 4.1.17 に示した整列配置のときとは異なり、林床の面積比はセンサ方位角が異なっても両者で大きな違いは認められない。図 4.1.21 に示すように、近赤外領域におけるシミュレーション結果は、格子点配置のときとは異なり不連続な変化がない。このシミュレーション結果から、BRF シミュレータにおける樹木配置は RC ヘリコプターによって取得した現実のプロットを再現したもの用いるのが現状では最適であると判断できる。

I .3.5 シミュレーションを利用したバイオマス推定

本節では、これまで説明してきた BRF シミュレーションと実測に基づく森林構造モデルを併用した、カラマツ林のバイオマス推定について述べる。

I .3.5-1 森林構造モデル

若年の針葉樹林を除いて、一般に針葉樹の樹冠形状は図に示すように樹冠径（Crown Diameter）、樹冠深さ（Crown Depth）で決まる円錐形とみなすことができる。そして、最大効率で光エネルギーを取り込むように発達する森林の性質上、樹高（Tree Height）および胸高直径(DBH)と樹冠径（Crown Diameter）、樹冠深さ（Crown Depth）は互いに関連した値を持つようになる。

樹高と胸高直径が判明すれば、林分形数法によってバイオマスを推定することが可能である。したがって、樹高（Tree Height）および胸高直径(DBH)と樹冠径（Crown Diameter）、樹冠深さ（Crown Depth）の関係を明確にすれば、BRF に影響を与える樹冠形状とバイオマスを関連付けることができる。

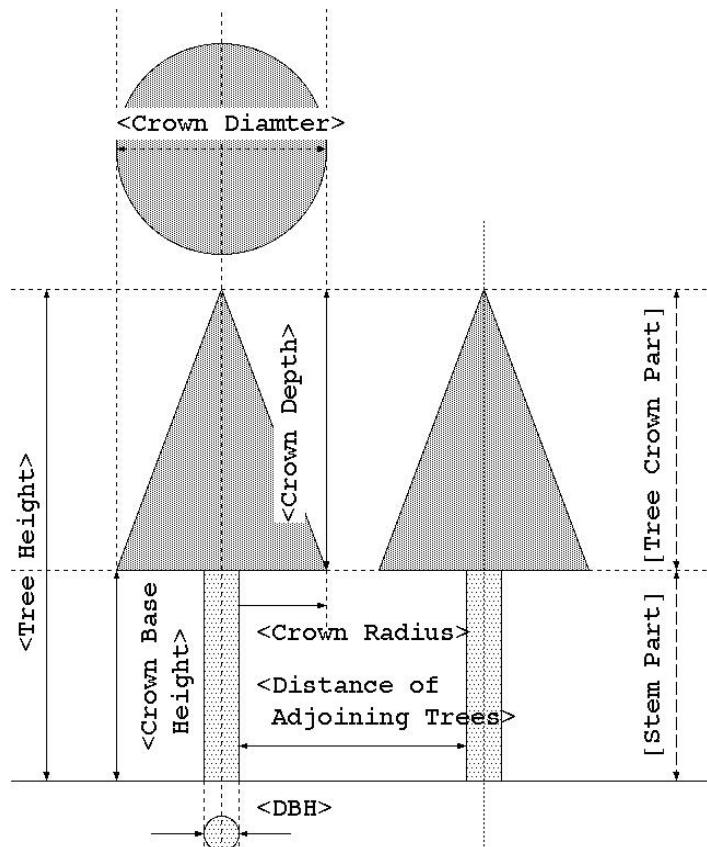
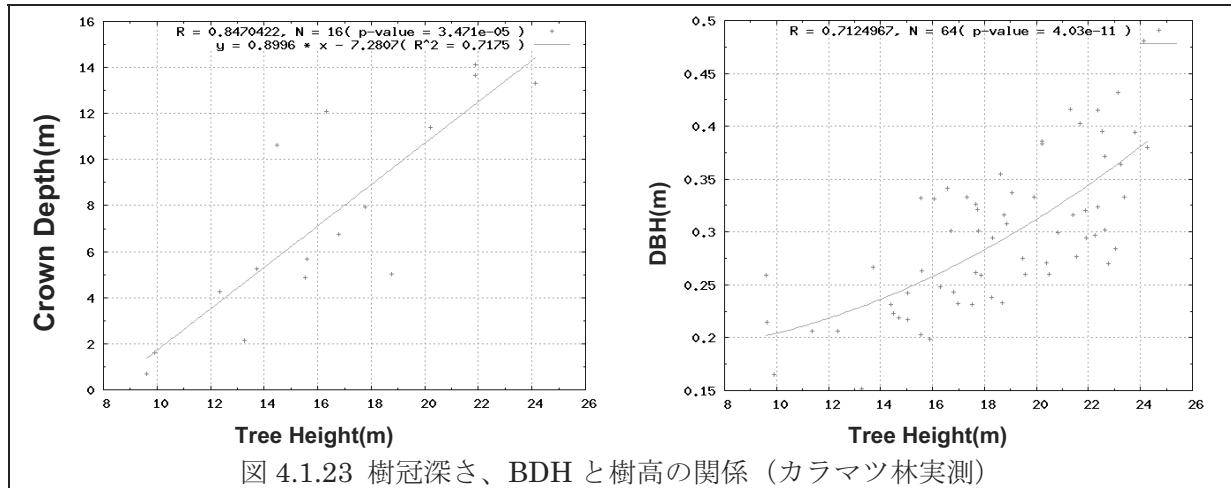


図 4.1.22 針葉樹の樹木形状パラメータ

山梨県八ヶ岳と北海道中標津のカラマツ林でこれらを実測した結果（一部を図 4.1.23 に示す）から、互いの関係を明らかにした。この結果から、あるバイオマス (t/ha) の森林における立木密度および樹冠深さ、樹冠径を求めることができる。BRF シミュレーションにおける仮想空間上の樹木形状は、ここで得られたモデルを使用している。



I .3.5-2 カラマツ林におけるバイオマス推定

I .2.1-2において、RC ヘリコプター観測で得られた BRF を検討した結果、直下観測と斜め観測の赤領域および近赤外領域の直交平面上でのプロットの遷移から、P1、P2、P3 という 3 つのパラメータを見出した。その後、これまで説明してきた BRF シミュレーションを実際のカラマツ林を対象に行なった結果、P1、P2、P3 は図 4.1.24 のように再定義したほうがよいことがわかった。これらの P1、P2、P3 を用いるとバイオマス推定式は式 4.1.8 に示すものとなる。

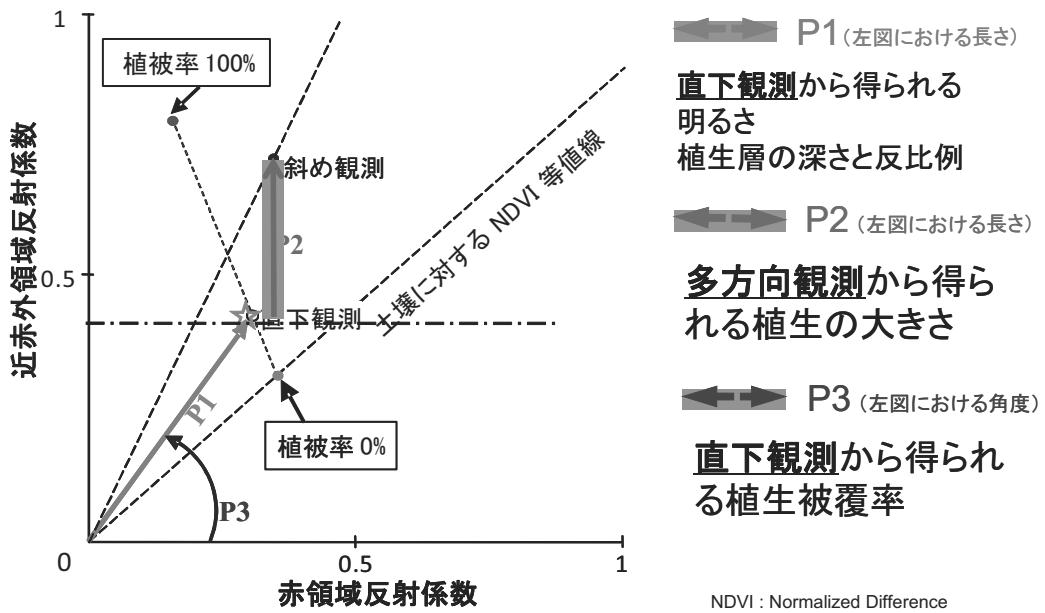


図 4.1.24 BRF から取得できるパラメータの意味

$$BM = C \cdot \left(\frac{P2}{P1} + 1 \right)^3 \cdot P3 \quad \dots \quad (4.1.8)$$

植生タイプに依存する密度に関する定数
植物のボリュームを示す
植物の被覆率を示す

ここで、BM はバイオマスを示す。C は植生タイプによって異なる定数である。

この推定式をカラマツ林に適用した結果を表 4.1.2 に示す。

推定式の適用に際して C を決定する必要がある。C の決定は、実測によって得られたバイオマスと BRF シミュレーションによって得られた P1、P2、P3 から式 4.1.8 を用いて求めた。その際 2007 年の実測値を使用したため 2007 年のシミュレーションによる推定値は表中で※として除いている。また、MODIS センサデータの解像度が 500m であることから、1km 以上の広がりをもたない中標津のカラマツ林では衛星データによる評価を行っていない。

この結果から、人工衛星を用いた多角観測データを用いて、閉鎖樹冠のカラマツ林のバイオマスを推定した場合、35%から 45%の誤差でバイオマス推定が可能であることがわかった。

表 4.1.2

	北海道中標津 カラマツ 若年林	北海道中標津 カラマツ 非閉鎖樹冠林	ハケ岳カラマツ 閉鎖樹冠林 (2000 年)	ハケ岳カラマツ 閉鎖樹冠林 (2004 年)	ハケ岳カラマツ 閉鎖樹冠林 (2007 年)
衛星による推定値 (MODIS センサ) (t/ha)			236	252	272
現地調査による 実測値 (t/ha)	29	96	162	187	202
誤差	—	—	47%	35%	35%
シミュレーションによる推定値	26	105	175	187	※

I.4 樹冠形状実測システムの開発

前項 I.3において、BRFシミュレーションを併用した多方向観測衛星データによるバイオマス推定が可能であることを実証した。そこで用いたBRFシミュレーションにおいて、樹冠モデルを単純形状のモデルとしたが、更なる精度向上を実現するためには、現実の樹冠形状をさらに分析する必要があると考えられる。そのためには、従来の単純形状モデルの各パラメータを林床から個々の樹木について計測することに換えて、RCヘリコプターを用いた直接的な樹冠形状計測が有効であると考えられる。上空からの形状実測を行なうことで、単純形状モデルと現実の樹冠形状のギャップ（特にカゲの面積比の角度依存性）をより精密に分析することが可能になるためである。

ここでは、RCヘリコプターにレーザースキャナを搭載して上空から樹冠形状を行なうためのシステム開発と計測結果について述べる。

I.4.1 構築した樹冠形状計測システム

開発した観測機材の概観を図 4.1.25 に、観測機材の構成図（一部 RC ヘリコプター、基地局の要素を含む）を図 4.1.26 に示す。RC ヘリコプターは上空を飛行して観測を行うという遠隔制御のプラットフォームであるため、これに搭載する観測機材は、自動で観測対象のデータの取得が可能であることが求められる。本研究で用いた観測機材は、レーザースキャナ、ジャイロセンサー、ビデオカメラ、分光放射計に関してはライト直前に連続データ取得状態にする。デジタルカメラに関しては、後述する観測機器諸元で詳しく述べるが、コンパクトフラッシュにデータを保存するために、撮影枚数が限られる。よって、効果的にデータ取得を行うために、RC ヘリコプターが観測対象上空に移動したときにデータ取得開始出来るように、データ取得開始時を設定可能にした。

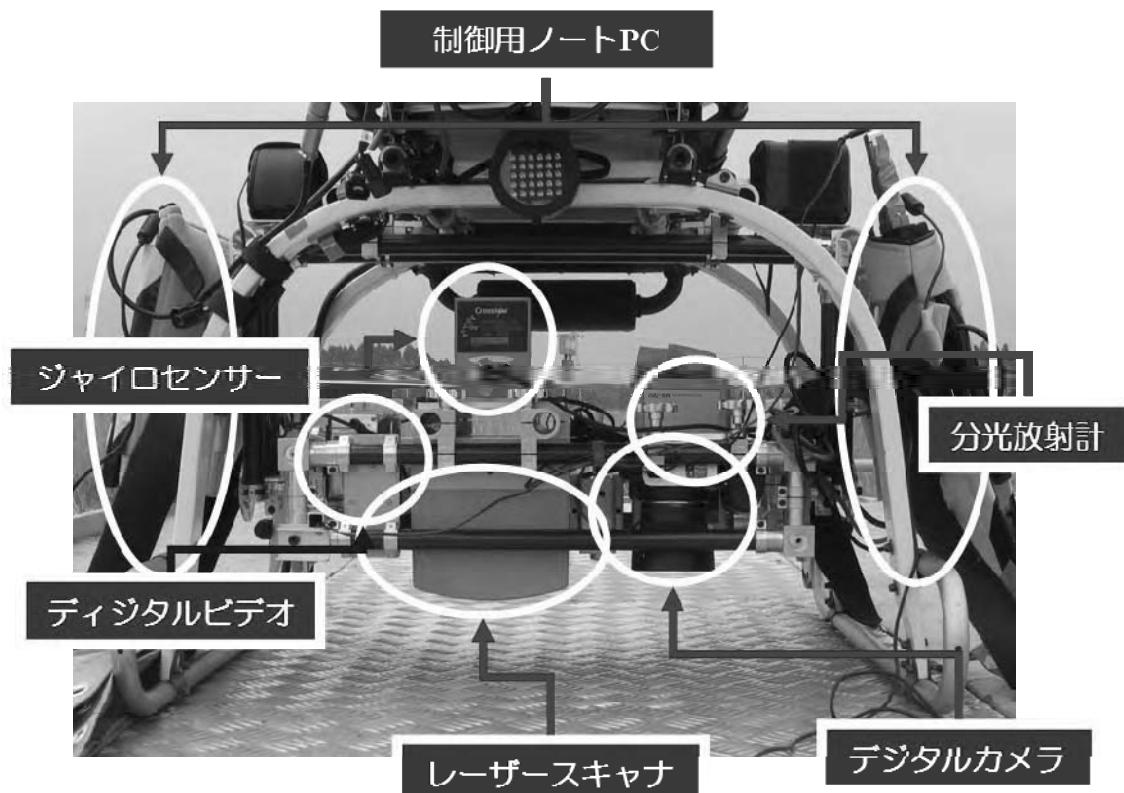


図 4.1.25 観測機材概観

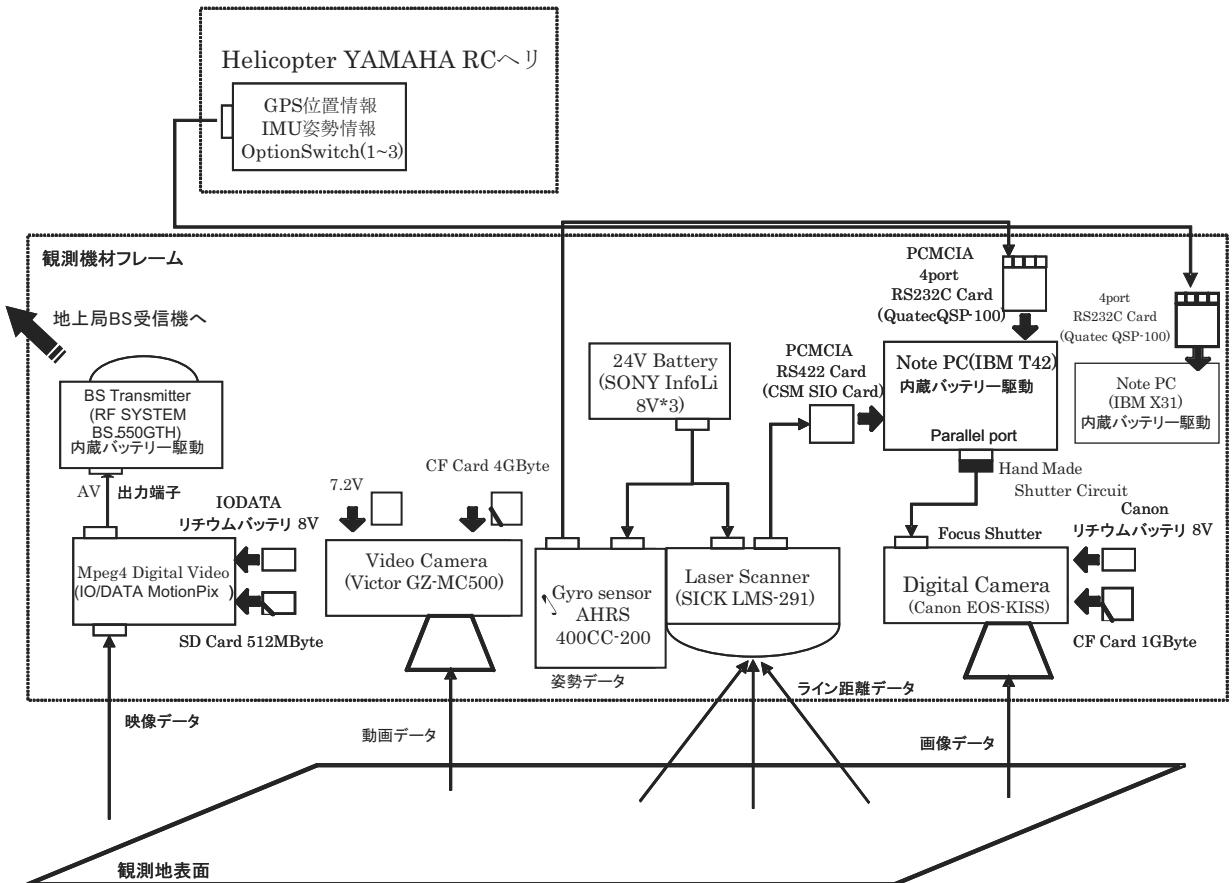


図 4.1.26 観測機材構成図

以下に観測機材に搭載されている各観測機器の詳細を示す。

フレーム部

各観測機器を支える骨組みに当たる部分である。軽量化・強度上昇のためにカーボンフレームとアルミ製の連結パーツを用いて製作されている。振動を軽減するアルファアゲルを介して、専用のアタッチメントによってRCヘリコプターの腹部に吊り下げられており、2名で取り付け、取り外しを行う。カーボンフレームの使用により、既存のアルミ材を中心とした観測機材より軽量化に成功している。フレーム単体の重さは2kg程度である。

雲台フレームはRCヘリコプターとの連結に用いる固定フレーム部分と、観測機器の角度を変更できる回転可能部分に分かれており、通常使用時には観測機器は直下を向いているが、必要に応じて機器の視野角を変更することができる。ただし、角度変更の作業はヘリ地上待機時にしか行なうことが出来ず、フライト中の視野角度は固定される。

電源系統

電源はRCヘリコプターより供給されるDC14V3Aを用いることも出来るが、RCヘリコプター本体からの電源供給はRCヘリコプター本体動作が必要な電源に負荷をかける。開発した観測機材では、ノートPC、BSトランスマッタは内蔵バッテリーを用い、デジタルカメラ、デジタルビデオは専用リチウムバッテリ、動作にDC24V電源が必要なレーザースキャナとジャイロセンサに関しては、自作バッテリーボックスより供給している。このバッテリーボックスは、SONY社製のバッテリーボックスを改造したもので、本来は8Vリチウムイオン3つを並列に配列していたのを直列に変更することで、DC24V供給を可能にしたもので、車載24Vバッテリーなどに比べて使用時間は短くなるが、軽量化に成功している。重量は1kg程度である。

観測機材制御用 PC

IBM 社製のノートパソコン T42 と X31 を用いている。T42 には PCMCIA カードスロットが 2つあることを利用し、PCMCIA 規格の RS232C の 4 ポートシリアルインターフェースカードと RS422 インターフェースカードを装着することで、制御に必要な入出力ポート数を満たしている。また、X31 は主に RC ヘリコプターからのデータ受信に使用する。制御プログラムは C++ 言語を用いて構築し、GUI 化を行うことにより、操作に熟練していない人でも扱いやすいシステムにしている。飛行中は RC ヘリコプターから機体の GPS 座標や姿勢の情報、GPS タイム（GPS 起動開始からの合計時間）を常に受け取っている。

レーザースキャナ

ドイツ SICK 社製のレーザースキャナである LMS291(図4.1.27 参照)を用いている。LMS レーザースキャナは非接触アクティブ型の測定システムで、905nm の近赤外域の光を発射し、レーザー光のパルス伝播時間測定 (Time of flight) の原理で距離を測定する。レーザーは、内部の回転ミラーで方向を変え、周囲のエリアを 2 次元的に $0^\circ \sim 180^\circ$ の範囲 (以降この測定範囲をラインと呼ぶ) で、 0.5° ごとにスキャンしている(図4.1.28 参照)。

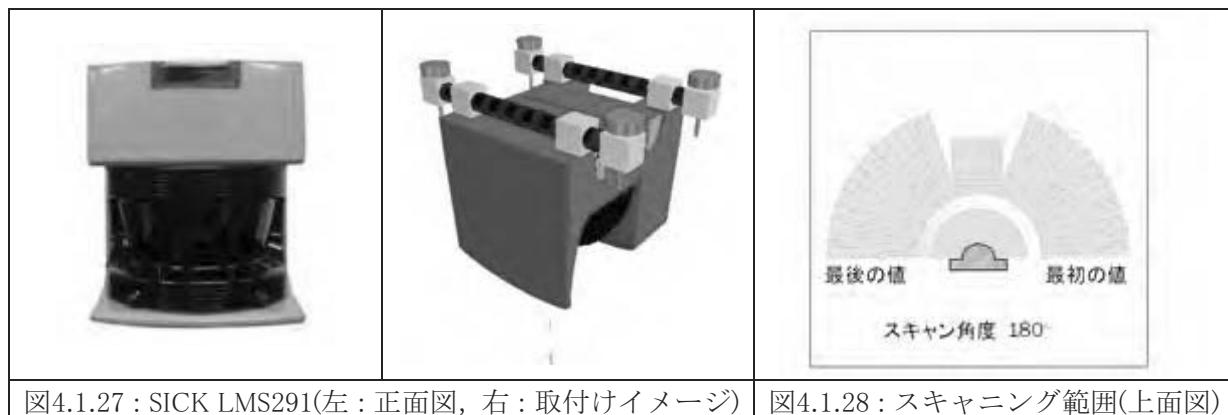


図4.1.27 : SICK LMS291(左 : 正面図, 右 : 取付けイメージ)

図4.1.28 : スキャニング範囲(上面図)

本来の SICK LMS291 は、衝突検出などに用いるため、光学系を保護するために前面カバーが金属製の硬度の強い物が用いられている。しかし、本研究の用途では、前面カバーにそれほどの硬度を必要としないため、FRP 樹脂で作成したカバーに換装することで、軽量化を行っている。計量化後の重量はケーブル等も含め、3kg 程度である。

ビデオカメラ

Victor 社製のハードディスクムービー、GZ-MC500 を用いた。従来のビデオカメラはテープにデータを記録し、後にエンコードする必要があったが、このカメラは MPEG2 フォーマットにて動画を記録できるため、データ処理が容易に行える。データの記録には、2GByte、もしくは 4GByte の CF カードを使用し、4GB のカードに約 90 分の動画を保存することができる。フライト時間が長くても 40 分という事を考慮すると、十分な記録可能時間である。ビデオカメラ以外の機器は、ノート PC により制御され、データ取得時間を管理しているためデータの同期が容易に行える。しかしビデオカメラはノート PC で制御できないため、他の機器と同期を取る手法を考案する必要がある。この手法については後述する。

デジタルカメラ

Canon 社製の一眼レフタイプの有効画素 630 万画素デジタルカメラ EOS-Kiss Digital に 35mm レンズを取り付けたものを用いる。このカメラは、Canon 独自形式である可逆圧縮の CRW 形式によって劣化のないデジタル画像を取得することができる。データの保存には 1GByte の CF カードを使用し、1GB のカードに約 120 枚の画像が保存することができる。観測時には制御 PC から電気信号を送り、自作のレリーズ回路を介することでシャッタ

一を切ることができる。重量は、カメラ本体とレンズをあわせ 1kg 程度である。

ジャイロセンサ

アメリカ Crossbow 社製の AHRS400CC-200 を用いた。これは 3 軸の加速度センサと 3 軸の角速度センサを用いており、システムの姿勢を計測可能である。また、 $\pm 2.5^\circ$ の精度にて測定レートは約 18Hz で姿勢角を取得できる。レーザースキャナの姿勢をより正確に取得するために、レーザースキャナの鉛直上に取り付けてある。重量は、ケーブルをあわせ 1kg 程度である。

分光放射計

英弘精機社製 MS720 を用いた。乾電池駆動のハンドヘルド設計であり、液晶モニタも搭載しているため、野外における各種の分光測定を容易に行うことができる。この分光放射計は 350~1,050nm の波長域を観測し、植生観測において重要な近赤外域も観測可能である。また、重量は 800 g 程度である。

観測状況モニタシステム

フレーム中央部に取り付けられた I/O DATA 社製小型ビデオカメラ Motion Pix により、デジタルカメラがとらえている範囲の映像を得る。この映像はデジタルビデオカメラに録画(Mpeg4 形式, 512MByte SD カードに記録)されるとともに、BS トランスマッタ送信機によって地上へと伝送され、基地局側で BS 受信機とテレビモニタを用いて確認することができる。デジタルビデオカメラと BS トランスマッタ及び接続ケーブルをあわせて、1kg 未満の重量である。

表 4.1.3 に観測機材の諸元を示す。

表 4.1.3 : 観測機材の諸元

観測機材 制御用 PC	IBM 社製 ノート PC T42	
	CPU/HD/Memory	Pentium M 735(1.7GHz) / 40GByte / DDR 512MByte
	PCMCIA Slot1	RS422 IF Card(独 CSM 社 SIO Card)
	PCMCIA Slot2	RS232C 4 ポート IF Card (独 Quatech 社 QSP-100)
ヘリとの通信	パラレルボード	自作シャッター回路を接続
	受信項目	GPS 座標, 標高, 姿勢情報, 速度 等
	受信周期	100ms/回 (10Hz)
レーザースキャナ	データ転送	RS232C 9600bps
	独 SICK 社製 LMS291	
	測定可能距離	80m(有効距離 <60m)
	レーザー波長	905nm
	測定範囲	$0^\circ \sim 180^\circ$
	測定間隔	0.5° (1.0° , 0.25° も選択可能)
	測定周期	50ms/line(20Hz)
ビデオカメラ	データ転送	RS422 500kbps
	Victor 社製 GZ-MC500	
	撮像素子	1/4.5 型 CCD133 万画素×3
	動画サイズ	720 × 480 pixel
	動画記録方式	MPEG-2 PS
	記録メディア	CF カード 2GByte, 4GByte
	レンズ	35mm 換算 46.2mm~462mm
視野角		39deg

		Canon 社製 EOS-Kiss Digital
デジタルカメラ	撮像素子 量子化 記録メディア 記録フォーマット 使用レンズ 視野角 フォーカス シャッター	有効 630 万画素 CCD(3072×2048pixel) 36bit フルカラー (RGB 各色 12bit) CF カード 1GByte CRW (Loss less 圧縮 Canon 独自 Format) 約 6MB 35mm Canon EF レンズ 30deg(35mm レンズ) オートフォーカスおよびマニュアルフォーカス パラレル制御 (電子スイッチングリリーズが使用可能)
		米 Cross Bow 社製 AHRS400CC-200
ジャイロセンサ	測定可能範囲 動的精度 解像度 測定周期 データ転送	Roll: ±180° Pitch: ±90° 2.5° <0.1° 55ms/回(18Hz) RS232C 38400bps
		英弘精機 MS720
分光放射計	波長範囲 波長分解能 波長精度 開口角	350～1,050nm 10nm <0.3nm 180 度と 90 度 (オプション 45 度)
観測状況 モニタシステム	ディジタルビデオ カメラ	I/O DATA 社製 Motion Pix (Moeg4 形式, 512MByteSD カード記録)
	BS 送信機 BS 受信機	RF SYSTEM 社製 BS トランスマッタ BS-550GTH RF SYSTEM 社製 16ch チュナー内蔵 TFT モニタ TP-6R

前述したビデオカメラと他の機器との同期の方法だが、デジタルカメラのシャッターを切るために利用しているパラレルポートからの電圧を利用して、LED を点滅させ、それをビデオカメラに写すという方法を考案した。LED が点滅する時間、すなわちデジタルカメラが撮影した時刻をスキヤナデータに書き込む。スキヤナは 20Hz でデータ取得を行っているため、理論的に 0.05 秒の精度でレーザースキヤナとビデオの同期が可能となる（図 4.1.29）。

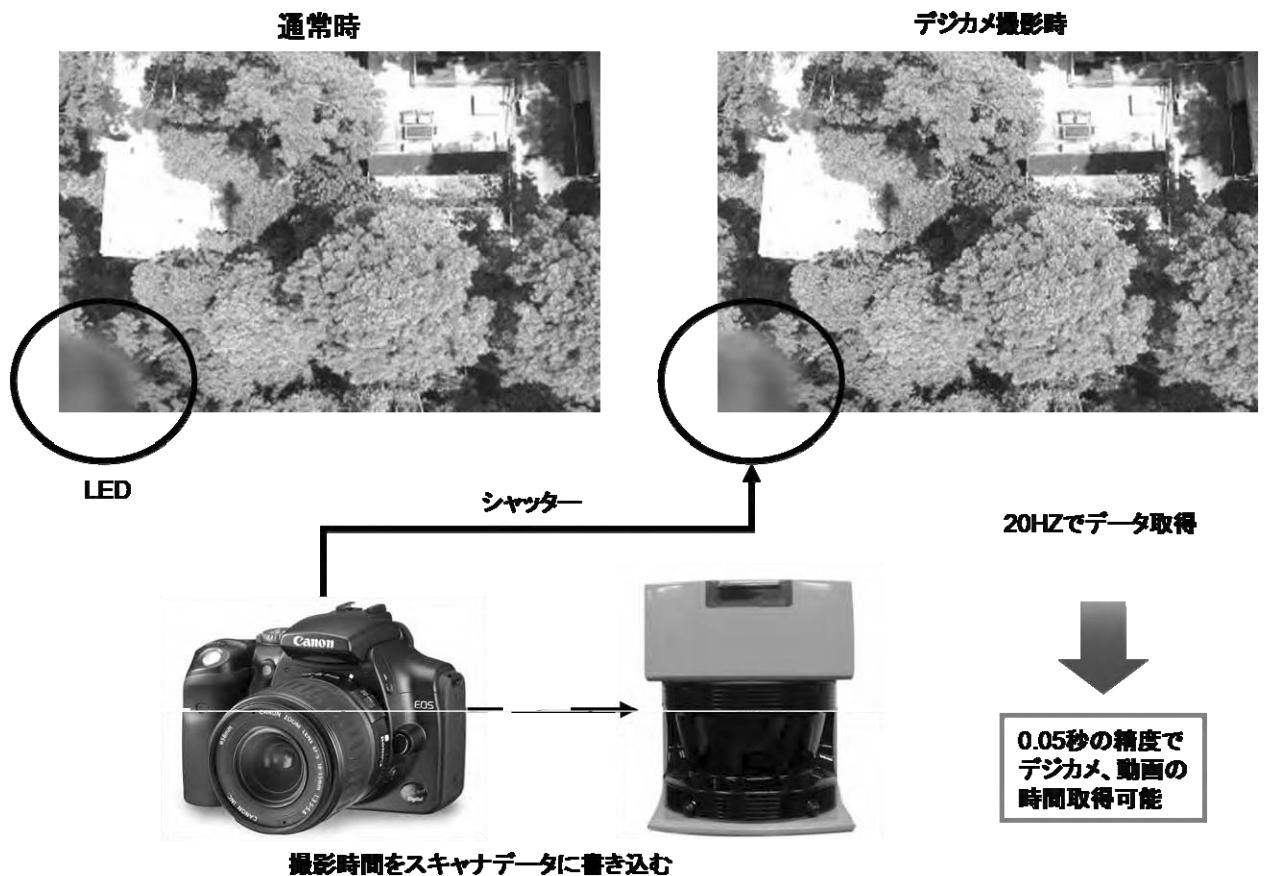


図4.1.29 動画時間同期概念図

LEDが写っている領域の各画素RGB値のうち、Rの加算を行い、前フレームとの差分を取り、領域内のREDの合計の差分が閾値を超えたときにLED点灯フレームと判定する（図4.1.30）。



図4.1.30：LED点灯フレーム－点灯前フレーム差分画像

I.6 構造取得アルゴリズム

観測によって取得されたデータから、形状データを取得する流れを、以下の4つの手順に分けて順に説明する。

- (1) レーザースキャナの計測位置をプラットフォーム(RCヘリコプター、モノレール)の位置および・姿勢データを用いて取得する。
- (2) レーザースキャナの計測位置に対応したビデオカメラの各フレームを決定する。
- (3) 計測位置・姿勢情報を元に、レーザースキャナの角度ごとの距離データを地上座標系にプロットする。
- (4) ビデオカメラの各フレームから、レーザースキャナでの計測地点を抽出する。
- (5) (1)～(4)の処理をすべての計測データ分繰り返しおこない、観測域の構造データを取得する。

手順 (1) : RCヘリコプターの計測位置取得

RCヘリコプターの位置データは100[ms]に1回取得されているのに対し、レーザースキャナの1ラインデータは、50[ms]に取得されているため、レーザースキャナの計測位置を求めるために、両者共通の時間として記録しているGPSタイムを用いて位置データを補完する必要がある(図4.1.30)。RCヘリコプターは低速(秒速50cm以下)かつ安定速度で移動しているため、微少時間変動での位置・姿勢変動は線形とみなして補完を行う。また、ジャイロセンサによる姿勢取得は55[ms]のため、同様に補完を行う。

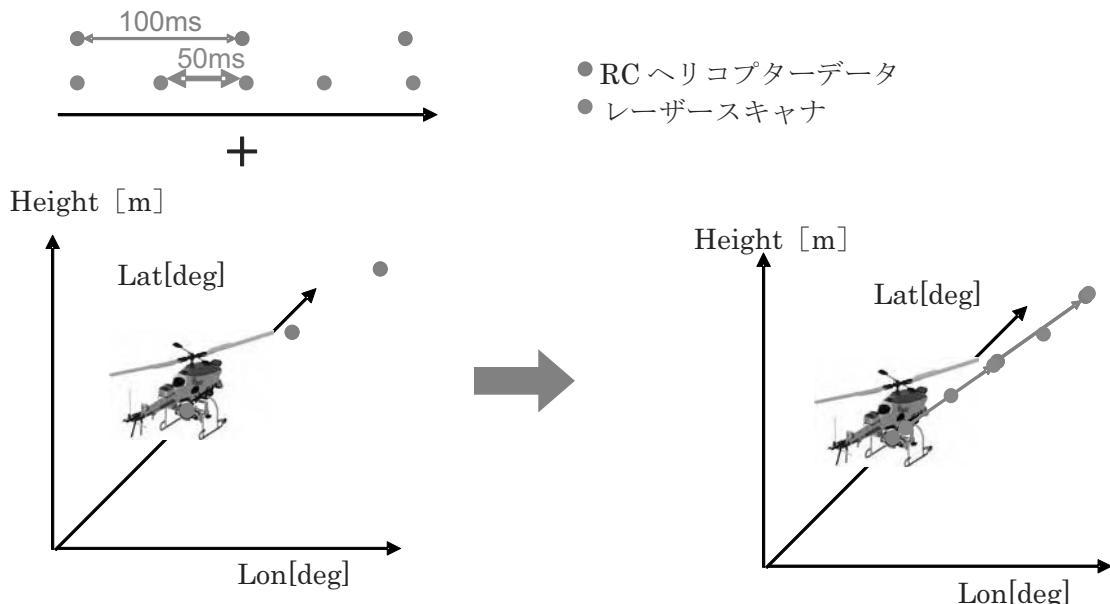


図4.1.31 計測位置補完

また、RCヘリコプターの緯度・経度・高度データを同一座標上で評価するために、ヘリポートを基準点としたセンチメートル単位の地上座標系に変換する(図4.1.31)。この処理は、RCヘリコプターの取得する位置情報(緯度・経度)は角度単位で記録されているのに対し、高度はメートル単位で記録されており、評価単位の統一が必要なため行われる。センチメートル単位を用いるのは、レーザースキャナの解像度、及びヘリの位置精度がセンチメートル単位であることを理由としている。なお、X軸は東を正とする東西方向を、Y軸は北を正とする南北方向とする。Z軸はヘリポート高度を基準とした相対高度とする。

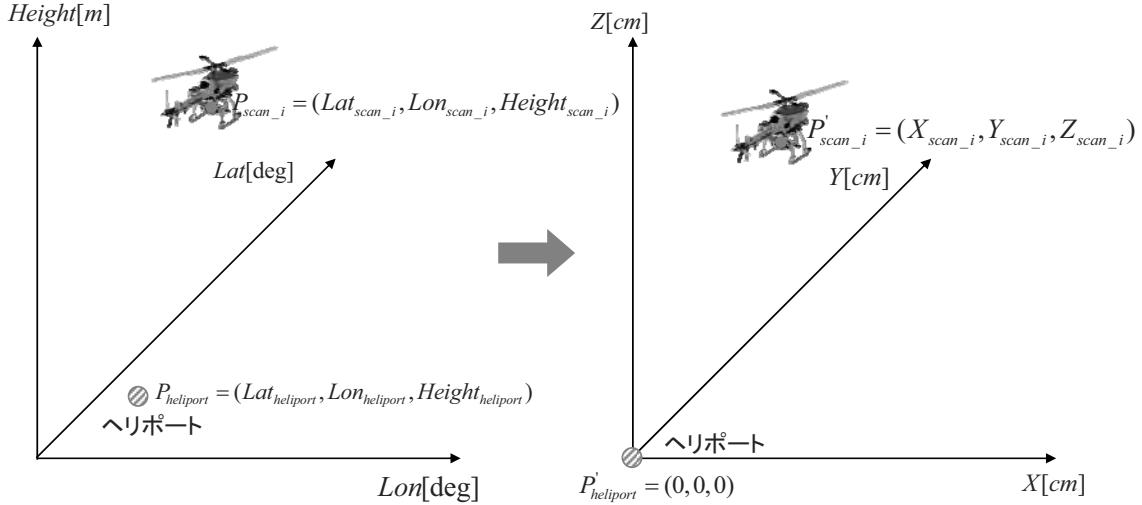


図 4.1.32 ヘリポート基準地上座標系への変換

具体的な処理は、ヘリポートの位置 $P_{heliport} = (Lat_{heliport}, Lon_{heliport}, Height_{heliport})$ (Lat : 北を正とする緯度[deg], Lon : 東を正とする経度[deg], $Height$: 標高[m]とする。) に対して、レーザースキナの計測位置を $P_{scan_i} = (Lat_{scan_i}, Lon_{scan_i}, Height_{scan_i})$ としたとき、ヘリポート位置を基準点とする地上座標系 P' は、それぞれ、

$$P'_{heliport} = (0, 0, 0), \quad P'_{scan_i} = (X_{scan_i}, Y_{scan_i}, Z_{scan_i}) \quad (4.1.9)$$

で表される。ただし、

$$\begin{aligned} X_{scan_i} &= EARTH * (Lon_{scan_i} - Lon_{heliport}) \\ Y_{scan_i} &= EARTH * \cos(Lat_{heliport}) * (Lat_{scan_i} - Lat_{heliport}) \\ Z_{scan_i} &= Height_{scan_i} - Height_{heliport} \end{aligned} \quad (4.1.10)$$

である。ここで $EARTH$ は、ヘリポート位置での角度 1 秒あたりの弧線長(単位 : cm)で、

$$EARTH = a * (1 - f * \sin(Lat_{heliport})) \quad (4.1.11)$$

で計算される。 a は地球の長半径(赤道地点の半径)、 f は地球の扁平率で、RC ヘリコプターの DGPS 世界測地系(WGS-84 座標系)で用いられる測地基準系 1980(GRS80 檜円体)に準拠した、

$$\begin{aligned} a &= 637813657.2[\text{cm}] \\ f &= 1/298.257222121 \end{aligned} \quad (4.1.12)$$

を用いている。

手順 (2)

ここでは、レーザースキナの各スキャンラインと、対応する動画のフレームを決定する。まず、スキナが計測しているラインと、動画のフレームとの同期を行う。2-4 節で述べたように、動画の端には L E D を設置し、LED が点滅したときの時間をスキナのデータに書き込んでいる。これによって、点滅したときのフレームとスキャンラインの同期を取ることが可能になる。次に、点滅フレーム間、同期を取ったスキナライン間で、各スキナラインに、近傍のフレームを対応させる(図 4.1.32)。スキャンラインは全て使用するが、動画は、スキャンラインに対応するフレームのみ用いる。

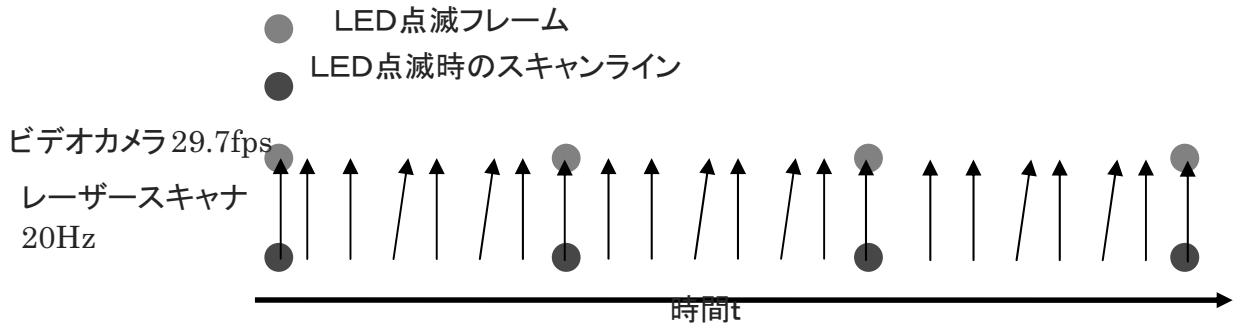


図 4.1.32 レーザースキャナと動画の同期

手順 (3)

ここでは、手順 (1) で求められたレーザースキャナの地上座標系上の計測原点 P_{scan_i}' から、スキャナの計測した距離 r_j (単位[cm])と角度 θ_j (単位[deg]または[rad])を元に、計測対象の地上座標系の点である $P_{i,\theta_j,r_j}' = (X_{i,\theta_j,r_j}', Y_{i,\theta_j,r_j}', Z_{i,\theta_j,r_j}')$ を求める(図 4.1.35)。このとき、計測原点の姿勢 Pitch, Roll(図 4.1.33 中 v 軸に対しての回転。一般的に左右方向の傾きを表す。図中計測原点から正の方向を向いて時計回りの方向の大きさを ϕ で表す。単位は[deg]または[rad])、Yaw を考慮する。

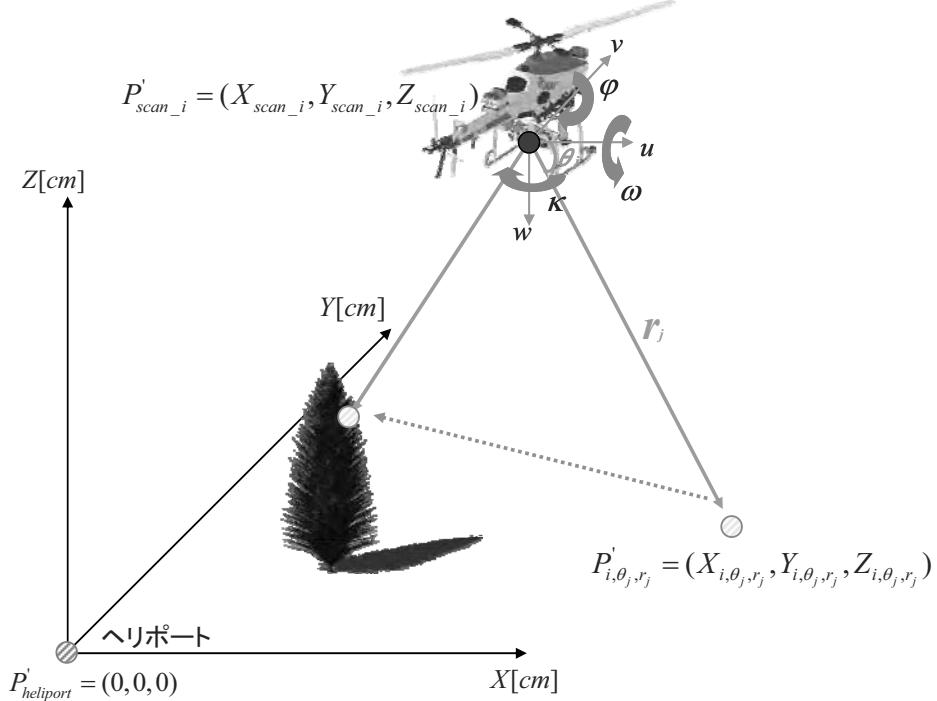


図 4.1.34 地上座標系変換

このとき、地上座標系における地上計測点 P_{i,θ_j,r_j}' は、回転行列 $R(\omega, \varphi, \kappa)$ を用いて以下のように算出される。

$$\begin{aligned}
P'_{i,\theta_j,r_j} &= \begin{pmatrix} X_{i,\theta_j,r_j} \\ Y_{i,\theta_j,r_j} \\ Z_{i,\theta_j,r_j} \end{pmatrix} \\
&= P'_{\text{scan_}_i} + r_j * R(\omega, \varphi, \kappa) \\
&= \begin{pmatrix} X_{\text{scan_}_i} \\ Y_{\text{scan_}_i} \\ Z_{\text{scan_}_i} \end{pmatrix} + r_j * \begin{pmatrix} \sin(\theta_j + \varphi) * \sin(\omega) * \sin(\kappa) + \cos(\theta_j + \varphi) * \cos(\kappa) \\ \sin(\theta_j + \varphi) * \sin(\omega) * \cos(\kappa) - \cos(\theta_j + \varphi) * \sin(\kappa) \\ -\sin(\theta_j + \varphi) * \cos(\omega) \end{pmatrix}
\end{aligned} \tag{4.1.13}$$

手順 (4)

ここでは、手順 (3) より得られた地上座標と、手順 (2) により得られたスキャナラインと対応するフレームを用いて、フレームより画像の抽出を行う。

動画の横の視野角が 39° という事を考慮し、スキャナが取得可能な $0^\circ \sim 180^\circ$ の範囲のうち、 $70.5^\circ \sim 109.5^\circ$ の範囲のデータを使用する（図 4.1.35）。また、範囲 39° の間には 79 点のスキャナでの計測地点があるのに対し、ピクセル数は 720Pixel である。よって、計測地点間のピクセルを有効に利用するために、計測地点間の地上座標を線形補完し、計測地点間のピクセルに割り当てる（図 4.1.36）。

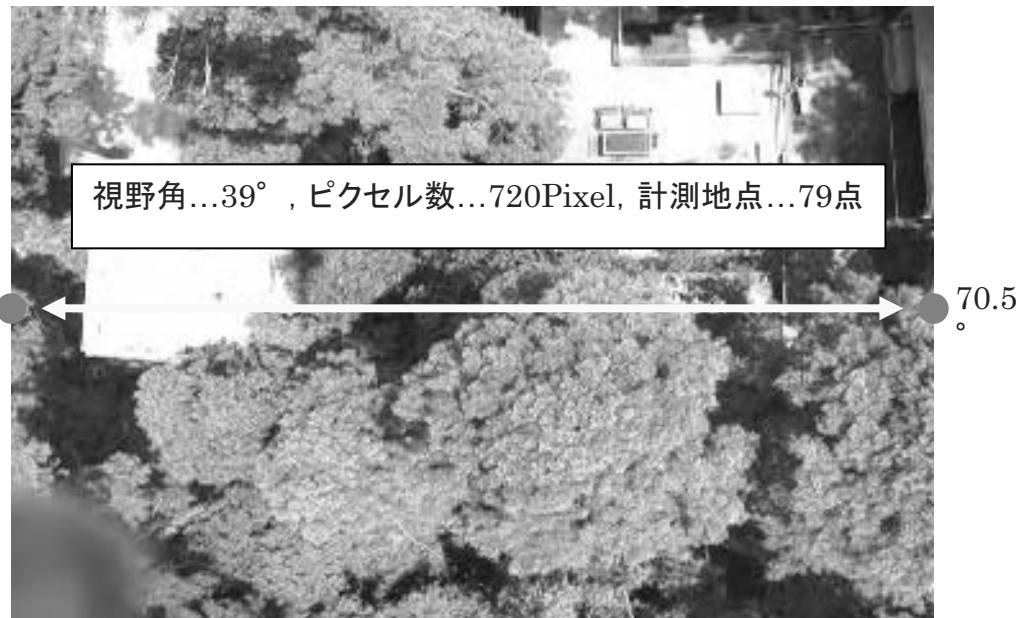


図 4.1.35 計測地点の動画への割り当て

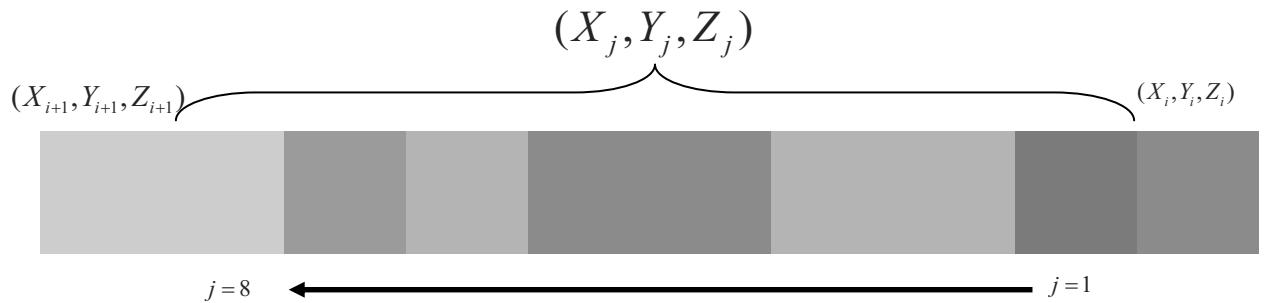


図 4.1.36 動画ピクセル間の補完

計測地点を (X_i, Y_i, Z_i) 、計測地点間のピクセルに対する地上座標を (X_j, Y_j, Z_j) ($1 \leq j \leq 8$) とすると、 (X_j, Y_j, Z_j) は、

$$\begin{pmatrix} X_j \\ Y_j \\ Z_j \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X_i \\ Y_i \\ Z_i \end{pmatrix} + j * \begin{pmatrix} X_{i+1} - X_i \\ Y_{i+1} - Y_i \\ Z_{i+1} - Z_i \end{pmatrix} / 9 \quad (4.1.14)$$

によって表すことが出来る。

手順 (5)

ここでは、すべての計測点に対してこの手順 (1) ~ (4) を繰り返し行う。地上座標系に計測地点をプロットし、計測地点の画像を動画の各フレームから抽出することで、観測対象の三次元構造データを取得することができる。

以下に、本システムで取得した樹冠形状データの三次元表示例を示す（図4.1.37）。

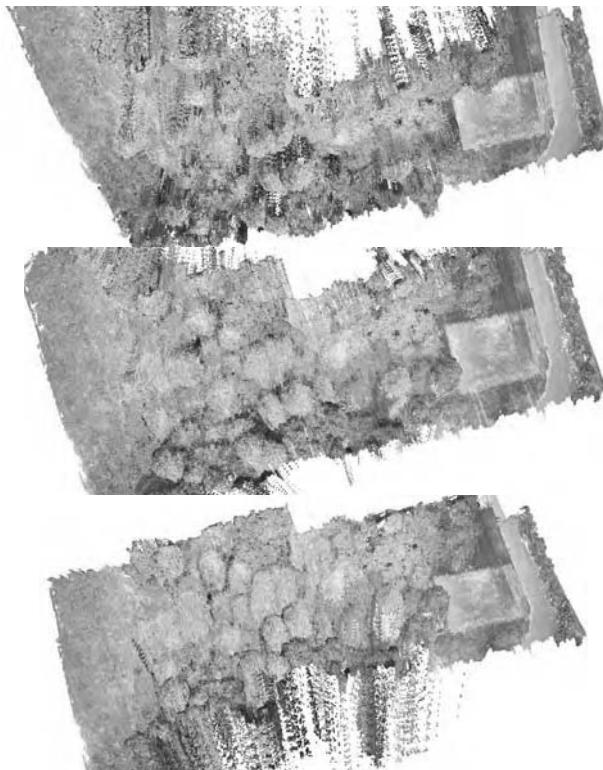


図4.1.37三次元表示例

II. カゲ指数 (SI)について

II. 1. カゲ指数開発の意義

広い領域で森林の植生状態を把握する手法として、人工衛星データを利用したリモートセンシング技術の活用が期待されているが、人工衛星で観測される反射スペクトルは地形効果、大気効果、カゲなどの影響を受けやすく、データ解析において、これらの影響を避けて通ることができない。特にカゲは、山や雲、建物や樹木などに遮られることによってできるごく通常的な自然現象であるが、その部分を補填することは極めて難しい。

ここで植生域にできるカゲについて考えてみることにする。まず、樹種（キャノピー形

状) の異なる植生帯では表層のカゲの面積(量)が異なっていると見なすことができる。すなわち、カゲの面積(量)がわかれば樹種分類に役立つと考えられる。次に、植物の生育・活性状況(質)が異なる植生帯について考えてみると、健全な樹林帯ではカゲの量が少ないので対し、枯れ木や倒木などを含む樹林帯ではカゲの面積(量)が増える。すなわち、カゲの面積(量)がわかれば、樹木の生育・活性状況(質)の把握が可能になると考えられる。また、カゲの面積(量)は林冠のギャップ変化の監視、草原と森林の境界の監視などにも役立ち、カゲの占有割合がわかれば、植生バイオマス推定の精密化、土地被覆分類の精度向上に貢献できると考えられる。

II.2. カゲ指数の開発

人工衛星で観測される反射スペクトルを形状と大きさに分離して考えてみる。スペクトルの大きさは地形の傾斜、日射量、入射角、反射角、標高、大気効果などの影響を受け、著しく変化するが、スペクトルの形状はあまり変動せず、ほぼ相似形とみなすことができる。この特性を利用し、反射スペクトルの総量で正規化する手法(正規化法)を開発した。これまでの解析結果から、正規化法には地形、大気、およびカゲの抑制効果があることが確認されている。そこで、このカゲの抑制効果を利用し、新しい植生指数であるカゲ指数(SI, Shadow Index)の開発に取り組むことにした。

カゲ領域を含む生データに対して、正規化処理を行うとカゲが抑制される。つまり、正規化前のデータはカゲありの状態であるが、正規化後のデータではカゲなしに近い状態に補正されることから、正規化によってカゲ情報が処理されたと考えられる。そこで、正規化前と正規化後の差データを用いてカゲ指数を開発することにした。

II.3. デジタルカメラデータでの解析結果

II.3.1 算出方法

まず始めに、デジタルカメラで撮影された画像データに対して、カゲ指数の算出を行った。以下にデジタルカメラデータに対する処理手順を述べる。まず、生データのカラー情報を画素ごとに3原色(R, G, B)に分離し、それぞれのデジタル値の相加平均を算出して、その値で(R, G, B)それぞれの値を正規化する。この正規化された(R, G, B)値と元の(R, G, B)値の差を用いて、カゲ領域を抽出する。ここでは抽出されたカゲ域に対し、ある面積内のカゲ被覆率を算出し、この値をカゲ指数とした。

II.3.2. カゲ指数の算出結果

図4.1.38にデジタルカメラで撮影された(a)針葉樹、(b)広葉樹、(c)牧草地の画像とその分類結果、およびカゲ指数の値を並べて示す。針葉樹ではカゲ指数の値が高く、広葉樹ではそれほど高くない。一方、牧草地ではカゲ指数の値が低い。また、カゲの分布状況を見ると、樹種によって違いがあることがわかる。

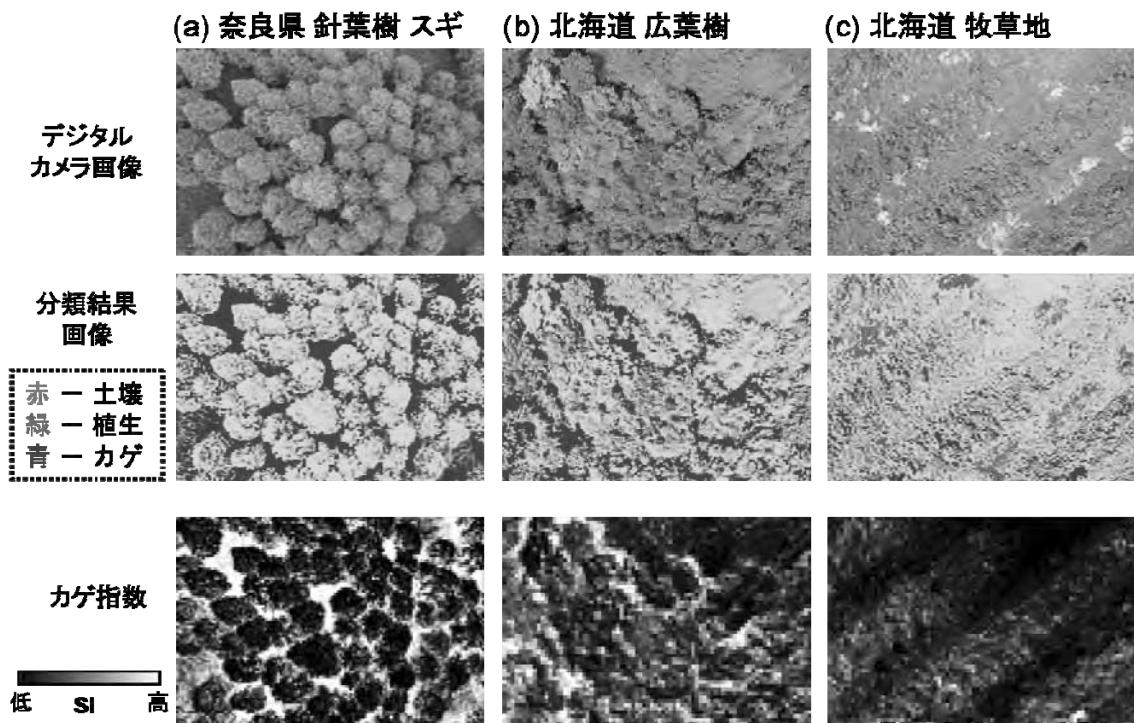
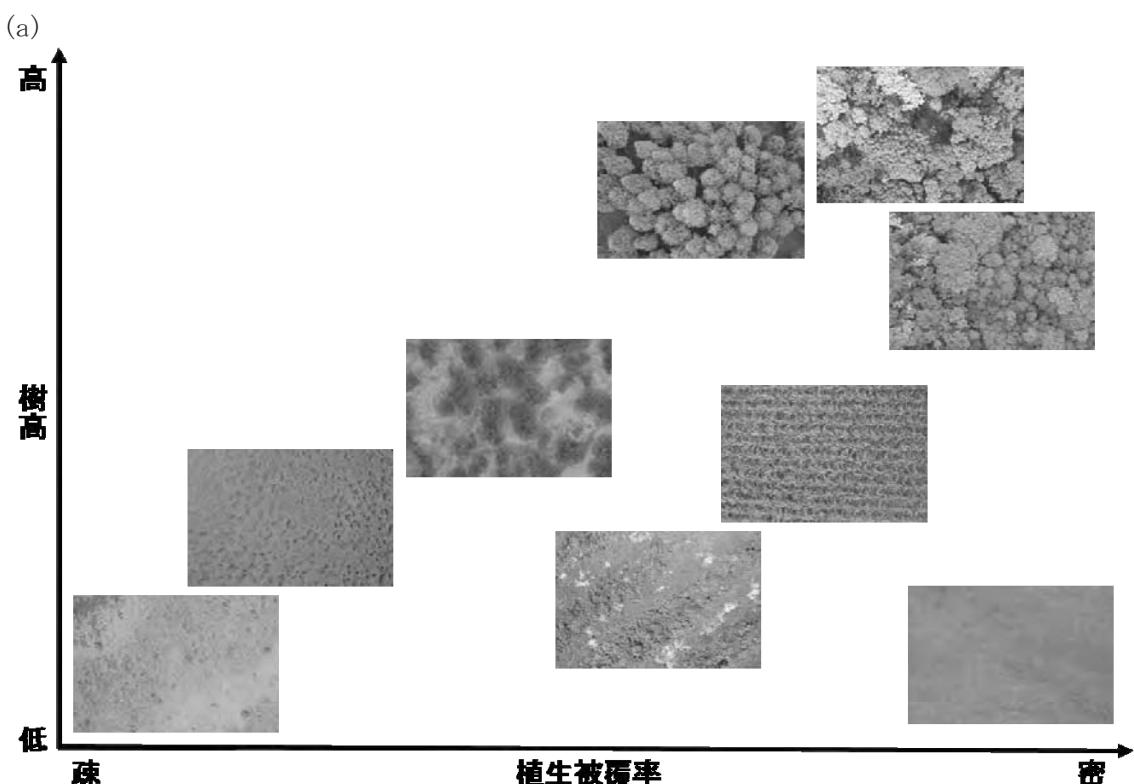


図 4.1.38 デジタルカメラで撮影された (a) 針葉樹、(b) 広葉樹、(c) 牧草地の画像とその分類結果、およびカゲ指数 (SI) の値。

図 4.1.39 は縦軸に植生の高さ（樹高）をとり、横軸に被覆率をとった図にそれぞれの画像を対応する位置に貼り付けたものである。カゲ指数はバイオマスが大きくなると高くなる傾向にあることが分かる。



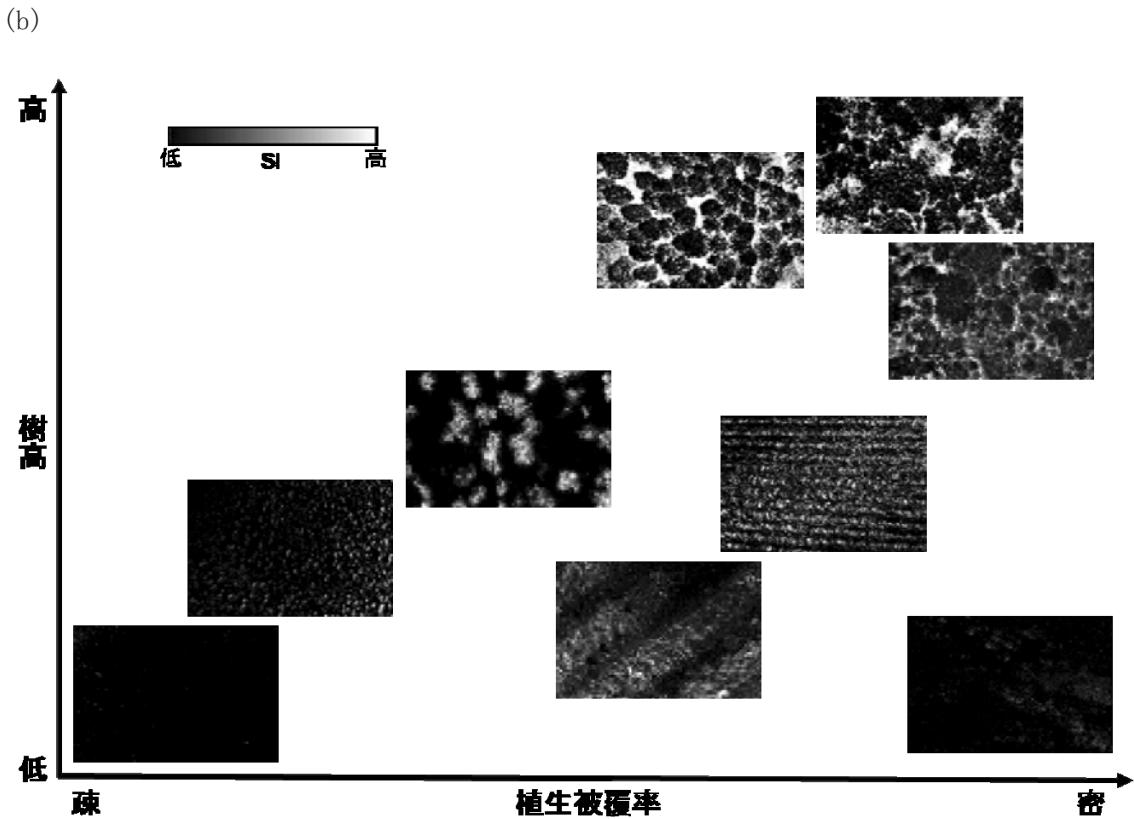


図 4.1.39 デジタルカメラで撮影された植生被覆率、樹種、樹高の異なる植生域の (a) 画像と (b) カゲ指数 (SI) の結果。

II.4. 人工衛星データへの適用

デジタルカメラで撮影された植生域の画像からカゲ指数を算出した結果、カゲの占める割合が把握できれば、樹種の違いや植物の生育・活性状況（質）が掴めるという感触が得られた。そこで、地上観測データから開発したカゲ指数を人工衛星データに適用し、指数の有用性について調べてみることにした。

II.4.1 算出方法の見直し

カゲ指数を人工衛星データに適用するにあたり、以下の二点について見直しを行った。

まず、デジタルカメラで撮影された画像データの解析では 1 画素毎にカゲ域であるか、ないかを識別してから、ある面積内のカゲ被覆率を算出し、この値をカゲ指数としていた。今後、高分解能に限らず、中・低分解能の人工衛星データを用いて広域での解析を行うことを考慮し、1 画素毎にカゲ被覆率（カゲ指数）を算出するように改めた。

次に、指数としては多くの人工衛星センサに汎用的に適用できる方が望ましい。そこで、ほとんどの人工衛星センサが観測している近赤外域のデータを用い、正規化後の近赤外域の反射率値と見かけ（正規化前）の近赤外域の反射率値の比からカゲ指数を算出するようにした。これが二点目の改良点である。

II.4.2 算出結果

人工衛星 ADEOS-II/GLI 250m データを用い、カゲ指数の有用性を検証した。

千葉県房総半島周辺で算出したカゲ指数を図 4.1.40 に示す。房総半島は九十九里平野に水田が広がっているが、半島は概ね森林域に覆われている。森林域は、北部は針葉樹、南部は広葉樹（照葉樹）が分布している。図 4.1.40 の結果を見ると、半島南部の照葉樹域でカゲ指数が高い値を示している。デジタルカメラで撮影した画像の解析で、広葉樹は針葉樹よりもカゲの占める面積が少ない（カゲ指数が低い）が、広葉樹の地域では照葉樹の領

域でカゲの占有域が大きい（カゲ指数が高い）ことが確かめられているが、得られた結果はこの特性と合致していて、樹種の特性の違いをよく反映している。また、半島南部の針葉樹域では、カゲ域が大きい（カゲ指数が高い）針葉樹の特徴をよく表している。したがって、得られた結果から、カゲ指数は樹種などによって生じるカゲ域の占有割合の違い（指數値の違い）を良く反映しているということが確認できる。

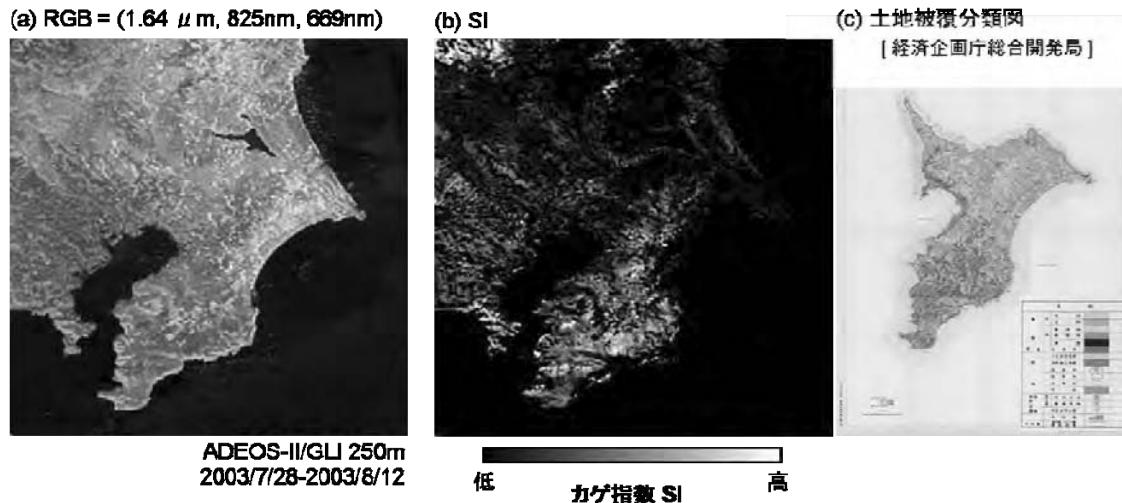


図 4.1.40 千葉県房総半島周辺の (a) RGB 画像、(b) カゲ指数 (SI)、(c) 土地被覆分類図。(a) と (b) は、ADEOS-II/GLI 250m データを使用、(c) は経済企画庁総合開発局が作成した図である。

次に、カゲ指数をインドシナ半島に適用してみた。図 4.1.41 に (a) RGB 画像、(b) カゲ指数、(c) 正規化植生指数 NDVI (Normalized Difference Vegetation Index)、および (d) 土地被覆分類の結果を示す。土地被覆分類の結果からも明らかなように、インドシナ半島は場所により常緑広葉樹でも密生、中層、疎生と分布状況が異なっている。NDVI は、光合成有効放射吸収率 fAPAR (fraction of Absorbed Photosynthetically Active Radiation) や植生被覆率（緑被率）の算出に有効で、植生解析において広く用いられている植生指数である。しかし、土地被覆分類の結果と比較すると、NDVI は樹種、樹冠構造の把握効力が弱く、植生域でほぼ同じ値になっていて、NDVI の値で樹種分類を行うことは難しいことがわかる。これに対して、カゲ指数には樹種の違い、樹木の構造、ギャップによるカゲ域の占有割合の違いがよく反映されていることから、カゲ指数は植生解析において有用な指標となるものと期待される。

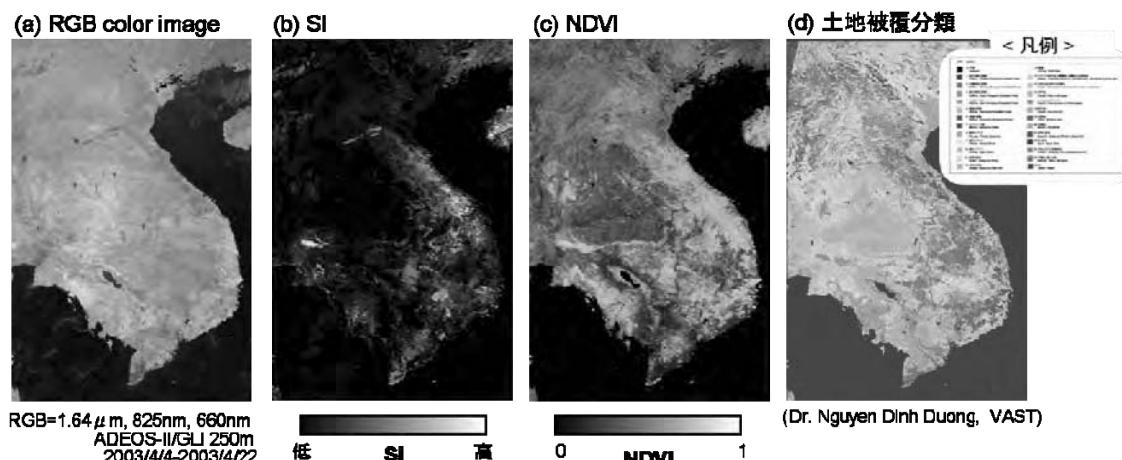


図 4.1.41 ADEOS-II/GLI 250m データから求めたインドシナ半島周辺の (a) RGB 画像、(b) カゲ指数 (SI)、(c) 正規化植生指数 NDVI、(d) 土地被覆分類の結果。

ここまで的人工衛星データに適用した解析結果から、カゲ指数がはじめに述べた指標開発の意義の1つである樹種分類に有用であることが確認できた。そこで、次に、2つ目の意義、樹木の生育・活性状況（質）の把握について調べてみた。

オーストラリアでは2002, 2006, 2007年に大規模な旱魃が発生し、農作物に多大な被害が生じた。オーストラリアはアメリカ、カナダに次ぐ小麦の輸出国で、小麦需要量の約9割を輸入に頼っている日本や、パスタやパンが主食であるイタリアなどでは、製粉会社、食品メーカが相次いで小麦価格の上昇に伴う商品の値上げを発表し、国民生活への影響も大きくなっている。そこで、オーストラリアを対象として、旱魃による農作物の生育・活性状況（質）とカゲ指数の関係を調べ、カゲ指数の有効性について検討した。

オーストラリア農業・資源経済局（ABARE: Australian Bureau of Agriculture and Resource Economics, <http://www.abareconomics.com>）が報告したオーストラリアの小麦栽培地域と冬穀物収穫量のデータを参考に、人工衛星 Terra/MODIS の地表面反射率データ MOD09 を用い、2000-2007年9-10月のオーストラリア全域のカゲ指数を算出した。カゲ指数の平均値、平均偏差値の結果を図4.1.42に示す。旱魃被害の影響で2002, 2006, 2007年は冬穀物収穫量が大幅に減少したが、2000, 2001, 2003, 2005年は旱魃被害の影響がなく冬穀物収穫量が平年並みであった。図4.1.42の結果を見ると、旱魃被害の生じた年（2002, 2006, 2007年）ではカゲ指数の値が小さく、旱魃被害のなかった年（2000, 2001, 2003, 2005年）ではカゲ指数が大きな値を示している。この結果を、デジタルカメラで撮影された画像の結果と合わせて考察してみる。旱魃被害のあった年は、農作物の生長・生育が悪くて疎な（植生被覆率が低い）状態に、一方、旱魃被害がない年では農作物の生長・生育が良くて密な（植生被覆率が高い）状態になっていたと見なされる。植生被覆率（疎密度）の違いのみから判断すると、植生被覆率が高い（密な）ほどカゲの占める面積は小さく、植生被覆率が低い（疎な）ほどカゲの占める面積は大きくなると考えられる。しかし、実際に算出したカゲ指数は逆の結果になった。これは旱魃被害のなかった年は被害のあった年に較べると植生被覆率が高い（密な）状態ではあるが、作物自身の草丈の違いなどによる樹冠の構造、ラフネスが生じるため、実際にはカゲの占有域が増え、カゲ指数の値が大きくなる。一方、旱魃被害のあった年は、作物の生長・生育が著しく悪く、草丈などに差が生じず、カゲの占有域が少なくなり、カゲ指数の値が小さくなつたためと考えられる。作柄があまりにわるく作物の個体同士の間隙があまりに大きすぎ濃い影ができずにカゲ指数が低くなったとも考えられる。いずれにしても、今後、植物（農作物）の生育・活性状況（質）とカゲ指数の関係については、今後さらに検証を続け、カゲ指数の有用性を確認することにしたい。

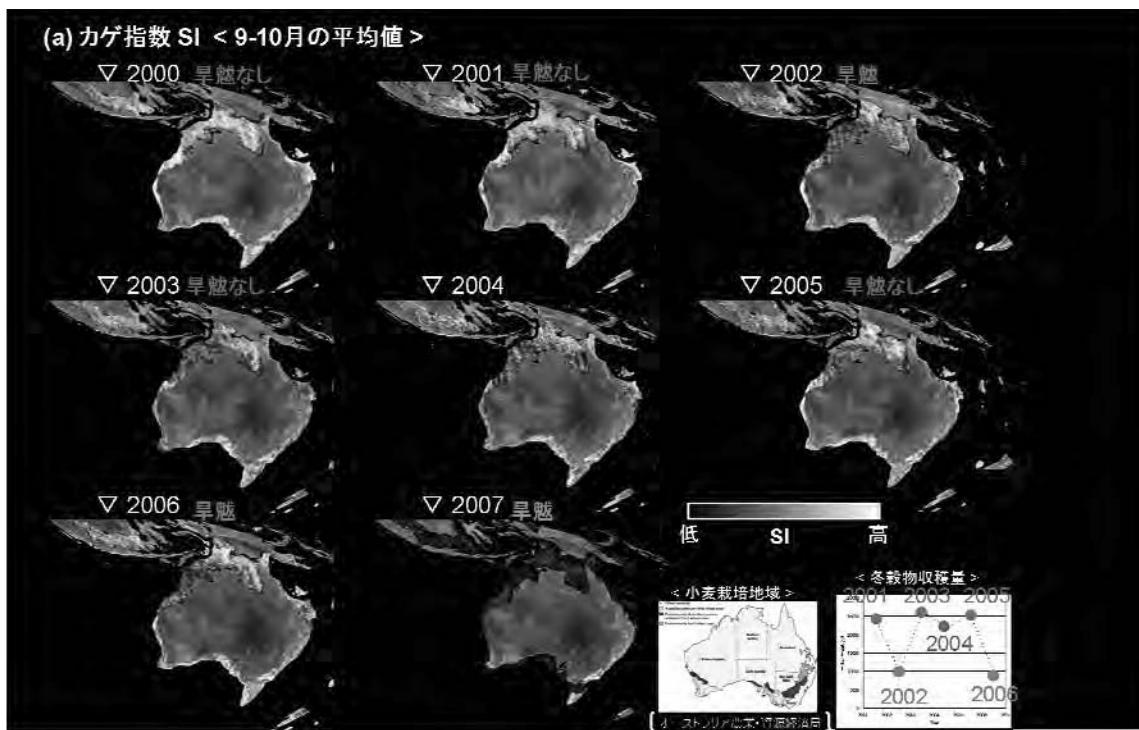


図 4.1.42 Terra/MODIS データから算出した 2000-2007 年 9-10 月のオーストラリア全域のカゲ指数の (a) 平均値

II.5.まとめ

これまで我々が提案してきた正規化法の特性を利用し、植生指数として新たなカゲ指数を考案し、デジタルカメラで撮影された画像と人工衛星データに対してカゲ指数を適用してみた。その結果、カゲ指数はデジタルカメラデータと人工衛星データの双方に適用することができ、一般的に用いられている植生指数の NDVI では判別の難しい樹種の違い、樹冠の構造、ギャップなどの識別、植生の生長・活性状況（質）などの把握に有用であることがわかった。日照部分とカゲの部分の面積比は林冠のギャップの変化の監視、草原と森林の境界の監視などに有用で、カゲの占有割合が検出できれば、植生バイオマス推定の精密化、土地被覆分類の精度向上に貢献できると考えられる。この点からみても、カゲ指数は植生解析にとって有用な指標となりうるものであり、今後指標のさらなる改善に取り組んでいきたい。

III. 水ストレス傾向指数について

III.1. 指数開発の意義

気候変動に関する政府間パネル（IPCC）の第 4 次報告書では、地球温暖化は既に世界中の自然と社会に影響を及ぼしているというまとめがなされた。この地球温暖化によって引き起こされる重大な問題の 1 つとして、我々が生きていくために必要な水や食糧の世界的な不足を挙げることができる。世界各地で既に旱魃や集中豪雨による洪水が多発し、気候変動や水不足・食糧危機の兆候が現れ始めている。このような地球規模の変動を把握するためには、植物生産量の見積もりと植物の生育状況（質）を求めることが重要である。

植物（農作物）の生育には光、水、栄養の三要素が重要な役割を果たしており、三要素のうちどれか 1 つでも欠けてしまうと生育活動に支障が生じる。特に、気候変動による降雨量の変化は水循環の変化、水資源の枯渇を引き起こすため、植物（農作物）に水ストレスを与え、生育へのダメージが大きくなる。

これまでに正規化植生指数 NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) をはじめとする数多くの植生指数が開発され、植生被覆率や光合成量などの見積もりに利用されてきた。しかし、これらの植生指数は植物の生育状況（質）の把握に対する効力が弱い。そ

ここで、植物の生育状況（質）を把握するためのモデル開発を目的として、植物の水ストレスに着目し、研究を進めてきた。

人工衛星データから植物の生育状況（質）を精確に求めるためには、地上計測における推定モデルの開発とその検証が重要である。そこで、まず地上において植物の継続観測を行い、取得された計測データを用いて生育状況把握のためのモデル開発、検証を行った。地上計測の解析結果から、水ストレスがかかり始めた時期の検出には、分光スペクトルよりも温度情報の方が敏感に応答していることがわかった。この解析結果を人工衛星データに適応し、新しい植生指数、水ストレス傾向の適用性と有効性について検証を行った。

III. 2. 地上計測

鉢植えのセイヨウガマズミ（スイカズラ科、ガマズミ属、常緑低木）2鉢を4セット用意し、一方には水を与え、他方には水を与えないという方法で生育させた。これら、水ストレスなしと水ストレスありの二組のサンプルについて、分光放射計（Field Spec FR）、サーモトローサー（TH7100）、携帯型赤外線温度計（IN-15）、水ポテンシャル測定装置（PMS Model 600）と土壤水分センサ（Hydro Sense）を用い継続的に観測を行い、植物の水ストレスを検出する手法の開発を行った。

III. 2.1 水ポテンシャル測定装置

植物がどの程度乾燥しているかを示す指標となる水ストレスの度合いは、水ポテンシャルの値から推定することができる。植物体内の水分が十分な状態では水ポテンシャル値は小さく、葉内水分量が減るに従って水ポテンシャル値は大きくなる。本研究では、枝から切り取ってすぐの葉を耐圧容器にかけ、容器の外に出しておいた茎の切り口から植物体の中の水がにじんできた瞬間の圧力の値を読み取る、プレッシャーチャンバー法で水ポテンシャル値を計測した。使用した測定装置は PMS Model 600 である。

図 4.1.43 に水ストレスのありとなしの二組のサンプルにおける水ポテンシャル値の経日変化を示す。この図から明らかなように、ストレスをかけ始めてからしばらくの間ストレスのあり・なしで共に変化が認めにくいが、ストレスをかけ始めてから 12 日以降に水ストレスありのサンプルの水ポテンシャルが急増し（すなわち、葉内水分量が急減し）、4 週間で計測飽和値に達した。そこで、葉内水分量をストレス度合いの指標にとり、他の観測機器から得られたデータとあわせて解析を進めてみることにした。

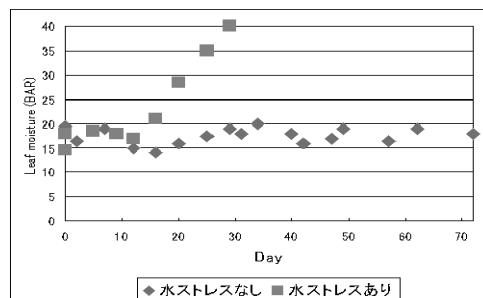


図 4.1.43 葉内水分量の経日変化。◇は水ストレスなし、□は水ストレスありのサンプル。

III. 2.2 携帯型赤外線温度計

水ポテンシャル測定装置を用いて葉内水分を計測した結果が示すように、水ストレスが続くとある時点から葉内の水分が急減し始める。ところで水には“温まりにくく、冷めにくい”という特性がある。この特性に着目すると、葉内に水分が充足されている葉は日射によって温まりにくく（冷めにくく）、水分の少なくなった葉は温まりやすい（冷めやすい）と考えられる。そこで、改めて携帯型赤外線温度計（IN-15）を用い、生育状況が異なる植物の葉表面の放射温度を計測してみた。

図 4.1.44 (a) にストレスをかけ始めてから 2, 9, 19, 31 日目の水ストレスあり・なしサンプルの放射温度の時間変化を示した。この図からもわかるように、温度は観測時の気

温、風速など気象条件の影響を受けやすいので、その絶対値は指標に適していない。ところで、ストレスが進行するにしたがって葉内の水分量は減少するので、ストレスのかかったサンプルでは葉の温度が変動しやすくなっていると推測される。そこで、放射温度の変化量の積算値を時系列でプロットしてみた。その結果を図 4.1.44(b) に示す。これらの図から、ストレスが進行するにつれて、ストレスあり・なしの温度変化量の積算値の差が広がっていく様相が確認できる。この結果は、温度変化量の差がストレスの検出に有効に使えることを示唆している。

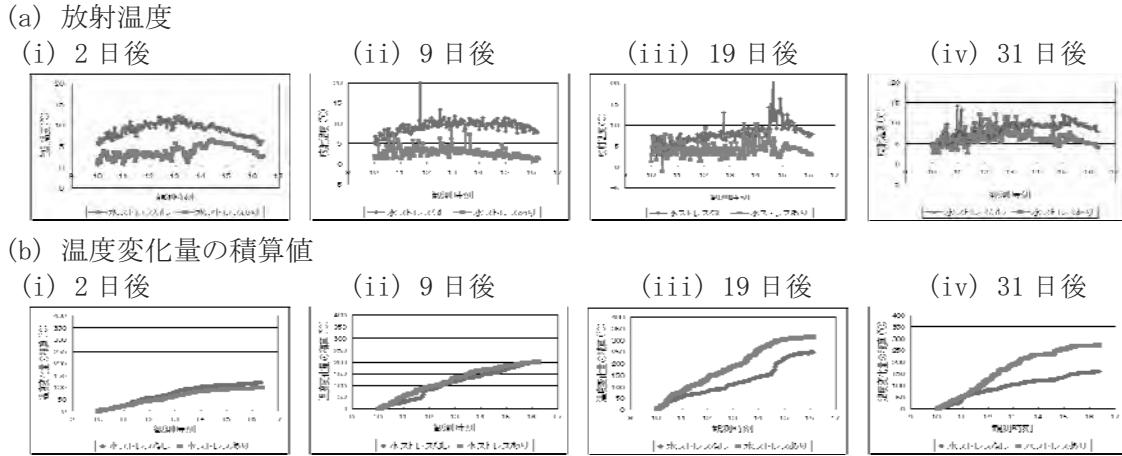


図 4.1.44 ストレスをかけ始めてから (i) 2, (ii) 9, (iii) 19, (iv) 31 日目の水ストレスあり・なしサンプルの (a) 放射温度と (b) 放射温度の変化量の積算値の時間変化。

III. 2.3 分光放射計

分光放射計 (Field Spec FR) で得られた分光スペクトルから、正規化植生指数 (NDVI, Normalized Difference Vegetation Index) と正規化水指数 (NDWI, Normalized Difference Water Index) を算出した。図 4.1.45 (a) に NDVI、図 4.1.45 (b) に NDWI の水ストレスあり・なしサンプルの経日変化を示す。ストレスのかかったサンプルでは、ストレスが進行しても NDVI 値は長期間ほぼ一定でその減少量は小さいが、NDWI 値は 30 日を経過した時点で急速な減少傾向に転じる。

NDWI は植生における水分状態が把握できる指標として知られている。今回の計測結果から NDWI でストレスは検知できるが、前述の水ポテンシャル測定装置で計測した葉内水分量と比べると応答が鈍く、検知日数が倍程度遅れることがわかった。

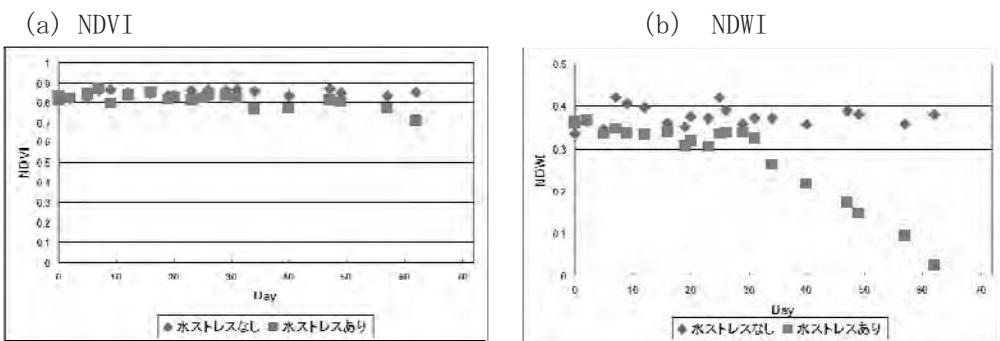


図 4.1.45 (a) NDVI と (b) NDWI の経日変化。◇は水ストレスなし、□は水ストレスありのサンプル。

III. 2.4 地上計測結果のまとめ

以上の地上計測の結果から、水ストレスの症状は、分光スペクトルよりも温度情報を用いた方が早期に検出できることがわかった。水ストレスが継続した場合、分光スペクトル

に変化が現れるのは、ストレスがかなり進行し、葉表面の色が変化した後である。しかし、温度は樹種、植被率、樹冠のラフネス、カゲ被率の影響などを受けやすい。そこで、上記の影響を軽減するために、二時期以上の温度データを用い、温度の変化量をパラメータにとれば水ストレスの傾向がより掴みやすくなる。

III. 3. 人工衛星データへの適用

上記の地上計測の結果を基に、温度変化量による解析手法を人工衛星データに適用してみた。人工衛星 Terra/MODIS の地表面温度データ MOD11 を用い、オーストラリアを対象として解析を行った。

オーストラリアは年間平均降水量が 465mm 程度と少なく、また、日中の寒暖差が大きいことから、内陸部を中心に乾燥気候が広がり、旱魃の起こりやすい地域である。最近では、2002, 2006, 2007 年に大規模な旱魃が発生し、農作物に多大な被害をもたらした。この三年、夏は記録的に暑く、8 月は記録的な少雨だったため、秋には記録的に乾燥し、冬作物の作付けが大幅に遅れた。その上、土壤水分が干上がったために、冬作物の収穫量が大幅に減少した。

図 4.1.46 にオーストラリア農業・資源経済局 (ABARE: Australian Bureau of Agricultural and Resource Economics, <http://www.abareconomics.com>) が報告したオーストラリアの小麦栽培地域を示す。図中の赤四角は、後述の解析エリアを示している。

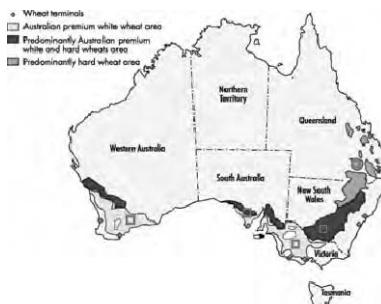
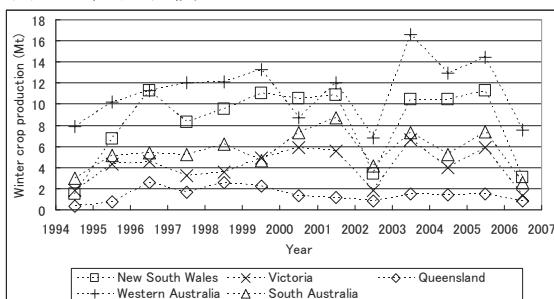


図 4.1.46 オーストラリアの小麦栽培地域。(ABARE: Australian Bureau of Agricultural and Resource Economics, <http://www.abareconomics.com>)

図 4.1.47 に五州 (New South Wales, Victoria, Queensland, Western Australia, South Australia) の 1994–2006 年における冬穀物と夏穀物のそれぞれの収穫量を示す。図 4.1.46 から、旱魃の影響で、2002 と 2006 年の両年で収穫量が冬、夏共に大幅に減少していることがわかる。

(a) 冬穀物収穫量



(b) 夏穀物収穫量

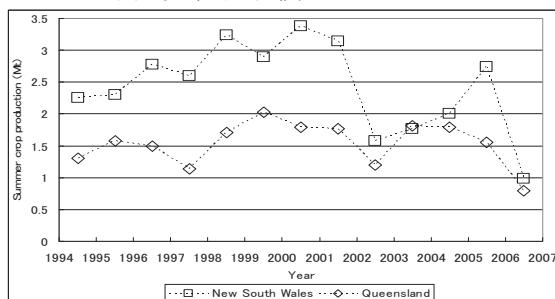


図 4.1.47 オーストラリア五州 (New South Wales, Victoria, Queensland, Western Australia, South Australia) の (a) 冬穀物と (b) 夏穀物収穫量の経年変化。(ABARE, <http://www.abareconomics.com>)

図 4.1.46 の赤四角で囲った五州で月毎の温度変化量を人工衛星 Terra/MODIS データから

算出した。温度変化は雲の影響を受けやすい。そこで、雲の影響が少ない日を抽出し、日中と夜間の温度変化量の算出を行った。オーストラリアの冬小麦は、4-6月が撒種期、10-11月が収穫期である。そこで、撒種期後の6月から収穫期の11月までの各月の温度変化量について算出した結果を図4.1.47に示す。五州とも月毎の温度変化量は旱魃被害なしの年

(2005年)よりも旱魃被害ありの年(2002, 2006年)の方が大きな値を示している。旱魃被害あり・なしの温度変化量の差は、収穫時期(11月)に近づくほど大きくなる(広がる)傾向がみられるが、撒種期後的小麦(作物)生長・生育の初期段階でも差が確認できる。このことは、温度変化量が早期に降水不足、乾燥化の検出を行え、植物(農作物)生長・生育の初期段階で旱魃被害の影響を察知できる可能性があることを示唆している。

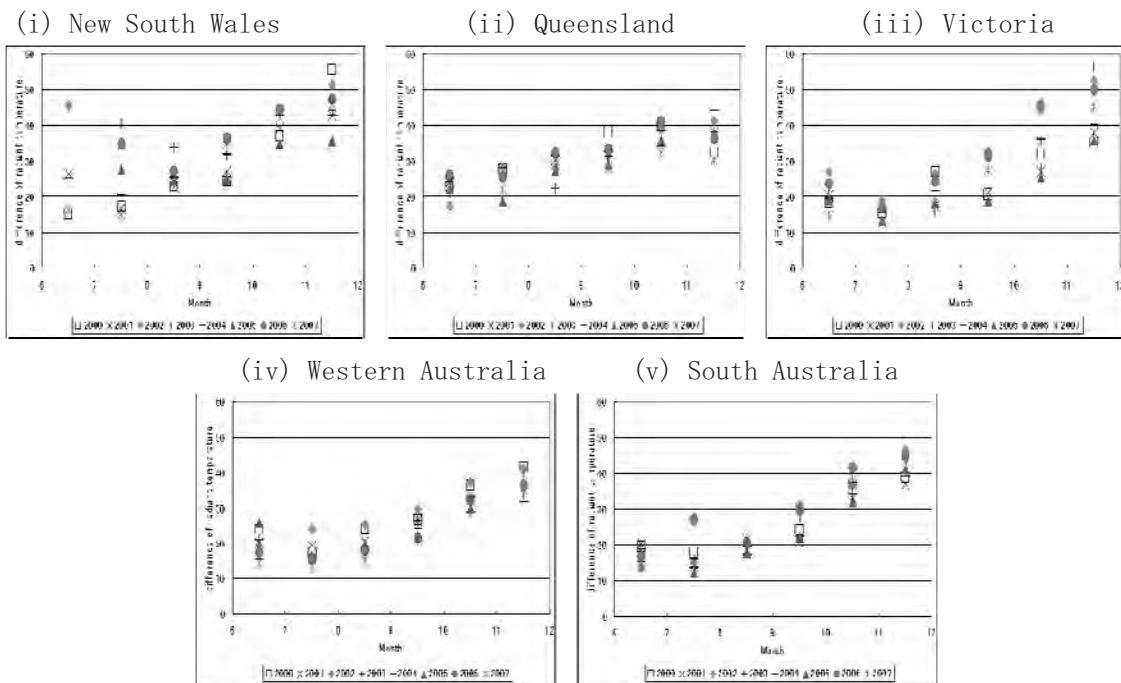


図4.1.48 Terra/MODISデータから算出したオーストラリア五州((i) New South Wales, (ii) Victoria, (iii) Queensland, (iv) Western Australia, (v) South Australia)の温度変化量の経月変化。

地上計測データの解析では、正規化植生指数 NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) や正規化水指数 NDWI (Normalized Difference Water Index) は温度変化量に較べ、乾燥化の初期段階の検出が難しく、植物(農作物)がある程度生長・生育した段階にならないとストレスの差が確認できないという結果が得られた。そこで、五州で温度変化量と NDVI, NDWI の関係を調べた。その結果を図4.1.49に示す。旱魃被害のなかった2005年(△)は NDVI, NDWI 共に変化幅が広いが、旱魃被害があった2002(◇), 2006年(○)は変化幅が狭い。一方、温度変化量は2002, 2005, 2006年共に変化幅が広いので、この特性が、乾燥化の初期段階の検出に有効に働いたと考えられる。

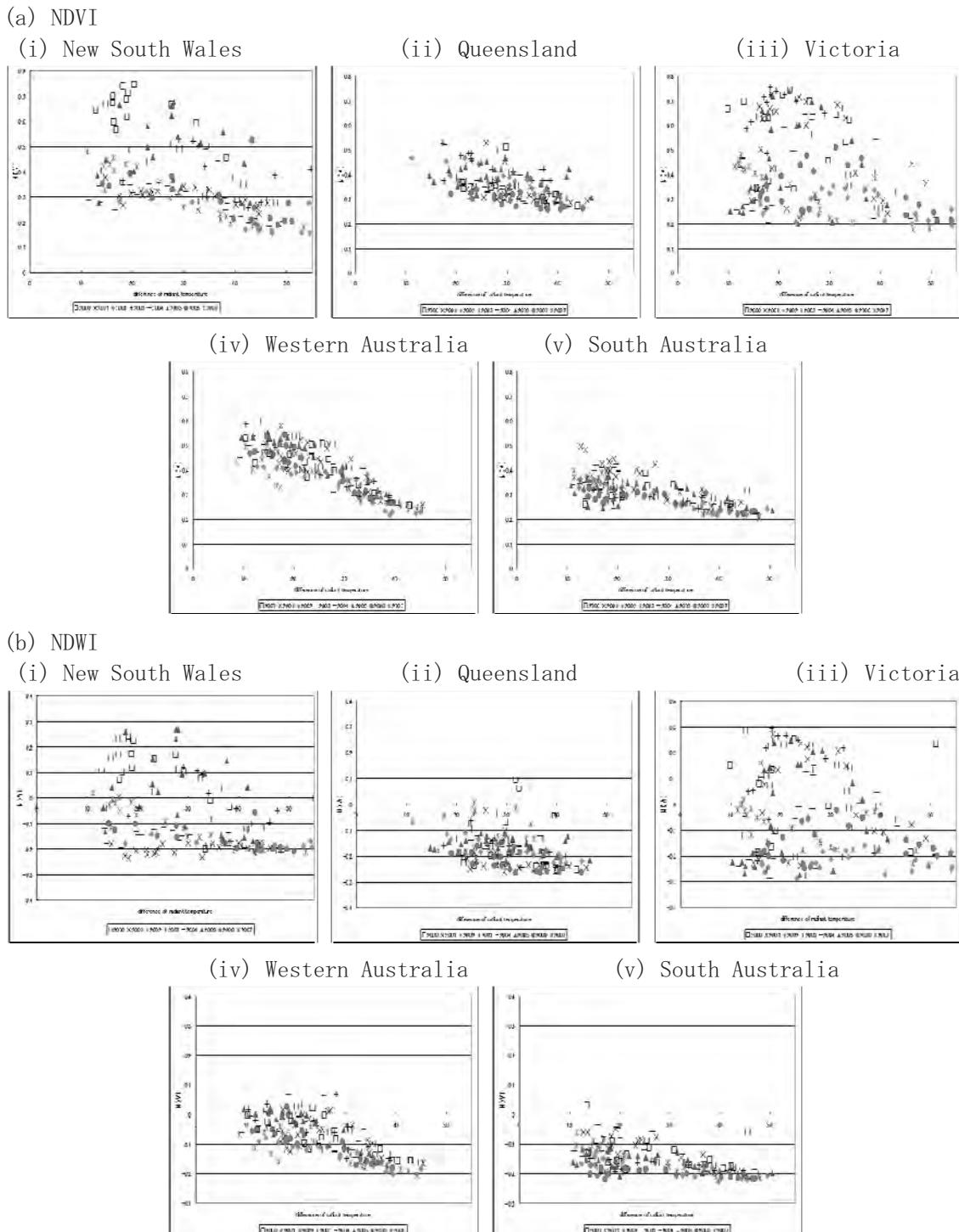


図 4.1.49Terra/MODIS データから算出したオーストラリア五州 ((i) New South Wales, (ii) Victoria, (iii) Queensland, (iv) Western Australia, (v) South Australia) の温度変化量と (a) 正規化植生指数 NDVI, (b) 正規化水指数 NDWI の関係。

そこで人工衛星 Terra/MODIS データを用い、オーストラリア全域で月毎の温度変化量を算出してみた。図 4.1.50 に 2002–2007 年の温度変化量の平均値と平均偏差値の結果を示す。図 4.1.50 から、図 4.1.45 に示す小麦栽培地域では平均偏差が旱魃被害のなかった 2005 年は小さく、旱魃被害のあった 2002, 2006 年では大きな値を示し、旱魃、乾燥化の影響が大きかったことを示唆している。この結果は、図 4.1.47 (a) の冬穀物収穫量に対応している。また、旱魃被害のあった 2002, 2006 年の経月変化から、4–6 月の撒種期後、作物が生長・

生育し始める時期の8月に降水量が少なく、乾燥化が進む（温度変化量が大きくなる）と旱魃被害となり、穀物（食糧）生産量に悪影響を及ぼしていることがわかる。図4.1.51にオーストラリア農業・資源経済局（ABARE: Australian Bureau of Agricultural and Resource Economics, <http://www.abareconomics.com>）が報告した降水量、穀物の旱魃被害状況とTerra/MODISデータから算出した温度変化量の結果を示す。図を見ると、温度変化量と降水量、穀物（食糧）の旱魃被害状況の分布結果が大変似ており、温度変化量による水ストレス傾向が乾燥化を表す指標となりうる可能性を示唆している。

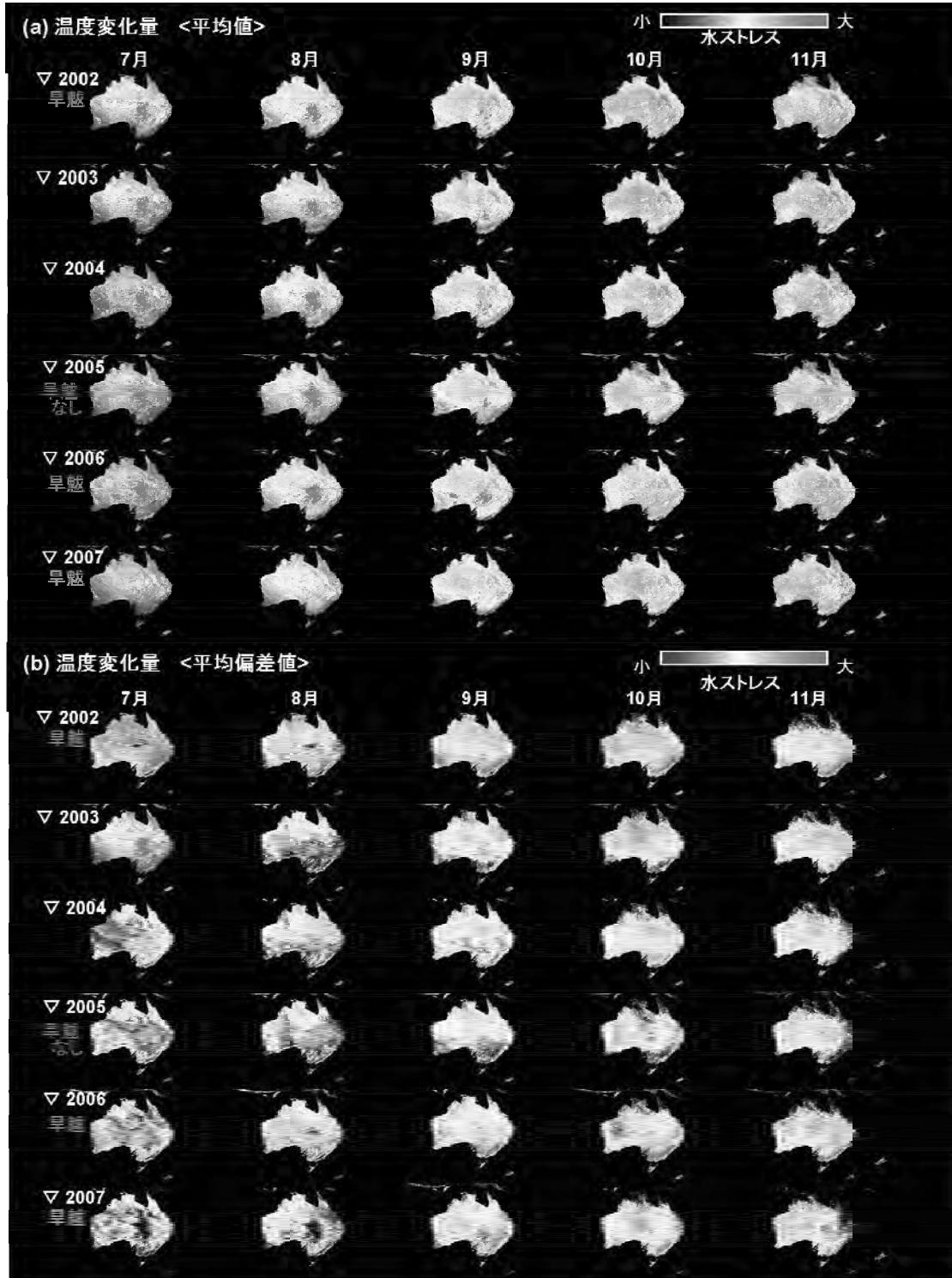


図4.1.50 Terra/MODISデータから算出した2002-2007年7-11月の月毎の温度変化量の(a)平均値と(b)平均偏差値。

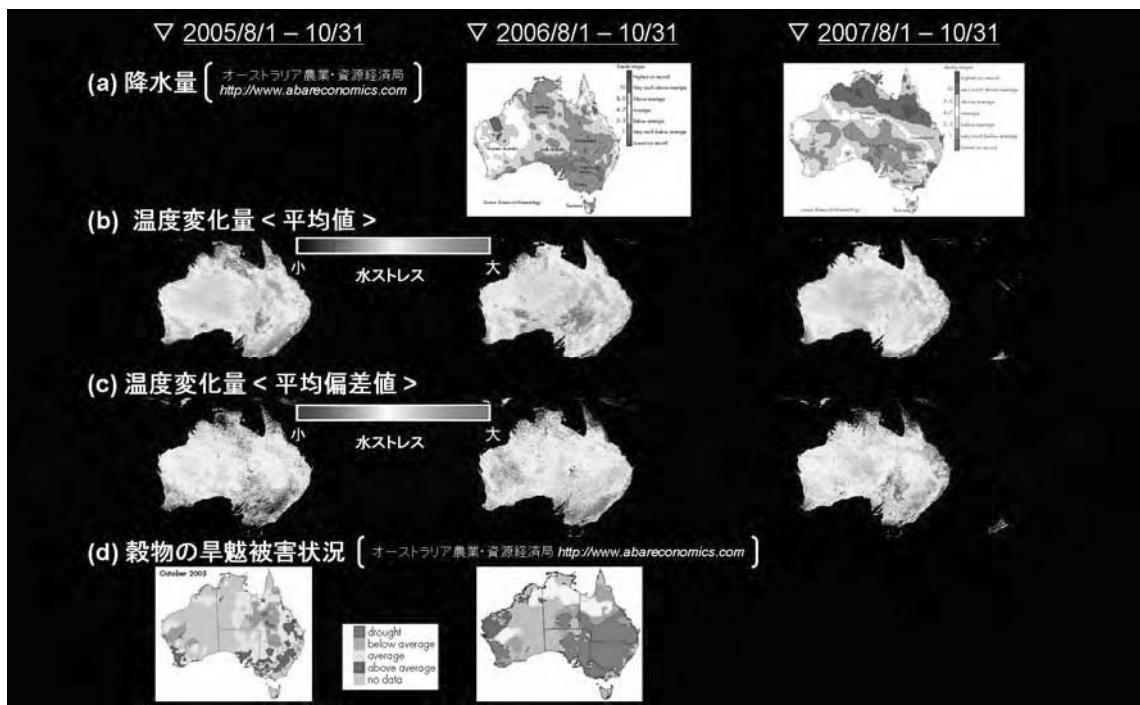


図 4.1.51 Terra/MODIS データから算出した温度変化量と降水量、穀物（食糧）の旱魃被害状況の比較。(a) 降水量と (d) 穀物（食糧）の旱魃被害状況の図は、オーストラリア農業・資源経済局 (ABARE, <http://www.abareconomics.com>) によって報告されたものである。

次に、穀物（食糧）収穫量との関係を調べてみた。図 4.1.52 に冬穀物収穫量と 8-10 月の温度変化量、NDVI、NDWI との比較結果を示す。これらを見ると、温度変化量の方が NDVI、NDWI よりも穀物（食糧）収穫量との相関がよく、温度変化量が植物（農作物）の生育状況（質）をよく表していて、食糧生産量の把握に役立つことが示唆される。

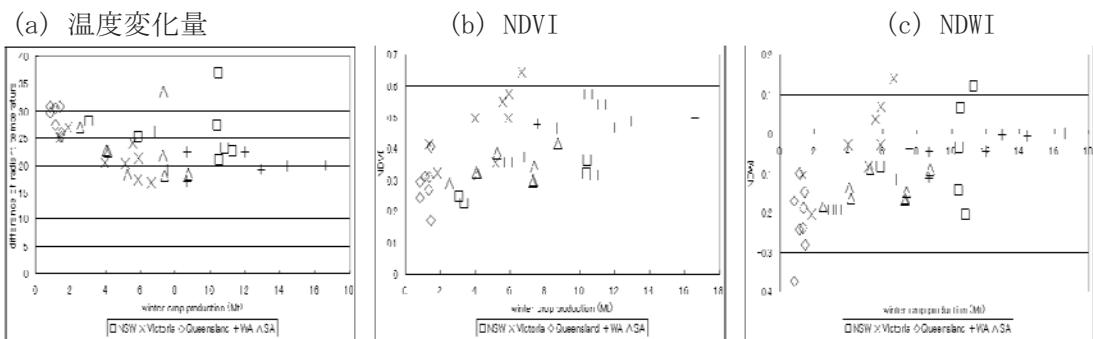


図 4.1.52 冬穀物収穫量と (a) 温度変化量、(b) 正規化植生指数 NDVI、(c) 正規化水指数 NDWI の関係。冬穀物収穫量は、オーストラリア農業・資源経済局 (ABARE, <http://www.abareconomics.com>) によって報告された数値である。

オーストラリア農業・資源経済局 (ABARE) の報告によると、2007 年も旱魃被害の影響で穀物収穫量が減少している。旱魃被害があった 2002, 2006, 2007 年について図 4.1.50 の温度変化量の平均値、平均偏差値の結果で比較を行うと、2002, 2006 年では作物が生長・生育し始める時期、8 月から温度変化量の値が大きくなり始めているが、2007 年は 9 月から差が大きくなり、乾燥化、旱魃被害が検出されている。図 4.1.53 に 2007 年 8 月について 1 週間ごとに温度変化量を算出した結果を示す。この結果から、2007 年は 8 月前半まで温度変化量が小さく、中旬以降、値が大きくなっていることがわかる。つまり、8 月の前半は旱

魃の影響がなく作物の生長・生育に適した湿润状態であったが、中旬以降、乾燥化が急激に進行し、旱魃被害を引き起こしたことがわかる。1ヶ月平均の結果では、前半と後半の温度変化量の違いが平均化されてしまったため、乾燥化の検出に遅れが生じ、次の月に乾燥化が明らかになっているが、日毎、週毎に温度変化量を算出することで、乾燥化の状態を早期に検出することが可能になる。しかし、温度変化は雲の影響を受けやすいため、如何に雲の影響が少ない日を抽出し、温度変化量を算出するかで水ストレス傾向の精度、指数の有用性、信頼性が変わる。今後の研究において、これらのこと考慮して指標開発を行っていくことが重要になる。

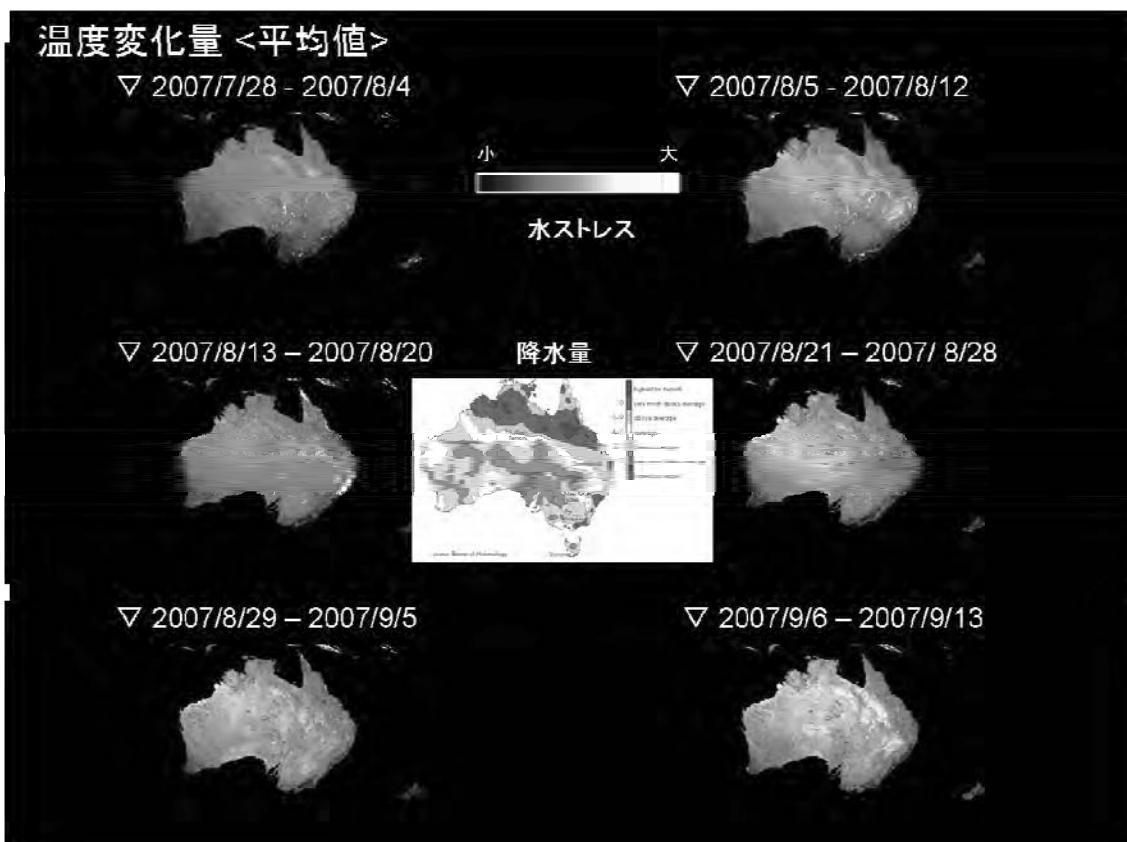


図 4.1.53 Terra/MODIS データから算出した 2007 年 8 月の温度変化量と降水量。降水量の図は、オーストラリア農業・資源経済局 (ABARE, <http://www.abareconomics.com>) によって報告されたものである。

III. 4.まとめ

地上計測の解析から、水ストレスの検出には温度情報が有効であるという結果が得られた。この結果を基に、温度変化量による解析を人工衛星データに適用し、2002, 2006, 2007 年に大規模な旱魃が起きたオーストラリアについて解析を行った。その結果、温度変化量は分光データから算出した NDVI, NDWI の値に較べ、乾燥化の初期段階でストレスありとなしの差が検出でき、乾燥化の検知には温度変化量が有効であることが分かった。また、温度変化量は降水量と大変よく似た分布結果が得られること、穀物（食糧）生産量と相関がよいことがわかった。

IV. 衛星データ並列処理システムの構築

IV. 1 NOAA AVHRR GAC 処理システム

CREST「衛星観測による植物生産量推定手法の開発」では、一般的な衛星データ処理と異なり多角情報を利用するために源データから処理を行う必要があった。その 1998 年当時、全球の NOAA AVHRR GAC データ 1 日分を 1 台のワークステーションで処理すると凡そ

15日間かかり、単純なワークステーションによる処理システムでは複数年の全球データ処理は非現実的であった。そこで、前プロジェクトでは NOAA GAC データ専用の複数台の PC を利用した並列処理の自動化システムを実現した（参照：図 4.1.54）。このシステムは 1 台のワークステーションでは凡そ 15 日間かかった処理を 2 時間強で処理できるようになった。図 4.1.55 は、前述のシステムを利用して作成した雲除去画像（10 日分）である。

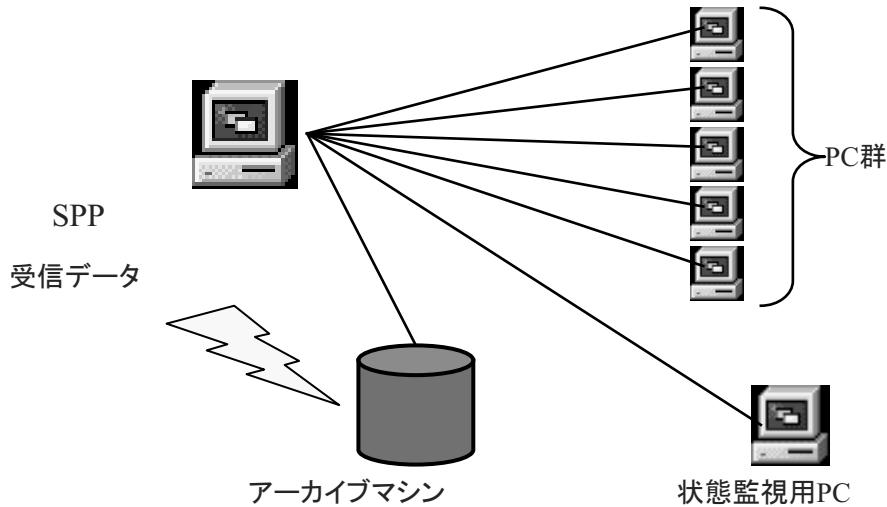


図 4.1.54 ハードウェア構成

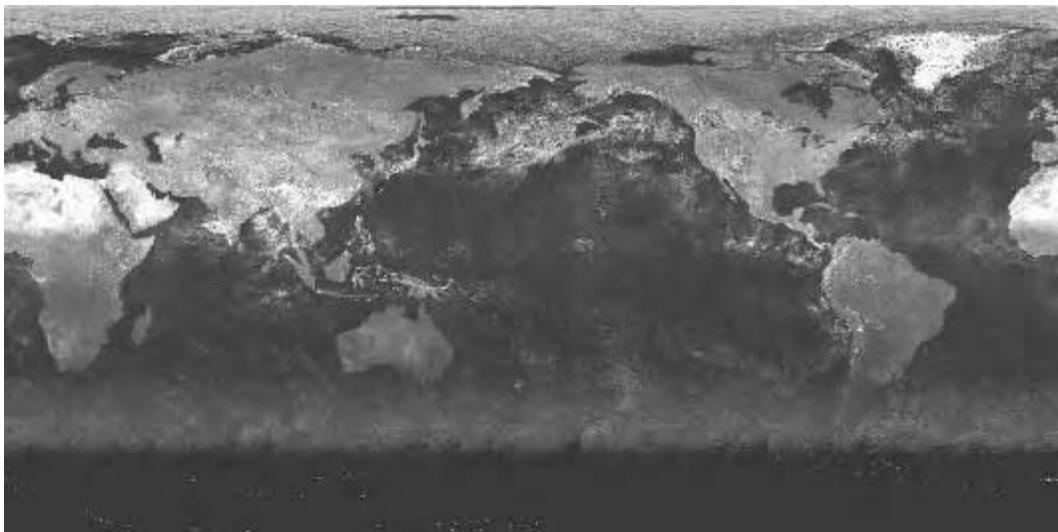


図 4.1.55 全球雲除去画像（10 日間）

IV.2 処理システムの柔軟性向上と効率化

前述のシステムは NOAA AVHRR GAC データに特化したシステムであった。地球環境問題が世界的な関心事になり、これまでの気象衛星に加え地球観測衛星の運用が本格化した。それに伴い地上解像度が高く、センサバンド数も増加した。これらを新しい衛星データや処理手法を開発するために活用するには、前述のシステムでは機能と処理能力とともに問題があった。衛星データ処理のような高負荷な処理を高速に行えるシステムとして、構築の難しさという難点があるものの、コストとパフォーマンスの両面から複数台の PC による分散処理システムの適用が望ましいと考えられる。

また、人工衛星及び搭載センサの多様化により、各々のデータに適した幾何補正プログラムも多様化することは明白である。しかし、新しいタイプのデータの処理をする要求が

出るたびに、新たな分散処理システムを構築していたのでは、ハード、ソフトの両面から見た生産性は結局のところ悪くなる。さらには、大気補正、多角観測、モデル解析などの大量データの処理要求も出てくる可能性が高いと考えられる。その処理が定常的であるか一時的であるかということを気にすることなく、同一システム内で複数種の処理を実行できるべきである。また、計算機の性能はこれからも急速に進歩していくと思われ、より高速にシステムを動かすためには、ハードウェアの補強が必要となってくる。部分的な補強も想定できるが、どのようなケースでも、やはりシステムを再構築しないで補強を行えることが望ましい。

特定のデータの処理に特化しない、効率的でダイナミックなスケジューリングを実現する衛星データの自動連続分散処理システムを開発が望まれる。ここでは特に本研究で開発したスケジューリングに注目し説明を行う。分散システムは、その中にいくつかの自律的なプロセッサと、プロセスをサポートするデータ蓄積装置、かつ、またはデータベースシステムがあって、全体として1つの目標を達成するように協調動作するシステムである。本システムのような大量データの自動処理システムが、他の一般的な分散システムと大きく異なる点は2つある。1つは、自動処理システムであること。もう1つは、ネットワーク転送量が膨大であること。自動処理システムであるためには、何らかの形でシステム全体を一元管理する必要があり、そのためにボトルネックが生じ、分散システムの最大の長所である並列性・非同期性が犠牲になる可能性がある。また、ネットワーク転送量が膨大であると、完全な非同期・並列システムを実現することは不可能である。したがって、この2点をいかに克服し、どのようにして並列性・非同期性を高めるかというのが、本システム構築に際する1つの大きな課題であり、新システムに求められる最低限必要な要素は以下の3点である。

- 1) ターゲットとなるデータとその処理モジュールを可変とする。
- 2) あらゆるハードウェア構成に柔軟に対応する。
- 3) システム全体で同時に複数種のデータの処理を可能とする。

複数のPCによる分散処理システムを自動化する上で、最も重要なのが、PC群をどのようにコントロールするかである。具体的には、システム全体をスケジューリングするマシンが、PC群に対してどのようにRJE (Remote Job Entry) するかである。これがクリアされないとシステムは成立しない。本システムでは図4.1.56のようにスケジューリングのみに専念し、かつ直接システム中にあるリモートマシンと通信するためのコントロールサーバ (PCサーバ) を1台使用する。

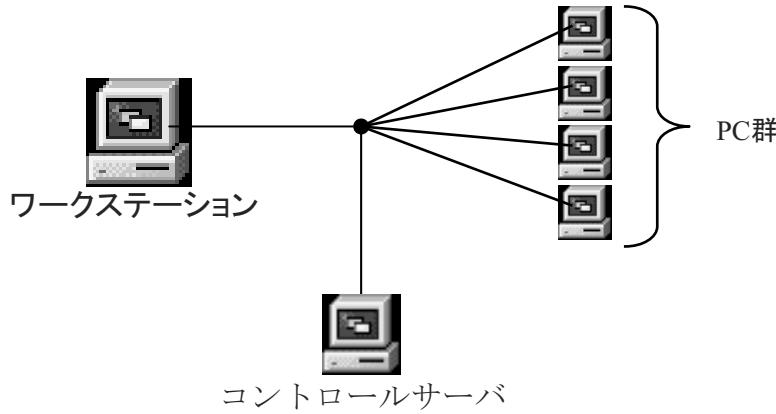


図 4.1.56 開発システムの概念図

処理用 PC のデータ処理モジュールをブラックボックス化するためには、処理用 PC に複雑なことをさせることはできない。各 PC が最低限すべきことは、処理対象となるデータを格納場所からダウンロードし、処理した後、処理済データを格納すべき場所へアップロードするということだけである。したがって、コントロールサーバに最低限持たせるべき機能は、各 PC のダウンロード、処理、アップロードという 3 種類のプロセスに対し、その開始指示を与えることである。また、コントロールサーバは各プロセスの終了時に報告を受けることによって、システム全体のスケジューリングを行い、開始指示を与えるタイミングを決定することができる。その様子を図 4.1.57 に示す。

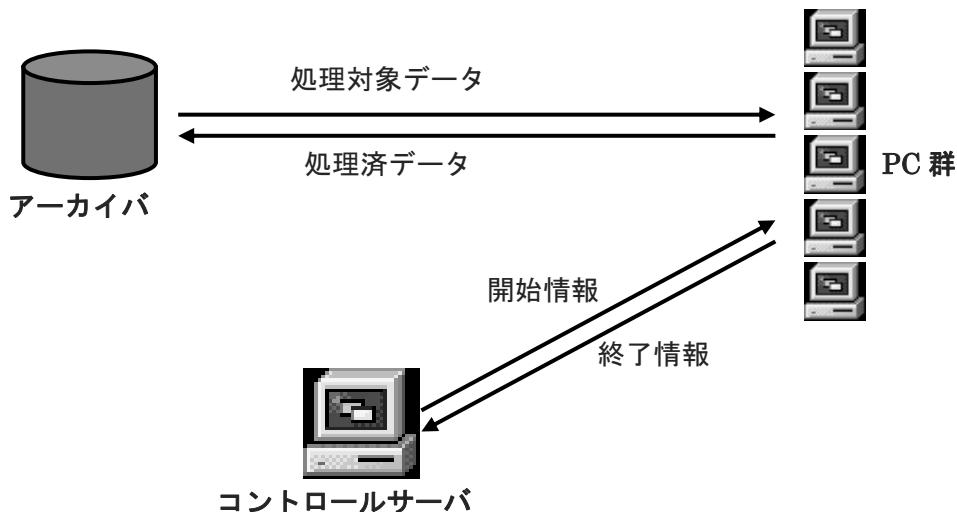


図 4.1.57 データの流れ

個々の処理を行う PC 側からみるとデータアーカイブからのデータのダウンロード、データ処理、データアーカイブへのデータのアップロードの 3 つの処理を行っていることになり、それぞれにかかる時間を以下のように表す。

D_t = (ダウンロードの開始から次のファイルのダウンロード開始までの時間)

P_t = (データ処理時間)

U_t = (アップロードの開始から次のファイルのアップロード開始までの時間)

實際には、<Download → データ処理 → Upload>が 1 処理単位であるなら、Download による先読みファイルは 1 つで良い。余分な先読みはディスクスペースを無駄

に消費してしまうだけでなく、同時に進行している他のプロセスの CPU 時間まで減らしてしまう。また、同じ理由でデータ処理が終って Upload を待っているファイルも 1 つで良い。このようなオペレーションにした場合の Dt、Pt、Ut のそれぞれボトルネックとなる処理 P C での各プロセスのタイミングチャートの例を図 4.1.58、図 4.1.59、図 4.1.60 に示す。

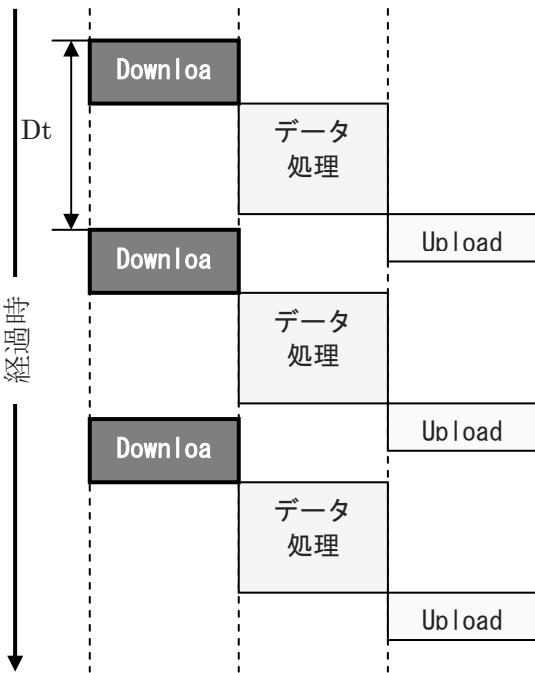


図 4.1.58 Dt がボトルネックとなる例

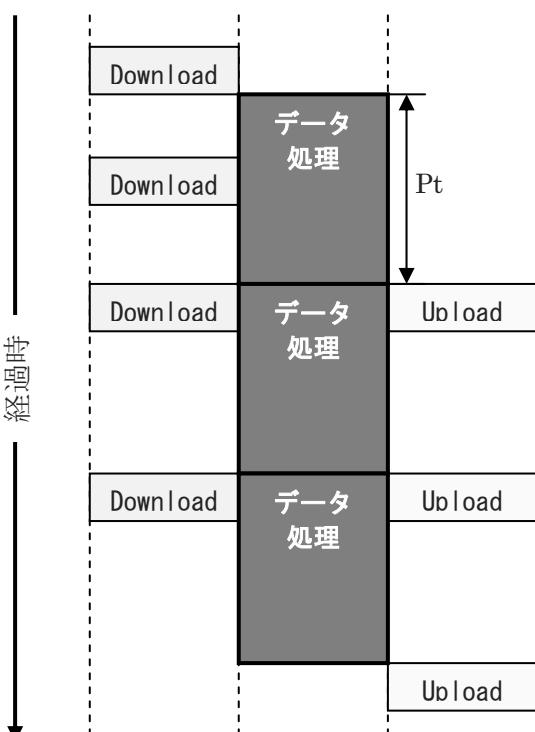


図 4.1.59 Pt がボトルネックとなる例

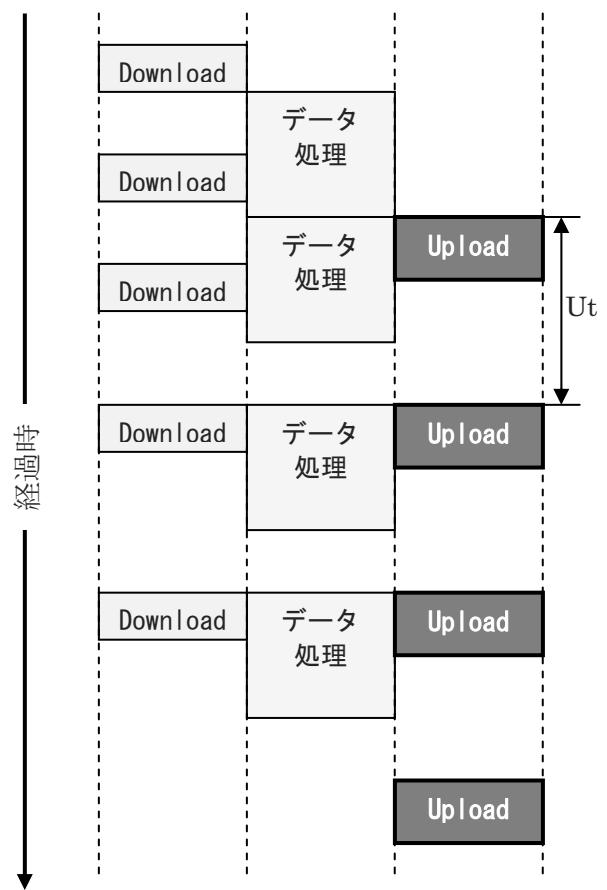
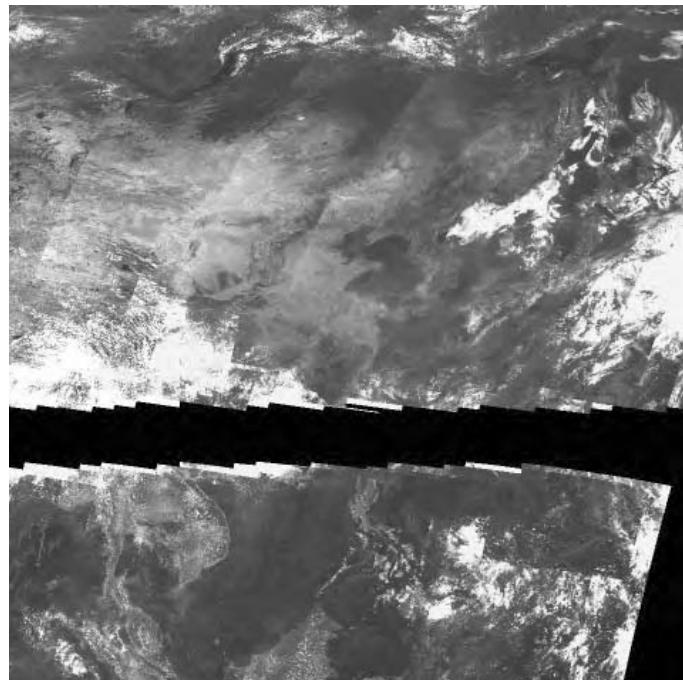


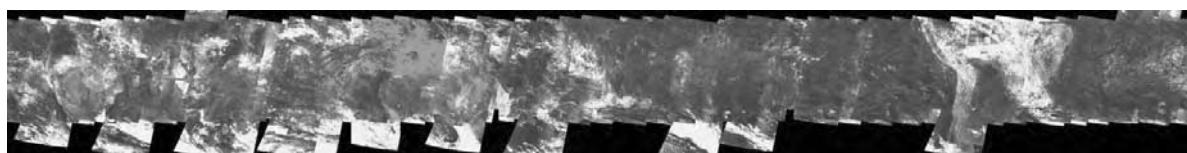
図 4.1.60 Ut がボトルネックとなる例

処理 PC では、どのプロセスがボトルネックとなった場合でも時間が経過すると、ある一定のマルチプロセス形態に収束する。転送速度に差がないと考えれば、各 DHSP クライアント間で Dt 、 Ut に大きな差が出ることはない。しかし、 Pt は処理速度が大きければ当然小さくなる。したがって、コントロールサーバ側で、各処理 PC のマシン性能に応じたスケジューリングをするためには、図 4.1.59 のような Pt がボトルネックとなる状態でなくてはならない。図の通り、 Pt は見かけ上処理単位時間と等しく、マシンパワーが高く Pt が小さいマシンは、必然的に多くの処理単位をこなすことになる。単純だが、効率的なスケジューリングはこのように実現することができる。

このような改良を施すことにより 1 日分の NOAA AVHRR GAC 処理に 2 時間強の時間を要していたが、1 時間に短縮することができた。また、システムの柔軟性を示すために NOAA AVHRR GAC データ以外の衛星データ処理を行った。図 4.1.61 は ADEOS OCTS データの処理例を示している。



北緯 60 度から 0 度、東経 90 度から 150 度 1997 年 160-169 日のコンポジット例



南緯 0 度から 45 度 1997 年 020-029 日のコンポジット例

図 4.1.61 ADEOS OCTS データ処理結果例

IV.3 現行システム

改良を施したシステムにおいてデータ量が膨大になる衛星データを処理する際にデータ転送がボトルネックになる。その傾向は C P U の性能向上により鮮明になる。また、オープンネットワークに繋がれている複数の P C 利用を想定していた計画に、昨今のネットワーク上のセキュリティが問題になり、今後この傾向はさらに強まる。そこで、方針を大転

換し安価になった光ファイバーチャネルを利用したシステムを構築し、満足がいくパフォーマンスを確保することができた。図 4.1.62 はそのシステムの概観である。

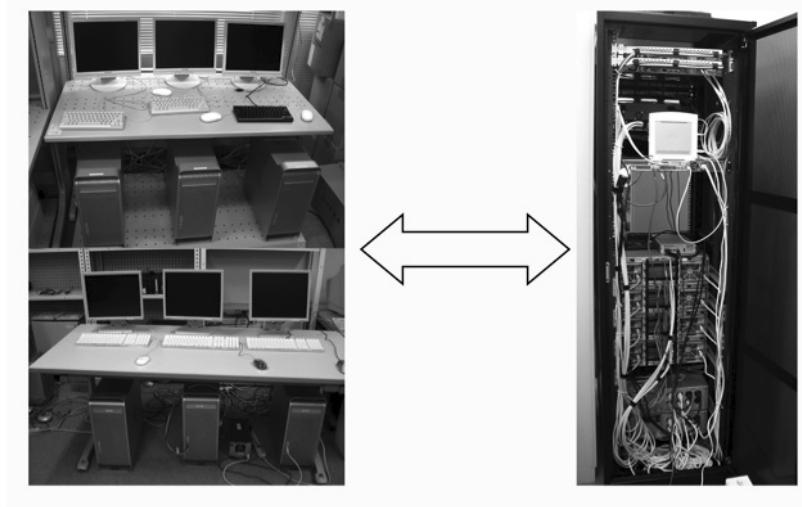


図 4.1.62 分散型衛星データ高速処理装置

(2) 得られた研究成果の状況及び今後期待される効果

人工衛星の多方向観測データを用いて森林バイオマスを推定する手法を開発した。この手法はこれまで存在しなかった全く新しいものである。現在のところ推定手法の適用および検証が可能な樹林タイプは針葉樹林に限られているが、本課題で対象としたカラマツはシベリアにひろがる北方林の優先種であり、広大な樹林面積に対応するバイオマス推定が可能になったと言える。これまで、植被率に対応する植生指標のみを用いたバイオマス推定手法が主流であったが、それらの手法では困難な閉鎖樹林のバイオマス推定を可能にしたことで、全球バイオマス推定の実現可能性を大きく開いたことになる。

また、本課題で開発した RC ヘリコプターの BRF 計測システム、樹冠形状計測システムを用いて他の樹種の観測を今後行っていくことで、より多様な樹種に対応したバイオマス推定手法を確立することが可能となる。近接した上空から BRF と形状を同一対象において計測できる仕組みは世界で唯一のものである。これらのシステムは、今後打ち上げられる人工衛星プロダクトの検証をこれらのシステムを用いて行なうことができ、全球観測を目的とする地球観測衛星計画にとっても重要な意味をもつ。

また、二酸化炭素収支に対する陸上植生の寄与はバイオマスの時間変化を追跡することにより高精度な推定が可能となり、ひいてはより正確な気候予測モデル構築へも寄与することになる。その意味でも全球バイオマス推定が極めて重要であると言えるが、全球のバイオマス推定においては草本植物と森林を分けてバイオマス推定を行う必要がある。本課題で開発したカゲ指数の応用がその分類精度を向上させることに寄与する。また、植生の形状に起因する BRF を用いて推定するバイオマスの経年変化を追跡するだけでなく、バイオマスの将来的な減少を早期に予測するためのアルゴリズム開発に対しても、開発した水ストレス傾向指数が大きく寄与すると考えられる。

4. 2 溫度センサの校正ならびに実温度推定アルゴリズム開発（長崎大学グループ）

(1) 実施の内容

I. 人工衛星からの地表面温度推定アルゴリズム開発

I.1 概説

人工衛星からの地表面温度(LST: Land Surface Temperature)推定は、ASTER, MODISにより定常的に推定され、標準プロダクトとして提供されている。これら標準プロダクトを推定するアルゴリズムは、ASTER は、8-12 μm 帯の 5 つの分光チャンネルの観測輝度を、外部から大気データを導入して大気補正した後に非線形連立方程式を解く準解析的手法であり、MODIS は、10.8, 12.0 μm 帯の二つの分光チャンネルの観測輝度温度を用い、外部から放射率を与えて、海面水温推定で用いられている Split window 法を拡張した回帰式を用いる統計的手法である。ASTER は、観測幅 70km 弱で、オンデマンド観測であるため、処理すべきデータが少なく、計算コストのかかる手法をとることができると、MODIS は観測幅が 2500km で常時観測であるため、簡易なアルゴリズムしか定常的に利用することができない。今後、開発が予定されている熱赤外センサは、MODIS のような広域観測用途がほとんどであり、分光チャンネル数も ASTER ほど多くない。このため、これまでの ASTER 型の準解析手法を少ない分光チャンネルのセンサへの適用と、MODIS 型の統計的手法のさらなる精度向上および両者の統合による安定した運用法の確立が望まれる。本研究では、これらの 2 種のアルゴリズム開発を実施した。

I.2 統計的 LST 推定アルゴリズム

現在、LST プロダクトを定常的に出している広域センサは、TERRA, AQUA/MODIS, ENVISAT/ATSR であるが、両者とも、放射率、または土地被覆を外部から与える Split window 法を採用している。両者を以下に示す。

$$MODIS : Ts = aT_{10.8} + b(T_{10.8} - T_{12.0}) + c + f(T_{10.8}, T_{12.0}, \bar{\varepsilon}, \Delta\varepsilon) \quad (4.2.1)$$

$$ATSR : Ts = C_1 T_{10.8} + C_2 (T_{10.8} - T_{12.0}) + C_0 \quad (4.2.2)$$

ここで、 T_s , T_{xx} , $\bar{\varepsilon}$, $\Delta\varepsilon$, f はそれぞれ地表面温度、波長 xx での観測輝度温度、10.8μm と 12.0μm での地表面放射率の平均値、および差、経験的に決められた関数であり、 a , b , c , C は回帰係数である。MODIS の場合は、外部から地表面放射率を陽に与えるが、ATSR の場合は地表面放射率をグループ化し、グループ毎に回帰係数を決めている。両者とも、LST 推定前に、土地被覆分類によって地表面放射率を決定している。現実的には、MODIS の場合は打ち上げ前に決めた土地被覆データセットから放射率を導出しておらず、その信憑性が問題となっている。また、ATSR は、100km 程度の平均温度の推定を主体とした検証を実施しているため、地表面放射率の影響を詳細に見積もっていない。このため、本研究では、統計的 LST 推定アルゴリズムにおける放射率の影響を数値実験により解析した。

統計的 LST 推定アルゴリズムとして ATSR 型のアルゴリズム(式(4.2.2))を採用することとして、GLI chs. 35, 36(10.8, 12.0 μm)の応答関数を用いてシミュレートした。まず、JHU Spectral library に登録されている物質の分光放射率を応答関数で重み付き積分して、両チャンネルの放射率を求め、両者を比較した。結果を図 4.2.1 に示す。

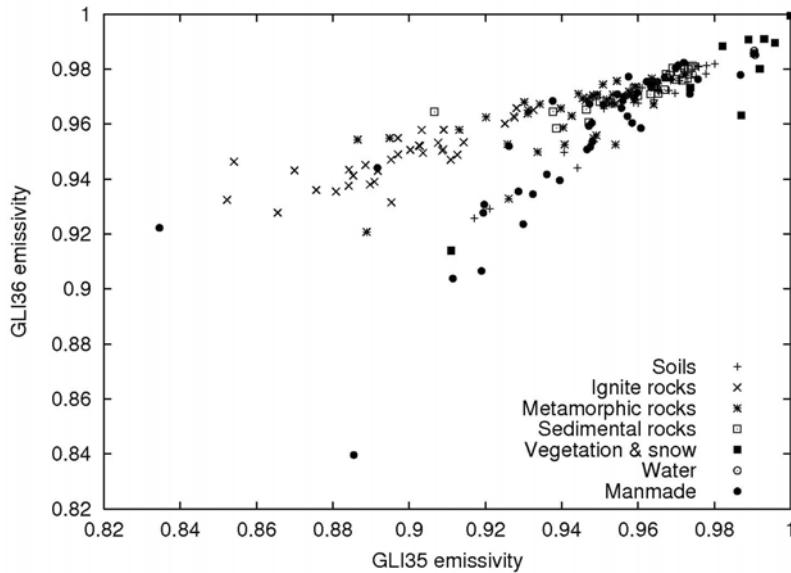


図 4.2.1 地表面分光放射率の波長依存性

上記の結果より、地表被覆は、GLI chs. 35, 36において、以下のどちらかの性質をもつことがいえる。

$$\varepsilon_{35} = \varepsilon_{36} \quad (4.2.3)$$

$$\varepsilon_{36} = 0.429\varepsilon_{35} + 0.560 \quad (4.2.4)$$

そこで、以下の条件で GLI chs. 35, 36 の観測輝度温度を MODTRAN3.5 を用いて計算し、統計的 LST 推定法の精度検証を行なった。

- 大気プロファイル : NCEP 1990 月別平均大気プロファイル
- 地表面温度 : 最下層気温 ±0, 5, 10 [K]
- 観測天頂角 : 0, 30, 60 [deg.]
- 地表面放射率
 - GLI ch. 35: 1.00, 0.98, 0.96, 0.94, 0.92
 - GLI ch. 36: 式(4.2.3, 4)より計算
- 計算項目
 - GLI chs. 35, 36 の輝度温度
 - 有効可降水量(可降水量 × エアマス)
- 雑音 : 標準偏差 0.2 [K]の正規雑音

表 4.2.1 に放射率毎の回帰係数と RMS 誤差を示し、図 4.2.2 に地表面が黒体の場合と、最も黒体から離れている場合の推定誤差を示す。

表 4.2.1 統計的 LST 推定アルゴリズムの回帰係数と誤差

ε_{35}	ε_{36}	C_1	C_2	C_0	RMS 誤差[K]
1.000	1.000	0.934	2.56	17.2	1.14
0.980	0.980	0.933	2.52	18.5	1.17
0.960	0.960	0.921	2.48	23.2	1.26
1.000	0.988	0.974	2.45	5.47	1.18
0.960	0.972	0.904	2.45	28.5	1.34
0.940	0.964	0.887	2.26	34.9	1.61
0.920	0.956	0.883	1.99	37.7	1.92

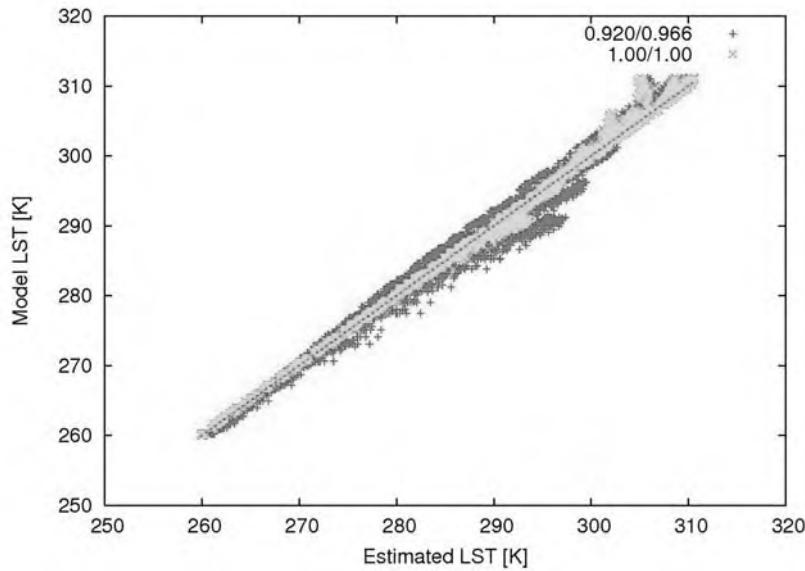


図 4.2.2 統計的 LST 推定法の誤差

地表面放射率が低下すると、LST 推定誤差が増加する傾向が見られたが、観測雑音 0.2[K] という状況であっても、放射率を正しく設定すれば 2[K] 以内の誤差で LST が推定できる可能性が示された。

I.3 準解析的 LST 推定アルゴリズム

統計的 LST 推定法は、地表面放射率を外部データとして与えるため、その設定誤差の影響が回避できない。その点、ASTER で採用している準解析的 LST 推定法は、地表面温度、放射率の同時推定が可能であり、衛星からの地表面温度推定だけでなく、放射率推定を可能にする。ASTER では、分光チャンネルが 5 チャンネルと多く、分光放射率の統計量同士の関係が明確であるが、分光チャンネルが 2 チャンネルの場合は、式(4.2.3, 4)のように画一的な関係が見られない。このため、以下のような手順のアルゴリズムを開発した。

- (i) 衛星観測輝度を大気補正し、 $10.8\text{ }\mu\text{m}$ および $12.0\text{ }\mu\text{m}$ での地表面放射輝度 $Is_{10.8}$, $Is_{12.0}$ および、地表面での下向き大気放射照度 $F_{10.8}$, $F_{12.0}$ を求める。
- (ii) 10.8 および $12.0\text{ }\mu\text{m}$ での地表面放射輝度が従う放射関係式を連立させる。ここで、 B_{xx} は波長 xx 帯のプランク関数である。

$$\begin{aligned} \frac{\varepsilon_{10.8}B_{10.8}(Ts) + (1 - \varepsilon_{10.8})F_{10.8}}{Is_{10.8}} - 1 &= 0 \\ \frac{\varepsilon_{12.0}B_{12.0}(Ts) + (1 - \varepsilon_{12.0})F_{12.0}}{Is_{12.0}} - 1 &= 0 \end{aligned} \quad (4.2.5)$$

- (iii) $12.0\text{ }\mu\text{m}$ の放射率を $10.8\text{ }\mu\text{m}$ の放射率の関数として表す。この場合、関数は一つではなく、たとえば式(4.2.3, 4)のように複数設定する。
- (iv) 地表面温度および $10.8\text{ }\mu\text{m}$ の放射率を未知数として、(iii) の関数毎に連立方程式を解く。
- (v) 残差が最も小さくなる関数の結果を解とする。

上記のアルゴリズムの精度を以下に示す数値シミュレーションにより明確にした。

- 地表面温度 : 270–320[K], 5[K]刻み
- 地表面放射率 : JHU spectral library に登録されている非金属物質の分光放射率を GLI chs. 35, 36 の応答関数で重み付き積分したもの
- 下向き放射照度 : 米国標準大気
- 地表面放射輝度の誤差(大気補正誤差) : 0–5%

地表面放射輝度の誤差(大気補正誤差)が 0, 1, 3%の場合の地表面温度の推定値と真値の比較を図 4.2.3–5 に示し、大気補正誤差と RMS 誤差、バイアス誤差の関係を図 4.2.6 に示す。大気補正誤差の増加とともに地表面温度推定誤差も増加する傾向にあるが、現行の大気データ(数値予報データ)を用いた大気補正誤差は 1.5%(300[K]での輝度温度誤差 1[K])であるため、この方法を用いれば、地表面温度が 1.3[K]の精度で求まることを示している。また、バイアス誤差の原因を究明しバイアス誤差を小さくすることができれば、より高精度の推定が期待できる。

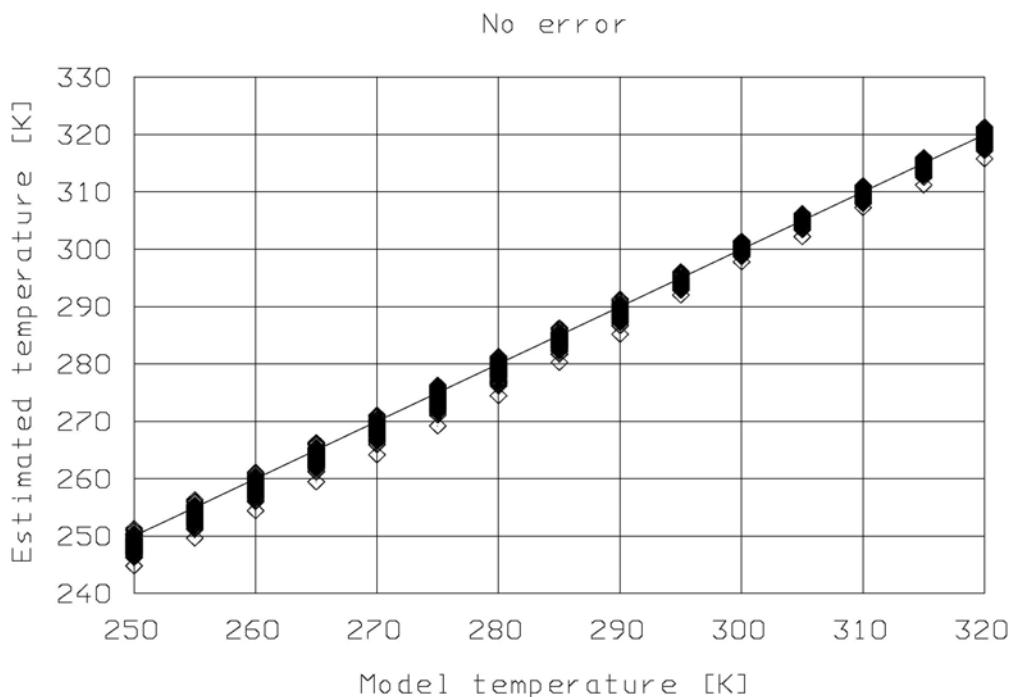


図 4.2.3 地表面温度推定値と真値の比較(大気補正誤差なし)

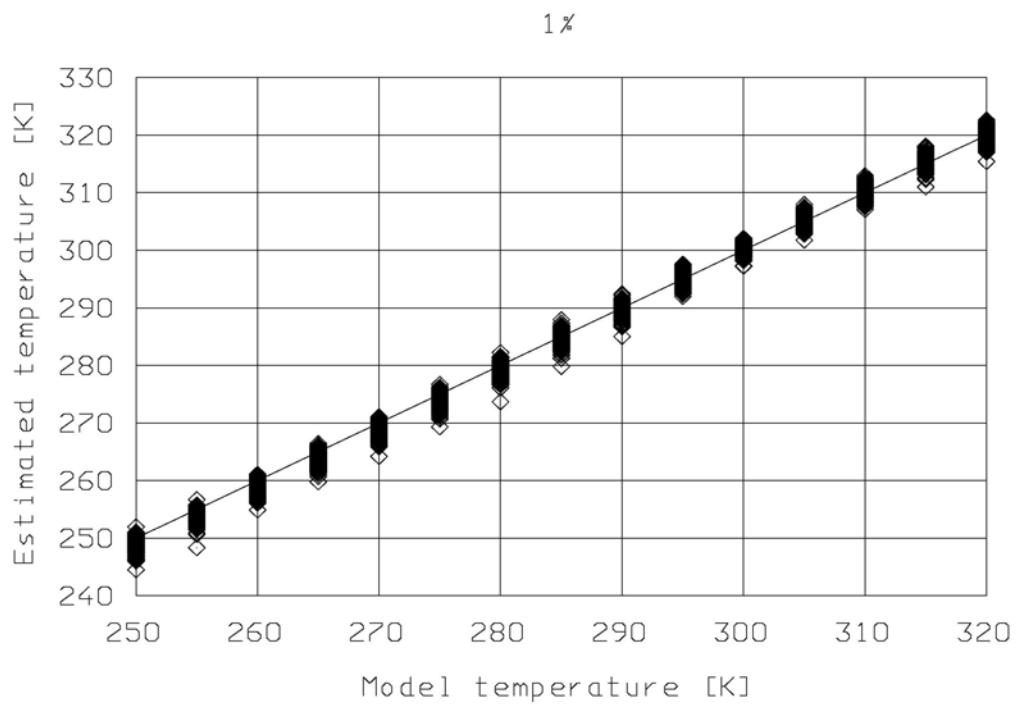


図 4.2.4 地表面温度推定値と真値の比較(大気補正誤差 1%)

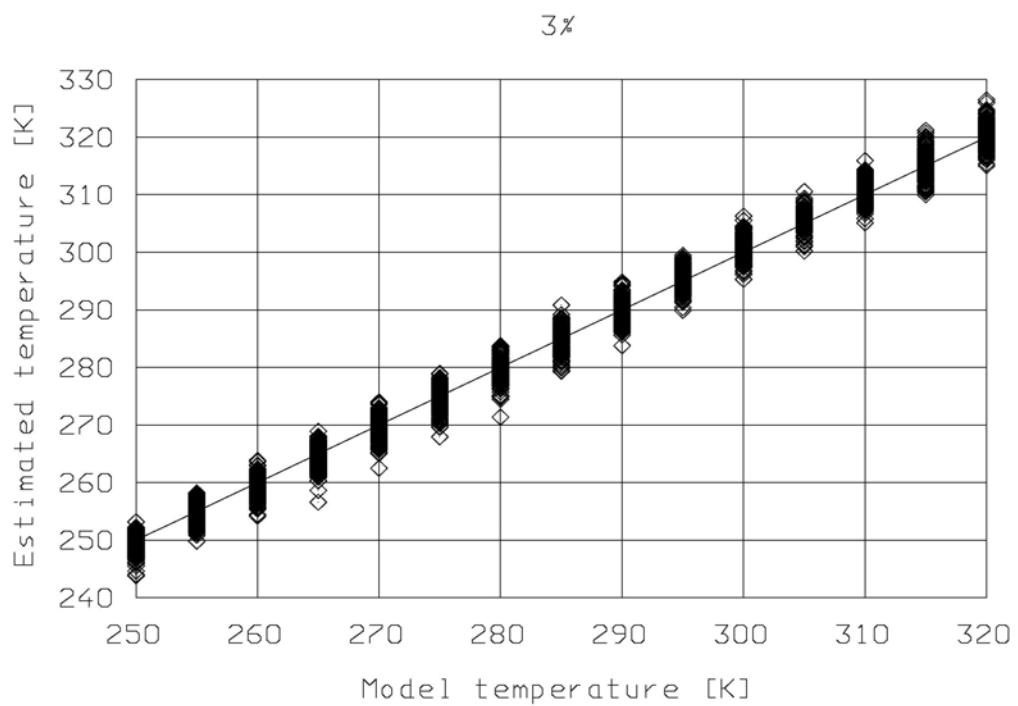


図 4.2.5 地表面温度推定値と真値の比較(大気補正誤差 3%)

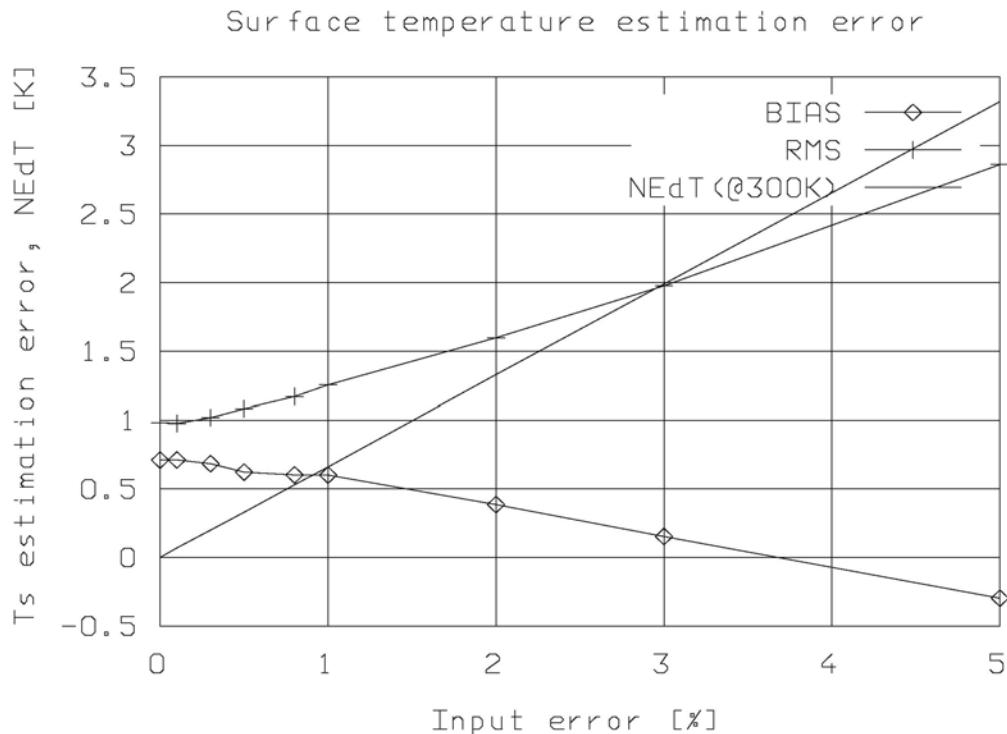


図 4.2.6 大気補正誤差と地表面温度推定誤差の関係

また、地表面温度 290[K]において、大気補正誤差が 0, 1, 3%の場合の地表面放射率の真値と推定値の比較を図 4.2.7-9 に示す。図中の◇は放射率が式(4.2.3)に従うとして求められた解であり、+は式(4.2.4)に従うとして求められた解であることを示す。

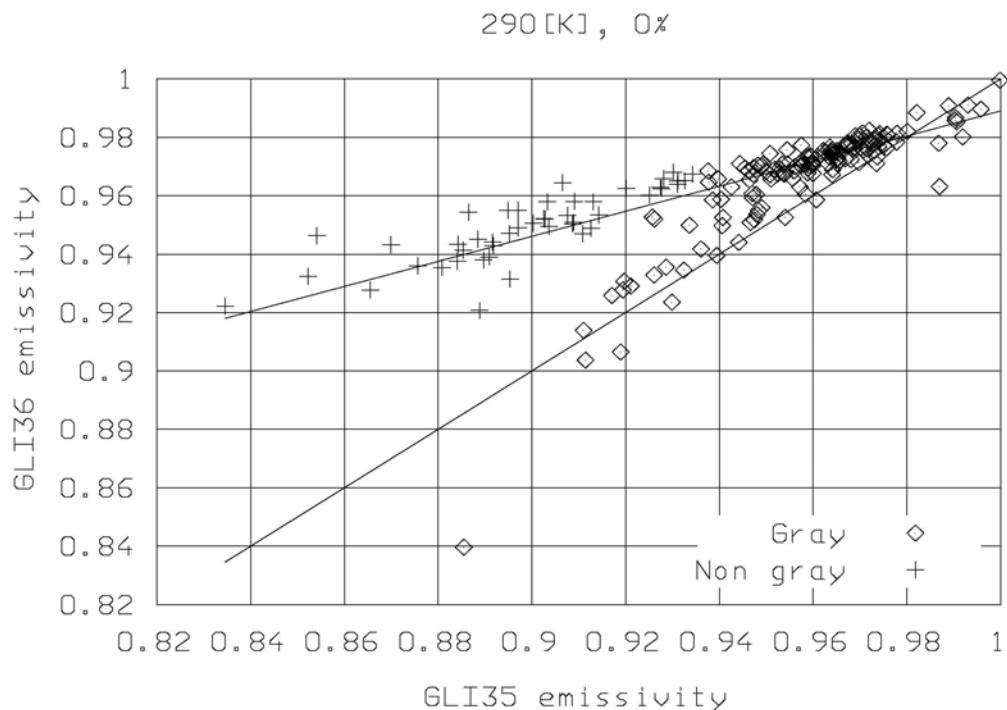


図 4.2.7 地表面放射率の真値と推定値の比較(地表面温度 290[K]、大気補正誤差無し)

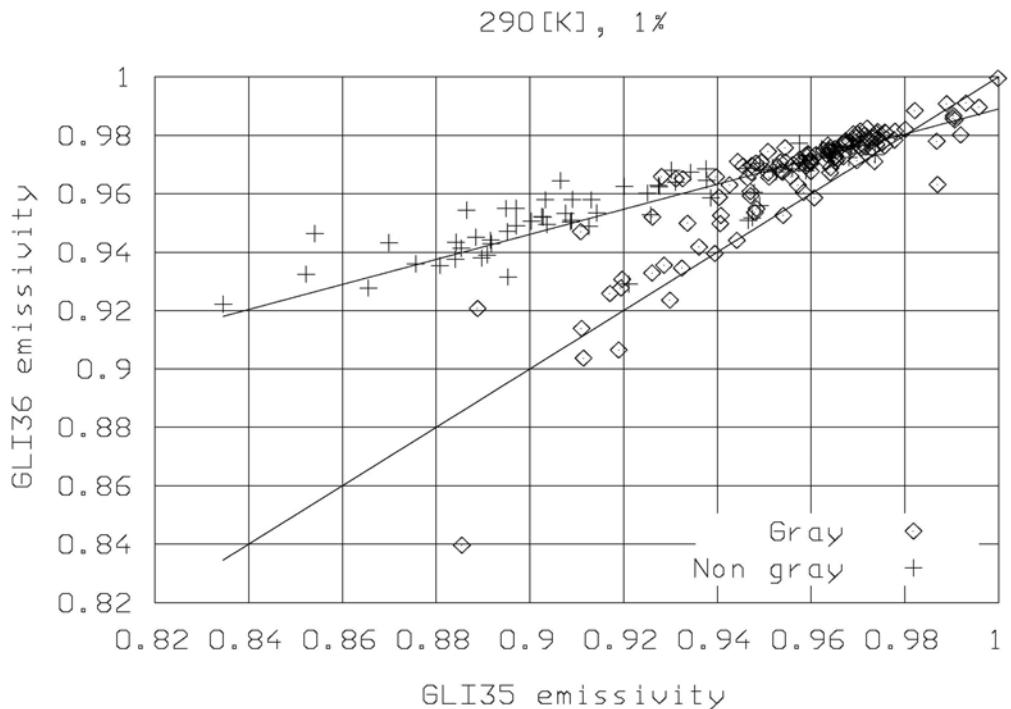


図 4.2.8 地表面放射率の真値と推定値の比較(地表面温度 290[K]、大気補正誤差 1%)

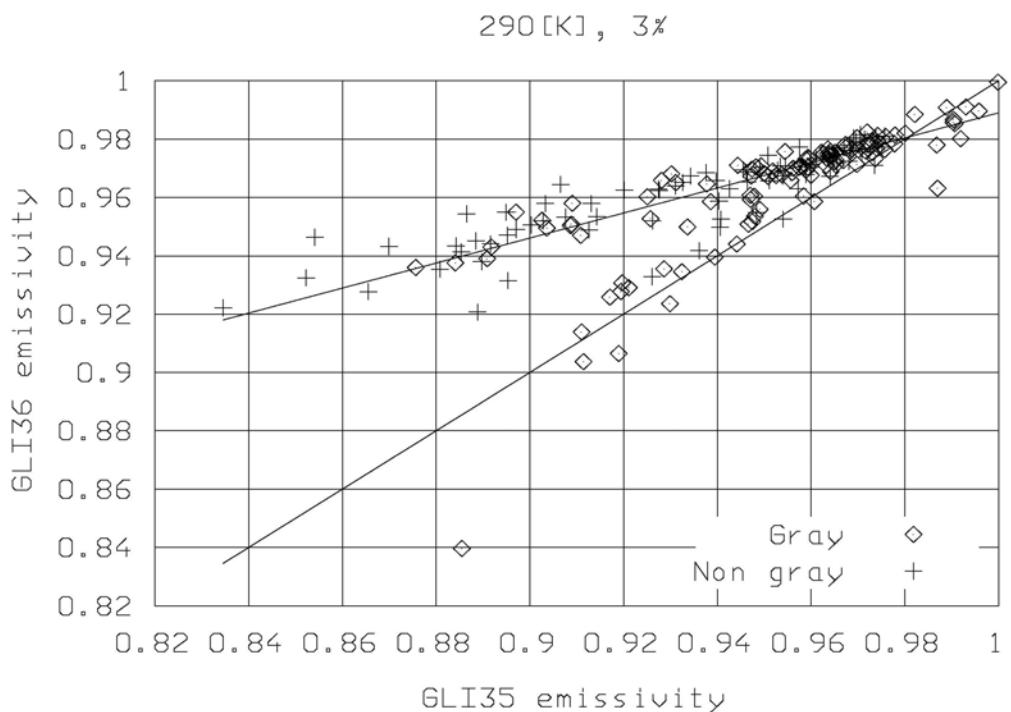


図 4.2.9 地表面放射率の真値と推定値の比較(地表面温度 290[K]、大気補正誤差 3%)

推定された放射率は、大気補正誤差にかかわらず 0.01 程度の標準偏差であり、放射率推定が安定的に行われていることを示している。

I.4 二つの地表面温度推定アルゴリズムの運用法の提案

統計的推定法は、計算負荷がかからない反面、地表面放射率を入力する必要がある。一方、準解析的手法は、放射率が推定できるが非線型連立方程式を画素毎に解く必要があるため計算負荷が大きい。このため、図 4.2.10 に示すように、一定期間間隔で準解析的手法を適用して放射率を求め、この放射率を用いて統計的手法で推定を実施する方法を採用すれば両者の得失を補い合って運用することが可能である。この運用法の確立のためには、準解析的手法を適用する時間間隔または、地表面放射率が変動したことを把握するための可視、赤外域データを用いた判別法の確立が必要となる。

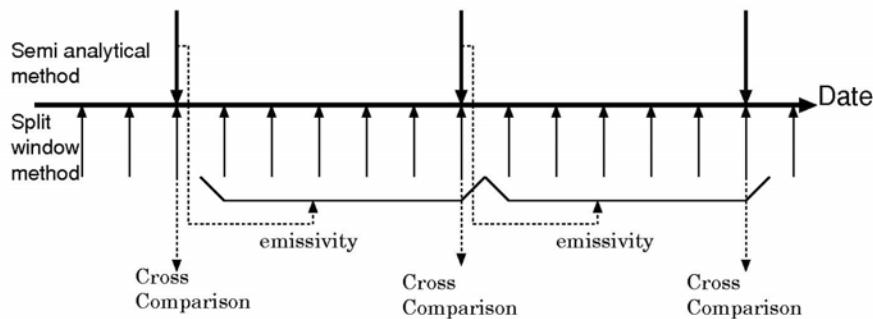


図 4.2.10 二つの解析法の運用法

I.5 推定例

2006 年 9 月 23 日米国西部の TERRA/MODIS データを用いて、準解析法を用いて地表面温度推定を行った。大気補正のための大気データは、当日の MODIS データから推定された大気プロファイルデータを用いた。可降水量、および $10.8\mu\text{m}$ 帯の透過率を図 4.2.11, 12 に示す。

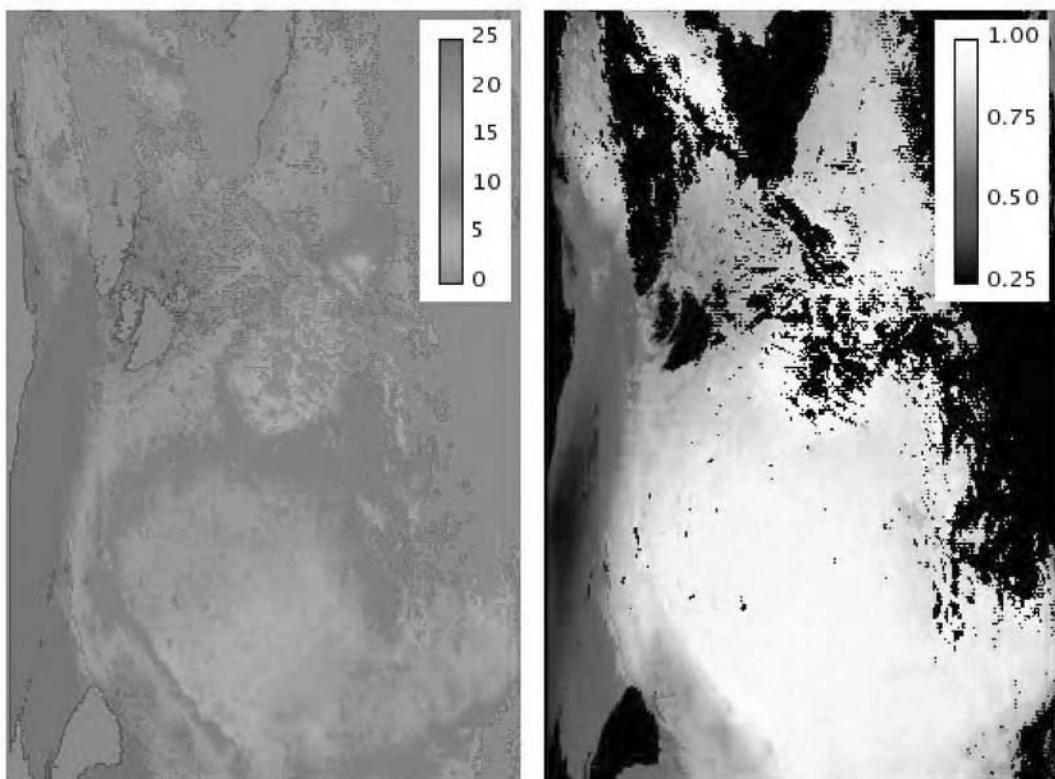


図 4.2.11 可降水量([mm])
推定した地表面温度を図 4.2.13 に示す。

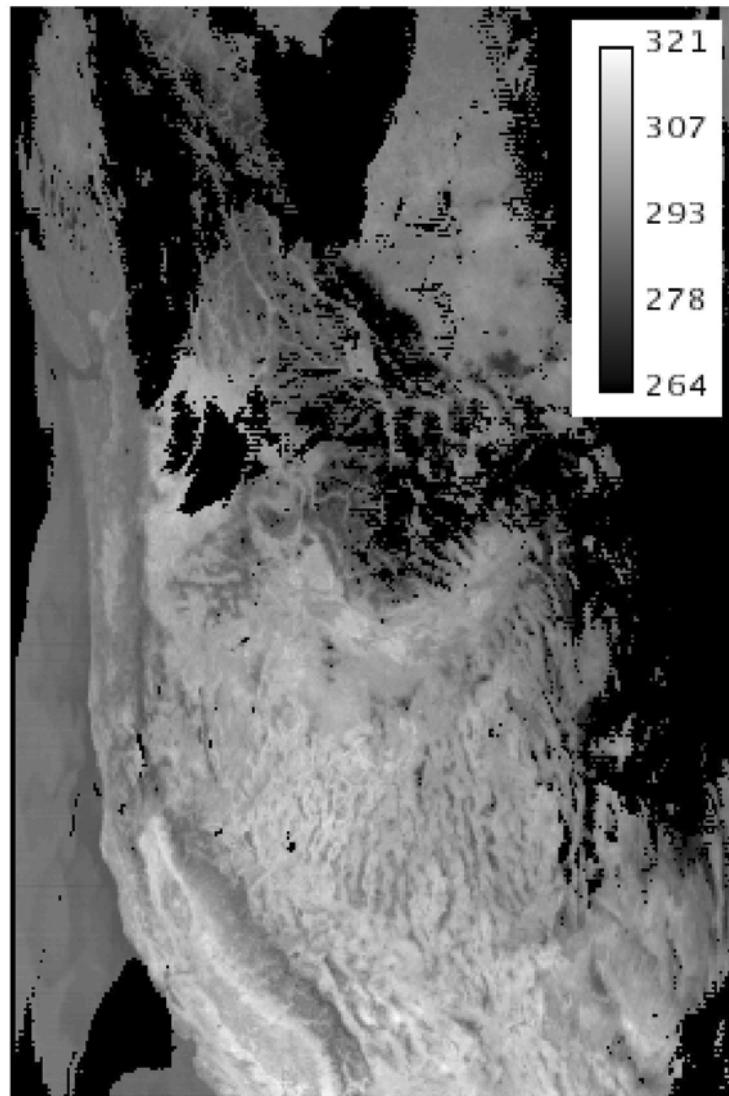


図 4.2.12 $10.8\mu\text{m}$ の透過率

図 4.2.13 地表面温度推定値([K])

II. 衛星観測熱赤外データの校正および、推定された地表面温度の検証に関する研究 II.1 実温度測定放射温度計の開発

植生はほぼ黒体と仮定できるが、裸地を黒体近似することは過剰近似となり、放射温度計を用いた地表面温度の地上検証では誤差を生むことになる。地上検証では、ある程度広域の温度を放射温度計によって計測することが必須であるため、裸地においては放射率の補正が必要となる。本研究では、簡単に放射率補正が可能な方法として、凹面鏡上部に穴をあけ、凹面鏡を地面に置き、上部の穴から放射温度計で温度を計測すると、多重反射により地表面の放射率が 1 と考えられ、放射率を補正した温度観測が可能となる。図 4.2.14 に計測法の模式図、図 4.2.15 にこの放射温度計を用いた温度観測の様子を示す。

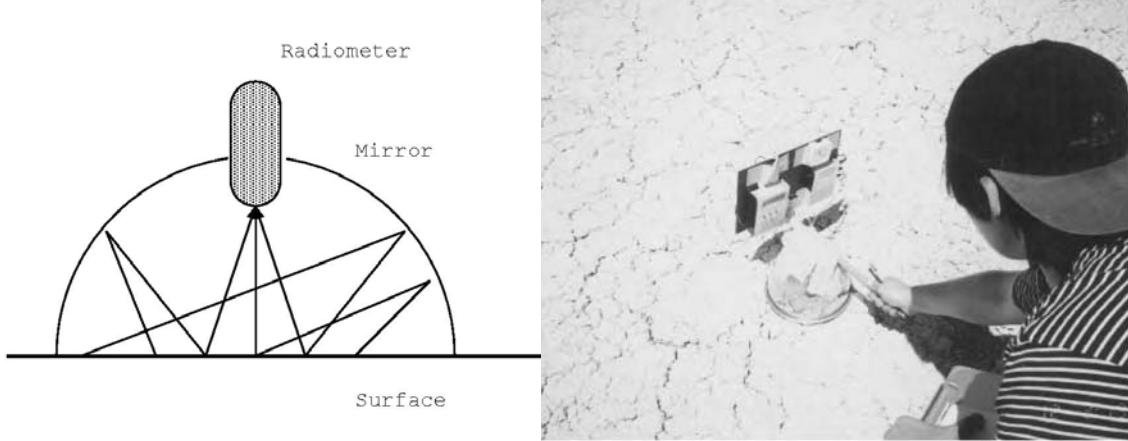


図 4.2.14 実温度測定放射温度計の原理

図 4.2.15 観測風景

II.2 裸地での地表面温度検証法

裸地はほぼ單一カテゴリと考えられるが、土壤の微妙な傾斜、土質の空間的変動などの影響により、温度は一定とは限らない。このため、対象領域内で出来る限り多く地表面温度を観測することが必要となる。このとき、観測点数を増加させるため放射温度計を増やすのは、凹面鏡を用いた観測の手間、放射温度計の校正の手間を考えると得策ではない。本研究では、以下に示す手順の地上観測法を開発した。

- (i) 凹面鏡を用いた放射温度計を持って対象領域内を歩きながら観測する。(移動観測点)
- (ii) 凹面鏡を用いずに、対象領域内のある 1 点の温度を高い時間分解能で計測する(固定観測点)。
- (iii) 時間ずらし処理により、固定観測点のデータを用いて、(i)の移動観測点の計測値を衛星通過時刻の温度に変換する。
- (iv) 時間ずらし処理後の移動観測点のデータを平均して衛星通過時刻の面平均温度とする。

時間ずらし処理は、時刻 t' 固定観測点の観測値 $T_f(t')$ を用いて同じ時刻の移動観測点の観測値 $T(t')$ を衛星観測時刻 t'' での値 $T(t'')$ に式(4.2.6)のように変換する。時間ずらし処理の模式図を図 4.2.16 に示す。

$$T(t'') = T(t') + [T_f(t'') - T_f(t')] \quad (4.2.6)$$

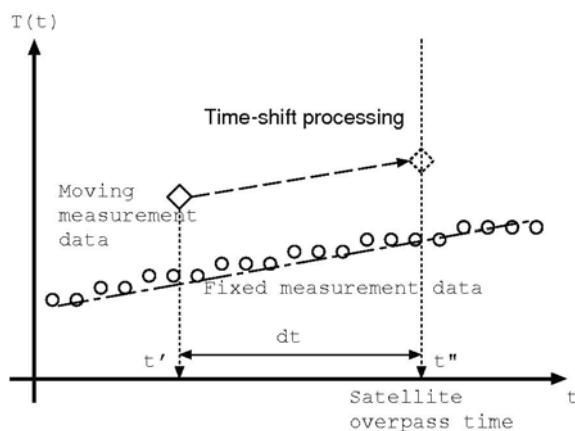


図 4.2.16 時間ずらし処理の模式図

II.3 検証例

2004年7月3~8日に米国ネバダ州 railroad playa で MODIS と同期して地表面温度観測を行った。対象領域として東西南北 1km の正方形領域をとり、その対角線方向を移動観測領域とした。移動観測においては、10 歩に 1 回観測を行うこととし、移動観測点数は測線あたり 200 点程度であった。対象領域の面平均温度と MODIS の LST プロダクトおよび、地表面放射率を変更して得られた地表面温度の比較を図 4.2.17 に示す。

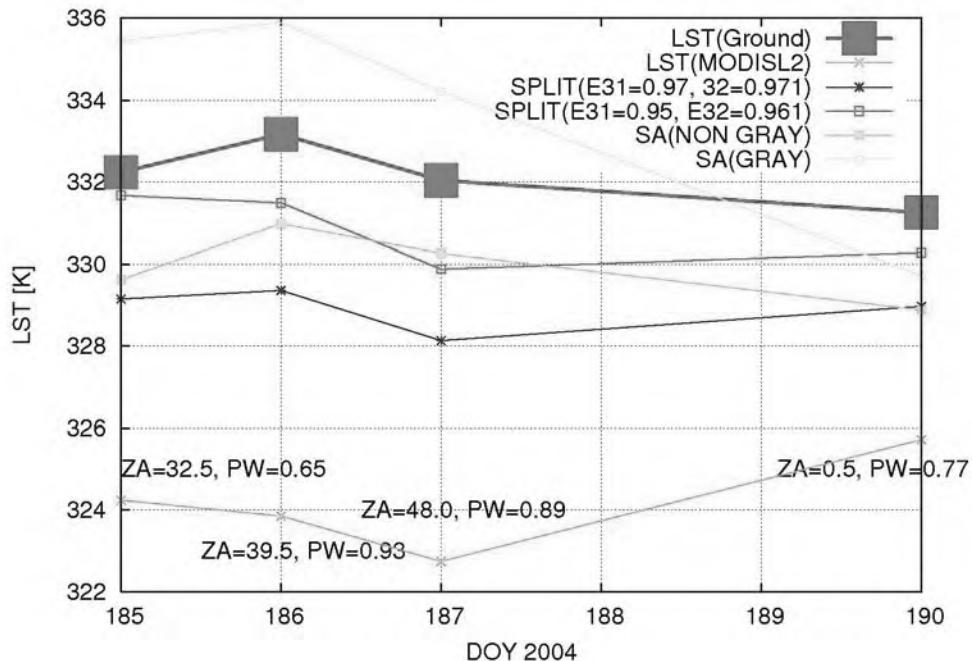


図 4.2.17 MODIS LST プロダクトと地上観測値の比較

MODIS LST プロダクトを算出する際の放射率はヘッダに記録されており、その値と JPL が計測した地表面放射率の比較を図 4.2.18 に示す。

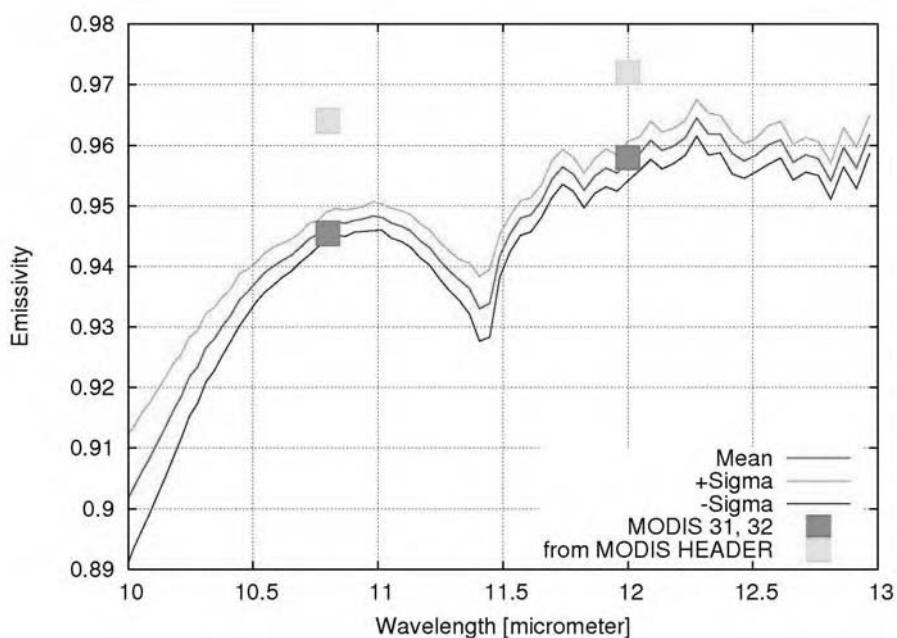
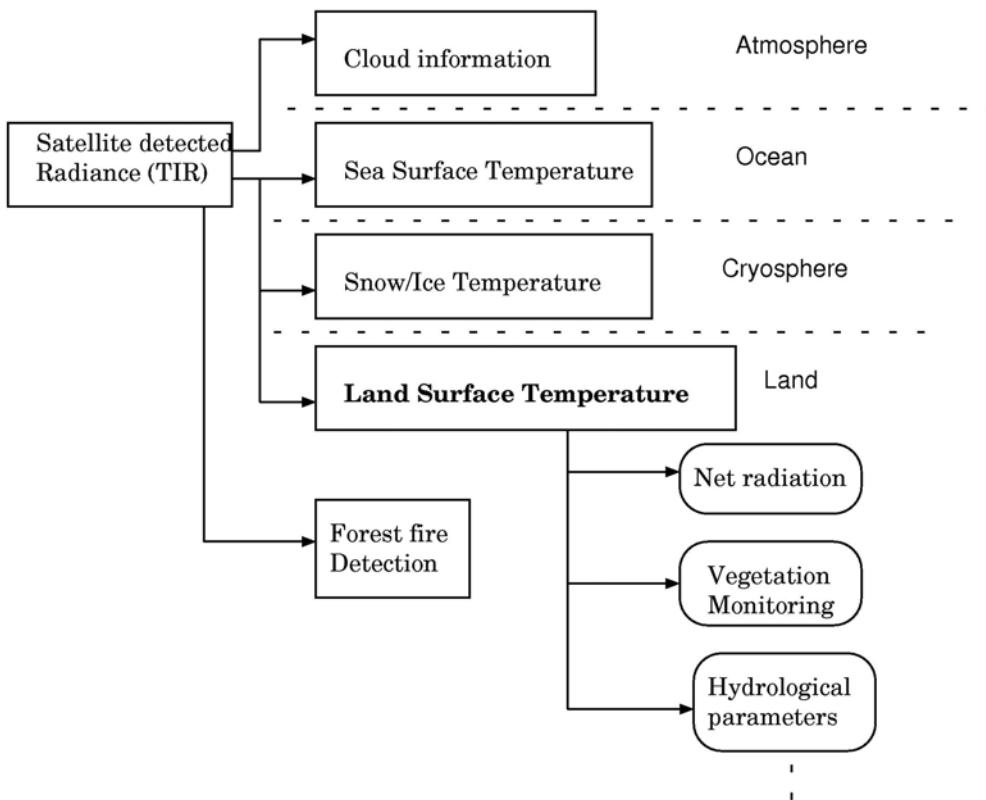


図 4.2.18 地表面放射率の比較

MODIS の用いている放射率は実測値よりも高いため、地表面温度が低く推定されており、正しい放射率を設定することで、より正確な地表面温度が推定できることがわかる。今後、このような検証を定期的に実施し、アルゴリズムの高精度化を図ることが必要となる。

(2) 得られた研究成果の状況及び今後期待される効果

地表面温度は、衛星から推定できる基礎的な物理量であり、図 4.2.18 に示すような、より高次のプロダクトの入力となる。このため、高精度化が要求されるプロダクトである。本研究は、地表面温度推定アルゴリズム開発、およびその検証法の開発を中心と/or するものであり、現行の衛星だけでなく、将来的な衛星計画における地表面温度推定法の基礎となるものである。このため、今後もこの方針で研究を進め、地球環境モニタリングの基礎となる技術の高精度化、安定化を進める予定である。



5. 類似研究の国内外の研究動向・状況と本研究課題の位置づけ

本研究では、森林の詳細な構造を取得するための標準的なバイオマス計測手法を確立して検証データを蓄積すると共に、多方向観測によって影の影響も含めた森林のスペクトル特性を把握し、これらを統合して中・低解像度センサによる高精度なバイオマス推定を可能とする手法開発を行っている。

リモートセンシングによる森林バイオマス推定に関する研究は、1)衛星の光学センサを用いる手法、2)合成開口レーダー(SAR)を用いる手法、3)航空機/地上設置のレーザースキャナを用いる手法、に大別できる。現在の各分野の動向は以下のとおりである。

1)は単純に衛星センサの観測値と実測の材積の相関からバイオマス推定を行う手法か、

COP3 以後注目されている樹冠率を推定し、想定した係数をかけて推定する手法の開発が主流である。前者は比較的高解像度の衛星データを用いた推定手法であり、全球モニタリングには適用し難い。また、両者共に樹冠の作り出す影が推定精度低下をもたらすことが判明しているが、その解決策は示されていない。2)は昼夜天候にかかわらず地表面の形状データ取得が可能なことから期待され活発な研究が行われているが、レーダーであるために植生・非植生の区別は SAR データのみでは難しいという問題がある。多バンドの SAR を用いてこれらを分離する研究は行われているが基礎研究の段階にある。3)は取得される距離画像から森林の構造を計測し、バイオマスを推定する手法の研究が盛んになりつつある。これらは森林の構造を精密に計測し高精度のバイオマス推定を行うことを目的とした研究である。しかし、航空機からの計測ではレーザースポットの照射密度を向上させることが困難であり、森林の表面形状計測の精度に限界がある。また、地上設置レーザースキヤナでは対象に接近した計測が可能であるが、航空機のように森林の上部からの計測が非常に困難である。

以上が関連研究の動向であるが、衛星データを用いた全球バイオマスマニタリングを行うために必要なバイオマス推定モデル構築と実測データ取得の手法開発を含めて一貫して行っている。さらに、衛星による多角観測の実現を提唱し実際の衛星計画に発展的に進んでいる本研究では、森林の詳細な構造を取得するための標準的なバイオマス計測手法を確立して検証データを蓄積すると共に、多方向観測によって影の影響も含めた森林のスペクトル特性を把握し、これらを統合して中・低解像度センサによる高精度なバイオマス推定を可能とする手法開発を行っている。

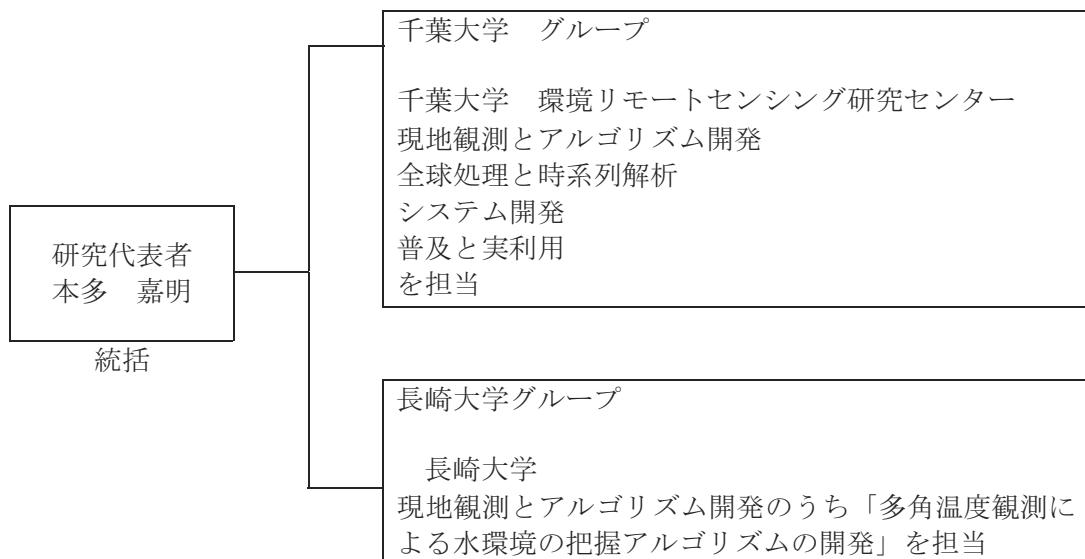
リモートセンシングによる森林バイオマス推定に関する研究は、1)衛星の光学センサを用いる手法、2)合成開口レーダー(SAR)を用いる手法、3)航空機/地上設置のレーザースキヤナを用いる手法、に大別できる。現在の各分野の動向は以下のとおりである。

1)は単純に衛星センサの観測値と実測の材積の相関からバイオマス推定を行う手法か、COP3 以後注目されている樹冠率を推定し、想定した係数をかけて推定する手法の開発が主流である。前者は比較的高解像度の衛星データを用いた推定手法であり、全球モニタリングには適用し難い。また、両者共に樹冠の作り出す影が推定精度低下をもたらすことが判明しているが、その解決策は示されていない。2)は昼夜天候にかかわらず地表面の形状データ取得が可能なことから期待され活発な研究が行われているが、レーダーであるために植生・非植生の区別は SAR データのみでは難しいという問題がある。多バンドの SAR を用いてこれらを分離する研究は行われているが基礎研究の段階にある。3)は取得される距離画像から森林の構造を計測し、バイオマスを推定する手法の研究が盛んになりつつある。これらは森林の構造を精密に計測し高精度のバイオマス推定を行うことを目的とした研究である。しかし、航空機からの計測ではレーザースポットの照射密度を向上させることが困難であり、森林の表面形状計測の精度に限界がある。また、地上設置レーザースキヤナでは対象に接近した計測が可能であるが、航空機のように森林の上部からの計測が非常に困難である。

以上が関連研究の動向であるが、衛星データを用いた全球バイオマスマニタリングを行うために必要なバイオマス推定モデル構築を、実測データ取得の手法開発を含めて一貫して行っている研究例はない。

6. 研究実施体制

(1) 体制



(2) メンバー表

① 千葉大学グループ

氏名	所属	役職	研究項目	参加時期
本多 嘉明	千葉大学環境リモートセンシング研究センター	准教授	研究総括	平成9年9月～平成20年3月
高村 民雄	千葉大学環境リモートセンシング研究センター	教授	大気モデル開発	平成9年9月～平成20年3月
近藤 昭彦	千葉大学環境リモートセンシング研究センター	准教授	気候変動解析	平成9年9月～平成20年3月
梶原 康司	千葉大学環境リモートセンシング研究センター	講師	衛星データ解析・調査機材開発	平成9年9月～平成20年3月
本郷 千春	千葉大学環境リモートセンシング研究センター	助手	土地被覆変動解析	平成9年9月～平成20年3月
近田 朝子	千葉大学環境リモートセンシング研究センター	研究生	衛星データ解析	平成9年9月～平成19年3月
高山 誠一	千葉大学自然	M2	リモコンヘリ観測	平成12年4月～

	科学研究科			平成 15 年 3 月
久保田 隆司	千葉大学自然 科学研究科	M2	リモコンヘリ観測	平成 12 年 4 月～ 平成 15 年 3 月
Tuya. Sanjaa	千葉大学自然 科学研究科	D3	データの蓄積管理	平成 10 年 1 月～ 平成 20 年 3 月
新井 健一	千葉大学自然 科学研究科	M2	大気放射モデル開発	平成 13 年 8 月～ 平成 18 年 3 月
矢野 幸二	千葉大学自然 科学研究科	D1	熱放射モデル開発	平成 13 年 7 月～ 平成 16 年 4 月
出水 将樹	千葉大学自然 科学研究科	M3	バイオマス刈り取り調 査	平成 13 年 4 月～ 平成 17 年 3 月
高藤 良史	千葉大学自然 科学研究科	M2	LAI 観測	平成 14 年 4 月～ 平成 17 年 3 月
西原 由登	千葉大学自然 科学研究科	M2	リモコンヘリ観測	平成 14 年 4 月～ 平成 17 年 3 月
斎藤 祐美子	千葉大学自然 科学研究科	M2	LAI 観測	平成 15 年 4 月～ 平成 18 年 3 月
本間 和幸	千葉大学自然 科学研究科	M2	リモコンヘリ観測	平成 15 年 4 月～ 平成 18 年 3 月
安立 光将	千葉大学自然 科学研究科	M2	LAI 観測	平成 16 年 1 月～ 平成 18 年 3 月
三宅 克英	千葉大学自然 科学研究科	M2	リモコンヘリ観測	平成 14 年 4 月～ 平成 19 年 3 月
五十嵐 悠也	千葉大学自然 科学研究科	M1	リモコンヘリ観測	平成 17 年 4 月～ 平成 19 年 3 月
野秋 浩三	千葉大学工学 部	工学部研 究生	リモコンヘリ観測	平成 13 年 4 月～ 平成 15 年 3 月
難波 聖一	千葉大学工学 部	S4	車両観測	平成 14 年 4 月～ 平成 15 年 3 月
片岡 可奈	千葉大学工学 部	研究生	LAI 観測	平成 15 年 4 月～ 平成 17 年 3 月
福田 竜平	千葉大学工学 部	S4	リモコンヘリ観測	平成 15 年 4 月～ 平成 16 年 3 月
貝塚 治樹	千葉大学工学 部	S4	LAI 観測	平成 16 年 4 月～ 平成 17 年 3 月
柚木 慎吾	千葉大学工学 部	S4	リモコンヘリ観測	平成 16 年 4 月～ 平成 17 年 3 月
佐藤 大輔	千葉大学工学 部	S4	LAI 観測	平成 16 年 4 月～ 平成 17 年 3 月
横手 恵亮	千葉大学工学 部	S4	LAI 観測	平成 17 年 4 月～ 平成 18 年 3 月
修 照	千葉大学工学 部	4S	LAI 観測	平成 19 年 4 月～ 平成 20 年 3 月
李 子墨	千葉大学自然 科学研究科	M1	LAI 観測	平成 19 年 4 月～ 平成 20 年 3 月
高木 方隆	高知工科大学 社会システム 工学科	准教授	計算機システム開発	平成 9 年 9 月～ 平成 20 年 3 月
鄭 鍾赫	高知工科大学 社会システム工学	研究室助 手	計算機システム開発	平成 16 年 10 月～ 平成 20 年 3 月

	科			
氏家 康二	高知工科大学 社会システム 工学科	M2	計算機システム開発	平成 16 年 10 月～ 平成 18 年 3 月
坂井 知也	高知工科大学 社会システム 工学科	M2	計算機システム開発	平成 16 年 10 月～ 平成 19 年 3 月
宮田 剛	高知工科大学 社会システム 工学科	M2	計算機システム開発	平成 16 年 10 月～ 平成 19 年 3 月
木下 和	高知工科大学 社会システム 工学科	M2	計算機システム開発	平成 18 年 3 月～ 平成 20 年 3 月
山本 優太	高知工科大学 社会システム 工学科	M2	計算機システム開発	平成 18 年 3 月～ 平成 20 年 3 月
山本 高史	高知工科大学 社会システム 工学科	M2	計算機システム開発	平成 18 年 7 月～ 平成 20 年 3 月
佐野 到	近畿大学理工 学部情報学科	准教授	大気モデル開発	平成 14 年 7 月～ 平成 20 年 3 月
坊野 浩規	近畿大学	M2	大気モデル開発	平成 13 年 7 月～ 平成 15 年 3 月
Compton Jim Tucker	米国航空宇宙 局	研究室長	衛星データ解析	平成 9 年 9 月～ 平成 20 年 3 月
古海 忍	奈良女子大学	特別研究 員	衛星データ解析	平成 15 年 11 月～ 平成 18 年 3 月
陳 路	奈良女子大学 大学院情報科 学専攻	M2	衛星データ解析	平成 15 年 11 月～ 平成 20 年 3 月
須崎 純一	東京大学生産 技術研究所	講師	二方向反射モデル解析	平成 12 年 7 月～ 平成 20 年 3 月
西田 顕郎	筑波大学農林 工学系	講師	二方向反射モデル解析	平成 15 年 5 月～ 平成 20 年 3 月
品川 徳秀	筑波大学	助手	計算機システム開発	平成 13 年 4 月～ 平成 16 年 3 月
小野 祐作	千葉大学自然 科学研究科	D1	温度センサの校正なら びに実温度推定アルゴリ ズム開発	平成 19 年 4 月～ 平成 20 年 3 月
山本 浩万	産業技術総合 研究所グリッ ド研究センター	研究員	現地観測データ解析	平成 9 年 9 月～ 平成 20 年 3 月
石平 博	山梨大学	講師	八ヶ岳観測サトの計測 及び補助	平成 15 年 4 月～ 平成 18 年 3 月
北原 健司	山梨大学	M2	八ヶ岳観測サトの計測 及び補助	平成 15 年 4 月～ 平成 18 年 3 月
石川 雄一	山梨大学	M2	八ヶ岳観測サトの計測 及び補助	平成 15 年 4 月～ 平成 18 年 3 月
中川 和憲	山梨大学	M2	八ヶ岳観測サトの計測	平成 15 年 4 月～

			及び補助	平成 18 年 3 月
武田 康宏	山梨大学	M2	八ヶ岳観測サイトの計測 及び補助	平成 15 年 4 月～ 平成 18 年 3 月
山下 恵	㈱GIS 東京	技士	森林計測	平成 15 年 12 月～ 平成 18 年 3 月
橋本 俊昭	宇宙航空研究 開発機構	研究員	衛星データ精密幾何補 正	平成 10 年 4 月～ 平成 20 年 3 月
小野 朗子	宇宙航空研究 開発機構	研究員	LAI 観測	平成 14 年 11 月～ 平成 20 年 3 月
吉岡 博貴	愛知県立大学	准教授	植生指数検証	平成 14 年 11 月～ 平成 20 年 3 月
鈴木 弘人	ヤマハ発動機 ㈱	技士	調査機材開発	平成 14 年 11 月～ 平成 20 年 3 月
Sodovyn Khudumur	モンゴル国立リモート センシングセンター	センター長	モンゴルサイトのデータ管理	平成 9 年 9 月～ 平成 20 年 3 月
松岡 真如	高知大学	助手	時系列データ解析	平成 9 年 9 月～ 平成 20 年 3 月
Alfred Huete	アリゾナ大学	教授	植生指数開発	平成 14 年 11 月～ 平成 20 年 3 月
Li Kim Thoa	Vietnam National Center for Natural Science and Technology Institute of Geography Nghiado, Tuliem, Hanoi, Vietnam	研究員	衛星データ解析	平成 15 年 1 月～ 平成 20 年 3 月
Thomas Schmugge	US Dept. of Agriculture, Hydrology Lab	物理科学者	熱環境計測及び解析	平成 14 年 11 月～ 平成 20 年 3 月
Dim Jules Rostand	千葉大学環境 リモートセン シング研究セ ンター	JST 研究員	多方向観測データ解析 処理、そのデータベー ス化および欧文論文作 成補助	平成 18 年 4 月～ 平成 20 年 3 月
一戸 慎也	千葉大学環境 リモートセン シング研究セ ンター	JST 研究員	衛生データの解析・処 理	平成 18 年 4 月～ 平成 20 年 3 月
立石 彩	千葉大学環境 リモートセン シング研究セ ンター	研究補助員	経理・事務担当	平成 9 年 12 月～ 平成 20 年 3 月

②長崎大学グループ

氏名	所属	役職	研究項目	参加時期
森山 雅雄	長崎大学	准教授	温度センサの校正ならびに実温度推定アルゴリズム開発	平成 9 年 9 月～平成 20 年 3 月
中山 義史	長崎大学	D3	温度センサの校正ならびに実温度推定アルゴリズム開発	平成 13 年 7 月～平成 20 年 3 月
山口 研寿	長崎大学	M2	温度センサの校正ならびに実温度推定アルゴリズム開発	平成 15 年 1 月～平成 17 年 3 月
近藤 博	長崎大学	M2	温度センサの校正ならびに実温度推定アルゴリズム開発	平成 16 年 7 月～平成 18 年 3 月
松井 隆	長崎大学	D2	温度センサの校正ならびに実温度推定アルゴリズム開発	平成 16 年 7 月～平成 20 年 3 月
谷川 聰	長崎大学	D1	温度センサの校正ならびに実温度推定アルゴリズム開発	平成 17 年 4 月～平成 20 年 3 月
三浦 高史	長崎大学	M2	温度センサの校正ならびに実温度推定アルゴリズム開発	平成 18 年 4 月～平成 20 年 3 月
石坂 丞二	長崎大学	教授	温度センサの校正ならびに実温度推定アルゴリズム開発	平成 18 年 12 月～平成 20 年 3 月

7. 研究期間中の主な活動

(1) ワークショップ・シンポジウム等

年月日	名称	場所	参加人数	概要
平成 17 年 1 月 20 日	Seminar on Satellite Observation Techniques for Detecting Earth Surface Phenomena	千葉大学 講義室 502 号室	18名	DMSP による夜間光の観測から、全球でのバイオマスバーニングの監視に寄与する時系列データセットを構築した Chris Elvidge 氏を招き、その概要を解説してもらうとともに、当チームでの研究成果の一端を紹介し、両者の研究対象から共通する研究方針に関する検討を行った。

(2) 指名した研究者等

氏名 (所属、役職)	指名の目的	滞在先	滞在期間
Chris Elvidge (NOAA National Geophysical Data Center、研究室長)	千葉大学で開催する「 Seminar on Satellite Observation Techniques for Detecting Earth Surface Phenomena」に参加し、我々が行っている研究についての打ち合せを行う為	西千葉プラザホテル	平成 17 年 1 月 19 日～平成 17 年 1 月 20 日

8. 発展研究による主な研究成果

(1) 論文発表 (英文論文 37 件 邦文論文 33 件)

- Li Kim Thoa, Yoshiaki Honda, Koji Kajiwara, Asako Konda 、” Automated Classification for Vegetation of Ninh Thuan, Binh Thuan and Lam Dong Provinces in Vietnam by Simulated GLI Data from Landsat MT”、『写真測量とリモートセンシング』 vol.41 6号、pp4-13、2002年12.25
- Akiko ONO・Koji KAJIWARA・Yoshiaki HONDA (Chiba Univ CEReS/JST)・Atsuo ONO (Otemae University)、 Spectral normalization method by band sum and its application 、 ISPRS Commission VII WG International Workshop on Monitoring/Modeling Global Environmental Chang、京都市国際交流会館、CD-ROM G3, pp1-4、2003. 10. 21-23
- Tuya Sanjaa・Koji Kajiwara・Yoshiaki Honda (Chiba Univ CEReS/JST)、 A STUDY ON GRASSLAND FIRE MONITORING USING MID-RESOLUTION SATELLITE SENSOR、ISPRS Commission VII WG International Workshop on Monitoring/Modeling Global

- Environmental Chang、京都市国際交流会館、CD-ROM C6, pp1-5、2003. 10. 22
4. Koji YANO・Koji KAJIWARA・Yoshiaki HONDA (Chiba Univ CEReS/JST)、A study on the vegetation monitoring using temperature observation、ISPRS Commission VII WG International Workshop on Monitoring/Modeling Global Environmental Chang、京都市国際交流会館、CD-ROM C2, pp1-3、2003. 10. 21-23
 5. Asako KONDA (JST)・Koji KAJIWARA・Yoshiaki HONDA (Chiba Univ CEReS/JST)、A study on the algorithm of vegetation surface roughness index for global monitoring、ISPRS Commission VII WG International Workshop on Monitoring/Modeling Global Environmental Chang、京都市国際交流会館、CD-ROM G5, pp1-4、2003. 10. 21-23
 6. Tuya Sanjaa・Koji Kajiwara・Yoshiaki Honda (Chiba Univ CEReS/ JST)、ESTIMATION OF EVAPOTRANSPIRATION IN MONGOLIAN GRASSLAND USING REMOTELY SENSED AND GROUND DATA、The 2nd International Workshop on Terrestrial Change in Mongolia- Joint Workshop of AMPEX, FORSGC and RAISE Projects -、JAMSTEC Yokohama Institute for Earth Science, Yokohama、2003. 12. 2-3
 7. Tuya Sanjaa・Yoshiaki Honda (Chiba Univ CEReS/ JST)・Dr. C. P. Gross (Gesellschaft für angewandte Fernerkundung (GAF))、FIRE DETECTION TECHNOLOGY IN MONGOLIA、モンゴルの環境保全と持続的発展、JICA日本センター・モンゴル国立大学敷地内、2003. 7. 23-25
 8. 小野朗子・梶原康司・本多嘉明（千葉大学環境リモートセンシング研究センター・JST）・小野厚夫（大手前大学）、Availability of normalized spectra of Landsat/TM data by their band sum、ACRS 2003 ISRS、Busan Exhibition and Convention Center、CD-ROM DATA030267, pp1-3、2003. 11. 4-7
 9. Tuya Sanjaa・Koji Kajiwara・Yoshiaki Honda (Chiba Univ CEReS/ JST)、ESTIMATION OF EVAPOTRANSPIRATION IN MONGOLIAN GRASSLAND USING REMOTELY SENSED AND GROUND DATA、ACRS 2003 ISRS、Busan Exhibition and Convention Center、CD-ROM DATA030145, pp1-3、2003. 11. 4-7
 10. 西原由登、梶原康司、本多嘉明（千葉大学環境リモートセンシング研究センター・JST）、Estimation of leaf quantity using spectrum data、ACRS 2003 ISRS、Busan Exhibition and Convention Center、CD-ROM DATA030304, pp1-3、2003. 11. 4-7
 11. 高藤良史、梶原康司、本多嘉明（千葉大学環境リモートセンシング研究センター・JST）、Method of vegetation spectrum measurement using multi spectrum camera、ACRS 2003 ISRS、Busan Exhibition and Convention Center、CD-ROM DATA030266, pp1-3、2003. 11. 4-7
 12. 近田朝子（JST, SORST）、梶原康司、本多嘉明（千葉大学環境リモートセンシング研究センター・JST, SORST）、Land Cover Change Detection Using GLI、30th International Symposium on Remote Sensing of Environment、Sheraton Waikiki Beach Resort、2003. 11. 14
 13. 梶原康司、本多嘉明（千葉大学 環境リモートセンシング研究センター・JST, SORST）、A study on estimation of grassland standing biomass in semi arid area using satellite data、日中共同シンポジウム「中国北方地域における環境保全型農牧業の展開」、内蒙古大学蒙古学研究中心（中国・内蒙古自治区フフホト市）、2004. 8. 5~6
 14. Masaki Demizu, Koji kajiwara, Yoshiaki Honda(Center for Environmental Remote Sensing, Chiba University, Japan/SORST, JST)、Development of Vegetation Structure Measurement System using Stereo pair Images and Laser Scanning data、ISRS2004、Jeju KAL Hotel、2004. 10. 28
 15. Koji kajiwara, Yoshiaki Honda(Center for Environmental Remote Sensing, Chiba University, Japan/SORST, JST)、Development of Measurement Method for Physical Parameter Related Photo-synthetic Active Radiation in Deciduous Conifer Forest、ISRS2004、Jeju KAL Hotel、2004. 10. 28

16. Kana Kataoka, Koji Kajiwara, Yoshiaki Honda, Asako Konda (Center for Environmental Remote Sensing, Chiba University, Japan/SORST, JST)、Desertification detection using Satellite data in Yellow River、25th Asian Conference Remote Sensing 、The Sheraton Chiang Mai Hotel、p846、2004. 11. 22～25
- 17. Yoshifumi Takafuji, Koji Kajiwara, Yoshiaki Honda (Center for Environmental Remote Sensing, Chiba University, Japan/SORST, JST)、VEGETATION CLASSIFICATIONS BY STRUCTURES ESTIMATED FROM DIFFERENCE OF BRF、25th Asian Conference Remote Sensing 、The Sheraton Chiang Mai Hotel、pp379-384、2004. 11. 22～25
18. Junichi Susaki, Keitarou Hara, Koji Kajiwara and Yoshiaki Honda, “Robust Estimation of BRDF Model Parameters” , Remote Sensing of Environment, vol. 89, pp. 63–71, 2004
19. T. SANJAA, B. ZAMBA, K. KAJIWARA AND Y. HONDA, ” Satellite-derived estimates of evapotranspiration in the arid and semi-arid region of Mongolia” , International Journal of Environmental Studies Vol. 62 No. 6, pp517-526(10)、2005年10月
20. Kazuyuki Honma、Koji Kajiwara、Yoshiaki Honda、DEVELOPMENT OF 3D STRUCTURE MEASUREMENT SYSTEM USING LASER SCANNING DATA AND CCD SENSOR、The International Symposium on Management System for Disaster Prevention、高知工科大学、2006. 3. 11
- 21. Yoshiaki HONDA(CEReS, JST. SORST), Hirokazu YAMAMOTO, Masahiro HORI, Hiroshi Murakami, Nobuyuki Kikuchi(JAXA)、Global environment monitoring using the next generation satellite sensor, SGLI/GCOM-C、International Geoscience And Remote Sensing Symposium(IGARSS)2005、COEX, Seoul, Korea, pp. 4208-4210、2005. 7. 28
22. Tuya Sanjaa、Koji Kajiwara、Yoshiaki Honda(CEReS, SORST. JST)、Daily Grass Reference Evapotranspiration Estimates: Variability and Relationship to NDVI in Mongolian Grassland region、The First International Symposium on Terrestrial and Climate Change in Mongolia 、Mongolia-Japan Center in Mongolia 、2005. 7. 26-2005. 7. 28
- 23. Kazuyuki Honma, Koji Kajiwara, Yoshiaki Honda、Development of 3D Structure Measurement System using Laser Scanning data and CCD sensor、International Symposium on Remote Sensing 2005、International Convention Center Jeju, pp76-78、2005. 10. 12-2005. 10. 14
24. Yoshiaki Honda(CEReS/SORST JST), Hirokazu YAMAMOTO, Masahiro HORI, Hiroshi MURAKAMI, Nobuyuki KIKUCHI (JAXA EORC)、Global environment change monitoring using the next generation satellite sensor, SGLI/GCOM-C 、International Symposium on Remote Sensing 2005、International Convention Center Jeju, pp11-13、2005. 10. 12-2005. 10. 14
25. Kazuyuki Honma Koji KAJIWARA Yoshiaki HONDA、Development of 3D Structure Measurement System using Laser Scanning data and Radio-Controlled Helicopter、The 26th Asian Conference on Remote Sensing(ACRS2005)、Melia Hanoi Hotelベトナム・ハノイ、CD-ROM DTP1-4、2005. 11. 7-2005. 11. 11
26. S. Tuya, K. Kajiwara, Y. Honda (CEReS Chiba Univ, SORST JST)、A COMPARISON OF FIVE POTENTIAL EVAPOTRANSPIRATION METHODS AND RELATIONSHIP TO NDVI FOR REGIONAL USE IN THE MONGOLIAN GRASSLAND、ISPRS第6部会シンポジウム『e-Learning and the Next Steps for Education』、東京大学駒場第2キャンパス・生産技術研究所メモリアルホール、2006. 6. 27-2006. 6. 30
27. T. SANJAA, K. KAJIWARA AND Y. HONDA (CEReS Chiba Univ, SORST JST)、A Comparative Study of Split Window Algorithms for Estimating Land Surface Temperature in the Mongolian Grassland、IGARSS 2006 & 27th Canadian Symposium on Remote Sensing、Colorado Convention Center, Denver. Colorado. USA、2006. 7. 31-2006. 8. 4
28. Yoshiaki HONDA(CEReS Chiba Univ, SORST JST), Hirokazu YAMAMOTO, Masahiro HORI, Hiroshi MURAKAMI, and Nobuyuki KIKUCHI (JAXA EORC) 、The possibility of

SGLI/GCOM-C for Global environment change monitoring、Remote Sensing 2006、
Stockholm International Fairs Stockholm, Sweden、vol6361 pp636106-1-4、
2006.9.11-2006.9.16

29. T. SANJAA, K. KAJIWARA AND Y. HONDA (CEReS Chiba Univ, SORST JST)、ESTIMATION OF LAND SURFACE TEMPERATURE USING NOAA-AVHRR THERMAL INFRARED AND WEATHER STATION DATA IN THE MONGOLIAN GRASSLAND、ACRS2006、Chinggis Khaan Hotel, Ulaanbaatar, Mongolia、P-2_Q52, pp1-5、2006.10.9-2006.10.13
30. 陳路, 古海忍, 熊彦, 村松加奈子, 本多嘉明, 梶原康司, 藤原昇、「Sensitivity Analysis of Net Primary Production Estimation using a Semi-empirical BRDF Model and Reflectance Observed by RC Helicopter for Japanese Cedar Forest」、『写真測量とリモートセンシング』Vol.45, No6, pp25-40、2006年12月
- 31. Y. HONDA (CEReS, JST-SORST), M. Moriyama (Nagasaki Univ), A. Ono (JAXA-EORC), K. KAJIWARA (CEReS, JST-SORST)、A study on possibility of land vegetation observation with SGLI/GCOM-C、Remote Sensing 2007、Palazzo degli Affari Conference Centre, FIRENZE Florence, Italy、Vol. 6744 67440K-1-8、2007年9月17日～2007年9月21日
- 32. Jules R. Dim (JST-SORST), Koji Kajiwara, Yoshiaki Honda (CEReS, JST-SORST)、Vegetation Canopy Structural and Physical Variability Based on Radiometric and Laser Analysis、Remote Sensing 2007、Palazzo degli Affari Conference Centre, FIRENZE Florence, Italy、Vol. 6742 67420C-1-8、2007年9月17日～2007年9月21日
33. Yoshiaki. Honda (CEReS, JST-SORST), Masao. Moriyama (Nagasaki Univ), Akiko. Ono (JAXA-EORC), Koji. Kajiwara (CEReS, JST-SORST)、A study on possibility of land vegetation observation with Mid-resolution sensor、ISRS2007、Pamada Plaza Jeju Hotel・韓国済州島、pp349-352、2007年10月31日～2007年11月2日
34. Yusaku. Ono, Yoshiaki. Honda, Koji. Kajiwara (CEReS, JST-SORST)、A study on 3D structure detection for forest trees using reflected spectrum information.、ISRS2007、Pamada Plaza Jeju Hotel・韓国済州島、pp345-348、2007年10月31日～2007年11月2日
35. Masayuki Matsuoka, Tadahiro Hayasaka, Yoshihiro Fukushima, and Yoshiaki Honda, "Land Cover in East Asia Classified using Terra MODIS and DMSP OLS Products", International Journal of Remote Sensing, Vol. 28, No. 1-2, pp. 221-248, 2007.
36. Jules R. Dim, Koji Kajiwara, Yoshiaki Honda, "Radiometric Signature and Spatial Variability of the Vegetation Coverage of a Boreal Forest"、International Journal of Remote Sensing、掲載号未定、2008年
37. Jules R. Dim, Koji Kajiwara, Yoshiaki Honda, "Airborne Laser Scanning Derived Vegetation Structures and Impact on Solar Radiation Scattering"、Remote Sensing of Environment、掲載号未定、2008年
1. 小野朗子（千葉大学 環境リモートセンシング研究センター・JST）・小野厚夫（大手前大学）、バンド和による正規化スペクトルの応用、第34回（平成15年度春季）学術講演会、日本大学文理学部百周年記念館、pp135-136、2003.5.15-16
2. 小野朗子・梶原康司・本多嘉明（千葉大学環境リモートセンシング研究センター・JST）、バンド和によるスペクトルの正規化法とその応用、日本写真測量学会 平成15年度年次学術講演会（春期）、東京ビックサイト、pp73-74、2003.6.12-13
3. 西原由登、古橋智洋、梶原康司、本多嘉明（千葉大学環境リモートセンシング研究センター・JST）、森林による分光吸収率の日変化計測、日本写真測量学会 平成15年度年次学術講演会（春期）、東京ビックサイト、2003.6.12-13
4. 西原由登、古橋智洋、梶原康司、本多嘉明（千葉大学環境リモートセンシング研究センター・JST）、スペクトルデータを用いた葉量推定、日本写真測量学会 平成15年度年次

- 学術講演会（春期）、東京ビックサイト、2003.6.12-13
5. 高藤良史、梶原康司、本多嘉明（千葉大学環境リモートセンシング研究センター・JST）、マルチスペクトル画像を利用した分光測定、日本写真測量学会 平成15年度年次学術講演会（春期）、東京ビックサイト、2003.6.12-13
 6. 近田朝子（JST）、梶原康司、本多嘉明（千葉大学環境リモートセンシング研究センター・JST）、植生指数 BSI における太陽入射角の補正に関する研究、日本写真測量学会 平成15年度年次学術講演会（春期）、東京ビックサイト、2003.6.12-13
 7. 出水将樹 高山誠一 梶原康司 本多嘉明（千葉大学環境リモートセンシング研究センター・JST）、多角ステレオ画像を用いた植物の立体構造計測に関する研究、第9回 画像センシングシンポジウム、パシフィコ横浜アネックスホール、2003.6.13
 8. 近田朝子（JST）、梶原康司、本多嘉明（千葉大学環境リモートセンシング研究センター・JST）、衛星多角観測から得られる植生指数 BSI におけるセンサ解像度の影響、日本写真測量学会 平成15年度年次学術講演会（秋期）、京都市国際交流会館、pp105-106、2003.10.23
 9. 小野朗子・梶原康司・本多嘉明（千葉大学環境リモートセンシング研究センター・JST）、バンド和によるスペクトルの正規化法とその応用 II、日本写真測量学会 平成15年度年次学術講演会（秋期）、京都市国際交流会館、pp97-98、2003.10.23
 10. 矢野幸二・梶原康司・本多嘉明（千葉大学環境リモートセンシング研究センター・JST）、多方向温度観測をもちいた植生活動モニタリングに関する研究、日本写真測量学会 平成15年度年次学術講演会（秋期）、京都市国際交流会館、pp143-144、2003.10.23
 11. 小野朗子（千葉大学 環境リモートセンシング研究センター・JST）・小野厚夫（大手前大学）、Landsat/TMデータを用いたバンド和によるスペクトルの正規化 II、第35回（平成15年度秋季）学術講演会、ハイブ長岡、pp45-46、2003.11.26-27
 12. 山本浩万・橋本俊昭・見富恭・吉岡博貴・本多嘉明・五十嵐保：ADEOS-IIIGLI 陸圏プロダクトを用いた陸域モニタリングに関する研究、日本リモートセンシング学会、平成15年度リモートセンシング学会年次講演論文集、pp.21-24、2003
 13. 本多嘉明、梶原康司、「東アジアにおける地表面植生の変化」、『天気』 vol.51 No.11、pp18-24、2004年11.20
 14. 小野朗子（千葉大学 環境リモートセンシング研究センター・JST, SORST）・小野厚夫（大手前大学）、バンド和で正規化したスペクトルと NDVI、（社）日本リモートセンシング学会、千葉大学けやき会館、pp9-10、2004.5.19
 15. 小野朗子、梶原康司、本多嘉明（千葉大学 環境リモートセンシング研究センター・JST, SORST）、バンド和で正規化したスペクトルを用いた植生解析、日本写真測量学会 平成16年度春季大会、東京ビックサイト会議棟6階、pp209-210、2004.6.18
 16. 小野朗子（千葉大学 環境リモートセンシング研究センター・JST, SORST）、植物の生育状況把握のための基礎研究、日本写真測量学会 平成16年度秋季大会、弘前商工会議所会館、pp115-116、2004.10.29
 17. 本間和幸、梶原康司、本多嘉明（千葉大学 環境リモートセンシング研究センター・JST, SORST）、空中カメラ姿勢不正確画像合成に関する研究、日本写真測量学会 平成16年度秋季大会、弘前商工会議所会館、2004.10.28～29
 18. 高藤良史、梶原康司、本多嘉明（千葉大学 環境リモートセンシング研究センター・JST, SORST）、BRF を利用した植生帯の三次元構造分類、日本写真測量学会 平成16年度秋季大会、弘前商工会議所会館、2004.10.28～29
 19. 斎藤祐美子、梶原康司、本多嘉明（千葉大学 環境リモートセンシング研究センター・JST, SORST）、分光反射率からの光合成有効放射吸収率推定、日本写真測量学会 平成16年度秋季大会、弘前商工会議所会館、2004.10.28～29
 20. 小野朗子（千葉大学 環境リモートセンシング研究センター・JST, SORST）、バンド和で正規化したスペクトルと NDVI(II)、（社）日本リモートセンシング学会、日立ビックセンター、pp49-50、2004.12.1～2
 21. 本多嘉明（千葉大学 環境リモートセンシング研究センター、JST・SORST）、衛星リモ

- ートセンシングによる植生物理量推定と現地観測、講演会『光と食・農』-バイオフォトニクスのブレイクスルーを求めて-（東京都江東区・みらい CAN ホール日本科学未来館 7 F）、2005. 2. 22
22. 本多嘉明、「研究開発用生態系基地（BIRD）について」、『写真測量とリモートセンシング』 vol. 44 no. 2、pp73-75、2005年
23. 小野朗子（JAXA/EORC）・梶原康司（千葉大学, SORST. JST）・本多嘉明（千葉大学, SORST. JST）、植物の生育状況把握のための基礎研究 II、日本写真測量学会平成 17 年次学術講演会春期、東京ビッグサイト会議棟 6 階、pp133-134、2005. 6. 23-2005. 6. 24
24. 小野朗子・梶原康司・本多嘉明、植物の生育状況把握のための基礎研究（III）、日本写真測量学会平成 17 年度秋季学術講演会、熊本市国際交流会館、pp89-90、2005. 10. 26-2005. 10. 27
25. 本多嘉明、新しい地球観測衛星と地上観測の可能性、炭素循環および温室効果ガス観測ワークショップ、メトロポリタンプラザ会議室、pp87-89、2005. 11. 11
26. 陳路、古海忍、熊彦、村松加奈子、本多嘉明、梶原康司、GLI データを用いた奈良県杉林 NPP の推定における BRDF の影響、日本リモートセンシング学会第 39 回（平成 17 年度秋季）学術講演会、鳴門教育大学、pp43-44、2006. 11. 30-2006. 12. 1
27. 陳路、古海忍、村松加奈子、本多嘉明、梶原康司、「針葉樹林NPPの推定におけるBRDF影響」、『同志社大学ワールドワイドビジネスレビュー』、第8巻 第1号、pp. 32-41、2006年 10. 31
28. 陳路（奈良女子大学, SORST JST）、古海忍、村松加奈子（奈良女子大学）、本多嘉明、梶原康司（CEReS Chiba Univ, SORST JST）、ヘリコプターによる反射率観測データを用いた広葉樹林と草地における BRDF の影響評価、日本リモートセンシング学会第 41 回（平成 18 年度秋季）学術講演会、沖縄県青年会館、2006. 11. 30-2006. 12. 1
29. 三宅克英、梶原康司、本多嘉明（CEReS Chiba Univ, SORST JST）、植生水ストレス検出手法に関する研究、日本写真測量学会 平成 18 年度秋季学術講演会、松江勤労者総合福祉センター・島根県松江市、pp99-100、2006. 11. 23-2006. 11. 24
30. 一戸慎也（SORST JST）、○梶原康司、本多嘉明（CEReS Chiba Univ, SORST JST）、レーザースキヤナによる地形と樹冠構造抽出に関する研究、日本写真測量学会 平成 18 年度秋季学術講演会、松江勤労者総合福祉センター・島根県松江市、pp161-162、2006. 11. 23-2006. 11. 24
31. 小野朗子（JAXA EORC）、梶原康司、本多嘉明（CEReS Chiba Univ, SORST JST）、植物の生育状況把握のための植生指数の開発 II、日本写真測量学会 平成 18 年度秋季学術講演会、松江勤労者総合福祉センター・島根県松江市、pp93-94、2006. 11. 23-2006. 11. 24
32. 小野朗子（JAXA/EORC）、梶原康司・本多嘉明（千葉大学 CEReS・SORST, JST）、植生の水ストレス傾向を検出するための手法開発、日本写真測量学会 平成 19 年度年次学術講演会、パシフィコ横浜・神奈川県横浜市、pp115-116、2007 年 6 月 22 日
33. 陳路、古海忍、村松加奈子、本多嘉明、梶原康司、醍醐元正、「ADEOS-II/GLI データを用いた全球植生純一次生産量の推定における二方向性反射率の影響評価」、『同志社大学ワールドワイドビジネスレビュー』第 9 卷 第 1 号、pp90-102、2007 年 10 月

(2) 口頭発表

①学会

　　国内 37 件, 海外 32 件

②その他

　　国内 7 件, 海外 2 件

(3)特許出願 (SORST 研究の成果に関わる特許 (出願人が JST 以外のものを含む))

	件数
国内出願	0
海外出願	0
計	0

(4)その他特記事項

TV 取材

番組名：NHK ニュース「おはよう日本」

放送年月日：平成 14 年 12 月 14 日

取材内容：平成 14 年 12 月 14 日の地球観測衛星の打ち上げに合わせて、衛星を利用した最先端の地球温暖化研究を紹介する。

9. 結び

地球観測サミットを受け、GEOSS10 年実施計画が策定された。このことを受け、我が国の衛星を用いた地球観測も再始動を始めようとしている。本研究の成果は、衛星ミッションに実装するためにタイミング的に好機を迎えた。他国の衛星ミッションでは達せし得ない成果を期待できると考える。

樹冠部のカゲ情報をバイオマス推定に活用することを考えた。植生がある程度高密度では衛星データでは、飽和状態になって計測できないと一般的に考えられたが、多角観測とカゲ情報の組み合わせで解決できる。本プロジェクトの成果が新しい日本の地球観測衛星のプログラムに組み込まれようとしている。

一方で JAXA (宇宙航空開発研究機構) は、2013 年度の打ち上げを目指し GCOM ミッション (地球観測衛星ミッション) を計画している。

本プロジェクトで開発したバイオマス推定、カゲ指数、水ストレス傾向などのアルゴリズムをこの新しい衛星のセンサにあわせ最適化するためと生産されるプロダクトの検証に、本プロジェクトで開発された無人ヘリコプタによる各種植生観測装置および手法は、衛星ミッションを遂行する上で世界に類を見ないツールとして役立つものと確信している。

最後に、私事で恐縮ですが、本プロジェクト開始年と最終年度に大病をした。その間、遅れが生じるなど研究チームの皆さんにご迷惑をおかけした。また、事務所の方々にもご心配をおかけした。この場を借りてお詫びとお礼を申し上げたい。

