

リモートセンシング技術を用いた人工林維持・管理のための基盤データの構築に関する研究

Research on Establishment of Man-made forest management database using satellite remote sensing

長谷川渚¹ 川緑将利² 谷川寛樹² 法眼利幸³

Nagisa HASEGAWA, Masatoshi KAWAMIDORI, Hiroki TANIKAWA, Toshiyuki HOGEN

Abstract: The Japanese forestry industry has been significantly affected by the increase in low-price timber imports and a diminishing work force. This has had a direct impact on the level of maintenance for the man-made forest. Therefore, a new maintenance system for the man-made forest is required. The purpose of this research is to quantify the volume of the man-made forest classified by growth condition, and to evaluate changes by the time series.

In the process, we used Satellite data as follows: LANDSAT5/TM at 04/08/1995, and at 04/10/2000, and LANDSAT7/ETM+ at 22/04/2001. Inami town in Wakayama Prefecture is selected for a case study since good quality spatial data are available for this town. We examined the satellite data taken various levels of blight in man-made forest into consideration. The area of the man-made forest in 1995 was 45km². In addition, 52% of man-made forest was sound, and 48% was blighted. In 2001, 62% of man-made forest was sound, and 38% was blighted.

Keywords: LANDSAT/TM/ETM+, the man-made forest maintenance, atmosphere correction, NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), change by the time series

1 はじめに

1.1 研究の背景と目的

国土の約7割¹⁾を占める森林は、木材生産の他に、水源涵養機能、山地災害の防止機能、二酸化炭素の吸収・貯蔵などの生活環境保全機能、レクリエーションの場の提供・野生鳥獣の生息の場などの保健文化機能といった多様な機能を有している。森林は、豊かで安らぎのある国民生活の形成に大きく貢献している。

戦後、全国各地で大規模な造林が行われ、日本の森林の約4割¹⁾を占める人工林の蓄積は、毎年7000万m³²⁾ずつ増加するなど、量的資源は充実しつつある。しかしながら、近年、わが国の林業をとりまく状況は厳しく、外材輸入の増加に伴う国産材需要の減退と材価の低迷に起因する間伐材の林地放置、高齢化に伴う労働力不足に起因する間伐実施率の低下が全国的に見受けられる状況にある。手入れのされない人工林は、健全性を失い、本来もつ多様な機能を十分に発揮できない現状にある。そこで、適切かつ持続可能な人工林の維持・管理が必要不可欠となっている。

また、人工衛星を用いたりモートセンシング技術は、広い範囲を繰り返し観測することができる。人工衛星に搭載されたセンサにより、肉眼で捉えることのできない赤外線領域などの情報が広範囲で入手可能となり、様々な解析に用いられるようになった。本研究では、高度な補正を施した衛星データを用いて、

- ・人工林の生育状態を把握、人工林の生育状態別面積を推計
- ・人工林の生育状態について経年比較および経年変化の抽出

を目的とし、人工林の維持・管理に役立てるものである。本研究では、1994年から1995年の高温少雨気象による乾燥害の影響で、枯死被害が広がっているとの報告がされている、和歌山県日高郡印南町付近の人工林をケーススタディ対象地域(図1)とする。

1.2 解析の流れ

図2に、衛星データの「画像補正処理」から、衛星データを用いた解析「人工林の生育状態について、経年比較および経年変化の抽出」までの研究の流れを示す。

衛星データには、幾何学的歪み(位置的歪み)、大気中のヘイズやもやによる障害が含まれている。衛星データを有効に使用するために、解析前処理として、画像に補正を施す。

補正を施した衛星データを用いて、土地被覆分類図を作成し、人工林域を抽出する。また、現地調査および過去に調査された文献³⁾をもとに、人工林健全地域と枯死地域のサンプル地域を抽出する。

サンプル地域の地表面情報(緯度経度情報)をもとに、衛星データを用いて人工林生育状態の定量化を行う。サンプル地域について、NDVI(正規化植生指標)を用いて人工林健全地域と枯死地域の比較を行う。ここでNDVIとは、植物の活性状況を示す指標とされ、近赤外線と可視光線領域での電磁波反射の強さに着目したものである。この特性をもとに、衛星データ上で人工林健全地域と枯死地域の特定を行い、人工林の生育状態を把握する。さらに、人工林の生育状態別面積推計を行う。また、衛星データによる推計結果と実際の状況を比較することで、人工林健全地域、枯死地域の整合性を検証する。最後に、人工林の生育状態について、経年で比較し、

1 和歌山大学大学院システム工学研究科 Graduate School of Systems Engineering, Wakayama University

2 和歌山大学システム工学部環境システム学科 Faculty of Systems Engineering, Wakayama University

3 和歌山県農林水産総合技術センター 林業試験場 Examination Site Forestry, Wakayama Research Center of Agriculture, Forestry and Fisheries



図1 ケーススタディ対象地域

表1 衛星データ概要

観測年月日	1995/08/04	2000/10/04	2001/04/22
衛星の種類	LANDSAT5	LANDSAT5	LANDSAT7
センサ	TM	TM	ETM+
PATH-ROW	110-36,110-37	110-36,110-37	110-36

経年変化の抽出を行う。

本研究で使用した衛星データの概要を表1に示す。

本研究では、人工林の生育状態について、経年で比較し、経年変化の抽出を行うために、LANDSAT5/TM (1995年)、(2000年)、LANDSAT7/ETM+ (2001年)を用いる。これら異なるセンサによる解析結果の比較についても行う。

2 衛星データを用いた人工林情報の把握

2.1 画像補正処理

(1) 幾何補正

衛星データには、データ収集時の衛星の姿勢の変化、地球の自転、地表面の比高などのさまざまな要因による幾何学的歪み（位置的歪み）が含まれており、衛星データ上に表現される地表面の物体の位置は、実際の位置とは異なったものになっている⁷⁾。本研究では、幾何学的歪みを除去するためにGCP（Ground Control Point：地上基準点）を利用した精密補正を施す。緯度・経度座標系により定義づけるために、UTM（Universal Transverse Mercator）投影法を用いる。さらに、以下の補正を施す。

(2) 大気補正

気象条件や太陽高度の変化によりもたらされる大気状態の変化は、地表物体からの光の反射特性に影響を与える。これらは、衛星データ中の対象物や地表面の真のスペクトル特性を覆い隠し、異なる時期やセンサ間での直接の衛星データ比較を困難にする⁸⁾。本研究では、このような大気中の障害を取り除くために、ドイツGEOSYSTEMS社により開発された、ERDAS IMAGINE/ATCORを用いて大気補正を施す。同研究グループによるこれまでの研究では、滑らかな地形に対して有効な、二次元的な大気補正を施してきたが、本研究では、さらに精密な補正として、山岳地帯のような起伏のある地形を考慮した、三次元的な大気補正を施す。この大気補正には、衛星データ、標高データ⁹⁾、視程データ

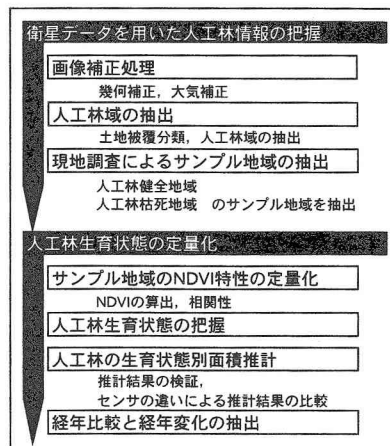


図2 解析の流れ

⁷⁾ の3つを用いる。本研究においてケーススタディ対象地域は山岳地域を多く含んでおり、補正精度の向上が期待できる。

補正を施した衛星データと行政界ベクタデータを重ね合わせ、ケーススタディ対象地域を切り出す（図3）。

2.2 グランドトルース

衛星データが観測されるときと同じ時点、あるいは同じと見なせる時点での地上の状態を調査する、グランドトルースを行う必要がある¹⁾。グランドトルースにより収集された情報は、2.3で行う土地被覆分類で利用する。本研究では、衛星データが観測された時期にグランドトルースを行っていない1995年の衛星データに対しては、以下のように情報収集を行う。

- ・被覆状況が変化していない地点については、GPSを用いて対象物の状況収集を行う
- ・対象物の状況や種類が変化している部分については、衛星データが観測された同時期の航空写真、文献などから現地と照らし合わせ情報を収集する

2.3 土地被覆分類図の作成および人工林域の抽出

本研究では、グランドトルースにより収集された情報をもとに分類項目の特徴空間を定義したトレーニングデータ（教師）を利用し、最尤法を用いて教師付き分類を行い、土地被覆分類図を作成する（図4）。本研究では、分類項目を、市街地、裸地、草地、水域、天然林域、人工林域の6項目とする。また、土地被覆分類図より人工林域を抽出する（図5）。

1995年、2000年、2001年の土地被覆分類図から算出された人工林面積は以下の通りである。1995年の人工林面積は45km²と算出された。2000年の人工林面積は34km²と算出された。2001年の人工林面積は41km²と算出された。参考値として、森林資源現況表（2003）⁸⁾によると人工林面積は35km²である。

土地被覆分類図から算出された人工林面積と、森林資源現況表での人工林面積に違いが認められる。特に1995年は、グランドトルースを行っていないことが影

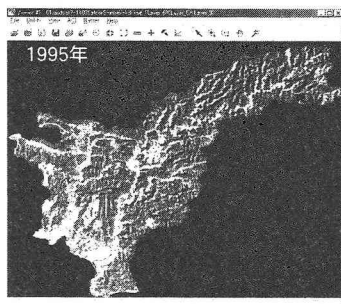


図3 衛星データ切り出し画像

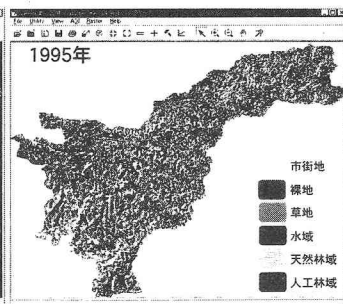


図4 土地被覆分類図

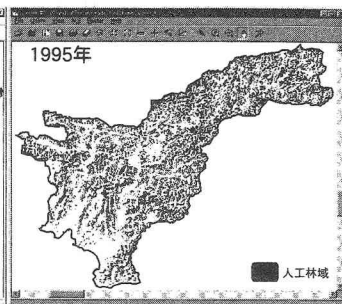


図5 人工林域の抽出

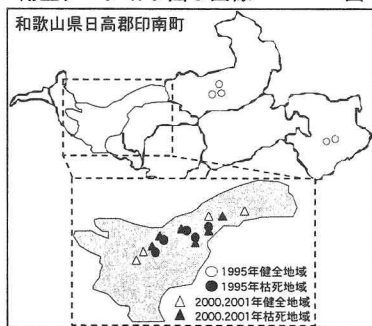


図6 サンプル地域の概要

響したと考えられる。

2.4 人工林健全地域と枯死地域の現地調査

衛星データを用いた、人工林健全地域と枯死地域の特定を行うために、現地調査をもとに両地域のサンプル地域の抽出を行う。

(1) 人工林健全地域の抽出

健全な人工林とは、維持管理作業が適度に行われている、枯死木のない人工林のことである。このような人工林は、下刈り、枝打ち、間伐など良質材生産のための施業がされ、雪害や風害、病虫害等に対して抵抗力の高い、健全性に優れた人工林である。そこで、和歌山県林業試験場が過去に調査³⁾を行った地域のなかで、人工林が健全に生育している地域を抽出した。人工林健全地域の抽出条件は以下の通りである。

- ・ 植林時に、適地適木の概念をもとに植林している
- ・ 植林後に、継続的に間伐等の手入れを行っている

適地適木の概念による理想的な植林とは以下にあげるものである。例えば、木の特性として、スギは肥沃で適潤な土壌を好み、ヒノキは谷筋、沢筋、凹地など、土壌水分の多い場所是不向きである。つづいて、維持管理作業として行うべき、一般的な作業をあげる。下刈りは植栽してから3～4年間は6月頃と8月頃に2度⁹⁾行い、7～8年間は年に1度⁹⁾行う。枝打ちは第1回目の間伐の前後、また無節材の生産では胸高直径10cm¹⁰⁾に達する前に行う。間伐は、1回目は12～13年後、2回目は20年後といった具合に10年おきに平均残存木の約20%程度の間伐を行う。

本研究では、以上のように一般的に言われている健全

表2 枯死地域の枯損タイプ別3分類

枯死地域	枯損率(%)	枯損タイプ
軽度枯損	20%以下	谷筋の林縁が枯損 ——: 川 ——: 枯損
中度枯損	20～70%	屋根部・モザイク枯損、 基岩である頁岩の露出 ——: 川 ——: 枯損
重度枯損	70～100%	全面枯損 ——: 川 ——: 枯損

な森林の判断基準を考慮したうえで、人工林健全地域の抽出を行う。現地調査より、サンプル地域として取りあげた健全地域を図6に示す。

(2) 人工林枯死地域の抽出

健全でない(枯死)人工林とは、2.4 (1) で示した程度の適切な手入れや維持管理作業が行われていないため、細くて弱々しい木が多く、木々がとても混んでおり、針葉樹本来の緑色を有さず、枯れている人工林のことである。本研究では、このような健全でない木が確認できる地域を枯死地域とした。枯死地域では、人工林の健全性が損なわれ、木材としての価値が低くなるだけでなく、雪害や風害、病虫害などで壊滅的な被害を受ける恐れがある¹¹⁾。さらに、地表面に光が十分に届かないために、下草が生えず、表土が洗い流され、土砂崩れの危険性が大きくなる。

枯死被害の増加から、その現状を把握するために、1995年に和歌山県林業試験場が枯死地域の目視調査及び林内調査³⁾を実施した。目視調査では、地域内を巡回し、造林木の生育、枯損林分の立地環境、その地理・地形状況、周辺の二次林の枯損状況などについて調査を行った。林内調査では、斜面における枯損の発生部位により枯損林分を分類し、各々の分類項目に当てはまる林分について簡単な立木調査を行った。調査対象となる林分は樹齢が20年から30年生程度のスギ・ヒノキ若齢林である。

枯死地域については、和歌山県林業試験場の調査³⁾をもとに、枯損タイプ別に、軽度枯損、中度枯損、重度枯損と3分類する(表2)。

本研究では、このような調査報告をもとに、人工林枯死地域の抽出を行う。現地調査より、サンプル地域として取りあげた枯死地域を図6に示す。

3 人工林生育状態の定量化

解析はLANDSAT5/TM (1995年), (2000年), LANDSAT7/ETM+ (2001年)を用いて行う。

3.1 サンプル地域のNDVI (正規化植生指標) 特性の定量化

(1) NDVI (正規化植生指標) の算出

生きた葉が示す可視光赤波長域の反射率は葉緑素の葉中含有量が多いほど低下し、近赤外波長域の反射率は葉緑素の活性が高いほど上昇する特性を有する¹²⁾。植生の分布状況やその活性度を把握するための植生指標のひとつにNDVI (Normalized Difference Vegetation Index: 正規化植生指標) がある。NDVIは-1~1までの値をとり、植生の密度が増すにつれて大きな値をとる。NDVIは植物の健康状態を知る手がかりになると考えられている。本研究では、現地調査から抽出した人工林健全地域と枯死地域のサンプル地域について、NDVIを用いて両地域の比較を行う。衛星データ切り出し画像(図3)からNDVIを算出する。

NDVIは、LANDSAT5/TM, LANDSAT7/ETM+データの場合は以下の式で計算することができる。

$$NDVI = (BAND4 - BAND3) / (BAND4 + BAND3)$$

ここで、BAND4: 近赤外波長帯, BAND3: 可視赤波長帯である。

(2) サンプル地域のNDVI (正規化植生指標) の相関性

人工林健全地域と枯死地域のサンプル地域から算出されたNDVIについて、t検定を行う。その結果(図7)から、NDVIにおける人工林健全地域と枯死地域には差が確認された。よって、人工林健全地域と枯死地域の判別にNDVIを用いて解析を行う。

3.2 人工林生育状態の把握

サンプル地域から得られた人工林健全地域と枯死地域のNDVIを用いて、人工林生育状態分布図を作成するために、生育状態別NDVI範囲を設定する必要がある。生育状態別NDVI範囲は、人工林健全地域、人工林枯死地域の軽度枯損、中度枯損、重度枯損の4範囲とする。各サンプル地域の面積により重み付けをした生育状態別加重NDVI値を算定する。次に生育状態別加重NDVI値を用い、生育状態別NDVI範囲を算定する(表3)。これにより作成された人工林生育状態分布を図8に示す。

3.3 人工林の生育状態別面積推計

3.2で作成された人工林生育状態分布図(図8)より、面積推計を行う。推計結果を図9に示す。1995年、2000年、2001年における人工林の生育状態別面積割合は以下の通りである。1995年は全人工林面積に対して、健全地域52%、枯死地域48%と推計された。さらに枯死地域における枯損タイプ別面積割合は、全枯死地域に対して、軽度枯損21%、中度枯損20%、重度枯損7%と推計された。2000年は全人工林面積に対して、健全地域59%、枯死地域41%と推計された。さらに枯死地域における枯損タイプ別面積割合は、全枯死地域に対して、軽度枯損33%、中度枯損6%、重度枯損2%と推計された。

2001年は全人工林面積に対して、健全地域62%、枯死地域38%と推計された。さらに枯死地域における枯損タイプ別面積割合は、全枯死地域に対して、軽度枯損31%、中度枯損5%、重度枯損2%と推計された。

3.4 推計結果の検証

2001年の衛星データにより推計された人工林の生育状態分布について、現地での検証調査を行った。

衛星データによる推計結果(図8)を地図画像に重ねたところ、切目川沿いに枯死地域が広がっていると認められたため、検証調査を切目川沿いで行った。現地では、GPSにより得た緯度経度情報をもとに、推計結果と実際の状況との比較検証を行った。

衛星データによる推計結果と実際の状況が一致した地点を以下の通り確認した。人工林健全地域については33地点中25地点であった。人工林枯死地域の枯損タイプ別分類については、軽度枯損が34地点中19地点、中度枯損が14地点中10地点、重度枯損が18地点中11地点であった。枯死地域の枯損タイプ別分類について、衛星データの推計結果と実際の状況が一致しない地点が多く確認された。

3.5 センサの違いによる推計結果の比較

LANDSAT5/TM(2000年)とLANDSAT7/ETM+(2001年)について、人工林生育状態別面積推計の結果を比較する。人工林健全地域が共に約60%、枯死地域が共に約40%であり、ほぼ同様の推計結果が得られた。これにより本研究では、センサの違いによる解析への影響はないものとし、LANDSAT5/TM (1995年)と、LANDSAT7/ETM+ (2001年)を用いて、経年で比較し、経年変化の抽出を行う。

3.6 経年比較と経年変化の抽出

1995年と2001年の人工林生育状態分布(図8)を比較し、経年変化の抽出を行う。さらに、最近の人工林生育状況を現地調査により確認する。図10-aでは1995年に健全地域、2001年に中度枯損と推計された。図10-bでは1995年に中度、重度枯損、2001年に重度枯損と推計された。図10-cでは1995年、2001年共に健全地域と推計された。図10-dでは1995年に健全地域、軽度枯損、2001年に重度枯損と推計された。図10-eでは1995年に軽度、中度枯損、2001年に軽度枯損と推計された。また、最近の調査において、図10-b, d, eでは土砂崩れが確認された。

また、1995年に枯死地域と推計された人工林のうち17%が2001年に健全地域と推計された。1995年に健全地域と推計された人工林のうち14%が2001年に枯死地域と推計された。

4 おわりに

本研究では、高度な補正を施した衛星データにより人工林域の抽出を行い、NDVIを用いて人工林を生育状態別に分け、生育状態分布図を作成し、人工林の生育状態別面積を推計した。さらに、人工林の生育状態について、経年比較および経年変化の抽出を行った。

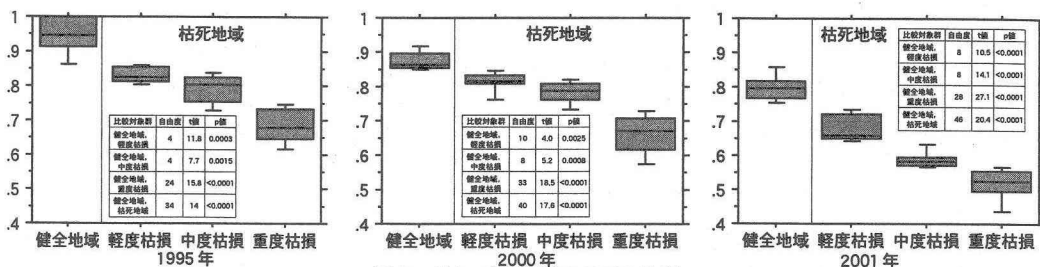


図7 サンプル地域のNDVI比較

表3 生育状態別NDVI範囲

1995年 生育状態		生育状態別NDVI範囲	
健全地域		最小値	最大値
健全地域	総平均	0.860	1.000
枯死地域	軽度枯損	0.823	0.860
	中度枯損	0.737	0.823
	重度枯損	0.609	0.737

2000年 生育状態		生育状態別NDVI範囲	
健全地域		最小値	最大値
健全地域	総平均	0.847	1.000
枯死地域	軽度枯損	0.794	0.847
	中度枯損	0.731	0.794
	重度枯損	0.584	0.731

2001年 生育状態		生育状態別NDVI範囲	
健全地域		最小値	最大値
健全地域	総平均	0.744	1.000
枯死地域	軽度枯損	0.639	0.744
	中度枯損	0.566	0.639
	重度枯損	0.458	0.566

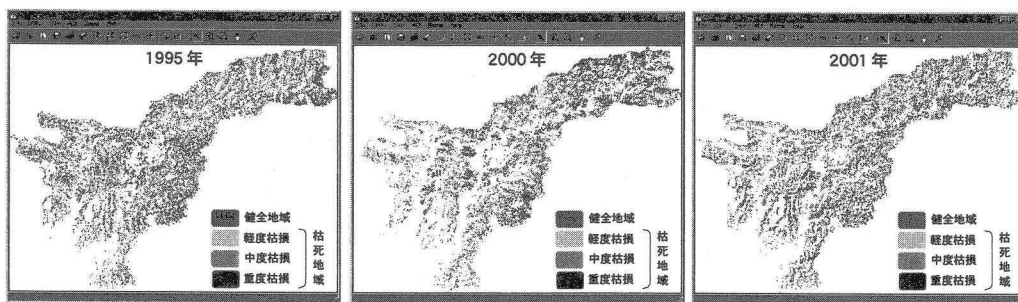


図8 人工林生育状態分布図

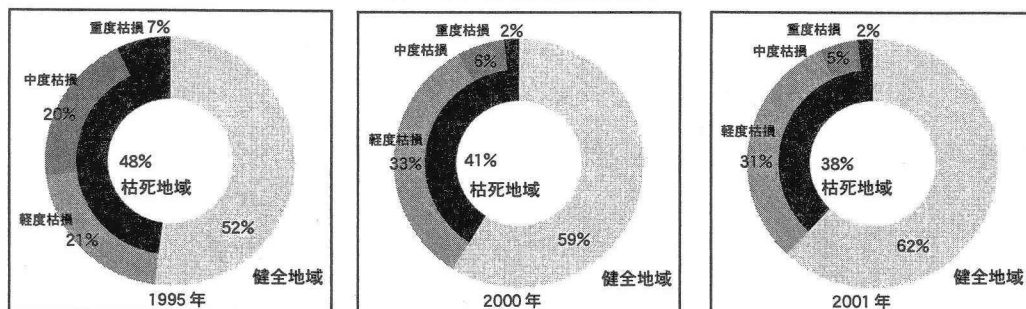


図9 人工林生育状態別面積推計

本研究で得られた結果を以下に整理する。

- ①衛星データに対して、これまでの画像補正処理に加え、山岳地帯のような起伏のある地形を考慮した三次元的な大気補正を施し、補正精度の向上を行うことができた。
- ②衛星データを用いて土地被覆分類を行い、人工林域を抽出することで、人工林面積を算出することができた。人工林の面積は1995年が45km²、2000年が34km²、2001年が41km²と算出された。
- ③現地調査から人工林健全地域と枯死地域のサンプル地域を抽出し、人工林枯死地域については枯損タイプ別に軽度枯損、中度枯損、重度枯損と3分類した。
- ④サンプル地域についてNDVIの反射特性を利用して比較を行ったところ、人工林健全地域と枯死地域の

NDVIには差があることが確認された。また、枯損タイプ別に3分類した枯死地域の軽度枯損、中度枯損、重度枯損におけるNDVIにも差があることが確認された。

- ⑤NDVIの定量化を行い、生育状態別NDVI範囲を設定した。生育状態別NDVI範囲をもとに人工林生育状態分布図を作成し、人工林の生育状態を把握することができた。さらに、人工林生育状態別面積推計を行った。その結果、人工林生育状態別面積割合は、1995年は全人工林の52%が健全地域、48%が枯死地域と推計された。2000、2001年は全人工林の約60%が健全地域、約40%が枯死地域と推計された。
- ⑥1995年と2001年の人工林生育状態について、人工林生育状態分布図と人工林生育状態別面積推計から、

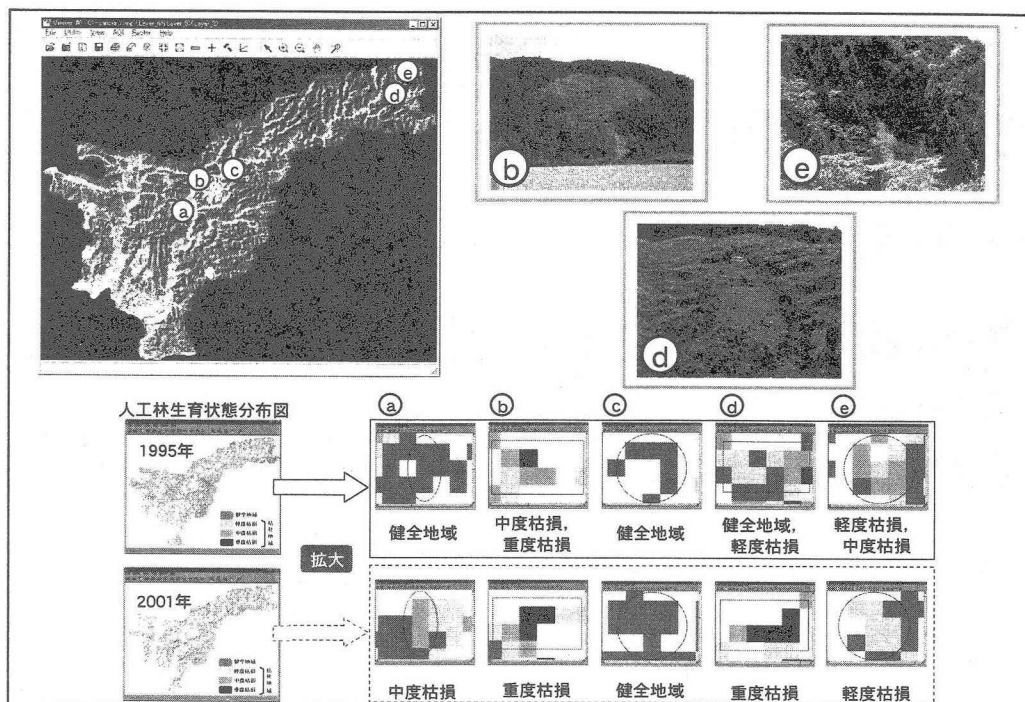


図10 人工林生育状態の経年変化

経年比較および経年変化の抽出を行うことができた。以上のことにより、本研究では、高度な補正を施した衛星データを用いて、人工林維持・管理を行ううえでの基盤データを構築することができた。

今後の課題は以下の通りである。

- ①本研究では、グランドトルースにより収集された地上情報をもとに、衛星データを用いた土地被覆分類を行った。今後は、グランドトルースを行っていない衛星データに対して、航空写真、文献などを用いて、より詳細な地上情報の収集を行う必要がある。
- ②本研究では、衛星データと現地調査により解析および検証を行ったが、今後はさらなる解析精度の向上を目指し、衛星データ解析には不可欠な現地調査による詳細な情報収集が必要である。
- ③本研究で使用した衛星データは、LANDSAT5/TM、LANDSAT7/ETM+である。今後は、異なる衛星データを用いて同様の解析を行い、結果の比較を行う必要がある。これにより、森林解析を行なうにあたって、より有効な衛星データを検討することができる。
- ④本研究で使用した衛星データは1995年、2000年、2001年のものである。今後は、枯死に至る人工林の特定を行うために、さらに経年的な解析を行う必要がある。
- ⑤今回は、ケーススタディ対象地域を和歌山県日高郡印南町としたが、今後はさらに対象地を拡げ、広範囲での森林評価を行う必要がある。

謝辞

本研究で用いたデータの所有は、米国政府、衛星データの提供は、SpaceImaging/宇宙開発事業団によるものである。また本研究はTAO（通信放送機構）により助成を受け、行ったものである。関係各位に深く感謝する。

【参考文献】

- 1) 林野庁：日本の森林と林業 そこが知りたい，pp.2-18，2000
- 2) 林野庁：森林・林業白書，<http://www.rinya.maff.go.jp/seisaku/sesakusyoukai/14hakusyo/1syoun.htm>
- 3) 大槻国彦，小川晃史，橋詰平，萩原進，宮本健治：日高県事務所管内の造林木の枯損についての調査報告書，和歌山県農林水産総合技術センター 林業試験場，1995
- 4) 大林成行：実務者のためのリモートセンシング，フジ・テクノシステム，pp.71，pp.78-93，pp.135，1995
- 5) (株) ESRI ジャパン：ERDAS IMAGINE ATCOR for ERDAS IMAGINE，http://www.esri.com/products/imagene_addon/atcor.html
- 6) (財) 日本地図センター：数値地図50mメッシュ（標高），国土地理院，日本-III，1997
- 7) (財) 気象業務支援センター：地上気象観測原簿データ（気象庁年報），気象庁，1995，2000，2001
- 8) 和歌山県：森林・林業および山村の概要，和歌山県農林水産部 緑の雇用推進局 林業振興課，pp.89-92，2003
- 9) 森林を学ぼう2，<http://www.asobox.com/o/mori/manabou2.htm>
- 10) 大森孟：孫たちに贈る森の科学7，<http://satonetweb.hp.infoseek.co.jp/child/child07.htm>
- 11) (社) 全国林業改良普及協会：間伐のしおり，林野庁，1998
- 12) 石山隆，土屋清，岡山浩：葉の分光反射および偏光特性，日本リモートセンシング学会誌，Vol.4，No.4，pp.19-21，1984