

空からみた“海上の森”^{かいしよ}

GIS と航空写真解析が明かす里山の現在・過去・未来

鈴木康弘 半田暢彦 山本一清

2005 年国際博覧会会場予定地付近の“海上の森”^{かいしよ}は、なぜ里山になったのか。その地理的な条件は何だろうか。この森は 20 世紀後半に質的・量的にどのように変遷し、今後はどうなるのか。50 年前以降撮影されてきた航空写真を 5 m メッシュでデジタル計測し、GIS で解析した結果、地点ごとの植生の質的变化や、樹木の高さ方向の成長量がわかった。こうしたデータから今後の森林の姿を予測できれば、二酸化炭素固定量の評価が可能になり、地球規模の気候変動予測に対しても重要なデータを提示できるかもしれない。〈カラーページ参照〉

2005 年国際博覧会会場予定地周辺のいわゆる“海上の森”は、古くから人間生活と密接な相互関係が維持されてきた“里山”の中に位置している。そこには親しみやすい自然環境が形成され、人々の憩いの場ともなっている。人と自然の微妙なバランスの中で形成された自然環境を大切に保全しつつ、今後どのようにこの自然環境とつきあっていくべきか、という問題は、単なる自然保護にとどまらない、“自然環境との共生”の問題の代表例として取り上げられている。

里山の保全と利用に関する具体的な議論のためにも、このような微妙なバランスを明らかにすることが求められている。そのような背景のなかで、われわれは、現在の“海上の森”の自然環境を調べるとともに、過去から現在までの変遷を明らかにし、どのような方向に向かって変化しつつあるかを示したいと考えた。環境変化は地理的な場の条件にも大きく影響されることから、広域的にみた“海上の森”の地理的特性に関する理解も重要である。それらに基づいて、できるだけ高精度で、

かつ検証可能な将来予測技術⁽¹⁾の開発をめざしている。

このような目的のために、ここでは、最先端のデジタル写真測量やリモートセンシングおよび GIS(地理情報システム)を用いて、(1)大地形スケールでみた“海上の森”の位置づけを明確にした上で、(2)この森が 20 世紀後半に質的・量的にどのような変遷をたどったかを解析する。また、(3)森林の将来予測や成長量計測が、地球環境問題においてどのような意義をもつかについても展望しよう。

上空 1 万 m から望む環伊勢湾と“海上の森”

航空機の航路上からみた伊勢湾周辺の眺めは、活断層と地形、および地形と都市との関係がよくわかる絶景である。近年の衛星写真と地形標高データ(DEM, digital elevation model)を組み合わせたコンピュータグラフィックスは、容易にこれを再現してくれる。カラーページ①は、伊勢市上空高度 1 万 m から名古屋市の方向を見下ろしたものである。国土地理院の 50 m メッシュ DEM(50 m ごとの格子点における標高)およびランドサッ

Yasuhiro SUZUKI, Nobuhiko HANDA 愛知県立大学情報科学部, Kazukiyo YAMAMOTO 名古屋大学大学院生命農学研究科



図1 環伊勢湾の地形と活断層. カラーページ①と同様のデータから作成. 山地と平野, 丘陵と平野などの地形境界に活断層が位置している. 濃尾平野の成因にも活断層の運動が大きく関与している. この図では遠近法が用いられているため東西幅は近景で50 km, 遠景で80 km, 南北は約80 kmの範囲がみえている.

ト衛星写真を用い, 地形の起伏を4倍に誇張して描いている.

環伊勢湾の地形構造は, 活断層と密接な関係がある(図1). 濃尾平野の西縁には養老断層が位置し, 東側を低下させる運動が最近の第四紀(約200万年前以降の“現在”)においても継続して生じている. 近年の活断層調査結果⁽²⁾によれば, 地震(推定されるマグニチュードは7.5もしくはそれ以上)を伴う活動がおよそ1500年ごとに生じ, そのたびに5~6m程度の上下変位が生じ, 西側の養老断層を隆起させ, 同時に東側の濃尾平野を沈降させてきたと考えられる. 沈降した側には木曾三川(木曾川, 長良川, 揖斐川)が運ぶ土砂が厚く堆積した. また, 第四紀における氷期・間氷期の繰り返しは, 海水準の変動を伴い, 高海面期には海域が濃尾平野内にも拡大した. このため濃尾平野内では, 海成の粘土層や砂層も河成堆積物のなかに挟在している⁽³⁾.

養老断層の南には桑名断層, 四日市断層が続き, 海岸平野の輪郭を成している. これらの活断層沿いにもきわめて明瞭な断層変位地形が確認され, 最近の歴史時代にも活動が繰り返している可能性

が高いことが知られている⁽⁴⁾. 養老山地の南麓や, その西側にある鈴鹿山脈の東麓も活断層によって限られている.

いっぽう, 知多半島に目を転じると, とくにその南半については半島の輪郭そのものが活断層によって決められている. 伊勢湾断層の南方延長の内海断層は, 知多半島の南縁にほぼ沿っている. 伊勢湾断層と内海断層は東側隆起で, 知多半島は, 断層運動に伴う隆起の影響を受けていることになる. 伊勢湾断層は海域にあり, 断層の隆起側(東側)も海域ではあるが, 断層の東側は水深7m程度より浅くなっている. その海底は知多半島を構成する常滑層群から成っていることから, 隆起域が浸食されて波食台地形が形成されたことがわかる. 伊勢湾断層の東に隣接する中部新空港建設予定地は, この波食台の上にある⁽⁵⁾.

知多半島の隆起帯の東縁も, 一部は活断層によって限られている. 隆起帯の北方延長では猿投-境川断層がその東縁に位置する. 養老断層や伊勢湾断層ほど活動性は高くないため, この断層を境とする地形のコントラストは相対的には弱い.

猿投-境川断層の北には猿投山北断層が並走す

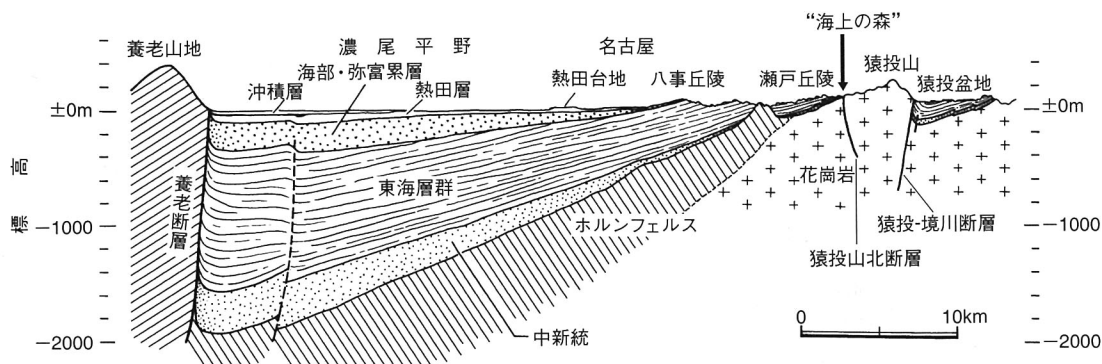


図2 濃尾傾動地塊運動⁽⁷⁾。西側上がりに養老断層が活動を繰り返した結果、養老山地が隆起し、濃尾平野内に堆積する地層群は、それぞれ養老断層に向かって傾き下っている。“海上の森”は相対的隆起域にある。

る。この活断層沿いには右横ずれ変位が明瞭で、トレンチ調査の結果⁽⁶⁾によれば、最近の2万年間に4回の活動(推定される地震のマグニチュードは7.0~7.3程度)が認められ、その間隔はほぼ5000年程度、最新活動期は2000~3000年前とされている。この断層の運動には東上がりの成分もあるため、猿投-境川断層との間に位置する猿投山を隆起させている。“海上の森”は、まさにこの断層の南西端に位置する。

ところで“海上の森”付近から西方へ、地形は徐々に標高を減じる。瀬戸丘陵、八事丘陵と呼ばれる丘陵地帯が東西幅約10 kmほど続き、その西側には熱田台地などと呼ばれる河成段丘面が広がる。名古屋城は、この段丘面の北西端に位置する。比高10 mほどの崖が城の西縁にあり、これを降りると標高わずかに数 m の沖積低地となる(図2)。

濃尾平野の東西断面(図2)は、“養老断層より東側の地盤はこの断層に向かって少しずつ西へ傾動し、そのために濃尾平野が形成されたという考え”⁽⁷⁾を示したものである。30年以上前に出された先見性の高いこの考えは濃尾傾動地塊運動と名づけられ、少なくとも濃尾平野内ではそのような運動が継続していることが、その後の検討においても検証されている⁽⁸⁾。リモートセンシング画像を用いたカラーページ①、図1においても、そのようすは明快に理解される。

いま一度、“海上の森”の位置に注目してみよう。知多半島隆起帯の北方延長に当たるために、“海上の森”一帯は起伏の緩やかな丘陵地となっ

ており、名古屋市の方向へは傾動地塊運動の影響で徐々に標高を下げていく。このため、この付近の高台からは、名古屋市および濃尾平野が一望できる。また、ここからさらに北東の方向へも森林地帯が広がる。これは、傾動地塊運動の傾向がさらに北東方向へも続くことによるとみられる。しだいに標高を増し、広大な美濃三河高原においては、標高も1000 mを越えるようになる。

“標高が比較的低く、起伏も緩やかな丘陵域で、都市域から近いために古くから人の手の入った里山”は、以上のような地理的位置に展開している。

航空写真による20世紀後半の “海上の森”の復元

“海上の森”が今後どのように変化するかを知りたい。そのための基礎資料として多くの人がこの森の現状を調査している⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾。ここでは、産学共同の地域環境GIS研究会(構成は最終ページ脚注参照)で進めている研究のうち、リモートセンシングと写真測量による解析結果を提示する(現地観測データに関しては別の機会に述べたい)。

その1—森はどう変わったか(植生変化)

丘陵地域の起伏は、比較的緩やかであるが波長が細かい。このため、通常市販されている50 mメッシュDEMではその姿をとらえられない⁽¹¹⁾。そのため、デジタル写真測量(DPW: digital photogrammetry workstation: ライカ・ヘラバ社製)を用いて、5 mメッシュのDEMを作成した。これほど細密なDEMを用いた解析はほとん



図3 終戦直後の海上の森の鳥瞰図(東西、南北それぞれおよそ4 km, 3 kmの範囲)。1949年米軍撮影の航空写真をDPWによって解析し、5 mメッシュの標高データ(DEM)を作成した。当時は、今と比べると植生の乏しい場所が多いことがわかる。また、標高データは樹冠の上で測っているため、カラーページ②と比較すると森の成長が読みとれる(カラーページ④)。図の範囲は、国際博覧会の当初計画範囲およびその南西地域で、一般に“海上の森”およびその西側の“広久手の森”と呼ばれている地域。輪郭は河川の流域界、破線は猿投山北断層の推定位置。

ど例をみないが、地域スケールの自然環境の総合的な解析にとってきわめて有効である。

カラーページ②は“海上の森”を含む瀬戸市東部地域の鳥瞰図である。1995年に瀬戸市によって撮影された航空写真をDPWによって解析し、作成された5 mメッシュDEMを用いている。通常の地形図や市販の50 mDEMは地形表面の標高データに基づいているが、カラーページ②を作成するにあたり使用したDEMは、樹冠の上(樹冠頂面)の標高データである。DPWは、画像のステレオマッチングと呼ばれる情報処理技術によって標高を自動計測するため、従来の図化機に比べて作業効率は飛躍的に向上している。航空写真測量のためのシステムであるため、ポイントごとの計測精度は十分に高い。しかしこのような標高データの自動計測においては、画像の条件によってはエラーデータも生じうる。その点をいかに補正・修正していくかは今後の課題であるが、今回はマニュアル操作によって、エラーを除去することにした⁽¹²⁾。

いっぽう、図3は、1949年撮影の航空写真か

ら作成した鳥瞰図である。DEMは1949年時点の樹冠の上で計測したものである。図3とカラーページ②とを比較すると、この46年間における森林の変化が読みとれる(後述)。カラーページ③は、1949年、1977年、1995年について、航空写真から植生判読をおこなった結果である。本研究では、すべてのデータを5 mメッシュの地理情報としてGIS上で解析するため、この判読作業においてもきわめて高い位置精度が要求された。拡大した航空写真を実体視しながら植生判読し、植生区分の輪郭線を正確に地図上に落とすために、解析図化機でトレースし直すなどさまざまな工夫をおこなった⁽¹³⁾。

植生の変化のうちで最も顕著な特徴は、1949年時点では薪炭林としての過度の伐採などによって、広い範囲に分布していた植生の乏しい崩壊地が、その後に落葉広葉樹林などに変化した点である。“この地域の里山は終戦直後は禿げ山で、その後に植生が自然に回復してきた場所だ”としばしばいわれるが、そのことはこの図からもある程度裏づけられる。しかし、全域がそのような状況

であったわけではないことも同時にわかる。

興味深いことは、このように崩壊地から植生が自然回復してきた中北部地域が、オオタカの主要な生息域(国際博覧会の環境影響評価書⁽¹⁴⁾のデータによるオオタカの出現率がとくに高い範囲)と一致している点である(カラーページ③)。これに対し中西部は、1949年時点でもアカマツ-クロマツ林および落葉広葉樹林であり、現在もその特徴が変化していない。このような場所に、東海地方の固有種であるシデコブシの分布が多い。動植物の分布は、必ずしもこの図の示す範囲だけではなく、さらに広範囲に展開する。しかしとくに分布が顕著な場所に注目すると、分布論的にみた場合にこのような特徴がある。このことは、植生のようすが、これらの動植物の分布に影響を及ぼしている可能性を示唆している。その可能性および要因の具体的な解析は今後の課題である。

その2—森はどれだけ成長したか(森林成長量)

植生変遷図(カラーページ③)をみると、1977年以降、北部では落葉広葉樹(高木)が、南東部ではスギ-ヒノキ植林(老齢林)がそれぞれ拡大している。どの程度成長したのであろうか。

カラーページ②のDEMと図3のDEMを差し引きするとその量が高さ変化として見積もれる。カラーページ④は、1949年から1995年までの樹冠頂面高度の増減の分布である。その値は、+30~-30mの範囲にあり、46年間の樹木の成長もしくはかつて存在した樹木の消失としては妥当な値であると考えられる。場所ごとで増減量は大きく異なるが、大局的にみれば、1949年当時水田として利用されていた谷底低地がその後放置され森林に変わり、一方で尾根などを中心に、かつて森林だった部分においては森林の消失がおこっている。その理由としては、人為的な伐採のほか、集中豪雨の際の斜面崩壊などが考えられる。また、そもそも大規模な斜面崩壊の際には地形そのものが変化するが、その効果もカラーページ④には含まれている。またとくに南西部にみられるような大規模な土地造成による標高の増減もある。

今後、以上のような種々の条件をGISを用いて整理することによって、カラーページ④から真

の森林の成長(消失)量を得ることができると考えている。森林が成長する速度は、地点ごとの地形条件や地質条件および水分条件によってある程度規定される。また、森林の施業履歴などによっても左右される(いくつかの諸条件との関係については別報⁽¹⁵⁾で論じ始めている)。このような検討は、この森の10年後、20年後を予測する技術開発の基礎になると考えられる。

地球環境問題における 森林解析の意義と展望

このような方法で森林の高さ方向の成長量が計測され、樹種構成(および樹齢)に関するデータが明らかになれば、樹木の成長モデルを考慮して、二酸化炭素固定量を評価することが可能になる。地球規模の気候変動の議論にとってもこのような計測技術の開発は意義が大きい。

温室効果の60%を占めるといわれている二酸化炭素の挙動を正確に見積もることの重要性はいうまでもない。とくに人為源二酸化炭素について、大気がその55%を吸収し、また25~28%を海洋が吸収していることが、観測およびモデル計算によって示されている⁽¹⁶⁾。ところが、陸域生態系による吸収量については今のところ不明で、単に上の結果から差分を仮定しているにすぎない。本研究が提示する森林成長量から二酸化炭素固定量を求める方法論は、このような議論に対して大きく貢献しうるものである。

しかしながら、その試みは始まったばかりで非常に多くの課題を抱えている。二酸化炭素固定量を評価するためには樹冠頂面の高度変化だけでは不十分であることは明白で、森林の中身を計測する必要性が高い。図4は、ヘリコプター搭載型のレーザーレーダによって計測された“海上の森”であり、50cmメッシュのDEMが得られている。本計測機器の精度検証の結果⁽¹⁷⁾によれば、高さ方向の誤差は15cm程度である。詳細な解析は今後の課題であるが、図4は樹冠の概形をとらえているので、この手法は樹木の計測に有用であると考えている。

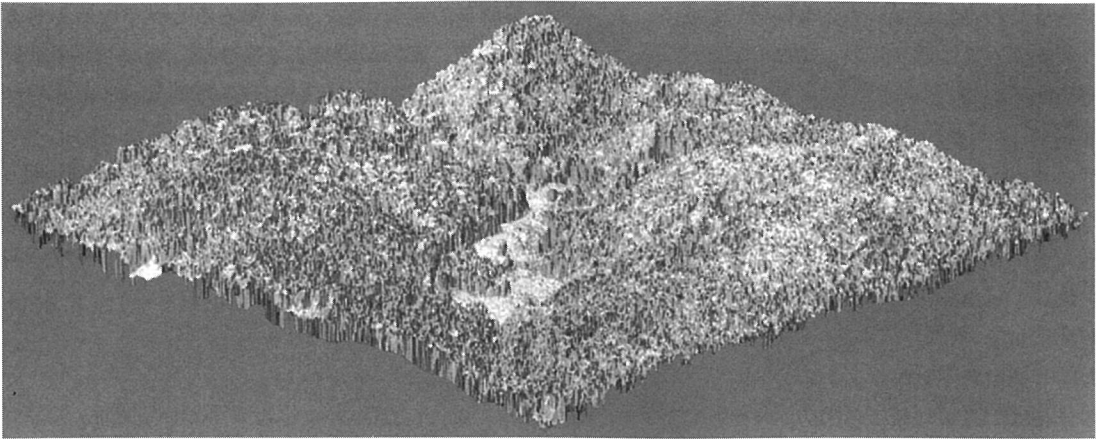


図4 ヘリコプターレーザーレーダによる50 cmメッシュDEM. 海上地区をほぼ西方から望む. 計測範囲は約400 m四方. 樹冠の形状をおよそとらえている可能性がある. (株)中日本航空所有のレーザーレーダによる.

ところで、森林生態学の分野において、植生の純一次生産力(NPP)を求めるために種々のモデルが提案されている。このうち、生物学的な樹木の挙動に基づくプロセスモデルは、バイオマス(生物量)の生産機構や、植生と外部環境の相互関係、さらには気候変動に対する生態系の反応を検討する上でより有効であるとされる⁽¹⁸⁾。このプロセスモデルを、衛星からのリモートセンシングと組み合わせることによって、森林単位(マクロスケール)でのNPPを推定するシステム開発がおこなわれている⁽¹⁹⁾。

里山は、このようなシステムをそのまま適用するには複雑すぎる。“海上の森”周辺の里山は、かつて薪炭林として利用され、数十年の周期で伐採が繰り返されることによって、遷移段階の初期と中期を繰り返していた。しかし、その後の燃料革命のために里山は放置されるようになり、近年では遷移が急速に進んでいる⁽²⁰⁾。また、里山は都市域と近接しているため、環境ストレスがその一因と考えられる樹木の集団枯損や森林衰退の問題も指摘されている。このような比較的短いタイムスケールでの急激な森林の変化を検討するためには、森林内の樹種構成およびその空間的構造、および樹木ごとの挙動を把握することが重要となり、従来よりはるかに高解像度の観測技術が不可欠である。

今後、現地における森林調査などによる精度検証、および定点観測による森林群落内での観測デ

ータとの比較検証が必要であるが、ここで示した高解像度のデジタル観測結果とプロセスモデルなどを組み合わせることによって、新たな展開が生まれる可能性がある。

ところで、地球環境問題への適用を考慮すると、より広範囲の解析手法が求められる。日本全国における20世紀後半の森林成長量を、実測データに基づいて推定するためには、多くの技術開発が必要となる。近赤外線など、可視光以外の波長の光も含めて観測できるMSS(マルチスペクトルスキャナー)観測は、植生の自動判別に有用であることが知られている。そのため、航空機搭載型のMSS観測をこの地域でおこない、5 mメッシュDEMを用いた細かい幾何補正や多時期観測を試み、自動判別の高度化を目指している⁽²¹⁾。こうした技術開発は、森林解析の広域化のための基礎となる。

自然環境情報の整備に向けて

この解説では、先端的リモートセンシング技術によって、“海上の森”をさまざまなスケールで観測した結果を紹介した。地域スケールの自然環境の理解は、環境共生の議論のために不可欠であり、さまざまなスケールで地理的条件をとらえる複眼的な見方が重要であろう。“海上の森”の地理的な位置ひとつとっても、そこが里山となる必然性がある。こうした自然環境の秩序についての

理解なくして、環境共生の議論はありえない。現状において、近年になって初めて50 mメッシュDEMが整備されたという例にもみられるように、このような環境情報整備に対する投資は十分におこなわれていない感が強い。

愛知県では2005年に向けて、このような環境情報整備についても、NTT西日本が遠隔ビデオによる常時モニタリングとweb(<http://www.ntt-expoview-unet.ocn.ne.jp/>)による公開を始めるなど、急速な動きがある。“自然の叡智”をテーマに掲げる“環境万博”の開催をめざすにあたっては、世界に向けて環境行政に関する有意義な情報を発信することが求められているためである。環境情報はただ多ければいいというものではない。ここでも述べたように環境情報を発信する際には、自然の秩序に則った正確な理解が求められる。情報を整理し、管理・運用する環境情報センターも必要になる。屋外で自然の多様性や秩序あるいはその魅力を学べるような“里山フィールドミュージアム構想⁽²²⁾”は、来場者に対して、また、インターネットを通じて世界に対して、里山の自然環境のビジュアルな情報提供をしようとするものとして期待が集まっている。

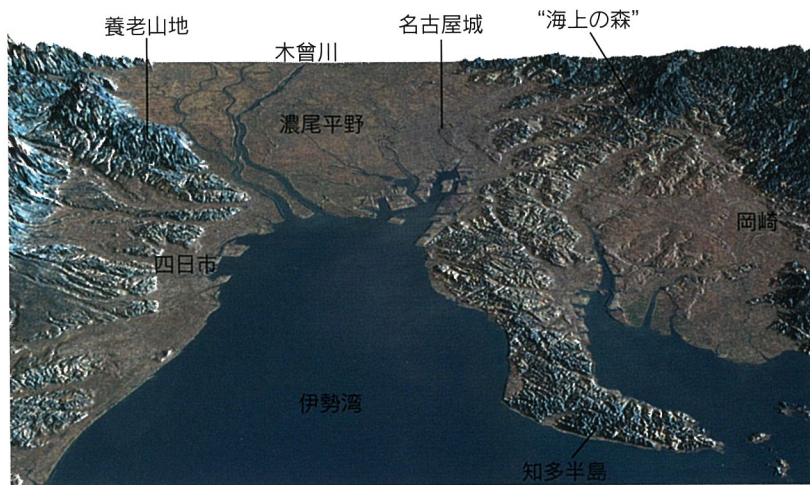
自然と人間の共生のあり方についての議論に向けて、客観性の高い環境情報の提供をおこないたいと考えている*。

文 献

- (1) 松田裕之: 科学, **68**, 632(1998), 検証可能な環境影響評価手法の必要性が生態学の立場から述べられている
- (2) 須貝俊彦ほか: 地質調査所速報, No. EQ/99/3, 89(1999)
- (3) 井関弘太郎: 沖積平野, 東京大学出版会(1983)
- (4) 渡辺満久・鈴木康弘: 活断層地形判読, 古今書院(1999)
- (5) 岡田篤正ほか: 地学雑誌, **109**, 10(2000)
- (6) 野澤竜二郎ほか: 地盤工学会誌, **46**, No. 2, 27, (1998)
- (7) 桑原徹: 第四紀研究, **7**, 235(1968)
- (8) 愛知県: 愛知県の活断層, 愛知県防災会議(2000)
- (9) 八田耕吉: 科学, **68**, 620(1998)
- (10) 曾我部行子: 科学, **68**, 628(1998)
- (11) 小口高ほか: 地形, **19**, 497(1999)
- (12) 佐野滋樹: デジタル観測手法を統合した里山のGIS解析, 杉盛啓明ほか編, 中日新聞社(2000年7月下旬刊行予定)pp. 10~19
- (13) 野村哲朗: デジタル観測手法を統合した里山のGIS解析, 杉盛啓明ほか編, 中日新聞社(2000年7月下旬刊行予定)pp. 56~64
- (14) 財団法人2005年日本国際博覧会協会: 2005年日本国際博覧会に係る環境影響評価書(その2)(1999)
- (15) 木村圭司ほか: GIS学会誌(投稿中)
- (16) 半田暢彦: 水・物質循環系の変化, 岩波講座地球環境学4, 岩波書店(1999)pp. 35~87
- (17) 坪井知美・村手直明: 東京大学空間情報科学研究センター・ディスカッションペーパー, **29**, 20(2000)
- (18) J. Liu et al.: Remote Sens. Environ., **62**, 158(1997)
- (19) N. Coops: Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, **65**, 1149(1999)
- (20) 樋口広芳: 保全生物学, 東京大学出版会(1996)
- (21) 宮坂聡・徳村公昭: 東京大学空間情報科学研究センター・ディスカッションペーパー, **29**, 71(2000)
- (22) 野澤竜二郎・勝野直樹: デジタル観測手法を統合した里山のGIS解析, 杉盛啓明ほか編, 中日新聞社(2000年7月下旬刊行予定)pp. 84~89

* このような研究は、従来の科学の専門領域の枠を越えたものであり、固有の技術を総合する必要性も高いことから、産学共同の研究会をベースにして初めて可能になった。本解説で紹介した内容は地域環境GIS研究会(事務局: 愛知県立大学情報科学部)の研究成果であり、研究会の構成員は以下の通りである。鈴木康弘・半田暢彦(愛知県立大学情報科学部)、小口高・杉盛啓明(東京大学空間情報科学研究センター)、山本一清・竹中千里(名古屋大学大学院生命農学研究科)、恩田裕一(筑波大学地球科学系)、木村圭司・隈元崇(東京都立大学大学院理学研究科)、中山大地(京都大学防災研究所)、喜代永さち子(名古屋大学大学院工学研究科)、川畑大作(京都大学大学院理学研究科)、青木賢人・勝部圭一・田中靖・林舟(東京大学大学院理学系研究科)、佐野滋樹・野澤竜二郎・勝野直樹・柚原正幸・野村哲朗・廣瀬昌彦(玉野総合コンサルタント株式会社)、村手直明・宮坂聡・徳村公昭・加藤悟(中日本航空株式会社)、筒井信之・関原康成・伊藤剛・永田圭司・上野美葉・橋本寿朗・菅内寿幸・野村雄一(株式会社創建)、古瀬勇一・竹島喜芳(株式会社ファルコン)。なお、本研究は、文部省科学研究費補助金地域連携推進費(1999年度から)、および愛知県の近未来社会対応型情報通信産業振興事業費(1998年度から)によって行われている。

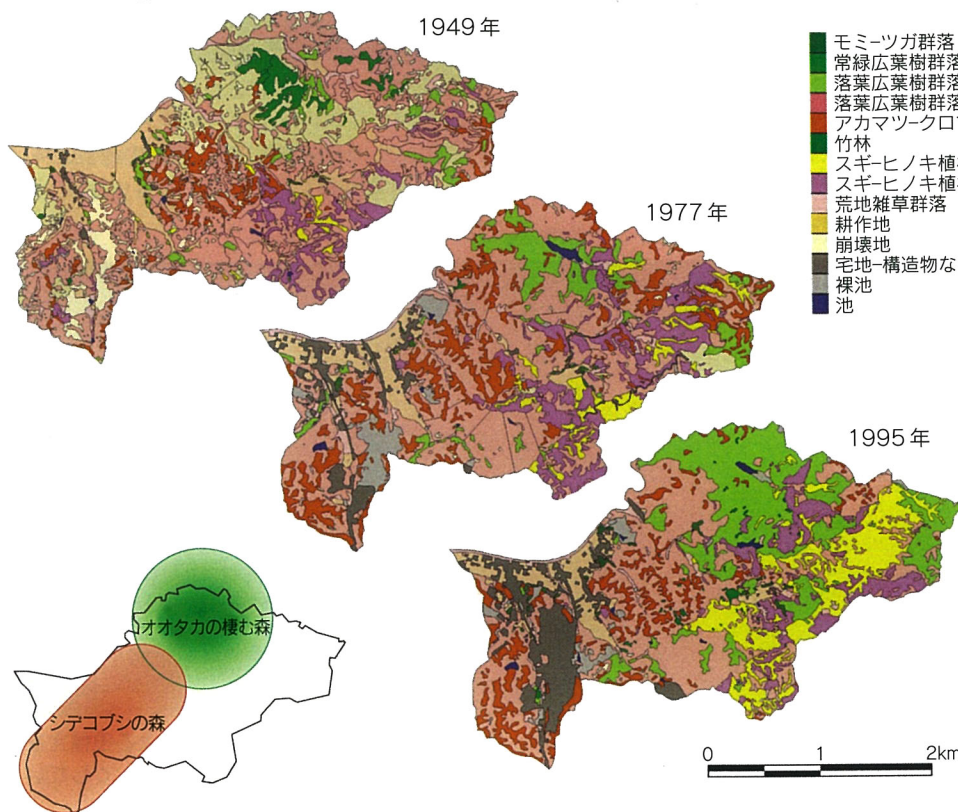
空からみた海上の森 鈴木康弘 半田暢彦 山本一清



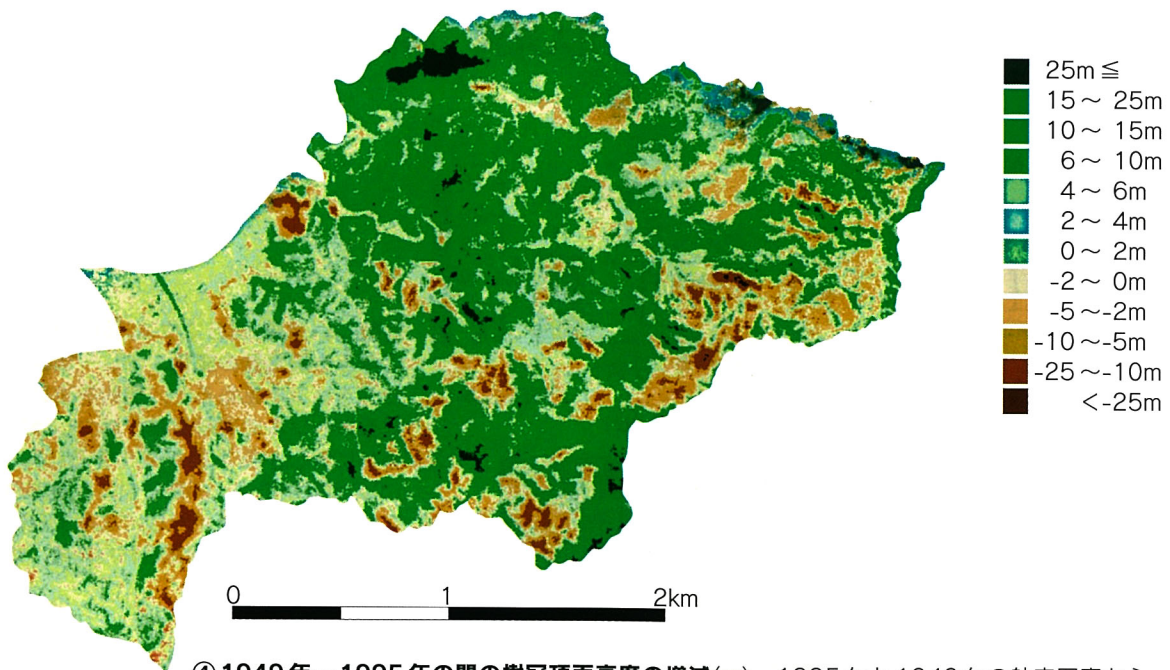
①環伊勢湾地域の鳥瞰図。知多半島隆起帯の北方延長に“海上の森”が位置する。国土地理院発行の50mメッシュの標高データ(DEM)とランドサット衛星画像を用いて田中靖(東京大学大学院理学系研究科)作成。高さは4倍に誇張してある。



②海上の森の鳥瞰図。1995年に瀬戸市が撮影した航空写真をDPW(digital photogrammetry workstation)によって解析し、5mメッシュの標高データを作成した。細かい地形の起伏や樹木の生育具合も観察できる。なお、標高は、地面でなく樹冠の上(樹冠頂面)で測っている。



③植生変遷図⁽¹³⁾。1949年、1977年、1995年の3時期の航空写真を詳細に判読して植生区分をおこなった。時代とともに森林がどのように質的な変化を遂げたかが読みとれる。



④ 1949年～1995年間の樹冠頂面高度の増減(m)。1995年と1949年の航空写真から、当時の樹冠上の標高データを5mメッシュで作成し、この間の変化量を算出した。値がプラスのところでは高さが増加、マイナスのところでは樹木が消失し減少している。