

J-1 人工衛星データを利用した陸域生態系の3次元構造の計測とその動態評価に関する研究

(3) 衛星リモートセンシングと結合した植生構造動態モデルによる植物群集変動の推定システムの開発

研究代表者 農林水産省 農業環境技術研究所 池田浩明

農林水産省 農業環境技術研究所

環境生物部 植生生態研究室 池田浩明

企画調整部 地球環境研究チーム 横沢正幸

環境資源部 大気生態研究室 川島茂人

平成9～11年度合計予算額 14,118千円

(平成11年度予算額 4,838千円)

〔要旨〕衛星リモートセンシングデータを導入できるようにデザインされた植生分布の動態を記述する数理モデル（植生構造動態モデル）を構築し、広域的な植物群集変動の推定システムを開発すること目的とした。まず、2時期（1986年7月28日と1997年7月19日）のランドサットTMデータを用いて、同じ地点を教師とする土地被覆分類を行い、日光戦場ヶ原の植生変動を解析した結果、ズミなどの木本種や乾性草本種の侵入に伴う湿原域の縮小が検出された。また、2時期の植生分布についてマルチフラクタル解析を行ったところ、面積が縮小した湿原のマルチフラクタル次元の最大値は減少し、面積が拡大した乾性草原のそれは上昇した。そこで、個々の植生が示したマルチフラクタル次元を数理モデルに導入するため、植生構造動態モデルとして1種系の格子モデルを構築し、数値実験を行った結果、競合の強さおよび競合の非対称性が小さいほどマルチフラクタル次元の最大値は減少することが判明した。すなわち、植生分布のマルチフラクタル解析から植生構造動態モデルの相互作用パラメータ（競合の強さと非対称性）を導くことが可能であることを明らかにした。以上より、植生分布のマルチフラクタル解析と植生構造動態モデルの組み合わせによる植物群集変動の推定システムを開発した。

〔キーワード〕日光戦場ヶ原、ランドサットTMデータ、植生変動、マルチフラクタル解析

1. 序

気候変動に伴う陸上生態系の変動予測を行うために、衛星リモートセンシングデータと結合した陸上生態系モデルの開発が急務となっている。しかし、既存のモデルでは、モデルにおける植物群集の構造が単純すぎるため、種間の競争・遷移・分布の移動といった動的な過程を扱えない。そのため、植生分布の移動や生物多様性の減少は解析できていない。一方、植物群集の動態を記述するモデルは、これまでも多くが提出されているが、衛星データと結合させたモデル化はまだ構築されていない。そのため、広域的な植物群集の動態は解析できていないのが現状である。

本研究では、衛星データを導入できるようにデザインされた植生構造動態モデルを構築し、広域的な植物群集変動の推定システムを開発することで、気候変動に伴う陸上生態系の変動予測に

資することを目的とする。また、本研究の成果は、将来高精度衛星画像が連続的に取得可能となった場合に一層活用できるものと考えられる。その第一歩として、日光戦場ヶ原を対象にした。この地域は、湿原を中心として森林や草原などの自然植生が広がっており、植生分布の動態や変遷を、できるだけ人為的攪乱が無い状態で調べるのに適している。また、この地域の一部には、人工的な農耕地が存在し、人工植生と自然植生の動態を対比的に調べるためにも適している。

初年度は、ランドサットTMデータを用いた土地被覆分類を行い、分類されたいくつかの代表的な土地被覆毎に、衛星画像を用いて植生指数と表面温度の季節的変動を調べた。また、植生構造動態モデルとして、衛星リモートセンシングデータを導入できるようにデザインされた植生分布の動態を記述する空間動態モデル（格子モデル）を構築した。

昨年度は、2時期のランドサットTMデータを用いて日光戦場ヶ原植生の年次間変動を解析し、年次間変動に感受性の高い波長域を特定した。また、植生構造動態モデルと衛星データの結合システムを構築するため、森林植生分布のマルチフラクタルスペクトルを解析し、分布特性とマルチフラクタル次元の関係を調べた。

本年度は、2時期のランドサットTMデータを用いて日光戦場ヶ原植生の年次間変動を解析し、その面積変化を明らかにした。また、主要な植生の分布についてマルチフラクタル解析を行い、植生の分布変動に伴うマルチフラクタル次元の変化を明らかにした。さらに、個々の植生が示したマルチフラクタル次元を植生構造動態モデルに導入するため、植生構造動態モデルのパラメータを変えた数値実験を行い、得られた植生分布のマルチフラクタル次元の特性を解析した。

2. 研究方法

(1) テストエリアの土地被覆分類

テストエリアを日光戦場ヶ原とし、このエリアのランドサットTMデータと現在の植生分布や植生遷移に関する情報を収集した。現地調査と福嶋（1991）作成の植生図に基づき、1993年5月28日のTMデータを用いた最尤法による土地被覆分類を行い、日光戦場ヶ原の植生区分図を作成した。分類には全7バンドを使用し、現地で卓越していた高層湿原、低層湿原、乾性草原、ササ群落、ホザキシモツケ群落、ズミ群落、広葉樹林（ミズナラ・ハルニレなど）、針葉樹林（カラマツ・アスナロなど）、農耕地、市街地を教師とした。

(2) 日光戦場ヶ原湿原の年次間変動の解析

テストエリアである日光戦場ヶ原の2時期（1986年7月28日と1997年7月19日）のランドサットTMデータを用いて、植生タイプと波長特性の関係を解析し、波長特性の変化から植生の年次間変動を推定した。解析に先立って、2時期の各バンドの平均値と標準偏差が一致するように、1986年7月の画像を基準にして1997年7月の画像を補正した。同データを用いて、同じ地点を教師とする土地被覆分類を行い、各植生の面積の年次間変動を推定した。さらに、土地被覆分類により得られた2時期の植生分布についてマルチフラクタル解析を行った。

(3) 森林植生分布のマルチフラクタル解析

解析に先立って、長崎県対馬タテラ山北麓の広葉樹林（200m × 200m）と北海道大学母子里演習林の針葉樹林（100m × 100m）の植生データを収集し、対象地を5m × 5mのサブコードラート

に区切り、各サブコードラート内の林冠の遮蔽が30%の時にギャップサイトとした。次に、ギャップサイトの空間分布のマルチフラクタル次元を計算することにより、ギャップ空間分布を指標化した。

(4) 競合関係に基づく植生の空間分布の動態を解析するために、植生構造動態モデルとして1種系の格子モデルを検討した。構築したモデルを用い、競合の強さと非対称性のパラメータを変化させて数値実験を行い、定常状態における分布パターンのマルチフラクタル解析を行った。

3. 結果および考察

(1) 日光戦場ヶ原の土地被覆分類

最尤法による土地被覆分類により、湿原、農耕地、広葉樹林、針葉樹林を主体とする日光戦場ヶ原の植生区分図(図1)を得た。この図では、簡略化のため、農耕地(arable land)以外について、高層湿原・低層湿原・乾性草原をまとめて湿原(wetlands)、ミズナラ林・ハルニレ林・ズミ林などを広葉樹林(deciduous forest)、カラマツ植林・アスナロ林などを針葉樹林(coniferous forest)、ササ群落・ホザキシモツケ群落・市街地をその他(others)とした。この湿原で比較的変動が大きいことが知られるズミ林と湿原植生(Hukusima et al. 1986, 福嶋 1991, Hukusima & Mizogushi 1991, Hukusima & Yoshikawa 1997)をTMデータから分類可能であることが示された。

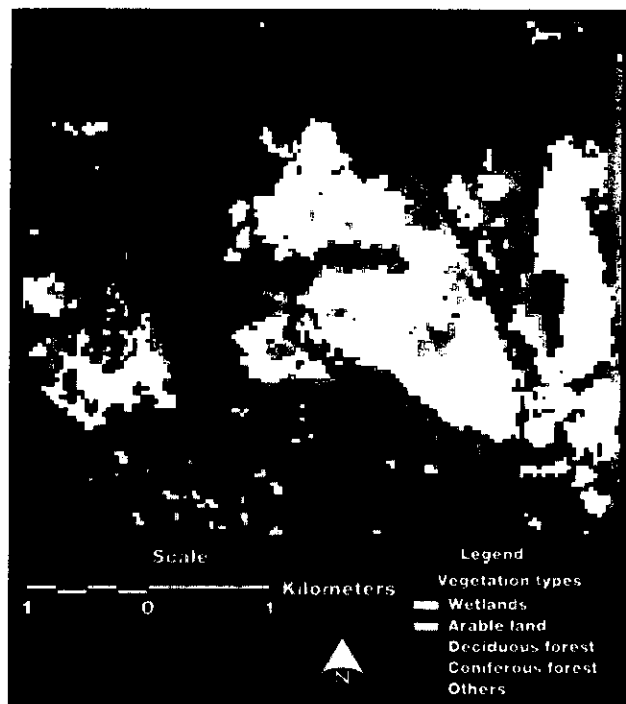


図1. 日光戦場ヶ原の植生区分図

(2) 日光戦場ヶ原の植生変動の解析

正規化植生指数NDVIを指標にして日光戦場ヶ原の植生変化の検出を試みた結果、微妙な植

生の変化が明瞭には表れず、湿原から森林への変化などをもっと明瞭に評価できる指標が必要であることが明らかになった。これに適した検出指標を見出すために、各領域ごとに、バンドによるDN値の変化を調べた結果、TM4（近赤外域）が森林域で高く、湿原域で低かったが、TM6（熱赤外域）では逆のパターンを示すことを発見した（図2）。したがって、この特性を利用して、湿原域と森林域を判別することが可能であると考えられた。

1986年から1997年にかけての植生変動は、逆川の氾濫に伴う乾燥化が指摘されている湿原域で顕著に見られ、湿原の森林化が示唆された（図2；矢印A）。逆に、森林域が湿原化している区域も検出された（図2；矢印B）。これらのTM4-TM6関係の変化を利用して、植生変動区分図（図3）を作成した。

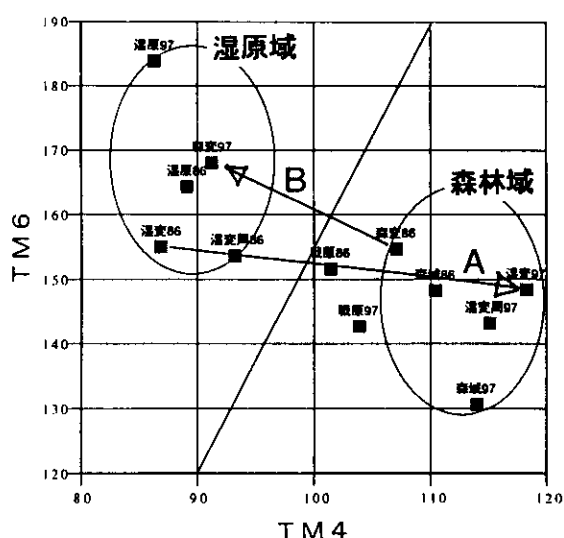


図2. 日光戦場ヶ原のTM4とTM6の変遷
 矢印A:湿原域が森林化した湿変区
 矢印B:森林域が湿原化した森変区

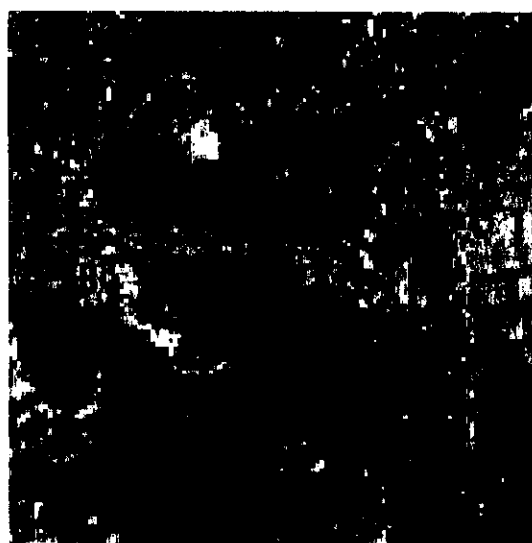


図3. 日光戦場ヶ原の植生変動区分図
 A:図2の湿変区, B:図2の森変区
 (白い地点ほど森林化している区域)

2時期TMデータを用いて日光戦場ヶ原の10年間の植生変動を解析した結果、調査対象域である20.25km²のうち、湿原域の面積は0.33km²ほど減少していると推定された（表1）。同じく湿原周辺域に分布するホザキシモツケ群落も0.29km²ほど減少していると推定された。代わって、ズミ群落（0.27km²）、乾性草原（0.50km²）、ササ群落（0.28km²）など乾性立地に成立する植生の面積の増大が推定された（表1）。これらの結果は、逆川の氾濫に伴う土砂の流入により、日光戦場ヶ原湿原の乾燥化を指摘する報告（Hukusima et al. 1986, 福嶋 1991, Hukusima & Mizogushi 1991, Hukusima & Yoshikawa 1997）を裏付けるものであり、さらに、最近の10年間でも、この乾燥化が進んでいることを示唆している。また、森林についてはミズナラに代表される広葉樹林の面積が縮小し、代わってカラマツに代表される針葉樹林の面積が増大した（表1）。

表1. 日光戦場ヶ原周辺域の1986年7月から1997年7月にかけての植生の面積変動

植生タイプ	1986年の面積(km ²)	1997年の面積(km ²)	面積変化(km ²)
湿原	1.95	1.62	-0.33
乾性草原	0.50	0.88	0.38
ササ群落	0.28	0.51	0.23
ホザキシモツケ群落	1.19	0.90	-0.29
ズミ群落	1.36	1.62	0.27
広葉樹林	7.05	6.32	-0.73
針葉樹林	5.29	5.73	0.44
農耕地	0.28	0.44	0.17
道路・家屋	0.42	0.29	-0.14
その他	1.94	1.94	0.00
合計	20.25	20.25	

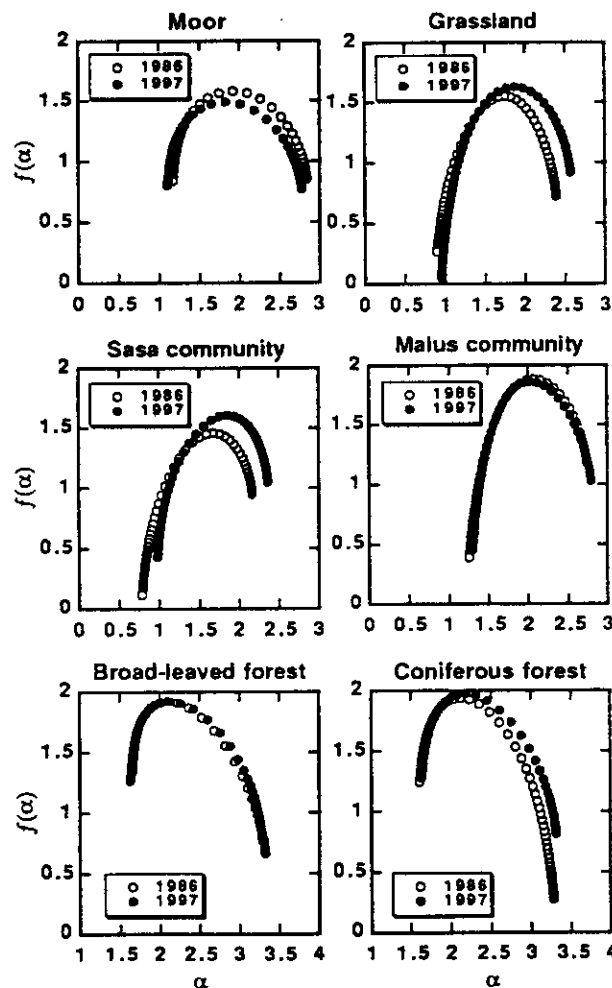


図4. 日光戦場ヶ原の湿原 (Moor), 乾性草原 (Grassland), ササ群落 (Sasa community), ズミ群落 (Malus community), 広葉樹林 (Broad-leaved forest), 針葉樹林 (Coniferous forest) のマルチフラクタルスペクトルの1986年7月から1997年7月にかけての変化
 α は特異点 singularity の強さ, $f(\alpha)$ はマルチフラクタル次元を示す。

これらの植生変動は、マルチフラクタルスペクトルにも特徴的に現れ、面積が縮小した湿原のマルチフラクタル次元の最大値は減少し、面積が拡大した乾性草原、ササ群落、針葉樹林のそれは上昇した（図4）。しかし、この傾向はズミ群落と広葉樹林では顕著に見られなかった（図4）。これらのことは、広葉樹種で感度が低下するものの、マルチフラクタル次元が、植生分布の変動全体を記述する上で極めて有効な指標となりうることを示唆している。

（3）森林のギャップ分布のマルチフラクタル解析

さらにマルチフラクタル次元と植生分布変動との関係を検証するために、森林のギャップ分布データに対してマルチフラクタル解析を行ったところ、南に位置し広葉樹種の多いタテラ山のデータと北の針葉樹種が多い母子里のデータとでは明らかな違いが見いだされた。母子里のデータでは2時期の測定年のデータとも最大値がほぼ2をとるマルチフラクタルスペクトルが得られたのに対して、タテラ山のデータでは最大値が2程度のマルチフラクタルスペクトルが得られ、さらに時間経過とともに最大値が下がる現象が見られた（図5）。針葉樹林におけるギャップはランダムな分布のまま時間的に推移するのに対し、広葉樹林におけるギャップはランダム分布から集中分布へと推移していくことが示された。

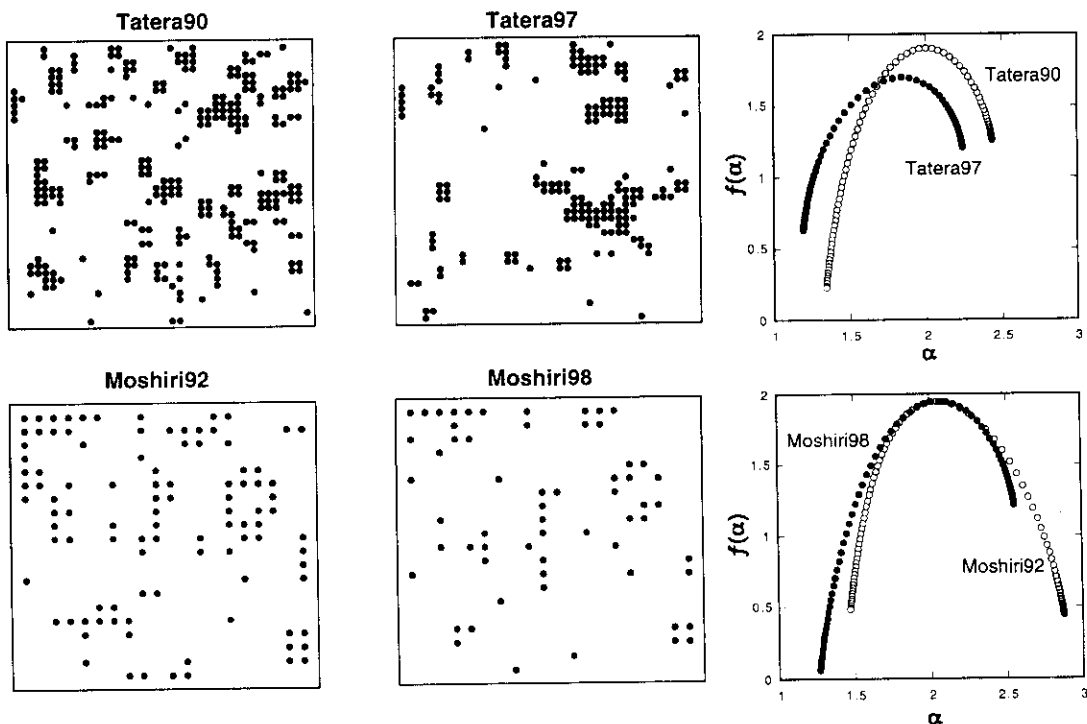


図5. 森林ギャップ分布のマルチフラクタル解析

左の4つの図中の●はギャップを、右の2図はマルチフラクタルスペクトルを示す。
 α は特異点 singularity の強さ、 $f(\alpha)$ はマルチフラクタル次元を示す。

（4）植生構造動態モデル

1種系の空間動態を記述する以下の植生構造動態モデルを構築した。

$$\Delta S(i, j) = a S(i, j) [1 - b S(i, j) - \sum C_s(i, j) \cdot W(i, j) / N]$$

ここで、 $S(i, j)$ は格子点 (i, j) の個体のサイズ、 a と b は定数、 $C_s(i, j)$ と $W(i, j)$ は格子点 (i, j) における競合の強さと非対称性、 N は近接個体数をそれぞれ示す。

このモデルでは正方格子の各格子点上に個体を配置して周りの8個体と相互作用を行いながら生長、枯死する。さらに、新規加入のプロセスも導入した。個体間の相互作用の強さと相互作用の非対称性（競争の効果が近接2個体のサイズの大きさの違いに依存する程度）をパラメータとして与え、個体間の競争過程によって分布が変動する系を解析できるものにした。また、このモデルは空間モデルであるため、衛星データで分類した植生図から個々の種の分布を抽出して導入することでモデル解析が可能である。

（5）植生構造動態モデルを利用したマルチフラクタル次元の解析

個々の植生が示したマルチフラクタル次元を数理モデルに導入するため、植生構造動態モデルを用いた数値実験（個体の枯死率を0.001と仮定）により、モデルの相互作用パラメータ（競争の強さ・非対称性）と空間分布のマルチフラクタル次元の関係を調べた。

数値実験の結果、競合の強さが同じ場合には、競合の非対称性が大きいほど定常状態のマルチフラクタル次元の最大値は増大して2（ランダム分布）に近づき、マルチフラクタル次元が最大値を取る特異点（singularityの強さ）も増大して2に近づいた（図6）。競合の非対称性が同じ場合には、競合の強さが大きくなるとマルチフラクタル次元の最大値は増大して2（ランダム分布）に近づき、最大値を取る特異点も増大して2に近づくことが判明した（図6）。また、マルチフラクタル次元の最大値とその時の特異点が2の値を取った場合、競合の強さと非対称性のどちらが増加しても、マルチフラクタルスペクトルの巾が狭くなり、一様な（局所的に異なる相似構造を持たない）ランダム分布に近づいていくことがわかった。このように、マルチフラクタルスペクトルはモデルにおける相互作用パラメータ（競合の強さ・非対称性）に強く依存するため、植生分布のマルチフラクタル解析により、植生構造動態モデルにおける相互作用パラメータ（格子間の競合関数）を導くことが可能であることを示している。

日光戦場ヶ原の植生のマルチフラクタルスペクトルは、面積増大の見られた乾性草原、ササ群落、針葉樹林で、フラクタル次元の最大値とその時の特異点が2に近づくパターン（図4）を示したが、このパターンは競合の強さと非対称性を増大させた時のマルチフラクタルスペクトルの変化に酷似している。したがって、これらの植生は競合の強さ、あるいは非対称性を高めることで分布を拡大している可能性がある。逆に、分布が拡大しながらも、同様なマルチフラクタルスペクトルの変化を示さなかったズミ群落は、逆川からの土砂の流入といった物理的攪乱に依存して拡大しており、競合といった相互作用には依存しない侵入を行っていると考えられることができる。

以上により、植生分布のマルチフラクタル解析と植生構造動態モデルの組み合わせによる植物群集変動の推定システムを開発した。残された問題としては、植生構造動態モデルを湿原以外の植生へ適用し、植生の空間分布予測モデルとして汎用性を高める必要がある。

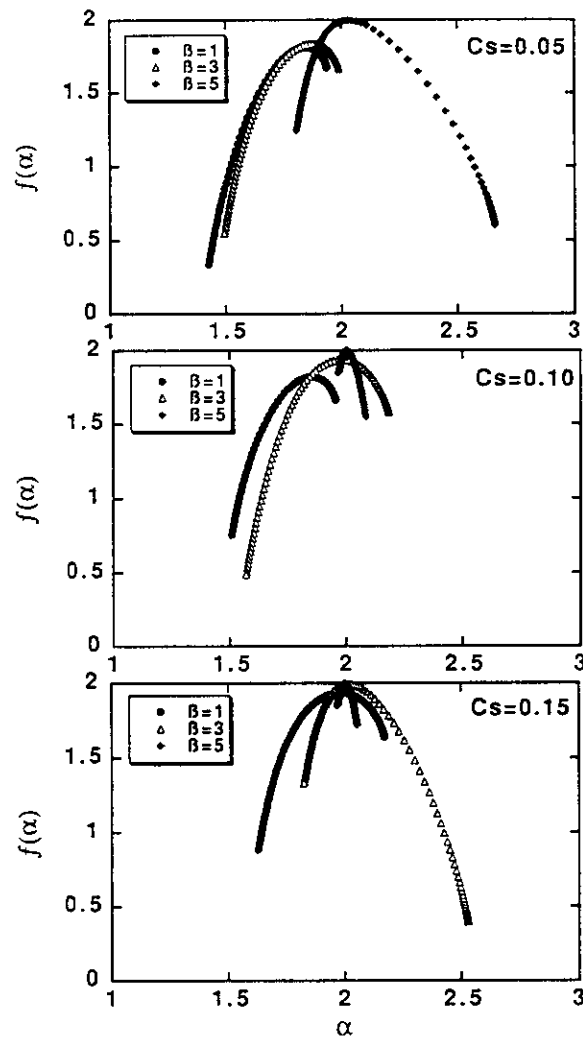


図6. 植生構造動態モデルを用いたマルチフラクタルスペクトルの数値実験
 図はそれぞれ、競争の非対称性 β （植生構造動態モデルの W ）を変化させた数値実験において、定常状態で得られた分布のマルチフラクタル次元を示す。下段ほど競争の強さ（植生構造動態モデルの C_s ）が強い場合の結果を示す。 α は特異点 singularity の強さ、 $f(\alpha)$ はマルチフラクタル次元を示す。全て、枯死率を0.001と仮定した場合のスペクトルである。

4. 本研究により得られた成果

- (1) ランドサット TM データを用いて、日光戦場ヶ原の土地被覆分類図を作成した。
- (2) 日光戦場ヶ原の波長別特性は、TM4（近赤外域）が森林域で高く、湿原域で低かったが、TM6（熱赤外域）では逆のパターンを示した。
- (3) 1986年から1997年にかけての日光戦場ヶ原の植生変動は、逆川の氾濫に伴う乾燥化が指摘されている湿原域で、実際に湿原が森林化していることが認められた。逆に、森林域が湿原化している区域も検出された。

(4) 針葉樹林におけるギャップはランダムな分布のまま時間的に推移するのに対し、広葉樹林におけるギャップはランダム分布から集中分布へと推移していくことが示された。

(5) 日光戦場ヶ原の2時期の植生分布についてマルチフラクタル解析を行ったところ、面積が縮小した湿原のマルチフラクタル次元の最大値は減少し、面積が拡大した乾性草原のそれは上昇した。

(6) 個々の植生が示したマルチフラクタル次元を数理モデルに導入するため、植生の広域的空間分布変動を解析できる植生構造動態モデルとして1種系の格子モデルを構築した。

(7) 植生構造動態モデルの数値実験により、競合の強さおよび競合の非対称性が小さいほどマルチフラクタル次元の最大値は減少することが判明した。これにより、マルチフラクタルスペクトル解析と格子モデルを組み合わせることにより、植生構造動態モデルにおける相互作用パラメータ（格子間の競合関数）を導くことが可能であることが示された。

(8) 以上より、植生分布のマルチフラクタル解析と植生構造動態モデルの組み合わせによる植物群集変動の推定システムを開発した。

5. 引用文献

- 福嶋司. 1991. 湿原周辺部の植生変化. 平成2年度日光戦場ヶ原湿原植生追跡調査報告書「日光戦場ヶ原湿原の植生変化」, 42-93, (財)日本自然保護協会.
- Hukusima, T., Kershaw, K. A. and Takase, Y. 1986. The impact on the Senjogahara ecosystem of extreme run-off events from the river Sakasagawa, Nikko National Park. I. Vegetation types and their relationship to flood damage. *Ecological Research* 1: 279-292.
- Hukusima, T. and Mizoguchi, K. 1991. Impact on the Senjogahara ecosystem of extreme run-off events from the river Sakasagawa, Nikko National Park. III. Pattern of alluvial deposition and effects on the growth of *Mallus toringo* and *Betula platyphylla* var. *japonica*. *Ecological Research* 6: 291-304.
- Hukusima, T. and Yoshikawa, M. 1997. The impact on the Senjogahara ecosystem of extreme run-off events from the river Sakasagawa, Nikko National Park. IV. Changes in tree and understory vegetation distribution patterns from 1982 to 1992. *Ecological Research* 12: 27-38.

[国際共同研究等の状況]

特になし

[研究成果の発表状況]

- 1) Hakamata, T., Matsumoto, N., Ikeda, H. and Nakane, K. 1997. Do plant and soil systems contribute to global carbon cycling as a sink of CO₂? experiences from research projects in Japan. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 49: 287-293.
- 2) 池田浩明・松井哲哉. 1999. ニュージーランド南島における湿性植生の表面温度特性. 植生学会講演要旨第4集, P. 39.

- 3) Ikeda, H., Okamoto, K. and Fukuhara, M. 1999. Estimation of aboveground grassland phytomass with a growth model using Landsat/TM and climate data. *International Journal of Remote Sensing* 20: 2283-2294.
- 4) Kawashima, S. and Nakatani, M. 1998. An algorithm for estimating chlorophyll content in leaves using a video camera. *Annals of Botany* 81: 49-54.
- 5) Kobayashi, T., Ikeda, H. and Hori, Y. 1999. Growth analysis and reproductive allocation of Japanese forbs and grasses in relation to organ toughness under trampling. *Plant Biology* 1: 445-452.
- 6) Yokozawa M. 1999. Size hierarchy and stability of competitive plant population. *Bulletin of Mathematical Biology* 61: 949-961.
- 7) Yokozawa M. 1999. Hierarchical structures in competitive plant communities. *Ecosystems and Sustainable Development* 2: 25-34.
- 8) Yokozawa M, Hara T. 1999. Global versus local coupling models and theoretical stability analysis of size-structure dynamics in plant populations. *Ecological Modelling* 118: 61-72.
- 9) Yokozawa M, Kubota Y, Hara T. 1997. Relationships between competitive asymmetry of individuals and local size distributions in plant communities. In: *Ecosystems and Sustainable Development*. Uso JL, Brebbia CA, Power H, eds. Ashurst, Southampton: Computational Mechanics Publications, 467-476.
- 10) Yokozawa M, Kubota Y, Hara T. 1998. Effects of competition mode on spatial pattern dynamics in plant communities. *Ecological Modelling* 106: 1-16.
- 11) Yokozawa M, Kubota Y, Hara T. 1999. Effects of competition mode on the spatial pattern dynamics of wave regeneration in subalpine tree stands. *Ecological Modelling* 118: 73-86.