世界植生モニタリング

Global Monitoring of Vegetation

本多 嘉明*, 村井 俊治*

加藤喜久雄**

Yoshiaki HONDA, Shunji MURAI

Kikuo KATOOU

Abstract: The objectives are to develop a methodology for global mapping of vegetation with NOAA Global Vegetation Index and geoinformation and to monitor the global change of biosphere.

The methodology which has been developed by the authors is based on multi-temporal analysis in which monthly vegetation activity cycles of NVI (Normalized Vegetation Index) were recognized by pattern of vegetation types together with geoinformation such as DEM (digital elevation model).

As the result of the study, a global vegetation map with eight vegetation types which were defined by multitemporal pattern was produced using three years average of NOAA GVI for 1985 to 1987.

1. はじめに

産業革命以来、人間活動の拡大や人口の増加は地球の環境にとって負担となり、第2次大戦後は急激に大きな負担となった。そして先進諸国で環境問題が自国の問題として盛んに論じられるようになったのは1960年代後半からである。このような流れの中、1972年には地球規模の国際会議「国連人間環境会議」(UN Conference on Human Environment)がスウェーデンのストックホルムで国連によってはじめて開かれた。その約10年後、1982年の後半から1984年にかけてアフリカ大陸を見舞った大干ばつは約30万人の餓死者を出し、当時発生していた大規模なエルニーニョとの関連が注目された。これを契機に地球環境問題に対する世界的な関心が高まり、地球システム科学の新しい概念が打ち出された。まず、地球環境そのものを継続的かつ体系的に観測・監視し地球生態系の仕組みを解明する必要が説かれた。このような中で気象衛星 NOAA

の AVHRR センサーによる植生モニタリングは数多く行われているが、単なる年間累積 NVI (正規化植生指標) や多変量解析による植生分類を行っているものがほとんどである。これに対し本研究では「いつ葉を出しどれくらいの期間葉を出しているか(植物の生活活動)」すなわち植物の生活様式を類型化した生活形(lifeform)によって植生を分類するものである。

2. 研究の目的

本研究では、まず地球生物環境を表すものとして地球全体の情報を提供してくれる植生をとりあげる。植生の状態がどうあるかを把握するには植生の活動を時系列変化でとらえる必要がある。さらに定量的に論ずるためには似た植生型の植物が生息するのに適した生態環境および気候条件を区切るゾーニング(区分)が必要になる。このゾーニングは著者らによって生態気候区分(Eco-Climate Mapping)と称され新しい概念に基づいている。そこで、本研究では、ゾーニングに欠かせないグローバルな植生分類の方法を提案し、世界植生図を作成することを目的とする。

* 東京大学生産技術研究所

** 名古屋大学水圏科学研究所

「写真測量とリモートセンシング」Vol. 31, No. 1, 1992

3. 使用するデータ

本研究で使用するデータは世界中の植物の活動状態を週ごとに示すグローバル植生指標 (Global Vegetation Index, 以下 GVI と呼ぶ) 及び世界2344地点の気候要素をデジタルデータにした世界気象情報である。

GVI(グローバル植生指標)には数種類のデータがあるが、本研究においては GVI は1982年 4 月以降、気象衛星 NOAA の AVHRR センサーの可視及び近赤外バンドから求められる正規化植生指標 (Normalized Vegetation Index: 以下 NVI と呼ぶ) を雲の影響を除去するため一週間の最大値でポーラ・ステレオの座標型にモザイク集成的なもののことをいう。NVI は理論上 -1 から +1 までの値を取るが、植生と深い関係があるのは0.1から0.6までであり、大きな値ほど緑色の植生 (クロロフィル) の密度が高い。現在1982年 4 月から1989年12月下旬までのデータが揃っている。

世界気象情報は日本の気象庁が世界中の2344カ所の地上観測点で観測された気圧、気温、蒸気圧、湿度、風速、雲量等の月毎の統計値をデジタルデータの形にまとめたものである。現在1982年 1 月から1989年 1 月までのデータが揃っている。

4. 植生区分の定義

気候は地圏の地球生物環境を決定する最も重要なもののひとつである。一般に、気候学では気候を分類する方法として主に次の4つがある。

- ①気候の成因による方法
- ②気候指数または気候要素の特性や階級による方法
- ③植生による方法
- ④自然現象による方法 (植生以外の自然特性を利用したもの)

現在、最も一般的なかつ有効な気候分類である Köppen の気候分類は③植生による方法を利用している。このことから植生と気候については地球生物環境

図1 植生安定変化地点分布図

は密接な関係を持つことが分かる。実際に植生型を分類することを考えると、大別して次の2つの方法がある。

①種類組成を基準とする方法

②優占種の生活形を基準にする方法

①種類組成を基準とする方法は現地の綿密な調査を必要とし、地球全体のようなグローバルな分類をする際には適さない。②優占種の生活形を基準にする方法はグローバルな植生分布を調べるときよく用いられ、1年間にどのように植生の生活活動が変化するかはGVIデータから知ることが出来る。さらに、以上気象の影響を出来る限り取り除き地球上の植生型(土地被覆)を分類する。従来の植物学、生態学、地理学等で用いられている植生区分のタイプ分けとその定義は極めて多く、それぞれが異なる。また、定量的な定義がない。そこで、著者らは衛星データ(GVI)のNVI月変化のパターンから表1の8つの植生区分を定量的に定めた。図2はそのパターンを示している。

5. 分類方法

具体的な分類は次の4つのステップに分けて行う。

ステップ1 月間GVIデータの作成

一週間毎にあるGVIデータを一月毎のデータにまとめる。雲の影響を取り除くためにほぼ四週間毎のNVIの最大値をひと月のデータとする。

ステップ2 典型的な植生型の変化

植生型によって固有のNVIの年間変動がある。1983年から1987年までの5年間の月間GVIデータの中から世界気象情報の2344カ所の観測点に一致した地点の植生変化をもとめる。つぎに次式によって求められる植生安定指数が小さいものすなわち毎年安定した植生変化をしている地点を240地点選びだす。選びだされた地点を図1に示す。それぞれの地点がKöppenの気候分類の何に当てはまるかを気象観測データより求める。

$$\text{植生安定指数} = \sum_{Y=1}^5 \left(\sum_{M=1}^{12} (Y \text{ 年 } M \text{ 月の } NVI - 5 \text{ 年間の } M \text{ 月の平均 } NVI)^2 \right)$$

その後、植生型によって決まる典型的なNVI変動パターンを求める。Köppenの植生を基本とした気候分類では樹木気候をA, C, Dと無樹木気候B, Eの5種の大分類をしている。本研究ではKöppen

の大分類を基本にして植物の生活形によって樹木気候を熱帯林, 常緑樹, 落葉樹, 無樹木気候をツンドラ, 草原, 半砂漠, 砂漠に分けた。したがってパターンは熱帯林, 常緑樹, 落葉樹, ツンドラ, 草原, 半砂漠, (ほぼ無植生), 砂漠(無植生)の7つがあり, 先述の240地点(安定した植生変化の地点)を7つのパターンに分ける。図2にあるように7パターン毎に5年間(1983年~1987年)の月毎平均NVIを求め典型的なNVI変動パターンを作成する。

ステップ3 各年のグローバルな植生型分類

1983年から1987年までの5カ年の月間GVIデータに対し、ピクセル毎にNVI変動パターンを調べ、植生型の分類を行う。植生分類はピクセル毎のNVI年間変動パターンのNVIのピークを用いて基準化を行いステップ2で求めた典型的な植生変化パターンとの距離を求める。距離はNVI値を1月から12月までの12次元空間に置いたときのユークリッド距離であり、基準化の意味は北半球と南半球による植生変化パターンのずれを補正するためである。それぞれのピクセルは最も距離の近い植生パターンに分類される。さらに、砂漠と判定された地域のうち標高が3000m以上のために植生がないと考えられる地域を高山性砂漠として別に分類した。

ステップ4 異常気象の影響除去

異常気象のように気象条件が悪いときには本来のNVI年間変動, パターンを取らない地域が出てくる。土地被覆を分類するという意味において森林であるところがNVI年間変動パターンが正常でないからといって森林と分類されないのは土地被覆分類の点で良くない。そこで、世界気象情報を用いて異常気象を示している観測点が多い1983年1984年を除き、後の1985年, 1986年, 1987年の3年間のGVIデータを用い3年間の月別平均GVIデータを作成する。この平均GVIデータを用いて植生分布図を作成する。

ところで、異常気象とは気象庁の「異常気象レポート84」によれば次の2つの場合と定義されている。

- ① それぞれの地点で月平均気温や月降水量が過去30年間あるいはそれ以上にわたって観測されなかったほど平年値から偏った場合
 - ② 月平均気温が正規分布する場合は、平年値からの偏差値が標準偏差値の2倍以上偏った場合
- 入手可能な平年値の情報は1931年から1960年のもの

表1 植生区分の定義

植生区分	定 義
熱帯林	パターンは年間を通じてNVIがおよそ0.3前後ではば一定である。
常緑樹	常緑樹はほぼ熱帯林と同じパターンを示すが、冬季にNVIの値がやや下がり平たい丘の形に似ている。
落葉樹	ピークが約0.4と高いNVIの一山を示している。
ツンドラ	NVIの変化パターンは非常に鋭いピークを持っている。
草原	NVIのピークが0.2程度である。しかし、草原のNVI変化パターンはピークが1つのもの2つのもの余りははっきりしないものと単純ではない。
半砂漠	一年を通じてNVIが低い、短期間だけNVIが少しだけ上がる。
砂漠	NVIが一年を通じてきわめて低いところで一定である。
高山性砂漠	標高が3000m以上でNVIが一年を通じてきわめて低いところで一定である。

図2 植生区分と植生季節変動パターン

表2-1 1983年世界植生面積表

	熱帯林	常緑樹	落葉樹	ツンドラ	草原	半砂漠	高山性 砂漠	砂漠	合計
アジア 欧州	680. 1.23	2440. 4.42	6533. 11.83	2293. 4.15	24212. 43.84	9413. 17.05	1502. 2.72	8153. 14.76	55226.
オセア ニア	155. 1.83	937. 11.01	633. 7.44	0. 0.00	2337. 27.47	3654. 42.96	1. 0.01	790. 9.28	8507.
北米	358. 1.48	1261. 5.20	4513. 18.61	356. 1.47	10688. 44.07	6129. 25.27	10. 0.04	937. 3.87	24253.
南米	2502. 14.48	6726. 38.94	2486. 14.39	0. 0.00	3499. 20.25	1053. 6.10	308. 1.79	700. 4.05	17274.
アフリカ	195. 0.67	2589. 8.87	4016. 13.75	0. 0.00	8346. 28.58	3312. 11.34	4. 0.01	10742. 36.78	29204.
合計	3890. 2.89	13953. 10.38	18181. 13.52	2649. 1.97	49082. 36.50	23563. 17.52	1824. 1.36	21323. 15.86	134465.

上段：×1000平方キロメートル 下段：パーセント

表2-2 1984年世界植生面積表

	熱帯林	常緑樹	落葉樹	ツンドラ	草原	半砂漠	高山性 砂漠	砂漠	合計
アジア 欧州	191. 0.35	1945. 3.52	9096. 16.47	2641. 4.78	23065. 41.76	7939. 14.38	1335. 2.42	9014. 16.32	55226.
オセア ニア	17. 0.20	555. 6.52	286. 3.36	0. 0.00	3114. 36.60	4052. 47.63	2. 0.02	482. 5.67	8507.
北米	110. 0.45	830. 3.42	5727. 23.61	530. 2.19	10725. 44.22	4347. 17.93	7. 0.03	1975. 8.14	24253.
南米	668. 3.86	7222. 41.81	1786. 10.34	0. 0.00	5255. 30.42	1333. 7.72	332. 1.92	679. 3.93	17274.
アフリカ	15. 0.05	1568. 5.37	2605. 8.92	0. 0.00	9948. 34.06	3482. 11.92	3. 0.01	11583. 39.66	29204.
合計	1001. 0.74	12119. 9.01	19499. 14.50	3171. 2.36	52107. 38.75	21154. 15.73	1679. 1.25	23734. 17.65	134465.

上段：×1000平方キロメートル 下段：パーセント

表2-3 1985年世界植生面積表

	熱帯林	常緑樹	落葉樹	ツンドラ	草原	半砂漠	高山性 砂漠	砂漠	合計
アジア 欧州	1096. 1.98	1965. 3.56	12006. 21.74	3300. 5.97	19684. 35.64	7476. 13.54	1351. 2.45	8350. 15.12	55226.
オセア ニア	374. 4.39	879. 10.33	423. 4.98	0. 0.00	1824. 21.45	3974. 46.72	0. 0.00	1032. 12.13	8507.
北米	475. 1.96	1409. 5.81	6052. 24.95	628. 2.59	9556. 39.40	4259. 17.56	9. 0.04	1865. 7.69	24253.
南米	5841. 33.81	5297. 30.66	1692. 9.79	0. 0.00	2371. 13.73	1033. 5.98	313. 1.81	728. 4.22	17274.
アフリカ	557. 1.91	3542. 12.13	4291. 14.69	0. 0.00	7406. 25.36	3229. 11.06	3. 0.01	10176. 34.84	29204.
合計	8341. 6.20	13091. 9.74	24464. 18.19	3928. 2.92	40842. 30.37	19971. 14.85	1676. 1.25	22151. 16.47	134465.

上段：×1000平方キロメートル 下段：パーセント

表2-4 1986年世界植生面積表

	熱帯林	常緑樹	落葉樹	ツンドラ	草原	半砂漠	高山性 砂漠	砂漠	合計
アジア 欧州	1435. 2.60	2355. 4.26	11772. 21.32	2727. 4.94	19813. 35.88	7214. 13.06	1219. 2.21	8691. 15.74	55226.
オセア ニア	348. 4.09	836. 9.83	436. 5.13	0. 0.00	1635. 19.22	4383. 51.52	0. 0.00	869. 10.21	8507.
北米	504. 2.08	1499. 6.18	6035. 24.88	537. 2.21	9876. 40.72	4044. 16.67	6. 0.02	1753. 7.23	24253.
南米	5983. 34.63	4993. 28.90	1565. 9.06	0. 0.00	2613. 15.13	1039. 6.02	281. 1.63	801. 4.63	17274.
アフリカ	676. 2.31	3579. 12.25	4297. 14.71	0. 0.00	7286. 24.95	3033. 10.38	4. 0.01	10331. 35.37	29204.
合計	8946. 6.65	13261. 9.86	24105. 17.93	3264. 2.43	41223. 30.66	19712. 14.66	1509. 1.12	22444. 16.69	134465.

上段：×1000平方キロメートル 下段：パーセント

表2-5 1987年世界植生面積表

	熱帯林	常緑樹	落葉樹	ツンドラ	草原	半砂漠	高山性 砂漠	砂漠	合計
アジア 欧州	1273. 2.31	2623. 4.75	11139. 20.17	3438. 6.23	20956. 37.94	6756. 12.23	1127. 2.04	7915. 14.33	55226.
オセア ニア	326. 3.83	844. 9.92	294. 3.45	0. 0.00	2094. 24.61	4494. 52.83	0. 0.00	455. 5.35	8507.
北米	462. 1.90	1569. 6.47	6111. 25.20	862. 3.55	9997. 41.22	4139. 17.06	4. 0.02	1110. 4.57	24253.
南米	4177. 24.18	6165. 35.69	1923. 11.13	0. 0.00	2890. 16.73	1293. 7.48	242. 1.40	584. 3.38	17274.
アフリカ	416. 1.42	3262. 11.17	4529. 15.51	0. 0.00	7247. 24.82	3561. 12.19	3. 0.01	10185. 34.88	29204.
合計	6654. 4.95	14463. 10.76	23997. 17.85	4300. 3.20	43184. 32.12	20243. 15.05	1375. 1.02	20249. 15.06	134465.

上段：×1000平方キロメートル 下段：パーセント

表2-6 世界植生面積表（1985年から1987年までの平均値）

	熱帯林	常緑樹	落葉樹	ツンドラ	草原	半砂漠	高山性 砂漠	砂漠	合計
アジア 欧州	1268. 2.30	2314. 4.19	11639. 21.08	3155. 5.71	20151. 36.49	7149. 12.94	1232. 2.23	8319. 15.06	55226.
オセア ニア	349. 4.10	853. 10.03	384. 4.52	0. 0.00	1851. 21.76	4284. 50.36	0. 0.00	785. 9.23	8507.
北米	480. 1.98	1492. 6.15	6066. 25.01	676. 2.78	9810. 40.45	4147. 17.10	6. 0.03	1576. 6.50	24253.
南米	5334. 30.87	5485. 31.75	1727. 9.99	0. 0.00	2625. 15.20	1122. 6.49	279. 1.61	704. 4.08	17274.
アフリカ	550. 1.88	3461. 11.85	4372. 14.97	0. 0.00	7313. 25.04	3274. 11.21	3. 0.01	10231. 35.03	29204.
合計	7981. 5.94	13605. 10.12	24188. 17.99	3831. 2.85	41750. 31.05	19976. 14.86	1520. 1.13	21615. 16.07	134465.

上段：×1000平方キロメートル 下段：パーセント

図4 累積NVI

図5 CO₂異常値とアマゾンの植生活動

であり、最高値と最少値が記録されている。したがって、異常気象かそうでないかの判断はの場合に当てはまるかそうでないかによって行った。図3は上記の方法で分類した1983年から1987年までの世界植生図および1985年から1987年の3年間の平均から作成した世界植生図である。

6. 世界植生図が語る こと

本研究で得られた世界植生分布の結果を表2によって示す。これらの表から1983年および1984年の結果とその他の年の結果を比較すると、1983年および1984年の熱帯林と判定された地域がその他の年よりかなり小さいことが解る。これは、本研究の新しい植生分類が植物の生活活動を NVI の変化パターンでとらえ、そのパターンに基づいて分類を行っているためである。すなわち、1983年および1984年は異常気象のため熱帯地域に本来その植生が行う健全な生活活動をしなかった地域が多くあることを示している。

異常気象の影響をできるだけ取り除いた1985年から1987年の3年間の平均から作成した植生分布に注目すると、全世界で森林（熱帯林・常緑樹・落葉樹）は約34%、草原（ツンドラ・草原）は約33%、砂漠（半砂漠・高山性砂漠・砂漠）は約33%とそれぞれ3分の1づつと極めて興味深い結果が得られた。

この結果は1983年から1986年に国連のFAOがまとめた統計結果（森林：約31.2%、草原：約35.4%、砂漠：約33.4%）をほとんど同じである。

本研究で定義した植生区分は本来の植物学とは異なり、先に述べたような年間の NVI の変化パターンによって定義されたものである。砂漠と分類された地域の中には1年を通して雪氷に覆われた部分も含まれている。

7. 大気中の CO₂濃度と植生活動

エルニーニョ現象がおきると大気中 CO₂濃度が高くなるが、原因が明らかにされていなかった。図3と表2にあるように地球全体での植生の活動が年によってかなり変わっていることが解る。全世界の NVI を合計した値、累加 NVI をグラフにすると図4になる。図4から1983年と1984年の累加 NVI が他の3年に比べて極端に小さく、今世紀最大のエルニーニョ現象が

発生した83年・84年の両年の植生の活動が極端に低かったことが解る。そこで南極とハワイのマウナロアで観測された大気中 CO₂濃度の平均値と両観測点に最も近い熱帯地域であるアマゾン全域の植生活動を比較した。図5は観測された CO₂濃度からトレンドとして増加する分と季節変動分を取り除いた CO₂濃度の異常値とアマゾン全域の植生が示す NVI の平均値から季節変動分を取り除いた値をしめしている。両者の関係は図5のように高い逆相関 ($R = -0.701$) 示すことが解り、陸域の植生活動が大気中の CO₂濃度と密接な関係があるといえる。

8. ま と め

以上を明らかにになったことをまとめる。

- ① NOAA グローバル植生指標 (GVI, Global Vegetation Index) データを用いた定量的植生分類の定義として「植生季節変動パターンによる植生分類法」を提案することができた。
- ② 1983年から1987年までの植生図と地域ごとに植生タイプ別の面積を求めた。また、本研究の定義に従った植生図は更新が容易にできることも5年間の植生図作成から証明できた。
- ③ 1982年4月から1988年10月まで植生指標の変動と気候の変動との関連が明らかにになった。特に、アマゾンの熱帯林の活動とエルニーニョ現象・CO₂濃度との関連を示すデータが世界ではじめて得られた。

9. 今後の発展

今まで世界にどれだけの面積の森林や砂漠があるのか信頼性のある定量的統計がなかった。また、その定義もあいまいであった。本研究により定義が定量的に明らかにされ、面積と分布が求められたことは意義が大きい。しかし、次に述べるいくつかの問題点が残されている。

- 1) ツンドラなど高緯度地域では冬季に太陽高度が低くなり、地表面の観測が十分なされていないとは考えられない。この解決のため、人工衛星から得られたデータ以外にも植物の生息限界などの情報を加味する必要がある。植生の生態学的限界値の情報を蓄積し、地上で得られた観測値とともに分類に応用する

必要がある。

- 2) GVII データは20km と粗いが、現在 4 km あるいは 1 km の分解能のデータ整備が行われおり、さらに精度を高める必要がある。

参 考 文 献

- 1) 吉岡邦二：植物地理学，共立出版，昭和48年 6 月30日
- 2) 吉野正敏：気候学，大明堂，昭和53年 5 月27日
- 3) 奈須紀幸：大気と海洋，日本放送出版協会，昭和61年 3 月20日
- 4) 岩城英夫：生態学概論，日本放送出版協会，昭和61年 3 月20日
- 5) 本多嘉明，村井俊治：GLOBAL VAEGETATION INDEX を用いた植生図について：日本写真測量学会 年次学術講演会発表論文集 pp135～138：1989年10月
- 6) Yoshiaki Honda, Shunji Murai: Vegetation Mapping Using Global Vegetation Index and Weather Data: 10th ACRS, Kuala Lumpur, Malaysia, ppA-2-4-1～A-2-4-6：1989年11月
- 7) 村井俊治，本多嘉明：衛星による地球生物環境の変動解明：文部省科学研究費 重点領域研究「衛星による地球環境の解明」 pp65～70：1990年 2 月
- 8) 加藤喜久雄，本多嘉明，村井俊治：エルニーニョ・熱帯雨林生産・大気 CO₂濃度の関連性について：日本海洋学会，1990年
- 9) Yoshiaki Honda, Shunji Murai: Vegetation Mapping Using Global Vegetation Index: ISPRS Commission IV Tsukuba Japan pp608～615：1990年 5 月
- 10) Shunji Murai, Yoshiaki Honda: Eco-Climate Map: ISPRS Commission I Manaus Brazil：1990年 6 月
- 11) Shunji Murai, Yoshiaki Honda: Vegetation Mapping Using Global Vegetation Index: V International Congress of Ecology 1990 S2-3-04 (14)：1990年 8 月
- 12) Shunji Murai, Yoshiaki Honda: Global Change Monitoring of Biosphere using NOAA Vegetation Index Geo-information: The National Biological Conference of Thailand including Asia and the Pacific Regions: Global Change: Effects on Tropical Forest, Agricultural, Urban and Industrial Ecosystems：1990 年10月

图 3-1 1983年 世界植生图

图 3-2 1984年 世界植生图

图 3-3 1985年 世界植生图

図 3 - 4 1986年 世界植生図

図 3 - 5 1987年 世界植生図

図 3 - 6 世界植生図 1985年から1987年の平均値