

# 衛星観測データを用いた 奈良県の植生による二酸化炭素吸収量の見積もり

環境教養学科 藤 原 昇

今世初頭の2000年及び2001年に地球観測衛星センサー LANDSAT-ETM で観測したデータを用いて、奈良県全域の土地被覆分類を行い、そのそれぞれの土地被覆について二酸化炭素の吸収量を見積もった。その解析方法の概略とその結果について述べ、「京都議定書」の二酸化炭素の森林吸収分と比較し検討する。

## 1 はじめに

2008年から2012年の日本における二酸化炭素放出量の平均値を1990年のその6 %減まで下げることが温暖化防止のための京都議定書の内容である。ただ日本列島の約 65 %が植生であることを考慮し、1990 年における二酸化炭素放出量の 3.8 %を森林吸収分とすることになっている。しかしこの数値の根拠は必ずしも明らかでない。その理由の一つは、森林による局所的な二酸化炭素の吸収量が推定できたとしても地域など広域の吸収量の推定が極めて困難なことによる。他の一つは、森林による真の吸収量は植生だけでなく生態系全体の中での二酸化炭素の循環を考慮しなければならないことによる。前者については広域を隈無く観測する地球観測衛星の測定データを利用する方法がある。

我々はこれまで、「パターン展開法」に基づいて、「可視領域から赤外領域までの植生の分光スペクトル」と「植生の活性」との関係を詳細に調べてきた<sup>1), 2)</sup>。昨年、衛星観測データを用いたグローバルな植生一次生産量 (Net Primary Production (NPP)) 及び日本全体の NPP の試行的な推定量<sup>3)</sup>と国土資料に基づいた地域毎の森林の割合から、奈良県の森林による NPP を試行的に算出した<sup>4)</sup>。ここでは奈良県の各季節の衛星観測データを解析し、土地被覆分類を行い、それに基づいて奈良県の森林による二酸化炭素の吸収量を見積もった。

以下使用した衛星観測データ、データ解析法の概略、土地被覆分類及び二酸化炭素吸収量に関する解析結果について述べ、最後に京都議定書における森林吸収分との関係について議論する。

## 2 使用データ

今回の解析に使用したデータは今世紀初頭の2000年及び2001年に Landsat ETM センサーにより観測さ

れたもので、それ等を表1に示す。各季節をカバーしている。1回の観測幅は約180 kmで一幅のデータはデータ名に109又は110を、二幅のデータを合わせて使用したものにはデータ名に109-110を付けている。この番号は南北に走る衛星軌道のパスの番号である。36はパスと直角方向の座標番号である。これらのデータを同じ座標で解析するために、同じ場所と同じ {ピクセル番号 (横方向)、ライン番号 (縦方向)} になるように座標変換している。表1には奈良県の一部が欠けているデータも含まれている。

表1 使用したLandsat ETM センサーのデータ

	観測年月日	データ名
1	2000年 4月 2日	ETM_109_36
2	2000年 6月 15日	ETM_109_36
3	2000年 7月 4日	ETM_109-110_36
4	2000年 8月 25日	ETM_110_36
5	2000年 9月 19日	ETM_109_36
6	2001年 10月 15日	ETM_110_36
7	2000年 12月 8日	ETM_109-110_36

### 3 植生指標と植生一次生産量

可視領域から赤外領域に至る波長領域の地上被覆物の反射スペクトルをパターン展開法により、四つの基本スペクトルに分解した。それぞれの基本パターンの振幅を  $C_w, C_v, C_s, C_4$  とする<sup>3), 4)</sup>。植生の活性度に関わる植生指標 (VIUPD) と上記展開係数との関係を以下の式で表す<sup>5), 6)</sup>。

$$VIUPD (C_w, C_v, C_s, C_4) = (C_v - C_w - 0.2 * C_s - C_4) / (C_w + C_v + C_s)$$

この植生指標と植生一次生産量 (NPP) との関係は、以下の式で与えられる<sup>5), 6)</sup>。植生指標をはじめ、以下の関係式は葉、木、森などの分光反射スペクトル及び二酸化炭素吸収量の地上測定を積み重ねて得られたものである。

$$NPP = GPP (1 - R_d)$$

$$GPP = \int P_i (PAR(t)) dt \quad \text{integrate for time interval}$$

$$P_i (PAR(t)) = f_{max} \times P_{std}(PAR(t)) \quad [mgCO_2/(m^2 \cdot sec)]$$

$$f_{max} = 0.6162 * VIUPD * VIUPD + 0.1121 * VIUPD$$

$$P_{std}(PAR(t)) = 0.028 * PAR(t) / (1 + 0.028 * PAR(t))$$

$$R_d = (7.83 + 1.15 * T [^\circ C]) / 100 \quad (\text{植生自身による消費量})$$

$$PAR(t) : [W/m^2] \quad (\text{日射量})$$

$f_{max}$  が植生指標と NPP との関係を示す式である。日射量 PAR は 2003 年のデータを使用し、日照時間での平均値を用いた。GPP 積分の時間は (日照時間-2) とした。気温は Landsat-ETM の観測地表面

温度データを使用した。また冬の気温が8度C以下では光合成をしないとしました。

## 4 土地被覆の分類結果

土地被覆分類の解析法は下記の通りである。被覆物の可視領域から赤外領域にわたる反射スペクトルについて、前節で述べたパターン展開を行う。当然その展開係数は被覆物の種類に依存する。さらに係数の季節変化を解析すれば、常緑樹か落葉樹はあるいは水田の植生か等が詳細に識別できる。こうして解析した奈良県全域土地被覆の分類結果を表2に示す。

表2 奈良県土地被覆の分類結果

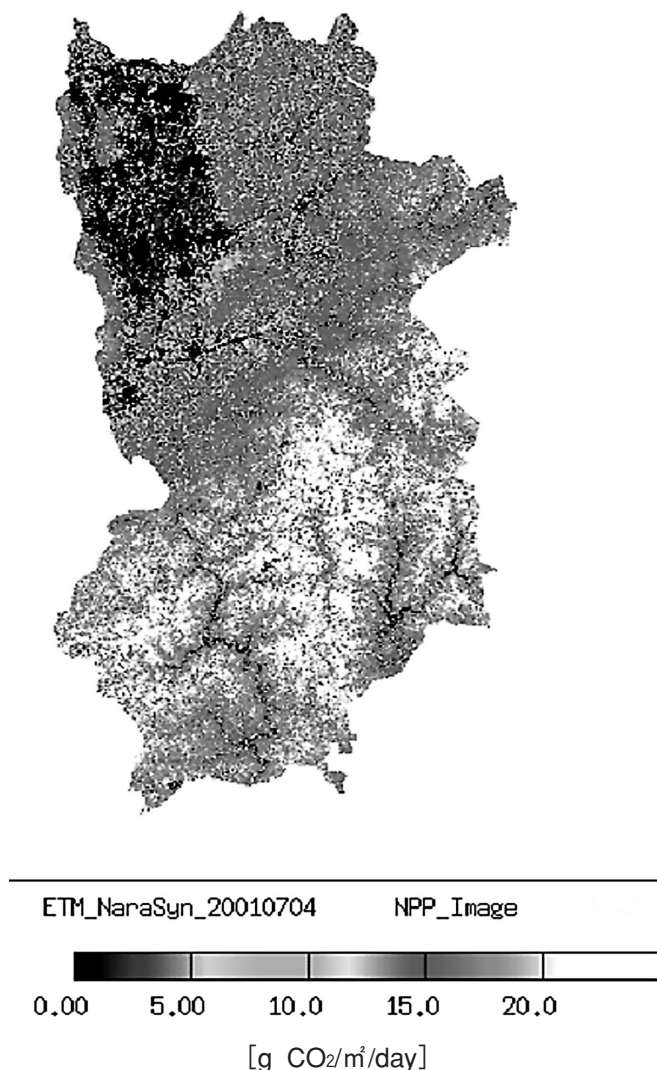
i	Class Name	Count [i]	Area [i] [km <sup>2</sup> ]
0	un Classified	0	0.00
1	Water	411	21.52
6	Cloud	14	0.73
11	Needle Leave Evergreen	31160	1631.56
12	Broad Leaf Evergreen	7681	402.08
13	Bamboo Forest	1449	75.85
14	Bright Deciduous	2720	142.40
15	Deciduous Forest	9142	478.54
16	Rice Field	3077	161.09
17	Golf Course	145	7.59
18	Grassy Plain	1491	78.05
21	Dark Town Area	1613	84.44
22	Bright Town Area	1561	81.72
23	Highway	1233	64.55
24	Bare Soil	422	22.09
25	Factory Area	73	3.82
26	Town with green	1054	55.18
27	Soil with green	1039	54.39
31	Highway with green	109	5.71
32	Weak I Wood	70	3.66
33	Weak II Wood	3722	194.85
34	Weak III Wood	1568	82.08
35	Dead Wood	1186	62.09
	合計	70940	3714 [km <sup>2</sup> ]

Class Name が分類クラス名、Count はそのクラスに属するピクセル数、Area がそのクラスの占める面積である。まず合計の欄をみると奈良県の面積が 3,714 [km<sup>2</sup>] と示されている。地図の統計資料では 3,692 [km<sup>2</sup>] で 0.6 % の誤差で互いに一致している。次に森林（クラス番号 11,12,13,14,15,33 の合計）であるが、本解析では 2,923 [km<sup>2</sup>]、このうち針葉樹は 1,637 [km<sup>2</sup>] である。一方農林水産省の平成12年の統計によると森林が 2,840 [km<sup>2</sup>]、このうち人工林が 1,760 [km<sup>2</sup>] である。人工林は針葉樹であると解釈すると今回の解析結果は農林水産省の統計より少なめである。農林水産省の統計は登録土地利用調査の結果と考えられるが本解析は実際の土地被覆である。その違いが出ているものと推定される。

## 5 植生純一次生産量の解析結果

第3節で述べた方法により植生純一次生産量（NPP）を推定した結果について述べる。前節で述べた土地被覆分類のクラス毎に NPP の算出を行った。一部の地域で衛星観測データが欠けている場合は、

図1 7月の奈良県植生一次生産量



分類クラス毎の面積で補正した。図1は2000年7月4日観測のデータより求めた奈良県全域の植生一次生産量を画像化したものである。上が北部、下が南部の森林地帯である。図の下の方で示すように黒から白になるに従って NPP が高いことを示す。但し原図はカラーなので必ずしも精確ではない。北部西側の奈良盆地は稲がまだ未成長で NPP は低い。南部吉野から十津川村にかけての森林では大きな NPP を示している。

図2、3に針葉樹及び落葉樹の植生一次生産量（NPP）の月変化を示す。横軸は1月1日から始まる1年の日数である。縦軸が NPP で 1 m<sup>2</sup> 当たり、1ヶ月当たりの二酸化炭素吸収量（単位は g）を示す。左から一番目の値が4月のデータより得られた結果である。

図2で、○印は典型的な針葉樹のサンプルに関するデータ、+印は奈良県の針葉樹全体に対する NPP を示す。同様に図3では、落葉樹に関する典型的なサンプル及び落葉樹全体に対する NPP を示

す。4月の針葉樹葉樹と落葉樹のNPPを比較するとその差は歴然としている。

各土地被覆クラス毎に上記の解析を行い、年間植生純一次生産量を推定した結果を表3に示す。森林はクラス番号11,12,13,14,15,33の合計で、前節で述べたように森林の総面積は2,923 km<sup>2</sup>である。この領域での植生純一次生産量は9.7 [10<sup>6</sup> t<sub>CO2</sub>/year] (= 2.64 [10<sup>6</sup> t<sub>C</sub>/year] = 0.0026 [Pg<sub>C</sub>/year])である。昨年の概算推定値2) 1.4 [10<sup>6</sup> t<sub>CO2</sub>/year] よりも低い値である。ただ昨年の概算推定は森林だけでなく全ての植生を含めた日本全体のNPP 1)、7)を基に計算しているので、少し高めに見積もられている。いずれにせよ今回の解析は奈良全域の衛星観測データを直接解析して得られた値である。水田については0.13 [10<sup>6</sup> t<sub>CO2</sub>/year]である。この値は米だけでなく葉、茎、根など稲の全てを含む量の二酸化炭素分である。

図2 針葉樹の植生純一次生産量の月変化

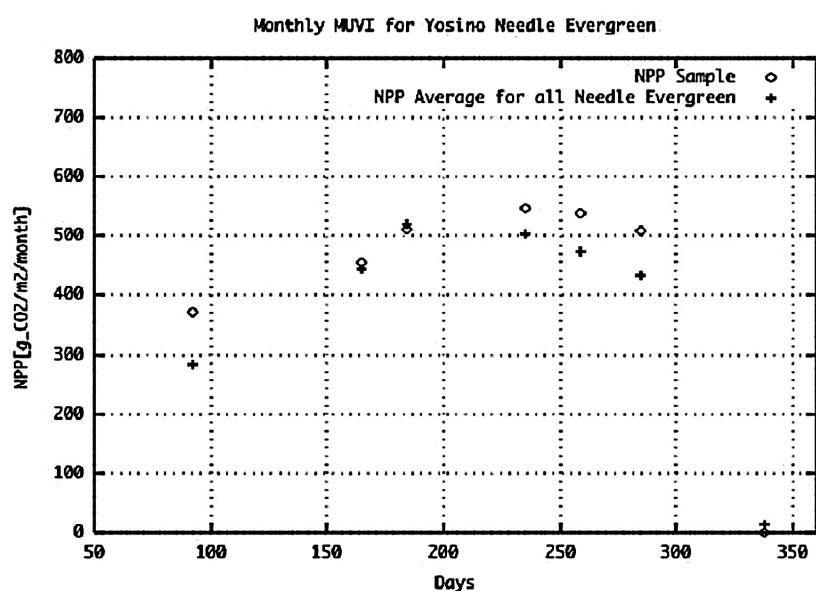
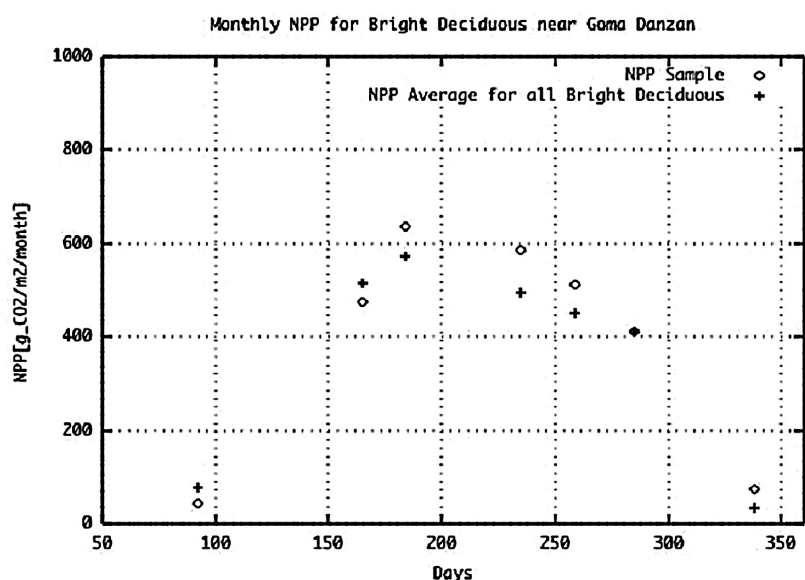


図3 落葉樹の植生純一次生産量の月変化



表で Weak Forest I、II、III は本来森であるが枯れ始めている植生である。I、II、III の順にその度合いが強くなる。35 番の Dead Forest はほぼ枯れた森である。八剣山周辺や大台ヶ原周辺がこれに当たる。八剣山については現地調査を行っているが、その頂上周辺は一面に枯れているのが確認されている。酸性雨が原因なのか、鹿など他の理由によるものなのか今のところ不明である。大台ヶ原の“トウヒ”も枯れが広がっている。

表 3 分類クラス毎の奈良県年間植生純一次生産量

Class No.	Class Name	Area [km <sup>2</sup> ]	NPP [t_CO <sub>2</sub> /km <sup>2</sup> /年]	NPPT [10 <sup>6</sup> t_CO <sub>2</sub> /年]
11	Needle Evergreen	1,631	3,550	5.78
12	Broad-leaved Evergreen	402	3,700	1.48
13	Bamboo Forest	76	3,360	0.26
	Part Sum	2,109	3,566 (平均)	7.52
14	Bright Deciduous	142	3,107	0.44
15	Deciduous Forest	478	2,610	1.26
	Part Sum	620	2,740 (平均)	1.70
16	Rice Field	161	830	0.13
18	Grassy Plane	78	1,538	0.12
33	Weak II Forest	195	2,444	0.47
34	Weak III Forest	82	2,007	0.16
35	Dead Forest	62	1,387	0.08
	Part Sum	339	2,090 (平均)	0.71
	合 計	3,307	3,080 (平均)	10.18

## 6 温暖化ガス排出量に関する「京都議定書」

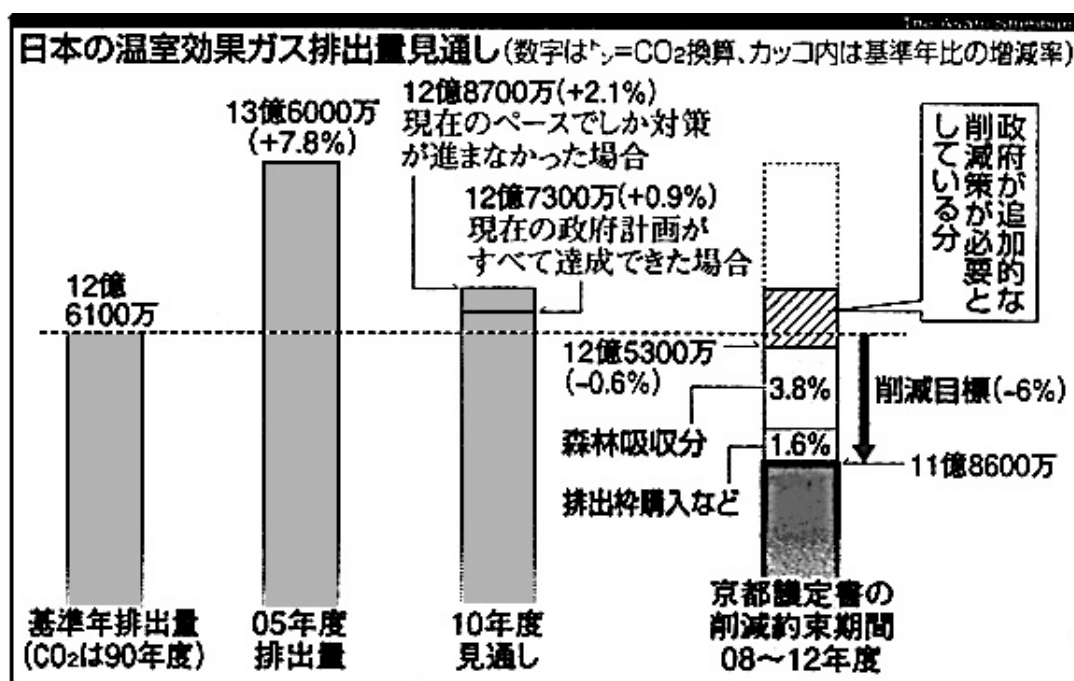
植生の純一次生産量（NPP）は光合成量から樹木自身の活動のために消費する量を差し引いた量である。落ち葉等も NPP に含まれている。森林により吸収される二酸化炭素の量は森林だけでなく生態系全体で考えなくてはならない。少なくとも 1 年周期で放出と吸収を繰り返す部分は収支 0 とすべきである。生態系全体を考慮すると二酸化炭素の正味の吸収量は NPP よりかなり低い値になる。

京都議定書での森林吸収分は、育成林では 650 [t\_CO<sub>2</sub>/km<sup>2</sup>/year]、天然生林では 331 [t\_CO<sub>2</sub>/km<sup>2</sup>/year] として計算している。NPP に関する本解析結果では、前者が 3,550 [t\_CO<sub>2</sub>/km<sup>2</sup>/year]、後者が 2,740 [t\_CO<sub>2</sub>/km<sup>2</sup>/year] である。森林吸収分として考慮されている値はこれらの 1/5 から 1/10 である。森林吸収分は 1990 年の日本での二酸化炭素放出量の 3.8 % に当たる。図 3 は日本の温暖化ガス排出量の見通



しを示す図である。平成19年8月15日の朝日新聞朝刊に掲載された図である。日本での削減量は2008-2012年の平均値を1990年の6%減とすることである。しかし2005年に二酸化炭素排出量は既に1990年より7.8%多くなっている。従って13.8%削減しなくてはならない。図に示されているように、このうち3.8%が日本の森林による吸収分として認められた値である。

図4 日本の温暖化ガス排出量の見通し（H19年8月15日朝日新聞）



生態系の中での正味の二酸化炭素吸収量についてはまだまだ多くの課題が残っている。ただ森が減れば二酸化炭素の吸収量も減り、森が増えれば二酸化炭素の吸収量も増える関係にあることだけは確かである。化石燃料を使わない産業革命以前の大気中の二酸化炭素濃度はほぼ一定で280 ppmであった。濃度が一定ということは地球全体の生態系で二酸化炭素の収支が釣り合っていたということである。現在の大気中の二酸化炭素濃度は370 ppmである。約200年で90 ppm増加している。この増加分が化石燃料を燃やしたことによる増加とアマゾンなどの森を破壊したことによる増加に相当する。従って二酸化炭素の森林吸収分は、1年周期で収支ゼロとなる落ち葉や果実を除いた、2年以上周期のもの全てで考えるべきであろう。

結論として二酸化炭素を減らすには1) 放出量を減らすこと、2) 現在ある森を守ること、そして3) 森を増やす努力をすることの3点に尽きる。2) については、「環境税」が、二酸化炭素を放出する都市からそれを吸収する山村に流れる仕組みが必要であろう。

## 7 終わりに

本解析に使用したデータ及び解析方法は宇宙航空研究開発機構（JAXA）の長い期間にわたる助成の結果得られたものである。ここに深く感謝します。また多くの共同研究者の協力に基づいた結果である。ご協力頂いた皆様にも深く感謝します。

### 参 考 文 献

- 1) 「衛生データ解析のためのパターン展開法」  
藤原 昇 (1996) 他と共著  
日本リモートセンシング学会誌、Vol.16, No.3, 17-34, 1996
- 2) "Sensor-independent analysis method for hyperspectral data  
based on the pattern decomposition method"  
Zhang Lifu 他と共著 (2006)  
International Journal of Remote Sensing (2006) , 27 (21) :4899-4910
- 3) 「地球観測衛星データを用いた全球植生一次生産量推定法の研究」  
藤原 昇 (2005)  
奈良文化女子短期大学紀要第36号 (2005)
- 4) 「奈良県における二酸化炭素収支と将来の共生循環型社会」  
藤原 昇 (2006)  
奈良文化女子短期大学紀要第37号 (2006)
- 5) "A New Vegetation Index Based on the Universal Pattern Decomposition Method,"  
Zhang Lifu 他と共著 (2007)  
International Journal of Remote Sensing (2007) , 28 (1) :107-124
- 6) "Establishment of an Algorithm to Estimate Canopy Photosynthesis  
by Pattern Decomposition using Multi-Spectral Data"  
Sinobu Furumi, Yan Xiang and Noboru Fujiwara (2005)  
J. of Remote Sensing Society of Japan, Vol. 25, No. 1, pp.47-59,2005
- 7) "A Study of Algorithm for Estimation of Global Terrestrial  
Net Primary Production using Satellite Data"  
Yan XIONG (2005)  
Doctor Thesis, The Division of Integrated Sciences, Nara Women's University 2005