

## 《研究ノート》

奈良県東吉野村における CO<sub>2</sub> 濃度の動態解析 II

海老名 桜 子

(奈良女子大学大学院人間文化研究科)

村 松 加奈子・古 川 昭 雄

(奈良女子大学共生科学研究センター)

醍 醐 元 正

(同志社大学経済学部)

古 海 忍

(佐保短期大学)

森 麻 美

(奈良女子大学大学院人間文化研究科)

## 1 はじめに

近年、世界中で地球環境問題への関心が高まっている。地球環境問題の中でも、地球温暖化を引き起こす温室効果ガスの濃度増加は深刻な問題となっている。温室効果ガスの1つである CO<sub>2</sub> は、主に人間活動によって排出され、産業革命以降の濃度増加が顕著な物質であり、日本で排出される温室効果ガスの約9割を占めている。この濃度増加は将来の人間活動だけでなく、地球生態系にも多大な影響を与えることが懸念されている。例えば、気候の変化による砂漠化や食糧難、海面上昇による陸地の水没など様々な影響が予測されている。この CO<sub>2</sub> を吸収、固定するものとして、陸域では植生による光合成が注目されている。この光合成による CO<sub>2</sub> 固定量を衛星データから推定する研究が現在行なわれている。奈良女子大学共生科学研究センターでは、CO<sub>2</sub> 濃度のモニタリングを奈良県東吉野村（1999 年から）、奈良県奈良市（2002 年から）、生駒山（2005 年から）で行なっている。しかし、一般的な測定方法である渦相関法による CO<sub>2</sub> 吸収量の測定は行なっていない。そこで、衛星データを用いた CO<sub>2</sub> 吸収量の地域的な評価をしていくことを最終目的とし、本研究では 2004 年から 2006 年までの奈良県東吉野と奈良市における CO<sub>2</sub> 濃度モニタリングデータを用いて CO<sub>2</sub> 吸収量算出手法の検討を行なう。

## 2 地上観測

本研究で使用した奈良県東吉野の CO<sub>2</sub> 濃度モニタリングデータは、1999 年から奈良県東吉

野村大字小川字小の山頂にある気象観測塔（以下、タワー）で測定された。タワーの場所は標高 685.5 m, 北緯 34°24′1″, 東経 135°59′3″ で、タワーの高さは 17 m, CO<sub>2</sub> 濃度の測定場所の高さは地上 19 m である。周囲にはコナラ、マツなどの雑木林がある。東吉野は林業が盛んな地域であり、周辺の山にはスギ、ヒノキの植林がある。また、奈良市の CO<sub>2</sub> 濃度モニタリングデータは、2002 年から奈良県奈良市北魚屋西町にある奈良女子大学新 E 棟屋上で測定された。測定場所は標高 120 m, 北緯 34°41′6″, 東経 135°49′4″ で、CO<sub>2</sub> 濃度の測定場所の高さは地上 15 m である。

測定項目は、CO<sub>2</sub> 濃度、風向、風速、光量子密度、気温、日射量で、測定は全て 1 分間隔で行なわれている。CO<sub>2</sub> 濃度の測定には、LI-COR 社製の CO<sub>2</sub> 分析計（LI-6262 型）、その他の測定項目である風向風速は、クリマテック社製の超音波風向風速計 PGWS-100-3 型、光量子は LI-COR 社製の LI-190 SA 型、湿度は Vaisala 社製の HMP 45 A 型を用いて測定を行なっている。緯度経度は GAR MIN 社製の GPSIIIplus 型を用いて測定した。

2004 年から 2006 年までの東吉野と奈良市の気温の各月毎の日平均値と光量子密度の各月毎の平均瞬時値を計算した。その結果を図 1 と図 2 に示す。東吉野の平均気温は 13.5 (°C)、奈

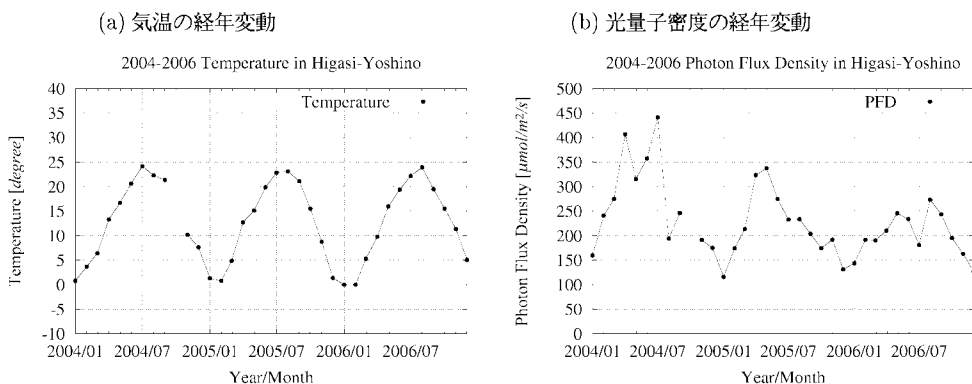


図 1 東吉野における 2004 年から 2006 年の気温と光量子密度の経年変化

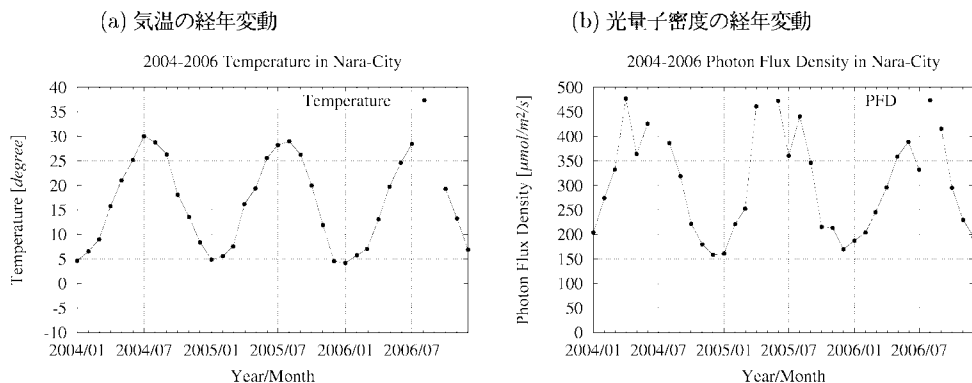


図 2 奈良市における 2004 年から 2006 年の気温と光量子密度の経年変化

良市の平均気温は 16.8 (°C) で、東吉野よりも 3.3 (°C) 高い。図 1 と図 2 の (b) 光量子密度の経年変動をみると、光量子密度が最大となる値が 2 つの地域で異なっている。これは、東吉野の光量子センサーの感度が下がっているためと考えられ、今後確認する予定である。

### 3 奈良県東吉野のデータ解析

#### 3.1 CO<sub>2</sub> 濃度の経年変化

東吉野での 2004 年から 2007 年の CO<sub>2</sub> 濃度の経年変化を調べるために、CO<sub>2</sub> 濃度の測定値を 1 日ごとに平均した結果を以下に示す。図 3 は、横軸が年月 (2004. 1–2007. 12) を表し、縦軸は日平均の CO<sub>2</sub> 濃度 ( $\mu\text{mol/mol}$ ) である。図 3 より、各年の 2 月頃に CO<sub>2</sub> 濃度が最大、9 月に最小となり、その季節変動幅は 22 ( $\mu\text{mol/mol}$ ) である。2004 年、2005 年、2006 年、2007 年の平均 CO<sub>2</sub> 濃度は、それぞれ 381.6, 387.6, 389.8, 391.7 ( $\mu\text{mol/mol}$ ) であり、その結果を表 1 にまとめる。4 年間で 2.5 ( $\mu\text{mol/mol/year}$ ) の上昇がみられる。

#### 3.2 CO<sub>2</sub> 濃度の時間変化

次に、CO<sub>2</sub> 濃度の月毎の時間変化をみるために、各月の時間毎に CO<sub>2</sub> 濃度の平均を計算した。2005 年と 2006 年の奇数月の CO<sub>2</sub> 濃度の時間変化を図 4 (a) と (b) に示す。グラフの横軸は時間 (0 時から 23 時)、縦軸は CO<sub>2</sub> 濃度 ( $\mu\text{mol/mol}$ ) である。2005 年の東吉野の CO<sub>2</sub> 濃度の時間変化 (図 4 (a)) を見

表 1 東吉野における年平均 CO<sub>2</sub> 濃度

年平均 CO <sub>2</sub> 濃度 [ $\mu\text{mol/mol}$ ]	
2004	381.6
2005	387.6
2006	389.8
2007	391.7

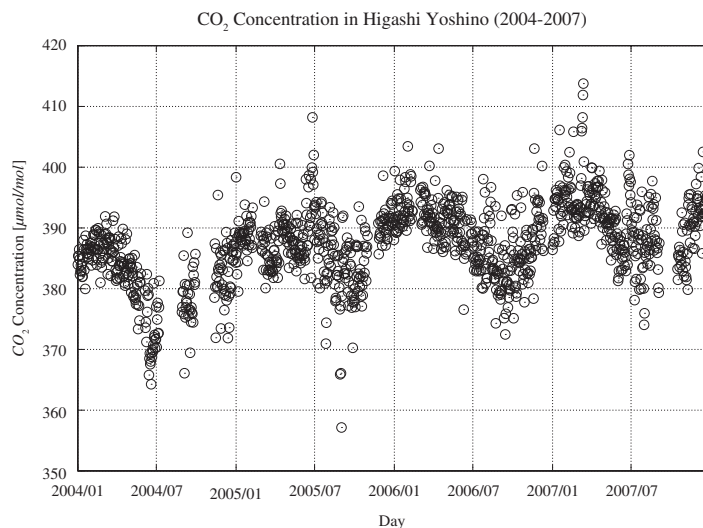
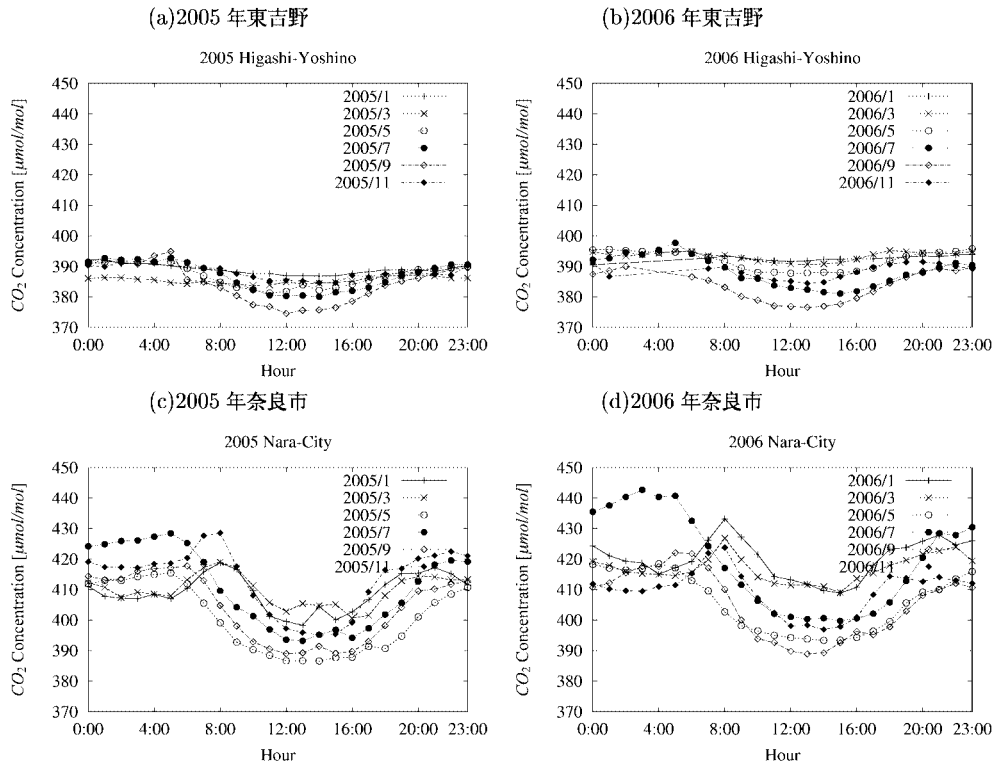


図 3 2004 年から 2007 年の CO<sub>2</sub> 濃度の経年変化

図 4 東吉野と奈良市における CO<sub>2</sub> 濃度の時間変化

ると、時間変化の幅に季節的な違いが見られる。1 月は CO<sub>2</sub> 濃度が 395 ( $\mu\text{mol/mol}$ ) でほぼ一定であるのに対して、9 月は夜に 390 ( $\mu\text{mol/mol}$ ) である CO<sub>2</sub> 濃度が正午には 375 ( $\mu\text{mol/mol}$ ) まで下がる。その幅は 15 ( $\mu\text{mol/mol}$ ) である。図 4 (b) の 2006 年の場合も同様である。

東吉野の結果と比較するために、奈良市（奈良女子大学屋上）での測定データについても同様に解析した。図 4 (c) と (d) は 2005 年と 2006 年の奈良市における CO<sub>2</sub> 濃度の時間変化を示す。横軸は時間（0 時から 23 時）、縦軸は CO<sub>2</sub> 濃度 ( $\mu\text{mol/mol}$ ) である。2005 年の奈良市の CO<sub>2</sub> 濃度の時間変化（図 4 (c)）を見ると、午前 8 時頃に CO<sub>2</sub> 濃度が最も高くなり、昼に向かって濃度が下がり、夜に再び上昇する。例えば、2005 年 9 月であれば、朝 6 時頃に 418 ( $\mu\text{mol/mol}$ ) であった CO<sub>2</sub> 濃度が、昼には 390 ( $\mu\text{mol/mol}$ ) まで下がり、その変化の幅は 28 ( $\mu\text{mol/mol}$ ) であり、東吉野よりも 13 ( $\mu\text{mol/mol}$ ) 大きく変化している。図 4 (d) の 2006 年の奈良市の結果も同様の傾向を示す。また、昼頃に CO<sub>2</sub> 濃度が下がり、夜に上がっていく傾向は東吉野の結果と似ているが、東吉野の CO<sub>2</sub> 濃度の変化の仕方には季節的な違いが見られ、奈良市の CO<sub>2</sub> 濃度の変化は 1 年を通してほぼ同じである。

### 3.3 CO<sub>2</sub> 吸収量の計算

前節の時間変化の結果から、東吉野のデータに植生の CO<sub>2</sub> 吸収量が反映されていると考えられる。ある気柱の中での CO<sub>2</sub> 収支のプロセスは、(a) 夜：土壌呼吸、植生による呼吸、他からの移流、(b) 昼：土壌呼吸、植生による呼吸、他からの移流、光合成による吸収から成る。いま、他からの移流はなく、昼と夜の呼吸量が同じで、気柱からの夜の放出はないと仮定する。夜の CO<sub>2</sub> 気柱量は、土壌呼吸と植物の呼吸と考えられるので、夜の CO<sub>2</sub> 気柱量から昼の CO<sub>2</sub> 気柱量を引く事により、生態系の吸収が計算できると考えられる。光量子密度が 10 ( $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ ) 以上である時間帯を昼とし、10 ( $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ ) 以下である時間帯を夜とした。それぞれの時間帯の気柱の CO<sub>2</sub> 濃度は一様であると仮定し、夜と昼の CO<sub>2</sub> 気柱量を求めた。その式を (1) に示す。

$$[\text{gCO}_2/\text{m}^2] = d\text{CO}_2 [\mu\text{mol}/\text{mol}] \times 10^{-6} \times 44 [\text{gCO}_2/\text{mol}] \times \frac{1}{V [\text{m}^3]} \times H [\text{m}] \quad (1)$$

ここでは、 $d\text{CO}_2$  は昼と夜それぞれの CO<sub>2</sub> 濃度 ( $\mu\text{mol}/\text{mol}$ )、 $V$  は  $\{(273+T)/273\} \times 22.4 \times 10^{-3}$  ( $\text{m}^3$ )、 $H$  はタワーの高さ (19 m) である。

式 (1) から求めた夜の CO<sub>2</sub> 気柱量から昼の CO<sub>2</sub> 気柱量を引いた。その結果を図 5 に示す。図 5 は横軸が年月 (2004. 1–2006. 12)、縦軸が昼と夜の CO<sub>2</sub> 量の差 ( $\text{gCO}_2/\text{m}^2$ ) である。昼と夜の CO<sub>2</sub> 量の差は、2004 年 7 月に 109.73 ( $\text{gCO}_2/\text{m}^2$ )、2005 年 9 月に 128.55 ( $\text{gCO}_2/\text{m}^2$ )、2006 年 8 月に 119.87 ( $\text{gCO}_2/\text{m}^2$ ) で最大になる。また、2004 年 1 月に 18.58 ( $\text{gCO}_2/\text{m}^2$ )、2005 年 2 月に 11.05 ( $\text{gCO}_2/\text{m}^2$ )、2006 年 2 月に -17.12 ( $\text{gCO}_2/\text{m}^2$ ) で最小になる。年間では、2005 年が 69.113 ( $\text{gCO}_2/\text{m}^2$ )、2006 年が 641.19 ( $\text{gCO}_2/\text{m}^2$ ) である。この計算手法の検証を行なうために、渦相関法による CO<sub>2</sub> 吸収量の測定と CO<sub>2</sub> 濃度の測定を行なっている岐阜県高山でデータを手し、そのデータを用いて東吉野と同様の解析を行なった。

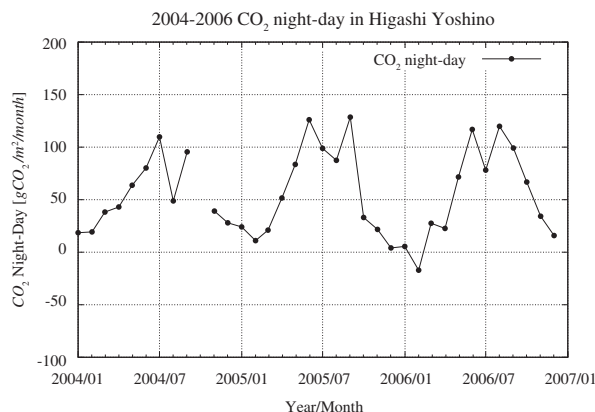


図 5 東吉野における 2004 年から 2006 年の昼と夜の CO<sub>2</sub> 気柱量の差

## 4 岐阜県高山のデータ解析

奈良県東吉野のデータ解析の参考とするため、岐阜県高山のデータを産業総合技術研究所より提供いただいた（WDCGG よりダウンロード）。東吉野と同様に CO<sub>2</sub> 濃度の経年変化、時間変化の解析、CO<sub>2</sub> 吸収量の計算を行なった。高山では、高度別に CO<sub>2</sub> 濃度の測定を行なっているが、本研究では全ての解析を測定高度が 18 m のデータを用いて行なった。次にその結果について述べる。

### 4.1 CO<sub>2</sub> 濃度の経年変化

岐阜県高山の 2004 年、2005 年の CO<sub>2</sub> 濃度の時間別データを用いて、1 日の平均 CO<sub>2</sub> 濃度を計算した。その結果を図 6 に示す。図 6 のグラフは横軸が年月（2004.1–2005.12）、縦軸が CO<sub>2</sub> 濃度（ppm）である。CO<sub>2</sub> 濃度の季節変動幅は約 15（ppm）であった。各年の年平均 CO<sub>2</sub> 濃度は、表 2 となった。東吉野の結果である表 1 の 2004 年、2005 年と比べると、ほぼ同じ濃度である。

### 4.2 CO<sub>2</sub> 濃度の時間変化

次に、CO<sub>2</sub> 濃度の月毎の時間変化を調べた。CO<sub>2</sub> 濃度の時間平均値を各月毎に計算した。2004 年の奇数月の CO<sub>2</sub> 濃度の時間変化を図 7 に示す。グラフの横軸は時間（0 時から 23 時）、縦軸は CO<sub>2</sub> 濃度（ppm）である。図 7 を見ると、東吉野（図 4（1）（2））と同様に時間変化の幅に季節的な違いが見られる。1 月と 3 月は CO<sub>2</sub> 濃度が 385（ppm）でほぼ一定であるのに対して、7 月と 9 月は夜に 380（ppm）である CO<sub>2</sub> 濃度が正午には 368（ppm）まで下がり、その

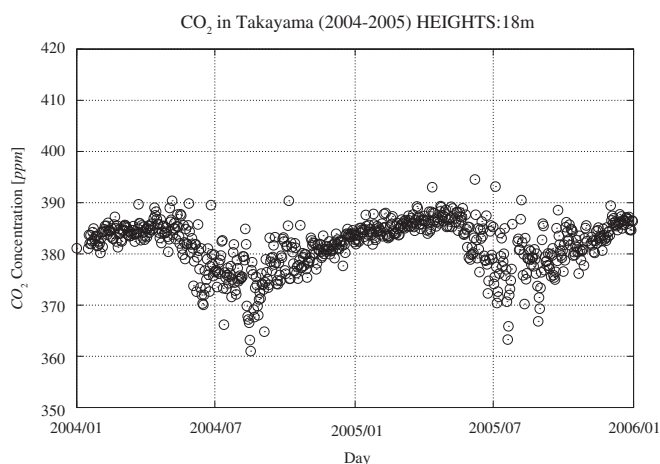
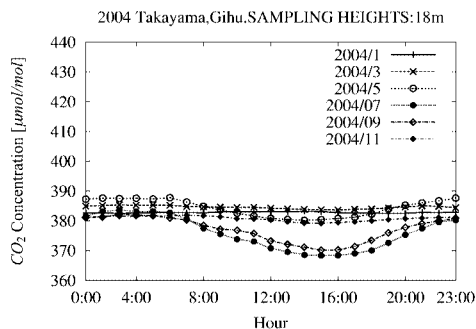
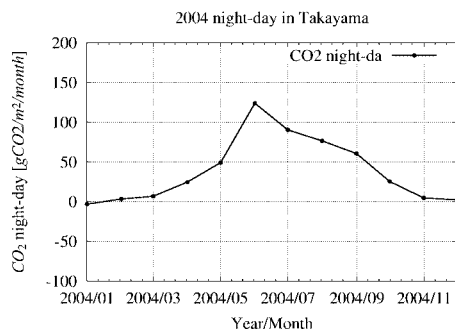


図 6 2004 から 2005 年の CO<sub>2</sub> 濃度の経年変化

表 2 高山における年平均 CO<sub>2</sub> 濃度 [ppm]

年平均 CO <sub>2</sub> 濃度 [ppm]	
2004	381.6
2005	384.2

図7 高山における CO<sub>2</sub> 濃度の時間変化図8 高山における 2004 年の昼と夜の CO<sub>2</sub> 気柱量の差表3 昼と夜の CO<sub>2</sub> 気柱量の差（東吉野、高山）と年間 NEP（高山）

年	昼夜の CO <sub>2</sub> 気柱量差 東吉野 [gCO <sub>2</sub> /m <sup>2</sup> ]	昼夜の CO <sub>2</sub> 気柱量差 高山 [gCO <sub>2</sub> /m <sup>2</sup> ]	NEP 高山 [gCO <sub>2</sub> /m <sup>2</sup> ]
1994–2002			869 ± 337
2004		465	
2005	691.13		
2006	641.19		

幅は 12 (ppm) である。東吉野（図 4 (1) (2)）よりも変動の幅が 3 (ppm) 小さく、冬に濃度が一定になる様子も東吉野よりはっきりとわかる。これは、東吉野の植生は常緑樹林帯である一方、高山の植生は落葉樹林帯である事と関連づけられる。

#### 4.3 CO<sub>2</sub> 吸収量の計算

高山のデータを用いて、東吉野と同様に経年変化、時間変化をみることで、高山の CO<sub>2</sub> 濃度のデータも植生の CO<sub>2</sub> 吸収量を反映していることがわかる。そこで、高山のデータを用いて昼と夜の CO<sub>2</sub> 気柱量の差を計算した。その結果を図 8 に示す。図 8 のグラフは、横軸が年月（2004. 1–2004. 12）、縦軸が昼と夜の CO<sub>2</sub> 量の差 (gCO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup>) である。6 月に 123.94 (gCO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup>) で最大、1 月に -3.10 (gCO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup>) で最小となり、年間積算値は、465 (gCO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup>) である。高山の年間 NEP (net ecosystem production) 869 ± 337 (gCO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup>) と誤差の範囲内で一致した。東吉野と高山の昼と夜の気柱量の差と高山の年間 NEP を表 3 にまとめた。この計算手法による CO<sub>2</sub> 吸収量の算出は、CO<sub>2</sub> 濃度の高度分布、呼吸量の気温依存、CO<sub>2</sub> の移流を考慮できていない。今後はこれらを改良していく。

### 5 まとめと今後の課題

本研究は、衛星データを用いて植生の CO<sub>2</sub> 吸収量の地域的な評価を行なうため、まず奈良県東吉野村森林内における植生の CO<sub>2</sub> 吸収量の算出手法に関する検討を行なった。2004 年か

ら 2006 年の CO<sub>2</sub> 濃度モニタリングデータを用いて CO<sub>2</sub> 濃度の動態解析を行ない、昼と夜の CO<sub>2</sub> 気柱量の差の昼間における積算値を計算した結果、年間で  $666 \pm 30$  ( $\text{gCO}_2/\text{m}^2$ ) であった。高山のデータでも同様の計算を行なった結果、 $465$  ( $\text{gCO}_2/\text{m}^2$ ) となり、高山の CO<sub>2</sub> フラックスサイトで測定された生態系 CO<sub>2</sub> 吸収量 ( $869 \pm 337$   $\text{gCO}_2/\text{m}^2$ ) と誤差の範囲内で一致した。しかし、CO<sub>2</sub> 濃度の高度分布や生態系呼吸量の気温依存、移流を考慮できていない。今後は高山での CO<sub>2</sub> 濃度の高度分布を用いた解析と生態系呼吸量の式を用いて昼と夜の CO<sub>2</sub> 気柱量の差を補正、CO<sub>2</sub> 吸収量の算出手法の検討を行ない、東吉野での CO<sub>2</sub> 吸収量算出の精度向上を目指す。

#### 謝辞

本研究で使用した奈良県東吉野の観測データは、奈良女子大学共生科学研究センターより提供された。岐阜県高山の観測データは産業技術総合研究所より提供された。また、本研究は文部科学省フロンティア推進事業（平成 11 年～平成 20 年度）により行なわれた。ここに感謝の意を表したい。

#### 参考文献

- [ 1 ] Nobuko Saigusa · Susumu Yamamoto · Shohei Murayama · Hiroaki Kondo. 「Inter-annual variability of carbon budget components in an AsiaFlux forest site estimated by long-term flux measurements」. *Agriculture and Forest Meteorology* 134, 4–16. 2005.
- [ 2 ] Susumu Yamamoto · Shohei Murayama · Nobuko Saigusa · Hiroaki Kondo. 「Seasonal and inter-annual variation of CO<sub>2</sub> flux between a temperate forest and the atmosphere in Japan」. *Tellus* 51 B, 402–413. 1999.
- [ 3 ] 浦昭二・原田賢一. 「C 入門」. 2002.
- [ 4 ] 近藤純正. 「地表面に近い大気の科学－理解と応用」. 2000.
- [ 5 ] 西岡秀三・原沢英夫. 「地球温暖化と日本－自然・人への影響予測－」. 1997.
- [ 6 ] 森麻美. 「大気中の二酸化炭素の変動要因に関する研究」. 奈良女子大学人間文化研究科生物科学専攻・2003 年度修士論文, 2004.
- [ 7 ] 全国地球温暖化防止活動推進センター. (<http://www.jccca.org/index.php>)
- [ 8 ] 独立行政法人, 産業技術総合研究所. (<http://www.aist.go.jp/>)