

B-6 陸域生態系の二酸化炭素動態の評価と予測・モデリングに関する研究

(4) グローバル・カーボン・サイクル・モデルの開発

④ グローバル・カーボン・サイクル・モデルの開発

研究代表者 農業環境技術研究所 地球環境研究チーム 袴田共之

農林水産省農業環境技術研究所

企画調整部 地球環境研究チーム 袴田共之

(委託先) 豊橋技術科学大学 後藤尚弘

平成8-10年度合計予算額 18,844 千円  
(平成10年度予算額 5,856 千円)

[要旨] 土壌は炭素の大きなリザーバーであり、地球規模の炭素循環の中で重要な役割を占める。また、ミッシングシンク・プロブレムにおいても、土壌中における炭素循環が鍵を握るといわれている。本研究では地球規模の炭素循環モデルを構築し、土壌中の炭素循環について検討を行った。その結果、地球温暖化により陸上生態系の炭素蓄積量は増大するが、その増加分の大部分は土壌中の炭素の増加であることが予測できた。また、農耕地土壌の炭素蓄積量も地球温暖化によって増加するが、その程度は高緯度地方と低緯度地方では大きく異なることが予測できた。

[キーワード] 数理モデル、陸上生態系、土壌炭素、炭素循環

1. 序

地球温暖化問題の発端である大気中の炭酸ガス濃度増加は、人類による地球規模の炭素循環の攪乱が原因である。つまり、近年の急激な人間活動の発展に伴う化石燃料の消費や森林伐採などによって、現在の炭素循環は本来あるべき姿からずれてしまっているといえよう。よって、地球の炭素循環の観点から地球環境問題を取り扱うのはひとつの重大な側面である。Siegenthaler and Sarmiento (1993)によると、化石燃料消費による大気中への炭酸ガス放出は5GtC/yr程度であるのに対して、大気と陸上生態系は実に100GtC/yrもの炭酸ガスをやり取りしている。仮に陸上生態系がその保持している炭素の1%でも変動すれば、化石燃料による放出と同程度の炭酸ガスが放出(吸収)されることになる。特に森林伐採や植林等人間活動の影響を受けやすい陸上生態系の地球規模の炭素循環を把握することは極めて重要である。

また、化石燃料消費によって放出された炭酸ガス5GtC/yrのうち大気濃度上昇分以外がどこへ吸収されたかが未だに不明であるいわゆる「ミッシングシンク・プロブレム」は未だに解明されていない。近年では土壌へ吸収されているのではないかという説が有力である。よって、陸上生態系の地球規模での炭素循環における果たす役割を把握することも欠かせない。さらに、取り扱う空間スケールが地球規模であるため、こうした、地球規模の炭素循環の把握は実験的手法では解決しない。

以上の理由より、この地球規模の炭素循環を記述できる唯一の方法が数理モデルによる方法である。

## 2 研究目的

本研究の目的は地球規模の陸上生態系における炭素循環を記述することのできる数理モデルを構築し、地球温暖化の陸上生態系への影響を予測することである。特に、ミッシングシンク・プロブレムで重要な鍵を握ると考えられる土壌における炭素循環を中心に検討する。また、人間活動の影響を最も受ける生態系である農業生態系における炭素循環も検討する。

これまで地球規模の陸上生態系を記述するモデルは大きく分けて気候モデルと炭素循環モデルの2つに分類できる。気候モデルとは温度や降雨量の気候条件と植生（植生分布、純生産速度等）の間に対応関係を構築するものである。現実の植生を記述するには有効であるが、将来の気候変動に対するダイナミクスを予測するには不適である。また、炭素循環モデルは地球を炭素のリザーバーとして大気、海洋、陸上生態系等のいくつかのボックスに区切り、それらボックス間の炭素循環を定式化するものであるが、従来のモデルの多くは陸上生態系を1つのボックスとしているため地域間の格差を導入するのは困難であった。現在さまざまな機関で大気大循環モデルによる将来の気候変動が予測されているが、いずれのモデルによる結果も地域によってその気候変動の幅が異なるとされている。また、ミッシングシンク問題でも陸上生態系、とりわけ中緯度から高緯度にかけての森林土壌が有力な炭酸ガスの吸収源であると考えられている (Simpson et al.: 1993)。よって、陸上生態系における炭素循環を考慮する場合、地域による格差が重要となる。よって、本研究では地域の影響を考慮するために、地球をいくつかのメッシュ（緯度 0.5 度×経度 0.5 度）に区切り、それぞれのメッシュにおける炭素循環を記述できる数理モデルを開発する。

## 3. 研究の成果

### 3. 1 モデルの構造

本研究では陸地をいくつかのメッシュに区切り、それぞれのメッシュ内で陸上生態系を記述する炭素循環モデルを構築することにより、地球規模の陸上生態系の炭素循環を記述した (Fig. 1)。まず、陸上生態系はその炭素蓄積の形態の違いから植生、土壌の2つに分けることができる。さらに、植生を光合成する部分である「葉」、光合成しない部分である「幹（枝や根も含む）」の2つのボックスに、また、土壌を分解速度の速い「植物遺体」、分解速度の遅い「腐植質」の2つのボックスに分けることができる。これら4つのボックスに「大気」を含めた5つのボックス間の炭素移動をモデル化した。また、本研究では将来の気候変動の影響を予測するため、陸上生態系の炭素循環に影響を及ぼす様々な環境条件をモデルに組み込んだ。地球規模の視点に立ち気候変動を考慮すると、温度、土壌水分量（降雨量）、大気中の炭酸ガス濃度が将来変化することが予測される。さらに、これらは直接的に陸上生態系の炭素循環に影響を及ぼすことが予測される。よって、これらの要因はモデルに組み込んだ (Goto et al: 1994, Suzuki and Goto: 1995)。炭素収支式は Appendix 参照。

### 3. 2 植生分布決定の概念

将来の気候変動の陸上生態系へ与える影響を評価するためには炭素蓄積量等の陸上生態系の炭素循環だけでなく、植生の分布の変動でも評価する必要がある。なぜなら、地球規模

の植生分布は様々な因子によって決定されており、中でも気候条件、温度及び降雨量は重要な役割を占めているといえるからである。現在のような植生分布を形成する要因は温度、降雨量、日照、土壌、地形など環境条件や植物間の競争など様々考えられる。これらの要因をすべて考慮し、地球規模の植生分布を決定するモデルを構築することは極めて困難である。本モデルではこれらの要因を植生の炭素蓄積量で代表できるものと仮定する。

本研究では、地球の陸地を緯度 0.5 度×経度 0.5 度のメッシュに区切り、それぞれのメッシュについて植生の炭素蓄積量を計算する。まず、それぞれのメッシュについてパラメータを変えることによって熱帯林、温帯林、寒帯林の 3 つのタイプについて炭素蓄積量を計算する。計算は、現在の気候条件を用い、定常状態に達するまで行い、各メッシュ毎に 3 つの植生の炭素蓄積量を比較し、最大の炭素蓄積量を持つ植生がそのメッシュの優占種となるとした。また、最大の炭素蓄積量が  $5 \text{ kg C/m}^2$  以下の場合はそのメッシュは草原に、 $0.5 \text{ kg C/m}^2$  の場合は砂漠・半砂漠になるとした。

ただし、農地に関しては農地データ (EPA, 1992) を利用し、農地のメッシュは固定した。そのメッシュでは植生の炭素蓄積量の最大値を  $1 \text{ kg C/m}^2$  とした。

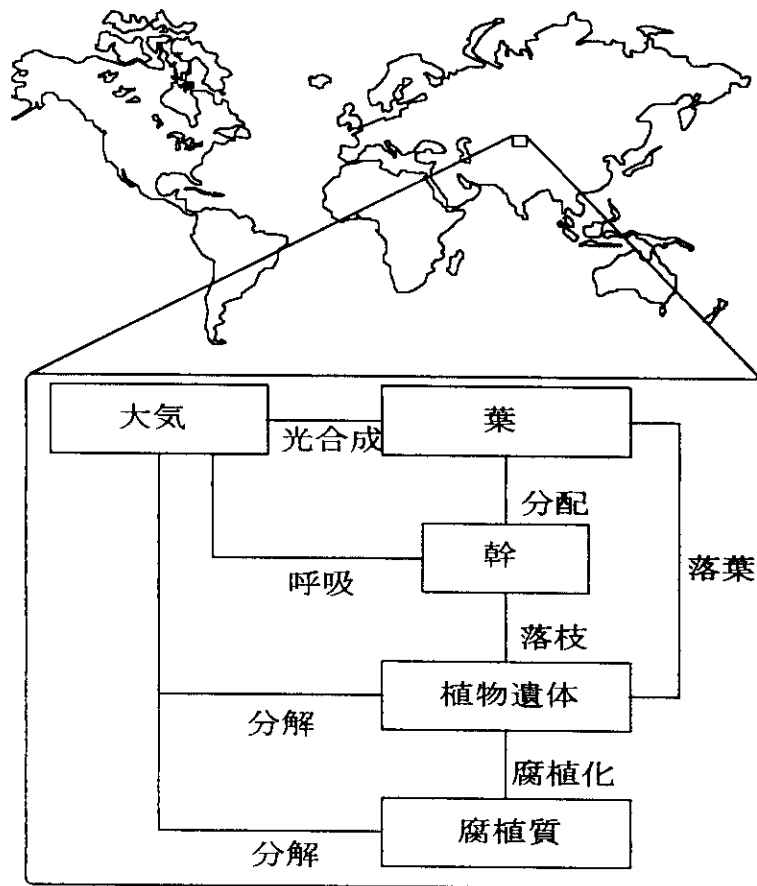


Fig. 1 モデル構造図

### 3. 3 計算結果

#### ①地球規模の炭素循環

Table 1 に現在の気候条件下と炭酸ガス濃度倍増時の気候条件下（気候条件は気象研究所の GCM の結果、MRI, 1996）における地球規模の植生面積、植生炭素蓄積量、土壤炭素蓄積量、純生産速度、土壤呼吸速度を示す。純生産速度は光合成速度と呼吸速度の差、土壤呼吸速度は植物遺体分解速度と腐植質分解速度の和である。ただし、定常状態における結果である為、純生産速度と土壤呼吸速度は等しくなる。Table 1 によると植生の炭素蓄積量は 391.5→430.1GtC (9.9%増)、土壤の炭素蓄積量は 1234.7→1391.7 (12.7%増)、純生産速度及び土壤呼吸速度は 128.5→1391.7 (22.0%増) となっている。植生の純生産速度が増加したのは温度の効果、炭酸ガス濃度増加の効果によるものと考えられる。これに伴い、植生の炭素蓄積量、土壤の炭素蓄積量、土壤呼吸速度が増加している。

陸上生態系の炭素蓄積量は 1626.3→1821.8GtC (195.1 GtC、12.0 増) である。つまり、炭酸ガス濃度倍増によって、195.1GtC の炭酸ガスが大気から陸上生態系へ吸収されることになる。仮に現在の炭酸ガス濃度が倍増するのに要する時間が 70 年とすると（毎年 1%増）、陸上生態系の炭酸ガス吸収は 2.8 GtC/yr となる。これは人間活動によって放出される炭酸ガスの量（約 6 GtC/yr）の約 50%にも達する。そして、その吸収量の 80%を土壤の吸収が占める。

## ②各植生の炭素循環

各植生に目を向けると、面積が増大している植生は熱帯林、温帯林、草原であるのに対して、面積が減少している植生は寒帯林、砂漠・半砂漠である。この傾向は

Table 1 現在の気候条件下と炭酸ガス濃度倍増時の気候条件下における植生および土壤の炭素蓄積量、純生産速度、土壤呼吸速度の変化（気候条件は気象研究所 GCM の結果による）

気候変動前		熱帯林	温帯林	寒帯林	草原	砂漠・半砂漠	合計
面積	10 <sup>6</sup> km <sup>2</sup>	9.7	9.3	12.5	27.0	73.1	131.7
植生炭素蓄積量	Gt	95.4	99.9	108.6	87.1	0.5	391.5
土壤炭素蓄積量	Gt	179.4	352.4	347.1	348.6	7.2	1234.7
陸上生態系炭素蓄積量	Gt	274.8	452.3	455.7	435.8	7.7	1626.3
純生産速度	Gt/yr	34.2	23.6	19.0	50.8	0.9	128.5
土壤呼吸速度	Gt/yr	34.2	23.6	19.0	50.8	0.9	128.5
気候変動後		熱帯林	温帯林	寒帯林	草原	砂漠・半砂漠	合計
面積	10 <sup>6</sup> km <sup>2</sup>	13.0	11.9	9.6	26.2	70.9	131.7
植生炭素蓄積量	Gt	127.7	131.0	88.2	82.9	0.3	430.1
土壤炭素蓄積量	Gt	220.7	561.1	281.0	324.4	4.6	1391.7
陸上生態系炭素蓄積量	Gt	348.4	692.1	369.2	407.3	4.9	1821.8
純生産速度	Gt/yr	49.4	26.9	15.5	64.4	0.5	156.7
土壤呼吸速度	Gt/yr	49.4	26.9	15.5	64.4	0.5	156.7

植生および土壌の炭素蓄積量、純生産速度、土壌呼吸速度に対しても同じことがいえる。これは地球温暖化が寒帯林に対して大きな負のフィードバックとなっていることがいえる。特に草原では炭素蓄積量が減少しているが、純生産速度は増加している。これは植生の更新（炭素蓄積量／純生産速度）が速くなることを示しており、この更新が何らかの原因でスムーズに行わなければ、草原の衰退は進行すると予測できる。

純生産速度、土壌呼吸速度に関して、温暖化による温度の影響だけを考えると速度は増加しなくてはならないが、寒帯林、砂漠・半砂漠では土壌水分状態が負のフィードバックとして働くので速度が増加せず、その結果土壌炭素蓄積量が増加しないと考えられる。

現在の気候条件下および炭酸ガス濃度倍増時の気候条件下における土壌炭素蓄積量と土壌呼吸速度の分布を Fig. 2、3 にそれぞれ示す。地球温暖化すると北東アジアや北米等の高緯地域での土壌炭素蓄積量の増大が著しいことがわかる。また、土壌呼吸速度は高緯度地域での増加よりも東南アジア等の低緯度地方での増加が著しい。

### ③農耕地土壌の炭素循環

Table 2 に現在の気候条件下と炭酸ガス濃度倍増時の気候条件下（気候条件は気象研究所 GCM の結果）における農耕地生態系の植生炭素蓄積量、土壌炭素蓄積量、純生産速度、土壌呼吸速度を示す。農地の炭素蓄積量は全陸上生態系の炭素蓄積量の 5.3% であり、純生産速度は全体の 18.2% である。気候変動によって、農耕地の炭素蓄積量は植生、土壌ともに増加している。

Table 2 現在の気候条件下と炭酸ガス濃度倍増時の気候条件下における農業生態系における植生および土壌の炭素蓄積量、純生産速度、土壌呼吸速度の変化

		気候変動前	気候変動後
植生炭素蓄積量	Gt	7.2	8.8
土壌炭素蓄積量	Gt	89.7	107.1
農地炭素蓄積量	Gt	96.9	115.9
純生産速度			
土壌呼吸速度	Gt /yr	28.5	39.8

また、Fig. 4 に農耕地土壌の炭素蓄積量の分布図を示す。図によると低緯度地方の農地で土壌炭素蓄積量が減少し、高緯度地方の農地で土壌炭素蓄積量が増加するのがわかる。このように温暖化の土壌への影響は地域によって異なることが予測できる。

## 5 本研究により得られた成果

本研究では陸上生態系の炭素循環モデルを記述するモデルを用いて、土壌炭素蓄積量と土壌呼吸速度の変動を予測するモデルを構築した。本モデルによって現在の気候における陸上生態系の炭素循環が十分に記述できることを示した。また、GCM の気候変動の予測を用いて、将来の炭素蓄積量の変動に関する予測を行なった。

本研究から地球温暖化による陸上生態系への影響で特筆すべき点は次の通りである。

- ①地球温暖化によって陸上生態系に炭酸ガスが吸収されることが予想され、その大部分を土壌が占める。
- ②地球温暖化によって寒帯林が大きなダメージを受ける。
- ③農耕地土壌は温暖化によって炭素蓄積量が増加する地域と減少する地域がある。

以上の点から地球規模の炭素循環に関しては土壌の占める役割は重要であると考えられる。近年、ミッシングシンク問題は陸上生態系、とりわけ土壌を炭酸ガス固定源とすることによって解決されようとしているが、その確証はない。よって、土壌中における炭素循環の解明が重要であり、以下の点が今後の重要な課題となるであろう。

#### ①土壌中の炭素循環機構

本モデルでは土壌における炭素循環に対する環境条件の影響を組み込んで入るが、特に温度や土壌水分に対する土壌呼吸速度の影響をより詳細に組み込むべきである。本研究の結果からもわかるように、温度が上昇しても水分条件が悪ければ速度は増加しないからである。

#### ②気候変動に対する土壌のダイナミクス

土壌の炭素蓄積量は植生のそれよりも大きい為、気候変動に対する応答が植生よりも遅い。よって、こうした時定数の違いをモデルに組み込むべきである。そうすることによって非定常状態での陸上生態系の地球温暖化に対する影響を予測することができる。

## 5. 参考文献

- EPA, Global Ecosystems Database, EPA Contract No. DW13934786-01-0, 1992  
Goto N. et al., Ecological Modeling, 74 (1994) 183  
Goto N. and M. Suzuki, Toward Global Planning of Sustainable Use of the Earth, Elsevier, Amsterdam, (1995) 135  
Meteorological Research Institute, CD-ROM on Global Warming Projection, 1, Japan Meteorological Agency, 1996  
Siegenthaler and Sarmiento, Nature, 363 (1993) 234  
Simpson et al. Water, Air and Soil Pollution, 70 (1993) 161

### [研究成果の発表状況]

#### (1) 論文発表

- ① Goto, N. and Y. Yanagisawa, Assessment of CO<sub>2</sub> reduction by technological usage of terrestrial ecosystems -reforestation and biomass energy-, Energy Convers. Mgmt, 1199 ~1204, 1996

## Appendix

### 各ボックスにおける炭素収支式

#### (1) 植生の炭素循環

植生の炭素循環は、Fig. 1 に示すように植生の炭素循環は大気中の炭酸ガスを光合成によって同化するフラックス、大気中へ炭酸ガスを呼吸によって放出するフラックス、植物から落葉や枯死によって土壌へ炭素を供給するフラックスの 3 つに分けることができる。以下に「葉」及び「幹」の炭素収支式を示す。

$$\text{葉} \quad \frac{dC_1}{dt} = \alpha R_1^P - R_1^L$$

$$\text{幹} \quad \frac{dC_2}{dt} = (1-\alpha)R_1^P - R_2^R - R_2^L$$

$C_1$  : 葉の炭素蓄積量(kg C/m<sup>2</sup>)

$C_2$  : 幹の炭素蓄積量(kg C/m<sup>2</sup>)

$\alpha$  : 光合成によって固定化される炭素のうち葉へ分配される割合

$R_1^P$  : 光合成速度(kg C/m<sup>2</sup>/day)

$R_1^L$  : 葉の落葉速度(kg C/m<sup>2</sup>/day)

$R_1^R$  : 幹の呼吸速度(kg C/m<sup>2</sup>/day)

$R_1^L$  : 幹の枯死速度(kg C/m<sup>2</sup>/day)

#### (2) 土壌の炭素循環

土壌植生の炭素循環は、Fig. 1 に示すように植生の炭素循環は大気中の炭酸ガスを光合成によって同化するフラックス、大気中へ炭酸ガスを呼吸によって放出するフラックス、植物から落葉や枯死によって土壌へ炭素を供給するフラックスの 3 つに分けることができる。以下に「葉」及び「幹」の炭素収支式を示す。

$$\text{植物遺体} \quad \frac{dC_3}{dt} = R_1^L + R_2^L - R_3^H - R_3^R$$

$$\text{腐植質} \quad \frac{dC_4}{dt} = R_3^H - R_4^D$$

$C_3$  : 植物遺体の炭素蓄積量(kg C/m<sup>2</sup>)

$C_4$  : 腐植質の炭素蓄積量(kg C/m<sup>2</sup>)

$R_3^H$  : 植物遺体の腐植化速度(kg C/m<sup>2</sup>/day)

$R_3^R$  : 植物遺体の分解速度(kg C/m<sup>2</sup>/day)

$R_4^D$  : 腐植質の分解速度(kg C/m<sup>2</sup>/day)

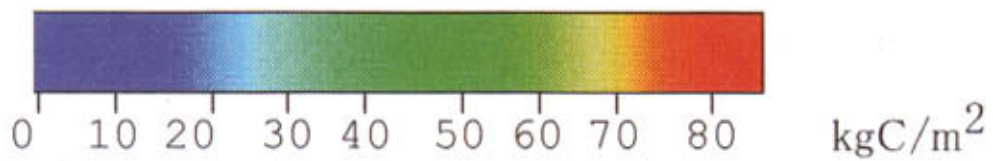
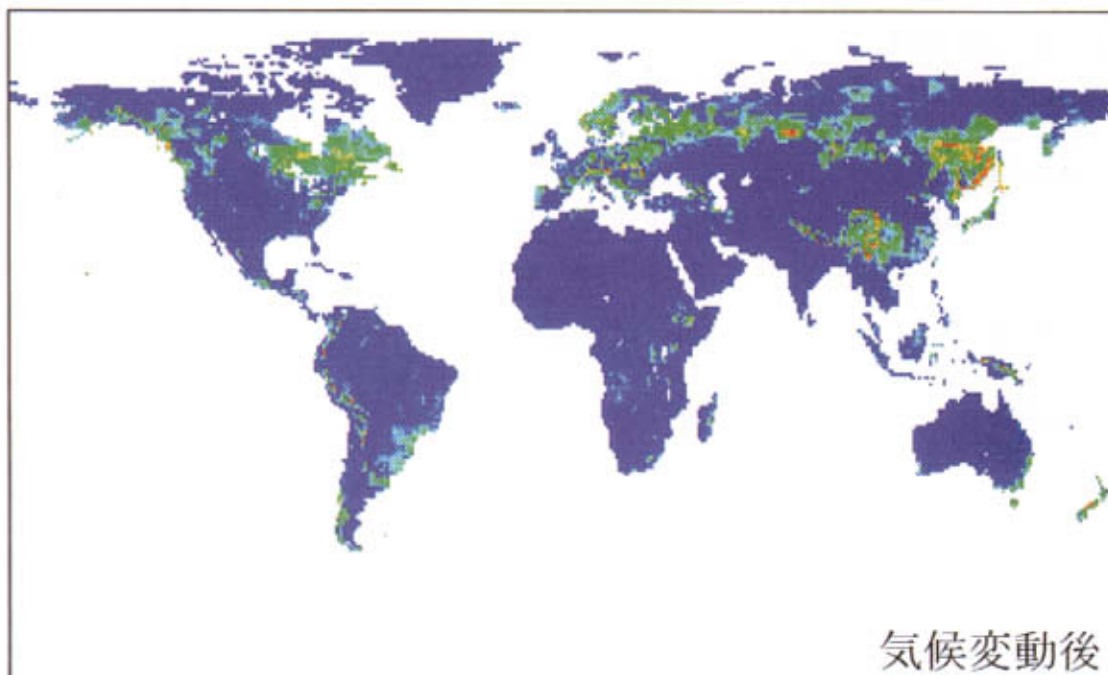
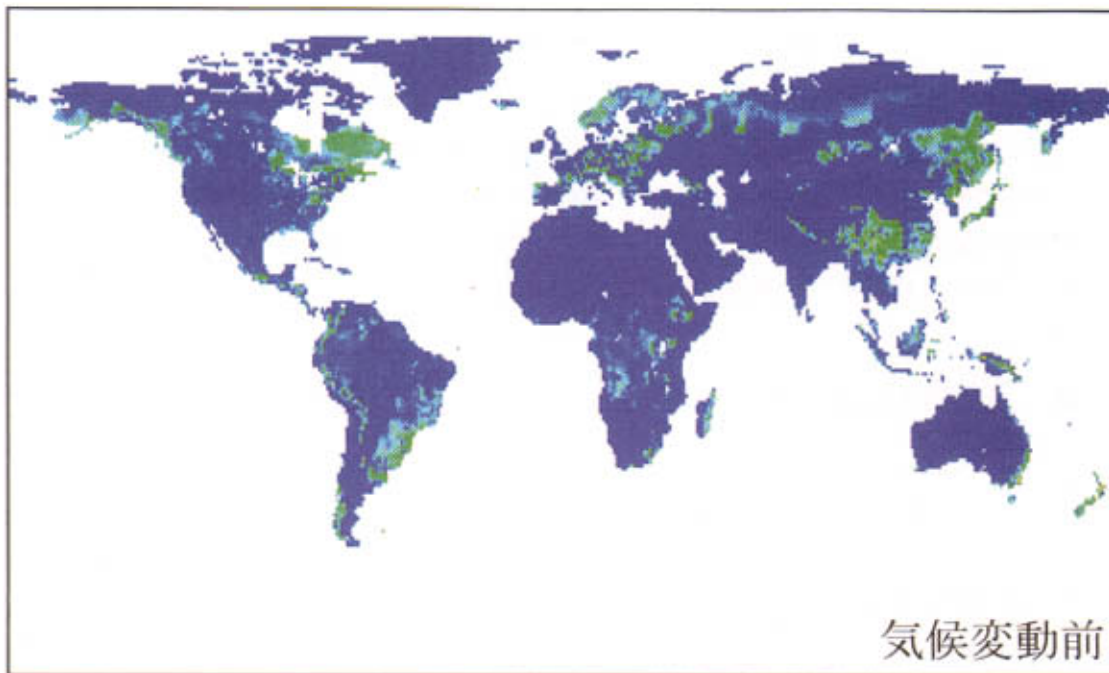


Fig.2 土壤炭素蓄積量



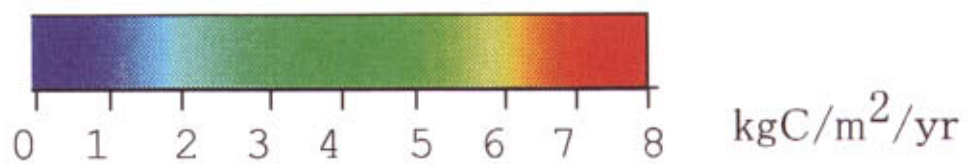
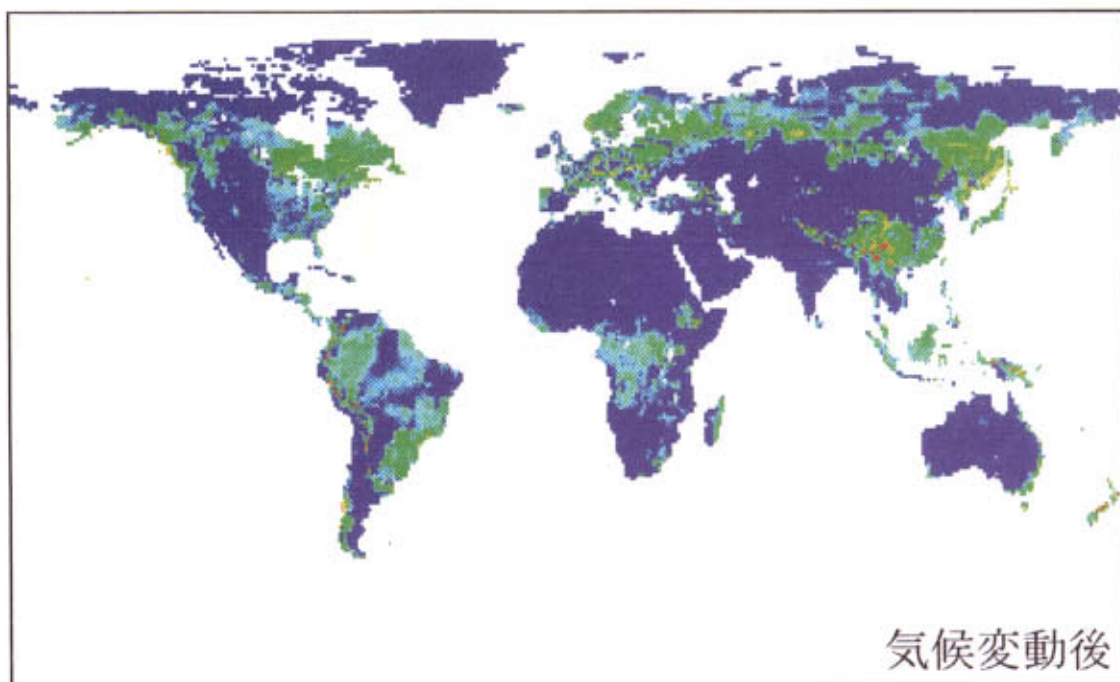
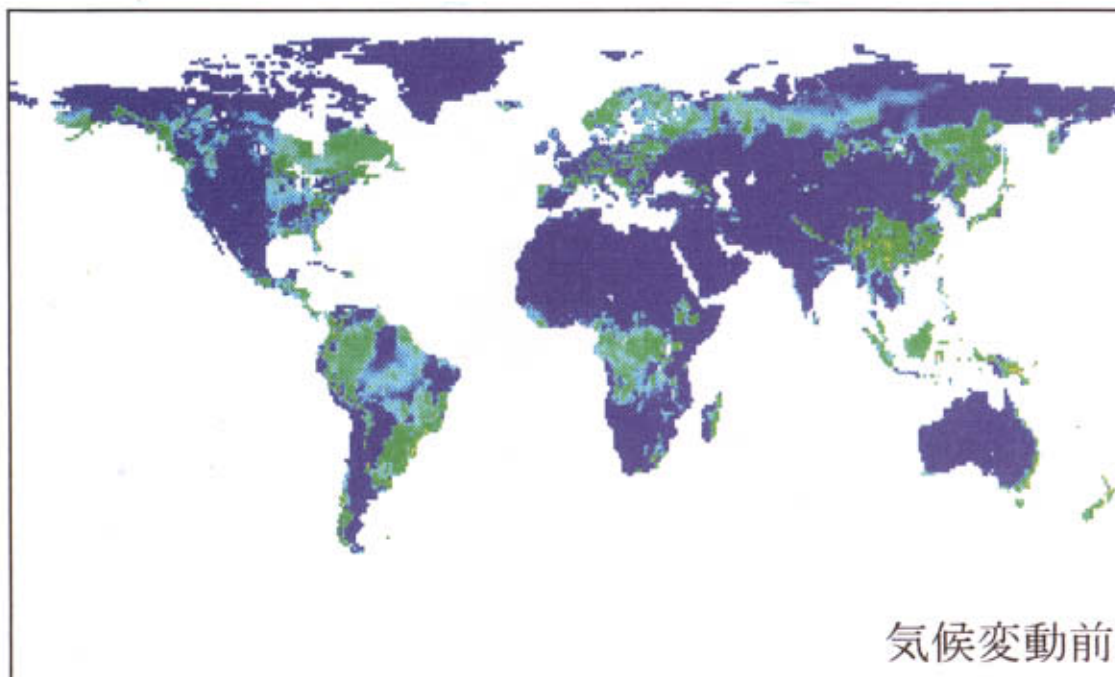


Fig.3 土壤呼吸速度

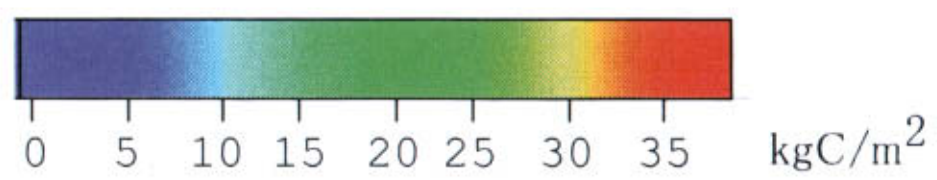
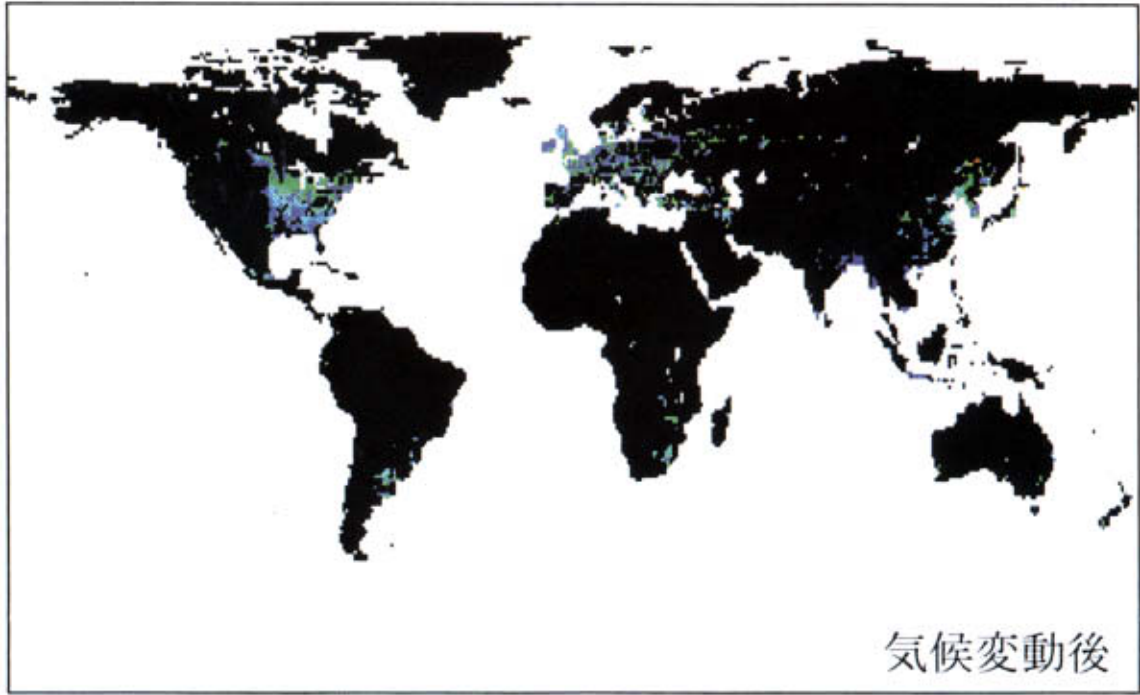
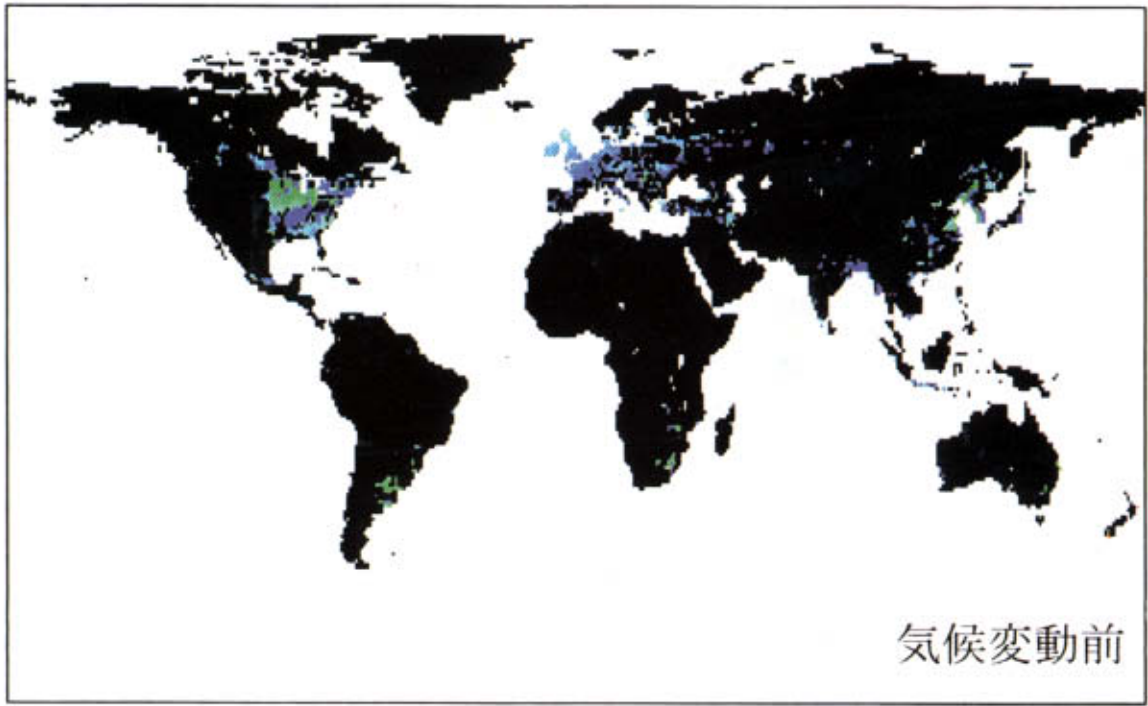


Fig.4 農耕地の土壌炭素蓄積量