

and N. Myers, 1987: Geographic distribution of the biotic flux of carbon in 1980. *Tellus*, **39B**, 122-139.

Keeling, C.D., R.B. Bacastow, A.F. Carter, S.C. Piper, T.P. Whorf, M. Heimann, W.G. Mook and H. Roeloffzen, 1989 a: A three dimensional model of atmospheric CO₂ transport based on observed winds: 1. Analysis of observational data. *Geophysical Monograph*, **55**, 165-235.

Keeling, C.D., S.C. Piper and M. Heimann, 1989 b: A three dimensional model of atmospheric CO₂ transport based on observed winds: 4. Mean annual gradients and interannual variations. *Geophysical Monograph*, **55**, 305-363.

Maier-Reimer, E. and K. Hasselmann, 1987: Transport and storage in the ocean—An inorganic ocean-circulation carbon cycle model. *Climate Dynamics*, **2**, 63-90.

Siegenthaler, U., 1983: Uptake of excess CO₂ by an outcrop-diffusion model of the ocean. *J. Geophys. Res.*, **88**, 3599-3608.

Tans, P.P., I.Y. Fung and T. Takahashi, 1990: Observational constraints on the global atmospheric CO₂ budget. *Science*, **247**, 1431-1438.

田中正之, 1991: 二酸化炭素の循環と地球の熱バランス. *応用物理*, **59**, 427-431.

———, 1979: 二酸化炭素, 大気汚染物質の動態, 磯野謙治編, 大気環境の科学 2. 東大出版会, 49-84.

409; 411 (生物圏; 一次の純生産 (NPP); 生態系純生産 (NEP); 二酸化炭素濃度)

3. 生物圏はソースかシンクか*

及川武久**

陸上生物圏の有機炭素量フラックス

植物は太陽光をエネルギー源として, CO₂ と水を原料として有機物を合成している. これを生態系としてみた時に総生産 (GPP; Gross Primary Production) と呼ぶ. 植物は光合成で有機物を合成すると同時に, 生命活動の源となる呼吸 (R_P) を行なって, 大気に CO₂ を放出している. GPP からこの R_P を差し引いた値が, 一次の純生産 (NPP; Net Primary Production) であり, この NPP が新たな植物体になる. われわれ人間も含めたあらゆる動物は有機物を合成できない. 草食動物は直接植物を食べ, 肉食動物は草食動物を食べることによって, 間接的に植物に依存して生きている. このように食物連鎖を通じて, 動物は植物の光合成産物を利用して生きており, その利用可能な量がこの NPP になる. 従って, NPP は植物の生産力を表わす指標であると同時に, その生態系の規模を決める指標でもある. 生物圏扶養能力と呼ばれる由縁である.

この一連の炭素の流れを式に表わすと,

$$NPP = GPP - R_P \quad (1-1)$$

$$= \Delta W + L + G \quad (1-2)$$

ここで, ΔW はある期間の植物体の炭素増加量を表わ

し, L は枯葉・枯枝となって植物から地面に供給される有機物量を表わし, G は動物に食われる植物の有機炭素量を表わす.

各生態系の NPP は, 一般に (1-2) 式に基づいて求められる. 例えば, 森林の NPP を求めるには, ある一定面積に生えているすべての木の幹の直径を, ある年 t_1 と, 1~2 年経た t_2 に測定し, この測定値から t_1 と t_2 におけるそれぞれの現存量 W_1 と W_2 を推定して, $\Delta W = W_2 - W_1$ とする. 同時に t_1 から t_2 の間に落ちて来る枯葉・枯枝を地表面で定期的に回収して, L を求める. G は一般に小さいので省略し, $\Delta W + L$ を NPP とする. このような方法で求められた世界各地の NPP と植物現存量が, 第 1 表に示してある. このような各生態系ごとの測定値をまとめて, 地球規模の炭素現存量とフラックスを求めた値が, 最近の IPCC のレポート (Watson *et al.*, 1990) に見ることができる.

Watson *et al.* は, 陸上生物圏には生きている植物体として 550, 土壌中の死んだ有機物として, 植物体の約 3 倍の 1,500, 合計 2,050 の C (単位はいずれも $10^{15}g = Pg$) が, 有機態として存在するものと見積もっている. 大気中の CO₂-C は 750 (1990 年の値で, 現在年間 3 つつ増えつつある) なので, 陸上生物圏の有機態の炭素量は, 大気圏のその約 3 倍であり, 有機物量の増減は, 大気中の CO₂ 濃度に大きな変化を与える.

* Is the Biosphere a sink or a source for CO₂.

** Takehisa Oikawa, 筑波大学生物科学系.

第1表 生物群系別の植物現存量と純生産力
(Whittaker, T.H. and Likens, G.E. (1973) による)

生態系タイプ	面積 (億ha)	純一次生産(乾物)			現存量(乾物)			リター量 (億t)
		変化幅 (t/ha・年)	平均 (t/ha・年)	生産量 (億t/年)	変化幅 (t/ha)	平均 (t/ha)	全量 (億t)	
熱帯多雨林	17.0	10~35	22	374	60~800	450	7,650	34
熱帯季節林	7.5	10~25	16	120	60~800	350	2,600	38
温帯常緑林	5.0	6~25	13	65	60~200	350	1,750	150
温帯落葉林	7.0	6~25	12	84	60~600	300	2,100	140
北方森林	12.0	4~20	8	96	60~400	200	2,400	480
高・低木林地	8.5	2.5~12	7	60	20~200	60	500	51
サバナ	15.0	2.0~20	9	135	2~150	40	600	30
温帯草地	9.0	2.0~15	6	54	2~50	16	140	36
ツンドラ・山岳高地	8.0	0.1~	1.4	11	1~30	6	50	80
砂漠・半砂漠植生	18.0	0.1~2.5	0.9	16	1~40	7	130	3.6
完全砂漠 (岩地, 砂地, 氷地)	24.0	0~0.1	0.03	0.7	0~2	0.2	5	0.3
耕地	14.0	1.0~40	6.5	91	4~120	10	140	14
沼沢・湿地	2.0	8.0~60	30.0	60	30~500	150	300	50
湖・河川	2.0	1.0~1.5	4.0	8	0~1	0.2	0.5	—
小計(全大陸)	149.0		7.82	1,175		122.0	18,370	1,110
大洋公海	332.0	0.02~4	1.25	415	0~0.05	0.03	10	—
湧昇流海域	0.4	4~10	5.0	2	0.05~1.0	0.2	0.08	—
大陸棚	26.6	2~6	3.6	96	0.01~0.4	0.01	2.7	—
藻場・海浜	0.6	5~40	25.0	16	0.4~40	20	12	—
河口(沼地を除く)	1.4	2~40	1.55	21	0.1~4.0	10	14	—
小計(全海洋)	361.0			550		0.1	39	
総計	510.0		3.36	1,725		3.6	18,410	—

この表の乾物量に0.45を掛けると、炭素量に換算できる。

次に炭素フラックス(単位はいずれも Pg C/yr)を見てみる。陸上生物圏全体では、GPPは102と見積もられている。これは約7年で大気中の全CO₂を固定し得る規模である。Watson *et al.*は(1-1)式のR_pをGPPほぼ半分の50と見積もっているため、NPPは52になる。

さらに、土壌中の死んだ有機物も土壌生物の働きで分解され、CO₂の大きな放出源になっている。これがいわゆる土壌呼吸(D)と呼ばれている炭素フラックスであるが、DはR_pと同じ50と見積もられている。人間活動に由来する陸上生物圏からの大きな炭素フラックスは、森林伐採(D_f)によるものであり、ここでは2と見積もられている。以上述べた陸上生物圏に関連した炭素フラックスをまとめてみると、

$$NEP = NPP - D - D_f \quad (2-1)$$

$$= GPP - R_p - D_p - D_f \quad (2-2)$$

$$= 102 - 50 - 52 \quad (2-3)$$

$$= 0 \quad (2-4)$$

となる。ここで、NEPは生態系純生産(Net Ecosystem Production)であり、この値が正ならば陸上生物圏は二酸化炭素のシンクであり、負ならばソースということになる。しかし、Watson *et al.*の見積もりではNEPは0であり、現在の生物圏はシンクでもソースでもないということになる。

以上紹介したWatson *et al.*の見積もりの特徴は、つい数年前まで陸上生物圏を二酸化炭素のソースとする一般的な見方を修正してきている点にある。何故このように変わってきたかといえ、森林伐採による炭素フラッ

第2表 森林伐採による炭素放出量の見積もり(単位は PgC/yr)

	世界全体	熱帯
Woodwell and Houghton (1977)	2.5-20	
Adamus <i>et al.</i> (1977)	0.4-4	
Bolin (1977)	0.4-1.6	
Brunig (1977)	6	
Wong (1978)	1.9	
Woodwell <i>et al.</i> (1978)	4-8	
Hampicke (1979)	1.5-4.5	
Seiler and Crutzen (1980)	-2.0-2.0	
Brown and Lugo (1981)	-1.0-0.5	
Moore <i>et al.</i> (1981)	2.2-4.7	1.8-3.8
Olson (1982)	0.5-2.0	
Houghton <i>et al.</i> (1983)	1.8-4.7	1.3-4.2
Detwiler <i>et al.</i> (1985)		1.0-1.5
Yoda (1985)	1.8	
Houghton <i>et al.</i> (1987)	1.0-2.6	0.9-2.5
Detwiler <i>et al.</i> (1988)		0.4-1.6
Woodwell (1989)	2	

クスが一時言われたほどは大きくはなさそうだ、ということがあげられる。例えば、Woodwell *et al.* (1978) は D_f を 4~8 Pg C/yr と見積もって、世界に大きな衝撃を与えた。現在の石油・石炭由来の二酸化炭素放出量 5.4 ± 0.5 Pg C/yr と比べて、Woodwell *et al.* の推定値が如何に大きな値かが分かる。しかし、第2表に示したように、森林伐採とそれに伴う土壌有機物の分解の促進による炭素フラックスは、研究者によってその推定値にかなり大きな開きがあるのが実情であるが、1980年以降の推定値に限れば、2 Pg C/yr 前後の値が多くなっている。

地球環境変化の生物圏への影響

現在、二酸化炭素を中心とした温室効果ガスが増加しており、地球温暖化や乾燥化が進行するものと見られている。このような環境変化は当然、生物圏の生産活動、ひいては地球上の炭素循環にも影響を及ぼすものと思われるし、すでにその効果が現われているかもしれない。Melillo *et al.* (1990) は、同じ IPCC レポートで次のような4つのプラスの効果が現われている可能性を指摘している。

- 1) 大気中の CO_2 濃度の増加が GPP を大きくしている(大気の富栄養化効果)
- 2) 気候の温暖化が GPP を大きくしている(生育

期間延長効果)

- 3) 農耕地に散布された肥料が GPP を大きくしている(土壌の富栄養化効果)
- 4) 北半球の中緯度帯における森林施業法の改良が D_f や D_r を小さくしている

以上のような項目があげられているが、それを実証するだけの定量的なデータは今のところないし、上の指摘には疑問な点も大きい。例えば、2) についていえば、高緯度地域では確かに冬の低温が植物の生育期間を短縮しており、温暖化すれば生育期間が長くなって、GPP が大きくなる可能性はあるが、同時に土壌有機物の分解も当然促進されて、NEP で見れば温暖化が果して正の方向に働くか、負の方向に働くかは一概には決められない。陸上生物圏でおそらく確実に期待できることは、1) の大気の富栄養化効果であろう。第3表はこれまで主に作物で得られた二酸化炭素倍増実験の結果をまとめたものである。表から明らかのように、植物のタイプによって反応の程度は異なるが、収量が平均で32%増加している。しかし、ここに示した結果は、水条件も栄養条件も良い状態で栽培されたものであり、自然植生、特に森林でこの結果がどの程度当てはまるかは全く分からない。この大気の富栄養化効果と関連して注意しなければならないのは、気象学では二酸化炭素と、それ以外のメタンや亜酸化窒素なども区別することなく、温室効果が

第3表 二酸化炭素増による各種植物の収量の変化 (Kimball, B.A. (1986) による)

植物群	平均値	-95%	+95%	種数	事例数
C3 植物					
繊維作物	118	88	156	1	7
果菜類	31	21	42	5	27
穀類	31	17	49	4	21
葉菜類	25	11	44	5	14
豆類	31	18	47	3	31
根菜類	49	35	65	2	10
非農作物	34	20	52	7	10
木本植物	26	19	34	5	14
全 C3 植物	34	29	40	32	134
全 C4 植物	14	5	27	4	13
全植物	32	27	38	36	147

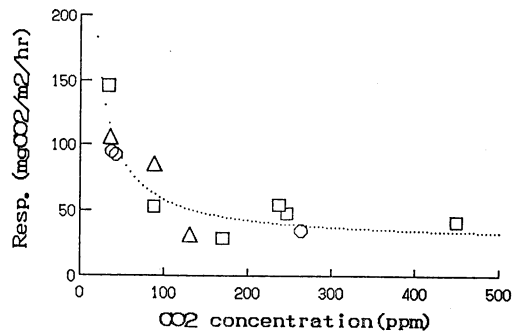
スとして二酸化炭素濃度に換算して扱っていることである。今述べたように、両者は植物にとっては、非常に違った効果を持っているので、それぞれ別個に取り扱わねばならない。

これまでの論議で抜けているのは、北米やヨーロッパで現在大きな問題になっている酸性雨による森林枯損の負の影響である。ヨーロッパの森林の多くで、葉が黄変したり落葉する徴候が認められており、枯死木も多数生じている。これらの影響を炭素循環という観点からも見る必要がある。

陸上生物圏の炭素量と炭素フラックスを考える上での最大の障害は、これらの量が時間的にも空間的にも大きな変動を含んでおり、正確な見積もりが非常に困難な点にある。第1表には、純生産量についても現存量についても、その変動範囲も示されているが、同じ生物群系でありながら10倍以上の開きのあるのが普通である。また、ここに紹介した Watson *et al.* の見積もりの精度も分からないし、またその算出の根拠も明示されていない。今後、研究が進展するに連れて、値が大幅に書き換えられる可能性さえ残っている。

土壌有機物の分解について

陸上生態圏における炭素動態を考える上で、植物現存量と純生産に関しては、現在かなりのデータが蓄積した段階にあるが、未だに不十分なのは、土壌有機物の動態についてである。しかし、先程も述べたように、土壌中には死んだ有機物として、生きている植物の3倍前後の



第1図 通気する空気の二酸化炭素濃度と土壌呼吸との関係
室温 25°C で測定。図中の回帰曲線は、
Resp=3122/C+26.6 (中台 1991)

炭素が蓄積されており、炭素フラックスは植物の呼吸によるものと土壌有機物の分解によるものがほぼ同じ大きさで見られている。従って、土壌呼吸の陸上生物圏における重要性は、生きている植物の呼吸量と同等の比重を占めているが、ここにあげた土壌有機物についての数値は植物の現存量や純生産の値よりも、はるかに誤差が大きいと思われる。今後、一層の取り組みが必要な分野と言えよう。

この土壌有機物の分解に関連して最近、明らかになってきたことがある。それは土壌有機物の分解速度を測定していた従来の方法が、かなり過大評価をしている可能性が出てきたことである。この従来の方法はアルカリ密

閉吸収法と呼ばれるもので、土壌表面に容器を一昼夜ほど被せ、この容器内に入れたアルカリ溶液に土壌呼吸で発生した二酸化炭素を吸収させ、溶液に吸収された二酸化炭素量を滴定で求めて、土壌呼吸量を算出する方法である。このような方法で測定すると、容器内の二酸化炭素濃度が著しく下がり（最低で 50 ppmv 前後）、しかも二酸化炭素濃度が低いと、土壌呼吸が著しく促進されることが分かってきた。第 1 図はアルカリ密閉吸収法の代わりに、通気法で求めた土壌呼吸速度を示している。この通気法というのは、二酸化炭素濃度を一定に保った空気を容器に絶えず流して、容器の入口と出口の二酸化炭素濃度差を非分散型赤外線分析計で連続測定して、有機物の分解速度を求める方法である。図から明らかなように、通常の二酸化炭素濃度 (350 ppmv) の場合よりも、低濃度の空気 (50 ppmv) を流すと、有機物の分解が 2, 3 倍促進されることが分かる。このような結果は、今のところ耕地土壌のみでしか調べられておらず、他の土壌でも同じような結果が得られるかは、これからの重要な検討課題である。もしも、この結果が広く他の土壌にもあてはまるなら、前に紹介した地球規模の分解速度にも影響を及ぼす可能性がある。

引用文献

- Kimball, B.A., 1986: Chapter 8. Influence of elevated CO₂ on crop yield. ed. H.Z. Enoch and B.A. Kimball "Carbon Dioxide Enrichment of Greenhouse Crops vol. II. Physiology, Yield and Economics", 105-115. CRC Press Inc. Boca Raton.
- Melillo, J.M. *et al.*, 1990: 10. Effects on ecosystems. ed. J.T. Houghton *et al.*, "Climate change, The IPCC scientific assessment", 283-310. Cambridge University Press, New York.
- 中台利枝, 1991: 耕地の土壌呼吸速度に関する実験的研究. 筑波大学環境科学研究科, 修士論文 56 pp.
- Watson, R.T. *et al.*, 1990: 1. Greenhouse gases and aerosols. ed. J.T. Houghton *et al.*, "Climate change, The IPCC scientific assessment", 1-40. Cambridge University Press, New York.
- Whittaker, T.H. and Likens, G.E., 1973: Carbon in the biota. ed. G.M. Woodwell and E.V. Pecan, "Carbon and the biosphere". US Atomic Energy Commission, 281-300.
- Woodwell, G.M. *et al.*, 1978: The biota and the world carbon budget. *Science*, 199, 141-146.

201 (地球化学)

4. 海洋中の生物・地球化学過程*

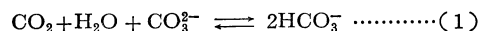
半田 暢彦**

はじめに

化石燃料の燃焼など、人間活動によって発生する二酸化炭素は年間 5.8 GtC (×10¹⁵gC) と見積られている。このうち、58%は大気中に残留し (第 1 表)、大気中の二酸化炭素濃度の上昇に関与しているが、残りについては海洋および陸上植生がその受け皿として考えられている。しかし、炭素収支から判断すると、これに対する陸上植生の寄与にはあまり大きな期待はもてない。むしろ、現時点では熱帯域を中心とする森林伐採などによる土壌の露出が土壌有機物の分解を促し、二酸化炭素の発生源となっているものと理解されている。

これに対して、海洋では、その表面を通しておこる大気-海洋間での二酸化炭素交換が活発である。この交換量

は海洋の ¹⁴C 収支 (Broecker *et al.*, 1979), ²²²Rn 収支 (Oeschger *et al.*, 1975) から見積ると、それぞれ 19±6 mol m⁻²年⁻¹, 16 mol m⁻²年⁻¹ となる。したがって、全海洋規模では、二酸化炭素交換量は 90 GtC 年⁻¹ と算定される。また、¹⁴C 収支 (Broecker *et al.*, 1981) および大気-海洋間を通しての二酸化炭素交換に関するボックスモデル (Oeschger *et al.*, 1975) では、人間活動によって発生する二酸化炭素のうち、年間 2 GtC が海洋に移行し、(1) 式を通して、重炭酸イオンとして海水



中に溶け込んでいる。この点では、海洋が地球表層で発生する二酸化炭素の受け皿となっていると理解される。

海洋表層の混合層では、大気との間に活発に二酸化炭素の交換を行っているが、ここではまた、生物活動によ

* Ocean Biogeochemical Processes.

** Nobuhiko Handa, 名古屋大学水圏科学研究所.