

森林土壌における有機炭素蓄積モデルの構築

Modeling of accumulation rate of soil organic carbon under forests

研究代表者 科学技術振興事業団 特別研究員

南部 桂

Domestic research fellow, Japan Science and Technology Corporation

Kei Nambu

The generation of DOC was simulated by dividing it into biotic production process and abiotic dissolution one. The relative contribution of each process was proved to depend on the quality of the organic layer, which is usually the largest source of DOC in forest ecosystems. The efficiency of adsorbing DOC onto soil minerals was controlled by soil pH, the amount of amorphous Al for Japan's soil and crystalline Fe hydroxides for tropical soils, and that of organic carbon. The qualities of both forest organic layer and soil minerals controlled the first-step reactions for carbon accumulation in forest soils.

1. 研究目的

土壌中には大気中の二酸化炭素の2倍に相当する炭素が難分解性の土壌有機物として存在し、地球全体でも大きな炭素プールを成している。樹体に含まれる有機物と比べても、土壌有機物はより難分解性でかつ量も多いことからより長期間安定な炭素プールである。環境変動が危惧される今日、土壌有機炭素プールの蓄積速度を予測することは重要である。

土壌有機物の蓄積過程は、次の3段階に分かれて進行すると考えられる。1. 植物遺体からの溶存有機炭素(DOC)の発生 2. DOCの土壌鉱物への吸着 3. 吸着した有機物の分解と腐植化。本研究は、1および2の段階の反応が、環境因子や土壌特性によってどのように制御されて進行するかをモデル化することを目的とする。

2. 研究経過

2. 1. DOC発生過程のモデル化

2. 1. 1 方法：京都府北部のブナ天然林で採取した Oi, Oe1, Oe2, Oe3 層の乾燥重 2g 相当量を、

プラスチックカラムに詰めて、温度を 30, 25, 15°Cの3段階に変えて(実験 A)、また DOCの抽出頻度を 3.5, 10, 28 日ごとの3段階に変えて(実験 B)培養を行いながら経時的に DOCを水で抽出した。DOC濃度およびDOCに含まれるフェノール化合物とヘキサースユニットで構成される糖類の濃度を測定した。また、同時に CO₂発生量を測定し微生物活性の指標とした。

2. 1. 2 結果と考察：DOC発生量は培養温度と共に上昇した。その際、CO₂発生量も増加することから、DOCは微生物による植物遺体の分解によって副次的に生成することが示唆された。また、抽出頻度を変えて培養しても微生物活性は変化しなかったが、DOC抽出量は抽出回数が多いほど増加した。これは、DOC発生量が微生物的生成過程だけでなく物理的な溶出過程にも大きく支配されたことを示す。分解の進行した有機物層ほど、DOC発生量が微生物的に支配される傾向が強かった。

DOC発生量を微生物活動に支配されて発生し

た分 (DOCbio) と抽出回数に支配された分 (DOCabio) に分けて考えた。実験 B で抽出回数の異なる処理間の比較から DOCabio を推定した (図 1)。

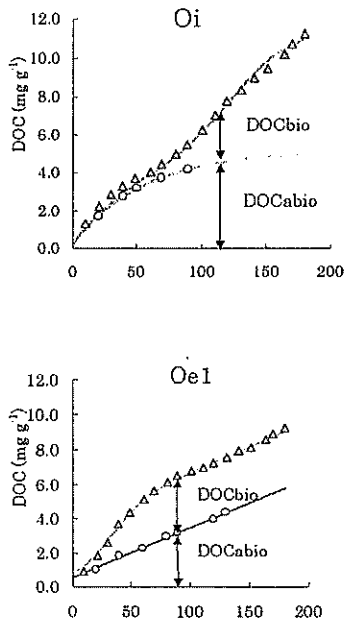


図 1 : 25°Cにおける Oi および Oe1 層からの DOC 発生量。微生物的 (DOCbio) および非生物的 (DOCabio) 発生量に分けて示す
また、DOCbio の推定量と CO₂ 発生量とを比較したところ (図 2)、Oe1,2,3 層に関してはほぼ 1:14 の比例関係が得られた。これは、基質の微生物分解に伴って DOCbio が発生するという仮

定を裏付ける結果であった。一方、Oi 層の場合は、培養初期に微生物活性が高かったにもかかわらず DOCbio の発生には結びつかなかった。

Oi 層からの DOC 発生は培養開始後約 80 日目までは DOCabio が 80%以上を占めた。この期間は水溶性糖類やタンニンの溶出が顕著に見られたため、これら易分解性成分の溶出が続いている期間は基質がほぼ完全に無機化されて、DOCbio の副次的生成が行われなかった。DOCbio の生成には、ヘミセルロースやリグノセルロースが基質として分解されることが必要であると考えられる。

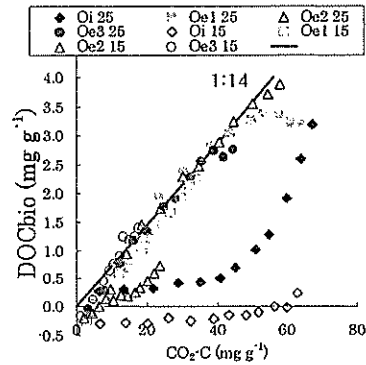


図 2 : CO₂ 発生量と DOCbio 発生量

DOCabio は抽出回数の関数として、DOCbio はアレニウスの法則を用いた解析により温度と培養日数の関数として解析した。得られた予測式を表 1 に示す。この地点における気象データ (温度、降雨回数) を用い予測式に基づいて予

表 1. 微生物的な DOC 生成プロセスのロジステックモデルの推定パラメータ

Horizon	Maximum production	Initial production	Rate constant	Activation energy	R^2
	m_{∞} (mg g ⁻¹)	m_0 (mg g ⁻¹)		E_a (J mol ⁻¹)	
mor-Oi	6.55	0.030	0.0437	35800	0.9820
mor-Oe1	3.24	0.220	0.0740	72600	0.9639
mor-Oe2	3.95	0.132	0.0587	90200	0.9875
mor-Oe3	3.26	0.197	0.0386	29400	0.9704

The model equation is as follows:
$$P = \frac{m_{\infty}}{1 + \left(\frac{m_{\infty}}{m_0} - 1\right) \exp \left\{ \cdot k_s \cdot t \cdot \exp \left(\frac{E_a(T_i - 298)}{298 \times 8.318 T_i} \right) \right\}}$$

測した DOC 発生量と、実測値との比較を行った (表 2)。その結果、予測値は実測値より大きく過大評価の傾向が見られた。これは野外と比べてより湿潤な条件で実験を行ったためと考えられた。

表 2. 各層からの DOC 発生量の予測値と実測値

Term	Estimated (g m ⁻²)						Measured (g m ⁻²)
	Oi	Oe1	Oe2	Oe3	Oa	Sum	
6/1 - 6/30	0.30	0.23	0.10	0.40	0.77	1.80	2.13
7/1 - 7/31	0.40	0.74	0.35	0.74	1.66	3.88	2.52
8/1 - 8/28	0.50	0.48	0.66	0.65	2.04	4.34	0.74
8/29 - 9/29	0.87	0.66	1.44	1.09	3.32	7.39	3.33
9/30 - 11/8	1.05	1.01	1.86	1.33	3.57	8.82	4.44
11/9 - 12/3	0.44	0.65	0.58	0.50	1.29	3.46	1.65

2. 2. 吸着特性の予測研究

2. 2. 1. 方法：実験には、日本の土壤 5 地点計 34 点と熱帯の土壤 6 地点計 30 点を用いた。DOC の吸着に関与する土壤特性として、比表面積、粒径組成、pH(H₂O)、pH(KCl)、pH(NaF)、遊離 Al、Fe、有機炭素 (OC) 含量、全窒素含量を測定した。次に、供試土壤と DOC 溶液とのバッチ式平衡試験によって吸着実験を行った。その後、DOC の吸着した土壤を純水と平衡させて DOC の脱着試験を行った。DOC の吸着量ははじめに添加した DOC 量と、脱着量は吸着量との間の関係を解析した。それぞれ、直線的な関係が得られ、その傾きは吸着、脱着の効率を表す。吸着効率と土壤特性値との関係は重回帰分析を用いて解析した。

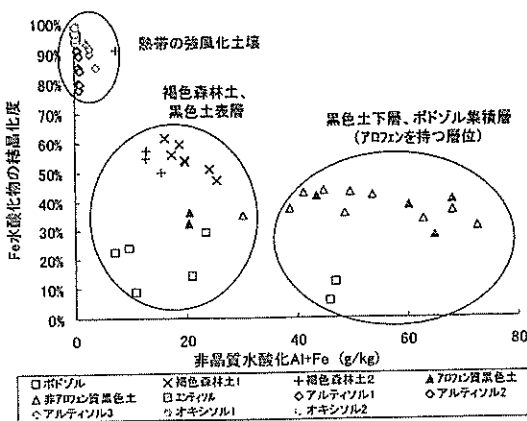


図 3：土壤特性の比較

結果と考察：日本の土壤は熱帯の土壤と比べ、

非晶質 Al、Fe 鉱物量が多く、Fe の結晶化度が低かった (図 3)。また OC 含量がより高い傾向を示した。

加えた DOC 量と吸着量の間には直線的な関係が認められた。下層土のほうが表層土より吸着効率が高く、脱着した割合が低かった。吸着効率と脱着効率の間には負の相関関係が見られた。この結果から、吸着効率の高い土壤層位は不可逆的な吸着機構 (配位子結合やイオン結合) の占める割合が高いと考えられた。また、OC 含量が高いと吸着効率は低下した。おそらく、土壤に蓄積している OC は不可逆的な吸着サイトから順に飽和しているものと考えられる。同一断面内で OC 含量が増加した際の吸着効率の下がり方は土壤タイプによって異なり、日本の土壤は OC 含量が多いわりに吸着効率は高かった (図 4)。特に、非晶質 Al、Fe 鉱物の含量が高い非アロフェン質クロボク土およびポドゾル土の集積層はその傾向が顕著であった。一方、熱帯の土壤は OC 含量が増加するに従い急激に吸着効率が低下した。

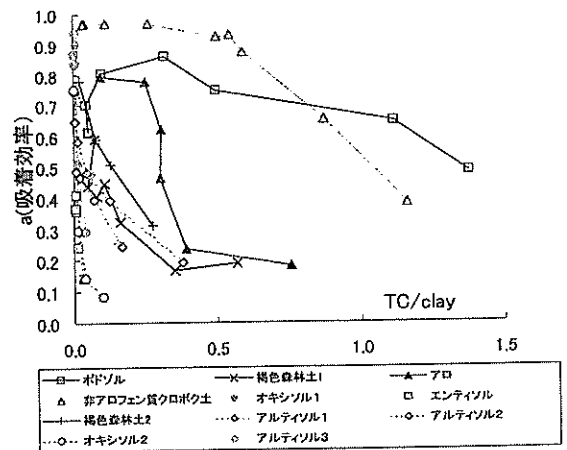


図 4：炭素集積量と吸着効率との関係

以上の結果から日本の森林土壤では、有機炭素を効率よく蓄積しうるのは OC 含量が低く非晶質 Al、Fe 鉱物含量が高い火山灰土壤の下層だと考えられる。OC が蓄積することによる吸着効

〈標準化した吸着効率Yの重回帰式〉

日本の土壌 $Y = -0.703\text{pH}(\text{H}_2\text{O}) - 0.581\text{OC} + 0.791(\text{Al}_0 + 1/2\text{Fe}_0)$ (式1) $R^2 = 0.773$

熱帯の土壌 $Y = -0.263\text{pH}(\text{H}_2\text{O}) - 0.535\text{OC} + 0.848(\text{Fed} - \text{Feo})$ (式2) $R^2 = 0.740$

すべての土壌 $Y = -0.439\text{pH}(\text{H}_2\text{O}) - 0.381\text{OC} + 0.821(\text{Al}_0 + 1/2\text{Fe}_0) + 0.499(\text{Fed} - \text{Feo})$ (式3) $R^2 = 0.619$

率の低下は、非晶質 Al, Fe 鉱物に乏しい熱帯土壌で顕著であった。

重回帰分析の結果、日本の土壌では結晶質 Fe 鉱物の吸着効率に対する寄与は小さく、OC・pH(H₂O)・非晶質 Al, Fe 鉱物によって吸着効率は回帰された($R^2 = 0.773$ 式1)。熱帯の土壌では非晶質 Al, Fe 鉱物はほとんど含まれていなかったため、吸着効率は OC・pH(H₂O)・結晶質 Fe 鉱物で回帰された($R^2 = 0.740$ 式2)。全体(日本と熱帯両方合わせて)の土壌において、pHの係数はマイナスで、pHが高いと吸着効率が低くなることを示した。Al, Fe 鉱物の係数はプラスで、Al, Fe 鉱物の量が多いほど吸着効率が高くなることを示した。結晶質 Fe 鉱物よりも非晶質 Al, Fe 鉱物の方が吸着効率に大きく寄与していたことが回帰係数によって示された($R^2 = 0.619$ 式3)。

3. 研究成果

1. DOCの発生過程を微生物的生成と溶出過程に分画して定量的に理解する手法を開発した。
2. 易分解性成分を多く含む Oi 層からの DOC 発生は、溶出過程が卓越し微生物的な DOC 生成の占める割合が小さいことを明らかにした。
3. 野外での水分変化を無視した DOC 発生のシミュレーションは、実測値よりも過大評価であり、当初の目標を達成できなかった。
4. 日本の土壌は主に非晶質 Al, Fe 成分が、湿潤熱帯の土壌では結晶質 Fe(OH)₃ が吸着に寄与することを明らかにした。
5. 日本の土壌は熱帯土壌と比べて既に多

くの有機炭素を吸着しているにもかかわらず、比較的高い吸着活性を持つことから吸着の容量が高いことが示唆された。

4. 研究の課題と発展

野外での水分環境を無視した単純化は、DOC 発生量を正確に予測する上で問題であることが明らかになった。その一方で、微生物的生成と溶出過程に分画したモデル化は研究の大きな進展であり、定量的な理解に近づいたことは間違いない。今後は、野外における水分変化を考慮した研究が必要である。

また、完全な平衡を前提として土壌特性から DOC の吸着特性を予測するモデルを作ったが、野外の状況に適用する際には不完全な平衡をも考慮した何らかの補正が必要だと思われる。土壌水の浸透速度を考慮した補正法の研究が今後の課題である。

5. 発表論文リスト

1. Generation of Dissolved Organic Carbon (DOC) from Organic Layers of Forest Soils Controlled by Biotic and Abiotic Processes. Nambu, K., Waku, T., Mori, K., Kaneko, S., and Yonebayashi, K., Soil Bio. Biochem. (投稿中)
2. Quantities and qualities of DOM leached from different types of forest O layers. Nambu, K., Sakai, H., Sakata, T., Fujimoto, K., Oshioka, S., and Yonebayashi, K. (投稿準備中)