

<報告>

志賀高原カヤノ平ブナ成熟林における土壤有機物の特徴

飯村康夫^{*1}・廣田充²・井田秀行³・大塚俊之¹

Chemical characteristics of soil organic matter in an old-growth beech forest in central Japan. Yasuo IMURA^{*1}, Mitsuru HIROTA², Hideyuki IDA³ and Toshiyuki OHTSUKA¹ (¹River Basin Research Center, Gifu University, Yanagido 1-1 501-1193, Japan. *E-mail: iimura@green.gifu-u.ac.jp, ²Graduate School of Life and Environmental Science, University of Tsukuba, 1-1-1 Tennodai, Tsukuba 305-8572. Japan, ³Institute of Nature Education in Shiga Heights, Faculty of Education, Shinshu University, Shigakogen, Yamanouchi-machi, Nagano 381-0401, Japan). *Bulletin, of the Institute of Nature Education in Shiga Heights, Shinshu University* 49: 1-5 (2012).

はじめに

地球温暖化が深刻化している現在、森林生態系の炭素吸収機能の定量的把握（どこにどのぐらいの炭素を蓄積できるのか？）は最重要課題の一つとして世界各国で勢力的に研究が行われている。一般に森林生態系は時間の進行、すなわち遷移に伴い途中までは炭素の吸収源として機能するものの、徐々に森林全体としてのバイオマス増加量も平衡に達するため、遷移段階のクライマックスである極相林生態系では吸収機能が無くなるとされている (Odum 1969; Gower et al. 1996; 2003)。そのため、極相林は炭素吸収の面で評価対象外となっている (IPCC 2007)。しかし、最近の研究では、極相林生態系でも、炭素を吸収し続けることが示唆されている (Luyssaert et al. 2008; Lewis et al. 2009)。このように、極相林生態系における炭素吸収機能は未だ解明されておらず、世界的にも注目度が高い。極相林生態系での炭素吸収機能評価が困難である主な理由は、ギャップモザイク構造に代表される森林構造の不均一性が他の森林に比べ高いことや、地下部（枯死木や土壌）での炭素動態の未解明が考えられる。

近年、極相林における土壤炭素蓄積量が生態系全体としての炭素吸収機能を左右する可能性が示唆されている (Gleixner et al. 2009)。それは、土壤に大気や植物の約3倍もの有機炭素が蓄積しており、

これらの量的変動が同一生態系における炭素循環にも多大な影響を及ぼすためであると考えられる。土壤炭素の量的変動は、外部からの有機炭素インプット量に加え、土壤有機物の物理的な存在形態や有機物自体の質に大きく依存する。したがって、生態系の炭素循環に対する土壤炭素の役割を考える場合、土壤有機物量だけでなく質を把握することは極めて重要である。しかしながら、極相林生態系における土壤有機物に関する知見は他の森林生態系に比べ少ない上、そのほとんどは量的特徴についてのみ議論したものである。

本稿では比較的知見の少ない極相林（志賀高原カヤノ平ブナ成熟林）における土壤有機物の特徴を量だけでなく質も含めて報告する。

調査地

調査は2005年に信州大学教育学部附属志賀自然教育研究施設カヤノ平分施設（カヤノ平教育園）内に環境省「モニタリングサイト1000」のコアサイト（カヤノ平ブナ林）として設置された長期モニタリング用の調査地（1 ha）で行った（図1）。カヤノ平ブナ林は、冷温帯の主な極相種であるブナ（*Fagus crenata* Blume）が優占する極相林（樹齢300~500齢）である（廣田ら2011）。2011年6月に調査地内に20m×20m（400m²）を1プロットとした調査区を計25設置し、その中から9プロットを規則的に選抜しA層土壌を採取した（図1）。

方法

前述した各プロットで土壤A層の深さ、乾土1kgあたりの土壤炭素・窒素含量、A層の土壤炭素

¹ 岐阜大学流域圏科学研究センター（〒501-1193 岐阜県岐阜市柳戸1-1 *E-mail: iimura@green.gifu-u.ac.jp）

² 筑波大学生命環境科学研究科（〒305-8572 茨城県つくば志賀天王台1-1-1）

³ 信州大学教育学部附属志賀自然教育研究施設（〒381-0401 長野県下高井郡山ノ内町志賀高原）

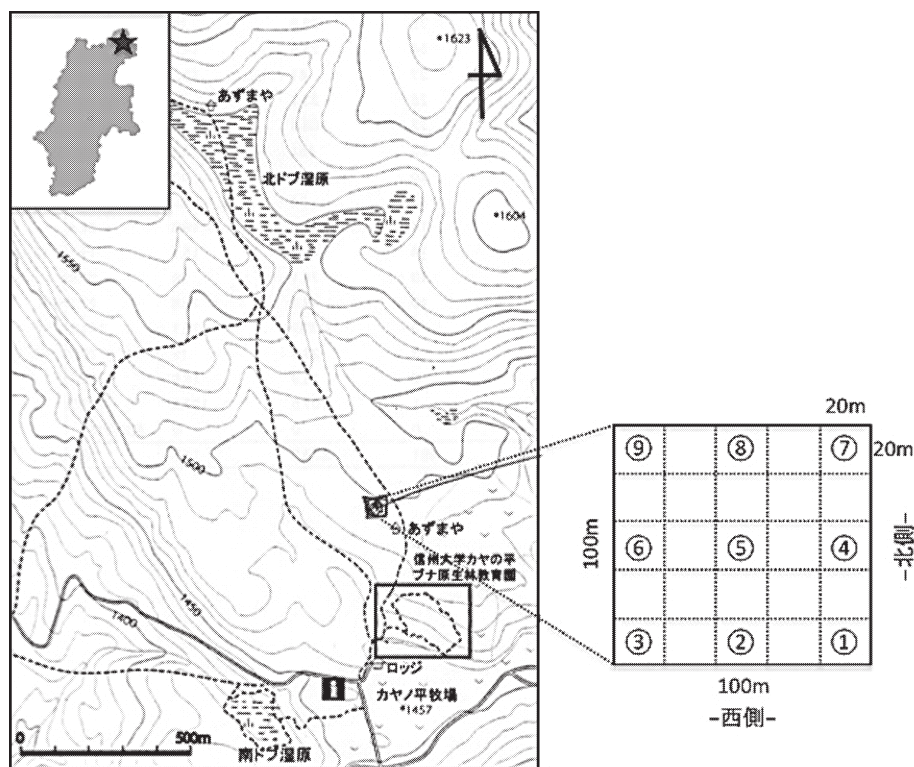


図1. 調査地と土壌試料採取地点
(数字は各プロットナンバーを示している)

蓄積量および土壌有機物（腐植酸）の特性を調べた。土壌A層深は検土杖を用いて各プロット内5地点をランダムに調べその平均値を採用した。同時に土壌も採取し、これら5地点の混合土壌（各地点とも同量程度）を各プロットの土壌試料とした。各プロットA層土壌試料の炭素含量は風乾後、根を除去し、微粉碎をしてCNアナライザーに供し測定した。A層の土壌炭素蓄積量は各プロットA層の仮比重と乾土1 kgあたりの土壌炭素含量より算出した。土壌腐植酸の質的特性は紫外・可視分光分析法（渡辺2007）を用いて光学的な特徴づけをおこなった。さらに土壌腐植酸の光学的特性と ^{13}C NMRスペクトルデータとの関係（Watanabe et al. 2005; Watanabe & Fujitake 2008）から以下の関係式を作成し、各腐植酸の各種官能基炭素割合を推定した。

$\text{Alkyl C} = -0.591 \text{ Aromatic C} + 41.7, r = 0.934 (P < 0.001, n = 15)$

$O\text{-alkyl C} = -0.568 \text{ Aromatic C} + 50.4, r = 0.952 (P < 0.001, n = 15)$

$\text{Aromatic C} = 2.64 A_{600}/C + 29.5, r = 0.854 (P < 0.001, n = 40)$

$\text{Carboxyl C} = 0.16 \text{ Aromatic C} + 7.616, r = 0.869 (P < 0.001, n = 15)$

結果と考察

表1に、各プロットの土壌A層深、乾土1 kgあたりの土壌炭素・窒素含量およびヘクタールあたりに換算したA層の炭素蓄積量を示す。乾土1 kgあたりの炭素含量は $104.2 \sim 168.5 \text{ g C kg}^{-1}$ を示した。日本で見られる代表的な土壌（褐色森林土や黒ボク土）が示す乾土1 kgあたりの土壌炭素量は $60 \sim 90 \text{ g C kg}^{-1}$ であることが多いが（Wada 1986）、今回得られた値はこれよりも高かった。A層の炭素蓄積量は $38.2 \sim 155.0 \text{ t C ha}^{-1}$ であり、変動係数（CV）も乾土1 kgあたりの炭素含量よりも高いことから空間的な不均一性がより高いことが示された（表1）。また、乾土1 kgあたりの炭素含量とA層の炭素蓄積量との間には有意な相関関係は認められなかったが、A層の炭素蓄積量とA層深の間には高い正の相関関係が認められた（ $r = 0.93, P < 0.001$ ）。これらの結果は、カヤノ平ブナ成熟林の土壌A層炭素蓄積量が、A層の深さに強く制御されていることを示している。表2に、Gleixner et al. (2009) らによる温帯落葉樹の極相林（100齢以上、 $n = 18$ ）での土壌炭素蓄積量を一部改変して示した。0-12cmの炭素蓄積量を示したのは、今回得られたカヤノ平ブナ成熟林のA層深平均値と比較

表1. 各プロットの土壌 A 層深, 乾土あたりの炭素・窒素含量およびヘクタールあたりの炭素蓄積量

Plot No.	A layer (cm)	T-C (g C kg ⁻¹)	T-N (g C kg ⁻¹)	C : N ratio	C stock (t C ha ⁻¹)
1	7	136.3	7.0	20	38.2
2	15	143.3	7.8	18	86.0
3	7	159.0	10.3	15	44.5
4	23	168.5	8.8	19	155.0
5	17	104.2	6.4	16	70.9
6	10	124.7	6.2	20	49.9
7	10	160.6	7.9	20	64.3
8	7	158.0	10.0	16	44.2
9	12	117.0	7.0	17	56.2
Mean	12	141.3	7.9	18	67.7
SD	5.5	22.3	1.5	1.9	36.0
CV	0.45	0.16	0.19	0.11	0.53

表2. 温帯落葉樹林 (>100歳) での炭素蓄積量 (Gleixner et al. 2009 を一部改変)

	Depth (cm)	Age (years)	SOC	
			Measured depth (t C ha ⁻¹)	0-12 cm (t C ha ⁻¹)
Hoover et al. 2002				
<i>beech</i>	30	128	62.0	24.8
	30	192	70.0	28.0
	30	250	88.0	35.2
Entry & Emmingham 1998				
<i>beech?</i>	10	185	13.5	16.2
Schöning & Kögel-Knabner 2006				
<i>beech</i>	40	111	56.0	16.8
	55	169	65.0	14.2
Mund 2004				
<i>beech</i>	15	111	32.2	25.8
	15	141	41.8	33.4
	15	153	43.1	34.5
	15	102	46.0	36.8
	15	171	43.7	35.0
	15	123	34.4	27.5
	15	168	43.3	34.6
	15	147	47.6	38.1
	15	131	51.0	40.8
	15	153	45.1	36.1
Gerighausen 2002				
<i>beech?</i>	20	170	36.8	22.1
	20	180	37.0	22.2
Mean			47.6	29.0
SD			16.5	8.2
CV			0.35	0.28

するためである。カヤノ平の平均炭素蓄積量は温帯落葉樹林の平均炭素蓄積量よりも約2.3倍も高く、比較した温帯落葉樹林の中で最も高い値を示した。カヤノ平ブナ林のA層土壌のpH (NaF) は10以上

を示す。pH (NaF) は土壌中の活性アルミニウムと高い正の相関関係を示すことがよく知られている。この活性アルミニウムや鉄といった非晶質酸化物は他の土壌鉱物に比べ高い有機物吸着力を持つことか

表3. 各プロットの土壤腐植酸の質的特性

Plot No.	A_{600}/C	Alkyl C	O-alkyl C	Aromatic C	Carboxyl C	Aromaticity ^a	Aliphaticity ^b
1	7.0	13.3	23.1	48.1	15.5	0.569	0.576
2	8.5	11.0	20.8	52.1	16.1	0.621	0.526
3	3.7	18.5	28.1	39.3	14.0	0.457	0.659
4	6.3	14.4	24.2	46.2	15.2	0.545	0.597
5	5.4	15.9	25.6	43.7	14.8	0.513	0.621
6	7.0	13.4	23.2	47.9	15.4	0.567	0.578
7	6.0	14.9	24.6	45.5	15.0	0.535	0.604
8	5.1	16.4	26.1	42.9	14.6	0.502	0.629
9	3.8	18.4	28.0	39.4	14.0	0.459	0.658
Mean	5.9	15.1	24.9	45.0	15.0	0.5	0.6
SD	1.6	2.5	2.4	4.2	0.7	0.1	0.0

^aAromaticity: (O-aryl C + Aryl C)/(O-aryl C + Aryl C + Alkyl C).

^bAliphaticity: Alkyl C/O-aryl

ら、カヤノ平ブナ成熟林での高い炭素蓄積量はこのような土壤特性も影響を及ぼしていると考えられる。

表3に、各プロットの土壤腐植酸の質的特性の一覧を示した。いずれのプロットでも芳香族炭素含量を示す Aromatic C 割合が最も高く、炭水化物炭素含量を示す O-alkyl C 割合や脂肪族炭素含量を示す Alkyl C 割合はより低い値を示した。腐植酸は土壤有機物の質的特性を最もよく反映する主要画分であることが古くから知られており、その特性は土壤タイプや植生タイプなどの影響を受け多様性が非常に高いことが近年明らかにされてきた (Watanabe & Fujitake 2008; Iimura et al. 2010)。例えば、黒ボク土の腐植酸は芳香族炭素含量が最も高いが、褐色森林土の腐植酸では芳香族炭素含量が炭水化物炭素含量もしくは脂肪族炭素含量と同等か、もしくはより低い値を示す (Watanabe & Fujitake 2008)。今回得られたカヤノ平ブナ成熟林の腐植酸はいずれのプロットでも黒ボク土でよく見られる質的特性を示すことが明らかであった。一方、表3で示した Aliphaticity は高い値ほど微生物分解作用をより多く受けている目安になると考えられている (Golchin et al. 1995)。同様に、表1で示した C:N 比は値が低い程、微生物分解作用を反映することがよく知られている。これら C:N 比と Aliphaticity の関係を見ても、プロット2を除いて高い負の相関関係を示した ($r = -0.85$, $P = 0.007$)。また、Aliphaticity はプロット3を除くと、プロット1~9にかけて正の相関関係 ($r = 0.78$, $P = 0.02$) が認められた。この結果はプロット1よりも東方向かつ南方向の土壤腐植酸がより微生物分解作用を受けており、土壤中での炭素の動きがより早いことを

示唆する結果である。Aliphaticity と乾土 1 kg あたりの炭素含量やA層の土壤炭素蓄積量との間には有意な関係は認められなかったが、A層の土壤炭素蓄積量とは弱い負の相関傾向が認められた ($r = -0.26$) ことから、土壤腐植酸の Aliphaticity が高いほど土壤炭素蓄積量は少ないという関係は、より多くの地点で測定することで成立する可能性はある。

まとめ

本稿ではカヤノ平ブナ成熟林における土壤有機物の量および質にスポットをあてた。カヤノ平では他の温帯落葉極相林に比べ非常に多くの有機炭素が表層土壤に蓄積しており、これは活性アルミニウムなどの酸化物に富む土壤特性が少なからず影響を及ぼしていると考えられた。また、土壤有機物(腐植酸)の質は比較的安定性が高い特徴を有していることや、空間的な不均一性は比較的低いことが示されたが、調査地の南東方向ほど微生物分解を受けやすく、土壤中での炭素は動きやすい特徴を有していることが示唆された。今後は地上部の植生構造や枯死木との関係、さらに土壤中の微生物分解活性、土壤呼吸量などとの関係にも着目し、より詳細に土壤有機物動態を明らかにしていく予定である。

引用文献

- Gleixner, G., Tefs, Cindy., Jorda, A., Hammer, M., Wirth, C., Nueske, A., Telz, A., Schmidt, UE. & Glatzel. (2009) Soil carbon accumulation in old-growth forests. In: Christan. W et al. (esd), *Old-growth forests*, Springer-Verlag, Berlin, pp 231-266.

- Golchin, A., Oades, J.M., Skjemstad, J.O., Clarke, P. (1995) Structural and dynamic properties of soil organic matter as reflected by ^{13}C natural abundance, pyrolysis mass spectrometry and solid-state ^{13}C NMR spectroscopy in density fractions of an Oxisol under forest and pasture. *Australian Journal of Soil Research*, **33**: 59-76.
- Gower, ST. (2003) Patterns and mechanisms of the forest carbon cycle. *Annual Review of Environment and Resources*, **28**: 169-204.
- Gower, ST., McMurtrie, RE. & Murty, D. (1996) Aboveground net primary production decline with stand age: potential causes. *TREE* **11**: 378-382.
- 廣田充, 八代裕一郎, 飯村康夫, 志津庸子, 大塚俊之, 井田秀行 (2011) 志賀高原カヤノ平ブナ林における炭素循環モニタリング I. 時空間的に不均一な土壤呼吸量の測定法の検討. 志賀高原自然教育研究施設研究業績, **48**: 9-14.
- IPCC (2007) Intergovernmental Panel on Climate Change 2007; Synthesis Report (eds. Abdelkader A et al.), pp 30, *IPCC*, Geneva, Switzerland.
- Iimura, Y., Fujimoto, M., Hirota, M., Tamura, K., Higashi, T., Yonebayashi, K., Fujitake, N. (2010) Effects of ecological succession on surface mineral horizons in Japanese volcanic ash soil. *Geoderma*, **159**: 122-130.
- Lewis, SL., Lopez-Gonzalez, G., Sonke, B., Affum-Baffoe, K., Baker, TR., Ojo, LO., Philips, OL., Reitsma, JM., White, L., Comiskey, JA., K, M-ND., Ewango, CEN., Feldpausch, TR., Hamilton, AC., Gloor, M., Hart, T., Hladik, A., Lloyd, J., Lovertt, JC., Makana, J-R., Malhi, Y., Mbango, FM., Ndangalasi, HJ., Peacock, J., Peh, KSH., Sheil, D., Sunderland, T., Swaine, MD., Taplin, J., Taylor, D., Thomas, SC., Votere, R. & Woll, H. (2009) Increasing carbon storage in intact African tropical forests. *Nature*, **457**: 1003-1006.
- Luyssaert, S., Schulze, ED., Börner, A., Knohl, A., Hessenmoller, D., Law, BE., Ciais, P. & Grace, J. (2008) Pld-growth forests as global carbon sinks. *Nature* **455**: 213-215.
- Odum, EP. (1969) The strategy of ecosystem development. *Science* **164**: 262-270
- Wada, K. (1986) *Ando Soils in Japan*. Kyushu Univ. Press, Fukuoka, pp 58.
- Watanabe, A. & Fujitake N. (2008) Comparability of composition of carbon functional groups in humic acids between inverse-gates decoupling and cross polarization/magic angle spinning ^{13}C nuclear magnetic resonance techniques. *Anal. Chim. Acta*, **618**: 110-115.
- Watanabe, A., McPhail, BD., Maie, N., Kawasaki, S., Anderson, H. & Cheshire. (2005) Electron spin resonance characteristics of humic acids from a wide range of soil types. *Org. Geochem.*, **36**: 981-990.