

^{14}C 年代測定法を用いた粗大枯死材の分解速度推定法の開発

大園享司

京都大学生態学研究センター

1. はじめに

粗大枯死材 (coarse woody debris、以下 CWD) は森林に存在する倒木や立ち枯れ、切り株などの大型の木質リターを指す。多くの森林において、CWD の現存量は地上部の全有機物量の約 3 分の 1 に達しており量的に重要な構成要素である (Harmon et al. 1986)。CWD はリグニンやセルロースといった難分解性の高分子化合物を主成分としており、また構造的な支持器官であるため窒素やリンなどの養分物質に乏しい。このため CWD は分解者にとって利用しにくい基物であり、多くの森林において 10~100 年という長期的なオーダーで滞留し、ゆっくり分解される (Berg and McClaugherty 2003)。このように CWD は森林を構成する炭素の主要な貯蔵庫かつ放出源となっており、その長期的な分解過程を調べることは森林生態系の炭素循環を理解する上で重要である。

CWD の分解速度は、時間経過にともなう残存重量の変化に指数式をあてはめたときの傾き (分解速度定数 k 、単位は/年) として評価される (Olson 1963)。CWD の分解速度定数の推定にはクロノシーケンス法がよく用いられてきたが、この方法ではさまざまな分解段階にある CWD 試料について、枯死後の分解時間と残存重量を推定して分解プロセスを再現する (Harmon et al. 1986)。このうち CWD 試料の分解時間については、CWD 上に定着した樹木稚樹の樹齢から枯死後の年数を推定したり、CWD の年輪幅の連年変動パターンを周辺の生木のそれと比較して枯死年を推定するなどの方法が用いられてきた。しかしこれらの方法には、客観性に乏しい、誤差が大きい、測定に手間と時間がかかるなどの問題点があり、CWD の分解研究を進める上での妨げとなっていた。より簡便で、再現性が高く、短期的な測定で枯死年を推定できる手法を開発する必要がある。

本研究では、放射性炭素同位体 (^{14}C) の測定に基づく新しい CWD の枯死年および分解速度の推定手法を新たに考案し、その有効性を検討した (菱沼ら 2011)。 ^{14}C 年代測定は古代遺跡の年代推定などに用いられて威力を発揮しているが、これを CWD の分解研究に応用して短期間で簡便に CWD の枯死年および分解速度を求めることができれば、森林生態学分野の発展に大きく貢献できるものと期待される。これまでも ^{14}C を用いて CWD の分解速度を推定した研究例がある (Daniels et al. 1997; Kueppers et al. 2004)。これらの先行研究では、年輪の明瞭な針葉樹 CWD を対象として、その最も外側に位置する年輪の一部を採取して $\Delta^{14}\text{C}$ を測定するなどによって、信頼性の高い結果が得られている。しかしこの方法では、多くの広葉樹種のように年輪の不明瞭な CWD や、年輪が認識できないほど腐朽の進んだ CWD の枯死年推定が困難である。

そこで本研究では、CWD を穿孔 (ドリル) 試料ないし円盤 (ディスク) 試料として、複数年の年輪を含むように採取した場合に適用可能な CWD の枯死年の推定手法を検討した。まず、採取し

た CWD の直径、直径と樹齢との関係を記述するアロメトリー式、および大気中の $^{14}\text{CO}_2$ 濃度の経年変化データに基づいて、CWD の枯死年と $\Delta^{14}\text{C}$ 推定値との関係を記述するリファレンス・カーブを作成した。そのリファレンス・カーブに CWD 試料の $\Delta^{14}\text{C}$ 実測値を当てはめることで、CWD 試料の枯死年を推定した。本研究では、その枯死年の推定値を、実際に記録された枯死年と比較することで、枯死年推定値の信頼性を検討した。またこの枯死年の推定値に基づいて得られた CWD の分解速度定数を、従来の研究手法により得られた分解速度の推定値と比較することで、本法による分解速度推定の有効性を検討した。

表 1. $\Delta^{14}\text{C}$ 測定に用いた CWD 試料

試料名	腐朽度	実際の枯死年	採取年	採取部の直径 (cm)	採取方法 (ドリル穴の深さ cm)	容積重 (g/cm^3)	重量残存率 (%)
98-20-1	1	1988	2005	20.0	ドリル (10.0)	0.25	63.1
98-20-2	1	1998	2005	20.0	ドリル (10.3)	0.22	55.3
113-20-1	2	1989	2005	20.0	ドリル (18.4)	0.34	86.6
154-20-1	2	1989	2005	20.0	ドリル (20.0)	0.30	78.3
82-20-1	3	1986	2005	20.0	ドリル (13.6)	0.20	51.6
82-20-2	3	1986	2005	20.0	ドリル (13.0)	0.19	49.2
OTK4-2	4	不明	2004	20.5	ディスク	0.12	31.2
OTK4-1	4	不明	2004	23.0	ディスク	0.15	38.6
OTK5-5	5	不明	2004	24.0	ディスク	0.11	28.7
OTK5-9	5	不明	2004	20.0	ディスク	0.12	30.1
OTK5-4	5	不明	2004	14.5	ディスク	0.10	25.3

2. 材料と方法

2-1. 試料の採取

岐阜県高山市御岳山の標高 2050m に位置する亜高山帯針葉樹林で採取した CWD 試料を分析に用いた。調査地の年平均気温は 3-4°C、年間降水量は 2500mm である (Tian et al. 1997)。トウヒ、オオシラビソ、シラビソ、コメツガの 4 種の針葉樹が優占する (Mori and Takeda 2004)。この調査地では CWD (倒木および立枯れ、直径 10cm 以上) のセンサスおよび試料採取がすでに行われており、それらのデータから CWD の現存量、供給速度、回転率が得られている (Katsumata 2006)。

本研究では、Katsumata (2006) が採取した CWD 試料のうち、採取部位の直径が 20cm 程度で、腐朽程度の異なる 11 点の倒木試料を ^{14}C 分析に用いた (表 1)。CWD の腐朽程度は腐朽度とよばれる指標により野外で視覚的に区分されており、倒木については大枝と小枝が脱落しておらず比較的未分解の腐朽度 1 から、自重を支えることができないほど腐朽が進んでいる腐朽度 5 までの 5 段階に区分されている (Sollins 1982)。腐朽度 1~3 の 6 試料は、2005 年 8 月に、過去の台風により倒れたため枯死年が記録されている倒木から採取した。長さ 24cm、直径 0.9cm の木工用ロン

ドリルを装着した電気ドリルを用いて、倒木の表面から倒木の繊維方向に対して直角となるように、かつ中心軸に向かって（半径方向に）ドリルで穿孔した時に得られる木屑を分析試料とした。ドリル穴は中心軸まで、あるいは中心軸を通過して反対側の表面まで貫通するように開けたが、試料によっては、中心軸を通過したが貫通せず、反対側の表面の手前まで穿孔した場合もあった。また今回の分析には用いなかったが、Katsumata (2006) には中心軸の手前までしか穿孔していない試料も含まれていた。腐朽度 4・5 の 5 試料は枯死年不明であり、2004 年 9 月にハンドソーを用いて厚さ一定（7～11.5cm）の半円状あるいは扇形のディスクとして採取した。今回分析に用いた 11 試料はいずれも針葉樹に由来するが、樹種は不明である。これらの試料は 40℃の送風乾燥機で一週間以上乾燥したのちミルで破碎し、チャック付きポリ袋に封入して保存した。ドリル試料についてはドリル穴の体積と木屑の乾燥重量から、ディスク試料についてはディスクの体積と乾燥重量から、それぞれ容積重を算出した。各試料の重量残存率は、生きた（未分解の）針葉樹材の容積重（ $0.39 \pm 0.01 \text{g/cm}^3$ 、平均±標準誤差、 $n=10$ ）に対する各試料の容積重の割合として、パーセントで表した。

2-2. $\Delta^{14}\text{C}$ 測定

$\Delta^{14}\text{C}$ 測定は株式会社加速器分析研究所および名古屋大学年代測定総合研究センターで行った。名古屋大学年代測定総合研究センターでは、試料は約 80℃のホットプレート上で、1.2M HCl、1.2M NaOH、1.2M HCl を用いて数日間リーチングを行った後、乾燥し、酸化銅とともに石英管に真空封入し、900℃で 4 時間加熱してガス化した。発生した試料ガスは、 CO_2 ガス精製ガラスラインの真空中にて精製した。試料 CO_2 ガスは鉄触媒下、水素を用いて 620℃で 6 時間加熱して還元し、グラファイトを作成した。グラファイトはアルミニウム製のターゲットホルダーに封入し、加速器質量分析計によって ^{14}C 濃度を測定した。試料調整および装置の ^{14}C バックグラウンド値を求めるために、 ^{14}C を含まないシュウ酸（キシダ化学）を用い、標準試料としてはシュウ酸（NIST SRM4990C）を用いた。得られた ^{14}C 濃度から $\Delta^{14}\text{C}$ の値を求めた。

表 2. 直径 (cm) と樹齢 (年) の関係を記述するアロメトリー式のパラメータ (Miyadokoro et al. 2003). アロメトリー式は、樹齢 = $a \times \text{直径}^b$.

樹種	a	b
トウヒ (<i>Picea jezoensis</i> var. <i>hondoensis</i>)	22.8	0.59
オオシラビソ (<i>Abies mariesii</i>)	66.3	0.36
シラビソ (<i>Abies veitchii</i>)	70.0	0.18
コメツガ (<i>Tsuga diversifolia</i>)	60.8	0.45

2-3. リファレンス・カーブの作成と枯死年の推定

CWD の枯死年とドリルないしディスク試料の $\Delta^{14}\text{C}$ 推定値との関係を記述するリファレンス・カーブを、数理モデルを用いて作成した。ドリル試料とディスク試料では、採取した試料に含まれる

年輪ごとの材積割合と、試料全体の材積の算出方法が異なるため、それぞれの採取方法に適用可能な2種類の数理モデルを作成した。これらの数理モデルにより得られるリファレンス・カーブは、採取したCWDの直径、直径と樹齢との関係を記述するアロメトリー式、および大気中の $^{14}\text{CO}_2$ 濃度の経年変化データに基づいている。

このモデルでは、試料を採取した部位の直径 (cm) は CWD の枯死時における直径であり、その部位は直径と樹齢の関係を記述するアロメトリー式 (表 2) に従って同心円状に経年成長したものと仮定した。このアロメトリー式により、試料を採取した部位の枯死時の樹齢 (n 年生) を算出した。次に、アロメトリー式を変形した次式により、樹齢が k 年 (k は $1\sim n$ の整数) のときの試料の半径 r_k を計算した：

$$r_k = \frac{1}{2} \left(\frac{k}{a} \right)^{\frac{1}{b}}$$

ただし、 a と b はアロメトリー式のパラメータである (表 2)。この r_k から、 k 年目の年輪までの材積 V_k を、ドリル試料とディスク試料のそれぞれの場合について、以下の手順で計算した。

ドリル試料では、木口面におけるドリル穴部分の面積 S_k を繊維方向に積分することで V_k を求めた。図 1a、b は、ドリル穴を含む任意の木口面の模式図である。ドリル半径を P (本研究では 0.45cm)、任意の木口面におけるドリル穴の接線方向の幅を $2x$ ($0 \leq x \leq P$) とする。このとき、 k 年目の年輪半径 r_k よりも x が大きい場合 (つまり $r_k < x$ 、図 1a) と、 r_k よりも x が小さい場合 ($r_k \geq x$ 、図 1b) とで、 S_k の算出方法が異なる。

(a) $r_k < x$ の場合、 k 年目までの年輪面積 $S_k(x)$ は半径 r_k の半円なので (図 1a)、

$$S_k(x) = \frac{1}{2} \pi r_k^2$$

(b) $r_k \geq x$ の場合、 k 年目までの年輪面積 $S_k(x)$ は図 1b の円弧 1、円弧 2 の 2 つ円弧と、三角形 3、三角形 4 の 2 つの三角形の、あわせて 4 つの図形の面積合計なので、

$$\begin{aligned} S_k(x) &= 2 \times \left(\frac{1}{2} x \sqrt{r_k^2 - x^2} + \frac{1}{2} r_k^2 \arcsin \frac{x}{r_k} \right) \\ &= \left(x \sqrt{r_k^2 - x^2} + r_k^2 \arcsin \frac{x}{r_k} \right) \end{aligned}$$

このようにして求めた $S_k(x)$ を繊維方向に積分して V_k を求めた。図 1c は、ドリル穴を板目面からみた模式図である。ドリル穴の中心 O を原点として、ドリル穴を含む任意の木口面までを y とすると、求める体積 V_k は、

$$\begin{aligned} V_k &= \int_{-P}^P S_k(x) dy \\ &= 2 \int_0^P S_k(x) dy \end{aligned}$$

$x = P \cos \theta$ 、 $y = P \sin \theta$ と書けるので (図 1c)、

$$V_k = 2 \int_0^{\pi/2} S_k(P \cos \theta) P \cos \theta d\theta$$

ここで、 k 年目の年輪半径 r_k よりもドリル半径 P が小さい場合 (つまり $r_k \geq P$) と、 r_k よりも P が大きい場合 ($r_k < P$) とで、 V_k の算出方法が異なる。

(i) $r_k \geq P$ の場合、常に $r_k \geq x$ (図 1b) なので、

$$V_k = 2 \int_0^{\pi/2} \left\{ P^2 \cos^2 \theta \sqrt{r_k^2 - P^2 \cos^2 \theta} + r_k^2 P \cos \theta \arcsin\left(\frac{P \cos \theta}{r_k}\right) \right\} d\theta$$

(ii) $r_k < P$ の場合、図 1c の θ ($0 \leq \theta \leq \pi/2$) が $\arccos\left(\frac{r_k}{P}\right) < \theta$ のとき $r_k \geq x$ (図 1b)、 $\arccos\left(\frac{r_k}{P}\right) \geq \theta$ のとき $r_k < x$ (図 1a) となるので、

$$V_k = \int_0^{\arccos(r_k/P)} \pi r_k^2 P \cos \theta d\theta + 2 \int_{\arccos(r_k/P)}^{\pi/2} \left\{ P^2 \cos^2 \theta \sqrt{r_k^2 - P^2 \cos^2 \theta} + r_k^2 P \cos \theta \arcsin\left(\frac{P \cos \theta}{r_k}\right) \right\} d\theta$$

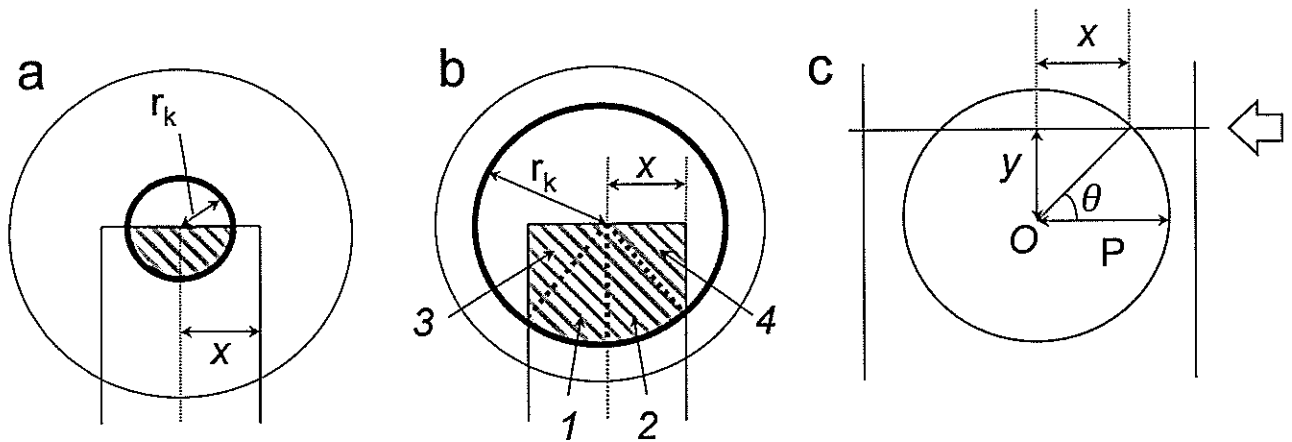


図 1. ドリル試料における k 年目の年輪までの材積 V_k の計算手順. a, b はドリル穴を含む任意の木口面の模式図. 太線の円は k 年目の年輪である. ドリル穴の接線方向の幅を $2x$ する. a は k 年目の年輪半径 r_k よりも x が大きい場合 ($r_k < x$), b は r_k よりも x が小さい場合 ($r_k \geq x$). 斜線の領域が、ドリル穴部分の面積 S_k である. c はドリル穴を板目面からみた模式図. O はドリル穴の中心. 任意の木口面を白抜きで示す. 詳細は本文を参照.

ディスク試料では、厚さ d (cm) のディスクの材積を次式で求めた:

$$V_k = d \pi r_k^2$$

ただし、 d の値は以下の計算には影響しない. このディスク試料の式は、採取したディスク試料が全円ではなく、例えば半円や円弧であっても適用可能である.

以上の手順で得られた V_k を用いて、 k 年目に形成された年輪の材積 R_k を次式により求めた:

$$R_k = V_k - V_{k-1}$$

ただし $V_0 = 0$ である.

k 年目の年輪には、その年輪が形成された年の大気中の $^{14}\text{CO}_2$ が固定されていると仮定した. 大気中 $^{14}\text{CO}_2$ 濃度 (%) の値には、1950 年までは IntCal09 の測定値 (Reimer et al. 2009)、1951 年から 1997 年までは Hua and Barbetti (2004) の測定値、1998 年から 2004 年までは Levin and

Kromer (1997) の計算式から算出された値を用いた。1年目の年輪が形成された西暦 m 年から枯死時 (n 年目、西暦 $m+n$ 年) までの毎年の年輪材積 R_k と、その年輪が形成された西暦年の $^{14}\text{CO}_2$ 濃度 (%) を掛け合わせた値の合計値を求め、その合計値を試料全体の材積で除して得られる値を CWD 試料全体の $\Delta^{14}\text{C}$ (%) の推定値 D_m とした。ドリル試料の場合、ドリル穴の深さを l (cm) としたとき、 l が試料の半径と同じあるいはそれ以下の場合 (つまり $l \leq r_n$) か、 l が試料の半径より大きい ($l > r_n$) 場合かのいずれかによって、 D_m を次の式で求めた：

$$l \leq r_n \text{ の場合 : } D_m = \frac{\sum_{k=x}^n R_k A_{m+k}}{V_n - V_x}$$

$$l > r_n \text{ の場合 : } D_m = \frac{\sum_{k=1}^n R_k A_{m+k} + \sum_{k=1}^y R_k A_{m+k}}{V_n + V_y}$$

ここで A_m は西暦 m 年における大気中 $\Delta^{14}\text{C}$ の値、そして $x = b(2r_n - 2l)^a$ (年)、 $y = b(2l - 2r_n)^a$ (年) である。一方、ディスク試料の場合、 D_m を次の式で求めた：

$$D_m = \frac{\sum_{k=1}^n R_k A_{m+k}}{V_n}$$

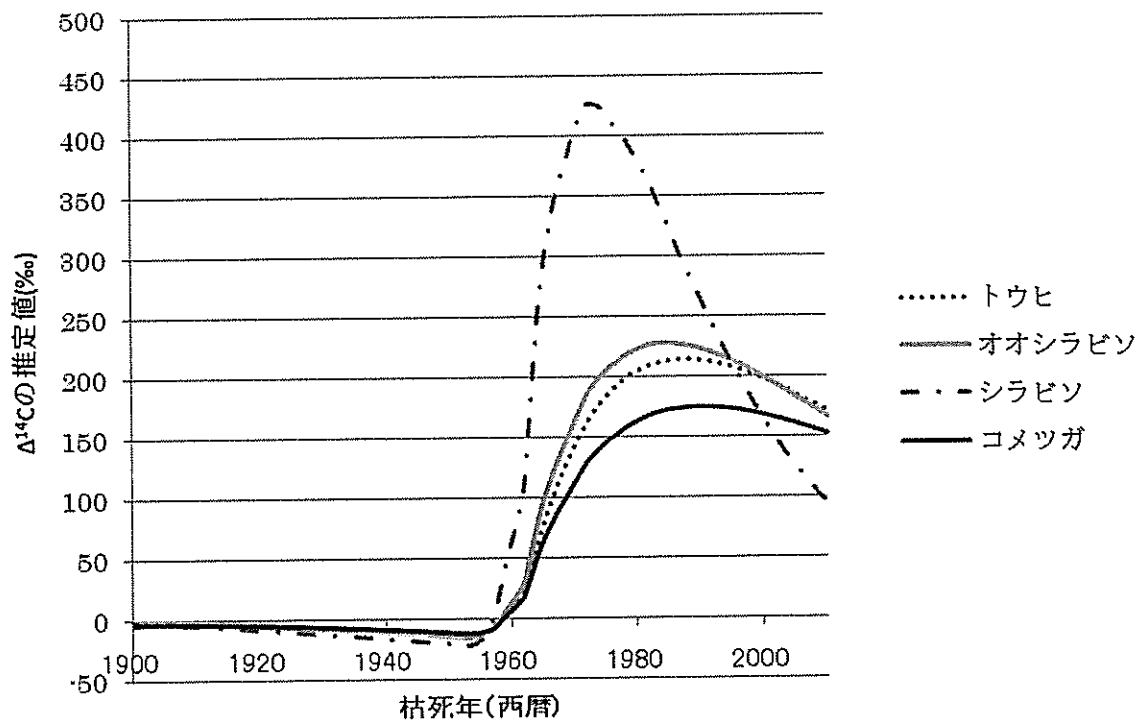


図 2. 枯死年と $\Delta^{14}\text{C}$ の推定値との関係を示すリファレンス・カーブ。直径 20cm のディスク試料の例。調査地で優占する 4 樹種で、直径と樹齢の関係を記述するアロメトリー式のパラメータ a 、 b が異なるため、各樹種に対応した 4 本のリファレンス・カーブを作成した。

例として、直径 20cm のディスク試料について得られた、枯死年（西暦 $m+n$ 年）と $\Delta^{14}\text{C}$ 値 (D_m) との関係を示すリファレンス・カーブを図 2 に示す。今回用いた CWD 試料では樹種が不明であるため、本調査地で優占する 4 樹種のアロメトリー式をそれぞれ用いてリファレンス・カーブを作成した。

最後に、採取した CWD 試料の $\Delta^{14}\text{C}$ (%) の実測値 D をこれらのリファレンス・カーブに当てはめることで枯死年を推定した。以下の条件式を満たす西暦 $m+n$ 年を推定枯死年とした：

$$D_m \geq D \geq D_{m-1} \quad \text{または} \quad D_m \leq D \leq D_{m-1}$$

4. 結果と考察

4-1. $\Delta^{14}\text{C}$ 値および枯死年の推定値

CWD 試料の $\delta^{13}\text{C}$ 値は $-32.8 \sim -21.3\text{‰}$ 、 $\Delta^{14}\text{C}$ 値は $-24.7 \sim 186.6\text{‰}$ となった (表 3)。これら $\Delta^{14}\text{C}$ の実測値を、各試料の直径 (表 1) に基づいて 4 樹種 (トウヒ、オオシラビソ、シラビソ、コメツガ) それぞれのアロメトリー式を用いて作成したリファレンス・カーブ (図 2) に当てはめることで枯死年を推定した (表 3)。2 点の試料 (OTK4-2、OTK5-5) では、実測値がリファレンス・カーブに該当せず、枯死年の推定値が得られなかった。いくつかの試料-樹種の組み合わせ (OTK4-1 のオオシラビソ、82-20-2・OTK4-1・OTK5-9 のシラビソ) では、推定枯死年として 2 つの値が得られた。腐朽度 1~3 の 6 試料の枯死年は、どの樹種のアロメトリー式を使うかにより異なるが、西暦 1927~1968 年と推定された。腐朽度 4・5 の 5 試料の枯死年は、1938~1962 年と推定された (表 3)。

比較的腐朽の進んでいない腐朽度 1~3 の 6 試料では、 $\Delta^{14}\text{C}$ 値から推定された枯死年 (西暦 1927~1968 年、表 3) が、実際に記録された枯死年 (1986~1998 年、表 1) に比べて 21~59 年古い値となった。このような差が生じる理由としては、リファレンス・カーブ作成に用いた大気中 $^{14}\text{CO}_2$ の値が調査地での大気中の値を反映していない可能性や、局所的な要因により対象試料の樹木がアロメトリー式にしたがって年輪生長をしていない可能性、さらには現場においてドリル試料を採取する際の技術的なエラー、つまりドリル刃が材の中心を通るように穿孔できていない可能性などの影響が考えられる。

4-2. 分解速度定数の推定

$\Delta^{14}\text{C}$ 分析から推定された枯死年 (表 3) と試料の採取年 (表 1) とのあいだの期間を分解時間 (単位は年) として求め、その分解時間と重量残存率 (表 1) から CWD の分解速度定数 k (1/年) を、次の指数関数式 (Olson 1963) により計算した：

$$k = -\ln (\text{重量残存率}) / \text{分解時間}$$

分解速度定数は、腐朽度 1~3 の 6 試料で 0.004~0.016/年と推定された (表 3)。これらの計算に用いた $\Delta^{14}\text{C}$ 分析による枯死年の推定値は、先に述べたように実測値よりも古く推定されている。つまり分解時間が過大評価であるため、分解速度定数は過小評価となっている。なおこれらの試料について、実際の枯死年から同様の手順で推定した分解速度定数は 0.010~0.099/年であった。

表 3. CWD 試料の $\delta^{13}\text{C}$ ・ $\Delta^{14}\text{C}$ 値およびリファレンス・カーブから推定した枯死年と分解速度。値は平均±標準誤差。トウヒ (Pj)、オオシラビソ (Am)、シラビソ (Av)、コメツガ (Td) のそれぞれのアロメトリー式を用いて作成したリファレンス・カーブに当てはめて推定した。na は実測値がリファレンス・カーブに該当せず、枯死年の推定値が得られなかったことを示す。

試料名	$\delta^{13}\text{C}$ (‰)	$\Delta^{14}\text{C}$ (‰)	Code	推定枯死年 (西暦)				分解速度定数 k (/年)			
				Pj	Am	Av	Td	Pj	Am	Av	Td
98-20-1	-24.5	46.5±3.0	IAAA-102600	1967	1965	1963	1969	0.012	0.012	0.011	0.013
98-20-2	-24.5	36.1±4.2	NUTA2-15818	1965	1965	1962	1968	0.015	0.016	0.014	0.016
113-20-1	-28.2	98.6±3.3	IAAA-102601	na	na	1968	na	na	na	0.004	na
154-20-1	-25.0	186.6±4.8	NUTA2-15820	na	na	1968	na	na	na	0.007	na
82-20-1	-29.4	-6.1±3.2	IAAA-102602	1946	1945	1927	na	0.011	0.011	0.008	na
82-20-2	-25.9	-9.3±4.1	NUTA2-15817	na	na	1939	na	na	na	0.011	na
						1958				0.015	
OTK4-2	-26.0	-22.7±3.1	IAAA-102603	na	na	na	na	na	na	na	na
OTK4-1	-32.8	-14.5±4.1	NUTA2-15819	na	1954	1938	na	na	0.019	0.014	na
					1956	1957			0.020	0.020	
OTK5-5	-25.6	-24.7±0.6	IAAA-102604	na	na	na	na	na	na	na	na
OTK5-9	-25.5	-16.5±4.1	NUTA2-15821	na	na	1943	na	na	na	0.020	na
						1957				0.026	
OTK5-4	-21.3	21.9±3.3	IAAA-73131	1962	1962	1959	1963	0.033	0.033	0.031	0.034

腐朽度 4・5 の 5 試料の分解速度定数 k は 0.014~0.034/年と推定された (表 3)。Katsumata (2006) は本調査地における CWD (直径 10cm 以上) の現存量 (42.4 ton/ha) と供給速度 (1.54 ton/ha/年) を求め、CWD 動態が定常であると仮定した上で分解速度定数 k を 0.036/年と推定した。また調査地において、死亡から 6~18 年経過した CWD の 7 試料 (直径 10cm ないし 20cm) それぞれについて求めた分解速度定数 k は 0.012~0.072/年 (平均 0.034/年) であった (Katsumata 2006)。今回の $\Delta^{14}\text{C}$ 分析に用いた腐朽度 4・5 の試料の実際の枯死年は未知であり、 $\Delta^{14}\text{C}$ 分析による枯死年の推定値について信頼性を検討することはできないが、今回の方法で求められた分解速度定数は従来の方法で推定された値の範囲に入っていた。

4-3. 今後の課題

本研究で作成したリファレンス・カーブは、CWD 試料の直径に加えて、樹齢と胸高直径の関係

を記述するアロメトリー式と、大気中の $^{14}\text{CO}_2$ 濃度の経年変化の値に基づいている。したがって、調査地あるいはその近傍における樹木の樹齢—直径関係が明らかでない限り適用できない。また大気中の $^{14}\text{CO}_2$ 濃度には、地域による変動や、Suess 効果として知られている 1900 年代以降の化石燃料消費による大気中 ^{14}C 濃度の下方へのシフト (Tans et al. 1979)、さらには自動車の排気ガスなど化石燃料由来の炭素の影響による局地的な変動 (Shibata et al. 2005) が影響を及ぼす可能性がある。これらのことが $\Delta^{14}\text{C}$ 分析に基づく CWD の枯死年と分解速度の推定に影響を及ぼしうる可能性を考慮する必要がある。しかしながら本法には、複数年にわたる年輪を含むドリル試料ないしディスク試料を、比較的簡便にかつ迅速に測定できる利点がある。今後は、長期にわたり分解を受けた枯死年既知の CWD 試料の分析や、より分解が速い広葉樹材や温帯以南の森林における CWD 試料の分析により、本研究で提案した $\Delta^{14}\text{C}$ 分析による CWD の枯死年や分解速度の推定法の妥当性を、さらに検討していく必要がある。

謝辞

本研究は公益信託エスベック地球環境研究・技術基金による研究助成に基づいて行われた。京都大学大学院農学研究科の菱沼卓也氏と名古屋大学年代測定総合研究センター准教授の南雅代博士には同位体分析で助力をいただいた。京都大学生態学研究センターの伊藤公一氏は数理モデルを作成いただいた。京都大学大学院農学研究科の勝又伸吾氏には試料を提供いただいた。ここに記して感謝の意を表します。

引用文献

- Berg, B., and McClaugherty, C., 2003. Plant Litter, Decomposition, Humus Formation, Carbon Sequestration. Springer Berlin (邦訳：森林生態系の落葉分解と腐植形成, 大園享司訳, シュプリンガーフェアラーク東京, 2004)
- Daniels, L. D., Dobry, J., Klinka, K., and Feller, M. C., 1997. Determining year of death of logs and snags of *Thuja plicata* in southwestern coastal British Columbia. *Canadian Journal of Forest Research* 27, 1132-1141.
- Harmon, M. E., Franklin, J. F., Swanson, F. J., Sollins, P. S., Gregory, V., Lattin, J. D., Anderson, N. H., Cline, S. P., Aumen, N. G., Sedell, J. R., Lienkaemper, G. W., Cromack, K. Jr., and Cummins, K. W., 1986. Ecology of coarse woody debris in temperate ecosystems. *Advances in Ecological Research* 15, 133-302.
- 菱沼卓也・南雅代・伊藤公一・大園享司, 2011. ^{14}C 測定による粗大枯死材の枯死年および分解速度の推定. 名古屋大学加速器質量分析計業績報告書 22, 72-81.
- Hua, Q., and Barbetti, M., 2004. Review of tropospheric bomb ^{14}C data for carbon cycle modeling and age calibration purposes. *Radiocarbon* 46(3), 1273-1298.
- Katsumata, S., 2006. Accumulation, input and decay of CWD in an old-growth subalpine forest in central Japan. Master thesis, Kyoto University, Kyoto.
- Kueppers, L. M., Southon, J., Baer, P., and Harte, J., 2004. Dead wood biomass and turnover

- time, measured by radiocarbon, along a subalpine elevation gradient. *Oecologia* 141, 641-651.
- Levin, I., and Kromer, B., 1997. Twenty years of atmospheric $^{14}\text{CO}_2$ observations at Schauinsland station, Germany. *Radiocarbon* 39(2), 205–218.
- Miyadokoro, T., Nishimura, N., and Yamamoto, S., 2003. Population structure and spatial patterns of major trees in a subalpine old-growth coniferous forest, central Japan. *Forest Ecology and Management* 182, 259-272.
- Mori, A. and Takeda, H., 2004. Effects of undisturbed canopy structure on population structure and species coexistence in an old-growth subalpine forest in central Japan. *Forest Ecology and Management* 200, 89-100.
- Olson, J. S., 1963. Energy storage and the balance of producers and decomposers in ecological systems. *Ecology* 44(2), 322-331.
- Reimer, P. J., Baillie, M. G. L., Bard, E., Bayliss, A., Beck, J. W., Blackwell, P. G., Bronk Ramsey, C., Buck, C. E., Burr, G. S., Edwards, R. L., Friedrich, M., Grootes, P. M., Guilderson, T. P., Hajdas, I., Heaton, T. J., Hogg, A. G., Hughen, K. A., Kaiser, K. F., Kromer, B., McCormac, F. G., Manning, S. W., Reimer, R. W., Richards, D. A., Southon, J. R., Talamo, S., Turney, C. S. M., van der Plicht, J., and Weyhenmeyer, C. E., 2009. IntCal09 and Marine09 radiocarbon age calibration curves, 0-50,000years cal BP. *Radiocarbon*, 51(4), 1111-1150.
- Shibata, S., Kawano, E., and Nakabayashi, T., 2005. Atmospheric [^{14}C]CO₂ variations in Japan during 1982–1999 based on ^{14}C measurements of rice grains. *Applied Radiation and Isotopes* 63, 285-290.
- Sollins, P., 1982. Input and decay of coarse woody debris in coniferous forest stands in western Oregon and Washington. *Canadian Journal of Forest Research* 12, 18-28.
- Tans, P. P., de Jong, A. F. M., and Mook, W. G., 1979. Natural atmospheric ^{14}C variation and the Suess effect. *Nature* 280, 826-828.
- Tian, X.-J., Takeda, H., and Ando, T., 1997. Application of a rapid thin section method for observations on decomposing litter in mor humus form in a subalpine coniferous forest. *Ecological Research* 12, 289-300.

平成 22 年度 助成金研究報告書（概要）

研究テーマ	^{14}C 年代測定法を用いた粗大枯死材の分解速度推定法の開発
申請者氏名	大園 享司
団体名	京都大学
研究期間	平成 22 年 9 月～平成 23 年 8 月

1. 研究内容の概要

粗大枯死材（coarse woody debris、以下 CWD）は森林に存在する倒木や立ち枯れ、切り株などの大型の木質リターを指す。多くの森林において、CWD の現存量は地上部の全有機物量の約 3 分の 1 に達しており量的に重要な構成要素である。CWD はリグニンやセルロースといった難分解性の高分子化合物を主成分としている一方で、窒素やリンなどの養分物質に乏しい。このため CWD は分解者にとって利用しにくい基物であり、多くの森林において 10～100 年という長期的なオーダーで滞留し、ゆっくり分解される。このように CWD は森林を構成する炭素の主要な貯蔵庫かつ放出源となっており、その長期的な分解過程を調べることは森林生態系の炭素循環を理解する上で重要である。しかしながら、CWD の分解が長期的なプロセスであるため追跡が困難であること、サイズが大きく扱いにくいなどの理由により、その分解に関する研究はほとんど行われていない。地球環境に果たす森林の役割に注目が集まっており、炭素の吸収源、放出源としての森林の機能が世界各地で測定されているが、それらの研究やモデルのほとんどが、粗大枯死材の寄与を無視している。森林における CWD の動態を短時間で効率的に評価する方法の開発が不可欠である。特に、CWD の枯死年をより簡便に、再現性が高く、短期的な測定で推定できる手法を開発する必要がある。

2. 研究の目的

本研究では、放射性炭素同位体（ ^{14}C ）の測定に基づく新しい CWD の枯死年および分解速度の推定手法を新たに考案し、その有効性を検討した。 ^{14}C 年代測定は古代遺跡の年代推定などに用いられて威力を発揮しているが、これを CWD の分解研究に応用して短期間で簡便に CWD の枯死年および分解速度を求めることができれば、森林生態学分野の発展に大きく貢献できる。今回は、多くの広葉樹種のように年輪の不明瞭な CWD や、年輪が認識できないほど腐朽の進んだ CWD の枯死年推定にも応用可能な方法を開発した。具体的には、CWD を穿孔（ドリル）試料ないし円盤（ディスク）試料として、複数年の年輪を含むように採取した場合に適用可能な CWD の枯死年の推定手法である。

本研究では、岐阜県高山市の御岳山で採取した、さまざまな腐朽段階にある CWD 試料 11 点を用いた。うち 6 試料については、実際に枯死した年が記録されており、本法における枯死年推定値の信頼性を検討することが可能である。またこの枯死年の推定値に基づいて得られた CWD の分解速度定数を、従来の研究手法により得られた分解速度の推定値と比較することで、本法による分解速度推定の有効性を検討した。

3. 今回の研究の成果

CWDの枯死年とドリルなしディスク試料の $\Delta^{14}\text{C}$ 推定値との関係を記述するリファレンス・カーブを、数理モデルを用いて作成した。ドリル試料とディスク試料では、採取した試料に含まれる年輪ごとの材積割合と、試料全体の材積の算出方法が異なるため、それぞれの採取方法に適用可能な2種類の数理モデルを作成した。これにCWD試料11点の $\Delta^{14}\text{C}$ 実測値を当てはめることで枯死年を推定した。

CWD試料の $\delta^{13}\text{C}$ 値は $-32.8\sim-21.3\text{‰}$ 、 $\Delta^{14}\text{C}$ 値は $-24.7\sim 186.6\text{‰}$ となった。これらの値から推定された腐朽度1~3の6試料の枯死年は、西暦1927~1968年となった。これらの年代は、実際に記録された枯死年(1986~1998年)に比べて21~59年古い値となった。腐朽度4・5の5試料の枯死年は1938~1962年と推定された。

$\Delta^{14}\text{C}$ 分析から推定された枯死年と試料の採取年とのあいだの期間を分解時間(単位は年)として、その分解時間と重量残存率からCWDの分解速度定数 k (/年)をOlsonの指数関数式の傾きとして求めた。分解速度定数は、腐朽度1~3の6試料で $0.004\sim 0.016$ /年と推定された。なおこれらの試料について、実際の枯死年から推定した分解速度定数は $0.010\sim 0.099$ /年であった。腐朽度4・5の5試料の分解速度定数 k は $0.014\sim 0.034$ /年と推定された。

本調査地におけるCWDの現存量と供給速度から、林分レベルでの分解速度定数 k が 0.036 /年と推定されている。また調査地において、死亡から6~18年経過したCWDの7試料(直径10cmないし20cm)それぞれについて求めた分解速度定数 k は $0.012\sim 0.072$ /年(平均 0.034 /年)であった。今回の $\Delta^{14}\text{C}$ 分析に用いた腐朽度4・5の試料について推定された分解速度定数は、従来の方法で推定された値の範囲に入っていた。

本研究で検討した $\Delta^{14}\text{C}$ 分析に基づくCWDの枯死年と分解速度の推定法では、調査地あるいはその近傍における樹木の樹齢-直径関係が明らかでない限り適用できないという欠点があるものの、複数年にわたる年輪を含むドリル試料ないしディスク試料を、比較的簡便にかつ迅速に測定できる利点がある。長期にわたり分解を受けた枯死年既知のCWD試料の分析や、より分解が速い広葉樹材や温帯以南の森林におけるCWD試料の分析に応用できるものと期待される。

4. 研究成果の発表

[学会発表]

Hishinuma T, Minami M, Osono T. Estimating the dead year and decomposition rate of coarse woody debris using radiocarbon (^{14}C): a preliminary analysis. International Symposium on Isotope Ecology 2010. November 2010, COOP Inn Kyoto. (poster session)

菱沼卓也・南雅代・大園享司 14C測定による粗大枯死材の枯死年および分解速度の推定. 第23回名古屋大学年代測定総合研究センターシンポジウム 名古屋大学 名古屋 2011年1月

[論文発表]

菱沼卓也・南雅代・伊藤公一・大園享司, 2011. ^{14}C 測定による粗大枯死材の枯死年および分解速度の推定. 名古屋大学加速器質量分析計業績報告書 22, 72-81.