

火入れ地における炭素蓄積量の定量化

米川修平・佐野淳之

**Quantitative Analysis of Carbon Accumulation Mass at Prescribed Burning
Grassland**

Shuhei Yonekawa and Junji Sano

広葉樹研究 第14号 別冊

平成23年3月

鳥取大学農学部

広葉樹開発実験室

Reprinted from

HARDWOOD RESEARCH

No. 14

March, 2011

Hardwood Laboratory

Faculty of Agriculture, Tottori University

Tottori, 680-8553 Japan

研究論文 Original Article

火入れ地における炭素蓄積量の定量化米川修平¹・佐野淳之²**Quantitative Analysis of Carbon Accumulation Mass at Prescribed Burning
Grassland**Shuhei Yonekawa¹ and Junji Sano²

¹鳥取大学大学院農学研究科フィールド生産科学専攻森林生態系管理学分野 (〒680-8553 鳥取市湖山町南 4-101)
Forest Ecology and Ecosystem Management Laboratory, Faculty of Agriculture, Tottori
University, Tottori, 680-8553, Japan

²鳥取大学農学部フィールドサイエンスセンター (〒680-8553 鳥取市湖山町南 4-101)
E-mail: jsano@muses.tottori-u.ac.jp
Field Science Center, Faculty of Agriculture, Tottori University, Tottori 680-8553, Japan

要 旨

本研究の目的は岡山県真庭市蒜山地域の火入れ地において、土壌中に蓄積される炭素の蓄積過程と分布様式を明らかにし、その蓄積量を定量化することである。火入れ後に再生した植生は火入れで放出された炭素を吸収する。さらに火入れや野火によって生じた植物炭化物は微生物によってほとんど分解されないため、植物炭化物は炭素を長期間土壌中に蓄積する。したがって火入れの炭素収支は蓄積の方が多い可能性がある。バイオマスおよび土壌中の植物炭化物密度と火入れによる炭素蓄積量には正の相関がみられた。また地形ごとの植物炭化物量は尾根部よりも谷部において多く、さらに斜度と黒色土層の厚さに負の相関がみられた。本調査地における火入れによる炭素の蓄積量は尾根部よりも谷部において多かった。全体として、火入れによる炭素収支は蓄積の方が多かった。そのため、火入れが大気中の二酸化炭素を増加させないことが示唆された。

キーワード : 炭, 蓄積, 地形, 土壌, バイオマス

Summary

The purpose of this study is to clarify accumulation and distribution processes of carbon contents into soil, and to analysis carbon mass quantitatively by prescribed burning at a grassland of Hiruzen area, Maniwa city, Okayama prefecture. Vegetation regenerated after prescribed burning could absorb carbon which emitted by prescribed burning. Futhermore, charcoal usually stores carbon in soil for a long time, because charcoal made by prescribed burning and wildfire is hardly decomposed by microorganism. Therefore, there is a possibility that accumulations would be more than emissions in carbon balance by prescribed burning. A positive relationship was found between charcoal and carbon accumulations by prescribed burning. Charcoal mass was much at the valley than at the ridge, and there was a negative relationship between slope and thickness of dark soil layer. Carbon accumulations by prescribed burning were much at the valley than at the ridge. As a whole, accumulations could be more than emissions in carbon balance of prescribed burining. It is suggested that prescribed burning would not increase carbon dioxide in the atmosphere.

Keywords: accumulation, biomass, charcoal, soil, topography

I. 序 論

近年地球温暖化が進行し、森林の持つ炭素吸収能力が注目されている。しかし地球全体でみた場合、土壌が蓄積している炭素量は植物バイオマスが蓄積している炭素量の約3倍である（波多野・木村2005）ため、土壌も炭素の蓄積源として重要である。日本には火山灰などの火山噴出物を母材として生成した黒ボク土が広く分布しており、本研究の調査地である岡山県真庭市の蒜山地域にも黒ボク土が分布している。黒ボク土は炭素含有率が高く（古林2002; 加藤2003）、黒色の度合いが強い腐食酸を多量に含んでいる（Shindo et al. 2004）。また火入れや野火によって生じる植物炭化物が黒ボク土の深くまで分布している（進藤ほか2003）。さらに田村ほか（1993）は、草原から森林への遷移が進むと腐植酸の色が薄くなり、その種類が変化すると報告している。黒ボク土中の植物炭化物と火入れによる植物炭化物の形態が一致する（富樫ほか2004）ため、黒ボク土の生成要因として火入れや山火事で生じる植物炭化物が重要である（Honma et al. 2002; Shindo et al. 2004）。

植物炭化物は微生物によってほとんど分解されず（Shindo 1991）、長期間土壌中に蓄積する。その要因として Brodowski et al. (2006) は植物炭化物が土壌碎石に包まれて分解されにくくなると報告している。森林火災の場合には植物炭化物が生じるが、樹木が燃焼すると一度に大量の二酸化炭素が大気中に放出され、植生の再生に時間がかかる（Cochrane and Schulze 1999; Ricardo and Xavier 2001）ため、地球温暖化に繋がる（松枝1988; 本間ほか2004）。頻繁に行われる火入れの場合にも土壌中に植物炭化物が蓄積されるが、火入れが大気中の二酸化炭素を増加させるかどうかは未解明である。

土壌中の炭素蓄積量について調べた研究は、草原群落の遷移段階による土壌有機物蓄積量の違い（李・及川2004）、日本の代表的な草原における炭素蓄積量（Nakagami et al. 2009）、Black Carbon の熱帯の傾斜地における伐採地や焼畑地での土壌有機物の構成への寄与（Rumpel et al. 2006）、欧州アカマツ林のポドソル土において火事頻度の増加が Black Carbon と有機物に与える影響（Czimeczik et al. 2005）、土壌中の炭素の分布と損失（Gregorich et al. 1998）などがある。しかし火入れによる炭素蓄積量や炭素収支を定量化した研究はない。したがって本研究では、火入れ地における炭素の蓄積過程と分布様式を明らかにし、火入れによる炭素蓄積量を定量化することを目的とする。

II. 調査地と方法

1. 調査地

調査地は岡山県真庭市蒜山地域に位置する火入れ地である（図1）。平成16年度から20年度までの年平均気温は11.9℃、年最高平均気温は16.5℃、年最低平均気温7.2℃で、積雪期間は12月から3月である。（鳥取大学FSC森林部門2009）。

川上村史編纂委員会（1980）によると、調査地周辺は古くから採草地や放牧地として利用されていた。前年の草が残ると鎌の切れが悪く、牛の食いも悪くなるため、毎春原野や丘陵地に残雪がなくなると大規模な火入れが行われてきた。また火入れはダニの駆除も目的に行っていた。その後、昭和30年代から徐々に火入れを行う面積は小さくなってきているものの、現在でも慣例的に4月初旬に火入れが行われ、蒜山地域における火入れは1000年以上前から行われていると推定されている（佐々木ほか2004）。

本研究では、現在でも火入れが行われている北向きと南向き斜面の尾根部と谷部を調査地とした。

2. 調査方法

(1) バイオマス調査

2010年度4月の火入れ前に北向きと南向き斜面の尾根部と谷部において斜面上部から下部までラインを設置し、斜面上部からラインに沿って10m間隔ごとにライン上とその左右の3点を調査地点とした。北向き斜面の尾根部と谷部においてそれぞれ

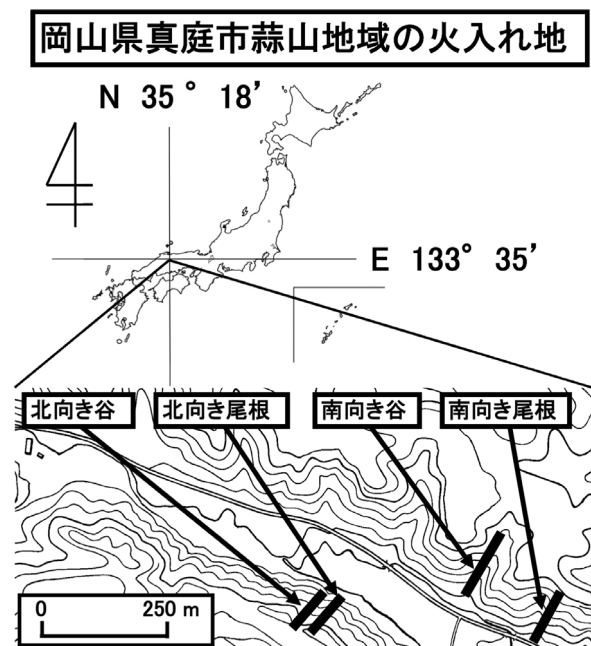


図1 調査地

27箇所と30箇所、南向き斜面の尾根部と谷部においてそれぞれ30箇所と36箇所の合計123の調査地点において $34.5 \times 44.5 \text{ cm}^2$ の範囲で植物体の地上部をすべて刈り取った。刈り取ったバイオマスを燃焼用と乾燥用の2つに分けた。2種類の処理をしたのは、バイオマスを火入れで燃焼させた場合どの程度燃焼するのか、地形ごとのバイオマスの現存量はどの程度なのかを調べるためである。

燃焼用バイオマスについては、火入れ当日に刈り取った123地点すべてに杭と針金で容器を固定して設置し、刈り取ったバイオマスを容器内に入れて燃焼させた。燃焼したバイオマスは火入れ終了後、直ちに回収した。

バイオマスの回収後、乾燥用については木本と草本に分け、乾燥用と燃焼用の両方を乾燥機に入れて 60°C で24時間乾燥させて乾燥重量を測定した。

(2) 土壌調査

2009年度に123箇所すべての調査地点において掛矢を用いて土壌サンプラー(WLS1015)を斜面に対して鉛直方向に打ち込んで土壌を採取した。その後黒ボク土の黒色土層の厚さを測定し、地上から10cmまでの土壌を採取した。さらにバイオマスを刈り取った各調査地点において斜度を測定し、ライン中央の各調査地点において土壌硬度を測定した。

(3) 炭素測定方法

2009年度に採取した土壌試料を乾燥機に入れて 60°C で24時間乾燥させた後、乳鉢内で砕いて $500 \mu\text{m}$ の篩にかけ、植物体や石を除去した。その後CNコーダーを用いて試料(1試料の重量は30~50mg)中の全炭素含有率(%)を測定し、密度(g/cm^3)を求めた。さらに2010年度に採取した乾燥用と燃焼用のバイオマスを乾燥後、石や砂を除去して粉碎機(PS3000S)で粉碎し、CNコーダーで試料(1試料の重量は100~200mg)中の全炭素含有率(%)を測定した。それらを乾燥重量を元にして換算し、火入れによる炭素蓄積量を求めた。また火入れによるバイオマス100gあたりの炭素蓄積量と炭素放出量を求め、炭素収支を算出した。

2009年度に北向き斜面の尾根部と谷部においてそれぞれで18箇所と20箇所、南向き斜面の尾根部と谷部でそれぞれ19箇所と12箇所において採土円筒を用いて地上から5cmまでの土壌を採取した。それらを 60°C で24時間乾燥させた後、 $500 \mu\text{m}$ の篩にかけ、試料中の $500 \mu\text{m}$ よりも大きい植物炭化物を目視で判別して採集し、その重量を測定して密度(g/cm^3)を求めた。

3. 解析方法

すべての統計解析にJMP IN version 8 (SAS Institute 2009)を用い、バイオマス、黒色土層の厚さ、斜度、土壌硬度、火入れによる炭素蓄積量、土壌中の全炭素密度、土壌中の植物炭化物密度、火入れの炭素収支の差の検定に、正規性がみられるものに関してはt-test、正規性がみられないものに関してはMann-Whitney U-testを用いた。

Ⅲ. 結 果

1. バイオマス

表1に地形ごとのバイオマスを示す。合計バイオマス(以後バイオマスとする)は尾根部よりも谷部において多い傾向がみられ、北尾根よりも北谷、南尾根、南谷において多かった($p < 0.01$)。また草本バイオマスも尾根部よりも谷部において多く、北尾根よりも北谷、南谷において多く($p < 0.0001$)、北谷よりも南谷において多かった($p < 0.01$)。図2に地形ごとの斜度を示す。斜度は北谷よりも北尾根において大きく($p < 0.05$)、南谷よりも北尾根、北谷、南尾根において大きかった($p < 0.0001$)。また斜度とバイオマスに負の相関がみられた(図3)。さらに斜度と土壌硬度に正の相関がみられた(図4)。

2. 火入れ地における炭素

図5に地形ごとの火入れによる炭素蓄積量を示す。炭素蓄積量は尾根部よりも谷部において多い傾向がみられ、北尾根よりも南谷において多く($p <$

表1 地形ごとのバイオマス(以後、異なるアルファベットは有意差を示す)

地形	草本(g/m^2)	木本(g/m^2)	合計(g/m^2)
北向き尾根	378.7 \pm 22.5	48.1 \pm 19.2	426.9 \pm 8.6 ^b
北向き谷	639.9 \pm 43.2	77.1 \pm 46.7	717.0 \pm 22.0 ^a
南向き尾根	421.8 \pm 41.7	196.6 \pm 25.5	618.4 \pm 33.9 ^a
南向き谷	624.6 \pm 29.5	30.1 \pm 25.6	654.7 \pm 48.9 ^a
平均	516.3	103.0	516.3

0.0001), 北谷よりも南谷において多く ($p < 0.05$), 南尾根よりも南谷において多かった ($p < 0.01$). 図6に地形ごとの土壌中の植物炭化物密度を示す. 植物炭化物密度は尾根部よりも谷部において高い傾向がみられ, 南尾根よりも北谷, 南谷において高かった ($p < 0.05$). 図7に地形ごとの土壌中の全炭素密度を示す.

全炭素密度は北尾根よりも北谷, 南谷において高く ($p < 0.01$), 南尾根よりも北谷, 南谷において高かった ($p < 0.01$). さらにバイオマスと火入れによる炭素蓄積量 (図8), 火入れによる炭素蓄積量と土壌中の植物炭化物密度 (図9) に正の相関がみられた.

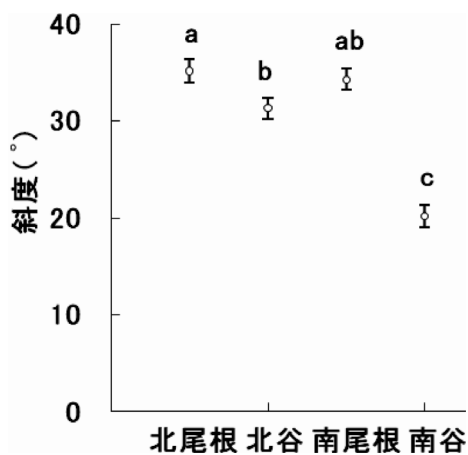


図2 地形ごとの傾度

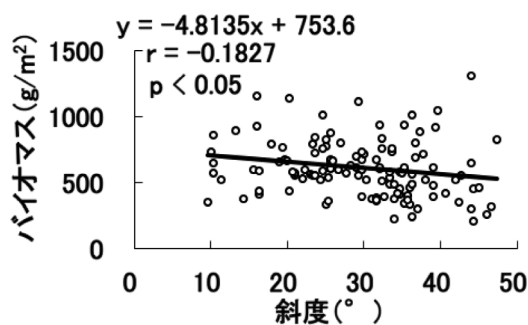


図3 傾度とバイオマスの関係

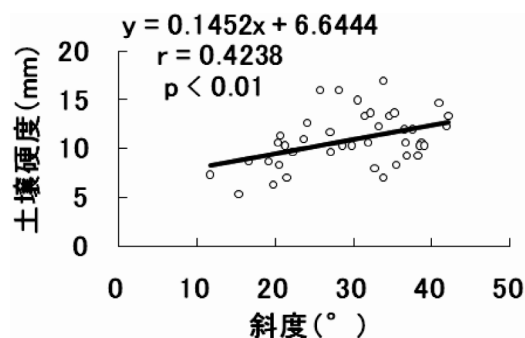


図4 傾度と土壌硬度の関係

3. 黒色土層の厚さ

図10に地形ごとの黒色土層の厚さを示す. 黒色土層の厚さは北尾根よりも北谷, 南谷において厚く ($p < 0.01$), 南尾根よりも北谷, 南谷において厚かった ($p < 0.01$).

また傾度と黒色土層の厚さに負の相関がみられた (図11). さらに土壌中の植物炭化物密度と黒色土層の厚さ (図12), 土壌中の全炭素密度と黒色土層の厚さ (図13) に正の相関がみられた.

4. 火入れの炭素収支

表2にバイオマス 100 当たりの火入れの炭素収支を示す. 炭素収支はすべての地形において正であった. また尾根部よりも谷部において多い傾向がみられ, 北尾根よりも南谷において多く ($p < 0.0001$), 北谷

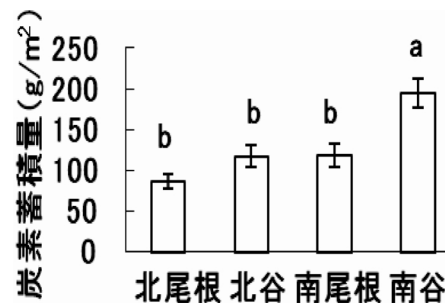


図5 地形ごとの火入れによる炭素蓄積量

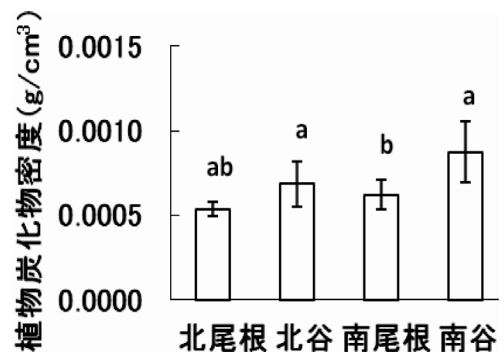


図6 地形ごとの土壌中の植物炭化物密度

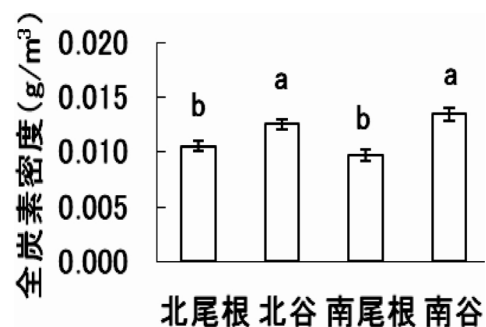


図7 地形ごとの土壌中の全炭素密度

よりも南谷において多く ($p < 0.0001$), 南尾根よりも北尾根, 北谷, 南谷において多かった ($p < 0.05$).

IV. 考 察

1. バイオマスに影響を与える要因

本調査地ではバイオマスは尾根部よりも谷部において多い傾向がみられた (表 1). また地形ごとの斜度は谷部よりも尾根部において大きく (図 2), 斜度とバイオマスに負の相関がみられた (図 3). さらに斜度と土壌硬度に正の相関がみられた (図 4). 一般に尾根部よりも谷部においてバイオマスが多い (Berg and Mcclaugherty 2003). 本調査地におい

ても同様の傾向がみられた (表 1). これらのことは, 斜度が大きいところにおいて土壌水分が少なくなり (宮崎 1984; 窪田 1987), 土壌流出量が多くなるために植被率が低くなる (山田 2003) ことを示している. さらに土壌硬度が大きいところにおいて植生高や植被率が低くなり (根本 1997), 尾根部よりも谷部において土壌水分が多くなる (大久保 2003; 鼻瀬ほか 2004) ことも, 尾根部よりも谷部においてバイオマスが多くなった (表 1) 原因と考えられる. また今回の調査では土壌の流出量を測定するこ

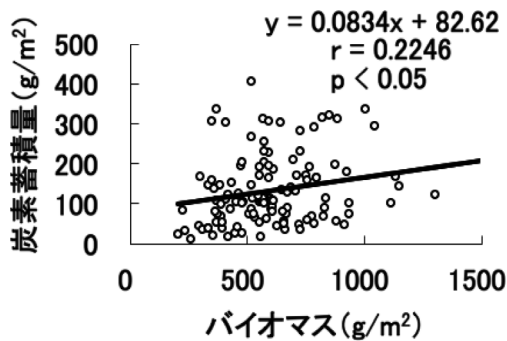


図 8 バイオマスと火入れによる炭素蓄積量の関係

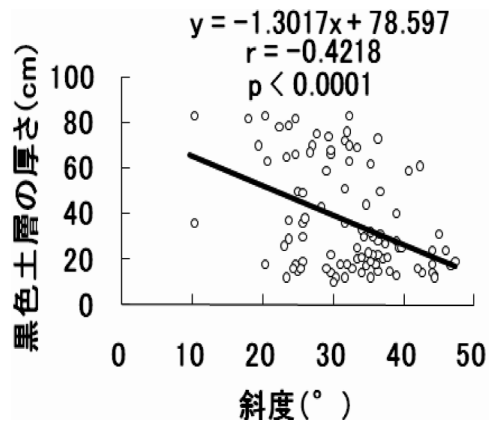


図 11 斜度と黒色土層の厚さの関係

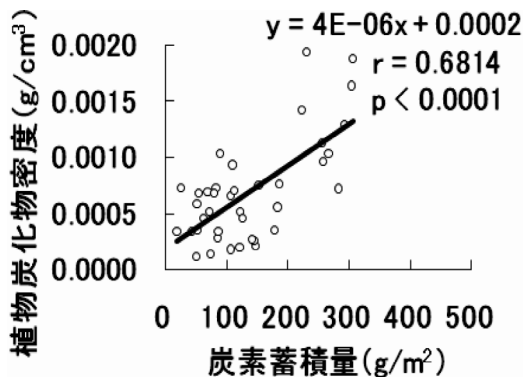


図 9 火入れによる炭素蓄積量と土壌中の植物炭化物密度の関係

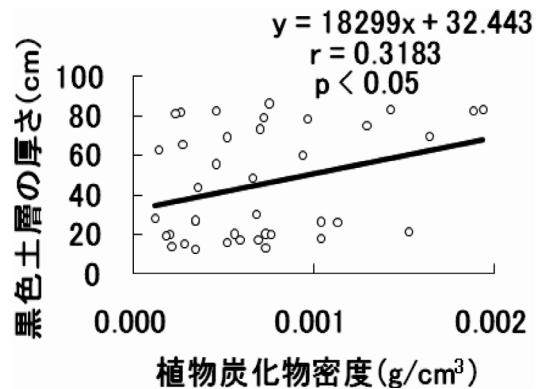


図 12 土壌中の植物炭化物密度と黒色土層の厚さの関係

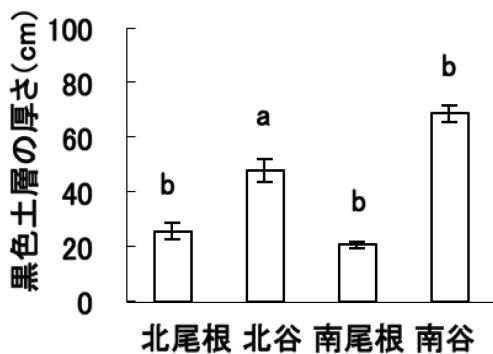


図 10 地形ごとの黒色土層の厚さ

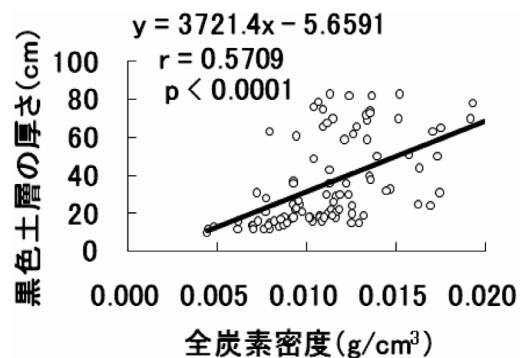


図 13 土壌中の全炭素密度と黒色土層の厚さの関係

表2 バイオマス 100 当たりの火入れの炭素収支

地形	炭素蓄積(g/100 g)	炭素放出(g/100 g)	炭素収支(g/100 g)
北向き屋根	29.4 ±0.9 ^c	16.7 ±1.0 ^b	12.7 ±1.7 ^b
北向き谷	33.7 ±0.6 ^b	12.5 ±1.4 ^c	21.3 ±1.7 ^b
南向き尾根	30.6 ±1.0 ^c	29.8 ±4.1 ^a	0.9 ±4.6 ^c
南向き谷	38.3 ±0.6 ^a	4.0 ±1.8 ^d	34.3 ±2.2 ^a
平均	33.0	15.7	17.3

とができなかったが、岩本 (1987) は土壌が梅雨期の降雨によって多量に流出することを報告しており、長沢ほか (1990) は春先の融雪とともに土壌が多量に流出することを報告している。そのため本調査地でも梅雨期の降雨や融雪によって土壌が多量に流出している可能性がある。

以上のことから、バイオマスは土壌水分量の低下による乾燥や土壌流出によって地形ごとに異なると考えられる。

2. 火入れ地における炭素の蓄積過程と分布様式

バイオマスと火入れによる炭素蓄積量 (図 8)、火入れによる炭素蓄積量と土壌中の植物炭化物密度 (図 9) に正の相関がみられた。これらのことから、バイオマスが多いと火入れによる炭素蓄積量が多くなり、火入れによる炭素蓄積量が多いところにおいて土壌中に蓄積される植物炭化物が多くなると考えられる。すなわち本調査地におけるバイオマスのほとんどは毎年 4 月の火入れによって燃焼するため、多くは植物炭化物となって蓄積すると考えられる。また本調査地では木本バイオマスと、火入れによる炭素蓄積量や土壌中の植物炭化物密度に関係がみられなかった。これらのことから、火入れによる炭素の蓄積には木本バイオマスと草本バイオマスの合計が影響していると考えられる。

本調査地におけるバイオマス (表 1)、火入れによる炭素蓄積量 (図 5) は尾根部よりも谷部において多い傾向がみられた。これらのことから、尾根部よりも谷部において火入れによる炭素蓄積量が多くなったと考えられる。また植物炭化物が尾根部よりも谷部において多量に蓄積する (図 6) ため、土壌中の全炭素密度が尾根部よりも谷部において高くなった (図 7) と考えられる。さらに斜度と黒色土層の厚さに負の相関がみられた (図 11)。このことから斜度が大きいところにおいて土壌が多量に流出する (長沢・梅田 1987) ため、炭素は土壌とともに流出し、地形によってその分布が変化していくと考えられる。

以上のことから、火入れによる炭素蓄積量や生じ

る植物炭化物はバイオマスが多いところにおいて多くなると考えられる。さらに土壌流出によって尾根部よりも谷部において炭素が多量に蓄積すると考えられる。

3. 黒色土層の堆積に影響を与える要因

本調査地では黒色土層の厚さが尾根部よりも谷部において厚く (図 10)、斜度が谷部よりも尾根部において大きかった (図 2)。さらに斜度と黒色土層の厚さに負の相関がみられた (図 11)。これらのことから、斜度が大きいところにおいて土壌が流出しやすい (有馬ほか 2007) ため、尾根部から谷部に向かって土壌が流出し、尾根部よりも谷部において黒色土層が厚くなったと考えられる。

植物炭化物は土壌中に蓄積され、それと結びついて生成される黒色の腐植酸が土壌中に多量に供給される (Shindo 2004)。土壌中の植物炭化物密度と黒色土層の厚さ (図 12)、土壌中の全炭素密度と黒色土層の厚さ (図 13) に正の相関がみられた。これらのことは植物炭化物が多いところにおいて黒色土層が厚く堆積することを示唆している。

火入れ時に残雪があり、バイオマスが燃焼しない地点も生じることがあった。しかし雪の下でも微生物によるバイオマスの分解が生じる (Uchida et al. 2005) ため、火入れ時に雪が残っている地点ではバイオマスが分解され、腐植が蓄積すると考えられる。

以上のことから、黒色土層の堆積には、土壌流出や植物炭化物の蓄積、バイオマスの分解による腐植の蓄積が影響していることが示唆された。

4. 火入れ地における炭素蓄積量

本調査地では火入れによりバイオマス 100 g あたり平均 15.7 g の炭素が放出され、平均 33.0 g の炭素が蓄積し、炭素収支は平均 17.3 g であり、蓄積の方が多かった。特に尾根部よりも谷部において炭素の蓄積が多かった (表 2)。火入れがされていない場所において、オオイタドリ、ヨシ、ササはその 95% が分解されるまでに、それぞれ 6.5, 7.9, 20.5 年か

かる (Oohara et al. 1971). しかし燃焼後に蓄積する植物炭化物は土壌中に 200~2000 年間は分解されずに蓄積する (Yakov et al. 2009). そのため毎年の火入れによって前年度に燃焼しなかったリターが燃焼して植物炭化物が生じている場合, バイオマスが燃焼した場合と分解した場合を比べると, 燃焼した場合の方が長期間蓄積する炭素量が多いと考えられる. また火入れ後に再生した草本植物の根の炭素蓄積量は火入れ前と比べて増加する (Ojima et al. 1994). さらに火入れによって植物や微生物に利用されにくい植物炭化物が多量に供給されるにもかかわらず, 火入れ前の草原よりも火入れ後の草原において土壌中の炭素蓄積量が増加する (Kuo et al. 2008). これらのことから火入れされた草原において土壌中に長期間蓄積される炭素量は火入れされていない草原のものとは比べて増加すると考えられる.

V. 結 論

バイオマスが多いと火入れによる炭素蓄積量が多くなり, 生じる植物炭化物が多くなる. 植物炭化物は尾根部よりも谷部において多量に蓄積し, 土壌中の全炭素密度も尾根部よりも谷部において高かった. 本調査地における火入れによる炭素蓄積量は尾根部よりも谷部において多かった. また全体として, 火入れの炭素収支は蓄積の方が多かった. そのため, 火入れが大気中の二酸化炭素を増加させないことが示唆された.

謝 辞

本研究をすすめるにあたり, 野外調査にご協力いただいた鳥取大学農学部フィールドサイエンスセンター教育研究林「蒜山の森」のスタッフの方々, 森林生態系管理学研究室の大学院生, 学生, 研究生の皆様へ深く感謝いたします.

なお, この研究の一部には平成 21 年度科学研究費補助金 (基盤研究 B, 19380090, 代表 高原 光) の一部を使用させて頂いた.

引用文献

有馬 眞・金子慶之・中村栄子 (2007) 丹沢山系における地質・土壌の地球科学的特性と流域圏の物質動態評価. 文部科学省 21 世紀 COE プログラム「生物・生態環境リスクマネジメント」. 文部科学省: 35-46.

Berg, B. and McLaugherty, C. (2003) 森林生態系の落葉分解と腐植形成. シュプリンガー・フェ

アラーク東京株式会社, 東京.

Brodowski, S., John, B., Flessa, H. and Amelung, W. (2006) Aggregate-occluded black carbon in soil. *Eur. J. Soil Sci.* 57: 539-546.

Cochrane, M. A. and Schulze, M. D. (1999) Fire as a recurrent event in tropical forests of the eastern amazon: effects on forest structure, biomass, and species composition. *Biotropica* 31: 2-16.

Czimczik, C. I., Schmidt, M. W. I. and Schulze, E. D. (2005) Effects of increasing fire frequency on black carbon and organic matter in Podzols of Siberian Scots pine forests. *Eur. J. Soil Sci.* 56: 417-428.

Gregorich, E. G., Greer, K. J., Anderson, D. W. and Liang, B. C. (1998) Carbon distribution and losses: erosion and deposition effects. *Soil Tillage Res.* 47: 291-302.

鼻瀬頼子・藤原宣夫・小栗ひとみ・百瀬浩・宇津木栄津子・大江栄三・井本郁子 (2004) 国営みちのく社の湖畔公園における森林管理計画のための林床植生と環境条件の関係解析. *ランドスケープ研究* 67: 543-546.

波多野隆介・木村真人 (2005) 土壌圏と地球温暖化. 名古屋大学出版会, 名古屋.

Honma, H., Honna, T., Yamamoto, S. and Shindo, H. (2002) Microscopic observation of charred plant fragments isolated from several ando samples by the specific gravity method. *Soil Sci. Plant Nutr.* 48: 871-875.

本間利久・上田英典・渡辺浩太・五十嵐一・福田正巳 (2004) 森林火災の延焼シュミレーション. *自然災害科学* 23: 344-347.

岩本保典 (1987) 大分県飯田高原の火山灰土傾斜畑における土壌浸食の実態と発生要因の究明. *日本土壌肥科学雑誌* 58: 414-419.

加藤 保 (2003) 有機物施用を中心とした土壌管理による土壌への炭素蓄積. *日本土壌肥科学雑誌* 74: 99-104.

川上村史編纂委員会 (1980) 川上村史. 岡山県川上村役場, 岡山.

古林章弘・尾和尚人・金野隆光 (2002) 土壌微生物の発熱特性に及ぼす土壌水分と前培養日数の影響. *日本土壌肥科学雑誌* 73: 765-768.

窪田順平・福嶋義宏・鈴木雅一 (1987) 山腹斜面における土壌水分変動の観測とモデル化. *日本林学会誌* 69: 258-269.

- Kuo, L. J., Louchouart, P., Herbert, B. E. (2008) Fate of cuo derived lignin oxidaiton products during plant combustion: Application to the evaluation of char input to soil oraganic matter. *Org Geochemi* 39: 1522-1536.
- 李 載丈・及川武士 (2004) 草原群落の遷移段階による土壌有機物蓄積量の違いについて. 筑波大学陸域環境研究センター報告: 115-118.
- 松枝秀和 (1998) 森林火災と地球環境. *森林科学* 24: 29-34.
- 宮崎 毅 (1984) 斜面中の水移動. *土壌の物理性* 49: 40-47.
- 長沢徹明・梅田安治 (1987) 山林傾斜地における草地造成と保全: 傾斜草地に関する農業土木的研究 (II). *北海道大学農学部邦文紀要* 15: 159-168.
- 長沢徹明・梅田安治・李 里漫 (1990) 傾斜地試験による土壌流亡挙動の研究 (II): 1989 年春季における流出と侵食. *北海道大学農学部邦文紀要* 17: 129-136.
- Nakagami, K., Hojito, M., Itano, S., Kohyama, K., Miyaji, T., Nishiwaki, A., Matsuura, S., Tsutsumi, M. and Kano, S. (2009) Soil carbon stock in typical grasslands in Japan. *Jap. Soc. Grassland Sci.* 55: 96-103.
- 根本 淳・養父志乃夫 (1997) 武蔵野台地におけるコナラ二次林の林床植生と土壌硬度の関係. *ランドスケープ研究* 60: 531-534.
- Ojima, D. S., Schimel, D. S., Parton, W. J. and Owensby, C. E. (1994) Long-and short-term effects of fire on nitrogen cycling in tallgrass prairie. *Biogeochemi.* 24: 67-84.
- Oohara, H., Yoshida, N., Nam, C. K. (1971) Balance of Producers and Decomposers in a Grassland Ecosystem in Obihiro 1. Energy storage, and the production and decomposition of litter. *Jap. Grassland Sci.* 17: 7-18.
- 大久保悟・神山麻子・北川淑子・武内和彦 (2003) 多摩丘陵におけるコナラ二次林および林縁の草本層種構成と微地形との対応. *ランドスケープ研究* 66: 537-542.
- Ricardo, D. D., Xavier, P. (2001) Spatial patterns of forest fires in Catalonia (NE of Spain) along the period 1975-1995. *For. Ecol. Manage.* 147: 67-74.
- Rumpel, C., Alexis, M., Chabbi, A., Chaplot, V., Rasse, D. P., Valentin, C. and Mariotti, A. (2006) Black Carbon contribution to soil organic matter composition in tropical sloping land under slash and burn agriculture. *Geoderma* 130: 35-46.
- SAS Institute (2009) JMP IN version 8. SAS Institute Cary, USA.
- 佐々木尚子・中野奈緒子・高原 光 (2004) 化石花粉と炭化片から探る「里山」の成立過程—過去 2000 年間の植生と人間の相互作用—. *アサヒビール学術振興財団-研究助成報*: 1-7.
- Shindo, H. (1991) Elementary composition, humus composition, and decomposition in soils of charred grassland plants. *Soil Sci. Plant Nutr.* 37: 651-657.
- 進藤晴夫・牛島夏子・本名俊正・山本定博・本間洋美 (2003) 黒ボク土における植物炭化物の分布と腐食組成あるいは非晶質 Al 成分との関係. *日本土壌肥科学雑誌* 74: 485-492.
- Shindo, H., Honna, T., Yamamoto, S. and Honma, H. (2004) Contribution of charred plant fragments to soil organic carbon in japanese volcanic ash soils containing black humic acids. *Org Geochemi.* 35: 235-241.
- 田村憲司・永塚鎮男・大羽 裕 (1993) 黒ボク土の一般理化学性に及ぼす植生遷移の影響. *日本土壌肥科学会* 64: 166-176.
- 富樫 均・田中養文・興津昌宏 (2004) 長野市飯綱高原の人間活動が自然環境に与えた影響とその変遷. *長野県自然保護研究所紀要* 7: 1-16.
- 鳥取大学 FSC 森林部門 (2009) 蒜山の森における平成 16~20 年の気象観測記録. *広葉樹研究* 13: 47-49.
- Uchida, M., Wenhong, M., Nakatubo, T., Tsuchiya, Y., Horikosi, T. and Koizumi, H. (2005) Microbial activity and litter decomposition under snow cover in a cool temperate broad leaved deciduous forest. *Agricultural and Forest Meteorol.* 134: 102-109.
- Yakov, K., Irina, S., Haiqing, C., Irina, B. and Xingliang, X. (2009) Black carbon decomposition and incorporation into soil microbial biomass estimated by ¹⁴C labeling. *Soil Biol. Biochem.* 41: 210-219.
- 山田康裕 (2003) 列状間伐林における高性能林業機械を用いた集材が林地に与える影響について. *九州森林研究* 56: 74-77.

