植物性発生材の化学的性質および窒素・
マンガン添加が分解特性に及ぼす影響¹高橋輝昌²・新井麻里子^{2,3}・浅野義人⁴・小林達明²

摘要：樹木由来の各種植物性発生材（チップ材、ソメイヨシノ、クスノキ、クロマツそれぞれの枝葉部と幹部）の化学的性質、分解・無機化特性を調査し、それらの関係について検討した。また、無機態窒素（N）や無機態マンガン（Mn）をチップ材に添加することによる分解・無機化の促進効果についても検討した。チップ材の養分含有量は幹部よりも枝葉部に多く、クスノキ枝葉部でもっとも多かった。土壌に混入されたチップ材からの二酸化炭素発生量（C無機化量）は概ねチップ材のC/N比やC/P比と負の相関関係にあった。分解初期（土壌への混入後50日間）のチップ材のC無機化量は無機態N添加によって増加したが、無機態Mn添加の影響を受けなかった。無機態N添加によるC無機化促進効果は、チップ材のC/N比が高いほど大きかった。野外（地表）に設置されたチップ材の重量は、枝葉部では設置後の積算地温とともに減少したが、幹部では微生物によるNの有機化によってC/N比が低下してから減少した。チップ材の重量減少はC/N比、C/P比といった化学的な性質の影響を強く受けていた。

キーワード：チップ材の分解促進、チップ材の分解・無機化特性、チップ材の養分特性、植物性発生材、チップ材

Takahashi, Terumasa, Arai, Mariko, Asano, Yoshito and Kobayashi, Tatsuki : The effects of chemical characteristics of plant waste and addition of nitrogen or manganese on the characteristics of decomposition

Abstract: We investigated the characteristics of nutrition concentrations, decomposition and carbon (C) mineralization of plant waste originated from tree (i.e. wood chip, stems or leaves and branches of *Prunus×yedoensis*, *Cinnamomum camphora* and *Pinus thunbergii*), and discussed the relationships among those factors. Furthermore, we examined the effects of addition of mineral nitrogen (N) or manganese (Mn) to the wood chips on the characteristics of C mineralization. The nutrition concentrations of leaves and branches were higher than those in stems, and showed the highest value in *Cinnamomum*. The amounts of C mineralization of wood chips mixed into soil had negative correlations with the C : N or C : P ratios of the wood chips. The amounts of C mineralizations of wood chips for 50 days after mixing wood chips and soil were accelerated by mineral N addition, and weren't affected by mineral Mn addition. The accelerations of C mineralization by mineral N addition were enhanced with the increases in C : N ratio of wood chips. The weights of wood chips from leaves and branches on surface soil were decreased with increases in accumulated temperature from immediately after the placement. On the other hand, the weight of wood chips from stems were decreased after decreasing in those C : N ratio by immobilization of N. The chemical characteristics of wood chips as C : N ratio or C : P ratio influenced strongly on weight losses of wood chips.

Key words: acceleration of decomposition of wood chip, characteristics of decomposition and mineralization of wood chip, nutrition characteristics of wood chip, plant waste, wood chip

1. はじめに

緑地の樹木管理作業で多量に発生する剪定枝条などの植物性発生材の再利用・有効利用は、緑地面積の拡大、法律による焼却処分規制、環境問題への関心の高まりに伴い重要な課題になっている。

植物性発生材の利用方法として、チップ化した植物性発生材（チップ材）の舗装工材や緑化工材としての利用が考案さ

れ、一部の緑地で実際に行われている¹²⁾。チップ材の性質やリサイクル利用については、これまでに一部の樹種について、堆肥化に伴う諸性質の変化³⁾、舗装材として利用したときの物理的な特性⁴⁾、施用（地表への散布）後のC/N（炭素含有量/窒素含有量）比の変化や地温、水分状態など土壌環境に及ぼす影響²⁾、樹木の生育に及ぼす影響⁹⁾などが調査されている。しかし、現在、多くの都市緑地で行われているような、堆肥化しない生のチップ材を散布したときの分解特性に関す

¹ 本研究の一部は第31回日本緑化学会大会でポスター発表（技術報告）した。本研究の一部は財団法人都市緑化技術開発機構「技術開発基金による調査研究助成」により行われた。

² 千葉大学園芸学部, Fac. of Hort., Chiba Univ.

³ 現：仙台市役所, Present address: Sendai City Office

⁴ 千葉大学大学院自然科学研究科, Grad. Sch. of Sci. and Tech., Chiba Univ.

る知見は十分であるとはいえない。

チップ材の性質として、舗装材として利用されるときには難分解性のものが、土壌改良材として利用されるときには易分解性で養分含有量の多いものがそれぞれ求められる。様々な種類のチップ材の分解特性を把握することは、利用目的に合わせたチップ材の使い分けを可能とし、植物性発生材のより有効なリサイクル利用に役立つ。また、土壌に施用されたチップ材の分解促進技術はチップ材による土壌改良効果を迅速に発揮させるために有益である。

有機物の化学的性質と分解特性の関係について、一般に、C/N 比の高い有機物ほど微生物による分解・無機化をうけにくい⁹⁾。また、森林生態系において、リグニン分解酵素の構成元素であるマンガン含有量の多い落葉ほど微生物による分解をうけた後の残渣が少ないとする報告¹⁾もある。一方、有機物の形、大きさ、乾燥しやすさといった形態的な性質も微生物の生育環境に影響し、ひいては分解されやすさにも影響すると考えられる。

そこで本研究では、堆肥化されていない生のチップ材を対象とし、粉末状に粉碎され、土壌に混入されたチップ材の炭素無機化特性と野外に設置した生のチップ材の分解特性から、チップ材の分解特性に及ぼす化学的性質の影響について検討した。また、粉末状のチップ材に無機態窒素や無機態マンガンを追加することによる炭素無機化特性の変化から、チップ材の分解促進の可能性について検討した。

2. 材料と方法

2.1 チップ材の化学的性質

実験材料には以下に示すような3樹種の各2部分、計6種類の緑化樹の剪定枝条等に由来するチップ材を用いた。「幹部」とは、剪定作業の際の「大枝すかし」や移植時の「切り詰め剪定」、または伐採作業に伴い生じたものをいう¹³⁾。いずれのチップ材についてもチップ化してから数日以内に実験を開始した。落葉広葉樹であるソメイヨシノ (*Prunus × yedoensis* Matsum.) の幹部 (密度 347.0 kg (生重) m⁻³, 含水率 0.412 kg kg⁻¹)、枝葉部 (密度 259.9 kg (生重) m⁻³, 含水率 0.446 kg kg⁻¹)、常緑広葉樹であるクスノキ (*Cinnamomum camphora* Presl.) の幹部 (密度 274.4 kg (生重) m⁻³, 含水率 0.463 kg kg⁻¹)、枝葉部 (密度 277.5 kg (生重) m⁻³, 含水率 0.599 kg kg⁻¹)、針葉樹であるクロマツ (*Pinus thunbergii* Parl.) の幹部 (密度 270.9 kg (生重) m⁻³, 含水率 0.299 kg kg⁻¹)、枝葉部 (密度 277.5 kg (生重) m⁻³, 含水率 0.508 kg kg⁻¹) である。枯死木を原料にしたクロマツ幹部のチップ材では、含水率が他のチップ材よりも低くなった。

各チップ材の全炭素 (C)、全窒素 (N)、全リン (P)、全カリウム (K)、全カルシウム (Ca)、全マグネシウム (Mg)、全ナトリウム (Na)、全マンガン (Mn) 含有量を測定した。

2.2 チップ材の無機化特性

風乾後、粉末状にしたチップ材をチップ材の種類毎に 3.0 g ずつ土壌 50 g (生土, 含水率 0.460 kg kg⁻¹) に混和し、500 ml 容のガラス瓶に入れ、25℃の恒温器内で培養した。

また、チップ材を混和しない土壌についても、同様に培養した。なお、土壌には千葉県松戸市にある千葉大学園芸学部構内で採取した赤土を用いた。培養期間中に土壌およびチップ材から発生する二酸化炭素 (CO₂) 量を密閉アルカリ吸収法¹⁰⁾により測定した。ガラス瓶内に CO₂ 吸収剤として 10 ml の 0.5 N-KOH を入れた 50 ml 容のビーカーを置き、24~72 時間の培養を連続的に行った。滴定には 0.2 N-HCl を用いた。培養 50 日目までのチップ材を混和した土壌からの CO₂ 発生量とチップ材を混和しない土壌からの CO₂ 発生量の差をチップ材の C 無機化量とした。

2.3 無機態 N・無機態 Mn 添加によるチップ材の無機化促進効果の検討

前節と同様にして 3.0 g のチップ材を混和した土壌 50 g に、N 添加の場合には NH₄Cl 粉末 229 mg (N 量で 20 mg) を、Mn 添加の場合には MnCl₂・4H₂O 粉末 162 mg (Mn 量で 15 mg) をそれぞれ加えて混和した。針葉樹由来の有機物を分解する微生物は有機物の C/N 比が 60 程度に低下するまで有機物周辺の無機態窒素を体内に取り込む (N の有機化)¹⁴⁾。そこで、本研究で用いたチップ材のうち、もっとも C/N 比の高いクロマツ幹部の N の有機化に必要な、すなわち C/N 比を 60 程度にするために必要な N 添加量を有機物 3 g に対しておよそ 20 mg と算出し、添加した。また、筆者らが調べたところ、樹木 (葉) に含まれる Mn 含有量は最大でも Nordén¹¹⁾ の報告にみられる 4 mg g⁻¹ 程度と考えられた。そこで、本研究ではこれにほぼ相当する Mn 量を添加した。チップ材の C 無機化量を前述の方法により求めた。

2.4 野外でのチップ材の分解特性

20 cm × 20 cm のナイロンネット (1.0 mm メッシュ) 製の袋 (以下、バッグ) にチップ材を種類毎に生重で 100 g ずつ入れ、1999 年 5 月 28 日に千葉大学園芸学部 (千葉県松戸市) 構内の裸地の地表に露出した状態で固定して設置した。同年 11 月 12 日まで 2~4 週間の間隔でバッグを回収し、内容物 (チップ材) の乾燥重量を測定した。設置前の乾燥重量に対する回収時の乾燥重量の割合を残存率とした。

バッグの設置と同時に地表温度を温度センサーとデータロガー (オンセットコンピュータ社製 TMC6-HA と H08-006-04) を用いて 1 時間毎に測定した。また、1 時間毎の地温を積算して、積算地温を算出した。

7 月 23 日、9 月 18 日、11 月 12 日回収のチップ材について、全 C、全 N 含有量を測定した。

3. 結果と考察

3.1 チップ材の化学的性質

チップ材の元素含有量を表-1 に示す。いずれの樹種でも、C を除く元素の濃度は幹部よりも枝葉部で高くなった。P、K、Ca、Mg 濃度はクスノキ枝葉部でもっとも高く、クロマツ幹部でもっとも低くなった。これらの結果は、堤¹⁵⁾ が指摘するような、常緑針葉樹の葉の養分含有量が落葉広葉樹や常緑広葉樹に比べて低いこと、落葉広葉樹の葉の N、P、K 含有率が常緑広葉樹や常緑針葉樹よりも高いこと、常緑針葉

表-1 チップ材の元素含有量

Table 1 Elements concentration of wood chips

Species	Part	C	N	P	K	Ca	Na	Mg	Mn	C : N ratio	C : P ratio
(g kg ⁻¹)											
<i>Prunus</i> *	Stems	470.2	1.70	0.11	1.02	6.29	0.03	0.59	trace	277.2	4273.6
	Branches and leaves	460.3	6.57	0.32	3.75	11.97	0.06	1.57	trace	71.2	1322.4
<i>Cinnamomum</i> **	Stems	393.6	1.14	0.10	3.02	6.83	0.07	1.45	trace	349.6	3737.8
	Branches and leaves	444.6	10.82	0.44	10.26	15.43	0.14	2.10	0.01	41.1	1017.7
<i>Pinus</i> ***	Stems	487.3	1.34	0.03	0.53	2.25	0.06	0.32	trace	364.6	18060.8
	Branches and leaves	445.2	6.32	0.23	2.90	7.16	0.19	1.38	0.06	70.5	1918.3

*, *Prunus* × *yedoensis* Matsum.; **, *Cinnamomum camphora* Presl.; ***, *Pinus thunbergii* Parl.

樹の枝、幹の N 含有率が落葉広葉樹や常緑広葉樹よりもやや低いこと、といった特徴とはほぼ一致する。土壌への養分供給量を多くするには広葉樹の枝葉部のチップ材散布が有効である。前述のように、本研究ではクスノキ枝葉部の元素含有量が他の樹種に比べて特に高くなっていた。これらの養分含有量には樹体に含まれる養分含有量のほかに、それぞれのチップ材の葉と枝の割合が影響していることも考えられる。

有機物の分解され易さや分解程度の指標とされる C/N 比をみると、いずれの樹種でも枝葉部よりも幹部で高かった。枝葉部の C/N 比はクロマツとソメイヨシノではおよそ 70 であるのに対し、クスノキでは 41 であった。幹部の C/N 比はクロマツ、クスノキではそれぞれ 365, 350 であるのに対し、ソメイヨシノでは 277 であり、低めであった。このように、同じ幹部であっても樹種によって C/N 比には差がみられた。有機物が土壌微生物の作用によって分解される際に、有機物中の N と P は相互に関連を持ち、量的には同じような変化をたどる。したがって、C/P 比も C/N 比と同様に有機物の分解され易さや分解程度の指標となりうる⁶⁾。チップ材の C/P 比をみると、C/N 比と同様に幹部で高く、枝葉部で低い傾向にあった。枝葉部の C/P 比はクスノキ (1018), ソメイヨシノ (1322), クロマツ (1918) の順に高くなった。幹部の C/P 比はクロマツで 18061 であり、ソメイヨシノのおよそ 4 倍、クスノキのおよそ 5 倍高かった。

3.2 チップ材の無機化特性

土壌に混入したチップ材からの CO₂ 発生量を積算して算出した C 無機化量を図-1 に示す。いずれの樹種でも幹部のチップ材の C 無機化量は枝葉部のチップ材よりも少なかった。部位毎にみると、幹部ではソメイヨシノ > クスノキ > クロマツの順で、また、枝葉部ではクスノキ > クロマツ > ソメイヨシノの順で C 無機化量はそれぞれ少なくなった。

チップ材の C/N 比と C 無機化量の関係を図-2 に示す。チップ材の C/N 比と C 無機化量は負の相関関係 ($R^2=0.899$) にあった。チップ材の C/P 比と C 無機化量の間にも負の相関関係がみられたが (図省略), C/N 比と C 無機化量の関係 (図-2) に比べると、やや不明瞭 ($R^2=0.612$) であった。このように、チップ材の無機化特性はチップ材の化学的性質、特に C/N 比の影響を強く受けていた。街路樹剪定枝条の C/N 比と剪定枝条の C 無機化特性の関係を調べた藤原・鎌田³⁾ も、同様の傾向を報告している。

図-1 チップ材の C 無機化量

Fig. 1 C mineralization rates of wood chip.

図-2 チップ材の C/N 比と C 無機化量の関係

○ ソメイヨシノ枝葉部, ● ソメイヨシノ幹部, △ クスノキ枝葉部, ▲ クスノキ幹部, □ クロマツ枝葉部, ■ クロマツ幹部

Fig. 2 Relationships between C : N ratios and C mineralization rates of wood chip.

○ leaves and branches of *Prunus*, ● stems of *Prunus*, △ leaves and branches of *Cinnamomum*, ▲ stems of *Cinnamomum*, □ leaves and branches of *Pinus*, ■ stems of *Pinus*.

3.3 無機態 N・無機態 Mn 添加によるチップ材無機化促進効果の検討

図-1 に示したチップ材の C 無機化量に対する、無機態 N または無機態 Mn 添加時のチップ材の C 無機化量の比 (添

表-2 チップ材のC無機化量における無機態N添加/無添加比および無機態Mn添加/無添加比

Table 2 The mineral N addition : additive-free ratios and the mineral Mn addition : additive-free ratios in C mineralization rates of wood chips

Species	Part	Mineral N addition : additive-free ratio	Mineral Mn addition : additive-free ratio
<i>Prunus</i> *	Stems	4.14	0.93
	Branches and leaves	3.41	0.96
<i>Cinnamomum</i> **	Stems	6.98	0.87
	Branches and leaves	2.95	0.84
<i>Pinus</i> ***	Stems	5.92	1.08
	Branches and leaves	2.74	0.95

*, *Prunus* × *yedoensis* Matsum.; **, *Cinnamomum camphora* Presl.; ***, *Pinus thunbergii* Parlat.

加/無添加比)を表-2に示す。チップ材のC無機化量はいずれの樹種、部位に関わらず、無機態Nを添加することによって、2.7~7倍に増加した。土壌中の微生物は土壌中の無機態Nを取り込みながらC/N比の高い有機物を分解・無機化することが知られている(Nの有機化)⁵⁾。無機態Nの添加は土壌微生物によるNの有機化を促進させ、チップ材のC無機化量を増加させたと考えられる。これに対して、無機態Mnを添加してもC無機化量は増加しなかった。有機物分解の進行に伴って土壌中で優勢な糸状菌の種類は、ステージ1:糖類などを分解するもの→ステージ2:セルロースを分解するもの→ステージ3:リグニンを分解するもの、と変化する⁵⁾。本研究では土壌にチップ材を添加してから50日目までのC無機化量を測定の対象としたため、リグニンを分解する(Mnを使ってリグニン分解酵素をつくる)微生物が優勢になっておらず、Mn添加の効果があらわれなかったことが考えられる。また、添加するMnの形態や量、CO₂放出量の測定方法を変えてMn添加の効果について検討する必要もあろう。

チップ材の無機態N添加/無添加比はチップ材のC/N比が高いほど大きかった(図-3)。このことから、無機態N添加

図-3 チップ材のC/N比とC無機化量の無機態N添加/無添加比の関係
凡例は図-2と同じ。

Fig. 3 Relationships between C : N ratios and mineral N addition : additive-free ratios in C mineralization rates of wood chip.

Legends are the same as in Fig. 2.

によるチップ材の分解・無機化促進効果は枝葉部由来のチップ材よりも幹部由来のチップ材で得られやすい。

3.4 野外でのチップ材の分解特性

バッグ内のチップ材の分解率を図-4に、バッグ設置地点の地温(地表)と日降雨量の経時変化を図-5に、バッグ内のチップ材のC、N含有量、C/N比の経時変化を図-6にそれぞれ示す。なお、日降雨量の測定値(図-5)には本試験地から南西におよそ17km離れた東京での気象庁による測定値⁷⁾を用いた。枝葉部のチップ材はバッグ設置直後から急激に分解された。11月19日(バッグ設置後24週目)の分解率(100-残存率(%))はソメイヨシノで52.1%、クスノキで54.4%、クロマツで47.6%となった。数種類の植物廃棄物の堆肥化について調査した鬼頭・吉田⁸⁾によれば、植物遺体の分解は3カ月間の調査期間のうち、土壌への埋設直後の1カ月間でもっとも大きい。本研究での枝葉部のチップ材の分解もバッグ設置直後に急激に進行した。これは調査期間後半の地温の低下(図-5)に加えて、チップ材に含まれる易分解性有機物の多くがバッグ設置直後に急激に分解されたためと考えられる。幹部のチップ材の分解は9月18日(バッグ設置後16週目)までほとんど進行しなかったが、その後、促進された。幹部のチップ材の分解が活発化し始めた9月中旬以降には、地温の低下と降雨量の減少(図-5)に伴うチップ材の乾燥によって、微生物活動は不活発になりつつあったと考えられる。9月18日には、幹部のチップ材のC/N比はC含有量の減少とN含有量の増加によってバッグ設置時のおよそ1/3~1/6に減少していた(図-6)。このことから、幹部の

図-4 チップ材分解率の経時変化

凡例は図-2と同じ。

Fig. 4 Temporal changes in decomposition rate of wood chip.

Legends are the same as in Fig. 2.

図-5 降雨量と地表温度の経時変化

Fig. 5 Temporal changes in rainfall and temperature at ground level.

図-6 チップ材の C, N 含有量, C/N 比の経時変化

凡例は図-2 と同じ。

Fig. 6 Temporal changes in C, N concentrations and C : N ratio.
Legends are the same as in Fig. 2.

チップ材は分解微生物の N の有機化によって、C/N 比を低下させたために、地温の低下や降雨量の減少に関わらず急激に分解されたと推察される。

積算地温とチップ材の残存率の関係を図-7 に示す。幹部のチップ材では積算地温 68,000°C 付近から残存率が減少した。堤・岡林¹⁶⁾ は樹木の新鮮落葉を用いた分解実験の結果から積算地温 (X) と残存率 (Y) が

$$\log Y = a - bX \quad (a, b: \text{定数})$$

の関係にあることを示した。本研究でも枝葉部のチップ材で

図-7 積算地温とチップ材残存率の関係
凡例は図-2 と同じ。

Fig. 7 Relationships between accumulated temperatures and weight remaining rates of wood chip.

Legends are the same as in Fig. 2. Regressions : ○ (solid line) $\log Y = 1.945 - 2.228 \times 10^{-6}X$ ($R^2 = 0.755$, $p < 0.01$), △ (chain line) $\log Y = 1.936 - 2.691 \times 10^{-6}X$ ($R^2 = 0.883$, $p < 0.01$), □ (dotted line) $\log Y = 1.944 - 2.364 \times 10^{-6}X$ ($R^2 = 0.837$, $p < 0.01$).

図-8 チップ材の C/N 比と分解率の関係

凡例は図-2 と同じ。

Fig. 8 Relationships between C : N ratios and decomposition rates of wood chip.

Legends are the same as in Fig. 2.

同様の関係がみられた。

11 月 12 日 (バッグ設置後 24 週目) における各種チップ材の分解率とバッグ設置時のチップ材の C/N 比の関係を図-8 に示す。チップ材の C/N 比と分解率は負の相関関係にあった。また、チップ材の C/P 比も分解率と負の相関関係にあった (図省略)。このことから、本研究ではチップ材の化学的性質が分解に強く影響していた。

本研究では少量のチップ材をナイロンネット製の袋に詰めた状態で分解させたため、実際の緑地での敷きならしと比較してチップ材と土壌との接触面が大きくなっている。今後、実際の敷きならしに近い状態でのチップ材の分解特性を調査する必要がある。