

木材の液化技術を利用したスギ伐根材の再資源化

栗本 康司¹・山内 秀文²・佐々木 貴信³・金高 悟⁴

¹正会員 博(農) 秋田県立大学准教授 木材高度加工研究所(〒016-0876 秋田県能代市海詠坂 11-1)

E-mail:kuri@iwt.akita-pu.ac.jp

²正会員 博(農) 秋田県立大学准教授 木材高度加工研究所(〒016-0876 秋田県能代市海詠坂 11-1)

³正会員 博(工) 秋田県立大学准教授 木材高度加工研究所(〒016-0876 秋田県能代市海詠坂 11-1)

⁴秋田県立大学主任 木材高度加工研究所(〒016-0876 秋田県能代市海詠坂 11-1)

土砂など異物を含み材質が均等でない伐根材を土木資材として再資源化するための手法を開発した。本手法では、道路建設に伴って排出されたスギ伐根材を用いて、木材-ウレタン樹脂複合体の骨材となる木質部材を調製すると共に、その骨材同士を接着するウレタン樹脂も伐根材を液化することにより得た液化物から合成した。試作した木材-ウレタン樹脂複合体は、マルチングおよび歩道材料として利用可能なことが、屋外での施工および長期の耐久性評価を通して明らかとなった。今後も耐久性の評価を継続するが、法面の防草資材や屋上緑化基盤材など親環境型素材としての用途開発を進めることが可能と考えられた。

Key Words : *sugi, stubs and roots, recycling of waste wooden materials, wood-polyurethane resin composite, wood-liquefaction*

1. はじめに

建設工事に伴い副次的に得られる「建設副産物」のうち「建設発生木材」の再資源化率は低く(平成12年度で38%¹⁾), これを引き上げることが課題となっている。しかしながら、道路建設などの大規模工事に伴って排出される伐根材のような廃材は、土砂、樹皮、材部などが混在しているため、木質ボードなど工業資材への再資源化には多くの問題点を抱えている。一部では堆肥化などの例があるものの利用の限られた資源である。

我々は木材の液化技術を木質廃材の再資源化法として適用することを提案している。本手法²⁾では、伐根材の破砕物から木材-ウレタン樹脂複合体の骨材となる木質部材を調製して利用すると共に、その骨材同士を接着するウレタン樹脂も廃材を液化することにより得た液化木材から合成するものである。

木材の液化は、多価アルコール類を溶媒として、常圧下で酸触媒と共に加熱することにより黒色の液状生成物(液化木材)を得る技術である³⁻⁶⁾。この液化木材は、液化に用いた溶媒と加溶媒分解した木材成分の混合物から成り、溶媒の水酸基に加えて液化した木材成分中にも反応性に富む水酸基を持っている。従って、こうした官能基を利用してイソシアネートと反応させることによりフィルム、発泡体、接着剤などの高分子材料に転換すること

ができる⁷⁾。また、反応により得られる樹脂は生物崩壊性を持つことも知られている⁸⁾。

本研究では、土砂等の異物を含み材質が均等でないスギ伐根材を用いて、マルチングおよび歩道材料を目的とした多孔質の木材-ウレタン樹脂複合体の試作と実施工を行った結果について報告する。

2. 実験方法

(1) 供試材料とその調製

山間部の道路建設に伴って排出されて間がなく腐朽も見られないスギ抜根材を、インパクトクラッシャー式の大破砕機で破砕したのち以下の実験に供した。尚、石のような目につく異物を除いたあとの破砕物に含まれる無機質重量(伐根材の灰分は含まない)はおおよそ1%であった。

まず破砕物を、チップスクリーンを用いて10 mm以下、10-40 mm、40 mm以上の3つに分画した。さらに10 mm以下に分画した一部からメッシュスクリーンを用いて1-10 mm画分を調整した。1-10 mmと10-40 mmの2つの画分は木材-ウレタン樹脂複合体の骨材に、10 mm以下の画分は液化処理しウレタン樹脂接着剤を調製するためのポリオール原料とした。図-1に材料調製の概要を示す。

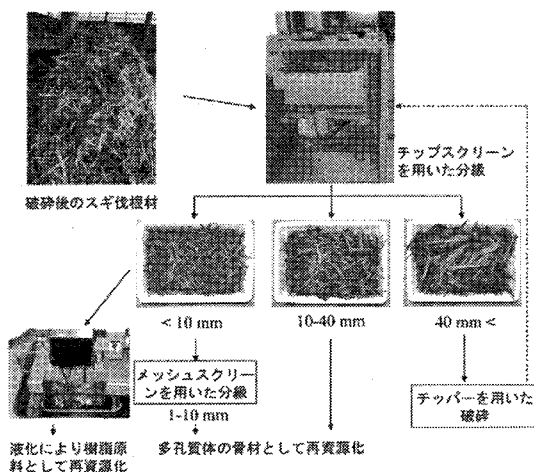


図-1 材料の調製方法の概要

(2) 伐根材の液化

絶乾にした伐根材（10 mm 以下の画分）300 g と液化溶媒 750 g（ポリエチレングリコール 400：グリセリン：硫酸 = 90：10：1，重量比）を加熱式ニーダーを用いて液化処理（200℃，90分）した。

伐根材の液化率と得られた液化木材の水酸基価，酸価，含水率，粘度は以下のようにして評価した。

a) 液化率の測定⁹⁾

およそ 10 g の液化木材を 50 ml の 1-4 ジオキサンに溶解したのちガラスフィルター（TOYO GA100：ポアサイズ 1.0 μm）を用いて濾過した。未溶解残渣は濾液の色が透明になるまでジオキサンで洗浄を繰り返した。その後，残渣を 105℃で乾燥し，式（1）により液化率を求めた。

$$\text{液化率} = (1 - W_r / W_s) \times 100 \quad (1)$$

ここで， W_r は未溶解残渣の重量（g）， W_s は液化木材中の伐根材重量（g）。

b) 水酸基価の測定⁹⁾

液化木材 1 g とフタル化剤 25 ml をビーカーに入れて 110℃のホットプレート上で 20 分間加熱した。反応終了後，50 ml の 1-4 ジオキサンと脱イオン水 25 ml を加え，1N の水酸化ナトリウム水溶液で滴定し残存しているフタル化剤の当量点を求めた。尚，フタル化剤は無水フタル酸 150 g，イミダゾール 24.2 g，1-4 ジオキサン 1000 g を混合して調製した。また，水酸基価は式（2）により算出した。

$$\text{水酸基価} = (B - A) \times N \times 56.1 / W + \text{酸価} \quad (2)$$

ここで， A はフタル化後試料の水酸化ナトリウム水溶液滴定量（ml）， A はブランクの水酸化ナトリウム水溶液

液滴定量（ml）， N は水酸化ナトリウム水溶液の規定度， W は液化木材の重量（g）。

c) 酸価の測定⁹⁾

液化木材 8 g に 1-4 ジオキサン 80 ml と脱イオン水 20 ml を加えてよく攪拌した後，1N の水酸化ナトリウム水溶液で滴定し当量点を求めた。酸価は式（3）により算出した。

$$\text{酸価} = (C - B) \times N \times 56.1 / W \quad (3)$$

ここで， C はサンプルの水酸化ナトリウム水溶液滴定量（ml）， A はブランクの水酸化ナトリウム水溶液滴定量（ml）， N は水酸化ナトリウム水溶液の規定度， W は液化木材の重量（g）。

d) 含水率の測定⁹⁾

Karl Fischer 水分計（京都電子 MKS-210）を用いて液化木材の含水率を求めた。

e) 粘度の測定⁹⁾

液化木材を 25℃に調整したあと，Brookfield 粘度計（HAT model）を用いて粘度を測定した。

(3) 木材-ウレタン樹脂複合体の調製

表-1 に示す配合に従い 2 種類の木材-ウレタン樹脂複合体を調製した。試験体 A は 10-40 mm 画分のみを骨材として用いるものである。試験体 B は，その芯層部が試験体 A と同じであるが，表層部（片面のみ）に 1-10 mm 画分を用いて複合化した。尚，試験体の樹脂添加量（芯層材で絶乾重量に対して 20 wt%）と樹脂化処方（イソシアネート基（NCO）/水酸基（OH）比 = 1.4）は既報²⁾の結果を適用した。

試験体 A の調製手順の概略を図-2 に示す。所定量の液化木材とイソシアネート（WC-300：日本ポリウレタン

表-1 木材-ウレタン樹脂複合体の配合と密度

試験体	配合 (kg)				密度 ²⁾ (g/cm ³)
	伐根骨材 ¹⁾	液化木材	イソシアネート ²⁾		
A	10-40mm	1.41	0.126	0.144	0.23
B	表層材 (1-10mm)	0.16	0.016	0.018	0.24
	芯層材 (10-40mm)	1.31	0.115	0.131	

¹⁾表層材含水率：8.8%；芯層材含水率：6.0%。

²⁾WC-300（日本ポリウレタン製），NCO/OH 比=1.4 に設定。

$$\text{NCO/OH} = \frac{M_{\text{MDI}} \times W_{\text{MDI}}}{M_{\text{Poly}} \times W_{\text{Poly}} + W_{\text{Water}} \times 2 / 18 \times 1000}$$

ここで， M_{MDI} は WC-300 中のイソシアネート基濃度（7.10 mmol/g）， M_{Poly} は液化木材中の水酸基濃度（4.70 mmol/g）， W_{MDI} ， W_{Poly} ， W_{Water} はそれぞれ WC-300，液化木材，液化木材中の水分重量。

³⁾多孔質体の外寸：300(L) × 300(W) × 80(T) mm。

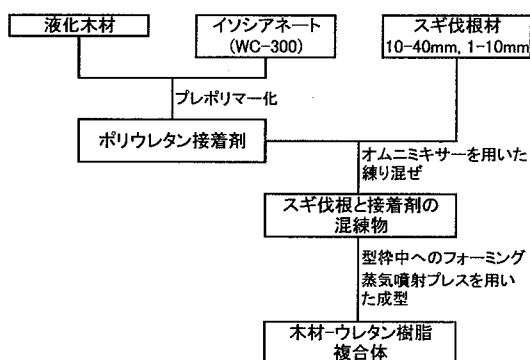


図-2 木材-ウレタン樹脂複合体の調製過程

製、イソシアネート基 (NCO) 含有率 = 29.8%) を高速攪拌 (8000 rpm, 1.5 分) してプレポリマー化したのち、オムニミキサー (30L) を用いて骨材と練混ぜた (1 分)。その後、練混ぜを終えた材料を底面が 300 × 300 mm の型枠中に手でフォーミングし、蒸気噴射プレスを用いて 80 mm まで圧縮し加熱成型した。成型条件は、熱板温度 130 °C, 蒸気圧 0.12 MPa, 蒸気噴射時間 20 秒, 全プレス時間 3 分とした。

試験体 B の調製では、フォーミング条件のみを試験体 A の調製方法と変更した。すなわち、1-10 mm の表層材を型枠の下面にフォーミングしたのち 10-40 mm の芯層材をフォーミングし蒸気噴射プレスを用いて一体成型した。

図-3 に作成した試験体 A と試験体 B の外観を示す。

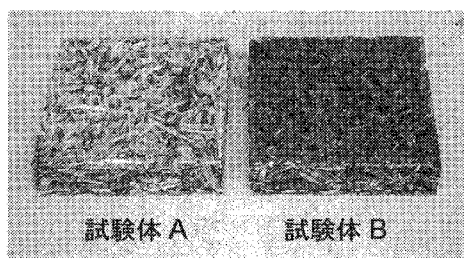


図-3 試作した木材-ウレタン樹脂複合体

(4) 曲げ試験

骨材が試験体の周辺部に型枠に沿って配向することがあるため、試験体の基準強度は、幅 120 mm, 長さ 300 mm に切り出した試験片を用い、曲げ試験により求めた。試験時のスパン長は 240 mm とし、2.0 mm/min の速度で負荷した。

また、施工実験に伴う試験体の強度は、成型体をそのまま用いて曲げ試験することで求めた。スパン長と荷重速度は基準試験と同じとした。

曲げ強度 (MOR) は最大荷重値 (P_{max}) から算出した。同じく曲げヤング率 (MOE) は、S-S 曲線における P_{max} の 20-50% 荷重域が直線域と見なすことが出来たので、これと変位が成す直線の傾きから算出した。

(5) 透水率試験

「インターロッキングブロック」(日本建築学会 JASS 7M-101) の試験方法に準じ透水係数を求めた。試験体の面積は 150 × 150 mm とした。

3. 結果と考察

(1) 液化木材の性質

スギ伐根材から調製した液化木材の物性を表-2 に示す。伐根材の液化率はおおよそ 50% である。スギの材部を伐根材と同様の条件で液化した場合、その液化率は 92% に達することから両者の液化挙動が大きく異なることがわかる。本実験では、伐根材全体に占める樹皮の割合を評価していないものの、これまでの知見から、直径 15mm 程度の根で樹皮の割合が 43%、これより細い細根で 90% 以上あることが分っている。また、樹皮のみの液化率が 30% 程度であったことから、液化率の違いは混入している樹皮の影響が最も大きいと考えられた。

粘度も 62.8 Pa·s と高い数値であるが、粘度の違いが得られる試験体の曲げ特性に影響しなかったため²⁾減粘剤による粘度調整を行わなかった。また、触媒として用いた酸も曲げ特性に影響しなかったことから²⁾中和処理も行わなかった。

表-2 伐根材から調製した液化木材の物性

水酸基価 (mg KOH/g)	酸価 (mg KOH/g)	水分 (%)	粘度 (Pa·s 25 °C)	液化率 (%)
263.6	0.8	1.1	62.8	49.5

(2) 試作試験体の曲げ特性

本実験では、試験体の外寸法を 300(L) × 300(W) × 80(T) mm に設定した。また、試験体の曲げ特性は、既報²⁾の結果から MOE で 10 MPa 程度を目標とし、試験体 A と試験体 B 芯層の密度を 0.23 g/cm³ とした。

ここで用いた骨材は既報²⁾で用いたものと同じサイズである。しかしながら、成型体の外寸法が報告 (400 × 400 × 100 mm) よりかなり小さい (容積比で 0.45)。そこで試験体 A から切り出した供試体の密度と MOE または MOR の関係 (□) を、400 × 400 × 100 mm 成型体のそれら (■) と比較して図-4 に示した。図中の破線は 400 × 400 × 100 mm 成型体における密度と MOR

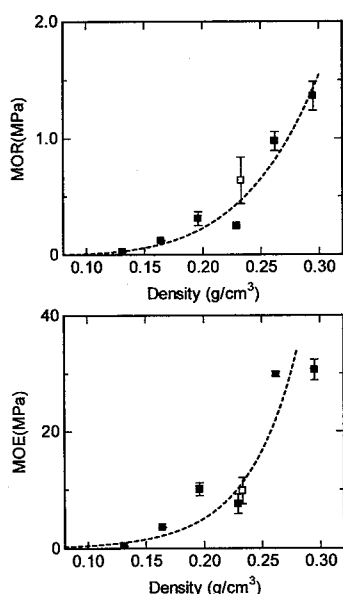


図-4 木材-ウレタン樹脂複合体の密度と曲げ性能の関係

または MOE の関係を近似したものである。図から明らかなように試験体 A の MOE と MOR はこれら線上から大きくずれることがなく、今回の検討では成型体が小さくなったことによる曲げ特性への影響は小さい。また、この結果は、成型体サイズの制限はあるものの、強度特性の制御が密度をコントロールすることで達成できることを示している。

(3) 試作試験体の実施工と耐久性の評価

a) マルチング材としての利用

試験体 A をマルチング材として用いた実施例を以下に示す。図-5 は試験体を敷設している状況と施工後の全景である。施工では、再生クラッシャーラン (RC-40, 150 mm 厚さ) の路盤上にクッション砂で不陸調整 (30 mm

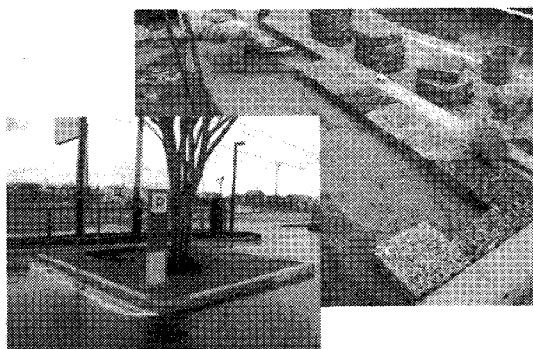


図-5 国土交通省東北地方整備局能代河川国道事務所で
の施工 (植込み部)

厚さ) したあとに試験体を敷設した。敷設作業中やその後の締め固め (転圧) など、一連の作業を通して試験体が破損することは無く、通常のインターロッキングブロックを施工するのと同様要領で作業できた。また、試験体を同サイズのコンクリート平板と比べると、その重量が軽いため敷設作業は非常に容易であった。一方、作業性が悪化した点として、試験体の表面が平滑で無いため目地埋め作業にやや時間を要することが判った。

施工は 2004 年の 12 月 16 日に行い、これまでに約 1 年 3 ヶ月が経過している。施工後数ヶ月で光劣化による表面骨材の白化が認められると共に一部剥離した部分も見られた。しかしながら、冬期間の凍結に起因する試験体の盛り上がりや層間剥離など、使用不能となるような著しい劣化は発生していない。図-6 に示すように目地部には雑草の生育が認められるものの試験体表面にはほとんど生育が無く、マルチング材としての十分な効果があることを確認できた。



図-6 国土交通省東北地方整備局能代河川国道事務所で
の施工 (フラッグポール周辺部)

b) 歩道材としての利用

歩道材料に成型体を用いた実施例を図-7 に示す。施工場所は熱帯植物園内 (ガラス温室) の散策路の一部である。ここではハイヒール等での歩行に支障がないよう表面の平滑性を確保した試験体 B を用いた。施工はマルチング材と同様に行ったが、一連の作業を通じて破損等のトラブルは無かった。

施工は 2005 年の 3 月 15 日に行った。温室内の気温と相対湿度は高く (夏期: 25℃~30℃, 80%RH; 冬期: 20℃, 70%RH; 年間を通し毎朝散水), 耐久性の観点からは厳しい使用環境である。また入園者が多く、施工後数ヶ月して通行量の多い試験体の角部分で表層骨材が剥離した。さらに、ガラス温室の構造から結露水が特定の場所に継続的に落下することによっても表層材の剥離が認められた。これら欠損部に山砂を入れて補修を行ったところ (図-7 右側), 歩道材と色の差ができて景観上の

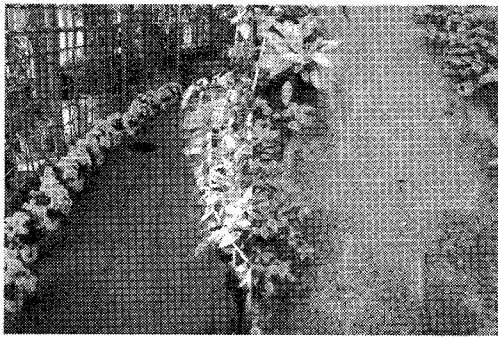


図-7 東北電力能代発電所能代エナジウムパークでの施工（熱帯植物園内の遊歩道）
左：施工直後；右：約3ヶ月後

差異を生じたものの、剥離が抑制され、施工後約1年を経過した時点でも交換の必要がなく使用を続けている。

c) 耐久性の評価

これまで試験体 A と試験体 B を用いた施工と時間経過に伴う外観の変化を主に述べた。次に、それぞれの施工箇所から数体の試験体を抜き取り曲げ試験と透水性試験に供した結果を表-3、表-4 に示す。尚、施工箇所から得た試験体と含水条件を近くするため、施工前試験体（コントロール）を2昼夜水に浸漬したあと、強度と透水係数の測定を行った。また、各項目の数値は3体の平均値である。

表-3 試験体 A の時間経過に伴う物性の変化

	経過時間 (day)	MOR (MPa)	MOE (MPa)	透水係数 (cm/s)	重量 (Kg)
施工前	0	0.37	7.12	1.36	3.33 ¹⁾
施工後	463	0.40	5.12	0.83	4.35 ²⁾
保持率 ³⁾ (%)		108	72	61	

¹⁾2 昼夜浸漬後の試験体重量

²⁾供試体の重量

³⁾施工後の値/施工前の値 × 100

表-4 試験体 B の時間経過に伴う物性の変化

	経過時間 (day)	MOR (MPa)	MOE (MPa)	透水係数 (cm/s)	重量 (Kg)
施工前	0	0.34	7.40	0.83	3.48 ¹⁾
施工後	376	0.25	2.23	0.66	2.55 ²⁾
保持率 ³⁾ (%)		74	30	80	

¹⁾2 昼夜浸漬後の試験体重量

²⁾供試体の重量

³⁾施工後の値/施工前の値 × 100

施工前後の物性を比較すると、マルチング材として用いた試験体 A で MOR は同等、MOE は7割まで減少した。透水係数も減少し保持率は約6割であった。一方、歩道材として用いた試験体 B では、MOR と MOE の保持率はそれぞれ7割と3割であった。表層材の違いを考慮しても試験体 A より試験体 B の方が強度低下の割合が大きいと判断できる。この違いは、歩行による負荷に加えて環境条件が影響したものと考えられる。透水係数の保持率は8割で、透水性の低下は比較的小さかった。

以上の結果をまとめると、試験体 A では強度の低下よりも透水性の低下が割合として大きい。一方、試験体 B ではこれと逆で、透水性の低下よりも強度の低下が大きい。現時点では、これら試験体が使用不能となる理由は何ら見あたらないが、マルチング材としての機能保持や歩道材の安全確保の面から、定期的な観察と性能評価を行う必要があると考えている。

4. まとめと今後の課題

(1) まとめ

スギ伐根材からマルチング材および歩道材を目的とした木材-ウレタン樹脂複合体を調製し実施工すると共に耐久性を評価した。試作した試験体は、インターロッキングブロックなど通常の土木資材と同等に施工することが可能であった。施工後の観察と物性評価から強度と透水性の低下が認められたものの、使用不能な状況には至っていない。本研究により施工性と耐久性の評価が出来たことから、法面の防草資材や屋上緑化基盤材など親環境型素材としての用途開発が見込めるものと考えられる。

(2) 今後の課題

今後も施工箇所の定期的な観察と試験体の物性評価を継続するとともに、既存材料と比較検討した場合の経済性について検討を行う予定である。また、使用後発生するであろう廃棄および再資源化の問題についても検討を行う予定である。

謝辞：本研究の一部は「建設副産物（伐根材）活用検討」（国土交通省東北地方整備局能代工事事務所）の支援を受けました。記して深甚なる謝意を表します。

参考文献

- 1) 建設副産物リサイクル広報推進会議編集：建設リサイクルハンドブック 2003, 大成出版社, pp.6-15, 2003.
- 2) 栗本康司, 佐々木貴信, 山内秀文：液化処理物による建設発生木材の再資源化, 木材工業, Vol.60, No.2, pp.70-74, 2005.
- 3) Shiraishi, N. : Plasticization of wood and its application, in Recent Research on Wood and Wood-based Materials, UK, Elsevier Applied Science, pp.155-167, 1993.

- 4) 小野 弘邦: 木質材料フェノール化物の接着剤への応用 (I) 木質材料のフェノール化反応, 木材工業, Vol.18, pp.590-594, 1993.
- 5) Kurimoto, Y., Takeda, M., Koizumi, A., Yamauchi, S., Doi, S. and Tamura, Y. : Mechanical properties of polyurethane films prepared from liquefied wood with polymeric MDI, *Bioresource Technology*, Vol.74, No.2, pp.151-157, 2000.
- 6) Yamada, T. and Ono, H. : Rapid liquefaction of lignocellulosic waste by using ethylene carbonate, *Bioresource Technology*, Vol.70, pp.61-67, 1999.
- 7) 小野 弘邦: 液化木材, 最新木材工業事典, 日本木材加工技術協会, pp.148-149, 1999.
- 8) Kawamura R, Sakota N: Biodegradable cushioning foams, *Kagaku to Kokyo*, Vol.67, No.8, pp.324-335, 1993.

PRODUCTION AND APPLICATION OF WOOD-POLYURETHANE RESIN COMPOSITES USING STUBS AND ROOTS OF JAPANESE CEDAR

Yasuji KURIMOTO, Hidefumi YAMAUCHI,
Takanobu SASAKI and Satoru KANETAKA

The objective of this work is to develop a suitable method to recycle stubs and roots (SR) as components for wood-urethane resin composites. SR are waste materials that were dug up from soil during construction works. Attempts were made to produce wooden aggregates and polyurethane (PU) resins as binder from the SR and to prepare specimens of wood-urethane resin composite tiles from the recycled materials. Results of physical evaluations by bending and permeability tests as well as applications of the tiles showed that they can be used as materials for several purposes, e.g. preventing the growth of grass and pavement construction.