

交付番号	23- I -11
------	-----------

令和 6 年 6 月 30 日

朝日ウッドテック財団研究助成事業
2023年度 研究成果報告書

報告者

所属機関	京都大学大学院農学研究科
職 名	教授
氏 名	村田功二

研究課題

荒廃農地に植林されたセンダン間伐材の利用技術開発

研究期間

2023年4月1日 ～ 2024年3月31日

[記入上の注意]

- この「研究成果報告書」は、当財団でとりまとめ、Webサイトや印刷物等で公表する予定です。
- 報告書はA4判（横書き）4枚程度にまとめ、必要に応じて図表等を挿入してください。
- 本助成金による研究の発表論文（発表予定を含む。）の別刷り又は作成した資料がありましたら、添付してください。

1 研究の背景と目的

中山間地域で農地への回復が困難な荒廃農地が増加している。その対策の一つと国産早生樹センダンを植林し、人手をかけずに収益を得ることが可能な早生樹の活用モデルの検討を進めている。2015年に植林を行った耕作放棄地では、センダンの胸高直径が10cmを超えるまでに順調に成長した。すでに樹冠が閉塞し、樹幹の肥大成長を抑制する可能性が出てきた。より高品質なセンダン材を短期間で収穫するために間伐が必要となった。そこで耕作放棄地での間伐の作業性の検証と低コストでエコな人工乾燥、間伐で得られた小径のセンダン材の有効活用を検討した。本研究では、農道が隣接する耕作放棄地での間伐作業の検証を行った。また、建築物のエンボディードカーボン削減で注目されているCLTは針葉樹材で作られているため、直交層のローリングシアが問題となっている。直交層にセンダンを配することでローリングシアの解決が可能か検証した。

2 研究方法・研究内容

本研究では、3つの検討を行った。

①耕作放棄地に植林されたセンダンの間伐作業の検証

兵庫県宍粟市山崎町梯の荒廃農地に2015年にセンダンを植栽した。2020年には樹幹が閉塞しはじめ、2023年には胸高直径は約15cmに達していた(図1)。樹冠が閉塞すると樹幹の肥大成長が抑制されるので間伐を実施することとした。成長が早い植栽間隔が5m(400本/ha)のものを対象とし、植栽本数を約半数にする定量間伐とした。



図1 宍粟市山崎町梯のセンダン試験植林地

②センダンの乾燥試験

荒廃農地に植栽された広葉樹の活用で解決しなければならない問題に乾燥がある。一定量の集材が見込める針葉樹人工林から得られる針葉樹材は、企業や森林組合で人工乾燥炉の導入が進み、乾燥スケジュールの検討も進んでいる。しかし、多品種小ロット生産となる荒廃農地での広葉樹植林では人工林からの針葉樹材のような乾燥プロセスは適用できない。そこで、センダンの乾燥特性を確認し、かつ小ロットの生産に適した太陽熱利用の簡易乾燥炉を検討する。まず、木材乾燥の基礎的な知見となる水分拡散係数を実測し、同じく近畿・中国地方で活用が検討がされているコナラや市場性のあるホオノキなどと乾燥性の比較を行った。次に、兵庫県森林技術センターで検討が進められたログハウス型木材乾燥室(図2)を改良し、さらに低コストで簡易的な太陽熱集熱システムを、ひのでやエコライフ研究所の協力をえて開発した。



図2 ログハウス型木材乾燥室(兵庫県森林技術センター)

③広葉樹材を活用したCLTの試作

澤田(1982)は針葉樹材と広葉樹材の物性を測定して、異方性について検討した。繊維

方向の弾性率(E_L)に対する半径方向と接線方向の弾性率(E_R, E_T)の比率、および各断面のせん断弾性率(G_{LR}, G_{LT}, G_{RT})を文献値から評価し、平均値を得た(表1)。針葉樹材の木口面にみられるせん断弾性率(G_{RT})は、 E_L の0.3%と非常に小さくローリングシアと呼ばれる。そのためにCLTを面外に変形させたとき、直交層で大きなせん断ひずみが表れて破壊が生じる(図3)。一方、広葉樹では E_L に対する G_{RT} の比率は2%となり、針葉樹材の10倍近い剛性となる。そこでセンダン材の弾性定数、および強度を実測した。それらの値をもとに、サンドイッチパネルのモデル式(大場 他 2013)に基づいて3層CLTの内部の応力分布を予測した。さらに、実際にセンダン材を中層に用いたCLTを試作し、スギCLTの性能比較や破壊性状の比較を実施した。

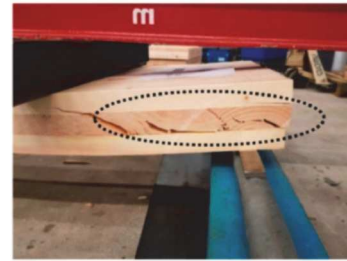


図3 面外変形によるローリングシア効果の破壊 (Yang et al. 2021)

表1 弾性定数の平均値(概数評価)(澤田稔 1982)

	E_R/E_L	E_T/E_L	G_{LR}/E_L	G_{LT}/E_L	G_{RT}/E_L
針葉樹材	0.075	0.040	0.060	0.050	0.003
広葉樹材	0.105	0.055	0.085	0.065	0.020

3 研究成果

①センダンの間伐作業の検証

間伐は2023年9月26日(火)に実施し、チェーンソーによって伐倒した。荒廃農地は農道が隣接する場合が多く、今回も農道を利用して集材のためのスイングヤーダーを容易に植栽地近くに移動できた(図4)。間伐後は樹冠間に十分な間隔が得られ、今後も同様の樹幹の肥大成長が期待できるだろう。伐採で得られた丸太は27本あり、末口径10cm以上のものでは、長さ4mが6本、3mが6本、2m以下が15本であった。中には末口径が20cmで長さが4mのものもあった(写真4)。得られた丸太は同市一宮町の製材所に運び、約20mm厚の板に挽いた。一部は乾燥およびCLT試作のために京都大学へ、残りは家具の試作のためにカリモク家具(株)に送付した。



図4 スイングヤーダーによる集材

②センダンの乾燥試験

乾燥試験は厚さ10mmで50×110mmの未乾燥材で実施した。コナラは生材、センダンおよびホオノキは放水状態とした。恒温恒湿槽(30℃、50RH)内にロードセルを設置し、重量変化がなくなるまで重量を記録した。含水率変化がほとんどみられなくなった乾燥時間は、センダンで約60時間、コナラで約120時間、ホオノキで約30時間であった。得られた水分拡散



図5 伐採されたセンダン丸太

係数を表2に示す。ホオノキの拡散係数が最も大きく、コナラが最も小さい値を示した。センダンは中間的な値をとった。乾燥速度だけで考えれば、ホオノキが最も乾燥が早い。センダンもコナラに比較すると十分に乾燥が早いことが確認された。

表2 乾燥試験の結果

	容積密度* (kg/m ³)	初期含水率 (%)	終了時含水率 (%)	水分拡散係数 (cm/h)
センダン	390	181.9	11.7	0.185
コナラ	655	73.8	13.0	0.068
ホオノキ	488	97.9	10.4	0.429

*容積密度：全乾重量を試験開始時の体積で除したものの。

京都大学北白川試験地内のログハウスに簡易型の太陽熱温水システムを導入した。屋根の上に簡易集熱パネルを設置し、温水循環タンクによって一定温度に達したとき水を循環させてログハウス内の温度が外気より 10℃程度高くなるようなシステムを導入した。今回の検討により約 50 万円程度で集熱システムが導入できることが確認できた(図6、図7)。本システムはログハウスだけでなく、ビニールハウスなどにも簡単に設定でき、小ロットでかつ低コストの乾燥システムの可能性が確認できた。太陽熱利用なので、乾燥効率としては従来の蒸気式乾燥機には及ばないが、乾燥が容易なセンダンやホオノキでは十分に活用可能だろうと思えた。また、温室効果ガスを出さず、導入コストが小さいことも評価すべき点である。



図6 京都大学北白川試験地ログハウスに設置された集熱パネル

③広葉樹材を活用した CLT の試作

得られたセンダン材の物性値を表3に示す。木口面のせん断弾性率は大きな値が得られた。

表3 センダンの物性値

	平均値 (MPa)	
曲げ強度	64.9	
曲げ弾性率	7270	
せん断強度	RT	11.1
	LT	11.4
	TR	4.7
	RT	4.9
せん断弾性率	RT	150
	LR	2400



図7 温水循環タンク

厚さ 10mm のラミナで3層構造のスギ CLT およびスギ・センダン複合 CLT を作成した。複合

CLT は直交層をセンダンとした。曲げ試験によって得られた強度を表4に示す。センダンの複合によって若干重量が増加するが、曲げ強度および曲げヤング率は向上していることが確認された。また代表的な破壊形態を図8に示す。スギ CLT では中央の直交層でのせん断破壊が観察されたが、スギ・センダン複合 CLT ではせん断破壊より先に最外層のスギで曲げ破壊が生じ、その後にセンダンの孔圏にそって破壊が生じた。実験で得られた物性値と曲げ破壊が生じた時の CLT 内部の応力分布を図9に示す。せん断応力はスギ CLT(CC)を複合 CLT(CM)ではほぼ同じだが、最外層の曲げ応力は複合 CLT が大きい。同じせん断応力でも複合 CLT は破壊せず、曲げ破壊が生じたことはこの解析からも理解できる。

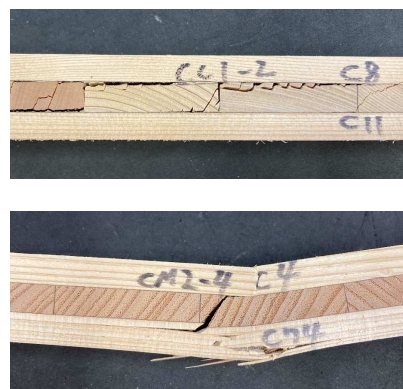


図8 スギ CLT (上) およびセンダン複合 CLT(下)の破壊形態

表4 スギ CLT(CC)と複合 CLT(CM)の強度比較

	気乾密度 (kg/m ³)	曲げ強度 (MPa)	曲げヤング率 (GPa)
CC	398	40.4	5.5
CM	437	47.7	7.4

4 研究成果の活用と今後の見通し

間伐作業では予想以上に費用を要した。農道に接しているために作業機械の移動は容易だが、スイングヤーダは過剰な性能だった。耕作放棄地での作業に適した作業機械の開発の必要性を感じた。

センダンは比較的乾燥が容易で、太陽熱利用の簡易乾燥には適した材料であると言える。乾燥条件などをさらに検討する必要がある。

センダンは他の広葉樹材同様にせん断弾性率やせん断強度は針葉樹材より優れていた。その結果、CLTの中層に利用した場合にはローリングシアの問題が解決できる可能性が確認できた。今後は実用的な実大試験体で強度や破壊性状の確認をする必要がある。

耕作放棄地対策としてのセンダン植林を実施し、間伐材作業と間伐材の利用を検討した。CLTの材料としての可能性を確認できた。林業としてより収益を上げるためには高付加価値の利用が必要である。カリモク家具に送付した板材は現在乾燥中であり、これから家具用材としての評価がされるであろう。これまで里山広葉樹材の楽器材利用として、木琴バーの評価方法を検討してきた。マホガニー属のセンダンも楽器材利用の可能性があり、木琴バーを含めた検討を進めたい。また、欠点を含む低質材は、クラフト用途では利用可能である。ウッドターニングなどでの加工性などをこれから検討していきたい。

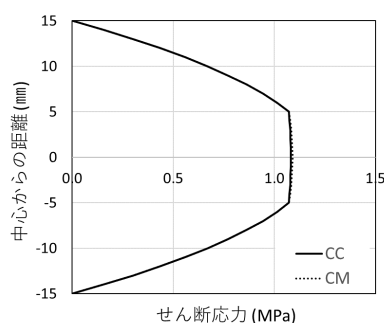
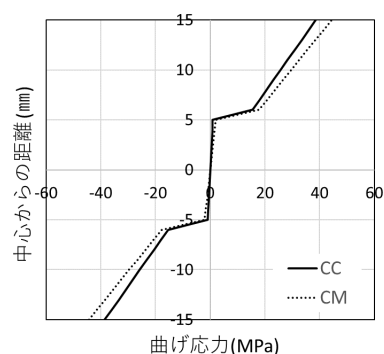


図9 スギ CLT およびセンダン複合 CLT の破壊時の応力分布：上：曲げ応力、下：せん断応力