

液状化対策で CO₂ を地中貯蔵

丸太打設液状化対策&カーボンストック (LP-LiC) 工法

沼田 淳紀

気候変動対策や地震被害対策は喫緊の課題である。このような環境下で、これからの地震被害対策は、地震被害対策だけを考えるのではなく、同時に、気候変動対策にも対応する必要がある。そこで、地震による液状化対策を実施しながら、伐採木材製品を大量かつ長期に使用し炭素を地中に貯蔵する「丸太打設液状化対策&カーボンストック (LP-LiC) 工法」を開発した。本稿では、丸太を使う意義を示し、この工法の概要とこれによる液状化対策効果と炭素貯蔵効果を示し、さらに、約10年前にLP-LiCを施工した地点で実施した丸太の掘出し調査より、丸太が確実に10年間炭素を貯蔵し続けていることを示す。

キーワード：液状化対策、密度増大、カーボンニュートラル、炭素貯蔵、木材

1. はじめに

地球温暖化にともなう異変が日常的にニュースとして取り上げられ、気候変動を誰しもが実感するようになってきた。しかしながら、この具体的な対策や効果は、ほとんど理解されていないのが現状だと感じられる。このような中で、日本政府は、2020年10月に、2050年までに温室効果ガスの排出量を全体としてゼロとするカーボンニュートラルを目指すことを宣言した。ここでカーボンニュートラルとは、二酸化炭素(CO₂)排出量から植林などによる吸収量を差し引いて、その合計を实施的にゼロにするという意味である。これは、今後もCO₂濃度が増え続け、気温は上昇し続けるが、2050年にはCO₂濃度の上昇をなんとか食い止め平衡状態にしようというもので、大気中のCO₂濃度が産業革命前に戻り、気温も産業革命前に戻るという意味ではないが、現実的で具体的な目標だと言える。これを進める上で、CO₂の排出削減を積極的に行うことは勿論大切であるが、それだけでは目標に届かないと考えられ、同時に、CO₂の吸収量を増やすことも重要である。吸収量を増やすには、造林や森林管理を進める以外に、丸太を含む伐採木材製品(HWP: Harvested Wood Products)を長く大量に使うことも効果があり、本稿はその具体的な方法を示す。

気候変動対策とともに、我が国は、地震が多く発生し、南海トラフ地震のような巨大地震が20年以内に発生する確率も60%と高まっており(地震調査研究推進本部地震調査委員会, 2023.1.13)、安全・安心な

社会を構築するためには、この対策も喫緊の課題である。地震による地盤の液状化は、大きな地震が起きると、広い範囲で発生し、甚大な被害をもたらすが、適切な対策を実施すれば被害を確実に低減できる。これからは、このような地震被害対策を気候変動と無関係に進めるのではなく、気候変動への影響を考慮して実施すべきである。

そこで、筆者らは、液状化対策を実施すると同時に、HWPを大量かつ長期に使用し炭素を地中に貯蔵する「丸太打設液状化対策&カーボンストック (LP-LiC) 工法」を開発した。本稿では、丸太を使う意義を示した後に、この工法の概要と、この工法の特徴である炭素貯蔵効果を実際の施工事例で計測した結果を示し、最後に、10年前に施工された丸太を掘出し、炭素貯蔵を検証した調査について述べる。

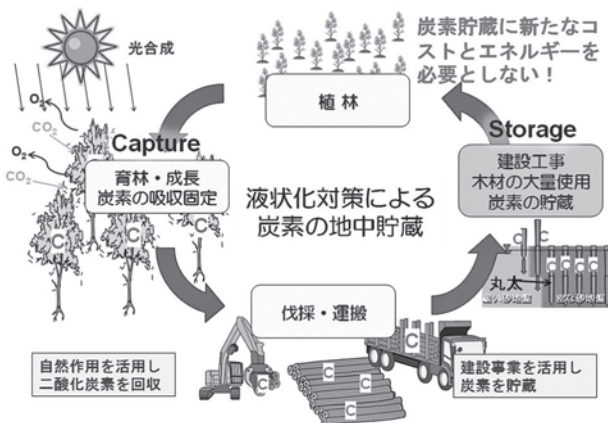
2. 木材を利用する意義

大気中のCO₂を回収する方法は、CO₂を直接空気から回収するDAC (Direct Air Capture)¹⁾といったアイデアがあるが、現実的なものは樹木の光合成による方法しか見当たらない。樹木は、太陽エネルギーを使って光合成により大気からCO₂を吸収し、炭素を樹木として固定し、酸素を放出する。したがって、樹木が生長した分、大気から二酸化炭素を回収したこととなる。海洋も大気からCO₂を吸収するが、これは人為的な制御が実状できない。一方、樹木は植林によって人為的に増やすことができ、さらに、樹木から

伐り出した HWP を増やし、再生林も進めれば、資源を枯渇させることなく持続的に HWP を使用し増やすことが可能である。LP-LiC 工法は、HWP を大量かつ長期的に使う具体的な方法の一つである。

地盤の液状化は、地下水位が浅いことが発生条件の一つである。一方、木材は地下水位以深では、空気が不足するため、腐朽菌やシロアリなどは活動できず、これらの生物劣化は進行しない。事実、このような条件下では、歴史的な木材が生物劣化することなく 100 年を優に超えて健全であることが確認されている (例えば 2)、3)。したがって、液状化対策の材料として丸太は相性がよく、恒久的に液状化対策効果を得られるとともに、木材に固定された炭素を地中に半永久的に貯蔵できる。

図一 1 に、CO₂ の回収 (Capture) から LP-LiC による炭素貯蔵 (Storage) の流れを示す。LP-LiC が、液状化対策工事として実施されていれば、木材を使うことで、CO₂ の回収と貯蔵に新たなエネルギーと費用をかけることなく、無理なく、現実的な方法で、確実に大気から CO₂ を回収し、炭素を地中へ安定的に長期貯蔵できる。

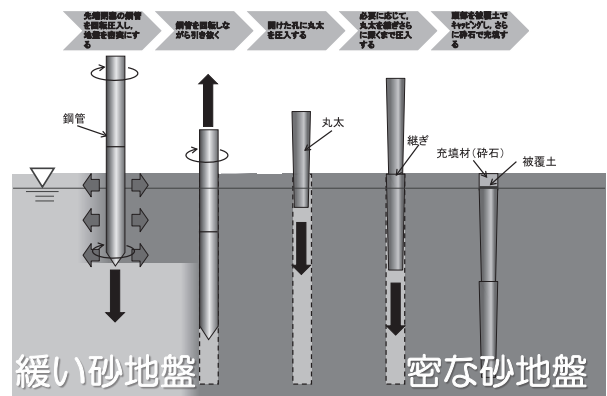


図一 1 木材による CO₂ 回収と炭素の貯蔵

3. LP-LiC 工法

(1) 工法の概要

LP-LiC 工法の概要を述べる。LP-LiC 工法は、緩い砂地盤に丸太を打設し、丸太の体積分砂地盤を密実にする工法である。図一 2 に、LP-LiC 工法の施工手順を示す。丸太を砂地盤へ直接打設することは困難なので、最初に先端閉塞の鋼管を正転反転させながら所定の深度まで無排土で圧入し、回転しながら鋼管を引き抜く。その後、鋼管でできた孔に、丸太を頭部が地下水位以深になるまで圧入する。改良深度が大きい場合には、丸太を縦に継いで打設する。丸太圧入後には丸太頭部から地表面に孔が残るため、丸太頭部を粘性土



図一 2 LP-LiC の施工手順

系の土で 50 mm 程度の厚さで被覆し、丸太頭部が空気と触れて生物劣化が生じないようにキャッピングする。その後、碎石を投入し、パイプレーターで締め固めながら孔を充填する。丸太は、杭ではなく、砂地盤を密実に保持するための地盤改良材なので、大きな強度は必要なく体積を維持できることが重要である。丸太の樹種は、基本的に問わないが、真っすぐな丸太が使いやすいので、スギやカラマツなどの針葉樹が一般的に使用される。継ぎ部も杭ではないので曲げに耐える必要はなく、丸太打設時に丸太同士がずれないようにしていればよい。

写真一 1 に、LP-LiC 工法の施工状況を示す。丸太の打設には、リーダー式の施工装置が用いられる。このため振動騒音はほとんど発生せず、加えて、残土が発生せず、材料飛散がなく、丸太径も 0.16 m 程度のものが用いられるので、1 回あたりの改良面積は大きくなく、境界近くまで施工できるといった長所がある。

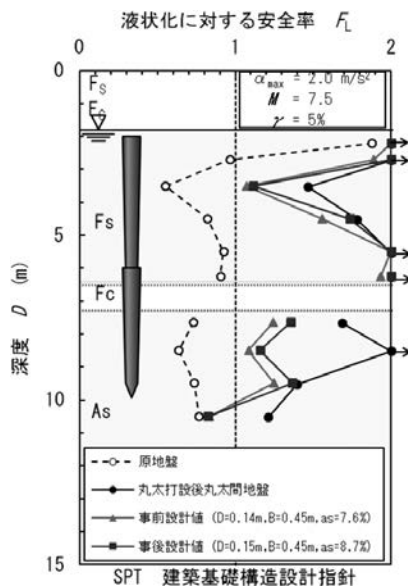
(2) 対策の効果

丸太を実際の地盤に打設し、*N* 値より液状化判定を行った結果を示す⁴⁾。施工の概要は、丸太末口径 (生材の丸太は太い径と細い径があり、細い側の径) :



写真一 1 LP-LiC 工法の施工状況

0.14 m, 丸太長さ:4 m を 2 本継ぎ 8 m, 丸太頭部位置: GL-2.0 m, 丸太打設間隔:0.45 m, 樹種:スギである。図一3に, 丸太打設前後の建築基礎構造設計指針⁵⁾に基づき求めた液状化に対する安全率 F_L を示す ($a_{max} = 2.0 \text{ m/s}^2, M = 7.5, \gamma = 5\%$)。図中には, 末口径 0.14 m で, F_L が 1 以上になるように設計した時の値と, 丸太搬入後丸太径を実測しその平均値が 0.15 m であったので事後設計としてその値を用いて F_L を計算した値を併記した。丸太打設前は, ほとんどの範囲で 1 以下であるが, 丸太打設後はいずれも 1 を大きく上回り, 設計値よりも大きくなった。



図一3 丸太打設前後および設計における液状化判定結果⁴⁾

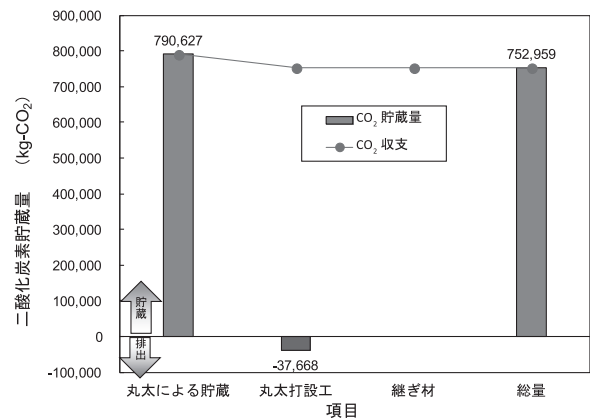
4. LP-LiC 施工による炭素貯蔵効果

97 宅地の大規模分譲住宅のほぼ全面 (改良面積 13,382 m²) に LP-LiC を施工し, 液状化対策を実施した時の, 丸太による炭素貯蔵量と工事による CO₂ 排出量の計測結果を示す⁶⁾。この地点における液状化に対する目標性能は, 国土交通省の「宅地の液状化被害可能性判定に係る技術指針」⁷⁾ にならい, GL-5 m 以浅の各層が「A: 顕著な被害の可能性が低い」となることとし, 液状化判定は, 建築基礎構造設計指針⁵⁾に従い, 地震動はマグニチュード 7.5, 地表面水平加速度 200 Gal とした。これより, 丸太の末口径:0.15 m, 丸太長さ:4.0 m, 丸太打設間隔:1.0 m で正方形配置, 樹種:スギ 7,000 本, カラマツ 6,420 本とした。表一1に, この時に使用した機械と台数を示す。

図一4に, この工事の丸太に貯蔵された炭素量 (CO₂ 換算値) と工事による CO₂ 排出量を示す。本工事では継ぎ材を用いていないので, 継ぎ材による排出量は

表一1 LP-LiC の施工に用いた使用機械⁶⁾

機械名称	型番	用途	台数
丸太打設機	BA100 (10 t)	先行回転圧入, 丸太圧入	2
丸太打設機	SPD20FL (20 t)	先行回転圧入, 丸太圧入	1
削孔機	SW1565	先行回転圧入	1
運搬機	ヤドカリ	丸太運搬	1
タイヤショベル	WA30 (0.4 m ³)	碎石運搬	2
バックホウ	PC128 (0.45 m ³)	整地等	1
発電機		パイプレータ碎石締固め	3



図一4 大規模分譲住宅で LP-LiC を施工した時の炭素貯蔵量と工事による CO₂ 排出量 (CO₂ 換算)⁶⁾

無い。なお, 計算は, 工事現場の敷地内の施工のみを対象とし, 敷地外の運搬や通勤, 現場事務所の電気などによる排出は対象としていない。丸太に貯蔵された総炭素量 (CO₂ 換算値) は 790.6 t-CO₂, 工事によって排出された総二酸化炭素量は 37.7 t-CO₂, その差は 753.0 t-CO₂ の貯蔵側である。このように, 丸太による炭素貯蔵量は, 工事による排出量の 20 倍程度であり, 炭素貯蔵効果が極めて大きいことが分かる。

5. 炭素貯蔵効果の検証

前章で LP-LiC 工法によって地中に貯蔵された HWP による炭素貯蔵量を示したが, このような炭素貯蔵効果が国際的に認知されているわけではない。HWP に使用される木材は, かつてはその総量が一定だと仮定され, 伐採時に即時排出とされていた。しかし, 京都議定書第二約束期間の 2013 年以降, 製材, 木質パネル, 紙などについては HWP による炭素貯蔵量を計上できるようになり, 我が国も 2015 年から HWP の炭素蓄積量を計算し, 気候変動に関する国際連合枠組条約 (UNFCCC: United Nations Framework

Convention on Climate Change) 事務局に報告している。その計算方法は、2006年 IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change) ガイドラインおよび2019年 IPCC 改定ガイドによっており、これによれば LP-LiC で用いる丸太は「その他の産業用丸太」に分類され、伐採された時点で、実質上即時排出とカウントされている⁸⁾。これを CO₂ 吸収量としてカウントできるようにするためには、地中に置かれた丸太の長期的な質量変化傾向を明らかにしていく必要がある。そこで、筆者らは地中にあった木材を掘出し、その調査を実施してきている。この一例として、約10年前に LP-LiC を施工した地点の調査概要を以下に示す。

2013年2月に千葉県木更津市の海岸埋立地で、LP-LiC 工法の実証実験を実施した。この時の施工仕様は、丸太の末口直径：0.14 m、丸太長さ：4 m、樹種：カラマツ、打設間隔：0.65 m、丸太頭部位置：GL-1 m、打設配列：8行×8列（正方形配置）、丸太打設本数：64本であった。ちなみに、この工事による炭素貯蔵量（CO₂ 換算）は 2.9 t-CO₂（改良面積当たり：0.116 t-CO₂/m²、改良体積当たり：0.0232 t-CO₂/m³）である。丸太打設から約10年経過した2022年12月に、丸太の掘り出し調査を実施した。写真-2に、丸太を掘り出した地盤の断面の様子を示す。この時の地下水位は、概ね GL-1.55 m 程度で、丸太頭部は地下水位以浅であったことがわかる。写真-3に、丸太頭部の様子を示す。前述した通り、丸太頭部は、丸太が生物劣化しないように空気と遮断する目的で粘性土がキャッピングされ、その上は、締め固められた碎石で充填されている。丸太は、地下水位以浅に位置しているが、極めて健全な状態であることがわかる。

採取した丸太を 50 mm 程度の円盤状に切り出し、その容積密度（＝全乾状態の質量／高含水率における容積）を求めた。図-5に、容積密度の深度分布を示す。なお、現在、採取した丸太の分析中であり、これらの値は暫定値である。図中には、地下水位位置と

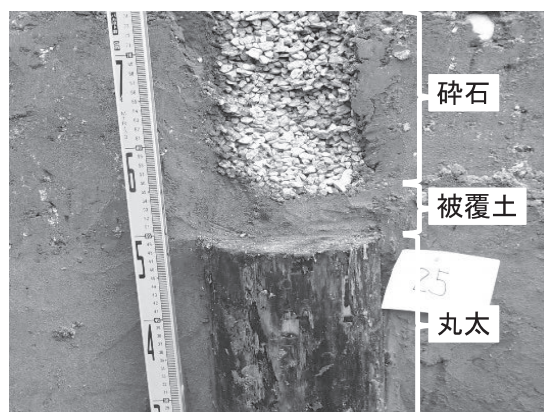


写真-3 丸太打設後10年経過した丸太頭部の様子

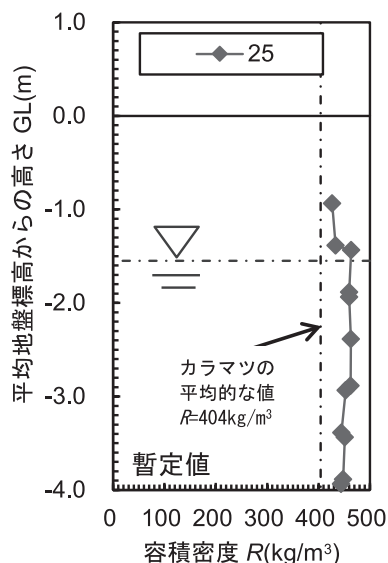


図-5 10年前にLP-LiCで施工した丸太の容積密度の深度分布

カラマツの平均的な容積密度を併記した。丸太の各部における容積密度は、平均的な値をやや上回り、深度方向にもほぼ一定値を示すことがわかる。したがって、丸太打設後10年が経過したが、10年前の炭素がそのまま地中に貯蔵されていると言える。

6. おわりに

木材を液状化対策に使う意義を示した後に、LP-LiC 工法の概要を示し、この施工による炭素貯蔵量（CO₂ 換算値）が施工による CO₂ 排出量の20倍程度である事例を紹介し、最後に、施工後10年が経過した丸太の掘り出し調査により地下水位以浅を含め、丸太の容積密度の変化は認められず、10年間炭素を貯蔵し続けている事例を示した。



写真-2 丸太打設後10年経過した地盤断面の様子

《参考文献》

- 1) ホール・ホーゲン編著, ドローダウン, 山と溪谷社, pp.346-349, 2021.1.
- 2) 中村裕昭, 濱田政則, 本山寛, 沼田淳紀: 地中に使用した木材の長期耐久性に関する事例調査, 第9回環境地盤工学シンポジウム発表論文集, 地盤工学会, pp.277-282, 2011.
- 3) 中村裕昭, 濱田政則, 沼田淳紀: 土木分野での木材地中使用の歴史的事例, 木材利用研究論文報告集 11, 土木学会木材工学特別委員会, pp.95-101, 2012.8.
- 4) 村田拓海, 沼田淳紀, 三輪滋, 原忠, 坂部晃子, 三村佳織: 丸太打設液状化対策の実施工地点におけるサウンディング試験, 第50回地盤工学研究発表会発表講演集, pp.1819-1820, 2015.9.
- 5) 日本建築学会, 建築基礎構造設計指針, 丸善, pp.61-64, 2001.
- 6) 沼田淳紀, 松下克也, 村田拓海, 川崎淳志, 三輪滋: LP-LiC 工法の大規模分譲住宅造成への適用事例, 木材利用研究論文報告集 15, 土木学会木材工学委員会, pp.83-88, 2016.8.
- 7) 国土交通省: 宅地の液状化被害可能性判定に係る技術指針, 2013.4.
- 8) 国際緑化推進センター, 軟弱地盤対策のための地中利用木材のCO₂蓄積量の評価に関する調査(フェーズII)(令和3年度CLT等木質建築部材技術開発・腐朽事業)報告書, pp.6-10, 2023.3.

【筆者紹介】

沼田 淳紀 (ぬまた あつのり)
 飛鳥建設㈱
 土木本部 グリーンインフラ部
 シニアエンジニア

