

木質材料の高周波加熱接着：CLT 製造への活用について

技術部 生産技術グループ 宮崎 淳子

■はじめに

木造建築はこれまで住宅を中心に建てられてきましたが、近年では学校や商業施設、オフィスビルといった非住宅分野にも展開されています。こうした中大規模建築物では、より高い強度や安定した性能が求められ、集成材や CLT（直交集成板）、LVL（単板積層材）といった構造用木質材料が多く利用されています。これらの材料の製造では、効率的で確実な接着が不可欠です。そこで、高周波誘電加熱（以下高周波加熱）を利用した接着技術が注目されています。高周波加熱は、厚みのある材料でも内部まで短時間で均一に加熱できるため、生産性の向上と安定的な接着品質の確保に有効です。

本稿では、高周波加熱の仕組みや接着の際の注意点を解説し、また企業と共同で実施した CLT 製造における省エネルギー化を目的としたプレス条件の検討について紹介します。

■高周波加熱の仕組み¹⁾

加熱方法は大きく分けて、外部加熱と内部加熱の 2 種類があります。外部加熱とは、ガスコンロで鍋を温めるように、物体の外側から熱を加える方法です。他にも暖房器具で部屋を暖めるなど、私たちが日常的に行っている加熱方法の多くは外部加熱です。一方、内部加熱は、電子レンジで食品を温めるというように、物体の中から加熱する方法です。電子レンジによる加熱は、高周波加熱という仕組みを利用しています。

物質には電気を流す導電体（主に金属）と電気を流さない誘電体（水、プラスチックなど）があります。誘電体を高周波電界の中に置くと、物質内部から加熱されます。代表的な誘電体である水を例に高周波加熱の仕組みを説明します（図 1）。水分子は、水素側がわずかにプラス（ $\delta+$ ）、酸素側がわずかにマイナス（ $\delta-$ ）の電荷を持っています。通常、水分子はランダムな向きで存在していますが、電圧のかかった電界の中に置くとマイナスを帯びた酸素が電界のプラス側に、プラスを帯びた水素がマイナス側に向き、水分子の向きが揃います。交流電流下では、プラスとマイナスが周期的に反転するので、水分子の向きもそれに合わせて反転しようとし、高周波加熱では、プラ

スとマイナスが 1 秒間に 300 万～3 億回反転します。そのため、水分子は非常に激しく振動します。この激しい振動によって分子間に摩擦熱が発生して、物質内部から加熱されるのです。

高周波加熱による発熱のしやすさは、物質によって異なります。高周波による発熱のしやすさの指標は「損失係数」と呼ばれる値で示されます。表 1 にいくつかの物質の損失係数を示します。水は損失係数が高く、高周波加熱によって発熱しやすい物質です。木材は水に比べて損失係数は低く、水よりも発熱しにくい物質ということになります。また、木材も含水率が高い方が発熱しやすくなります。木材の接着では水を溶剤とする接着剤が多く用いられています。接着剤中の水が発熱しやすいことを利用して、集成材や CLT、

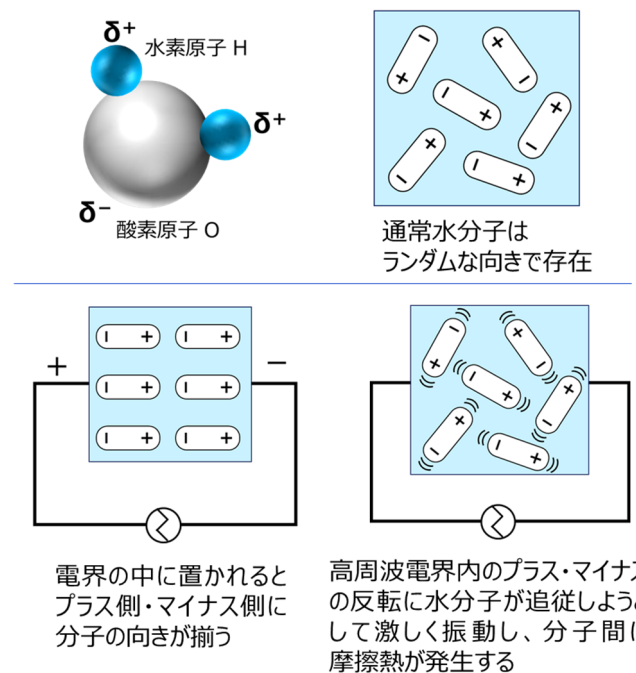


図 1 高周波誘電加熱の仕組み

表 1 高周波加熱による発熱しやすさ（損失係数）¹⁾

誘電物質	損失係数
空気	0
水（25℃）	0.39
木材（含水率15%）	0.02～0.2
木材（含水率30%）	0.3～3

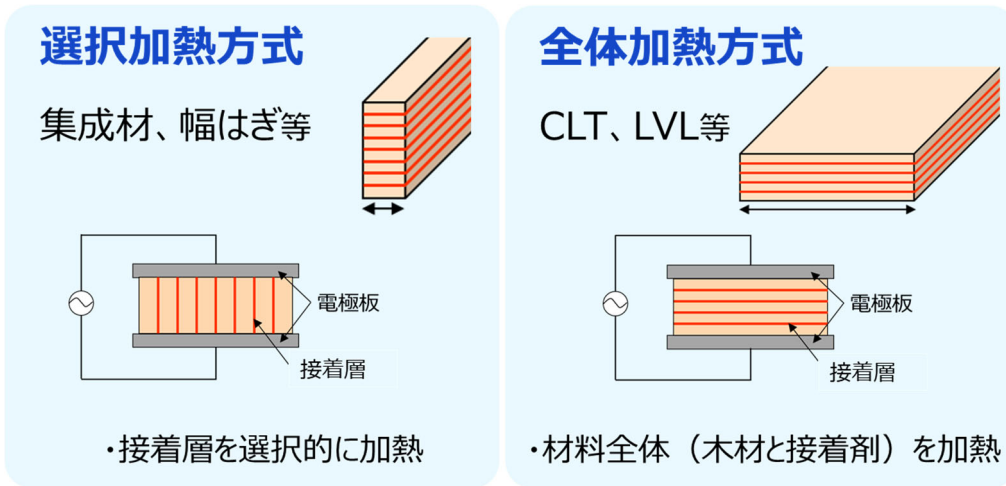


図2 木材の接着における高周波加熱の方式

LVL などの接着工程で高周波加熱が使用されています。

■木材の高周波加熱接着¹⁾

木材産業において高周波加熱は、接着、曲げ成形、乾燥の行程で利用されています。特に接着工程については、集成材、LVL、CLT、成型合板、パネル材などの製造において、高周波加熱装置が広く導入されています。厚みのある材料の接着では、木材の熱伝導率が低いため、熱圧プレスのような外部加熱では内部まで均一に加熱することが困難です。そのため、集成材やCLTのような厚みのある材料には、内部から加熱できる高周波加熱が有効な手段となります。

木質材料の高周波加熱の方式は、材料の形状に応じて異なる方式が用いられます。代表的な加熱方式は、以下の2種類です(図2)。

・選択加熱方式：電界の向きと接着層を平行に配置し、接着層が選択的に加熱されます。集成材の接着に用いられる方式です。

・全体加熱方式：幅の大きな材料（CLT や LVL など）では、電極間距離の制約から選択加熱が困難です。そのため、電界方向に対して接着層が垂直になるように配置し、材料全体を加熱します。

高周波加熱では、一定時間電力を加えることで、材料内部に熱が生じます。このときの発熱量 H (J) は、電力 P (W) と加熱時間 t (秒) との積で表されます。

$$H = P \times t \quad (1)$$

この発熱量のうちの一部が温度上昇に使われます。材料を T_1 °C から T_2 °C に上げるために使われる熱量 ηH は、以下の式で表されます。

$$\eta H = c \times s \times \Omega \times (T_2 - T_1) \quad (2)$$

ここで、

c : 比熱 [J/kg・°C]

s : 密度 [kg/m³]

Ω : 体積 [m³]

$(T_2 - T_1)$: 温度差 [°C]

式(1)と式(2)をまとめると、以下の関係が得られます。

$$P \times t = 1/\eta \times c \times s \times \Omega \times (T_2 - T_1) \quad (3)$$

この関係から、高周波加熱で T_1 °C から T_2 °C に上げるために必要な電力と加熱時間は、材料の密度や体積に関係することが分かります。全体加熱方式で接着されるCLTやLVLでは材料の体積が大きくなるほど加熱時間が長くなります(図3)。選択加熱方式の集成材の場合は、接着層の面積に応じて加熱時間を調整します。さらに、密度が低い木材に比べて密度が高い木材を加熱するには、より多くの熱量を要し、それに合わせて電力や加熱時間を増やす必要があります。

このように、加熱条件は材料の構成や特性に応じて調整する必要があります。あわせて、安全で安定した接着を行うためには、いくつかの注意点にも留意する

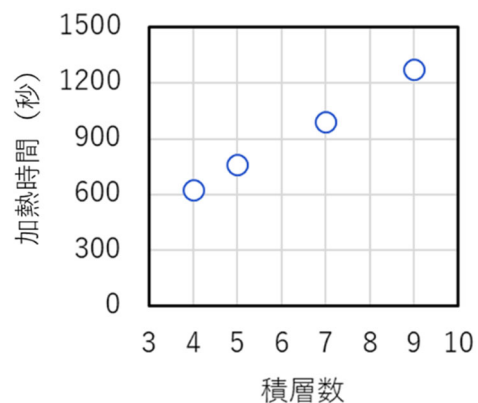


図3 CLTの積層数と加熱時間 (カラマツCLTにおける一例)

必要があります。

高周波加熱接着において特に注意すべき点は、木材の含水率です。含水率が高いと、木材中の水分によって電力が消費され、接着層の加熱効率が下がるおそれがあります。このため、含水率はおよそ10%程度に管理することが推奨されています。また、材料内に含水率のムラがあると、局部的に電界強度が高まり、温度が著しく上昇してスパークが発生するおそれがあります。接着剤が過剰にはみ出している場合にも、スパークが生じることがあります。さらに、ヤニツボのある材や抽出成分の多い樹種では、電力量を上げすぎるとスパークのリスクが高まります²⁾。

スパークが発生すると、木材や接着剤の炭化やパンクを引き起こし、接着性能の低下や火災につながるおそれがあるため、加熱条件の制御が極めて重要です。

■CLTのプレス条件の検討と省エネルギー化

どのような加熱条件で十分な接着性能が得られるのかを検討することは、効率的なCLT製造に必要です。そこで著者らは、道産カラマツを用いたCLTの製造において、加熱時間と接着性能の関係について検討しました。

CLTの製造には、水性高分子ーイソシアネート系接着剤あるいはフェノールーレゾルシノール樹脂接着剤が使用されています。本検討では、強度が高く耐久性に優れるフェノールーレゾルシノール樹脂接着剤を対象としました。この接着剤は常温でも硬化が進む一方で、硬化速度が比較的遅いため、通常は長時間のプレスが必要となります。そのため、高周波加熱によってプレス時間の短縮が図られています。

高周波プレスにおける加熱時間の目安としては、集成材製造での接着剤メーカーの推奨として、接着層の温度が80℃に達するまでとされることが一般的です。この検討においても、まずこの基準を参考に、ラボスケールの小型の高周波プレスを用いて接着層温度をモニタリングしながら加熱条件の検討を行いました。

まず、高周波出力が最大に近い条件で加熱し、接着層の温度が80℃に達するまでの時間を「標準条件」としました。この標準条件よりも加熱時間を短縮した条件でCLTを製造し、接着性能を比較した結果、接着層の到達温度が60℃程度であっても直交集成板の日本農林規格(JAS)の接着性能の基準を満たすことが確認されました(表2)。

図4は、集成材とCLTの高周波プレス中における接着層温度の推移を示しています。集成材では3分程度で80℃に達したのに対し、CLTでは温度の上昇が緩やかで、80℃に達するまでに約15分を要しました。レゾルシノール樹脂接着剤は室温でも硬化が進む性質があるため、CLTの場合、必ずしも80℃に達する必要はなく、一定時間の加熱を確保すれば十分な接着が可能であることが示唆されました。

表2 高周波加熱の時間に対する接着層の到達温度および接着性能(カラマツCLT, 5層5プライ, 150×300×300mm)

電力量	印加時間	接着層温度(℃)	接着性能適否 ^{※1}
1.5 kW	約15分 ^{※2}	88.9	○
	10分	61.3	○
	5分	43.7	×

※1 直交集成板のJASの減圧加圧剝離試験による評価
※2 接着層温度が80℃に到達するまで

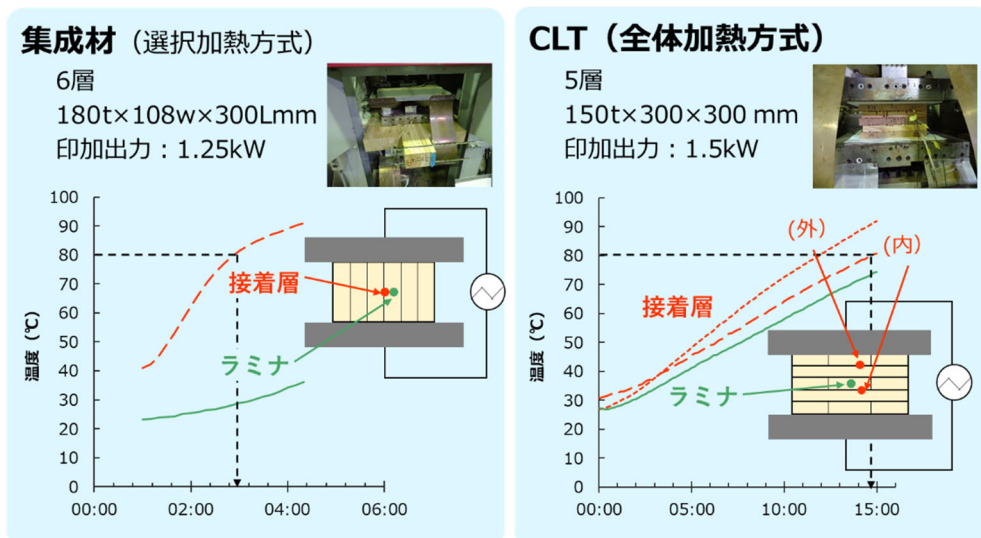


図4 加熱方式による材料の温度変化の違い

そこで、高出力で加熱した後に出力を20%に下げ、保温する「2段階印加プログラム」を考案し、プレス試験を行いました³⁾。全体のプレス時間を18分に固定し、高出力での加熱時間を13分から4分まで段階的に変化させ、残りの時間は出力を20%に下げ保温しました(表3, 図5)。その結果、出力を下げた後も接着層の温度は保たれており、いずれの条件においても良好な接着が得られました(図5)。また、この2段階印加プログラムを用いることで、電力量を最大で約50%に抑えることができる可能性が示唆されました(表3)。

さらに、実大CLTの製造では、高出力加熱の後に高周波の印加を停止し、そのままプレスのみを継続する方式で行った結果、JAS基準を満たす接着性能が得られました。高周波によって材料内部から加熱されるため、高周波加熱を停止した後も木材の高い断熱性によって接着層が保温され、硬化が進行したと考えられます。

CLT製造では全体加熱方式が用いられるため、選択加熱方式と比べて加熱時間が長くなります。しかしながら、今回の検討により、木材の断熱性を活かした「高出力→低出力(または停止)」の2段階印加プログラムを用いることで、加熱効率の向上と使用電力量の削減につながる事が明らかとなりました。

■おわりに

外部加熱である熱盤プレスでは、熱盤の温度と材料の温度上昇との関係は感覚的に把握しやすいのに対し、内部から加熱される高周波加熱では、加熱条件と材料の温度変化との関係が直感的につかみにくく、扱いの難しさを感じることもあります。一方で、高周波加熱を利用することで、高性能な接着剤を用いて効率よく接着することができるため、大断面化が進み、ますます高い性能が求められる木質材料の接着において、有用な加熱方法のひとつと言えます。高周波による木材および接着剤の加熱特性を正しく理解し、加熱条件の最適化を図ることで、安全で効率よい木質材料の生産につながる事が期待されます。本稿が、高周波加熱接着を安全かつ有効に活用するための一助となれば幸いです。

■謝辞

本報告の一部は、経済産業省 戦略的基盤技術高度化支援事業「中高層木造ビルを実現する高性能な大型木質パネルの効率的な製造技術と接合技術の開発」

(H30~R2)で行われました。試験実施にあたり山本ビニター(株)に多大な御尽力を賜りました。ここに深く謝意を表します。

表3 2段階印加プログラムによる電力量の削減効果および接着性能

条件	印加時間(分)		電力量の割合	接着性能適否 [※]
	高出力2kW	低出力0.4kW		
13-5	13	5	100%	○
10-8	10	8	83%	○
7-11	7	11	66%	○
6-12	6	12	60%	○
4-14	4	14	49%	○

※ 直交集成板のJASの減圧加圧剥離試験による評価

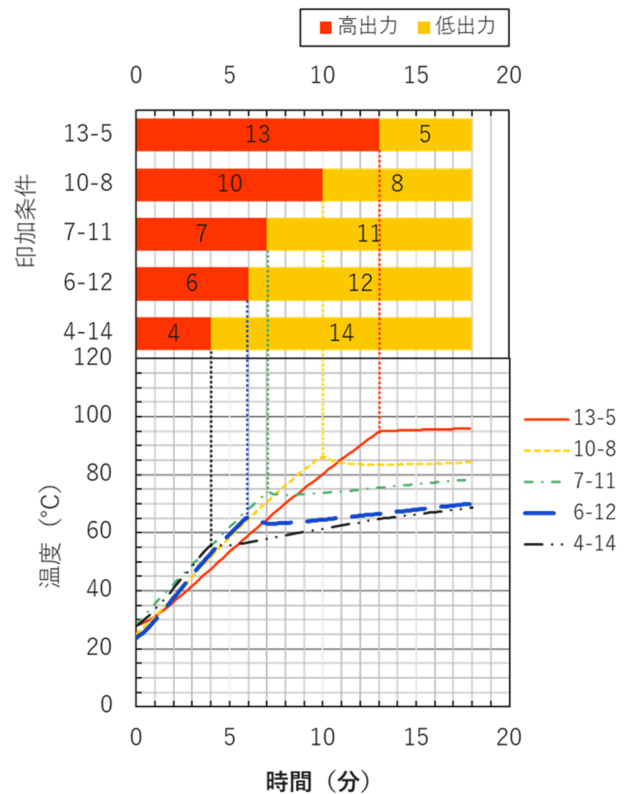


図5 2段階印加プログラムの加熱スケジュール(上)と接着層温度(下)

■参考文献

- 1) 山本ビニター：高周波誘電加熱技術情報. <https://www.vinita.co.jp/institute/radiofrequency/> (閲覧日 2025/4/13)
- 2) 滝欽二, 原満：木材工業, 34(8), 344 (1979).
- 3) 宮崎淳子, 大橋義徳, 平林靖, 古田直之, 中村神衣：林産試だより 2021年8月, <https://www.hro.or.jp/upload/8860/2108-2.pdf>