 総 説

[木材学会誌 Vol. 61, No. 3, p. 191-195 (2015)]

木質材料における木材接着研究の重要性*¹宮本康太*²Importance of Research on Wood Adhesion for
Wood-based Materials*¹Kohta MIYAMOTO*²

Wood-based material is constituted by bonding small pieces of processed wood, called elements, using wood adhesives. Therefore, researches on wood-based materials and wood adhesives are very closely related. In recent years, cross-laminated timber (CLT), which has been developed as a new wood-based material, is beginning to spread as a structural material in the wood industry in Europe, North America, and Japan. This paper reviews the changes in element size in the development history of wood-based materials and the relation between element type and bonding properties of wood-based materials. It also discusses the importance of research on wood adhesion for the technical development of wood-based materials through CLT.

Keywords: cross-laminated timber, wood-based material, wood adhesive.

木質材料は、エレメントと呼ばれる木材や木材小片を接着することで構成されている。木質材料が諸性能を十分に発現するには、エレメント同士が良好な接着を得ることが必要である。したがって、木質材料における木材接着の研究は、木質材料の技術開発にとって重要であると考えられる。本稿では、近年構造用材料として開発および普及が進んでいる Cross-laminated timber (CLT) を題材として採りあげ、木質材料の開発の歴史とエレメントのサイズの関係および木質材料の接着性能の評価とエレメント・製造方法の関係から、木質材料における木材接着研究の重要性について論じる。

1. はじめに

木質材料は、再構成木質材料とも呼ばれるように、エレメントとなる木材や木材小片を接着剤を介して接着し、一体化されることで製造される。エレメントの形状やその配置によって軸状・面状の外形を構

成することができ、木質材料の種類は多岐にわたる。木質材料が諸性能を十分に発揮するためには、エレメント同士が良好な接着を有していることが必須である。したがって、木質材料において木材接着は重要な役割を果たしていると言える。現在、木材学会の年次大会等においては、木質材料と木材接着の研究分野は分かれて設置されている。しかし、例えば、この10年での年次大会における研究発表をみると、未利用材の木質材料への有効活用、天然系接着剤を用いた木質材料、木質材料中の接着剤の動態、木質材料からのホルムアルデヒドや揮発性有機化合物の放散、といったテーマは両分野にまたがって発表されており、両分野の関連が深いことが窺える。すなわち、木質材料の新規開発や製造技術の高度化、性

*¹ Received January 5, 2015; accepted February 13, 2015.

*² 国立研究開発法人 森林総合研究所 Forestry and Forest Products Research Institute, Tsukuba 305-8687, Japan

Corresponding author: K. Miyamoto (mkohta@ffpri.affrc.go.jp)

能評価において、木質材料と木材接着の研究は極めて密接な関係にあると考えられる。

また近年、欧州と北米において、新しい木質材料と言える Cross-laminated timber (CLT) の技術開発と構造用途への普及が進められている。日本においても、木材を積極的に活用するための施策が進められていることも相まって、CLT の技術開発が進められてきており、研究的な取り組みも盛んとなっている。そこで本稿では、CLT を題材として、特に木質材料のエLEMENTと製造方法の観点から、木質材料における木材接着に関する研究について論じる。

2. CLT について

CLT の概要について簡単に述べる。CLT の定義に関する表現はいくつかあるが、「ひき板を並列することで単層を構成し、その単層の軸方向を直交させながら積層接着した大きな断面を持つ面状の集成加工材料¹⁾とされるように、CLT は、これまで集成材に使用されてきたラミナをELEMENTとして、3層3プライから9層9プライのように断面も大きくかつ面的にも大きく構成した木質材料である。CLT に関する用語の定義や技術開発・普及に関する情報は既往の文献に詳しい^{2, 3)}。1990年代後半から欧州において、CLT の製造・利用技術の開発および普及が精力的に取り組まれてきている。北米でもこれに追隨してCLTに関する取り組みが盛んとなり、CLTに関する詳細な技術資料も発行されている⁴⁾。国内においても、1つの製品について使用される木材量が多いこと、また低質材の利用も原理的には可能であることなどから、地域材の利用拡大の点からも注目されている。また2013年には日本版CLTの材料規格と言える直交集成板の日本農林規格(JAS)⁵⁾も制定され、本格的な普及に向けた気運が高まっている。これと並行して、CLTに関する研究的な取り組みも盛んになってきており、木材学会の年次大会においても、強度や木材接着の分野での研究発表件数が増えてきている。

3. 木質材料の開発の歴史とELEMENTのサイズ

第1章で述べたように、木質材料はELEMENTと呼ばれる木質要素から構成されている。木質材料の分類や開発の経緯は、既往の報告に詳しい⁶⁻⁹⁾。これらの報告の中で、種々の木質材料の開発の歴史とELEMENTのサイズ(体積)の関係が論じられており、本稿でもこの議論を参照したい。

まず、木質材料は軸材料と面材料に大別すること

ができる。軸材料については、1890年代に開発された集成材を端緒とし、1960年代以降にLVL (Laminated Veneer Lumber: 単板積層材)、PSL (Parallel Strand Lumber)、OSL (Oriented Strand Lumber) と順に開発が進められてきたとされている^{6, 7)}。ELEMENTのサイズの観点では、集成材のELEMENTであるラミナの体積を 10^7 mm^3 から、OSLのELEMENTに用いられるストランドの $5 \times 10^3 \text{ mm}^3$ までそのサイズは小型化している。一方、面材料については、単板をELEMENTとする合板と、その代替材として開発が進められてきたストランドをELEMENTとするOSB (Oriented Strand Board) とを一つの開発の流れとしている。合板とOSBのそれぞれの開発時期とELEMENTのサイズについては、合板の1900年代、約 10^5 mm^3 から、OSBの1980年頃、約 10^3 mm^3 としており、この経緯においてもELEMENTが小型化していると言える。また、1940年代が起点となるパーティクルボード、1950~60年代が起点となる繊維板については、ELEMENTのサイズはそれぞれ約 10^1 , 10^0 mm^3 とされ、非常に小型なELEMENTを持つ木質材料が出現したことになる。木質材料の中では、単板やストランドなどの一部のELEMENTについては、軸材料と面材料で共通に利用されるものもあるため、ELEMENTの種類や面材料の中でも構造用と造作用で分類することもできるが⁸⁾、いずれにせよ、木質材料の開発の歴史の中でELEMENTが小型化してきた大きな流れがあると言える。木質材料にとって、ELEMENTが小型化すると原料の選択の幅が広がるのが大きなメリットとなる。加えて近年では、木粉を原料としプラスチックと混練して製造するウッドプラスチック(WPC)、さらにはセルロースナノファイバーの利用など、これまでと比べて、言わば極小サイズのELEMENTを利用する木質材料の研究開発が進展してきている。木材学会の年次大会においても、この10年の間に多くの発表が行われてきており、研究的な取り組みが盛んであることが見て取れる。WPCについては、成型加工品として木質材料の開発の歴史の中に位置づけることが提案されている⁹⁾。WPCのELEMENTとなる木粉のサイズは、 10^{-2} mm^3 のオーダーとされる⁹⁾。したがって、木質材料の開発の歴史を概観すると、ELEMENTのサイズは、 10^7 mm^3 から 10^{-2} mm^3 まで小型化してきていると言える。

ところが前述のように、最近になって集成材と同様にラミナをELEMENTとするCLTの開発への取り組みが盛んになってきた。上述の木質材料の歴史

とエレメントの関係に、CLTを当てはめてみる。CLTの技術開発の歴史に触れると、CLTは1970年代にドイツ・オーストリアを中心に開発が進められ、1998年に欧州にて建築構造材料として実用化されている³⁾。以降、生産量と生産地域が拡大を続けている。一方、国内においては、スギを用いた3層クロスボードの開発の取り組み^{10, 11)}は、2000年頃から進められている。欧州における実用化、日本国内のCLTに関する動きの活性化、直交集成板のJAS⁵⁾の制定およびCLTの研究的な取り組みの増加という点から考えると、CLTの歴史的な起点はここ数年のところでみなすことができる。すなわち、木質材料の歴史についてエレメントのサイズを採りあげてみると、集成材に用いられるラミナから始まって木粉まで小型化が進んできた流れの中で、2000年以降になって再びラミナのサイズに原点回帰するものが現れたと考えられる。

4. 木質材料のエレメントサイズと接着性能評価

木質材料は、エレメント同士の接着が良好に行われていて初めて、製造時に企図した諸性能を十分発揮できる。木質材料における接着に関する要求性能はその材料の用途によって異なるものの、いずれの材料においても、接着性能の評価は製品の品質管理や性能の担保、新たな技術開発の上で重要となる。木質材料の接着性能を評価する目的は、製造工程で接着不良が無いかどうかの判別、材料の初期性能の把握、初期性能がどのくらい維持または低下するか(長期耐久性)に大別することが出来よう。材料規格においては、初期性能の把握と接着不良の判定が主であり、また材料の新規開発で最初に検討される接着性能も同様であると考えられる。長期耐久性の評価については、例えば屋外暴露試験のように時間を要する評価の場合、材料や接着剤の種類毎の接着性能の経時変化の特徴を把握できる一方、実用上の環境の予測・再現が難しいことや、試験終了時には長年経過していることにより試験に供した材料の仕様が現状と異なってしまうといった課題もある。いずれの目的においても、木質材料において接着性能の評価は材料の基礎的な性質を表すものと考えられるが、ここでは接着性能の評価方法、特に初期性能を把握するものについて、木質材料のエレメントのサイズとの関係を考察する。

例えば集成材の場合、ラミナの繊維方向を平行に積層接着して製造されることから、ラミナ同士の接着の程度を評価する方法として、圧縮せん断試験(ブロックせん断試験)が用いられる。これは、任意の

接着層に対してラミナの繊維方向に平行にせん断力を負荷し、そのせん断強さを接着力として評価するものである。また、合板の場合、単板の繊維方向を直交させて積層接着して製造されることから、任意の接着層に対して引張せん断試験を用いることで、そのせん断強さを接着力として評価できる。すなわち、エレメント同士を面的に貼り合わせ、面状の接着層を有する材料については、接着層を選択してエレメント間の接着性能の評価を行うことが可能となっている。

一方、小型のエレメントをマット状に成型して製造する木質ボード類では、厚さ方向に引張力を加える剥離試験を用いることで、材料の内部結合力を評価できる。この手法は木質ボード類の接着の程度を評価しているとも言えるが、材料の厚さ方向において強度的に弱い箇所が破壊を生ずるものであり、エレメント同士が接着している箇所を選択して評価するものではない。また内部結合力には、僅かながらも、繊維板におけるファイバーの絡み合いなどのような接着に依らない因子も働くため、厳密には剥離強さが必ずしも接着剤によって発現する接着性能のみを表さないと考えられる。また湿潤時曲げ試験のような、水分処理前後の性能を比較した残存率と処理の強弱によって耐水性を評価する手法は、材料の接着の程度を表すものであるが、やはり直接的にエレメント間の接着性能を評価するものではない。木質ボード類のようにエレメントが小さい材料では、材料内のエレメントが三次元的に配置・構成されている。そのため、エレメント同士の接着は、面的な接着層を持つものではなく、三次元的かつ点状に拡散したものとなる。したがって、エレメント間の接着性能のみを取り出して評価することは現実的に難しく、材料全体の性能値をもって接着の程度を評価していると言える。

以上より、木質材料のエレメントと接着性能評価の関係を概観すると、エレメントのサイズや配置によって、接着性能の評価方法は、エレメント間の接着している箇所(接着層)を選択して接着の程度を直接的に評価するものと、材料の強度等の性能値に置き換えて評価するものに大別できると言える。

5. 基礎的な木材接着研究の必要性

CLTについて、エレメントと接着性能の関係を考察する。CLTは長大かつ厚い材料であるが、エレメント間の接着、すなわちラミナ1本同士の接着をみると、厚さ(積層)方向においては、直交積層した場合はそれぞれのラミナの幅四方の面積で接着

されているに過ぎない。この接着部がラミナの交差している数だけ集まって、CLTの一接着層を構成している。平行積層した場合、ラミナ同士はおおよそラミナの長さとおよそ幅の積の面積で接着されていることになり、エレメント同士の密着性は高いと言える。一方、面方向においては、幅はぎ接着の有無が、隣り合うエレメント間の接着の有無と等しい。幅はぎ接着が無い場合、層内のエレメント同士の連続性は、直近層との接着によって間接的に発現することになる。厚さ方向、面方向いずれの場合も、CLTにおけるエレメント同士の接着は面的な接着層を有することから、任意の箇所を選択して接着性能を評価することが可能であり、この点では比較的単純なエレメント構成と言える。しかし、上記のような接着の在り方を考えると、CLTの材料全体では、エレメント間の接着は三次元的にやや複雑に構成されているとみなせる。

また、CLTのエレメント間に求められる接着力を考えると、例えば材料が水分変化を受けるとき、木材の異方性による膨潤収縮は10倍程度異なりうることから、直交積層した接着層付近では平行積層の場合と比較して大きな膨潤収縮応力が生じることが予想される。すなわち接着にとっては、直交積層することは、これまでの平行積層に比べると厳しい条件になると考えられ、要求される性能も高度になる。さらに、CLTの実用上、鉛直・水平の両構面に利用されうることを考えると、エレメント間の接着層に働く応力は、ラミナの積層の方向（直交・平行）と荷重方向との組み合わせによって多岐にわたる。したがって、これまでの木材接着においてあまり想定されていない接着性能、すなわち、平行積層した接着層に繊維方向平行に応力が働くもの以外の接着力に関する知見が必要となる。

上記のように、CLTにおけるエレメント間の接着の構成が複雑であり、エレメント間に生じうる応力が多様である性質は、小片型のエレメントを用いた木質ボード類と類似すると考えられる。木質ボード類の場合、前述のように、エレメントの構成は三次元的にランダムな配向・配置をしており、エレメント同士の接着における繊維方向や木理の組み合わせも多岐にわたる。しかし、これらのエレメント同士がどのように接着されているかについては、未解明な点が多い。特に木質ボードにおいて、接着機構の解明を困難にしている一因は、その製造方法にある。ほとんどの場合、木質ボード類は熱硬化性樹脂接着剤を用いて200℃程度の高温で熱圧成型して製造される。そのため、熱圧中のマット内部の熱と水

分の状態は刻々と変化し¹²⁾、接着剤の動態や硬化に大きく影響を及ぼす。しかし、熱圧中のマット内部の状態と接着剤の硬化や接着力の発現に関して論じた報告はほとんどない。木質ボード類の熱圧中に生じる現象は、多くの因子が関係し合うため実証が難しい。木質ボード類の接着機構を解明するには、熱、水および木材自身を因子とした木材接着の基礎的な知見を積み重ねることが必要と言える。

以上より、CLTの接着機構を解明することは、より複雑なエレメント構成を持つ木質ボード類の接着機構の解明へとつながると考えられる。また、CLTも含めた木質材料における木材接着研究の現状として、例えば木材の繊維走向や木取りが接着性能に及ぼす影響^{13, 14)}のような、これまで得られている木材接着の原理を活かすことに加え、実用上を想定した基礎的な知見が必要とされている。特にCLTの接着に関する影響因子や評価方法については課題も多く¹⁵⁾、関連する研究は端緒に就いたところである。木質ボード類など他の木質材料についても、接着機構の未解明な部分に研究的に取り組むことは、実用上、生産エネルギーやコスト面の課題解決に直結しうる。とりわけ、木質材料において現在利用が盛んになっている国産針葉樹材と、構造用途として使用されることを想定した接着剤の組み合わせによる接着性能に関する知見は多くなく、系統立てた研究の必要性は極めて高いと考えられる。そして将来的には、これらの知見は、木質材料の強度等の諸性能の発現機構についての議論につながるであろう。

6. おわりに

主に木質エレメントの観点から、CLTを題材として、木質材料における木材接着について論じた。構造用途への木質材料の利用拡大が進む中で、原木やチップなどの原料や接着剤の情勢は非常に短いサイクルで変動しうる中、実際の製造現場では状況の変化に日々対応を進めている。その一方で、木質材料や木材接着に関する研究分野においては、CLTをきっかけとして、基礎的ではあるがこれまで手つかずにいたような事象に敢えて取り組まなければならないのではないかと考えた。延いてはそれが木質材料の今後の新たな展開に寄与できると考えている。本稿が当該分野の研究のさらなる発展の参考になれば幸いである。

文 献

- 1) 宮武 敦：CLTについて、木材工業 68(5),

- 192-197 (2013).
- 2) 宮武 敦：CLT・直交集成板の定義. 木材工業 68(11), 468-471 (2013).
- 3) 渡部 博：欧州におけるCLT研究開発の現況. 木材工業 69(2), 50-55 (2014).
- 4) Gagnon, S., Pirvu, C.: "CLT Handbook Cross-laminated timber Canadian edition", FPIInnovations, Quebec, 2011.
- 5) 直交集成板の日本農林規格, 農林水産省告示第3079号 (2013).
- 6) Kawai, S.: Toward the new generation of bio-based composite products. Proceedings of the 3rd Pacific Rim Bio-based Composites Symposium, Kyoto, 1996, pp. 1-4.
- 7) 川井秀一：木質材料の開発研究の現状と今後の展開. 木材学会誌 43(8), 617-622 (1997).
- 8) 鈴木滋彦：木質材料のこれまでの発展と今後の展開. 木材学会誌 51(1), 29-32 (2005).
- 9) 鈴木滋彦：木質バイオマス材料の中のウッドプラスチック. 木材工業 67(11), 516-519 (2012).
- 10) 池田潔彦, 溝口 忠, 宇田孝彦, 浅井正幸：スギ3層クロスボードの開発. 木材工業 55(6), 280-284 (2000).
- 11) 川上敬介：スギ3層クロスパネルの住宅用部材としての性能と展開. 木材工業 63(3), 108-113 (2008).
- 12) Humphrey, P. E., Bolton, A. J.: The hot pressing of dry-formed wood-based composites PartII. A simulation model for heat and moisture transfer, and typical results. *Holz-forschung* 43(3), 199-206 (1989).
- 13) 半井勇三：木材の接着と接着剤. "実用木材加工全書3", 森北出版, 東京, 1961, pp. 28-29.
- 14) 上田康太郎, 土屋欣也, 藤城幹夫：1.5接着剤に関係する木材の条件. "木工 (増補版)", 平井信二監修, 朝倉書店, 東京, 2000, pp. 152-153.
- 15) 塔村真一郎：CLTの接着性能評価に関する課題. 木材工業 68(11), 506-511 (2013).