< 綜 説 >

(受理：平成 17 年 11 月 29 日)

防腐処理された集成材の接着性能
— 防腐処理が接着性能に及ぼす影響について —
Bondability of Glued-Laminated Wood Treated
with Preservatives:
Effect of Wood Preservatives on Adhesive Properties

宮 崎 淳 子*
Junko MIYAZAKI

1. はじめに

集成材とは、ひき板（ラミナ）や小角材等をその繊維方向を平行にし、厚さ、幅および長さ方向に集成接着した材料である（図 1）。比較的小さな材料から長大材はもちろん様々な寸法の部材の供給が可能である。また、強度上の欠点である節や腐れを除かれ、積層効果によって性能のバラツキが抑えられている¹⁾。このような利点から、集成材は構造用部材として使用されている。

近年、木造橋のような風雨にさらされる建設物に構造用集成材が使用されている。このような使用環境では、腐朽

や虫害、水や温度など様々な環境因子が集成材の強度性能に影響する。菅野ら²⁾は、集成材の耐用年数を左右する環境因子を明らかにするために、屋外で暴露した集成材の接着強さの変化を経時的に調べた。その結果、防腐処理を施していない集成材は、約 3 年が経過したあたりからせん断接着強さが低下し始め、約 7 年でほとんど失われたが、防腐処理された集成材は、10 年後においても初期接着力の 60～80% が残存したことから、集成材の耐久性は接着層の劣化よりもラミナの腐朽による劣化に支配されると述べている。集成材は適切な防腐処理を施せば、屋外で少なくとも 20 年間は十分な接着性能を保持することがわかっている^{3,4)}。

集成材に防腐処理を施す方法としては、集成材に木材保護着色料を塗布する方法、集成材に防腐薬剤を加圧注入する方法、ラミナに防腐薬剤を加圧注入し、積層接着する方法がある。木材保護着色料を塗布した場合、薬剤は表層に付着しているだけであるため、使用中に木材が割れてむきだしになった無処理部分に腐朽菌が繁殖することが問題である⁵⁾。他方、防腐薬剤を加圧注入する方法では、木材の

図 1 一般的な構造用集成材の模式図

*北海道立林産試験場
旭川市西神楽 1 線 10 号 〒071-0198
Hokkaido Forest Products Research Institute
1-10, Nishikagura, Asahikawa, Hokkaido, 071-198, Japan

宮 崎 淳 子

現職：北海道立林産試験場 研究職員
略歴：平成 9 年北海道大学農学部森林科学科卒業、同年北海道立林産試験場に入所。現在に至る。平成 17 年博士（農学）（東京大学）。
専門：高分子化学
趣味：料理、読書

内部まで薬剤を浸透させることができるため高い耐朽性を付与できる。集成材を加圧注入する方法は、処理できる集成材の大きさが注薬管の大きさに限られるために大断面材には適用できないが、ラミナに防腐処理を施してから集成化すれば集成材の大きさは注薬管に制限されないうえ、防腐薬剤は集成材の内部まで行き渡るために高い耐朽性が期待できる。しかしながら、このような集成材を実用に供するには、防腐処理されたラミナの接着性能を把握する必要がある。

防腐処理を施した木材を接着する試みは以前から行なわれており、クレオソートやペンタクロロフェノール、CCA (クロム・銅・ヒ素化合物)、ナフテン酸銅など様々な薬剤で処理された木材の接着性能が検討された^{6~8)}。とりわけ、高い防腐性能を有し、広く使用されていた CCA については、接着剤の接着強さやはく離に対する抵抗性を低下させるため、その原因の解明と接着性能の改善を検討した多くの報告がある^{9~16)}。しかしながら、近年、ヒ素やクロムの廃棄処理が難しくなったことから、CCA の使用量は急激に減少し^{17,18)}、アルキルアンモニウム化合物や銅、亜鉛といった比較的毒性が低い化合物を含有する防腐薬剤が代替として使用されている。これらの新たな低毒性防腐薬剤で防腐処理された木材についても接着して使用する試みがなされている^{19~31)}。

本稿では、新たに使用されるようになった低毒性防腐薬剤が接着性能に及ぼす影響についてこれまでの報告を概観する。しかしながら、一般に用いられている木材防腐薬剤の種類は加圧注入用に限っても多く、すべてについて接着性能への影響を論じることは著者の手に余る。ここではアルキルアンモニウム化合物系防腐薬剤 (AAC)、銅・アルキルアンモニウム化合物系防腐薬剤 (ACQ)、銅・ホウ酸・アゾール系防腐薬剤 (CuAz) (表 1) に絞り、これらの薬剤を用いた防腐処理がレゾルシノール樹脂接着剤 (RF) の接着性能に及ぼす影響について著者らが行った一連の検討を中心にまとめることをあらかじめご容赦いただきたい。

表 1 防腐薬剤の種類と主な成分

防腐薬剤	主な成分	pH
AAC	ジデシルジメチルアンモニウムクロライド (DDAC)	2
ACQ	銅 塩化ベンザルコニウム (BKC) アンモニア	10
CuAz	銅 ホウ酸 テブコナゾール	10

※この他に防錆剤、防カビ剤、消泡剤が含まれる

2. 防腐処理された木材の接着性能^{19,20)}

図 2 は AAC を加圧注入したカラマツ材について、ブロックせん断試験を行った結果である。試験方法は構造用集成材の日本農林規格 (JAS) に従った。接着剤はフェノール・レゾルシノール共縮合樹脂 (PRF) を用いた。この PRF はフェノールを 30% 含んでおり、接着性能は RF と同等である³²⁾。防腐処理材をそのまま接着した場合と防腐処理材の表面をプレーナーで切削した場合のせん断接着強さ、木部破断率を比較した。防腐処理後に切削をしなかった場合、無処理材と比較してせん断接着強さ、木部破断率は低下し、JAS の基準値を下回った。表面を切削するとせん断接着強さ、木部破断率は JAS の基準値を上回り、無処理材とほぼ同等にまで改善された。このような結果は、他の報告^{23~28)}でも確認されている。たとえば、鈴木²⁶⁾は DDAC で処理したラミナの表面をプレーナーで切削することで接着性能が向上することを確認している。また、加藤ら²⁷⁾も接着の前に防腐処理材の表面をプレーナーで処理する必要性を述べている。

これらの結果から、防腐処理によってラミナの接着性能は低下するが、表面を切削することによって改善されることがわかる。つまり、防腐処理によって接着不良の原因となる因子が木材表面に付与されるが、表面を切削すること

図 2 AAC で処理されたカラマツ材において表面の切削深さを変えたときのせん断接着強さと木部破断率の変化 (宮崎ら¹⁹⁾) 接着剤はフェノール・レゾルシノール共縮合樹脂接着剤 (PRF) を用いた。

凡例：■：せん断接着強さ，●：木部破断率
構造用集成材の JAS における基準値
—：せん断接着強さ (7.06MPa)，
----：木部破断率 (65%)

で、そのような因子が除去されたか、あるいはその効果が低減されたと考えられる。では、防腐処理による木材表面の変化のうち、接着性能を低下させる因子とは何であろうか。このことについて、以下の節で論じる。

3. 防腐処理による木材表面の物理的变化が接着性能におよぼす影響

3.1 防腐処理による表面のぬれ性への影響²⁰⁾

AAC, ACQ, CuAz で処理されたラミナ表面のぬれ性を調べるために、ラミナに蒸留水を滴下したときの接触角を測定した(表2)。AAC, ACQ, CuAz で処理した木材の接触角は無処理材の接触角より小さく、いずれの防腐処理材もぬれ性は良好であった。従って、AAC, ACQ, CuAz での処理による表面のぬれ性の変化は接着性能を低下させる原因ではない。

表2 防腐処理されたカラマツ材の接触角(宮崎ら¹⁹⁾)

	切削前		切削後	
	早材	晩材	早材	晩材
AAC	— a)	— a)	— a)	— a)
ACQ	16.7	38.5	29.2	25.8
CuAz	— a)	5.0	7.1	9.6
無処理	88.4	75.5	38.0	30.3

a) 液滴はサンプルに滴下した後、ただちに吸収された。
70 秒後の接触角を測定した。

3.2 防腐処理による表面の平滑さへの影響²⁰⁾

図3は防腐処理されたラミナの表面を粗さ計で測定し、ラミナの横断面を木口面方向から見た図である。防腐処理されたラミナは早材部が陥没して表面に凹凸が生じた。過剰に粗い表面は接着強度を低下させる^{33~35)}。これは、接着層に厚い箇所が生じることで接着剤の内部に気泡が形成されたり、接着剤の硬化過程で樹脂が収縮して内部応力が発生したりして、接着層に欠陥ができる確率が高まるためである。防腐処理後に生じる落ち込みは過剰に粗い表面を形成し、接着不良を引き起こす原因になると考えられる。

図3 AAC, ACQ, CuAz を加圧注入したカラマツ材、トマツ材の表面の様子(宮崎ら²⁰⁾)

4. 防腐薬剤が接着剤の硬化反応に及ぼす影響

4.1 防腐薬剤が RF の硬化反応に及ぼす影響

RF の硬化反応は pH³⁶⁾ や金属イオン³⁷⁾ の影響を受けることが知られている。AAC は酸性、ACQ と CuAz はアルカリ性で銅を含む(表1)ことから、防腐薬剤が RF の硬化反応に影響を及ぼす可能性が考えられる。そこで、AAC, ACQ, CuAz が RF の架橋構造の生成に及ぼす影響を検討した。

防腐薬剤を添加して硬化させた RF を TBA (Torsional braid analysis) 法による動的粘弾性測定に供し、薬剤の有無による RF 硬化物の力学的性質の違いから、防腐薬剤が RF の架橋構造の生成に及ぼす影響を検討した。図4は AAC, ACQ, CuAz を添加して硬化させた RF について、相対剛性率と $\tan \delta$ の温度依存性を比較したものである。防腐薬剤を添加していない RF の $\tan \delta$ は漸増し、緻密な三次元網目構造を形成していることが示唆された。AAC を添加した場合、相対剛性率と $\tan \delta$ は防腐薬剤を添加していない RF とほぼ類似していたことから、AAC を添加して硬化させても RF の分子構造には影響がないことが示唆された。他方、ACQ, CuAz を添加した場合、防腐薬剤を添加していない RF よりも $\tan \delta$ は高かった。このことから、ACQ, CuAz は RF の硬化に影響を及ぼすことが考

図4 AAC, ACQ, CuAz を添加して硬化させたレゾルシノール樹脂(RF)の相対剛性率と $\tan \delta$ の温度依存性
相対剛性率は-50°Cでの G' をベースにした。

えられる。ACQ, CuAz には共通して銅が含まれることから、銅が RF の硬化に何らかの影響を及ぼしているかもしれない。そこで、銅を添加して硬化させた RF の架橋構造を紫外吸収スペクトル (UV) 分析, 赤外 (IR) 分光分析, TBA 測定で調べ、銅が RF の硬化反応に及ぼす影響を検討した。

4.2 銅が RF の硬化反応に及ぼす影響²¹⁾

図 5 は十分に硬化させた RF の UV スペクトルである。スペクトルは、積分球を用いて反射光を測定した。図 5 (a) は硬化剤の添加量を変えて硬化させた RF の UV スペクトルである。硬化剤の添加量を増すと 270nm, 360nm の吸収強度は増大した。270nm は芳香環に帰属される。360nm における透過率はレゾルシノールとホルムアルデヒドとの反応を進めると低下することが報告されている³⁸⁾。すなわち硬化が進むと 360nm 付近のピークの吸光度が増大する。このことから、図 5 (a) における硬化剤の添加量を増したときの 360nm の変化は、硬化反応の促進を反映している。図 5 (a) におけるスペクトルの変化を参考に、銅として硫酸銅を添加して硬化させた RF の UV スペクトル (図 5 (b)) を見ると、銅の添加量の増加に伴う UV スペクトルの変化は、硬化剤の添加量を減じたときのスペクトルの変化と類似していることがわかる。従って、銅を添加した RF の硬化は十分に進んでいないと考えられる。

銅が RF の架橋結合の形成に及ぼす影響をより詳しく調べるために、IR 分光分析を行った。RF は、レゾルシノールの 2, 4, 6 位の全てあるいはいずれかが架橋結合されて

三次元網目構造を形成する。硬化反応の解析に用いる特性吸収バンドの帰属は過去の報告に従った。架橋結合であるメチレン結合に帰属される吸収は 1475cm^{-1} に生じる^{39,43)}。山尾ら^{40,41)}によって、 960cm^{-1} はレゾルシノールの 2 位の水素の振動に帰属され、4 位にアルキル基が入ると 980cm^{-1} にシフトし、2 位に置換が起こると消失することが報告された。すなわち、 960cm^{-1} は未反応のレゾルシノールに由来する吸収で、 980cm^{-1} は 4 位が置換されたレゾルシノールあるいは 4, 6 位が置換されたレゾルシノールに由来する吸収である。 825cm^{-1} は 2 隣接水素の面外変角振動に帰属され^{39,42,44)}、4 位が置換されたレゾルシノール核、2, 4 位が置換されたレゾルシノール核に帰属される。スペクトルの解析には 1605cm^{-1} を基準ピーク^{43,44)}とした相対吸光度比を用いた。

図 6 は銅を添加して硬化させた RF について、銅の添加量に対する特性バンドの相対吸光度比の変化を示した図である。 960cm^{-1} 付近に明瞭なピークは認められなかったことから、銅を添加して十分に硬化させた RF に未反応のレゾルシノールはほとんど残存していないことが示された。メチレン結合に帰属される D_{1475}/D_{1605} は銅の添加量を増加すると減少したことから、銅の添加量を増すと架橋結合が減少することが示唆された。この変化に対応して、 D_{980}/D_{1605} , D_{825}/D_{1605} は増大した。銅を添加していない RF (0mmol/g) は三次元網目構造が十分に発達しており、2, 4, 6 位のすべてが架橋結合されたレゾルシノール核が形成されている。これに対して、銅を添加するとメチレン結合が減少するとともに 4 位、4, 6 位、2, 4 位が置換されたレゾルシノールが増加したということは、2, 4, 6 位が

図 5 RF の紫外吸収 (UV) スペクトル (宮崎ら²¹⁾)
(a) 硬化剤の添加量を変えて硬化させた RF の UV スペクトル (硫酸銅は添加していない。)
(b) 硫酸銅を添加して硬化させた RF の UV スペクトル

積分球を用いて反射光を測定した

図 6 硫酸銅の添加量に対する RF の相対吸光度比の変化 (宮崎ら²¹⁾)

図7 硫酸銅を添加して硬化させたRFの相対剛性率と $\tan \delta$ の温度依存性(宮崎ら²¹⁾)
相対剛性率は-50°Cのときの G' をベースにした。

すべて架橋結合されたレゾルシノール核が減少したことを示唆する。従って、銅はRFの架橋結合の生成を妨げると考えられる。

そこで、銅を添加して硬化させたRFの力学的性質をTBA法による動的粘弾性測定で調べ、銅を添加することによって形成されるRFの架橋構造の変化を考察した。図7は銅を添加して硬化させたRFの相対剛性率と $\tan \delta$ の温度依存性を示す。銅を添加していないRFでは、温度の上昇に対して $\tan \delta$ は漸増した。銅を添加したRFでは、 $\tan \delta$ は60°C付近から急激に増大し、銅の添加量を増加すると低温側にシフトした。これは、銅を添加することによってRF硬化物の分子の易動性が増大し、分子の拘束が弱まったことを示唆する。IR分析の結果、銅を添加することでRFの架橋結合の生成が阻害されたことをあわせて考慮すると、銅の存在下で硬化させたRFは、架橋結合の生成が阻害され、架橋密度が減少すると考えられる。

以上の結果から、RFの硬化に対してAAC, ACQ, CuAzが及ぼす影響は次のようにまとめられる。AACはRFの硬化反応に影響しないが、ACQ, CuAzはRFの硬化を阻害する。これは、ACQ, CuAzに含まれる銅がRFの架橋の生成を阻害して架橋密度が減少したためであると考えられる。

5. 防腐処理された木材に付与された接着阻害因子と接着性能との関係²⁰⁾

以上の検討から、防腐処理されたラミナにおいて接着を阻害すると考えられる因子は防腐処理ラミナに生じる凹凸による表面粗さの増大と薬剤成分による接着剤の硬化阻害であった。では実際にAAC, ACQ, CuAzで処理された

図8 AACで処理されたトドマツ材において表面の切削深さを変えたときのせん断接着強さと木部破断率の変化
接着剤はRFを用いた。

凡例：▨：せん断接着強さ，○：木部破断率
構造用集成材のJASにおける基準値
—：せん断接着強さ (5.88MPa)
----：木部破断率 (65%)

ラミナを接着した系において、これらの阻害因子が接着性能に影響しているのかどうかを検討した。

図2はAACで処理されたカラマツ材について、表面の切削深さを変えたときのせん断接着強さ、木部破断率を示したものである。接着する前に表面切削しないとせん断接着強さは無処理材よりも低下したが、表面の切削深さを増すと木部破断率は増大し、1mm切削することで無処理材とほぼ同等の接着性能にまで改善できた。AACはRFの硬化反応に影響しないことを考慮すると、防腐処理によって低下したラミナの接着性能を改善することができたのは、切削によって表面の凹凸が除去されたためである。

なお、AACで処理されたトドマツ材でもカラマツ材と同様に防腐処理によって表面に凹凸が生じた(図3)にもかかわらず、表面を切削しなくてもせん断接着強さは低下しなかった(図8)。これは、トドマツは早晩材とも比重が小さく、早晩材の比重差も小さい⁴⁵⁾ため、表面に生じた凹凸が接着時の圧縮によって軽減されて、接着不良の原因にならなかったと考えられる。カラマツは早晩材の比重差が大きく晩材がかたい⁴⁵⁾ため、接着時の圧縮で凹凸は軽減されず接着不良を引き起こす原因となったと考えられる。

図9はAAC, ACQ, CuAzで処理されたラミナのせん断接着強さ、木部破断率を示す。落ち込みの影響を除くために表面を1mm切削した。なお、切削後の表面に薬剤成

図9 種々の防腐薬剤で処理されたカラマツ材・トドマツ材のせん断接着強さと木部破断率
カラマツにはPRFを使用し、トドマツにはRFを使用した。
接着の前に防腐処理材は表面を1mm切削した。

凡例：■：せん断接着強さ，○：木部破断率
構造用集成材のJASにおける基準値
——：せん断接着強さ，
----：木部破断率

分は残存していることを確認した²⁰⁾。いずれの薬剤で処理したラミナも無処理材と同程度の接着性能が得られた。なお、構造用集成材のJASに規定されている耐水接着性能試験である浸せきはく離試験，煮沸はく離試験の結果，ブロックせん断試験と同様の傾向を示した。従って，表面の凹凸を軽減すれば，AAC，ACQ，CuAzで処理されたラミナは良好な接着性能が得られることがわかった。ACQ，CuAz中に含まれる銅はRFの硬化を阻害することが示されたが，ACQ，CuAzで処理されたラミナの接着性能試験の結果には影響しなかった。

ACQ処理されたラミナを接着した集成材の促進劣化試験の結果，無処理材では煮沸繰返し，減圧加圧処理を5回繰返ししてもはく離率は5%以下であったが，ACQで処理されたラミナをRFで積層接着した集成材は，煮沸繰返し処理あるいは減圧加圧処理を2回行った後に接着層のはく離率が5%を上回ったことが報告されている^{29,30)}。また，ACQ処理されたラミナをRFで接着した集成材を3年間の屋外暴露試験に供した結果，せん断接着強さは無処理材よりも低く，はく離率は無処理材よりも高かったとの報告もある³¹⁾。これらの試験では，ACQ処理されたラミナ表面はプレーナーで切削した後に接着したことから，防腐処理によって生じる落ち込みが接着性能を低下させたとは考え難い。

木材中に注入された銅は，ヘミセルロースやリグニンのカルボニル基と結合し⁴⁶⁾，水に溶けにくい安定な錯体を形成すると言われている⁴⁷⁾が，ACQ処理材から水によって溶出しうる銅の量は比較的多いことが報告されている^{48,49)}。

このことを考慮すると，防腐処理材中の銅が接着剤に溶出し，硬化を阻害する可能性は十分に考えられる。上述のとおり，銅を含むACQで処理されたラミナは接着耐久性が低かったことから，銅によるRFの硬化阻害は接着耐久性に影響するかもしれない。このことについては更なる検討が必要である。

6. おわりに

本稿は，防腐処理されたラミナの接着性能について著者らの検討を中心に述べてきた。このことについて，今後の課題として，次のことがあげられる。防腐処理によって木材表面に生じる凹凸を低減させるため，防腐処理材の表面を切削することが有効であったが，これは薬剤が高濃度に含まれた部分を除くことになり，防腐性能の観点からは決して好ましい処理とは言えない。そこで，落ち込みが生じないように防腐処理を施すなど，防腐性能を最大に発揮できるような方法を施す工夫が必要であろう。また，銅によるRFの硬化阻害は実際の接着強さや耐久性にどのような影響を及ぼしているのかを明らかにすることが必要である。

木造橋のような高度な性能が求められる環境下における構造用集成材の安全な利用が促進されるために，本稿が少しでも参考になれば幸いである。

謝辞

本研究を共同で行った島根大学総合理工学部 中野隆人教授に感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) 林知行, 材料, 47(4), 331 (1998).
- 2) 菅野養作, 森屋和美, 木材工業, 38(11), 530 (1983).
- 3) 宮武敦, 藤井毅, 林知行, 第44回日本木材学会研究発表要旨集, 414 (1994).
- 4) 宮武敦, 藤井毅, 森屋和美, 林知行, 森林総合研究所 平成9年度 研究成果選集, p. 22 (1998).
- 5) 佐々木貴信, 土井修一, 伊藤良介, 柴田悟, 第52回日本木材学会大会研究発表要旨集, p. 564 (2002).
- 6) J. G. Kuenzel, N. V. Poletika, H. B. McKean, *J of FPRS*, 3(12), 35 (1953).
- 7) M. L. Selbo, H. W. Angell, *Forest Prod. J.*, 5(2), 84 (1955).
- 8) M. L. Selbo, *Forest Prod. J.*, 8(9), 25 (1958).
- 9) C. B. Vick, Adhesives and bonded wood products: Proceedings of symposium; 1991, 158 (1994).
- 10) C. B. Vick, *Forest Prod. J.*, 30(9), 25 (1980).
- 11) C. B. Vick, *Forest Prod. J.*, 31(9), 34 (1981).
- 12) C. B. Vick, *Forest Prod. J.*, 45(3), 78 (1995).
- 13) J. J. Janowiack, H. B. Manbeck, P. R. Blakenhorn, K. R. Kessler, *Forest Prod. J.*, 42(10), 68 (1992).
- 14) 山本幸一, J. N. R. Ruddick, 木材保存, 19(3), 104, (1993).
- 15) T. Sellers, Jr., G. D. Miller, Jr., *Forest Prod. J.*, 47(10), 73 (1997).
- 16) C.-M. Chen, D. L. Nicholls, *Forest Prod. J.*, 50(3), 81 (2000).
- 17) 石田英生, 木材工業, 55(11), 577 (2000).
- 18) 山本幸一, 木工機械, 190(1), 6 (2001).
- 19) 宮崎淳子, 中野隆人, 平林靖, 岸野正典, 木材学会誌, 45(1), 34 (1999).
- 20) 宮崎淳子, 中野隆人, 木材学会誌, 49(3), 212 (2003).
- 21) 宮崎淳子, 中野隆人, 木材学会誌, 48(3), 178 (2002).
- 22) 宮崎淳子, 中野隆人, 木材学会誌, 48(3), 184 (2002).
- 23) 鈴木広明, 松田雄一, 青山賢一, 今村正輝, 農林水産消費技術センター調査研究報告, 20, 77 (1996).
- 24) 沖公友, 津嶋貴弘, 山崎憲輔, 入野智介, 高知県工業技術センター研究報告, 27, 79 (1996).
- 25) 沖公友, 高知県工業技術センター研究報告, 28, 72 (1997).
- 26) 鈴木憲太郎, 「木質系新素材による高強度・高耐久・環境調和型架構技術の開発」, 農林水産技術会議事務局編, 36 (1995).
- 27) 加藤真吾, 村口良範, 武智正典, 藤田誠, 松岡真悟, 愛媛県林技研報, 22, 22 (2004).
- 28) 宮武敦, *APAST*, 22, 16-20 (1997).
- 29) 宮崎祐子, 和田博, 満名香織, 奈良県森技セ研報, 34, 97 (2005).
- 30) 宮崎祐子, 和田博, 満名香織, 奈良県森技セ研報, 34, 103 (2005).
- 31) 満名香織, 増田勝則, 中田欣作, 西雅史, 奈良県森技セ業務報告, 平成11年度, p. 17, (2002).
- 32) 小西信, 木材工業, 29(3), 96 (1974).
- 33) 堀岡邦典, 林試研報, 89, 105 (1956).
- 34) J. E. Marian, D. A. Stumbo, C. W. Maxey, *Forest Prod. J.*, 8(12), 345 (1958).
- 35) L. Murmanis, B. H. River, H. Stewart, *Wood Fiber Sci.*, 15(2), 102 (1983).
- 36) G. E. Little, K. W. Pepper, *British plastics*, 20, 430 (1947).
- 37) A. Pizzi, *J. Apply. Polym. Sci.*, 24, 1247 (1979).
- 38) P. J. Stedry, *Ind. Eng. Chem.*, 43(10), 2372 (1951).
- 39) 吉見直喜, 山尾正義, 田中誠之, 工業化学雑誌, 66(11), 1601 (1963).
- 40) 山尾正義, 貫井繁雄, 北沢英俊, 田中誠之, 工業化学雑誌, 74(10), 2193 (1971).
- 41) 山尾正義, 田中米美, 貫井繁雄, 久保田明, 田中誠之, 分析化学, 21, 491 (1972).
- 42) K. Nakanishi, "Infrared absorption spectroscopy", Holden-day Inc., San Francisco, p. 26 (1962).
- 43) 山尾正義, 渡辺忠勇, 田中誠之, 分析化学, 18, 958 (1969).
- 44) 山尾正義, 貫井繁雄, 山田忠和, 田中誠之, 工業化学雑誌, 74(12), 2571 (1971).
- 45) 渡辺治人, 木材理学総論, 農林出版 (株), (1978).
- 46) J. N. R. Ruddick, C. Xie, F. G. Herring, *Holzforchung*, 55(6), 585 (2001).
- 47) J. Zhang, D. P. Kamdem, *Wood Fiber Sci.*, 32(3), 332, (2000).
- 48) C. Tascioglu, P. Cooper, T. Ung, *Holzforchung*, 59, 574, (2005).
- 49) L. Waldron, P. A. Cooper, T. Y. Ung, *Holzforchung*, 59, 581-588 (2005).