

未来の木材科学・歩むべき方向

樋 口 隆 昌*

Future Research Direction in Wood Science

Takayoshi HIGUCHI*

1. はじめに

“人間は考える葦である”。45億年前に誕生した地球が幾多の変遷を経て10億年後には生物が誕生し、更に中新世（2500万年～1600万年前）末には人類が誕生した。木材は極めて加工し易く、また燃料としても好適であるから人類の誕生以来、木材が住居、道具、燃料として生活上欠く事のできない資源であっただろう事は容易に想像できる。それ以来、文明は森林とともに栄え、森林の破壊とともに消滅してきた事は歴史の語るところである。これは現在でも例外ではない。ランドサットの測定が示すように、主としてブラジルの熱帯雨林、東南アジア、アフリカ地域などに於いて大規模な森林の破壊が進みつつあり、これに伴う洪水、異常気象、土地の砂漠化は人類の将来に対して警鐘を鳴らしている¹⁾。

世界の森林資源は熱帯多雨林、熱帯季節林、温帯常緑林、温帯落葉林、亜熱帯林、ウッドランド・低木林を合わせると 170×10^{10} トンになり²⁾、その平均生産量は 74×10^9 トン/年（蓄積量の約4.4%）に達する。世界の年間木材消費量は約 14×10^9 トンに達し、生産量の19%であるからグローバルな見地からは今のところは幾分余裕があるようにみえるが、木材は一端失ったら人類の生存にも関わるかけがえのない資源である。

木材研究所においては、「木材が再生産可能な資源で、その生産過程は国土、生態系、環境の保全に貢献していること、またその利用過程は非公害的で、残渣は生態系の維持に寄与し、人間生活に適合していることを深く認識し、木材資源の永遠保続的供給と、生産から廃棄に至るあらゆる段階で、合目的で、環境にマッチした方法論を確立する³⁾。」ことを基本理念としている。この基本理念にたって21世紀を目指す木材科学の方向を考えたとき、どのような分野があるであろうか？ 以下主として化学・生化学的立場から私見を述べることにする。

2. これからの研究開発方向

前節で述べたように、世界的にみた森林資源は現在のところ、世界の木材需用を満たしているが、局地的には既に需要が生産量を上まわっているところも多く、今後さらに発展途上国の人口の急増に伴う林地の伐採、土地の砂漠化など多くの原因によって世界の木材資源のさきゆきは極めて厳しい状況にある。我国においても、現在の木材需用に対する国産材による充足率は30%にすぎず、戦後植林した森林が成熟した状態に至っても需要の60%を満たすにすぎないと推定されている。木材は物性、加工性、木質住宅の居住性などの面から住宅材料に好適であるから、今後ともその需要の大半は木質住宅関連分野にあると考えられる。一

* リグニン化学部門 (Research Section of Lignin Chemistry)

方、従来紙の需要量は文化のバロメーターと言われ、我国で木材が紙・パルプ用に用いられる量は総需要の30%に達している。今後、情報手段の多角化に伴いビデオ、コンピューター、ファクシミリなどの組合せによる近代的ニューメディアによって置き変っていったとしても紙・パルプの用途もこれに伴って増々多角化し、その需要量は変わらないかあるいは増えるものと思われる。したがって、木材の需要は現状に余程の変化がない限り、主として住宅関連と紙・パルプ関連産業からと考えられる。それ故、この分野においても既設のプロセスの単なる改善技術的研究ばかりでなく、革新技術的な研究が増々要望されるであろう。

実際、我国大学農学部林産(工)学科の講座の内容と研究・教育の方向も大部分が住宅、紙・パルプ関連の基礎・応用科目からなっている。欧米の大学、例えばノースカロライナ州立大森林資源学部、アメリカ林産物研究所を始めとするヨーロッパ、オーストラリア等の木材関係の研究所においてもこの基調は変わっていないように思われる。

一般に、この分野の研究は住宅・パルプ・紙の分野でも産業的に基本的方式が既に確立されていて、その各プロセスの改善のためのテクノロジーとして方向づけられている場合が多いように思われる。例えば、木材パルプ製造の分野においても歴史的にはサルファイト法が Tilgman により1866年に、クラフト法が Dahl により1879年にそれぞれ開発され、これらのパルプ化法の開発は原理的にも技術的にもすばらしいものであったが、その後この分野の研究の大部分は主として両法のパルプ蒸解の機構の解明とその改良として方向づけられていると言える。その他の住宅・木質材料分野においても事情はそれ程ちがわないように思われる。技術の改善を通して social needs に答える研究は日日の人間生活と密着していてももちろん重要であり、発展途上国への技術移転や指導も主として、この分野で行われてきたが、将来、木材の全く新しい産業、新素材分野の開発につながる可能性をもった木材科学及び工学分野の基礎的研究は一層重要であり、このような基礎的研究なくしては将来活力に満ちた林産学の発展は期待できないであろう。したがって、木材研究所においてもこの方向の研究を一層重視すべきであろう。

3. バイオマス変換とウッドケミカルス

林産工学分野の躍進を計るには、第1に木材を自然科学の対照としてあらゆる分野から徹底的に解明し、その特質を明らかにすることである。さしあたり応用面では新しい産業分野の開発につながる分野の一つとして未利用材及び木質残渣をそのまま、あるいは主要成分に分離してから化学的・生化学的にウッドケミカルス、飼料、液体燃料などへの変換に関する研究がある。

a) ウッドプラスチック

最近、白石・則元・横田らが中心になって、アシル化及びエーテル化木材のプラスチック化の研究が進んでいる⁴⁾。アシル化及びエーテル化木材は加熱・圧縮すれば成型したり、フィルムにしたりすることができ木粉からの住宅・家具材料の製造に好適である。またこの研究は従来、個々の成分で主として官能基分析として行われていたアシル化、エーテル化を木材そのものに行い、その物性との関係を明らかにすることによってプラスチック化に成功したもので、木材の表面加工、接着剤、木材溶液の製造にも利用でき、将来未利用残渣利用の新しい方向として研究を強化すべきである。

b) ウッドリファイナリー

木材からのパルプ・紙・エタノール製造等は木材中の多糖類を利用するもので、リグニンの利用についてはほとんど考慮されていなかった。最近になって木材の主要成分を分離し、各成分についての有効利用を計るいわゆるウッドリファイナリーについての研究が重視されてきた。その代表例として木材の爆砕処理⁵⁾とソルボリシス⁶⁾をあげることができる。

木材の爆砕法は木材チップを高温(180~270°C)、高圧(14~60 kg/cm²)の水蒸気で短時間(20秒~20分)処理し、急速に大気圧まで減圧することにより木材をいわゆる爆砕する方法で、この処理によりヘミセルロ

ースはほとんど単糖まで加水分解され、リグニンの α 及び β -O-4 結合は開裂して低分子化（分子量約2100）し、セルロースと分離することができる。爆砕木材は牧草（アルファルファ、オーチャード、チモシー）以上の消化率で消化され、家畜のよい粗飼料とすることができ、またセルラーゼによりほとんど全セルロースが糖化される。ヘミセルロースフラクションは水抽出により、またリグニンはメタノールあるいはアルカリ抽出で得られる。これらの成分の利用については今後の問題であるが、一般にケミカルス、液体燃料の原料とすることができる。

ソルボリシスは例えばクレゾール水混液で木材チップを高温（160～190°C）で60～90分処理して常温に戻すと、リグニンは開裂してクレゾール層に、また水層にはヘミセルロースの加水分解物がそれぞれ溶け、残渣としてセルロースが得られるもので、ヘミセルロース、リグニンをとも利用できる新しいパルプ化法として注目を集めている。この方法は榊原らの指導で日本紙パルプ研究所が研究にとりくんでおり、また類似の方法としてスイスの Battelle-Geneva Process⁷⁾ が知られており、またアメリカ Hydrocarbon Research Institute ではリグノールプロセス⁸⁾ として、クラフトリグニンを水素化分解（ハイドロクラッキング）と水素気流下での熱分解（ハイドロデアルキレーション）によってフェノール、ベンゼンの著しい収率の向上に成功している。今後、これらの方法を組合せるいわゆるウッドリファインリー研究は木質残渣有効利用の極めて重要な分野に発展するものと考えられる。

4. 樹木の成長・木材成分の遺伝的生化学的調節

a) エネルギー・バイオマス造林

日本の林業政策は国土及び環境の保全と、主として住宅用木材（スギ、ヒノキ等）の生産を目的として行われてきた。しかし、最近になって農林水産技術会議はバイオマス変換計画を一大プロジェクトとしてかけ、住宅用木材の生産以外に北海道、東北地方を中心にシラカンバ、ポプラなどの短中期（5年）高収獲量14～20トン/ha/年）を目指した高密度植栽の試験を行っており、世界的にも表1に示すように多くのエネルギー造林の試みがなされている⁹⁾。

ちなみに、1984年度 Marcus Wallenberg 賞はユーカリのクローンによる高生長量森林の造成研究によって Aracruz Florestal S.A. (ブラジル) の Leopoldo G. Brandao, Edgard Campinhos Jr., Ney M. Dos Santos, Miss Yara K. Ikemori に受与されている。この研究は多くの地理的に異なる地域から採集した異なる種及びその交配種の多数の遺伝子プールを利用して、ブラジルにおけるユーカリ植林に優れた成果をあげたものである。彼らはクローンユーカリの根の切断片を植える植林法によって種子から生長したユーカリ森林の数倍の生産量をあげている。年間生長量は天然の温帯林の生長量の10～20倍に達し、病理学に対する抵抗性、異なった環境土地に対する適応性、材質の均一性などについても大きな成果をえている。また、1968年に不適地として放棄されたリオデジャネイロ北方の大西洋岸の土地にこの方法で植林し、現在大規模パルプ工場に充分な原料の供給に成功している。

その他この分野の研究として、アメリカでは適当なミコリザ（菌根）を針葉樹の根に接種する事により対照樹の数倍の成長量をあげる研究¹⁰⁾ が行われており、例えば pitch pine-loblolly pine の交配種に *Pisolithus tinctorius* の一定の株を接種すると、本来、生育不適地（テネシー州の石炭掘出し地）での活着と成長に著しい改善がみられることを明らかにしている。また、本年の Tappi R & D Conference (1984 Sept. 30～Oct. 3) におけるプログラムでも、J.W. Banny: Specialized hardwood crops for energy and fiber-status, impact and need., B. McCown: From gene manipulation to forest establishment: shoot cultures of woody plants can be a central tool., P.R. Blackenhorn: The characterization of hybrid poplar as a potential feedstock for fermentation and pyrolysis などがあり、パルプ産業関係でも遺伝的方法の応用による住宅材以外の biomass 変換用材の育成が重要な課題になっている事が理

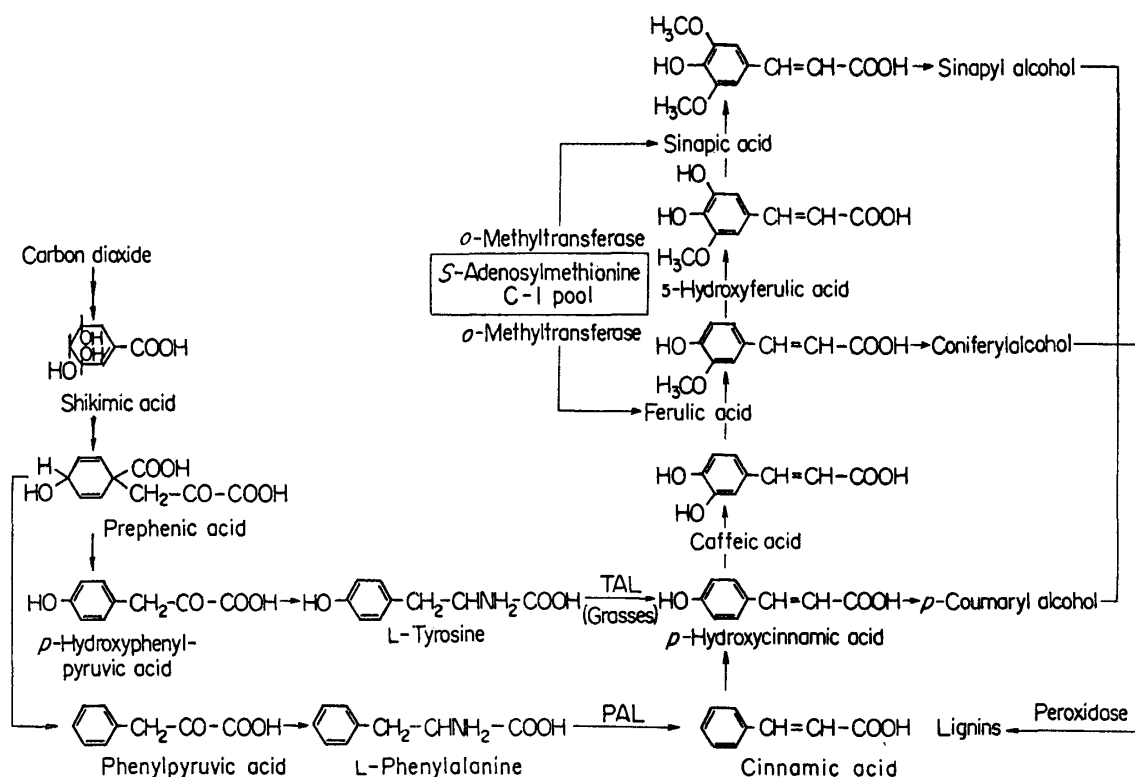
表1. 各国のエネルギー造林の要約²⁾

国 別	造 林 樹 種	生 産 方 式 (計画)	備 考
ブ ラ ジ ル	ユ ー カ リ	伐期 7 ~ 10年, 収穫後萌芽更新, 年平均生長量 20 ~ 25 m ³ /ha	アルコール生産量
カ ナ ダ	ポ プ ラ	sort 輪伐期: 伐期10年, 植付 3 × 3 m, 期待胸高直径 20 cm, 樹高 18 m, 生長量 20 × 30 m ³ /ha/yr. mini 輪伐期: 伐期 1 ~ 3 年, 植付 0.3 × 0.9 m, 生長量 15 乾トン/ha/yr. midi 輪伐期: 伐期 5 ~ 6 年, 窒素固定植 物と混植 機械または薬剤地ごしらえ・下刈, 病虫 害防除, 肥培, かんがい, 枝打ちを行う。 適合品種の選定。収穫後萌芽更新。	パルプ・紙工業用と して計画されている が, エネルギー生産 にも適用できる。
フィンランド	ヤナギ・ポプラ・ カンバ・ハンノキ	伐期10~20年, 期待収穫 90~270トン/ha, 生長量 7~17生トン/ha/yr., 収穫後萌芽 更新。未利用肥沃地と転換可能農地を予 定。育種, 造林特性, 保育法の研究。	国内エネルギー自給 率を28%から40%へ 高める (1990年まで に) 計画
アイルランド	ハンノキ・クリ・ トネリコ・ポプラ・ ヤナギ・ユーカリ	植栽密度, 育林法, 伐期の研究。 期待生長量 12トン/ha/yr.	発電用ビートの代用
ニュージーランド	ヤナギ・ポプラ・ ラジアータマツ	ヤナギクローン: 植付 3 × 3 m ~ 1.2 × 1.2 m, 伐期 1 ~ 2 年, 期待生長量 8.9 ~ 30.8 乾トン/ha/yr.	バイオマスエネルギ ー用
フィリッピン	ジャイアントイピ ルーイビル	密植 (0.3 ~ 3 m), 伐期 4 ~ 6 年, 期待生長量 5 ~ 25 乾トン/ha/yr, 収穫後萌芽更新。	木質系熱動力計画に よる小規模木材火力 発電用
スウェーデン	ヤ ナ ギ	生長量 20 乾トン/ha/yr. 植付 0.75 × 1.25 m, 伐期 2 ~ 3 年, 放棄 農地と泥炭地利用, かんがい, 施肥, 機械 収搬の研究。	木質エネルギー自給 率 8 % を 46 % に 高 め る計画 (2015年まで に) 国土の 6 ~ 7 % のエネルギー造林
ア メ リ カ	ポプラ・クローン	伐期 4 年, 密植, 集約栽培, 肥培, かんが い, 耕耘, 成長量 20 乾トン/ha/yr.	バイオマスのエネル ギー寄与率 2 % を 6 % に 高 め る (2000年 までに) 計画。

解されよう。今後、微生物と同じように遺伝子工学的手法による質・量とも end-user に適した木材の生産が期待される。

b) 低リグニン木材

木材をバイオマス変換・紙パルプ用に用いる場合、リグニンのない、あるいは少い樹木が育成できればパルプ蒸解試薬をおおいに節約する事ができ、多糖類の糖化・発酵面にも寄与するところが大きい。主としてリグニン化学部門での長年の研究によって、リグニンの生合成経路 (図1) が明らかにされ¹⁾, その全過程に関与する酵素の性質についても解明された。例えば、L-フェニルアラニンアンモニリアーゼ (PAL) は高等植物の一次代謝から二次代謝への移行に関係する key enzyme であること、この酵素が α -アミノキシ- β -フェニルプロピオン酸によって強く阻害され、この阻害剤を加えるとリグニンのない植物ができる

図1. リグニン生成経路¹¹⁾

PAL：フェニルアラニンアンモニアラーゼ

TAL：チロシンアンモニアラーゼ

ことなども明らかになった¹²⁾。さらに、ヒドロキシシナモイル CoA 還元酵素、ヒドロキシシナミルアルコール還元酵素はモノリグノール生成の最後の反応に関与する木化に特異的な酵素であるから、これら二酵素の遺伝的欠落あるいは阻害はリグニンのない、あるいは少ない植物の生産につながることであり、応用的にも極めて興味深い課題である。その他有用木材抽出物の生合成経路もほとんど解明されつつあり、生産の基礎としての組織培養・細胞培養なども薬学の分野で研究が進んでおり、今後発展・期待される分野である。

c) 微生物セルロース

高等植物の場合は、ワタの綿毛以外は細胞壁中のセルロースは常にリグニンと共存しているが、酢酸菌 (*Acetobacter xylinum*) はセルロースを生産する唯一の細菌で、リグニンは生産しない。酢酸菌によるセルロースの生成機構については、最近 M. Brown Jr.¹³⁾ らによる優れた研究があり、セルロースの生成経路についても緑藻 *Prototheca zopfii* を用い、図2に示すように UDPG, GDPG, ドリコールリン酸-糖の関与する経路が明らかにされている¹⁴⁾。セルロースの用途から考えて、酢酸菌によるセルロース生産が現状では産業的になりたち得る経済的基盤は薄いように思われるが、アメリカにおいてはこの問題についても既に論議が深められており、将来特定の機能に適したセルロースの生産を酢酸菌による事はあながち夢物語ではないようである。

d) 木材腐朽菌の生化学と遺伝子工学

1970年以降、リグニンの微生物分解の機構、リグニン分解の生理学についての研究が著しく進歩し、その応用分野として、クラフトパルプ蒸解液のリグニン分解菌による脱色・脱塩素、未晒しパルプの白色度・強

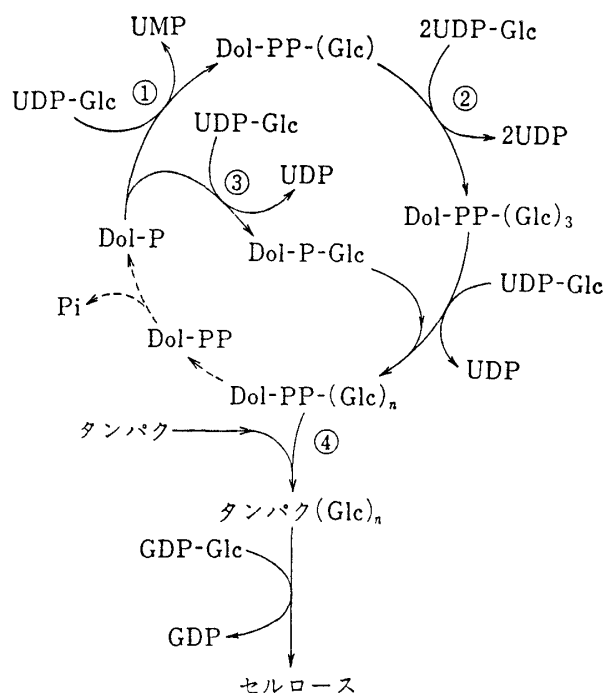


図2. 緑藻での糖タンパク質とセルロースの合成 (Hoop ら¹⁴⁾)

(破線は未証明の反応)

Glc: グルコース, Dol: ドリコール, Dol-P: ドリコールリン酸, Dol-PP: ドリコールピロリン酸, Pi: 無機リン酸

度の改善, さらには生物学的パルプの製造などが研究されてきた¹⁵⁾。リグニン微生物分解に関与する酵素もようやく明らかにされつつあり, 欧米ではこの酵素を指標として既に突然変異種の選抜, 遺伝子工学への活発な研究活動が進められつつある。今後, 生物学的機能を利用したバイオリアクターにより常温・常圧反応によるパルプ化, バイオマス変換の研究が極めて重要である。ちなみに, この分野に関連する Tappi 1984 R & D Conference の発表課題の主なものをあげると次の通りである。

E.S. Lipinsky and J.H. Litchfield: Microbiological processing of streams from advanced pulping processes

L. Jurasek: Biological treatments of pulps for improvement of their properties

E. Bjurström: Bioconversion of wood pulp to fuels

D.F. Carey: Pulp mill odor control problems and some unique biological solutions

V.-B. Huynh, H.-m. Chang and T.W. Joyce: Dechlorination of chlorolignins by a white-rot fungus

G.R. Lanza: Decolorization of Kraft effluent with clay-bioflocculant treatment

A. Griffin: Pulp and paper industry energy savings from implementation of biotechnologies

以上, 従来の木材利用の延長線上にない方向, 特に化学的・生化学的変換によるバイオマス利用の方向についての可能性について論議した。この他にも今後重点的に研究を進めなければならない多くの基礎的分野があるであろう。いずれにしても, 木材科学 (wood science) と木材工学 (wood technology) は車の両輪であり, 木材科学の発展なくして木材工学の発展はありえない。林産学の分野のさきゆきは厳しいものがある。それぞれの分野の研究者による真剣な努力が望まれる。

引用文献

- 1) アメリカ合衆国政府特別調査報告：西暦2000年の地球 I 人口・資源・食糧編，逸見謙三，立花一雄監訳，家の光協会 p.150 (1981)
- 2) 林業科学技術振興所：森林資源の新しい利用，上巻資源編，蜂屋欣二 p. 10 (1984)
- 3) 木材研究所短期整備計画 p. 24 (1974)
- 4) 白石信夫：繊維と工業，**39**，19 (1983)
- 5) 棚橋光彦，樋口隆昌：高分子加工，**32**，39 (1983)
- 6) 浅岡 宏，可知省吾：ウッドケミカルの先端技術と展望，中野準三，原口隆英監修，シーエムシー社 p. 50 (1983)
- 7) C&EN, May 31, **38** (1982)
- 8) D.T.A. HUIPERS, M.W. JONES: Can. J. Chem. Eng., **58**, 718 (1980)
- 9) 2) の p. 15
- 10) D.H. MARX, J.L. RUEHLE, D.S. KENNEY, C.E. CORDEL, J.W. RITTLE, R.J. MOLINA, W.H. PAUREK, S. NAVRATIL, R.W. TINUS and O.C. GOODWIN: Forest Sci., **20**, 373 (1982)
- 11) T. HIGUCHI: Plant Carbohydrate II. Encyclopedia of Plant Physiology New Series 13B (ed. W. TANNER and F.A. LOEWUS), Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, p. 203 (1981)
- 12) N. AMERHEIN and K.-H. GÖDEKE: Plant Sci. Lett., **8**, 313 (1977)
- 13) R. BROWN, Jr: Cellulose and Other Natural Polymer Systems, Plenum Press (1982)
- 14) H.E. HOPP, P.A. ROMERO, G.R. GALEO and R.P. LEZICA: Eur. J. Biochem., **84**, 561 (1978)
- 15) T.K. KIRK, T. HIGUCHI and H.-m. CHANG: Lignin Biodegradation: Microbiology, Chemistry and Potential Applications, Vol. I, II, CRC Press Inc., Boca Raton, Florida (1980)