先端材料のエコバランス的リサイクル技術に関する 国際ワークショップについて

物質工学工業技術研究所 畠山 兵衛*, 剣 持 潔**

Report on “International Workshop on Environmentally Compatible Materials and Recycling Technology”

Hyo Hatakeyama and Kiyoshi Kemmochi
National Institute of Materials and Chemical Research

1. はじめに

21世紀を目の前にして、材料に要求される性能はますます多様化し高度化されている。それらに応える材料として高性能プラスチック、高機能性複合材料など非常に多くの先端材料が開発されている。一方、地球上の限りある資源や環境の保全の重要性が昨今指摘され、自然と人間の調和の上に立った科学の進歩が強く望まれている。従って、先端材料の開発にあたっては地球全体の環境、資源のバランス、エネルギー収支の観点に立った材料開発が必須となってきた。

本国際ワークショップは、科学技術庁の重点国際交流制度によるもので、物質工学工業技術研究所（通産省）、金属材料技術研究所（科技厅）、(独)科学技術国際交流センター（科技厅）の共催で行われ、原材料、製造、使用、寿命、再資源化に至る全流れについて、投入エネルギーと環境へのインパクトを考慮して材料間の比較評価をすることを企図し、さらに現在、欧米で興りつつあるエコバランスを考えた材料開発、及びリサイクル技術の現状を把握しつつ、全世界のコンセンサスの得られる先端材料開発への指針を求めようとしたものである。

開催場所は工業技術院筑波研究センターで、平成5年11月15日（月）～16日（火）に行われ、日瑞科学技術協力、日英二国間協力協定、サミット覚え書き協定（VAMAS）等に基づいて、世界的に研究協力を進めている研究者による活発な研究発表と討論が行われた。本ワークショップの企画運営委員長は平石次郎工業技術院物質工学工業技術研究所所長であり、日本

側コンタクトパーソンは筆者（畠山）、外国側コンタクトパーソンはG. O. Phillips英国ノースイーストウェールズ大学教授であった。出席者は日本人225名、外国人は英国他5ヶ国、17名で合計242名の参加者があり盛会であった。

2. 概 要

先端材料のエコバランス的リサイクル技術に関する国際ワークショップは、英国ノースウェールズ大学のG. O. Phillips教授と東京大学の山本良一教授による基調講演を初めとして、研究講演25件（海外10件、日本16件）とポスターセッションでの発表20件（海外1件、日本19件）が行われた。

研究講演はエコバランス的リサイクル技術の内容を2つに分けて、環境適合材料（Environmentally Compatible Materials）とリサイクル技術（Recycling Technology）の2つのセッションが持たれた。環境適合材料については日本側10件、海外5件の講演があり、リサイクル技術については日本側6件、海外4件の講演が行われた。さらにポスターセッションにおいては産、官、学の各機関から、若手研究者による最先端の研究結果についてポスター展示があり、熱心な討議が展開された。以下にその概要を述べる。

1) 基調講演

英国ノースイーストウェールズ大学のフィリップ教授の基調講演は、「環境適合型高分子材料」と題するもので、「神はアダムに“あなたは塵だから塵に帰る。その間はハーブの実とパンを食べなさい”と教えられた」という聖書の一説を引用し、1950年以前は地球上で創り出されたものは、総てまた地球に戻るものと信じられていた。ところが、50年位前の化学者達が材料製造のため、天然自然に存在する芳香環を変性して“塵として地球に戻せない”物質を創り出してから、

*：物質工学工業技術研究所首席研究官

**：物質工学工業技術研究所複合材料部複合材料構造研究室長

環境不適合材料の存在が始まったことに対して、化学者の一人として責任を痛感しているという、非常に印象的な言葉から始められた。

教授はプラスチック製品の代表として繊維製品を採り挙げ、その発展の歴史を振り返って、1950年代までの木綿、羊毛など天然繊維の第1世代から、1950年代に入ってナイロン、ポリエステル、ポリアクリロニトリルなどの化学繊維が現れた第2世代、さらにこれらの繊維に加えて、より軽く、しかも強度の高いスーパー繊維、ガラス、PAN（ポリアクリルニトリル）系カーボン繊維等々が開発された1985年から今日までの第3世代、これから先の第4世代に分類した。第4世代は、これまでの化学繊維と天然繊維の長所を結び付け、融合化させる技術が重要視され、環境適合性が最大限改善される繊維の時代であろうと述べている。

ナイロン、ポリエチレン等の化繊が開発された当初、人々は天然繊維にはない軽さ、丈夫さに驚喜しそれを利用した。しかし、次第に“地球の塵に戻るものがない”化繊に困り、天然繊維とハイブリッドして使うことも行われるようになった。さらに、天然繊維の肌触りの良さ、親和性が見直されてきた。今では従来の“High-tech”繊維よりも“High-touch”繊維が重要視されるようになり、それを解決するためには人体を含めた天然自然の材料から学ぶ生体模倣（Biomimetics）が重要であるとしている。また、生体模倣材料であれば、生物分解が可能となり、自ずと環境適合材料となるであろうと結んでいる。

日本側からは、東京大学山本良一教授が「エコバランスの考察から出てきた材料の新概念—エコマテリアル—」と題して基調講演を行った。

先端材料の開発技術では、材料のライフサイクル全てにわたって環境負荷を最小にし、最大限材料の再利用を図ることが要求されている。講演の骨子は1993年4月に科学技術庁が組織した“環境と調和する材料技術の開発（ECOMATERIALS）”と題するナショナルプロジェクトの概要を紹介するとともに、その中から次の二つの話題について述べている。すなわち、材料の全寿命にわたってのエコバランスの評価と、材料のエコバランスの改善方法に関する研究である。

ECOMATERIALSとは環境認知材料（Environmentally Conscious Materials）の略である。これに関する研究は、環境と調和し、環境負荷を最小限に抑える新しい材料及び新しい材料技術の開発を目的としている。

図1にこれからの材料開発の新しい概念を示す。即ち、これからの材料開発は、従来の高性能や高機能性

写真1 講演中の Phillips 教授

写真2 講演中の山本教授

高 性 能
高 機 能 性
環 境 調 和 性
将来に亘って社会対価の不要性

図1 材料開発の新概念

に加えて、環境調和性と工業生産に対する社会的対価を少なくすることなどが要求される。これらの要求に応えるためには、天然資源は有限であること、また、きれいな空気や水等の環境も有限であるという観点に立つことが重要である。そのため、工業生産における材料設計、製造、特性解明と解析は自然・生物圏への負荷及び影響を常に考慮する必要がある。

上記の概念に沿って製造された材料で製品を作り使用するとともに、同時に元の資源へ戻すためのリサイクル技術も確立しておかなければならない。また、製品としての寿命が終わった後は、廃棄物として環境に負荷を及ぼす量を最低限に抑える必要がある。このような材料をエコマテリアル（環境認知材料）と呼ぶことにすると述べている。

2) 環境適合材料 (Environmentally Compatible Materials) セッション

本セッションでの課題は、今日の石油化学から創り出された、主にプラスチック材料を“地球の塵”に戻すための研究が中心で、山本教授の講演にあった ECOMATERIALS (Environmentally Conscious Materials) の一部として位置付けられる。

基調講演で G.O. Phillips 教授が示唆したように、石油化学において合成された種々の高分子材料は変性されていて光、水、生物においてもなかなか分解されない。そのため、いわゆる“地球の塵”に戻り難く、環境に大きな負荷を及ぼしている。

本セッションでは筆者畠山（物質研）らが、“植物材料から誘導される生分解性ポリウレタン”と題する講演において、植物材料を原料として得られる糖類或いはリグニン等をポリウレタン中に組み込むことにより、汎用性があり、かつ安価な生分解性材料が得られると報告した。

また、W.B. Banks (ウェールズ大学, 英国) らは、“外装材パネル製造用原料としてのアセチル化油ヤシ繊維”について報告し、耐湿性と寸度安定性のある住宅用材料が得られるとしている。高分子材料の原料を自然界にある植物から得ることが環境保全に大いに寄与することになる。

W.G. Glasser (バージニア大学, USA) は“セルロース、キシラン及びリグニンベースの高加工性高分子”について報告し、木質資源から得られるセルロース、ヘミセルロース、リグニンなどは工業材料として使用でき、十分量を確保できる上に、更新可能材料であり、さらに容易に分解して環境に負荷を及ぼさないと述べた。

L. Salmen (STFI, Sweden) は“セルロース物

写真 3 講演中の Glasser 教授

質の水との相互作用と膨潤特性”について述べ、代表的な更新可能資源であり、かつ良好な生分解性を有する紙の原料であるセルロースが水とどのような相互作用を有するかについて報告した。

また、国岡正雄（物質研）は“微生物によるポリ(γ-グルタミン酸)の合成とその応用”において、植物からだけでなく微生物に生分解性高分子を合成させる研究について報告した。増田隆志（物質研）らは“一酸化炭素を利用する生分解性高分子の合成”において、一酸化炭素から微生物が分解し易い高分子を合成する研究について述べ、多くの参加者の興味を引いた。

生分解がどのような機構で進むかについては、諸星紀幸（東京農工大）らが“リグニン及び関連化合物の生分解”において、遺伝子解明を含む先端的な研究について報告した。

A. C. Albertsson (王立工科大学, スウェーデン) らは“ブレンドの組成とモルホロジーが劣化速度と劣化生成物へ及ぼす影響”で、生分解においては高分子材料のモルホロジーが重要な影響を及ぼすことを明らかにした。

J. F. Kennedy (バーミンガム大学, 英国) は“工業生産と工業廃棄物処理への新しい酵素利用技術”と題する講演で、高分子材料が生物や酵素の働きで分解されてゆく過程やメカニズムの解明に関する研究について述べ、関連分野の将来の発展を約束する基礎研究についての位置付けを行った。

3) リサイクル技術 (Recycling Technology) セッション

本セッションでは山本良一教授（東京大学）による基調講演の ECOMATERIAL 概念を具体化する研究として、八木晃一（金材技研）らの“低環境負担材料

開発のための新しい考え方”と題する金属材料についての講演があり、製品としての寿命が終わった時点で原料に還元できるリサイクル技術を、材料設計の時点で考慮しなければならないことが示された。

世界の現時点でのリサイクル技術の現状について、C. J. Andreen (NUTEK, スウェーデン) が“スウェーデンにおける環境保全に関する最新動向と計画の概要”について紹介し、大谷寛治 (ITB, 日本) は“アジア、米国、欧州におけるプラスチックリサイクルリング”について報告した。我が国における具体例については、小川弘正 (大工研) が“日本におけるプラスチックリサイクルリング例”と題して講演した。

高分子材料をマトリックスとして、ガラスやカーボン繊維で強化した複合材料 (FRP) は比強度、比剛性が高いことや要求される性能に合った設計が可能であることなどの利点のため、航空・宇宙はもとより車両・船舶、住宅・建設資材等のあらゆる分野に使用されていて、今後、さらに生産量の増大が予想されている。しかし、複合材料のリサイクルは、プラスチック等の高分子材料のそれよりも困難であり、現在までのところマテリアルリサイクルとケミカルリサイクルについては、ごく一部がサーマルリサイクルとして燃焼され、熱エネルギーに変換されているに過ぎない。このサーマルリサイクルにおいてすら、多くの問題があり、FRP 廃棄物の環境破壊が懸念されている。FRP は使用されるマトリックス樹脂により熱硬化性と熱可塑性複合材料に分けられ、これまでは常温硬化型のポリエテル樹脂の熱硬化型 FRP が多く成形されている。しかし、リサイクルを考えた場合、熱可塑性型 FRP (FRTP) の方が多くの利点を持ち、今後は FRTP の生産量が増大するものと考えられる。

熱硬化 FRP に関する講演として、北村達人 (強化プラスチック協会が“熱硬化性複合材料のリサイクル—新たな技術ニーズを求めて—”において、新しい熱硬化性 FRP のリサイクル産業についての提言を示した。FRTP については三宅彰 (住友化学) が“熱可塑性プラスチックのリサイクル”において、プラスチック樹脂そのものに関して述べた。また、その複合材料に関しては北野武 (物質研) らが“熱可塑性樹脂複合材料成形時の繊維破壊”について報告し、リサイクルを重ねた場合、FRTP の強化機構がどのように低減するかを示した。

多大の問題点を抱えるリサイクル技術の解決策となるべき技術開発や周辺機器開発などについては、C. Klason (チャルマース大学, スウェーデン) らが“高分子混合材のリサイクル技術”で、電話帳や新聞

写真 4 講演中の Klason 教授

写真 5 講演中の Olsson 教授と会場風景

紙の古紙を蒸煮してプラスチック樹脂に混ぜ合わせた材料で高性能のリングを実際に成形した例を紹介した。FRP 関連では、P. Beutin (EUREKA, フランス) が“高分子成形と FRP 廃棄物のための競合技術：工業生産としての熱分解と化学処理の問題”において、リサイクル製品がバージンの高分子複合材料 (FRP) と競合するためには、リサイクルにかかるコストの低減が不可欠であると述べた。

大柳康 (工学院大学) は“FRP の粉碎と再利用”で、FRP を粉碎し添加物として再利用することにより、材料の性能向上や機能付与に役立ち、高付価製品の製造が可能となると報告した。剣持潔 (物質研) らは“FRTP の閉鎖型リサイクル技術の研究”で、熱可塑性プラスチックの複合材料に限定されるが、強化繊維の長さを尺度とした 4 次のリサイクルを繰り返すことにより、閉鎖型マテリアルリサイクルの可能性があると報告した。榊原実雄 (四工研) らは“大型 FRP 廃材再利用のための自動解体装置の開発”で、FRP 廃材を効率よく省エネルギー、低コストで粉碎するための開発研究について報告した。

写真 6 ポスターセッション

産業分野別ならびに具体的製品のリサイクル技術について、以下に示す3件の報告があった。即ち、K. A. Olsson（王立工科大学，スウェーデン）の“FRP サンドイッチ構造体のリサイクル”，井上健（本田技研工業の“自動車産業でのプラスチックリサイクリング”及び福島哲郎（日立製作所）の“日立における家庭用電子及び電気製品のリサイクル”である。

4) ポスターセッション

ポスターセッションでは、環境適合型の高分子材料の合成に関する研究が中心で合計20点のポスターが展示され、発表者と参加者の熱心な討議が行われた。その内容はG. O. Phillips教授の基調講演に沿うもので、地中奥深くから汲み上げた石油を変性して合成した高分子材料ではなく、天然自然にある樹木、草、バクテリア、空気から合成する材料開発を目標としている。

そのような材料であれば、山本良一教授が基調講演で述べたように、自ずとECOMATERIALになり、地球環境に及ぼす負荷を低減する方向の材料開発につながるものとなろう。

5) おわりに

本国際ワークショップ，“先端材料のエコバランス的リサイクル技術”の参加者は前述したように、延べ240名を超え多くの関心を集めたワークショップであったと言えよう。このワークショップによって得られた具体的な成果は下記の通りである。

(1) 宇宙の塵として誕生した地球で生産された材料

は“地球の塵”として自然界に帰さなければ、地球環境保全にとって大きなマイナスとなるという基調講演が賛同された。

- (2) 英、仏、米、瑞、チェコにおけるプラスチック産業廃棄物が環境に及ぼす悪影響について報告があり、環境に優しい材料研究及びリサイクル技術の必要性が強く再確認された。
- (3) 地球環境保全には、工業発展を100年前に戻すべきだとする人もいるが、本ワークショップでは、現代の文明文化を発展させる産業を維持発達させながら地球環境を保全する技術や研究開発を進めるべきであるという共通の認識に立つこととした。
- (4) 化学原料はなるべく天然自然の原料を使用し、石油資源に依存しないこと、材料の長寿命化を図り、ゴミの減量化を図ること、また、適切なマテリアルリサイクル技術を開発すること等の合意を得た。
- (5) 全体的な議論として、リサイクルに要するコストの問題が大きな将来課題となった。その解決策として一般的には自動車、エレクトロニクス等比較的 material コストの高い分野での廃棄物を建築・土木等材料等コストの低い産業分野へリサイクルして再利用することを考えがちであるが、本来低いコストで材料が賄える分野へ、リサイクルコストをかけた材料は競合の余地を見出すことは不可能である。

結論的には、廃棄物を出した産業分野で、その分野で使用する材料へのリサイクル技術を開発することが最良である。リサイクルのコストを最初の段階で考慮すべきである。すなわち、材料開発においては製造コスト、製品としての全寿命におけるコスト及びリサイクルに必要となるコスト等々エコバランスを考えた材料設計が肝要であるということになる。

以上に述べたことを考慮すると、地球上で最大量の有機材料資源、すなわち生分解可能資源を扱い、かつ現状ですでに古紙のリサイクルを達成している紙パルプ産業は、未来に向けては他の産業分野に比較して極めて優位にあると言えよう。