

# 機能化の高分子設計を通じて学んだことと研究のおもしろさ

(後藤技術事務所) 後藤 幸平

## 《要旨》

重縮合系高分子の分野に挑んで研究領域を拡げ、顧客ニーズを機能化高分子設計から読み解き、技術課題をブレイクスルーしてきた過程で学んだことを整理した。自身の専門領域を拡げる意志とともに、融合化に勉めた蓄積技術による経験知を駆使できたことが実用化に繋げられた要因と考えている。高分子の機能化設計は研究者個人の表現力によって、社会に貢献でき、自己実現ができる。まさに研究の醍醐味が実感できる魅力ある研究分野といえる。

### 1. はじめに

企業研究者として、機能発現の高分子設計を主担当して、いくつかの材料を開発・実用化できた。これらの機能材料の解は一つではなく、研究者の知恵によって、いくつかの解が生まれ得る。各社の研究者がそれぞれの異なる発想や考え方で競争することになり、勝ち残ることが研究者の力量の見せどころでもあるし、これが高分子の機能化設計のおもしろさでもある。ここでは企業研究者 OB として、研究から学んだことを通じてのこの研究分野の魅力について、特に若い研究開発者に発信してみたい。

### 2. 高分子材料研究開発から学んだこと

#### 2.1. 高度成長から安定成長時期（入社 1972～80 年代前半）の研究経験から

筆者は 1972 年に日本合成ゴム（現在の JSR）に入社した。その後、東京研究所に配属された。73 年のオイルショックを契機に国内の高度経済成長は終わったとされているが、JSR の製品はまだ市場拡大の成長を続けていた時代であった。配属先では、シーズ指向のいくつかの研究テーマを担当したが、この研究期間の 7～8 年は、残念ながら実用化に至る研究実績は残せなかった。

この経験から、事業化に成功するための企業研究は、1) 企業研究の本来のあるべき姿（①研究の目的、②Vision（研究テーマ、研究者個人、事業部、会社）の明確化、2) 研究テーマ選択（競合優位となる技術の拠り所）の重要性、3) 狙う市場（規模、成長性、企業の適性、ビジネスプラン）の確度の高い情報などが必要条件であることを悟り、その後、研究推進にあたっては、これらの必要条件を強く意識するようになった。

---

## "Polymer Design and My Research Life : Truly Intriguing "

Kohei GOTO (GOTO Engineering Consultant Office)

6-104, Kamoshida 533, Aoba, Yokohama, Kanagawa 227-0033, JAPAN

TEL&FAX : 045-482-6835, e-mail : goto@gijyutu-jimusyo.name

## 2.2. 企業の成長への変革の時代（1980 年前半～90 年前半）における研究経験から

### 1) 社内シーズと国内外での大きなニーズへの展開

1980 年代半ば頃から JSR の売上高の伸びも停滞してきた。社内のコア技術のラジカル乳化重合技術による合成ゴム、ABS 樹脂、エマルジョンなどの主力の開発製品市場が飽和してきたためと推測される。このような状況のもと、87 年に RD 中長期計画として、光・電子材料分の部材開発と川下展開の方向性が示され<sup>1)</sup>、社内変革への舵が取られた。実際には、この時点より以前から、所属していた新規材料の開発部隊は既に稼働していた。80 年代初めのポリイミド、80 年代半ばの光学樹脂の開発である。前者は過剰品質と言われていたデュポン社の Kapton<sup>®</sup> に代わる FPC (Flexible Print Circuit) 用ポリイミドフィルム、後者は PMMA と PC の両者の特長を有した光ディスク用光学樹脂材料の開発である。これらは将来の市場が期待できる新規ニーズ材料として業界やメディアでも盛んに採り上げられ、多くの化学企業間での競争となるメジャーなテーマであった。これらのテーマは先に述べた研究の成功の要因を備えているので、開発できれば、実用化の可能性は高く、社内の理解と支援も得られやすい環境にもあった。

ニーズ指向のメジャーなテーマに参加していくには、研究基盤の拡がりの小さな当時の社内の研究部隊では、何らかの社内シーズの接点からの研究アプローチが必要である。アプローチする技術の接点として、最初に述べたいくつかの不成功に終わった研究の知見がこれらのニーズ研究の開発材料に活用していくのである。初期の 7～8 年間にヒットを打てなかった悔いの残っていた研究が報われていくことになる。

#### ①FPC 用ポリイミドフィルム

80 年代初めのポリイミドの研究は他部署で開発された C5 留分からの脂環族テトラカルボン酸 2 無水物がシーズである (Fig. 1)。

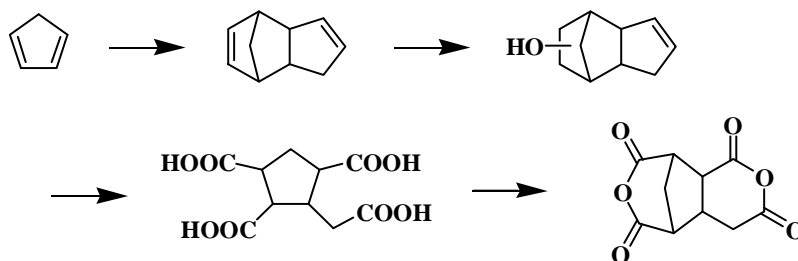


Fig. 1 C5 留分のシクロペンタジエンからの脂環族テトラカルボン酸 2 無水物

筆者がたまたま FPC 用途のポリイミド開発の担当者となり、所属会社にとって新規のポリイミドの技術分野に新参研究者として検討を継続することになった。しかしながら、FPC に必須の主要特性には到達できず、ニーズ展開は失敗に終わった。この脂環族系ポリイミドは後年、他用途への展開で実用化に結実するのである。これについては、後述する。この研究以降、筆者はポリイミド、および芳香族高分子研究による機能材料開発を断続的に担当することになり、この研究分野がコアの専門領域となった。

## ② 光学樹脂<sup>2)</sup>

80年代半ばからの光学樹脂の開発は、当初の検討した候補材料に難があることが判明し、異なる材料系へのシフトが余儀なくされた。過去に実用化に至らなかったC5留分からのノルボルネン誘導体のROMP (Ring Opening Metathesis Polymerization) に展開の可能性を考えた。このアプローチからの課題は透明性を維持した高T<sub>g</sub>化と重合で生成する主鎖の2重結合の水素添加(水添)反応にあることも先の検討から理解していた。高分子設計として、単環から多環構造を考えて前者の課題をクリアし、水添触媒は、他の研究者が高活性触媒を見いだしたことで、市場の要求特性を満足した光学樹脂の開発に至った (Fig. 2) (製品名アートン<sup>®</sup>)。

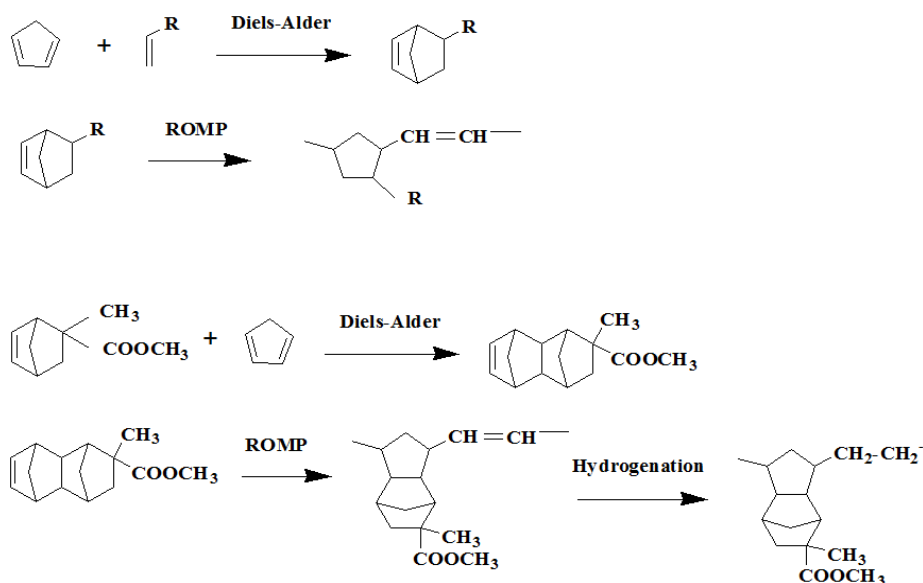


Fig. 2 70年代に検討のROMPによる樹脂材料とその技術を展開した新規光学樹脂

この研究の成功の要因として、研究テーマ終了の考え方にあったと思っている。研究テーマ検討の終了は、社内で終了という意味であって、自分の考えを反映させた思い入れの強い研究テーマは、研究者個人の頭の中ではいつまでも完結しておらず、どうしてこのような現象が起こるのか、特性が発現するのか、こうすれば改善されるのではとか、構造と特性の関係から、なんとなく思考を継続していることがある。この思考の習慣が役立った。

透明耐熱性発現のユニットとしてのノルボルネン骨格を導入するアプローチは、日本ゼオン (非極性ノルボルネン系のROMP)、三井石油化学 (エチレンとノルボルネンの付加共重合) が、JSR同様、それまでの各社のシーズから展開してきた。各社の考え方は似通っている。これらの企業の全ての開発研究者がそれぞれの展開を考えつくかといえば、そうではないだろう。おそらく経験者のなかでも限られた研究者しか展開を提案できなかったはずと思う。経験からの学習を知恵に活用して、他社に先駆け、いち早く、考えつく瞬発力が問われる。競合他社に先駆ける先手の重要性である。言い換えれば、

過去の経験した技術課題の本質を理解する、それを研究者個人の知恵にする習慣である。

ついでながら言及すると、この ROMP による新規樹脂開発研究も脂環族系ポリイミドの研究同様に C5 留分の有効利用から開始している。企業研究には、社内の既存事業からの何らかの接点から研究はスタートするのが当時の普通の考え方であった。

### ③ 液晶配向膜用脂環族系ポリイミド<sup>3)</sup>

80年代は液晶ディスプレイ (LCD) のフルカラー化の検討が始まった頃である。カラー化に必須の染料の耐熱性から、関わる液晶配向膜材料は 300~350°C の高温のイミド化反応が必要な芳香族系ポリイミドを 180°C 程度のイミド化反応で調製していた (注: モノクロの時代から液晶配向膜は高温熱処理の芳香族ポリイミドが使用されていた)。このイミド化率では、化学的にも不安定で、十分な配向機能を備えた配向膜にはならなかった<sup>1)</sup>。この技術の限界から、可溶性ポリイミドに可能性があることが示唆され、筆者らは可溶性の芳香族系ポリイミドを検討していたが、手詰まり状態になっていた。納期は迫る、やむなく、先の FPC 展開で不成功に終わった可溶性の脂環族系ポリイミドを提出することにした。たまたま、その時にもう 1 種類のサンプルも追加し、複数の脂環族系の可溶性ポリイミドを提出した。後年、追加提出したポリイミドが優れた液晶配向膜材料になる顧客の評価結果が知らされた。JSR の配向膜の最初の有力グレードとなった開発材料 (オプトマー AL1051<sup>®</sup>) は 1995 年『フルカラーアクティブマトリックス LCD 用低温処理型配向膜の開発』の貢献により、市村産業賞功績賞の受賞に繋がった。

まさにセレンディピティの贈り物の幸運に巡り会えた研究といえる。研究者にはセレンディピティに遭遇する機会はあるが、多くは見逃してしまうという。その違いは『執念+直感力』にあるような気がする。自分の研究への強い思いと仕事を成し遂げようとする研究者にはうまく巡り合えるということだろう。

## 2.3. 新規部門成長時代 (90年代~) における研究経験から

### 1) 完全なニーズ指向型の研究にシフト

過去の自分が経験したテーマからの発掘できるシーズの接点をベースに国内外の有力なニーズに展開していく研究から、機能化の高分子設計のアプローチからの新規機能材料開発に研究をシフトしていくのも、自然な流れであった。個人の経験から扱えるシーズにも限界があることから当然である。

この当時は、会社の事業変革の方向に沿って、社内技術の価値感も変化し、積極的に新しい分野にチャレンジできる (しなくてはならない) 時代でもあった。しかしながら、ニーズ対応と言うことは、研究者にとっては、駆使する (出来る) 技術範囲を拡げていかなければならない難しさがある。新規技術で参入しようとする研究者が越えるべき『魔の川』や新規分野に新規技術で参入しようとする研究者が越えるべき『死の谷』の課題がある。研究者個人にとっての不連続の技術を連続化させるための新しい分野に積極的に挑む『ジャンプ』の必要性である。まさに「飛躍」へのジャンプである。これは企業の新事業展開にも同じことがあてはまる。要求される幅広い専門知識を自ら修得して知恵にしていこうとする意志が必須になる。それには経験してきた専門知識を点→線→

面→容に、さらに融合化を図り、自分自身の専門領域を拡げることや専門のベースが異なる研究者との議論を通じての学習や気づきなど、他の研究者を利用しての専門領域を拡げることにある。これらからの知恵を出し続けて考えることが、次の研究領域への「飛躍」へのジャンプの踏み台になる。さらに踏み台を利用してジャンプすることで、手の内の領域は確実に拡げることができる。要はどれだけ多くの視点から課題の検討ができるかが、ニーズ対応の高分子設計の研究を成功させるかにかかっているように思う。

高分子の機能設計は、研究者の経験知によって、いくつかの解が生まれ得る。各社の研究者がそれぞれの異なる発想や考え方で競争する。それにもまして、新規技術で新規分野に挑んで自分の考えをまとめていくことで、より研究への思い入れが強くなり、研究のモチベーションも必然的に高まることにも繋がる。また、有力な顧客との対応や激しい企業間競争のため、研究シナリオに自社技術の優位性を盛り込み、確度を高めた作業仮説による緻密な考えによる取り組む『考え抜く』研究の重要性を知ることになる。企業研究者が、実用化への成功要因を考える研究活動の修練の場にもなったように思う。

#### ① 低誘電率ポリイミド<sup>4)</sup>

90年代半ば頃の半導体の層間絶縁膜の耐熱性の低誘電率材料のニーズに対応した高分子設計の研究がある。耐熱性電子材料では芳香族ポリイミドは既に市場での実績があり、この分野に参入するのに芳香族ポリイミドを候補材料として外すのは常識的な判断ではない。モノマー設計の多様性からも機能発現に有利であるし、耐熱性の機能性高分子に最も適した重合方法であること、電子材料に適したクリーンな反応系、高度な実験スキルが不要の重合反応、高い重合反応性（重合体を得るための反応性の高い官能基として考えることもできる）であることも、芳香族ポリイミドをベースにした機能化設計を行う価値がある。

高分子設計の研究に限らず、仕事の成功確率を向上させるためには、確度の高い作業仮説に基づく検討が必須である。特に新規技術による新規分野への参入を考えるなら、なおさらである。まずは、既存の芳香族ポリイミドの公表されている誘電率を化学構造の関係から整理した。誘電率はポリイミド構造のイミド基濃度との相関関係を確認し、必要な誘電率を発現出来るイミド基濃度を推定し、これを目標に高分子設計を行う作業仮説を考えた。あとは **how** の問題がある。この課題では、低密度化による低誘電化というアプローチも考えていたので、カルド構造のフルオレン骨格の導入を考えた。可能なイミド基濃度を低減したポリイミドを合成し、予想の誘電率に低減できることを見いだした。さらに得られた誘電率が芳香族ポリイミドの下限界値であることを対応するイミド骨格を含まないポリアーレンの結果から検証した (Fig.3, 4)。最終的には芳香族ポリイミドの化学構造から誘電率を推定できる一般解としてもまとめることができた。

今までの公知のデータを見直すことから、活用できる確度の高い作業仮説に結び付けられた。また、それをどのような化学構造を考えて展開していくかは、経験を通じて蓄積された専門領域からの知恵によるところが大きい。どれだけの考えの視点があるかということになる。

最終的に一般解としてまとめることによって、競合会社の開発ポリイミドの誘電率予

測も出来るほか、自分自身の活用できる専門知識の引き出しの整理にも有効となる。

開発材料は、実用化には至らなかったが、2002年に“低誘電ポリイミドの高分子設計に関する研究”により、Photopolymer Science & Technology Award, を受賞し、研究の考え方の確かなことは社外で認められた。

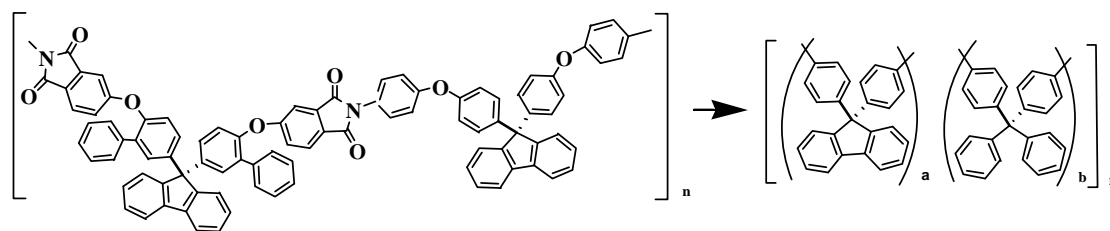


Fig. 3 非含Fポリイミドの誘電率 ( $k=2.77$ ) と  $k$  の下限界を検証したポリアリーレン ( $k=2.70$ )

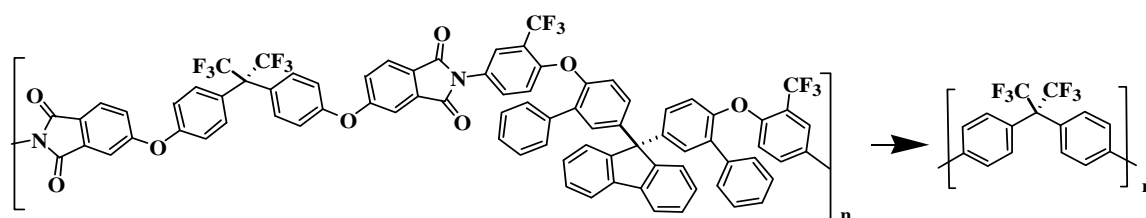


Fig. 4 含Fポリイミドの誘電率 ( $k=2.35$ ) と  $k$  の下限界を検証したポリアリーレン ( $k=2.20$ )

## ② 燃料電池用電解質膜<sup>5)</sup>

90年代後半には高分子電解質膜型燃料電池 (PEMFC) が車載用、住宅用、携帯用の発電装置として注目されてきた。経産省も2001年7月に「2010年には燃料電池車 (FCV) が5万台走行する」計画を挙げ、PEMFCの過熱気味のブームを引き起こしたこともあり、多くの化学系企業がその中枢材料である高分子電解質膜の研究開発に参入した (国内でも16社以上が開発を公表)。

当時検討されてきたパーフルオロ炭化水素からなるフッ素系高分子電解質膜の性能、耐久性、コストの観点から、普及にはさらなる高性能化膜が必要で、その開発要請である。ここでも作業仮説をベースにした確度の高い開発シナリオができるかということが成功の鍵に繋がる。大きな技術課題として①耐水性の維持と伝導性能の向上、②耐久性の向上について考え方を絞った。①はそれぞれの異なる高分子にトレードオフの関係の性能・機能の役割を分担させる。しかも、それらの相構造が絡みあうようなモルホロジーを形成させるブロック共重合体による相分離構造の制御。②分子量低下が耐久性を下げることから主鎖の結合エネルギーの高い芳香環-芳香環の連鎖からなるポリフェニレン構造にして、分子量低下と伝導機能の官能基のスルホン酸の脱離反応を抑制する高分子設計を考えた (Fig. 5, 6, 7)。

低温始動可能なPMFCを可能にし、FCV用の電解質膜として、自動車メーカーに採用された最初の非フッ素系電解質膜である。2007年に“伝導性・耐久性に優れた燃料電池用芳香族系電解質膜の開発“により、高分子学会賞 (技術) を受賞した。

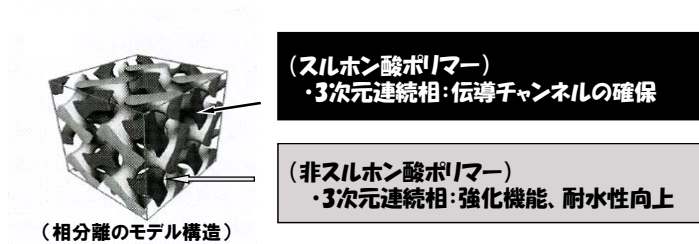


Fig. 5 電解質膜の性能・機能発現のための開発のコンセプト

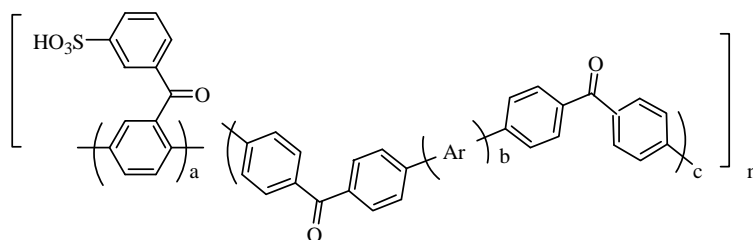


Fig. 6 電解質膜のブロック共重合体の化学構造 a: 伝導ユニット b: 補強ユニット

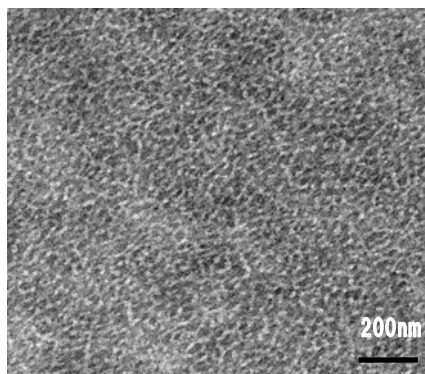


Fig. 7 開発した電解質膜の相分離構造 (黒色: 伝導相、白色: 補強相)

企業研究は顧客のロードマップに対応し、時期を失うことなくこれらを満足する材料を開発し、提供していくことにある。顧客の開発スピードと製品供給量にいかに対応していけるかということになる。そのための必要な打ち手を常に考え、実行していかなければならない。本研究は顧客のロードマップに応え、研究進捗を実感しながら、企業研究の本道を経験した学習効果の高い研究であった。『どのような優れた工夫や発明でも必要なきに提供されなければ何の価値もない。(本田宗一郎)』(上之郷利昭、“本田宗一郎の3分間スピーチ”、光文社 (1986)、この思いを意識し続けた研究でもあった。

技術の多くの経験知を組み合わせることで、競合他社との技術優位性に優れた材料が開発できることは明らかである。このことは、自社内の他分野の専門の研究者や顧客との視点の異なる研究開発者や技術者との有用な議論などを通じてのコラボレーションによって、生まれ、加速できたと言える。その研究事例となったことも追記したい。

### 3. まとめ

実用化への成功確率を高めるには、課題の本質的理解力からの展開力が必要である。それには 研究者が専門性をいかに広げ、高めていく努力が出来るかにある。自分自身で言えば、経験してきた知識と技術を点 → 線 → 面 → 容へと融合化させ、応用力に広げられたことが大きな要因だろう。最大の学習効果のある経験からの蓄積した経験知を駆使できたことが実用化への考えの基本となった。他分野の技術者と **Collaboration** できる能力が専門能力を高める上でも研究効率の点からも改めてその重要性を認識した。また、専門領域が広がり、高めることによって、研究者の駆使できる技術分野が広がり、さらに新しい研究領域にも挑む資質が培われる。自分にとっての不連続の技術を連続化させていく『飛躍へのジャンプ』の行動になり、結果的には、個人から企業で駆使できる技術になり、事業を拓ける基点となる。自分の技術・専門領域の不連続性を連続化する視点からの思考・行動が研究の成功確率を高めることに繋がる。

機能化の高分子設計の対象としての芳香族系高分子は、強度的性質や耐熱性に優れ、先端部材で要求される基本的な性能を充たし、それだけでも機能化設計が有利となる魅力がある。さらに芳香族系高分子は構造や反応の多様性から、新規機能材料への展開にも有望な領域にも思えた。特に、最初に手がけたポリイミドは、この分野の若葉マークの研究者には、合成面からも非常にとっつきやすく、学ぶ教材として絶好の材料という幸運もあった。さらに深耕していけば、多様な機能材料への高分子設計も可能と想像が膨らんだ。ポリイミドの研究蓄積から、他の芳香族系高分子にも展開する打ち手を考え、研究領域が広がっていく研究のおもしろさをも実感した。これも本会議を通じて、この分野の多くの研究者の繋がりによる交流のおかげと感謝している。自分の研究を振り返ると芳香族系高分子領域への『飛躍へのジャンプ』が転換となり、研究者としてのアイデンティが確立できた分岐点になったと思っている。

高分子の機能化設計は研究者個人が持ち合わせている専門能力の知恵による表現力によって可能となり、その結果が製品として社会に貢献し、研究者としての自己実現できる。まさに研究の醍醐味が実感できる魅力ある研究分野といえる。

最後に、企業研究の成功確率を上げる思考・行動の私見<sup>6)</sup>を後輩研究者の諸氏にメッセージとして伝えておきたい。①《1+1>2 の効果を引き出す》 ②《経験からの学習効果を重視》 ③《行動目的の研究目標との整合性確認》 ④《人との繋がり》 ⑤《自分を修正できる気づきの感性》 ⑥《自分を追い込める意志》 ⑦《自分のありたい姿の目標》。

### 文献

- 1) 技術の地平を拓く-JSR50年の歩み-, (2009)
- 2) Y. Yoshida, K. Goto and Z. Komiya, *J. Appl. Polym. Sci.*, **66**, 367-375 (1997).
- 3) 吉田淑則, 竹内安正, 後藤幸平, JSR テクニカルレビューNo.113 p.1-7 (1996).
- 4) K. Goto, T. Akiike, Y. Inoue, and M. Matsubara, *Macromol. Symp.*, **199**, p.321-331 (2003).
- 5) K. Goto, I. Rozhanskii, Y. Yamakawa, T. Otsuki, and Y. Naito, *Polymer J.*, **41**, 95-104 (2009).
- 6) 後藤幸平, 研究開発リーダー, (No.2) pp.21-23 (2011), *ibid*, (No.6) pp.47-51 (2011).