

査読論文

石油化学工業における多品種大量生産プロセスの成立と展開 ——ポリプロピレン生産プロセスを事例に——

中村 真悟*

要 旨

本稿はポリプロピレンの生産プロセスを事例に、石油化学工業の多品種大量生産プロセスの成立と展開を考察した。多くの研究では石油化学工業では規模の経済性が重視されてきた。しかし石油化学工業は多様なユーザーの生産財の生産者として、様々な品質要求に合わせた生産プロセスが求められるのであり、多品種大量生産プロセスの成立と展開も重視されるべき観点である。本稿では以上の問題意識に基づきポリプロピレンの生産プロセスの成立と展開を分析した。ポリプロピレン生産における多品種生産プロセスは、最初期には触媒技術を要因とする品質面の課題から多数の不純物除去装置を配置する生産性の低いプロセスであった。また多品種生産の実現には複数の生産ラインで行なわなければならない、大規模化に限界のあるプロセスであった。1960年代以降、触媒技術における生産性と品質の課題の克服により生産プロセスが簡略化され、多品種生産と大規模化が統合する生産プロセスへと進展した。

キーワード：

石油化学工業、装置工業、多品種大量生産、ポリプロピレン、生産性、品質、触媒

I. はじめに

石油化学工業の技術発達はコンビナートに象徴されるように、装置の大規模化、生産プロセスの連続化、副産物の総合的利用が規定要因だと認識されてきた。たとえば、中村（1975）は石油化学工業を装置工業の一種として分析しており、装置工業の技術発達の主たる要因として、容器の拡大による生産コストの低減、生産工程の連続化・自動化による中間原料の移動時間ロスの短縮、副産物の用途展開に伴うコンビナート化を挙げている¹⁾。中村（1975）の主張は、多くの化学技術論や化学産業論に共通してみられるものである²⁾。またこうした認識は今日の石油化学産業研究の潮流にも引き継がれている³⁾。以上の彼らの議論には、石油化学工業

* 執筆者：中村真悟

所属/職位：大阪市立大学大学院経営学研究科附属先端研究教育センター／特別研究員

連絡先：〒558-8585 大阪市住吉区杉本3-3-138

E-mail：nakamura-s@tortuga.sakura.ne.jp

は少品種大量生産であり、品質差別化競争が困難で、コスト競争が主たる競争であるという考え方が前提されている。

しかし、実際の石油化学工業製品をみると、既存研究の前提が必ずしも正しいとはいえない。表1は、石油化学工業製品の中でも主要な製品である低密度ポリエチレン、高密度ポリエチレン、ポリプロピレンという合成樹脂に関して各国での生産品種数を示したものである。これをみると明らかなように、サウジアラビアは別として汎用合成樹脂生産は多品種生産である。

表1 ポリエチレン、ポリプロピレンにおける多品種生産の国際比較

	日本	米国	欧州	韓国	台湾	サウジ
低密度ポリエチレン	2500	300	500	200	60	4
高密度ポリエチレン	1000	150	150	100	30	5
ポリプロピレン	6000	300	500	150	60	-

注1 原典では品種をグレードと表記している。グレードとは同一製品領域における品質や機能性の異なる製品を指す用語としては一般に化学業界では用いられているが、一般には品種と定義される内容であることから、本稿ではグレードを品種と定義している。

注2 低密度ポリエチレンは主にフィルム、高密度ポリエチレンは各種容器、ポリプロピレンは自動車・家電等の工業部品に用いられている。

出所 石油化学製品需給協議会国際小委員会(1994)表6より転載。

石油化学製品の多くは生産財として他の産業に利用されるが、その際企業ごとに要求される品質要件は多様である。たとえば本稿が対象とするポリプロピレンの場合、その用途は主に工業部品用途(たとえば自動車用内装材、バンパー、医療用器具)、雑貨用途(たとえば洗面器や各種容器)、食品包装用途が挙げられるが、それぞれの用途に応じて剛性、耐熱性、軽量性、耐薬品性、ガスバリアー性、成形性などの仕様が異なり、石油化学企業各社はこれらのニーズに対応した生産を行なっている。ポリプロピレン生産プロセスの大量生産は、こうした様々な品質要求を満たす素材の提供、すなわち多品種生産を伴いつつ実現されていった。これは他の合成樹脂、合成ゴム、合成繊維などの石油化学製品にもみられる特徴である。よって石油化学工業の生産プロセスの展開は、既存研究の指摘する装置の大規模化、生産プロセスの連続化、副産物の総合利用に基づくコンビナートの展開だけではなく、多品種大量生産プロセスの展開過程としても分析する必要がある。

ところで石油化学工業においては大量生産と多品種生産はただちに両立するわけではない。石油化学工業の生産プロセスは化学装置内での化学反応によって行なわれるが、装置内の反応は一定に維持・安定しなければ事故の原因となる。よって、装置工業での多品種生産は、複数の小規模装置による多系列生産か、生産プロセスの進展による少数の大規模装置での生産が展開される。本稿の分析対象であるポリプロピレンの生産プロセスの場合、大量生産と多品種生産の統合は前者から後者へと進展していったのであるが、その技術的契機を明らかにすること

は多品種大量生産プロセスの展開過程において重要である。

本稿は以上の問題意識に基づいて、石油化学工業製品の一つであるポリプロピレンにおける多品種大量生産プロセスの成立、展開過程を分析し、石油化学工業における多品種大量生産プロセスの特質を明らかにする。まずⅡでは、ポリプロピレンのプロセスが成立した背景を考察する。Ⅲでは初期ポリプロピレン生産の特徴と課題を明らかにし、それが多品種大量生産プロセスにどのように現れたのかを明らかにする。Ⅳでは初期ポリプロピレン生産の課題の克服過程を示しつつ、そのことが多品種大量生産プロセスにどのような変化をもたらしたのかを考察する。

Ⅱ. 初期ポリプロピレン生産プロセスの成立要因

多くの技術の歴史において明らかにされてきたように、技術の発達は既存の技術の有する何らかの制約を克服しようとする科学者や技術者の取組と、彼らの取組を企業経営や政治的・社会的課題の克服に合致するものとして位置づけた企業や国家などの取組との相互作用を通じて社会化される。ポリプロピレン生産の場合、それはポリエチレン生産プロセスにおける技術発達、具体的にはポリエチレン生産用の触媒であるチーグラール触媒の発見が重要な契機であった。

1. チーグラール触媒の発見とプロピレン生産プロセスへの応用

ポリエチレン生産プロセスはイギリスの I.C.I. 社が1939年に工業化したが、そのプロセスは2,000気圧、170℃という高温・高圧を条件とする極めて高コストの生産プロセスであった。その上、分子量が比較的少なく剛性の低い低密度のポリエチレンであった。低密度ポリエチレンはその当時の第二次世界大戦という特殊な社会的状況下ということもあって、レーダーや航空機に用いられるケーブルの絶縁材料の生産という軍需向けに限定して用いられており、また I.C.I. 社とアメリカのデュボン社との間での特許協定の下、事実上両社に独占されていた。

第二次世界大戦が終わると、これまで軍需限定に事実上クローズドにされていたポリエチレンは民需向けの販売が行なわれるようになった。とりわけアメリカでは押出成形機・射出成形機・フィルム成形機などのプラスチック加工機の開発によりポリエチレンのフィルム材料、雑貨等の容器・成形品用材料としての市場が展開された。さらに I.C.I. 社とデュボン社との間で結ばれた独占的な特許協定に対して反トラスト法違反とする判決が出されると、テキサス・イースタン社、モンサント社などの化学企業各社も I.C.I. 社と技術導入契約を結びポリエチレン生産を行なうようになった。また BASF 社やフィリップス社においても、I.C.I. 社とは異なる独自技術によってポリエチレン生産が行なわれるようになった⁴⁾。

第二次世界戦後のポリエチレン生産プロセスの普及は、ポリエチレン製品市場の競争を促進

することとなり、石油化学企業各社では新製法の開発、既存のプロセス改良、製品開発などが研究された。そうした中、1953年10月に当時ドイツのマックス・プランク石炭研究所所長であったチーグラー (Karl Zeigler) がポリエチレン製造用触媒である、発見者の名を冠して呼ばれるようになったチーグラー触媒を発見した。

チーグラー触媒の発見は、ポリエチレンメーカーにとっては、既存の高温・高圧によるポリエチレン生産とは異なる、新たな進化した生産プロセスの可能性を示すものとして注目されたが、同時にエチレンに近似する石油化学製品の基礎材料であるプロピレンの重合の可能性をもたらすものでもあった⁵⁾。

チーグラー触媒の発見以前の化学合成は主に高温・高圧プロセスの下で行なわれていたが、プロピレン生産の場合、分子間の結合がほとんど行なわれず製品の形状を保てない無定形オイルしか生成できなかった⁶⁾。そのために、多くの化学合成研究者の間ではプロピレン同士の化学合成、すなわち重合によるプロピレン高分子の生成は不可能だと考えられていた。しかし、チーグラー触媒による常温常圧下での高分子生成の実現は、これまでの高温・高圧法とは異なる新しい高分子生成の方法で、その方法を用いた生産プロセスはポリエチレンだけでなく他の化学合成にも有効ではないかと考えられ、プロピレンへの応用研究を触発することとなった。

この応用研究において事実上最初の工業化に繋がる成果を発表したのは、ミラノ工科大学のナッタ (Giulio Natta) であった⁷⁾。ナッタは1950年頃からチーグラーの研究に関心を持ち、自身のアシスタントをチーグラーの在籍する研究所に派遣するなど、非常に早い段階でチーグラー触媒の成功を知ることができた。彼がチーグラーの研究に関心を示した背景には、そのスポンサーであるイタリアのモンテカチーニ社との関係が挙げられる。

このモンテカチーニ社は1888年操業開始、元々は鉱山開発の企業であったが、その後事業の多角化を図り、硫酸、肥料生産を皮切りに化学工業を展開し、1950年頃には合成染料、医薬品、プラスチックなどを生産する総合化学企業となった。しかし、当時のヨーロッパ市場はイギリスのI.C.I.社やドイツのヘキスト社、BASF社などの多国籍化学企業が主流を占めており、モンテカチーニ社の事業は国内であるイタリア市場に事実上限定されていた。モンテカチーニ社はヨーロッパ市場における自社のポジションを高めようと、当時先端技術領域であった石油化学工業に進出した⁸⁾。

モンテカチーニ社がナッタとの間に産学連携を構築したのは、同社の石油化学分野における新製品開発、新プロセスなどの研究成果を求めてのことであった。そうした事情からナッタは同社との委託研究を行うことになったが、ナッタはチーグラー触媒によるポリエチレン生産の成功を受け、同触媒の他の素材への応用研究に研究分野を注力することとなった。その結果、チーグラー触媒の発見からわずか5ヶ月後の1954年3月にポリプロピレン製造用触媒であるチーグラー・ナッタ触媒の発見に成功するのである⁹⁾。

ナッタが成功した当初のポリプロピレンの生成率、すなわち投入したプロピレンがポリプロ

ピレンとして抽出される割合は40%程度であったが、ナッタとモンテカチーニ社の研究者らによって生産比率向上とその工業化のための共同研究が行なわれると、1955年には70%以上の生成率となり、1957年には工業規模でのポリプロピレンの生産プロセスが確立された。

2. ポリエチレン生産量の拡大と余剰プロピレンの高付加価値化戦略

ポリプロピレン生産プロセスの石油化学企業各社へ広がり背景は、直接にはモンテカチーニ社によるポリプロピレンの生産プロセスの確立が挙げられるが、同時に技術を導入ないし模倣しようとする石油化学企業各社の事情、すなわち石油化学コンビナートの形成・展開に伴う余剰プロピレンの高付加価値戦略の必要性の高まりも重要である。

チーグラー触媒の登場により、ポリエチレン生産技術は高温高圧プロセスでの低密度ポリエチレン（主にフィルム用途）とチーグラー触媒を利用した高密度ポリエチレン（主に容器製造などの射出成形・押出成形用途）の生産が可能になった。その結果、1950年代後半には石油化学工業はポリエチレンを中心に石油化学コンビナートを先進各国で形成していった。

石油化学工業は図1に示すように、プロセス全体としてみれば、石油化学用原料から製品化までの一連の過程を包摂している。そのため、ポリエチレンの生産規模拡大にはエチレン生産量の増加、すなわちナフサ、エタンなどの石油化学原料を熱分解し、各種基礎材に分離・精製する生産プロセスの大規模化が必要になる。しかし、同プロセスの大規模化はエチレンのみな

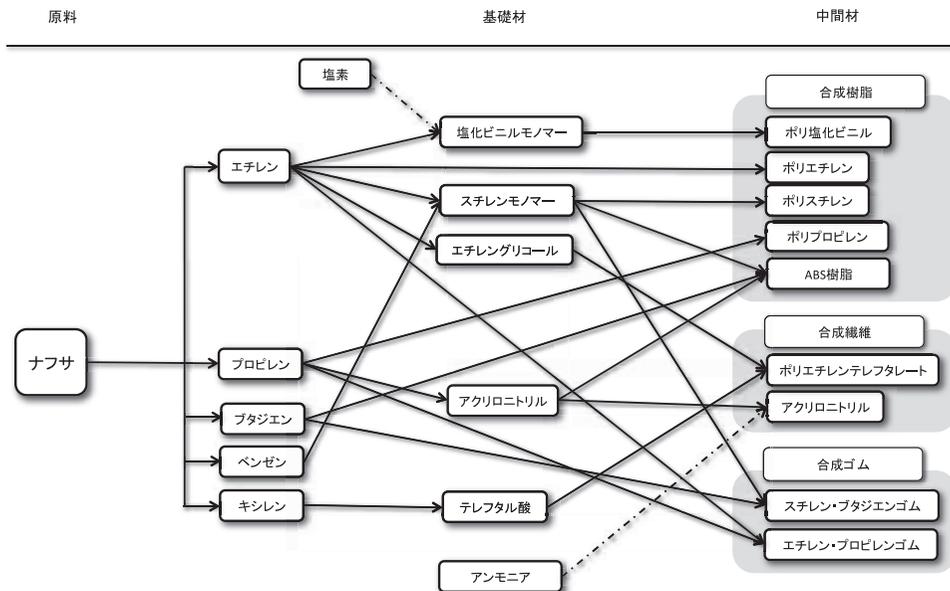


図1 石油化学工業（合成樹脂、合成繊維、合成ゴム）の生産フロー

注 塩素、アンモニアは石油化学工業とは異なる化学工業の中で生産された製品ないし副製品である。
筆者作成。

らず、その他の基礎材の大量生産をもたらすのであるが、このうちプロピレンはエチレンに次ぐ抽出率の多い基礎材であった。

ポリプロピレン生産プロセスが確立する以前のプロピレンの用途としてはキュメン（フェノール¹⁰ やアセトン製造用の原料の一つ）、アルキルベンゼン（合成洗剤の原料用途）、アセトン（接着剤などの除光液用途）、酸化プロピレン（主にポリウレタンやポリエステル製造用の原料の一つ）、アクリロニトリル（アクリル繊維の原料の一つ）、オクタノール（合成樹脂の可塑剤、塗料用溶剤、潤滑剤などの用途）などの各種化学製品のための原材料利用が挙げられるものの、その割合はプロピレン生産量からいえば少なく、大半は液化石油ガス（LPG）か、あるいは自社工場内での燃料利用などに用いられていた。図2は日本の石油化学コンビナートにおけるナフサ分解成分の製品用原材料としての利用率をみたものである。日本でのポリプロピレンの工業的生産は1962,63年に始まったが、それ以前のプロピレンの製品用原材料としての利用率は20%程度であった。一般に石油化学工業における抽出成分の燃料利用などの低付加価値製品利用は、高付加価値製品としての用途がみつけれない場合の次善の策か、廃棄物処理コストを抑制するための対策であった。しかしプロピレンの燃料利用は、当時燃焼用燃料として利用していた原油分解成分である重油やLPGと比較してコスト高であった。なぜなら重油やLPGは原油の熱分解装置によって抽出されるが、プロピレンの場合、原油の熱分解装置で抽出されたナフサをさらにナフサ分解装置ならびに各種分解成分の生成装置によって抽出するという多段階のプロセスを必要としていたからである。

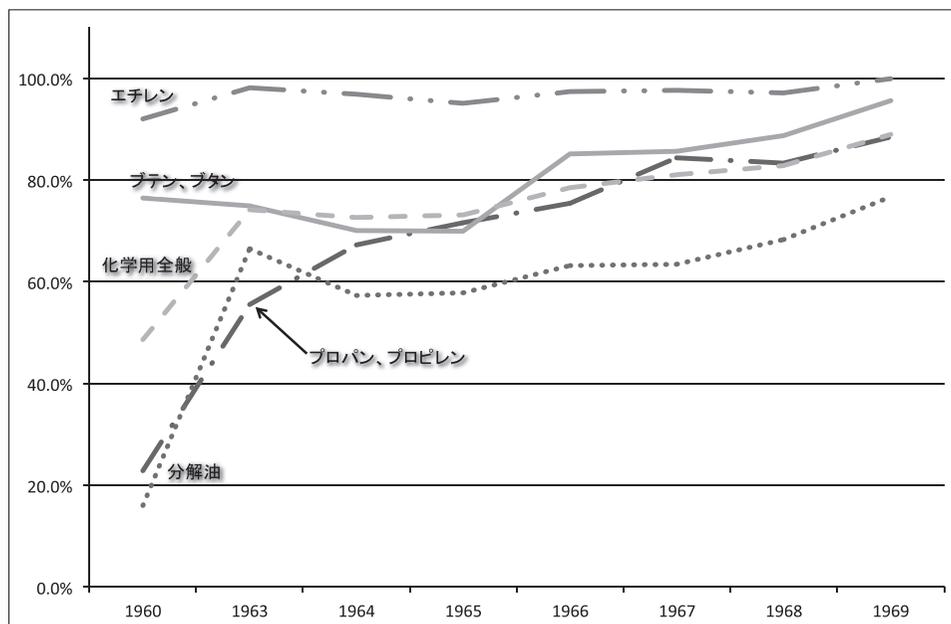


図2 日本の石油化学工業における各種ナフサ分解成分の製品用途比率の推移 (1960-69年)

出所 石油化学工業協会 (1971) 540頁, 第8表より作成。

このような状況の中で、モンテカチーニ社によるポリプロピレン生産プロセスの確立は、余剰プロピレンをポリプロピレンという高付加価値製品として販売する可能性をもたらした。しかも、チーグラー・ナッタ触媒を発見したナッタや工業化したモンテカチーニ社は、ポリプロピレンがポリエチレンなどの他のプラスチックとは異なり立体規則性（Ⅲにて詳述）をもっていること、また軽量で摩耗耐性が高いことから、既存のポリエチレンとは競合しない繊維用途への可能性があるとして積極的に宣伝するなど、ポリエチレンの市場との棲み分けによる新たな用途展開の可能性を示した¹¹⁾。こうしてチーグラー触媒による新たなポリプロピレンの化学合成は、石油化学工業全体の収益性を改善するものとして大いに期待された。モンテカチーニ社との合弁企業設立や同社からの技術導入、あるいは模倣と改良を通じた自社技術化など、その工業化の形態は異なるが、同プロセスは各地の石油化学コンビナート内に普及した。

日本の場合、1957年に三井化学工業¹²⁾、三菱油化¹³⁾、日産化学工業、住友化学工業がモンテカチーニ社の技術導入を図ろうと動いた。しかし当時の日本は通商産業省省議「石油化学工業の育成対策」（1955年7月）の下、石油化学工業の第Ⅰ期計画に基づいて四日市（三菱油化）、岩国（三井石油化学¹⁴⁾）、新居浜（住友化学工業）、川崎（日本石油化学）の各地で石油化学コンビナートが設立され、ポリエチレン生産が始まったばかりであった。またエチレンを一原料として生産するポリエステル繊維も帝国人造綿糸と東洋レーヨンが1957年にI.C.I.社から技術導入し、翌年工業化したばかりであった。そのために、当時繊維用途として期待されていたポリプロピレンが工業化されると、石油化学工業内部での競争を触発し、結果的に石油化学工業の発展を阻害することが予想された。こうした事態を受けて、通商産業省は各社の技術導入の動きを一旦休止させた。

石油化学工業の第Ⅰ期計画が完了した1959年以降、通産省は石油化学工業化の第Ⅱ期計画として「当面の石油化学企業化計画の処理について」（1960年10月27日）を発表するなど、石油化学工業における製品利用の全面的展開を推進する方針を明確に打ち出し、ポリプロピレン生産プロセスの技術導入を認める姿勢へと転換した。その結果、三菱油化と三菱レイヨン、三井化学工業と東洋レーヨン、住友化学工業と東洋紡績という三つの企業連合体はモンテカチーニ社と、チッソはアメリカのアビスン社とそれぞれ技術導入契約を調印し、1962, 63年にはポリプロピレン製造を開始した¹⁵⁾。

Ⅲ. 初期ポリプロピレン生産プロセスにおける多品種大量生産の課題

ポリプロピレンの生産プロセスは、ポリエチレン生産技術の発達に伴うチーグラー触媒の登場、ナッタおよびモンテカチーニ社による同触媒のプロピレン重合への応用と工業化、これに続くエチレン需要の拡大に伴う余剰プロピレンの高付加価値戦略という石油化学企業の経営戦略を背景に広まった。しかしモンテカチーニ社が主導し確立した初期ポリプロピレン生産プロ

分子配列に規則性のないポリプロピレンはアタクチックポリマーと呼ばれる。前者のアイソタクチックポリマーはポリプロピレンが本来持つ機能性としての剛性、耐衝撃性などを高める。だが、それは一方で粘性を高め、成形時の生産性を低めることとなる。後者のアタクチックポリマーはその逆の傾向をポリプロピレンに与える。立体規則性はこのうちアイソタクチックポリマーがポリプロピレン中に含まれる比率を示しているのだが、その比率を制御する技術はポリプロピレンの品質をコントロールする重要な要素技術である。

多くの各種製品の用途展開を可能とするには95%以上の立体規則性が求められていたが、初期ポリプロピレン生産プロセスで利用された触媒では70~90%程度しか達成できなかった。そのため触媒以外の方法、具体的にはヘプタン溶媒を投入してアイソタクチックポリマーとアタクチックポリマーを分離し、その後アタクチックポリマー除去装置やヘプタン溶媒除去装置を媒介するという装置対応によってポリエチレンの立体規則性を向上させるという、手間のかかるプロセスを経る必要があった¹⁷⁾。

ポリプロピレンが工業化された当初の生産プロセスにはモンテカチーニ社の他にアメリカのハーキュレス社のものが挙げられる。ハーキュレス社のプロセスは重合装置を多段階で配置することで、プロピレンの反応率を引き上げ未反応プロピレンの生成率を抑える工夫がなされており、結果プロピレン除去装置がないことがモンテカチーニ社の生産プロセスと異なる。しかし、基本的にはチーグラール・ナッタ触媒の持つ触媒活性の低さと立体規則性制御の低さを、前述のような各種装置の多段階の配置によってカバーするというのは同じであった¹⁸⁾。

2. 初期ポリプロピレン生産プロセスにおける生産性と品質の課題

以上が初期ポリプロピレン生産プロセスの特徴であるが、以下に示すように生産性と品質の点において課題のあるプロセスであった。

第一に、触媒活性の低さをカバーするためには、未反応プロピレンが重合反応槽から排出されることを前提に回収・循環装置を配置するか、重合反応工程において多段階の重合反応槽を配置するかのどちらかの対応をする必要があった。前者はモンテカチーニ社のプロセスで、後者はハーキュレス社のプロセスで行なわれた対応であるが、いずれの多数の装置による対応もポリプロピレンの生産における生産時間の延長とエネルギーコストの増大をもたらすものであった。

第二に、触媒活性の低さと立体規則性の低さは未反応プロピレン、残留触媒、残留アタクチックポリマーというポリプロピレンの品質に悪影響を及ぼす要因をプロセスで生じさせた。初期プロピレン生産プロセスではこれらの品質劣化要因を装置によって取り除くことで対応しようとした。しかし、装置的手段による不純物の除去を100%行なうことは技術的に不可能であることから、製品品質の向上の阻害要因となった¹⁹⁾。また不純物の除去装置は、不純物の数に応じて増やす必要があるため、生産時間の延長と生産コストの増加をもたらした。

以上の初期ポリプロピレン生産プロセスの課題は、石油化学工業各社がポリプロピレンの生産プロセスを導入し、確立していく過程で明らかとなった。Ⅱにて述べたように、石油化学企業各社は石油化学コンビナートの拡大に伴うプロピレン余剰分の高付加価値化を期待してポリプロピレン生産プロセスの技術導入や自社技術の開発を行なった。

しかし各社の期待とは異なり、ポリプロピレンは染色の困難性、吸水性の低さ、紫外線に対する弱さ、紡糸性の低さなど繊維用途には適さない性質を多数持ち合わせていた。そうした事情もあって、ポリプロピレンの繊維用途への展開はすぐには困難であった。そのため、当面は食品包装や日用雑貨・工業部品などの既存の合成樹脂が形成している市場に進出した。

食品包装、日用雑貨・工業部品向けの合成樹脂市場の進出は、既存のポリエチレン、塩化ビニル、ポリスチレンなどの熱可塑性樹脂や、ユリア樹脂、フェノール樹脂などの熱硬化性樹脂との競争をもたらした。初期ポリプロピレン生産プロセスが持つ生産性と品質の課題を克服する必要性をポリプロピレンメーカー各社に触発することとなり、各社は根本的な原因である触媒活性と立体規則性を向上させる触媒研究とプロセス開発を行なっていた。

3. 初期ポリプロピレン生産プロセスにおける多品種大量生産の展開とその限界

しかし新触媒の発見やプロセス開発の研究はすぐに成果として現れるものではなく、また新触媒、プロセスの工業化には、試作実験段階を含めると工業化には数年を要する。そのため、各社は当面の対応として既存プロセスを前提に生産性の改善と製品の高付加価値製品化に取り組む必要から、生産プロセスの専用化と大規模化による多品種大量生産という方向を選択した。

三井化学の場合、1962年から大竹工場にてポリプロピレンの生産を開始したが、その後の品種増加とそれぞれの需要増加に伴い、第二プラント、第三プラントと生産系列を増やし、それぞれのプラントを専用化させていった(表2)。三井化学が生産プラントを専用化した背景には、これまで述べてきた触媒能力の低さに加えてプロセス制御技術の未成熟が挙げられる。1960年当時のプロセス制御はアナログ測定器と空気圧伝送を利用したアナログ調節が主流であり、頻繁な反応条件の切替を伴うプロセス制御は困難であった。こうした事情から、ポリプロピレンの多品種生産に際しては、近似する品種毎に生産ラインを分ける、すなわちプラントを別々に建設するという方式を採用し、それぞれのプラントでの大規模化やプロセス改良による生産性の向上が図られた。このような複数の生産ラインによる多品種大量プロセスという方法は、日本のみならず欧米のポリプロピレン生産プロセスにおいても共通してみられるものであった。

しかし、初期ポリプロピレン生産プロセスは、装置工業における多品種生産と大量生産の統合には限界のあるプロセスであった。装置工業は一般に装置の大規模化による建設費用と生産コストの低減効果が機械工業などに比べて大きいとされる。しかし、初期ポリプロピレン生産

表 2 三井化学（大竹工場）におけるポリプロピレン生産の展開

	操業開始年	生産量	製品用途
第一プラント	1962年	1万t/年（1962年）	成形用高分子量ホモポリマー 二軸延伸フィルム用ホモポリマー 成形用コポリマー
第二プラント	1965年	1.8万t/年（1965年）	繊維用ホモポリマー フィルム用コポリマー 成形用低分子量ホモポリマー
第三プラント	1967年	1.5万t/年（1967年）	成形用低分子ホモポリマー
第四プラント	1968年	2万t/年（1968年）	

注 第一プラントは1964年に1.35万t/年、第二プラントは1967年に2.64万t/年とそれぞれ増設されている。
出所 三井東圧化学株式会社（1994）426-7頁および464頁より作成。

プロセスでは多様な用途に合わせた生産を行なうには複数のプラントで行なわざるを得なかった。よってポリプロピレン生産プロセスの多品種生産を維持しつつ、大規模化のコスト削減効果を最大限発揮するには、既存の複数のプラントによる多品種大量生産をより少数のプラントでカバーする生産プロセスの確立と、初期の触媒技術の持つ限界、すなわち触媒活性と立体規則性の低さを根本的に改善する触媒の発見が不可欠であった。

IV 生産プロセスの進展と多品種大量生産の変化

Ⅲにてみたように、初期ポリプロピレン生産プロセスは、触媒活性と立体規則性の低さという触媒技術の課題を多数の装置でカバーするもので、生産性と品質の課題を抱えていた。また多品種大量生産という観点では、複数のプラントによる品種の作り分けが行なわれており、大規模化という装置工業における経済性の発揮に限界のある生産プロセスであった。生産プロセスにおける生産性と品質の課題、多品種生産と大量生産の統合という課題は、その根本的な原因である触媒技術の発達を契機に克服された²⁰⁾。

1. 触媒技術の発達

初期ポリプロピレン触媒の課題を克服しようと、ポリプロピレンメーカー各社はより活性が高く、立体規則性制御が可能な触媒の開発に取り組んだ。ところで触媒活性および立体規則性の向上に関する触媒研究の方向としては、異なる触媒原子の発見または既存の触媒原子の機能性向上の二つが挙げられるが、この時期に石油化学企業各社が取り組んだ触媒開発は後者の研究であった²¹⁾。この背景には、後者の研究開発の方が既存の生産プロセスを前提に研究開発を行なうことができたこと、一旦確立された技術の機能性向上は新しい技術の発見よりも早期の成果が期待されることが挙げられる。その中でポリプロピレン生産プロセスの進展に大きく寄与したのが、ソルヴェー社が開発した触媒（1970年）と、三井石油化学およびモンテカチーニ

社がそれぞれ開発し、その後共同開発により確立した触媒(1971年)であった。

これらの企業では既存の触媒活性が低い原因として、化学反応を促進させるチタン原子が既存の触媒構造では十分に発揮されていないと考えた²²⁾。そのため、チタン原子とプロピレンとの接触機会を増やすため、チタン原子の表面積を拡大する手段を研究した。

触媒開発は既にポリエチレン生産プロセスの進展を目的に開発された触媒研究の成果を応用するという、かつてナッタが行なったのと同じ展開で行なわれた。たとえば、ソルヴェー社の開発した触媒はポリエチレン生産用触媒としてフィリップス社が開発した触媒を応用開発したものであった。三井石油化学とモンテカチーニ社の開発した触媒は1963年にソルヴェー社がポリエチレン生産用触媒として開発したものを、三井石油化学とモンテカチーニ社のそれぞれがポリプロピレン用に応用研究し、その後共同開発を通じて完成させたものであった²³⁾。その結果、初期の触媒の活性と比較してソルヴェー社のポリプロピレン生産用触媒は約5倍、三井石油化学・モンテカチーニ社のそれは約50倍にまで向上した。また立体規則性制御もそれまでの90%程度から95%以上となった²⁴⁾。とりわけ三井石油化学・モンテカチーニ社の触媒は、チタン触媒の活性と立体規則性を最大限まで向上させた触媒として今日においてもポリプロピレン生産用触媒のスタンダードとなっている。

1970年代以降、ポリプロピレン用触媒の開発は自動車用・家電用・エレクトロニクス用など従来よりも高い剛性・耐衝撃性などの機能性が要求される用途への展開を行なうべく、ポリプロピレンの品質を規定する要因の一つである分子量分布および分子量の制御に注力が注がれるようになった(表3)。

表3 チーグラール・ナッタ触媒の展開

触 媒	発見年	生産性 (kg _{pp} /gc _{at})	立体規則性 (%)	M _w /M _n	水素反応性
初期チーグラール触媒	1954	2 ~ 4	90 ~ 94		低い
ソルヴェー社開発触媒	1970	10 ~ 15	94 ~ 97		
マグネシウム担持型触媒 (三井石油化学・モンテカチーニ社が最 初に発見・工業化)	1968	15	40		低い
	1971	15 ~ 30	95 ~ 97	8 ~ 10	
	1980	40 ~ 70	95 ~ 99	6.5 ~ 8	中程度
	1988	100 ~ 130 70 ~ 100	95 ~ 98 98 ~ 99	5 ~ 5.5 4.5 ~ 5	非常に高い 高い
	1999	40 ~ 70	95 ~ 99	10 ~ 15	中程度

注1 高分子の多分散度(M_w:重量平均分子量/M_n:数平均分子量)は、値が大きいかほど分子量分布が広くなり、成形加工がしやすい一方で、機械的性質(=剛性、耐衝撃性、耐熱性など)が低下する。

注2 水素反応性とは水素の化学反応に対する感度を示す指標で、高いほど水素の連鎖反応感度が高まり、より分子量の多い(=剛性、耐衝撃性、耐熱性などが高い一方で、成形加工の困難な)ポリプロピレンが生成される。

出所 Pasquini (2005) 21頁、表2.1を抜粋・加筆・修正。

2. 生産プロセスの進展

触媒技術の開発の成果がもたらした生産プロセスの変化は当初、ポリプロピレン生産プロセスにおける不純物除去装置を省略しえるという形で現れた。

ポリプロピレン触媒技術の向上により、触媒活性と立体規則性が向上する中で、ポリプロピレン内に残留する触媒や品質劣化をもたらすアタクチックポリマーの割合が無視できる程度にまで減少した。その結果、初期ポリプロピレン生産プロセスでは触媒除去装置やアタクチックポリマー除去装置などの不純物の除去装置を徐々に不必要なものにし、その結果は建設コストでは約55%とプロセスに要するエネルギー量の削減では約30%の削減効果をもたらしたといわれる²⁵⁾。

また、初期ポリプロピレン生産プロセスでは、化学合成によって生じるアタクチックポリマーの除去を目的としてヘプタン溶媒による生産プロセスを構築していた。だが、触媒技術の向上によりアタクチックポリマーがほとんど生成されなくなった。そのため、溶媒を用いる必要がなくなった。その結果、1970年代に入ると新たにヘプタン溶媒を用いずにポリプロピレンを生産するプロセスとして、塊状重合プロセス、気相重合プロセスが登場した。

図4はHIMONT社²⁶⁾の塊状重合プロセス、図5はBASF社の気相重合プロセスの概略図であるが、両プロセスに共通していることは初期ポリプロピレン生産プロセスからさらにヘプタン溶媒の混合装置が省略されたことである。その結果、初期ポリプロピレン生産が触媒活性と立体規則性をカバーするための対応として配置していた装置は完全に消え去り、生産プロセスにおける時間と投資のムダが節約されることになった。図6は生産プロセスとポリプロピレ

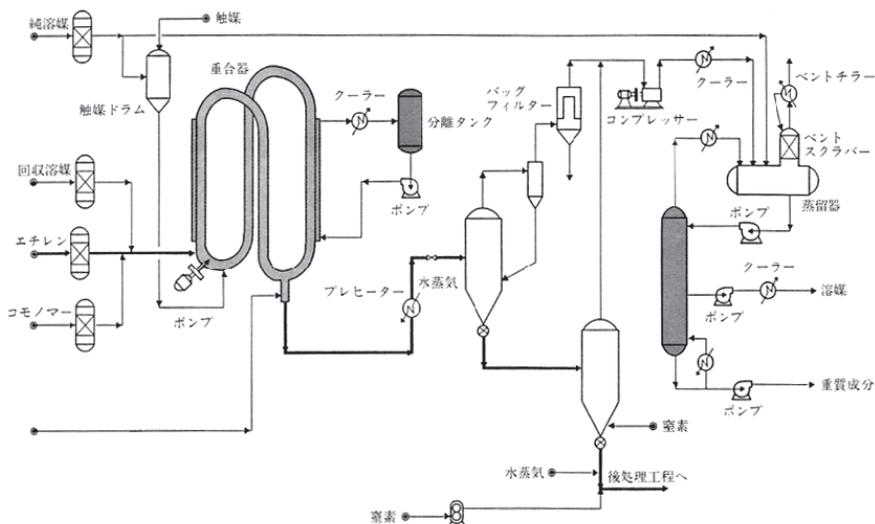


図4 HIMONT社の塊状重合プロセス
出所 曾我ほか（1994）70頁，図2.9を転載。

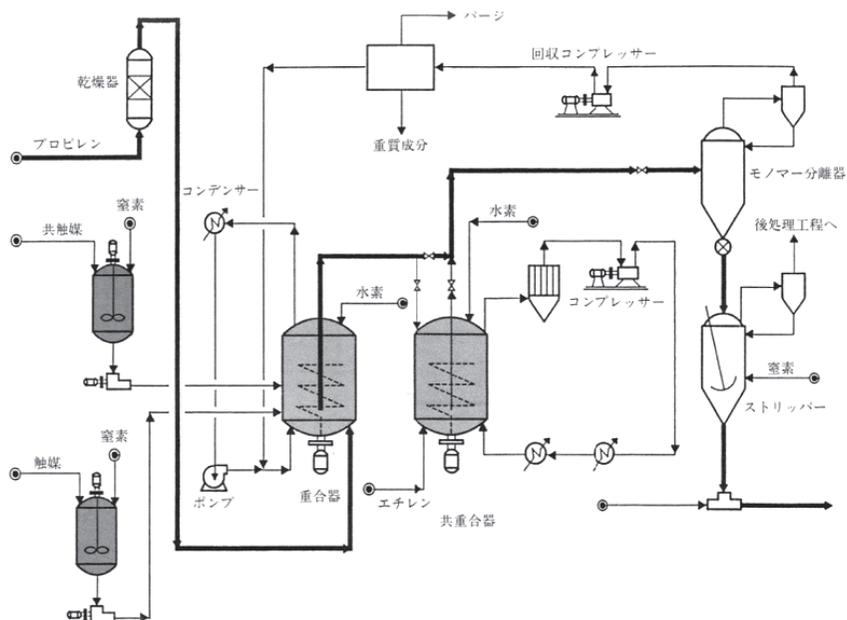


図5 BASF社の気相重合プロセス
出所 曾我ほか(1994)71頁, 図2.10を転載.

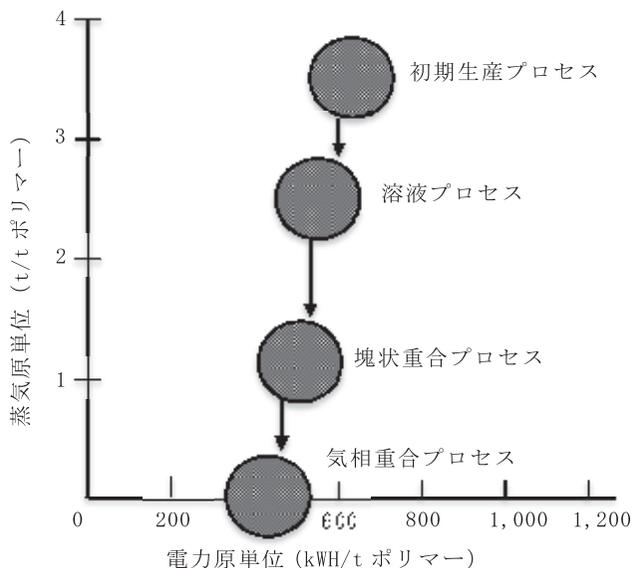


図6 ポリプロピレン生産の各種プロセスとエネルギーコスト比較

注 HDPE (高密度ポリエチレン) とはチーグラー触媒を用いた生産プロセス, LDPE (低密度ポリエチレン) は高温高压の生産プロセスで, 無脱灰法とは触媒の除去工程のない生産プロセス, スラリー法はヘプタン溶媒を用いる生産プロセス, バルク法は塊状重合プロセスのことである.

出所 佐伯・尾見(1994)29頁, 図1.11に加筆・修正.

ンの製品に要するエネルギー原単位の関係を見たものであるが、生産プロセスの進展とともにエネルギー生産性が急速に高まっていることは明らかである。

なお塊状重合プロセス、気相重合プロセスの相違は、原料であるポリプロピレンの状態が液体か、気体という違いが大きい。これはポリプロピレンの中間材製品としての形状化のために乾燥工程を必要とするかしないかというプロセスの違い、また原料プロピレンの装置内の移動速度の違い（気体状態の方が早い）をもたらす。その結果、気相重合プロセスの方がコスト効率性は高くなるのだが、装置内の移動速度の違いはできあがる製品の品質に違いをもたらす。図7はポリエチレンの場合ではあるが、ポリプロピレンにおいても同様のことが生じている。またそれぞれの重合プロセスは開発した企業によって重合装置部分の形状が異なっているが、重合層の形状によっても重合時間とそれによる品質の相違をもたらしている²⁷⁾。

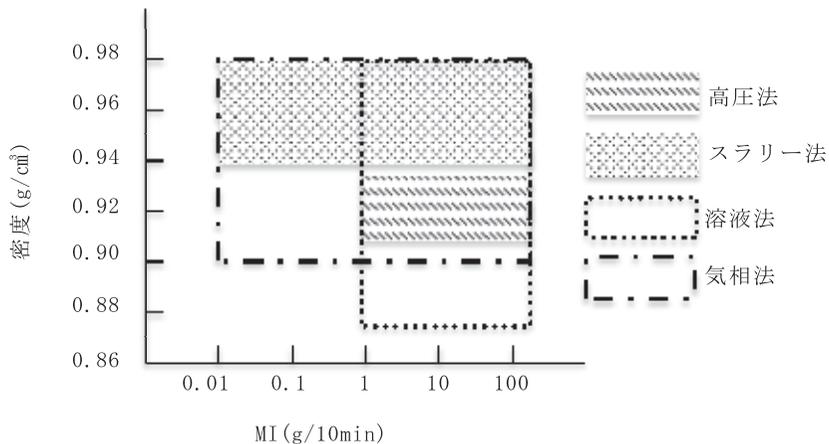


図7 ポリエチレン生産における生産プロセスと製品品質の関係

注 MI（メルトインデックス）とは、成形加工時の樹脂の流動性を表す指標である。
出所 佐伯・尾見（1994）89頁，図4.1に加筆・修正。

3. 生産プロセスの進展と多品種大量生産プロセスの変容

生産プロセスの進展は、初期プロピレン生産プロセスにおける不純物除去工程の省略に始まり、塊状重合プロセス、気相重合プロセスの登場を通じて、ポリプロピレン生産における生産性と品質の向上をもたらした。それは同時にポリプロピレンメーカー各社の多品種大量生産プロセスにも変化をもたらした。これは先に述べた触媒活性と立体規則性の向上による生産プロセスの進展に加えて、1970年代後半から本格化するプロセス制御技術のデジタル化も重要である。

化学工業におけるプロセス制御はフィードバック制御，すなわち生産時の温度・圧力・流体速度・濃度などの目標値と実際値のズレを検出し調整する制御である。1970年に入るまでポリプロピレン生産ではアナログ測定器かデジタル計測と空気圧によって調節を組み合わせる制御

を行なうアナログ制御が主流であった。同時期には石油精製など製品の種類が限定されるプラントでは大型コンピュータを用いたデジタル制御が導入されていたが、多品種生産という生産品種の切替が頻繁な生産プロセスでは、熟練スタッフによる調節よりも高コストになることから導入されなかった。70年代に入ると、マイクロプロセッサの登場によりミニコンピュータを多数接続した低コストの分散制御システムが登場したが、オイルショックによる石油化学原料の高騰などの影響からプロセス制御技術よりも省エネ・省資源のための設備投資が行なわれた。80年代に入ると、市場の成熟化により製品差別化が市場競争における重要な内容となるなかで、石油化学企業各社は各種ユーザーが求める品質に厳格に対応し、かつ低コストでの生産をする必要が生じた。それには従来以上に多品種生産、厳密な制御、頻繁な生産プロセスの切替が必要になりデジタル制御技術を導入するようになった²⁸⁾。

新プロセスやデジタル制御技術の導入は、初期ポリプロピレン生産プロセスを導入した企業の1970年代以降の設備更新や、新規参入企業のプラント建設の中で行なわれた。たとえば三井化学の場合、コンビナートを泉北地区および浮島地区に集約させていったが、その過程で泉北ポリマー（三井化学、日本石油化学、旭化成の共同出資企業）は塊状重合プロセスのプラント（1984年）、浮島ポリプロ（日本石油化学、三井化学、三井石油化学の共同出資企業）では気相重合プラントを建設し、大竹工場のプラントを廃止した。その結果、三井化学のポリプロピレン生産は1970年代には大竹工場の四プラントと泉北ポリマーの一プラントで行なわれていたが、1990年には泉北ポリマーの二つのプラントと浮島ポリプロの一つのプラントに集約化された。しかも、1990年頃のポリプロピレンの生産品種は1970年代よりも自動車向けの品種が増え、その需要先のニーズに応えるべくより多くの品種の生産を行なっていた。

このようにポリプロピレンの生産プロセスの進展は、多品種大量生産の形態に変化をもたらした。初期ポリプロピレン生産プロセスにおける多品種大量生産は、触媒技術等の限界から複数の生産ラインによって行なわれていた。しかし、高活性・高立体規則性触媒を用いた塊状重合プロセス、気相重合プロセスでは、より精密な反応制御と生産品種の素早い切替が可能になり、以前に比べてより少ないプラントでの多品種大量生産が行なわれるようになった。

さらに、塊状重合プロセス、気相重合プロセスは従来のプロセスに比べてより精密な反応制御が可能であったことから、耐衝撃性、耐熱性、剛性、成形加工性において高い品質要求のある自動車・家電・エレクトロニクス向けのポリプロピレンの生産を可能にし、多品種生産の幅をさらに広げることが可能になった（図8）。

4. 生産プロセスの進展と普及過程のタイムラグ

以上、ポリプロピレン生産における生産プロセスの進展とそれによる多品種大量生産の変化を考察した。しかし実際の生産プロセスの進展とその普及過程には後述するように国ごと、企業ごとにタイムラグが生じている。

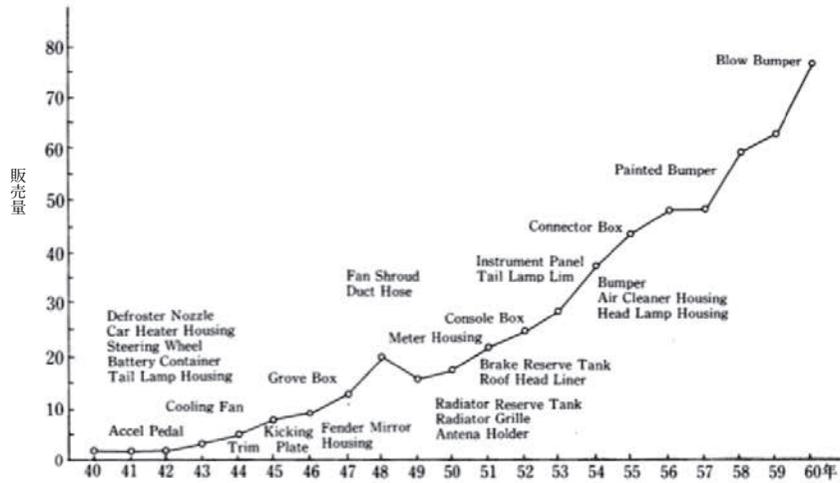


図8 三菱油化の自動車用ポリプロピレンの開発とポリプロピレン生産量の推移（単位：1,000t）

出所 三菱油化株式会社（1988）347頁，第3-3-2図より転載。

装置工業の特徴として、生産プロセスの建設および償却費用は高く、また一旦建設されたプロセスでは部分的改良による生産能力の拡大や生産性の向上は可能である。だが、そのプロセスはある程度専用化されていることもあって、フレキシブルな対応は必ずしも可能ではなく、プロセスそのものを抜本的に切替えることは極めて困難である。また既存の生産プロセスを残したまま、新規プロセスを導入した場合、結果的に当該市場における供給過剰をもたらし、企業の収益性を悪化させる場合もある。実際、1970年代の日本の石油化学工業はそれまでの設備導入の結果、供給過剰状態が常態化し、収益性が低迷する自体となっている。

そうした事情から、化学工業では生産効率や品質の向上をもたらす生産技術が登場したとしても、触媒の導入や部分的な装置の改良（たとえば装置の除去や追加）などは例外として、その普及の速度は国ごと、企業ごとに様々である。表4は、日本、アメリカ、欧州における1990年当時のポリプロピレンの生産プロセスの導入状況を示したものである。これを見ると明らかなように、ポリプロピレンの生産プロセスの進展に対して、アメリカ、ヨーロッパでは塊状重合プロセスが主流を占め、日本では初期プロピレン生産プロセスである溶媒懸濁重合プロセスが多く残っているという相違がみられる。他方で最新の気相重合プロセスの比率でいえば、日本、アメリカ、ヨーロッパの順になっている。このような各国における生産プロセスの導入状況の相違は、石油化学工業の形成の歴史的過程の相違に加えて、1970年代、80年代の各国の化学産業における産業政策と各社の企業戦略を反映している。このことが結果的に、表1に示した先進各国における多品種生産の差異にも影響しているものと推察される²⁹⁾。

表4 地域別の重合プロセスの生産能力(1990年)

単位: 1,000t

	日本	アメリカ	西欧	その他	全世界
溶媒懸濁重合プロセス	855 (44%)	914 (22%)	1,225 (25%)	1,090 (26%)	4,084 (27%)
塊状重合プロセス	314 (16%)	2,425 (58%)	2,260 (47%)	1,500 (36%)	6,499 (43%)
気相重合プロセス	475 (25%)	826 (20%)	742 (15%)	545 (13%)	2,588 (17%)
その他の重合プロセス	289 (15%)		595 (12%)	1,073 (25%)	1,957 (13%)
合計	1,933	4,165	4,822	4,208	15,128

注 溶媒懸濁重合プロセスとは本稿で論じてきた初期ポリプロピレン生産プロセスのことである。
出所 曾我ほか(1994)76頁,表2.5に加筆修正。

V. おわりに

本稿は、ポリプロピレンの生産プロセスを対象に、石油化学工業における多品種大量生産プロセスの展開過程を考察した。

ポリプロピレンの生産プロセスはチーグラ触媒の登場とその応用研究、工業化によって確立され、また石油化学工業の拡大に伴うプロピレン余剰とその高付加価値化戦略を通じて世界的に浸透した。しかし、初期ポリプロピレン生産プロセスは、触媒能力の限界を多数の装置によってカバーするプロセスであったことから、生産性と品質の課題を抱えた生産プロセスであった。またプロセス制御技術も未成熟であった。こうした事情から、多品種大量生産への対応は少品種生産の専用ラインを複数用意することで行なわれたのが、それは同時に装置工業における生産性向上の手段である装置の大規模化の制限要因にもなっていた。

1960年代以降、ポリプロピレンメーカー各社は以上の課題や制限を抜本的に解決するべく、高活性・高立体規則性制御の触媒開発研究とその生産プロセスの工業化に取り組んでいった。その結果、1960年代後半にはソルヴェー社や三井石油化学・モンテカチーニ社の高活性・高立体規則性触媒の発見や、塊状重合プロセス、気相重合プロセスが提案され、1970年代後半にはこれらの成果を融合させた生産プロセスが成立し、各社がその技術を導入するようになった。さらに1970年代後半以降、プロセス制御技術の発達による反応条件の精密制御が進展したことで、ポリプロピレンの多品種大量生産の形態は、従来の複数の専用プラントによるものから、より少数の汎用プラントによる柔軟な生産品種の切替へと変化した。

既存研究における石油化学工業の技術発達分析は装置の大規模化、生産プロセスの連続化、副産物の総合的利用によるコンビナート化に限定されていた。しかし、実際の石油化学工業の展開過程をみると、ポリエチレンやポリプロピレン生産プロセスの成立と進展、用途展開に伴う多品種生産の実現が石油化学工業における装置の大規模化に寄与した、初期生産プロセスにおける生産性と品質の課題の克服が生産プロセスの大規模化と連続化の条件となったなど、多品種大量生産プロセスがコンビナート化、生産プロセスの大規模化に果たした役割を大きいこ

とが分かる。このように本稿では、コンビナート化を典型にみる既存の石油化学工業研究とは異なる新たな技術発達の分析視角を示したのに加えて、石油化学コンビナートの展開は各種製品の多品種大量生産に支えられていることを明らかにした。

最後に本稿の課題について簡単に触れておきたい。本稿はポリプロピレンを事例に、石油化学工業における多品種大量生産プロセスの展開を分析した。しかし、多品種大量生産プロセスは石油化学工業に限らず、鉄鋼業などの他の装置工業や機械工業にもみられる。これらの生産プロセスにおける大量生産と多品種生産の統合は石油化学工業とは異なる独自の困難と克服の過程があり、今後はこれらの産業との比較を通じて石油化学工業における多品種大量生産の独自性を明らかにしていく必要がある。

註

- 1) 中村（1975）352頁。
- 2) たとえば渡辺（1966）、飯島（1981）など。
- 3) たとえば Utterback（1994）、平野・橋川（2011）、稲葉・橋川・平野（2013）など。
- 4) Allen(1968)pp.29-30.
- 5) ポリエチレンの生産プロセスの進展については、曾我ほか（1994）46-63頁が詳しい。
- 6) Pasquini（2005）邦訳9頁。
- 7) Pasquini（2005）邦訳9頁。
- 8) モンテカチーニ社の歴史については井上（1967）を参照。
- 9) しかもこの成果は当のチーグラー自身によるポリプロピレンの成功よりも早いものであった。チーグラーも自身の触媒をプロピレンに応用し成功したのであるが、それはナッタよりも数ヶ月遅れてのことであった（Pasquini, 2005, 邦訳10-12頁）。
- 10) フェノールは合成樹脂の一種であるフェノール樹脂のほかに、医薬品や染料の原料として用いられる。
- 11) 石油化学工業協会（1971）353-4頁、住友化学工業株式会社（1980）353頁、日本化学工業協会（1998）70頁。
- 12) 現在の三井化学。1996年に東洋高压工業と合併し三井東圧化学となった後、1997年に三井石油化学と合併した。
- 13) 現在の三菱化学。1994年に三菱油化と合併。
- 14) 現在の三井化学。1997年に三井東圧化学と合併。
- 15) 以上のポリプロピレンの導入過程については、石油化学工業協会（1971）353-4頁、住友化学工業株式会社（1980）353-6頁、三菱油化（1988）119-21頁、三井東圧化学株式会社（1994）419-27頁を参照。
- 16) 曾我ほか（1994）46頁。

- 17) 化学工学会編 (1998) 185-6頁.
- 18) Pasquini (2005) 邦訳433-4頁を参照.
- 19) 村田 (1979) によれば機械的・装置的手段の高度化による不純物の除去率を向上させることは可能であるが, その場合はより多くの機械的・装置的手段を必要とするため, 生産コストを引き上げる要因となる.
- 20) 生産プロセスの進展には触媒技術の発達以外にも, 装置とその周辺技術の変化も不可欠である. この点に関して, たとえば飯島 (1981) は反応容器内での不純物等の付着防止, 反応熱の除去や, 攪拌翼, 圧力装置などの技術発達を挙げている (320頁).
- 21) 前者の代表的な事例として, 1980年代にアメリカのカミンスキー教授 (Walter Kaminsky) によって発見されたメタロセン触媒が挙げられる.
- 22) ソルヴェー社の触媒開発の詳細は, Pasquini (2005) 邦訳19頁, 曾我ほか (1994) 6-7頁, 三井石油化学の触媒開発の詳細は, 日本機械工業連合会・研究産業協会 (2006) 30-40頁を参照.
- 23) 石油化学工業協会 (1981) 314-5頁. 触媒開発の詳細は Pasquini (2005) 邦訳, 曾我ほか (1994) を参照.
- 24) Pasquini (2005) 邦訳18-20頁.
- 25) 曾我ほか (1994) 69頁.
- 26) 現在の Basell 社. Himont 社はモンテエジソン社(モンテカチーニ社とエジソン社の合併会社)とハーキュレス社のポリプロピレン事業部の合併会社である.
- 27) 曾我ほか (1994) 70-75頁.
- 28) 佐伯・尾見 (1994) 59-81頁. 佐伯・尾見 (1994) によれば, 多品種生産プロセスでは多いものでは300品種を越えるものもあり, 品種ごとに原料, 触媒, 添加剤, 反応温度, 圧力, 時間などをコンピュータ内に格納し, 生産時にデータを呼び出しているとのことである.
- 29) 1970年代以降の日米欧の石油化学工業の展開の相違は, その後の各国の石油化学工業の国際競争力にも影響するものである. この点は別稿にて検討する予定である.

参考文献・資料 [英語, 日本語の順, アルファベット順]

- Allen, J.A. (1968) *Studies in Innovation in the Steel & Chemical Industries*, Augustus M. Kelley, New York.
- Pasquini, N. (2005) *Polypropylene Handbook, 2nd Edition*, Carl Hanser Fachbuchverlag (横山裕・坂本浩基本訳『新版ポリプロピレンハンドブック』日刊工業新聞社, 2012年).
- Utterback, J. M (1994) *Mastering the Dynamics of Innovation*, Harvard Business School Press, Boston, Massachusetts (大津正和・小川進訳『イノベーション・ダイナミクス—事例から学ぶ技術戦略』有斐閣, 1998年).

- 平野創・橋川武郎（2011）『化学産業の時代—日本はなぜ世界を追い抜けるか』化学工業日報社.
- 飯島孝（1981）『日本の化学技術—企業史にみるその構造—』工業調査会.
- 稲葉和也・橋川武郎・平野創（2013）『コンビナート統合』化学工業日報社.
- 井上隆一郎（1967）『ある大企業モンテカチーニの没落』至誠堂.
- 化学工学会編（1998）『化学プロセス：基礎から技術開発まで』東京化学同人.
- 近藤完一（1968）『現代工業経済論』勁草書房.
- 三井東圧化学株式会社（1994）『三井東圧化学社史』三井東圧化学株式会社.
- 三菱油化株式会社（1988）『三菱油化三十年史』三菱油化株式会社.
- 村田富二郎（1979）『日本産業の課題—公害問題の考え方』勁草書房.
- 中村静治（1975）『技術論争史（下）』青木書店.
- 日本化学工業協会（1998）『日本の化学工業50年のあゆみ』日本化学工業協会
- 日本機械工業連合会・研究産業協会（2006）『平成17年度産業技術の歴史の集大成・体系化を行うことによるイノベーション創出の環境整備に関する調査研究報告書—我が国の産業技術革新を推進した先人と技術に関する調査編—』http://www.jmf.or.jp/japanese/houkokusho/kensaku/pdf/2006/17kodoka_01_1.pdf（2013年12月13日閲覧）.
- 佐伯康治・尾見信三（1994）『新ポリマー製造プロセス』工業調査会.
- 石油化学工業協会（1971）『石油化学工業10年史』石油化学工業協会.
- 石油化学工業協会（1981）『石油化学工業20年史』石油化学工業協会.
- 石油化学製品需給協議会（1994）『我が国石油化学産業の国際競争力について』石油化学製品需給協議会.
- 曾我和雄ほか（1994）『重合プロセス技術—ポリオレフィン』大日本図書.
- 住友化学工業株式会社（1980）『住友化学工業社株式会社史』住友化学工業株式会社.
- 渡辺徳二（1966）『化学工業』日本評論社.

Formation and Evolution of High Mix and High Volume Productive Process in
Petrochemical Industries:
A Case Study of Polypropylene Production Process

NAKAMURA Shingo *

Abstract

In this paper, I discuss the history of high mix and high volume productive process in petrochemical industries from a case study of polypropylene production. Most studies have focused on the development of economies by the scale of petrochemical industries. Since petrochemical industries are producers of production goods for various users, it is necessary for petrochemical producers to meet the various qualities and needs. Thus, it should be emphasized that a focus on formation and evolution of high mix and high volume productive process is also needed. The high mix and high volume productive process in polypropylene production was in low productivity in order to deploy impurity removal devices from quality problems that cause the catalyst technology in the first place. As this process has to carry out a plurality of production lines for the realization of high mix production, it is a process that is limited for large scale production. Since the 1960s, production process has been simplified by overcoming the problems of productivity and quality in catalyst technology. As a result, it has developed into a manufacturing process of both high mix and large-scale production.

Keywords

Petrochemical Industry, Process Industry, High Mix and High Volume Production, Productivity, Quality, Catalyst

* Correspondence to : NAKAMURA Shingo
Special Researcher, Graduate School of Business, The Advanced Research and Education Center of Business
Osaka City University
3-3-138 Sugimoto Sumiyoshiku, Osaka 558-8585 JAPAN
E-mail: nakamura-s@tortuga.sakura.ne.jp