

「技術は人が育てる—高分子フィルム開発を通じた技術者の軌跡」(全4回)

第3回 現場と理論、そして教育の融合

金井俊孝*

(1月号からのつづき)

3. 研究所時代

3.1 理論解析技術を成形加工全般への応用

1983年(昭和58年)に帰国後、留学前に所属していた研究所に戻り、留学中研究した成形加工の動的解析や理論解析技術を成形加工解析全般に適用することを考えた。自宅に、当時は非常に高価なPCを設置した。16ビットパソコンのNEC 9801が出回ったばかりだったが、パソコンに50万円、ハードディスクに20万円、ドットプリンターに25万円、その他の備品を入れると100万円ほどかけて購入した。会社での仕事はかなり忙しかったので、週末を利用して、N 88 BasicやFortranを使って、テネシー大学でプログラムしたインフレーション成形プログラムを自宅のパソコンに入れて計算可能にし、さらにTダイキャスト成形の成形過程解析や成形安定性解析、チューブラー延伸プロセス解析、スパイラルダイス内流動解析、コートハンガーダイ内流動解析、Tadmor理論を応用した押出機内の解析、その後、伸長変形解析を溶融紡糸やSpunbond不織布成形解析などにも展開し、多くの成形加工解析のソフト開発を行った。これは業務というのではなく、自分の趣味として、週末を利用してプログラム開発を行った時期でもある。現在でいうと、ゲームソフトを作る感覚かもしれない。

3.2 Tダイキャスト成形

インフレーション成形以外のシミュレーション技術の開発の一例として、Tダイキャストの成形挙動を予測する技術を挙げる。当時、成形では樹脂により成形安定性が大きく変化し、引取速度や成形温度でも安定性が変化する挙動が実験的に確認されており、成形不安定性の条件になると必ずドローレゾナンスが発生していたため、ドローレゾナンスの簡易的な予測法を検討した。過去に行われていた検討として、FisherとDennによる文献¹⁴⁾が発表されていたが、現実的な成形条件や樹脂に当てはめた具体的な適用法

を考える必要があった。

そんな折に読んだ信州大学の鳥海浩一郎氏の学位論文¹⁵⁾は、溶融紡糸の振動現象として不安定現象を解析するものであったが、その考え方をTダイキャストに応用することを考えた。

無次元解析すると成形不安定性は、溶融フィルムがロールタッチする位置での無次元歪み速度の不連続性とドローダウン比で整理でき、無次元歪み速度の不連続性は伸長速度の歪み速度依存性と粘度の温度依存性を表す活性化エネルギーが支配していることがわかった(図15)。

つまり、樹脂で言うと分岐がない場合には、樹脂粘度のニュートン性が強いほど(分子量分布が狭いほど)安定になり、長鎖分岐が存在する場合、この量が多くなると安定化し、側鎖にバルキーな鎖があると活性化エネルギーが大きくなり安定化する(図16)。また、樹脂温度が上がるほど、エアナイフやエアノズルを使用するほど歪み速度

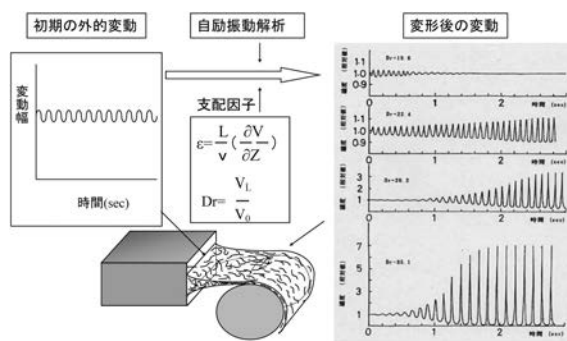


図15 振動とドローレゾナンスの関係

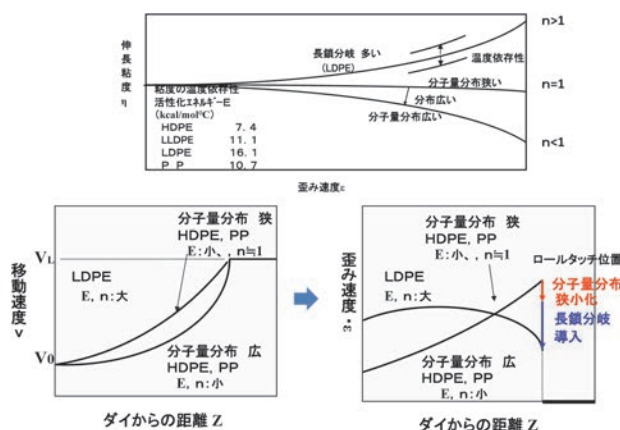


図16 樹脂のレオロジー特性と変形挙動

Technology is Developed by People—The Trajectory of an Engineer through the Development of Polymer Films
3. Integration of Field, Theory, and Education

* Kanai, Toshitaka
KT POLYMER 代表
toshitaka.kanai@ktpolymer.com
2025.7.31 受理
<https://doi.org/10.4325/seikeikakou.38.58>

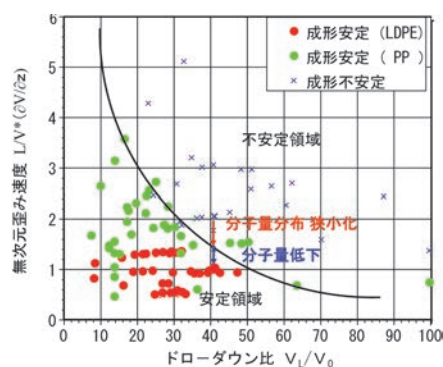


図 17 歪み速度パラメーターと成形安定性の関係

の不連続性が小さくなり、安定化することが理論的に説明できることがわかった (図 17)^{16)~19)}。さらに、成形中の破断は成形中の最大応力とワイゼンベルグ数に左右されることが予測された¹⁸⁾。

3.3 博士号の取得とアフター 5 の論文作成の日々

出身校である東京工業大学の清水教授がテネシー大学に滞在中に、何度か深夜の午前中にわたるまで研究討論する機会があり、私の研究に興味を持っていただき、帰国後、論文博士を取得することを勧めていただいた。その時は軽い気持ちで考えてみますと言ったものの、それからが論文をまとめ、また投稿論文作成と、たいへんな事態になった。研究所での業務は忙しかったので、会社から帰宅後の毎晩と週末のみが論文作成の時間だった。自分で論文作成し、投稿し、査読者の意見に対する修正を繰り返す日々が続いた。図や表の数は 300 枚以上になり、当時は Word や Excel などもなく、ロットリングを使って、一枚一枚作成する日々が続いた。毎月、1 報書き上げるペースで論文を作成し、投稿した論文の修正や査読結果への対応が重かった。

結局、工学博士を出身大学である東京工業大学から昭和 61 年 (1986 年) に授与された。

フィルム成形関連の文献は 2 年間にインフレーション成形の研究成果や後に行った T ダイキャスト成形の成果を含め、1984 年、1985 年の 2 年間に投稿論文 13 報、さらに業界雑誌に 4 報の解説記事を出した。その実績により 1986 年に繊維学会から論文賞厚木賞をいただいた。

3.4 成形解析技術の実務への適用

一方、同じ頃、ポリカーボネート製造メーカーのメリットを生かす観点から光磁気記録用メディア基板として、光ディスク基板事業にも参入するべく、検討を開始した。高記録媒体の書き換え可能な光磁気ディスク用の金型を設計するために、光ディスク基板に重要な複屈折の低減、光学均一性、長期に高温下でも安定したディスクの平面性を重視し、面ブレ防止などの観点で、流動起因の複屈折、熱応力起因の複屈折、残留応力などを考慮する必要性があった。

射出成形解析技術を当時、国家 PJ として行っていたアメリカの Cornell 大学の K. K. Wang 研究室が開発した流動複屈折を解析できるプログラムを導入し、Leonov の多モードの粘弾性モデルを適用し、光ディスク基板成形に適用できる流動複屈折を予測するプログラムに改良した。さらに、熱応力解析については、有限要素法を利用して、冷却孔や金型の材質、射出条件を考慮して金型内の温度分布を予測し、その結果を利用して熱応力を計算した。両者の

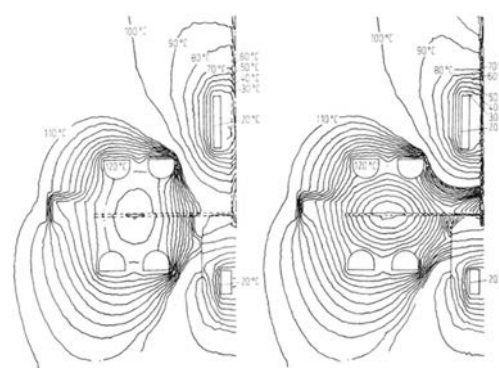


図 18 金型内の等温線図 (左図：充填前、右図：充填後)

プログラムを合わせて流動起因と熱応力起因の複屈折を予測し、複屈折の影響を受けにくい金型設計を実施した (図 18)^{20), 21)}。当時、光ディスク基板の製造技術を Sony との共同開発で行っていた。

しかし、生産工場の用地も準備し、工場建設の計画も具体的に進めていたが、この分野の世界での競合が激しくなり、低コスト化が強く要求されるようになり、企業としてはこの事業を残念ながら断念することになった。

ただし、発表した“光ディスク基板の複屈折制御に関する理論予測”の文献²⁰⁾はこの分野の国内外の研究者にはかなり影響を与えていたことを後になってから聞くことになった。この研究では Cornell 大学の CIMP (Cornell Injection Molding Program) コンソーシアムにもメンバーとして参加し、K. K. Wang 研究室のメンバーとも何度か研究討論を行った。

3.5 専門職からマネージャーへの転向

研究職を希望していたのだが、会社の事情もあり、1989 年、37 歳の時に急遽専門職からマネージャーに転向することを命じられた。

急遽、新規樹脂グレードの開発・設計、一次および高次構造解析とその手法開発、成形加工分野を担当する研究室の室長となり、ほとんどすべての研究開発テーマや製造に関する仕事が担当する研究室に飛び込んできた。プラスチック材料開発としては、バンパー・インパネなどの自動車統合材料、家電材料、建材、水道管パイプ、自動車用ガソリタンク、ドラム缶、化粧品や洗剤向け容器の材料設計と開発、食品フィルム用材料開発、SPS-PJなどを担当した。さらに、プラントの押出機等の設計・解析、樹脂の高次構造解析技術、樹脂性状を評価する GPC 粘度や昇温分別 (TREF) やクロス分別法などの新規分析技術開発が研究室の主な仕事だった。

その中でも最もたいへんだったのが、トヨタ自動車の開発材料である TSOP 材料のコンペであり、結局、研究室を担当した 7 年間はすべてこのコンペに会社の材料開発部隊の責任者として、関与することになった。2~3 カ月に一度の頻度で、トヨタ自動車本社の材料部門の部長に面会し、開発状況を説明することを求められた。海島構造の微細制御、高衝撃化のためのゴムの組成制御、フローマークを発生させる原因となるドメインの変形抑制制御、高耐熱・高剛性化のための高立体規則性化、高流動化、寸法精度、塗装性など多くの因子を考えながら、社内の多くの部署からの協力も得ながら、当時 PP 製造メーカー 11 社と

のコンペにしのぎを削っていた。

低温衝撃強度、高剛性、成形収縮を考慮した寸法精度、耐熱性、高流動性、塗装性など多くの要求特性を満足するためのブロック PP のマトリックスや EPR の設計、後添加ゴム、タルクの粒径や粒径分布に加え、フローマークを抑制するための EPR 部の分子量、組成とマトリックス PP の分子量と分子量分布の設計なども重要だった。

特に、耐熱性では当時最も耐熱性のある高立体規則性 PP を使用し、衝撃強度と流動性を得る為、タイ分子が十分形成できる範囲内で流動性が良い分子量に設定し、かつエネルギー吸収を効率的に行うために、EPR 部の粒径を小さく、粒径分布をシャープにしてクレズの発生効率を高め、かつ耐寒性を考慮して低温衝撃を得るために EPR 部の Tg を下げるためにエチレン量をゲルが発生しない範囲で上げることで、対応した。エラストマーの粒径制御には、Wu の式²²⁾がたいへん参考になり、マトリックス PP とドメインのエラストマーの分子量、ブレンド系の相溶化パラメーター、混練時の剪断応力などを判断する上で役に立った。

さらに、フローマーク抑制に取り組んだ。充填圧力が低くなるゲートから少し離れた位置から Snake-Like な不安定流動になりやすい (図 19)。これがゴムの変形状態に影響を与え、周期的な光沢の差になる。ゴム部の変形を抑えるために、ゲルが発生しにくい範囲内で、PP の分子量はタイ分子を生成できる範囲で小さく、分子量分布は狭く、ゴムの分子量は高めに設定し (図 20)、かつ混練を十分かせる方法で製造した^{23), 24)}。

最終的には、トヨタにバンパー材料を納入することはできたが、非常に多くの仕事を抱えながらの担当だったため、

かなりハードな仕事であったが、この経験は複合材料の設計技術を研究する上で非常に勉強になった。

マネージングの仕事の傍ら、東京工業大学の出身学科である高分子工学科から非常勤講師として“高分子加工”の授業を担当のお誘いがあり、引き受けた。高分子加工の授業は 14 回、90 分授業だったと記憶しているが、適当な本が見つからず、結局、初年度は毎週 90 分の授業の資料を週末作り、講義の回ごとに学生に資料を渡していたが、週末しか作る時間がなく、今思うと若かったからできたと思う。この授業を 7 年間、担当した。このテキストはその後、A 4 版 285 頁にまとめ、多くの機会に講義用資料として使用することになり、今では高分子加工や材料設計の教育用資料として非常に役立っている。この頃、物性や成形性に影響する因子の把握と物性メカニズムの解明の重要性を認識した。

3.6 強い希望で研究職に戻る ―二軸延伸解析―

長年の希望が受け入れられ、7 年続いたマネージャーからやっと研究職に戻ることができたが、いざ研究職に戻ると、しばらくやっていない研究職としてのテーマの発掘力や技術力がかかなりさび付いていることがわかった。

最終的にはフィルム分野を中心にした材料開発の研究テーマを行うこととした。主に、二軸延伸フィルムの材料設計に取り組んだ。当時、PA 6 のチューブラー延伸フィルムの開発には関与していたが、出光興産自体は二軸延伸分野での PP グレードには特徴がなく、あまり売れていなかった。その時に、三菱重工業から、引取速度 500 m/min の高速成形可能な成形機開発をしたいが、そのために樹脂メーカーと共同取り組みをしたいとの話があり、出光がその共同取り組みに手を上げた。あまり実績がなく、評価機も十分ではない状況ではかなり難しいことはわかっていたため、連続の逐次テンター二軸延伸試験機を導入したいとの話を本社に提案したが、装置や建屋を含めると当時 10 億円近い投資が必要であり、投資は本社から却下された。

当時、研究所には岩本製作所製のテーブルテンター延伸試験機だけであったが、そこで考えたのが、二軸延伸シミュレーション技術を使って、疑似的に二軸延伸挙動を解析することであった。モデル的にいろいろな樹脂性状を変えたサンプルをオートクレーブで重合し、そのサンプルを使ってテーブルテンターで延伸倍率と応力曲線 (S-S カーブ) の結果を近似してモデルに組み込み FEM で解析した (図 21)。この時、樹脂の性状として粘弾性特性 (多モードの粘弾性の性質: 分子量、分子量分布や緩和時間) と応

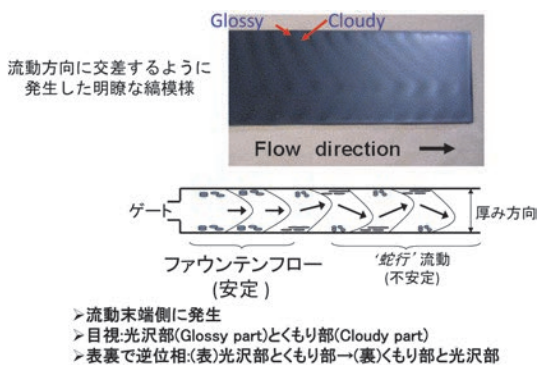


図 19 典型的なフローマーク (PP/ゴム/タルク系)

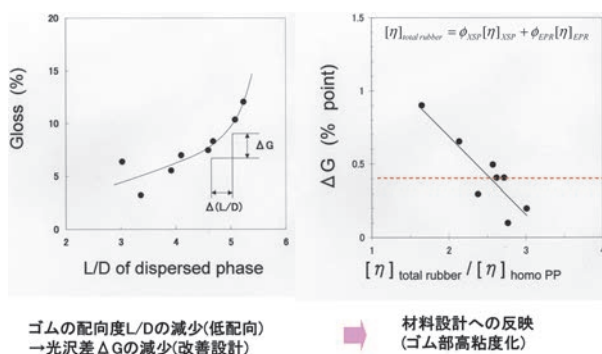


図 20 樹脂設計によるモルフォロジー制御とフローマーク改善設計

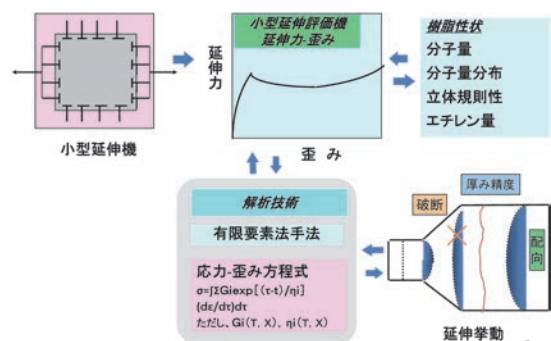


図 21 二軸延伸フィルム成形過程の解析技術

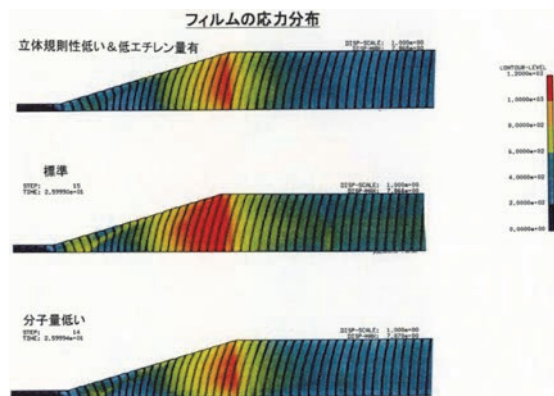


図 22 シミュレーションによる二軸延伸の応力分布予測結果

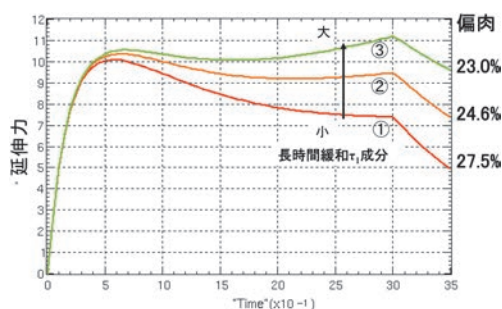


図 23 理論解析による延伸力曲線とフィルムの偏肉の関係

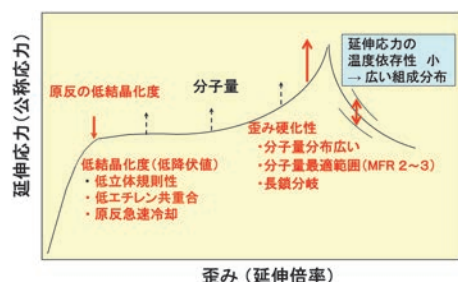


図 24 二軸延伸用グレードの考え方

力結晶化による歪み硬化の特性を考慮した。時々刻々変化する厚み分布変化、延伸応力分布 (図 22)、延伸時の変形挙動やボーイング現象を予測し、そこから最適な樹脂設計を決定する解析であった。一度、モデル化すると多くのケースを計算することができた。その予測結果から原反の結晶化度を抑制し、樹脂の緩和時間を長くし、延伸時の応力-歪み曲線を右肩上がりにする事で、高速成形条件下でのフィルムの厚み精度が向上できることが判明した (図 23)。また延伸応力分布 (成形中の破断に関係する因子) から最大応力を抑える樹脂設計が判明し、高速グレード設計することが可能になった。

具体的には、高速二軸延伸 PP 用グレードとして、延伸応力を抑えるために従来よりも低めの分子量 (MFR 3)、厚み精度を良好にするためにはタイ分子を多くかつ延伸時の延伸倍率/応力曲線が右肩上がりになる広い分子量分布、初期の降伏値を抑え延伸前の結晶化度を抑えてネック状変形を抑制するために低立体規則性 (mmmm 90) になるような樹脂デザインとした。パイロットプラントで製造し、三菱重工業の連続のテンター逐次二軸延伸機で検証し、高速成形のスピードに耐えられる樹脂設計が可能になった

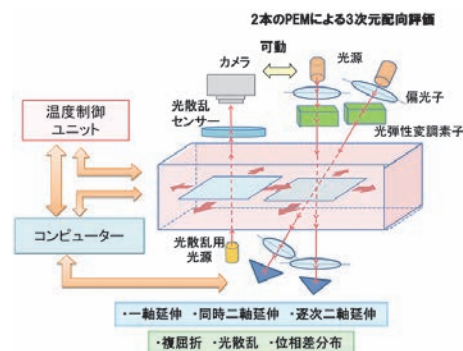


図 25 構造解析可能な二軸延伸フィルム試験機の概略図

(図 24)^{25), 26)}。当然、二軸延伸グレード開発には、重合・触媒研究者やプラントの技術者、材料評価部門の研究者たちの貢献が大きかった。

48 歳で、出光興産初代の主幹研究員を拝命した。この頃から樹脂関連の研究で数々の問題の案件にも関係するようになった。また、二軸延伸フィルムや熱成形などの評価にはもっと効率的な評価方法ができないかを考えていたが、どこの企業も in-situ で延伸中の高次構造解析できる二軸延伸評価機が開発されていなかった。国内外の光学機器メーカーやテンター延伸機メーカーにも相談したが、二軸延伸機と高次構造測定器を組み合わせたテスト機を製作することは難しいとのこと、どのメーカーからも断られた。

そのため、独自に小型の二軸延伸テスト機で延伸性評価や延伸中の S-S 曲線や 3 軸の動的な配向挙動、球晶や位相差などの高次構造変化、延伸終了後のフィルム厚みの計測や位相差分布・光軸分布が計測できる装置を設計した。十分な精度と評価ができる完成品に仕上げるまでには 8 年ほどの年月がかかったが、装置を完成させることができた (図 25)^{27), 28)}。この装置を活用することにより、二軸延伸過程の MD, TD の延伸力、三次元の配向、球晶の変形や崩壊、延伸後の位相差や厚み分布などを同時に測定することで、延伸時のメカニズムを把握することが可能となった²⁷⁾。

現在、金沢大学の博士課程を修了した学生が新しい会社エバー測機㈱を立上げ、製造販売しているが、多くのフィルム関連企業に活用されている。

参 考 文 献

- 14) Fisher, R. and Denn, M.: *A. I. Ch. E. Journal*, **23**, 236 (1976)
- 15) 鳥海浩一郎: 学位論文, 東京工業大学 (1985)
- 16) 金井俊孝: 繊維学会誌, **41**, T-409 (1985)
- 17) 金井俊孝, 船本章: 繊維学会誌, **41**, T-521 (1985)
- 18) 金井俊孝, 船本章: 繊維学会誌, **42**, T-1 (1986)
- 19) 船本章, 金井俊孝: 繊維学会誌, **41**, T-203 (1986)
- 20) Kanai, T. and Shimizu, K.: *Int. Polym. Process.*, **4**, 132 (1989)
- 21) 金井俊孝: 成形加工, **2**, 2 (1990)
- 22) Wu, S.: *Polym. Eng. Sci.*, **27**, 335 (1987)
- 23) Hirano, K., Tamura, S., and Kanai, T.: *J. Appl. Polym. Sci.*, **105**, 2416 (2007)
- 24) Hirano, K., Tamura, S., Obata, Y., and Kanai, T.: *J. Appl. Polym. Sci.*, **108**, 76 (2008)
- 25) Kanai, T.: *Film Processing Advances*, Hanser (2014)
- 26) 金井俊孝監修: フィルム成形のプロセス技術, Andtech 社 (2016)
- 27) Kanai, T., Egoshi, K., Ohno, S., and Takebe, T.: *Adv. Polym. Technol.*, **37**, 2253 (2018)
- 28) Egoshi, K., Kanai, T., and Tamura, K.: *J. Polym. Eng.*, **8**, 605 (2018)