3. エンプラ時代のスクリュアッシィ Spiral Logic 一無剪断発熱可塑化の誕生と可能性―

神谷宗克*1 丸本洋嗣*2

はじめに

一IPF2008でデビューしたSpiral Logic 一無剪断 発熱融解理論

射出成形機業界にとって、21世紀の最初の10年を表現するとすれば、「絶頂からどん底」であろう。「97年不況」から立ち直った2002年以降、日本製成形機業界は、中国への輸出という追い風もあり、出荷台数は順調に推移してきた(図1).不安材料はあったものの、業界は好況を楽観視していた.そこへ、2008年9月のリーマンショックが襲う.金融危機や優等生だった自動車産業の不振などの渦中で、成形機業界は急激に縮小してしまった.経産省の生産動態統計を見ると、2008年10月から減少に転じた後、2009年4月まで7カ月連続して減少傾向が止まらない(図2).トップメーカー1社のみで生産をカバーできるほどの低水準にまで落ち込んでいる.いまだ浮上の兆しが見えておらず、先行きが案じられるところである.

IPF2008(11月17日~21日・幕張メッセ)が催されたのは、オバマ氏がアメリカ新大統領に選出されたころだった。彼のスピーチで使われた、「Yes, we can」や

「Change」という勇ましい言葉が示すように、閉塞感に満ちた世相が待望する、新たな人材の登場である。

Spiral Logicは、この激動の大転換期の真只中、住友重機械工業株式会社の新機種SE-DUZシリーズのオプションとして、IPF2008でデビューした。成形機業界を激変させる可能性を持った、新しい融解理論の登場である。緻密な研究と解析により、過去に信奉されてきた剪断発熱の功罪を明らかにし、その上で作り出されたこの新しいハードウェアについて、以下に詳しく紹介する。

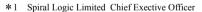
前半では、IPF2008で発表された、Spiral Logicのスクリュアッシィの概要について記す。後半では、この新しい融解理論の発見にいたる研究の成果を詳述していく。前半の概要($1.\sim5$.)で説明の不十分な点については、後半の「SL社の研究成果」($6.\sim9$.)を参照することで、理解していただけるものと思う。

※以下、理論名であるSpiral LogicをSL、社名である Spiral Logic LimitedをSL社、住友重機械工業株式会社は 住友重機械とそれぞれ表記。

1. 射出成形の課題とSLの登場

1.1 社会の動きと射出成形の変化

私たちの生活と成形を取り巻く環境の変化を表してみ



^{*2} 住友重機械工業株式会社 プラスチック機械事業部 技術部

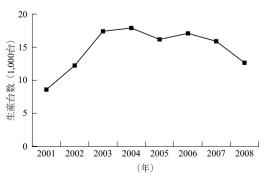


図1 日本製成形機生産台数の推移(年次)

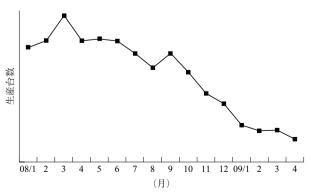


図2 日本製成形機生産台数の推移(08~09年月次)

た(図3). 1980年代は、オーディオカセット・ビデオカセットに代表されるアナログの時代であった。電動成形機(F社)とプリプラプランジャ式(S社)が登場し、成形機に変革の兆しが見えた時代ともいえる。しかし、後述のとおり、計量=融解の基本に変化はなく、1950年代から続く成形機の基本構造に変わりは見られなかった。

1990年代は、デジタル化の時代である。携帯電話に代表される小型軽量のIT機器が激増した。エンプラの急速な普及にともない、T社からは真空乾燥機が、住友重機械からはアルフィンという真空ホッパが発売になるなど、「ガス」という新たな課題が表面化した時期であった。

2000年代には、さらに環境負荷という概念が生まれる。2001年にオランダで、ゲーム機の被覆電線のカドミウム含有という事件が発生した。その後、原材料の環境への負荷低減の機運が高まり、RoHSが2003年に公布、2006年に施行されたことにより、鉛フリーはんだの使用が余儀なくされる。また、耐熱温度要求が260℃になったことがLCPの普及を進めた。高機能ナイロンでは、ノンハロゲン難燃グレードが登場することにより、射出成形の現場において、従来とは違う現象への対処が泊られるようになる

1.2 射出はヒーローなのか

1984年にF社が電動成形機専業メーカーとして参入以来,すでに四半世紀が経ち,今では電動がデファクトとなっている。当時の油圧機では,クローズドループ制御やコンピュータ接続など,最高峰のモデルだけに搭載されていた機構が、電動では標準となった。

その後は、成形品の軽量化・薄肉化にともない、最大射出速度を競う動きが加速する。住友成形機も、ネオマットの時代は300mm/sといえば最高速機であったが、今では標準機でも500mm/s、高速機では800mm/sという仕様がある(図4)、いずれにせよ、射出がヒーローとし

て捉えられていたのであり、その前工程である樹脂の計量=融解に、大きな進歩は見られなかった。

現在,世界中の射出成形機で使われているスクリュは、1950年代にドイツで生まれた,計量部・圧縮部・供給部を備えたデザインとなっている(図5).これは,インライン式でもスクリュプリプラ式でも,まったく同じ構造である.前述のように社会が変わり,使われる樹脂に変化があり,成形機には油圧から電動へと大きな動きがあったわけだが,射出成形にとって最も基本的・根元的な融解工程は,50年間まったく進化することがなかった.

昨今のエンプラ成形における不良や課題の多くは、プ

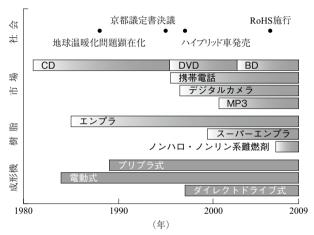


図3 成形機を取り巻く環境の変化

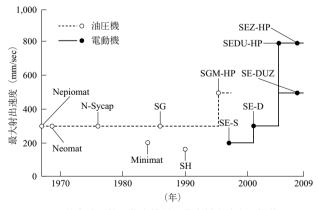


図4 住友成形機の代表機種と最大射出速度の推移



ラスチック製品を取り巻く環境や条件の変化に対して、 射出成形の最も重要ともいえる計量=融解工程の仕組み が変わっていないことが原因なのではないか……. SL 開発の原点はここにある.

1.3 SLの開発と登場

20世紀後半は、大量生産・大量消費の時代であり、社会全体が、合理化・標準化を目指していった。こうした時代には、「新しい理論」よりも「過去の踏襲」が、また、「実験による検証と開発」よりも「開発速度」が優先されてしまう。その結果、射出成形機はデジタル化・電動化されたものの、基本的な構造には何も変化が起きなかったのである。

SL社は2002年,エンプラ成形の最前線で起きる問題の根本的な解決策として,計量=融解工程に新しい理論を導入し,従来とはまったく異なるスクリュアッシィを開発することに着手した。6年にわたる研究と解析によって,無剪断発熱可塑化を軸とした新しい融解理論の構築と、ハードウェアの基礎開発に成功した。

SLは、単にスクリュデザインを変えただけではなく、アッシィの各部がまったく新しい設計となっており、従来の問題対策的な「専用スクリュ」とは一線を画している。不良を起こしにくくするのではなく、その根本原因を排除して不良のない成形を実現する、いわば「エンプラ時代のスクリュアッシィ」である。また、スケールアップやスケールダウンで作られる大量生産的設計コンセプトに基づくものでもない。2008年、住友重機械はSL

社との技術提携で、SE-DUZシリーズ用にSLスクリュアッシィの発売を開始した。インライン式・スクリュプリプラプランジャ式に続く、第3の可塑化装置となることを予感させる。革新的なハードウェアの登場である。

2. SLのシステム構成

SLは、滞留炭化を起こさないストレートスクリュ、 熱履歴の短いバレル、樹脂を適量供給するGSローダ、 そしてメルトの逆流を遮断するGSバルブから構成され ている(図6).

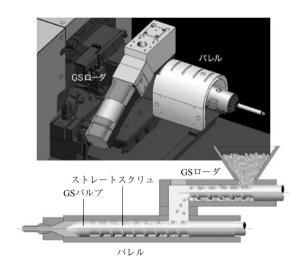
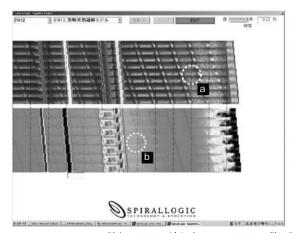
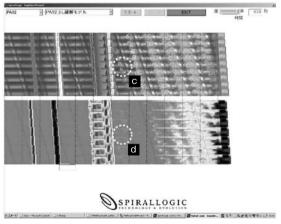


図6 SLスクリュアッシィの外観と構造





従来のバレル(左)と、SLのバレル.数カ所の縦の線は、押さえブロック部分の映り込み

2.1 スクリュ

インラインスクリュの最大の問題点は、「ネジ抜き」である. 特にLCPやナイロンなど低粘性のエンプラでは、ネジ抜きが頻繁に発生し、これが今まで原因不明で再現性がないとされていたショートショットの原因となっていることがわかった.

バレルに単結晶サファイアの大型観察窓を取り付けた独自開発の「サファイアバレル」で確認すると、低粘性のエンプラは、ホッパ口から入るとすぐに溶けている(図7-a). メルトは前進速度が遅いため、傾斜のある圧縮部を起点に渋滞の列がつながっていく. これは、坂道付近を起点として始まる、高速道路の渋滞をイメージすればわかりやすい(図8).

圧力センサバレルで見ると、渋滞の最後端では、ペレ

ットが押し付けられてしまっているため、大きな圧力が発生している(図9-a). この状態でスクリュは、ナットから抜けるボルトのようにスクリュ自身が抜けていってしまう. つまり、ペレットを前に押出していないのである(図10). これにより、図9-bのようにメルトは減圧され、メルトの密度がばらつくことから、ショートショットが起きる.

一般的には、背圧をかければメルト圧が上がってスクリュが後退するためにメルト圧が安定する、といわれている。しかし、ネジ抜きが起きていると、背圧はネジ抜き部の圧力損失でメルトには伝わらない。そのネジ抜き力は、ホッパ口付近の圧力が図9-aのようにショット毎にばらついていることから、一定ではないことが分かる。したがって、背圧をかけてもメルト圧のばらつきは収まらない。

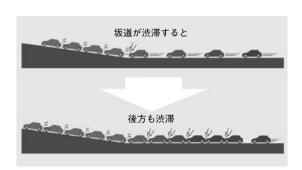
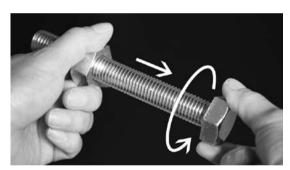
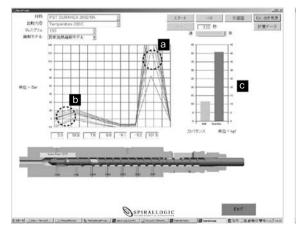


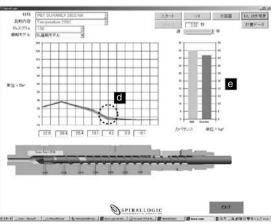
図8 圧縮部に起因する渋滞の列



ナットを持ってボルトを回すと, ボルトが後退する ネジ抜き状態では、 樹脂が進まずスクリュが後退

図10 ネジ抜きを示すナットとボルトによるモデル





従来のバレル(左)と、SLのバレル

図9 バレル内圧力の挙動解析



従来型スクリュ(上)と、SLのストレートスクリュ

図11 スクリュ外観の比較

SLは、溝深さが一定な、圧縮比1のストレートスクリュである(図11). 渋滞の起点となる圧縮部をなくすことにより、メルトのばらつきの原因であるネジ抜きを起こさない構造となっている。圧力センサバレルで確認すると、メルト圧の10ショット重ね描きがほぼ同じ軌跡をたどっている(図9右). また、圧縮部がないため、全長を約2/3に短縮することができた. 熱履歴の短縮は、バレル内での樹脂の脱水分解を避けるという点で、有益である.

2.2 GSローダ

渋滞の起点となるスクリュ圧縮部がなくても、メルトの前進速度はペレットの前進速度よりも遅いため、バレル内ではペレットが押し込まれることになり、無圧縮スクリュでもほとんどの樹脂でネジ抜きが起きてしまう。 SLでは、ペレットを定量供給するGSローダを組み込んだ。スクリュの回転トルクを監視することでペレットの供給量を調節し、適量供給状態を作る。

バレル内にペレットは充満せず、適当な間隙がある.このため、バレル内壁の摩耗は皆無となり、融解時にペレット内部から発生する水分は自然に放出されていく.また、バレル内の樹脂が少ないことと併せ、ホッパ口に樹脂がないことから、パージング量は従来のバレルの1/5しかない、樹脂替えが速くなるのと同時に、廃棄物を大幅に減らすことができる.

2.3 バレル

単にGSローダを装着しただけでは、計量能力が大きく低下してしまう。これが、単品で後付けされる、いわゆる「フィーダ」が充分活用できない理由である。SLのバレルは、噛み込みを改善する特殊構造となっている。また、図6でも分かるように、ホッパ口にはペレットがないのでブリッジの心配はないため、水冷シリンダ温度

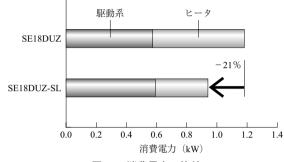


図12 消費電力の比較

は80~100℃でも問題はない. 水分の排出を促すには高めの温度が有利である. このように, 脱気に関してはポンプによる吸引や真空ホッパなどを必要としない.

さらに、もう一つ特徴が挙げられる。前述したように、SLはヒータの熱だけを利用して樹脂を融解する。水冷シリンダ温度を高くすることは、Zone1のヒータ容量を効率的に利用することにつながる。このような高効率性の追求で、例えば、SE18DUZの16SL(スクリュ径16mm)搭載機では、標準の電動成形機に比べ、20%以上の省エネとなった(図12)。

2.4 GSバルブ

インラインスクリュのもう一つの弱点は、スクリュへッド3点セットの閉まり挙動である。計量完了後のサックバックでは、メルトが流れ込む。また、射出開始時にチェックリングの後退が遅れると、メルトが後ろに漏れてしまう。これらの挙動が、不安定要因となり、転写性の悪化をも引き起こす。

SLは、新開発の4点セットを搭載している。スクリュヘッド・カムリング(共回り)・チェックリング(非共回り)・シールリングで構成されている(図13)。電動成形機の特徴を活かし、カムリングを反転させることで、

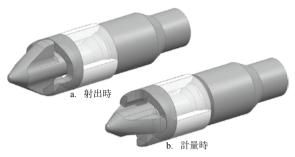


図13 GSバルブの挙動



図14 300万ショット連続成形後のGSバルブ

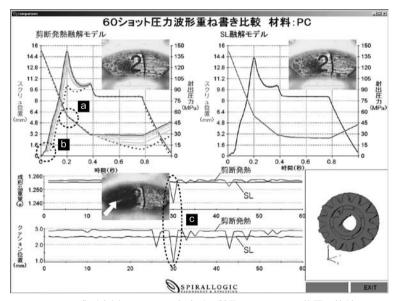


図15 成形事例における圧力波形と質量・クッション位置の比較

チェックリングを閉じる. これが, あえてバルブと名づけた理由である. また, 開閉をカムリング, シールをチェックリングと機能を分けたことにより, 耐久性が大幅に向上した. PA46ガラス30%入り・サイクル7秒で, 300万ショット(1年間)成形しても, クッション異常は発生していない(図14).

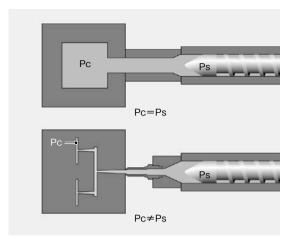
3. SLの効果

前述のように、SLはエンプラ成形の不良原因となっていたインライン式スクリュアッシィを根本的に見直したデザインとなっている。メルトの安定が射出の安定を実現し、さらに黒点がまったく出ないという点で、スクリュプリプラプランジャ式とも異なる性質の性能を発揮することができる。

3.1 射出工程が安定

最新の電動成形機では、電動サーボ・デジタル制御により、優れた繰り返し安定動作が保証されている。それでは、なぜ突然のショートショットが起きるのだろうか。 SL社では、圧力センサバレルのデータ解析による研究から、その原因がメルトの密度のばらつきであると結論付けている。そのばらつきは、ネジ抜きによって発生したものであり、従来のスクリュやバレルを使用する限り、解消することはできない。

実際の成形事例においても、メルトのばらつきがショートショットの原因であることを示している。図15左上の従来型バレルのロードセル圧力波形で、30ショット目(点線)に注目されたい、スクリュは、射出中に設定の速度どおり正確に動いている(a).しかし、射出開始時



従来の考え方では、パスカルの原理で、スクリュの保圧力がキャビティに伝わるとする(上).しかし実際のエンプラ成形では、製品が長く薄く、ゲート・ランナ・ノズル径が小さい(細い)ため、圧力は完全には伝わらない(下).

図16 メルトの挙動

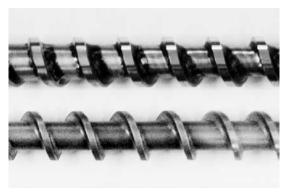
に圧力が上昇してこない(b). メルトの密度が低いため、スクリュが押しても圧力が上がらなかったのである。その結果、充填ピーク圧が上がらず、保圧で補正できないため、質量で約1%のショートとなってしまった(c). 「スクリュを押せば、その圧力がキャビティに伝達する」というパスカルの原理による力の均衡を考えれば、保圧で充填不足を補償できると捉えがちである。しかし、この30ショット目を見ると、ゲートもランナも細い現実の精密成形では、保圧による充填の補償が、完全にはできないことを表している(図16).

一方で、図15右上のSLでは60ショットの圧力波形が ほぼ同じ軌跡を描く.これは、充填工程中のメルトの挙 動が、60ショットで同じであったことを示している.

3.2 黒点(ヤケ)が出ない

黒点(ヤケ)は、透明成形品や淡色の成形品では、最大の不良原因である。PP電池パッキングやLCPコネクタでも黒点が出る。これに対し、さまざまな対策スクリュが登場したが、どれも決め手には至っていない。

そもそも樹脂は、H・O・Cの元素で構成される化合物であり、熱履歴による脱水分解(H・Oの脱落)が起きれば、Cがスクリュの表面に付着する炭化現象が発生する。このため、どんな樹脂でも炭化を生じる。共通しているのは、圧縮部に炭化が形成されていることである。溝を浅くしても深くしても、また、サブフライトを付加



圧縮部に炭化のある従来のコーティングスクリュ(上)と、 圧縮部のないSLスクリュ(コーティングなし).

図17 スクリュ炭化の比較

してもメッキを施しても,スクリュの基本構造が変わらないのであれば,必ず圧縮部で樹脂の炭化は起こるのである.

SLは圧縮部の傾斜がないので、炭化の原因となるメルトの滞留が、スクリュ表面で起きない(図17).この現象は、クエット流という粘性流体の流動理論から説明している(詳しい説明は後述).「ヤケが減る」のではなく、「ヤケという不良現象が起きない」スクリュアッシィなのであり、従来の射出成形の常識を変える、といっても過言ではない.

4. SLの選択と設定

住友重機械は、IPF2008において全電動成形機SE-DUZシリーズを発表した、SLスクリュアッシィは、このシリーズの可塑化選択仕様として、すでに16mm・22mm・32mmを発売しているほか、さらに太径の開発にも着手している。

選択の組合せは、図18のとおりである.

4.1 世界最小計量インラインスクリュ-16s

16sは、射出量1g以下という、世界最小計量を実現するインラインスクリュである(図19). これは、単に製品が小さいということではなく、0.5gを安定計量できる画期的なスクリュである.



図18 SLスクリュアッシィと適合機種



図19 16sスクリュアッシィ

スクリュは、スクリュヘッドのネジ部の耐久性とペレット外寸の制約があり、16mmが最小径とされている。このスクリュで0.5gを計量すると、わずか3/4回転しか回らない(14mmでも大差はない)。剪断発熱が熱源の大半を占めている従来のスクリュでは、3/4回転では剪断で発熱することができず、樹脂が十分に溶けているはずはない。これは、インライン式に限らず、プリプラプランジャ式でも同じことがいえる。細いノズルやゲート部を通過する際に、なんとか溶けて充填している、というのが実像である。

SLは、GSローダからのペレット供給速度を遅くして、計量時間を決定することができる。図9-eの圧力センサバレルの棒グラフで分かるように、SLでは常にメルトの圧力だけでスクリュは後退する。この原理を利用して、

16sでは、わずか0.5gの計量においても、約4回の回転を 実現することができた、スムースに溶ければ樹脂粘度は 低くなり、射出・充填は容易になる。この16sは、LCP の小物精密部品成形で、すでに実績がある。

4.2 設定方法

従来のバレルでは、剪断発熱がどれだけ(何℃)発生しているのか、外部からは確認できないのだから、温度設定における「経験値」は、まったく科学的であるとはいえない、SLの熱源は、ヒータのみであり、不安定な剪断発熱は利用しないため、ヒータの設定温度は、樹脂毎に決めることができる。また、Zone2でのオーバーヒートがなくなることにより、基本的にはフラットな設定で良い、SL社では、示差熱計を使い、樹脂の融点・分解点・比熱のデータベースを作成している。ユーザーの最適な設定を支援するために、将来は適切な温度設定をアドバイスできるサービスをしたいと考えている。

GSローダとメインスクリュの関係は、従来の成形機ではなじみのない新しい設定項目である。定量供給量が少な過ぎると、ヤケのない無圧縮スクリュでも滞留の原因となり、逆に多過ぎると剪断発熱を起こしてしまう。 SL搭載の住友成形機では、メインスクリュの計量トルクを監視して、供給過剰を防止している。そこで、GSローダの設定を少しずつ上げながら、トルク異常が出ず、かつ計量時間が短い、という最適な供給量を決めていく。 いったん条件をつかめば、都度変更する必要がないため、慣れてしまうと簡単に設定できるが、従来の「経験」による判断が正しい設定を邪魔することもあるので、注意が必要である。すなわち、黒点やヤケが心配で供給量を絞ってしまったり、噛み込みを気にするあまり供給量を増やしてしまったりといった、「経験」に基づいて行う設定は、SLの正しい運用上、逆効果を招く結果となる、表1に、設定例を示す。

5. 成形工場の未来をデザインするSL

SLは、成形工場を大きく変える可能性を秘めている. 前述したように、ショートショットやヤケが発生しない ため、それらを不良項目として管理する必要がなくなる かもしれない.

さらに、注目されたいのは、図15の成形事例で見た波形である。成形機の動作が均一であることは、成形機の ロギングデータから保証されている。しかし、それと成形品の品質に相関がないことから、このデータは品質保証には使われていない。成形品の製造工程において、「所定の条件で成形した」「検査基準書にしたがって検査した」だけで、生産記録の開示(ディスクロージャ)という、今後益々関心の高まるであろう製造者としての社会的責任(CSR)を、果たしているといえるだろうか。

ここで、SLの描くロードセル波形を考えてみる。電動成形機のスクリュの挙動は、サーボモータによるデジタル制御のため、繰り返し安定性は抜群に良い。つまり、

表1 SE18DUZ-16SL設定例

| 樹脂 | ZONE4/2/1 (°C) | スクリュ (rpm) / GSローダ設定 |
|------|----------------|----------------------|
| POM | 200/200/200 | 130/40 |
| PA46 | 320/320/320 | 250/30 |
| LCP | 360/360/360 | 300/20 |

射出工程でスクリュ位置のグラフの重ね描きがばらつかないのは当然である。一方、ロードセル波形は、そのようにスクリュが動いた結果のメルトの圧力挙動と考えられる。つまり、射出の結果といえる。SL社では、成形機から充填工程の圧力を抽出して作画し、それを元に不良品判別が可能なデータとしてグラフを保存するソフトを開発している。これを用いれば、成形品が同じように作られたと証明できるのではないだろうか。

成形工場の集中監視システムのいくつかには、波形を表示する機能が備わっている。しかしながら、成形事例のような従来の波形では、1ショットの波形を参照するしか使い道がない。SL社の開発するソフトは、全ショットを保存するという機能を備えており、品質管理のパラダイムシフトを期待させる仕様となっている。

SLの提供する生産システムが、不可解な不良の対策に追われることなく「夜はぐっすり安眠」することができ、「充填工程からCSRを推し進める」強力なツールとなる……。このようなイメージを実現し、射出成形工場・成形業界のさらなるアップグレードを目指して、今後も開発を進めていきたいと考えている。





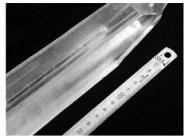
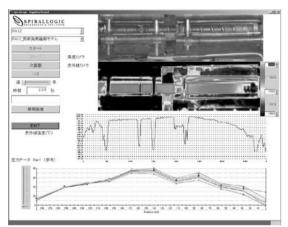
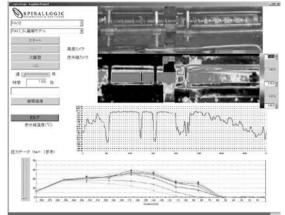


図20 サファイアバレルとサファイアインゴッド





従来のバレル(左)と、SLのバレル(右)

図21 サファイア画像

6. SL社の研究成果-1 サファイアバレル

可視化バレルでは、東京大学の横井秀俊教授の研究が有名である。SL社においても、まずペレットとメルトの挙動を観察することから始めている。SL社が開発したサファイアバレルの観察窓部分には、人造のサファイア単結晶を使用した(図20)、サファイアは、光学特性や耐用性が高いため、高級レンズに使われるほか、高級腕時計のガラスにも採用されている。SL社では、サファイアインゴッドを6本購入、全長95mm×幅12mmの窓状に加工し、研究用のバレルに取り付けた。かつて東京大学の研究で用いられた石英ガラスとは違い、サファイアを採用したことにより、赤外線ビデオカメラでバレル内温度のリアルタイムでの測定に成功した(図21)。

すでに図7の連続合成画像が紹介されているが、ここに示した画像が、オリジナルである。これを元に、個々の写真を合成した展開画像にすることで見やすく編集したものが、図7である。

成形技術の講習会などでは、「ペレットは圧縮部に押し込まれて摩擦で溶ける」とされているが、図21の従来バレル(左)の画像から、実際にはメルトがホッパ口までつながってしまっている状態が確認できた。

また、ヒータは200℃で設定しているが、バレル内の温度は206℃以上にまで上昇していることを赤外線カメラで測定した。これが、剪断発熱の正体である。つまり、メルト(液体)とペレット(固体)の前進速度の差が、バレル内でのメルトの行列を作り、その最後尾で発熱・融解しているというわけである。

SL(図21右)では、GSローダの効果として、フライト内に間隙がある。ペレットはZone1のヒータのみを熱源として加熱され、比較的前方でスムースに溶けていく.

7. SL社の研究成果-2 圧力センサバレル

視覚・温度で観察すると同時に、圧力センサを7個取り付けた圧力センサバレルで、バレル内樹脂の圧力挙動

を経時的に捉えた.これにより,剪断発熱モデルでは, スクリュが「ネジ抜き」をしていることを発見した(以下図9を参照).

従来バレルでは、ホッパロ近くに大きな圧力が見える. 高速度カメラでも確認されている.この部分まで渋滞したメルトにペレットが押し込まれているためで,この力がネジ抜きの原因となる.棒グラフを見ると,圧力の異常な関係が分かる.メルト(左)がスクリュ後退力(右)よりも低い状態は、教科書にあるような「スクリュはメルトの圧力で後退する」のではなく、別の力で下がってしまっている状態を証明している.折れ線グラフの左端がメルトの圧力だが、10ショットの波形がばらばらになっている.ネジ抜きによりメルトが減圧されているからである.

剪断発熱のないSLでは、ペレットはゆっくりと加熱される。赤外線画像のとおり、圧力センサバレルでもホッパ口から3つ目のセンサまでは溶けていないのが確認できた。GSローダによる適量供給状態では、ペレットが無理に押し込まれないため、バレル内に異常な圧力が発生しないのである。棒グラフで、メルト(左)がスクリュ後退力(右)より高いことが示すように、スクリュはメルトの圧力で後退するため、折れ線グラフの左端のメルト圧は一定となる。このメルトの安定があるからこそ、GSバルブの優れたシャットオフ効果を100%発揮することができる。

8. SL社の研究成果-3 黒点(ヤケ)のシミュ レーション

従来は、黒点の原因に対して、明快な説明がなかった。 樹脂の粉が早く溶けてしまいヤケる、スクリュの表面に

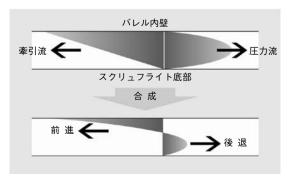


図22 クエット流

付着したメルトが滞留するなど、いろいろな通説がある. しかし、問題があるスクリュを抜いてみれば、程度の差はあれ、圧縮部に炭化層が発生していることに気が付く. (図17). 圧縮部で何かが起きているのであり、樹脂やスクリュの表面が原因ではないことが容易に想像がつく.

SL社は、この疑問について、粘性流体の輸送理論-クエット流で説明した. 図22は、単純化したバレル内で のメルトの流動のシミュレーションである. これで分か るとおり、メルトはバレル側では前進し、スクリュのフ ライト底部では、逆流成分のために後退している。ここ で、フライト底部で後退するメルトが、圧縮部にさしか かるとどうなるだろうか、後退するメルトは、圧縮部の 広くなった部分にくると、勢いを失ってしまう、ストレ ートならば表面を流れるのだが、傾斜のある圧縮部の表 面をメルトは流れない(図23). ちょうど、川の水が河 口で勢いを失い、三角州を形成するような状態である。 つまり、圧縮部の表面には、一番最初に計量した時に流 れたメルトが、ずっと滞留しているのである、その滞留 層は、計量の条件や樹脂などにより異なるが、時間とと もに熱の影響で脱水分解=炭化していく. その断片が黒 点として成形品に入ってしまうのである.

圧縮部のないSLのストレートスクリュでは、バレル側は常に前進、フライト底部は常に後退しているため、スクリュ表面の滞留は起きず、炭化することもなく、黒点(ヤケ)は発生しない.

9. SL社の研究成果-4 腐食の正体

9.1 超臨界水が原因

RoHS規制とともに、電子部品では要求される耐熱温度が上がり、従来のPA66などに代わって、320~340℃

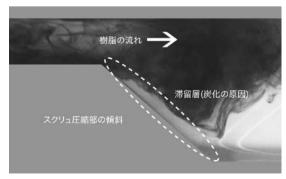


図23 水を使った滞留層形成のシミュレーション

で成形するPA46・PA6T・PA9Tなどが増えてきた.これらの成形現場では、スクリュやスクリュヘッドの腐食が大きな問題となっている(図24). まるで溶けているように見えることや、ヘッドからスクリュ計量部に限定していることが特徴的である. ガラス繊維の影響とも思えず、一方でさらに温度の高いLCPでは、あまりこのような極端な腐食は見られないため、温度が原因でもない. 原因不明のため対策が取れないままでは、メンテナンス費用が大きな負担となってしまう. SL社では、この腐食の原因を、超臨界水によるものと疑っている.

374℃以上の温度,かつ22.1MPa以上の圧力の環境下では、水は液体でも気体でもない、非常に腐食性の強い超臨界状態となる(図25).成形機のバレル内部では、毎ショットこれに近い状態となっている。ナイロンはその性質上、絶乾状態でも0.02%の水分を含んでいる。また、前述のとおり、圧縮部では脱水分解が起き、水が発生している。このようにバレル内にある水が超臨界水となり、ショット毎に腐食が進行しているのではないだろうか。

9.2 亜臨界水実証設備レポート

イビデン株式会社中央事業所(岐阜県大垣市)では、 亜臨界水を利用した生ゴミ処理実証設備が、2008年9月から稼働し、研究が続けられている。以下に、このプラントをSL社が2009年5月に見学したレポートを紹介する。

高圧容器内の生ゴミが、茶色の廃液として排出される 様子を見学した。固体はほとんど残っておらず、少しドロドロとした液体が出てくる。ひとたび亜臨界状態になった水は、常温・大気圧でも強い酸性のままである。ボ イラーの蒸気で作った亜臨界水なので、成形機のバレル内に比べて、温度も圧力もかなり低い状態である。それでも、薬剤はまったく使わずに、給食センターの廃棄物が液状になっているのには、大変驚かされた。

成形機のバレル内部では、例えばナイロンの部品では 340℃以上・50~100MPaの状態が例えばサイクル10秒 なら3秒程度、つまり毎分18秒も発生し、しかも24時間連続運転している、と紹介したところ、プロジェクトリーダーより、「超臨界水の実験プラントでは、せいぜい数秒間の超臨界状態、それでプラスチックを分解する研究をしている」と聞いた。エンプラ成形がいかに厳しい環境にさらされているかが、改めて認識される。

超臨界水では、誘電率とイオン積が変化し、反応溶媒効果を高め、強い腐食性を持つとされる。このうちイオン積は、水素イオン濃度と水酸イオン濃度の積であり、超臨界水ではこの値が大きく増加し、水が強腐食性を呈する。設備メーカーのフジムラインベント株式会社の話しでは、こういった実験容器でも耐腐食性が課題となっており、現在は特殊なステンレス鋼を採用しているとのことである。

- ・超臨界水-あらゆる有機物・金属を分解
- ・気体の数百倍の密度=液体並みの融解力と、低い粘度=気体並みの流動性を兼ね備えた性質.
- ・超臨界水の特徴 超臨界状態で水は特性が変わる⇔ 常温室圧では元に戻る
 - (1) 誘電率:溶媒としての特性の極性 超臨界状態では,有機溶媒並みとなる(超臨界水は 油を溶かす).
 - (2) イオン積:純水中の水素イオンH+と水酸イオ



図24 腐食したスクリュヘッドとスクリュ

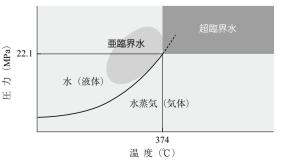


図25 超臨界水

ンOH-の濃度

・300℃付近では室温時の約30 倍になり、解離したイオンが 触媒となりイオン反応が加 速される。

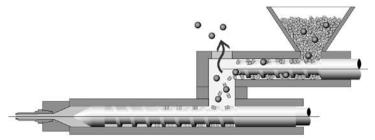
9.3 「腐食性ガス」の信憑性

すでに説明したとおり、SLのホッパ口にペレットは詰まっておらず、融解時にペレットから出た水蒸気は、GSローダを経てスムースに排気されていく、さらに、脱水分解もないため、水が存在せず、超臨界のような極端な高温高圧の条件下でも、スクリュの腐食は起きないのである(図26).

腐食の原因は、「腐食性ガス」が原因だとされてきた. しかし、もし何らかのガスが原因なら、成形機の固定プラテンから金型まですべて腐食するはずであり、ショット毎にガスが出ているとすれば、工場内部の設備が腐食して

しまう. 第一, 作業者が無事であるはずがない.

超臨界水は、燃焼を伴わないゴミ処理としても注目されており、PETボトルやプラスチック廃棄物を数分から数十分で分解してしまうという研究成果を、しばしば目にする。しかし、その強い腐食性から、圧力容器の耐用性が課題となっている。一般社会では「善玉」と捉えられる超臨界水だが、エンプラ成形においては、今後はノンハロゲン系難燃剤の台頭で、ますます腐食の問題が増えてくると予想されており、決して歓迎されるものでは



樹脂に内包する水分は、定量供給の間隙を縫って排出される. スクリュは無圧縮なので、 滞留による脱水分解(炭化)もなく、短い熱履歴で難燃剤の脱水分解もない

図26 何も出さないSL

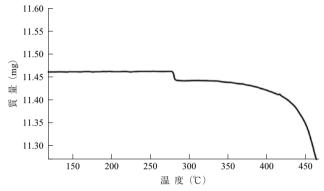


図27 PPSノンハログレードの示差熱計データ

ない。例えば、ノンハロの代表である水酸化マグネシウムは、250℃付近から分解して、 $MgO+H_2O$ となる。あるPPSノンハログレードでは、当社の示差熱計によるテスト結果を見ると、270℃付近で突然質量が0.17%減少している(図27)。つまり、分解して水が発生しているわけで、その量は、ペレット<math>1tにつき 1.7ℓ に達する。これらノンハロゲン系難燃剤については、これから特に注目していきたい。