プラスチック成形品の機械特性評価

小 郷 正 勝*

1. はじめに

近年、地球温暖化、オゾン層の破壊などの様々な地球環境の問題に対する取り組みがなされている。特に、自動車業界においては、地球温暖化や石油の価格高騰により、燃費向上が取り組むべき重要な課題になっている。燃費向上の有効な方策の1つとして挙げられるのが自動車の軽量化である。プラスチック化の流れは古く、第1次石油危機(1973年)を機に急速に検討が進められ、プラスチック化開始当初は汎用プラスチックを中心に内装部品等の比較的使用条件の厳しくない部品から進められてきた。

その後、バンパー等に代表される外装部品や電装品にもプラスチック部品が適用されるようになり、今では、使用条件の非常に厳しいエンジン周りの部品や、衝突安全性の配慮が必要な構造部品へとプラスチック化が拡大してきた¹⁾。プラスチック材料は、金型を用いることにより複雑な形状の製品を短時間に大量生産することが可能であり、安価な製造コストでしかも軽くて多くの機能を付加できる。

そのため、金属材料と並んで自動車以外にも家電製品等で多く使用されるに至っており、プラスチック材料は既に欠かせないものとなっている。

一方、自動車を含め、多くの工業製品では開発競争が激化しており、製品投入サイクルの短縮化を目指して、3次元CADやCAEの導入が積極的に進められ、従来の試作品による検討と比較すると、「開発期間」は大幅に短くなった。特に自動車においては、3次元CAD形状データを活用することで、製造プロセスにおける金型加工や、組み立てロボットの制御、部品の干渉や、仕上がりチェックを行い、製造プロセスは大幅に効率化が進んだ。同時に、CAE導入によって、試作車の検討前に車体剛性や衝突安全性、耐久性等まで検証できるので、試作車の完成度が上がり、試作段階での設計変更が少なくなったことで開発期間短縮と開発コストの削減ができるようになった。このような手法の導入の結果、36カ月といわれた自動車の開発期間が、最近では半分の18カ月程度まで短縮されてきた。プラットフォームを既存車種から流用した場合には、12カ月という例も出てきている²⁾。それらはボディ等の金属部品だ

けで無く、プラスチック部品についてもCAE導入を行わなければ実現が難しい。

しかしながら、プラスチック成形品においてCAEを用いた仮想設計を行うため必要となるプラスチック材料の機械的特性は、金属材料に比べて未だ十分に整備されていないのが現状である。

2. プラスチック成形品機械特性の重要性

多くのプラスチック材料は、粘弾性特性を有しており測定時間(引張速度等)、環境温度、及びその熱履歴によって大きく機械特性へ影響することが知られている^{3)~5)}。そのため、金属等他の構造材料に比べて非常に大きく機械特性が変化し、非線形性も強い。さらに、取扱いを複雑化している要因として、成形加工プロセスが成形品の機械特性に影響することが挙げられる。例えば、エンジン部品に用いるプラスチックは、エンジンの熱と振動に耐えうるため、剛性を確保する必要がある。

現在では、プラスチックにガラス繊維を混入した複合材料が一般的に用いられている。それら複合材料は機械特性に強い異方性が現れ、荷重負荷の方向によって異なった機械性質を呈す。それゆえ、プラスチック製品を設計する場合や金属材料の代替として使用する場合、製造者のカタログデータを参考に設計を行うことは大きな危険を伴う⁶⁾。それらは、CAEを活用した仮想設計の際にも同様である。使用した物性データの精度が低いと如何に優秀な解析ソフトウェアといえども期待する結果を得ることはできない。すなわち「プラスチックの物性データを制するものが、CAEを制す」と言っても過言ではない。

したがって、JISやISOで規格されている一般的な試験方法に限定せず、CAEを用いて実現象を模擬できる高精度な物性データの測定手法開発及び整備・蓄積が急務である。

3. 当該分野での研究開発動向

CAEを活用したプラスチック成形品の仮想設計で現在、最も盛んに研究されているのが、自動車部品の衝突解析である。自動車のプラスチック内外装部品における衝突安全性の確保は、近年、法規として定められており、乗員及び歩行者保護を目的とした安全性能を達成するために、部品自体に高度な緩衝性能が要求されているからである。そのため、試作削減を目指し、CAEでの仮想設計を精度良く行うには、高精度な物性データが必要である。

* Ogo, Masakatsu
宇部興産(株) 研究開発本部自動車部材開発センター
宇部市小串沖の山 1980 番地
2007.1.25 受理

衝突解析での研究について着目してみると、設計手法でいえば、内装部品でリブ等を有する衝撃吸収部品の最適設計手法について提案されており⁷⁾、これは衝突安全評価を行う上で重要な因子とされる頭部損傷値 (HIC) を最小値とする部品形状の探索に、衝突解析と市販の最適化支援ソフトウェアを連携させ解析するものであり、解析精度というより解析時間短縮に注力した研究である。

また、解析手法での研究は、「解析モデルを作成する時に必要となるメッシュ依存性や境界条件の設定等による解析への影響及び実験との比較⁸⁾」、「材料の異方性特性を解析用物性データに反映させることで、解析と実験との評価⁹⁾」など多く見られるが、定性的に実験の傾向を表すものが少なくない。一方で、実際の引張試験を解析で模擬し、解析と実験との比較により物性データを同定するといった研究¹⁰⁾もなされている。

さらに、成形加工プロセスを考慮したプラスチック成形品の衝突解析に関しても既に研究が始まっており、それらは、成形条件によって成形品内に不均一な物性分布が生じるため、通常使用される代表物性データ (プラスチック本来の物性データ) を使用した解析結果と乖離する。そこで、樹脂流動解析ソフトを用いた連成解析により、成形品内の物性分布を考慮した衝突解析を行うことで高精度な解析結果を得る¹¹⁾というものである。研究成果として、定性的な効果は得られ設計に役立つものの、定量的評価までには至っていない。

これらの研究に共通して論じられているのが、プラスチック材料の物性データ (衝突解析では、高ひずみ速度時の物性) の必要性和測定の難しさについてである。しかしながら、測定技術の開発が必要であると論じつつも、実際の物性データの測定方法に関しては、具体的な方法まで十分に検討されていないのが実状である。解析手法と物性データと相互のスパイラルアップによってはじめて高精度な設計が可能となる。

以上を鑑み、筆者らが検討している、プラスチック成形品特有の物性データの測定方法及び評価方法について一部紹介する。

4. 機械特性のひずみ速度依存性

比較的小さなひずみ領域における強度のひずみ速度依存性については、Nielsen¹²⁾、山口¹³⁾、大ひずみ領域の応力～ひずみ特性については富田¹⁴⁾ら、G'sell¹⁵⁾ら、Arimoto ら¹⁶⁾をはじめ多くの研究が行われている。しかしながら、小ひずみ領域～大ひずみ領域を通しての応力-ひずみ特性のひずみ速度依存性の評価方法については、研究事例が少ない。そこで、今回、CAE に活用できるデータとして、独自に開発した測定手法を紹介する。

応力-ひずみ特性のひずみ速度依存性を確認するために、耐衝撃化ポリプロピレン製 JIS 2 号型試験片 (図 1) を用い、独自に開発した引張/圧縮試験装置にて、応力～ひずみ特性を測定した。また、ひずみの測定には伸び計を用い、伸張変形が進むにつれて発生するネッキングの変形挙動 (図 2) をビデオ撮影で観察した。図 3～4 に、静的引張試験における応力-ひずみ特性と試験片正面及び側面方向から観察した変形挙動を示す。

図1 JIS K 7113 2号型試験片

図2 ネッキング現象

図3 試験片中のネッキング変形挙動 (正面)

図4 試験中のネッキング変形挙動 (側面)

本稿におけるプラスチック材料でのネッキング発生の原因については、冷延伸等で誘発される再結晶化による可能性が示されている¹²⁾。参考として、応力-ひずみの関係を n 乗硬化則近似し、さらに、塑性力学に基づいて求めた拡散くびれと、局所くびれの発生ひずみ¹⁷⁾を図3～4中に▽、▼にてそれぞれ示す。試験片正面側及び側面側観察結果とも、概ね局所くびれひずみ (19%) 以降でネッキングが発生していることがわかる。

ネッキングが発生した部位において、局所的に断面積が縮小するとともにひずみが成長し、公称ひずみや公称応力よりも大きくなっていることが予測される。このような応力～ひずみ特性の測定精度を向上させる方策として、図4

図5 公称応力-公称ひずみ応答曲線

図6 真応力-真ひずみ応答曲線

図7 引張荷重-時間応答グラフ

図8 降伏応力-ひずみ速度グラフ

～5に示したネッキング変形挙動から画像処理手法を用いてひずみを測定する方法が提案されている¹⁶⁾。

本稿ではネッキング発生までのひずみ測定には伸び計を用い、ネッキング発生以降は画像処理手法を用いて測定した。測定により得られた各ひずみ速度について、伸び計から測定した伸びと、ロードセル荷重の関係から求めた公称応力-公称ひずみ特性を図5に示す。

各曲線に付したSRは、公称ひずみ速度を示す。また曲線の終端は各ひずみ速度における公称破断ひずみを示す。

応力は、ひずみ速度の増加とともに増大し、一旦極大値をとった後、断面積の減少、ネッキングの発生にしたがって減少する傾向を示した。また、破断ひずみはひずみ速度の増加に伴い小さくなる傾向を示した。

さらに、これら公称応力-公称ひずみ特性から、伸び計と画像処理手法から測定したひずみを用いて、真応力-真ひずみ特性の算出を行った。得られた応力-ひずみ関係を図6に示す。断面積変化、およびネッキング変形を考慮したことで、公称応力-公称ひずみ関係で見られた極大値をとった後の応力減少がなくなり、ひずみの増大とともに応力が単調増加していることがわかる。なお、図中の破線は伸び計のみを用いて求めた真応力-真ひずみ曲線の一例(静

的引張試験)を示したものである。

このようにして得られた物性データを用い、動的有限要素法にて単軸引張試験状態を解析した結果を、図7に示す。解析結果(図中の図5-SS、図6-SS)と実験結果を比較すると、前述した手法で求めた物性データを用いて解析した結果(図中の図6-SS)は非常に良い一致を見た。

5. 機械特性の温度依存性

第2章の記述の通り、プラスチック材料はその機械的特性に温度依存性を示すことが知られている。特に、自動車部品を評価する際には、 $-35\sim 80^{\circ}\text{C}$ と広範囲の温度範囲で検証する必要があるため、プラスチック材料の温度依存性の影響を考慮しなければならない(図8)。自動車の評価を対象に考えると、プラスチック材料ごとに異なる固有のガラス転移点より低い低温域では脆化という問題もあり、自動車の安全性を評価する上で低温かつ高ひずみ速度下における物性データの把握が重要である。しかしながら、測定環境下での厳密な温度管理が困難であるなどの理由から、ひずみ速度を考慮した低温下での温度試験を行う手法は十分に確立されているとは言い難い状況である。

そこで、低温から高温における引張特性の測定方法を考

図9 各温度における弾性率

案し、次に自動車評価用の温度範囲（ $-35^{\circ}\text{C} \sim 80^{\circ}\text{C}$ ）でプラスチックの引張特性データを測定した。さらに得られた測定データを用い、既存の数学的モデルを参考にして、機械特性の温度依存性を考慮した数学モデルについて評価を行った。

独自に開発した恒温槽を用い、前章と同じく自動車用PPのJIS 2号試験片（図2）を使用し、検証温度範囲（ $-35^{\circ}\text{C} \sim 80^{\circ}\text{C}$ ）で引張試験を実施した。測定データから求められた各温度における弾性率を図9に示す。

図9より、各引張速度において、温度の上昇とともに弾性率の減少傾向が見られる。すなわち弾性率の温度依存性が確認できる。また、弾性率は $-35^{\circ}\text{C} \sim -10^{\circ}\text{C}$ までは線形的に低下し、 -10°C 以上より高温側では温度上昇とともにの緩やかに低下している。これらは、ガラス転移（PPのガラス転移温度： -10°C ）の影響である。

ここで、新たなモデルを構築する際に、参考としたプラスチック材料の温度依存性を表す代表的な数学的モデルを以下に示す。

- (1) Arrhenius モデル：化学反応の速度定数と温度の関係について1889年 S. A. Arrhenius が提出した実験式であり、基本的な数学的モデルとされる。熱力学的にも化学的、物理的反応プロセスにも適用が可能である。
- (2) WLF モデル：M. L. Williams, R. F. Landel, J. D. Ferry の3人によって提唱された代表的な時間温度換算則である。
- (3) Peleg モデル：WLF モデルの問題点を修正したモデルである。

上記の数学的モデルから弾性率の温度依存性を考慮したモデルを用いて実験との対比を行った。図10に弾性率の温度依存性に各提案モデルをあてはめた結果を示す。

Arrhenius モデルは、検証した温度域上下限において、実験との乖離が大きくなる傾向を示している。また、WLF モデルは、 -20°C 以上の温度範囲で、実験と良好な一致を見たが、 -20°C 以下の温度範囲では、計算値を過大評価する傾向を示している。Peleg モデルは、検証温度範囲内で、実験と最も良好な一致を示している。

したがって、上記の結果より Peleg モデルが弾性率の温

図10 各提案モデルによる結果

度依存性を精度良く表現できることがわかった。今後、解析での検証を行う予定である。

6. 機械特性の繊維配向依存性

第2章でも述べたが、自動車部品の中でもエンジン周りの部品においては、高剛性が必要とされるため、ガラス短繊維等により複合材料化されたプラスチックが使用されることが多い。

しかしながら、短繊維強化プラスチックの射出成形では、予め短繊維が混練されたプラスチック材料を金型内に溶融された状態で圧入するため、成形加工プロセスでのプラスチックの応力場や流動挙動により、製品内部の繊維配向が場所によって異なる分布（方向、配向度）を持つことが知られている。

通常は、この配向分布による影響を無視し、単一方向から充填成形した矩形板を用いて、流れ方向とこれに直交方向の弾性率を測定して、異方性データとして提示される。しかし、実際の製品においては、繊維の配向方向および配向分布はその製品形状のみならず、製品を射出成形する際の成形加工プロセスによっても異なってくることから、このような一般的な物性データだけでは精度不足である。

また、製品設計の現場においては試作品の製作前に、予め製品の性能を正確に予測する要求もある。しかし、製品が実在しない段階での繊維配向状態を正確に予測できないことから、多くの場合、これら異方性データさえも有効活用することができず、一様な等方性とみなして（異方性弾性率を、等方性弾性率に変換して使用）設計計算に用いられているのが実状である。

既に延伸プラスチック材料に関しては、一部、異方性弾性率の構成式についての研究¹⁸⁾がなされているが、短繊維強化樹脂における異方性弾性率の予測手法の研究は充分ではない。

そこで、以下にこの問題を解決すべく、成形プロセスにおける繊維配向挙動を考慮して、短繊維強化樹脂の弾性率を予測する手法の一例を紹介する。

まず、図11に示すように、矩形板試験片から樹脂充填

図 11 弾性率と樹脂注入方向からの角度の関係を測定するための試験片

図 12 各角度における弾性率

方向を基準として、 $0^{\circ} \sim 90^{\circ}$ 方向について引張試験片を切り出し、それぞれの引張弾性率を測定した。つぎに、樹脂流動 CAE により得られた、成形プロセスでの樹脂流動を考慮して予測されたガラス短繊維配向分布を用いて、ガラス短繊維とナイロン樹脂の力学的複合則から複合化された状態での弾性率を予測し、実験結果との比較を行った。

図 12 に示した試験片の引張試験から求めた弾性率と樹脂流動方向の関係を図中に◆印で示す。流動方向 (0°) で最大、これに垂直方向 (90°) で最小の弾性率を示すものの、その間でも独特の分布を持っており、単純な異方性として取り扱えないことがわかる。

図中に●印で示した線は、繊維配向を考慮した手法による複合材弾性率の予測結果である。市販の樹脂流動解析ソフトウェア (Moldflow 社製 MPI/FLOW 2.0) を用いて、矩形板の射出成形プロセスの流動解析を行い、充填中の樹脂内に浮遊するガラス短繊維の挙動を予測した。得られた繊維配向分布を基に、Tandon¹⁹⁾、Haplpin-Tsai²⁰⁾の提案式を用い算出した。

異方性の程度およびその分布の傾向ともに 10% 程度の誤差内で、精度良く予測できていることがわかり、開発した樹脂材料特性予測手法は、製品や試作品が存在しない段階での仮想設計に有効な予測手法であるといえる。

7. 今後の展開

今後、自動車業界は、さらに強化される燃費規制に対応

するため、これまで以上の軽量化推進が必須となり、より使用条件の厳しい部品のプラスチック化が予想される。同時に開発期間の短縮も求められる。例えば、CAE による事前検討を行うことで試作レスもしくは試作を 1 回のみに削減することである。それらを実現するには CAE による仮想設計の精度向上が、これまで以上に重要になる。

今では、プラスチック材料に対しても、弾性率、降伏応力等におけるひずみ速度依存性、温度依存性等については数多く議論がなされるようになった。さらに、成形品の成形加工プロセスで生じる要因 (繊維配向、ウエルド、反り変形、残留応力等) までを考慮した物性データを適切に評価する手法も研究されつつある。しかしながら、その手法は流動解析と構造解析の連成解析といった解析手法が先行し、成形加工プロセスを経た製品自体の評価手法については、今後の整備が望まれる。

また、本稿では触れなかったが、重要な特性の 1 つである破壊特性に関しても、同様にプラスチック材料本来の特性と成形品としての特性に分けて測定手法の確立に取り組まなければならない。その結果を CAE に反映することにより、成形品に対し高精度な破壊予測も可能となり、さらに使用条件の厳しい部品へのプラスチック化を加速できると期待する。

参 考 文 献

- 1) 草川紀久：自動車と高分子材料，1(1998)，シーエムシー出版
- 2) “解析と設計の省力化で『見えざる開発期間』を短縮”，日経 Automotive Technology, Autumn 創刊第 2 号，106(2004)
- 3) 成澤郁夫：プラスチックの機械的性質，91(1994)，シグマ出版
- 4) 成澤郁夫：プラスチックの強度設計と選び方，45(1990)，工業調査会
- 5) プラスチック成形加工データブック，41(1988)，日本塑性加工学会
- 6) 篠塚正樹，望月政夫，井沢 徹：プラスチック成形品の性能評価技術(第 1 報)，65(1990) 茨城県工業技術センター研究報告第 19 号
- 7) 広田知生：プラスチック衝撃吸収部品のロバスト最適設計プラスチック，成形加工シンポジア '06，233(2006)
- 8) 米川 太：プラスチック製品の CAE 解析(現状と課題)，成形加工，12(3)，209(2000)
- 9) 大須賀晴信：ポリアセタールの部品の衝撃解析，成形加工シンポジア '05，225(2005)
- 10) 小林卓哉：汎用 FEM を用いた最近の非線形構造解析—樹脂材料モデルの同定を中心として—，成形加工，18(12)，853(2006)
- 11) 一之瀬規世：自動車関連樹脂部品の衝突解析の現状と今後の課題，成形加工シンポジア '06，231(2006)
- 12) Nielsen, L. E.：高分子と複合材料の力学的性質，292(1976)，化学同人
- 13) 山口章三郎：加工と設計のためのプラスチックの機械的性質，112(1974)，日刊工業新聞社

- 14) 富田佳宏, 林 健一: 不安定伝播挙動を示すポリマー棒の構成式の同定, 日本機械学会材料力学講演会講演論文集, Vol. B, 7(1991)
- 15) G'sell, C. and Jonas, J. J.: Determination of the plastic behaviour of solid polymers at constant strain rate, Mater. Sci., **14**, 583(1979)
- 16) Arimoto, H. and Yasuki, T., et al.: A Study on Energy-Absorbing Mechanism of Plastic Ribs., IBEC'98982346(1998)
- 17) Mechanical Design & Analysis Co., 薄板の拡散くびれと局所くびれ, Mech D&A News, **200**(3), 4(2000)
- 18) 佐野村幸夫, 早川邦夫ほか: 有理連続体力学に基づく延伸高分子材料の異方弾性構成式の定式化, 成形計加工シンポジウム '05, 209(2005)
- 19) Tandon, G. P. and Weng, G. P.: *Polymer Composites*, 5-4, 327(1984)
- 20) Halpin, J. C. and Kardos, J. L.: *Polymer Engineering and Science*, **16**(5), 344(1976)
- 21) Osswald, T. A., Georg, H. and Menges, L.: エンジニアのためのプラスチック材料工学, 247(1997), シグマ出版
- 22) 平尾雅彦, 藤井昌浩, 河野俊一, 藤野宏史: 成形加工, **6**(4), 271(1994)
- 23) 藤井昌浩, 河野俊一, 藤野宏史: リブ構造を持つ樹脂部品に対する衝突解析技術の研究(第1報), 自動車技術会論文集, **33**(4), 115(2002)
- 24) 藤井昌浩, 河野俊一: 樹脂材料の熱的・機械的諸物性に関する測定, 2001年度年次大会, 日本機械学会, 309(2001)

技術者たるもの勘を養え

ある時、金型の構造部品を鋳物で製作することになった。金型を軽量化する必要があるが、鋳物部材なら肉をぬすむことで、容易に軽量化が可能であるということがその理由であった。

若手の金型設計者は、その指示通り、重量要件を満足すべく、軽量化のための肉ぬすみ設計を行った。彼は、勇んで出来上がった図面を持ってきたが、その図面を見ると愕然とした。ただ単に機械的に肉ぬすみしただけで、強度的要件をクリアしているようには見えない。そこで、金型にかかる荷重・圧力からこの設計で充分満たされているのかと尋ねると、彼はCAEである構造解析をかけたので、大丈夫ですと答えた。それなら、その構造解析のソフトウェアをどこまで理解しているのかと聞くと知らないという。

私の経験から、また直感的に観て、荷重のかかる方向

や大きさを考えると、肉ぬすみの方向、その位置や量の大きさが気になる。材料力学の知識から判断しても、気になるものは気になる。気になることを定量的に上手く言えないが、原理原則から、やり直せという指示を出さざるをえなかった。

最近の若い者というのは、愚痴になってしまうが、もしCAEがない世界で即断・即決を求められたら、技術者たるもの自分の頭で考え、その場で判断しなければならないことがある。毎日連続で大量生産をしている工場では、時間は待ってくれない。現場で課題を見つけ、その場で事前に手を打てるのが、真(まこと)の技術者で、物や現象との対決から勘を養いながら、技術者は育っていくものである。

御意見番