

光ファイバ・センサによる 射出成形金型挙動の詳細観察

＜FBI-Gaugeシステムによる温度・ひずみ分布の同時計測＞

榎富士テクニカルリサーチ 高橋 久範・渡邊 惇・永洞 和宏・後藤 征也
埼玉工業大学 高原 忠良

1. はじめに

インダストリ4.0をはじめとし、モノづくりにおけるIoTやAIの活用が急拡大している。そのためには製造時のデータを的確に取得し、デジタルデータとして蓄積していくことが重要となる。蓄積データの活用によりデジタル・ツインの世界、すなわち、現実と仮想を表裏一体とした新たなモノづくりの世界も垣間見えてきている。リアルな世界においての加工の瞬間の物理情報の継続的な収集が重要である。

射出成形プロセスは型内現象であり、放射温度計やデジタル画像相関法など表面情報を基にする計測手法は活用できない。このため、従来より熱電対や型内圧力センサにより計測してきたが、せいぜい十点程度の離散化した点計測であり、面分布計測は不可能で、取得できる情報量に制約があった。産業界では、ここ数年で光ファイバをセンサとした計測方法⁽¹⁾⁽²⁾が急速に普及している。この方法により型内

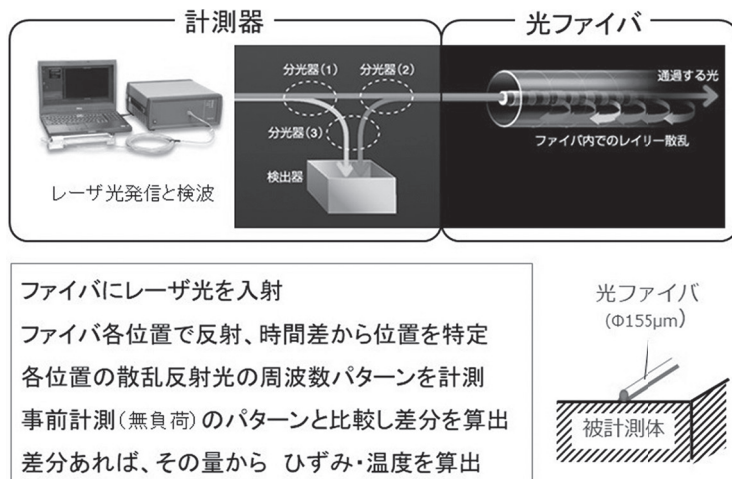
の数百点の温度とひずみの同時計測が可能となった。型内現象の面分布計測も可能になったといえる。

本稿では、まず、光ファイバ計測システムの原理と射出型への光ファイバ設置方法を解説する。ついで、型内分布計測結果を説明の上で、成形条件の影響に関する結果を紹介する。また、流動解析と型剛性解析を連成活用し、金型挙動の考察も紹介する。

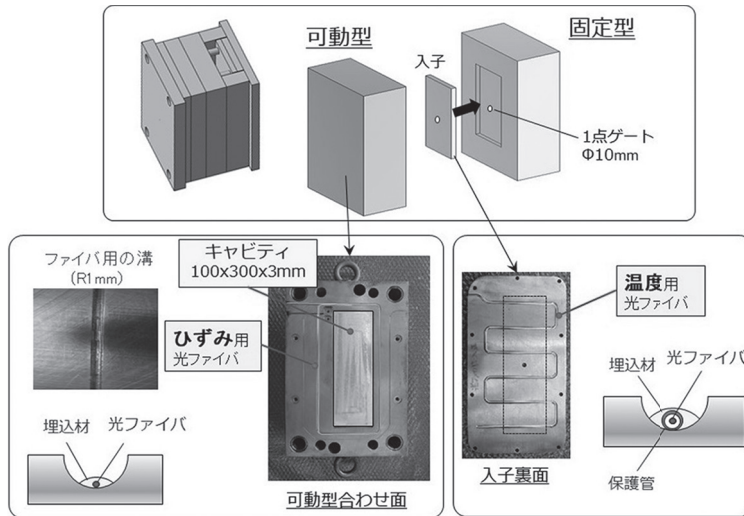
2. 計測原理と射出型への ファイバ設置方法

第1図に計測原理を示す。直径155 μm のファイバを貼りつけた部位の温度ないしはひずみを計測することができる。光ファイバの長手方向に最小0.65 mm置きでの計測が可能であり、光ファイバの設置方法の工夫により、型内での面分布に相当する計測も可能となる。

ファイバ素材の石英ガラスの密度や組成の揺らぎ



第1図 光ファイバをセンサとしたひずみ・温度の計測の原理



第2図 型仕様と光ファイバの配置

などにより、ファイバの局所局所でレイリー後方散乱が生じる。この散乱は部位ごとに特有の周波数分布を呈している。外力がかかった場合、この周波数が微小に変化するが、この変化量を温度あるいはひずみに換算するという原理である。

第2図は型の概要と光ファイバの配置状況の説明図である。可動・固定それぞれにR1 mmの溝加工を施し、その溝内にファイバを配置することで、ガラス製のファイバが直に圧縮されて破壊することを抑制している。可動型のキャビティ外周にひずみ計測用のファイバを設置した。型ひずみを確実に検知するように完全接着してある。固定型の平板入子のキャビティ裏面にはジグザグ状に温度用ファイバを設置した。機械的ひずみは検知せず、熱膨張で自由に光ファイバが伸縮し、その際の熱ひずみのみを計測するように保護管内に配置してある。

なお、ひずみは光ファイバの伸縮に伴うものであり、光ファイバ方向のひずみの計測となる。

3. 実験方法

第1表には使用した機器と樹脂材料を示す。第2表に示す成形条件にて計測した。温度、ひずみともに、10 mm毎の計測とした。計測時定数は1 Hz、すなわち1秒に1回の計測である。

第1表 使用した機器と樹脂

樹脂	ブライムポリマ株式会社 ポリプロピレン J-650HP
成形機	東芝機械株式会社 射出成型機 EC220N-16A
計測機器	株式会社ニカルリサーチ製 光ファイバセンシングシステム FBI-Gauge A-Type

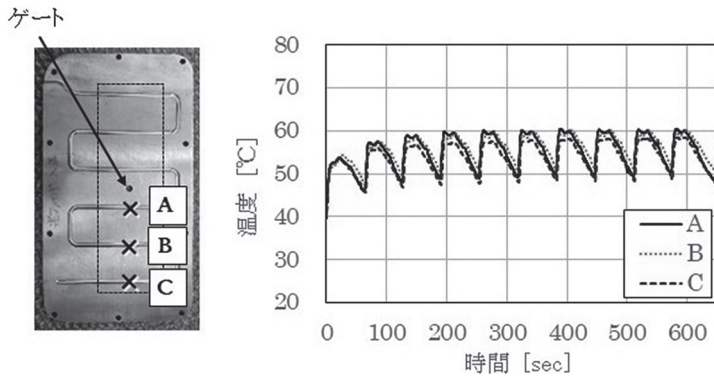
4. 計測結果と考察

4-1 基本検討

第3図は成形条件②にて連続10ショット成形した際の温度変化である。ゲート直下から端末までの代

第2表 成形条件

成形条件	射出圧 (Mpa)	射出速度 (mm/sec)	保圧 (MPa)	樹脂温 (°C)	金型初期温度 (°C)
①	80	15	70	210	40
②	80	30	70	210	40
③	80	30	30	210	40
④	60	30	30	210	40



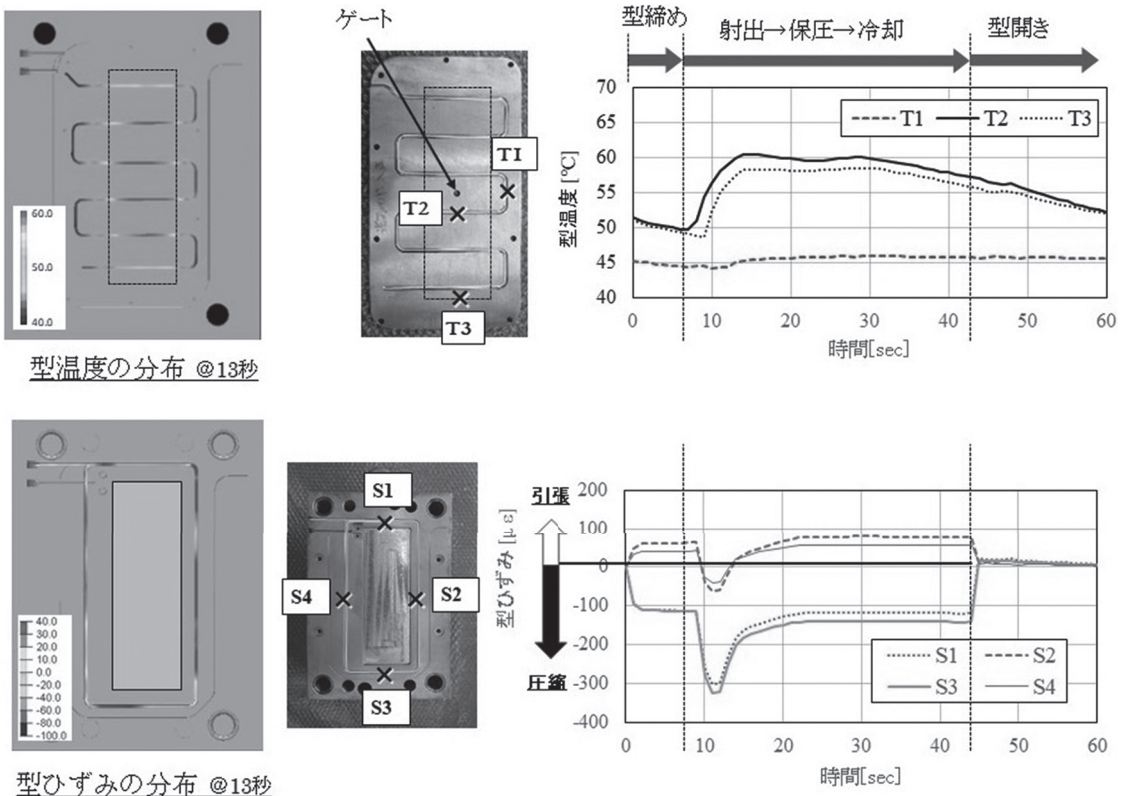
第3図 連続成形における温度変化

表的3点、A・B・Cでの計測値をプロットしてある。連続成形により金型に蓄熱し、ショットごとに温度上昇する挙動が確認できるが、3ないし4ショット目にはその温度上昇はほぼ飽和している。

第4図左に型温度、ひずみの分布をコンター図で示す。成形開始13秒の時点での分布である。センタ一点ゲートであり、キャビティ長手方向の端末T3に

向かい温度が低下する分布を示す。キャビティ外部T1はほとんど温度上昇が見られない。ひずみは長手側S2・S4で引張ひずみ、短手側S1・S3で圧縮ひずみとして分布している。

第4図右に、代表点の経時変化を示す。温度計測ファイバは第2図に示すように平板入子の裏面に設置してあり、キャビティから約1 mm離れているが、



第4図 型温度、ひずみの分布と経時変化

鋭敏に温度変化をとらえることができています。ゲート直下のT2の温度上昇に対して、キャピティ端末近傍のT3の温度上昇は約2秒遅れていることから、流動時間は約2秒と推定できる。ひずみの変化をみると、型締めとともに、長手側S2・S4では圧縮ひずみ、短手側S1・S3では引張ひずみが発生している。その後、樹脂が型内に充満したタイミング、すなわち流動端末近傍のT3点の温度上昇と同タイミングで、計測4点ともにひずみは圧縮側へと変化している。

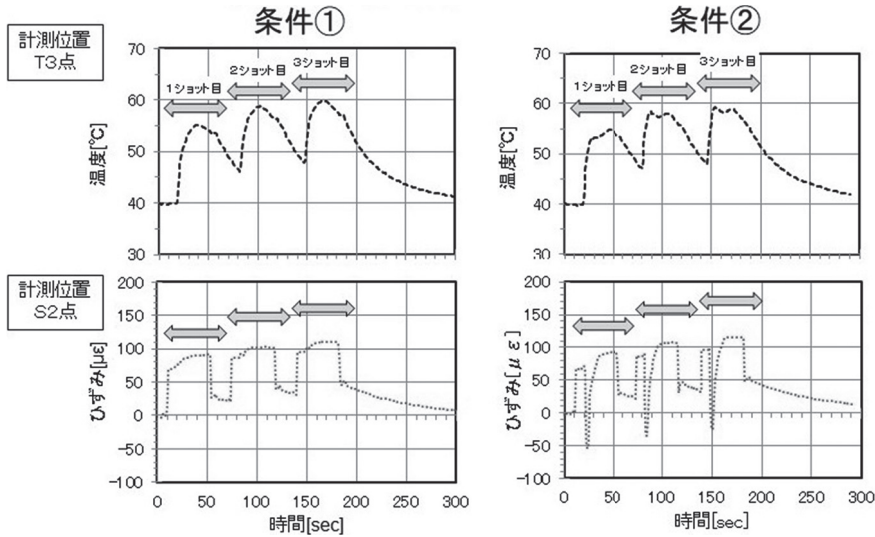
ここまでの計測結果から、分布計測が可能である

とともに、射出成形プロセス中の変化も詳細に計測できることが示された。

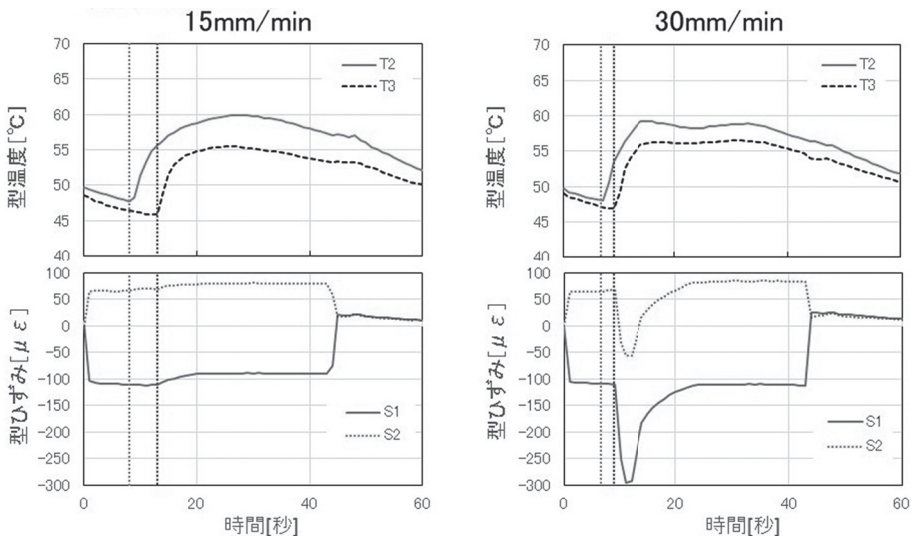
なお、ひずみの変化挙動に関しては、後程CAEを活用して検討する。

4-2 成形条件の影響の検討

第5図は、条件①と②の、代表点T3における温度とS2におけるひずみの、連続成形3ショット分の経時変化である。第3図で確認した型温度の上昇が見られる。なお、ひずみ計測の際も熱膨張によるひずみ加わるため、その影響が見られる。厳密なひず



第5図 連続成形3ショットでのひずみ・温度の変化



第6図 射出速度の影響

み計測の際には、ひずみ用ファイバのすぐ横に温度計測用ファイバを平行配置し、熱膨張分を除することで機械的ひずみ成分のみの計測が可能となる。

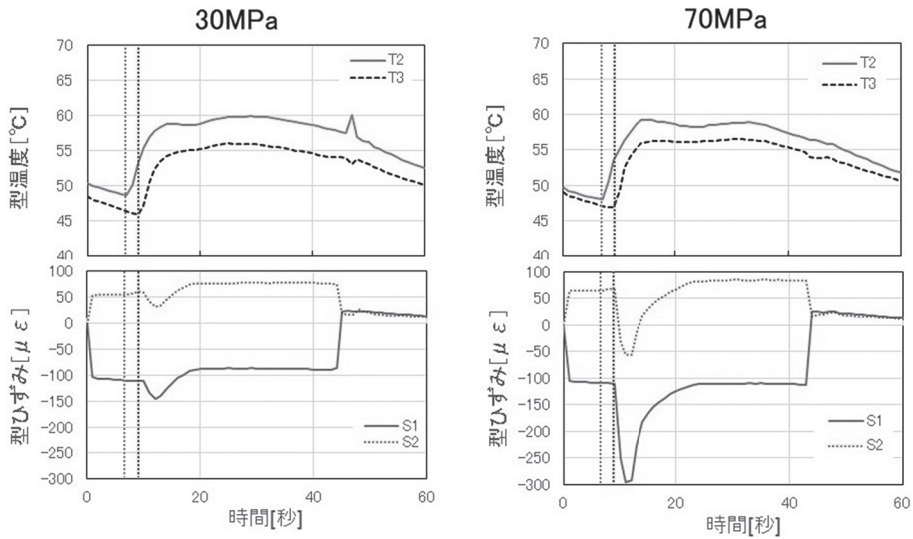
いずれの成形条件でも、温度・ひずみそれぞれで特徴的な変化パターンを示している。また、各ショットでこのパターンは再現されており、成形条件に起因する変化と考えられる。

以降、成形3ショット目のデータにて、成形条件による温度とひずみの経時変化を比較検討する。温度・ひずみともに代表点、すなわちT2とT3、S1と

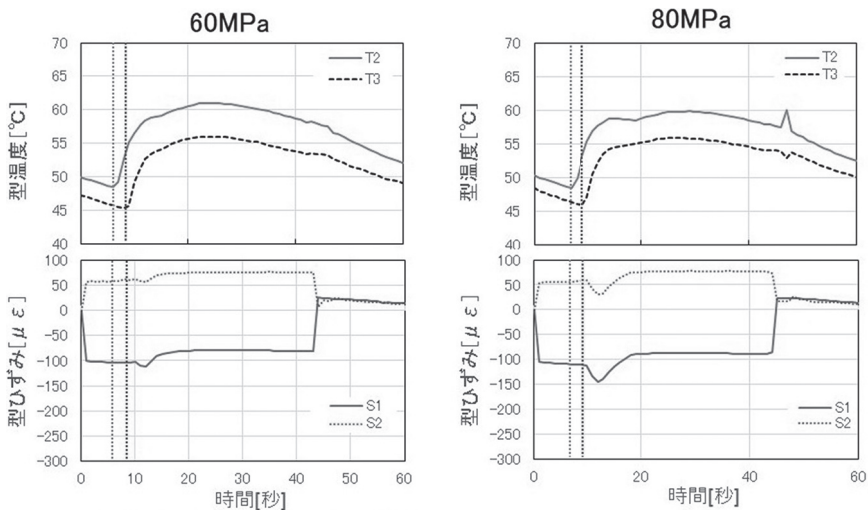
S2での比較である。

第6図は条件①②による射出速度の検討である。T2とT3の温度上昇時間差は、速度を2倍にすると4秒から2秒へと半減している。高速射出の場合はT3温度上昇と同時に大きな圧縮ひずみを生じているが、低速射出ではむしろわずかに引張方向へとひずみが変化している。

第7図は条件②③による保圧の検討である。30MPaの保圧でも、T3温度上昇からわずかに遅れたタイミングでひずみが圧縮側に変化しているがその量



第7図 保圧の影響



射出圧とともに 圧縮ひずみが増加

第8図 射出圧の影響

は小さい。保圧の大小が型の変形に影響していると推察できる。

第8図は条件③④による射出圧の検討である。いずれも、T3温度上昇からわずかに遅れたタイミングでひずみが圧縮側に変化している。その量は射出圧が高いほど大きい。なお、この条件③④の際の保圧は30 MPaであり、保圧力70 MPaの場合ほど顕著な圧縮ひずみは観察されない。

総じて、射出速度が速いほど、保圧力が高いほど、射出圧が高いほど圧縮ひずみは大きい。このことは、充填後の樹脂圧が型開き方向に作用するという型変形を示唆している。また、これらの成形条件ほど、T2とT3の温度差は小さい。樹脂が型に密着しやすく末端の温度低下が少ないと推察した。樹脂圧が型開き方向に作用するという推察とも整合性がある推察である。

4-3 CAEを活用した成形時型挙動考察³⁾

ひずみの特異な現象である以下の2点に関してCAEを活用した現象解明を試みた。

A：型閉じと同時に長手側で引張ひずみ、短手側で圧縮ひずみとして分布

B：樹脂が充满したと考えられるタイミングで生じる型全体の圧縮ひずみ

現象Aは、型閉じと同時にひずみに分布を生じていることから、型締め力による金型変形と推察した。第9図は、汎用ソルバAbaqusにて、型締め力2,000 kNを負荷した際の型剛性解析結果と光ファイバ計測結果の比較である。分布もひずみ値も実測とよく一

致している。型締め力による金型の弾性ひずみとの推察は妥当と結論付けた。

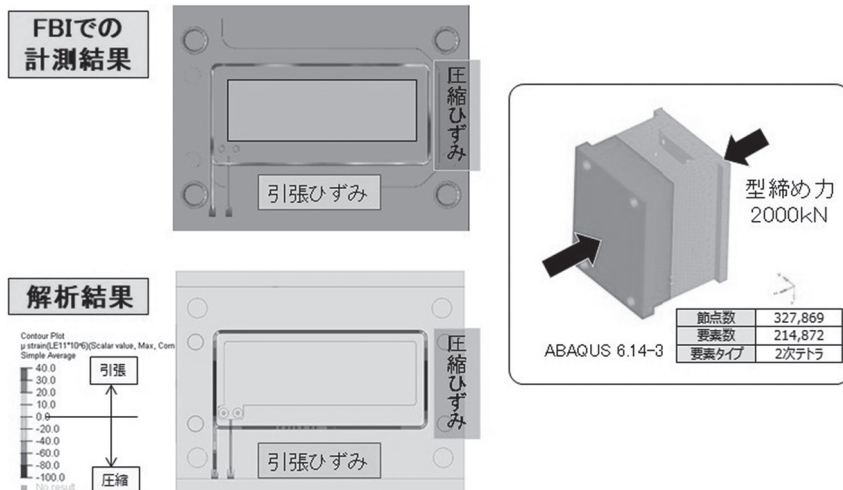
現象Bは、樹脂充填とともに圧縮ひずみが生じていることから、型内樹脂圧による型の押し開き現象と推察した。東レエンジニアリング D ソリューションズ株式製の3D-TIMON[®]により型内樹脂圧の経時変化を求め、その結果と前述のAbaqusの型剛性解析とを連成させ、ひずみの経時変化を求めた。第10図は実測と解析の比較である。経時変化挙動もひずみ値もよく一致している。端末まで樹脂が到達した後、樹脂圧は金型を押し開く方向で作用しているとの推察は妥当と考えられる。

5. おわりに：まとめ

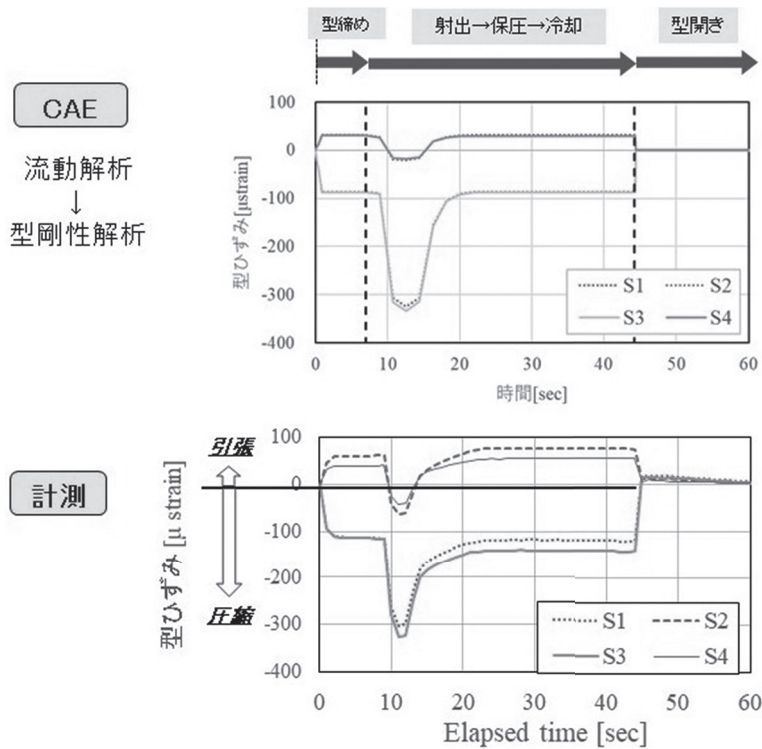
光ファイバ計測システムFBI-Gaugeにより、型内の温度・ひずみの分布と経時変化を詳細に計測できることが示された。温度変化挙動から流動状況の推察も可能である。ひずみ計測結果の分布と変化の現象考察のためにCAEでメカニズムを探索した。型締め時のひずみ分布は型締め力による金型全体の弾性変形、充填完了時の圧縮ひずみは充填後の樹脂圧による型開き現象と推察できる結果が示された。

最新機種では、最小で0.65 mm置きで計測や、最速で毎秒250回の計測の選択が可能となった。より厳密、詳細な計測が可能である。

型内圧力センサや加速度計等の情報との組み合わせ検討も、さらなる挙動解明につながるものと考えられる。



第9図 型締め時のひずみ分布の検討



第10図 CAEによるひずみの経時変化の確認

本件のような計測手法により製造中の情報をモニタし蓄積し、AI等も活用して分析解析することでデジタル・ツインなど産業革命にもつながるものと期待する。

<参考文献>

- (1) 富士テクニカルリサーチHP
https://ftr.co.jp/solution/hardware/fbi_gauge/
- (2) 高原忠良：光ファイバ計測システム「FBI-Gauge」の自動車分野での最新活用状況、自動車技術会 テスティングツール最前線2020、pp.16-17 (2020)
http://guide.jsae.or.jp/first_column/276369/
- (3) 高原忠良・名取孝・大友一之・高橋久範・今井雄一：計測・CAEを活用した原理原則回帰の成形加工、成形加工'19、p.11 (2019)

【筆者紹介】

高橋久範

株式会社富士テクニカルリサーチ ソリューション開発部
部長

後藤征也

株式会社富士テクニカルリサーチ 本社技術1部
E&S5室 主任

渡邊 惇

株式会社富士テクニカルリサーチ ソリューション開発部
要素技術開発室 室長

高原忠良

埼玉工業大学 先端科学研究所
客員教授

永洞和宏

株式会社富士テクニカルリサーチ 本社技術1部
部長