熱可塑性プラスチック/エラストマー サンドイッチ射出成形板の振動特性解析

西脇 剛史*¹・藤田 章洋*²・谷本 安浩*³・丹下 章男*³・前川 善一郎*³

Vibration Analysis of Thermoplastic Resin/Elastomer Sandwich Injection Moldings

NISHIWAKI, Tsuyoshi*¹/FUJITA, Akihiro*²/TANIMOTO, Yasuhiro*³
TANGE, Akio*³/MAEKAWA, Zen-ichiro*³

The vibration damping properties of sandwich-injection moldings are investigated. The sandwich plates used in this work are made of polystyrene (the skin layer) and thermoplastic elastomer (the core) formed by the foam process. The vibration tests have been conducted to obtain the damping factor, by applying an impulse with a hammer on the central portion of the plate under the free boundary condition. A method of finite-element analysis was used to analyze the damping factors of the sandwich-injection moldings. After its validity has been confirmed by experiments, the influences of the size and position of the core upon the damping factors are quantitatively discussed.

Key words : Sandwich-injection moldings/Finite element method/Damping factor/
Foam/Shear deformation

1. 緒 言

プラスチック射出成形品は、電子・電気機器をはじめとする様々な分野で用いられており、最近ではさらなる軽量化、低コスト化、高機能化が求められている。一例を挙げるなら、剛性、強度に代表される力学的特性のみならず、機器から発生する振動に対する制振性

を併せもつことも要求特性の一つとなっている。プラスチック射出成形品に、このような異なる特性を同時に付与するためには、単体材料では困難である場合が多く、2種類以上の材料を用いた複合化が考えられる。2種類の材料を同一ゲートから射出することが可能なサンドイッチ射出成形法は、今後さらに複合化される要求特性を満たす成形品を得る上で、有効な成形法であると言えよう。

サンドイッチ成形法は、表面部（スキン層）を構成する材料および内部（コア部）を構成する材料を選択することによって、幅広い材料の組み合わせが可能である。例えば、コア材に導電フィラー充填樹脂、スキン材に通常の樹脂を用いることにより、外観品質と電磁波シールド性を両立させた事務機器などのハウジングを得ることができる。さらに、環境問題を考慮し、リサイクル材料をコア部に使用した例などいくつかの報告が見られる^{1)~5)}。しかしながら、サンドイッチ射出成形品の物性に関する研究は少なく、サンドイッチ射出成形品についてのさらなる研究が必要であると思われる。筆者らは、スキン材にポリスチレン、コア材に

*¹ (株)アシックス スポーツ工学研究所
アスレチックスポーツ研究部
神戸市西区高塚台 6-2-1 (〒651-2271)
Asics Co. Ltd.
6-2-1 Takatsukadai, Nishi-ku, Kobe, Hyogo 651-2271
Japan

*² 三菱電機(株) 先端技術総合研究所 環境・分析評価技術部
尼崎市塚口本町 8-1-1 (〒661-8661)
Mitsubishi Electric Co. Ltd.
8-1-1 Tsukaguchihonmachi, Amagasaki, Hyogo 661-8661 Japan

*³ 京都工芸繊維大学 繊維学部 高分子学科 材料力学研究室
京都市左京区松ヶ崎御所海道町 (〒606-8585)
Kyoto Institute of Technology
Matsugasakiyoshokaido-cho, Sakyo-ku, Kyoto,
Kyoto 606-8585 Japan
1998.3.4 受理

ポリエステル系エラストマーを適用したサンドイッチ射出成形板を作成し、静的特性として、曲げ剛性や強度を、動的特性として固有振動数について研究を行ってきた^{6)~8)}。曲げ剛性や強度は、これら射出成形板の実使用を考えた場合に、必要不可欠な検討対象である。一方、実構造部材としての射出成形品においては、静的な外力に比べ、数 Hz から数百 Hz に至るまでの幅広いレンジの動的な外力を受ける場合が多い。射出成形品の固有振動数と外力の振動数が一致した場合、成形品の振幅が急速に大きくなり、成形品に過応力が発生し、しばしば破壊にまで至る。これが共振と呼ばれる現象であり、共振を避けるためには射出成形品の固有振動数を、受ける外力の振動数と異なるよう設計すること、射出成形品に大きな減衰特性を付与させることなどが重要になる。サンドイッチ成形品の実用品への適用を考えた場合、これらの成形品の特性を企画段階で予測できることは、設計の点から非常に重要である。そこで、有限要素法によってサンドイッチ射出成形板の固有振動数を、高精度かつ短時間に予測しうる数値モデルの構築についても報告してきた^{6)~8)}。

本研究では、さらなる減衰特性の向上を目的とし、スキン材にポリスチレン、コア材に発泡させたポリエステル系エラストマーを用いたサンドイッチ射出成形板を作成し、その振動減衰特性を評価した。また、先に提案した数値モデルを用い、振動減衰特性を予測できる解析手法を提案し、その妥当性を評価するとともに、減衰特性を向上させるためのコア充填状態についても検討を加えた。

2. 材料および試験方法

2.1 材 料

本研究では、スキン材にポリスチレン（ダイアレックス HF-55、三菱化学㈱、以下 PS と称す）、コア材に PS との接着性が優れているポリエステル系エラストマー（フレクマー G 125、日本合成化学工業㈱、以下 FL と称す）を用いた。また、コア材のエラストマーには微小中空フィラー（エクспанセル 092 MB-120、日本フィライト㈱）をコア材に対して 5 wt% 混入した。本研究で用いた中空フィラーは、射出成形時のシリンダ

一温度による加熱により膨張し、中空球体を形成する材料である。

2.2 サンドイッチ射出成形板

サンドイッチ板の成形には同時複合射出成形機 (FE 260 S 71 AD：日精樹脂工業) を用いた。成形条件を Table 1 に示す。Fig.1 に本研究で使用した平板金型のキャビティ形状およびコアを示す。ゲートは、サンドイッチ射出成形板の中央に位置し、成形板形状は長さ 300 mm、幅 210 mm、板厚 5 mm である。また、スキン／コアの体積比は 85：15 である。

2.3 振動試験

振動測定には GenRad 2515 振動解析装置を用い、測定板を糸で吊した自由な境界条件とみなせる状態において、インパルスハンマーで板中央を加振し、Fig.2 中

Fig.1 Illustration of the sandwich injection moldings

Fig.2 Illustration of the vibration testing system

に示す 16 点での加速度応答を測定した。得られた全ての加速度データおよび加振データに高速フーリエ変換を施し、前者を後者で除することにより、伝達関数を算出した。この伝達関数は試験片固有の特性を表現するものであり、伝達関数のピーク位置が固有振動数に対応している。また、得られた 16 個の加速度応答から振動モードの抽出を行った。同時に振幅が最大となるコーナー部の応答から得られた伝達関数を用いて、以下の手法により損失係数を定義し、その算出を行った。Fig.3 に示すように固有振動数 f_0 、ピーク高さを Y とし、 Y が半減したときのピーク幅 Δf とすれば、損失係数 η は

$$\eta = \Delta f / f_0 \quad (1)$$

で求めることができる⁹⁾。

3. 結 果

Fig.4 に得られた発泡 FL (以下 FLf と称す) をコア材としたサンドイッチ射出成形板の一次固有振動モードを示す。得られた一次固有振動モードは、長手方向に主曲率を有しており、幅方向にも逆の曲率を有する鞍型に変形していることがわかる。これは平板の代表的な曲げモードである。本振動システムにより算出したサンドイッチ射出成形板の実験結果を Table 2 にま

Table 2 Measured vibration properties of the three types of molded specimens

Type	Weight (g)	Frequency (Hz)	Damping factor
PS	330.9	106.00	0.071
PS/FL	323.6	96.48	0.244
PS/FLf	320.0	97.72	0.399

とめる。Table 2 中の PS は、PS/FLf と同一サイズで、同様に測定したスキン材である PS 単体の結果を表しており、PS/FL は、PS/FLf と同一コアサイズ、同一 FL 含有量の未発泡 FL をコア材に用いたサンドイッチ射出成形板の結果を表している。Table 2 によれば、PS 単体での一次振動モードに対する対数減衰率が 0.071 に対し、PS/FL では 0.244 にまで増大することが確認できた。さらにコア材に FLf を適用することで対数減衰率は 0.399 にまで増加した。コア材である FL を発泡させることにより、コア材の剛性が減少し、曲げモードが励起される。最も高い面外せん断ひずみが作用するコア部の変形が促進されることによって、成形板全体の減衰率が増大したものと考えられる。一方、重量において、コア材の充填による変化は見られなかった。同様に、一次固有振動数についても、変化は見られなかった。以上のことからコアの充填によって、サンドイッチ射出成形板全体としての曲げ剛性を変化させることなく、対数減衰率のみを変化させることを見いだした。

Fig.3 A bode diagram

4. 有限要素法による振動特性解析

サンドイッチ射出成形板の振動特性を議論したが、振動減衰性を考慮する際に、本成形手法をより効果的なものとするためには、最適コア充填率が射出成形板の振動特性に及ぼす影響を検討する必要がある。そこで、有限要素法を用いたサンドイッチ射出成形板の振動特性予測を試みた。

4.1 解析手法および結果

前節で述べたように、サンドイッチ射出成形板に励起される振動モードは、長手方向だけでなく幅方向にも曲率を有する 3 次元挙動を示す。したがって、3 次元挙動を考慮できる数値解析手法の適用が望まれる。そこで、スキン、コアを立体要素で表現した 3 次元立体要素の適用が要求されるが、立体要素の適用において、精度の良い有限要素解析を行うには、各要素の要素アスペクト比を 1 に近づける必要が生じる。また本研究で解析対象としたサンドイッチ射出成形板は辺長比が大きいので、要素数の増加に伴い、解析時間の増加は避けることができない。そのため複雑な 3 次元変形を伴う構造物に対して高精度な解析を行い、かつ、解析

Fig.4 The measured 1st resonance mode

Fig. 5 Basic concept for the modeling

Fig. 6 Finite-element modeling

Fig. 7 Impulsive loading

Fig. 8 The calculated 1st resonance mode

時間の短縮を図るためには要素アスペクト比を考慮する必要がなく、さらに、コア部のせん断変形を考慮することができる有限要素モデルの構築が必要である。著者らは、サンドイッチ材のスキン層を等方性シェル要素、コア部を梁要素によりモデル化し、前者を後者と拘束することにより構造物全体をモデル化した。Fig. 5 に本研究で提案したモデル化手法を示す^{7),8)}。シェル要素はスキン層の中央面上に配置されており、シェル要素を構成する節点を板厚方向に、FLの物性値を有する梁要素で連結した。また、梁要素長さを解析対象のコア部厚さと同一にするため、シェル要素と梁要素の間を剛体リンクによって連結した。この剛体リンクによって接続された両節点は同一変位を有するものであり、剛体リンク長は、シェル要素がスキン層の板厚中心に位置していることから、スキン層厚さの1/2とした。

使用した解析モデルを Fig. 6 に示す。本解析モデルの中央に Fig. 7 に示したインパルス荷重を与え、負荷開始から 150 ms までの間での全節点での変位応答を算出した。得られた応答およびインパルス荷重に高速フーリエ変換を施し、変換後の前者を後者で除することによって伝達関数を算出する。得られた伝達関数のピーク形状から (1) 式を用いて損失係数の算出を行った。本解析モデルならびに解析手法の妥当性を検討するために、先に述べた PS/FLf サンドイッチ射出成形板について応答解析を行った。

解析によって得られた一次振動モードを Fig. 8 に示す。一次振動モードは長手方向だけでなく、幅方向に関しても逆の曲率を有する鞍型の曲げモードであり、この振動モードは実験によっても支持されている。また、得られた一次固有振動数は 102.3 Hz となり、実験

Fig.9 Core filling patterns

(Unit : mm)

Fig.10 Bode diagram of the numerical results

との間に良い対応が見られた。さらに、解析によって算出された損失係数は0.375となった。Table 2中に示した実測平均値との誤差の原因として、実測において発生するであろう粘性減衰、クーロン減衰、ヒステリシス減衰のうち、解析モデルにおいては粘性減衰以外は考慮していないこと、スキン材におけるPSは薄板要素でモデル化することによって、加振点における厚さ方向の局所変形による減衰を考慮しなかったことが考えられるが、サンドイッチ射出成形板の振動特性予測に関して、本解析モデルおよび解析手法が妥当であるものと判断した。

4.2 コア材が減衰特性に与える影響

先に述べた解析モデルを用い、スキン/コアの体積比を85:15に固定し、コア材となるFLfの面積を変化させたときのサンドイッチ射出成形板の振動特性を予測した。用いたモデルは実射出成形時におけるコア材の充填形態を考慮し、成形板全体の辺長比を一定にした2タイプとした。Fig.9に3および4.1で検討したサンドイッチ射出成形板(便宜上Type-Bと称す)とともに示す。ここで、Type-Aは3タイプの中でコア材の充填エリアが最小であるため、コア材の板厚は最大とした。一方、Type-Cは、充填エリアが最大となるため、板厚は最小となっている。解析によって得ら

Table 3 Calculated vibration properties of the three types of molded specimens

Type	Eigenfrequency (Hz)	Damping factor
A	105.26	0.420
B	98.24	0.375
C	103.07	0.286

Table 4 Comparison between the experimental and numerical data on the resonance frequency and the damping factor

Type	Eigenfrequency (Hz)		Damping factor	
	Experiment	Analysis	Experiment	Analysis
A	103.10	105.26	0.554	0.420
B	97.72	98.24	0.399	0.375
C	99.13	103.07	0.318	0.286

れた3つのタイプの伝達関数をFig.10に示す。また、振動特性結果をTable3に示す。Table3によれば、3つのタイプでの固有振動数の差は無視できるものである。一方、損失係数においては、大きな差異が見られた。つまりゲート近傍に小エリアで大きな板厚を有するType-Aが最大の損失係数を有するのに対し、大エリア、小さな板厚を有するType-Cが最小のそれを有した。この原因として、構造物の内部減衰は主にコア材のせん断変形によって生じる。このため、振動の腹近傍(成形板中央部)に厚さの大きいコアを配置することで、そのせん断変形量を増大させることができたためと考えられる。本解析結果を基に、スキン・コアの充填量はもちろんのこと、補暑、冷却時間、金型温度を同一とし、射出速度のみを変化させることによって、Type-AおよびCの成形を行い、先の振動測定システムを用い、振動特性の測定を行った。先に行ったType-Bとともに、結果をTable4に示す。本検証測定により、固有振動数に変化が見られないこと、損失係数の大小関係ともに、解析によって予測した結果を支持しており、本解析結果の妥当性を裏付けるとともに、本解析モデルおよび手法がサンドイッチ射出成形板の振動特性に有効であることが確認できた。

5. 結 言

本研究では、構造物の振動減衰特性を向上させることを目的とし、コア材に発泡エラストマーを有するサンドイッチ射出成形板を作製し、その振動減衰特性を実験および解析の両面から検討を行い、以下に示す知見を得た。

(1) コア材に発泡エラストマーを有するサンドイッチ射出成形板は、未発泡コア材のそれに比べ、振動減衰特性の大幅な向上が図れることが明らかになった。

(2) サンドイッチ射出成形板の振動減衰特性を精度良くかつ短時間で予測を行うため、新たな数値解析モデルの提案を行った。その結果、解析によって得られた固有振動数・振動モードおよび減衰特性はいずれも実験結果によって支持されており、本数値解析モデルおよび解析手法がサンドイッチ射出成形板の振動減衰特性を予測するのに有効であることが明らかになった。

(3) スキン・コア材の体積を一定にし、コア材の発泡エラストマーの面積を変化させた場合、振動の腹近傍に厚さの大きいコア材を配置することにより、高減衰特性を発現することが明らかになった。

参 考 文 献

- 1) 池田詔郎：材料加工，503(1997)
- 2) 大堀徳子，須山了充，山本尚孝，八木信雄：自動車技術，50，11-16(1996)
- 3) 中川康成，藤井 透：第23回FRPシンポジウム講演論文集，89(1994)
- 4) 竹内 淳，幕田 実，大金 仁，浜辺健二，青木修：自動車技術，51，17-22(1997)
- 5) 竹内 淳，幕田 実，大金 仁，浜辺健二，青木修：自動車技術，8，186-193(1996)
- 6) 谷本安浩，丹下章男，西脇剛史，藤田章洋，後藤彰彦，前川善一郎：第41回材料研究連合講演会前刷集，356-357(1997)
- 7) 谷本安浩，丹下章男，西脇剛史，藤田章洋，後藤彰彦，前川善一郎：溶接構造シンポジウム'97講演論文集，419-422(1997)
- 8) 谷本安浩，丹下章男，西脇剛史，藤田章洋，山田祥，前川善一郎：成形加工シンポジウム'97講演論文集，123-124(1997)
- 9) Voidya, U.K., Raju, P.K. and Kowbel, W.: *Mechanical and Mechanism of Material Damping*, 490-501(1992)