

特集 | アルミ代替可能なインタークーラタンク用樹脂材料の開発*

Development of Intercooler Plastic Tank Material Instead of Aluminum Die-cast

厚味昌和 小島和重 漆原 勝 山中 章
Masakazu ATSUMI Kazushige KOJIMA Masaru URUSHIHARA Akira YAMANAKA

In recent years, fuel consumption regulation is becoming severe in every country in the world. Combination of Engine size reduction and turbo is one of the solutions. Heat exchanger Turbo system has intercooler which cools high temperature gas compressed by turbocharger. Intercooler tank (tank) is mounted on both sides of heat exchanger. The tank connects heat exchanger and system to pass the gas and EGR (Exhaust Gas Recirculation) gas through the heat exchanger.

Resinification is demanded from the viewpoint of the material cost reduction, weight saving, machining less, and form flexibility. Due to the tightening of the exhaust gas regulation, LPL (Low Pressure Loop) system which refluxes EGR gas is expected to increase from now on. Since the EGR gas has high temperature, high pressure, and acidic condensed water, improvement of fatigue strength at high temperature and acid resistivity of the plastic material is needed.

In consideration of mass-production, plastic parts are normally produced by injection molding of glass fiber (GF) reinforced plastics. However, injection-molded products have GF orientation. Therefore, strength of transverse direction (TD) is about 50% of that of the molding direction (MD). This report shows plastic material was developed in which fatigue strength of TD is improved by about 40% by applying flat glass fiber, to be used instead of aluminum Al die-cast, and using LPL acidic condensed water.

Key words : (Standardized) materials, polymer material, fatigue (Free) flat glass fiber, polyamide 9T, Intercooler, Plastic Tank

1. まえがき

近年、世界各国で燃費規制が厳しくなっている。その解決手段の1つとして、エンジンダウンサイジング+ターボ化が挙げられる。ターボシステムには、Fig. 1に示すように、過給器により圧縮された高温空気を冷却するインタークーラが搭載されており、熱交換器の両側に搭載される導風路をインタークーラタンク（以下タンク）と呼ぶ。タンクは軽量化、切削レスによる低コスト化、形状自由度の観点より樹脂化が求められている。

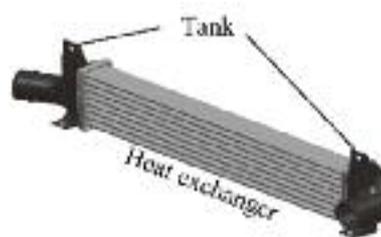


Fig. 1 Structure of intercooler

今後、排気ガス規制の強化に伴いFig. 2に示すようにEGRガスを還流させるLPL (Low Pressure Loop) システムが増加すると考えられており、EGRガスにより高温/高圧環境での使用による耐圧疲労特性や、酸性凝縮水の発生による耐酸性が必要になり、従来よりも厳しい環境での信頼性確保が課題となっている。

* (社)自動車技術会の了解を得て、「2012年自動車技術会 秋季学術講演会講演会」前刷集より一部加筆して転載
* (社)成形加工学会の了解を得て、「2012成形加工学会 秋季大会」前刷集より一部加筆して転載
* SAEの了解を得て、SAE2013-01-1175を和訳、一部加筆して転載

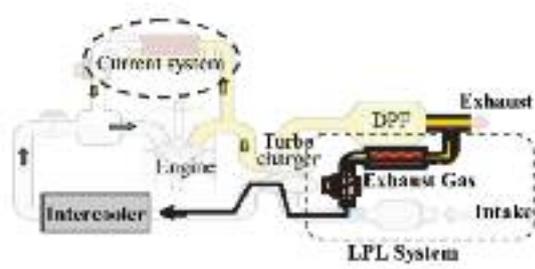


Fig. 2 LPL turbo system

一方、射出成形用のガラス繊維（以下GF）強化樹脂の成形品はGFの配向により、強化方向（MD：Molding Direction）、非強化方向（TD：Transverse Direction）が存在するため、内圧により様々な箇所が高応力が発生するタンクでは、より強度の低いTD物性で強度設計をする必要がある。そのため、製品ストレス（発生応力）に対する安全率の確保が樹脂では困難になり、インタークーラの中でも非常に高温高压になるタイプでは、現状アルミダイカストを使用している。

本研究では、強度発現のメカニズムより強化材形状を最適化し、TDでの強度を飛躍的に改善すると同時に、耐酸性に優れたポリマーを採用することにより、アルミダイカストを用いていた領域までカバー可能な高強度、高耐酸性材料を開発し、タンク材料として2012年より採用した。

2. タンクの課題

2.1 材料の使用範囲

インタークーラ材の現状の使い分けをFig. 3に示す。温度、圧力の大きさ、融雪塩の有無により、樹脂とアルミダイカストを使い分けている。今回、高温/高压領域、新規環境である耐酸性領域にも適用可能な材料を開発が求められている。

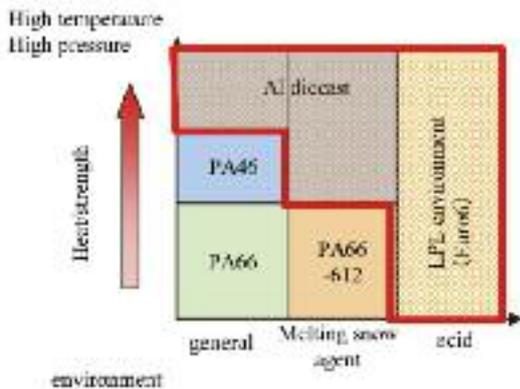


Fig. 3 Diagram of Intercooler tank suitable material

2.2 耐薬品性

Fig. 2に前述したように、今後排ガス規制の強化により、EGRガスを還流させるシステムの増加が見込まれるため、タンク内部には、排ガス成分であるNOx、SOxより酸性排気凝縮水が発生する。そのため、耐酸性を有するポリマー選定が必要になる。また、搭載位置により融雪塩が付着する可能性があるため、耐融雪塩性が必要となる。

2.3 疲労強度

インタークーラはターボチャージャにより圧縮された空気とガスによる高温環境で、高压が繰り返しかかるため高い疲労強度が求められる。また、Fig. 4にPBT-GF30の例を示すように、射出成形品はGFの配向によりMDとTDがあり、引張強度は、MDが120MPaに対してTDは60MPa程度とおよそ▲50%となる。

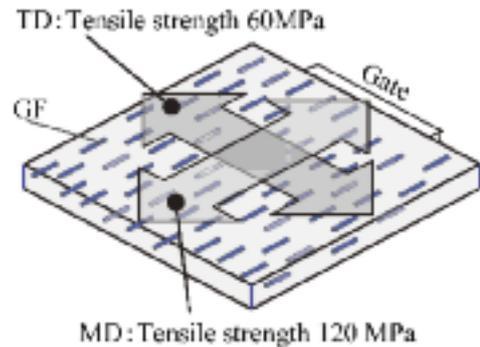


Fig. 4 Relationship between strength and GF orientation

一般的には、ゲート位置を変えることにより高応力発生部位の応力方向をMDにすることにより対策を行うが、Fig. 5に示すようにインタークーラのように様々な箇所/方向に内圧がかかる製品においてはこの対策がとれず、製品板厚の増加による重量増、高コストになり、アルミダイカストを使用せざるを得ない場合がある。そのため、TDでの強度向上が求められる。



Fig. 5 Stress distribution of intercooler tank

2.4 流動性

タンクは搭載スペースや冷却能力により様々な形状になることが想定されており、最大寸法は300mm程度になる。そのため、高い流動性が求められる。

3. 従来手法での改良と結果

耐酸性、疲労強度、流動性を両立するため、ポリマー選定を行った結果をTable 1に示す。これより、上市されているエンジニアリングプラスチックの中では全てにおいて優れるポリマーはないことがわかった。

まず、ポリマー構造に大きく依存する薬品性よりポリマー種を決め、次いで強化材の寄与率の大きい機械強度の観点より、TDの疲労強度向上検討を行った。

Table 1 Polymer type and property

	Chemical resistance		Fatigue strength at 180°C	Flow length
	Salt	Acid		
PA66 GF30	NG	NG	NG	OK
PA66-S12 GF30	OK	NG	NG	OK
PA46 GF30	NG	NG	good	OK
PA6T GF35	OK	OK	NG	OK
PA9T GF30	OK	OK	NG	OK
PPS GF40	good	good	NG	good

Table 2にその手法を示す。いずれの手法も流動性が低下することがわかる。

Table 2 Improvement list of fatigue strength

Method		Flow length	Cost
Polymer	Increase crystallinity	down	constant
	Increase molecular weight	down	constant
Filler	Glass Fiber	Improving surface agent	down
		Increase content	down
		Using long fiber	up
	Carbon Fiber	Increase content	down
Using long fiber		down	

また、この手法を用いた場合の流動性と疲労強度の結果をFig. 6に示す (Fig. 6のデータは想定される推定値を含む)。これより、従来手法では、流動性と疲労強度の目標値を満足できないことがわかった。

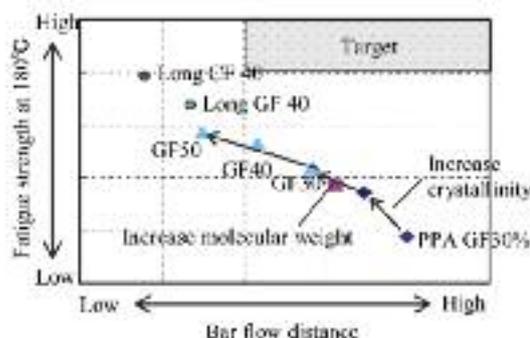


Fig. 6 Improvement result of conventional method

このため、耐薬品性、疲労強度、流動性を両立するため以下の観点より材料開発を行った。

- ・耐薬品性、疲労特性に優れるポリマーの選定
- ・TD強度と流動性を両立するため、理想的な強化材形状を明らかにし、最適な強化材を選定

4. ポリマー選定

Fig. 7に各種樹脂のTDの疲労強度と排気凝縮水を模擬した酸溶液に浸漬後の分子量保持率を示す。これより、耐酸性に優れるPPSは韌性に劣るため疲労強度が低い問題がある。

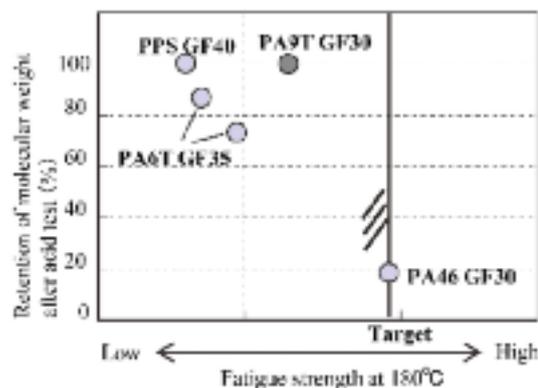


Fig. 7 Relationship between fatigue strength and retention of molecular weight after acid test

PA6TとPA9TはFig. 8に示すように分子構造にアミド結合をもつため酸による劣化が想定されるが、今回の環境下では、PA9Tは分子量低下が見られないことがわかった。これは、アミド結合濃度の差であると考えられる。そのため、PA9TをベースポリマーとしてTDの疲労強度向上の検討を行った。

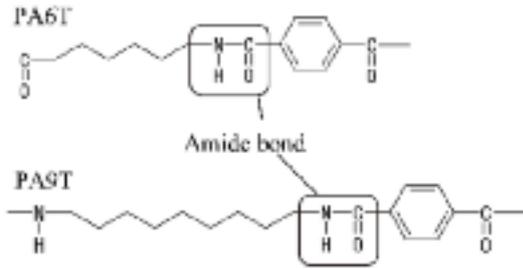


Fig. 8 Structure of PA6T and PA9T materials

5. 強化材形状の最適化

5.1 強度発現メカニズムと最適形状の検討

Fig. 9にGFによる強化のイメージを示す。GFの強度は樹脂界面の破壊強度と比較して非常に高い。このため、発生応力を強化材でより多く受け持つことができ、樹脂/強化材で構成される複合材の強度も向上すると考えられる。

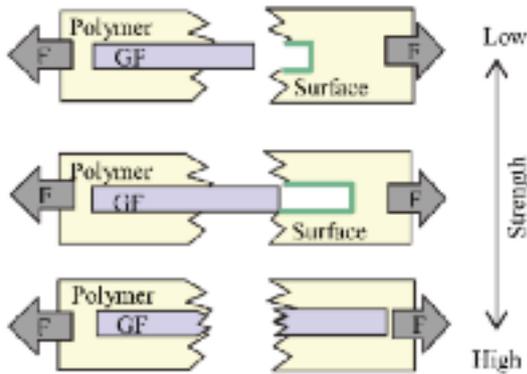


Fig. 9 Diagram of braking mode and strength

次に、強化材での破壊をするために理想的な形状を考察する。Fig. 10は複合材の両端より力Fをかけた場合に発生する力の関係を示している。力Fをかけた場合に、樹脂断面で受ける力 F_p +強化材断面で受ける F_g とつりあう。このとき樹脂強度は強化材と比較して低いため、強化材にて受ける力 F_g を大きくすることにより複合材の強度は向上することになる。ここで、強化材断面に発生する応力 σ は式1で表される。

$$\sigma = 2 \times \tau \times L / d \quad \dots \quad (1)$$

τ : 強化材表面に発生するせん断応力

L : 強化材長さ

d : 強化材径もしくは板厚

これより、 L/d が大きい強化材を用いることにより、複合材の強度を向上することができる。

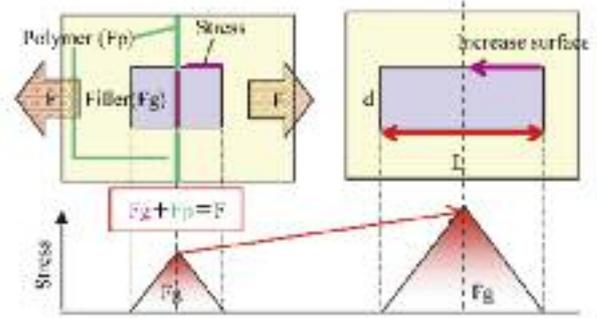


Fig. 10 Mechanism of composite material macro strength

今回はFig. 11に示すようにMDの長さをL, TDの長さをWとする。すなわち、TDの強度向上のためには W/d を大きくする必要があると考えられる。

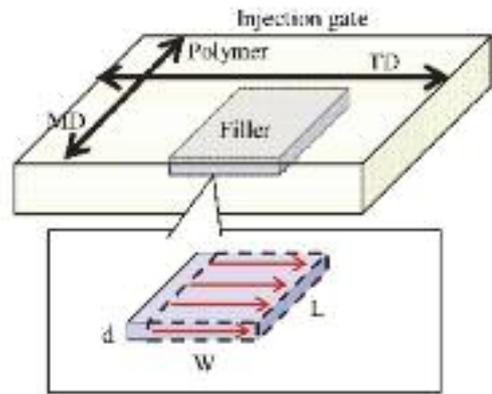


Fig. 11 Condition of high strength

5.2 流動性発現メカニズムと最適形状の検討

次に流動性発現のメカニズムと最適形状を考察する。Fig. 12は成形時の樹脂複合材の流動先端を模式的に表している。樹脂と強化材の界面には成形時に常にせん断力が発生しており、抵抗となる。このため、強化材の表面積が小さいほど界面が減少し、流動抵抗が減少すると考えられる。

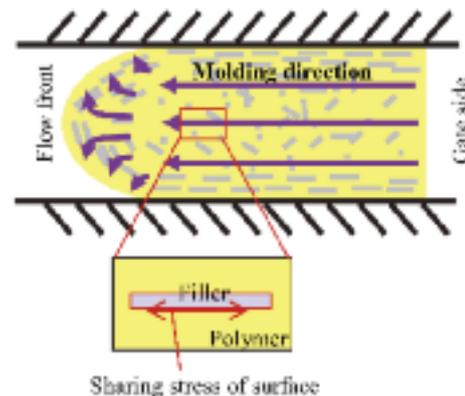


Fig. 12 Diagram of flow front

5.3 強化材形状の最適化

今回、MD強度を維持し、TDの強度を向上するという観点より、Fig. 13に示すようにMD強度に影響するLを一般的な成形品のGF長 $300\mu\text{m}$ と仮定して算出を行った。

また、5.1、5.2にて複合材の高強度の方向性より、TDの強度を向上させるためには W/d を高く、流動性を向上するためには表面積 S を低くする必要があるが、 W もしくは d を変化させて高強度化をすると流動性が低くなる場合が考えられるため、最適な形状を検討した。

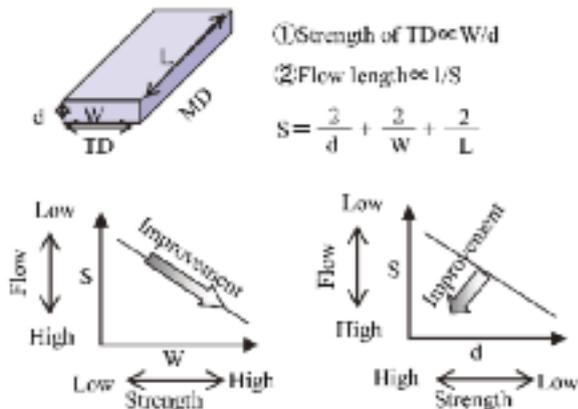


Fig. 13 Relationship between TD strength and flow

検討結果をFig. 14に示す。これより、MD強度を維持するため L/d は同等で W を大きくすることにより、高強度と流動性の両立ができると考えた。 W を大きくすると、板状の形状となるが、ガラスフレークでは低強度、高コストのため適用が困難と判断し、MD強度を維持しつつ W を増加できる手段として断面形状が扁平であるGFが最適であると考えた。

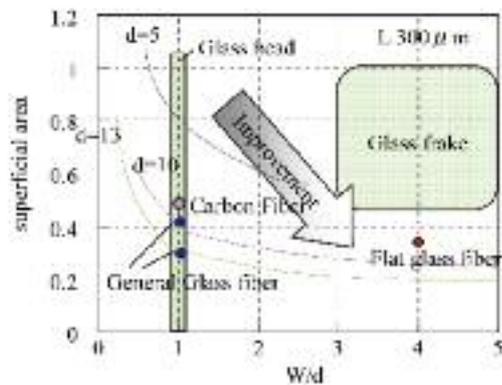


Fig. 14 Optimization of filler shape

Fig. 15は一般的なGFと扁平GFの違いを示す。GFの製造工程は溶融したガラスを紡糸ノズルより押し出し、冷却することにより製造されている。扁平GFは、この

紡糸ノズルを丸型から扁平にすることにより、この形状を実現している。

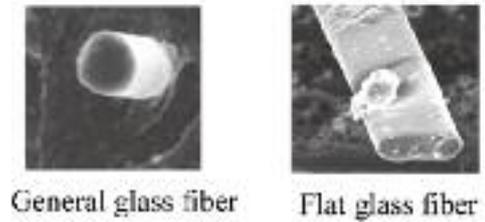


Fig. 15 SEM photograph of glass fiber

6. 効果の確認

4、5の検討結果より、ポリマーはPA9T、断面形状が扁平であるGFを用いることにより、耐薬品性、TDの疲労強度、流動性を満足することができると考え材料を作製した。

開発材の疲労強度をFig. 16に、流動性をFig. 17に示す。これより、TDの疲労強度は約40%向上し、流動性も向上することがわかった。

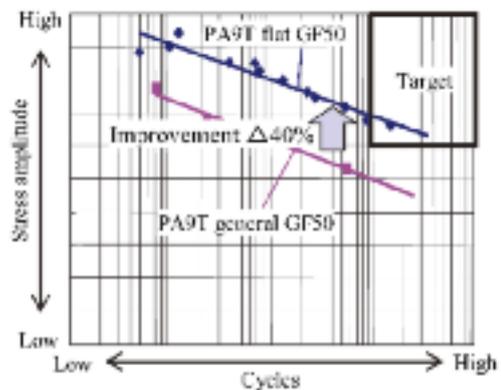


Fig. 16 Fatigue Strength (TD 180°C)

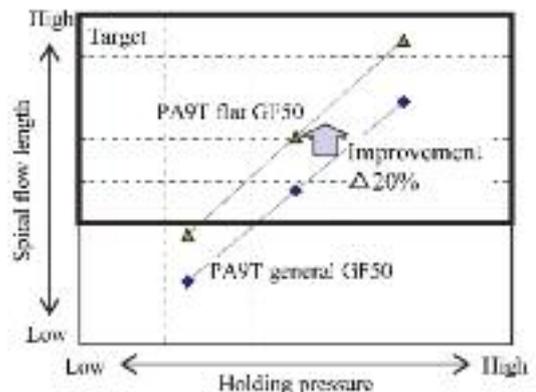


Fig. 17 Spiral flow length of development material

Fig. 18にタンク単体の重量を示す。TD疲労強度を飛躍的に向上させた材料を用いることにより、タンク単体でアルミダイキャストと比較して40%の軽量化を達成した。

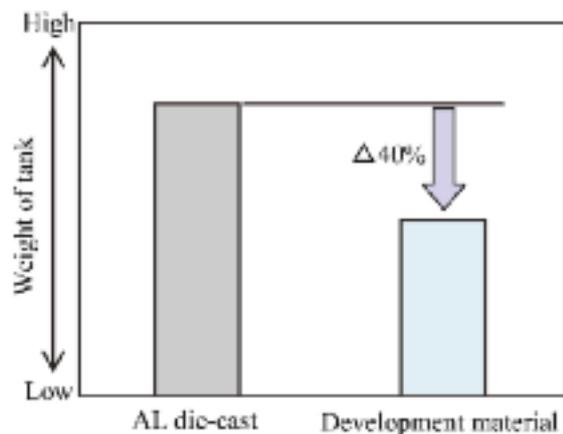


Fig. 18 Weight reduction using development material

7. むすび

耐薬品性、疲労強度、流動性を両立する材料開発を以下の観点で行い、タンクに適用可能な材料を開発した。

- ・ベースポリマーとして耐酸性、疲労特性に優れるPA9Tを選定した。
- ・複合材の強度発現メカニズムより、強化材形状の最適化することにより、TDの疲労強度を約40%向上した。
- ・開発材を用いたタンクはアルミダイキャストと比較して40%の軽量化を達成した。

<参考文献>

- 1) 社団法人強化プラスチック協会，日本複合材料学会：新版複合材料・技術総覧，p.40-445（2004）
- 2) 強度シリーズⅡ：プラスチックの破壊靱性，成澤郁夫著，シグマ出版
- 3) 高分子学会：複合材料をつくる，p18-22 高久明，多田尚著，共立出版

<著 者>



厚味 昌和
(あつみ まさかず)
材料技術部 機能複合材料室
2013年まで樹脂材料開発に従事。
その後、注型材料に従事



小島 和重
(こじま かずしげ)
材料技術部 有機構造材料室
樹脂材料開発に従事



漆原 勝
(うるしはら まさる)
材料技術部 有機構造材料室
樹脂材料開発に従事



山中 章
(やまなか あきら)
熱交換器開発部 第4開発室
開発2課
熱交換器の開発設計に従事