

特集 自動車用樹脂プーリの材料開発*

Material Development of Automobile Plastic Pulley

岡 秀 樹 加 藤 和 生 田 淵 泰 生
 Hideki OKA Kazuo KATO Yasuo TABUCHI

The automotive industry has increasingly been focusing its efforts on vehicle part weight reduction, with the aim of improving fuel efficiency as an environmental protection measure. As part of these efforts, the industry has actively been developing plastic pulleys to replace conventional steel pulleys. Of the various pulleys used in vehicles, the air conditioner (A/C) compressor pulley is exposed to the harshest working environment. We therefore investigated the development of a plastic pulley for A/C compressor application. Required material properties were first identified on the basis of required product characteristic values. As a result, a phenolic resin material was developed that is superior in heat resistance, one of the most important properties among those identified. Using this material, we succeeded in developing an A/C compressor plastic pulley, and achieving approximately a 50% weight reduction compared to conventional steel pulleys. The A/C compressor plastic pulley made of this newly developed material has been in use since early 2001.

Key words : Plastic, Heat resistance / Plastic pulley, Phenolic resin

1. はじめに

近年自動車業界では従来にも増し、環境対応への取り組みが積極的に進められ、その活動として部品の軽量化による燃費向上が推進されてきている。その一例として自動車用スチール製プーリの樹脂化も盛んに行われている（例えばパワステポンプやウォーターポンププーリ^{1),2)}。その中で我々は各種プーリの中でも最も使用環境が厳しく、世の中に例のないエアコンディショナ（以下、A/Cと記す）コンプレッサ用プーリの樹脂化検討を行った。（Fig.1）

今回プーリに要求される製品特性値より、材料要求特性を明確にした上で、その特性の中でも特に重要な耐熱性および耐熱変形性に優れるフェノール樹脂材料を開発した。本論文では、A/Cコンプレッサ用プーリ

の樹脂化において、開発段階で抽出された耐熱性と耐熱変形性の課題に対して、メカニズムの解明およびその対策である材料開発について述べる。

2. 開発の狙いと考え方

2.1 狙い

A/Cコンプレッサプーリの軽量化動向をFig.2に示した。A/Cプーリは磁気回路を内蔵したマグネットクラッチが主流で、現在質量は約1200gである。これまでA/Cプーリの樹脂化はマグネットクラッチの磁気回路が存在していたため樹脂化が成立してもコイル部を必要とし、さらに樹脂に置き換わる部分がプーリ先端のV溝だけに限定されるため、軽量化効果が約 20% (ex.1200g → 960g) と少なかった。

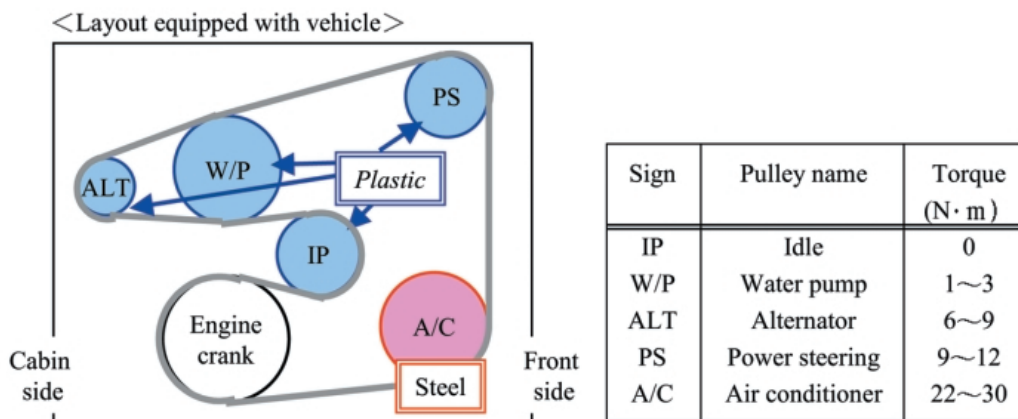


Fig.1 Vehicle layout for pulley system and torque load of various pulleys

* (社)自動車技術会の了解を得て、2001年秋季大会学術講演会前刷集No.79-01, 34より一部加筆転載

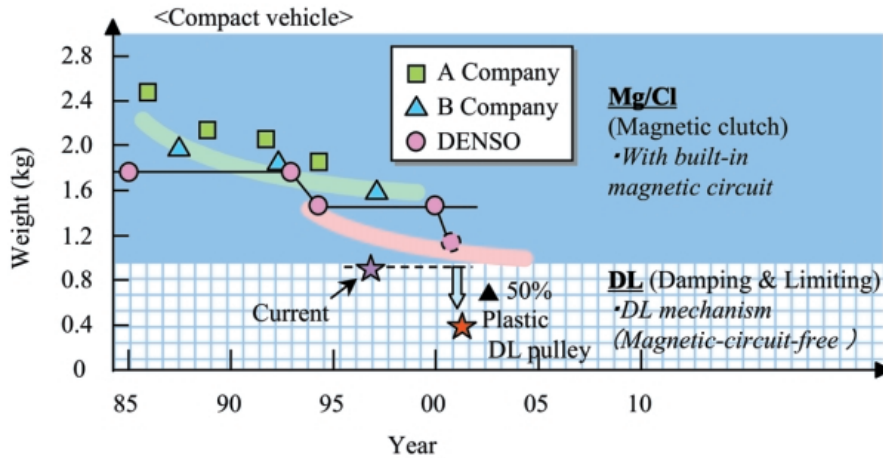


Fig.2 Lightweight trend of pulley for air conditioner compressor

一方、1997年に当社が開発した磁気回路廃止型のDL (Damping & Limiting) 機構^{3) 4)}を用いた樹脂プーリでは 50%以上 (ex.870g 400g) の軽量化効果が予測されるため、樹脂化による超軽量化を目指した。

2.2 基本構成

本開発プーリの断面図をFig.3に表した。A/Cコンプレッサ用プーリは他のプーリと異なりベアリング(以下、Brgと記す)が必要である。Brgはボール軌道面の精度が重要な精密部品であるため、このBrgを保護するための加工方法として、Brgより一回り大きな金属リングをインサート成形し、後工程でBrgを圧入する方法を採用した。

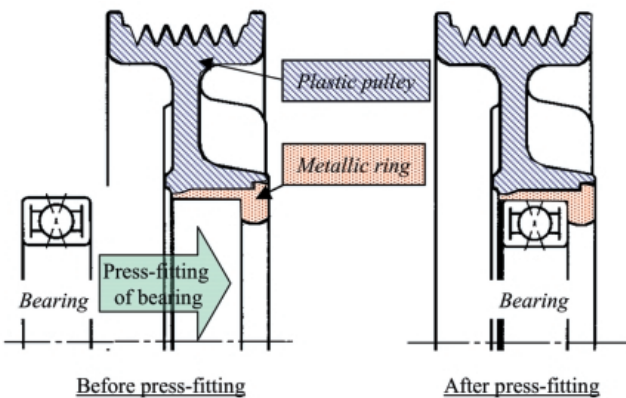


Fig.3 Cross section and processing method of pulley

2.3 材料選定

プーリの樹脂化に当たり、材料に必要な要求特性と

一般的な樹脂材料のポテンシャルをTable 1に比較した。ベルトとの摩擦熱で樹脂が溶融することを考慮すると、熱可塑性樹脂での成立は困難であるため、熱硬化性であるフェノール (PF) 樹脂材料を候補材料として選定した。

Table 1 Comparison of material required characteristic for typical plastic

	PF	PA	PAA	PBT	PPS	Steel
Low density	○	○	○	○	○	×
Dimensional accuracy	○	△	○	△	○	○
Strength	○	○	○	○	○	○
Thermal shock	△	○	○	○	△	○
Heat resistance	○	×	×	×	×	○
Chemical resistance	○	×	△	△	○	○
Productivity	△	○	○	○	○	△
Judgement	○	×	△	×	△	

※ ○ : Good △ : Some concerns × : Poor

2.4 開発要領

材料開発要領は、はじめに汎用PF樹脂を用いて製品特性から材料要求特性を明確にし、それに基づき評価・解析を行い汎用PF樹脂の課題を抽出する。次に各々の課題について材料の改良を行い、最終的に開発材料の適用性を確認した。

3. 材料要求特性の明確化

プーリを樹脂化するに当たり、構造的にTable 2に示したようにベルトと接触するV溝部 (A) とインサート金属リングとの界面部 (B) に以下項目が必要であり、個々の要求項目について、汎用材を用いた試作評価結果に基づき材料要求特性を明確にし性能予測をした。

Table 2 Product required items of plastic pulley

Section	Problem	Required item
A	① Crack according to the belt tension	Fatigue strength
	② Deterioration because of heat when belt slips	Heat resistant
B	③ Crack by the heat stress between the plastic and the metal	Fatigue strength
	④ Crack due to retentivity shortage of a metallic ring.	Linear expansion coefficient

3.1 疲労特性

3.1.1 ベルトテンションによる応力

エンジンからのトルクをプーリが回転してコンプレッサに伝達する際に、プーリA部にはベルトテンションによる繰り返し応力が掛かり、疲労現象が発生する。この時の疲労強度予測は、FEM解析によりプーリに発生する応力を求め、使用環境温度の疲労限度線図を作成することにより把握することができる。

FEM解析結果と劣化後の高温疲労限度線図および汎用材試作品評価でベルトテンションによる問題は発生しないことが確認できた。

3.1.2 冷熱時の熱応力

Fig.3に示したように本樹脂プーリは、金属リングをインサート成形しているため、冷熱時に樹脂と金属界面で熱応力が発生する。これは、金属より線膨張係数の大きな樹脂部分が高温から低温になる時、樹脂が収縮することにより金属に対し引張応力が発生し、これが材料許容値を超えると界面からき裂が発生し、プーリ破壊につながると予測される。先のベルトテンションと同様に、FEM解析により発生応力を把握し、き裂が発生すると考えられる低温時の疲労限度線図において汎用材は目標を満足し、試作品評価でも異常は認められなかった。

3.2 耐熱性

A/Cコンプレッサ用プーリは他のプーリに比べ負荷トルクが最も高いため、水・粉塵等が付着した際にプーリがスリップする可能性が考えられる。スチール製プーリではスリップしてもプーリ自身の変化は生じないが、樹脂プーリの場合は、ベルトとの界面の発熱により樹脂が劣化・分解することが予測される。この場合特にベルト接触部であるV溝が局部的に熱劣化し、

V溝強度が低下し欠ける可能性があると考えられ、V溝が欠けるとトルク伝達能力が下がり、さらには相手のベルトを損傷させる危険性がある。

汎用材の試作品評価では、冠水路走行中にプーリのスリップが発生し表面が膨れる現象が起きた。評価後のサンプルの断面を走査電子顕微鏡（SEM）で精査すると、Fig.4(a)の新品に比べ

Fig.4(b)の評価後サンプルはプーリ山部（ベルトとの接触部）に変形・膨れが観察された。さらにFig.4(b)-1写真中の破線部を拡大しFig.4(b)-2に表した。樹脂組織に無数のポイド（発泡跡）が変形箇所近傍に観察された。

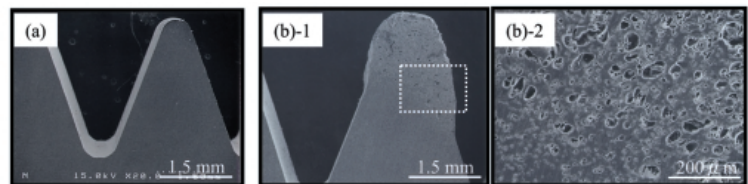


Fig.4 SEM micrographs of cross section surface

次に発泡部分の熱重量（TG）分析結果をFig.5に表した。評価後のサンプルは新品に比べ熱分解開始温度（重量減少開始点）が高温側にシフトしていた。この現象は評価後のサンプルが熱履歴を受け、低温で分解する成分が消失したことにより評価後サンプルが高温側にシフトしたと解釈される。

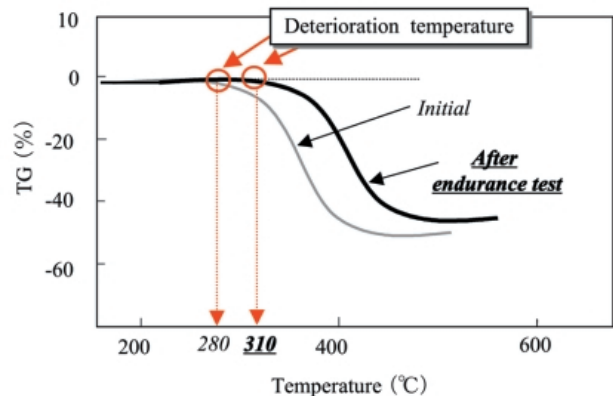


Fig.5 TG decomposition profile of material both before (initial) and after endurance test

この発泡現象を推定するために、エンジンルーム内に取り付けたビデオカメラでスリップ現象をその場観察した。スリップは冠水路走行中にプーリとベルト間に水膜が形成され、樹脂本来の摩擦係数を失い発生していた。スリップの発生時間は10～20秒と瞬時であり、この時にベルトとの界面が摩擦により異常発熱し、樹脂が熱分解して発泡に至ったと考えられる。

スリップ時の界面異常発熱を把握するために、急激な熱履歴をテストピースに与えて検証実験を行った。時間はその場観察より20秒間と決定し、負荷する熱を250～400℃で設定し、横軸に与えた熱履歴、縦軸にTG分析より熱履歴の指標となる熱分解開始温度をとりFig.6に表した。これより、評価後の発泡サンプルは約300℃の熱履歴を急速に受けていることが明確になり、開発当初には全く予測できなかった熱履歴を受けていた。従って、300℃以上の耐熱性を有する材料が必要である。

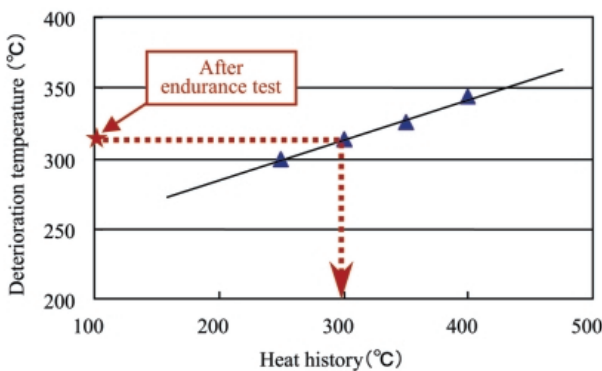


Fig.6 Calibration curve of heat history and deterioration temperature

3.3 耐熱変形性

本開発プーリは金属リングがインサート成形されているが、樹脂と金属の界面の接着は、接着剤を使用せず、樹脂の収縮率により金属との接着（締付け力）を保持している。プーリが高温かつ高速で回転したとき、金属への樹脂の締付け力が重要な課題となる。仮に界面の締付け力が保持されていない場合、界面に隙間が発生し、ベルトテンションにより繰返し応力が掛かり、疲労現象が生じる。

汎用材の試作品評価では、高温高速運転時に樹脂と金属界面に微小き裂の発生が確認された。き裂の発生した樹脂と金属界面の観察を詳細に行うと、Fig.7に示したように樹脂部分が初期形状を維持しておらず、金属リングで擦られたと考えられる異常摩耗跡が観察

された。

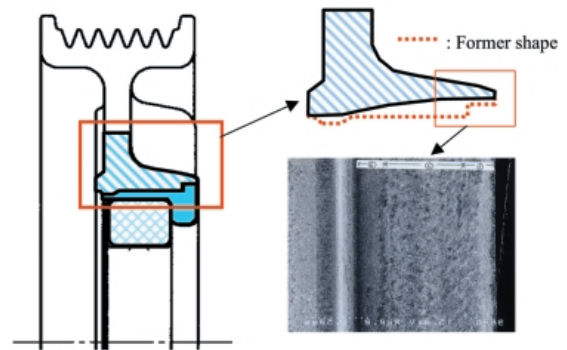


Fig.7 Investigation of the interface between plastic and metallic ring

試作品評価後の観察を基に、き裂発生メカニズムを以下に推定する（Fig.8）。高速回転時のBrg発熱によりプーリ内径が拡大し、金属リングとの界面に隙間が発生する。この隙間発生時にプーリと金属リング間に位相差が生じ（Fig.9）、Fig.7のような樹脂界面の摩耗が発生したと考えられる。さらに隙間発生時にベルト荷重やオフセット荷重が界面部に繰返し作用して、Fig.10に表したようにプーリ端面に応力集中を引き起こしたと推定され、発生応力が許容値を超えプーリ界面にき裂が生じたと考えられる。この課題に対して（1）隙間の発生を抑制する、（2）オフセットを無くし、応力集中を避ける、（3）材料強度を向上させるなどの改良が考えられるが、発生源となった（1）に対しての隙間低減化の改善を進めた。

界面隙間発生抑制には、樹脂と金属の線膨張係数差に注目する必要がある。仮に樹脂と金属の線膨張係数差が存在しなければ、隙間は発生せずこの課題は発生していないと考える。界面の温度が上昇するにつれ、樹脂は大きく膨張しようとするが、金属はほとんど膨張しない。回転中の樹脂と金属の温度を実測し、各温度での各々の線膨張係数を用い隙間発生シミュレーションをFig.11に表した。汎用材では運転時に界面に隙間が発生することが明確であり、本推定メカニズムの裏付けができたと考える。この課題を克服するためにはFig.11に示したように、PF樹脂の線膨張係数を30ppm/℃以下にすることが必要であり、これを材料要求特性とした。

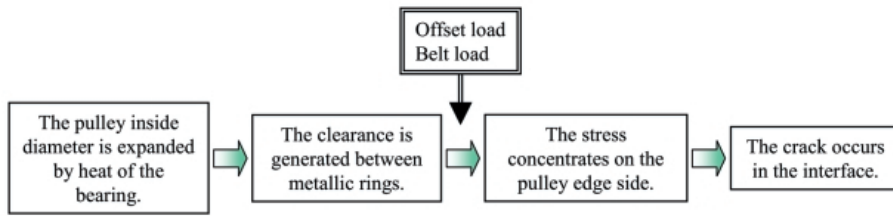


Fig.8 Presumption of crack generation mechanism

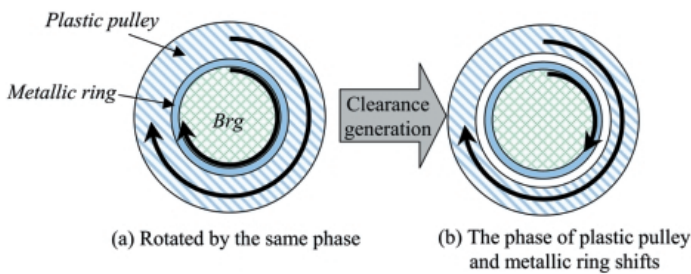


Fig.9 Phase difference between plastic pulley and metallic ring by clearance generation

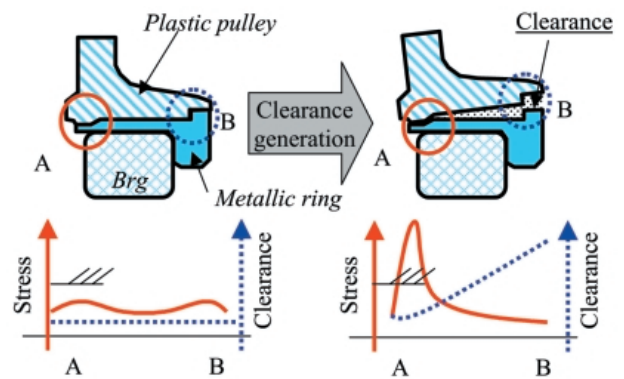


Fig.10 Scheme of crack due to retentivity shortage of a metallic ring

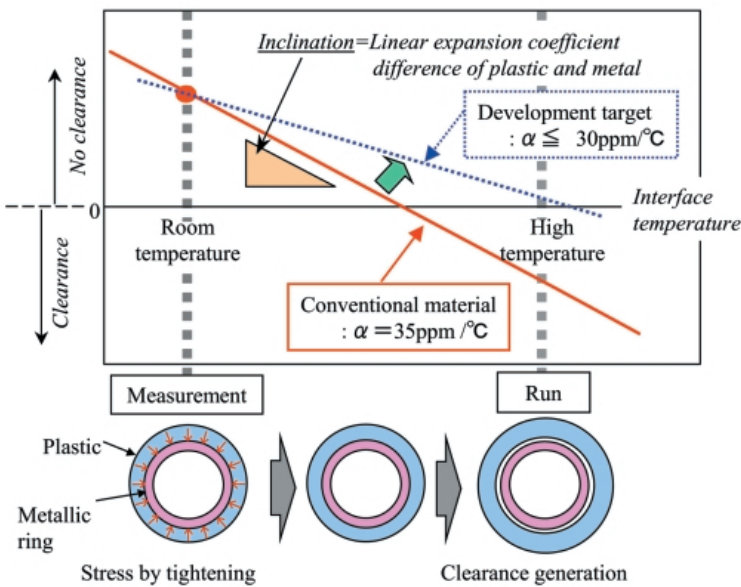


Fig.11 Simulation of interfacial amount of clearance generation

4. 材料開発

前章の課題より材料要求特性を明確にし、材料開発指針をTable 3に表した。課題1に対しては、熱分解開始温度が300以上の耐熱性が必要であり、有機成分を中心とした熱分解温度の低い成分の改良が必要となる。課題2に対しては、材料目標値が30ppm/以下の低線膨張係数化で、無機フィラーの最適化が必要である。材料開発手順は、ベースとなる有機成分を決定した後、無機成分の調整を行う。

Table 3 Material development indicator

Problem	Material development target value	Means
1. Control of foam	Pyrolysis temperature $\geq 300^\circ\text{C}$	Review of low boiling point agent
2. Thermal deformation	Linear expansion coefficient $\leq 30\text{ppm}/^\circ\text{C}$	Optimization of amount of inorganic filler

4.1 耐熱性

耐熱性阻害要因は、材料中の有機成分が主である。Fig.12に汎用材および汎用材に含まれる個々の成分のTG曲線を示した。硬化剤と柔軟性付与剤の低い温度での熱分解が顕著であり、この2成分の影響を受け汎用材は300 以下での熱分解が発生していると考えられる。

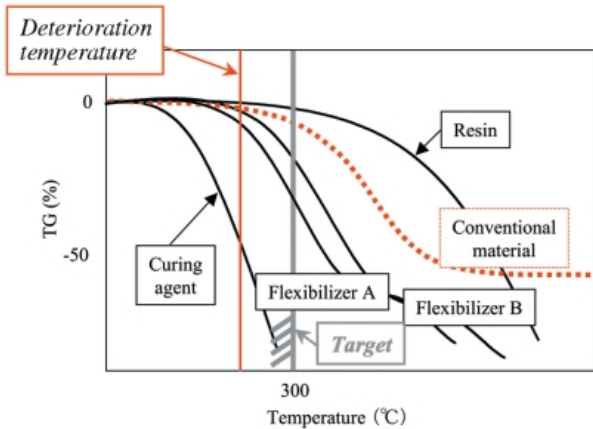


Fig.12 Thermal decomposition behavior of the ingredients contained in the conventional material

はじめにベースレジンに硬化剤が不要で熱分解開始温度が360 の成分に変更し、機械的特性を付与させる柔軟性付与剤は耐熱性を改良し熱分解温度が320 である成分に変更した。さらに柔軟性付与剤は、機械的特性を満足する最小添加量に抑え、熱分解抑制を行った。

開発材料の耐熱性の指標評価として、所定の温度で一定時間熱履歴を与えた時の重量減少率を把握する手法を採用した。これは、材料中の低沸点成分のガス化現象をとらえることができる。Fig.13に汎用材と開発材料の熱処理温度と重量減少率の関係を示し、組織観察において発泡が確認された部分を Blister Area と定義した。開発材料は硬化剤と柔軟性付与剤の低沸点成分の改良を行ったため、プーリスリップ時の負荷温度である300 でも発泡は認められず、良好な結果を得た。

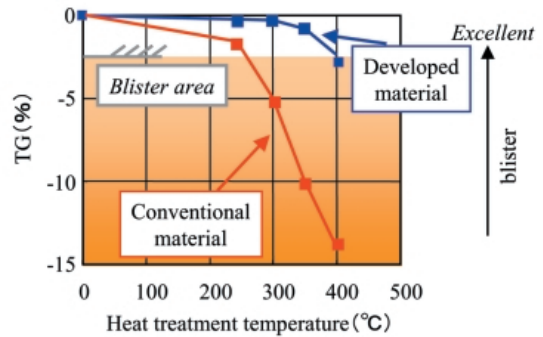


Fig.13 TG decomposition profile showing blister formation if developed material

4.2 耐熱変形性

運転中に熱変形が発生する要因は、材料中の有機成分と無機成分のバランスに依存し、無機成分の含有量に強く影響を受ける。無機成分には強化材で代表されるガラス繊維 (GF) が挙げられ、これに支配される材料物性値は強度と線膨張係数である。そこで、強度を維持しつつ線膨張係数を30ppm/ 以下にするようにGFを含む無機フィラーを35 ~ 55wt%含有させ目標の線膨張係数に調整した。

5 . 開発材料の効果確認

課題1の耐熱性に付いては、実機評価において、高回転で強制的にスリップを誘発させてもPF樹脂は発泡すること無く、A/Cコンプレッサプリー用樹脂材料として十分な耐熱性を確保していることを確認した。

課題2に対しては、線膨張係数をインサート金属リングに近づけることにより、高温高速運転時でもインサート金属リングから離れることなく、樹脂と金属界面での保持力を確保することができた。また、使用中における樹脂材料のクリープを考慮しても十分な締め代を確保しており、耐久試験後の締め代測定時にも隙間は発生していなかった。(Fig.14)

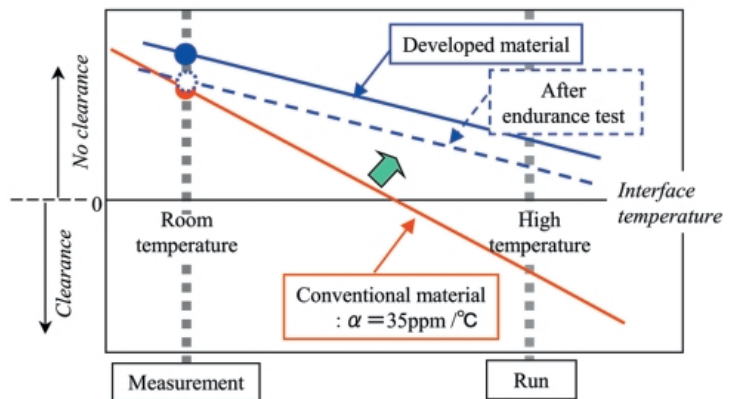


Fig.14 Simulation of interfacial amount of clearance

さらに、開発材料を用いた樹脂プーリはすべての品質確認項目を満足し、製品要求特性を満足した。本材料開発により、強度・耐熱性はじめとする諸物性のバランスの取れた材料開発ができたと考える。(Fig.15)

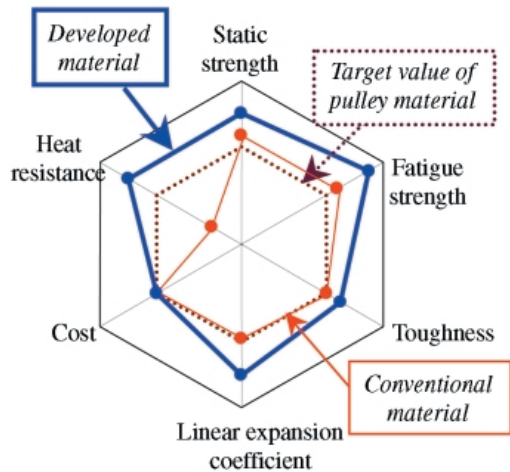


Fig.15 Characteristic of developed material

6. おわりに

(1) A/Cコンプレッサ用樹脂プーリの材料要求特性を明確にし、要求特性に満足する材料開発ができた。

(2) 上記材料開発により、A/Cコンプレッサ用樹脂プーリの開発に成功し、既存スチール製プーリからの55%の軽量化を実現することができた。今回開発した材料を用いたA/Cコンプレッサ用樹脂プーリは、2001年より流動中である。

(3) 自動車用樹脂プーリの中で、負荷トルク・使用環境が最も厳しいと考えられるA/Cコンプレッサ用に開発した本材料を用いることにより、他の自動車用樹脂プーリの樹脂化も可能になったと考える。

謝辞

本研究の遂行にあたり、樹脂材料の提供を頂いた住友ベークライト(株) 殿に感謝の意を表します。

<参考文献>

- 1) 吉住文成, 船津敦, 谷澤秀実: 自動車技術会学術講演会前刷集, 976 (1997-10), p.299.
- 2) 椎名晶彦, 新井大和, 黒川貴則: KOYO Engineering Journal, No.152 (1997) p.62.
- 3) A. Kishibuchi, M. Nosaka and T. Fukunuma: SAE Technical Paper 1999-01-0876
- 4) T. Honda, K. Takeuchi, Y. Murakami, S. Kawabata and M. Saiki: SAE Technical Paper 2000-01-0972

<著者>



岡 秀樹
(おか ひでき)
材料技術部
樹脂材料研究に従事



加藤 和生
(かとう かずお)
材料技術部
非金属材料研究に従事



田淵 泰生
(たぶち やすお)
冷暖房開発2部
電磁クラッチ, DLプーリの設計・開発に従事