

高強度ダイカストピストン材の開発

Development of High-strength Piston Material with Die Casting

谷 畑 昭 人*
Akito TANIHATA

佐 藤 謙 次*
Kenji SATO

古 川 和 也*
Kazunari FURUKAWA

要 旨

自動車の燃費、出力向上が求められる中で、エンジン高効率化の要であるピストンの熱的、機械的負荷上昇対応、及び軽量化対応を目的に、ピストン材料の高強度化技術を開発した。

本技術の特徴は、冷却速度の速いダイカスト製法を用いてアルミ合金の Ni 添加限界を 5.5mass% まで高めることと、晶出物の粗大化を抑制するために Fe 添加量を 0.4mass% 以下、Mn/Fe 比を 0.6 以下に制御することにより、これによって高温疲労強度を従来ピストン材の 1.5 倍以上に向上することができた。また、ピストンの内部品質については、金型内の真空化と二次加圧を用いることにより、従来ピストン以上の高品質化を実現した。

本開発材を用いたピストンは、材料特性に合わせた形状最適化をおこなうことで、エンジン単体フリクション 4.4% 低減、エンジン単体台上燃費 2.2% 向上の効果が得られた。

ABSTRACT

The pistons are an essential element in the achievement of greater engine efficiency. A method of increasing the strength of the material employed in pistons to respond to increased thermal and mechanical loads and reducing weight has been developed to contribute to the quest for enhancements in power and fuel economy.

This method is used in the die cast production process, which has a rapid rate of cooling. The limit for addition of Ni to the aluminum alloy employed has been increased to 5.5mass%. At the same time, less than 0.4mass% of Fe is added and the Mn/Fe ratio is controlled to less than 0.6 in order to limit the coarsening of the crystals. This technique has increased the high-temperature fatigue strength of the material by more than 1.5 times against the material conventionally employed. In addition, the uses of die vacuum and additional pressure have enabled quality exceeding that of conventional GDC pistons.

Optimization of the piston shape to match the characteristics of the new material has resulted in decreasing engine friction by 4.4% and increasing fuel efficiency by 2.2% in engine bench testing.

1. ま え が き

近年、地球環境保護に対する社会要求がますます高まっており、Hondaにおいても新世代パワープラント「i-シリーズ」の商品化⁽¹⁾⁻⁽⁴⁾など、燃費向上、エミッション低減を主眼にエンジンの更なる高効率化に向けて開発を進めている。その中で、ピストンの熱的、機械的負荷上昇への対応や軽量化への要求は高まっており、ピストン材料としては更なる高温強度向上が求められている。

ピストン材料の高温強度向上技術としては、AC8A 系アルミ合金をベースに Cu, Ni, Fe, Mn などの耐熱性向上元素を増量する手法がとられてきたが、ピストンの大半が重

力鑄造(Gravity Die Casting: GDC)で製造されていることから、鑄造時の冷却速度が遅く、晶出する金属間化合物が粗大化するため、これらの添加元素の増量には限界がある。そこで、冷却速度を速める手法として粉末鍛造法を用い、添加元素の増量によって高強度化する例が 2 サイクルエンジン用ピストンなど、一部で実用化⁽⁵⁾されている。しかし、本手法は粉末の酸化皮膜や不純物の混入、鍛造成形時のメタルフローによる強度異方性、品質管理を含めた製造工程の複雑さなど、信頼性やコストへの課題が大きく、自動車用ピストンとして普及していない。

一方、アルミ部品の鑄造技術については、自動車用シャーシ部品を中心にダイカスト製法を用いた実用例^{(6), (7)}がヨー

*栃木研究所

ロッパや日本で増加しており、中でもサブフレームにおいては、真空ダイカスト技術を用いて溶接を可能としていることから、近年のダイカスト高品質化技術は高いレベルに達している。ダイカストは GDC に対し冷却速度が速いため、急冷効果による添加元素の増量が可能と考えられるが、ピストンにおけるダイカストの適用例は、GDC に対する生産性向上を目的とした汎用エンジン用⁽⁸⁾にとどまり、高強度化を目的とした適用例は現在まで報告がない。

今回、大幅なコストアップを伴うことなく高温強度を向上させた高強度ダイカストピストン材を開発し、自動車用ピストンとして量産化を実現した。本論文では、開発材の組織制御と強度向上効果、開発ピストンの高品質化、エンジンへの適用効果について述べる。

2. 開発目標と達成手法

2.1. 開発目標

ピストンの主な機能は、燃焼圧力容器の一部形成、燃焼圧力の伝達、燃焼時に発生する熱の伝達であり、必要な材料特性として、高温強度、耐摩耗性、破壊靱性、ヤング率、熱伝導、熱膨張があげられる。本開発では、ピストン材料として特に重要な 523 K 以上の高温域での疲労強度を、Honda 従来高強度材(GDC 製法)に対し 1.5 倍以上向上することを目標とした。また、ピストンとしての強度信頼性を確保するため、鑄造品質については従来 GDC ピストン同等以上の高品質化を目指した。

2.2. 達成手法

ピストン材料はCu, Mgなどを固溶したアルミマトリックス相(以下、 α 相と示す)とSi粒及びNi, Fe, Mnなどによる金属間化合物が晶出した複合組織を呈している。523 K 以上の高温環境下では α 相の軟化が大きく、応力負荷による亀裂は α 相から生じる傾向があるため、高温強度の向上には、晶出物の増量と微細分散により α 相を保護することが必要である。Fig. 1に本開発で目指すマイクロ組織の模式図を示す。

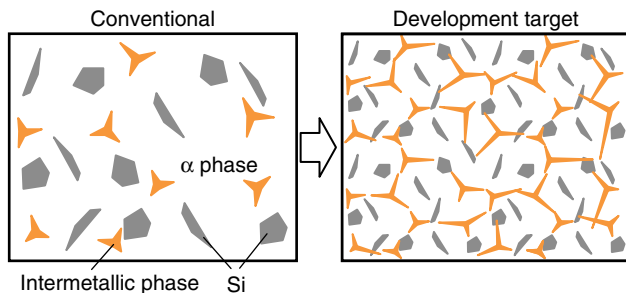


Fig. 1 Schematic microstructures of conventional material and developmental target

増量する元素としては、微細分散の指標である急冷時固溶限増加率⁽⁹⁾、耐熱性の指標であるアルミ中の拡散係数⁽¹⁰⁾、熱伝導の指標である比抵抗増加率⁽¹¹⁾から Ni が有効と考えられる。Fig. 2 に各製法における Ni 増量時の強度向上効果、Fig. 3 に Ni 増量時のマイクロ組織比較を示す。GDC では Ni 増量により晶出物が粗大化し強度向上効果がわずかであるのに対し、ダイカストでは微細な晶出物分散組織が得られ、強度向上効果が大きい。以上のことから、ダイカスト製法によるNi増量を高温強度向上のコンセプトとし、詳細仕様の設定をおこなう。

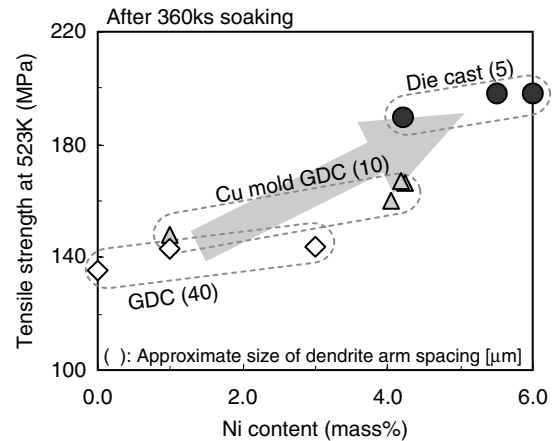


Fig. 2 Effect of Ni on tensile strength in various manufacturing processes

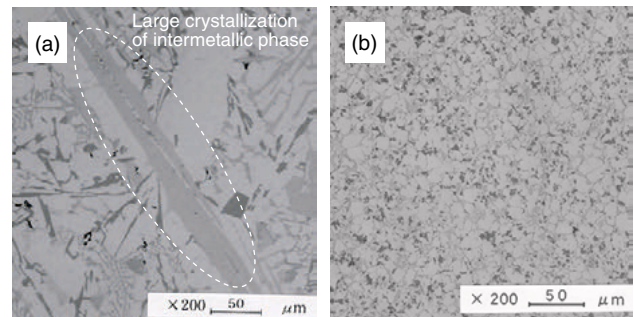


Fig. 3 Microstructures of (a)GDC-Ni 4mass% added and (b)Die cast-Ni 6mass% added

3. 実験方法

ダイカストは方案設定、金型製作、鑄造条件設定に時間を要することから、詳細仕様の設定にあたっては下記手順で進めた。

- (1)くさび形状試験片を GDC にて作製し、急冷時の組織と添加元素量の相関を確認し、基本成分を設定
- (2)簡易的なピストン形状試験片(以下、簡易ピストンと示す)をダイカストにて作製し、材料特性を確認
- (3)実際のピストン形状(以下、実ピストンと示す)をダイカストにて作製し、品質を確認

3.1. くさび形状試験片による基本成分設定

急冷時における Ni の添加限界を確認するため、実験用合金成分はベース合金を Al-12%Si-4%Cu -1%Mg(いずれも mass%)とし、Ni を 4.5-6.0mass% の間で変化させた。また、Ni 系晶出物との親和性が高いと考えられる Fe は 0.2-0.5mass% の間で変化させて晶出形態への影響性を確認した。さらに、Mn は Al-(SiFe)系板状晶の改良効果が知られている⁽¹²⁾ため、その量比 Mn/Fe を 0.2 から 1.0 の間で変化させて改良効果有無を確認した。

くさび形状試験片は、溶湯温度 993 K、金型温度 343 K の条件で製造し、ダイカストピストンの冷却速度に相当する肉厚部位を金属顕微鏡にて組織観察した。また、組織形態の強度に及ぼす影響を検証するため、ピッカースで同部位の硬さを測定した。Fig. 4 にくさび形状試験片を示す。

3.2. 簡易ピストンによる材料特性確認

Table 1 に実験用合金及び比較用従来合金の成分を示す。実験用合金は 350 ton ダイカストマシンを用い、溶湯温度 973 K、 casting 圧 80 MPa、ゲート速度 80 m/s で簡易ピストン型に casting し、熱処理 T5 を実施した後、簡易ピストンの天井部(肉厚 10 mm)から試験片を採取した。また、従来合金は溶湯温度 1023 K、金型温度 593 K で JIS4 号舟型に casting し、熱処理 T7 を実施した後、型底より 10 mm 部位から試験片を採取した。材料特性は、抗張力、疲労強度、叩

Table 1 Chemical composition of experimental alloy for die cast and conventional alloy for GDC

	(mass%)					
	Si	Cu	Ni	Mg	Fe	Mn
Experimental alloy	12.4	3.9	5.4	1.0	0.4	0.2
Conventional alloy	12.6	4.8	1.0	1.0	0.1	—

Table 2 Test methods and temperature conditions

	Method	Temperature (K)					Soaking time
		R.T.	473	523	548	573	
Tensile strength	JIS Z2241		○	○		○	360ks
Fatigue strength	Push-Pull servo pulser		○	○		○	
Abrasiveness	Abrasion tester			○	○	○	360ks
Young's modulus	JIS Z2280	○					
Thermal conductivity	JIS R1611			○			
Thermal expansion	TMA			○			
Notch fatigue strength	Push-Pull servo pulser			○			

かれ磨耗、ヤング率、熱伝導率、熱膨張率、切欠き疲労強度の試験を実施し、各温度での平均値を求めた。簡易ピストンの形状を Fig. 5、それぞれの試験方法と温度条件を Table 2 に示す。

3.3. 実ピストンによる品質確認

実ピストンは 1.3L エンジンのピストン形状をもとに、ダイカスト製法を考慮して各部肉厚を調整した。Fig. 6 に概略形状を示す。実験用合金は Table 1 で示した成分とし、250 ton ダイカストマシンを用いて、溶湯温度 1003 K、 casting 圧 95 MPa、ゲート速度 80 m/s で casting し、高品質化の施策として、金型内の真空化と二次加圧を実施した。

内部品質は浸透探傷と気孔率測定で評価した。気孔率 χ (%) は、合金の理論密度 ρ_r (g/cm³)、ピストンの実密度 ρ_a (g/cm³) とすると、ピストン内部の空間割合を示す指標として、(1) 式にて算出できる。

$$\chi = \frac{(\rho_r - \rho_a)}{\rho_r} \times 100 \quad (1)$$

理論密度は計算が困難なため、今回は鑄巣が発生しにくいとされるランズレー法で採取した試験片の密度を測定し、理論密度に代えて用いた。

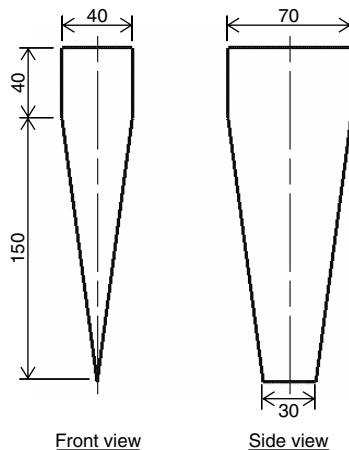


Fig. 4 Schematic diagram of wedge specimen

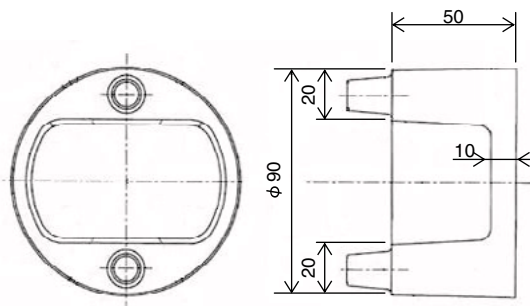


Fig. 5 Schematic diagram of temporary piston

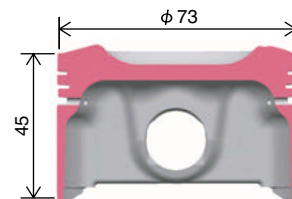


Fig. 6 Schematic diagram of piston

4. 結果と考察

4.1. 組織形態

4.1.1. 組織形態に及ぼす Ni, Fe 添加量の影響

Fig. 7 にミクロ組織中の100 μm 以上の粗大晶の有無と Ni, Fe 添加量の関係を示す。Ni4.5mass% では Fe0.5mass% までは粗大晶が見られずねらいとする組織を示すが、Ni添加量の増加に伴い粗大晶が発生する。Fe 添加量が低下し、Ni6.0mass% では Fe0.2mass% まで低下させてもわずかに粗大晶が認められた。

Fe が粗大化に影響を及ぼす現象は、Al-Ni 系晶出物内で Fe が置換され、Al-(NiFe)系晶出物になることにより、粗大化が促進されたためと考えられる。Al-Ni 二元系状態図から Al-Ni 共晶点は 5.7mass% 付近であり、初晶の晶出危険性や Fe 置換による粗大化を考慮すると、Ni は 5.5mass% 以下、Fe は 0.4mass% 以下の設定が必要と言える。

4.1.2. 組織形態に及ぼす Mn 添加量の影響

Mn については 3.1. 節で示した改良効果が Al-(NiFe)系晶出物にも発現することを期待し、Mn/Fe比を変化させてミクロ組織と硬さを確認した。Fig. 8にその結果を示す。期待に反してMn/Fe比の高い方が粗大化を起こし、ビッカース硬度も低下した。

Mnの分布を確認するため、粗大晶の構成元素をElectro-probe X-ray microanalyzer (EPMA)により分析した結果を Fig. 9 に示す。Mn の置換が認められる晶出物は Al-(SiFe)系、Al-Fe 系及び Al-(NiFe)系であり、そのうち Al-(SiFe)系は Al-Fe 系と一体化して Mn による塊状化が認められたが、Al-(NiFe)系は Mn の置換により板状粗大化していることがわかった。

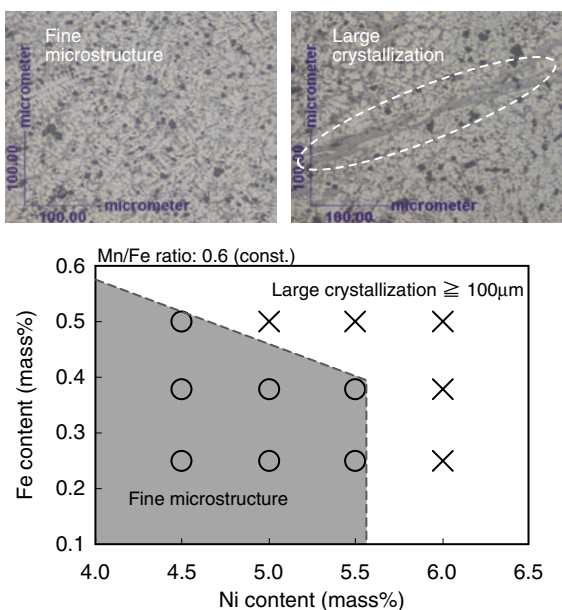


Fig. 7 Effect of Ni and Fe content on microstructure

Table 3 Chemical composition of developed alloy

	Si	Cu	Ni	Mg	Fe	Mn
Developed alloy	13	4	5	0.8	0.4	≤ 0.2

以上より、Mn の増加による硬度低下は、Fe を含有する高 Ni 添加合金において、Mn が Al-(NiFe)系晶出物の板状粗大化を促進して微細分散する晶出物を減少させたためと考えられる。各晶出物への Mn 作用メカニズムの解明は更なる研究を要するが、本実験結果から Mn/Fe 比 0.6 以下の設定が必要と言える。

4.2. 基本成分設定

4.1. 節の結果から、開発合金の Ni 添加量を 5.0mass%, Fe 添加量を 0.4mass%, Mn 添加量を 0.2mass% 以下と設定した。Table 3 に成分表を示す。

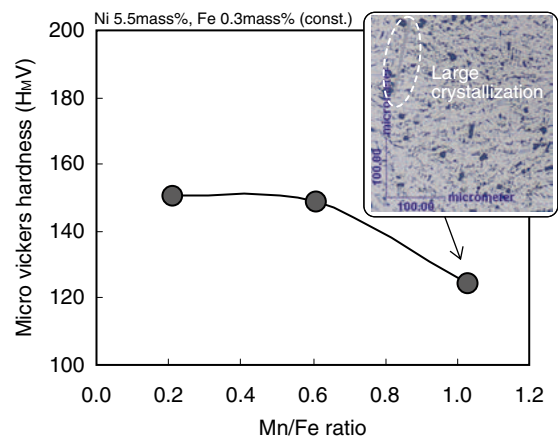


Fig. 8 Effect of various Mn/Fe ratios on microstructure and hardness

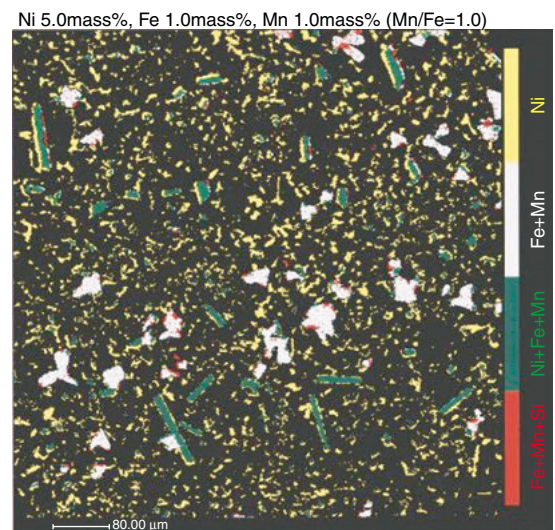


Fig. 9 Photograph of EPMA element mapping

4.3. 材料特性

4.3.1. 高温強度

抗張力及び疲労強度の試験結果をFig. 10に示す。523 K, 573 Kの疲労強度向上率は従来材に対しそれぞれ1.5倍, 1.8倍と目標強度を達成することができた。

4.3.2. リング溝磨耗特性

単体叩かれ磨耗試験の結果を Fig. 11 に示す。従来材に対し、523K での磨耗量は 1/6 と耐磨耗性向上効果が得られた。これは、Ni増量によりアルミ母材面積率が従来材に対し低減するため、凝着発生までの時間が延びることと、高温による材料軟化の影響が低減するためと考えられる。Fig. 12に凝着発生までの時間と硬度劣化特性の従来材との比較を示す。

4.3.3. 靱性・物性

切欠き疲労強度、ヤング率、熱膨張率、熱伝導度の試験結果を Fig. 13 に示す。切欠き疲労強度は、従来材に対し1.2倍と平滑試験片に比べ強度向上率は低減するものの、必要な靱性を確保できた。ヤング率は16%向上、熱膨張率は6%低減の効果が得られた。Niは従来からこれらの特性改善効果が高いことが知られており^{(13), (14)}、本開発材においてもNi増量による効果が得られたと考えられる。熱伝導度については、従来材に対し11%低下となったが、Computer Aided Engineering(CAE)による温度上昇予測は従来材に対し5 K程度であり、また実機でのノッキング特性に悪化が見られなかったことから、ピストンへ適用可能な特性を有すると考えられる。

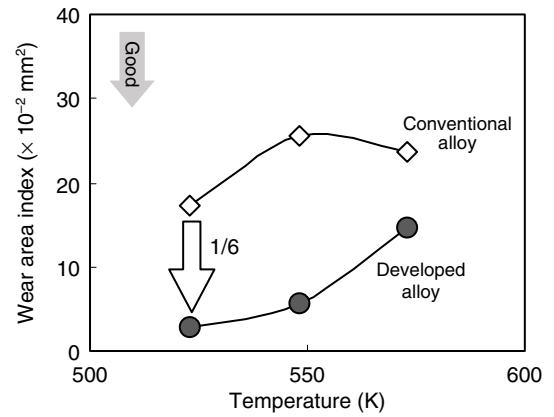


Fig. 11 Abrasiveness

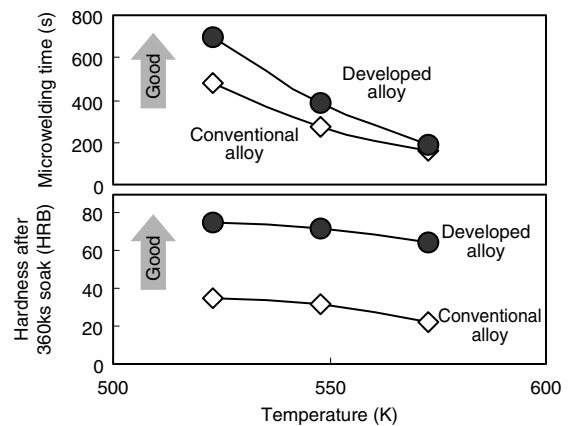


Fig. 12 Comparison of microwelding time and hardness

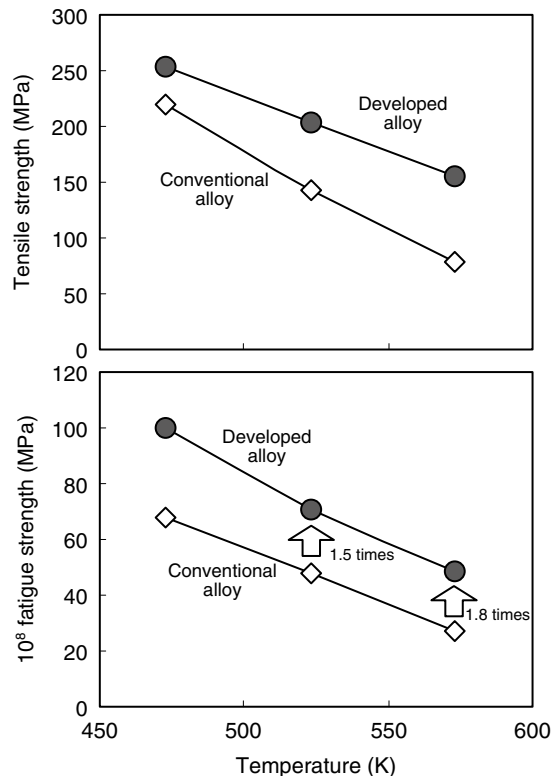


Fig. 10 Tensile and fatigue strength

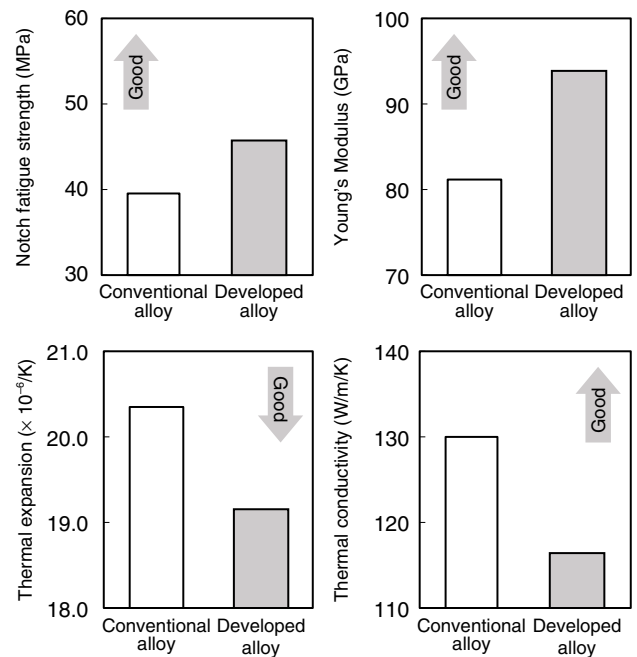


Fig. 13 Notch fatigue strength and physical properties

4.4. 鑄造品質

Fig. 14に真空化及び二次加圧による品質の向上効果を示す。ダイカストは空気の巻込みによって発生する内部鑄巣がしばしば問題となるが、真空化と二次加圧により、GDCピストン以下の気孔率を達成することができた。おのこの効果をみると、真空化より二次加圧の方が気孔率低減効果が高く、これはダイカストにおいても凝固収縮を補うことの重要性を示唆している。

また、溶湯中や注湯時に発生するスラッジや酸化膜、破断チルについても、鑄造方案、溶湯処理、プランジャースリーブ材質、離型剤、潤滑剤量などを最適化し高品質化を実現した。

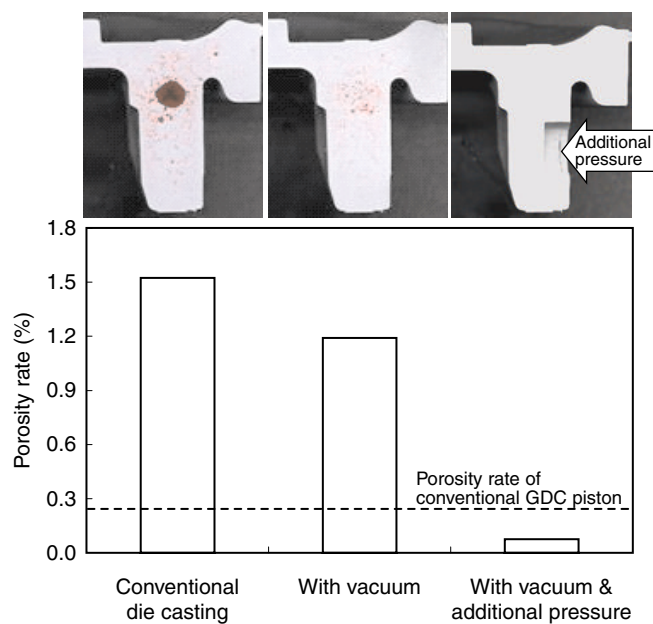


Fig. 14 Effect of vacuum and additional pressure on casting quality

5. ピストン適用事例と効果

5.1. ピストン基本諸元

Table 4 に本開発材を用いたピストンの基本諸元を示す。適用にあたっては、燃費向上をねらいとするエンジンを選定し、ピストン各部の形状はCAEを用いて耐久信頼性を確保しながらフリクション低減効果が最大となるよう最適化した。Fig. 15に三次元挙動計算により最適化したピストンスカート面圧分布の例を示す。

5.2. 適用効果

5.1. 節で示したピストンのフリクションと燃費の測定結果を Fig. 16 に示す。エンジン単体フリクションで 4.4% 低減、エンジン単体台上燃費で 2.2% 向上の効果が得られた。

Table 4 Specifications of developed piston

	Conventional piston	Developed piston
Diameter (mm)	73	73
Compression height (mm)	26.2	26.2
Crown thickness (mm)	5.2	4.5
Land height [top/2nd/3rd] (mm)	5.55/3.0/2.5	5.55/3.0/2.5
Skirt width x height (mm)	34 x 29.5	38 x 29.5
Skirt thickness [skirt/side wall] (mm)	2.0/3.5	2.5/3.45
Piston weight (g)	207	205
Piston shape		
Specific power of applied engine (kW/L)	47.1	52.3
Top ring material/Outer surface treatment	Carbon steel/ Hard chromium plating	Carbon steel/ Ion plating

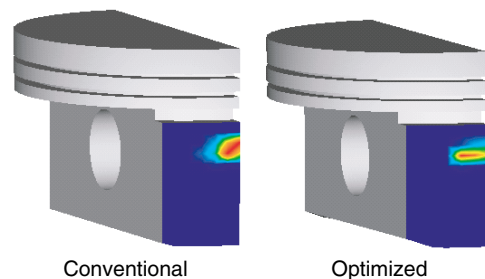


Fig. 15 Three-dimensional piston dynamics calculation

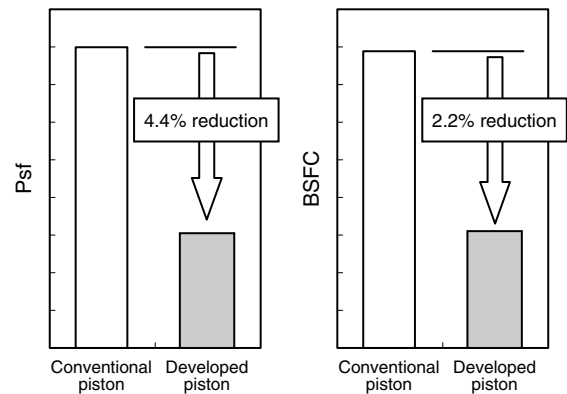


Fig. 16 Effect of developed piston on brake specific fuel consumption (BSFC) and friction loss (Psf)

6. まとめ

ダイカスト製法を用いてアルミ合金の Ni 添加限界を高めることをコンセプトに、ピストン材の高強度化技術を開発した。本開発で得られた知見や結果を以下に示す。

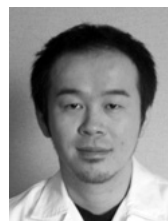
(1)ダイカスト製法により Ni 添加量を 5.5mass% まで増量することが可能となり、523 K 以上の疲労強度を従来 GDC 材比 1.5 倍以上向上できた。

- (2) 晶出物の粗大化を防止するためには、Fe, Mn 添加量の制御が重要であり、Fe添加量を0.4mass%以下、Mn/Fe 比を 0.6 以下に規制する必要がある。
- (3) 金型内の真空化と二次加圧により、従来 GDC ピストン以上の高品質化が達成できた。
- (4) 本開発材を用いたピストンにより、エンジンフリクション 4.4%低減、台上燃費 2.2%向上の効果が得られた。

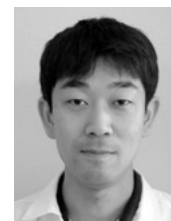
参考文献

- (1) 新里智則, 林有登: 新型 2.0L リーンバーンエンジンの開発, HONDA R&D Technical Review, Vol.12, No.2, p.45-54
- (2) 中山幸夫, 鈴木誠, 岩田洋一, 山野順司: 2002 年モデル「Fit」用 1.3L 2 プラグエンジンの開発, Honda R&D Technical Review, Vol.13, No.2, p.43-52
- (3) 松木正人, 岩城輝男, 神山敏宏, 佐藤利行, 賀来嘉昭, 神田正浩: ハイブリッドカー「Civic Hybrid」用パワートレインの開発, Honda R&D Technical Review, Vol.14, No.1, p.39-48
- (4) 和田祐介, 大津啓司, 成田研之助, 篠原利光: 新型LIFE 用 i-DSI 2 プラグエンジンの開発, Honda R&D Technical Review, Vol.16, No.1, p.93-102
- (5) 小池俊勝, 山縣裕, 金武直幸: 高性能鍛造ピストン用アルミニウム合金の機械的性質: 軽金属, 第 51 巻, 第 5 号, p.267-272(2001)
- (6) 福地文亮, 矢羽々隆憲, 秋山浩, 小川努, 岩崎晴之, 堀出: 熱間バルジと高真空ダイカストを用いたアルミサブフレームの開発, Honda R&D Technical Review, Vol.16, No.2, p.23-30
- (7) 宇都秀之: 自動車軽量化の最新動向と新しい技術, アルトピア, Vol.35, No.1, p.9-14(2005)
- (8) 高崎憲政, 吉村裕子, 佐藤和義, 杉本幸男, 佐藤貴紀: 高圧金型鑄造用ピストン合金の開発, Honda R&D Technical Review, Vol.13, No.1, p.175-184
- (9) Polmear, I.J.: LIGHT ALLOYS Metallurgy of the light metals, p.330-331(1995)
- (10) 藤川辰一郎, 馬場義雄ら: アルミニウム中での各種金属元素の拡散データ, 軽金属協会編アルミニウム技術便覧, p.1275(1996)
- (11) 村上陽太郎ら: 工業用材料, アルミニウム材料の基礎と工業技術, 軽金属協会, p.344(1985)
- (12) 馬場義雄ら: 鑄造用アルミニウム合金, 軽金属協会編アルミニウム技術便覧, p.131-132(1996)
- (13) Polmear, I.J.: LIGHT ALLOYS Metallurgy of the light metals, p.126-127(1995)
- (14) 河村敏孝ら: アルミニウムおよびその合金の性質, アルミニウム技術便覧, p.65-66(1985)

■ 著 者 ■



谷 畑 昭 人



佐 藤 謙 次



古 川 和 也