

小型二輪車触媒用メタルハニカム担体の開発

Development of Metal Honeycomb Substrate for Small Two-wheeled Vehicle Catalysts

大久保 克 紀*
Katsunori OKUBO

辻 正 光*
Masateru TSUJI

三ッ川 誠*
Makoto MITSUKAWA

要 旨

世界的な環境意識の高まりの中、先進国のみならず進展国においても排出ガスエミッション規制が強化されつつある。排出ガス浄化にはメタルハニカム触媒を用いることが有効である。今回、進展国で多くの人々に使われている小型二輪車向け用途として、ハニカム触媒用のメタル担体を開発した。本開発にあたり、新たに熱応力CAE解析及び単体冷熱加振耐久試験の評価手法を確立した。これらを活用することにより、振動耐久性と冷熱耐久性を両立させた廉価なメタルハニカム担体を開発することができた。

ABSTRACT

With the growing concern on protecting the global environment, exhaust emission regulations are becoming more stringent than ever, not only in advanced countries, but also in developing countries. To purify exhaust gases, the use of a metal-honeycomb catalyst is effective. A metal substrate for a honeycomb catalyst has been developed recently to use in small motorcycles used by a large number of people in developing countries. As part of this development, we have established a new assessment method for the CAE analysis of thermal stress and the hot-cold cycle and vibration-durability tests. Making full use of the said techniques, a low-cost metal-honeycomb substrate featuring vibration resistance and hot-cold cycle durability has been developed.

1. はじめに

近年、二輪車においても先進国を中心に排出ガスエミッション規制が強化されつつあり、これに追従する形で進展国についても規制強化の動きが活発化してきた。

排出ガス浄化のために、新エンジン技術やデバイスの開発、キャブレタのセッティングやFI化⁽¹⁾等の対策が次々ととられつつある。しかし、より高い浄化性能を追求していくと、四輪車において一般化されているハニカム担体を用いた触媒(以下、ハニカム触媒)の装着適用拡大が必要不可欠である。

二輪車の大多数はインド・中国・ASEAN地区を中心とした進展国で生活の足として使われており、これらに装着するための廉価なハニカム触媒が要求されている。ハニカム触媒の構成要素は、排出ガスの浄化をつかさどる担体と呼

ばれる触媒コーティングと、これら担体を保持するハニカム担体とに分けられる。この中で、四輪車で主流となっている廉価なセラミックス製のハニカム担体の適用は、二輪車特有の耐振動要求特性から、振動強度上一部機種を除き困難である。このため、高コストではあるが金属製の担体であるメタルハニカム担体が採用されている。進展国向けの小型二輪車に、ハニカム触媒の適用を拡大していくためには、耐久性を損なわずにメタルハニカム担体を低コスト化することが必要不可欠である。

今回、高い耐久性を維持しつつ低コスト化を達成した小型二輪車用のメタルハニカム担体を開発した。これらをFig. 1に示す。2005年のインドエミッション規制対応機種から適用を開始したこの小型二輪車触媒用メタルハニカム担体(Fig. 2)と開発に用いた手法について紹介する。



Fig. 1 Metal honeycomb substrates

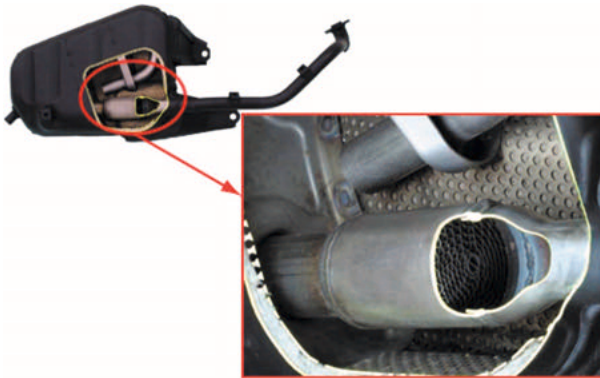


Fig. 2 Outline view of muffler with metal-honeycomb catalyst on small sized two-wheeled vehicle for India model

2. 開発の背景

メタルハニカム担体(以下、メタル担体)はフェライト系ステンレス材からなる平箔と波付け成形した波箔を重ね合わせて巻取り(ハニカムコアと呼ぶ)、これをフェライト系ステンレス材の外筒に挿入した構造体である。ハニカムコアに用いられる平箔及び波箔を Fig. 3 に示す。

これら平箔・波箔・外筒は各々接合されておりその接合方法は、ろう付け・拡散接合・レーザ溶接^{(2)・(4)}などがあり、現在は接合自由度の高い Fig. 4 に示すような Ni 系ろう材を用いたろう付け手法によるものが主流となっている。

これまでも小型二輪車向けとしてタイなど一部地域向けにメタル担体を適用してきたが、それらは小型2ストロークエンジンが全盛の1990年代初めに開発した仕様が主流となっていた。2ストロークエンジンは同排気量の4ストロークエンジンと比較し、ピストン、コネクティングロッドなどのエンジン往復部重量が重いため、エンジン振動が大きく、また、2ストロークエンジン搭載車はその機種コンセプトにより一般的に廉価であるので、バランスシャフトを有していないものもあった。このため、エンジン振動により発生する振動加速度(以下、振動G)が非常に高く、これに対する機械的耐久性が求められた。メタル担体の耐久性とは、



Fig. 3 Flat foil and corrugated foil

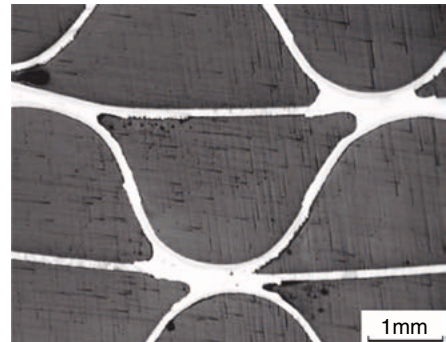


Fig. 4 Microstructure of cross section for Ni brazing

Fig. 5 の a, b に示すとおりハニカムコアが二輪車の発生する振動Gによる疲労現象によりコアが抜け落ちないための耐久性である。これに対する技術手法として、Niろう材による接合面積を増やし剛性を高めることにより耐久性を確保していた(Fig. 5-c)。

しかし、この Ni ろう材自体、高コスト材料であるため、以前からNiろう材の使用量をいかに低減するかが、二輪車向けメタル担体の技術課題となっていた。

一方、近年排出ガスのクリーン化要求より二輪車に用いられるエンジンが2ストロークから、より排出ガスがクリーンな4ストローク化⁽⁵⁾され、これに伴いメタル担体の要求特性に変化が生じた。四輪車と比較すれば、エンジンのマウント方法、マフラの固定方法の違いにより、依然要求振動Gは高いものの2ストロークエンジン車に比べ約1/2の発生振動Gとなり、一方、4ストローク化による排出ガス温度の上昇とそれに伴うハニカム内温度の昇温速度上昇により冷熱耐久性が求められるようになってきた。これらを、Fig. 6, Fig. 7 及び Table 1 に示す。

このようなことから、現在の小型二輪車のメタル担体として求められる要求特性は

- ・振動耐久性と冷熱耐久性の両立
 - ・低コスト化
- である。

これまでの開発における知見からメタル担体のろう付け面積と特性についてまとめると Table 2 のようになる。

ろう付け面積をパラメータとした場合、振動耐久強度と冷熱耐久強度・コストとは相反する要求である。これらの要

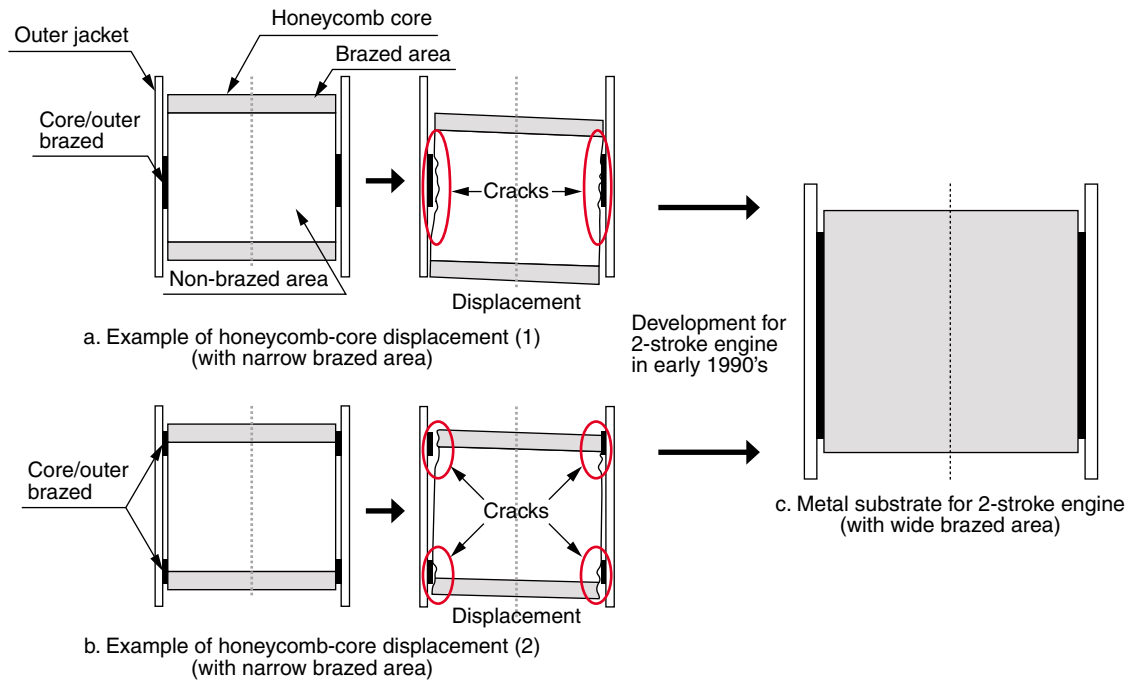


Fig. 5 Brazing joint structures of metal substrates

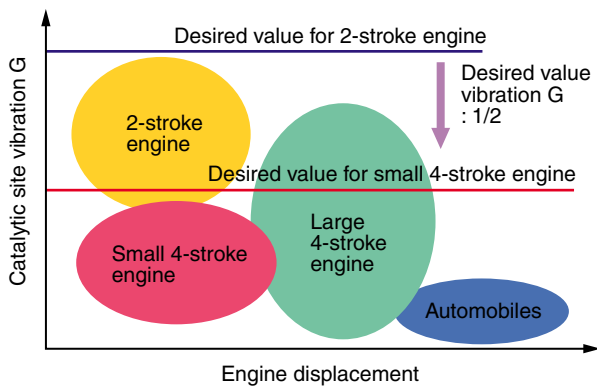


Fig. 6 Positioning of small size 4-stroke engine

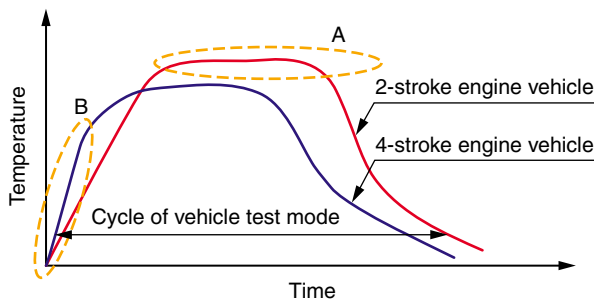


Fig. 7 Comparison of catalytic center temperature profiles during the endurance vehicle test mode

Table 1 Comparison and demand characteristic of honeycomb catalyst load of 2-stroke engine and 4-stroke engine

Items	Comparison	Requirement characteristic
Highest temperature (See Fig. 7 area: A)	2-stroke >> 4-stroke	Vibration durability (High temperature fatigue strength)
Heating rate (See Fig. 7 area: B)	2-stroke << 4-stroke	Heat cycle durability

Table 2 Relationship between brazed area and properties of metal honeycomb substrates

Property	Brazing area Wide ↔ Narrow
Durability of vibration strength heat cycle resistant	Good ↔ Bad Bad ↔ Good
Cost	High ↔ Low

には、ハニカムコア内及びハニカムコア - 外筒間のどこをろう付けするかがキーポイントとなる。

3. 開発内容

3.1. 基本コンセプト

小型二輪車の機種特性から開発コンセプトを以下のとおりとした。

- ・ 小型二輪車の振動Gに耐え得る必要最低限のろう付け面積
- ・ 冷熱耐久性を満足するろう付け位置の最適化

求を満足させるためには、必要最低限のろう材をいかに効率良く使うかという点が重要である。冷熱耐久性を向上させる手法としては、メタル担体の温度変化の際に生ずる熱応力をいかに軽減させるかが重要なポイントとなる。これ

また、更なるコスト低減のためには、単なる Ni ろう材の低減だけでなく、量産性を考慮する必要がある。このため、複雑な製造ライン構成をとらなくてすむような「単純化したろう付けデザイン」とした。

3.2. 仕様開発の技術手段

前述のコンセプトを満たすために用いた技術手段は以下のとおりである。

- ・ 冷熱耐久性：熱応力 CAE
- ・ 振動耐久性及び冷熱耐久性：新開発の単体耐久試験

メタル担体の冷熱耐久性としてはハニカムコアの、熱疲労寿命のことであり、排気系部品の熱疲労現象に対する CAE 評価については、近年四輪車のエキゾーストマニホールドの薄肉化対応^{(6), (7)}として用いられるようになってきたが、メタル担体に適用した事例は極めて少ない。また、適用事例についても熱疲労現象は塑性域疲労であることより、Marc. などの非線形構造解析での実施事例⁽⁸⁾であり、計算に数日を要し実用性の点では十分とはいえない。これに対し、今回は一般的な線形構造解析を用いて、モデル及び境界条件等の最適化を実施した解析手法を確立し、熱応力を評価パラメータとして本開発に適用した。Fig. 8に本開発で用いたモデルでの熱伝導解析の実施事例を示す。

本来塑性疲労の寿命評価をおこなう場合は、評価パラメータとして応力を用いることはできない。ただし、本開発においては、従来の仕様においても耐久要件に対してはコアが抜け落ちないレベルの十分な耐久性を有していることにより、絶対的な寿命評価は必要ではない。ねらいは、さらなる熱応力低減となるようろう付け位置の最適化であることより、相対的に熱応力を評価パラメータとして用いることができると判断した。これにより、従来はいくつもの仕様を実際に試作し実車を用いた耐久性確認試験により評価していたものが、本手法を用いることにより数時間でのスクリーニングが可能となった。

一方、振動耐久性については、加熱冷却ガスを交互に流しながら振動を加えるという単体耐久試験(以下、冷熱加振耐久試験という)装置を作成し、実機と相関をとった冷熱加振耐久試験モードを確立した。Fig. 9に本試験装置の概要を

示す。これにより、振動耐久性・冷熱耐久性の観点から机上決定した仕様の妥当性を評価した。

3.3. メタル担体の構成

メタル担体の構成要素は、前述のとおり、ハニカムコア、外筒、それらを接合するろう材とに分類できる。

ハニカム素材は、耐酸化性と強度の観点より箔厚さ 100 μm の 20Cr - 5Al フェライト系ステンレス材とした。また、外筒材質は耐酸化性の観点より、板厚 1.0 mm の Mo 添加 17Cr 系ステンレス (JIS SUS436L 相当)を選定した。

ろう材については、JIS BNi5 相当を選定した。これらを Table 3 に示す。

3.4. ろう付け最低面積の設定

Fig. 10に示すとおり、ろう付け面積を変化させて破壊荷重の測定を実施した。荷重のばらつき幅及び破壊形態も考慮し、所定の荷重値を満足するようろう付け面積を選定

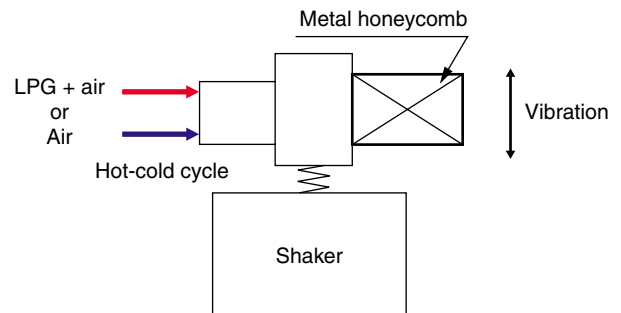


Fig. 9 Facility image of unit durability tests

Table 3 Composition of metal honeycomb substrate

Items	Materials
Honeycomb material	20Cr-5Al-REM (YUS205M1)
Outer jacket material	17Cr-Mo-LC (JIS SUS436L)
Brazing metal	Ni brazing filler metal (JIS BNi-5)

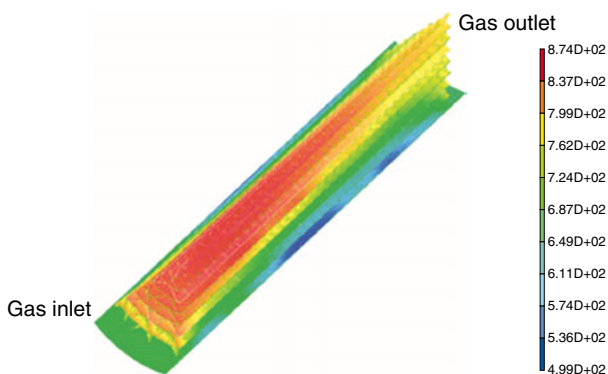


Fig. 8 CAE model; result of heat transfer analysis

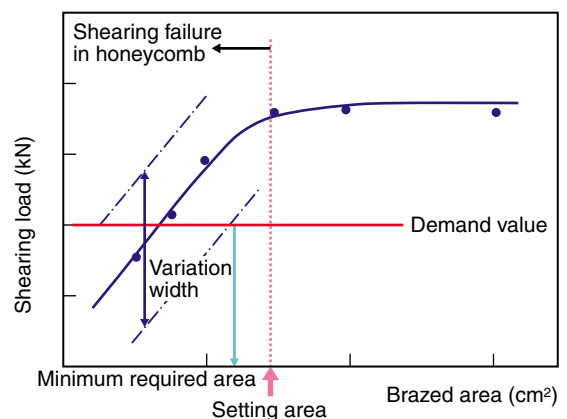


Fig. 10 Optimization of brazing area

した。この設定値は、従来の2ストロークエンジン仕様と比較し、1/2 以下である。

3.5. ろう付け位置の最適化

小型二輪車を用いて、排出ガス温度及びメタル担体内の詳細測温をおこなった。それらの数値を CAE モデルに与え、熱伝導解析、熱応力解析の順で CAE 解析を実施した。

従来の2ストロークエンジン用メタル担体とせん断荷重値より求めた必要接合面積を基準として、以下の3案について検討した。

A案：ハニカムコア、ハニカムコア - 外筒間(ともに排出ガス入口側ろう付け)

B案：ハニカムコア、ハニカムコア - 外筒間(ともに排出ガス出口側ろう付け)

C案：ハニカムコア(排出ガス入口側ろう付け)、ハニカムコア - 外筒間(排出ガス出口側ろう付け)

CAE解析結果より、最も熱応力の低くなるB案を選定した。解析実施事例を Fig. 11 に示す。

B案のろう付け仕様とすることで、メタル担体の最弱部であるハニカムコア最外周部の応力値は、従来仕様と比較し、約 1/2 以下になることが確認された(Fig. 12)。

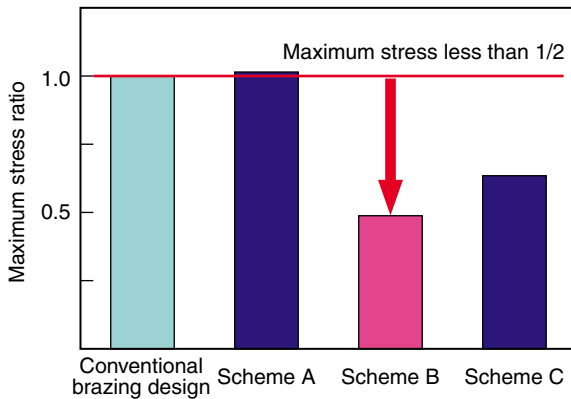


Fig. 12 Comparison of CAE results

3.6. 単体冷熱加振耐久試験結果

CAEにより決定したろう付け位置をもとに、ろう付け幅、ろう塗布量などの最適化を実施し、テスト品を作成した。テスト品の仕様を Table 4 に示す。

このメタル担体で冷熱加振耐久試験を実施し、振動耐久性及び冷熱耐久性についての評価を実施した。耐久試験後のメタル担体外観を Fig. 13 に示す。振動Gによるコア抜け破損は無く、またねらいどおりハニカムコア最外周部近傍のセル変形やクラック等も生じていない。

また、従来品と比較し、Fig. 14に示すとおり、耐久後の静的せん断荷重比で約 2.5 倍の耐久性を有していることが確認できた。

3.7. 実車耐久性評価

部品としての機能を総合評価するために、Table 4に示したメタル担体に触媒コーティングを施し、実車での耐久性試験を実施した。

Table 4 Specifications of test metal honeycomb

Items	Specifications
Cell density	100 cpsi
Honeycomb core diameter	40 mm
Honeycomb core length	90 mm

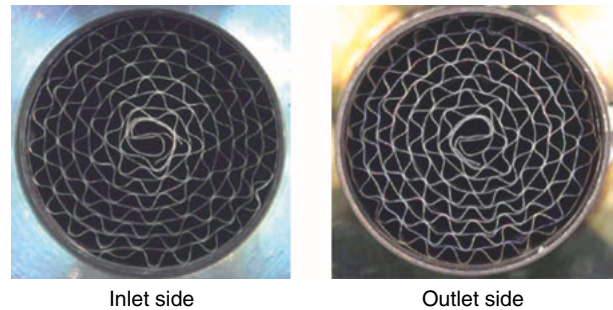


Fig. 13 Photograph of after unit durability test

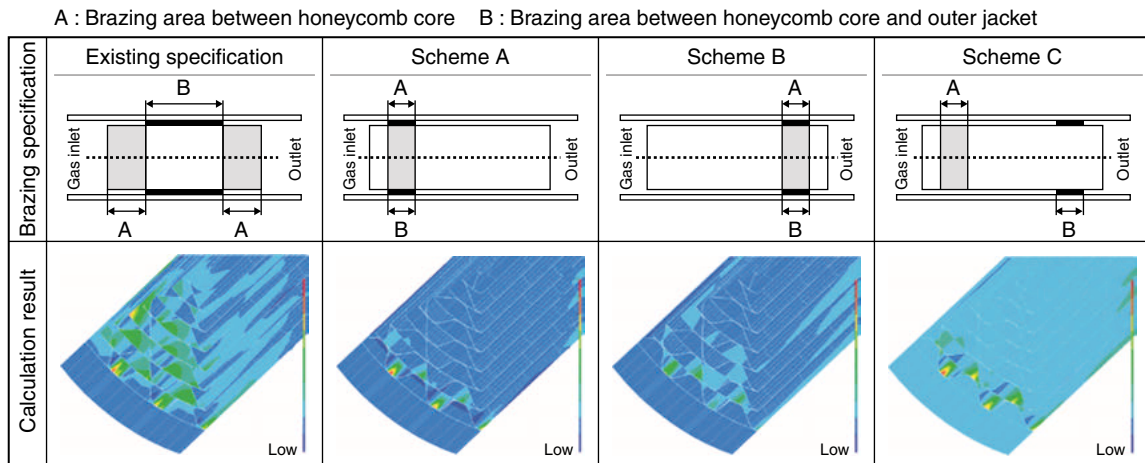


Fig. 11 CAE results of thermal stress analysis

(1) 機械的耐久性

テスト車両は要求振動Gとほぼ同じ最大振動Gを発生する機種を選定した。実車走行耐久試験後も単体試験後同様に、ハニカムコア最外周部近傍のセル変形やクラックなどは生じないで、充分な耐久性を有している (Fig. 15)。

(2) 排出ガス浄化性能

触媒コーティングの密着性を含めた排出ガス浄化性能劣化を評価するため、テスト車両のメタルハニカム触媒がついている排気管の取付け構造を工夫し、要求振動Gの約2倍のGが発生するような条件下で実車エンジンを用いたベンチでの加速試験を実施した。加速耐久試験後も、触媒コーティング層のはく離は生じていない、また Fig. 16 に示すとおり従来品同等の高い浄化性能を示すことが確認できた。

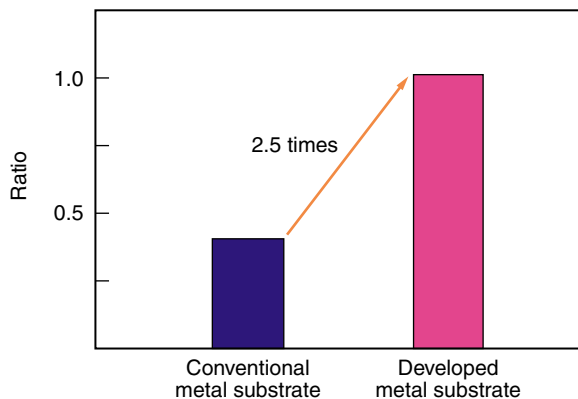
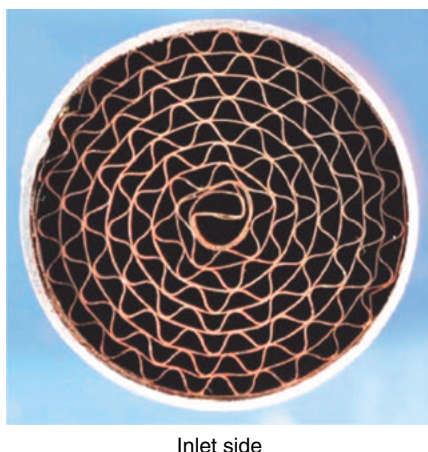


Fig. 14 Comparison of shearing load after unit durability tests



Inlet side

Fig. 15 Photograph of after vehicle durability test

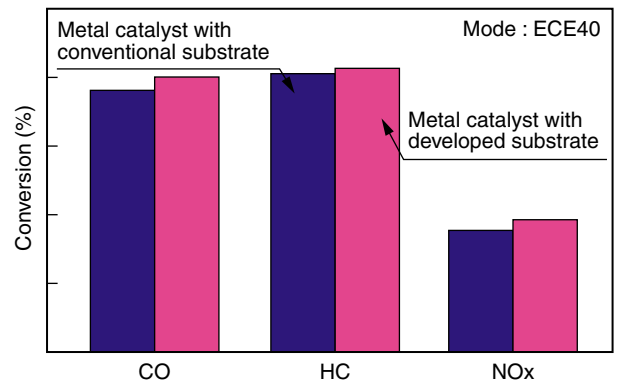


Fig. 16 Comparison of CO/HC/NOx conversion after vehicle durability tests

4. まとめ

メタル担体の開発において、熱応力 CAE 及び単体冷熱加振耐久試験の評価手法を確立した。これらを活用することにより、従来の二輪車向けメタル担体に対し、振動耐久性・冷熱耐久性を両立させた廉価なメタル担体を開発した。

- (1) 小型4ストロークエンジンの振動Gに耐え得るためのせん断荷重を設定し、必要ろう付け面積を決定した。従来品と比較してろう付け面積は 1/2 以下、すなわち、ろう材コストを 1/2 以下に低減できた。
- (2) 冷熱耐久性向上のため、ハニカムコア内の熱応力について新たに確立した CAE 手法を用い、ろう付け位置の最適化を図った。
- (3) 新たに確立した単体冷熱加振耐久試験により、振動耐久性・冷熱耐久性の評価をおこない、従来品と比較し耐久後の静的せん断荷重で2.5倍の耐久性を確認した。

開発した小型二輪車触媒用メタルハニカム担体は、2005年インド向け機種より適用を開始し、順次進展国向けを中心とした小型二輪車に適用拡大予定である。また、本開発に際し確立した評価手法は、今後さらなる浄化性能向上の要求に対し予想されるメタルハニカム担体の仕様多様化においても、有効な評価手法として活用していく予定である。

謝 辞

本開発にあたり、ご協力頂きました合志技研工業株式会社の皆様に紙面を借りて厚く御礼申し上げます。

参考文献

- (1) 赤松俊二, 上田稔, 林徹, 大内勝博: 小型二輪車フューエルインジェクションシステムの開発, Honda R & D Technical Review, Vol.17, No.2, p.1-7

- (2) Takada,T., Tanaka,T.: Development of a Highly Heat – Resistant Metal Supported Catalyst, SAE Paper, No.910615(1991)
- (3) 柴田勝弘, 大内健, 西沢公良, 渡部昇: 超薄壁触媒メタル担体の開発, 自動車技術会春季学術講演会前刷集, 20025062, No.52-02, p.1-4(2002)
- (4) 大久保克紀, 仲森正治, 久保幹夫, 金田幸悟: 二輪車レーザ溶接メタルハニカム担体の開発: 自動車技術会秋季学術講演会前刷集, 9839641, No.102-98, p.9-12 (1998)
- (5) 杉岡浩一, 関谷義之, 林秀樹, 笠啓次, 中島広幸, 鳥山正雪: 4ストローク小型スクータ「ジョルノクレア」の開発, HONDA R&D Technical Review, Vol.11, No.2, p.9-14
- (6) 安藤聡, 中塚純一, 梅田浩美: 排気マニホールドの熱応力解析, 自動車技術会春季学術講演会前刷集 934, p.89-92(1994)
- (7) 中田真, 石井和夫, 榎本勝, 小西泰則, 高橋伸一: 拘束率によるエキゾーストマニホールドの熱疲労寿命評価, HONDA R&D Technical Review, Vol.11, No.2, p.57-66
- (8) Konya,S., Kasuya,M., Okazaki,Y., Imai,A., Kikuchi,A.: Numerical Analysis of Thermal Stress Distribution in Metal Substrates for Catalytic Converters, SAE Paper, No.2002-01-0060

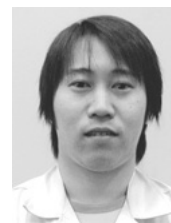
■著 者■



大久保克紀



辻 正光



三ツ川 誠