

# 18 金属細線で強化した自動車エンジン用ピストンの強度特性と有限要素解析

寺山 朗, 府山伸行, 小村勇樹\*, 萩原多津美\*

## Mechanical Properties and Finite-Element Analysis of Piston Reinforced by Metal Fiber for Automobile Engine

TERAYAMA Akira, FUYAMA Nobuyuki, OMURA Yuki and HAGIWARA Tatsumi

The purpose of this research is to clear the effect of fiber-reinforced metal (FRM) on strength of pistons reinforced by FRM. First, the finite element model of a simplified piston of gasoline engines was constructed. Stress analyses were performed using the proposed model, in the case that combustion pressure was loaded to the piston made of aluminum alloy (AC8A). Stress analyses of the piston composed of aluminum alloy (AC8A) and FRM were also performed. The effect of FRM on strength of pistons was discussed using the results of stress analyses.

キーワード：アルミニウム合金，鉄基金属細線，複合材料，エンジンピストン，有限要素解析

### 1 緒 言

現在，高出力・低燃費の自動車用エンジンの開発が各メーカーで進められており，燃焼室内で圧力および温度は，従来のエンジンに比べて高まっている。このため，より高圧・高温に耐え得るピストンの開発が急務である。

一般に自動車用ピストンは，アルミニウム合金のみで造られているが，耐圧性および耐熱性を大幅に改善することは難しい。そこで，繊維強化金属（FRM）を用いてピストンを部分的に強化する方法が提案され，一部で実用化されている<sup>1)</sup>。しかし，高温強度の向上が期待される金属細線で強化したFRMの材料特性は明らかでない。

このような金属材料の複合強化技術ニーズに対し，本研修において試料作製，特性評価，解析技術などについて座学及び実習により習得した。本報ではこのうち，金属細線で強化したFRM試作品の引張強度特性とピストンモデルの有限要素解析（FEA）に関して報告する。

### 2 機械的性質評価

#### 2.1 FRMの作製

強化材料には高温強度向上に適したFeCrSi合金（Fe<sub>75</sub>Cr<sub>20</sub>Si<sub>5</sub>）の金属細線を使用した。本材料は従来

のステンレス鋼では得ることのできない優れた高温強度を有する。溶湯含浸法によって母材となるAC8Aアルミニウム合金に金属細線を3種類（15%，20%，25%）の配合率で強化したFRMを作成した。

#### 2.2 引張試験方法

引張試験は常温（25℃）からピストン使用領域（300℃）の温度条件下で行った。試験片中央部に2軸のひずみゲージを貼り，荷重ごとに荷重方向と荷重方向に垂直な方向のひずみを測定し，ヤング率と引張強度を求めた。

#### 2.3 引張試験結果

図1，2に常温（25℃）および高温（300℃）における強化材の体積含有率とヤング率および引張強度の関係を示す。FRMは強化材の体積含有率が高くなる

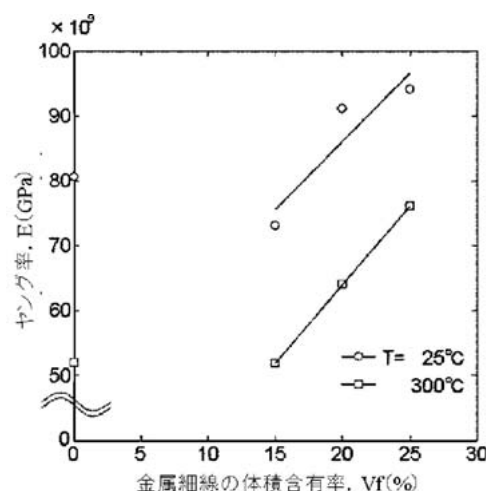


図1 強化材含有率とヤング率の関係

\*コルベンシュミット株式会社

に従い、ヤング率と引張強度が向上した。

常温での引張強度は AC8A 単体より FRM が低いが、ピストンの使用領域とされる高温 (300℃) での引張強度は AC8A 単体より FRM が大幅に高まった。特に25%体積含有率では約2倍に向上しており、高温特性に優れた FRM であることが明らかになった。

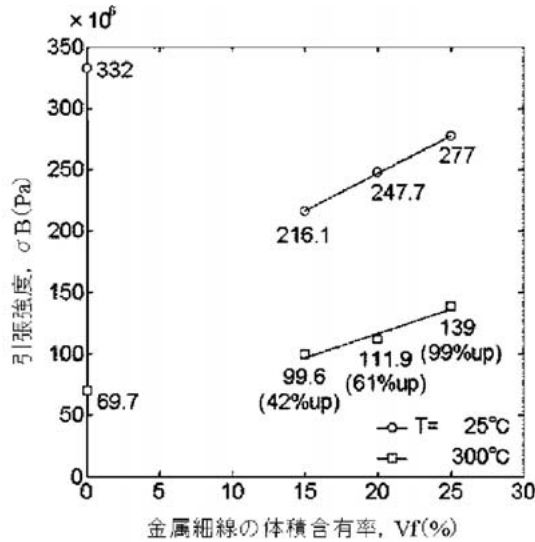


図2 強化材含有率と引張強度の関係

### 3 有限要素解析

#### 3.1 解析モデル

自動車エンジン用のピストンの材質としては、一般に AC8A アルミニウム合金が用いられている。また、一般にエンジンのピストン頭部の温度は約250℃であるが、高出力エンジンの場合は約300℃になる。そこで、AC8A のヤング率は、実測した300℃における値を用いた。また、ポアソン比  $\nu$  は0.3とした。

ガソリン・エンジン用のピストンの簡略図を図3に示す。ピストンの外径は99.5mm、高さは51.5mmとした。簡略化したピストンは x 面および y 面に対して、それぞれ鏡対象であるため、FEA では図4に

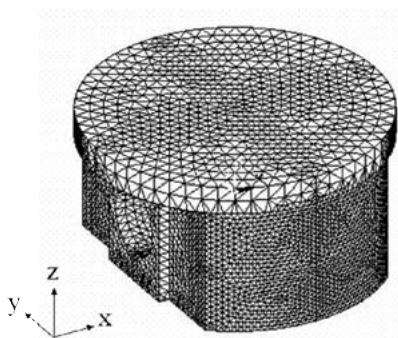


図3 ピストンモデルの概略図

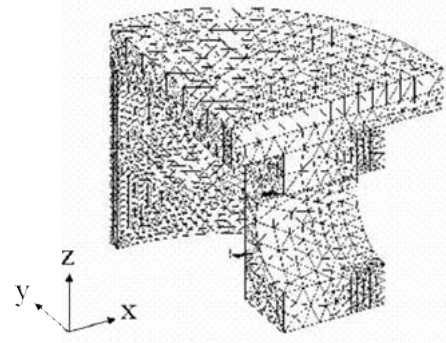


図4 1/4ピストンモデルの概略図

示す1/4モデルを用いた。1/4モデルは6面体20節点要素を用いて、12,077個に分割した。

#### 3.2 計算方法

境界条件としては、図4に示す1/4モデルの x 面および y 面の断面に鏡対象の条件を用いた。また、ピストン・ピン穴の上側の面の z 軸方向の変位を拘束した。

一般に自動車用エンジンの燃焼室内の燃焼圧力は6MPaであるが、高出力エンジンの場合の燃焼圧力は10MPaに達する。そこで、ピストンの頂面に z 軸の負の向きに等分布荷重として圧力  $p$  を10MPa 加えた。以上の条件下でピストンの応力解析を行った。

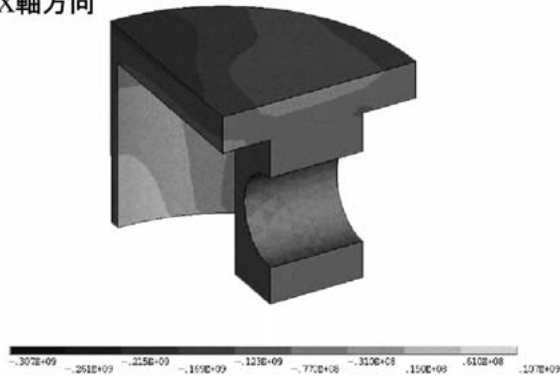
#### 3.3 解析結果

ピストン頂面圧力  $p$  が10MPa 加わる場合の x, y および z 軸方向の垂直応力の分布を図5に、相当応力の分布を図6に示す。濃薄の濃い(黒い)部分は応力が小さい部分を、薄い(白い)部分は応力が大きい部分を表している。ピストン頭部における x, y および z 軸方向の垂直応力の最大値は、それぞれ  $\sigma_x 51.4\text{MPa}$ ,  $\sigma_y 83.4\text{MPa}$  および  $\sigma_z 15.5\text{MPa}$  となった。x と z 軸方向の垂直応力に比べ、y 軸方向の垂直応力が大きくなった。また、ピストン頭部における相当応力の最大値は  $\sigma_e 79.6\text{MPa}$  となった。

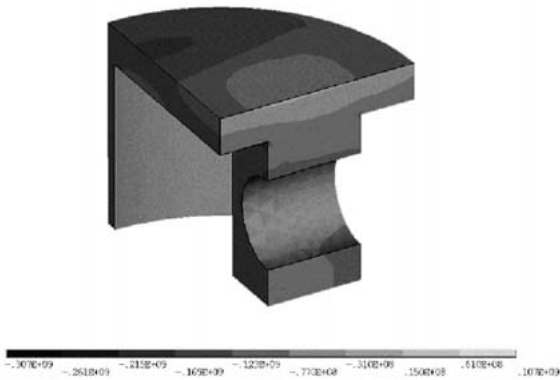
このように、ピストン頂面に燃焼圧力が加わる場合、ピストン・ピンを支点としてピストン頭部は z 軸方向にたわむため、頂面には大きな引張り応力が生じ、ピストン・ピンの長手軸方向に大きな引張り応力が分布していることが分かった。この結果により、ピストン・ピンの長手軸方向に亀裂が生じることが予測できる。実際に使用したピストンもピストン・ピン長手軸方向に亀裂が生じることが多いので、この計算結果は実際の現象をうまく表現できている。

次に、FRM で補強したピストンの応力解析を行った。一例として、図7にピストン頭部の上部1/2をFRM で補強した場合の相当応力の分布を示す。ピス

a) X軸方向



b) Y軸方向



c) Z軸方向

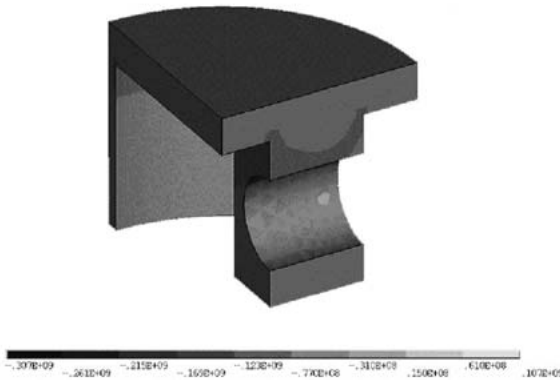


図5 アルミ単体ピストンの垂直応力分布

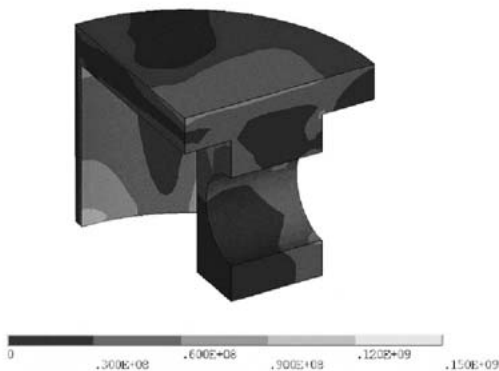


図6 アルミ単体ピストンの相対応力分布

トン頭部の上部1/2をFRMで補強した場合、ピストン頭部のFRM部(上部の1/2)とAC8A部(下部の1/2)の相当応力の最大値は、それぞれ $\sigma$ 88.4MPaと $\sigma$ 69.1MPaとなった。一方、AC8Aのみで造られたアルミ単体ピストンの場合、上部および下部の1/2で相当応力の最大値は、それぞれ $\sigma$ 79.6MPaと $\sigma$ 70.4MPaとなっており、補強による応力分布の変化を表すことができた。

このように、本解析技術により、FRMの補強箇所・形状を任意に変化させ、各種エンジンピストンの要求特性を満たす最適な応力分布を検討することが可能と考える。

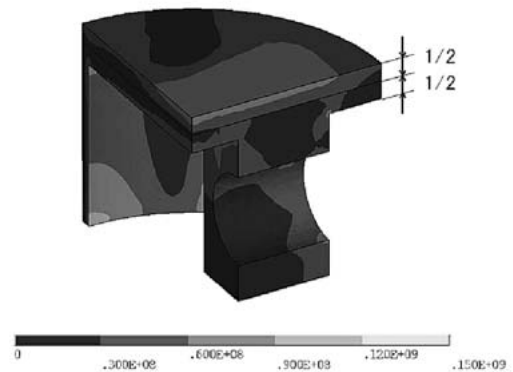


図7 複合材料ピストンの相当応力分布

## 4 結 言

エンジン用ピストンを部分補強するため、金属細線で強化したFRMを試作し、その優れた高温強度・弾性特性を明らかにした。得られた材料データを用い、簡略化したピストンモデルについて有限要素解析を行った。その結果、各部位の相当応力分布の信頼性が向上し、FRMの有効な補強箇所を解析することが可能となった。

## 謝 辞

おわりにあたり、材料評価および解析技術に関してご協力いただいた広島大学大学院工学研究科 機械システム工学専攻 設計工学講座 材料力学研究室 岡本助教授に深く感謝いたします。

## 文 献

- 1) 菅沼克昭：マテリアルインテグレーション，Vol.12 (1999)，No.1，P.23