

## 高エネルギーX線によるアルミニウム鋳造材の内部応力評価の検討 Investigation of Internal Stress Analysis in Aluminum Casting Alloy Using High Energy X-rays

平野 辰巳, 寺田 尚平, 日高 貴志夫  
Tatsumi Hirano, Shohei Terada, Kishio Hidaka

(株)日立製作所日立研究所  
Hitachi Ltd., Hitachi Research Lab.

産業用部材の微小領域での内部応力評価には、高エネルギーX線の利用が適している。しかしアルミニウム鋳造材は熱処理により結晶粒が粗大化し、スポット状の回折線となるため測定が困難となる。そこで、試料揺動法を検討し、4点曲げ試験片の内部応力を精度：5MPa程度で評価できることを検証した。

キーワード： 残留応力、アルミニウム鋳造材、高エネルギーX線、曲げ試験

### 背景と研究目的：

自動車本体の中枢部であるエンジンは、高温・振動・駆動などにより、材料としては極めて過酷な環境下にある。燃焼室近傍では、ピストン、燃料噴射弁、吸気弁、点火プラグ、外壁などから構成される。特にピストンにおいては、鋳造時や熱処理による残留応力、使用環境下での熱応力、摺動面における機械応力などが、耐久性や予寿命に影響を及ぼす。このため、残留応力は重要な評価項目となっている。

一般的に残留応力は、X線や中性子による回折測定で評価できる。しかしながら、ピストンの材料であるアルミニウム鋳造材は、熱処理により結晶粒が粗大化(数100 $\mu\text{m}$ )するため、回折線がスポット状になり、測定が困難となる問題がある。また、加速試験したピストンにおいては、ピストン実機を無切断でそのまま、燃焼面近傍の熱応力変化を把握したいという要望がある。中性子回折では、材料を透過する能力は高いが、ゲージボリュームが $2 \times 2 \times 2 \text{ mm}^3$ 程度と大きい表面近傍の応力測定は困難である[1,2]。

そこで、透過能力が高い、高エネルギーX線による残留応力評価に着目した。高エネルギーX線回折では、ゲージボリュームが $0.5 \times 0.5 \times 0.5 \text{ mm}^3$ 程度と小さくなる一方で、結晶粒の粗大化の問題が顕在化する。そこで、ピストン実機の残留応力測定の第1ステップとして、アルミニウム鋳造材の4点曲げ試験により、内部応力の評価法の検討を目的とした。

### 実験：

SPring-8のBL46XUを利用し、X線エネルギー：72keVで実験した。試料は自動車エンジン用のピストン材料である共晶型アルミニウム-シリコン(12wt%)合金である。入射スリット：0.7mm(H) $\times$ 0.4mm(V)で制限したX線を4点曲げ治具上の試料(50mm $\times$ 16mm $\times$ 5.8mm厚)に照射した(図1(a)参照)。入射X線、回折X線は紙面垂直方向で、散乱ベクトルは試料長手方向(50mm)で、この方向の面間隔の測定に対応する。測定位置は、x方向(試料厚さ5.8mm方向)の3点で、 $x = 1.4$ では引張応力、 $x = 0$ では応力：0、 $x = -1.4$ では圧縮応力となる(図1(b)参照)。また、揺動方向は紙面垂直で、 $\pm 5\text{mm}$ の範囲で試料を揺動(試料長さ16mm方向)させながら、Al(311)の回折X線を検出した。無負荷時のAl(311)の面間隔を基準とし、応力負荷時の面間隔の歪にヤング率(77GPa)を掛けて応力を算出した。

### 結果および考察：

図1(c：揺動無)、(d：揺動有)にX線回折で測定した内部応力と歪ゲージで測定した表面応力との関係を示す。試料を揺動した場合、両者の直線関係は明確で、試料揺動により結晶粒の粗大化の問題が回避できていることがわかる。 $x = 1.4$ では引張応力、 $x = 0$ では応力：0、 $x = -1.4$ で

は圧縮応力となっていることがわかる。 $x = 1.4$  および  $-1.4$  の測定位置は中心と表面間の midpoint であり、その内部応力は表面応力の半分となる。測定した内部応力は歪ゲージによる表面応力のほぼ半分であり、X線回折で測定した内部応力の数値も正しいことが検証できた。また、X線回折による測定誤差は 5MPa 程度であり、高い精度での残留応力測定が可能となった。

**今後の課題：**

試料揺動法により、アルミニウム鋳造材の内部応力が評価できることが検証できた。一方、ピストン実機においては、着目する熱応力測定部位が限定されており、広範囲での揺動法（試料移動および回転）の適用が困難となる。そこで、試料の微小移動と回転により回折強度が最大となる位置での回折線測定が有効となる。これは、ブラッグ条件を満足する単粒子からの回折線の測定に対応する（単粒子回折法）。本手法により、加速試験したピストン実機の予備測定を実施し、1)ピストン実機において透過回折 X線が検出できること、2)表面端部では引張応力であることが確認できた。今後、単粒子回折法による4点曲げ試験と加速試験したピストン実機の本測定を実施する予定である。

**参考文献：**

[1] S. Harjo, K. Aizawa, T. Ito, H. Arima, J. Abe, A. Moriai, K. Sakasai, T. Nakamura, T. Nakatani, T. Iwahashi, and T. Kamiya, *Materials Science Forum* **652** (2010) 99–104.  
 [2] T. Hirano, K. Hidaka, D. Takamatsu, N. Takahasi, K. Shishido, M. Sasaki, and Y. Kawashima, *6th International Conference on Mechanical Stress Evaluation by Neutrons and Synchrotron Radiation (MECA SENS VI)*, CT24.

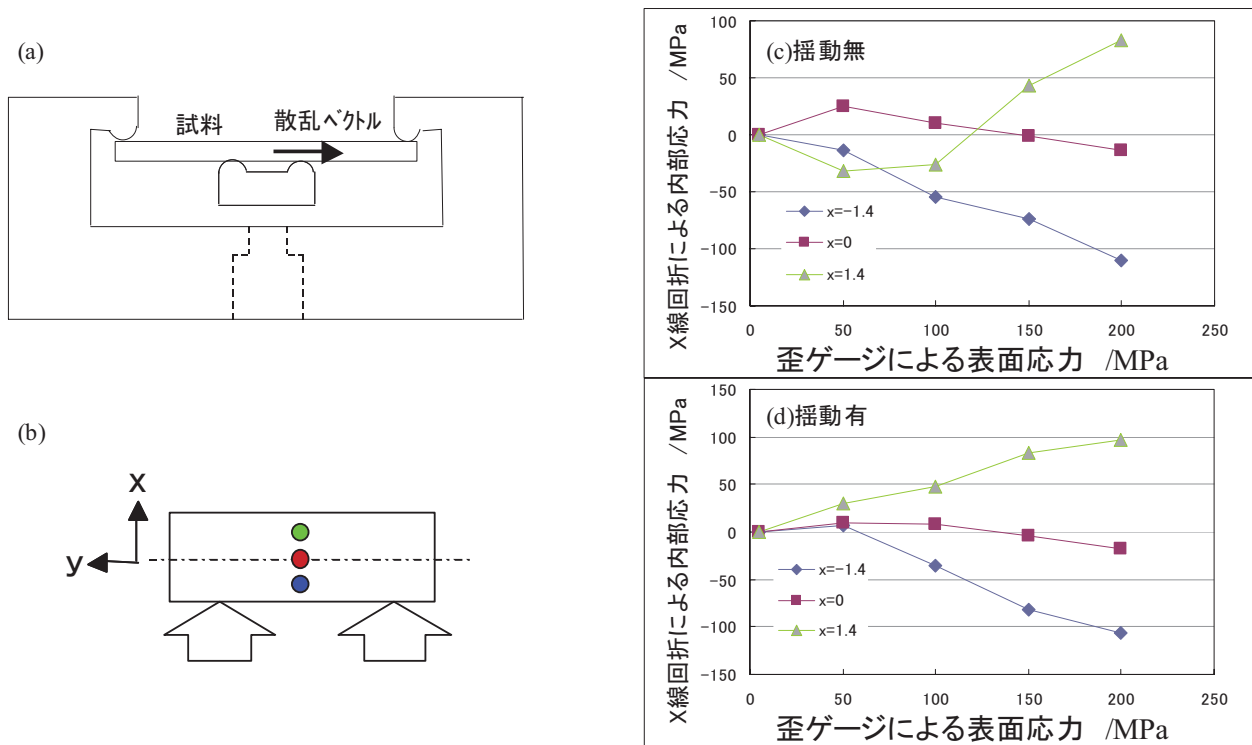


図1 4点曲げ治具(a)、測定位置(b)の模式図と測定結果((c):揺動無、(d):揺動有での歪ゲージによる表面応力に対するX線回折による内部応力)。