

# Fe-Mn-Si-Cr形状記憶合金切削屑を利用した スマート複合材料の開発

若槻 哲平\*・佐藤 尚\*<sup>2</sup>・渡辺 義見\*<sup>2</sup>・丸山 忠克\*<sup>3</sup>

Development of Fe-Mn-Si-Cr Shape Memory Alloy Machining Chips Reinforced Smart Composite

Tepei WAKATSUKI, Hisashi SATO, Yoshimi WATANABE and Tadakatsu MARUYAMA

**Synopsis :** Fe-Mn-Si-Cr shape memory alloy (SMA) machining chips reinforced smart composites are developed. The smart composites consist of SMA machining chips and plaster matrix. Because SMA waste machining chips are used as its reinforcements, the smart material can be treated as ecomaterial. In this study, fabrication method and mechanical properties of the smart composite, which can be used in architectural and civil engineering applications, are reported. Fe-Mn-Si-Cr SMA machining chips are subjected to pretensile strain at room temperature, and are embedded into plaster matrix. The Fe-Mn-Si-Cr SMA machining chips/plaster composites are then heated up to 250°C (above  $A_s$ ) compressive residual stress in the matrix. Three-point bending test is performed for the mechanical property characterization. To discuss fracture behavior of Fe-Mn-Si-Cr SMA machining chips/plaster composites, Fe-Mn-Si-Cr SMA coils/plaster composites using SMA fibers are also fabricated and mechanical tested as model material. SMA machining chips have the property of shape recovery regardless of its heavy deformation due to machining. Therefore, SMA machining chips are available for reinforcement material as well as SMA fiber. It is found that SMA machining chips with prestrain improve the bending strength of composite. By using the Fe-Mn-Si-Cr SMA machining chips for the reinforcement of the SMA composite, one can obtain materials for practical engineering applications at low cost.

**Key words:** smart material; Fe-Mn-Si-Cr shape memory alloy (SMA); machining chip; coil; plaster; residual stress; three-point bending test.

## 1. 緒言

近年、省資源や省エネルギーなど、環境問題に対する関心が様々な分野で高まっている。特に、建築土木分野において、耐環境性と環境調和性を兼ね備えた材料を製造することは、非常に大きな課題である。この課題を解決するひとつの構造材料としてスマート材料<sup>1,2)</sup>が注目されている。スマート材料の一例として、き裂を自己認知し、かつ修復する特性を持ち、さらに予測不可能な突発的な原因に起因する局所的な応力集中が生じた場合、その部位を自ら強化するような特性を持ち合わせた材料が有る。これにより、今まで必要であった人為的な修復や補修が不必要となり、メンテナンスコスト削減につながる。それゆえ、建築土木分野において、突発的な事故防止や耐久性向上の目的で、ヘルスマニタリングを兼ね備えたスマート材料の研究開発が盛んに進められている<sup>3,4)</sup>。

ところで、材料内部に発生する引張の残留応力は、機械加工や熱処理後における部品寸法の狂い、さらには応力腐食割れなどの原因のひとつとして認識されている<sup>5)</sup>。これに対して、材料中の圧縮残留応力は、その分布によって材

料の機械的性質を向上させる<sup>6)</sup>。すなわち、材料中の残留応力分布を自在に制御することができれば、機械的性質の向上はもちろん、センサ機能などの特性を付与したスマート材料を製造することが可能である。この目的のため、形状記憶合金(以下SMA)を材料中に埋め込み、形状記憶効果によって内部残留応力を制御するという考えが生まれ、近年盛んに研究されている。過去の研究において、AlやMg母材、高分子樹脂およびモルタル母材中にSMAを埋め込み、複合材料のき裂修復機能や制振性および機械的性質を向上させたSMA複合材料が報告されている<sup>7-17)</sup>。これら研究の多くは、Ni-Ti系SMAを用いている。しかしながら、Ni-Ti系SMAは良好な形状記憶効果を有するが、材料自身のコストが高く、建築土木などの大型構造材料への応用に不向きである。

Ni-Ti系SMAと比べ約10分の1のコストであるFe-Mn-Si系SMA<sup>18,19)</sup>の研究も積極的に行われている。このSMAの加工性は良好であるため、構造材料として優れている。今までに、パイプの接合継手やクレーンレールの継目板などとして実用化されてきている<sup>20)</sup>。Fig. 1にFe-Mn-Si-Cr SMAのパイプの接合継手への応用例を示す。

平成18年4月7日受付 平成18年5月16日受理 (Received on Apr. 7, 2006; Accepted on May 16, 2006)

\* 名古屋工業大学大学院生 (Graduate Student, Nagoya Institute of Technology, Gokiso-cho Showa-ku Nagoya 466-8555)

\*<sup>2</sup> 名古屋工業大学大学院工学研究科おもひ領域 (Omohi College, Nagoya Institute of Technology)

\*<sup>3</sup> 淡路マテリア (株) (Awaji Materia Corp.)

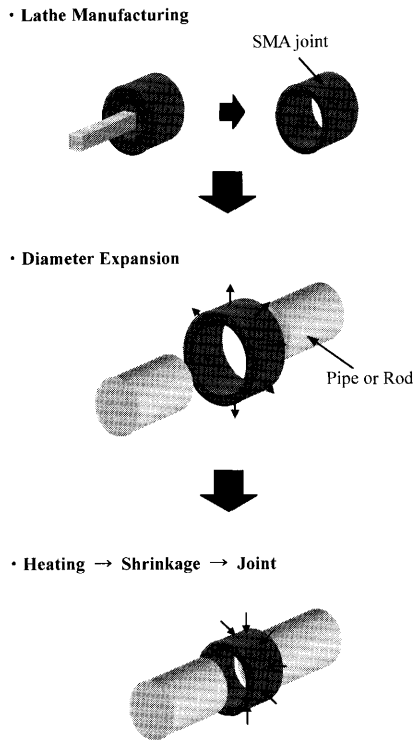


Fig. 1. Schematic illustrations showing SMA joint.

SMAを継手として用いると、溶接など施工現場での加工が不要となり、結合する鋼管に必要な鋼管端部の予備加工も事前に工場内で済ませるため、現場での接続時間は溶接に比べて著しく短縮する。このFe-Mn-Si-Cr SMA接合継手は、その施工の容易さと利便性の面から、今後さらなる実用化が期待されている。しかしながら、Fig. 1に示すように、パイプ内面の切削加工が不可欠であり、このとき、大量のFe-Mn-Si-Cr SMA切削屑が発生してしまう。

本研究では、Fe-Mn-Si-Cr SMA継手製造時に発生する切削屑に注目する。過去の研究において、我々はFe-Mn-Si-Cr SMA繊維/プラスタ複合材料を作製し、wavy状SMA繊維強化複合材料の機械的性質が形状回復特性によって向上することを見いだした<sup>21-23</sup>)。つまり、wavy状の形状を有する切削屑が複合材料の強化材として利用可能であれば、廃材利用という観点から環境問題の解決や省エネルギーにつながり、環境調和型材料としての利用が期待できる。

本研究では、切削屑の中でもコイル形状の切削屑を利用し、その形状回復特性を測定し、強化材としての有用性を調査した。そして、コイル状SMA切削屑/プラスタ複合材料を作製し、その機械的性質を3点曲げ試験によって評価した。SMA切削屑は形状が複雑であるため、複合材料の機械的性質を評価する場合、影響を受ける要因が多くなってしまふ。そこで、コイル状SMA切削屑複合材料のモデル材として、直径1mmのSMA繊維をコイル状に加工し強化材とした複合材料も作製し、機械的性質と破壊挙動を調査し、切削屑複合材料のそれらと比較した。

Table 1. Chemical composition of Fe-Mn-Si-Cr SMA (mass%).

Mn	Si	Cr	P	N	C	Fe
27.80	5.97	4.93	0.008	0.004	0.026	Bal.

Table 2. Mechanical properties of Fe-27.80Mn-5.97Si-4.93Cr SMA (mass%).

Yield Stress	MPa	334
Tensile Stress	MPa	760
Elongation	%	27
Young Modulus	GPa	170
Poisson ratio		0.359
$M_s$	°C	-20~20
$A_f$	°C	130~185

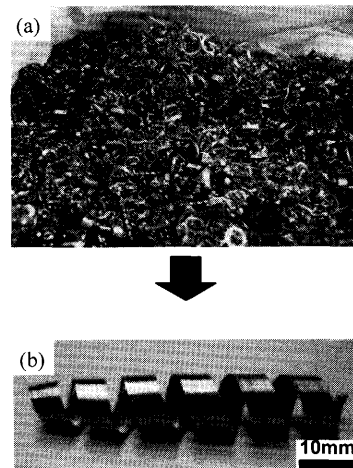


Fig. 2. (a) Fe-Mn-Si-Cr shape memory alloy machining chips and (b) a chip used in the present experiment.

## 2. 実験方法

### 2.1 Fe-Mn-Si-Cr SMA切削屑の形状回復特性

本実験では、Fe-Mn-Si-Cr SMAパイプ接合継手製造時に発生する切削屑を複合材料の強化材として利用した。SMA切削屑は、すべて同一組成のパイプ接合継手製造時に発生したものを利用した。Table 1に本実験で用いたFe-Mn-Si-Cr SMA切削屑の組成を、Table 2にこの組成を有するFe-Mn-Si-Cr SMAの機械的性質を示す。

比較的形状に近いコイル状SMA切削屑(直径約4mm、長さ約30mm)を選び出した。Fig. 2は、選び出したコイル状SMA切削屑を示す。そして、マッフル炉にて空气中950°Cで10分間保持し、形状記憶処理を施した試料と無熱処理の試料を用意した。これは、切削加工時の加工熱が形状回復特性に与える影響を調べるためである。その後、コイル状SMA切削屑を長手方向に対し10および20%の巨視的予ひずみを与え、100°Cから350°Cまで50°Cおきに加熱し、各温度における形状回復後の長さを測定し、形状回復

率を求めた。測定したSMA切削屑の形状回復率より、切削屑の形容回復特性と形状記憶処理の必要性について評価した。

## 2.2 SMA切削屑/プラスタ複合材料の作製

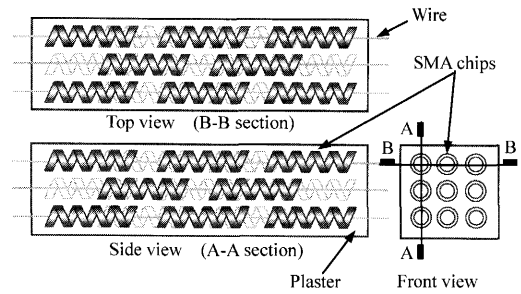
前節で選び出されたコイル状Fe-Mn-Si-Cr SMA切削屑に対して、切削屑長手方向へ10%程度の巨視的な予ひずみを与えた。予ひずみを与えたコイル状SMA切削屑を試料型の長手方向に渡した極細糸（直径0.09mm）により均一に配置した試料をSpecimen A (Fig. 3(a))とし、隣り合う切削屑の隙間にさらに一回り小さい切削屑を配置させた試料をSpecimen B (Fig. 3(b))とした。強化材であるSMA切削屑の体積分率は約3 vol%とし、切削屑の比重と重量から算出して1つの試料につき25~30本程度使用した。また、後で述べるが、本実験で使用した糸は極めて細いため、曲げ強度に及ぼす影響は無視できる。SMA切削屑を極細い糸で配置後、型にプラスタを流し込んだ。Fig. 4は作製した試料の模式図を示す。試料の大きさは、JIS R 5201セメントの物理試験方法に基づき20mm×20mm×80mmとした<sup>24)</sup>。プラスタは、室温20°C、湿度58%、分量比プラスタ：水=1:0.7、攪拌速度160rpmの条件にて作製した。試料を室温20°C、湿度58%の一定条件の恒温室で2日間、さらに40°Cの乾燥炉で2時間乾燥させた。試料乾燥後、強化材であるSMA切削屑の形状を回復させるため、250°Cのマッフル炉で20分間加熱した。加熱温度が高すぎるとプラスタの強度が低下するため、本実験では250°Cを形状回復温度とした。また、比較材として、切削屑に予ひずみを与えずに作製した試料およびプラスタ単体で作製した試料を同様の条件にて作製した。作製した試料を用いて、万能引張圧縮試験機にて3点曲げ試験を行い、曲げ強度を測定した。3点曲げ試験の条件は、支点間距離60mmのもとでクロスヘッドスピード2mm/minとした。

なお、Fe-Mn-Si系SMAはトレーニング効果により形状記憶効果が向上する<sup>25)</sup>。しかし、本研究では、プロセスの簡易化のためトレーニング処理は施さなかった。

## 2.3 SMA切削屑/プラスタ複合材料のモデル材の作製

直径1mmのSMA繊維を外径4.5mm、内径2.5mmのコイル状に加工し、形状記憶処理を施した。このコイル状SMA繊維に巨視的な予ひずみを約10%付与し、プラスタへ等間隔に埋め込んだ。コイル状に加工したSMA繊維を強化材としたモデル材の繊維配置をFig. 5に示す。Specimen Aのモデル材として長さ約80mmのコイル状SMA繊維(Fig. 5(a))を配置した試料（以後、Model A）を、Specimen Bのモデル材として長さ約2.5mmのコイル(Fig. 5(b))を試料長手方向に均一に配置した試料（以後、Model B）をそれぞれ用意した。Model AおよびBともに、SMA繊維の体積分率は、SMA繊維の比重と重量より算出し、約3 vol%となるようにした。その後、SMA切削屑複合材料と同様の方法で、機械的性質を調査した。

(a) Specimen A



(b) Specimen B

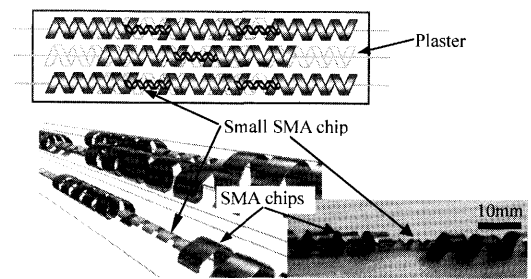


Fig. 3. Arrangements of SMA machining chips in (a) Specimen A and (b) Specimen B.

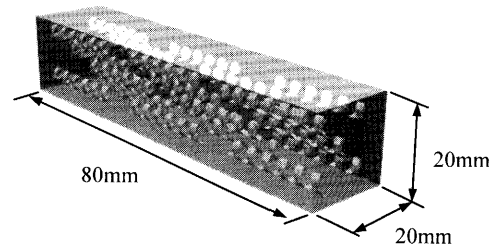
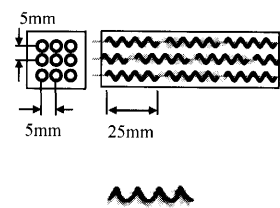


Fig. 4. A schematic illustration showing machining chips reinforced composite material.

(a) Model A



(b) Model B

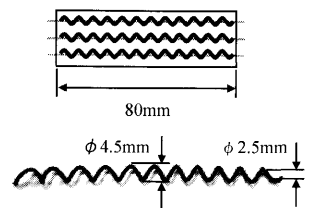


Fig. 5. Arrangement of coil shape SMA fibers in (a) Model A and (b) Model B.

## 3. 実験結果および考察

### 3.1 コイル状SMA切削屑の形状回復特性

Fig. 6にSMA切削屑の巨視的な形状回復率を示す。図に示すように、250°CでのSMA切削屑の形状回復率は約30~40%であった。これは、 $\phi 1$ mmのSMA繊維の形状回復率とほぼ同じ値である。この様に、SMA切削屑でも複合材料の強化材として十分使用可能であると考えられる。また、形状記憶処理を施したSMA切削屑の形状回復率は、

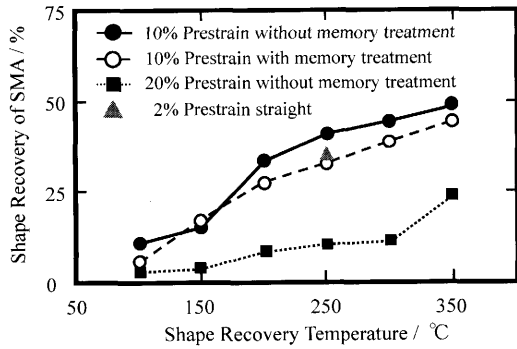


Fig. 6. Macroscopic shape recovery of SMA machining chips.

処理を施していない試料と比べて、若干低い程度であった。これより、SMA切削屑は切削加工熱によって形状記憶がなされており、その後の形状記憶処理はSMA切削屑の形状回復特性に大きな影響を与えないことがわかる。さらに、SMA切削屑に20%の予ひずみ与えた試料の形状回復率は、他の試料に比べ低い値を示した。これより、10%程度の予ひずみを与えれば、コイル状SMA切削屑でも十分大きな形状回復率を示すことが見いだされた。

### 3.2 コイル状SMA切削屑/プラスタ複合材料の機械的性質

Fig. 7に各試料の荷重-クロスヘッド変位曲線を示す。これより、Specimen AおよびSpecimen Bともに、SMA切削屑の形状回復効果による強度向上が確認できる。また、切削屑固定用に用いた極細繊維のみを埋め込んだ試料とプラスタ単体の曲げ強度を比較すると、両者には大きな差異が見られなかった。

Fig. 8はSpecimen AおよびSpecimen Bの曲げ強度と予ひずみとの関係を示す。図より、Specimen Aでは、SMA切削屑の形状回復特性によって曲げ強度が約1.2倍向上することがわかる。さらに、Specimen Bでは、プラスタ単体と比べて約1.6倍の曲げ強度を有する。つまり、SMA切削屑の形状回復特性が母材強化に有効に作用することがわかる。

しかし、Fig. 7およびFig. 8からも明らかなように、Specimen Aの曲げ強度は、プラスタ単体より低くなる結果であった。Fig. 9は曲げ試験後の試料写真を示している。Fig. 9より、曲げ試験後のSpecimen Aでは、クラックが試料中央部に集中していることがわかる。ここには示さないが、SMA切削屑がクラックから剥き出しになった状態の試料もあった。これより、Specimen Aでは、プラスタ母材と鋭利な形状を持つSMA切削屑端部に応力集中が発生し、クラックが導入されやすい状態にあったものと考えられる。それゆえ、Fig. 7のSpecimen Aの荷重-変位曲線が急な右上がりにならず、プラスタ単体より強度が低下した。一方、Specimen Bのクラック分布は、Specimen Aに比べて分散していた。これは、SMA切削屑同士の隙間を一回り小さ

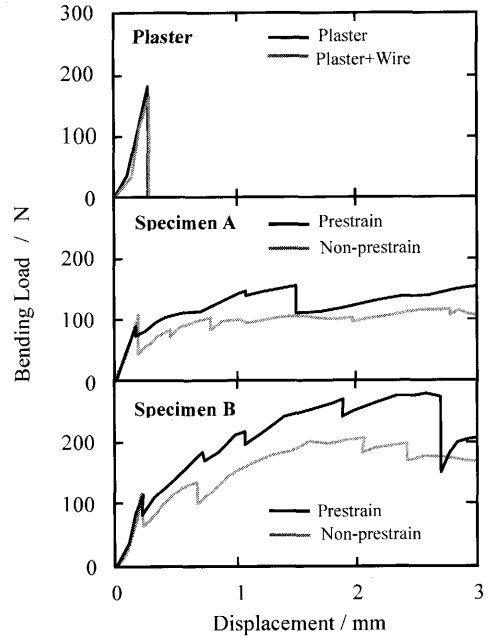


Fig. 7. Load-displacement curves of SMA chips composites.

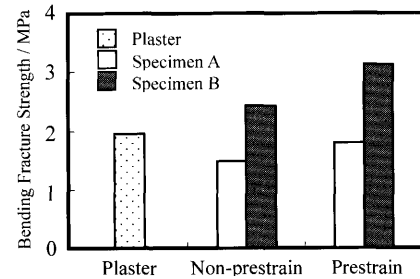


Fig. 8. Bending fracture strength of SMA machining chips reinforced composite materials.

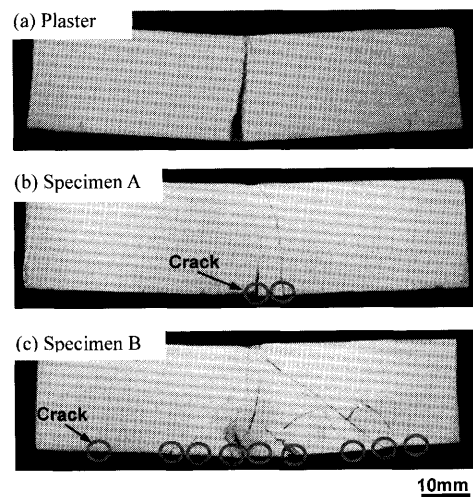


Fig. 9. Fracture behavior of the each SMA machining chips reinforced composite materials.

な切削屑で補強することにより、プラスタと切削屑端部での応力集中が緩和されたためと考えられる。この応力集中の緩和により、クラックが発生してもその進展を抑制し、

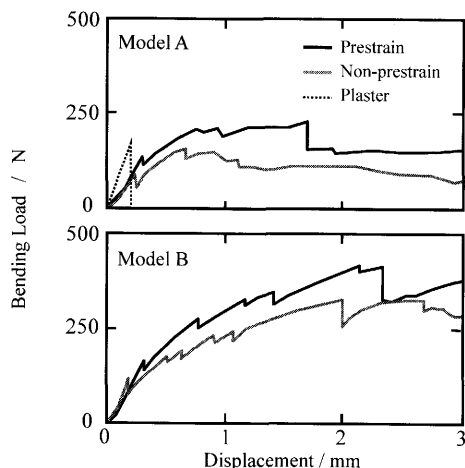


Fig. 10. Load-displacement curves of model specimens.

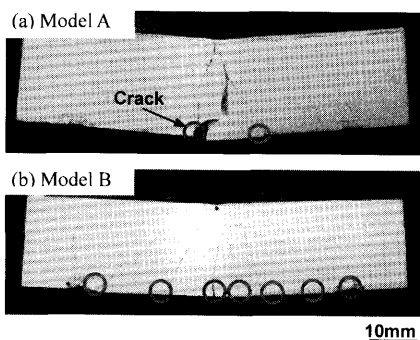


Fig. 11. Fracture behavior of specimen of (a) Model A and (b) Model B.

結果として荷重-変位曲線が急な右上がりの傾向を示す。

### 3.3 コイル状 SMA 切削屑/プラスタ複合材料とモデル材の比較

Fig.10にモデル材の曲げ荷重-変位曲線を示す。これより、両試料とも形状記憶合金の形状回復特性によって複合材料が強化されていることが確認できる。また、短コイル試料では、荷重-変位曲線が平坦であり、長コイル試料では右上がりの傾向を示す。このモデル材の曲げ試験結果は、Fig. 7に示されている Specimen A および Specimen B の結果とほぼ同じ傾向を示している。Fig.11は、曲げ試験後のモデル材の写真である。これより、短コイル試料ではクラックが集中(Fig.11(a))しているのに対して、長コイル試料ではクラックの分散が見られた(Fig.11(b))。この様に、Fig. 9に示した SMA 切削屑複合材料の曲げ試験後の試料写真と同じ傾向を呈している。

本実験により、SMA 切削屑複合材料とモデル材の破壊挙動が同じであることが見いだされた。それゆえ、コイル状 SMA 切削屑の複雑な形状が機械的性質に与える影響は小さく、切削屑同士の隙間に発生する応力集中が機械的性質を主に支配すると結論できる。これは、切削屑の配置や分布状態が、複合材料の機械的性質に大きく影響を与える

ことを意味している。

## 4. 結論

本研究では、Fe-Mn-Si-Cr SMAの切削屑を複合材料の強化材として使用したスマート複合材料について報告した。SMA切削屑は、切削という加工をうけているが、本来の形状回復特性を損なっていない。そのため、SMA切削屑の形状回復特性を応用することが可能であることを見いだした。予ひずみを与えたSMA切削屑を強化材としてプラスタ母材へ埋め込んだ複合材料では、曲げ強度が向上する。

本研究では、本来廃材となるSMA切削屑を利用した新しい材料強化法および環境調和型材料として、新しい材料設計の形を示すことができた。今後、さらなる研究を進めることで、安価で環境を考慮したスマート複合材料材料として応用されることが期待できる。

本研究は日本鉄鋼協会鉄鋼研究振興助成および文部科学省21世紀COEプログラム「先進ファイバー工学研究教育拠点」によって行われた。心より感謝いたします。

## 文 献

- 1) Y.Furuya: *Materia Jpn.*, **32** (1993), 616.
- 2) S.Shimamoto: *Sci. Machine*, **56** (2004), 861.
- 3) M.Nakamura: *Trans. SICE*, **41** (2002), 819.
- 4) A.Todoroki: *Sci. Machine*, **56** (2004), 227.
- 5) K.Wakashima, Y.Suzuki and S.Umekawa: *J. Comp. Mater.*, **13** (1979), 288.
- 6) 米谷 茂: 残留応力の発生と対策, 養賢堂, (1975), 1.
- 7) 島本 聡, 古屋泰文, 黒沢信行, 阿部博之: 日本機会学会論文集A編, **67** (2001), 110.
- 8) G.A.Porter, P.K.Liaw, T.N.Tiegs and K.H.Wu: *Mater. Sci. Eng. A*, **A314** (2001), 186.
- 9) Y.Furuya, A.Sasaki and M.Taya: *Mater. Trans., JIM*, **34** (1993), 224.
- 10) K.Mizuuchi, K.Hamada, M.Sugioka, M.Itami, M.Fukusumi and M.Kawahara: *Mater. Sci. Eng. A*, **A367** (2004), 343.
- 11) G.Murasawa and K.Tohgo: *Trans MRS-J*, **26** (2001), 163.
- 12) Y.Zheng, J.Schrooten and L.Cui: *Intermetallics*, **13** (2005), 305.
- 13) A.Shimamoto, H.Ohkawara and F.Nogata: *Eng. Fract. Mech.*, **71** (2004), 737.
- 14) K.-t.Lau: *Mater. Des.*, **23** (2002), 741.
- 15) H.Hosoda, S.Takeuchi, T.Inamura and K.Wakashima: *Sci. Technol. Adv. Mater.*, **5** (2004), 503.
- 16) E.Umezaki: *Mater. Sci. Eng. A*, **A285** (2000), 363.
- 17) M.Tanaka and S.Motoki: *Mater. Technol.*, **52** (2004), 86.
- 18) T.Kobayashi, H.Toda and T.Hashizume: *Trans MRS-J*, **26** (2001), 247.
- 19) A.Sato, E.Chishima, K.Soma and T.Mori: *Acta Metall.*, **30** (1982), 1177.
- 20) H.Otsuka, H.Tanahashi, T.Maruyama, M.Murakami and H.Yamada: *Materia Jpn.*, **37** (1998), 283.
- 21) Y.Watanabe, E.Miyazaki and H.Okada: *Mater. Trans.*, **43** (2002), 974.
- 22) Y.Watanabe, E.Miyazaki and H.Okada: *Trans. MRS-J*, **28** (2003), 671.
- 23) T.Wakatsuki, Y.Watanabe and H.Okada: *Mater. Sci. Forum*, **475** (2005), 2063.
- 24) 石膏石灰学会編: 石膏石灰ハンドブック, 技報堂, 東京, (1972), 639.
- 25) Y.Watanabe, Y.Mori and A.Sato: *J. Mater. Sci.*, **28** (1993), 1509.