

低コストで高性能な鉄系形状記憶合金の開発に成功

平成14年7月31日
独立行政法人物質・材料研究機構

1. 概要

独立行政法人物質・材料研究機構（略称NIMS、理事長：岸 輝雄）材料研究所機能融合材料グループの菊池武丕児（たけひこ）主席研究員、梶原節夫客員研究員（東京理科大学非常勤講師）らのグループは、低コストで高い機能特性を持つ鉄系形状記憶合金の開発に成功した。

この合金は、パイプの締結部材として応用可能で、家庭用水道配管から石油輸送管にいたる広範囲の締結に適用可能な形状記憶特性を持ち、特に化学工場などの配管やオイルブランチに適用されれば、産業界において大きな波及効果をもたらすと考えられる。また、トンネル工事や地下鉄工事の支保工材として、パイプの継ぎ手など大型の締結部材への応用が期待される。

2. 研究の背景

形状記憶合金は、省エネルギーの一環として従来の溶接法によるパイプ締結の代わりに極めて簡単に施工できる部材として、Ti-Ni系形状記憶合金が米国において軍用機などに応用されている。しかしながら、Ti-Ni系形状記憶合金は非常に高価なため、民生用に使用されることがなかった。

廉価な形状記憶合金としては鉄系の形状記憶合金であるFe-Mn-Si系形状記憶合金がある。これは約20年前に日本で発明されたもので、低コストで加工性、切削性、溶接性にも優れているが、形状記憶特性がTi-Ni系形状記憶合金に比べると著しく劣る。これを改善するために、室温で数%の変形を加えた後、600℃近傍まで加熱して形状を元に戻す処理を数回繰り返す“トレーニング”¹⁾という特殊な加工熱処理法（図1）が考案されているが、工程が多く、コストがかさむのと、一定の形状をしたものでなければ適用できないなどの問題がある。そのため、Ti-Ni系形状記憶合金に匹敵するような形状記憶特性を持つ廉価な鉄系形状記憶合金の開発が産業界において強く望まれていた。

3. 研究の成果

NIMSでは、一昨年、従来のFe-Mn-Si系形状記憶合金に微量のNbとCを添加し、炭化物（NbC）を時効²⁾析出させることによって形状記憶特性が著しく向上することを発見したが、さらに、この合金に時効熱処理する前に温間加工を施すことにより、形状記憶特性がさらに顕著に向上し、パイプ締結部材として十分適用できるほど形状記憶特性の改善がなされることを明らかにした。

形状記憶合金によるパイプ締結の原理は図2のとおりであるが、パイプ締結部材として適用されるためには、材料に加えた変形量の何パーセントが加熱によって回復するか（形状回復率）ということのみならず、パイプを締め付けた状態で保持できる力（形状回復力）が大きいことが要求される。NbとCを添加したFe-Mn-Si系形状記憶合金に、時効熱処理前

に温間加工を施すことで形状記憶特性がどの程度改善されるかを図3及び図4に示す。実用的に必要とされる変形量は約4%であるが、図3に示すように温間圧延(14%及び30%)を施した場合には、トレーニング熱処理をした場合と同等の95%という高い形状回復率が得られた。また、実的に必要とされる形状回復力は、回復歪み₃がゼロのとき200MPa以上とされているが、図4に示すように温間圧延を施した場合には、この条件を遙かに超えており、30%圧延の場合は回復歪みが3%のときでも200MPaの形状回復力を示すほどの特性を示す。

このように、時効熱処理前に温間加工を施すことによって形状記憶特性が大幅に向上する要因として、次の3点が挙げられる。

1) 析出するNbC炭化物の大きさが無加工の場合には50-100nmであるが、加工を施した場合は5-10nmと一桁小さくなる。

2) 加工を施した場合は析出物が均一に分布している。しかも、析出物のまわりには大きな弾性歪みが存在している。

3) 上記1)及び2)から、変形によって生じるミクロ組織としては、3-5nm幅のきわめて薄い板状マルテンサイトが均一に分布している状態が得られる。

上記はFe-28Mn-6Si-5Cr-0.53Nb-0.06C合金の場合であるが、Mn量を減らしNiを加えた耐食性のよい合金についてもほぼ同様の結果が得られた。さらに、実的に有利な特徴としては、NbとCの添加量は時効して析出するNbCの量が0.5-1.5%の範囲ならば同じ効果が得られること、及び時効時間が10分程度と短時間でよいことが挙げられる。

4. 実用が期待される分野と波及効果

本研究成果がもっとも効果的に使われる例として、パイプ締結部材としての応用が考えられる。形状記憶合金の継ぎ手としては、化学工場などの配管やオイルプラント、トンネル工事や地下鉄工事の際における支保工材としての利用が考えられる。この場合、狭い現場で大きなパイプの締結をしなければならないため、溶接法に比べ、安全性と施工のスピードにおいて形状記憶合金の継ぎ手ははるかに優れている。今後、人口の都市集中化に伴いこの分野への大幅な需要の増大が見込まれる。

現在ある形状記憶合金のうち、形状記憶特性が最も優れているTi-Ni系形状記憶合金は、形状記憶効果を担うマルテンサイト変態⁴⁾の正変態点(Ms)⁵⁾と逆変態⁶⁾終了温度(Af)⁷⁾との差が小さいため、作業しやすい室温付近ではMs、Af温度を設定できず、液体窒素温度付近にMsをもつ組成の合金を用い、締結作業は液体窒素中で行わなければならない。そのために、多大な施工コストがかかるだけでなく、パイプの径や接合可能場所などに著しい制約が生じるなど、パイプ継ぎ手としての適用には決定的な問題がある。これに対して今回開発した鉄系形状記憶合金は、室温でパイプ締結を行うことができ、Af温度以上に加熱してから室温に戻しても大きな回復力を維持しているという特長がある。さらに、素材の値段の違いも含めた締結部品のコストについては、今回開発したものはTi-Ni系形状記憶合金より少なくとも一桁、場合によっては二桁低いと推定される。

用語説明

1) トレーニング

形状記憶効果を向上させるために、試料に変形と加熱を繰り返し加え、変形とその形状回復を反復させることにより形状回復率を上げることをトレーニングという。物理的現象はマルテンサイト変態と逆変態とを繰り返すことである。

2) 時効

等温保持によって、合金中に新しい安定相を形成させることを時効という。

3) 回復歪み

形状記憶合金では試料に加えた歪みが加熱によって回復するが、回復する歪みの量を試料の長さに対して表したものを回復歪みという。通常%で示す。

4) マルテンサイト変態

合金の相変態が原子の拡散を伴わず起こることをマルテンサイト変態という。一般的には温度を高温から急冷した場合に起こるが、応力を加えた場合にもマルテンサイト変態が生じる。これを応力誘起マルテンサイトという。

5) 正変態点 (M_s)

試料に応力をかけずに冷却したとき、マルテンサイト変態が起こり始める温度。

6) マルテンサイトの逆変態

マルテンサイト変態によって生じた相を加熱して元の結晶構造に戻すことをいい、その際原子の拡散は伴わない。

7) 終了温度 (A_f)

マルテンサイト変態した試料を加熱したとき、逆変態が終了する温度。

問い合わせ先

独立行政法人物質・材料研究機構

広報・支援室

〒305-0047 茨城県つくば市千現一丁目2番1号

TEL:0298-59-2026 FAX:0298-59-2017

研究内容に関すること

独立行政法人物質・材料研究機構

材料研究所 機能融合材料グループ

主席研究員 菊池武丕児(きくち たけひこ) TEL:0298-59-2451

客員研究員 梶原 節夫(かじわら せつお) TEL:0298-59-2424

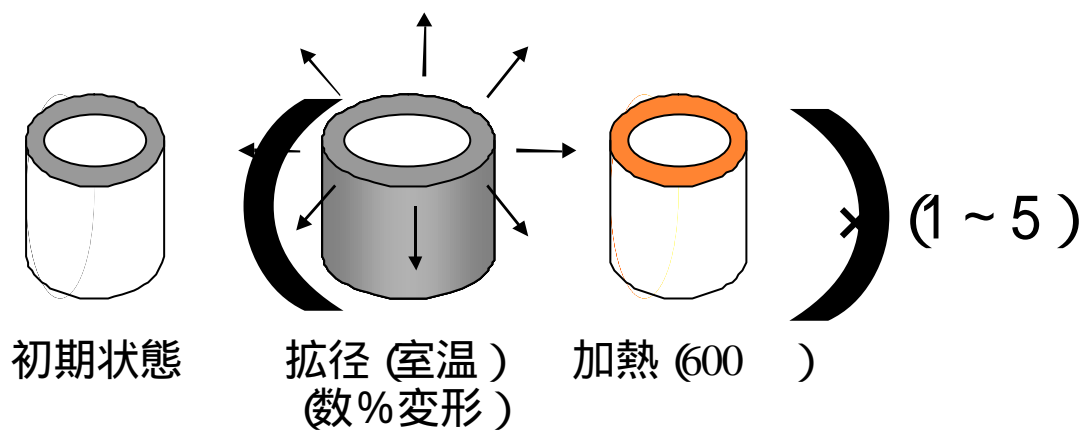


図 1 . 形状記憶合金継ぎ手のトレーニング (1~ 5回行う)

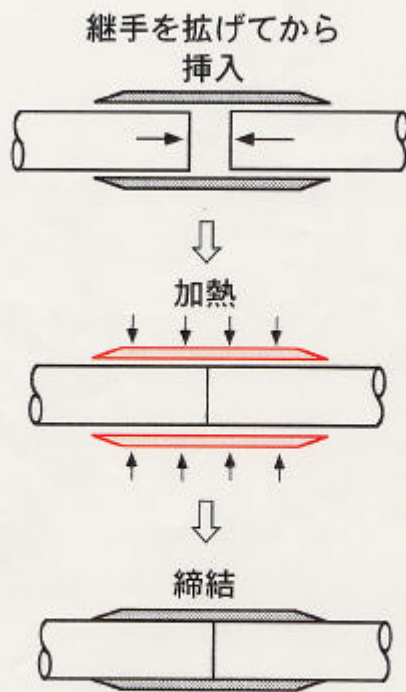


図 2. 形状記憶合金によるパイプ締結の原理

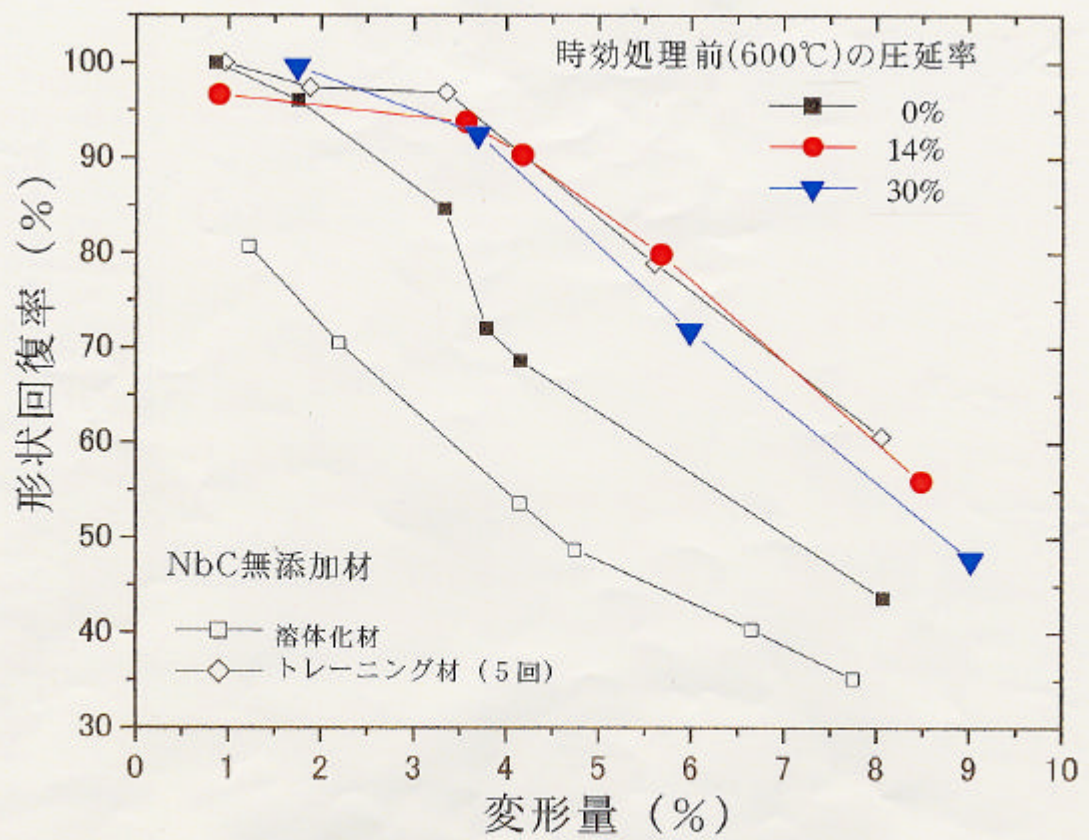


図3. 変形量と形状回復率との関係：時効処理のみの場合と14, 30%温間圧延後時効処理した場合の比較を示す。参考のためにNbC無添加の試料の形状回復率も示す。

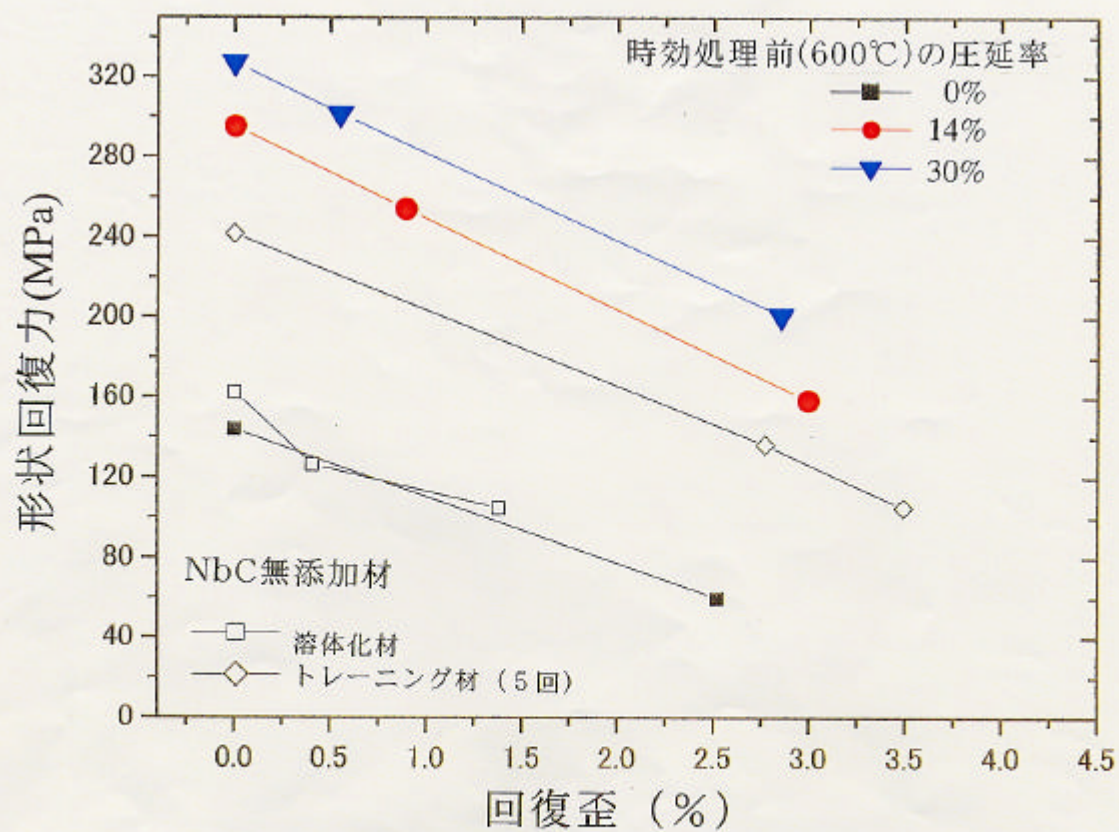


図4. 形状回復力と回復歪との関係：時効処理のみの場合と14、30%温間圧延後時効処理した場合の比較を示す。参考のためにNbC無添加の試料の形状回復力も示す。