

特集2

形状記憶合金がひらく新技術

新たな熱処理技術によって生まれた優れた銅系合金の実用化に挑む

メガネのフレームからロボットの人工筋肉まで、幅広い実用化が進む形状記憶合金。東北大学大学院工学研究科の貝沼亮介教授らのグループは、建築部材にも利用できるような大型の形状記憶合金の開発に成功し、今年9月に発表した。地震で大きな揺れを受けても変形しにくい強靱な建物も、もはや遠い夢ではない。

秘密は結晶にあり

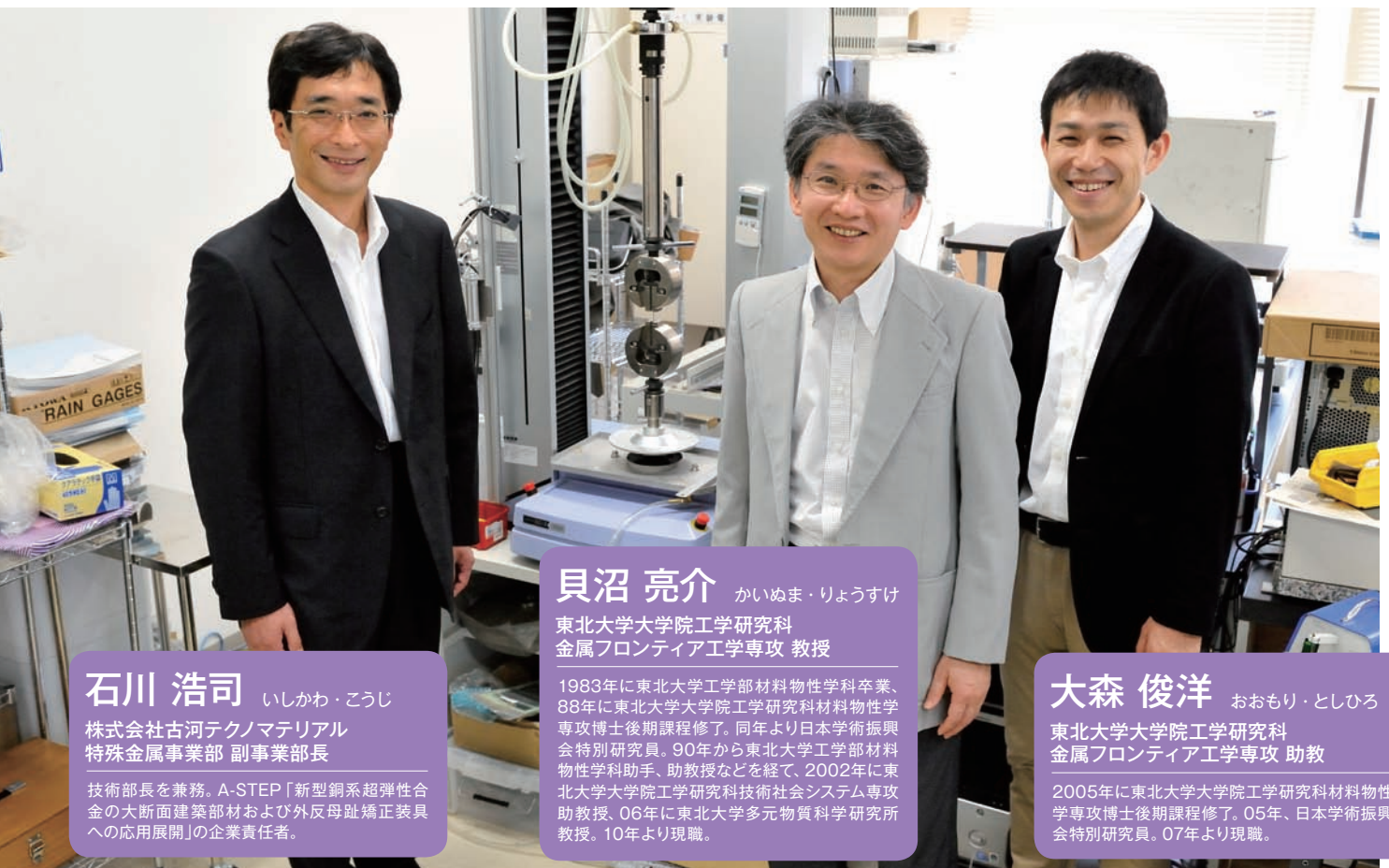
普段はあまり意識をしていないが、私たちはたくさんの合金とともに暮らしている。鉄や銅、アルミニウムなど、いくつもの金属を混ぜ合わせた合金は、錆に強いステンレスや軽くて強度の高いジュラルミンなどのように、優れた特性をもっているためだ。形状記憶合金もその一種だが、他の合金にはない特殊な性質をもっている。形状記憶効果と超弾性効果だ。

金属のミクロの構造は、原子が規則的に並んだジャングルジムのような「結晶格子」でつくられている。一般の金属に力を

加えると、この結晶格子が断層のようにずれる「滑り」が発生して変形して元に戻らない（塑性変形。p.9左上図）。ところが形状記憶合金は、あたかもバントグラフが動くように、格子の形が変わるだけだ。力を抜くと、ある温度以上で格子の形を最初の状態に戻すことができる（p.9右上図）。これが形状記憶効果だ。また、その時の温度を「変態点」という。もし変態点以上の温度で扱うことができれば、力を加えるとゴムのようにしなやかに曲がっていき、手を放せばすぐに元の状態に戻る不思議な現象を目にすることができる。もちろん一般的な金属もこのよう

な弾性を少しもつが、通常は1%以上変形すると曲がったままになってしまう。ところが、形状記憶合金の場合は、7%くらい変形させても元に戻るのだ。「超」弾性効果と呼ばれているゆえんである。

形状記憶合金は1951年にアメリカで開発され、1960年代に室温付近に変態点をもつニッケル・チタン合金が発見されたことで、世界中に広まった。現在は、ブラジャーのワイヤー、メガネのフレーム、歯列矯正ワイヤー、カテーテルなど幅広い場所で使われている。かつて携帯電話に備わっていたアンテナも、形状記憶合金だ。だが、ほとんどが細いワイヤー



石川 浩司 いしかわ・こうじ

株式会社古河テクノマテリアル
特殊金属事業部 副事業部長

技術部長を兼務。A-STEP「新型銅系超弾性合金の大断面建築部材および外反母趾矯正器具への応用展開」の企業責任者。

貝沼 亮介 かいぬま・りょうすけ

東北大学大学院工学研究科
金属フロンティア工学専攻 教授

1983年に東北大学工学部材料物性学科卒業、88年に東北大学大学院工学研究科材料物性学専攻博士後期課程修了。同年より日本学術振興会特別研究員。90年から東北大学工学部材料物性学科助手、助教授などを経て、2002年に東北大学大学院工学研究科技術社会システム専攻助教授、06年に東北大学多元物質科学研究所教授。10年より現職。

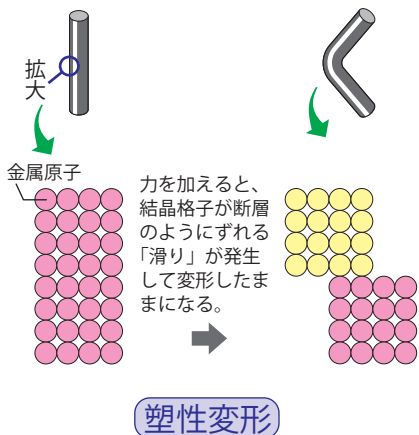
大森 俊洋 おおもり・としひろ

東北大学大学院工学研究科
金属フロンティア工学専攻 助教

2005年に東北大学大学院工学研究科材料物性学専攻博士後期課程修了。05年、日本学術振興会特別研究員。07年より現職。



〈一般の金属〉



に限られていた。

失敗をヒントに
大型化に成功

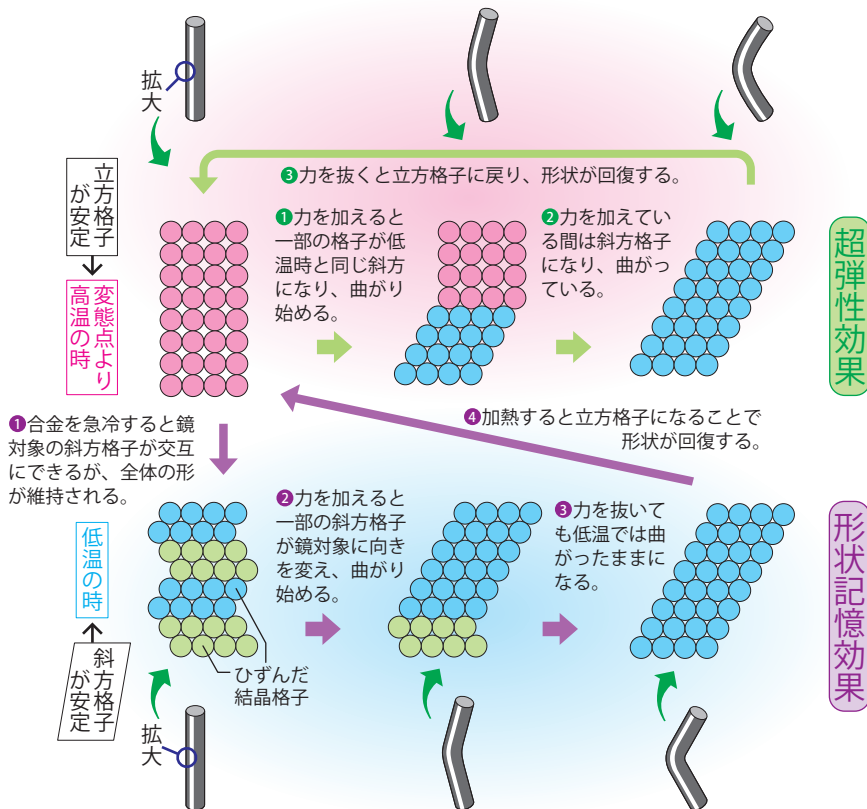
世界中で実用化されているニッケル・チタン合金は高性能だが、加工しにくく、コストがかかるという欠点があった。そこで、貝沼さんは加工しやすく、コストの低い形状記憶合金の開発に取り組んだ。当時、銅を主体とした形状記憶合金は大きくするとろくなり、材料として使えるものではなかったが、銅とアルミニウム、マンガンからなる加工性の高い銅系合金を見つけた。

「この合金は扱いやすいのですが、弾性が思うほど高くできませんでした。あきらめかけたとき薄い板状にしてみたら、とても大きな弾性、つまり超弾性効果を測定できたのです」と貝沼さんは振り返る。

詳しく調べてみると、合金に含まれる結晶の粒 (p.10上図) の大きさと合金そのものの大きさのバランスが性能に大きく関係していることがわかってきた。合金の太さ (板なら厚さ) が、結晶粒より大きくなってしまうと、性能が極端に悪くなってしまふ。そのころの結晶粒は直径数ミリ程度だったが、センチメートル単位の太さの材料では断面に結晶粒が数十個組み合わさってしまうからだ。

形状記憶合金は、大きな力をかけて変形させるときに、格子

〈形状記憶合金〉

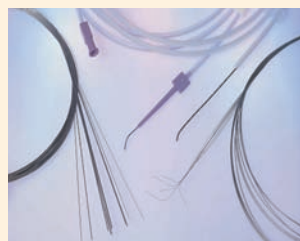


が変形することでその力を吸収する。「格子がたわむ方向は結晶粒ごとに決まっています。結晶粒が小さくて、バラバラの方向を向いていると、それぞれの粒で変化できる方向が違うために、弾性を打ち消し合ってしまう、大きな効果を出すことができないのです」と説明する。大きな材料で十分な弾性を発揮させるには、合金の結晶粒を10倍は大きくする必要があった。

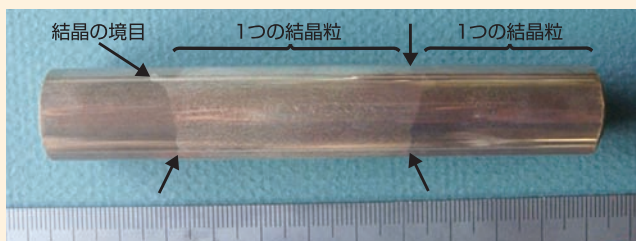
貝沼さんは研究を積み重ね、ようやく10年がかりで結晶粒を大きくする方法を見つけ出すことができた。実は、これは実験の失敗によって偶然発見されたの

だという。
実験では、酸化を防ぐために合金の材料をアルゴンガスとともにガラス管に封入し、電気炉の中で900℃まで加熱する。加熱が終わったところで管を水中で割り、急冷して合金を仕上げる。ところが1回、急冷に失敗したサンプルを再び熱処理してしまったのだ。

大森俊洋助教は、「サンプルに、1つだけ結晶粒が異常に大きいものを見つけたのです。つくった学生に細かく聞いてみると、ガラス管がうまく割れなかったために、ゆっくり冷えたようでした。私ならその時点で実験を止めてしましますが、そ



実用化されているニッケル・チタン形状記憶合金は、ワイヤーのほか肉薄の管や板が主だ。
写真提供：古河テクノマテリアル



新たな熱処理プロセスによって、通常より1～2桁ほど大きな結晶粒径が得られた銅・アルミニウム・マンガン形状記憶合金 (直径2cm)。結晶粒は最大5cmに巨大化している。

の学生は自分が苦労してつくった合金を捨ててしまうのはもったいないと思ったのでしょ。そのまま再加熱して実験を続けたのです」とエピソードを話してくれた。

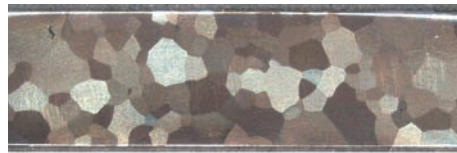
この経験から、900℃まで加熱した後温度をゆっくり下げ、再び温度を上げることで、結晶粒を大きくできることがわかった。効率良く結晶を育てるために最適な温度や結晶粒が大きくなる理由 (p.2表紙解説参照) はすぐにはわからなかったが、これは大きな発見だと確信し、貝沼さんらはJSTの「研究成果展開事業 研究成果最適展開支援プログラム (A-STEP)」を活用して企業との共同研究を開始した。

新しい形状記憶合金を早く世の中へ

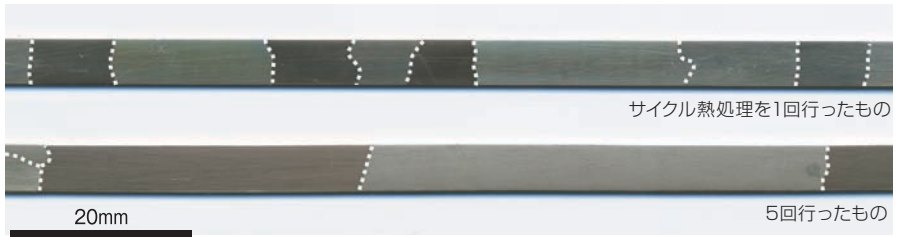
A-STEPは、大学などで生みだされた研究成果を産業につなげて、その実用化を支援していく技術移転支援プログラムである。滑り出しの実証研究から本格的な製品開発まで、さまざまなニーズに合わせたタイプが用意されている。貝沼さんらは、ニッケル・チタン合金で実績のある古河テクノマテリアル (平塚市) と共同で、実証研究型の「シーズ顕在化タイプ」で、この新たな形状記憶合金の製品化の可能性を調べ始めた。

その結果、結晶粒成長に効果的なのは900℃から500℃まで冷やして再加熱する温度サイクルを繰り返すことで、結晶粒をどんどん大きくできることがわかった (上図)。これまで、形状記憶合金は加工が難しかったため幅数ミリの製品が主体であったが、銅系合金の最適な加工および熱処理の技術を開発したことで、一気に10倍程度の直径数センチメートルの材料を実用可能なレベルでつくることに成功した。

貝沼さんらと同社は、前にも共同で簡便な巻き爪矯正具の製品化に取り組んだことがある (p.11上図)。従来のニッケル・チタン合金での矯正はワイヤーしかないので、爪に穴をあけて固定する手間がかかっていた。そこで、加工しやすい銅系合金を活用して、爪を挟むだけのクリップ型の器具をつくり、2011年春に医療機関



5mm



サイクル熱処理を1回行ったもの

5回行ったもの

銅系形状記憶合金の熱処理による変化。900℃で24時間のシンプルな加熱処理を行ったものでは大きな結晶は見られない (左)。加熱と冷却のサイクル熱処理では、繰り返すほどより大きな結晶粒が確認された (下)。点線は結晶粒の境目を示している。

向けの販売を開始した。その時の経験として、良い応用を提案することではじめて素材が売れる、と実感した。

そこで今度は、銅系形状記憶合金の活用のため、大きな建築部材 (p.11右下図) や外反母趾矯正器具 (p.11左下図) などの製品化を目指し、「シーズ育成タイプ」で本格的な開発に着手した。製品の規模を大きくし、より良い解決策が提供できる分野に参入することで、用途を拡大していく狙いだ。

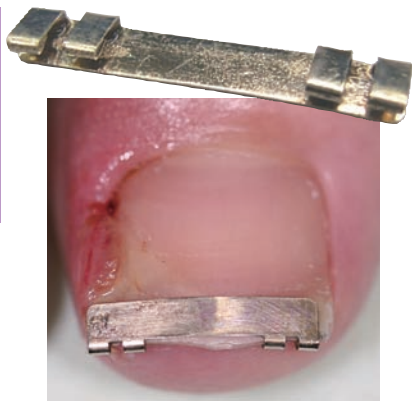
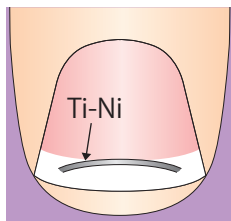
その中でも、特に期待がかかるのが建築部材である。「2011年の東日本大震災により、何としても超弾性建材を実用化

したいと思いました」と大森さん言う。東北地方太平洋側は昔から大きな地震が周期的に発生していた地域で、地震対策を施した建物は多かった。しかし今回、倒壊はまぬかれても、変形して使えなくなった建物が多数あった。もし、超弾性効果をもつ建築部材をつくれれば、一時的に大きな力を受けても変形が残らずに、そのまま使える強い建物ができるはずだ。

古河テクノマテリアルの石川浩司副事業部長は、「まずは住宅メーカーや建設会社の方々から話を聞いて、どのような制震部材が有効かつ必要なかを明らかにしながら、超弾性部材の用途を探って



実験室の電気炉と。手前は細めの棒状のサンプルを加熱するもの、奥は太い素材も入れることができる大型炉だ。



足の親指でよく見られる巻き爪は、先の両端が内側にきつく曲がるため、皮膚への食い込みが問題となる。従来のニッケル・チタン合金による矯正では、加工が難しかったため、爪に穴をあけてワイヤーを固定していた(左)が、銅系形状記憶合金を活用した新たな矯正具は、クリップ型で爪に挟み込むだけ(右)。患者自身が着脱できるため、肉体的な負担だけでなく診療の時間も減らすことができた。

鉄を主体にした形状記憶合金の開発は難しく、世界中の研究者が取り組んできたが、性能のいいものがなかなかできなかった。だが、東北大学では貝沼さんや大森さんらは、13%の歪みにも耐えられる超弾性効果をもった鉄系合金の開発にも成功している。その他にも磁性をもった形状記憶合金など、新しい材料を次々に開発している。

合金には、まだまだ私たちが知らない可能性が秘められている。新しい形状記憶合金を開発し、それらを実用化する技術を育てていくことによって、生活をさらに豊かにできる新しい製品が生まれてくるはずだ。

いこうと考えています」と語り、「すでにわかっている課題もあります」とも付け加えた。劣化の問題だ。超弾性を示す範囲でも、大きく変形させると、少しずつ元の形に戻らなくなっていくのだ。今は、100回程度の変形が限界だが、先の震災では3分間にわたる揺れで200回近く振動している計算になるので、実用化にはより劣化しにくい組成や製法を見つけることが課題といえる。

貝沼さんが中心となり、20年近く磨き上げられてきた銅・アルミニウム・マンガン合金は、これからさまざまな分野での製品化が期待されている。さらに、

貝沼さんや大森さんらは、銅・アルミニウム・マンガン合金以外にも、いろいろな形状記憶合金を探している。なかでも力を入れているのが、鉄を主体にした形状記憶合金だ。「鉄はコストが低いので、性能のいい形状記憶合金ができれば、極限温度でのゴムの代用品など、世の中に広く浸透できると思います」と大森さんは語る。極低温の宇宙や、エンジンの熱などで高温になりやすい自動車用品など、確実に需要が見込める。



貝沼さんらは現在銅系形状記憶合金の超弾性効果を活用した建築部材の開発を進めている(写真上・右はそのイメージ)。数%伸び縮みしても元に戻り、制震性に優れている。

矯正前

装着時

銅系形状記憶合金の超弾性効果を活用した外反母趾矯正装具の研究開発も進めている。足の親指側に合金製の装具をあてて外側に反るように固定することで矯正を行う。レントゲン写真は左が矯正前、右が矯正後。写真提供：羽鳥正仁医師（東北公済病院）

切削加工によってネジ山が施された、銅系形状記憶合金の超弾性部材。これまでの形状記憶合金では難しかった穴あけや切削加工が可能であることから、実現できた形状である。

