

建築の構造部材に使われる鉄や木、鉄筋コンクリートが驚くべき進化を遂げつつある。

建設会社や素材メーカー、研究機関がタッグを組んで、開発や適用を進めている。

異素材とのかけ合わせや解析技術の駆使によって、古典的な建築材料の可能性が大きく広がりそうだ。

日経クロステック 特集 設計者がザワつく驚異の建築材料 より

コストを抑え、住宅向け部材商品化

新開発の形状記憶合金を使い、地震の繰り返しの揺れによる建築物の損傷を抑える研究 が注目されている。

高コストなどの課題を産学連携で乗り越え、既に国内大手住宅メーカ ーが住宅向けの筋交いを商品化、

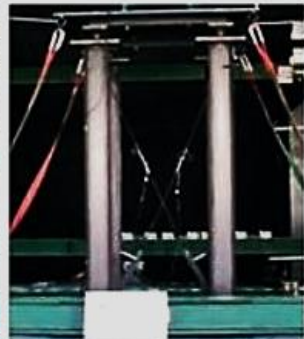
橋や道路など土木分野での応用も検討されている。

研究者の一人は「高機能な制震を手軽に実現できるようにしたい」と話す。

2024.8.8. 神戸新聞 朝刊 広域神戸版

科 学

形状記憶合金で地震の揺れ抑制



形状記憶合金には、加熱すると元の形に戻る性質の他に、力を加えてもゴムのようになややかに元に戻る「超弾性」と呼ばれる性質がある。眼鏡のフレームや歯列矯正ワイヤなどに幅広く使われ、ニッケルチタン合金が主流となっている。

京都大の荒木慶一教授（建築構造学）によると、1990年代前半から欧米で、超弾性に着目した建築への応用が研究されてきた。しかし材料や加工のコストが高く、使用例はイタリアでの世界遺産修復や米シアトルの高速道路の橋脚といった少数だ。チームの一員で、今も荒木さんが中心だ。

「ありがたいが、建築材料としての実用化は疑問だった。チムの一員で、今も荒木さんが中心だ。」

「超弾性は材料中の全ての原子が規則正しく並んだ「単結晶」のときに最も発揮される。大森さんらは冷却と加熱を繰り返して、内部の結晶を成長させる手法で単結晶を作るが、当時は1%程度までの粒しかできなかった。

建築で使うには最低でも直径1センチで棒状の単結晶が必要だ。大森さんらは加熱する温度や回数工夫で巨大な単結晶が得られることを発見。直径1.5センチ、長さ70センチの棒の作製にも成功し、17年に発表した。

コスト抑え、住宅向け部材商品化

新開発の形状記憶合金を使い、地震の繰り返しの揺れによる建築物の損傷を抑える研究が注目されている。高コストなどの課題を産学連携で乗り越え、既に国内大手住宅メーカーが住宅向けの筋交いを商品化、橋や道路など土木分野での応用も検討されている。研究者の一人は「高機能な制震を手軽に実現できるようにしたい」と話す。



直立する鉄骨の間に筋交いを取り付け、振動台実験を行った様子。左の鉄鋼の筋交い（中央のX字状の部分）は変形し、鉄骨も傾いてしまったが、右の形状記憶合金を使った筋交い（同）はほとんど変形が見られず、鉄骨も傾いていない（いずれも荒木慶一・京都大教授提供）



銅などでできた形状記憶合金を曲げた状態（上）。力を抜くと元の真っすぐな形に戻った

超弾性に着目／橋や道路への応用も検討

異なる研究分野のつなぎ役となった荒木さんは「阪本地震では立て続けに大きな地震が起きた。揺れが来ても使い続けられる建物や構造物が実現できればいい」と期待する。

「超弾性は材料中の全ての原子が規則正しく並んだ「単結晶」のときに最も発揮される。大森さんらは冷却と加熱を繰り返して、内部の結晶を成長させる手法で単結晶を作るが、当時は1%程度までの粒しかできなかった。建築で使うには最低でも直径1センチで棒状の単結晶が必要だ。大森さんらは加熱する温度や回数工夫で巨大な単結晶が得られることを発見。直径1.5センチ、長さ70センチの棒の作製にも成功し、17年に発表した。

商品化を担った積水ハウス（大阪市）は22年3月、住宅の外周に設置する筋交いの一部として販売を始め、24年4月までに46棟が使われた。荒木さんが次に狙うのは、さらに低コスト化が見込める鉄合金の部材開発と、銅合金の土木構造物での活用だ。東北大チームが開発した鉄合金は、超弾性を保てる温度が約200度から零下26.9度までで、既存の形状記憶合金より高い性能を誇る。土木分野では、宇都宮大と高速道路総合技術研究所が中心となり、高速道路の橋脚での使用について研究を進めている。

筋交いの一部に  
この合金を使った筋交いの制震性能を調べるため、阪神・淡路大震災の際に神戸気象台で観測された1.5倍の揺れを振動台で加える実験も実施した。比較した鉄鋼の筋交いが変形し、骨組みが傾いてしまった一方、銅合金を使った方はほとんど変形しなかった。

海外のニーズにも  
建物の地震対策は、耐震、制震、免震の大きく三つに分けられる。京都大の荒木慶一教授によると、形状記憶合金を使った対策は、揺れを建物に伝えない免震と、揺れを吸収する制震の中間的な特徴を持つという。超弾性を保てる温度幅からみて、商品化された銅合金はほぼ全国で使えるが、より温度幅の広い鉄合金が実用化できれば普及に弾みがつく。  
2023年のトルコ・シリア地震では短期間に大きな地震が続いた。日本発の形状記憶合金は海外のニーズにも応えられると期待される。

## 参考

日経クロステック 日経 **XTECH** 特集 設計者がザワつく驚異の建築材料 より

### 鉄・木・RC が“超”進化 桁違いの性能で建築の限界突破 木村 駿

出典:日経アーキテクチャ、2020年3月12日号 pp.42-43 特集 設計者がザワつく驚異の建築材料

<https://xtech.nikkei.com/atcl/nxt/mag/na/18/00095/>

建築の構造部材に使われる鉄や木、鉄筋コンクリートが驚くべき進化を遂げつつある。建設会社や素材メーカー、研究機関がタッグを組んで、開発や適用を進めている。異素材とのかけ合わせや解析技術の駆使によって、古典的な建築材料の可能性が大きく広がりそうだ。

## ザワつく材料図鑑① Fe-Mn-Si系耐疲労合金

竹中工務店などが2006年から、制振ダンパー向けに開発してきた従来の鋼材の約10倍もの疲労寿命を持つ合金 Fe-15Mn-4Si-10Cr-8Niと表記する。マンガンを15%、ケイ素を4%、クロムを10%、ニッケルを8%含む

### ■ 竹中工務店、NIMS、淡路マテリア 10倍の疲労耐久性を実現

長周期地震動や大地震の連発に備えるには、鋼材ダンパーではなく粘性ダンパーやオイルダンパーを用いることが多い。芯材に変形を集中させる鋼材ダンパーは金属疲労で損傷しやすく、繰り返しの揺れに対応しづらいからだ。

一方で、粘性ダンパーなどよりも安価で剛性や耐荷重性能が高いという利点もある。

何とかして金属疲労に強い鋼材ダンパーを開発できないか。

竹中工務店と物質・材料研究機構(NIMS)、淡路マテリア(兵庫県洲本市)が10年以上の月日をかけてものにしたのが、従来の鋼材の約10倍もの疲労耐久性を持つ「Fe-Mn-S耐疲労合金」を芯材に用いた制振ダンパーだ

#### 【写真1】 金属疲労に強い鋼材ダンパー

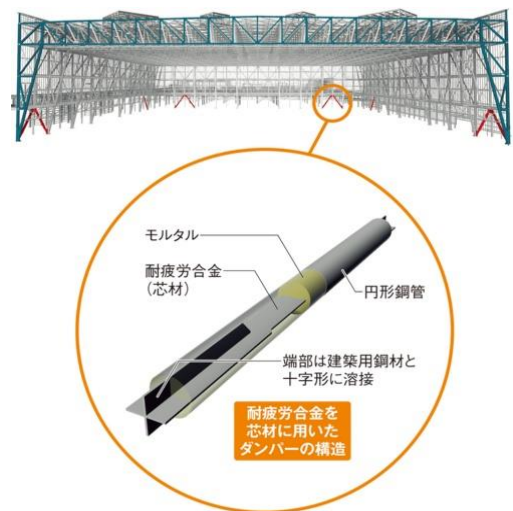
2019年8月末にオープンした愛知県国際展示場に初適用した(図1、2)。



耐疲労合金に鋼材を溶接する様子

この合金はマンガンを多く含み溶接しづらいため、専用の溶接ワイヤを開発した(写真:石川 典)

【図1】愛知県国際展示場にブレース型を初適用



愛知県国際展示場の西棟展示ホールは100mの大スパン。耐疲労合金のダンパーを16本用いた



ダンパーの長さは約6m。最大分担荷重は約2000kNだ建物自体は耐震構造として確認申請した。

南海トラフ巨大地震などに備え、地震時の余力を確保する目的で制振効果が得られる耐疲労合金を使用した

(写真:資料:竹中工務店の資料を基に日経アーキテクチャ作成)

構造設計を担った竹中工務店名古屋支店設計部構造 1 グループの梅村建次副部長は、「構造設計者にとっては夢のような材料だ」と語る。

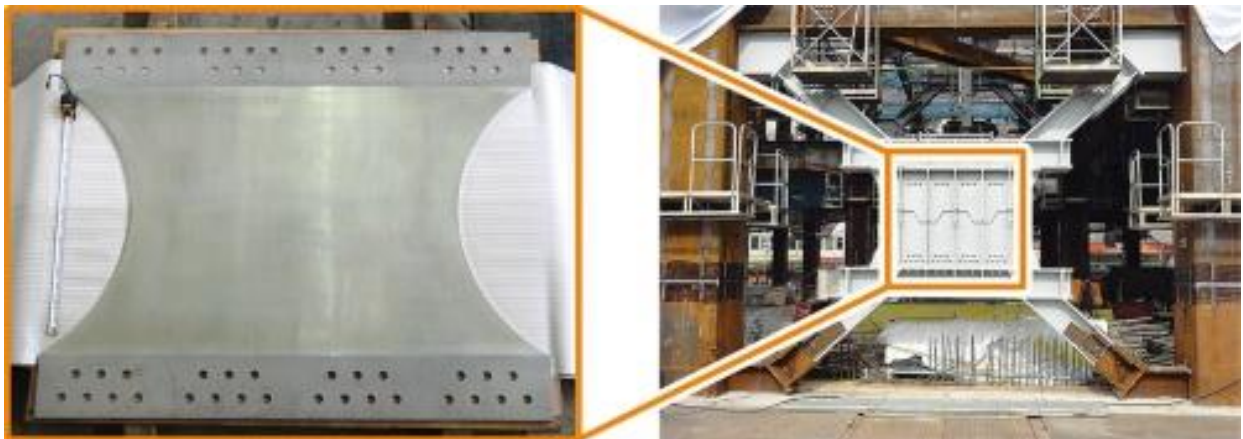
### 形状記憶合金と似ている

なぜ耐疲労合金は、一般的な鋼材の 10 倍もの疲労寿命を持つのか。  
 金属に大きな荷重が作用して塑性変形すると、原子の位置が並び変わる。通常の金属だと、逆方向に変形させても原子は元の位置に戻らない。こうして配列の乱れが蓄積すると、亀裂が発生して成長する。これが金属疲労、なかでも低サイクル疲労と呼ばれる現象だ。  
 ところが耐疲労合金は、逆方向の変形を受けると、原子が最初の変形とほぼ同じ経路をたどって元の位置に戻る。

このため従来の鋼材に比べて損傷の蓄積速度が非常に遅い。

合金を設計した NIMS 構造材料研究拠点振動制御材料グループの澤口孝宏グループリーダーは、「温度変化で原子が元に戻る形状記憶効果と根本の現象は同じだ」と話す。実は、耐疲労合金の“デビュー”は 2 度目だ。竹中工務店は 14 年、名古屋駅前の超高層ビル「JP タワー名古屋」に適用している。当時は製造技術の制約で大きな部材をつくれず、座屈を防ぐためのリブの溶接も困難だったため、板状の合金を補剛板で挟み込む特殊な「せん断パネル型制振ダンパー」とした〔図 3〕。

〔図 3〕JP タワー名古屋の「せん断パネル型制振ダンパー」



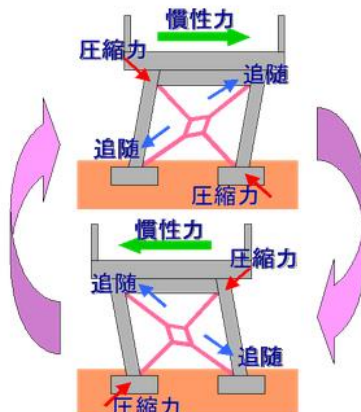
名古屋駅前の超高層ビル「JP タワー名古屋」に 16 基配置したせん断パネル型制振ダンパー(写真:竹中工務店)

この形式だと、ダンパー下部に開口部をとれないなど設計上の制約が大きい。  
 そこで 3 者は、汎用性が高いブレース型ダンパーの実現に向けて改良に取り組んだ。

### 参考



高架橋への取り付け例

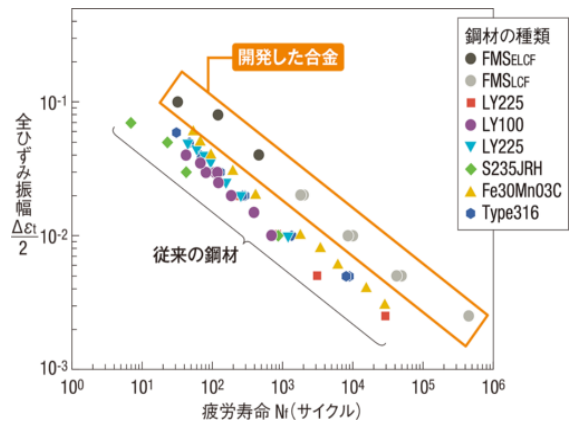


地震エネルギーの吸収イメージ

X 型配置のブレースと中央に設けたダンパーで構成される、ダンパーブレースを用いた耐震補強工法

[https://www.obayashi.co.jp/solution technology/detail/tech\\_d079.html](https://www.obayashi.co.jp/solution technology/detail/tech_d079.html)

〔図 2〕既存の鋼材とは桁違いの性能



鋼材の試験体に繰り返し負荷をかけて破断するまでの回数を示した

(資料:物質・材料研究機構)

## 専用の溶接ワイヤも開発

**その1つが製造技術。**14年当時は、溶解量が10tと小さい電気炉で金属を溶かして塊にし、スラブ状に鍛造した後に圧延して芯材を製造していた。大量生産が難しく、鍛造時の傷などが影響して歩留まりが落ち、コストが高つく。

そこで淡路マテリアは、熔融金属を連続的に鑄型に注いで急速冷却しながらスラブをつくる連続鑄造法を採用。あとはスラブを圧延するだけで製造できる。同社の大塚広明・開発グループ部長は「かなり工程を省略できた。1チャージ(1回の溶解量)が60tなので量産もできる」と語る。

**もう1つの改良点が溶接技術。**耐疲労合金はマンガン重量比で15%も含むため、大量にヒューム(粉塵)が発生して溶接しづらい。また、一般的な溶接ワイヤを使って鋼材と溶接しようとすると、すぐに割れてしまう問題がある。

そこでNIMSは、専用の溶接ワイヤを新たに開発した。

NIMS 溶接・接合技術グループの中村照美グループリーダーは「通常のアーク溶接法で効率を落とさず溶接できるようにした」と説明する。こうして、芯材の端部に接合部用の鋼材を溶接できるようになり、ブレースとして使用できるようになった。

竹中工務店技術研究所建設材料部の榎部淳道・先端材料グループ長は、「コストは一般的な鋼材ダンパーと粘性ダンパーの間ぐらい。技術はなるべくオープンにして、他社を含め広く合金を使ってもらい、市場を広げたい」と力を込める。

## 地震の揺れを吸収する材料



<https://www.nims.go.jp/chikara/column/fms-damper.htm>

制振ダンパーというビルの部材(部品)があります。写真のものです。

大きなビルの基礎部分に使われていて、ビル全体をぐっと支えています。

制振とは、読んで字のごとく、振れ(揺れ)を制する、という意味です。ダンパーは、ショックを和らげる部品として知られています。

つまり制振ダンパーは、「揺れを制してショックをやわらげる」ということになります。

ここに、NIMSの材料が入っているのです。

### 耐震から制振へ

1995年の阪神淡路大震災では、大都市である神戸を中心に多くのビルが倒壊しました。

それまでビル建築の地震対策としては、振動に耐える「耐震」が中心でした。

強く壊れないようながっちりした造りにする、

という考え方です。しかし、今まで考えていなかった

ような震度の地震が実際に起きてしまい、この固く強くするだけでは限界があることがわかりました。では、どうするか。

そこで出てきたのが、「免震」「制振」という考え方です。

免震は地盤のゆれが建物に伝わるのを防ぎ、制振はゆれを吸収して建物へのダメージを少なくしようというものです。

「免震」は比較的小さな家で使われ、地面との間に揺れを少なくする隙間やゴムをいれようというものです。

しかし、巨大なビルではこの方式は使えません。そこで、制振が注目されるようになったのです。



Photo by Michito Ishikawa

## 新しい制振技術を求めて

1995年の阪神淡路大震災から、ビルを造るときにはこの「制振」という考え方をどんどん取り入れようと建築会社は考えるようになりました。大阪に本社がある竹中工務店もそのひとつです。(大阪も阪神淡路大震災で大きな被害がありました。)

制振ダンパーで、地震の揺れを吸収するにはどんな材料がいいのだろうか。

竹中工務店の研究者は検討を重ねていました。同じころ、NIMSでは1990年代からひとつの研究を進めていました。形状記憶合金です。

ある素材に力を加えて変形させても、元に戻る性質が形状記憶効果といわれるものです。熱を加えると元に戻る針金や、曲げても手を離すと元の形に戻る眼鏡のフレームなどがその代表例です。



竹中工務店とNIMSは、2003年、この「形状記憶の元に戻る性質」を制振ダンパーに使えないかと研究を開始しました。このアイデア自体は昔からあり、特に、変形しても力を開放すると元に戻る「超弾性」の性質が有効だと考えられ、研究もされてきました。しかし、超弾性を示す形状記憶合金の多くは高価で建築用の大型部材を作ることが難しく、一方、NIMSが開発していた安価な鉄系の形状記憶合金は超弾性を示しません。

一度変形すると、自分では元に戻れないNIMSの形状記憶合金。これを、制振ダンパーとして使うことができるのだろうか？

竹中工務店と議論を重ねる中で、意外なところに解決の糸口があることに気が付きました。

## 異分野連携による新発見

それは「制振ダンパーでは必ずしも超弾性は必要ではない」ということ。

そもそも、金属が壊れる仕組みとは、目に見えない原子のつながりがちぎれることです。

強い力が加わったり、小さな力でもそれが繰り返しかわると、原子のつながりがちぎれて壊れてしまいます。

これが、金属が壊れるということです。地震の揺れを吸収しながら、金属が壊れないようにするには、

地震の揺れを受けても原子のつながりがちぎれないようにすればよいのです。

そこでポイントとなるのが、地震の揺り返しです。

地震は一方向に揺れて終わりではない。反対向きにも同じような力がかかります。

超弾性は、力を加えると原子の並びがちぎれないまま変形し、力を開放すると自分で元の原子の並びにもどる性質です。

しかし、地震には揺り返しがあるので、自分で元の形に戻れなくても、反対向きの揺れ(力)で、元の原子の並びに戻ればよいのです。

このことに気が付いたNIMSと竹中工務店は、超弾性とは異なる新しい変形の仕組みで、

はるかに安価に、揺れによって原子のつながりがちぎれない合金を生み出しました。

しかし、実際には採用されなかったその合金は鉄(Fe)、マンガン(Mn)、シリコン(Si)を基本成分として、微量のクロム(Cr)、ニッケル(Ni)、アルミニウム(Al)などが混ざっています。

基本成分のFe、Mn、Siの頭文字をとって**FMS合金**と呼ばれ、それぞれの元素を混ぜる割合で材料の強さや寿命が決まります。2008年には、素材の製造を担当する淡路マテリアが研究に加わり、地震で壊れにくい合金を実現するために、混ぜる割合について何度も検討を繰り返しました。そしてついに、従来よりも耐久性の高い合金の開発に成功したのです。

さらに、2009年にはこの合金を用いた制振ダンパーの試作品もできました。

しかし、それでも、なかなか実際のビルに使われることはありませんでした。

なぜなら、加工しにくく、値段も高かったからです。

「そこまで高性能でなくてもいいんじゃない？大きな地震なんてめったに起きないんだから」

「値段が高いのであれば、なかなか使えないよね」

「安いダンパーを増やせば同じ性能がでるんじゃないの？」そんな意見が多く出ていました。

阪神淡路大震災が10年近くたち、大地震に対する備えについてあまり議論されなくなってきていたという背景もありました。しかし、大きな地震は起きました。2011年の東日本大震災です。

## プロジェクトを加速させろ！

2011年の東日本大震災の被害も甚大でした。警鐘が鳴らされてきた大きな地震が、起きてしまった。

特に高層ビルで問題になったのが、長く大きく、ゆっくり揺れる「長周期地震動」です。こうした揺れは、ビルのどこかで吸収しないとイケない。それにはやはり、より性能の高い制振ダンパーを実際に使えるようにしなければ・・・

NIMSは従来の研究計画を急ぎよ変更して、この「原子のつながりの切れない金属」=FMS合金を社会に使うようになり、ということになりました。しかし、コストや加工のしにくさの問題は依然としてある。それはマンガンの割合に原因がありました。マンガンは多く含まれると加工しにくくなるため、普通、ビルなどに使われる部材はマンガンを1%くらいしか混ぜません。

ところがNIMSのFMS合金はマンガンが28%も混ざっていました。加工しにくく、工場での量産ができないことが、値段が高くなる理由でした。素材メーカーと相談を重ねた結果、「マンガンの割合が15%くらいであれば、何とかなるかもしれない」という意見が出ました。

しかしそんな簡単な話ではありません。

マンガンをどうすれば少なくできるのかマンガンを15%にするとしたら、その分耐久性は落ちる。別の元素を加えても性能を落とさないようにするしかない。しかし、どの元素を加えたらいいだろう。元素は118もあります。

そのどれを使うのか、どの組み合わせ、どの割合、やり方はそれこそ星の数です。

ここでNIMSの、形状記憶合金の本質に迫る長年の研究が生かされました。

これまでの研究で「なぜ原子のつながりがちぎれないのか」という仕組みを深く考えたことで、どの元素を加えれば、耐久性を落とさずマンガンを減らすことができるのか、を推理する基礎ができていました。

その予測をもとに、2012年4月に研究を開始。

当初は元素の組み合わせと割合を3つのグループに分け、一段階ずつ結果をフィードバックして精度を上げていく計画でした。

すると、なんと最初のグループの中に素晴らしい結果を示す合金があったのです。新合金は従来のものと比べて10倍の疲労耐久性を持ち、マンガンも15%以下に減らすことができました。

実用化へ大きく前進した瞬間です。

名古屋のビルに採用決定！

## 名古屋のビルに採用決定！

その後、素材メーカーの尽力もあり、2012年9月にははやくも量産の試験にも成功しました。

この結果を知り、タッグを組んでいた竹中工務店から、「実は名古屋駅に大きなビルを建てるのだが、そこでこの新しい合金で作った制振ダンパーを使えないか」と相談がありました。そこで製造計画が始まり、さまざまな試験を経て、2013年11月には、国土交通省の認可が下りました。そして2015年、このビルは完成しました。

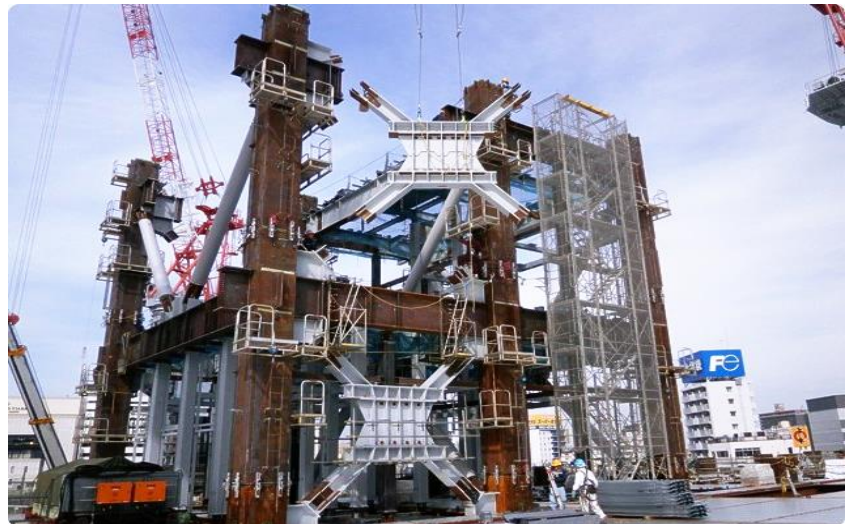
実に驚くべきスピードです。

**JPタワー名古屋**という、地下3階、地上40階の建物で、その1階から4階までの間に、16の制振ダンパーが設置され、いざというときに、このビルを倒壊から守ります。

2018年には愛知県の国際展示場「**Aichi Sky Expo**」にも採用されています。

ここにはNIMSが開発した新しい溶接技術を用いた新タイプの制振ダンパーが使われています。

Aichi Sky Expoに実装された制振ダンパー第2号機では、連続铸造と溶接技術が新たに加わり、実装場所に応じた形状の制



振ダンパーが製造できるようになった  
**地震のある国に求められる材料研究とは**  
採用されたのはどちらも愛知県。

これは、何時きてもおかしくないといわれる「南海トラフ大地震」の発生が懸念される地域です。「もう大きな地震は起こらない」と考えるのではなく、大地震が発生する可能性を受け入れ、これに対処していくことが大切です。震災から10年。FMS合金を開発した研究者・澤口 孝広はこう話します。  
「ご家族を亡くし、家を失い、今も苦しんでいる方が沢山います。原発のデブリと汚染水に有効な解決策も見いだされていません。



Photo by Michito Ishikawa

種々の課題に対してあまりに無力ながらも、研究者として、ただ自分の専門で役立つ防災の新技术に力を尽くしたい一念でやってきました。巨大地震や台風災害が発生する現実をただ恐れるのではなく、正しく受け止めて、被害を最小に止めるために努力することが大切です。

FMS合金制振ダンパーをそのような技術の一つに育てることが生涯の目標です。」

長く培ってきた基礎研究、国研と企業の垣根を越えた信頼関係、そして2つの震災を経て実用化を目指した研究者と技術者の強い思い、そのすべてが結実した制振ダンパー。そこには、地震が頻発する日本でも人々に安全に暮らして欲しいという願いが込められているのです。



一度できたから終わり、ではない。

より広く使われるために、制振ダンパーのさらなる進化を求めて、竹中工務店、淡路マテリア、NIMS それぞれがお互いの技術と専門性を持ち寄り、3社一丸となって今なお研究を進めている