

東京工業大学教授の永田和宏氏に、日本の製鉄技術の原点とも言える「たたら製鉄」の魅力についてお話を伺った。

# たたらを 現代に



発見することの大切さを、  
「たたら」は教えてくれます。



東京工業大学教授

## 永田 和宏氏

プロフィール / ながた かずひろ

1969年、東京工業大学工学部金属工学科卒業、1975年、同大学院理工学研究科博士課程修了、工学博士。ベネズエラ国立科学研究所主任研究員を経て、1992年より東京工業大学教授（現在、大学院理工学研究科物質科学専攻）の間、マサチューセッツ工科大学（MIT）客員助教授も務める。専門分野は、鉄冶金学、熱力学、非平衡熱力学、高温物理化学。日本鉄鋼協会依論文賞、日本金属学会功績賞・論文賞、日本鉄鋼協会学術功績賞など受賞多数。

実は鉄の作り方を全く知りませんでした。

ご専門の金属工学、中でも「鉄冶金学」に取り組み始めたきっかけは何ですか？

私は岐阜県飛騨金山という、人口約6,000人の町で生まれました。自宅は薬局でたくさんの化学薬品があったので、子供の頃はソーダ水や日光写真の印画紙などを作っていました。今で言う「科学少年」で、そういう特技を活かしてガキ大将をやっていました（笑）。たまたま東京工業大学に入学し、「金属工学科」を選んだのは、好きだった物理・数学・化学すべてを幅広く勉強できると思ったからです。なぜ「鉄冶金学」を専攻したかと言うと、雀部實（ささべ・みのる）先生（現在、千葉工業大学教授）が助手をされていたとき、学生実験で電気炉の中を覗くと高温で輝いていて、とてもきれいで面白そうだなと思ったからです。

さらに、この分野を究めてこられた経緯はどのようなものだったのですか？

卒業研究で、転炉内の酸素濃度測定用センサーのはしりとなった「酸素濃淡電池」の研究に取り組み、その後、修士課程では「硫黄濃淡電池」を、博士課程では、電気化学的方法を使って「スラグ中の拡散」を研究しました。ところが、博士最終試験のときに、現東京工業大学名誉教授の田中良平先生から、「君、鉄冶金学だろう？鉄の作り方を簡単に説明してくれ」と言われて立ち往生してしまいました



たたら吹き炉

できあがった鋼(ケラ)

写真提供：(財)日本美術刀剣保存協会、2004年2月7日撮影

た。実は鉄の作り方をまったく知らなかったのです。その後、鉄鋼メーカーのパイロットプラントを使って溶融スラグ中の発熱分布を検証する研究を行い、その論文で「依論文賞（日本鉄鋼協会）」を受賞しました。1976年、鉱物資源が豊富なベネズエラの国立科学研究所に主任研究員として就職して、これまで誰も成功したことのない、鉄とアルミの酸化物でできた「ラテライト」の製錬を研究しました。私自身、鉱石の製錬は初体験で、さまざまな文献を調べながら研究を進め、『硫化塩化法』で酸化鉄の分離に成功し、特許を取りました。

1978年に帰国した後は、先ほど触れた酸素センサーを使った転炉内の酸素濃度測定プロジェクトがスタートし、私も製鉄所に行って3カ月間転炉で、3年間高炉で研究に取り組みました。初めて腰を据えて鉄鋼プロセスの操業を見る経験となり、鉄づくりの具体的なイメージを理解しました。その後研究分野を広げ、今は製鉄製鋼分野を中心に研究に取り組んでいます。

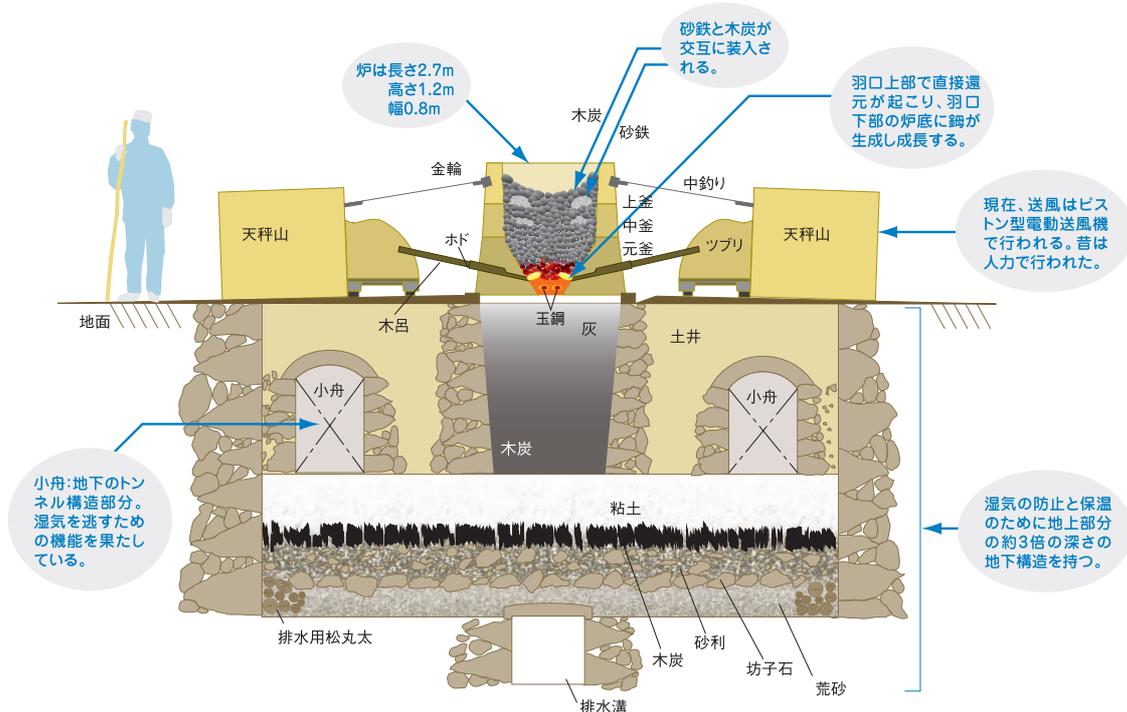
## 鉄の良し悪しは製品にしてこそ評価できる、ということに気づきました。

先生は『たたら製鉄』の原理から発想した低温製鉄の研究をされていますが、たたら製鉄との出会いについてお聞かせください。

ベネズエラから帰国した年の秋、東工大の大学祭がありました。ところが金属工学科の学生は何もやらないの

で、学生を元気づけたいと思い、まず郷里の近く、美濃の関の孫六さんという刀鍛冶を訪ねました。材料も自ら作るという話に驚き、暑い夏でしたが、鍛冶炉による鉄づくりを特別に見せてもらいました。幅約30センチメートルの炉に『ふいご』で風を送る単純な構造で、そこに木炭と砂鉄を交互に入れて火を起こすと、わずか1時間で鉤(ケラ)ができたのです。早速大学に戻り、学生たちと耐火煉瓦(れんが)で高さ約50センチメートルの炉を作り、横に羽口を付け、そこから掃除機を逆向きにした送風機で風を送り、鋼造りに挑戦しましたが、失敗の連続でした。4年後に大野兼正刀匠の実験を見せてもらい、コツがわかりました。まず炉底を加熱してノロと呼ばれるスラグを作っていたんです。昔から「良い鉄を作るには良いスラグが必要」と言われたとおり、ノロが鉄の再酸化を防いでいたのです。その後、大学の操業では百発百中です(笑)。それでいい気になっていると、見ていた人から「ところで何に使うの?」と言われ、愕然としました。確かに漬物石にもならない(笑)。そこで、今度は学生を連れて1週間泊まり込みの「包丁づくりツアー」を敢行しました。本当は刀が作りたかったのですが難しいので…。しかし包丁でも焼き入れ方法などは刀と同じで、ちゃんと刃紋もつく。一緒に行った女子学生は、結婚した現在でもその包丁を使っています。包丁は切れて使いやすいのが当たり前です。鉄の良し悪しは、製品にしてこそ評価できる、という当たり前のことに気づきました。「品質」まで体感できたのは非常に貴重な経験でした。

### 日刀保たたら炉の構造



たたら製鉄は、粘土で築いた箱型の低い炉に、原料の砂鉄と還元剤の木炭を装入し、鞴(ふいご)で送風する日本古来からの製鉄技術。6世紀後半以降に朝鮮半島から伝えられたと考えられ、時代が進むにつれて進化し、江戸中期に技術的に完成した。

炉の下部から空気を脈動的に吹き込むと同時に、木炭と砂鉄を交互に装入し、3昼夜1操業で約3トンの鋼(鋼=ケラ)と銑鉄(銑=ズク)を生産する。炉は1

操業ごとに取り壊され、作り直される。

明治以降、生産性が劣っていたため、競争に勝てず、大正12年に商業生産操業を終了した。その後も断続的に日本刀の原料として生産が続けられたが、戦後しばらく途絶えた。昭和52年に(財)日本美術刀剣保存協会が文化庁の補助事業として、島根県仁多郡横田町で復活し、今日に至る。

(『たたら製鉄の炉内反応機構と操業技術』鉄と鋼vol.86、2000年、永田和宏、鈴木卓夫より)

### 先生にとって、たたら製鉄の魅力は何ですか？

たたら製鉄の良さは、原料である砂鉄・木炭の品質から、炉の構造、反応、製品化まで、鉄づくりの流れがすべて分かることです。近代製鉄はそのプロセスが見えにくく、一般の人には分かりづらい。年間1億トン作って、鉄が生活に溢れているはずなのに、陶芸教室のように個人が楽しむ世界がありません。その点、たたら製鉄は自分でいじくれる陶芸のような側面を持っているのが魅力です。また、原料から製品に至る工程で、刀鍛冶、研ぎ師、道具を作る人など多くの人々との出会いがあります。(財)日本美術刀剣保存協会が出雲(島根県)の横田町でたたら製鉄を復元し、文部大臣より選定保存技術の認定を受け、1977年から毎冬操業していますが、十数年前、雪が降り積もる中、新日鉄の技術者と初めて本格的なたたら製鉄を見ました。3日3晩の操業の結果、最後に炉を壊すと、畳大の約2.5トンのケラが出てきました。とても幻想的で、感激し、それ以来、毎冬出雲に向かっています。そこで知り合った村下(むらげ、たたら操業の長)木原明さんや、兵庫県の伝統工芸品である『明珍火箸』の52代目明珍宗理さんや、宮大工の道具を作る職人の方など、貴重な出会いが数多くあり、今でも親交があります。全国にはたたらを楽しむ一般の方々も数多くいて、2年に1回「たたらサミット」を行っていますが、5回目となる今年は10月に室蘭で開催しました。

### 日刀保たたら炉

(財)日本美術刀剣保存協会は国の重要無形文化財である日本刀の製作技術を材料面から保護し、あわせてたたら製鉄技術の伝承者を養成することを目的に、島根県仁多郡横田町で、毎年冬にたたら製鉄「日刀保たたら」を操業している。



たたら吹き炉



村下(むらげ)の木原明氏(左)と永田教授(右)

写真提供：(財)日本美術刀剣保存協会、2004年2月7日撮影

## たたら製鉄のキーワードは、「低温、高酸素ポテンシャル、高速製鉄」

### 近代製鉄との比較を含めて、たたら製鉄の技術的特徴は何でしょうか？

たたら製鉄は、直径0.5ミリ程度の砂鉄(粉鉱石)を使うユニークなプロセスです。このように粉鉱石を焼結などせずに精錬する装置は他にはありません。粉鉱石を使うということは、体積に比べて反応面積が大きくなり、還元反応が早くなります。高炉と比較すると、高さわずか1.2メートルの小さな炉でも銑鉄を作ることができ、その温度は200度低く、酸素ポテンシャル(酸素濃度)は5桁ぐらい高くなります。しかも原料装入から銑鉄生成までわずか40分です(高炉は約8時間)。たたら製鉄のキーワードは、「低温、高酸素ポテンシャル、高速製鉄」で、ある意味で、現代の直接製鉄法、間接製鉄法と並ぶ第3の製鉄法だと言えるかもしれません。

### たたら製鉄で作った鉄は品質が優れていると言われますが、その理由についてどうお考えですか？

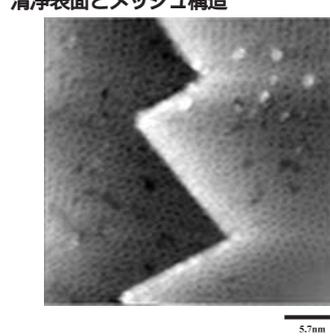
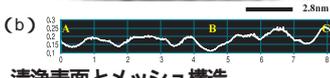
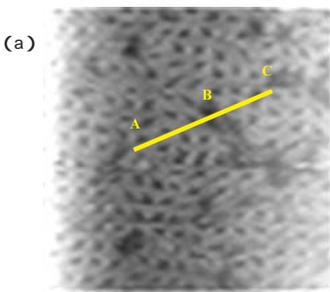
たたら製鉄はもともと、鋸(ケラ、鋼)ではなく、炭素濃度の高い銑(ズク、銑鉄)を作ることが目的でした。硬い鋼ではなく、割りやすいズク(銑鉄)であればすぐに小分けして、脱炭し、軟鉄にしてさまざまな道具に利用できるからです。しかも、高炭素鋼でも伸びが良く、折り曲げて1,300度で容易にくっつきません。現代の鉄では、もっと温度を上げないとくっつきません。さらにたたら製鉄の鉄は錆びにくい。例えば、法隆寺の解体修理の際に出てきた千年昔に作られた釘は、曲がりさえ直せば再び使える状態でした。たたら製鉄の特徴は、まず炉内の酸素濃度が高いこと。酸化鉄が還元するギリギリの酸素濃度で、シリコンなど他の不純物が還元されず、またノ口との接触時間も短い。ため鉄の中に入ってきません。しかし本来であれば、炭素を吸収するためには酸素濃度が低くしなければならず、この状態では、炭素の少ない軟鉄ができるはずですが、そこで炉内をよく見ていると、還元した砂鉄が上からパラパラ落ちてきて、固体の木炭と直接接触して炭素を吸収し、融点の低い溶けた銑鉄に変わっていたのです。こうしてほぼ炭素と鉄だけの純度の高い銑鉄が生まれると、私は考えています。その銑鉄を脱炭する工程が「大鍛冶」で、そこで軟鉄が作られます。銑鉄に空気を吹きつけ、炭素を燃やすのですが、約1,350度の木炭の燃焼熱で、炭素0.1%以下に脱炭するのは理論的に不可能です。炭素が抜ける前に鉄が酸化してしまいます。実際は、「下げ」と「本場」の2工程で脱炭していましたが、原理はわかりません。

### 鍛冶屋さんの経験とサイエンスの結び付きで、新たな発見があるはずです。

### 研究に対して常に心掛けていることは何ですか？

最も重要なことは、事実から物事を判断するという事です。作ったり、実験して理解することが大切です。酸化

表面のメッシュ構造と原子の抜けた穴



走査型電子顕微鏡 (STM) で見た酸化鉄 (1000C=1273Kで4分間焼鈍)

「酸化鉄の一種であるウスタイトは酸素原子が抜けた穴(原子欠陥)がたくさん存在する構造です。メッシュの大きさは1辺が約1.2nmで、この中に原子が数個入る大きさです。2枚目の写真はメッシュの中が空洞になっていることを示していますが、これは鉄原子が不足している結果とされます。」(永田氏)

鉄の表面をナノサイズの原子レベルで見ると、そこには大きな驚きと発見があります。炭素原子と鉄や酸素原子の接触方法の研究から、さらに新しい鉄づくりの条件が見つかるかもしれません。また、高温X線解析装置を使って、反応中にどういった成分が生成されるのかを見ることが出来ます。低い温度で還元されたばかりの鉄は、まだ結晶がきちんとしておらずガサガサのようで、そこに炭素が染み込んでいくのが観察できます。鍛冶屋さんは「たたらで作った鉄は、炭素の出し入れ時間が早い」と言いますが、確かにX線で見てみると、鉄の状態によって浸炭のスピードにも違いがあるように思えます。今後、鍛冶屋さんの経験と、私たちが研究するサイエンスの世界が結び付くことによって、新たな発見があるのではないかと思います。学生の指導では、私は答えを与えません。問題を作るところからが教育です。自ら問題を作り、面白い、美しいといった感動を味わってもらい、感性やセンスを磨いてほしいと思っています。そうした経験があれば、就職後に企業でどんな研究テーマが与えられても、そこに美しい山を見つけ、面白いと思えるはずで

大学でのお忙しい研究・指導の一方で、日本鉄鋼協会では「ものづくりワーキンググループ」の主査をされ、各地で小中学生を対象に「たたらづくり」の実践教育をされています。その意義は何でしょうか？

たたら製鉄は、先ほど触れたように、ものづくりの一連のプロセスが見られる良さに加えて、小学生でも簡単にできます。実際に自分の手で砂鉄を拾い、炉を作って、大きな鉄の塊を作る、いわば「MY IRON」です。そうした創造の喜びは、子供たちに強烈な印象を残すようです。今では小中学校だけでなく、高校、大学からの依頼もあり、2カ月に1回はどこかでたたら製鉄を教えています。その教育的効果はとても大きいと毎回感じています。

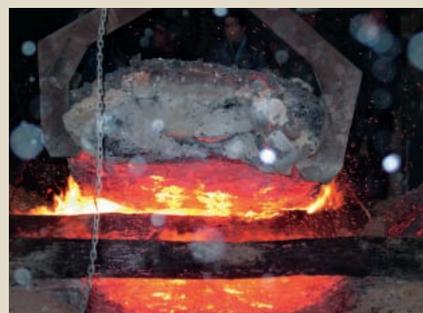
「たたら」の優れた原理を 未来の製鉄に活かしていきたいですね。

今後の夢をお聞かせください。

これまで数多くの新製鉄法が提案されてきましたが、高炉を凌ぐものはありませんでした。たたら製鉄は、1トンの鉄を作るのに、4トンの木炭と砂鉄が必要で、しかも1操業ごとに炉を作り直さなければならないことから、明治時代に外国との価格競争に敗れ、「死んだ技術」とされてしまいました。しかし、たたらの技術改良によって誕生した『砂鉄吹き角炉』は、反応効率と歩留を上げることによって昭和40年まで操業し、現代でも、非常に優秀な「やすき鋼」という刃物鋼のブランドとして受け継がれています。また、現代の製鉄技術は、プロセス全体で考えると石炭の有効活用なども含めて徹底的に効率性が追求されていますが、「たたら」ではこんなに優れた鉄が簡単に作れます。ぜひ、その原理を使って、効率的に、高品位の鉄を作ることにチャレンジしたいものです。「たたらを現代に！」という気持ちです。砂鉄という表面積が大きく反応性の高い原料をもっと有効に使えないか、あるいは反応時間が短いという特長を生かして効率を上げ、不純物の少ない銑鉄を量産できないかなど、夢は尽きません。石炭と鉄鉱石の直接反応は吸熱反応のため、熱供給などの問題点も多くありますが、それを一つひとつ解決していくことが研究する喜びです。



できあがった 鋼(ケラ、右) と除かれた木炭(左)



雪の中、搬出される 鋼(ケラ)



写真提供：(財)日本美術刀剣保存協会、2004年2月7日撮影