



未来社会の電気自動車のイメージ。
今後も自動車に鉄鋼材料は多く使われると予測されている。
(写真提供:ゲッティ イメージズ)

鉄と鋼 第100巻記念

材料分野座談会

新しい 自動車材料開発への挑戦

近年、活発な研究開発によって、自動車材料の高強度化は著しく進展している。今後、自動車材料がさらなる進化を遂げるには既存の概念に捉われない新しい発想が必要となっている。そこで今回は「鉄と鋼」第100巻を記念して、大学や研究機関、企業の研究所などで自動車材料開発に取り組む方々にお集まりいただき、新たな材料開発の可能性について、自由に議論していただいた。

(2014年5月13日収録)

出席者(敬称略)

- | | |
|-------|--|
| 高木 節雄 | 九州大学 大学院工学研究院 材料工学部門 教授 (司会) |
| 梅澤 修 | 横浜国立大学 大学院工学研究院 機能の創生部門 教授 |
| 吉永 直樹 | 新日鐵住金(株) 技術開発本部 鉄鋼研究所 薄板研究部長 |
| 瀬戸 一洋 | JFEスチール(株) スチール研究所 薄板研究部長 |
| 二村 裕一 | (株)神戸製鋼所 鉄鋼事業部門 技術開発センター 薄板開発部薄板開発室 主任研究員 |
| 奥 学 | 日新製鋼(株) 技術研究所 表面処理研究部長 |
| 平岡 和彦 | 山陽特殊製鋼(株) 東京支社部長(市場開拓)兼 自産機CS室 室長 |
| 木村 勇次 | (一社)日本鉄鋼協会 論文誌編集委員会「鉄と鋼」第100巻特命小委員会 委員 |
| 土山 聡宏 | (一社)日本鉄鋼協会 論文誌編集委員会 材料分野担当幹事、「鉄と鋼」第100巻特命小委員会 委員 |

自動車でも今後も重要な鉄鋼材料

高木 皆さん本日はお集まりいただきありがとうございます。今回は、鉄鋼材料の中でも特に読者の関心が高いと思われる自動車材料にテーマを絞りました。ついては、今後の自動車材料開発について皆さんの忌憚のないご意見をうかがいたと思います。

現在、自動車1台当たりで使用される鉄鋼材料は重量で約70%を占めていますが、一部プラスチックやアルミニウムに置き替わっている部品もあります。まず最初の議論として、自動車の中で果たして鉄は今後も使われ続けるのか、ご意見をうかがいたと思います。

瀬戸 1970年代から徐々に減っているとはいえ鉄は重量で70~80%位の割合で使用されてきたので、この後もそれほど

大きく減るとは考えにくいと思います。鉄が使用される理由は3つあります。1つは資源量が豊富で供給安定性に優れていること。2つ目は価格競争力がありコストパフォーマンスに優れていること。3つ目がリサイクル性に優れていること。これら3つがある限り、鉄の優位性は変わらないと思います。もちろん車体の骨格や外板などではCFRPの使用例が出てきています。昨年、欧州において自動車メーカー、材料メーカーが参加した国際会議「Materials in Car Body Engineering」では、将来的にはマルチマテリアル化が進むという意見が多数ありました。しかし自動車メーカーの総意として、2020年に車体の90%以上を鉄鋼材料が占める車は50%以上に及ぶと予測しているの、基本的には変わらないのではないのでしょうか。特に駆動系に関しては現在、特殊鋼が使用されていますが、これが他の材料に変わるとはイメージしにくく、鉄の優位性は当面は変わらないというのが私の意見です。

土山 一時期、アルミニウムにかなり置き替わるのではないかと言われましたが、鉄の本当のライバルはカーボンファイバーかもしれませんね。

瀬戸 車体の骨格と外板の材料では、1番の競合はCFRPと思っています。比剛性、比強度で、鉄よりも優れた特性を持ち、一体で成形できますから。

高木 最近、燃料電池車や電気自動車、ハイブリッドカーが実用化されていますが、これらは部品を根本的に変えてしまう可能性があると言われています。新しい自動車の登場で、鉄の使われ方はどう変わるとお思いますか。

平岡 特殊鋼分野の立場から言うと、2025年頃まで主流になると考えられているハイブリッドカーの場合、基本的にはエンジンはそのまま、変速機構は一部CVTなどがあるものの、現在のシステムが踏襲されるため、特殊鋼はあまり減らないと言われています。ハイブリッドカーになると部品点数が増え、むしろ当面は鉄鋼材料が少し増加するのではないかと予測しています。ただ、電気自動車や燃料電池車になると、少なくともエンジンはなくなるため、コンロッドやクランクシャフトなどの鉄鋼部品がかなり減少するのではないのでしょうか。

奥 私は排気系のステンレス鋼を開発してきました。最近、燃費を向上するために部品がむしろ増える傾向にあり、使用量は増加しています。これが電気自動車や燃料電池車になると、排気系部品は全部なくなるので、現在20~30kg位使われているステンレス鋼は基本的にはなくなることとなります。ただ燃料電池車では、電池のセパレータに金属が検討されており、それが鉄系になるか、チタンになるかアルミニウムになるかは、これらの表面処理を含めた今後の開発にかかってくると思っています。

高木 今後、一気に燃料電池車へ移行するとは考えにくく、また



電気自動車もバッテリーに課題が残っています。当分の間、ハイブリッドカーの時代が続くと考えると、鉄鋼材料が使用されている部品は他の材料では代替できない重要なものばかりであり、将来的にも鉄鋼材料は主要な材料として重要な役割を果たしていきそうですね。

材料性能を向上する理想組織とは

高木 今後も自動車に鉄鋼材料が使用され続けるとして、鉄鋼材料のさらなる高強度化、高機能化を実現するにはどのような課題がありますか。また材料の組織はどのようなものが理想となり、それをどう追求していくのでしょうか。

平岡 パワートレインでいうと、高強度化が求められるのはギアやシャフト、ベアリングなどです。硬度が800HV程度あり、そこから高強度化するのは非常に難しい。そのため高強度化を図るには超微細化が考えられると思います。パワートレインの部品の材料の結晶粒径はオーステナイトで10~15 μm 位、マルテンサイトは高炭素であればブロックで3 μm 位なので、すでに微細粒のサイズなのです。ギアは、表面のみを超微細化する技術が一部すでに研究されていますが、実際の部品への適用が今後は期待されることです。結晶粒径はすでに3 μm なので今後1 μm 以下に微細化しないと有意な差は出ないのではないのでしょうか。

高木 それは表面だけ高機能化する傾斜機能化ですね。ショットピーニングを適用する可能性はありますか。

平岡 ショットピーニングは有力なのですが、影響層が浅いのです。ギアやベアリングは接触荷重による圧縮場内のせん断応力で疲労が進行します。その最大せん断応力の位置は表面から0.数mm位です。部品によっては表面の仕上げが必要で、仕上げ代を入れて表面から1mm強化できれば、従来にない特性が出る可能性が高いと思います。

奥 自動車エンジン排気系のステンレス鋼は強化手法として



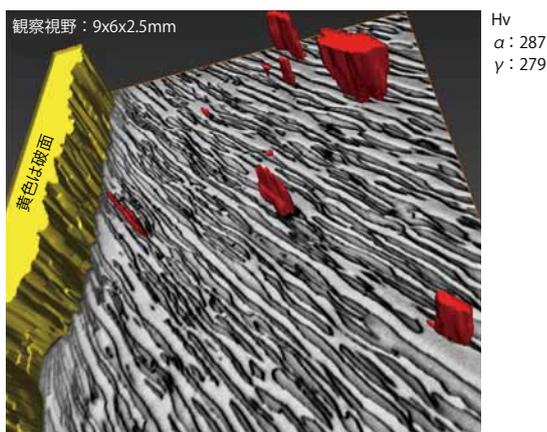
瀬戸 一洋

JFEスチール(株)
スチール研究所
薄板研究部長

相変態を使っていません。必要な特性を満足させるため、フェライトの単相とオーステナイトの単相が多く使用されているからです。強化機構で使えるものは限られており、とくに耐熱ステンレス鋼では結晶粒微細化も強化手段として使えません。要するに主に固溶強化くらいしか高強度化に使えないのです。あとは析出強化を最近使った例があるくらいですね。ですからステンレス鋼では、強度を上げるのにほぼ限界にきているので、壊れやすい場所だけを強化することが今後求められると思います。

また薄肉化については、排気系の場合、エンジンからの透過音を防ぐため、板の厚さを薄くするのが難しいとされています。音をどうやって周りに出さないかが、今後の課題になると思います。

■2相ステンレス鋼に生成した初期ボイドの3次元像



7.1Ni-24.9Cr-3.0Mo二相(フェライト-オーステナイト)duplexステンレス鋼に生成したボイドの3D組織像(全自動シリアルセクションング3D顕微鏡を使ってセクションング像を取得した)。黄色は破面、赤はボイド。オーステナイト体積率は50%、硬度はフェライト相Hv287、オーステナイト相Hv279とほぼ同じとなっている。ボイドは相界面(フェライト側)に沿って生成している。破面の凹凸は組織の積層周期にほぼ対応している。

(「鉄鋼材料の組織と延性破壊」研究会(川真知氏、足立吉隆氏)の実験結果より)

土山 均一なものではなく、場所によって特性を変えていくという方向なのですね。

瀬戸 私は薄板の研究開発に携わっていますが、現在、超ハイテン材の強度は1.2GPa級を超えた領域に進んでいます。適用課題は6つあり、成形性、成形荷重への対応、スプリングバックに対する寸法精度、溶接性、部品になった後の遅れ破壊、薄肉化に伴う部品の剛性低下、が挙げられます。このうち、成形や成形荷重、寸法精度等の課題を解決、または軽減するための手法としてホットスタンプが使われています。ただし残りの課題である溶接性や遅れ破壊、部品の剛性低下などを解決する技術がないと、超ハイテン材の高強度化は難しいと感じています。理想組織という観点では、遅れ破壊に関してこれから組織に何ができるのかを考えていかなければいけないと思っています。今後、超ハイテン材の高強度化の最大のネックになるのは遅れ破壊ではないでしょうか。

梅澤 ハイテン材の課題に対し、大学の立場としては基本的な知見を提供することによって、適切な組織制御に貢献できるのではないかと考えています。例えば、高強度化で製造上問題となる成形性については、応力分配などの情報がスプリングバックを含めた劣化要因を明らかにすることに役立つのではないかと思います。

また実際にできた製品では、遅れ破壊に代表される脆化が問題となりますが、そこには疲労の問題も関わっています。水素が集積して脆化や直接的な影響をもたらす場合、組織のつくり込みの中で水素がどういう形態で集積するのか、またそれを誘因する応力場あるいはひずみ場との関係が明らかになれば、ものづくりとの接点が見えてくるのではと思います。

それから、シャフトやギアなどに用いる機械構造用鋼についても、非常に高強度化された中で、応力に耐える組織形態をどうつくり込むのでしょうか。おそらく面荷重はもっと厳しくなるでしょう。オイルも燃費を上げるためには粘性を低くしなければならず、潤滑の状況も厳しくなりそうです。異物による表面の亀裂の発生等も問題になるため、使用環境に適した金属表面のつくり方を提案するなど、もう少し踏み込んだ情報を大学や研究機関はユーザー企業に提供してもいいのではないかと感じています。

高木 水素の話が出ましたが、水素の役割はBCC系の材料ではもう明らかになっているのでしょうか。例えば遅れ破壊は結晶粒径との関係がよく言われています。もう一つは転動疲労ですね。ベアリングなどは潤滑剤から出てくる水素が影響したり、油との相性もありますが、水素があると必ず疲労が促進され、介在物がある周りにバタフライができやすくなります。現象論では昔から知られていますが、メカニズムは明らかになっているのでしょうか。

梅澤 水素そのものの影響、外的影響が環境因子としてどう働くかは、必ずしも明確にはわかっていないようです。一方で水素の振る舞いは、最近、計算によってさまざまなことがわかってきているので、近い将来、明らかになるかもしれません。

平岡 水素については、これほど意見の分かれるところはないですね。わかっているのは、水素があればそういう現象が起こるということです。私が思うに、水素は微視的にみて塑性変形を局在化させることに関与していて、結果的には白色組織変化を起こします。そういう問題を解決するには、マトリックスの強度を上げていくことが必要な方策だと思います。

吉永 先ほど話に出たホットスタンプですが、良い面もありながら、一方で生産性に劣るという問題があります。そのため、超高強度鋼板の冷間プレスで形状の自由度を上げることが大きな課題となっています。そのための鋼板の組織制御技術に関しては先人から譲り受けた膨大な知恵があります。一方で、その知識をさらに高度なものに仕上げていく必要があります。それにはいくつかの手法があって、多くの知見を先輩から譲り受けています。例えばマルテンサイトなら、焼き戻しマルテンサイトをはじめたくさんのバリエーションがあり、それをどう配置するか、形状をどうするか、ときには積層するのがいいのかもしれない。硬質な材料をソフトな材料で積層すると、硬質なものの延性が上がります。このような現象は二次元では知見が得られていま



奥学

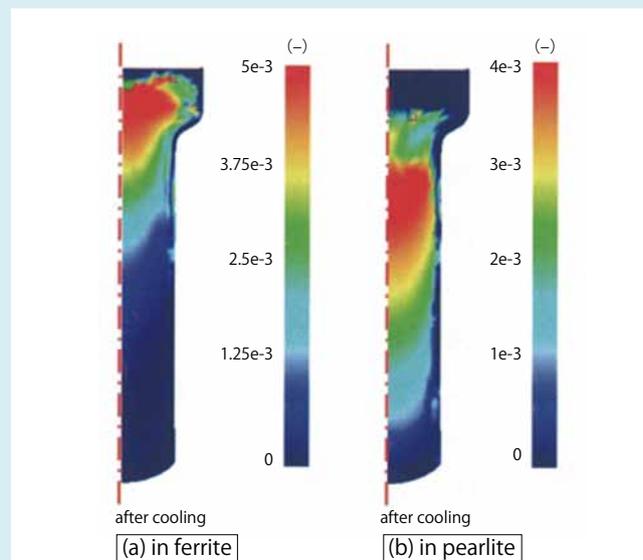
日新製鋼(株)
技術研究所
表面処理研究部長

すが、三次元でどうコントロールしていくかはこれからの課題です。そのため最適な3D組織を明らかにし、そこに近づけていく努力を地道に続けていかなければいけないと思っています。

高木 成形性の改善にレーザーを導入する可能性はありますか。例えば加熱する前に曲げるところだけレーザーで加熱するというような。

瀬戸 すでに検討している研究者がいるようです。レーザーの技術が進歩し、コストも下がっているので、うまく活用して、部分的に軟らかくしたり、あるいは曲げ加工性を上げたいところに適用するのは十分あり得ると思います。

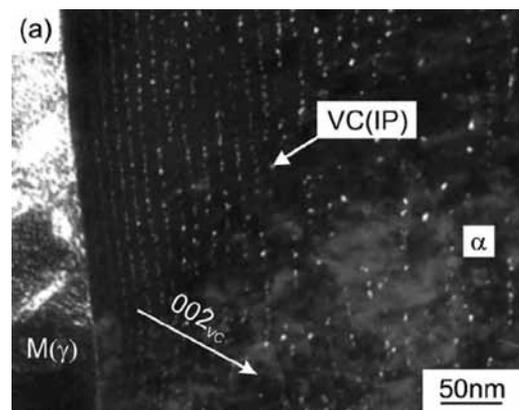
■制御鍛造による強度傾斜機能付与に向けた研究事例



押し出し後のVC析出体積率予測 (S45C+0.5V)

鍛造部材への傾斜機能付与を目指して開発された変形解析システムにより予測したフェライトならびにパーライト中のVC析出量分布。

(出典: 湯川伸樹氏、石川孝司氏、鉄鋼材料の革新的高強度・高機能化基盤研究開発プロジェクト第2回シンポジウム講演予稿集、(2012)、104)



V添加S45C鋼における初析フェライト(α) / オーステナイト(γ) 相界面VC析出

高い強化作用が期待される相界面析出の観察事例。オーステナイトからのフェライト変態時に相界面に沿ったナノサイズのVC析出が認められている。

(出典: G.Miyamoto, R.Hori, B.Poorganji, T.Furuhara :ISIJ Int., 51 (2011), 1733.)



梅澤 修

横浜国立大学
大学院工学研究院
機能の創生部門 教授

高木 鉄鋼材料はうまく相変態を使うと、加熱したところを硬くできるのが特徴ですから、ピンポイントで入熱して冷やすという方法で、通常は焼きが入らないようなものでも焼きが入る可能性があります。レーザー加熱やレーザー熱処理は、実現するのにおそらく数年かからないと思いますね。

二次元から三次元へと高度化する組織制御

高木 先ほど話に出た「3D構造制御」は最近の研究のキーワードになっています。これは、三次元での組織の分布形態を把握して、最適な理想組織に制御するという技術です。そこまで限界に近い制御が要求されているということですね。コントロールしなければいけないファクターが増えて、非常に難しくなっています。

二村 確かに、これまではマクロな組織制御がメインでしたが、これからはマイクロ、ナノ領域での緻密な組織制御や三次元の組織制御へとシフトしていきそうです。

また材料開発では、部品となった時の性能が重要になると思います。これまで薄板では組織制御のためには熱処理が重要な製造プロセスでしたが、今後はつくり込みや部品での加工も踏まえた理想の組織を考える必要があります。結晶粒の微細化が重要になるとは思います。それが薄板の中で成形性や部品性能に対して、どういうメリットとなるか。組織と成形性、組織と部品性能という関係が非常に興味のあるところです。

高木 材料内部のひずみ分布や応力分布については実際に観察しづらいということもあり、これまであまり議論されてきませんでした。画像関連法など、解析技術はずいぶん進みましたね。

二村 ひずみ分布が三次元で見えにくいのは、大きな課題として残っています。削ることで状態が変わるので、そのときのひずみは見えても、変形に伴うひずみは見えにくい。いくつもサンプルを見て、そのうえで中身を推察する必要があります。解決

のきっかけはおそらく計算工学の活用ではないでしょうか。

土山 以前と大きく異なるのは、解析技術が非常に発達したことで、最近では中性子回折でバルクの中での応力状態を見ることができるようになってきました。それからSPring-8など、放射光を使ってボイドの三次元構造を直接観察するという研究成果も上がっています。これからは実験と計算の足並みをそろえて進めていくことが重要ではないでしょうか。

それから、大学での今後の組織制御研究を考えるとさまざまな手法のうち、大きくは3つの柱があったと思います。1つ目は結晶粒微細化、2つ目は析出強化、3つ目は複相化です。これら3つの研究開発はそれぞれ独立して進んできましたが、今後はそれらの融合技術が重要になると考えられます。それには製造プロセスの開発、特性発現機構の理解、強化機構の加算の理解が必要であり、さらにはモデリングによる特性予測に関する研究も必要となります。まずはバルク組織制御を研究している者が3D構造も含めた議論を行う必要があります。それには高度な情報処理技術も駆使していかないと、特性を最大限生かす理想組織像は見えてこないのではないかと思います。

そして大学が果たすべき役割は、指導原理や原理原則の構築ですね。そして物をつくる企業と産学連携、産学官連携で進めていくことが重要ではないかと考えています。

高木 相界面析出というのが最近のトレンドになっていますが、非常に効率的で時間もかからず、微細な析出物が出るようです。バナジウムカーバイドが有名ですね。そのメカニズムは明らかになっているのでしょうか。

瀬戸 おそらく相界面析出は、拡散の速度と変態温度がうまくバランスしたときに生じるようです。微妙なバランスの上に成り立っている現象なのではないかと理解しています。

土山 鉄炭素系でも相界面析出が起こることは、昔から知られています。ベイナイト変態温度とパーライト変態温度の境界あたりの温度で相界面析出が起こることがわかっています。それはベイナイトよりも強度が高かったりするのですが、強化機構や機械的性質は未開拓な領域のようです。

木村 私は15年近く2GPa級の超高力ボルトの研究開発を行ってきたのですが、まずフェライトの結晶粒微細化で2GPaの引張強さを達成しようとする、0.1 μ m位にフェライト粒径を細くする必要があり、これは現実的に不可能でした。そのため、微細化に加えて複合的に強化機構を使ったところ、2GPaの引張強さが実現可能となりました。そこで直面したのが成形性の問題です。通常は球状化焼きなましして軟らかくし、冷間でボルトの形状に鍛造成形し、それを焼き入れ、焼き戻しする工程を経るのですが、2GPa級の鋼材を焼きなましすると、強度が下がらないのです。というのは、合金元素を入れずに強化をすると、Cを多く入れないといけないので、球状化焼きなまし自

体に限界がきて、成形も冷間成形もできなくなります。冷間成形できたとしても、それを焼き入れ、焼き戻して、焼き戻しマルテンサイトの組織にしてボルトとして使おうとすると、遅れ破壊で、頭飛びやねじ部破断が起こり、使いものになりません。そこで根本的につくり方を変え、温間成形に着目しました。温間成形は微細な組織を壊すことなく、むしろ細かくする方向で材料ができるので、靱性も上がり、ようやくボルトの形に成形できることを見出したのが、これまでの経緯です。

この研究で感じたのが、キーワードは「適材適所」ということです。遅れ破壊や疲労破壊はたいてい表層で起こり、遅れ破壊では表層の100 μ mか200 μ m位のところに起点があるので、この組織をうまく制御できれば、実用化するのではないかと考えています。「部分的には壊れても全体が壊れなければいい」という思想を取り入れながら、材料開発と部材開発までが連携できるようなものづくりができればいいと思います。

高木 木村先生の研究は集合組織をうまく使ったものですよ。析出物が出た状態で加工すると、再結晶しにくいという特性をうまく利用しています。高温焼き戻してフェライトセメンタイトの状態では加工すると、ピン止めがきいて再結晶しないのです。結晶粒だけがロールで圧延するときに延びるので、これをうまく使う。そうすると、引張方向には横切る粒界が非常に少ないため、水素脆化を起こしても、他の部分で支えられます。組織を部材の力の働く方向にそろえる技術も、これからの研究の1つの方向性だと思います。

土山 その材料もそうですが、積層鋼板やハーモニックスラックチャーなど、ヘテロ構造をコントロールして構造材の特性を高める技術はトレンドになっていますよね。JSTでも、ヘテロ構造制御というプロジェクトが採択されており、組織制御は均一なバルクの特性を高めていくと同時に、ヘテロ構造を有効に利用していくことが大きな指針になるのではないのでしょうか。

高木 鉄鋼材料で常識と思われていることはずいぶん昔に確立されたもので、我々は教科書に記載されていることをベースとして研究を行ってきたわけですが、実は根本から見直さなければいけないことや未知の部分がたくさんあることが最近わかってきました。そういう意味ではもう一度基礎を見直すことも我々の仕事だと思います。

それから企業における研究のトレンドは、複合化に加えて、マクロな不均一化、傾斜化などが挙げられます。20世紀はどんなものでも均一につくろうとしてきましたが、これからは部材ごとにそれぞれの不均一さをつくり込んでいく時代だと思います。材料の強度は出せても、加工性についてはある程度新たな技術を取り入れていかなければあまり向上しません。開発の余地はまだ多く残っていて、新しいアイデアを取り入れた開発が必要なのだと思います。



吉永 直樹

新日鐵住金(株)
技術開発本部
鉄鋼研究所
薄板研究部長

3Dプリンタで鉄の材料設計が変わるか

高木 これからの自動車材料の開発は、新しい発想でものづくりを考えていく必要があります。そこで今日は、思い切って既存技術とは遠く離れた技術について皆さんと話をしてみたいと思います。

最近話題となっている技術に3Dプリンタがあります。これは3次元に材料を積層して物をつくる技術で、最近では不幸にも3Dプリンタが悪用されて拳銃がつくられたというニュースがありました。形だけで良ければ、3Dプリンタで自動車そのものを作ることでも不可能ではありません。そこで皆さんに聞きたいのですが、3Dプリンタを使って鉄で自動車部材をつくることはできると思いますか。

梅澤 3Dプリンタの将来の可能性ということであればエンジンのような複雑な部品にも適用できると思います。CAD/CAMデータにより、時間さえかければ成形できると思います。日進月歩の開発の中で桁違いにプロセススピードが上げられればコストも下がり、最終的にはもしかすると自動車部材が3Dプリンタによりでき上がってもおかしくはないと思います。

土山 フレーム全体となると、3Dプリンタはスキャンする時間がかかりますよね。やはりボディは板やプラスチック、カーボンファイバー等を使うのではないのでしょうか。

吉永 私も、骨格やパネルよりも、トランスミッションやパワートレイン系などが3Dプリンタの成形に向いていると思います。

高木 3Dプリンタは、性質の違うプラスチックをノズルに配合すると、異なる材料を積層できるという特徴がありますが、鉄についても、性質の異なる材料や今のプロセスではできないものを物理的に混合できるならば、メリットは大きいと思います。例えば表面は耐食性のあるもの、内側は強度の高いものにするなど、場所によって異なる性質にすることができ、傾斜化が容易になりそうです。

自動車において、傾斜化が有効な部材はどこだと思いますか。



平岡 和彦

山陽特殊製鋼(株)
東京支社部長(市場開拓)兼
自産機CS室 室長

二村 例えばボディの骨格系は、衝突安全性なども同時に求められるので、傾斜化により部品性能向上と薄肉化が達成できるようになるかもしれません。またエンジン部品は表面処理が多く施されているので、機能性を付与する方法として傾斜化はメリットがあるのではないのでしょうか。

木村 3Dプリンタなら、溶けた金属を急冷凝固させることができるのも大きな特徴です。鉄の場合、低くても1,200℃位の温度でノズルから細い粉末状、液滴として噴射することになると思います。それが金属につくと、冷却速度が1,000℃/sec以上になる可能性があります。以前私は、メカニカルアロイングという混合金属粉末を超強加工して新たな合金をつくる研究をしていましたが、粉末の場合だと複雑な形状ができませんでした。3Dプリンタで急冷凝固粉末を使えば、固相で特殊な合金ができる可能性があります。また超微細な結晶粒ができ、単純な成分でも強度を上げることが可能になると思います。

高木 結晶粒が細かくなると、強度に加えて疲労特性や靱性が良くなるのがわかっていますが、1μm以下の微細粒の材料がどうなるかは全くわかっていません。

通常、不純物は鉄鋼材料では偏析すると悪さをするので嫌われますが、超急冷状態で、しかも融点を下げて微細粒組織

を作り込むという観点からすると、P、S、Bなどの元素はむしろ有用な合金元素ということになるかもしれませんね。

ところで、鉄炭素系の材料を超急冷凝固させたらどういう変態が起こると思いますか。

土山 どういう変態が起こるかはよくわかりませんが、組成に縛られなくなるのが大きなメリットではないでしょうか。溶解し凝固するときは状態図があり、固溶できる元素の量が決まっているので、その範囲で成分設計しないとイケません。3Dプリンタの技術を応用すれば、任意に組成を得ることができるので、我々が知らなかった超高炭素濃度の鉄鋼材料ができたり、学術的にも意味のある成果が得られるかもしれません。

吉永 3Dプリンタが導入されると強化機構も変わってくるのでしょうか。現在は、板の製造プロセスやプレス等の加工も考慮しながら、最終的に部材になった時に必要となる要件を満たすように材料設計をしています。同じ部材を3Dプリンタで積み重ねて成形する場合、果たして現在と同じ成分で良いのかは全くわかりません。

二村 先ほどお話のあったPですが、もし無害になったら、もっと積極的に使えますね。Pの固溶強化は非常に良いですから。

木村 Pにしても、偏析や不均一性が特性を劣化させているので、それを全く考えずに材料設計ができるのではないかと思います。

高木 結晶粒が大きな材料ではPは間違いなく悪者ですが、それは我々が知っている世界を前提として判断していますよね。3Dプリンタでは凝固速度を非常に大きくすることができますので、アモルファスとは言えないまでも超微細な組織を直接作り込むことも可能と考えられます。溶接などの技術に関連して、鉄鋼材料の冷却速度と凝固組織の関係はある程度明らかになっていますが、超急冷で凝固させた鉄鋼材料の組織や機械的性質については解明されていないと思います。



試作や金型への適用に期待

高木 鉄に3Dプリンタを適用する際、最も大きな課題は鉄の融点で、融点を下げなければ適用は難しいでしょう。二元系より三元、四元と合金元素の数を増やしていけば一般的には共晶温度は低下しますので、融点を1,000℃以下に下げられれば実用化の可能性が出てくるのではないのでしょうか。

適用が可能となったら、どういう組織をつかって強度を出していくか。これは従来の鉄鋼材料と全く違った方法を考えなければいけません。アイデアとして、肉盛り溶接はどうでしょう。部材の上に溶接を施していくので、一種の3Dによるものづくりだと言えます。そのノズルを小さくして自由自在に形状を制御できるようになれば、もうこれは3Dプリンタですよ。金属粉末を溶かして吹き付けながら部材を作るオスプレイ法も一種の3Dプリンタですよ。

平岡 鉄鋼材料では鍛造によって比較的複雑な形状の部品を製造することができます。熱間鍛造であっても冷間鍛造であっても、最大で1分間に100個位のオーダーで成形できるので、成形性だけ見ると3Dプリンタに勝ち目はないと思います。ただ部品の小型化は間違いなく進めなければならず、剛性の問題を解決しなければ、小型化には限界があると言われてます。特にねじられる部品は剛性が重要なので、3Dプリンタで積層構造にしたり、あるいは複合化して疲労強度や剛性を上げることができれば、適用の可能性は高まるのではないかと思います。

木村 試作ではもう3Dプリンタを適用しているのですよね。試作品は鋼でつくっているのですか。

梅澤 アルミニウム合金などです。最初は砂型を3Dプリンタで作り、薄肉のアルミニウム合金鑄物の試作に適用したのだと思います。試作品の砂型をつくることは、かなり前から行われていますが、量産化するにはコストを下げる必要がありますね。

土山 複雑な形状のダイカストなど、金型は意外に適用が早い



二村 裕一

(株)神戸製鋼所
鉄鋼事業部門
技術開発センター
薄板開発部薄板開発室
主任研究員

かもしれないですね。なにより一番のメリットは、複雑な形状が切削加工なしでできるということですから。

梅澤 一方で、切削加工もCAD/CAMデータを利用して精度よく加工できるようになっているので、3Dプリンタとの競争ですよ。

土山 現在は3Dプリンタによるものづくりが始まったばかりですが、プラスチックの次にアルミニウムで容易になれば、次は銅が考えられます。鉄系材料も融点を十分に下げることができれば、そう遠くない話になるかもしれません。自動車部品に使われるというだけでなく、試作品や量産する前の単品のものづくりに、3Dプリンタはかなり有効かもしれないですね。

相変態も含めたトータルな研究が必要

高木 鉄鋼材料では、アルミニウムや銅などの金属とは異なり、固体状態での相変態があるところに大きな特徴があり、これまで、高温の γ 単相域から冷却したときにどのような相変態が起こるかという点に着目して多くの研究がなされてきました。しかし、凝固過程から一貫して鉄鋼材料の相変態を議論した例は少ないように思います。3Dプリンタを鉄鋼材料に応用しよ





木村 勇次

(一社)日本鉄鋼協会
論文誌編集委員会
「鉄と鋼」第100巻
特命小委員会 委員

(独)物質・材料研究機構
元素戦略材料センター
主幹研究員

うとすれば、凝固段階から室温に至るまでの非平衡な相変態の挙動を明らかにする必要がありますので、新たにおもしろい学術分野が開けることも期待できますね。

また、3Dプリンタによる成形方法は、雨水の代わりに溶けた鉄を降らすようなもので、液滴は下地に接触した瞬間に固まってしまいます。凝固部の組織が微細であるということも重要ですが、界面がうまく密着して空隙ができないということも重要な要素の一つだと思います。これは実現できるのでしょうか。現在実用化されているアルミニウムの場合には問題ありませんか。

梅澤 オスプレイ法では実現できています。凝固形態は変わりますが、非常にファインなアルミシリコン系の共晶合金をつくっています。ただ緻密度という点では空隙が入るので、必要に応じて後から押出ししたりしています。

高木 そこがプラスチックと異なるところで、プラスチックは凝固速度が遅いので空隙が残らないように成形できますが、金属の場合は凝固速度が極端に速いのでどうしてもこうした欠陥の問題が残りますよね。

ただ、研究対象としては非常におもしろいと感じています。超急冷状態での非平衡相変態をぜひ見てみたいですね。そこから新たな特性が出てくる可能性もあります。3Dプリンタでは、物を作るだけでなく、鉄鋼材料に特有の相変態がどう変わっていくのかは未知の世界です。液体状態からの超急冷は、鉄鋼の分野でこれから取り組むべき課題の一つではないでしょうか。

吉永 鉄鋼の組織はバリエーションがたくさんあり、相変態を通じて変態生成物ができ、それがさまざまな特性を生み出します。さらに超非平衡という概念が入ってきて、新しい組織、新しい性能を生み出したとすると、それが高速変形特性とどう関わっているかが非常に興味深いですね。

高木 極低炭素の鉄でマルテンサイト変態が起こらないことは周知の事実ですが、冷却速度が極端に大きい場合には、微量のBやCが存在するだけでマルテンサイト変態が起こる可能性もあります。つまり、3Dプリンタで凝固後の冷却速度を大きくし

てやれば、高強度で高靱性の材料を直接作り出すことも期待できます。

吉永 成形の3Dプリンタが進歩したときに、相変わらずプラスチックやアルミニウムと競合しているだけなら、つまらないですね。つまり、鉄に適用する意味やおもしろさが必要です。超非平衡などのように。

奥 新しい手法で、強度に加え材料そのものの剛性が格段によくなるのであれば、構造材料としても魅力がありますよね。

高木 圧延材では加工集合組織が発達しやすく、圧延材から切削によって部材を切り出すと角部が弱くなります。3Dプリンタをうまく活用すれば、応力が集中する箇所に繊維組織を作り込んで局部強度を高めるといったこともできるかもしれませんね。

二村 相変態を含めて研究開発しないと、鉄の成形を3D化するメリットが見出せない可能性はありますよ。

瀬戸 超急冷による非平衡を含めた組織制御で、組織が微細化され、偏析が制御され、それが遅れ破壊に対しても効果があることが副次的に出てくるのであれば、成形の3D化は意味があると思います。

高木 今後、超非平衡相変態は、鉄鋼材料の新たなキーワードになるのではないのでしょうか。現在は、学問分野が、凝固、加工、組織制御と専門ごとに分かれています。3Dの成形技術開発では、凝固過程での dendrite の形成や成分分配、凝固組織と相変態の関係、組織と特性の関係などトータルに見て研究することが必要となりそうです。

将来有望な技術こそオールジャパンで研究を

高木 鉄の3D成形技術には装置の開発も必要になります。溶接技術やオスプレイ法を応用する他に、なにかアイデアはありますか。

瀬戸 レーザーを活用するのはどうでしょうか。レーザーで必要などところに照射をして、部分的に急冷装置をつくるのです。

二村 マイクロワイヤーなども使えるかもしれませんね。

高木 例えばワイヤーを2本用意しておけば、内側と外側で違うものができます。ワイヤーを用いてコンピュータ制御で溶接する技術はすでに確立されていますし、大型船などでは、無人の溶接機が自動で溶接作業をすることなど当たり前になっています。こうした技術は、3D化の入口に相当するといえます。

二村 立体にするとということでは、建築技術などもヒントになるかもしれませんね。

高木 パウダーフィードの場合と溶接の場合を比べると冷却速度は異なり、組織も変わります。鉄鋼材料にはどれが適しているか等、研究すべきことはたくさんありますね。これは非常に

おもしろいと思います。実は、3Dプリンタの利用は夢物語と思っていたのですが、意外に現実味があるのではないのでしょうか。

平岡 3Dプリンタは、重ねることによって形をつくっていくでしょう。特殊鋼製品のつくり方は機械加工で削っていくので、切削屑が非常にもったいない。冷間鍛造は歩どまりがいいのですが、熱間鍛造や削り出しの方法は、精錬してつくったきれいな鋼が大部分スクラップになってしまいます。これに比べ、積み重ねて成形するのは合理的だと思います。むだを省くという点でも、3Dの成形はおもしろいですね。

瀬戸 それは薄板も同じです。製品の形状に打ち抜くので、歩どまりが悪いです。材料開発の大きなポイントは加工性をいかによくするかですが、3Dでの成形ならばそれがいらなくなるのですよね。材料設計の世界がずいぶんと変わりそうです。

木村 そうですね。3Dでは、成形加工が省略できることが一番の利点です。現在苦労しているのは、高強度になればなるほど、スプリングバックが大きく、成形しにくく、金型も痛むことでしょう。それが不要になるのですからね。

奥 成形の3D化ができれば、溶接もいらなくなるのですよね。それはかなりメリットがあると思います。特にステンレス鋼は、溶接部やHAZ部の粒界腐食という問題がありますが、3D成形にすればCやNを入れることができたり、さまざまなことが可能に



土山 聡宏

(一社)日本鉄鋼協会
論文誌編集委員会
材料分野担当幹事、
「鉄と鋼」第100巻
特命小委員会 委員

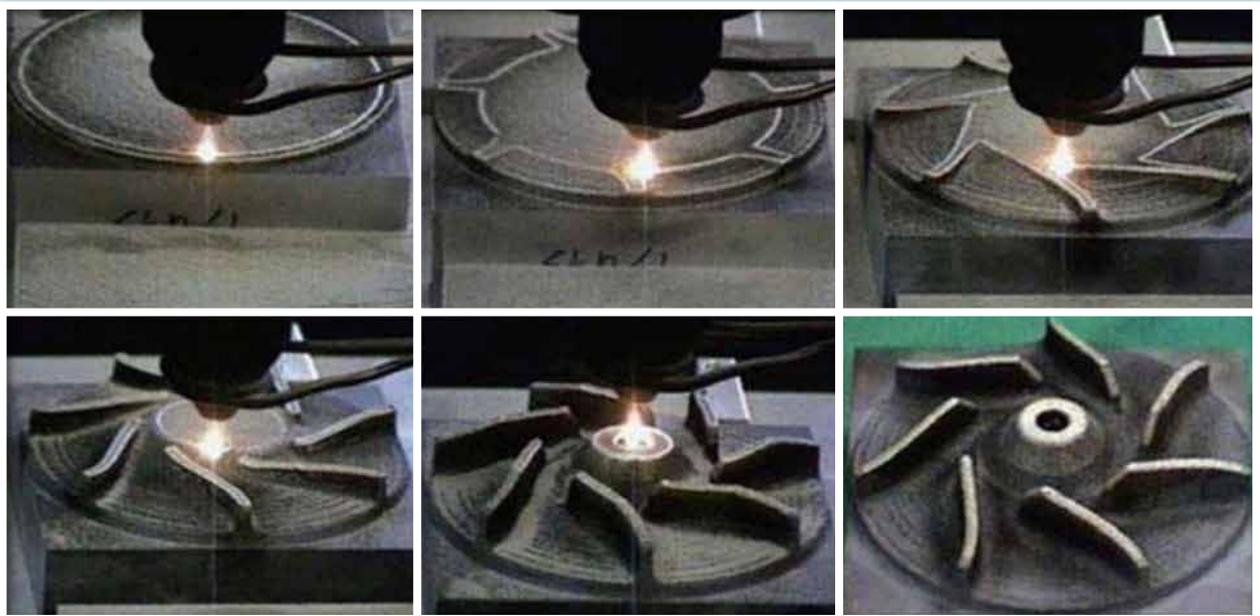
九州大学
大学院工学研究院
材料工学部門 准教授

なりそうな気がします。

瀬戸 超ハイテン材で問題になっている遅れ破壊も、溶接がなくなれば心配が軽減されます。加工もいらなくなり、溶接もいらなくなる。ひょっとしたら産業構造が変わるかもしれません。

高木 今の日本では、実現可能な研究テーマには投資しますが、30年先、50先にもしかしたら実現可能な研究テーマには、国も企業もなかなか投資してくれません。エポックメイキングな発明が、日本から生まれにくい要因になっていると思います。新しい技術はぜひとも日本で先行開発し、これに対応した産業構

■粉末金属造形機InssTek Mxシリーズによる3次元金属造形過程



3Dデータに基づいて造形を行なっている様子。通常の造形機は金属粉体の層を敷き詰め、レーザーにて一層ずつ焼結していくが、本機では工作機械と同様のNCデータを用い、3軸同時制御で造形する。ヘッド周囲部分から金属粉体を噴出、同時にヘッド中心部よりレーザーが照射され金属粉体が熔融し形状を形成し立体物を造形する。この方法を用い、切削加工等を行なった製造物に対し、金属コーティングを行なうことも可能である。

(資料提供: (株)システムクリエイト HP http://www.systemcreate-inc.co.jp/products/3d/printer/insstek_mx.html アクセス日: 2014年6月11日)



(前列左から) 瀬戸一洋氏、梅澤修氏、高木節雄氏、吉永直樹氏(後列左から) 二村裕一氏、奥学氏、平岡和彦氏、土山聡宏氏、木村勇次氏

造を世界に先駆けて構築することが大切です。技術立国として生きていくしかない日本が、技術面で他の国々に負けてしまつては、日本経済はおかしくなってしまいます。

土山 こういうことこそ企業だけでは研究投資しにくいので、産学連携が必要になります。この座談会をきっかけにして国家プロジェクトまで発展させる価値のある分野ではないでしょうか。ただ急冷凝固ではなかなか魅力のあるテーマではないので、「成形の3D化に伴う」を付ければ、多くの人が興味を持つテーマになるのではないのでしょうか。

瀬戸 今年度募集された国家プロジェクトは、次世代の3Dプリンタそのものの技術開発と、精密鑄造の金型、鋳型の開発、の2つです。対象としている材料はアルミニウムやチタンなどが中心のようですが。

奥 それを鉄に発展させれば、大きなプロジェクトになると思いますね。

土山 新分野の開拓には大学、企業の垣根を越えたオールジャパンで臨むことが重要だと思います。これまでも大学の基礎研究と企業の応用研究は連携されてきましたが、その多くは1対1の共同研究でした。大型連携組織で対応しないと、海外の研究レベルに追いつかれ、国内の材料研究が衰退してしまいます。

梅澤 今後は材料メーカーが保有する知見やノウハウの重要性がより増していくと思われませんが、個々の企業との共同研究になると、研究成果を外に出すことが難しくなります。そのた

め新しい技術に関しては産学連携で研究開発することが重要だと思います。

瀬戸 確かに、自動車メーカーとの共同研究で最適化した技術は、他への展開が難しくなりますね。

梅澤 新しい技術は、標準化や規格化することが国際競争力の確保のためにも理想です。

高木 3Dの成形技術の研究は、まずは鉄鋼協会の研究会で始めるのに向いていると思います。研究が広範に及ぶので、部会ごとに課題を分担すると良さそうです。

土山 できれば上工程、下工程の連携もあって良いと思います。あるいは材料と機械、構造材料と機能材料など、新分野を開拓するには異分野間の連携が不可欠だと思います。

二村 世界において技術的な優位性を持つ日本の自動車産業と鉄鋼産業がコラボレーションできたら素晴らしい。オールジャパンで新技術に挑戦することで、世界を牽引していくという夢を持ちたいですね。

高木 こうして皆さんと話してみると、鉄鋼材料の製造に関する3D化や解析技術の3D化は意外と大きなテーマで、しかも魅力的だと感じました。これらに関連したプロジェクトが動き出すと、取り組むべき課題もたくさん見出され、鉄鋼材料の研究に興味を持つ研究者の数も増えていくのではないのでしょうか。早くプロジェクトを立ち上げて、研究をスタートさせたいですね。本日は、皆さんどうもありがとうございました。