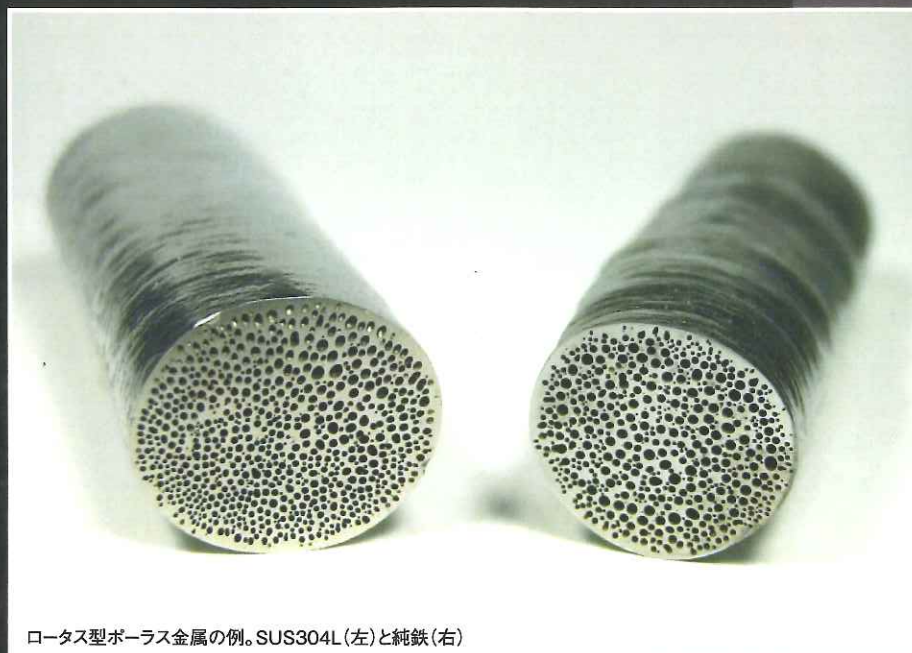


可能性が広がる ロータス型ポーラス金属



ロータス型ポーラス金属の例。SUS304L(左)と純鉄(右)

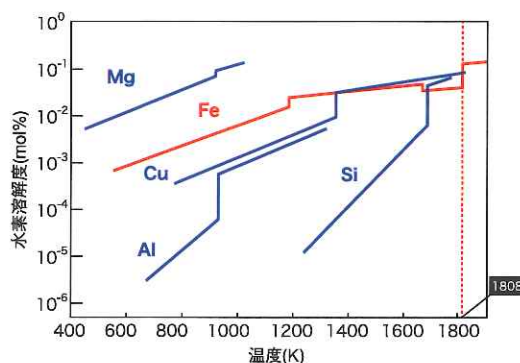
ポーラス金属は、内部を多孔質化した材料として知られている。最近、内部に気孔を細長く形成したロータス型ポーラス金属の研究が注目されている。これまで、求める気孔の形状を制御するために、さまざまな製造法が研究されてきた。また材質も、各種金属での適用が検討され、鉄鋼材料のロータス化を図る技術についても検討されている。ロータス金属は、従来材料に比べ軽量であり、各種機能材料、衝撃吸収材、生体用材料など幅広い用途への展開が期待されている。

自然界にはありふれた「ポーラス構造」

追って来るライオンから逃げるために、追われるシマウマは速く走らなければならない。シマウマが身を守るために、体が軽いことは不可欠である。もし、体を支える骨の内部にいくらか孔が開いていれば、重量が軽くなるであろう。その上、応力に耐えられれば最適だ。人間の骨でも同じことである。人間の体にかかる荷重を支えるため、骨の内部には細かい孔があり、その孔の形状により応力に耐えることができるようになっていっている。

自然界の動物や植物には、いたるところに多孔質構造が見られる。しかし金属材料の分野では、気孔は鑄造欠陥や焼結金属中の空隙などのように「欠陥」としてとらえられるのが普通である。この気孔の形状を制御すると、新しい特性が得られることが明らかになり、これに着目した新材料の開発が進められている。

■金属中の水素の溶解度(0.1MPa水素雰囲気)



溶融金属中のガス溶解度が大きく、固体金属中のガス溶解度が小さい材料において、高圧ガス雰囲気中で溶解し、凝固させることによりロータス金属を作製することができる。

内部に気孔のある材料は、セル構造体やポーラス構造体などと呼ばれ、気孔サイズは数 μm ～数mm程度、内部の形状はセル同士がつながっているものや別れているもの、など多様な材料がある。材質では、金属、セラミックス、プラスチックなどがある。

このうちポーラス金属には、気孔サイズが数 μm ～数10 μm で、固めた粉末を焼結して材料内に微細な気孔を残存させた焼結金属や、気孔サイズが数mmの発泡金属などがある。

しかし、これまでのポーラス金属の多くは、大きな応力を負荷した時に耐えられない、という問題点があった。これを解決するため、内部の気孔の形状をレンコンのように細長く成長させた、ロータス型ポーラス金属（以下、ロータス金属）が開発された。

現在までに研究されてきたロータス金属の形状の特徴をまとめてみると、以下ようになる。

- ・気孔径:数 μm ～1mm程度
- ・気孔の伸びる方向:自由に制御可能
- ・気孔率:最大60%程度
- ・気孔には直進性がある
- ・気孔サイズは比較的均一
- ・閉鎖気孔で内部にガスが充填されている

このような形状により、従来の発泡金属や焼結金属に比べて強度に優れ、制振性に優れる、などの特徴がある。

しかし何よりも、ロータス金属の大きな魅力は、内部に気孔が分散する独特な構造によって、緻密材料では難しかったある程度の強度を保持しつつ軽量化が実現することである。また、さまざまな金属をロータス化することにより、多様な特性を持つ軽量構造材が生まれる可能性が広がる。

水素ガス溶解度の変化を利用して ロータス金属を作製

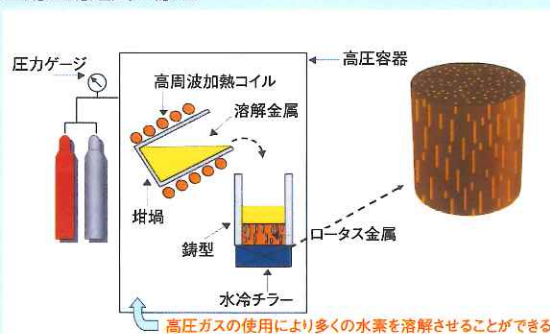
ロータス金属を作製する原理は以下のとおりである。

溶融金属中に水素などのガスを溶かし込んでおき、これを凝固させる過程で溶けきれない過飽和となった水素が気孔を生成することによってロータス金属を作製することができる。

金属材料の温度変化に伴う水素溶解度（図参照）を見てみると、高温の液相では水素ガスが多く溶解しているが、融点において溶解度は大きく変化し、固相になると溶解度は小さくなる。特に、溶融金属中の水素の溶解度が大きく、固体金属中での溶解度が小さい場合に、気孔が生成しやすくなる。鉄の場合は結晶の構造が変わるので、温度変化により水素溶解度が細かく変化するが、液相と固相とで水素溶解度が1桁ほど変化する点では他の金属と同様である。

ロータス金属を作る代表的な方法は「鋳型鋳造法」である。ま

■鋳型鋳造法の原理

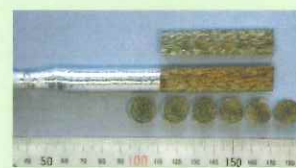
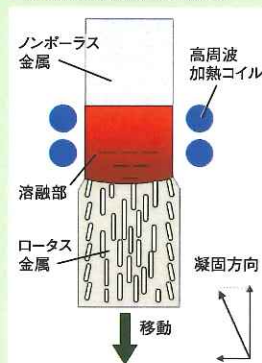


高圧容器の中で、坩堝内に金属素材を挿入し、高周波加熱によって溶解し、そこに水素ガスを溶解させる。坩堝から鋳型に溶湯を鋳込むと、溶融金属は底面から徐々に一方方向に凝固し、この時気孔が形成される。（鋳型の底面は水冷されている）



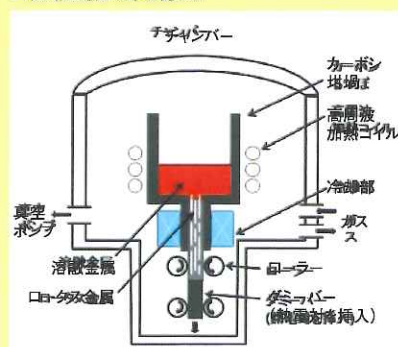
鋳型鋳造法の作製装置。この装置では、10kg程度のロータス金属を作製することが可能である。

■連続帯溶融法の原理



連続帯溶融法による直径15mmの太さのロータス型ステンレス鋼。ロータス化された部分は、直径が5mm程度広がっていることがわかる。

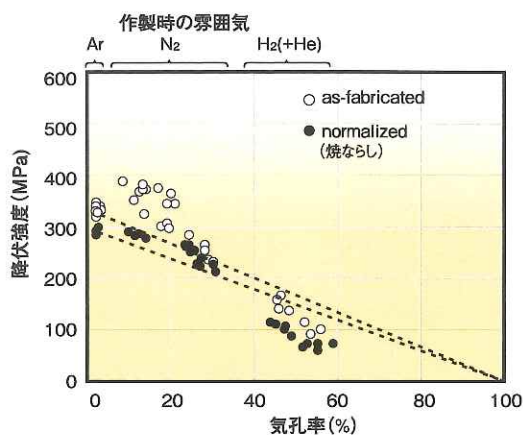
■連続鋳造法の原理



ダミーバーを、ピンチロールの移動機構により一定速度で連続的に移動させることにより、長尺のロータス金属を製造することができる。

ロータス金属の機械的特性

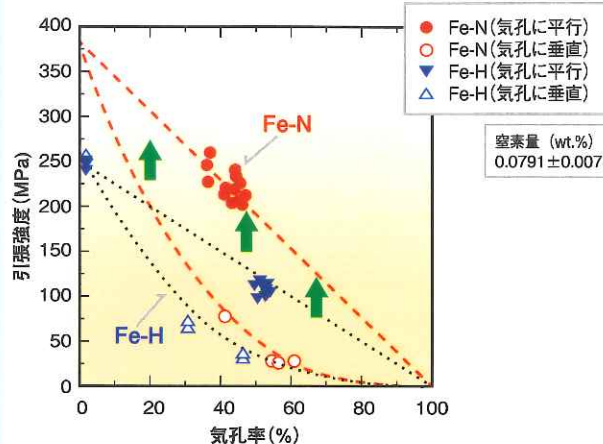
■ロータス炭素鋼の気孔率と降伏強度の関係



窒素ガスで作製されたロータス炭素鋼の気孔率30%までの降伏強度は、ノンポーラス炭素鋼(気孔率0%)とほぼ同程度で、窒素の固溶強化による。水素ガスで作製された炭素鋼では気孔率の増加とともに強度は減少している。

■ロータス鉄の引張強度の比較

(使用ガスが窒素と水素の場合の比較)



水素雰囲気で作製されたロータス鉄(純鉄)は、気孔率の上昇とともに引張強度が低下する。しかし窒素雰囲気で作製されたロータス鉄は、気孔率40%であっても、ノンポーラス鉄と同程度の強度を示している。これは、窒素による固溶強化によるものと考えられる。

ず、数十気圧に耐える高圧容器の中で、坩堝内部に金属素材を挿入後、高周波加熱によって融点より100~200℃高い温度まで加熱して溶解し、容器内に高圧水素ガスを充填し熔融金属中に吸収させる。次に、坩堝から鋳型(底面部は水冷チラーで冷却した銅板)に溶湯を鋳込む。これにより、熔融金属は底面から上方へ徐々に一方向凝固し、同時に気孔が上に向かって形成されていく。

求める気孔の形状を作りだすには、上記の工程に必要な因子を調整する必要がある。細長い気孔の直径の大きさは凝固速度、気孔の方向は凝固方向、気孔率は加えるガス圧力で決まる。

この鋳型鋳造法により、銅やマグネシウムなどでは均一で微細な気孔を形成することができるが、ステンレス鋼では気孔が不均一で粗大化してしまうという問題があった。この現象は、ステンレス鋼の熱伝導率が低いことが原因であった。つまり、熱伝導率が低いと鋳型底部の冷却装置に近い部分では凝固速度が速いが、冷却装置から遠い部分は放熱が不十分であるので凝固速度が遅くなり、結果的に気孔が合体して粗大化するのである。

この問題を解決するため、材料を部分的に溶解する方法が検討された。まず、材料(ロッド)の一部分だけを高周波加熱コイ

ルで溶解する。溶融状態となった部分では、平衡濃度のガスが雰囲気から吸収される。次にロッドを一定速度で連続的に移動させると凝固速度も一定となり、溶融状態で吸収されたガスが凝固に伴い過飽和ガスとなってほぼ均一サイズの気孔を形成させるのである。

この方法は「連続帯溶融法」と呼ばれ、これによりステンレス鋼や金属間化合物など、熱伝導性の低い材料でも適用できるようになった。ただし、この方法では、製造できる形状がロッドに限られており、量産化には適さなかった。

今後、ロータス金属の実用化を進めるためには、気孔サイズや気孔率の均一化を図り、かつ材料を大型化し量産可能にすることが必要である。そこで、ロータス金属を量産するための技術として、「連続鋳造法」の検討が行われた。

一般に、鉄鋼材料を連続鋳造で作製する時、インゴットは凝固収縮により円滑に引き抜くことができる。しかしロータス金属の場合には、気孔の形成によって体積膨張が起こるため、出口側でインゴットを取り出すのが困難になることが懸念された。ところが実際に鋳造してみると、固相の膨張は上部の液相に張り出すように軸方向にのみ発生することが明らかになり、この問題は起こらなかった。

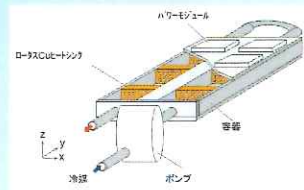
ロータス金属の実用化例

●ヒートシンク



空冷型ヒートシンクに組み込んだロータス銅

電子デバイスのヒートシンクにロータス金属(銅)を用いた例。ポラス材料は表面積が増大することから、放熱部品として期待される。内部を微細な気孔が貫通するロータス金属は、冷媒に接する面積が格段に広く、冷却性能を高めることができる(詳しくは連携記事を参照)。



水冷型ロータス金属ヒートシンクの例

●ゴルフパター



ロータス銅を用いたゴルフパター

ゴルフパターのヘッド中央部に、気孔径の細かいロータス金属(銅)を用いた例。ロータス金属は振動吸収性に優れ、ソフトなタッチでボールを打つことができるといわれている。

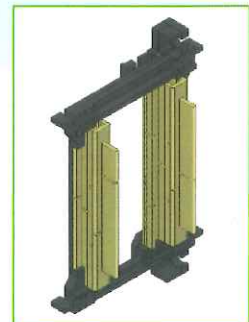


●工作機械



マシニングセンターとサドル部

マシニングセンターの中のサドル(移動体)にロータス金属(炭素鋼)が検討されている例。ロータス金属を使用すれば、軽量なので省エネルギーや経済性が向上し、また振動吸収性にすぐれるので作動時の振動を最小に抑え工作性が高まる。などさまざまなメリットが期待できる(詳しくは連携記事を参照)。



SS400
ロータス炭素鋼

●インプラント(人工歯根)

インプラントにロータス金属(ニッケルフリーステンレス鋼やチタンなど)を用いた例。動物実験で、ロータス金属を歯根部に埋め込むと、1~2か月で気孔内に新生骨の組織や線維質が生成され、高い固着力が得られることが確認された。



4週後 (左)では新生骨が気孔の一部に成長し、8週後(右)では気孔内に新生骨が侵入し固着している。

工作機械で期待されるロータス炭素鋼

これまで工作機械の分野では、構造材料として鋳鉄品が使用されてきた。工作機械の生産性向上を図るためには、軽量化、制振性、熱伝導性などの特長を持つ構造材料が求められる。その候補として検討が進められているのがロータス型ポラス金属である。

次に、ロータス型ポラス炭素鋼の作製方法と機械的性質についての研究成果について紹介する*。これまで、炭素鋼のロータス化については、あまり研究されてこなかった。通常、ロー

タス金属で気孔を作るために用いるのは水素ガスである。しかし量産製造を想定すると、水素ガスは爆発しやすいため安全対策が必要であり、また炭素鋼の水素脆化が懸念される、などの理由から、水素ガスを使用しない製造方法が模索された。

水素ガスの代わりに使ったのは窒素ガスである。窒素ガスなら爆発の恐れはなく、しかも窒素による固溶強化が期待できる。ただし炭素鋼は熱伝導率が低く気孔が不均一になりやすいなどの問題点があり、これらを解決するため、さまざまな圧力条件で実験が行われた。

作製にあたっては、連続鋳造法が用いられた。まず、坩堝内の炭素鋼素材を高周波加熱で溶解する。坩堝底部には溶湯を引き出すための孔と、底に連結された鋳型が設けられている。鋳

*本研究は2005~2007年度に新製造技術プログラム「高度機械加工システム開発 機械加工システムの新構造部材の開発 軽量高剛性構造材料と評価技術の開発」の一環として、(独)新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)委託事業として(株)森精機製作所及び大阪大学産業科学研究所により実施された。

型にはあらかじめダミーバーを挿入しておき、溶湯の流出を防いでいる。このダミーバーを移動機構により一定速度で連続的に移動させることにより、ロータス炭素鋼を作製することができる。

このようにしてできたロータス炭素鋼の引張強度および降伏強度を調べたところ、気孔方向による異方性があり、また気孔率40%のロータス炭素鋼の強度は、ノンポラス炭素鋼のそれとほぼ同等であることがわかった(図参照)。これは、添加した窒素原子による固溶硬化、あるいは窒化鉄による分散硬化により鋼が強化されたためと考えられる。

量産性を高めたガス化合物熱分解法

さらに経済性や量産しやすさを考慮した方法として、現在開発が進められているのが「ガス化合物熱分解法」である。これまでの方法では、高価な高压容器の中で高压ガスを溶融金属に溶かし込んでいたが、この方法に代わる低コストな製造法として開発されたものである。

ガス化合物熱分解法では、溶融金属中に水素化合物(または窒素化合物など)のペレットを添加する。これを鋳型内で分解し、一方向凝固させることによりロータス金属を作製する。例えばTiH₂ペレットを溶融金属に添加すると、熱分解でTiと2Hに分解し、これが水素の供給源となる。またペレット中の金属チタンは、溶融金属中でTiO₂金属間化合物を生成する。それが気孔発生の核生成サイトになり、凝固時に微細で均一な気孔分布を作る。

現在、ガス化合物熱分解法を連続鋳造に適用する技術への期待が高まっている。これが実現すれば、大がかりな設備が不要で、数年後にはロータス金属の低コスト・量産化の目途がつくものと期待される。

さて、ロータス金属の用途としては、これまでスポーツ用品やエレクトロニクス部品、医療機器などへの採用が検討されてきた。



実用連続鋳造装置で作製したロータス炭素鋼
(窒素ガス圧2.5MPa, 引き抜き速度5.20mm/min)

ロータス化により世界初の超軽量金属材料を開発

先ごろ、超軽量ロータス金属材料が世界で初めて作製された。これは、アルミニウムで40%に及ぶ高い気孔率のロータス金属を実現したもので、マグネシウムより軽く、強度に優れる特徴を持つ。

アルミニウムのロータス化は、溶融アルミニウムへの水素溶解度が小さいことから鉄や銅に比べ困難であり、従来の作製方法では気孔率はわずかに2~3%にとどまっていた。そこで、大阪大学の中嶋英雄教授らのグループでは、溶融金属が凝固する際に、溶融アルミニウムを引き抜く速度を遅くすることでゆっくりと凝固するようにし、液相と固相の界面付近の水素の拡散条件を精密に制御した。この方法により、凝固したアルミニウム中に多数の気孔を生成することに成功した。

今後、自動車や航空機などの軽量化部材や、電子基板のヒートシンクなどに使用できる可能性があると期待されている。



マグネシウムより軽量で
加工性、耐食性に優れた
ロータスアルミニウム

今後期待できる分野の1つが、自動車用構造材料である。これまで自動車部品では、軽量化のため鉄からアルミニウムやマグネシウムなどへの代替が検討されてきた。しかし、ロータス化することによりこれまでの緻密材料では難しかった軽量材料が生まれる可能性がある。

すでに海外の自動車では、クラッシュボックスに衝撃吸収性の高いポラス金属を採用した例もある。例えば、衝撃吸収性や強度が求められるバンパー部材やボディフレーム部材などに適用される可能性が考えられている。

またこれまでに、航空機エンジン部品や超音速機の耐熱部品などへ超合金によるロータス金属の適用も検討されている。航空宇宙分野では、ロータス金属は従来材料より穿孔が容易であることから、製造コスト低減につながるものとして期待される。

レンコンのような形をしたユニークなロータス金属。この小さな孔の向こうに、どんな可能性が拓かれるのだろうか。