# モノづくりの原点 — 科学の世界 VOL.36

# 成形性に優れた 軟らかい鉄 薄板(2)

自動車外板パネル用の鋼板には、美しいフォルムを作 り出すためのプレス成形性が要求される。大きな変形 を可能にする軟らかい鋼板を作るためには、鋼中の 炭素や不純物を取り除き、あるいは化合物として無害 化して、鉄の結晶方位を緻密に制御する必要がある。 シリーズ2回目では、前号で解説した鋼板の軟質化 の原理と仕組みに引き続き、過酷な深絞り成形に適し た軟らかい鋼板をトン単位で生産する製造技術開発の 挑戦を紹介するとともに、今後の自動車用薄鋼板開発 の未来を展望する。

### 軟鋼板製造は炭素との戦いの歴史

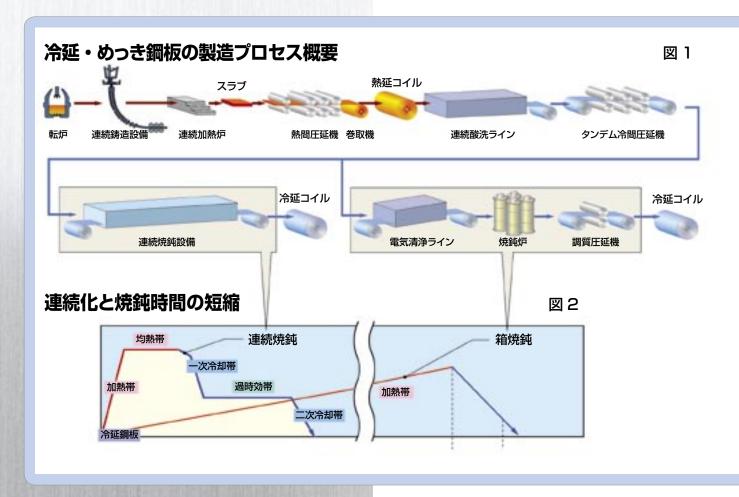
自動車外板パネル用に深絞り成形される薄鋼板には、加 工しやすい軟らかさが求められる。鉄は純鉄に近いほど軟 らかくなるが、その軟らかい鉄を作る阻害要因となるのは 「炭素」であり、軟鋼板製造工程には、炭素や不純物を徹底 的に取り除き、加工しやすいように鉄の結晶方位を制御す るさまざまな技術が織り込まれている。

まず製鋼工程で炭素や不純物の除去を中心とする成分調 整を行い低炭素鋼をつくり込み、鉄の結晶方位を好ましい 方向に制御しやすい状態にする。その後熱間・冷間圧延で 形状・材質を整えて、焼鈍 (焼きなまし) 工程で結晶方位を そろえるとともに鋼板に溶け込んだ炭素 (固溶炭素)を鉄の 炭化物(セメンタイト)として固定無害化し、軟らかくして いる。こうした材質制御を350トンの溶鋼(おおよそ12畳の リビング一部屋分の容量)を0.8mmの薄鋼板に仕上げるま での一貫工程で行っている(図1)。

ここでは、「焼鈍」と「熱間圧延時の材質制御」に焦点を当 てて、炭素を取り除くための製造技術を解説するとともに、 進化する外板パネル用鋼板に込められた、さらに高度な炭 素の制御技術を「IF鋼」「BH鋼板」を例に紹介する。

#### 結晶制御の鍵を握る焼鈍

深絞り用鋼板を製造する上で最も重要な工程は「焼鈍 | だ。冷間圧延で薄く延ばされた鋼板はカチカチに硬くなっ



ているため、この焼鈍工程で軟らかくされる。この軟化は、 冷間圧延で延ばされて硬くなった結晶粒から次々と軟らか い粒が生まれる「再結晶」と呼ばれる現象によってもたらさ れる。また、焼鈍工程では深絞り成形性を向上させるため に再結晶によって結晶の並び方を制御すると同時に、後述 する鋼板材質の経時劣化を抑制するために最終製品中の固 溶炭素量を低減する。

焼鈍方法には大きく分けて「箱焼鈍 (バッチ焼鈍)」と「連 続焼鈍」があり、歴史的には前者の技術が古く、現在でも 世界各地で利用されている。この二つの焼鈍方法の大きな 違いは、加熱と冷却の速度(時間)にある。箱焼鈍ではコイ ル状の鋼板を加熱に1日、冷却に3日程かけてゆっくり熱 処理する。一方連続焼鈍では加熱から冷却まで合計でも10 分程度で完了する(図2)。

箱焼鈍ではゆっくりと加熱されることで鋼中のアルミニウ ム(AI)が窒素(N)と結合して、再結晶で出てくる粒の中で 深絞り成形性に適したテント形の結晶粒だけを選択して大 きくしてくれるため、比較的多くの炭素を含む鋼板でも良 好な深絞り成形性を確保できた。また、ゆっくりと冷却す るために、高温で溶け出した炭素を冷却中に再度セメンタ イト(鉄炭化物)の形で固定できるため、鋼板材質の経時変 化も軽減される。しかし、焼鈍に3~4日もかかることや、 大きな鉄の塊(コイル)を温めたり、冷やしたりするために 均一性に欠けるなどの課題もあり、より短時間で鋼板温度 も均一に処理できる連続焼鈍が導入された(1972年)。連続 焼鈍は生産性や材質の均一性に優れるが、加熱速度が速く、 アルミニウムと窒素が結合する時間が確保できないために、

#### ストレッチャー・ストレインの例 写真 1



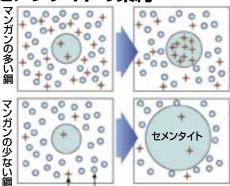
見られる例





プレス品での例

### 熱間圧延後の巻き取り時の セメンタイトの集約



セメンタイトには マンガンと炭素が 吸い寄せられて太 る。しかしマンガ ンの吸い寄せられ る速度が遅いた め、マンガンが多 いとセメンタイト がなかなか太れ ない。

図3

マンガン(Mn) 炭素(C)

深絞り成形性向上の障害となる炭素が本当の意味で「悪役」 となり、より厳格に管理する必要が出てきた。

## 焼鈍後の冷却の工夫で品質変化を防ぎ 滑らかな外板を維持

自動車の外板パネル用鋼板には加工性と同時に表面の滑 らかさ、美しさが求められる。各種の疵以外にも、プレス 加工に伴う表面の小さなしわ(面ひずみと呼ばれる)や模様 の発生を回避することが非常に重要である。

鋼板中に極微量溶けている炭素や窒素は室温でも鋼中を 動き回り、深絞り成形の際にすべり変形をしようとする場 所に集まって、鋼板の変形を阻害する。この現象は「**時効**| と呼ばれ、製造からの時間経過とともに延びが小さくなる とか、硬くなるなどの材質劣化として表れる(時効劣化)。 また、時効後の鋼板を軽加工すると、部分的に変形が集中 した筋状の模様 (ストレッチャー・ストレイン (写真1)) が 発生して外観が損なわれ、自動車外板パネル用の素材と しての商品価値はなくなる。また鋼板が硬くなるとドアの 取っ手部のくぼみ近傍などで小さなしわ(面ひずみ)が発生 する。従って、鋼中に残った固溶炭素による時効劣化を防 ぐために、焼鈍後も固溶炭素が残らないようにする必要が ある。そこで新日鉄では、焼鈍して冷却した後に炭素をセ メンタイト(鉄炭化物)として固定無害化するための熱処理 すなわち「**過時効処理**」を施している。

過時効処理は、700℃以上の高温での焼鈍で結晶の向き を制御した後、鋼板を300℃付近まですばやく冷やし、そこ でセメンタイトの種をたくさん作り、しばらく保持すること で鋼中の固溶炭素を集めてセメンタイトを太らせる処理だ。 この種を作るために硫化物を分散させたり、冷却する温度 を下げるなどの工夫を行って、実用上、時効劣化の無い鋼 を製造している。

# マンガン量と熱間圧延後の巻き取り 温度を制御し、材質の全体最適を狙う

深絞り成形性を向上させるための結晶方位制御には、固 溶炭素をなくすことと、セメンタイトによる加工時の乱れ (前号参照) の影響を最小にすることが重要だ。このために 成分調整と圧延時の温度制御を行っている。

従来、冷間圧延する前に、熱延鋼板を高温で巻き取る方 法が採用されていた。巻き取り後は非常にゆっくりと冷却 されるため、生成したセメンタイトが十分に大きく太り、 加工時に乱れが発生する場所を少なくすることができ、ま た、ゆっくりとした冷却中に、ほとんどの炭素をセメンタ イトに集めることができる。

しかし熱延コイルは大きな鉄の塊なので、高温で巻き取 られるほど表面と内部で冷却速度が異なり、セメンタイト の分散の程度や固溶炭素量がばらつき、部分的に結晶の向 きが十分にそろわない場合がある。これを回避するために は、巻き取り温度を下げることが最も効果的である。この

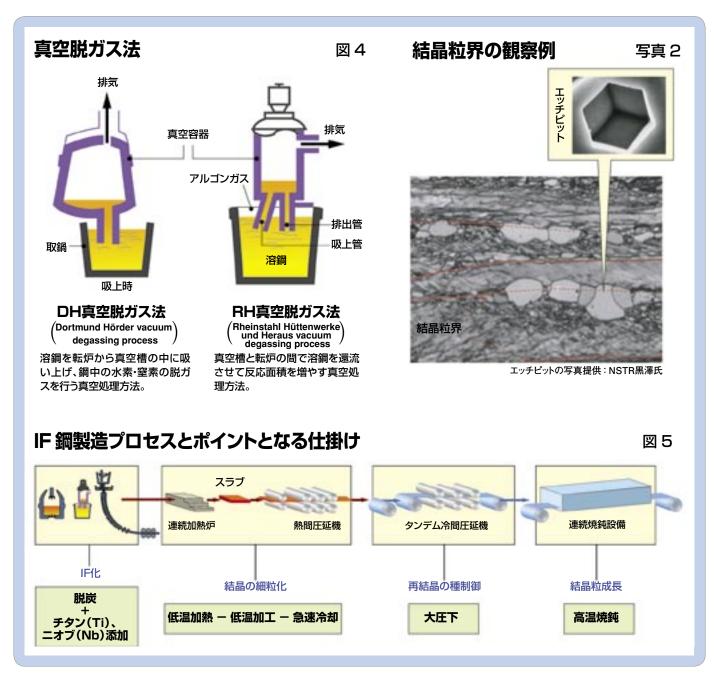
矛盾を解決するために、セメンタイトの太る速度を詳細に 検討した結果、鋼板中のマンガンを低下させることで低温 巻き取りでもセメンタイトが太りやすくなることが判明し た(前頁図3)。そして比較的低温での巻き取りでも炭素と セメンタイトを理想の形に制御でき、安定した深絞り成形 用の鋼板が製造可能となった。

# IF鋼—成分調整、温度管理、圧延制御で 理想的な結晶方位を生み出す

1980年代後半、車体形状の複雑化やいくつかに分かれて いた部品の一体化の要求とともに自動車用外板パネルにそ れまで以上の過酷な深絞り成形が求められるようになり、 製鋼工程で低炭素鋼(0.01~0.05重量%程度の炭素を含む) よりさらに炭素を極少化 (純鉄化) して結晶方位を制御しや すくする技術が追求されるようになった。

純鉄化するプロセスの鍵は、極限まで炭素や不純物を除 去して成分を整える「製鋼工程」にある。そのポイントは、 1970年台に登場した「真空脱ガス法 (二次精錬)」だ。転炉 で一次精錬が終わった鋼を、さらに真空槽の中で脱炭、脱 ガス (脱水素、窒素)、脱酸し、炭素含有量を10ppm (※1) 以下まで落とすことが可能となった(図4)。

このようにして製造された純鉄に近い鋼にチタン (Ti) や ニオブ (Nb) を適量添加し、わずかに残った炭素を無害化 する。これがIF (Interstitial Free) 鋼だ。冷間圧延で延ばさ れて硬くなった結晶粒から焼鈍時に軟らかい粒が生まれる 再結晶の過程を観察すると、冷間圧延前の粒と粒の境界(結 晶粒界)で生まれた粒が深絞り性向上に有利なr値(※2)の 高いテント状の結晶方位を持つことがわかる(写真2)。従っ て、できるだけ多くの結晶粒界を準備するために、冷間圧 延前に結晶粒をできるだけ小さくする。IF鋼は不純物が非 常に少ないため、結晶粒が簡単に大きくなってしまう。こ



※ 1 ppm: parts per million。100万分の1の濃度を表す単位。 ※2 r値(ランクフォード値):鉄の縮み変形のしやすさを表現する指標。

のため、熱間圧延を始める際の加熱温度を低くし、できる だけ低温で熱間圧延し、結晶粒が大きくなる前に冷却する。 また、チタンやニオブの添加量を調整することでさらに結 晶粒を小さくする。このようにして最適化された熱延鋼板 は冷間圧延後、今度は結晶粒界から生まれたテント状の結 晶方位を持つ粒をできるだけ太らせるために高温で焼鈍さ れる。IF鋼は低炭素鋼と異なり、鋼中の炭素はチタンやニ オブで固定されているため、時効劣化の心配も無い。

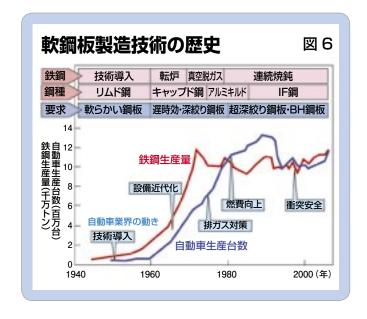
現在、新日鉄では高度な製鋼技術と圧延技術、そして熱 間圧延から連続焼鈍までの緻密な温度制御技術で、過酷な 深絞り成形に耐える高品質なIF鋼を生産している(図5)。

# 軟らかい、けれども強い"生モノ"。 「BH鋼板」

外板パネル用鋼板には軟らかさと美しさが要求される が、完成した車では外板が衝撃に耐えられる特性も求めら れる。小石が飛んできたり、駐車場で隣の車にドアをぶつ けられたりしたときに簡単に凹んでしまわない特性(耐デ ント特性) も自動車外板パネルの重要な機能の一つである。 1mmに満たない薄い鋼板に耐デント特性を付与するには、 鋼板を硬くする必要がある。しかし、硬い鋼板はプレス成 形しにくいばかりでなく、プレス成形した時に部分的に小 さなしわ(面ひずみ)が発生して外観を損ねる。この矛盾を 解決するために開発されたのが「プレス成形時には軟らか く、商品完成後の使用時には硬くなる鋼板 | である、「BH (焼 付硬化: Bake hardening) 鋼板」だ。BH特性とは、鋼板に 極微量残された固溶炭素が、自動車車体に塗装された塗料 を乾かす焼付け工程(約170℃で20分程度)時に鋼中を移動 し、すべり変形をしにくくすることで鋼板を硬くする特性 である。新日鉄では、チタンやニオブの添加量を制御して、 室温で約6カ月間保管しても性能に変化がなく、成形に悪

影響を及ぼさない微量の固溶炭素をあえて残し、成形後の 塗装焼付け時に部品を硬くするBH鋼板を開発し、実用化 している。このような製品は、いわば「生モノ」で、賞味期 限とも言える耐時効性の保証期間に使用されることにより、 外板パネルの薄手化すなわち軽量化にも貢献している。

今特集では自動車の美しいフォルムを作り出す外板パネ ル用鋼板を取り上げ、その成形性向上の機構と製造技術に ついて概説した(図6)。現在の自動車産業界では、CO<sub>2</sub>排 出量削減に代表される環境との調和と、衝突安全性向上な どによる社会との調和を両立させる活動が活発になってい る。一般的には相矛盾するこれらの要求に応える技術の一 つが高強度鋼板の適用拡大である。より強くそしてより軽 い自動車を目指して、高強度鋼材の開発とその適用技術の 革新が進められている。次回の薄板シリーズでは自動車用 高強度鋼板に焦点を当て、進歩し続ける鉄鋼製品をミクロ なスケールからのぞいてみたい。



# 優れた成形性をベースに、強く、しなやかな鉄へ

鉄鋼材料はお客様のさまざまな要求に答えてその材料特 性を進化させてきました。この過程で、生産性や品質、さ らには材料特性を大きく向上させるために、製鋼から圧延・ 焼鈍、そして表面処理にいたる各製造工程で、技術革新や 設備導入が進められてきました。

自動車は私たちの生活の一部であり、切り離すことので きない存在です。それゆえに私たちを取り巻く環境や社会 との調和が強く求められています。この中で自動車には、 強さという特性をも捨て去った徹底的に軟らかい鉄「IF 鋼 | から、タイヤをしなやかにそして強くするための世界最強 のワイヤまで、ありとあらゆる特性の鋼材が適用され、そ の性能向上に貢献しています。外見だけでは違いがわかり にくい鋼材ですが、自動車の安全性向上、燃費改善による

CO<sub>2</sub>排出量削減などを目指し、あらゆる成形加工に耐え、 強く、しなやかな鉄へと着実に進化しています。社会や環 境の変化に対応する「鉄」。今後もその歩みを止めず、素 材の立場から社会へ貢献していきます。

監修 新日本製鉄(株) 技術開発本部 鉄鋼研究所 鋼材第一研究部長

> 学 (たかはし・まなぶ) 高橋

プロフィール

1956年生まれ、熊本県出身。

1982 年入社。

自動車用薄鋼板、特に高強度鋼板の 研究開発に従事。

2007年4月より現職。

