成形性に優れた軟らかい鉄薄板（1）

現在、自動車や家電、建材などに幅広く使われている薄鋼板の技術開発史は、さまざまな形状に成形しやすい「軟鋼板」への挑戦から始まった。このシリーズでは２回にわたり、過酷な成形が求められる自動車外板パネル用の薄鋼板（写真１）を例に、成形性向上に不可欠な結晶組織制御や、大量生産を可能にする製造プロセス技術開発など、薄鋼板の技術開発の原点となった「軟らかい鉄」への挑戦を紹介する。

本来の鉄の特徴「硬さ」を捨てる技術開発

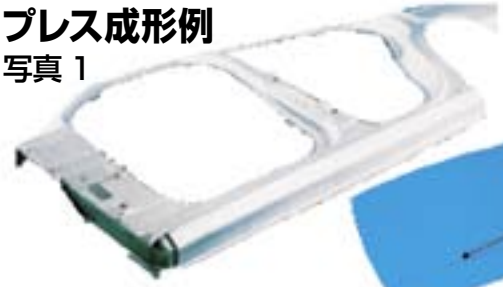
日本の鉄鋼業において、薄鋼板の開発の歴史は自動車産業の発展とともにあった。薄鋼板は、外観を構成するドアやフードなどの外板パネルをはじめ、フロアなどの内板、構造部材（骨格）、床下部材（シャシーなど）に使用され、成形性向上や、高強度化による軽量化など、時代が求める自動車の進化を材料の側面から支えてきた（**図1**）。

19世紀末に始まった自動車製造では当初板金加工（叩き出し）による部品製造が主体であったが、20世紀に入ってから金型を用いるプレス成形が本格的にスタートした。プレス成形の高速化とともに、自動車用鋼板はより複雑な形状への成形性、よりきれいな表面性状、さらには金型数の削減への対応なども要求されるようになった。これらの要求に応えるべく進められた自動車用鋼板の技術開発は、鋼板をできるだけ軟らかくし、デザイナーが要求する金型形状の転写を容易にすることであった。

鉄鋼業界では、製鋼・圧延・焼鈍といった薄鋼板の全製造プロセスにおいて、「より軟らかい鋼板」の製造という命題を掲げ、技術開発に取り組んできた。その挑戦は、いわば「硬い」という本来の鉄の特徴を捨てる歴史でもあった。

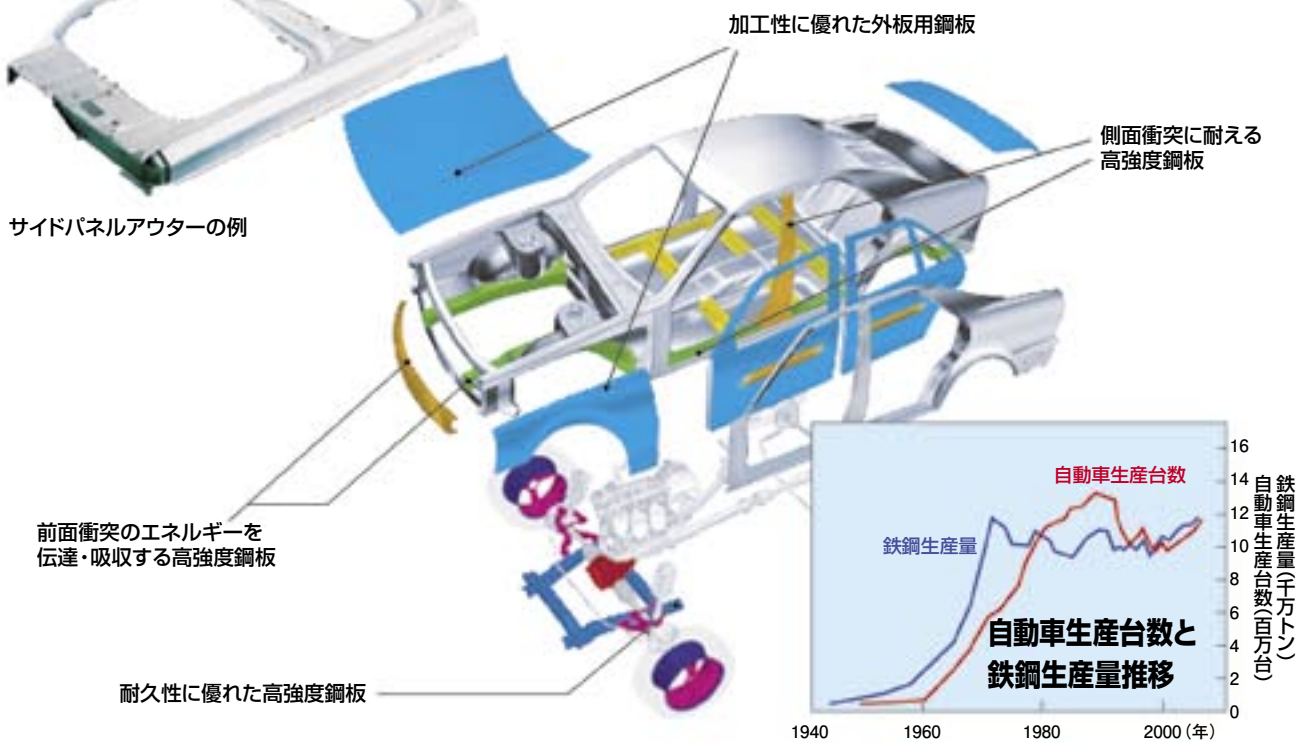
その後、鉄の成形性を飛躍的に高める製造技術の高度化とともに、1980年代に入るとアメリカの排ガス規制

プレス成形例
写真１



サイドパネルアウターの例

薄鋼板が使用される自動車の部位　図１



「CAFE(※)」などに対応して、燃費向上のための車体軽量化が要求され、さらに衝突安全性への要求が高まる中で薄鋼板には薄く（軽く）しても強い「高強度化」が求められるようになった。現在では、外板パネルには軟らかい薄鋼板を使い、骨格に使われる鋼板を高強度化するという二極化が進んでいる。高強度鋼板の使用は最近の10年間で一層加速されているが、かつて鋼材を軟らかくするために生み出された多くの製造プロセス・設備技術が、現在求められている高強度鋼板製造の基盤技術になっていることは必ずしも偶然ではない。

自動車外板パネルに求められる独特な変形

ほぼすべての場合、自動車用薄鋼板はプレス成形によって部品に成形される。薄鋼板を金型形状に変形させるために幾つかの特徴的な変形様式がある。一つは風船を膨らますのと同様の変形様式で、板厚を薄くしながら張り出す「**張り出し成形**」。この方法で大きな変形を与えると、一部の板厚が薄くなりすぎて風船が割れるように破断に至る。一方板厚をできるだけ薄くせずに板状の鋼板を深いカップ状に変形させるのが「**深絞り成形**」と呼ばれ、自動車の外板のように複雑な形状をした部品の成形には不可欠な変形様式である（**図2**）。張り出し成形には軟らかくて良く伸びる材料が適しているが、深絞り成形には軟らかいだけでは十分ではない。

軟らかいハンカチを円筒形の金型に押し付けた場合を考えてみると、割れはしないものの、あらゆるところにシワができて、とてもカップ状の部品にはなりそうにない。ところが成形性の良い円盤状の鋼板を円筒形の金型でプレス成形すると、シワもなく滑らかな部品が成形できる。この違いは、鋼板はハンカチとは違って変形の途中で幅方向に縮むことができることに起因している。軟らかくてよく膨らむだけでなく、まるでろくろを使って円盤状の粘土をカップ状に加工したように、板厚をそれほど薄くせずに板からカップ状にその形を変えることができるのが自動車の外板パネル用鋼板の一つの特徴である。

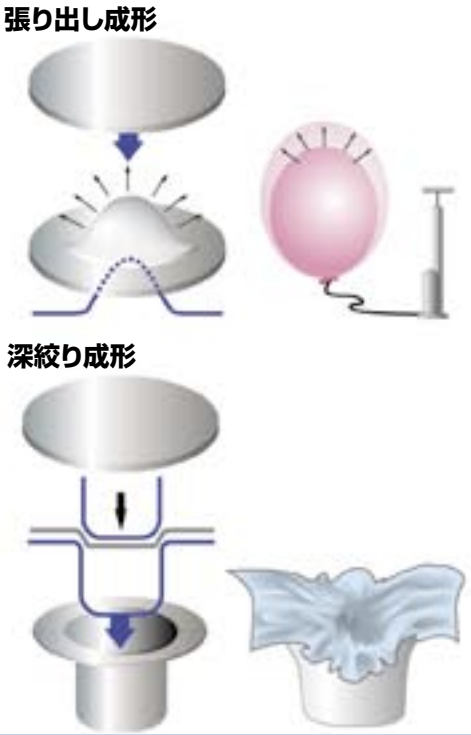
「縮む」現象が過酷なプレス成形を可能に

では、なぜ鉄はこうした多様な変形が可能なのか。その鍵は鉄の結晶のすべり方にある。

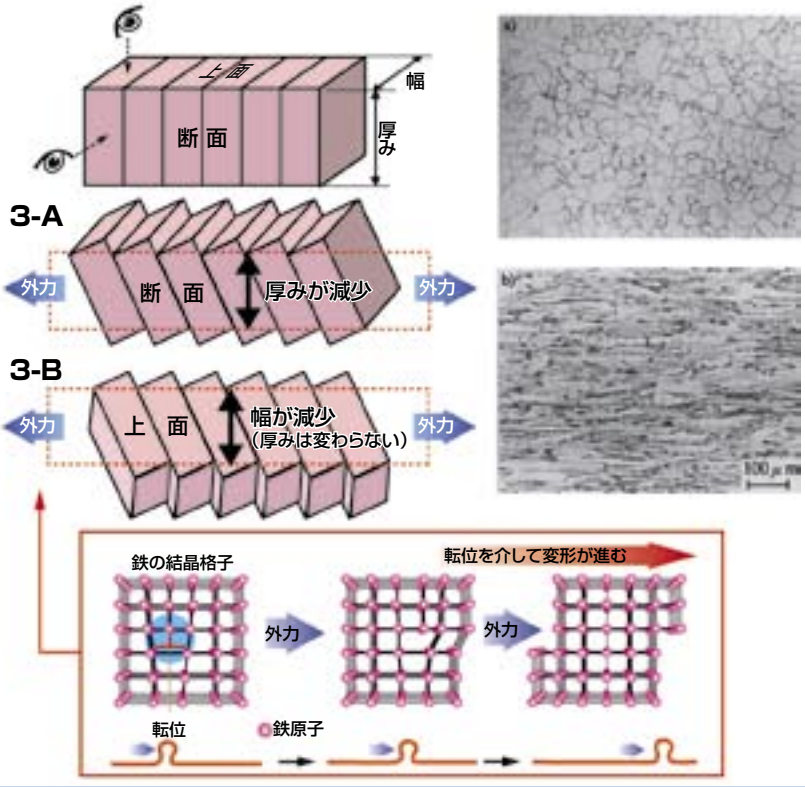
鉄の変形は結晶のすべりによって生じ、この結晶同士の微小なすべりが連動することで大きな変形を生み出す。

例えば、きちんと並べた積み木がそれぞれ少しずつすべると、全体的に長さが長くなっていることがわかる（**図3**）。これがすべり変形である。鉄は原子が規則正しく並んだ立方体を積み上げた結晶構造をしており、この結晶には特定のすべり面が存在する。このすべり面を鋼板の中にうまく配置することによって鋼板のすべり変形の仕方を制御することができる。**図3**の積み木のすべり変形が薄鋼板の幅と

薄板のプレス成形における代表的な変形様式 図2



すべりによる鋼の塑性変形 図3



※ CAFE（Corporate Average Fuel Economy）：アメリカの燃費効率改善法案の総称。CAFE 自体は「メーカー別平均燃費」と訳す

厚みにどのように影響するか考えると、鋼板が伸びると同時に、**図3-A**の場合には板厚が減少しているが、**図3-B**の場合には板厚は減少せずに板幅が減少していることとなる。後者の変形が前述の「縮む」変形であり、鉄の結晶構造におけるすべり面の配置を制御して縮みやすい鋼板を製造することができる。外板パネル用には通常１mm以下の非常に薄い鋼板が適用されることから、板厚が薄くなりながら伸びる場合には容易に破断に至る。一方、縮み変形をうまく利用すると、破断せずに深い絞り変形が可能となる。このような縮み変形のしやすさを表現する指標は「**r値（ランクフォード値）**」と呼ばれ、引張り変形した際の板厚の縮み量と幅の縮み量の比率（板厚縮み量÷幅縮み）で表され、両方が同じように減少する場合を１として、板厚縮みが大きくなればその値はゼロに近づき、幅縮みが大きくなると数値は上昇する。つまり、この数値が高くなるほど深絞り成形性に優れる（**図4**）。

不純物を取り除いて「テント形」の結晶方位を生み出す

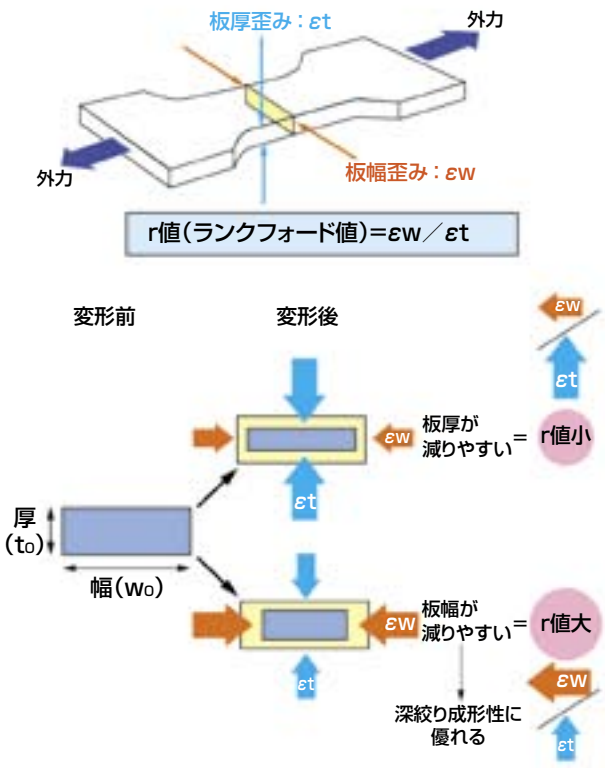
前述のように鉄の結晶構造の中には特定のすべり面が存在する。r値を上昇させて深絞り性を高めるためには、結晶の向きを制御してこのすべり面を最適に配置する必要がある。深絞りに適した結晶の向きと並びは、鋼板を軟らかくするための熱処理を繰り返す中で発見され、その後結晶構造の理解が進むとともに、理論的な背景も確立した。

鉄は拡大してみると、小さな領域（結晶粒と呼ばれる）に分けられていることがわかる。この境界は違う方向を向いた結晶がぶつかったところである。つまり鉄は同じ結晶構造ではあるものの、結晶の並ぶ方向が異なる粒の集合体となっている。各々の結晶粒がどの方向を向いているかを調べる方法は色々と開発されているが、その中の一つの方法による観察例を**写真2**に示した。特殊な方法で鋼板を腐食させることで、サイコロの形をした立方体結晶構造の特定の面の部分を選択的に腐食させることができる（エッチング）。その結果、立方体の結晶構造が結晶粒ごとにどちらを向いているのかを直接観察することができる。このようにして深絞り性に優れる結晶方向を確認した結果、鋼板面からテントのように突き出た三角形に腐食される（＝サイコロの角が鋼板面に向いた）{111}方向の結晶粒が数多くあり、逆に正方形に腐食される（＝サイコロの面が鋼板面に向いた）結晶粒が少ないほどr値が高くなり、成形の際に板厚が薄くならずに幅方向に縮みながら深く絞れることがわかった（**図5**）。

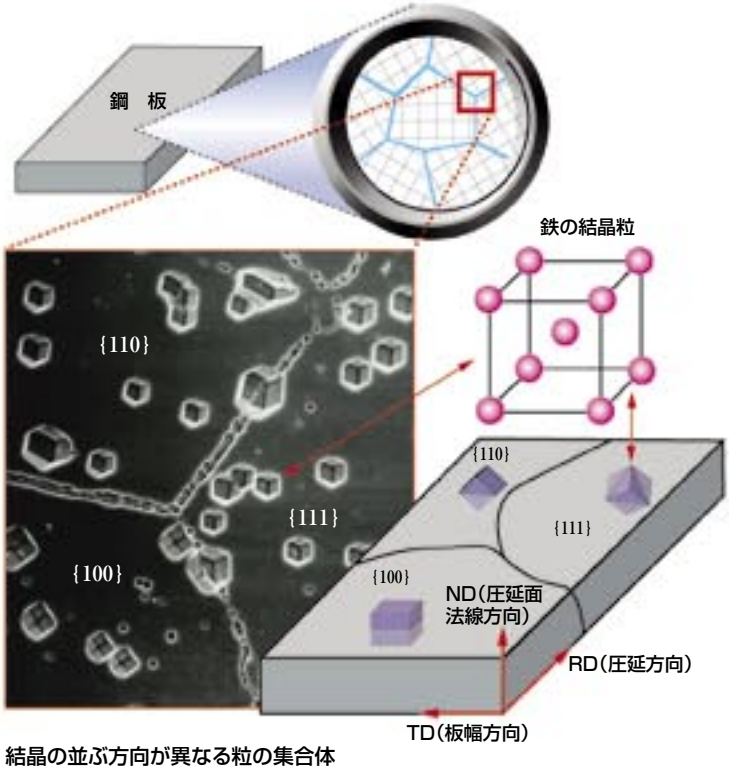
深絞りに適したテント形の方向の結晶粒を数多く生成させ、サイコロの面が鋼板面に向いた粒を減少させる上での邪魔者は、鉄中に含まれる各種不純物元素であり、特に鉄中にサイズが小さい炭素や窒素の原子が溶け込んでいる場合には、結晶の方向をコントロールすることが困難となる。従って、深絞り成形性を向上させるためには鉄中に含まれる炭素や不純物を徹底的に取り除くことが望ましい。

一般的に、厚板や棒鋼などは合金化することで強度や靭

ランクフォード値（r 値）の支配要因 図４



鋼板表面のエッチング写真と模式図 写真２



結晶の並ぶ方向が異なる粒の集合体
{111}方向の結晶粒が多いほどr値が高くなる

性（ねばり）などの特性を上げているが、自動車外板パネルに使われる薄鋼板では、まったく逆の方向を目指し、ひたすら「純鉄」に近づけるための技術開発が進められた。

炭素を操り「無害化」して材質をつくり込む

しかし、大量生産が求められる製造環境下では、効率性・コストの観点から鋼板中の炭素や不純物を完全に取り除くことは難しい。そこで、残存する炭素や不純物をいかに制御して結晶方位をテント形の好ましい向きにそろえていくかが新たなハードルとなった。

深絞り成形する薄鋼板は、製鋼で成分調整を行った後、熱間圧延・冷間圧延で形を整え、最後に高温で焼鈍して（焼きなまし）材質を軟らかくしている。一般に、炭素量を下げれば鉄は軟らかくなるため、成分調整を行う製鋼工程では炭素量の低減を極限まで追求してきた。

特に、冷延時に、鉄と炭素が結び付いたセメンタイト（炭化物）のような硬く大きな異物があると、川の水流が岩に当たって乱されるように、その部分の結晶方位が大幅に変化してしまう（**図6**）。また、たとえセメンタイトが生成しないぐらいに炭素量を下げても、残存する微量の炭素が結晶方位の制御に悪影響を及ぼす。鋼中に固溶した炭素は微量元素であるマンガンと相互作用し、テント形の結晶方位生成を阻害するため、なかなかr値を上昇させることができない。

そこで、チタン（Ti）やニオブ（Nb）などの炭素と結合しやすい元素を適量添加して炭素を炭化物として「**無害化**」する方法が考案された。鉄中に分散したチタンやニオブは鉄中を自由に動き回れる炭素を効果的に捉え、微細に分散した炭化物として固定する。微細化された炭化物は冷間加工、再結晶の際に、粗大なセメンタイトのようにテント型の結晶方位生成に悪影響を及ぼさない（**図7**）。これがチタンとニオブで炭素を掃き出し（**スカベンジング**）無害化した「**極低炭素鋼**（**IF鋼**）」だ。邪魔になる溶けた炭素がほとんど存在しないため、冷間圧延後の焼鈍で、結晶がきれいにテント形にそろってくる。

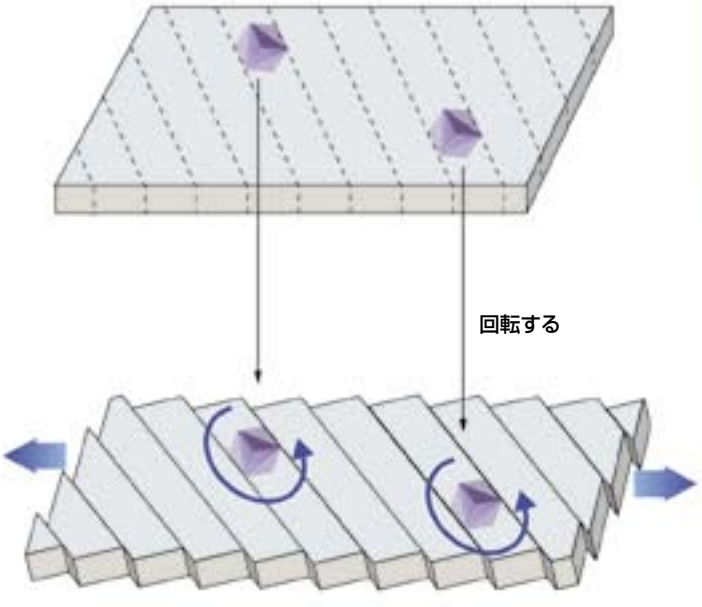
自動車外板用で深絞りなどの過酷な成形に耐え得る軟鋼板では、こうした結晶の方位制御を350トンの溶鋼から0.8mmの薄鋼板に仕上げるまでの一貫工程で行っている。

次回は、大量生産工程でのr値向上のための製造プロセス技術開発への挑戦を紹介する。

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
高橋　学（たかはし・まなぶ）

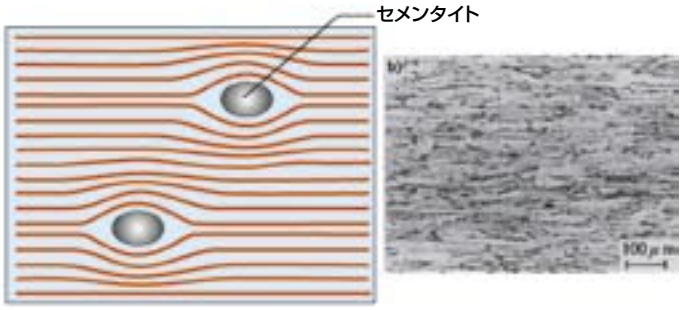
プロフィール
1956年生まれ、熊本県出身。
1982年入社。
自動車用薄鋼板、特に高強度鋼板の研究開発に従事。
2007年4月より現職。

幅が縮むのに適した結晶方向　図5

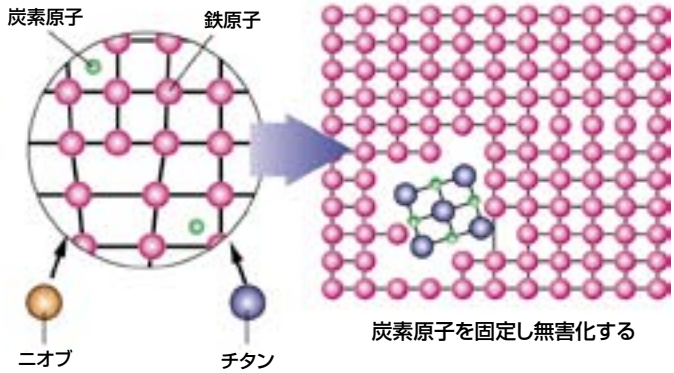


結晶が板面内で回転するために板幅が縮み、深く絞れる

セメンタイトが結晶方位制御を阻害する　図6



チタン・ニオブが炭素を無害化する　図7



炭素原子を固定し無害化する