



入門講座

材料試験法編 機械的性質-5

企業で行われている機械的試験

三浦和哉

(社)日本鉄鋼協会 学会部門事務局*

Kazuya Miura

Mechanical Tests in Steel Company

1 はじめに

最終回となる今回は、企業で行われている鋼板の機械的試験について紹介する。本講座では既に、1. 常温強度¹⁾(茨城大学工学部・友田陽教授)、2. 高温強度²⁾(東北大学工学部・丸山公一教授)および3. 疲労と破壊靱性^{3,4)}(豊橋技科大生産システム工学系・新家光雄教授)に関する試験方法とその意義が解説されており、企業で行われている機械的試験はそれらに準じた方法で行われている。

鉄鋼メーカーでの機械試験は、製品の検査工程と研究開発段階で行われている。検査工程での試験は、顧客の要求と製品規格を保証することを目的として、JISに準拠した方法で行われている。

鉄鋼メーカーから出荷された鋼板が素材のまま使用される事はほとんどなく、様々な形状への成形、溶接および塗装等が施されて、建物、輸送機器、家電製品あるいは缶などに用いられている。したがって、研究開発での機械的試験の趣旨は1)成形加工する際の優れた変形特性の評価、2)製品となった時の強度、耐久性といった機能特性の評価、に分類することができる。研究開発での機械的試験は、JISで標準化された方法によるだけでなく、より加工条件、使用条件に近い状況をシミュレートした方法で行われている。

そこで今回は、種々の鉄鋼製品の中で主要な製品のうちのひとつである自動車用鋼板をとりあげ、鉄鋼メーカーにおいて製品開発時等に行われている代表的な機械的試験を紹介する。

2 プレス成形性評価のための機械的試験

自動車の車体は鋼板部品によって構成されており、ドア、

フェンダー、フード、屋根といった外から見える部品の他に、フロアー、エンジン周りのフレームといった構造部品、サスペンション等、部品数は300点を超える。これらの部品に用いられる鋼板には所定の形状にプレスするために優れた成形性が要求される。さらに、車体デザインの多様化、複数部品の結合による1枚パネルでの一体成形化、高張力鋼板の使用あるいは表面処理鋼板の使用等の要因によって、さらに優れた成形加工性が要求されるようになり、鉄鋼メーカーで研究開発が行われている。

プレス成形性の評価は、成形中の変形状態と変形限界を越えて破断する形態から、図1に示すように1)深絞り成形、2)張出し成形、3)伸びフランジ成形、および4)曲げ成形の単純化したモデルに分類される。実際のプレス部品ではこれらの様式のいくつかが複合された変形となっている。

それぞれの成形性は、引張試験によって大まかには評価可能で、研究開発の初期段階では引張試験による成形性評価が主体となっている。

2.1 深絞り成形試験

円盤状に打ち抜いた鋼板サンプル(ブランク)を上下のダイではさみ、パンチでカップ状に成形する試験で、パンチの形状を一定とした場合、ブランクの直径が大きいほど深いカップが成形できるが、加工条件は厳しくなる。したがって評価の指標は、

絞り比 = ブランク径 / パンチ径

となり、破断せずにカップに絞り抜けた最大の絞り比が限界絞り比で、軟鋼板では2.0から優れたものは2.5⁵⁾に至る。限界絞り比は、フランジが円周方向に縮んで流入する抵抗とカップ底のコーナー部での破断抵抗の平衡によって決まる。従って、破断抵抗が同等であれば、限界絞り比は引張試験で得られる塑性ひずみ比(ランクフォード値、 r 値)¹⁾が大きいほど限界絞り比は大きくなる。材質だけでなく、

* 現 川崎製鉄(株)

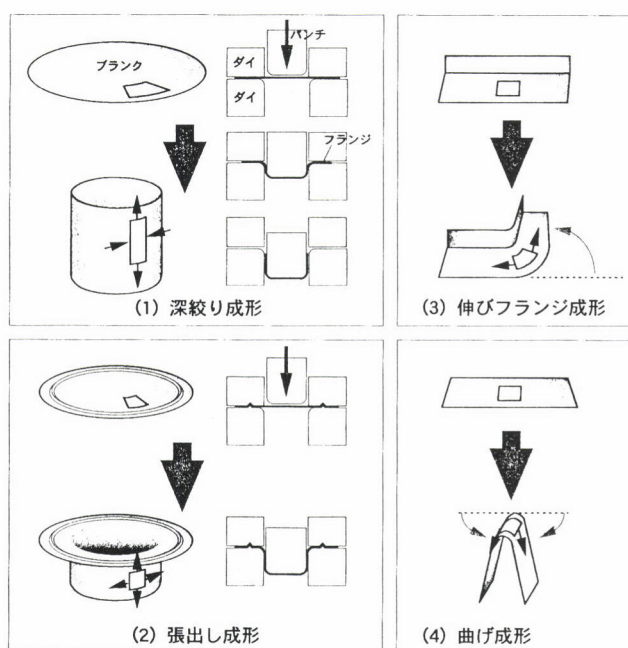


図1 プレス成形の分類

潤滑条件、ダイでプラックを押さえる圧力(プラックホルド圧)といった試験条件も限界絞り比に影響を及ぼし、プラックホルド圧が高すぎるとフランジが流入せず、低すぎるとプラックにしわが発生して同様にフランジでの流入抵抗が高まるので、最適圧が存在しその条件で試験される。

2.2 張出し成形試験

深絞り成形と同様な試験であるが、ダイ型にビードを付ける等の方法により、フランジをダイ肩に流入させずに成形する試験である。図1ではパンチが円柱状であるが、球状のパンチを用いたり、工具ではなく加圧した液体で成形する場合もある。

張出し成形ではフランジ部からの材料の流入がないので表面積が増加して板厚の減少が進み、変形が厳しい部位でくびれが生じて破断が起こる。従って、引張試験で得られる加工硬化指数(n値)¹⁾との相関が強く、加工硬化指数が大きいと、塑性変形量の大きい部位ほど鋼板強度が高くなるので変形が均一化して張出し成形性が良好となる。破断せずに成形できる最大成形深さが張出し成形性の指標になる。成形中にひずみ誘起変態を起こす準安定型オーステナイト系ステンレスやTRIP鋼(Transformation induced plasticity steel)は、張出し成形性に優れている。

2.3 伸びフランジ成形試験

伸びフランジ成形は折れ曲がった形状のサスペンションアームのようなフレーム部品、あるいはホイールディスクの成形に良く見られる成形様式で、図1(3)のようにフラ

ンジの端部に添って引張応力が作用する。代表的な伸びフランジ成形性の評価法は図2に示す穴抜き試験である。プラックに穴を打ち抜き、円錐状のパンチで穴を抜き、穴の周囲が割れるまでの穴抜き率で評価される。

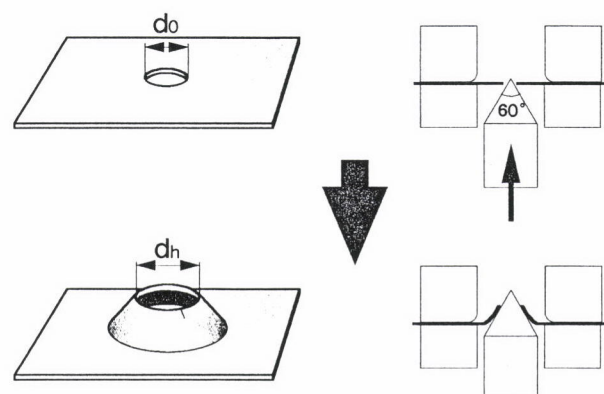
穴抜き試験の結果は試験条件の影響を受けやすく、プラック径と穴径のバランス、打ち抜かれた穴の周囲のばりの状況、パンチの頂角の違いによって穴抜き率変動するだけでなく、破断位置も異なってくるため、試験方法が標準化されている⁹⁾。伸びフランジ性は、鋼板の局部伸び変形能、あるいは金属組織の影響を受ける⁷⁾。足廻り部品には、引張強さが540MPaを超える高張力鋼板が使用されるようになってきたが、マルテンサイト相のような硬質な変態相を強化に利用すると、ひずみがフェライト相に集中して伸びフランジ性に悪影響をおよぼすため、強化方法を組み合わせることで組織を制御し伸びフランジ性に優れた高張力鋼板が開発されている⁸⁾。

2.4 曲げ成形試験

曲げ成形は、他の成形様式と比較すると単純な加工であるが、深絞り成形や伸びフランジ成形にも組み合わされており、あらゆる成形品に含まれている。曲げ成形試験は、板を180°に折曲げる際の、割れが発生せずに折り曲げられる曲率半径(板厚の倍数)で評価される。冷延軟鋼板では密着曲げを行っても割れが発生することはない。曲げ成形性は、鋼板の機械的特性よりも、鋼板表層部の介在物形態に依存することが多い。

2.5 プレス成形限界試験

以上の4つの成形試験によって鋼板のプレス成形性を評価することができるが、実際のプレス成形では量産した場合のくびれの発生や破断の発生といった成形不良の発生頻



$$\text{穴抜き率 } \lambda (\%) = \frac{D_h - D_0}{D_0} \times 100$$

図2 穴抜き試験

度が重要となる。深絞り成形試験や張出し成形試験での成形限界は、破断した部分の変形能や耐破断強度だけで決まるのではなく、他の部位との塑性力学的バランスで決まっている。したがって、プレス成形性の良否は部品形状の影響を大きく受けるため、実プレスでの成形性や成形不良に対する安全性を評価するために、スクライブドサークル試験⁹⁾が行われている。

スクライブドサークル試験は直径5～20mmの円を成形前の鋼板に描き、成形後の楕円の長軸で最大主ひずみ、短軸で最小主ひずみを求める試験で、部品のあらゆる部位での局所的な変形挙動を把握する事ができる。破断した部分の近傍の値から破断限界がわかる。

図3は、種々のひずみ状態での破断限界測定例¹⁰⁾である。ひずみの状態は1軸引張と等2軸引張変形(球型のパンチで張出し成形した場合の頂上部)に挟まれた領域に存在し、それらの中間にある平面ひずみ変形(たとえば幅の狭い短冊試験片を球型のパンチで張出し成形)では、破断限界のひずみが、一般に最も小さい。

実際の部品でスクライブド試験を行い、その結果をあらかじめ実験で求めた破断限界図上にプロットすれば、成形時の破断に対する安全性や材料の適正を判断することができる。

ただし、実際のプレス部品の形状は図3のモデル成形に比べると複雑で、プレスも1工程でなく複数のプレスが組み合わされるので、ひずみの経路は直線ではなく、変形経路の違いに対する考慮も必要となる。

2.6 摺動試験

プレス成形性には、鋼板の変形特性だけでなく、鋼板が

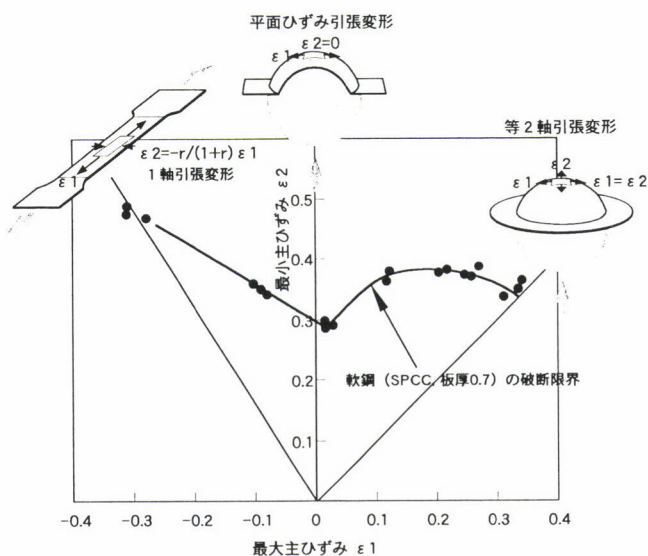


図3 軟鋼の破断限界

プレス金型と接触して滑る時の摩擦係数も大きな影響をおよぼす。摩擦係数は、鋼板と金型の表面粗度、潤滑油の塗布量や粘度、鋼板の硬さ、プレス条件といった多くの要因の影響を受ける。したがって、出荷時に鋼板に塗布される防錆油の種類や量は厳重に管理されており、さらに近年は、冷延鋼板にくらべて摩擦係数が高い亜鉛めっき鋼板や成形性がやや劣る高張力鋼板が多く利用されるようになったため、摩擦係数の低減に関する研究開発が重要となっている。

摩擦係数は図4に示す例¹¹⁾のような摺動試験によって測定される。工具間を鋼板を滑らせる時の工具を押さえ付ける圧力Pと鋼板を引張り、滑らせるための力Dの関係から摩擦係数が得られる。

工具の形状は金型内での成形様式に対応していて、(a)は平面工具を用い、フランジでの圧力が比較的低い状態(約10MPa)での摺動を、(b)は、円柱工具を用い、材料がダイ肩を通過する際の高圧力での摺動を、(c)は実際のプレス成形のように曲げ、曲げ戻しを伴った状態での摺動をそれぞれシミュレートすることができる。

3 製品性能評価のための機械的試験

3.1 耐デント性試験

乗用車のドア、フード、およびトランクリッドは、指で押して閉めたり、小石などが飛来して当たり、駐車場で隣の車のドアがぶつかったりする場合があります。凹みに対する抵抗性である耐デント性が要求される。耐デント性は、鋼板の板厚と降伏強さの影響を受ける。したがって、耐デント性をさらに向上させる場合や、車体を軽量化するために鋼板の板厚を低減させ、かつ十分な耐デント性を確保する場合は、高張力鋼板や後述するBH鋼板を適用するような方策がとられている。

図5に耐デント性の評価方法の概略¹²⁾を示す。耐デント性は、成形パネルに圧子を介して荷重を加え、除荷しても永久くぼみが発生する荷重、あるいは所定の荷重を負荷した時のくぼみの深さによって評価される。耐デント性は鋼板の材質だけでなく、パネルの曲率半径等の影響も受ける。このような静荷重を与える試験は静デント試験とも呼ば

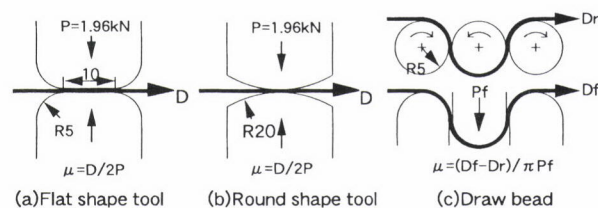


図4 摺動試験

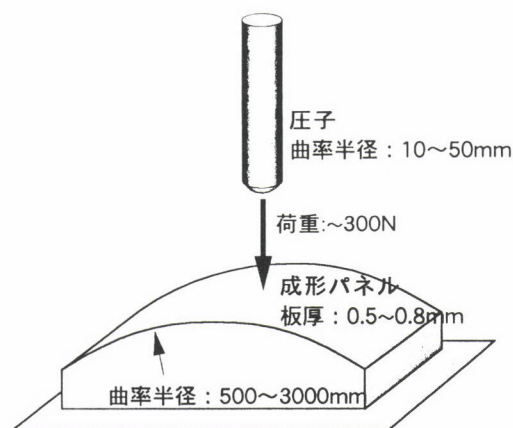


図5 耐デント性の評価方法

れ、この他に衝撃的な動荷重を与える動デント試験もある。

3.2 BH(Bake Hardenability：焼付硬化性)試験

鋼板の強度を高めることにより、車体の強度や耐久性が向上し、また車体を軽量化できる反面、プレス成形性が低下する問題がある。BH鋼板は、成形する時には強度が低くて成形性に優れ、車体となって顧客の手に渡った時には強度が高くなる鋼板であるため、上述の耐デント性等にも優れ、現在製造されている多くの乗用車に使用されている。

鋼板はプレス成形に引き続き、塗装された後に約170℃で塗装膜の焼付処理が施されるが、BH鋼板は焼付処理によって強度が約50MPa増加する。これはひずみ時効を活用した技術で、約5 ppmの固溶炭素を含有するように精錬、圧延、焼鈍することにより調質圧延が施された後は、プレス成形までは時効することなく低い降伏強さと良好な延性を維持したままで加工することができるが、塗装後の焼付時に固溶している炭素がプレス成形で導入された転位に固着して時効硬化が生じ、焼付処理を行う前よりも強度が高くなる。

図6に実験室的にBHを評価する方法¹³⁾を示す。あらかじめ2%の引張変形を行った後、170℃20minの熱処理を施し、さらに引張試験を行った際の降伏強さと最初の引張試験で除荷した際の強度の差からBH量を求めることができる。

BH鋼板は連続焼鈍法でもバッチ焼鈍法でも製造でき、また現在自動車用鋼板に広く使用されている合金化溶融亜鉛めっき鋼板にもBH性を付与させることができる。

3.3 耐二次加工脆性試験

C、Nといった侵入型元素は鋼板の深絞り性や延性を阻害するので、優れた成形性が要求される自動車パネルには、CとNの含有量を約30ppm以下に低め、かつTiやNbでCとNを炭窒化物として固定した、極低炭素IF(Interstitial

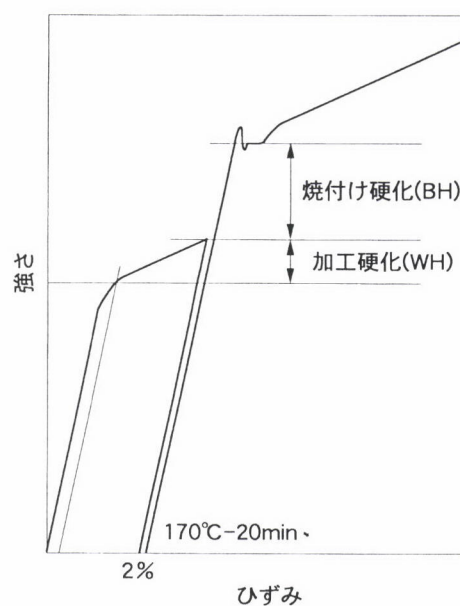


図6 引張試験による焼付硬化(BH)の評価方法

Free)鋼が用いられている。ところが固溶Cと固溶Nが非常に少なくなると結晶粒界の強度が低下し、プレス成形での縮みフランジ変形部が低温で脆性的に破壊する、二次加工脆性破壊が起こりやすくなる問題がある。また、高張力鋼板の固溶強化元素として用いられるPは二次加工脆性をさらに劣化させる。

一般的な低炭素の軟鋼板では脆性破壊が起こるのは150K以下だが、極低炭素鋼では250K程度に上昇し、寒冷地での使用時に問題を生じる可能性がある。しかしBを10～20ppm程度微量に添加することによって脆性破壊が生じる遷移温度を問題のない温度まで低減できることが明らかにされており^{14,15)}、実用化もされている。

測定は図7に示すように比較的単純で、深絞り成形を

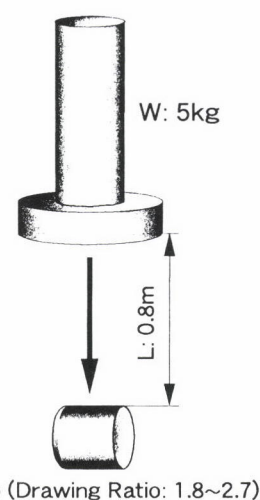


図7 耐二次加工脆性評価試験

行ったカップ状のサンプルの温度を液体窒素やドライアイスアルコール等で変化させ、サンプルの胴部に落錘で衝撃を与える方法で行われている。破断面を走査型顕微鏡等で観察して破壊形態を判別している。

3.4 高速引張試験

自動車の衝突安全性を考慮する場合には高速引張試験が重要となる。自動車が正面衝突した時にはエンジンルームの下方にあるフレーム部品が、衝突エネルギーを吸収して乗客の安全を守る役割をしている。通常の引張試験はひずみ速度 $10^{-3}\sim 10^{-2}$ /sで行われるが耐衝突部材の衝突時のひずみ速度は 10^3 /sに達する¹⁶⁾と言われている。このような部材にも高張力鋼板を適用して耐衝突安全性を向上させたり車体の軽量化を図る検討がされている。ところが鋼板の強度はひずみ速度に依存し、ひずみ速度が大きくなるほど強度が高くなるが、鋼種によって強度のひずみ依存性が異なり、軟鋼よりも高張力鋼板のひずみ速度依存性が低い。したがって、衝突変形する際の鋼板の材料特性を把握するには、高速引張を行う必要がある。

通常の引張試験機でクロスヘッドスピードを増加させた時に、ひずみ速度が約 10^2 /sを越えると、変形中にサンプルと試験機中を応力波が5 km/sもの高速で往復するようになるために応力を正確に測定できない。したがって、ひずみ速度 10^3 /sでの高速引張試験はホプキンソン棒法を応用した引張試験機で行われている。高速引張試験機の一例としてホプキンソン棒法衝撃引張試験機の概略¹⁷⁾を図8に示す。

これは2バー方式とも呼ばれていて、圧縮空気の圧力で打撃棒を入力棒に衝突させることにより応力波を発生させ、入力棒と出力棒の間のサンプルに応力が作用することによって引張変形が起こる。入力棒と出力棒はロードセルとなっておりサンプルに作用する応力が検出され、ひずみ

速度とひずみは理論計算される原理となっている。この時、応力波は入力棒と出力棒の端部で反射するが、応力波が1往復した時にはすでにサンプルが破断しており、応力波の重なりは生じない。この他に、同様な原理の1バー方式の高速引張試験機¹⁸⁾もある。また、従来型の引張試験機を用いて、サンプルに直接ひずみゲージを張付け、応力波の重なりの影響を受けずに測定する方法¹⁹⁾も開発されている。

3.5 疲労試験

フレーム部品、サスペンション、ホイールディスク等は、走行中繰返荷重を受けるが、安全上非常に重要な部品であるため、疲労亀裂等が発生することはあってはならない。したがって、これらの部品には高張力鋼板が用いられることが多く、適用に際しては綿密な疲労試験が行われている。

疲労試験方法とその力学的解釈については本入門講座で既に解説済みなので参照されたい。企業で行われている自動車用鋼板の疲労試験は、さらにこれを製品に近い状態をシミュレートした方法で行われている。通常は引張試験と同様な短冊状のサンプルで試験を行うが、これに打抜穴を付けて切り欠感受性を評価²⁰⁾したり、溶接継手をつけて溶接部の疲労特性を評価²¹⁾している。また、ホイールディスク用の鋼板では、実際にホイールディスクを作成し、車軸からトルク荷重を与えて疲労試験を行う場合や、トラックのフレームを組み立てて、構造体にねじり荷重を加えながら実際の走行を模した状況で疲労試験を行う場合もある。

4 おわりに

薄鋼板の機械的試験に関して代表的なものを簡単に紹介したが、詳細な実験条件とデータが必要な場合は参考文献を付したので、ご参照いただきたい。鋼板の特性に高付加価値を付与するために、この他にもさらに新しい試験方法が開発されていると同時に、機械的試験を行わずに、FEM解析によって鋼板の特性を評価される例も増えてきている。

参考文献

- 1) 友田 陽：ふえらむ，4 (1999) 8，14.
- 2) 丸山公一：ふえらむ，4 (1999) 9，611.
- 3) 新家光雄：ふえらむ，5 (2000) 1，17.
- 4) 新家光雄：ふえらむ，5 (1999) 2，82.
- 5) 坂田敬，松岡才二，小原隆史，角山浩三，白石昌司：まてりあ，36 (1997)，376.
- 6) 日本鉄鋼連盟規格，JFS T1001-1996.
- 7) 河野 治，脇田淳一：CAMP-ISIJ，9 (1996)，1337.
- 8) 森田正彦，清水哲雄，古君 修，青柳信男，加藤俊之：

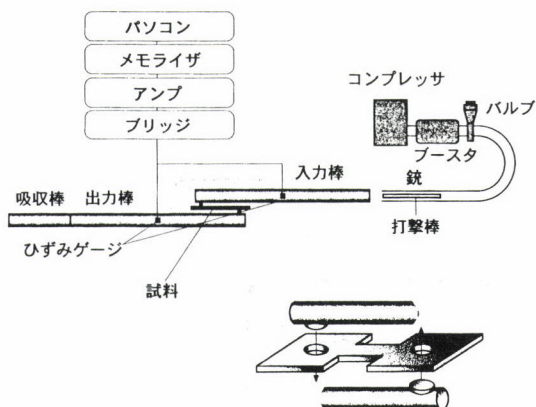


図8 高速引張試験機の一例(ホプキンソン棒法衝撃引張試験機)

- まてりあ, 37 (1998), 513.
- 9) プレス成形難易ハンドブック, 日刊工業新聞社, (1996), 39.
- 10) プレス成形難易ハンドブック, 日刊工業新聞社, (1996), 62.
- 11) K. Miura, T. Hira and T. Kato : Proc. Int. Symp. on IDDRG, Lisbon, (1994), 85.
- 12) プレス成形難易ハンドブック, 日刊工業新聞社, (1996), 341.
- 13) K. Sakata, S. Satoh, T. Kato and O. Hashimoto : Proc. Int. Symp. on Physical Metallurgy of IF Steels, Tokyo, (1994), 279.
- 14) E. Yasuhara, K. Sakata, T. Kato and O. Hashimoto : ISIJ Internatiol, 34 (1994), 99.
- 15) 坂田 敬, 奥田金晴, 瀬戸洋一, 小原 隆 : 鉄と銅, 83 (1997), 55.
- 16) 武智 弘 : 自動車用材料シンポジウム, 日本鉄鋼協会, (1997), 3.
- 17) K. Miura, S. Takagi, T. Hira, O. Furukimi and S. Tanimura : SAE Technical Paper Series 980952, SAE, (1998)
- 18) 高橋 学, 上西朗弘, 栗山幸久, 岸田宏司 : 自動車用材料シンポジウム, 日本鉄鋼協会, (1997), 41.
- 19) 渡辺憲一, 岩谷二郎, 岡野洋一郎 : 自動車用材料シンポジウム, 日本鉄鋼協会, (1997), 73.
- 20) 林 宏信, 真柄秀一, 高原正雄 : 自動車技術会学術講演会前刷集, 自動車技術会, 936 (1993), 193.
- 21) 篠崎正利, 加藤俊之, 入江敏夫, 高橋 功 : 鉄と銅, 68 (1982), 318.
- (1999年12月24日受付)

ふえらむの窓

古代製鉄史における3つの謎

著名なルドウィヒ・ベックの大著「技術的・文化史的にみた鉄の歴史」(訳: 中澤護人 発行: たたら書房(第1巻昭和49年刊))の初版刊行からすでに四半世紀が過ぎ、ドイツ語の初版からは100年以上の時が流れている。

筆者は、このほど改めてローマ時代までの古代編(第1巻第2分冊の途中まで)を通読する機会があった。

うかつなことに、この本の標題に「技術的・文化的にみた」という形容詞句が付いていることを初めて認識したしだいである。ベックは序章において、「金属は、われわれの近代文化の基盤であり、道具、武器、機械を供給し、人類はこれを利用して、現在のような地位を獲得した。従って、この金属の利用の歴史は、人類発展史の重要な部分である。」と述べており、ここに標題の形容詞句の意義がある。

和訳版は、著者と訳者が、それぞれ精力的に、金属を媒介とする人類発展の歴史を考察したもので、名著といって過言ではない。

歴史も古代に遡るほど情報や物証が少なくなるのはやむを得ないことであるが、この本から筆者が強い印象を受けた論点を「古代製鉄史の3つの謎」として以下に列記してご紹介したい。

興味のある読者は、必ずしも通説に拘らない著者と訳者の考察の一端にふれていただきたい。

1. 「石器→青銅器→鉄器」とされる「継起説」は、正しいか?
2. 「隕鉄」は、人類が初めて手にした鉄であったのか?
3. 「鉄の発祥の地」としてヒッタイトを挙げるのは、正しいか?

(住友金属ビジネス企画(株) 佐藤 駿 2000年2月23日受付)