

自動車用冷延鋼板向け鋼種の変遷

薄鋼板製造技術と車体製造技術の共鳴の歴史

荒木健治
Kenji Araki

NKK総合材料技術研究所 主席

A History of Steel Applied to Cold Rolled Sheet for Automobile Body

1 はじめに

自動車用冷延鋼板向け鋼種の主力は、今はIF鋼である。しかし1965年に、著者が薄板の材質に関する研究に従事し始めた頃は、それはキャップド鋼だった。それが1970年代後半にはアルミキルド鋼に替わった。大量に使われる鋼製品で、主力鋼種がこのような替わったのは自動車用冷延鋼板のみである。

自動車用冷延鋼板は、生産量がきわめて多い上に、品質要求も非常に高いので、薄板分野全体の技術開発の牽引車となってきた。またそれは製鋼分野の技術にも多大な影響を及ぼしてきた。自動車用鋼板向け鋼種の交替の影響は大きい。

鋼種の交代は鉄鋼側の事情でのみ行われたのではない。図1に、鉄鋼側と自動車側における諸動向の変遷を示すが、両者の変化はよく対応している。即ち両者が影響し合ったことが伺える。この一種の共鳴現象の歴史を振り返ることは、自動車用冷延鋼板向けの鋼種の今後を考えるための糧になると考える。

2 オープンリムド鋼（～1960年頃）

製鋼炉での精錬終点時には、溶鋼には約0.05%のCと約0.05%のOが含まれている。溶鋼をこのまま底のある鋳型に注入し、固めるとオープンリムド鋼になる。鋳型内で溶鋼が凝固する際、CとOが反応し、多量のCOガスが発生する。COガスは気泡となって上昇するので、鋳型内はあたかも沸騰しているような状態を示す。この現象はリムド鋼特有のものでリングアクションと呼ばれる。この現象をおこしながら生成された鋼塊表層（リム層、ふち層）は純度が高く、肌もきわめてきれいである（図2）。車体は外観がきれいなことが要求されるので、リム層のあるこの鋼種は車体用に最適だった。

1950年代中頃までの車体製造技術は、戦前の技術を受け継いだままの状態であった。鋼板の成形にはプレス機械も用いられた。しかし成形後、打ち出し板金や手修正を加えることを前提とした。プレス機械の役割は板金の型打ちであったともいえる（図3）。鋼板材質に対する要求は、板金し易いこと、

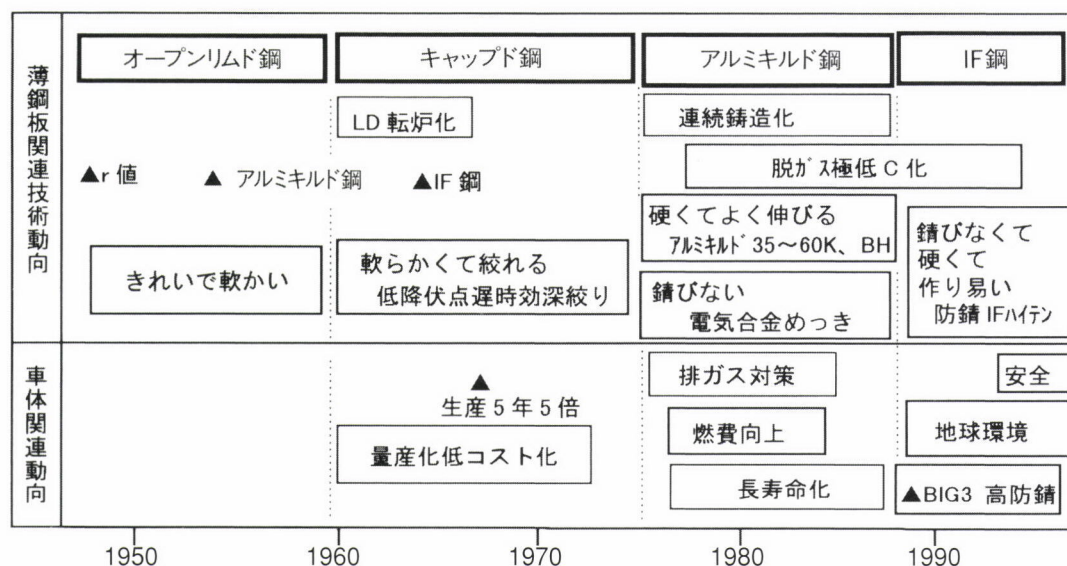
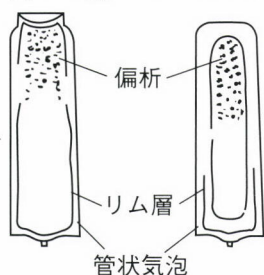
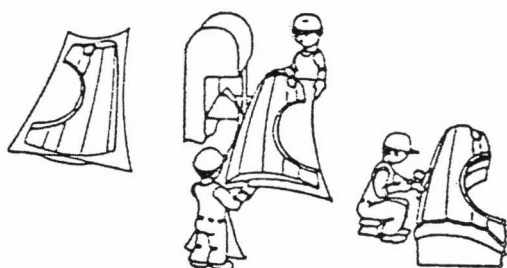


図1 薄鋼板関連技術と車体関連動向の推移

キャップド鋼 オープンリムド鋼

図2 リムド鋼塊の内部性状¹⁾図3 戦後のプレス部品の成形模様（日産自動車）²⁾

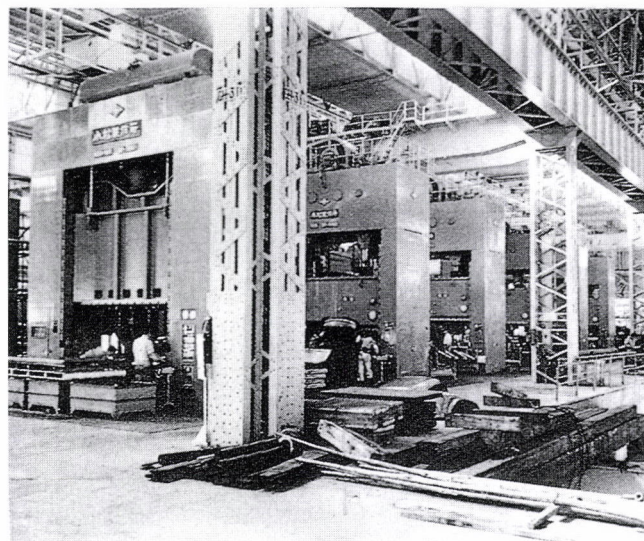
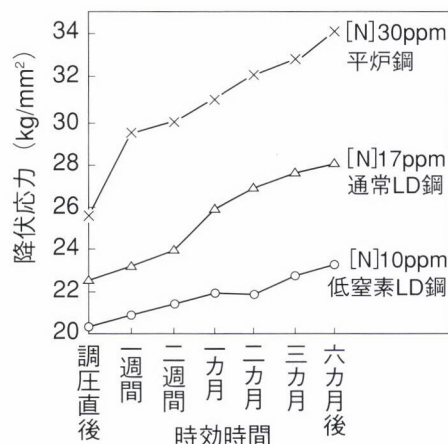
すなわち軟らかいことであった。オープンリムド鋼はこの要求にもミートした。

3 キャップド鋼（1960年頃～1975年頃）

1960年代になると、平炉から転炉への移行が急速に進行した。これと同時に進行形で、キャップドリムド鋼（キャップド鋼と呼ばれた）が採用され始めた。オープンリムド鋼は、鋼塊内部に純度の高い部分と不純物含有量の多い部分（偏析）を生じ、これが材質の不均一を招いた。キャップド鋼は、偏析を抑えるため、リミングアクションを凝固途中で止めたものである（図2）。注入終了後、鑄型に蓋（Cap）をかけ、それによって鑄型内のCOガスの圧力を高め、COガスの発生を抑えれば、リミングアクションは止る。

1960年頃になると世の中は神武景気にわき、自動車の普及が急拡大し始めた。プレス工場では、近代化の掛け声とともに、大容量プレスが数台一列に並ぶ、現在でもみられるライン構成となった（図4）。またプレス成形のための車体分割、すなわちプレス部品はヨーロッパの影響を受けて大きくなった。車体の組立もコンベア上で連続的に行われるようになった。

このような諸変化は、プレス成形に対し、「割れ」だけでなく、「しわ」「ひけ」などの面不良対策、車体組立での作業性をよくするための寸法精度の向上をも要求するようになった。

図4 プレスライン（1960年）³⁾図5 転炉鋼と平炉鋼の時効挙動⁴⁾

面不良対策、寸法精度向上策として、鋼板には降伏点が高く時効しにくいこと、材質が均一なことが望まれた。転炉法は鋼中N量を、平炉の20～40PPMから10～20PPMへと低下できた。低N化は時効を遅らせ、降伏点を下げる（図5）。転炉製キャップド鋼による低降伏点遅時効鋼板が自動車用鋼板のベースとなった。

1960年代に入ると、オープンコイル焼鈍法（OCA）が始まった。OCAはストリップをルーズなコイルにして焼鈍を行う方法である。鋼板表面に雰囲気ガスを接触させるので、雰囲気ガスと鋼中のCを反応させ、鋼中からCを除去することができた（脱炭焼鈍）。さらに焼鈍中に鋼板同士の焼き付きが発生しないので、焼鈍温度をより高くすることができた。脱炭高温焼鈍は結晶粒成長を促すので、一層の低降伏点化と高r値*化を計れた。キャップド鋼のOCA焼鈍鋼板の成形性はアルミキルド鋼に比肩するものであった。

*r値 = ϵ_w / ϵ_t

ϵ_w ；引張試験片を引張った場合の、その巾の縮み歪み ϵ_t ；引張試験片を引張った場合の、その板厚の薄肉化歪み

1960年代後半は昭和元禄といわれた。5年間で乗用車の生産台数が5倍になり、大衆車といわれる車種が生まれるなど車種も大幅に増加した。このことは新モデル発表後の生産の急拡大を必須としたので、OCA焼鈍銅板に恰好の活躍の場を与えた。

4 アルミキルド鋼 (1970年頃～1990年頃)

アルミキルド鋼は、鋳造前に溶鋼中にAlを添加し、溶鋼中Oを Al_2O_3 として浮上除去したものである。Oがないのでリミングアクションはおきない。この鋼は、コイル状態のまま焼きなますと(バッチ焼鈍)、等軸結晶粒のキャップド鋼やIF鋼とは異なる、結晶粒が圧延方向に伸びた特色ある組織(展伸粒組織)を呈し(図6)、非時効性に加え、高r値と低降伏点を有するようになる。展伸粒組織が得られる製造技術が確

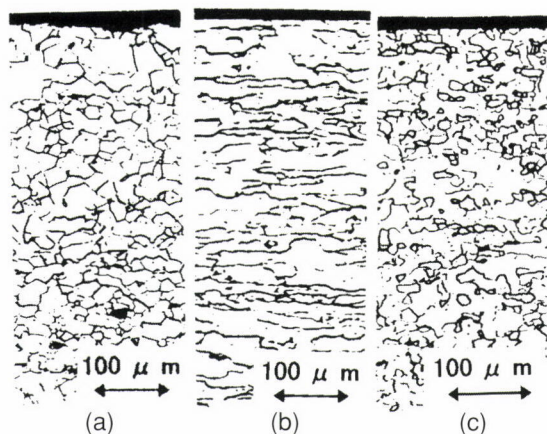


図6 冷延銅板の結晶粒組織
(a) キャップド鋼 (b) アルミキルド鋼 (c) IF鋼

NEW CRITERIA FOR PREDICTING THE PRESS PERFORMANCE OF DEEP DRAWING SHEETS

By W. T. LANKFORD, S. C. SNYDER AND J. A. BAUSCHER

Abstract

In the past it has been generally believed that an isotropic material is more suitable for all types of sheet metal forming operations than an anisotropic material. Evidence has been developed in the present investigation, however, which refutes this general belief. Although it is still believed that an isotropic material is best suited for symmetrical formations, it has been demonstrated that, for certain unsymmetrical formations, material having a considerable degree of plastic anisotropy of a favorable nature results in the best press performance. By considering favorable plastic anisotropy together with favorable strain hardening characteristics as requisites for good press performance, it is possible to discriminate very successfully between materials having quite similar ordinary mechanical properties but which exhibited wide differences in press performance in unsymmetrical fender draws. A good correlation has been found between plastic anisotropy and magnetic anisotropy, indicating that the plastic anisotropy arises from preferred crystallographic orientations. These new findings suggest that for optimum press performance the plastic anisotropy characteristics of the material must be suited to the symmetry of the forming operation.

図7 ランクフォードらの歴史的論文の表題とAbstract⁶⁾

立されたのは1950年代中頃である。その技術の要点は、熱間圧延後のストリップの水冷を強くし、熱延コイルでは鋼中のAlとNが AlN として析出するのを防ぐことである⁵⁾。アルミキルド銅板とは、一般的には展伸粒結晶組織の銅板を指すので、この銅板の出発は実質的にはこの頃と言えよう。

アルミキルド銅板の技術開発の牽引力は、W.T.Lankfordら⁶⁾による深絞り性の評価尺度としてのr値の提案と、Alを添加したキルド銅板での高r値材の混在の発見であった(図7)。W.T.Lankfordらは、46ロットのキルド銅板につき、実車フロントフェンダーでのプレス成績と各種の材料特性値との関係を調査した。Alを添加したキルド銅板を選んだのは、この銅板が実車プレス成績でバラツキが大きかったからである。実車プレス成績と相関の強い特性値はr値であった(図8)。当時、塑性異方性のあることは、深絞り性にとり好ましくないとされていただけに⁶⁾、この発見は材料開発の方向を大転換した。高r値化は現在でも成形性向上の一大指針である。W.T.Lankfordらの業績は、自動車用銅板の開発史上、最高の偉業であると言っても過言ではあるまい。

1960年代に入ると、アルミキルド銅板は、 Al_2O_3 系介在物による表面疵問題も解決され、低降伏点、高r値、非時効性を兼ね備えた、品質的には理想的な銅板として重宝がられた。1960年代の、乗用車の生産台数、モデル数の急増期には、キャップド銅板を補完する銅板として活躍した。しかし低歩留まりからくる高コストのため、「補完する銅板」の域を出ることができなかった。

1950年代の終わり頃、条銅などに向けられる小断面鋳片で連続鋳造が実用化された。アルミキルド鋼の低歩留まりは、鋳造が造塊法であることに起因していたため、この新しい鋳造法をアルミキルド鋼に適用する試みが、1960年代後半になると行われはじめた。品質的には完璧のアルミキルド鋼を、

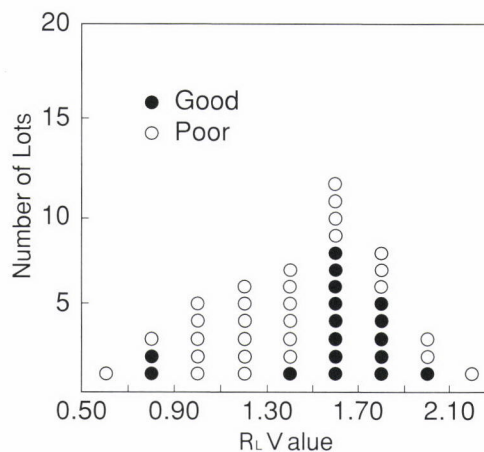
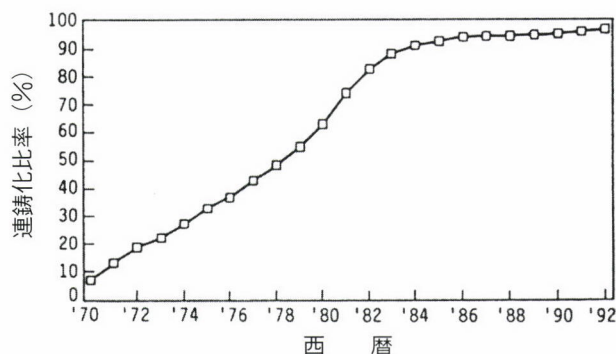
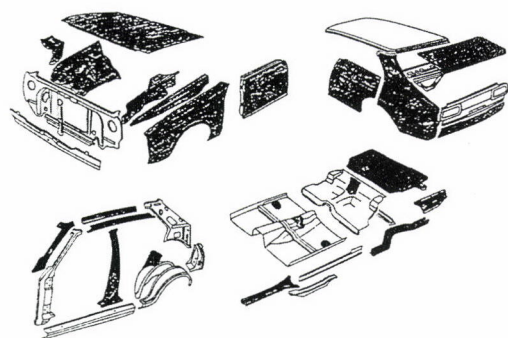
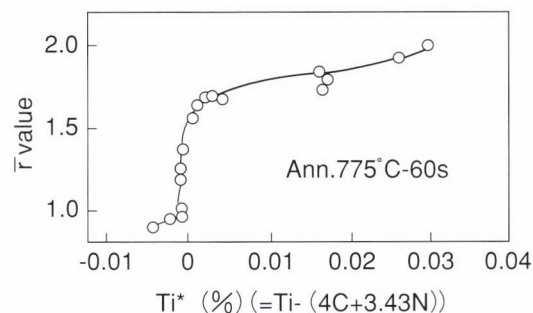
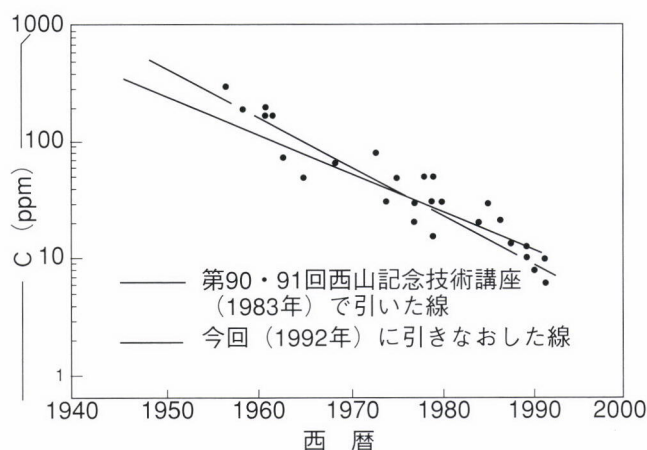


図8 ランクフォードらの論文でのr値と実車プレス成績の関係⁶⁾

図9 わが国における連続鋳造比率の推移⁹⁾図10 車体での高張力銅板適用例⁹⁾
(着色部分が高張力銅板)

キャップド鋼の歩留まりで鋳造できれば画期的なことであった。しかしキャップド鋼なみの表面性状を得ることは至難であり、アルミキルド鋼の連続鋳造化は量産鋼種の中では最後の方だった。それでも、鋳造中の大気の影響などいくつかの技術開発を経て^{7, 8)}、1975年頃にはこの鋼も連続鋳造できるようになった。難関突破後は、キャップド鋼からアルミキルド鋼への変換は堰を切ったように進展し、図9の連鋳比率の推移からも読みとれるように、1980年代に入ると自動車用銅板向けキャップド鋼は姿を消した。

1970年代に入ると日米の両国で光化学スモッグが発生し、これがきっかけとなり、1975年に排ガス規制が制定された。1971年に始まった米国のESV（実験安全車）計画後、安全規制強化の動きが早まった。1972年秋の石油危機がきっかけとなり、米国ではCAFE（企業平均燃費）が成立した。これに基づいて、わが国でも1979年に省エネ法が制定された。これら三つの規制は、今日に至るまで年々厳しくなっている。安全、排ガス関係の規制は、車体の重量増をとまう。燃費関係の規制は、その軽減を必要とする。両者は加工性の良い高張力銅板に対する強いニーズを生んだ（図10）。鋼の高強度化には、P、Si、Mn、Ti、Nbなどの強化元素の添加が必須である。キャップド鋼では、これらの添加を十分にはできない。Pでは偏析が大きくなり、その他の元素は酸化物となるからである。高張力銅板のための鋼は、アルミキルド鋼でな

図11 Ti量とr値の関係¹¹⁾図12 炭素の精錬限界の推移¹⁴⁾

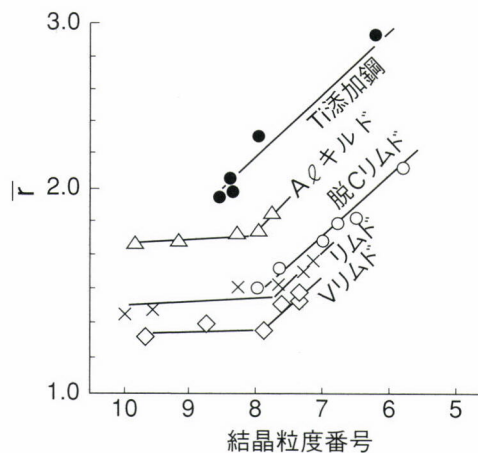
ければならない。アルミキルド鋼の連続鋳造化は、高張力銅板の開発にとり、まことにタイムリーだったことになる。1970年代後半における高張力銅板に対するニーズの高まりは、キャップド鋼からアルミキルド鋼への変換に拍車をかけた。

5 IF鋼（1985年頃～）

IF鋼とは、固溶C、N（Interstitial atom）がない（Free）鋼という意味である。CやNと化合物を作り易い元素、例えばTiをCとNの合計量より多く添加すればこのような状態になる。IF状態になると、極低炭素鋼は非常に高いr値（図11）、低い降伏点、非時効性を兼備するようになる。

IF鋼は1964年にわが国で生まれた¹²⁾。発明者のひとりである清水によると、発明のきっかけは次のようである¹³⁾。「厚板の研究グループでTiやNbを添加し、鋼を強化する研究を行っていた。そのグループより、C量を0.04%程度まで下げ、Tiを多めに添加すると、不思議なことに降伏点が低くなる、なぜだろう、との相談を受けた。当時、薄板では低降伏点鋼ばかりだったので、これを薄板に応用できないか、と考えた。」ということである。

1970年頃は、工業的に到達できるC量は50～100ppmであった（図12）。それでもIF鋼は、非常な細粒にもかかわらず、

図13 結晶粒度と r 値¹⁵⁾

アルミキルド鋼よりも高い r 値を示した。これがIF鋼の金属組織上の最大の特徴である(図6、図13)。成形性に関してはオールマイティな鋼であったが、製造コストが非常に高く、表面性状も悪かったため、量産鋼種にはならなかった。

1980年代になるとIF鋼も連続製造できるようになった。最量産鋼種は連続製造されたアルミキルド鋼であったので、最量産鋼種とのコスト差は、1960年代に比べ大幅に縮まった。IF鋼は、焼鈍時に急速加熱、急速冷却を行っても、材質上の魅力を失うことはない。連続焼鈍設備の設置があいついだが、この設備で超深絞り用鋼板をつくるための鋼種として魅力的であった。このことが牽引力となり、真空脱ガス処理技術が進歩し、一層の極低炭素化を、生産性を上げながら実現できるようになった(図12)。1980年代前半の乗用車のモデル数の増加は超深絞り用高張力鋼板に対するニーズを高めた。以上の諸状況が重なり、1980年代に入るとIF鋼の生産量は着実に増加した。

1976年のカナダCCAコードは、車体への防錆鋼板適用のきっかけをつくった。防錆力強化の動きは年々強まり、この傾向は1983年のノルディックコード「6年孔あき無、3年表面錆無」、その約2年後の米国BIG3の「10年孔あき無、5年表面錆無」まで続いた。高防錆は自動車の重要な性能として、また車の商品力の強力な宣伝手段として定着した。1980年代後半

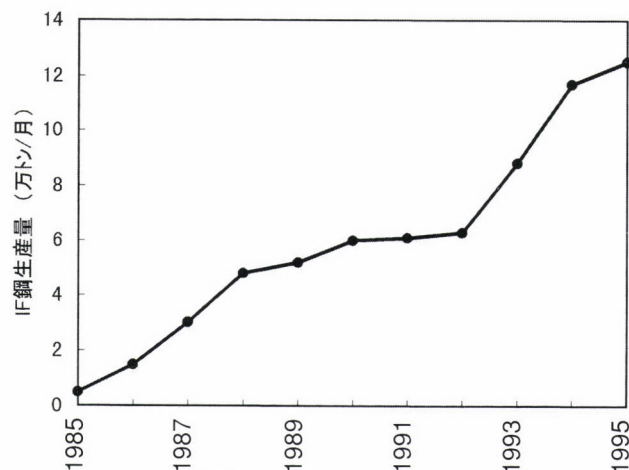
図14 車体での防錆鋼板の適用例¹⁶⁾(着色部分が防錆鋼板)

図15 NKK福山製鉄所でのIF鋼の生産量推移

は、国内はバブル景気に沸いた。国内向け車もBIG3なみの防錆性能を目指すようになった。このような背景のもと、多くの自動車会社において、「防錆鋼板は溶融亜鉛めっき鋼板にする」という決定が下された。車体用鋼板の大半が防錆鋼板であったので(図14)、この判断は鋼種にも決定的な影響をおよぼした。溶融亜鉛めっき設備では、連続焼鈍設備のような過時効処理熱サイクルをとれないので、車体用鋼板を焼鈍するにはIF鋼を用いざるをえない。上記の決定を機に、IF鋼の生産量が急増し、IF鋼が自動車用冷延鋼板の主役の座を占めるようになった(図15)。

溶融亜鉛めっき鋼板採用の判断を誘起した要因のうち、大きなのは次の二つであった。一つめは、IF鋼のコストが、1980年以降、大幅に低下したことである。二つめは、防錆性能を確実にするには、亜鉛の付着量として $60\text{g}/\text{m}^2$ 程度の厚めっきが必要なることが明らかになってきたことである¹⁷⁾。

IF鋼の低コスト化に寄与したのは、合金元素すなわちTiやNbコストの大幅な低減と、脱ガス処理費の低減である。合金元素コストの大幅な低減の要因は、合金元素価格の低下(図16)、一層の低C化による添加量の低減(図12)、合金鉄製造

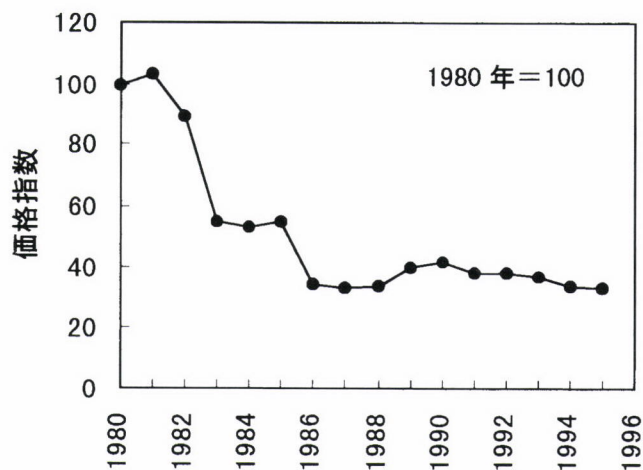
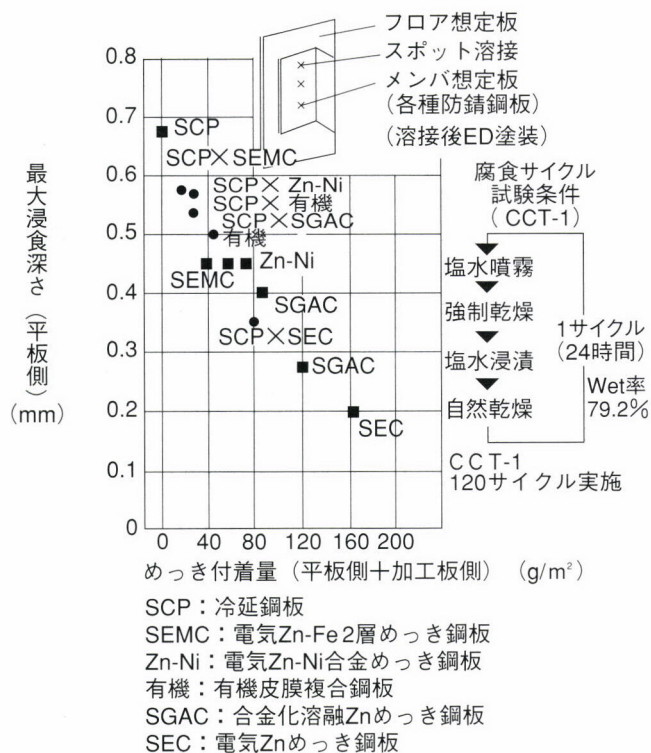


図16 スポンジ鉄の市中価格推移

図17 合わせ部腐食試験結果¹⁷⁾

方法の改良などである。

1980年頃をはさみ、電気Zn-Ni合金めっき鋼板、電気Zn-Fe2層めっき鋼板など各種の防錆鋼板が開発された。別所ら¹⁷⁾は、より現実に即した腐食試験方法を考案し、それにより各種の防錆鋼板の耐食性能を評価し、耐食性はめっきの種類によらず、単純に亜鉛の付着量により決まることを明らかにした(図17)。Zn付着量に関する前記の判断はこの調査結果に基づいたものである。めっき法には溶融めっき法と電気めっき法があるが、60g/m²という厚目付の場合には、コスト上、溶融めっきの方が相当有利である。電気めっきでは処理速度を極端に落さざるをえない。一方溶融めっき法は、ストリップが亜鉛浴から出てきたところで、亜鉛融液をガスワイピングする方法であるので、付着量が増えても処理速度を落す必要がない。

IF鋼は、低コスト化したとしても脱ガス処理費や合金元素代がかかるため、めっき原板でのコストはそれらの必要のないアルミキルド鋼よりは安くなりようがない。厚目付化の要望がなければ、電気めっき法で対処でき、この場合には焼鈍は連続焼鈍法かバッチ焼鈍法になり、大部分の用途では鋼種はアルミキルド鋼で十分である。すなわちIF鋼が低コスト化したとしても、厚目付化の要望がなかったらIF鋼の今のポジションはなかったと思われる。逆に厚目付化の要望があったとしても、IF鋼のコストが非常に高ければ、生産性の低下による電気めっきでの大幅なコスト上昇があったとしても、やはりIF鋼は使われなかったと思われる。すなわちIF鋼の今

の姿は、めっき原板でのIF鋼とアルミキルド鋼のコスト差の大幅縮小という薄鋼板製造技術と、亜鉛の厚目付け化を必要とした車体製造技術の完璧なまでの共鳴現象の産物である。

6 おわりに

自動車用冷延鋼板向けの主力鋼種が、他の鋼材には見られないような大きな転換をおこなってきたのは、鉄鋼側の変化と同時に、自動車側も大きく変化したからであると思える。自動車用鋼板は、自動車側の車体製造技術などの変化と、強弱はあるが共鳴しながら、それ向けの鋼種を変えてきた。

鉄鋼、自動車を取りまく環境が、過去になかったほど変化している昨今である。両者とも、地球環境問題、グローバル化・大競争の渦中にある。鉄鋼単独では、ミニミル関連技術の進歩と鉄源問題である。自動車単独では安全性能である。これらはIF鋼をいつまでも今の座に置かない、と思った方がよさそうである。

引用文献

- 1) 薄板マニュアル冷延鋼板編, 日本鉄鋼協会編 (1965), p.10
- 2) 吉田清太: 日本機械学会誌, 84-748 (1980), p.49
- 3) 日刊工業新聞社: 創刊30周年記念「プレス技術」'92/6月別冊, (1992), p.13
- 4) LD委員会10周年記念論文集, 日本鉄鋼協会LD委員会編, (1969), p.297
- 5) R.L.Ricket, S.H.Kalin and J.T.Mackenzie: Metals Transactions, AIME, 185 (1949), p.242
- 6) W.T.Lankford, S.C.Snyder and J.A.Bauscher: Trans. ASM, 42 (1950), p.1197
- 7) 新日鉄: 私信, (1975)
- 8) 住金: 私信, (1975)
- 9) 王寺睦満: 第153・154回西山記念技術講座, 日本鉄鋼協会編, (1994), p.3
- 10) 佐藤満: 第74・75回西山記念技術講座, 日本鉄鋼協会編, (1981), p.177
- 11) 早川浩, 古野嘉邦, 柴田政明, 高橋延幸: 鉄と鋼, 69 (1983), S594
- 12) 清水峯男, 河原田実, 柴田政明: 特許公報, 特公42-12348
- 13) 清水峯男: 私信, 1996年9月
- 14) 雀部実: 第143・144回西山記念技術講座, 日本鉄鋼協会, (1993), p.19
- 15) 福田宣雄, 清水峯男, 高橋延幸: 鉄と鋼, 59 (1973), S193
- 16) 鋼材倶楽部編: 自動車と鋼材 (改定版), (1992), p.64
- 17) 別所毅, 近田滋, 深田新: トヨタ技術, 40 (1990), p.254

(1996年10月15日受付)