

強さとしなやかさを演出し世界をリードする薄鋼板

NKK's State-of-the-arts Flat-rolled Products Borne in a Last Decade

実川 正治 鉄鋼事業部 薄板セクター部 部長
細谷 佳弘 総合材料技術研究所 薄板研究部 部長

Masaharu Jitsukawa
Yoshihiro Hosoya

当社では薄鋼板のマーケットが求める多種多様のニーズに応えるため、世界をリードする薄鋼板商品開発を進めてきた。本稿では、連続焼鈍技術を源流とする今日の当社の薄鋼板開発の歴史をふまえ、自動車、電機、容器、ほうろうの主要薄板需要分野において、1990年以降当社が開発・商品化に成功した技術を主体に紹介する。

NKK has developed a wide variety of state-of-the-art flat-rolled products in response to demands from both domestic and overseas customers. This paper introduces typical new products for use in automobiles, electric appliances, can making, and enameling that were developed by NKK in the last decade based on its continuous annealing technology.

1. はじめに

当社が世界に先駆けてシート用連続焼鈍ライン(NKK-CAL)を実用化して四半世紀が経過した。その間、日本の自動車産業の成長・発展と生産拠点の海外進出の動きは目覚しく、当社の薄鋼板は自動車メーカーのニーズに応える形で量の拡大と品質の向上を果たした。とりわけ1990年代以降は、北米におけるCAFE(Corporate Average Fuel Economy)規制の動きを機に、省エネルギー、地球環境保全、リサイクルなどのグローバルな視点と、衝突安全性などの乗員保護の視点での車作りが強く求められるようになり、構造設計・材料技術・生産技術が一体となった、いわゆるSimultaneous Engineeringによる車作りを視野に入れた技術開発を推進した。その結果、自動車を構成する(1) ボディーパネル、(2) シャシー足回り部品、(3) 安全強度部品、(4) 駆動系部品のおのおのについて特長ある商品を開発・商品化するとともに、高強度鋼板を高精度で成形加工する技術、CAEによる部品の成形難易評価と鋼板選定技術、加工部品の接合技術、部品の衝突安全性能評価などに関しても独自の技術開発を進めた。

一方、1980年代後半より当社は薄板分野における新規事業開拓の一環として、無方向性電磁鋼板や高Ni合金鋼薄板などの高機能薄板市場への参入を果たした。とくに、1990年以降の省エネ機運の高まりに応える形で、数々の独自商品を開発した。無方向性電磁鋼板の分野では、CVD技術による6.5%Si鋼(NKスーパーコア)の量産化技術を世界で初めて実現させ、高周波チョークや高周波トランスなどへの適用に道を拓いた。また、JIS規格相当の電磁鋼板に関しては、従来品を上回る低鉄損-高磁束密度型NK-Bコアを開発し、ハイブリッド型自動車(EHV)用モータコア

材に採用された。高Ni合金鋼薄板の分野では、高精細ブラウン管用マスク材として36%Niアンバー材の一貫製造体制を確立し、フォトエッチング性などの向上に加えて、優れた磁気シールド特性を付与するための技術開発を展開してきた。

その他の主要薄板品種としては、缶用鋼板とほうろう用鋼板が挙げられる。缶用鋼板の分野では、1990年代以降、製缶工程の合理化・環境負荷低減とアルミ缶対抗技術として、従来のDI(Draw & Ironing)缶からPETフィルムをラミネートした鋼板を用いたストレッチドロー缶への転換が進み、高度な製鋼性介入物制御技術をベースとした素材の一貫製造技術を確立した。ほうろう用鋼板の分野では、1980年代に連铸化技術を確立したリムド鋼代替高酸素鋼について、1990年代以降も継続して安定製造と品質向上を推し進め、直接1回掛けほうろう用鋼板としてCr添加高酸素鋼を商品化するなど、常に業界をリードする開発を進めた。

そこで本稿では、連続焼鈍技術を起源とする今日の当社の薄板技術開発の歴史の中で、1990年以降に花開いた“強さ”と“しなやかさ”を演出する当社の多種多様な薄鋼板にスポットライトを当てながら、それらの技術の真髄を紹介する。

2. 連続焼鈍によって拓かれた当社の薄鋼板の世界

当社は、1972年に世界に先駆けて福山 No.1 CAL(Continuous Annealing Line)をベースとしたシート用連続焼鈍ラインの雛型を開発し、1976年にシート用本格設備としてNo.2連続焼鈍ライン(NKK-CAL)を稼働させた。NKK-CALは、冷延鋼板の焼鈍工程を画期的に短縮したば

かりか、鋼帯の水焼入れ機能を有するユニークな熱処理方法を採用したことで、従来の箱焼鈍プロセスでは不可能であった各種の高強度冷延鋼板の製造にも道を拓いた¹⁾。

当社はその後、1987年にNo.3 CAL、1993年にNo.4 CALを稼働させると同時に、海外からもその高い技術力が評価され、現在までに世界中で18基のNKK-CALが稼働している。その間、生産能力の拡大に加えて、新たな加熱方法として還元炎による直火加熱技術や新たな冷却方法としてロール冷却法を開発した¹⁾。

Fig.1は、NKK-CALが実用化されて以降の当社における薄鋼板の品種拡大のフローを模式的に示したものである。

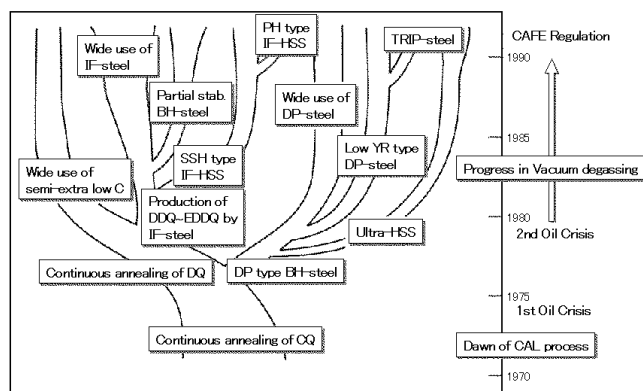


Fig.1 History of the development of new cold-rolled products for automotive use by NKK-CAL

800 以上での高温焼鈍が可能な連続焼鈍技術は、1980年代における二次精錬技術の進歩と融合することにより、再結晶温度の高い極低炭素IF (Interstitial Free) 鋼を汎用鋼種として一般化させた。IF 鋼の普及は、連続溶融亜鉛めっき鋼板を自動車用途に展開する原動力となった。

一方、NKK-CALにおける水焼入れ技術は、440MPa 級 DP (Dual Phase) 鋼板の開発を出発点として 1470MPa 級のウルトラハイテンまでの商品化を可能にし、1990 年代以降の自動車用鋼板のハイテン化をリードした。

3. 自動車用高強度鋼板の開発とその利用技術

薄鋼板の最大の用途は自動車向けであり、燃費改善や排出ガス削減に不可欠な車体の軽量化を図るため、種々の高強度鋼板を開発した。以下に、熱延高強度鋼板と冷延高強度鋼板のおのおのについて主要な開発成果を紹介するとともに、利用技術の発展について述べる。

3.1 熱延高強度鋼板

自動車用熱延高強度鋼板としては、1970年代までは析出強化による低合金型高強度鋼板が主流であったが、プレス成形性が十分ではなく、適用部品に制約があった。そこで変態組織強化に着目し、熱間圧延機出側のランナウトテーブル上での冷却を制御することで、フェライトとマルテン

サイトの2相組織からなる590MPa-780MPa 級アズロール型 DP 鋼板 (NKHA590L, 780L) を1981年から1984年にかけて開発した²⁾。DP 鋼板を製造するには幾つかの方法があるが、Si を1.0%程度添加した鋼を熱間圧延後ランナウトテーブル上で2段冷却 (急冷 - 放冷 - 急冷) し、200 以下の極低温で巻き取ることで組織形成の安定性を高めた点に当社の特長がある。DP 鋼板は、低降伏比でかつ優れた加工硬化特性と伸びを有するため、ホイールディスクなどに使用されている。

1990年に入ると伸びフランジ成形性に関する研究開発を精力的に進め、1994年には伸びと穴広げ率に優れたベイナイト系鋼板をシリーズ化した (NKHA440 ~ 780SF)³⁾。当時、穴広げ率はベイナイト単相組織が最も優れており、さらに母相ベイナイトに適量のフェライトを混在させると穴広げ率を維持しながら伸びの向上が可能であった。こうした知見より、SF シリーズではベイナイトによる強化をベースとして、組織をベイナイト+フェライト、もしくはベイナイト単相とすることで伸びと穴広げ率の両立を図った。SF シリーズでは炭素 (C) は成形性と溶接性を劣化させ、硫化物は穴広げ率を低下させるため、低 C-Si-Mn-極低 S 鋼を基本成分とした。また590MPa 以上では溶接部のHAZ 軟化防止のため微量元素添加を行った。さらにSF シリーズは疲労特性にも優れているため、サスペンションアームを始めとする足回り部品に幅広く使用されている。

足回り部品の薄肉化を進める際、腐食による穴開き寿命が問題となるため、部位によっては耐食性が重要となる。亜鉛めっき鋼板は溶接時のブローホール欠陥が問題となるため、素材自体の耐食性向上が求められた。そこでSF シリーズをベースとして耐食性を改善した耐腐食鋼板を1995年に開発した (NKHK440 ~ 780SF)⁴⁾。開発鋼にはP-Cuを複合添加しており、これらの元素が錆層に濃縮し、錆層を緻密・安定化させることで裸耐食性を改善した。開発鋼の腐食促進試験および大気暴露試験における最大侵食深さは一般材に比べて30~40%改善された。開発鋼は耐食性に加えて成形性、溶接性、塗装適合性、疲労特性も良好であり、サスペンションアームに採用されている。

さらに1990年代初頭、残留オーステナイトの変態誘起塑性を利用した高延性型熱延高強度鋼板を自動車部品に適用する動きが起こり、当社も開発を進めた⁵⁾。しかしながら材質のばらつきが大きく、熱間圧延で残留オーステナイト鋼板を製造するのは適当でないと判断し、NKK-CALでオーステンパー処理が容易な冷延品種のみ、590, 780MPa 級の残留オーステナイト型高加工性冷延高強度鋼板を商品化した。

1990年代における各種熱延高強度鋼板の開発経緯をふまえて、2001年にフェライト単相組織をナノサイズの超微細析出物で強化した全く新しいタイプの780MPa 級および980MPa 級 NANQ (New Application of Nano Obstacle

for dislocation movement)ハイテンを開発した⁶⁾。従来の変態組織強化型熱延高強度鋼板に対して、NANO ハイテンはC, Ti, Mo比を適正化することで析出物(TiMoC₂)の大きさを数ナノサイズまで微細化することに成功したもので、フェライト相を母相として980MPaの強度まで析出強化できることを実証した。NANO ハイテンは低温変態組織を含まないため、成形性に優れたSFシリーズを上回る高い伸びと穴広げ率のバランスを有する。とくに析出物の熱的安定性が極めて高いため、Fig.2に示すように従来の熱延鋼板に比べて材質のバラツキが極めて小さい。圧延荷重が低い点もNANO ハイテンの特長であり、薄物材や広幅材の製造が容易である。強化元素としてSi含有量が少ないため、熱延下地の溶融亜鉛めっき鋼板への適用が可能である。

780MPa級を例にとって、成形性の指標として伸びと穴広げ率の積(EI×)の変化をFig.3に示す。1990年代以降、強度と伸びフランジ性のバランスが大幅に改善された。

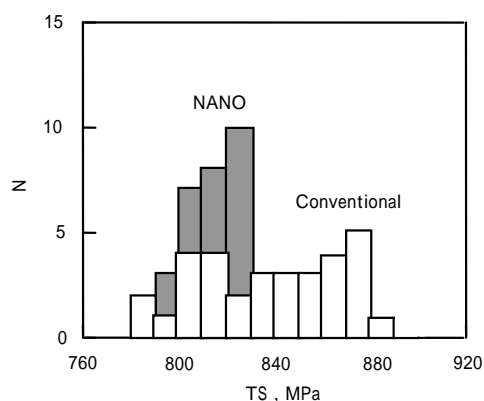


Fig.2 Scattering of tensile strength in NANO-Hiten compared with those of conventional hot-rolled HSS

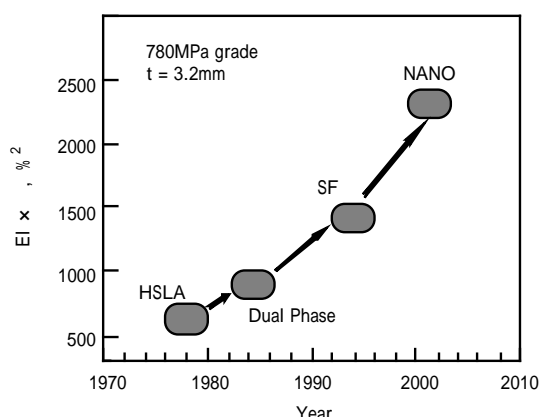


Fig.3 Improvement in formability of 780MPa grade hot rolled high strength steel sheets

3.2 高強度冷延・めっき鋼板

自動車外板パネルには、優れた深絞り成形性と耐デント性が求められる。1990年代以降は極低碳素鋼を基本組

成とする340MPa級焼付け硬化型高強度冷延鋼板(BH鋼板)⁷⁾の材料設計を合金化溶融亜鉛めっき鋼板に適用し、その安定製造と品質向上に注力した。さらに1990年代以降、自動車メーカーより海外調達性が求められるようになり、時効性の観点から制約を設けていたBH鋼板の輸出を可能にするため、BH特性と遅時効特性を両立させた輸出用BH鋼板を開発した。340MPaを超えるパネル用高強度鋼板に関しては、1980年代後半より汎用的に使用されるようになったIF鋼にSi, Mn, Pなどを添加して固溶強化した高r値型高強度冷延鋼板の開発を進め、1990年代前半には合金化溶融亜鉛めっきの密着性を阻害しないMnによる固溶強化を主体とした390~440MPa高強度冷延鋼板を開発した⁸⁾。しかしながら、合金化溶融亜鉛めっき鋼板として成形性と表面品質をさらに向上させるためには、固溶強化元素添加に依存した強化法には限界があった。そこで、従来型のIF鋼の約3倍まで炭素量を増加し、当量以上の炭窒化物形成元素の添加により微細炭窒化物を分散析出させることで、結晶粒の細粒強化と析出物の分散強化を有効活用した、全く新しいタイプの深絞り成形性と合金化溶融亜鉛めっき適性に優れた微細粒型高強度鋼板(SFGハイテン)の開発に成功した⁹⁾。Si, Mn, Pなどの固溶強化元素の添加量が低減できたことで、SFGハイテンは合金化溶融亜鉛めっき鋼板として外板適性を十分満足する表面品質を可能にした。さらに、Fig.4に示すように、従来技術では達成できなかった微細組織における高r値化の可能性を実証するとともに、微細組織でありながら低降伏比となるなど数々の特長を有しており、今後のボディ内・外板パネルの高強度化ニーズに応える鋼板として期待される。

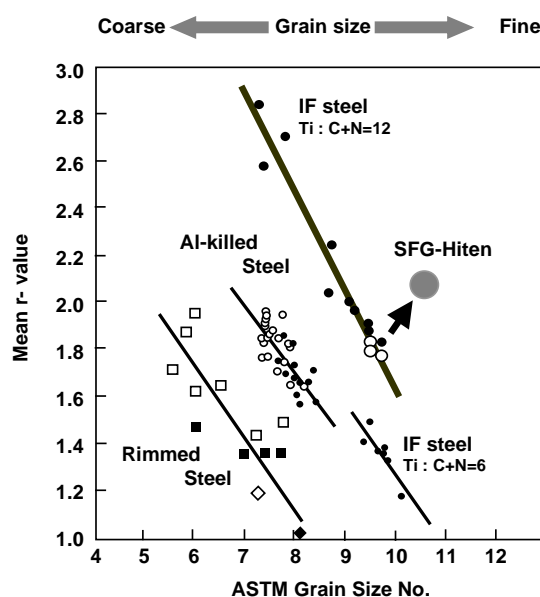


Fig.4 Correlation between mean r-value and grain size in both SFG-Hiten and other conventional steels

一方、サイドメンバーやセンターピラーなどボディの内板骨格部品には、1990年代に入り車体の衝突性能向上の観点から590MPa級を超えた高強度冷延鋼板の適用検討を進めた。とくに、ボディ下部の骨格部品には防錆性能の観点から合金化溶融亜鉛めっき鋼板の要望が高まり、めっき性とスポット溶接性に配慮した合金成分設計により、590MPa級を対象として低炭素析出強化型高強度鋼板とDP型低降伏比高強度鋼板を開発した。また、TWB(Tailor Weld Blank)素材への適用を視野に入れた780MPa級および980MPa級高強度鋼板の開発にも取り組み、高延性化と低降伏比化によるプレス成形の改善とともにレーザ接合時の耐HAZ軟化特性の向上を図った。

780MPa級以上の超高強度冷延鋼板(ウルトラハイテン)においては、NKK-CAL 水冷(WQ)プロセスを活用することで低合金成分での焼入れ強化の安定化を図り、1990年代前半までに1470MPa級鋼板まで商品化した。ウルトラハイテンは、バンパーリンホースメント、ドアインパクトビームなどの安全補強部品、ロールフォーミング部品やパイプ成形部品などに適用される。さらに1200MPa以上のウルトラハイテンで懸念される腐食環境下での耐遅れ破壊特性に関しても、低炭素当量成分設計と焼戻しマルテンサイト組織の炭化物形態制御により克服した¹⁰⁾。

1990年代後半には、ウルトラハイテンを複雑形状の部品に適用するニーズが高まった。そのため鋼板の延性改善だけではなく、ブランク端面から生じる伸びフランジ割れの抑制が重要となり、延性の高いDP鋼をベースとしてフェライトとマルテンサイトの強度差を低減し、590MPa級高強度冷延鋼板と同程度の伸びフランジ成形性を具備した鋼板を開発した¹¹⁾。また、高強度鋼板のプレス成形時に課題となるスプリングバックに伴う寸法精度不良に対しては、コイル内での強度バラツキを低減するため、WQプロセスにおける焼入れ性の安定化によるコイル長手、幅方向の強度安定化を図った。また、製鋼段階の成分狭範囲制御と一貫製造プロセスでの強度変動因子のフィードフォワード管理により、590MPa級高強度冷延鋼板と同程度の強度変動を実現した。

さらに、980MPa級ウルトラハイテンでは、張出し成形部品を対象とした高延性低降伏比型DP鋼板および厳しい曲げ成形部品を対象とした超高型鋼板を開発した¹²⁾。とりわけ超高型鋼板は、440MPa級鋼板をしのぐ穴広げ率を達成し、従来、軟鋼やアルミなど低強度材に限定されていた機械かしめにも適しており、自動車用シートフレームの軽量化など、新たな適用分野を開拓した。

Fig.5に、980MPa級ウルトラハイテンのEI-バランスをベースとした品種展開を示す。

3.3 高炭素鋼板

高炭素鋼板は、機械構造用材料として自動車駆動系部品などを対象として幅広く使用されている。たとえば、リン

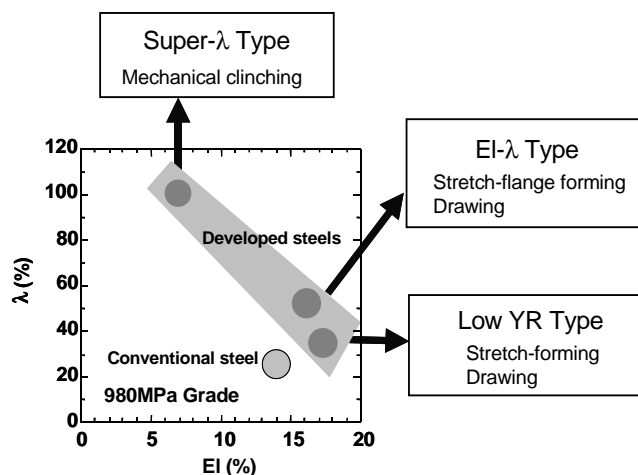


Fig.5 Typical EI – balance of newly developed 980MPa grade cold-rolled ultra-high strength steels

グギア・ドライブプレートなどの自動車部品は、部品製造コスト低減のため、従来の鍛造・鍛造工程から高炭素冷延鋼板をプレス成形後熱処理する方法が開発された。しかし、高い寸法精度が要求されるギア部品では、鋼板の異方性に起因した形状不良の矯正工程が必要となる。1990年代後半から、このような難成形・高寸法精度部品への高炭素鋼板の適用検討に対応し、優れた成形性と焼入れ性に加えて、板面内の異方性が極めて小さい無方向性高炭素冷延鋼板を開発した¹³⁾。セメントaitを微細分散化し再結晶集合組織の制御により、Fig.6に示すような円筒深絞り成形後の耳の発生が極めて小さく、偏心がなく真円度の優れた回転部品への適用を可能にした。

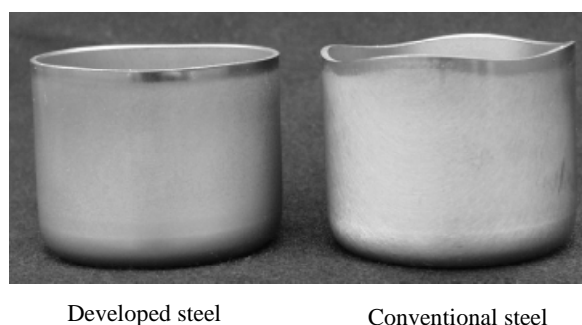


Fig.6 Appearance of drawn cups made of newly developed S35C and the conventional S35C cold-rolled steel sheets

3.4 自動車用高強度鋼板の評価・適用技術

1990年代に自動車メーカーで高強度鋼板の適用による自動車部品の軽量化が積極的に検討され始めたが、高強度鋼板に適した型設計、プレス成形、溶接など生産技術面での技術開発および安全強度部品の衝突安全性に対する評価技術の重要性が増した。

当社は、1990年代初頭高強度鋼板のプレス成形技術として期待された対向液圧成形法が抱える、生産性が低くプレス機が大型化するなどの問題点を解決するため、Fig.7に示すように、しわ押さえ部の鋼板と工具の隙間に高圧ポンプで液体を供給しながらプレス成形を行う「液圧潤滑成形法」を開発した¹⁴⁾。本技術は、フランジ部からダイキャビティーへの素材の流入抵抗を低減することで、高強度鋼板のプレス成形におけるわれ発生抑制とフランジしわ発生抑制を可能にしたもので、プレス機本体の改造を伴うことなく高強度鋼板の成形時に安定した成形余裕度を確保する方法として注目された。

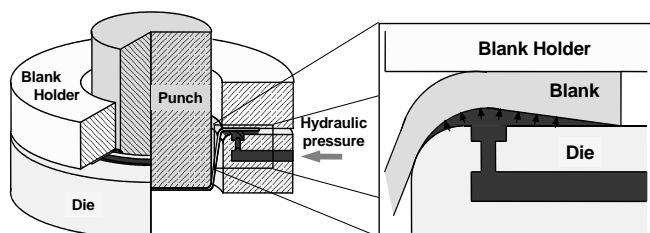


Fig.7 Schematic diagram of the High Pressure Liquid Lubrication Method

自動車部材の軽量化を鋼板の薄肉化で実現する場合には高強度化が不可欠である。当社は軽量化部品の衝突時のエネルギー吸収能を定量的に評価するため、1993年に独自設計による等速高速圧壊試験装置を開発し、高速圧壊試験時の衝撃吸収エネルギーに及ぼす鋼板強度、板厚の影響について詳細に検討した¹⁵⁾。結果の一例をFig.8に示す。鋼板の高強度化による部材の軽量化効果は、厚肉部材に適用するほど効果的である。

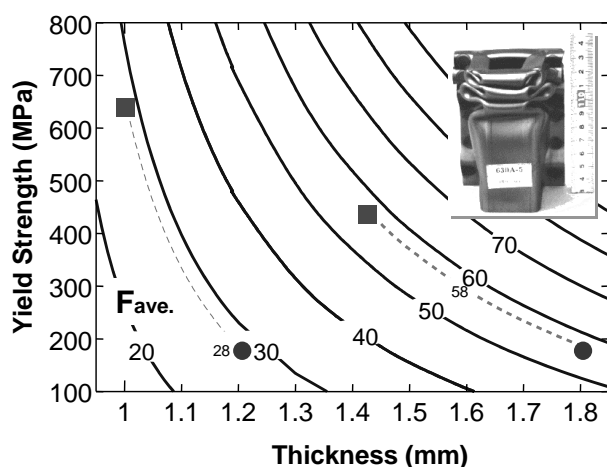


Fig.8 Effects of thickness and yield strength of steel sheet on the crash worthiness (Fave.: Average Folding Force)

これら試験評価技術と CAE を活用した部品の成形・衝突強度評価技術を、新たな軽量化技術として期待されるテイラード・ブランク (TWB) 技術に応用し、当社は 2001 年より国内市場に向けて TWB 製造事業を開始した。

4. エコ技術を支える電磁鋼板の開発とその技術展開

当社は 1988 年に JIS 最高級規格まで無方向性電磁鋼板の製造・販売体制を整えた。その後、家電リサイクル法や改正省エネ法による家電製品の省電力化、環境に優しいハイブリッド型電気自動車の開発など、環境重視の動きを背景として高効率電磁鋼板の開発を成功させた。さらに、電気機器の高周波化に対応して世界で初めて 6.5%けい素電磁鋼板の工業化を実現した。

4.1 無方向性電磁鋼板

当社は 1988 年より福山製鉄所で電磁鋼板専用の連続焼鈍設備 (NKK-EFL) を稼働させ、JIS 最高級グレードまでの無方向性電磁鋼板 (NKE-CORE シリーズ) の製造を開始した。NKK-EFL は、最新の炉制御、強度制御などの品質安定化技術に加え、オンライン連続磁気特性測定装置、膜厚計などの品質保証技術を取り入れた。NKE-CORE は EF シリーズ (フルプロセス材) と ES シリーズ (セミプロセス材) で構成される。Fig.9 に板厚 0.5mm の EF シリーズの鉄損 - 磁束密度特性を示す。NKE-CORE シリーズはカスタマーよりその優れた特性バランスが高く評価され、モータの鉄心材料として大量に使用されている^{16),17)}。

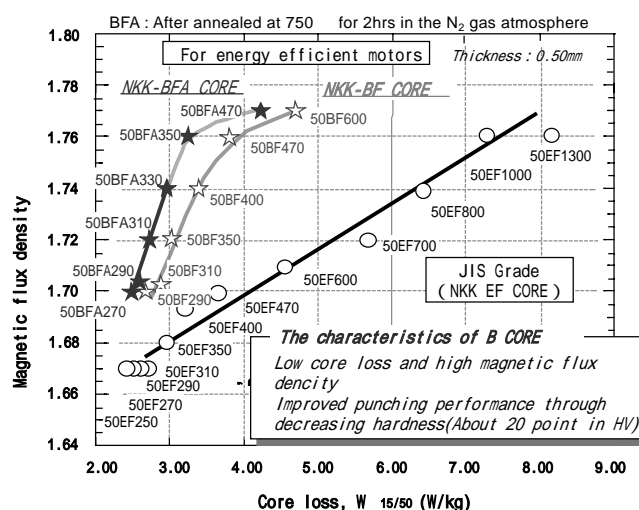


Fig.9 Correlation between core loss and induction in NKK-EF, NKK-BF and NKK-BFA cores

さらに、高効率モータ用コア材として優れた低鉄損と高磁束密度性能を有する NKBF-CORE およびセミプロセス材の NKBFA-CORE を開発した¹⁸⁾。NKBF-CORE は低鉄損・高磁束密度と低硬度を両立させたコア材料である。これら

の相反する要求を満足するため、鋼を高純度化して結晶粒径の適正化を図ることで、ヒステリシス損の大幅な低減を可能にした。鋼の高純度化として MnS 低減による粒成長性向上に着目し極低硫化した。さらに、極低硫化に伴い発生する表層窒化を防止するため界面偏析型の元素を添加した。0.5mm の BF および BFA-CORE の磁束密度・鉄損特性を Fig.9 に示す。JIS グレードに比べ BF および BFA-CORE は大幅に高磁束密度、低鉄損化が達成されている。

BF-CORE はモータの効率化を実現した。その一例として電動パワーステアリング (EPS) 駆動用モータへの適用が挙げられる。EPS は従来の油圧パワーステアリングに比べ 3~5% の燃費改善が見込まれるが、操舵性に影響するモータ空転時のトルク発生 (ロストトルク) を抑えるため、ヒステリシス損の低い材料が求められる。BF-CORE を DC ブラシレスタイプの EPS モータに適用してロストトルクを比較した結果を Fig.10 に示す。40% 程度のロストトルク低下が確認された。BF-CORE は EPS 以外にもハイブリッド電気自動車の駆動モータなどに使用され、自動車のエコ技術を支える材料として期待される。

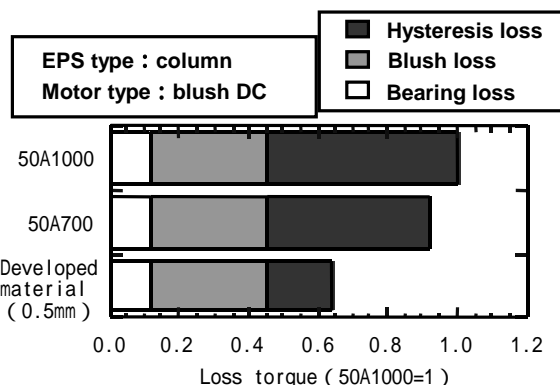


Fig.10 Improvement of loss-torque in EPS motor by using newly developed BF-core

4.2 高けい素電磁鋼板

当社は、高周波鉄損が極小でかつ磁歪がゼロとなる 6.5% けい素鋼板の量産技術の研究に取り組み、世界で初めて化学気相蒸着法 (CVD) を用いた 6.5% けい素鋼板の連続製造技術の開発に成功した。1993 年に連続 CVD ライン (NKK-SEL) を稼働させ、6.5% けい素鋼板 (商品名; スーパー-E コア) の量産を開始した。さらに、CVD の特長を生かして板厚方向に Si 含有量を変化させた傾斜高けい素電磁鋼板 (商品名; スーパー-HF コア) を開発した^{19),20)}。スーパー-HF コアは板厚方向でけい素の濃度勾配を形成させることで表皮効果を誘起し、20kHz 以上の周波数でスーパー-E コアより鉄損を 20~30% 低減することに成功した。

Fig.11 に 6.5% けい素鋼板用 CVD 法の原理を模式的に示す。CVD 法では冷間圧延された 3% けい素鋼板を無酸化雰囲気中で加熱しながら鋼板表面に 4 塩化シリコン (SiCl₄)

を供給することで、鋼板表面の鉄と SiCl₄ 中の Si の置換反応によって、表層に Fe₃Si を形成させる。その後無酸化雰囲気中での均熱処理で Fe₃Si 中の Si を鋼板内部へ均一に拡散させて 6.5% けい素鋼板を得る。

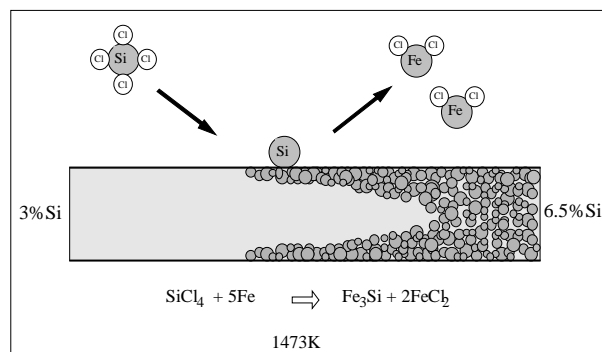


Fig.11 Principal of CVD method in NKK-SEL

スーパー-E コアは、板厚 0.1mm と 0.05mm を生産しており、その代表的磁気特性を Table 1 に示す。たとえば、10kHz の高周波鉄損は同じ板厚の方向性電磁鋼板に比べ約 1/2 であり、無方向性電磁鋼板の 40% 減の極めて優れた特性を有する。また、騒音の原因となる磁歪は方向性電磁鋼板の 1/10 程度であり、一般無方向性電磁鋼板に比べると約 1/80 まで低下する。

今日、スーパー-E コアは高周波低鉄損および低騒音材料として、太陽光発電、無停電電源、インバータおよび高速モータなどに使用されている。

Table 1 Magnetic properties of NK Super E Cores

Thickness (mm)	Core loss (W/kg)			Magnetostriction (x 10 ⁻⁶)
	W _{10/1k}	W _{1/10k}	W _{0.5/20k}	
0.05	18.8	5.3	4.1	0.1
0.10	18.7	8.3	6.9	0.1

5. テレビ用薄鋼板の創生とその技術展開

当社は 1970 年代に業界に先駆けてカラーテレビシャドウマスク用 Al キルド鋼板を商品化した。1980 年以降のマルチメディア化時代の到来に対応して、長年培ってきた高純度鋼の溶製技術を生かし、更に最新鋭の冷間圧延機ならびに光輝焼鈍設備を駆使して、高精細ディスプレイ、大画面 TV 用にアンバー合金薄板を始めとするマスク材の開発を手がけ、量産化に成功した²¹⁾。Fig.12 に CRT に組み込まれる各種機能性薄鋼板の構成と、磁気シールド性に優れたインナーシールド材、防爆バンド材など、新規開発商品を模式的に示す。

5.1 Al キルド系シャドウマスク材

シャドウマスク材は、主にフォトリソグラフィ、プレス前焼鈍、曲面プレス成形、黒化処理の工程を経て製造されるため、材料の極限までの高純度性と材質均一性が要求され

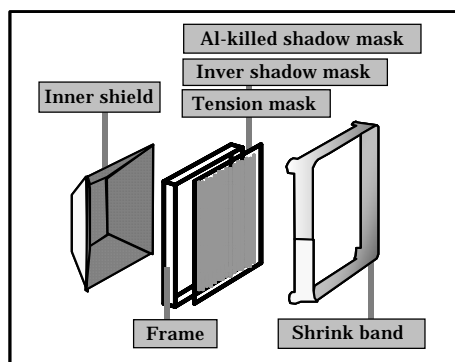


Fig.12 NKK's new steel sheet products for CRT

る。カラーテレビの開発当初はリムド鋼が用いられていたが、曲面プレス成形時の透過むら(伸びむら)の問題より、降伏伸びを抑制し組織が均一なAIキルド鋼板(NKTV-X)を開発した。その後、NKTV-Xはプレスマスクの代表的商品として高い信頼を得るとともに、1990年代以降も低保持力化、連続焼鈍化などの課題に取り組んだ。

5.2 シャドウマスク用アンパー材

シャドウマスク用アンパー材については、基本となる低熱膨張特性以外にも、シャドウマスク材の製造工程に応じた多くの材料特性が要求される。当社では、電気炉と炉外精錬プロセスをベースとした高純度化技術、高精度な形状制御機能を備えたホットストリップミル(熱間圧延機)および広幅、高精度冷間圧延機(12段レバースミル)を駆使し、シャドウマスク用アンパー合金の溶解からエッチング原板コイルまでの高品質、高歩留まりの一貫製造体制を確立した。アンパーシャドウマスクの拡大写真の一例をFig.13に示す。当社材においては、介在物に起因する穿孔不良は見られず、エッチング性は良好である。最近では、テンションマスク用途での高強度化、磁気シールド性向上やコンピュータディスプレイ用途での超低熱膨張化といったユーザーニーズに合致した商品開発を展開している。

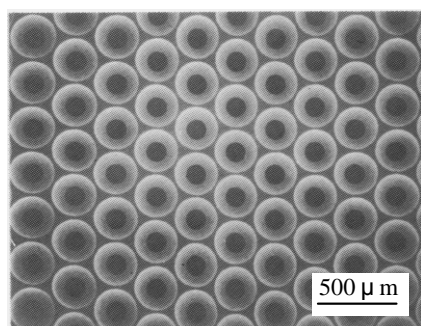


Fig.13 Appearance of fine pitch CDT Invar shadow mask

5.3 インナーシールド材および防爆バンド材

これらのTV用金属部材は、電子ビームの照射精度をミクロン単位まで高めるために優れた地磁気シールド性が求

められる。当社は、TVの使用条件を考慮した磁気特性として非履歴透磁率に着目した開発を進めた。Fig.14にセットスイッチ投入時の消磁過程における金属部材の磁化履歴を示す。交流消磁過程では、材料は地磁気によるバイアスマグ界が重畳した状態でマイナーループを描くため、消磁後ではB-Hカーブの原点には戻らず、材料特性に応じた非定常な磁化状態となる(図中の)。このため、ブラウン管の地磁気シールド性を高めるために部材に要求される特性は通常透磁率(図中の-の傾き)よりも、非履歴透磁率(図中の-の傾き)を高めることが重要である²²⁾。こうした発想に基づき、鋼板の成分、ミクロ組織の最適化により非履歴透磁率を高めたインナーシールド材を始め、張力付加によるクリープ変形が少ないフレーム用高強度鋼板、高強度と優れた磁気特性を併せ持つ防爆バンド用鋼板の商品化に成功した。

上記した開発商品の性能を十分に発揮させるためには、各部材のブラウン管内での構成、配置を考慮した計算機シミュレーションなどの解析による磁気シールド性の総合設計技術の駆使も重要なため、これらの技術を商品設計に反映させている。

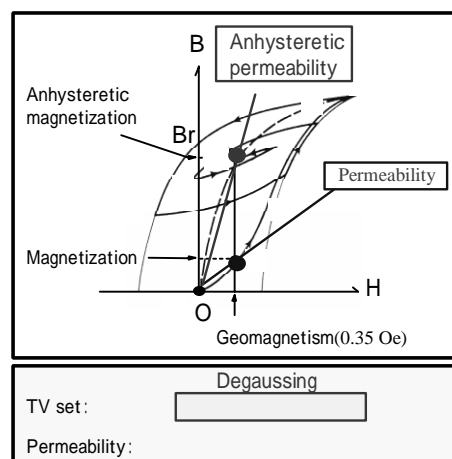


Fig.14 Schematic diagram showing the demagnetizing process under geomagnetism

6. その他の主な薄鋼板の技術開発と商品展開

6.1 缶用鋼板

1990年代以降、缶用鋼板では環境問題への対応、他素材対抗のためのコスト競争力強化、差別化技術を中心とした鋼板開発を進めてきた。

環境問題への対応では、従来の塗装に替えてフィルムラミネート鋼板の利用が指向され、2ピース缶ではPETラミネート鋼板を用いたストレッチドロー缶²³⁾が開発された。これはフランジに高いしわ押さえ圧を加え、それで生じる高張力下での曲げ・曲げ戻しで薄肉化を行う製缶方法であり、フランジ巾均一化のため鋼板には従来以上の耳発生の抑制が求められた。これに対し、Fig.15に示す耳発生を集合

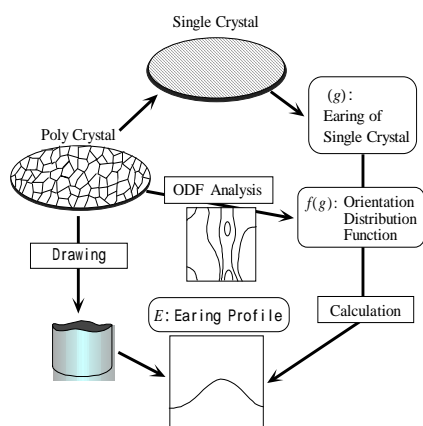


Fig.15 Numerical method of earing evaluation based on texture analysis

組織から解析する手法²⁴⁾を用いて集合組織制御を行うことで、耳発生を抑制した鋼板を実用化した。また、スチール缶の製造コストに占める素材コストの割合が高いため、素材使用量の低減を目的とした缶体の板厚低減が指向された。2ピース缶では、Table 2 のように缶底部の耐圧強度低下、ネック部のネック加工性劣化が問題となる²⁵⁾が、材質改善の方向性が相反するため、これらを両立する鋼板が求められた。これに対し、BH 性を付与するとともに、加工硬化を抑制する材質設計を行うことで双方の両立を達成した。これらの技術で実用化した鋼板は、2ピース缶用鋼板として国内外で使用されている。

Table2 Problems and measures for gauge down in 2 piece can

	Bottom	Neck	
Problems	Decline of bottom buckling resistance	Decline of necking formability	
Measures	Improvement of bake hardenability	Restraint of work hardenability	

一方、缶胴部にくびれ加工を施した 3ピース溶接缶²⁶⁾が、レトルト加熱での高温短時間処理を可能とするとともに、消費者に強くアピールする特徴的な意匠性によって商品を差別化するものとして注目された。この用途には、目的形状を得る加工性に加え、必要な缶体強度を確保する鋼板が求められた。パネリング強度に関する材料力学的検討²⁷⁾および座屈強度に関する FEM 解析技術を駆使することにより、Fig.16 のように加工性と缶体強度を両立する板厚および材料特性の最適設計を行い、くびれ加工缶用鋼板を実用化した。

缶用鋼板はアルミ缶、PET ボトルなどとの素材間競争が激しい分野であるため、今後は国際市場も視野に入れた新規需要の開拓に向けた開発が重要な課題になると考えられる。

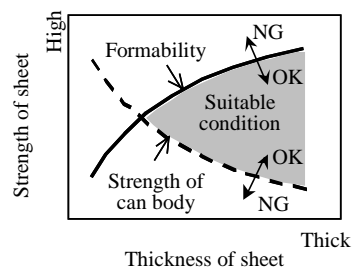


Fig.16 Method of materials design in new type of design can

6.2 ほうろう用鋼板

ほうろう用鋼板には、通常の冷延鋼板に要求される成形性に加えて優れたほうろう加工性が求められる。ほうろう加工性の良否は(1) 耐爪とび性、(2) 泡、黒点などの表面外観、(3) ほうろう密着性などで判断される。直接 1 回掛けの用途では、密着促進剤を含む下釉を施釉せずに上釉のみを直接施釉するため、ほうろう欠陥が発生しやすく、とくに優れたほうろう性が求められる。

従来、こうした要求を満たす直接 1 回掛け用鋼板は、造塊法によるリムド鋼板を脱炭焼鈍して製造された。これに対し、当社は材質の均一性と生産性に優れた連続製造法で製造可能なリムド鋼相当の直接 1 回掛け用鋼として、酸素を 600ppm 程度含有する極低炭素鋼板（高酸素鋼板）を開発した。今日、直接 1 回掛け用途の鋼板はすべて連続製造高酸素鋼に置き替わっている。また、連続製造プロセスにより、深絞り性に優れた Ti 添加鋼や、軽加工用の B 添加鋼といった 2 回掛け用鋼板も開発した。最近では、工程省略による納期短縮や材質均一化などに有利な連続焼鈍（CAL）での製造が可能で、かつ優れた成形性とほうろう性を兼ね備えた Cr 添加高酸素鋼板を開発した。当社のほうろう用鋼板の商品一覧を Table 3 に示す。

Table 3 Products list of enameling steel in NKK

Enameling type	Press formability		
	SPCC	SPCD	SPCE
Direct-firing	Cr bearing high oxygen steel		-
Two coat-two firing	B bearing steel	B decarburized steel	Ti bearing steel

Cr 添加高酸素鋼板は、オキサイドメタラジーの活用により酸化物の形態を最適に制御することで、優れた成形性を達成したほうろう用鋼板である²⁸⁾。Fig.17 に従来鋼および開発鋼の析出物の形態変化を示す。従来の高酸素鋼中には数 μm 程度の MnO 介在物に加えて、数 10nm 程度の微細な (Cr, Mn)-O が存在するため結晶粒成長性が阻害される。そこで、酸化物の粗大化による結晶粒成長性の向上を目指した。酸化物の粗大化には、Cr 添加の活用により高温から Cr 酸化物を核として析出させ、これを起点として

(Cr, Mn)-O を粗大化させた。開発鋼では Cr 添加により、(Cr, Mn)-O などの複合酸化物が粗大化し、従来鋼で見られた微細酸化物が減少している。本開発鋼は連続焼鈍でも従来の脱炭焼鈍材と同等の成形性に加えて、優れたほうろう加工性と耐爪とび性を有する。

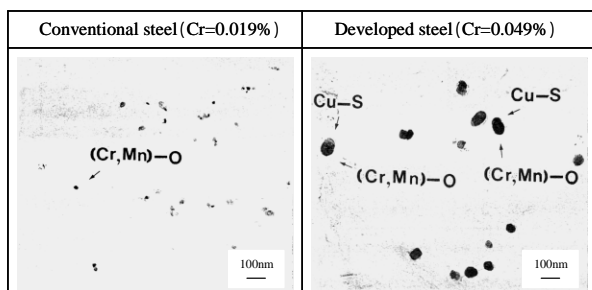


Fig.17 Morphology of oxide inclusion in Cr bearing high oxygen enameling steel

また、Ti 添加鋼のほうろう密着性の改善も重要な課題であるため、ほうろう層と鋼板の界面の形態制御による改善を検討した²⁹⁾。ほうろう加工の前処理における酸洗減量、Ni 附着量の適正化により Ni の析出状態を粒状とし、ほうろう焼成過程でのほうろう層と鋼板の界面に凹凸を形成させることで密着性を向上できることを見出し、該鋼の特性改善の指針としている。

7. おわりに

自動車、電機、容器のあらゆる分野で“強さ”と“しなやかさ”を演出する当社の薄鋼板の世界を紹介した。NKK-CAL 技術を起源とした今日の当社の薄板技術は、常に独創性を重視したシーズ技術開発とカスタマーの視点に立った応用技術開発の両立を志向し、国内外のユーザーより高い評価を受けてきた。こうした遺伝子は、2003 年 4 月より川崎製鉄の薄板技術の遺伝子とともに JFE スチールに引き継がれる。2つの異なる遺伝子が Creative conflict を繰り返しながら新たな JFE の薄板技術の遺伝子を創出したとき、世界をリードする強力な薄板技術が誕生することを確信している。

参考文献

- 1) S. Kanetoh, et. al. “The Equipment and Operation of NKK Fukuyama No.3 CAL”. NKK Technical Review. No.56, pp.1-9(1989).
- 2) 大北智良ほか。“熱延複合組織鋼の品質特性”. 日本鋼管技報. No.105, pp.53-61(1984).
- 3) 木下正行ほか。“伸びフランジ性の優れた自動車用高強度熱延鋼板”. NKK 技報. No.145, pp.1-8(1994).
- 4) 吉武明英ほか。“自動車用耐腐食熱延鋼板”. NKK 技報. No.145, pp.9-16(1994).
- 5) 木村浩ほか。“残留オーステナイト活用熱延鋼板の組織制御と機械特性”. CAMP-ISIJ. Vol.4, pp.784(1991).

- 6) 特願 2001 - 333374 号, 333375 号, 333376 号.
- 7) 谷川克己ほか。“極低炭素焼付硬化型冷延鋼板の時効性”. NKK 技報. No.145, p.25-32(1994).
- 8) 細谷佳弘ほか。“390 ~ 440N/mm² 級超深絞り用冷延鋼板”. NKK 技報. No.145, pp.17-24(1994).
- 9) F. Kitano et al. “New Type of IF-High Strength Steel with superior Anti-secondary Work Embrittlement”. Trans. ISIJ, Vol.41, No.11, pp.1402-1410(2001).
- 10) 長滝康伸ほか。“1370 および 1560MPa 級超高強度冷延鋼板の開発”. 日本金属学会会報. Vol.32, No.4, pp.238-240(1993).
- 11) 中村展之ほか。“超高強度冷延鋼板の伸びフランジ成形性に及ぼす組織の影響”. CAMP-ISIJ. Vol.13, pp.391-394(2000).
- 12) K. Hasegawa et al. “Development of 980N/mm² Class Ultra High Strength Steel Suitable for Mechanical Joining”. ATTCE 2001 Proceedings, Vol.4, pp.175-181(2001).
- 13) 藤田毅ほか。“無方向性高炭素冷延鋼板の開発”. までりあ. Vol.40, No.3, pp.283-285(2001).
- 14) 山崎雄司ほか。“液圧潤滑成形法の開発”. 第 7 回機械材料・材料加工技術講演会講演論文集. No.99-23, pp.17-20(1999).
- 15) Kentaro Sato et al. “A Study on Improving the Crashworthiness of Automotive Parts by Using Hat Square Columns”. Interior, Safety & Environment, Vol.31, IBEC, (1997).
- 16) 実川正治ほか。“福山電磁鋼板ラインの設備操業と商品の品質”. NKK 技報. No.131, pp.16-23(1990).
- 17) 日裏昭ほか。“無方向性電磁鋼板の高機能化と磁気特性”. NKK 技報. No.157, pp.11-15(1997).
- 18) 尾田善彦ほか。“極低 S 系高効率電磁鋼板の開発その応用”. までりあ. Vol.41, No.2, pp.114-116(2002).
- 19) 石川勝ほか。“スーパー E コア製造設備と製品特性”. NKK 技報. No.145, pp.53-60(1994).
- 20) 岡見雄二ほか。“6.5%けい素鋼板の高速無孔連続 Si 浸透技術”. 鉄と鋼. Vol.80, No.10, pp.777-782(1994).
- 21) 大北智良。“シャドウマスク用アンバー合金(NKK アンバー)”. NKK 技報. No.131, pp.74-76(1990).
- 22) 斉藤一郎。“CRT における磁気シールド材の磁気特性と地磁気ドリフト”. 電子情報通信学会論文誌. Vol. J79-C-11, No.6, pp.311-319(1996).
- 23) 今津勝宏。“ラミネート板のストレッチドロー成形”. 塑性と加工. Vol.38, No.432, pp.52 - 56(1997).
- 24) 小島克己ほか。“集合組織変化に伴う深絞り成形時の耳変化の解析”. NKK 技報. No.167, pp.29 - 33(1999).
- 25) Tsurumaru, M. et al. “Steel for tinsplate DI cans”. Proc. 6th Int. Tinsplate Conf. London. (1996). ITRI. pp.195 - 204.
- 26) 新保寛明。“ウエストウエーブ缶について”. 包装技術. Vol.39, No.5, pp.21 - 25(2001).
- 27) 杉原玲子ほか。“飲料用溶接缶のパネリング強度に及ぼす鋼板強度の影響”. 材料とプロセス. Vol.10, No.6, pp.1228(1997).
- 28) 松木康浩ほか。“Cr 添加高炭素ほうろう用鋼板の開発”. までりあ. Vol.37, No.5, pp.406-408(1998).
- 29) 松木康浩ほか。“ほうろう密着性に及ぼす Ni 析出状態の影響”. NKK 技報. No.161, pp.89-93(1998).