



日本鉄鋼業における独自技術の開発と現在-12

板クラウン・形状制御ミルの開発

Development of Strip Profile and Shape Control Mill

三菱日立製鉄機械(株)
広島事業所 圧延機設計部

富野貴義

Takayoshi Tomino

同上

宇杉敏裕

Toshihiro Usugi

三菱日立製鉄機械(株)
技術開発統括部 主幹技師

橋本正一

Shoichi Hashimoto

三菱日立製鉄機械(株)
技術開発統括部 技師長

林 寛治

Kanji Hayashi

三菱日立製鉄機械(株)
副社長

芳村泰嗣

Yasutsugu Yoshimura

1 まえがき

1.1 概要

日本の鉄鋼業にとって、1970年代から80年代は粗鋼生産高1億トンが達成され、従来の外国技術依存から日本独自の新技术が開花した時代と言える。1994年6月に開催された鉄鋼協会圧延理論部会第100回記念シンポジウムでも概説されたとおり、1970年代以降の板用圧延機の世界では油圧圧下ミルによる板長手方向の板厚精度向上後の技術課題として、図1に示すような板の形状不良、板クラウン対策が取り上げられるようになった。そして種々の板クラウン・形状制御ミルが1970年代から80年代にかけて開発・提案されており、それらをまとめて図2に示す¹⁾。三菱日立製鉄機械(株)はそのなかでも主役となるHCミルとPCミルを開発したので、その開発の経緯につきご紹介する。

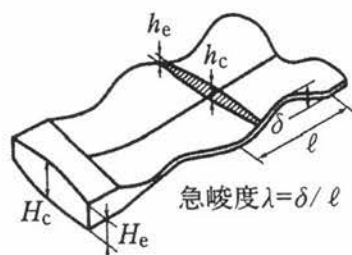
ご存知のように三菱日立製鉄機械(株)は6段HCミルを開発した(株)日立製作所(以下日立と略す)と4段PCミルを開発した三菱重工業(株)(以下三菱重工と略す)の製鉄機械プラント事業を統合して2000年に設立された会社である。そのHCミルとPCミルの開発の歴史を時間軸に合わせながら、お互いがライバル社として切磋琢磨した経緯を解説することは、今後の日本の製鉄業を担う若手エンジニアにとって

も価値あることと考える次第である。本稿ではその主旨から技術的側面とともに背景の苦労話などでもできるだけ詳しく解説したいと考える。

1.2 従来ミルの問題点

図3に示すとおり従来の4段ミルでは圧延時の荷重はバックアップロールのロールネックに負荷されるが、バックアップロールおよびワークロールの胴長は圧延材の板幅よりも大きいので、ロールの撓みが発生する。このロールの撓みにより、図1²⁾に示すような耳波と呼ばれる板形状不良や、板クラウンが生じることとなる。板形状不良は最終製品としては当然のことながら品質不良であるし、中間製品としてもコイルのその後の工程での通板作業でトラブルの元となるため、なるべく板を平坦な形状に圧延する必要がある。そのためワークロールの胴長方向に径分布(初期クラウン)を与え、ロールが撓んだ状態で、上下ワークロールの間隙の幅方向分布を一定とする工夫が必要となっていた。板厚1mmの平坦な板を圧延する場合、板幅中央と端部の板厚差がわずか0.25 μ m変化するだけで急峻度は要求値の1%も変化することからその要求精度の厳しさが想像されよう。さらにはワークロールの撓みは、圧延材の板幅、板厚、圧下率、変形抵抗、潤滑条件、等々の圧延条件によって変化するので適正なワークロールクラウンを選定する必要がある。この選定作業には非常に高度な熟練技術を要していたし、頻繁なロール組替は圧延の生産効率の妨げにもなっていた。また多様な初期クラウンのロールを常時多数準備しておかなければならず、非経済的でもあった。

板クラウンについては1980年頃の板クラウン制御が困難な時代(冷延薄板で10%レベル)に、国内の鋼板のクラウンを完全に0にできれば、日本全体での節減重量は200万トンにも及ぶといわれたことから板クラウン制御の重要性が理解されよう³⁾。



出側板クラウン $C_h = h_c - h_e$
入側板クラウン $C_H = H_c - H_e$

図1 板クラウン・形状²⁾

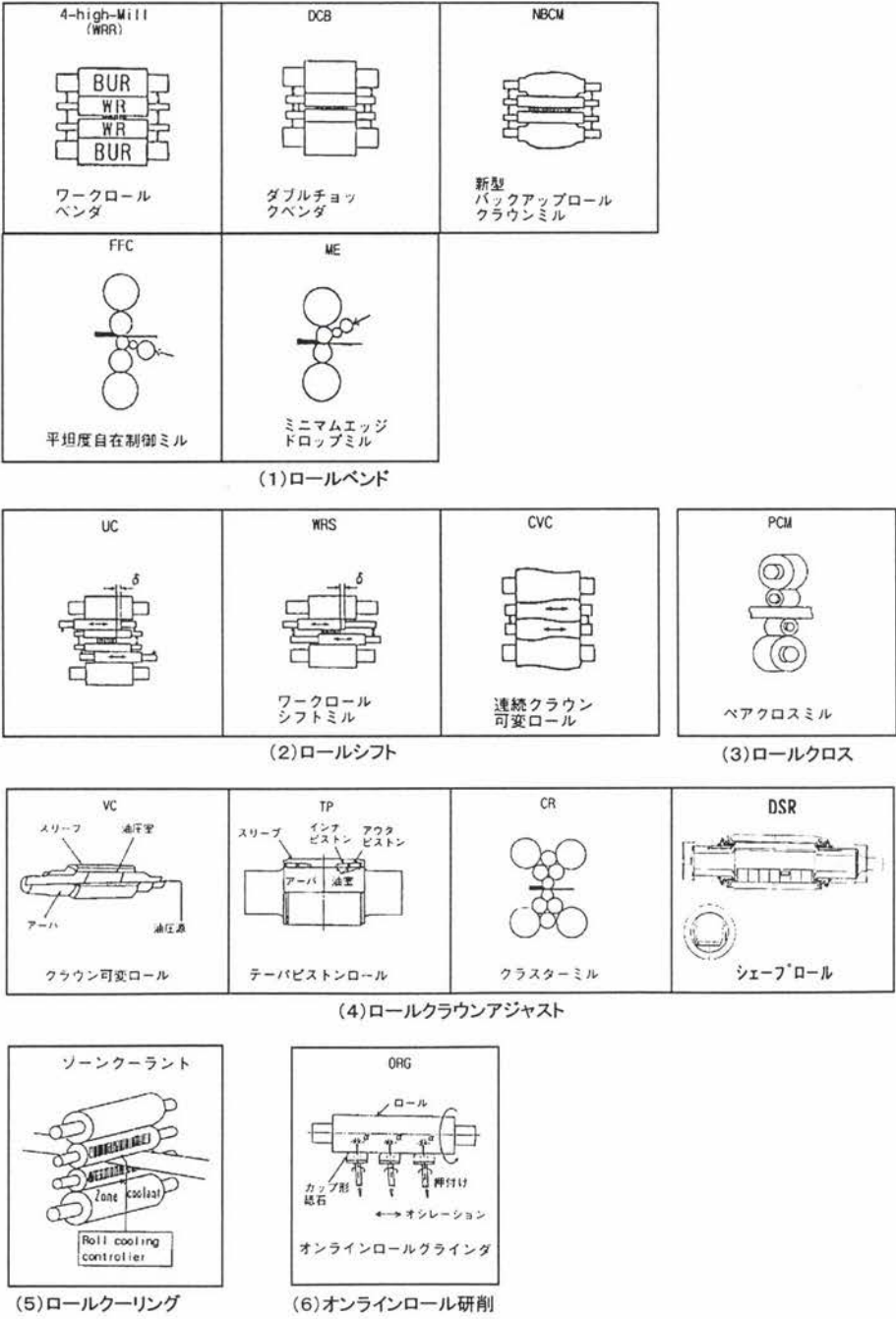


図2 各種板形状制御圧延機、装置他¹⁾

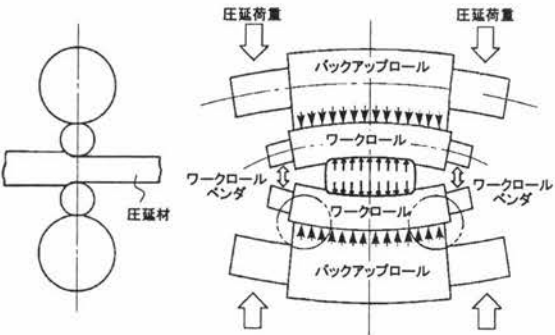


図3 圧延機の変形

2 HC (High Crown Control) ミルの開発

2.1 HCミルの原理と特徴

従来型ミルにおいて、圧延時に発生するワークロールの撓みの原因は、圧延材の板幅より外側のバックアップロールとの接触荷重である（有害接触荷重）。また、ワークロールの撓みを矯正する装置であるワークロールベンダが備わっていてもその機能が有害接触荷重によって制限され、十分な矯正機能が得られない。図4は理想的HCミルの概念図である⁴⁾。

バックアップロール胴長を圧延材の板幅と同じとし、上述のロール間の有害接触部を無くし、ワークロールの撓みを防止している。また、この有害接触部が無くなればワークロールベンダの機能も増大され、板クラウンおよび板形状の制御範囲が大幅に広がる。すなわち、この有害接触部を無くす（減らす）ことにより圧延荷重変化に対する圧延材の板クラウンおよび形状の安定性と、ワークロールベンディング力による大きな板クラウン・形状制御能力という一見相反する機能を同時に得ることができるのである。

しかしながら、実際には圧延材の板幅に応じてバックアップロールの胴長を変えるのは非現実的である。そこで、HCミルはバックアップロールとワークロールの間にロール軸方向に移動可能な中間ロールを設けた6段ミルとしている。図5にHCミルの構造を示す。中間ロールを軸方向に移動（シフト）することにより、片側の有害接触部を板幅に応じて調整することが可能となる。また、上下で中間ロールを逆方向すなわち圧延中心点に対して点对称に移動することにより、残った有害接触部の接触荷重も減少させる事ができるため、バックアップロール胴長が板幅と同じである横剛性無限大の理想的HCミルの状態に近づけることができる。

HCミル小型試験機での圧延試験により得られた板形状制御実験結果の一例を図6に示す。中間ロールの位置をワークロール胴端部近くに合わせた横剛性の小さな従来型4段ミル相当圧延では圧延荷重の増大に伴って板幅より外側のバックアップロールからの有害接触荷重が大きくなりワークロールが大きく曲げられることにより、板は耳波形状へと変化していく。これに対し、HCミルでは中間ロールシフトを板幅に合わせ適性位置に設定することにより、このバックアップロールからの有害接触荷重を少なくすることができるので、圧延荷重が大きくなっても板形状が平坦のままで変化しない、

すなわち横剛性の高い圧延機とすることが可能となる。

さらに、HCミルでは、ワークロール径が細くてもミルの横剛性は大きく保つことができるため、ワークロールを小径化することが可能となる。ワークロールの小径化により圧延荷重と圧延動力が削減できるので硬質材の圧延と省エネルギーに有効である。

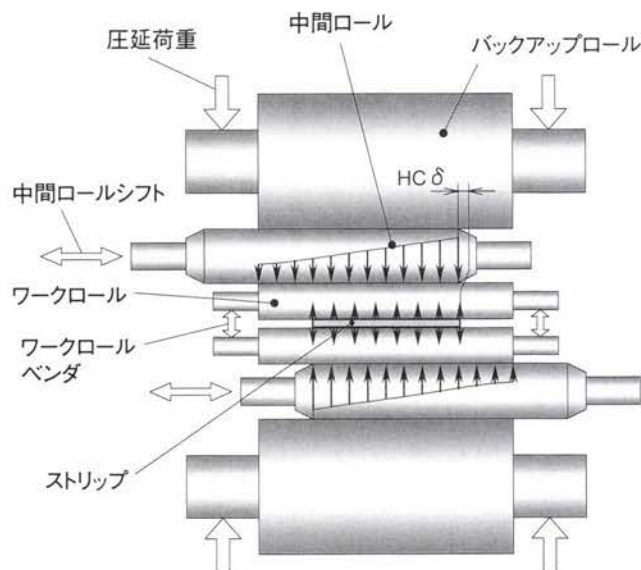
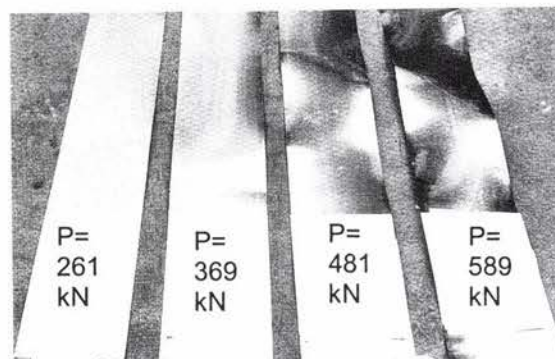
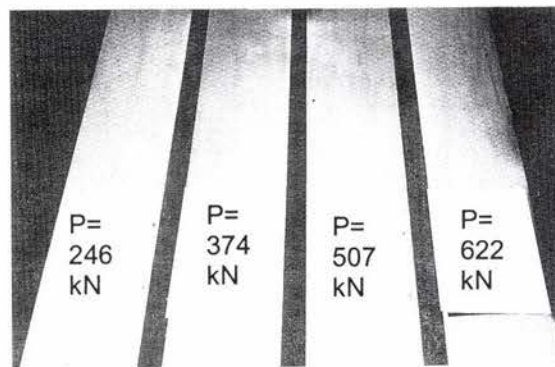


図5 HCミルの構造



(a) 4段ミル相当（横剛性：小）



(b) HCミル（横剛性：大）

図6 板形状制御実験結果（P：圧延荷重）

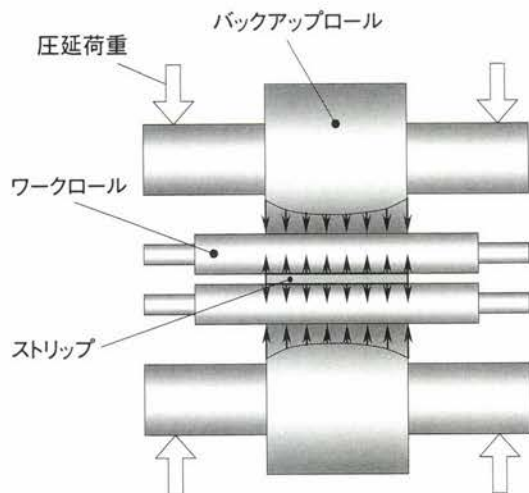


図4 理想的HCミル

2.2 HCミルの開発

HCミルの開発は1970年代初頭に日立にて開始された⁵⁾。当時、クラウンコントロールとはワークロールベンダのことを指し、ワークロールベンダ付きの従来型の4段ミルが一般的に使用されており、HCミルの開発は顧客から特に要望や依頼があったわけではなかった。開発の動機は、日立の技術者の「メーカとして誰にでも簡単にフラット板を圧延できる圧延機を作りたい」という思いであった。また、この頃、日立では油圧圧下装置 (HYROP: Hydraulic Roll Positioning Device) の自主技術開発をきっかけに新しい技術を開発するムードも高くなっていた。

1960年代終わり頃、日立ではロールの撓みに関する疑問より4段ミルのワークロールの撓みが実測され、分割モデルを用いた計算でその撓みを検証する研究が行われていた。その結果、ロールの撓みはワークロールとバックアップロールで全く異なっており、当時、常識の様に考えられていた「ワークロールはバックアップロールに倣って撓む」というのは間違いであることが検証された。また、この分割モデルを用いてバックアップロールの胴長を圧延材の板幅と同幅として計算すると、ワークロールの撓みが大幅に減少することも検証された。これらの事が2.1節で述べたHCミルの原理の創案を裏付けることとなった。

HCミルを具現するにあたり、中間ロールをシフトするという発想に対して、当時、日立にて製作していたSendzimirミルで第一中間ロールを軸方向にアジャストする機構の実績があったため、大きな抵抗は無かった。図7にHCミル特許第1号の特開昭47-29260の図を示すが、中間ロールを片側2本 (合計4本) のバックアップロールで支持する8段ミルが当初のアイデアであった⁶⁾。その後、ハード設計、保守作業等の検討から、よりシンプルな6段ミルへと検討が収束していった。

当時、電動機開発用に保有していた3スタンド実験ミルの1スタンドを改造してHCミル小型試験機が日立の機械研究所に設置されたのは1972年の事である。図8にHCミル小型

試験機の写真を示す。この小型試験機で、クラウンロールを用いず、ストレートロールのみでフラットな板材を容易に圧延できる事が初めて実証された。開発当初は、 $HC\delta = 0$ 、すなわち中間ロール胴端は板幅端に合わせる、という概念で試験が行われていた。ある時、 $HC\delta$ を“-”(マイナス)方向にシフトする、つまり中間ロール胴端を圧延材の板端よりも内側にシフトすると、荷重が大きくなる程、中伸び圧延になり、従来型4段ミルの逆になる事に気が付いた。一方、 $HC\delta$ を“+”(プラス)にシフトすると従来型4段ミルと同様に端伸び圧延となることから、その変極点が存在すると考えられた。この変極点では圧延荷重が変化してもワークロールベンダを調整することなく、良好な板形状 (板クラウン) が得られる安定した圧延が可能であると考えられた。この点を横剛性無限大点と呼び、計算および実際の圧延試験にてその存在が確認された⁷⁾。さらに、この小型試験機での圧延試験において、HCミルのエッジドロップ低減能力も実証された。

2.3 HCミルの実機化

板クラウン、板形状およびエッジドロップは、発電機や変圧器の鉄心として使用される電磁鋼板の圧延において特に重要視される。従って、HCミルの実機初号機は新日本製鐵 (株) 八幡製鐵所の電磁鋼板圧延用ミルであった。図9に大型HCミル初号機の写真を示す。大型HCミル初号機は新日本製鐵 (株) との共同研究という形で開発が進められ、1974年に圧延開始となった。本共同研究にて、形状制御特性、エッジドロップ低減効果、およびその後のハード設計に係る必要なデータが得られた。普通鋼圧延にHCミルが初めて適用さ

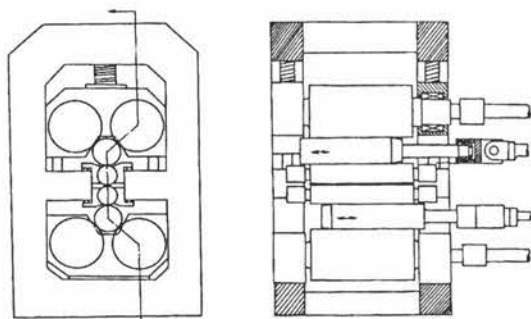


図7 HCミル特許の図⁶⁾

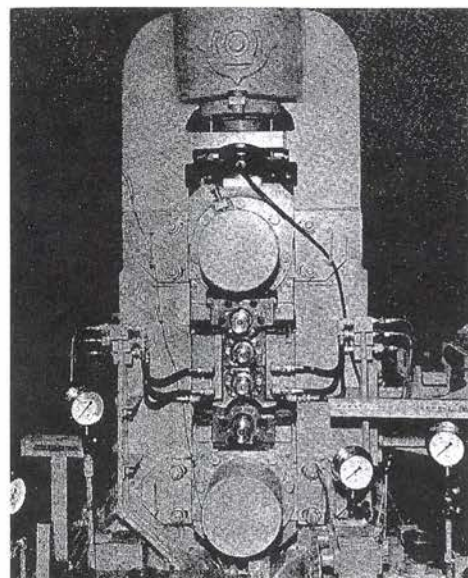


図8 小型HCミル試験機

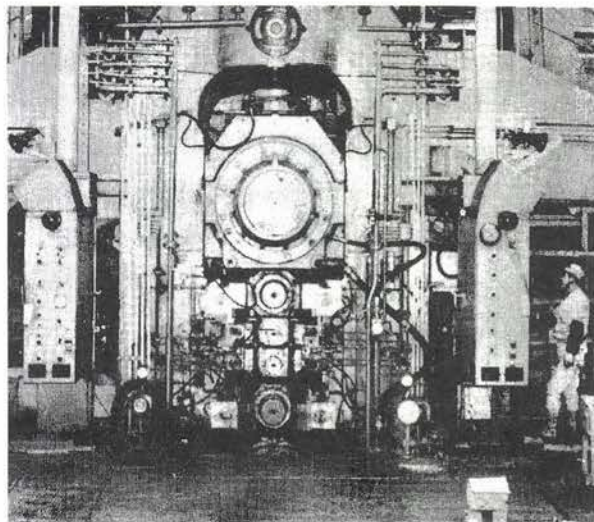


図9 大型HCミル初号機

れたのは1976年、大洋製鋼(株)船橋工場のリバースミルであった。その後、タンデムコールドミル、スキンプスミル、そして熱延ミルへと適用が拡大されていった。

HCミルの実用化において克服しなければならない問題もいくつかあった。なかでも大きな問題はロールに関する技術およびクーラントのワイピングに関する技術であった。

ロール間の荷重分布を変える中間ロールシフトにより中間ロール胴端部に発生する局部応力集中をまず抑える必要があり、テスト段階にて中間ロール胴端部のチャンファー形状を曲率半径やテーパ角度を変えた実験検討が行われた。この結果、1000 mmR以上の曲率半径あるいは 0.5° 以下のテーパを付与すれば良いことが確認された。

しかし実操業ではチャンファーが滑らかに加工されていなかったためピッチングが発生したり、中間ロールを最小板幅位置に設定しクーラントをかけずに高荷重の下でレベリングが行われたりしたため、焼きつきが発生するなどした。いずれも研削方法や操業方法に対するユーザのご理解を得て解決された。

一方、ロールの長寿命化や耐荷重性向上を目的として高硬度のロール表面を得る高周波焼入れを行った鍛鋼ロールが用いられ始めていた。中間ロールの硬度はワークロールとバックアップロールの中間的な硬度Hs75近辺が選ばれたが、ロール間の硬度差が従来と比べて狭くなり異物噛込みの影響が大きな事が予想された。高い面圧に耐えることはHCミルにとって好都合であったが、異物噛込みや絞込みなどのトラブルの後目に見えないヘアークラックが残ると、圧延によりこのヘアークラックを起点とした亀裂が進展し硬化層を全部剥がすような大きなスポーリングに至る事故が発生した。必ずしもHCミル特有のトラブルではないがHCミルの大きな面圧も影響するためユーザのご理解を得るのに苦労した。発生

原因やヘアークラックを残さないためのクラック検出方法と研削手順などをミル稼動前に説明を行うことにより、次第にユーザのご理解も得られるようになった。また中間ロールの硬度は一般的にはHs75近辺であったが、ダルやブライトなどのロール表面性状あるいは圧延材に合わせて調整することを行った。

クーラントのワイピングすなわち水切り技術は、ロールと板の間の潤滑およびロールを冷却するためにパス入側にてロールにスプレーされるクーラントの出側への飛散防止および飛散したクーラントのワイピングである。パス入側のクーラントが出側に飛散し製品板上にかけると、製品板表面に染みとして残ってしまい表面品質が悪くなる。問題は中間ロールシフトにより中間ロールの胴端小径部分がワークロールやバックアップロールの胴部の内側に入ってくるため、従来の4段ミルに比べ非常に多くのクーラントが出側に飛散したことであった。このため出側の水切り装置に排水効率を高める工夫を施すことや、中間ロールのシフトに合わせて間隙部に対向する部分の入側クーラントのスプレーを停止するなどの対策を講じることにより問題が解消された。

2.4 HCミルの展開

1981年、HCミルに中間ロールベンダを追加したUCミル(Universal Crown Control Mill)が開発された⁸⁾。UCミルでは中間ロールシフト、ワークロール/中間ロールベンダという高度な複合形状制御機能を保有したことにより中伸び、端伸びのような単純伸びだけでなく、複合伸び形状にも対応し、より複雑な板クラウン、板形状の制御が可能となっている。硬質材の薄板化にはワークロールの小径化が有効であったが、一方でワークロール胴長/径比が大きくなると複合伸びが発生し、ワークロール小径化にも限界があると考えられていた。これがUCミルの開発によりその複合形状制御を克服できたことにより、更なるワークロール小径化そして硬質材の広幅/薄板圧延が可能となり、また圧延動力も削減して省エネルギーへも寄与することができた。

その他、2.1節で述べたHCミルの原理を応用した様々な用途に対応するミルが開発され、実用化されている。図10にHCミルシリーズの一覧を示す。HCミル(広義)の建設実績を図11に示す。HCミルは、その安定した形状制御機能が高く評価され、形状制御が特に重要視される冷延分野にて使用される形状制御ミルとして定着していった。現在までに400スタンドのHCミル(広義)が建設(または建設中)され、順調に稼動している。

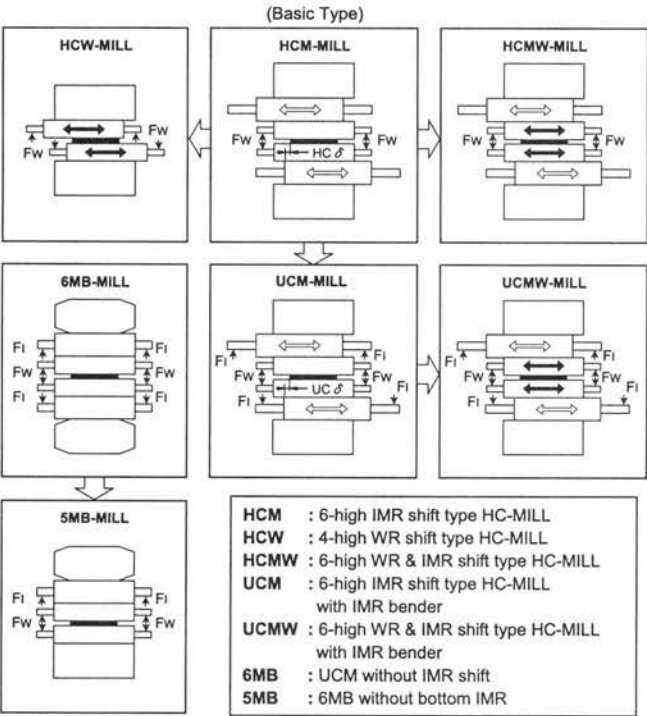


図10 HCミルシリーズ

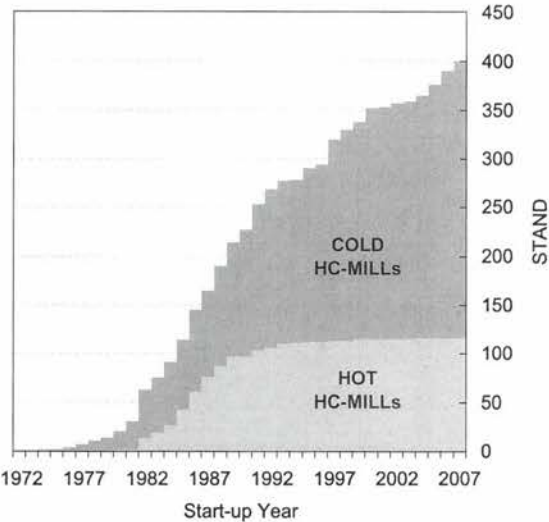


図11 HCミル（広義）納入実績

3 PC (Pair Cross) ミルの開発

3.1 PCミルの原理と特徴

PCミルは図13 (a) に示すようにワークロール軸とバックアップロール軸を互いに平行に保持したまま上下のロール群をクロスさせて圧延する圧延機である。このように上下のワークロール軸をクロスさせると、両ロールの間隙がロール端部になるほど広い放物線状となる。

一方、圧延荷重に起因するロールの撓みは図3に示すとおり中央が広く、端部になるほど狭くなる曲線となる。つまり、

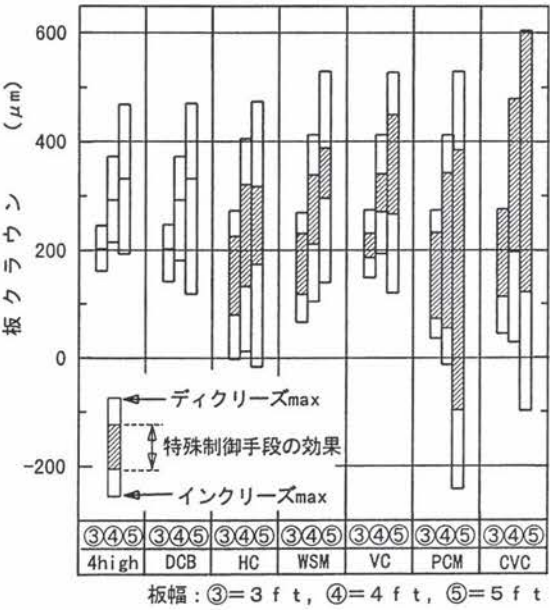


図12 板クラウン制御能力の比較⁹⁾

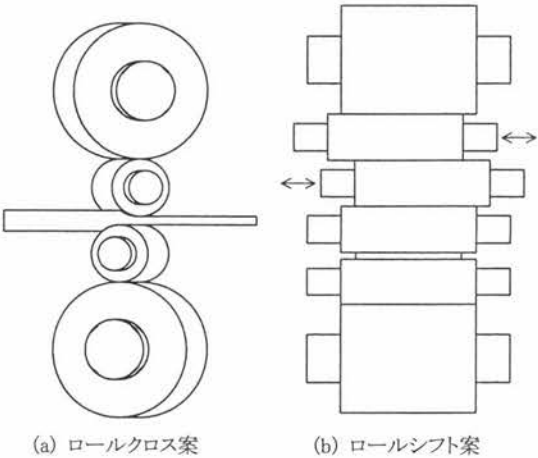


図13 新型形状制御圧延機案

ロールクロスによるロール間隙は、ロール撓みとほぼ相殺する方向に働くため、クロス角度の増減によって板の断面形状の制御が可能となるのである。

熱間圧延では数千トンの圧延荷重によるワークロール/バックアップロールの撓み、ワークロール自身の径方向の熱膨張（サーマルクラウン）、更には圧延する長さによってワークロールが摩耗していくロール摩耗といったように、ロールクラウンは数百ミクロンのレベルで変化する。これをロールの曲げ効果であるワークロールベンダで制御しようとしてもロール自身の強度的制約もあり従来困難であった。それに対しPCミルはわずか1°レベルのクロス角度で、1000 μm 程度のワークロールクラウン（直径）と等価なロール間隙を作り出すことが可能である。しかもこのロール間隙は幾何学的に創生されるため、強度上の制約も無い。そのため、図12⁹⁾に

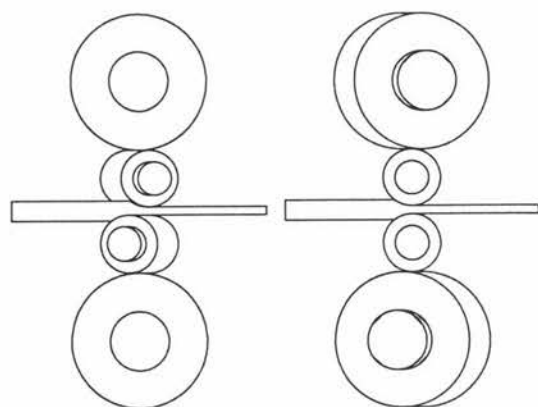
示すように、PCミルはHCミルやワークロールシフトミルよりも板クラウン制御能力が格段に大きい。これがPCミルが熱間圧延機さらには厚板圧延機に広く採用された理由である。

3.2 PCミル開発の動機

当時（1970年代後半頃）、HCミルの登場もあり「これからは形状制御ミルだ」との認識は製鉄業界全体にあった。米国MESTA社の技術に頼っていた三菱重工が後のPCミルとなる新世代圧延機の開発を始めたきっかけは、1977年頃に顧客から上記のような言葉を頂いたからであった。早速社内でアイデアを公募したところ、20数件の案が寄せられ、最終的に図13に示す2案に絞られることとなった。1つがクロスミル、もう1つがHCミルの亜流と呼べるような代物だった。最終的にはクロスミルが生き残ることになるが、その選択に大きな影響を及ぼしたのが、「日立に勝てる圧延機」という観点であった。当時、日立のHCミルは既に冷間圧延機に実用化されており、さらには三菱重工が牙城と考えていた熱間圧延設備にも進出してきていた。1980年の新日本製鐵（株）八幡製鐵所における新熱延の商談では日立に完敗したことで、三菱重工は急速に危機感をつのらせていった。そこへ来て、図13（b）のような日立HCミルのアイデアの焼き直しでは勝てるはずが無い。このような状況からクロスミル採用の方向性が出来上がっていった。

3.3 PCミルの誕生

上下のロールをクロスさせて圧延を行うという図14のようなアイデアそのものは昔から存在しており、プラスチックの圧延機や製紙機械などで実用化されていた。しかし、その原理上、圧延中にロール軸方向に働く力（スラスト力）は不可避免なため、圧延荷重が大きい、すなわちスラスト力が大き



(a) ワークロールクロス (b) バックアップロールクロス

図14 ワークロールクロスとバックアップロールクロス

くになってしまう製鉄用圧延機では不可能と考えられていた。特に、ワークロールのみをクロスさせるワークロールクロスミル、バックアップロールのみをクロスさせるバックアップロールクロスミルの場合、ワークロールとバックアップロールの間にすべりが生じてしまうため、スラスト力だけでなくロール摩耗やエネルギーロスが大きく、実用化の壁となっていた。

ワークロールとバックアップロールをクロスさせると悪影響が出るのであれば、平行にしたままペアでクロスさせればよい。非常に単純なアイデアからPCミルは生まれた。単純であるために、以前に誰かが思いついていたかもしれないが、誰もやろうとはしなかった。それは製鉄圧延の分野で上下ワークロールをクロスさせるということがよほど非常識だったということだ。非常識と思っていたのは三菱重工の技術者も同じだった。しかし、いくら検証をしてみてもロールをクロスさせてはならないという結果が出なかった。クロスの板断面制御効果は誰もが認めるものだ。だからやるしかない。実機化へ向けて更なる検証を続けたのであった。

3.4 PCミル実機化への道

(1) 開発体制

PCミルの開発が実機化に向けて本格的に動き出したのは、1979年暮に三菱重工と新日本製鐵（株）の共同研究が開始されてからである。三菱重工は1/3モデル実験機（図15）を製作し、この試験圧延機を用いて、主として冷間圧延（熱間圧延の模擬材としてアルミ板を圧延）でのクロス圧延特性を調べた。さらに新日本製鐵（株）では既存の大型試験機を1/2モデルのPCミルに改造して熱間でのクロス圧延実験が本格化していった。前述したとおり、1979年の時点で、新日本

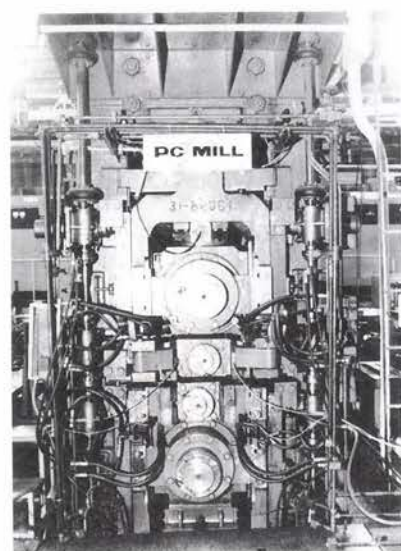


図15 1/3モデルPC実験機

製鐵(株)は日立との共同でHCミルを実用化していたため、無理をして新しい形状制御ミルを開発する必要はなかった。にもかかわらず、共同研究が実施されることとなったのは、PCがHCよりもクラウン制御能力が大きいことの他に、6段のHCミルよりも4段のPCの方が既設圧延機の改造がし易いという理由付けがなされたからである。しかし、開発を進める原動力となった実際の理由は、当時の製鉄技術者が新技術に対する貪欲な欲求を持っていたのが本音であったようにも想像される。

(2) 共同研究の成果

共同研究はクロス圧延原理の検証とハード設計のためのデータ収集が目的だった。圧延状態(荷重、トルクなど)、板の蛇行及び通板性、スラスト力、AGCヒステリシス、圧延材の性状、ワークロール摩耗などの検証を、実験機による圧延、要素試験、理論計算で行った。最終的には新日本製鐵(株)広畑製鐵所で稼動していた既設の実機圧延機をライナの厚みを調整してロールを無理やりクロス改造させて圧延することまで行った。結局、クロスによる圧延状態や成品に対する悪影響はなく、検証した項目は全て従来圧延機と同等であることが確認された^{10・15)}。

ハード設計の大きな難関となったのはスラスト力であった。ベアクロス化によってスラスト力は低減できたものの、板とワークロール間のスラスト力は原理上取り除くことが困難であった。理論解析と実験結果から、圧延荷重 P 、スラスト係数 μ 、スラスト力 F とすると $F=\mu P$ なる式で記述できることがわかった。図16¹⁰⁾にスラスト係数 μ を示す。これによるとスラスト力は圧延荷重の15%にもなり、従来のスラストベ어링では容量が足りなかった。このため、PCミルには高負荷のスラストベ어링を新たに開発することとなった。実験は非定常の温度変化を伴う焼きつき現象を追

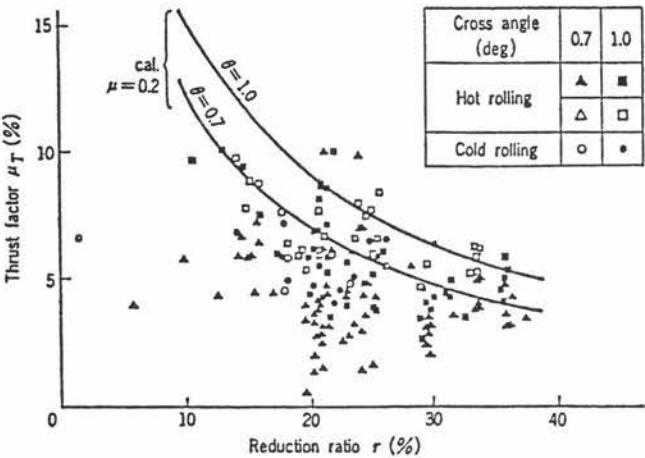


図16 スラスト係数¹⁰⁾

求するため連続運転が必須であったので、スラストベ어링に負荷を与えながら温度監視し、約1年半ほぼ毎日朝から晩まで連続で実施した。その結果、後にもっと厳しいと判明したロールキス時のスラスト力($\mu \approx 0.3$)にも耐えうるベ어링が開発された。

また、初号機に対してはワークロール駆動用にギアスピンドルを採用した。本来、振り角の大きいPCミルに対しては、クロスピンタイプが適当であったが、PCミルにクロスピンタイプを適用すると、モータ側を等速回転させてもロール側が不等速回転すること(カルダン誤差)を心配したため、ギアスピンドルの採用となったのである。しかし、ギアスピンドルもクロスによるロールの傾きに伴うギア歯面の焼きつきが問題となる。最終的には歯面の窒化処理と潤滑の確保により対応したが、実機サイズで実験するなどかなり苦労した項目であった(ここでも熱容量が影響する非定常温度変化を重視し実機サイズの連続運転試験を実施した)。しかし後になって、カルダン誤差は圧延に対してはほとんど影響しないことがわかった。当時の心配は全くの杞憂だったのだが、このような話は全く新しい物を生み出すときに特有な開発プロセスとして述懐させて頂きたい。もちろん、現在のPCミルではギアスピンドルではなく、クロスピンタイプのスピンドルを採用している。

(3) 初号機受注と設計展開

共同研究の結果をふまえて、1982年、三菱重工は新日本製鐵(株)広畑製鐵所の熱延設備更新を受注し、6スタンドの仕上ミル全てにPCミルを採用することとなった。

共同研究はこれと前後して終了したものの、三菱重工は信頼性向上のために継続的に検討、検証を行った。実際、スラストベ어링、ロールスラスト受機構(図17)、クロス機構(図19)など主要部の目途が立ったのもこの時期であった。

結局、圧延機全体で160件程度の不安要素を挙げ、その中から60件程を抽出して徹底検討を行った。机上計算で済まないものは試験を行い検証し、作成した検討書は700項目に

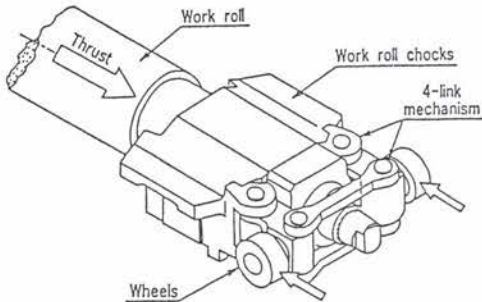


図17 スラスト受機構¹⁰⁾

もなった。また、出来た設計図を製造現場に持って行き、製作、組立の立場から意見をもらってさらに改善を行った。そのおかげで、設計担当者に「機械要素に不安なし」と言わしめるまでの圧延機が出来上がったのである。実際、初号機立ち上げでは、機械要素に関するトラブルは一切出さなかった。

当時を回想する三菱重工技術者の共通の認識として、「ロール軸をたかだか1.5°クロスしただけで圧延機の1から10を全て勉強させられた」という言葉が聞かれる。当時、三菱重工は米MESTA社の技術供与を受けていた。そのおかげでハード設計技術は鍛錬されていたものの、MESTA社実績への依存心があり、1から圧延機を設計することは少なかったのである。その後を支える三菱重工の製鉄機械設計技術の礎は、実はPCミルの開発によって培われたものだった。

3.5 PCミルの展開

形状制御ミルが開発された当時は、その名の示す通り如何にして形状を制御するかが最優先の課題と考えられていた。従って、熱延タンデムミルにおいては、形状に敏感なミルから、すなわち最終段から遡って形状制御ミルを配置することとなった。表1に示す様に、HCミルに対抗した形状制御ミルとして開発されたPCミルも、当初は仕上後段に採用された。ところが、仕上前段で板クラウンを制御した方が、結果

的に後段で形状を乱さないことがわかり始め、前段での板クラウン制御の重要性が認識されるようになった。その結果、1993年頃から稼動の新日本製鐵(株)名古屋製鐵所及び君津製鐵所向け前後から、PCミルは仕上前段に採用されるようになり、他の形状制御ミルよりもクラウン制御能力が大きいPCミルが主に熱間圧延に採用されることとなった。熱延用HCミル(ワークロールシフトミル)に対し、PCミルが1990年代に熱延用(タンデムミルに限る)として採用された歴史を図18に示す。先に述べたようにこの頃HCミルは冷延用ミルとして大いに採用されている。

また、クロス機構改善も進めた。図19に示すように、初号機PCミルと最新型は全く別の圧延機と言っても過言ではない。踏襲しているのはロールクロスという基本原理のみである。

現在までにPCミルは104スタンド建設され(建設中も含む)、世界中で稼動している。

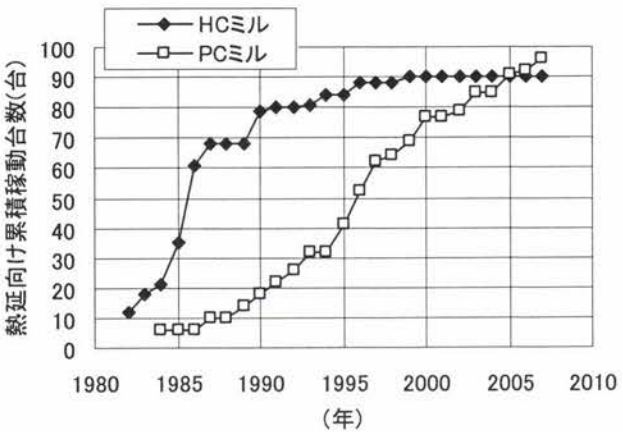


図18 熱延タンデムミルでの累積稼動台数

表1 ヘアクロスミルの建設実績

年	設置工場(*)	スタンド	新/改
1984	NSC 広畑	F1-F6	新
1987	POSCO 光陽 1(韓)	F3-F6	新
1989	NKK 京浜	F4-F7	改造
1990	POSCO 光陽 2(韓)	F3-F6	新
1991	ARMCO(米)	F4-F7	改造
	NSC 君津厚板	仕上げ	改造
1992	POSCO 光陽 3(韓)	F4-F7	新
1993	NKK 福山	F4-F7	改造
	NSC 名古屋	F1, F2	改造
	住金鹿島冷延	#1-#3	新
1995	NSC 君津	F2, F3	改造
	KSC 千葉	F1-F7	改造
1996	POSCO 浦項 2(韓)	F2, F3	改造
	POSCO 光陽ミニミル(韓)	F2-F4	新
	宝山鋼鉄 2(中)	F2-F7	新
	日金工衣浦	仕上げ	新
1997	TRICO(米)	F2-F5	新
	POSCO 浦項 1(韓)	F2, F3	改造
	韓宝(韓)	F2-F5	新
	POSCO 浦項厚板 3(韓)	仕上げ	新
1998	SSM(タイ)	F2, F3	新
1999	POSCO 光陽 1(韓)	F7	改造
	POSCO 光陽ミニミル 2(韓)	F1-F4	新
2000	鞍山鋼鉄(中)	F2-F4	新
	Hoogovens(蘭)	R2, F1-F5	新
2002	POSCO 光陽 2(韓)	F1, F2	改造
	唐山(中)	F1-F3	新
2003	上海一鋼(中)	F2-F4	新
2005	本溪鋼鉄(中)	F1-F3	新
	通化鋼鉄(中)	F1-F3	新
2006	POSCO 浦項 2(韓)	F4	改造
	POSCO 浦項 SC(韓)	仕上げ	新
2007	宝山鋼鉄 3(中)	F1-F4	新

* 社名は当時、特記以外は熱延

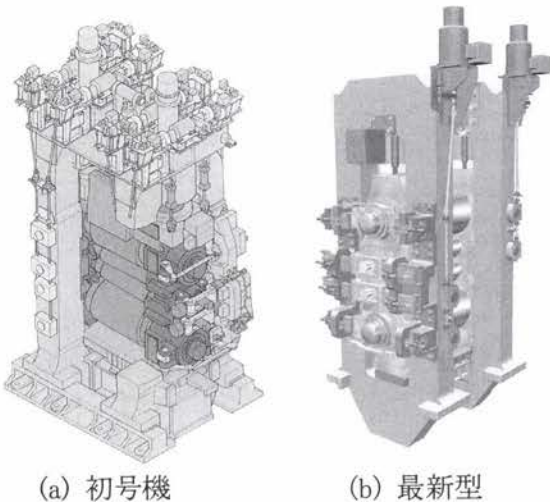


図19 PCミルの変遷

4 あとがき

1970年代から現在までに開発され、実用化した板クラウン・形状制御圧延機で代表的なHCミル、PCミルについて、原理と機能について概説し、その開発の動機、着目点、実機化までの課題、またその課題がどのようにして克服されたのかを解説した。熱延・冷延とも板クラウン・形状制御については一定の完成の域に到達した感がある。この10数年来、欧米及び中国を中心に採用されたミニミルがコスト低減という流れのひとつを形作り、その中で熱延・冷延用のミニミルコンセプトが形成されてきたが、そんな中でもPCミルやHC/UCミルのようなプロフィル/形状制御機能は最低限必要な機能として具備されるようになっている。粗鋼生産高10億トン/年を達成した現在、圧延機は量を追及したミニミルから再度高級鋼化への流れに回帰するように見受けられる。その流れの中で熱延においては、板端を含めた高次板厚プロフィルの改善や表面性状の向上が必要となっている。また高級鋼狙いのため今後とも指向される高圧下圧延の制約となっている、ロール肌荒れ、圧延機振動、通板性の改善が今後の課題と考えられる。冷延においても、更なる板端のプロフィル制御や高次の形状制御が必要となっている。また熱延と同様に高級鋼化のための高圧下圧延や極薄圧延を狙った小径ロール圧延機の高機能化が求められるようになると考えられる。

本稿で解説したHCミル、PCミル開発の歴史は、お互いライバル社として切磋琢磨した日立と三菱重工の圧延機の歴史でもあるが、同時にさらに重要であったのは、これら新型圧延機を開発・採用するにあたってのユーザである各製鉄メーカーからの厳しい叱咤激励と暖かいコメント・助言である。ハードメーカーではわからない圧延機を使用する上での様々な操業条件、鋼種の違いによる種々の仕様条件などを踏まえてユーザ・メーカー一体となって開発した結果がHCミル、PCミルの玉成につながったことは疑うべくもない歴史的事実であり、これこそが日本独自の圧延技術を開発させた原動力と考える。今後も新鋼種・新プロセス開発の中で圧延機メーカーとして新機種開発をユーザの製鉄メーカーと協力しながら推進していきたい。

参考文献

- 1) 中野恒夫：鉄と鋼，79 (1993) 3，312.
- 2) 梶原哲雄：塑性と加工，43 (2002) 493，101.
- 3) 鈴木弘：日本機械学会誌，82 (1979) 724，258.
- 4) 梶原利幸：日本機械学会誌，84 (1981) 750，58.
- 5) 梶原利幸：塑性と加工，32 (1991) 370，1370.
- 6) 特許公開公報，特開昭47-29260
- 7) 梶原利幸：博士論文 板材の形状改善に関する新型圧延機の研究，(1975)
- 8) 西英俊：博士論文 板材圧延における複合伸び形状の改善に関する研究，(1982)
- 9) 最新塑性加工要覧 第2版，日本塑性加工学会編，コロナ社，(1986)，25.
- 10) 中島浩衛，川本利治，波多江誠亮，大森舜二，塚本顕彦，日野裕之，荒谷博史：三菱重工技報，21 (1984) 6，809.
- 11) 大森舜二，塚本顕彦，日野裕之，中島浩衛，中沢吉：塑性と加工，28 (1987) 321，1067.
- 12) 大森舜二，梶原哲雄，田浦良治，貞広信二，松本絃美：塑性と加工，28 (1987) 323，1259.
- 13) 大森舜二，梶原哲雄，葉山安信，西崎純一，岩谷浄：塑性と加工，29 (1988) 325，123.
- 14) 大森舜二，林寛治，荒谷博史，川並高雄，小川茂，上堀雄司：塑性と加工，29 (1988) 327，349.
- 15) 大森舜二，梶原哲雄，飯伏順一，林寛治，大園隆一：塑性と加工，29 (1988) 327，701.

(2005年5月9日受付)