

特別講演

□西山賞受賞記念

塑性加工と鉄鋼生産技術

Technology of Plasticity for Production Engineering of Steel

木原 諄二
Junji Kihara

日本大学 総合科学研究所
生産工学部管理工学科 教授

1 塑性加工と圧延との出会い

1959年に東京大学工学部冶金学科に進学し、1960年卒業論文を五弓研究室すなわち物理冶金学研究室で仕上げるようになった。当時、学科にはほかに、非鉄冶金学、鉄冶金学、電気冶金学、製造冶金学、加工冶金学の5研究室があった。物理冶金学研究室はもともと工学部共通の放射線工学の研究室であった。物理という名前はX線による物質の同定や結晶構造解析さらに集合組織の構造解析などを主な仕事とする故であった。しかし、金属物理/物性を仕事としている研究室は加工冶金学研究室であった。そして、この物理冶金学研究室では塑性加工の仕事が行われていた。

X線回折による構造解析を応用すると結晶のあるいは集合組織の構造の解明ができるが、塑性加工と熱処理によってどのような集合組織ができるのか、に興味を持ったのが五弓勇雄教授であった。自然に塑性加工そのものの研究も大きな研究室の仕事となっていた。

筆者が物理冶金研究室で携わった卒業論文の研究は金属材料の熱間変形抵抗の測定をすることであった。ハンマーを一对両側から相打ちさせて試験片を圧縮する計装相打鍛造試験機を用いて行う金属の鍛造性の研究である。このテーマが与えられたことがその後の筆者の大学における研究全体を決定づけるものとなった¹⁾。

当時、日本鉄鋼協会の共同研究会の単立分科会であった圧延理論分科会(現 圧延理論部会)に卒論生として参加することになった。当時、分科会では鋼の熱間変形抵抗の共同研究をしておりその数年前に「圧延理論と変形抵抗」を出版していた。筆者らの実験で得られたデータに不審な点が多くあったので、各社各大学の実験担当者の直接の意見を知りたくて西千葉の鈴木弘教授の研究室を会場にしての研究会に出席したのは1965年11月であった。

2 大学院時代の研究

鋼を始めとする多くの金属材料の変形強度をとくに高ひずみ速度領域で測定して、変形の仕組みとの関連を中心に研究したのが大学院の5年間であった。その中で塑性加工技術の進展に必要であるならば何でも研究するという態度が身に付いた。

大学院時代、すなわち1960年代前半、鉄鋼の圧延・材料技術において注目すべき展開があった。それは「鉄鋼の6番目の添加元素?は水である。」という当時のベスレヘムステイルの副社長の言葉に代表される、熱間圧延と冷却とを総合的に連関させた厚板製造技術である。国内のある製鉄会社でもリムド鋼の熱間圧延仕上げ温度と冷却を制御して、高r値の冷間圧延焼鈍板を製造する技術も開発された。30代前の研究所のメンバーが現場の協力によって熱間圧延条件と冷延焼鈍板の集合組織の制御に成功したということであった。早速変形抵抗測定装置を熱間加工機にし加工直後急冷できるアタッチメントをつけて現場で展開しているであろうからくりのモデルを考えて追試した。大凡のところはシミュレートできたが、冷間圧延状態からの再結晶における優先方位形成のモデルとの連関のところはアカデミズムの森の迷路から出て解明するに至らなかった。このとき一回で60%に及ぶ圧縮率を与えることが出来たことが実験の成功のもとであった²⁾。

変形抵抗の研究で最も重要だったのは、鋼の冷間変形抵抗についての研究である。冷間タンデム圧延におけるひずみ速度は100~1000/sの範囲にあって、この領域での変形抵抗の測定はかなり難しい。自分自身の実験におけるデータの扱いでも、理論的背景が十分でないまま仕事を進めることが優先された面もある。そこで、鋼の冷間変形抵抗をより定量的に把握する工夫を巡らして、冷間圧延における荷重とトルクの計算値を用いてロールと圧延材との間の摩擦係数の評価な

どを行った。ここでは加工冶金研究室の大学院の仲間とのつきあいが大きな力となった^{3,4)}。

3 熱間圧延における組織制御の研究から圧延現象の解明の研究への転進

熱間圧延現場のモデルを作り、そして熱間圧延における冶金的现象を解明する目的で実験装置を開発した。すなわち、15 m/s程度で圧延できる圧延機を開発して圧延研究を現場と同等の圧延速度条件のもとでの実験をベースに実施できるようにした。1960年代後半であった。しかし、1パスの圧下率が30%台では十分な熱間圧延材が得られなかった。やはり、1パス60%程度の圧下が必要であった。そこで、この実験圧延機を用いて現場のタンデム圧延機の圧延現象のモデリングをすることにした。

4 板圧延における変形抵抗と摩擦係数

1970年代に入り、次第に板圧延の研究が本業になった。1940年のE.Orowanが圧延の圧下力などの計算理論を発表する際、緒言で「熱間圧延では摩擦力は板の剪断降伏応力達しており、従って圧延理論と圧延荷重から変形抵抗を求めることが出来る。一方冷間圧延では変形抵抗が変形速度に殆ど依存しないので変形抵抗を材料試験機で求めておけば圧延荷重から摩擦力を知ることが出来る。」と述べた。しかし、冷間圧延での変形速度では変形抵抗は材料試験での値から乖離し、また、熱間圧延では潤滑の採用が考えられるようになって、Orowanの前提は成り立たなくなっていた。これに対し、冷間圧延での変形抵抗の評価には大学院時代の研究が有効で対応することができた。一方、熱間圧延での潤滑の効果が残された課題であった。

そこで、この研究ではとくに圧延における潤滑と摩擦係数の評価の研究にもかなりの力を入れた。鋼の冷間圧延における摩擦係数は冷間変形抵抗の正当と思われる評価をベースにすれば大凡妥当な値に収まることも、圧延理論部会との共同研究の結果確かめられた。そのとき大学院時代の研究から導き出した平均変形抵抗の計算法が役に立った。とくに、計算の基礎になった数式は五弓一木原の式とよばれ以後20年くらいは知られることになった。この式の紹介が五弓勇雄教授の西山賞受賞記念講演の掉尾を飾った^{3,4)}。

鋼板の熱間圧延における潤滑もついでに研究した。潤滑油の粘度、油性が潤滑特性とどのような関係があるかについては、定説とも言えると思われる認識にたどりついたと考えている。潤滑油の粘度が摩擦低減に寄与することと、摩擦低減に

効果のない鉱油に大きさと構造の違う脂肪酸やリン酸エステルを添加した場合の各添加剤の効果を系統的に明らかにした⁵⁾。

今後につながるエピソードがあった。それは、鉱油の粘度を系統的に変えて効果を調べていたところ、ある粘度の鉱油の効果が飛び抜けていることがわかった。調べてみると他の粘度の油は缶を開けたてであったが、その油は一年前に開缶したものであった。そこで、新しく開缶したものを用いると当たり前の効果に収まった。次にこの鉱油に水を飽和させてみると古い油と同様の効果を示した。圧延潤滑における水の役割は何か、ドグマとして語れることはないが、少量の水の添加が大きな効果を示すことは今後楽しみなことであろうと思っている。この話は講演発表はしたが論文にしていない。

鋼の熱間圧延のロール摩耗も重要な問題である。実験用圧延機で潤滑による摩擦低減の仕事をしていたとき、摩耗の仕事もしようということになった。そのための実験装置を考案した。素朴な構想で、100 mm径のワークロールの二段圧延機で100 m/min程度の圧延速度で1 mm厚さ・10 mm幅のフープを500 m連続圧延ができる装置であった。板端の摩耗やロール材の表面損傷などは実機の状態を再現した。1980年代に入った頃であった。

実機でも、板端近傍に当たる位置でのロールの摩耗が進行することがよく知られており、従来は板端の温度が低くなるが板端は平面応力状態なので圧力が少々低くなるので圧延圧力のピークが少し内側になり、そこに当たるロールの摩耗が進行するなどという説明をしていた。実は後年、相澤龍彦現教授などの協力の下でロール変形と板の変形を連成した弾塑性境界要素法圧延モデルで計算シミュレーションをしてみると、温度勾配による変形抵抗勾配を考えなくても圧延圧力のピークが出現していることがわかった。この研究成果も圧延理論部会や境界要素法研究会では発表したが、論文にはしていない。

二段圧延機のシミュレーターで再現できなかったのはマグネタイトの黒皮の被覆である。いくつかの黒皮被覆の説を批判的に検証しつつ現場におけるマグネタイト被覆は四段圧延機特有の現象で高温で被覆したフェライトのマグネタイトへの圧力下での変態であろうと考え、新加熱方式を取り入れた新しい四段の熱間圧延摩耗試験機を考案した。前のタイプをコピーした試験機は二、三カ所で建造され、その中の一つは二スタンド備えて、四段圧延機にしているものもあった。最初の装置は当初製油会社に設置したが現在はある製鉄会社で利用されている。これらはガス燃焼加熱炉によるフープの加熱を行っていたが、サイクルタイムが一日に及ぶので実験の回数を上げるのが難しかった。そこで電気加熱によるカセット的なコンパクトな加熱方式にし、圧延機も四段にした。こ

れによってほぼシナリオ通りの黒皮の付着現象を観測することができるようになった。これは考案や実験結果の相談には関与したが、連名の論文などによって公表していない。この実験機はそれまでのタイプの装置とともにロール材質の開発や潤滑油の開発に寄与した。

5 圧延ロール研究部会の活動

1990年頃、鉄鋼協会に圧延ロール研究部会を組織してもらって、ステンレスの冷間圧延の表面品質と連関する潤滑技術と圧延スケジュールの共同研究と併せて熱間圧延における高クロム材質とハイス的材質のロールの摩耗特性の調査研究を行った。とくに後半は超ハイスといえるような炭化物の量を増し組織の微細化を図った材質の特性を調べた。この部会を発足させたそもそもの狙いは、ステンレスのストリップを熱間圧延するときロール材質が高クロムであると焼き付きなどに問題はないか、ステンレスの冷間圧延のロールが高クロム合金鋼のSKD11相当の材質であるとき潤滑に問題が生じないのかということ掘り下げて考えてみようということであった。しかし、熱間圧延に関してはハイス的材質が脚光浴びるという事態で、実際の活動は上述のようなことになった⁶⁾。

6 圧延理論部会の意義

圧延理論部会は卒論生のとき参加した5年後、物理冶金研究室から金属塑性加工研究室に改組改称した研究室に所属して以来、代理と正式メンバーとして連なっている。この部会は、圧延を専門と心得る冶金・機械・電気・制御の専門家と鉄鋼会社と電機会社それから重機会社の技術研究者によって構成されている。この会の活動を通じて自分の研究分野ばかりではない工学全体に広がる知見に触れることができた。この部会によって育てられた圧延の専門家と心得ていると挨拶

で述べることにしている。

大学の研究者にとって自分の研究を真の意味に於いて現場の技術の進歩に結びつける機会を与えられる部会であると思っている。工学研究者にとっての好ましい産学共同の場である。

7 鉄鋼生産技術にとっての塑性加工技術

塑性加工は機械工学から見ればものに形を与える鋳造や切削などの除去加工さらに接合溶接、組み立て工作とならぶ機械工作の一分野である。冶金から見れば、鍛造さらに鍛錬とも言える技術であって、性質作り込みを旨とする技術である。塑性加工は材質の宝を未知の鉱脈から発掘する技術であるということにおいて、鋳造と並んで材質作り込みが重要である鉄鋼生産技術の大きな柱であるといえる。

参考文献

- 1) 五弓勇雄，木原諄二：塑性と加工，3（1962），825.
- 2) 五弓勇雄，木原諄二，落合征雄：日本金属学会誌，31（1967），63.
- 3) 中島浩衛：圧延研究の進歩と最新の圧延技術，圧延理論部会20周年記念シンポジウム，日本鉄鋼協会，（1974），1.
- 4) 木原諄二：上掲書31
- 5) 木原諄二：摩擦・摩耗及び潤滑の理論と応用，第67・68回西山記念講座，日本鉄鋼協会，（1980），115.
- 6) 木原諄二：圧延におけるトライボロジー潤滑と摩耗に関する研究の最近の動向一，第148・149回西山記念講座日本鉄鋼協会，（1993），97.

（2003年4月8日受付）