

ものづくり基礎講座 金属の魅力をみなおそう プロセス技術編 第1回 圧延（第37回技術セミナー）

東北大学金属材料研究所 正橋直哉

1. はじめに

金属は天然の鉱石中に酸化物や窒化物などの化合物として存在しています。これらの化合物から酸素や窒素を取り除く製錬を経て精製された金属は、所望の合金元素を添加して溶解・鋳造し、合金インゴット（鋳塊）として形作られます。インゴットに様々な加工を施すことで、最終の製品形状、あるいはそれに近い形にまで成型加工を施します。そのような成型加工の中で最も汎用的に用いられるのが圧延加工です。

圧延とはその名の通り、素材に「圧」すなわち「圧力」をかけて、「延ばす」、すなわち「薄くする」加工を称し、通常は板に仕上げます。圧延の定義は、「回転する複数のロールの間に板状または棒状の素材を通して、素材の厚さまたは断面積を減じ、同時に断面を目的形状に成形する加工法」で、圧延ロール（図 1(c)）を備えた圧延機を使用します。加工される素材はロールから受ける摩擦力によってロール間隙に引き込まれ、そこでロールからの圧縮力を受けて変形しますから、素材にかかる力の大きさや分布によって、加工される素材形状や表面形状が変わり、内部状態（組織）は変化します。また、金属は温度を上げるほど軟化して成型加工が容易となりますから、高温で圧延するほうが簡単に「延ばす」（薄くする）ことができます。そのため、溶解鋳造後すぐに素材の温度が高いうちにスラブと称する幅 300 mm 以上の板状の塊に成型するプロセス（連続鋳造）が確立しています。スラブの素材温度がなるべく高いうちに、次の熱間圧延（図 1(a)）を施しますが、最終工程に近いほど冷間圧延で成型を施します（図 1(b)）。



図1 熱間圧延(a)、冷間圧延(b)、圧延ロール(c)

圧延は、ヨーロッパにおいて行われたコインや装飾品製造に用いた手動式圧延機による加工が発端と考えられています。手動のため硬い金属の成型は難しく、鉛、スズ、銀、銅等の軟らかい金属の加工に利用されました。蒸気機関が発明されるまで、金属の製錬や加工は水車を動力に使用しましたが、ロールを備えた圧延機をミル (mill) と称するのは、その語源が「製粉所、水車小屋」であることに由来します。そのため金属加工工場は急峻な山の近くやその下流に立地せざるをえず、大型素材を大量に加工することが困難でした。18 世紀に英国でジェームズ・ワット (James Watt) により蒸気機関が発明されるに至り、水力に頼らない工場立地が可能となり、大量に大型の素材の圧延が可能となりました。ヘンリー・コート (Henry Cort、図 2(a)) は英国ポーツマス海軍造船所 (Portsmouth Dockyard) への鋼材加工品を提供するため近郊のファントリー (Funtley) に Fontley Iron Mills を設立しました。1783 年に溝付ローラー特許を、1784 年のパドル炉 (溶融銑鉄を攪拌して半溶融状可鍛鉄を製造する炉) 特許を取得し、レールや鉄板の安定加工を可能とし、工業材料として産業革命を支えました。一方、アメリカでは、自動車や電力輸送 (ケイ素鋼板) 等の新工業の確立に伴い、長尺の圧延材を効率よく製造する技術の必要性が生じました。これまでの圧延は、圧延機の入口側と出口側で工員が加工材を交互に手渡しして成型する方法 (プル・オーバー方式と称します) でしたが、この方法では生産性が低く社会ニーズに対応できなかったためです。ジョン・ティラス (John Butler Tytus、図 2(b)) は圧延材の機械的性質や組織に及ぼす、圧延ロールの形状や材質、圧下率や圧延パス数、鋼材の板厚・板幅の影響を、膨大な実験から明らかにしました。そして 1924 年に連続制御圧延技術を発明し、American Rolling Mill Company にて広幅の圧延板を短時間に製造することに成功しました (図 2(c))。このように厚板から帯状の薄板を連続的に製造する圧延機を、「細長い一片」の意味のストリップ (strip) と、上述のミルを併せてストリップミルと称します。1920 年初頭には旧式の圧延機で月に 500~600 トンしか製造できなかった鋼板が、連続圧延技術の導入された 1924 年 1 月には 9,000 トン、そして 3 年後の 1927 年には 40,000 トンの鋼板製造が可能となりました。

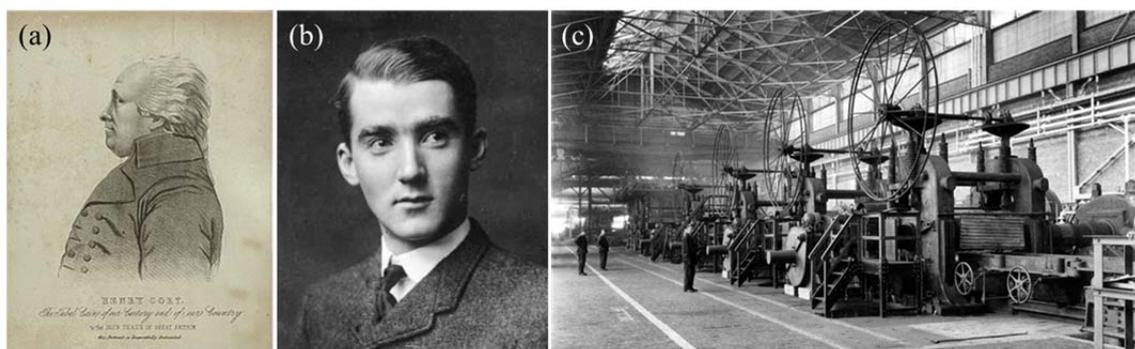


図2 ヘンリー・コート(a)、ジョン・ティラス(b)、連続圧延機(c)

2. 圧延の種類

圧延加工は大別して、厚板やコイルを製造する「ロール圧延」、H型鋼等を製造する「ユニバーサル圧延」、素材・異形棒を製造する「孔型圧延」、シームレスパイプを製造する「マンネスマン穿孔圧延」の四種類に分類できます。最も一般的に用いられるロール圧延は、図3(a)のように、一対の円柱状のロールを回転しながら、その間に素材を巻き込んで成型する加工で、通常は、ほぼ平行に配置した回転方向が逆の2本のロールの軸に垂直に素材を装入します。

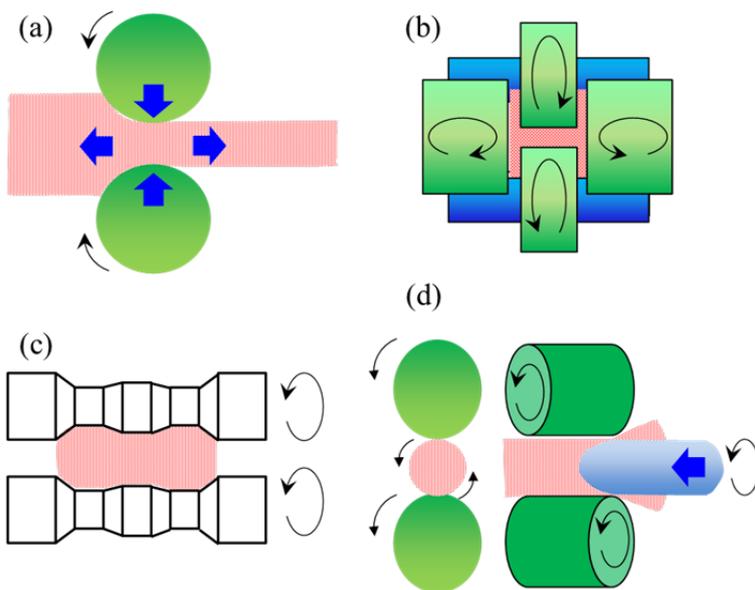


図3 各種圧延:ロール圧延(a)、ユニバーサル圧延(b)、孔型圧延(c)、マンネスマン穿孔圧延(d)

図3(b)のユニバーサル圧延では、上下一対の水平ロールと左右一対の垂直ロールを組み合わせて素材を成型加工します。図3(c)の孔型圧延では、上下のロールに幾つもの孔型を作り、圧延時に通る経路を変えて目的の素材に加工します。そしてマンネスマン穿孔圧延は、斜めに配置した一対のロールで断面が丸い素材を回転しながら圧延することで中央に孔をあけ、そこにマンドレルを挿入する加工で、シームレスパイプの製造に用いられます(図3(d))。

ロール圧延にはロールの配置と数により様々な種類があります。図4はロールの配置を変えた時の主な圧延ロールの模式図です。最も一般的な2ロール縦圧延では逆方向に回転するロール間で素材が圧延されます(図4(a))。3ロール縦圧延では、図4(b)のように素材を中心に対象配置したロールが三方向から荷重を印加し成型加

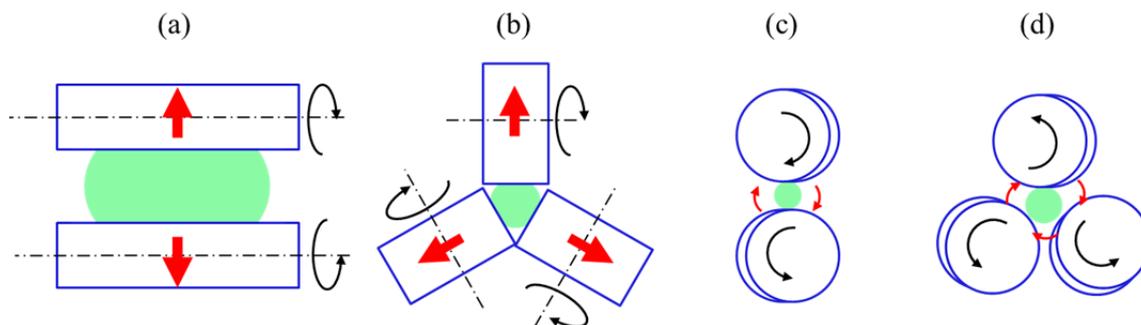


図4 各種圧延機のロール配置:2ロール縦圧延(a)、2ロール縦圧延(b)、2ロール傾斜圧延(c)、3ロール傾斜圧延(d)

工を施します。2ロール傾斜圧延(c)、3ロール傾斜圧延(d)はそれぞれ、2本或いは3本の圧延ロールを互いに傾斜させ、後述するクラウンなどの不均一変形を抑制する加工です。(a)と(b)の配置では、素材は長さ方向に並進しますが、(c)と(d)の配置では素材は軸の周りを回転しつつ前進します。圧延加工は寸法精度が良く、大量に製造することが可能ですが、ロール扁平による不良が起こりやすいという欠点があります。そこでロール扁平を抑制するために、ロール管理やバックアップロールが必要となります。図5はバックアップロールなどのロールを素材が直接接するワークロールの周りに配置した圧延機の模式図です。基本の2重圧延機(a)の片方のロールの後方にロールを配置した3重圧延機(b)、両方のロールの後ろにそれぞれロールを配置した4重圧延機(c)、そしてワークロールよりも大径のロールを複数本後方に4本(d)、あるいは18本(e)、それぞれ配置したクラスターミルの模式図です。素材の板厚は、スラブのような数百mmから箔のような数十 μm まで広範囲にわたりますが、一般に板厚が薄くなるにつれてロール直径も小さくしなければなりません。しかしロールの胴長はあまり変えることはできませんから、必然的にロールは細長くなり、弾性変形で曲り易くなります。その結果、小径のワークロールではそれを支持するバックアップロールが必要となります。

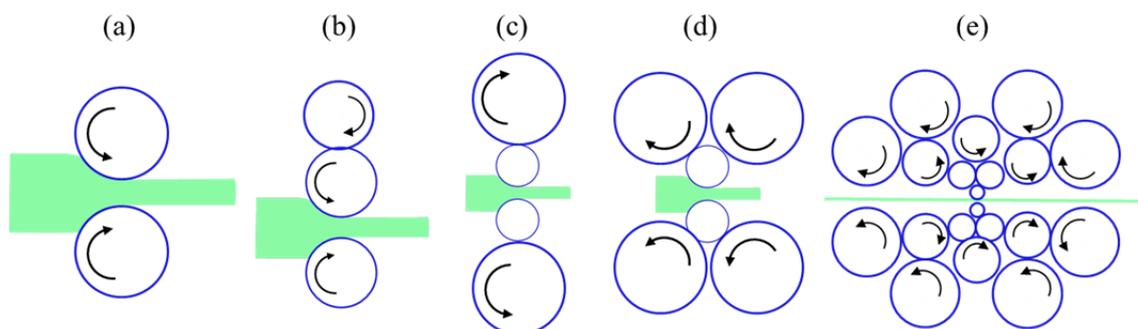


図5 各種圧延機のロール配置:2重圧延機(a)、3重圧延機(b)、4重圧延機(c)
6本ロールクラスターミル(d)、20本ロールクラスターミル(e)

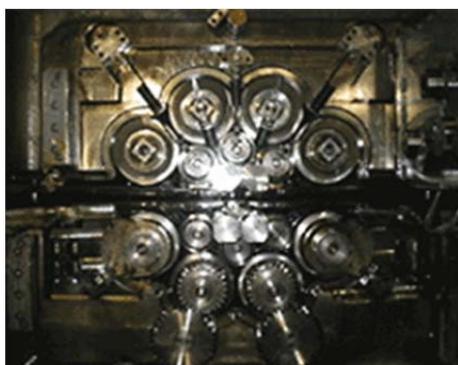


図6 センジミア圧延機

図6は20本ロールクラスターミル中心部の実物写真です。ワークロールに最初に接する後方の2本のロールを第一中間ロール、その2本のロールに接して後方中間に配置するロールを第二中間ロールと称します。このような圧延機を開発者のタデウス・センジミア (Tadeusz Sendzimir) に因み、センジミア圧延機と称し、高強度材料の強圧下圧延や極薄圧延に使用されています。

3. 圧延加工による材料の変形

圧延加工を施すと、素材の板厚は減少し板幅は広がります。素材が圧延ロールに入る前（変形前）とロールから出た変形後の板厚を h_1 と h_2 、変形前と変形後の板幅を b_1 と b_2 、変形前と変形後の素材の速度を V_1 と V_2 とします。また、ロール半径を R 、素材がロールと接触する圧延方向の長さを L 、 L に対応するロール中心角を α 、ロール周速を V_R とします。図7はそれらを記した平面図(a)と側面図(b)です。

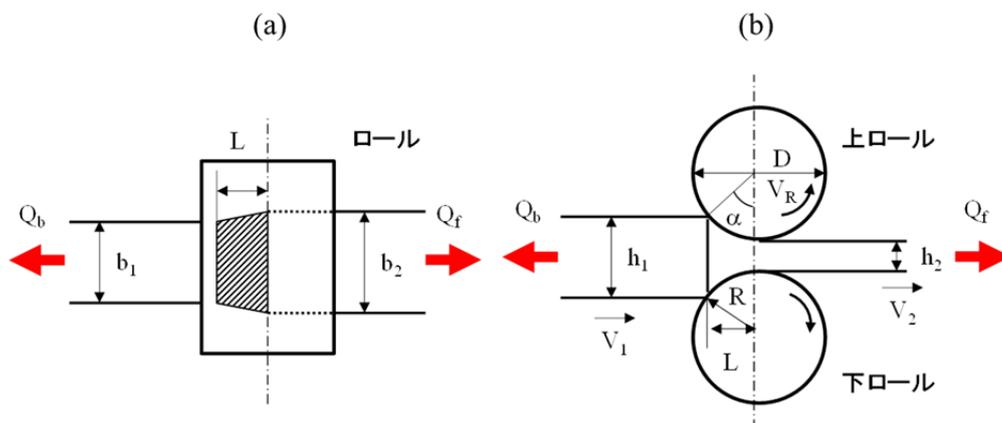


図7 圧延プロセスを特徴づけるパラメータ:(a)平面図と(b)側面図

圧延では、压下量 Δh 、压下率 r 、幅広がり量 Δb が(1)式のように定義されます。

$$\text{压下量 } \Delta h = h_1 - h_2 \quad \text{压下率 } r = \Delta h / h_1 \quad \text{幅広がり量 } \Delta b = b_2 - b_1 \dots\dots\dots (1)$$

また α と L （投影接触長と称します）は、(2)(3)式のように表記できます。

$$\text{ロール中心角 } \alpha = 2 \sin^{-1} \sqrt{\Delta h / (4R)} \approx \sqrt{\Delta h / R} \dots\dots\dots (2)$$

$$\text{投影接触長 } L = \sqrt{R\Delta h - \Delta h^2 / 4} \approx \sqrt{R \cdot \Delta h} \dots\dots\dots (3)$$

Δh や r は圧延前後の板厚変化（公称歪みに相当）による加工率に多用されます。 r を大きくする（ Δh を大きくする）と圧延荷重が増加しますが、特に板幅が広い場合には、圧延荷重は板幅に比例するため、さらに高い荷重を印加することになり、压下歪みが増加します。なお压下歪みは(4)式のように表します。

$$\text{压下歪み } \varepsilon = \ln \frac{h_1}{h_2} = \ln(1 - r) \dots\dots\dots (4)$$

圧延ロールの間で変形を受ける素材がロールと接する入口から離れる出口に近づくにつれて、素材の断面積は減少し、素材速度は速くなります。ロール周速 V_R と材料速度が一致する点を中立点と称し、接触弧内に存在します。ロールから材料に

働く面圧が接触弧に沿って一定とすると、中立点の位置(ϕ)は(5)式のようにになります。

$$\sin \phi = \{(\cos(\rho - \alpha) - \cos \rho)\} / (2 \sin \rho) \dots \dots \dots (5)$$

$\rho = \tan^{-1} \mu$: 摩擦角、 μ : 摩擦係数

式中 ρ を摩擦角と称し、摩擦係数 μ のアークタンジェントで表されます。材料がスリップしないで圧延されるためには、 $\phi \geq 0$ ですから、 $V_2 \geq V_R$ が成立します。また中立点に向かってロールから素材に摩擦力 τ が作用し、入口側では出口方向に、出口側では逆方向の入口側に向きます(図8赤矢印)。さらに、(6)式で定義される Ψ を材料の先進の大小を示した先進率と称し、摩擦係数 μ が高いほど増加します(概ね数%以下の値)。

$$\Psi = \frac{V_2 - V_R}{V_R} \dots \dots \dots (6)$$

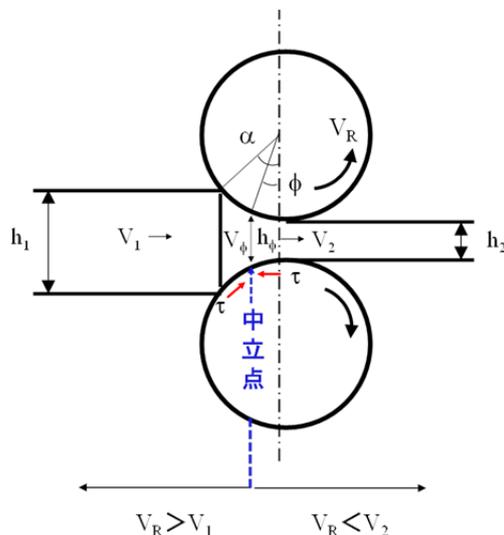


図8 中立点の位置を示す圧延側面図

圧下力は、材料から圧延ロールに作用する力の合力で近似式(7)のように表すことができます。式中の Y_m は平均変形抵抗、 Q は圧下力関数、 λ はトルクアーム係数(約0.5)、 L' はロールの扁平変形により接触弧の曲率半径が R から R' に増加した時の投影接触長を示します。

$$P = 1.15 Y_m b_1 L' Q_p = 1.15 Y_m b_1 \sqrt{R' \Delta h} \cdot Q_p \dots \dots \dots (7)$$

$$R' = R \{1 + C_0 P / (b_1 \Delta h)\} \quad L' = \sqrt{R' \Delta h}$$

$$Q_p = 1.08 + 1.79 r \mu \sqrt{R' / h_1} - 1.02 r \dots \dots \dots (8)$$

圧下力を大きくするには、(8)式で表される Q_p を大きくすればよいので、 $R/h_1, r, \mu$ が大きくすればよいことが判ります。すなわち、圧延で素材に強加工を施す、あるいは板厚の薄い成形品を製造したいときは、①ロールの曲率半径 R を大きくする、②加工前の素材の板厚 h_1 を小さくする、③圧下率 r を大きくする、④摩擦係数 μ を大きくすることになります。

4. 圧延材の変形の均一性

圧延加工では素材はロールから受ける板厚方向への圧縮力で塑性変形をおこしますが、塑性加工を施した素材内部の変形量は一様ではありません。図9(a)は圧延

におけるメタルフローを実験的に求めた結果ですが、前節で紹介した中立点を境にしてメタルフローが変化することが判ります。すなわち中立点より入口側では、ロールからの摩擦力 τ により、表面に垂直な格子線は表面が中心部より先進して湾曲し、表面程せん断変形が大きくなっています。一方、中立点より出口側では、摩擦力の反転により、入口側と逆向きのせん断変形が生じ、格子線は入口側で生じた湾曲を少し戻すように変形していることが判ります。また図 9(b)の圧延材の変形量の分布図から、素材が変形しない領域 I、大きな変形を生ずる領域 II、小さな変形を生じる領域 III に分けられ、中立点近傍が領域 I、入口側および出口側の中心部が領域 III、そして中立点の板厚中心部からワークロールに向かって領域 I と III を避けた部分が大きな変形をおこす領域 II となります。

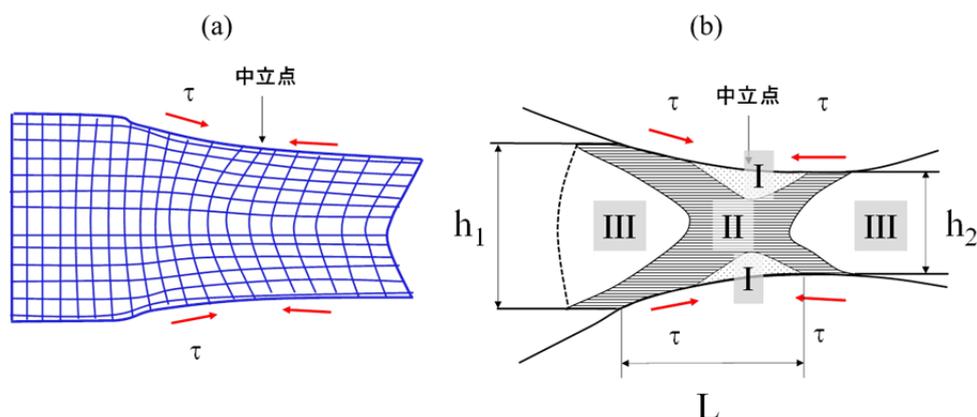


図9 圧延におけるメタルフロー(a)と変形量分布の模式図(b)

圧延加工による素材への歪みが限界量を越えると、成型体そのものが不均一変形をおこします。(9)式で表すロール間隙の平均板厚 $h_m (= (h_1 + 2h_2) / 3)$ とロール接触長 L の比によって、図 10 のような不良箇所が発生します。すなわち、 h_m/L が 2 より小さい場合(a)、圧延材横断面と先後端形状はバレルリングを形成し、2 より大きい時には、板厚中央が先進するような変形をして、横断面と先後端形状はダブルバレルリング形成します(b)。そしてダブルバレルリング材を繰り返して圧延すると、板の先後端と側端に素材のオーバーラップが発生し、板厚中心部で破断が起こります(c)。

また、長方形断面形状のスラブから板に圧延する際には、板厚圧下（水平圧延）と板幅圧下（幅圧延）が起こりますが、長方形板の平面形状は、先後端で非定常変形が起こるために健全な長方形断面に成り難くなります。水平圧延の場合（図 11(a)）、圧延板の先端と後端でフレアと称するイチョウ型の幅拡がりが起こります。また板幅圧延の場合（図 11(b)）は、圧延板の先端と後端でフィッシュテールと称する幅方向の中心部が素材中心部に向かって縮む形状となります。この場合は b_1/h_1 が小さいために、縦断面はドッグボーン上の不均一形状となります。その他にも、ワニ口割れと称する不均一変形（図 11(c)）は、先端の板厚中心部に板厚方向の引張応力が生

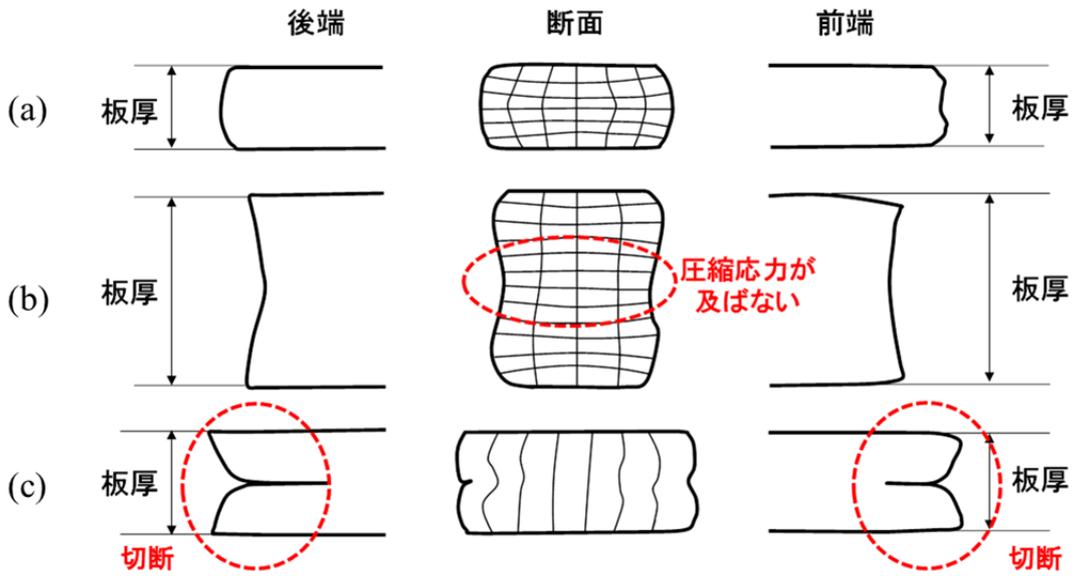


図 10 様々な不均一変形: バレリング(a)、ダブルバレリング(b)、ダブルバレリングの進展(c)

じるために起こる現象で、表面より板厚中心が伸び易いことに起因します。そして、圧延板の縁では材料が幅方向に流れるために延伸が不足し、圧延方向の張力が生じて、縁が割れる耳割れという現象がおこります (図 10(d))。

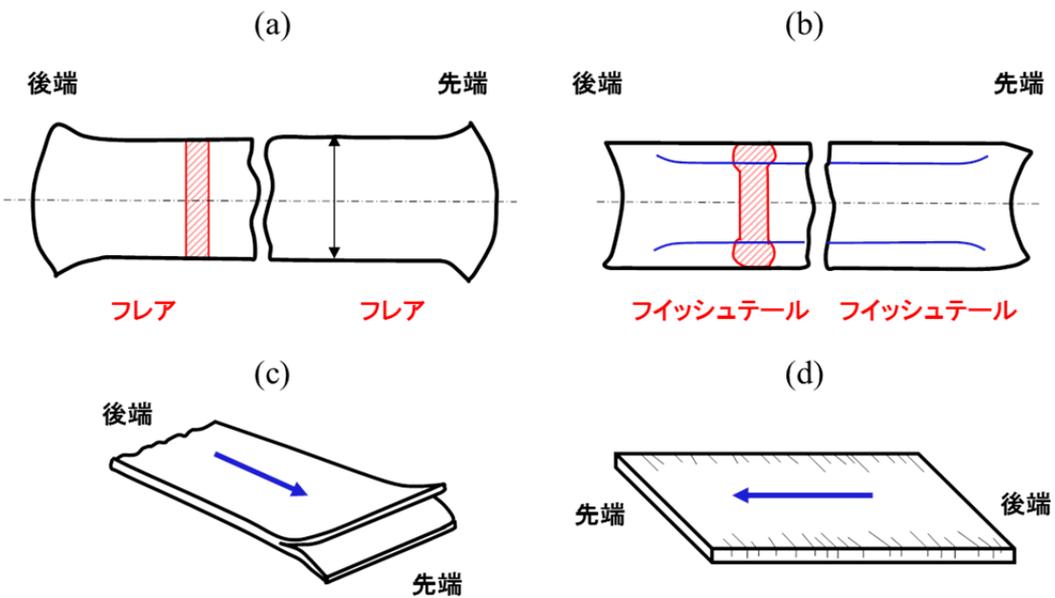


図 11 様々な不均一変形: 水平圧延(a)、板幅圧延(b)、ワニ口割れ(c)、耳割れ(d)

5. クラウン

弾性体の圧延ロールは圧下力がかかると弾性変形し（図 12）、軸方向に不均等な熱膨張による変形（サーマルクラウン）がおこり、ロールギャップが変化して板厚精度や平坦度が悪くなります。このようなロールの弾性変形により、軸心がたわんで板の中央が厚くなる板クラウンが生じ、板の両端部では板厚が急激に減少するエッジドロップが発生します。これは、金属を押さえる力を大きくすることで大きな荷重が発生する一方で、ワークロールが変形することが原因です。変形したワークロールで圧延した板は、中央部が厚く端部が薄くなりますが、クラウンが大きくなると歩留りの低下をもたらすだけでなく、耳伸び（edgewave）を生じるために平坦度を悪くし、クラウンを少なくするための様々な技術が開発されています。

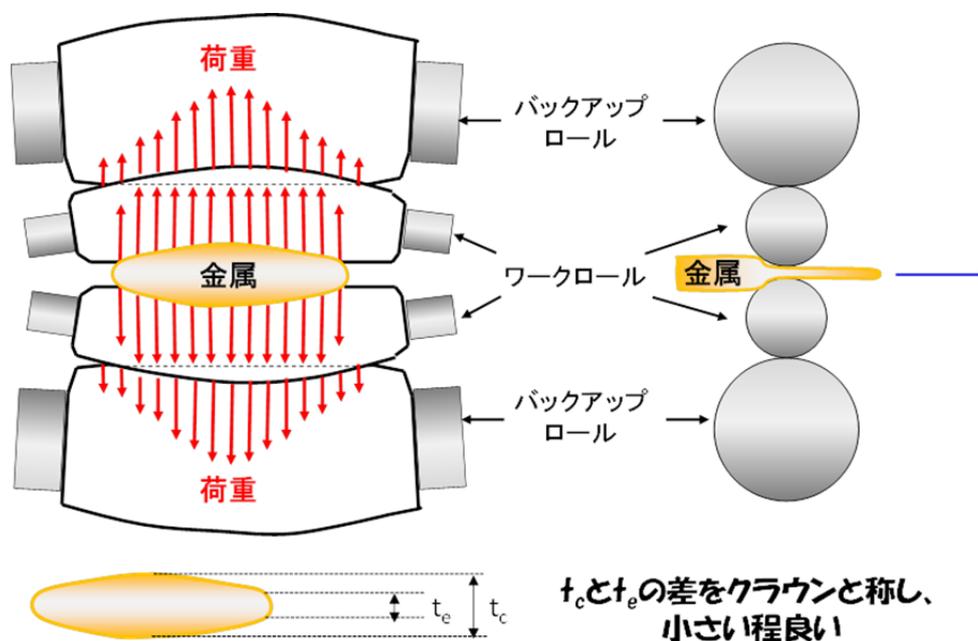


図 12 ロールの変形と板の形状

クラウンを解消する方法として素材にかかる圧縮力を板幅方向で制御する 6 重圧延機が開発されました（図 13）。この方法では素材に接するワークロールとバックアップロールの間に中間ロールを配置し、上下の中間ロールの位置を板幅方向の逆方向に配置することで、素材上下からの圧縮力の分布を上下で逆方向に不均一に制御します。この際、端部におけるバックアップロールとワークロールの直接的な接触を防ぎ、ワークロールの変形をコントロールすることに注意を払うことで、ワークロールはたわむことなく、強压下でもクラウン値の小さい圧延が可能となります。また上下それぞれのバックアップロールとワークロールをペアーで前後クロスさせることで、板幅方向の上下ロール間隙を変え幅中央部の圧下力を強くする、ペアクロス圧延もクラウン値の小さい板成形に効果があります。

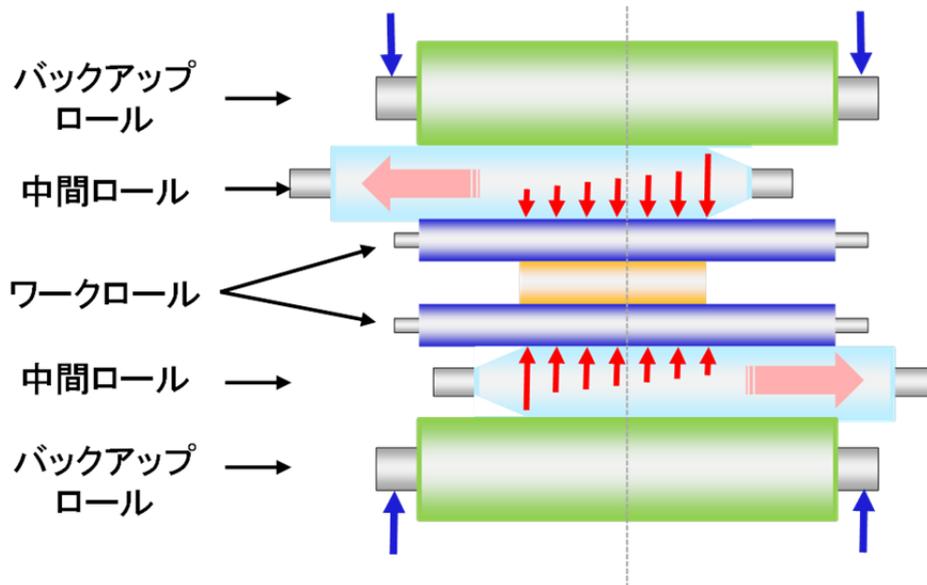


図 13 6 重圧延機

6. 圧延による結晶方位制御

金属原子は規則的に配列しますが、これを結晶と称します。原子配列の仕方は金属元素によって異なります。私達の身の回りで多用される鉄の場合は、立方体の真ん中と隅に原子が存在し、これを体心立方構造 (bcc 構造) と称します。鉄は磁化を帯びて磁石に成り易い事が知られていますが、磁石の成り易さは鉄の原子の並びにより異なります。そのため磁化され易い方向に原子をならびそろえた鉄に、外から磁場をわずかに変化させると容易に磁化を変えることができます。図 14 は原子がいろいろな方向に揃った鉄に対して、外から磁場をあたえた時の磁化の変化を示したものです。Tetragonal[100]と記した配列の時が、他の配列の時よりもわずかの磁場で磁化が増加

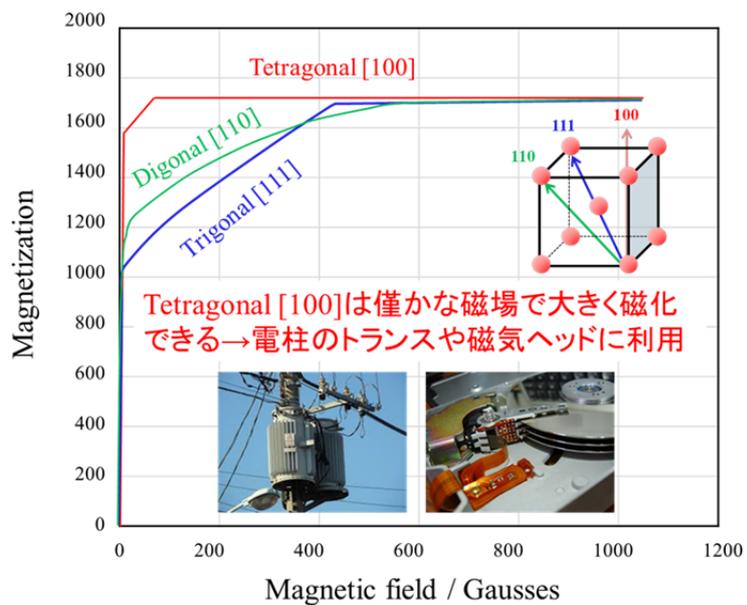


図 14 主な結晶方位を持つ鉄の磁化曲線

することが判ります。つまりこの方向に原子がそろっていれば、磁化した時に鉄が消費するエネルギー（鉄損と称します）を下げるができますから、変圧器や電動機の効率を向上させることができます。1934年にアメリカのゴスが、圧延加工とその後の熱処理を系統的にかえることで、圧延方向に優れた磁気特性が出ることを発見しました。この圧延方向は上記の Tetragonal[100]であり、圧延面が{110}（図15の水色の面）であったことから、このような方位をゴス方位と称します。ケイ素（シリコン）添加は結晶方位の揃え方や磁区幅制御に効果があり、ゴス方位にそろえたシリコン添加鋼板は方向性ケイ素鋼板として、

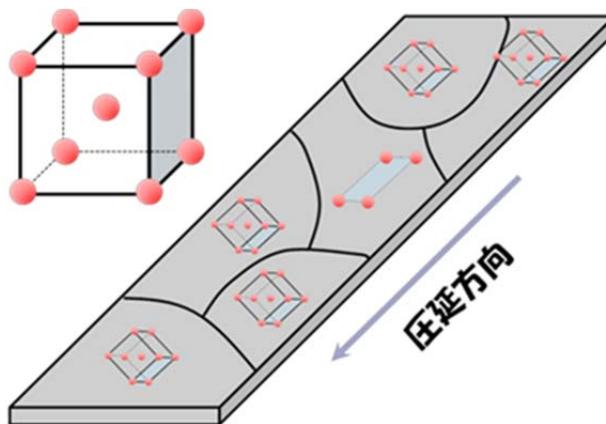


図15 圧延板におけるゴス方位を持つ結晶粒の模式図

、アメリカのアームコ社を中心に実用化に成功しました。そして、1968年に当時の新日本製鐵からオリエントコア・ハイビーと称する鋼板が、1973年に川崎製鐵からはRGHという鋼板が高磁束密度方向性珪素鋼板として実用化されました。ともに、インヒビターと称する微細化合物による粒成長抑制効果を利用した鋼板で、ゴス方位以外の結晶粒の成長を抑制することで、高い磁気特性を得ることができました。高度な圧延技術と再結晶などの材料科学を駆使したこの鋼板の出現により、世界の電磁鋼板のほとんどが日本製の電磁鋼板に置き換わりました。

7. 最後に

圧延は素材を所望の形状に加工する最も一般的な方法ですが、ユーザーニーズの多様化に応じて、圧延技術そのものも日々進化しています。圧延加工では素材に対して圧縮応力を印加していますので、素材は圧縮方向に潰されるか、圧縮方向と垂直の幅方向に流れるか、どちらかの選択しかありません。素材に対する拘束があるために前者が優先的に働いて素材の厚みが減少するわけですが、変形抵抗の高い難加工材料の加工や高圧下率で板厚の薄い素材を加工する時は、減厚だけでは圧縮応力をまかなうことができず、その場合にはクラックなどの割れを形成してしまいます。すなわち、素材の変形抵抗（強度）や最終形状に応じて、圧下率や圧延回数、中間熱処理など加工プロセスを制御しなければなりません。また5節で紹介したように、圧縮応力を印加する圧延ロールそのものが弾性変形をおこすため、被加工材の厚みが不均一になるクラウンという現象は、圧延加工の本質に関わる現象で加工法そのものを工夫する必要があります。

一方、前節の電磁鋼板で紹介した、圧延加工により原子配列を変えることで特性が変わることは、現在の加工熱処理

(Thermo-mechanical Processing) の根幹の現象です。加工により結晶方位を制御するという現象を理解するために、集合組織という材料組織を特徴づける考えが新たに生まれました。この学問分野の発展には、歴史的に見て日本人研究者の貢献が大きく、さかのぼると、理化学研究所からアメリカに留学した西川正治氏(1884-1952)と浅原源七氏(1891-1970)の研究と、彼らを指導した当時の東京帝国大学実験物理学の寺田寅彦氏(1878-1935)と冶金学科の俄国一氏(1872-1958)に行き着きます(図16)。



図16 西川正治氏(a)、浅原源七氏(b)、寺田寅彦氏(c)、俄国一氏(d)

X線回折学を専門とする西川氏と鉄鋼中の介在物や黒鉛化を研究していた浅原氏が、加工や熱処理を施した時の金属組織の変化をX線回折実験により調べ(図17)、その研究が、後年の圧延による加工再結晶や熱処理による再結晶集合組織の源流となりました。その後、西川氏は東京大学教授としてX線金属組織学の世界的権威となり、浅原氏は実業界に入り、戸畑鋳物を経て日産自動車社長となり、共に日本の学術界と産業界を牽引する逸材となりました。

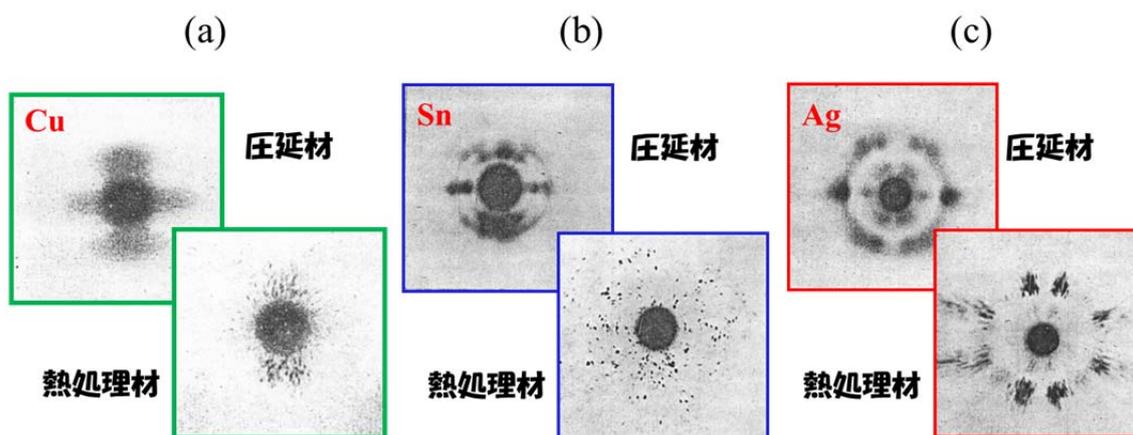


図17 銅(a)、スズ(b)、銀(c)の圧延および熱処理材のラウエ斑点

板材は私達の生活を支える基本形ですから、その製造法である圧延の重要性は自明です。成型加工技術の一つの圧延をさらに発展させるためにも、プロセスと材料の複合的な視点による材料開発が必要と考えます。