

アルミニウムおよび銅条材表面への小ピッチ溝列形成法

— 高性能沸騰伝熱面製造のための溝形成圧延に関する実験的研究 —

中西 賢二・福井 泰好・木通 克男

貝田 博英*・岡村 俊一**

(受理 昭和60年5月31日)

FINE PITCH GROOVING ON THE SURFACES OF ALUMINUM AND COPPER STRIP — EXPERIMENTAL STUDY ON GROOVED ROLLING FOR PRODUCING ENHANCED BOILING SURFACES —

Kenji NAKANISHI, Yasuyoshi FUKUI, Katsuo KIZUSHI

Hirohide KAITA* and Shunichi OKAMURA**

Abstract : Recently, new processes to produce enhanced boiling surfaces have been developed. Those are extrusion, a combination of extrusion and chipping, mechanical rolling, hydraulic expansion, and sintering of metal powder, all of which involve complex operations and high production costs. Grooved rolling is introduced as a simple process to form enhanced boiling surfaces. First, the deformation caused by grooved rolling was analysed by applying a visio-plasticity method with plasticine model rolling. Characteristic deformations using the grooved rolling technique occur in the form of a continuous indentation by the teeth of the grooved roll to the surface of a plane sheet or strip, deformation is mainly confined to the region between the teeth of the upper grooved roll and lower flat roll, plastic flow of the work occurs mainly in a longitudinality and the tips of rib projections formed by grooved rolling are rounded. Second, grooved rolling of thin aluminum and copper strips was examined and it was found that 1 mm pitch grooves can be formed on the strip surfaces successfully. Finally, three-stand tandem mill, by which longitudinal grooving, additional 45 degree cross grooving, and flattening and trimming of the rounded tips of the rib projections could be performed, was introduced as a test system, and some examples of products were obtained by the system.

1. 緒 論

周知の様に、省資源、省エネルギーは工業製品の製造過程、製品の機能の両方において達成されるべき重要な目標の1つとなっている。熱交換器関連技術の分野でも、より高効率の熱伝達を実現するために、伝熱面を Fig. 1 に示す様な特別な幾何学的形状とした各種高性能伝熱面が開発され、いくつか実用に供せられている^{1),2)}。高性能伝熱面の製造には板素材のプレス加工、液圧張り出し加工、転造加工、表面切削加工の各加工法あるいはこれらの複合加工法が用いられてい

る。また、高性能伝熱管製造方法として開発された技術には、管内壁に金属粉末を焼結して多孔質層を形成する方法、あるいは押し出し加工により管内壁にフィンを形成する方法がある。生産性の上ですぐれた製造方法として提案できる他の加工法に圧延加工法があげられる。特に金属条材を素材に用いて高生産性を保ちながら連続的に管を製造する装置にロールフォーミングと高周波誘導（あるいは抵抗）連続溶接を組み合わせた電縫管製造装置があるが³⁾、この装置のパスライン中に圧延ロール加工による条材の表面加工過程を含めると、他の加工法では得難い連続成形加工、かなり自

*三井アルミニウム工業株式会社

**川内職業訓練短期大学校

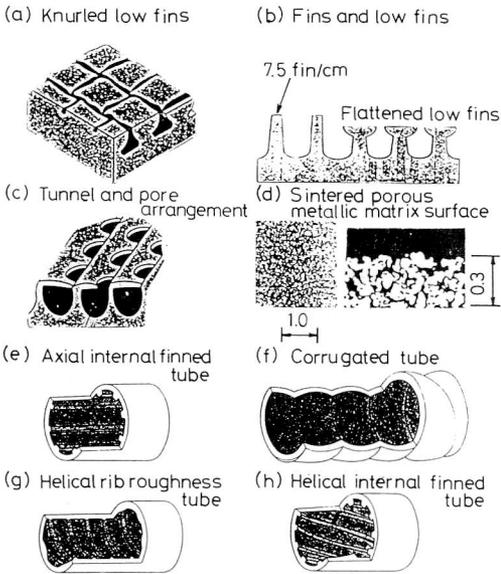


Fig. 1 Some enhanced boiling surfaces, (a)-(d), and typical tube-side enhancements, (e)-(h).

由な伝熱面形状設計，均質な製品特性等を可能としながら，高性能伝熱管が製造できるものと思われる。本研究では，はじめにプラスティシオン板を用いて，1段圧延機による溝形成圧延を行ない，板材表面に溝列を形成する場合の材料内部塑性流れの様相と相当ひずみ分布を求めるとともに，溝形成圧延加工の変形機構を明らかにした。つぎに，試作した伝熱管素材成形加工実験機によるアルミニウム条材，銅条材を用いた各種の溝形成圧延および3段連続（タンデム）圧延実験を行ない，条材表面に高性能伝熱面として要求される小ピッチ溝列が良好に形成されることを確かめた。

2. 基礎式

圧延状態を表す諸式及びプラスティシオン模型実験のひずみ解析に用いた諸式を以下に記す。

2-1 圧延状態を表わす諸式

a) 圧下率（各段における圧下率： r ）

穴形圧延では素材断面積の矩形換算で得る平均板厚（Fig. 2(a)の hm ）を用いて式(1)で圧下率を表わしているが⁴⁾，薄板条材の溝歯付ロールによる圧延では

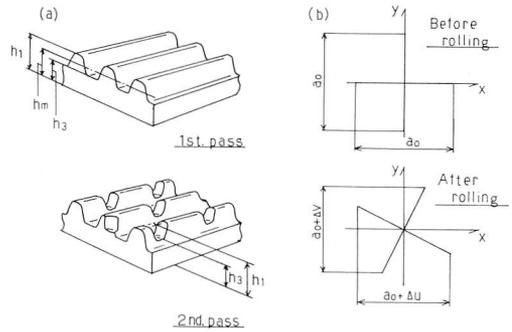


Fig. 2 Dimensions in thickness of grooved sheet material, (a), and distortion of gird pattern in X-Y plane projection, (b)

板材の圧延がロール全面でなく溝歯部分によるものであることから式(2)で圧下率を表わした。

$$r = 1 - (hm/h_0) \quad (1)$$

$$r = 1 - (h_3/h_0) \quad (2)$$

b) 圧延方向伸び率（各段における伸び率 δl ）

$$\delta l = (l/l_0) - 1 \quad (3)$$

c) 幅方向拡がり率（各段における幅拡がり率 δb ）

$$\delta b = (b/b_0) - 1 \quad (4)$$

d) 圧延荷重と圧延トルク（各段における加工材の単位幅当りの圧延荷重 P と圧延トルク Tq ）

$$P = F/b \quad (5)$$

圧延トルクは，ロール面圧力分布の中心を接触弧中心に仮定して⁴⁾，次式で計算した。なおロールの弾性変

$$Tq = P[R(h_0 - h_3)]^{1/2} \quad (6)$$

形によるロール扁平化の影響は，扁平化時の接触弧が円弧を保つと仮定した式(7)の R' を式(6)の R に代入することにより考慮した⁵⁾。

$$R' = R[(1 + C_k \cdot F)/b(h_0 - h_3)] \quad (7)$$

式(1)-(7)において， h_0 は各段の入口（溝付板では凸部）板厚， h_1 ， hm ， h_3 は順に各段の圧延終了後凸部板厚，矩形換算による平均板厚，凹部板厚を表わす。

(Fig. 2(a)参照) l_0 ， b_0 ， l ， b は順に各段圧延前の板長さと板幅，圧延終了後の板長さと板幅を表わす。 F は各段の荷重計による圧延荷重測定値を表わす。

C_k は鋼製ロールであることから $C_k = 2.154 \times 10^{-4} \text{ mm}^2/\text{kg}$ の値を用いた。

2-2 ひずみ解析に用いた諸式

格子線解析法⁶⁾に従ってプラスチック板の圧延加工で得た塑性流れの様相から下記の式で加工材内部のひずみ分布を計算した。なお計算には圧延前後の変形のみに着目した全ひずみ理論にもとづく式を適用した。Fig. 2 (b)の上図および下図に示す様に、圧延材の幅方向、厚さ方向、長さ方向をそれぞれ直交座標系の x, y, z 軸に一致させて、(b)の上図に示す一辺 a₀ の直交格子が変形により、(b)の下図に変わるとき、x, y 方向の変位 Δu, Δv の測定値と z 方向の変位 Δw の（長さ方向の変位が場所によって変化しないとして、体積一定の条件から求めた）計算値を用いて、基準長さ a₀ の要素のひずみ成分を定義式、式(8)で計算した。

$$\left. \begin{aligned} \epsilon_x &= \Delta u/a_0, & \epsilon_y &= \Delta v/a_0 \\ \epsilon_z &= \Delta w/a_0, & \gamma_{xy} &= (\Delta u + \Delta v)/a_0 \\ \gamma_{yz} &= (\Delta v + \Delta w)/a_0, & \gamma_{zx} &= (\Delta w + \Delta u)/a_0 \end{aligned} \right\} (8)$$

また相当ひずみ ε は、式(9)で計算した。

$$\epsilon = (\sqrt{2}/3) \{ (\epsilon_x - \epsilon_y)^2 + (\epsilon_y - \epsilon_z)^2 + (\epsilon_z - \epsilon_x)^2 + 3/2 (\gamma_{xy}^2 + \gamma_{yz}^2 + \gamma_{zx}^2) \}^{1/2} \quad (9)$$

式(8)において、ε_x, ε_y, ε_z は順に x, y, z 軸方向ひずみ成分を表わし、γ_{xy}, γ_{yz}, γ_{zx} は順に x, y, z 軸に直交する面上で y, z, x 軸方向に作用するせん断ひずみ成分を表わす。

3. 溝列形成圧延加工の変形特性について

プラスチック（塑性変形試験用油粘土で剛塑性体の変形抵抗を示す）を加工素材（金属条材素材の約16倍模型）に用いて、1個または複数個で等ピッチの溝列を設けた溝歯付きロール（上ロール）と平ロール（下ロール）による溝列形成圧延の模型実験を行ない、本圧延加工の変形特性一、下記a), b), を明らかにした。a) 圧延加工成形品の横断面における塑性変形の様相とひずみ分布, b) a)に及ぼす上ロール溝歯の形状の影響

3-1 実験装置および実験方法

Fig. 3 に小型1段圧延機を用いた実験の概略図を示し、Fig. 4 に溝歯付き上ロールの溝歯形状および配列（ピッチ）を示す。板厚 16 mm, 板幅 48 mm, 長さ 300 mm のプラスチック板素材として、板厚 2 mm, 板幅 48 mm（または 16 mm）, 長さ 300 mm に成形した白色および黒色プラスチック板を交互に色を変えて板厚方向に層状に積層したもの（以下、横縞ビレットと

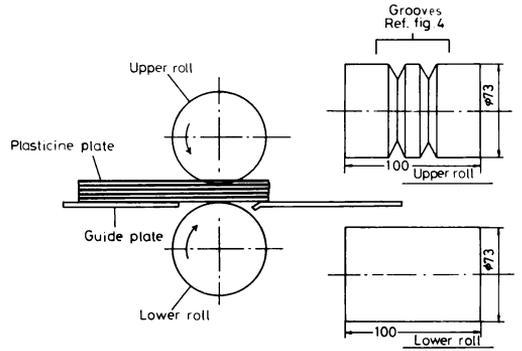


Fig. 3 Schematic sketch of the rolling mill and rolling experiment with plasticine plate

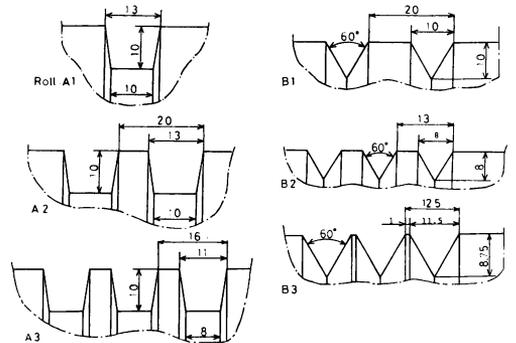


Fig. 4 Types and dimensions of the grooves formed on the upper rolls (Ref. Fig. 3)

呼ぶ)、同様に板幅方向に層状に積層したもの（縦縞ビレットと呼ぶ）および辺の長さが 4 mm × 2.4 mm で長さ 300 mm の棒材に成形した白色および黒色プラスチック棒を上下、左右方向に交互に色を変えて積層したもの（市松模様ビレットと呼ぶ）を準備した。実験は圧延速度、2m/min の低速度でFig. 4 A1~B3 の各溝歯形ロールごとに上記3種類のビレットを用いた圧延を行ない、横縞ビレットと縦縞ビレットの圧延加工成形品横断面（切断面）から成形品断面形状を見るとともに、横断面の色模様の輪郭線を重ね合わせて得る格子線のゆがみから塑性変形の様相とひずみ分布を求めた。市松模様ビレットを用いた実験では、圧延途中でロールを停止して、ロールバイト内での溝形成圧延の様子を観測した。

3-2 実験結果及び解析結果

Fig. 5, 6にFig. 4のA3溝歯形ロールによる圧延過程の進行状態および圧延後の加工材に残存する変形の様子(いずれも加工材横断面上で見た結果)を示す。

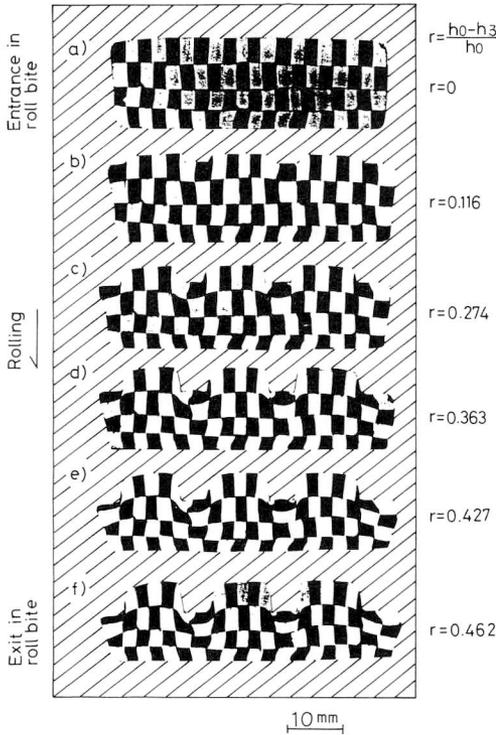


Fig. 5 Series of the distortion of grid pattern observed on the cross section of plasticine plate during the grooved rolling [Type of grooved roll : A 3 in Fig. 4]

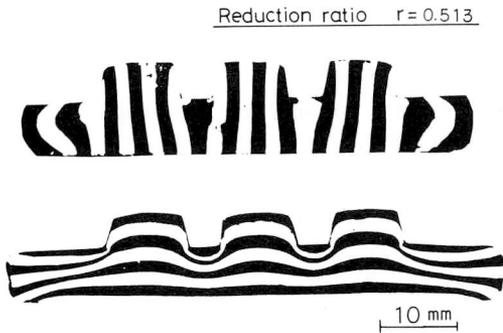


Fig. 6 Distortions of lamina patterns of plasticine plate observed by grooved rolling [Type of grooved roll : A 3 in Fig. 4]

す。Fig. 5 a)の素材横断面がロール溝歯によりb)からf)へと溝が形成された横断面に変形加工される様子が分る。また変形は加工材溝部において著るしく、加工は、素材表面へのロール溝歯の連続押し込み変形の形態で進行している。Fig. 6は縦縞ビレットと横縞ビレットの溝形成圧延後の横断面における色模様の変化を表わす。同様の結果を他の溝歯形ロールによる圧延実験でも得た。Fig. 7, 8にFig. 4 A1-A3, B1-B3 溝歯形ロールによる加工成形品横断面上の格子線のゆがみ(図a)と図a)をもとにして式(8), (9)を用いて計算した(計算点は160点~230点)横断面上の相当ひずみ ϵ の分布(図b))を表わす。これらの図において、断面両端部に見られる幅拡がり(試験材料では、板幅に比較して板厚が大きい ($b_0/h_0=3$) ためであり、実際の金属条材の場合 ($b_0/h_0>40$) は幅拡がりほとんど起きない)と考える。(後述の実験で確認した。)従って、Fig. 7, 8各図の両端部の結果を考察の対象外とすると、板材表面の溝形成圧延の変形の特徴を以下の様に述べる事ができる。i) 成形品の溝部形状はロールの溝歯形状に一致するがロール溝部内で自由面となっている成形品凸部上面に丸みが付くことが分る。またこれはロール溝

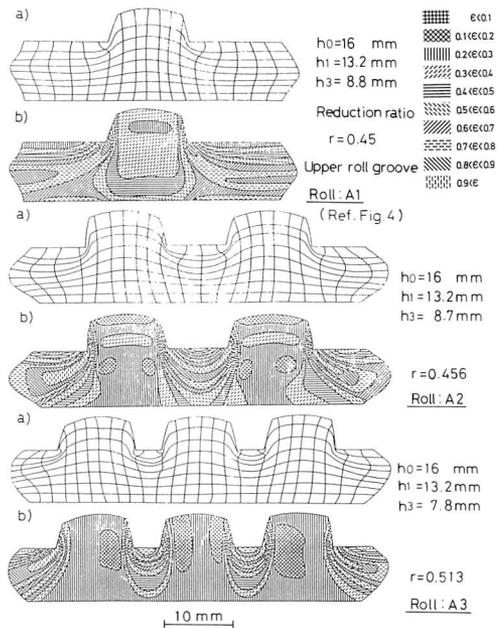


Fig. 7 Distortions of grid patterns, a), and effective strain distributions, b) in grooved rolling of plasticine plates

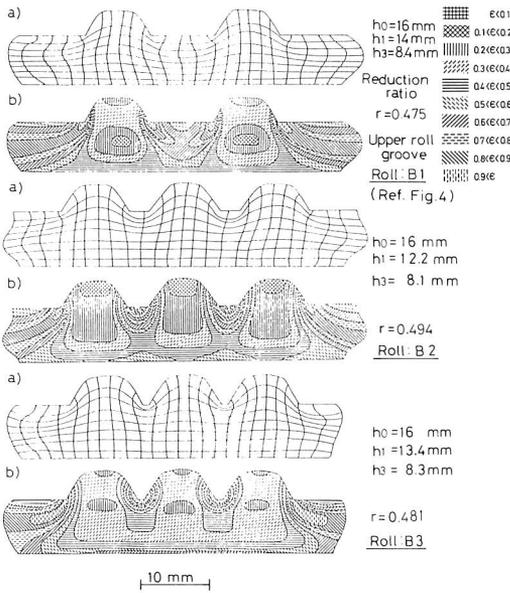


Fig. 8 Distortions of gird patterns, a), and effective strain distributions, b) in grooved rolling of plasticine plates

部への歯による加圧部からの塑性流れによるものではなく、溝歯に近い部分ほど板厚方向への圧縮変形量が大きいことによる。(凸部の最大板厚は素材板厚の約0.75~0.83倍となっていて、これは圧延ロール溝歯列の連続押し込み変形による圧延加工の結果と言える。)

ii) 成形品の横断面上の相当ひずみの分布は、溝歯付きロールの歯の部分と平ロールの間で加工材料は大きな圧縮変形を受けるが、ロールの溝部分と平ロール間の変形は小さいことを示している。また成形品の溝部分のひずみ分布の結果から、上ロール歯形による成形面の表層近くに最大ひずみが現われることが分る。

iii) ロールの溝歯形が矩形の場合の変形は、三角形の場合よりも上ロールの歯と下ロール間に集中する傾向が強い。

4. 試作加工実験機による加工試験

アルミニウム素材あるいは銅条材表面に前2段の溝歯付ロールによる圧延加工で小ピッチ溝列を形成し、後1段の平ロール圧延で成形材の山形頂部の丸みを平坦に修正するパススケジュールで表面加工が行なえる3段タンデム(連続)圧延加工試作機による下記の試験を行なった。a) 前1段ロールのみを用いた、金属

条材の小ピッチ溝列形成圧延の変形試験および b) 前述の3段タンデム圧延加工による小ピッチ溝列形成圧延試験

4-1 試験装置

Fig. 9に3段タンデム(連続)圧延加工機(試験用の試作機)を示す。各段のロールは独立に油圧モータで駆動する機構となっていて、回転数は0~

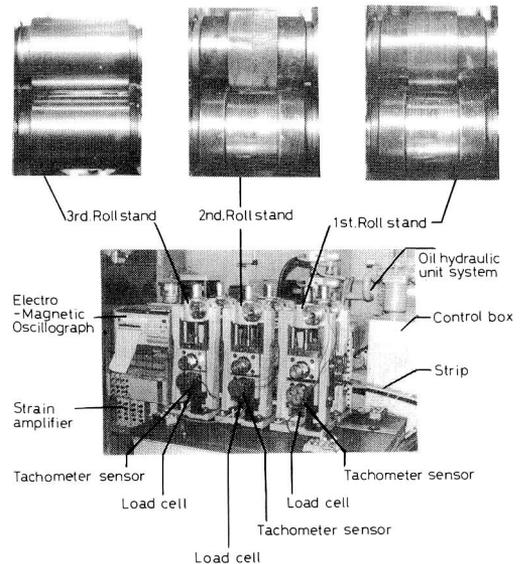


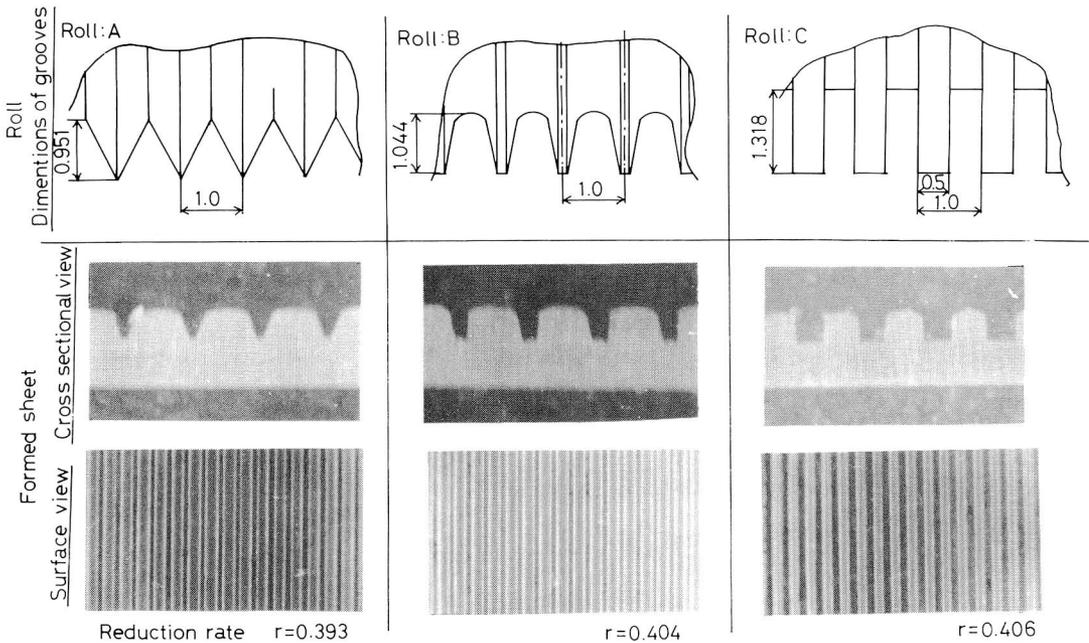
Fig. 9 3-stand tandem mill, rolls and measurement instrumentation

Roll axle diameter : 45 mm,
Roll width : 100 mm
Roll gap : Max. 75 mm,
Roll separating force : Max. 5 ton
Stand pitch : 250 mm

175r.p.m.の範囲で無段階に調整可能である。実験条件(運転条件)はコントロールボックス正面のダイヤルとスイッチで設定し、各段のロール回転数と圧延荷重は光パルスを利用した回転計、ロードセル、動ひずみ増幅器、電磁オシログラフで構成した計測装置で測定・記録した。Fig. 9の上部3面のロール写真は3段タンデム圧延加工試験に用いたロールを示す。前1段のみを用いた試験では下ロールに平ロールを用いた。(上ロールは写真と同じロールを用いた。)

4-2 試験および試験結果

a) 金属条材の小ピッチ溝列形成圧延の変形試験



[Aluminum strip : Thickness : 1.2 mm, Width : 49.98 mm]

Fig.10 Examples of grooved rolling of aluminum strip by using three types of grooved rolls (Roll diameter : 85 mm)

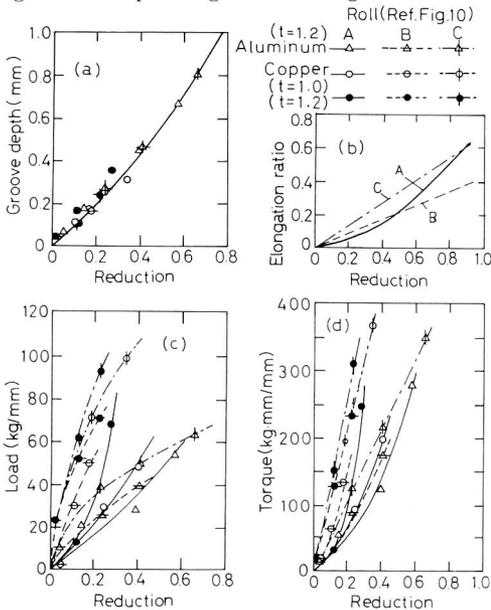


Fig.11 The experimental values of groove depth, (a), elongation ratio, (b), load, (c), and torque, (d) with regard to reduction in grooved rolling (Three types of grooved rolls, (A)-(C), are shown in Fig.10.) t : Initial thickness, (= h_0), mm

Fig. 10, 11にFig. 9の前1段ロールのみを用いた小ピッチ溝列形成圧延の試験条件ならびに試験結果を示す。Fig. 10の上部3図面に示すピッチ1mmの三角形溝歯、(Roll : A), 台形溝歯 (Roll : B), 矩形溝歯 (Roll : C)を上ロールに用いて(下ロールには平ロールを用いた。)アルミニウム条材(板厚 $h_0=t=1.2\text{mm}$, 板幅 $b_0=50\text{mm}$), 銅条材(板厚 $h_0=t=1.2\text{mm}$ あるいは 1.0mm , 板幅 50.1mm)の溝形成圧延を行なった。圧下率の設定は上下ロール軸受箱間に(1.0, 0.7および0.4mmの3種類のスペーサを置いて)3種類(1mm板厚銅のみ2種類)に設定した。圧延速度は約 2m/min の低速度に設定した。Fig. 10の下部に上部の各溝歯付ロールによる圧延加工で得た条材の表面(横断面と上面)写真を示す。これからロール溝歯によって条材表面に1mmの小ピッチで溝列が良好に形成されることが分る。凸部の頂面にはプラスチック模型圧延実験で明らかにした様に本加工法の変形特性による丸みが付くことが確認できる。Fig. 11は圧下率に関する成形品の溝深さ(図(a), 伸び率(図(b)), 圧延荷重(図(c)), 圧延トルク計算値(図(d))のそれぞれを示す。溝深さと圧下率との関係はロール溝歯形にほとんど無関係である。伸び率は溝

歯形が三角形の場合は、圧下率の増加とともに急激に増加する。(圧下率の増加とともにロールと加工材の接触面積が急速に増加することによると考える) 圧延荷重と圧延トルクはいずれの溝歯形の場合も圧下率の増加とともに増大する。また同一材料で同一板厚の条材で得た結果を比較すると、溝歯形が矩形、台形、三角形の順に圧延荷重と圧延トルクは大きな値となること分る。なお図に示さなかったが加工材の幅拡がりほぼほとんど無視できる程度であることを確かめた。

(δb は 0.005 程度)

b) 3 段タンデム (連続) 圧延加工による小ピッチ溝列形成圧延試験

Fig. 12 に Fig. 9 の各段圧延ロールに使用したロール

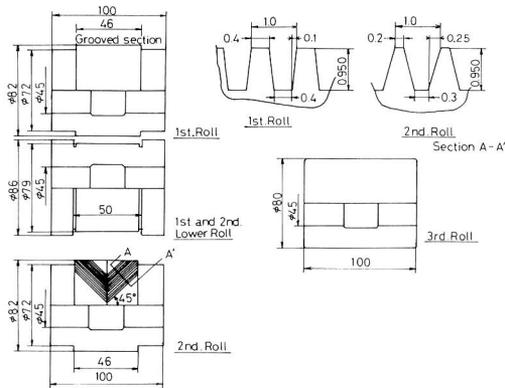


Fig. 12 Dimensions of the rolls installed in the 3-stand tandem mill (Ref. Fig. 9)

形状と主要寸法を示す。第 1 段ロールは矩形に近い台形溝歯の縦溝ロールであり、第 2 段ロールは同様の歯形の山形溝ロールである。第 1 段と第 2 段の下ロールには条材を保持するための段付きロールを用いて、条材表面に小ピッチ (ここでは 1 mm ピッチ) の溝列が正しく形成される様にした。第 3 段ロールには上下ロールとも平ロールを用いた。Fig. 13 に上述のロールを用いた 3 段タンデム圧延加工によりアルミニウム条材表面に (第 1 段ロールにより) 1 mm ピッチの縦溝列が形成され、(第 2 段ロールにより) その上に 1 mm ピッチの山形溝列が重なされて、最後に (第 3 段) 平ロールによる表層部の圧延で凸部頂面の丸みが平坦に修正された微小なひし形突起の配列が形成される加工

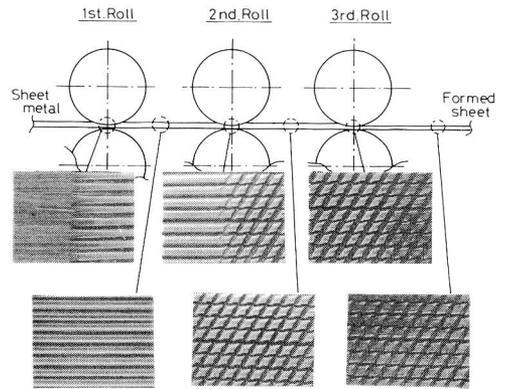
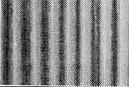
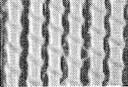


Fig. 13 Sequence of the grooved rolling of a metal strip by operating the 3-stand tandem mill

Table. 1 Experimental results

(Material : Aluminum strip, Thickness : 1.18 mm, Width : 49.98 mm)

Pass schedule	1st. Rolling	2nd. Rolling	3rd. Rolling		
			3 different pass schedules were tested.		
Reduction ratio	0.451	0.331	0.092	0.113	0.232
Groove depth, mm	0.502	0.465	0.359	0.335	0.198
Rolling load	75.63	43.08	6.0	12.0	26.01
Rolling torque	5.54	1.78	0.2	0.3	1.2
Hardnesses, Hv 	A: 37	A: 37	A: 37	A: 37	A: 39
	B: 36	B: 35	B: 35	B: 35	B: 35
	C: 37	C: 37	C: 37	C: 38	C: 38
Formed sheet surface					
Formed sheet cross section					

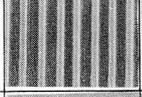
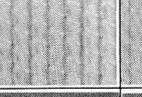
Initial hardness of Aluminum strip: Hv=31

Rolling load and torque are presented by the values per unit width.

Rolling load: Kq/mm Rolling torque: Kq mm/mm

Rolling speed [1st. rolling: 2.32 m/min, 2nd. and 3rd. rollings: 2.58 m/min]

Table 2 Experimental results
(Material : Copper strip, Thickness : 1.01 mm, Width : 49.86 mm)

Pass schedule	1st. Rolling	2nd. Rolling	3rd. Rolling		
Reduction ratio	0.582	0.327	3 different pass schedules were tested.		
Groove depth,mm	0.578	0.407	0.095	0.106	0.193
Rolling load	185.18	176.13	22.06	44.12	70.2
Rolling torque	12.88	6.72	0.8	1.2	3.61
Hardnesses, Hv 	A: 98 B: 99 C: 102	A: 102 B: 101 C: 102	A: 101 B: 101 C: 102	A: 101 B: 101 C: 102	A: 103 B: 101 C: 107
Formed sheet surface					
Formed sheet cross section					

Initial hardness of Copper strip: Hv=77

Rolling load and torque are presented by the values per unit width.
Rolling load: Kg/mm, Rolling torque: Kg mm/mm

Rolling speed [1st. rolling: 2.32m/min, 2nd. and 3rd. rollings: 2.58m/min]

過程を示す。Table 1 と 2 にはそれぞれアルミニウム条材および銅条材を素材に用いた、上述の 3 段タンデム圧延加工機による表面成形加工試験の加工条件と試験結果を示す。なお成形加工のパス・スケジュールの中で第 3 段目の圧延加工は平ロールによる条材表面凸部の修正圧延であることから圧下率 r は圧延前の凸部高さ h_0 と圧延後の凸部高さ h_1 を用いて次式で定義した。

$$r = 1 - h_1/h_0 \quad (10)$$

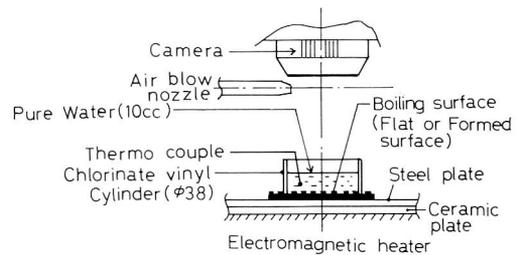
また、圧下率 r を 3 種類に変えて圧延を行ない、凸部形状の修正を良好に行なうための第 3 段目圧下率に検討を加えた。Table 1, 2 中の成形品横断面写真で凸部形状が不規則に見えるのは、切断面が縦溝に直交して山形溝と交差した状態であることによる。写真から第 3 段ロールによる圧延では凸部頂面が圧縮変形をうけて平坦に修正されるとともに溝深さが減少することが分る。したがって第 3 段ロール圧延の圧下率は溝深さと凸部形状の両条件から定まることになる。第 3 段目の圧延による溝深さ hg は凸部が均一圧縮変形をすと仮定した場合、圧延前溝深さ hg_0 、圧下率 r を用いて式(11)で表記できる。また、凸部にバレルリング

$$hg = hg_0 - rh_0 \quad (11)$$

が起こると溝幅は圧延前の溝幅よりも幾分小さくなりくびれのある空間となる。Table 1, 2 の結果はアルミニウム、銅ともに $r=0.1$ 以上でごくわずかながら凸部にバレルリングが起きはじめることを明らかにし

ている。以上の試験により、3 段タンデム圧延加工により、銅あるいはアルミニウム条材表面に 1 mm ピッチのひし形突起の配列が良好に形成されることを確認した。

Fig. 14 は簡単な沸騰試験により第 3 段目圧延加工圧下率 r を $r=0.113$ (アルミニウム), $r=0.106$ (銅) として得た加工面を伝熱面とした場合と平面の



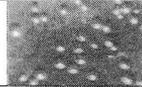
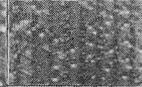
Water temp. °C	Flat surface	Formed surface
80		
90		
100		

Fig. 14 Comparisons of boiling phenomenon observed by the simple tests

まを伝熱面とした場合の気泡の発生状態の比較を示す。これから、加工面にはほとんど全面に気泡が発生しているが平面の場合は発生箇所にもラがあることが分る。

5. 結 論

溝歯付ロールを用いた圧延加工による金属条材表面への小ピッチ溝列形成法の開発を目標として、プラスチック模型圧延による変形特性の解明および3段タンデム（連続）圧延機（試作機）を用いたアルミニウムおよび銅条材の表面加工試験を行ない下記の結果を得た。1) 溝歯付ロールによる条材表面加工は条材表面へのロール溝歯の連続押込み加工と考えることができ、a) 上ロールの溝歯と下ロール（平ロール）の間の圧縮変形が主要な変形である。b) ロール溝部の形状が条材凸部の側面形状に転写される。c) 条材凸部の頂面に丸みが現われる。従って加工の最終段で平ロールによる修正圧延が必要である。e) 条材の板厚は本加工法では常に減少する。また板幅方向伸びは無視できるほど小さく、溝形成による素材内部の塑性流れは圧延方向がほとんどであり、成形品には長手方向の伸びとして現われる。2) 溝歯形が矩形、台形、三角形のロールを用いたアルミニウム条材、銅条材の溝形成圧延を

行ない、条材表面に小ピッチ溝列が形成できることが確認できた。3) 3段タンデム圧延（条材表面に縦溝の形成、45°溝の重合形成、および平ロールにより条材表面の突起部頂面の修正の加工過程を連続して行なう）により目標とする平坦な頂面を有するひし形突起物の配列が創成できた。

最後に、実験用3段タンデム圧延機を試作・貸与していただきました三井アルミニウム工業(株)に厚くお礼を申し上げます。

文 献

- 1) Webb, R. L. ・ Bergles, A. E. :
Mechanical Engineering 6 (1983), 60
- 2) Shah, R. K. : Mechanical Engineering
5 (1984), 50
- 3) 田中壽恒・横山栄一・豊岡高明：
塑性と加工 22-249 (1981) 975
- 4) Gelege, A. (五弓勇雄訳)
金属塑性加工の計算 コロナ社 (1964) 182
- 5) Larke, E. C. : 板材の圧延 コロナ社 (1965)
195-248
- 6) 提 成晃： 塑性と加工 13-133 (1972) 149