U.D.C. 621.771.1

軟鋼圧延用高速センジマミルの特異性

Characteristics of the High Speed Sendzimir Mill for Mild Steel Rolling

川口　洋*　広政梅夫*
Hiroshi Kawaguchi　Umeo Hiromasa
原口成人**　梶原利幸**　藤野伸弘**
Shigeto Haraguchi　Toshiyuki Kajiwara　Nobuhiro Fujino

内　容　梗　概

軟鋼用高速センジマミルとして業界の注視を浴びながら1961年日新製鋼大阪工場に建設された世界最大のセンジマミルは，稼動1年有余を経過したが，その性能の四重冷間圧延機との実際的な比較は，大いに関心が持たれていた。本稿では，これまでの運転成績，および比較実測により両者の優劣を比較し，製品の品質および操業性においてすぐれていることを指摘するとともに，最近急速に脚光を浴びてきた極薄ブリキ製造に対するセンジマミルの適応性が，大いに期待されることを指摘した。

1. 緒　　言

ステンレス鋼板やケイ素鋼板のようにかたい材料を薄く圧延するためには，小径作業ロールを使用しうるセンジマミルがもっとも適した圧延機であることは，すでに常識となっているが，軟鋼用として，しかも可逆式としては，可逆式四重冷間圧延機の圧延速度を上回る高速センジマミルを採用したことは，まさに画期的な試みでありその成果には多大の関心が寄せられていた。このたび日新製鋼と日立製作所が共同して，その成果を問うため，製品の品質，圧延性能および操業上の優劣につき実地測定を行なったのでここにその結果を紹介するとともに，薄物圧延に好適の特性を有するセンジマミルが，最近の圧延界の焦点ともいえる極薄ブリキ圧延に対しいかなる適応性と問題点を有するかを現在の運転データに基づいて論ずる。

2. 供試圧延機の主要仕様

2.1 センジマミル

形　　式	ZR-21-50
圧　延　材	軟　鋼　2.0 tmm～4.5 tmm×625^{b} mm～1,250^{b} mm
	製品板厚　最小　0.152 mm
作業ロール寸法	86 ϕmm×1,400 l mm
圧延速度	0～±370～±820 m/min
主電動機	DC 1,850 kW (925 kW×2) 250/550 rpm 2台(双電動機駆動)
巻取機用電動機	DC 2,850 kW (950 kW×3) 150/600 rpm 左右各1台
ロールクーラント	ソリュブルオイル

AGC 装置付

2.2 四重冷間圧延機

ロール寸法	420 ϕmm&1,250 ϕmm×1,060 l mm (補強ロールベアリングは4列テーパローラベアリング)
圧　延　材	軟　鋼　1.6 tmm～4.5 tmm×1,000^{b} mm (最大)
	製品板厚　2.0 tmm～0.179 tmm
圧延速度	0～±220～±460 m/min
主電動機	DC 1,600 kW 150/380 rpm 1台
巻取機用電動機	DC 550 kW 150/705 rpm 左右各1台
ロールクーラント	ソリュブルオイル

3. 板厚精度

一般に圧延製品の板厚変動は，

（i） 圧延圧力を規定する圧延条件の変化（たとえば，材料厚みむら，かたさむら，張力や圧延速度の変化など）

（ii） 圧延機自身のロール間げきの変化（ロール偏心，およびロールの熱膨張など）

の二つによって，生ずるが，その度合を定めるものは，圧延機の剛性（バネ常数）である。この間の定量的関係についてはすでに発表済[1][2]みであるが，バネ常数大なるほど(i)の影響は小さく(ii)の影響は大きく，したがって精度特性を調べるためには圧延機のバネ常数を求めることが先決である。

3.1 センジマミルのバネ常数

3.1.1 バネ常数の理論計算

センジマミルにおいては，圧延荷重による変形は主として次の各部に生じるものと考えられる。

（a） ロールハウジング
（b） 各ロール間の接触部
（c） 支持ベアリング軸
（d） 支持ベアリングサドル
（e） 圧下装置

圧延荷重Pによる上記各部の変形を求め，それによるロール間げきCの変化と圧延荷重との関係より，バネ常数Kは，次のように求められる。

$$K=\frac{dP}{dC} \quad \cdots\cdots(1)$$

ただし　K：バネ常数 (t/mm)
P：圧延荷重 (t)
C：ロール間げき (mm)

以下各部の変形によるロール間げきの変化を求める。

各ロールに作用する力，および力の作用線と垂直軸のなす角度を**第1図**および**第1表**に示す。

（1） ハウジングの変形

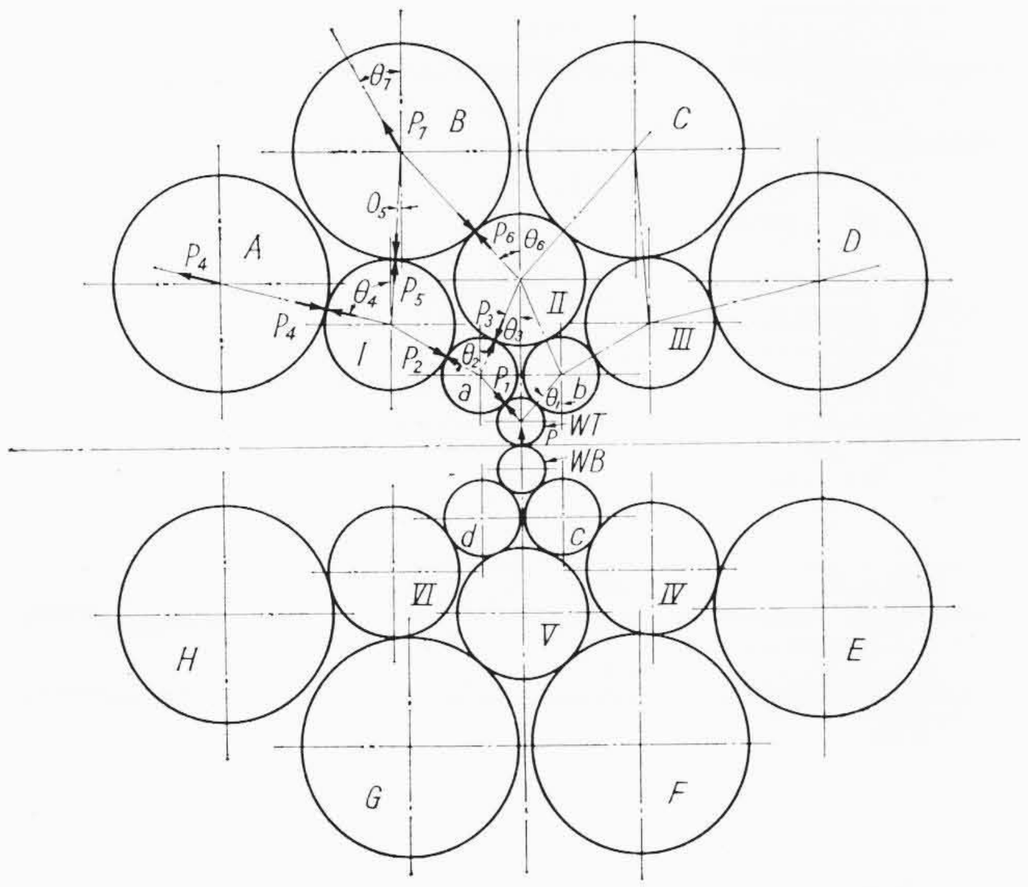
$$\delta_H=5.86\times10^{-5}P \quad \cdots\cdots(2)$$

δ_H：ロールハウジングの変形の作業ロール間げきへの換算量 (mm)（以下変形はすべて，作業ロール間げきへの換算値を示す）

P：圧延荷重 (t)（以下同様）

---

* 日新製鋼株式会社
** 日立製作所日立工場



第1図　ZR-21-50形センジマミルロール配置図

第1表　各ロールの接触角および作用角

接触個所	接触荷重	作用角
作業ロールと第1中間ロール間	$P_1=0.658P$	$\theta_1=40°30'$
第1中間ロールと第2中間駆動ロール間	$P_2=0.531P$	$\theta_2=59°30'$
第1中間ロールと第2中間中央ロール間	$P_3=0.233P$	$\theta_3=23°10'$
第2中間駆動ロールと支持ベアリングA間	$P_4=0.502P$	$\theta_4=78°20'$
第2中間駆動ロールと支持ベアリングB間	$P_5=0.173P$	$\theta_5=5°30'$
第2中間中央ロールと支持ベアリングB間	$P_6=0.281P$	$\theta_6=40°20'$
支持ベアリングBの軸受荷重	$P_7=0.420P$	$\theta_7=20°50'$

（2）　支持ベアリング軸

$$\delta_T=10.46\times10^{-5}P \quad \cdots\cdots(3)$$

（3）　支持ベアリングサドル

$$\delta_{sd}=7.7\times10^{-5}P \quad \cdots\cdots(4)$$

（4）　圧下装置

$$\delta_s=1.84\times10^{-5}P \quad \cdots\cdots(5)$$

（5）　各ロールの接触部

$$\delta_R=197\times10^{-5}P-10.7\times10^{-5}P\ln P \quad \cdots\cdots(6)$$

（6）　作業ロール間げきの変化

$$\delta=\delta_H+\delta_T+\delta_{sd}+\delta_s+\delta_R$$
$$=2.23\times10^{-3}P-10.7\times10^{-5}P\ln P \quad \cdots\cdots(7)$$

（7）　バネ常数の理論値

センジマミルのバネ常数は(1)式より

$$K=\frac{dP}{d\delta}=\frac{1}{2.12\times10^{-3}-10.7\times10^{-5}\ln P} \quad \cdots\cdots(8)$$

(8)式より求めたKの値を**第3図**に示す。

3.1.2　センジマミルのバネ常数の実験

圧延機のバネ常数は，(1)式で定義されている。圧延後の圧延材の弾性復元は，その板厚に比べてきわめて小さいから，これを無視すると，ロール間げきの変化，すなわち，圧延機の伸びは，圧下装置を動かさない場合次式で示される。

$$\Delta C=(\delta)=h-C_0 \quad \cdots\cdots(9)$$

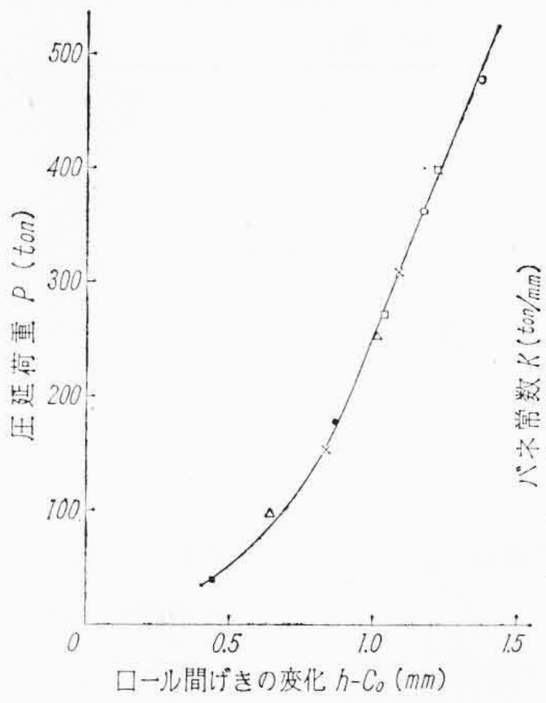
h：圧延材の出口板厚　(mm)

C_0：圧延前のロール間げき　(mm)

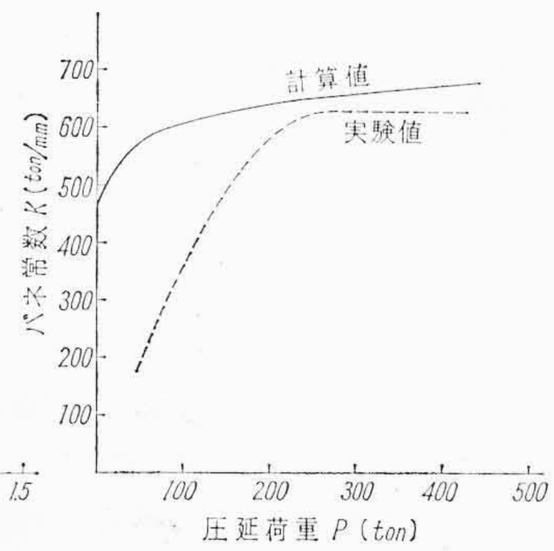
したがって，(1)式より次式が成立する。

$$P=K(h-C_0) \quad \cdots\cdots(10)$$

すなわち，$h-C_0$と圧延荷重とがわかれば，バネ常数Kが求まる。



第2図　ロール間げきの変化と圧延荷重の関係



第3図　バネ常数の計算値と実験値の比較

第2表　バネ常数の実験データー

No.		入口板厚 (mm)	出口板厚 (mm)	圧下量 (mm)	圧下率 (%)	平均変形抵抗 (kg/mm²)	圧延荷重 (t)
1	1	1.978	1.625	0.353	17.8	43.6	177
	2	1.239	1.198	0.041	3.3	28.8	41
2	1	1.981	1.316	0.665	33.6	51.1	308
	2	1.264	1.059	0.205	16.2	42.8	165
3	1	1.991	1.485	0.506	25.4	47.2	252
	2	1.222	1.114	0.108	8.9	37.2	97.5
4	1	1.989	0.750	1,429	62.8	61.6	478
	2	1.269	0.550	0.719	56.9	60.0	362
5	1	1.987	1.021	0.966	48.8	57.4	401
	2	1.269	0.830	0.439	34.6	51.4	271

（1）　実験方法

センジマミルでは，圧延前のロール間げきC_0の絶対値を求めがたいので，段付板を圧延し，圧延荷重と出口板厚を求め，あるロール間げきC_0に対して，各2種のPとhの関係を求め，**第2図**のように$h-C_0$とPの関係を得た。バネ常数はこの曲線のこう配として求められる。

この結果を**第3図**に示す。

（a）　圧延条件

圧延材　軟鋼焼鈍材

圧延速度　約10 m/min

張力　なし

潤滑条件　ソリュブル油スプレイ

（b）　測定法

板厚　マイクロメータによる

圧延荷重　センジマミルであるから，ロードセルなどによって直接測定できないために，圧延材（圧延前の）より抽出したテストピースより材料の拘束変形抵抗を測定し，これにより圧延荷重をBland & Fordの式を用いて計算した。

3.1.3　検討

（1）　理論計算と実験結果との比較

第3図に圧延荷重とバネ常数の関係を，それぞれ計算値，および実験値について示したが，これをみると，実験値では圧延荷重の小さい間はバネ常数も低く，約200 t 以上では，ほぼ一定となっている。この傾向は，われわれがすでに行なった四重圧延機の

第3表　センジマミルの各部の変形の割合

部品名	変形の割合（%）
ロールハウジング	3.6
支持ベアリング軸	6.5
支持ベアリングサドル	4.5
圧下装置	1.1
ロール接触部	84.3
合計	100.0

第4表　四重圧延機の各部の変形の割合

部品名	変形量の割合（%）
ロールハウジング	14.8
ロールのたわみ	20.1
ロールの接触部	19.3
圧下ネジ	3.7
圧力測定用バー	5.5
スラストメタル	32.3
そのほか	4.3
合計	100.0

バネ常数の実験の場合にもみられたもので，バネ常数の一般的傾向である。この圧延機の標準スケジュールでは，圧延荷重は200 t以上と考えられ，この場合バネ常数は大略一定とみなしうる。圧延荷重200 t 以上では，実験値と計算値との相違は，約5% 以下であり，ほとんど一致していると考えてさしつかえない。

（2）　センジマミルのバネ常数と四重圧延機のバネ常数の比較

第3表に圧延荷重が300 t の場合の各部の変形の割合を，**第4表**に四重圧延機の各部の変形の割合[1]を示す。特に顕著なのは，センジマミルでは，ロールハウジングの変形の占める割合が少なく，その反面ロールの接触変形の割合が大きく，変形の大部分を占めている。これはロールの数が多く，したがって接触部も多いので，当然のことと考えられる。ロールの変形が，圧延機の変形の大部分を占めているから，これを求めれば，バネ常数のおよその見当がつく。また，ロールの配置の関係により，支持ベアリングの外径が定まれば，その他のロール径も定まってくる。したがってセンジマミルのバネ常数は，支持ベアリング外径の関数として，次式で近似的に示される。

$$K=\frac{cL}{a+b\ln D} \quad \cdots\cdots(11)$$

a, b については計算により，c については実験結果よりその値を求めて次式が得られる。

$$K=\frac{L}{0.56+0.27\ln D} \quad \cdots\cdots(12)$$

ただし　K：バネ常数（t/mm）

L：作業ロール面長（mm）

D：支持ベアリング径（mm）

四重圧延機のバネ常数は，次式で示される[1]。

$K=0.3D$

D：補強ロール径（mm）

このセンジマミルと同程度の能力を持つ四重圧延機では，$D=1{,}240\,\phi\sim1{,}420\,\phi$mm 程度であり，したがって $K=370\sim420$ t/mm となる。この結果，センジマミルのバネ常数は，四重圧延機のそれの約 1.5 倍であることがわかる。

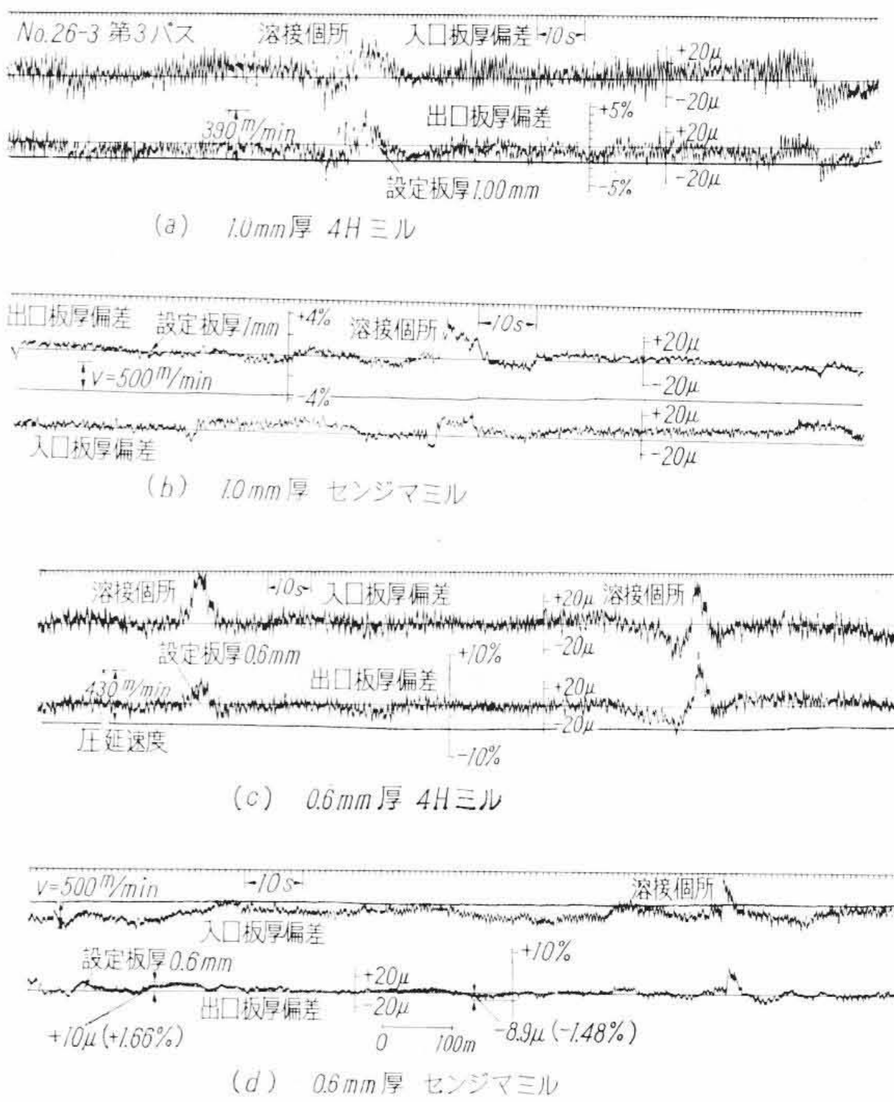
3.2　長手方向の板厚精度の測定

3.2.1　測定方法

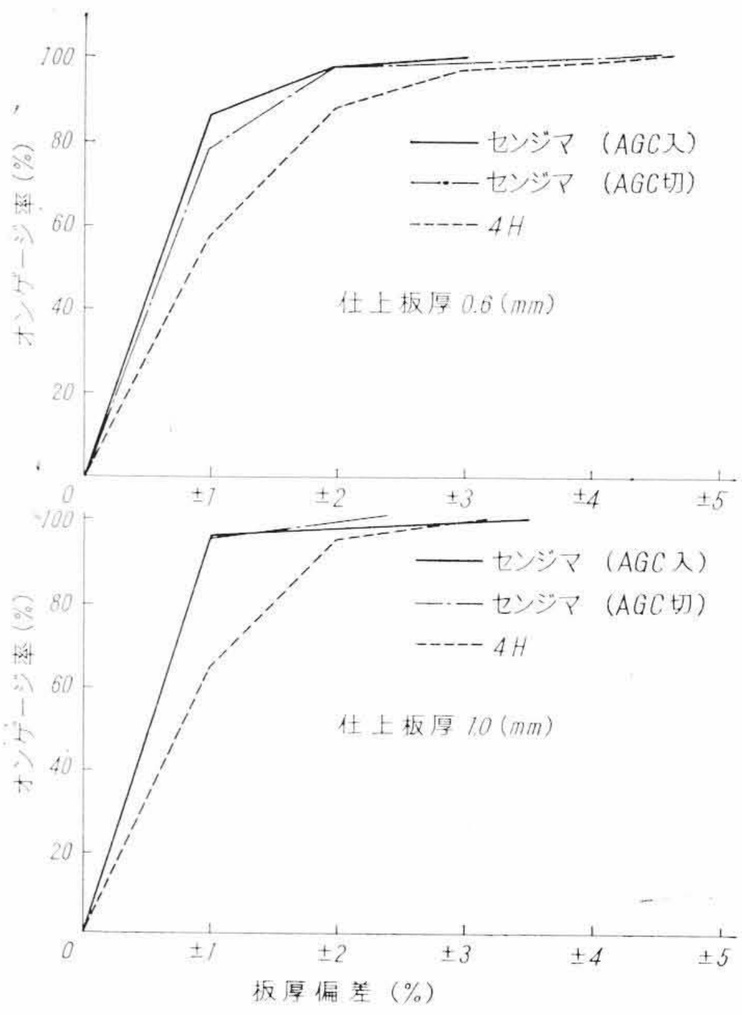
圧延機に付属しているPratt & Whitney製のフライングマイクロメータより信号を取り直流増幅器を経て，電磁オシログラフに記録した。

3.2.2　測定結果およびその検討

板厚偏差を記録したオシログラムを**第4図**に，オシログラムより読み取った板厚偏差とオンゲージ率との関係を**第5図**に示す。**第5図**より板厚0.6～1.0 mm の場合，板厚偏差を ±1% 以内におさえるとセンジマミルは，オンゲージ率が100% に近いのに対して四重圧延機ではオンゲージ率は65% 程度である。これらの結果により，センジマミルで圧延した製品精度は，四重圧延機で圧延した製品と比較するときわめて優秀であることがわかる。また



第4図　センジマミルと四重圧延機の長平方向の板厚精度

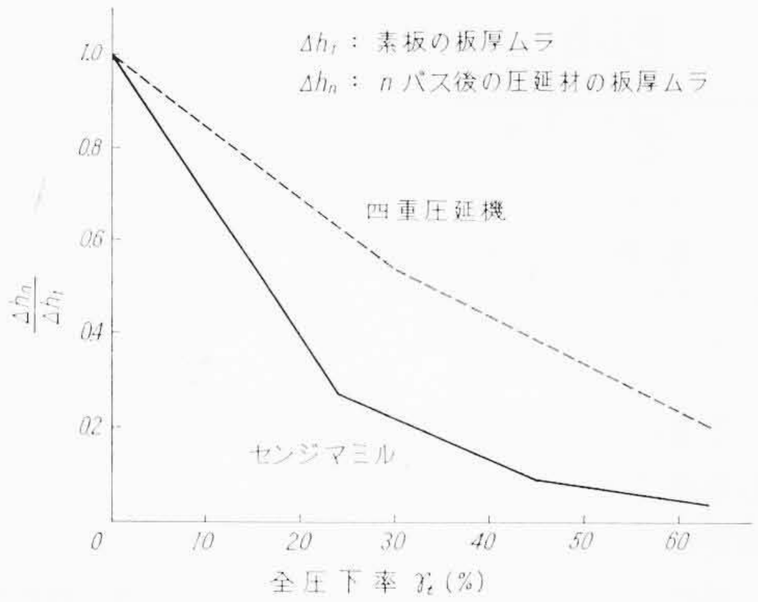


第5図　板厚偏差とオンゲージ率の関係

センジマミルの場合も，四重圧延機の場合も周期的な板厚の変動がみられ，特に四重圧延機の場合著しい。これはロールの偏心のためと考えられる。以下材料の板厚むらの影響，ロールの偏心の影響について調べてみる。

（1）　材料板厚むらの影響

すでに発表されている[1]ように，素材に板厚のむらがある場合，圧延機の剛性度が高いほど，また作業ロール径が小さいほど板厚むらの矯正能力が大きい。板厚むらの減少率をさきに示したオシログラムの製品板厚 1.0 mm の場合について計算した結果を**第6図**に示す。この図では同じ材料を圧延した場合センジマミルの製品の板厚むらは四重圧延機の5分の1程度となっているが，実際には，ロールの偏心などの影響のため，計算結果より板厚むらは大きくなり，2～3分の1程度になっている。



（外乱として材料の板厚ムラのみを考えたばあい）

第6図　板厚ムラの減少率曲線

（2）　ロールの偏心の影響

軸受の偏心がそのまま回転時の振れとなり，周期的な板厚変動を起こす。

四重圧延機の場合ロールの偏心によるロール間げきの変化は次式で示される。

$$\left.\begin{aligned}\delta_e &= e_1 \sin \omega_1 t + e_2 \sin(\omega_2 t+\theta) \\ &= \sqrt{e^2{}_1+e^2{}_2+2\,e_1 e_2 \cos\{(\omega_2-\omega_1)t+\theta\}}\sin(\omega_1 t+\beta) \\ \beta &= \tan^{-1}\frac{e_2 \sin\{(\omega_2-\omega_1)t+\theta\}}{e_1+e_2\cos\{(\omega_2-\omega_1)t+\theta\}}\end{aligned}\right\} \quad \cdots\cdots(13)$$

ただし e_1, e_2：　上下各ロールの偏心量　(mm)

ω_1, ω_2：　上下各ロールの角速度　(rad/s)

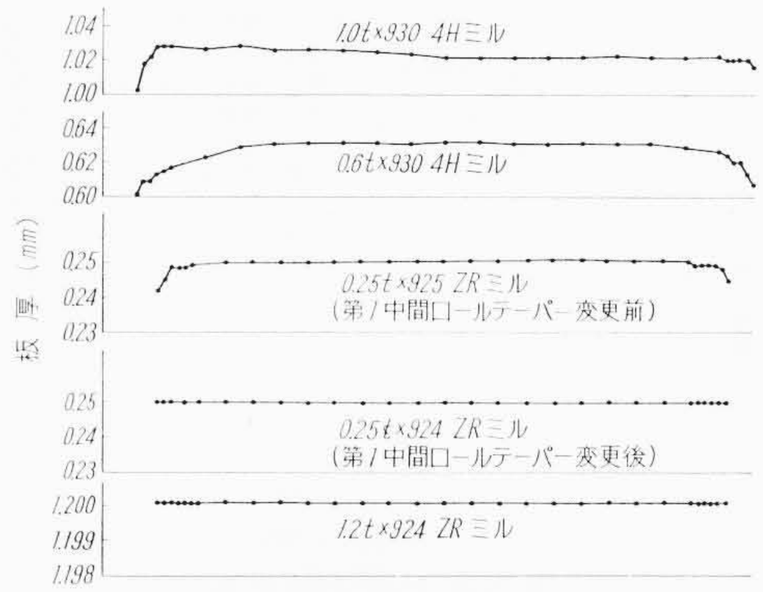
$\omega_1 \neq \omega_2$ の場合，すなわち，上下補強ロール径が異なる場合は，上式はいわゆるうなりの式となる。四重圧延機の板厚偏差の記録を見ると明らかにうなりの現象がみられる。測定時の補強ロール径は，上ロール径 1237.61 ϕmm，下ロール径 1208.85 ϕmm であった。これより偏心による板厚のうなりの周期を求めると計算値と実測値はよく一致する。このことは四重圧延機の場合のこの板厚偏差は明らかにロールの偏心によるものだということを示している。センジマミルの測定結果にも，ロールの偏心（この場合は支持ベアリングの偏心や各ロールの真円度）のためと判断される周期的な板厚変動がみられるが四重圧延機に比しかなり小さい。センジマミルのように，小径作業ロールを有し，しかもバネ常数の大きいものは圧延機の誤差が板にうつる割合が大きいが，多数の小形のベアリングを採用することにより，誤差の絶対値を小さくするとともに相互に打ち消し合う機会を多くし，この欠点をさけているため変動が小さくなるものと考えられる。

（3）　AGC の 効 果

今回の測定結果では，AGC をかけた場合，顕著な板厚精度の改善はみられない。これは，センジマミルのように剛性度の高い圧延機では，ミル自身の板厚むら矯正能力が高く，あとには AGC では除去困難なロール偏心の影響が残るからと考えられる。しかし AGC を用いることによって，四重圧延機に比し比較的高級な圧延技術を必要とするセンジマミルの操作を楽にするという意味で著効がある。

3.3　幅方向の板厚精度

圧延後の板の幅方向の板厚分布を測定した結果を**第7図**に示す。幅方向板厚調整の困難な四重圧延機に対し，アズユーロールおよび第一中間テーパロールの軸方向調整機構を有するセンジマミルのもっともすぐれた面がこの図より明らかに見いだされる。特に注目すべきことは，普通のミルではどうしても避けられないエッヂ効果（ストリップの両端部が急激に薄くなる現象）が第一中間ロールの適正な使用により完全に消滅していることである。このことは，単に



第7図　幅方向板厚精度の比較

第5表　最大圧下量測定結果

実験 No.	入口板厚 H (mm)	すべり限界出口板厚 h (mm)	最大圧下量 Δh_{max}	圧延速度 v (m/min)	入口張力 T_1 (kg/mm)	出口張力 T_2 (kg/mm)
1	2,150	1.34	0.81	100	25.9	18.1
2	2,150	1.28	0.97	200	25.9	18.1
3	2,150	1.45	0.70	250	25.9	18.1
4	2,150	1.52	0.63	230	25.9	18.1
5	2,150	1.60	0.55	300	25.9	18.1

板幅　930 mm

第6表　圧延スケジュールの一例

パス No.	入口板厚 H (mm)	出口板厚 h (mm)	圧下量 Δh (mm)	圧延速度 v (m/min)	入口張力 T_1 (kg/mm)	出口張力 T_2 (kg/mm)
1	4.00	3.30	0.70	300	0	34.0
2	3.30	2.67	0.63	500	17.4	30.3
3	2.67	2.10	0.57	500	15.1	24.2
4	2.10	1.60	0.50	500	13.6	22.7

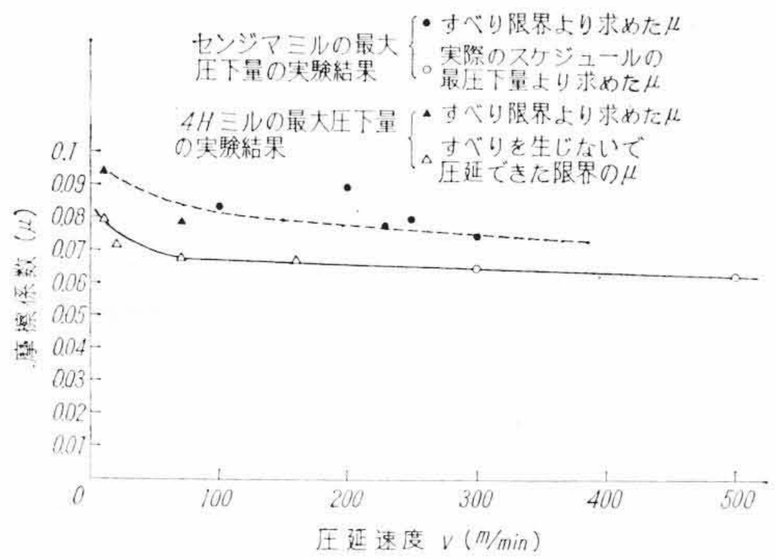
板幅　740 mm

精度と歩留りの向上のみに止まらずストリップのフラットネスの改善にも大いに関係があると考えられる。事実，数値的比較は行なっていないが，0.15 mm の薄物をフルハードで切断した結果では，きわめてフラットネス良好な板を製造できた。

4.　圧延可能な最大圧下量

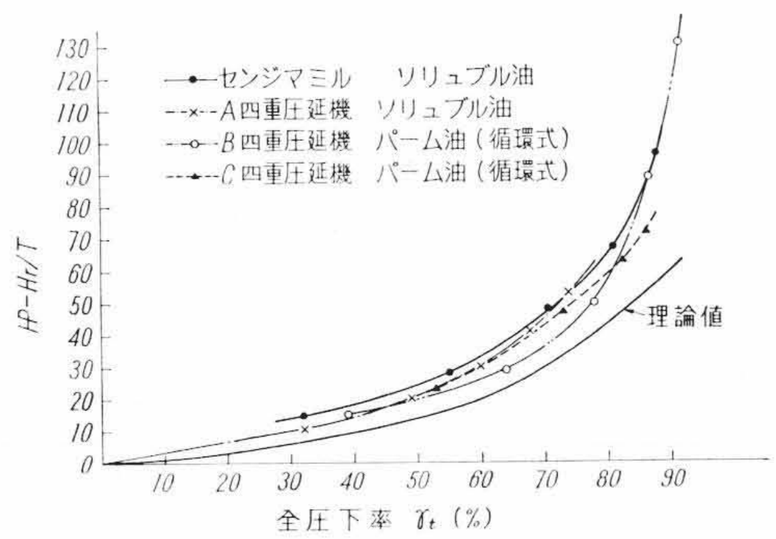
センジマミルは，その作業ロール径が小さいために，かたい圧延材を薄く，しかもよい精度で圧延できることを特長としているが，その反面，1パスでかけうる最大圧下量が小さいという欠点を持っている。ステンレス鋼のようにかたい材料では，材料の性質，強度，動力などの点からも制限されるので，このような限界はあまり問題とならない。しかし軟鋼のように，比較的軟かい材料を能率よく圧延するためには機械の強度，動力が許す範囲で，できるだけ大きな圧下量をうることが望ましい。また能力上四重圧延機に対抗するために，圧延速度を上げる必要がある。後に示すように，最大圧下量は摩擦係数の2乗に比例するから圧延速度の上昇とともに摩擦係数が減少すると，ますます圧下量が減少し，それによりパス回数を増す必要を生じ，最初の目的とは逆の結果を生じる。このようにセンジマミル，特に軟鋼圧延用センジマミルでは，最大圧下量は大きな問題となってくる。今回センジマミルで最大圧下量を実験的に求めた。実験は所要の圧延速度になってから徐々に圧下を加えてゆき，圧延限界に到達すれば，そのときの板厚を測定し，最大圧下量を求めた。圧延限界の判定は，ロールと圧延材の間のすべりによる騒音，およびすべり傷の発生によって行なわれた。この結果を**第5表**に示す。**第6表**は圧延スケジュールの一例を示したものである。最大圧下量は次式で示される[3]。

$$\Delta h_{max} = \left\{2\,\mu^2 - \frac{(T_1-T_2)\eta_f}{(S_0-T_1/h_1)R} + 2\,\mu\sqrt{\mu^2-\frac{(T_1-T_2)\eta_f}{(S_0-T_1/h_1)R}}\right\}R \quad \cdots\cdots(14)$$



（最大圧下量より算出）

第8図　圧延速度と摩擦係数



第9図　冷間圧延のエネルギーカーブ

Δh_{max} は既知であるので，逆にこの式より摩擦係数 μ を求めて実験結果を一般化すると

$$\mu^2=\frac{1}{4R\Delta h_{max}}\left\{\Delta h_{max}+\frac{(T_1-T_2)\eta_f}{S_0-T_1/h_1}\right\}^2 \quad \cdots\cdots\cdots\cdots(15)$$

ただし　Δh_{max}：最大圧下量　(mm)
h_1：入口板厚　(mm)
T_1：単位板幅に対する入口張力　(kg/mm)
T_2：単位板幅に対する出口張力　(kg/mm)
S_0：圧延材の変形抵抗　(kg/mm^2)
η_f：変形効率
R：作業ロール半径　(mm)

第5，6表の場合について求めた摩擦は**第8図**に示すとおりである。**第8図**において破線は，これ以上圧延できないという圧延限界の下限を示し，実線はここまで圧下を加えても圧延できたという圧延可能域の上限を示している。真の限界はこの両者にはさまれた区域にあると考えてよい。

センジマミルで問題なく圧延している最大圧下量は，この圧延機で $\Delta h_{max}=0.7\sim0.8$ mm 程度である。一方この程度の能力を持つ四重圧延機では，動力その他の制限で 0.8～1.0 mm 程度と考えられ，センジマミルはこれより若干小さい。しかし材料が加工硬化しても大きな圧下をかけ得るので材料が 2～3 mm 厚の場合 2～3 パス以後はセンジマミルが大きな圧下をかけうると考えられる。なお，圧延速度と摩擦係数の関係が，今まで発表されている圧延荷重より逆算した結果とは一致しない。一般に圧延中の摩擦係数は各算出方法によりかなり異なり，決定的なものはないが，今回と同様のスリップ現象より求めた結果と本結果とはよく一致しているので，最大圧下量を求める場合は，この摩擦係数の値を用いればよいと考える。

5. 消費動力の比較

一般に，センジマミルの消費動力は，四重圧延機のそれと比較すると小さいと考えられている。これはわれわれにとって大いに興味ある事がらなので，圧延中の消費動力を，センジマミル，四重圧延機について測定し，エネルギーカーブの形として，整理したのが**第9図**である。図によると，センジマミルは四重圧延機と同程度，または，パーム油をロールクーラントに使用した四重圧延機の例と比較すると，板厚の厚い所では，若干大きくでている。実際圧延を行なうに必要な正味の仕事はロール径に無関係であるが，ロール径による変形効率の相違，ロールクーラント，その他機械的損失により各種の場合に違いを生じてくる。センジマミルは，作業ロール径が小さいので，変形効率は大きい。また，支持ベアリングに作用する荷重は，圧延荷重の2倍（**第1表**参照）になるが，圧延荷重の絶対値が四重圧延機のそれの約 1/3～1/4 であるので，軸受荷重は，四重圧延機の 2/3～1/2 となる。この点からは，四重圧延機より消費動力が小さいとみられるが，その反面，軸受の数が多く，また，多くの円筒が接触しているので，これらの接触による損失が大きいと考えられ，したがってこれらの影響を合計すると，結果としては，センジマミルの消費動力も，四重圧延機のそれと同程度，または，パーム油などの潤滑性のよい油をロールクーラントに用いた四重圧延機より大きくなることもありうるわけである。以上により，センジマミルの消費動力は，仕上板厚が，0.4～0.6 mm 程度以上の場合では，必ずしも四重圧延機より小さいとはいえない。

第7表　センジマミルと四重圧延機のロール組替の比較

圧延機	所要時間	組替法
センジマミル	1分以内	人力のみ，道具不要
四重圧延機	10～15分	クレーンおよびポーターバー入要

6. 操業上の特長

これまでセンジマミルの圧延機としての特性について述べてきたが，次に，操業上からみたセンジマミルの得失について述べてみる。

（1）作業ロールの交換

センジマミルと四重圧延機との比較を**第7表**に示す。

表に示したように，センジマミルでは，ロール組替がきわめて簡単である。したがって最終パスごとにロールを交換できるために，常に表面状態のすぐれた板が得られる。

（2）非常保護装置

板切れなどの非常事故に対しては，板切れスイッチと連動して，急速圧下上昇が行なわれ，油圧によりロール間げきが急速に開くので，高速圧延時ですら，板切時の絞り込みがなく，安全に運転できる。また，板切時の板の送出量が小さいので，板の損失が小さい。

（3）圧下装置

強圧下がかけられ，また，圧下の速応性がよい。したがってコイルエンドの厚い部分を強圧下されるため歩留りが向上する。

（4）スラストが小さい

このために，サイドガイドの摩耗が小さく，経済的。

（5）圧延油

ロール径が小さいのでパーム油を使用しなくても，薄い板が得られる。このために，圧延油に要するコストが安くてすむ。またソリュブル油ではスカムが少なく，圧延油の管理が，パーム油を使用する場合に比べて容易である。以上利点を列挙したが，欠点としては材料の欠陥に対して敏感であるので運転技術が，むずかしく習得するまで比較的時間がかかることがあげられる。

第8表　薄　板　の　圧　延　限　界

	W-ROLL (mm)	圧延速度 (m/min)	潤滑条件	μ	全圧下率 (%)	S_0 (kg/mm²)	δ_t (kg/mm²)	h_{min} 計算値 (mm)	測定値 (mm)
テスト（1）	130	20	パーム油塗布	0.08	76.5	83	0	0.069	0.070
テスト（2）	130	180	パーム油塗布	0.039	82.5	87	0	0.035	0.035
4H	480	1,220	パーム油＋水	0.018	50	70	15	0.038	
ZR	86	1,220	ソルブル油	0.045	50	70	15	0.017	

7. 極薄ブリキ圧延用としてのセンジマミルと四重圧延機

近時アルミニウム工業の急速な発展，その他の工業材料の開発により，特に容器用素材としてのブリキ板の利用分野は侵食されつつあり，すでにアメリカでは，アルミニウムはビール，油，果汁などの容器の材料として確固たる地位を築きつつある。これに対抗するため，アメリカでは，従来のブリキ板よりさらに薄く，しかもかたい，いわゆる極薄ブリキを生産し，低廉なブリキを供給しようとしており，すでに，極薄ブリキ専用の圧延設備が数基稼動を開始している。このようなすうせいは，わが国にも敏感に取り入れられ，各鉄鋼メーカーとも真剣にこの問題を検討している段階である。

現在アメリカで行なわれている方法は，2～3スタンドタンデムミルで圧延している例が多く，センジマミルを使用しているのは一例のみであるが，センジマミル，四重圧延機のいずれが有利であるかはむずかしい問題であり，結論を出すのは早計であるが，この機会にこの問題について検討してみることにする。

7.1　薄板圧延の可能性について

普通のブリキ板の厚みは，0.2～0.36 mm 程度，極薄ブリキについては明確な規定はないが，大略 0.2～0.076 mm と称している。したがって当然圧延可能な最小板厚の限界が問題となる。

M. D. Stone によれば最小板厚は次式で示される[4]。

$$h_{min}=\frac{3.58\,\mu D(S_0-\sigma_t)}{E} \quad \cdots\cdots(16)$$

ただし　h_{min}：最小板厚（mm）

D：作業ロール径（mm）

S_0：圧延材の拘束変形抵抗（kg/mm²）

σ_t：入口，出口張力の平均値（kg/mm²）

μ：ロールと圧延材の間の摩擦係数（第10図参照）

E：ロール材のヤング率（kg/mm²）

鋼製ロールについては

$$h_{min}=17\,\mu D(S_0-\sigma_t)\times10^{-3} \quad \cdots\cdots(17)$$

となる。一方われわれの行なった実験結果では，Stone の式より求めた値の約 1/2 板厚まで圧延可能であることがわかった。これにより，最小板厚の式を求めると(18)式で示される。

$$h_{min}=8\,\mu D(S_0-\sigma_t)\times10^{-3} \quad \cdots\cdots(18)$$

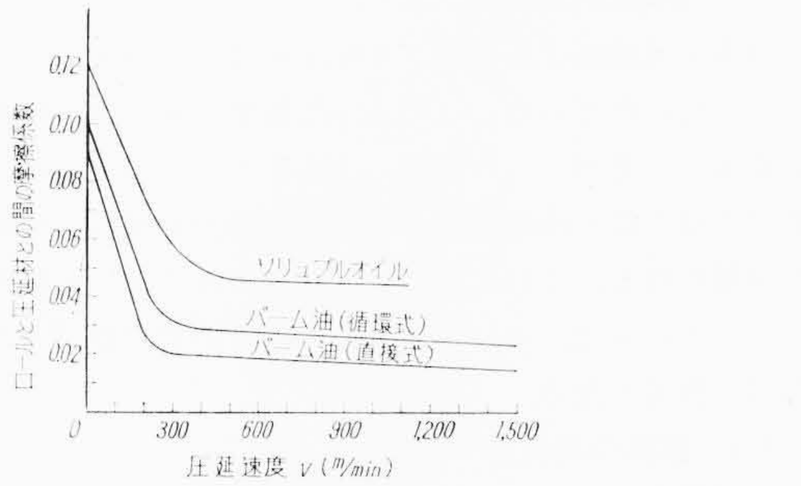
実験結果，および(18)式によるセンジマミルと四重圧延機の比較を第8表に示す。この値は計算上最小値であるから，実用上安全をみても極薄ブリキが 0.076 mm 程度以上の場合は，センジマミルにしなければならない理由はない。

7.2　最大許容速度

前述のように，極薄ブリキは主としてコスト引き下げの要請から生まれたものであり，そのためには，できるだけ圧延速度を速くする必要がある。アメリカの例では，1,400～1,700 m/min の高速となっている。四重圧延機の場合は，特に問題ないが，センジマミルではロール冷却の問題，支持ベアリングが，主として速度増加の障害となると考えられる。

7.2.1　ロール冷却の問題

センジマミルは，小径ロールのために，ロールの冷却が特に問題になるといわれている。このために圧延速度がどこでおさえられるか検討してみる。作業ロールの表面温度の理想最大温度は，種々の圧延状態より大略 100℃ 前後と考えられる。桑原氏らの実測[5]によると 100℃ 以下という結果がでている。ロールに与えられる熱量は，圧延によって高温となったストリップからの熱伝導によるものと，ロールとストリップの摩擦作用による発熱である。この両者を比較するために，かなり乱暴な推定であるが，ロールの表面温度を 100℃，ロールとの接触部におけるストリップの平均温度 150℃（入口で 30℃，出口で 200℃ と推定される）摩擦熱はロールとストリップに平等に伝わると仮定すれば，1秒当たりロールに伝わる熱量 Q は



（M.D.Stone 氏による）

第10図　圧延速度と摩擦係数

$$Q=\lambda LB\,\Delta\theta+\frac{1}{4}\left(\frac{1}{\eta_f}-1\right)N_e\times\frac{102}{427} \quad \cdots\cdots(19)$$

ここに　λ：ロールとストリップの熱伝導率

0.18×10^{-3} (kcal/cm²cs)

L：ロールとストリップの接触弧長（cm）

B：板幅（cm）

$\Delta\theta$：ロールとストリップの平均温度差

N_e：正味圧延動力（kW）

η_f：変形効率

今，板厚 0.3 mm，板幅 1,050 mm の完全焼鈍鋼を 1,220 m/min の圧延速度で 0.15 mm に圧延する場合について検討すると，作業ロール半径を 43 mm とすれば

$$Q=0.283+28.8\ \text{kcal/s}$$

となる。すなわち，ストリップからの熱伝導は，摩擦による発熱量に比して，きわめて小さく無視することができる。したがって，変形効率が等しければ，ロールに加わる発熱量は圧延動力に比例すると考えて大きなまちがいはないと思われる。変形効率は $\mu\sqrt{R/h_2}$ の値で左右されるが，パーム油を用いた，四重圧延機とソリュブル油を用いたセンジマミルとでは，その値は第7表の条件下では，それぞれ 0.76，0.72 と大差なく，この場合，四重圧延機とセンジマミルも変形効率は同程度と考えてよい。

現在日新製鋼株式会社で，このセンジマミルの主電動機が定格出力を出して，ロールの冷却に問題を生じていないから，この結果より，0.3 mm から 0.15 mm 厚の極薄ブリキを圧延しうる最高の圧延速度は，圧延動力の式より V=1,700 m/min となり一応十分な速度と考えられる。

7.2.2　支持ベアリング

センジマミルは支持ベアリングにころがり軸受を用いているので，寿命および許容速度が問題となる。現在までにこの820m/minのセンジマミルでは特別の問題は生じていない。さらに高速化に対してはベアリングメーカーとも詳細検討の必要があるが，現在の実績から推定して，これが致命的問題になるとは考えられない。

7.3　制御上の問題について

四重圧延機による極薄ブリキ圧延は，2～3スタンドタンデムミルで行なわれている。このように板厚が薄い場合張力制御の厳密性が要求されるが，この場合，No.2スタンドミルモータには，張力動力のほかに，圧延動力，軸受摩擦動力が加わるため，微細な制御が困難になる。これに対しセンジマミルでは，前後面は，テンションリールのみで，モータ出力の大部分が張力動力となるため，張力制御は容易となる。

7.4　製品の品質について

板厚精度については，すでに述べたようにセンジマミルが非常にすぐれている。このような薄物は板の平坦度を出すのがむずかしく，四重圧延機では主としてNo.1スタンドで大半の圧延を行ない，No.2スタンドで軽い圧下で板の平坦度を整える方法がとられている。センジマミルは1スタンドであるが，前述のように任意に調整しうるロールクラウン調整装置により，幅方向の精度がきわめてよい板が圧延できるので，この点は十分補うことができると考えられるが，今後具体的測定を行なう予定である。

7.5　設備費について

1台のスタンドですむこと，ロールクーラント装置が簡単であることなどの点より，センジマミルのほうがはるかに設備費が安くなり，かつ建屋も狭くてよく，運転費も安くてすむ。ただわが国においてはここしばらくは，極薄ブリキの需要が急激に伸びるとは思われないことから，2スタンドタンデムスキンパスミルとの兼用を考える傾向にある。

8.　結　　言

以上述べてきたことを要約すると次のようになる。

（1）　板　厚　精　度

（a）　センジマミルのバネ常数はZR-21-50形で約630 t/mmで，その変形の大部分はロールどうしの接触部における偏平変形である。なおこれは同じ幅を有する四重圧延機の1.5倍以上のバネ常数であり，小径作業ロールと相まって，材料の厚みむらの矯正能力は，格段に大きい。

（b）　長手方向の板厚偏差については，ローラベアリングを補強ロールネックベアリングに有する四重冷間圧延機で製品板厚0.6～1.0 mmのもので±2%以上の厚み偏差を生ずるのに対し，センジマミルでは比較的容易に±1%以内に収めることができる。

（c）　幅方向の板厚精度はきわめてよく，適正なクラウン調整，および第一中間ロールのテーパ調整によって，全幅にわたって完全に一様な製品をうることも可能であり，この点四重圧延機とは比較にならぬほどすぐれている。

（d）　センジマミル自体の固有の性能のためAGCにより精度そのものを大幅に向上せしめることは困難であるが，圧延操作がAGCのために大いに簡素化され，比較的むずかしいセンジマの圧延操作技術を楽にするのに大きな効果がある。

（2）　最　大　圧　下　量

センジマミルでの最大圧下量は研削仕上をした作業ロールを使用した場合およそ0.7～0.8mmであり，四重圧延機の0.8～1.0mmに対し若干少ない，しかしダルロールの使用により1.0 mm以上の圧下量が得られる。

（3）　消　費　動　力

今回の実例結果では，製品板厚0.3～0.4 mm程度までの全消費動力はセンジマミルも四重圧延機も同程度で，パーム油系統を四重圧延機で使用する場合は必ずしもセンジマミルの消費動力が小さいとはいえない。

（4）　操　　業　　性

（a）　作業ロールの交換が容易（1分以内）で最終パスごとに新しいロールを使用できるため，製品の光沢がすぐれている。

（b）　圧下が油圧作動で急速に行なわれるため高速圧延時でも板切れ検出で急速圧下開放により絞り込みを防止できるとともに，ストリップの進行が急停止するので歩留りがよい。

（c）　ホットコイルの先端後端のオフゲージ部分も強圧下によりオンゲージにすることが可能で歩留りが向上できる。

（d）　小径ロールのためのサイドガイドのスラスト荷重が小さくガイドの寿命がながい。

（e）　パームオイルを使用せずに薄物圧延ができるのでコスト的にまたオイルセラーの管理上も有利である。

（c）　欠点としては，材料の欠陥に対して敏感なため当初は圧延技術が四重圧延機に比しむずかしいことがあげられるが，AGCの採用により大いに軽減せられる。

（5）　極薄ブリキ圧延に対する適応性

圧延限界上特にセンジマにする必要はないが，四重圧延機との長短を比較すると次のとおりになる。

（a）　センジマミルの極薄ブリキ用としての長所

（i）　ソリュブルオイルで圧延可能なため経費および管理上有利。

（ii）　極薄のため板切れや絞り込みが発生しやすいが，センジマミルでは，シングルスタンドであるため制御困難なスタンド間張力がなく，また板切れの際油圧による急速ロール開きが可能である。

(iii)　四重式は2～3タンデムを必要とするがセンジマミルでは1スタンドでよく設備費が安い。

(iv)　常に新しい作業ロールを使用できるため表面光沢のすぐれた製品が得られる。

（b）　極薄ブリキ用センジマミルで今後さらに検討すべき点

（i）　センジマミルの高速性

小径ロールのため心配されるロール冷却の問題は少なくとも1,700 m/min程度までは今回の実績から見て問題ないと推定されるが，支持ベアリングの寿命その他，これだけの高速で問題ないとは言い切れずさらに検討を要する。

終わりにのぞみ，各種の測定にあたって終始ご協力いただいた冷延課原組長，電気課吉村班長，日立研究所堀氏そのほか圧延現場の各位に心から感謝する。

参　考　文　献

（1）　梶原：　日本機械学会日立地方講演会前刷集（昭35-10-19)
（2）　梶原，秦：　日本機械学会日立地方講演会前刷集（1961)
（3）　山本，梶原：　日立評論，圧延機特集号（1959)
（4）　M. D. Stone：　Journal of Tron & Steel Eng., Vol. 37, June (1961)
（5）　桑原，久能佐伯：　塑性と加工　Vol. 2 No. 9 (1961) および Vol. 3 No. 13 (1962)