

タンデム式冷間圧延機の運転特性

Operation Characteristics of the Tandem Cold Strip Mill

西 政 隆* 庄 山 悦 彦*
Masataka Nishi Etsuhiko Syōyama

内 容 梗 概

タンデム式冷間圧延機では、ストリップが全スタンドにまたがるため、張力変化、板厚変化はかなり複雑な様相を呈する。

製品板厚に与える電動機速度、圧下、母材板厚変動の影響につき、代表的な5スタンドの圧延スケジュールを例にして、数値計算を行なった。

これらより変動の伝播がはっきりし、また、第1、最終スタンドは圧延特性上特異性を有していることが、数値的にはっきりした。

1. 緒 言

タンデム式冷間圧延機の最終目的は、一定厚みで表面仕上り度の良好なストリップを高効率で生産することであり、最近では35 m/sの圧延機が運転している。タンデム式冷間圧延機では加減速中ならびに定速運転中を通じて常に圧延ストリップが全スタンドにある一定の張力をもってまたがっており、その張力変動はストリップ厚みに重大な影響を与えるので、各スタンド間張力を一定に保たねばならず、また加減速時間を極力短くし、高速運転するために、各スタンド駆動の直流電動機速度特性、その速度制御装置の特性、圧延機とロールの弾性特性あるいは圧延現象そのものの特性などはそのタンデム式冷間圧延機の総合性能を決定する重要な要素となる。

ここに代表的な5スタンドの圧延スケジュールにつき、文献⁽¹⁾の計算を進展させ圧延現象の理論的解析および電動機に要求される諸特性につき検討を行なったので以下に報告する。

2. 圧延現象における板張力変動の自動除去作用

圧延中の板厚に変動を与える諸因子としては、ストリップの塑性特性から影響されるものと、スタンドの弾性特性から決まるものがある。前者には素材の板厚変動、スタンド前後面張力の変動、摩擦係数の変動、圧延材質のむらなどがあり、後者には圧下の変動、ロールの変形などロールの間げき変動によるものがある。

これらのうち、摩擦係数の変動とか、圧延材のかたさのむら、ロールの変形などは一応無視して、出入口板厚変動、張力変動および圧下変動に対して、圧延圧力および中立点板厚がどのように変動するかを、さらにこれにスタンド電動機速度変動も加えて検討することにする。

Bland-Ford などの圧延圧力の式より、おのおのの変動分が十分に小さな場合には、次の式が導き出される(第1図)。

$$\Delta F = K_1 \Delta h_0 + K_2 \Delta T_i + K_3 \Delta T_0 + K_4 \Delta h_i \dots (1)$$

$$\Delta h_n = K_5 \Delta h_0 + K_6 \Delta T_i + K_7 \Delta T_0 + K_8 \Delta h_i^{(1)} \dots (2)$$

一方、ロールおよび圧延機の弾性の条件より

$$\Delta F = m \Delta h_0 - n \Delta s \dots (3)$$

ここで、 ΔF : 圧延圧力の変動の割合

Δh_0 : あるスタンド出口の板厚の変動の割合

Δh_i : そのスタンドにはいる板厚の変動の割合

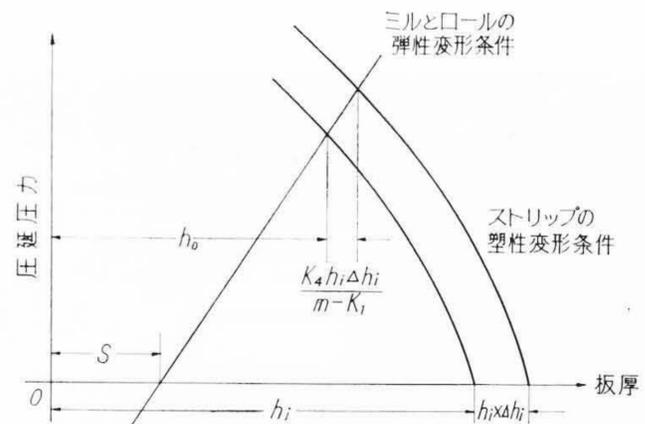
ΔT_i : 入口張力の変動の割合

ΔT_0 : 出口張力の変動の割合

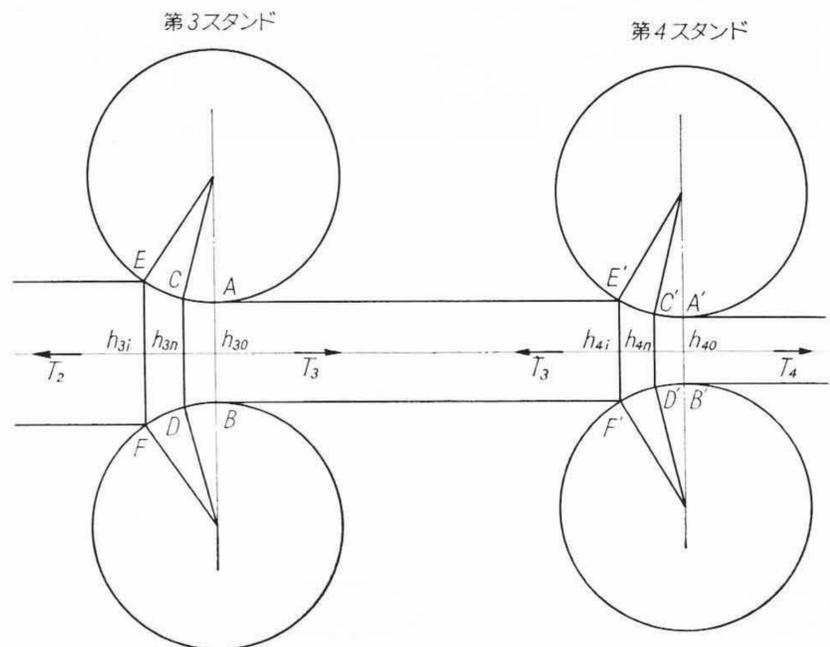
Δh_n : 中立点における板厚の変動の割合

Δs : 圧下の変動分 単位 mm

* 日立製作所日立工場



第1図 ストリップ塑性変形条件と圧延機の弾性変形条件



AB, A'B': ストリップ出口点
CD, C'D': 中立点
EF, E'F': ストリップ入口点

第2図 圧 延 現 象

$K_1 \sim K_8, m, n$: スケジュールによりきまる定数 (第1表)

(1)および(3)式より

$$\Delta h_0 = \frac{K_2}{m - K_1} \Delta T_i + \frac{K_3}{m - K_1} \Delta T_0 + \frac{K_4}{m - K_1} \Delta h_i + \frac{n}{m - K_1} \Delta s \dots (4)$$

また(2)と(4)式とから

$$\Delta h_n = \left(\frac{K_2 K_5}{m - K_1} + K_6 \right) \Delta T_i + \left(\frac{K_3 K_5}{m - K_1} + K_7 \right) \Delta T_0 + \left(\frac{K_4 K_5}{m - K_1} + K_8 \right) \Delta h_i + \frac{n K_5}{m - K_1} \Delta s \dots (5)$$

第1表 代表的5スタンド・タンデム冷間圧延機の
圧延スケジュール⁽¹⁾

スタンド	1	2	3	4	5
入口板厚 (mm)	2.3	1.6	1.0	0.59	0.36
出口板厚 (mm)	1.6	1.0	0.59	0.36	0.20
入口張力 (kg/mm ²)	0	7.0	10.5	10.5	10.5
出口張力 (kg/mm ²)	7.0	10.5	10.5	10.5	6.3
圧延圧力 (t)	1,060	1,190	1,240	1,270	1,200
中立点板厚 (mm)	1.70	1.06	0.625	0.381	0.218
圧延回転力 (t-m)	11.1	11.8	9.1	6.1	4.2
K_1	-2.488	-1.336	-1.204	-1.368	-1.275
K_2		-0.112	-0.171	-0.186	-0.206
K_3	-0.072	-0.081	-0.080	-0.100	-0.06
K_4	2.484	0.782	0.643	0.477	-0.002
K_5	0.886	0.916	0.909	0.892	0.909
K_6		-0.013	-0.017	-0.014	-0.016
K_7	0.012	0.017	0.013	0.011	0.007
K_8	0.097	0.046	0.048	0.062	0.028
K_9	-3.507	-2.007	-1.799	-2.019	-1.801
K_{10}		-0.122	-0.170	-0.166	-0.170
K_{11}	-0.034	-0.031	-0.031	-0.034	-0.025
K_{12}	4.205	2.152	2.066	2.170	1.744
K_{13}		0.32	0.26	0.23	0.20
K_{14}	-0.23	-0.20	-0.15	-0.14	-0.07
m	1.07	0.60	0.34	0.20	0.12
n (1/mm)	0.67	0.60	0.58	0.56	0.60
s (mm)	0.1	-0.67	-1.13	-1.43	-1.47

各スタンドとも圧延機とロールの総合弾性係数は715 t/mmとする。

となる。一方塑性変形中は比重の変化はなく、ロールの下の塑性変形部分では質量流れが一定であることより、(vは各点の速度)

$$v_i \cdot h_i = v_n \cdot h_n = v_0 \cdot h_0 \dots\dots\dots (6)$$

微小部分をとれば、次式がえられる。

$$\Delta v_i + \Delta h_i = \Delta v_n + \Delta h_n = \Delta v_0 + \Delta h_0 \dots\dots\dots (7)$$

張力変動はスタンド出口点の速度と、次のスタンド入口点の速度から求められるから、たとえば、3、4スタンドでは(第2図)

$$\frac{E}{L} \int_0^t (v_{4i} - v_{30}) dt = \frac{T_3}{A_{4i}} \dots\dots\dots (8)$$

さらに

$$\frac{E \cdot v_{3n}}{L} \int_0^t (\Delta v_{4i} - \Delta v_{30}) dt = \frac{T_3}{A_{4i}} \cdot \Delta T_3 \dots\dots\dots (9)$$

ゆえに初期張力 T_3 に対する伸びの量を ε_3 とすると、

$$\Delta T_3 = \frac{v_{3n}}{\varepsilon_3} \int_0^t (\Delta v_{4i} - \Delta v_{30}) dt \dots\dots\dots (10)$$

また

$$\begin{aligned} \Delta v_{4i} &= \Delta v_{4n} + \Delta h_{4n} - \Delta h_{4i} \\ &= \Delta v_{4n} + \left(\frac{K_2 K_5}{m - K_1} + K_6 \right) \Delta T_3 + \left(\frac{K_3 K_5}{m - K_1} + K_7 \right) \Delta T_4 \\ &\quad + \left(\frac{K_4 K_5}{m - K_1} + K_8 - 1 \right) \Delta h_{4i} + \frac{n K_5}{m - K_1} \Delta s_4 \dots (11) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta v_{30} &= \Delta v_{3n} + \left\{ \frac{K_2 (K_5 - 1)}{m - K_1} + K_6 \right\} \Delta T_2 \\ &\quad + \left\{ \frac{K_3 (K_5 - 1)}{m - K_1} + K_7 \right\} \Delta T_3 + \left\{ \frac{K_4 (K_5 - 1)}{m - K_1} + K_8 \right\} \Delta h_{3i} \\ &\quad + \frac{n (K_5 - 1)}{m - K_1} \Delta s_3 \dots\dots\dots (12) \end{aligned}$$

ゆえに(10)、(11)、(12)式から

$$\begin{aligned} p \Delta T_3 &= \frac{v_{3n}}{\varepsilon_3} \left[\Delta v_{4n} - \Delta v_{3n} - \left\{ \frac{K_2 (K_5 - 1)}{m - K_1} + K_6 \right\} \Delta T_2 \right. \\ &\quad + \left(\frac{K_3 K_5}{m - K_1} + K_7 \right) \Delta T_4 - \left\{ \frac{K_4 (K_5 - 1)}{m - K_1} + K_8 \right\} \Delta h_{3i} \\ &\quad + \left(\frac{K_4 K_5}{m - K_1} + K_8 - 1 \right) \Delta h_{4i} - \frac{n (K_5 - 1)}{m - K_1} \Delta s_3 \\ &\quad \left. + \frac{n K_5}{m - K_1} \Delta s_4 - \left\{ \frac{K_3 (K_5 - 1)}{m - K_1} + K_7 \right\} \right] \end{aligned}$$

$$- \left(\frac{K_2 K_5}{m - K_1} + K_6 \right) \Delta T_3 \dots\dots\dots (13)$$

この(13)式で隣接2スタンドの関連速度差が変わったとき、張力はそれにつき変動するが、この変動とともにこれを抑制する効果(これを板張力変動の自動除去作用という)が発生することがわかる。

その大きさは、

$$\frac{v_{3n}}{\varepsilon_3} \left\{ \frac{K_3 (K_5 - 1)}{m - K_1} + K_7 - \left(\frac{K_2 K_5}{m - K_1} + K_6 \right) \right\} \dots\dots\dots (14)$$

で与えられる。

まず、前者の $\left\{ \frac{K_3 (K_5 - 1)}{m - K_1} + K_7 \right\}$ は第3スタンドで前面張力が1%増したために中立点が入口側に移動し、その厚みが $K_7\%$ だけ増し、第3スタンドの通過質量は $K_7\%$ だけ増す。一方前面張力が大となったため、圧延機の弾性により出口板厚は $\frac{K_3}{m - K_1} \%$ だけ増す。ところがこのため同時に中立点の厚みも $\frac{K_3 K_5}{m - K_1} \%$ だけ大となるから出口速度は終局において、

$$K_7 - \frac{K_3}{m - K_1} + \frac{K_3 K_5}{m - K_1} = \left\{ \frac{K_3 (K_5 - 1)}{m - K_1} + K_7 \right\} \%$$

だけ大となる。

次に $\left(\frac{K_2 K_5}{m - K_1} + K_6 \right)$ は、第4スタンドで後面張力が1%大となったため中立点が出口側に移動し、その厚みが $K_6\%$ だけ大となり、これだけ第4スタンドの通過量は大きくなる。同時にロール圧力変わり中立点の厚みはさらに $\frac{K_2 K_5}{m - K_1} \%$ だけ大となるから、第4スタンドの通過量は全体として $\left(\frac{K_2 K_5}{m - K_1} + K_6 \right) \%$ だけ大となる。

第3スタンドの出口速度の増加分と第4スタンドの入口速度の増加分の差で張力の増大を妨げようとするところから(14)式となる。その効果は後者のほうが大きい。

第1表の代表的な5タンデムミルの圧延スケジュールにつき数値計算すると、(13)式の関係より次式が得られる。

$$\begin{aligned} \Delta T_1 &= \frac{12.5}{1 + \frac{0.017}{v_{1n}} p} [\Delta v_{2n} - \Delta v_{1n} - 0.022 \Delta T_2 - 0.0174 \Delta h_{1i} \\ &\quad - 0.583 \Delta h_{2i} + 0.0217 \Delta s_1 + 0.284 \Delta s_2] \dots\dots\dots (15) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta T_2 &= \frac{7.25}{1 + \frac{0.015}{v_{2n}} p} [\Delta v_{3n} - \Delta v_{2n} + 0.0082 \Delta T_1 - 0.033 \Delta T_3 \\ &\quad - 0.0119 \Delta h_{2i} - 0.573 \Delta h_{3i} + 0.0262 \Delta s_2 + 0.34 \Delta s_3] \dots\dots\dots (16) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta T_3 &= \frac{7.25}{1 + \frac{0.015}{v_{3n}} p} [\Delta v_{4n} - \Delta v_{3n} + 0.0068 \Delta T_2 - 0.046 \Delta T_4 \\ &\quad - 0.0096 \Delta h_{3i} - 0.668 \Delta h_{4i} + 0.034 \Delta s_3 + 0.322 \Delta s_4] \dots\dots\dots (17) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta T_4 &= \frac{6.0}{1 + \frac{0.012}{v_{4n}} p} [\Delta v_{5n} - \Delta v_{4n} + 0.0015 \Delta T_3 - 0.0324 \Delta T_5 \\ &\quad - 0.0287 \Delta h_{4i} - 0.974 \Delta h_{5i} + 0.039 \Delta s_4 + 0.388 \Delta s_5] \dots\dots\dots (18) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta T_5 &= \frac{94.3}{1 + \frac{0.113}{v_{5n}} p} [\Delta v_{6n} - \Delta v_{5n} + 0.0023 \Delta T_4 \\ &\quad - 0.0279 \Delta h_{5i} + 0.039 \Delta s_5] \dots\dots\dots (19) \end{aligned}$$

上式から ΔT_5 については、変動除去効果の大きなスタンドの代わりに、塑性変形を行なわないリールがあるために、他のスタンドよりも10倍程度大きな張力変動となることがわかる。

さらに、板厚変動の伝播は伝播時定数だけの時間遅れで表わすと

$$\Delta h_{3i} = \varepsilon^{-p} \frac{L}{v_{3n}} \Delta h_{20} \dots\dots\dots (20)$$

L: スタンド間距離

となる。したがって、次式が得られる。

$$\Delta h_{2i} = \varepsilon^{-p} \frac{4.0}{v_{1n}} [-0.020 \Delta T_1 + 0.70 \Delta h_{1i} + 0.189 \Delta s_1] \dots (21)$$

$$\Delta h_{3i} = \varepsilon^{-p} \frac{4.0}{v_{2n}} [-0.058 \Delta T_1 - 0.042 \Delta T_2 + 0.403 \Delta h_{2i} + 0.31 \Delta s_2] \dots (22)$$

$$\Delta h_{4i} = \varepsilon^{-p} \frac{4.0}{v_{3n}} [-0.111 \Delta T_2 - 0.052 \Delta T_3 + 0.417 \Delta h_{3i} + 0.376 \Delta s_3] \dots (23)$$

$$\Delta h_{5i} = \varepsilon^{-p} \frac{4.0}{v_{4n}} [-0.119 \Delta T_3 - 0.064 \Delta T_4 + 0.304 \Delta h_{4i} + 0.357 \Delta s_4] \dots (24)$$

$$\Delta h_{50} = -0.148 \Delta T_4 - 0.043 \Delta T_5 - 0.0014 \Delta h_{5i} + 0.43 \Delta s_5 \dots (25)$$

次に圧延回転力の式より、微小変動分を考えた場合

$$\Delta \tau_\gamma = K_9 \Delta h_0 + K_{10} \Delta T_i + K_{11} \Delta T_0 + K_{12} \Delta h_i \dots (26)$$

(4)式を代入して、

$$\Delta \tau_\gamma = \left(\frac{K_2 K_9}{m - K_1} + K_{10} \right) \Delta T_i + \left(\frac{K_3 K_9}{m - K_1} + K_{11} \right) \Delta T_0 + \left(\frac{K_4 K_9}{m - K_1} + K_{12} \right) \Delta h_i + \frac{n K_9}{m - K_1} \Delta s \dots (27)$$

$\Delta \tau_\gamma$: 圧延回転力の変動分の割合

また電動機回転力の変動分の割合 $\Delta \tau_m$ に対しては、

$$\Delta \tau_m = \Delta \tau_\gamma + K_{13} \Delta T_i + K_{14} \Delta T_0 \dots (28)$$

で与えられるから

$$\Delta \tau_m = \left(\frac{K_2 K_9}{m - K_1} + K_{10} + K_{13} \right) \Delta T_i + \left(\frac{K_3 K_9}{m - K_1} + K_{11} + K_{14} \right) \Delta T_0 + \left(\frac{K_4 K_9}{m - K_1} + K_{12} \right) \Delta h_i + \frac{n K_9}{m - K_1} \Delta s \dots (29)$$

第2表 板張力変動の時定数とストリップ通過時間 (単位 秒)

板張力変動の時定数		各スタンド間のストリップ通過時間	
τ_1	0.00474	t_1	1.145
τ_2	0.00261	t_2	0.696
τ_3	0.00154	t_3	0.411
τ_4	0.00076	t_4	0.253
τ_5	0.00404	計	2.505

各スタンド間距離を4m
最終スタンド出口板速度を30.5m/sとする。

が得られる。第1表の圧延スケジュールによる場合、これらは次式のように計算される。

$$\Delta \tau_{1m} = -0.19 \Delta T_1 + 1.77 \Delta h_{1i} - 0.67 \Delta s_1 \dots (30)$$

$$\Delta \tau_{2m} = 0.31 \Delta T_1 - 0.15 \Delta T_2 + 1.34 \Delta h_{2i} - 0.62 \Delta s_2 \dots (31)$$

$$\Delta \tau_{3m} = 0.27 \Delta T_2 - 0.09 \Delta T_3 + 1.32 \Delta h_{3i} - 0.68 \Delta s_3 \dots (32)$$

$$\Delta \tau_{4m} = 0.31 \Delta T_3 - 0.04 \Delta T_4 + 1.56 \Delta h_{4i} - 0.72 \Delta s_4 \dots (33)$$

$$\Delta \tau_{5m} = 0.30 \Delta T_4 - 0.02 \Delta T_5 + 1.77 \Delta h_{5i} - 0.77 \Delta s_5 \dots (34)$$

これらの式をみても明らかのように、電動機回転力に変動を与える影響は、直接張力の変動によるよりも、板厚の変動によるほうがはるかに大きいことがわかる。電動機回転力の変動分による電動機速度に与える影響は次式で与えられる。

$$\Delta v_n = \Delta v_{n0} - K \Delta \tau_m \cdot \frac{1}{1 + t_m \cdot p} \dots (35)$$

ここで Δv_{n0} : 初期の速度変動の割合

t_m : 回転力変動に対する速度変動の時定数

以上第1表の圧延スケジュールにつき数値計算した結果、(15)~(19)式、(21)~(25)式、(30)~(34)式が得られたが、圧延特性を一括してブロック線図に表わしたのが第3図である。これからみてもわかるように、それぞれの微小変動は互いに関係しあって非常に複雑な変動となる。図中の τ および t の値を第2表に示す。

3. 電動機速度、圧下、母材板厚変動と板張力、板厚変動

先に計算した数式をもとにして、さらに計算を進め、速度—張力、速度—板厚、圧下—張力、圧下—板厚、母材板厚—張力、母材板厚—仕上り板厚の関係を調べてみる。

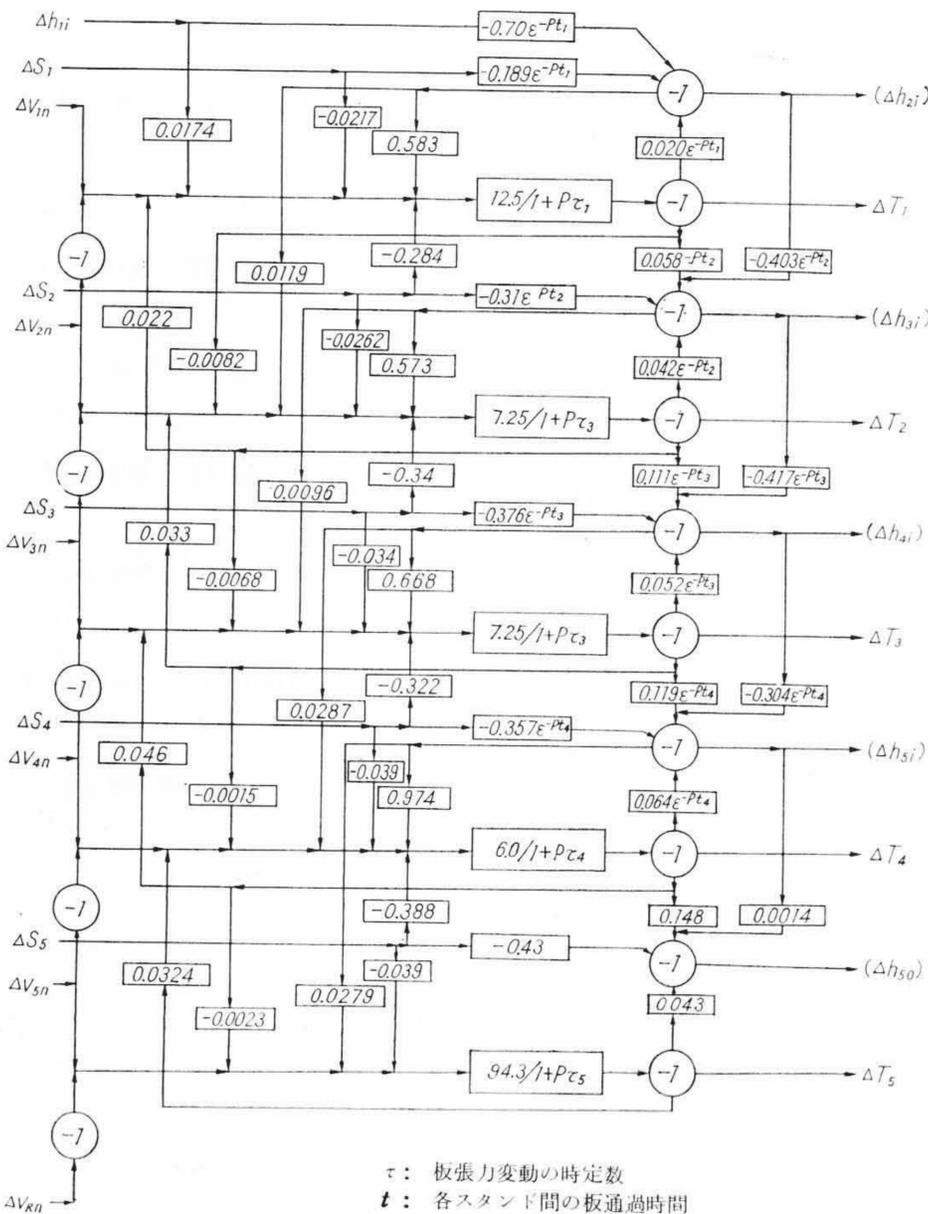
3.1 電動機速度と板張力

電動機速度の変動に対して、ストリップ板厚および張力が、その現象をどのように伝播してゆくかを調べてみる。

(1) あるスタンドの速度を1%変化させた場合、そのスタンドの前後張力は、そのスタンドにより大きさが異なるが、大体6.0~12.5%だけ、板張力変動の時定数 τ をもって変化する。この場合スタンド速度が上昇した場合には、前面張力は減少側に、また後面張力は増大側に変化する。

(2) これらの前後張力の変化はさらに時定数 τ をもって、板厚変動を媒介とすることなく直接に板張力の変動として前後に伝播していくことになるが、前面側への伝播は、1基のスタンドを通過することによる減衰係数が約1/20~1/100であるので、ほぼ無視することができる。他方、後面側への伝播はスタンド1基の通過による減衰が1/3~1/5程度しかないので、スタンド2基程度通過後でなければその伝播による影響を見ることができない。

(3) 後面側へむかう張力の変動は、上記(2)で述べたようなスタンド越しに直接張力変動として、時定数 τ をもって伝播するもののみを考えればよいが、前面側に対しては、張力変動によって生じた板厚変動を介して伝播するものを考えなくてはならない。これに対する考え方は次の4種類になるものと考えられる。第2スタンドにつき考える。



第3図 ブロックダイアグラム

(A) 今、第2スタンドの速度を上昇すると第3スタンドの後面張力が減ることになり、第3スタンド出口板厚は大きくなり、これが第4スタンドに達すると、第4スタンドの圧下が増したかのごとき現象となり、第4スタンドの後面張力は減る。これにより、第4スタンド出口板厚は厚くなり、ストリップの通過時間 t_4 時間後に第5スタンドに達して、第5スタンドの後面張力を減らす。同時に第3スタンド出口板厚が厚くなった分は第4スタンドでとりきれず、このためにも第4スタンド出口板厚は大となり、第5スタンドに達してからの後面張力の増大をますます大とする方向に働く。かように、厚みの変化の伝播と、張力を介するものの伝播との両者の結果により、第4スタンドの後面張力は減り、結局、第3スタンドの後面張力の現象は、あまり減衰しないで出口張力の減少として伝わって行く。ここで、伝播はほとんど厚みを介するもののみによることがわかる。

(B) 第2スタンドの速度を上昇すると、第2スタンドにしてみれば前面張力が減少することになる。したがって、第2スタンドの出口板厚は厚くなり、この厚い板厚が第3スタンドに達すると、第2スタンドの前面張力の減少となつてはねかえってくる。

この減少と第3スタンド入口に達した厚い板厚の二つのために、第3、第4スタンド間張力は減少するが、これは(A)の場合と同じく、やはり、ほとんど減衰しないで出口側に伝わって行くことになる。この現象は、(A)に比べ大きさは、前面張力と後面張力が板厚に与える効果の大きさの差だけ異なり、かつ(B)は(A)に比し、 t_2 だけ遅れていることになる。

(C) 第2スタンドの速度を上昇すれば、第2スタンドの後面張力が増大することになる。この場合の現象は、(A)と同じであるが、スタンドが一つ手前から始まることと、その向きが逆になっていることが異なる。すなわち、この(C)の現象は(A)の現象を t_2 時間後に打ち消していくことになる。

(D) 第2スタンドの速度を上昇すれば、第1スタンドにしてみれば、その前面張力が増大したことになる。このときの現象は、(B)と同じであるが、スタンドが一つ手前の第1スタンドより始まること、すなわち、時間的に t_1 だけ遅れていることになるわけで、かつその向きが(B)と逆である。したがって、 t_1 時間後に(D)の現象は、(B)の現象を打ち消していくことになる。

以上のことを総合すると、 n 番目のスタンドの速度を1%上昇すると、そのスタンドの後面張力 T_{n-1} は6~12.5%だけ時定数 τ_{n-1} をもって増大し、その大きさは以後あまり変わらない。一方前面張力 T_n は時定数 τ_n をもってやはり6~12.5%だけ変わるが、後面側で生じた板厚変動が t_n 時間後に伝播してきて、その変動分を打ち消してしまう。

なお T_{n+1} 、 T_{n+2} などの出口側の板張力はスタンドを通過しても減衰することなくストリップ圧延速度で、3~4%の大きさだけ減少伝播していくことになるが、いずれも張力 T_n と同じようにその変動が生じた後 t_{n-1} ~ t_n 時間だけ遅れて張力 T_{n-1} の増大によって生じた現象が伝播してくると打ち消されてしまう。

(4) 第1スタンドの特異性

第1スタンドでは、その後面張力は常に0であるので、上記(3)-(C)、および(D)項に相当する打消作用は伴わない。したがって、第1スタンドの速度を上昇した場合、その前面張力 T_1 は約12.5%減少したままとなり、また、その出口側の張力 T_2 、 T_3 、 T_4 なども約4~5%程度減少したままとなる。

(5) 第5スタンド(最終スタンド)の特異性

リールでは塑性変形はないため、第5スタンドのわずかな速度変化でもきわめて大きなリール張力変化を生じることになるわけで、その値はスタンド間の張力変化のときの10倍にもなる。

したがって、従来の現象のように伝播現象がほとんどすべて、厚みを介するもののみで決まるという原理は適用できず、直接、張力を介して入口側に伝わるものも無視できなくなる。

リールの張力制御は、タンデムミルの場合、第5スタンド間張力でこれの一定制御はできないため、十分即応的に行なう必要がある。

3.2 電動機速度と板厚

板厚の変動は張力の変動によって起こるものであるから、その伝播状況は張力のそれと全く同じである。

第2スタンドを例にとれば、そのスタンド速度を上昇したとき、永久に残る変動は、第2スタンド後面張力変動による第2スタンド出口板厚、すなわち、第3スタンド入口板厚の変動のみであって、ほかの出口側各点における板厚変動はたちまちに消滅してしまうことになる。その結果1%の速度変動はそのスタンド出口板厚をほぼ1%変化させるという関係が得られる。したがって最終スタンドではその速度をかえて板厚制御をすることができる。

第1スタンドについては、張力のときと同じく打消作用がないため、第1スタンド速度変動は出口側各点の板厚変動となりそのまま伝播される。したがってその速度を1%上昇すると第2、3、4、5スタンド出口厚みはおおのほほ1%増大しその状態を保持することになる。

第5スタンドについても張力の場合で述べたのと同様に、リールの張力制御のレスポンスが悪いと、第5スタンドの速度1%上昇に対しリール張力は100%減少することになり、このため第5スタンド出口板厚は約4%増大する。一方このリール張力の減少は直接第5スタンドのスタンド越しにその後面張力を約20%ほど増大させる。このため第5スタンド出口板厚は約2.7%減少する。これらの現象はほとんど同時におこり、かつ最も大きなものであるが、結果として、スタンド速度を上昇させると約1%ほどの板厚増加を生ずることになる。これはリールの定張力制御が働いてきて、第5スタンド出口張力の変動を補償するにつれて0になってゆく。したがって、最終製品板厚の制御にとって、リールの定張力制御の応動制御の迅速性はきわめて大切なものとなる。

以上総合して次のことがいえる。

- (1) 第1スタンドの速度1%の変動は、第2スタンド以後の出口厚みを約1%変動させる。上昇に対しては増加となる。
- (2) 第5スタンドの速度を1%上昇すると、リールの定張力制御が完全に行なわれるとした場合、製品板厚は約1%減少する。
- (3) 中間スタンドの速度を1%上昇させた場合、そのスタンドの出口厚みは1%ほど減少するが、それより出口側のスタンドではその出口板厚は結果においてほとんど影響をうけない。またそれより以前のスタンドの出口厚みもあまり影響をうけない。この場合、張力のほうも結果において変化をうけるのはそのスタンドの後面張力のみであり、1%の速度上昇に対して大略10%の後面張力の増大を招致し、約1%そのスタンドの出口板厚を減ずることになる。
- (4) リールの定張力制御は応動速度を十分早くする必要がある。
- (5) 前記(1)、(2)のように、第1スタンドと最終スタンドはそれぞれ特異性を有するが、これを製品板厚制御として利用しようとするとき、第5スタンドで行なうのがほかのスタンドへの影響が少なく、かつ時間遅れが短いという点で得策である。

(6) 冷間圧延ストリップの板厚精度は板厚により異なるが JIS では 5.5~10% とされている。今もしこれを 5% に押えたとすると、速度制御の面から第 1 スタンドまたは第 5 スタンドは単独の場合 5%、同時の場合 2.5% 程度の精度を要求される。一般にタンデム圧延機のスタンド電動機は「定電圧制御+IR 降下補償」の制御方式をとっているが、加速電流を含めた IR 降下の未補償分のスタンド間の差異は 0.8~1.0% 程度あるのが普通である。したがって、板通し速度と最高運転速度の比が 1:10 あるような高速圧延機では板通し速度におけるこの差異は 8~10% となる。このため各スタンド間張力は 50% ほどに減少し、また最終板厚は 8~10% 増大することになる。実際の圧延においては、圧延機および圧延現象自体に、低速になると板厚が増大する現象があるため、上記の数値はやや減るはずである。

中間スタンドの速度変動は最終板厚にはほとんど影響を及ぼさないが、安全な運転を行なうことを考えて張力の上下限よりやはり数%の精度におさえなくてはならない。

3.3 圧下と板張力

あるスタンドの圧下操作を行なった場合の現象の伝播は、スタンド速度変動のときと同様、前面張力、後面張力に影響を与えるほかに直接板厚の変動をも誘起させ、この三つが現象の出発点となる。

(1) 1/100 mm の圧下操作に対して前面張力の変動は、ほぼ 0.2~0.3% 程度のもので、これによる伝播はもちろん、そのもの自体も無視できるほどである。これは中立点の位置からいって当然である。

(2) 圧下操作を行なったスタンドの後面張力は大きな影響をうけ、その大きさは 2.5~3.5% ほど変動する。これによる後面側の張力の伝播は直接スタンド越しに行なわれるもので、スタンド 1 基を通過すると 1/3~1/5 に減少してしまうのでスタンドを 2 基通過すればその影響はほとんど無視できる。

(3) 直接の板厚の変動は、圧下を 1/100 mm 上げた場合、大体 0.2~0.4% 程度の増大である。この増大はそれぞれ t_n 時間後次のスタンドに到達しその後後面張力すなわち、圧下操作をしたスタンドの前面張力を減少させる。その大きさは約 1.5~2.0% 程度であり、これは今まで述べた厚み変動を原因とした張力変動の出口側伝播と同じようにほとんど減衰することなく出口側スタンドへ向かって伝播していく。

(4) 圧下操作の場合、伝播現象の主たるものは以上述べた(1)、(2)、(3)の三つであるが、このうち(2)と(3)とは同じ経路をたどって伝播していくので互いに打ち消しあうように働く。いま第 n スタンドの圧下を 1/100 mm あげた場合、その後後面張力 $T_{(n-1)}$ が時定数 $\tau_{(n-1)}$ で 2.5~3.5% 増大し、そのため第 n スタンド出口板厚 h_{n0} が減少し、また第 $(n-1)$ スタンドにとってみればその前面張力が増大することになるので、その出口板厚 $h_{(n-1)0}$ が減少し、これが $t_{(n-1)}$ 時間後第 n スタンドにはいっていくためそのときよりさらに第 n スタンドの出口板厚 h_{n0} は減少していくのである。一方第 n スタンドの出口厚み h_{n0} は、そのスタンドの圧下をあげたために時定数 τ_n でもって増大する。この張力増大による現象と、圧下をあげたことによる現象は方向反対でその大きさが $t_{(n-1)}$ 時間後ではほぼ等しくなるために互いに打ち消しあって 0 となり、必然的に以後の出口スタンドへの波及も 0 となる。

したがってタンデム圧延機では、圧下を操作しても同時にその後面張力の変動を誘発して出口板厚に及ぼす影響がそれら両方で符号反対で大きさほぼ等しいことのために互いに打ち消し合い、たんにそのスタンドの後面張力が変化するにすぎず、ほかへ張力変動としてほとんど伝播しないことになる。

(5) 第 1 スタンドには後面張力がないため圧下による出口厚み

の変動が生じ、このため第 1 スタンドの前面張力は約 1.4% 減少し、以後この大きさはほとんど減衰しないで出口側に伝わっていく。

3.4 圧下と板厚

前項でも述べたように現象の出発点は、後面張力の変動と直接出口板厚の変動によることには変わらない。

(1) 中間スタンドおよび最終スタンドの圧下を操作しても、どの点の板厚もほとんど影響を受けない。その理由は前項(4)において説明したとおりである。この場合の現象は今まで述べたような大きな流れではなく、二次的な伝播現象で圧下 1/100 mm に対して板厚の変化 0.15% 程度のものである。

(2) 第 1 スタンドでは後面張力が常に 0 であるために後面張力の変化による出口板厚の変動現象がないために、直接圧下操作による出口板厚の変化をうけ、ほとんど減衰することなく出口側スタンドに伝播していき、その大きさは 1/100 mm の圧下操作に対して、ほぼ 0.2~0.15% である。

(3) 圧下操作により板厚制御を行なう場合、第 1 スタンドでは板厚変動伝播に伴う張力変動から、運転の安全性からいって 0.3 mm 程度が限度と考えられ、ほかのスタンドでは後面張力の点から 0.1 mm 程度までといえる。

3.5 母材板厚と板張力

母材板厚の変動は、直接スタンド越しにその前面張力の変動と出口板厚の変動として表われてくる。

(1) 前面張力に対してはその変化はほとんど無視できる。

(2) 母材板厚の変動は第 1 スタンドの弾性のために完全にそこで消滅しないでその出口板厚の変動として表われてくる。その大きさは母材板厚 1% に対して約 0.7% であって、この変動が、引き続いて起こる現象の出発点となるもので、これは第 1 スタンドの圧下操作の場合と全く同一現象となる。すなわち、圧下操作の場合には、1/100 mm 圧下操作に対して、第 1 スタンド出口板厚は約 0.19% 変動したが、母材板厚の場合には、1% 変動に対して約 0.7% 変動となり、ちょうど、母材板厚 1% の変化は第 1 スタンドの圧下をほぼ 3.7/100 mm 操作したと同等となる。以後の伝播現象も第 1 スタンドの圧下操作の場合と同様に説明され、各スタンド間張力をほぼ 4% 程度変化させる。

3.6 母材板厚と板厚

母材板厚 1% の変動は、第 1 スタンド出口板厚に対して、0.7% の変動となって表われ、以後あまり減衰することなく出口側に伝播していく。

(1) 母材板厚 1% の変動は、仕上がり製品板厚には、ほぼ 0.5% の変動として表われる。したがって、母材板厚の精度も重要な問題となってくる。

(2) 母材板厚の変動は、スタンド間張力をほぼ 4% 程度変化させるから、(1) のことと合わせて、数% 程度におさえる必要がある。

4. 結 言

以上タンデム式冷間圧延機の代表的なスケジュールにつき、その圧延現象の理論的な解析結果につき述べたが、これを総合すると下記のとおりである。

(1) スタンド速度に変動があっても、塑性変形による張力変動の自動除去効果があるためにそれほど大きな張力変動とはならない。

(2) 第 1 スタンドを除くスタンドの速度を 1% 上昇させた場合、そのスタンドの後面張力は 6~12.5% 増大し、そのスタンドの出口板厚は約 1% 減少するのみでほかにはほとんど変動は表わ

れない。

(3) 第1スタンドの速度を1%上昇させた場合、各スタンド間張力に影響を及ぼし第2スタンド以降の出口板厚はほぼ1%増加する。したがって第1スタンドの速度制御は十分精度の高いものが要求される。

(4) 最終スタンドの速度を1%増すと製品板厚を約1%減少できる。

(5) リールの定張力制御は、各スタンド電動機速度変動速度または各スタンドの圧下操作に比べて十分に速応性の高いものでなくてはならない。

(6) 第1スタンドを除くスタンドの圧下を操作してもその後張力の変動を誘発するのみでほかの点の板厚、板張力にはほとんど影響を与えない。

(7) 第1スタンドの圧下を1/100mmあげた場合、各スタンドの出口板厚は0.2~0.15%増大し圧延速度で出口側へ伝播する。

(8) 母材板厚1%の増大は、第1スタンドの圧下をほぼ3.7/100mm操作したと同等となる。すなわち、ほぼ0.5%の仕

上り板厚変動となる。母材板厚の変動は第1スタンドの圧下で補正することが他スタンドへ影響を与えないという点で最適である。

(9) 電動機速度の変動許容値は、中間スタンドでは張力変動の限界より±5%に、第1と第5スタンドでは製品板厚精度より定まる。

(10) スタンド電動機は、全速運転中あるいは加減速中を通じて電動機の負荷変動による速度変動が小さく、かつ、スタンド間で異なる少ないことが必要である。

これらの解析結果については、実験用3タンデム冷間圧延機により十分検討された。また実際の圧延機の測定結果からも傾向はよくあっていることがわかったが、その詳細については別の機会に報告することにしたい。

参 考 文 献

- (1) R. A. Phillips: AIEE, pp. 355 (1957. Jan)
- (2) D. R. Bland, Hugh Ford: P. I. M. E., Vol. 159, pp. 144 (1948)



特 許 と 新 案



最近登録された日立製作所の特許(その1)

特許番号	名 称	氏 名	登録年月日	特許番号	名 称	氏 名	登録年月日
304443	継電器による時計較正信号発生装置	長土真油	38. 1. 28	305403	磁界型弱励磁電子レンズ	片桐信二郎	38. 2. 23
304444	テレビ放送電波による時計較正方式	浜井利井	"	305404	光電装置回路	山田英一	"
304445	ド ア ス イ ッ チ	土井重哲	"	306115	磁気計数素子	宮尾夫睦	38. 3. 14
304446	偏向線輪	土朝口	"	306116	数値制御方式	松野卓郎	"
304447	油圧駆動昇降機制御装置	樋村塚	"	306117	エレベータ運転制御装置	須藤卓雄	"
304448	巻上機の制動装置	犬小野	"	306118	発電機自動電圧調整装置	大井平昭	"
304449	巻上機の制動装置	神尾昌史	"	306119	ダイヤル機構兼用パリコン	森岡健一	"
304450	放射線応用計器の計数率計回路	神尾昌史	"	306120	溶接機電源装置	森外仁	"
304451	半導体ウェハの表面処理方法	神尾昌史	"	306121	磁気的シーケンスタイマー装置	伊藤和晴	"
304434	遅延特性の良い有極帯域増幅器	鷺見哲	"	306122	送電線の再閉路装置	藤本英明	"
304435	機械的戸波器	大川野地	"	306123	自動盤の刃物送りカム	橋本敬造	"
304436	強誘電体素子のマトリックス配置に於ける書き込み読み出し方法	岸地陽	"	306124	遠方監視制御方式	中月忠徳	"
304437	陰極線管の2次電子を集取する電圧を供給する装置	山源一	"	306125	鋼帯圧延機における自動厚み制御方式	滝田武夫	"
304438	共振選択継電器	橋篤志	"	306126	車外信号と自動運転装置との連動装置	前川敏俊	"
304439	アナログ・デジタル変換器における感度自動切換装置	熊田明生	"	306128	密閉母線監視装置	中川幸太郎	"
304440	放射線利用厚み計	西口武雄	"	402523	高圧整流装置	近藤喜久雄	37. 12. 26
304441	交換機のロータリースイッチ	三川浦村	"	402719	オイルシール	上田幸安	38. 1. 9
304442	固体光増幅板用溝型光導電層の製造方法	中村久香	"	402926	内面薄金属板貼付合成樹脂積層管製造方法	三山次学	38. 1. 22
304452	二重円筒状の放射素子を有する空中線	鷺見哲	"	402928	自動車用トルクコンバータ付変速機の切換装置	横井光彦	"
304454	磁気増幅器用鉄心の選別方法	菊地惟幸	"	402929	座席位置調整装置	横内直仁	38. 1. 22
304603	在庫数自動表示装置	及川忠夫	"	402930	座席位置調整装置	横内直仁	"
305393	トランジスタ特性測定装置	古谷美雄	"	402931	座席位置調整装置	横内直仁	"
305394	トランジスタ増幅器	島大隆	"	402932	揚水発電所の発電電動機制動装置	高橋昭吉	"
305395	一様磁界筒型永久磁石	今尾清	"	402933	斜流形水力機械	高岡英信	"
305396	緩衝装置	杉浦繁	"	402934	自動車用トルクコンバータ付変速機の自動直結切換装置	横井英彦	"
305397	合金拡散型半導体装置の製法	西田和	38. 1. 30	402935	扱ひ物の異なる複数のチップラに対する鉤車の操作方式	若森俊郎	"
305397	ヒーター自動取出加工装置	永池和	38. 2. 16	402936	連続回転ピストン機構	松崎淳	"
305399	板状単結晶製造方法	三浦野村	"	402937	筒形水車用案内羽根支持装置	横井信安	"
305400	二重管式高圧送炭管	北野田	"	402938	軸封圧力制御装置	蜂谷昌彦	"
305401	ピストン形コンスタントハンガー	滝勝三	"	403503	列車自動制御用制御弁装置	藤岡多喜男	38. 2. 15
305402	小非点収差磁界型電子レンズ構成部片	鈴木喜久	"	403504	半導体単結晶の製造法	藤岡八十次	"
		横江直邦	"			古田内野寺	"
		阿部享	"				"
		理想太郎	"				"
		黒崎重彦	"				"
		黒古重芳	"				"
		寺畑進	"				"
		郡司五郎	38. 2. 23				"
		片桐信二郎	"				"
		只野文哉	"				"