

生成量は飽和状態に達し、その飽和量は材料の安定度の低いほど多く、同一試料では引張強さの遅いほど多い。また、同一試料での引張強さの影響度は、ひずみ量の増加につれて顕著になっている。

4. 考察および結言

SUS 39 においては、準静的範囲での引張速さが引張特性値に大きく影響し、しかもその影響のおよぼし方および程度も  $\gamma$  相の安定性によって異なっている。これは、この種の材料においては、その向き方向に [110], [112] の違いがあるが<sup>11)</sup> 向き型変形と  $\gamma$ - $\alpha$  変態型変形の両者とその塑性変形の全機構を構成し、外力のなす仕事の一部は変形エネルギーとして働き、大部分は向き面 (111) における摩擦熱として消費散逸されることおよび Ms 点よりあまり高くない温度では、 $\gamma$ - $\alpha$  変態を促進するに要する臨界分解剪断応力は向き型変形に要するそれよりも小さいので、 $\gamma$ - $\alpha$  変態が塑性流動の主体をなし、一方 Md 点以上では向き型変形が塑性流動の主体をなすことを考えあわせればよく説明しうる。

すなわち、Ms 点の高い試料 A では、変形初期から  $\gamma$ - $\alpha$  変態のひずみ核が活性化されているため、 $\gamma$ - $\alpha$  型変態が生じ、生成されたマルテンサイトのために急激な温度上昇をもたらす。Ms 点の低い試料 C では、与えられた変形エネルギーの大部分は、向き型変形に費され、変形量が増して始めてひずみ核のエネルギー順位が高まり、 $\gamma$ - $\alpha$  変態を生じている。このマルテンサイト生成挙動はよく材料の塑性変形過程と一致し、Ms 点の高い材料は小さい応力で降伏し、その硬化曲線もマルテンサイト生成に類似した様相を呈し、マルテンサイト量の多い材料が高い破断強度を示している。したがって、点 (P) は、Ms 点と同様材料の  $\gamma$  相の安定性を評価する 1 つの指標にも成りうると考えられる。

一方、引張速さの大きいときは、向き面における摩擦熱は十分外部に放出されないで、あたかも断熱の様相を呈し、変形の増すにつれて材温は上昇する。したがって、同一試料でも引張速さが大きいと、 $\gamma$ - $\alpha$  変態に要する臨界分解剪断応力が大きくなり、その反面向きに要するそれは小さくなって、マルテンサイト生成量が少なく、この事実が塑性変形過程の差および引張強さの差としてあらわれている。

また、伸びは一般に変形速度の増加につれて低下するが、試料 A では、逆に向き型変形のため硬化速度がおそくなり増加している。試料 B は、互いに逆の作用が相殺しあつて引張速さの影響をほとんど受けていない。

文 献

- 1) L. KAUFMAN and MOHEN: J. Metals, 8 (1956), p. 1393
- 2) T. ANGEL: J. Iron & Steel Inst. (U.K.), 177 (1954), p. 165
- 3) B. CINA: *ibid.*, 177 (1954), p. 406
- 4) C. B. POST and W. C. EBERLY: Trans. Amer. Soc. Metals, 39 (1947), p. 868
- 5) G. H. EICHELMAN and F. C. HULL: *ibid.*, 45 (1953), p. 77
- 6) B. L. AVERBACH and M. COHEN: *ibid.*, 47 (1955), p. 267

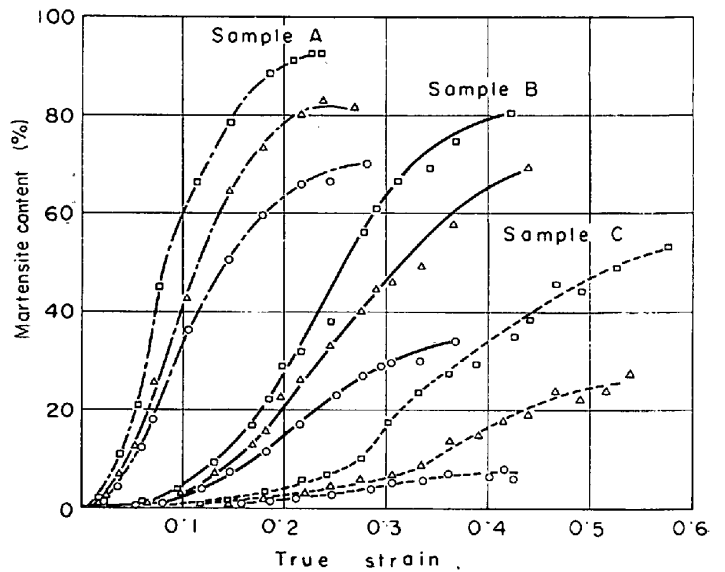


Fig. 4. Relation between martensite content and true strain. Symbols  $\circ$ ,  $\triangle$  and  $\nabla$  indicate strain-rate 50, 5 and 0.5 mm/min. respectively.

- 7) S. A. KULIN and M. COHEN: Trans. Met. Soc., Amer. Inst. Min., Met., & Pet. Eng., 194 (1952), p. 661
- 8) E. C. BAIN: *ibid.*, 70 (1925), p. 25
- 9) S. FONER: Rev. Sci. Instrum., 30 (1959), P. 548
- 10) 広田, 根市, 千葉: National Tech. Report, 10 (1964), p. 370
- 11) R. LAGNEBORG: Acta Met., 12 (1964), p. 823
- 12) K. HOSELITZ: Ferromagnetic Properties of Metals and Alloys (1952), p. 297 [Oxford, Clarendon Press]

(188) 普通炭素鋼熱間変形抵抗数式化

住友金属工業, 中央技術研究所

美坂 佳助・○吉本 友吉

Formularization of Resistance to Deformation of Plain Carbon Steels at Elevated Temperature.

Yoshisuke MISAKA and Tomokichi YOSHIMOTO.

1. 緒 言

鋼の熱間変形抵抗については、従来より多くの研究がなされ、炭素鋼の場合 (1) 式が成立する<sup>1)2)</sup>。

$$K_{fm} = K \cdot \epsilon^{A/TK} \cdot \dot{\epsilon}^n \cdot \epsilon^m \dots \dots \dots (1)$$

$K_{fm}$ : 平均変形抵抗 (kg/mm<sup>2</sup>),  $\epsilon$ : 加工度 (対数歪),  $\dot{\epsilon}$ : 平均歪速度 (1/sec),  $T_K$ : 絶対温度 (°K),  $K, A, n, m$ : 定数

$K, A, m, n$  は鋼種による定数といわれているが、その数値が化学成分などによつてどのように表わせるかについては明らかにされていない。そこでこれらの定数を鋼種の関数として解いて変形抵抗の数式化を試みた。

2. 変形抵抗の測定方法

落下ハンマーによる圧縮試験法<sup>1)</sup>で試験条件は次のと

おりである。

ハンマー重量 80 kg, 加工度 (対数歪) 0.1~0.5,

試験温度 750~1200°C

平均歪速度 (初歪速度の 80% とする)

30~200 1/sec

平均変形抵抗 エネルギー法<sup>2)</sup>により求める。

すなわち

$$K_{fm} = W \cdot H / (V \cdot \epsilon) \dots\dots\dots (2)$$

W: ハンマー重量 (kg), H: ハンマー高さ (mm),

V: 試片体積 (mm<sup>3</sup>), ε: 加工度 (対数歪), ln h<sub>0</sub>/h<sub>1</sub>

h<sub>0</sub>: 試験前試片高さ, h<sub>1</sub>: 試験後試片高さ

試片寸法 15φ×22h (mm)

減摩剤 鱗状黒鉛+シリンダー油

(圧縮前にハンマーと試片に塗付する)

3. 鋼の成分の影響

変形抵抗の数式化を試みる予備実験として, 化学成分の変形抵抗におよぼす影響をラテン方格により統計的に検討するために, 普通炭素鋼の化学成分の中で, 変形抵抗に影響を与えると思われる C, Si, Mn について 3 水準 (C=0.05, 0.15, 0.25%, Si=tr., 0.25, 0.50%, Mn=0.30, 0.80, 1.30%) をとり上げ 50 kg インゴットに溶製した。

すなわち 9 チャージのインゴットを鍛造 (25 mm φ), 焼準処理後旋削して試片を作り前記測定方法により変形抵抗を求めた。

ただしこの実験では, ハンマー重量を一定にしているため, 実測値は歪速度一定のデータではなく, 化学成分のみの影響を検討する場合不都合であるので (3) 式により歪速度 70 1/sec の場合に修正した。

$$K_{fm} = \bar{K}_{fm} \cdot (70/\dot{\epsilon})^m \dots\dots\dots (3)$$

$\bar{K}_{fm}$ :  $\dot{\epsilon}$  での平均変形抵抗実測値

$\dot{\epsilon}$ : 平均歪速度実測値

なお歪速度依存指数  $m$  については後述のごとく実験結果より  $m=0.13$  とした。

これらの実験結果を温度, 加工度 (温度  $T=800, 900, 1000, 1100^\circ\text{C}$  加工度  $\epsilon=0.1, 0.2, 0.3$ ) の各組合せごとに

$$K_{fm} = a_1 C + a_2 C^2 + a_3 \text{Si} + a_4 \text{Mn}$$

として分散分析を行なったが, いずれの場合も C% の 1 次のみが有意で Si, Mn については有意でないことが明らかになった。分散分析の一例として  $T=900^\circ\text{C}$ ,  $\epsilon=0.3$  および  $T=1000^\circ\text{C}$   $\epsilon=0.2$  の場合をそれぞれ Table 1 および Table 2 に示す。

4. 変形抵抗の数式化

4.1 実験結果

統計的検討結果より C% 以外は無視できることがわかったが, 数式化を行なうためにさらに鋼種を追加し, Table 3 に示す 20 鋼種について実験を行なった。

Table 3 でわかるように C, Si, Mn の成分範囲は次のとおりである。

$$C = 0.05 \sim 1.16\% \quad \text{Si} = \text{tr} \sim 0.51\%$$

$$\text{Mn} = 0.33 \sim 1.78\%$$

Fig. 1 は, 実測データを前記のごとく歪速度 70 1/sec に修正したもののうち加工度 0.2 について  $K_{fm}$  と C% の関係を示したものである。参考までに Fig. 1 よ

Table 1. Analysis of variance of  $K_{fm}$  at temperature 900°C and reduction 30%.

Factor		SS	DF	MS	F <sub>0</sub>	
a <sub>1</sub>	C	16.07	1	16.07	41.07	**
a <sub>2</sub>	C <sup>2</sup>	0.488	1	0.488		
a <sub>3</sub>	Si	2.150	2	1.075		
a <sub>4</sub>	Mn	0.056	2	0.028		
	Error	0.045	2	0.023		
	Total		8			

Table 2. Analysis of variance of  $K_{fm}$  at temperature 1000°C and reduction 20%.

Factor		SS	DF	MS	F <sub>0</sub>	
a <sub>1</sub>	C	6.161	1	6.161	24.4	**
a <sub>2</sub>	C <sup>2</sup>	0.014	1	0.014		
a <sub>3</sub>	Si	1.401	2	0.701		
a <sub>4</sub>	Mn	0.158	2	0.079		
	Error	0.197	2	0.099		
	Total		8			

Table 3. Chemical composition of test specimen.

Steel No.	C	Si	Mn	P	S	Cu	Others
1	0.08	0.51	0.33	0.009	0.019	0.09	
2	0.05	0.24	0.77	0.009	0.018	0.08	
3	0.06	0.01	1.78	0.011	0.016	0.08	Al 0.047
4	0.16	0.45	0.77	0.008	0.018	0.08	
5	0.15	0.16	1.35	0.014	0.018	0.08	
6	0.16	0.01	0.33	0.009	0.021	0.08	Al 0.030
7	0.28	0.40	1.40	0.009	0.019	0.09	
8	0.27	0.22	0.33	0.008	0.018	0.08	
9	0.32	0.01	0.84	0.013	0.023	0.08	Al 0.048
10	0.07	<0.01	0.36	0.014	0.024	0.09	
11	0.15	0.01	0.48	0.020	0.018	0.06	
12	0.17	0.01	0.42	0.015	0.018	0.06	
13	0.17	0.01	0.63	0.013	0.022	0.09	Ni 0.04
14	0.23	0.02	0.78	0.017	0.021	0.10	Ni 0.03
15	0.19	0.05	0.86	0.018	0.014	0.05	Ni 0.04
16	0.23	0.03	0.80	0.024	0.016	0.06	Ni 0.04
17	0.17	0.01	0.41	0.018	0.029	0.08	Ni 0.03
18	0.61	0.25	0.38	0.013	0.016	0.09	
19	0.81	0.23	0.43	0.015	0.013	0.26	
20	1.16	0.24	0.40	0.008	0.004	0.21	

り C% の影響分を求めて, おのおのの  $K_{fm}$  から差し引き, 温度, 加工度の条件ごとに対 Si, 対 Mn でプロットすると, 同一条件ではほとんど同程度の値となり, Si や Mn の影響を無視できることが再確認された。Fig. 2 は C% をパラメーターとして  $K_{fm}$  と温度の関係を示すもので, 本実験範囲においては低温程 C% の影響は大きく, 高温になると C% の影響は少なくなり 1200°C 程度でほとんど C% の影響はないと判断できる。なお Fig. 2 の点線は C=0.08% の実測値を併記したもので変態点付近の異常現象である。

4.2 歪速度依存指数 (m)

80 kg, 30 kg, 10 kg の 3 種のハンマーを用いて, ハンマー高さを変えて同一加工度で歪速度の異なる場合の

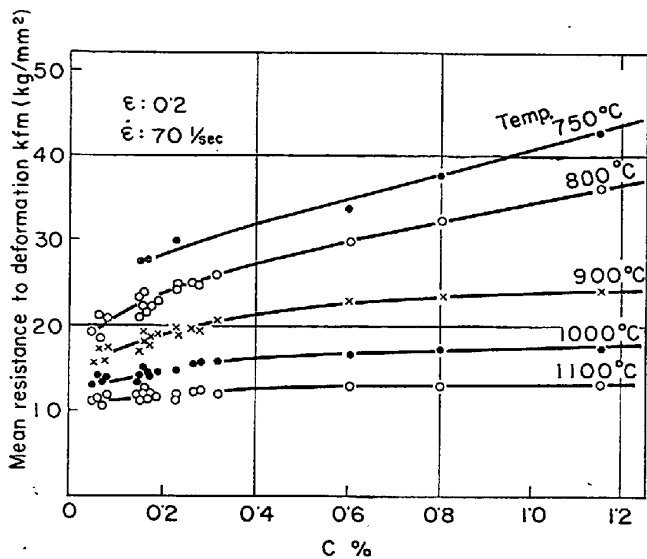


Fig. 1. The relation between mean resistance to deformation and carbon content.

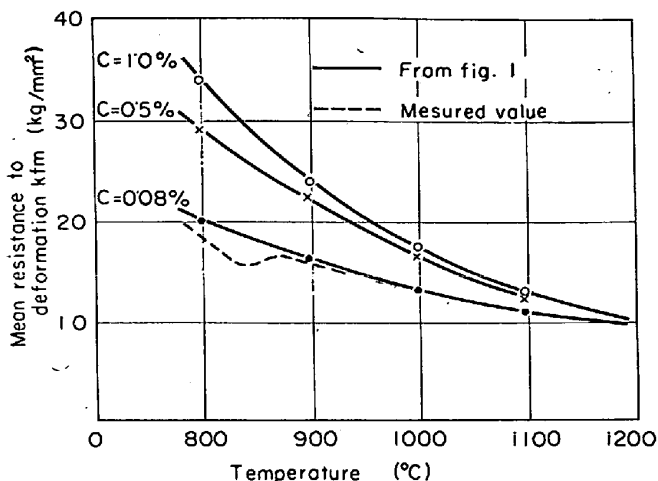


Fig. 2. The relation between mean resistance to deformation and temperature.

平均変形抵抗を求めた。そして  $\ln K_{fm}$  と  $\ln \dot{\epsilon}$  の関係を図示すると両者は直線関係であり (3) 式が成立することがわかった。

$$K_{fm} = \alpha \dot{\epsilon}^m \dots \dots \dots (3)$$

そして直線の傾斜は  $m$  である。  $m$  の値は材質や温度によつて一定の傾向を示さずかつかなり異なっており、これらを一つの定数とすることは問題ではあるが、実用範囲に 30~200 1/sec の制限を設ければ実測の平均値 0.13 を用いても誤差は非常に少ない。

4.3 加工硬化指数 ( $n$ )

さきの  $\ln K_{fm} - \ln \dot{\epsilon}$  線図を 100 1/sec および 200 1/sec で切つて  $\ln K_{fm}$  と  $\ln \epsilon$  の関係をプロットすると、両者は直線関係にある。したがつて (4) 式が成立する。

$$K_{fm} = \alpha \epsilon^n \dots \dots \dots (4)$$

そして直線の傾斜は  $n$  である。  $n$  の値についても材質や温度によつて一定の傾向を示さずかつかなり変動はある。したがつて一つの定数とすることは問題ではあるが加工度があまり大きくない場合 ( $\epsilon \leq 0.5$ ) では  $n$  の値とし

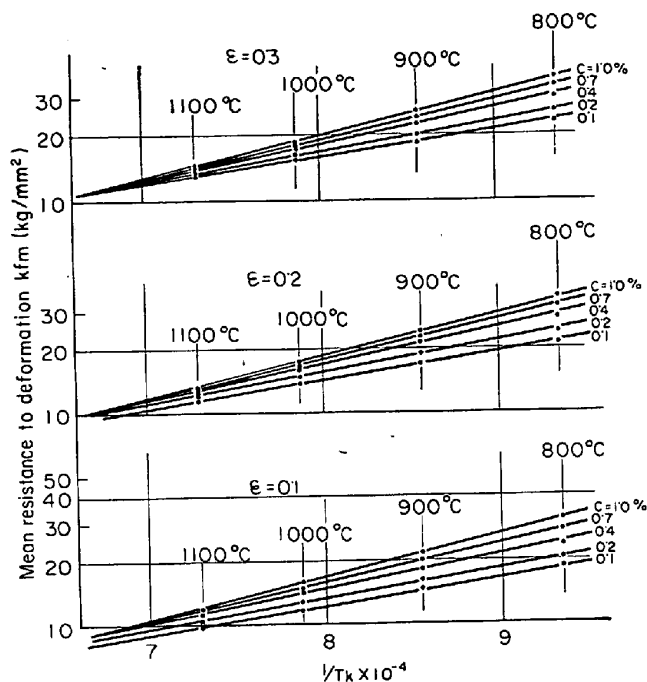


Fig. 3. The relation between log  $K_{fm}$  and  $1/T_k$ .

Table 4. The value of  $A$  in equation 5.

C%	$\epsilon$			
	0.1	0.2	0.3	Average
0.10	3122	3122	2926	3057
0.20	3306	3513	3318	3379
0.40	3720	4055	3928	3901
0.70	4309	4365	4309	4328
1.00	4665	4678	4678	4674

て実測の平均値 0.21 を用いても誤差は小さいと考える。

4.4 平均変形抵抗の数式化

Fig. 1 では若干のばらつきはあるが、これは実験の誤差であると解釈して Fig. 1 の曲線が正しく  $C\%$  と  $K_{fm}$  の関係を示すものとする。曲線を  $C=0.1, 0.2, 0.4, 0.7, 1.0\%$  で切つて加工度 0.1, 0.2, 0.3 の場合について  $C\%$  をパラメーターとして  $\ln K_{fm}$  と  $1/T_K$  の関係を示すと Fig. 3 のごとく 800°C の場合は若干はずれるが直線関係である。Fig. 3 の直線の傾斜は (5) 式の  $A$  である。

$$K_{fm} = \alpha \exp(A/T_K) \dots \dots \dots (5)$$

$A$  を Fig. 3 より求めたものは Table 4 である。

Table 4 に示されるように  $A$  の値は加工度によつてあまり差がないので平均値をとることにし、 $A$  を単に  $C\%$  の関数として次のように表わすことにした。

$$A = 2851 + 2968C - 1120C^2 \dots \dots \dots (6)$$

以上により (1) 式の  $A, n, m$  は決定されたので残る  $k$  を定めるのであるが、式の形をととのえるために (7) 式の  $k$  を求めることにする。

$$K_{fm} = e^k \cdot e^{A/T_K} \cdot \epsilon^n \cdot \dot{\epsilon}^m \dots \dots \dots (7)$$

(7) 式を変形すると (9) 式がえられ実測データより  $k$  を求める。

$$k = [\log K_{fm} - \{(A/T_K) \cdot \log e + n \log \epsilon + m \log \dot{\epsilon}\}] / \log e \dots \dots \dots (8)$$

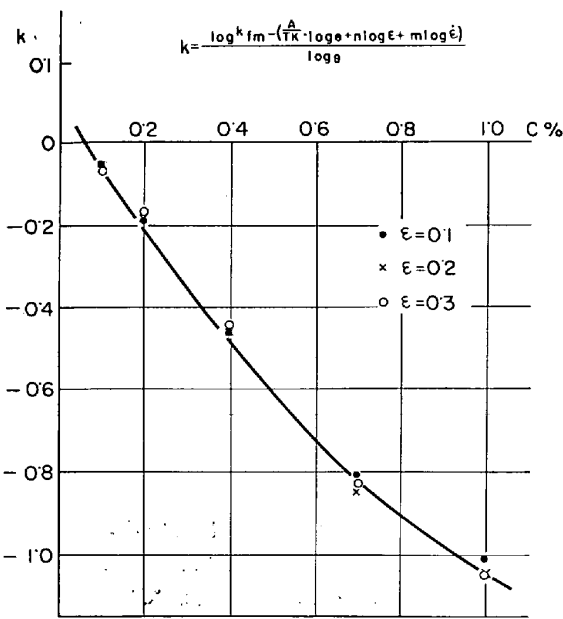


Fig. 4. The relation between  $K$  and  $C\%$ .

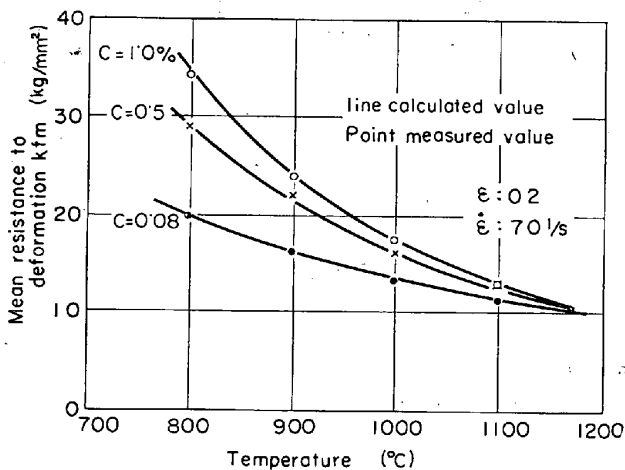


Fig. 5. The comparison between the measured and calculated value.

$k$  と  $C\%$  の関係を Fig. 4 に示す。図でわかるように  $k$  は  $C\%$  の函数としてよいと思われ  $C\%$  に関して 2 次式の形にすると (9) 式のとおりとなる。

$$k = 0.126 - 1.75C + 0.594C^2 \dots\dots\dots (9)$$

以上を要約すると  $K_{fm}$  は (10) 式で表わされると考えられる。

$$K_{fm} = \exp[0.126 - 1.75C + 0.594C^2 + (2851 + 2968C - 1170C^2/T_K) \cdot \epsilon^{0.21} \cdot \dot{\epsilon}^{0.13}] \dots\dots\dots (10)$$

$T_K$ : 絶対温度 (°K),  $\epsilon$ : 加工度 (対数歪),  $\dot{\epsilon}$ : 平均歪速度 (1/sec),  $C$ : 炭素含有量 (%)

4.5 計算値と実測値の比較

Fig. 1 の曲線を読み取った値と (10) 式により求めた値を比較すると Fig. 5 に示すごとくきわめて良い一致をみた。

さらに  $\epsilon = 70$  1/sec  $\epsilon = 0.1 \sim 0.4$  温度 = 750 ~ 1200

°C における実測全データと (11) 式により求めた  $K_{fm}$  の比較では、計算値との相異が  $\pm 5\%$  の範囲では 84%,  $\pm 10\%$  の範囲では 前記低炭素鋼の変態点付近の異常現象のものを除けばほとんどすべてが包含され実用上十分な精度であることが判明した。

5. 結 言

本実験式は普通炭素鋼の平均変形抵抗の計算に適用されるが、その適用範囲は次のとおりである。

炭素量: 1.20% 以下, 対数歪: 0.5 以下, 平均歪速度: 30 ~ 200 1/sec, 温度: 750 ~ 1200°C, ただし、低炭素鋼にみられる 800 ~ 900°C での変形抵抗の異常部分については別途考慮されねばならない。

文 献

- 1) 井上: 鉄と鋼, 41 (1955) 5, 6, 8
- 2) 鉄鋼技術共同研究会編: 圧延理論と変形抵抗, (1960), p. 159 [誠文堂新光社]
- 3) 井上: 鉄と鋼, 48 (1962) 5
- 3) 池島: 日本金属学会誌, (1953)

(195)  $\gamma$ -線厚さ計による厚板の板厚測定

日本鋼管, 鶴見製鉄所

○松田一敏・前田直正・島田勝彦  
安居孝司・松原博義

Thickness Measurement of Steel Plate with  $\gamma$ -ray Thickness Gauge.

Kazutoshi MATSUDA, Naomasa MAEDA,  
Katsuhiko SHIMADA, Takashi YASUI  
and Hiroyoshi MATSUBARA.

1. 緒 言

圧延工程において板厚を連続的に測定する方法は古くから研究が進められ、特にストリップ・ミルにおいては X 線厚さ計が実用化されてきた。しかし厚板については X 線管の管電圧を上げ、またその放射密度も大きくしなければならぬことなどから、ほとんどその例を見ない。最近 R.I. の工業利用が急激に進んで、厚さ計についても  $\beta$  線、 $\gamma$  線を用いたものが鉄鋼業において、冷間薄板については多く実用化されている。厚板の熱間圧延工程中での測定は、原理的にはなんらこれらのものと変わらないが、工業測定器として実用する際には種々の問題がある。著者らはこの問題点について検討を行ない、試験を重ねた結果、これらを解決し、厚板の  $\gamma$  線厚さ計の実用化に成功したので報告する。

2.  $\gamma$  線厚さ計

2.1 厚さ計の仕様

- (1) 名 称:  $\gamma$  線厚さ計
- (2) 型 式: RTI-S 形 (日立製作所製)
- (3) 測定対象: 厚鋼板 (温度 700°C ~ 1150°C)
- (4) 測定範囲: 4 mm ~ 32 mm
- (5) 使用核種:  $^{137}\text{Cs}$   $^{10}\text{Ci}$
- (6) 測定方法: 設定値とそれに対する偏差値を絶対値で表示
- (7) 保証精度: 板厚 4 mm ~ 10 mm で  $\pm 0.1$  mm