研　究　速　報

UDC 621.771.237.011

タンデム・ストリップ・ミルの影響係数に関する一考察

Study on the Control Equations of Tandem Strip Mills

浜田圭一*・鈴木　弘*

Keiichi HAMADA and Hiromu SUZUKI

1. まえがき

タンデム・ミルの総合特性の研究で，影響係数を用いた解析例は数多く発表されているが，タンデム・ミルの特性方程式としての影響係数そのものに対する研究はいまだ不十分である．本報告では熱間，冷間タンデム・ミルについて一般的に影響係数の意味を明らかにし，影響係数を直接圧延条件因子で表し，実際にミルの制御に適用し得る精度で簡単化することを目的として影響係数を定性的に考察した．

2. タンデム・ミルの基本方程式

n std のタンデム・ミルの定常圧延状態において，第 i std では

$$2\pi R_i N_i (1+z_i{}^* G_i)(1+f_i) h_i b = U \quad (1)$$

$$h_i = S_i + (P_i/K_i) \quad (2)$$

が成立している．また $P_i \cdot G_i \cdot f_i$ は熱間タンデム・ミルでは

$$P_i = P_i(H_i, h_i, T_i, N_i) \quad (3)$$

$$G_i = G_i(H_i, h_i, T_i, N_i) \quad (4)$$

$$f_i = f_i(H_i, h_i, T_i, N_i) \quad (5)$$

冷間タンデム・ミルでは

$$P_i = P_i(H_1, H_i, h_i, t_{bi}, t_{fi}) \quad (6)$$

$$G_i = G_i(H_1, H_i, h_i, t_{bi}, t_{fi}) \quad (7)$$

$$f_i = f_i(H_1, H_i, h_i, t_{bi}, t_{fi}) \quad (8)$$

で表わされるとする．いま圧延状態に変化が生じて新しい定常状態に移行した時，圧延条件の変化率は上式をテーラ展開し2次以上の項を無視した基本方程式を満足しなければならない．

熱間タンデム・ミルでは

$$\left.\begin{array}{l} \sigma_{Hi}\bar{H}_i + (\sigma_{hi}+1)\bar{h}_i + \sigma_{Ti}\bar{T}_i + (\sigma_{Ni}+1)\bar{N}_i - \bar{U} = 0 \\ \nu_{Hi}\bar{H}_i + (\nu_{hi}-1)\bar{h}_i + \nu_{Ti}\bar{T}_i + \nu_{Ni}\bar{N}_i + \bar{S}_i = 0 \\ \bar{H}_{i-1} = \bar{h}_i \end{array}\right\} \quad (9)$$

冷間タンデム・ミルでは

$$\begin{array}{l} \sigma_{H1i}\bar{H}_1 + \sigma_{Hi}\bar{H}_i + (\sigma_{hi}+1)\bar{h}_i + \sigma_{tbi}\bar{t}_{bi} + \sigma_{tfi}\bar{t}_{fi} \\ \qquad + \bar{N}_i - \bar{U} = 0 \\ \nu_{H1i}\bar{H}_1 + \nu_{Hi}\bar{H}_i + (\nu_{hi}-1)\bar{h}_i + \nu_{tbi}\bar{t}_{bi} + \nu_{tfi}\bar{t}_{fi} \\ \qquad + \bar{S}_i = 0 \\ \bar{H}_{i-1} = \bar{h}_i \\ \bar{t}_{bi-1} = \bar{t}_{fi} \end{array} \quad (10)$$

表1　記号の説明

b	板幅	(mm)	R	ワーク・ロール半径	(mm)
f	先進率	(—)	S	ロール間隙設定値	(mm)
G	圧延トルク	(kg・mm)	T	圧延温度	(℃)
H	入側板厚	(mm)	t_b	入側張力応力	(kg/mm²)
h	出側板厚	(mm)	t_f	出側張力応力	(kg/mm²)
K	ミル定数	(kg/mm)	U	体積速度	(mm³/sec)
N	ロール速度設定値	(rps)	z^*	ミル・モータ垂下特性	(1/kg・mm)
P	圧延荷重	(kg)			

サフィックス i はスタンド番号を示す．
$\bar{\lambda} = \Delta\lambda/\lambda$ で微小変化率を示す．ただし $\bar{S} = \Delta S/h$

ただし

$$\sigma_{\lambda i} = \lambda_i \left\{ \frac{z_i{}^*}{1+z_i{}^* G_i} \frac{\partial G_i}{\partial \lambda_i} + \frac{1}{1+f_i} \frac{\partial f_i}{\partial \lambda_i} \right\}, \quad \nu_{\lambda i} = \frac{\lambda_i}{h_i K_i} \frac{\partial P_i}{\partial \lambda_i} \quad (11)$$

が基本方程式となる．熱間の場合 $n=6$ std，冷間の場合 $n=5$ std とした基本方程式の係数を表2，表3に示す．

3. タンデム・ミルの影響係数

上述のように，圧延条件 $\lambda_i (i=1, 2, \cdots, M)$ の2定常状態間の変化率 $\bar{\lambda}_i$ に対して $2n$ 個の一次の基本方程式が成立している．M 個の変数のうち $(M-2n)$ 個は独立に，$2n$ 個は従属に選べる．いま適当に従属変数と独立変数に分離し，それぞれの変数ベクトルを $\bar{\boldsymbol{y}}$, $\bar{\boldsymbol{x}}$, また係数行列を A, B とすると基本方程式は $A\bar{\boldsymbol{y}} = B\bar{\boldsymbol{x}}$ となる．従属変数係数行列 A の逆行列が求まると $\bar{\boldsymbol{y}} = A^{-1}B\bar{\boldsymbol{x}} = C\bar{\boldsymbol{x}}$ と解けて，従属変数 $\bar{\boldsymbol{y}}$ を独立変数 $\bar{\boldsymbol{x}}$ の一次式で表せる．この係数行列 C の要素 c_{ij} $(i=1, 2, \cdots, 2n;\ j=1, 2, \cdots, M-2n)$ が従属な圧延条件 y_i に対する独立な圧延条件 x_j の影響係数である．

したがって影響係数を求めることは，従属変数を未知として一次方程式を解くことと同義である．また影響係数は従属変数と独立変数の分離法に対応し，その分離法はタンデム・ミルの運転法や制御法により決定するものである．以下 6 std の熱間，5 std の冷間タンデム・ミルの従属変数と独立変数のいくつかの分離例（表4）に対して，その従属変数係数行列，その逆行列，影響係数を考える．

その分離例のうちの数例について従属変数係数行列を表5～表8に示す．

次に各 Case について従属変数係数行列のパターンに

* 東京大学生産技術研究所　第2部

表2　熱間タンデム・ミルの基本方程式

$\bar{h}_0$	$\bar{h}_1$	$\bar{h}_2$	$\bar{h}_3$	$\bar{h}_4$	$\bar{h}_5$	$\bar{h}_6$	$\bar{T}_1$	$\bar{T}_2$	$\bar{T}_3$	$\bar{T}_4$	$\bar{T}_5$	$\bar{T}_6$	$\bar{N}_1$	$\bar{N}_2$	$\bar{N}_3$	$\bar{N}_4$	$\bar{N}_5$	$\bar{N}_6$	$\bar{S}_1$	$\bar{S}_2$	$\bar{S}_3$	$\bar{S}_4$	$\bar{S}_5$	$\bar{S}_6$	$\bar{U}$
σ_{H_1}	$\sigma_{h_1}+1$						σ_{T_1}						$\sigma_{N_1}+1$												-1
	σ_{H_2}	$\sigma_{h_2}+1$						σ_{T_2}						$\sigma_{N_2}+1$											-1
		σ_{H_3}	$\sigma_{h_3}+1$						σ_{T_3}						$\sigma_{N_3}+1$										-1
			σ_{H_4}	$\sigma_{h_4}+1$						σ_{T_4}						$\sigma_{N_4}+1$									-1
				σ_{H_5}	$\sigma_{h_5}+1$						σ_{T_5}						$\sigma_{N_5}+1$								-1
					σ_{H_6}	$\sigma_{h_6}+1$						σ_{T_6}						$\sigma_{N_6}+1$							-1
ν_{H_1}	$\nu_{h_1}-1$						ν_{T_1}						ν_{N_1}						1						
	ν_{H_2}	$\nu_{h_2}-1$						ν_{T_2}						ν_{N_2}						1					
		ν_{H_3}	$\nu_{h_3}-1$						ν_{T_3}						ν_{N_3}						1				
			ν_{H_4}	$\nu_{h_4}-1$						ν_{T_4}						ν_{N_4}						1			
				ν_{H_5}	$\nu_{h_5}-1$						ν_{T_5}						ν_{N_5}						1		
					ν_{H_6}	$\nu_{h_6}-1$						ν_{T_6}						ν_{N_6}						1	

表3　冷間タンデム・ミルの基本方程式

$\bar{h}_0$	$\bar{h}_1$	$\bar{h}_2$	$\bar{h}_3$	$\bar{h}_4$	$\bar{h}_5$	$\bar{t}_{f0}$	$\bar{t}_{f1}$	$\bar{t}_{f2}$	$\bar{t}_{f3}$	$\bar{t}_{f4}$	$\bar{t}_{f5}$	$\bar{N}_1$	$\bar{N}_2$	$\bar{N}_3$	$\bar{N}_4$	$\bar{N}_5$	$\bar{S}_1$	$\bar{S}_2$	$\bar{S}_3$	$\bar{S}_4$	$\bar{S}_5$	$\bar{U}$
$\sigma_{H_1}+\sigma_{H_1}$	$\sigma_{h_1}+1$					σ_{tb_1}	σ_{tf_1}					1										-1
$\sigma_{H_{12}}$	σ_{H_2}	$\sigma_{h_2}+1$					σ_{tb_2}	σ_{tf_2}					1									-1
$\sigma_{H_{13}}$		σ_{H_3}	$\sigma_{h_3}+1$					σ_{tb_3}	σ_{tf_3}					1								-1
$\sigma_{H_{14}}$			σ_{H_4}	$\sigma_{h_4}+1$					σ_{tb_4}	σ_{tf_4}					1							-1
$\sigma_{H_{15}}$				σ_{H_5}	$\sigma_{h_5}+1$					σ_{tb_5}	σ_{tf_5}					1						-1
$\nu_{H_{11}}+\nu_{H_1}$	$\nu_{h_1}-1$					ν_{tb_1}	ν_{tf_1}										1					
$\nu_{H_{12}}$	ν_{H_2}	$\nu_{h_2}-1$					ν_{tb_2}	ν_{tf_2}										1				
$\nu_{H_{13}}$		ν_{H_3}	$\nu_{h_3}-1$					ν_{tb_3}	ν_{tf_3}										1			
$\nu_{H_{14}}$			ν_{H_4}	$\nu_{h_4}-1$					ν_{tb_4}	ν_{tf_4}										1		
$\nu_{H_{15}}$				ν_{H_5}	$\nu_{h_5}-1$					ν_{tb_5}	ν_{tf_5}										1	

表4　従属変数と独立変数の分離例

熱 間 タ ン デ ム ミ ル			冷 間 タ ン デ ム ミ ル		
Case No.	従 属 変 数	独 立 変 数	Case No.	従 属 変 数	独 立 変 数
H-I	$\bar{h}_1\sim\bar{h}_6,\ \bar{T}_2\sim\bar{T}_6,\ \bar{U}$	$\bar{h}_0,\ \bar{N}_1\sim\bar{N}_6,\ \bar{T}_1,\ \bar{S}_1\sim\bar{S}_6$	C-I	$\bar{h}_1\sim\bar{h}_5,\ \bar{t}_{f1}\sim\bar{t}_{f4},\ \bar{U}$	$\bar{h}_0,\ \bar{t}_{f0}, \bar{t}_{f5}, \bar{N}_1\sim\bar{N}_5, \bar{S}_1\sim\bar{S}_5$
H-II	$\bar{N}_1\sim\bar{N}_6,\ \bar{S}_1\sim\bar{S}_6$	$\bar{h}_0\sim\bar{h}_6,\ \bar{T}_1\sim\bar{T}_6,\ \bar{U}$	C-II	$\bar{N}_1\sim\bar{N}_5,\ \bar{S}_1\sim\bar{S}_5$	$\bar{h}_0\sim\bar{h}_5,\ \bar{t}_{f0}\sim\bar{t}_{f5},\ \bar{U}$
H-III	$\bar{h}_1\sim\bar{h}_5,\ \bar{U},\ \bar{S}_1\sim\bar{S}_6$	$\bar{h}_0,\ \bar{T}_1\sim\bar{T}_6,\ \bar{h}_6,\ \bar{N}_1\sim\bar{N}_6$	C-III	$\bar{h}_1\sim\bar{h}_4,\ \bar{U},\ \bar{S}_1\sim\bar{S}_5$	$\bar{h}_0,\ \bar{t}_{f0}\sim\bar{t}_{f5},\ \bar{h}_5,\ \bar{N}_1\sim\bar{N}_5$
H-IV	$\bar{h}_1\sim\bar{h}_5,\ \bar{U},\ \bar{N}_1\sim\bar{N}_6$	$\bar{h}_0,\ \bar{T}_1\sim\bar{T}_6,\ \bar{h}_6,\ \bar{S}_1\sim\bar{S}_6$	C-IV	$\bar{h}_1\sim\bar{h}_4,\ \bar{U},\ \bar{N}_1\sim\bar{N}_5$	$\bar{h}_0,\ \bar{t}_{f0}\sim\bar{t}_{f5},\ \bar{h}_5,\ \bar{S}_1\sim\bar{S}_5$
H-V	$\bar{T}_2\sim\bar{T}_6,\ \bar{U},\ \bar{S}_1\sim\bar{S}_6$	$\bar{h}_0\sim\bar{h}_6,\ \bar{T}_1,\ \bar{N}_1\sim\bar{N}_6$	C-V	$\bar{t}_{f1}\sim\bar{t}_{f4},\ \bar{U},\ \bar{S}_1\sim\bar{S}_5$	$\bar{h}_0\sim\bar{h}_5,\ \bar{t}_{f0},\ \bar{t}_{f5},\ \bar{N}_1\sim\bar{N}_5$
H-VI	$\bar{T}_2\sim\bar{T}_6,\ \bar{U},\ \bar{N}_1\sim\bar{N}_6$	$\bar{h}_0\sim\bar{h}_6,\ \bar{T}_1,\ \bar{S}_1\sim\bar{S}_6$	C-VI	$\bar{t}_{f1}\sim\bar{t}_{f4},\ \bar{U},\ \bar{N}_1\sim\bar{N}_5$	$\bar{h}_0\sim\bar{h}_5,\ \bar{t}_{f0},\ \bar{t}_{f5},\ \bar{S}_1\sim\bar{S}_5$

表5　Case H-I の係数行列

$\bar{U}$	$\bar{h}_1$	$\bar{T}_2$	$\bar{h}_2$	$\bar{T}_3$	$\bar{h}_3$	$\bar{T}_4$	$\bar{h}_4$	$\bar{T}_5$	$\bar{h}_5$	$\bar{T}_6$	$\bar{h}_6$
-1	$\sigma_{h_1}+1$										
	$\nu_{h_1}-1$										
-1	σ_{H_2}	σ_{T_2}	$\sigma_{h_2}+1$								
	ν_{H_2}	ν_{T_2}	$\nu_{h_2}-1$								
-1			σ_{H_3}	σ_{T_3}	$\sigma_{h_3}+1$						
			ν_{H_3}	ν_{T_3}	$\nu_{h_3}-1$						
-1					σ_{H_4}	σ_{T_4}	$\sigma_{h_4}+1$				
					ν_{H_4}	ν_{T_4}	$\nu_{h_4}-1$				
-1							σ_{H_5}	σ_{T_5}	$\sigma_{h_5}+1$		
							ν_{H_5}	ν_{T_5}	$\nu_{h_5}-1$		
-1									σ_{H_6}	σ_{T_6}	$\sigma_{h_6}+1$
									ν_{H_6}	ν_{T_6}	$\nu_{h_6}-1$

表6　Case H-III の係数行列

$\bar{h}_1$	$\bar{S}_1$	$\bar{h}_2$	$\bar{S}_2$	$\bar{h}_3$	$\bar{S}_3$	$\bar{h}_4$	$\bar{S}_4$	$\bar{h}_5$	$\bar{S}_5$	$\bar{U}$	$\bar{S}_6$
$\sigma_{h_1}+1$										-1	
$\nu_{h_1}-1$	1										
σ_{H_2}		$\sigma_{h_2}+1$								-1	
ν_{H_2}		$\nu_{h_2}-1$	1								
		σ_{H_3}		$\sigma_{h_3}+1$						-1	
		ν_{H_3}		$\nu_{h_3}-1$	1						
				σ_{H_4}		$\sigma_{h_4}+1$				-1	
				ν_{H_4}		$\nu_{h_4}-1$	1				
						σ_{H_5}		$\sigma_{h_5}+1$		-1	
						ν_{H_5}		$\nu_{h_5}-1$	1		
								σ_{H_6}		-1	
								ν_{H_6}			1

研　究　速　報

より影響係数の性格を分類すると表9のようになる．従属変数係数行列が三角行列となる場合は逆行列，したがって影響係数が容易に求められ，また三角行列の逆行列を定義により求めてみると影響係数は上流スタンドの圧延条件の変化が下流スタンドの圧延条件にのみ影響する順流現象を示すことがわかる．三角行列でない場合は逆行列を解析的に簡単な形で求めることはできず，逆流現象を示す．また従属変数係数行列が正則でない場合はその従属変数を未知数としてタンデム圧延の式

表7　Case C-Ⅱの係数行列

$\bar{N}_1$	$\bar{S}_1$	$\bar{N}_2$	$\bar{S}_2$	$\bar{N}_3$	$\bar{S}_3$	$\bar{N}_4$	$\bar{S}_4$	$\bar{N}_5$	$\bar{S}_5$
1									
	1								
		1							
			1						
				1					
					1				
						1			
							1		
								1	
									1

表8　Case C-Ⅳの係数行列

$\bar{h}_1$	$\bar{N}_1$	$\bar{h}_2$	$\bar{N}_2$	$\bar{h}_3$	$\bar{N}_3$	$\bar{h}_4$	$\bar{N}_4$	$\bar{U}$	$\bar{N}_5$
$\sigma_{h_1}+1$	1							-1	
$\nu_{h_1}-1$									
σ_{H2}		$\sigma_{h_2}+1$	1					-1	
ν_{H2}		$\nu_{k_2}-1$							
		σ_{H3}		$\sigma_{h_3}+1$	1			-1	
		ν_{H3}		$\nu_{h_3}-1$					
				σ_{H4}		$\sigma_{h_4}+1$	1	-1	
				ν_{H4}		$\nu_{h_4}-1$			
						σ_{H5}		-1	1
						ν_{H5}			

表9　従属変数の係数行列

Case	熱間	冷間	Case	熱間	冷間	Case	熱間	冷間
Ⅰ	○	△	Ⅲ	△	△	Ⅴ	○	△
Ⅱ	○	○	Ⅳ	△	×	Ⅵ	○	×

○：三角行列（逆行列容易に求まり，逆流現象なし）
△：三角行列でない（逆行列容易に求まらず，逆流現象あり）
×：行列式がゼロ（不可能な変数分離法）

（1）　体積速度一定の式　　　　（1）式

（2）　ゲージ・メータ式　　　　（2）式

（3）　圧延荷重式，圧延トルク式，先進率式

が連立して成立せず，タンデム圧延を構成しなくなるので，そのような変数を従属変数として選ぶことはできない．

以下ここでは従属変数係数行列が三角行列となるもののうち Case H-I，C-II について影響係数を直接求める．

（ⅰ）　Case H-I　基本方程式の第1，2式より

$$\left.\begin{aligned} \bar{h}_1 &= -\frac{1}{\nu_{h1}-1}(\nu_{H1}\bar{H}_1+\nu_{T1}\bar{T}_1+\nu_{N1}\bar{N}_1+\bar{S}_1) \\ \bar{U} &= \left(\sigma_{H1}-\frac{\sigma_{h1}+1}{\nu_{h1}-1}\nu_{H1}\right)\bar{H}_1+\left(\sigma_{T1}-\frac{\sigma_{h1}+1}{\nu_{h1}-1}\nu_{T1}\right)\bar{T}_1 \\ &\quad +\left(\sigma_{N1}+1-\frac{\sigma_{h1}+1}{\nu_{h1}-1}\nu_{N1}\right)\bar{N}_1-\frac{\sigma_{h1}+1}{\nu_{h1}-1}\bar{S}_1 \end{aligned}\right\} \tag{12}$$

第3式以後各スタンドに対応する2つの式を組にして

$$\begin{bmatrix}\bar{T}_i\\ \bar{h}_i\end{bmatrix}=-\frac{1}{\sigma_{Ti}(\nu_{hi}-1)-(\sigma_{hi}+1)\nu_{Ti}}\begin{bmatrix} -(\nu_{hi}-1), & \sigma_{Hi}(\nu_{hi}-1)-(\sigma_{hi}+1)\nu_{Hi}, & ({}_{Ni}+1)(\nu_{hi}-1)-(\sigma_{hi}+1)\nu_{Ni}, & -(\sigma_{hi}+1) \\ \nu_{Ti}, & -\sigma_{Hi}\nu_{Ti}+\sigma_{Ti}\nu_{Hi}, & -(\sigma_{Ni}+1)\nu_{Ti}+\sigma_{Ti}\nu_{Ni}, & \sigma_{Ti}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\bar{U}\\ \bar{H}_i\\ \bar{N}_i\\ \bar{S}_i\end{bmatrix} \tag{13}$$

を得る．$\bar{T}_i$，$\bar{h}_i$ は前スタンドの板厚変化 $\bar{H}_i=\bar{h}_{i-1}$ で表わされ，上流から順に板厚変化が下流へ伝わり，S_i・N_i を変化させると板厚，圧延温度の変化は第 i std 以降にのみ現われ逆流現象はない．

（ⅱ）　Case C-II　従属変数係数行列は三角行列でも最も簡単な対角行列で影響係数はすぐに求まり，

$$\begin{bmatrix}\bar{N}_i\\ \bar{S}_i\end{bmatrix}=-\begin{bmatrix}\sigma_{H1i}, \sigma_{Hi}, \sigma_{hi}+1, \sigma_{tbi}, \sigma_{tfi}, -1\\ \nu_{H1i}, \nu_{Hi}, \nu_{hi}-1, \nu_{tbi}, \nu_{tfi}, 0\end{bmatrix}[\bar{H}_1, \bar{H}_i, \bar{h}_i, \bar{t}_{bi}, \bar{t}_{fi}, \bar{U}]^t \tag{14}$$

となる．圧延条件を変化させたい場合その条件が関係するスタンドの圧下およびロール速度のみを調節すればよい．

4．ま と め

（1）　影響係数の意味　影響係数は基本方程式において従属変数と独立変数を分離し，従属変数を独立変数で表わした時の独立変数の係数である．

（2）　従属変数と独立変数の分離法　変数の分離法はタンデム・ミルの運転法や制御法に対応しており，問題に応じた分離法をすべきである．Case H-II・C-II は最も簡単に影響係数が求まるが，この方法はある圧延条件を変化させたい場合その条件の関係するスタンドのみの圧下と速度を調節する運転法に対応し，他の運転法や制御法に対してはこの方法の影響係数は適用できない．

（3）　従属変数係数行列　従属変数を未知として連立一次式を解くことになり，その係数行列が影響係数の性格を支配する．係数行列が正則でない時この変数の分離法はタンデム圧延を構成せず不可能な変数の分離法である．係数行列が正則の時は問題ないが，実際にはスタンド数が多いため行列の規則性や特殊性を利用し得る特別な行列のみ陽の形で逆行列を求めることができる．

（4）　三角行列　その特別な行列として三角行列がある．従属変数係数行列が三角行列の場合は容易に逆行列が求まり順流現象のみを示す．逆に三角行列でない場合は逆行列は容易に求まらず逆流現象を示す．

5. あ と が き

影響係数を直接圧延条件因子で表し，より簡単な特性方程式の提案を目的として影響係数を直接解析的にアプローチしたが，その結果次の事項が明らかとなった．

（1）　従属変数と独立変数の分離方法が多い．

（2）　その各分離法に対して従属変数係数行列の逆行列が簡単に求まらない場合が多い．

などの点からすべての問題に対して統一的に論ずることは困難である．したがって逆行列が容易に求まるものは解析的にそうでないものは数値計算や実機ミルのロギング・データ，実験データを解析して影響係数を求め特性方程式を確立すべきである．

従来影響係数を求めることに対して明確な理念が確立されておらず，数値計算，実測データによる2方法で行なわれてきた．本研究ではさらに従属変数係数行列のパターンにより解析的な方法の有効な領域が存在することを示し，またどのような圧延現象に対応するかを明らかにした．

(1971 年 11 月 30 日受理)

参 考 文 献

たとえば，鈴木・阿高：鉄と鋼 56-7 (1970) 896