

Fig. 7. (b) Relation between sand content and casting velocity.

化が少く又熔鋼中の Al は急速に酸化を受ける。

尙本実験はその実施上種々の難点はあるが目下引続き検討を行つており、現場作業との関連性に就いても明ら

イ) 鑄込過程に於いて熔鋼は空气中の酸素と反応し全酸素量、サンド量及び顕微鏡的介在物は増加する。その程度は鑄込時における熔鋼流の状態及び熔鋼の化学成分と強い関連性を有している。

ロ) 鎮静不充分的な熔鋼は熔鋼流の状態が不齊で従つて酸化の程度が大である。

ハ) 高炭素鋼は C 以外の元素の酸

かにしたいと考えている。大方の御教示と御批判を賜り度い。

終りに本研究の発表を許可せられたる株式会社日本製鋼所室蘭製作所長常務取締役柳武氏に謝意を表すると共に終始御鞭撻を賜つた同所副所長取締役皆川孝光氏並びに種々御助言を頂いた北海道大学工学部吉井助教授に深謝する。尙実験の実施及び分析等に協力せられた曾我政雄、竹林朝雄、須藤実及び藤森英一の諸氏にお礼申し上げます。(昭和 30 年 1 月寄稿)

文 献

- 1) Bardenheuer & Henke: Mitt. K-W. Inst. Eisef. 21 (1937), 243.
- 2) Wentrup & Linder: St. u. Ei. 63 (1943), 873
- 3) Ranque: St. u. Ei. 64 (1944), 459.
- 4) Hultgren: Jerkont. Annal. 129 (1945), 633.
- 5) Brower, Bain & Larsen: Trans. A.I.M.E. 133 (1950), 851.
- 6) 八幡製鉄株式会社: 学振 19 委 3335. (1954)
- 7) 中川, 曾我: 鉄と鋼 39 (1953), 101
- 8) 前川, 中川: 日金属誌 13 (1954), 57

熔鉄の流動性に関する研究 (III)*

小 池 与 作**

STUDIES ON THE FLUIDITY OF MOLTEN IRON (III)

Yosaku Koike

Synopsis:

The flowing properties of various molten irons were measured by the weight which flowed out through the capillary (2.3mm diameter, 15mm length). The flowabilities of these capillaries were determined by the mercury at room temperature. The flowing properties of the molten irons consisting of the almost same composition (C, Si, Mn, P, S) were different by its molten state, especially by the oxygen content or excess deoxidizer.

Now the authors measured the flowing properties of mercury, molten tin and bismuth by the same capillary which was used for molten iron, and obtained the relation between kinematic viscosity ($\nu = \eta/\rho$) and the time (τ) required to let flow constant volume of the metal.

By the theory of hydrodynamics, τ is the function of ν , so that from the above relation for mercury, tin and bismuth the value of ν corresponding to τ which was experimentally measured about the molten iron could be obtained. The viscosity of molten iron was calculated from the value of ν .

The viscosity of molten pig generally used was 0.0156~0.0120 at 1250~1400°C, while that of steel (0.3% carbon) was 0.0195 at 1535°C. The viscosity of steel at 1620°C was estimated

* 昭和 28 年 4 月本会講演大会にて講演 ** 富士製鉄釜石製鉄所, 研究所

as 0.0169 by exterpolation, when the rate of viscosity-change of the molten steel against the temperature was assumed to be the same as that of molten pig.

I. 緒 言

熔鉄の粘性は鉄鋼製錬の際、その化学反応速度や反応生成物の浮上除去等に大きな影響を有する。

真島博士 (1942)¹⁾, Thielmann 氏 (1927)²⁾ 等は振動法により、又斎藤、松川両博士 (1942)³⁾は回転円筒法により熔鉄の物理学的粘性を測定した。熔鋼の粘性についてはその実測値の発表されたものは少く H. Schenck⁴⁾は 1927 年 Thielmann 氏が振動法により 3.85% carbon の熔鉄について行つた実験結果を外延して、1600°C に於ける熔鋼の粘性に 0.10 なる値を与えた。

長さ 15mm, 径 2.3mm の MgO 流出孔を使用しして各種の熔鉄並びに熔鋼を一定静圧のもとに流出せしめ温度の影響や熔融状態がその流動性に及ぼす影響を調査した結果は既に報告した⁵⁾。今回はこれ等の実験結果及びその後得られた測定成績より熔鉄の物理学的粘性の近似値を求め従来の研究結果と比較検討することとした。

II. 流動性の測定方法並測定結果の概要

(1) 熔鉄についての測定

詳細は前回発表の通りであるが Fig. 1 の如き装置を用い熔鉄の head 137mm の下に径 2.3mm, 長さ 15mm の流出孔を使用して各種熔鉄の流出実験を行つた。流出孔は熔鉄流出前に常温に於いて水銀の流出試験により、その流出能力を測定したものである。また熔鉄は 500kg 高周波炉にて熔解し一定温度に達した後 5 分間保ちこれを Fig. 1 の熔鉄溜り B に出湯する。B はあらかじめ 600°C に加熱されており 1 回の実験にて 65kg の熔鉄が注入される。又この湯溜り B には流出孔 A を装備しこれはあらかじめ Stopper でとめられており出湯鎮静後、Stopper を除去して一定時間に流出する熔鉄の重量を測定した。時間の測定には Stop watch を使用し

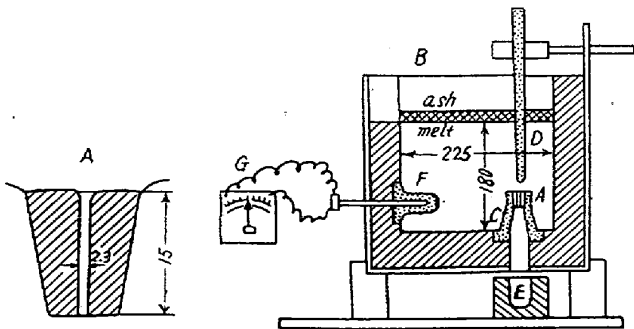


Fig. 1. (2)

Fig. 1. (1)

Table 1. The fluidity of molten pig generally used

Sample No.	Temp. of molten pig (°C)	Weight of pig which flowed out through the capillary for 90 sec (gm)	Time required to let flow 0.3 kg pig (Z)	Composition	Remark
2	1400	3155	8.56	C 3.3~3.6 Si 1.6~2.6 Mn 0.40~0.50 P 0.20~0.30 S 0.05~0.10	The flowability of the capillary is to let flow out 1154g mercury for 30 seconds at the mean head of 30mm
	1330	3070	8.80		
	1160	2935	9.20		
3	1300	3280	8.23		
	1270	3216	8.40		
4	1400	3330	8.11		
	1330	3181	8.49		
	1255	3090	8.74		
7	1360	2945	9.16		
	1320	2903	9.30		
	1260	2823	9.56		
8	1350	2998	9.01		
	1280	2900	9.32		
	1260	2800	9.38		
9	1410	2935	9.20		
	1340	2853	9.46		
	1250	2770	9.75		
10	1310	2950	9.15		
	1230	2845	9.49		
11	1300	3132	8.62		
	1275	3098	8.72		
	1230	3021	9.94		
12	1390	3214	8.40		
	1330	3180	8.49		
	1240	3104	8.70		
13	1360	3269	8.26		
	1310	3237	8.34		
	1260	3162	8.54		
15	1300	2307	11.7	Al (addition)	
	1250	2142	12.6		

た。又熔鉄の温度は Pt-Pt Rh 熱電対を F にさし込み流出開始後 60 秒経過した時の温度を測定した。Table 1 には普通の熔鉄及び普通熔鉄に過剰 Al (又は Fe-Si) を添加したものについての 2, 3 の成績を示した。Table 2 には C 約 0.35% の低合金鋼及び C 約 0.30% の炭素鋼についての測定値を示した。

Table 1 及び Table 2 より明らかなる如く熔鉄、熔鋼共にその熔融状態により流動性の大きさ、温度に対す

る変化率は可成り相違している。平衡状態に近いものが流動性は大きく、温度に対する変化率は小さいことを前回報告した。Table 1 及び Table 2 の成績の中比較的

Table 2. Fluidity of molten Steel

Sample No.	Temp. of molten Steel (°C)	Weight of steel which flowed out through the capillary for 90 sec. (gm)	Time required to let flow 0.3kg steel (Z)	Composition	Remark
1	1545	2950	9.15	Ni-Cr low alloy steel	the flowability of the capillary is to let flow out 1154g, mercury for 30 seconds at the mean head of 30mm
2	1537	2997	9.01		
3	1535	2730	9.89		
4	1543	2870	9.41		
5	1535	3150	8.57	0.3% C steel	0.2kg Al/100kg steel addition
6	1540	3080	8.77		
7	1550	5900	9.02		
8	1555	1860	14.50	0.2kg Al/100kg steel addition	
9	1540	2880	9.38		
10	1550	2060	13.10		

流動性が大きで温度に対する変化率の小なるものを選び、これを便宜上一定重量 (3300gm) の流出秒時に換算した。Table 3 はこれを示す。

Table 3 に於いて先ず測定された流出重量を 100cc の流体が流出する秒時に換算した。次にその成績を温度変化に伴う液体の体積変化及び流出孔断面積の変化等流

Table 3. The time required to let flow out 100cc molten iron through the capillary (2.3mm dia, 15mm length)

Sample	Temp. of iron (°C)	Time required (sec)	Time required to let flow out 100cc molten iron (sec)		Z	Addition
			Non corrected value for temp.	Corrected value for temp.		
Pig The weight which flowed out is 3300gm, mean head is 137mm	1250	95.54	19.98	20.38	8.68	Molten pig generally used
	1300	94.30	19.72	20.10	8.57	
	1350	93.01	19.45	19.84	8.45	
	1400	91.96	19.23	19.61	8.36	
	1250	140.70	29.40	29.99	12.6	Al addition
	1300	128.80	26.90	27.44	11.7	
Steel Same as pig	1535	94.56	20.49	20.90		
	1620					

Remark: The calculations are carried out by the following assumptions.

- (i) Pig: The specific gravity at 1250°C is 6.9 and the expansion coefficient at this temp. is 1×10^{-4}
- (ii) Steel: The specific gravity at 1535°C is 7.15.
- (iii) MgO: The linear expansion coefficient is 1.6×10^{-5} at 20~1540°C.
- (iv) The value of total correction for observed temp. is $+2/100$.

動性の絶対値を考えるため必要な要素を加味して修正した。

(2) Hg, Sn, Bi, H₂O についての測定

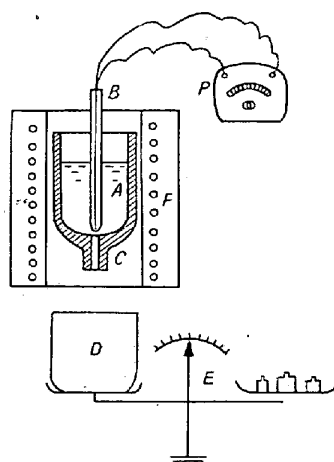


Fig. 2.

る。流出始めより一定量が流出した天秤Eの針がふれて中心を通過するまでの時間を stop watch にて測定した。

Table 4 には Hg, Sn, Bi, H₂O の流出秒時及びこの流出秒時を head 137mm, 流出量 100cc に換算したもの、更にこれ等の値より求めた力学的粘性 (ν), 流出係数 (c), Reynolds No. (Re) を示した。

III. 物理学的粘性 η と流出秒時 τ との関係

Table 4. Relation between the time (second) required to let flow out the unit volume through the capillary (2.3mm dia, 15mm length) and ν , C , Re

Sub.	Temp. (°C)	time required (τ)		ρ	η	$\eta/\rho(\nu) \times 10^{-3}$	v	C	$Re \times 10^4$
		Non-corrected	Corrected						
Sn	240	16.09	20.80	6.99	0.0185	2.646	115.9	0.7068	1.007
	280	15.90	20.56	6.96	0.0169	2.428	112.2	0.7147	1.110
	320	15.75	20.36	6.93	0.0154	2.222	118.4	0.7220	1.226
Bi	280	15.05	19.46	10.08	0.0164	1.627	123.8	0.7549	1.750
	310	14.93	19.36	10.02	0.0157	1.566	124.9	0.7616	1.835
	340	14.82	19.16	9.98	0.0151	1.313	125.8	0.7671	1.914
H ₂ O	10	17.25	21.37	1.00	0.0131	13.10	112.8	0.6879	0.1980
	20	16.71	20.47	0.998	0.0100	10.12	118.3	0.7214	0.269
	40	15.75	19.51	0.992	0.0067	6.75	123.5	0.7531	0.421
	60	15.16	18.81	0.983	0.0046	4.67	128.1	0.7812	0.641
Hg	22	14.26	18.44	13.54	0.0158	1.167	130.7	0.7970	2.576
	35	14.17	18.33	13.51	0.0152	1.125	131.5	0.8019	2.686
	45	14.12	18.26	13.48	0.0147	1.091	132.0	0.8049	2.783
	60	14.04	18.16	13.45	0.0142	1.056	132.7	0.8092	2.890
	80	13.94	18.03	13.40	0.0134	1.000	133.7	0.8153	3.075

Remark (i) actually measured value is the time required to let flow out 45cc at the mean head of 46.5mm.

(ii) corrected value is calculated as the time required to let flow out 100cc at the mean head of 137mm.

(iii)
$$v = \frac{Q}{\frac{\pi}{4} d^2 \tau}, \quad \frac{Q}{\frac{\pi}{4} d^2} = 2410 \quad Re = \frac{vd}{\nu} = \frac{vds}{\eta}, \quad C = \frac{v}{\sqrt{2gH}}, \quad \frac{v}{\sqrt{2gH}} = 164$$

流出法で普通の液体の粘性が測定される場合には比較法が用いられる。此の場合は Poiseulle の一般式が成立し、Hagenbach の補正を必要としない場合に限る。このためには流出孔径がある限度より小さく、流出孔の長さとの比が層流となるに必要な大きさであり、又 Reynolds 数が層流となるに充分な条件を備えていなければならない。此の実験では径 2.3mm, 長さ 15mm の流出孔により流出秒時を測定しているのて次に示す方法で流出秒時 τ より物理学的粘性 η を求めることとした。

(1) τ と ν との関係

銻鉄以外の熔融金属 Hg, Sn, Bi について同一流出孔を使用し head H と流出量 Q とを一定として流出実験を行い、流出秒時 τ と力学的粘性 ν との関係を求める。次に銻鉄について同一流出孔により τ を実測し前に求めた τ - ν 曲線よりこの τ に相当する ν を求める。 $\eta = \rho\nu$ であるから η を計算することが出来る。

τ と ν との関係式は次の通りである。

流出係数: $C = v/\sqrt{2gH}$(1)

流速: $v = Q/\frac{\pi}{2} d^2 \tau$(2)

Reynolds No.: $Re = vd/\nu$(3)

$C = f(Re)$(4)

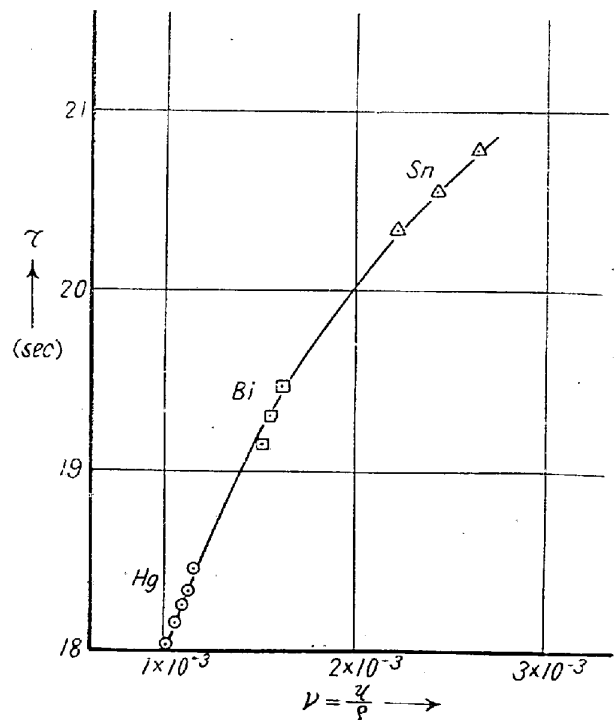


Fig. 3.

$$Q/\frac{\pi}{4} d^2 \tau / \sqrt{2gH} = f\left(Q/\frac{\pi}{4} d^2 \tau / \nu\right)$$

$$\tau = \varphi(\nu HQ) \quad (H, Q \text{ は const.}) \dots\dots\dots (5)$$

Sn, Bi, Hg, H₂O についての流出試験実測値は Table 4 の通りであるが、これを熔鉄の場合と同様の head 137 mm, 流出量 100cc に換算した場合の流出秒時 τ と力学的粘性 ν との関係は Fig. 3 の如くである。熔鉄及び熔鋼の各温度に於ける流出秒時 τ は Table 3 の通りである。前に求めた $\tau-\nu$ 曲線よりこの τ に対する ν を求め、これより η を計算すると Table 5 の如くである。

Table 5.

Sample	Temp. °C	ρ	τ	ν	η
Pig	1250	6.90	20.38	2.26×10^{-3}	0.0156
	1300	6.87	20.10	2.07 "	0.0142
	1350	6.83	19.84	1.90 "	0.0130
	1400	6.80	19.61	1.76 "	0.0120
Steel	1535	7.15		2.71 "	0.0192

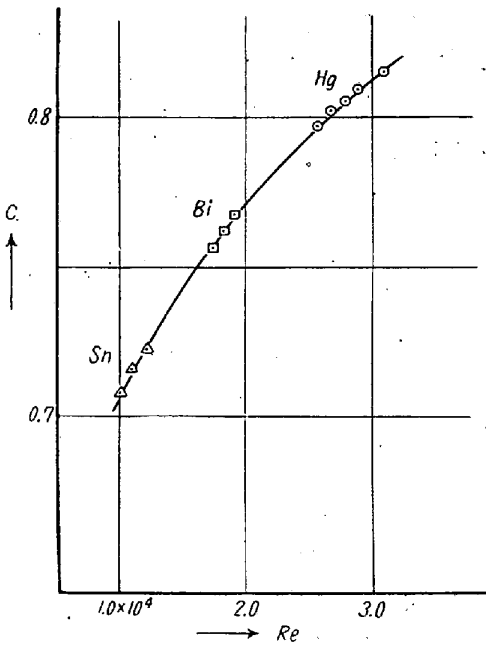


Fig. 4.

(2) C と Re

Sn, Bi, Hg, H₂O について行った流出実験の成績 (Table 4) より求めた流出係数 C と Reynolds No. Re との関係を示したものが Fig. 4 である。熔鉄及び熔鋼の各温度に於ける流出秒時 τ より Table 6 の如く C を計算し、Fig. 4 の curve よりこの C に対する Reynolds No. を求める。Re は $vd/\eta/\rho$ であるから、Table 6 の如く η を計算することが出来る。

Table 6.

Sample	Temp °C	τ	ν	C	Re	η
Pig	1250	20.38	118.3	0.7213	1.22×10^5	0.0154
	1300	20.10	119.9	0.7311	1.35 "	0.0140
	1350	19.84	121.5	0.7409	1.50 "	0.0127
	1400	19.61	122.7	0.7482	1.62 "	0.0118
Steel	1535				0.97 "	0.0191

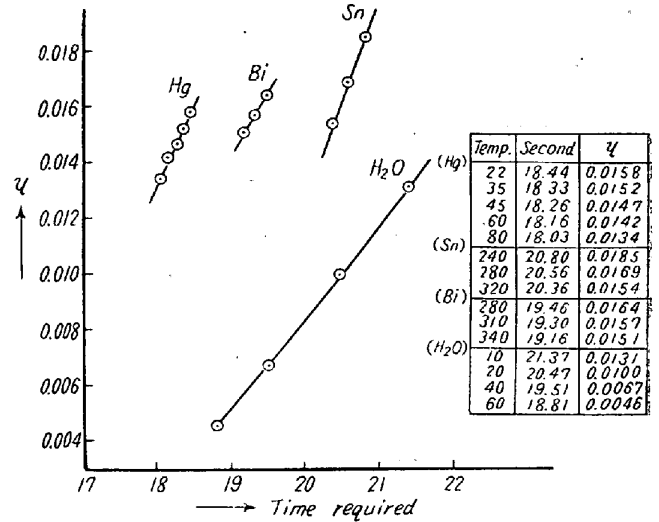


Fig. 5.

(1) (2) の方法より求めた熔鉄の粘性 η の間には大きな差異がなく実用上一致していると言うことが出来る。

又参考のため Sn, Bi, Hg, H₂O の各々について τ と η との関係を図示すると Fig. 5 の如くで Sn, Bi, Hg の如き熔融重金属にありては夫々の curve が Reynolds 数に略々比例してずれている。H₂O の如き流体にありて Reynolds 数と更にその物理的性質の差異が影響している。

(3) 1620°C に於ける熔鋼の粘性

1535°C に於ける熔鋼の粘性は前述の如くにして求めたが実験装置の構造, 耐火度等の関係で更に高温の熔鋼の流動性の測定は困難であつた。熔鋼の場合も温度に対する粘性の変化率が熔鉄の場合と同様であると仮定し Fig. 6 に示す如く 1620°C に於ける粘性の近似値を求めれば 0.0169 となる。

IV. 実験結果に対する考察

熔鉄や熔鋼はその熔融状態により流動性を変化することは前回発表した通りである。普通の熔鉄についてその温度と粘性との関係を求めたものを Fig. 6 に示した。又熔鉄に Al や Fe-Si を投入したものについては、その流出秒時 τ が著しく大きくなつていたので Fig. 3 及び Fig. 4 の曲線より求めると誤差が大きくなり粘性の

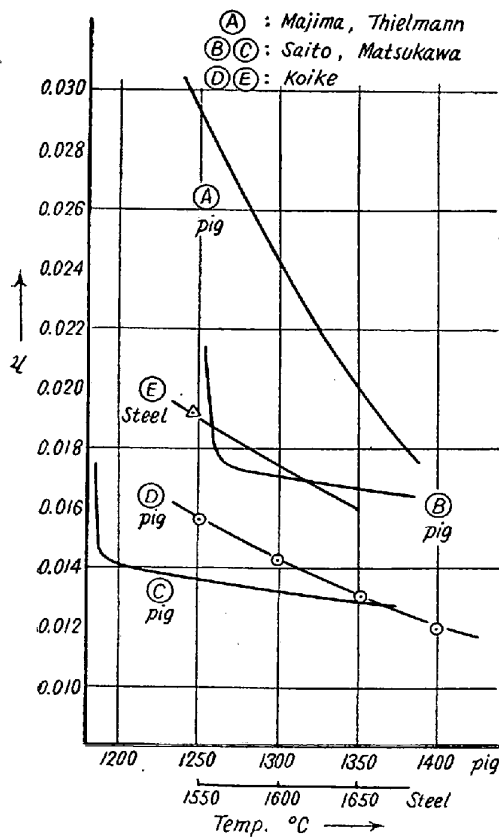


Fig. 6.

値を求めることは出来ないがその絶対値は相当に大きく又温度に対する変化率も増大していることが推定される。Fig. 6 には更に真島博士、Thielmann 氏及び斎藤、松川両博士により測定された物理学的粘性をつけ加えて示した。真島博士と Thielmann 氏による測定値はほとんど一致しているが、これ等は斎藤、松川両博士の測定値とはその絶対値に於いても、その傾向に於いても著しい差がある。本実験に於いても熔銑の熔融状態特に熔銑中の [O] と脱酸元素との関係により可成り大きな差異を生じた。而して普通に実用されている熔銑はその絶対値に於いては概ね斎藤、松川博士の測定値と類似の成績を示したが、温度に対する変化率においては真島博士、Thielmann 氏の測定値と斎藤、松川両博士の測定値の中間の成績となった。又熔銑中に急激に Al や Fe-Si のような脱酸元素を添加したものはその流動性の

絶対値も温度に対する変化率も極めて大きくなっている。その粘性は真島博士、Thielmann 氏の測定値に近いものと考えられる。

熔鋼の粘性については未だ実測されたものが少く、H. Schenck 氏は Thielmann 氏の熔銑に対する測定結果を外延して、1600°C に於ける熔鋼の粘性係数 0.010 にを与えた。然しこれは銑鉄から鋼への物理的性質の変化が完全に continuous に行われること、及びその他の仮定のものとなされたものであり、今回 1535°C 附近に於ける熔鋼についての実測値より求めたものは H. Schenck 氏の求めたものより可成り大きく 1620°C に於いて 0.0169 となった。又熔鋼の場合も過剰 Al を添加したものは流出秒時 τ が大きくなり、Fig. 3 又は Fig. 4 の曲線より求めることは出来なかつたが、その粘性が可成り大きくなっているものと考えられる。Fig. 6 の各測定値に対する化学成分は Table 7 の通りである。

V. 結 言

熔銑又は熔鋼は水銀の如き純金属と異なり高温に於いて平衡状態にあるか否かで、その流動性に相当の差異を生ずる。又温度を低下しつつ測定を行う場合はその速度も又平衡状態を左右するので測定値に可成り大きな影響がある。本実験は実際作業に近い状態に於ける熔銑の流動性を測定し、これをもととして物理学的粘性の近似値を求めたもので平衡状態のものに比べると粘性の絶対値も変化率も幾分差異があるものと考えられる。

本研究は東北大学の場教授の御懇切なる御指導によるものであり、流体力学的考察については東北大学坪内教授、菊池助教授の御教示を仰いたものである。又実験は日本ニッケル株式会社奉職中同社関係各位の御援助により行われたものである。ここに厚く感謝の意を表す。

(昭和 30 年 1 月寄稿)

文 献

- 1) 真島: 理研 3 (1924) 51
- 2) H. Thielmann: Stahl und Eisen 47 (1927) 389
- 3) 斎藤, 松川: 鉄と鋼, 17 (1942) 502
- 4) H. Schenck: Physikalische Chemie der

Table 7.

Observer	C	Si	Mn	P	S	Remark
(A) Majima Thielmann	3.50					
(B) Saito Matsukawa	2.84	1.52	0.58	0.17	0.10	
(C) " "	3.64	1.32	0.37	0.18	0.19	
(D) Koike (Pig)	3.3~3.6	1.6~2.0	0.40~0.50	0.20~0.30	0.05~0.10	
(E) " (Steel)	0.30~0.33	0.18~0.20	0.31~0.35	0.034~0.036	0.035~0.036	

Eisen hüttenprozesse B 2, 203

(ii) 鉄と鋼 39 (1953) 1171

5) 小池: (i) 鉄と鋼 39 (1953) 948

鋼の高温加工強度に関する研究 (II)*

(各種鋼材の高温変形抵抗)

井上勝郎**

STUDIES ON THE HOT-WORKING STRENGTH OF STEELS (II)

(High-Temperature Deforming Strength of Various Steels)

Katsuro Inouye

Synopsis:

By the use of the high-temperature and high-speed tensile testing machine mentioned in report No. 1 (Tetsu-to-Hagané vol. 41 (1955) No. 5, p. 506~515), the author performed tensile tests of the following combinations in regard to 15 kinds of steels (refer to Table 1) to be used for seamless tubes.

Speed \ Temp.	77/S	7/S	0.8/S
1230°C			
1030			
830			

For all of these, the author obtained both the nominal stress-strain curve and the true stress-natural strain curve. The values of deforming stress (at 20% strain) were listed in Table 2. These data conformed to those of other authors already developed.

Among such factors as deforming stress σ , deformation (strain) ϵ , deforming speed $\dot{\epsilon}$ and temperature (absolute) Tk , the author obtained the following equation.

$$\sigma = k \cdot \epsilon^n \cdot \dot{\epsilon}^m \cdot e^{A/Tk}$$

In this report the above relation was fully discussed.

I. 緒言

第1報*** に於いて述べた高温高速度引張り試験装置を使用し、実用各種鋼材について高温引張り試験を行い、高温変形抵抗を求めたので、その結果を述べる。

II. 試験材料及び試験条件

試験材料として選んだのは Table 1 に示す 15 鋼種である。筆者はマンネスマン法による継目無し鋼管製造に従事しているので、試験材料も鋼管用素材から選んだが、この 15 鋼種で現在実用されている鋼管用材料は殆んど全部尽きている。試験材は直径 100mm 程度の実用材料より代表的成分のものを選び、之を直径 25mm の丸棒に鍛造し、Table 1 に示した熱処理を施して標準

組織にした後、旋盤加工により試験片を削り出した。試験片の常温の機械的性質は Table 1 に示す通りである。

試験条件は第1報の Table 1 に基き、変形速度は 77/S, 7/S 及び 0.8/S, 試験温度は 1230°C, 1030°C 及び 830°C とし、各鋼種毎に両条件の組合せの9条件に於ける値を求めた。既に述べた様に、之で実際の圧延鍛造、製管、押し出しその他の高温塑性加工で実現される条件を十分にカバーする事ができる。実験は各条件共 2~3 回のくりかえしを行い、再現性を確認した。

* 昭和 29 年 10 月塑性加工専門講演会に於て講演

** 日本特殊鋼管株式会社

*** 鉄と鋼昭和 30 年 5 月号 506~515.