

ノズルの形状による熔鉄ジェットの安定性*

(出鋼造塊時の熔鋼の流体力学的研究—III)

小池与作**・武藤陽造***・大久保惣三郎****

On the Stability of Molten Iron Jet through Various Shapes of Nozzles.

(Study of the hydrodynamics of molten steel in tapping and teeming—III)

Yosaku Koike, Yōzo Mutō and Sōzaburo Ōkubo

Synopsis:

In the previous research (ib., Tetsu-to-Hagané vol. 44, 1958, p. 122.), the characteristics of jets of some water solutions and mercury through the nozzles of various diameters and shapes were studied, and the flowing property of a nozzle tapered at entrance and with a short parallel straight part at outlet was better than that of normal one.

In this research, the flowing conditions of the molten iron through 20mm ϕ and 40mm ϕ practical nozzles were observed, and for both sizes of nozzles, specially tapered and normally designed types were examined. The results obtained were as follows:

(i) 20mm ϕ nozzle:

The condition of jets through both types of nozzles (specially tapered and normally designed) were almost the same and seemed not to be turbulent at a high head (about 900mm). The flowing properties of both type nozzles were different at a low head. Though the jets through tapered nozzles were dripping under 200mm head, the jets through normal ones dripping under 340mm head.

(ii) 40mm ϕ nozzle:

The jets through tapered nozzles did not show turbulence even at the 900mm head, but the jets through normal nozzles were thought to be turbulent above 700~750mm head. The dripping condition of jets through both tapered and normal nozzles were almost same at a low head. The dripping range of each type nozzle was very small and could not be measured clearly.

(iii) Bubble enfolded by molten iron jet:

If the molten iron jet was assumed to begin enfolded bubbles at the same Reynolds number $\times \nu$ (kinematic viscosity) where the mercury jet began to enfold bubbles, the molten iron jets through 20mm ϕ and 40mm ϕ nozzles began to enfold bubbles at 640mm and 580mm heads respectively by calculation.

Though the experiments for higher heads of a ladle and erosion of nozzle material have not been completed yet, some considerations for design of nozzles and ladles were described in conclusion based on the results of the previous and this investigations.

I. 緒 言

ノズルより流出する溶融重金属の流れの状況がノズル入口側の head やノズル形状によりいちじるしい変化のあることを水や水銀により 3~10mm 径のノズルを使用して実験した。その結果についてはすでに報告した。今回は以上の基礎実験の結果にもとづいて直径 20mm ϕ および 40mm ϕ で実用ノズルにつき特殊形状のものとして普通のもの 2 種類を設計製作し、約 4.0t の熔銑

を使用してその流出性能を試験した。物理的性質の異なる液体をノズルより流出した場合の流れの状況が主としてレーノルズ数により左右されると仮定すれば、水銀による 10mm ϕ ノズルの実験はおおむね熔鉄による 20mm ϕ ノズルの実験に相当することになる。

* 昭和34年4月本会講演大会にて発表

** 富士製鉄株式会社釜石製鉄所 研究所 工博

*** // 窯業課

**** // 工作課

II. 実験方法

前回までの水銀による予備実験の結果により特殊形状および普通形状の 20mm ϕ および 40mm ϕ ノズルを Fig. 1 (1) (2) お

よび Fig. 2 (1)

(2) のごとく設計

製作した。Fig. 1

(1) および Fig.

2 (1) に示すノズル

は入口側にテー

パーをつけたこと

およびノズル孔の

平行直線部をでき

るだけ短くしたも

のである。またノ

ズル耐火物は熔銑

流出による浸蝕変形を防止するため高 Al_2O_3 製のものを使用した。その化学成分は SiO_2 53%, Al_2O_3 43% である。この実験においてはノズルの形状を重要視したので注入過程で変形しないため比較的融点の低い熔銑について試験を行なった。

Fig. 3 はその装置の概要

を示す。流出し始めてより

流出終了まで 10~60 s お

きに露出時間 1/1000s, 絞

り f5.6, フィルター p01

にて熔鉄流の状況を逐次撮

影した。撮影距離は430cm

とした。またノズルは全開

し、ストッパーの lift (ノ

ズルとストッパーとの間隔)

は 55mm であった。これだけの lift があればその微

少の差異は流出状況には影響しない。

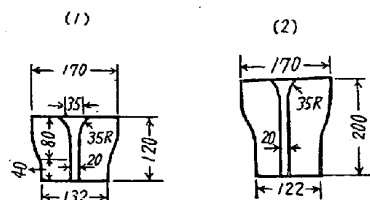


Fig. 1. 20mm ϕ nozzles.

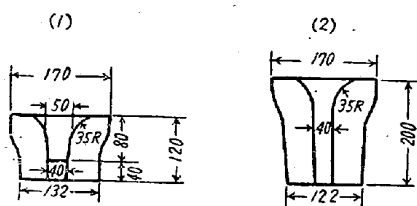


Fig. 2. 40mm ϕ nozzles.

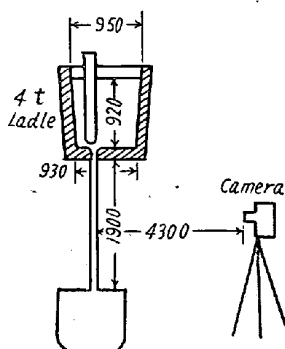


Fig. 3. Equipment for flowing test.

III. 実験結果

(1) 20mm ϕ および 40mm ϕ ノズルによる測定結果

第1次実験は実験番号 1~9 で 20mm ϕ ノズルを使用したものであり、第2次実験は実験番号 11~16 まで 40mm ϕ のノズルを使用したものである。実験に使用した熔銑の化学成分の1例は Table 1 の通りであり、また各試験とも cupola より出銑後流出実験開始までの保持時間は3~4分であった。また流出試験経過を Table 2 に示した。第1次実験のうち、実験番号 No. 1~No. 5

Table 1. Chemical analysis of samples.

Nozzle type	Exp. No.	Composition (%)				
		C	Si	Mn	P	S
Special	No. 1	3.64	1.57	0.51	0.078	0.068
	No. 4	4.10	1.50	0.45	0.111	0.063
Normal	No. 2	3.71	1.53	0.48	0.110	0.071
	No. 3	3.58	1.37	0.43	0.093	0.069

Table 2. Process of flowing tests.

Experiment number	Nozzle form and number		Tapping temp. °C (op. py)	Time during flow-test (mn-s)	Interval of photo. (s)
I Nozzle dia 20mm	Specially designed	No. 1	1430	13'20"	10~30
		No. 4	1420	13'25"	10~30
		No. 5	1430	13'20"	10~30
		No. 6	1400	12' 0"	10~30
		No. 8	1420	12'15"	30~60
	Normally designed	No. 2	1430	15'45"	10~30
		No. 3	1420	15'40"	10~30
		No. 7	1410	13'50"	10~30
		No. 9	1410	12'40"	30~60
II Nozzle dia 40mm	Specially designed	No. 11	1406	3' 0"	15~30
		No. 13	1417	2'55"	15~30
		No. 15	1406	2'55"	15~30
	Normally designed	No. 12	1417	3' 5"	15~30
		No. 14	1425	3' 0"	15~30
		No. 16	1420	3' 0"	15~30

までは同一時期の取鍋を使用した。したがって同一 head にたいしては熔銑量はほとんど同一であった。No. 6~No. 9 は取鍋ライニングを張り換えたため同一 head にたいして熔銑量はかなり少くなっている。また第2次実験は同一時期の取鍋を使用したので同一 head に対する熔銑量はおおむね一定と考えられる。第1次実験における 20mm ϕ の特殊ノズルおよび普通ノズルによる各注入時期における熔鉄流を撮影したものの1例を Photo. 1 の (1), (2) に示した。Photo. 1(1) は特殊ノズル No. 8 (No. 1, No. 6 等略), また Photo. 1(2) は普通ノズル No. 9 (No. 7, No. 8 等略) について撮影したものである。また第2次実験における 40mm ϕ の特殊ノズル No. 11 (No. 13, No. 15 等略) および普通ノズル No. 12 (No. 14, No. 16 等略) による各注入時期の熔鉄流を撮影したものを Photo. 2 の (1), (2) に示した。

Photo. 1 (1), (2) に撮影された (a)~(e) 各 jet および Photo. 2 における (a)~(g) など各 jet の流出始めより撮影瞬間までの時間を Table 3 に示した。Table 3 より Photo. 1~2 における各 jet は同一径の

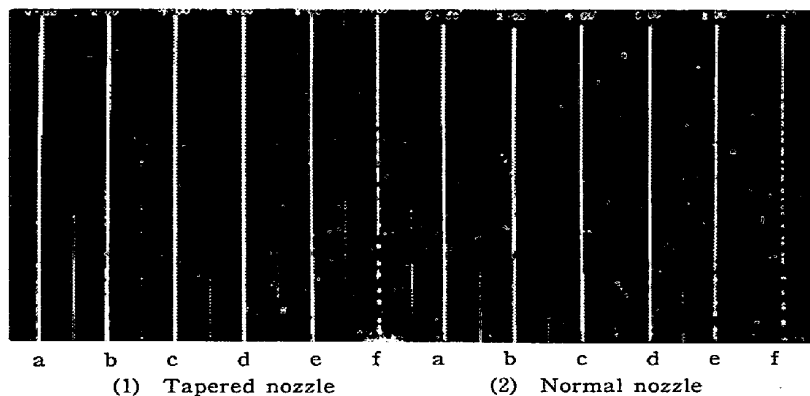


Photo. 1. The conditions of molten iron jets through 20mm ϕ nozzles at various heads.

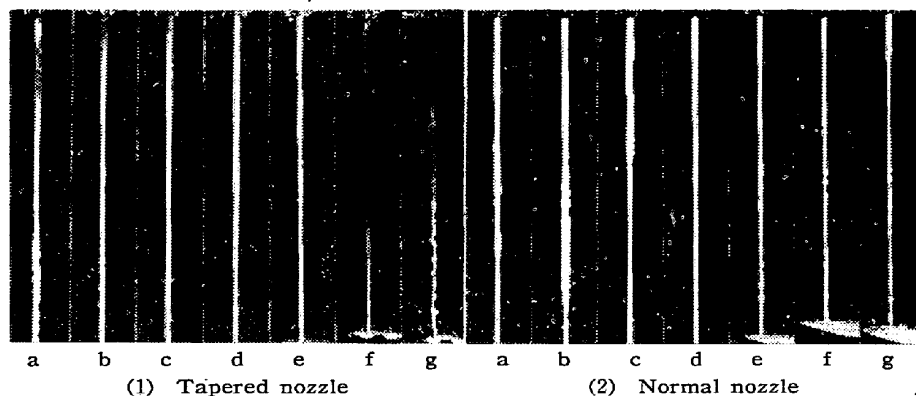


Photo. 2. The conditions of molten iron jets through 40mm ϕ nozzles at various heads.

Table 3. Time to photograph from test-beginning and corresponding head in the ladle.

Nozzle dia		20 (mm)		40 (mm)	
Marks jets photographed	Time head	Time (mn-s)	Head (mm)	Time (mn-s)	Head (mm)
(a)		0-30	865	0-15	795
(b)		2-00	705	0-45	570
(c)		4-00	520	1-15	455
(d)		6-00	355	1-45	250
(e)		8-00	240	2-30	75
(f)		11-00	75	2-45	20
(g)				3-00	0
				(2-55)	(Nearly)

ノズルに対してはいずれも取鍋内熔鉄 head がおおむね同一時期に撮影されたことがわかる。流出始めよりの経過時間と取鍋内の head との関係を各ノズルごとに概算したものを Table 3 に示した。各実験番号についての撮影写真により乱流から層流へ、層流から滴下流への遷移の状況の概要を調査すると Table 4 の通りである。熔鉄 jet の高い head における乱れや、空法巻込みの程度を正確に判定することは困難であり、ここでは後にも述べる通る水銀実験の場合の空気の巻き込みと jet の形状および Reynolds 数の関係より熔鉄 jet の乱れの

程度を推定した。また低い head における層流より滴下流への遷移は jet の撮影写真により明らかに判定することができた。この滴下流による空気巻込みの程度は水銀実験の場合に調査した滴下流と空気の巻込みとの関係より一応推定することができる。また実験に使用したノズルは終了後、取り外し調査したが浸蝕または変形を全く受けていなかった。したがってこの実験は熔鉄流出の間ノズルの理想的な形が保たれていた場合のものである。これらの jet の撮影写真および成績表よりつぎの結果が得られた。

(i) 20mm ϕ ノズルについて:

(a) 特殊ノズルと普通ノズルとの比較では高い head (900~800 mm) における乱流程度の差異は写真では全く判定できなかった。さらに高い 1500~2000mm 程度の head においては両ノズル間の差異が認められると思われる。

(b) 低い head (400mm 以下) における層流より滴下流への遷移では特殊ノズルの方が普通ノズルより

良好であつた。特殊ノズルの場合は取鍋内 head 約 200 mm より、また普通ノズルの場合は約 340mm より滴下流となつた。両ノズルとも水銀実験による予想以上に滴下流の範囲が大であつた。

(c) 特殊ノズルによる一定量の流出時間は普通ノズルの場合に比して短い。理論的にもまた水銀による実験でもノズルの長い方が流速が大となるのであるが、この実験ではノズル内面の摩擦やノズル内面に接する部分の熔鉄温度の低下による粘性増加などの影響のため短いノズルの流速が大きくあらわれたものと思われる。

(ii) 40mm ϕ ノズルについて:

(a) 特殊ノズルでは高い head (900~920mm) においても jet の写真判定でほとんど乱流を認めなかつたが。普通ノズルの場合は head 約 700mm 以上ではかなりの乱れが認められた。

(b) 低い head (400mm 以下) における層流より滴下流への遷移は特殊ノズルと普通ノズルとの間にほとんど差異がない。また両ノズルとも滴下流の範囲は 20 mm ϕ ノズルの場合に比してきわめて僅少であり、正確な測定は困難であつた。

(2) jet の乱れによる空気の巻き込みと Reynolds 数ノズルより流出する熔鉄 jet の状態は同一 Reynolds

Table 4. The stream condition of molten iron inspected from photographs.

Exp. No.	Nozzle type (dia mm)	Nozzle No.	Time during turbulent flow (begin/end)	Time during laminar flow (begin/end)	Time during dripping flow (begin/end)
I	Specially tapered (20)	No. 1	0	0 8'30"	9' 0" 13'20"
		No. 6	0	0 7'30"	8' 0" 12' 0"
		No. 8	0	0 7' 0"	8' 0" 12'15"
	Normally designed (20)	No. 7	0	0 4'30"	5'30" 13'50"
		No. 8	0	0 5'10"	6' 0" 13'45"
		No. 9	0	0 5' 0"	6' 0" 12'40"
II	Specially tapered (40)	No. 11	0	0 2'30"	2'45" 3' 0"
		No. 13	0 0'15"	0'15" 2'30"	2'45" 2'55"
		No. 15	0 0'15"	0'30" 2'45"	<10"
	Normally designed (40)	No. 12	0 1'15"	1'30" 2'30"	2'45" 3' 0"
		No. 14	0 0'30"	0'45" 2'30"	2'45" 3' 0"
		No. 16	0 1'15"	1'45" 2'45"	3' 0" 3'10"

数であつてもノズル入口側の熔鉄の初攪乱、ノズル、ストッパーの操作など僅かの条件の差異によりかなりの変化があり、その意味では今回行なつた実験の回数はなお不十分で、前述の実験結果はこの問題に対する大体の傾向を示したものである。

ここで用いた乱流、層流という表現は前報に示した通り、ノズルより流出した jet がすでにたまつている液体の上に落下した場合流れの乱れにより空気を巻き込むか否かによりきめたもので、流体力学的に厳密な調査を行なつたものではない。この空気の巻き込みの起る限界の乱れと流体力学的の乱流との関係を主として Reynolds 数より求めればつぎの通りである。一般に管内の流れについては Reynolds 数がある一定の値を越すと層流より乱流へ遷移し、従来の研究では普通の水溶液についての下限臨界 Reynolds 数は 2000~2200 また上限臨界 Reynolds 数は 13000~40000 とされている。前回行なつた水および水銀についての実験で空気の巻き込みの起つた限界の head (HC) よりその Reynolds 数 (Rec) を計算すると、Table 5 の通りである。すなわち水については空気の巻き込みは上限臨界 Reynolds 数に近いところで起り、jet が流体力学的に乱流となつている所

Table 5. Critical heads and Reynolds numbers (H_2O , Hg)

HC; Critical heads at which turbulent flows enfold bubbles

Rec; Reynolds number corresponding to Hc

Sample	Nozzle dia (mm)	HC (obs)	ReC(cal)
H_2O	7	31	1.7×10^4
	5	35	1.3×10^4
	3	47	0.91×10^4
Hg	10	65	2.9×10^5
	7	95	2.5×10^5
	5	130	2.1×10^5

と概ね一致している。しかし水銀の場合は空気を巻き込む限界の Reynolds 数は水の場合の 10~20 倍となつているのでこれが流体力学的の乱流と一致しているか否かは明らかでない。また空気を巻き込む限界の Reynolds 数は同一の流体についてはノズル径の増大するにつれて大きくなつていくことがわかる。

熔鉄の jet がどの程度の乱れより空気を巻き込むかは今回の実験より求めることは困難であるが、水銀 jet が空気を巻き込む限界の Reynolds 数 $\times \nu$ (動粘性係数) に等しい Reynolds 数 $\times \nu$ より空気の巻き込みが起ると仮定し、その限界の head を計算した。水銀と熔鉄の動粘性係数はそれぞれ 0.0012 と 0.0024 であるから Reynolds 数 $\times \nu$ が同一であるためには熔鉄の場合のノズル径は水銀の場合の 2 倍となる。このことより 20mm ϕ ノズルの場合熔鉄 jet の空気を巻き込む限界 Reynolds 数は 2.9×10^5 、また 40mm ϕ の場合のそれは 4.0×10^5 となる。以上の仮定によればノズル径 2cm では head 約 62cm 以上、またノズル径 4cm では head 約 59cm 以上で熔鉄 jet の乱れによる軽微な空気の巻き込みが起り始めると考えられる。

IV. 総 括

今回の実験で取扱つた溶鉄 head は最大 920mm で実際の平炉用取鍋のごとく head 2m 程度のものにつき溶鋼実験を行なう場合はノズルの軟化、変形、溶損などが流出状況に大きな影響を与えるばかりでなく、設備安全などの面よりも幾多の困難がある。ここでは一応、今まで行なつた水溶液、水銀および溶鉄による流出実験の結果をとりまとめ、ノズルや取鍋などの設計についての 2, 3 考察を加えた。

(i) 普通のノズルより流出する水銀 jet の特性曲線は前報に示した通り各ノズルの径ごとに、ノズル入口側の head と jet の落下距離により安定な層流の保たれる範

図 (領域 a. b. c. d.) がありまた、ノズル径と安定な jet の長さの最大値との間にもそれぞれ一定の関係がある。ノズル径の大きいほど、安定な層流の得られる取鍋内 head は低い方に移るが安定な jet の最大値は大となる。滴下流の範囲はノズル径の大なるほど少ない。今回の溶鉄実験の結果、各ノズルの乱流より層流、滴下流への遷移状況は定性的には概ねこれと一致している。銅塊の高さとノズル径および取鍋 head の関係は適当でなければならぬし、大銅塊の底部ほど条件が悪いことも推定される。また安定な層流の領域 (a b c d) の広さは流出する液体の粘性が大きいほど大きく、溶鋼の注入温度によってもかなりの影響を受けると考えられる。

(ii) 取鍋内 head やノズル径などが一定で、取鍋内の液体が静止の状態より注入される場合は長さ/ノズル径の値が 2 より大なる範囲においてはノズル径に対する長さの小さいものの方が層流の得られる範囲が広い。実際の場合はノズル入口側の溶鋼の動揺を無視することができないのでその影響をさらに検討する必要がある。溶鋼が取鍋内ではげしく動揺している場合はノズル長さがある程度大きいものがよいと考えられる。

(iii) ノズルより流出する流れが鑄型内にすでに溜っている溶鉄上に落下し、内部に突入する深さに対してはノズル入口側の溶鉄 head よりもノズル径の影響が大きい。径の大きいノズルを使用し、流出状況が不良な場合は特に空気や scum を溶鉄内部に深く巻込むおそれがある。

(iv) 一般に取鍋内溶鉄 head やノズル径が適当であつてもなお乱流となる原因の 1 つとして、使用中ノズル出口側の部分的浸蝕あるいはストッパーの圧力による入口側の変形などでノズル入口側径より出口側径が大きくなることがあげられる。本実験の特殊テーパノズルはこれを防止する 1 つの有効な方法と思われる。また出口側下半分に耐火度の高い材料を組合せる方法なども考え

られる。

(v) ノズルより流出する jet を安定な層流とするためには取鍋内の溶鉄の head が jet の特性曲線に示された安定な層流を保つに必要な head 以下とすることおよび滴下流を最小限にするためには滴下流の発生する低い head における取鍋容積をできるだけ減少することなどが考えられる。

(vi) 40mm ϕ 程度のノズルを使用する場合、低い head における jet の滴下流はきわめて少ないが大型取鍋の高い head における乱流は問題となる。また同一径のノズルを使用する場合、注入流が空気や scum を溶鋼内部への巻込む割合は head の大なるほど、大である。これ等の点より考えると、取鍋は高さに対して径の大なる方が有利であるが、高さ/直径がいちじるしく小となれば溶鋼表面積を増加し、溶鋼温度の低下、空気による溶鋼表面層の酸化などの問題が起るので、ノズル数を増加するなど特別の方法によらなければ高さ/直径の比は自ら一定の限界がある。

(vii) ノズル径が 20mm 程度で極端に小さい場合は 400~500mm の低い head において滴下流となる可能性があり、逆に高い head では相当の広い範囲で層流となつているので取鍋の高さと直径の比も大形ノズル装備の場合と異なるものがある。

(viii) 一定の head を保つという点で考えられることは tun dish や pot の使用である。しかし pot や tun dish では初攪乱の影響が大きく、鑄型内への注入流の安定性という点ではなお不十分な所があり、初攪乱の制止などの研究が必要であろう。

以上、ノズルや取鍋の設計について定性的な意見を述べたが要するに現在の造塊法は流体力学的にはかなり無理な点もあるように思われる。しかし実際作業は高温で大容量を取扱う関係上、これの改善はあらゆる関係分野の今後の研究に待つほかはない。(昭和 35 年 1 月寄稿)