

UDC 669.15'26-194.3 : 669.14.018.8-412 : 536.421 : 620.184.2
: 620.192.43 : 620.192.45 : 621.3.029

論 文

振動法による 430 ステンレス鋼の凝固組織微細化*

伊藤 幸良**・岡島 忠治**・田代 清**

Refining of Solidification Structures of Type 430

Stainless Steel by Vibration Method

Yukiyoshi ITOH, Tadaharu OKAJIMA, and Kiyoshi TASHIRO

Synopsis:

Refining of the solidification structures of Type 430 stainless steel by the mechanical vibration and the liquid surface vibration was tried. The structures of 15 kg test ingots were remarkable improved by these vibration methods. Change of structure into the equiaxed one starts after the superheat of liquid steel disappears.

The liquid surface vibration was applied to 6t ingots for practical use and its effect on structure refining was confirmed. By the investigation of size of crystals and negative segregation in the equiaxed zone, it was concluded that the structure refining was caused by the showering of the free crystals.

In the case of continuously cast slabs, the liquid surface vibration was effective only under low superheat.

1. 緒 言

17% クロムステンレス鋼 (SUS 430 鋼) の連铸化のためには、凝固組織の微細等軸晶化が不可避であり、従来から種々の対策が試みられている¹⁾²⁾。著者らも SUS 430 鋼の凝固組織改善について一連の研究をおこない、前報³⁾では合金化法および接種法の研究結果について報告した。本報では振動法による凝固組織微細化について述べる。

凝固組織微細化のための振動源としては、一般に音波、機械エネルギー、電気エネルギーが利用されるが、铸塊内部に有効な振動量を伝達することが重要なポイントである。

本研究では、はじめに凝固過程の铸塊をエアハンマーで連打するという簡単な機械振動法を採用した。さらに、梅村⁴⁾がアルミニウムの凝固組織微細化を目的に開発した液面振動法について研究をおこなった。

2. 実験方法

300 kg 高周波電気炉で溶製した SUS 430 鋼を Fig. 1 に示すように、下注ぎ 2 本立て 150 kg 用铸型に注入し、注入終了後一方の铸型をエアハンマーで連打した。実験条件は Table 1 のとおりで、Test No. 1 は一

体ものの台座上に铸型 2 本を載せたため、他方の铸型へも振動が伝播した。Test No. 2~No. 5 では分離型の台座を採用した。铸型の振動を実測した結果は Table 2

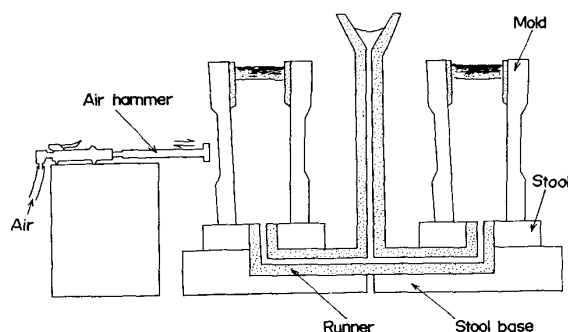


Fig. 1. Experimental method of mechanical vibration.

Table 1. Experimental condition of mechanical vibration.

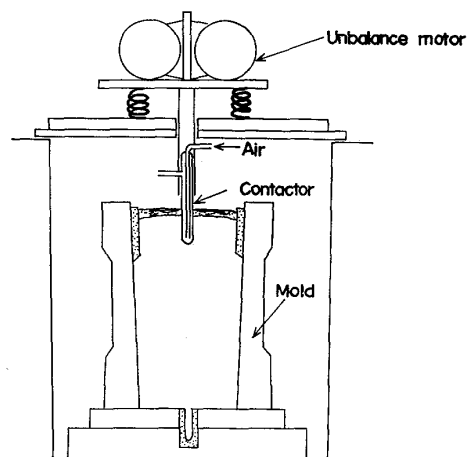
Test No.	Superheat in mold (°C)	Teeming time (s)	Start of vibration (after teeming end : s)	Vibration time (min)
1	25	57	10	6.23
2	30	50	20	7.00
3	35	39	10	10.00
4	30	40	10	3.00
5	40	45	50	1.00

* 昭和 50 年 10 月本会講演大会にて発表 昭和 54 年 10 月 8 日受付 (Received Oct. 8, 1979)

** 新日本製鉄(株)室蘭製鉄所 (Muroran Works, Nippon Steel Corp., 12 Nakamachi Muroran 050)

Table 2. Condition of mechanical vibration.

Test No.	Ingot	Amplitude of vibration (μ)	Number of vibration (c/s)
4	With vibration	570/730	8/9
	Without vibration	120/125	9
5	With vibration	120/125	8/9



Vibration condition 18Hz-11mm
 Contactor Silica 31mm ϕ
 Cooling air 0~40l/min
 Immersion depth 50~70mm
 Ingot Size 210mm ϕ $\times$ 620mm
 Weight 150kg

Fig. 2. Experimental method of vibration by liquid surface contactor.

に示すとおりで、分離型台座の場合でも湯道などのため、若干の振動伝播は避けられない。

液面振動法については、Fig. 2 に示すような方法で2本立て 150 kg 鋼塊の一方に、振動子を 50~70 mm 浸漬し、アンバランスモーターにより振動（振動数 18 Hz、振幅 11 mm）を与えた。振動子としては空冷式石英管を用いたが、一部キャストブル製振動子についても試験した。実験条件は Table 3 のとおりで、振動時間、冷却用空気量を変動させた。

150 kg 鋼塊の予備実験に続いて、6 t 実用鋼塊対象に液面振動子の適用を試みた。実験方法は Photo. 1 に示すように、連铸用溶融石英製タンディッシュノズル3本を振動子として用いた。実験条件は Table 4 に示すとおりで、振動数、振幅を変動させた。

以上の 150 kg および 6 t 鋼塊の実験により、後述するように、液面振動法が SUS 430 鋼の凝固組織微細化に有効であることが立証されたので、連铸への適用のた

Table 3. Experimental condition of vibration by liquid surface contactor for 150 kg ingots.

Test No.	Contactor	Cooling air (l/min)	Vibration time (min)	Superheat ($^{\circ}$ C)
1	Silica	20	2	16
2		20	6	15
3		20	13	35
4		40	0.5	35
5		0	1	n.d.
6		0	2	n.d.
7		0	4	n.d.
8		0	4.25	25
9	Castable	0	1	n.d.
10		0	4	n.d.

Chemical composition (%)

C	Mn	Si	P	S	Cr
0.06 /0.07	0.36 /0.48	0.42 /0.51	0.017 /0.018	0.020 /0.025	16.30 /16.67

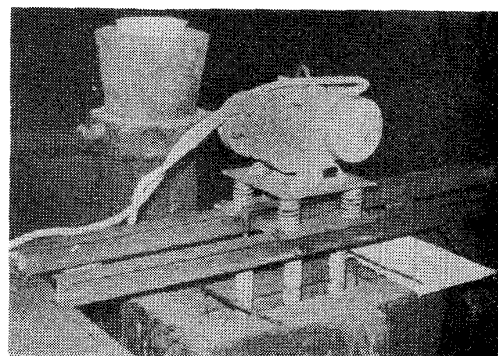


Photo. 1. Experimental apparatus of vibration by liquid surface contactor for 6t ingots.

めの試験を試みた。すなわち、アンバランスモーターに連結した空冷式キャストブル製振動子を連铸型内の Photo. 2 に示す位置に約 100 mm 浸漬し、25 Hz、6 mm の条件で振動を与えた。冷却用空気量は 30 Nm³/h 流した。実験条件および調査試片採取方法は Fig. 3 に示した。なお、鑄造の都合により SUS 430 鋼と類似の凝固挙動をするとみられる 13% クロムステンレス鋼 (SUS 410 鋼) を対象とした。

3. 実験結果および考察

3.1 機械振動法

振動鑄造が SUS 430 鋼の凝固組織微細化におよぼす影響を明らかにする目的で実施したエアハンマー連打方式による機械振動 150 kg 鋼塊について、縦断面のマクロ腐蝕により凝固組織を観察した。

Table 4. Experimental condition of vibration by liquid surface contactor for 6t ingots.

Test No.		Condition of vibration			Teeming time (min)	Teeming temperature (°C)	Chemical composition (%)					
		Frequency (Hz)	Amplitude (mm)	Time (min)			C	Mn	Si	P	S	Cr
1	A	18	11	19	3.50	1 550	0.07	0.52	0.56	0.026	0.009	16.35
	B	—	—	—								
2		18	11	10	3.25	1 550	0.07	0.49	0.61	0.030	0.006	16.11
3		25	6	20	3.33	1 555	0.05	0.48	0.40	0.029	0.008	16.66
4		50	2	20	5.83	1 573	0.06	0.48	0.53	0.029	0.008	16.43

Mold : Top 500mm×1172mm, Bottom 465mm×1100mm, Height 1783mm

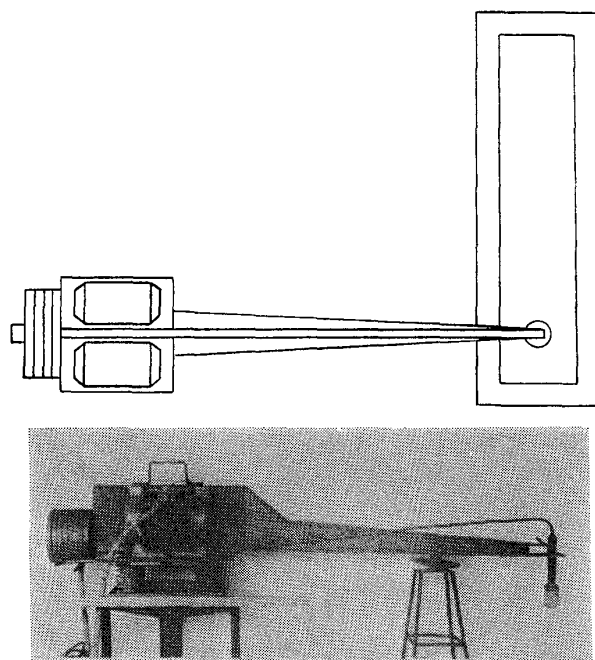
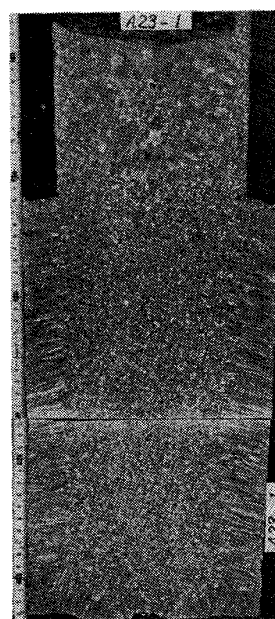


Photo. 2. Experimental apparatus of vibration by liquid surface contactor for continuously cast slabs.

一体もの台座を採用した Test No. 1 の鋼塊のマクロ組織は Photo. 3 のとおりで、振動鋼塊の等軸晶化は顕著に認められるが、比較鋼塊においても振動伝播が大きく鋼塊底部側では振動鋼塊と同程度の等軸晶率になっている。分離型台座を採用した Test No. 2~No. 5 では Photo. 4 のマクロ組織に示されるように振動鋼塊の等軸晶化は比較鋼塊に比べ明瞭である。

マクロ組織上で鋼塊底部から押湯肩部までの柱状晶長さ率を測定した結果を Fig. 4 に示す。振動時間 3 min 以上では鋼塊全長に亘って柱状晶長さが 40% 以下に抑制されているが、振動時間 1 min では振動付与が不十分

With vibration



Without vibration

Photo. 3. Macrostructures of ingots cast on one stool base.

のため鋼塊頭部側で再び柱状晶が成長している。一方、比較鋼塊では振幅 120 μ 程度の振動が伝播しているが、柱状晶抑制効果は小さい。

以上の実験結果により、SUS 430 鋼 150 kg 鋼塊では振幅約 500 μ 以上、振動時間約 3 min 以上程度の機械振動により等軸晶化が可能であることが証明された。

振動による凝固組織の微細化については多くの機構が提唱されているが、溶湯中での核生成の促進⁵⁾ および固液界面での結晶の溶断⁶⁾ の二つに大別される。

本研究の結果から機械振動による凝固組織微細化の機構を結論づけることはできないが、Photo. 3 および

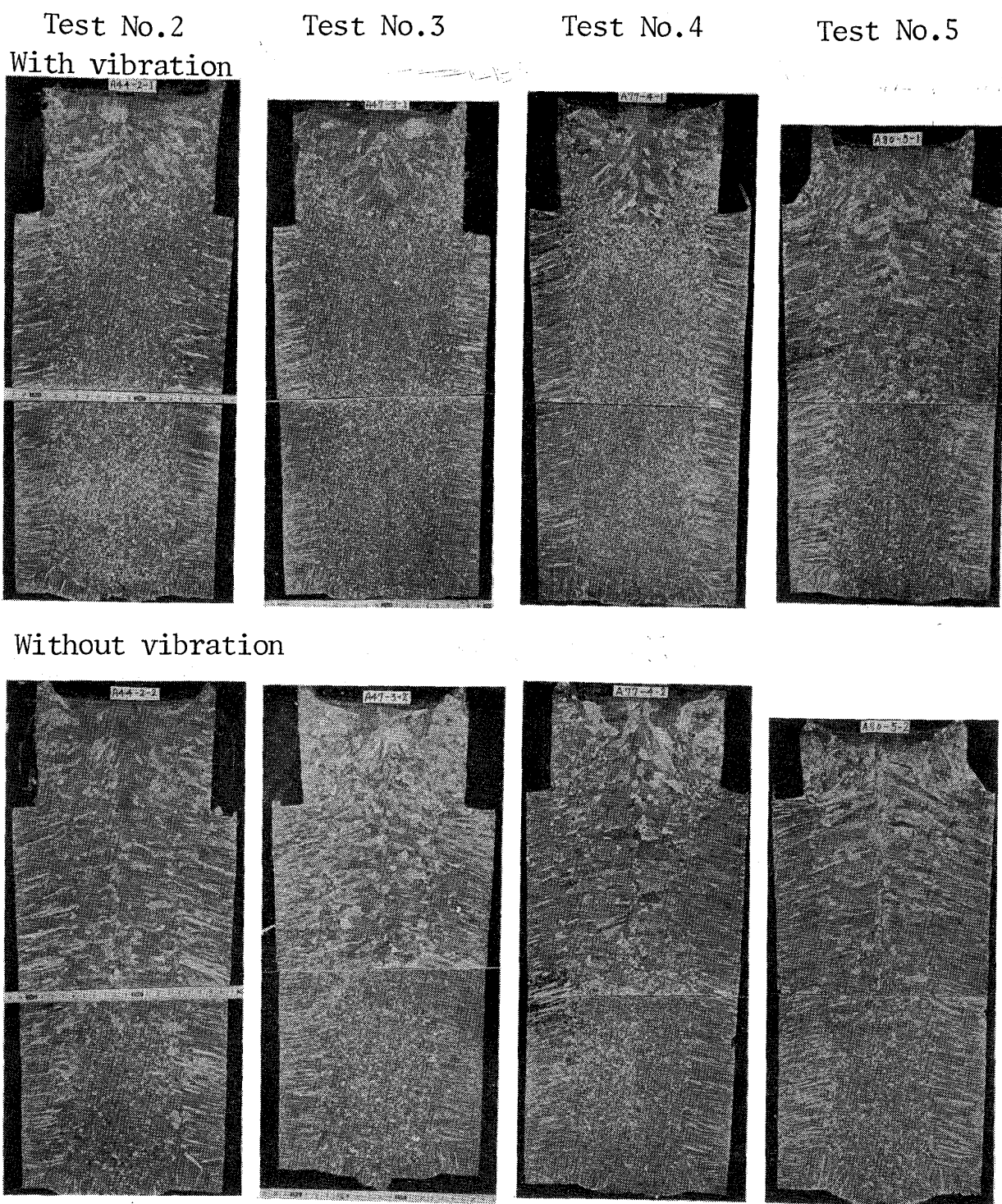


Photo. 4. Macrostructures of ingots cast on the separate stool base.

Photo. 4 のマクロ組織に見られるように、鋼塊底部ほど等軸晶化が顕著なことから、結晶のシャワリングがおこったことは確実である。

なお、本研究において測定した凝固速度係数 ($K=24.3 \text{ mm/min}^{1/2}$) および注入時間から計算した振動開始時のシェル厚と柱状晶長さを比べると、いずれの鋼塊においても等軸晶化は振動開始点より遅れており、溶鋼過

熱度が大きいほどその傾向は強い。この現象については次節の液面振動法の研究においてより詳細に解析した。

3.2 液面振動法

液面振動法については、はじめに SUS 430 鋼 150 kg 鋼塊を対象に Table 3 に示した条件で実験をおこなった。すなわち、石英製振動子を用いた実験では冷却用空気を $0\sim 40 \text{ l/min}$ 、振動時間を $0.5\sim 13 \text{ min}$ に変動させ

Casting condition

Slab size 210mm x 1010mm
Casting speed 0.5 m/min
Superheat 14–22 °C

Chemical composition of steel

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ti	Al	O
0.034	0.24	0.34	0.029	0.006	13.25	0.024	0.0097	

Weight %

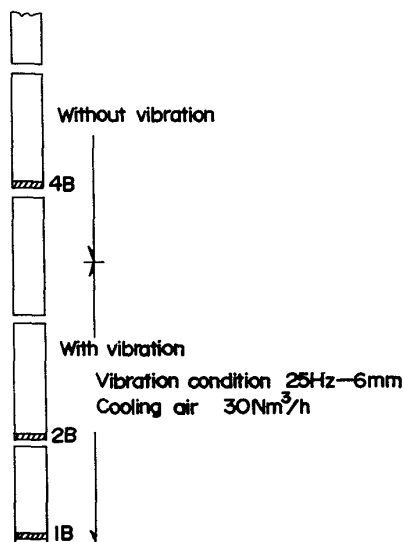


Fig. 3. Experimental condition of vibration by liquid surface contactor for continuously cast slabs and sampling positions.

た。空冷なしのキャストブル製振動子を用いた実験では 1 および 4 min の振動を与えた。得られた鋼塊の縦断面についてマクロ腐蝕をおこない凝固組織を観察した。代表例として Test No. 2 (空気量 20 l/min, 振動時間 6 min) および Test No. 7 (空気量 0 l/min, 振動時間 4 min) の鋼塊のマクロ組織を Photo. 5 に示した。いずれの場合も比較鋼塊に比べて振動鋼塊の微細化は明瞭で、鋼塊全長にわたって等軸晶化が進んでいる。振動鋼塊のマクロ組織から鋼塊高さ方向の等軸晶率を求め、振動時間との関係を図示すると Fig. 5 のとおりで、等軸晶率は振動子の種類、冷却用空気量の影響をほとんどくずし、振動時間で決まっている。約 5 min 以上の振動によりほぼ 100% の等軸晶化が可能である。

以上の結果から液面振動法による凝固組織微細化は、鋳型内湯面で形成する結晶が振動によつてシャワリングすることによつておこると推定される。この場合、鋳型内溶鋼の温度条件によつては、沈降した結晶核が再溶解することが考えられる。

Test No. 1 の実験において、振動鋼塊の底部より 100 mm の位置に熱電対をセットし、溶鋼温度を連続的に測定し凝固組織との関係を調査した。結果は Photo. 6 のとおりで、振動開始点ではなお柱状晶が成長を続け

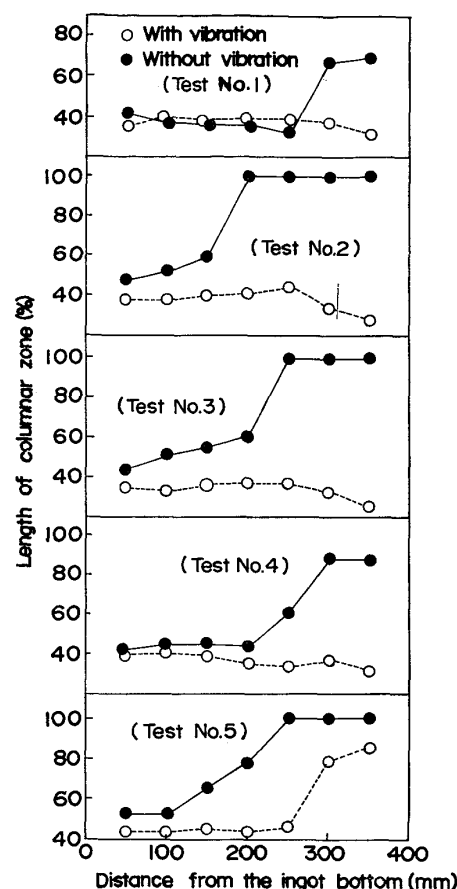


Fig. 4. Length of columnar zone of mechanically vibrated 150 kg ingots.

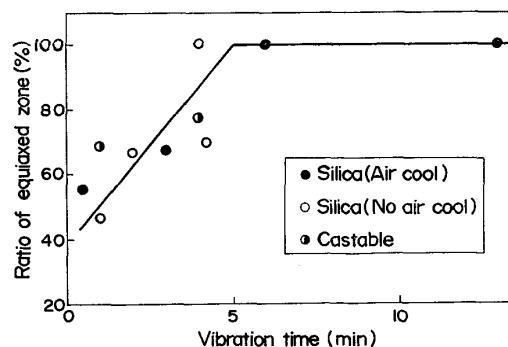


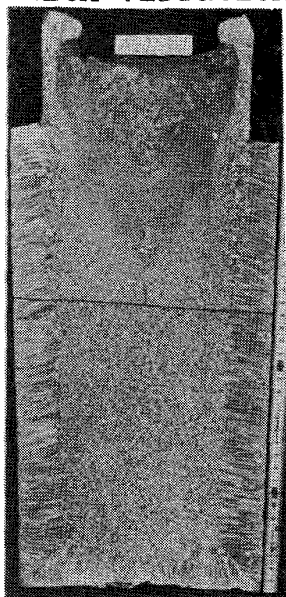
Fig. 5. Relation between vibration time and ratio of equiaxed zone of 150 kg ingots vibrated by liquid surface contactor.

ており、溶鋼の過熱が消滅した点で等軸晶化が始まっている。液面振動により結晶のシャワリングがおこつても、溶鋼の過熱が残る間は微細化は進行しない。

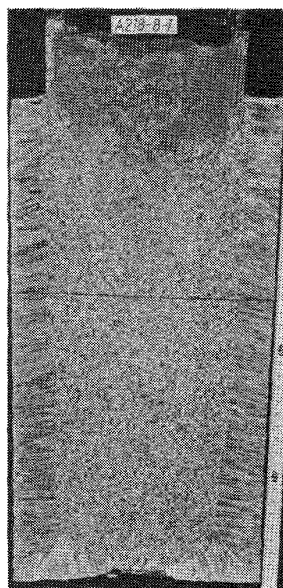
前節で述べた機械振動鋼塊における振動開始に対する等軸晶化の遅れも同様の現象である。

振動鋳造による等軸晶化のためには、十分な結晶核の供給と結晶核が安定に生き残るための溶鋼の温度条件をととのえることが必要である。

150 kg 鋼塊の実験で液面振動法による SUS 430 の組

Test No.2
With vibration

Test No.7



Without vibration

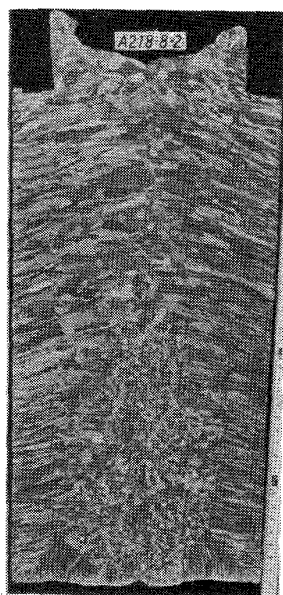
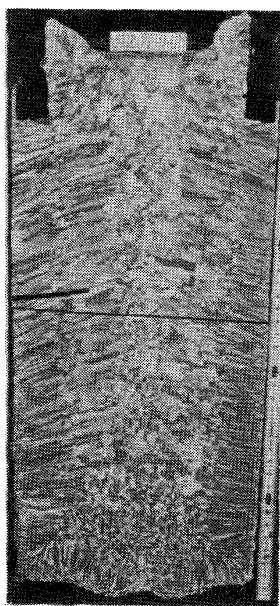


Photo. 5. Macrostructures of 150 kg ingots vibrated by liquid surface contactor.

組織微細化が確認されたので、続いて 6 t 実用鋼塊を対象として実験をおこなった。実用鋼塊の場合、鋼塊頭部湯面を保温材で被覆するため、液面振動の条件によつては保温材の巻き込みが懸念される。そこで、振動数および振幅を変動させて、振動条件が組織微細化および巻き込みにおよぼす影響を調査した。

振動数 18 Hz、振幅 11 mm、振動時間 19 min の条件で振動を付与した鋼塊および同一注入管の比較鋼塊

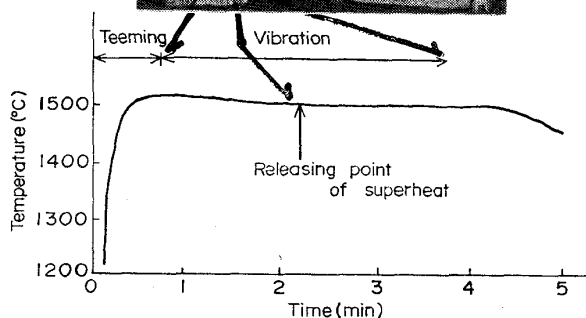
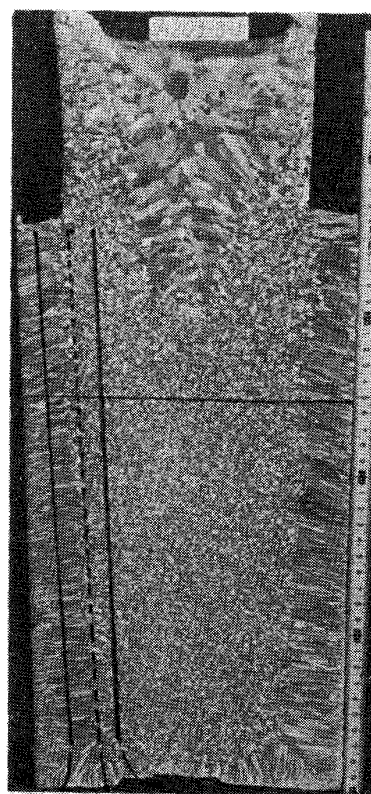


Photo. 6. Relation between temperature of liquid steel in mold and solidification structure of ingot.

(Test No. 1) についての縦断面のマクロ組織を Photo. 7 に示した。比較鋼塊に比べて振動鋼塊では柱状晶長さが短く等軸晶もより細粒になっており、液面振動による凝固組織微細化効果は 6 t 鋼塊においても明瞭である。

全試験鋼塊について、高さ方向各位置における柱状晶長さを測定した結果は Fig. 6 に示すとおりで、振動鋼塊はいずれも柱状晶長さが 70 mm 以下に抑制されている。マクロ組織によると等軸晶も Photo. 7 同様に微細粒になっている。振動条件の影響については、振動時間の短い鋼塊で柱状晶が若干長くなっているが、振動数および振幅の影響はほとんど認められない。

液面振動による凝固組織微細化は湯面で形成する結晶のシャワリングにより、鋼塊底部の沈澱晶形成に類似の機構と考えられる。したがって、振動による組織微細化は成分偏析の上で何らかの影響を伴うはずである。

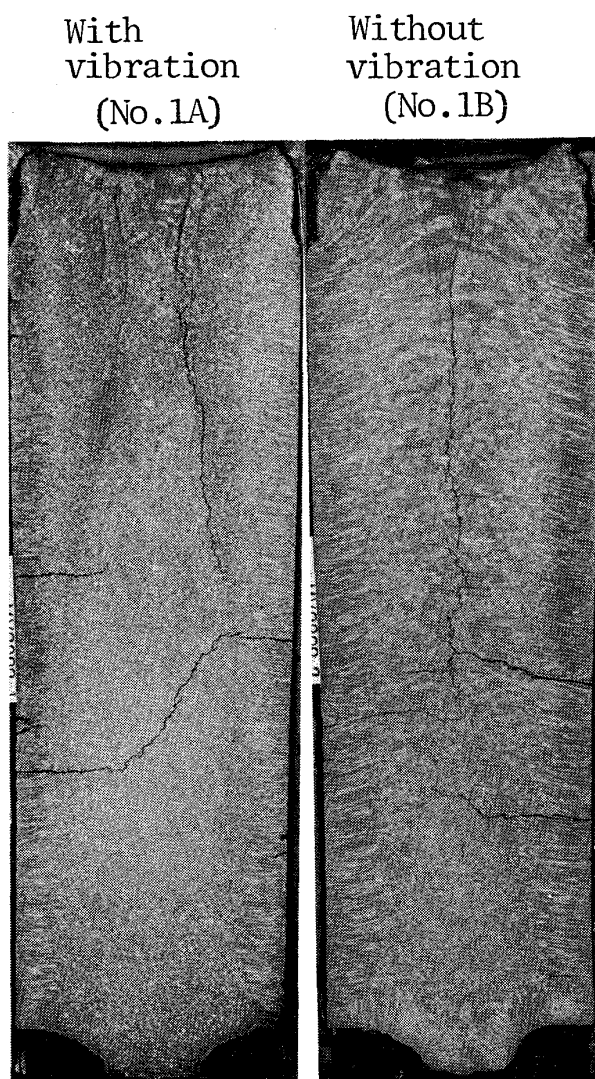


Photo. 7. Macrostructures of 6t ingots.

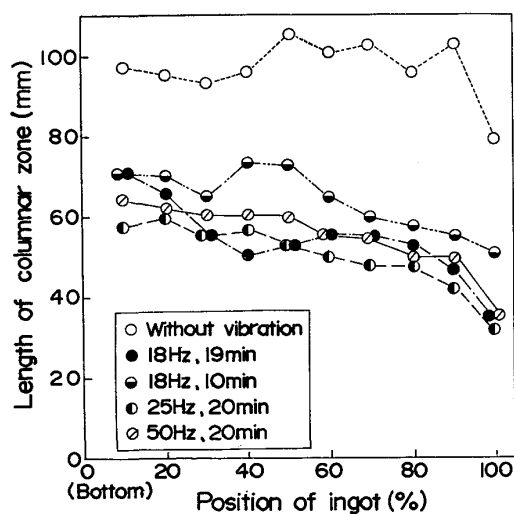


Fig. 6. Length of columnar zone of 6t ingots vibrated by liquid surface contactor.

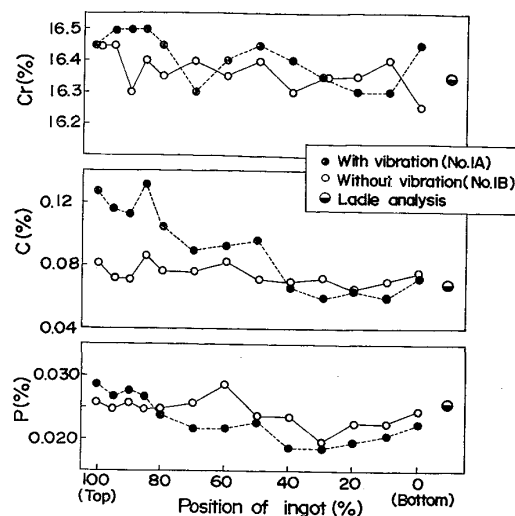


Fig. 7. Distributions of Cr, C and P in 6t ingots.

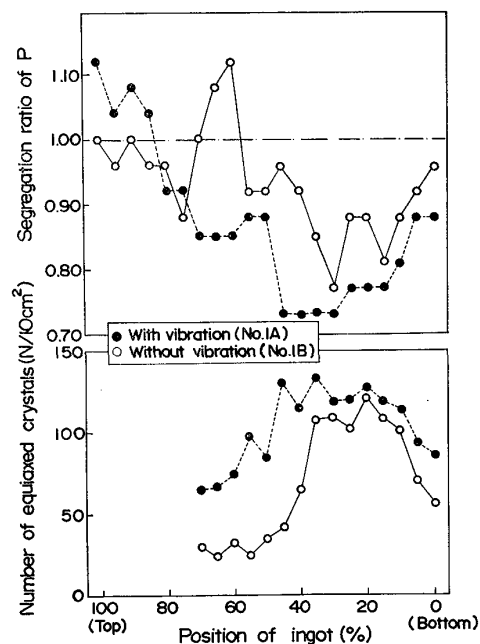


Fig. 8. Number of equiaxed crystals and segregation ratio of P in 6t ingots.

Test No. 1 の振動鋼塊および比較鋼塊について、成分偏析および等軸晶粒度の比較を試みた。Fig. 7 は鋼塊軸心の成分分布を示したもので、振動鋼塊底部側でCおよびPの負偏析が助長されているのが明らかである。Fig. 8 および Fig. 9 はPの偏析率と等軸晶粒度との関係を示したものであり、Pの負偏析率の増大とともに単位面積当りの等軸晶数が増大すなわち、等軸晶の細粒化が進んでいる。Fig. 9の結果からも振動による組織微細化は結晶のシャワリングによることが立証された。

液面振動による組織微細化が結晶のシャワリングによるとすれば、通常造塊法で問題となる鋼塊沈澱晶帯への

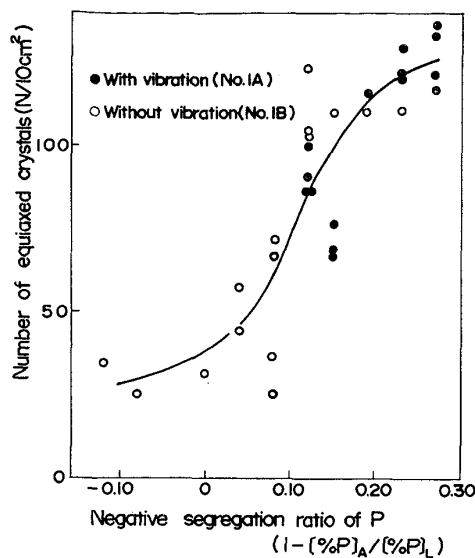


Fig. 9. Relation between negative segregation ratio of P and number of equiaxed crystals.

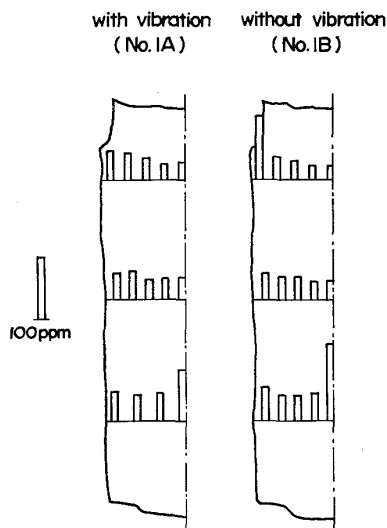


Fig. 10. O contents in 6t ingots.

非金属介在物の集積⁷⁾と同様の現象についても検討が必要である。Test No. 1 の両鋼塊の各位置での酸素含有量を比較した場合は Fig. 10 のとおりで、振動による全酸素量の増加は認められない。しかし、Fig. 11 に示した鋼塊縦断面の目視による地疵測定結果では、振幅 11 mm、振動時間 19 min で振動した鋼塊の地疵が比較材の約 8 倍に増加している。EPMA 分析によると地疵組成は湯面保温材と同一組成であり振動により巻き込みが助長されたことが明らかである。もちろん、Fig. 11 にみられるように振幅および振動時間の低減により保温材巻き込みの抑制は可能である。

SUS 430 鋼 150 kg および 6 t 鋼塊を対象とした実験により、液面振動法の凝固組織微細化作用が確認され、

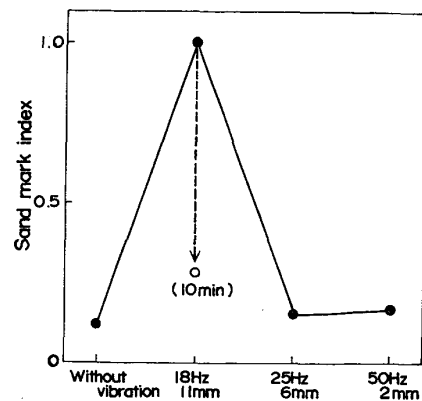


Fig. 11. Sand mark index in 6t ingots.

その機構は湯面で形成した結晶のシャワリングであることが立証された。したがって、この液面振動法を連続铸造へ適用する場合、湯面の温度条件が重要である。通常造塊法と異なり連続铸造法では常に湯面へ新しい溶鋼が供給されるため湯面において、シャワリングすべき結晶の形成がおこりにくいと推定される。しかし、SUS 430 鋼の凝固組織微細化は連続铸造において、とりわけ、その必要性が大きいことから、液面振動法の連铸材への適用の可能性を確認すべく、前章で述べたような方法で実験試験を試みた。

操業上の都合により SUS 430 鋼と類似の凝固挙動をすると思われる SUS 410 鋼を対象として試験をおこなった。湯面温度条件の不利な点を考慮して振動子は 30 Nm³/h の空気で冷却し、铸造初期から約 20 min 間振動を付与した。Fig. 3 の各位置から採取したスラブ試片の横断面マクロ組織を Photo. 8 に、スラブ厚方向の等軸晶帯率を Fig. 12 に示した。

铸造初期のスラブ (No. 1B) では溶鋼温度降下が大きいため、全般に 50% 以上の等軸晶帯が形成され、液面振動を付与した位置ではさらに等軸晶化が促進され、約 80% の等軸晶帯率に達している。ちなみに、铸造初期のタンディッシュ内溶鋼の過熱度は 14°C であり、铸型内では過熱はほぼ消滅していると考えられる。スラブ No. 2B 铸造時の過熱度は 18°C で、30~40% 程度の等軸晶帯が形成されているが、もはや液面振動の効果は現れていない。液面振動を付与しないスラブ No. 4B では溶鋼過熱度 22°C で等軸晶帯率は 10% 程度にとどまっている。

以上の連铸実験への液面振動適用試験によると、溶鋼過熱度の小さい場合には振動による等軸晶化の効果は明瞭に現れるが、過熱度がある程度の値になるとその効果はほとんど消失する。振動子の空冷では振動子表面での結晶形成は極めて少ないものと言える。すなわち、液面



Photo. 8. Macrostructures of continuously cast slabs with vibration.

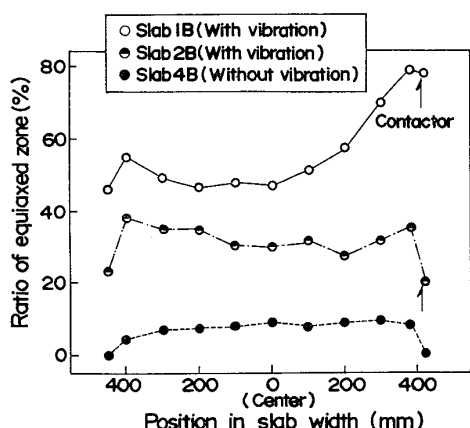


Fig. 12. Ratio of equiaxed zone in continuously cast slabs

振動による凝固組織微細化のためには、湯面において結晶が形成可能な温度条件が満たされなければならない。

一方、このような温度条件下では当然連铸パウダーの巻き込みが懸念されるが、供試片の地疵測定によつてもスラブ No. 1B でパウダーと同組成の地疵が観察されている。

しかし、振動子への水冷却の採用による結晶形成の促進、振動子浸漬部への堰設置によるパウダー巻き込み防止などの対策を講ずることによつて、液面振動法を連続铸造へ適用することは可能である。

4. 結 言

SUS 430 鋼の凝固組織微細化を目的として振動铸造法について実験をおこなつた。

はじめに、150 kg 鋼塊を対象としてエアハンマーにより铸型を連打するという簡単な機械振動法を試み、3 min 以上の振動付与により柱状晶が抑制され等軸晶化が進行することを確認し、機械振動による組織微細化の機構は結晶のシャワリングであることを推定した。しかし、この種の機械振動を実用鋼塊または連続铸造へ適用した場合、湯もれやブレイクアウトなどの問題発生が想定されるので、その実用化は断念し、液面振動法の試験に移行した。

150 kg 鋼塊を対象とした予備試験により、振動数 18 Hz、振幅 11 mm の条件で 5 min 以上の液面振動を与えると、鋼塊全長にわたつて等軸晶化が進むことを確認した。また、等軸晶化開始点は溶鋼過熱が消失する点とほぼ一致することすなわち、等軸晶化のためには溶鋼の温度条件も重要であることを明らかにした。

続いて、SUS 430 鋼 6 t 実用鋼塊を対象に液面振動法適用の試験をおこなつた。比較鋼塊に比べて振動鋼塊ではいずれも柱状晶が大幅に抑制され、等軸晶もより細粒となつている。振動条件の影響では振動時間が短いと等軸晶化が弱まつているが、振動数および振幅の影響は明瞭でない。

液面振動による組織微細化は湯面で形成した結晶のシャワリングであると推定されるが、鋼塊の負偏析率と等軸晶粒度の関係からこれが立証された。一方、液面振動により湯面保温材の巻き込みが懸念されるが、高振幅、長時間振動の場合明らかな地疵増加が認められた。

最後に、等軸晶化が最も要求される連続铸造につい

て, SUS 410 鋼を対象に実機試験を試みた. 溶鋼過熱度の小さい場合は液面振動の凝固組織微細化作用が明瞭に認められたが, ある程度以上の溶鋼過熱度下ではほとんど効果が現れていない. しかし, 振動子への水冷却の採用などの対策により, 連続鋳造での液面振動法の適用は可能であると考えられる.

文 献

- 1) 漆山信夫, 大岡耕之, 竹内英麿, 池原康允, 若松道生: 鉄と鋼, 60 (1974) 4, S112
- 2) 竹内英麿, 池原康允, 柳井隆司, 松村省吾: 鉄と

鋼, 63 (1977) 8, p. 1287

- 3) 伊藤幸良, 高尾滋良, 岡島志治, 田代 清: 鉄と鋼 66 (1980) 6, p. 710
- 4) 梅村晃由, 駒村健二郎, 手島立男: 鋳物, 44 (1972) 7, p. 570
- 5) B. CHALMERS: Principles of Solidification, John Wiley & Sons, Inc. (1964)
- 6) 大野篤美, 早田 博: 鉄と鋼, 56 (1970) 2, p. 230
- 7) 垣生泰弘, 江見俊彦, 北岡英就: 鉄と鋼, 62 (1976) 8, p. 971