

技術報告 振動凝固の鋼への適用

畑村 洋太郎*・中尾 政之**

Application of Vibration during Solidification of Steel

Yotaro HATAMURA and Masayuki NAKAO

Synopsis:

In order to clarify the influence of vibration applied during solidification and the effect of mold wall conditions on ingots, rolled steel and weld zone, some experiments were conducted on steel specimens (SM41, SM50, and Fe-3.5%Ni). The following items were revealed through these experiments:

(1) Content of equi-axial crystalline grains increase and their grain size are refined by vibration (horizontal circular vibration, 0.3 mmp-p, 60 Hz).

(2) These effects are enhanced when the mold wall is replaced by silicon nitride.

(3) The change in crystalline structures caused by application of vibration disappears when the ingots are rolled. (4) Steel sheets rolled from the ingots solidified under application of vibration are inferior in toughness. (5) Application of vibration during solidification has no effect on the properties of the heat affected zone of welded areas (6) In most cases, vibration during welding does not affect the properties of the welded metal.

1. 結 言

凝固中の金属溶湯を振動、攪拌、注湯流等で動かすと凝固組織の等軸晶が増加し、かつ微細化することは広く知られている。筆者らはH型材の連続鋳造時の摩擦力を水平円振動によつて減少させることを目的として振動鋳造を始めたが、当初の目的とは別にこの振動による凝固組織の結晶粒微細化の効果に注目して研究をすすめてきた。そして、金属溶湯材質、鋳込温度、鋳型温度、振動時期、鋳壁材質・粗度等の条件を変化させ、凝固組織におよぼす影響が大である条件とその傾向を次のように見いだした^{1)~4)}。①純度が高いほど結晶粒は振動によつてより微細化する。この理由については、合金は溶湯内で多くの核が発生するので振動の効果は相対的に小さいためと考えられる。99.7%Alの場合、振動を加えると等軸晶組織が、加えないと柱状晶組織が得られる。その等軸晶は、②鋳込温度を凝固点直上にすると微細化し、③鋳壁を多孔質材（例えばセラミックスや焼結金属）やTi, Ni, 面粗度大なるもの等にすると微細化する。④注湯中の振動がその等軸晶におよぼす影響は大きい。注湯後凝固終了までの振動の影響はほとんどない。⑤Alの振動凝固材を押し出加工すると、その後の再結晶組織も

微細である。

しかし振動凝固による微細化のメカニズムとしては、成長中の柱状晶や湯面にはりだした殻の破壊切断による細分化や、振動の圧力変動のエネルギーによる核生成の安定化⁵⁾等が考えられてきたが、これらは先に得られた結果（特に③④）を説明するに十分なものではなかつた。そこで筆者らは、振動する冷却面（鋳壁）から等軸晶の核が発生すると仮定し冷却面に注目して研究を行った結果、純金属に微細化剤を添加することなく純機械的振動のみで微細化するには、鋳壁を工夫して振動凝固すればよいことを明らかにした⁴⁾。

本報告は、これらの知見を鉄系材料に応用し、振動による鋳造組織の微細化と圧延後に残る鋳造時の影響を調べたものである。また同じ凝固を伴う工程として溶接時にも振動を加え、溶接金属の微細化を調べた。なお圧延組織に鋳造時に見られた微細組織が残っていた場合には、溶接の熱影響部で生じる結晶粒粗大化による溶接脆化を防止できることが期待できるため、この点についても調査した。

実験は(i)造塊から溶接までの全工程におよぼす振動の効果を知る実験と(ii)各工程における振動の効果を知る実験との二つに大別して行った。その理由は、

昭和 60 年 8 月 26 日 受付 (Received Aug. 26, 1985)

* 東京大学工学部 工博 (Faculty of Engineering, The University of Tokyo)

** 東京大学工学部 (現:日立金属(株)磁性材料研究所) (Faculty of Engineering, The University of Tokyo, Now Magnetic and Electronic Materials Research Laboratory, Hitachi Metals, Ltd., 5200 Mikajiri Kumagaya 360)

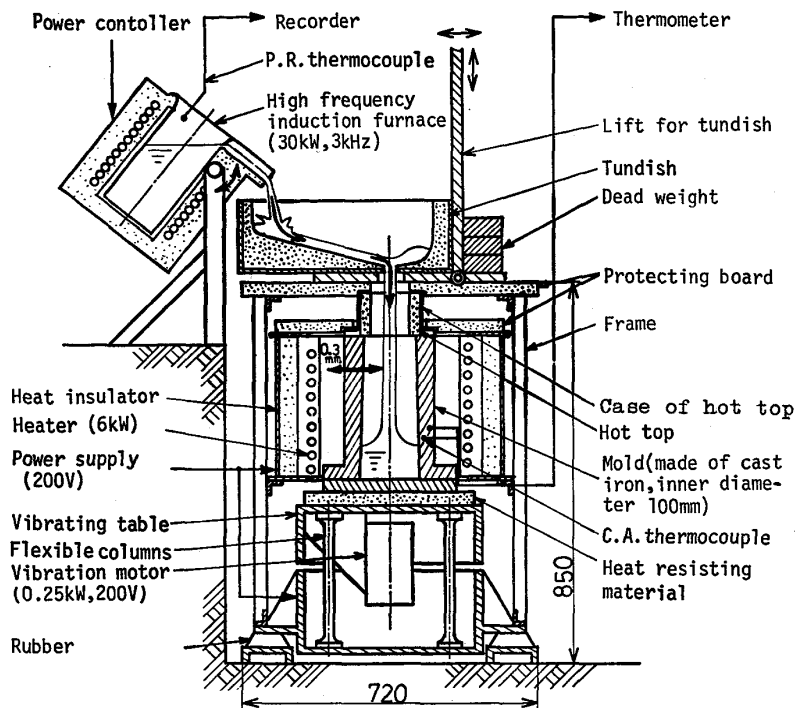


Fig. 1. Experimental apparatus for casting of ingot with horizontal circular vibration.

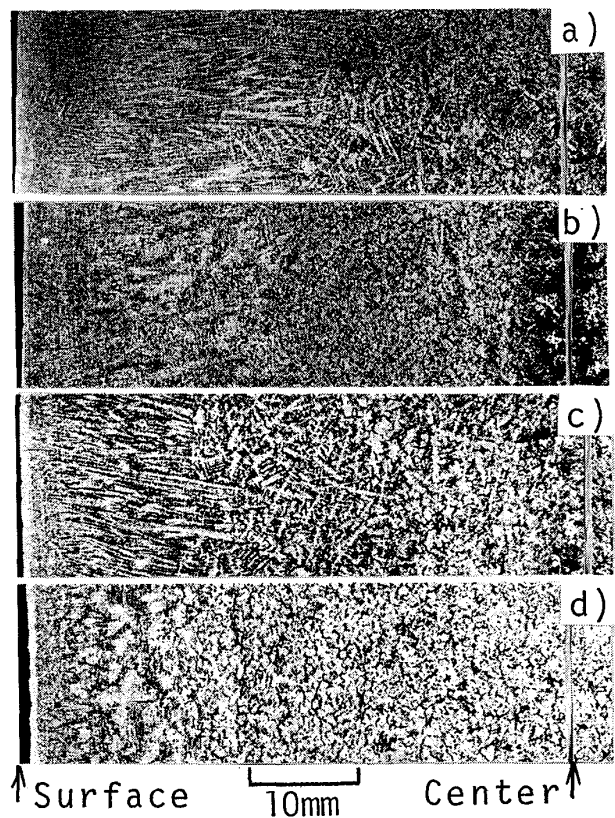
(i) では振動造塊と振動溶接との相乗効果があるか否かを (ii) では個々の凝固現象に振動の効果が生じるか否かを明らかにするためである。

2. 実験の内容と結果

2.1 造塊から溶接までの全工程におよぼす振動の効果

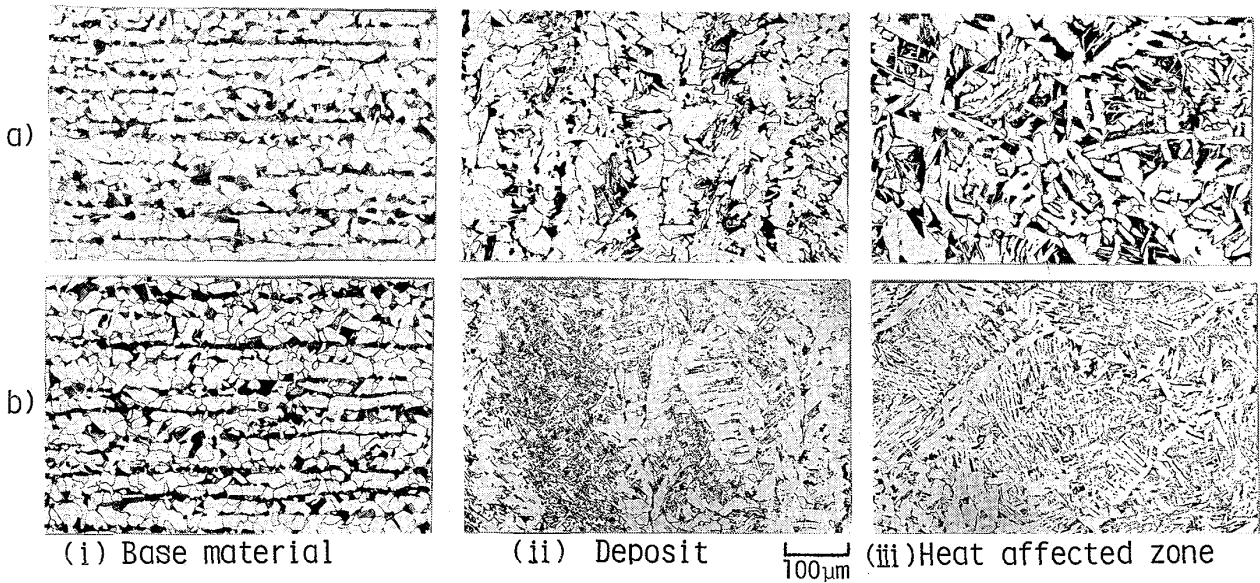
材料は溶接構造物として最も一般的な SM 41 (溶接構造物用圧延鋼板 [C 0.16%, Si 0.30%, Mn 1.00%, P 0.013%, S 0.015%]) とした。

(1) 造塊の実験 全体が鑄鉄 (FC 25) 製の鑄型と外枠が鑄鉄で内部に窒化珪素スリーブを装着した鑄型との 2 種類の鑄型 (内径 ϕ 100 mm, 高さ 300 mm) に前記の材料を注湯し、凝固させた。なお、窒化珪素スリーブ (反応焼結 Si_3N_4 , 厚さ 10 mm) を用いた理由は、序論で述べた先の実験結果③の知見による。鑄型の状態は、凝固中、静止状態としたものと微小な水平円振動 (60 Hz, 0.3 mmp-p) を加えるものの 2 種類がある。従つて凝固の条件としては振動条件と鑄壁の条件との組合せで、合計 4 種類について実験を行った。造塊の実験装置を Fig. 1 に示す。鑄型は 300°C に予熱し、鑄鉄製鑄型の内壁面には焼付き防止のため酸化クロムを塗布した。振動台は 3 本のたわみ柱で支えられ、振動モーター (250 W) によつて水平円振動が与えられる。高周波誘導炉で溶解を行い 1600°C で注湯した。2 種類の鑄型の温度上昇を鑄型胴部に装着した熱電対で測定した結果、窒化珪素スリーブ付鑄型の方がゆるやかに昇温することがわかった。なお窒化珪素スリーブは一度湯を鑄込むと



a) Without vibration, Mold; FC25
 b) With vibration, Mold; FC25
 c) Without vibration, Mold; Si_3N_4
 d) With vibration, Mold; Si_3N_4
 Material; SM41, Casting temperature; 1600°C
 Sampling position; 120 mm from the bottom
 Vibration; Horizontal circular, 0.3 mmp-p, 60 Hz

Photo. 1. Effect of vibration and mold material on a solidified structure.



a) Cast without vibration, Mold; FC25, Welded without vibration

b) Cast with vibration, Mold; Si_3N_4 , Welded with vibration

Vibration during casting; Horizontal circular vibration, 0.3 mmp-p, 60 Hz

Rolling conditions; Initial temperature; 1200°C , Final temperature; 900°C , Rolling velocity; 1.25 m/s, Reduction ratio; 5

Submerged arc welding, Base material; SM41, Welding rod; US36 \times MF38 ϕ 4.8

Welding conditions; 450 A \times 36 V \times 230 mm/min 4 layers, Vibration during welding; Vertical vibration, 0.2 mmp-p, 50 Hz

Photo. 2. Influence of vibration during casting and welding on the micro-crystalline structure of rolled material.

Table 1. Mechanical properties of rolled steel plate caused by vibration.

Vibration during casting	No	Yes	No	Yes
Material of mold wall	FC25	FC25	Si_3N_4	Si_3N_4
Tensile strength (kgf/mm ²)	51.1	51.1	51.3	53.6
Yield stress (kgf/mm ²)	32.9	33.8	32.8	34.8
Elongation (%)	36.8	36.8	36.2	35.9
Reduction of area (%)	65.6	66.0	65.7	63.8
Ductility transition temperature (°C)	-15	-18	-18	-8
Absorbed energy at 0°C (kgf-m)	6.9	7.0	6.5	5.4

Material; SM 41, Reduction ratio; 5
Vibration; 60Hz, 0.3mmp-p

亀甲状のひび割れが生じ、高温時に鋳塊を取り出すと割れて崩壊した。また鋳込後のスリーブの表面は鋳込前の明灰色から濃い茶色に変化した。

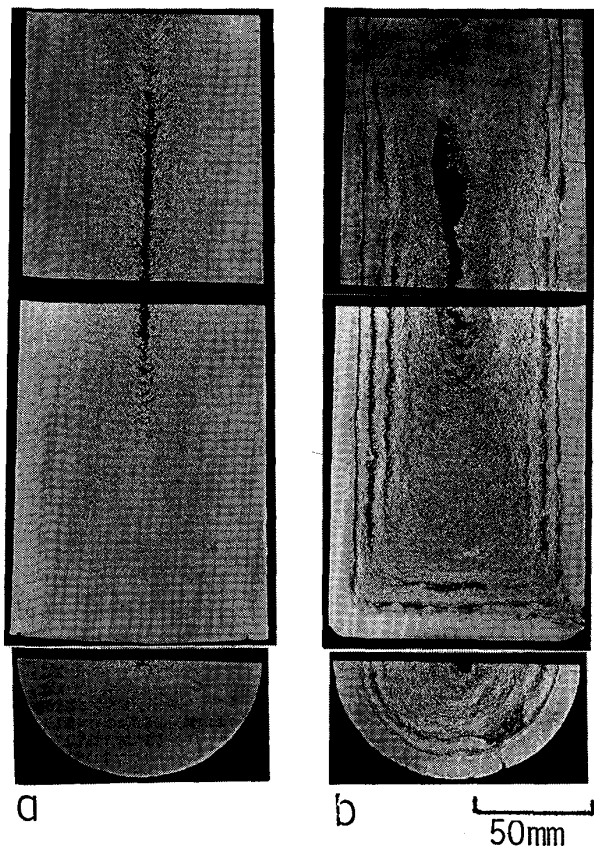
実験の結果を次に示す。鋳肌は、振動の有無にかかわらず双方とも滑らかで良好であった。鋳塊の縦断面のうち、底から約 120 mm のところのマクロ組織を Photo. 1 に示す。振動を加えたものは分岐柱状晶組織の領域が広くなり、特に窒化珪素スリーブを用い、かつ加振したものは中央部の等軸晶領域が増加している。

(2) 圧延の実験 造塊で得られた円柱状の鋳塊を厚さ 20 mm の厚板 (圧下率 5) に、また、縦割した半円形の鋳塊を厚さ 5 mm の薄板 (圧下率 10) にそれぞれ

圧延した。なお圧延に先だち鋳塊は炉内で $1200^\circ\text{C}\cdot 60$ min の均熱をし、圧延開始温度は 1100°C 、終了温度は 900°C としてパスごとの温度条件をそろえた。パス間の圧延率は、円柱状の鋳塊では 15%、半円形の鋳塊では 20% とした。

実験の結果を次に示す。造塊時の条件 (鋳壁の種類、振動の有無) による圧下力の差は見られなかった。厚板のミクロ組織を Photo. 2-(i) に示す。造塊時の振動の有無による差は見られない。このことから造塊時に振動を加えた場合結晶粒は微細化するが圧延によつて振動の有無による差異が消失することがわかった。薄板のミクロ組織も厚板のそれと同様に造塊時の条件による差は見られなかった。機械的性質として引張強度、衝撃値等を調べたが、その結果を Table 1 に示す。窒化珪素スリーブ付鋳型で振動を加えたものは他の条件で得られたものに比べ強かつ脆くなっているが、残りの 3 条件 (窒化珪素鋳型で振動なしと 鋳鉄鋳型で振動ありおよびなしの 3 条件) では機械的性質の有意差が認められない。

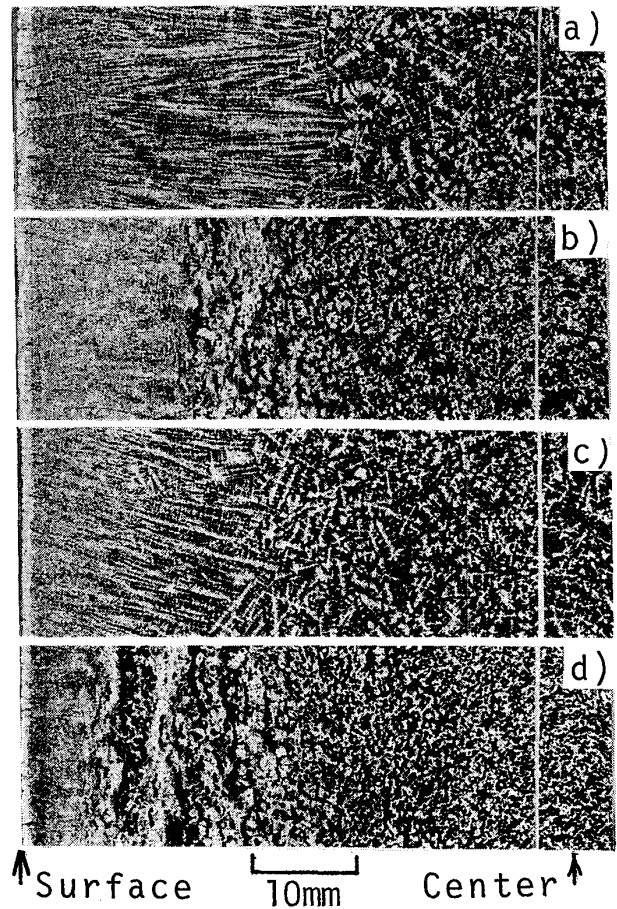
(3) 溶接の実験 溶接工程では前述の厚板 (厚さ 20 mm) にはサブマージドアーク溶接を、薄板 (厚さ 5 mm) には被覆アーク溶接およびマイクロプラズマ溶接を行つた。これらのいずれについても溶接時の振動 (鉛直振動 0.3 mmp-p, 50 Hz) の有無の効果を調べた。



- a) Without vibration, Mold ; FC25
 b) With vibration, Mold ; Si_3N_4
 Material ; SM50, Casting temperature ; 1600°C
 Vibration ; Horizontal circular, 0.3 mmp-p, 60 Hz

Photo. 3. Effect of vibration and mold material on a solidified structure.

実験の結果を次に示す。消耗電極（溶加材）や非消耗電極と溶接金属との間の距離が鉛直振動によつて変動するため、アークの不安定現象の生ずることが考えられたが、いずれの実験においてもそのような現象は生じなかつた。サブマージドアーク溶接の溶接金属（4層盛の最表層）とその熱影響部のマイクロ組織を Photo. 2-(ii) (iii) に示す。サブマージドアーク溶接の溶接金属は、溶接時に振動を加えると針状組織となり微細化していることがわかる。しかし熱影響部には差が見られない。また多層盛の溶接（サブマージドアーク溶接および被覆アーク溶接）では、表層以外の溶接金属がその後の入熱によりオーステナイト変態し針状組織が消えるものもあつた。また表層以外の熱影響部には振動の有無による差はなかつた。次に、サブマージドアーク溶接をした材料の機械的性質である硬度分布・衝撃値を測定した。溶接時に振動を加えると溶接金属の硬度が上昇（HV で 10～30）し、脆性温度が低下（約 15°C ）し、 0°C の吸収エネルギーが上昇（約 2 kgf-m）するが、熱影響部には差が生じないことがわかつた。なお、造塊時の振動の有無



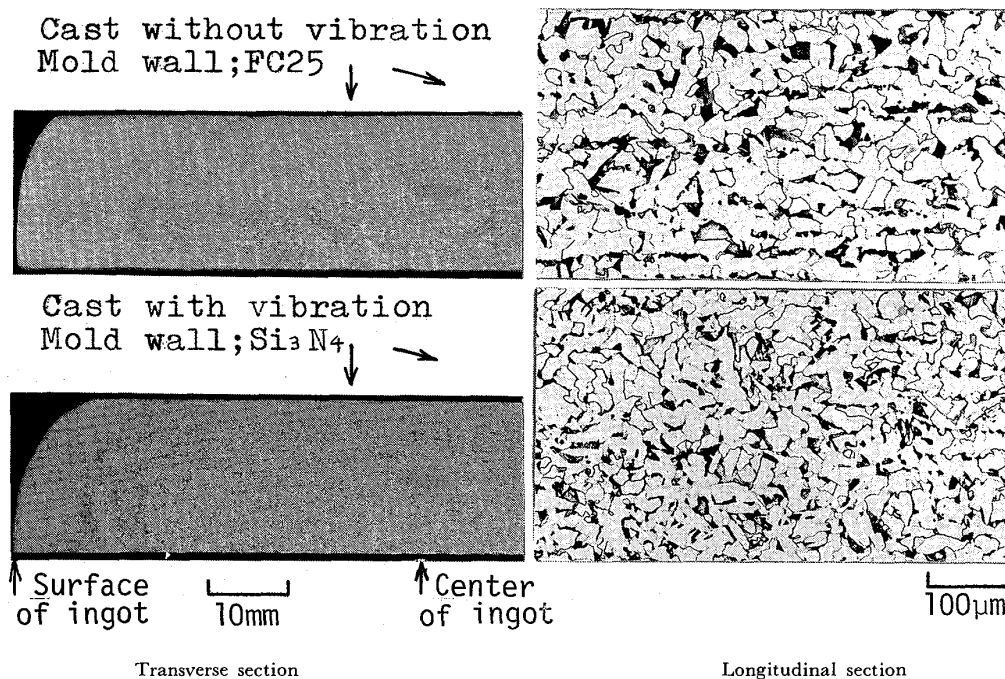
- a) Without vibration, Mold ; FC25
 b) With vibration, Mold ; FC25
 c) Without vibration, Mold ; Si_3N_4
 d) With vibration, Mold ; Si_3N_4
 Material ; SM50, Casting temperature ; 1600°C
 The position of sampled section ; 120 mm from the bottom
 Vibration ; Horizontal circular, 0.3 mmp-p, 60 Hz

Photo. 4. Effect of vibration and mold material on a solidified structure.

による熱影響部への差はみられなかつた。また、被覆アーク溶接とプラズマアーク溶接とでは、いずれの部分にも振動の有無による組織・機械的性質の差は見られなかつた。

2.2 各工程における振動の効果

前述の実験では溶接熱影響部におよぼす铸造条件の影響と溶接組織におよぼす溶接法の影響とを調べた。その結果いずれもその影響が見られなかつたため、ここでは造塊時に加える振動の効果を知る実験と、溶接時に加える振動の効果を知る実験との二つに分離しかつ溶接条件を単純化した。対象とする材質は SM 50 (C0.12%, Si 0.28%, Mn1.42%, P0.020%, S0.010%) とした。SM 50 は機械構造物を作るのに広く用いられる材料であり、かつ SM 41 に比べて圧延による再結晶が起りにくく、造塊時の振動の効果を明確にすることができる。なお、おのおの実験の手順は 2.1 の実験と同じである。



Transverse section
Material ; SM50
Rolling condition ;
Initial temperature ; 1200°C Final temperature ; 900°C
Rolling velocity ; 1.25 m/s Reduction ratio ; 2.5
Sampling position ; 120 mm from the bottom of ingot
Photo. 5. Effect of vibration during solidification on rolled structure.

Table 2. Mechanical properties of ingot and rolled steel plate caused by vibration.

(a) Ingot

Vibration during casting	No	Yes	No	Yes
Material of mold wall	FC25	FC25	Si ₃ N ₄	Si ₃ N ₄
Tensile strength (kgf/mm ²)	46.4	44.8	47.0	46.4
Yield stress (kgf/mm ²)	28.2	29.1	27.6	28.9
Elongation (%)	40.2	39.8	40.0	38.6
Reduction of area (%)	68.8	74.4	68.1	68.1
Ductility transition temperature (°C)	50	40	40	40
Absorbed energy at 0°C (kgf-m)	1.0	1.6	2.5	1.3

(b) Rolled steel plate

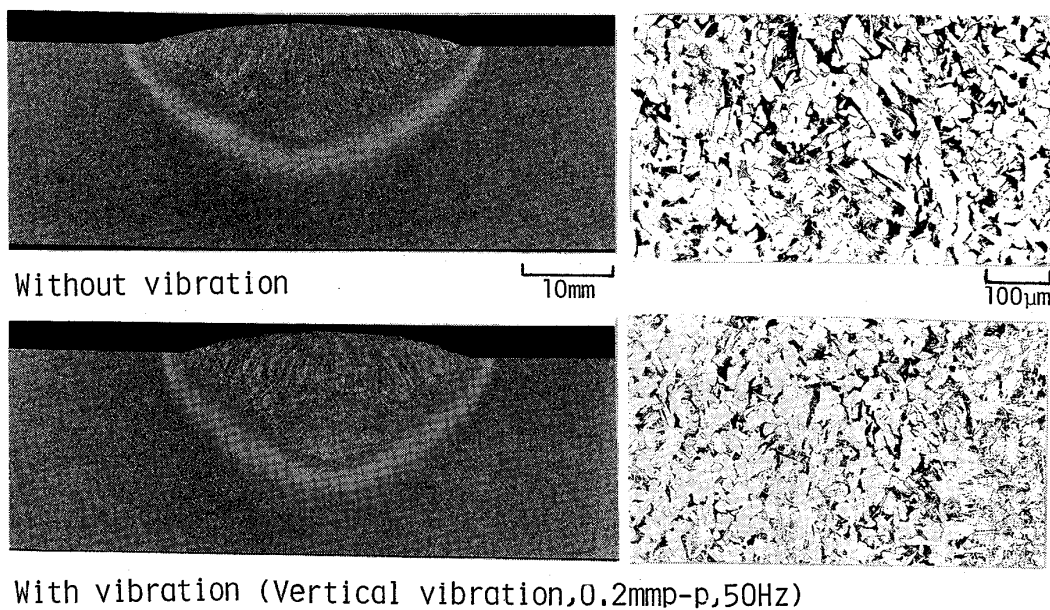
Vibration during casting	No	Yes	No	Yes
Material of mold wall	FC25	FC25	Si ₃ N ₄	Si ₃ N ₄
Tensile strength (kgf/mm ²)	48.9	46.6	48.8	48.2
Yield stress (kgf/mm ²)	31.5	28.0	30.6	31.9
Elongation (%)	40.3	39.1	42.5	39.2
Reduction of area (%)	78.7	79.9	77.2	77.5
Ductility transition temperature (°C)	10	16	22	38
Absorbed energy at 0°C (kgf-m)	9.4	5.8	5.0	3.0

Material; SM50, Casting temperature; 1600°C
Vibration; 60Hz, 0.3mm p-p, Reductin ratio; 2.5

(1) 造塊の実験 造塊工程では 2・1 の実験と同一の 2 種類の鑄型を用いた。ただし窒化珪素スリーブ付鑄型では、スリーブと外側の鑄型枠との間にジルコンサンド (平均粒径 0.1~0.15 mm) を振動充填し、注湯時のスリーブと鑄型との熱膨張の差による空隙の発生を防止した。この窒化珪素スリーブ付鑄型で振動を加えたものでは注湯後凝固中に 2~3 回共振が生じていると思われる大きなうなりが生じた。(湯面および鑄型は、ダンディッシュや飛散防止板があるため、直接観察できなかった。)

実験結果として鑄塊の縦断面のマクロ組織を Photo. 3, 4 に示す。振動をかけたものには鑄型の種類によらず合計 4 回の実験のうち 3 回までに、Photo. 3-(b) に示すようなホワイトバンドが現れた。振動を加えないものでは、いずれの鑄型のものにもこのホワイトバンドは生じておらず、凝固中の機械的振動がホワイトバンドの発生を促していることがわかる。しかし Photo. 4 に示すように振動を加えたものは加えないものに比べて結晶粒が微細化し、特に窒化珪素スリーブ付鑄型を用いたものではそれが顕著である。

(2) 圧延の実験 縦割の半月形 (半径 50 mm 長さ 300 mm) の鑄塊を軽圧下 (圧下率=2.5) で圧延した。これは造塊時に微細化した結晶粒を圧延による再結晶に



Submerged arc welding
 Base material ; Equivalent to SM50, Welding rod ; US36×MF38, ϕ 4
 Welding conditions ; 500 A×35 V×150 mm/s, 1 layer
 The position of the section sampled for micro structure ; Deposit in the center
 Photo. 6. Effect of vibration during welding on welded structure.

よつて消失させないためである。

実験結果を次に示す。圧延板のマクロ組織および、同じ断面のミクロ組織を Photo. 5 に示す。Photo. 5 は底から 120 mm の横断面であり、鑄塊の組織の様相がそのまま残っていることがわかる（なお中心線上の楕円状の影は熱電対の跡である）。Photo. 5 から再結晶粒の大きさは、振動有無と鑄型差異にかかわらずほぼ同じであるが、振動をかけたものはパーライトバンドが乱れていることがわかる。なお、圧延時の変形抵抗にも差異は認められなかつた。次に鑄塊材と圧延材の機械的性質を Table 2-(a), (b) に示す。引張強度・降伏応力・伸び・絞りについては鑄塊・圧延材のいずれにおいても鑄壁の種類および振動の有無による差はほとんど見られない。一方、靱性について見ると鑄塊では明瞭な傾向がつかめないのに対し、圧延材では、かなり明瞭な傾向がある。すなわち、振動を加えたものは鑄壁の種類によらず加えないものに比べて劣り、また、鑄壁の種類別に見ると鑄鉄鑄型によるものは振動の有無によらず窒化珪素付鑄型によるものより優れている。

(3) 溶接の実験 (i) 市販の SM 50 の鋼板（厚さ 22 mm）にサブマージドアーク溶接を行う、(ii) 市販の 3.5% ニッケル鋼板（厚さ 18 mm）に被覆アーク溶接を行う、の 2 種類の溶接につき溶接時の振動の効果を調べた。なお、いずれの溶接も 1 パスで行い、2 層めからの入熱の影響を排除した。

実験結果は次のとおりである。SM 50 の溶接後の横断面のマクロ組織 (Photo. 6) から振動の有無による溶接金属の組織の差はないことがわかる。また 3.5% ニッケル鋼の場合も同様に組織に差は認められなかつた。機械的性質として SM 50 の硬度分布と衝撃値を調べたが振動の有無による差はなかつた。

3. 考 察

SM 50 を振動造塊した場合に生じたホワイトバンドについて考慮する。先の溶湯の凝固進行中に圧力を加えた実験においても鑄型と平行にホワイトバンドが生じた。これは凝固進行中の部分とすでに凝固した部分とが加圧によりすべり、その界面に生じたすきまに溶湯がさしこんだため鑄型と平行に偏析帯が生じたためと考えられた。本実験でも同様に、振動により未凝固部分が共振し凝固部分と分離して鑄型と平行な偏析帯を作るすきまが生じたものと思われる。

これを防止するには先の結果³⁾より加振を注湯中のみに限ればよいと考えられる。ゆえに、本実験の場合も注湯中の加振のみで等軸晶化とホワイトバンド発生防止ができると考えられる。

振動造塊の応用について述べる。凝固中の加振は多くの問題を含んでいるが、振動を加えることで鑄塊の組織が微細化することも事実である。応用例として極厚板の圧延が挙げられよう。ここでは、低圧下率の圧延しか

できず、圧延による再結晶が期待できないため、結晶粒の微細化・偏析軽減が困難である。また直接圧延では通常の造塊-圧延の間で通過する冷却・加熱工程が省かれるのでオーステナイト変態が起こらず、再結晶による微細化が望めない。それゆえ、あらかじめ鑄造組織が微細化できる本方法は有効と考える。

母材を鑄壁に、溶接金属を溶湯に見たてた造塊と溶接をモデル化して考えると、溶接は鑄壁と溶湯との温度差が非常に小さく、鑄壁で生じる不均質核は極めて少ない造塊であるとする事ができる。したがって鑄壁という冷却面で不均質核が多数発生する造塊と、溶接とを同じ条件の凝固と考えて鑄壁振動による微細化を期待することは適当でないことになる。そこで振動造塊で得た知識を溶接に応用し、微細な溶接金属の組織を得るには新たに振動する冷却面を作ればよいことになる。そのためには溶融池の中に不均質核を発生させ、かつ界面に食われぬような挿入タイプの冷却器を用いることが良策であると考えられる。筆者らは Al の造塊の場合、注湯終了までこのような振動冷却器を溶湯の中に挿入すれば微細な等軸晶が得られることを確かめている⁴⁾。

4. 結 言

SM 41, SM 50, 3.5%Ni 鋼等を用いて、造塊時の振動や鑄壁が鑄塊・圧延材・溶接部等におよぼす影響、および溶接時の振動が溶接部におよぼす影響等を明らかにする実験を行い、次のことを明らかにした。

(1) 鋼の凝固時に振動(水平円振動; 公転成分のみで自転運動成分を含まない円振動, 0.3 mmp-p, 60 Hz)を加えると、等軸晶が増加し結晶粒は微細化する。ただし鑄塊の凝固中に加振すると未凝固の溶湯が激しく振動し、ホワイトバンドを生じる場合がある。

(2) 鑄型を通常の鑄鉄のものから鑄壁のみ窒化珪素に替えたものにするると上記の効果が促進される。

(3) 圧延後の結晶粒には圧下比が 2.5 と小さい場合にも再結晶が生じるため、造塊時の振動の有無による結晶組織の差は消失する。

(4) 振動を加えて凝固させた鑄塊とその圧延材は、振動を加えないものに比べ、靱性が劣る。圧延材では特にその傾向が顕著である。

(5) 造塊時の振動は溶接の熱影響部に影響をおよぼさない。

(6) 溶接時の振動(縦振動 0.2 mmp-p, 50 Hz)は、SM 41 をサブマージドアーク溶接する場合以外、溶接金属に影響をおよぼさない。

本研究に協力していただいた、トピー工業(株)須田興世、園田徹、日本鋼管(株)伊藤雅治、矢沢恒治、藤田米章、新倉正和、平坂正人、三井造船(株)手塚則雄の各氏に心から感謝の意を表します。

なお、本研究は昭和 56 年度・57 年度の文部省科学研究費(一般研究 B56460073)の助成を受けて行つたものである。

文 献

- 1) 千々岩健児, 畑村洋太郎, 石村和彦: 日本機械学会講演論文集, No. 790-5 (1979 年 4 月), p. 156
- 2) 千々岩健児, 畑村洋太郎, 石村和彦: 日本機械学会講演論文集, No. 790-17 (1979 年 10 月), p. 149
- 3) 千々岩健児, 畑村洋太郎, 林 英男: 日本機械学会講演論文集, No. 823-1 (1982 年 3 月), p. 148
- 4) 畑村洋太郎, 中尾政之, 松下裕之: 日本機械学会論文集 C 編, 51 (1985 年 12 月) 472
- 5) A. H. FREEDMAN, J. F. WALLACE: Trans. of the Foundrymen's Society, 67 (1959), p. 578