

球状黒鉛鑄鉄の諸性質に及ぼす Mn, Cu, Sn の影響

Effect of Manganese, Copper and Tin on the Properties of Nodular Graphite Cast Iron

谷川 実*
Minoru Tanikawa柳井 岩雄*
Iwao Yanai山内 健敏*
Taketoshi Yamauchi

内 容 梗 概

球状黒鉛鑄鉄の基地組織を鑄造のままでパーライトにして強度、耐摩耗性を向上させる目的で Mn, Cu, Sn を添加し、種々の冷却速度における組織と機械的性質の関係および鑄造時に生ずるひけの状態について調査した。その結果いずれの元素も冷却速度が遅い場合には、わずかに黒鉛球状化を低下させる。パーライトの析出に対しては Sn が最も効果的で、次に Mn, Cu の順となるが、機械的性質は Cu を含有するものが最もすぐれ、次に Mn, Sn の順となった。すなわち同一パーライト量で比較した場合、Cu は Mn, Sn に比べて強度が大きく、靱性 (じんせい) の低下が小さい。Sn はかたさ、縦弾性率を上昇するが引張強さの向上は期待できず、靱性の低下も著しい。鑄造時に生ずるひけは Mn を含有した場合が最も大きく、Cu, Sn はほとんど影響しないことが判明した。

1. 緒 言

球状黒鉛鑄鉄は基地組織のパーライト化によって引張強さ、かたさが著しく向上するが、その反面伸び、絞り、衝撃値が低下し、衝撃遷移温度の上昇をきたす⁽¹⁾。したがってパーライト組織の場合は靱性を要求する製品には適さないが、強度、耐摩耗性が著しく向上するので^{(2)~(7)}、この方面への用途は広く、球状黒鉛の直径が 20~30 μ 程度のものが最も良好な耐摩耗性を示すといわれている^{(8)~(9)}。しかし通常鑄造のままでは黒鉛の周囲にフェライトが析出し、いわゆるブルス・アイ組織を呈するので、基地組織の調整は熱処理によって行なわれている。

本研究は鑄造のままでパーライト組織を多く析出させて強度、耐摩耗性の要求される製品に適用する目的で行なったものである。基地組織に影響を及ぼすおもな因子としては

- (1) 原料鉄の種類および化学組成
- (2) 溶解条件、黒鉛球状化剤の相違
- (3) 接種方法の差、二次接種の有無
- (4) 球状化処理、接種から鑄造するまでの経過時間
- (5) 鑄造後の冷却速度の大小

などであるが、工業生産上これらの諸条件を画一的にそろえることはほとんど不可能に近い。したがって本報では現状の製造工程で得られた球状化処理溶湯にフェライトの析出を阻止し、パーライトの析出を促進させるような金属元素を添加することを試みた。金属元素としては Mn, Cu, Ni, Cr, Sn, P, Mo, W, V, Co, Sb などが考えられるが、このなかで取鍋添加によって容易に溶入し、かつ効果的と推定される Mn, Cu, Sn を常時現場で溶製している球状化処理溶湯に添加し、種々の冷却速度のもとで凝固、冷却させた場合の組織と機械的性質の関係ならびに鑄造時に生ずるひけの状態について調査した。

2. 球状黒鉛鑄鉄の諸性質に及ぼす Mn, Cu, Sn の影響に関する現在までの研究概要

実験方針ならびに結果の検討の参考にするため Mn^{(10)~(12)}, Cu^{(10)~(11)~(13)~(15)}, Sn^{(10)~(16)~(20)} の影響に関する現在までの研究結果を取りまとめると次のようになる。パーライトの析出に対しては Sn が最も効果的で Sn 0.041% 程度になると効果が現われ、過量に含有するとかたさは上昇しても引張強さの向上は全く期待できず、靱性を著しく低下し、黒鉛球状化をも妨げる⁽¹⁰⁾。しかし Mg に Ce

* 日立製作所清水工場

を併用することによって Sn の球状化阻害作用を打ち消せることが指摘されている^{(16)~(17)}。Mn は約 1.5% 前後でパーライト組織となり、これ以上では遊離セメント、以下ではフェライトが混在するようになる。Cu は約 1% まではパーライトの析出に対して効果的に作用し、引張強さも最高を示すにいたるが、それ以上 Cu を含有してもほとんど効果が認められず、約 2% 以上になると黒鉛球状化が不完全になるため機械的性質が著しく低下するといわれている。

しかしながら諸元素の影響は原料鉄の種類、溶解条件、化学組成、球状化処理などの相違によって多少結果も異なってくる。また実際製造するとき問題となる鑄造時のひけ、あるいは種々の冷却速度のもとで凝固、冷却させた場合の黒鉛の分布状態、基地組織、機械的性質の影響などについても十分検討されていない。したがって本実験では、これらの点について日立製作所清水工場に常時溶解している球状化処理溶湯を用い種々調査した。

3. 実 験 方 法

3.1 供試料の溶製方法

供試料の溶製方法は次のようにして行なった。まず黒鉛球状化処理は第 1 表に示す球状化剤を取鍋の底に置き、これに現場 6 t 酸性キュポラで溶解された約 1,530°C の DCI 未処理溶湯を約 1,200kg 注入し、反応終了後ほかの取鍋の底に Fe-Si を置いて、これに移しかえる方法で二次接種を行なった。このときの化学組成を第 2 表に示す。

このようにして得られた球状化処理溶湯を約 80 kg ずつ 100 kg 取鍋にとり Mn, Cu, Sn を添加し、約 1,320°C でひけ試験片および冷却速度を変化させるために各種肉厚の Y ブロックに鑄造した。Mn, Cu, Sn の目標含有量は第 3 表に示すように黒鉛球状化、機械的性質を著しく悪化しない範囲内で変化させたが、分析値は取湯量、歩どまりの変動によって目標値より多少異なってくる。

第 1 表 黒 鉛 球 状 化 剤

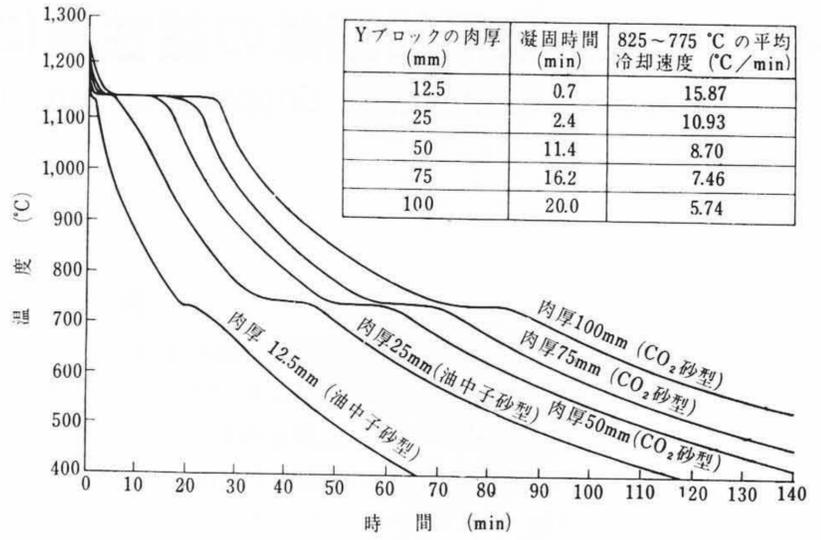
種 類	添 加 量 (%)
Fe-Si-Mg (35:45:20)	0.5
Ca-Si-Mg (22:44:25)	0.5
Ca 系 球 状 化 剤	0.5
Fe-Si (25:75) 二 次 接 種	0.5

第 2 表 球状化処理後の試料の化学組成 (%)

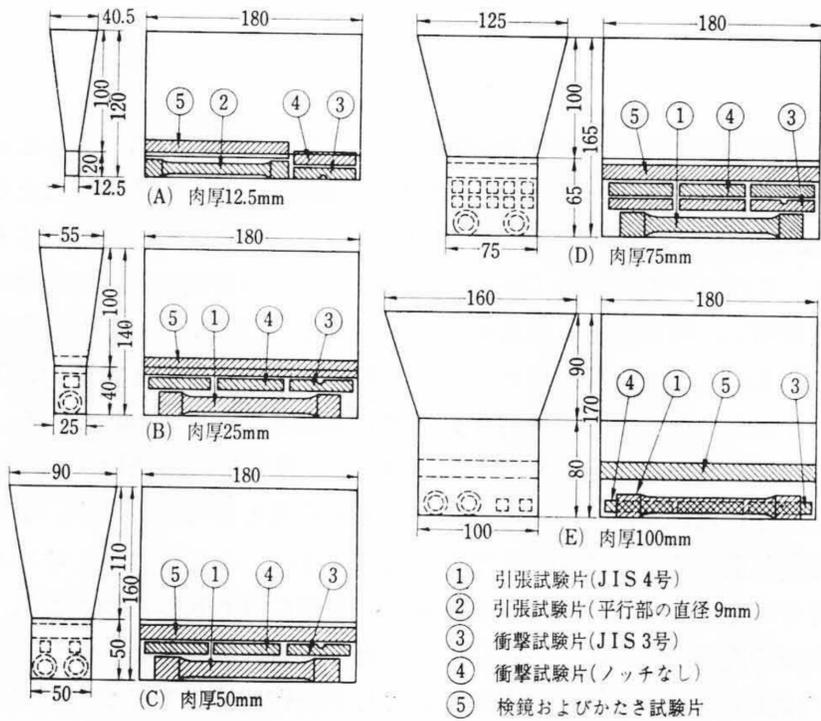
C	Si	Mn	P	S	Cu	Sn	Ni	Cr	Mg
3.84	2.18	0.31	0.040	0.013	0.21	0.007	0.021	0.042	0.070

第3表 Mn, Cu, Snの目標含有量および分析結果

添加元素の種類	試料番号	目標含有量 (%)	分析値 (%)
添加せず	1	—	—
Mn (Fe-Mn)	2	0.50	0.42
	3	0.75	0.68
	4	1.00	0.85
Cu (電解 Cu)	5	0.50	0.62
	6	1.00	1.08
	7	1.50	1.55
	8	2.50	2.52
Sn (純 Sn)	9	0.025	0.028
	10	0.050	0.059
	11	0.100	0.103
	12	0.150	0.144
	13	0.300	0.286



第2図 各種Yブロックの冷却曲線



第1図 Yブロックの形状および試験片の採取方法

3.2 各種Yブロックの形状および冷却速度と各種試験片の採取方法

各種Yブロックの形状および引張り、かたさ、検鏡試験片の採取方法を第1図に示す。Yブロックの寸法はJIS規格G-5502(1961)およびASTM規格A339-51(1951)を参考にして決めた。このような各種Yブロックに鋳造する際、肉厚25mmまでは油中子砂型、50mm以上ではCO₂砂型を使用した。その冷却曲線を第2図に示し、凝固時間およびA₁変態点直上付近(825~775°C)の冷却速度を図に併記した。

3.3 検鏡方法

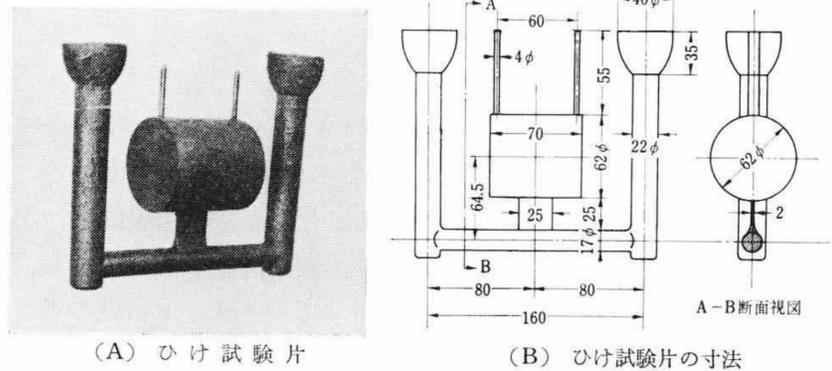
組織の観察にはInclusion用接眼レンズを用い、一視野の面積0.64mm²における黒鉛粒数、黒鉛球径およびパーライト量を80倍の倍率のもとで5視野について測定した。

3.4 材料試験方法

引張試験は同一試料について2個の試験片を30t万能材料試験機を用いて行なった。この際差動トランスによる伸び計を用いて応力-ひずみ線図を精密にX-Yレコーダに記録し、これから耐力(0.2%の永久ひずみを生ずる応力)および縦弾性率、伸び率を求めた。かたさはブリネル硬度計を用いて測定した。衝撃試験は30kg-mシャルピ衝撃試験機を用い、40mmスパンで同一試料について2~3回行なった。衝撃遷移曲線を求める場合には肉厚75mmのYブロックより切り出したノッチなしの試験片を用いた。

3.5 ひけ試験方法

ひけ試験にはPilling氏ら⁽²¹⁾が考案し、それをさらに改良した藤



第3図 ひけ試験片の外観写真および寸法

田氏ら⁽²²⁾の方法を採用した。この方法の特長は外びけと内びけが定量的に測定算出できることにある。ひけ試験片の寸法は第3図に示すが、測定精度を上げるために鋳型をシェルモールドにした。この鋳型で鋳造した場合、試験片に溶湯がみたされるとせきを薄くしてあるため、この部分が先に凝固するので溶湯の補給が断たれ、押湯の影響はほとんど無視できる。

本試験におけるひけの算出法は次のとおりである。

(1) 外びけの算出法

$$\text{外びけ\%} = \frac{V_0 - V}{V_0} \times 100$$

ここに V₀: 試験片の鋳型の容積

V: 試験片のみかけの体積 (試験片の室温における空気中の重量と水中の重量との差)

(2) 内びけの算出法

$$\text{内びけ\%} = \frac{V_a - V_s}{V_s} \times 100$$

ここに V_a: 試験片のみかけの比容積

$$\left(\frac{V}{\text{試験片の室温における空気中の重量}} \right)$$

V_s: 真の比容積

$$\left(\frac{1}{\text{試験片の内びけのない個所の比重}} \right)$$

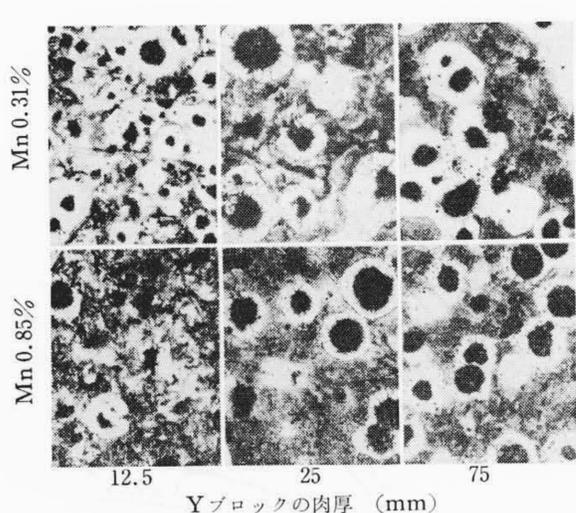
以上のようにして求められる外びけはDrawやSinkの量と凝固、冷却に伴う容積変化を含み、内びけはInternal CavitiesとInternal Porosityを含めたものである。

4. 実験結果と検討

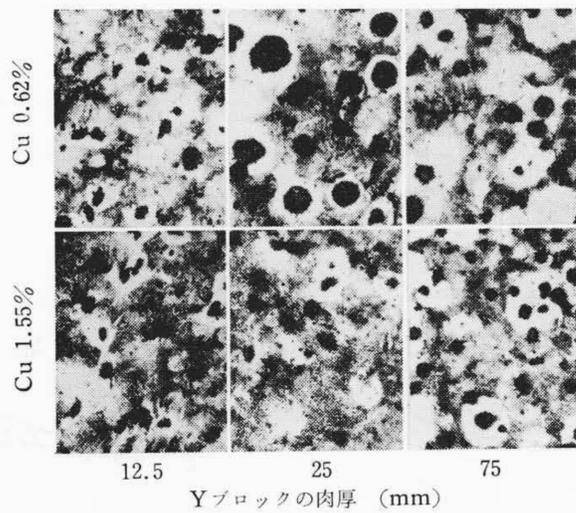
4.1 組織に及ぼすMn, Cu, Snの影響

(1) Mnの影響

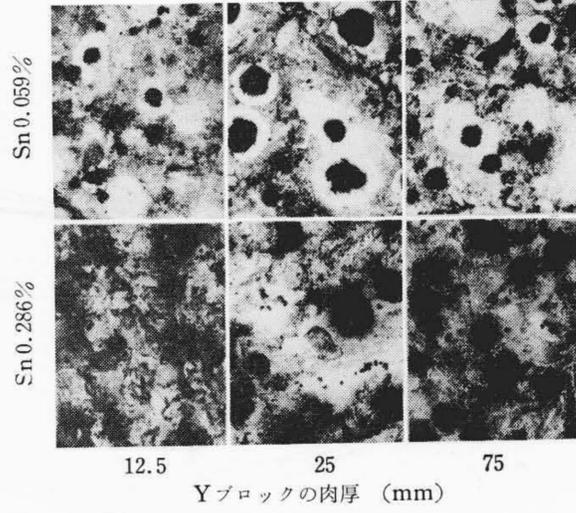
Mnは第4図の顕微鏡組織からも明らかなように黒鉛球状化に対する影響は小さいが、肉厚75mm以上になると球状化がやや



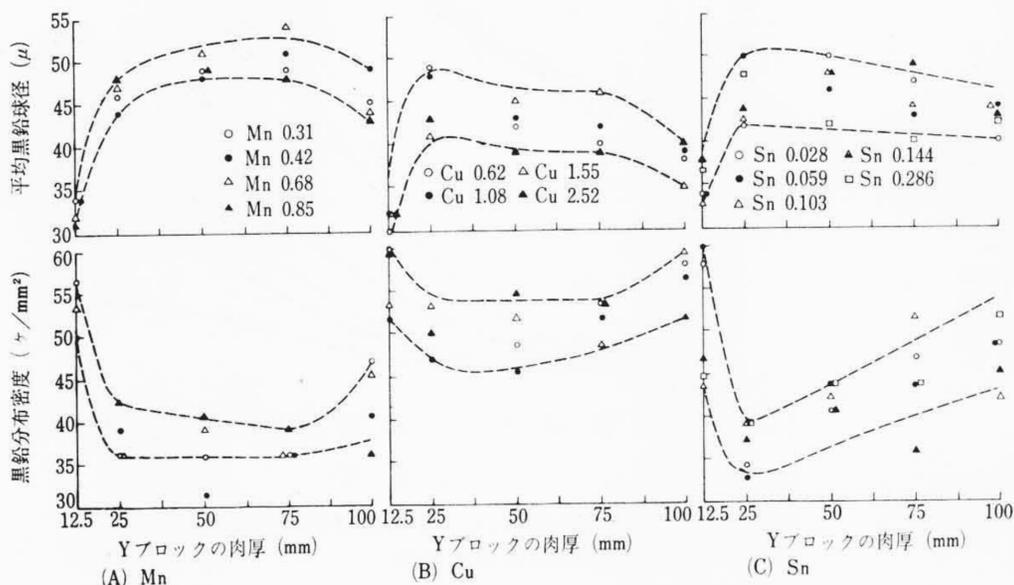
第4図 Mn量を変化した試料の顕微鏡組織 (×40)



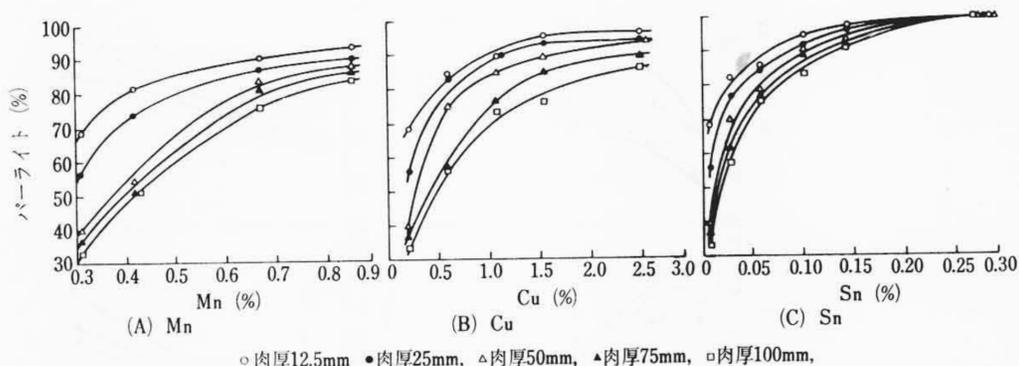
第7図 Cu量を変化した試料の顕微鏡組織 (×40)



第8図 Sn量を変化した試料の顕微鏡組織 (×40)



第5図 Yブロックの肉厚と平均黒鉛球径および黒鉛分布密度の関係



第6図 各種肉厚Yブロックの Mn, Cu および Sn 量とパーライトの関係

悪くなる。平均黒鉛球径、黒鉛分布密度は第5図(A)に示すようにいずれも Mn, Cu, Sn 量より肉厚の影響が大きく現われる。Mn の場合は第5図(A)のように肉厚 75 mm 付近で黒鉛球径はピークを示し、その分布密度は逆に最小となる。肉厚 75 mm 以上で平均黒鉛球径の減少、分布密度の増加をきたすのは黒鉛の球状化がやや悪くなり、黒鉛の大小の差が大きくなるためである。

基地組織は第6図(A)に示すように Mn によって、いずれの肉厚においてもフェライトは減少し、パーライト化が促進される。しかし本実験範囲の Mn 量では遊離セメントは晶出しないがフェライトの析出を伴い完全なパーライト組織は得られなかった。

(2) Cu の影響

Cu は第7図の顕微鏡組織からも明らかなように黒鉛球状化に対しては Cu 1.08% 付近までほとんど影響しないが、1.55% 以上になると冷却速度の遅い肉厚 75 mm 以上では黒鉛が微細となり、球状化もやや悪くなる。平均黒鉛球径、黒鉛分布密度は第5図

(B)に示すように肉厚の影響が大きく、肉厚 25 mm 付近で黒鉛球径はピークを示し、その分布密度は逆に最小となり、Mn, Sn に比べて黒鉛球径は小さく、分布密度が大である。

基地組織は第6図(B)に示すように Cu によってフェライトは減少しパーライト化が促進され、遊離セメントも晶出しない。しかし Cu がパーライトの析出に効果的に作用するのは約 1.5% までで、それ以上 Cu を含有してもほとんどその効果が期待できず、完全なパーライト組織を得ることは不可能である。

(3) Sn の影響

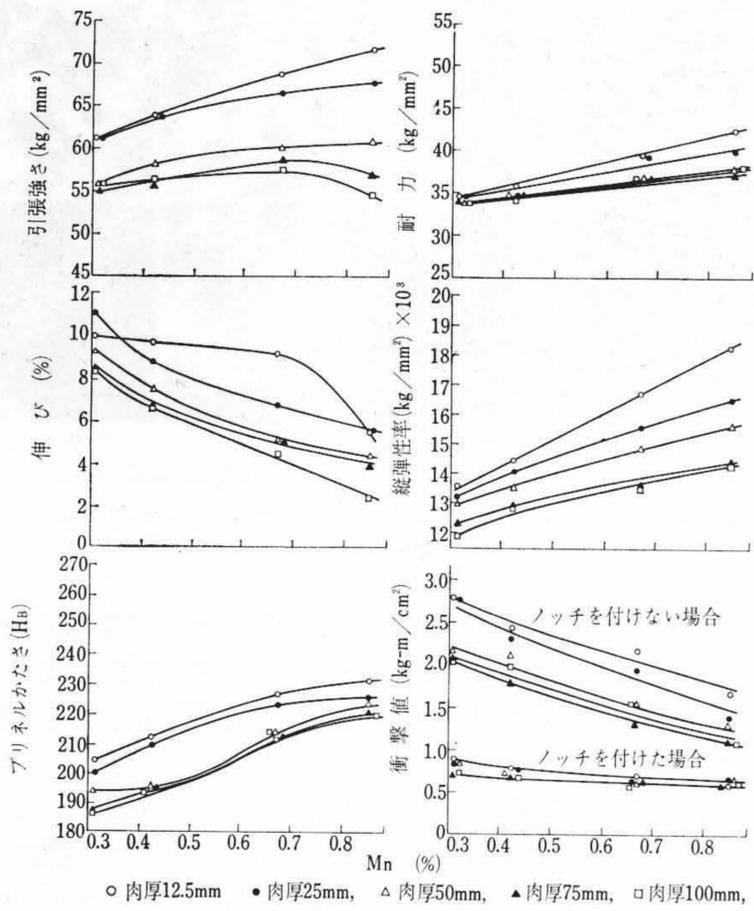
Sn は第8図の顕微鏡組織からも明らかなように Sn 0.1% 以上になると、冷却速度の遅い肉厚 75 mm 以上では黒鉛の大小の差が大きく、球状化がやや悪くなり、その作用は Mn, Cu に比べて大きい。平均黒鉛球径、黒鉛分布密度は第5図(C)に示すように肉厚の影響が大きく、肉厚 25 mm 付近で黒鉛球径はピークを示し、分布密度は逆に最小となり、Mn について球状黒鉛を細かくする作用がある。

基地組織は第6図(C)に示すように Sn によってフェライトは減少し、パーライト化が著しく促進され、Sn 約 0.25% になるといずれの肉厚においても完全なパーライト組織が得られる。しかし肉厚 50 mm 以下のものに微量(1%以内)の遊離セメントが晶出している。

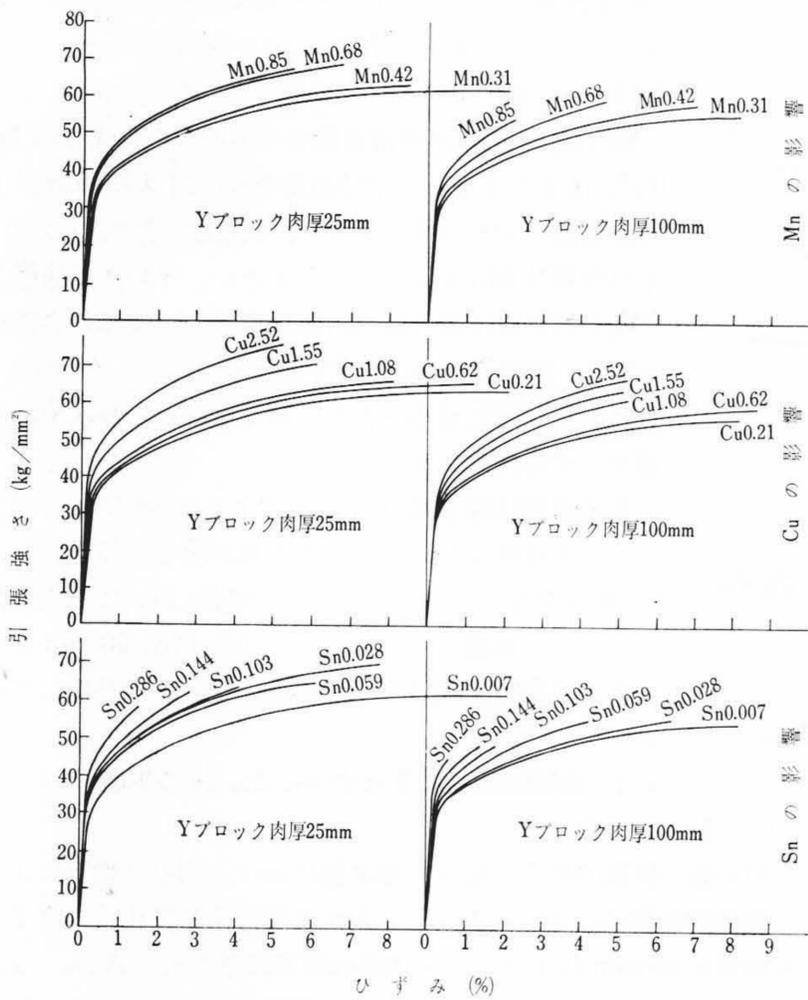
4.2 機械的性質に及ぼす Mn, Cu, Sn の影響

(1) Mn の影響

Mn 量と機械的性質の関係を第9図に示す。肉厚の増加によって機械的性質はいずれも低下し、Mn に対応する変化も小さくなり肉厚が 50 mm 以上になると肉厚の影響は著しく小さい。また Mn の増加によって引張強さ、耐力、縦弾性率、かたさは上昇するが、肉厚 75 mm 以上になると引張強さは Mn 0.68% を境として、さらに Mn が増加しても低下するようになる。これは黒鉛球状化がやや悪くなることに原因していると考えられる。第10図に応力-ひずみ線図の一例を示したが、Mn によって弾性限界におけるこう配は大きくなり、破断時のひずみ量は小さくなる。一方伸び、衝撃値(20℃)は Mn の増加によって順次低下し、衝撃試験ではノッチを付けないほうがその変化が大きく現われた。ノッチを付けた場合はその変化が小さく後述の Cu, Sn とほぼ同一値を示した。また Mn 量を変化した試料の衝撃遷移曲線を求めてこれを第11図に示す。図より明らかなように Mn によって各温度における衝撃値は低下し、遷移温度も高温側に移行する。



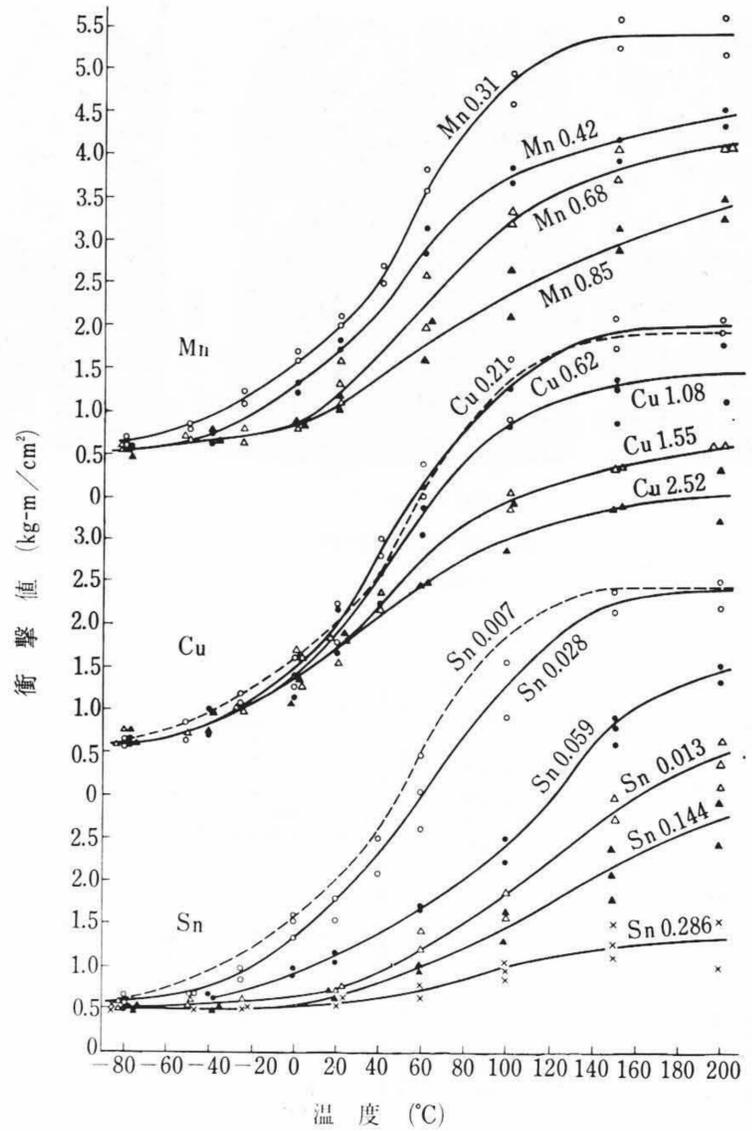
第9図 各種肉厚YブロックのMn量と機械的性質の関係



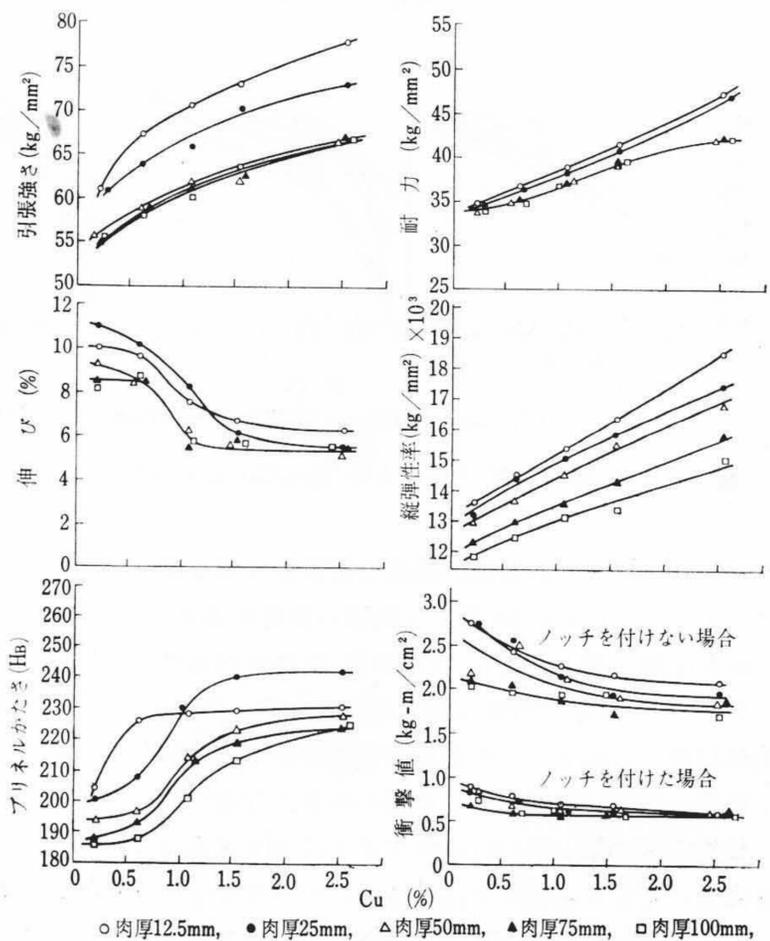
第10図 Yブロックの肉厚およびMn, Cu, Sn量を変化した試料の応力-ひずみ線図

(2) Cuの影響

Cu量と機械的性質の関係を第12図に示す。肉厚50mmまではMnの場合と同様に機械的性質の変化が大きく現われる。またCuの増加によって引張強さ、耐力、縦弾性率、かたさは上昇し、Mnに比べていずれもやや高値を示す。特に引張強さの上昇が著しく、かたさに対して上昇が認められるのはCu約1.5%までである。一方第10図の応力-ひずみ線図からも明らかなようにCuにより弾性限界におけるこう配は大きくなり、破断時のひずみ量もMn, Snに比べて大きい。伸びおよびノッチを付けない場合の

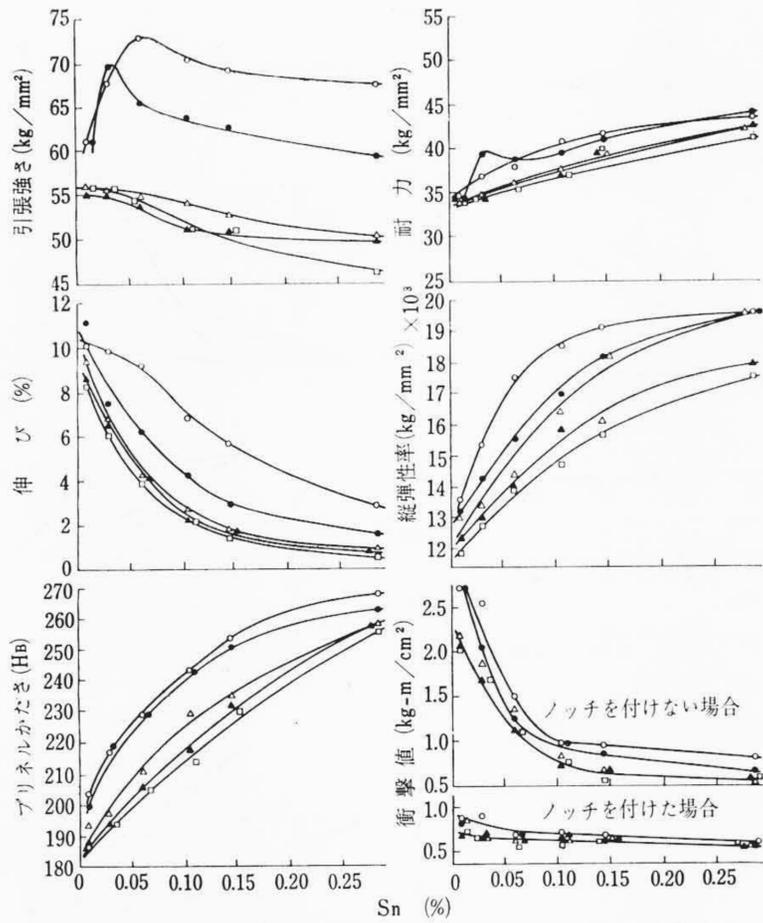


第11図 Mn, CuおよびSn量を変化した試料の衝撃遷移曲線



第12図 各種肉厚YブロックのCu量と機械的性質の関係

衝撃値(20°C)はCu約1.5%まで低下するが、それ以上Cuが増加してもほとんど低下せず、Mn, Snに比べて高値を示し、靱性が大きい。しかしノッチを付けた場合の衝撃値は低く、Mn, Snとほぼ同一値を示している。またCu量を変化した試料の衝撃遷移曲線を求めてこれを第11図に示す。図より明らかなように



○ 肉厚12.5mm, ● 肉厚25mm, △ 肉厚50mm, ▲ 肉厚75mm, □ 肉厚100mm,
第13図 各種肉厚YブロックのSn量と機械的性質の関係

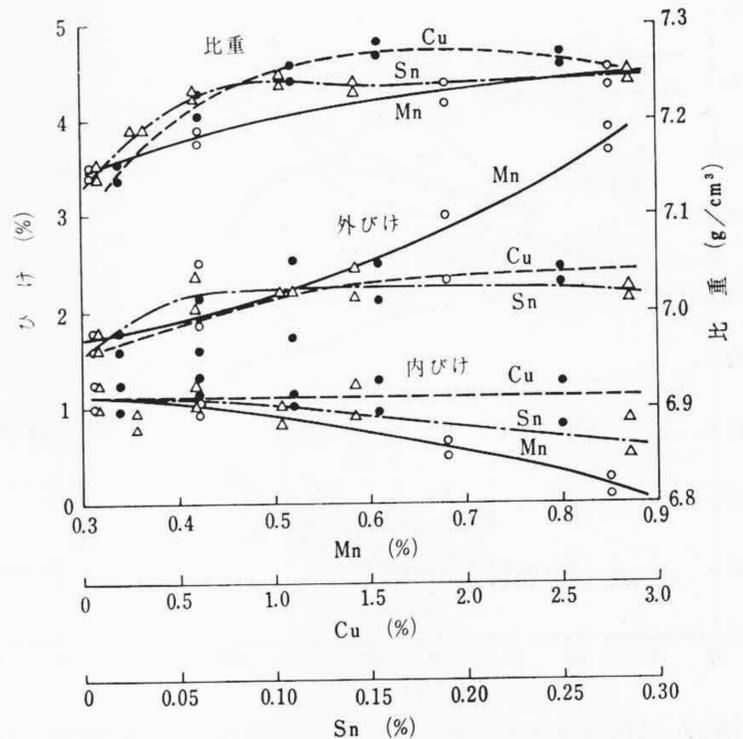
Cuによって各温度における衝撃値が低下し、遷移温度も高温側に移行するが、その傾向はMn, Snに比べて小さい。このようにCuは衝撃特性、靱性を低下させるがその作用はMn, Snほど顕著でない。

(3) Sn の影響

Sn量と機械的性質の関係を第13図に示す。肉厚50mmまでは機械的性質の変化が大きく現われる。また引張強さは前述のMn, Cuに比べその傾向が異なり、肉厚12.5, 25mmではおのおのSn 0.059, 0.028%付近で引張強さにピークが認められる。肉厚がさらに増加すると、このようなピークは生じないでSnの増加によって引張強さは低下し、その向上は全く期待できない。しかしSnはパーライトの析出を促進するのでかたさの増加が大きく、第10図に示す応力-ひずみ線図の弾性限界におけるこう配もMn, Cuに比べて大きくなるので縦弾性率は著しく上昇し、Snによって引張強さが低下する場合でも耐力は増加を示している。一方伸び、衝撃値はSnによって著しく低下し、衝撃試験ではノッチを付けないほうがその変化が大きく、ノッチを付けた場合にはMn, Cuとほぼ同一値を示している。またSn量を変化した試料の衝撃遷移曲線を求めてこれを第11図に示す。図より明らかなようにSnによって各温度における衝撃値が低下し、遷移温度も高温側に移行するが、その傾向はMn, Cuに比べて著しく大きい。このようにSnは衝撃特性、靱性を著しく低下させる。

4.3 ひけに及ぼす Mn, Cu, Sn の影響

Mn, Cu, Snとひけ試験片に生じた外ひけ、内ひけおよび比重の関係を第14図に示す。Mnはひけに及ぼす影響が最も大きく、外ひけを増加し、内ひけを減少させる。Cu, Snは外ひけをわずかに増加させるが内ひけにはほとんど影響しない。Mn, Cu, Snによって比重がいずれもわずかに増加しているのは基地組織がパーライト化するためと考えられる。Cu, Snによる外ひけの増加は比重変化と同じような傾向を示し、その変化も小さいのでおもに、パーライトの析出に原因するものと考えられる。Mnの外ひけ増加もパーライトの析出が一つの原因としてあげられるが、その変化が大きいことより凝固過程の変化することが主原因と考えられる。



第14図 Mn, Cu, Sn量とひけおよび比重の関係

5. Mn, Cu, Sn の効果と問題点

今までの実験によって球状黒鉛鑄鉄の諸性質に及ぼすMn, Cu, Snの影響を明らかにしたが、さらにその効果と問題点について検討、考察を加えると次のようになる。

5.1 黒鉛組織について

黒鉛球状化に対してはいずれの元素もやや球状化を阻害する傾向を示し、その作用はSnが最も大きく、次にCuで、Mnの影響はわずかであった。このような球状化阻害作用は肉厚が増して徐冷されると大きく現われるので、今後さらに大物鑄物に適用する場合にはCeの併用によって球状化阻害作用を打ち消すことが望ましいと考えられる⁽¹⁶⁾⁽¹⁷⁾。

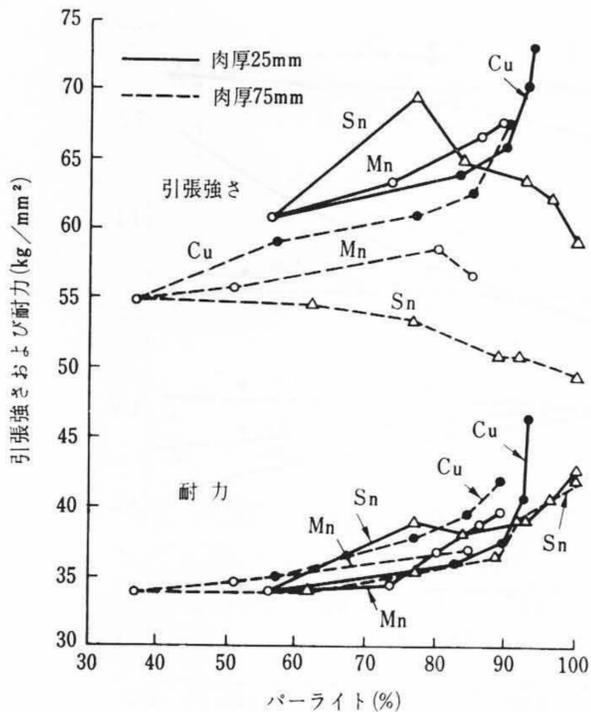
5.2 組織と機械的性質について

以上調査した結果機械的性質はCuを含有する場合が最もすぐれ、次にMn, Snの順となった。しかし機械的性質は基地組織によって大きく変化するのでパーライト量との関係もあわせて検討すると次のようになる。

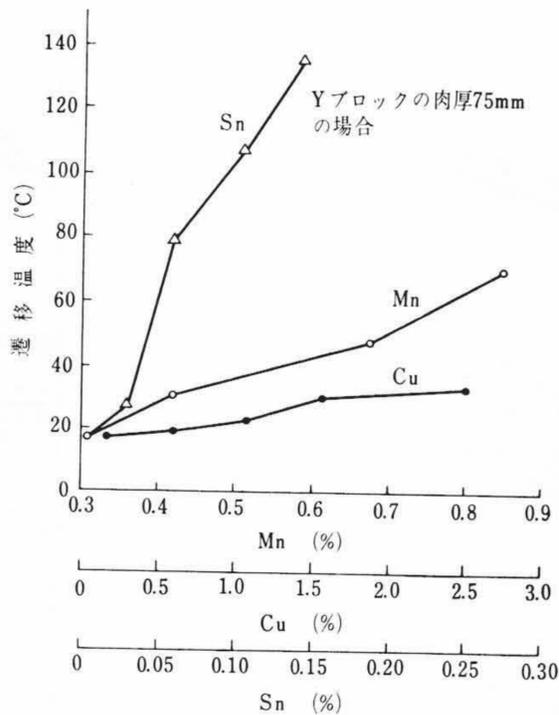
引張強さおよび耐力とパーライト量の関係は第15図に示すとおりで、Cuはいずれの肉厚においてもパーライトの増加によって引張強さを上昇させる。この原因としては、

- (1) Cuがフェライトに固溶して著しくフェライトの強度を増すこと⁽¹⁵⁾
- (2) $\gamma \rightarrow \alpha + Fe_3C + \epsilon$ の反応によりパーライト中に微細なCuが析出すること
- (3) Ar_1 変態点の降下によるパーライトの微細化

などの効果によるためと考えられる。Mn, Snは肉厚が大きくなるとパーライトが増加しても引張強さが低下する。これは黒鉛球状化およびその分布状態が悪くなるのが原因するものと考えられる。しかしパーライト量の増加によって応力-ひずみ線図のこう配が大きくなるため、耐力はMn, Cu, Snいずれの場合も上昇する。一方伸び、衝撃値など靱性の低下はCuが最も小さく、次にMn, Snの順となった。これをさらに遷移温度あるいはパーライト量との関係について検討すると次のようになる。第11図に示した衝撃遷移曲線上で2kg-mを示す温度を衝撃遷移点としてMn, Cu, Sn量と遷移温度の関係を求めると第16図に示すようになる。図より明らかなようにSnは遷移温度を著しく上昇させる。Mnはこれに次ぎ、Cuの場合は上昇がわずかである。さらに遷移点におけるパーライト量を求め、遷移温度とパーライト量の関係を図示すると第17図のよ



第15図 Mn, Cu, Sn を種々含有せる試料のパーライト量と引張強さおよび耐力の関係



第16図 Mn, Cu, Sn 量と遷移温度の関係

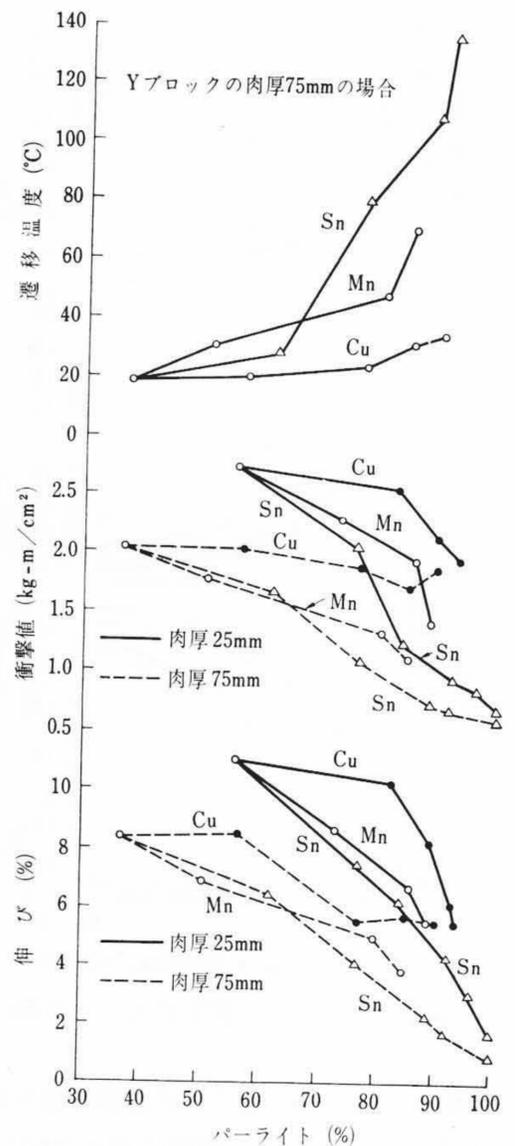
うになる。またパーライト量と衝撃値(20°C), 伸びの関係を求め、これを第17図に併記した。図より明らかなようにパーライトが増加すると遷移温度は上昇し、衝撃値(20°C), 伸びの低下が認められ、その作用はSnが最も大きく、次にMnとなり、Cuは著しく小さい。

また肉厚変化に対して機械的性質は肉厚50mmまでは変化も大きいですが、それ以上になると肉厚の影響は著しく小さくなる。またMn, Cu, Snを含有するといずれの肉厚においても耐力, かたさ, 縦弾性率が増加し、靱性が低下する。引張強さはCuの場合にはいずれの肉厚でもCuの増加によって上昇する。しかしMnの場合には肉厚75mm以上ではMn 0.68%以上になると引張強さは低下を示し、Snの場合には肉厚が12.5, 25mmではおのおのSn 0.059, 0.028%にピークが現われ、さらに肉厚が増加すると引張強さは低下するので、その向上は期待できない。

6. 結 言

球状黒鉛鑄鉄の諸性質に及ぼすMn, Cu, Snの影響について調査した結果を要約すると次のようになる。

- (1) 肉厚が増加するといずれの元素もやや球状化を低下させ、その作用はSnが最も大きく、次にCu, Mnの順となる。
- (2) Cuは黒鉛分布密度を最も大きくし、次にSn, Mnの順となり、平均黒鉛球径は分布密度と逆の変化をたどる。
- (3) パーライトの析出に対してSnが最も効果的で、次にMn, Cuの順となり、Cuのパーライトの析出に対する効果は約1.5%までである。
- (4) 肉厚の増加によって機械的性質はいずれも低下するが肉厚50mm以上になるとその影響は小さくなる。
- (5) 機械的性質はCuを含有する場合が最もすぐれ、次にMn, Snの順となる。すなわちCuの場合はその増加によって強度を上昇させ、いずれの肉厚においても約1.5%までは有効に作用する。
- (6) Mn, Snも強度を増加させ、特にSnはパーライトの析出が著しいのでかたさ、縦弾性率の上昇が大きい。しかしMnの場合には肉厚75mm以上になるとMn 0.68%を境にして、引張強さが低下し、Snの場合には肉厚12.5, 25mmではおのおのSn 0.059, 0.028%で引張強さにピークが現われるが、さらに肉厚が大きくなると低下するのみで、引張強さの向上は全く期待できない。
- (7) 靱性はMn, Cu, Snの増加によって低下するが、Cuによ



第17図 Mn, Cu, Sn を種々含有せる試料のパーライト量と遷移温度, 衝撃値, 伸びの関係

る低下が最も小さく、次にMnとなり、Snの場合は著しく大きい。

- (8) 鑄造時に生ずるひけに対してMnは外ひけを増加し、内ひけを減少するがCu, Snはほとんど影響しない。

本研究のSn分析は日立金属株式会社冶金研究所にお願いしたもので、ここに厚く感謝の意を表する。

参 考 文 献

- (1) W. S. Pellini, G. Sandoz, H. F. Bishop: Trans A. F. M., 46, 418 (1954)
- (2) 岡本, 蓮井: 機械学会誌 18, 38 (1952)
- (3) 斎藤, 岡林, 田中: 金属学会誌 16, 404 (1952)
- (4) 小川: 金属学会誌 17, 407 (1953)
- (5) 西山, 小池: 日立評論 24, 89 (1958)
- (6) 岡林, 斎藤, 中村: 鑄物 30, 836 (1958)
- (7) 岡林, 野谷, 杉浦: 鑄物 33, 別冊 (1961)
- (8) 高瀬, 中村: 金属学会誌 20, 74 (1956)
- (9) 奥本, 岡田: 第27回DCI技術委員会資料 (昭37-11)
- (10) H. Morrogh, J. Research and Dev, B. C. I. R. A., April (1952)
- (11) 筒井, 相原: 鉄と鋼 43, 253
- (12) トヨタ技術 10, 18
- (13) Von. Johann Verelst, A. De Sy: Giesserei, 43, 305 (1956)
- (14) 日本強靱鑄鉄協会編: 強靱鑄鉄 204 (昭36-1, 日刊工業新聞社)
- (15) A. De Sy: Trans A. F. S., 67, 321 (1959)
- (16) H. Morrogh: Trans A. F. S., 60, 439 (1952)
- (17) E. C. Ellwood: Trans A. F. S., 67, 423 (1959)
- (18) G. N. J. Gilbert: B. C. I. R. A., 7, 478 (1959)
- (19) J. C. Prytherch, G. N. J. Gilbert: F. T. J., February, 16, 197 (1961)
- (20) D. A. Robins: F. T. J., November, 23, 635 (1961)
- (21) N. B. Pilling, T. E. Kihlgren: Trans A. F. S., 40, 201 (1932)
- (22) 藤田ほか: 第25回DCI技術委員会提出資料 (昭36-11)