

## 連携記事

# 希土類元素を用いた鑄鉄の高強度化

## Strengthening Cast Irons by Using Rare Earth Elements

堀江 皓  
Hiroshi Horie

岩手大学 大学院工学研究科  
金型・鑄造工学専攻 教授

### 1 はじめに

鑄鉄は我が国では約580万t/年生産されている重要な鑄造用構造材料であり、その生産量の約51%は自動車部品用、26%が建設機械、工作機械などの一般機械用、11%が上下水道用鑄鉄管、マンホールなどの公共事業用、残り12%が継手、厨房品、工芸品などのその他用として使用されている。特に、自動車は車体の軽量化、部品の高性能化が求められ、自動車部品に使用されている鑄鉄材料も薄肉軽量化、高機能化が強く求められている。

しかし、鑄鉄は薄肉化を図ると冷却速度が大きくなり、凝固に際して後述する「チル化」と呼ばれる現象が起き、著しく硬く、脆くなる。さらに、鑄鉄を薄肉化すると断面積が減少するため、材料自体をより強靱化することも必要となってくる。したがって、自動車をはじめ機械構造体の品質要求が厳しくなってきた今日、薄肉化を図ってもチル化せずに高強度を有する鑄鉄が望まれてきている。ここでは、希土類元素を用いた組織の微細化による鑄鉄のチル化抑制および高強度化について紹介する。

### 2 鑄鉄とは

前述のように、鑄鉄は我が国では約580万t/年生産されている鑄造用構造材料で、鉄鋼も約1億t/年生産されている加工用構造材料であり、そして鑄鉄と鉄鋼はともに鉄 (Fe) と炭素 (C) から構成されるFe-C系合金である。

それでは鑄鉄と鉄鋼の違いは何であろうか。両者はC含有量で区別されており、C含有量2 mass%以下が鉄鋼、2 mass%以上が鑄鉄として分類されている。すなわち、Fe-C複平衡状態図におけるオーステナイトへのCの最大固溶量2 mass%がこれに相当する。したがって、C含有量が2 mass%を越えると、Cは共晶凝固に際して黒鉛の結晶構

造をとってFe中に現れてくる。この黒鉛形態は図1のように6種類の形に分類されているが、実用上はI型の片状とVI型の球状の黒鉛が現れることが多い。さらに、片状黒鉛は図2に示すようにA型の均一無方向の形からE型の樹枝状の形の5種類に分類されているが、A型が現れることが多く、強度の面からもA型が優れている。このように、鑄鉄はFe基地に種々の形状の黒鉛が分布した一種の複合材料と見なされ

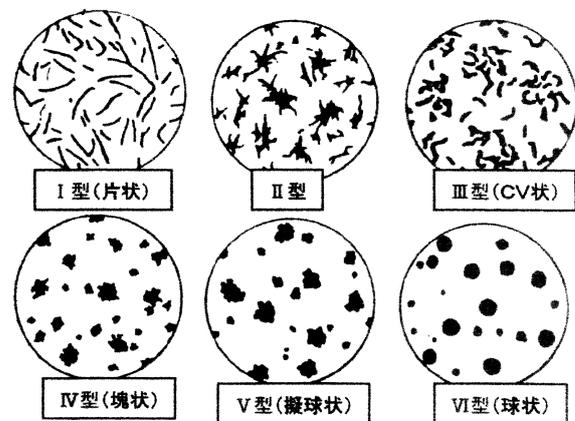


図1 鑄鉄の黒鉛組織の分類

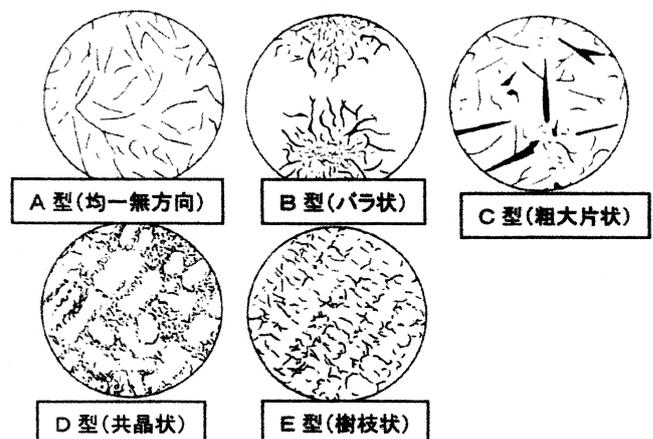


図2 片状黒鉛組織の分類

ている。また、鑄鉄の組織はこの黒鉛組織と黒鉛以外の基地組織から構成されている。

このような鑄鉄を破断すると、黒色を示す黒鉛組織と白色を示すFe基地組織の両方の破面が混在したねずみ色の破面を示すので、「ねずみ鑄鉄」と呼ばれる。そして、黒鉛形態がI型の片状を示す鑄鉄は片状黒鉛鑄鉄、VI型の球状の形態を示す鑄鉄は球状黒鉛鑄鉄と呼ばれている。球状黒鉛鑄鉄は溶融鑄鉄(溶湯)にマグネシウム(Mg)や後述する希土類元素等を少量添加する黒鉛球状化処理を施して製造される。

### 3 鑄鉄の強度、機能および用途

鑄鉄組織内で約10%の体積を占める黒鉛はその引張強さが20 MPa程度ときわめて小さく、かつFe基地との結合力も小さい。そこで鑄鉄中の黒鉛はそれ自身「内部切欠き」や「割れ」と見なされている。したがって、割れの形が球状を示す球状黒鉛鑄鉄の方が片状を示す片状黒鉛鑄鉄よりも引張強さは大きい。JIS規格では球状黒鉛鑄鉄(FCD: G5502)の引張強さは350~800 MPa、伸びは2~22%の範囲に分類されているのに対して、片状黒鉛鑄鉄(FC: G5501)の引張強さは100~350 MPaの範囲に分類されている。なお、JIS規格では片状黒鉛鑄鉄のことを「ねずみ鑄鉄品」、球状黒鉛鑄鉄は「球状黒鉛鑄鉄品」と呼ばれている。

片状黒鉛鑄鉄は振動吸収能、切削性、熱伝導性、耐摩耗性、鑄造性に優れ、工作機械のベッドや自動車のシリンダーブロック、シリンダーヘッド、ブレーキドラム等に用いられている。一方、球状黒鉛鑄鉄は片状黒鉛鑄鉄に比べて引張強さが大きく、さらに伸び、衝撃値なども大きいので、靱性を必

要とする自動車部品や上下水道用鑄鉄管等に使用されている。球状黒鉛鑄鉄は靱性がきわめて大きいことから一般には「ダクタイル鑄鉄」とも呼ばれている。

## 4 鑄鉄のチル化

鑄鉄を薄肉化すると冷却が速くなり、共晶凝固に際してCは黒鉛を形成することができなくなり、セメント石( $Fe_3C$ )を形成して凝固する。図3に鑄鉄のチル化の模式図を示すが、溶融鑄鉄は多くのFe原子と数少ないC原子で構成されている。鑄鉄が共晶凝固温度に達すると、C原子は6個集まって蜂の巣状の六方晶の黒鉛結晶を形成してねずみ鑄鉄として凝固するが、急冷されるとC原子が集まる時間的余裕がなくなり、C原子は周囲に存在するFe原子3個と斜方晶のセメント石( $Fe_3C$ )を形成して凝固する。この場合、C原子が6個集まって最小単位の黒鉛結晶を形成するより、周囲のFe原子3個と結びついてセメント石を形成して凝固する方がはるかに容易である。したがって、冷却速度が大きくなるとねずみ鑄鉄の凝固は遅れて溶湯は過冷却され、やがてセメント石を形成して凝固を完了する。

このような鑄鉄は、破面は黒鉛が形成されていないので白色となり、「白鑄鉄」と呼ばれている。そして白鑄鉄として凝固することを鑄鉄の分野では「チル化」と呼ばれ、チル化した鑄鉄は著しく硬く、脆くなる。ちなみに、圧延用ロールの表面や南部風鈴はこの白鑄鉄が用いられている。鑄鉄のチル化の度合いはチル試験で測定される。これは、底部に金型を当てた鑄型に板状の鑄鉄を鑄造すると、金型のある底部ほど冷却が速いので、板状に鑄込まれたチル試験片の底部から

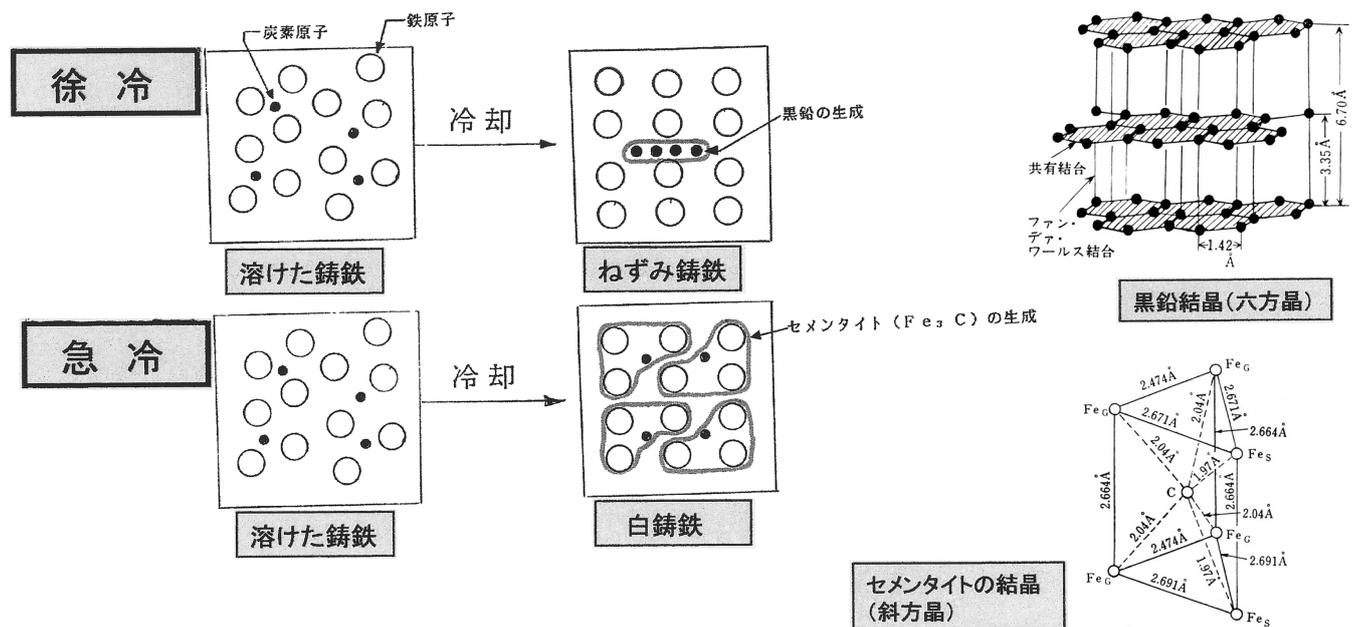


図3 鑄鉄のチル化模式図

ある高さまで白鋳鉄で凝固する。このチル試験片を割ってその破面を見ると白鋳鉄で凝固した部分は白くなるので、この高さを測定することで鋳鉄のチル化の程度を定量的に知ることができる。

鋳鉄を溶解し、鋳型に鋳込む前にFeとけい素(Si)との合金(Fe-Si)等を0.1~0.4 mass%程度の少量を鋳鉄溶湯に添加する「接種」と呼ばれる溶湯処理は、鋳鉄のチル化を抑制するために鋳造現場ではよく行われている。これは接種により鋳鉄溶湯中に黒鉛の不均質核が生成し、共晶凝固に際してこの不均質核に優先的に黒鉛が晶出するために、チル化が抑制される。

鋳鉄を構成する元素や鋳鉄に添加される合金元素はチル化を抑制する元素(黒鉛化促進元素)とチル化を促進する元素(黒鉛化阻害元素)とに区別されている。鋳鉄を構成する元素C、Si、マンガン(Mn)、りん(P)、硫黄(S)のうちSi、P、Sは黒鉛化促進元素で、Mnは黒鉛化阻害元素に分類されている。一方、鋳鉄に合金元素として添加される元素の中で、銅(Cu)、ニッケル(Ni)、コバルト(Co)、アルミニウム(Al)等は黒鉛化促進元素で、クロム(Cr)、モリブデン(Mo)、バナジウム(V)等は黒鉛化阻害元素に分類されている。

## 5 一般的な鋳鉄の高強度化法

前述のように鋳鉄の組織は黒鉛組織と黒鉛以外の基地組織から構成されているので、鋳鉄の高強度化を図る場合にはこの両組織を考慮する必要がある。すなわち、黒鉛組織に関してはI型の片状(A型)、III型のCV状、VI型の球状の順に強度が向上し、基地組織に関してはフェライト、パーライト、ベイナイト(オースフェライト)の順に強度が向上する。しかし、基地組織のベイナイトは熱処理が必要であり、非合金の鋳放し組織では得られない。さらに鋳鉄中の黒鉛は割れ、空洞と見なされているので、黒鉛の量も鋳鉄の強度を支配する。したがって、片状黒鉛鋳鉄の場合は黒鉛組織をA型とし、黒鉛の量に相当する炭素当量 $[C+1/3(Si+P)]$ を低下すること、基地組織をパーライトにすることが高強度化には効果的である。一方、球状黒鉛鋳鉄の場合は、黒鉛組織はVI型の球状で変えようがないので、基地組織をパーライトとすることが高強度化には効果的である。基地組織のパーライトを安定化して鋳鉄の引張強さを向上させる元素として一般にCu、Cr、Mo、V等が知られているが、Cr、Mo、Vは同時に黒鉛化阻害元素であるためチル化を促進するので、鋳鉄に多量に添加することができない。また、片状黒鉛鋳鉄の高強度化を図るために行う炭素当量の低下もチル化を促進する。したがって、鋳鉄の高強度化を図るためには最初に鋳鉄のチル化の抑制を図らなければならない。

## 6 希土類元素による鋳鉄のチル化の抑制

鋳鉄はC含有量3~4 mass%のFe-C合金であるが、実用鋳鉄は黒鉛化を促進するため1~3 mass%のSiが含有されており、これ以外に0.4~0.8 mass%程度のMn、不純物として0.1 mass%以下のS、Pが含有されている。そして鉄鋼と同様にS、Pは鋳鉄に対しても有害不純物元素である。とくにSは少量では黒鉛化促進元素であるが、多量に含まれるとチル化を促進する。

今、S含有量を3水準に変えたJIS規格G5501の4種に相当するFC250クラスの片状黒鉛鋳鉄に対して希土類元素(RE: Rare Earth Elements)の中のセリウム(Ce)を添加してチル化傾向を測定した結果<sup>1)</sup>を図4に示す。一般にREは黒鉛化阻害元素であるが、鋳鉄中のSとの反応性が大きく、溶湯中で硫化物を生成し易い元素である。図4の結果より、いずれのS含有量の試料もCe添加量を増加するに従ってチル深さが減少し、最適なCe添加量のところで最小のチル深さとなり、さらにCe添加量を増加すると再びチル深さは増加する。そして、低Sの試料よりも高Sの試料ほどチル深さの減少量が大きく、大幅にチル化が抑制されており、特に高Sの試料ではCe0.2%添加した試料でほとんどチルがなくなっている。

そこで、大幅にチルが減少した試料について、凝固の途中から金型に急冷し、組織観察を行った。図5にX線マイクロアナライザーの反射電子線像(COMP.)を測定した結果を示すが、数 $\mu\text{m}$ の径を持つ異相の周囲に黒鉛が晶出していることがわかる。さらに各元素の特性X線像の測定結果および定量分析結果から、この異相は少量の硫化マンガン(MnS)を含んだセリウムの複合硫化物 $[(\text{Ce}, \text{Mn})_2\text{S}_3]$ であり、この複合硫化物が黒鉛晶出の下地として作用することが確認された。

すなわち、鋳鉄中のSに対して化学量論的な量(Ce/S=2.9)のCeを添加すると、溶湯中でCeはSと反応して多数のCeの複合硫化物を生成し、この硫化物に黒鉛が優先的に晶

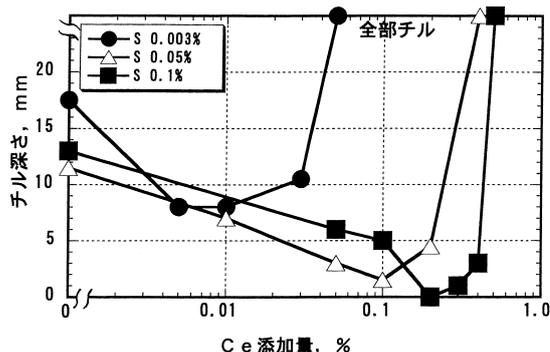


図4 Ce添加量とチル深さとの関係

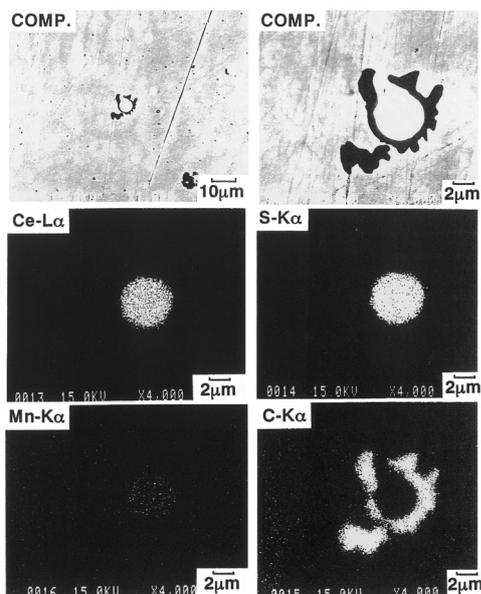


図5 X線マイクロアナライザー分析結果

出するため、著しくチル化が抑制されることが判明した。

なお、鋳鉄に対するCeおよびREのチル抑制効果は試行錯誤の実験の過程で発見されたものであり、後述する球状黒鉛鋳鉄でも同様の現象が起こることが確認されている。

## 7 希土類元素のチル抑制効果を利用した片状黒鉛鋳鉄の強靱化

このように、鋳鉄のチル化が大幅に抑制されると、鋳鉄に対して引張強さを向上させるが、同時に黒鉛化阻害元素であるためチル化を促進するので、鋳鉄に多量に添加できなかったV、Cr、Mo等の元素の多量添加が可能となる。

そこで、S0.1 mass%を含むFC250クラスの片状黒鉛鋳鉄にチル化の低減に効果のあるREをSiとの合金(RE-Si)の形で0.2 mass%添加し、さらに、チル化促進元素であるが基地強化元素でもあるV、Crを1 mass%まで、Cuを1.5 mass%までそれぞれ単独で添加し、チル深さ、引張強さを測定した結果<sup>2,3)</sup>をそれぞれ図6と図7に示す。RE無添加の試料のチル深さが約12.5 mmで、RE0.2 mass%の添加で黒鉛化が著しく促進して無チルとなっている。V、Crの添加量を増加するにしたがって、RE無添加試料およびRE0.2 mass%添加試料ともチル深さが増加している。しかし、RE無添加試料に比べてRE添加試料のチル深さの増加量はきわめて少ない。このように、VおよびCr添加した試料では、REの有無によってチル深さの差がかなり大きくなっている。一方、Cu添加した試料では、RE無添加の試料でチル深さが多少減少するが、RE添加試料ではいずれの試料とも無チルとなっている。Cuは鋳鉄のパーライト安定化元素であるが、前述のように

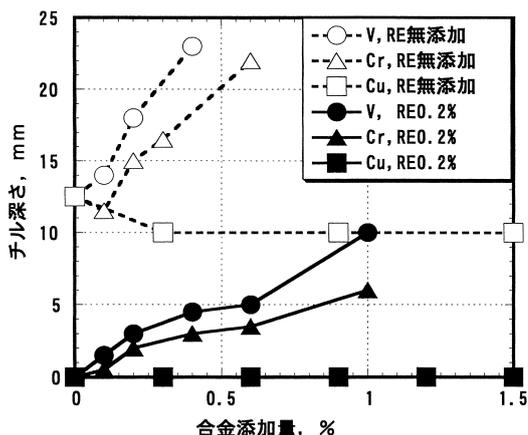


図6 RE添加の有無によるV、CrおよびCu添加量とチル深さとの関係

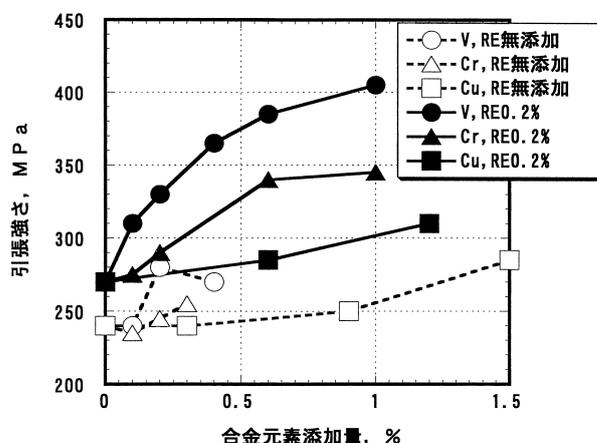


図7 RE添加の有無によるV、CrおよびCu添加量と引張強さとの関係

凝固に際して黒鉛化促進元素として作用するため、Cuを多量添加することによってチル深さが減少したものである。

次に引張強さを測定した結果を見ると、REを添加した試料ではRE無添加の試料より引張強さが全般に高くなっている。RE無添加の場合は、各元素の添加量を増加するにしたがって引張強さが向上しているが、その増加量はきわめて少なく、V、Crを0.6 mass%添加した試料ではチル組織となり、引張試験片を加工することができなかった。これに対して、REを0.2 mass%添加した場合は、V1 mass%添加した試料で引張強さが無添加の268 MPaから405 MPaまで向上し、Crを1 mass%添加した試料では349 MPa、Cuを1.2 mass%添加した試料では310 MPaまで引張強さが向上した。なお、Cr1 mass%およびV1 mass%添加した試料にさらにCuを1 mass%複合添加すると、それぞれCr添加試料では403 MPa、V添加試料では447 MPaまで引張強さが向上することも確認されている。

これらのV、CrおよびCuを添加した試料の顕微鏡組織は、これらの元素の添加量を増加するにしたがって黒鉛組織は完全なA型で、基地組織はこれらの元素量を増加するにつれて

黒鉛周囲のフェライトが消失して完全なパーライト地となり、さらにパーライト層間隔も著しく狭くなることが確認された。

この鋳鉄はJIS規格のFC250クラスで、引張強さが250 MPa以上、300 MPa未満の材質であるが、このように、RE添加してチル化を大幅に抑制した鋳鉄に、本来パーライト安定化元素で、かつ黒鉛化阻害元素でチルを促進する元素であるV、Crを多量に添加することにより、JIS規格G5501の最高引張強さである350 MPaを大幅に上回る引張強さを持つ片状黒鉛鋳鉄を得ることが可能である。

## 8 高Mn鋼板屑を原料とした強靱鋳鉄の製造

近年、自動車の衝突時における安全性の観点から車体に高強度、軽量でMn含有量の高い高Mn鋼板(表1)が使用されており、2005年の時点では自動車用車体鋼板の約50%はこの高Mn鋼板が使用されたといわれている。一般に車体のプレス行程で発生した鋼板のプレス屑は鋳造工場に回り、シリンダーブロック等の自動車部品の原材料としてリサイクルされている。しかし、この高Mn鋼板屑は前述のようにMnが黒鉛化阻害元素であるためチル化しやすく、鋳鉄の原料としてリサイクルすることは困難である。鋳鉄の不純物としてのSに対して化学量論的な量のREを添加してチル化を抑制するという今回開発された技術を用いることにより、高Mn鋼板屑のリサイクルが可能となる。

そこで、S0.08 mass%含有するFC250クラスの鋳鉄に5 mass%までのMnを添加してチル深さと引張強さを測定した結果<sup>4,5)</sup>を、RE無添加試料とRE0.2 mass%添加試料に分けてそれぞれ図8、図9に示す。チル深さの結果を見ると、RE添加試料ではRE無添加試料に比べて全体としてチル深さが減少しており、REによるチル低減効果が認められる。そして、Mn1~2 mass%添加した試料では著しくチルが低下している。さらにMn添加量を増加するとチル深さは増加し、Mn添加量5 mass%では全チルとなっている。

引張強さの結果を見ると、RE無添加の試料ではMn添加量を増加するに伴い引張強さは低下し、Mn添加量1 mass%以上で一定となる。これに対して、REを添加した試料ではMn添加量0.4~0.8 mass%の間で一旦引張強さは低下した

後、Mn添加量の増加に伴って引張強さは次第に増加し、Mn3 mass%添加した試料では350 MPaの引張強さが得られている。

図10にRE添加した試料のMn添加量とブリネル硬さを測定した結果を示す。Mn添加に伴い硬さが急激に低下し、Mn添加量0.5 mass%~1.5 mass%の試料では最低の硬さとなり、Mn3 mass%添加した試料では再び硬さが増加している。

図11および図12にMn添加量の異なる試料の黒鉛組織の光学顕微鏡組織および基地パーライトの走査型電子顕微鏡写真(SEM像)を示す。黒鉛組織はMn添加量の少ない試料に比べて、高Mn鋼板のMn量に相当するMn1.5 mass%添加した試料では完全なA型黒鉛組織で、全体として黒鉛が小さく、かつ黒鉛先端の曲率も大きい。また、パーライトの層間隔はMn添加量を増加するほど次第に狭くなってきている。この

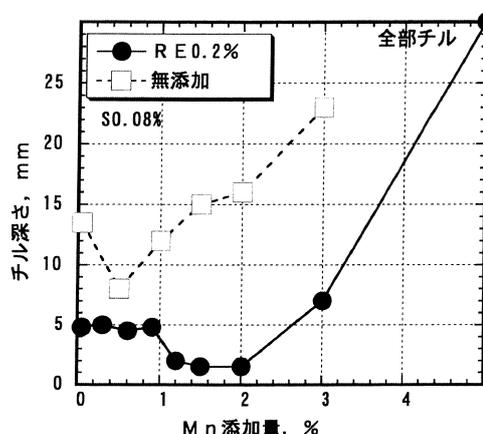


図8 RE添加の有無によるMn添加量とチル深さとの関係

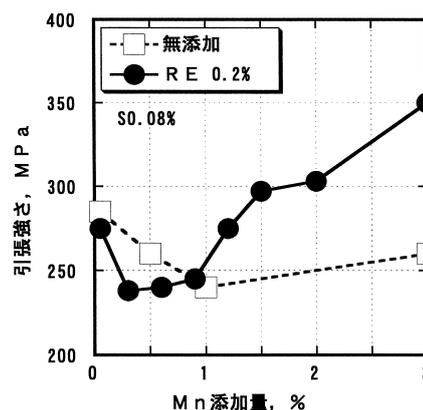


図9 RE添加の有無によるMn添加量と引張強さとの関係

表1 高Mn鋼板の化学分析結果

鋼種	No.	C	Si	Mn	P	S	Cr	Nb	N	Fe
高Mnスクラップ鋼	1	0.05	0.94	1.44	0.012	0.001	0.89	<0.01	0.036	Bal.
	2	0.08	0.03	1.81	0.072	0.004	0.03	<0.01	0.038	Bal.
	3	0.11	1.09	1.63	0.006	0.001	0.04	<0.01	0.035	Bal.

ような黒鉛組織およびパーライト層間隔の変化がMn添加量を増加した試料での引張強さの向上につながったものと思われる。また、引張強さが向上するMn添加量1.5 mass%から3.0 mass%の範囲でブリネル硬さが減少したのは、この範囲で黒鉛面積率が最大になることがその原因と考えられている。

図13にREを添加し、さらにMn添加量を変化した試料の引張強さ(σ)とブリネル硬さ(HB)の関係を示す。図15中には引張強さに対する硬さの基準線[HBn = 100 + 0.44σ (MPa)], すなわちJ.T.Machenzieの関係式<sup>6)</sup>を示した。そして、この関係式の値と実際のブリネル硬さとの比を比較硬さ(RH = HB/HBn)と称し、この値が1より小さい鉄ほどその材質が良好であることが知られている<sup>7)</sup>。すなわち、同一の引張強さであれば硬さが低いほど材質は良好と評価される。Mn添加量1.5~2.0 mass%の試料がRH = 1の基準線から大きく右下に位置しており、良好な材質であることを示している。

以上の結果、鉄中の不純物としてのS量(0.08 mass%)に対して化学量論的な量に近い量(0.2 mass%)のREを添加して著しくチルを低減した試料に、1.5~2.0 mass%のMnを添加した試料では引張強さ300 MPa以上、ブルネル硬

さ200程度という、通常のFC300のJIS規格の硬さ(HB262以下)よりもはるかに低い硬さで引張強さを満足できることがわかる。また、この方法により強靱鉄を製造する場合には、自動車の車体に使用されている高Mn鋼板屑のリサイクルが可能であり、さらに合金元素としてのMnの添加も不要となることも判明した。このようにREとMnを複合添加した鉄は引張強さが高い割には硬さが低いので、同程度の引張強さを示す通常の鉄に比べて被削性が良好であることも確認<sup>8)</sup>されている。

## 9 希土類元素を利用した球状黒鉛鉄のチル抑制効果および強靱化

球状黒鉛鉄のチル化の抑制は黒鉛粒数と密接な関係があり、チル化を防止するための臨界の黒鉛粒数「チル臨界粒数」が存在し、このチル臨界粒数は鉄の冷却速度と次式の関係<sup>9)</sup>を示すことが知られている。

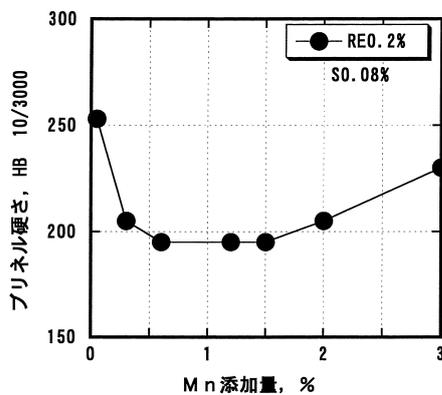


図10 RE添加試料のMn添加量とブリネル硬さとの関係

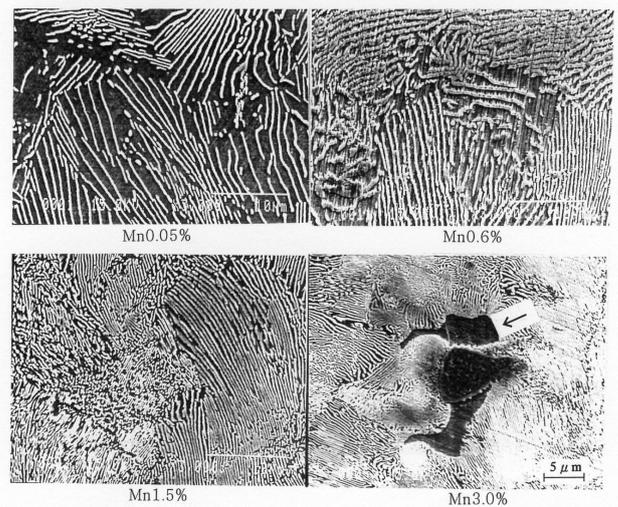


図12 Mn添加量の異なる試料のパーライト組織の走査型電子顕微鏡写真

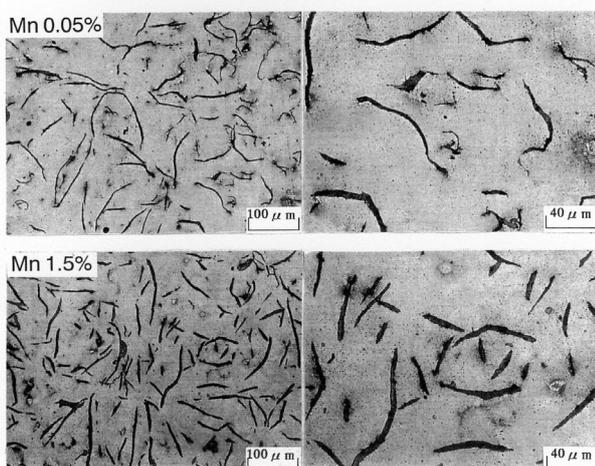


図11 Mn添加量の異なる試料の光学顕微鏡組織

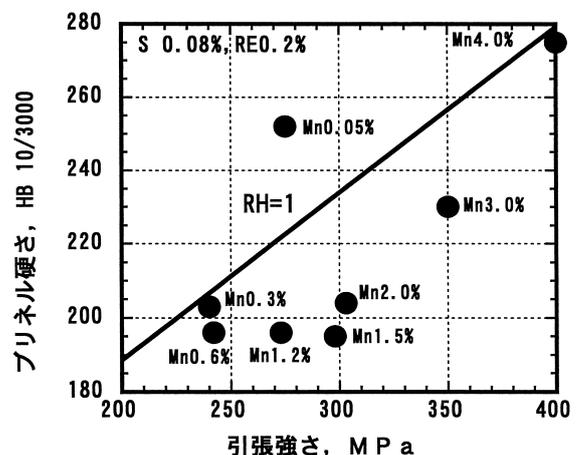


図13 Mn添加量の異なる試料の引張強さとブリネル硬さとの関係

$$N = 0.58R^2 + 19.07R$$

ただし、N：チル臨界粒数 (個/mm<sup>2</sup>)、

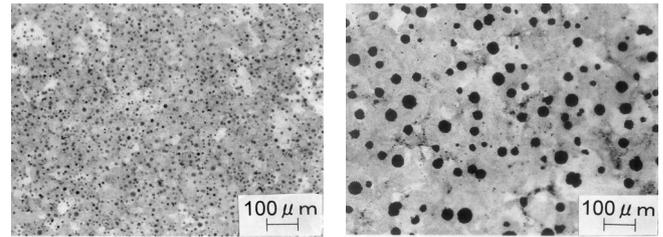
R：冷却速度 (K/s)

したがって、球状黒鉛鋳鉄の場合はチル臨界粒数以上に黒鉛粒数を増加することによりチル化は抑制される。ちなみに3 mm肉厚 (21K/s) の板状鋳鉄の場合は約650個/mm<sup>2</sup>以上に黒鉛粒数を増加するともはやチル化は起こらないのである。そして、前項で述べたようにREは球状黒鉛鋳鉄に対しても黒鉛粒数増加効果を示すことが知られている<sup>10)</sup>。すなわち、鋳鉄中のSに対して化学量論的な量 (RE/S=4.4) のREを添加すると多数のREの複合硫化物が生成し、この硫化物に黒鉛が優先的に晶出するため、著しく黒鉛粒数が増加し、チル化が抑制される。なお、片状黒鉛鋳鉄と球状黒鉛鋳鉄でRE/S比が異なるのは硫化物の形態が前者ではRE<sub>2</sub>S<sub>3</sub>で、後者ではRESと異なるからである。

このように、REで黒鉛組織を微細化し、チル化を抑制した鋳鉄にパーライト安定化元素であるMn、Cuを添加すると、球状黒鉛鋳鉄のJIS規格の最高強度800 MPaを大幅に上回る1000 MPa以上の強度を示す鋳鉄が得られている。図14に鋳鉄中のSに対して化学量論的な量のREとCu2.5 mass %、Mn1 mass %を添加し、さらに鋳型内接種を施して直径10 mmの丸棒に鋳造した試料と、Cu2.5 mass %、Mn1 mass %を添加し、さらに通常の接種を施して直径30 mmの丸棒に鋳造した試料の顕微鏡組織を示す。直径10 mmの丸棒試料は直径30 mmの丸棒に比べて冷却が速いにもかかわらずチル化せず、図14中に両試料の黒鉛粒数を示したが、直径10 mmの丸棒試料ではREの添加と鋳型内接種で黒鉛組織が著しく微細化されている。両試料の機械的性質を見ると、直径30 mmの丸棒試料が引張強さ958 MPa、伸び4.3%に対して、直径10 mmの丸棒試料では引張強さ1233 MPa、伸び3.2%という高い強度<sup>11)</sup>を示した。

## 10 おわりに

以上のように、鋳鉄に不純物として含まれているS量と化学量論的な量の希土類元素 (RE) を添加すると、希土類元素の硫化物が共晶凝固に際して黒鉛晶出の下地となって著しくチル化が抑制されるので、従来チル化により不可能であったV、Cr、Mn等の黒鉛化阻害元素の鋳鉄への多量添加が可能となり、片状黒鉛鋳鉄および球状黒鉛鋳鉄の引張強さを大幅に向上することができた。現在、片状黒鉛鋳鉄はジーゼルエンジン用シリンダーブロックへの適用が検討されており、超微細組織を有する球状黒鉛鋳鉄は図15に示すような建築鉄筋用継ぎ手<sup>12)</sup>として実用化されている。また、この方法に



a) 10mm φ 試験片  
RE 添加、インモールド接種  
(黒鉛粒数 1835個/mm<sup>2</sup>)  
b) 30mm φ 試験片  
RE 無添加、通常接種  
(黒鉛粒数 152個/mm<sup>2</sup>)

図14 Mn、Cu添加した球状黒鉛鋳鉄の走査型電子顕微鏡写真

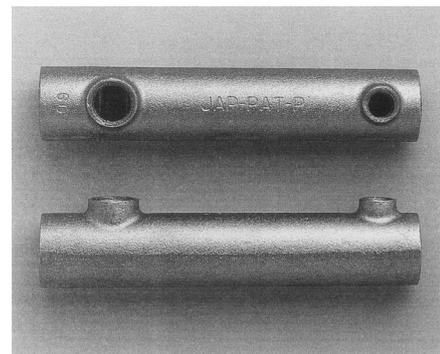


図15 超微細組織球状黒鉛鋳鉄を用いて製造された建築鉄筋用継ぎ手

より自動車の車体に使用されている高Mn鋼板屑のリサイクルも可能となった。今後、ますます厳しくなる鋳鉄材料の薄肉軽量化、高強度化の要求に対して、これらの鋳鉄の適用が期待されている。

## 参考文献

- 1) 堀江皓：鋳物，67 (1995) 2，124.
- 2) 堀江皓：まてりあ，33 (1994) 6，791.
- 3) 堀江皓：鋳造工学，68 (1996) 12，1056.
- 4) 小綿利憲，堀江皓，平塚貞人，王上均，鶴田直己：鋳造工学，68 (1996) 11，963.
- 5) 小綿利憲，堀江皓，平塚貞人，金昌圭，劉耀輝：鋳造工学，71 (1999) 5，314.
- 6) J.T. Machenzie：Foundry，(1996)，10.
- 7) 鋳造技術講座3 普通鋳鉄鋳物，鋳造技術講座編集委員会，日刊工業新聞社，(1987)，98.
- 8) 小綿利憲：岩手大学学位論文，工第5号 (2001)，135.
- 9) 堀江皓，宮手敏男，齊藤實，小綿利憲：鋳物，56 (1984) 8，491.
- 10) 堀江皓，小綿利憲，阿部喜佐男，千田昭夫：鋳物，88 (1986) 1，21.
- 11) 雷富軍：未発表研究，(2003)
- 12) ネジテックン施工事例集，東京鉄鋼 (株)

(2008年1月10日受付)