

球状黒鉛鑄鉄の鑄造特性に及ぼすトランプ元素の影響

藤川 貴朗*, 村川 悟*, 金森 陽一*, 谷澤 之彦*, 河合 真*

Effects of Trampe Elements on the Castability of Ductile Cast Iron

by Takao FUJIKAWA, Satoru MURAKAWA, Yoichi KANAMORI,
Yukihiko TANIZAWA and Makoto KAWAI

A large quantity of impurity elements are contained in the iron scrap. The effects of trampe elements on the castability have been examined to use this scrap as a raw material of the ductile cast iron. Investigated elements were Al, Ti, Cr, V and Mo. Examined characteristics were fluidity, chilling tendency, shrinkage tendency and section sensitivity. These results were compared with the case of the gray cast iron. It was shown that the ductile cast iron was sensitive for the impurity elements.

Keywords: impurity, trampe element, ductile cast-iron, castability

1. はじめに

家電や自動車等の解体時には、様々な不純物を含んだ鉄系スクラップが発生する。この鉄系スクラップを再生利用する場合に、除去困難で有害な不純物元素のことを特にトランプ元素という。近年では、このトランプ元素の含有量が増し、リサイクル性を阻害して深刻な問題となっている^{1)~4)}。

本研究で対象とする鋳鉄鑄物業界では、一般廃棄物の鉄系スクラップをほとんど利用していない。その理由は、鑄物製品の欠陥や製造上のトラブルを起こすリスクが大きいためである。しかし、一般に鑄鉄の不純物元素への許容力は比較的大きいので、その使用条件を誤らなければ、トランプ元素によって汚染された鉄源を鑄造プロセスの原材料として利用することが可能である。鉄系スクラップを利用するためには、鑄鉄の鑄造特性に及ぼすトランプ元素の影響を把握しておくことが必要である。そこで、平成11年度には、

ねずみ鑄鉄の鑄造特性に及ぼすトランプ元素の影響について研究を行った⁵⁾。本年度(12年度)は、球状黒鉛鑄鉄について調査し、両者の比較検討ができる鑄造特性データを作成することとした。さらに、一部の元素について実作業規模での溶解と製品の試作を行った。

2. 研究のねらいと具体的手法

鑄鉄の品質に及ぼす不純物元素の影響については、従来から数多くの研究が行われている⁶⁾。しかし、その多くが実験室で機械的性質について調査されたものであり、製造現場で問題となる鑄鉄の鑄造特性については報告が少ない。また、ねずみ鑄鉄については不純物元素の限界量⁷⁾やその挙動に関する報告も多いが、球状黒鉛鑄鉄⁸⁾については十分とはいえない。そこで、本研究ではトランプ元素として、特に高張力鋼板に添加されている元素を選び、球状黒鉛鑄鉄の鑄造特性に及ぼす影響を調査した。本実験で調査した元素はAl, Ti, Cr, V, Moである。

この調査のため、高純度鋳を主体とした材料を

* 金属センター研究グループ

もちいて、ベースの球状黒鉛鉄溶湯を溶解した。ここでは、低炭素高珪素低マンガンのフェライト系と、高炭素低珪素高マンガンのパーライト系の、2種の溶湯を準備した。これに、鑄造工場での管理値や文献による限界値^{6)~8)}を参考に決めた量のトランプエレメントを添加した。球状化処理を行ったあと、後述する複合鑄型⁹⁾に鑄込んで、鑄造特性(湯流れ、チル深さ、引け傾向、肉厚感受性、その他の鑄造欠陥)を調べた。さらに、引張強度、硬さ、酸素、窒素量などを調査した。これらをできるだけ統一した条件で系統的に実験し、ねずみ鑄鉄の結果と比較検討を加えて、鑄造特性に及ぼすトランプエレメントの影響をデータ化することにした。このデータを鑄造工場の現場技術者に提供して、リサイクル鉄源の利用やトラブル対策の立案に役立ててもらおうことが本研究のねら

いである。

3 実験方法

原材料として、表1に示す高純度鉄、高張力鋼板、Fe-Si、Fe-Mn、Fe-S、Fe-Pを用いた。添加元素は、Al (Fe-Al)、Ti (Fe-Ti)、Cr (電解Cr)、V (Fe-V)、Mo (Fe-Mo)とした。各元素の実験範囲を表2に示す。鑄鉄の標準組成は表3のように定めた。アルミナ質るつぼで築炉した高周波誘導炉により48kgの溶湯をそれぞれ溶解した。溶解プログラムは図1のようにし、それぞれ複合鑄型とノックオフ試験片用鑄型に鑄込んだ。

型ばらしは注湯後90分とした。複合鑄型試験片からは、板状湯流れ試験片、くさび型チル試験片、階段状試験片50, 25, 10, 5, 2 mm、引け試験片(1 kg程度)が採取できる。図2に複合試験片

表1 原材料の化学組成 (mass%)

材料	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ti	Al	Cu	その他
鉄鉄	3.88	0.39	0.15	0.014	0.003	0.018	0.002	-	-	
鋼板	0.038	0.028	0.12	0.015	0.003	-	-	-	-	
Fe-Si	0.12	75.20	-	0.022	0.003	-	-	-	-	
Fe-Mn	6.20	0.20	73.0	0.080	0.001	-	-	-	-	
Fe-P	-	-	-	26.45	-	-	-	-	-	
Fe-S	-	-	-	-	26.85	-	-	-	-	
Fe-V	0.15	0.48	-	0.029	0.016	-	-	1.55	-	50.1V
Fe-Mo	0.048	0.44	-	0.036	0.032	-	-	-	0.23	61.12Mo
Ca-Si	0.41	61.65	-	0.023	-	-	-	-	-	30.1Ca
Fe-Al	-	-	-	-	-	-	-	50.66	-	
Fe-Ti	0.080	0.020	0.23	0.01	0.010	-	43.1	-	-	
電解Cr	0.015	0.007	-	0.003	0.022	99.42	-	0.004	0.0005	0.40 O, 0.029N

表2 各元素の実験範囲

元素	シリーズ名	範囲 (mass%)
Al	DA	0.02~0.15
Ti	DB	0.03~0.02
Cr	DC	0.05~0.2
V	DD	0.03~0.2
Mo	DE	0.02~0.25

表3 鑄鉄の標準組成 (mass%)

	C	Si	Mn	P	S	Mg
フェライト系	3.6	2.8	0.3	0.02	0.002	0.030
パーライト系	3.7	2.8	0.7	0.02	0.002	0.030

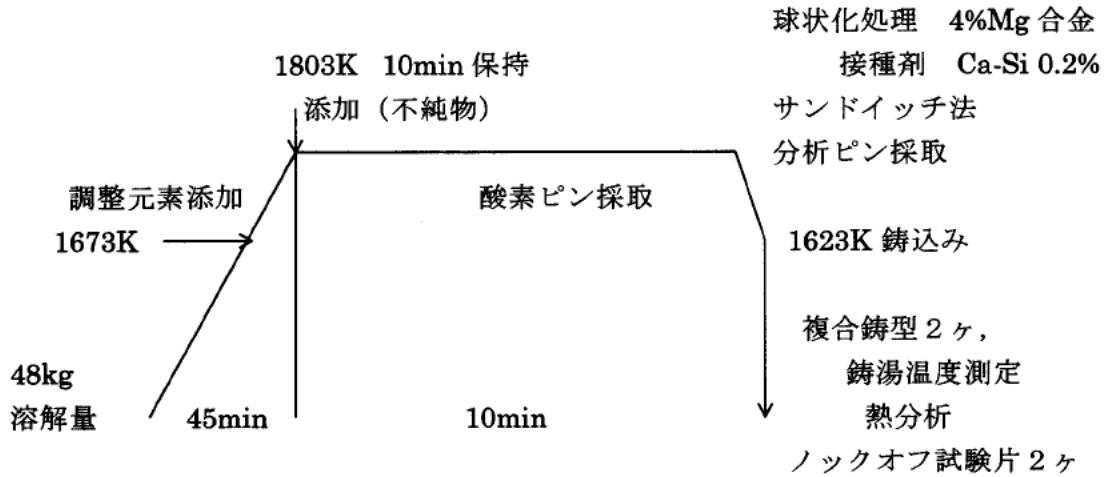
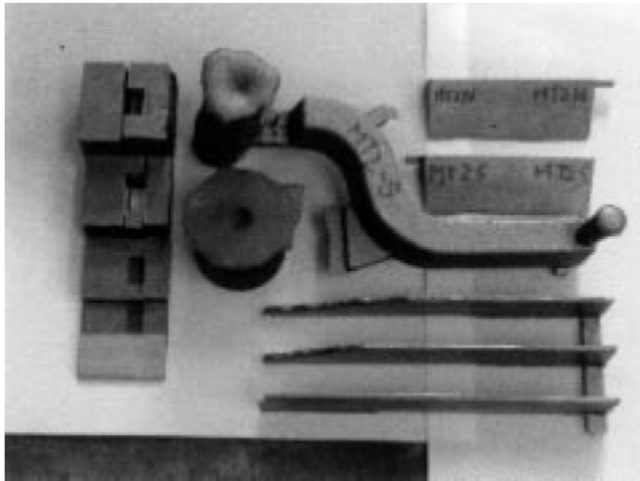
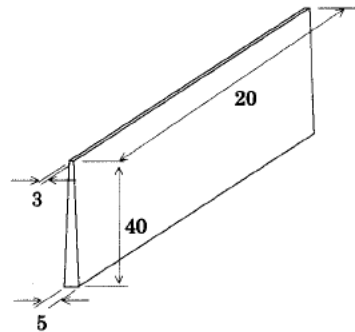


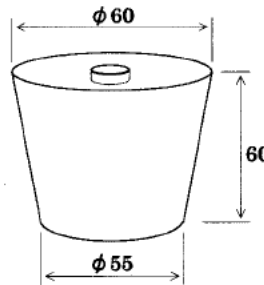
図1 溶解実験のプログラム



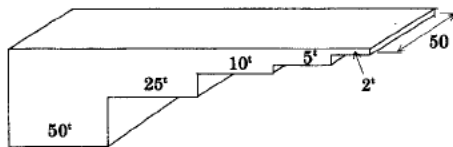
試験片の外観



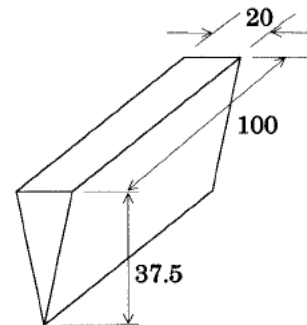
湯流れ試験片



引け試験片



階段状試験片



くさび形チル試験片

図2 複合試験片の外観と寸法

の外観と寸法を示す。複合試験片の評価方法の詳細については、先の著者らの報告⁵⁾と同様である。

4 結果と考察

Al, Ti, Cr, V, Mo, の5元素について、4水

準で、フェライト系、パーライト系の実験を行った。また、Ceとの相互作用としてのBi, Sbについて実験を行った。紙面の制約により、ここではAlについての結果をやや詳しく述べ、その他の元素についてはねずみ鉄の結果と併せて、要約した

結果の表のみ記す。

4. 1 AIの影響

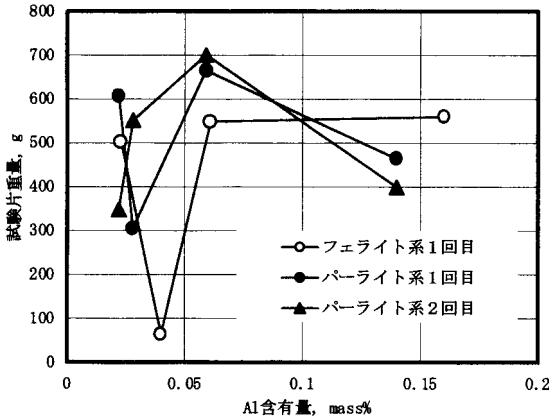


図3 AI含有量と湯流れ試験片重量の関係

図3にAl含有量と湯流れ試験片の重量の関係を示す。通常Alが含有すると湯流れは極度に悪化するといわれている。しかし本実験では、全般に湯流れは比較的良好であり、高含有量で湯流れが若干悪化しているが、0.05mass%付近までは良好あるいはやや改善の傾向を示した。図4に引け傾向に及ぼすAlの影響を、引け試験片の断面で示す。フェライト系、パーライト系ともAl含有量が増すと共に引けが生じた。また、パーライト系の方が引け傾向は強かった。図5に低Siすなわちパーライト系の試料における黒鉛粒数に及ぼすAl含有量の影響を、図6に形状係数に及ぼすAl含有量の影響を示す。この場合にはAlは黒鉛粒数を増し、黒鉛の形状を悪化させたが、JIS法での黒鉛球状化率ではすべて80%以上になりその差は小さかった。図7に機械的性質に及ぼすAl含有量の影響を示す。引張強度、耐力、伸びとも少量のAlによって急激に悪化しているが、硬さはほとんど変化していなかった。この機械的性質の低下は、黒鉛形状の悪化と、介在物による機械的性質の劣化と考えられる。

表4に球状黒鉛鑄鉄についての結果と、ねずみ鑄鉄についての結果を要約して示す。一般にAlは強力な黒鉛化元素として働きチル化傾向を押さえ、湯流れ、引けを悪化させるといわれている。本実験では、ねずみ、球状黒鉛のいずれもAl添加により溶湯表面は酸化膜に覆われたが、その湯流れは比較的良好であった。引け傾向はAlにより悪化するが、ねずみ鑄鉄では外引け、球状黒鉛鑄鉄では内部引け巣を生じさせた。差込欠陥はねず

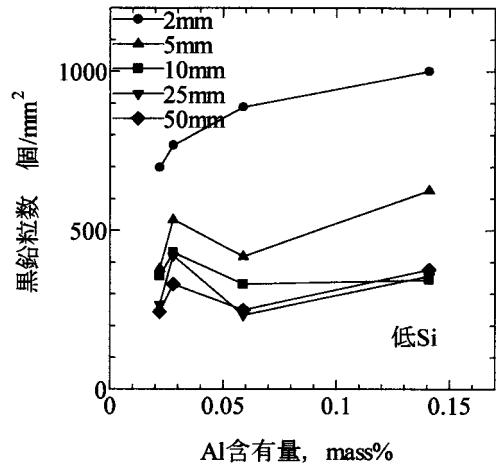


図5 AI含有量と黒鉛粒数の関係

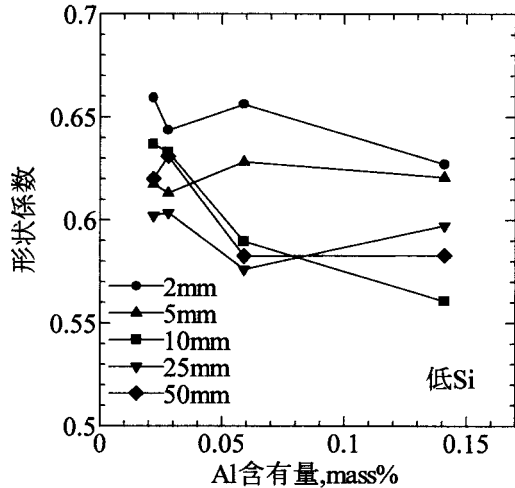


図6 AI含有量と形状係数の関係

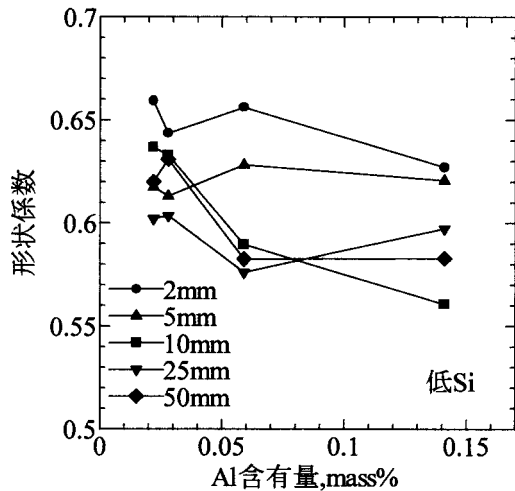


図7 AI含有量と機械的性質の関係

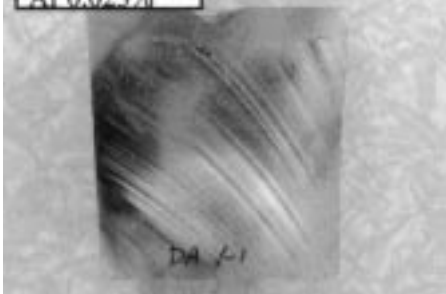


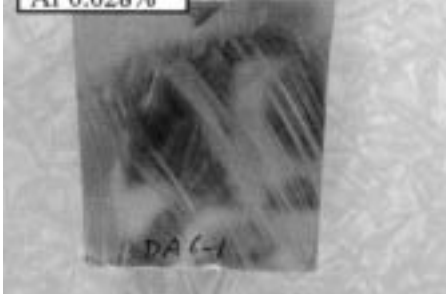
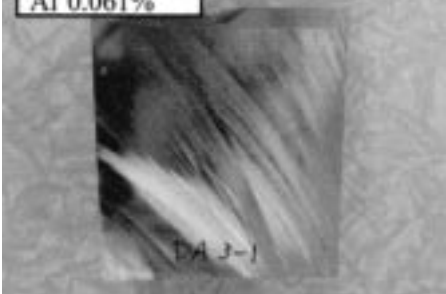
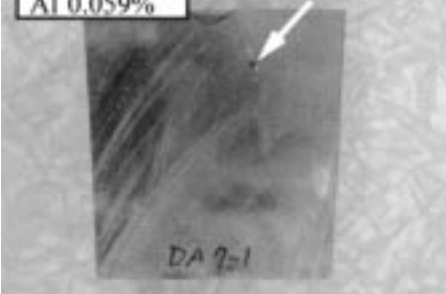
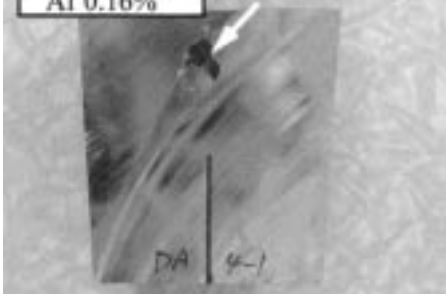

フェライト系試料 DA 1～4	パーライト系試料 DA 5～8
<p>Al 0.023%</p>  <p>DA 1-1</p>	<p>Al 0.022%</p>  <p>DA 5-2</p>
<p>Al 0.040%</p>  <p>DA 2-1</p>	<p>Al 0.028%</p>  <p>DA 6-1</p>
<p>Al 0.061%</p>  <p>DA 3-1</p>	<p>Al 0.059%</p>  <p>DA 7-1</p>
<p>Al 0.16%</p>  <p>DA 4-1</p>	<p>Al 0.14%</p>  <p>DA 8-1</p>
<p>DA 4のみ小さな引け巣</p> <p>Al増とともに引けを増す。</p>	<p>DA 7 微少な引け巣 DA 8 小さな引け巣</p> <p>Al増とともに引けを増す。</p>

図4 引け特性に及ぼすAl含有量の影響

表4 鋳鉄溶湯特性に及ぼすAlの影響

	湯流れ	引け	差込	チル	組織	強度	限界
ねずみ鋳鉄 低硫黄系接種	良から 悪化	外引け 悪化	悪化	良から 改善	接種効果 大, α 化	悪化 硬さ減	0.03
〃 接種なし	良から 微減	良	良から 微悪化	不良から 改善	チル大 改善, α	悪化 硬さ減	
高硫黄系接種	良から 悪化	外引け 悪化	不良	最良	接種効果 \times , α 小	中性	0.4 可
〃 接種なし	良	外引け 微悪化	良から 悪化	良	チル小 α 小	中性	
球状黒鉛鋳鉄 フェライト系	良から 微改善	悪化	なし	悪から 黒鉛化	形状悪化 粒数増加	強度微減 伸び急減	伸び 0.02 以下
パーライト系	良から 微改善	最悪化	なし	悪から 黒鉛化 むら	形状悪化 強い, 粒数増加	強度減 伸び急減	伸び 0.02 以下

み鋳鉄のみに現れるが、Alによって悪化した。チル化傾向はAl添加により小さくなるが、球状黒鉛鋳鉄の場合のくさび型試験片に問題が生じた。金属組織は、ねずみ鋳鉄でフェライト化が進み、球状黒鉛鋳鉄では黒鉛形状が悪化すると共に、粒数が増加した。

これらの結果を概観すれば、ねずみ鋳鉄では硫黄量が大きいとAlの種々の悪影響が緩和されるのに対して、球状黒鉛鋳鉄では機械的性質が劣化して伸びが出なくなる。Alは球状黒鉛鋳鉄に含有すると望ましくなく、その限界量も小さいことが判った。表の最後に元素としての限界量を記入したが、これはあくまで本実験での値であり、後述する実験のように、実際にはこの値を越えても十分使用が可能な場合がある。

4. 2 その他の元素の影響

以下にAl以外の元素について表5～8に示す。それぞれの元素についてのデータの詳細及びBi, Sbの影響については、別途出版する予定の報告書を参照していただきたい。

4. 3. 実操業規模での溶解と製品の試作例

鋳鉄の鋳造特性に及ぼす不純物元素の実用規模での鋳込み実験として以下の試作を行った。ダクタイル用銑鉄、珪素鋼板屑、リターン材、加炭材、フェロシリコン、SiCを原料にし、FCD700相当の

溶湯を1.8T低周波溶解炉で溶解した。これを600kgずつFe-Si-Mg (4%)で球状化处理し、Fe-Al, Fe-Tiを(0.25 mass%Al, 0.17 mass%Ti)添加した。それぞれ、有機自硬性鋳型で成型したマンホールとグレーチングに注湯し、併せて複合試験鋳型にも注湯した。製品は仕上げ後破壊試験を行った。ただし、マンホールについては、初加重210kNをかけた後であるので、残留たわみは当然0となる。複合試験片からは鋳造特性及び組織等を検討した。

表9に製品の破壊試験の結果を示す。製品はすべて良好な仕上がりで、破壊強度も一部を除いて何ら問題がなかった。

その他の結果の詳細は省略するが、要約すると、引張試験の結果は、実験室での結果とほぼ同様で、材料としての機械的性質は良好でなかった。また、湯流れは良好でAl, Tiを添加してさらに若干改善した。組織は、Al, Ti添加により黒鉛粒数が増し、球状化率がやや悪化した。引け傾向はAl, Tiとも悪化し、製品のリップ交差部付近には大きな引けが生じた。しかし、製品としての特性には何ら問題がないことから、その使用条件を考慮すれば、不純物に汚染された鉄源の利用が可能であることを確認できた。鋳造特性に関して、実験室での結果と実用規模での結果を比較すると、全般に実験

表5 鋳鉄溶湯特性に及ぼすTiの影響のまとめ

	湯流れ	引け	差込	チル	組織	強度	限界
ねずみ鋳鉄 低硫黄系接種	良から 悪化	外引け 悪化	悪化	接種効果 大	接種効果 大, 過冷黒鉛 α	強度上昇	ごく微量
〃 接種なし	良から 微減	良	なし	悪化	チル大 過冷黒鉛 α	強度上昇	
高硫黄系接種	良から 悪化	外引け 微悪化	微悪化	接種効果 ない	接種効果 \times , 細かい	やや低下 硬さ低下	0.1でも可
〃 接種なし	良	外引け 悪化	なし	悪化	チル小 過冷黒鉛 α	やや低下 硬さ低下	
球状黒鉛鋳鉄 フェライト系	良から 悪化	悪化	なし	極微量で 悪化	形状悪化 粒数減後増, 介在物	強度微上昇 微減 伸び低下	チル 0.02 以下
パーライト系	良から 悪化	最悪化	なし	全チル	形状悪化 粒数減後増, 介在物, パーライト化	強度微上昇 微減 伸び低下	チル 0.02 以下

表6 鋳鉄溶湯特性に及ぼすCrの影響のまとめ

	湯流れ	引け	差込	チル	組織	強度	限界
ねずみ鋳鉄 低硫黄系接種	改善	微悪化	悪化	チル化 接種効果 大	接種効果 大, 微黒鉛 α 化	やや強度 増加 硬さ増	接種改善 0.1 可
〃 接種なし	微改善	微悪化	なし	極端に チル化	チル大	強度減 硬さ減	使えない
高硫黄系接種	微改善	変化無し	悪化	やや チル化	接種効果 \times , 組織 むらが大きい	強度やや 増加 硬さ増	0.08 可
〃 接種なし	変化無し	外引け 微悪化	良から 悪化	チル化	チル化	強度やや 増加 硬さ増	使えない
球状黒鉛鋳鉄 フェライト系	悪化? 高濃度で 改善	変化無し	なし	チル化 むら	粒数変化無し, チル化 パーライト化	強度増加 伸び減 硬さ増	チル化 0.05以下
パーライト系	不明 高濃度で 改善	高濃度で やや悪化	なし	チル化	形状悪化 粒数変化無し, チル化 パーライト化	強度増加 伸び減 硬さ増	チル化 わずかでも 危険

表7 鋳鉄溶湯特性に及ぼすVの影響のまとめ

	湯流れ	引け	差込	チル	組織	強度	限界
ねずみ鋳鉄 低硫黄系接種	変化無し	悪化	なし	チル化だが 接種効果大	接種効果 大, 過冷黒鉛	強度減 硬さ減	0.1でも可
〃 接種なし	やや悪化	悪化	なし	悪化	チル大 過冷黒鉛 α 異常黒鉛	強度 やや減	不可
高硫黄系接種	変化無し	良好	Vが 抑制	適正量あり	接種効果 \times , 細かい 介在物	強度増加 硬さ増加	0.1でも可
〃 接種なし	やや悪化	やや悪化	Vが 抑制	チル化	チル小 過冷黒鉛 α 介在物	強度増加 硬さ増加	0.05以下
球状黒鉛鋳鉄 フェライト系	不明	悪化	なし	極微量で 悪化	形状悪微改善 粒数減, 介在物	強度増加 伸び低下	チル 0.05 以下
パーライト系	不明	悪化	なし	全チル	形状悪化 粒数減減, 介在物, パーライト化	強度増加 伸び低下	チル 0.03 以下

表8 鋳鉄溶湯特性に及ぼすMoの影響のまとめ

	湯流れ	引け	差込	チル	組織	強度	限界
ねずみ鋳鉄 低硫黄系接種	改善	微悪化	改善	チル化 接種効果大	接種効果大,	やや強度 増加 硬さ増	問題なし
〃 接種なし	微改善	改善	なし	極端にチル化	チル大 微細黒鉛	強度減 硬さ減	少量でも チル化
高硫黄系接種	微改善	変化無し	改善	ややチル化	接種効果中	強度増加 硬さ増	問題なし
〃 接種なし	微改善	外引け 微悪化	なし	ややチル化	ややチル化	強度増加 硬さ増	問題なし
球状黒鉛鋳鉄 フェライト系	最適値 あり?	悪化	なし	ほとんど 変化なし	粒数増す パーライト化	強度増加 伸び減 硬さ増	問題なし
パーライト系	不明 高濃度で 改善	高濃度で やや悪化	なし	ややチル化	粒数変化無し, チル化 パーライト化	強度増加 伸び減 硬さ増	チル化0.1

表9 試作製品の破壊試験の結果

	マンホール 210kNたわみ (mm)	残留たわみ (mm)	破壊700kNまで (N)	グレーチング 破壊加重 (N)
添加なし	1.1	0.0	破壊せず	160,000
	1.1	0.0	〃	153,000
	1.1	0.0	〃	149,000
Al添加	1.1	0.0	650,000N	162,000
	1.2	0.0	破壊せず	163,000
	1.2	0.0	〃	164,000
Al添加	1.2	0.0	〃	154,000
	1.1	0.0	〃	133,000
	1.3	0.0	〃	151,000

室の方が不純物に対して敏感に反応しているようである。

5 まとめ

本研究は以下のように統括することができる。

- 1) 球状黒鉛鑄鉄の鑄造特性に及ぼすトランプエレメントの効果を明らかにした。これらの元素は微量添加の場合に従来の報告とは違った挙動を示すことがある。
- 2) 実験室のデータと実用規模でのデータを製品レベルで比較検討した。実験室では不純物元素の効果が強調して現れるので、実験室データは現場で読み替えが必要である。

トランプエレメントを含有する鉄源を鑄鉄へ利用しようとする場合、鑄鉄の鑄造特性を検討した報告は驚くほど少ない。しかし、鑄鉄のトランプエレメントへの許容度は鋼に比べて大きく、その特徴も異なるので、リサイクル促進の見地、コスト削減の見地から、その利用は十分意義があると考えられる。本研究のデータの詳細は別途データ集として出版するので、こちらを参照していただきたい。

謝辞

本研究は平成12年度産学官連携促進事業費補助金を受けて実施したものである。ご指導をいただいた工業技術院名古屋工業技術研究所（現産業技術総合研究所中部センター）中西勝主任研究官はじめ中小企業庁、東北、中部通商産業局の方々に深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 片山裕之, 水上義正.” 鉄のリサイクルプロセス”. まてりあ. Vol.35, No.12, p.1283-1289 (1996)
- 2) 秋末治, 羽田隆司.” 自動車用鋼板の開発と将来”. 金属. Vol.65, No. 4, p.287-294 (1995)
- 3) 日本鉄鋼協会. 鉄スクラップ中のトランプエレメント分離法に関する基礎的検討. 日本鉄鋼協会. 1996, p. 1-18
- 4) 日本鉄鋼協会.” 鉄鋼スクラップをめぐる社会的背景” トランプエレメントの鉄鋼材料学. 日本鉄鋼協会. 1997, p.1-19
- 5) 藤川貴朗 ほか.” 鑄鉄溶湯の鑄造特性に及ぼすトランプエレメントの影響” 三重県工業技術総合研究所研究報告. No.24, p.30-37 (2000)
- 6) 日本鑄造工学会. 鑄鉄溶湯の性状及び材質に関する微量元素の影響. 日本鑄造工学会. 1997, 217p.
- 7) 鑄造技術データブック編集委員会. 鑄造技術データブック. 日刊工業, 1969, p.287-288
- 8) S.C.Massari. Mod. Cast. Vol.57, No. 4, p.45 (1967)
- 9) 伊崎博, 吉野正規.” 一体試験片による鑄鉄溶湯性状の調査”. 日本鑄造工学会第132回講演概要集, p.88 (1998)