

生き残りを賭けた鋳物作り
— 高品質、低価格の生産技術 —

講演会プログラム(案)

平成9年2月14日
機械振興会館 研修2号室

社団法人 日本強靱鋳鉄協会

時 間	演 題	講 師
9:50~10:00 (10分)	開 会 の 辞	社団法人 日本強靱鋳鉄協会 専務理事 安 藤 勉
10:00~11:40 (90分) (内休憩10分)	生型鋳物のバリなし生産技術	日立金属株式会社 素形材研究所 主任研究員 森 田 茂 隆 氏
11:40~12:00 (20分)	質 疑 応 答	
12:00~13:00 (60分)	《 昼 食 》	
13:00~14:00 (60分)	大物鋳物の方案設計の考え方と実例	株式会社 宇部スチール 技術部技術課課長 糸 藤 春 喜 氏
14:00~15:00 (60分)	小物鋳物の方案設計の考え方と実例	自動車鋳物株式会社土浦工場 製造技術部長 宇 塚 恭 治 氏
15:00~15:20 (20分)	質 疑 応 答	
15:20~15:30 (10分)	《 コーヒブレーク 》	
15:30~16:30 (60分)	鋳物砂とベントナイトの現状と 将来展望 (質疑応答含む)	ベントナイト産業株式会社 鋳物営業部課長 峯 田 俊 明 氏
16:30~16:40 (10分)	閉 会 の 辞	社団法人 日本強靱鋳鉄協会 専務理事 安 藤 勉

大物鋳物の方案設計の考え方と実例

㈱宇部スチール 工博 糸藤春喜

1. 緒言

従来の大物鋳物の方案設計は、一般に、引巣の防止並びに寸法精度の向上が主に取り扱われがちであった。しかし、最近の厳しい品質要求や国際的な価格競争の面から、製造工程全体を理解した上で、個々の工程管理をも含めた総合的な方案設計を余儀なくされているのが現状である。例えば、品質面では、鋳物本体強度を保証する目的で、本体付或いは本体強度用供試材による材料試験が求められるようになって来た。この種の仕様によれば、鋳物本体内外に発生する引巣、ドロス等の欠陥についても、厳しい制約が課せられることになる。また、為替レートに関連から、国際入札絡みの鋳物については、品質に見合った価格で受注出来ないことが多い。必然的に、高品質な鋳物を無駄なく造り上げなくてはならないことになる。一品当たりの重量が大きいだけに、お釈迦は、大幅な製造コストアップとなる。更に、大物であるが故に確性試験にも制約があり、一度トラブルが発生すると中々出口が見えなくなることが多い。

本技術講演では、上述のような問題に対処するため、大物鋳物製造に対する基本概念を紹介すると共に、2～3の実例を紹介したい。材質としては、今後益々需要の伸びが期待される球状黒鉛鋳鉄 (FCD) を取り上げることにする。

2. 欠陥及び不具合の種類

先ず、大物FCD鋳物に発生し、トラブルの原因となる欠陥及び不具合を確認する必要がある。具体的な例とその発生因子を表1に取りまとめた。

表1 大物FCD鋳物の欠陥及び不具合の種類とその発生因子

欠陥・不具合の種類		発生因子
マクロ状	引巣 (内, 外), ふくれ	化学成分 (C, Si, CE), 押湯方案, 鋳型プロセス, 鋳物の形状・寸法, 締付け, 鋳込み条件, 鋳型壁の移動, 中子の浮上, 湯流れ
	Mgドロス (塊状, 線状)	化学成分 (Mg, Al, Ca), 鋳込み条件, 取鍋の性状, 掛堰の構造, 二次酸化 (キャビティ内雰囲気, 型内湯流れ)
	黒鉛ドロス	化学成分 (CE), 肉厚 (凝固時間)
	ガス欠陥 (ブロー状, 引巣状)	鋳型プロセス (Ig. Loss), 塗型, 型内湯流れ, 鋳物の形状・寸法, 乾燥
	カン玉, 湯じわ	型内湯流れ (堰, 鋳込み姿勢)
	異物カミ (砂, 塗型, 湯口煉瓦)	型くずれ, 塗型の厚み, 型の清浄, 治具の置忘れ, 煉瓦の破損
	欠肉, 寸法不良	型くずれ, 伸尺 (鋳物形状), 鋳型強度 (変形, 拘束), 鋳型壁の移動, 中子の浮上, 入干
焼着, 浸透	鋳型の耐火度・充填度・強度・Ig. Loss・乾燥, 湯流れ, 湯温	
脆化割れ	化学成分 (Si, P, S, Mg), 700K付近徐冷	
成長	α 化処理	
ミクロ状	球状化不良 (全体, 表層)	化学成分 (Mg), 不純物 (S, Ti, Bi, Sb, As, Pb, Sn等), 接種, 肉厚 (凝固時間), 二次酸化, 浸硫, 鋳型ガスの吹込み, スーパーヒート
	チャンキ黒鉛	化学成分 (Si, Ni, RE, Mg), 肉厚 (凝固時間)
	炭化物 (板状, セル間)	化学成分 (Mn, Cr, Mo, V, Mg等), 接種, 凝固時間 (冷金, 肉厚)
	ステダイト	接種, P量, 凝固時間 (肉厚)
ポロシティ (セル間巣)	化学成分 (Mg), 炭化物生成, 締付け, 鋳型壁移動	

マイクロ状のものは、発生してしまったものを改善する余地は無い。唯一炭化物については、高温処理により黒鉛化させることが出来るものの、成長を伴うため多量に晶出すると寸法不良になり、結局、不具合となる場合がある。マクロ状のものは、溶接補修による修正が可能なものもあるが、作業性、機械的性質の保証、コストの面で問題がある。大物FCD鋳物の品質は、その殆どを鋳込み工程までに制御出来る。また、制御してしまうべきである。

3. 大物FCD鋳物の鋳造方案

大物FCD鋳物は、鋳造歩留りの向上や鋳仕上げの簡便化等による製造コスト低減の観点からすると、無押湯方案による製造がベストである。また、余分な物を付けないことにより、鋳造時のボリュームを最小限に出来るため、実体強度の保証にとっても有利である。

しかし、FCDの凝固特性は複雑であり、どの鋳物に対しても常に無押湯方案を成功させることは、そう易しいことではない。事実、鋳鋼並みに押湯が必要な場合もある。大物FCD鋳物の製造にとって重要な要素として、以下に示す点が挙げられる。

- (1) 溶湯処理～鋳込みまでの時間の短縮
- (2) 凝固時間自体の短縮
- (3) 鋳型内で偏りの少ない凝固、即ち均一凝固化
- (4) 共晶黒鉛膨張体積及び圧力の利用

これらを、製造における具体的な管理項目を数値として示すと、以下ようになる。押湯方案のみでなく、押湯方案にとって優位な条件を与える管理項目についても、ガイドラインとなる数値を示した。

(1) 化学成分 (mass%)

C	3.40~3.60	Ce	<0.010
Si	2.10~2.70	Mg	0.040~0.050
Mn	<0.35	不純物 (資料① ¹⁾)	<0.20
P	<0.060	CE (=C + 1/3Si)	4.20 ~4.35
S	≒0.010		

C, Siは、黒鉛晶出量を左右する重要な元素であるから、正確な管理が必要である。同じCE値の場合、C量が多い方が、黒鉛晶出による総合膨張量が多くなる(添付資料②²⁾③³⁾)。しかし、Siを低くすると、引張特性の内、特に0.2%耐力を低下させるので注意を要する。逆に高過ぎると、チャンキ黒鉛を晶出させ易くなる。高Si値に加えてNi, Ceを高含有すると、更にチャンキ黒鉛を晶出させ易いので注意を要する。材質によっては、Cu, Moを合金元素として添加する必要があるが、添加量次第では凝固温度範囲を変化させ、チャンキ黒鉛晶出や引裂発生傾向を助長することがある。Mo添加により凝固冷却挙動が変化した例を、図1に示す。

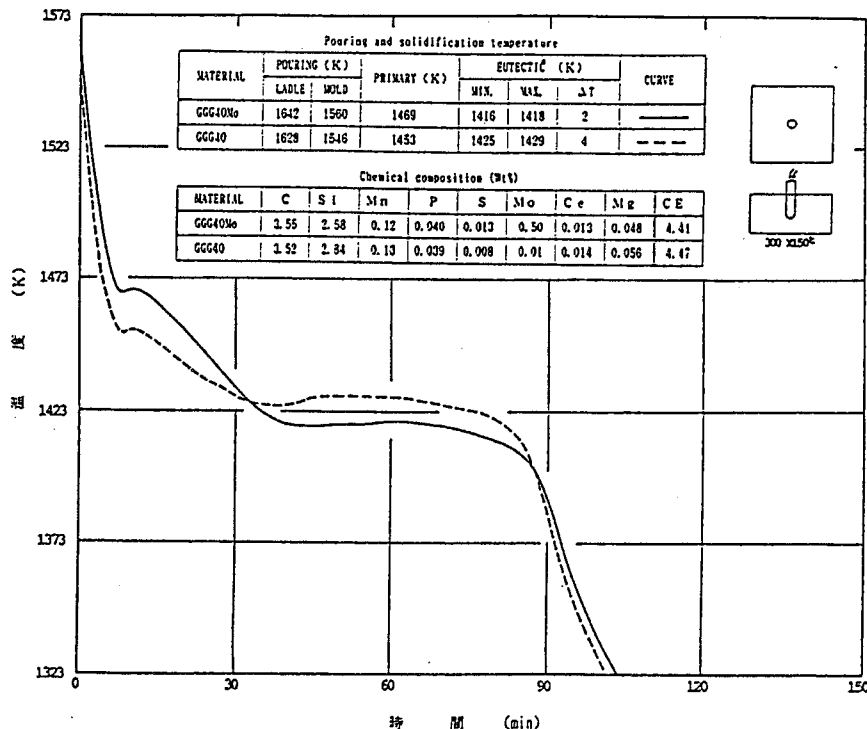


図1 GGG40MoとGGG40の凝固冷却曲線 (300×300×150mm 試験鋳物)

Mgは、少な過ぎると球状化不良を起こし、多過ぎると逆チル、Mgドロス及びボロシティが発生し易くなる。Sとのコンビネーションによる上述程度が適当と思われる。アーク炉溶解では、元湯のSを0.005%以下に脱Sすることが容易であり、Mgの管理巾を0.030~0.040%とすることも可能である。ドロス発生防止や有効Mg量確保の点から、球状化処理は、元湯を一度スーパーヒートしてCO反応域にて精錬した後に実施することが望ましい。また、最もMgドロスの発生が多い温度域(約1450~1350℃)が、鑄込み工程に掛からないようにするべきである。Mg処理溶湯の冷却に伴うドロス生成挙動を図2⁴⁾に示す。この他、鑄込み中にも鑄型ガスによりMgが二次酸化し、上型面以外にも線状の微細ドロスを発生することがある⁵⁾ので注意を要する。

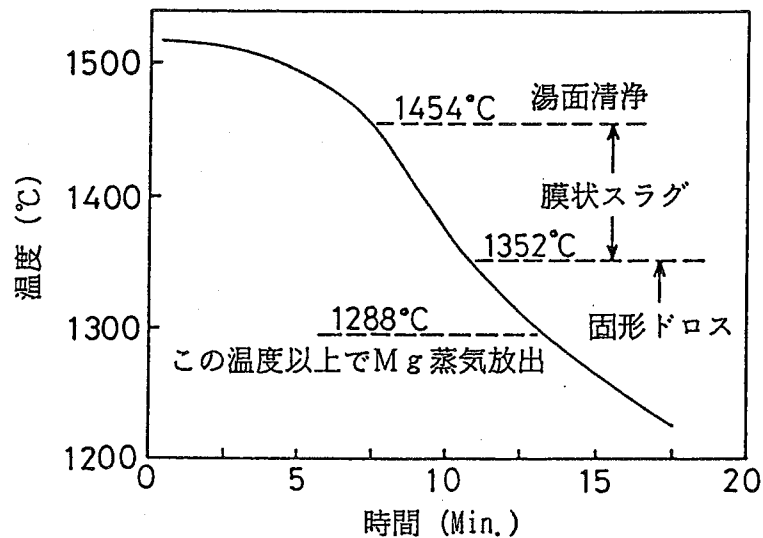


図2 大気雰囲気下でのMg処理溶湯の冷却カーブ；スラグ及びドロス生成温度をこのカーブ上に示す⁴⁾

(2) 鑄込み温度

添付資料②の鑄込み後の鑄型内容湯の体積収支を考慮すると、凝固開始までの液体収縮分(1.5%/100℃)が少ないほど良いから、鑄込み温度は、湯じわ、湯廻り不良等が発生しない限り、低いほど良いことになる。一般的な目安としては、1310±10℃程度が適当であろう。鑄込み中の温度ロス、フラン型の場合で約70℃である。

(3) 溶湯処理から鑄込みまでの時間

比較的低温で溶湯が扱われるため、Mg及び接種のフェーディング速度も、小物FCD鑄物に比べれば遅い。このフェーディングの程度を把握するデータとして、接種後の経過時間と引張特性の関係を図3に示す。

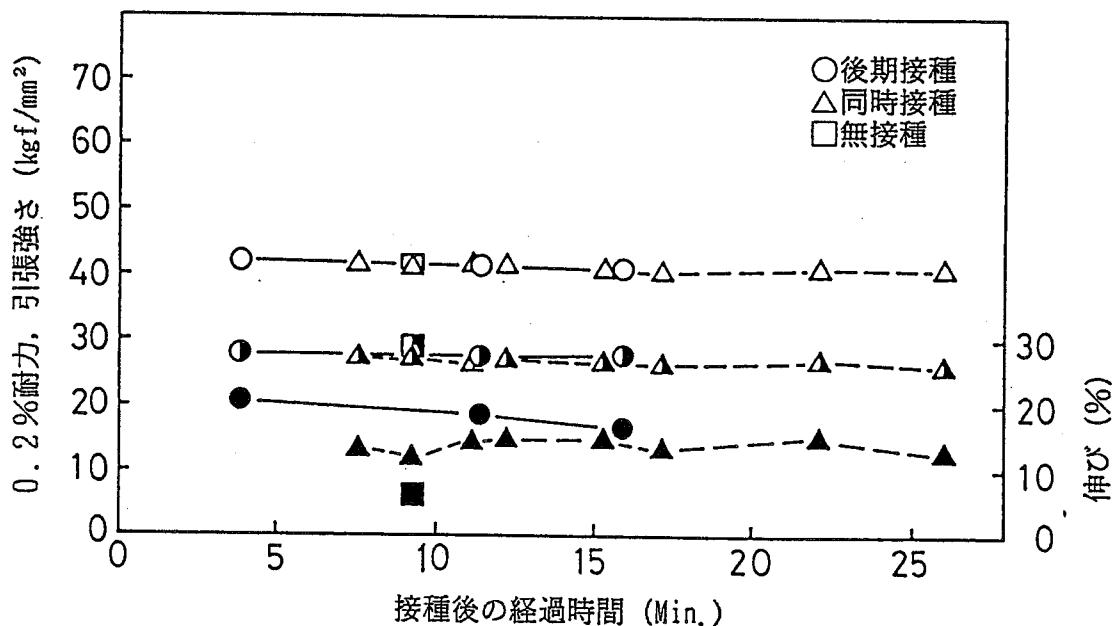


図3 300×300×150mm 試験ブロックにおける接種後の経過時間と引張特性の関係 (現A-mold corp. 守武氏提供)

しかし、それでも実体強度の保証が要求される場合には、溶湯処理後、出来るだけ早く鑄込む方が良い。溶湯重量が大きく、ハンドリングに手間を要するものの、15分以内には鑄込みを完了させたい。大物FCD鑄物においては、鑄型内においても、凝固開始までの間にフェーディングが進行する。Mgのフェーディングを考慮して掛堰にて球状化处理をする場合もあるが、処理剤の反応性、Mgドロスの混入防止等の点で掛堰の構造に注意を払う必要があり、技術上の難点が多い。接種は、掛堰或いは湯口系等に合金をセットして補助的に実施して、マイクロ組織の改善を図ることが比較的容易に出来る^{6) 9)}。掛堰接種によるマイクロ組織改善例⁷⁾を写真1に示す。

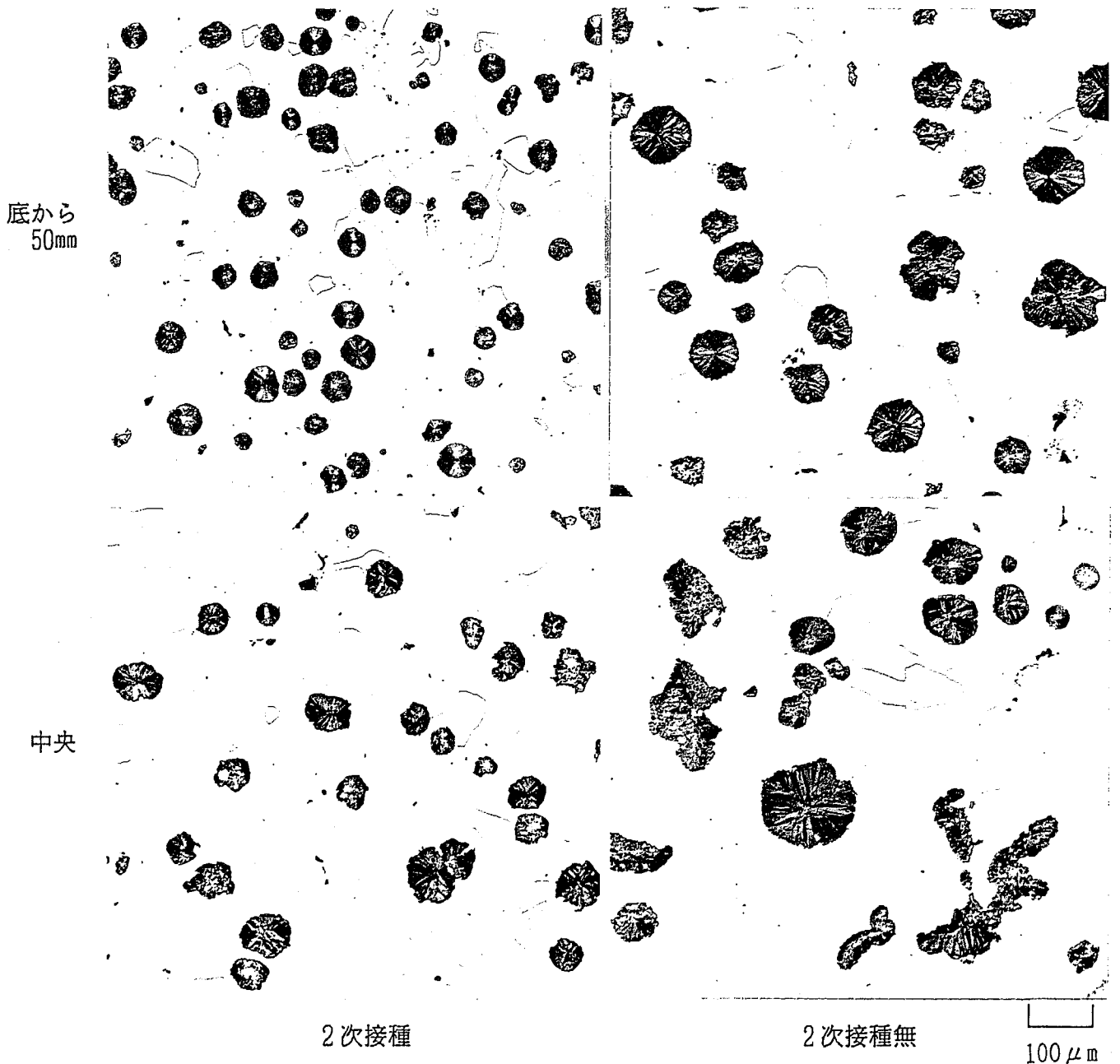


写真1 掛堰2次接種による大物鑄物のマイクロ組織改善 (冷金により凝固制御の600×600×600mm 試験鑄物)⁷⁾

(4) 凝固時間

球状黒鉛粒の粗大化及び粗悪化を少なくすると共に、チャンキ黒鉛の晶出を防止するためには、凝固を3時間⁹⁾¹⁰⁾程度までに完了させることが望ましい。この凝固時間の調整は、実体の機械的性質の保証と同時に、実体の内部品質をチェックする際の超音波探傷試験(U T)の精度を上げるためにも重要である。冷金により凝固時間を調整し厚肉鑄物の引張特性を改善した例を図4に示す。凝固時間は、次式に示すようにモジュラスとの間に良好な相関があることが一般に知られている。

$$T = KM^2$$

T = 凝固時間 (分),

K = 係数,

M = モジュラス (cm) = 体積 (cm³) / 表面積 (cm²)

このため、鑄物のモジュラスを求めることにより、概略の時間を知ることが出来る。フラン珪砂型に鑄込んだ鑄物のモジュラスと凝固時間の関係を図5に示す。大物F C D鑄物の係数Kは5.15程度であり、大物S C鑄物の2.15より大きい。しかし、大物F C D鑄物では、制御することなしに凝固時間が3時間以内となるものは少なく、図5に示す相関を適用出来るケースは少ない。凝固時間を制御するには、冷金等による強制冷却が必要となる。冷金を用いる場合、実体と同等かそれ以上の肉厚のものが必要となることもある。適切な形状・寸法の冷金の設計は、R. Wlodawer⁹⁾が鋼鑄物用に示した式を、張¹⁰⁾がF C D鑄物用に適用出来るとしている。しかし、コンピュータにより凝固シミュレーションする方法が最適である。

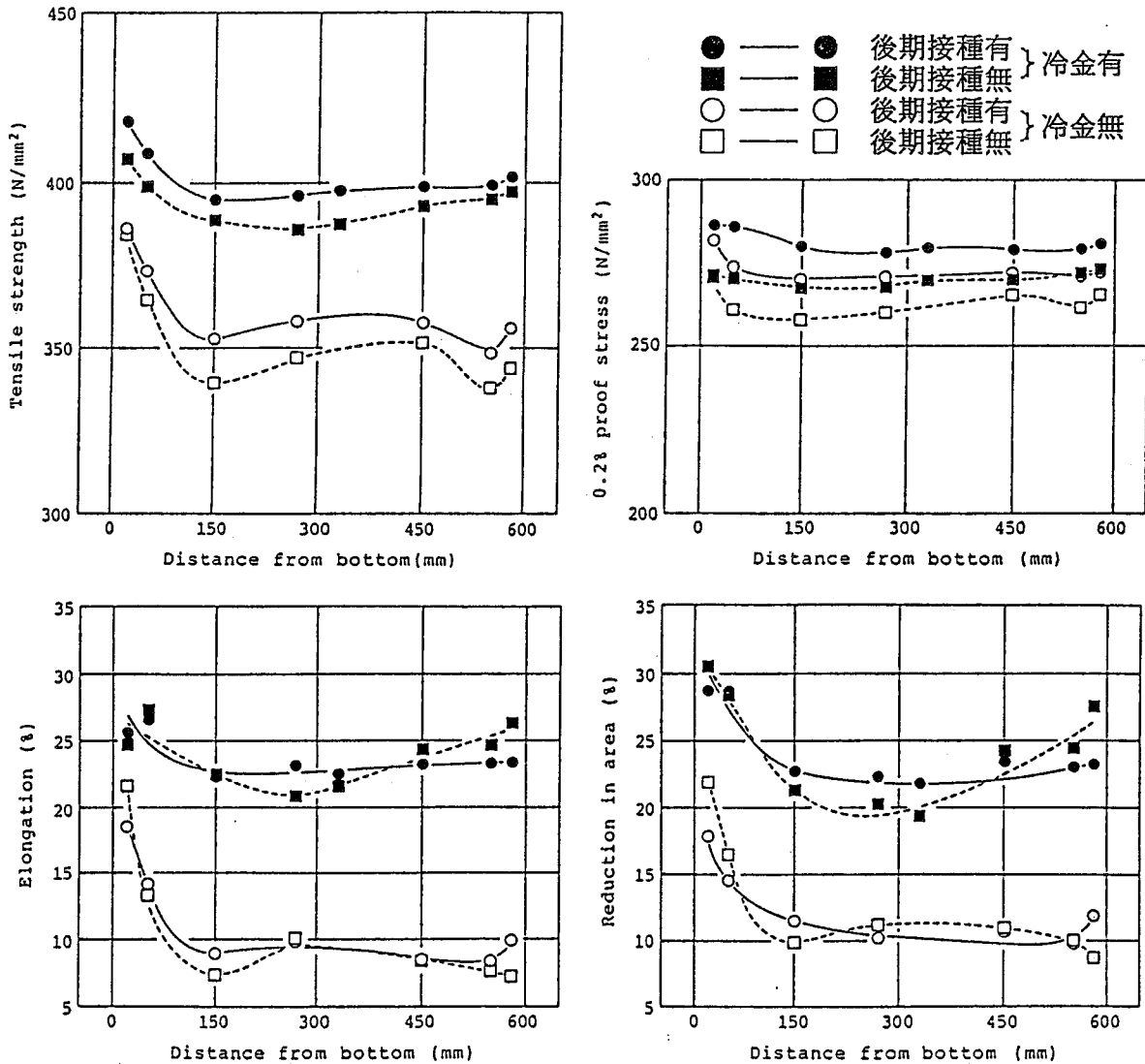


図4 凝固時間短縮(540→150分)による大物鑄物の引張特性の改善 (600×600×600mm 試験鑄物)⁷⁾

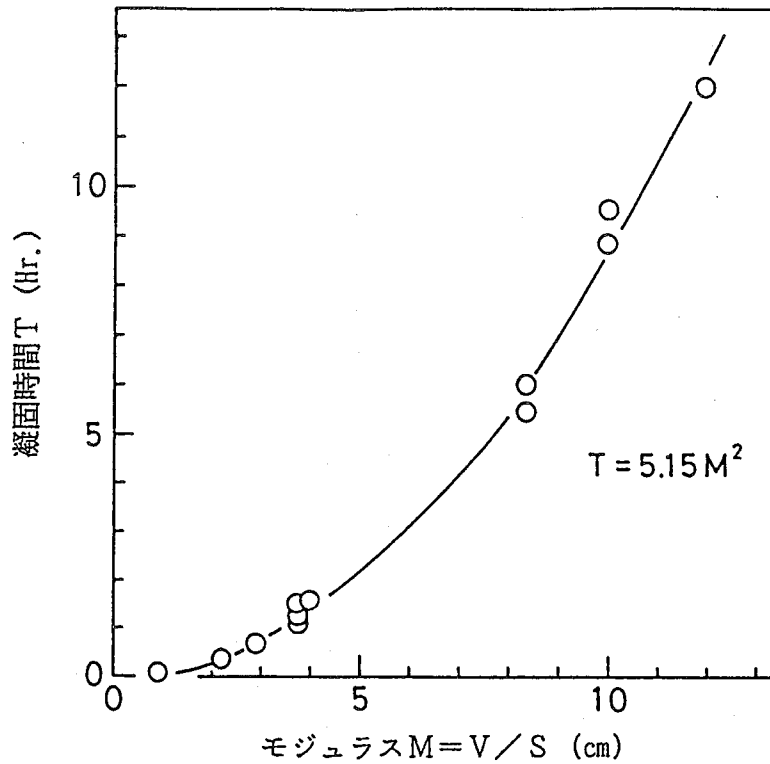


図5 大物FCD鋳物の凝固時間とモジュラスの関係

(5) 押湯設計

大物FCD鋳物は、形状及び寸法的に無押湯方案が可能なものが多い。無押湯方案は、鋳物のモジュラスM、無押湯方案安全指数I²⁾ 8)、修正温度勾配K¹⁾ 11) によって適用の可否が判断される。無押湯方案を成功させるためには、次に示す各項目の基準値を全て満足しなければならない。無湯方案の場合、揚がりの直径が重要なポイントとなる。また、ガス抜き穴としても必要である。小さ過ぎると、揚がりの付根周辺に外引けが生じる。逆に大き過ぎると、鋳仕上げの妨げとなる。鋳込み後の液体収縮分の何割かを補う程度のものが良い。目安は、直径D(cm) = 1.6Mである。

a. モジュラスM(cm) = V/S > 2.5

b. 無押湯方案安全指数(cm) I = M/F > 0.5

M = モジュラス
 F = 形状係数
 = (L+W) / T
 L = 長さ (cm)
 W = 巾 (cm)
 T = 肉厚 (cm)

c. 修正温度勾配K (deg^{1/2}min^{1/2}cm⁻¹) = G/√R > 1.0

K < 1.0 の領域 (%) < 2.0

G = 温度勾配 (°C/cm)
 R = 冷却速度 (°C/min.)

押湯が必要となるのは、項目b, cを満足しない場合があるためである。項目aについては、基準値を下回る例は極めて少ない。しかし、押湯本来の給湯を目的として用いるのではなく、熱的バランサーとして用いる。このため、このような場合の押湯を熱バランサーと名付けている⁸⁾。熱バランサーには、実体と同様に、いわゆる引巣は発生しない。しかし、熱バランサーを取り去ると、実体に引巣が発生する。熱バランサーは、項目cを満足させるように凝固シミュレーションによりその形状・寸法が決定される。熱バランサーの有効範囲は、その直径の倍数で示される。鋳物の形状によっても異なるが、熱バランサーの周辺に対し最大8倍の領域までを有効範囲と出来た実績がある。

しかし、大物FCD鋳物であるが故に、失敗時の追加原価及び遅納ペナルティを考慮すると、無押湯及び熱バランサー方案を実施するには、経営者の理解と方案設計者本人の情熱並びに勇気が必要であろう。

この他、従来どおりの押湯方案によっても、健全な鋳物を製造することが出来る。押湯のサイズは、次式の鋳鋼のものが用いられる。保温スリーブを用いない場合には、係数K2を削除すれば良い。

$$D=H=K1 \cdot K2 \cdot M$$

- D = 押湯の直径 (cm)
- H = 押湯の高さ (cm)
- K1 = 係数 = 6.2
- K2 = 保温スリーブの係数 = 0.8
- M = モジュラス (cm)

(6) 湯口系の設計

湯口系は、鋳込み速度を基準に設計するが、単位時間当たりの重量 (kg/s) よりも、単位時間当たりの上昇距離 (cm/s) を基準にした方が良い。これは、鋳型の照らされや溶湯の乱流による不具合を制御するのに、後者の方が現象を解析しやすいためである。上昇速度は、2~3 cm/s が標準的な値である。次式より堰の総断面積を求め、湯口比から湯口系全体の設計を行う。

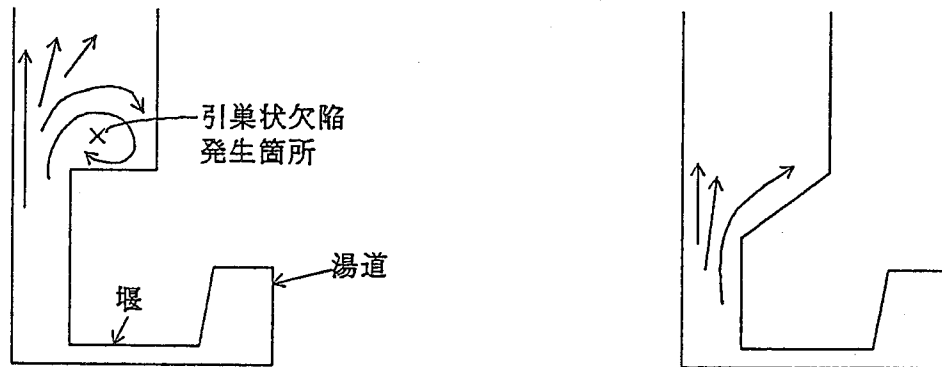
$$T=h/V, Q=W/T, Q=\left(\frac{C \cdot A_c \sqrt{2gh}}{1000}\right)^{1.2}$$

- T = 鋳込み時間 (s)
- h = 溶湯ヘッド (cm)
- V = 溶湯の上昇速度 (cm/s)
- Q = 鋳込み速度 (kg/s)
- W = 鋳込み重量 (kg)
- C = 定数 (g/cm³) = 0.5 ~ 1.0
- A_c = 堰の総断面積 (cm²)
- g = 重力加速度 (981 cm/s²)

$$\text{湯口比} = A_s : A_r : A_c = 1 : 2 : 4$$

- A_s = 湯口棒の断面積 (cm²)
- A_r = 湯道の断面積 (cm²)

照らされによる不具合としては、ブローホールがある。一方、鋳型での乱流は、二次酸化によるMgドロス、ガス巻き込みによる引巣状欠陥 (図6) 及びカン玉や湯じわ等の発生原因となる。



(a) 乱流の弊害

(b) 形状の改善による乱流防止

図6 湯流れに伴う引巣状ガス欠陥の発生とその対策

(7) 鋳型強度

FCDは、マッシー (かゆ状) な凝固様式を取るため、黒鉛晶出に伴う体積膨張を圧力として鋳型に伝える。大物FCD鋳物の共晶膨張圧力は、500~600 N/cm² と高い¹³⁾。炭素当量と共晶膨張圧力の関係を図7¹³⁾に示す。このため、鋳型の圧縮強度は、鋳枠や芯金等によるバックアップも含めて、共晶膨張圧力以上に制御する必要がある。鋳型強度が不足すると、表面的にはふくれや外引け、内部的には引巣の発生を誘発する。最近の鋳型プロセスでは、フラン型が最も安定して高強度が得られる。鋳型強度は、樹脂及び硬化剤の添加量だけでなく、砂の充填度も考慮して制御すべきである。上述のように、鋳枠の形状や鉄筋の挿入による鋳型強度の補強も重要なポイントである。

(8) 締付け及び張止め

鑄型強度が十分にあって、上下鑄型間の締付けを十分にしないと、共晶膨張圧力を抑え込むことは出来ない。締付け力は、共晶膨張圧力に加えて浮力も考慮に入れたものでなければならない。

鑄込み後、大きな鑄型では、鑄枠にサポートされていても鑄型自体がたわむことがある。このたわみにより鑄物がふくれることがある。ピット内で鑄込む等により、鑄型側面に張止めをする必要がある。この場合、共晶膨張圧力と溶湯ヘッド圧を押さえ込む程の治具としなければならない。

(9) 型バラシ

殆どの場合、約550℃程度で型バラシが行われる。大型エンジンのフレーム等については、型バラシ後の不均一な冷却に伴う熱応力を最小にするため、300℃以下まで型内冷却が必要な場合がある。

(10) 熱処理

機械加工中の変形を嫌って、鑄造応力を除去する目的で歪取り焼鈍が行われる。しかし、鑄物によっては、発生する歪を加工中に調整出来るものがあり、歪取り焼鈍を省略出来ることがある。

熱処理によりパーライト組織とすることは、非常に困難である。合金添加により鑄放しでパーライト組織とする方が、より確実で安定性がある。

フェライト系大物FCD鑄物では、フェライト化焼鈍を実施することがある。レデブライトの晶出やパーライトの析出量によっては、黒鉛化に伴う成長量が大きく、場合によっては寸法不良を引き起こすことがあるので注意を要する。やはりこの点でも、品質を鑄放しにて造り込むことが重要である。これによりフェライト化焼鈍の工程が削除出来る点でも、メリットは大きい。

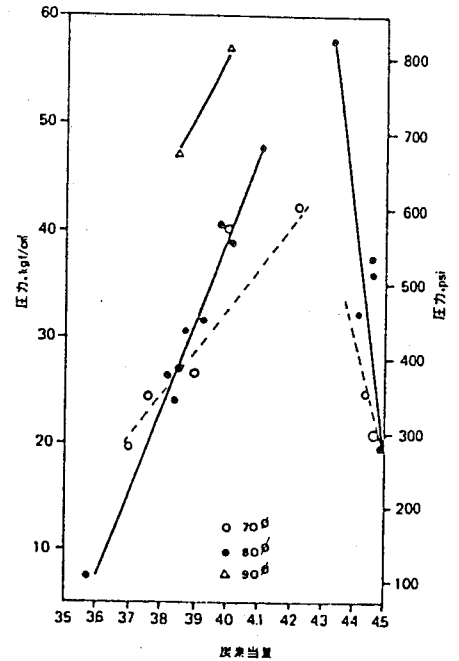


図7 炭素当量と共晶膨張圧力の関係¹⁹⁾

4. 方案の精度向上

前章の管理項目及びその値は、理想的な条件を示す理論上のものであり、実践的には単にガイドラインに過ぎない。設備やそのレイアウトなどの製造条件を考慮して、自社に合った管理項目を設定し、現象を詳細に観察しながら具体的な管理値を決定していく必要がある。高品質な鑄物を最小コスト*で安定して製造するためには、鑄造プロセスの中で図8に示すようなPDCAの輪を確実に廻し、方案精度を向上させなければならない。方案設計者は、工程及び現象を正確にチェック出来ると共に、良・不良に関係なく品質を診断し、解析出来ることが望ましい。更に、管理項目と品質との因果関係に対して作業者が理解を深めることが出来るように教育することも、成功の鍵である。

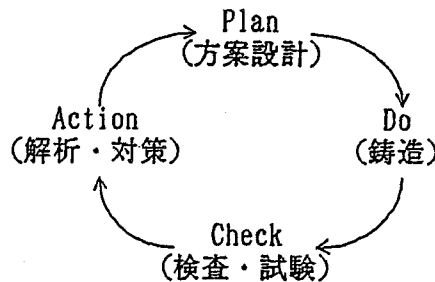


図8 方案設計者によるPDCAの輪

* 「最小コスト」とは、あくまでも最小工数で競争力のある品質を造り上げようとするものである。安売りを意味するのではない。

5. 実施例

(1) 大型インジェクション・マシンのダイ・プレート

材質 : FCD450
重量 : 36000kg
最大肉厚 : 245mm
押湯方案 : 無押湯
歩留り : 95.7%

(2) ガスタービン部品

材質 : GGG40Mo
重量 : 3700kg
最大肉厚 : 95mm
押湯方案 : 押湯+熱バランサー
歩留り : 81%

(3) その他

*詳細は、当日OHPにて紹介する。

- 文献
- 1) C. R. Loper Jr., "Tramp Elements in Cast Iron," Foundry M&T (1977) Oct., P56. / KUSAKA TECHNICAL NEWS, No.14 (1985) Oct., P6.
 - 2) 張博「押湯なしダクタイル鑄鉄鑄物について」JACT NEWS, No.419 (1985), P1.
 - 3) 糸藤春喜, "Study on Graphite Spheroidization in Cast Irons," 京都大学学位論文 (1993), P238.
 - 4) R. W. Heine and C. R. Loper Jr., "Dross Formation in the Processing of Ductile Cast Iron," AFS Trans., Vol.74 (1966), P274.
 - 5) 中山, 糸藤, 佐川「鑄物側面のマグネシウムドロス欠陥」日本鑄造工学会第128回全国講演大会 (1996), P105.
 - 6) J. N. Harvey and P. P. Mohla, "Mold Inoculation of Cast Iron Using Pressed Block," Modern Casting, Vol.83 (1993), P48.
 - 7) 榎谷, 鶴井, 糸藤, 村上, 山田「厚肉FCDに対する掛堰2次接種の効果」日本鑄物協会中四国支部研究発表会資料, 12月9日 (1993), P21.
 - 8) 前橋良嗣, 有本象治『ダクタイル鑄鉄の進歩』日本ダクタイル鑄鉄協会 (1982), P303.
 - 9) R. Wlodawer『鋼鑄物の指向性凝固』(1967).
 - 10) 張博「球状黒鉛鑄鉄の押湯無し方案」鑄物, 第55巻 (1983), 第2号, P113.
 - 11) E. Niyama, et al., "A Method of Shrinkage Prediction and Its Application to Steel Casting Practice," IMONO, Vol.54 (1982), No.8, P507.
 - 12) A. Holzmuller and L. Kucharcik, "Atlas zur Anschnitt-und Speisertechnik fur Gusseisen," ドイツ鑄物協会監修 (1975). / 高橋良治訳『鑄鉄の鑄造方案図解集』アグネ (1976), P24.
 - 13) K. S. Lee and M. Kayama, IMONO, Vol.47 (1975), P549. / S. I. Karsay, "Ductile Cast Iron 3; Design of Runner System and Riser," QIT Publish (Canada), (1981), P67.

表 FCDの残留元素¹⁾

元素	主な汚染源	典型的な汚染量	主な影響
Al	鋼屑（残留Al）、鋼屑や故鉄中に混在するAl地金、鉄合金（副資材）。Tiと共存するとピンホールを誘発する。	0.003～ 0.06%	Alはチル化防止のために合金鉄中に含まれている。Al量が多いと短くならずぐりした片状黒鉛生成の原因となりやすい。特に厚肉部に大きな影響をもたらす。ある文献では0.005%でピンホールの原因になるとしているが、他の文献では0.01%あるいは0.10%でピンホールを阻止すると報告している。
Sb	故鉄や鋼屑中の不純物。	0.005%	特に、希土類元素が存在する場合、黒鉛の球状化にほとんど影響しない。0.25%Sbで球状の悪化。希土類元素を用いないで、0.02～0.03%Sbは球状化率を低下させる原因となることが言われている。全パーライト基地を得るために約0.05～0.10%が必要である。
As	故鉄や鋼屑中の不純物。	0.01%	球状の良否に影響なし。全パーライト基地を得るために約0.10%が必要である。
Bi	通常、取鍋添加以外にない。	0.01%	希土類元素を含有しないと、片状黒鉛生成を促進する（0.05%Bi）。希土類元素を添加すると、黒鉛粒数及び形状が改善する。
B	ある種の鉄、エナメルスクラップ。故意に添加される。	0.0005%	約0.005%で、 α 化焼鈍しても分解が極めて難しい炭化物が生成する。
Ca	合金鉄（副資材）。	未公知	接種剤に含有させて用いるのが最適な添加である。黒鉛粒数や球状化率を増加させると言われている。過剰添加は初晶炭化物生成を促進する。
Cr	合金鋼、ねずみ鉄、鋼板のメッキ、故鉄。	0.02～ 0.13%	炭化物生成傾向が強い。炭化物は α 化焼鈍に対し難分解性を示す。鑄放してフェライト基地を得るには、0.04%以下とすべきである。パーライト基地を得る目的で添加する際でも、0.1%以下とすること。
Cu	鋼屑や故鉄に混在する非鉄地金。取鍋添加。	0.01～ 0.90%	球状の良否及び初晶炭化物生成に影響なし。パーライト生成傾向が強い：約0.50%で全パーライト基地をもたらすが、肉厚の大きさや他合金元素の存在に左右される。
H	溶解中及び凝固前に雰囲気ガスと接触。乾燥不充分的な炉や取鍋の耐火物。	0.002～ 0.0015%	逆チルあるいは中心線炭化物を促進すると言われている。また、ピンホール生成に関与する。
Pb	鋼屑や故鉄に混在する非鉄地金。ほたる石、鉛快削鋼屑、銅添加。	0.003%	最も有害な元素の一つである。球状化を大きく阻害する。約0.01%ミッシュ・メタルで0.05%Pbを相殺すると言われている。
Mn	鋼屑や故鉄中の合金元素。	1.20%まで	0.70%以上でセル間炭化物を生成する。フェライト系では、一般に0.20%以下に制御する。鑄放しパーライトを得るためには、0.50～0.90%添加される。
Mo	鋼屑や故鉄中の合金元素。	0.01～ 0.50%	パーライト量の増加による硬さの増大。炭化物生成傾向は弱い、黒鉛粒数が少ないとセル境界に偏析する。
N	溶解中に大気と接触。特にアーク炉溶解。	0.002～ 0.008%	炭化物生成傾向は弱い。ポロシティ生成の一因となる。乾性窒素ガスは、溶湯中に溶け込まない。元湯中の量はMg処理で減少する。
O	溶解中の雰囲気、スラグ中の酸化物。	0.005%	大部分は酸化物として存在し、この酸化物は溶湯中のカーボンと反応してガスを発生し減少する。溶解量は、溶湯中でもかなり少ない。
P	鉄、故鉄及び鋼屑中の不純物。	0.05%	網状組織のリン化物を生成する。一般に、できるだけ低い値にする（0.06%）。衝撃遷移温度を高める。
S	コークス、加炭剤及び故鉄中の不純物。	0.02%	Mgあるいは希土類元素と優先的に反応する。
Te	通常、取鍋添加以外にない。鋼屑や故鉄へ地金として混在。鋼屑中の合金元素。	0.005%	希土類元素が存在していない場合、黒鉛を劣化させる有害元素と考えられる。ピンホールを抑制するために添加される（1～2g/45.3kg）。
Sn	通常、取鍋添加以外にない。故鉄から混入することもある。	0.10%	強力なパーライト生成元素。0.10%Sn以上でセル境界に形状の悪い黒鉛を生成させる。
Ti	鉄中の不純物。	0.07%	Alと同様の影響を及ぼす有害元素と考えられる。その影響は、Alより強い。Alが共存すると、ピンホール生成傾向が増す。希土類元素は、これらの悪影響を阻止する。
V	鋼屑や故鉄中の合金元素。	0.04%	非常に安定した炭化物を生成する。
Zr	何種かの鉄合金（副資材）。	0.01%	片状黒鉛生成を促進する。球状化度の悪い黒鉛を誘発させる。

表 鑄込後のF.C.Dの体積変化 (Vol.%)^{2) 3)}

CE = C + 1/3Si (C, Si)	4.2 (3.5, 2.1)	4.2 (3.4, 2.4)	4.2 (3.3, 2.7)	4.3 (3.6, 2.1)	4.3 (3.5, 2.4)	4.3 (3.4, 2.7)	4.4 (3.7, 2.1)	4.4 (3.6, 2.4)	4.4 (3.5, 2.7)
Cr	1.67	1.62	1.56	1.67	1.62	1.56	1.67	1.62	1.56
Ce	3.57	3.47	3.37	3.57	3.47	3.37	3.57	3.47	3.37
初期温度 1400℃ (1673K)	1. 液体収縮	-3.75	-3.75	-3.75	-3.75	-3.75	-3.75	-3.75	-3.75
	2. 初晶Gによる膨張 (初晶 γ による収縮)	(-0.13)	(-0.13)	(-0.14)	+0.11	+0.11	+0.11	+0.46	+0.46
	3. 共晶 γ による収縮	-3.31	-3.31	-3.31	-3.30	-3.30	-3.31	-3.30	-3.30
	4. 共晶Gによる膨張	+6.32	+6.16	+6.03	+6.32	+6.15	+6.02	+6.31	+6.14
	総合変化 (1+2+3+4)	-0.87	-1.03	-1.17	-0.62	-0.79	-0.93	-0.28	-0.45
	初晶Gを除いた変化 (1+3+4)	-	-	-	-0.73	-0.90	-1.04	-0.74	-0.91
1350℃ (1623K)	1. 液体収縮	-3.00	-3.00	-3.00	-3.00	-3.00	-3.00	-3.00	-3.00
	2. 初晶Gによる膨張 (初晶 γ による収縮)	(-0.13)	(-0.13)	(-0.14)	+0.11	+0.11	+0.11	+0.46	+0.46
	3. 共晶 γ による収縮	-3.33	-3.33	-3.33	-3.33	-3.33	-3.33	-3.32	-3.33
	4. 共晶Gによる膨張	+6.37	+6.20	+6.07	+6.37	+6.20	+6.07	+6.36	+6.19
	総合変化 (1+2+3+4)	-0.09	-0.26	-0.40	+0.15	-0.02	-0.15	+0.50	+0.32
	初晶Gを除いた変化 (1+3+4)	-	-	-	+0.04	-0.13	-0.26	+0.04	-0.14
1300℃ (1573K)	1. 液体収縮	-2.25	-2.25	-2.25	-2.25	-2.25	-2.25	-2.25	-2.25
	2. 初晶Gによる膨張 (初晶 γ による収縮)	(-0.13)	(-0.13)	(-0.14)	+0.11	+0.11	+0.11	+0.46	+0.46
	3. 共晶 γ による収縮	-3.36	-3.36	-3.36	-3.35	-3.36	-3.36	-3.35	-3.36
	4. 共晶Gによる膨張	+6.42	+6.25	+6.12	+6.42	+6.25	+6.11	+6.41	+6.24
	総合変化 (1+2+3+4)	+0.68	+0.51	+0.37	+0.93	+0.75	+0.61	+1.27	+1.09
	初晶Gを除いた変化 (1+3+4)	-	-	-	+0.82	+0.64	+0.50	+0.81	+0.63
1250℃ (1523K)	1. 液体収縮	-1.50	-1.50	-1.50	-1.50	-1.50	-1.50	-1.50	-1.50
	2. 初晶Gによる膨張 (初晶 γ による収縮)	(-0.13)	(-0.13)	(-0.14)	+0.11	+0.11	+0.11	+0.46	+0.46
	3. 共晶 γ による収縮	-3.38	-3.38	-3.39	-3.38	-3.38	-3.38	-3.38	-3.39
	4. 共晶Gによる膨張	+6.47	+6.30	+6.17	+6.47	+6.29	+6.16	+6.45	+6.29
	総合変化 (1+2+3+4)	+1.46	+1.29	+1.14	+1.70	+1.52	+1.39	+2.03	+1.86
	初晶Gを除いた変化 (1+3+4)	-	-	-	+1.59	+1.41	+1.28	+1.57	+1.40
1200℃ (1473K)	1. 液体収縮	-0.75	-0.75	-0.75	-0.75	-0.75	-0.75	-0.75	-0.75
	2. 初晶Gによる膨張 (初晶 γ による収縮)	(-0.13)	(-0.13)	(-0.14)	+0.11	+0.11	+0.11	+0.46	+0.46
	3. 共晶 γ による収縮	-3.41	-3.41	-3.41	-3.40	-3.40	-3.41	-3.40	-3.41
	4. 共晶Gによる膨張	+6.52	+6.35	+6.21	+6.52	+6.34	+6.21	+6.50	+6.34
	総合変化 (1+2+3+4)	+2.23	+2.06	+1.91	+2.48	+2.30	+2.16	+2.81	+2.64
	初晶Gを除いた変化 (1+3+4)	-	-	-	+2.37	+2.19	+2.05	+2.35	+2.18

表1-1 FCDの鋳込み後から凝固完了までの体積変化

CE	4.2	4.2	4.3	4.3	4.4	4.5	4.6	4.7
(C, Si)	(3.6, 1.8)	(3.5, 2.1)	(3.6, 2.1)	(3.5, 2.4)	(3.6, 2.4)	(3.6, 2.7)	(3.7, 2.7)	(3.8, 2.7)
C _γ	1.72	1.67	1.67	1.62	1.62	1.56	1.56	1.56
Ce	3.67	3.57	3.57	3.47	3.47	3.37	3.37	3.37

Ti=1400°C

1.S _ℓ	-3.75	-3.75	-3.75	-3.75	-3.75	-3.75	-3.75	-3.75
2.Epg(Ep _γ)	(-0.13)	(-0.13)	+0.11	+0.11	+0.46	+0.81	+1.16	+1.51
3.S _γ	-3.31	-3.31	-3.30	-3.30	-3.30	-3.30	-3.30	-3.29
4.Eeg	+6.48	+6.32	+6.32	+6.15	+6.15	+6.00	+6.00	+5.99
1+2+3+4	-0.71	-0.87	-0.62	-0.79	-0.44	-0.24	+0.11	+0.46
1+3+4	-	-	-0.73	-0.90	-0.90	-1.05	-1.27	-1.97

Ti=1350°C

1.S _ℓ	-3.00	-3.00	-3.00	-3.00	-3.00	-3.00	-3.00	-3.00
2.Epg(Ep _γ)	(-0.13)	(-0.13)	+0.11	+0.11	+0.46	+0.81	+1.16	+1.51
3.S _γ	-3.33	-3.33	-3.33	-3.33	-3.33	-3.32	-3.32	-3.32
4.Eeg	+6.53	+6.37	+6.37	+6.20	+6.19	+6.05	+6.04	+6.04
1+2+3+4	+0.07	-0.09	+0.15	-0.02	+0.32	+0.54	+0.88	+1.23
1+3+4	-	-	+0.04	-0.13	-0.14	-0.27	-0.26	-0.28

Ti=1300°C

1.S _ℓ	-2.25	-2.25	-2.25	-2.25	-2.25	-2.25	-2.25	-2.25
2.Epg(Ep _γ)	(-0.31)	(-0.13)	+0.11	+0.11	+0.46	+0.81	+1.16	+1.51
3.S _γ	-3.36	-3.36	-3.35	-3.36	-3.35	-3.35	-3.35	-3.34
4.Eeg	+6.59	+6.42	+6.42	+6.25	+6.24	+6.10	+6.09	+6.08
1+2+3+4	+0.85	+0.68	+0.93	+0.75	+1.10	+1.31	+1.65	+2.00
1+3+4	-	-	+0.82	+0.64	+0.64	+0.50	+0.49	+0.49

Ti=1250°C

1.S _ℓ	-1.50	-1.50	-1.50	-1.50	-1.50	-1.50	-1.50	-1.50
2.Epg(Ep _γ)	(-0.13)	(-0.13)	+0.11	+0.11	+0.46	+0.81	+1.16	+1.51
3.S _γ	-3.38	-3.38	-3.38	-3.38	-3.38	-3.38	-3.37	-3.37
4.Eeg	+6.64	+6.47	+6.47	+6.29	+6.29	+6.14	+6.14	+6.13
1+2+3+4	+1.63	+1.46	+1.70	+1.52	+1.87	+2.07	+2.43	+2.77
1+3+4	-	-	+1.59	+1.41	+1.41	+1.26	+1.27	+1.26

Ti=1200°C

1.S _ℓ	-0.75	-0.75	-0.75	-0.75	-0.75	-0.75	-0.75	-0.75
2.Epg(Ep _γ)	(-0.13)	(-0.13)	+0.11	+0.11	+0.46	+0.81	+1.16	+1.51
3.S _γ	-3.41	-3.41	-3.40	-3.40	-3.40	-3.40	-3.40	-3.39
4.Eeg	+6.67	+6.52	+6.52	+6.34	+6.34	+6.19	+6.18	+6.18
1+2+3+4	+2.38	+2.23	+2.48	+2.30	+2.65	+2.89	+3.19	+3.55
1+3+4	-	-	+2.37	+2.19	+2.19	+2.04	+2.03	+2.04

CE = 炭素当量 (wt.%)
= C + 1/3 Si

C_γ = γ中の炭素固溶量 (wt.%)
= 2.045 - 0.178 Si

Ce = 共晶点の炭素量 (wt.%)
= 4.27 - 1/3 Si

Cx = 溶湯の炭素量 (wt.%)

S_ℓ = 液体収縮量 (Vol.%)
= 1.5 x (Ti - 1150)/100

Ti = 鋳型内初期温度 (°C)
1.5/100 = 液体収縮率 (%/100°C)
1150 = 凝固終了温度 (°C)

Epg = 初晶黒鉛晶出に伴う膨張量 (Vol.%)

$$= 3.4 \times \frac{C_x - C_e}{100 - C_e} \times 100$$

$$3.4 = \frac{\gamma \text{の比重}(7.66)}{\text{黒鉛の比重}(2.25)}$$

Ep_γ = 初晶γ晶出に伴う収縮量 (Vol.%)

$$= 3.5 \times \frac{C_e - C_x}{C_e - C_\gamma}$$

3.5 = 溶湯の凝固収縮量 (Vol.%)
= 初晶γ晶出に伴う収縮量 (Vol.%)

S_γ = 共晶γ晶出に伴う収縮量 (Vol.%)

$$= \left(1 - \frac{S_\ell}{100}\right) \times \frac{100 - C_x}{100 - C_e} \times \frac{100 - C_e}{100 - C_\gamma} \times 3.5$$

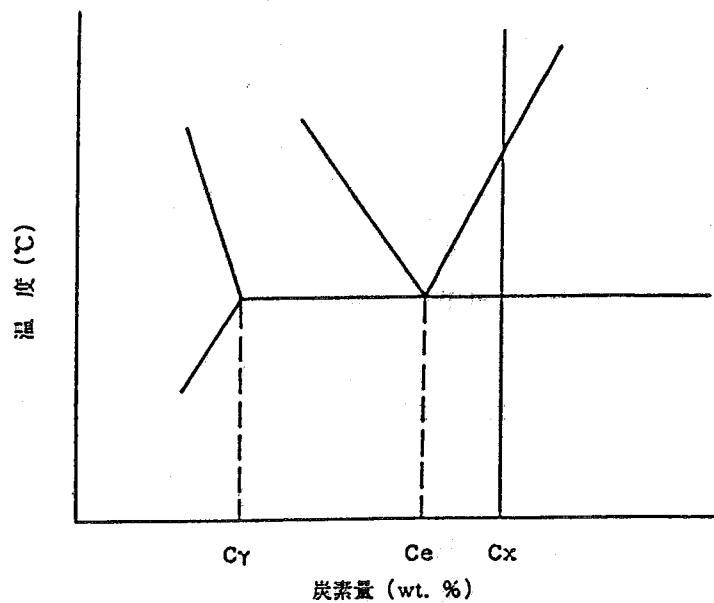
3.5 = 共晶γ晶出に伴う収縮量 (Vol.%)

Eeg = 共晶黒鉛晶出に伴う膨張量 (Vol.%)

$$= \left(1 - \frac{S_\ell}{100}\right) \times \frac{100 - C_x}{100 - C_e} \times \frac{C_e - C_\gamma}{100 - C_\gamma} \times 100 \times 3.4$$

1 + 2 + 3 + 4 = 総合体積変化量 (Vol.%)

1 + 3 + 4 = ドロスとなる初晶黒鉛を除いた
体積変化量 (Vol.%)



付録1-1 Fe-C 平衡状態図の略図

*付録1及び1-1の記号

$$CE = \text{炭素当量 (wt. \%)} = C + 1/3 Si$$

$$C\gamma = \text{オーステナイト炭素固溶量 (wt. \%)} = 2.045 - 0.178Si$$

$$Ce = \text{共晶点の炭素量 (wt. \%)} = 4.27 - 1/3 Si$$

$$Cx = \text{炭素量 (wt. \%)}$$

$$SI = \text{液体収縮 (Vol. \%)} = 1.5 (Ti - 1150) / 100$$

$$Ti = \text{型内初期温度 (°C)}$$

$$1.5/100 = \text{液体収縮率 (\%/°C)}$$

$$1150 = \text{凝固終了温度 (°C)}$$

$$Epg = \text{初晶黒鉛晶出による膨脹 (Vol. \%)}$$

$$= 3.4 [(Cx - Ce) / (100 - Ce)] \cdot 100$$

$$3.4 = \text{オーステナイトの比重 / 黒鉛の比重} = 7.66 / 2.25$$

$$Epy = \text{初晶オーステナイト晶出による収縮 (Vol. \%)}$$

$$= 3.5 [(Ce - C\gamma) / (Ce - C\gamma)]$$

$$3.5 = \text{溶湯の凝固収縮 (Vol. \%)} = \text{初晶オーステナイト晶出による収縮 (Vol. \%)}$$

$$S\gamma = \text{共晶オーステナイト晶出による収縮 (Vol. \%)}$$

$$= 3.5 (1 - SI/100) [(100 - Cx) / (100 - Ce)] [(100 - Ce) / (100 - C\gamma)]$$

$$Eeg = \text{共晶黒鉛晶出による膨脹 (Vol. \%)}$$

$$= 3.4 (1 - SI/100) [(100 - Cx) / (100 - Ce)] [(Ce - C\gamma) / (100 - C\gamma)] \cdot 100$$

鑄鉄と元素

鑄鉄中の微量随伴元素

今回は鑄鉄と元素のまとめの一部として、Foundry M&T/OCT, 1977 よりねずみ鑄鉄中の残留元素の汚染源と汚染量と主な影響について抜粋し訳しましたので御一読下さい。

<T.Y訳>

ねずみ鑄鉄の残留元素

元素	主な汚染源	代表的な汚染量	主な影響
Al	合金鉄、故鉄あるいはS.Sに混入している非鉄材料。	0.01~0.05%	強力な黒鉛化作用。チル化傾向の減少。文献では0.010~0.10%でピンホールを誘発すると注意している。鑄鉄中のTi含有量が増加するにつれ助長される。元湯にはじめから入っている場合と取鍋で添加される場合では影響に差がある。
Sb	故鉄あるいはS.S中の微量随伴元素。故鉄あるいはS.Sについている透明なエナメル; Cuの添加によっても発生する。	0.005%	黒鉛を細かくするが、異常黒鉛が生じると言われている。約0.03~0.06%で全パーライト基地となる。チル化傾向への明らかな影響はない。Sb 0.2%で黒鉛がD型となりフェライトが除去される。
As	故鉄あるいはS.S中の微量随伴元素; Cuの添加によっても発生する。	0.01%	黒鉛組織やチル化に大きな影響を与えない。約0.10%で全パーライト基地となる。
Bi	通常、取鍋添加される。	0.01%	実質的にチル化を促進する。D型黒鉛やメッシュ黒鉛を誘発させる。接種及びCe処理で影響は減少する。共晶セル数を減少させる。
B	故意に添加。鉄鉄、エナメルS.S中に存在する。	0.01~0.05%	D型黒鉛を促進する。セル寸法を大きくする。オーステナイト・デンドライト凝固を促進させる。
Ca	合金鉄中に存在。	0.04%	セル数を増加させる。多すぎるとチル深さを増大させる。Fe-Siの後期接種処理効果を強める。
Cr	故鉄あるいはS.S中の合金化元素。また、取鍋添加としても使用される。	0.03~0.04%	チル化に大きく影響を及ぼす。基地のパーライト化を促進するが、初晶炭化物をも誘発させる。
Cu	故鉄あるいはS.S中の非鉄材料。また、取鍋添加としても使用される。	0.01~0.90%	主としてパーライト基地を出すために使用されている。Cuは他の残留元素の源である。
H	溶解中及び凝固前期にガスとの接触。湿った炉や取鍋の耐火物から。	0.0002~0.0015%	チル化を促進すると言われている。また、ピンホール形成と関連づけられる。
Pb	S.Sや故鉄中に入っている非鉄材料。また、ぼたる石、Cu添加、あるいはターンプレート(Pbをコーティングしたガソリンタンク用鋼板材スクラップ)使用により入る。	0.003%	実際にチルを増加させる。D型黒鉛及びメッシュ黒鉛を誘発させる。接種及びCe処理によって影響は多少やわらげられる。水蒸気と化合して異常黒鉛組織(Widmanstaetten graphite)を誘発させる。
Mo	S.Sあるいは故鉄中の合金元素として。	0.01~1.5%	強力なパーライト形成元素、硬度を増加させる。中間的な炭化物形成の傾向をもつ。
N	溶解中にガスとの接触。特にアーク炉溶解。高N ₂ 含有中子粘結剤から入る。	0.002~0.008%	中間的な炭化物形成の傾向。ガス欠陥の一因となる。乾燥N ₂ は溶湯中に溶け込まない。
P	ある種の鉄鉄、故鉄、S.S。	0.01~0.80%	ステダイトをつくるが、フェライト中に入り基地の強さと硬さを増す。高レベルPは流動性を良くするが基地を脆化させる。
S	コークス、加炭剤、故鉄。	0.02~0.18% (あるいはそれ以上)	Mn-Sの比に従って硫化物として存在する。黒鉛化に必要な最少量は0.04~0.06%である。Sの増加は流動性を多少減ずる。セル数及びひけを増加させる。0.15%以上はガス欠陥を誘発すると言われている。
Te	通常、取鍋添加。また、S.Sあるいは故鉄中に合金元素として存在する。中子の中に使用されて部分的に存在する。	0.005%	チル形成を増加させる。D型黒鉛とメッシュ黒鉛を誘発させる。接種及びCe処理により影響は減少する。
Sn	通常、取鍋添加。	0.10%	約0.06~0.10%はパーライト基地を促進するために使用される。
Ti	鉄鉄中に存在。	0.010~0.60%	0.10%までは黒鉛化、0.25%以上でチル化促進、セル数減少、D型黒鉛を誘発させる。しかしながら接種効果を高めるために0.03~0.04%残留は望ましい。N ₂ を固定する。
Zn	故鉄あるいはS.S中に非鉄材料として入る。	ND(not detected) 認められていない。	黒鉛、寸法、形状、または分布に影響しない。基地のフェライト化促進の傾向があると言われている。

表1-2 主にFCを対象とした鋳込み後から凝固完了までの体積変化

CE	3.5	3.6	3.6	3.7	3.7	3.80	3.80	3.80	3.90	3.90	4.00	4.00	4.00	4.10	4.10	4.10
(C, Si)	(3.00,1.50)	(3.10,1.80)	(3.10,1.80)	(3.20,1.50)	(3.20,1.80)	(3.30,1.50)	(3.20,1.80)	(3.10,2.10)	(3.30,1.80)	(3.40,1.50)	(3.50,1.80)	(3.30,2.10)	(3.40,1.80)	(3.50,1.80)	(3.40,2.10)	(3.30,2.40)
Cy	1.78	1.78	1.72	1.78	1.72	1.78	1.72	1.67	1.72	1.78	1.72	1.67	1.72	1.72	1.67	1.62
Ce	3.77	3.67	3.77	3.77	3.67	3.77	3.67	3.57	3.67	3.77	3.67	3.57	3.67	3.67	3.57	3.47

Ti=1400°C

1. S _l	-3.75	-3.75	-3.75	-3.75	-3.75	-3.75	-3.75	-3.75	-3.75	-3.75	-3.75	-3.75	-3.75	-3.75	-3.75	-3.75
2. E _{yp}	-1.35	-1.18	-1.20	-1.00	-0.84	-0.88	-0.84	-0.87	-0.66	-0.65	-0.47	-0.48	-0.50	-0.31	-0.31	-0.32
3. S _y	-3.33	-3.32	-3.33	-3.32	-3.32	-3.32	-3.32	-3.32	-3.31	-3.29	-3.31	-3.31	-3.31	-3.31	-3.31	-3.31
4. E _{ge}	+6.63	+6.68	+6.54	+6.67	+6.53	+6.67	+6.53	+6.36	+6.52	+6.61	+6.65	+6.51	+6.34	+6.51	+6.32	+6.17
1+2+3+4	-1.80	-1.91	-1.74	-1.40	-1.23	-1.23	-1.39	-1.58	-1.20	-1.08	-0.88	-1.03	-1.22	-0.86	-1.05	-1.21

Ti=1350°C

1. S _l	-3.00	-3.00	-3.00	-3.00	-3.00	-3.00	-3.00	-3.00	-3.00	-3.00	-3.00	-3.00	-3.00	-3.00	-3.00	-3.00
2. E _{yp}	-1.35	-1.18	-1.20	-1.00	-0.84	-0.88	-0.84	-0.87	-0.66	-0.65	-0.47	-0.48	-0.50	-0.31	-0.31	-0.32
3. S _y	-3.35	-3.35	-3.35	-3.35	-3.34	-3.35	-3.34	-3.35	-3.34	-3.34	-3.34	-3.34	-3.34	-3.33	-3.31	-3.34
4. E _{ge}	+6.68	+6.60	+6.73	+6.59	+6.72	+6.72	+6.58	+6.40	+6.57	+6.66	+6.70	+6.56	+6.39	+6.56	+6.37	+6.21
1+2+3+4	-1.02	-1.13	-0.80	-0.63	-0.46	-0.46	-0.60	-0.82	-0.43	-0.30	-0.11	-0.26	-0.45	-0.08	-0.25	-0.45

Ti=1300°C

1. S _l	-2.25	-2.25	-2.25	-2.25	-2.25	-2.25	-2.25	-2.25	-2.25	-2.25	-2.25	-2.25	-2.25	-2.25	-2.25	-2.25
2. E _{yp}	-1.35	-1.18	-1.20	-1.00	-0.84	-0.88	-0.84	-0.87	-0.66	-0.65	-0.47	-0.48	-0.48	-0.31	-0.31	-0.32
3. S _y	-3.38	-3.38	-3.38	-3.37	-3.37	-3.37	-3.37	-3.37	-3.37	-3.34	-3.35	-3.35	-3.37	-3.36	-3.34	-3.36
4. E _{ge}	+6.73	+6.65	+6.78	+6.77	+6.63	+6.77	+6.63	+6.45	+6.62	+6.71	+6.75	+6.61	+6.44	+6.61	+6.42	+6.26
1+2+3+4	-0.24	-0.36	-0.03	+0.15	+0.32	+0.32	+0.17	-0.04	+0.34	+0.47	+0.67	+0.52	+0.34	+0.69	+0.52	+0.33

Ti=1250°C

1. S _l	-1.50	-1.50	-1.50	-1.50	-1.50	-1.50	-1.50	-1.50	-1.50	-1.50	-1.50	-1.50	-1.50	-1.50	-1.50	-1.50
2. E _{yp}	-1.35	-1.18	-1.20	-1.00	-0.84	-0.88	-0.84	-0.87	-0.66	-0.65	-0.47	-0.48	-0.50	-0.31	-0.31	-0.32
3. S _y	-3.40	-3.41	-3.40	-3.40	-3.40	-3.40	-3.40	-3.40	-3.39	-3.36	-3.39	-3.39	-3.39	-3.39	-3.39	-3.39
4. E _{ge}	+6.79	+6.70	+6.83	+6.83	+6.69	+6.82	+6.69	+6.50	+6.67	+6.76	+6.81	+6.66	+6.49	+6.66	+6.47	+6.31
1+2+3+4	+0.54	+0.41	+0.75	+0.93	+1.09	+1.09	+0.94	+0.73	+1.12	+1.25	+1.45	+1.29	+1.10	+1.46	+1.27	+1.10

Ti=1200°C

1. S _l	-0.75	-0.75	-0.75	-0.75	-0.75	-0.75	-0.75	-0.75	-0.75	-0.75	-0.75	-0.75	-0.75	-0.75	-0.75	-0.75
2. E _{yp}	-1.35	-1.18	-1.20	-1.00	-0.84	-0.88	-0.84	-0.87	-0.66	-0.65	-0.47	-0.48	-0.50	-0.31	-0.31	-0.32
3. S _y	-3.43	-3.43	-3.43	-3.42	-3.42	-3.42	-3.42	-3.42	-3.42	-3.39	-3.41	-3.41	-3.42	-3.41	-3.41	-3.42
4. E _{ge}	+6.84	+6.75	+6.88	+6.74	+6.88	+6.88	+6.73	+6.55	+6.72	+6.86	+6.86	+6.72	+6.53	+6.71	+6.52	+6.36
1+2+3+4	+1.31	+1.20	+1.52	+1.71	+1.88	+1.88	+1.72	+1.51	+1.89	+2.02	+2.23	+2.08	+1.86	+2.05	+2.05	+1.87