

溶解・鋳造凝固の基礎

ものづくり基礎講座（第46回技術セミナー）

『金属の魅力をみなおそう 第二弾 プロセス技術編 第六回』

東北大学金属材料研究所

正橋直哉

masahasi@imr.tohoku.ac.jp

2016. March. 24 14:05~14:35

クリエイション・コア東大阪 南館3階 技術交流室A



身の回りの鋳造品

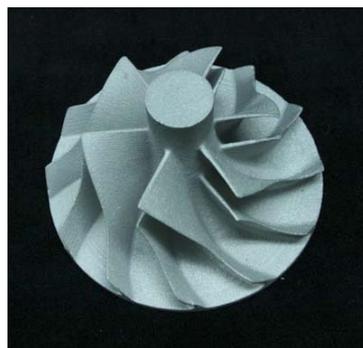
『金属の魅力をみなおそう 第6回 溶解・鋳造凝固』
2016 March 24 14:05~14:35 東北大学金属材料研究所 正橋直哉



バルブ



プロペラ



インペラー



美術品



ホイール



シリンダーブロック



マンホール



テーブルとイス



鋳造貨幣



ガウディの門扉



鉄モニュメント



南部鉄器



街路灯



風鈴

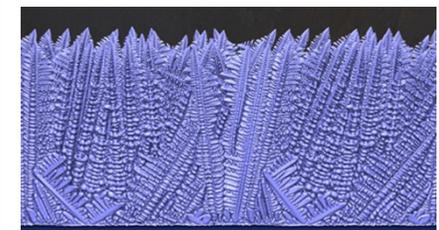
溶解は、気体・液体・固体の物質が他の液体や固体の物質（溶媒）に混合して均一な相を形成する現象を称し、物質が液体に溶けて溶液を生成することを示す。



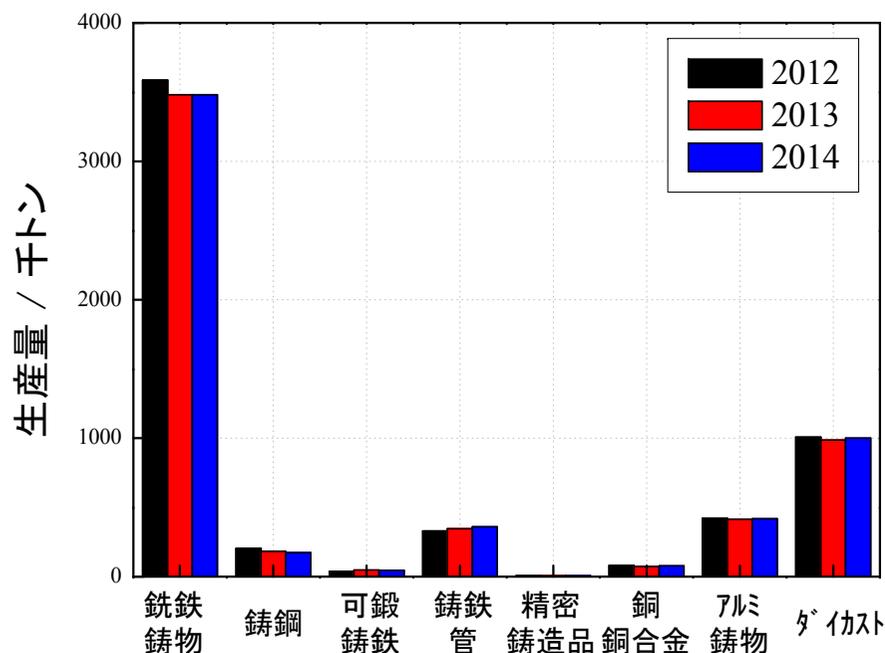
鑄造は、材料（鉄・アルミ・銅等の金属）を融点より高温で熱して液体にした後、型に流し込み、冷やして目的の形状に固める加工方法。鑄造に使用する型を鑄型と称し、鑄造でできた製品を鑄物と称する。英語で casting は、鑄造と鑄物の双方をさす。



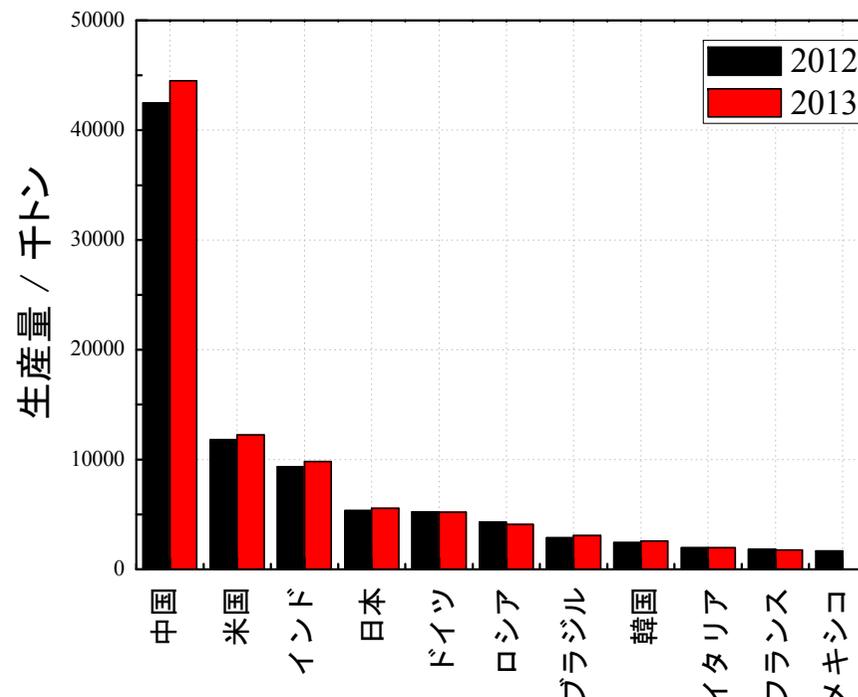
凝固は、物質が液体から固体に変る現象で固化とも称する。一定の圧力のもとで液体を冷却すると、凝固が進行している間は一定の温度が保たれ、この温度は物質固有で、凝固点または氷点と称し、融点と一致する。



国内の鑄造産業の動向



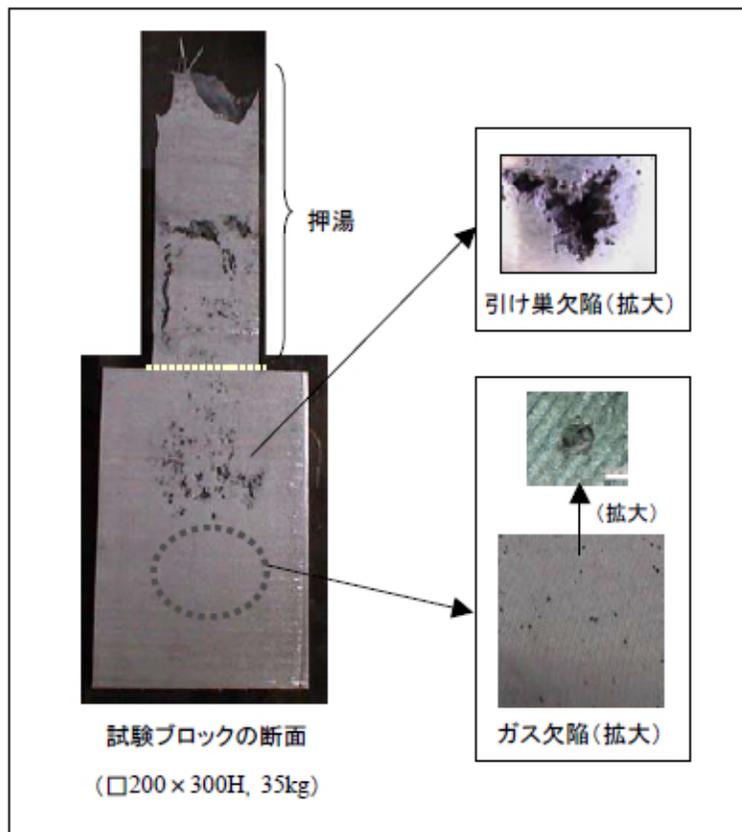
世界の鑄造産業の動向



- ① 鉄鉄鑄物は前年比横ばい
- ② 鑄鋼は同5.5%減と3年連続減少
- ③ 精密鑄造品は同4.7%増で3年連続増加
- ④ 銅・銅合金鑄物は同5.5%増で3年ぶり増加
- ⑤ アルミ鑄物は同1.0%増で2年ぶりに増加

- ① 2013年の世界鑄物生産量は、1億300万ton、対前年比3.4%増と4年連続増加
- ② 中国は4.7%増で4年連続5%以下の伸び
- ③ 米国はリーマンショック後3年連続増加
- ④ 日本は同3.6%増

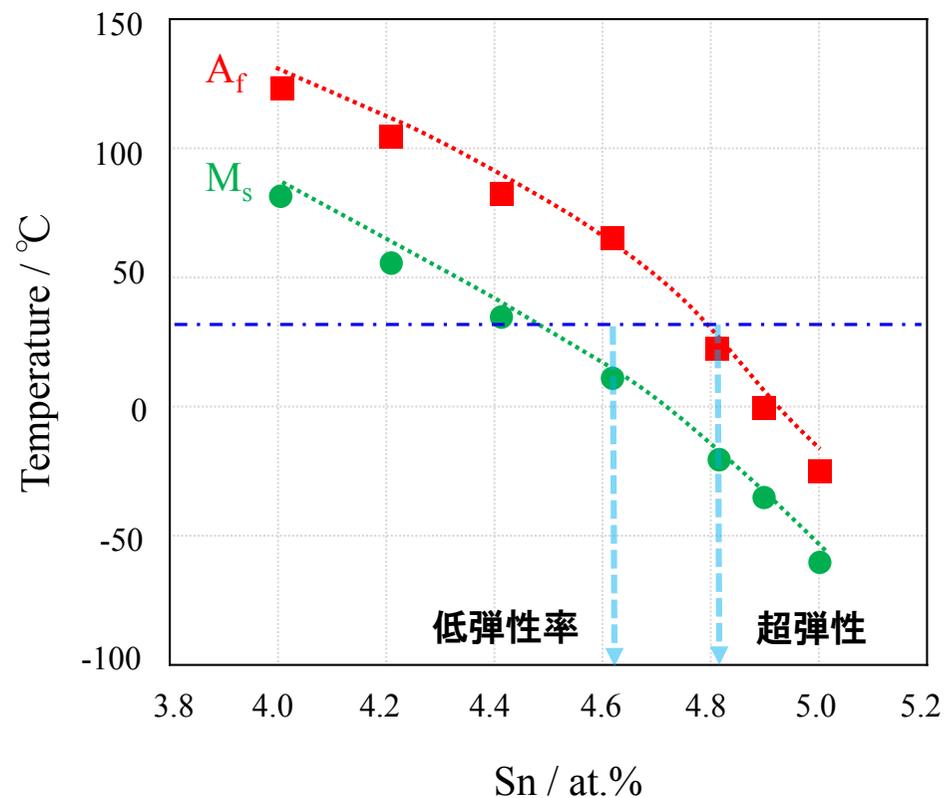
欠陥の問題



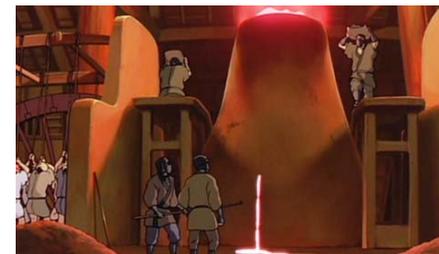
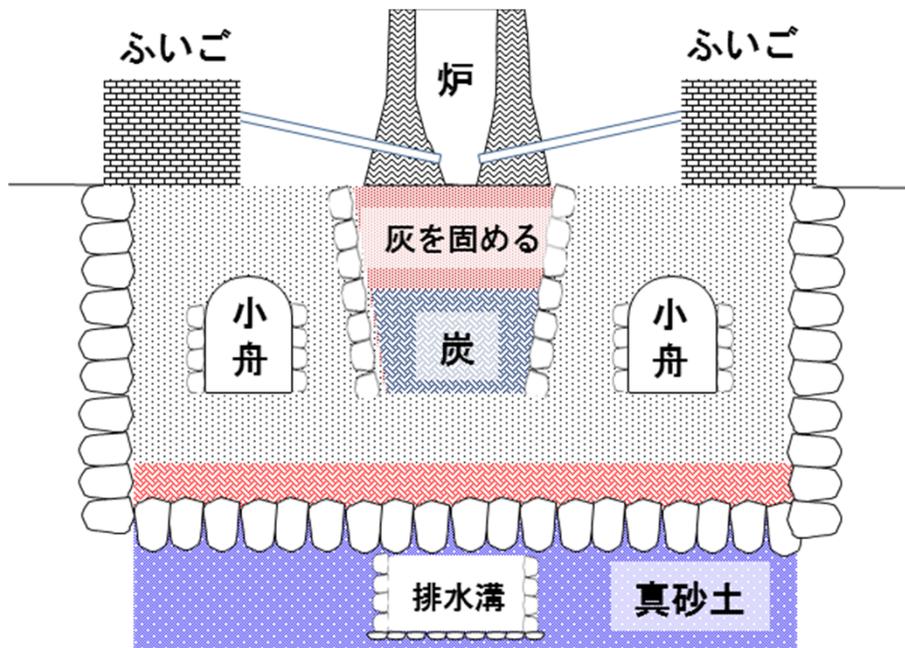
<http://www.tac-casting.com/contents/casting/poreless/>

溶融Alの凝固冷却時に体積収縮により押湯に引き巣が、その下方からブロック中央にかけて水素発生に伴う欠陥が観察できる

組成の問題



TiNb合金にSnを添加することにより変態点は低下し、低弾性は4.6% Sn、超弾性は4.8% Sn近傍が期待できる



ケラ（和鋼博物館）

炉温は1200~1300℃だが不均一のため、炭素の多い銑鉄と少ない鋼からなるケラとなる。ケラは砕いて銑鉄と鋼に分ける。地表が乾燥すると地下水が地表が上昇して炉温を低下させるため、炉の下に排水溝を設け、小舟と称する予備燃焼室を設けた。玉鋼は炭素量1~1.5%左下鉄は約0.7%、包丁鉄は0.1~0.3%の炭素量で、いずれも展延性に優れる。



- ①玉鋼：1級は炭素量1.0~1.5%、2級は0.5~1.2%
- ②銑（ずく）：炭素量2.1%以上
- ③歩鋸（ぶけら）：鋼・半還元鉄・ノロ（鉄滓）が混在
- ④大割下：炭素0.2~1.0%の鋼と半還元鉄やノロが混在

金属製品ができるまで



鉄鉱石



鉄鉱石をコークスで溶かす(高炉)



炭素を取り除く(転炉)



溶けた鉄を連続鑄造する



連続鑄造材を圧延する

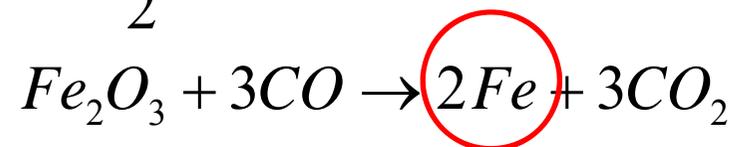
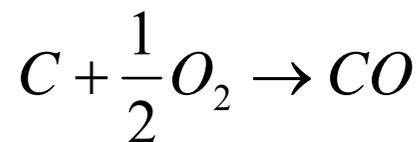


圧延を加工する

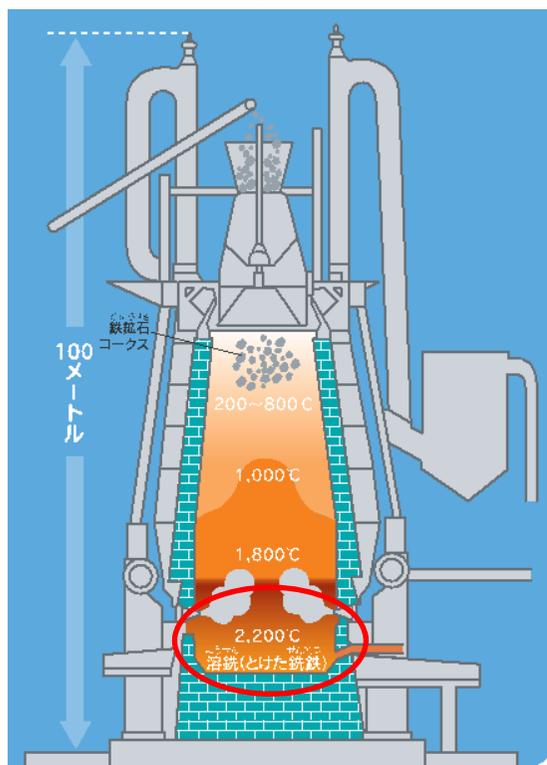


製鉄：鉄鉱石を還元する

石灰石 (CaCO₃) 鉄鉱石 (Fe₂O₃) コークス



鉄鉄 1ト作るには
鉄鉱石 1.6ト
コークス 0.4ト
石灰石 0.1ト
が必要



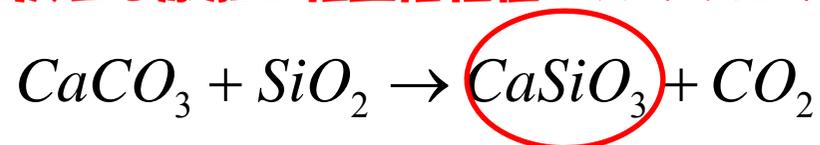
鉄鉱石が還元されてCO₂が発生すると、2200度まで昇温する

鉄鉄 = 炭素が多く脆くて加工ができない

フ fragil の鉄鋼石はシリカやアルミナが少なく、オーストラリア鉄鉱石は多い。



石灰石を添加し軽量低粘性のスラグにする。



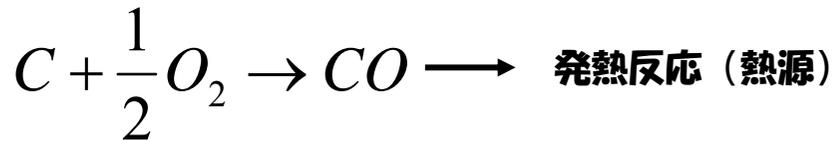
高炉セメント・道路路盤材、舗装材・
建築用断熱材・イネ育成用ケイ酸肥料

製鋼：加工できる鉄にする

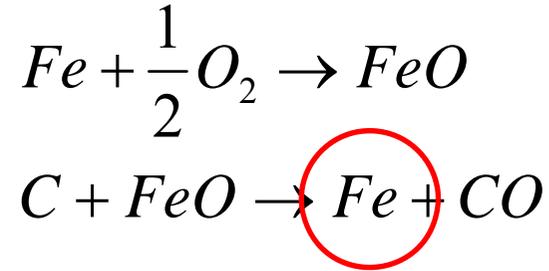
酸素を吹き込む
鉄鉄を入れる



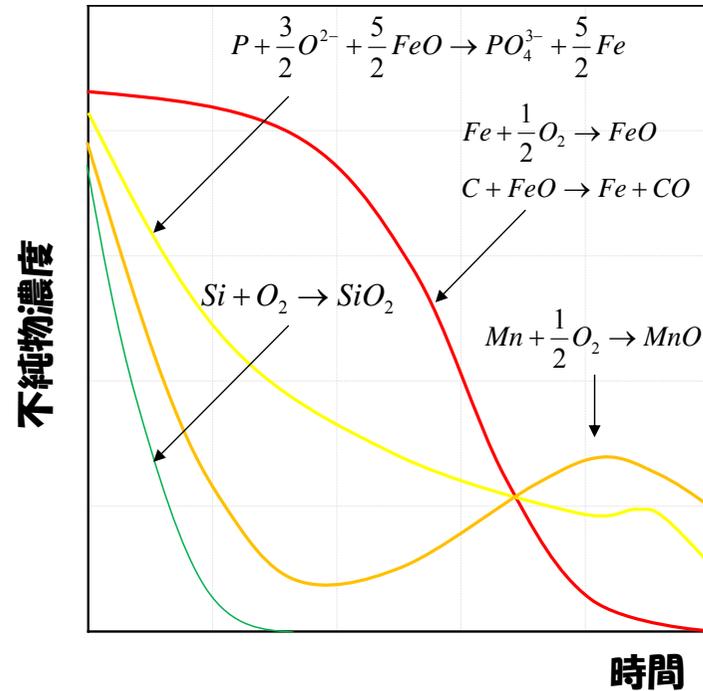
300トンの炉の中に鉄鉄とスクラップを入れて、不要な炭素を酸化除去



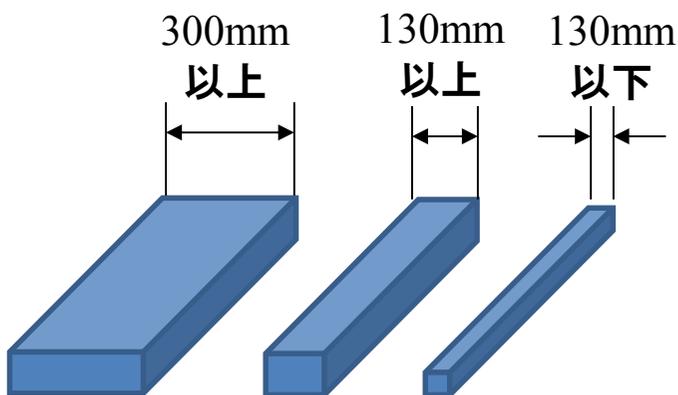
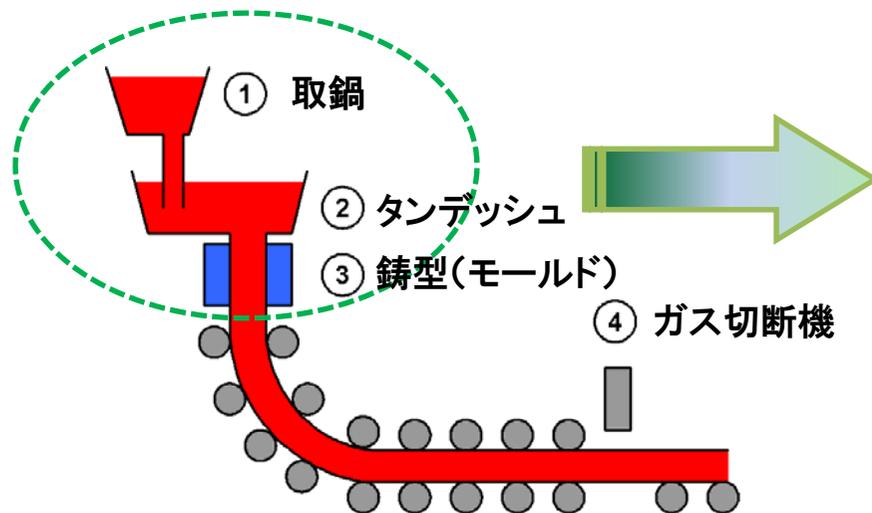
転炉の中の温度をCの燃焼熱で高める



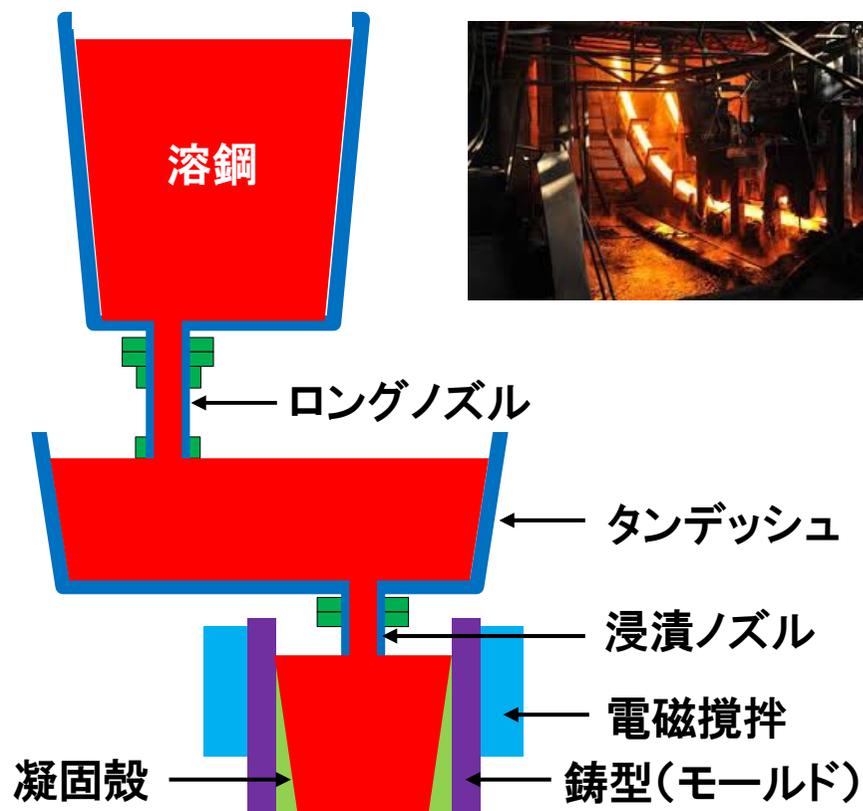
二次精錬により鋼（炭素が1.7%未満）とし、加工性を付与する



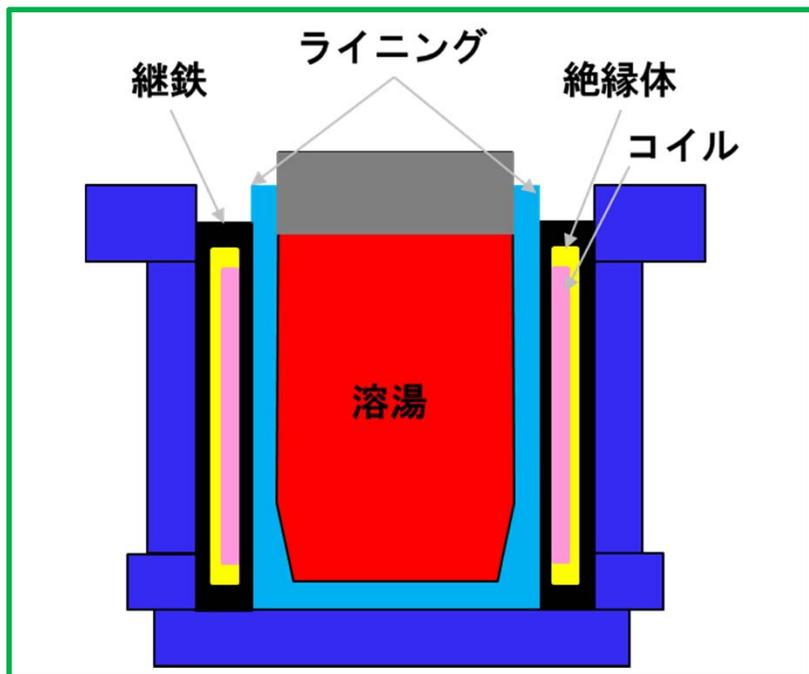
底の開いた長い鑄型で溶融金属を凝固し、底部から連続的に引出して切断する鑄造法



スラブ ブルーム ビレット
分塊鑄造の形状

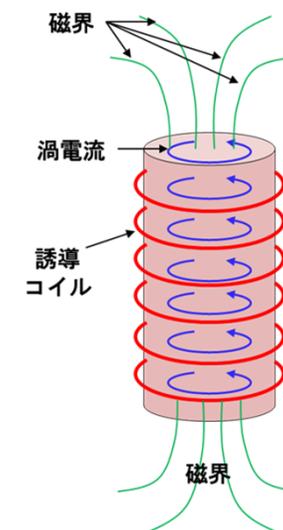


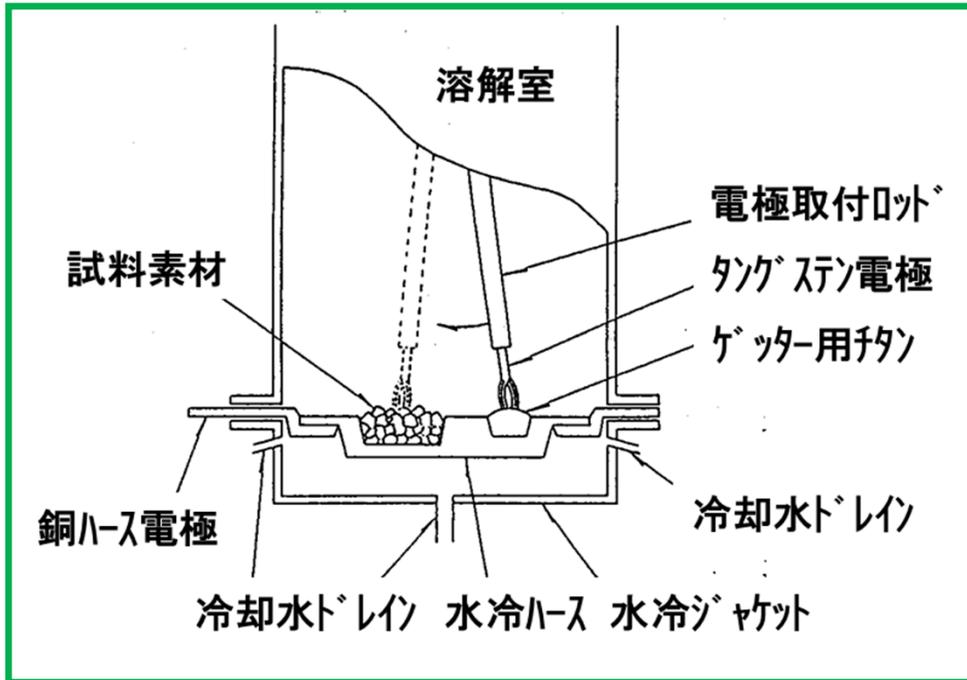
熱いうちに熱間圧延工程に送られるが、厳しい用途に使用される鋼は、表面・内部欠陥の検査のため、冷却後に圧延工程に送られる



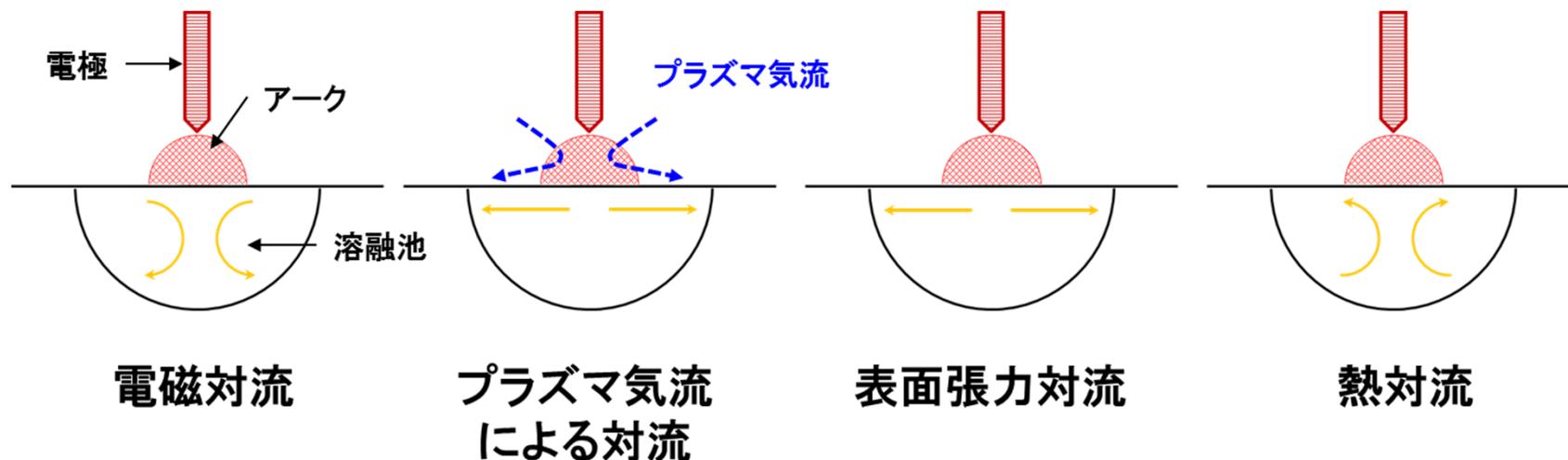
- ① 小型地金でも溶解が可能で、スターティングブロックが不要。
- ② 急速溶解が可能で、目的の高温や高歩留りでの操業が可能。
- ③ 高周波発生サイリスタにより、電源効率が高く、設備費が安価。
- ④ 高周波数ほど、溶解速度は速くなるが、溶湯の攪拌力は弱くなる。

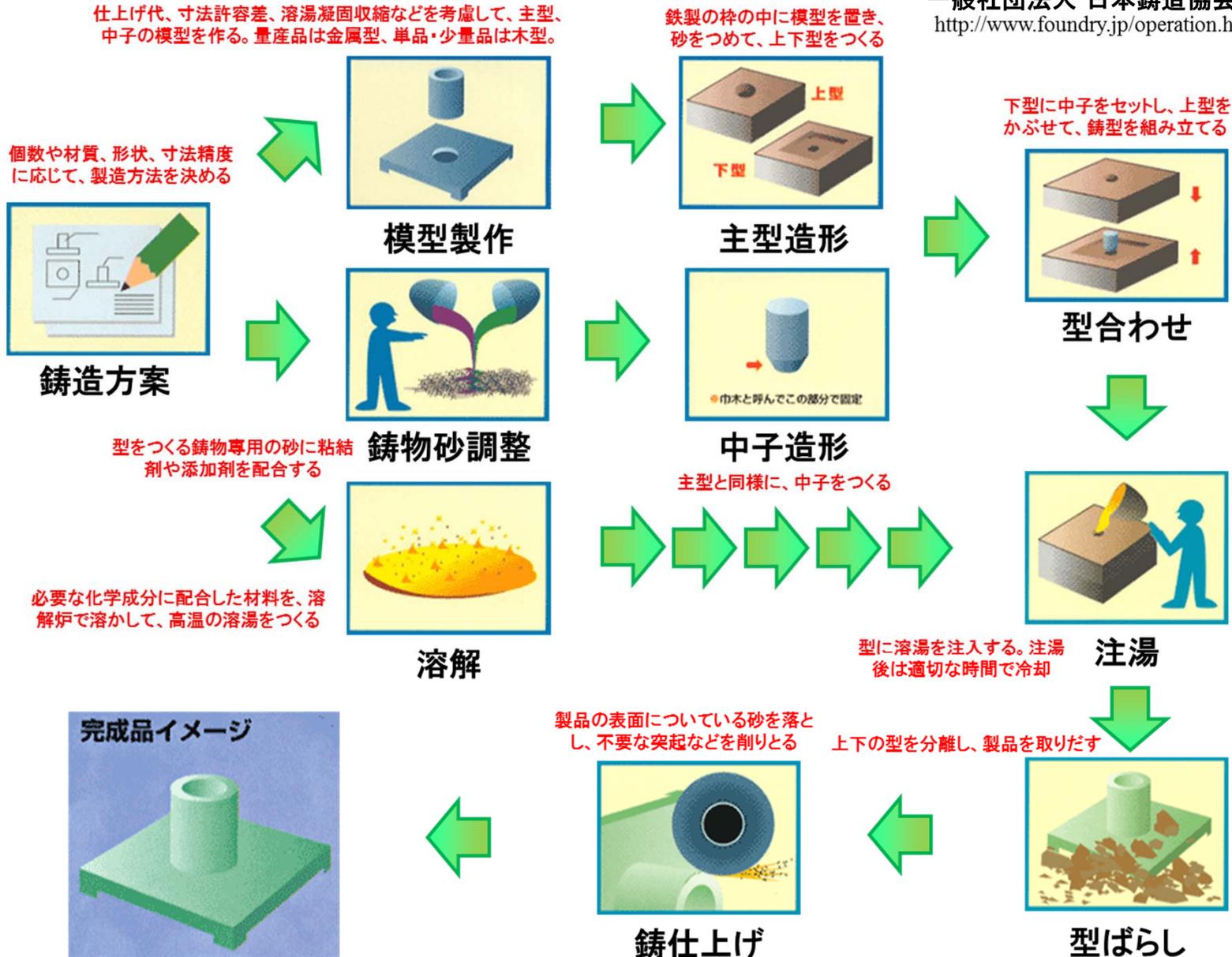
金属に交流電流を流すと周囲に磁力線が発生し、金属中に渦電流が流れジュール熱が発生するため、自己発熱する（誘導加熱）。発生エネルギーは金属の半径に比例して高さに反比例し、周波数の2乗に比例する。表面ほど電流量が高い。

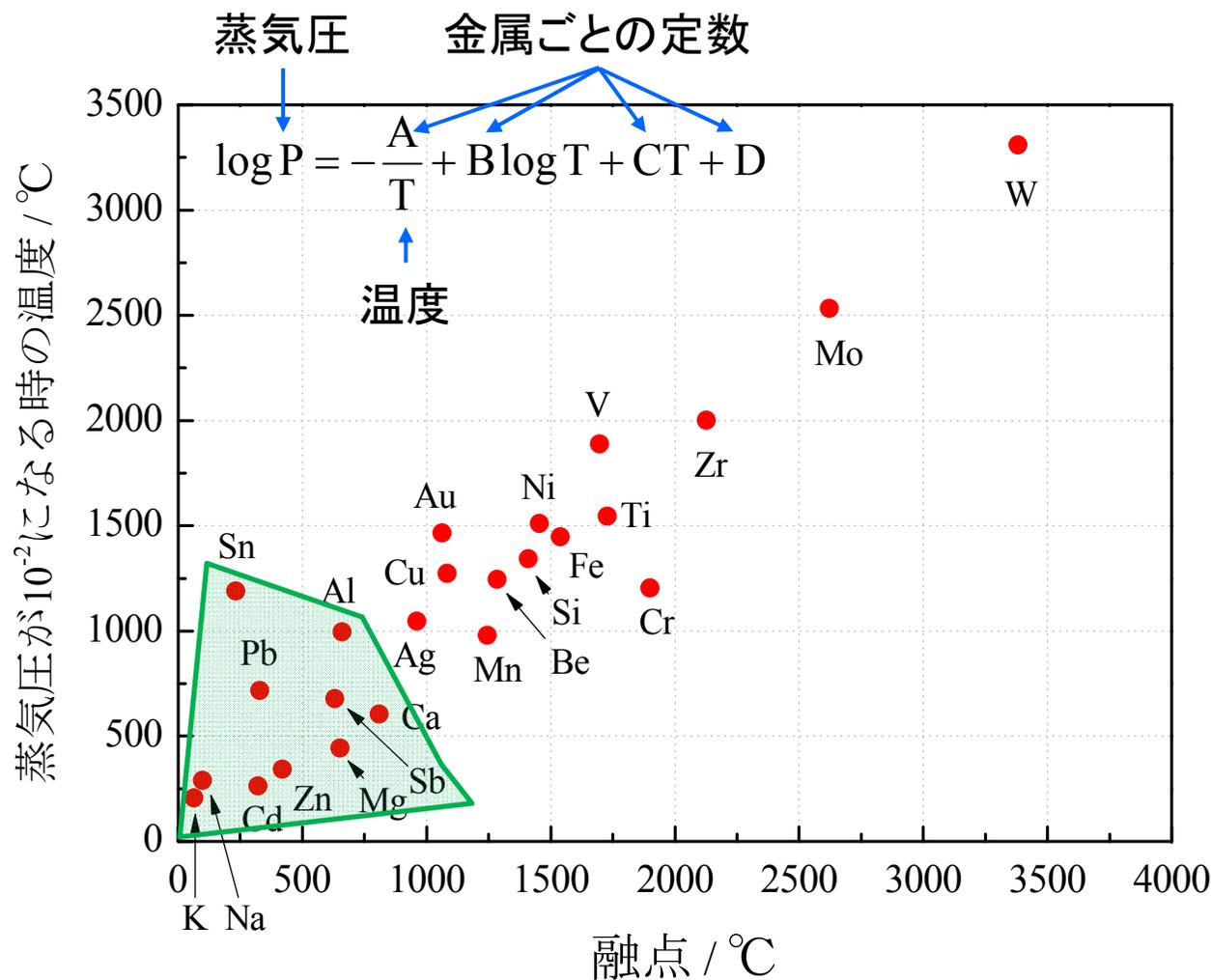




- ① 真空溶解でゲッターを使用するため不純物量は少ない
- ② 所望の成分の合金を溶製可能
- ③ アーク攪拌による均質性は高いが、水冷銅ハースを用いるため特徴的な凝固組織
- ④ 大型インゴットの溶製には不向きで、成分探索用に使用する
- ⑤ アーク熱源を使用するため、高融点合金の溶製が可能







- ① 融点が高い金属ほど蒸発しにくい：W, Mo, Zr, V, Ti
- ② 溶解雰囲気を減圧すると低融点元素ほど蒸発しやすい：Sn, Pb, Zn, Mg, Sb, Al

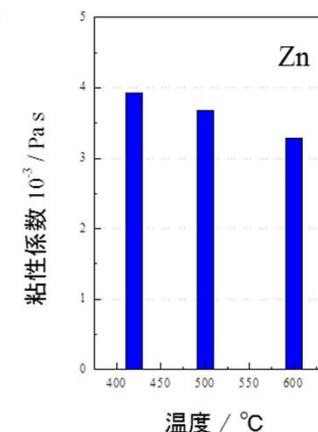
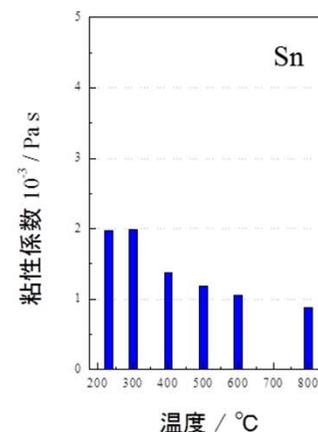
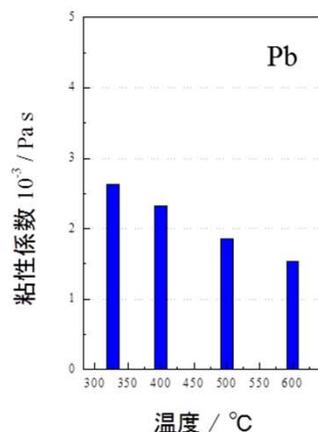
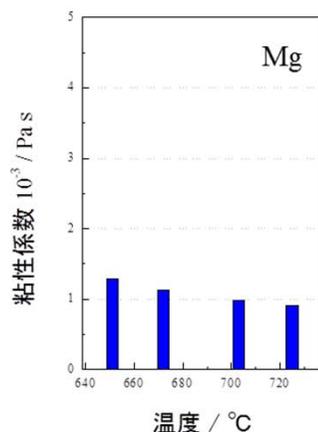
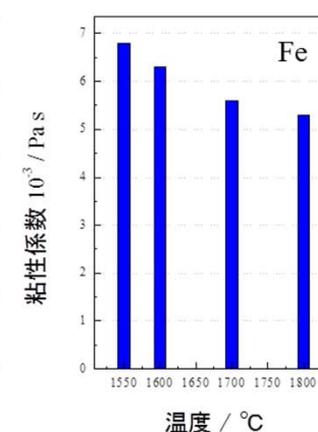
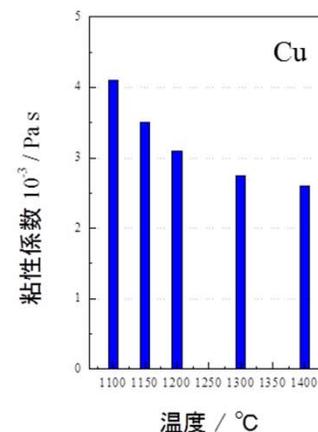
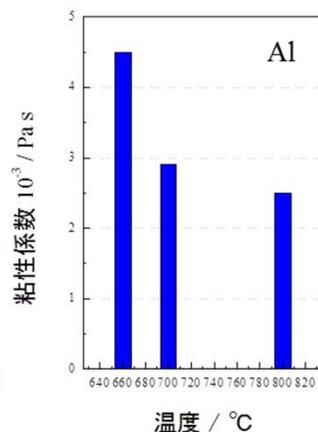
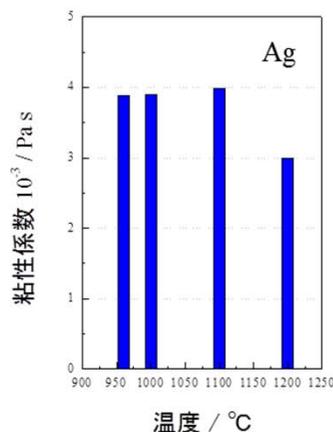
溶融液体が流動する時、界面の面積Aに働く力Fは流体速度の勾配dv/dxと次式が成立

$$F = \eta \cdot A \cdot \frac{dv}{dx}$$

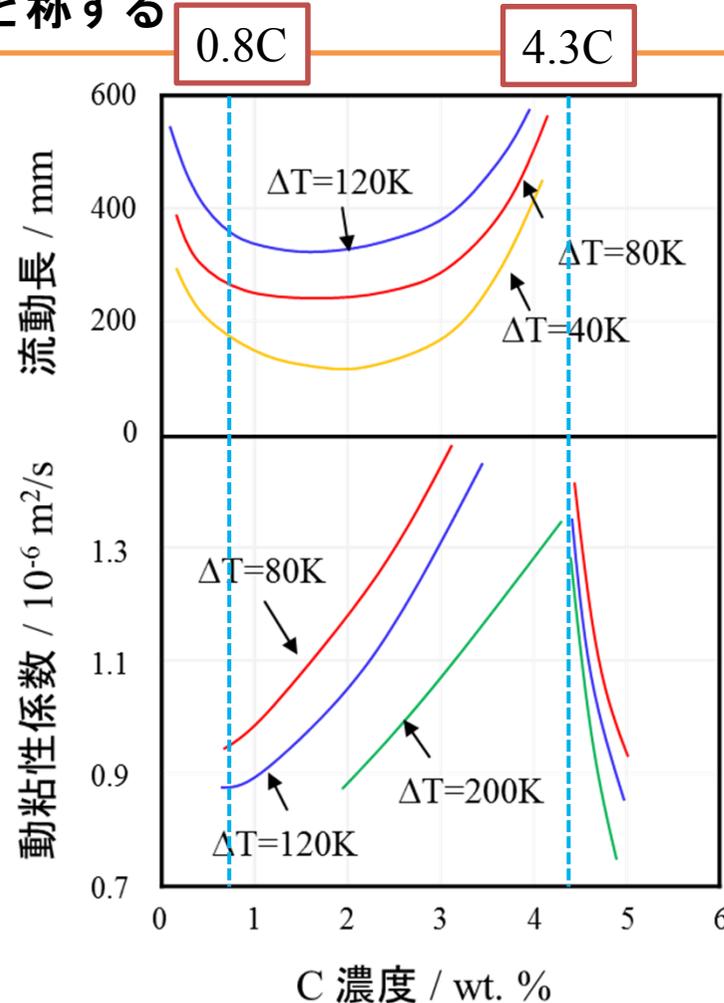
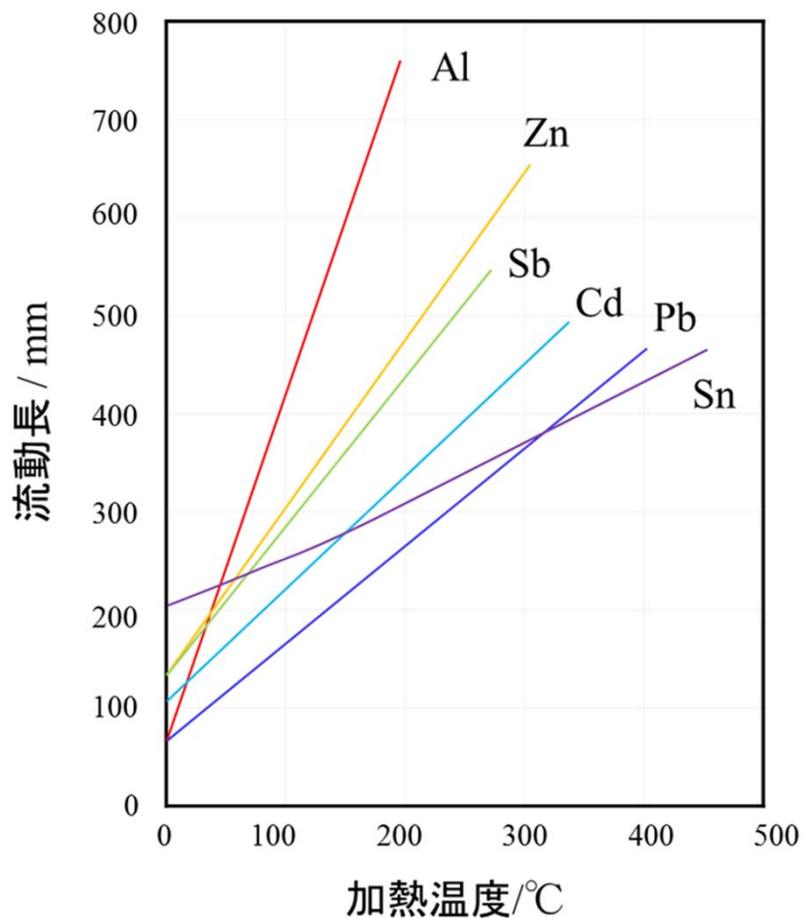
η を粘性係数(単位はPa·s)で、流体の種類や温度によって異なる

η は液体運動
への摩擦に相当

- ・ η は温度上昇により低下する
- ・ η の高い金属ほど流体移動が難しく、低い金属ほど易しい
- ・ η は金属の融点と相関がある



鑄造では、溶融金属が鑄型の隅々まで十分に行き渡る必要がある。溶融金属が自由に流動して鑄型内に充填する能力を流動長と称する



鑄込み温度が高いほど流動性は向上

固相量増加 → 粘性増加、流動性低下

高品質Al合金鋳造品は、水素が多いと凝固過程において原子状水素が分子状水素となりピンホールを発生するため、水素量を一定値以下にしなければならない。水素は溶湯が水分との反応で侵入したり、溶解材料に付着する水分、油分により発生する。

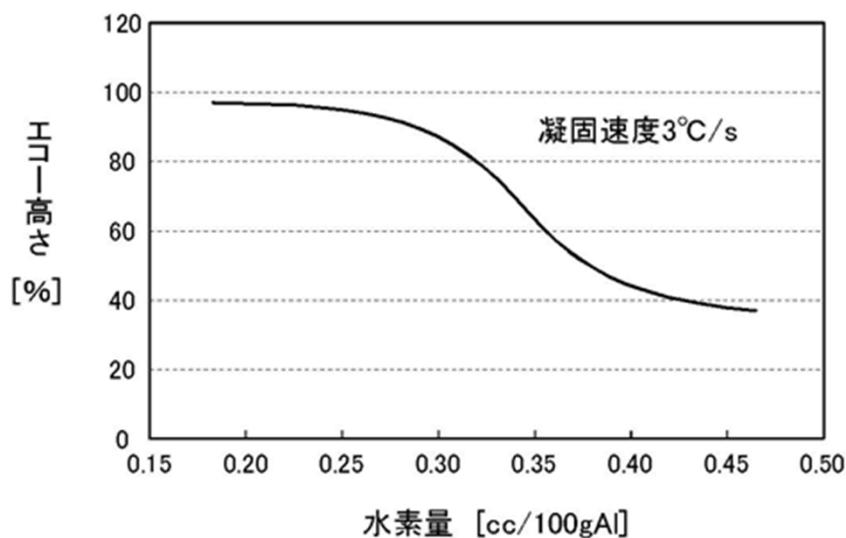
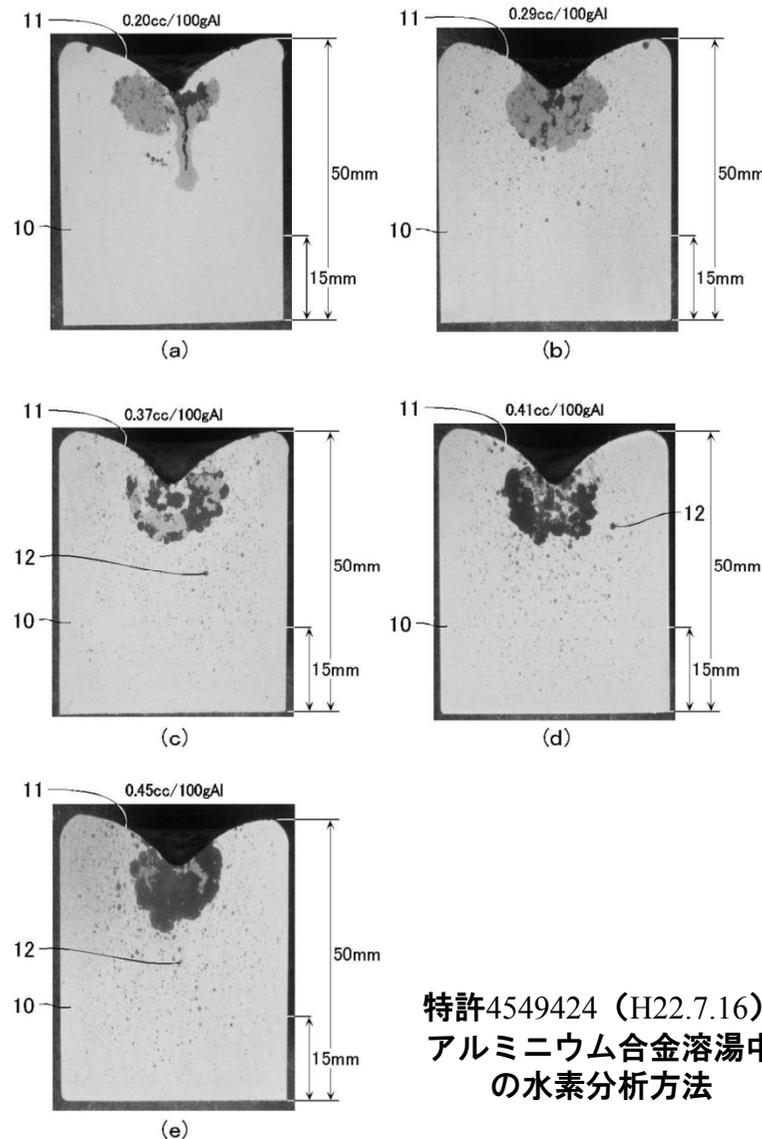


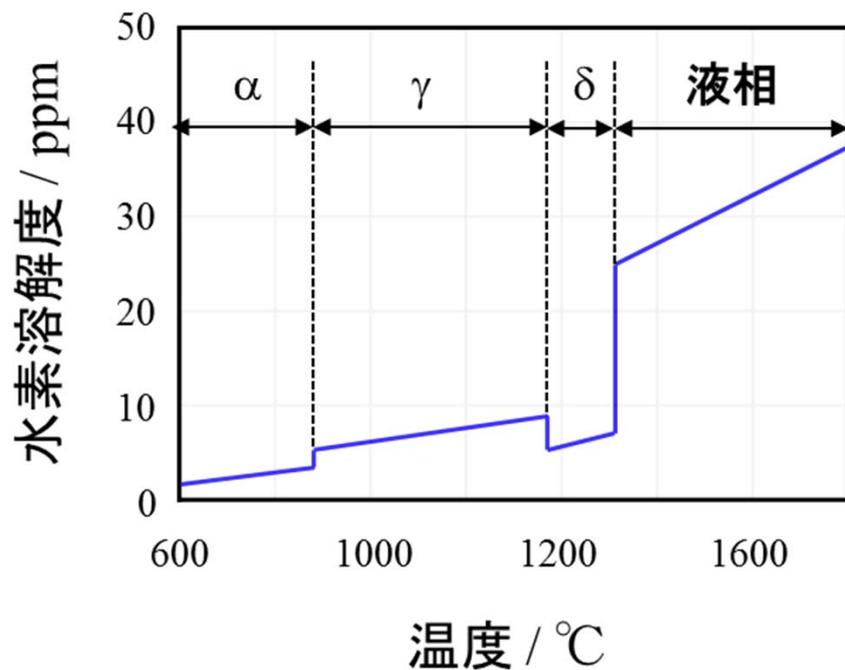
図 Al合金鋳造材中の水素量と超音波エコー高さの相関



特許4549424 (H22.7.16)
アルミニウム合金溶湯中の水素分析方法

水素

純鉄への水素の固溶度は凝固時に大きく減少する。またどの相でも温度の増加と共に固溶度は増加するが、 γ 相の方が α 相や δ 相より固溶度は高い。



窒素

純鉄への窒素の固溶度は水素より高い。固溶度は水素同様、凝固時に減少し、 γ 相は δ 相より固溶度が高く、 γ 相が初晶析出する場合はポロシテイとならない。

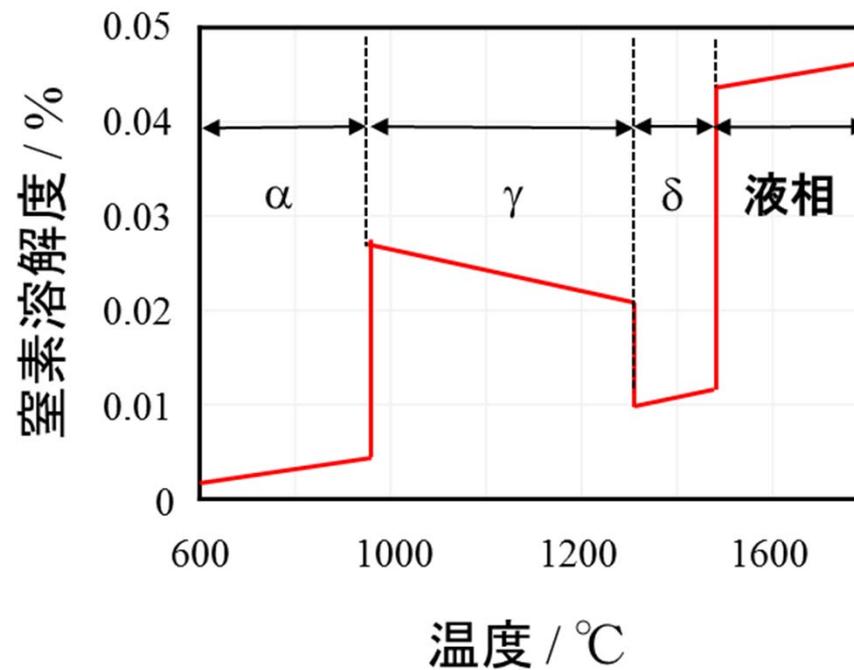
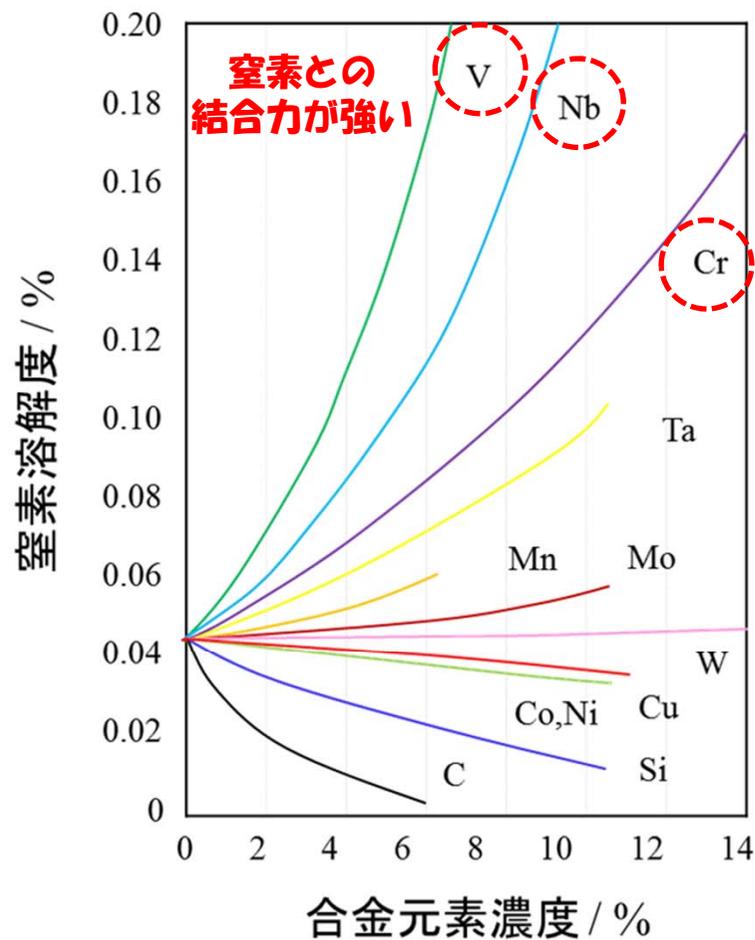
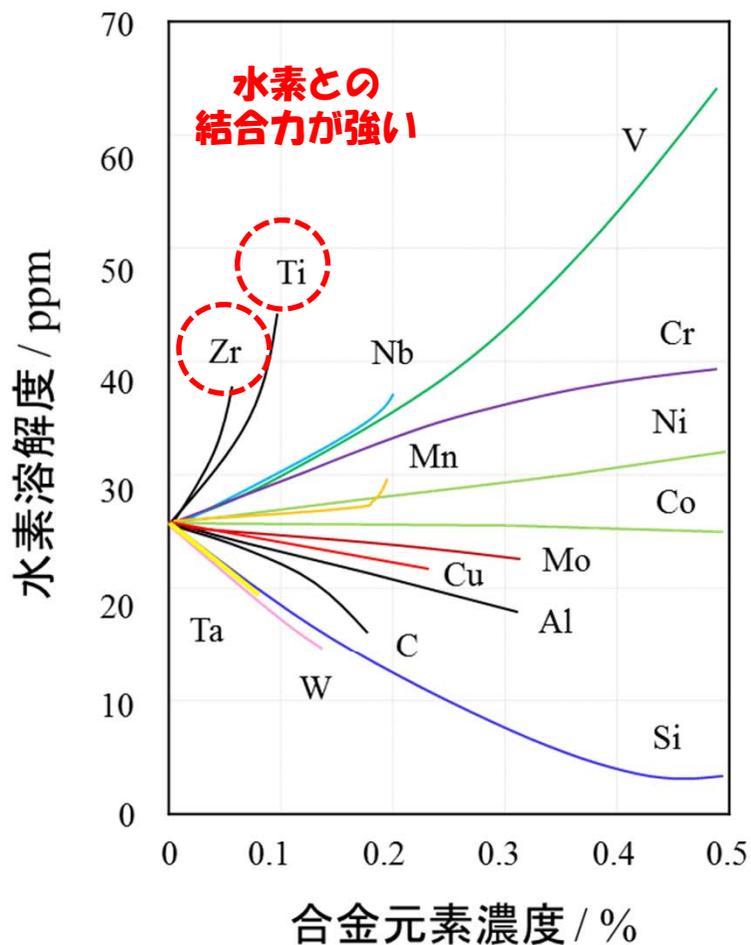


図 純鉄中の水素（左）と窒素（右）の溶解度の温度依存性

金属中の水素や窒素はそれらの分圧の平方根に比例して増加し（シーベルトの法則）、凝固の際は溶解度が減少するため、多量のガスを発生しポロシティとなる。



溶融鉄合金中の水素（左）と窒素（右）の溶解度

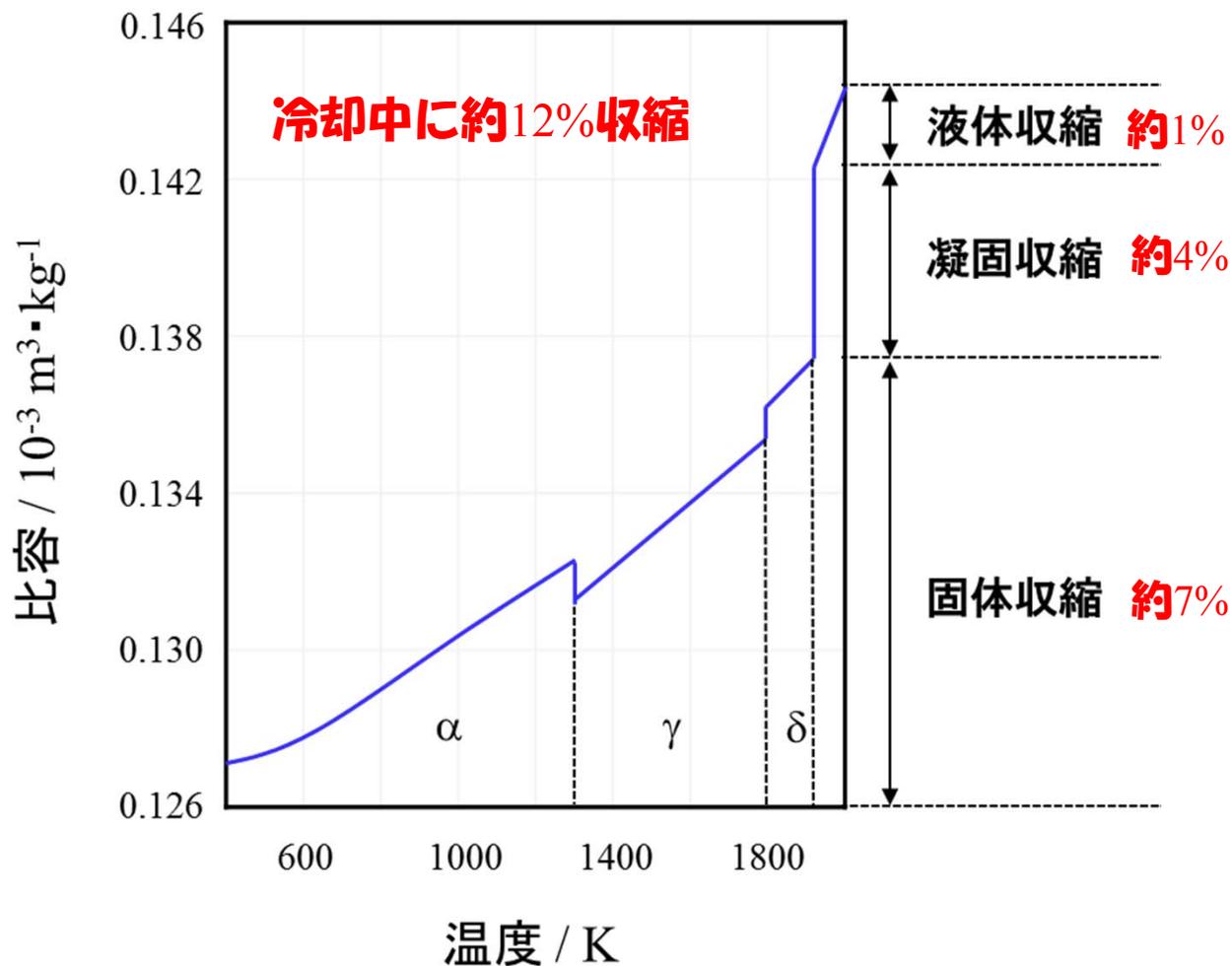


図 1873Kから室温までの冷却中の鉄の収縮

砂型（熱拡散が小）

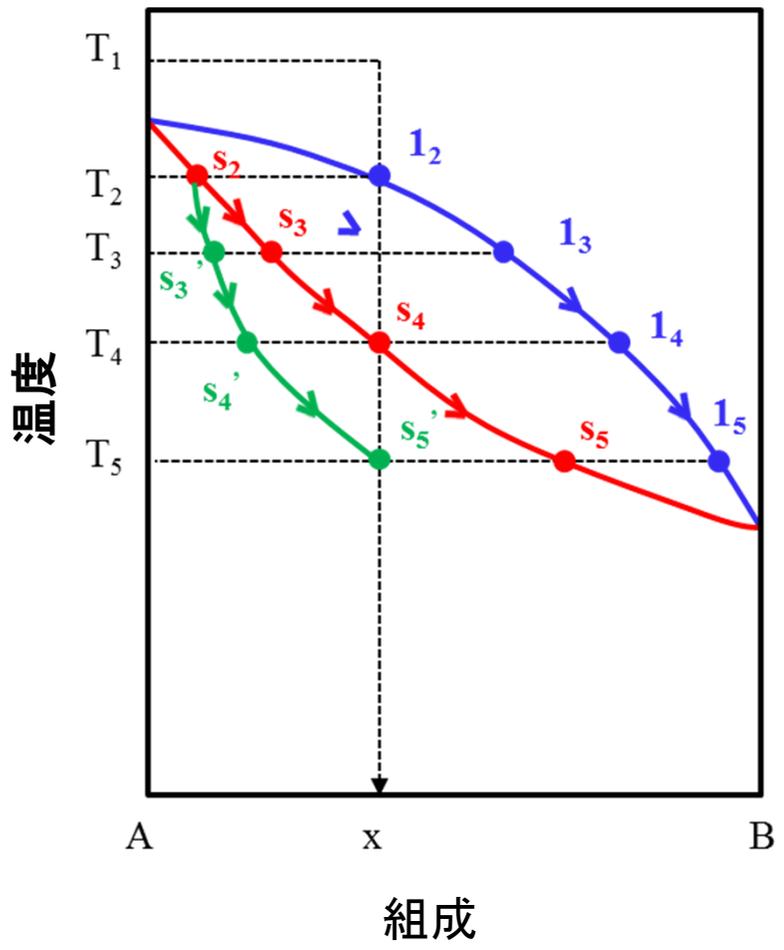
→液体収縮は小さく、凝固収縮と固体収縮が大きく、前者は「引け巣」、後者は「縮み代」となる

*砂型は凝固時に鑄型壁が外側に移動し鑄型空隙部が大きくなる

金型（熱拡散が大）

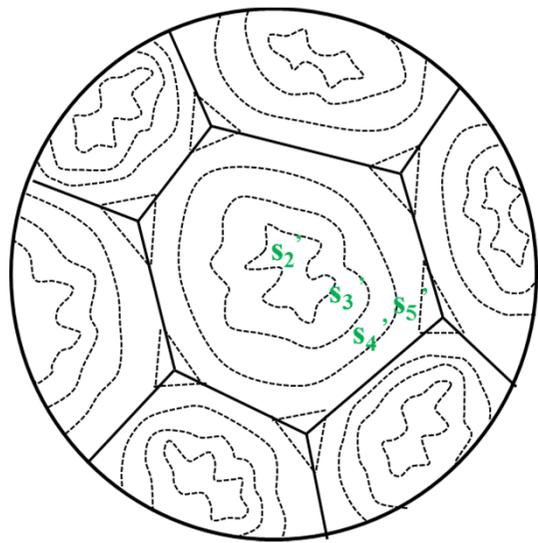
→鑄型接触部より内部が高温で、両者間の温度差に起因した液体収縮が大きい

組成 x の合金を温度 T_1 からゆっくり冷却すると、液相線(青線)との交点 T_2 で凝固が始まり、液相と固相で原子の分配により、液相組成は $l_2 \rightarrow l_3 \rightarrow l_4$ 、固相組成は $s_2 \rightarrow s_3 \rightarrow s_4$ に変化



上は拡散が完全に行われる完全平衡の場合だが、凝固は固相拡散が殆どないので、固相の平均組成は、 $s_2' \rightarrow s_3' \rightarrow s_4'$ となり、 T_4 では液相が残り T_5 で凝固完了。

以上から、凝固組織は均質ではなく、結晶中心と周辺で組成が異なる。この組成不均一性を偏析と称し、凝固区間の温度範囲が大きい合金ほど顕著



溶質原子は中心部で最も低い s_2 で、外側に行くほど増加し、最終凝固部の s_5 が最も高くなる。

鑄物の凝固は一般に鑄型に接した壁面での核生成と、その直角方向への粒成長で進む

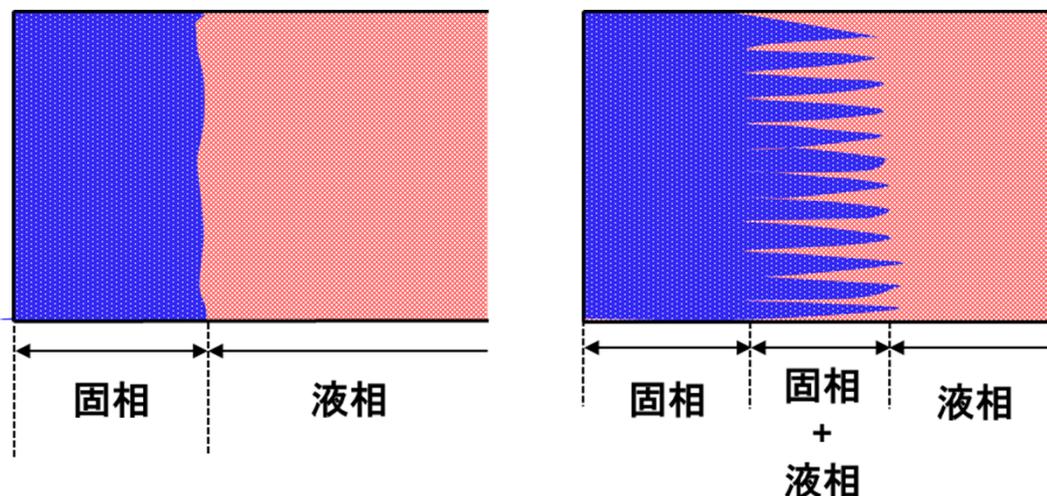


図 純金属（左）と合金（右）の凝固

純金属では固液が明瞭に分離するが、合金はある温度範囲で凝固が進むため固液共存領域が存在する。

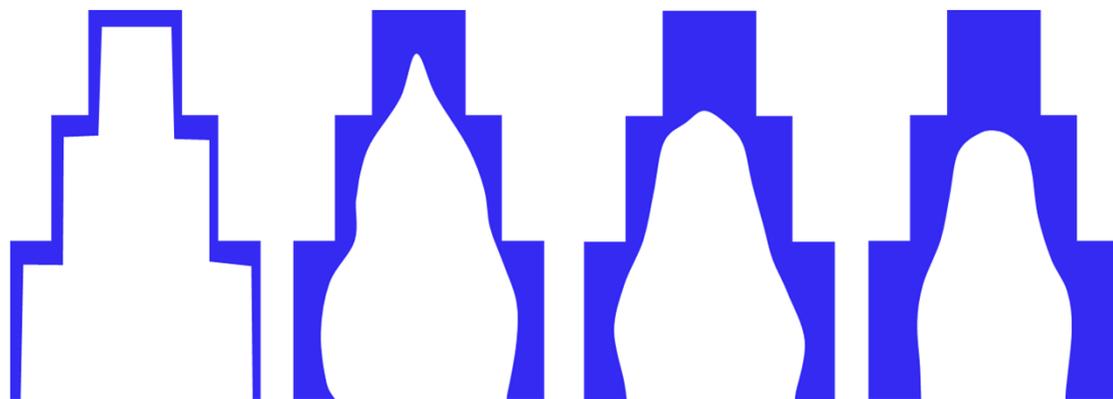
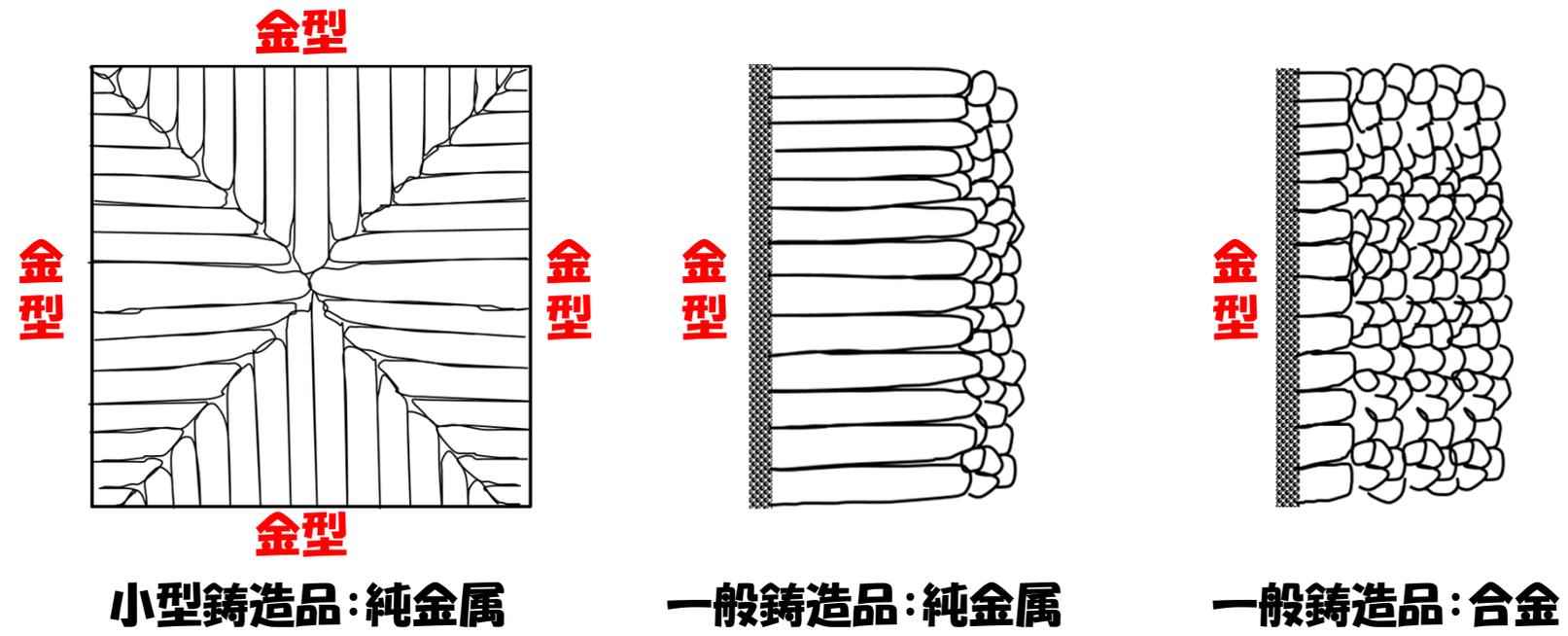


図 鋼の各時間における凝固層の厚さ

凝固では隅部の影響が大きいため凝固層の厚さDは一様ではない。一端から冷却されるとき、一般に時間tとDの関係は次式が提案されている

$$D = \alpha\sqrt{t} \quad D = \frac{1}{2} \cdot \frac{K}{\sqrt{t}}$$

溶融金属は鑄型の周壁からの冷却作用によって、壁と直角方向に結晶が成長する



金型による小型鑄造品は、左図の様な柱状晶になるが、純金属は一般に中図の様に、金型接触部は微細な粒状晶で、金型から離れるにつれて柱状晶、そして先端部では粗い粒状晶となる。合金の場合は、柱状晶の幅方向の長さは合金の種類によるものの、結晶粒の核生成は濃度分布に依存し、温度勾配が駆動力の柱状晶の発達を抑えられて、微細な粒状晶が発達し、右図のような組織となる



東北大学

『金属の魅力をみなおそう 第6回 溶解・鋳造凝固』
2016 March 24 14:05~14:35 東北大学金属材料研究所 正橋直哉

御清聴有難うございました



東北大学 金属材料研究所
附属研究施設関西センター
KANSAI CENTER for Industrial Materials Research,
Institute for Materials Research, Tohoku Univ.