

技術論文

CPCプロセスの凝固伝熱解析

Thermal analysis on solidification in Continuous Pouring process for Cladding



CPC技術開発室

大野 京一郎
Kyo_ichiro Oono

CPC技術開発室長

尾崎 健一
Ken_ichi Ozaki

鋼管計測株式会社
計測・診断事業部次長

吉原 直武
Naotake Yoshihara

鋼管計測株式会社
計測・診断事業部

田中 紀子
Noriko Tanaka

要旨

本報で取り扱う、CPCプロセス（Continuous Pouring process for Cladding）は、クラッド厚を問わずに一層肉盛が可能なメリットを有し、すでに各種ローラ類の実績からその効果は明らかである。

しかし、一方では、芯材予熱温度や注湯温度などの操業要因が凝固界面に与える影響が大きく、その基礎的な凝固界面制御方法についてはいまだ確立されていない。

そこで、汎用有限要素プログラムANSYSを用いて、凝固界面の形状に及ぼす操業要因の影響を解析したところ、固相線深さが操業要因の影響を受けやすく、また、鑄造欠陥の発生は固相線深さと対応していた。

Synopsis

CPC Process (Continuous Pouring Process for Cladding) mentioned in this paper has the advantage of being able to make one layer cladding independent of cladding thickness.

This process has proven its effectiveness in the track record of manufacturing various actual clad rollers, yet the fundamental method of controlling solidification front is not established so far because operating factors such as preheating temperature of mother materials and pouring temperature affect a solidification surface significantly.

So, the influence of operating factors on the shape of solidification front was analyzed with a general-purpose finite-element program, ANSYS. The result showed that the depth of solidus line was sensitive to operating factors, and the occurrence of casting defect corresponded to the depth of solidus line.

1 緒言

CPCプロセスとはContinuous Pouring process for Claddingの略称である。概要はFig.1に示す様に、中実または中空の芯材をモールド中心にセットし、黒鉛モールドと芯材との間にクラッドしようとする溶融金属を鑄込み、高周波誘導加熱により予熱された芯材に融接させながら断続的に、下方に引き抜き複合材を成形するプロセスである。

本プロセスの特徴は、一層肉盛法であるため、熱の集中度が極めて小さく、従来の溶接肉盛法では不可能であった材質、例えば過共晶材等のクラッドを可能にした。また、溶接肉盛法に見られるビードマーク発生は皆無である。

しかし、一方では、クラッド膜厚サイズや芯材形状などの操業要因が凝固界面に与える影響は大きく、その基礎的な凝固界面制御方法については、いまだ確立されていない。

そこで、肉盛り材の凝固過程を伝熱解析によって、凝固界面の形状に及ぼす操業要因の影響について定量的な検討を行うこととした。

2 解析方法

本解析ではCPCプロセスと同様、芯材と肉盛り材は一定の速度で下方へ移動するものとし、一定の速度で移動する物体の定常熱伝導解析機能を有する有限要素法プログラム

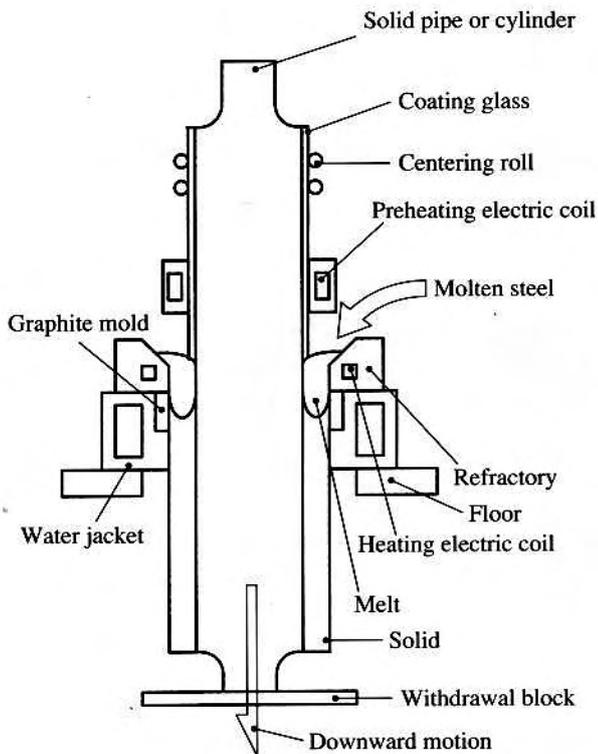


Fig.1 Schematic view of Continuous Pouring process for Cladding (CPC)

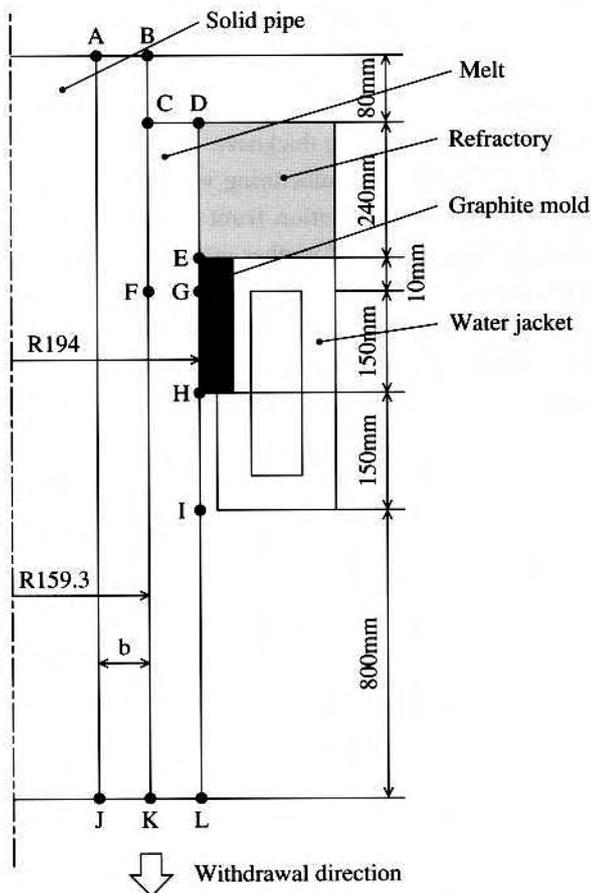


Fig.2 Model for thermal analysis of CPC

ANSYS ver.5.6を用いて解析した。

(1) 解析モデル

解析モデルはFig.2に示すような軸対象モデルとした。解析領域全体ABCDLJAは一定の速度1.11mm/sで下方に移動するとしている。領域ABKJは芯材、領域CDLKは肉盛り材である。Fig.1に示すようにモールドの上に置かれている耐火棒内面形状は上方に開いたラッパ状をしているが、これに対応する熔融状態の肉盛り材外面DE部分は解析を容易にするため凝固部GHILと同一直線状にあるとした。

次に、伝熱解析の境界条件を述べる。芯材ABの温度は T_p 、溶湯の上面CD及びDEは注湯温度 T_m とした。芯材AJ部、BC部とJL部は断熱とした。黒鉛モールド部EG(長さ10mm)は断熱、GH部では次式で示す拔熱 q を与えた。

$$q = 2 \times 10^6 - 1.26 \times 10^7 y \quad (0 \leq y \leq 0.15)$$

ここで、 y は点Gからの距離(m)である。

このように仮定した理由は、水冷ジャケット下端から約300mm下方のクラッド材表面温度が放射温度計にて計測した結果(=900℃)に一致するように定めた。

また、水冷ジャケット下部HIでは

(1) 放射率0.8で外部温度125℃との放射冷却の条件を与え、凝固した肉盛り材の表面ILでは、

(1) 熱伝達係数 11.6W/(m²K)、外部温度40℃の自然対流冷却条件

(2) 放射率0.8で外部温度40℃との放射冷却の条件を与えた。

解析領域の要素分割をFig.3に示す。本解析の精度を確保するため、熱伝導による熱伝播流量と物質移動による熱伝播流量との比であるペクレ数を1未満にする必要がある。そこで、移動方向のペクレ数が1未満にするため、引き抜き方向の要素長さを1.4mm以下とした。一方、引き抜き方向に直交する方向(芯材厚方向)の要素分割は芯材部8等分、肉盛り部8等分とした。総要素数は約15000である。

なお、解析はANSYSで従来使用している4節点要素で行った。

(2) 解析に用いる材料特性値

芯材および肉盛り材の熱物性値はTable 1に示す値を使用した。液相から固相への相変態温度領域(1476.5℃~1412.5℃)における比熱は、肉盛り材の凝固潜熱343KJ/kgを考慮するため、凝固潜熱に相当する分、見かけ上高い値とした。

Fig.4に比熱、熱伝導率と温度の関係を示す。密度は7800kg/m³一定とした。

(3) 解析ケース

Table 2に4つの解析ケースの条件を示す。Case 1は最も代表的な条件であり、その他のCase 2~Case 4は、芯材の

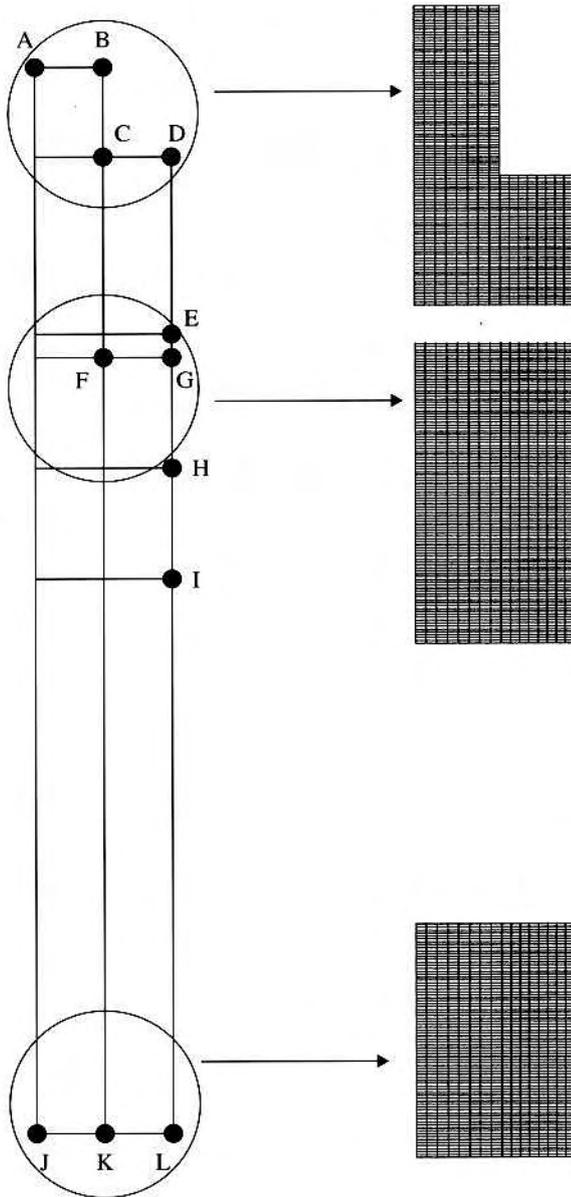


Fig.3 Mesh divisions in FEM analysis

Table 1 Thermal properties of material

Temperature (°C)	Specific Heat (J/kg K)	Thermal Conductivity (W/mk)
25	468.92	51.70
375	586.15	43.15
625	728.50	33.09
675	770.37	31.17
725	1582.61	29.67
825	510.79	24.66
875	544.28	25.12
1411.5	700.00	33.00
1412.5	5346.54	33.00
1476.5	5346.54	35.00
1477.5	745.25	35.00
1500	753.62	35.36

予熱温度 T_p 、肉盛り材の注湯温度 T_m と芯材鋼管厚さの影響を調べるために解析を行った。

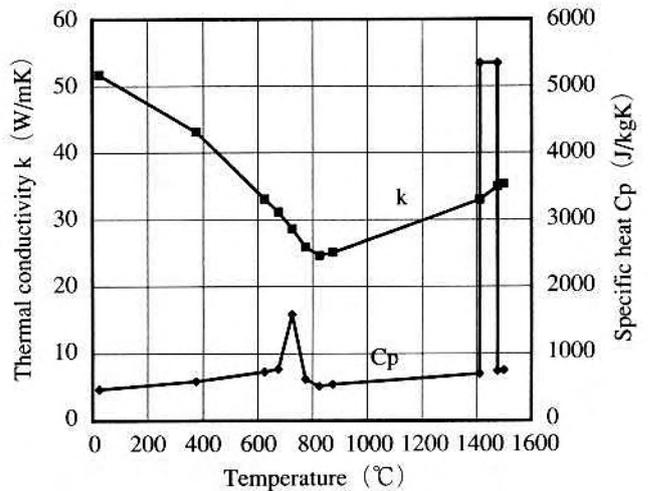


Fig.4 Thermal properties of material

Table 2 Analysis conditions

Case	Temperature of HF heated pipe T_p (°C)	Temperature of Molten steel T_m (°C)	Thickness of Inner pipe B (mm)
1	880	1500	40
2	780	1500	40
3	880	1550	40
4	880	1500	80

3 解析結果

(1) 温度分布

Case 1~Case 4に対する温度分布をFig.5に示す。等温線1476.5°Cと1412.5°C間の黄色の部分、半熔融状態の固液共存領域である。4つのケースの固液共存領域の大きさはいずれも異なっている。すなわち、芯材の予熱温度 T_p 、肉盛り材の注湯温度 T_m と芯材鋼管厚さ b が固液共存領域の大きさに影響を及ぼすことがわかる。

(2) 凝固界面の形状に及ぼす操業要因の影響

凝固界面特性に関連の深い固相線の形状をFig.6に示し、各ケースによる固相線形状の距離 c と固相線深さ d をTable 3に示す。

Case 1とCase 2の比較から、芯材の予熱温度 T_p を100°C下げると d は浅くなることわかる。Case 1とCase 3の比較から、肉盛り材の注湯温度 T_m を50°C上げると d はかなり深くなることわかる。Case 1とCase 4の比較から、芯材鋼管厚さを2倍の80mmにすると d は浅くなることわかる。

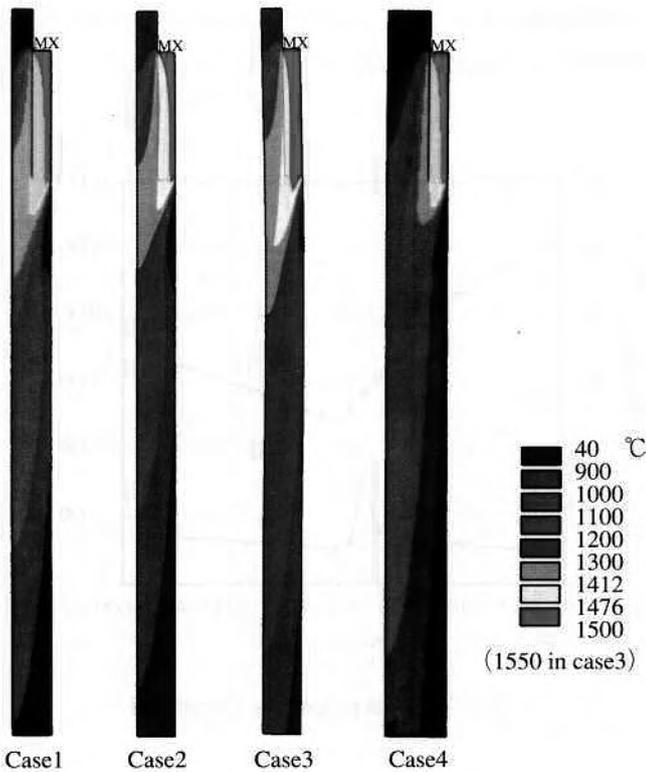


Fig.5 Temperature distribution in clad materials

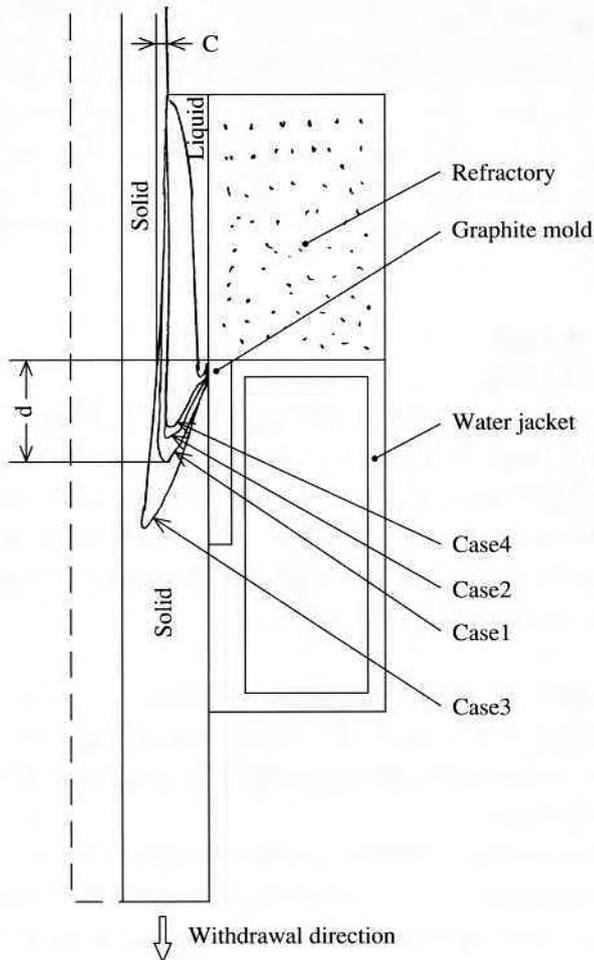


Fig.6 Comparison among the shape of solidus lines for various conditions shown in Table 2

固相線形状の距離 c は固相線深さ d と相関があり、 d が大きいほど c は大きくなっている。

Table 3 Results of solidus lines c, d

Case	Solidus lines	
	Interval : c	Depth : d
1	6	95
2	1	72
3	26	157
4	-2	59

4 考察

(1) 黒鉛モールド内壁部での凝固開始点

溶湯は黒鉛モールドの内壁で凝固し黒鉛モールドに固着し、実際には断続的に下方に引き抜かれる。そのため、凝固した肉盛り材の強度が黒鉛モールド強度よりも高くなると、黒鉛モールド内面一部も肉盛り材と共に下方に移動させられ黒鉛モールドの損耗が生じることになる。操業経験によると黒鉛モールドの上端から距離約30mmよりも下方において損耗が認められる。この位置（黒鉛モールド上端から30mm）はちょうどFig.5に示す等高線温度900℃（強度が著しく低下を始める温度）の黒鉛モールド内面位置に対応しており、少なくとも黒鉛モールド内面における凝固に関しては本解析モデルが適切であることを示している。

(2) 肉盛り材の融着

完全に凝固した肉盛り材の縦断面組織の肉厚方向分布を観察から、CPCプロセスにおける芯材外表面の溶融深さ c を求めることができる。Case 1の場合、解析結果は $c = 6\text{mm}$ であり、実操業の結果の約5mmにほぼ等しくなっている。

(3) ブリッジ、引け巣やポロシティ欠陥へ及ぼす操業条件の影響

ブリッジや引け巣、ポロシティなどの铸造欠陥は、一般に凝固界面プロフィール深さが深くなるほど発生しやすい傾向がある。固相線深さ d はFig.6に示す通り、凝固界面プロフィール深さとは密接な相関がある。操業経験による铸造欠陥発生率は、この d の値と良い対応を示している。

以上(1)、(2)、(3)から、本解析モデルの妥当性が推測される。

5 結言および今後の課題

CPCプロセスにおける凝固過程を、有限要素法解析プログラムANSYSで調査した。解析から得られた温度分布が

ら推測される黒鉛モールド部損耗開始位置および芯材の溶融深さは実測結果と近似していた。

また、解析結果の固相線プロフィール深さは、芯材予熱温度、溶湯温度、芯材パイプ肉厚によって影響を受け、その傾向は操業経験と一致した。

以上のことから、本解析モデルを用いて今後、各操業条件による影響度の検討、予測に活用していきたいと考えている。

参考文献

- 1) 菅野五郎、鈴木章：連続鑄造法，(1969)，日刊工業新聞
- 2) 中江秀雄：鑄造工学，(1995)，産業図書
- 3) 斉藤彬夫、岡田昌志、一宮浩市，(1985)，産業図書
- 4) 巨東英、井上達雄、吉原直武：日本機械学会論文集，56-513, A(1989)，1236-1242