

技術論文

CPCプロセスの凝固伝熱解析 (第2報)

Analysis of Solidification Heat Transmission in CPC Process (Reports2)



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

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1層肉盛が可能で、さまざまなメリットを有し、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、その基本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。

前報は中空の芯材を適用し、解析を行った。本報はその続報として、中実の芯材を適用して、凝固界面形状に及ぼす操業要因の影響を解析した。

その結果、凝固界面形状は操業要因中、CPC保持時間が大きく影響することが推察できた。

Synopsis

This report discusses the CPC process. One of the advantages it offers is the possibility of single-layer cladding irrespective of thickness, whose usefulness has been confirmed by a variety of CPC-processed rolls in use at various industrial steel making plants.

On the other hand, it had a disadvantage that operational factors such as core preheating temperature and pouring temperature affect largely solidifying surfaces. At the moment, no fundamental approach to control surface solidification process has been established.

Our preceding report analyzed the effects of using hollow cores as a solution to the problem. This report as a sequel discusses the influence of operating factors on solidifying surfaces when solid cores are used. As a result, we have come to an assumption that CPC holding time among other operational factors should influence surface solidifying process.

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、その基本的な凝固界面制御方法については、クラッド膜厚サイズ、芯材形状、CPCの引き抜き条件 (降下時の降下速度、1回当たりの降下幅、保持時間) などの操業要因が凝固界面に大きく影響を与え、いまだ確立されていない。

特に、鉄鋼の熱間圧延および矯正ロールの製造においては、肉盛材の凝固制御が困難であり、製造歩留は多種のロール・ローラ類と比較しても低い。

そこで本報では、前報1)同様、肉盛材の凝固過程のシミュレーションを伝熱解析によって行い、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った。

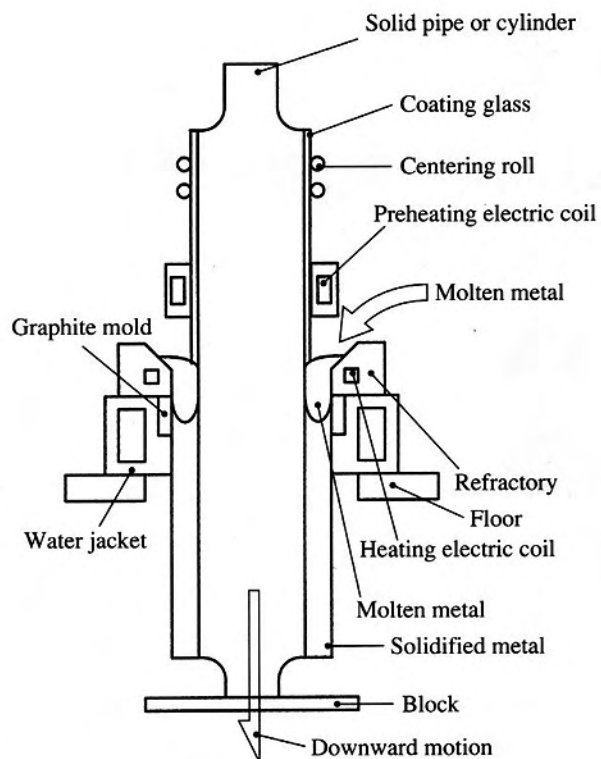


Fig.1 Schematic view of Continuous Pouring process for Cladding (CPC)

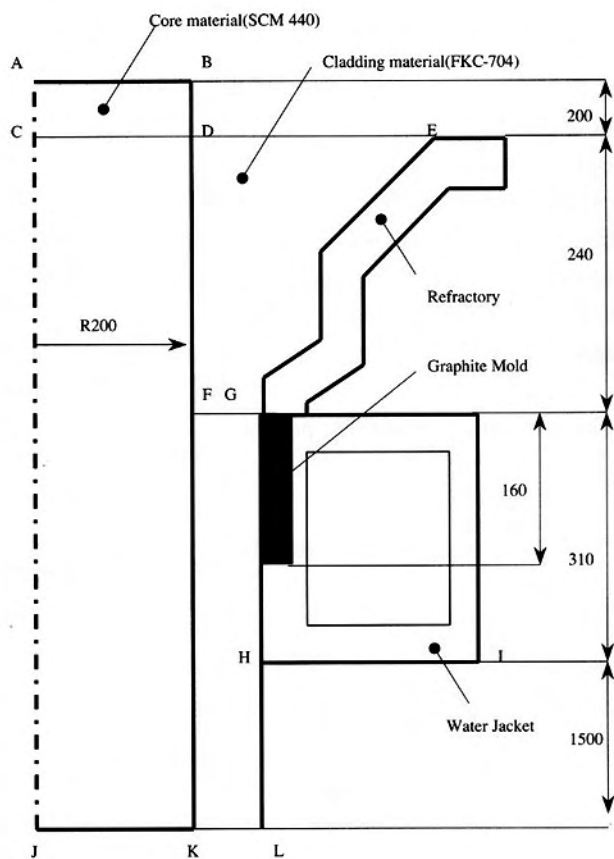


Fig.2 Simulation model of solidification

2 解析方法

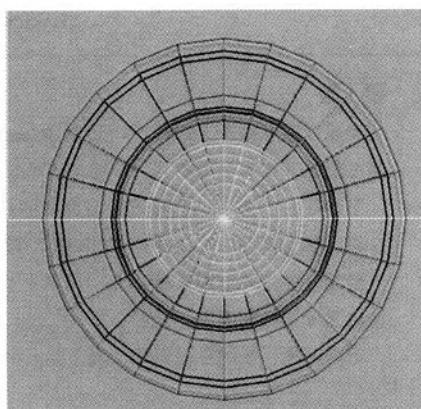
今回は従来から圧延ロールの製造で採用している複合一体ロールを想定した。なお、芯材は外径 $\phi 400$ の中実を適用した。

解析は各材料とも指定した初期温度から実施したため、湯流れ解析からの初期温度データは取り込んでいない。また、重力や対流などは考慮していない。

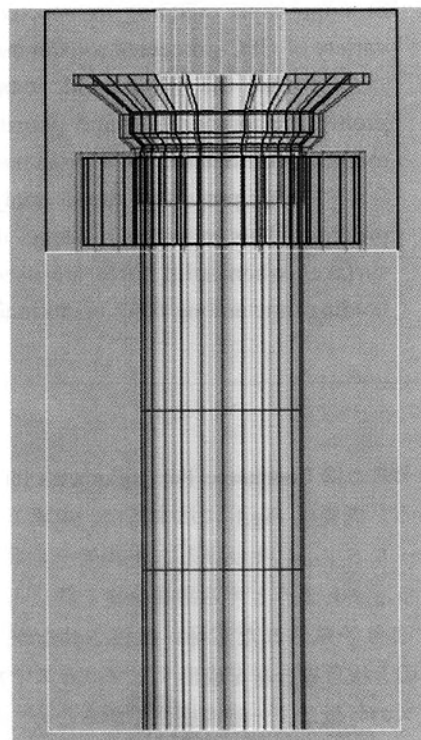
(1) 解析モデル

解析モデルはFig.2に示す軸対象の1/2を作成した。領域ABKJは芯材、領域DEGLKは肉盛材である。

その後、Fig.3に示すように、ワイヤーフレームにて3次元化した。



a) x-z plane



b) x-y plane

Fig.3 Wire flamed pattern of 3D model

(2) 解析に用いる物性値

今回使用した物性値および各種温度は以下の通りに設定した。

- ① 芯材、肉盛材、黒鉛の各物性値はTable 1に示す値を使用した。ここで、液相線温度LLおよび固相線温度SLはThermo-Calcの計算結果を代用した。
- ② 外気温度はFig.2に示す金属モールドの下端部GHを境として、上側は30℃、下側は800℃に固定した。
- ③ 芯材BD部は断熱とし、領域CDKJの温度はTable 2およびFig.4に示すように、細分化した。
- ④ 肉盛材の領域DEGFは、常時溶湯状態とし、溶湯温度Tmは後述する解析ケースの数値に保持した。また、金型モールド内の水温Twも溶湯温度と同様な作業を行った。

Table 1 Physical properties

	Liquidus line LL(℃)	Solidus line SL(℃)	Specific gravity ρ (g/cm ³)	Specific heat c(cal/g・℃)	Thermal conductivity λ (cal/cm・sec・℃)
Cladding Material (FKC-704)	1299	1192	8.10	0.14	0.05
Core Material (SCM-440)	1489	1404	7.80	0.14	0.05
Graphite	-	-	2.01	0.28	0.05

Table 2 Vertical temperature distribution

Distance from center of core material (mm)	0	90	115	140	165	190
	~	~	~	~	~	~
Institution temperature (℃)	900	1000	1100	1200	1300	1400

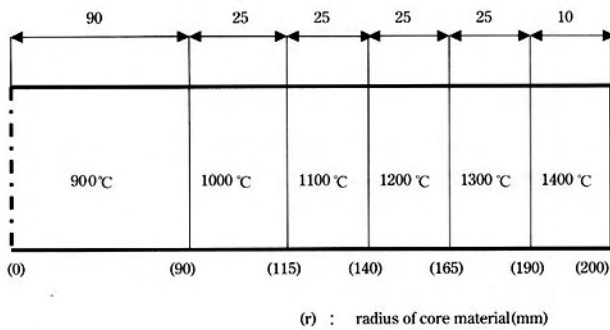


Fig.4 Vertical temperature distribution

(3) 解析ケース

Table 3に解析ケースの条件を示す。Case1は実操業の施工条件であり、その他のCase2~Case4は肉盛材の溶湯温度Tm(℃)、Case5,6は金属モールド内の水温Tw(℃)、Case7,8はCPC保持時間t(sec)、Case9,10は黒鉛の熱伝導率λ(cal/cm・sec・℃)の各影響を調べるために解析を行った。

尚、解析は直交差分法を適用した。

Table 3 Analytical parameter

Case	Temperature of molten metal Tm(℃)	Water temperature Tw(℃)	Holding time t(sec)	Thermal conductivity λ (cal/cm・sec・℃)
1	1450	50	30	0.05
2	1400	50	30	0.05
3	1425	50	30	0.05
4	1475	50	30	0.05
5	1450	10	30	0.05
6	1450	25	30	0.05
7	1450	50	60	0.05
8	1450	50	90	0.05
9	1450	50	30	0.5
10	1450	50	30	0.025

3 解析結果

(1) 温度分布

解析はFig.5に示すように、3次元にて行った後、2次元の表示を行う。各ケースの解析後、2次元表示した結果をFig.6に示す。温度は、液相線温度LL以上1300℃~1450℃を50本の等高線にて表示した。

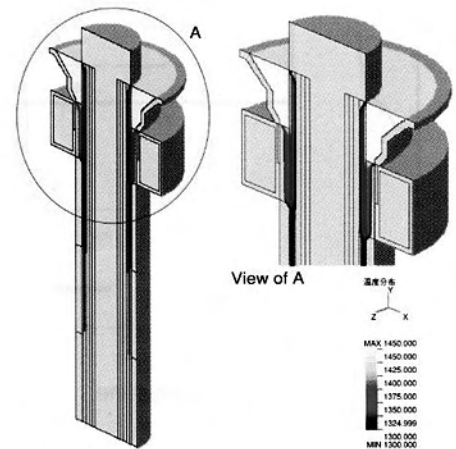


Fig.5 Temperature distribution in cladding materials(3D-model)

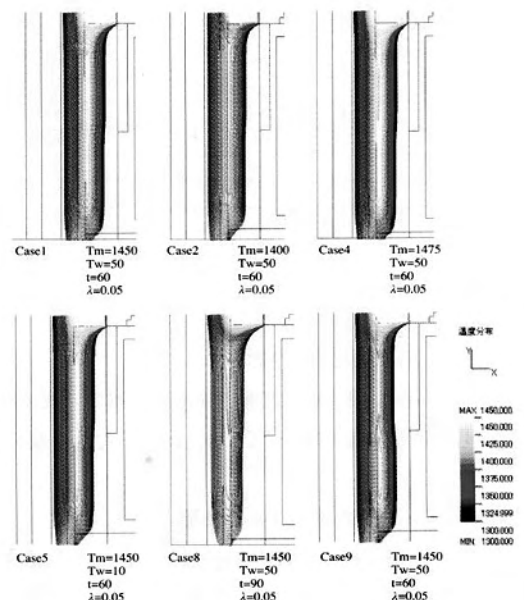


Fig.6 Temperature distribution in cladding materials(x-y plane)

(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液相線の形状はFig.7に示し、各ケースによるd、eをTable 4に示す。ここで、d、eは以下の通りである。

d : 領域FGを基準とした、1400℃の位置

e : 点Mでの、芯材の外径FKからの等高線末端までの幅

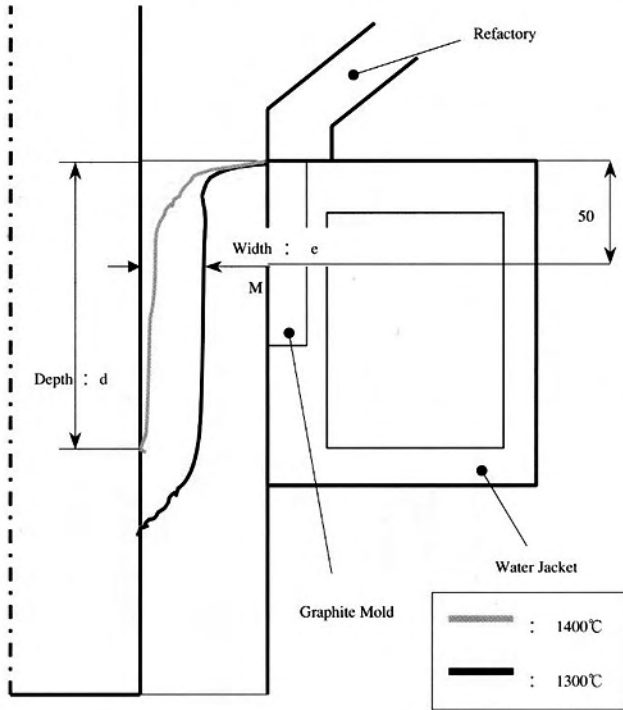


Fig.7 Profile of liquidus line

Table 4 Depth and width of liquidus line

Case	Liquidus lines	
	Depth:d	Width:e
1	264	30.4
2	255	27.5
3	259	26.6
4	282	32.0
5	260	29.8
6	262	30.4
7	176	25.0
8	158	19.6
9	32	25.5
10	263	33.3

① 肉盛材の溶湯温度Tmの影響

Case1とCase2、3、4の比較をFig.8に示す。その結果、溶湯温度が高くなるに従って、d、e共に大きくなった。

② 金属モールド内の水温Twの影響

Case1とCase5、6の比較をFig.9に示す。その結果、d、eは近似しており、水温による影響は少ないと判断する。

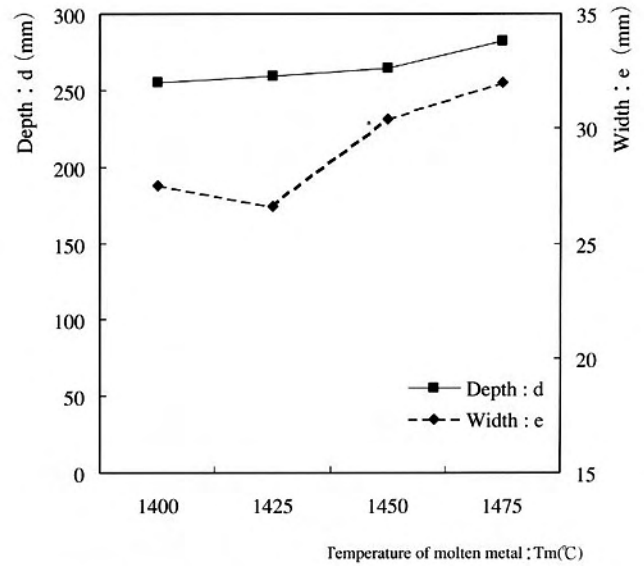


Fig.8 Depth,width vs. temperature of molten steel

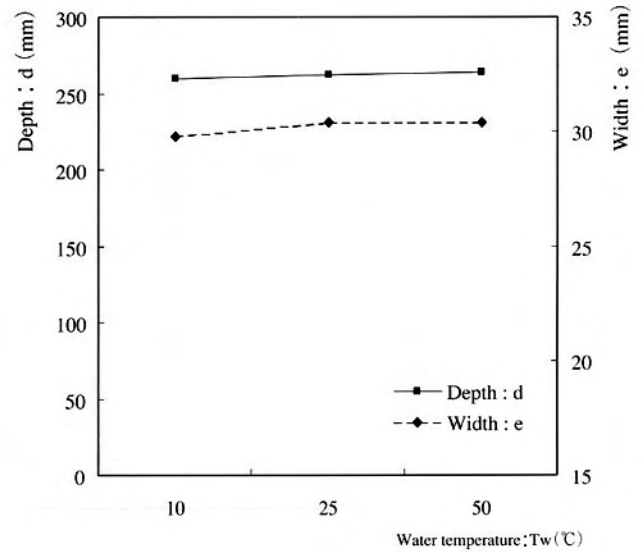


Fig.9 Depth,width vs. water temperature

③ CPC保持時間tの影響

Case1とCase7、8の比較をFig.10に示す。これから分かるように、保持時間が長くなるに従って、d、e共に小さくなった。

④ 黒鉛の熱伝導率λの影響

Case1とCase9、10の比較をFig.11に示す。Case10はCase1と近似していたが、Case9は凝固下部において、副熱と推定される曲線（閉ループ）が表示されている。これは、黒鉛の熱伝導率を現状(=0.05)の10倍(=0.5)に設定した影響と推測する。

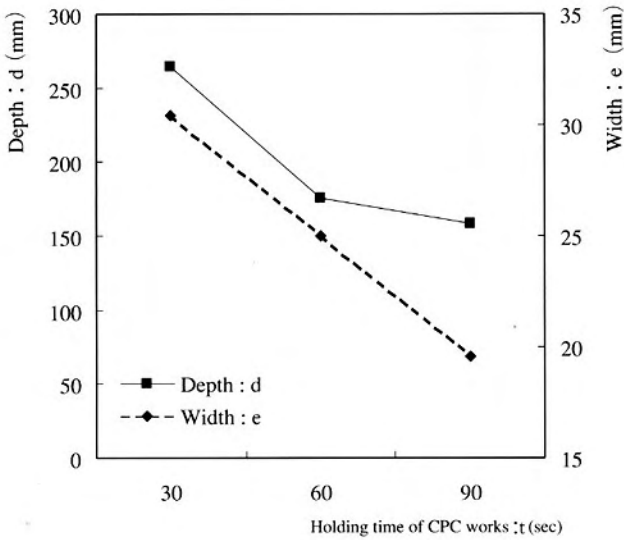


Fig.10 Depth,width vs. Holding time of CPC

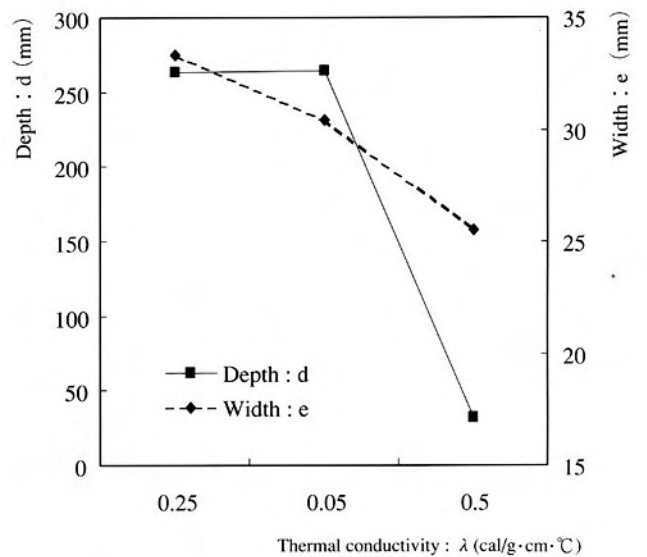


Fig.11 Depth,width vs. thermal conductivity

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、断続的に下方に引き抜かれる。そのため、凝固した肉盛材の強度が黒鉛モールド強度よりも高くなると、黒鉛モールドの内面も肉盛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。

解析結果では、肉盛材の表層部は、既に黒鉛モールドの上端で凝固している。実際、作業後の黒鉛モールドを観察すると、損耗は上端から既に認められている。

これより、解析結果は作業と対応しており、肉盛材の表層部は黒鉛の上端で凝固終了している事が推察できる。

(2) ブリッジ、引け巣やポロシティ欠陥へ及ぼす作業条件の影響

ブリッジや引け巣、ポロシティなどの铸造欠陥は、一般に、凝固ブリッジが深くなるほど発生しやすい傾向にある。

凝固ブリッジの深さは、液相域および固相・液相共存域と密接に関連している。今回、各ケースによる液相域の形状を比較した結果、液相域は作業条件により変化した。

特に、CPC保持時間はFig.10に示すとおり、凝固制御を大きく左右する因子であると推定できる。

5 結言

肉盛材の凝固過程を伝熱解析にて行い、凝固界面の形状に及ぼす作業要因の影響について定量的な検討を行った結果、以下のことが推察できた。

- (1) 肉盛表層部の凝固は、黒鉛の上端で終了している。
- (2) 凝固ブリッジはCPC作業条件に影響する。中でも、CPC保持時間を長くすることで、凝固ブリッジは比較的容易に浅くなり、铸造欠陥の抑制が可能と考えられる。

6 謝辞

本研究の遂行に際し、凝固伝熱解析にあたり、プログラムのご指導、ご協力して頂いたコマツソフト(株)に深く感謝いたします。

また、Thermo-Calcによる液相線・固相線温度の算出にあたり、ご指導して頂いた九州工業大学工学部長谷部教授ならびに福岡県工業技術センター機械電子研究所徳永主任技師に深く感謝いたします。

参考文献

- 1) 大野、尾崎、吉原、田中：フジコー技報、No.8(2000)
- 2) 菅野五郎、鈴木章：連続铸造法、(1969)、日刊工業新聞
- 3) 中江秀雄：铸造工学、(1995)産業図書
- 4) 齊藤彬夫、岡田昌志、一宮浩市：(1985)、産業図書