

# 技 術 論 文

## 2層複合鑄造ライナーの界面溶着特性に及ぼす湯流れの影響 Influence of Molten Metal Flow on Characteristics of Interfacial Cladding in Two-layer Composite Casting Liner



技術開発センター  
商品・生産技術開発班  
主任 花田 喜嗣  
Yoshitsugu Hanada

技術開発センター  
商品・生産技術開発班  
課長 古田 博昭  
Hiroaki Furuta

技術開発センター  
商品・生産技術開発班  
課長 牟田 敏克  
Toshikatsu Muta

技術開発センター  
商品・生産技術開発班  
班長 博士(工学)姜 孝京  
Hyo-Gyoung Kang

技術開発センター  
センター長  
博士(工学)永吉 英昭  
Hideaki Nagayoshi

### 要 旨

当社の代表的な高温耐摩耗用鑄造複合製品である EST ライナーは独自の鑄掛技術により製造しており、更なる品質向上および製造コストダウンを目指し、鑄掛方案の大幅な変更を検討している。そこで、方案改造の効率化を図るため、鑄造シミュレーションシステムを導入した。湯流れのシミュレーション解析結果により、製品部の湯流れを全体的に均一化する鑄型構造を構築したことで、実機試験において製品としての欠陥である鑄物とベース板との未溶着部を大幅に抑制することができた。今後の開発において、シミュレーション解析は鑄造鑄掛方案の効率的な改善手法として期待ができる。

### Synopsis:

EST liner has been manufactured by FUJICO's original cast cladding method, and extensively used as the typical two-layer composite liner with the high wear resistance in high temperature environments. We have been developing extensive modifications of casting designs for EST liner to reduce manufacturing cost. We have introduced the casting simulation system that was useful for improving the efficiency in casting designs. From the simulation results for molten metal flow, it was confirmed that the mold designing to make uniform molten metal flow can be minimized amount of the uncladding defect by the comparisons of simulation results and real casting results. Therefore, the casting simulation can be expected to improve the efficiency for cast cladding designs.

### 1. 緒言

当社の代表的な高温耐摩耗用鑄造複合ライナーとして EST シリーズ EST-1, EST-2 があり<sup>1)</sup>、高温環境下で耐摩耗性を要求される設備に広く適用されている<sup>2,3)</sup>。EST ライナーは当社独自の鑄掛け技術により製造しているが、更なる価格競争力を向上させるため、現行の鑄掛方案の見直しを含んだ製造工程の効率化が求められている。そのため、大幅な方

案変更が必須となるが、工場設備を使用した実機試験では、生産工程の遅延・圧迫や試験負担額の増大といった影響がある。さらには一般的な鑄掛方案の設計は技術者の勘や経験に頼った試行錯誤的な手法が主流であるため、多大な費用と時間が必要となっているのが現状である。

そこで、本研究では鑄造シミュレーションシステムを導入した鑄掛方案の改善に努めた。鑄造シミュ

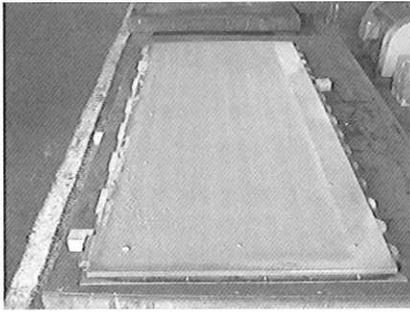


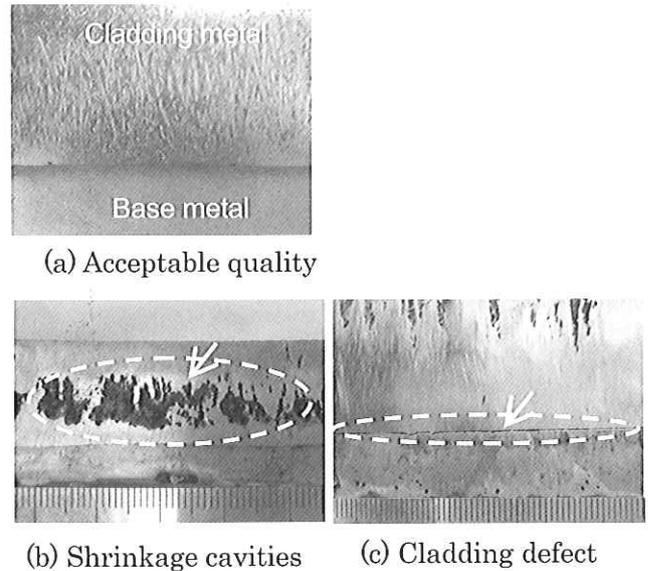
Fig.1 Photo showing appearance of EST liner after casting

レーションシステムは鋳型内への熔融金属の流入状態や凝固過程をシミュレーションし、その過程を三次元で視覚的に表現することができるため、鋳造品の品質改善、歩留り向上およびコスト低減などに非常に有効である。これにより、鋳造欠陥を事前に予測できることから、大掛かりな実機試験を行うにあたって、試験費用と時間を大幅に節約できるため、効率的な改善を進めることができる。

本研究では、市販の鋳造シミュレーションシステム<sup>4)</sup>を用いて、EST ライナーの鋳造における湯流れおよび凝固状態の計算解析を行った。鋳掛方案の変更によって変化する注湯中の湯流れ状態および湯充填後からの凝固過程を把握することで、複合材として重大な欠陥であるベース板と鋳掛材との未溶着性および引け巣の鋳造欠陥の相関性を調査した。実機試験によりシミュレーションの予測に対する検証を行い、相互の結果を組み合わせることで、品質向上を目指した鋳掛方案の最適化を進めた。本稿ではその結果を報告する。

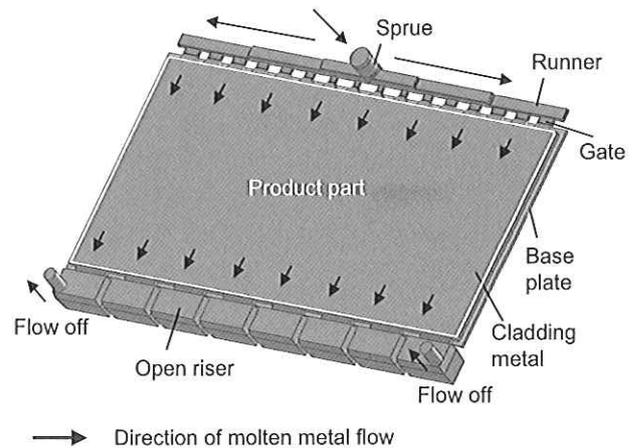
## 2. EST ライナーの鋳造方案

当社の EST ライナー製品は SS 鋼板をベース板にし、高 Cr 鋳鉄材をクラッドした 2 重構造を持つ複合鋳造ライナーである。Fig.1 に鋳造後の EST ライナー外観を示す。この一枚のライナーから要求されるサイズへと加工する。複合ライナーとして本来の性能を発揮するためには、SS 鋼板と高 Cr 鋳鉄材との完全界面溶着が必須である。また、製品歩留りを上げるためにも、全面的な溶着不良を抑制しなければならない。この溶着性には鋳込み溶湯温度、鋳込み溶湯量、SS 鋼板の予熱など様々な要素が影響を及ぼすが、特に湯流れが非常に大きく影響すると考えられる。ところで、今回は複合ライナーとしての製品不良の対象ではないが、一般的な鋳造欠陥とし



(a) Acceptable quality (b) Shrinkage cavities (c) Cladding defect

Fig.2 Photos showing cross section of specimen for acceptable quality and production defects for EST liner



→ Direction of molten metal flow

Fig.3 Schematic illustration showing molten metal flow and mold design for casting of EST liner

て、広範囲に存在する引け巣部が懸念されている。引け巣部は空洞あるいはスポンジ状となり、本来の高耐摩耗性を有することができない。Fig.2 に良好な溶着状態および欠陥部位の写真を示す。これらの欠陥の評価法として超音波探傷試験(UT)を用い、溶着性の向上とともに、引け巣の最小化を目指した。

本稿では、これまで取組んできた鋳掛方案の検討結果について一部を紹介する。Fig.3 に EST ライナー鋳造の鋳型および湯流れの概略図を示す。湯口から入った湯は左右の湯道で分かれ、各堰から製品部

へ流れ込む。それから、製品部の充填とともに揚がり部へと流れ、鋳型内の充填が完了する。この方案は、湯口から揚がりまでの湯流れが一方向となるよう設計した。

このシミュレーションシステムでは3次元CADで設計したモデルが必要であり、基本的に湯口の設置と鋳型がすべて連続体であれば、形状やサイズに関わらず解析が可能である。また、湯流れや凝固予測だけでなく、引け巣や金属組織の予測も可能となり、鋳造欠陥対策に対しても大いに期待できるシミュレータである。今回は、湯流れ状態と湯充填後からの凝固予測の解析を行い、実機試験結果との比較検証を行った。

### 3. 湯流れおよび凝固解析結果

前節の基本方案に基づき、湯流れおよび凝固予測の解析を行った。Table 1 に鋳物と砂型の物性値を示す。Fig.4 に湯の充填開始からの湯流れ、Fig.5 に湯の充填後からの凝固の様子を示す。いずれの図も(a)から(d)にかけて時間経過を表している。

Fig.4 では、濃淡の濃い箇所ほど湯温が高く、流れる湯量が多いことを示す。湯口付近の堰から製品部へ湯が順次的に入り始め、徐々に全体的に充填される様子が確認できる。湯は堰と同じ幅を持ったまま製品部へと流れ込み、湯が広がるとともに湯温が低下している。また、先に中央部から入った湯は時間が経過しても、中央部が優先的に流れていくことがわかった。Fig.4(d)を全体的に見ると、揚がり側よりも湯口側の方が湯温は高くなり、揚がりへと近づくにつれ湯温は低下していることがわかった。

Fig.5 では濃淡の濃いところが残液の状態であり、白色部は凝固部である。凝固はまず製品部の端部から始まり徐々に中心部へと進む。最終凝固部と予測されるのは、Fig.5(d)から見てとれるのが製品部の中央湯口側である。ここは湯口に近く、常に高温の湯が供給される場所であるため、湯の充填後も湯温が高い箇所であり、鋳造欠陥として引け巣が発生する可能性が高いことが推察される。

Table 1 Properties of cast iron and sand mold used for calculation

Material	Density (kg/m <sup>3</sup> )	Thermal conductivity (W/m/K)	Heat capacity (J/kg/K)	Viscosity (m <sup>2</sup> /s)	Initial temperature (°C)
Cast iron	7.00	0.080	150	0.0078	1580
Sand mold	1.45	0.002	250		25

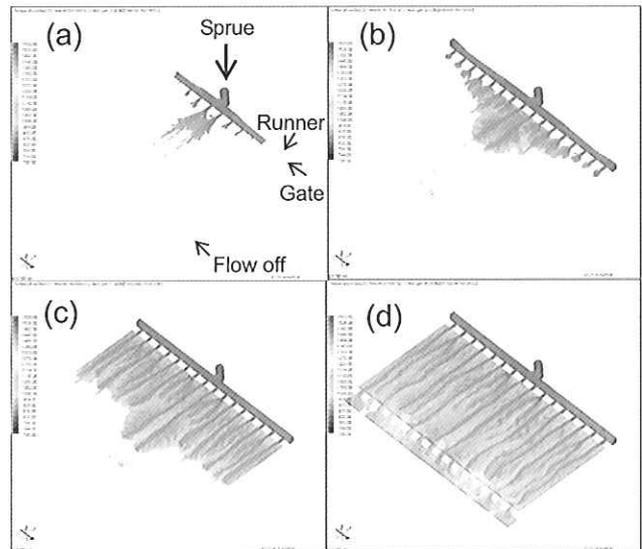


Fig.4 Change of flow pattern of molten metal at filled ratio of (a) 5%, (b) 10%, (c) 25%, and (d) 50%

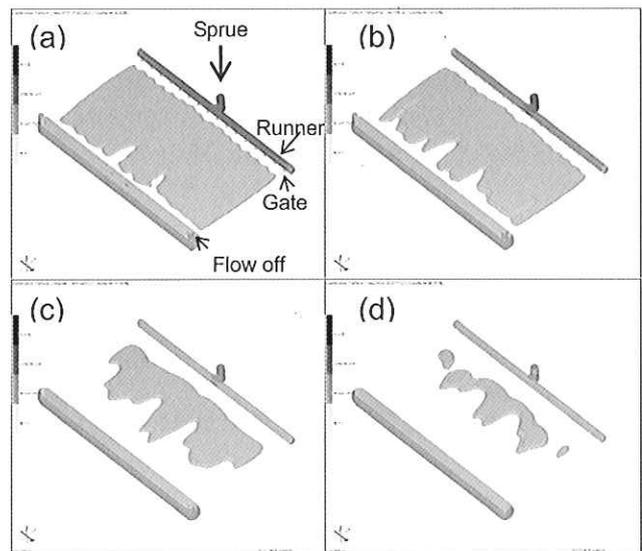


Fig.5 Change of solidification of molten metal after pouring at (a) 100s, (b) 200s, (c) 400s, and (d) 600s

Fig.3 の鋳掛方案を基にした実機鋳掛試験を行った。Fig.6 に鋳造後の鋳物表面上の UT 検査結果を示す。UT 検査によりベース板との溶着可否および引け巣部の評価を行った。評価記号として、×は未溶着部、△は引け巣部を表す。湯流れ方向は図に対して上方(湯口側)から下方(揚がり側)である。未溶着部は揚がり側に集中しており、板の端へいくにつれて広がっている。また、湯口側にある未溶着

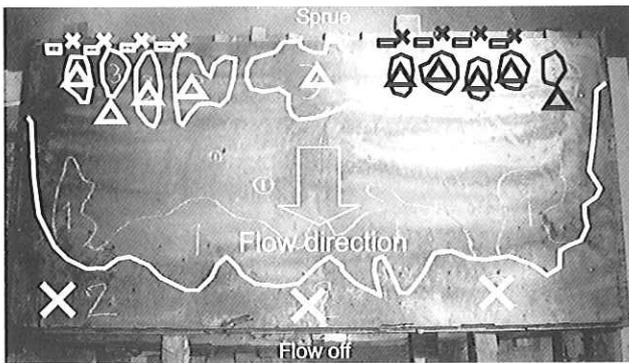


Fig.6 Photo showing ultrasonic testing inspection results on cladding metal surface of EST liner after cast cladding:

×, uncladded place; △, shrinkage cavities

部は堰と堰との間に多く存在している。Fig. 4 の湯流れ解析結果から考察すると、湯口側から揚がり側へと湯が進むにつれて湯温が低下することにより、ベース板への溶着能力の低下が未溶着部の発生に繋がっていると見える。また、両端側部の方がより未溶着部が広範囲であることは、端部は湯口からの距離が長く、より湯温の低下が大きく、また湯流れ速度の低下と鋳型接触による流動の減少があったと推察される。さらに、堰間の未溶着の原因は堰近傍の湯は勢いが強く一方向だけの流れとなり、幅方向の広がりがあまりないためと推察される。これらのことから、全体的な未溶着を抑制するには、局所的な湯温の低下を防ぐとともに、均一な湯流れが必要となることがわかった。

次に、引け巣部は湯口側に多く存在している。Fig.5 の凝固予測結果から考察すると、最終凝固部となりうる箇所とほぼ同位置である。凝固収縮部が引け巣となるが、解析によって予測可能であることが確認できた。

これらの結果から、解析と実機試験の相関が確認でき、高い精度での欠陥予測が可能であることが検証できた。次章からは、方案変更に伴う湯流れおよび凝固状態の解析とともに、実機試験による品質検証を行った事例を紹介する。

#### 4. 堰形状による湯流れ制御

##### 4.1 加圧型鋳造

Fig.6 の結果を踏まえ湯道堰間における幅方向の湯流れを与えるため、堰幅を拡大させ製品部へ接続される箇所をさらに広げる構造に変更した。Fig.7

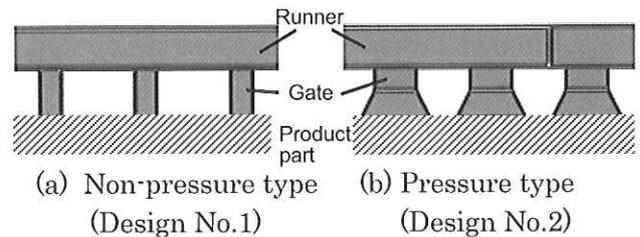


Fig.7 Schematic image showing shapes of runner and gate

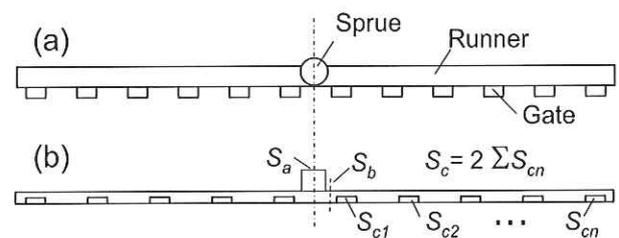


Fig.8 Schematic illustration showing structure for each parts (a) and cross sectional area(b):  $S_a$ , sprue;  $S_b$ , runner;  $S_c$ , sum of all gates

Table 2 Comparison of each area ratios by difference of casting mold design

Design No.	Pressure	Sprue ( $S_a/S_a$ )	Runner ( $S_b/S_a$ )	Gate ( $S_c/S_a$ )
1	×	1.00	1.27	1.07
2	○	1.00	0.98	0.91

に堰形状を示す。また、湯口断面積と堰断面積の比を調整し、堰面にかかる湯圧を制御することで、開放型から加圧型鋳掛方案<sup>6)</sup>へ変更した。Fig.8に湯口、湯道および堰の構造を示し、その断面積比率をTable 2に示す。湯口部の面積率を1とし、湯口、湯道および堰までの断面積比を徐々に小さくすることで、湯の充填中は堰面への圧力が一定にかかるようにし、いずれの堰においても通過する湯の流速を一定かつ安定化させる構造に設計した。

Fig.9およびFig.10に堰の形状および面積比を変更した場合の湯流れおよび凝固解析結果を示す。いずれの図も(a)は前節の結果と同一である。Fig.9(a)と(b)を比較すると、堰からの湯の広がりが大きくなり、揚がり側へ進むにつれてより湯温が低くなっていることがわかる。また、中央部分に集中的であった流れは緩和され、両側端の方の流れが改善されて

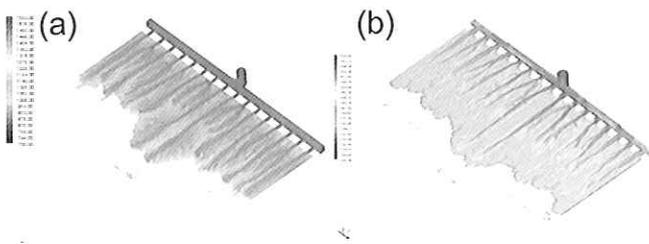


Fig.9 Effect of change of casting design on flow pattern of molten metal:  
(a) non-pressure type, (b) pressure type

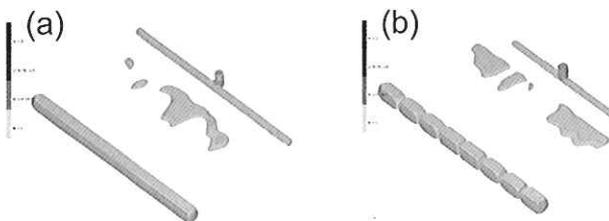


Fig.10 Effect of change casting design on solidification process of molten metal:  
(a) non-pressure type, (b) pressure type

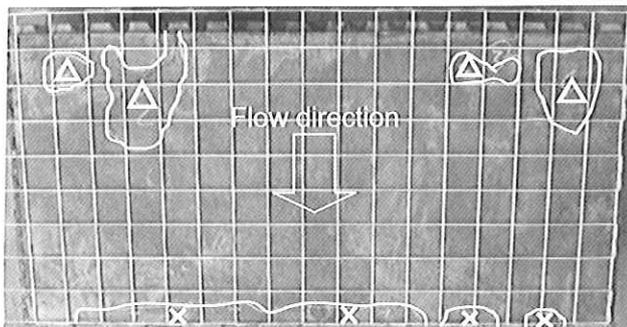


Fig.11 Quality inspection result for actual product mode by pressure type casting design:  
X, uncladded place; Δ, shrinkage cavities

いることがわかった。Fig.9(a)の開放型では湯口に近い場所の堰ほど湯量が比較的多い。これは湯道が十分に充填されることなく、湯が最短の堰から流出してしまうため、堰によって湯量が異なる。堰面に対する湯圧を開放型から加圧型へ変更することで、どの堰からも一定の湯量の確保がしやすくなる。

Fig.10(a)と(b)を比較すると、最終凝固部が中央部からやや左右端側へ広がりを見せている。先に述べたように中央部に集中的であった流れがより均

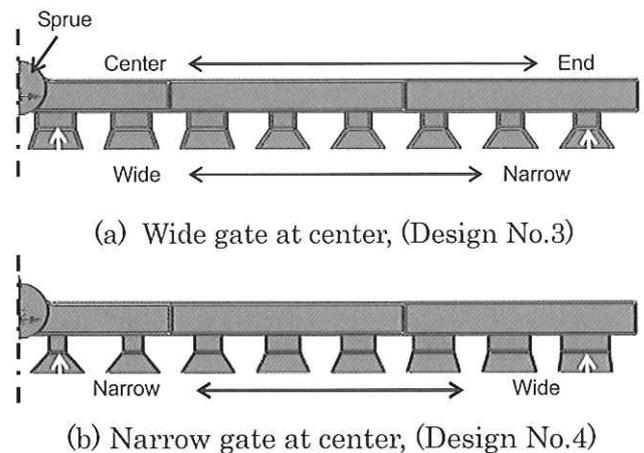


Fig.12 Schematic illustration showing gate structures for controlling molten metal flow

Table 3 Comparisons of area ratios of each part and area slope ratio of gates

Design No.	Area ratio			Slope-ratio of gates ( $S_{cn}/S_{ca}$ )
	Sprue ( $S_a/S_a$ )	Runner ( $S_b/S_a$ )	Gate ( $S_c/S_a$ )	
2	1.00	0.97	0.91	all same
3	1.00	0.97	0.86	0.67
4	1.00	0.97	0.87	2.80

一に分配されたためであると考えられる。

Fig.11に堰の変更を行った案を用いて、実機試験を行った鋳物表面でのUT結果写真を示す。UT検査によりベース板との溶着可否および引け巣部の評価を行った。Fig.6の結果と比べ揚がり側の未溶着部が減少している。Fig.9(b)の湯流れが示すように、端の湯流れを促進することにより未溶着部の縮小を確認できた。しかしながら、未溶着部は未だ揚がり側端部全体に広がっている。また、引け巣部が左右端部側へと移動していることは、Fig.10(b)が示す最終凝固部の箇所と一致した。

このように、鋳造方案の変更に伴う品質への影響は、今回の解析によっておおよその予測が可能であることを確認した。

#### 4.2 湯流れ制御による未溶着部の抑制

前節の結果を受けて、堰幅を調整することで湯流れを制御し、未溶着部を抑制させる効果を確認する。Fig.12に変更する堰幅形状を示し、Table 3に面積

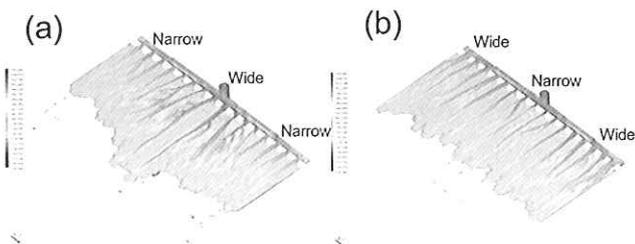


Fig.13 Effect of gate structures on flow pattern of molten metal

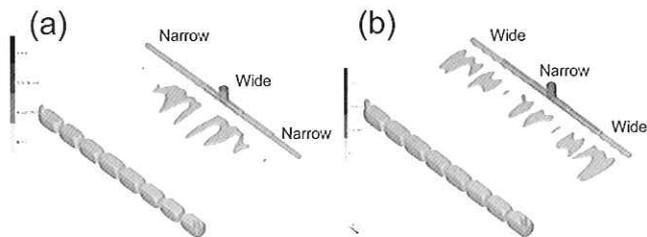
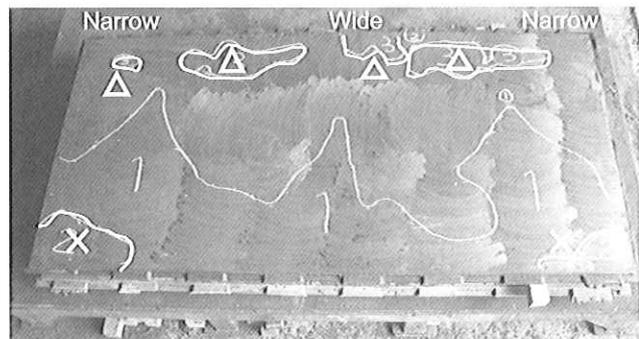


Fig.14 Effect of gate structures on solidification process of molten metal

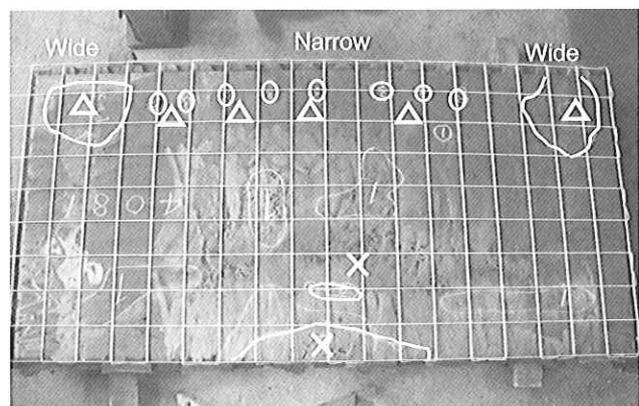
比率および各堰の面積傾斜率を示す。また、加圧鋳掛法を維持したままで、製品部へ流れ込む湯量を制御させる。(a)の方案は中央部の堰幅を広く、端側を狭くした。逆に(b)の方案は中央部の方を狭くした。このように極端に堰幅を操作し、それに伴う湯流れが溶着性に及ぼす効果を確認した。

Fig.13 に湯流れの解析結果を示す。(a)では中央部に極端に優先的な流れになっており、(b)では中央部への湯量を抑えたことで、ほぼ均一な流れとなった。(a)の方案の流れは Fig.11 の結果が示す揚がり側中央部付近の未溶着部を抑制させ、一方、(b)では流れを揚がり方向に対して一様にし、どの箇所においても一定の湯量を通させることで、欠陥の分散および最小化を図った。Fig.14 に最終凝固部の予測結果を示す。Fig.14 では濃淡が濃く示されている湯温の高い場所が最終凝固部となっている。湯流れを中央部に集中させれば、中央部に引け巣部が発生する傾向が強くなり、流れを均一化させると引け巣部は分散する傾向を示す結果となった。

Fig.15 に Table 3 の堰変更方案での実機試験における鋳物表面の UT 検査写真の評価結果を示す。基本的には予測通りの結果となった。ただし、いずれの方案でも未溶着部の完全解消までにはいたっていない。Fig.15(a)の結果からは、湯流れが中央部へ集中することにより、中央部の未溶着部はなくなっ



(a) Wide gate at center



(b) Narrow gate at center

Fig.15 Quality inspection result for actual products made by two types of gate structure:

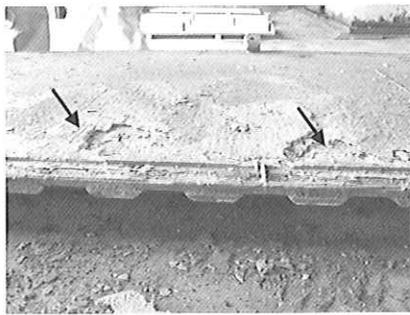
×, uncladded place; △, shrinkage cavities

たものの、端部の未溶着部が残存しているのが確認できた。また、Fig.15(b)の結果からは、解析上で均一な湯流れとして堰幅を決定したものの、揚がり側の中央部に未溶着が発生した。

これらの実機試験の結果を基に、湯流れ解析結果を再度検証すると、湯口側から揚がり側までの間において、十分な高温溶湯が供給できず、湯温が低下することで未溶着を招いていることが推察される。最適な湯流れを実現するための条件は、Fig.15(b)の結果から、Fig.12(b)の方案において中央部の湯流れを改善する手段が有効であると予測できる。

## 5. 引け巣部最小化対策

次に、引け巣部の最小化対策を取入れた鋳掛方案を解析した。一般的な対策では押湯を設置することで収縮分の湯を補給することにより、引け巣を抑え



(a) Appearance of damaged plate



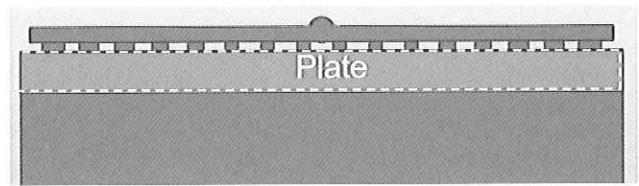
(b) Melting loss of base metal

Fig.16 Photos showing melting damage on base metal by molten metal flow

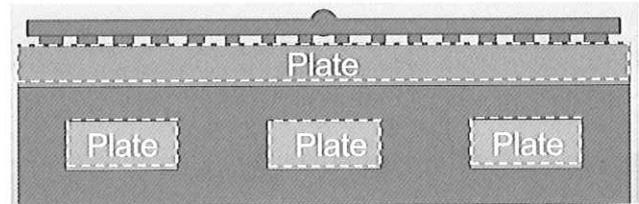
ることが可能であるが、ライナーの製造コストを考えると、大幅な鋳型改造および追加工程として仕上げ加工を必要とするため、コストの面から効果的ではない。堰形状の変更だけの方案改造では、解析および実機試験の結果から、最終凝固部は必ず製品部上に存在すると推察される。対策の狙いとして、製品歩留りを低下させ品質悪化を招く面積を持つ引け巣に対し、いかに分散・最小化させるかを対策の指針として考えた。

ここで、実機試験の結果から、堰近傍の集中的な湯流れによりベース板が溶け込み、貫通するほどの溶損が発生していることが問題となっている。Fig.16 にベース板の溶損状態を示す。堰直下の板が完全に溶損していることが確認でき、ベース板の裏へ大量の湯差しがあった。

そこで、局所的な冷却方法として冷し金の設置を検討した。問題となる最終凝固部の湯を速く冷却させることで、ベース板の溶損防止および凝固促進を図った。Fig.17 に2種類の冷し金設置パターンを示す。冷し金はベース板の裏面に接するように設置した。(a) では湯口側全体の引け巣部を除去および溶損防止のため、冷し金として平板を設置した。また、(b) では(a)の方案を軸にして、Fig.15(b)の結果からさらに引け巣部を挟むように3枚の冷し金を設置し、引け巣部の分散化を狙った。



(a) Long plate only, (Design No.5)



(b) Long plate and three short plates, (Design No.6)

Fig.17 Installation configuration of chiller plates on underside of base metal

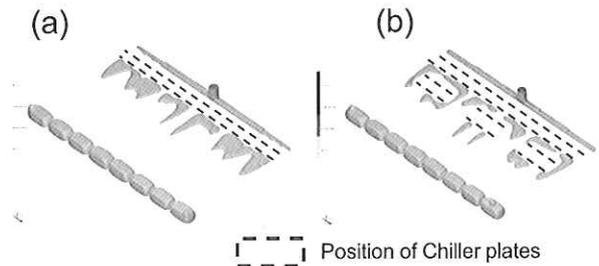
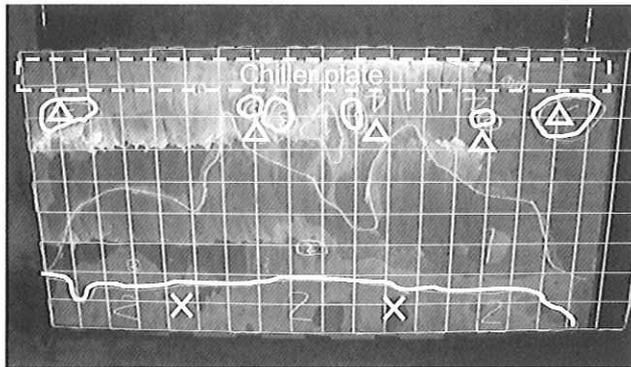


Fig.18 Effect of chiller plates on solidification of molten metal:

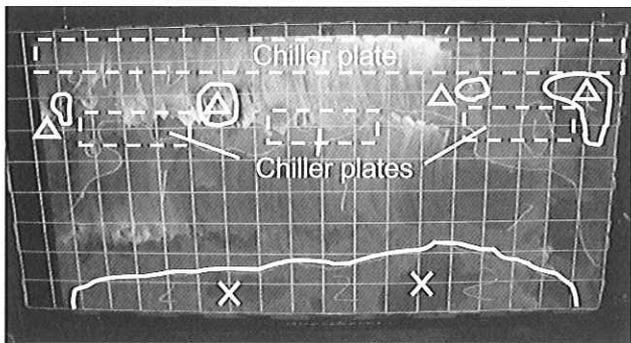
(a) long plate only, (b) added three short plates

Fig.18 に冷し金を用いた凝固予測結果を示す。(a) を見ると最終凝固部の位置が冷し金の効果により、揚がり側へとずれるように移動していることがわかった。(b) では(a)の結果に加え、3枚の冷し金設置部を避けるように、最終的な凝固部が現れていることがわかった。したがって、凝固予測では(b)案の方がより凝固部を分散化できることが確認できた。しがしながら、いずれの冷し金による凝固への影響の解析結果からも、冷し金の効果による大幅な改善は困難であることが考えられる。

Fig.19 に実機試験における現物の評価結果写真を示す。解析予測の通りに冷し金を避けるように引け巣部が発生した。これまでの実機テスト結果と比



(a) Long plate only



(b) Long plate and three short plates

Fig.19 Quality inspection results for actual product made by casting mold with chiller plates:

×, uncladded place; Δ, shrinkage cavities

較すると、全体的に引け巣部の縮小が見られた。しかし、未溶着部位を見ると、明らかに拡大しているのが確認され、結果として品質の悪化を招いた。この原因としては、冷し金による湯温の低下の影響が大きいと考えられる。そのため、引け巣対策の方向は未溶着の拡大を促進させることから、効果を見極め、最低限の引け巣部縮小化の対策を施す必要であることがわかった。しかしながら、ベース板の溶損に対しては湯差しが改善され、冷し金による一定の効果が認められた。

## 6. 方案最適化

これまでの試験結果により、溶着範囲の向上および引け巣欠陥の最小化を図るための鑄掛方案の最適化の検討を行った。Fig.15, Fig.19の実機結果を受けて解析を行い、Fig.20のような方案に決定した。Table 4に寸法比率および各堰の面積傾斜率を示す。Fig.20(a)は Fig.12(b)を基に、中央部から端部への

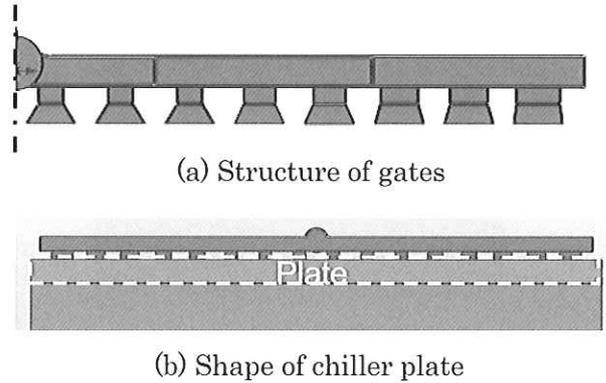


Fig.20 Schematic illustration showing optimized casting design,(Design No.7)

Table 4 Areas ratio and slope ratio of gate for optimized casting design

Design No.	Area ratio			Slope-ratio of gate ( $S_{c1}/S_{cl}$ )
	Sprue ( $S_d/S_a$ )	Runner ( $S_l/S_a$ )	Gate ( $S_d/S_a$ )	
7	1.00	0.97	0.93	1.75

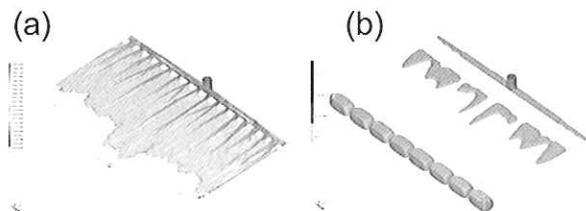


Fig.21 Prediction results for optimized casting design: (a) flow pattern,(b) solidification of molten metal

堰幅比率を緩やかに拡大させ、端側の湯量を保持しつつも中央部への湯流れを促すような構造に設定した。また Fig.20(b)は Fig.17(a)を基に、冷し金の幅を小さくし、できるだけ湯温の低下を防ぐようにし、引け巣よりも未溶着の対策を優先させた。

Fig.21 に湯流れおよび凝固解析の予測結果を示す。Fig.13(b)に比べ、Fig.21(a)では中央部の湯流れが改善されており、また Fig.21(b)では、最終凝固部の位置が冷し金分だけ移動した結果となった。

この解析結果を踏まえて、Fig.22に実機試験を行った鑄物表面のUT品質評価写真を示す。引け巣部の完全除去はできなかったものの縮小しており、また未溶着部の面積も大幅に減少した。これまでの

Table 5 Comparisons of rejectable quality and shrinkages area ratio at all test castings (%)

Design No.	Pressure	Width of gates	Chiller plate	Rejectable quality	Shrinkages area
1	×	All same (1)	-	25	10
2	○	All same (1)	-	7	7
3	○	Wide→Narrow (0.67)	-	5	5
4	○	Narrow→Wide (2.87)	-	3	6
5	○	Narrow→Wide (2.87)	Long plate only	14	3
6	○	Narrow→Wide (2.87)	Four plates	15	3
7	○	Narrow→Wide (1.75)	Long plate only	1	4

( ): Slope-ratio of area as  $S_{cd}/S_{ca}$

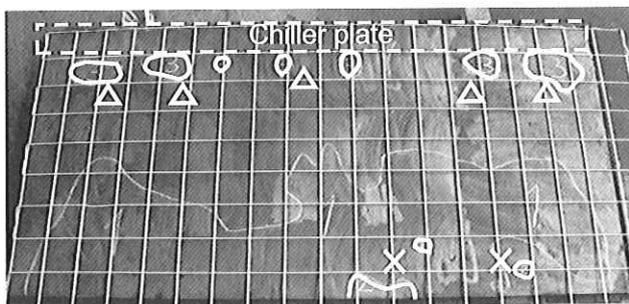


Fig.22 Quality inspection result for actual product made by optimized casting design:

×, uncladded place; Δ, shrinkage cavities

方案の中で最も品質合格率が高く、全体的に改善が実施できた。Table 5にこれまでの実機試験における品質の評価結果を示す。初期方案 Design No.1に比べ最適化方案 Design No.7では、引け巣の範囲および不良である未溶着部の縮小化については、かなりの改善ができた。特に未溶着部の出現率は25%から1%まで低下させることができた。

シミュレーションシステム導入以前に比べ、導入後は改善に対する準備期間および費用は格段に抑えることが可能になった。また、改善対策においても、より効果的な方案を検討できるようになった。

## 7. 結言

本研究では、市販の鋳造シミュレーションシステムを用いて、鋳掛方案の構築および結果予測により、ESTライナー鋳掛方案の改善を行った。実機鋳掛試験により鋳造した鋳物表面の品質評価を行い、方案の適否を検証し、改善を進めた。今回得られた研究成果を要約すると次の通りである。

- 1) 本稿で用いた鋳造シミュレーションシステムは、高い精度で鋳造結果の予測が可能であることを確認し、当社独自のライナー製法に対して効果的な改善手段であることが実証された。
- 2) 鋳物とベース板との溶着は湯流れに大きく影響され、湯流れが弱いところほど未溶着部になりやすいことがわかった。
- 3) 最適な湯流れ方案として、未溶着部を抑制させるには、製品部の湯流れを均一化させることが有効であることがわかった。
- 4) 冷し金による引け巣部の最小化対策は大きな効果はなく、むしろ未溶着部の拡大を招いたが、ベース板の溶損には効果的であった。
- 5) シミュレーション解析を用いた手法により、鋳掛方案の改善を大幅に効率化することができた。さらには製品結果である未溶着部を25%から1%まで縮小化することができた。

## 参考文献

- 1) 宮崎 裕之：フジコー技報 No.8, 2000, 43-51
- 2) 大野 京一郎, 吉永 宏, 嵩 純孝：フジコー技報 No.15, 2007, 47-52
- 3) 大野 京一郎, 野村 大志郎：フジコー技報 No.13, 2005, 60-64
- 4) 鋳造シミュレーションシステム ADSTEFAN ホームページ: <http://www.adstefan.com/>, 茨城日立情報サービス(株), 2010年10月7日
- 5) 鋳型の生産技術教本編集部会：鋳型の生産技術, 2002, 194-218
- 6) 中江 秀雄：鋳造工学, 1995, 産業図書, 108-112