

# 鋼片加熱炉シミュレーション技術の開発

Development of temperature simulation technology for a reheating furnace

谷口 剛\*

Tsuyoshi Taniguchi

Synopsis: The temperature simulation technology for a reheating furnace was developed, where the variation of radiation-heat-transfer due to different distances between blooms was taken into account.

An optimum distance between blooms for efficient heating was found through the simulation model at a given productivity, since wider bloom distance resulted in the increase of heat supplied to bloom sides and the decrease of heating time.

Key words: reheating furnace, CAE analysis, radiation, distance between the blooms, productivity improvement

## 1. はじめに

昨今の旺盛な特殊鋼鋼材需要に対応して生産能力を増大させるために、各種設備の改造が検討・実施されてきている。最近では、設備の設計、改造案の評価、操業の制御にシミュレーション技術が広く用いられており、鋼片加熱炉についても多くの報告例がある。鋼片加熱炉のシミュレーション技術は、加熱炉内の熱伝達計算を行って鋼片温度をシミュレーションする技術<sup>1-7)</sup>が基となっており、さらにシミュレーション結果を加熱炉の操業条件に反映させて最適加熱制御を行う報告例<sup>2,4)</sup>や、加熱炉のバーナーの燃焼シミュレーション<sup>6,7)</sup>をも行い、最適燃焼制御、排ガス制御を行う報告例<sup>7)</sup>もある。

当社においても、150T製鋼工場の鋼片加熱炉の生産性向上が必要であったことから、鋼片加熱炉シミュレーション技術を開発し、種々の改造方案の検討を行った。本論文では、開発した鋼片加熱炉シミュレーション技術の概要とその適用例として加熱炉内のブルーム配置間隔変更時のシミュレーション評価結果を示す。

## 2. 鋼片加熱炉

Fig. 1に150T製鋼工場の工程概略を示す。150T製鋼工場では、棒鋼や鋼管製品の間形成体である鋼片（ビレット）を製造しており、電気炉でのスクラップ溶解からビレットの検査まで連続して行っている。鋼片加熱炉は、ウォーキングビーム式の連続加熱炉で、連鑄機で鑄込まれたブルームを鋼片圧延に適した温度に加熱する役割を果たしている。

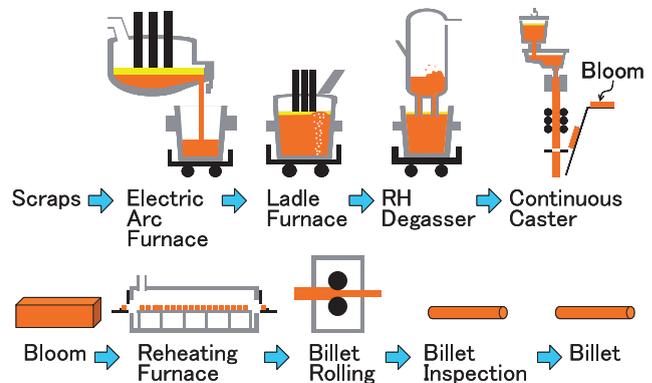


Fig.1 Production processes of 150T steelmaking plant.

鋼片加熱炉の生産性向上のために、ブルームの送り速度を上げると、ブルームの昇温が不十分になり、延性不足による鋼片圧延疵が発生して品質の悪化を招く恐れがあるため、同時に昇温速度を増加させる、あるいは在炉時間を延長するための設定変更や改造が必要である。

これに関して、昇温速度を増加させるために加熱炉の設定温度を上げる方法や、在炉時間を延長するために炉長を延長する方法があるが、本論文では、鋼片加熱炉内のブルーム配置間隔変化による昇温速度の増加・在炉時間の延長についてシミュレーションを行い、その影響を評価した。

鋼片加熱炉内のブルーム配置間隔は、ブルーム配置間隔を狭くすると炉内のブルーム装入本数が増えて在炉時間が延長されるが、ブルーム間の側面からの入熱が減って昇温速度が減少すると考えられる。一方、ブルーム配置間隔を拡大するとブルーム間の側面からの入熱が増えて昇温速度が増加するが、炉内のブルーム装入本数が減って在炉時間が短縮されると考えられる。このようにブルーム配置間隔の変化は、ブルームの昇温に対して相反する効果を持つこ

\* 研究・開発センター プロセス開発グループ

とから、鋼片加熱炉の生産性向上を検討する上で、適正なブルーム配置間隔を見出すべく、鋼片加熱炉のシミュレーションを行った。

### 3. 鋼片加熱炉シミュレーション

Fig. 2に鋼片加熱炉内のブルーム加熱イメージを示す。加熱炉からブルームへの熱伝達は、フレーム・炉体壁・他のブルーム・雰囲気ガスからの輻射、雰囲気ガスの対流によって行われ、ブルーム内部は熱伝導によって昇温して行く。1000℃を超える高温の加熱炉内では、輻射による伝熱が大部分を占め、対流による伝熱量は全体の数%に過ぎない<sup>8)</sup>とされている。

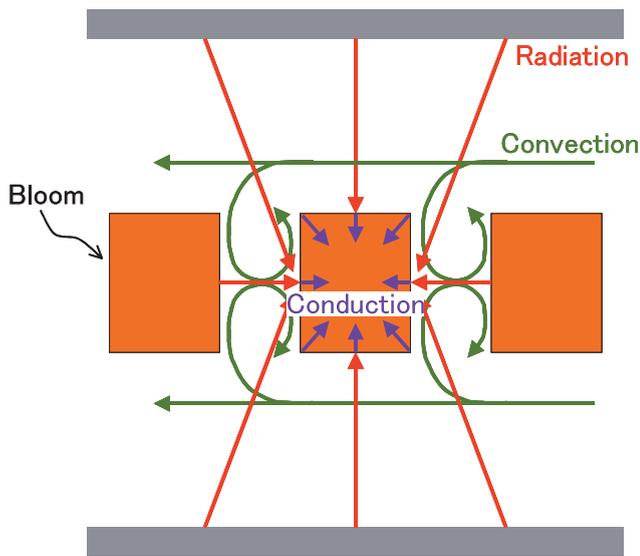


Fig.2 Bloom heating image in the reheating furnace.

これまでもシミュレーション技術を用いて加熱炉の設定温度変更の影響を評価し、適正な設定温度を決めるための支援をしてきているが、ブルーム配置間隔の変更のような炉内配置の変化に応じた各部位への輻射伝熱の変化を、十分な精度でシミュレーションすることはできていなかった。そこで、加熱炉内のブルーム配置間隔の変化に応じた輻射伝熱の変化をシミュレーションできる解析コードのFLUENTにてモデルを作成し、ブルーム配置間隔変更時のシミュレーション評価を行った。

Fig. 3にシミュレーションモデルの一例を示す。シミュレーション条件をTable 1に示す。シミュレーションモデル形状は、鋼片加熱炉縦断面の二次元モデルを用い、対象とするブルーム以外の他のブルームからの輻射伝熱を考慮するため、対象ブルームの前後2本のブルームについてもシミュレーションを行った。実際の鋼片加熱炉ではフレームと対象ブルームの位置関係は経時変化するが、モデルの簡略化のため、フレームおよび炉体壁を同一と見なし、炉体上壁、炉体下壁から設定温度に応じた輻射が生じるものとした。また、ブルームを移動させる代わりに、ブルーム

送り速度に対応した加熱炉内位置の温度に炉体上下壁と流入する雰囲気ガスの温度が経時変化するように非常常モデルを作成した。輻射計算モデルについては、種々の輻射計算モデルを用いた場合のシミュレーション結果を比較して、実際の現象に最も適合したDiscrete ordinates radiation modelを採用した。シミュレーションモデルの妥当性は、シミュレーション結果と放射温度計で測定した実際のブルームの鋼片加熱炉装入温度、抽出温度がほぼ一致することで確認できた。

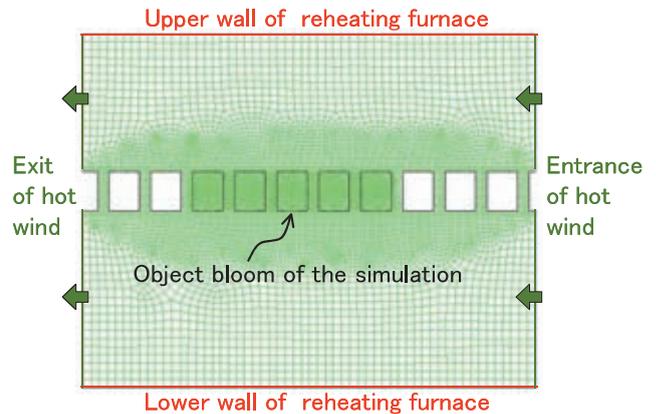


Fig.3 An example of the simulation model.

Table 1. Calculating conditions

CAE code	FLUENT
Dimension	2D
Time dependence	Unsteady
Radiation model	Discrete ordinates radiation model
Density of steel	7800 kg/m <sup>3</sup>
Specific heat of steel	468.6~1430.9 J/kg·K
Thermal conductivity of steel	25.9~51.8 W/m·K
Emissivity of bloom surface	0.72

### 4. シミュレーション結果

シミュレーションの結果、各種条件に応じてFig. 4に示す温度分布図や、Fig. 5に示すブルームの昇温曲線が得られる。これらのシミュレーション結果を一定の生産性・加熱炉温度設定の条件でブルーム配置間隔についてまとめたものがFig. 6である。

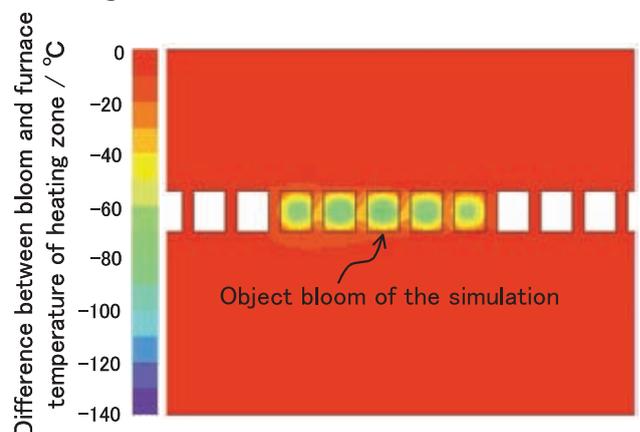


Fig.4 An example of calculated temperature distribution.

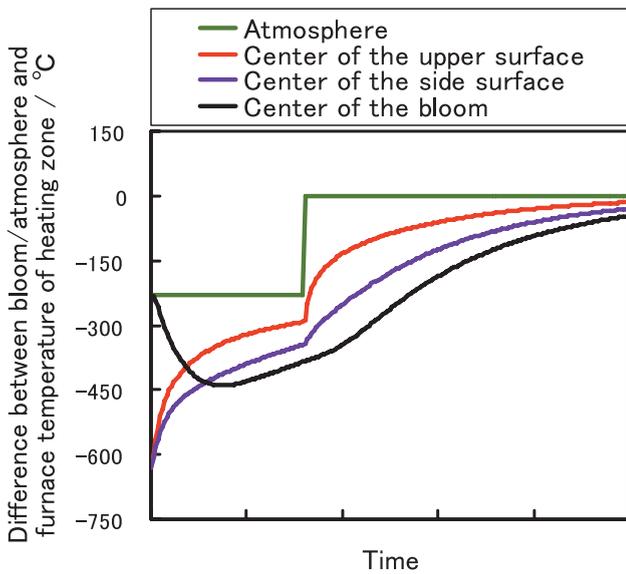


Fig.5 An example of calculated temperature course of the bloom.

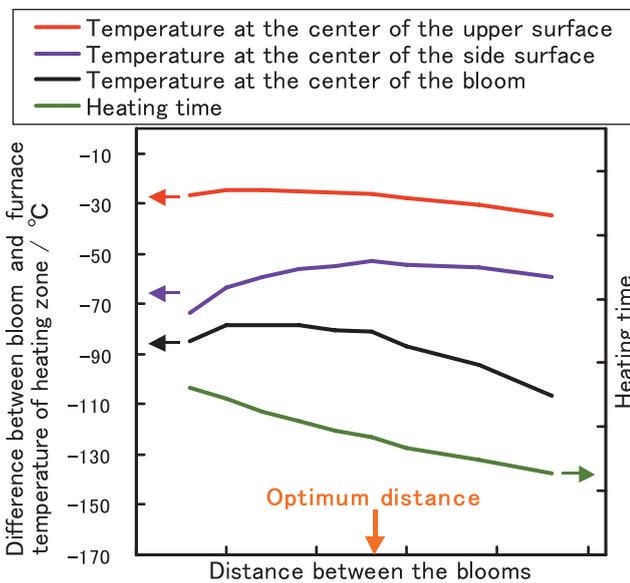


Fig.6 Influence of distance between the blooms on the temperature at fixed productivity and heat pattern.

Fig. 6からブloom配置間隔を狭くすると炉内のブloom装入本数が増えることで、在炉時間が延長されてブloomの中心温度は高くなるが、ブloomの側面への入熱が減少して側面の温度が上がりにくくなることが分かる。さらに、ブloom配置間隔を狭くし過ぎると、側面への入熱が減少し過ぎて全体の入熱が少なくなるため、在炉時間が延長されるにも関わらずに中心温度が上がりにくくなることが分かる。また、ブloom配置間隔を拡大するとブloom側面への入熱が増加してブloom側面の昇温速度が増加するが、炉内のブloom装入本数が減ることで、在炉時間が短縮されてブloom中心の温度が上がりにくくなり、ブloom表面の昇温も抑えられることが分かる。

延性不足によって鋼片圧延疵を発生させないようにブル

ーム表面を十分に加熱するという観点からは、昇温しにくいブloom側面の温度を高くできる条件が適正条件と言える。したがって、この生産性・温度設定条件での適正なブloom配置間隔は、Fig. 6に矢印で示したブloom配置間隔であることが分かった。

## 5. まとめ

鋼片加熱炉内のブloom配置間隔の変化に応じた輻射伝熱の変化をシミュレーションできるモデルを作成した。このモデルを用いて、ブloom配置間隔変更時のシミュレーション評価を行った結果、適正なブloom配置間隔を明らかにすることができた。

## 参考文献

- 1) 江川元浩, 白石典久, 小橋正満: 鉄と鋼, 68 (1982) 12, S1188.
- 2) 遠藤敏夫, 舟橋康行: 鉄と鋼, 71 (1985) 10, 1335.
- 3) 水野正志, 遠藤敏夫, 八木富一: 電気製鋼, 57 (1986) 2, 85.
- 4) 芳谷直治, 永沼洋一, 梁井俊男: 製鉄研究, 339 (1990), 41.
- 5) 大森敬明, 永田敬博, 谷口博, 工藤一彦: 日本機械学会論文集B, 57 (1991) 542, 3491.
- 6) 石井俊夫, 日野善道, 杉山峻一, 石岡宗浩: 材料とプロセス, 10 (1997) 4, 924.
- 7) 杉山峻一, 石井俊夫, 石岡宗浩, 日野善道: NKK技報, 161 (1998), 26.
- 8) 連続鋼片加熱炉における伝熱実験と計算方法, 日本鉄鋼協会, (1971), 7.

■ 著者



谷口 剛