

グリッドコンピューティングによる加熱炉の温度計算

Temperature Calculation of a Reheating Furnace Using Grid Computing

坂本 憲昭*, 小沢 和浩*, 新村 隆英**
Noriaki.SAKAMOTO*, Kazuhiro.OZAWA*, Takahide.NIIMURA**

Abstract: We calculate the process model of a reheating furnace by using a grid computing system. It shows that the calculation time is very short and the cost is advantageous than we use of a computer made in order to control a process.

Keywords: grid computing, reheating furnace, process computer

1. はじめに

おもに鉄鋼業で用いられる連続式加熱炉は、鋼片を炉の片側から装入し、高温の炉内を「少し前進」「停止」を繰り返して移動させ、加熱して装入の反対側から抽出するものである (Fig.1 参照)。装入と抽出を継続して繰り返す操業形態であり、鋼片は数珠つなぎの様相となる。

この加熱炉の操業に用いるモデル計算は少なくとも3つ以上に分けることができ、いずれの計算も繰り返しや温度分布のメッシュ計算であるためにCPUの負担が大きい。モデルのなかでも特に負荷が高い設定炉温計算は、計算機上で鋼片の位置を進めて、現在の炉内の温度 (以下、炉温) を用いて鋼片の温度分布計算を繰り返し、鋼片が抽出される時の温度を予測する。これを利用して、炉温の変更を調整パラメータとしてシミュレーションを繰り返せば、逆に抽出時の鋼片温度が指定された温度に到達するための炉温を得ることができる。

シミュレーションの繰り返しは、CPU負荷が高いモデル計算をさらに繰り返す。この計算を規定時間内に (鋼片が停止している間に) 終了させなければならないため、専用のなるべく高速な計算機が要求される。また、24時間365日の連続操業に対応するため、故障時の対策としてバックアップ計算機を準備しておく必要がある。

一方、低コストで計算高速化を実現する手法として、パソコンのクラスタ化やグリッドコンピューティング環境 (以下、グリッド) がある。クラスタ化は専用のソフトウェアやハードウェアが必要であり導入は容易ではない。グリッドの場合、汎用パソコンを用いて構築が可能であり、故障により1,2台欠けても計算能力に顕著な影響はない。さらにWindowsパソコンであればよいので、保守・運用コスト削減に寄与する。

本稿は実際にグリッドで加熱炉のモデル計算を行い、計算時間の短縮化の効果とコスト削減の意味を示すことが目的である。

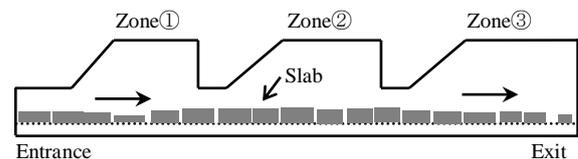


図1. 加熱炉
Fig.1 Control system of the reheating furnace

2. グリッドコンピューティング環境

著者らの研究室には以下に示すグリッドがあり、電力市場価格の予測³⁾において計算時間短縮に効果をあげている。グリッドを実現するAD-POWERS²⁾は、処理に時間を要するジョブや計算を同一ネットワークセグメント内のパソコンに分散処理させるミドルウェアであり、Windowsパソコンのスクリーンセーバとして稼動する。導入にあたってはメーカーのサポートは不要で、普通のアプリケーションをパソコンにインストールするのと同じである。

ソフトウェア	グリッド	AD-POWERS
	OS	WindowsXP Home Edition
ハードウェア	CPU	Celeron 2.93GHz
	Memory	512Mb
	HDD	7200rpm, U-ATA133
	台数	最大 20 台使用

Fig.2にグリッドのシステム構成を示す。マスターパソコンはデータのとりまとめ役を担うが、特別なパソコンではなく、スクリーンセーバで計算をおこなうボランティアパソコンと同じである。マスターパソコンが故障すれば、ボランティアパソコンの1台をマスターパソコンにすればよい。なお、各パソコンは同一性能である必要はない。

動作の仕組みは、ボランティアパソコンのスクリーンセーバが稼動すると、マスターパソコンから計算するモデル

* 法政大学
* HOSEI University
** TNC Systems
(Received November 9, 2007)

と必要な入力データをもたらす。計算終了後、結果をマスターパソコンに送信する。計算すべきデータがなくなるまでこの繰り返しである。

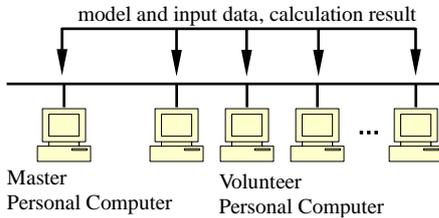


図2. グリッドシステム
Fig.2 Grid Computing System

3. モデル計算¹⁾

本稿で用いる加熱炉のモデル計算を示す。

- ① 雰囲気温度計算：炉内の温度計による測定値から鋼片周囲の雰囲気温度を予測する
- ② 鋼片温度計算：①の結果を用いて鋼片の温度分布を計算する
- ③ 設定炉温計算：装入から現在位置までの移動履歴が、抽出まで同じ移動時間・移動間隔で連続すると仮定して、炉温を変更した場合に抽出位置に到達したときの鋼片の温度分布はどうなるかを、②鋼片温度計算を繰り返し計算して求める。この予測結果が、あらかじめ指定された抽出時の温度と一致するまで、炉温の増減をパラメータとしてシミュレーションを繰り返す。

②鋼片温度計算は、炉内すべての鋼片に対して、さらに③設定炉温計算において繰り返し用いられる中心となるモデルである。以下に計算内容の概略を説明する。まず、本稿で用いる記号を示す。

$T_{j,n}$	鋼片各計算点温度 (Fig.3 参照)
TA	鋼片周囲の雰囲気温度 (Fig.3 参照) (①雰囲気温度計算による結果)
σ	ステファン・ボルツマン定数
α	温度伝導率
ρ	密度
F	形態係数
k	計算時刻
Δt	計算刻み時間
ε	放射率
c	比熱
Δx	計算メッシュ幅
Δy	計算メッシュ厚み (Fig.3 参照)

鋼片の温度は2次の熱伝導方程式を差分公式から求める。鋼片の搬送方向の長さをゼロとし、対する幅方向に計算メッシュを105点設ける (Fig.3 参照)。鋼片表面のある1点 $T_{j,n}$ は次式から求める。

$$T_{j,n}[k] = \gamma(T_{j,n}[k-1]^4 - TA[k-1]^4) + (1-2r_x-2r_y)T_{j,n}[k-1] + r_x(T_{j+1,n}[k-1] + T_{j-1,n}[k-1]) + 2r_yT_{j,n-1}[k-1]$$

$$r_x \equiv \frac{\alpha \Delta t}{\Delta x^2} \quad r_y \equiv \frac{\alpha \Delta t}{\Delta y^2} \quad \gamma \equiv \frac{2\Delta t \varepsilon \sigma F}{\Delta y \rho c}$$

一方、鋼片内部の熱伝導は

$$T_{j,n-1}[k] = r_x(T_{j+1,n-1}[k-1] + T_{j-1,n-1}[k-1]) + (1-2r_x-2r_y)T_{j,n-1}[k-1] + r_y(T_{j,n}[k-1] + T_{j,n-2}[k-1])$$

により求める。すべての計算点105点を同様に計算する。

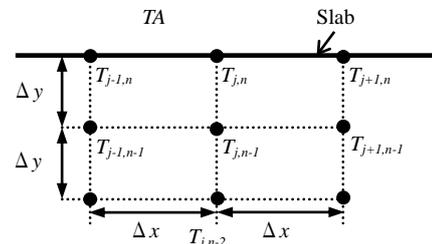


図3. 計算メッシュ
Fig.3 Calculation nodes of slab temperature

4. 数値実験

前章の鋼片の雰囲気温度 TA は①雰囲気温度計算により求まる値であり、炉温を調整することで変化する。③設定炉温計算では、①の計算結果をそのまま用いずにシミュレーション上で **Table.1** に示す増減 (ここでは8パターンを想定) を行なう。なお **Table.1** の値やパターン数は計算負荷を検討するために想定した単なる数値例である。

表1. 炉内温度の増減パターン

Table.1 The increase and decrease of pattern of the temperature in the furnace [°C]

	1	2	3	4	5	6	7	8
Zone①	+10	-10	0	0	0	0	0	0
Zone②	+10	-10	+10	-10	0	0	+10	-10
Zone③	+10	-10	0	0	+10	-10	-10	+10

炉内には常に120枚の鋼片が180秒周期で「移動」「停止」を繰り返していると仮定する。したがって、すべてのモデル計算を180秒以内に終了する必要がある。現実には、限られた時間内に必ず計算を終了しなければならないため、繰り返し計算の有限回数での打ち切り、炉内すべての鋼片ではなく重要品に限定した計算などが考えられるが、ここでは炉内すべての鋼片について①～③ (③設定炉温計算では **Table.1** の8パターン) をすべて計算して終了とする。

分散処理の方法は、鋼片毎の計算 (①～③) をひとつのジョブとし、120枚の鋼片があるので120個のジョブを各ボ

ランティアパソコンに1個ずつ投げる。マスターパソコンから各ボランティアパソコンに対して、鋼片のサイズ、材質、炉内温度などのデータ(約9kB)を送信する。ボランティアパソコンは、このデータを入力データとして①～③のモデル計算を行い、計算結果である鋼片の温度分布データ(約65kB)をマスターパソコンに返す。120個の入力データを180秒以内に処理することになる。

比較のためにグリッドで用いるパソコンよりもCPUが高速な以下のパソコン1台で同じ処理を行なう。

ソフトウェア	グリッド	なし
	OS	Windows2000
ハードウェア	CPU	Pentium4 1.6GHz
	Memory	512Mb
	HDD	7200rpm, U-ATA133

計算結果(各3回実施)をFig.4に示す。この例ではボランティアパソコンが5台でも180秒以内に計算を終了している。

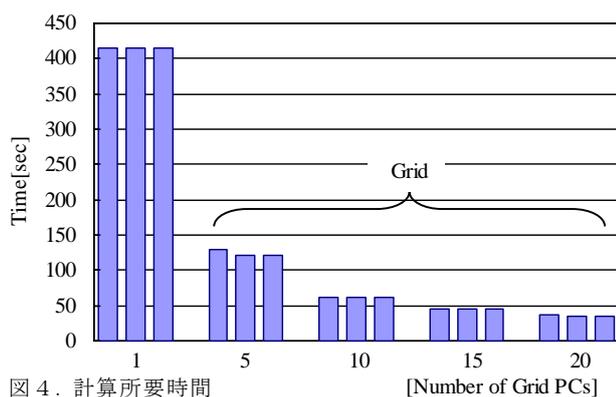


図4. 計算所要時間
Fig.4 Time which was required for model calculation

5. スクリーンセーバの起動時間と停止時の対策

AD-POWERsはスクリーンセーバとして稼動する。スクリーンセーバの起動までの最短時間は1分であるが、工場の保全時に操業開始まで1分以上の余裕は明らかにあり、1分間の影響はない。

また、ボランティアパソコンにマウスやキーボードをメンテナンス時以外には接続しておく必要はないので、スクリーンセーバが解除される可能性は非常に低い。しかしながら、より冗長性を高めるのならば、マスターパソコンから定周期でボランティアパソコンのスクリーンセーバを遠隔起動するバッチプログラムをAD-POWERsとは別に組み込めばよい。AD-POWERsの起動命令は、スクリーンセーバの実行ファイルであり、また、起動中に再起動をかけても2重起動しないので問題はない。

6. おわりに

(1) 計算負荷の高い加熱炉のモデル計算をグリッドで処理することで計算時間の短縮を示した。数値実験では汎用パソコンが5台でも十分に計算時間の制約を満足することができた。実験例では70%減の計算時間短縮効果である。

(2) グリッドの場合、4章の数値実験が示したとおり台数が多いほど計算時間は短縮されるが、ボランティアパソコン1台が故障しても顕著な影響はないと判断する。したがって1台ごとの堅牢性は要求されないため、高価なFA用パソコンではなく安価な汎用パソコンを用いて壊れたら交換という事後保守で充分であることがわかる。このことから、専用のプロセスモデル用計算機を導入するよりも以下のコストダウンを図ることができよう。

- ・ハードウェアの初期導入および予備品不要によるコストダウン
- ・ハードウェアの健全性を監視するなどの専用のミドルウェアが不要
- ・ランニングコストとなるメーカーの保全・点検が不要

(3) プロセスモデル用計算機には、数年以上の長寿命が要求されるが、最近では、ハードウェア・ソフトウェアともに同一品(または同等品)・同一プログラム開発環境を維持するのが困難になっている。これに対して、スクリーンセーバが稼動するWindows系パソコンが要件である本グリッドならば、従来の専用計算機に比べて個々のパソコンの信頼性は劣るが、その時代に入手できるパソコンを購入すればよいので、システムとしての寿命は長くできると考える。

[参 考 文 献]

- 1) 坂本: スライディングモード制御による加熱炉の温度追従制御, 計測自動制御学会論文集, Vo.38, No.9, 806/811 (2002)
- 2) AD-POWERs 紹介サイト: www.ad-powers.jp/
- 3) N Sakamoto, K Ozawa and Tak Niimura: Grid Computing Solutions for Artificial Neural Network-based Electricity Market Forecasts, IEEE World Congress on Computational Intelligence, Vancouver, Canada, July 16-21 (2006)

議 論

査読者におかれましては、貴重な時間を割いていただき、この場を借りてお礼申し上げます。議論として補足をさせていただきます。

(1) 分散処理の方法が鋼片単位と、単純で実用的な面はあるが、モデル計算の精度向上、または計算時間を保障する工夫についても必要と思われる。

→ 限られた時間内に必ず計算を終了しなければならないため、本文に示した繰り返し計算の有限回数での打ち切りや重要品に限定した計算などの対策のほかに、上記の対策の必要性はご指摘のとおりである。モデル計算自体の再考

であるため、今後の検討課題としたい。

- (2) プロセス制御システムに要求される 24 時間 365 日運転に対して、グリッド環境の適用は有効性を感じるが、本報告内容ではマスターパソコンが故障した場合は人手による切り替えが必要なため、通常の 2 重化システム構成に対する優位性があまり感じられない。

→ ご指摘のとおり、冗長化のためにホットスタンバイが可能な重厚なシステムに対する優位性はない。

なお、マスターパソコンが故障した場合に自動切り替えは可能である。マスターパソコンの上位に位置するコンピュータ（操業データをマスターパソコンに送信、グリッドによる計算結果を受信して操業に反映）側に、マスターパソコンの無応答を検知し、他のボランティアパソコンを通信相手のマスターパソコンとして切り替える処理を導入する。グリッド側では、マスターパソコンで処理するプログラムをボランティアパソコンにも導入しておけばよい。

- (3) 市販のグリッド環境構築ソフトを利用しているため、問題発生時の解析がどの程度まで行えるかが不透明である。

→ 問題発生時に原因究明（責任の所在追及を除く）を考えた場合、ハードウェア・ソフトウェアともにメーカーにおいてすべてを自社開発しているケース、またはメーカーに頼らず社内ですべてを開発しているケース、いずれも非常に少なくなってきたおり、不透明であることは本製品に限らず同じである。逆に、

- 本ミドルウェアは DLL による提供であり、その DLL に対するインタフェースはすべてオープンソースなので、C プログラミング技術者ならば解析や開発が可能である。
- 導入の容易性から市販品を利用したが、グリッドコンピューティング環境はネットワーク関連のプログラミング経験者ならば自作が可能である。
- 紹介例として、Globus Toolkit (www.globus.org/toolkit/) というグリッドシステム構築のためのオープンソースのライブラリおよびコマンドツール群が公開されている。

- (4) WindowsOS バージョンへの追従など対象ソフトの継続性に懸念があり、実システムへの適用に際する検証の必要性がある。

→ ご指摘のとおり Windows 系 OS のバージョンアップに対する懸念はある。本製品の場合、WindowsNT4.0 Workstation 以降、新しくは WindowsVista に対応するとなっている。したがって、少なくとも 2,3 世代に渡る OS のサポート期間の継続性はあると考えている。
