

# 5Y-6 適応的温度調節機能を持つ温度並列シミュレーテッドアニーリング

三木 光範<sup>†</sup> 廣安 知之<sup>†</sup> 輪湖 純也<sup>††</sup> 吉田 武史<sup>‡</sup>

<sup>†</sup>同志社大学工学部   <sup>††</sup>同志社大学工学部学生   <sup>‡</sup>同志社大学大学院学生

## 1 はじめに

シミュレーテッドアニーリング (Simulated Annealing: SA) は, 広範囲の組合せ最適化問題に有効な汎用近似解法である. しかし, 最適解を得るためには長い計算時間を必要とすることや適切な温度パラメータの決定が容易でないなどの問題点を有する.

近年, SA の並列化に関する研究が多くなされている. 中でも温度並列 SA (Temperature Parallel SA:TPSA) は, 温度スケジュールが原理的に不要であるという優れた特徴をもつ [1].

一方, これまでの組合せ最適化問題に SA を適用した研究において, 特定範囲の温度でのアニーリングが SA の性能に大きく影響を与えることが分かっている [2]. そこで, TPSA にこの重要な温度領域を自律的に探索するメカニズムを組み込んだ適応的 TPSA (Adaptive TPSA: ATPSA) を提案し, 解探索性能の向上を考える.

なお, 対象問題としてジョブショップスケジューリング問題 (Job-shop Scheduling Problem:JSP) を考える. この問題に関して重要温度領域に関する報告はなく, これについても明らかにする.

## 2 JSP における重要温度領域

一定温度 SA が解探索性能に与える影響について調べる. 実験は, 温度を 50.0 から 1.0 まで等比的に 32 分割し, 総探索数を 320000 に固定し, 20 回試行の平均を比較する. 図 1 に, JSP の代表的なベンチマーク問題である FT10 を用いた結果を示す.

この図より, 温度 7~10 付近で精度の良い解が得られており, JSP にも重要温度領域があることが分かった. FT10 以外に FT20, ORB1, ABZ5, ABZ9, LA40 のベンチマーク問題に対しても, すべて重要温度領域を見つけることができた.

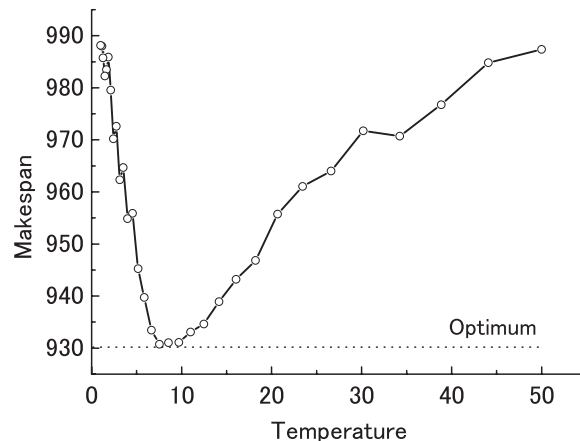


図 1: FT10 における重要温度領域

## 3 温度並列 SA

TPSA は並列処理との高い親和性を持ち, 温度スケジュールが原理的に不要であるという優れた特徴をもつ. TPSA では, 複数のプロセスに異なる温度を与え, 各プロセスは一定温度のアニーリングを行う. さらに, ある一定間隔で隣接する温度のプロセス間で解交換を行う.

TPSA では温度スケジュールは不要であるが, 最高温度, 最低温度, および温度段数を定める必要がある. この決定が不適切である場合, 良好な解を得ることはできない.

## 4 適応的 TPSA

種々の温度範囲を用いて TPSA を行ったところ, 重要温度領域を集中的に探索することで効率的な探索が行えることが分かった. そこで, 自律的に重要温度領域を探索する適応的 TPSA (ATPSA) を提案する.

ATPSA は, 解の値とは別に重要温度指数という値を用いることにより, 重要温度領域を探索するメカニズムを持つ. ATPSA のアルゴリズムを図 2 に示す.

次状態生成には, クリティカルブロック近傍 (CB 近傍) [3] を用いる. CB 近傍により生成された次状態のいくつかは, 実行可能ではない. そこで, ここでは GT 法 [4] により実行可能解への修正を加えている.

重要温度指数とは解の動きを評価する値で, 重要温度領域に近い温度で解探索するほど高い値を示すようにする. すなわち, ATPSA では全プロセスに同一の基準値を設定し, 改良方向への解遷移が生じた場合, 解と基準値との差を加算する. 基準値には全プロセス

Temperature Parallel Simulated Annealing with Adaptive Temperature Tuning

<sup>†</sup> Mitsunori MIKI(mmiki@mail.doshisha.ac.jp)

<sup>††</sup> Tomoyuki HIROYASU(tomo@is.doshisha.ac.jp)

<sup>‡</sup> Junya WAKO(wako@mikilab.doshisha.ac.jp)

<sup>‡</sup> Takeshi YOSHIDA(undry@mikilab.doshisha.ac.jp)

Department of Knowledge Engineering (†)(††)

Graduated School of Knowledge Engineering (‡)

Doshisha University, 1-3 Miyakodani, Tatara, Kyotanabe, Kyoto 610-0321, Japan

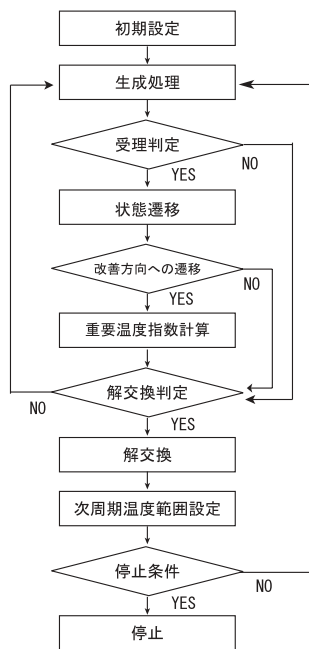


図 2: ATPSA のアルゴリズム

の解の平均値を用いる。

次周期の温度範囲は、解交換周期ごとに全プロセスが同期をとり、重要温度指数の比較を行うことで決定する。その際、式 (1) および式 (2) を用いて、次周期の最高温度  $T'_{\max}$ 、最低温度  $T'_{\min}$  を設定し、この温度範囲内で各プロセスの温度を等比間隔で割り当てる。式 (1) および式 (2) により、最高（最低）温度が高（低）すぎる場合は、温度を下（上）げるため、重要温度領域を含む温度範囲の決定が可能になる。

$$T'_{\max} = T_{\max} \cdot c_{\max} \quad (1)$$

$$c_{\max} = \begin{cases} 1 & \text{if } index > 0 \\ r & \text{if } index < 0 \\ 2 & \text{if } index = 0 \end{cases}$$

$$T'_{\min} = T_{\min} \cdot c_{\min} \quad (2)$$

$$c_{\min} = \begin{cases} 1 & \text{if } index > 0 \\ 0.5 & \text{if } index < 0 \\ 1/r & \text{if } index = 0 \end{cases}$$

ここで、 $index$  は重要温度指数、 $c_{\max}$ 、 $c_{\min}$  は次周期の温度範囲を決定するパラメータ、 $r$  は温度を等比的に割り当てるパラメータである。

## 5 数値実験

ATPSA を用いて、数値実験を行い性能を検証する。対象問題には、JSP の代表的なベンチマーク問題である FT10、LA40、ABZ9 を用いた。ATPSA、TPSA、逐次 SA を同じパラメータで比較した。実験結果を図 3 に示す。図 3 の横軸に問題名、縦軸に最適解との誤差（30 回試行の平均 - 最適解）をとる。

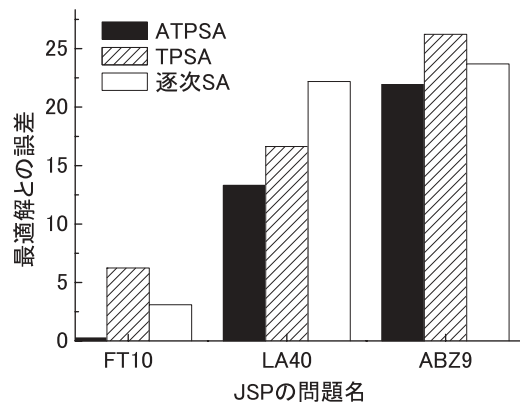


図 3: 数値実験結果

この図から、ATPSA の解探索性能は他の手法に比べて優れていることが分かる。

図 4 に、FT10 における ATPSA の温度履歴を示す。横軸に探索数、縦軸に温度をとり、32 のプロセスの温度推移を示したものである。

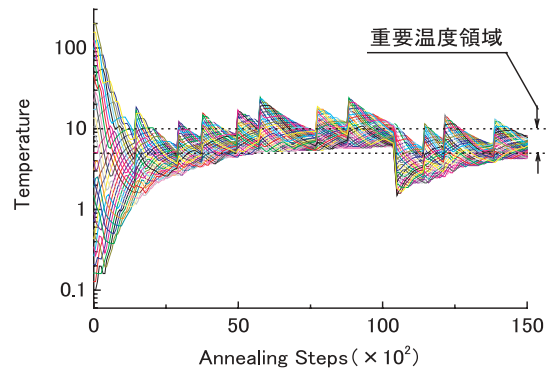


図 4: ATPSA の温度履歴（15000 回までを示す）

この図から、ATPSA では探索が進むにしたがって、温度範囲が重要温度領域に集中していくことが分かる。

この ATPSA の持つ重要温度領域を探索するメカニズムが、解探索性能を向上させた理由であると考えられる。

## 参考文献

- [1] 小西建三, 滝和男. 温度並列シミュレーテッド・アニーリング法の評価. 情報学会論文誌, 1995
- [2] Mark Fielding. Simulated Annealing with An Optimal Fixed Temperature. Society for Industrial and Applied Mathematics, 2000.
- [3] 山田武士, Bruce E. Rosen, 中野良平. クリティカルブロックシミュレーテッドアニーリング法によるジョブショップスケジューリング問題の解法. 電気学会論文誌, 1994
- [4] B. Giffier and G. Thompson. Algorithms for solving production scheduling problems. Operations Research, 1960.