実践講座

スケジューリング問題の新解法

(8)：スケジューリング問題に対するシミュレーティドアニーリング法

木瀬　洋

1．はじめに

シミュレーティドアニーリング（Simulated Annealing，以下，SA と略記）は難しい（言わゆるNP困難な）組合せ最適化問題に対する有力なメタヒューリスティクの1つであり，固体のアニーリング（焼きなまし）という物理的プロセスからの類以性に基づいている点が大きな特長である。本誌でもかつて中野ら [22]，また，最近では久保 [15] によって取上げられている。

ここでは SA の基本戦略と共にジョブショプスケジューリング問題に対する SA の最近の成果を解説する。最後に，この実践講座の締めくくりとして若干の私見を述べることをお許し頂きたい。

2．SAの基本戦略

2.1 SAとは

元々，アニーリングは機械加工の分野でよく用いられる熱処理の1つであって，加工後の固体の硬化あるいは残留応力の除去を目的として一端加熱後，徐冷する操作である。この結果，固体内部（歪）エネルギが最小となる。これと対称的なのが，焼入れであって加熱後，急冷して物体の硬度あるいは強度を増加させる。Kirkpatrick ら [10]，Cerney[2] はアニーリングの計算機（モンテカルロ）シミュレーションが組合せ最適化のプロセスと類以していることに注目した。(表1参照)

すなわち，高温下の固体の内部状態は一定温度下でも確率的に分布する。このとき，この分布が時間に依存しない状態，すなはち熱的平衡状態を保ちながら，徐冷すると，内部エネルギー最小状態に凍結する。他方急冷すると高い内部エネルギーを有する局所状態に陥る。この事を最適化プロセスに当てはめると，より良い解しか生成しない局所探索（反復改善法、欲ばり法）では局所解しか得られないが，良くも悪くも全ての解を確率的に生成しながら，緩やかに探索方向を収束させて行けば，最終的に大域最適解に収束するのではないかと考えるのである。事実，その事が理論的に証明されるのであるが，その前に SA の基本手順を示そう。

表 1: SA における物理システムと最適化問題の対比

物理システム	最適化問題
状態	実行可能解
状態の微小変化	近傍解への移動
内部エネルギー	コスト
エネルギー最小状態	最小コスト（大域最適解）
急冷（焼入れ）	局所探索（局所解）
徐冷（アニーリング）	SA

2.2 SA の基本手順

スケジューリングも含めた組合せ最適化問題を

$$P: Min.C(i),\ S.t.\ i \in S \tag{1}$$

とする。ただし，$C(i)$ は解 i のコスト，S は離散的な実行可能解の集合とする。ここで解 i とその近傍解の集合 $N(i)$ について

$$\Delta C(i,j) \equiv C(j) - C(i) \geq 0,\ {}^{\forall} j \in N(i) \subset S \tag{2}$$

が成立つとする。このとき，i は局所解となり，$N(i)$ の中では最良解であるが，大域最適解である保証はない。局所探索法は解 i に達したとき，探索を停止する。一方，表2に示す SA の基本手順が局所探索法と異なる点は局所解から脱出するために改悪解も確率的に受理する点にある（手順2.2参照)。

2.3 SA の大域最適解への収束性

表2の手順を固体のアニーリングプロセス，すなわち解 i を1つの状態と見なしたとき，手順2で

$$AP(i,j;T_k) = \exp[-\Delta C(i,j)/T_k] \tag{3}$$

とするならば，$L_k \to \infty$ で (熱的) 平衡状態に達する。このとき，状態 i が存在する平衡確率は

$$g(i;T_k) = \left(1/Q(T_k)\right) \exp[-C(i)/T_k] \tag{4}$$

きせ　ひろし　京都工芸繊維大学工芸学部
〒606 京都市左京区松ケ崎御所海道町

表 2: SAの基本手順

手順1（初期化）:

(1.1) 初期温度 T_s，停止条件（最終温度 T_f，ステージ数 Kなど）を設定。

(1.2) 初期解 i_sを生成し，$i := i_s$を現在解，$i^* := i$を暫定解（最良解）とする。

(1.3) 現在のステージ数 $k := 1$，温度 $T_k := T_s$とする。

手順2（遷移）: 反復回数 L_kを設定し，以下の手順を L_k回繰り返す。

(2.1) 現在解 i の近傍解 $j \in N(i)$ を無作為に選ぶ。（重複無作為抽出）

(2.2) $\Delta C(i,j) \leq 0$ ならば，無条件に $i := j$とする。そうでなければ，$[0,1)$ の一様乱数 rを生成し，rが受理関数 $AP_k(i,j:T_k)$ の値以下ならば，$i := j$とする。（改悪解 j を受入れる）

(2.3) $\Delta C(i^*,j) < 0$ ならば，$i^* := j$とする。

手順3（冷却）: 停止条件（$T_k \leq T_f$, $k \geq K$など）を満たすならば，停止. i^*が求める解である。そうでなければ，冷却スケジュールに基いて $T_{k+1}(< T_k)$ を設定。$k := k+1$ として手順2へ戻る。

で与えられる [21]。式 (3) は Metropolis 規準，式 (4) は Boltzmann 分布として知られている。

ところで，式 (3) は i から jへの状態遷移が i 以前の状態には依存しないことを示しており，この様にして生成される状態遷移の列をマルコフ連鎖という。従って式 (3) の受理関数を用いるとき，SA による解の生成は多数の斉時的マルコフ連鎖（$L_k > 1$のとき）あるいは1本の非斉時的マルコフ連鎖（$L_k = 1$のとき）を生成していると見なす事が出来る。この様なマルコフ連鎖の理論によれば，任意の2つの解 i,jに対し，i から jへの遷移が可能（すなわち，既約的マルコフ連鎖）という条件のもとで，斉時的SA に対して

$$\lim_{T_k \downarrow 0} \lim_{L_k \to \infty} Prob[i \in S_{opt}] = 1 \tag{5}$$

が成立つ [1]。ただし，S_{opt}は大域最適解の集合である。すなわち，SA で最後に残った解 i が最良解 i^*であり，かつ大域最適解でもある。他方，非斉時的 SA が大域最適解に漸近的に収束するためには

$T_k \geq c/\log(1+k)$，c は問題規模に依存する数

を満たさなければならない事も証明されている [4,18]。

この事は膨大な計算量（解の全数より多い場合もある）が要求される事を意味している。

以上から SA の大域最適解への収束性について2つの見方ができる。

1) 式 (3) を用いた SA によって最適解を得るためには無限回に近い計算が必要で，現実的ではない。
2) SA の漸近的収束性は計算回数（$L_k \times K$）を増す程，良い解が得られる可能性を示唆している。

2.4 近似解法としてのSA戦略

前節の見方から近似解法としての SA の有効性が期待できる。このためには表2において適当に設定しなければならないパラメータが存在し，それらを表3に示す。パラメータ設定の戦略としては次の2つが考えられる。1) SA の理論（大域解への収束性）に沿う。2) 改悪解を確率的に受理する点だけを残して後は問題の性質を利用した工夫を行なう。

2) については次章以下で論議するとして，ここでは 1) について簡単に述べる [1]。

C1) 初期温度 T_s: 実質的に全近傍解が受理される様に決定する。すなわち，温度 Tで m_1個の改善解と m_2個の改悪解を生成した時，受理率は
$$X \approx \{m_1 + m_2 \exp[-\overline{\Delta c}^{+}/T]\}/(m_1+m_2) \tag{6}$$
となる（$\overline{\Delta c}^{+}$は改悪解の$\Delta c(i,j)$ の平均値）から
$$T = \overline{\Delta c}^{+} \ln[m_2/(m_2 X - m_1(1-X))] \tag{7}$$
よって Tを低温から一定倍率で上昇させ，(6),(7) の計算を繰返し，指定の初期受理率 X_o（$= 0.90 \sim 0.99$）に達したときの Tを T_sとする。

C2) 冷却関数：斉時的 SA において反復数（マルコフ連鎖長）を有限とするためには相続く連鎖の平衡確率 (4) が互いに近いことが望ましい。すなわち，δを小さい数とし，任意の $i \in S$，kに対して

表 3: 近似的SAのパラメータ

冷却スケジュール	問題依存のパラメータ
C1)T_s(初期温度)	P1)i_s(初期解)
C2)L_k(反復数)	P2)$N(i)$（近傍解集合）
C3)T_k(冷却関数)	P3)AP$(i,j;T_k)$（受理関数）
C4) 停止条件：T_f(最終温度)，K(ステージ数）など	

$$1/(1+\delta) < g(i;T_k)/g(i;T_{k+1}) < 1+\delta \qquad (8)$$

を満す様に温度T_{k+1}を設定する。このとき,

$$T_{k+1} = T_k/[1+T_k ln(1+\delta)/3\sigma_k] \qquad (9)$$

となる。ただし，σ_kはステージkにおけるコスト$C(i)$の標準偏差である。

C3) 反復数L_k: 近傍解集合の大きさ$|N(i)|$にとる。このとき，$N(i)$の2/3程度の異なる解が生成され，式(8)のδが小さいときはこれで十分である。

C4) 停止条件：初期温度T_sで受理される解の期待コストに対する最終ステージ数Kで受理される解の期待コストの最適コストとの差の比率が値ϵ_t(停止パラメータと言う）以下になる様にKを選ぶ。このとき，式(9)のもとで，Kは$O(\ln|S|)$となる。(式(1)参照）また，式(9)より最終温度T_fは

$$T_f \approx T_s/\{1+K\delta T_s/3\sigma_K\}, \quad \delta \ll 1 \qquad (10)$$

となる。

2.5 まとめと文献

この章では主としてSAの理論的側面を論議した（詳細については成書[1,16]を参照)。SAはほとんどの組合せ最適化問題に対して大域最適解に漸近的に収束することが理論的に示された唯一のメタヒューリスティクである。また，近似解法としたときのパラメータを合理的に設定することも可能である。しかもこれらがコスト関数と近傍解以外の問題の構造を利用する事なく実現できる点は特筆に値する。このためSAの適用範囲は離散変数のみならず連続変数また，工学のみならず，物理学，生物学も含む（種々の応用例については文献[1,3,16,28]を参照)。他方，SAの問題点は得られる解の質とそれに要する計算時間，すなわち，効果に対する効率から見たコストパフォーマンスである。この点に関するSAの性能は問題に依存する（文献[8,9]参照)。以下及び筆者らの経験[11,12,25,31]からSA適用の指針として以下の2点を掲げたい。

- 問題のコスト関数や制約条件が複雑で容易に良好なヒューリスティクが得られない場合,
- コスト関数や近傍解の計算時間が短い場合

なお紙数制限のため取上げられなかったが，SAとニューロコンピューティングとの関係も重要である。例えば，ニューロコンピューティングはSAの並列演算化の有力な手段の1つとなりうる[1]。

3. ジョブショップスケジューリング問題（JSP）への応用

3.1 JSPの概要

ジョブショップスケジューリング問題（Jobshop Scheduling Problem，以下，JSPと略記）は組合せ最適化の中でも最も難しい問題の1つとして知られる一方，実際的な生産スケジューリング問題の典型的なモデルである。JSPは概略，以下の様に記述される。

nジョブをm機械で順次処理する（各機械におけるジョブの処理を作業と言う)。ただし，作業の中断，分割処理は許されない（以下では説明簡単のため各ジョブ共m作業からなるとする)。各ジョブがm機械を通過する順序は技術的制約として予め与えられ，各作業処理時間も既知とする。このとき，各機械は一時に高々1ジョブを処理し，各ジョブは一時に高々1機械でしか処理されないという制約のもとで全作業を処理するのに要する時間（最大完了時間と言う）を最小にする様に各機械でのm作業の処理順序を決定する。(JSPは離接グラフによってより明確に表現される[32]）

3.2 Laarhovenらの SA アルゴリズム

Laarhoven,Arrts,Lenstra[17]によって提案されたSA（以下，LALSAと略記）は2.で述べた理論に沿って設計された近似解法である。この意味でSAの現実的振舞を知る格好のアルゴリズムである。以下，表3に従ってパラメータの設定法を示す。

C1) 初期受理率：$X_o = 0.95$とする。

C2) 冷却関数：式(9)を用い，$\delta = 10^{-1} \sim 10^{-4}$とする。

C3) 反復数L_k:近傍解集合の大きさにとる。(後述のR2）参照)

C4) 停止パラメータ：$\epsilon_t = 10^{-6}$とする。

R1) 初期解i_s: ランダムに選ぶ。

R2) 近傍解：1つの順序に対して各作業の最早開始時刻とこれに基づく最大完了時間を遅らせないための最遅開始時刻を決定することができる。このとき，最早時刻と最遅時刻が等しい作業を時系列的に並べたものをクリテカルパスと言う（PERT/CPMのそれと同じ意味)。このとき，クリテカルパス上で隣接する一対の作業の順序を交換して得られる順序を近傍解とする。(以後，これを隣接交換と言う。クリテカルパス以外の作業対の順序を交換してもより良い解は決して得られないことに注意。）従って近傍解集合$N(i)$の大きさは$m(n-1)$以下である。

R3) 受理関数 $AP(i,j:T_k)$：式(3)を用いる。

以上の設定のもとで，アルゴリズム LALSA の計算時間は問題例の規模に対しては $O((nm)^3 \log n)$ となる。

アルゴリズム LALSA の性能評価のため以下の3種の近似解法と比較実験が行われている [17]。すなわち，

- 等時間局所探索法：LALSA と同じ計算時間を費して同じ近傍解集合をもつランダム多スタート局所探索法を用いる。
- Shifting Bottleneck 法（SB 法）：Adams らによって開発され，現時点で最良のヒューリスティクの1つである（本実践講座 [13,32] 参照)。
- Controlled Search SA 法（CSSA 法）：後述する Matsuo ら [20] による近似的 SA 法。

得られた実験結果を計算時間（効率）と解の質（効果）から評価すると次の様である。

1) 等時間局所探索法との比較：LALSA の方が平均的に 11 %程効果的である。生成される解数はほぼ等しく，異なる解の種類はおそらく LALSA の方が少ないであろう。にもかかわらず，この様な差がでるのは改悪解の附近にも質の高い解が存在する事を示唆している。
2) SB 法との比較：これと同程度の効果を得るために必要な計算時間は平均的に LALSA の方が大で，場合によっては100倍に達する事もある。しかし，時間をかけると（すなわち，δを小さくすると）確実に LALSA の方が高い効果をもたらす。
3) CSSA 法との比較：同じ効果を得るための効率については LALSA を著しく改善している。この理由については後述する。
4) δ の影響：δを小さくすると確実に効果は上がる。これは前章の理論的結果を裏付けるものである。他方，効率は反比例的に低下する。

3.3 近似的SA の改善策

LALSA は正統的な SA だけに計算量が膨大となる傾向があり（Fisher & Thompson の悪名高い 10×10 問題例に対して$\delta = 10^{-4}$のとき16時間程度），近似解法としては改善の余地がある。JSP に対しては次の2つの改善策が提案されている。

1) CSSA 法 [20]：以下の点が主な改善策である。

1.1) 初期解：良好な近似解を用いる事によって比較的低温（$T_s = 0.5$）から冷却を行う。(この点の論議は文献 [19] を参照)

1.2) 近傍解：クリテカルパス上の隣接交換だけでより良い近傍解を得る可能性は極めて低い（云換えるとるとそれだけ無駄な解生成をしている)。他方，それより少し離れた所にはより良い解が存在する可能性がある。3.2 1) 参照) よって近傍領域を2回の隣接交換まで拡げると共に，クリテカルパスの条件によって近傍解の生成を Control する。

1.3) 受理関数：$AP(i,j;k)(=0.5-0.02k)$ はコストには依存しない。

以上の設定に基き CSSA は前述の SB 法よりも効果が高く，効率も同等か，それ以上である。また，CSSA は1機械重み付き納期遅れ最小化問題に対して，99%の割合で最適解を与えている [19]。

2) クリテカルブロック SA 法（CBSA 法）[35]：

2.1) クリテカルブロック近傍：クリテカルパスにおいて同一機械上の連続する作業の集合（クリテカルブロック）内の1作業をブロックの先頭あるいは後尾に挿入することによって近傍解を得る。(この様な近傍解の中に（有るとすれば）より良い解が存在する。)

2.2) 再重点化戦略：十分多い受理回数（R 回）後も，暫定解が改善されないとき，現在解及び温度を暫定解の状態へ戻し，再アニーリングを行う。

2.3) 冷却率：冷却率 r（$i.e, T_{k+1} = rT_k$，$r < 1$）を固定して指数関数的に冷却する。

数値実験から，クリテカルブロック近傍解は隣接交換より効果が高い，また，再重点化戦略（R=3000）は最良解への収束を早めるなどが確かめられている。この結果，CSSA より効果的であるが，効率はむしろ LALSA($\delta = 10^{-2}$) と同程度と推定される。

3.4 まとめと文献

SA は JSP に対して従来の近似解法に比して効果という点では遜色なく，また，プログラミングの容易性という点でむしろ実用的であると言える。

SA に比して Tabu Search（TS と略記）の方が効果，効率共高いという数値実験結果の報告 [32,35] があるので，若干の私見を述べたい。両者共，改悪解の受入れを許すが，SA は確率的に全ての改悪解を，TS は改悪度の最も低い解を確定的に受入れる。さらに SA は解

に重複抽出を許すのに対し，TS は Tabu List によってできるだけ避けようとする。云換えると，SA が“あてどもなく酔歩する”[19] のに対し，TS は目的意識？を持って進むと言えそうである。従って平均的には TS の方が同じ計算時間では効果が高いという結果は妥当と言えそうである。しかし，SA への大域最適解への収束性（TS についてはまだ証明されていない）という点を考慮すると，最悪例に対する効果は SA の方が良いのではないかと思われる。

なお，紙数の制限で取上げられないが，JSP 以外のスケジューリング問題に対する SA の最近の応用例としては文献 [7,11,12,14,19,23-27,30] を参照されたい。

4．結言

スケジューリング問題の新解法というタイトルで8回にわたった連載講座の締めくくりとして簡単な総括を行い，結言としたい。この連載講座で解説された解法を解くべき問題の性質との関わり合いの程度から次の4種類に分類してみる。

1) 数理解析的手法：数学的または理論的に明示された問題の性質に基づいて解法を構築する。分枝限定法 [13] 等の厳密解法 [6] 及びヒューリスティクはこれに属する。解法の厳密性は高いが，汎用性は低い。
2) 専門家のノウハウによる方法：問題の性質は必ずしも論理的に明示されないが，暗黙的に用いられる。エキスパートシステム [34] が代表例である。実用性は高いが，ノウハウ取得に問題がある [34]。
3) シュミレーションによる方法：シュミレーション言語の様なツール，ペトリネット [33] の様なモデルを構築すると，汎用性は高くなる。これを実用的にするには問題に則したスケジュール自動生成機構あるいはノウハウ活性化機構が必要である [5]。
4) メタヒューリスティク：上記の方法と異なり，問題の性質に依存しない（ヒューリスティクを越えた）解法である。局所探索法，ニューロ，SA，遺伝アルゴリズム [29]，Tabu Search[32] などがある。いずれもプログラムが容易で汎用性も高い。また，限られた実験的経験では効果も高い。しかし，それらは理論的裏付けもなく [6]，また，複雑大規模な現実問題に対してもまだ未知数である [32]。

最後に，「数理解析的手法（OR 的手法？）は実際に役立たない」という見方があるとすれば，それはやや短絡的であるという点を強調したい。数理解析的手法がエキスパートシステム（問題の数理的性質もノウハウの1つである）やシュミレーションの中で部分的にでも活用される事は十分可能である。また，近似を行うもう1つの有力な手段はモデルの近似化であり，複雑なシステムでも古典的なジョブショップやフローショップ問題に（1機械問題にすら）近似できる場合も少なくない。この場合，それらに対して豊富に存在する数理解析的手法が元の問題に有力な近似解を与えうる。従って，問題があるとすれば，「数理解析的手法を実用化に向ける努力不足，あるいは使おうとしない実用化」にあるのではないかと思われる。今後のさらなる理論と実践の融合に期待したい。

謝辞: 貴重な助言を頂いた軽野義行氏，原稿清打をして頂いた澤井伸吾氏に謝意を表します。

参考文献

[1] Aarts, E. & J. Korst (1990): Simulated Annealing and Boltzmann Machines, John Wiley & Sons

[2] Cerny, V. (1985): A Thermodynamical Approach to the Traveling Salesman Problem: An Efficient Simulation Algorithm, J. Optimization Theory and Appl., 45, pp.41-51

[3] Collins, N. E., et al (1988): Simulated Annealing -An Annoted Bibliography-, American J. Math. and Manag. Sci., 8, pp.209-307

[4] Geman, S. & D. Geman (1984): Stochastic Relaxa-tion, Gibbs Distribution, and the Baysian Restoration of Images, IEEE Proc. Pattern Analysis and Machine Intelligence, 6, pp.721-741

[5] 井上、冬木 (1995):ノウハウ活性化シュミレーション法に基づく生産スケジューリング業務支援、オペレーションズ・リサーチ、40

[6] 茨木 (1994):スケジューリング問題と計算の複雑さ、オペレーションズ・リサーチ, 39, pp.541-546

[7] Jeffcoat, D. E. & R. E. Bulfin (1993): Simulated Annealing for Resources-Constrained Scheduling, Euro. J. Oper. Res., 70, pp.43-51

[8] Johnson, D. S., et al (1989): Optimization by Simulated Annealing:An Empirical Evaluation; Part I, OR, 37, pp.865-892

[9] —(1991): —; Part II, OR, 39, pp.378-406

[10] Kirkpatrick, S., et al (1983): Optimization by Simulated Annealing,Science, 220, pp.671-680

[11] 木瀬、軽野 (1993): 2 機械自動生産システムの最適運用計画、機学論 (C) 、59, pp. 285-290

[12] Kise,H., et al(1993): Simultaneous Optimization of Tool Allocation and Scheduling for FMS's:An Application of Simulated Annealing, Robotics, Mechatronics and Manufacturing Systems (T.Takamori and K.Tsuchiya Eds.), Elsevir Sci. Pub. B.V.(North Holland), pp. 557-562

[13] 木瀬 (1994): 分枝限定法で大規模問題例を解く、オペレーションズ・リサーチ、39, pp.601-606

[14] Ku,H. & I.Karimi(1991):Evaluation of Simulated Annealing for Batch Process Scheduling, Indus.& Eng. Chemistry Res., 30, pp.163-169

[15] 久保 (1994): 巡回セールスマン問題への招待、オペレーションズ・リサーチ、39 、pp.156-162

[16] Laarhovenn, P. H. M. Van & E. H. L. Arts (1987): Sim- ulated Annealing: Theory and Applications, D.Reidel Pub. Comp.

[17] Laarhovenn,P.H.M.Van, et al(1992): Jobshop Scheduling by Simulated Annealing, OR, 40, pp.113-125

[18] Lundy,M.& A. Mees(1986): Convergence of an Annealing Algorithm, Math. Programming, 34, pp.111- 124

[19] Matsuo,H., et al(1989): A Controlled Search Simulated Annealing Method for the Single Machine Tardiness Problem, Annals of Oper. Res., 21, pp.85-108

[20] — (1988): A Controlled Search Simulated Annealing Method for the General Jobshop Scheduling Problem, Working Paper03-04-88, Department of Management, The university of Texas at Austin

[21] Metropolis,N., et al(1953):Equation of State Calculations by Fast Computing Machines, J. Chemical Physics, 21, pp.1087-1092

[22] 中野、中西(1986): 組合せ最適化問題に対する Simulated Annealing 法、オペレーションズ・リサーチ、31, pp.43-48

[23] Ogubu,F.A. & D.K.Smith(1990):The Application of the Simulated Annealing Algorithm to the Solution of the n/m/Cmax Flowshop Problem, Comp. and Oper, 17, pp.243-253

[24] — (1991): Simulated Annealing for the Permutation Flowshop Schedling, Omega, 19, pp.64- 67

[25] 大野、他 (1995):ライン停止を考慮した混合品種組立ラインの順序ずけ問題、日本経営工学会誌、掲載予定

[26] Osman,I.H. & C.N.Potts(1989):Simulated Annealing for Permutation Flowshop Scheduling, Omega, 17, pp. 551-557

[27] Price, C. C. & M. A. Salama (1990): Scheduling of Precedence-constrained Tasks on Multiprocessor, Comp. J.,33, pp.219-229

[28] Rene,V.V.Vidal(Ed.)(1993):Applied Simulated Annealing, Springer Verlag

[29] 三宮 (1994):スケジューリング問題に対する遺伝アルゴリズム、オペレーションズ・リサーチ、39 、pp.659-664

[30] Satoh,T. & K.Nara(1991): Maintenance Scheduling by Using Simulated Annealing Method (for Power Plant), IEEE Trans. on Power Sys. , 6, pp.850-857

[31] 芝、他 (1993):SA による FMS レイアウト計画の最適化、 Proc 4th Intelligent FA Symp., ISCIE, pp.119-122

[32] 高山、久保、森戸 (1995): スケジューリングと Tubu Search , オペレーションズ・リサーチ、40, pp.47-54

[33] 玉木 (1995): 一般化ペトリネット・モデルを用いたシミュレーション・ベースド・スケジューリング、オペレーションズ・リサーチ、40, pp.106-111

[34] 渡辺 (1995):エキスパート 手法のスケジューリング 問題への応用、オペレーションズ・リサーチ、40

[35] 山田、中野 (1994): クリテカルブロックシミュレーティ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、電学論、114-C,pp.476-472