

シミュレーテッド・アニーリングによる 農業施設の最適配置設計

佐竹隆顕*・古谷立美**・太田芳彦***

*筑波大学 農林工学系, 〒 305-8572 つくば市

**東邦大学 理学部, 〒 274-0072 船橋市

***筑波大学大学院バイオシステム研究科, 〒 305-8572 つくば市

要 旨

共同選果包装施設や予冷・保冷施設をはじめとする農業施設の建設予定敷地内の最適配置設計問題に対して、ヒューリスティックアルゴリズムの一つであるシミュレーテッド・アニーリング (SA) を援用した合理化施工支援のための基本プログラムをC言語により新規に作成するとともに、実用プログラム開発の知見を得るための準備的な配置設計シミュレーションを行った。

配置設計上の制約条件とした施設と敷地内トラックヤードないしは道路との重なり程度、施設の出入口とトラックヤードの距離、および各施設の図心間の積算距離などを総合的に評価するコスト関数に基づいてシミュレーションの解の評価を行った。

また、同じく組合せ最適化問題の解法の一つである山登り法 (HC) による最適解と比較検討を行った結果、シミュレーテッド・アニーリングによるコスト評価値は平均で約 100 低減するとともに解のばらつきも抑えられており、局所的最適解に捕らわれにくいシミュレーテッド・アニーリングの長所が認められた。

キーワード：組合せ最適化問題、合理化施工、シミュレーテッド・アニーリング、農業施設、配置設計、山登り法

I. 緒 言

現在、わが国の農産物の多くは、カントリエレベータ、ライスセンター、予冷・保冷施設、選果包装施設などの農業施設において収穫後の加工、調製、貯蔵、選果、包装などの各工程処理を経た後、消費地に向け出荷される。従来、これらの各工程の処理は、個別の生産農家において行われてきたが、製品品質の安定化、コストの削減、あるいは流通システムの高度複雑化への対応などを目的として、農業協同組合を中心に地域で一ないしは数カ所の各種農業施設を設置するとともに、それらの施設に設けられた設備を共同利用するのが現在の主流である。

農業施設は、農業をとりまく地域の実状と今後の生産構想などを基に、所要設備の内容や規模が検討され

た後、同諸設備を収容する施設の建坪および設置予定場所などが決定される (宮沢, 1990)。一方、個々の施設の設計条件は千差万別であり、モデルケースをもって建設予定敷地内の配置および建築設計を決定することは出来ない。このため、各種農業施設の配置および構造設計はカスタム設計となり、設計を行うに当たっては満足すべき設計条件を総合的に勘案し、設計技術者の経験に基づく設計が行われる場合が多い。

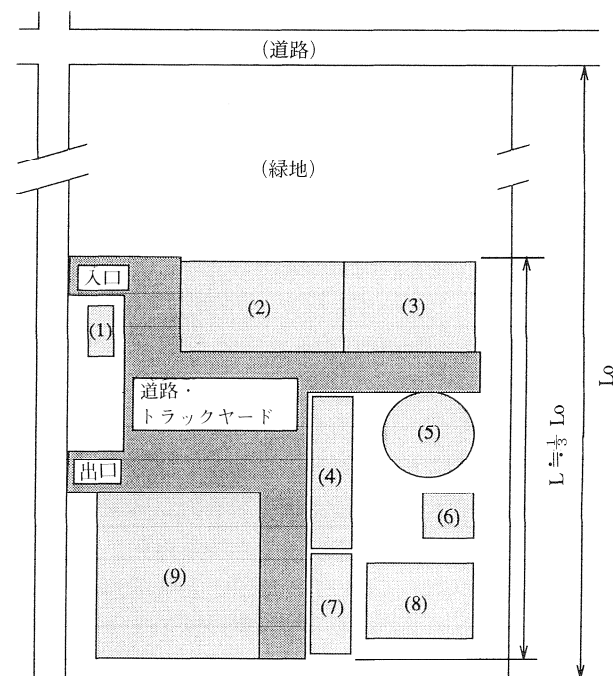
農業施設の設計において、建設予定敷地内の配置設計の代表的なパターンとしては概ね次のようなものがある。a) 単一配置型 (一つの施設にすべての設備が収容されており、公道から施設入口までのアプローチを中心に一つの建物の配置を決定するタイプ)、b) 周縁配置型 (機能が異なる施設を敷地の周縁部に配置することにより、敷地中央部にスペースを設けるタイプ)。

原稿受理 1999 年 4 月 1 日

照会先：E-Mail：satake@sakura.cc.tsukuba.ac.jp

中央部のスペースに余裕があるため、製品や資材の搬出・搬入に便利、建物間の移動に無駄な迂回が生じない等の利点がある。)、c) 直線配置型(細長い敷地に複数の施設を概ね直線上に配置するタイプ。公道からのアプローチおよび建物間の人や物の移動を勘案し、施設の配置順を決定する。)、d) 隙間配置型(建設予定敷地内に既存の建物があり、既存建物の間あるいは建物と敷地境界の間のスペースを利用して新規の施設を配置するタイプ)、e) 集中配置型(建設予定敷地内に機能が異なる複数の施設を建物間の距離ができるだけ短くなるように配置するタイプ。機能上関連をもつ施設を相互の所要スペースを確保しつつ、製品や資材の搬出・搬入、および人の移動など施設利用効率の観点より接近させて配置する。)。以上の5つのパターンの内、集中配置型の設計事例を図1に示す。同図はバーク堆肥製造施設の設計事例であり、道路およびトラックヤードを中心に堆肥原料のバーク置場、混合場、発酵装置、熟成場、製品貯留場および関連設備などが近接して配置されている。

以上のような限られた敷地における施設の配置設計と類似の問題に、複数の図形を2次元領域に適当な制約のもとに配置する問題であるVLSIのレイアウト、



[計画施設]

- (1) 管理棟 (2) 製品貯留場 (3) 堆肥熟成場 (4) 混合場 (5) 発酵装置
(6) 脱臭槽 (7) ロールパレット置場 (8) 汚水処理施設 (9) バーク置場

図1 集中配置型配置設計例(文献8より改変)

都市計画に関するレイアウトおよび布地の効率的裁断などがあり、近年、コンピュータを利用して複雑な配置問題を解く手法としてシミュレーテッド・アニーリング(以下SAと略記する)、山登り法(以下HCと略記する)および遺伝的アルゴリズムといったヒューリスティックアルゴリズムが注目されている(Cohonら, 1986; Shahookarら, 1990; 北野ら, 1993; Hasteerら, 1997)。

本論文においては、現在設計上の制約条件と技術者の経験に基づき各々カスタム設計が行われている農業施設の敷地内配置設計に対して、合理化施工支援技術としてSAを援用した最適配置アルゴリズムを提案する。研究の端緒として、はじめにC言語により新規に開発した最適配置設計用SA基本プログラムについて紹介するとともに、実用プログラム開発の知見を得るために準備的に行った配置設計シミュレーションの結果、および比較検討を目的として行ったHCによる同シミュレーション結果について報告する。

II. 実験方法

1. シミュレーテッド・アニーリングの基本アルゴリズム

組合せ最適化問題の汎用近似解法の一つであり、本研究の農業施設の配置設計に対して援用したSAの基本アルゴリズム(Kirtpatrickら, 1983; Rosenら, 1994)を簡単に述べる。

はじめに、有限の状態からなる状態空間 Ω があり、各状態 x に対してコスト関数 $f(x)$ が定義されているとする。

コスト関数は統計力学ではエネルギー関数 $E(x)$ に相当する。SAの目的は最小のコスト(エネルギー)を与える状態 x^* を求めることであり、与えられた初期状態から出発して、次々と状態を遷移させ、最終的に最適状態に到達する。SAの基本アルゴリズムにおいては、次の3つの関数が定義される。

生成関数 $G(x)$ は、現在の状態 x を与えると、次に遷移すべき状態 x' を出力する関数である。この生成処理には、状態 x が与えられて状態 x' が生起する確率分布 $G(x, x')$ を用いる。組合せ最適化問題で遷移に優先性を考慮しない場合は、次の等確率遷移となる。

$$G(x, x') = \frac{1}{n(x)} \quad (1)$$

ここで、 $n(x)$ は、状態 x の近傍を構成する状態の数である。

受理関数 $A(E, E', T)$ は、次の状態 x' のエネルギー $E' = f(x')$ と現在の状態 x のエネルギー $E = f(x)$ との差分 $\Delta E (= E' - E)$ 、および温度パラメータ T を得て、次の状態への遷移を受理するか否かの真偽値を出力する。一般的には、次の Metropolis の方法が採用される。

$$A(E, E', T) = \begin{cases} 1 & \text{if } E' \leq E \\ \exp(-(E-E')/T) & \text{otherwise} \end{cases} \quad (2)$$

温度 T は、コスト (エネルギー) が増加する方向への遷移確率に大きな影響を与えるパラメータであり、アニーリングの温度が高い場合は悪い状態への遷移確率も大きくなる一方、同温度が低い場合はおのずから良い方向に遷移することになる。

アニーリング関数 $R(T_k)$ は、アニーリングの第 k ステップの温度 T_k を得て、次のステップの温度 T_{k+1} を出力する関数である。一般的には、次式の指数型アニーリングが採用される。

$$T_{k+1} = R(T_k) = \gamma T_k \quad (3)$$

ここで γ はアニーリングの冷却速度を決定する冷却速度係数であり、 $0.8 \leq \gamma < 1$ の値が経験的に良く用いられる。このことは時間をかけてアニーリングが行われることと対応している。

SA のアルゴリズムとしては、まず温度 T を初期設定した後、与えられた初期状態 x_0 から出発して、次の状態 x' を生成関数 $G(x)$ で生成し、そのエネルギー E' を計算する。次にエネルギーの差分 ΔE と温度 T_k に応じて新しい状態 x' を受理するか否かを受理関数 $A(E, E', T)$ で計算し、受理の場合は遷移する。以上の確率的処理を繰り返すことにより現在の温度での平衡状態が達成されるまで十分な探索を行う。この十分な探索としては、定めた探索回数だけ計算を繰り返す、あるいは定めた受理回数になるまで繰り返すなどの方法がある。

また、温度 T_k での平衡状態に達した後、アニーリング関数 $R(T_k)$ を用いて次の温度 T_{k+1} を求め、再びその温度での平衡状態に達するまで十分な探索を繰り返す。最終的に温度が十分に冷えて停止条件に達すれば、その段階の状態とエネルギーを最適状態と最適値として出力する。停止条件としては、アニーリング温度が十分に低くなったら停止する、アニーリングを定めた回数 k_f だけ繰り返したら停止する、およびエネルギーが十分小さくなったら停止するなどの方法がある。

2. シミュレーテッド・アニーリングと比較検討を行った山登り法の基本アルゴリズム

HC は SA と同様に組合せ最適化問題の汎用近似解法の一つである。本研究では SA の合理化施工支援技術としての性能を相対評価するために、同様な初期状態 x_0 や各状態 x における最大探索繰り返し数等の条件の下で、HC による配置設計シミュレーションを行った。

HC のアルゴリズムとしては、はじめに SA と同様に有限の状態からなる状態空間 Ω があり、各状態 x に対してコスト関数 $C = f(x)$ が定義されているとする。まず与えられた初期状態 x_0 から出発して、次の状態 x' を生成関数 $G(x)$ で生成し、そのコスト C' を計算する。ここで、次の状態 x' のコスト $C' = f(x')$ と現在の状態 x_0 のコスト $C_0 = f(x_0)$ との差分 $\Delta C (= C' - C_0)$ を計算し、 $\Delta C \leq 0$ ならば次の状態に遷移する一方、 $\Delta C > 0$ ならば次の状態 x' を破棄し遷移せずに初期状態 x_0 をもとに再び次の状態 x'' を探索する。以上の処理を繰り返すことにより平衡状態に達すれば、その段階の状態とコストを最適状態と最適値として出力する。

なお、HC は最初に登り始める場所 (初期状態 x_0) によっても得られる最適解の質が異なる一方、局所最適解に常にトラップされるとは限らないものの、トラップされ易い特性をもつことから、これを防ぐための工夫が SA やタブー探索をはじめとする各種最適化アルゴリズムでなされている。

以上の SA と HC による最適解の探索プロセスをおおまかな模式図として示すと図 2 の通りである。ただし、前述のように、SA は必ず最適解に到達し、一方 HC は必ず局所最適解にトラップされるものではない。

3. 建設予定敷地のグリッド表示および施設配置の制約条件

本シミュレーションプログラムにおいては、建設予定敷地を任意の辺長をもつ正方形のグリッドで区切ったものとして扱い、各設計施設は常にグリッドの辺に沿って配置される。従って同じ土地面積でも、一つのグリッドの大きさを変える、すなわち建設予定敷地を包含するグリッド集合の要素数を増減することにより、任意の解像度の下で配置設計を行うことが可能である。同様にグリッド数を増やすことにより、敷地が直線で囲まれた矩形でない不定形の場合や、敷地境界に対して施設やトラックヤードおよび道路などが斜めに配置される場合にも応用が可能である。

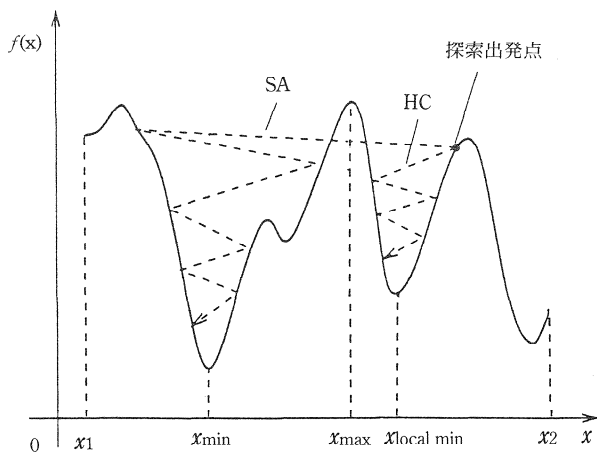


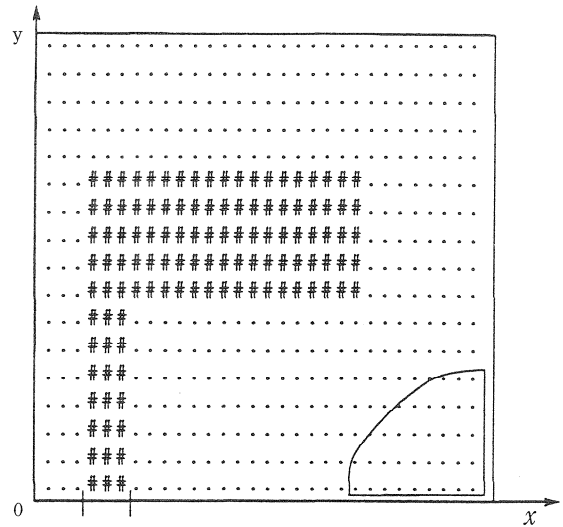
図2 シミュレーテッド・アニーリングおよび山登り法による最適解（最小値）の探索プロセス

農業施設の敷地内配置設計の端緒として、本シミュレーションでは比較的単純な矩形領域内における施設の配置設計を行った。図3に直角座標系のもとでグリッド総数 17×30として設定した本シミュレーションの建設予定敷地を示す。図中の#記号は敷地内に任意に設定した境界の門から配置予定の施設に至る道路とトラックヤードの部分を示している。

また、シミュレーションでは、配置施設として(1)管理棟（グリッド数 縦5×横5）、(2)冷蔵施設（同縦5×横10）、(3)資材倉庫（同縦4×横8）、(4)選果施設（同縦8×横8）の4つを想定した。この配置予定施設の数および大きさ（グリッド数）についても、敷地と同様に任意に設定が可能である。

一方、図4には本シミュレーションにおいて設定した施設配置の制約条件を示す。本シミュレーションは、農業施設の配置設計パターンのうち、図1に例示した集中配置型の場合を想定しており、集中配置上の制約としては次の3つの条件を設定し、端緒の最適配置設計を試みた。(1)各施設は敷地内に収まり、かつ他の施設やトラックヤード等と重複配置されないこと。(2)各施設の長辺ないしは短辺の中央部に設定した出入口が敷地内道路あるいはトラックヤードに接して配置されること。および(3)機能上相互に関連する施設どうしが近接して配置されること。すなわち、各施設の図心間の積算距離が可能な限り短くなるように施設が配置されること。

なお、出入口はその間口の大きさに関わらず施設の4辺の中点4点の内、最もトラックヤードないし道路



建設予定敷地設定：矩形（グリッド総数 17×30）、「・」部分
トラックヤード・道路設定：「#」部分

図3 配置設計シミュレーションにおける土地とトラックヤード・道路の形状

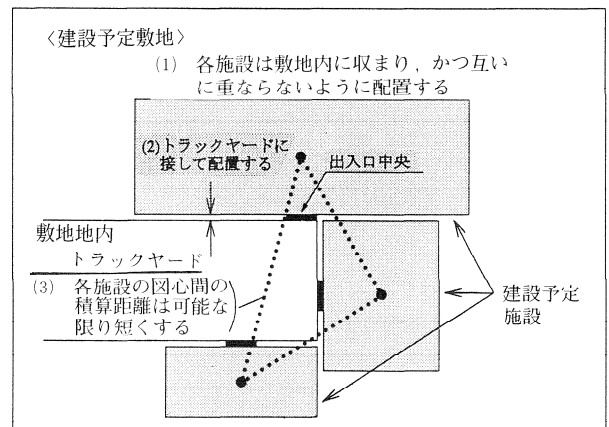


図4 配置設計シミュレーションにおいて設定した制約条件

に近いグリッドに距離の基準として設定されるものとした。

4. 配置設計で定義したコスト関数

建設予定敷地内の施設配置が最適であるか否かを評価するコスト関数 $f(L, D_r, D_b)$ を次式のように定義した。

$$f(L, D_r, D_b) = P_l L + P_{dr} D_r + P_{db} D_b \quad (4)$$

ここで、 L は設計施設と他の施設、あるいは設計施設とトラックヤードないしは道路との重なり程度を示

す重複パラメータ, D_r は各施設の出入口とトラックヤードないしは道路との近接の程度を示す近接パラメータ, D_b は各施設の図心間の積算距離を示す距離パラメータである。

また, P_l , P_{dr} および P_{db} は先の3つのパラメータの配置設計における優先度を決定する重み係数であり, 本シミュレーションにおいては優先度を強調するために100の累乗を採用し, それぞれ便宜的に10,000, 100および1の値を与えた。この重み係数が大きい程, 当該パラメータの値を小さくするように配置の最適化がなされる。なお, 本シミュレーションにおいては, 式(4)により各配置設計のコストを求めているが, 別途各施設の出入口の向きや特定施設間の距離などのパラメータの項を式に付加することにより, 他の様々な条件を満たす配置設計を試みることも可能である。

一方, 3つのパラメータの算出は以下による。

重複パラメータ L については,

$$L = \sum_k (m_k \times n_k) \quad (5)$$

ここで m_k は, 4つの施設が敷地境界内をランダム移動する過程で生ずる重複配置において, 各重複箇所での重複施設数, n_k は当該重複箇所における重複グリッド数。ただし, 施設がトラックヤードないしは道路と重なる配置に対しては, 施設どうしの重複配置に優先させて避ける観点から, m の値として, 施設どうしが重複配置される場合の最大値4を越える値である6を便宜的に代入することとした。

まず個々の重複箇所の L 値を求め, それらの積算値をもって配置設計の重複パラメータ値とする。

本シミュレーションにおいては, 17×30 のグリッド表現による矩形領域内の施設の配置設計を試みているが, 式(5)のアナロジーにより, 建設予定敷地境界が曲線の場合や, 図3の右側下部に概略扇型で示した部分のように敷地内で施設の配置が不可能な場所や既存建物がある場合などの配置設計にも拡張が可能である。

近接パラメータ D_r については,

$$D_r = \sum_i (x_i^2 + y_i^2 - 1) \quad (6)$$

ここで x_i および y_i は, 当該出入口が x 軸方向および y 軸方向においてトラックヤードまたは道路と離れているグリッド数。個々の施設の出入口の D_r 値を求め, それらの積算値をもって配置設計の近接パラメータ値とする。

また, 距離パラメータ D_b については,

$$D_b = \sum_j (x_j^2 + y_j^2) \quad (7)$$

ここで x_j および y_j は, 2つの施設の図心が x 軸方向および y 軸方向において離れているグリッド数。個々の施設の図心間の D_b 値を求め, それらの積算値をもって配置設計の距離パラメータ値とする。

5. 配置設計シミュレーション

ANSIに準拠したC言語による最適配置設計用SA基本プログラムを開発しシミュレーションを行った。コンパイルにはGNU C Compiler ver. 2.7.2.1を使用するとともに, シミュレーションはPC互換機(富士通FMV-DESKPOWER TP, 150MHz)で行った。

本研究のSAによる敷地内配置設計のアルゴリズムを図5に示す。図に沿って基本動作を概説する。

1) SAパラメータの設定

本シミュレーションに先立って実施した予備的な配置設計シミュレーションの結果を参考にして, アニーリングの初期温度, シミュレーションの停止条件として設定したアニーリング温度, およびアニーリングの当該ステップにおける探索繰り返し数の最大値といっ

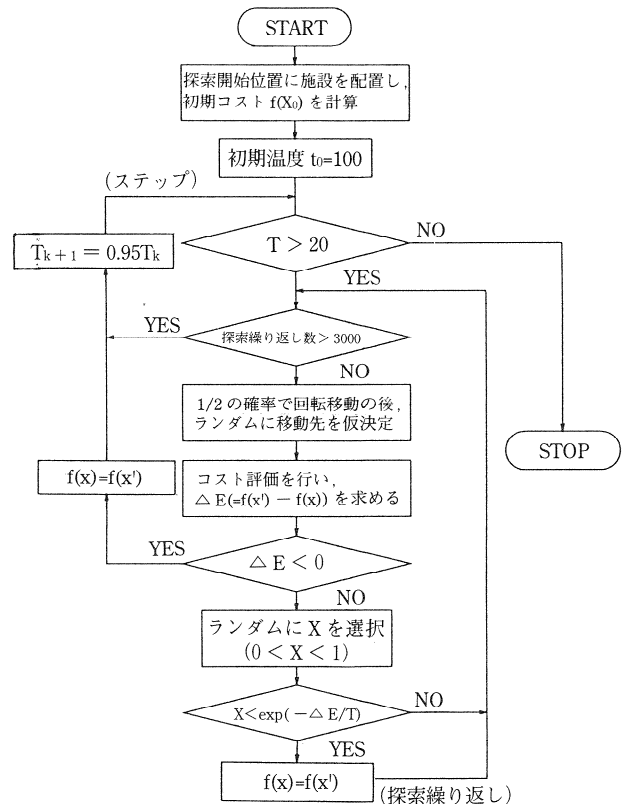


図5 本研究の最適配置設計用SAの基本スキーム

たSAパラメータを100度, 20度および3,000回と各々設定した。

2) 探索開始位置への施設の配置

配置設計シミュレーションの開始にあたっては, グリッドの矩形領域で示される4つの施設の左上隅のグリッドを, 図3に示す直交座標系の(1, 17), (4, 14), (7, 11) および(10, 8)のグリッド位置に便宜的に置き, この配置を初期状態として最適状態の探索を行った。

4つの施設の初期配置状態の決定には, 1) 建設予定敷地として設定したグリッド集合中の特定位置を便宜的に決定する。2) グリッド集合より座標位置を乱数により決定する。等の方法が考えられるものの, 本シミュレーションでは1)の方法により初期配置状態を決定した。

3) 敷地境界内における施設のランダム移動

施設の移動は, 移動させる施設をランダムに選択する一方, 同様に境界内で新座標をランダムに仮決定した後, 移動を行う。この際, 2回の移動に対して1度の割合で, 施設の90度の回転移動をとまなう移動を行った。4つの施設の新座標の仮決定が終了した後, 次に述べるコスト関数により各施設の新配置状態を総合的に評価した。

4) コスト関数による新配置状態の評価

式(4)を用いて新配置状態のコスト(エネルギー) $f(x')$ を算出するとともに, 旧配置状態のコスト $f(x)$ との差分 $\Delta E (= f(x') - f(x))$ を求めた。

5) 遷移の受理の決定

コストの差分が $\Delta E < 0$ ならば新配置状態を受理し, コスト評価値を置き換えるとともに, 次のステップのアニーリング温度 T_{k+1} を次式により求める。

$$T_{k+1} = 0.95 \times T_k \quad (8)$$

ここで, 0.95は冷却速度係数であり, 十分なアニーリングが行われるように, 1に近い値を便宜的に設定した。

一方, コストの差分が $\Delta E > 0$ ならば, まず $0 < x < 1$ なるパラメータ x を乱数により選択する。次に $x < \exp(-(E-E')/T)$ ならばコストが増大しても新配置状態を受理し, 同じアニーリング温度の下で探索計算を繰り返す。また, $x > \exp(-(E-E')/T)$ ならば新配置状態を棄却するとともに, 元の配置状態に戻り探索計算を繰り返す。

6) 探索の繰り返しおよび配置設計シミュレーション

の停止

5)までに述べた処理を, 当該アニーリング温度の下でコストが減少する施設配置を得るか, あるいはコストが平衡状態に達するまで3,000回を区切りとして繰り返す。さらに, アニーリングが進み, 十分温度が冷えて20度に達したならば, SAによる配置設計シミュレーションを終了する。

一方, HCによる敷地内配置設計の基本動作は, 以上述べたSAの基本動作よりアニーリング温度処理および新配置状態の確率的な受理または棄却の選択処理を除いた残りの探索処理を繰り返すものである。

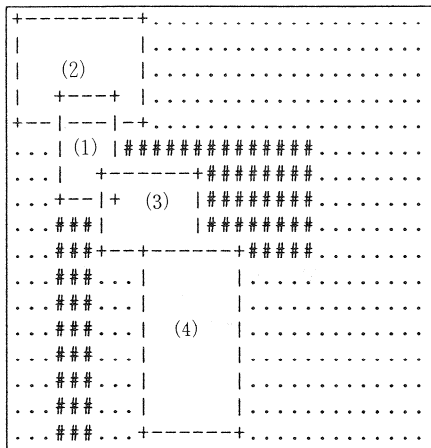
なお, 予備的に行った配置設計シミュレーションの結果において, SAとHCによる最適配置のコストがシミュレーション毎に異なるため, 本実験ではそれぞれ100回ずつシミュレーションを行い, 得られたコストの平均値をもって2つの最適化手法の比較検討を行った。

III. 実験結果

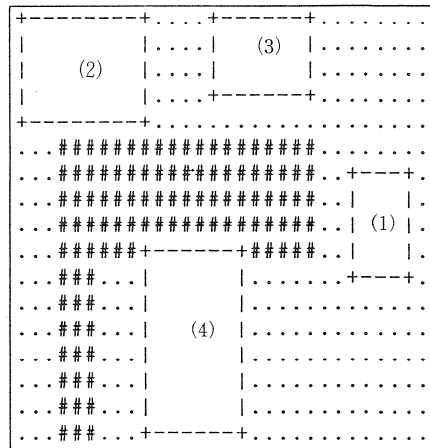
1. シミュレーテッド・アニーリングによる最適配置設計

図6にアニーリング温度の減少にともなう施設配置の変化を例示する。(a)は配置設計シミュレーションの初期配置, (b)~(e)は途中経過, (f)はコストが平衡状態に達した段階の施設配置を示している。また, 先に述べたように図中の(1)は管理棟, (2)は冷蔵施設, (3)は資材倉庫, および(4)は選果施設をそれぞれ想定している。なお, 図の敷地の縦幅は17グリッド, 横幅は30グリッドで表示しているもの, グリッド間のスペースが縦横で異なるため, 敷地は概略1:2の縦横比で表示されていない。

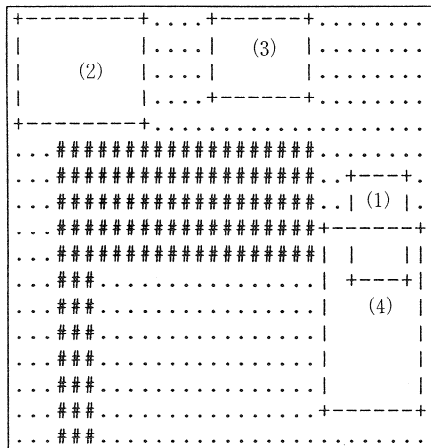
同図から明らかなように, シミュレーションの初期に施設どうしが重なり, さらに敷地内に設定されたトラックヤードないしは道路上に施設が配置されていた状態が, 最適解への探索が進行し, アニーリング温度の減少およびアニーリングの各ステップにおける探索数の積算値である累積探索数の増加にとまなない, 式(4)のコスト関数で定義した各パラメータの優先度すなわち重み係数の大小に従って最適化がなされていく。図6-(b)の累積探索数が11回前後の段階で重複パラメータの値を小さくするよう, 概ねトラックヤード上への施設の配置は無くなり, 更に累積探索数が160回前後において, 重複パラメータの評価値は零となる。累積探索数が160回前後以降は, まず各施設の長



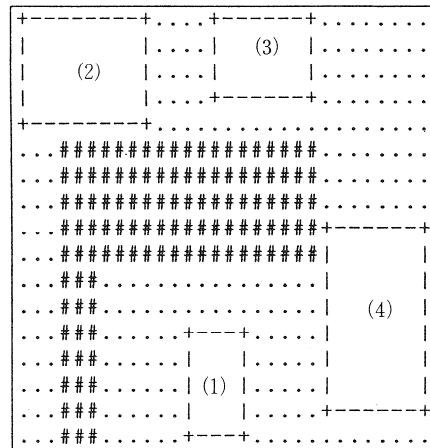
(f(x)=3680076, L=368, D_r= - 3, D_s=376)
 (a) 初期配置



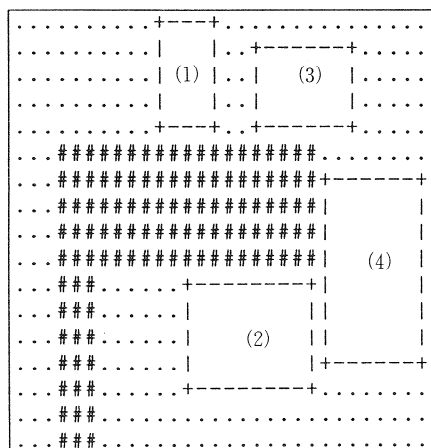
(f(x)=482342, L=48, D_r=10, D_s=1342)
 (b) 累積探索数：11回、温度：86度



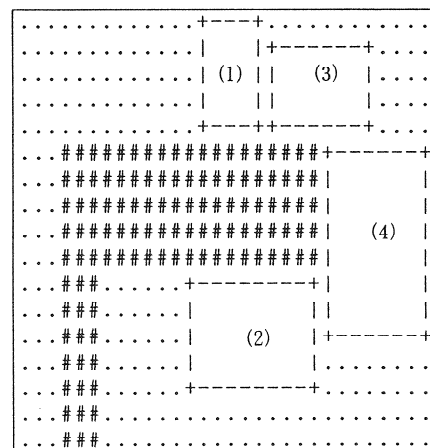
(f(x)=303016, L=30, D_r=15, D_s=1516)
 (c) 累積探索数：142回、温度：82度



(f(x)=2908, L=0, D_r=15, D_s=1408)
 (d) 累積探索数：188回、温度：71度



(f(x)=699, L=0, D_r=0, D_s=699)
 (e) 累積探索数：1991回、温度：56度



(f(x)=547, L=0, D_r=0, D_s=547)
 (f) 累積探索数：7870回、温度：42度

図6 シミュレーテッド・アニーリングの温度の減少にともなう施設配置の変化

辺あるいは短辺の中央に設定された出入口がトラックヤードないしは道路に接するように施設の配置移動が進み(図6-(d), (e)参照), 次いで最終的に各施設の凶心間の距離が最も小さくなる様, すなわち各施設が相互に接する様トラックヤードの周囲に配置される(図6-(f)参照)。図6-(f)は, 式(4)のコスト関数が概ね平衡に達した状態であり, この配置設計シミュレーションにおいてコストを最小とする最適配置となる。

一方, SAにおける累積探索数の増加にともなうコストおよび3つのパラメータの評価値の変化を図7に例示する。同図は図6に示した敷地内の施設配置の変化をコストおよびパラメータの変化として数量的に示したものである。図中の $f(x)$ は式(4)のコスト関数を示しており, 本シミュレーションにおいて配置状態の指数とした重複, 近接および距離の3つのパラメータからなる総合的な状態指数である。なお L , D_r および D_b は重複, 近接および距離の3つのパラメータである。

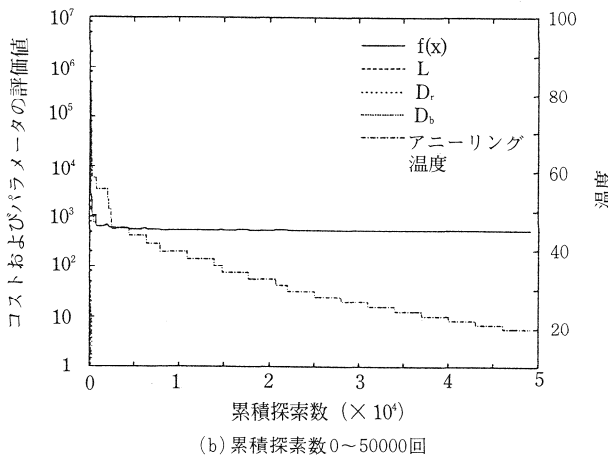
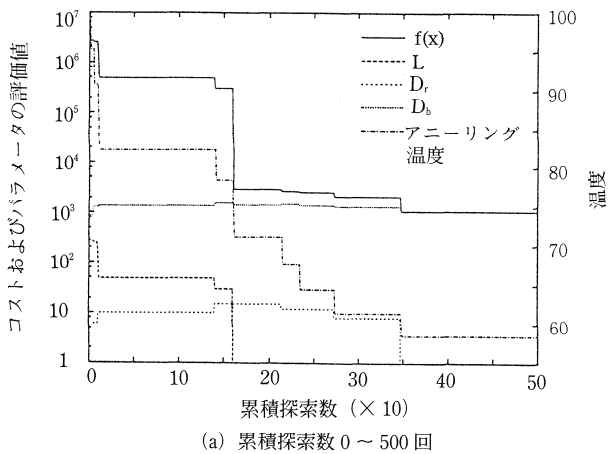
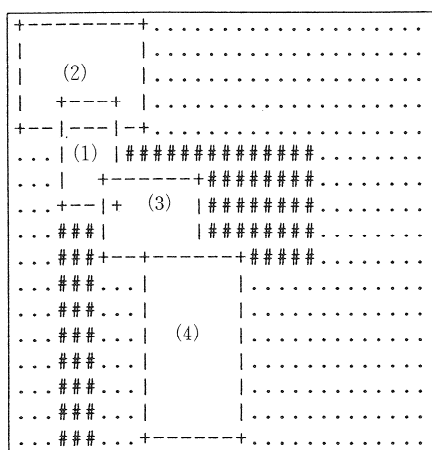


図7 シミュレーテッド・アニーリングにおける累積探索数の増加にともなうコストの変化

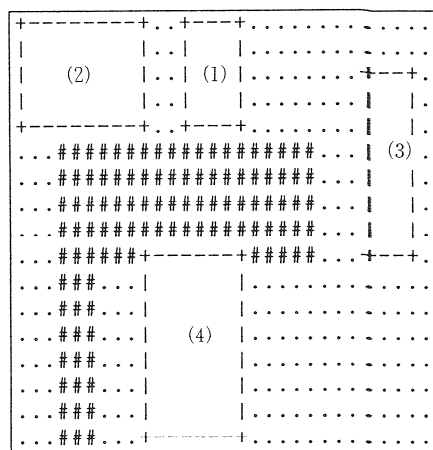
図6の配置変化でも明らかなように, 累積探索数が160回前後までの探索の初期段階において, コストの減少は, その重み係数が10,000と3つのパラメータの中で最も大きい重複パラメータの減少に追随している。また, 累積探索数が350回前後に至る探索段階において, 近接パラメータの評価値は増減するものの, 同回数前後で近接パラメータは零となる。これは探索の初期段階においては, コストに一番大きな影響をもつ重複パラメータが, 時には近接パラメータを改悪しても同パラメータに優先して改善されることを示している。累積探索数が350回前後以降は, 距離パラメータの評価値がコスト評価値となる。一方, 累積探索数が3,000回前後においてコストは概ね平衡状態となり, その後幾つかの局所解をSAの機能により回避しながら, 最終的な最適配置のコストに収束している。探索の後期段階においては, コストの改善はほぼ認められないものの, 各アニーリング温度で課した最大探索数3,000回を区切りとした探索が順次行われる一方, アニーリング温度が20度に達した段階で配置設計シミュレーションが終了し, 最適配置コストを提示している。

2. 山登り法による最適配置設計

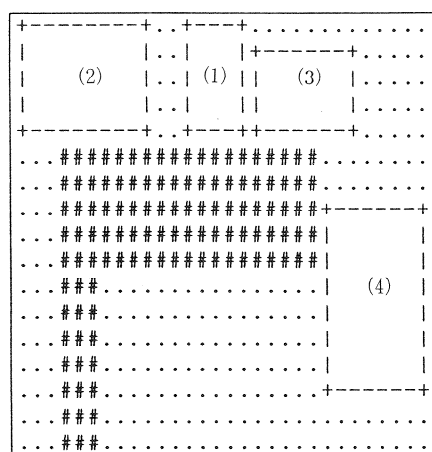
図8に累積探索数の増加にともなう施設配置の変化を例示する。同図から明らかなように, SAの場合と同様に, シミュレーションの初期に施設どうしが重なり, さらに敷地内に設定されたトラックヤードないしは道路上に施設が配置されていた状態が, 最適解への探索が進行し累積探索数の増加にともない, コスト関数で定義した各パラメータの優先度に従って最適化がなされていく。図8-(b)の累積探索数が15回程度の段階で概ねトラックヤード上への施設の配置は無くなり, 更に累積探索数が70回前後において, 重複パラメータの評価値は零となる(図8-(c)参照)。累積探索数が70回前後以降は, まず各施設の出入口がトラックヤードないしは道路に接するように施設の配置移動が進み(図8-(d), (e)参照), 次いで最終的に各施設の凶心間の距離が可能な限り小さくなる様トラックヤードの周囲に施設が配置される(図8-(f)参照)。ただし, 例示した本シミュレーションの場合, HCの問題点として指摘される局所解にトラップしており, 完全最適解を実現していない。図8-(f)は, コストに関してまだ改善の余地が認められるものの, コスト関数が平衡に達した状態であり, この配置設計シミュレーションにおいてコストを最小とする最適配置となる。



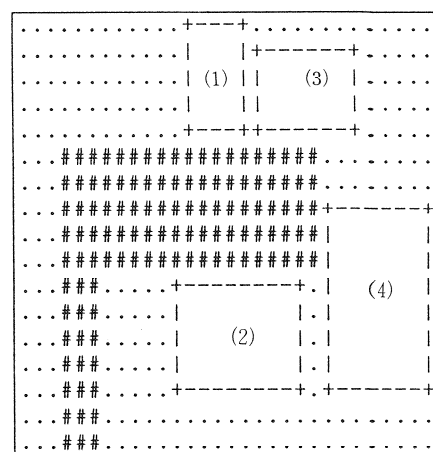
(f(x)=3680076, L=368, D_r=-3, D_b=376)
(a) 初期配置



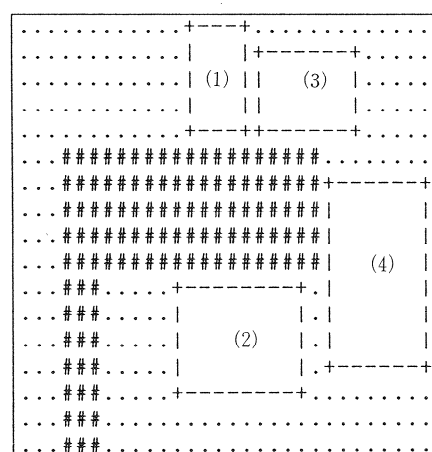
(f(x)=482659, L=48, D_r=14, D_b=1259)
(b) 累積探索数：15回



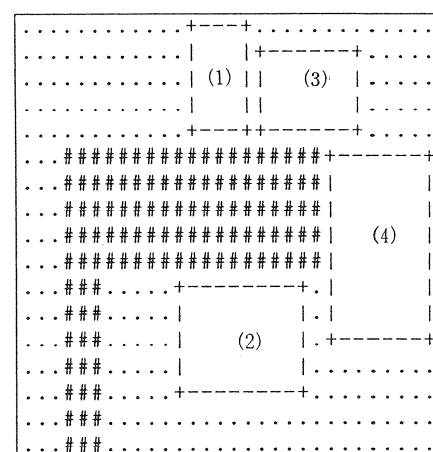
(f(x)=1271, L=0, D_r=1, D_b=1171)
(c) 累積探索数：69回



(f(x)=740, L=0, D_r=1, D_b=640)
(d) 累積探索数：105回



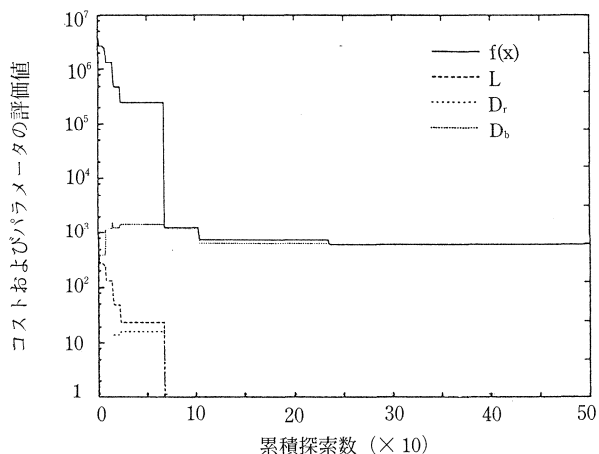
(f(x)=615, L=0, D_r=0, D_b=615)
(e) 累積探索数：236回



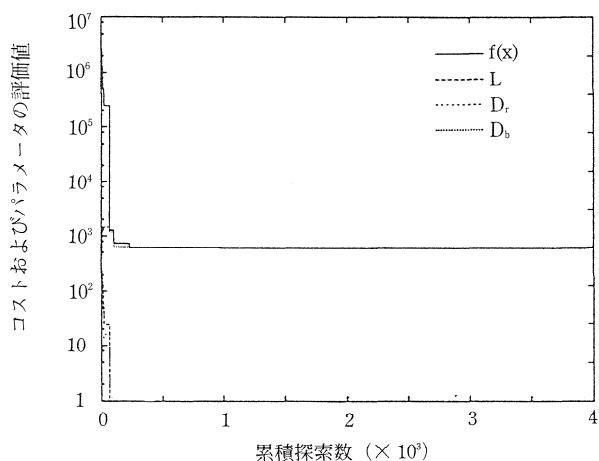
(f(x)=596, L=0, D_r=0, D_b=596)
(f) 累積探索数：972回

図8 山登り法における累積探索数の増加ともなう施設配置の変化

一方、HCにおける累積探索数の増加にともなうコストおよび3つのパラメータの評価値の変化を図9に例示する。同図は図8に示した施設配置の変化をコストおよびパラメータの変化として数量的に示したものである。SAによるシミュレーションの結果と同様に、累積探索数が70回前後までの探索初期段階において、コストの減少は重複パラメータの減少に追従する一方コストに一番大きな影響をもつ重複パラメータが、時には他の2つのパラメータを改悪しても、優先して改善される。また、累積探索数が240回前後以降は、距離パラメータの評価値がコスト評価値となる。なお、累積探索数が概ね970回以降はコストが平衡に達しており、累積探索数4,000回をもって探索を打ち切るとともに、終了時のコストを最適配置コストとして提示している。



(a) 累積探索数 0 ~ 500 回



(b) 累積探索数 0 ~ 4000 回

図9 山登り法における累積探索数の増加にともなうコストの変化

3. シミュレーテッド・アニーリングおよび山登り法による最適配置設計のコスト平均値

SAおよびHCにより各々100回ずつ配置設計シミュレーションを行った結果、得られたコストの平均値ならびに同平均値の危険率5%の区間推定巾を図10に示す。

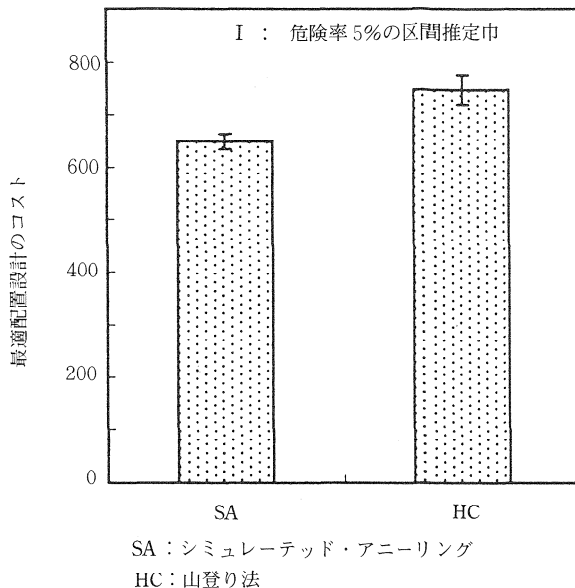


図10 SAおよびHCによる最適配置設計のコスト平均値の比較

コスト平均値および標準偏差は、SAが648.8および8.7であり、一方HCは747.1および16.4であった。またコストの最大値および最小値は、SAが936および518であるのに対して、HCは1,592および559であった。

配置状態の総合的な状態指数であるコストの平均値は、SAを用いた場合が山登り法による場合に比べて約100程度低く、また標準偏差もSAを用いた場合の方が小さいことなどから、アニーリングを行ったことによる解空間の探索がなされ、局所的な最適解に捕らわれにくいSAの長所が発揮されたものと考えられた。これにより複数回の設計シミュレーションの実行を前提とした最適配置設計問題においては、今後さらに十分な検証が必要であるものの、HCに比べてSAの採用の妥当性が示唆された。

一方、100回を目処に繰り返して行ったSAによる設計シミュレーションの結果、個々のシミュレーションの最適配置コストが予備実験と同様に変動することから、配置設計シミュレーションにおいてグローバルな完全最適解を得るには、本研究で開発した最適配置

設計用 SA 基本プログラムを用いても複数のシミュレーションの実行の必要性が追認された。これは本問題の最適配置設計のような特定問題を解くに当たっては、アニーリングの初期温度、アニーリングの冷却速度の決定係数、アニーリングの各ステップにおける最大探索数およびシミュレーションの停止条件のアニーリング温度などといった SA パラメータを、本実験に先立って行った予備的な配置シミュレーションの結果を基に試行錯誤の上設定せねばならないという SA をはじめとするメタ戦略の特性に起因するものと考えられた。なお、各シミュレーションの最適配置コストの変動は、上記の温度管理をさらに適切に行うことによる配置コストの一層の改善の可能性を一方で示唆している。

IV. 摘要

現在、配置設計上の制約条件と設計技術者の経験に基づく設計が行われている農業施設の建設予定敷地内の最適配置計画問題に対して、シミュレーテッド・アニーリング (SA) を援用した合理化施工支援のための基本プログラムを作成するとともに、実用プログラム開発のための準備的な配置設計シミュレーションを行った。本研究により得られた主な知見は以下の通りである。

1. シミュレーテッド・アニーリングを援用した最適配置設計基本プログラムを ANSI に準拠した C 言語により開発した。同プログラムは特定の言語処理系やアーキテクチャに依存していないために、どのような C コンパイラでもコンパイル可能であり、UNIX ワークステーション上やパソコン上など機種を選ばず汎用的に動作可能である。
2. 開発した配置設計基本プログラムは、グリッド表示法を導入するとともに、各農業施設の配置設計結果を逐次モニター上で表示し、最適化のプロセスがビジュアルに観察可能である。
3. シミュレーテッド・アニーリングによる配置設計シミュレーションでは、山登り法による結果と比べて、コストが平均で約 100 低減する配置を実現することができた。また山登り法と比べてコストの標準偏差も小さく、解のバラツキが抑えられており、アニーリングを行ったことによる解空間の探索がなされ、局所的な最適解に捕らわれにくい SA の長所が発

揮されたことが示唆された。また、本シミュレーションにおいては研究の端緒として指数型アニーリングを採用しているが、実用プログラムの開発に向けて、コストの一層の低減には対数型アニーリングの適用の検討を、一方収束性能には双曲線型の高速度アニーリングや本シミュレーションで用いた指数型を改良した超高速アニーリング等の適用を検討する必要がある。

4. グローバルな完全最適解を得るには、シミュレーテッド・アニーリングを用いても複数のシミュレーションの実行の必要性が認められた。これは本問題の最適配置設計のような特定問題に対処するには、その SA パラメータを試行錯誤の上設定せねばならないというメタ戦略に起因すると考えられた。

今後、一度のシミュレーションでグローバルな最適解の探索を可能とするアニーリング温度に関する検討が必要である一方、単純な形状ではない複雑な建坪形状の建物の最適配置設計を処理できるようグリッド数の増加への対応や、配置制約となるコスト関数において別のパラメータも付加する等のプログラム上の改良が必要である。

引用・参考文献

1. Cohoon, J. P. and Paris, W. D. (1986): Genetic Placement. in: Proceedings of the IEEE International Conference on Computer-Aided Design, 422-425.
2. Hasteer, G. and Banerjee, P. (1997): Simulated Annealing Based Parallel State Assignment of Finite State Machines. Journal of Parallel and Distributed Computing, 43: 21-35.
3. Kirkpatrick, S., Gelatt, C. D. Jr. and Vecchi, M. P. (1983): Optimization by Simulated Annealing. Science, Vol.220: 671-680.
4. 北野宏明, 古谷立美, 他 (1993): 遺伝的アルゴリズム. 産業図書.
5. 宮沢鉄蔵 (1990): 農業施設の設計. 農業施設ハンドブック. 農業施設学会, 39-47.
6. Rosen, B. E. and 中野良平 (1994): シミュレーテッドアニーリング. 人工知能学会誌, 9(3): 33-40.
7. Shahookar, K. and Mazumder, P. (1990): A genetic approach to standard cell placement using meta-genetic parameter optimization. IEEE Transactions on Computer-Aided Design, vol. 9: 500-511.
8. Z 協会 (1998): 鳥取県境港市境港地区近代化施設等基本計画 [高品質堆肥製造施設]. H9 近代化施設 No. 8.

Optimum Layout Design for Agricultural Facility Using a Simulated Annealing

Takaaki SATAKE *, Tatsumi FURUYA ** and Yoshihiko OHTA ***

* Institute of Agricultural and Forest Engineering, University of Tsukuba, Tsukuba 305-8572

** Faculty of Science, Toho University, Funabashi 274-0072

*** Master's Program in Biosystem Studies, University of Tsukuba, Tsukuba 305-8572

Summary

About the optimum layout design problem of agricultural facilities such as packing house, precooling and insulated facility, and others during site layout design, basic program to support the rational construction of such facilities using simulated annealing (SA), which is one of the heuristic algorithms, was coded in C language and preliminary layout design simulations were carried out to get some information for the development of a program for practical problems.

The evaluation of optimum solution of layout design simulations was carried out based on the cost which was a function of the level of superposition between facility and truck yard or road, the cumulative distance between entrance of facilities and truck yard, and cumulative distance between the center of rectangular figures of facility layouts.

As a result of the comparison with the optimum solution by hill climbing (HC), which is one of the solutions of combinatorial optimization problems, the averaged value of cost evaluation by simulated annealing was lower than that of hill climbing by approximately 100. And also, the value of standard deviation of the cost by SA was lower than that of HC. It was cleared that SA, which is comparatively difficult to trap at a local minimum, performed better than HC.

Keywords: combinatorial optimization problem, rational construction, simulated annealing, agricultural facility, layout design, hill climbing.