

ケーソン製作工程への G. A. (遺伝的アルゴリズム) の適用研究

Study on Applying G. A. (Genetic Algorithm)
to Caisson Manufacturing Schedule

鹿島 佐々 雄司

By Yuji Sassa

ダーウィンによれば、生物は集団及び環境との相互作用を通じて環境に適応する個体が生き残り、交配による世代間での優れた形質の継承ならびに突然変異による新しい形質の獲得を通じて、生命の誕生以来長い年月をかけて進化を繰り返してきたとされている。G. A. (遺伝的アルゴリズム) は生物のこの進化機構を模倣した最適化手法である。

1993年「ケーソン製作工程検討システムの開発」¹⁾において、良いスケジュールを発見的に求める方法について述べた。しかし数学的に厳密な意味での最適解の保証はされていない。すなわちもっと良いスケジュールがあるかもしれない可能性が残っている。今回、ケーソン製作のための工程計画に、段取り替えの費用を評価基準として、G. A. を適用し、良好な結果を得たので報告する。

[キーワード] G. A. (Genetic Algorithm: 遺伝的アルゴリズム)、工程計画、最適化

1. はじめに

埠頭や防波堤の建設のために100を超す数のケーソンを製作する工事がある。この製作工程の検討について「第11回建設マネジメント問題に関する研究発表・討論会」において「ケーソン製作工程検討システムの開発」を報告した。そこでの問題は各種の制約条件を守って、100函ものケーソンを数台の製作函台にわりつける順番（並列ショップスケジュール）を求めることである。各種の制約条件とは全体工期、各ケーソン要求期限などである。そこにおいては、より良いスケジュールをパソコンで検討していくシステムについて述べた。得られるスケジュールはヒューリスティックに求められ、総合的な見地から評価されてより良いものに変更されていくが、数学的に厳密な意味での最適解の保証はされていない。すなわちもっと良いスケジュールがあるかもしれないという余地

情報システム部主査

TEL. 03-3746-7105 FAX. 03-3746-7132

が残っている。

従来この種の問題は混合0-1整数計画問題として扱われ、分岐限定法(Branch and Bound)などにより解こうと試みられてきたが、実用の範囲では解が求められていない。ところがG. A. によれば数学的に厳密に最適でなくとも、実用の範囲でよりよい解が期待できたので試みることにした。

2. システムを適用した工事の概要

(1) 常陸那珂ケーソン製作工事

東京電力(株)と電源開発(株)が茨城県常陸那珂港第4埠頭に石炭火力発電所の建設を計画している。そのうち第4埠頭の土地造成護岸工事が1993年4月から始まり、約3年の工期で現在も進められている。図-1に示すように鉄筋コンクリート製護岸ケーソンを製作函台で作り、一旦仮置函台に仮置きした後縦引函台から台船に乗せ、海上仮置場所に移動仮置きした後、据付箇所に曳航して、据付けるという内容である。そのうち弊社を中心とするケーソン製作JVでは101函のケーソンを8つの函台で製作する工事を担当している。ど

のケーソンをどの函台でどういう順番に作るかのスケジュールが重要であり、そのために3. で述べるシステムを適用している。

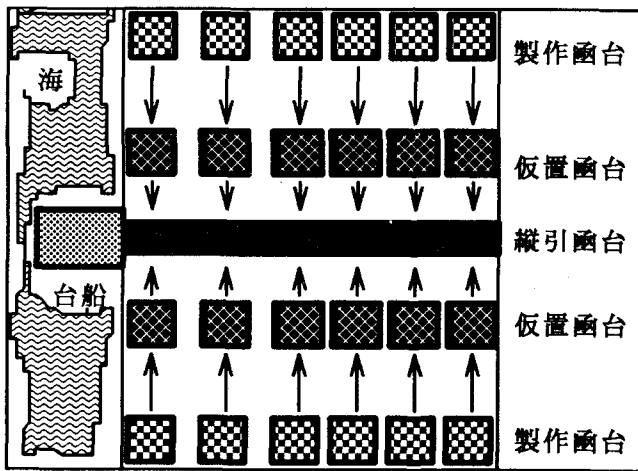


図-1 製作現場概略平面図

（2）原町火力ケーソン製作工事

東北電力（株）は福島県原町において石炭火力発電所の建設を計画している。そのうちケーソン式混成堤の建設工事が1993年7月から始まり、約3年の工期で現在も進められている。常陸那珂の現場とは陸上仮置がない点を除きほぼ同様に、鉄筋コンクリート製防波堤ケーソンを製作函台で作製、養生終了後シンクロリフトにより進水し、海上仮置場所へ移動仮置きした後、据付箇所に曳航して、据付けるといった内容である。そのうち弊社を中心とする第6工区ケーソン製作JVでは99函のケーソンを6つの函台で製作する工事を担当している。常陸那珂と同様に下記のシステムを適用している。

なお、本論文で表しているデータは全てモデル化したものを用いている。

3. 既存システム概要

（1）入力データ

ケーソンタイプ別製作ネット日数、月別稼働対象日数、同一タイプ製作連続性優先順位、製作～据付実績、据付予定期間、型枠転用など。

（2）出力

工程図・山積図（図-2）、不具合情報など。

（3）スケジュール方法

3か月の範囲の中に予定据付時期を持つケーソ

ンから、タイプができるだけ連続するように選ぶ。

実績、函台指定、函台無指定の順番にケーソンを割り付ける。

予定据付時期が守られなかったり、海上仮置個数制限や、異型函に先行すべきケーソンが条件通りに製作できないスケジュールになっても、不具合情報として出力するに留める。

（4）その他

パソコンでスケジュールし、市販の表ソフトにより、入力、出力をコントロールしている。

担当者が総合的に判断して、より良いスケジュールを求めていく。

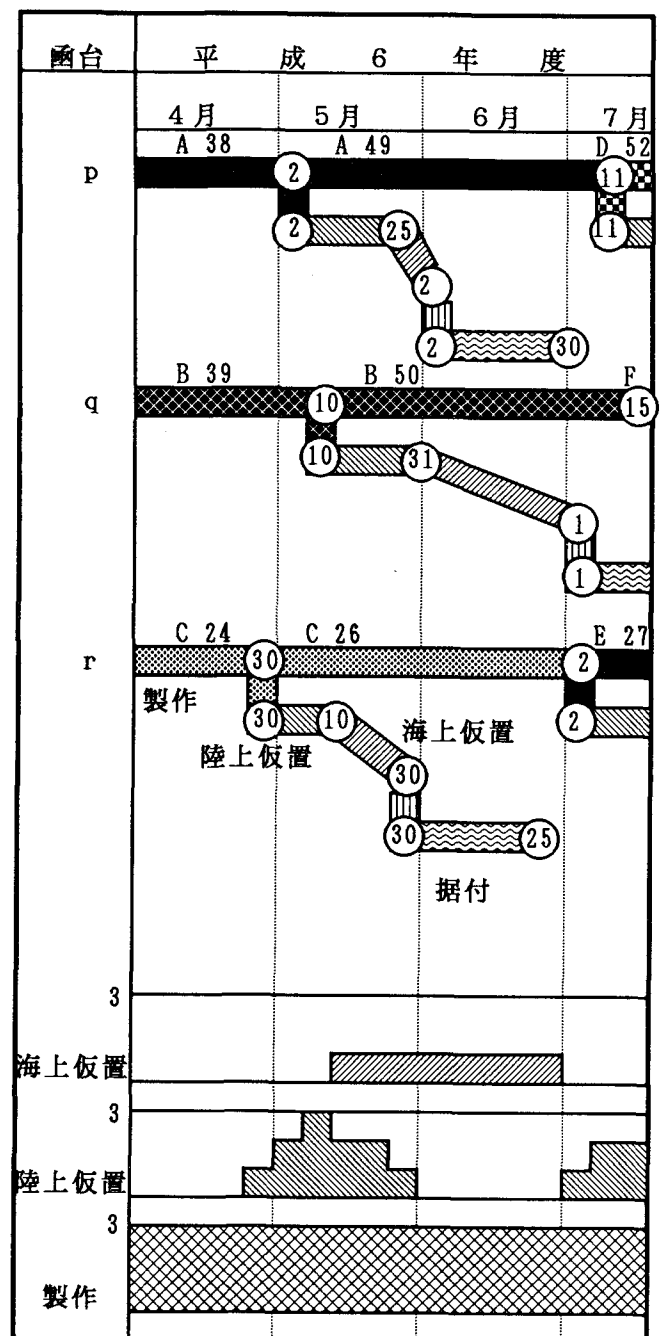


図-2 工程図・山積図

表-1 G.A. の応用分野

制御	ガスパイプライン、ミサイル回避
スケジューリング	生産スケジューリング、並列計算機のタスク割当
設計	VLSIレイアウト、通信ネットワーク設計、ニューラルネット、キーボード構成
組合せ最適化	巡回セールスマン、グラフの分割
画像処理	パターン認識、特徴抽出
信号処理	フィルタ設計
ロボット	軌道プランニング
クラシファイシステム	機械による学習システム
A.L.:人工生命	生命現象のシミュレーション

4. G.A. 概要

(1) G.A. の特性

ダーウィンによれば、生物は集団及び環境との相互作用を通じて環境に適応する個体が生き残り、交叉による世代間での優れた形質の継承ならびに突然変異による新しい形質の獲得を通じて、生命の誕生以来長い年月をかけて進化を繰り返してきた。G.A. は生物のこの進化機構を模倣した計画モデルであり、探索や学習の手法の一つと見なすことができる。その一般的枠組みは以下の4つのステップで記述できる。

第一ステップ：初期化

第二ステップ：繁殖・淘汰

第三ステップ：交叉

第四ステップ：突然変異

G.A. は、J. D. Bagleyにより初めて用いられた用語である。巡回セールスマン問題やスケジューリングなど組合せ最適化の問題の解法として注目されている特に有効な探索アルゴリズムである。すなわち問題に固有な知識を利用できないために、探索空間をうまく狭められず、組合せ爆発を起こしてしまうような大きな探索空間を持つ問題に対しても適用できる汎用の探索技法である。

(2) G.A. の適用分野

文献²⁾によると、G.A. の初期には最適化問題への応用が多かったが、近年ではニューラルネット、ロボット、クラシファイアシステム、人工生命など

応用が多岐にわたるようになった。

表-1にG.A. の主な応用分野の分類を引用する。

(3) 応用事例

また、土木分野における応用事例について、杉本³⁾の研究から数例引用する。

a) 骨組み構造物の最適設計への応用

トラス構造物や平面骨組構造物の設計において、鋼管やH型鋼の断面寸法により、入手の難易に違いがある。また最小重量設計はよく行われるが、その結果得られた各部材の断面は異なることが多い。異なる断面を用いるより、同種類の部材内ではなるべく同じ断面を使う方が、加工と施工などいろいろな面でコストを減らすことができ、より实际的である。したがって各部材への荷重と応力を制約条件として、入手難易、部材断面の不揃いを目的関数として最適設計を行う。

b) 仮設鋼矢板締切工の設計への応用

鋼矢板とH鋼で土留をする際、腹起し、切梁など求めるべき支保工の位置は10~20cm刻みの離散量となる。一方目的関数は総工費、応力度余裕、施工性向上など多目的で非連続である。

c) 複合材料からなる構造体設計への応用

部材の材料コストや、要素体積、加工費、部材数などから構成される目的関数を最小化するように、有限要素分割された構造体の各要素に材料を割当てる。

d) 道路ネットワーク上の維持補修工事の順位付けへの応用

交通供給源となる地域をノード、道路区間をリンクとする道路ネットワークについて、O-D表と各ルートごとの工事費及びQ-V係数が与えられている。最も費用便益比が大きくなるようにするには、どういう順番に補修工事をしたらかよいかを求める。

5. G.A. の組み込み

今回対象としているケーソン製作工程は前に述べたように100函のケーソンを数個の函台に割当てるスケジュールである。ある函台で作るケーソンのタイプの連続性に注目し、最適化のための評価基準として段取り替え費用を定め、その最小化を

狙った。ところが100函のケーソンを順番に並べることだけでもその順列の数は100!となり莫大な数である。そのすべてについて段取り替え費用を求めて比較することは現実には不可能である。このような問題に対して厳密な意味での最適解でなくとも、得られる解が、何回か手順を繰り返しても改善が見られなくなったら、それが求める最も良い解であると考えるのは現実的な方法である。さらに最適解を求める手順として同じ回数捜すならば、戦略を持たずにランダムに捜すより、ある戦略に基づいて捜した方がより良い解が得られる。G. A. の戦略とはその名が示すように解を遺伝子になぞらえ、悪い形質は淘汰して良い形質を残し交叉を繰り返し、突然変異により局所的最適から逃れ、最適解に近づいていくという方法である。

本来ケーソンの製作工程は製作ヤード内の都合だけでなく、全体工事計画、施工条件、仮置きヤード、据付け手順などで総合的に判断され、製作手順が決定されるべきであろう。しかし現実の工事に関係する立場は多く、それぞれに事情がある。つまり各立場ごとに目的関数が異なる。それぞれの目的関数をできるだけ最適になるように、多目的最適化を企画することはできそうである。現実には各立場の目的関数を明確に表現することは難しいし、ある目的関数を最大にすることと別の目的関数を最大にすることが相反する場合が多い。

誰にとっての最適化を目指すかによって、遺伝子の内容や尺度とするべき評価基準が変わってくる。工事発注者の立場では時間と費用を制約した上で、できるだけ品質を上げようとする。一方施工業者の立場では与えられた時間と品質を制約条件として守った上、できるだけ費用を抑えようとする。

(1) 遺伝子

100函のケーソンを函台に割当てるスケジュールに若干工夫を施し遺伝子として表す。表-2に示すように函台の何番目にどのケーソンを製作するかを表した2次元表でスケジュールを表す。後で述べる交叉において遺伝子を1次元の線列として扱うので、2次元のスケジュール表を横方向にきざんで1次元の線列に並べかえ、遺伝子とする。横方向にきざむと、函台ごとに2番目なり3番目な

りの大体同時期に製作されるケーソンが近くに並ぶはずで、製作する時期が近いものが並ぶ方が後で述べる交叉にとって都合が良いからである。函台によって作るケーソンの数は異なるので遺伝子の内部にはケーソンを作らないという意味の空白が存在する。

表-2 ケーソンスケジュール

順番	函台	p	q	r	s	t	u	v	w
1		43	41	40	42	70	71	68	19
2		46	45	44	47	69	72	73	17
3		49	74	48	50	75	67	66	18
4		51	76	39	37	77	64	65	1
5		35	62	38	36	79	63	78	30
6		33	80	34	32	60	81	61	29
7		15	83	16	14	84	59	82	26
8		11	85	13	12	57	56	58	
9		9	87	31	10	55	54	86	
10		28	93	27	25	98	97	94	
11		89	96	88	23	3	8	95	
12		91	99	92	22	6	5	4	
13		52	100	90	7	53	101	20	
14			24	21	2				

表-3 段取り替え費用テーブル

前製作 タイプ	後製作					
	A	B	C	D	E	F
A	10	20	30	40	41	42
B	30	10	20	40	41	42
C	30	20	10	40	41	42
D	50	51	52	10	20	30
E	50	51	52	20	10	30
F	40	41	42	20	21	10

(2) 評価基準

現場においてはいろいろな観点が複合して絡んでいるので、スケジュールの良否を単純に決める評価基準は明確になっていない。今回はケーソンを製作する施工業者の立場で、同一函台で製作するケーソンのタイプの連続的製作を優先することを目的として、函台で製作される時の段取り替えの手間の抑制を費用にみたてて簡易な評価基準とした。すなわち、ある函台であるタイプのケーソ

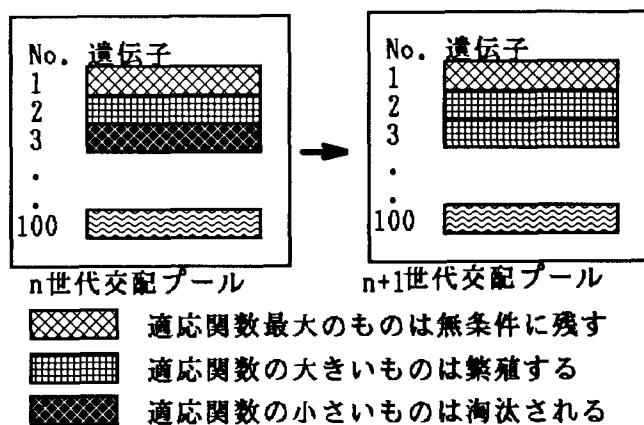


図-3 繁殖・淘汰

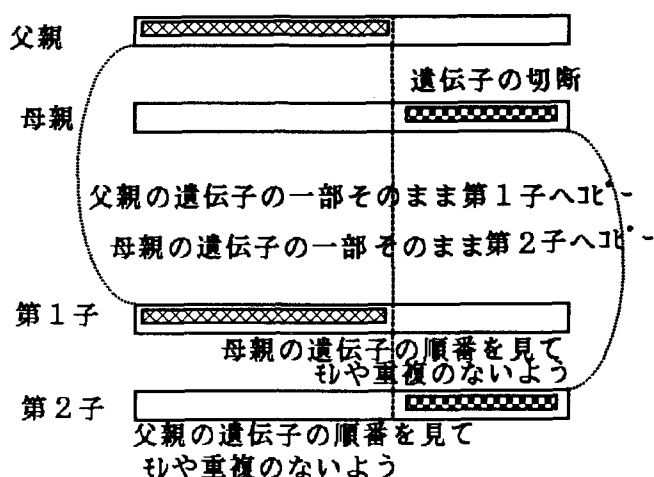


図-4 遺伝子の交叉

ンを作った次にはできるだけ同じタイプのケースンを作るほうが、違ったタイプを作る場合より段取り替えの費用が少なく済む。すべてのタイプについて次に作るのが望ましいタイプの順番があるので、それを換算して表-3のように段取り替えの費用とし、100函のタイプのつながりから段取り替え費用の総和を最小化するようにスケジュールを求めていく。

(3) 人口、世代

遺伝子をいくつ作ればよいか定説はない。数十から数百と言われるが、今回対象とするケースンの数が100であることから、10ではその変容を表すに足りない。しかし、人口数が多ければ計算時間も増える。100、200、300で試してみたが、結果に大きな違いがなかった。人口数は100とした。また、交叉をどこまで続けるかについても、決まった値はない。50～100が適当とされるが、世代を進めても改善が見られないなら途中で打ち切ることにした。

(4) 適応関数

人口の数だけある遺伝子各々について、評価基準により、段取り替え総費用を求める。それが高いものは淘汰され、安いものが繁殖するようにするため、最大値から各々の値を差し引いて逆に適応関数⁴⁾とする。

(5) 繁殖・淘汰

図-3に示すように、n世代からn+1世代へ世代交代する際、交配プールにおいて繁殖・淘汰を行う。適応関数最大のものは無条件で残し（エリート戦略）、各遺伝子の適応関数の値に比例した数に人口が配分される（ルーレット選択）ようにした。適応関数の値の高い遺伝子は複数残りうる（繁殖）。適応関数の値の低い遺伝子は排除される（淘汰）事もある。

(6) 交叉

図-4に示すように、遺伝子を2個選んで父親と母親にする。この両親に対して交叉を行うかどうかを確率的に決定する。交叉が行われない場合は、遺伝子は変化しないで、そのまま子供達にコピーされる。交叉する場合は、遺伝子を適当な場所で切断し、父親は前方、母親は後方の遺伝子の1部分をそのまま子供にコピーする。今回のようなケースンの番号が遺伝子の要素である場合、単純に1部分を入れ換えるだけでは、どの函台でも作られないケースンができたり、同じケースンが異なる函台で2回作られるというような矛盾がおり、遺伝子としては意味のないものになってしまう。このようなことのないように父親や母親の遺伝子の先頭や最後尾から参照して、モレや重複のないように次の世代を作っていく。また、その時必要とされる時期が掛け離れたケースンを近接してスケジュールすることが少ないように、遺伝子の構造を考えている。

(7) 突然変異

繁殖・淘汰と交叉だけでは解が局所的な最適解に収束することがある。突然変異により、局所的な最適解から脱出可能となる。しかし交叉によりせっかく作られた良い遺伝子も破壊されることがある。組み込んだ突然変異の方法は対象とする遺伝子の2箇所をランダムに選び、それらを入れ換えるという方法である。通常は0.1～0.5%の低い

確率で起きるようにしているが、30世代以降10世代ごとに50%の確率で起きるようにした。

(8) ケーソン選択の方針

スケジュールに関して何らかの知識があるなら、その知識を使うことにより信頼性が向上するものとされている。⁵⁾ 表-3に示すケーソンタイプの段取り替え費用から個々のケーソン相互の段取り替え費用が求められる。個々のケーソンについて後続ケーソンへの段取り替え費用でソートすれば、あるケーソンの次に選ぶべきケーソンの順番が自ずと定まる。したがってケーソンを選択するとき全くランダムに選ぶより、前のケーソンに段取り替え費用が安く続くべきものを選べば良い解を導く方向になる。

目的関数

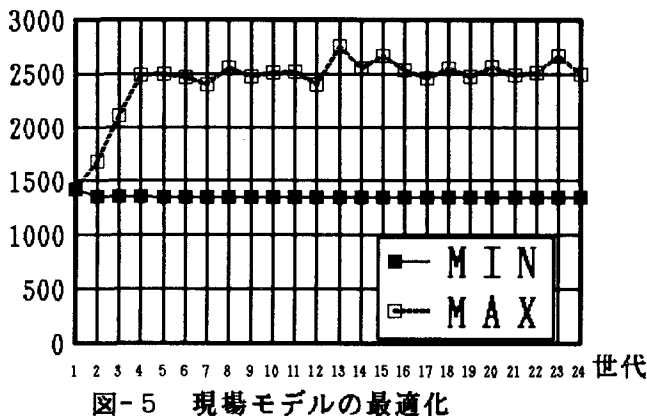


図-5 現場モデルの最適化

6. 適用事例

(1) 現場モデル

既存システムの適用現場における現状のスケジュールに基づき架空のスケジュールを想定して初期遺伝子（現場モデル：段取り替え総費用：1416）とした。それよりもっと良いスケジュールを求めて、G.A.的ルーチンを付け加えた新しいシステムを走らせた。図-5に示すように初期遺伝子で表されるスケジュールよりわずかに良い解（段取り替え総費用：1355、1335(GA0/表-4))は2世代と5世代で見つかったが、遥かに良い解は見いだせなかった。

初期遺伝子で参考にしたスケジュールは、工程担当者が何週間にも渡って吟味を繰り返したものであって、かなり良いスケジュールであることは間違いない。良いスケジュールを初期値にとれば、

表-4 不具合情報によるスケジュールの比較

項目	現場モデル	GA0	GA1
段取り替え費用	1416	1335	1317
タイプ替数	23函	24函	27函
遅れ1	26函	23函	7函
遅れ2	8函	8函	2函
遅れ3	15函	16函	37函
最終日	80818	80901	80709

註) 遅れ1：軽微な遅れ

遅れ2：中程度の遅れ

遅れ3：大きな遅れ

最終日：計算による最終据付年月日

どのようなシステムであっても劇的な改良は期待できない。ケーソン製作工程図や不具合情報により比較しても、表-4に示すようにさほど変わらない。段取り替え費用は1416から1335に81単位低くなったが、タイプ変更の数や据付け予定に対する遅れなどはあまり変わらない。しかし、据付けの最終日はGA0の方が約半カ月遅くなっている。本システムの場合各ケーソンに求められている据付け予定日付、目標工期などは絶対的な強い制約としないで、目安としてなるべくそれを守るようにしている。

目的関数

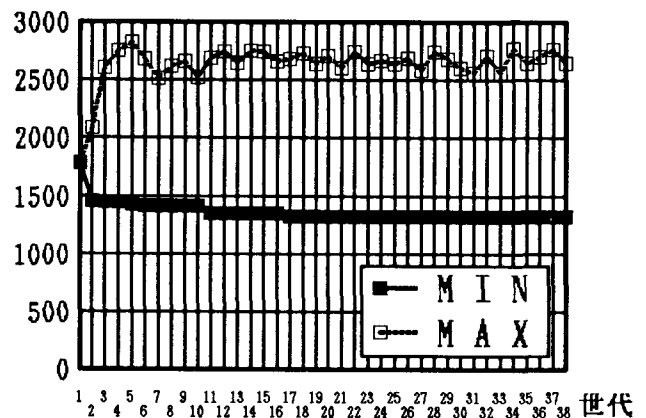


図-6 事前検討における最適化

(2) 事前検討

翻って、着工前において何週間も費やした事前検討において、このシステムがあったなら、短時間で同等レベルのスケジュールを生み出したであろう。ちなみに函台の指定もしない自由な条件では段取り替え総費用1780のスケジュールが得られ

た。それを初期遺伝子として世代を進めていくと、図-6のようにどんどん段取り替え総費用の値が下がり17世代では1317 (GA1/表-4)に達しそれ以上世代を進めても改善されず38世代で打ち切っている。不具合情報により比較すると、表-4に示すように担当者の立てたスケジュールに比べて、若干良い解が得られた。段取り替え費用については初期値1780に比べると463単位、担当者スケジュールに比べると99単位の削減である。タイプ変更の数は若干多くなっているし、据付け予定に対して大きな遅れを持つケースが多くなっているが、工事全体の最終据付けは逆に1カ月以上も短くなっている。目的関数とした段取り替え費用や、最終据付けについては良い結果が得られているが、個々のケースの据付けについては、協議が必要となるスケジュールである。

ここで段取り替え費用は万円や百万円単位の絶対的なものではなく、互いに比較して意味のある相対的なものとして考えている。

(3) 適用効果

長時間頭を捻って良いスケジュールを生み出す代わりに、G.A.的ケースン製作工程検討システムを使えば、手軽に短時間で良いスケジュールが得られる。数学的に厳密な意味での最適解ではないかもしれないが、実用の範囲で求められる内では最も良い解である。今回は評価基準として段取り替え費用のみを設定したので、現場で真に最適化すべきものとは若干ずれがある可能性がある。最適化すべき項目によっては、遺伝子の形や交叉などの方法が異なってくる場合がある。現場にとって他に最適化すべきものとは各ケースン据付け予定からの遅れ日数の合計などが考えられる。

7. G.A. の評価

(1) 厳密性と実用性

G.A.は数学的裏付けに弱点がある。しかし、実用的な範囲で尤もな解答を出す。従来最適化といえば数学的な厳密性が重視され、ともすれば検討すべき数の天文学的莫大さからいきおい現実に実行できる数に矮小化して、ランダムサーチが行われる場合もあった。戦略を持たない単なるランダ

ムサーチよりも最適化の手法としてのダーウニズムは目的関数に沿った戦略によってより良い解を示す。G.A.はそのような数学的な厳密性の呪縛から最適化問題を解き放ったとも言える。しかしあくまでも数学的厳密性が要求される対象には向いていない。

(2) 簡単なロジック

ロジック化にあたり、特に難解な手順はない。コンピュータプログラムのサブルーチンのようなコンパクトなものにはならないが、個々の最適化問題を解くために組立てられているロジックに比較的簡単に追加できる考え方である。⁶⁾

8. 今後の課題

一般に、スケジューリング問題とは、制約条件を満たしながら、目的関数を最大/最小にするように、共用資源の時間配分を決める組合せ最適化問題である。n個の異なる仕事をm台の異なる機械で処理するとき、すべての仕事が同一の手順からなり、またその実行順序も同一である場合にフローショップ問題と呼ばれる。各仕事がm台ある同種の機械のいずれか1つで処理される場合には並列ショップ問題⁷⁾と呼ばれる。また一般に、各仕事にたいして機械の数が一定でなく、各手順を処理するための機械の順序も異なる場合をジョブショップ問題と呼ぶ。ケースン製作工程は並列ショップ問題である。ジョブショップ問題はフローショップや並列ショップを包含しており、その難解さと産業上の応用分野の広さからORの分野で30年以上も盛んに研究されている。従来、解法の殆どは、厳密な最適解を求めるために分岐限定法 (Branch and Bound) が使われてきた。近年その数学的厳密性にこだわらず、効率的に近似解を求める方法が提案されている。G.A. (遺伝的アルゴリズム)、S.A. (シミュレーテッドアニーリング)、タブサーチ、神経回路網などである。ジョブショップ問題の解空間は通常滑らかではなく、局所的最適解を数多く離散的に持つ多峰性で、良い解の一部を入れ換えただけでも解の品質が大きく劣化する。工夫を施せばG.A.によりジョブショップ問題も扱えるので、ケースン製作工程以外の一般的な建設工事の工程

への展開が考えられる。その場合設計図に対応した施工単位を搬送、設置するスケジュールを立てるにあたり、どのように（誰が、いつ、どれだけの施工資源を使って）施工単位を各種施工資源に割当てるか、いろいろな評価基準（時間、費用など）での最適化が行われるだろう。

9. おわりに

取り敢えず評価基準として段取り替え費用を設定したが、これだけでは現場にとって最適化すべきものを完全には表現し切れていないものと思われる。G.A.を適用することによって実用的な範囲で最適なスケジュールを求められることが分かったので、段取り替え費用以外に最適化すべき条件を組入れ、実用に供することが今後の課題である。

さらにケーソン製作工程のみならず、他の建設工程についてもその最適化のためにG.A.の適用の可能性があり、進めていきたい。さてその時も問題となるのは評価基準である。いろいろな評価基準を複雑に絡めず、単純かつ大胆に扱うのが良いようだ。

さらにG.A.による解は数学的に厳密な意味での最適解である保証は確かにはないが、世代を進めていって、改善の具合を見れば、まだまだ良い解がありそうか、あってもそんなに違いがなさそうかは推測できる。最適化すべき対象にもよるが、厳密に数学的な最適解を時間をかけて求めるよりは、厳密には最適解でなくても実用の範囲で求められる良い解ならば、それを受け入れるという考え方が許されてもよい。

謝辞：

この論文のために有用なヒントと御意見を下さった北海学園大学工学部土木工学科杉本博之教授、鹿島情報システム部の高橋健一君、東京電力常陸那珂火力発電建設所の皆様、東北電力原町火力建設所の皆様、そして各現場の皆様に感謝の意を表します。

[参考文献]

1) 若山尚子他「ケーソン製作工程検討システム

の開発」：第11回建設マネジメント問題に関する研究発表・討論会講演集、1993.12

2) 樋口哲也他「遺伝的アルゴリズムとその応用」：情報処理1993.7 Vol.34 No.7

3) 杉本博之他「離散的構造最適設計のためのGAの信頼性向上に関する研究」：土木学会論文集No.471/I-24, pp67-76, 1993.7

4) 杉本博之「GAの工業設計への応用にむけて」：数理科学No.353, 1992.11

5) David E.Goldberg 「Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning」：The University of Alabama

6) 後藤高志他「計画型問題へのGA・ニューラルネット・AIの応用」：NKK技報 No.144(1993), pp78-85

7) 今野浩、鈴木久敏「整数計画法と組合せ最適化」：日科技連1982