

## 論文 遺伝的アルゴリズムに基づく要求性能型調合設計手法の基礎研究

丸山 一平\*<sup>1</sup>・長井 宏憲\*<sup>2</sup>・野口 貴文\*<sup>3</sup>・友澤 史紀\*<sup>4</sup>

要旨：本研究は、構造物に要求される性能から材料に求められる性能が定義できるという仮定のもとで、要求された性能を満たすコンクリートの調合設計手法を確立することを目的としたコンクリートの要求性能型調合設計に関する基礎的研究である。本研究ではコンクリートに対する多くの要求性能値を同時に満たす調合問題を多目的最適化問題として扱い、遺伝的アルゴリズムを用いて、その解を導出するシステム構築を目指したところ、一定の成果が得られた。

キーワード：遺伝的アルゴリズム、調合設計、パレート最適

## 1. はじめに

近年、構法仕様規定によって設計・施工され、建造後の性能に関しては特に問われてこなかった構造に対して、機能・性能を明確にした設計を行う手法が模索されている。

構造物の性能設計では、下位要素の機能・性能を踏まえて、要求される上位要素の機能・性能を達成するように合理的に各要素を構成する。近・現代において多量に使用されてきた経緯のあるコンクリートは、構成する材料種類・量によってさまざまな性能を持つ構造物を造ることができ、性能設計の中の材料選択過程において、要求される性能を満たすよう合理的に調合されるべきである。またそのような要求性能型調合システムの構築は性能設計において非常に重要であるといえる。

## 2. 最適化問題としての調合

## 2.1 従来の問題点

コンクリートの調合設計を、「いくつかの異なる性能に対し、その要求のレベルを最もバランス良く満たすような調合を求めること」

と位置付けると、コンクリートの調合設計は多目的最適化問題と捉えることができる。多目的最適化問題として調合設計をとらえた研究に、制約条件つき非線形最適化問題における Kuhn-Tucker 定理を用いた W.Marks, J.Potrzebowski らの研究<sup>1)</sup>や効用関数を用いて評価関数の重み付けを行いその中で最適解をもとめた Z.Pasta, L.Czarnecki らの研究<sup>2)</sup>がある。しかしながら、調合設計に対しては、各性能に対する評価間で、それらのトレードオフ関係をバランスさせながら、解をいかにもとめるかという技術が必要であり、従来の線形計画法や非線形型計画法などの、解空間内で一つの目的関数を最大または最小にする最適点を決定する、単一の目的関数による最小化問題を解く数学的手段では対応ができない。

## 2.2 パレート最適

コンクリートの調合設計では、すべての要求性能に対して満足いく最適解を、もしそのような最適解がない場合にはそれに準じた解を探し出す必要がある。そのような問題に対しては、先の線形計画問題のように単一の目

*1 東京大学	工学系研究科建築学専攻	工修	(正会員)
*2 東京大学	工学系研究科建築学専攻		(正会員)
*3 東京大学助教授	工学系研究科建築学専攻	工博	(正会員)
*4 北海道大学教授	工学研究科社会基盤工学専攻	工博	(正会員)

的関数による評価ではなく、複数の目的関数によってつくられるパレート最適と呼ばれる解空間を求めることで解決をはかることができる。

パレート最適な解空間<sup>3)</sup>とは、多目的関数

$$f(x) \equiv (f_1(x), \dots, f_p(x)) \quad (1)$$

に対して、

$p$ 次元ベクトル  $x^1, x^2 \in F$  において

- (a)  $f(x^1) \leq f(x^2)$  のとき、 $x^1$  は  $x^2$  に対して優越な関係である。
- (b)  $f(x^1) < f(x^2)$  のとき、 $x^1$  は  $x^2$  に対して強い意味で優越な関係である。

と定義された言葉を用いて

$x^0 \in F$ ,  $\{F \equiv p$ 次元における部分集合 $\}$ としたとき、

- (1)  $x^0$  に強い意味で優越な  $x \in F$  が存在しないとき、 $x^0$  を弱パレート最適解という。
- (2)  $x^0$  に優越な  $x \in F$  が存在しないとき、 $x^0$  を(強)パレート最適解という。
- (3)  $x^0$  が任意の  $x \in F$  に対して優越なとき、 $x^0$  を(完全)最適解という。

というように定義される解の集合である。

定義に従えば、最適解があればそれがパレート最適解であり、それ以外のパレート最適解は存在しない。以上のように、パレート最適解の集合は多目的最適化問題に対する最も合理的な解の集合と考えることができる。

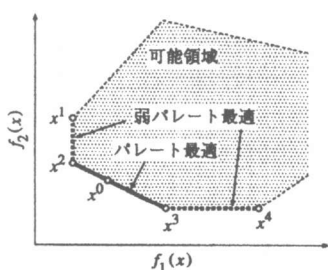


図-1 パレート最適な関係を示す図

目的関数が二つ ( $p = 2$ ) の場合のパレート最適解の例を図-1に示す。図中の太線がパレート最適解を、太い破線が弱パレート最適解をそれぞれ示している。

### 3. 遺伝的アルゴリズムでのパレート最適の実装

#### 3.1 遺伝的アルゴリズム

遺伝的アルゴリズム (Genetic Algorithm 以下 GA) は、生物の進化過程における遺伝子の複製・選択・淘汰のメカニズムをモデルとした確率的探索・学習・最適化アルゴリズムの一手法である。<sup>4)</sup>

GA は、組み合わせの最適化 (探索と表現されることが多い) 問題を中心として工学的に広く応用されており、最適解はわからないが、解の評価は可能であるという問題に対して準最適解を探索する場合により成果が得られることがいわれている。<sup>4)</sup> このような特徴はコンクリート調合設計の最適化手法が材料の組み合わせ問題であるということを考えてその解法手段としての妥当性があると考えられる。

GA で扱う情報は、表現型と遺伝子型の 2 層構造をもつ。遺伝子型は 0・1 の配列からなる局所規則の集合であり、遺伝的操作の対象となる。一方、表現型は環境内での発達に伴う行動や構造を遺伝子型から構築したもので、環境に応じて表現型から適合度を算出し、適合度にしたがって遺伝子の進化をおこす。

GA においては、

- (1) 遺伝子の形
- (2) 遺伝子情報から生じる表現型
- (3) 表現型によって起こる淘汰の仕組み
- (4) 次世代へと引き継ぐ交配方法等

を設計することによって、自然界を模した進化的アルゴリズムを作ることができる。

GA によって探索される解の候補は、遺伝子型個体として表現され、各世代は個体の集合として表現される。

### 3.2 パレート最適の実装

GAを多目的最適化問題に対して適用する場合、パレート最適解を適切に評価・選択し、次世代に残していく手法を問題に対応させて設計しなくてはならない。このようなパレート最適解導出に関する実装手法として、Gold-Berg<sup>5)</sup>, Schaffer, 玉置らの研究があるが、われわれはそれらの手法を以下のように改良してGAに実装した。

今、評価関数が  $p$  個、世代個体数が  $n$  個あるとしたとき、 $n$  個の次世代を以下のアルゴリズムによって導出する。

- (a) 評価関数 1 に従って、各遺伝子の評価値を決定し、ルーレット選択（評価値に比例した確率で、親遺伝子を選択する方法）を行い、親 A・親 B を選ぶ。
- (b) それらを一様交叉させ、子 A・子 B を作る。
- (c) これを、評価値 1 から  $p$  について、個体数が  $n$  個になるまで順番に繰り返す。このようにしてできた新しい  $n$  個を new generation とよび、親世代にあたる古い世代の  $n$  個を old generation と呼ぶことにする。
- (d) new generation  $n$  個と old generation  $n$  個を合わせて、 $2n$  個の temporary generation を形成する。
- (e) 0.01 (1%) の確率で、任意の遺伝子座を反転させこれらに突然変異をおこす。
- (f) この  $2n$  個の個体の中から、パレート保存を行い次世代となる  $n$  個を選択する。

(I) パレート解の個数が  $n$  個以下のとき、まず、全体の中から、パレート解を全保存する。残りの中から、評価値 1 から  $n$  まで順番に、全体数が  $n$  個になるまで、ルーレット選択により、各評価値に従って、繰り返し選択していく。

(II) パレート解の個数が  $n$  個以上のとき、パレート解の中から、評価値 1 から  $n$  まで順番に、各評価値に従って、ルーレット選択により、全個体数が  $n$  個になるまで繰り返し選択する。

### 3.3 遺伝子の設計

コンクリートの調合を GA 上に実装するにあたっては、多種多様な材料の種類および量があるが、今回対象とした材料種類を表-1 に示す。

表-1 GA に実装した材料種類

水	水道水
セメント	普通ポルトランドセメント 早強ポルトランドセメント 中庸熱ポルトランドセメント
粗骨材	川砂利, 碎石
細骨材	川砂, 碎石
混和材	高炉スラグ微粉末 フライアッシュ シリカヒューム
混和剤	AE 剤, AE 減水剤 高性能 AE 減水剤

表-2 データシート上での構成材料のもつ物性値

セメント	セメント種類 密度 セメント強さ 価格	混和材	混和材種類 密度 ブレン値 価格
粗骨材	産地 骨材種類 区分 密度 吸水率 実積率 粗粒率 価格 最大寸法	混和剤	混和剤種類 減水率 標準添加量 連行空気量 価格
細骨材	産地 骨材種類 区分 比重 吸水率 最大寸法 実積率 粗粒率 価格		

GA 遺伝子上にコンクリート調合の多くの構成材料種類を実装するために、データベースを用意した。このデータベースには調合によってできあがるコンクリートの各性能・物性値に対して現時点で評価できる範囲の構成材料の性能値・物性値等が格納されている。それらを表-2 に示す。

データベースに記述された各材料は遺伝子上から参照することのできるシリアルナンバーが与えられ、遺伝子上の情報は実際のコンクリート構成材料の各性質を保持するのではなく、それらの各性質を保有しているデータベース上へのリンクをのみ保有する。こうすることによって遺伝子の長さを短くすることができ、計算にかかる時間と資源を節約することができる。

材料・調合からコンクリートの各性能値を算出するときには遺伝子上のリンクをたどり、データシート上の構成材料のもつ性質を参照する。



図-2 GA 遺伝子・データベース・表現型

今回の GA 上の遺伝子においては、水量に対する体積比をコード化することで実装を行い、遺伝子上には水量は直接は記述せず、各体積比によって 1m<sup>3</sup> を内分することで調査上の構成材料量を表現することにした。

以上のコンクリート調査の GA 遺伝子設計と表現型、データベースとの関係を図-2 に示す。今回は、紙面の都合上、コンクリート遺伝子からそのコンクリートのもつ性質を求め表現型関数についての説明は割愛した。

### 3.4 評価関数

既存の GA における評価関数は、一律に価値を決定付け、遺伝子を進化させるものが多く、

パレート解を GA で導出するのに最適な関数とは言えないものが多いため、本研究では、調査設計において必要と思われるいくつかの評価関数を新たに設計し用いた。その概形と、それぞれに用いた表現関数との対応を図-3 に示す。

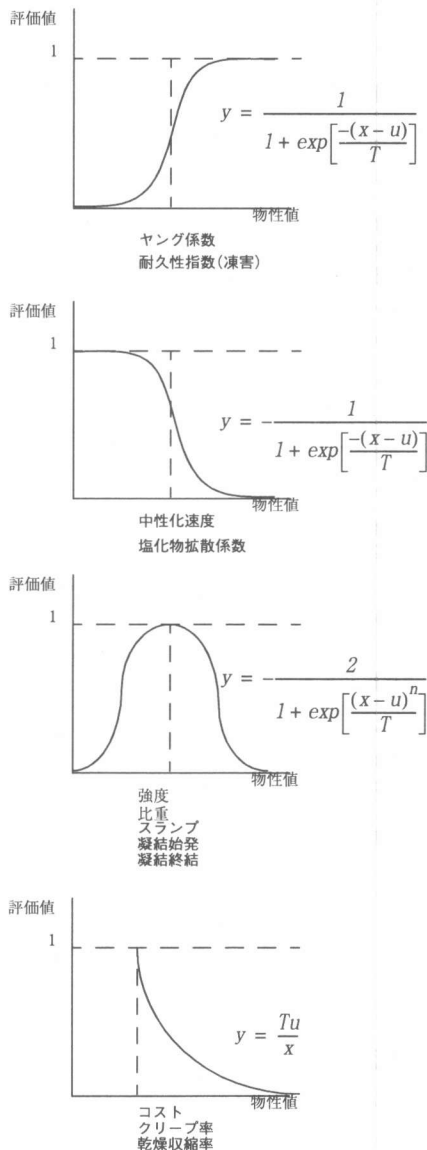


図-3 各物性値に評価値を与える関数(評価関数)

このなかで、y は評価値を示し 0 から 1 の間の値をとる。一方、u は要求される物性値、x は遺伝子から求めた物性値の値を示す。評価

関数は求められる要求性能・物性値にふさわしい（収束が早いという点において）ものとしなくてはならない。本研究においては、パラメータスタディによって変数  $T$ 、 $n$  の最適値を得た。これら  $T$ 、 $n$  は関数における勾配を支配し、例えば、 $T$  を小さな値にするとその勾配は大きくなり、要求性能値をはさんで急激な淘汰圧が進化の過程に働くことになる。

#### 4. 試行結果

表-3 入力した要求性能の値

要求性能	要求値
耐久指数	60
塩分拡散係数	1.0E-08 (cm <sup>2</sup> /s)
中性化速度	0.37 (m/√ year)
強度	30 (N/mm <sup>2</sup> )
密度	2.25 (t/m <sup>3</sup> )
ヤング係数	25 (kN/mm <sup>2</sup> )
乾燥収縮率	5.0E-04
クリープ率	2.0E-07
凝結始発	5 (h)
凝結終結	6 (h)
スランブ	18 (cm)
価格	10000 (yen)

表-3 に GA によって試行した入力値を挙げる。この要求性能値を元に、50 個体、1000 世代の遺伝後に得られた結果が表-4、表-5 である。表-4 はパレート最適として求められた各表現型関数の値であり、表-5 はその表現型関数の遺伝子が持つコンクリートの割合である。

乱数によって生じた 50 個体の遺伝子は、まず表現型関数によってコンクリートの物性値に変換される（図-2 下部）。次に遺伝子ごとに表-3 の要求物性値によって形づくられた評価関数（図-3）によってそれぞれの物性値に評価値が与えられる。つまり 50 個のヴァーチャルなコンクリートの持つ 12 個の物性値にそれぞれ点数が与えられるわけである。こうしてできたコンクリートはそれぞれの点数を比較しあい、パレート保存戦略という次世代につながるアルゴリズムによって新しい 50 個

となる（3.2 節）。こうした進化を 10000 世代行うことにより、要求した性能を満足するコンクリートの集団ができていく。この中にはパレート最適という定義によって一つの物性値に対しては満点を獲得しているが、残りの物性値はひどいものも混じっている。そこでこれらのコンクリートの評価値の平均点を取り、上から順に挙げたものが表-4、表-5 である。以上の結果に関する考察を以下に示す。

- (1) パレート最適手法による要求性能のトレードオフ関係にある割合が探索結果として得られた。例えばコンクリート性能値として表-4 の割合 b と k および e と j である。それらの割合を見てみると、b と k はスランブと強度をトレードオフし、e と j は価格と強度をトレードオフしていることがみてとれる。
- (2) 表現型に関する関数が GA 上の収束に関して適正な制約条件を与えなかったために実際に行われている割合と異なったものに収束がしてしまっている。

#### 5. 結論

要求性能型コンクリート割合システムの基幹部分をパレート最適手法の GA 実装によって実現した。この手法によれば、要求性能を満たす完全な解となるコンクリート割合がない場合でも、各性能値のトレードオフ関係を含めて最適と思われる解の集合を導出することができる。今回の割合の不整合に関しては、骨材の実積率の評価とペースト分の割合とといった影に隠れたコンクリートの制約条件を反映させていなかったことが原因と考えられ、これらを実装することで実用に耐えうるものとなると考えられる。今後はそのような制約条件と、より精度のよい割合と性能値の関係を実装すること、また、環境、養生条件、施工方法まで評価を拡大することが課題である。

表-4 最適化された調合のもつ性能値

性能項目	要求性能	a	b	c	d	e	f	g	h	i	j	k	l
耐久性指数	60	97	97	97	97	97	97	97	97	97	99	99	72
塩分拡散係数	1.0 E-08	2.6 E-08	3.1 E-08	3.1 E-08	3.1 E-08	3.1 E-08	3.1 E-08	3.1 E-08	3.1 E-08	3.1 E-08	3.1 E-08	3.1 E-08	3.5 E-08
中性化速度	0.37	0.063	0.075	0.075	0.075	0.075	0.113	0.075	0.075	0.113	0.075	0.075	0.123
強度	30	31.8	30.1	30.1	30.1	30.1	30.1	30.1	30.1	30.1	28.8	28.8	31.7
密度	2.24	2.26	2.27	2.28	2.26	2.25	2.26	2.26	2.26	2.27	2.25	2.25	2.29
ヤング係数	25	25.8	25.2	25.4	25.1	25	25.2	25.1	25.1	25.3	24.4	24.4	26.3
乾燥収縮率	5.0 E-04	5.9 E-04	5.8 E-04	5.5 E-04	5.7 E-04	6.0 E-04	5.7 E-04	5.7 E-04	6.0 E-04	5.7 E-04	5.6 E-04	5.6 E-04	6.2 E-04
単位クリープ	2.0 E-07	3.0 E-06	2.9 E-06	2.8 E-06	2.9 E-06	3.1 E-06	2.9 E-06	2. 9E-06	3.1 E-06	2.9 E-06	2.9 E-06	2.9 E-06	3.5 E-06
凝結始発	5	4.51	4.67	4.67	4.67	4.67	4.67	4.67	4.67	4.67	4.67	4.67	4.77
凝結終始	6	6.19	6.41	6.41	6.41	6.41	6.41	6.41	6.41	6.41	6.41	6.41	6.53
スランプ	18	17.7	16.3	16.3	16.7	18.2	17.7	18	18.1	18.1	17.4	18.2	21.6
価格	10000	11087	10370	10407	11227	11225	11537	10389	10393	10766	10330	10389	10773

塩化物拡散係数：(cm<sup>2</sup>/s), 中性化速度：(cm/√ year), 強度：(N/mm<sup>2</sup>), 密度 (t/m<sup>3</sup>), ヤング係数 (kN/mm<sup>2</sup>), 凝結始発・終結 (h), スランプ (cm), 価格 (yen),

表-5 最適化され、求められた解 (調合)

調合	a	b	c	d	e	f	g	h	i	j	k	l
W/C	47.4	49.2	49.2	49.2	49.2	49.2	49.2	49.2	49.2	49.2	49.2	50.2
単位水量	142	138	138	142	142	141	142	142	142	140	140	154
空気量 (%)	6.3	6.3	6.3	6.3	6.3	6.3	6.3	6.3	6.3	7.2	7.2	4.6
絶対容積	セメント	95	89	89	91	91	91	91	91	90	90	97
	細骨材	284	401	401	387	387	391	387	387	387	383	419
	粗骨材	417	309	309	317	317	315	317	317	317	314	285
	混和材	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	混和剤	0.647	0.793	0.793	0.615	0.655	0.654	0.791	0.789	0.792	0.784	0.853
質量	セメント	299	280	280	288	288	286	288	288	288	285	306
	細骨材	738	1060	1060	1006	1006	1016	1010	1021	1021	1012	1105
	粗骨材	1100	816	825	846	836	841	846	836	846	838	762
	混和材	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	混和剤	0.647	0.793	0.793	0.615	0.655	0.654	0.791	0.789	0.792	0.784	0.853
セメント種類	普通	普通	普通	普通	普通	普通	普通	普通	普通	普通	普通	普通
細骨材	産地 / 岩種	段・硬	富・硬	富・硬	青・硬	段・硬	段・硬	小・硬	富・硬	富・硬	富・硬	富・硬
	種別	砕砂	川砂	川砂	砕砂	砕砂	砕砂	海砂	川砂	川砂	川砂	川砂
粗骨材	産地 / 岩種	青・硬	青・硬	八・硬	八・硬	青・硬	八・硬	八・硬	青・硬	八・硬	八・硬	八・硬
	種別	砕石	砕石	砕石	砕石	砕石	砕石	砕石	砕石	砕石	砕石	砕石
混和材種類	なし	なし	なし	なし	なし	なし	なし	なし	なし	なし	なし	なし
混和剤種類	AE 減	AE 減	AE 減	AE 減	AE 減	AE	AE 減	AE 減	AE	AE 減	AE 減	AE

単位：絶対容積 (l/m<sup>3</sup>), 質量 (kg/m<sup>3</sup>)

普通：普通ポルトランドセメント, 硬：硬質砂岩, 段：段戸産, 富：富士川産, 青：青梅産, 小：小豆島産, 八：八王子産, AE 減：AE 減水剤, AE：AE 剤, 混和剤の値は標準添加量に対する割合

[参考文献]

- 1) Marks, W. and Potrzebowski, J. Multicriteria optimization of structural concrete mixes, Arch.Civil Engineering, 38(4), 77-01, 1992
- 2) Piasta, Z. and Czarneski, L. Analysis of material efficiency of resin concrete. IN Brittle Matrix Composite, Elsevier Applied Science, London and New York, pp.593-602, 1989
- 3) 北野宏明, 遺伝的アルゴリズム 2, 産業図書, pp.73, 1995
- 4) 北野宏明, 遺伝的アルゴリズム, 産業図書, pp.1-41, 1993
- 5) Avid E. Goldberg, Genetic Algorithms in Search, Optimization & Machine Learning, Addison Wesley, pp.192-208, 1989