

## 遺伝的アルゴリズムによる飼料の多目的配合設計

佐竹隆顕\*・古谷立美\*\*・南 善行\*\*\*

\*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

\*\*\*全農 飼料畜産中央研究所, 〒 300-4204 つくば市

### 要 旨

遺伝的アルゴリズム (GA) を援用した飼料の多目的配合設計の端緒として、成鶏飼育用、肉豚肥育用および肉用牛肥育用の 3 種の配合飼料の同時最適配合設計を試みた。

共通飼料原料としてコーン、マイロ、脱脂米ヌカなど 12 品目、また栄養組成および栄養価の指標として粗蛋白質、可消化粗蛋白質、可消化養分総量など 6 項目を選択抽出する一方、これら飼料原料や栄養組成などの制約条件のもとで 3 配合飼料の各飼料原料コストを同時並行的に最小化する多目的配合設計を可能とするよう前報で報告した GA を改良し、シミュレーションを行った。

配合設計にあたり十分量の飼料原料が準備されている場合、飼料原料の内のコーンおよびコーングルテンフィードの使用量に制限や取り合いがある場合など計 7 種類のシミュレーションを行った結果、本研究で改良開発した多目的遺伝的アルゴリズムは様々な条件下において 3 配合飼料の同時最適配合設計を実現する可能性をもつことが明らかとなった。

キーワード：遺伝的アルゴリズム、最適設計、飼料原料、多目的配合設計、飼料原料コスト

### I. 緒 言

近年、家畜や家禽の配合飼料の設計において、必要にして十分な栄養素を供給し、かつ最も安価な飼料を得るため、線形計画法（以下 LP と略記する）を援用したコンピュータによる配合計算が行われている（配合飼料講座編纂委員会、1980）。しかし LP による配合計算においては、配合飼料の高機能化により配合する飼料原料の数が増えてくると、必然的に制約条件式の数も増え、全ての条件を満たすと同時に、飼料原料コストを最小とする配合の最適解を得ることが困難であることなどが指摘されている。

また、一種の配合飼料のみを設計対象とし、その飼料原料コストを最小とする配合率の最適設計に留まらず、複数の配合飼料を同時に設計対象とするとともに、各々の配合設計において相競合する飼料原料コストなどの同時並行的な最適化を可能とする総合的な配合設

計に対するニーズも高まってきている。この問題に対して、多目的線形計画法（坂和、1991）（以下 MOLP と略記する）を援用した配合設計が試みられているものの、複数個設定する配合原料コストなどの全ての目的関数を同時に最小とする完全最適解は一般には存在しない。このため完全最適解の代わりに消極的な解として、ある目的関数の値を改善するためには、少なくとも他の一つの目的関数の値を改悪するいわゆるトレード・オフの概念を取り入れたパレート最適解をもって配合設計結果としており、実際の設計現場における援用までには至っていない（三谷ら、1994）。

家畜、家禽および養殖魚などを対象とした配合飼料の設計に関する以上のような技術水準を背景として、畜産業界においては、生産コストの低減や最大の生産につながる配合飼料の新しい最適設計手法の開発が期待されている。

これら配合設計上の諸問題の解決の端緒として、前

原稿受理 1999 年 3 月 18 日

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

報（佐竹ら，1998）では配合設計の新機軸である遺伝的アルゴリズム（Holland, 1992, Michalewicz, 1995）

（以下 GA と略記する）を援用した配合設計法を提案するとともに、肉豚肥育用配合飼料のみを設計対象とし、その飼料原料コストを最小化するシミュレーションを行い、GA による配合設計においても、従来技術の LP による最適解とほぼ等しい解が得られることなどを報告した。

本論文においては、前報で報告した一つの目的関数の最小化に留まらず、相競合する複数の目的関数の同時最小化を実現する多目的遺伝的アルゴリズム（以下 MOGA と略記する）を前報で紹介した GA を改良して開発するとともに、GA による飼料の多目的配合設計の端緒として、成鶏飼育用（以下、成鶏用と略記する）、肉豚肥育用（以下、豚肥育用と略記する）および肉用牛肥育用（以下、牛肥育用と略記する）の 3 種の配合飼料の飼料原料コストを最小化する同時最適配合設計を試みた結果について報告する。

## II. シミュレーション方法

### 1. 多目的配合設計に用いた飼料原料の栄養組成、栄養価および配合制約条件

複数配合飼料の同時最適配合設計シミュレーション

を行うに当たり、対象飼料としては成鶏用、豚肥育用および牛肥育用の 3 種の配合飼料を選択した。3 飼料の飼料原料として、現在わが国の配合飼料の主原料であるコーンをはじめとして、マイロ（以上穀類）、脱脂米ヌカ（そうこう類）、ダイズ油粕、ナタネ油粕（以上植物性油粕類）、コーングルテンフィード、ビタミン・ミネラル添加物（V.M）および炭酸カルシウム等の 12 原料を抽出する一方、栄養組成および栄養価の検討項目として粗蛋白質（CP）、可消化粗蛋白質（DCP）、可消化養分総量（TDN）、代謝エネルギー（ME）、カルシウム（Ca）およびリン（P）の 6 項目を抽出した。抽出した飼料原料の原物中の栄養組成と栄養価および各配合飼料毎の配合設計の制約条件、ならびに 1 トン当たりの価格を表 1 に示す。同表中の組成および栄養価などの数値は、日本飼料標準表より抜粋した値である。

一方、飼料原料の各飼料毎の配合率の上限および下限の値、同様に各飼料毎の栄養組成・栄養価の含有率の上限および下限の値、ならびに各飼料原料の 1 トン当たりの価格は、文献やメーカーの配合設計技術者の助言を参考にしつつ、配合設計において常識的な範囲内で仮に設定した値である。配合設計において制約条件となるこれらの上限および下限の値で、F はフリーを意味しており、制約条件内の値を自由に選択可能で

表 1 3 配合飼料の原料の栄養組成・栄養価および配合設計の制約条件と単価

飼料原料	栄養組成・栄養価（%*, Mcal/t**）						配合率（%）						価格 （千円/t）	
							成鶏用		豚肥育用		牛肥育用			
	CP*	DCP*	TDN*	ME**	Ca*	P*	Min	Max	Min	Max	Min	Max		
コーン	8.8	6.7	80.7	3270	0.03	0.31	40	F	15	F	10	F	22	
マイロ	9.0	6.7	80.6	3210	0.03	0.30	F	25	F	50	F	50	21	
脱脂米ヌカ	17.7	12.6	52.4	1650	0.07	2.28	F	10	F	5	F	20	20	
コーングルテンフィード	19.8	14.5	57.9	1910	0.25	1.00	F	5	F	5	F	10	17	
ダイズ油粕	46.1	40.6	71.0	2390	0.33	0.70	3	F	3	20	3	F	40	
ナタネ油粕	37.1	29.3	59.9	1680	0.71	1.25	F	5	F	5	F	5	30	
魚粉（CP60）	61.2	53.2	69.6	2920	5.69	3.24	2	F	F	3	F	3	80	
ミートボーンミール	50.4	41.8	63.1	2430	11.4	5.74	F	5	F	5	F	5	60	
イエローグリース	0	0	214	8370	0	0	F	3	F	3	F	3	62	
ビタミン・ミネラル添加物	0	0	0	0	10.0	5.00	0.5	0.5	0.2	0.2	0.2	0.2	450	
炭酸カルシウム	0	0	0	0	39.0	0							9	
第 3 リン酸カルシウム	0	0	0	0	32.0	18.0							70	
組成 栄養価 （%）	成鶏用	Min	17	F	F	3000	1.5	0.8						
		Max	18	F	F	3050	1.5	0.8						
	豚肥育用	Min	16	13.5	76	F	1.2	0.8						
		Max	17	14.5	77	F	1.2	0.8						
	牛肥育用	Min	12	9	74	F	1.2	0.8						
		Max	13	10	75	F	1.2	0.8						

※ 1) CP: 粗蛋白質, DCP: 可消化粗蛋白質, TDN: 可消化養分総量, ME: 代謝エネルギー  
 2) 表中の F はフリー（制限無し）

あることを示している。

同時最適配合設計シミュレーションにおいては、コーン、脱脂米ヌカ、ダイズ油粕などといった原料の配合率、および粗蛋白質、可消化養分総量、代謝エネルギーなどといった栄養組成・栄養価の含有率の上限および下限値に関する各制約条件を、成鶏用飼料では計 16、豚肥育用飼料では計 19、および牛肥育用飼料では計 18 個設定するとともに、これらの条件を全て満たしつつ、各原材料の単価に基づく最小の飼料原料コストを各配合飼料および 3 配合飼料合計のいずれにおいても実現するように、各飼料原料の 3 配合飼料毎の配合率を決定することになる。

## 2. 実施配合設計シミュレーション

GA による多目的配合設計の可能性を明らかにする端緒の研究として、3 種の配合飼料の同時最適配合設計を行うに当たり、本研究では豚および牛肥育用飼料の設計数量を成鶏用飼料の半量（ただし、計算時には設計数量を豚および牛肥育用飼料はそれぞれ 100 トン、成鶏用飼料は 200 トンとする）と仮定し、次に示す 7 種の配合設計シミュレーションを行った。

- a. 配合候補の各飼料原料は、3 配合飼料への配分にあたり十分量が準備されている場合。（シミュレーションコード GA0、以下同様）
- b. 3 配合飼料のコーン使用量を GA0 で得られた配合結果より各々 10% 減とする一方、他原料については十分量が準備されている場合。（GA1）
- c. 3 配合飼料のコーン使用量総計を GA0 で得られた配合結果の 10% 減とし、3 飼料間でその使用量に関して取り合いを認める一方、他原料については十分量が準備されている場合。（GA1'）
- d. 3 配合飼料のコーングルテンフィード使用量を、成鶏用飼料では設計飼料 200 トン中 2.5%（5 トン）、豚肥育用飼料では同飼料 100 トン中 2.5%（2.5 トン）、牛肥育用飼料では同飼料 100 トン中 5%（5 トン）の合計 12.5 トンに固定する一方、他原料については十分量が準備されている場合。（GA2）
- e. 3 配合飼料のコーングルテンフィード使用量総計を 12.5 トン（設計飼料総計 400 トン中）とし、3 飼料間で同使用量に関して取り合いを認める一方、他原料については十分量が準備されている場合。（GA2'）
- f. 前記のシミュレーション GA1 と GA2 の設計条件を組み合わせる実施した場合。（GA12）
- g. 前記のシミュレーション GA1' と GA2' の設計条

件を組み合わせる実施した場合。（GA12'）

## 3. 多目的遺伝的アルゴリズムによる複数配合飼料の同時最適配合設計基本スキーム

多目的配合設計の基本スキームを図 1 に示す。以下に処理プロセスを概説する。

### 1) 制約式と目的関数の作成

GA による本問題の多目的配合設計は、m 種類の栄養組成・栄養価をそれぞれ所要量含む k 種類の配合飼料を、それぞれ最小の飼料原料コストで実現するために、配合する n 種類の飼料原料各々の配合率を決定するものである。この問題は次のように定式化される。

k 個の線形の目的関数

$$\left. \begin{aligned} z_1(\mathbf{x}_1) &= \mathbf{c}_1 \mathbf{x}_1^T \\ z_2(\mathbf{x}_2) &= \mathbf{c}_2 \mathbf{x}_2^T \\ \dots\dots\dots \\ z_k(\mathbf{x}_k) &= \mathbf{c}_k \mathbf{x}_k^T \end{aligned} \right\} \rightarrow \text{Min} \quad (1)$$

を線形の制約条件

$$\mathbf{A} \mathbf{x}_j^T \leq \mathbf{b}_{j\max} \text{ および } \mathbf{A} \mathbf{x}_j^T \geq \mathbf{b}_{j\min} \quad (2)$$

$$\mathbf{0} \leq \mathbf{x}_j, \sum_p \mathbf{x}_{jp} = 1 \quad (i=1, \dots, m), (j=1, \dots, k) \quad (3)$$

のもとで同時に最適化する。ここで、

$$\mathbf{c}_j = (c_{j1}, \dots, c_{jn}) \quad (4)$$

$$\mathbf{x}_j = (x_{j1}, \dots, x_{jn}) \quad (5)$$

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} a_{11}, \dots, a_{1n} \\ \dots\dots\dots \\ a_{m1}, \dots, a_{mn} \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$\mathbf{b}_j = (b_{j1}, \dots, b_{jm})^T \quad (7)$$

であり、 $z_j$  は配合飼料の飼料原料コスト、 $\mathbf{c}_j$  は原材料の単価、 $\mathbf{x}_j$  は飼料原料の配合率、 $\mathbf{A}$  は飼料原料に含まれる栄養組成または栄養価の含有率、 $\mathbf{b}_{j\max}$  および  $\mathbf{b}_{j\min}$  は配合飼料中の栄養組成・栄養価の最大および最小含有率。また、上付きの添え字 T は転置を表す。

多目的配合設計シミュレーションの始めに、表 1 に示した制約条件をもとに、上記の線形の不等式制約と最小化する複数の線形の目的関数を作成する。

### 2) 遺伝子型の決定

前報と同様に配合飼料原料の配合率を仮想的な遺伝子とみなし、本 GA シミュレーションに用いたワークステーション（富士通 S-4/10）のアレイメモリ上に配列変数すなわち染色体として設定する。この際、遺伝子はバイナリーで表現するのではなく、位取りを変えた 5 桁までの整数で表現する（坂和ら、1995）。

### 3) 生物個体集団の発生

表 1 に示した配合率の制約条件内で、乱数発生に基づくランダム法により配合候補の各飼料原料の配合率

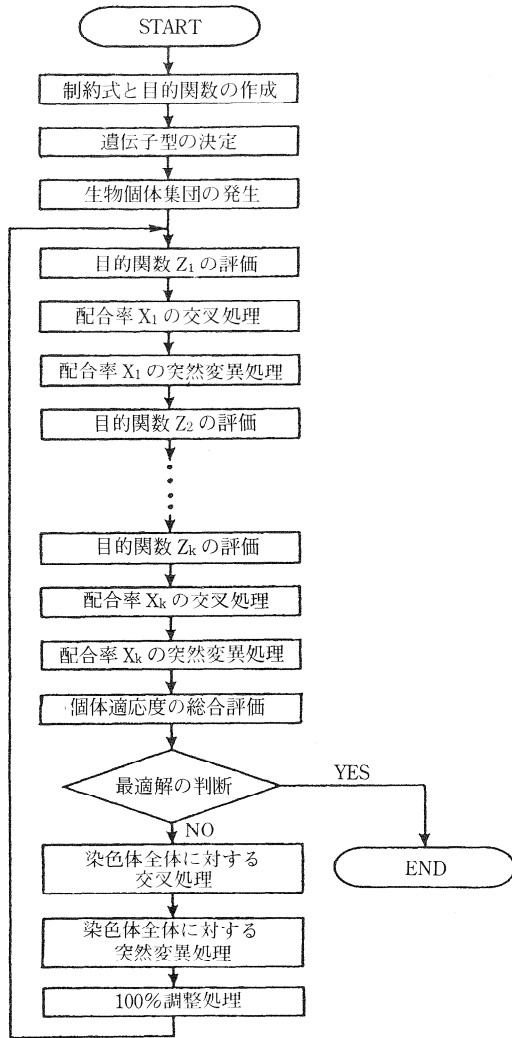


図1 MOGAによる複数配合飼料同時配合設計の基本スキーム

を任意に複数設定するとともに、アレイメモリ上に染色体として2次元配列する。すなわち、成鶏用飼料の各原料の任意の配合率を1次元配列するとともに、続いて豚肥育用および牛肥育用飼料の各原料の任意の配合率を同列に連続的に配列する。一方、各配合飼料の上記の仮想染色体の下に、それぞれランダム法により決定した当該飼料の複数の配合設計モデルを染色体として2次元配列する。この際、GAパラメータである各初期個体群のサイズ  $P_s$  は、前報のシミュレーション結果をもとに各々500とした。

4) 目的関数  $z_1 \sim z_k$  の評価, 配合率  $x_1 \sim x_k$  の交叉および突然変異処理

本研究において同時最小化を目的としている3配合飼料の各飼料原料コストのように、目的関数が複数あ

る場合のGAの進め方としては、各目的関数のパラメータである最適解候補の次元連続配列を一つの染色体と考え、交叉および突然変異処理ならびにエリート戦略などの遺伝的オペレータをその染色体全体に対して適用し適応度  $f_i$  を求める方法も考えられる。

しかし本研究の場合、この方法を採用すると染色体が長くなり、世代交代に伴う収束に長時間を要することが想定されることや、本研究の問題は各目的関数に関与する遺伝子が独立しているという性質があるため、まず各目的関数の最適解候補である遺伝子列毎に前述の遺伝的オペレータを適用し、各目的関数に対する最適化がある程度進んだ段階で、染色体全体に対する遺伝的オペレータをかける方式を採用した。これにより探索空間が狭まり、早期の収束が期待できる。

本シミュレーションでは、始めに遺伝子として配列した成鶏用飼料の各配合設計モデルの飼料原料コストを計算するとともに、配合率の解(遺伝子)が式(2)の制約条件を越えている割合である罰則値を計算する。罰則値は前報で紹介した罰則値  $Pe_2$ 、すなわち栄養組成・栄養価の各値域をどの程度越えているかの割合を数値化するとともに、次式により各遺伝子列の適応度  $f_i$  を求める。(佐竹ら, 1997)

$$f_i = \frac{1}{c_j x_j^T \times (Pe_2 + 1)} \tag{8}$$

ここで、 $c_j x_j^T$  は成鶏用飼料の飼料原料コスト。

次に、得られた適応度をもとに適応度の高いものから低いものへと遺伝子列の再配列をアレイメモリ上で行うとともに、以下の交叉と選択の処理を行う。

はじめに、同じく成鶏用飼料の配合設計モデルの遺伝子群よりランダムに選択抽出した2つの遺伝子列、親1、親2の染色体上で、ランダムに交叉点を1箇所選び、交叉点の右側の2つの親の遺伝子列すなわち飼料原料の配合率を変換し、子1、子2を生成する。2つの親を選ぶ際、一方の親の適応度が再配列した個体群の下位1/3以下の場合には、他の一方の親にはエリート染色体(最も適応度の高い染色体)を用いる。

また、交叉処理のみでは、初期個体群に依存した高適応度(低配合コスト)の個体を元にしていない場合、進化が十分行われないことが多い。この制限の解除のため、成鶏用飼料の配合設計モデルの遺伝子群より規定された確率(突然変異確率)  $P_m$  でランダムに選択抽出する染色体の一部の遺伝子を、他の対立遺伝子に置換する突然変異処理を施す。変異点の決定は一様乱数と正規乱数を組み合わせる方法で行うとともに、当該遺伝

子座の新しい遺伝子すなわち新規の配合率を制約範囲内で乱数により決定して置き換える。GAパラメータである突然変異確率  $P_m$  は、一般に遺伝子がビットパターンで表示されている場合には小さい値が採用されているのに対して、遺伝子が実数で表現されている場合には、同確率は大き目の値が採用されている。本シミュレーションにおいては突然変異確率は1/4で行った。

以上のような処理を、豚肥育用および牛肥育用飼料の配合設計モデルについて連続的に行う。

5) 個体適応度の総合評価

アレイメモリ上で1次元的に連続配列した成鶏用、豚肥育用および牛肥育用飼料の各配合設計モデルを一つのまとまった染色体と仮想し、配合設計モデル全体の配合コストを計算するとともに、各飼料の配合率の解(遺伝子)が式(2)の制約を越えている割合(罰則値  $Pe_2$ )を計算する。罰則値の計算の後、3飼料の配合設計モデル全体の総合評価として仮想染色体の個体適応度  $f_i$  を式(8)により求める。ただし式(8)に示す飼料原料コストには、配合設計モデル全体の同コスト、すなわち3配合飼料の各飼料原料コストの合計値を用いる。

6) 最適解の判断

5)で得られた適応度の高い個体から低い個体へと個体群中の染色体の再配列をアレイメモリ上で行うとともに、世代交代にともなって収束する個体群中の最大の適応度や個体群全体の適応度を検討し、3飼料の各飼料原料の配合率の組合せが最小の飼料原料コストを実現する最適解であるか否かを判断する。

7) 交叉および突然変異処理

アレイメモリ上で一つの染色体と仮想した3配合飼料の1次元連続配列配合設計モデル(個体)群よりランダムに選択抽出した2つの個体の染色体上で、ランダムに交叉点を1箇所選び、交叉処理を行う。またこの際、エリート戦略を採用する。

次に交叉処理に引き続き、突然変異確率  $P_m$  で個体群よりランダムに選択抽出する染色体の一部の遺伝子を、他の対立遺伝子に置換える突然変異処理を施す。本プロセスにおける遺伝子の置換は、4)で述べた処理と同様にランダム法により行い、突然変異確率も同じ1/4で行った。

8) 100%調整処理

遺伝子として染色体を構成する3飼料の各配合モデルの配合率の総計が各々100%になるように調整する。交叉や突然変異処理の結果、式(3)が満たされなくなった場合に、染色体の一部の遺伝子を乱数で選択す

る一方、式(3)を満たすよう強制的に変更する。

以上の処理プロセスの内、「目的関数  $z_1$  の評価」から「100%調整処理」までを、多目的配合設計シミュレーションの開始にあたって生成した初期個体群に対して繰り返して実行することにより個体群の世代交代が進み、適応度の高い個体群へと進化していく。すなわち、3飼料の飼料原料の配合率や栄養組成・栄養価の制約条件をそれぞれ満たしつつ、3飼料の飼料原料コストを各々最小化する配合率の解へと収束することとなる。

なお、前報において紹介したGAによる一種の配合飼料の飼料原料コストを最小化する最適設計の試みにおいて、GAはLPによる最適解と同様な配合率の組み合わせを最適解として提示したことより、本シミュレーションにおいても適応度が安定した段階で世代交代を終了し最適解とした。

Ⅲ. シミュレーション結果

3配合飼料の同時最適配合設計を目的とした本研究の7種の設計シミュレーションの結果の内、基本的な多目的配合設計であるシミュレーションコードGA0、および配合設計条件を複合化し、やや設計条件が複雑な同コードGA12ならびにGA12'の結果について以下に述べる。

1. 十分量の各飼料原料が準備されている場合の同時最適配合設計

図2に、十分量の各飼料原料が準備されている場合の3配合飼料の同時最適配合設計シミュレーションの結果、得られた各飼料毎の飼料原料の配合率分布を示す。

同図から明らかなように、成鶏用、豚肥育用および牛肥育用の3配合飼料とも概ねコーン、マイロ、脱脂米ヌカ、コーングルテンフィードおよびダイズ油粕の

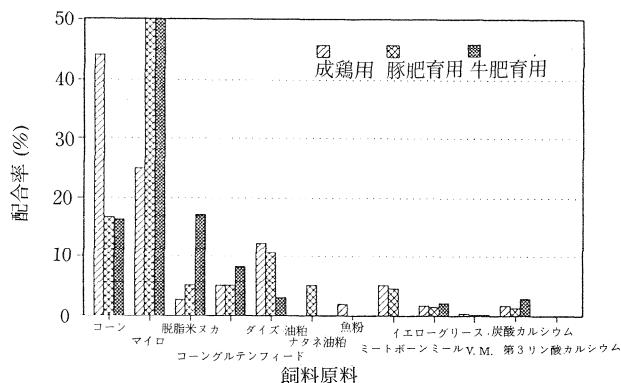


図2 MOGAによる3配合飼料の原料配合率 (シミュレーションGA0)

5つの原料で配合量の大半を占め、これらの原料の合計配合率は87.3～94.8%である。飼料別にみると、成鶏用飼料ではコーン、マイロ、ダイズ油粕の順で多く利用され、豚肥育用および牛肥育用飼料ではマイロ、次いでコーンないしは脱脂米ヌカが多用される。一方、本シミュレーションにおいては、配合可能な十分量の飼料原料があること前提条件としているため、3飼料間において原料の取り合い現象は生じない。

この他の原料では、栄養組成内のカルシウム源として、炭酸カルシウムが1.5～3%程度配合されている。第3リン酸カルシウムも同様にカルシウム源として配合候補の主原料であるものの、炭酸カルシウムに比べてトン当たりコストが約7倍高いため、原料として採用されていない。また、イエローグリースは代謝エネルギー値が最も高い原料であるものの、次にその値が高いコーンおよびマイロに比べてトン当たりコストが約3倍高いため、代謝エネルギー源として価格の安価なコーンやマイロが積極的に配合されるのに対して、補足的原料として用いられる。コーングルテンフィードは、今回の配合候補原料の中でトン当たりコストが最も安価な部類の原料であることから、成鶏用および豚肥育用飼料の設計では配合率の制約上限(5%)まで用いられる。

一方、図3に本シミュレーションの結果、得られた3配合飼料の栄養組成および栄養価の含有率分布を示す。ただし、同図中の可消化養分総量(TDN)値および代謝エネルギー(ME)値は、6つの栄養組成・栄養価の含有率分布を同一図中に示す関係で、TDN値がその1/2の値を、またME値は1/100の値で示している。

栄養組成・栄養価の含有率の制約は、成鶏用飼料で可消化粗蛋白質(DCP)およびTDNが制限無し、豚肥育用および牛肥育用飼料ではMEが制限無しである

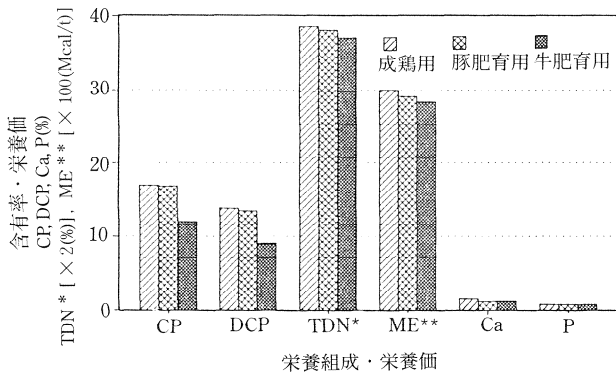


図3 MOGAによる3配合飼料の栄養組成・栄養価 (シミュレーション GA0)

ものの、3配合飼料とも概ね同様な含有率分布を示している。含有率の制限の無い成鶏用飼料のDCPおよびTDNは、約13.8%および約76.9%であり、同様に制限の無い豚肥育用および牛肥育用飼料のMEは約2830～2910Mcal/tである。

先に述べた本シミュレーションの結果である飼料原料の配合率は、配合飼料コストの最小化を命題としていることもあり制約条件を満たすものの、その上限や下限値の制約に対して明かな傾向は認められなかった。一方、栄養組成・栄養価の含有率は、家畜・家禽の成育上必要な栄養成分を供給する関係で、3飼料とも配合制約条件の式(2)を満たすもののほぼ制約の下限値を示した。

十分量の各飼料原料が準備されている場合の3配合飼料の同時最適配合設計である本シミュレーションの配合飼料コストについてみると、設計数量が200トンの成鶏用飼料で約586.4万円、各々100トンの豚肥育用および牛肥育用飼料で約264.9万円および約226.3万円であり、3配合飼料全体では約1077.6万円であった。

## 2. 特定の飼料原料の飼料毎の使用量に制限がある場合の同時最適配合設計

図4に、特定の飼料原料の飼料毎の使用量に制限がある場合の3配合飼料の同時最適配合設計シミュレーションの結果、得られた各飼料毎の飼料原料の配合率分布を示す。

本シミュレーションは、1.に示したシミュレーションコードGA0の結果より、3配合飼料のコーン使用量を各々10%減とする、すなわち成鶏用、豚肥育用および牛肥育用飼料のコーン使用量を各々79.2トン、15.0トンおよび14.7トンとする。また、各飼料のコーングルテンフィード配合率を成鶏用および豚肥育用で各々2.5%、および牛肥育用飼料では5%に固定する。すな

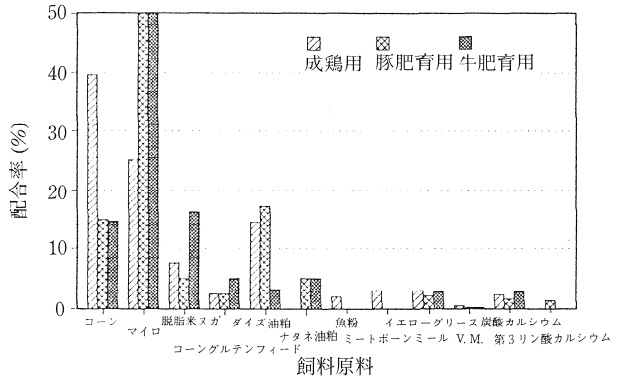


図4 MOGAによる3配合飼料の原料配合率 (シミュレーション GA12)

わち、使用量で見ると成鶏用で設計数量 200 トン中 5 トン、豚肥育用で 100 トン中 2.5 トン、牛肥育用飼料で 100 トン中 5 トンとする。一方、他原料については配合に十分量が準備されている場合の同時配合設計である。

同図より明らかなように、コーンおよびコーングルテンフィードの使用量に制限を設けたことにより、図 2 に示したこれらの 2 原料の配合率に比べて、いずれも所定分だけ配合率が減少している。一方、不足する栄養分を補うために配合率の制限を満たしつつ、他の安価な原料の配合率が増加する。本シミュレーションの飼料原料の中で比較的単価の安い原料の部類に入るマイロは、既に配合制限の上限まで使用しているため増やすことはできず、同様に安価な脱脂米ヌカ、ダイズ油粕、ナタネ油粕等より補っている。飼料により所要の栄養組成・栄養価が異なるため、この補い方は飼料によって異なっており、成鶏用では主に脱脂米ヌカ、ダイズ油粕より、豚肥育用では主にダイズ油粕、第 3 リン酸カルシウムより、牛肥育用飼料では主にナタネ油粕、イエローグリースより補っている。

一方、図 5 に本シミュレーションの結果、得られた 3 配合飼料の栄養組成・栄養価の含有率分布を示す。TDN と ME の値の表現については、図 3 と同様である。

3 飼料の栄養組成・栄養価の一部を除き、これらの含有率に関する配合制限が厳しいため、3 飼料の栄養組成・栄養価の含有率分布は、牛肥育用飼料で CP, DCP, TDN において含有率が 1% 程度増加した以外は、先の図 3 に示した含有率分布と概ね同様であった。これにより本研究で改良開発した MOGA は、特定原料の使用量に制限のある配合設計においても、配合率の制限を満たしつつ栄養組成・栄養価の制限を十分満たす同時最適設計が可能であることが明かとなった。

本シミュレーションの飼料原料コストについてみる

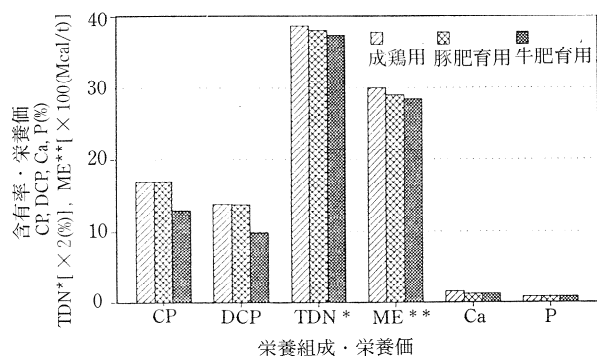


図 5 MOGA による 3 配合飼料の栄養組成・栄養価 (シミュレーション GA12)

と、設計数量が 200 トンの成鶏用飼料で約 589.0 万円、各々 100 トンの豚肥育用および牛肥育用飼料で約 269.4 万円および約 235.3 万円であり、3 配合飼料全体では約 1093.6 万円であった。

### 3. 特定の飼料原料の総使用量に制限があり、飼料間で当該原料の使用量に関して取り合いがある場合の同時最適配合設計

図 6 に本シミュレーションの結果、得られた各飼料毎の飼料原料の配合率分布を示す。

本シミュレーションは、2. で述べた配合設計シミュレーションの条件を発展させたものである。原料のコーンおよびコーングルテンフィードの使用量に関して、3 配合飼料を通じた総使用量には制限があるものの、各飼料毎の使用量には制限が無く、自由な取り合いを認める。すなわち、3 配合飼料の合計設計数量 400 トンに対して、全体でコーンは 108.9 トン、同じくコーングルテンフィードは 12.5 トン使用するが、飼料あたりの使用量に制限がなく、他原料については配合に十分量が準備されている場合の同時配合設計である。

同図と図 4 の比較から明らかなように、本シミュレーションでは、コーンおよびコーングルテンフィードの使用配分に関して 3 飼料の間に取り合いが認められる。コーンの配合率についてみると、成鶏用では変わらず、豚肥育用の減少分を牛肥育用飼料で使用している。また、コーングルテンフィードの配合率についてみると、成鶏用では配分が無くなり、牛肥育用も配分が減少している一方、豚肥育用飼料でこれらの減少分を使用している。なお、3 飼料ともコーンおよびコーングルテンフィードの 2 原料のみの配分量の増減では栄養成分・栄養価の過不足を補うことが出来ないため、脱脂米ヌカ、ダイズ油粕、ナタネ油粕、イエローグリース等の使用量を調整し栄養成分・栄養価のバラ

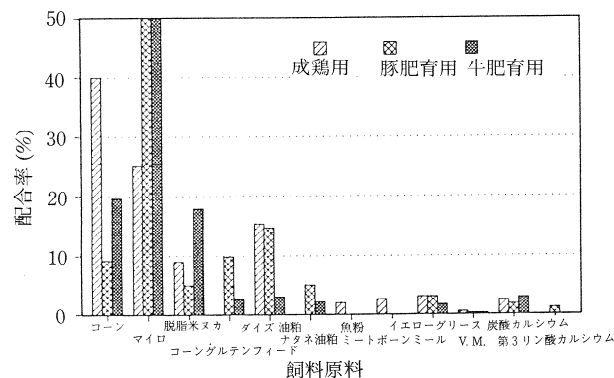


図 6 MOGA による 3 配合飼料の原料配合率 (シミュレーション GA12')

ンスをとっている。

この様に同時配合設計を行っている複数飼料間で原料の取り合いが認められるのは、各飼料毎に飼料原料コストの最小化を行うとともに、3飼料全体においてもコストの最小化を可能とする本MOGAの利点である。

一方、図7に本シミュレーションの結果、得られた3配合飼料の栄養組成・栄養価の含有率分布を示す。

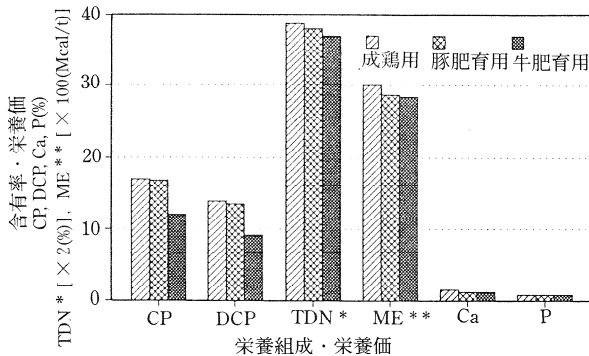


図7 MOGAによる3配合飼料の栄養組成・栄養価 (シミュレーション GA12')

TDNとMEの値の表現については、図3と同様である。

3飼料の栄養組成・栄養価の含有率分布は、牛肥育用飼料でCP, DCP, TDNにおいて含有率が1%程度減少した以外は、先の図5に示した含有率分布と概ね同様であった。これにより本研究のMOGAは、特定原料の総使用量に制限があるものの各飼料毎の使用量には制限が無く、自由な取り合いを認める配合設計においても、配合率の制限を満たしつつ栄養組成・栄養価の制限を十分満たす同時最適設計が可能であることが明らかとなった。

本シミュレーションの飼料原料コストについてみると、設計数量が200トンの成鶏用飼料で約590.1万円、各々100トンの豚肥育用および牛肥育用飼料で約263.4万円および約228.6万円であり、3配合飼料全体では約1082.2万円であった。飼料間で特定原料の取り合いを認める本設計は、飼料毎に同原料の使用量を制限する先の設計に比べて約1.05%のコスト削減効果をもつことが明らかとなった。

#### IV. 摘 要

複数配合飼料の飼料毎の原料や栄養組成に関する配合制約条件を満たしつつ、各飼料の飼料原料コストを同時に最小化する最適設計手法として、遺伝的アルゴリズムを援用する方法を提案するとともに、成鶏用、

豚肥育用および牛肥育用の3配合飼料の同時配合設計シミュレーションを試みた。本研究により得られた主な知見は以下のとおりである。

1. 複数配合飼料の同時配合設計において、飼料原料の配合率や栄養成分の含有率などの制約条件を満たしつつ、各配合飼料コストの同時最小化を可能とする多目的遺伝的アルゴリズムを示した。
2. 十分量の各飼料原料が準備されている場合の同時配合設計において、飼料毎の配合制約条件が異なるものの、概ねコーン、マイロ、脱脂米ヌカ、コーングルテンフィード、ダイズ油粕の5つの原料で配合量の87.3～94.8%を占めた。
3. 特定の飼料原料の飼料毎の使用量に固定制限がある同時配合設計において、本研究のMOGAは使用原料の制限条件を満たすと同時に、不足する栄養分を補うよう他の安価な原料の配合率を増加させる配合結果を示し、配合条件に柔軟な対応が可能な設計手法であることが明らかとなった。
4. 特定の飼料原料の使用量に関して飼料間で取り合いを認める同時配合設計において、本研究のMOGAは原料の取り合いを生じさせることにより、当該原料の使用量に固定制限を加える設計に比べ、約1.05%のコスト削減効果を示す一方、複数飼料の各飼料原料コストの同時最小化に向け有効な設計手法であることが明らかとなった。

#### 引用・参考文献

1. 配合飼料講座編纂委員会編 (1980): 配合飼料講座 (上巻) 設計編, チクサン出版社.
2. Holland, J. H. (1992): Adaptation in Natural and Artificial Systems. MIT Press, USA.
3. Michalewicz, Z. (1995): Genetic Algorithms + Data Structures = Evolution Programs, Third, Revised and Extended Edition. Springer-Verlag, Berlin.
4. 三谷克之輔, 中山弘隆 (1994): 対話型多目的計画法による飼料配合設計. システム農学会 秋季シンポジウム要旨集, 5-6.
5. 坂和正敏 (1991): 経営数理システムの基礎. 森北出版.
6. 坂和正敏, 田中雅博 (1995): 遺伝的アルゴリズム. 朝倉書店.
7. 佐竹隆顕, 古谷立美, 南善行, 立花文夫 (1997): 飼料の配合設計方法. 公開特許公報, 特開平9-201167.
8. 佐竹隆顕, 古谷立美, 南善行, 立花文夫 (1998): 遺伝的アルゴリズムによる配合飼料の最適設計. 農業施設, 28巻4号, 3-11.

## Multiobjective Design of Livestock Feed Formulation Using a Genetic Algorithm

Takaaki SATAKE \*, Tatsumi FURUYA \*\* and Yoshiyuki MINAMI \*\*\*

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

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

\*\*\* Central Research Institute for Feed and Livestock, Zen-Noh, Tsukuba 300-4204

### Summary

As a preliminary step to develop a multiobjective design method of livestock feed formulations using a genetic algorithm, simultaneous optimum design of three kinds of feed, such as poultry feed, swine feed and cattle feed were tried. Twelve different rations of feed ingredients such as corn, grain sorghum, defatted rice bran, and others were designed under constraint conditions of specified nutrient contents. Examples of nutrient contents utilized were crude protein, digestible crude protein, total digestive nutrition and others. Genetic algorithm reported in the previous paper has been improved upon to minimize the raw material cost of three feed formulations mentioned above.

Seven simulations were carried out for different feed formulation using twelve raw materials under three conditions. Firstly, the volume of each raw material for poultry, swine and cattle feed was sufficiently prepared for mix design without restriction. Secondly, the total volume of specified raw materials such as corn and/or corn gluten feed and their usable volumes for three types of feed were restricted. Thirdly, the total volume of specified raw materials such as corn and/or corn gluten feed was restricted but their usable volumes for three types of feed were not restricted.

Based on this study, it was cleared that the multiobjective genetic algorithm which was developed in this research has the feasibility to attain the simultaneous optimum design of three kinds of feed formulation under various conditions.

**Keywords:** genetic algorithm, optimum design, feed ingredient, multiobjective design, raw material cost

## 原稿送り状としてご利用下さい

農業施設学会誌原稿送り状				*受理番号	
原稿の種類	(該当欄を○で囲む) 論文, 資料, 論説, 随想, 総説, 講座, 今現場では, 海外報告, 会員だより, 書評, 抄録			*受理年月日	年 月 日
				*掲予載定	卷 号
				(英文は必ずタイプして下さい)	
標 題					
著 者 名			会員種別	所 属	
1					
2					
3					
4					
5					
6					
原 稿 内 容				連 絡 先	氏 名
原 稿	枚	図	枚		住 所
写 真	枚	表	枚		(〒 )
発 送 年 月 日		年 月 日			TEL
別 刷 希 望 数		部			FAX
使用ワードプロセッサ名 又はワープロソフト名					E-mail.

\* 印欄は学会にて記入します

\* \* A4版に拡大コピーしてご利用下さい。

農業施設学会