

DEA を用いたエージェントベース協調設計システムの構築と検討

An Examination and Development of Agents based Collaborative Design System using DEA

宮下朋之^{*}・山川 宏^{**}

Tomoyuki MIYASHITA, Hiroshi YAMAKAWA

^{*}工修 早稲田大学 理工学部 機械工学科 (〒169-8555 東京都新宿区大久保 3-4-1)^{**}工博 早稲田大学 理工学部 機械工学科

In the design of products, designers have to maximize the benefit and minimize the cost of the products under sever economical environment and design to equip functions and satisfy performances that surpass the competitors' products. Many discussions from various points of view are done and each designer who belongs to other technical field and has different knowledge comes together in design project. A lack of common knowledge yields the difficulty to absorb conflicts among their opinions. Multi-objective optimization methods would be useful if multi-objective optimization method could treat the collaboration among designers who belong to different field and have different knowledge. In this paper we extend our proposed method and confirm the effectiveness through some numerical examples.

Key Words: Multi-Objective Optimization, Data Envelopment Analysis, Multi-Disciplinary Optimization, Collaborative Optimization

1. はじめに

構造物の設計においては費用便益の最大化が求められ、より厳しい開発環境下において同業他社に対して優位にたてる機能、性能の向上が要求される。そのため多くの観点から検討を加えることになり、異分野の設計者、技術者が知識を共有しないレベルにおいても協調し設計を行うことが必要かつ重要と考えられる。既存の協調設計においては、分野間での交渉の成功を前提としているが、実際の開発設計現場においては、他の性能の向上を目的として自らが達成した性能を悪化させることは好まれず、協調設計の前提となる交渉の成立は難しい。そのため、何らかの客観的な評価を共通尺度として利用することが必要かつ有用と考えられる。筆者らは、複数の評価指標を単一化した指標としてデータ包絡分析法を用いた評価法を提案した⁽¹⁾。ここでは、単一化の際に決定される重み係数を他の設計変数の値より得られている複数の目的関数値より構成される最適化問題により決定され、効率値と呼ばれる設計の優劣を単一指標により得ることができる。さらに、領域限定法⁽²⁾により重み係数に制限を加えることにより極端な重み係数をとる設計案の評価を低下させることが可能であることを確認した。すなわち、ある目的関数の指標のみが優れる設計案の評価を低下させることを確認した。この効率値の向上を設計者に要求することにより、ある設計目標のみに秀でた設計案に偏らない設計を行うことが可能となった。評価値の向上を求めて、目的関数の妥協を行うことが必要とされる。設計者に妥協すべき方向や具体的な妥協案を提示するためにスーパーバイズエージェント⁽¹⁾と呼ぶ妥協案算出の方法を提示し検討し、その有効性を確認した。協調設計においては、設計者の嗜好を取り入れることが有効であるために、Fishburn ら⁽⁴⁾や Raiffa ら⁽⁵⁾

により確立された効用理論における効用関数を導入した方法が存在するものの、効用関数を事前に求めることは必ずしも容易ではない。また、ゲーム理論による取り扱いは見られるが、そこでは、共通の知識の存在が仮定され、協調が成功とする前提が置かれている。

本研究で対象として考える複数の技術分野が複合した設計問題（複合領域設計）では、共通の知識は必ずしも存在しないと考えられる。そのため、本研究では、設計を評価する合理的な尺度を設計者に提供し、設計案を提示する場において、コンピュータネットワークを用いることにより、設計者間の競争を促進し、そこから生じる妥協を促進することにより、協調した設計候補の絞り込みを可能とすることが有用であると考えられる。図1に示す概念図では、二つの領域の設計案の目的関数が競合しており、妥協による合意形成が必要であり、その妥協の困難さを表す領域間の隔たりとしている。

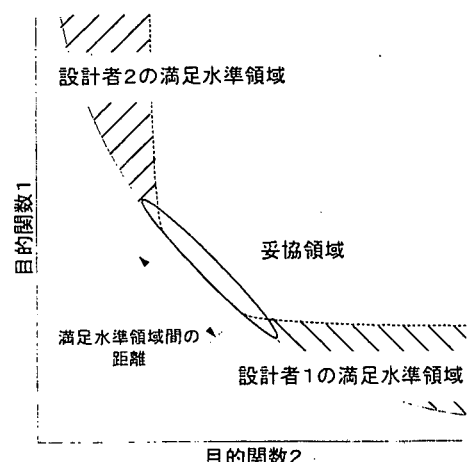


図1 二つの技術領域における設計案の競合

2. DEA による設計案の評価

複数ある設計のうち、 k 番目の設計に関する評価値 θ^k は、その設計案の評価項目のうち、最小化するものを x_j^k に、最大化するものを y_i^k に割り当て、式(1)~(4)の分数計画問題をシンプレックス法により解き算出する。評価値 θ^k は、式(1)で定義され、重み係数 u_i^k 、 v_j^k を非負のものから k 番目の設計の評価値が最も高くなるように決定される。

find u_i^k, v_j^k such that

$$\text{maximize } \theta^k = \frac{\sum_{i=1}^n u_i^k y_i^k}{\sum_{j=1}^m v_j^k x_j^k} \quad (1)$$

$$\text{subject to } \frac{\sum_{i=1}^n u_i^k y_i^l}{\sum_{j=1}^m v_j^k x_j^l} \leq 1 \quad (l=1, \dots, p) \quad (2)$$

$$u_i^k \geq 0 \quad (i=1, \dots, n) \quad (3)$$

$$v_j^k \geq 0 \quad (j=1, \dots, m) \quad (4)$$

設計評価値は $[0, 1]$ の範囲の実数であり、式(1)~(4)による定式化の場合には、1 であるほど評価が高い設計案である。また、式(1)~(4)の分数計画問題は線形化された後に双対変換した問題をシンプレックス法により解くことができる。双対問題におけるラグランジュ乗数により、 k 番目の設計案に優位な設計案が提示され、設計の優劣関係を把握することが可能となり、その設計変数などの設計案の詳細を比較することによる比較検討を行うことができる。

3. 妥協案の算出法とその提示方法

3.1 妥協案の算出法

妥協案を算出する方法として、次の(1)、(2)の2通りの方法を提案した^{(1),(2)}。

(1) 設計変数に関する妥協案 (方法 I)

妥協案は、複数の設計者の設計案を内分する案と定義し、式(5)にて求める。

$$x = \sum_{i=1}^{d_n} a_i x_i \quad (5)$$

$$\sum_{i=1}^n a_i = 1 \quad (6)$$

ここにおいて、 x_i は、 d_n 人存在する設計者のうち、 i 番目の設計者が提示する設計案の設計変数 α_i は、式(7)の値を用いる。

$$a_i = \frac{1}{d_n} \quad (7)$$

$$a_i = \begin{cases} \frac{2}{n+1} & (i=k) \\ \frac{1}{n+1} & (i \neq k) \end{cases} \quad (8)$$

式(7)で定められる重み係数は、すべての設計者に対して等しいものとなっており、「中庸」な妥協案と言える。また、式(8)で定められる重み係数は、 k 番目の設計者に対して傾斜した妥協案となると考えられる。

(2) 目的関数に関する妥協案 (方法 2)

この方法は目的関数空間にて設計案を内分する妥協案として、以下の満足化トレードオフ法⁽⁶⁾を適用することにより求める。

$$\text{Find } x = (x_1, \dots, x_n), z \quad (9)$$

such that

$$z \rightarrow \min. \quad (10)$$

subject to

$$w_i^a (f_i(x) - f_i^*) \leq z \quad (11)$$

$$g_j(x) \leq 0 \quad (12)$$

$$w_i^a = \frac{1}{f_i^a - f_i^*} \quad (13)$$

ここにおいて、 f_i^* は i 番目の目的関数に対する理想点、 f_i^a は希求水準である。理想点は必ずしも設計可能領域に属する必要はなく、簡易に決定することができる。例えば、重量の最小化の場合には 0 として決定する。

満足化トレードオフ法において、希求水準を式(14)により算出することにより、妥協案を定める。

$$f_i^* = \sum_{j=1}^{d_n} \alpha_j f_i(x_j) \quad (14)$$

$$\sum_{j=1}^{d_n} \alpha_j = 1 \quad (15)$$

式(14)で使用する重み係数は式(7)又は式(8)で示すものである。目的関数空間において、それぞれ「中庸」な妥協案、 k 番目の設計者に傾斜した妥協案として考えることができる。

3.2 妥協情報

3.1の方法により算出された妥協案や2で説明した設計案の評価結果(評価値と優位集合)は、設計改善を行う上で有用な情報となる。しかしながら、妥協を促すために、どの程度の隔たりが存在するか把握することは有用であると考えられる。そこで、設計者に提示すべき妥協を促す情報として、本研究では、(1)設計案の評価結果(評価値と優位集合)、(2)妥協案、(3)妥協領域の幅とする。妥協領域の幅は次式により算出する。

$$d_k = \frac{1}{N(\text{Conflict})} \sum_{i \in \text{Conflict}} \frac{\text{Min} \left\{ \left| f(x^{(k)}) - f(x^{(i)}) \right| \mid x^{(k)} \in X^k, x^{(i)} \in X^i \right\}}{\text{Max} \left\{ \left| f(x^{(k)}) - f(x^{(i)}) \right| \mid x^{(k)} \in X^k, x^{(i)} \in X^i \right\}} \quad \dots \dots \dots (16)$$

ここにおいて、 d_k は設計者kに関するk以外の設計者1,2,...,mとの妥協領域の距離の総和を表し、最大値は1である。 X^k は設計者kが提示した設計案の集合を表す。ただし、算出の対象となるのは、競合の発生が見られる設計者を対象としており、競合がない目的関数の成分は0として算出する。

3.3 妥協案の提示方法

3.3.1 交渉状態の定義

交渉過程は複数の意志決定主体との話し合い等の手段により、ある事柄に関する決定を行う過程を言う。この過程の状態を詳細に定義することは大変に困難であると考えられるが、以下の5つの状態に簡易に分類し、各状態を定義する⁽⁷⁾。

(1) 闘争(Fight)状態

自らの要求水準を上回るように、または、交渉相手の要求水準より優れた水準になるよう争う状態である。交渉相手に意図的に何らかの不利益を与え、交渉相手が要求水準を満たすことを妨げる状態である。

(2) 競争(Competition)状態

自らの要求水準を上回るように、または、交渉相手の要求水準より優れた水準になるよう争う状態である。

(3) 交渉(Negotiation)状態

自らの案と交渉相手の案より、1つの案に定めるために、情報交換により妥協を行う状態である。

(4) 仲裁(Mediation)状態

自らの案と交渉相手の案に隔たりがあり、それぞれ、その案より妥協することがない状態である。

(5) 調停(Arbitration)状態

第三者により最終的に1つの案に定めることを依頼する状態である。

3.3.2 交渉状態の決定方法

3.3.1で述べた交渉状態を判別する方法について説

明する。設計案は、設計目標値、設計変数値により定量化される。そこで、これらの量のうち、設計目標値を時系列として扱い、この時系列の変化より簡易に状態を判定する。設計目標値の時系列を図2に示す。

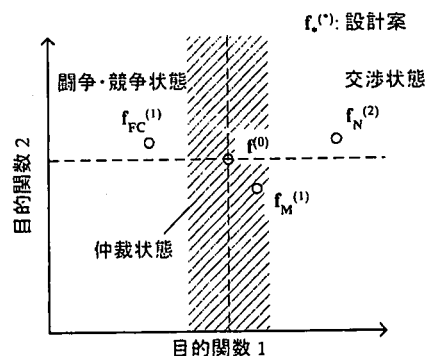


図2 設計案の履歴

図2では、2つの目的関数(設計目標)の最小化を目標とする設計の状況で、ある設計案 $f^{(0)}$ が存在し、その設計案の次案として、 $f_N^{(1)}$ 、 $f_F^{(1)}$ 、 $f_M^{(1)}$ のいずれかを提示した場合を想定している。

目的関数1の向上に責任を持つ設計者の状態を図2より、以下のように対応させる。設計案 $f^{(0)}$ の次案として $f_M^{(1)}$ を示した場合、これらの設計案について目的関数1の変化が少ない。この場合、妥協していないため仲裁(Mediation)状態と考える。すなわち、目的関数1の変化があまり無い状況であるため、他の設計者の案に近づいていかず、妥協が見られないと考えられる。図中では斜線で記すある幅を持つ領域に、設計案 $f_M^{(1)}$ が位置する場合として判断する。設計案 $f^{(0)}$ の次案として $f_F^{(1)}$ を示した場合、目的関数1が改善され、目的関数2が悪化している。このような設計案を提示した場合に闘争(Fight)又は競争(Competition)状態として判断する。この場合は競合する目的が存在すると考えられる。次に、設計案 $f^{(0)}$ の次案として $f_N^{(1)}$ を示した場合を考えると、目的関数1の悪化が見られるため、何らかの妥協がなされ、自らの責任を持つ設計指標の悪化を許容しているものと考えられ、交渉(Negotiation)状態と考える。

これらの状況の判定は、目的関数の値の変化により判定することができる。具体的には、式(17)により行う。

$$Index^k = \sum_{j=1}^{c_n} \frac{f^k_j - f^{k-1}_j}{f^k_j} \quad (17)$$

ここにおいて、k番目の目的関数 f^k を時系列j番目の値より、 c_n 個の値を用いて指標 $Index^k$ を算出する。この指標の絶対値がある正の定数D以下の場合に、仲裁状態として判断する。定数Dより大きい場合には、闘争、競争状態として判断し、定数Dの負値より小さい

場合には、交渉状態として判断する。これらの判断により設計者の状態が簡易に判別することができ、不要な情報を提示しないようにする。

4. 数値計算例

3で示した方法をコンピュータネットワークを介したシステムを構築し検証を行った。ここでは、妥協案を提示する機構をスーパーバイズエージェントと称し、設計者の状況に応じた妥協情報の提供を行う仲介人と考えたサーバプロセスとして構築した。ここでは、複数の設計者が設計案を評価し、設計変数より目的関数とその設計変数に関する感度を算出しスーパーバイズエージェントに与え、スーパーバイズエージェントにより他の設計案やすべての目的関数より評価値を算出し妥協情報を設計者に提示する。

4.1 2部材トラスの最小重量、最小変位問題

図3に示す2部材トラスの部材断面積 A_1 , A_2 を設計変数として、構造質量および荷重作用点変位を目的関数として、それらの最小化を行う設計問題を取り扱った。縦弾性定数は、10 GPaとし、密度は、 1.0×10^4 kg/m³とし、側面制約を $5 \leq A_i \leq 50$ mm²とした。

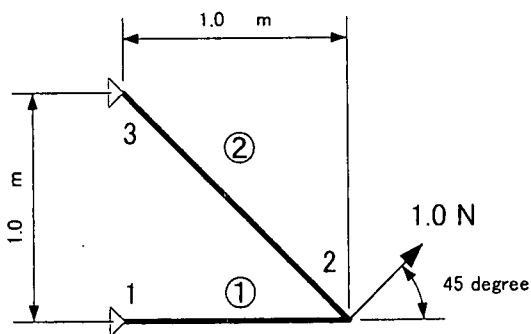


図3 2部材トラスの設計問題

側面制約条件内に発生する乱数により初期の設計案を与えた。設計者の動作として以下の2つの動作を想定した。

- (1) 各設計者は自らが責任を持つ設計目的が最も良くなる設計案を側面制約条件や単目的の最適化問題から算出し、システムに与える。
- (2) スーパーバイズエージェントが提示する設計評価値が最も高くなり、妥協領域の幅が小さくなる設計案を求める。
- (3) スーパーバイズエージェントが提示する妥協案から設計改善を図り、その結果をシステムに与える。

このような要請に従い、設計者はシステムが与えた初期設計案および妥協案と妥協方向を参考にしながら、設計を改善しシステムに設計案を与える。システムは

妥協領域の幅が0.2以下になった段階で設計の終了を通知し、システムに入力された設計案のうち、評価値が最も高いものを提示して終了する。

方法1と方法2を用いた場合の設計課程の推移を図4と図5に示す。ここでは、変位が0.2mm以下で、重量が 30×10^{-2} kgとするような要求仕様の元で実験を行った。乱数により設計変数を発生させた初期設計案を各設計者に提示し、その後、各設計者が設計変数と目的関数の値を別の解析プログラムにより算出しシステムに与える。方法1と方法2のいずれにおいても、各設計者が提示する設計案は自らの設計指標が最も良い設計案から要求仕様の範囲内において妥協が図られていることがわかる。妥協案の算出方法より、方法1は必ずしもパレート最適曲線上の妥協案ではなく、方法2はパレート最適曲線上の妥協案となる。しかしながら、各設計者の設計案が近づくにつれ、方法1の設計案もパレート最適曲線上に属するようになることが認められた。方法2では、妥協案の算出に多くの繰り返し計算を要し、設計過程の初期においては、必ずしもパレート曲線上の妥協案を提示する必要は無く点を考慮すると、方法1による方法が適していると考えられる。

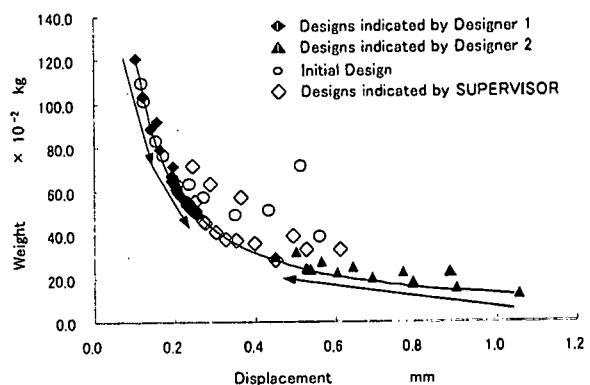


図4 設計者が提示した設計案の推移（方法1）

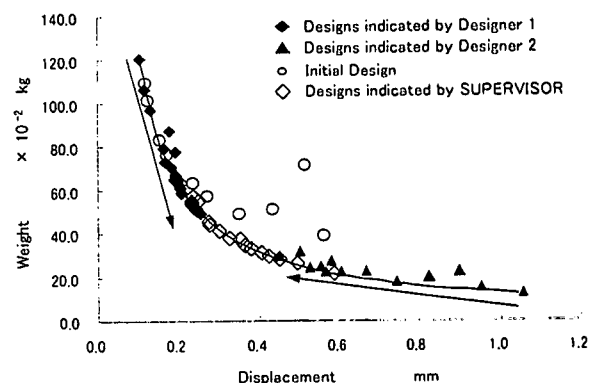


図5 設計者が提示した設計案の推移（方法2）

4.2 航空機概念設計

NASAにより、マッハ数2.6の高速巡航を実現するために、Hish Speed Civil Transport(HSCT)に関する検討がなされており、関連したデータが公開されている。ここでは、このデータを利用して飛行機の翼形状の概念設計を構築システムにより取り扱う。設計問題は次のように定式化される。設計において決定すべき変数を表1に示すとおりであり、その上下限値を得られたデータより定めた。設計変数のうち翼形状に関する量を図7に示す。制約条件は翼形状に関するものや性能や安定性に関するものなど67個の制約が存在する。

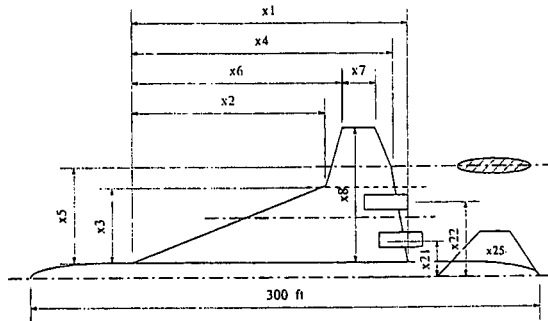


図7 翼形状に関する設計案

表1 設計変数

番号	設計変数	単位	下限値	上限値
1	翼付根弦長	ft	127.98	196.42
2	前縁分岐位置, x	ft	79.13	190.01
3	前縁分岐位置, y	ft	12.010	63.842
4	後縁分岐位置, x	ft	163.24	234.95
5	後縁分岐位置, y	ft	12.641	87.100
6	後縁端, x	ft	135.08	246.72
7	翼端弦長	ft	6.985	12.622
8	翼幅	ft	56.338	99.119
9	最大厚さ比位置	%chord	0.07866	0.69759
10	翼付根断面厚さ比	%	1.5070×10^{-2}	4.6485×10^{-2}
11	翼分岐断面厚さ比	%	1.5048×10^{-2}	3.8868×10^{-2}
12	翼先端断面厚さ比	%	1.5037×10^{-2}	3.2470×10^{-2}
13	胴体拘束部 1, x	ft	2.000	3.960
14	胴体拘束部 1, r	ft	0.2120	1.910
15	胴体拘束部 2, x	ft	12.17	21.99
16	胴体拘束部 2, r	ft	0.6990	6.293
17	胴体拘束部 3, x	ft	26.04	238.43
18	胴体拘束部 3, r	ft	1.068	7.911
19	胴体拘束部 4, x	ft	49.73	296.85
20	胴体拘束部 4, r	ft	2.654	8.122
21	エンジン位置 1, y	ft	6.967	47.214
22	エンジン位置 2, y	ft	26.302	58.384
23	搭載燃料	lbs	2.4151×10^5	4.0372×10^5
24	垂直尾翼面積	sq-ft	1.3742×10^2	9.9880×10^2
25	水平尾翼面積	sq-ft	1.4041×10^2	9.8157×10^2

目的関数は航続距離と費用を考え、航続距離を最大にし、費用を低減する設計候補を求めることとする。費用は、Modified DAPCA IV Cost Model⁽⁶⁾に従う。すなわち、以下の式(18)~(25)により算出する。ここ

では、エンジニアリング、生産のための設備準備、生産労働、品質管理に要する時間を H_E, H_T, H_M, H_Q として算出し、開発および生産の支援、試験飛行に要する費用を C_D, C_F, C_M として算出する。ここでは、エンジンの費用は既に存在すると仮定して費用には算入しないこととされ、飛行制御用のコンピュータや無線、運航支援装置、レーダーなどの電装品に関する費用は考慮されない。

$$H_E = 7.53W_e^{0.777}V^{0.894}Q^{0.163} \quad (18)$$

$$H_T = 10.5W_e^{0.777}V^{0.696}Q^{0.263} \quad (19)$$

$$H_M = 15.2W_e^{0.820}V^{0.484}Q^{0.641} \quad (20)$$

$$H_Q = 0.133 \quad (21)$$

$$C_D = 48.7W_e^{0.630}V^{1.30} \quad (22)$$

$$C_F = 1408W_e^{0.325}V^{0.822}FTA^{1.21} \quad (23)$$

$$C_M = 22.6W_e^{0.921}V^{0.621}Q^{0.799} \quad (24)$$

$$Cost = H_ER_E + H_TR_T + H_MR_M + H_QR_Q + C_D + C_F + C_M \quad (25)$$

ここにおいて、 W_e は自重、 V は最大速度、 Q は5年間の生産台数を示しており、 $Q=50$ として算出した。

設計案の推移を図9に示す。ここでは、方法1による結果を示している。方法1による方法では、算出した妥協案が実行不可能になることがあり、この場合は妥協案の提示は行わない。設計変数の数が多いため、設計者は自らの領域の目的関数に関する最適化問題より算出する。ただし、ここにおいて、他領域の目的関数の設計変数に関する感度を導入した。図9では設計者より提示された設計案は必ずしも良い設計案となっていないことが観測された。これは、活性な制約条件が必ずしも同一では無く、初期値により得られる最適解が異なる初期値依存性によるものと考えられる。

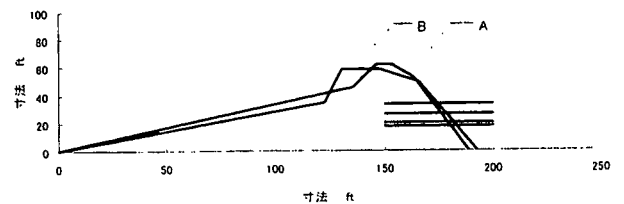


図8 妥協領域の両端に位置する設計案の翼形状

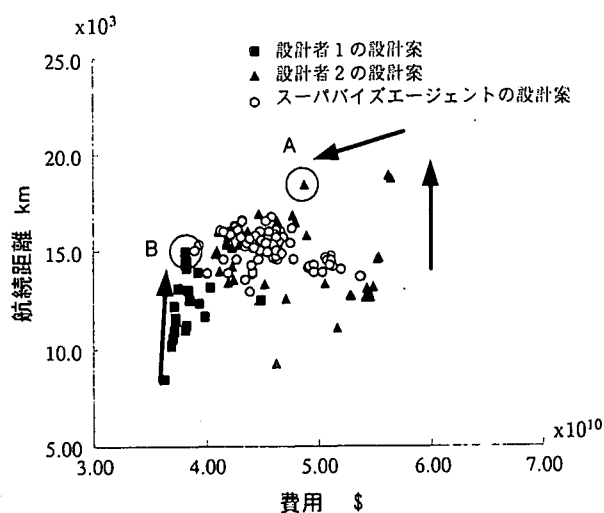


図9 設計案の推移

5. さいごに

本研究では、複数の技術領域を統合した設計を行う場合に発生する目的関数の競合を考慮した妥協情報を設計者に提示することによる設計法において、妥協案を算出する方法を数値計算により比較した。その結果において得られた知見は以下の通りである。

- (1) 設計変数の内分による算出方法(方法1)は、その算出が簡便である一方で、得られる妥協案は必ずしもパレート最適解に属するものは得られない。
- (2) しかしながら、方法1では、算出に用いた設計案が目的関数空間上における距離が短く、パレート解に近い場合には、得られる妥協案はパレート最適解に近いものが得られた。
- (3) 満足化トレードオフ法による方法(方法2)による場合には、パレート最適解が得られる一方で、繰り返し計算が発生するために、妥協案の算出に多くの目的関数の算出を要する。

今後は以下の点を考慮した検討を行う予定である。

- (1) 個別の技術領域における設計解を導出する場合に、他の領域の目的関数に関する情報を必要とする。本研究では感度を用いた方法としたが、その検討が不十分である。

参考文献

- (1) 宮下朋之・山川宏, スーパーバイズシステムによる最適設計に関する研究, 機論 66-643 (C), 921-928
- (2) 宮下朋之・山川宏, 複合領域設計システムの構築と検討, 機講論 No. 99-27, 142-145
- (3) 刀根薫, データ包絡分析法, 日科技連
- (4) P.C. Fishburn, "Conditions on Preferences that Guarantee a Simple Majority Winner"; Journal of Mathematical Sociology; Vol. 2, No. 1; January, 1972; 105-112.
- (5) R. Keeney, H. Raiffa, 高原康彦他監訳, 多目標問題解決の理論と実例, 構造計画研究所, 1980
- (6) 中山弘隆, 谷野哲三, 多目的計画法の理論と応用, (1994), 計測自動制御学会
- (7) MIYASHITA, T., YAMAKAWA, H., "An Examination on the Supervisor System in the Multidisciplinary Design Optimization under Conflict Objectives", Proc. of 8th Symposium on Multidisciplinary Analysis and Opt., AIAA2000-4724.
- (8) D.P. Raymer, "Aircraft Design: A Conceptual Approach (Third Edition)", AIAA Education Series, 1999, 586-588.
- (9) RAO, J., "A Study of Optimal Design Under Conflict Using Models of Multi-Player Games", Eng. Opt., 28 (1997), 63-69
- (10) Balling, R.J., "Collaborative Optimization of Systems Involving Discrete Design at The Discipline level", Trans. ASME, J. of Mech. Design, 120 (1998), 32-39
- (11) R.J. Balling, "Collaborative Optimization of Systems Involving Discrete Design at The Discipline level", Trans. ASME, J. of Mech. Design, 120 (1998), 32-39
- (12) J.E. Renaud, "Multiobjective Collaborative Optimization", Proc. of The 1997 ASME Design Eng. Tech. Conf. and Comp. in Eng. Conf., DETC97/DAC-3772