

建築設計問題における
事例の学習による代替案選択法に関する研究

2002年 1月

松下 大輔

目次

第1章 序論	7
1.1 研究の背景と目的	7
1.2 論文の構成	14
注釈	17
参考文献	18
第2章 ホテルの客室部分構成比と各事業主体のNPV最大化の二目的問題	21
2.1 はじめに	21
2.1.1 既往の研究	22
2.1.2 研究の方法	23
2.2 評価関数の設定	23
2.3 ホテルのモデル化	25
2.3.1 収支モデルの作成	25
2.3.2 形態モデルの作成	28
2.3.3 遺伝子コード化	31
2.3.4 SE (Story-Enclosure) 面積法による建築工事費の計算	32
2.4 GAの試行	33
2.4.1 はじめに設定した制約条件	34
2.4.2 想定されるその他の前提条件	38
2.5 考察	41
2.6 まとめ	42
注釈	43
参考文献	43
第3章 対話型進化計算による形態構成規則の獲得モデル	45
3.1 はじめに	45
3.1.1 研究の目的	46
3.1.2 研究の概要	47

3.1.3 既往の研究	47
3.2 デザイン体系の設定	48
3.3 形態表現とS式表現の対応関係	50
3.3.1 S式表現の概要	50
3.3.2 形態表現とS式表現の対応関係	50
3.4 GPへのコード化	52
3.4.1 GPの概要	52
3.4.2 関数記号、終端記号の設定	53
3.4.3 木構造の形態表現への翻訳	54
3.5 IECの試行	55
3.5.1 試行の概要	55
3.5.2 試行と考察	56
3.6 まとめ	66
注釈	67
参考文献	67
付録 試行1の各世代の代替案の推移	69
第4章 述語論理の概念を用いた教師図形の形態構成規則の記述	79
4.1 はじめに	79
4.1.1 研究の目的	79
4.1.2 研究の概要	80
4.1.3 既往の研究	80
4.2 モデルの設定	81
4.3 評価値の計算	81
4.4 試行	82
4.5 まとめ	87
注釈	87
参考文献	87

第5章 事例の学習による設計者の評価尺度を用いた代替案選択	89
5.1 はじめに	89
5.1.1 研究の目的	90
5.1.2 研究の概要	90
5.1.3 既往の研究	91
5.2 木造3階建住宅のモデル化	91
5.2.1 木造3階建住宅	91
5.2.2 木造3階建住宅モデルの概要	92
5.2.3 コーディング	93
5.3 偏心率と昼光率を評価尺度とした二目的最適化	94
5.3.1 評価関数の設定	94
5.3.2 二目的最適化の試行	100
5.4 採用可能な住宅平面の条件の設定	108
5.4.1 住宅平面モデルの設定	108
5.4.2 デザイナーによる代替案の対象平面の修正	110
5.5 帰納推論による事例の学習	113
5.5.1 関数記号、終端記号の設定	113
5.5.2 個体の関数の評価方法	113
5.6.1 関数による代替案集合の各代替案の値の算出	115
5.6.2 記述された関数の有効性の検証	116
注釈	122
参考文献	123
付録	124
第6章 結論	127
付章 進化的計算の概要	135

第1章 序論

1.1 研究の背景と目的

建築設計過程の設計問題に対し、デザイナーは限定的な問題空間において、一定時間内により良い代替案を探索する問題解決行為を行う。本論文は、代替案の探索過程としてモデル化された建築設計における設計問題の問題解決行為に対し、進化計算を用いて、より良い代替案^(注1)の合理的な選択方法を提案し、その有効性を確かめるものである。

・設計問題の構造と問題解決行為

設計問題はその問題構造の特性により分類すると、「輪郭の明確な問題」(well-defined problems)と、「輪郭の不明瞭な問題」(ill-defined problems)に区別されるといわれる[churchman 67]。前者は、目標や問題解決の手段の有無が明らかな場合の問題で、後者は、その目標や解決方法が全く未知で、それらが存在するのかどうかさえ不明の場合の問題であるとされる。そして、建築設計の設計問題の多くが後者の部類に入るといわれている[Newell 他 67]。設計問題に問題解決の手段がある場合は、手続き的に問題を解決することができる。しかし、そうでない場合は、デザイナーが自らの努力によって設計解を模索する「行為」が不可欠となる。この問題解決行為は、行為の主体に依存した個別的なものである。デザイナーは、自らの限定的な知識や状況認識のコンテキストにおいて、問題を定義し、設計解を導いて行く。このようなデザイナーの行為は、非明示的で解明が困難であるとされてきたが、建築設計における設計問題を優れたデザイナーの経験的知識や洞察に委ねるばかりでなく、如何にして合理的に設計解を導くかという課題は、重要性を増している。

・建築設計の問題解決行為における代替案

設計問題の目標や目標に向かう手続き的な手段についての手がかりがない場合、デザイナーは自らの限定的な知識や状況認識に基づく行為を通して、暫定的な設計解を見だし、明示的に表現してみることを行うか、あるいは、思考を継続し、全く設計解を見いだすことができないかのどちらかとなるといえる。建築設計では一定の時間内に、適当な設計解を成果として表現することが必要となるため、実際にはデザイナーは、たとえ満足に行く設計解が得られなくとも、暫定的な設計解を受け入れ、表現することを制限時間において繰り返して行くことが必要となる^(注2)。すなわちここでは、より良い代替案を一定の有限時間内に探索して行く行為が重要となる。前述のように、このような設計過程の行為は、デザイナー固有の特別な経験的知識や状況認識に基づくもので、解明が困難であるとされてきたが、一方で、如何にして、目標や手段の未知な設計問題を合理的に解決して行くかと

いう課題を無視することはできない。建築設計では、複雑で多岐にわたる問題領域を扱い、それらを総合的に解決してゆくことが必要となるが、有限時間内に適当な設計解を見いだす、より良い代替案の探索行為の対象という視点で、設計問題を適切にモデル化した場合、デザイナーの問題解決行為を補完する、合理的な方法の適用可能性を試みることは有効であると考えられる^(注3)。

・問題解決行為と方法

問題解決行為は、「問題表現問題(problem representation problem)」、「設計解生成問題(solution generation problem)」、「設計解評価問題(solution evaluation problem)」に区分されるといわれる[Rowe 87]。「問題表現問題」は、問題空間を構築することによって、問題を表現することであり、「設計解生成問題」は、候補となる代替案を生成することであり、「設計解評価問題」は、候補となる代替案を評価することである^(注4)。前述のように建築設計では、一定の時間内に適当な設計解を表現する必要から、デザイナーは固有の知識や状況認識に基づき、問題空間の定義、再定義を繰り返し、探索範囲を絞り込んで行く必要がある。これは、設計過程のある局面をとり上げると、そこでは、直ちに目標に近づく手段もなく、また、あらゆる可能性を全て検討することはできないため、限定的な問題空間を自ら設定し、その枠組みの中でより良い代替案を探索していることを意味している。すなわち、手続き的に目標となる代替案を生成する手がかりがない場合は、探索の対象となる可能な全ての代替案を限定した問題の場合において、ある代替案を生成したときに、デザイナーがその代替案の評価によって得られる情報を用いて、一定の時間内で、より良い代替案を模索して行くことになる。本論では、このようなデザイナーの問題解決行為を補完する方法を提示するために、ある前提の下に設定される全ての代替案からなる問題空間において、代替案の評価により得られる情報を考察することによって以下のような設計問題のモデル化を行う^(注5)。

(I) 評価関数が記述できる場合の代替案の探索

評価尺度とは一般に、目的の達成度を測るもの[中山他 94]、とされる。例えば、偏心率という評価尺度は、代替案である建物の、偏心の度合いがどれほど小さいか(0に近い)という目的に対して、その達成度を測る指標である。対象の評価尺度が明示的に数式で記述できる場合は、生成された代替案の目標の達成度を数値表現で表すことができる。このような評価尺度、すなわち評価関数によって、代替案の写像としての、目標の達成度を測る評価値を算出することができる。これにより、評価値のより優秀なものを客観的に探索して行く手法を採ることが可能となる。このように、設計問題の目標となる代替案も、そ

れに至る手段も未知であるが、ある代替案の目標の達成度を評価値として算出する評価関数が記述できれば、ある試行により得られた代替案の評価値を次の試行に生かして、より良い代替案の探索を行うことができる。すなわち、既存の代替案よりも優れた評価値を持つ代替案が見つければそれを採択し、そうでなければ採択しない過程を繰り返すことにより、次第に目標に近づくことができる。この方法は、発生・検証の方法 (Generate-and-Test Procedures) と呼ばれる。一方、建築設計では、単一の特性の追求でなく、対象が様々な要求を同時に満たすことが必要になる場合が多い。そのため対象に求められる複数個の重要な特性を考慮した、代替案の評価が行われることが必要となる。ここで、対象の複数個の特性を互いに直接比較したり優劣をつけたりすることは一般に困難であるため、複数の評価関数の値を同時に改善して行く進化計算の手法は有効であると考えられる。進化計算では、適者生存の生物進化の概念をアナロジーに得て、遺伝子表現された代替案の集団に、交叉、複製、突然変異等の遺伝的オペレータを適用することによる、多点探索が行われる。結果として、複数の特性について半順序^(注6)が規定される代替案の集合が得られると予測される。これらのうち、ある目的関数を改善するためには、少なくとも他の一つの目的関数を犠牲にせざるを得ないような解、すなわちパレート解に注目し、問題空間の特性を俯瞰することが可能となるならば、複数の要求を同時に満足させる設計問題の解決方法に資すると考えられる (図1)。本論では第2章において、明示的な複数の評価関数が存在する場合の事例としてホテルを扱い、オーナーとオペレータの2つの主体の事業採算性を評価尺度として記述し、両者の事業採算性を同時に高度に満たす客室部分構成比を、遺伝的アルゴリズムを用いた二目的最適化手法により求める。

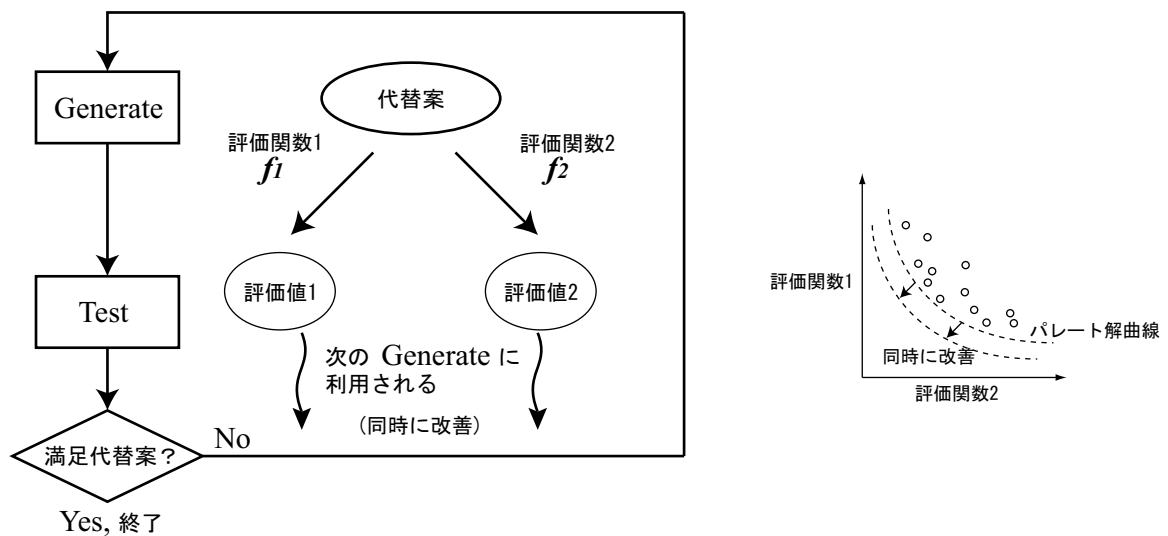


図1 複数の評価関数を用いた発生・検証の方法

(II) 評価関数が記述が困難な場合の代替案の探索

以上により、代替案の目標の達成度を客観的に測る評価関数が記述可能な場合において、少なくとも複数の特性については他に検討すべき代替案がないとみなしてよい状態に問題範囲を絞り込むことが可能になると見込まれる。しかしながら建築設計の設計問題では、このように数式表現による明示的な評価関数が存在し、設計過程において一定不変である場合ばかりではない。例えば、代替案の意匠を創造的に探索するような設計問題では、評価尺度を一意に記述することが困難であり、さらに設計過程の個々の局面毎に変化して行くことが考えられる。このような場合は、数式化が困難なデザイナーの評価を発生・検証のモデルに取り込むことができれば有効であると考えられる(図2)。代替案の目標の達成度を測る明示的な指標を評価関数として予め記述することは困難であるが、生成された複数の代替案を、デザイナーが相対的に評価することなら可能である場合、進化計算を用い、その評価を次の代替案の生成に役立てることによって、目標に近づいて行く可能性がある。すなわち、遺伝子表現された代替案に適者生存や有性生殖の概念に基づく遺伝的オペレータを適用することにより、代替案の評価の高い部分構造を進化させて行くことが期待される。評価関数を予め明示的に記述せず、生成される代替案の評価をデザイナーが行い、その評価に基づいて新たな代替案が生成され、提示された代替案に出会うことで形成される新たな状況認識のコンテキストの下に次なる評価を下すという、逐次的な生成、評価の過程を繰り返すことにより、代替案の探索空間の絞り込みを行いつつ、大域的な探索を進める、創発的なモデルの可能性を確かめる。本論では第3章において窓配置パターンのスタディを想定し、デザイナーの評価を取り込んだ代替案の発生・検証の手続きとして、対話型進化計算により代替案の探索を行うモデルを試行する。

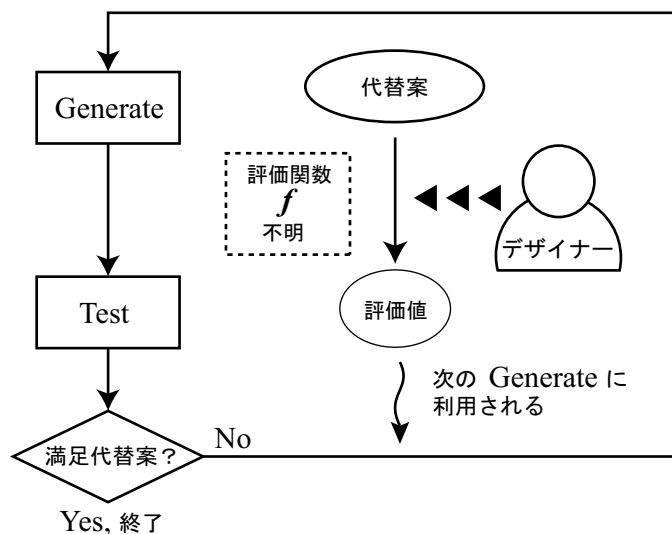


図2 デザイナーの評価を用いる発生・検証の方法

(Ⅲ) デザイナーにより与えられる事例の学習による評価関数の獲得

数式表現の評価関数が記述できない場合は、デザイナーの評価を用いることが必要となる。前述のように、生成された複数の代替案の相対的な評価が可能な場合には、デザイナーが個々の評価値を与えることにより、進化計算を用いた代替案の探索が可能になると考えられる。しかしこの場合、毎行われる評価の負担を無視することはできず、多数の代替案の評価を行うことは困難となる。ここで、このような手続き的に数式表現にできないデザイナーの評価を、評価関数として部分的に記述することができれば、効率的な代替案の探索に資すると期待される。このような評価関数の記述にあたって、デザイナーによって評価され、与えられる事例には、デザイナーの評価をもたらず構造が内在していると考えられるという立場から、以下では、このデザイナーによって与えられる事例に注目することにより、モデル化された設計問題において、事例に内在する知識を獲得することを試みる。

まず第4章では、デザイナーにより用意された事例を学習し、事例に内在する知識を帰納的に獲得するモデルを試みる。設計行為の結果としての図形が存在する場合に、図形を記述する形態構成規則を明示的に記述する方法を提示する。任意の教師図形の形態構成規則を記述する方法を提示することによって、教師図形に反映されている知識を獲得する可能性を試みる。

最後に、手続き的に数式化できない評価尺度をデザイナーの与える事例の学習により、評価関数として記述するモデルを試みる。建築設計の設計問題では、代替案の評価尺度が評価関数として数式化できる場合ばかりではなく、また一方、デザイナーの主観のみに基づいた自由な評価が行われる場合ばかりでもない。実際は、法規や要求等の、数式表現でなく、言語を用いて表現されることが一般的な、評価の指針が与えられており、デザイナーはそれを解釈し、代替案の評価に反映させる行為が行われる場合がしばしばある。これはすなわち、言語の、人間にとって汎用性が高く、柔軟で、幅広い表現が可能な表現手段により、評価尺度が部分的に記述されており、それはデザイナーによって解釈されて、代替案の評価に用いられることを意味するといえる。このような評価を用いた代替案の探索では、デザイナーが各代替案を逐次、言語表現の評価の指針に照らして、それを満たすかどうか見分ける行為を、目標の代替案が得られるまで繰り返すことが行われることになる。このような問題解決行為は、試行錯誤の方法(Trial-and-Error Procedures)と呼ばれ、ある代替案の評価によって得られる情報を次の代替案の生成に生かすことが困難な場合に採られる(図3)。これに対し、言語表現で記述される部分的な評価尺度を評価関数として獲得できれば、これを計算機上で用いることにより、効率的な代替案の探索に資すると考えられる。

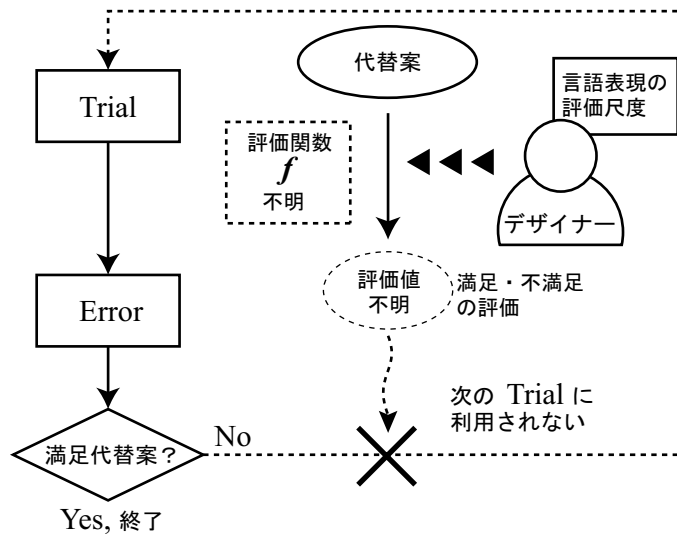


図3 デザイナーが言語表現の評価尺度を解釈して行う試行錯誤の方法

このような視点から、ここでは、評価尺度が言語表現による必要条件として部分的に与えられている場合を想定し、この評価尺度を評価関数として獲得するモデルを試みる。評価関数の獲得には、条件を満足していない代替案をデザイナーが修正し、条件を満足する代替案を作成し、両者を見分ける関数を帰納推論により学習する方法を用いる。得られた関数が、学習に用いられなかった他の代替案を、条件に基づいてどの程度正しく評価し、条件を満足する代替案を絞り込むふるいとして有効にはたらくか検証することによって、この方法の可能性を提示する。

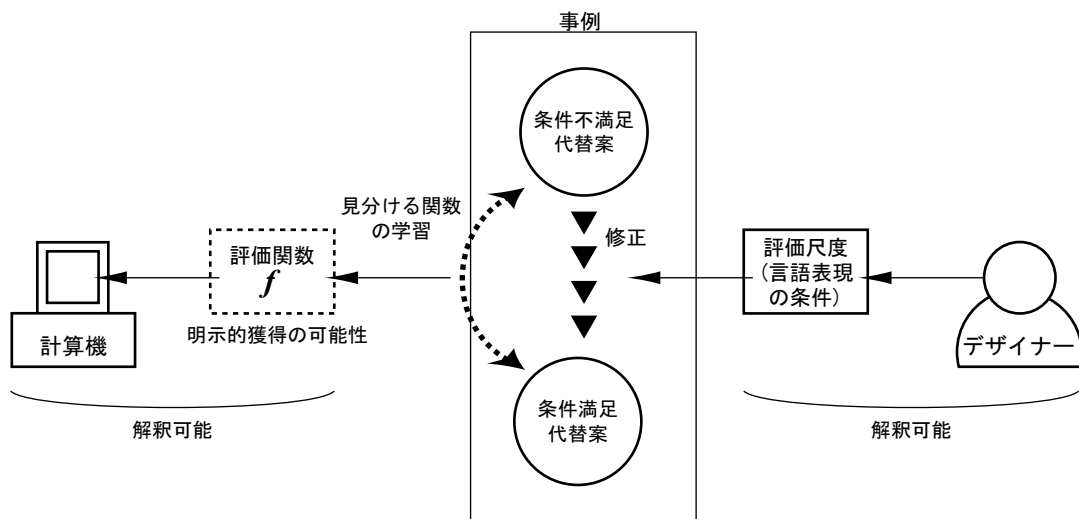


図4 言語表現の評価尺度の学習による評価関数の獲得

本論では第5章において、耐震性能と居室の光環境を同時に満たし、かつ住宅平面として採用可能な耐力壁配置が求められる木造3階建住宅を対象とした設計問題を扱う。住宅

平面が採用可能となるために満たすべき条件を言語により設定し、代替案がこの条件を満足するかどうかを見分ける評価関数の獲得を試みる。ここでは、複数の代替案について、デザイナーが条件を満たす住宅平面になるよう修正を施し、帰納推論により、修正前の代替案と修正後の代替案を見分ける関数を獲得する。「偏心率」と「昼光率」という明示的な評価尺度を用いた二目的最適化の結果の代替案集合に、得られた関数をふるいとして用いることにより、耐震性能と居室の光環境を高度に満たし、住宅平面として採用可能な代替案を得る効率的な方法の可能性を提示する。

以上、代替案の評価を考察することによって様々な設計問題のモデル化を行い、進化的計算を援用してそれらを解決する方法を考えたが、実際は、個々の場合が単独で存在するのではなく、それらの複合であり、用いる方法も、問題の特性に応じてふさわしく組み合わせる必要がある。第5章で示す設計問題のように、建築設計では、明示的な記述が可能な評価関数のみならず、言語で表された部分的な評価尺度のような、数式表現が困難な評価を取り入れることも重要となる。本論では最終的に、進化計算に明示的な評価関数を用いる手法と、事例の学習により獲得される評価関数をふるいとして用いる手法を組み合わせ、両者の手法を相互補完的に援用することにより、モデル化された建築設計過程において、合理的により良い代替案の選択を行う方法を提示することが目的である。

1.2 論文の構成

論文の章構成を図式化して示す（図1）。

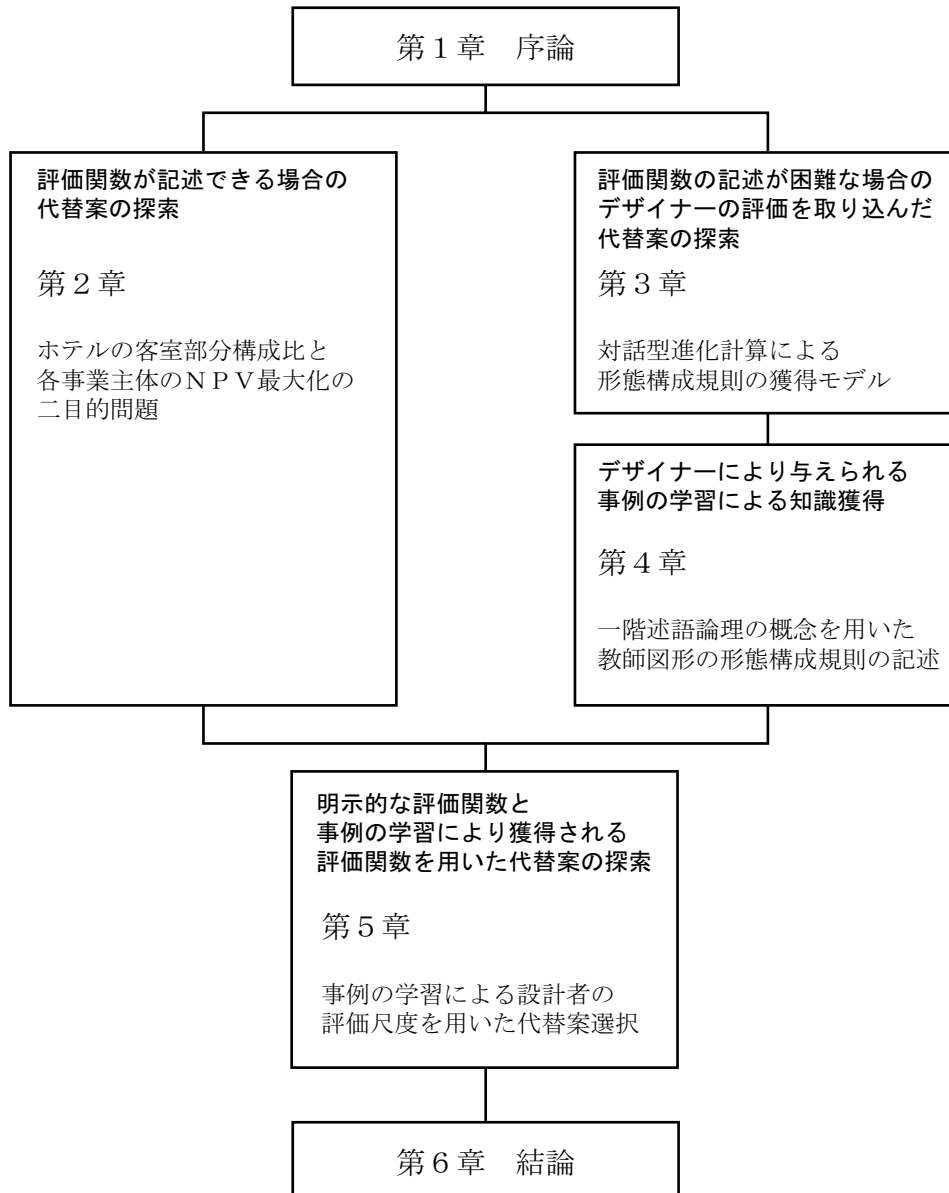


図5 論文の章構成

第2章では、ホテルの建物形状について、所有者と運営者の2つの主体の一定期間の事業採算性を評価関数とした二目的最適化を行う。ホテルの、客室部分と共用・管理部分の構成比率は、建物の全体形状に影響を与える主要な指標である。この構成比率はまた、関係主体である所有者と運営者の投資収益性を左右する重要な要因である。そして事業が成立するには、両者の収支を高度に満たす必要がある。ここでは、ホテルの建物形状より算

出される、両主体の一定期間における事業採算性を評価関数として、それらを同時に高度に満たす客室部分と共用・管理部分の構成比率を持つ代替案の探索を行う。所有者と運営者の関係主体は、一定事業期間における期待効用を大にしよう合理的に行動すると仮定されるが、総事業費や運転資金等の様々な事業制約を有することが一般であることから、試行の前提条件としてこれらの事業制約を変化させた場合、得られる代替案集合にどのような影響が現れるかを調べるためのシミュレーションを行う。二目的最適化により得られる代替案は、半順序の集合を形成し、問題空間の特性を例示すると考えられる。ここでは、この代替案集合のうちから、パレート解とみなせる特徴的な代替案を任意に取り出し、それらの客室部分と共用・管理部分の構成比率と両事業主体の事業採算性との関係を示す。設計問題に明示的な評価尺度が存在する場合の事例として、ホテル建築の関係主体の投資収益性を最大化する計画方法を提案することを目的とする。

第3章では、明示的な評価関数が存在しない創造的な設計問題において、代替案の探索に人間の評価を取り込む方法を試みる。対象に機能的な特性が求められず、意匠的な検討のみを行うような場合は、評価関数を明示的に記述することは困難である。また評価の基準も一定ではなく、設計過程の個々の局面毎に変化して行くことが考えられる。設計問題の目標やそれに至る手段は全く未知であるが、設計過程のある局面で実在する複数の代替案に対しては、相対的な評価が可能となる状況において、デザイナーの評価を取り込んだ代替案の発生・検証の手続きとして、対話型進化計算により代替案の探索を行うモデルを試行する。ここでは、窓配置パターンを表す単純な図形が扱われる。扱う図形の体系は、人間の形態認知に基づいた形態操作にふさわしい形式において、「プリミティブ」と「演算子」から成り、それらは木構造で表され、形態表現との翻訳が可能であるように定義する。計算機により提示される、ある世代の複数の代替案の形態表現に、デザイナーが評価を与え、その評価をもとに遺伝的オペレータを適用された次世代の形態が生成されるという手続きを繰り返して行く、対話型進化計算を行う。ランダムに生成された無秩序な図形から開始される、代替案の探索過程を考察し、デザイナーによる評価と計算機による生成を通して、平面上の形態獲得過程における形態創発の可能性を示すことを目的とする。

第4章では、設計行為の結果としての図形が存在する場合、図形にどのような形態構成規則が用いられているかを明示的に記述する方法を提示する。デザイナーにより作成され、与えられた代替案には、何らかの形態構成規則が存在すると考えられる。しかしながら、デザイナーは代替案を規定する形態構成規則を自ら明示的に意識しつつ形態操作を行っておらず、デザイナーにより与えられたある代替案から、その形態構成規則を明示的に記述す

るには、再度形態操作の過程を反芻することによる試行錯誤が強いられる。ここで、デザイナーによって与えられた任意の図形を教師図形とした場合、この教師図形を記述する、形態構成規則を知ることは重要である。ある教師図形を記述する形態構成規則は幾通りもあるが、教師図形の形態構成規則を記述することは、有効な知識の獲得方法となると考えられる。任意の教師図形の形態構成規則を記述する方法を提示することによって、教師図形に反映されているとみなされる形態操作の知識を獲得する可能性を試みるのが目的である。

第5章では、言語表現により設定された代替案が満たすべき必要条件に基づいて、デザイナーによって条件の満足不満足を評価された正負事例の学習により、両者を見分ける評価関数を記述し、多数の代替案の集合に対してふるいとして用いる方法の可能性を提案する。対象として木造3階建住宅の耐力壁配置モデルにおける住宅平面が扱われる。木造3階建住宅は平屋や2階建住宅よりも風圧力や地震力が増加し、耐震性能を考慮した耐力壁の配置は重要な問題である。一方、住空間には内部環境の質も同時に求められ、その点で光環境は重要な特性である。耐力壁の配置は、耐震性能と居室の光環境を左右する重要な要因であるが、その設計技術は未熟であり、確認申請後に耐力壁を取り払う等、諸室の要求と耐震性能との調整がつかず、結果、必要な耐力壁を犠牲にしている危険な現状がある。従来は、先に所要室を配置した後、耐力壁を配置可能な位置に適宜配置する方法をとることが一般であったが、耐震性能と居室の光環境を高度に満たす耐力壁配置で、かつ住宅平面として採用可能な代替案を選択する方法が求められる。本章でははじめに、耐震性能を表す「偏心率」と、居室の光環境を表す「昼光率」を明示的な評価尺度として、二目的最適化手法により、両者を高度に満たす代替案の集合を獲得する。この代替案の集合の中には、住宅平面として不相当で、採用が不可能なものも多く含まれていると考えられる。デザイナーは、各代替案の住宅平面を逐次参照することによって、採用可能かどうか判定することができる。しかし、一つ一つ代替案を逐次参照して評価を行う負担は大きく、代替案の集合が大きい場合は、探索が困難になる。

このようなデザイナーによる代替案の評価を補助する方法があれば有効である。ここでは、住宅平面が採用可能となるために満たすべき必要条件が、デザイナーの理解できる言語表現により設定されている場合を想定する。これは、代替案の評価尺度は言語により部分的に記述されているが、代替案が条件を満たすかどうかを見分ける数式表現の評価関数は明示的でなく、それを書き下す手順も未知である状況であるといえる。代替案の条件の満足不満足を評価する評価関数が得られれば、この評価関数を計算機上で用い、代替案を効率的に絞り込むことができると考えられる。したがって、設定された条件から、各代替

案が条件を満たすかどうか、ある程度の精度で評価することが可能な評価関数を導く方法があれば有効である。ここでは、予め設定された条件の下にデザイナーによって評価され、与えられる一定数の正負事例を学習し、正負事例に内在すると考えられる、条件の満足、不満足をもたらす構造を見分ける関数を獲得するモデルが提案される。住宅平面を表す代替案の集合を記述された関数を用いて評価し、序列をつけ、得られた関数が評価尺度として有効にはたらいっているかどうか検証する。この関数を前述の二目的最適化の代替案の集合にふるいとして用いることによって、耐震性能と居室の光環境を高度に満たし、かつ住宅平面として採用可能な代替案を選択する。明示的な評価関数による二目的最適化の結果の代替案の集合に対し、帰納推論を用いた事例の学習で得られる評価関数をふるいとして用い、複数の客観的な評価関数を高度に満たし、かつ設定された条件を満足する代替案を効率的に絞り込む方法を提示することが目的である。

最後に第6章では、本研究で得られた成果をまとめると共に、今後の研究に残された課題を挙げ、本研究の結論とする。

注釈

1. 意思決定問題において解の候補となる解のことを代替案(alternative)という[中山他94]。
2. ここでいうような暫定的な代替案に対して、Simon[Simon 69]は「甘んじて満足する」(satisficing)と言及した。Schon[Schon 83]は、対話というアナロジーを用いて、デザイナーは設計過程の個々の局面における状況を熟考し、反映しながら設計を進めると述べた。
3. Akin[Akin 86]は、建築設計は問題解決行為の一つであることを示し、一般的な問題解決の手法を建築設計に適用すること、計算機の利用の重要性について言及した。
4. このことは、Newell, Shaw, Simon[Newell 他 67]の問題の一般的定義、「Pという集合が与えられているとき、一定の特性を持ったPの部分集合Sを見つける」に関係づけられる。
5. Mitchell[Mitchell 90]はまた、”The Logic of Architecture”のDesign as Computationの節において、次のように述べている。「発生・検証の過程(generate-and-test process)

を実行するための計算機であれば、発生メカニズム (generation mechanism)、検証メカニズム (test mechanism)、および制御原理 (control strategy) の三者を備えていることが必要である。そして、制御原理とは、次にどの代替案を試みるかを定めるための規則である。そして、デザインにおける知性 (design intelligence) は、代替案の発生メカニズムか、得られた代替案をチェックする検証 (評価) メカニズムかのどちらかに見いだされるべきであろう。前者の場合は、文法の規則は、満足の行く解答を即座に発生することをかなりの確率で約束 (おそらく保証さえ) しなければならない。そして、評価メカニズムは、ほとんど、あるいは全く関与しない。他方、後者の場合では、まず発生メカニズムによって多数の代替案が盲目的に作り出される。そして、知識基盤を持ち出し、推論を行い、代替案の含意を吟味することによって、そこから満足の行く解答を選び出す仕事は、評価メカニズム次第である。以上のことを別の言葉で表すと、満足の行く結果を得るためには、優れたデザイナーに出来の悪い批評家を組み合わせる方法と、優れた批評家に出来は悪いが精力的なデザイナーを組み合わせる方法との二通りがある。神 (批評家の存在を必要としない優秀なデザイナー) を選ぶのもよし、進化 (盲目的な生成であるが非常に効果的な批評による取捨選択を受ける) を選ぶのもよし、ということである。」

6. 半順序 (partial order) : 複数の目的関数の大小関係において必ずしも順序がつけられない場合の状態。

参考文献

Churchman, C. West (1967). "Wicked Problems." *Management Science*, 4, no. 14, pp. B-141, and B-142.

Newell, Allen, J. C. Shaw, and Herbert A. Simon (1967). "The Process of Creative Thinking." In H. Gruber, G. Terrell, and M. Wertheimer, eds., *Contemporary Approaches to Creative Thinking*, pp. 63-119. New York: Atherton Press.

Rowe, Peter G. (1987). *Design Thinking*. Cambridge, Massachusetts: Massachusetts Institute of Technology.

中山弘隆, 谷野哲三 (1994). *多目的計画法の理論と応用*. 東京: 社団法人計測自動制御学会

Simon, H. A. (1969). *The Sciences of the Artificial*. Cambridge, Massachusetts: MIT Press.

Schon, Donald A. (1983). *The Reflective Practitioner: How Professionals Think in Action*. New York: Basic Books.

Akin Omer (1986). *Psychology of Architectural Design*. London: Pion

Mitchell, William J. (1990). *The Logic of Architecture*. Cambridge, Massachusetts: Massachusetts Institute of Technology.

第2章 ホテルの客室部分構成比と各事業主体のNPV最大化の二目的問題

2.1 はじめに

ホテル建築は一般に機能的にも建物形状についても客室部分、共用・管理部分等の構成施設の特徴が顕著^{文献1)}で、事業としても土地建物所有者やホテル会社という複数の主体が関係する。建築の形態が決定される要因は様々であるが、建物の大規模化、複合化に伴い投資収益性を指標とした事業の財務的評価の重要性が高まりつつある。複数の事業主体が関係する場合はそれら各々の事業採算性が一定の水準で満たされる必要がある。ホテルは様々な比率の施設構成をとるものが見られるが、それらは計画主体の多岐にわたる経験的知識から決定されている。ホテルを事業として捉え、既得の経験的知識に固執せず、各事業主体の採算性を評価基準として建物の施設構成比を求めることによって、第三者的な立場から事業の全体状況を俯瞰することは重要である。

ホテルのように複数の事業主体が関係し、建物の施設構成により各主体の事業収支が異なる事業をゲームと捉えた場合には、単純に互いの得失で差し引きゼロのゼロサムゲームとはならない。各主体の事業採算性を高度に満たす建物の施設構成を知るためには、各々の事業採算性を評価指標とした多目的最適化が有効である。

ホテル事業は、土地建物所有者（以下オーナー）によって建設されたホテルをホテル会社（以下オペレータ）が賃借して内装什器の設備投資を行い経営運営を行う図1のような事業形態をとり、上記の二つの事業主体が関係する場合が多い。

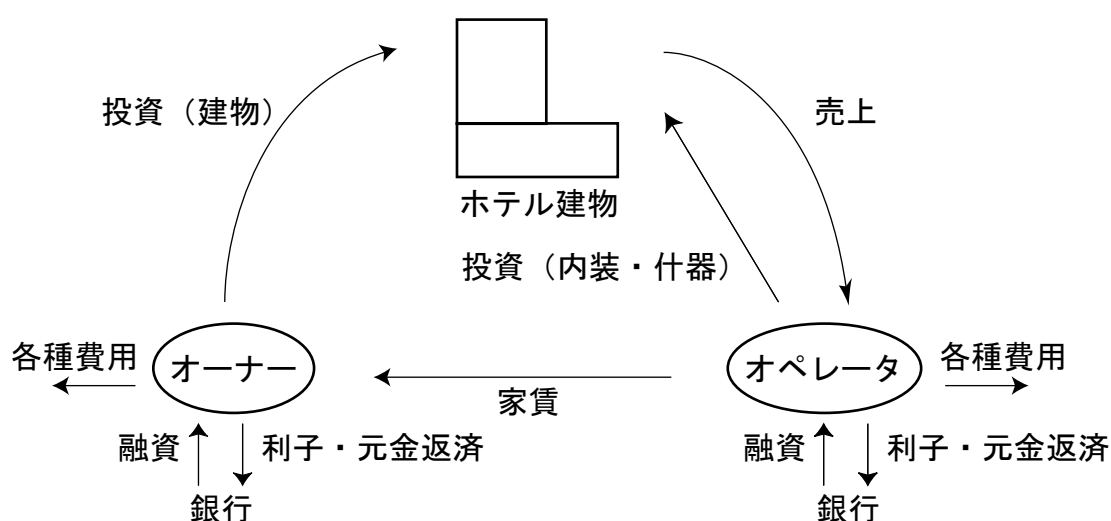


図1 本章で扱うホテルの事業形態

同じ投資対象建物について利害を異にする両事業主体(オーナー、オペレータ)は、それぞれ期待効用を最大にするよう合理的に行動すると仮定する。ホテルでは事業期間が長期となるため時間的価値を考慮する必要から投資収益性を測る数値として正味現在価値(Net Present Value 以下NPV)^{文献2)}を用いる^{注1)}。本章ではまず両事業主体の正味現在価値を計算するために事業期間における各々の収支の経年推移を表すモデルと、収支の計算に必要なホテルの施設構成を表す建物形状のモデルを作成して事業のモデル化を行う。つぎに各事業主体の一定事業期間における正味現在価値を目的関数とした二目的最適化を行うことにより、各主体の事業採算性を高度に満たすシティホテルの施設構成を明らかにする。ここでは特に、客室部分と共用・管理部分から構成される総延床面積が2万㎡程度のシティホテルを想定した。

2.1.1 既往の研究

建物を事業における投資対象と捉え、採算性を評価基準とした研究はこれまでもなされてきた。運輸省大臣官房観光部の「ホテル業の現状と問題点」^{文献3)}では、料飲部門の比重の相違についてホテルを4カテゴリに分類し、客室数等の前提条件を与件として決定した後、各条件を個別に変化させることによってモデル分析を行った。また高草木は、事例として予め設定された賃貸事務所建物に対してNPV法を用いて投資評価の観点からLCCと事業収支の関連を把握した^{文献4)}。これらは予め限定した対象に実際のデータを用い、投資判断に関する綿密な分析を行っている。その他にも、実際のデータベースを用いて建築工事費の経年変化から要求性能の変化を推定した竹林他の研究^{文献5)}や、改修の基本計画における予算を決定することを目的に期待収益率とリスクを推定することにより改修の投資規模を概数値として求める方法を提示した高草木の研究^{文献6)}がある。ホテル経営の研究では、ホテル空間に対する利用者の評価データから利用意向率を予測した宇治川の研究^{文献7)}がある。また遺伝的アルゴリズム(Genetic Algorithm 以下GA)は建築分野においても様々に利用されており、筆者らは多目的最適化を用いた研究^{文献8)}を進めてきているが、本章ではホテルを2つの事業主体による、単純にゼロサムゲームとはならない相互関係の上に成り立つ事業として扱うことが特徴である。また、予め計画対象を固定するのではなく、その前段階として、各事業主体のNPVを目的関数とした二目的最適化を行うことにより、各主体の事業採算性を高度に満たす施設構成比を明らかにした研究はない。

2.1.2 研究の方法

各事業主体の採算性を評価基準とした二目的最適化^{文献9)}を行う際「集合による探索」、すなわちそれぞれの目的関数についてある程度良い値をとる個体を同時に保ちながら探索を進めることができるという特徴を持つGAを援用することにより効率的な探索が行われ、計画主体の様々な事業予測下での試行が可能になる。

本章では事業の財務的評価に投資収益性の代表的な評価指標であるNPVを用い、GAの評価関数としてオーナー、オペレータの事業期間におけるNPVを設定する。ホテル事業計画では各事業主体の収支計算には施設構成の概略が必要である。施設構成を各事業主体の採算性により評価するために、NPVの計算と年次毎の制約条件の判定を行う、事業期間における各関係主体の収支の経年推移を財務諸表として表す「収支モデル」と、収支予測に必要な建物の施設構成比を表す「形態モデル」を作成し、双方に支配的となる要因を遺伝子としてGA内でランキング法を用いた二目的最適化を行う(図2)。

結果として、想定された事業予測下における、オーナー・オペレータのNPVと優秀な施設構成比との対応関係が得られる。

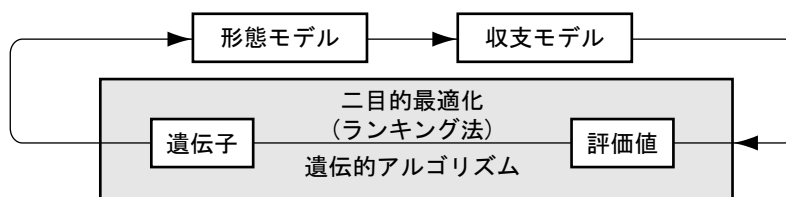


図2 優秀な個体の探索手法

2.2 評価関数の設定

一般に投資機会の財務的評価は、

- ①適切なキャッシュフローの予測。
- ②投資に対する評価数値の計算。
- ③採択基準と評価数値の比較。

という段階を踏んで行われる^{文献2)}。

本章の事業評価ではこれに倣い、

- ①両主体の財務諸表より事業期間のキャッシュフローを予測。
- ②評価指標としてNPVを計算。
- ③GA内で各年次の財務諸表の項目が制約条件に適合するか判定し、両主体の評価値を計算し個体群を進化させる。

という段階を踏む。

ここでNPVは事業期間中のキャッシュインフローの現在価値からキャッシュアウトフローの現在価値を減じたものであり、これが正であるときその投資はフィージブルであるとされる。

現在価値換算された、 n 年次までのキャッシュインフローの合計 $C_{in}(n)$ は、(1)式のように表される。

$$C_{in}(n) = \sum_{k=1}^n (F / (1 + d)^k) \quad \dots (1)$$

F : 各年次の期末資金残高
 d : 割引率

以上より n 年次のオーナー、オペレータのNPVは(2)、(3)式のように計算される。

$$NPV_{Ow}(n) = C_{in_{Ow}}(n) - PC_{Ow} - (BV(n) / (1 + d_{Ow})^n) \quad \dots (2)$$

$$NPV_{Op}(n) = C_{in_{Op}}(n) - PC_{Op} - (IV(n) / (1 + d_{Op})^n) \quad \dots (3)$$

$NPV_{Ow}(n)$: n 年次のオーナーのNPV

$NPV_{Op}(n)$: n 年次のオペレータのNPV

PC_{Ow} : オーナーの総事業費

PC_{Op} : オペレータの総事業費

$BV(n)$: n 年次の建物価値

$IV(n)$: n 年次の内装什器価値

d_{Ow} : オーナーの割引率

d_{Op} : オペレータの割引率

両者の評価値を(4)、(5)式のように設定する^{注2)}。

$$Tx = 1.0 / (NPV_{Ow}(n) * 10^{(-7)}) \quad \dots (4)$$

$$Ty = 1.0 / (NPV_{Op}(n) * 10^{(-7)}) \quad \dots (5)$$

Tx : オーナーの評価値

Ty : オペレータの評価値

2.3 ホテルのモデル化

2.3.1 収支モデルの作成

評価値を与える両主体のNPVを計算し、制約条件を判定するためには各々の事業期間における財務諸表を記述する必要がある。財務諸表には、各期末の資産状況を表示した貸借対照表、期中の経営成績を表示した損益計算書、その間の資金収支を表示した資金繰計算書がある。各々の記述のために貸借対照表、損益計算書、貸借対照表というサイクルを毎年1回行う。

両主体の財務諸表の各項目は対象とするシティホテルと同規模のホテル事業計画の事例に倣う^{文献10)~14)}。損益計算書の売上、原価、営業外費用は、収益を与える部分から構成される建物形状に依存するため、これらは形態モデルより与えられる。収支モデルは事業開業前と開業後に分けて表1～8のように設定される。

表1 オーナー投資計画

項目	摘要	設定
建築工事費	①コスト予測の方法には、直接工事費を予測するものと、数量の予測を行い、単位数当りのコストをこれに乗じて予測するものが考えられる ^{文献15)} 。 ②建築工事費は、総額を着工時、中間時、竣工時の3回に分けて支払われることが多い。 ③対象とするシティホテルと同規模の事業計画の事例では、工期は20ヶ月と設定されている。	①特殊指標によるコスト予測として、SE面積法を用いる。 ②着工時、中間時、竣工時の3回に均等に分割して支払われるとする。 ③同左。
設計料	一般に工事費に対する一定割合を支払う。	建築工事費の3%を設計料とする。
近隣対策費等	事例では、100,000[千円]と設定されている。	同左。
期中金利	営業開始前に支出した金銭の、営業開始までの期間の利息から建物関係利息を差し引いたもの。	同左。
登録免許税	所有権保存登記のために建築工事費の0.6%が課税される。	同左。
不動産取得税	標準税率は4%。	同左。
事業所税	1[m ²]当たり6[千円]。	同左。
土地租税公課	①固定資産税 ②都市計画税 ③地価税	①固定資産税評価額の1.8%。 ②時価評価額の0.3%。 ③時価評価額より15億円の定額控除を差し引いた額の0.3%。

表2 オーナー資金調達計画

短期借入金	金利は長期プライムレートと相関を持ち、長期借入金よりも低い。	短期借入金金利4.6%。留保金の全てを借入金の返済に充てるとする。
長期借入金A	日本開発銀行による低金利の融資制度による。元金均等方式による返済。	建築工事費の30%を調達する。金利3.35%、5年据え置き、15年返済。
長期借入金B	日本開発銀行による低金利の融資制度による。元金均等方式による返済。	建築工事費の20%を調達する。金利3.55%、5年据え置き20年返済。

表3 オーナー初年次収入計画

ホテル賃料	家賃は、貸床面積に賃料単価を乗じて求める。一定の割合で上昇を見込むことが多い。事例では、初年度から3年度までは単位面積当たり6[千円/m ²]。以降8[千円/m ²]で、年1%ずつ上昇すると設定されている。	同左。
-------	---	-----

表4 オーナー初年次費用計画

修繕管理費	建築工事費の一定割合を計上する。物価上昇率程度の値上げを見込む。	6年度より、建築工事費の0.5%とし、毎年0.6%ずつ上昇するとする。
損害保険料	建築工事費に保険料率を乗じた額とする。値上げは見込まず、毎年同額とする。	建築工事費に0.2%を乗じた額とする。
土地租税公課	固定資産税。	固定資産税評価額の1.8%とする。
建物租税公課	固定資産税。	固定資産税評価額の1.8%とする。
減価償却躯体	建物取得価格の60%を躯体として償却する。躯体の耐用年数は47年とする。このとき償却率は0.016である。	同左。
減価償却設備	建物取得価格の40%を躯体として償却する。躯体の耐用年数は15年とする。このとき償却率は0.066である。	同左。
短期借入金利息	短期借入金残高に対して金利4.6%で計算される。	同左。
長期借入金利息	長期借入金A、長期借入金Bそれぞれの残高に対して、金利3.35%、3.55%で計算される。	同左。
法人税等	ここでは実行税率を50.47%とする。	同左。

表5 オペレータ投資計画

特殊内装・什器	什器備品費は、一般の目安として、建築工事費の12ないし22%の範囲と予想することができる ^{文献16)} 。	建築工事費にグレードに応じた割合を乗じた額とする。
預入敷金	家賃の1年分とすることが多い。	同左。
広告宣伝費	事例では、100,000[千円]と設定されている。	同左。
従業員教育費	事例では、従業員一人当たり2,000[千円]と設定されている。	同左。
開業前経費	事例では、30,000[千円]と設定されている。	同左。

表6 オペレータ資金調達計画

自己資金	事例では、自己資金1,000,000[千円]。	同左。
借入金	事例では、調達資金は短期借入金で賄うと設定されている。	総事業費より自己資金を減じた額。金利4.6%。

表7 オペレータ初年次収入計画

宿泊売上	宿泊部門は売上は、室数、室料、稼働率より計算される。	室数、室料、稼働率は形態モデルより与えられる。
共用・管理部分売上	共用・管理部門の売上の総和。	単位面積当たりの売上と共用・管理部分の収益面積で計算される。これらは形態モデルより与えられる。

表8 オペレータ初年次費用計画

人件費	事例では、従業員一人当たり5,000[千円]とし、年1%ずつ上昇すると設定されている。	同左。
材料費	事例ではホテル会社へのヒアリングにより、客室部分、共用・管理部分上の25%と設定されている。	同左。
営業費	事例ではホテル会社へのヒアリングにより、客室部分、共用・管理部分売上の28%と設定されている。	同左。
建物租税公課	固定資産税。	固定資産税評価額の1.8%。
減価償却	特殊内装、什器・備品の償却費。償却期間は5年。償却率は0.2。	同左。
支払賃料	オーナーに支払うホテル賃料。	オーナーの収入と同様。
支払利息	借入金残高に対して金利4.6%で計算される。	同左。
繰延資産償却	開業前の計算で開業費を繰延資産として計上したものの償却。5年で均等に償却することが多い。償却率0.2。	同左。
法人税等	オーナーの法人税と同様。	同左。

2.3.2 形態モデルの作成

形態モデルでは、収益を計算する単位となる部分と、建築工事費を計算するために建物の全体形状が表現される必要がある。

一般に建築物は用途、機能により形態的な制約条件を前提的に有しており、収支計算に必要な建物形状は無秩序に多様な集合とはならない。ホテル建物は関係法律や構造的、機能的な要求から以下のような建物形態に関する制約を有している^{文献16)}。

①客室部分は、1室毎に区画された構造単位の集合体であり、他の部分から分離し、構造的にも設備の面でも他からの影響を受けないように独立させて計画するのが原則であるため、主に客室部分と、共用・管理部分の2ブロックから構成されること。

②共用部分のみを一時的に利用する外来客と宿泊客の導線の分離が必要であること、シティホテルは比較的地価の高額な場所に立地することから、一般に低層部に共用・管理部分が集約しておさめられ、高層部に客室部分が積層して配置されること。

③客室は採光や換気が可能な外部に面する必要があること^{文献17)}。

④商品としての客室は同一の価格に対し同一のサービスを提供するため規則的な配置となること。

⑤投資効率を高めるため、一般に形状は整形となること。

建築の構成上まとまりのあるグループをブロック化することによってその配置計画を行うことはブロックプランとよばれる。上記のようにホテル建物は客室部分と共用・管理部分から構成されることから各々をブロックとして捉え、以下ではそれぞれの特性に応じてモデル化する。

1) 客室部分

客室部分の平面形の事例は、上記の制約より下図のように廊下のトポロジーに依存する単純な形状となる場合が多い。本章では二方向避難を考慮し、60m毎にコアを持ち、部屋面積と部屋数について変化する以下のような客室基準階のモデルを作成し、形態モデルではこれが階数分積層するものとする(図3)。

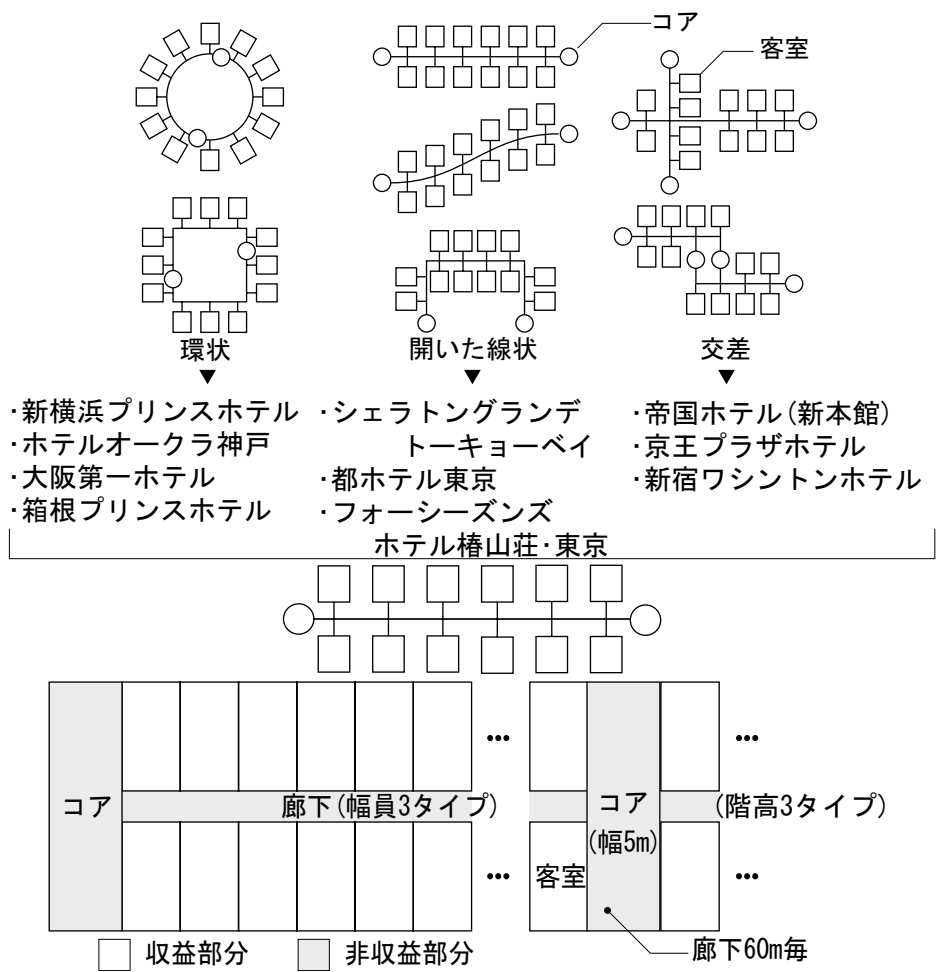


図3 客室基準階のモデル

客室部屋面積等はグレードに関して異なる。グレードと支払われる対価の間には一般に競争原理等により相関関係が存在する。グレードに影響を与える項目としていくつかの条件が知られている^{文献14)}がそれらと形態モデルのグレード指標との対応を表9のように設定する。ツインルームに関する3グループの実例^{文献18)}から、本章ではグレードに関して3種類のタイプを表10のように設定する。

表9 グレードに影響を与える項目と形態モデルのグレード指標

グレードに影響を与える項目	本論で設定する対応する項目	
坪当たり建築工事費	①内装・什器費の坪単価[千円/坪]	
建築設備の材質、品質		
建築工法、技術のレベル		
デザイン	考慮しない。	
施設の規模、種類、機能の品質	客室部分	②間口幅[m]、奥行幅[m] (面積[m ²]) ③廊下幅員[m] ④階高[m]
	共用・管理部分	⑤有効率
商品の価格	客室部分	⑥宿泊料[円]
	共用・管理部分	⑦単面積当たり売上[千円/m ²]
対人サービスのレベル	⑧従業員人数[人]	

表10 グレード指標のタイプ毎の設定

グレード指標			タイプ0(低)		タイプ1		タイプ2(高)	
部屋面積	間口	面積	2.8[m]	14[m ²]	4.0[m]	26[m ²]	5.0[m]	37.5[m ²]
	奥行		5.0[m]		6.5[m]		7.5[m]	
階高	客室部分		2.5[m]	2.8[m]	3.1[m]			
	共用・管理部分		3.5[m]	4.3[m]	4.6[m]			
廊下幅員			1.6[m]	2.1[m]	2.8[m]			
室料金			8000[円/日・室]	14000[円/日・室]	16000[円/日・室]			
客室稼働率 (10年度以降毎年1%ずつ上昇)	初年度		95[%]	65[%]	55[%]			
	10年度目		100[%]	70[%]	60[%]			
共用・管理部分有効率			0.70	0.55	0.45			
共用・管理部分売上(単位面積当り)			300[千円/m ²]	535[千円/m ²]	730[千円/m ²]			
内装・什器費(建築工事費に対して)			12[%]	14[%]	16[%]			
従業員数(単位客室当たり)			0.4[人]	0.9[人]	1.1[人]			

2) 共用・管理部分

一般に階高は高めで、整形の矩形が多く、一定のスパンによる柱割りが基準となっている。(図4)

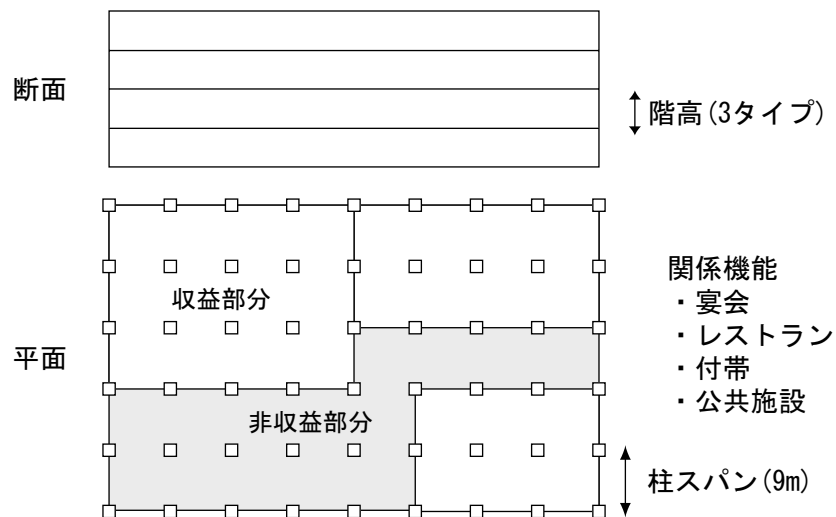


図4 共用・管理部分のモデル

2.3.3 遺伝子コード化

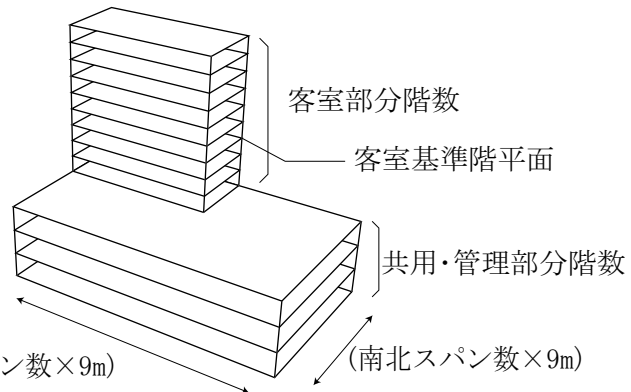
以上より以下の項目が設定できれば、客室部分、共用・管理部分の面積と収益、建物の全体形状が決定されることが分かる。

客室部分 : ①タイプ ②基準階客室数 ③階数

共用・管理部分 : ④南北スパン数 ⑤東西スパン数 ⑥階数

これら6項目を、収支の予測と建物形状に関して支配的な要因と捉え、GA適用における遺伝子として設定する。これらはヴォリュームモデルとして以下のように図示され、客室部分と共用・管理部分の収益が計算される(図5)。

〈ヴォリュームモデル〉



客室部分
収益計算 = 基準階客室数 × 客室階数 × 宿泊料 × 稼働率.

共用・管理部分
収益計算 = (南北スパン数 × 9) × (東西スパン数 × 9) × 共用・管理階数 × 有効率 × 単位面積売上.

図5 NPV計算に必要な形態情報

2.3.4 SE (Story-Enclosure) 面積法による建築工事費の計算

建築工事費は建物の全体形の概略と相関を持つものと捉えて、概算値を計算する方法が知られている。この代表的な例はSE法と呼ばれる予測手法である。建物を床と壁と屋根で構成するものとし、この床・壁・屋根面積にコスト比率を乗じて重み付きの各面積を求め、それらの合計面積が工事費と相関を持つ面積であるとする。本章では建築工事費は形態モデルから得られる建物各部寸法をもとにSE面積法を利用して表11と式(6)により計算される^{文献15)}。

表11 SE面積法 (左辺はSE面積、右辺は建物の各部寸法を用いた計算式)

屋根面積	:	屋根の水平面積	×	1
地上階の外壁面積	:	外壁面積	×	1
1階の床面積	:	1階の床面積	×	2
地上n階の床面積	:	n階の床面積	×	(2 + (n - 1) × 0.15)
地下階の床面積	:	地下階の床面積	×	3
地下階の外壁面積	:	地下階の外壁面積	×	2

合計面積 : 工事費と相関を持つ面積

実際の事業計画の事例より、客室部分の延床面積約6000[m²]、共用・管理部分の延床面積約16000[m²]のシティホテルの建築工事費が6,806,250[千円]であったことを鑑みるとモデルの建築工事費 C は(6)式のようになる。

$$C = c * (X + KY) / (x + ky) \quad \dots (6)$$

<事例> x : 客室部分のSE面積 y : 共用・管理部分のSE面積
 k : 客室部分に対する共用・管理部分の工費坪単価の比率
 c : 建築工事費

<形態モデル> X : 客室部分のSE面積、 Y : 共用・管理部分のSE面積
 K : 工費坪単価の比率

評価値計算のフローは図6のようになる。

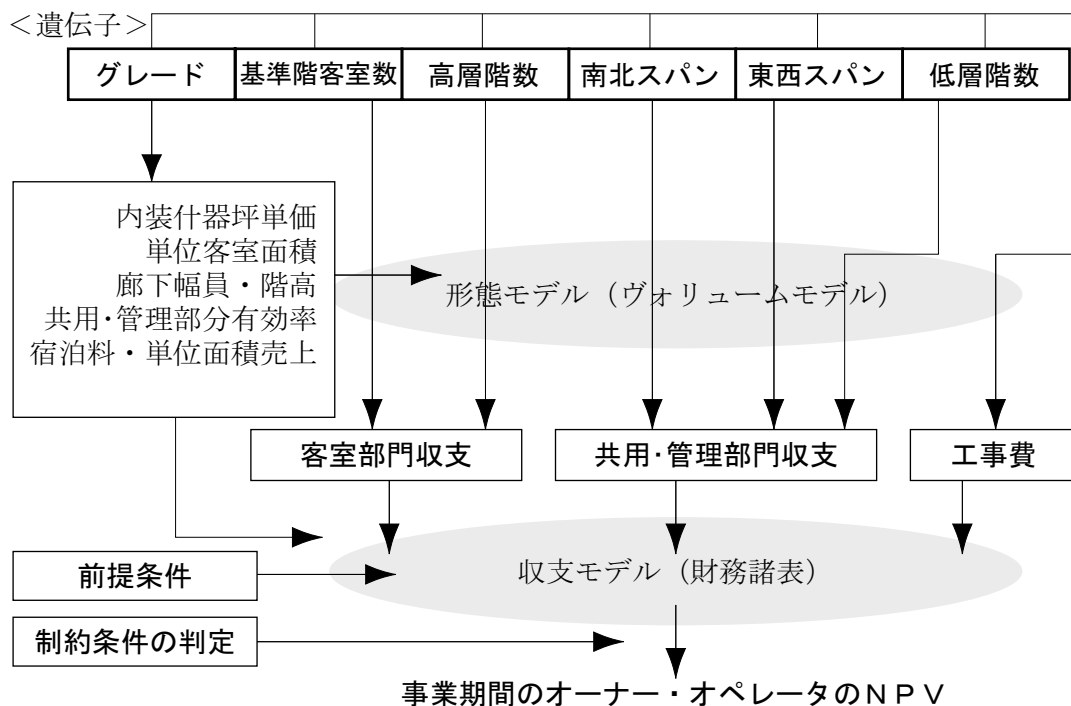


図6 評価値計算のフロー

2.4 GAの試行

本章では、優越関係に基づいて定まるランクを利用して個体の選択を行うGoldbergらのランキング法^{注3)}を用い、個体群中のパレート最適個体を全て次世代の個体群に加えるエリート保存戦略を組み合わせ探索を行う^{文献9)}。

2.4.1 はじめに設定した制約条件

一般に各主体は利得の最大化を指向するが、総事業費や事業期間中の運転資金等の様々な事業制約を有しており、これらを満足することが必要となる。事業制約は各主体の個別事情により様々であるが、本章でははじめに、表12のような条件を設定する。

表12 設定した制約条件

項目	設定
資金繰計算書の 総事業費、借入金	オーナー総事業費6,000,000[千円]以下 オペレータ借入金1,200,000[千円]以下
貸借対照表の 運転資金	借入なし
資金繰計算書より 計算されるNPV	事業期間30年間においてオーナー、オペレータともに正

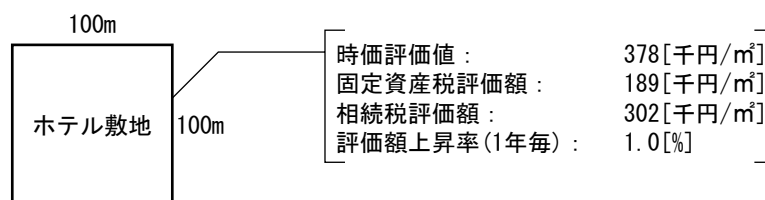


図7 設定した敷地条件

試行の結果、オーナーにとっては客室部分の大きい個体が、オペレータにとっては共用・管理部分の大きい個体がNPVについて優秀となり、また客室部分構成比の大きい個体は低いグレード、客室部分構成比の小さい個体は高いグレードのものが優秀となった(図8,9)。個体の進化を表す個体群の評価値の推移は図10に示されるように第96世代辺りで評価値の減少はそれ以上起こらなくなった。

図8,9に示される、優秀な個体のうち客室部分構成比について特徴的な3個体を抽出した。それらの延床面積と客室部分構成比について実在のホテル事例に対する位置づけを日本ホテル年鑑^{文献11)}より、情報が公開されている事例をグラフ化することにより図11に示した。また3個体の個体概要、建物の構成、各主体の収支の推移を表すグラフを図12に並列して示す。

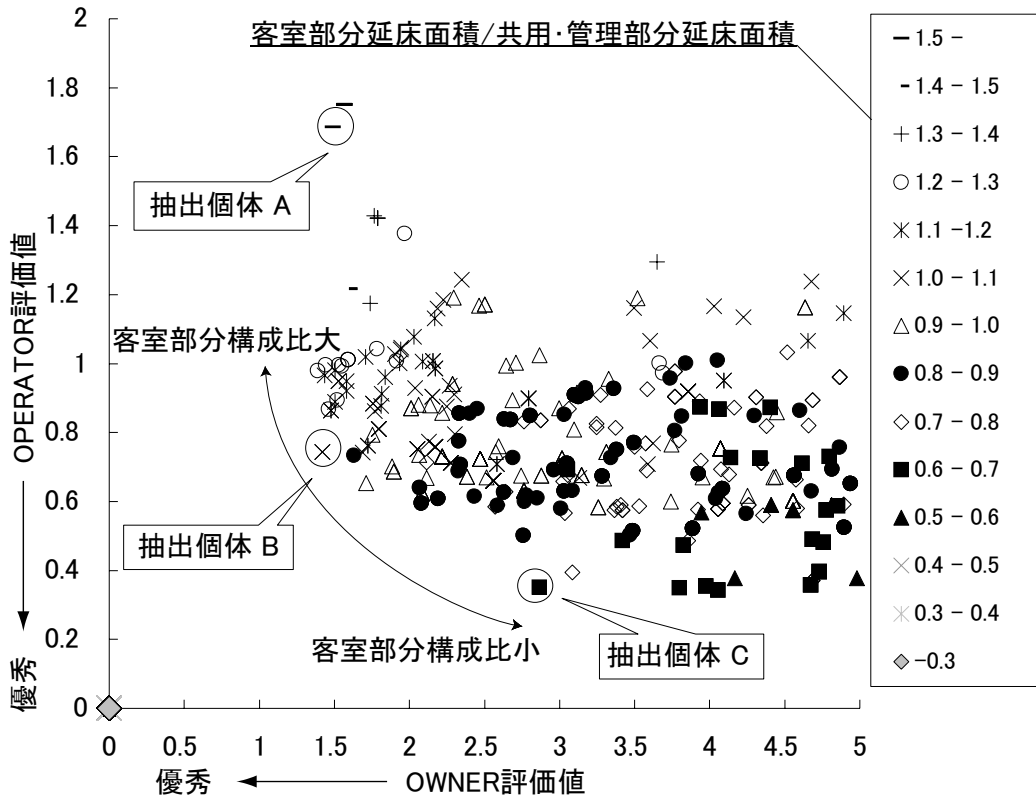


図8 客室部分と、共用・管理部分の比率についての優秀な解の分布

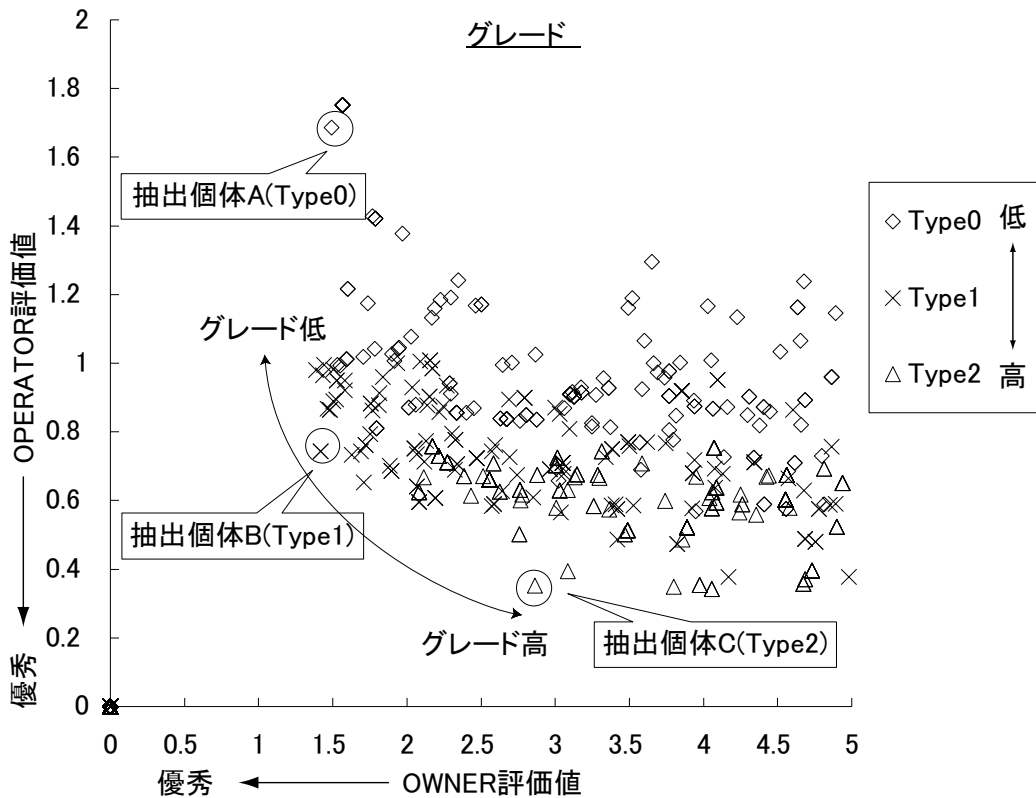


図9 グレードについての優秀な解の分布

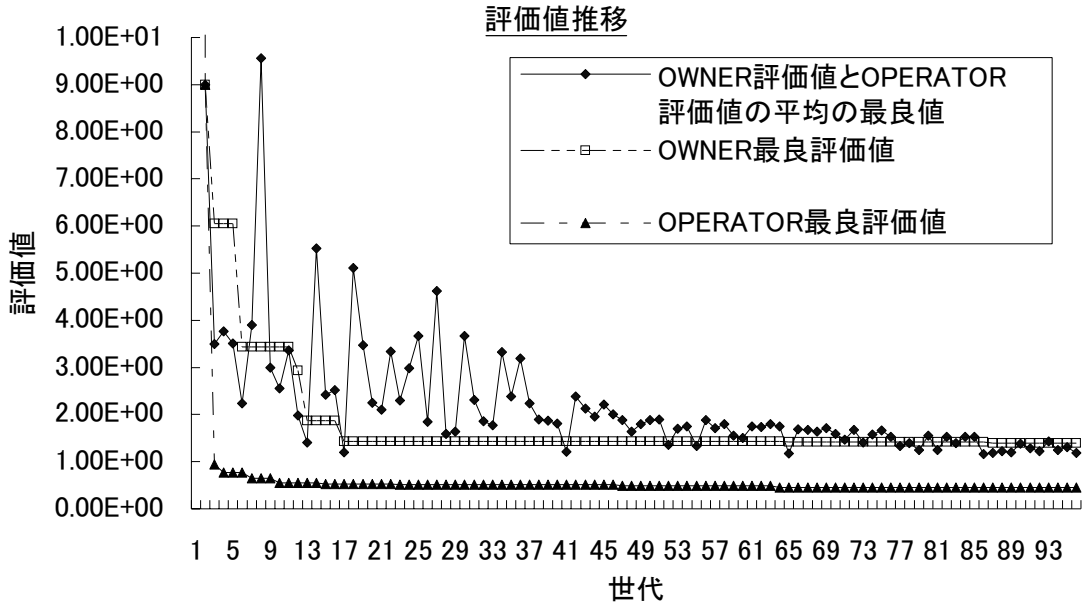


図10 GAにおける個体群の評価値の推移

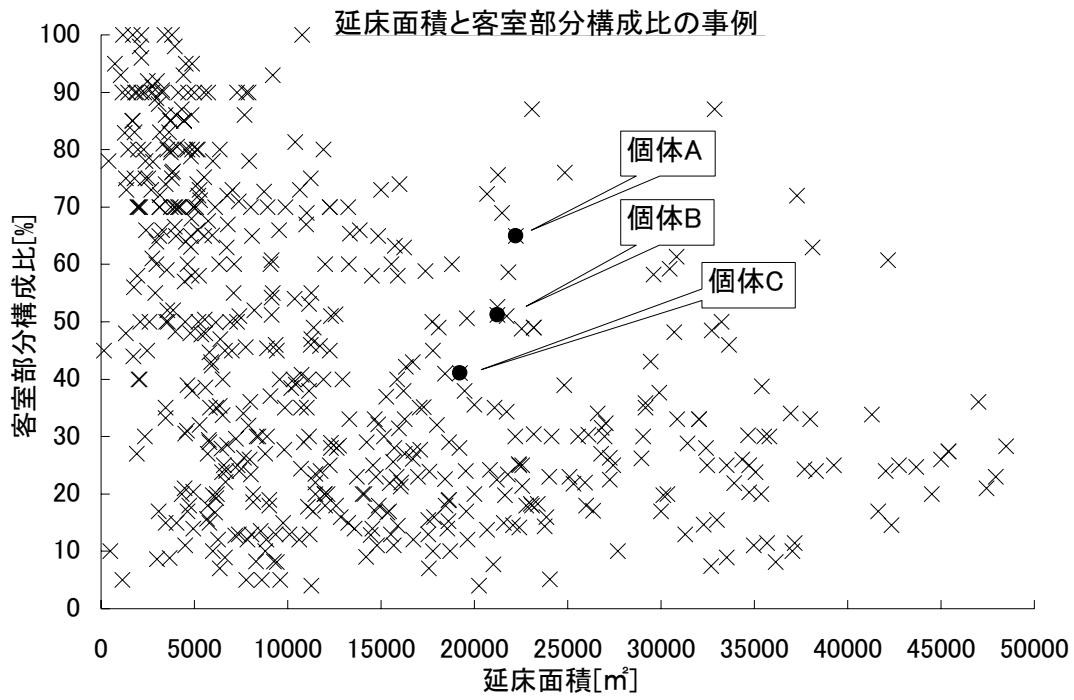


図11 抽出個体のホテル事例との関係

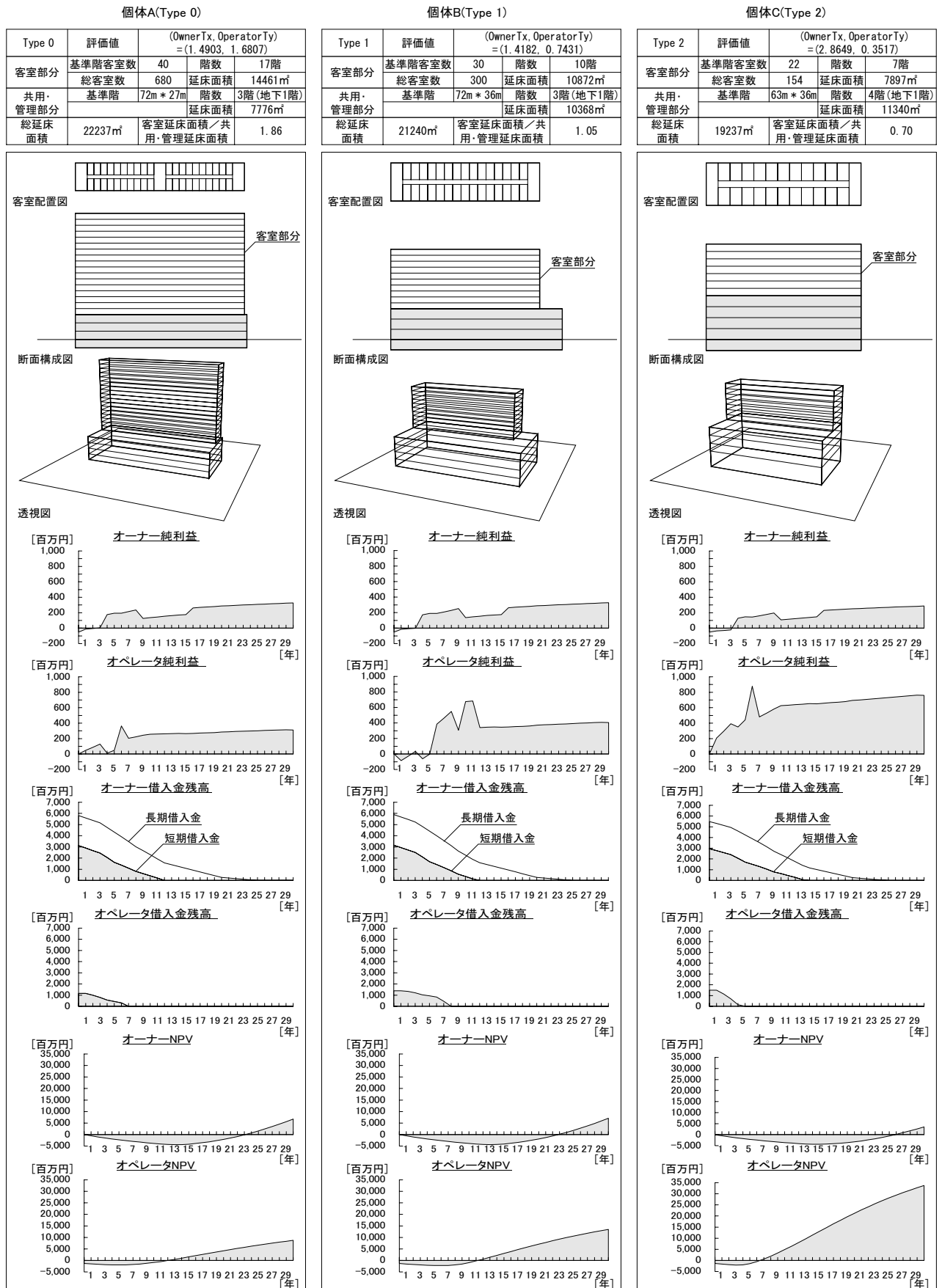


図12 抽出した個体の概要、客室構成図、断面構成図、透視図、収支の経年推移

2.4.2 想定されるその他の前提条件

以下では、事業の前提条件について4つの場合を想定し、同様に優秀な個体の分布を二目的最適化により求め、オーナーのNPVに対するオペレータのNPVの比率が3となる優秀個体を抽出して示した。

(2) オペレータの借入金限度額を1,000,000[千円]とした場合。

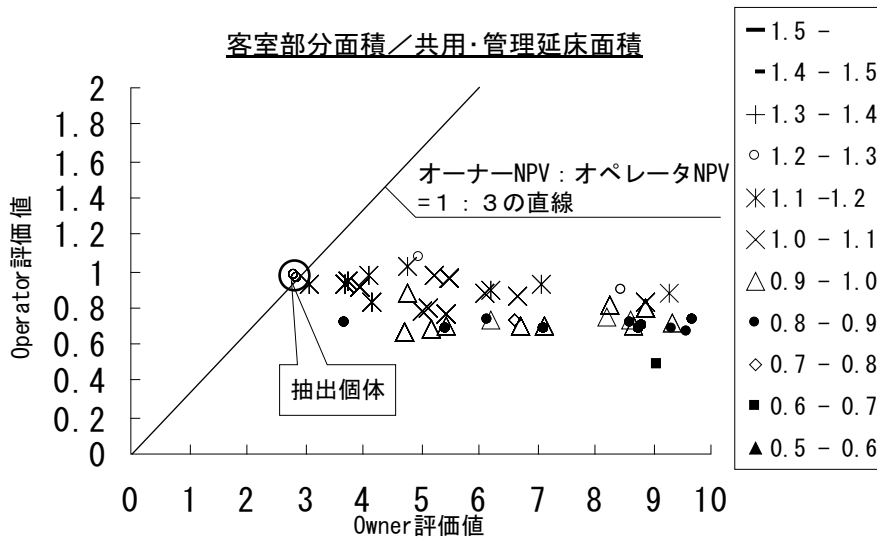


図13 優秀な個体の分布

表13 抽出個体の概要

(2)		評価値 (OwnerTx, OperatorTy)=(2.8396, 0.9709)		
客室部分	基準階客室数	26	階数	11階
	総客室数	286	延床面積	10542m ²
共用・管理部分	基準階	63m * 27m	階数	4階 (地下1階)
			延床面積	8505m ²
客室延床面積 / 共用・管理延床面積		1.24		

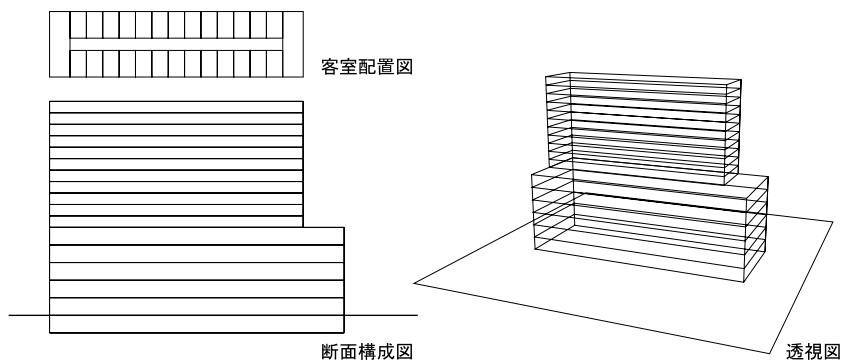


図14 抽出個体の客室配置図、断面構成図、透視図

オペレータのNPVは減少している。オーナーに対するオペレータのNPVの比率が3となる直線上の個体は客室部分の比率が大きくなっている。借入金の減少により単位面積当たりの初期投資が客室部分に比べて大きい共用・管理部分の割合が減少したものと考えられる。

(3) オペレータの自己資金を 500,000[千円]とした場合。

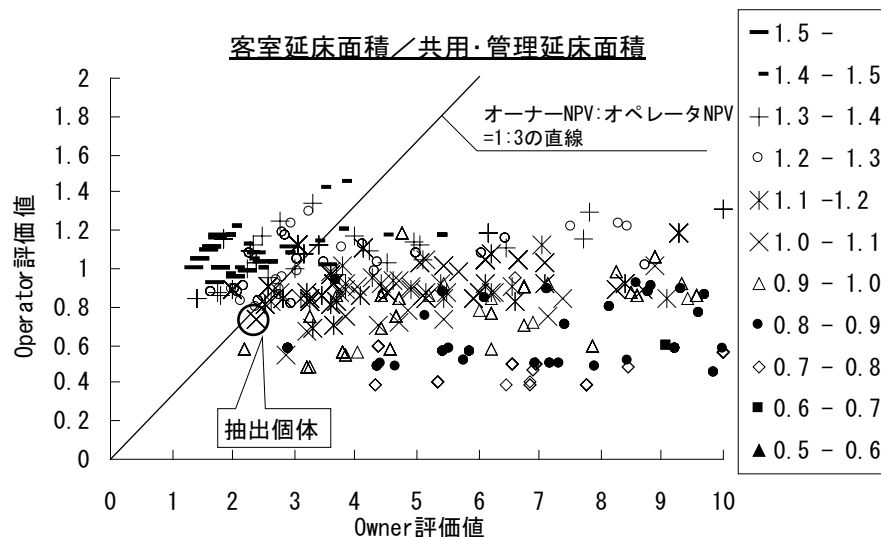


図 15 優秀な個体の分布

表 14 抽出個体の概要

(3)		評価値 (OwnerTx, OperatorTy)=(2.3886, 0.7315)		
客室部分	基準階客室数	30	階数	10階
	総客室数	300	延床面積	10872㎡
共用・管理部分	基準階	72m * 36m	階数	3階 (地下1階)
			延床面積	10368㎡
客室延床面積 / 共用・管理延床面積		1.05		

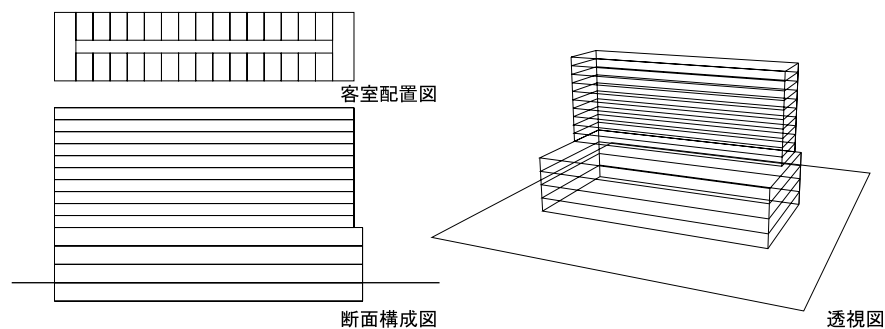


図 16 抽出個体の客室配置図、断面構成図、透視図

同様にオペレータのNPVは減少しており、客室部分の比率が低い個体が消え、比率が1.5以上となる個体が見られる。

(4) 賃料3年度まで6.5[千円/月坪]、以降8.5[千円/月坪]とした場合。

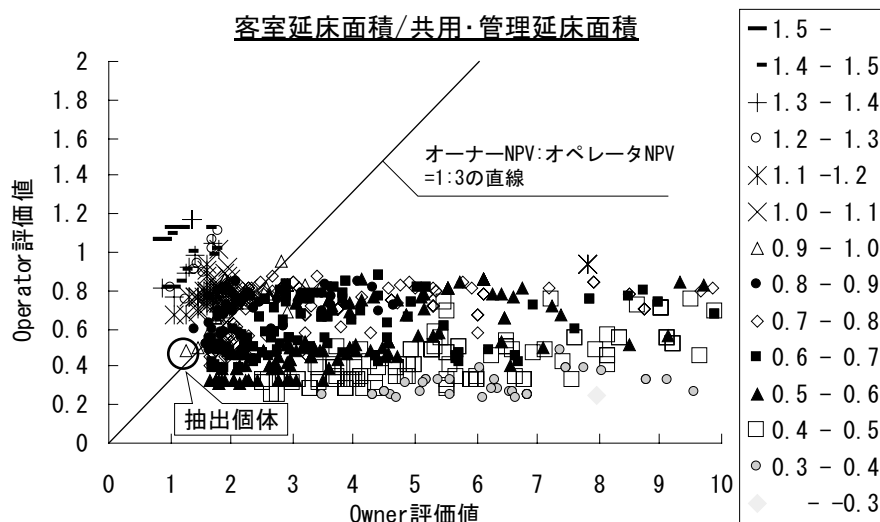


図17 優秀な個体の分布

表15 抽出個体の概要

(4)	評価値	(OwnerTx, OperatorTy)=(1.2626, 0.4805)		
客室部分	基準階客室数	28	階数	11階
	総客室数	308	延床面積	11251㎡
共用・管理部分	基準階	63m * 36m	階数	4階(地下1階)
			延床面積	11340㎡
客室延床面積 / 共用・管理延床面積			0.99	

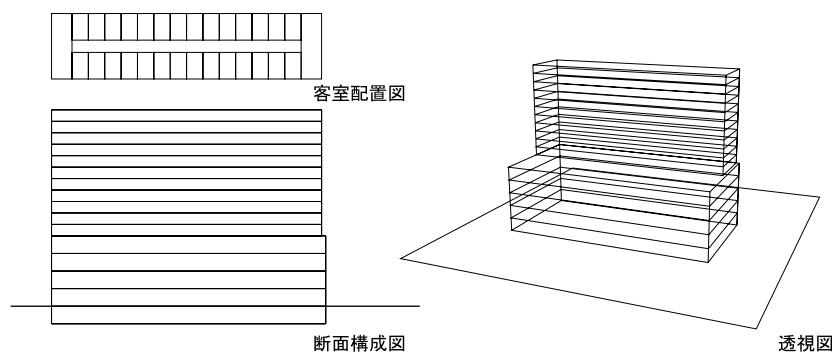


図18 抽出個体の客室配置図、断面構成図、透視図

オーナー、オペレータともにNPVは大きくなり、多様な客室部分の比率の個体が見られる。オーナーにとって有利な客室部分がかなり減少してもフィージブルとなっている。

(5) 賃料を歩合制(オペレータの売上の17.0%)とした場合。

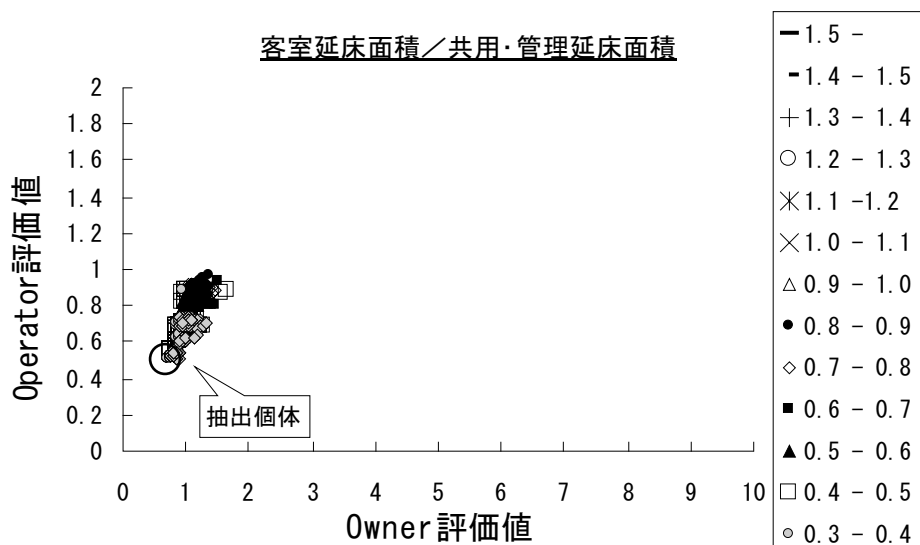


図 19 優秀な個体の分布

表 16 抽出個体の概要

(5)	評価値	(OwnerTx, OperatorTy)=(0.8688, 0.5037)		
客室部分	基準階客室数	10	階数	5階
	総客室数	50	延床面積	2215㎡
共用・管理部分	基準階	81m * 45m	階数	3階(地下1階)
			延床面積	14580㎡
客室延床面積 / 共用・管理延床面積		0.15		

オーナーのNPVは増大している。歩合賃料制の場合、ホテルの運営、経営のリスクをオーナーとオペレータで分担することになるので、オーナーの割引率を適宜変更する必要がある。

2.5 考察

個体群の分布による事業の全体状況の把握とともに、個別の個体の建物形状と各事業主体の収支の推移を知るために、優秀な個体のうち客室部分構成比について特徴的な3個体(A, B, C)を抽出し、それぞれのヴォリュームモデルと各主体の収支の経年変化を示した(図12)。Aは事業において相対的にオーナーに有利な個体、Cはオペレータに有利な個体、Bはそれらの間に位置づけられる個体である。図11のホテル実例との関係では、敷地、立地条件は様々に異なるが、3個体の客室部分構成比は同規模のホテルに比べて高めとなっている。建物形状については本章では余裕のある敷地を設定したため、SE法による建築工事を減減させるように階数が抑えられ、表面積の小さいものとなっている。

一般に各主体は利得の最大化を指向するためNPVを指標としたが、30年間の利得の総和だけでなく各期の財務状況が一定の事業制約を満たす必要があるため、財務諸表より各主体の収支の推移を表す純利益と、借入金残高を併せてグラフ化して示した。各主体の収支の推移は、法人税課税、借入金完済、繰延資産償却等によりそれぞれ異なる変化を示しているが、運転資金の借入がないこと、総事業費限度額、30年間におけるNPVが正という制約条件を設けているため、特に極端な経年変化を示すものはない。両主体とも開業後数年間は純利益が赤字となるものが見られるが、これは一般的な事業計画においても同様である。投資収益性を測る数値としてのNPVは、前述のように客室部分構成比の大きい個体Aは相対的にオーナーに有利、客室部分構成比の小さいCはオペレータに有利な経年推移を示している。NPVの量的比較では、全体的にオペレータの方が大となる傾向があるが、これはオーナーが大きな初期投資を行い、毎年一定額の賃料を回収して行くのに対し、オペレータは比較的小さい初期投資に対して経営・運営に応じた利益を得るという事業における性格の相違によると考えられる。本章では事業計画の事例に則して、オペレータの売上、経費は毎年一定割合上昇すると仮定して、その現在価値を割引率という形で考慮したことも影響していると考えられる。

2.6 まとめ

ホテルを事業の投資対象と捉え、オーナー、オペレータのNPVを評価指標としてそれらを最大化した場合の客室部分、共用・管理部分の構成比を求めた。結果として、パラメータ設定の試行錯誤により概ねパレート最適個体集合^{注4)}とみなせる優秀な個体の分布が図8の散布図に示されるように得られた。本章で設定した前提条件下ではそれらは、オーナーの評価値が優秀なもの、すなわちオーナーのNPVが大きく事業において相対的に有利となるものは客室部分構成比が大きく、オペレータが有利となるものは客室部分構成比が小さくなり、それら両者のNPVにトレードオフの関係がみられた。グレードについては、客室部分構成比の大きいものは低いグレードで、客室部分構成比の小さいものは高いグレードでNPVが大となる個体を選ばれた。すなわちシティホテルのうちでも比較的客室部分構成比が大きく、いわゆるビジネスホテルに近いものはグレードが低く、逆に客室部分構成比が小さく宴会・料飲等を含む共用・管理部分の大きいものはグレードが高いという現状のホテル事例に則した個体が優秀となることを示した結果となった。

以上のように、事業における投資対象としてのホテルは関係事業主体の各々のNPVを

最大化させた場合、客室部分構成比は事業主体のゲームの関係と対応して様々な値をとり、同時にグレードの高低を伴っていることが図 8, 9 のパレート最適と見なせる個体の分布より明らかとなった。

事業を提案する立場にある計画主体は、計画案の決定を行う過程で、各事業主体の投資に関する個別条件を調整する必要がある、各事業主体の NPV の最大化による優秀な個体の分布は事業の全体状況の概略を定量的に示すものとしてフイジビリティスタディの意思決定過程に資すると考えられる。

注釈

注 1) NPV を用いるにあたって、各事業主体の財務予測は所与のものとする。

注 2) C 言語によるプログラム上の配慮のため評価値計算の右辺の分母に 10^{-7} を乗じている。

注 3) 優越関係に基づいて定められるランクを利用して選択を行う方法で、ランキングは以下に示す方法で行われる^{文献 9)}。

①ランク $r = 1$ とする。

②個体群の中からパレート最適個体を求め、これらのランクを r とする。

③得られたパレート最適個体を個体群の中から除き、 $r = r + 1$ とする。

④全ての個体のランクが決定されるまで、②および③の手続きを繰り返す。

但し、個体群中で他に優越されない個体（問題に対するパレート最適解に対応するとは限らない）を「パレート最適個体」と呼ぶ。

注 4) n 人のプレイヤーがいて、実現可能集合に属する利得ベクトル x によって与えられる利得よりも、ある一人の人の利得を、実現可能集合の範囲で増加させるためには、他の人の利得を減少させなければならないとき、利得ベクトル x はパレート最適であるという。パレート最適（あるいは、効率性）は、 n 人のプレーヤー全体として考えたときの利得配分についての合理性の概念であるから、パレート最適は、共同合理性または全体合理性と呼ぶことができる^{文献 19)}。

参考文献

- 1) 吉江憲吉：「ホテル—計画と設計—」、槇書店、1980
- 2) ロバート C. ヒギンズ 著、小原克馬 監訳：「ファイナンシャル・マネジメント—企

業財務の理論と実践―」、ダイヤモンド社、1998

- 3) 運輸省大臣官房観光部：「ホテル業の現状と問題点」、1970
- 4) 高草木明：「賃貸事務所建物経営の収支計画に対応したライフサイクルコストに関する研究」、日本建築学会計画系論文集 第496号、pp145-152、1997.6
- 5) 竹林芳久、尾島俊雄、村上公哉、長谷川隆：「建築工事費の分析による事務所ビルの要求性能の変化に関する研究」、日本建築学会計画系論文集、第443号、pp151-158
- 6) 高草木明：「賃貸事務所建物の集中的改修の計画における社会的劣化の回復への投資評価に関する研究」、日本建築学会計画系論文集、第505号、pp159-166、1998.3
- 7) 宇治川正人：「シティホテルのインテリアデザイン評価と利用意向率の予測に関する研究」、日本建築学会計画系論文集、第473号、pp43-50
- 8) 阪野明文、宗本順三、吉田哲、岩田伸一郎：「大学キャンパス逐次立替計画における総延床面積と補正立面面積の推移シミュレーション ―遺伝的アルゴリズムを用いた二目的最適化―」、日本建築学会計画系論文集、第529号、pp203-210、2000.3
- 9) 北野宏明編：「遺伝的アルゴリズム②」、産業図書、1995
- 10) 産業タイムズ社：「ホテル旅館計画総覧」、1999
- 11) オータパブリケーションズ：「日本ホテル年鑑1999(I、II)」、1999
- 12) (社)日本ホテル協会：「平成9年度全国主要ホテル経営実態調」、1997
- 13) (社)全日本シティホテル連盟：「平成9年度経営分析」、1999
- 14) (社)全日本シティホテル連盟：「客室料金調査」、1999
- 15) C.D. ブロウニング著、長倉康彦[ほか]訳：「コストプランニング入門」、彰国社、1968
- 16) 作古貞義：「ホテル事業論[事業計画から開業まで]」、柴田書店、1994
- 17) 国際観光ホテル整備法[昭和二十四年十二月二十四日 法律第二七九号]
- 18) 日本建築学会：「建築設計資料集成 文化7」、1996
- 19) 鈴木光男：「新ゲーム理論」、勁草書房、1997

第3章 対話型進化計算による形態構成規則の獲得モデル

3.1 はじめに

建築設計は、帰納的または発見的思考に大きく依存する点で特殊であり、多くの場合悪構造問題^{文献1)}となる。経験豊富な設計者は設計過程において、多様な解候補から優れたものを経験的知識により選択して案を収束させて行くが、そこに用いられている非明示的な知識を明示的に記述することは重要である。

Akin^{文献1)}は建築設計の特殊性を指摘した上で、十分な時間とふさわしい道具が用いられれば設計に対する意識的なアプローチが可能となると述べた。記述モデル(descriptive model)の提案に際して建築設計は問題解決行為の一つであることを示し、一般的な問題解決の手法を建築設計に適用すること、計算機の利用の重要性について言及した。

建築設計を問題解決行為の一つと捉えた場合の特殊性は、明確に定義された問題を解くだけではなく、定まった問いも答えも不明な状況において、設計者自らが設計案について可能性を見出し、かつ批評するような試行を行い、更に自分の持つ他の経験的知識とも関連させて行く点にある。

Schon^{文献2)}は事例分析により、設計者は設計過程の個々の局面における状況を熟考し反映しながら設計を進めるということを対話(conversation)というアナロジーを用いて説明した。

Mitchell^{文献3)}はまた、設計とは形態的可能性の探求と批評的推論とを同時に展開することで、それはある複雑なゲームと捉えることができると述べた。

最終的な解答は不詳であるが設計過程のある時点において実在する解の評価ならば可能という場合、各時点における解答案の生成、評価を通して逐次的に解の探索がなされていくと言える。このような問題解決行為は発生・検証のプロセス(generate-and-test process)として知られるが、Mitchell^{文献3)}はさらに、計算機を用いてこのプロセスを実行する場合、発生メカニズム(generation mechanism)、検証メカニズム(test mechanism)、制御原理(control strategy)の三者が必要であり、設計における知性は発生メカニズムか検証メカニズムかのいずれかに見出されるべきであるとしている。

ここで建築設計を問題解決行為と捉え、設計過程を解答案との逐次的な対話というアナロジーにおいてモデル化することが可能である。すなわち解答案の制御を行う進化計算アルゴリズムを援用して解答案の生成を行う計算機と、生成された案の評価を行う人間との

組み合わせにおいて、それらの相互作用による対話型進化計算を行うことにより、解答案の探索空間の絞り込みを行いつつ創発的に探索を進めるモデルを設定し、これを設計の形態創発のモデルとして捉えた試行を行うことができる。

3.1.1 研究の目的

図形の体系はプリミティブ (Primitive : 基本図形記号) と、その操作を表す演算子 (Design Operator) から構成される^{文献3)}と設定する。設定された図形の体系に、対話型進化計算 (Interactive Evolutionary Computation: 以下 I E C) を用い、モデルによる形態創発の可能性を示すことが本章の目的である。I E C では、デザイナーの評価を反映した形態構成規則が明示的に記述され、進化する。本章では、人工知能指向言語を用いた述語論理の概念により、形態表現と木構造言語表現の翻訳可能な枠組みを定義した。

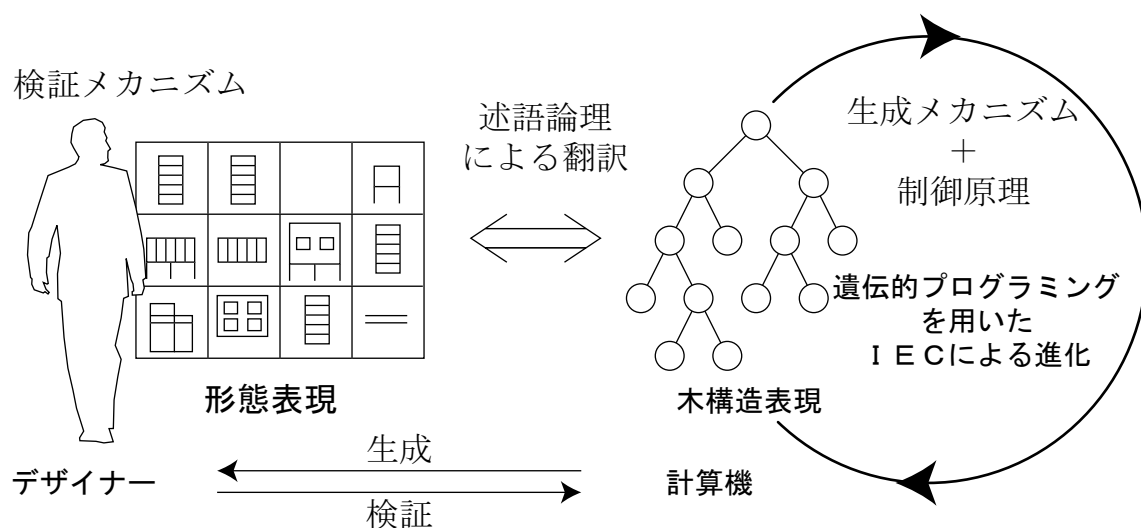


図1 デザイナーと計算機の対話による形態表現と言語表現の進化

設計の初期段階では、三次元の建築形態を直接考察し、操作する場合や、より単純で操作対象の俯瞰が容易な平面上の抽象的な図形の操作により、建築形態のスタディを行う場合がある。本章では後者の場合において、制約条件が比較的少なく、デザイナー固有の評価が大きく影響する建物立面の窓配置パターンの平面上のスタディを想定した試行を行う。

3.1.2 研究の概要

本論では形態獲得過程の体系は「プリミティブ」と「演算子」から成り、それらは人工知能指向言語であるLISP^{文献4)}のS式表現^{注1)}、すなわち木構造で表される。表裏一体の関係にある形態表現とS式表現としてモデル化された図形の体系に、IECを適用する。IECでは遺伝的プログラミング (Genetic Programming:以下GP)^{文献5)}を用いる。デザイナーは計算機により生成された図形の評価を行い、計算機は交叉(Crossover)、突然変異(Mutation)、転置(Inversion)、複製(reproduction)のGPオペレータを適用して逐次世代を生成する。これによりデザイナーと計算機の間で双方向に図形を評価・生成し、デザイナーの評価を反映した形態表現とS式表現の進化を行う。得られた図形と木構造の進化の過程の分析により、形態に用いられた規則の獲得を検証しモデルの可能性を示す。

3.1.3 既往の研究

建築設計における形態構成規則の知識を事例の分析、類型化により獲得しようとする研究は盛んになされてきた。Roger^{文献6)}は建築形態の図化された特性に注目し、形態に翻訳された概念的な操作を分類、分析した。Koning^{文献7)}はフランク・ロイド・ライトの草原住宅の構成原理を構成規則によって分析した。Stiny^{文献8)}はヴィラ・マルコテンタの平面形を分析し、その構成原理をパラメーターを持つ形態文法で記述している。

建築形態の原型的な概念を精密な事例の分析によって解明しようとする従来の研究に対し、形態表現を計算機に入力可能な言語表現に翻訳し、計算機による記号処理を用いた知識の構築や設計支援を提案する試みがある。Akin^{文献1)}は建物の一般的な特性の収集によって建物を同定する計算機を用いた推論システム(AIM)を提案した。青木^{文献9)}は建築形態記述の基本方程式により形態記述が可能であることを示し、建築形態情報を言語により計算機に入力する基本システムを提案した。渡辺^{文献10)}は建築設計を認知科学的視点から捉え、幾何的制約に関する決定において人間の思考に従う形式で表現しうるモデルを提案した。

建築形態の解の探索を創発という点から進化計算により獲得するものとして3DソリッドオブジェクトにGA(遺伝的アルゴリズム)を適用し、進化計算が最適化のみでなく創発にも有効であることを示したBentley^{文献11)}の研究やGP(遺伝的プログラミング)を用いて3次元形態の進化計算を行っているUna-may^{文献12)}の研究がある。

建築設計の概念や設計者の嗜好、認知プロセスの生成等を進化計算を用いて生成したものとして、環境との関係の下に行動、進化するエージェントが獲得するふるまいを分析し、

意図を伴う認知プロセスが生成されることを示した藤井^{文献13)}の研究や、数種類の規則の組み合わせからGAを用いて発生的に設計解を生成し、そこに規則性が生じることをもって設計の概念が構成されうることを示したGeroの研究^{文献14)}や、家具デザインにおけるユーザーの嗜好を定量化した瀧澤他の研究^{文献15)}がある。

設計支援の目的に対して計算機と設計者の対話関係の必要性から対話型最適化を行ったものとして宗本他の研究^{文献16)}がある。

以上のように、形態表現の記述が可能であることを示したり、予め高度に設定された形態構成の枠組みの中で計算機を用いた設計支援を行ったり、認知プロセスの生成を示したりする研究はなされているが、形態構成規則の知識を予め恣意的に設定することなく、形態表現とその言語表現による記述をデザイナーと計算機の双方向の対話を通じて進化させることによって、形態構成の知識を創発的に獲得するモデルを提示した研究はない。

3.2 デザイン体系の設定

デザイン体系(design world)の基本的な構造は、最初に用意された形のヴォキャブラリーと、それらに適用される演算子、およびその結果生じる代数の系によって与えられる^{文献3)}とされ、汎用CADの形態記述・処理システムにおいても同様の概念に基づいているものがある。例えばある3次元CADのモデリングでは、基本図形記号である球、立方体等のプリミティブを選択し、次に個々のプリミティブに移動、拡大縮小、回転等の操作を加える手法がとられている^{注1)}。

幾何学的変形は図2のように階層的に分類され、この中の各々の種類の変形は自身より下位にある変形を包含する。

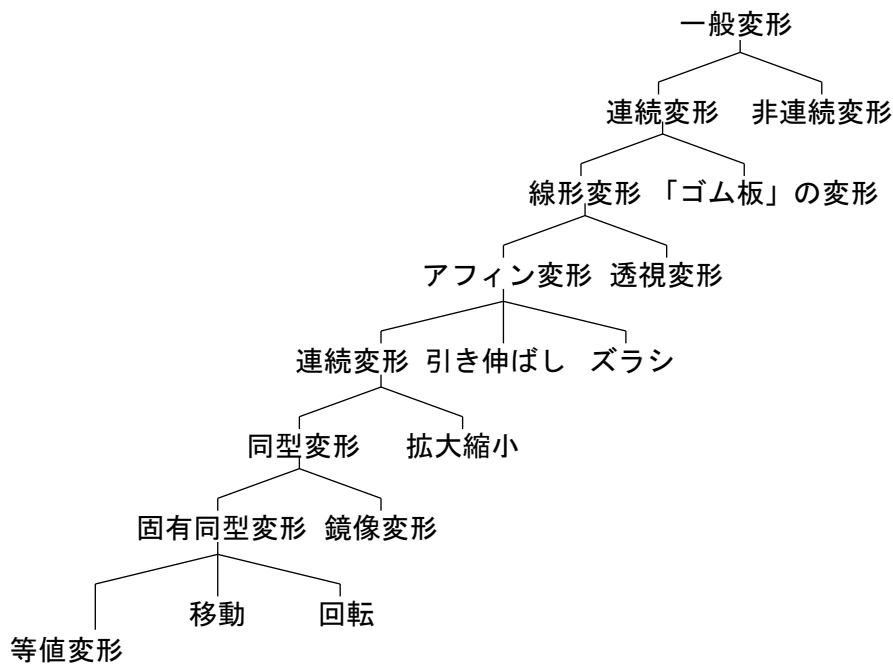


図2 デザイン演算 ウィリアム・ミッチェル著「建築の形態言語」より

本論では2次元座標系で表される図形を扱い、プリミティブとして、「線分(line)」と「矩形(rectangle)」を、演算子として、「アフィン変形より下位の「移動(translate)」「回転(rotate)」「拡大縮小(scale)―鏡像変形含む」を設定する(図3)。ここで設定された図形の体系は、プリミティブと演算子、すなわち図形記号とそれらの関係の組み合わせにより多様な2次元の図形表現が可能であり、モデルの十分な一般性を見込んだ^{注2参照}。

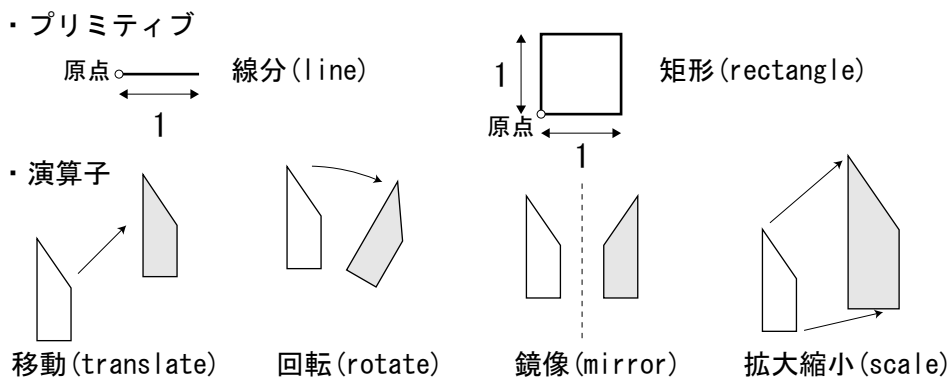


図3 設定したプリミティブと演算子

3.3 形態表現とS式表現の対応関係

3.3.1 S式表現の概要

S式表現はグラフ表現の木構造をLISPの記法で表したもので、本論ではこの言語表現を形態表現の翻訳として進化させる。木構造とS式と通常の式との関係は図のようになる^{文献5)}(図4)。ここでA、B、Cを「終端記号」、-、*を「関数記号」という。最も上位のノードである-は根という。Aの親は*で、*の子(引数)はA、B。*、A、Bで構成される部分を部分木、*はその部分木の根という。

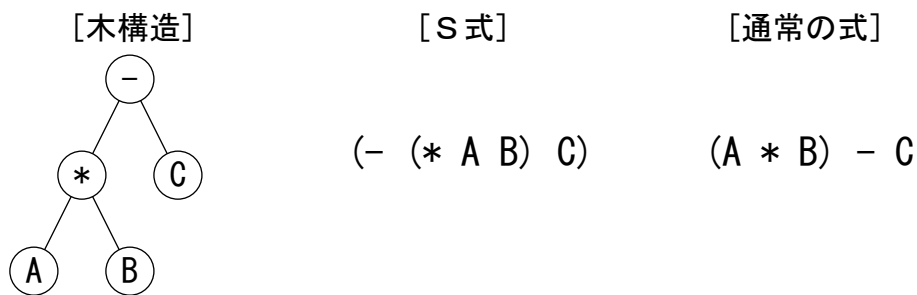


図4 木構造とS式と通常の式の関係

3.3.2 形態表現とS式表現の対応関係

形態表現を言語表現で表すために、デザイン体系は基本図形記号であるプリミティブと演算子から成るといふ仮定から、これらを述語論理の概念^{文献17)}を用い、人工知能指向言語であるS式表現で表す枠組みを定義する。

1) 演算子によるデザイン体系の状態の変化

デザイン体系において、ある演算子により、ある状態が次の状態に移行する場合、それらは下図のような関係にある^{文献3)}(図5)。

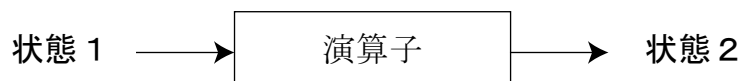


図5 演算子による図形の状態の変化

設定されたデザイン体系において、その初期状態であるプリミティブと演算子の組が定義されれば、初期状態に個々の演算子を繰り返し適用することで生成される図形の全ての選択枝が表現可能となる^{文献3)}。図6の樹状図の丸印は各段階での図形の状態、矢印は演算子による操作を表す。樹状図の全体は解空間全体に相当する。

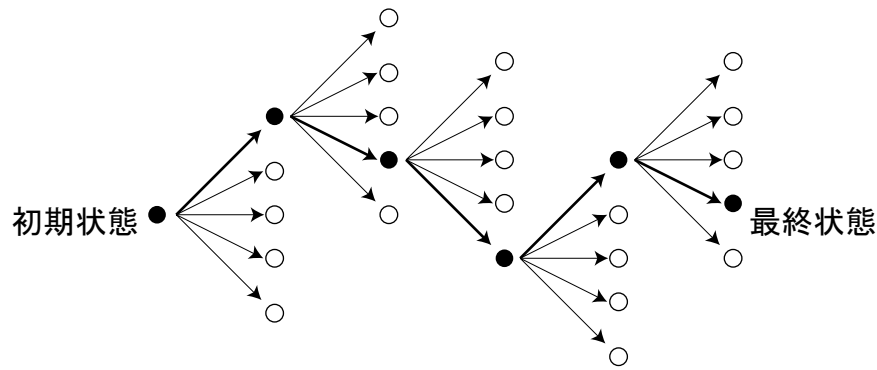


図6 デザイン体系の状態・操作の樹状図(state-action tree)の一部 ウィリアム・ミッチェル
著「建築の形態言語」より

2) プリミティブと演算子によるS式表現

6. で設定された「移動」「回転」「拡大縮小(鏡像変形含む)」という幾何学変形を表す演算子は、それらにより状態(x, y)が次の状態(X, Y)に移動するとき、a ~ eのパラメータを用いて3行3列の行列で表され、さらにそれらは図7のようにまとめられる。

移動	回転	拡大縮小
$\begin{bmatrix} 1 & 0 & a \\ 0 & 1 & b \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} \cos c & -\sin c & 0 \\ \sin c & \cos c & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} d & 0 & 0 \\ 0 & e & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$
(x方向にa y方向にb移動)	(c/2 πラジアン回転)	(x方向にd y方向にe倍)
$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} d \cdot \cos c & -\sin c & a \\ \sin c & e \cdot \cos c & b \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix}$		
移動	Translate X : a	Translate Y : b
回転	Rotate θ : c	
拡大縮小	Scale X : d	Scale Y : e

図7 設定された演算子の行列での表記

S式表現では、演算子、プリミティブという順序による前置記法で、式1のように定める。

(演算子[パラメータ] プリミティブ) . . . (式1)

例えば辺の長さ各1の矩形プリミティブが、①y方向に2倍、②x方向に3移動、③y方向に-2移動するとき(図8)式2のようになる。

$(b[-2] \quad (a[3] \quad (e[2] \quad \text{rectangle}))) \dots (式2)$

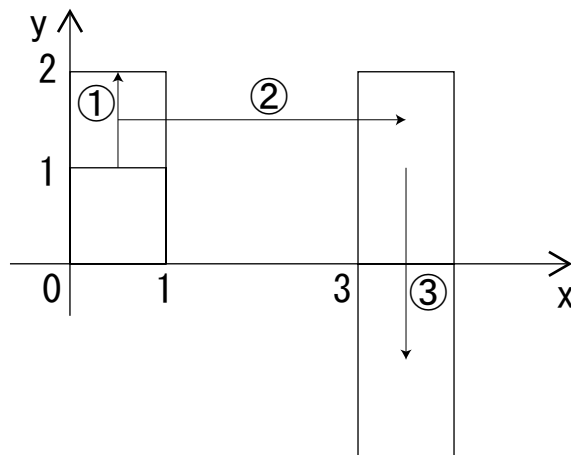


図8 図形の状態の変化

3.4 GPへのコード化

3.4.1 GPの概要

遺伝的アルゴリズムを構造的表現に拡張し、機械学習によりプログラムが進化するようにしたものを遺伝的プログラミング(GP)といい、「探索のための的確な部分構造の把握」、「問題の表現形式に基づいた効果的な探索の実現」、「より高次の知識の適応的な学習システムの構築」といった長所^{文献5)}が知られている(付章2.2参照)。

GPでは関数記号と終端記号から成る木構造を個体として扱い、「交配」、「突然変異」、「転置」、「複製」という遺伝的オペレータが用いられる(図9)。なお複製は親と同一の子を作成する。

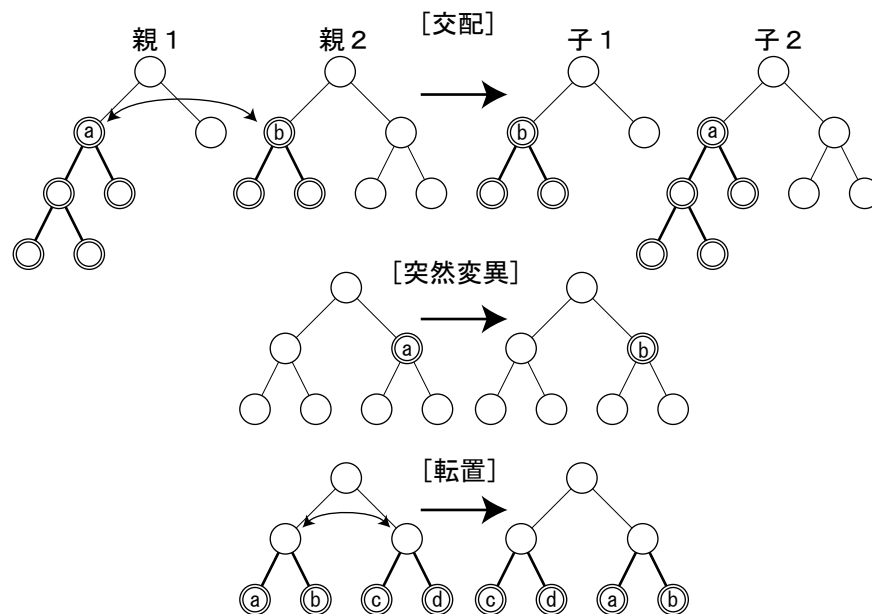


図9 遺伝的オペレータ

3.4.2 関数記号、終端記号の設定

既に定義されたS式表現において、プリミティブは終端記号に、演算子は関数記号に対応させる。演算子は図7における行列の要素を構成する変数 (a ~ e) に加えてプリミティブの表示・非表示を切り替えるスイッチの PRINT 関数を関数記号に設定する。さらに終端記号として定数乱数を扱い、関数記号として四則演算、IFLTE 関数を扱う (表1, 2)。これにより演算子を構成する変数を根とする部分木の値がパラメータとして用いられる。

表1 関数記号の設定

記号	引数の数	戻り値(引数 ①、②、③、④)
+	2	① + ②。
-	2	① - ②。
*	2	① * ②。
%	2	②が0でない場合 : ① / ②。0の場合 : 1。
A	1	①。
B	1	①。
C	1	①。
D	1	①。
E	1	①。
PRINT	1	①。
IFLTE	4	① < ② の場合 : ③。そうでない場合 : ④。

表2 終端記号の設定

記号	意味
line	単位長さの線分。0を返す。
rectangle	単位長さの辺を持つ矩形。0を返す。
1, -2.8等	-5以上5以下の浮動小数点型定数乱数。

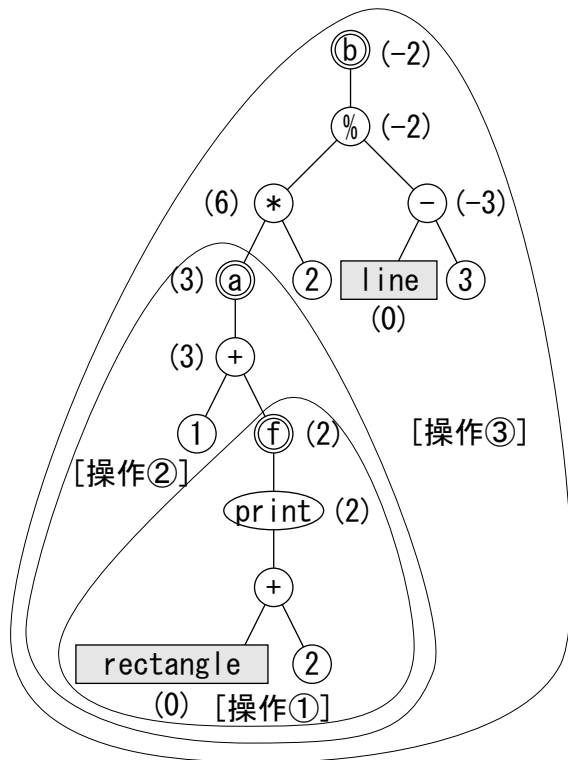
3.4.3 木構造の形態表現への翻訳

木構造では、終端記号から根に向かって数値が渡されながら計算され、a～eの関数記号のパラメータとなり、それらを根とする部分木が図形での1つの操作を表す(表3)。各プリミティブから部分木の根の間のPRINT関数は表示・非表示の切り替えを行う。すなわち各プリミティブから部分木の根の間のPRINT関数が奇数個の場合にそのプリミティブは表示され、偶数個の場合は表示されない。

表3 木構造の形態表現への翻訳におけるa～e、print関数の意味

関数	意味
A	x方向にA移動。(Translate X)
B	y方向にB移動。(Translate Y)
C	cラジアン回転。(Rotate θ)
D	x方向に比率Aで拡大縮小。(Scale X)
E	y方向に比率Bで拡大縮小。(Scale Y)
PRINT	プリミティブの表示・非表示のスイッチ。

図10に木構造の形態表現への翻訳の一例を示す。ここでは一つのrectangleプリミティブに3つの演算子が適用されている。このように木構造の上位の演算子は下位の演算子を包含して適用され、プリミティブに連続的に操作がなされる。なおlineプリミティブと根の間にはPRINT関数がないため、この場合非表示となる。



[操作①]
(f[2] rectangle)

[操作②]
(a[3] (f[2] rectangle))

[操作③]
(b[-2] (a[3] (f[2] rectangle)))
(b[-2] line)
(注) line は非表示。

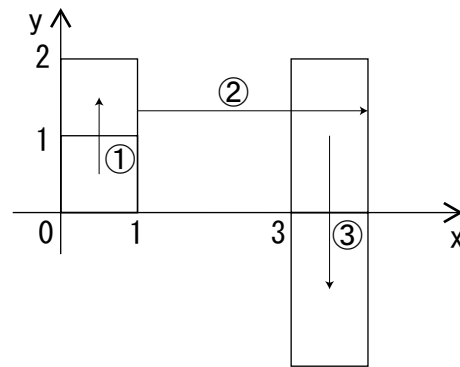


図10 木構造の形態表現への翻訳の一例

3.5 IECの試行

3.5.1 試行の概要

はじめに初期個体がそれぞれ画面に表示される。デザイナーは評価に基づいた得点付けを行い、計算機に入力する。その得点を反映して次世代が生成され、画面に表示される(図11)。望ましい個体が得られたところで試行を終了する。GPのパラメータは次のように設定した^{注3)}。

集団数 = 12

初期に生成される木の最大深さ = 6

交叉で生成される木の最大深さ = 17

突然変異で生成される木の最大深さ = 4

木の生成規則 = ランダム、最大深度まで生成

選択方式 = ルーレット方式

関数ノードでの交叉の確率 = 5%

関数および終端ノードでの交叉の確率 = 75%

複製の確率 = 5%

突然変異の確率 = 15%

小さい木を優先するための適合度の変換係数 = 5%

個体 1	個体 2	個体 3	個体 4
個体 5	個体 6	個体 7	個体 8
個体 9	個体 10	個体 11	個体 12

図 11 計算機の画面表示

3.5.2 試行と考察

1) 初期個体をランダムに発生させる場合 (試行 1)

I E C の試行の際、初期個体として予めデザイナーにより作成された図形を用いることも可能であるが、ここでは形態構成規則を与えない状態、すなわち低次元の知識から何らかの設計行為が関与したと考えられるより高次元の知識を含んだ図形を獲得することを目標とするため、初期個体として事前に設定したものをを用いず、G P オペレータによるランダムな生成によって得られた初期個体を用いる。

ここでは個体の評価において、表示図形のない空白の個体は 50、意味のない図形の個体は 30、体を成しているが好ましくない個体は 20、好ましい個体は 10、特別好ましい個体は 5 という原則に基づいて、世代内の相対評価で得点を与えた。なお評価が高いほど得点の数値は小さくなる。

-	目	□	□
	-	□	-

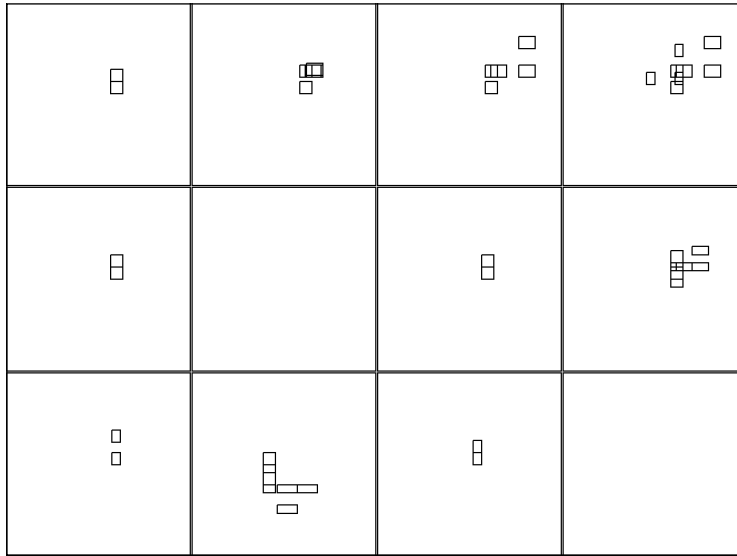
	20	5	20	20
[評価値]	50	30	30	30
	50	50	50	50

図12 初期（第0）世代の代替案（上）と与えられた評価値（下）

目		-	□ □ □ □
	目	□ □	□ □
□	□	目	目

	20	50	30	10
[評価値]	50	10	50	50
	20	10	50	20

図13 第4世代の代替案と与えられた評価値



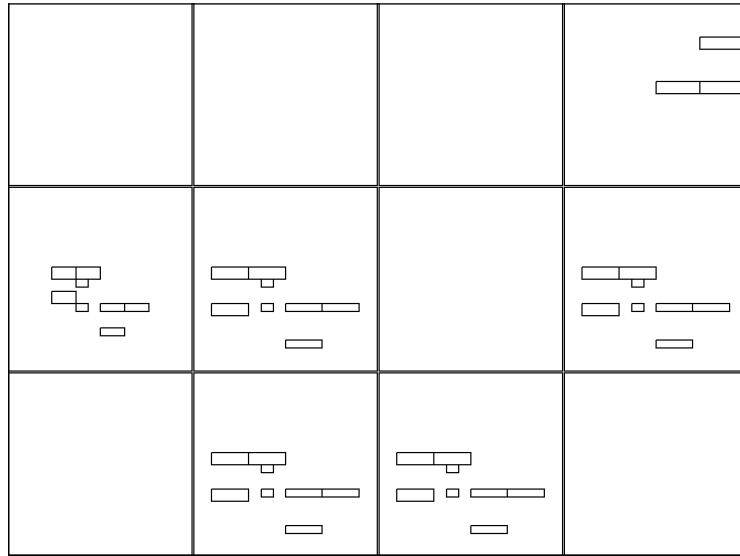
	30	20	10	30
[評価値]	20	50	20	20
	30	20	20	50

図14 第8世代の代替案と与えられた評価値



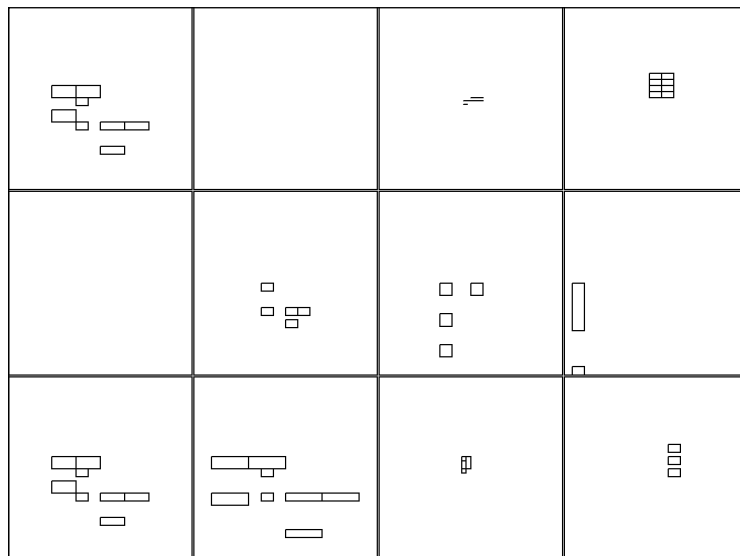
	10	50	50	20
[評価値]	20	50	50	30
	20	50	30	30

図15 第19世代の代替案と与えられた評価値



	50	50	50	20
[評価値]	10	10	50	10
	50	10	10	50

図16 第58世代の代替案と与えられた評価値



	20	50	30	10
[評価値]	50	30	20	30
	20	20	20	20

図17 第71世代の代替案と与えられた評価値

		-	
		=	
		□ □ □	

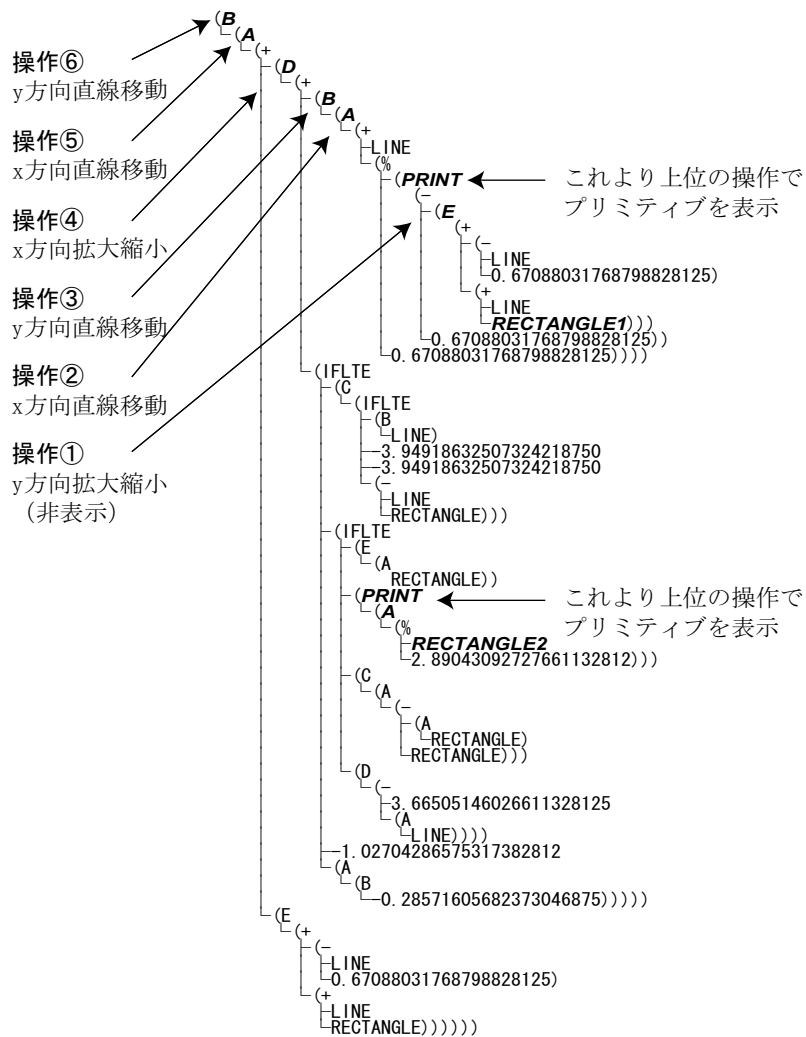
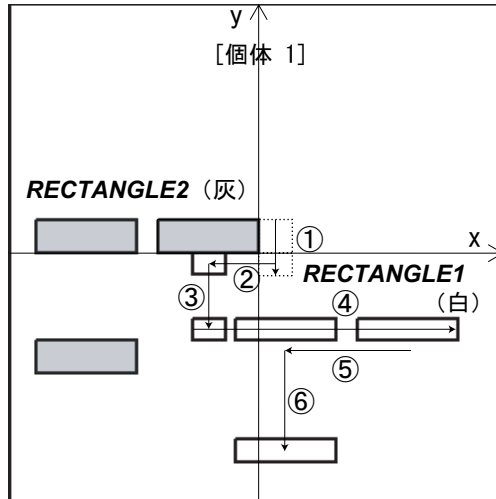
	20	20	30	50
[評価値]	20	20	30	10
	30	20	20	20

図18 第73世代の代替案と与えられた評価値

図19 試行を終了した（第79）世代の代替案

第0世代から第79世代まで試行を行い、その間に得られた個体群を各特徴的な世代ごとに示した(図12-19, 全世代は付録参照)。初期個体では、各個体は単純なプリミティブのみか、表示される形態がない状態であったが、試行を進めるにつれ次第に複雑さを増し、あるパターンとそれから派生する類似の形態構成が見られるようになった。世代が小さい初期の間は、全く無秩序な形態構成を呈する個体や、形態が表示されない個体が多く現れたが、世代を経るにしたがい一定の規則性を示すものが多くなり、デザイナーの評価が低い無秩序な個体や空白を示す個体は減少した。同時に、前世代で評価の高かった優秀な個体が、次世代において前世代の優秀な個体の形態構成に類似しつつも部分の形態構成の異なる個体へと世代交代し、評価がより高くなる過程が認められた。同様にデザイナーの評価の高い個体が複数共存する状態になり形態構成のパターンが分岐したり、それらがある規則で組み合わせられたりする過程があった(図17, 18参照)。

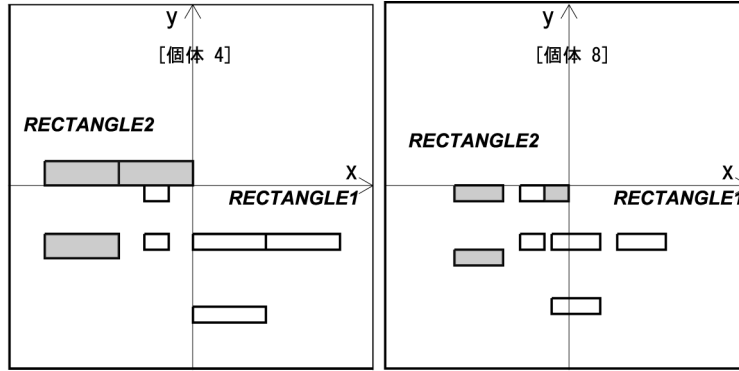
第79世代のうち評価の高かった3個体についてそれぞれ形態表現とS式表現、さらに図面に表示されているプリミティブ、`rectangle1`と`rectangle2`の操作に直接関わる部分をまとめてS式で表現したものを示した(図20, 21)。



```
rectangle1
(b[-3.69] (a[-3.69] (d[-3.02] (b[-2.0] (a[-2.0] (print (e[-0.67] rectangle1))))))))
```

```
rectangle2
(b[-3.69] (a[-3.69] (d[-3.02] (print (a[0.0] rectangle2))))))
```

図 20 第 79 世代の評価の高かった個体 1



standardized = 23.299999,
adjusted = 0.041152, norm = 0.096973

standardized = 24.750000,
adjusted = 0.038835, norm = 0.091513

```
(B (A (+ (D (+ (B (A (+ (LINE (% (PRINT (- (E (+ (- (LINE (0.67088031768798828125) (+ (LINE (RECTANGLE1)))) (0.67088031768798828125)) (0.67088031768798828125)))) (IFLTE (C (IFLTE (B (LINE) -3.94918632507324218750 -3.94918632507324218750 (- (LINE (RECTANGLE))) (IFLTE (E (A (RECTANGLE)) (PRINT (A (% (RECTANGLE2 2.89043092727661132812))) (C (A (- (A (RECTANGLE) (RECTANGLE))) (D (- (3.66505146026611328125 (A (LINE)))) (-1.02704286575317382812 (A (B (LINE)))))) (E (+ (- (LINE (+ (LINE (RECTANGLE))) (+ (LINE (RECTANGLE))))))))) (IFLTE (C (IFLTE (B (LINE) 1.12421274185180664062 -3.94918632507324218750 (A (RECTANGLE))) (A (RECTANGLE)))) (-1.02704286575317382812 (A (B (LINE)))))) (E (+ (- (LINE (0.67088031768798828125) (+ (LINE (RECTANGLE2)))) (0.67088031768798828125)) (C (A (- (LINE (RECTANGLE))) (E (+ (C (IFLTE (B (LINE) 1.12421274185180664062 -3.94918632507324218750 (A (RECTANGLE))) (A (RECTANGLE)))) (-1.02704286575317382812 (A (B (LINE)))))) (E (+ (- (LINE (0.67088031768798828125) (+ (LINE (RECTANGLE2)))) (E (+ (* (RECTANGLE (LINE) (E (C (LINE))))))))))
```

```

個体4
rectangle1
(b[-3.02] (a[-3.02] (d[-3.02] (b[-2.0] (a[-2.0] (print (e[-0.67] rectangle1)))))))
rectangle2
(b[-3.02] (a[-3.02] (d[-3.02] (print (a[0.0] rectangle2))))))

個体8
rectangle1
(b[-2.67] (a[-2.67] (d[-2.0] (b[-2.0] (a[-2.0] (print (e[-0.67] rectangle1)))))))
rectangle2
(b[-2.67] (a[-2.67] (d[-2.0] (print (e[-0.67] rectangle2))))))

```

図 21 第 79 世代の評価の高かった個体 2、個体 3

3 個体の間には類似点と相違点の両者が認められる。

a) 類似点

・ 3 つの扁平な矩形で構成されるパターンが左上（以下パターン 1）と右下（以下パターン 2）に存在し、両者を連携するように同形の小さい矩形が上下（以下パターン 3）に存在している。左上と右下のパターンを連携するように、同形の 2 つの矩形が上下に存在している（図 22）。

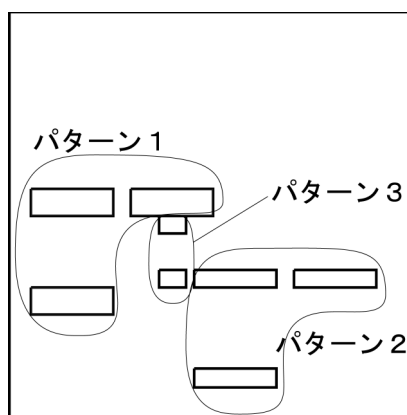


図 22 部分のパターン

b) 相違点

- ・ パターン 1 の上の y 座標の等しい 2 つの矩形は、個体 1、個体 8 では一定の間隔を開けているが、個体 4 では接している。
- ・ 矩形の高さは、個体 8 では 0.67 と一定であるが、個体 1、個体 4 ではパターン 1 は高さ 1、パターン 2 とパターン 3 は高さ 0.67 となっており、異なる。
- ・ パターン 3 の上の矩形は、個体 1、個体 4 ではパターン 1 の下に接しているが、個体 8 では、パターン 1 の矩形に内接している。

一方、S 式表現について 3 個体いずれにも共通する部分として $(b(a(d(b(a(\text{print}))))))$ があり、さらにこれら 3 個体以外にもこの部分を有するものが多く、各世代において支配的であった。前述のように、試行が進み世代を経るに従い図形に見られた一定の規則性はこの共通部分によって形成されており、図形の変換のパラメータの値や細部の部分木が交叉、突然変異等の G P オペレータによって変化しつつも、デザイナーの評価が常に高い部分が逐次的に継承され、形成されていったと考えられる。この規

則性はリズム、比例、対称性といった形態的特性によって説明されると言える^{文献3)}。これらの基本的な形態構成規則は、デザイナーの評価を反映しつつ、I E Cの試行を通して明示的に獲得された。

なお、3個体のS式に同様に共通するIFLTE以下の部分木では、IFLTE関数の、第1引数と第2引数を比較して第1引数が小さければ第3引数を、そうでなければ第4引数を親に戻すという特性から、木の末端付近の数値情報が変化することによって、木の上部に渡される数値が変化し、それが形態表現の部分的な相違点をもたらしていることが分かる。前世代において評価の高かった優秀な個体が、次世代において前世代の評価の高い構造を維持しつつ、部分の異なる代替案を生じさせ、それがデザイナーの試行により近い個体となる過程は、このように木構造で表された知識としての形態構成規則が適当に進化していったためと考えられる。

2) デザイナーにより初期個体を与える場合（試行2）

予めデザイナーにより作成された図形をS式表現に翻訳し、これを初期個体として設定することにより試行を開始する。

ここではデザイナーは図左上に示される、同じ大きさの正方形が直行グリッド上に等間隔で配置される図形を描き、試行においては左右対称の図形を創発的に獲得して行くことを目的とした。特に定まった目標図形はなく、対称という概念に沿った図形をデザイナーが評価した。

第40世代まで試行を進め、その間に得られた左右対称かつ特徴的な個体を以下に示す(図23)。

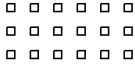
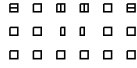

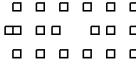
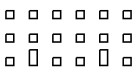

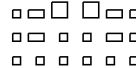
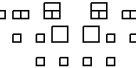




 (第0世代) 設計者が与えた初期個体	 (第5世代)	 (第13世代)	 (第23世代)
 (第24世代)	 (第26世代)	 (第28世代)	 (第34世代)
 (第36世代)	 (第38世代)	 (第40世代)	 (第42世代)

図23 設定された初期個体（左上）と試行により得られた個体（左上以外）

図のように左右対称というデザイナーの想定した図形の概念に則った図形が、初期個体との類似点と相違点を様々に変化させながら得られていった。ここでも、世代を経るに従いデザイナーの評価の高い個体、ここでは左右対称性を満たす図形が頻出するようになり、左右対称でない図形の生成される割合は減少した。木構造の分析により、 $(d[-1.0])$ というX軸に関する鏡像変形を表す部分を有する個体が増加し、世代交代によっても失われずに次世代に継承されていた。その他の部分では交叉、突然変異を経て多様な木構造を形成していた。

3.6 まとめ

建築設計を問題解決行為と捉え、平面上の形態獲得過程を解答案との対話を通して進めるモデル化を行った。人工知能指向言語を用いたIECの試行を通して図形のデザイナーの評価を反映した形態構成規則を獲得した。IECでは初期個体を恣意的に与えない場合とデザイナーにより設定した場合を試行した。前者では初めは無秩序を呈していた個体群も対話による世代交代を経るに従いある一定の規則性を示すようになり、それらの木構造には共通した部分構造が形成されていた。後者では左右対称等のデザイナーの概念が保たれつつ、デザイナーの評価に基づき多様な解答案が生成されて行く過程が認められた。

進化計算による発生的な試行を行う場合は一般に、前提的な一定の制約条件、評価関数等が用いられる。本論ではデザイナーの評価に基づいて、対称、リズム、比例等の一定の規則が木構造における支配的な部分構造として制約的に形成され、その枠組みの中で多様な解答案の探索がなされる過程が示された。提示した対話的なモデルを用いることにより、デザイナーの評価の高い構造を明示的な形態構成規則として記述し、平面上の形態獲得過程における形態創発が可能となることが示された。

注釈

注1) Symbolic Expression (L I S Pの記法、本論7.-(1)参照)。

注2) Alias Wavefront MAYA(R) プリミティブ ポリゴンキューブのプロパティ

pCube1			
TranslateX	<input type="text" value="0"/>	TranslateY <input type="text" value="0"/>	TranslateZ <input type="text" value="0"/>
RotateX	<input type="text" value="0"/>	RotateY <input type="text" value="0"/>	RotateZ <input type="text" value="0"/>
ScaleX	<input type="text" value="1"/>	ScaleY <input type="text" value="1"/>	ScaleZ <input type="text" value="1"/>
Visibility	<input type="text" value="on"/>		

注3) Walter Alden Tackett, Aviram Carmiのsgpc(Simple Genetic Programming in C)を元に実装した。

参考文献

- 1) Akin O. : Psychology of Architectural Design, Pion, 1986.
- 2) Schon D. A. : The Reflective Practitioner, How Professionals Think In Action, Basic Books, 1982.
- 3) ウィリアム・ミッチェル著、長倉威彦訳:「建築の形態言語」、鹿島出版会、1991.
- 4) Gerald Jay Sussman 他著、和田英一訳、「計算機プログラムの構造と解釈」、ピアソン、2000.
- 5) Wolfgang Banzhaf, Peter Nordi, Robert E. Keller, Frank D. Francone 著、新田徹、伊庭斉志訳、「遺伝的プログラミング」、科学技術出版、2000.
- 6) Roger H. Clark and Michael Pause: Precedents in Architecture, Van Nostrand Reinhold, 1985.
- 7) Koning H, Eizenberg J : The language of the prairie ” Frank Lloyd Wright’s

- prairie houses” Planning and Design, 8 295-323, 1981
- 8)Stiny, George, and James Gips: Shape Grammars and the Generative Specification of Painting and Sculpture, Information Processing 71, C.V.Freiman, 1972
- 9) 青木義次:「建築形態言語の基本システム—建築CADのための基礎的研究 その4」、日本建築学会計画系論文集、第418号、pp41-50、1990.12
- 10) 渡辺俊:「建築設計プロセスにおける幾何的知識の表現に関する研究」、日本建築学会計画系論文集、第496号、pp263-268、1997.6
- 11)Peter J.Bentley: The Evolution of Solid Object Designs using Genetic Algorithms, Modern Heuristic Search Methods, chap12, 1996
- 12)Una-May O'Reilly, Girich Ramachandran: A Preliminary Investigation of Evolution as a Form Design Strategy, Artificial Life IV, 1998
- 13) 藤井晴行、谷本潤:「意図的とみなせる行動の発生に関する思考実験」、日本建築学会計画系論文集、第547号、pp149-155、2001.9
- 14) John S.Gero, Concept Formation in Design, Knowledge-Based Systems, 10(7-8), 429-435, 1998
- 15) 瀧澤重志、河村廣、谷明勲:「対話型進化計算法による家具デザイン—遺伝的プログラミングによるユーザーの嗜好の定量化と予測」、日本建築学会情報システム技術委員会 第23回情報システム利用シンポジウム、pp175-180、2000.12
- 16) 宗本晋作、加藤直樹、今村元一:「直行グラフ描画法を用いた室配置手法—タブー探索法を用いた対話型多目的最適化」、日本建築学会計画系論文集、第529号、pp279-286、2000.3
- 17) 有川節夫他、「述語論理と論理プログラミング」、オーム社、1988

付録 試行1の各世代の代替案の推移

-	目	口	口
	-	口	-

世代1

	目		-
口			
目		目	目

世代2

目		-	口口
	目	口	口
口	口	目	目

世代3

口口	目	口口	目
口	口	口口	目
目	目		口

世代4

口	目	-	
口	目	口	目
	口	目	目

世代5

目		口口	
口	目	口	口
口	目	目	

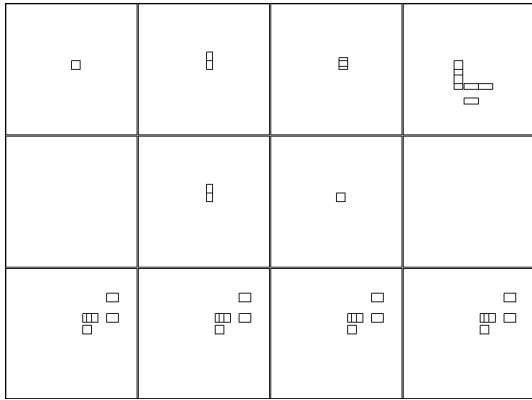
世代6

目	目	口	口
目		目	口
口	目	目	

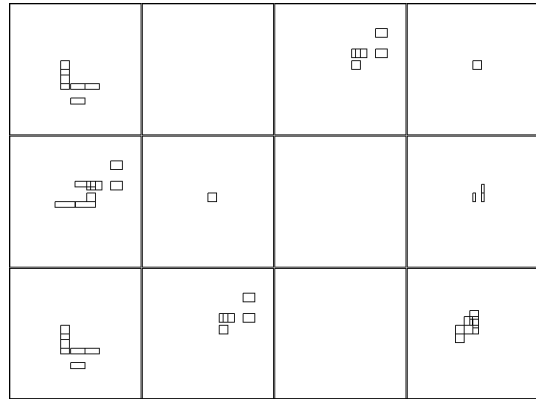
世代7

	口	目	目
口	口	目	
目	目	口	目

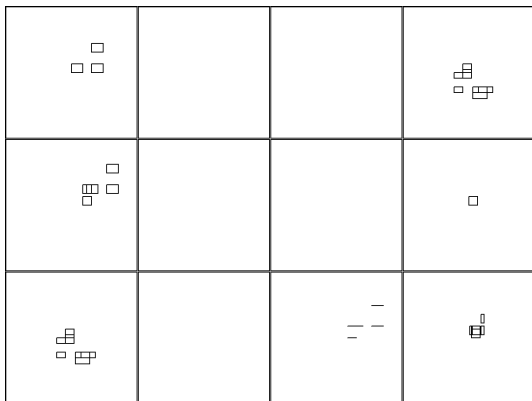
世代8



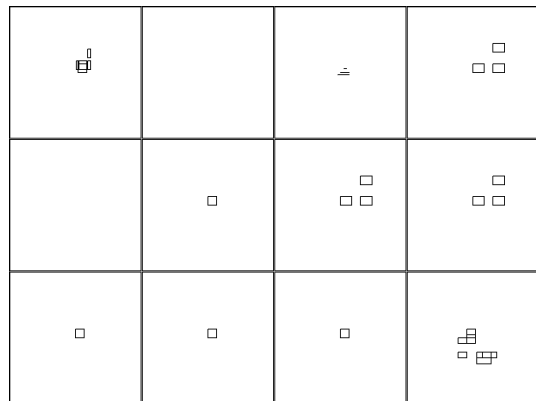
世代 9



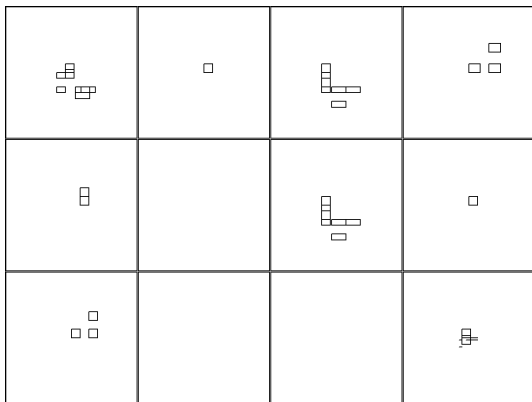
世代 10



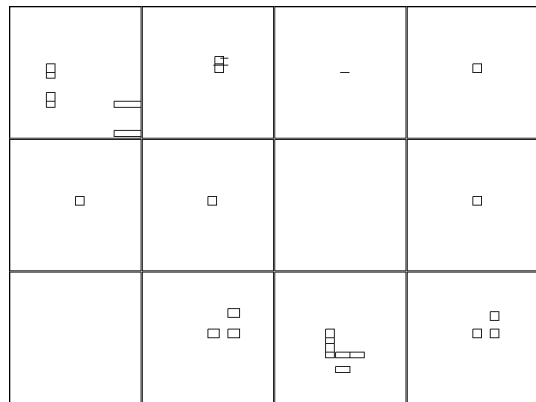
世代 11



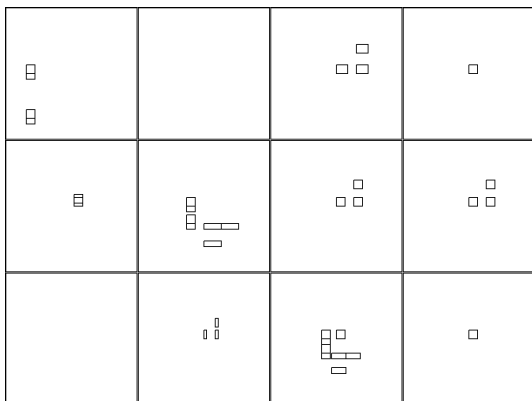
世代 12



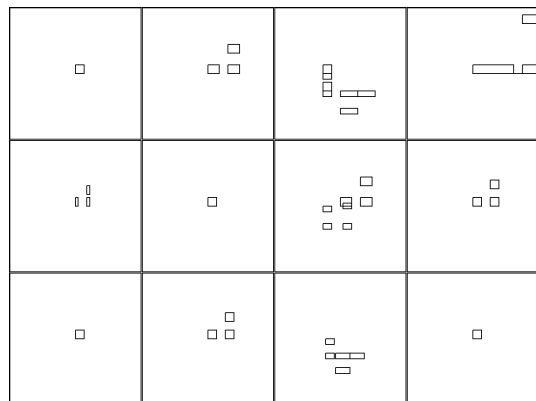
世代 13



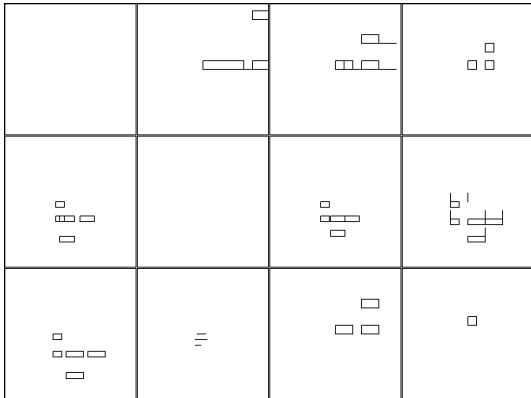
世代 14



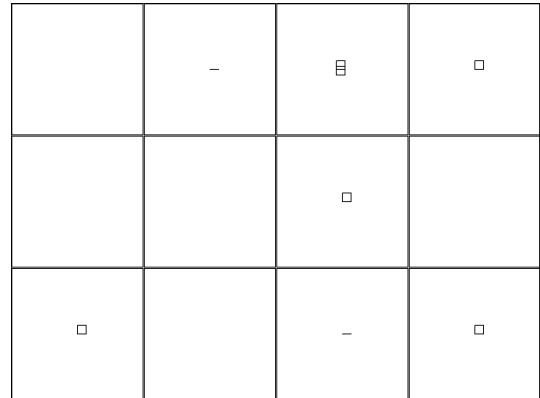
世代 15



世代 16



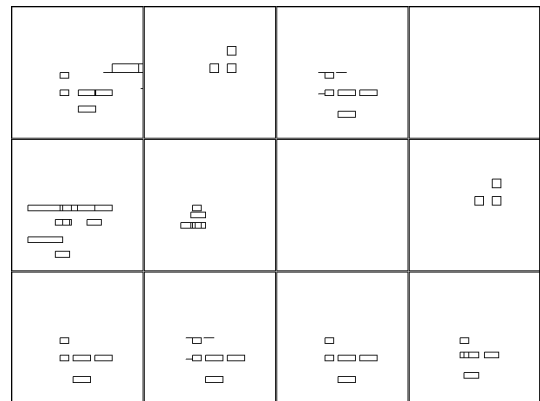
世代 17



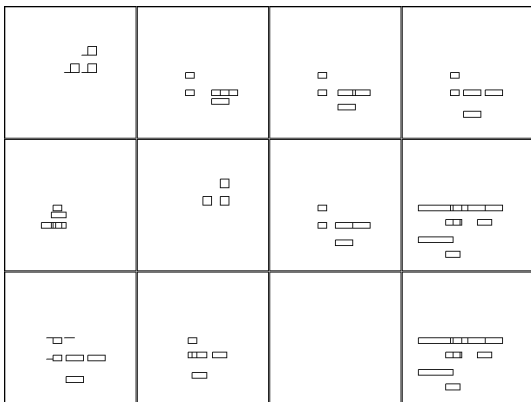
世代 18



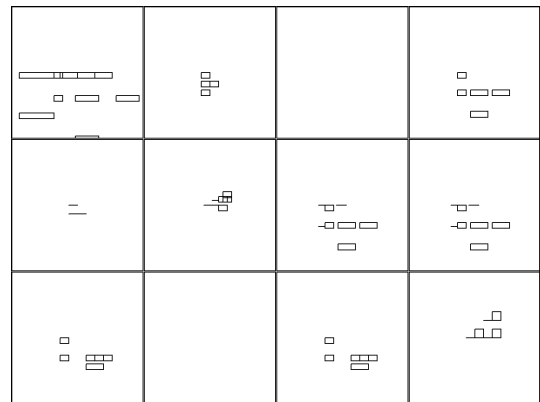
世代 19



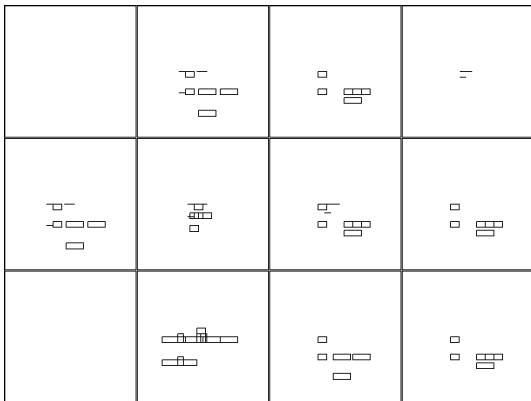
世代 20



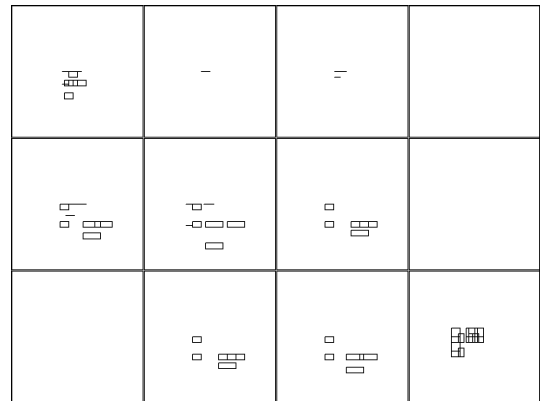
世代 21



世代 22



世代 23



世代 24

世代 25

			—

世代 26

—	—	—	
—			

世代 27

			—
			—

世代 28

世代 29

—		—	

世代 30

		—	

世代 31

	—		
			—

世代 32

世代 33

世代 34

世代 35

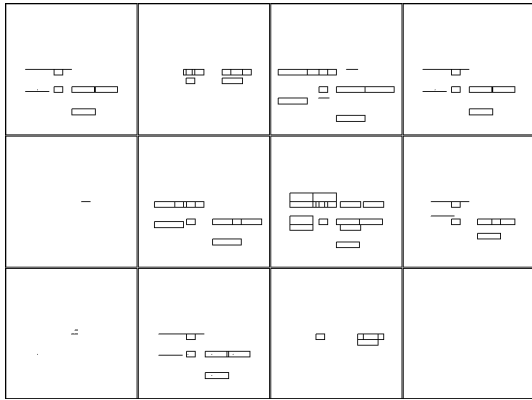
世代 36

世代 37

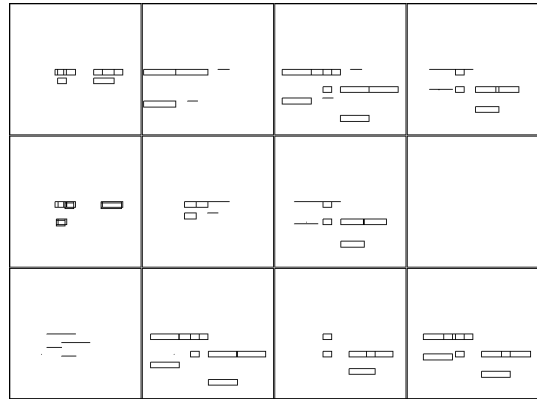
世代 38

世代 39

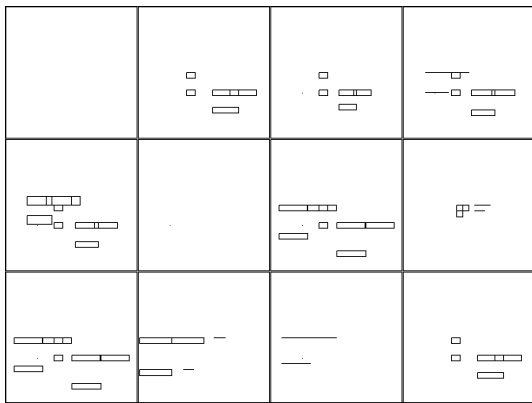
世代 40



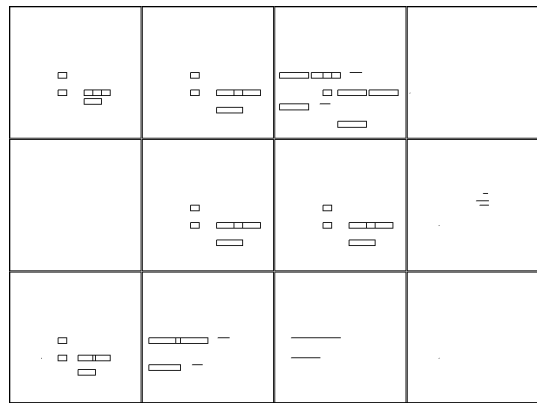
世代 41



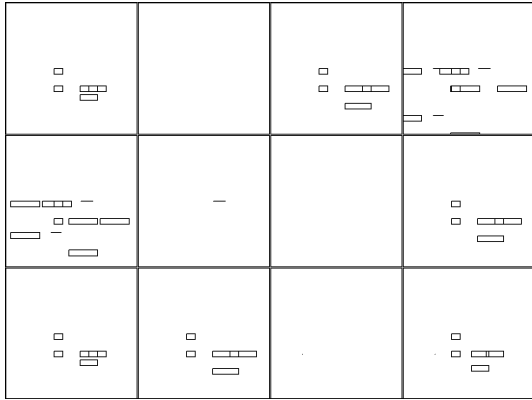
世代 42



世代 43



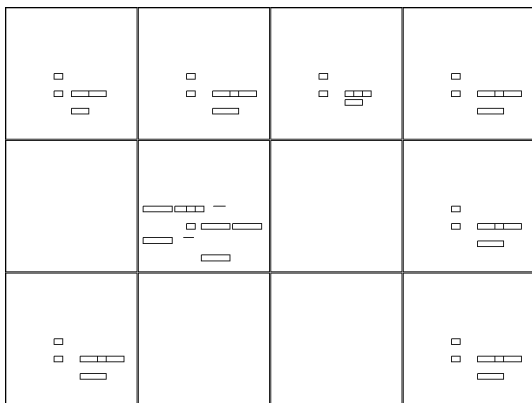
世代 44



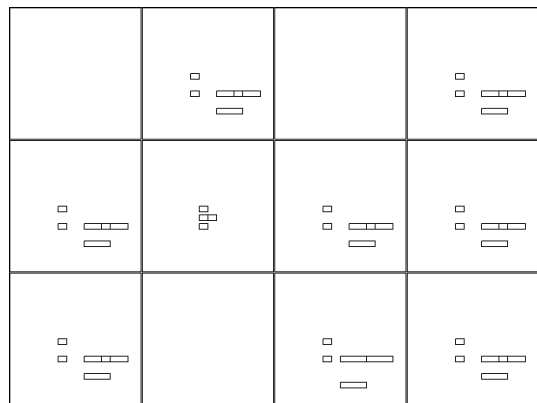
世代 45



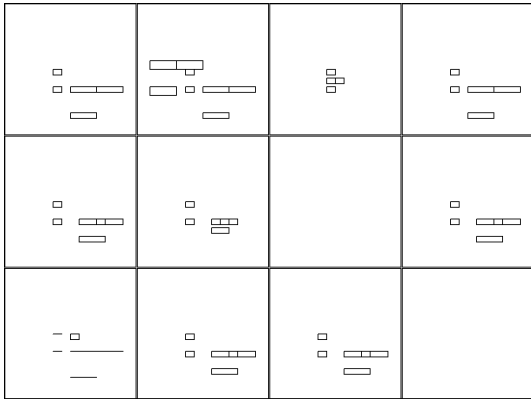
世代 46



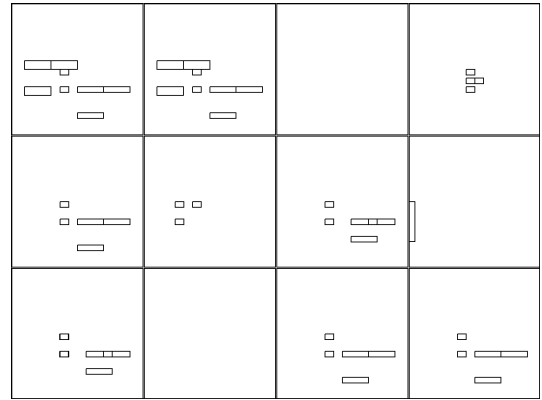
世代 47



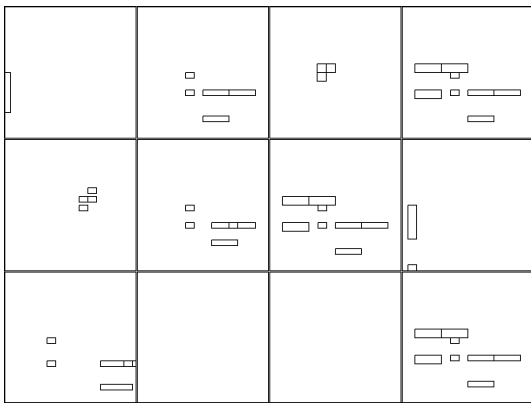
世代 48



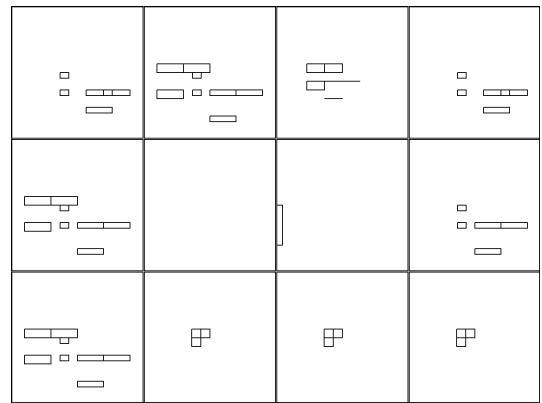
世代 49



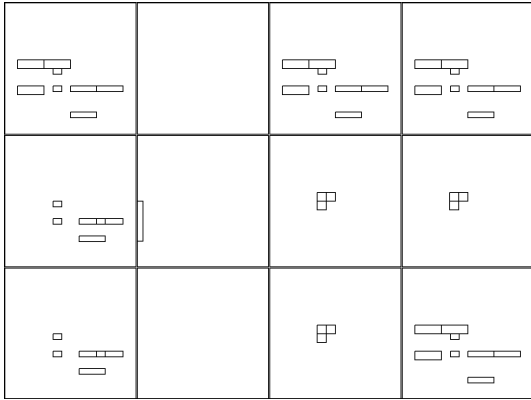
世代 50



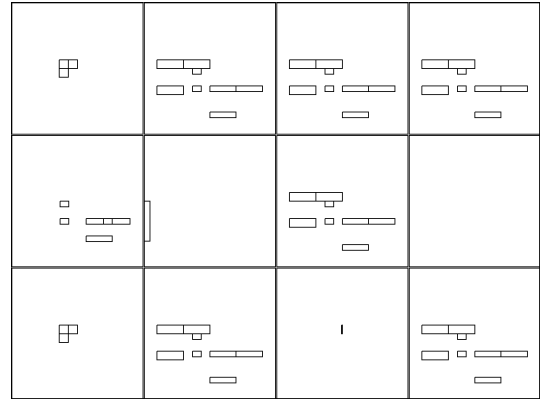
世代 51



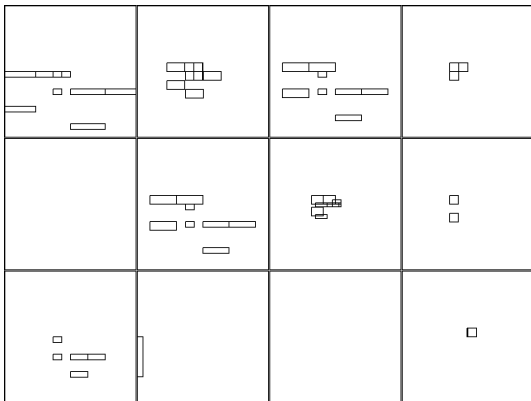
世代 52



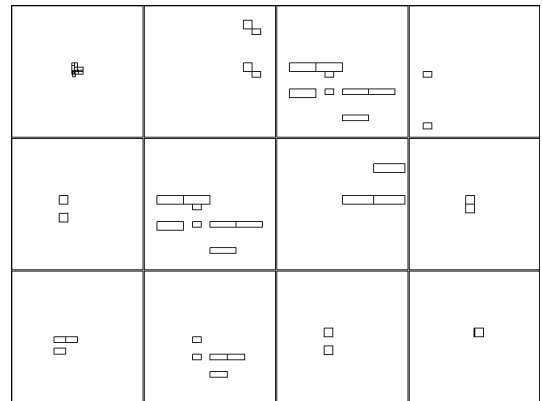
世代 53



世代 54



世代 55



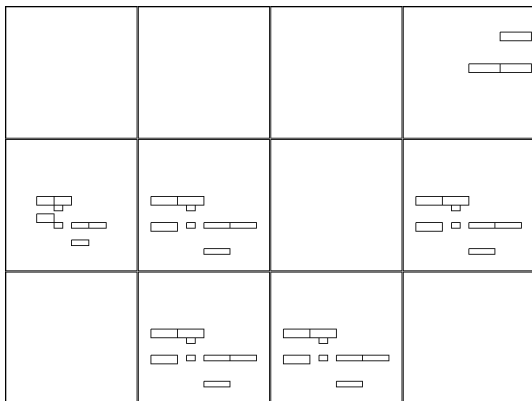
世代 56



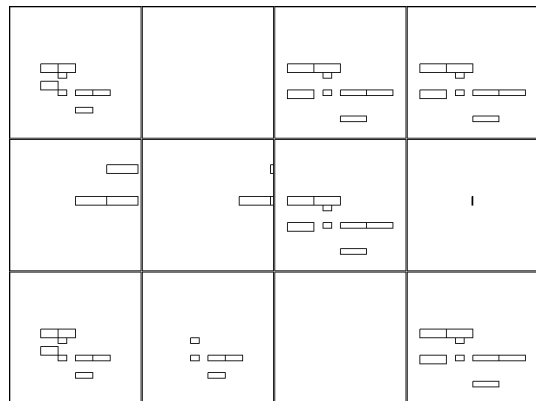
世代 57



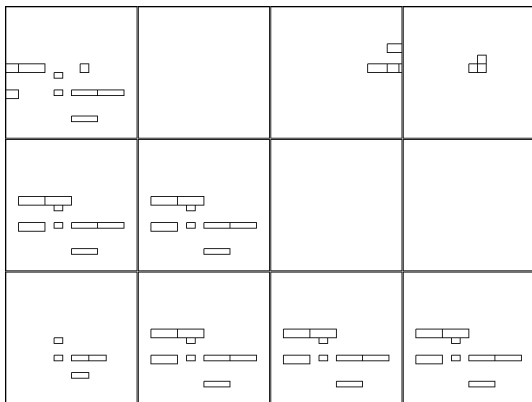
世代 58



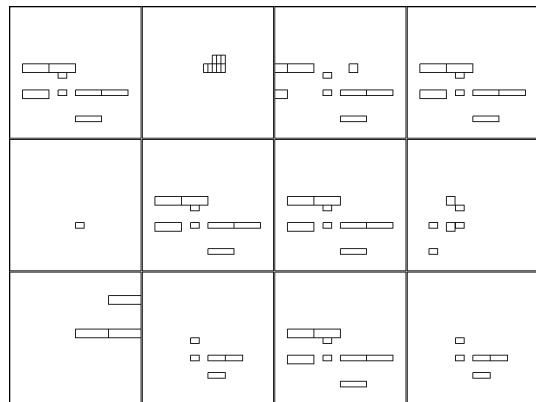
世代 59



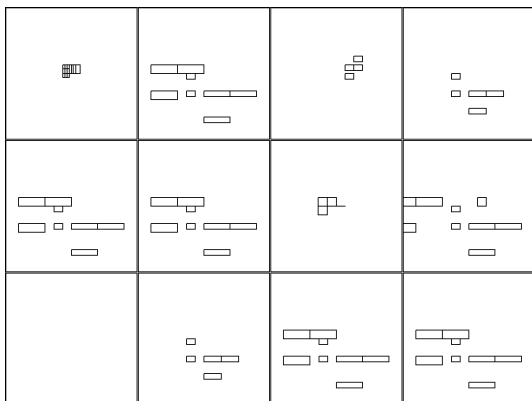
世代 60



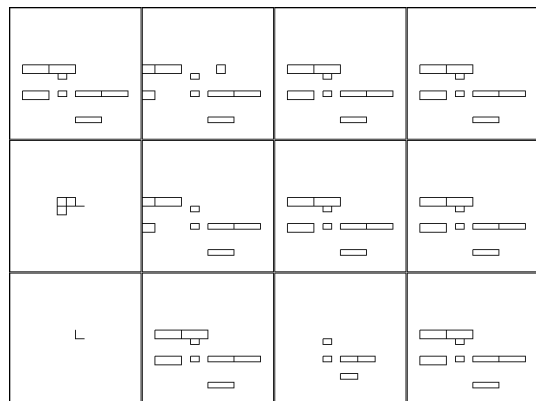
世代 61



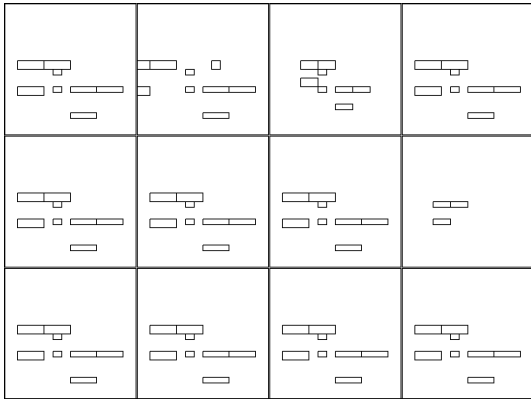
世代 62



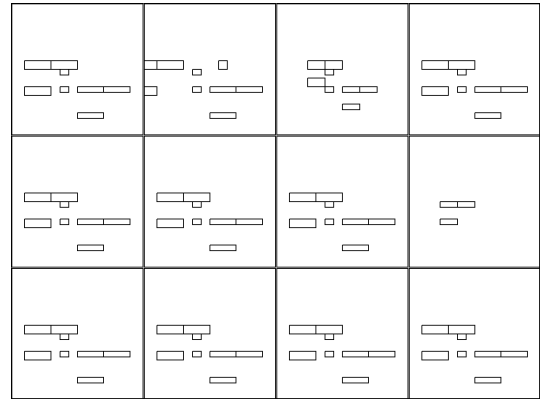
世代 63



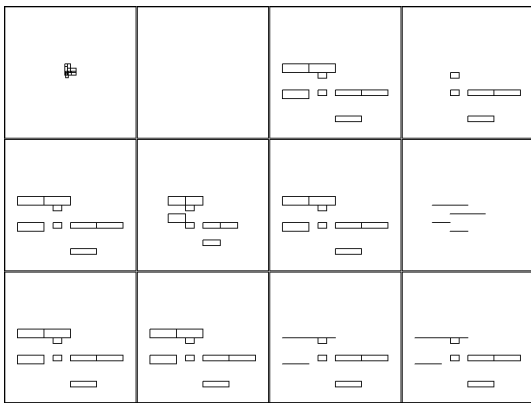
世代 64



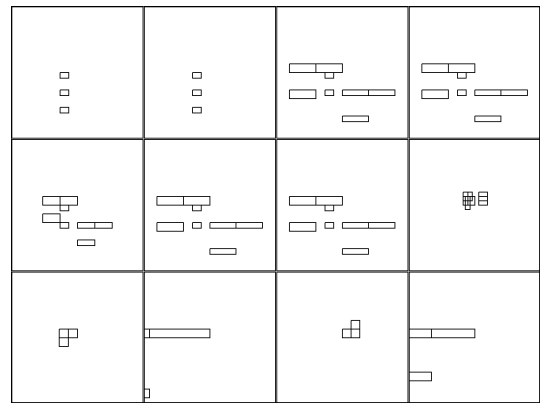
世代 65



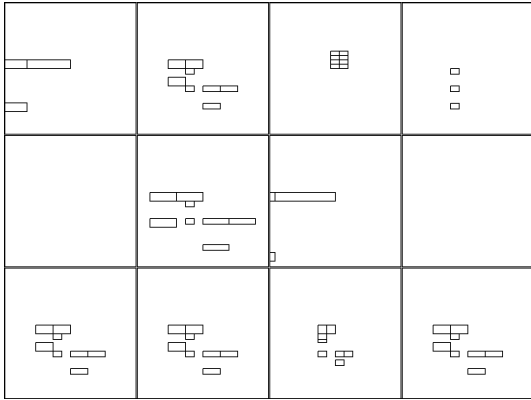
世代 66



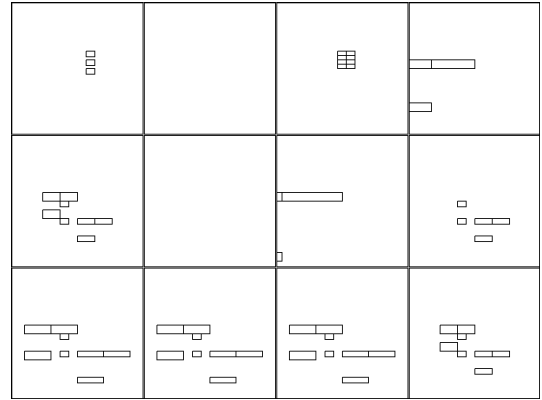
世代 67



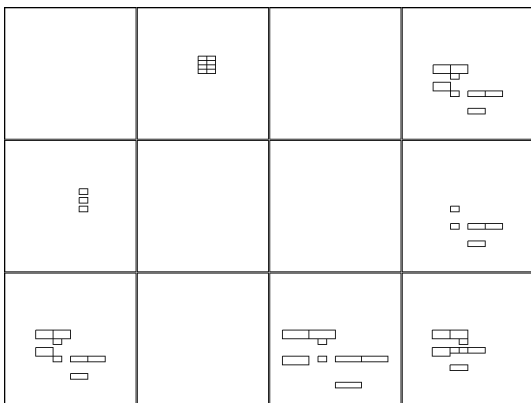
世代 68



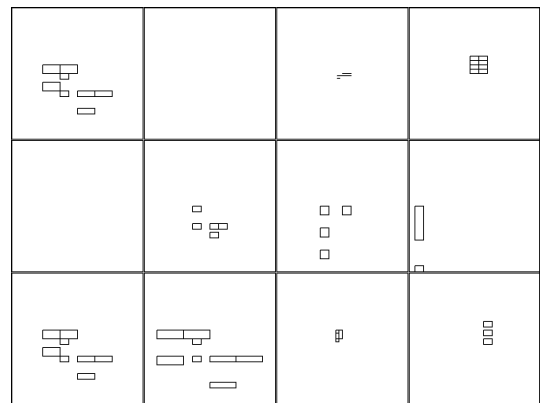
世代 69



世代 70



世代 71



世代 72

世代 73

世代 74

世代 75

世代 76

世代 77

世代 78

世代 79

世代 80

第4章 述語論理の概念を用いた教師図形の形態構成規則の記述

4.1 はじめに

建築形態言語を用いて建築形態を記述することはこれまで様々な形でなされ、人間の形態認知の方法にふさわしい記述方法が数多く提案されてきた^{文献1)2)}。デザイナーによって形態操作がなされた設計解には、形態構成規則が存在すると考えられる。しかしながら、デザイナーは、設計解を規定する形態構成規則を自ら明示的に意識しつつ設計を行っておらず、設計行為の結果としての設計解から、その形態構成規則を明示的に記述するには、再度設計過程を反芻することによる試行錯誤が強いられる。

ここで、デザイナーによって形態操作がなされ、与えられたものを教師図形とした場合、この教師図形を記述する形態構成規則を知ることは重要である。ある教師図形を記述する形態構成規則は幾通りもあるが、教師図形の形態構成規則を記述することは、有効な知識の獲得方法となると考えられる。

4.1.1 研究の目的

デザイナーによって与えられた教師図形の形態構成規則を遺伝的プログラミングの回帰処理を援用し、述語論理の概念を用いたS式表現により記述する枠組みを提示することが本章の目的である。提示した枠組みを用い、事例として設定した教師図形の形態構成規則を明示的に記述し、それを分析することによって、本章のモデルの有効性を確かめる。なお、本章の試行では、形態構成規則の明解化のため、教師図形として簡単な図形を用いる。

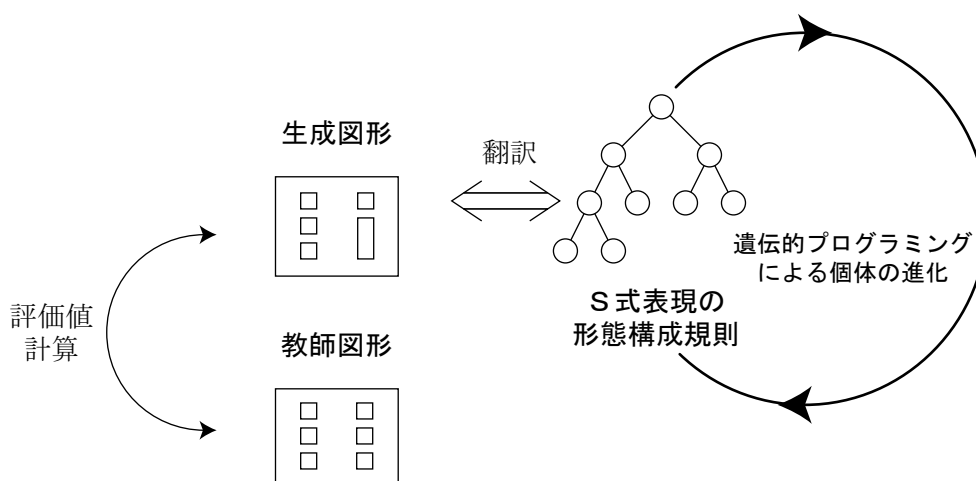


図1 教師図形の形態構成規則の記述の枠組み

4.1.2 研究の概要

筆者らの既往研究^{文献3)}に倣い、本章では形態獲得過程の体系は基本図形記号（以下プリミティブ;primitive）と、それらに適用される操作を表す演算子（design operator）から構成されると設定する。プリミティブは矩形と線分を扱い、演算子はアフィン変換以下を扱う。設定された図形の体系が設計過程において状態を変化させてゆく仕組みを、述語論理の概念を用い、記号的な構造表現である（LISP^{文献4)}の）S式表現（Symbolic Expression）により表す方法を定義する。S式表現で表された個体に対し、遺伝的プログラミング（Genetic Programming;以下GP）^{文献5)}の回帰処理を援用し、教師図形に合致する個体を進化的に獲得する。最後に、獲得された個体のS式表現と、それが表す図形を考察する。

4.1.3 既往の研究

建築設計に用いられる形態構成規則の知識を明らかにしようとする研究は盛んになされてきた。優れた事例や特定の作家の一連の作品を精密に分析し、そこに用いられている規則や形態の文法を発見的に見出す方法による研究がある。ClarkとPause^{文献6)}は建築形態のうち、図化できる特性に限定して、形態パターンとして認識されるデザインのボキャブラリーを分析、分類した。KoenigとEizenberg^{文献7)}はフランク・ロイド・ライトの草原住宅の構成規則、装飾規則を事例の分析により見出し、それらの規則の適用によりライト風住宅が生成される過程を示した。Stiny^{文献8)}はパラメーター型の形態文法（parametric shape grammar）を定義し、Mitchell^{文献2) 16)}と共にヴィラ・マルコテンタの平面形に用いられている形態文法を二次元の線分の体系の規則として表した。またその規則により平面形が構成されていく様子を段階的に示した。小川、安野、坂本^{文献9)}は都市型中高層建築のファサードを、意匠的な操作の組み合わせとして捉え、形態構成の類型化を行った。

建築形態の構成規則やデザインのボキャブラリーを事例の分析により見出そうとする研究に対し、形態表現をデザイナーの形態認知の仕組みにふさわしい言語的表現に翻訳し、計算機の記号処理を用いた知識の獲得や、それを用いた設計支援を行う研究がある。Akin^{文献10)}は建物の一般的な特性の収集によって、ある建物を同定する推論システム（AIM）を提案した。青木^{文献11)}は建築形態記述の基本方程式により形態記述が可能であることを示し、建築携帯情報を言語により計算機に入力する基本システムを提案した。渡辺^{文献12)}は幾何的制約に関する決定において、人間の思考に従う形式で表現しうるモデルを提案した。また拙稿^{文献3)}では、対話型進化計算により、デザイナーの評価を反映した窓配置パターンの形態構成規則を記述しつつ、形態創発が行われるモデルが示された。

建築設計の概念やデザイナーの嗜好等を進化的計算を用いて発生的に生成させる研究と

して、藤井^{文献13)}の環境との関係の下に行動、進化するエージェントが獲得する振る舞いを分析し、意図を伴う認知プロセスが生成されることを示した研究や、Gero^{文献14)}の数種類の規則の組み合わせからGAを用いて設計解を生成し、そこに規則性が生じることをもって設計の概念が構成されうることを示した研究などがある。

これらの既往研究では、形態構成規則の記述が可能であることを示したり、経験ある主体による事例の分析により形態構成規則を発見的に獲得し、獲得された規則の組み合わせによって目的の形態が生成可能であることを示したりする研究はなされているが、本章では、予め規則の獲得のための知識を恣意的に用意することなく、目的となる教師図形の形態構成規則を計算機の記号処理を援用して獲得することが試みられる。

4.2 モデルの設定

述語論理の概念を用いた形態構成規則の記述は、第3章の3.2と3.3で設定されるものと同様のモデルを用いるため、本章では省略する。

4.3 評価値の計算

教師図形と、GPオペレータによって生成される生成図形の類似度に基づいて評価値が計算される。本章では、予め恣意的な知識をシステムに与えることなく、教師図形の形態構成規則を発生的に記述することを狙うため、教師図形と生成図形の類似度の計算には、図形を線分に分解する単純な方法を採用（図2）。それぞれの図形は10x10の直交グリッドを構成する合計220本の単位線分に分解され、教師図形と生成図形の線分単位の不一致の数がカウントされ、これが評価値となる。評価値は小さいほど優秀で、これが0になった時点で試行を止める。

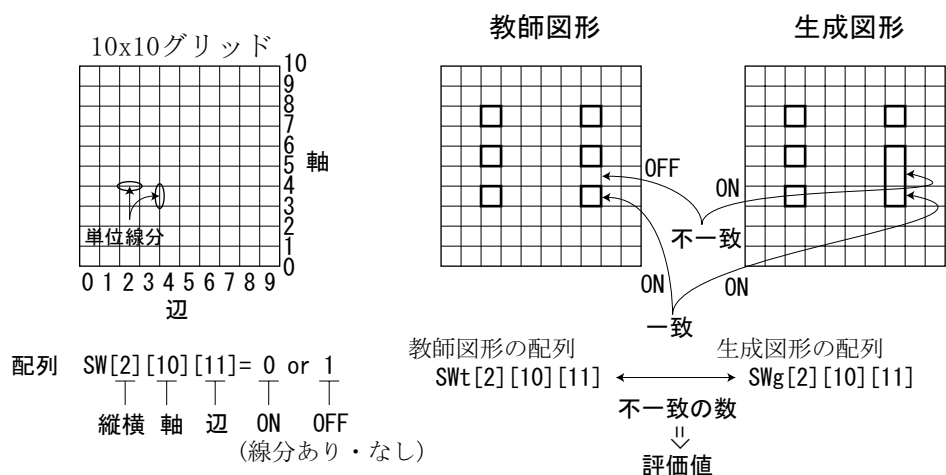


図2 評価値計算の方法

4.4 試行

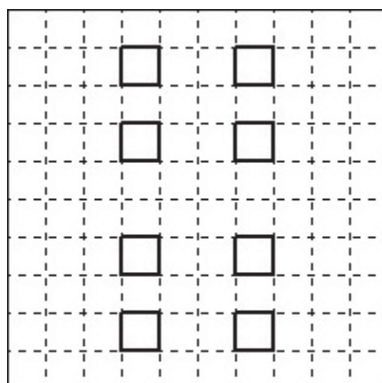


図3 教師図形

図3に示される教師図形の形態構成規則を記述する試行を行った。初期個体数は1000、パラメータは以下のように適宜設定した。

乱数のシード = 99

個体数 = 1000

初期に生成される木の最大深さ = 6

交叉で生成される木の最大深さ = 17

突然変異で生成される木の最大深さ = 4

木の生成規則 = RAMPED (集団内の個体毎に木の成長方式を変える)

選択方式 = FITNESSPROP (評価値に比例した選択確率)

非終端ノードでの交叉の確率 = 0.2

非終端及び終端ノードでの交叉の確率 = 0.2

複製のみの確率 = 0.1

小さい木を優先する評価値の変換係数 = 0

評価値0の個体、すなわち教師図形と同様の図形を表す形態構成規則を持つ個体は、第210世代目に現れ、そこで試行を終了した。集団内の個体の評価値の平均と、世代毎の最良個体の評価値の推移を図4に示す。

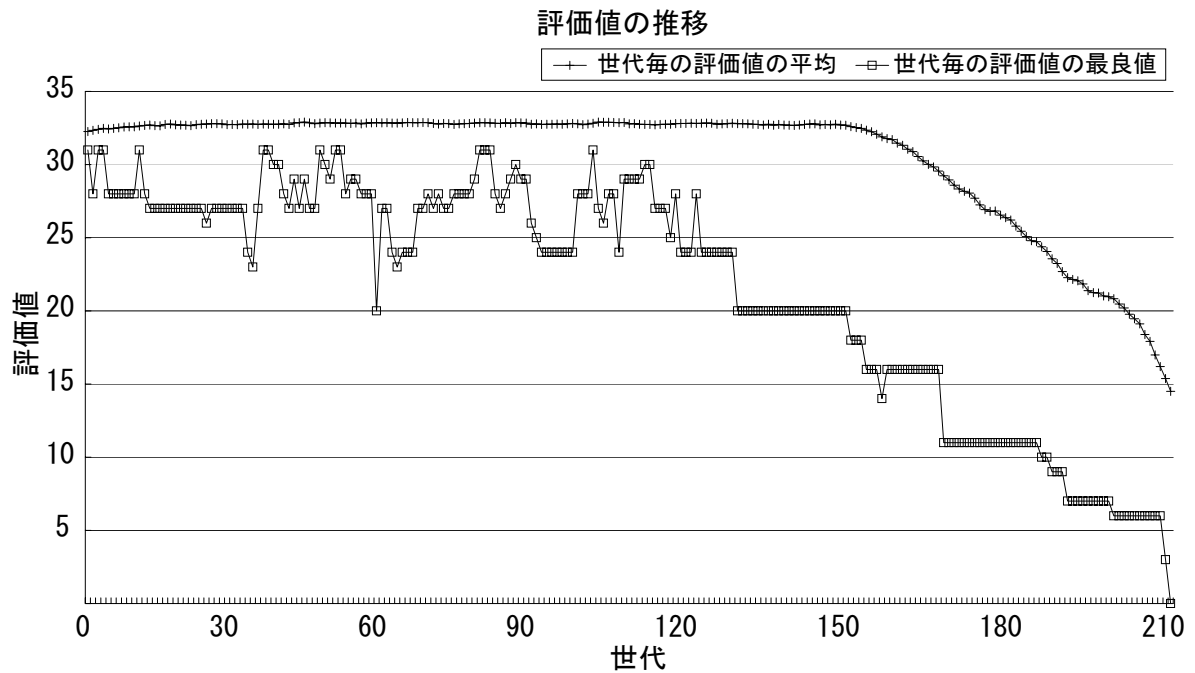


図4 評価値の推移

獲得された評価値0の個体、すなわち教師図形と同様の図形を表す個体の形態構成規則(規則1)を図5に示す。簡単のため、図13の形態構成規則のうち、図形に表示されるプリミティブ(RECTANGLE1, RECTANGLE2)に関する操作を抽出して、プリミティブ毎に整理したS式を式3と式4(規則1s)に示す。規則1sによって表される図形が、プリミティブに対する操作を経て描かれる過程を図6に矢印を用いて図示する。RECTANGLE1は、X方向1移動(非表示)、Y方向1移動(以下表示)、90度回転、90度回転、90度回転、90度回転、Y方向2移動、180度回転。RECTANGLE2はX方向1移動(非表示)、Y方向1移動(以下表示)、Y方向2移動、180度回転という操作がなされている。

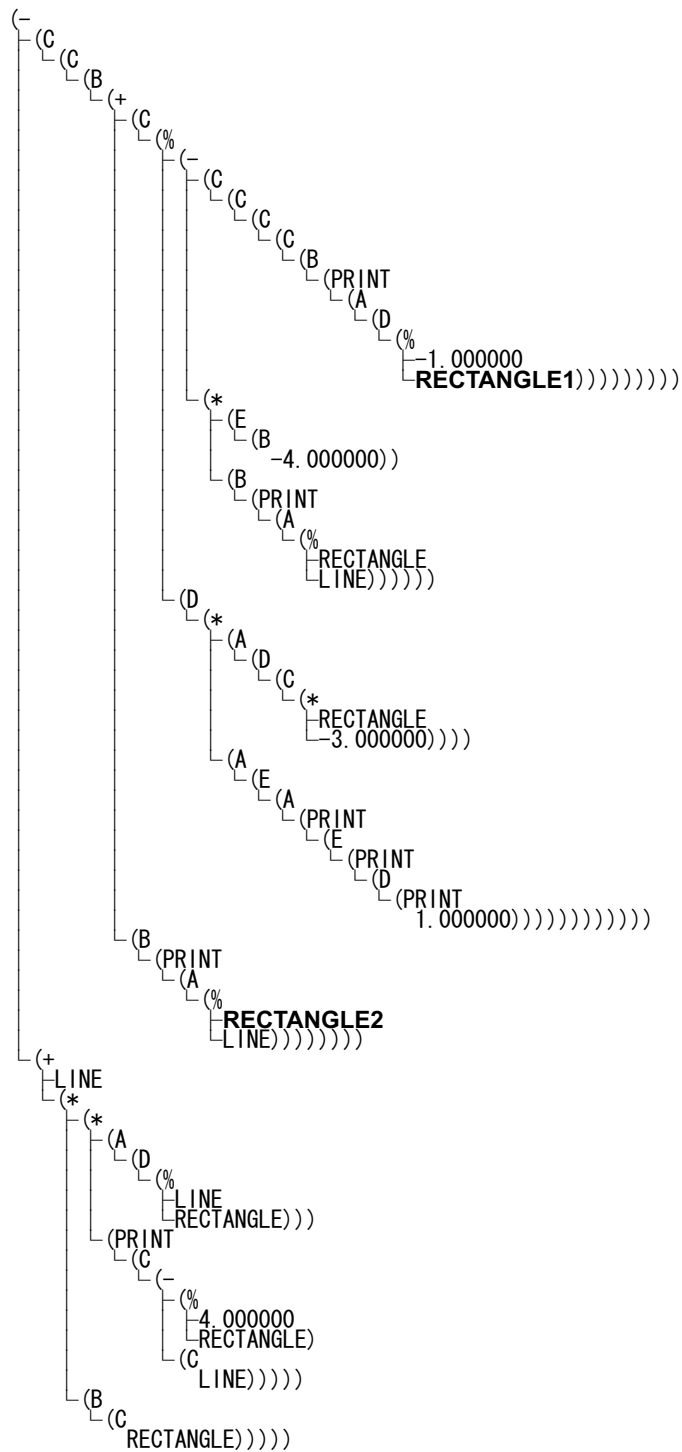


図5 獲得された個体の教師図形を表す形態構成規則（規則1）

(C[2] (B[2] (C[1] (C[1] (C[1] (C[1] (B[1] (PRINT
 (A[1]RECTANGLE1)))))))))) . . . (1)

(C[2] (B[2] (B[1] (PRINT (A[1] RECTANGLE2))))))
 . . . (2)

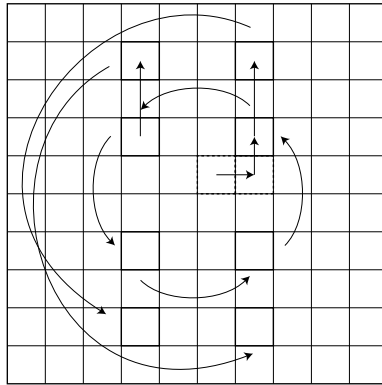


図6 3式の図形の変換操作

次に、同様の教師図形に対して、試行のパラメータのうち乱数のシードのみを変更 (seed=55) して同様の試行を行った。ここで得られた形態構成規則についても同様に、図7と式3、4、5に示す。

式1、2、4、5では、いずれも最も高次（左側）の演算子としてC[2]という、180度回転を表す操作がある。この操作は木構造では木の根（左上）に近い部分に形成されており、プリミティブに対する共通の操作となっていることがわかる。教師図形は同型の矩形がグリッド状に配置される図形であるが、全て等間隔ではないため、ここでは、点対称の概念を持つ形態構成規則が形成されたと考えられる。

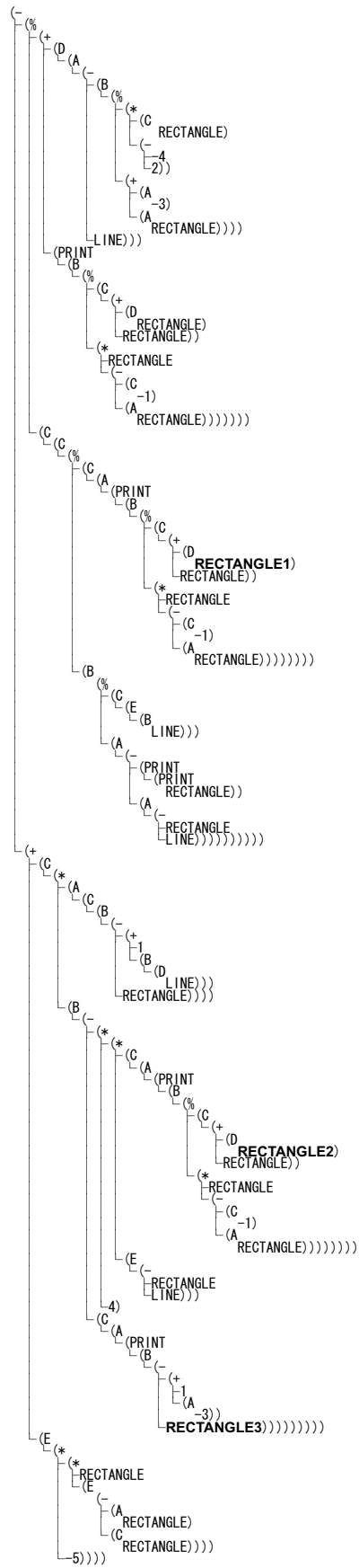


図7 獲得された個体の形態構成規則（規則2）

```

(C[1]      (C[1]      (C[1]      (A[1]      (PRINT      (B[1]      RECTANGLE1))))))
          . . . (3)
(C[2]      (B[2]      (C[1]      (A[1]      (PRINT      (B[1]      RENTANGLE2))))))
          . . . (4)
(C[2]      (B[2]      (C[-2]     (A[-2]     (PRINT      (B[-2]     RECTANGLE3))))))
. . . (5)

```

4.5 まとめ

教師図形の形態構成規則を、遺伝的プログラミングを援用し、述語論理の概念を用いた S 式表現により記述する枠組みを示した。予め高度な知識を恣意的に与えることなく、試行では、ランダムな初期個体から、教師図形を記述する形態構成規則が帰納的に生成された。教師図形を記述する形態構成規則は無数にあると考えられるが、本章の試行では 2 通りの形態構成規則を得た。木構造の分析により、包含、階層関係を有するプリミティブとそれらに対する操作の構造が形成されていた。無駄で冗長と見られる部分木も、数値の受け渡しに関係しているものがあつた。木の根に近い、上位の演算子には、教師図形の特性から、原点对称を表す操作が形成されていた。本章で提示した枠組みにより、教師図形の形態構成規則の一つを、人間の形態認知に沿った形態操作の知識表現として獲得できることが示された。

注釈

注 1) 遺伝的プログラミング (GP) については、付章 2.2 参照。

注 2) Walter Alden Tackett, Aviram Carmi の sgpc (Simple Genetic Programming in C) を元の実装した。

参考文献

- 1) ピーター・G. ロウ著、奥山健二訳：「デザインの思考過程」、鹿島出版会、1990
- 2) ウィリアム・ミッチェル著、長倉威彦訳：「建築の形態言語」、鹿島出版会、1991.
- 3) 松下大輔、宗本順三：「対話型進化計算による形態構成規則の獲得モデル」、日本建築学会計画系論文集、第 560 号、2002. 10
- 4) Gerald Jay Sussman 他著、和田英一訳、「計算機プログラムの構造と解釈」、ピアソン、2000.
- 5) Wolfgang Banzhaf, Peter Nordi, Robert E. Keller, Frank D. Francone 著、新田徹、伊庭斉志訳、「遺伝的プログラミング」、科学技術出版、2000.

- 6) Roger H. Clark and Michael Pause: *Precedents in Architecture*, Van Nostrand Reinhold, 1985.
- 7) Koning H, Eizenberg J : *The language of the prairie ” Frank Lloyd Wright’s prairie houses”* *Planning and Design*, 8 295-323, 1981
- 8) Stiny, George, and James Gips: *Shape Grammars and the Generative Specification of Painting and Sculpture*, *Information Processing* 71, C.V.Freiman, 1972
- 9) 小川次郎、安野彰、坂本一成、「都市型中高層建築のファサードにおける形態構成」、*日本建築学会計画系論文集*、第496号、pp105-112、1997.6
- 10) Akin O. : *Psychology of Architectural Design*, Pion, 1986.
- 11) 青木義次:「建築形態言語の基本システム—建築CADのための基礎的研究 その4」、*日本建築学会計画系論文集*、第418号、pp41-50、1990.12
- 12) 渡辺俊:「建築設計プロセスにおける幾何的知識の表現に関する研究」、*日本建築学会計画系論文集*、第496号、pp263-268、1997.6
- 13) 藤井晴行、谷本潤:「意図的とみなせる行動の発生に関する思考実験」、*日本建築学会計画系論文集*、第547号、pp149-155、2001.9
- 14) John S.Gero, *Concept Formation in Design*, *Knowledge-Based Systems*, 10(7-8), 429-435, 1998
- 15) 有川節夫他、「述語論理と論理プログラミング」、オーム社、1988
- 16) Stiny, George, Mitchell: *The Palladian Grammar*, *Environment and Planning B5*, no. 1:5-18, 1978

第5章 事例の学習による設計者の評価尺度を用いた代替案選択

5.1 はじめに

本章では、言語表現により設定された代替案が満たすべき必要条件に基づいて、デザイナーによって条件の満足不満足を評価された正負事例の学習により、両者を見分ける評価関数を記述し、多数の代替案の集合に対してふるいとして用いる方法の可能性を提案する。

発生・検証型(generate-and-test process)の問題解決法が採られる設計問題において、複数の重要で明示的な評価関数が存在する場合は、遺伝的アルゴリズム等を用いた多目的最適化手法により、少なくともそれらの特性については他に検討すべき代替案がないとみなしてよい状態に問題範囲を絞り込む方法がある^{文献1)}。一方、明示的な評価関数が存在せず、各局面で変化して行くような場合においては、対話的にデザイナーの非明示的な評価を取り込み、問題空間の絞り込みを行いつつ創発的に探索を進めるモデルが様々に試みられている^{文献2,3)}。

ここではこれに対し、言語表現で設定された部分的な評価尺度は明確であるが、評価関数は明示的でなく、それを書き下す手順も未知であるような状況を想定する。例えば、代替案の集合が予め存在し、それらが満たすべき条件が、言語表現により設定されているが、代替案が条件を満足するかどうかを見分ける数式表現の評価関数に対する手がかりがなく、デザイナーが個々の代替案を逐次条件に照らして解釈し、検証することでしか評価ができない場合が考えられる。この場合、各代替案毎に条件を満たすかどうか検証する負担は大きく、特に代替案集合が大きい場合は探索が困難になる。ここで、代替案が条件を満足するかどうか評価する指標に近似できる評価関数が得られれば、代替案の検証を補助するものとしてこの評価尺度を計算機上で用い、代替案を効率的に絞り込むことができると考えられる。したがって、設定された言語表現による部分的な評価尺度から、各代替案が条件を満たすかどうか、ある程度の精度で評価することが可能な評価関数を導く方法があれば有効である。ここで、このような評価関数の記述のために、予め設定された言語表現による条件に照らして、デザイナーにより悪い評価が下された代替案と、良い評価が下された代替案の構造的な差異を帰納的に学習させるモデルの可能性を確かめる。すなわち、評価尺度に基づいてデザイナーにより評価され与えられる一定数の正負事例の帰納推論を用いた学習により、それらの正負事例に内在すると考えられる、良い評価をもたらす構造と、悪い評価をもたらす構造を判別して評価する指標を、計算機で演算可能な表現による関数として獲得し、その評価関数が有効にはたらくかどうか検証する実験を行う。

5.1.1 研究の目的

本章では、対象として木造3階建住宅の耐力壁配置による住宅平面を扱う。「ポリシー」として予め言語により設定された条件の下に、デザイナーによって与えられる一定数の正負事例を学習し、正負事例に内在すると考えられる、条件の満足、不満足をもたらす構造を評価する指標に近似できる関数（図1中の f ）を獲得するモデルが提案される。住宅平面を表す代替案の集合を記述された関数を用いて評価し、序列をつけ、得られた関数が評価関数として有効にはたらいているかどうか検証する。「偏心率」と「昼光率」の明示的な評価関数による二目的最適化の結果の代替案の集合に対し、帰納推論を用いた事例の学習で得られる評価関数をふるいとして用い、複数の客観的な評価関数を高度に満たし、かつ設定された条件を満足する代替案を効率的に絞り込む方法を提示することが目的である（図1）。

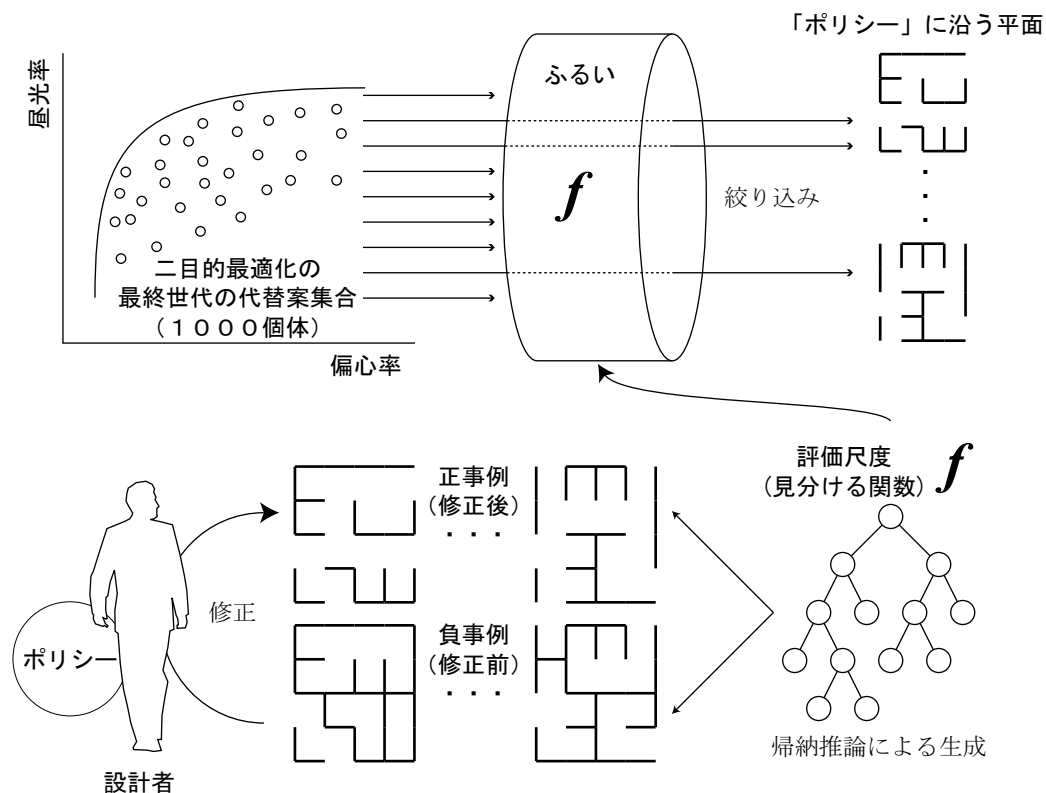


図1 本章の概要

5.1.2 研究の概要

代替案の集合として、偏心率と昼光率を指標とした、遺伝的アルゴリズムを用いた二目的最適化の試行の最終世代を用いる^{文献4)}。木造3階建住宅のモデルは、各階85箇所、合計255箇所のグリッド上の各線分を耐力壁配置候補位置とする（図2）。対象とする住宅平面

部分を、耐力壁が多く、住宅平面の整合性が実現されにくい、1階の駐車場を除く矩形部分（以下、「対象平面」）とする（図3）。はじめに、予め用意された1000個の代替案集合（以下、「代替案集合」）のうち、任意の50個の代替案を選択し、各代替案の「対象平面」のデータベースを作成する。「対象平面」が住宅平面として採用可能になるために満たすべき条件を「ポリシー」として言語表現により設定する。50個の代替案の「対象平面」に対し、「ポリシー」を満たすために必要な、なるべく少ない枚数の耐力壁の削除をデザイナーが行い、修正前の代替案を負事例、修正後の代替案を正事例とするデータベースを用意する。準備された50個の正事例と負事例を、遺伝的プログラミング (Genetic Programming) の進化計算を用いた帰納推論で学習することにより、正事例と負事例を見分ける関数を獲得する。最後に、得られた関数で1000個の代替案からなる「代替案集合」を評価して序列をつけ、記述された関数が、条件の満足度を測る評価関数として、どれほど有効に「ポリシー」を満たす代替案を絞り込んでいるか検証し、モデルの可能性を考察する。

5.1.3 既往の研究

事例をもとに、それらに含まれる規則を推論する研究は様々になされている。例示によってプログラムを自動的に作成する手法は、PBE (Programming By Example) や PBD (Programming By Demonstration) 等と呼ばれて研究されてきた。Hudson^{文献5)} は、Layout by Example システムにおいて、図形を配置するためのレイアウト規則を例示により推論した。増井^{文献6)} は、ユーザが良い配置例と悪い配置例の組を与えることにより、配置の良否を決定する評価関数を抽出するシステムを提案した。千葉他^{文献7)} は、ILP (帰納論理プログラミング) を用い、グラフィックデザインにおけるレイアウトの知識を事例から獲得するモデルを提案した。また、対話型のシステムにおいて、人の主観を含む嗜好を獲得しようと試みる研究では、瀧澤他^{文献8)} の研究や、拙稿^{文献4)} がある。事例の学習による帰納推論に用いられる手法は様々にあるが、遺伝的プログラミングを用いるものでは、顔の表情の方程式を獲得する Loizides 他^{文献9)} の研究等がある。記号的処理を行う遺伝的プログラミングは、ニューラルネットワーク等の手法に比べ、高度な知識への対応の可能性が指摘されており^{文献10)}、本章ではこれを用いた。

5.2 木造3階建住宅のモデル化

5.2.1 木造3階建住宅

木造3階建住宅では、平屋や2階建住宅よりも地震力や風圧力による水平荷重が増加する。また基準法により構造計算、確認申請が必要とされており、耐震性能を考慮した耐力壁の適切な配置は重要な問題である。しかしながら、その設計技術は未熟であり、確認申請

後に耐力壁を取り払うなど、駐車場や諸室の要求と、耐震性能の要求の調整がつかず、結果、必要な体力壁を犠牲にしている危険な現状がある。木造3階建住宅が高水準で成立するには、所要室が適当に配置可能であり、かつ耐震性能と内部環境の質を同時に高度に満たす設計を行う必要がある。所要室の配置や内部環境の質は、耐力壁の配置に依存するため、耐力壁配置は室の配置、耐震性能、および内部環境を左右する支配的な要因である。従来は、先に所要室を配置した後、耐力壁を配置可能な位置に適宜配置する方法を採ることが一般であったが、耐震性能と光環境を高度に満たす耐力壁配置で、かつ住宅平面として適当な代替案を採用する方法が求められる。

5.2.2 木造3階建住宅モデルの概要

狭小な敷地に立つ、間口3.64m、奥行き8.19mの木造3階建住宅を設定する(図1)。設定されたモデルは、各階同形状平面であるが、事例を踏まえ、1階には普通乗用車1台分の駐車スペースを、2階と3階の南東部には居室を設ける。

各階平面は910mmのモジュールからなるとし、張間方向(以下x方向)に4コマ、桁行き方向(以下y方向)に9コマのspanとなる(図1)。耐力壁を配置できる位置は、各階とも桁行き方向45カ所(9×5)、張間方向40カ所(4×10)の合計255カ所となる。耐力壁の種類は10種類とする(表1)。

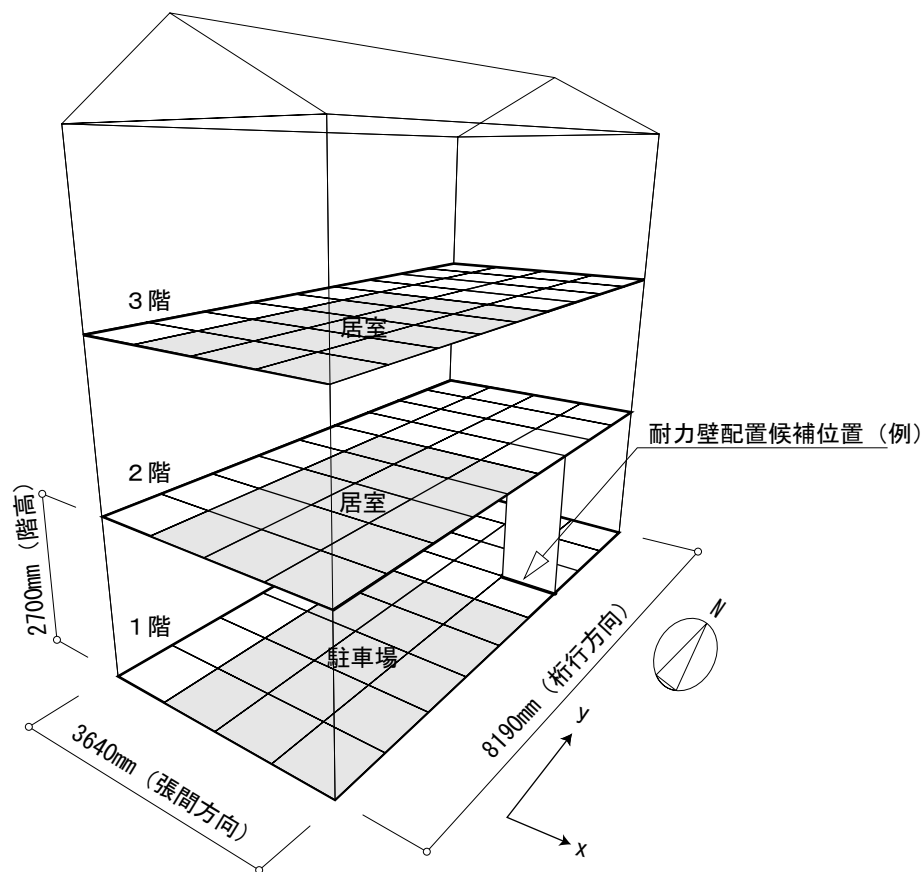


図2 木造3階建住宅モデル概要

耐力壁配置候補位置に耐力壁が配置されない場合、その位置は床から天井までの全面開口、又は窓などの開口を含む腰壁や袖壁、垂れ壁等の非耐力要素とする。但し居室の、外部に面する部分、すなわち南端と東端は、耐力壁が配置されない場合、全面開口として昼光率を算定する。また敷地の周囲に採光の妨げとなる障害物は存在しないとする。

表1 耐力壁の種類と倍率（建築基準法施行令第46条）

耐力壁の種類	摘要	倍率
1	土塗り壁	0.5
2	木摺り壁	0.5
3		1.0
4	径9mmの鉄筋筋かい	1.0
5		2.0
6	木材筋交い	1.0
7		1.5
8		2.0
9		3.0
10	木材たすき掛け筋かい	2.0
11		3.0
12		4.0
13		5.0
14	1～3の筋かいと4～12の筋かいを併用したもの(5.0を超えない範囲で加算)	それぞれの和
15	その他、大臣の認定	0.5～5.0

5.2.3 コーディング

耐力壁の配置を遺伝子情報化し、染色体として表現する枠組みを設定する。(2)で作成されたモデルの各耐力壁配置候補位置には0から254までの番号が割り当てられる(図2)。GAにおける個体の染色体は255個の遺伝子からなる。各遺伝子は0～10の整数値をとる。各遺伝子は遺伝子番号と同じ番号の壁と対応し、それぞれの表す数値は、壁倍率に対応した耐力壁の種類を意味する。但し、耐力壁の種類が0の場合、そこには耐力壁は配置されないとする。

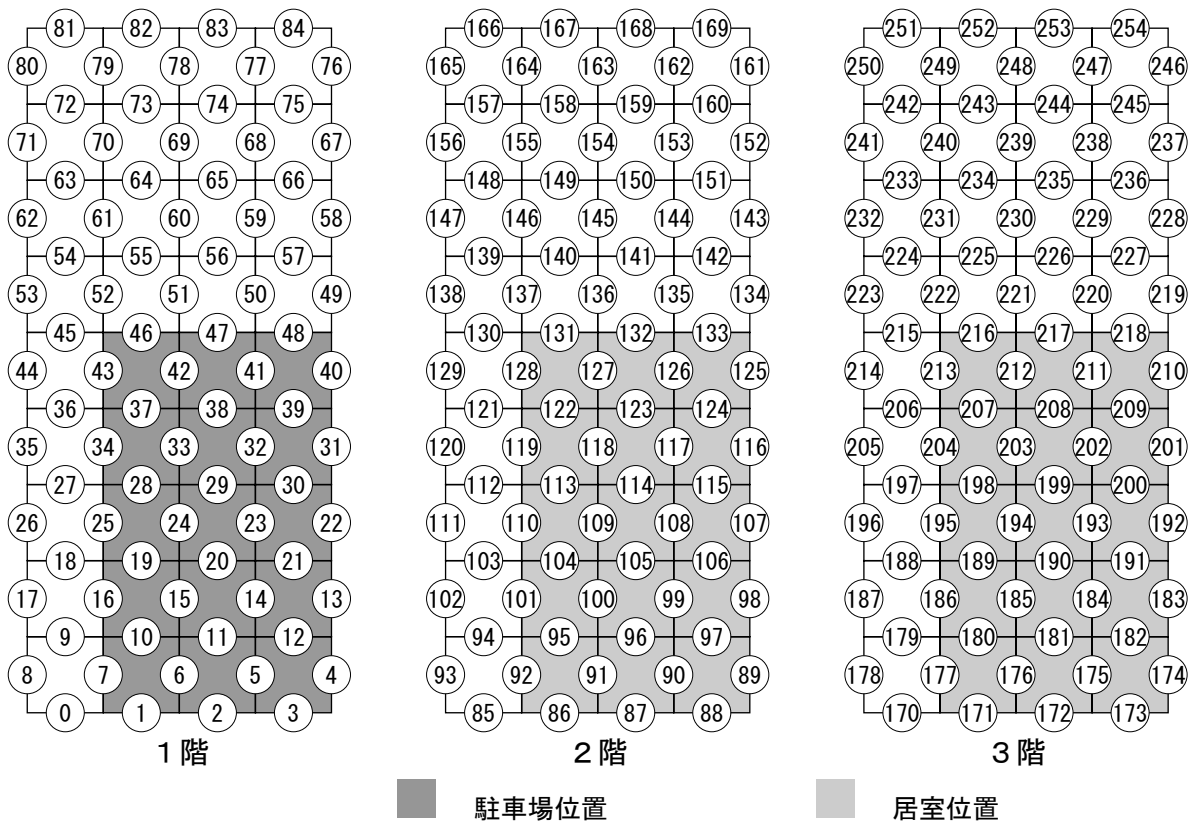


図3 耐力壁候補位置



図4 GAの個体の染色体

5.3 偏心率と昼光率を評価尺度とした二目的最適化

5.3.1 評価関数の設定

(1) 偏心率

耐震性能の厳密な評価には複雑な手続きを要する。そこで地震時に建物へ大きな損傷を与える要因であるねじれ振動の起こしやすさを測る指標として、基準法によって偏心率 Re が定義されている。本章ではこの偏心率 Re を木造3階建住宅の評価尺度の一つとして、これの最小化を目指す。

偏心率は、重心と剛心の隔たりの、ねじれ抵抗に対する割合として定義され、その数値が大きいくほど偏心の度合いは大きい。耐力壁の他に柱等も水平方向に剛性を持つ耐力要素であるが、木造住宅では耐力壁が主要な耐力要素であるため、本章では耐力壁のみを偏心に関わる構造部材として扱う。

1) 偏心率の算定

x 方向、y 方向の各偏心率は、偏心距離を弾力半径で除した値で定義されている（基準法施行令第82条の3第2号）。

$$R_{ex} = \frac{e_y}{r_{ex}} \quad \dots(1)$$

$$R_{ey} = \frac{e_x}{r_{ey}} \quad \dots(2)$$

R_{ex}, R_{ey} : 偏心率, e_x, e_y : 偏心距離, r_{ex}, r_{ey} : 弾力半径

偏心距離 e_x, e_y は、以下のように計算される。

$$e_x = \sqrt{(l_x - g_x)^2} \quad \dots(3), \quad e_y = \sqrt{(l_y - g_y)^2} \quad \dots(4)$$

l_x, l_y : 剛心座標 g_x, g_y : 重心座標

但し、各階とも固定加重、積載荷重等が平面的に一様に分布して偏りがないとして、重心は平面の図心と一致するとする。

剛心は以下のように計算される。

$$l_x = \frac{(K_y \cdot L_x)}{K_y} \quad \dots(5), \quad l_y = \frac{(K_x \cdot L_y)}{K_x} \quad \dots(6)$$

K_x, K_y : 耐力壁の水平剛性 L_x, L_y : 耐力壁座標

但し、耐力壁座標 L_x, L_y は、各耐力壁の図心座標である。水平剛性は、各耐力壁が水平力をどれほど負担できるかを示す壁倍率によって決まる。壁倍率は、せん断変形角 1/200rad. 時に単位長さあたり 1.96kN のせん断力に耐えられる耐力壁をもって倍率 1 の壁と定められている。

弾力半径 r_{ex}, r_{ey} は、以下のように計算される。

$$r_{ex} = \sqrt{\frac{K_r}{K_x}} \quad \dots(7), \quad r_{ey} = \sqrt{\frac{K_r}{K_y}} \quad \dots(8)$$

K_r : 剛心まわりのねじれ剛性

$$K_r = (K_x \cdot (L_y - l_y)^2) + (K_y \cdot (L_x - l_x)^2) \quad \dots(9)$$

以上より偏心率 R_{ex}, R_{ey} が計算される。一つ目の評価関数として、各階の x 方向偏心率、

y 方向偏心率のうち、大きい方の偏心率をそれぞれ選び出し、それらを合計したもの、 E_1 を設定する。

$$E_1 = \sum^l R_i \quad \dots (10)$$

l : 階数

(2) 居室の昼光率

室内空間の光環境の評価尺度として昼光率を用いる。居室の外部に面する部分で、耐力壁が配置されない所は全面開口とし、この開口部からの採光による居室内の昼光率の最大化を目指す。昼光率には窓を光源とする直接照度による成分と、室内の総合反射照度による成分があり、前者を直接昼光率、後者を間接昼光率という。ある点における昼光率は、直接昼光率と間接昼光率を独立に求め、これらを合計して算定する。

1) 直接昼光率の算定

直接昼光率を測定する床上の点を図5のように設定する。ある測定点の立体角投射率は、有効な開口部分全てについて、各開口部分を通して見える立体角投射率を^{文献20)} 求め、それらを合計することにより求められる。ある測定点での直接昼光率 D_p は、次式で表される。

$$D_p = \sum^k (C_w \times \tau \times m \times R) \quad \dots (11)$$

C_w : 立体角投射率, k : 開口部の数, τ : 窓の透過率,
 m : 窓の保守率, R : 窓面積有効率

居室内の直接昼光率 D_d は、各測定点の直接昼光率の和をとする。

$$D_d = \sum^p D_p \quad \dots (12)$$

p : 測定点の個数

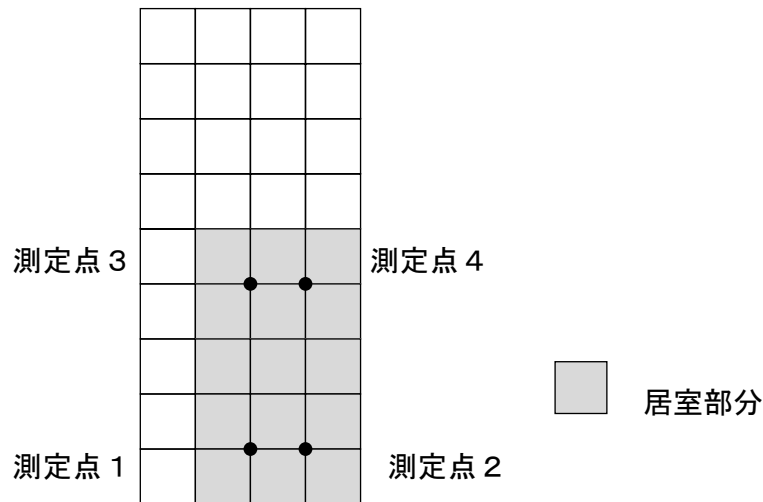


図5 直接昼光率の測定点の位置

2) 間接昼光率の算定

間接照度の精算にはかなり煩雑な計算が必要となる。しかし、間接照度は室内にはほぼ一様に分布するとみなせるので、一般に用いられる簡易計算式による室内面平均値の式^{文献19)}より、間接昼光率 D_r は次式で表される。

$$D_r = \frac{D_w \cdot S_w \cdot \tau \cdot m \cdot R \cdot E_s \cdot \rho_m}{E_s \cdot S(1 - \rho_m)} \quad \dots (13)$$

D_w : 窓面昼光率, S_w : 窓面積, E_s : 全天空照度,
 ρ : 室内平均反射率, S : 室内全表面積

以上よりある階の居室の全昼光率 D_i は次式で表される。

$$D_i = D_d + D_r \quad \dots (14)$$

二つ目の評価関数として、各階の居室の全昼光率の平均を設定する。

$$E_2 = \sum^n Di / l \quad \dots (15)$$

n : 居室の数

(3) 制約条件

1) 必要壁量

地震力や風圧力による水平力を支えるために、配置される耐力壁の量は基準法施行令に

よって定められている必要壁量を満たさなければならないとする（基準法施行令第46条）。

$$W_x \cdot L \cdot Z \geq L_x \quad \dots (16)$$

$$W_y \cdot L \cdot Z \geq L_y \quad \dots (17)$$

W_x : X方向耐力壁配置枚数, W_y : Y方向耐力壁配置枚数

L_x : X方向必要壁量, L_y : Y方向必要壁量

L : 耐力壁一枚の長さ, Z : 壁倍率

必要壁量は、地震力に対する必要壁量および風圧力に対する必要壁量の両方を算出し、大きい方の値を採用する。

a) 地震力に対する必要壁量

地震力に対する必要壁量は、基準法施行令第46条により、以下の式で定義される。

$$L_e = A \cdot K \quad \dots (18)$$

A : 床面積[m²], K : 単位床面積あたりの所要壁量[cm / m²]

(但しKは、1階:50、2階:39、3階:24)

b) 風圧力に対する必要壁量

風圧力に対する必要壁量も基準法施行令により定められている。

$$L_w = A \cdot K$$

A : 見付面積[m²], K : 壁量率[cm / m²]

(但しKは、50)

2) 耐力壁配置の制約条件

1) 1階駐車スペースの耐力壁配置不可能位置

1階部分の南側に、2,730 × 4,550 mm (3 × 5セル)の部分を乗用車一台分の駐車スペースとして確保し、この内部及び南側には耐力壁を配置できないとする(図6)。

2) 2、3階居室内部の耐力壁配置不可能位置

2、3階の南東に2,730 × 4,550 mm (3 × 5セル)の部分を居室として確保するために、この内部に耐力壁を配置できないとする。

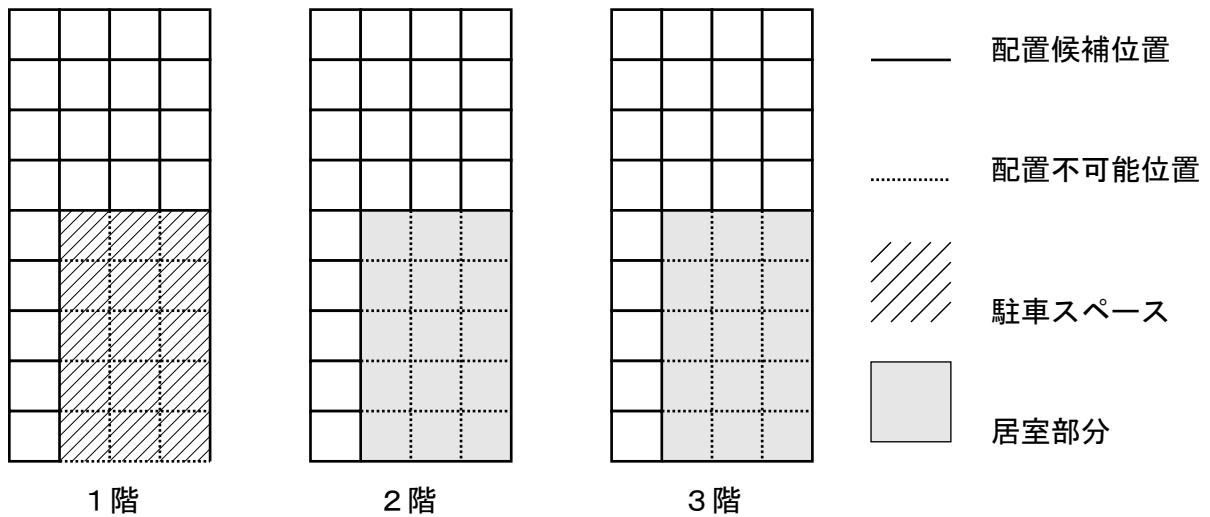


図6 各階の耐力壁配置不可能位置

3) 耐力壁の上下階位置関係による制約

耐力壁で中空にあるものは有効と見なされず、上階の耐力壁の構造線の下に下階の耐力壁が設けられていなければならないので、2階及び3階の耐力壁の配置は、各階の下階の耐力壁配置によって制限される。本章では、2階及び3階の耐力壁は、下階の真下位置あるいはその両隣位置のいずれかに耐力壁が配置されていなければ、配置できないとする(図7)。

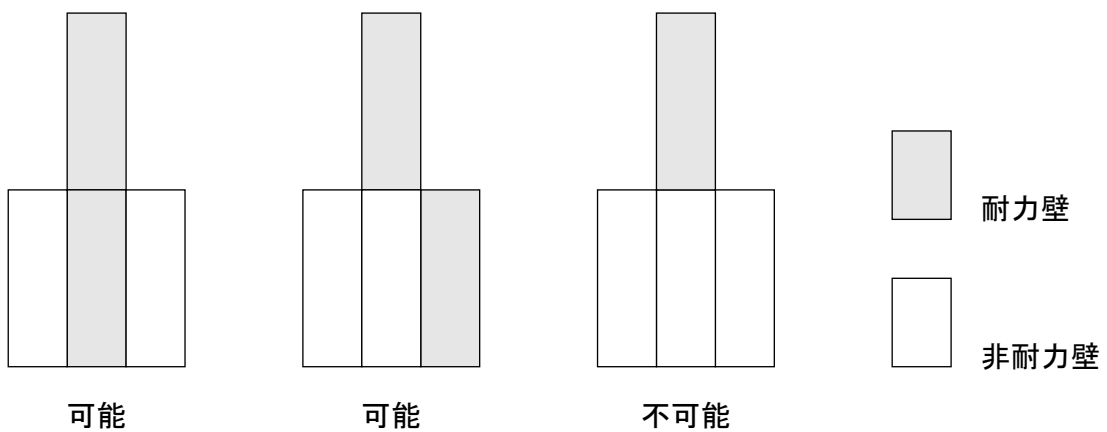


図7 耐力壁の上下階位置関係による制約

4) 耐力壁の各階平面における位置関係による制約

四面を耐力壁又は、建物外周に囲まれるような配置は、進入不可能なデッドスペースを形成するので不可とする。住宅平面の合理的な形成には、様々な諸条件を考慮する必要があるが、本章の試行では簡単のため、以下の2つの条件を制約条件とする。

a) あるグリッドが四面を耐力壁、あるいは建物外周部分によって囲まれるような耐力壁配

置はできないとする(図8)。

b) 張間方向、あるいは桁行方向に、建物の一端から他端まで全ての耐力壁候補位置に耐力壁を配置することはできないとする(図8)。

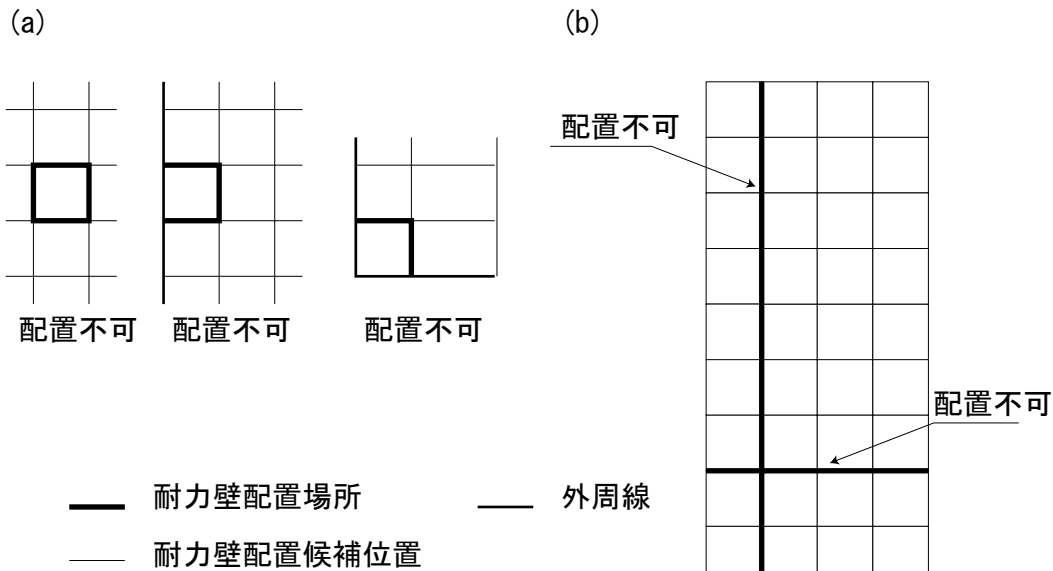


図8 耐力壁の各階平面における位置関係による制約

5.3.2 二目的最適化の試行

(1) GAによる二目的最適化

二目的最適化において、GAを用いることにより、その多点探索の特徴を生かし、個体評価における多目的性を直接扱うことができる。すなわち、各目的関数についてある程度良い値をとる個体を同時に保ちながら探索を進めることができる(付章2.1-3参照)。各目的関数を高度に満たす個体群を獲得するためにGAによる二目的最適化を試行する。

1) 事例の木造3階建住宅平面の偏心率と昼光率

狭小敷地に立つ一般的な木造3階建住宅の事例(図9)をもとに、簡単な平面図を作成した。これを元に耐力壁を抽出(図10)し、本章のモデルに当てはめ、各階偏心率及び、昼光率を計算した。

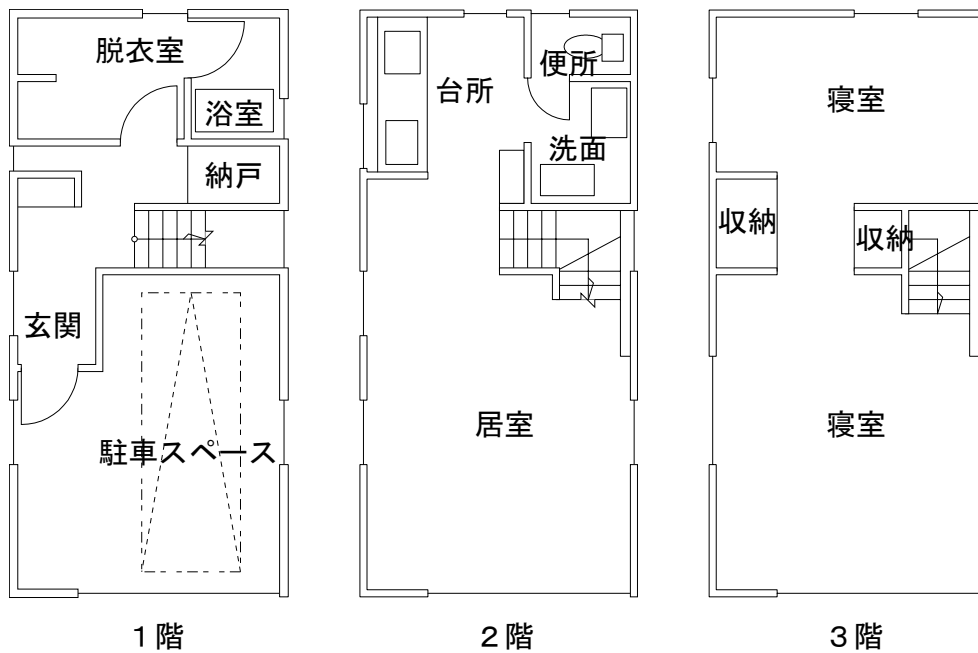


図9 事例から作成した平面図

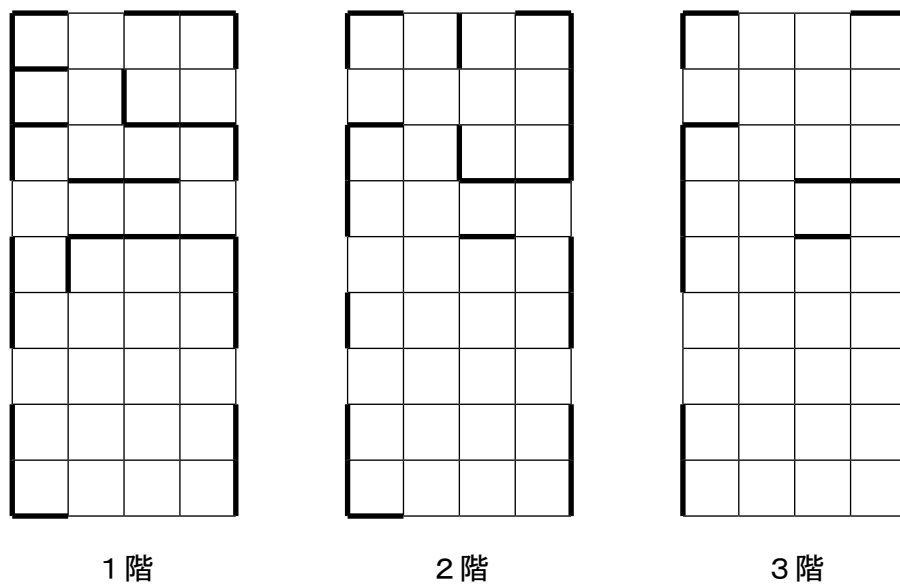


図10 図8の平面図より抽出した耐力壁配置図

X方向の耐力壁は、水回り及び階段回りに、東西ほぼ均等に配置され、X方向の偏心率は小さくなっている。Y方向の耐力壁は外周部への配置が多く、内部にはあまり配置されていない。配置場所が北側に偏っているため、Y方向偏心率は大きくなっている(図11)。採光については、南面は大きく開口がとられているが、東西面には耐力壁が多いため、測定点3、4において昼光率が小さくなっている(図12)。

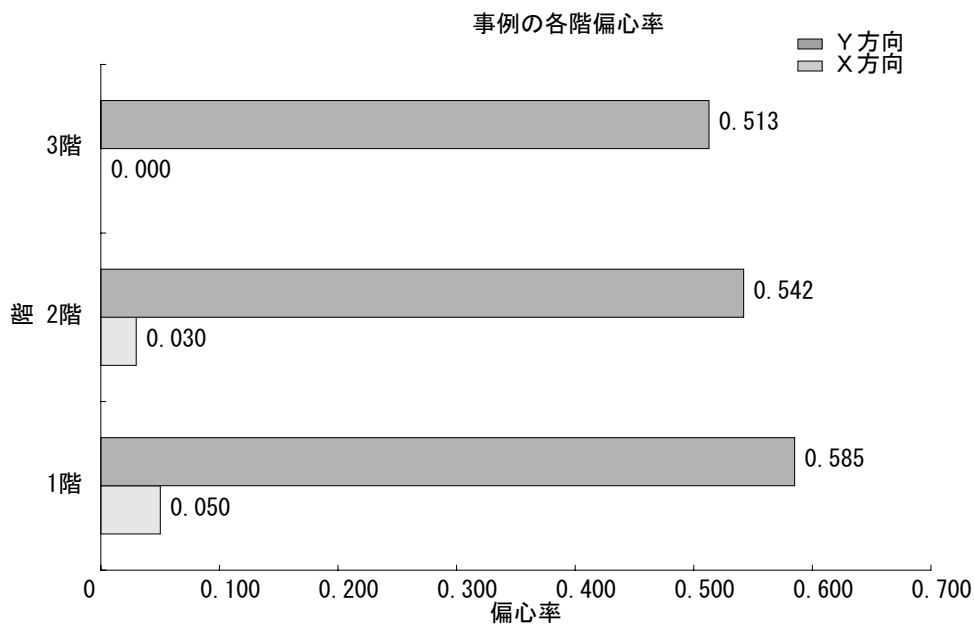


図11 事例の各階偏心率

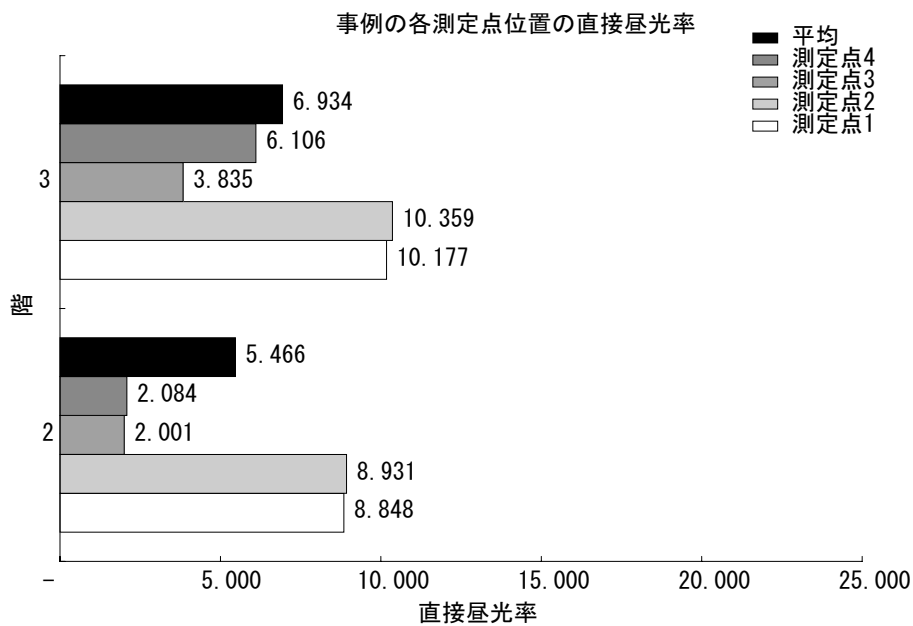


図12 事例の各階各測定点の直接昼光率

2) GAによる二目的最適化の試行

Goldbergのランキング法にパレート保存戦略を加えたGAを用いた。試行のパラメータは以下のように設定した。

個体数 = 1000, 交叉率 = 0.6, 突然変異率 = 0.01, 世代交代率 = 0.8

評価値の減少がほとんど見られなくなった1500世代で試行を終了した。世代毎の偏心率(E_1)と昼光率の逆数($1/E_2$)の最良値の推移を図13に示す。最終世代の個体を、偏心率と昼光率を2軸とした座標上に表した散布図を図14に示す。

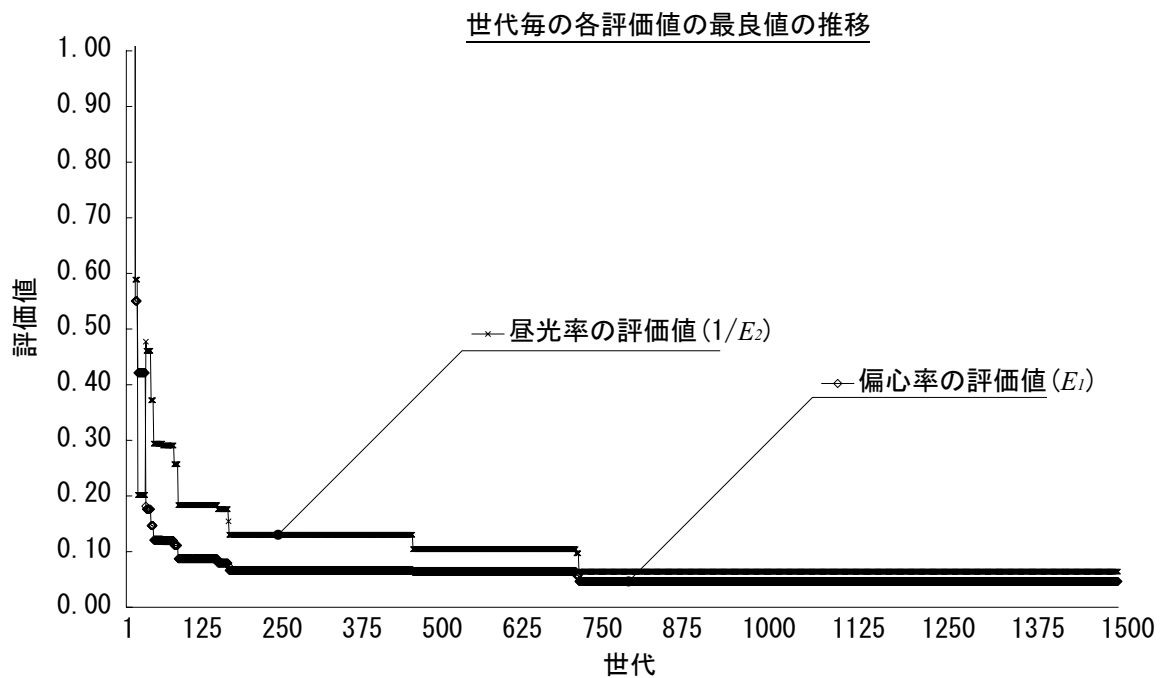


図13 評価値の推移

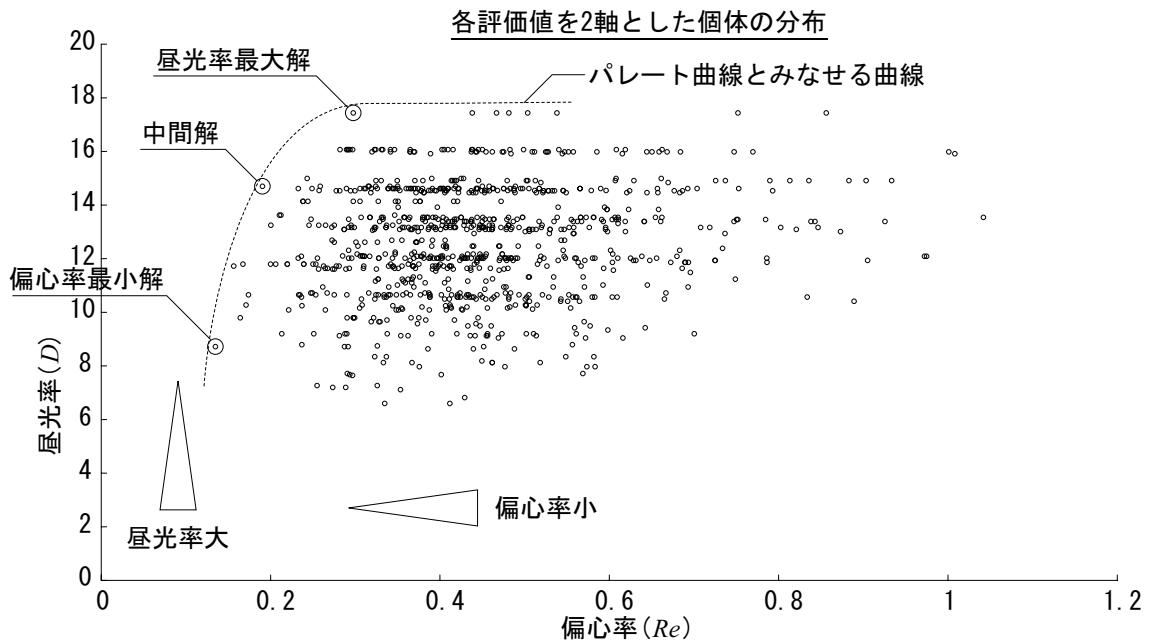


図 14 各評価値を 2 軸とした評価値の分布

図 13 では、グラフ中で左に行くほど偏心率について優秀で、上に行くほど昼光率について優秀となる。パレート曲線とみなせる曲線を描き、曲線付近で、かつ各評価値について特徴的な 3 つの個体を抽出した。3 個体はそれぞれ、偏心率が小さい解（偏心率最小解）、昼光率が大きい解（昼光率最大解）、両者の間に位置する解（中間解）である。3 個体の概要を次に示す（図 15）。

(2) 試行の結果

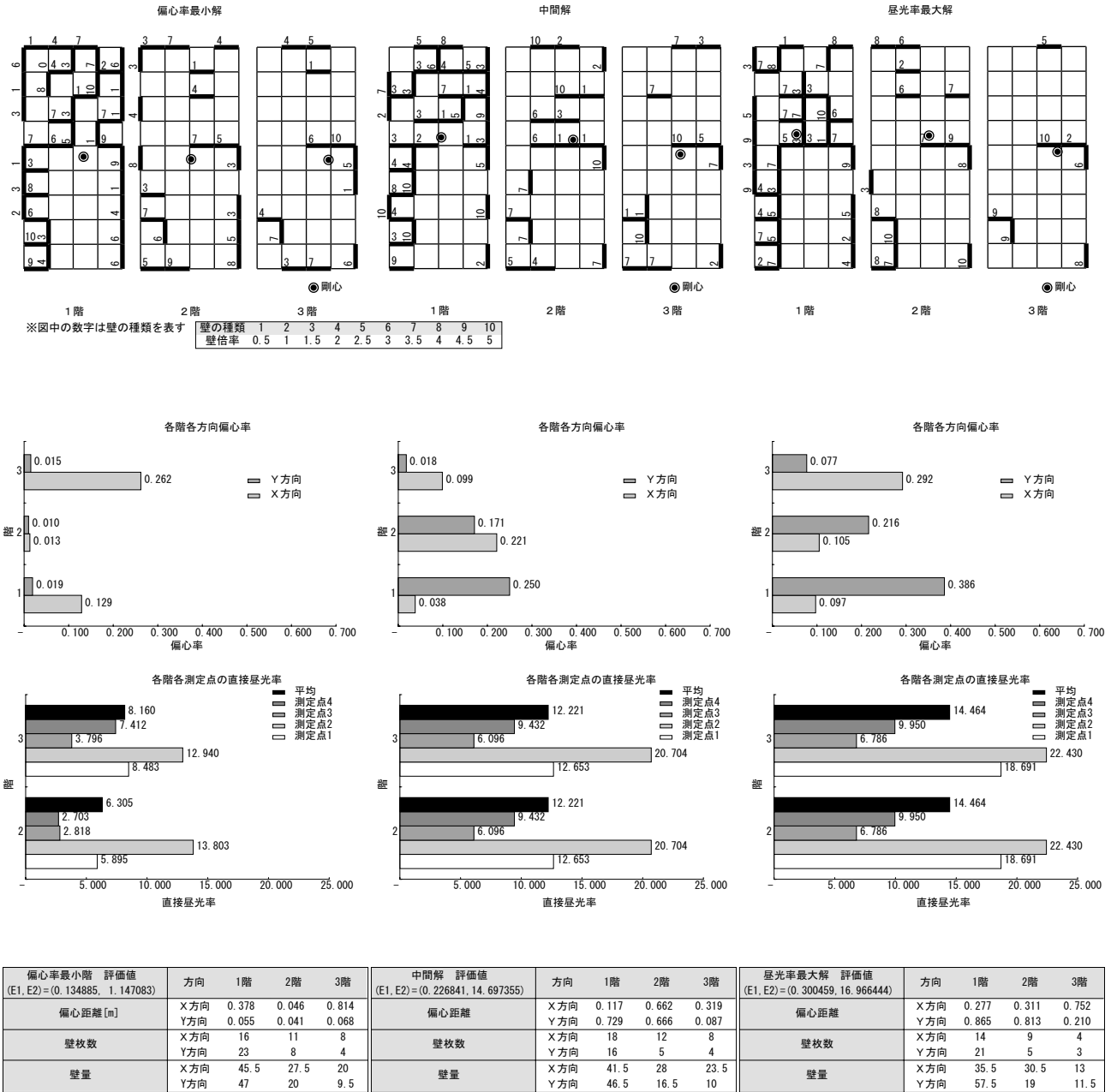


図 15 3代替案の概要

左から、偏心率最小解、中間解、昼光率最大解を3列に並べた。

1) 偏心率について

建物の南側には、1階には駐車スペース、2・3階には居室があるため、事例と同様に、中間解と昼光率最大解の1、2階で剛心が北側に寄っている。昼光率最大解では、居室の開口を大きくとっているため、他の2解よりも各階偏心率が大きくなっている。偏心率最小階では、特にY方向の偏心率が、各階とも小さく押さえられている。しかし一方、直接

昼光率も小さく押しえられてしまっている。中間解は、X方向偏心率が事例よりも大きい値となっているが、Y方向偏心率は、小さく押しえられている。

2) 昼光率について

偏心率最小解以外は、いずれも事例よりも優れた直接昼光率を示している。中間解と昼光率最大解に注目すると、居室の外部に面する部分の隅角部に、壁倍率の大きい耐力壁が配置され、大きな開口部が設けられている。これにより測定点1・2の直接昼光率が大きくなっていると考えられる。測定点3・4について、事例では小さい値となっているが、3解ではいずれも事例を上回る値を示している。これは、居室の深い部分まで良好な光環境が得られる耐力壁の配置となっていることを表している。風圧力と地震力の必要壁量の制約を満たした上で、偏心率と昼光率を高度に満たす耐力壁の配置が3解に特徴的に見られた。

(3) 平面計画が可能な解の獲得

1) 「中間解」を基にしたプランの作成

以下では、試行により得られた「中間解」をもとに、実現可能な解の生成を行う。

建築設計の目的は一つの設計解を明示的に表現することであり、そこに至る過程では様々な要因を考慮する必要がある。実現可能な住宅平面となるには、上記の部分目的以外にも検討すべき要因がある。少なくとも所要室が、適切な位置に配置可能であることが不可欠である。本来は、得られたパレート解とみなせる優秀な解について、全ての実現可能性を検討することが求められるが、ここでは特徴的な3解を抽出し、その中の一つの解に修正を加えて行く方法を採用。デザイナーが、中間解を基に想定する住宅プラン(図16)を実現する上で不適當、かつ、壁倍率が5以下で、上階の耐力壁が依存していない耐力壁を8枚削除した(図17)。

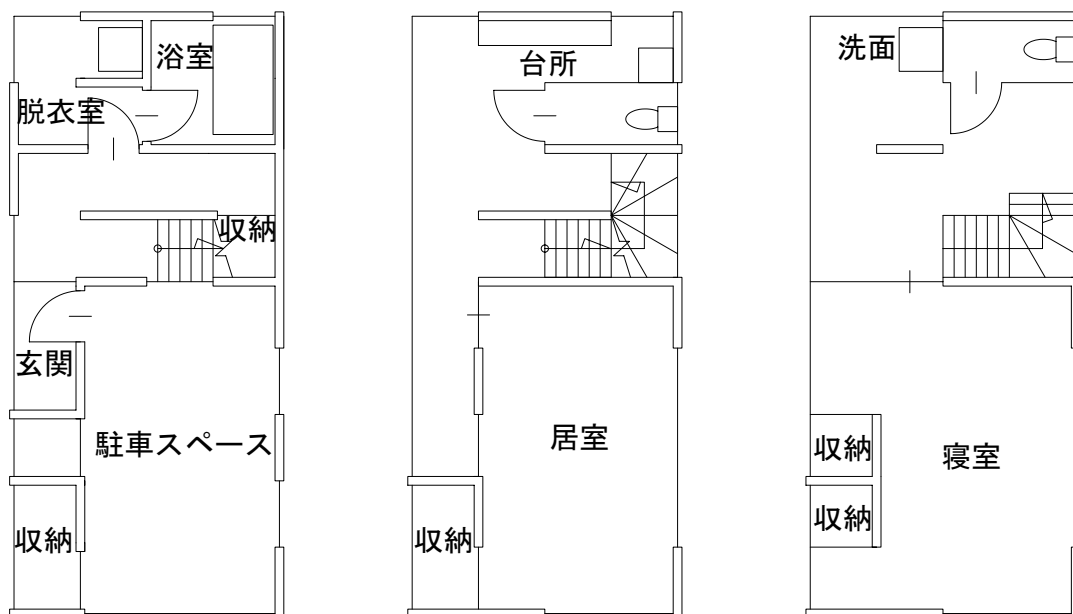


図16 作成したプラン

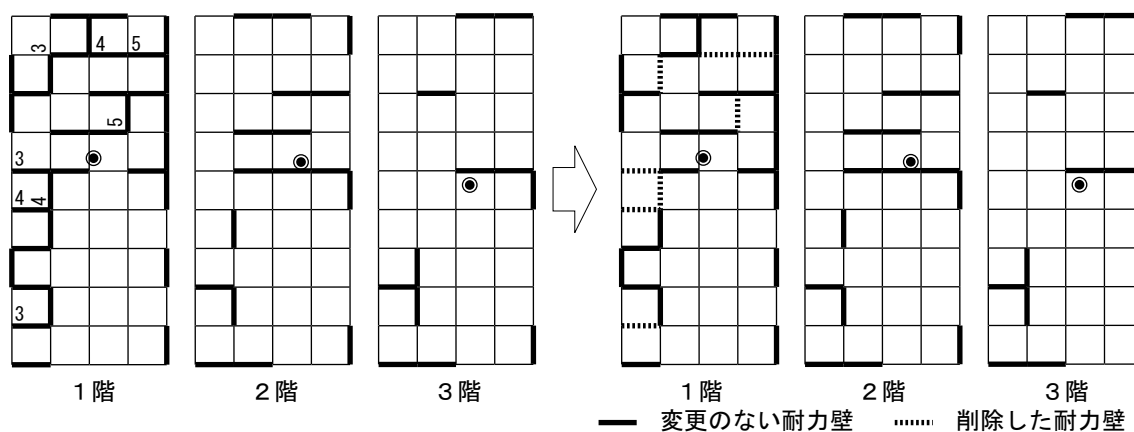


図17 耐力壁配置位置の変更

2) 壁倍率の調整

修正された耐力壁配置プランについて、耐力壁配置を固定し、各耐力壁の壁倍率を調整することにより、偏心率を減少させる。評価値として偏心率を設定し、単目的のGAを試行した。

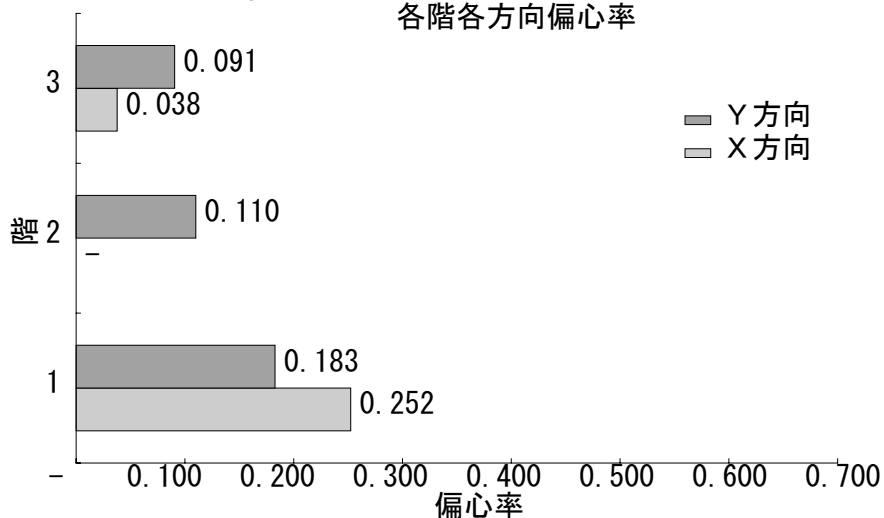
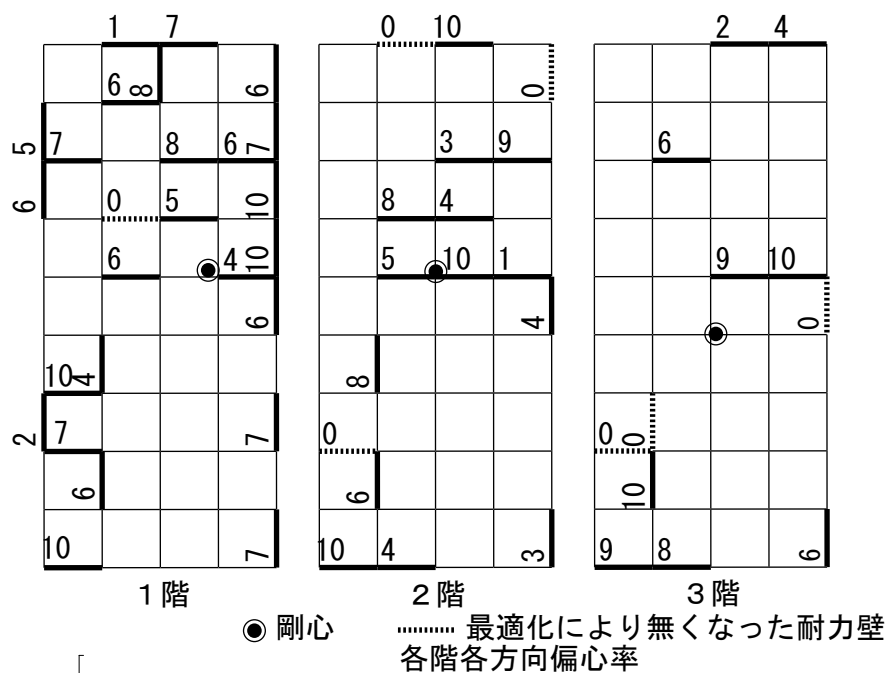


図18 試行の結果

5.4 採用可能な住宅平面の条件の設定

5.4.1 住宅平面モデルの設定

以下では、採用可能な住宅平面を見分ける評価関数を獲得するためのモデル化を行う。「代替案集合」の住宅平面としての整合性を検討する際、2・3階は耐力壁の数も少なく、所要室の配置は比較的自由度があり、容易であることが分かっている。これに対し、1階は耐力壁の数が多く、必要所要室を配置するには、2・3階よりも複雑な検討を要する。本章では簡単のため、木造3階建住宅モデルの一階の駐車場を除いた、4×4グリッドの矩形部分を「対象平面」とし、この部分についてのみ考察を行う（図19）。

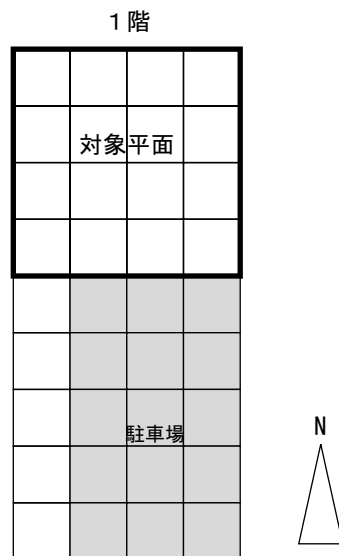


図19 対象平面

「対象平面」において、耐力壁の有無は、単位グリッド(以下、セル)において表現される。セルは周囲に4つの耐力壁候補位置を持つ。各耐力壁候補位置における耐力壁の有無を考慮すると、セルのとりタイプは、4ビット(2の4乗)の16通り設定される(図19)。

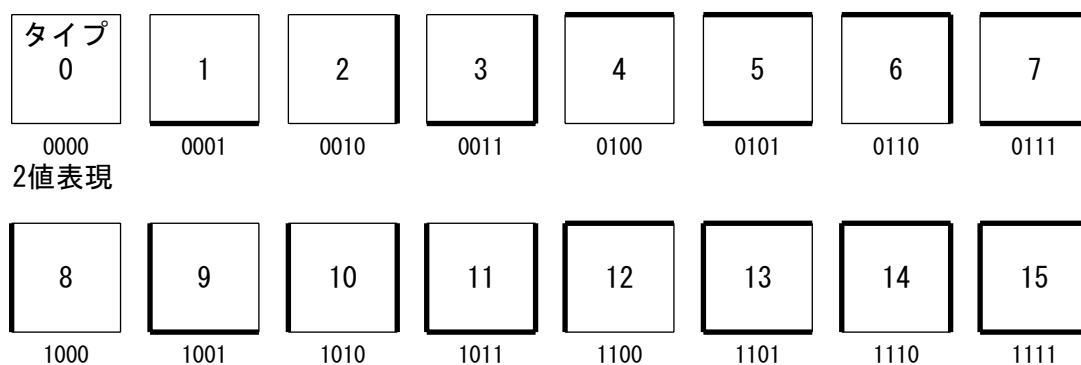


図19 セルのタイプ

「代替案集合」の1000個の各代替案は、耐力壁候補位置について耐力壁の有無を表す255の数値の列により表現されている。ここでは、各代替案の「対象平面」を表す部分を抽出し、これをセルのタイプによる表現に翻訳し、新たな「代替案集合」のデータベースを準備する(図20)。この0~15番のセルは、後の事例の学習に用いる遺伝的プログラミングにおいて、終端記号となる。

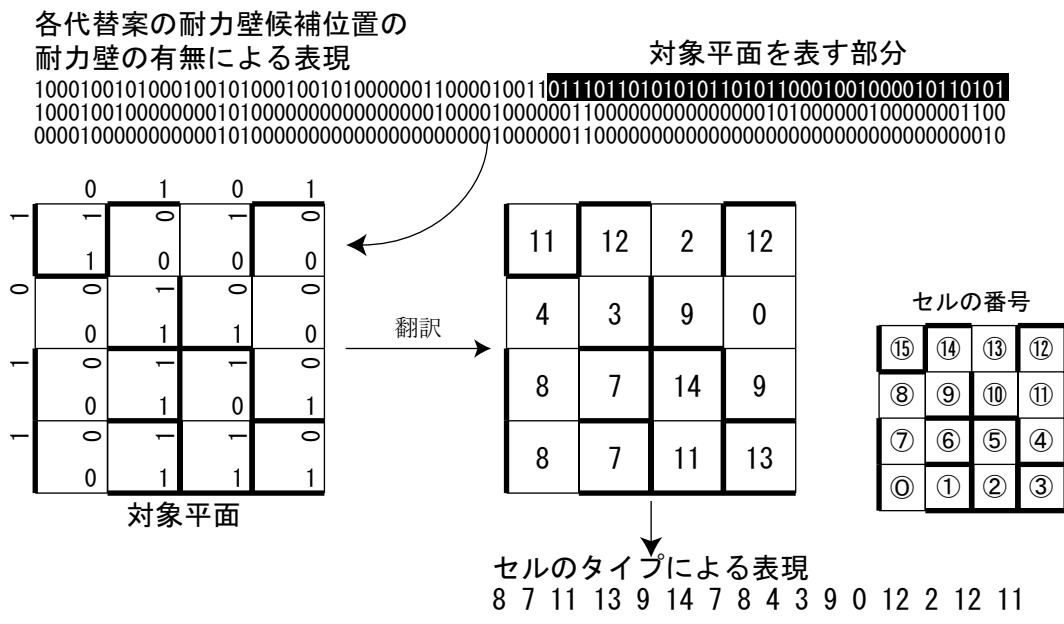


図 20 セルのタイプによる表現への翻訳

5. 4. 2 デザイナーによる代替案の対象平面の修正

1) 事例となる代替案の選択

「代替案集合」のうち、任意の 50 個の代替案を選択する。ここでは、1000 個の代替案のデータベースの中から、先頭の 50 個体を選択した。但し、データベースでは、各代替案はランダムな順序で並んでいる。

2) ポリシーの設定

ここでは、少なくとも「対象平面」が住宅平面として満たすべきと想定する必要条件を「ポリシー」として設定する。ポリシーは言語表現による複数の条件の集合からなる。本章で設定したポリシーを以下に示す。

1. 袋小路がなく、どの部分にもアプローチが可能であること。
2. 「所要室」(下記) が配置可能であること。
3. 所要室が適切な「関係」(下記) で配置されていること。

・「所要室」(必要グリッド数[G])

- a) 玄関 (2 G 以上)
- b) ホール (2 G 以上)
- c) 階段 (2 G 以上)
- d) 浴室 (4 G 以上、但し間口奥行共 2 G 以上、採光必要)

- e) 脱衣室（2 G 以上）
- f) 洗濯パン（1 G）
- g) 収納（1 G 以上、但しまとまったスペースでなくても良い）

・所要室の「関係」

- イ) 玄関は、南側からアプローチできる。
- ロ) ホールは、玄関からもアプローチできる。
- ハ) 階段は、ホールからアプローチできる。
- ニ) 脱衣室は、ホールからアプローチできる。
- ホ) 浴室は、脱衣室からアプローチできる。
- ヘ) 洗濯パンは、脱衣室に隣接している。
- ト) 収納は、浴室、階段以外からアプローチできる。

3) 代替案の対象平面の修正

1 で選択された代替案はいずれも「ポリシー」を満たしてはいなかった。ここでは、「ポリシー」を満たす住宅平面になるように、50 の代替案全てについて、デザイナーがなるべく少ない枚数の耐力壁の削除による修正を行い、修正前の代替案の集合と修正後の代替案の集合のデータベースを作成した。修正前と修正後の、代替案のセルのタイプの配列が、後の学習における正事例と負事例のデータベースとして用意される。50 組の正事例と負事例の組のうち、はじめの 10 組の「対象平面」を以下に例示する（図 21）。

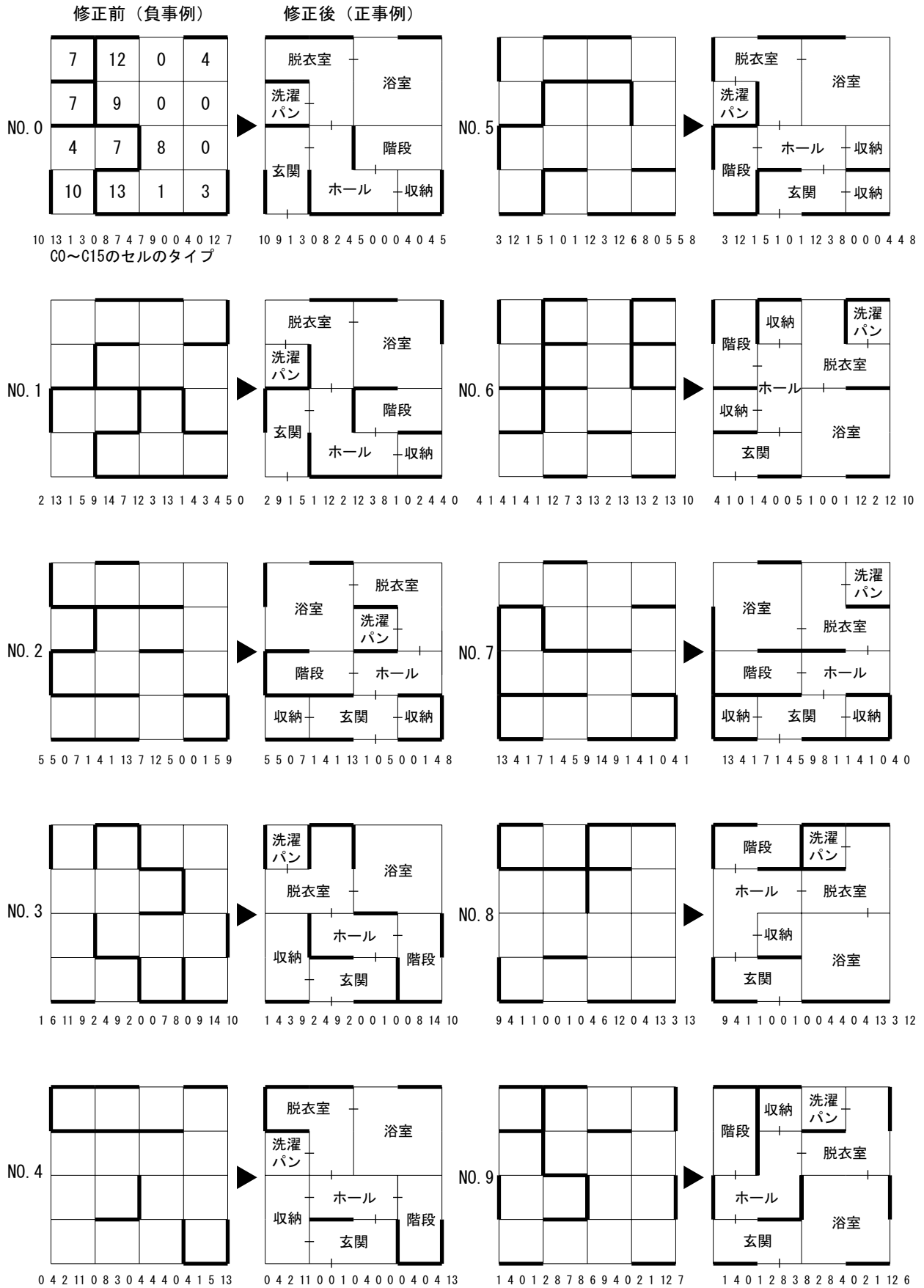


図 21 作成した 50 組の正事例と負事例のうちの最初の 10 組

5.5 帰納推論による事例の学習

5.5.1 関数記号、終端記号の設定

遺伝的プログラミング (Genetic Programming)^{注2)} を用いた記号当てはめ (Symbolic Regression) では、入力と出力の組を与えることにより、進化的な記号処理を行い、それら間の木構造表現による関係式を帰納的に生成することができる。このとき、関係式を同定するのに使って良い四則演算や論理演算等の関数、変数、定数が予め与えられる。遺伝的プログラミングにおける各個体は木構造で表現され、交配、突然変異、転置、複製という遺伝的オペレータが適用される (付章2.2参照)。5.4で設定した住宅平面モデルをもとに、遺伝的プログラミングにおける関数記号と終端記号を設定する (表2, 3)。

表2 関数記号

記号	引数の数	戻り値 (引数①、②、③、④)
+	2	① + ②
-	2	① - ②
*	2	① * ②
%	2	① / ② (但し②が0の場合は1)
IFLTE	4	① < ②の場合③、そうでない場合④

表3 終端記号

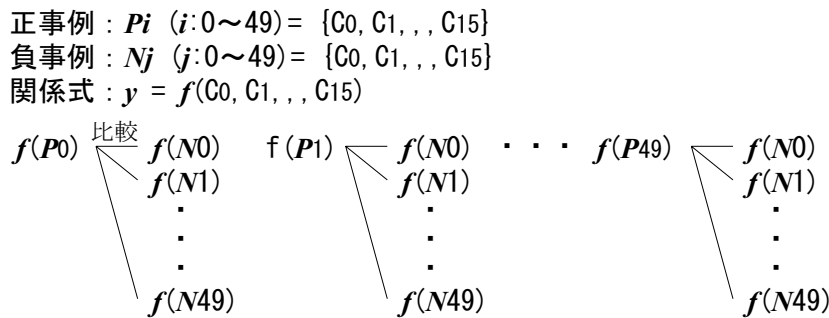
記号	意味
C0, C1, C2, C3, C4, C5, C6, C7, C8, C9, C10, C11, C12, C13, C14, C15	セル ⑩~⑮ のタイプ
定数	ランダムな定数 (-5~5)

5.5.2 個体の関数の評価方法

GPの試行において、遺伝的オペレータにより生成された個体の表す関数は、与えた正事例と負事例をどれほどよく見分けているかに応じて評価値が算定され、進化してゆく。ここでは、正事例を評価した時のある関数の値が、負事例を評価した時の同関数の値を上回っている場合、この関数は正事例と負事例を見分けているものとし、一つ見分ける毎に評価値が1加算される。ある個体の関数が、各正事例に対し、50個の全ての負事例を見分けているとき、すなわち、各正事例をある関数に適用した場合の値が、50個の全ての負事例の値を上回っているとき、その関数は50×50の2500回の場合について、与えた事例を全て見分けており、そこで試行を終了する (図22)。試行のパラメータは以下のように設定した。

個体数：8192，初期に生成される木の最大深さ：6，交叉で生成される木の最大深さ：17，
 突然変異で生成される木の最大深さ：4，木の生成規則：ランダム，選択方式：ルーレット方式，
 関数ノードでの交叉の確率：20%，関数及び終端ノードでの交叉の確率：20%，複製の確率：10%，
 小さい木を優先するための適合度の変換：なし

第82世代で、全ての事例を見分ける個体、すなわち評価値2500の個体が見つかり、試行を終了した（図23）。個体の関数はLISPのS式^{注3)}による表現で以下のようになった（図24）。



各比較で、 $f(P_i) > f(N_j) (i, j: 0\sim49)$ ならば、
 関係式 f は、正しく事例を見分けており 1 点獲得。2500 点で試行を終了。

図 22 個体の関数の評価の方法

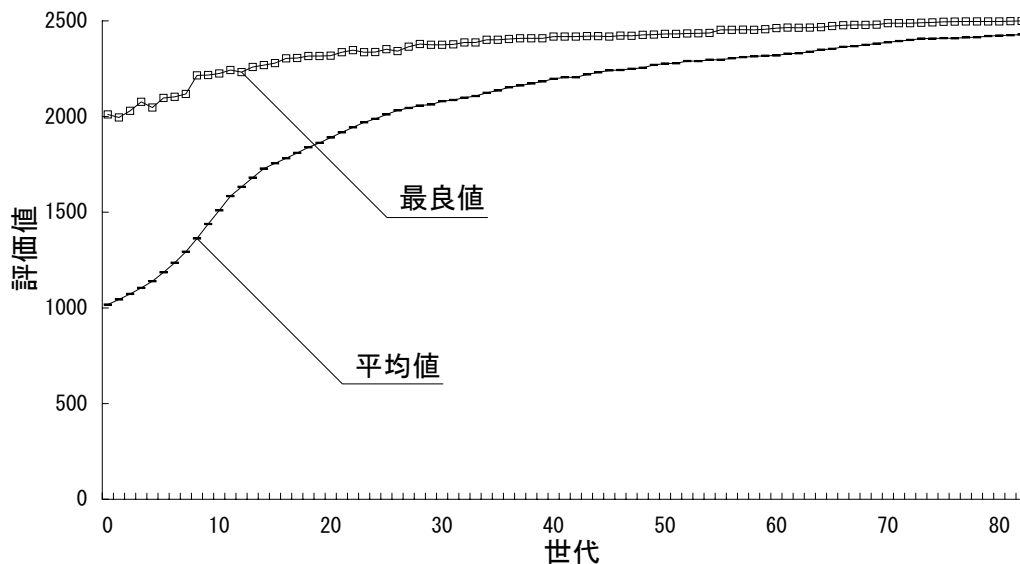


図 23 各世代の最良個体の評価値と平均値の推移

```

(- (- (IFLTE C12 C10 C5 C3) (+ (IFLTE (% C12(+ (% C1(* (IFLTE C3 C8 C7 (* C3 C10)) C0))
(- C7 (+ (* (* C1 C10) (+ C5 C3)) (- (* (+ (% C7 C10) (* C11 C13)) (+ (% (* (+ C5 C14)
(IFLTE (+ C5 C3) (IFLTE C3 C12 C3 C0) (+ C15 C0) (IFLTE C8 C10 (IFLTE C2 C7 C14 C15) (-
C12 C2)))) -0.269638) C7)) (+ (IFLTE (IFLTE C3 C4 C10 C1) C6(+ (% C15 C10) (* C3 C3))C8)
(* (* C13 C12) (* (* (IFLTE (- (+ C8 C10)C4) (- (IFLTE G2 C1 (% C14 C12) C6) C15) C8
(IFLTE C12 C8 C0(- C10 C0)) C9) -2.422014)))))) C3 (- (% (% C11 C2) C11) (* C4 -
1.754433)) (% (- C10 C10) C6)) (+ (* (* C1 C10) (+ C5 C13)) (- C7 (+ (IFLTE C1 (%
(IFLTE (IFLTE C12 C5 C5 C2) (* C8 C11) (* C14 (IFLTE (- C8 C3) C14 C12 C2)) (+ (- C5 -
3.280964) C13)) C13) (+ (+ (% (+ C14 (* C8 C0)) C10) (+ C8 (IFLTE (* (* C3 C10) C6) C9
C13 C4))) C4) (% (- C15 C8) C8)) (* (* C6C8) (* C9 -2.422014)))))) (+ C1(+ (% (- (* (%
0.708279C14) -3.968790) C6) C8) (- (% C10 C11) (- (* (% (% (- C15 C11) (+ C11 C5))
(IFLTE (* C14 C9) C7 (- (% (IFLTE C2 C15 C15 (* C8 C11))C12) (* (* C1 C10) C11)) (+ C0
3.547750))) (+ C14 (- (- C10 C14) (- (- C3 (* (+ C6 (+ C3 (+ C11 4.702710))) (+ C9
C13))) (IFLTE C4 C4 C10 (+ (+ (* (IFLTE 0.939933 C0 C1 C15) C14) C9) C6)))))) (+ (+ (+
(+ C14 (- (- C13 C14) (- (- C3 (* (+ C6 (+ C3 (+ C11 C5))) (+ C9 C13))) (IFLTE C14 C4
C10 (+ (+ (* C13 C14) C9) C6)))))) (- C9 C2)) (+ (* (+ C3 (* C11 C13)) (- (* 3.547750
C9) -2.754384)) (+ (* (+ (* C1 C10) C10) C13) C9))) (+ (* (* C1 C10) (+ C7 C12)) (- C6(+
(% (* (+ C5 C14) (IFLTE (+ -2.754384C3) (IFLTE C0 C12 C3 C0) (+ C15 C0) (IFLTE (- C15
0.862892) (* (+ C15 C13) C13) (IFLTE C11 C14 3.854014 (IFLTE (% C3 (+ C11 (IFLTE C7 C0

```

図24 試行の結果得られた個体の関数

5.6 関数のふるいとしての代替案集合への適用

5.6.1 関数による代替案集合の各代替案の値の算出

得られた関数は、「ポリシー」の下に、少なくとも与えた各50個の正事例と負事例を全て見分け、正事例に負事例よりも高い評価を与えるものである。この関数が、与えた事例以外の「対象平面」に対して、どれほど正しい評価を行うか、すなわち、どれほど「ポリシー」の満足度を測る指標として有効であるのか確かめるために、この関数で「代替案集合」の各代替案を評価する。ここでは、代替案集合の各代替案($S_i[i:0 \sim 999]$)の「対象平面」のセルのタイプを、関数のC0～C15の変数に代入して、関数の値($f(S_i)[i:0 \sim 999]$)を求める。各代替案に対応する関数の値を図に示す(図25)。

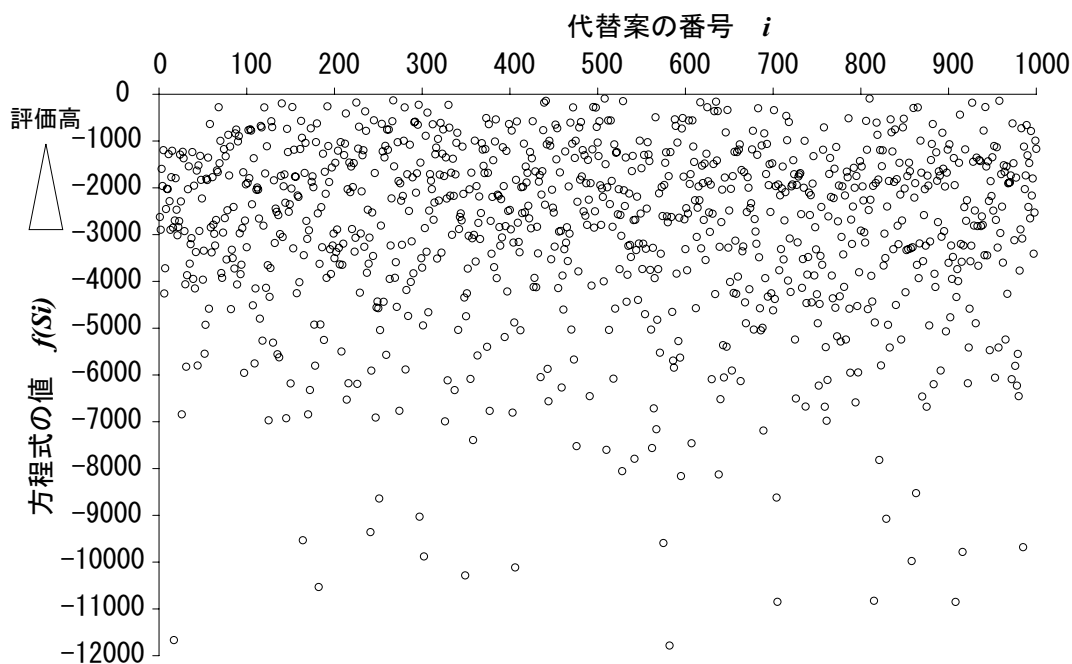


図25 代替案集合の各代替案の関数の値

5.6.2 記述された関数の有効性の検証

得られた関数の評価関数としての有効性を確かめるため、序列がつけられ、降順で並べられた「代替案集合」全てについて、「ポリシー」に照らし、条件を満たしているかどうか精密に調べた。各代替案を逐次参照した結果、1000個の「代替案集合」のうち、「満足代替案」は24個存在した(図26)。また「満足代替案」には、学習させた事例と同様のものはなかった。なお、本章付録の表中の●は、条件を満たしているもの(以下、「満足代替案」)を表す(但し、表において、156位以降には「満足代替案」は存在しなかったため、上位300位までに限り示した)。これらは、得られた関数に当てはめたときの値(以下、ポイント)によってソートすると、比較的上位に分布していた。「満足代替案」の全てが、上位156位以内、すなわち上位15.6%にランクされていた。また上位84位以内に、24個の全「満足代替案」のうち21個、すなわち87.5%が存在していた(図27)。図25に「満足代替案」をプロットすると図28のようになった。またそれを代替案の番号順から、ポイント順に並び替えたものが図29である。調べた結果存在した全ての「満足代替案」の平面(図30)と、それらに関数の値のポイント順に整理したもの(図28, 29)を示す。同一平面を持つものを考慮すると、満足代替案は17種類に分類され、それぞれポイント順にA~Qとした。満足代替案の二目的最適化の半順序集合における位置(図32)を考慮し、偏心率と昼光率を高度満たすNo. 451(72位)の代替案を選択し、住宅平面を作成した(図33-36)。

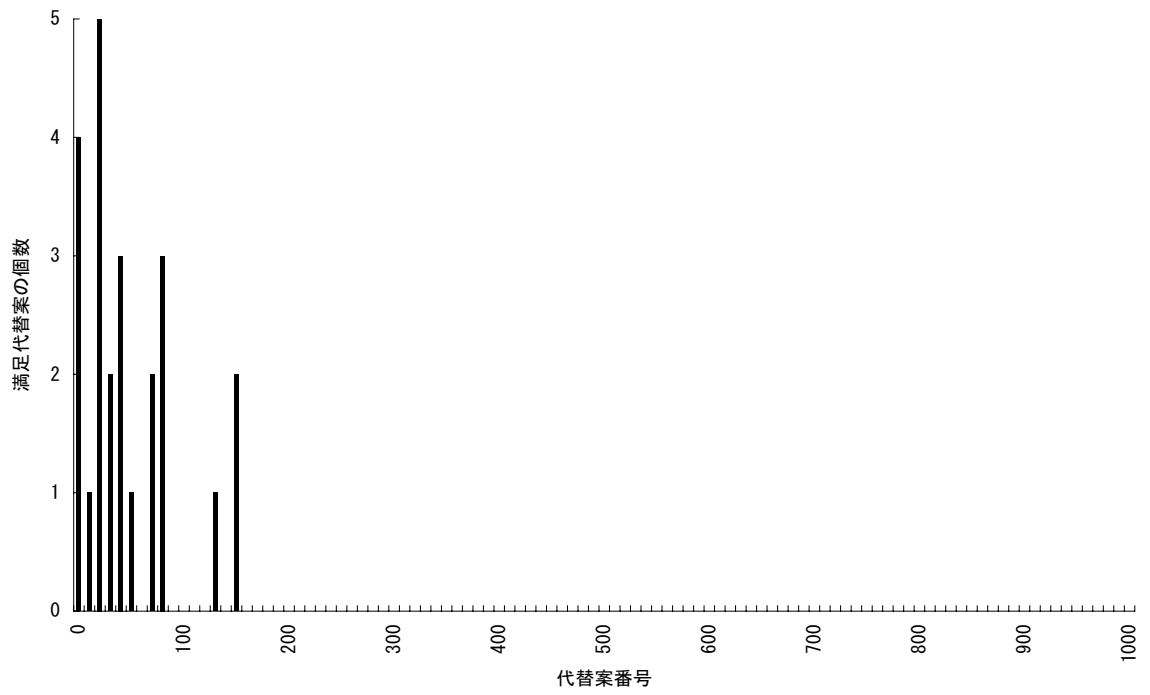


図26 「満足代替案」の分布

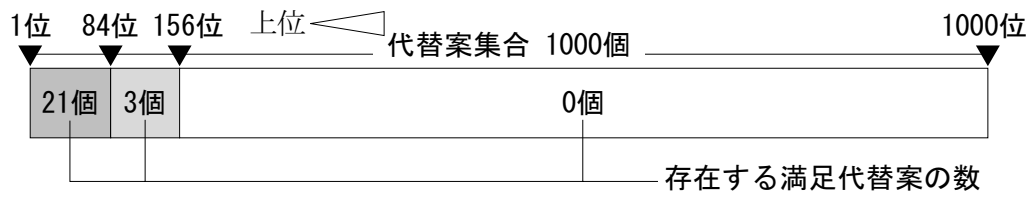


図27 満足代替案の分布の概略

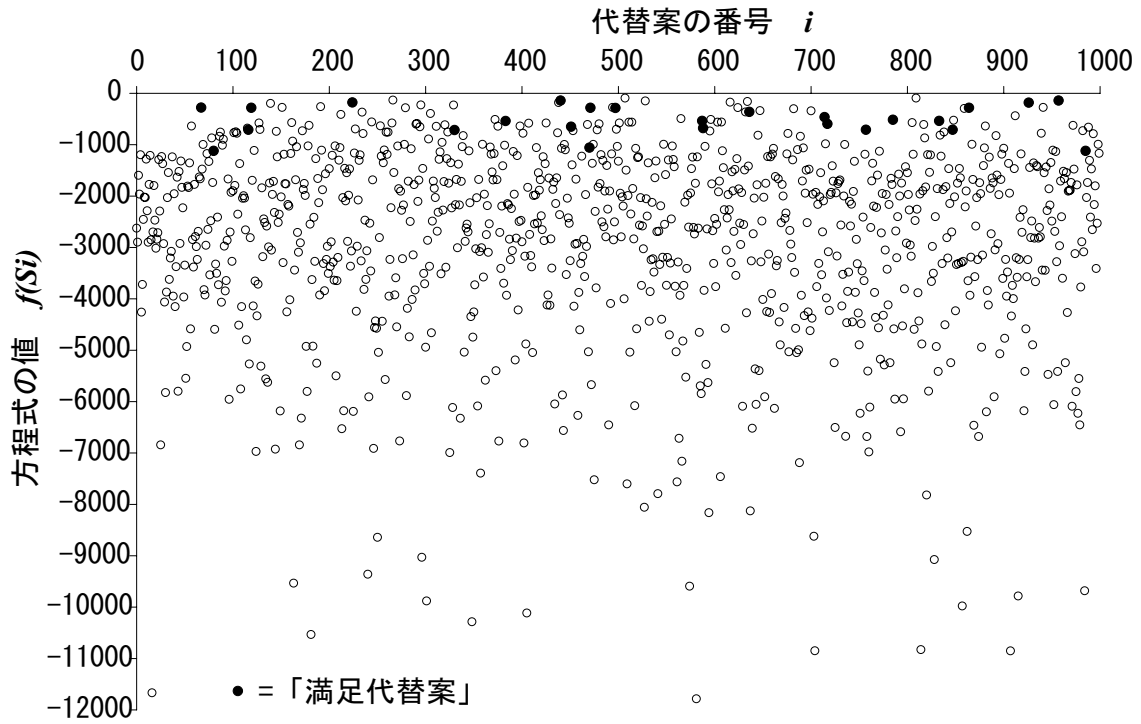


図 28 代替案集合における「満足代替案」の関数の値

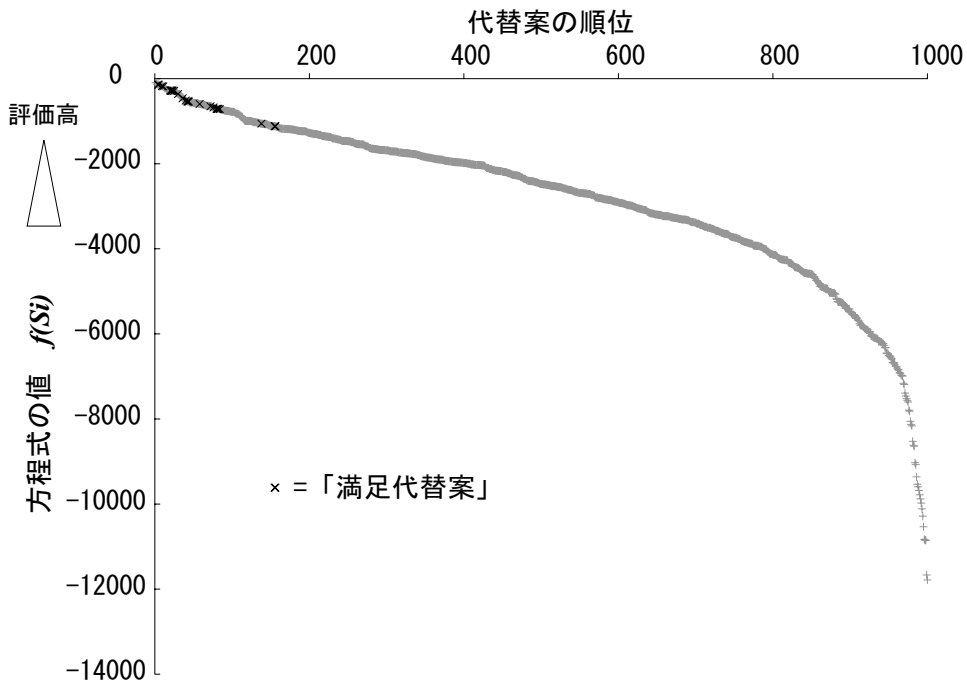


図 29 代替案集合における「満足代替案」の関数の値(ポイント順)

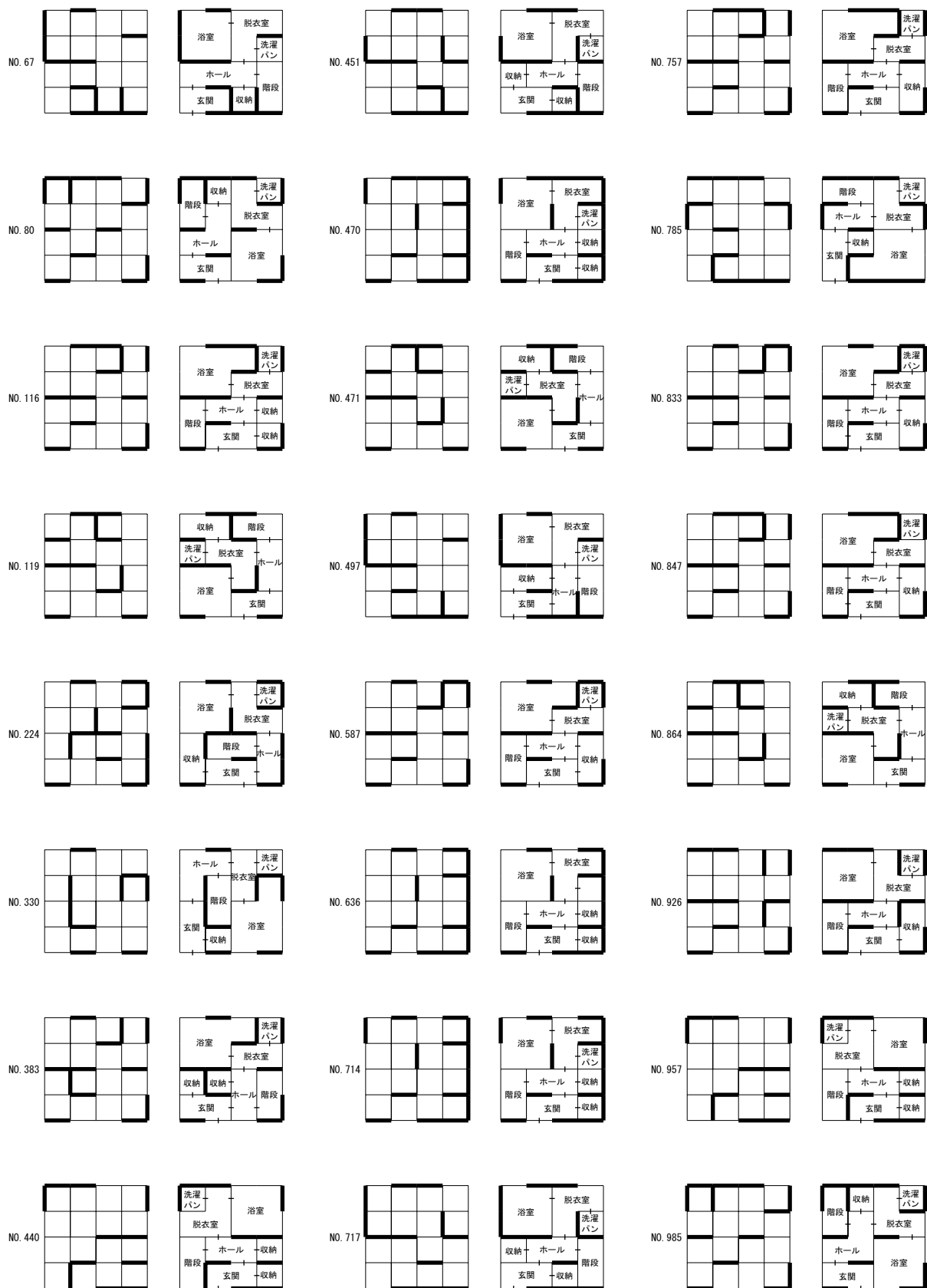


図30 代替案集合に存在した「満足代替案」

- ・タイプ
- ・(ポイント)
- ・順位
- ・代替案番号
- ・耐力壁配置
- ・室配置
- ・[特記事項]

タイプA (-141.04p) 第4位 NO. 440 NO. 957			タイプJ (-535.93p) 第42位 NO. 587 NO. 833			[脱衣室 2G] (浴室不整形)
タイプB (-178.14p) 第9位 NO. 224			タイプK (-538.79p) 第44位 NO. 383			[脱衣室 2G] (浴室不整形)
タイプC (-182.01p) 第11位 NO. 926			タイプL (-594.34p) 第58位 NO. 717			
タイプD (-278.38p) 第20位 NO. 67			タイプM (-650.18p) 第72位 NO. 451			
タイプE (-281.35p) 第21位 NO. 119 NO. 471 NO. 864			タイプN (-709.19p) 第80位 NO. 116 NO. 757 NO. 847			[脱衣室 2G] (浴室不整形)
タイプF (-284.62p) 第25位 NO. 497			タイプO (-714.07p) 第84位 NO. 330			[脱衣室 2G] [収納 1G] (浴室不整形)
タイプG (-360.00p) 第30位 NO. 636			タイプP (-1056.76p) 第138位 NO. 470			
タイプH (-461.85p) 第36位 NO. 714			タイプQ (-1119.47p) 第155位 NO. 80 NO. 985			[収納 1G]
タイプI (-515.05p) 第40位 NO. 785						[収納 1G] (浴室不整形)

図31 ポイント順に並べた「満足代替案」の概要

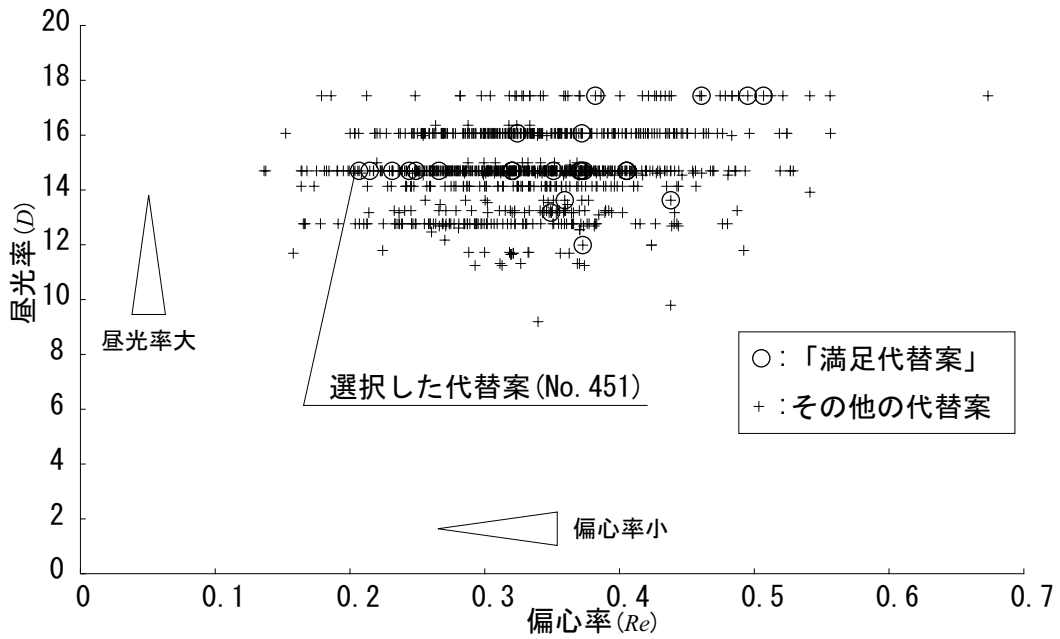


図 32 「満足代替案」の二目的最適化の半順序集合における位置

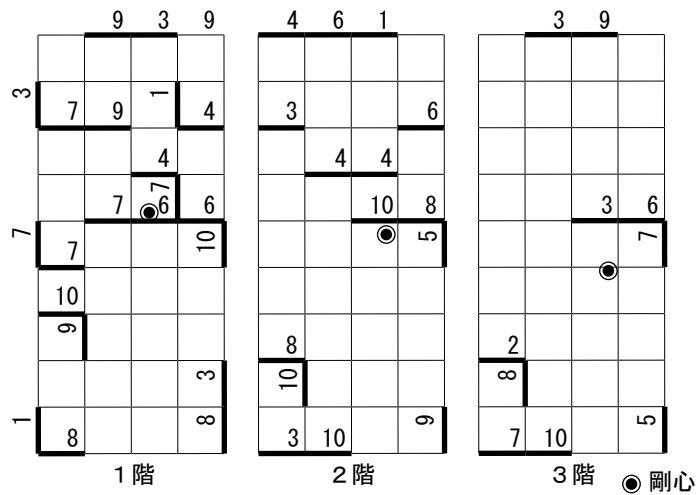


図 33 選択した代替案の耐力壁配置

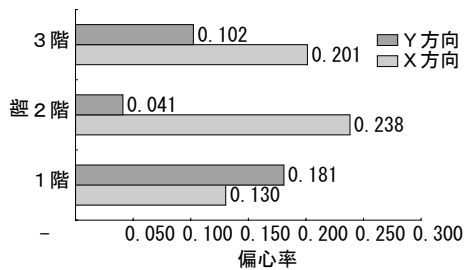


図 34 選択した代替案の偏心率

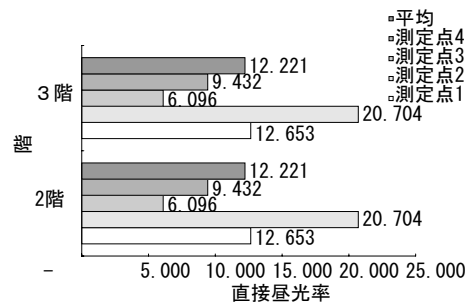


図 35 選択した代替案の昼光率

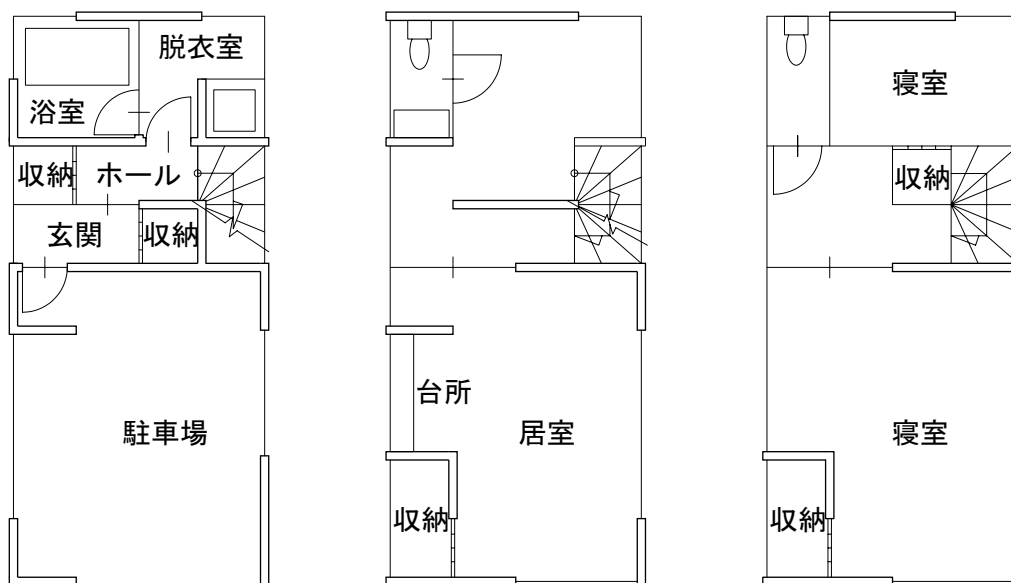


図 36 選択した代替案の住宅平面

5.7 まとめ

本章では、評価関数が明示的でなく、それを記述する手順も未知であるが、部分的な評価尺度が言語表現により「ポリシー」として設定されている場合を想定した。木造3階建住宅の耐力壁配置による住宅平面を対象に、「ポリシー」に則ってデザイナーにより評価され与えられる各50個の正負事例の学習により、両者を見分ける関数をGPを用いた帰納推論の手法により獲得した。得られた関数で「代替案集合」の各代替案を評価し、序列をつけた。結果、「ポリシー」を満たす代替案は、序列の比較的上位に分布していることが確かめられた。このことから、正負事例の学習により獲得された関数は、学習に用いられなかった他の代替案に対してもある程度有効に「ポリシー」に基づいた評価を行うことが示された。すなわち、記述された関数は、正負事例に内在すると考えられる「ポリシー」の満足、不満足をもたらす構造を評価する指標として、一定の精度で有効な評価尺度となっていることが示された。最後に、「ポリシー」を満たし、住宅平面として採用可能で、かつ偏心率と昼光率を高度に満たす代替案を選択して例示した。

注釈

- 1) 本章では、代替案の選択を行う意思決定主体を狭義の設計者とする。
- 2) Tackett W. A, Carmi A. のSGPC(Simple Genetic Programming in C)をもとに実装した。
- 3) S式表現(Symbolic Expression)は、LISPの記法で、例えば、通常の式の $(1 + 2)$ は、S式で $(+ 1 2)$ と表される。3章参照。

参考文献

- 1) 松下大輔, 宗本順三, 岩田伸一郎 : ホテルの客室部分構成比と各事業主体のNPV最大化の二目的問題, 日本建築学会計画系論文集 No. 539, pp139, 2001. 1
- 2) 松下大輔, 宗本順三: 対話型進化計算による形態構成規則の獲得モデル, 日本建築学会計画系論文集, NO. 560, P. 135, 2002. 10.
- 3) 孫京廷, 福富涼, 松下大輔, 宮本勇樹, 吉田哲, 宗本順三: 木造3階建住宅におけるGAを用いた耐力壁の配置計画の研究, 日本建築学会大会(2002)学術講演梗概集 情報システム技術 11059, 11060, pp. 559-562
- 4) 高木英行, 畝見達夫, 寺野隆雄: 対話型進化計算法の研究動向, 人工知能学会誌, vol. 13 No. 5, 1998-9
- 5) Hudson, S. E. and Hsi, C.-N.: A Synergistic Approach to Specifying Simple Number Independent Layouts by Example, Proceedings of ACM INTERCHI'93 Conference on Human Factors in Computing Systems, Addison Wesley, April 1993, pp. 285-292.
- 6) 増井俊之: 進化的学習機構を用いたグラフ配置制約の自動抽出, インタラクティブシステムとソフトウェアII: 日本ソフトウェア科学会 WISS'94, 近代科学社, 1994, pp. 195-204.
- 7) 千葉和也, 大和田勇人, 溝口文雄: 帰納論理プログラミングを用いたグラフィックデザイン知識の獲得, 人工知能学会論文誌, Vol. 16, No. 1, pp. 156-163, 2001. 1.
- 8) 瀧澤重志, 河村廣, 谷明勲: 対話型進化計算法による家具デザイン- 遺伝的プログラミングによるユーザーの嗜好の定量化と予測 -, 日本建築学会, 第23回情報システム利用シンポジウム, pp. 175-180, 2000. 12.
- 9) A. Loizides and M. Slater and W. B. Langdon: Measuring Facial Emotional Expressions Using Genetic Programming, 6th Online World Conference on Soft Computing in Industrial Applications, 2001.9.
- 10) 三田英之, 石塚満, 伊庭斉志: 遺伝的プログラミングを用いた脱出問題の解法, 第9回マルチ・エージェントと協調計算ワークショップ, 2000. 12.

付録

関数により序列がつけられた代替案集合における満足代替案の分布

順位	代替案番号	値	順位	代替案番号	値	順位	代替案番号	値	順位	代替案番号	値			
1	No. 507	-92.9	101	No. 676	-780.15	201	No. 10	-1280.65	301	No. 730	-1686.17	401	No. 220	-1983.16
2	No. 809	-92.9	102	No. 235	-783.18	202	No. 314	-1284.73	302	No. 293	-1689.66	402	No. 412	-1986.84
3	No. 266	-131.51	103	No. 993	-785.88	203	No. 557	-1288.06	303	No. 120	-1692.98	403	No. 175	-1987.02
●	No. 440	-141.04	104	No. 834	-814.49	204	No. 23	-1290.78	304	No. 763	-1704.28	404	No. 510	-1990.37
●	No. 957	-141.04	105	No. 645	-816.85	205	No. 681	-1294.6	305	No. 691	-1705.67	405	No. 111	-1994.09
●	No. 628	-147.21	106	No. 339	-822.76	206	No. 552	-1297.97	306	No. 308	-1708.68	406	No. 734	-1998.7
●	No. 634	-158.25	107	No. 892	-822.76	207	No. 210	-1301.73	307	No. 605	-1708.68	407	No. 792	-1998.7
●	No. 616	-172.28	108	No. 86	-836.65	208	No. 231	-1303.89	308	No. 959	-1708.68	408	No. 671	-1998.75
●	No. 224	-178.14	109	No. 689	-836.65	209	No. 484	-1303.89	309	No. 723	-1710.75	409	No. 709	-2014.31
●	No. 438	-179.95	110	No. 78	-867.9	210	No. 989	-1303.89	310	No. 282	-1710.86	410	No. 504	-2016.23
●	No. 926	-182.01	111	No. 818	-867.9	211	No. 46	-1316.92	311	No. 337	-1713.87	411	No. 150	-2016.26
●	No. 139	-196.85	112	No. 303	-888.42	212	No. 539	-1317.47	312	No. 142	-1713.91	412	No. 849	-2016.26
●	No. 295	-226.7	113	No. 90	-894.52	213	No. 500	-1320.68	313	No. 729	-1714.51	413	No. 8	-2021.67
●	No. 329	-227.14	114	No. 162	-931.7	214	No. 745	-1322.94	314	No. 319	-1717.86	414	No. 651	-2023.13
●	No. 191	-259.11	115	No. 317	-955.36	215	No. 75	-1327.54	315	No. 433	-1727.38	415	No. 310	-2029.03
●	No. 151	-273.47	116	No. 715	-983.09	216	No. 949	-1346.99	316	No. 970	-1736.21	416	No. 9	-2029.07
●	No. 494	-273.47	117	No. 359	-992.27	217	No. 326	-1350.74	317	No. 79	-1736.66	417	No. 986	-2029.07
●	No. 941	-273.47	118	No. 547	-992.27	218	No. 256	-1351.48	318	No. 987	-1736.66	418	No. 32	-2029.56
●	No. 624	-276.98	119	No. 998	-992.27	219	No. 531	-1352.2	319	No. 875	-1739.68	419	No. 872	-2029.56
●	No. 67	-278.38	120	No. 867	-992.45	220	No. 55	-1353.87	320	No. 889	-1740.96	420	No. 214	-2030.77
●	No. 119	-281.35	121	No. 278	-993.45	221	No. 931	-1354.87	321	No. 138	-1744.68	421	No. 523	-2030.92
●	No. 471	-281.35	122	No. 474	-993.67	222	No. 473	-1362.39	322	No. 794	-1746.15	422	No. 353	-2032.02
●	No. 864	-281.35	123	No. 444	-995.55	223	No. 764	-1362.93	323	No. 852	-1749.23	423	No. 641	-2038.63
●	No. 279	-281.88	124	No. 735	-995.55	224	No. 905	-1363.62	324	No. 324	-1749.51	424	No. 112	-2038.89
●	No. 497	-284.62	125	No. 69	-996.04	225	No. 107	-1367.67	325	No. 580	-1751.61	425	No. 447	-2041.07
●	No. 859	-294.3	126	No. 89	-1010.37	226	No. 27	-1368.84	326	No. 653	-1751.61	426	No. 110	-2041.27
●	No. 682	-299.18	127	No. 382	-1010.37	227	No. 424	-1368.84	327	No. 174	-1754.08	427	No. 529	-2052.21
●	No. 647	-336.07	128	No. 178	-1023.28	228	No. 334	-1377.97	328	No. 481	-1755.9	428	No. 230	-2076.52
●	No. 700	-340.93	129	No. 206	-1023.28	229	No. 452	-1392.13	329	No. 154	-1757.86	429	No. 217	-2093.46
●	No. 636	-360	130	No. 271	-1024.46	230	No. 488	-1404.72	330	No. 728	-1758.42	430	No. 713	-2093.46
●	No. 632	-363.53	131	No. 556	-1024.46	231	No. 879	-1405.69	331	No. 597	-1762.12	431	No. 740	-2102.8
●	No. 234	-366.13	132	No. 499	-1032.46	232	No. 934	-1405.86	332	No. 155	-1764.48	432	No. 292	-2105.02
●	No. 305	-392.11	133	No. 590	-1033.59	233	No. 380	-1409.57	333	No. 13	-1772.37	433	No. 569	-2119.62
●	No. 212	-410.2	134	No. 338	-1038.68	234	No. 722	-1411.13	334	No. 60	-1772.37	434	No. 535	-2123
●	No. 912	-437.06	135	No. 166	-1040.07	235	No. 635	-1416.39	335	No. 670	-1772.37	435	No. 189	-2128.11
●	No. 714	-461.85	136	No. 367	-1046.44	236	No. 798	-1428.51	336	No. 784	-1775.06	436	No. 346	-2129.89
●	No. 565	-492.75	137	No. 415	-1056.36	237	No. 558	-1429	337	No. 288	-1775.91	437	No. 435	-2145.11
●	No. 596	-508.32	138	No. 470	-1056.76	238	No. 935	-1429	338	No. 644	-1780.99	438	No. 844	-2145.11
●	No. 372	-509.02	139	No. 211	-1057.56	239	No. 944	-1435.18	339	No. 976	-1782.29	439	No. 385	-2147.19
●	No. 785	-515.05	140	No. 880	-1062.57	240	No. 927	-1443.19	340	No. 102	-1792.63	440	No. 742	-2158.79
●	No. 848	-523.65	141	No. 692	-1062.68	241	No. 609	-1448.02	341	No. 18	-1794.73	441	No. 707	-2161.29
●	No. 587	-535.93	142	No. 900	-1070.23	242	No. 216	-1460.28	342	No. 995	-1800.27	442	No. 157	-2162.81
●	No. 833	-535.93	143	No. 518	-1070.92	243	No. 297	-1461.97	343	No. 53	-1805.54	443	No. 781	-2163.6
●	No. 383	-538.79	144	No. 441	-1071.87	244	No. 854	-1464.29	344	No. 840	-1815.58	444	No. 994	-2165.64
●	No. 244	-556.29	145	No. 661	-1071.87	245	No. 200	-1464.87	345	No. 819	-1822.08	445	No. 331	-2167.23
●	No. 607	-559.55	146	No. 285	-1079.34	246	No. 576	-1464.87	346	No. 479	-1825.98	446	No. 386	-2172.19
●	No. 511	-560.4	147	No. 686	-1096.34	247	No. 843	-1464.87	347	No. 47	-1830.48	447	No. 335	-2172.52
●	No. 514	-560.4	148	No. 445	-1099.77	248	No. 911	-1464.87	348	No. 406	-1830.6	448	No. 277	-2172.74
●	No. 603	-560.4	149	No. 257	-1102.72	249	No. 221	-1471.18	349	No. 54	-1834.87	449	No. 948	-2175.19
●	No. 161	-570.64	150	No. 192	-1106.38	250	No. 991	-1471.18	350	No. 130	-1839.63	450	No. 364	-2185.6
●	No. 805	-570.64	151	No. 951	-1107.27	251	No. 68	-1474.12	351	No. 309	-1848.82	451	No. 544	-2189.93
●	No. 127	-578.3	152	No. 122	-1111.73	252	No. 973	-1474.12	352	No. 886	-1851.43	452	No. 158	-2194.65
●	No. 265	-578.3	153	No. 608	-1117.86	253	No. 698	-1477.53	353	No. 515	-1851.92	453	No. 379	-2195.79
●	No. 425	-578.3	154	No. 345	-1118.77	254	No. 621	-1480.77	354	No. 831	-1854.31	454	No. 505	-2195.79
●	No. 501	-578.3	155	No. 80	-1119.47	255	No. 631	-1491.91	355	No. 272	-1855.76	455	No. 765	-2195.79
●	No. 407	-580.22	156	No. 985	-1119.47	256	No. 508	-1494.72	356	No. 947	-1857.49	456	No. 860	-2210.16
●	No. 291	-585.96	157	No. 771	-1126.21	257	No. 695	-1495	357	No. 625	-1860.22	457	No. 768	-2220.33
●	No. 717	-594.34	158	No. 391	-1133.43	258	No. 962	-1518.05	358	No. 432	-1868.71	458	No. 264	-2225.54
●	No. 480	-594.78	159	No. 954	-1133.43	259	No. 44	-1521.73	359	No. 173	-1873.37	459	No. 48	-2227.37
●	No. 290	-599.6	160	No. 315	-1139.46	260	No. 618	-1526.74	360	No. 837	-1874.81	460	No. 327	-2230.1
●	No. 468	-607.79	161	No. 226	-1162.11	261	No. 369	-1530.45	361	No. 193	-1877.08	461	No. 389	-2242.72
●	No. 817	-607.79	162	No. 999	-1167	262	No. 823	-1537.17	362	No. 418	-1885.57	462	No. 489	-2253.96
●	No. 320	-612.51	163	No. 160	-1171.96	263	No. 267	-1540.91	363	No. 968	-1887.56	463	No. 810	-2255.42
●	No. 179	-623.53	164	No. 371	-1172.98	264	No. 33	-1542.07	364	No. 969	-1887.59	464	No. 615	-2265.3
●	No. 972	-623.53	165	No. 73	-1173.84	265	No. 965	-1542.07	365	No. 100	-1896.43	465	No. 920	-2265.3
●	No. 253	-633.62	166	No. 675	-1179.19	266	No. 218	-1544.58	366	No. 816	-1897.33	466	No. 610	-2265.97
●	No. 57	-636.5	167	No. 918	-1179.19	267	No. 942	-1544.58	367	No. 619	-1899.13	467	No. 802	-2270.79
●	No. 398	-636.5	168	No. 493	-1179.56	268	No. 710	-1545.58	368	No. 861	-1900.85	468	No. 318	-2272.59
●	No. 881	-637.47	169	No. 660	-1183.33	269	No. 417	-1546.17	369	No. 491	-1901.25	469	No. 275	-2275.5
●	No. 375	-640.07	170	No. 368	-1184.15	270	No. 800	-1546.17	370	No. 486	-1902.7	470	No. 945	-2282.26
●	No. 311	-642.32	171	No. 898	-1184.15	271	No. 196	-1566.16	371	No. 274	-1903.58	471	No. 11	-2286.34
●	No. 451	-650.18	172	No. 756	-1185.78	272	No. 791	-1572.55	372	No. 967	-1903.58	472	No. 24	-2291.86
●	No. 294	-650.58	173	No. 806	-1185.78	273	No. 549	-1581.56	373	No. 744	-1909.38	473	No. 476	-2299.21
●	No. 988	-658.74	174	No. 153	-1186.03	274	No. 769	-1591.41	374	No. 604	-1916.85	474	No. 313	-2315.91
●	No. 115	-676.77	175	No. 260	-1187.3	275	No. 893	-1592.46	375	No. 98	-1927.35	475	No. 143	-2318.47
●	No. 588	-676.77	176	No. 482	-1192.82	276	No. 2	-1595.62	376	No. 705	-1929.03	476	No. 674	-2329.35
●	No. 227	-694.89	177	No. 821	-1192.82	277	No. 663	-1619.97	377	No. 721	-1929.13	477	No. 513	-2348.83
●	No. 498	-698.74	178	No. 4	-1194.68	278	No. 65	-1628.9	378	No. 628	-1932.64	478	No. 105	-2351.96
●	No. 128	-704.02	179	No. 232	-1196.96	279	No. 42	-1632.73	379	No. 726	-1936.89	479	No. 148	-2352.54
●	No. 116	-709.19	180	No. 824	-1199.87	280	No. 538	-1643.15	380	No. 575	-1939.71	480	No. 439	-2361.14
●	No. 757	-709.19	181	No. 203	-1206.06	281	No. 436	-1645.43	381	No. 694	-1943.44	481	No. 420	-2383.05
●	No. 847	-709.19	182	No. 14	-1208.22									

顺位 代替案番号 值

501 No. 808 -2476.03	601 No. 799 -2914.79	701 No. 431 -3402.32	801 No. 121 -4139.07	901 No. 207 -5498.93
502 No. 77 -2480.36	602 No. 45 -2921.63	702 No. 996 -3408.8	802 No. 454 -4143.89	902 No. 570 -5524.54
503 No. 649 -2486.42	603 No. 457 -2922.49	703 No. 571 -3408.93	803 No. 109 -4150.44	903 No. 51 -5547.31
504 No. 929 -2486.42	604 No. 28 -2926.62	704 No. 378 -3409.12	804 No. 40 -4150.73	904 No. 978 -5550.87
505 No. 950 -2487.93	605 No. 894 -2926.62	705 No. 779 -3423.16	805 No. 672 -4168.57	905 No. 134 -5558.23
506 No. 307 -2488.15	606 No. 455 -2935.06	706 No. 164 -3439.57	806 No. 281 -4184.47	906 No. 258 -5571.23
507 No. 397 -2494.93	607 No. 679 -2935.11	707 No. 940 -3439.57	807 No. 396 -4215.63	907 No. 362 -5584.23
508 No. 284 -2495.11	608 No. 627 -2942.52	708 No. 943 -3445.04	808 No. 719 -4226.23	908 No. 136 -5624.56
509 No. 483 -2501.72	609 No. 803 -2950.96	709 No. 753 -3455.87	809 No. 850 -4233.18	909 No. 593 -5629.43
510 No. 496 -2502.71	610 No. 72 -2957.93	710 No. 243 -3456.22	810 No. 228 -4242.05	910 No. 472 -5671.22
511 No. 147 -2512.48	611 No. 958 -2967.35	711 No. 904 -3477.35	811 No. 654 -4248.12	911 No. 585 -5691.96
512 No. 133 -2513.36	612 No. 91 -2974.33	712 No. 537 -3479.04	812 No. 156 -4252.32	912 No. 108 -5754.61
513 No. 696 -2517.59	613 No. 229 -2976.36	713 No. 739 -3479.04	813 No. 350 -4254.5	913 No. 822 -5795.8
514 No. 669 -2519.47	614 No. 198 -2978.15	714 No. 683 -3484.71	814 No. 697 -4255.51	914 No. 43 -5798.34
515 No. 416 -2523.8	615 No. 467 -2980.13	715 No. 827 -3501.6	815 No. 5 -4258.22	915 No. 177 -5801.78
516 No. 626 -2525.76	616 No. 826 -2980.13	716 No. 83 -3503.3	816 No. 657 -4265.17	916 No. 975 -5805.51
517 No. 242 -2527.97	617 No. 62 -2983.88	717 No. 298 -3504.77	817 No. 966 -4265.17	917 No. 30 -5824.04
518 No. 997 -2527.97	618 No. 137 -2988.88	718 No. 199 -3505.69	818 No. 633 -4270.81	918 No. 586 -5843.69
519 No. 449 -2529.32	619 No. 358 -3004.88	719 No. 316 -3511.74	819 No. 749 -4275.65	919 No. 442 -5870.65
520 No. 366 -2538.52	620 No. 333 -3005.19	720 No. 733 -3523.1	820 No. 775 -4320.17	920 No. 280 -5882.53
521 No. 413 -2541.1	621 No. 20 -3015.28	721 No. 446 -3527.42	821 No. 693 -4326.75	921 No. 652 -5904.82
522 No. 180 -2545.75	622 No. 352 -3025.02	722 No. 711 -3531.08	822 No. 125 -4331.49	922 No. 890 -5904.82
523 No. 343 -2546.65	623 No. 526 -3026.46	723 No. 76 -3532.45	823 No. 908 -4333.87	923 No. 241 -5907.83
524 No. 602 -2550.9	624 No. 891 -3045.39	724 No. 622 -3544.56	824 No. 347 -4345.34	924 No. 796 -5947.17
525 No. 548 -2551.11	625 No. 612 -3050.14	725 No. 465 -3566.7	825 No. 767 -4362.19	925 No. 787 -5951.77
526 No. 630 -2554.25	626 No. 777 -3050.14	726 No. 870 -3568.74	826 No. 701 -4376.81	926 No. 96 -5955.62
527 No. 731 -2562.7	627 No. 140 -3051.53	727 No. 924 -3570.78	827 No. 545 -4398.12	927 No. 434 -6047.04
528 No. 522 -2564.99	628 No. 390 -3061.98	728 No. 360 -3575.7	828 No. 812 -4429.96	928 No. 643 -6054.05
529 No. 525 -2581.92	629 No. 239 -3064.65	729 No. 914 -3581.33	829 No. 248 -4430.84	929 No. 952 -6059.64
530 No. 741 -2581.92	630 No. 223 -3068.37	730 No. 269 -3590.38	830 No. 255 -4436.74	930 No. 517 -6079.05
531 No. 871 -2583.86	631 No. 36 -3075.6	731 No. 961 -3599.25	831 No. 532 -4436.74	931 No. 354 -6084.36
532 No. 135 -2584.34	632 No. 356 -3080.03	732 No. 899 -3602.47	832 No. 743 -4448.78	932 No. 629 -6091.39
533 No. 485 -2596.95	633 No. 718 -3083.95	733 No. 34 -3621.43	833 No. 667 -4449.77	933 No. 971 -6091.39
534 No. 573 -2603.17	634 No. 983 -3084.34	734 No. 238 -3621.6	834 No. 737 -4463.43	934 No. 761 -6107.45
535 No. 762 -2610.44	635 No. 168 -3092.15	735 No. 182 -3625.18	835 No. 752 -4481.67	935 No. 328 -6114.95
536 No. 578 -2611.83	636 No. 365 -3093.89	736 No. 205 -3637.56	836 No. 839 -4504.23	936 No. 662 -6130.79
537 No. 937 -2611.83	637 No. 974 -3120.8	737 No. 93 -3643.83	837 No. 106 -4512.4	937 No. 215 -6177.97
538 No. 342 -2621.56	638 No. 656 -3129.17	738 No. 755 -3645.29	838 No. 795 -4526.68	938 No. 921 -6177.97
539 No. 0 -2623.62	639 No. 287 -3143.61	739 No. 208 -3646.58	839 No. 270 -4546.21	939 No. 149 -6181.98
540 No. 583 -2624.63	640 No. 878 -3148.72	740 No. 863 -3647.76	840 No. 247 -4559.09	940 No. 225 -6189.91
541 No. 592 -2639.57	641 No. 409 -3157.9	741 No. 123 -3652.99	841 No. 770 -4564.23	941 No. 882 -6197.16
542 No. 74 -2648.45	642 No. 727 -3165.99	742 No. 825 -3662.63	842 No. 611 -4572.51	942 No. 751 -6228.36
543 No. 421 -2653.9	643 No. 403 -3169.49	743 No. 933 -3665.55	843 No. 249 -4572.81	943 No. 977 -6228.36
544 No. 992 -2653.9	644 No. 804 -3169.49	744 No. 381 -3696.35	844 No. 684 -4574.08	944 No. 458 -6267.83
545 No. 113 -2658.38	645 No. 463 -3171.46	745 No. 299 -3706.07	845 No. 519 -4581.82	945 No. 171 -6322.75
546 No. 678 -2668.6	646 No. 131 -3179.05	746 No. 126 -3715.27	846 No. 56 -4583.89	946 No. 336 -6324.05
547 No. 598 -2674.97	647 No. 866 -3188.35	747 No. 6 -3719.06	847 No. 786 -4583.89	947 No. 490 -6453.25
548 No. 788 -2679.35	648 No. 546 -3190.3	748 No. 85 -3725.07	848 No. 923 -4583.89	948 No. 979 -6453.25
549 No. 312 -2683.1	649 No. 551 -3193.41	749 No. 351 -3728.08	849 No. 81 -4594.11	949 No. 869 -6461.57
550 No. 542 -2683.7	650 No. 209 -3195.13	750 No. 550 -3737.29	850 No. 807 -4594.11	950 No. 725 -6503.86
551 No. 64 -2686.67	651 No. 680 -3195.73	751 No. 568 -3738.03	851 No. 460 -4602.86	951 No. 639 -6518.59
552 No. 620 -2687.74	652 No. 789 -3200.36	752 No. 524 -3739.11	852 No. 699 -4619.3	952 No. 213 -6528.13
553 No. 953 -2687.74	653 No. 913 -3200.36	753 No. 909 -3739.11	853 No. 584 -4653.4	953 No. 443 -6563.45
554 No. 540 -2690.75	654 No. 35 -3205.1	754 No. 559 -3754.77	854 No. 306 -4659.67	954 No. 793 -6587.36
555 No. 712 -2696.4	655 No. 842 -3205.1	755 No. 706 -3761.93	855 No. 553 -4700.92	955 No. 736 -6674.77
556 No. 344 -2696.94	656 No. 276 -3217.64	756 No. 601 -3762.22	856 No. 283 -4739.79	956 No. 758 -6679.63
557 No. 17 -2698.9	657 No. 536 -3220.2	757 No. 980 -3770.05	857 No. 349 -4745.27	957 No. 874 -6679.95
558 No. 846 -2698.9	658 No. 63 -3232.55	758 No. 477 -3786.31	858 No. 901 -4766.62	958 No. 563 -6714.21
559 No. 97 -2700.87	659 No. 197 -3232.55	759 No. 797 -3804.7	859 No. 114 -4797.7	959 No. 273 -6766.65
560 No. 919 -2706.24	660 No. 263 -3232.55	760 No. 236 -3816.3	860 No. 567 -4821.47	960 No. 376 -6767.14
561 No. 167 -2706.87	661 No. 902 -3232.55	761 No. 70 -3821.05	861 No. 404 -4879.28	961 No. 402 -6805.1
562 No. 377 -2706.87	662 No. 916 -3232.55	762 No. 289 -3826.9	862 No. 815 -4879.28	962 No. 25 -6841.46
563 No. 22 -2713.49	663 No. 388 -3236.06	763 No. 589 -3834.81	863 No. 668 -4894.56	963 No. 169 -6842.36
564 No. 773 -2716.08	664 No. 925 -3236.06	764 No. 883 -3838.94	864 No. 930 -4894.56	964 No. 246 -6910.02
565 No. 640 -2732.96	665 No. 873 -3237.7	765 No. 195 -3842.82	865 No. 750 -4894.73	965 No. 144 -6925.93
566 No. 867 -2733.84	666 No. 534 -3239.84	766 No. 92 -3845.66	866 No. 183 -4920.32	966 No. 124 -6969.71
567 No. 579 -2736.43	667 No. 665 -3254.2	767 No. 738 -3855	867 No. 176 -4925.5	967 No. 760 -6978.2
568 No. 408 -2746.22	668 No. 450 -3258.11	768 No. 533 -3859.28	868 No. 52 -4927.67	968 No. 325 -6992.36
569 No. 363 -2750.46	669 No. 233 -3261.29	769 No. 31 -3867.58	869 No. 830 -4927.67	969 No. 566 -7160.79
570 No. 61 -2787.26	670 No. 638 -3261.29	770 No. 746 -3873.71	870 No. 300 -4940.9	970 No. 688 -7188.68
571 No. 487 -2792.47	671 No. 99 -3269.77	771 No. 459 -3876.17	871 No. 877 -4940.9	971 No. 357 -7391.14
572 No. 503 -2792.47	672 No. 185 -3269.77	772 No. 766 -3876.17	872 No. 687 -4990.83	972 No. 606 -7460.32
573 No. 938 -2792.47	673 No. 858 -3269.77	773 No. 811 -3881.32	873 No. 469 -5030.62	973 No. 475 -7520.64
574 No. 928 -2806.8	674 No. 955 -3277.73	774 No. 659 -3897.83	874 No. 560 -5030.62	974 No. 561 -7562.85
575 No. 252 -2806.89	675 No. 648 -3280.27	775 No. 265 -3923.83	875 No. 677 -5030.62	975 No. 509 -7600.88
576 No. 118 -2809.72	676 No. 562 -3282.94	776 No. 427 -3924.79	876 No. 340 -5037.48	976 No. 541 -7792.16
577 No. 841 -2809.72	677 No. 204 -3284.22	777 No. 71 -3925.29	877 No. 512 -5038.43	977 No. 820 -7817.37
578 No. 394 -2818.02	678 No. 152 -3294.56	778 No. 190 -3925.29	878 No. 251 -5041.26	978 No. 527 -8056.3
579 No. 936 -2818.02	679 No. 617 -3294.56	779 No. 564 -3930.72	879 No. 411 -5044.38	979 No. 637 -8126.26
580 No. 932 -2818.08	680 No. 856 -3294.56	780 No. 690 -3930.72	880 No. 685 -5046.85	980 No. 594 -8160.86
581 No. 430 -2833.6	681 No. 554 -3304.22	781 No. 865 -3930.72	881 No. 896 -5068.37	981 No. 682 -8526.83
582 No. 516 -2833.6	682 No. 708 -3310.18	782 No. 384 -3930.75	882 No. 772 -5174.12	982 No. 703 -8619.74
583 No. 387 -2838.36	683 No. 599 -3311.08	783 No. 38 -3947.82	883 No. 393 -5188.59	983 No. 250 -8640.15
584 No. 21 -2839.25	684 No. 853 -3311.46	784 No. 262 -3947.82	884 No. 724 -5243.05	984 No. 296 -9028.87
585 No. 464 -2842	685 No. 194 -3312.55	785 No. 903 -3947.82	885 No. 782 -5243.05	985 No. 828 -9074.52
586 No. 747 -2843.48	686 No. 461 -3313.12	786 No. 49 -3963.89	886 No. 845 -5243.05	986 No. 240 -9358.15
587 No. 58 -2845.66	687 No. 836 -3313.12	787 No. 716 -3983.54	887 No. 964 -5243.05	987 No. 163 -9533.67
588 No. 495 -2852.15	688 No. 748 -3315.94	788 No. 910 -3995.67	888 No. 187 -5252.45	988 No. 574 -9592.49
589 No. 15 -2852.19	689 No. 82 -3324.76	789 No. 506 -3998.78	889 No. 117 -5266.88	989 No. 984 -9660.53
590 No. 94 -2860.57	690 No. 543 -3331.4	790 No. 850 -4012.16	890 No. 591 -5275.78	990 No. 915 -9783.2
591 No. 302 -2861.09	691 No. 851 -3331.4	791 No. 286 -4012.95	891 No. 776 -5284.89	991 No. 301 -9879.45
592 No. 423 -2866.32	692 No. 50 -3344.77	792 No. 155 -4018.43	892 No. 129 -5309.53	992 No. 857 -9976.69
593 No. 219 -2881	693 No. 664 -3356.39	793 No. 29 -4061.67	893 No. 642 -5362.81	993 No. 405 -10113.68
594 No. 341 -2881.17	694 No. 222 -3364.73	794 No. 88 -4065.21	894 No. 646 -5395.83	994 No. 348 -10283.87
595 No. 400 -2888.7	695 No. 304 -3366.62	795 No. 492 -4090.28	895 No. 373 -5398.24	995 No. 181 -10532.33
596 No. 981 -2888.7	696 No. 201 -3372.35	796 No. 780 -4118.04	896 No. 759 -5405.48	996 No. 814 -10827.49
597 No. 202 -2890.55	697 No. 41 -3373.33	797 No. 426 -4120.6	897 No. 922 -5413.03	997 No. 704 -10849.47
598 No. 1 -2896.38	698 No. 410 -3377.43	798 No. 884 -4120.6	898 No. 832 -5413.71	998 No. 907 -10850.46
599 No. 12 -2898.1	699 No. 59 -3381.19	799 No. 429 -4125.56	899 No. 956 -5413.71	999 No. 16 -11666.81
600 No. 170 -2909.63	700 No. 321 -3384.77	800 No. 732 -4138.85	900 No. 946 -5471.17	1000 No. 581 -11784.24

第6章 結論

本研究は、代替案の探索過程としてモデル化された建築設計における設計問題の問題解決行為に対し、進化計算を用いて、より良い代替案の合理的な選択方法を提案し、そのモデルの有効性を試みたものである。

デザイナーの問題解決行為を補完する方法を提示するために、ある前提の下に設定される全ての代替案からなる問題空間において、代替案の評価により得られる情報を考察することによって設計問題のモデル化を行った。ある代替案の目標の達成度を測る客観的な評価関数が設定可能な場合には、その値を改善して行くことで、より良い代替案を得ることができると考えられるが、そうでない場合は、数式化できない非明示的な評価尺度を代替案の探索に如何に取り込むかが重要となる。このような視点で、評価関数が明示的である場合と、非明示的である場合を想定し、代替案の探索過程のモデルを用いた試行を行った。そして、評価関数が非明示的な場合では、はじめに、デザイナーが逐次的に複数の代替案を相対的に評価して探索を行う対話型進化計算の方法を提示した。次に、デザイナーにより与えられた事例に内在する知識を帰納的に獲得する方法を提示した。最後に、設定された言語表現の部分的な評価尺度に基づいて、デザイナーにより与えられた正負事例の学習により、両者を見分けるふりとして有効にはたらく評価関数を帰納推論により獲得し、明示的な評価関数と組み合わせて代替案の探索を行う方法を提示した。

第2章では、明示的な評価関数が記述できる場合の事例として、ホテル建築の関係主体の投資収益性を最大化する建築計画の方法を提案した。ホテルの客室部分と共用・管理部分の構成比率は建物の全体形状に影響を与える主要な指標であると同時に、関係主体である所有者と運営者の投資収益性を左右する重要な要因でもある。一方、事業が成立するには両関係主体の収支を高度に満たす必要があるという立場から、実現可能な客室部分と共用・管理部分の構成比率を両事業主体の一定事業期間におけるNPVを評価尺度とした二目的問題として求めた。評価尺度となるNPVは、ホテルのヴォリュームモデルを表す「形態モデル」と、両主体の財務諸表を表す「収支モデル」から算出されるようモデル化した。両関係主体は、一定事業期間におけるNPVを大にするよう合理的に行動すると仮定されるが、借入金限度額や自己資金、賃料の支払い方法等の様々な事業制約を有することが一般であることから、試行の前提条件としてこれらの事業制約を変化させた場合に、得られる代替案集合にどのような影響が現れるかを調べるシミュレーションを行った。遺伝的アルゴリズムを用いた二目的最適化計算により得られた代替案の半順序集合から、パレート最適とみなせる特徴的な代替案を任意に取り出し、それらの客室部分と共用・管理部分の

構成比率と両事業主体の事業採算性との関係を示した。ホテルのように複数の事業主体が関係し、建物の施設構成により各主体の事業収支が異なる事業をゲームと捉えると、単純に互いの得失で差し引きゼロのゼロサムゲームにはならず、全体合理性を意味するパレート最適とみなせる代替案の分布より、優秀な客室部分構成比は、事業主体のゲームの関係と対応して様々な値をとり、同時にグレードの高低を伴っていることが明らかとなった。事業を提案する立場にある計画主体は、計画案の決定を行う過程で、各事業主体の投資の個別条件を調整する必要がある。各事業主体のNPVを評価尺度として定義し、遺伝的アルゴリズムを用いて獲得された大域的な優秀な代替案の分布は、事業の全体状況の概略を示すものとしてフィジビリティスタディに資するものとなりうる点で、提案した手法の有効性が確かめられた。第2章で得られた成果を整理すると以下のようになる。

①ホテルを事業の投資対象と捉え、ホテルのヴォリュームモデルを表す「形態モデル」と、オーナー、オペレータの財務諸表を表す「収支モデル」から、両関係主体のNPVを算出し、2つの評価尺度を遺伝的アルゴリズムを用いて同時に改善することで、パレート解とみなせる代替案集合を獲得した。

②期中の運転資金借入なし、総事業費、借入金等の条件を制約条件として設定して探索を行ったため、30年間の利得の総和を最大にするだけでなく、各期の財務状況が考慮された代替案が得られた。

③事業の前提条件を様々に変化させて試行を行い、獲得される代替案の分布の変化を調べた。

はじめに設定された前提条件下では、オーナーのNPVが大きく、事業において相対的に有利となるものは客室部分構成比が大きく、オペレータが有利となるものは客室部分構成比が小さくなり、それら両者のNPVにトレードオフの関係が見られた。グレードについては、客室部分構成比の大きいものは低いグレードで、客室部分構成比の小さいものは高いグレードでNPVが大となる個体を選ばれた。このことは、シティホテルのうちでも比較的客室部分構成比がおおきく、いわゆるビジネスホテルに近いものはグレードが低く、逆に客室部分構成比が小さく宴会・料飲等を含む共用・管理部分の大きいものはグレードが高いという現状のホテル事例に則した代替案が優秀となることを示した結果となった。NPVの量的比較では、全体的にオペレータの方が大となる傾向が見られたが、これはオーナーが大きな初期投資を行い、毎年一定額の賃料を回収していくのに対し、オペレータは比較的小さい初期投資に対して経営・運営に応じた利益を得るという事業における性格の相違を反映していると考えられる。

次に、オペレータの借入金限度額を1,200,000[千円]から1,000,000[千円]に変更して設定した場合は、オペレータのNPVは減少した。オーナーに対するオペレータのNPVの

比率が3となる直線上の代替案では客室部分構成比が大きくなった。これは、借入金の減少により、単位面積当たりの初期投資が客室部分に比べて大きい共用・管理部分の割合が減少したためと考えられる。

次に、オペレータの自己資金を1,000,000[千円]から500,000[千円]にした場合は、同様にオペレータのNPVは減少し、客室部分構成比の小さい代替案が生じなくなり、客室部分構成比が1.5以上となるものが獲得された。

次に、賃料を初年度から3年度までは6[千円/月坪]、以降8[千円/月坪]で年1%ずつ上昇としていたものを、初年度から3年度までは6.5[千円/月坪]、以降8.5[千円/月坪]とした場合は、オーナー、オペレータともにNPVは大きくなり、多様な客室部分構成比の代替案が見られた。オーナーにとって有利な客室部分がかなり減少してもフィージブルとなった。

最後に、賃料を歩合制（オペレータの売上の17.0%）にした場合は、オーナーのNPVは増加した。但し、歩合賃料制の場合、ホテルの運営、経営のリスクをオーナーとオペレータで分担することになるので、オーナーの割引率を適宜変更する必要があると考えられる。④事業における投資対象としてのホテルは、関係事業主体の各々のNPVを同時に改善させた場合、客室部分構成比は、事業主体のゲームの関係と対応して様々な値をとり、同時にグレードの高低を伴っていることが、パレート解とみなせる代替案の分布より明らかとなった。

⑤獲得された大域的な優秀な代替案の分布は、事業の全体状況の概略を示すものとしてフィージビリティスタディに資するものとなりうる点で、提案した方法の有効性が確かめられた。

第3章では、明示的な評価関数の記述が困難な場合として、窓配置パターンを表す単純な図形を構成する設計問題における代替案の探索を行った。形態の検討のために創造的に代替案の探索を行う場合、手続き的に評価関数を記述することは困難で、さらに局面毎に変化して行くことが考えられる。このような場合、最終的な目標も、それに至る手段も未知であるが、ある局面において実在する複数の代替案を、デザイナーが相対的に評価することは可能であることから、代替案の生成・評価を繰り返して探索を進める行為を、代替案の生成を行う計算機と生成された案の評価を行うデザイナーにより、対話的に行うモデルを提案した。はじめに、窓配置パターンを表す図形の体系を、人間の形態認知に沿った形態操作に相応な形式において、基本図形記号を表す「プリミティブ (primitive)」と、その操作を表す「演算子 (design operator)」から構成されると設定した。図形の形態表現を、述語論理を用いて、「プリミティブ」と「演算子」によりLISPのS式、すなわち「プ

「プリミティブ」と「演算子」をノードとする木構造表現で記述する枠組みを定義した。代替案の生成には、木構造の記号を扱うことのできる遺伝的プログラミングを用いた。計算機により提示される、ある世代の複数の代替案の形態表現に、デザイナーが評価を与え、その評価をもとに遺伝的オペレータを適用された次世代の代替案が生成され、デザイナーは新たに提示された代替案から影響を与えられて次の評価を行うという手続きを繰り返して行く、対話型進化計算を行った。ランダムに生成された初期個体では、各個体は単純なプリミティブのみか、表示される形態がない状態であったが、試行が進むにつれ次第に複雑さを増し、あるパターンとそれから派生する類似の形態構成が見られるようになった。世代が小さい初期の間は、全く無秩序な形態構成を呈する個体や、形態が表示されない個体が多く現れたが、世代を経るにしたがい一定の規則性を示すものが多くなり、デザイナーの評価が低い無秩序な個体や空白を示す個体は減少した。同時に、前世代で評価の高かった優秀な個体が、次世代において、前世代の優秀な個体の形態構成に類似しつつも部分の形態構成の異なる個体へと世代交代し、評価がより高くなる過程が認められた。同様にデザイナーの評価が高い個体が複数共存する状態になり形態構成のパターンが分岐したり、それらがある規則で組み合わせられたりする過程があった。試行の最終世代の評価の高かった3個体の間には、類似点と相違点の両者が共存して認められた。S式表現について3個体いずれにも共通する部分構造があり、さらにこれら3個体以外にもこの部分構造を有するものが多かった。試行が進み世代を経るに従い図形に見られた一定の規則性は、この共通部分によって形成されており、デザイナーの評価が常に高い図形の構造が、遺伝的プログラミングの遺伝的オペレータにより形成され、その枠組みの中で多様な図形の代替案の探索がなされていったと考えられる。この規則性は、リズム、比例、対称性といった形態的特性によって説明され、これらの基本的な形態構成規則は、各局面毎にデザイナーが与えた評価によって、ランダムな初期個体から開始された対話型進化計算の試行を通して明示的に獲得された。提示した対話的なモデルを用いることにより、デザイナーの評価を代替案の探索に取り込んで行われる、平面上の形態獲得過程における形態創発が可能となることが明らかになった。第3章で得られた成果を整理すると以下ようになる。

①図形の形態表現を、述語論理の概念を用いて、「プリミティブ」と「演算子」によりLISPのS式、すなわち「プリミティブ」と「演算子」をノードとする木構造表現で記述する枠組みを定義した。

②計算機により提示される、ある世代の複数の代替案の形態表現に、デザイナーが評価を与え、その評価をもとに遺伝的オペレータを適用された次世代の形態が生成され、デザイナーは新たに提示された代替案から影響を与えられ次の評価を行うという手続きを繰り返して行く、対話型進化計算を行った。

③試行の最終世代で評価の高かった3個体の間には、類似点と相違点の両者が共存して認められた。

④S式表現について3個体いずれにも共通する部分構造($b(a(d(b(a(\text{print}))))))$)があった。試行が進み世代を経るに従い図形に見られた一定の規則性は、この共通部分によって形成されており、デザイナーの評価が常に高い図形の構造が、遺伝的オペレータにより形成され、その枠組みの中で多様な図形の代替案の探索がなされていったと考えられる。この規則性は、リズム、比例、対称性といった形態的特性によって説明され、これらの基本的な形態構成規則は、デザイナーの与える評価によって、ランダムな初期個体から開始される対話型進化計算の試行を通して明示的に獲得された。

⑤提示した対話的なモデルを用いることにより、デザイナーの評価を取り込んで行われる、平面上の形態獲得過程における形態創発が可能となることが明らかになった。

第4章では、設計行為の結果の事例としての図形が存在する場合、図形にどのような形態構成規則が用いられているかを明示的に記述する方法を提案した。デザイナーによって与えられる図形を教師図形とした場合、教師図形の形態構成規則を記述することは、有効な知識の獲得方法となりうるという立場から、任意の教師図形の形態構成規則を記述する方法を提示した。図形の体系は、第3章にならい、「プリミティブ」と「演算子」から構成されると設定した。形態表現とS式表現との翻訳可能な枠組みについても同様に設定した。教師図形と、遺伝的プログラミングにより生成される生成図形との、線分単位の不一致の数を評価値として設定し、これが0となった時点で、すなわち教師図形と同様の図形が生成された時点で試行を終了した。予め教師図形の形態構成規則の知識を恣意的に与えることなく、ランダムな初期個体から、教師図形を記述する形態構成規則が生成された。教師図形を記述する形態構成規則は無数にあると考えられるが、試行では2通りの形態構成規則を得た。木構造の分析により、包含、階層関係を有するプリミティブとそれらに対する操作の構造が形成されていた。木の根に近い、上位の演算子には、教師図形の一側面を表すものとして、原点对称を表す操作が形成されていた。提示した方法により、教師図形の形態構成規則を、人間の形態認知に沿った形態操作の知識表現として記述することができ、有効な知識の獲得方法となる可能性が示された。第4章で得られた成果を整理すると以下ようになる。

①教師図形と生成図形との線分単位の不一致の数を評価値として設定し、これを改善して行くことで、教師図形と同様の生成図形を記述する形態構成規則を獲得した。

②獲得された2通りの形態構成規則には、包含、階層関係を有するプリミティブとそれらに対する操作の構造が形成されていた。木の根に近い、上位の演算子には、教師図形の特

性の一側面を表すものとして、原点对称を表す操作が形成されていた。教師図形は同型の矩形がグリッド状に配置される図形であるが、全て等間隔ではないため、この試行では、点对称の概念を持つ形態構成規則が形成されたと考えられる。

③教師図形の形態構成規則の一つを、人間の形態認知に沿った知識表現として記述し、有効な知識の獲得方法となる可能性が示された。

第5章では、代替案が満たすべき評価尺度は言語表現により部分的に設定されているが、評価関数は明示的でなく、それを記述する手順も未知である場合を想定し、設定された評価尺度に基づいてデザイナーにより与えられた正負事例の学習により、両者を見分ける評価関数を記述し、ふるいとして用いる方法の可能性を提案した。対象として木造3階建住宅の耐力壁配置モデルにおける住宅平面を扱った。はじめに、住宅平面における耐力壁配置は、耐震性能を表す「偏心率」と居室の光環境を表す「昼光率」を左右する重要な要因であることから、遺伝的アルゴリズムを用い、両指標を評価尺度とした耐力壁配置の二目的最適化を行い、最終世代の代替案1000個体を「代替案集合」として用意した。この「代替案集合」の中には、住宅平面として不適當で、採用が不可能なものも多く含まれているため、ここから採用可能な住宅平面を持つ代替案を絞り込む方法を次のように試みた。採用可能な住宅平面となるために、対象とする住宅平面が満たすべき複数の必要条件を言語により記述し、それらを「ポリシー」として設定した。「代替案集合」のうち50個の代替案を抽出し、「ポリシー」を満たす住宅平面となるように、デザイナーが耐力壁の変更による修正を加えた。修正前の代替案を負事例、修正後の代替案を正事例として、帰納推論の手法により両者を見分ける関数を獲得した。得られた関数で「代替案集合」の各代替案を評価し、序列をつけた。得られた関数の評価尺度としての有効性を確かめるため、デザイナーが、「代替案集合」の各代替案を「ポリシー」に則って精密に逐次参照し、「ポリシー」を満たす代替案を選び出した。これらの「満足代替案」が、得られた関数による序列のどの辺りに位置づけられているか調べた結果、「満足代替案」は、序列の比較的上位に分布していることが確かめられた。「満足代替案」の全てが上位156位以内、すなわち上位15.6%に分布していた。また上位84位以内に、24個の全「満足代替案」のうち21個、すなわち87.5%が存在していた。このことから、正負事例の学習により獲得された関数は、学習に用いられなかった他の代替案に対してもある程度有効に「ポリシー」に基づいた評価を行うことが示された。すなわち、記述された関数は、正負事例に内在すると考えられる「ポリシー」の満足、不満足をもたらす構造を評価する汎化された指標として、一定の精度で有効な評価関数となっていることが示された。最後に、「ポリシー」を満たし、住宅平面として採用可能で、かつ「偏心率」と「昼光率」を高度に同時に満たす代替案を選択して例

示した。以上より、言語表現の部分的な評価尺度に基づいてデザイナーにより与えられる正負事例の学習により、両者を見分ける評価関数を獲得し、多数の代替案の集合にふるいとして用いる方法の可能性が明らかとなった。第5章で得られた成果を整理すると以下のようになる。

①住宅平面をグリッドに分割し、各グリッドを囲む耐力壁の状態を終端記号に、演算子を関数記号に用い、遺伝的プログラミングを用いて、正負事例を学習させるモデルを提案した。

②得られた関数の評価尺度としての有効性を確かめるため、人間が、「代替案集合」の各代替案を「ポリシー」に則って精密に逐次参照し、「満足代替案」が、序列のどの辺りに位置づけられているか調べた結果、序列の比較的上位に分布していることが確かめられた。「満足代替案」の全てが上位156位以内、すなわち上位15.6%に分布していた。また上位84位以内に、24個の全「満足代替案」のうち21個、すなわち87.5%が存在していた。

③学習により得られた関数は、正負事例に内在すると考えられる「ポリシー」の満足、不満足をもたらす構造を評価する汎化された指標として、一定の精度で有効な評価関数となっている可能性が示された。

④「ポリシー」を満たし、住宅平面として採用可能で、かつ「偏心率」と「昼光率」を高度に同時に満たす代替案を選択して例示した。

⑤予め評価された正負事例の学習により、両者を見分ける評価関数を記述し、多目的最適化手法の結果の代替案集合に、ふるいとして用いる方法の可能性が明らかとなった。

以上より、最終的な目標も、それを手続き的に生成する手段も不明な、モデル化された建築設計問題において、進化計算を用いてより良い代替案の選択を行う方法を提案した。明示的な評価関数が記述可能な場合に、複数の評価関数の値を同時に改善して行き、大域的な優秀代替案の集合を獲得するモデルを提示した。数式表現の評価関数を明示的に記述することが困難な場合は、はじめに、デザイナーの評価を代替案の探索に取り込むモデルを提示した。次に、デザイナーによって与えられる事例に内在する知識を獲得するモデルを提示した。最後に、言語表現による部分的な評価尺度を、それに基づいてデザイナーが用意した事例の学習により、数式で表される評価関数として獲得するモデルを提示した。

手続き的に記述される評価関数は、単純であるが、客観的で正確な評価値を算出することができる特性を持つ。一方、デザイナーの評価を取り込む手法は、デザイナー固有の非明示的な評価を反映させることができるが、評価の負担が大きく、評価が可能となる代替案の数も限られる。建築設計の設計問題では、このように評価関数が手続き的に記述可能である場合や、全く不明であるためデザイナー固有の評価に依存する場合ばかりでなく、言

語等で表された法規や要求のように、デザイナーにとって扱いやすい表現手段によって記述された部分的な評価尺度に則って代替案の探索を行うことが重要となる場合がある。人間にとって解釈可能なこのような評価尺度を評価関数として獲得することにより、計算機を用いた効率的な代替案の探索に適用することができる。ここで獲得される評価関数は、前述の手続き的に記述される評価関数に対して、複雑で、明確な検証は困難であるが、高度な知識を表現している可能性がある。本論では最終的に、両者の評価関数の特性を生かし、組み合わせて用いることによる建築設計の設計問題における合理的な代替案の選択方法の可能性が提示された。

今後の研究に残された課題を整理する。第5章では、代替案集合全体の5%の事例を学習させたが、学習に用いる事例の数と、得られる関数の評価尺度としての精度との関係については考慮されていない。事例の数や設定する必要条件を変化させた場合に、どのように代替案の絞り込みの効率が変化するか調べて行きたい。また、「満足代替案」でないにもかかわらず上位にランクされた代替案、すなわち誤って評価されている代替案を再び学習させることの有効性も確かめる必要がある。そして、得られた関数では、どのような演算が行われているのか、すなわち、関数の分析によって、関数の意味的な解釈を行う可能性も検討したい。本論では、言語表現により評価尺度を部分的に設定して、それを評価関数として獲得することを試みた。一方、評価尺度を与えない場合、例えば、あるデザイナーの非明示的な評価に基づいて適当に事例が用意される場合において、デザイナーの評価尺度を関数として明示的に記述する可能性についても研究して行きたいと考えている。

付章 進化的計算の概要

ここでは、本論で用いた進化的計算の基本的な内容を解説する。

1 進化的計算の概要

進化的計算 (Evolutionary Computation) は、生物の進化の仕組みを適応システムと捉え、それにアナロジーを得て、効率的に優れた解の探索を行う各種の計算方法の総称である。進化的計算の主な特徴は次のように説明される (文献1)。

- ①同時に存在する多数の解候補による探索
- ②交叉、突然変異、複製等の遺伝的オペレータが用いられる (有性生殖)
- ③確率に基づいた探索 (自然選択)
- ④問題空間の情報 (非線形最適化問題の勾配法で行われる問題空間の微分のような) をほとんど用いない。

2 各種の進化的計算

進化的計算の主な種類として、GA (Genetic Algorithm)、ES (Evolutionary Strategy)、EP (Evolutionary Programming)、GP (Genetic Programming) 等がある。以下では、本論で用いた遺伝的アルゴリズムと、遺伝的プログラミングについて解説する。

2.1 遺伝的アルゴリズム (GA :Genetic Algorithm)

遺伝的アルゴリズムは、1次元の二値表現の数値列によって構成される染色体として遺伝子情報化された解に、交叉、突然変異等の遺伝的オペレータを適用して、より良い解を効率的に探索する手法である。但し、この手法は理論でも方法論でもなく、遺伝的アルゴリズムと呼ばれるように、「アルゴリズム (算法)」に過ぎない (注1)。しかし、非線形最適化のような解の探索方法と較べて、柔軟で汎用性が高く、頑健な特徴を持ち、実用的なツールとして用いられ、様々に成果を上げている。

1) 遺伝子型と表現型

遺伝子型とは、001001111のような二値表現の数値列による染色体のことで、表現型とは、ある解釈機構によって遺伝子型を翻訳した、実際の問題空間における解のことである。表現型の評価によって決められる適合度が、遺伝子型の遺伝的操作に反映されることによって、解の探索が行われる。遺伝子型から、その個体の評価までの流れは図1のように示される。

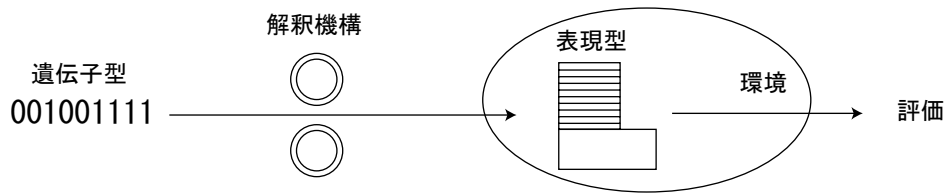


図1 遺伝子型の評価

2) 遺伝的アルゴリズムのフロー

遺伝的アルゴリズムのフローは主に以下ようになる (文献2)。

(1) 初期個体の発生

設定した個体数分の遺伝子をランダムに発生させる。

(2) 親の選択

ある選択基準(ルーレット戦略、トーナメント戦略等)で、親を2個体選択する。一般に評価の高い親ほど多くの子供を残すように選択される。

(3) 遺伝的オペレータの適用

親に、交叉(crossover)、突然変異(mutation)等の遺伝的オペレータを、それぞれ適当な確率で適用し、個体を生成する。

(4) 淘汰

新たに生まれた個体の代わりに、適当な選択基準で個体を取り除く。

(5) 終了判定

終了条件を満たしていれば終了し、満たしていなければ(2)からの手続きを繰り返す。

3) 遺伝的アルゴリズムを用いた多目的最適化手法

遺伝的アルゴリズムでは、個体群によって探索が進められるので、探索の各世代で、複数の目的を同時に考慮して個体を評価し、多目的に個体を改善してゆくことが可能である。すなわち、各目的関数について、ある程度よい値をとる個体を同時に保ちながら探索を進めることができ、パレート最適な個体を直接求めることが可能となる。パレート解を重みパラメータ法等で求めるには、目的関数の重みを変えながらパレート解を一つずつ求める必要があるため、計算コストは必要とするパレート解の数に応じて増大する。しかし遺伝的アルゴリズムでは、多点探索の特性から、単目的の場合とほぼ同様な関数評価の回数で、パレート解の集合を効率的に求めることができる。

本論で用いたパレート最適な解の生成方法として、Goldbergのランキング法を解説する。

ランキング法は、複数の目的関数についての優越関係に基づいて定められる順位（ランク）を用いて選択を行う方法である。ランキングは次のように行われる（文献3）。

- (1) 初めにランクを1とする。（ $r = 1$ ）
- (2) 個体群の中からパレート最適な個体を選択し、これらのランクを r とする。
- (3) ランク r の個体を取り除き、ランク r を $r + 1$ とする。（ $r = r + 1$ ）
- (4) すべての個体のランクが決定されるまで(2)および(3)の手続きを繰り返す。

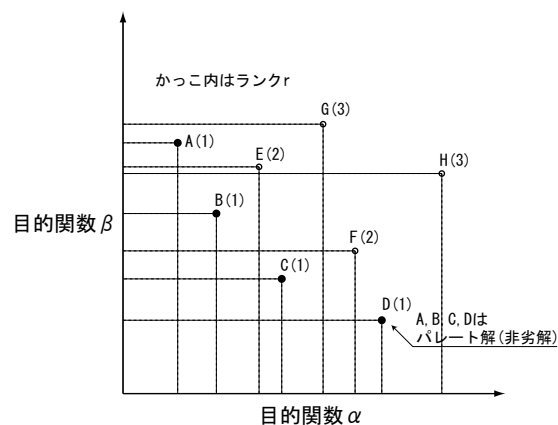


図2 Goldbergのランキング法

2.2 遺伝的プログラミング (GP :Genetic Programming)

遺伝的プログラミングは、遺伝的アルゴリズムの遺伝子型を拡張し、構造的な表現を扱えるようにしたものである。本論では、木構造の遺伝子型の遺伝的プログラミングを用いた。木構造は、複雑な数式や概念、関係などを表現できるといわれている。遺伝的プログラミングの主な特徴は次のようにまとめられる（文献4）。

- ①プログラムを進化させる。
- ②ロボットのプログラムや人工知能の問題解決、推論、学習のためのプログラムが進化的に生成される。
- ③遺伝的アルゴリズムの考え方に基づいているが、遺伝的アルゴリズムが主に最適化を目指すのに対し、遺伝的プログラミングは記号処理的なプログラム生成を目的としている。
- ④ニューラルネットワークは、数値的な処理を行うのに対し、遺伝的プログラミングは記号的なプログラムによる処理を行う。

1) 木構造表現

遺伝的プログラミングでは、主に木構造表現の遺伝子型を用いる。木構造は、サイクルを持たないグラフのことである。木構造はS式(Symbolic Expression)と同一視できる。木構造とS式の関係は図3のようになる。

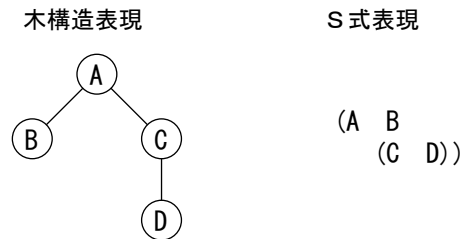


図3 木構造表現とS式表現の関係

ここで、A、B、C、Dはノードと呼ばれ、そのうちB、Dは終端記号、A、Cは非終端記号と呼ばれる。また、Aは根と呼ばれ、Aの子供はB、Cで、BとCは兄弟、Cの親はAとなる。

2) 遺伝的オペレータ

遺伝的プログラミングの遺伝的オペレータは、1次元の二値表現の数値列を遺伝子型に持つ遺伝的アルゴリズムの遺伝的オペレータに準じたものが用いられる。遺伝的アルゴリズムの遺伝的オペレータの自然な拡張として、部分木の取り替えを行う交叉(crossover)、ノードの記号の変更を行う突然変異(mutation)、兄弟の並び替えを行う転置(inversion)や、複製等の遺伝的オペレータが用いられる(文献5)。

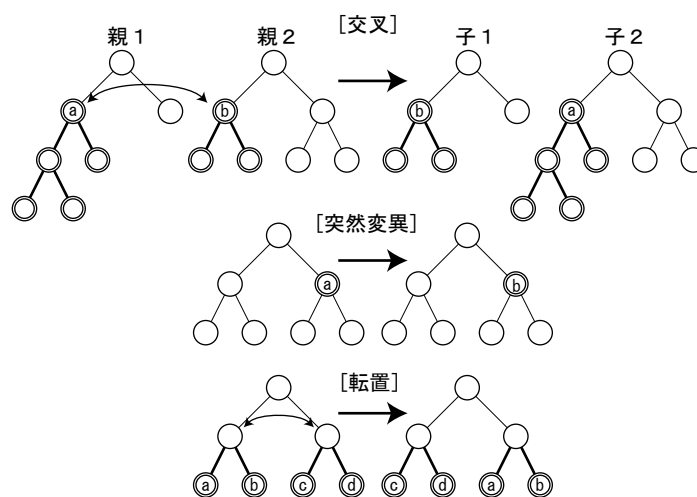


図4 遺伝的プログラミングの遺伝的オペレータ

3) 記号当てはめ問題への遺伝的プログラミングの適用

記号当てはめ問題 (Symbolic Regression) とは、未知の関数 f の入力値と出力値の組が分かっているときに、 f を同定する問題である。

未知の関数 f 、 f の入力変数を $\{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ 、出力変数を y とする (式 1)。

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad \dots (式 1)$$

ここで、入力値と出力値の組 $(x_1, x_2, \dots, x_n; y)$ が与えられ、 f を同定するのに用いる関数記号と終端記号が与えられれば、遺伝的プログラミングによってこの問題に取り組むことができる。ここで終端記号は $\{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ と定数。関数記号は四則演算等の演算子となる。このとき個体の適合度は、式の当てはめ誤差 (Error-of-fit) として設定されることが多い。この場合、すべての入出力の組の当てはめ誤差が 0 となるものが、求める関数となる。図 5 は、遺伝的プログラミングを用いた記号当てはめの一例を示している。



図5 遺伝的プログラミングによる記号当てはめ

注釈

1) Building Block 仮説 (文献6)

「定義長が短く、かつ低い次数で高い適合度を持つスキーマ (Building Block: 積み木) が、生き残り、ほかのスキーマと組み合わせあって、より良いスキーマが誕生する。」

しかし、これは仮説であって、証明はされていない。この仮説が成立しない事例も報告されている。進化的計算は、道具としては十分うまく機能するが多いが、それを証明する理論的背景が弱く、今後それを確立してゆく必要があるといわれている。

参考文献

1) 田口善弘, 三井秀樹, 高木英行, 複雑性のキーワード, 共立出版, 2000

- 2) 平野広美, 応用事例で分かる遺伝的アルゴリズムプログラミング, パーソナルメディア, 1998
- 3) (編) 北野宏明, 玉置久, 遺伝的アルゴリズム② (第3章), 産業図書, 1998
- 4) 伊庭斉志, 遺伝的プログラミング, 東京電機大学出版局, 1997
- 5) Wolfgang Banzhaf, Peter Nordin, Robert E. Keller, Frank D. Francone, (訳) 伊庭斉志, 新田徹, 遺伝的プログラミング, 科学技術出版, 2000
- 6) Goldberg, D. E., Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning, Addison-Wesley, 1989

謝 辞

本論文をまとめるにあたり、多くの方々に貴重なご教示とご協力をいただいた。ここに感謝の意を表します。

京都大学大学院工学研究科の宗本順三教授には、筆者が京都大学工学部4回生時に当研究室に配属されて以来、公私にわたる親身なご指導をいただいた。設計方法に関する興味から本研究を開始した筆者に対し、工学研究の方法のみならず、幅広く設計の実際に関する貴重なご指導をいただいた。本研究の構想から遂行にわたって、すべての段階で熱心にご指導いただいたことに心から感謝いたします。

京都大学大学院工学研究科の加藤直樹教授には、博士課程在籍者に対する講義を通して、情報技術に関する貴重な知見を与えていただいた。また、本論文の内容に対しても、有意義な助言を与えていただいた。深く感謝いたします。

京都大学情報学研究科の片井修教授には、知識情報処理に関する、貴重な助言をいただいた。また、関連分野の研究動向を紹介していただき、本論文のとりまとめにあたって大変参考になりました。篤くお礼申し上げます。

鹿島建設株式会社の橋本暢氏には、ホテルの事業計画に関する貴重な資料を快く提供していただき、研究の大きな後押しをしていただいた。深く感謝いたします。

また、京都大学宗本研究室の諸兄姉には、研究生活のなかで助力と暖かい励ましをいただいた。謹んで謝意を申し上げます。

これらの方々をはじめ、多くの方々の深甚なるご支援なくしては、本論文は完成し得なかったことは言うに及びません。重ねて心から感謝の意を表させていただきます。