

最適化から建築の計画・設計を眺める

青木 義次

1. はじめに

遠い昔に読んだ本に、次のような場面があった。ある人が「アルキピアテスは美しい」「カルミテスも美しい」と言い、ソクラテスが質問する。「それでは、美とは何か」。その人は、「美とは、」と発しただけで、返答に窮し、自分自身が使用している言葉の意味も分からない無知であることを知る。建築家も美しい建築、良い建築を設計したいと思っている。しかし、「美しい建築とは何か」「良い建築とは何か」と問われると困る。ときには「自分がこれから設計するものだ」と開き直る方もいるが、すぐれた建築家ほど、無知であることを知り、「良い建築とは何か」を自問し続けている。

最適化では、問題が明瞭に定式化され、制約条件、評価関数（目的関数）が固定化されている。しかし、建築の設計や計画では、評価関数が明示されることはまずない。設計の終了時点で、何に価値をおいたかが設計案そのものによって示されると言ってもよい。また、制約条件ですら、設計案の内容によって変化することもある。例をあげよう。近年、用途の異なる建築をまとめて一体的にする複合建築が増えてきた。それまで、それぞれの用途の空間を良くするため別々に作ってきた。最初に複合建築とすることを考えた設計者は異質な用途が会うことによる面白さや効果に価値を発見したとも言える。また、制約条件についても、従来には考えもしなかった条件が建築を複合化することで発生する。たとえば、片方の用途の営業時間が終了してシャッターを降ろし、もうひとつの用途で営業を続けている場合の火災時の避難ルートを確認する必要がある。やや大袈裟に言えば、建築の計画・設計では、設計変数の選択によって価値を見だし、制約条件の発生と消滅を行っている。独創的な設計のときほど、こ

うしたことが起こる。

建築の計画・設計の問題の特徴をあげると、この定式化困難性ということになる。しかし、定式化の困難性は、建築の計画・設計では極端であるものの、多くの工学問題にも少なからず存在しているように思う。以下、定式化困難な状況における数理的手法、とりわけ最適化手法の活用の現場報告をしてみたい。

2. 定式化問題

最初に定式化プロセスを仮想の例で考えることとし、設計・計画の流れと、数理的手法の活用の関係を述べたい。

スキー場でリフトの前に長蛇の列で、利用者から不満の声。スキー場の管理者はなんとかしたいと考える。少しでも待ち行列の長さを短くしたい。こんな状況が計画や設計のスタートである。そこで担当者は、以下のように目的関数を設定する。

待ち行列の長さ→最小化

また、リフトメーカーから資料を取り寄せ、予算等の制約条件を満足するリフト機種として、以下の3種が設置可能であることを知る。

A：座席間隔は離れているが高速で、1分当たり15人という輸送力が高い機種

B：現状と同じで1分当たり10人という輸送力は中位の機種

C：低速であるが座席間隔は詰まっていて、1分当たり6人という輸送力は低い機種

そこで、担当者は、目的に一番かなっているのは直感的に、輸送力の高いA案であると判断する。しかし、この判断は間違っている。A案は目的関数を最小化しないのである。実際の計画や設計では、このように直感的に推測で答えを出すことが多いが、冷静に考えると誤っていることがある。この場合では、A案は高速で輸送力があるため、直ぐに頂上に着き、利用者が滑り降りてくるため、リフト待ちに並ぶ人を同時に多く供給することになって、待ち行列の長さはかえっ

あおき よしつぐ

東京工業大学 理工学研究科建築学専攻
〒152-8552 目黒区大岡山 2-12-1

て増加する。逆にC案はスピードが遅いため各時刻でリフトに乗っている人数が多くなりリフト待ちに並ぶ人が減少し、待ち行列の長さは短くなる。極端には、スキー場の利用者全員がリフトに乗った状態でノロノロと低速で輸送すると中々頂上に到達しないので、待ち行列の長さは0になる。

しかし、C案が目的関数を最小化する最適案だとしても、明らかにおかしい。最初の目的関数の定式化が誤っていたのである。スキー客の目的は、待ち行列の長さの最小化ではなく、むしろ、より多く滑りたいことが目的だろう。したがって、目的関数は次のように修正されなくてはならない。

滑り時間→最大化

このようにした場合には、もちろんA案が最適案として選択されよう。

以上のように簡単なケースですら、目的関数を正しく設定することは難しい。実際の計画・設計では、上記のように定式化の修正が繰り返されるが、直感的な推測ではなく、定式化し、きちんとした検討によって、定式化の不備があらわになり修正されるのである。その意味では、明瞭な定式化と数理的手法等による推論が、不備の発見と修正の推進力になっている。

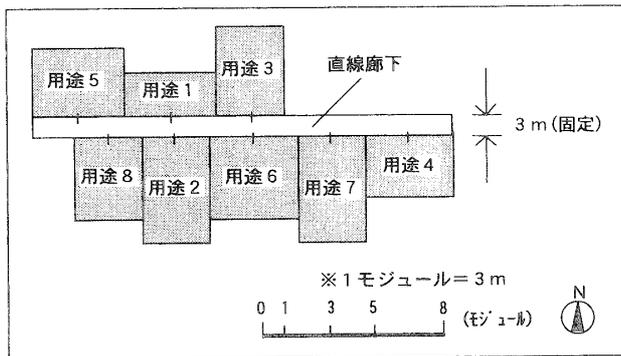


図1

3. 失敗して制約条件を検出する

建築では『中廊下型プラン』と呼ぶ平面タイプがある。図1のように廊下をはさんで各室が並ぶタイプで、事務所建築に多い。この種のプランをGAを用いて最適化してみる。

まず、評価尺度であるが、美しいとかいった評価は人によって相当異なるし計量的に記述するのは困難なので棚上げにし、誰でもが評価判断の中で議論せざるを得ない機能性とコストに重点をさぼる。

機能としては、各室の内部はかなり独立的に内装・仕上げ等が可能と考えると、室間の関係から決まる機能が大切である。使用状態では、使用用途が定まった各室間に移動行動が発生するので、移動距離が少ないほど望ましい。ここでは、計8室について、移動行動の発生頻度が図2のように分かっている（数字は基準化して整数で示し、「単位当たり移動コスト」と呼んでいる）ので、レイアウトしたときのドアからドアの移動距離とこの数字をかけて合計したものが総移動コストとなる。

次に建設コストがあるが、簡単な積算式を使用する。詳細は省略するが、床面積、壁長さ、柱本数にそれぞれ単価をかけて合計する式となっている。

また、各室の必要面積は制約として与えておく。

GAの計算の中では、制約条件を逸脱するにしたがって急増するペナルティを与え、上記の評価尺度とともに、線形加重和型の評価関数としている。各ウエイトを設定して最適化をし、ウエイトの設定値を変化させて繰り返すことを試みる（プラン形状を遺伝子としてどのように表現するか、交叉をどのようにするかなど、プランの良い面を破壊することなく遺伝進化するために若干の工夫を要するが、ここでは省略する。参考文献を参照されたい）。

しかし、得られた“最適プラン”はまったく使いも

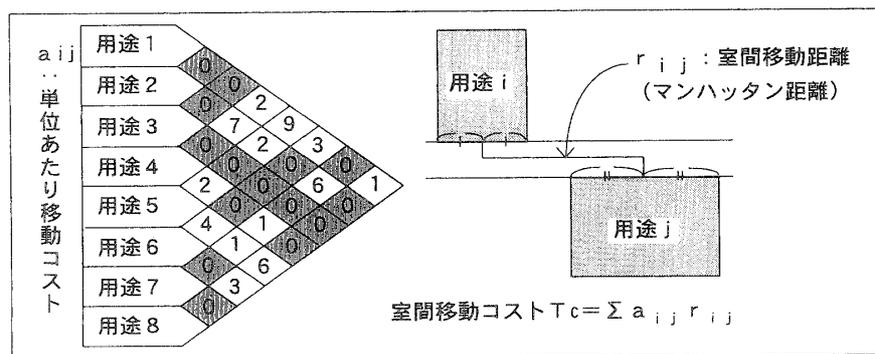


図2

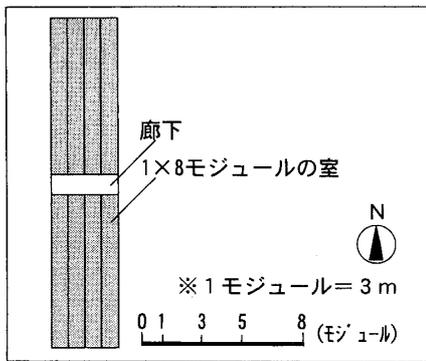


図 3

のにならないプランだけであった。もちろんプログラムにバグがあったわけではない。上述の問題の定式化は粗く完全なものではないにせよ、常識的にはある程度妥当だと思っていたが、まったく肝心なものが抜けていたのである。それが何かは“最適プラン”が教えてくれた。あまりにもひどいので、記録を残していなかったのだが、概略、図3のようなプランが得られていた。各室の必要面積を確保しながら、総移動コスト、建設コストを最小化するために、各室形状を極端に縦細にし、常識では使いものにならない室形状にしているのである。実際の設計では、無意識のうちに、室内

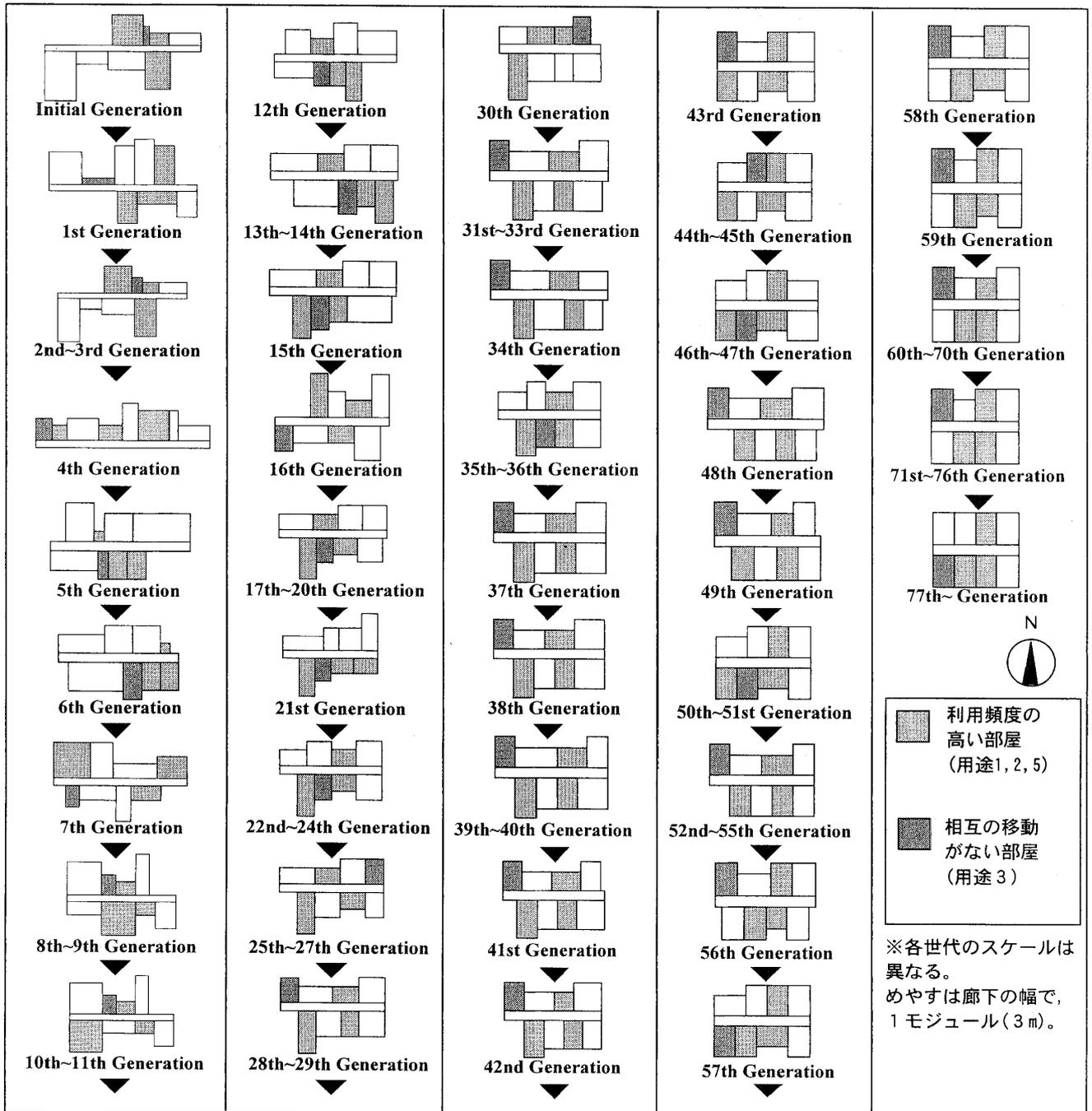


図 4

の使用状況をイメージし、ある範囲の形状を採用している。この当然すぎるものが評価尺度に入っていなかったのである。

この事例は、当然すぎるものが定式化段階で欠落してしまう可能性を示しているとともに、最適化手法が、実際の設計の中で何に価値を置いていたのかを顕在化させる契機にもなることを示している。最適化手法の活用法としては、特異なことかもしれないが、定式化し最適化する繰り返しによって、われわれ自身の価値判断を顕在化する道具としても活用できるのではないかと思うのである。

4. 成功例から設計ノウハウを知る

前述の最適化の例で、使用しにくい形状の室にはペナルティを与える目的関数に修正して、再度GAによる最適化をおこなってみた。今度は、建築的にみてまともなプランが最適解として得られた。初期値を変えて、また、評価のパラメータを変化させて繰り返してみた。典型的な進化過程（各世代で評価が最上位であったものを順次並べたもの）を図4に示す。この繰り返しの中で、最終的に得られる最適解もしくは評価の上位となるプランには、次のような共通の特徴があることに気づいた。

- 1) 室形状は、廊下に面する間口が狭く、奥行き方向が長くなっている。
- 2) 隣接する室の壁は共有している。
- 3) 隣接する室の奥行き寸法を同一にしている。
- 4) 行き来の多い室を中央に配置し、行き来の少ない室は周辺に配置している。

この他にも、建築設計上興味深い特徴もあるが、あまりにも専門的になるので省略する。

面白いことに、上記の特徴は、経験的に知られている設計ノウハウであり、建築設計教育の中で、われわれ教師が学生に教えていることでもある(図5)。

1)はフロンテージセイビングという設計手法である。矩形型の室で考えると分かりやすい。廊下に面した辺の長さを奥行き方向の長さよりも長くすると、廊下の長さが増えてしまう。結果的に同じ室数、室面積合計に対して、廊下を含めた総面積は大きくなってしまふ。コストの面でも移動長さの点でも不利になる。とくにマンションなど片廊下型集合住宅プラン（各住戸が並び北側に廊下が配置される集合住宅のプラン）で、この手法が重視される。マンションでは、各住戸の面積で購入価格が決まり、廊下の面積が多くと誰

もお金を払う人はいないので、設計者は極力、廊下部分の面積を小さくするからである。同様な理由で、戸建て住宅地開発では、道路面積を少なくするため道路に面する辺の長さを奥行き長さより小さくしている。

2)および3)は、建築設計では「柱通りの良いプラン」と言うことが多い。室内の中央に柱があると室内の自由度が減るので柱は壁のライン上に配置した方が良く、また、壁のラインが一致していれば、少ない数の柱ですませることができる。

4)はしばしば「同時使用や行き来の多い部屋をまとめて配置しなさい」と教えている。このようにすることで、移動に伴うさまざまな問題が解消されるからである。似たものに「水まわりはまとめる」というのがある。上下水道を使用する空間をまとめておかないと、どこに配管を通すかという面倒な問題が生じたり、防水の対応する面積が広がったりするからである。設計の上手い下手のひとつのポイントは、余計な問題を作らないことでもある。

以上のように、GAで最適化したものが示しているのは、一種の設計ノウハウでもある。だとすると、最適化計算の結果をカンニングして、新たな設計ノウハウを発見したり、設計のヒントを見つけることができなだろうかと考えることも、あながち可能性のないことではない。

そこで、次のような最適化を試みた。近年、環境を重視する傾向にあるが、なるべくエネルギーを消費しないで、夏は涼しく冬は暖かい集合住宅の形を探してみた。詳細は省略するが、各住戸が、夏期になるべく日照を受けず、冬期には日照をなるべく受けるようにすると評価が高いという目的関数となっている。日照

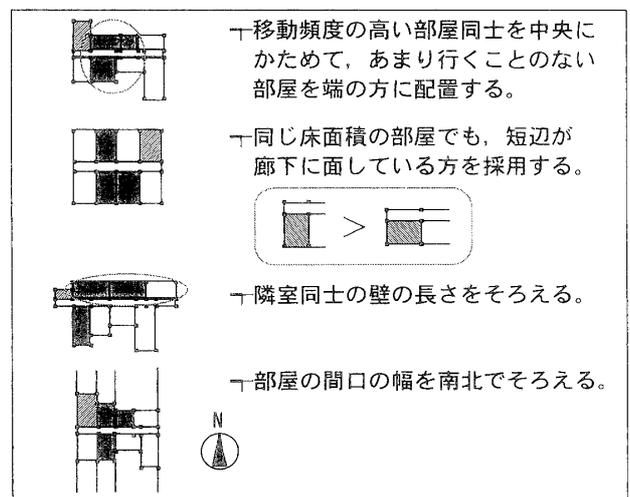


図5

条件は東京での太陽高度を設定している。各住戸の大きさは一定、住戸数も一定として、地震のときの安全性などはまったく考慮せず、ちょうど積み木を適当に積むような問題となっている。それでも、大変な計算量で、計算の手抜きをするために、GAの途中のプロセスでニューラルネットワークモデルを用いて、簡単に評価計算ができる計算式を学習させたりする工夫も

している。初期値を変えていろいろな最適解をもとめてみた。進化計算のプロセスを図6に示す。評価値の高い形態に共通の特徴をみると以下のようにになっている。

- 1) 普通の集合住宅のように各階で横につながるのではなく、ところどころに隙間を作っている。
- 2) 高層部は南側へ張り出している。

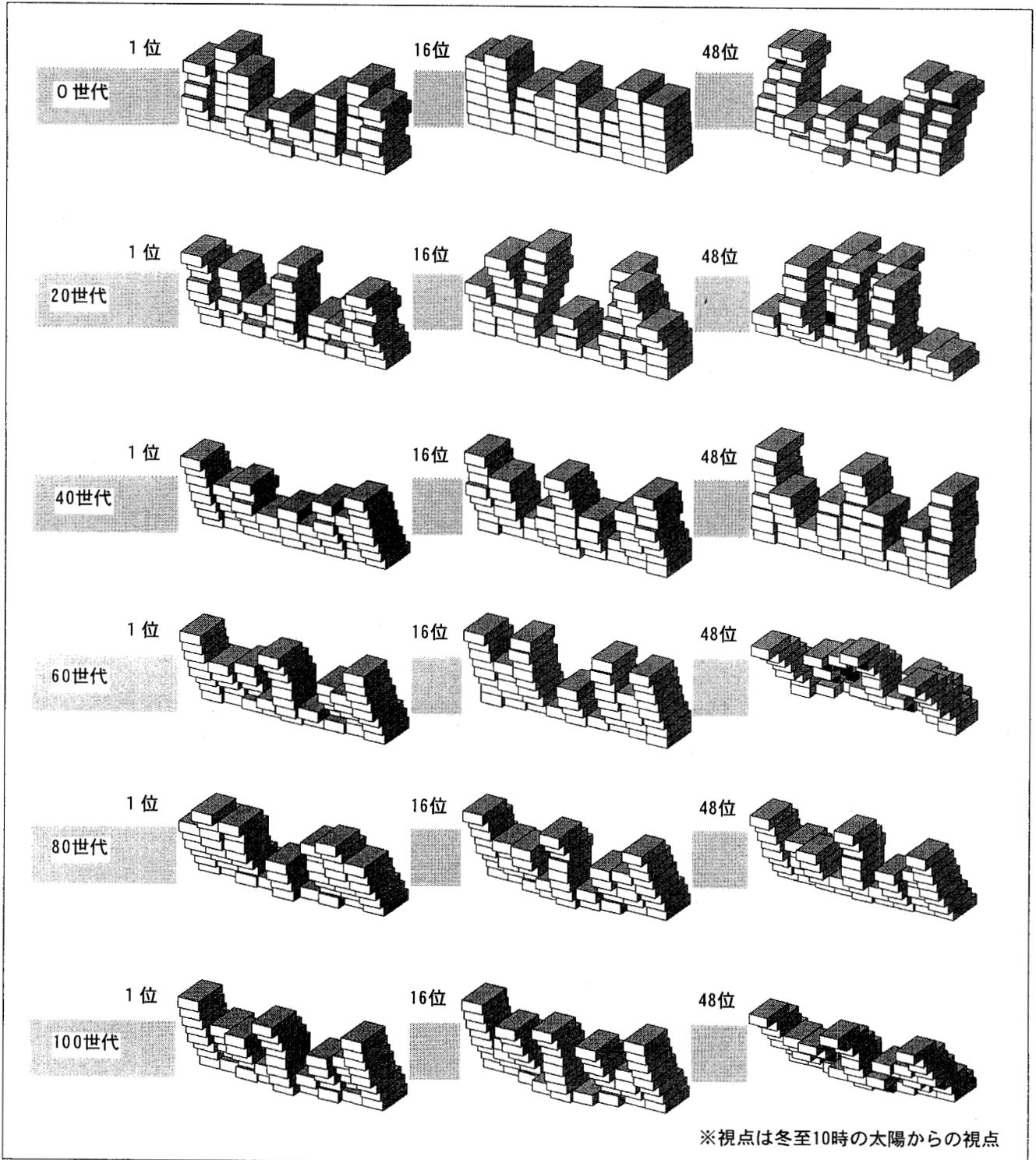


図6

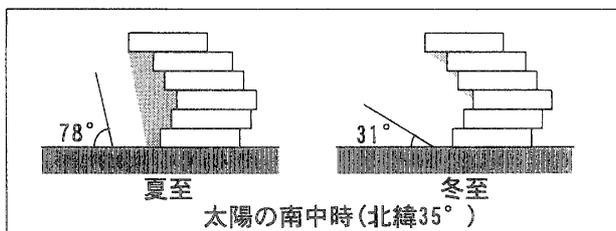


図7

- 3) 低層部で北側へセットバックしている。
- 4) 1階部分では、各住戸が波形にウエイブした形に並んでいる。

1)は、隙間を作ることで、樹木のように、あるときは隙間から日照を受け、あるときには他の住戸の影になって日照を遮ることで、ちょうど良い日照を確保しているらしい。

2)および3)は、図7のように夏期には最上階を庇のようにすることで日照を遮り、冬期には低い高度の日照を充分受ける仕掛けとなっている。

4)の理由はよくわからない。

上記の結果を直ぐに実際の建築に応用するわけにはいかない。構造力学的な問題やどのように廊下やエレベータを配置するかなどの問題があるからである。しかし、上記の結果は、分かった後では、それほどのアイデアとは言えないが、現実の中での経験だけでは中々得られないアイデアのように思う。

このような最適化計算の積み重ねの中から、まったく新たな独創的な建築が生まれるのではないかと期待している。

5. まとめ

ここでは、最適化を普通に最適解を求めるプロセスとは見ずに、問題定式化をサポートしたり、ノウハウ

を発見する道具としてみることもできるという観点から、いくつかを報告した。建築の計画や設計では、いつも普通とは異なることをしているというわけではない。筆者の場合でも、普通にGAを用いて集会所の最適配置を求め、実際の施設計画へ適用している。

しかし、最適化の手法を単に最適解を求める計算手法とみなすのではなく、現実的な問題を前にして、広い視野の中で柔軟な思考で、われわれ自身の問題認識の甘さや思い込みを是正し、経験だけではなかなか得られないアイデアを作り出すツールとみることも、あながちORの精神から外れているわけではないと思っている。

詳細をかなり省略した報告なので、詳しくは以下の文献を参照されたい。ただし、手法そのものについての文献は省略した。

参考文献

- [1] 青木義次：プラン作成と遺伝進化のアナロジー，日本建築学会計画系論文集，第481号，pp.151-156，1996
- [2] 青木義次，村岡直人：遺伝的アルゴリズムを用いた地域施設配置手法，日本建築学会計画系論文集，第484号，pp.129-134，1996
- [3] 村岡直人，青木義次：遺伝的アルゴリズムによる平面形状の最適化と設計ノウハウの獲得，日本建築学会計画系論文集，第497号，pp.111-115，1997
- [4] Aoki, Y., Muraoka, N.: An optimization method for facility location using genetic algorithm, Decision Support Systems in Urban Planning (Timmermans, H. eds), E & SP SPON, pp.175-191, 1998
- [5] 村岡直人，青木義次：評価規準の学習をとり入れた遺伝的アルゴリズムによる建物形状の最適化，日本建築学会計画系論文集，第514号，pp.141-146，1998