

海洋波の生成アルゴリズムに基づく空間構造の建築設計支援システム

等高線を用いた設計支援と適用例題

○朝山 秀一*¹ 金城 忠之*²

キーワード：アルゴリズム・デザイン 平面計画 等高線 構造形態創生 海洋波 空間構造

1. はじめに

現在、建築の設計から施工に至るプロセスは、3次元CADのデータを基本に、それに構造のデータ、環境・設備のデータを加えたBIM(Building Information Model)を中心に展開する方向に進みつつある。この背景には、単なる設計・施工技術の現代化という側面以外に、Frank O. Gehry、Zaha Hadid、Herzog & de Meuronらを始めとする世界の建築家が複雑で立体的な空間を追求し、現代の先端技術を駆使して過去には成し得なかった建築を実現しようとしていることが挙げられる。これらの建築の中に自然の地形をモチーフにしたMoussavi & Poloによる大栈橋、波の形をしたlarsenのThe waveもあるが、その形態は、設計者の感性が導き出したもので、自然の地形や波がもつ科学的な性質や合理性を利用するためのものではない。その一方、波の形は、柔らかさを表す意匠として以外にも、トタンやスレート板においては強度を増す方法として用いられている。

こうした状況の中で、筆者らは、自然界の形態システムを用いて、自然のように複雑でありながらもある種の合理性を持つ3次元的な構造形態^{1) 2) 3)}を作ることが可能と考え、それを追及してきた。複雑な構造形態を持つ建築を設計する場合、当然のことながら、通常のCADの機能では内部空間の形状の把握が極めて難しく、平面計画や断面計画に困難が伴う。本論文では、筆者らがこれまでに発表した海洋波の生成理論に基づく空間構造^{4) 5)}を用いて建築物を設計することを前提に、等高線を応用した設計支援システムを開発して、複雑な3次元曲面を持つ建築の基本設計例の作成することで、複雑な空間を設計する一手法を示すことを試みた。

2. 海洋波の基本理論

本論文では、海洋波動の一つであるうねりの運動方程式を用いて波形を生成している。その式展開の詳細は既に発表した文献を参照されたい^{4) 5)}。図1のように座標と変位を定め、ベルヌーイの定理を速度ポテンシャル ϕ 、時間 t 、重力加速度 g で表現すれば、

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\partial \phi}{\partial t} \right) + g \frac{\partial z}{\partial t} = 0 \quad \dots\dots (1)$$

で、この式より境界条件を設定している^{4) 6)}。その条件の

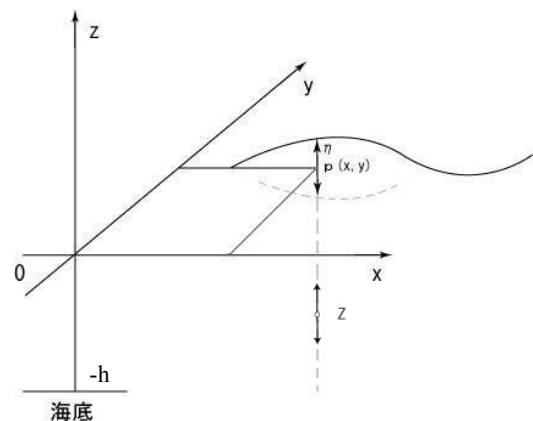


図1. 平均水面および海中における波の揺れ

下、非圧縮性流体の基本式、

$$\text{div} V = \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} = 0 \quad \dots\dots (2)$$

を解いた解

$$\eta = \frac{A(1 - e^{-2kh})}{c} \sin \left(\sqrt{k_1^2 + k_2^2} \left(\frac{k_1}{\sqrt{k_1^2 + k_2^2}} x + \frac{k_2}{\sqrt{k_1^2 + k_2^2}} y - \frac{\omega}{\sqrt{k_1^2 + k_2^2}} t \right) \right) \quad \dots\dots (3)$$

を用いて、うねりの波形を生成する。海水の z 方向の振幅 η は、波の速度 c 、周波数 ω 、海底の深さ h の影響を受ける。波数 $k(k_1: x$ 方向波数, $k_2: y$ 方向波数)と方向余弦の関係は、波動方程式から得られ、

$$\frac{k_1}{\sqrt{k_1^2 + k_2^2}} = l = \cos \theta, \quad \frac{k_2}{\sqrt{k_1^2 + k_2^2}} = m = \sin \theta \quad \dots\dots (4)$$

と表すことができる。但し θ は、波の進行方向と x 軸のなす角度である。式(3)で示されるうねりの鉛直方向変位 η は、一定気圧の下、外部から風などの強制力が加わらず、海洋を速度 c で伝播してゆく波を示している。

3. 海洋波の等高線の生成

海洋波のうねりを用いた複雑な構造形態を持つ空間を設計する場合、平面図と断面図から内部空間を把握することは難しい。そこで、本研究では平面図に等高線を加えた表示を考えた。等高線の描き方は、本論文のよう

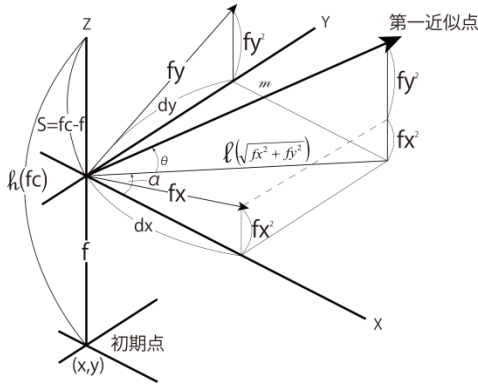


図 2. 偏微分を用いた等高線の第一近似点の方向決定

に函数系が分かっている曲面の場合、偏微分を応用した方法が良いとされるが、今回は、メッシュ分割による方法を選択せざるを得なかったので、以下にこの 2 つ方法を示し、メッシュ分割方法を採用した理由を述べる。

3-1. 偏微分と Newton 法による等高線の探索

あり、一長一短がある。ここでは偏微分と Newton 法による方法⁷⁾とメッシュ分割による方法⁸⁾を比較検討する。

この方法では、初めに等高線を探索する方向を定め、次に移動量を決定している。図 2 は、等高線の高さ fc の xy 座標を探すために、任意の初期値 (x, y) からその xy 座標を求める第一近似点の方向を示したものである。初期値 (x, y) の位置で、曲面を x 方向で偏微分した値 fx だけ $dx=fx$ として x 方向に進み、同様に y 方向に偏微分した値 fy だけ $dy=fy$ として進んだ方向に等高線への第一近似点の方向を定めている。図 2 のように記号を定めれば、移動方向角度 α は、

$$\cos \alpha = \frac{fx}{\sqrt{fx^2 + fy^2}} \quad \dots\dots(5)$$

$$\sin \alpha = \frac{fy}{\sqrt{fx^2 + fy^2}} \quad \dots\dots(6)$$

で表される。

第一近似点への移動量 dx 、 dy は

$$dx = l \cos \alpha = \frac{S}{\sqrt{fx^2 + fy^2}} \times \frac{fx}{\sqrt{fx^2 + fy^2}} \quad \dots\dots(7)$$

$$dy = l \sin \alpha = \frac{S}{\sqrt{fx^2 + fy^2}} \times \frac{fy}{\sqrt{fx^2 + fy^2}} \quad \dots\dots(8)$$

とし、第一近似点へ移動後は再度偏微分を計算して、第二近似点への移動量を計算し、値が収束するまで繰り返すことで等高線上の点を求めた。

等高線の高さ fc を満たす始点の xy 座標が得られたので、等高線の刻みの長さ $step$ を任意で与え、次の探索を始める点へ以下の方法で移動する。なるべく、等高線の高さに近い位置から探索を始めたいので、等高線に到達した時の探索方向と直行する方向に次のスタート点を以下の式で定める。

$$x = x + Step \times \cos(90^\circ - \theta) = x + Step \times \frac{fx}{\sqrt{fx^2 + fy^2}} \quad \dots\dots(9)$$

$$y = y + Step \times \sin(90^\circ - \theta) = y + Step \times \frac{fy}{\sqrt{fx^2 + fy^2}} \quad \dots\dots(10)$$

この座標から再び Newton 法を用い、等高線高さが fc となる xy 座標を再度求める。以下同様に繰り返し、得られた点を次々と結び等高線とする。

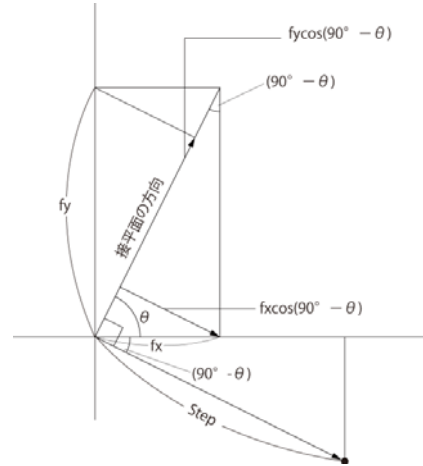


図 3. 探索方向と再探索方向との関係

3-2. Mesh 分割による等高線探索

この方法では、まず始めに等高線探索用の細かいメッシュを作り、海洋波の高さを計算し全節点に与える(図 4)。次に、メッシュ 1 ずつについて等高線の位置の探索を行う。図 5 のようにメッシュの 4 辺を順番に調べ、辺の両端の高さ $Zn1$ と $Zn2$ から等高線の値 fc を引いた積の符号が、

$$(zn1 - hc) \times (zn2 - hc) < 0 \quad \dots\dots(11)$$

となる場合、等高線はこの間に存在し、その x 座標または y 座標を以下の式で算出できる。

$$xy1 + (xy2 - xy1) \times \frac{(zn1 - fc)}{(zn2 - zn1)} \quad \dots\dots(12)$$

一つの小さいメッシュの探索が終わると次のメッシュへ移動し、再度そこで同様な探索を始める。以下、その作業を全メッシュに対して行う。

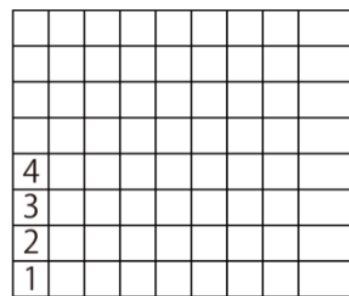


図 4. 全体のメッシュの設定

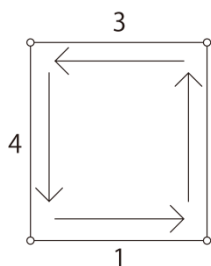


図 5. メッシュにおける等高線の探索順序

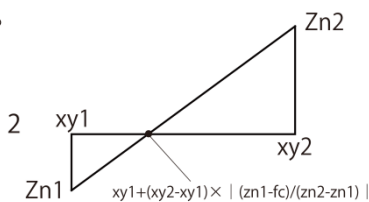
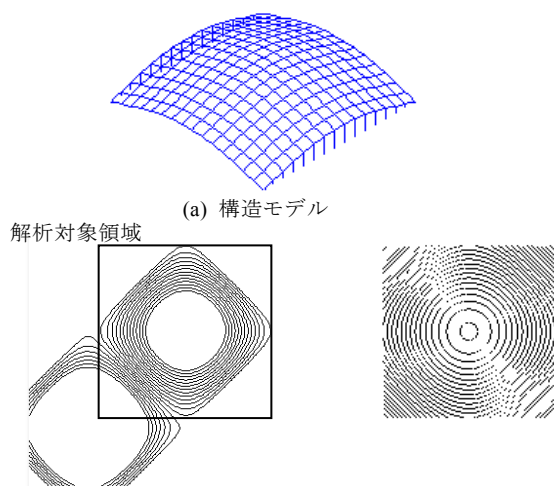


図 6. 等高線の位置の決定方法

図 5 の順番で等高線を描く場合、メッシュの辺 1 上の点に対しては、辺 2,3,4 のいずれかと線を引く可能性がある。描画の重複を避けるためには、辺 2 に対しては辺 3、4、辺 3 に対しては辺 4 のみを考慮すればよい。

3-3. 数値解析結果の検討

図 7 は上述の二つの方法で描いた等高線を比較したもので、図 7(a)は曲面骨組のモデルで、(b)は偏微分と Newton 法で求めた等高線、(c)はメッシュ分割で求めた等高線である。(b)の場合、接線勾配が緩やかな曲面頂部での等高線探索が必ずしも上手くいかない。また、等高線探索が初期値に依存するため等高線が探索できない領域が偶然できてしまうことがあった。複雑な形態では等高線を探せない問題も生じた。一見、論理的な偏微分を用いた方法に適用性が無く、単純なメッシュ分割法が実用的あるとの結果になった。そこで、本論文ではメッシュ分割法を採用した。



(b)偏微分と Newton による等高線 (c) メッシュ分割による等高線

図 7. 手法別の等高線の比較

4. 設計支援システムの概要

本システムは、海洋波の基本理論に基づき空間構造を生成する方法に基づき⁴⁾、前章のメッシュ分割法で等高線を描く機能を組んでいる。このシステムでは等高線のレイヤ分けをして、構造体のデータと共に DXF 形式の

ファイルとして書き出すことができる。図 8 はそのシステムのグラフィック・ユーザインターフェースである。海洋波を生成するための基本パラメータを設定した後、最初の等高線の高さ、間隔、数を指定すれば、前章のメッシュ分割法で等高線を描画することができる。

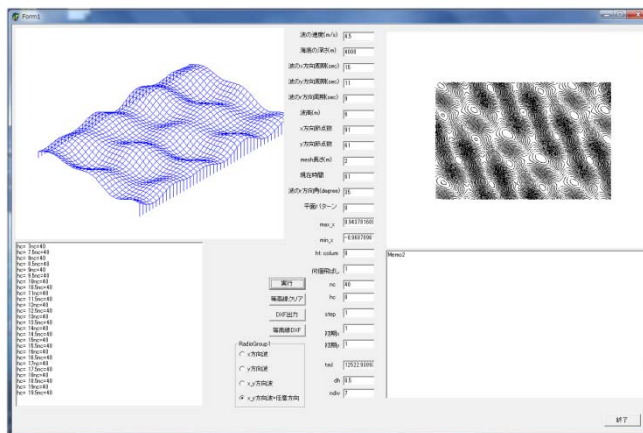


図 8. グラフィック・ユーザインターフェース

5. 建築設計への適用例題

はじめに、海洋波のパラメータを変化させながら構造体を発生させ、ゾーニングと平面計画に対応しそうな一例を選択して、海洋博物館の基本設計を行うことで、本システムの実用性の検証を試みた。平面の大きさは、長手方向に 180m、短手方向に 120m とした。海洋波のパラメータは、太平洋の平均水深 4000m とし、波の速度 4.5m/s、波高 6m、波の r 方向の伝搬角度 35°、波の周期は、それぞれ x 方向で 15sec、y 方向 11sec、r 方向 9sec、波動の継続時間 61sec とした。本システムは建築設計支援のみを対象としているが、一応、構造体の部材は 400×30、ヤング率 205000N/mm²、せん断弾性率 79000N/mm²、ポアソン比 0.3、質量密度 0.078 N/mm³ とし、部材断面が長期荷重に対して許容応力度以下となることを調べたレベルで CG などを作成している。等高線は 0.5m 間隔で、高さ 0~18m の間で 36 層作成した。図 9 はすべての等高線を表示させたものである。第 9 層の等高線を 1 階の床レベルに採用した。曲面が下がってきて、人が通れず使えない範囲を 1 階床レベルから 2m のところで定め、その部分を除き、1 階の平面計画のスペースに充てる(図 10)。次に 2 階を 1 階床から 5m のレベルに設定し、同様に人が使えない範囲として 1 階床から 7m のレベルを設定してその部分を除き 2 階の設計に充てた(図 11)。1 階では空間を等高線で確認しながら、諸室を配置した。0~2m の部分は外部空間として設計した。人が立ったままで室内として利用できる面積(床から 2m の高さがある部分)を室内の有効面積と考えた場合、その割合は 1 階での建築面積の 78% となった。2 階の平面計画は、1 階との関係を考えながら等高線を参照して行った。2 階の有効面

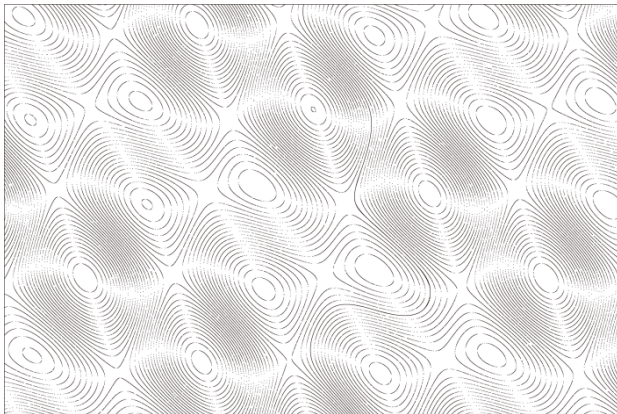


図 9. 海洋波の等高線

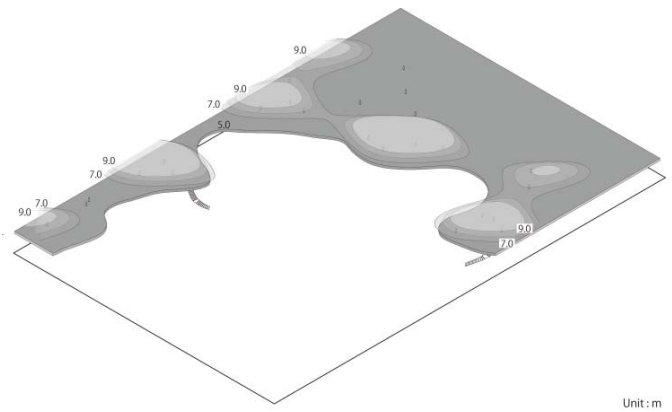


図 13. 2 階のアイソメ

Unit: m

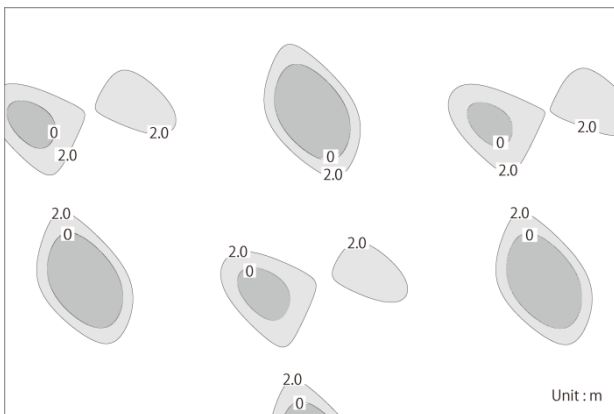


図 10. 1 階のレベルの等高線

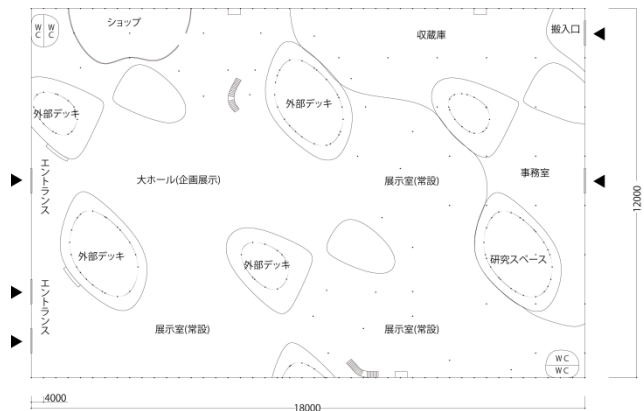


図 14. 1 階平面図

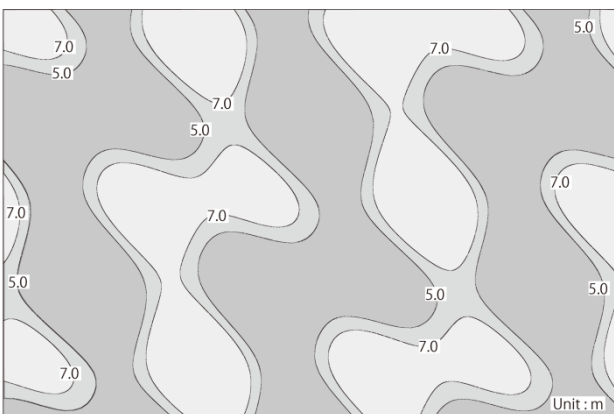


図 11. 2 階のレベルの等高線

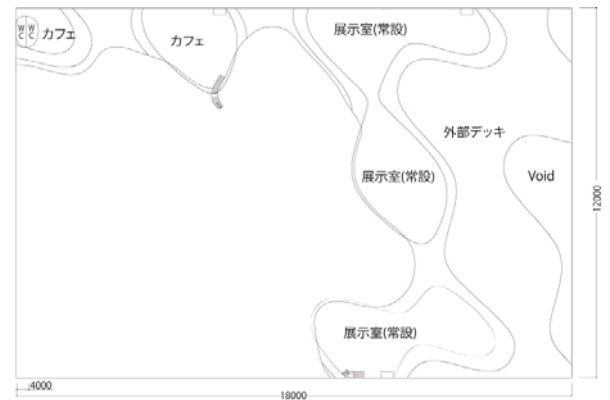


図 15. 2 階平面図

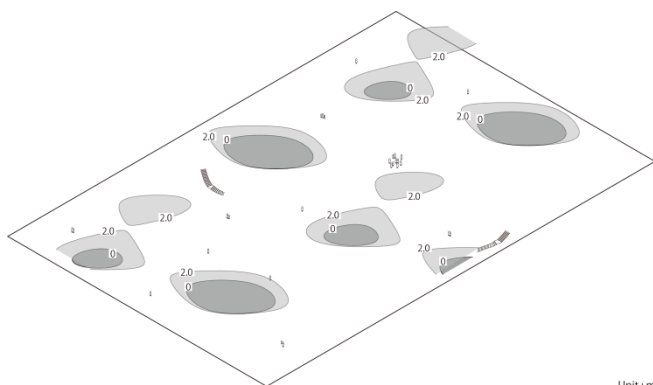


図 12. 1 階アイソメ

Unit: m

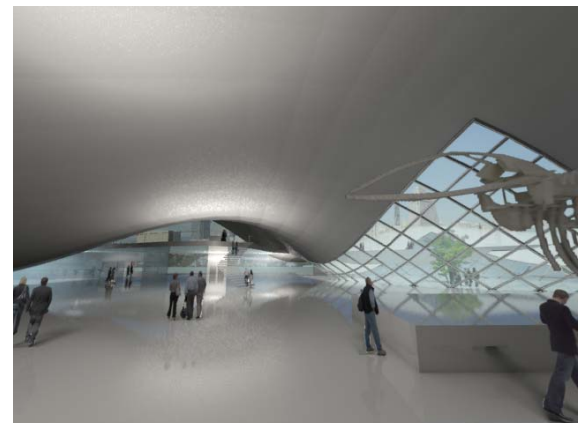


図 16. 企画展示のための大ホール

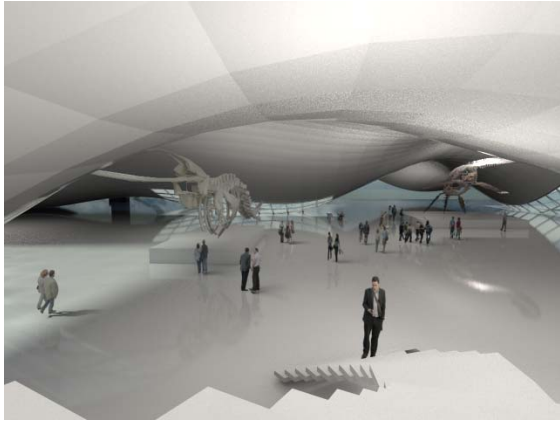


図 17.2 階からの俯瞰

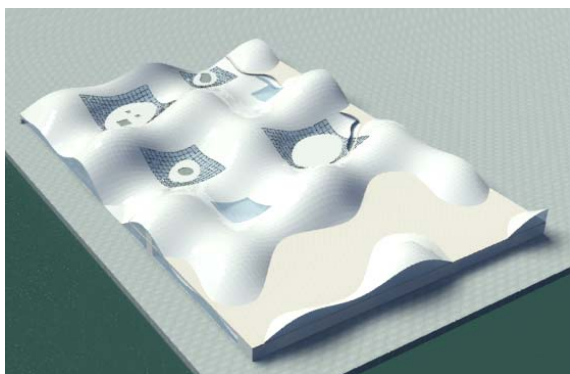


図 18. 外観透視図

積は内部空間として 37%、外部空間として 40%、合計 77% が利用できた。図 12 と図 13 は、それらのアイソメで、図 14 と図 15 は 1 階及び 2 階の平面図である。今回の適用例題は 1 例であるが、等高線を自由に表示させることで、複雑な 3 次元空間を把握しながら、平面計画を比較的容易に行うことができた。

図 16、17、18 は適用例題のモデルを CG で可視化したものである。海洋波のうねりに基づく複雑な曲面構造体とその中に計画した大ホール、2 階展示空間へのシーケンスなどを視覚的に認識できる。

なお、このプロジェクトでは、曲面の窪んだ部分の雨仕舞が心配されるが、大部分は中庭に利用し、或いはフラットな屋外デッキの下に防水用の床を設けて、その下に排水溝を設置するなどの対策をしているが、室内を通る隠し雨樋などで排水することも可能と考えられる。

6. 結論

本論文では、海洋波のうねりの生成理論に基づいて発生させた複雑な 3 次元曲面で構成される空間について、等高線を自由に表示できる建築設計支援システムを用いることで、比較的容易に平面計画を行うことができた。その結果、本論文の手法が、平面計画を行う上で、有効な支援となり得ることを検証できた。今後は、床面積の

計算、気積などを算出する機能を加え、より使い易い設計支援システムを目指す予定である。海洋波の理論に基づき形態を生成する本設計支援システムでは、従来の感性から導いた形態ではできなかった波の周期、伝播速度など波の本質に関わるパラメータから系統的に形態を生成して、それと計画する空間との整合性を CAD 上で把握しながら、立体的な空間を設計することが可能になった。それは、これまでの感性のみに導かれた波のような建築造形に、より深い自然との科学的なつながりを与えるものである。

【参考文献】

- 1) 朝山秀一，前 稔文：フラクタル幾何学にもとづく積層アーチの形状生成とその応用に関する研究，日本建築学会構造系論文集，No557，pp. 181-189，2002 年 7 月
- 2) 朝山秀一，田中規之：不定形空間構造の最適形態の探索台地の侵食アルゴリズムを用いた不定形骨組の形状生成（その 3），日本建築学会学術講演梗概集，A-2，防火，海洋，情報システム技術，pp. 433-434，2007 年 7 月
- 3) 朝山秀一，橋本夏樹：風紋と砂丘の形成アルゴリズムに基づく空間構造-形態生成の方法と適用例題，第 34 回情報・システム・利用・技術シンポジウム論文集（報告），pp. 199-202，2011 年 12 月
- 4) 朝山秀一，金城忠之：海洋のうねりの生成アルゴリズムに基づく構造形態の創生，日本建築学会学術講演梗概集，A-2，pp. 533-534，2010 年 9 月
- 5) S. Asayama, Y. Arakaki and T. Kinjo: A Space Structure Based on an Algorithm Generating Ocean Wave: Proceedings of the International Symposium on Algorithmic Design for Architecture and Urban Design, ALGODE TOKYO 2011, March 2011.
- 6) 関根義彦：「海洋物理学概論」，pp. 32-38，成山堂書店，2003 年 7 月
- 7) 奥村晴彦：C 言語によるアルゴリズム辞典，pp196-198，2009 年 6 月
- 8) 森 正武：曲線と曲面，pp70-77，1982 年 7 月

*1 東京電機大学未来科学部建築学科 教授 工博

*2 榊集研設計(元同大学大学院生) 修士(工学)

CAAD System for a Space Structure Based on an Algorithm Generating Ocean Wave

Design Aid Using Contour Lines and an Applied Example

○Shuichi ASAYAMA^{*1} Tadayuki KINJO^{*2}

Keywords : Algorithmic design, Planning, Contour, Structural morphogenesis, Ocean wave, Space structure

Nowadays the design procedures are shifting to be integrated by Building Information Model from the past way where architectural, structural and environmental designs were conducted separately after meeting for the project. The reason seems to be not only modernization of the process from design to construction for efficiency but also the pursuit of complex and 3 dimensional space never been seen in the past using modern technology. The later trend can be understood when design works of Frank O. Gehry, Zaha Hadid, Herzog & de Meuron are mentioned. Under the above situations, authors have been engaged in developing new structures based on the form system of nature such as bifurcation of a tree, land erosion and propagation of ocean wave. These researches were carried out, keeping certain distance from the microscopic rationality in the modern structures. The activities stem from the philosophy that nature still has a large number of morphogenetic systems to be learned and macroscopic rationality and that leads to complex but rational space like nature we have never experienced. In this paper the authors present a design aid system for planning on complex 3D space based on ocean wave theory using contour lines and verify the validity of the procedure through a design example.

Firstly ocean wave theory on swell is described briefly. Secondly a numerical method for drawing contour lines based on partial differentiation and one based on mesh division are compared and the later is adopted because of its flexibility to complex form. The former has some difficulties in determining contour at the top of the wave and analytical area. This CAAD system provides contour lines with arbitrary pitch and number if the designer specifies them. Next authors attempt to conduct planning on a marine museum with 3D wavy form by operating the system. The model has a dimension of 180m×120m. The contour lines displayed on the plan are helpful to grasp the space where a human can walk around without knocking his head against the wall leaning to all directions. They also provide usable area comparing with total area in plan. Thus the repeated process of form generation and planning are completed and 3D model is generated. The designer can understand complex interior space easily through perspective view rendered.

Finally the authors conclude that the CAAD system is helpful to understand relationship between complex 3D space and the plan when they conduct planning through a design example of a marine museum project.

*1 Professor, Department of Architecture and Building Engineering, Tokyo Denki University, Dr.Eng.

*2 Shuiken Sekkei Inc. , Ex-Graduate Student of Tokyo Denki University, Master Eng.