

都市における風環境に関する研究

Study for Numerical Analysis of Wind Environment in City

研究代表者 研 究 員 川原 睦人 (中央大学理工学部土木工学科)
共同研究者 研 究 員 櫻山 和男 (中央大学理工学部土木工学科)
共同研究者 客員研究員 櫻井 英行 (清水建設(株)技術研究所)
共同研究者 客員研究員 林 正宏 (J F E 技研(株)土木建築研究部)
共同研究者 客員研究員 加藤証一郎 (大木建設(株)技術研究所)
共同研究者 準 研 究 員 野島 和也 (土木工学専攻博士課程前期)

1 はじめに

市街地に新たに構造物を建造する場合、計画の段階から周辺の風環境に与える影響を推定することは非常に重要である。特に高層ビルでは、建設後にビル風が問題となることが多く、その程度や影響範囲の事前調査が必要である。近年では、事前調査において CFD も利用されており、本研究のような解析において必要な数値計算能力は、コンピュータの性能の飛躍的な進歩とハードウェアの低価格化に伴い、著しく向上してきている。

しかし、その一方で三次元モデル生成は依然労力を必要とする作業であり、場合によっては、有限要素の生成が行えない場合もある。更に、計算格子の生成は、解析対象の複雑化・大規模化に伴いより時間のかかる作業となった。このことから、数値解析の実現象への適用において最大の課題は解析領域作成を担う要素生成方法であり、三次元の任意形状に対して確実かつ迅速な要素生成法の開発が必要とされる。

有限要素解析においては、使用する計算格子が1回の操作で決まることは少なく、解析者は使用可能な格子が得られるまで、生成作業を繰り返すことになる。それゆえ、地形風解析など規模の大きな領域に対しては、要素生成時間の短縮化も大きな課題となる。また計算格子生成には、いかなる状況に於いても要素生成作業が失敗することなく確実に要素生成を行う強固性も求められる。

そこで、本研究では三次元ビル周りの計算格子作成手法を中心に研究を行い、三次元に拡張された Delaunay 分割法の処理速度と強固性を改良し、これをベースにした非構造メッシュ作成法を提案する。

2 非構造メッシュ生成

現在、要素分割法は構造格子 (Structured Grid) 生成法と非構造格子 (Unstructured Grid) 生成法に大別される。構造格子分割は、代数式により正則格子を変形させてモデ

ルを形成を行い、非常にきれいな要素分割を行うことができる。その反面複雑領域に対してはモデル生成が非常に困難である。一方、非構造格子では要素分割はきれいではないが、その規則性を排除した特性から、どのような場に対しても要素生成が可能である。非構造格子生成法にはいくつかの手法が利用されているが、本手法では幾何学特性が簡単であることから Delaunay 分割法を用いている。

2.1 Delaunay 分割法

Delaunay 分割法は、すべての要素についてその外接円または外接球が他の要素の頂点を含まないという幾何学的特性を有する。この特性は、有限要素解析で理想とされる正三角形または正四面体に近い要素を生成することが可能であり、Delaunay 分割が有限要素解析に適していることを示している。

2.1.1 Delaunay 分割法高速化

Delaunay 要素の生成は、予め Delaunay 要素で満たされた領域に計算点を追加し、逐次その点を含む四面体の細分化し、非 Delaunay 要素を修正することで行う。これまで、非 Delaunay 要素の修正は、局所的作業を繰り返しながらある形状に収束させるものであったが、この方法は非常に時間かかった。そこで、本研究では要素修正を局所的に繰り返すのではなく、修正すべき要素を一括して修正するように変更した。

この四面体置き換え (スワッピング) のアルゴリズムは次の通りである。初めに新たに領域に加えた点を外接球に含む要素を全て探索しスワップリストに加える。次にスワップ

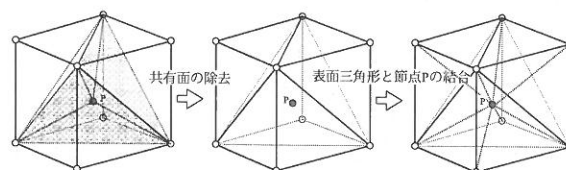


図1 非 Delaunay 要素の修正

リスト内の四面体群の共有辺を取り除いて多面体を作成し、最後に、多面体の表面の三角形と点とを結び四面体を作成する(図1)以上の操作で非Delaunay四面体とDelaunay四面体との置き換えを行うことができる。

2.1.2 ロバストネスの強化

上記のスワッピングにおいて、外接球の半径及び外接球の中心と追加節点の距離の計算における数値誤差により、計算格子として望ましくない要素が発生する場合がある。図2は、本来スワッピングで置き換えられるべき要素が、要素外接球の内外判定の失敗によりスワップリストから外されたために、体積負の要素が発生された例を示している。一度このような要素を生成すると、要素外接球の内外判定が正しく行われず、これ以降のスワッピングで要素の隣接関係が崩れてしまい、要素生成の継続が不可能となる。この問題に対しては、整数多倍長計算などの高精度計算を利用する方法^[3]などが提案されているが、有限要素解析プログラムにも、これより作成された要素メッシュを利用できるだけの精度を求めなければならないため、本研究では、計算誤差を処理することにより不適格要素の生成を抑える改善を行った。次にいくつかの改善点を示す。まず、図3に示されるように、点Pが外接球表面上にあるか球表面に非常に近い場合、外接球内に節点Pを含んでいるにもかかわらず、計算誤差により点Pを外接球に含まれないと判断してしまう。この計算誤差は経験的に倍精度(64bit)計算のとき外接球の半径の 10^{16} 倍前後であることがわかっている。外接球の内外判定の誤判は、外接球の半径と節点と球中心との距離の差が外接球の半径の 10^{16} 倍以下で頻繁に起こり、最大 10^{14} 倍で起こっている。これに対して、本研究では、節点と球中心との距離 ρ が、球の半径 r と許容誤差($r \times \epsilon$)の和よりも小さいときはその節点が球に含まれると判定する。ここで、 ϵ は小さい数であり、 10^{13} を用いた。更に図4に示すように、追加点Pが二つの四面体の共有面の延長面上かつ外接球面上に存在する場合、一方の四面体で節点Pが外接球外と判断されてしまうことがある。この場合、スワッピング時に、本来共有面であるはずの面と節点Pにより四面体が作られることになり、体積がゼロの要素が発生する。これを回避するために、節点Pが多面体表面の延長平面上にあると判断された場合は、もう一方の四面体も強制的にスワップリストに加える。このような処理を加えることにより要素生成のロバスト性の強化を図る。

2.2 モデル作成法

以下に、ビル風解析の為のモデル作成について記す。

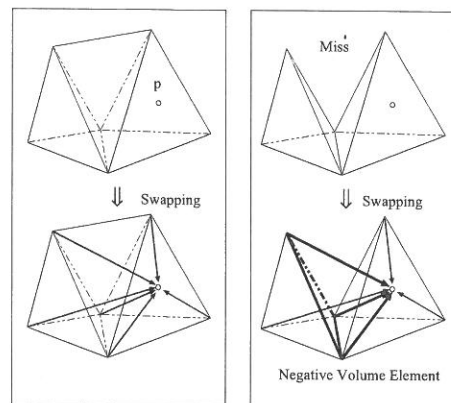


図2 体積負の要素の発生

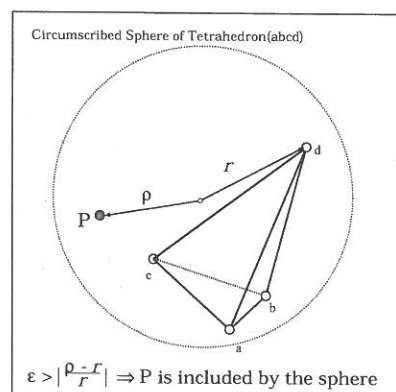


図3 計算誤差の考慮

2.2.1 壁面形成

建物の壁面形成は、個々の建物に対して行う。建物データは電子地図等により建物の輪郭をとり、建物それを鉛直方向に立ち上げて作成する。モデル作成に必要なとされるデータは、面・稜線・頂点である。壁面の節点分配は図5に示すように、各面・稜線・頂点ごとに行う。

2.2.2 仮節点による壁面形成

建物の物体形状を得るため、Delaunay分割を適用する前に、一時的な仮節点を発生させる。この点は壁面の各節点に対して、その節点の存在する面に垂直かつ領域外側方向に発生されるものである。節点群にDelaunay分割を適用した後、図6の様に、要素を分類することで、不要な要素を分離することができ、最終的に物体形状及び有限要素を得ることができる。

2.3 計算点分布法

またその離散点を要素で結合する必要がある。この離散点の発生は以下のようにして行った。まず壁面の要素幅を境界条件としラプラス方程式を解く。得られた解を各要素に必要な要素幅とする。最後に各要素ごとに、計算された要素幅を用いて節点を発生する。この節点の分配には、松

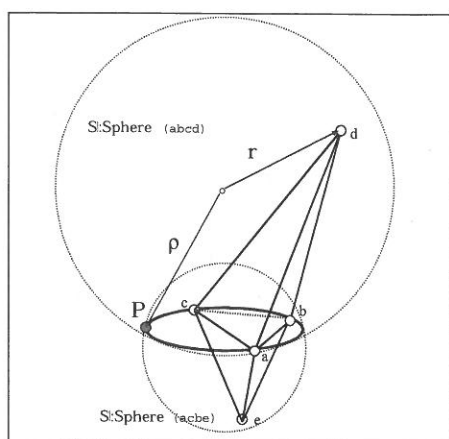


図4 Delaunay 分割の退縮問題

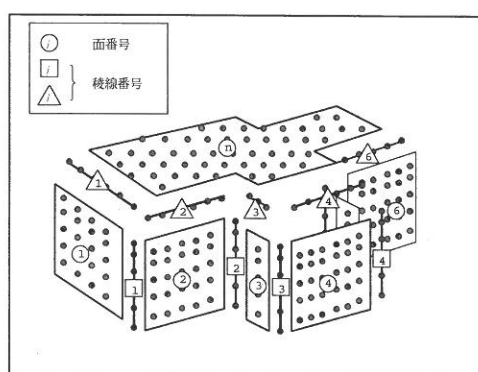


図5 Building 壁面の節点分配

本ら^[4]によって提案された放射基準線法を三次元に拡張したものを用いた。計算格子は、発生させた節点を一つずつ領域に追加し、2.1.2節で示した要素修正を行うことで更新することができる。

3 生成例

この計算格子生成法の有効性を示すために、図7に示す中央大学理工学部校舎のモデル生成を行った。このモデルでは、流入風向の変化を考慮して、円筒形の外部境界を採用した。この有限要素メッシュでは、最小要素幅を1.0m、外部境界の半径を160mとした結果、総節点数が258,896、総要素数は1,447,491となった。領域をすべて1.0mの幅で分割したとき、総節点数が約4千万になることと比較すると、解析領域の広さ、最小メッシュ幅から考えて、このメッシュ生成では節点総数の削減に成功しているといえる。仮に、25万節点の要素分割を同一幅で行おうとすると5.8mの要素幅が必要となり、設定した最小要素幅よりかなり大きくなってしまふ。

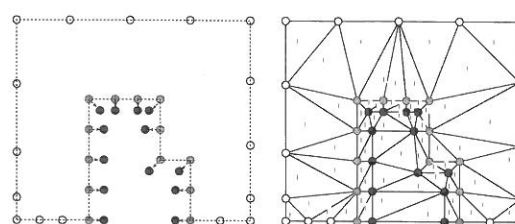


図6 仮節点による壁面形成

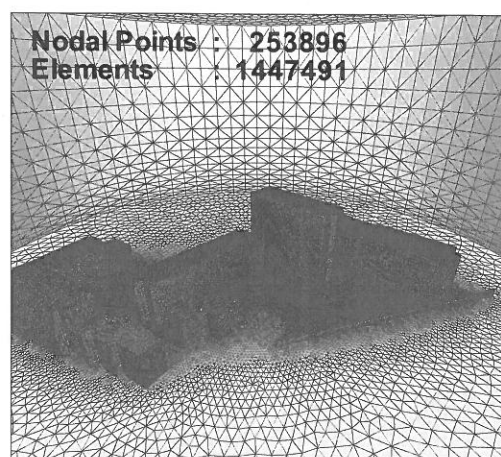


図7 後楽園キャンパス周りの有限要素分割

4 解析例

作成された計算格子で実際に計算が行えることを確認するために、非圧縮 Navier-Stokes 方程式を用いて計算を行った。計算に際して計算領域が広大なため、データサイズが大きくなり、さらには非常に多くの計算時間を要する。そのため、複数の Intel Pentium4 Processor 搭載 PC クラスタを構築し、並列計算を行った。図10は、Y断面、Z断面上の流速ベクトルを表している。建物背面の複雑な流れも表現されている。図11は、圧力の等値面と流線を描かせたものであり、それぞれ無次元時間で10、20、30、40の時の結果である。図10の結果が示すように実際に計算が行えることが証明出来た。

5 おわりに

本研究では風環境の数値解析のアプローチとして、ビル風計算のための計算格子生成法を主に研究を行った。生成例の結果より、提案された格子生成法が複雑なプロファイルの領域でも要素分割が可能であることが示された。また、非圧縮粘性流れの計算の結果より、改良型三次元 Delaunay 分割法、仮節点による要素分離法、ラプラス方程式による節点発生法を組み合わせた本手法の計算格子の有効性を示すことができた。

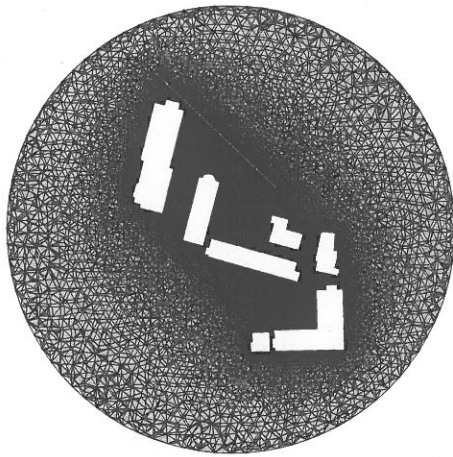


図 8 後楽園キャンパス周りの有限要素分割 (断面)

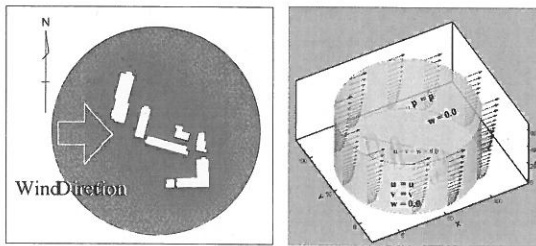
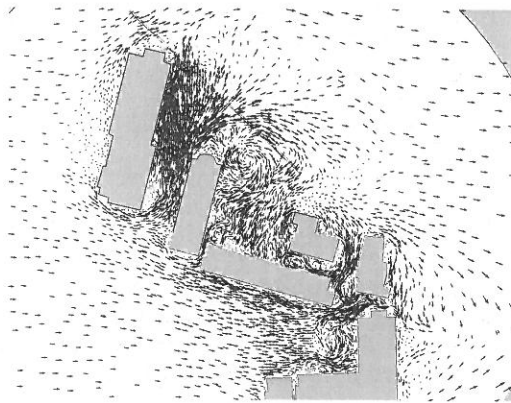
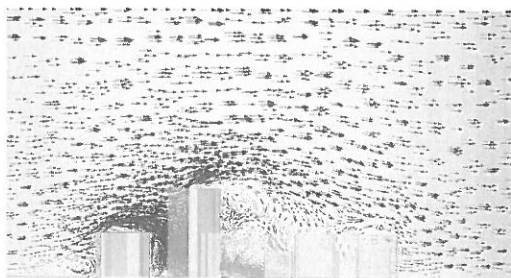


図 9 解析モデル

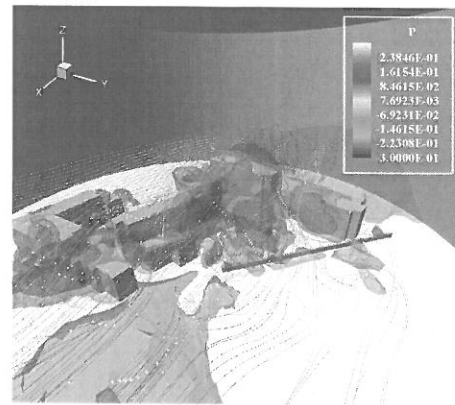


X - Z 断面

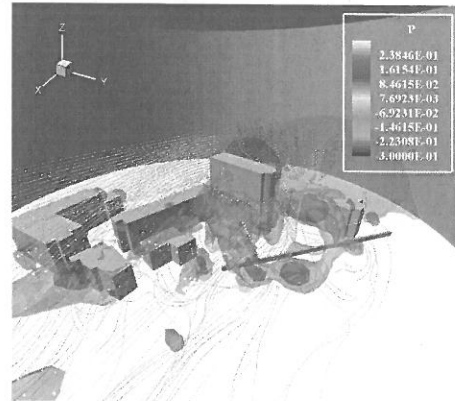


X - Z 断面

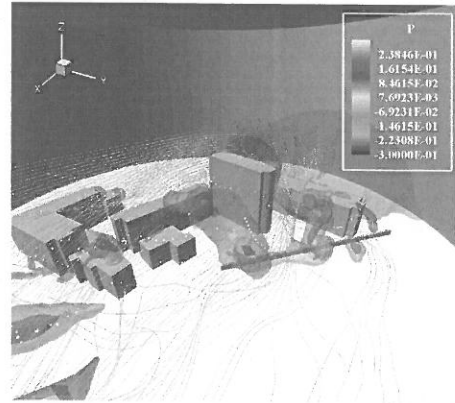
図 10 非圧縮粘性流れ解析結果 流速ベクトル図



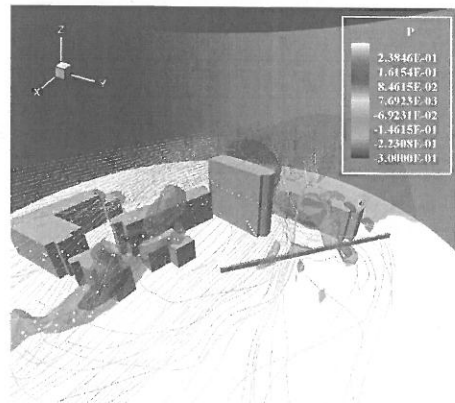
T=10



T=20



T=30



T=40

図 11 非圧縮粘性流れ解析結果 圧力図

参 考 文 献

- [1] 谷口健男：F E Mのための自動要素分割-デローニー三角分割法の利用，森北出版，(1992).
- [2] 野島和也・川原睦人：三次元 Delaunay 分割を用いた地価トンネル三次元有限要素分割モデルの作成，応用力学論文集，5，(2002)，pp.253-262.
- [3] 杉原厚吉：F O R T R A N 計算幾何プログラミング，岩波書店，(1998).
- [4] 松本純一・梅津剛：アダプティブリメッシング法を用いたデローニー分割型メッシュ生成法の開発，計算工学講演会論文集，4，(1999)，pp.195-198.