

■移動物体解析の目的

計算流体力学(CFD)の分野において、非構造格子はその利点である自由な形状表現やCADデータとの親和性を考えると、あたかも万能のように見える。一方、構造格子は、計算アルゴリズムの蓄積や計算精度などで多くの利点を持ちながら、その形状表現の稚拙さのために建築業界では多用されても産業界全体への応用では非構造格子に大きく遅れをとっている。

しかし構造格子においても勾配面や球面を表現しうる離散化スキームが存在する。このようなスキームを6面体や円柱などの基本図形のモデラーにより生成された3次元形状やインポートされた3次元CADデータと関連付けして全体の解析形状のモデリング実現に結びつけば、非構造格子の出来ないCFD解析をカバーする新しいソフトウェア体系が成立する。

ここでは、直交格子をベースとした勾配面や球面を表現し得る離散化手法を説明し、その応用として、薄物構造の表側と裏側を同時に解析できるスキームを考案した。さらに、この離散化手法の考え方を発展させて、簡単に移動物体問題の解析が可能となる事を示す。この手法の有効性について、いくつかの解析事例により検証していると同時に実用問題への応用も展開中である。

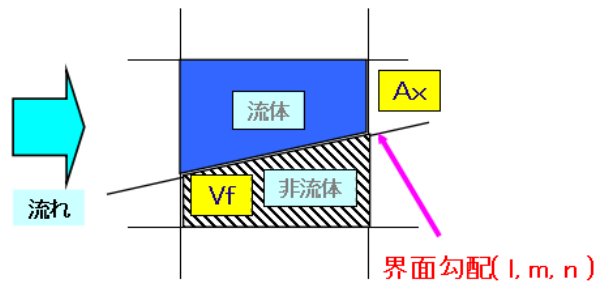
表1 移動物体解析手法の比較

手法	長所	短所
Euler	簡単な定式化, 計算コスト少	形状表現に難がある, 格子生成ソフトが無い
ALE	形状表現への柔軟性, 格子生成ソフトが豊富	計算コスト大, リメッシュ・リゾーン時の物 理量割り当てが困難
Multi Grid	簡単な定式化	複数の移動物体の取り扱い は困難, 計算コスト大

■移動物体解析の手法

非圧縮性流体のCFDの基本方程式は、流体の運動を記述するNavier-Stokes方程式と、質量保存則を規定する連続の式である。筆者らがSuper Cartesian法と呼ぶ手法では、これらの方程式は、直交格子での各セルの体積占有率と隣接セル間の開口率で表して式1)から4)のように表現される。

- Euler格子の中でセル毎の体積占有率と各面開口率を用いて一般的な斜め境界を表現。界面勾配を考慮することにより、詳細な境界条件の扱いが可能



体積占有率: Vf
各面開口率: Ax, Ay, Az 界面勾配

セル内で界面を仮定し、流体側の運動をシミュレート

図1 Supercartesian法の格子定義模式図

- 運動方程式(Navier-Stokes方程式):

$$\begin{aligned} \frac{\partial (uVf)}{\partial t} + uAx \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right) + vAy \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right) + wAz \left(\frac{\partial u}{\partial z} \right) \\ = Vf \cdot \left(-\frac{\partial P}{\partial x} + (\mu / \rho) \nabla^2 U|_x + F_x \right) \quad \text{--1)} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial (vVf)}{\partial t} + uAx \left(\frac{\partial v}{\partial x} \right) + vAy \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right) + wAz \left(\frac{\partial v}{\partial z} \right) \\ = Vf \cdot \left(-\frac{\partial P}{\partial y} + (\mu / \rho) \nabla^2 U|_y + F_y \right) \quad \text{--2)} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial (wVf)}{\partial t} + uAx \left(\frac{\partial w}{\partial x} \right) + vAy \left(\frac{\partial w}{\partial y} \right) + wAz \left(\frac{\partial w}{\partial z} \right) \\ = Vf \cdot \left(-\frac{\partial P}{\partial z} + (\mu / \rho) \nabla^2 U|_z + F_z \right) \quad \text{--3)} \end{aligned}$$

- 連続の式:

$$\frac{\partial (Vf)}{\partial t} + Ax \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right) + Ay \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right) + Az \left(\frac{\partial u}{\partial z} \right) = 0 \quad \text{--4)}$$

ここでu,v,wは各速度成分、Vfは体積占有率、Ax,Ay,Azは隣接セル間の開口率、μは粘性係数、ρは密度、Pは圧力、U=(u,v,w)、Fx,Fy,Fzは体積力である。

この離散化の過程で、図 1 に示すように、各セル毎に任意に斜めの面でコントロールボリューム(検査体積)を定義することが可能である。しかしながら、隣接セル間の開口率 A_x, A_y, A_z の情報だけでは面の勾配値が正確に決まらない上にセルを 2 つ以上の面が横切る場合の処理も不可能である。そこで筆者らは、新たにセルを横切る面の勾配値 (l, m, n) を定義し、境界面(壁面)直近のセルの法線方向速度成分や接線方向速度成分などを正確に設定し境界面近傍の流体挙動を、精度良く再現可能とした。

また、セルを切断した物体境界面の内側は必ずしも固体セルまたは非流体セルでなくとも良く、同種あるいは別種の流体セルと定義することも可能である。この場合、境界面を持つセルでは速度や圧力などの物理量を二重に保持する必要があり、計算手続きはより煩雑になる。

■移動物体解析の応用例

今までの走行中の車両の空力解析は、車両自身が動いているにも関わらず、車両を固定して走行速度に対応した風を当てるといった手法で行われてきた。このようにいわゆるガリレイ変換を用いた手法は、風洞実験・シミュレーションの容易さやデータの採取しやすさなどから極めて一般的となっているが、こうした手法で実際に車体周辺に起こっている流体力学的挙動を正確に捉えられているかどうかは疑わしい。

第一には、グラウンド効果や壁面・天井面の影響が考えられ、タイヤを回転させ路面を風と同じ速度で移動させたとしても、すぐそばにある壁面や天井面までは動かしていないので、実際に車体を動かした場合の流体力学的挙動とは大きく異なるのは当然である。

第二には、車体にぶつかる風の上流の乱れの問題である。静止空気中を動く車両は自然の風が車両に当たると想定されるが、車体を固定した風洞実験・シミュレーションでは、上流の風の風向や乱れ成分は自然の風と一致しない。風速が速ければ速いほどこの乖離は大きくならざるを得ない。

自然の風と一致しない上流風では、物体に当たった際の渦の剥離が異なるので、車体表面に発生する圧力分布の測定ピーク値も異なる可能性がある。結果として、車体を動かさない風洞実験・シミュレーションは、実際に車体を動かした際の流体力学的挙動とは異なるものを評価している可能性がある。

また、前述のガリレイ変換は等速直線運動を前提しており、回転を含む複雑な運動では、車両を固定した従来の手法では定性的な挙動でさえも評価出来ていないかも知れない。本手法では、単純な直線運動・曲線運動に加えて、オブジェクトの重心周りの回転運動も同時に表

現する事が出来る。図2にはドリフト中のセダン型乗用車の周囲に発生する風圧分布を示した。直線走行の最中での重心周りの回転を考慮しているが、車体に対して非対称に生じた圧力分布が興味深い。また、図3では回転速度をさらに上げて、スピンする4輪駆動車の周辺に発生する圧力を示した。負圧・正圧の生じる箇所や渦中心の位置などは、我々の予想とかなり異なる事が分かります。

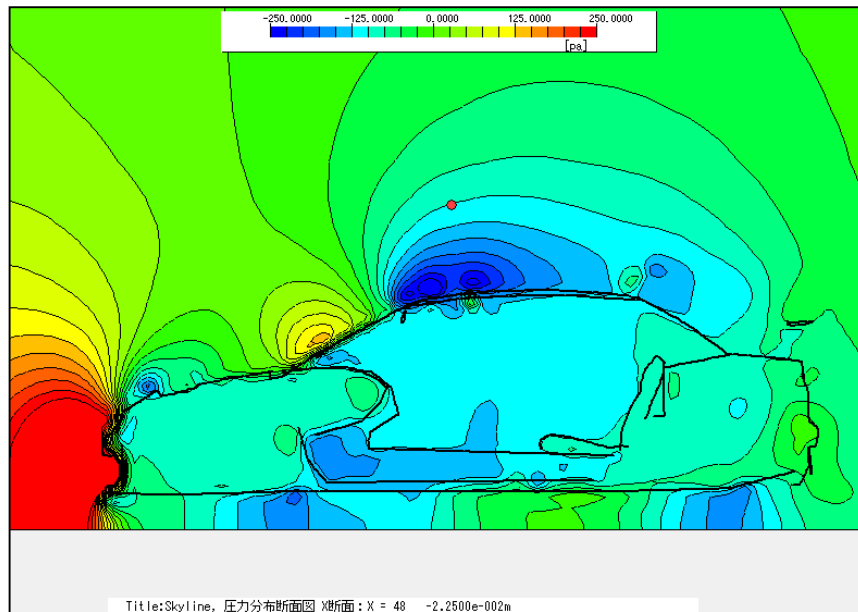


図2 直線運動する車両内外の断面圧力分布

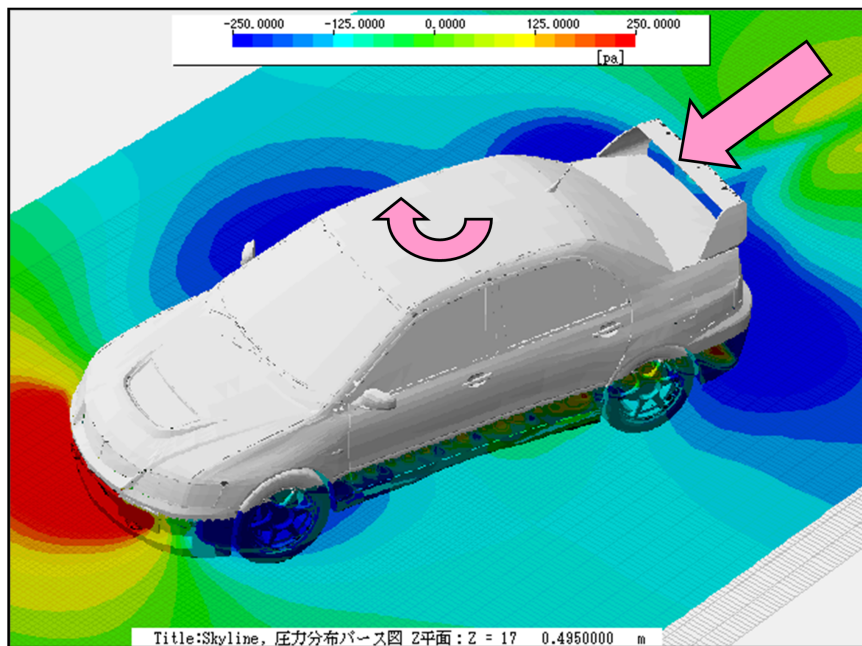


図3 ドリフト走行する車体周りの風圧力