

# サボニウス型回転装置まわりの差分格子生成法

## Grid generation around Savonius rotor

河村 哲也

抄録：垂直軸抗力型の風車のひとつにサボニウス風車がある。サボニウス風車には、低速回転、高トルクという特徴があるため、風力発電に用いられることはほとんどなく、揚水や粉挽きなどに用いられる。一方、最近注目されている海流発電は、大きな潜在力をもちながらも、研究例は少なく、実用化はなされていない。海流は比較的低速であるため、サボニウス型回転装置を用いた発電は大きな可能性をもっている。サボニウス型回転装置の性能を調べる上で数値シミュレーションが効果的であるが、数値シミュレーションを行う上で、回転装置を含む領域を格子分割する必要がある。サボニウス風車は幾何学的には単純な形状をしているが、解析に適した格子をつくることはあまり容易ではない。本報告では、複数の回転装置が独立して回転する場合にも適用できる差分格子の生成法についてひとつの提案をおこなう。

Abstract: One of the vertical axis wind turbines that utilize drag force is the Savonius wind turbine. Savonius wind turbines are characterized by low speed rotation and high torque, so they are rarely used for wind power generation and are used for pumping and milling. On the other hand, ocean current power generation, which has been attracting attention recently, has great potential, but there are few research examples and it has not been put into practical use. Since the ocean current is relatively slow, power generation using the Savonius type rotating device has great potential. Numerical simulation is effective for investigating the performance of the Savonius type rotating device, but in performing the numerical simulation, it is necessary to divide the area including the rotating device into a grid. Although the Savonius wind turbine has a simple geometric shape, it is not so easy to generate a grid suitable for analysis. In this report, we propose a grid generation method that can be applied even when multiple rotating devices rotate independently.

キーワード：サボニウス風車、海流発電、格子生成、2方向補間、差分法

Key words: Savonius rotor, ocean current power generation, grid generation, transfinite interpolation, finite difference method

### 1. はじめに

持続可能な社会構築のため、化石燃料に頼らない自然エネルギーの獲得法の獲得が急務である。現在、有望視されているのが風力発電であるが、国土の狭い日本では大規模なウィンドファームを建設するための土地が限られている。そのため、洋上に風車を設置する洋上風力発電が国策として推進されている。

一方で、日本は島国で周囲を海に取り囲まれており、近海には世界最大規模の海流である黒潮をはじめ、数々の海流が流れており、それらがもつ莫大なエネルギーを活用することも考えられる。沿岸から海流までの距離は長くエネル

ギーの運搬という解決すべき課題はあるが、それは洋上発電でも同じである。また、遠くの大規模海流のみならず、沿岸近くを流れる「瀬」と呼ばれる潮流もありそれを発電に利用するとエネルギーの輸送コストは下げられる。こういったエネルギー獲得方法を海流発電や潮流発電とよばれる。さらに、洋上風力発電には高さ 100m を超える風車を海上に設置するため景観の問題も起きるが、海流発電や潮流発電は発電装置の大部分を海中に沈めるため景観の問題はほとんど起きない。

このような利点をもつ海流発電であるが、まだ実用化にいたっていないのは、送電の問題以外にもいくつかの理由がある。そのひとつとして、海流の速度が地上を吹く風に比べて小さいことがあげられる。黒潮の平均流速はせいぜい 1m/s であり、プロペラ風車が稼働する数 m/s に比べて圧倒的に小さい。そのため、風力発電で主流であるプロペラ型はそのままでは使えない。いいかえれば、風力発電で培われてきた知見が海流発電ではあまり役立たないことになる。すなわち、実用化がまだ先であるのは、研究が十分でないことがあげられる。なお、回転装置が流体から得るエネルギーは流速の 3 乗に比例するため、海流の潜在エネルギーは一見小さいようにみえる。しかし、エネルギーは流体の密度にも比例し、海水は空気の 1000 倍の密度をもつため、流速は小さくても十分なエネルギーをもっている。

風車は揚力型と抗力型に分類される。前者は物体が流体から受ける揚力を利用するもので、流速より速く回転できるという特徴がある。その一方でトルクは小さい。代表例として前述のプロペラ型風車がある。後者は物体が流体から受ける抗力を利用するもので、流速よりはやく回転できないが、トルクが大きいという特徴がある。サボニウス風車やクロスフロー風車が代表例である。回転速度は変速機を用いて変化させることが可能であるが、エネルギーロスが大きい。したがって、発電には高速回転する風車を用いるのが効率的であるため、風力発電ではプロペラ型が現在主流になっている。それに反して、海流は流速が小さいため、揚力型は不向きである。それとともに、海中でプロペラを高速回転させると、キャビテーションが発生し、著しいエネルギーロスがあると同時に回転体にもダメージを与えるという問題もある。したがって、海流発電には抗力型が適切であると考えられる。



図1 種々の垂直軸風車（左から S 字風車、ダリウス風車、垂直軸直線翼風車）

以上のような背景を踏まえて、本報告では、海流発電の実用化に向け、サボニウス型回転装置に着目した。発電用の回転装置の性能を見積もる上では、その装置が回転しているときのまわりの流れを調べることは必要不可欠である。最終的には模型を作って直接トルクを測定するにしても、流れを十分に理解した上で、系統的に回転装置の形を変化させていくのが効率がよい。そのような場合には数値シミュレーションが有用になる。

サボニウス風車は、見かけは簡単な形状であるが、数値シミュレーションを行う上でいくつかの困難な点がある。流体シミュレーションでは基礎方程式であるナビエ・ストークス方程式を、数値的に近似的にコンピュータを使って解く。ナビエ・ストークス方程式は非線形の連立偏微分方程式であり、代表的な数値解法として差分法と有限要素法がある。後者は通常、計算領域を（2次元計算では）三角形の要素に分割する。三角形であることから、複雑な領域でも要素分割が容易であることが最大の利点である。しかし差分法に比べて計算時間がかかるとともに、ナビエ・ストークス方程式の非線形性に由来する計算不安定性を回避するための方法が使いにくいいため、特に実際の風車で想定されるレイノルズ数に対して

適用が困難になる。

差分法では、通常は計算領域を差分格子とよばれる四辺形の格子に分割する。形状表現能力は有限要素法に劣るが、計算時間が少なくすむとともに高レイノルズ数流れに対応しやすいという利点がある。

本報告では、サボニウス型回転装置の形状が、差分法では非常に困難になるほど複雑ではないため、差分法を用いた解析が可能なような差分格子の生成の方法を提案する。この格子を用いれば複数個の風車が近接しておかれた場合の解析も可能になる。

## 2. サボニウス型回転装置

サボニウス風車（回転装置）は図2に示すように、縦方向に置いたドラム缶のような中空の円筒を、軸を含む面で2つに割ってそれを重なりをもつように横方向にずらした形状をしている。この風車はフィンランド人技師サボニウスによって考案され1924年に特許がとられているため、サボニウス風車とよばれる。サボニウス風車で重なり部分をなくした場合は、上から見るとアルファベットのSの形をしているため特にS字型風車とよばれる（図1の左図）。風車の径と重なり部分の長さの比  $s/d$  をオーバーラップ比という。サボニウス風車の特性に関する詳細な研究から、オーバーラップ比が0.3程度のとき最大のパワーが得られる。

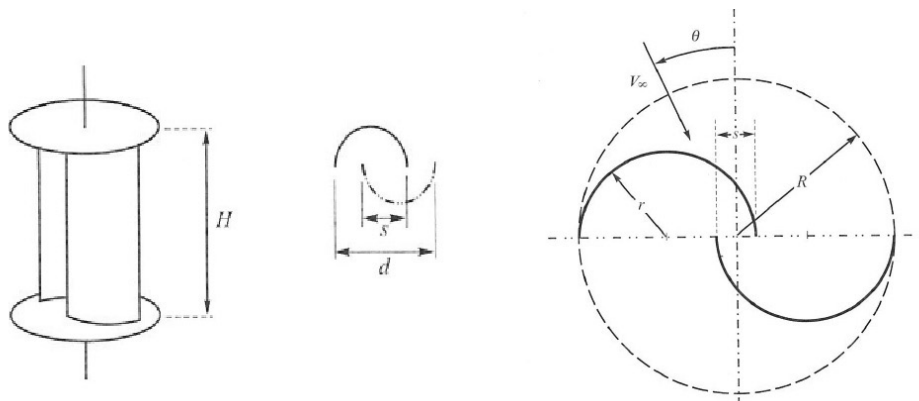


図2 サボニウス風車

サボニウス風車では、円筒形のブレード内側で受ける抵抗の方が外側で受ける抵抗よりも大きく、その差によって回転力が発生する。また内側で受けとめた空気の一部が、オーバーラップ部分に流れ込み、反対側にあるブレードを押し形になるため、S字型風車より効率がよくなる。

サボニウス風車は回転軸と流れが垂直になっているため、垂直軸型とも分類される。垂直軸型風車には風向によらず回転できるという利点がある。ただし、風向きが特別な角度のとき、回転力が生じないこともあり得るが、自然の風は風向がたえず変化するため、特別な装置をつけなくても回転を始める。すなわち自己機動性がある。なお、回転を維持するためには風（流体）が風車を押し続ける必要がある。回転速度がある限度を超えると風は風車を押すことができなくなるため、回転速度には限界がある。トルクは風車が静止しているとき最大で、風車が回転を始めると風と風車の相対速度が小さくなるため小さくなる。風車が風から取り出せるパワーはトルクに回転速度を乗じたものなので、回転数を横軸、パワーを縦軸にとったグラフではピークをもつ形になる。最大値は周速度比（=回転速度/風速）がおよそ0.6のときに得られる。パワー係数は一般に高速回転する風車が大きく、サボニウス型では0.1-0.2程度である。なお、どのような風車であってもパワー係数は0.6を超えることはない（ベッツ限界）。

図2に示すように、ふつうサボニウス風車では、軸方向に蓋（端板）を取り付ける。このことにより性能を上げることができる。

### 3. 格子生成のための補間法

与えられた領域内に格子を生成する場合、補間法がしばしば有効である。特に多方向（2次元の場合は2方向）の補間法は、transfinite interpolation とよばれ汎用性が高い。これは1方向の補間法であるラグランジュ補間を多方向に拡張したものである。

ラグランジュ補間は図3の左に示すように領域の向かい合った2組の辺において1組が直線、他の1組が曲線の場合に利用できる。前提として曲線は既知でありその上で格子点の座標は与えられているとする。まず、図のように2つの向かい合った曲線上の格子点を1番目から順に直線で結ぶ。次に各直線上に格子をある規則にしたがって分布させる。もっとも単純には等分割する。j番目の格子線をm等分する場合には、両端の格子のX座標を  $x(1,j)$  と  $x(m,j)$  とすればi番目の格子のx座標  $x(i,j)$  は

$$x(i,j) = x(1,j) \cdot (1-f(i)) + x(m,j) \cdot f(i) \quad \text{ただし} \quad f(i) = i/m$$

となる。同様にy座標は

$$y(i,j) = y(1,j) \cdot (1-f(i)) + y(m,j) \cdot f(i) \quad \text{ただし} \quad f(i) = i/m$$

である。ここで、たとえば  $f(i) = (i/m) \cdot (i/m)$  とすれば、1番目の格子から離れるに従い、格子幅が2乗の割合で広がる。

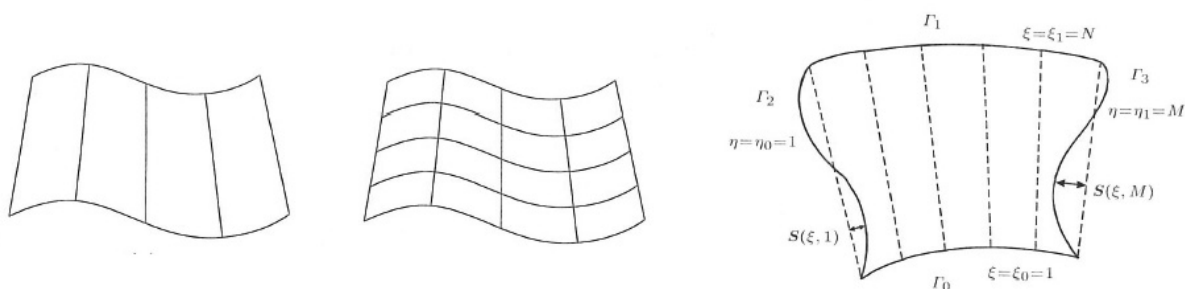


図3 1方向補間（ラグランジュ補間）と2方向補間（transfinite interpolation）

2方向補間では2つの向かい合った辺が曲線になる。この場合にはまずどちらか1組の曲線をそのままにしてラグランジュ補間する（図3の右）。そのとき、もう一方の曲線の両端が直線で結ばれるため差が生じる。ただし、曲線上の格子点の座標が与えられているため、その差は既知である。ラグランジュ補間におけるj番目の直線上の格子点の座標は既知であるため、最終的なj番目の格子線とラグランジュ補間で決められたj番目の格子線における差が計算できれば、最終的な格子点の座標を求めることができる。この差を、ラグランジュ補間を用いて2つの境界における既知の差から求める方法が2方向補間法である。

最終的には領域の4つの頂点のx座標を  $x(1,1), x(m,1), x(1,n), x(m,n)$  とすれば  $(i,j)$  番目の格子点の座標は

$$x(i,j) = x(1,j) \cdot (1-f(i)) + x(m,j) \cdot f(i) + x(i,1) \cdot (1-g(j)) + x(i,n) \cdot g(j)$$

$$- x(1,1) \cdot (1-f(i)) \cdot (1-g(j)) - x(1,n) \cdot (1-f(i)) \cdot g(j) - x(m,1) \cdot f(i) \cdot (1-g(j))$$

$$- x(m,n) \cdot f(i) \cdot g(j) \quad \text{ただし、} \quad f(i) = i/m, \quad g(j) = j/n$$

から計算できる。同様にy座標も

$$y(i,j) = y(1,j) \cdot (1-f(i)) + y(m,j) \cdot f(i) + y(i,1) \cdot (1-g(j)) + y(i,n) \cdot g(j)$$

$$- y(1,1) \cdot (1-f(i)) \cdot (1-g(j)) - y(1,n) \cdot (1-f(i)) \cdot g(j) - y(m,1) \cdot f(i) \cdot (1-g(j))$$

$$- y(m,n) \cdot f(i) \cdot g(j) \quad \text{ただし、} \quad f(i) = i/m, \quad g(j) = j/n$$

から計算できる。多くの格子生成のプログラムではこの補間法を何回も使うため、副プログラム化しておくとう便利である。

たとえば、Fortran では

```
SUBROUTINE TRANS(IS,JS,IL,JL)
parameter(MX=11,MY=11)
COMMON/XY/ X(MX,MY),Y(MX,MY)
DO J = JS+1,JL-1
DO I = IS+1,IL-1
A = FLOAT(I-IS)/FLOAT(IL-IS)
B = FLOAT(J-JS)/FLOAT(JL-IS)
X(I,J) = (1-A)*X(IS,J)+A*X(IL,J)+(1-B)*X(I,JS)+B*X(I,JL)
1      -(1-A)*(1-B)*X(IS,JS)-(1-A)*B*X(IS,JL)
2      -A*(1-B)*X(IL,JS)-A*B*X(IL,JL)
Y(I,J) = (1-A)*Y(IS,J)+A*Y(IL,J)+(1-B)*Y(I,JS)+B*Y(I,JL)
1      -(1-A)*(1-B)*Y(IS,JS)-(1-A)*B*Y(IS,JL)
2      -A*(1-B)*Y(IL,JS)-A*B*Y(IL,JL)
END DO
END DO
RETURN
END
```

と記述する。ただし MX と MY はそれぞれ X と Y 方向の格子数で上では 11 にとっている。なお、このプログラムを使う前に領域の境界上の 4 辺における格子点の座標を与える必要がある。この場合、4 辺上の格子点番号は I=IS (J=JS ~ JL)、I=IL (J=JS ~ JL)、J=JS (I=IS ~ IL)、J=JL (I=IS ~ IL) となる。

たとえば、半径 1 の円内に格子を生成する場合は、円周上に、四辺形の 4 つの角に対応する点を定める。極座標表示でその 4 点が  $\pi/4$ 、 $3\pi/4$ 、 $5\pi/4$ 、 $7\pi/4$  ( $=-\pi/4$ ) で、等間隔に格子を配置する場合には

```
TET=2.*3.141592/(2*(IL-IS+JL-JS))
DO I=IS,IL
TET1=5.0/4.0*3.141592+TET*(I-1)
X(I,JS)=COS(TET1)
Y(I,JS)=SIN(TET1)
TET2=3.0/4.0*3.141592-TET*(I-1)
X(I,JL)=COS(TET2)
Y(I,JL)=SIN(TET2)
END DO
DO J=JS,JL
TET3=5.0/4.0*3.141592-TET*(J-1)
X(IS,J)=COS(TET3)
Y(IS,J)=SIN(TET3)
TET4=-3.141592/4.0+TET*(J-1)
X(IL,J)=COS(TET4)
Y(IL,J)=SIN(TET4)
```

```
END DO
```

となる。以上のことを考慮して半径 1 の円内に格子をつくるプログラムは

```
parameter(MX=11,MY=11)
```

```
COMMON/XY/ X(MX,MY),Y(MX,MY)
```

```
PI=3.141592
```

```
TET=2.*PI/(2*(MX+MY-2))
```

```
DO I=1,MX
```

```
TET1=5.0/4.0*PI+TET*(I-1)
```

```
X(I,1)=COS(TET1)
```

```
Y(I,1)=SIN(TET1)
```

```
TET2=3.0/4.0*PI-TET*(I-1)
```

```
X(I,MY)=COS(TET2)
```

```
Y(I,MY)=SIN(TET2)
```

```
END DO
```

```
DO J=1,MY
```

```
TET3=5.0/4.0*PI-TET*(J-1)
```

```
X(1,J)=COS(TET3)
```

```
Y(1,J)=SIN(TET3)
```

```
TET4=-PI/4.0+TET*(J-1)
```

```
X(MX,J)=COS(TET4)
```

```
Y(MX,J)=SIN(TET4)
```

```
END DO
```

```
CALL TRANS(1,1,MX,MY)
```

```
c WRITE(*,*)((X(I,J),I=1,MX),J=1,MY)
```

```
c WRITE(*,*)((Y(I,J),I=1,MX),J=1,MY)
```

```
MZ=1
```

```
WRITE(10) MX,MY,MZ
```

```
WRITE(10)((X(I,J),I=1,MX),J=1,MY),K=1,MZ)
```

```
WRITE(10)((Y(I,J),I=1,MX),J=1,MY),K=1,MZ)
```

```
WRITE(10)((0.0,I=1,MX),J=1,MY),K=1,MZ)
```

```
END
```

```
SUBROUTINE TRANS(IS,JS,IL,JL)
```

```
parameter(MX=11,MY=11)
```

```
COMMON/XY/ X(MX,MY),Y(MX,MY)
```

```
DO J = JS+1,JL-1
```

```
DO I = IS+1,IL-1
```

```
A = FLOAT(I-IS)/FLOAT(IL-IS)
```

```
B = FLOAT(J-JS)/FLOAT(JL-IS)
```

```
X(I,J) = (1-A)*X(IS,J)+A*X(IL,J)+(1-B)*X(I,JS)+B*X(I,JL)
```

```

1      -(1-A)*(1-B)*X(IS,JS)-(1-A)*B*X(IS,JL)
2      -A*(1-B)*X(IL,JS)-A*B*X(IL,JL)
      Y(I,J) = (1-A)*Y(IS,J)+A*Y(IL,J)+(1-B)*Y(I,JS)+B*Y(I,JL)
1      -(1-A)*(1-B)*Y(IS,JS)-(1-A)*B*Y(IS,JL)
2      -A*(1-B)*Y(IL,JS)-A*B*Y(IL,JL)
      END DO
      END DO
      RETURN
      END

```

と書ける。実行結果のデータを用いて格子を描いたものを図4に示す。4つの角点では格子が歪んでいるものの極座標で現れる原点付近の特異性は除かれている。

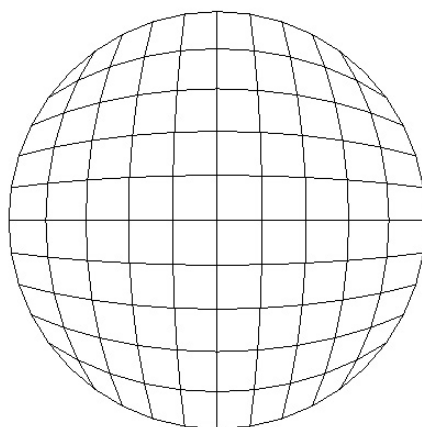


図4 2方向補間法で作成した円内の格子

サボニウス風車のブレード内における格子生成には上記の方法を利用する。格子にひずみのある部分はブレード内側にあり、実際の流体計算では流速が遅い部分になるため、その影響は限定的になる。

#### 4. サボニウス風車まわりの格子

差分法で複雑な領域を格子分割する場合に通常とられる方法として、単一の格子で分割するのではなく、もとの領域をいくつかの小領域に分割してそれらをつなぎ合わせるという方法がある。このとき領域の境界では格子点が一致していることが望ましい。一致させるのが困難な場合には、2つの領域を、重なりをもつように重ね合わせて、一方の境界での物理量を他方の領域の隣接格子点における物理量から補間するという手続きがとられる。この場合も、補間の精度をあげるためには1方向の格子線は両領域で一致しているのが望ましい。

本報告における格子に対する別の要求として、回転する物体を適切に表現できることがあげられる。風車のような回転物体まわりの流れの有効な解析法として、基礎方程式であるナビエ・ストークス方程式を物体とともに回転する回転座標系で表現するという方法がある。そのようにすれば格子を回転させることなく計算が可能になる。ただし、問題点もある。ひとつは基礎方程式には回転を表す付加項が加わる。この付加項の大きさは回転中心からの距離に比例するため、遠方境界では非常に大きな値をもつ。したがって、通常非回転系での計算のように遠方の影響を小さくするためなるべく遠方境界を遠くにとると、逆に誤差が大きくなる。

もうひとつのより本質的な問題として、多くの風車が回転している状況をシミュレーションする場合に、ひとつの回転

系では表現できないことがあげられる。このような場合にはそれぞれの風車ごとにそれに合った別々の回転座標系を使い、適切につなぎ合わせる必要がある。

本報告の解析対象として複数風車の場合も含まれるため、つなぎ合わせのときになるべく精度がよくなる格子が望まれる。

これらの要求を満たす格子として、本研究では次のような格子を提案する。なお、2つのサボニウス風車が近接しておかれた状況を想定している。

- (1) ひとつのサボニウス風車を含む領域は5つの部分領域から成り立つ。
- (2) この5つの領域は入れ子状になっている。
- (3) 一番外側の領域Aは、長方形から一部分欠いた凹型をしている。
- (4) ひとつ内側の領域Bの外縁は(3)の凹んだ部分に正確にはまる長方形(正方形)形状をしている。
- (5) 領域Bの内縁は円形をしている。
- (6) もうひとつ内側の領域Cは外縁が円形、内縁はサボニウス風車のブレードを一部分含むようなダンベルのような形状をしている。領域Bの内縁と領域Cの外縁は1格子分重なっている。
- (7) ダンベル形状の外縁をもつ領域Dには、サボニウス風車特有のオーバーラップ領域を取り除いた形状をしている。
- (8) もっとも内側の領域Eは上記のオーバーラップ領域である。

手順(3)の領域Aはサボニウス風車が1台の場合には不要になる。その場合は領域Bの外部境界を十分に遠方にとる。サボニウス風車が2台の場合には、領域Aを凹みがある辺で上下に折り返してつなぎ合わせて領域を2倍にすれば、近接した2台の風車を表現できる。領域Bの外側領域の格子点は、領域Aの凹み部分の格子点と3辺で完全に一致させるようにとる。この点を出発点として外側(図5では凹みの左右と下方向)に徐々に広がるように格子を作成する。残りの部分(図5の凹みの左下と右下)の格子は自動的に決まる。この作り方から領域Aの格子はデカルト座標系をベースにしたものになる。

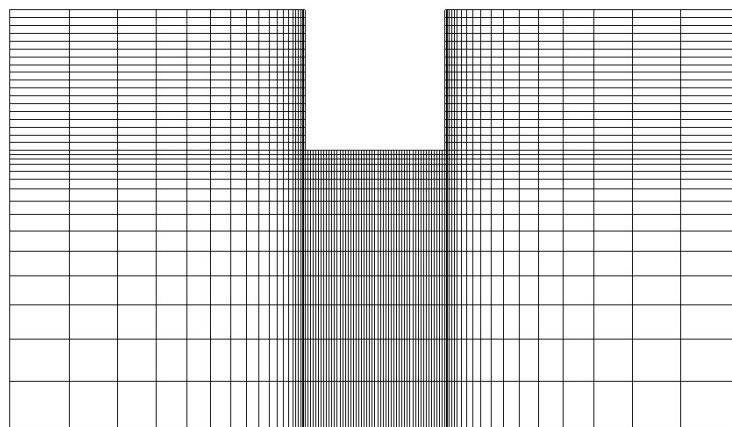


図5 領域Aの格子の例

手順(4)、(5)の領域Bは外部境界が長方形(正方形)で内部境界が円形をしている。円柱座標をもとに格子をつくる。内側の円周上では等間隔に点を分布させる。領域Bは必ずしも正方形でなくてもよいが、正方形の方がプログラムは容易になる。なお、同じ数の格子を外側の長方形の周に分布させる。したがって、外側が正方形で等間隔に格子を分布させる場合には格子点数は4の倍数になる。領域Bの格子は外側と内側の格子点を順番に結ぶことで得られる(もっとも近くの点を結ぶという自然なことを行えばよい)。この放射状に延びた格子線上にそれぞれ同じ数だけある規則にし



たがって格子点を分布させる。規則としては内側から外側に向かってたとえば等比級数的に間隔が広がるようにとる。なお、最内側の格子線は円であるが、それよりひとつ外側の格子線も円になるようにする。そのようにすることにより回転する領域である領域Cとのデータのやり取りが容易になる。領域Bの格子は極座標がベースになっている。

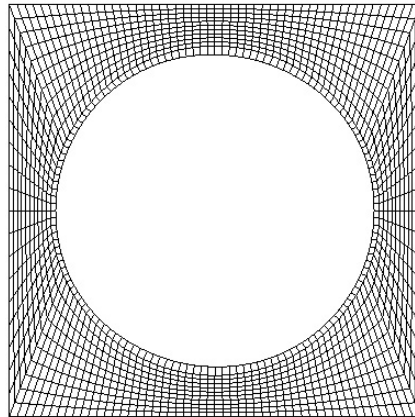


図6 領域Bでの格子の例

手順(6)の領域Cにおいて最外側の格子線は領域Bの最内側よりひとつ外の格子線と一致するようにとる。また、領域Cの最外側よりひとつ内側の格子線と領域Bの最内側の格子と一致するようにとる。このことにより領域Bと領域Cは格子を1つ分重なっていることになる。

領域Cの内側の格子線はその一部分に風車のブレードを含む。このとき2枚あるサボニウス風車のブレードはそれぞれ半円である。風車の回転軸を原点にとったとき、1枚のブレードの両端がX軸上にあり、上側に凸の状態でその大部分が第3象限にあるとする。このブレードの左端から、円に沿って円周の1/4よりも右の適当な位置(たとえば円の3/8)まで進み、その点からX軸に平行にもうひとつのブレードを表す半円を含む円に交わる点まで進む。それ以降は、円に沿ってX軸に交わるまで進む。このようにして第3象限と第1象限に2つの円周の一部分と直線からなる曲線ができる。さらに点対称性を使って180度回転させれば閉曲線ができるため、これを内側の格子線とする(図7のようなダンベルに似た形状)。

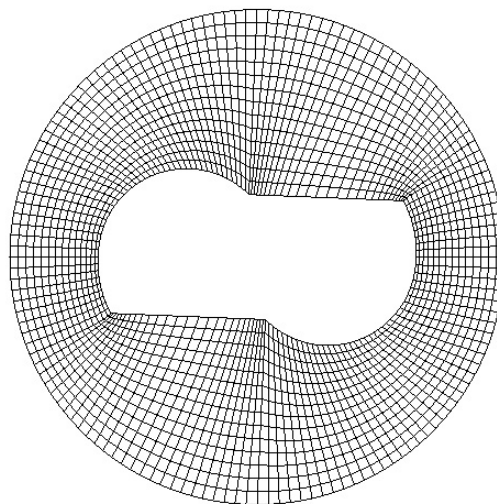


図7 領域Cでの格子の例

領域Cの外側には等間隔で格子点を分布させ、内側でも円周上には等間隔に格子を分布させる。直線上の格子は2つの端点に向かって多少細くなるように格子点を分布させる。なお、外側境界と内側境界の格子点数は同じにする必要がある。このようにして境界上の格子点が決まれば、領域Bと同じくもっとも近い格子点どうしを直線で結び、直線上では内側境界に向かって細くなるように格子点を分布させる。あるいは前述の2方向補間法を用いることもできる。この作り方から領域Cは領域Bと同様に極座標がベースになっている。

手順(7)のダンベル形状の領域B内の格子は以下のようにして生成する。点対称であるため、左半分( $x < 0$ )を考え、右半分は180度回転させる。半円の内側と外側の2つの領域に分けて考える。半円の内側の領域は外部境界が円の一部なので、極座標が自然であるが、極の近くで格子幅が非常に小さくなることを防ぐため、デカルト座標をベースにとる。この場合、半円を長方形とみなすため、半円の両端および、円周上で左から進んで円周の1/8と3/8の点(領域Cで3/8とした場合)を4つの角点とみなす。

2方向補間では4つの辺を表す曲線上の格子点を指定する。円周上にある点は等間隔にとる。一方、Y軸上では第2象限にあるブレードの左端と第4象限にあるブレードの左端の間に両方の端点に近づくほど細くなるように格子点を分布させる。このとき、ギャップ部分の格子幅は非常に粗くなるが、最終的には使わないのでこのままにしておく。補間を行ったあと右から2番目の格子線までを実際の格子とする。

半円の外側では左の半円を延長し、左端から円周上に円周の長さの1/8進んだ点、同じくもうひとつのブレードの左端から円周の長さの1/8すすんだ点を2頂点にもち、あとの2頂点を、上で述べた半円領域のX軸上の2頂点とする四辺形に、2方向補間を用いて格子点を分布させる。あとは前述のように180度回転させることにより図8に示すようなダンベル内のデカルト座標をベースにした格子ができる。なお、中央部分に空洞ができることに注意する。

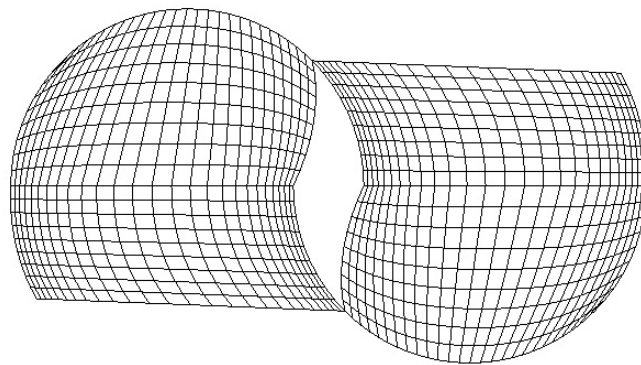


図8 領域Dでの格子の例

手順(8)では最後に空洞部分の格子を生成する。この領域は菱形に似た形状をしている。すでに手順(7)において、菱形の4辺上の格子点の座標は決まっているため、2方向補間によって内部の格子点が得られる。

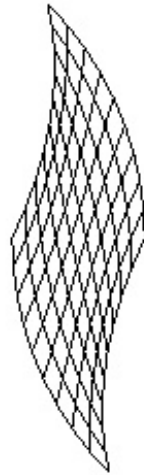


図9 領域Eでの格子の例

以上の入れ子構造の5種類の格子のなかで、内部4つをまとめて表示すると図10のようになる。

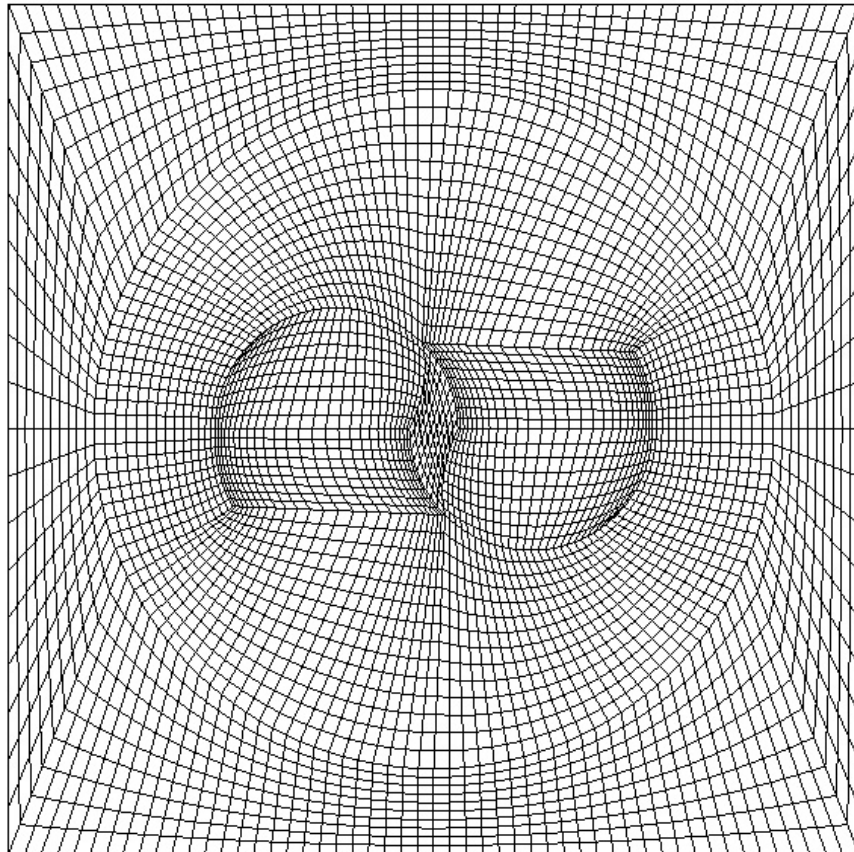


図10 領域B、C、D、Eを重ねた図

複数の回転体がある場合は、上の格子を並べ、それらを取り囲む領域でのデカルト座標ベースの格子を生成する。特に2つのサボニウス型回転体の場合は、凹面上辺で折り返した格子を計算に用いればよい。格子の例を以下に示すが、スペースの関係で90度回転したものを表示している。

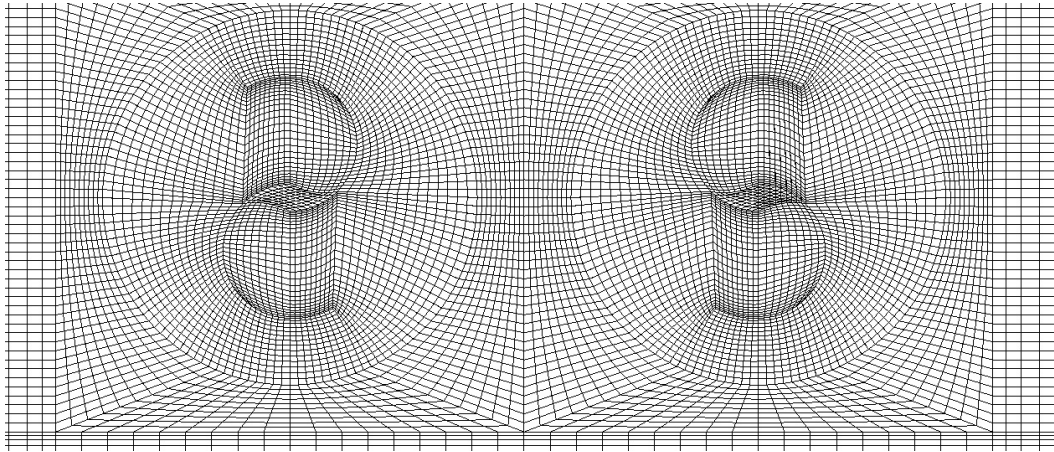


図 11 2つの回転装置が逆方向回転する場合の格子 (一部分)

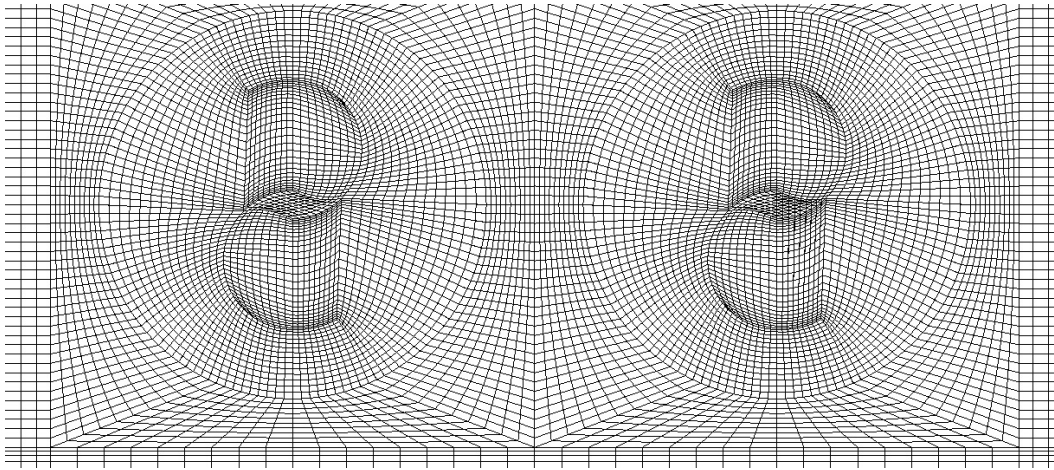


図 12 2つの回転装置が同方向回転する場合の格子 (一部分)

流体計算を実行する場合、格子が一致しないと補間を行う必要がある。補間を行うと予期しない数値粘性が入ることもあるので、補間はなるべく避けるのが望ましい。上述の格子は回転系と非回転系をつなぐ領域 B と領域 C で補間を行う必要があるが、他の接続部分では格子が一致している。領域 B と領域 C では風車の回転にともない角度方向にのみ格子が一致しなくなるが 1 次元の補間によって両領域のデータの受け渡しが可能になる。

補間を行う物理量として圧力  $P$  を例にとると、回転領域 C から非回転領域 B への補間は以下のプログラムで可能になる。

```

C---- rotational(3) -> stationary(4)
DTH=2*3.141592/IL
DO i=1,IL
  JW=TTT/DTH
  WQ=(TTT-JW*DTH)/DTH
  IW=I-JW
  IWQ=IW-1
  IF(IWQ.LT.1) IWQ=IWQ+IL
  P(I,1,4)=(1-WQ)*P(IW,my-1,3)+WQ*P(IWQ,my-1,3)

```

END DO

ここで TTT は回転角、IL は周方向の格子数、3 番目の添え字は 3 のとき回転系、4 のとき非回転系を表す。また my は領域 3 の最外側の格子番号である。

同様に、非回転系から回転系への補間のプログラムは以下のようになる。

C---- stational(4) -> rotational(3)

DO I=1,IL

JW=TTT/DTH

WQ=(TTT-JW\*DTH)/DTH

IW=I+JW

IWQ=IW+1

IF(IWQ.GT.IL) IWQ=IWQ-IL

P(I,my,3,m)=(1-WQ)\*P(IW,2,4,m)+WQ\*P(IWQ,2,4,m)

END DO

なお、速度成分の補間に対しては回転系と非回転系の間では回転の効果を含める必要がある。

## 5. まとめ

本報告では、海流発電の実用化に向けて、海流発電に利用可能な回転装置として、比較的流速が小さいとき効率がよくなるサボニウス型風車を取り上げた。水中という環境のもとで、複数個設置する場合には回転装置どうしの相互作用を詳しく調べる必要がある。流体の数値シミュレーションを行う場合は、計算時間の関係で差分法を用いることが多いが、格子の良し悪しがシミュレーションの精度に及ぼす影響も多い。サボニウス型風車はブレードが半円であり、幾何形状が簡単である。しかし、2つのブレード間に間隙があるため格子生成は見かけ以上に困難である。さらに複数風車がある場合には、各風車近傍には独立した回転系を用い、それを静止系に埋め込んでつなぎ合わせることを望ましい。このことから、領域をいくつかの部分に分割する必要があるが、それぞれの小領域でのデータの受け渡しではなるべく補間を避けるのが、精度的に有利である。

本報告では、上記の複雑さを解決できる格子生成法を提案した。なお、不規則な領域における格子生成には多方向補間を用いた。

今後は、本報告で作成した格子を用いて、2つのサボニウス型回転装置が近接して設置された場合の流れの解析を、非圧縮性ナビエ・ストークス方程式を数値的に解くことにより行い、回転装置間の相互作用を定量的に評価する予定である。

なお、この研究の一部は日本学術振興会科学研究費基盤研究 (C) 19K04165 「CFD による海流発電用回転の動特性の解析と形状の最適化」の補助を受けて行われた。

## 参考文献

- (1) 石松克也、篠原俊夫、詫磨史孝：サボニウス風車に関する数値計算、日本機械学会論文集 B 編 60 巻 569 号 pp154-160 (1994)
- (2) 高久有幹：サボニウス風車の動向と展望、ターボ機械 19 巻 5 号 pp62-67 (1991)
- (3) 牛山泉：風車工学入門、森北出版 ISBN4-627-94651-1 (2002)
- (4) 河村哲也：流体解析の基礎、朝倉書店 ISBN978-4-254-13111-6 (2014)

