

流れ解析演習用ソフトを用いた空気力学特性に関する考察

加藤泰世

1. はじめに

本学モータースポーツエンジニアリング学科は2009年に学科が開設されて以降、各種レース参戦において数々の成果を残してきたが、本研究で取り上げる空気力学特性はレース走行において重要な要因の一つである。走行中の空気抵抗による抗力を軽減させることが重要であることは言うまでもなく、また車体に備え付けられているウイングに生ずるダウンフォースも興味深い点である。すなわち、ダウンフォースの発生によって走行抵抗を増大させる逆効果となることも当然ではあるが、ダウンフォースによって大きな遠心力を伴うコーナリングであっても高速走行の可能の拡大させることに期待できる¹⁾。

また、こうした空気力学特性について数値解析を行うために高機能の備わった解析ソフトが市販されているが、流体力学を学び始める短大生向けの解析演習の導入ソフトとしては、極限られた機能でありながらも必要な学習ポイントが盛り込まれていれば、限られた講義時間内に行う解析演習用としては問題なく、初歩の教育用としては充分であると思われる。

さて、本学の学生の流体力学の演習用として使用している解析ソフト²⁾は、解析が非圧縮性流体の扱いであり粘性解析では乱流を扱う機能が含まれておらず、層流の場合でも解析結果が収束するためのレイノルズ数に制限があるが、このソフトを使いこなすことで円柱の周りの流れによる抗力や流れの中で翼に生ずる揚力の解析結果について、他で示されている結果^{3)~7)}と比較し考察を行った。以下、得られた結果について報告する。

2. 解析の重要性および使用した解析ソフトについて

本学モータースポーツエンジニアリング学科では整備士の資格取得を主たる目的とした自動車工学科のカリキュラムには、含まれていないモータースポーツ関連の専門科目が設置されており、空気力学もそのような基礎科目の一部に含まれている。粘性の低い状態の空気であっても空気抵抗を扱う場合には空気の粘性の影響を無視することはできないので、基礎式としてナビエ・ストークスの方程式^{3), 7)}に基づく数値解析などが必要となるが、微分方程式の解法を含めた計算に限られた講義時間内に行うのは容易ではなく、また空気力学の解釈は実際に現象を確かめながら経験的な知識を蓄積しながら知識を深めていく必要もあるように思われるので、充実した実験装置

の導入も現在検討中である。その一方で、解析ソフトの導入も検討しているが、様々な条件に対して厳密な解析を行うためには解析機能の豊富な大規模ソフトによる解析も必要である。しかし、そのような大規模解析ソフトは短期間で使いこなすことは容易ではなく、また学生数だけのライセンスを確保するためには大きな負担となる。そこで、先に述べたような制限があるにせよ流体力学で演習用に使用している算生会²⁾の解析ソフトで抗力と揚力に関する解析を試みた。

流れ解析は二次元解析で行い、使用した算生会ソフトは、解析モデルを作成する SectData と解析の前処理・計算・後処理を行う FlowLiq である。この他に、流線を描くためのソフト FlowLine もあるが、今回は使用していない。また、ここで取り上げた円柱の周りの流れ解析と翼に生ずる揚力解析は、これまでにしばしば試みられてきたことであるが^{3)~7)}、現在の学生向けの演習用解析ソフトとして活用している上述の算生会ソフトで行った結果である。

3. 空気力学の解析

3.1 円柱の周りの流れによる抗力解析

図1は、円柱の周りの流れ解析を行った要素のモデルである。1辺の長さが2mの正方形の中央に直径0.5mの円形の穴を設けたモデルであり、境界条件は流速も圧力も円柱の前方・後方を含めた全ての四角形の周囲の辺上にある節点に与えた。流速は全て四角形の周囲の辺にある節点に流れの向きがx方向になるように同じ値で与えた。また、ここでの二次元解析のモデルは全て厚さが1mである。それから、使用したソフト FlowLiq では粘性解析の場合は負圧がサポー

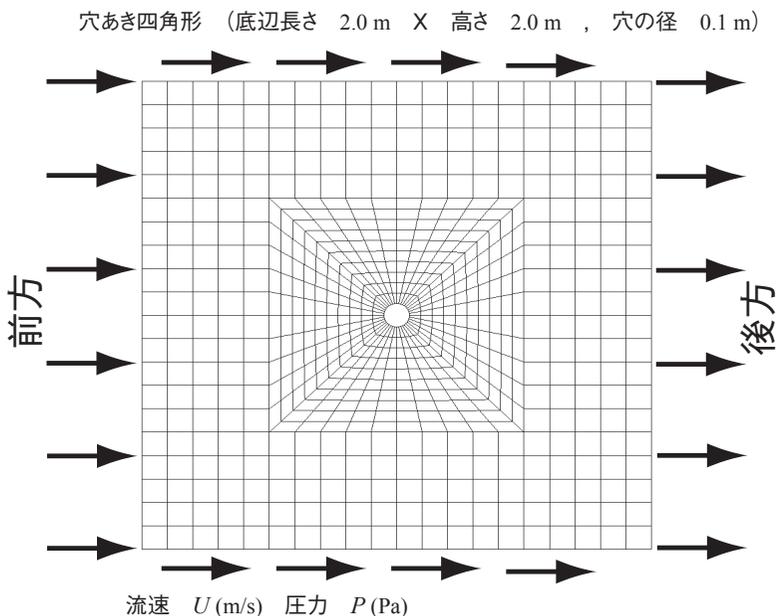


図1 円柱の周りの流れによる抗力解析を行ったモデル

トされておらず、負圧が算出された場合には解析結果が0 Paと算出されるので、解析された圧力の値が0 Pa以下にならないように圧力条件は周囲の全ての節点に 10^{-5} Paを与えた。この値は非常に小さな数値であるが、解析結果が収束し、適切な結果が得られる圧力条件として与えた値である。そこで、物体の遠方での圧力を0 Paとみなし、解析された圧力からは圧力条件 10^{-5} Paを差し引いた値を圧力結果として見なすこととした。また、解析条件として扱った空気の特徴であるが、密度を 1.2kg/m^3 とし、また粘性係数を $1.8 \times 10^{-5} \text{Pa} \cdot \text{s}$ とした。

図1に示すようなモデルで解析を行い、円柱の周囲での圧力係数を求めてみた。ここで、圧力係数 C_p は次式で定義される。

$$C_p = \frac{P - P_\infty}{\frac{1}{2} \rho U^2} \quad (1)$$

式(1)にて、 P は円柱の周りでの圧力であり、解析された結果より圧力条件 10^{-5} Paを引いた値である。また P_∞ は遠方での圧力であり0 Paとした。それから、 ρ と U はそれぞれ条件入力した空気の密度および流速の値である。そして、図2に示すように円柱の位置を示すために流れの前方の方向を基準とした角度 θ と圧力係数の関係を求めてみた。図3は、こうして得られた解析で得られた円柱の周りでの圧力係数である。図中の記号の区別は解析条件としての流速の違いを意味しているが、流速と合わせてレイノルズ数も記号の区別に併記している。なお、ここでのレイノルズ数の計算では代表寸法として円柱の直径を用いている。円柱の周りの流れ解析では、図2にて $\theta = 0^\circ$ のところでは圧力係数が1となるのが他でよく示されているが^{3)~5)}、今回の結果ではレイノルズ数が非常に小さいところでは、 $\theta = 0^\circ$ での圧力係数が1より大きくなったことが有意な差として認められる。また、図3で示した解析結果でのレイノルズ数の最大値は8.333であるが、レイノルズ数が20より大きい場合には解析結果は収束しなかった。それから、同図中には非粘性解析で導いた圧力係数の式^{3), 7)}

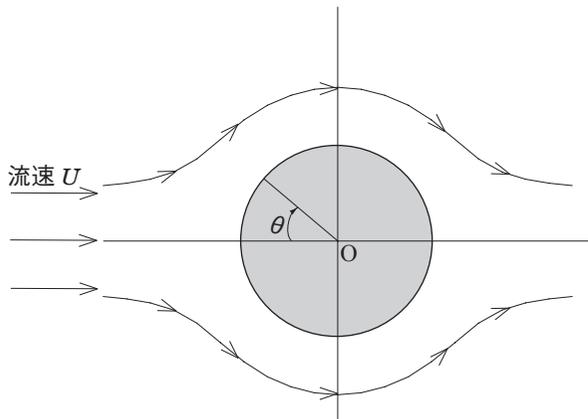


図2 圧力係数を計算する際の角度の表し方

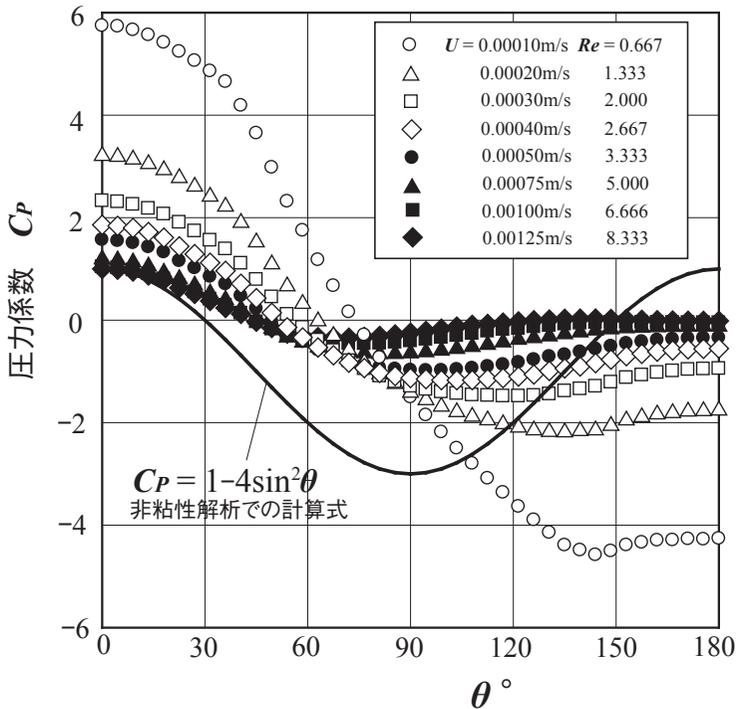


図3 圧力係数の解析結果

$$C_p = 1 - 4 \sin^2 \theta \tag{2}$$

に基づく計算結果も実線で合わせて示してある。また、粘性流体の場合で、図2にて $\theta = 0^\circ$ のところでは圧力係数が1となり、また物体の前方では非粘性の解析に概ね従う傾向が認められる場合でも、はく離が生ずることによって圧力係数は(2)式から外れていく現象が良く知られているが^{3)~5)}、図3に示した結果からは、はく離についての検討は困難である。

さて、ここまで示した解析について、モデルの大きさや境界条件の与え方を変えた場合について同様の解析を行い、得られた結果についての検討を行ってみた。すなわち、物体の後方は流速が低速になる領域が現れるが^{3)~5)}、流れの後方の辺にも前方の辺と同じ流速を与えてしまうと、こうした物体後方の低速域に影響が及ぶと思われるので、物体後方の辺のみ流速条件を境界条件として与えないようにしたモデルでも解析を行ってみた。また、物体後方の低速域の生じ方が物体の抗力に及ぼす影響を調べるために、物体の後方を大きくしたモデルでの解析も行ってみた。図4(a)は、図1に示したモデルより形状を大きくしたものであり、また図4(b)は物体(円柱)の後方を大きくしたモデルである。これらのモデルにて円柱の直径は図1で示したモデルと同じ0.1mである。これらのモデルを用いて図3に示した流速が0.00075m/sの場合について解析を行い、図1に示したモデルでの結果と比較を行ってみた。また、流速条件について、先の図3に

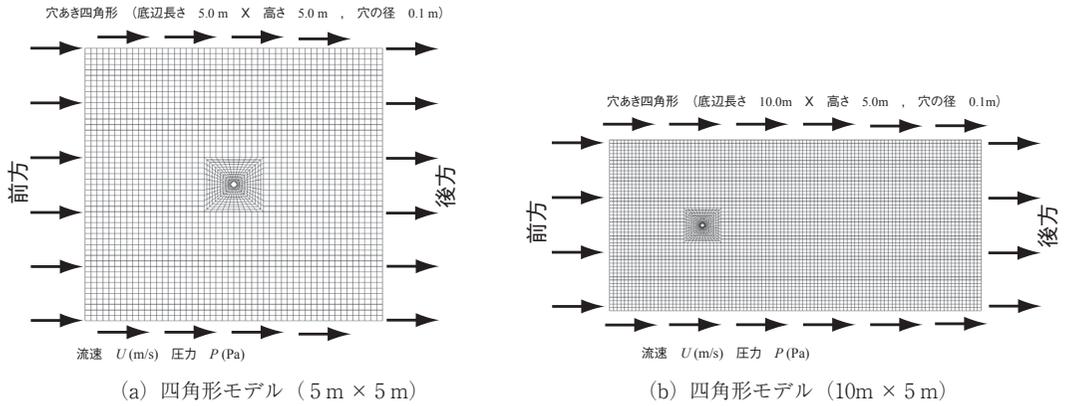


図4 領域の大きさを変えた解析モデル

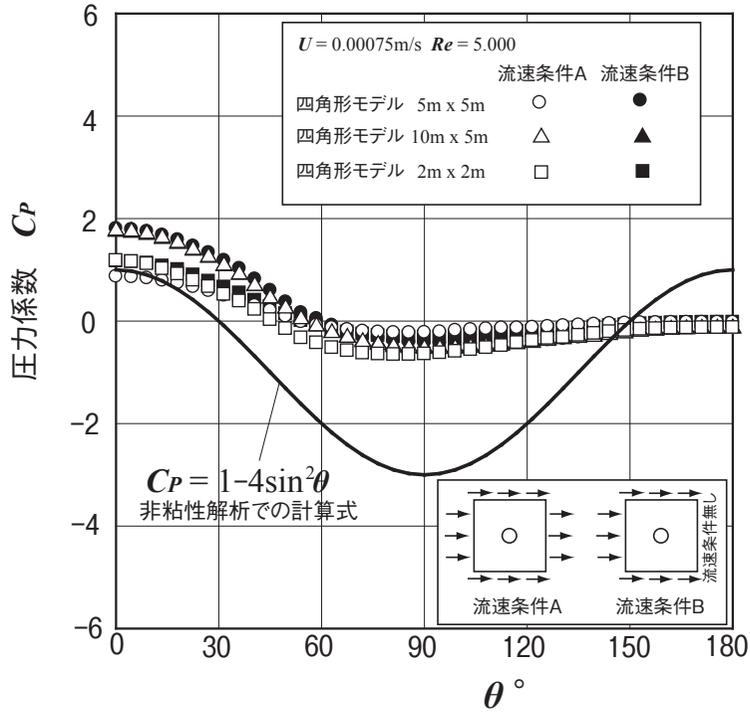


図5 圧力係数のモデル形状、流速条件依存性

示した解析の場合と同様に四角形の周囲の全ての辺にある節点に流速条件を与えた場合（流速条件 A と記す）と、円柱の後方のみ流速条件を与えない場合（流速条件 B と記す）について、図 3 に示したような圧力係数の違いを比較してみた。それらの結果は、図 5 に示す通りであるが、流速条件の違いによる圧力係数の結果には幾分数値的な違いが確認できるが、どの流速条件に対する結果についても大きく際立った差異は認められない。図中には、流速条件 A, B の違いを模

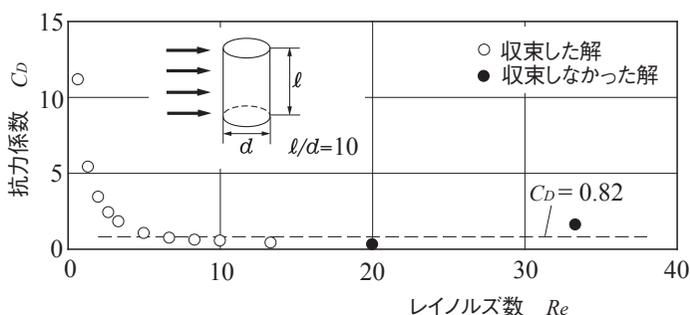


図6 抗力係数の解析結果

式的に示しているが圧力条件については、図3で示した解析の場合と同様に四角形の周囲の辺上の全ての節点に 10^{-5} Paを与えた。

次に、抗力係数を求めた結果について示す。抗力係数は下記(3)式で定義され、算生会ソフト FlowLiq で求められる抗力 D (流れ方向の作用力) と、解析条件としての密度 ρ 、流速 U 、物体の流れ方向への投影面積 A より算出した。

$$D = C_D \frac{\rho}{2} U^2 A \tag{3}$$

図6は、解析で得られた抗力係数とレイノルズ数の関係である。今回解析した円柱では直径(0.1m)に対する高さ(1m)の比が10であり、文献^{4), 6)}では抗力係数が0.8~0.82と記されている。しかし、この値はレイノルズ数が充分大きな値に対する場合であり、図6に示したようなレイノルズ数が小さい範囲で解析された抗力係数とは単純な比較は困難である。また、円柱の直径に対する高さの比が無限大の場合については、他で記されており^{3)~5)}、レイノルズ数が小さい範囲においては、レイノルズ数の減少に伴い抗力係数が大きくなる傾向が示されている。ここで示した解析結果を、円柱の直径に対する高さの比が無限大の場合の結果^{3)~5)}と比較しても数値的には有意な差異が認められるが、今回の解析で収束した解の得られた範囲においては、ほぼ同様な傾向が現れたといえる。

3.2 翼のモデルを用いた揚力解析

ここでは、翼のモデルを用いて行った揚力の計算結果について示す。図7はジュコフスキーの手法⁷⁾に基づいて作成した翼のモデルである。算生会ソフト SectData を用いて要素分割を行ってみた。xyメッシュでの分割で分割数を何通りにも変えてみたが、翼の周囲の一部の要素分割にてエラーが無くならないので、エラーを無くすために手動で図7のように修正して解析に用いた。解析を行ったモデルの境界条件は、先に示した円柱モデルの場合と同様に、四角形の周囲の辺にある節点に、全て同じ流速と圧力を与えることとした。圧力は円柱モデルと同様に 10^{-5} Paとし、また流速は円柱モデルで収束解が得られたレイノルズ数と同様に比較的小さい範囲とした。それから、揚力の解析では流れの向きに対する翼の傾斜角度(迎え角 α)も興味深い要因である

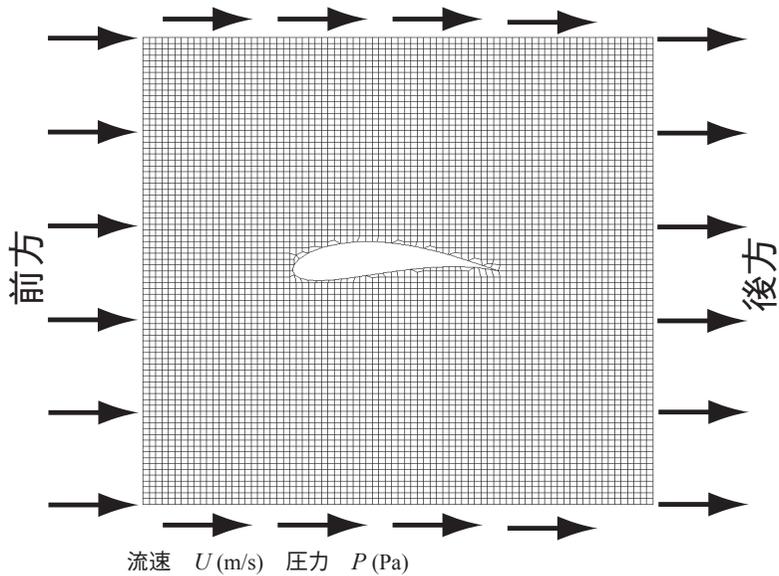


図7 翼の周りの流れによる揚力解析を行ったモデル

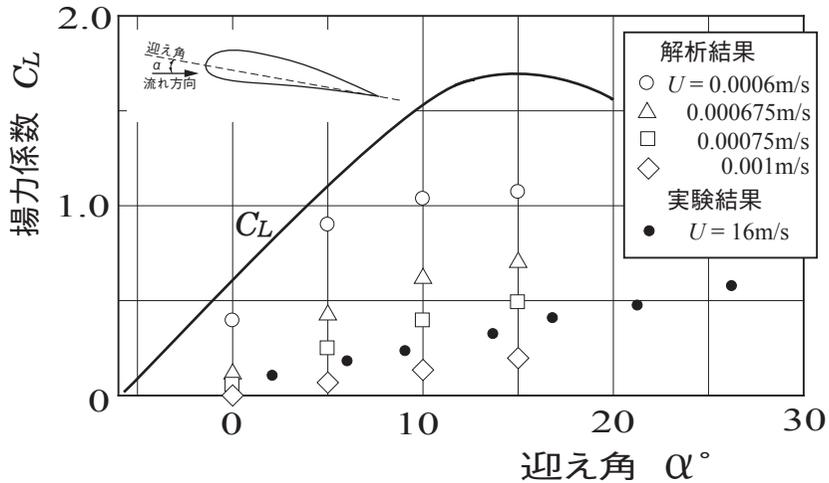


図8 揚力係数の解析結果

ので、図7に示すモデルを5度、10度、15度傾けた場合にも同様の解析を行ってみた。

図7に示す翼のモデルを用いた揚力解析では、今回行った全ての流速条件で解は収束したが、一部の結果において揚力の値が負になるような不適切な結果となった。この問題を解決するためには、収束判定条件を全て初期設定のままとするのではなく適切な設定方法を習得することや要素分割の手法を再度検討することなどが考えられるが、今回は図7に示す翼のモデルにて比較的妥当と考えられる流速条件下での結果について示すことにする。ここで示す結果のレイノルズ数

は、先に示した円柱モデルの場合とほぼ同じレイノルズ数で解析した結果が比較的妥当であると思われる。図8は翼の迎え角と揚力係数の関係である。揚力係数 C_L は下記の(4)式で定義され、算生会ソフト FlowLiq で求められる揚力 L (流れと垂直の向きの作用力) と、解析条件としての密度 ρ 、流速 U 、翼の垂直方向への投影面積 S より算出した。

$$L = C_L \frac{\rho}{2} U^2 S \quad (4)$$

ここで示した揚力係数の解析結果は迎え角と良い対応関係がみられ、また図中に黒塗り印で示すのは、既に示した翼模型を用いた揚力測定結果¹⁾であるが、これらと比較してもその傾向をよく反映しているといえる。また図中の曲線は文献⁶⁾からの引用であり、解析結果と実験結果は数値的にやや外れているが、こうした理由については今後検討していきたいと考えている。

4. 終わりに

本文中に述べたように、ここで使用した解析ソフトは層流であっても解析結果が収束するレイノルズ数に制限があるので、流速の値を極めて小さくして試行錯誤を繰り返しながら収束できる条件を探したところ、レイノルズ数の極めて小さな範囲において収束する解を得ることができた。また、円柱の周りの流れによる圧力解析では、レイノルズ数がほぼ10より小さい範囲においては、よく示されている結果と類似性のある傾向が確認された。また、大きさを変えたモデルや境界条件を変えたモデルでも同様の解析を行ってみたが、こうした解析条件の違いが結果にそれほど著しい影響を与えないことを確認した。それから、抗力係数のレイノルズ数依存性についてもレイノルズ数がほぼ10より小さい範囲においては、よく示されている結果と類似性のある傾向が確認された。

また、翼のモデルを用いた揚力係数の解析については、抗力係数の解析で収束した解の得られた条件下ではほぼ妥当な結果が得られたといえるが、詳細については今後さらに検討が必要となる結果となった。

参 考 文 献

- 1) 加藤泰世, スーパーFJのウィングに関する空力的考察, 自動車整備技術の関する研究報告誌 第42号 (2013)
- 2) 黒田英夫, 基礎からの数値計算, 工学社 (2010)
- 3) 杉山 弘, 遠藤 剛, 新井隆景, 流体力学, 森北出版 (1995)
- 4) 杉山 弘, 松村昌典, 河合秀樹, 風間俊治, 明解入門流体力学, 森北出版 (2012)
- 5) 中林功一, 山口健二, 図解によるわかりやすい流体力学, 森北出版 (2010)
- 6) 森田泰司, 流体の力学計算法, 東京電機大学出版 (1996)
- 7) 八田夏夫, 基礎流体力学, 恒星社恒星閣, (1983)