
2020年 2月

* 「ジューコフスキー翼解析」の紹介 *

[著者] 黒田 英夫

<プログラム開発環境>

OS : Windows 10 . . . Windows 7、8でも使用可

言語 : Visual Basic 2017 (Visual Studio 2017 Express)

等角写像を利用したジューコフスキー翼の解析ソフトを提供します。このソフトは、複素ポテンシャルを用いて、翼の回りの流れについて理論解を算出するものです。ジューコフスキー翼はジューコフスキー変換で円形から翼形に写像変換されたものを指します。計算結果は、速度ベクトル図および等高線図を表示することができます。

計算理論は、次の書籍に準拠しています。ただし、翼を含む空間の節点作成は独自方法を採用しています。

BLUE BACKS「高校数学でわかる流体力学」、竹内 淳、講談社、2014

なお、本書の解析事例の計算時間は、下記仕様のパソコンによります。

CPU : 2.9GHz (64bit) RAM : 8GB

<目次>

	ページ
第1章 解析理論 -----	2
第2章 プログラムの機能・構成 -----	6
第3章 データの作り方 -----	10
第4章 「構造仕様データ」処理プログラム -----	12
第5章 「解析データ」処理プログラム -----	16
第6章 「計算」プログラム -----	22
第7章 「後処理」プログラム -----	27
[参考文献] -----	40

第1章 解析理論

先ず計算空間において理論解を算出し、次に物理空間へ写像変換して現実の解を得ます。これら計算空間と物理空間は両者共、複素数を用いる複素空間で、複素ポテンシャルを使用します。

1.1 複素ポテンシャル

複素空間においては、複素座標 z は x, y 座標により次式で表わされます。

$$z = x + iy \quad (1-1)$$

i : 虚数単位

さらに、複素ポテンシャルを次式で定義します。

$$w = \phi + i\psi \quad (1-2)$$

ϕ : 速度ポテンシャル

ψ : 流れ関数

ここで、 ϕ と ψ は次のように定義されます。

$$\frac{\partial \phi}{\partial x} = u \quad (1-3)$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial y} = v \quad (1-4)$$

$$\frac{\partial \psi}{\partial x} = -v \quad (1-5)$$

$$\frac{\partial \psi}{\partial y} = u \quad (1-6)$$

u : x 方向速度

v : y 方向速度

従って、

$$\frac{dw}{dz} = \frac{\partial \phi}{\partial x} + i \frac{\partial \psi}{\partial x} = \frac{\partial \psi}{\partial y} - i \frac{\partial \phi}{\partial y} = u - iv \quad (1-7)$$

次に、図1-1に示す円柱回りの流れを考えます。同図で右斜め上方へ角度 α で流速 U の一樣流れがあり、その中にある半径 R の円柱があります。その場合の複素ポテンシャルは次式で表わされます。

$$w = Ue^{-i\alpha}z + \frac{UR^2e^{i\alpha}}{z} + i\frac{\Gamma}{2\pi}\log z \quad (1-8)$$

Γ : 循環の値。図1-1の $(0, R)$ によどみ点がある場合、

$$\Gamma = 4\pi UR \sin \alpha \quad (1-9)$$

(1-8) 式を z で微分して、(1-7) 式による u と v を求めると下記のようにになります。

$$u = U \cos \alpha - UR^2 \frac{(x^2 - y^2) \cos \alpha + 2xy \sin \alpha}{x^2 + y^2} + \frac{\Gamma y}{2\pi(x^2 + y^2)} \quad (1-10)$$

$$v = U \sin \alpha + UR^2 \frac{(x^2 - y^2) \sin \alpha - 2xy \cos \alpha}{x^2 + y^2} - \frac{\Gamma x}{2\pi(x^2 + y^2)} \quad (1-11)$$

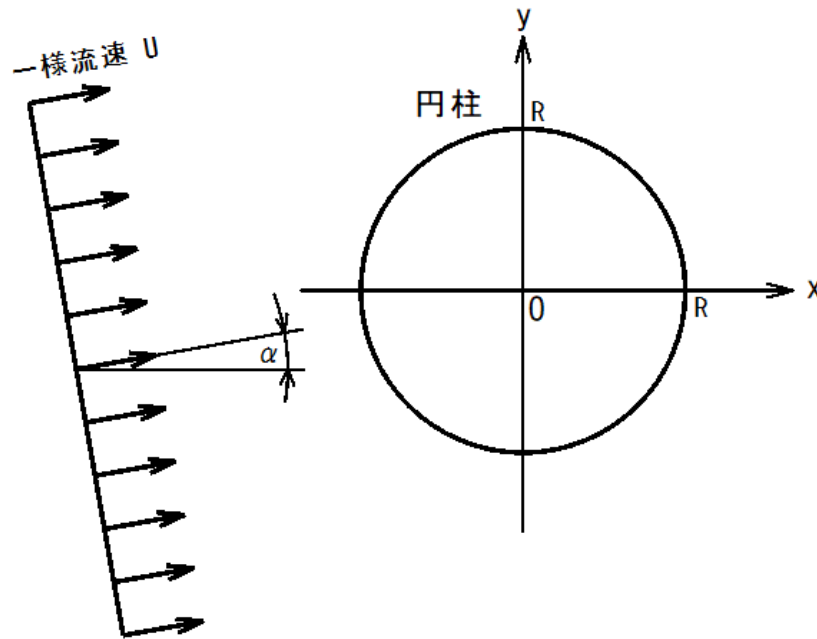


図1-1 円柱回りの流れ

1.2 ジューコフスキー変換

図1-2にジューコフスキー変換の説明図を示します。同図では、半径 a の基本円と半径 R_2 の第2円があります。基本円はジューコフスキー変換のためのもので、第2円は前節で説明した円柱回りの流れを計算するためのものです。すなわち、第2円の中心 (x_0, y_0) を図1-1の原点とし、 R_2 を図1-1の R に置き換えれば流れ計算できます。

他方、図1-2の計算空間をジューコフスキー変換して物理空間の複素座標を Z とし、 X, Y を座標値とすると、次式が定義されます。

$$Z = z + iY \quad (1-12)$$

そして、ジューコフスキー変換は次式で表わされます。ただし、複素座標 z の原点は基本円の中心になります。

$$Z = z + \frac{a^2}{z} \quad (1-13)$$

また、物理空間の複素ポテンシャルを W を次式で定義します。複素ポテンシャルと循環は座標変換しても変わりません。従って、 W と w は等しいです。

$$W = \Phi + i\Psi \quad (1-14)$$

Φ : 速度ポテンシャル

Ψ : 流れ関数

ここで、 X, Y 方向の速度を V_x, V_y とおくと次式が定義されます。

$$V_x - iV_y = \frac{dW}{dZ} = \frac{dw}{dZ} = \frac{\frac{dw}{dz}}{\frac{dZ}{dz}} = \frac{u - iv}{\frac{dZ}{dz}} \quad (1-15)$$

(1-13)式より

$$\frac{dZ}{dz} = 1 - \frac{a^2}{z^2} \quad (1-16)$$

(1-16)式を(1-15)式に代入すると、

$$V_x - iV_y = \frac{u - iv}{1 - \frac{a^2}{z^2}} \quad (1-17)$$

物理空間では、最後に位置座標と速度を角度 α だけ右回転させ、一様流れを水平に戻します。

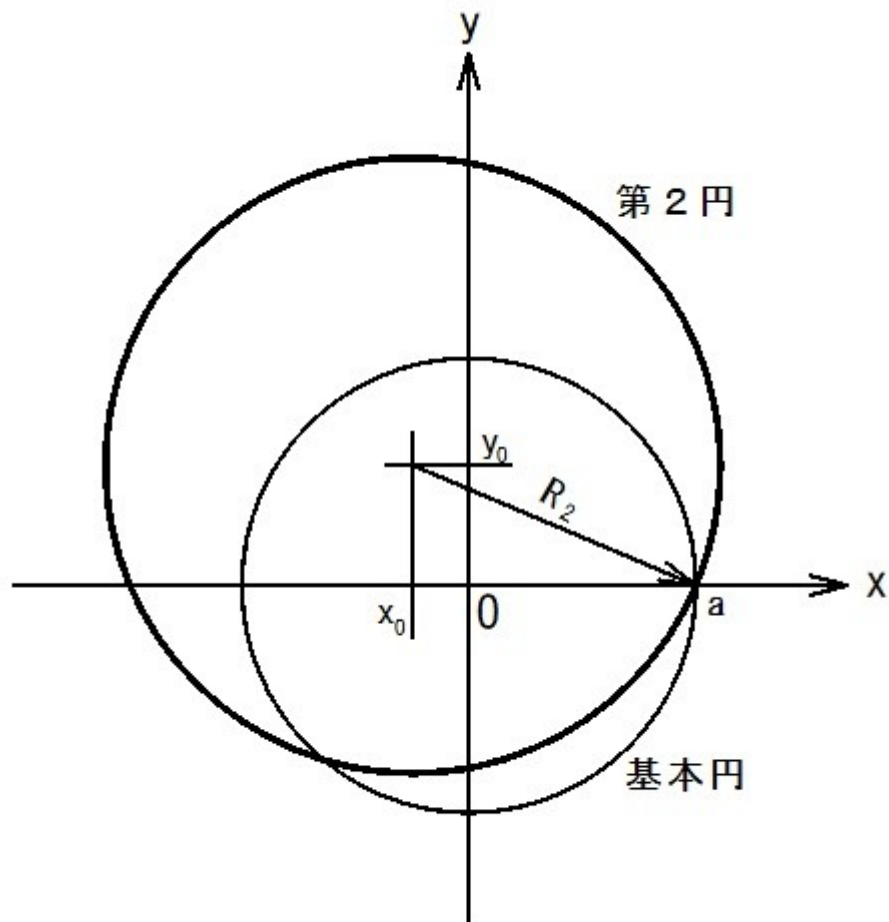


図1-2 ジューコフスキー変換の説明図

1.3 圧力と翼に作用する力

重力を無視すると、ベルヌーイの定理により

$$p + \frac{1}{2} \rho v^2 = \text{一定} \quad (1-18)$$

p : 圧力

ρ : 密度

注) 本ソフトでは重力は無視しています。

従って、どこか1点の圧力 p を与えれば、他の全点の圧力を計算できます。本ソフトでは一様流れの入口中央の圧力を入力設定します。ただし、圧力は相対差だけが有効になりますので、設定値は任意です。

圧力が求まれば、翼回りの圧力積分を X, Y 方向に実施して、 X 方向の抗力と Y 方向の揚力を算出します。また、計算空間における揚力 L の理論値は次式となります。

$$L = \rho U \Gamma \quad (1-19)$$

Γ には(1-9)式を代入。同式の R の代わりに 第2円の半径 R_2 を使用。

第2章 プログラムの機能・構成

[VBプロジェクト名] J o u k o W i n g

本ソフトではジュコフスキー翼の流れ解析を行ないます。ジュコフスキー変換前の計算空間と変換後の物理空間の両方を計算します。

本ソフトの立ち上げ画面は、図2-1のメニュー画面です。同図のように5つの基本メニューがあります。

- 1) 「構造仕様データ」メニューでは、計算空間の仕様データを作成し、さらにメッシュ生成を行ないます。
- 2) 「解析データ」メニューでは、メッシュ構造を引き継いで解析用データを作成します。
- 3) 「計算」メニューでは解析計算を実行します。
- 4) 「後処理」メニューでは計算結果の図を作画します。
- 5) 「終了」メニューをクリックすると、ソフトが終了します。

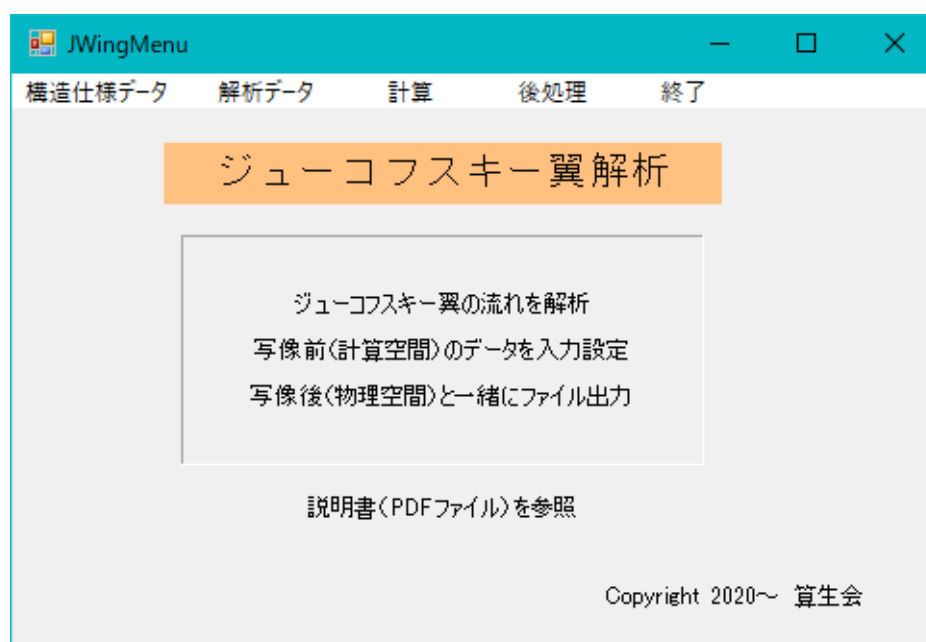


図2-1 「J o u k o W i n g」ソフトのメニュー画面

次に、図2-2にプログラム構成を示します。同図のように、全体を「メニュー」の JWingMenuモジュール* で制御し、その下に「構造仕様データ」、「データ」、「計算」、「後処理」の4つのプログラム群に分かれています。

注) *モジュール名や各フォーム名は、ファイル名と名前を一致させてあります。

データファイルは、「構造仕様データファイル」、「解析データファイル」「結果データファイル」の3種類を使用しています。それらをまとめて表2-1に示します。ただし、同表には示していませんが、いくつかのプログラム部分で一時記憶ファイル（ファイル拡張子「.tmp」）も使用しています。これらデータファイルはいずれもテキスト形式であり、エディターや表計算ソフトで閲覧・印刷することができます。

表2-2に本ソフトのファイルリストを示します。

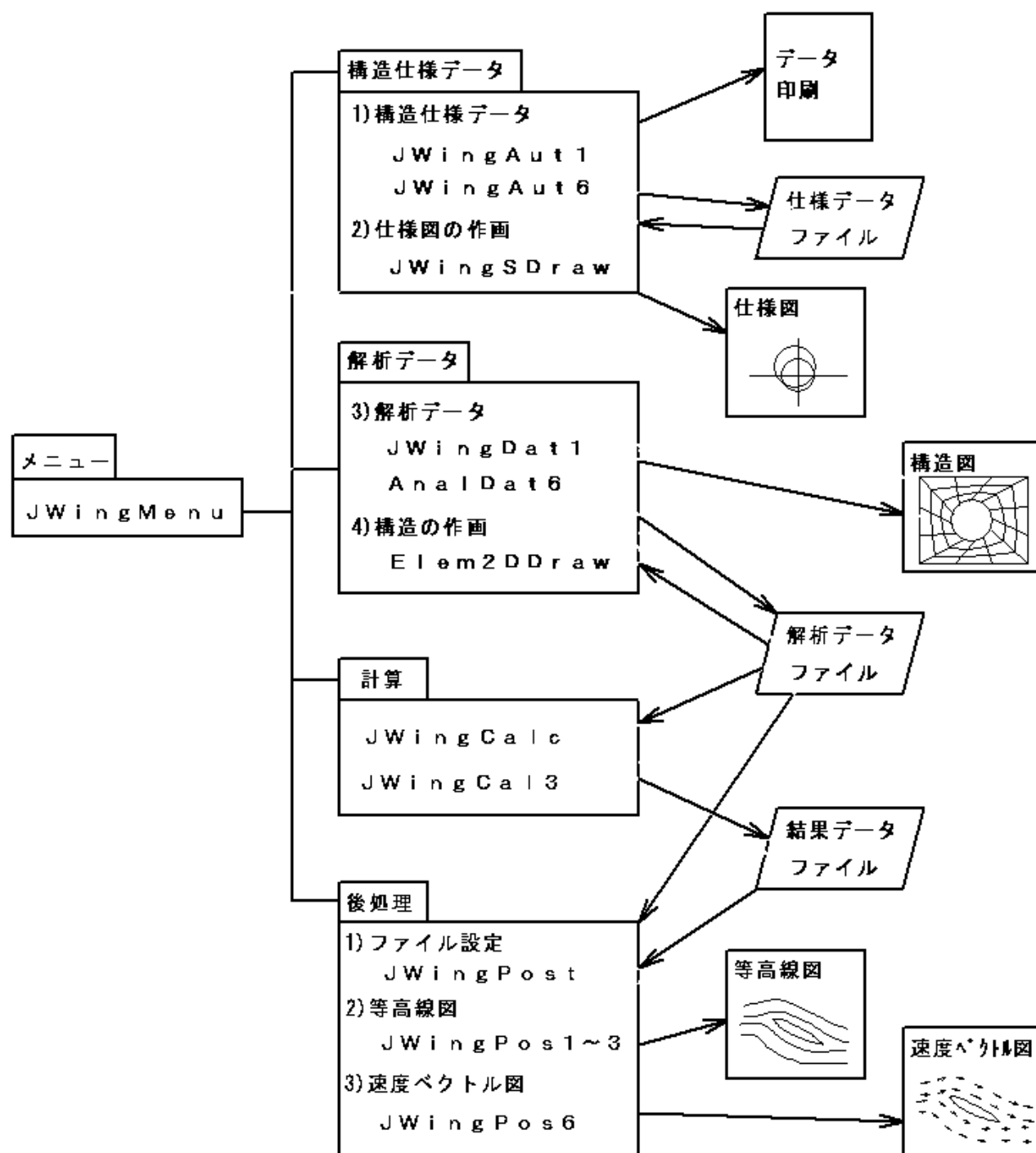


図2-2 「JoukoWing」ソフトのプログラム構成

表2-1 本ソフトのデータファイルの種類

名称	デフォルトの ファイル拡張子	内容
1) 構造仕様データファイル	.aus	計算空間と物理空間の仕様を定義するファイル
2) 解析データファイル	.dat	解析用のデータファイル（計算空間のメッシュを含む）
3) 結果データファイル	.rep	解析結果のデータファイル （計算空間と物理空間の両方入り）

注）オプションで、1)、2)のデータファイルは、読み込み時にバックアップファイル（拡張子.bak）を自動作成できます。ただし、同じ名前で元の拡張子だけ異なる場合は、拡張0子によらず同一名のバックアップファイルが上書きされます。

表2-2 「J o u k o W i n g」ソフトのファイルリスト

[全般]

ファイル名	内 容
JWingCom. vb	共通変数の宣言とサブルーチンの定義
JWingMenu. vb	メニューの提示・選択（メッシュ生成を含む）

[構造仕様データ]

ファイル名	内 容
JWingAut1. vb	構造仕様データの入力
JWingAut6. vb	構造仕様ファイルの入出力
JWingDrawS. vb	仕様図の作画

[解析データ]

ファイル名	内 容
JWingDat1. vb	解析データの入力
AnalDat6. vb	データファイルの入出力
Elem2DDraw. vb	構造の作画

[計算]

ファイル名	内 容
JWingCalc. vb	計算に使用するファイルの設定
FL2DCal3. vb	解析計算の実行

[後処理]

ファイル名	内 容
JWingPost. vb	後処理に使用するファイルの設定
JWingPos1. vb	等高線作画の変数の指定
JWingPos2. vb	等高線図の仕様設定
JWingPos3. vb	等高線図の作画実行
JWingPos6. vb	速度ベクトル図の作画実行

第3章 データの作り方

図3-1に示す例題に沿って説明します。基本円の半径 a 、第2円の中心位置 x_0 、 y_0 、計算空間辺の倍率 n 、分割数 m を図示のように設定しています。

1) 第2円の中心位置 x_0 、 y_0 は座標の第2象限になければなりません(0を含む)。

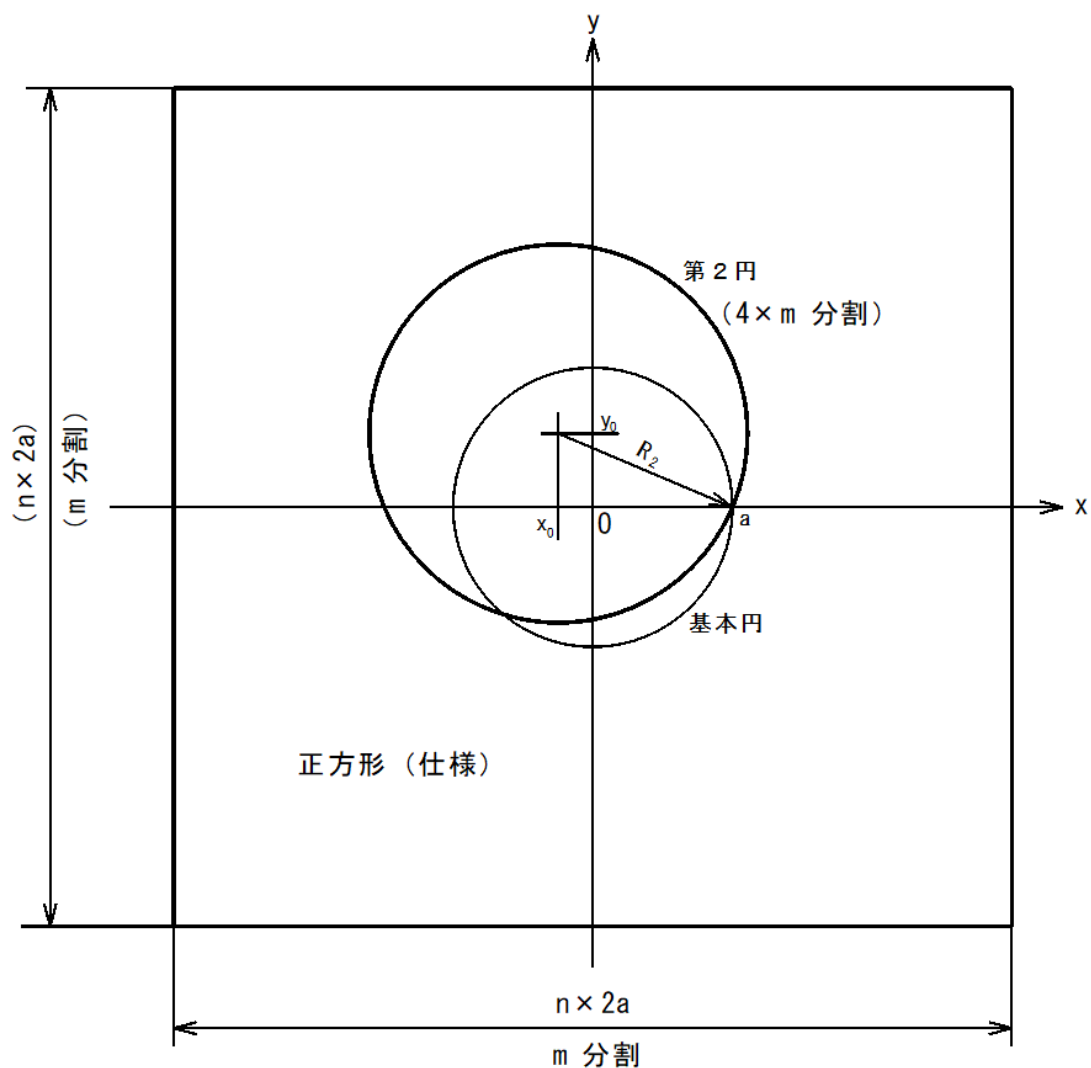
◇第2円の半径 R_2 は自動生成されるので、データ設定は不要です。

2) 計算空間辺の倍率 n は、基本円の直径 $2a$ に対するものです。

◇計算空間の大きさは全体図を見るためのもので、計算結果に影響しません。

3) 分割数 m は、計算空間辺を分割する数で、それ以外の分割数は自動設定してメッシュ生成します。

◇メッシュ生成は、計算する格子点を設けるためです。



$a=1$ $x_0=-0.1$ $y_0=0.05$ 単位 : m
 $n=3$ $m=20$

図3-1 例題の構造

構造の他に、次のデータも用意します（数値は例題）。

- a. 一様流速 U 1 m/s
- b. 一様流れの角度 10° （右上方が正）
- c. 入口中央の圧力 1000 Pa （任意）
- d. 密度 1.204 kg/m^3

<データの単位系>

本ソフトでは、データの単位系は何でも使用できますが、入力データ全体の単位系は統一しておかねばなりません。表3-1にS I 単位系を示しておきます。

表3-1 S I 単位系

データ項目	単位
時間	s
長さ	m
密度	kg/m^3

データ項目	単位
速度	m/s
圧力	$\text{Pa} (= \text{N/m}^2)$
速度ポテンシャル	m^2/s

第4章 「構造仕様データ」処理プログラム

4.1 サブメニュー画面

「メニュー」プログラムにおける「構造仕様データ」のサブメニュー選択画面を図4-1に示します。同図に示すように7つのサブメニューがあります。全く新たにデータを作成する場合は「データ入力・修正」を選択しますが、既存ファイルを修正して新たなファイルを作成する場合は、「ファイル読み込み」を先に行ないます。

また、「オプション」→「バックアップファイル作成」にチェックを入れると、データ読み込み時にバックアップファイル（.bak）が自動作成されます。チェックを外すと作成されなくなります。これは、「解析データ」にも一括適用となります。

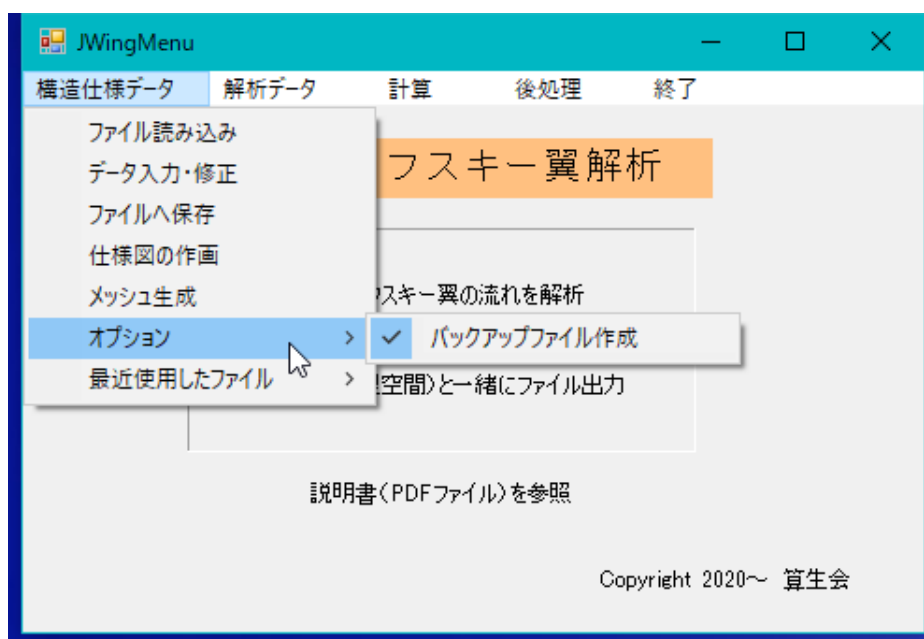


図4-1 「構造仕様データ」サブメニュー画面

4.2 ファイル読み込み

サブメニューの「ファイル読み込み」を選択すると、コモンダイアログでファイルを開く画面となり、構造仕様データファイルを選定して読み込みます。なお、構造仕様データファイルのデフォルトの拡張子は、「.aus」です。

4.3 データ入力・修正

サブメニューの「データ入力・修正」を選択すると、図4-2のデータ仕様入力画面となります。本画面の入力について補足説明します。

①タイトルは、任意の題名を入力できます。

②基本円の半径a、第2円のX座標、Y座標を入力します。

◇X座標は0以下、Y座標は0以上です。

③計算空間辺の長さ倍率を入力します。

◇計算空間は原点に関して対称の正方形で、長さ倍率は基本円直径に対するものです。

④計算空間辺の分割数（偶数）を入力します。

◇この分割数は計算空間のメッシュを生成して、節点を設けるためのものです。

⑤「設定」ボタンをクリックすると、入力データが確定します。

データを入力してください。

タイトル

基本円の半径 a

第2円中心のX座標

第2円中心のY座標

計算空間辺の長さ倍率

(基本円直径に対する倍率)

計算空間辺の分割数(偶数)

図4-2 構造仕様データ入力画面

4.4 ファイルへの保存

サブメニューの「ファイルへの保存」を選択すると、コモンダイアログでファイルを保存する画面となり、構造仕様データファイルを設定すると、データが書き出されます。新たなファイル名を入力すると新ファイルが作成されます。先に構造仕様データファイルを読み込んである場合に、同ファイルを選定すると上書きとなります。

図4-3に構造仕様データファイル例を示します。

```
"ジューコフスキー翼"  
"基本円の半径a", 1  
"第2円中心のX座標", -0.2  
"第2円中心のY座標", 0.05  
"計算空間辺の長さ倍率", 3  
"計算空間辺の分割数", 20
```

図4-3 構造仕様データファイル例

4.5 仕様図の作画

サブメニューの「仕様図の作画」を選択すると、図4-4のように仕様図が画面に作画されます。

- ①基本円が青色、第2円が赤色で示されています。
- ②「標準・全画面切換」ボタンをクリックすると、標準画面と全画面を切り換えることができます。また、画面Formの右下コーナー等をマウスドラッグすることにより、標準画面と全画面の間で自由に拡大・縮小できます。
- ③マウス中ボタン、ホイールにより移動、拡大・縮小を行なうことができます。
◇中ボタンを押したまま動かせば図形を移動できます。また、ホイールの回転により拡大・縮小ができます。
- ④「コピー印刷」ボタンをクリックすると、プリンターで画面コピーを印刷できます。
◇「通常画面」の作画が印刷されます。
- ⑤「再描画」ボタンをクリックすると、初期の画面になります。
- ⑥本画面を終了するには、「中止」ボタンをクリックします。

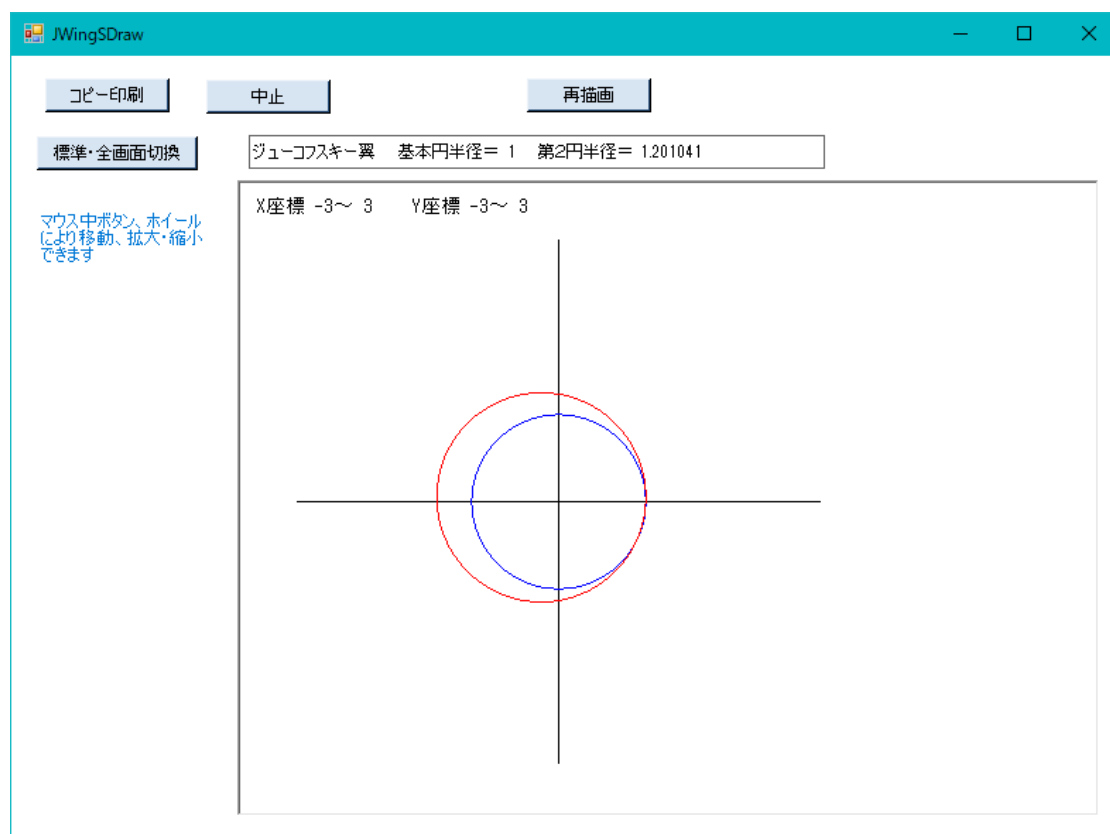


図4-4 仕様図の画面例

4.6 メッシュ生成

サブメニューの「メッシュ生成」を選択すると、メッシュ生成が実行されます。終了すると、計算終了確認ボックスが出て、生成データのファイルへの保存を問うてきますので、ここで「はい」を選択すると、書き出し用のファイル設定画面となり、解析データファイルを出力できます。また、「いいえ」を選んでも、「解析データ」処理のサブメニュー「データ入力・修正」をクリックして、メッシュ構造を引き継ぐことができます。

生成したメッシュ構造を確認するには、「解析データ」処理のサブメニュー「構造図の作画」を実施してください。

4.7 最近使用したファイルの選択

サブメニュー「最近使用したファイル」のポップアップで、ファイルリストから選択できます。

注) 新版ソフトでファイルが使用されないとリスト表示されません。

第5章 「解析データ」処理プログラム

5.1 サブメニュー画面

「メニュー」プログラムにおける「解析データ」のサブメニュー選択画面を図5-1に示します。同図に示すように、5つのサブメニューがあります。第4章の「構造仕様データ」の「メッシュ生成」を引き継ぐ場合は「データ入力・修正」を選択します。既存ファイルを修正して新たなファイルを作成する場合は、「ファイル読み込み」を先に行ない、その後他のサブメニューを使用します。

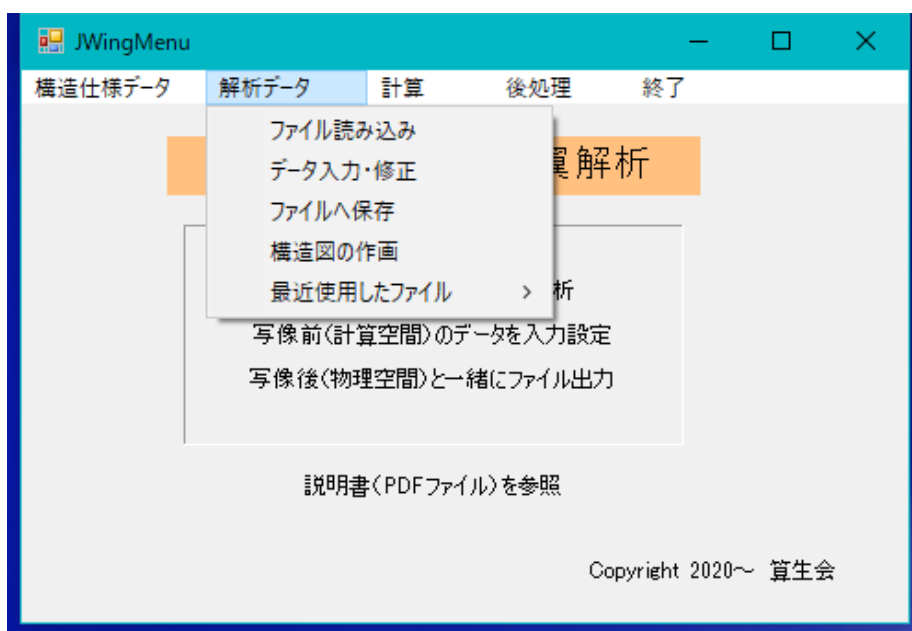


図5-1 「解析データ」サブメニュー画面

5.2 ファイル読み込み

サブメニューの「ファイル読み込み」を選択すると、コモンダイアログでファイルを開く画面となり、入力データファイルを選定して読み込みます。なお、入力データファイルのデフォルトの拡張子は、「.dat」です。

5.3 データ入力・修正

サブメニューの「データ入力・修正」を選択すると、図5-2のデータ入力画面となります。

- ①タイトルは、任意の題名を入力できます。
- ②基本円の半径aから計算空間辺の分割数まで、構造仕様データで確定済みのものが表示されています。
◇メッシュ構造データは、別途保持されています。
- ③一様流速と流れ角度(°)を入力します。
- ④入口中央の圧力を入力します。
◇圧力は差だけが有効に作用しますので、圧力の値は任意で差し支えありません。
- ⑤密度を入力します。
- ⑥「設定」ボタンをクリックすると、入力データが確定します。

JWingDat1

データを入力してください。

タイトル

基本円の半径aは 1 変換式 $Z = z + a^2 / z$

第2円中心のXY座標は -2, .05

計算空間辺の長さ倍率は 3 (基本円直径に対する倍率)

計算空間辺の分割数(偶数)は 20

一様流速 循環はクッタ条件により自動設定

流れ角度(°)

入口中央の圧力(任意) 密度

(節点番号は 462)

図5-2 データ入力画面

5.4 ファイルへの保存

サブメニューの「ファイルへの保存」を選択すると、コモンダイアログでファイルを保存する画面となり、入力データファイルを設定すると、データが書き出されます。新たなファイル名を入力すると新ファイルが作成されます。先に入力データファイルを読み込んである場合に、同ファイルを選定すると上書きとなります。図5-3に入力データファイル例を示します。

```

"プログラム名", "JoukoWing"
"ジュコフスキー翼"
"基本円の半径a", 1
"第2円中心のX座標", -0.2
"第2円中心のY座標", 0.05
"計算空間辺の長さ倍率", 3
"計算空間辺の分割数", 20
"一様流速", 1
"流れ角度 (°)", 10
"入口中央の節点番号", 440
"入口中央の圧力", 1000
"密度", 1.204
"<計算空間>"
"節点数", 880
"要素数", 800
"要素データ (要素番号、4節点番号)"
1, 1, 2, 13, 12
2, 2, 3, 14, 13
3, 3, 4, 15, 14
4, 4, 5, 16, 15
5, 5, 6, 17, 16
6, 6, 7, 18, 17
7, 7, 8, 19, 18
. . . . .
. . . . .
794, 873, 874, 5, 4
795, 874, 875, 6, 5
796, 875, 876, 7, 6
797, 876, 877, 8, 7
798, 877, 878, 9, 8
799, 878, 879, 10, 9
800, 879, 880, 11, 10
"節点データ (節点番号、X座標、Y座標)"
1, 1, 3.638312E-09
2, 1.2, -.03000002
3, 1.4, -.06000004
4, 1.6, -.09000006
5, 1.8, -.1200001
6, 2, -.1500001
7, 2.2, -.1800001
. . . . .
. . . . .
874, 1.795427, -.2963977
875, 1.996189, -.3469981
876, 2.196951, -.3975985
877, 2.397713, -.4481989
878, 2.598475, -.4987993
879, 2.799238, -.5493997
880, 3, -.6000001

```

図5-3 入力データファイル例

5.5 構造の作画

サブメニューの「構造の作画」を選択すると、構造図が画面に作画されます。図5-4に構造作画の画面例を示します。同図は、本画面に移った状態のもので、作画のパラメータは標準条件になっています。

- ①「標準・全画面切換」ボタンをクリックすると、標準画面と全画面を切り換えることができます。また、画面Formの右下コーナー等をマウスドラッグすることにより、標準画面と全画面の間で自由に拡大・縮小できます。
- ②マウス中ボタン、ホイールにより移動、拡大・縮小を行なうことができます。中ボタンを押したまま動かせば図形を移動できます。また、ホイールの回転により拡大・縮小ができます。
- ③マウスドラッグ矩形により、構造図の一部分を拡大できます。
- ◇マウスドラッグ矩形は、拡大したい部分の左上隅にマウスを移動し、そこでマウスの左ボタンを押し、その左ボタンを押した状態で拡大部分の右下隅までマウスを移動させ、そこで左ボタンを離します。そうしますと、図5-5のようにマウスドラッグ範囲の矩形が表示され、コモンダイアログで「選択領域を拡大しますか？」と問うてきます。そこで、「はい」を選択すると、選択領域が拡大されて表示されます。
 - ◇上記の選択領域に関しては、要素全体（4 節点）が選択領域に入っている要素だけがすべて拡大の対象となります。
 - ◇拡大操作を行なった後、元の全体構造図に戻りたい場合は、「全要素描画」ボタンをクリックします。
- ⑤「番号表示の項目」は、「要素番号」と「節点番号」の内、表示したい項目を重複選択できます。
- ◇「番号表示の文字サイズ」は任意の値に設定できます。
 - ◇「要素番号」と「節点番号」を両方選択して、「再描画」させた部分拡大画面を図5-6に示します。ただし、本画面では、「番号表示の文字サイズ」を10に変更してあります。
- ⑥任意の要素を右クリックすると、図5-7のように当該要素の各番号が表示されます。
- ◇ESCキーを押すと上記の番号表示が解除されます。
- ⑦本画面で「コピー印刷」ボタンをクリックすると、プリンターで画面コピーを印刷できます。
- ◇「通常画面」の作画が印刷されます。
- ⑧本画面を終了するには、「中止」ボタンをクリックします。

5.6 最近使用したファイルの選択

サブメニュー「最近使用したファイル」のポップアップで、ファイルリストから選択できます。

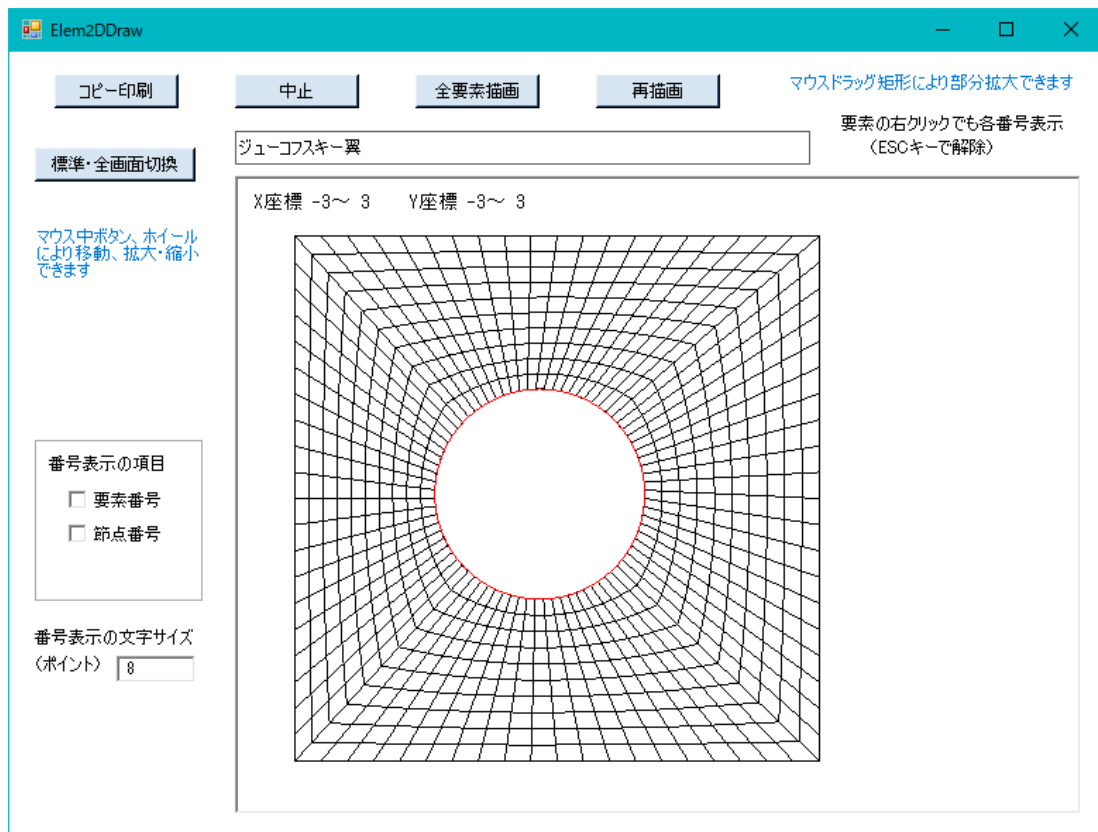


図5-4 構造作画の画面例

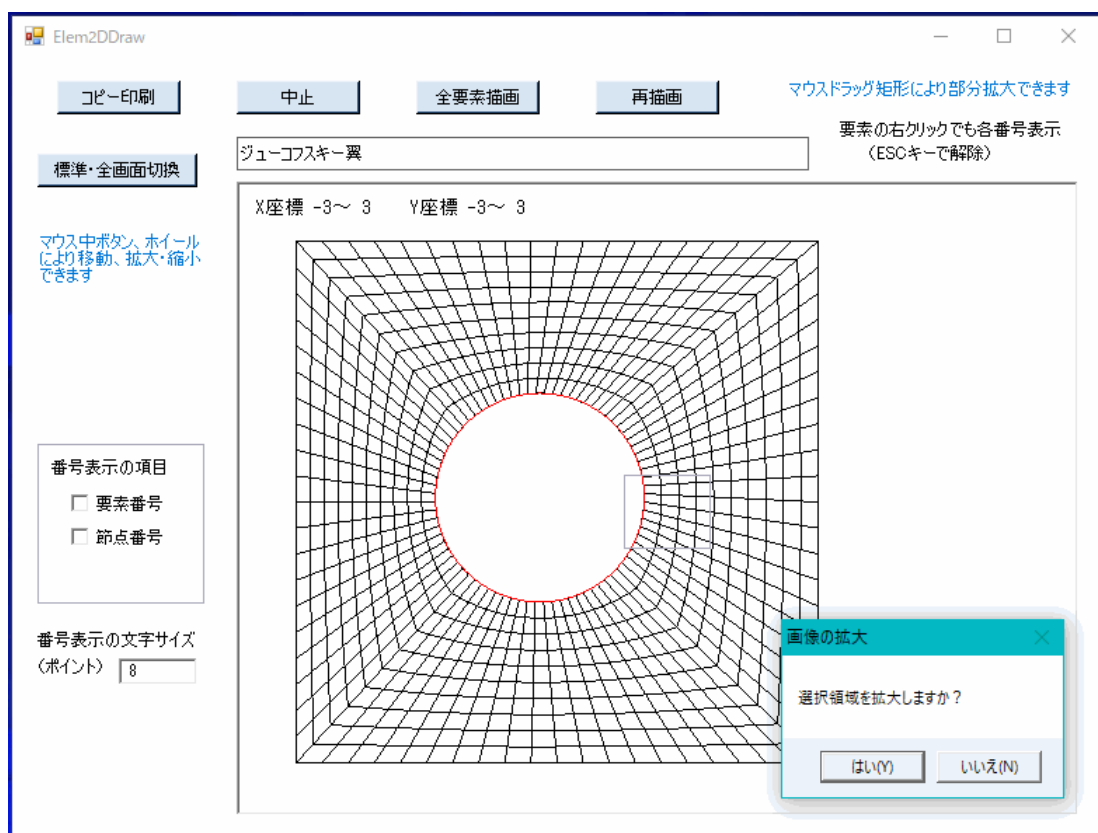


図5-5 構造作画における拡大領域選択例

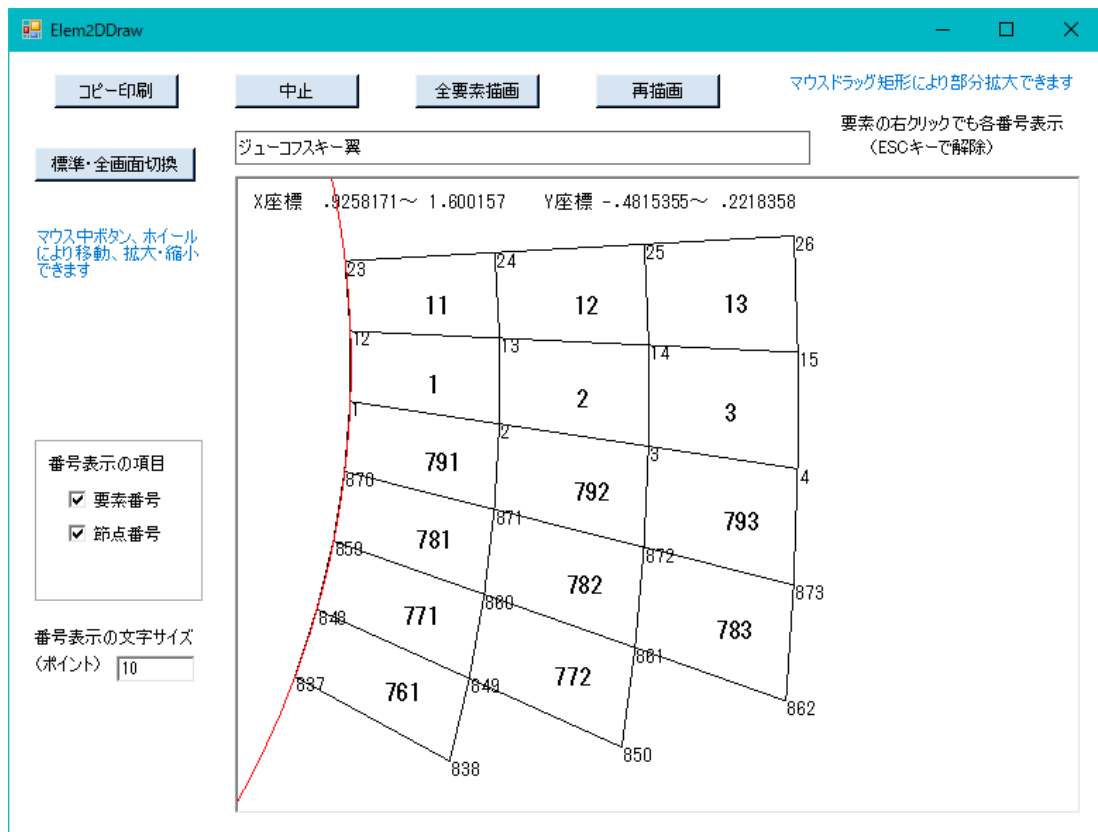


図5-6 構造作画の部分拡大例

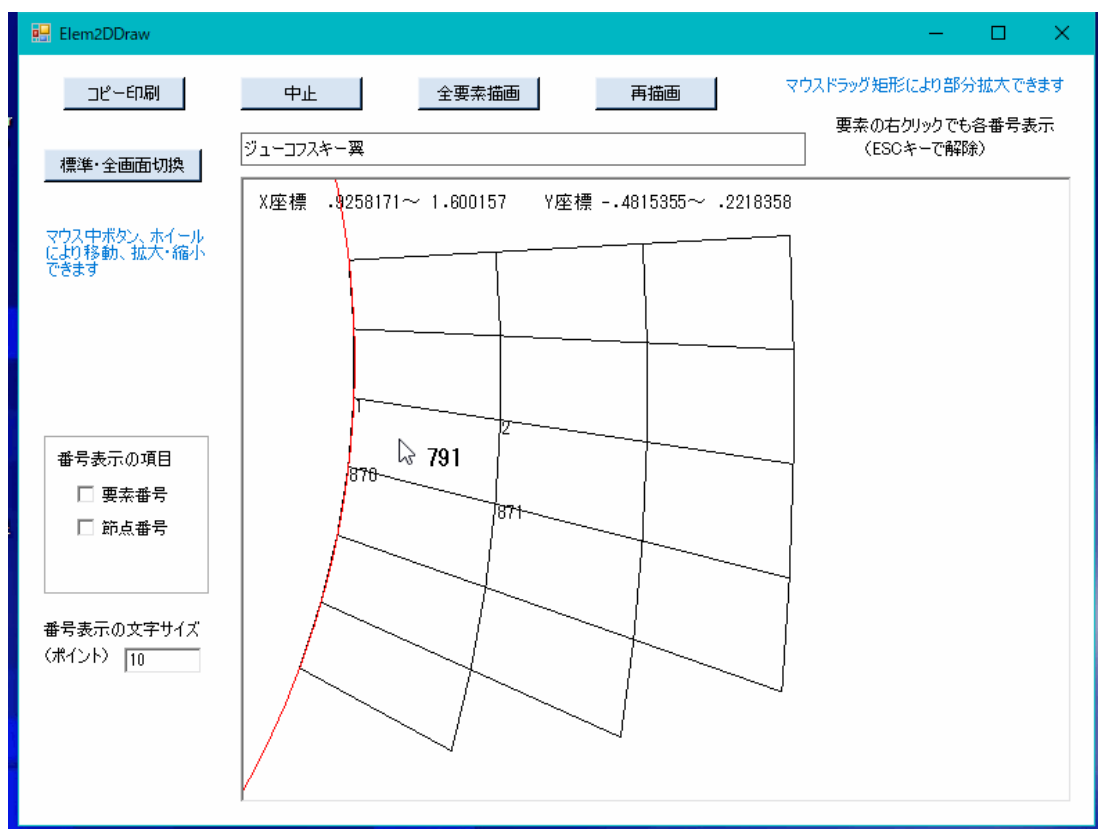


図5-7 構造作画における要素右クリック画面例

第6章 「計算」プログラム

6.1 サブメニュー画面

「メニュー」プログラムにおける「計算」のサブメニュー画面を図6-1に示します。サブメニューの「解析計算の実行」をクリックすると、次の「計算」ファイル設定画面に移ります。

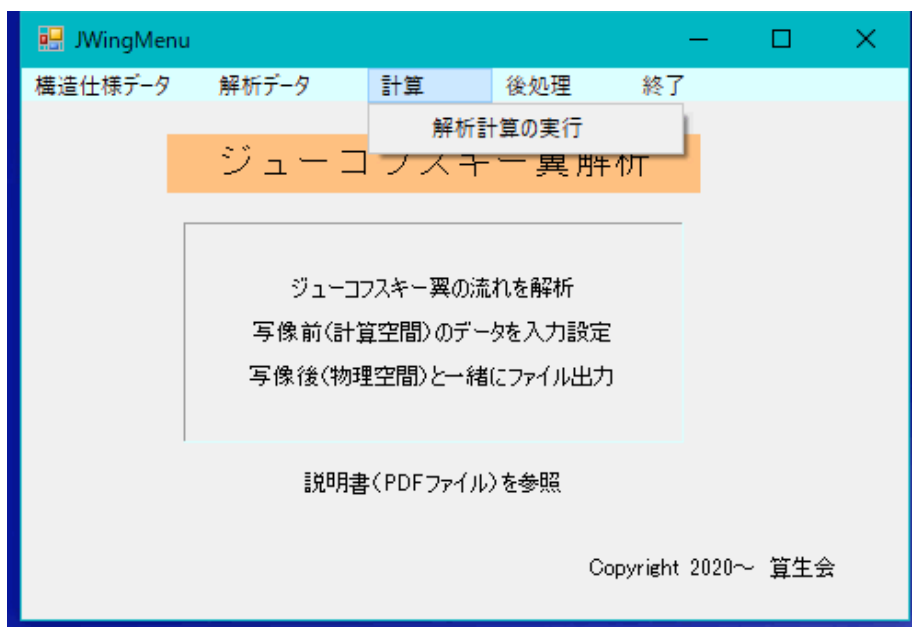


図6-1 「計算」サブメニュー画面

6.2 「計算」ファイル設定

図6-2に「計算」ファイル設定画面を示します。同画面で、「入力ファイル指定」ボタンをクリックすると、コモンダイアログで入力データファイルを選定できます。そして、再び「計算」ファイル設定画面に戻ると、「入力ファイル指定」のテキストボックスには選定済み入力ファイル名が、また「出力ファイル指定」の方には入力ファイル名の拡張子を「.rep」に変更したファイル名が表示されます。もし、他のファイル名に変更したい場合は、テキストボックスで修正できます。

本画面で「設定」ボタンをクリックすると、計算が開始されます。

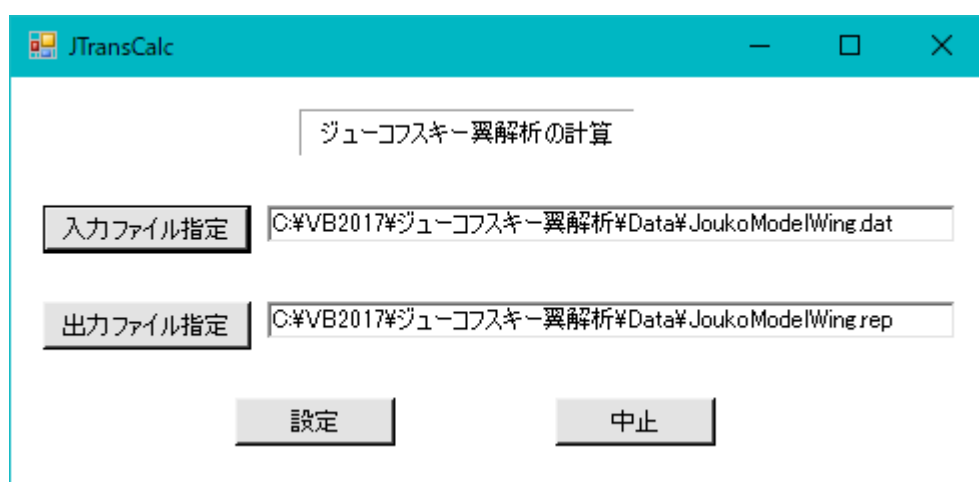


図6-2 「計算」 ファイル設定画面

6.3 計算終了

図6-3に計算終了画面、図6-4に計算確認ダイアログ画面を示します。図6-3では、かかった計算時間も表示されますが、0sになっています。また、図6-4の計算確認ダイアログ画面では、最大値データや揚力等も表示されます。本画面で「OK」ボタンをクリックすると、立ち上げ時のメニュー画面に戻ります。

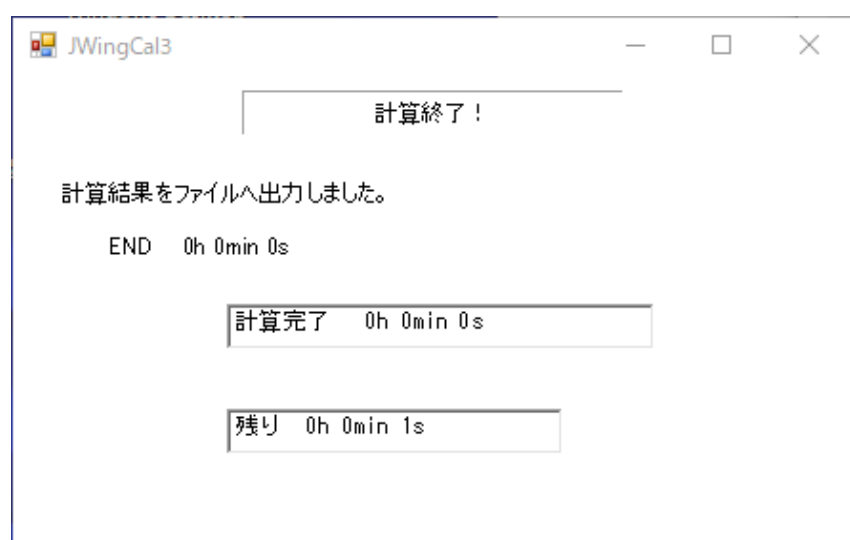


図6-3 計算終了画面

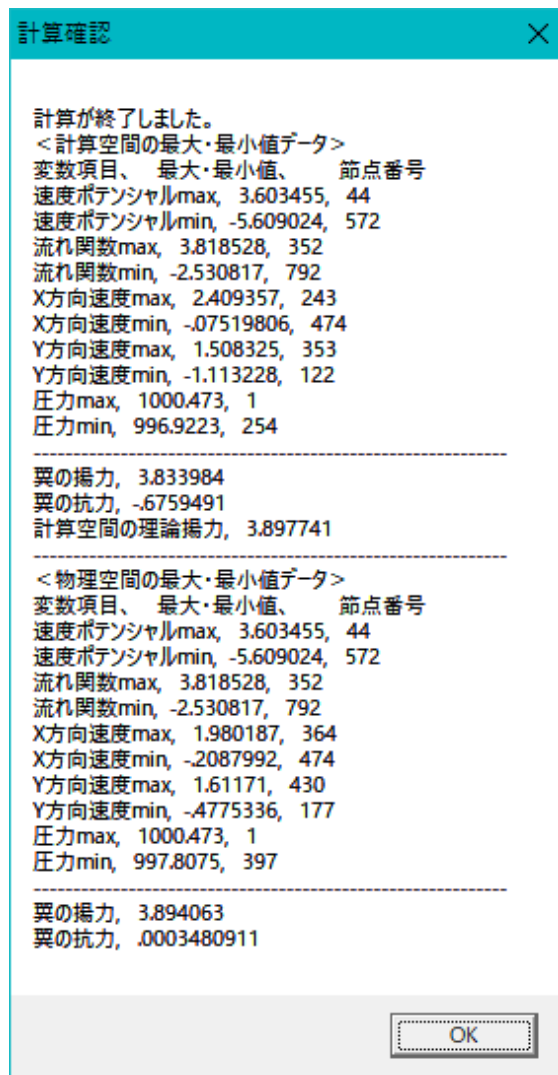


図6-4 計算確認ダイアログ画面

6.4 計算結果

上記6.2節で指定した出力ファイルに計算結果が書き出されます。図6-5に結果ファイルへの出力例を示します。図6-5について、○印を付した数字の部分に補足説明します。

- ①循環Γの値が示されています。本値は翼端のクッタ条件から算出されたものです。
- ②物理空間の節点データが出力されています。
- ③計算空間の結果が出力されています。

◇各節点ごとに速度ポテンシャル、流れ関数、X方向速度、Y方向速度、圧力が出力されています。

- ④計算空間の最大・最小値、節点番号がリスト出力されています。
- ⑤計算空間の揚力等が出力されています。
- ⑥物理空間の結果が出力されています。

◇各節点ごとに速度ポテンシャル、流れ関数、X方向速度、Y方向速度、圧力が出力されています。

- ⑦物理空間の最大・最小値、節点番号がリスト出力されています。
- ⑧物理空間の揚力等が出力されています。

⑨最後に計算時間も出力されています（本例では0s）。

```

"<<ジュコフスキー解析の計算結果>>"
"ジュコフスキー翼"
"[入力データファイル] ", "C:\¥VB2017¥ジュコフスキー翼解析¥Data¥JoukoModelWing.dat"
"循環Γ", 3.237326
"-----"
"物理空間の節点データ（節点番号、X座標、Y座標）"
1, 1.969615, -.3472964
2, 2.000336, -.3620345
3, 2.075762, -.3959111
4, 2.179713, -.4401447
5, 2.302914, -.4904752
6, 2.439693, -.5446324
7, 2.586399, -.6013162
. . . . .
874, 2.266181, -.6096703
875, 2.399158, -.6895567
876, 2.542428, -.7710361
877, 2.693399, -.8535413
878, 2.85028, -.9367282
879, 3.011796, -1.020381
880, 3.177009, -1.104357
"-----"
"<計算空間の結果出力>"
"節点番号、速度ポテンシャル、流れ関数、X方向速度、Y方向速度、圧力"
1, 2.36763, .09438556, 1.341105E-07, 0, 1000.473
2, -.8418667, .08844214, .2606301, .01566929, 1000.432
3, -.7723918, .07378361, .4289913, .02519524, 1000.362
4, -.6752796, .05330013, .5439856, .03243482, 1000.294
5, -.5589128, .02856263, .6260206, .03867054, 1000.236
6, -.4286058, .0005199585, .6866163, .04435153, 1000.188
7, -.2878873, -.0302044, .7326684, .04964159, 1000.148
. . . . .
874, -.5738657, -.0822039, .6358021, .09721735, 1000.224
875, -.4448898, -.135025, .6941875, .09342436, 1000.178
876, -.3055608, -.1898521, .7383999, .09145185, 1000.14
877, -.158339, -.2463886, .772723, .09072426, 1000.109
878, -.004963398, -.3044172, .7999328, .09084566, 1000.083
879, .153301, -.3637694, .8218926, .09154329, 1000.061
880, .3155115, -.4243094, .8398905, .09262826, 1000.043
"-----"
"<計算空間の最大・最小値データ>"
"変数項目、最大・最小値、節点番号"
速度ポテンシャルmax, 3.603455, 44
速度ポテンシャルmin, -5.609024, 572
流れ関数max, 3.818528, 352
流れ関数min, -2.530817, 792
X方向速度max, 2.409357, 243
X方向速度min, -.07519806, 474
Y方向速度max, 1.508325, 353
Y方向速度min, -1.113228, 122
圧力max, 1000.473, 1
圧力min, 996.9223, 254
"-----"
翼の揚力, 3.833984
翼の抗力, -.6759491
計算空間の理論揚力, 3.897741

```

図6-5（1/2） 結果ファイルへの出力例

```

"-----"
"<物理空間の結果出力>"
"節点番号、速度ポテンシャル、流れ関数、X方向速度、Y方向速度、圧力"
1, 2.36763, .09438556, 0, 0, 1000.473
2, -.8418667, .08844214, .8238121, -.1903027, 1000.043
3, -.7723918, .07378361, .8509465, -.1761235, 1000.018
4, -.6752796, .05330013, .8713451, -.1640458, 999.9998
5, -.5589128, .02856263, .8871474, -.1535857, 999.985
6, -.4286058, .0005199585, .8996949, -.1444141, 999.9732
7, -.2878873, -.0302044, .9098661, -.1362938, 999.9634
. . . . .
874, -.5738657, -.0822039, .881468, -.1403597, 999.9934
875, -.4448898, -.135025, .8939747, -.1323844, 999.9814
876, -.3055608, -.1898521, .9041325, -.1252656, 999.9715
877, -.158339, -.2463886, .9125342, -.1188671, 999.9632
878, -.004963398, -.3044172, .9195919, -.1130828, 999.9562
879, .153301, -.3637694, .9256001, -.1078276, 999.9503
880, .3155115, -.4243094, .930774, -.1030322, 999.9451
"-----"

"<物理空間の最大・最小値データ>"
"変数項目、 最大・最小値、 節点番号"
速度ポテンシャルmax, 3.603455, 44
速度ポテンシャルmin, -5.609024, 572
流れ関数max, 3.818528, 352
流れ関数min, -2.530817, 792
X方向速度max, 1.980187, 364
X方向速度min, -.2087992, 474
Y方向速度max, 1.61171, 430
Y方向速度min, -.4775336, 177
圧力max, 1000.473, 1
圧力min, 997.8075, 397
"-----"

翼の揚力, 3.894063
翼の抗力, .0003480911
"END 0h 0min 0s"

```

⑥

⑦

⑧

⑨

図6-5 (2/2) 結果ファイルへの出力例

第7章 「後処理」プログラム

7.1 サブメニュー画面

「メニュー」プログラムにおける「後処理」のサブメニュー画面を図7-1に示します。同図のように、5つのサブメニューがあります。いずれのサブメニューをクリックしても、次の使用ファイル設定画面となります。

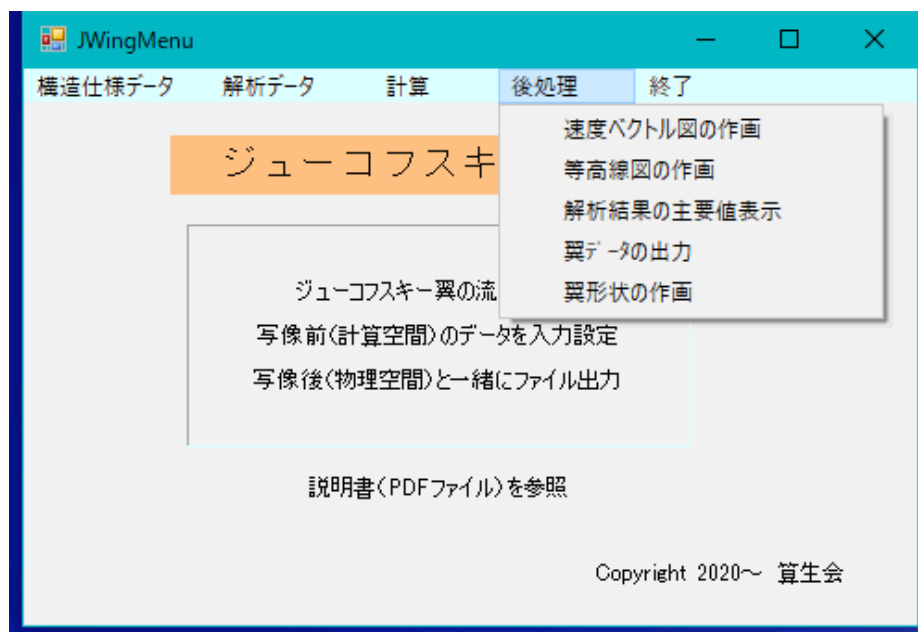


図7-1 「後処理」サブメニュー画面

7.2 使用ファイルの設定

図7-2に使用ファイル設定画面を示します。同画面で、表題が「速度ベクトル図の作画」になっていますが、各サブメニューにより表題が入れ替わります。

- 1) 「入力データファイル指定」コマンドをクリックすると、コモンダイアログで入力データファイルを選定できます。そして、再び使用ファイル設定画面に戻ると、「入力データファイル指定」のテキストボックスには選定済み入力ファイル名が、また「解析結果ファイル指定」の方には入力ファイル名の拡張子を「.rep」に変更したファイル名が表示されます。もし、結果データファイル名が他の名前であった場合は、テキストボックスで修正します。
- 2) 「速度ベクトル図の作画」と「等高線図の作画」では、「計算空間」か「物理空間」かを選択します。
- 3) 「設定」ボタンをクリックすると、それぞれの画面に移ります。

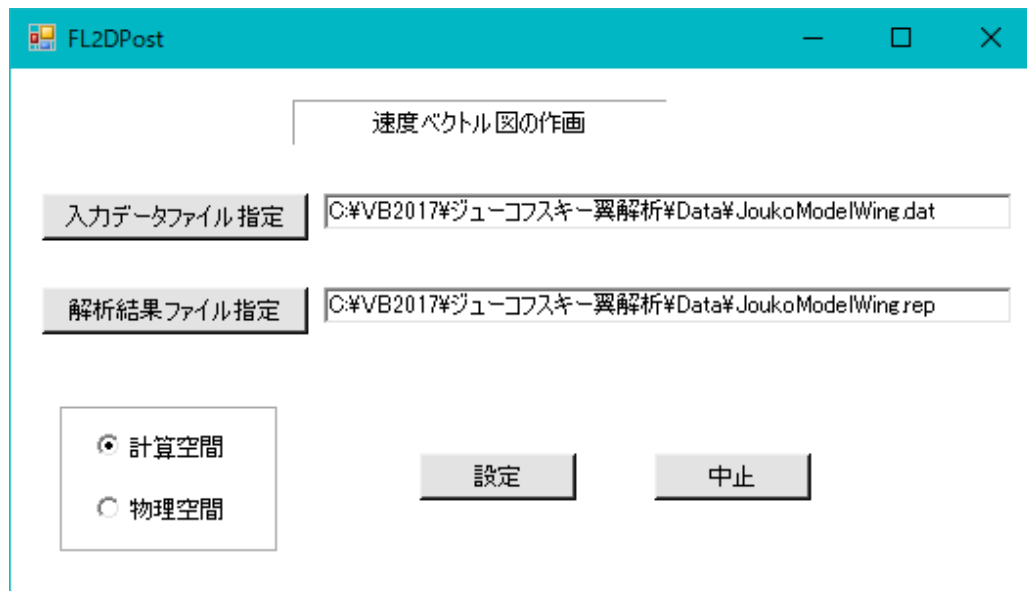


図7-2 使用ファイル設定画面

7.3 速度ベクトル図の作画画面

図7-3に計算空間の速度ベクトル図の作画画面、図7-4に物理空間の速度ベクトル図の作画画面を示します。

- ①それら画面のように、各節点における速度ベクトルが青色で表示されています。
- ②本画面の左側に、「ベクトルの長さ係数」、「ベクトルの矢印長さ係数」、「ベクトル線の幅」の3つのパラメーターを表示してあります。それらのパラメーターを変更することができます。変更した後は、「再描画」ボタンをクリックすると、新しいパラメーター条件による作画画面に変更されます。
 - ◇「ベクトルの長さ係数」と「矢印長さ係数」の標準値は1にしています。実際に作画させてみて適当な値を再設定できます。
 - ◇「ベクトル線の幅」は1～3が可能で、初期値は2にしています。
- ③「標準・全画面切換」ボタンをクリックすると、標準画面と全画面を切り換えることができます。また、画面Formの右下コーナー等をマウスドラッグすることにより、標準画面と全画面の間で自由に拡大・縮小できます。
- ④マウス中ボタン、ホイールにより移動、拡大・縮小を行なうことができます。中ボタンを押したまま動かせば図形を移動できます。また、ホイールの回転により拡大・縮小ができます。
- ⑤マウスドラッグ矩形により、構造図の一部分を拡大できます。
 - ◇マウスドラッグ矩形は、拡大したい部分の左上隅にマウスを移動し、そこでマウスの左ボタンを押し、その左ボタンを押した状態で拡大部分の右下隅までマウスを移動させ、そこで左ボタンを離します。そうしますと、図7-5のようにマウスドラッグ範囲の矩形が表示され、コモンダイアログで「選択領域を拡大しますか？」と問ってきます。そこで、「はい」を選択すると、選択領域が拡大されて表示されます。部分拡大した速度ベクトル図を図7-6に示します。
 - ◇上記の選択領域に関しては、要素全体（4節点）が選択領域に入っている要素

だけがすべて拡大の対象となります。

◇拡大操作を行なった後、元の全体構造図に戻りたい場合は、「全要素描画」ボタンをクリックします。

⑥マウス右クリックで任意の節点を選択すると、図7-6のように同節点の速度値が表示されます。

◇ESCキーを押すと節点選択が解除されます。

⑦本画面で「コピー印刷」ボタンをクリックすると、プリンターで画面コピーを印刷できます。

◇「通常画面」の作画が印刷されます。

⑧本画面を終了するには、「戻る」ボタンをクリックします。

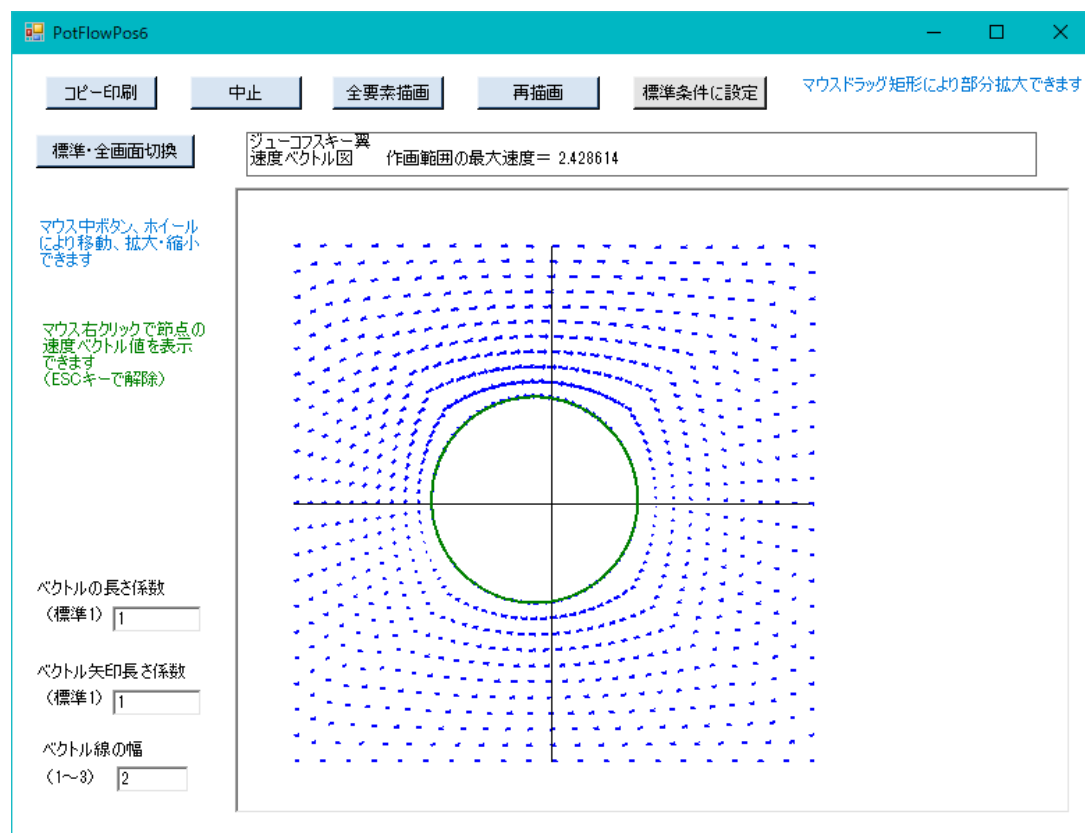


図7-3 計算空間の速度ベクトル図の作画画面

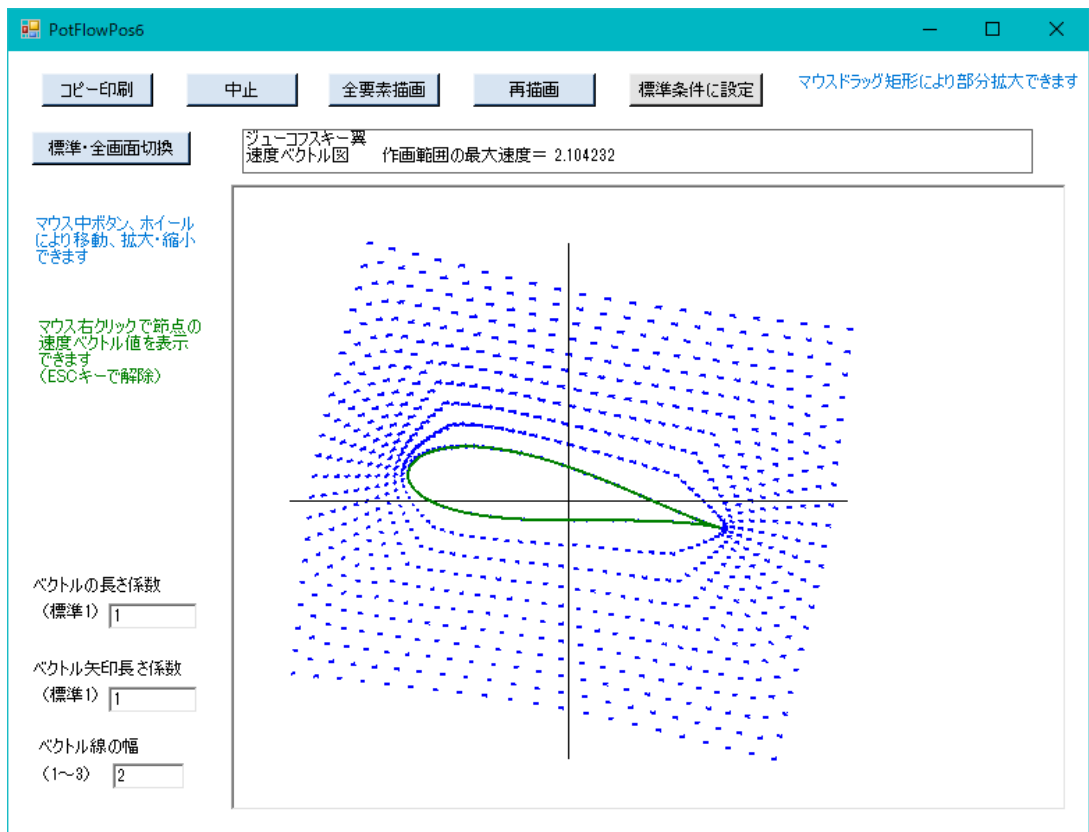


図7-4 物理空間の速度ベクトル図の作画画面

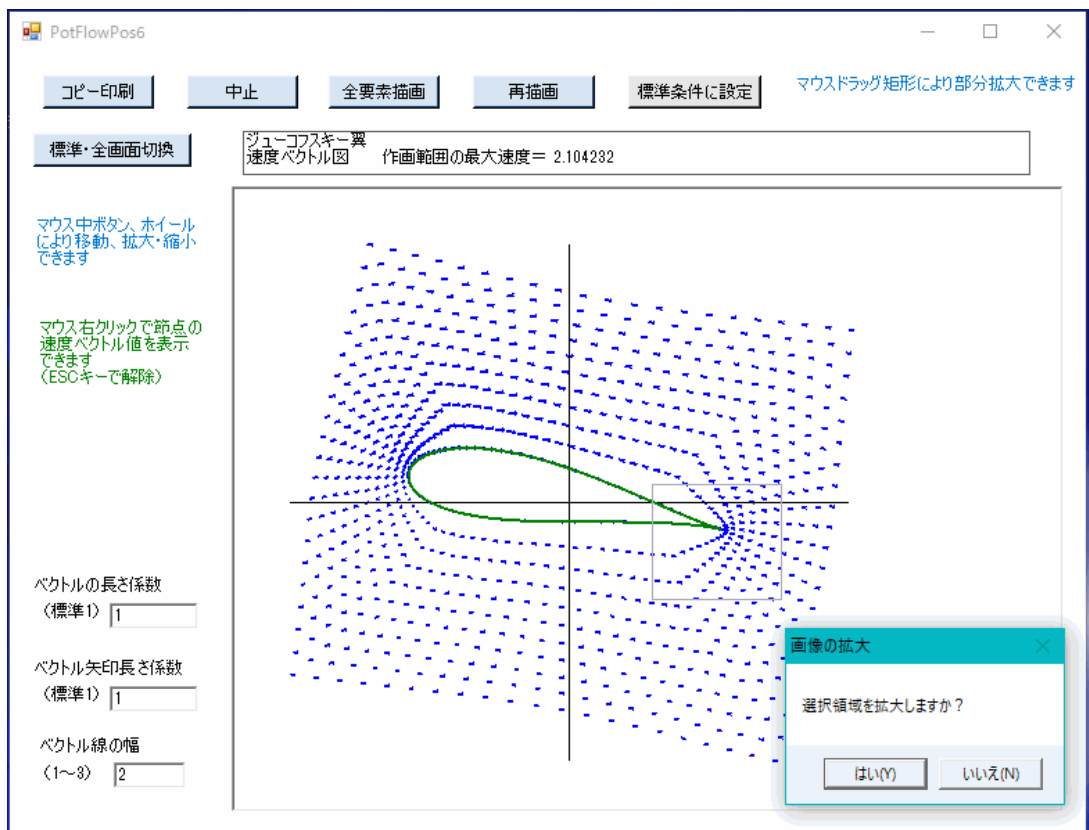


図7-5 物理空間の速度ベクトル図で拡大領域選択例

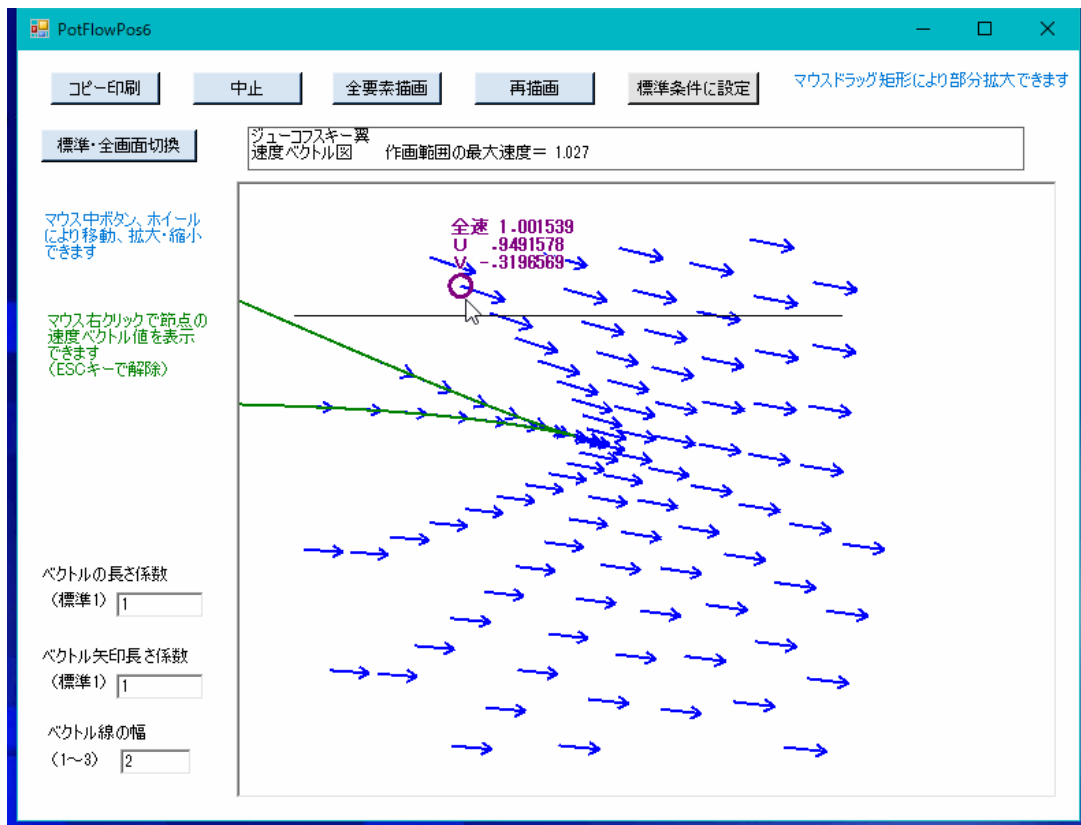


図7-6 速度ベクトル図の部分拡大例（マウス右クリックの節点の速度表示有り）

7.4 等高線の指定画面

図7-7に等高線指定画面を示します。

①本画面で、作画したい変数項目を選択します。

◇全速は速度の絶対値を意味します。

◇「最大値データ」のボタンをクリックすると、最大値データが表示されます。

図7-8に最大値データの表示例を示します。

②本画面で、「設定」ボタンをクリックすると、次の仕様設定画面に移ります。



図7-7 等高線指定画面

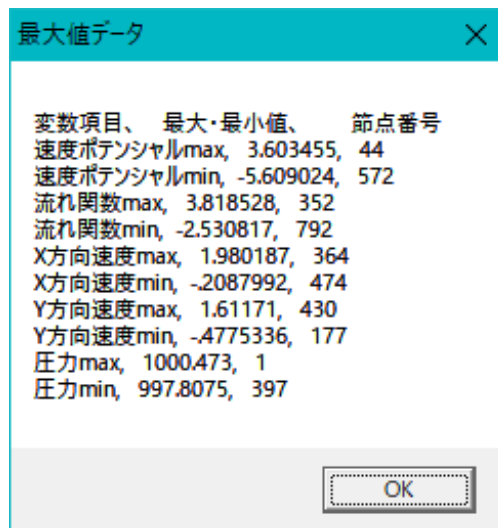


図7-8 最大値データの表示例

7.5 等高線図の仕様設定画面

図7-9に等高線図の仕様設定画面を示します。

- ①まず、等高線の表示変数について、等高線の表示MIN、MAX、分割数を入力します。
 その際、入力の便のため、解析結果データの最小値と最大値を画面表示しています。
 ◇分割数を21以上にすると、自動的にグラデーションとなります。グラデーションはカラー256階調で作画されます。なお、グラデーションの作画は処理時間が1桁増加しますので注意してください。
- ②また、チェックボックスで「カラーフィル」、「場所・数値表示」を指定できます。
 ただし、スライダーショーの場合は「場所・数値表示」がありません。
 ◇初期設定では両者とも指定されています。
 ◇「カラーフィル」を指定すると、各等高線の間が色塗りされ、全面カラー図となります。なお、グラデーションの場合は無条件でカラーフィルになります。
 ◇「場所・数値表示」を指定すると、対象変数の最大の場所と数値が等高線図に表示されます。
- ③本画面で、「設定」ボタンをクリックすると、次の等高線図作画画面に移ります。

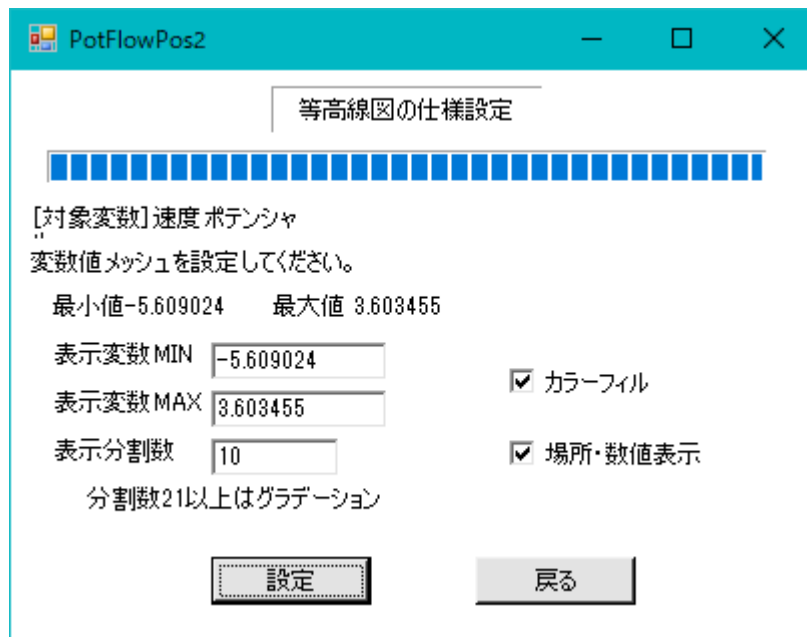


図7-9 等高線の仕様設定画面

7.6 等高線の作画画面

図7-10～7-13に物理空間の等高線の作画画面を示します。図7-10は要素辺表示有りの速度ポテンシャル等高線図、以降は要素辺表示なしで、図7-11は流れ関数の等高線図、図7-12は全速の等高線図、図7-13は圧力の等高線図です。また、図7-14は圧力のグラデーション等高線図です。

- ①それらの図面のように、等高線がカラー表示され、右欄には各等高線における変数値も明示してあります。

◇図7-14のグラデーションの場合は、4等分の5つの変数値が示されます。

- ②本画面の左側の「要素辺の表示」は、「なし」か「有り」を選択できます。選択した後に「再描画」ボタンをクリックします。
- ③マウス右クリックで任意の節点を選択すると、図7-13のように同節点の変数値が表示されます。

◇ESCキーを押すと節点選択が解除されます。

- ④「標準・全画面切換」ボタンをクリックすると、標準画面と全画面を切り換えることができます。また、画面Formの右下コーナー等をマウスドラッグすることにより、標準画面と全画面の間で自由に拡大・縮小できます。
- ⑤マウス中ボタン、ホイールにより移動、拡大・縮小を行なうことができます。中ボタンを押したまま動かせば図形を移動できます。また、ホイールの回転により拡大・縮小ができます。
- ⑥マウスドラッグ矩形により、速度ベクトル図の一部分を拡大できます。操作方法は5.5節の構造図と同じです。
- ⑦本画面で「コピー印刷」ボタンをクリックすると、プリンターで画面コピーを印刷できます。

◇「通常画面」の作画が印刷されます。

- ⑧本画面を終了するには、「戻る」ボタンをクリックして、仕様設定画面に戻ります。
また、もし等高線図の出来栄えに不満があれば、「戻る」ボタンで仕様設定画面に戻って仕様変更し、再度、等高線図を作画することができます。

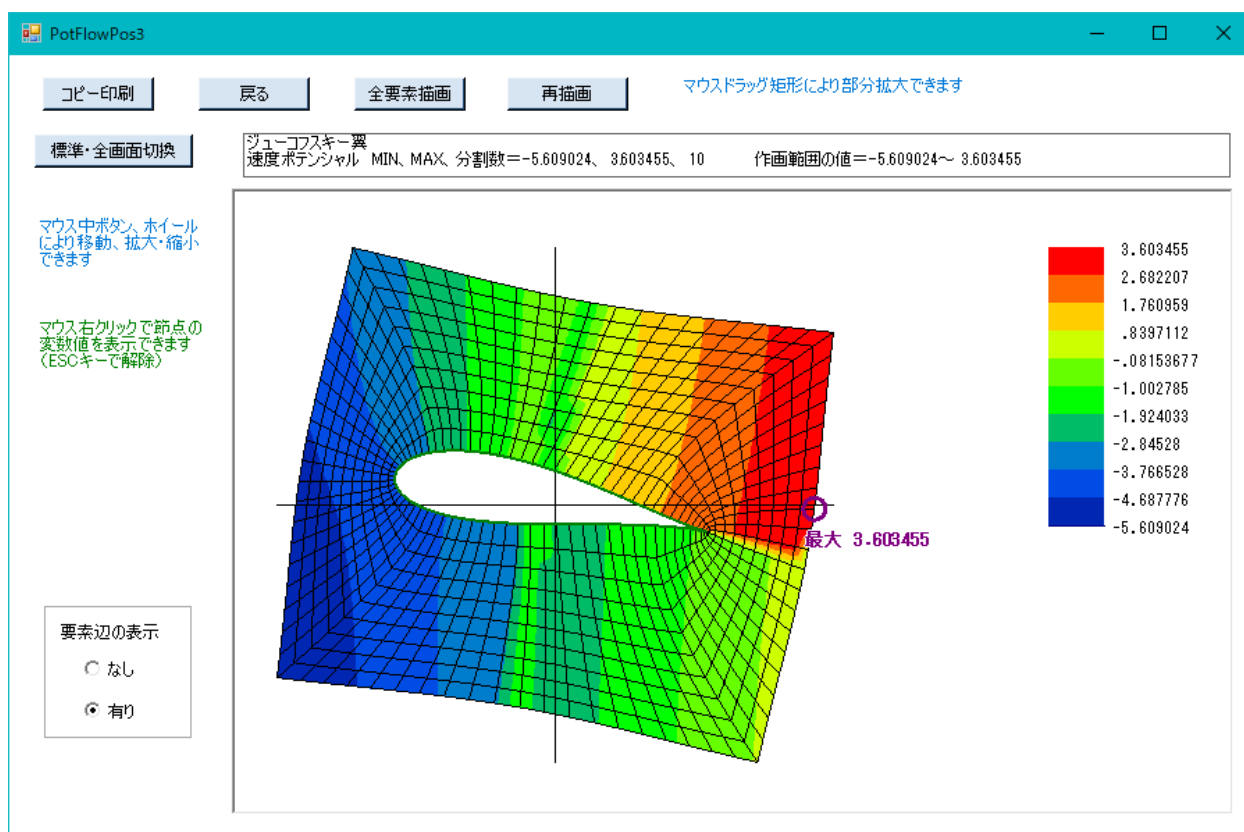


図7-10 速度ポテンシャル等高線図（要素辺表示有り）

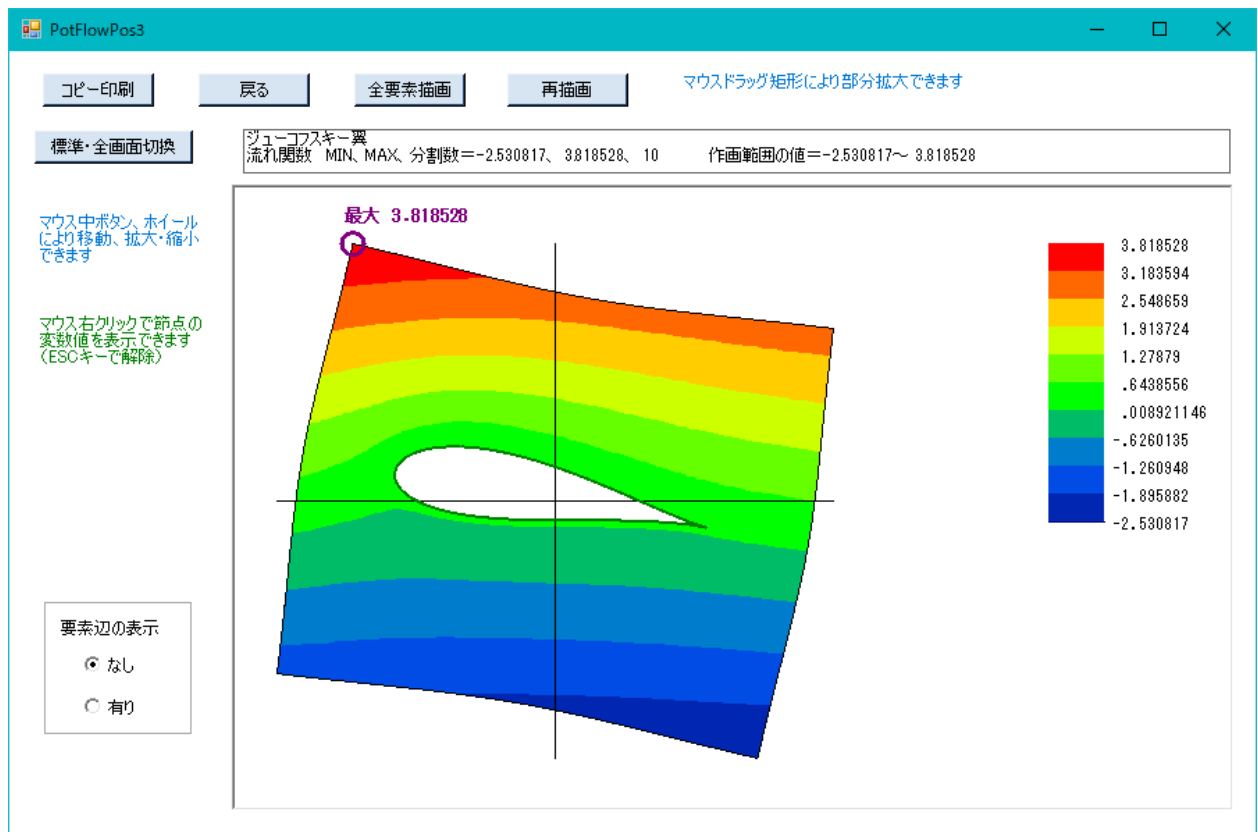


図7-11 流れ関数の等高線図

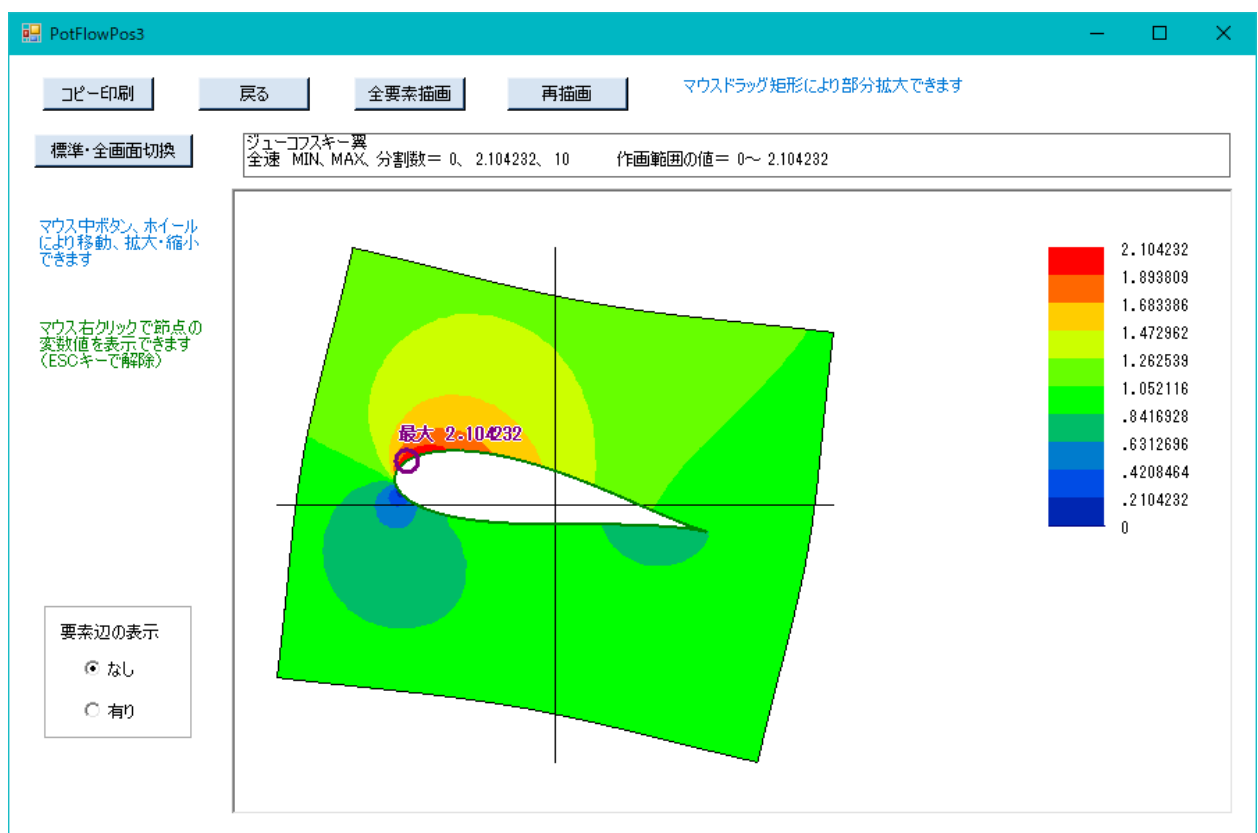


図7-12 全速の等高線図

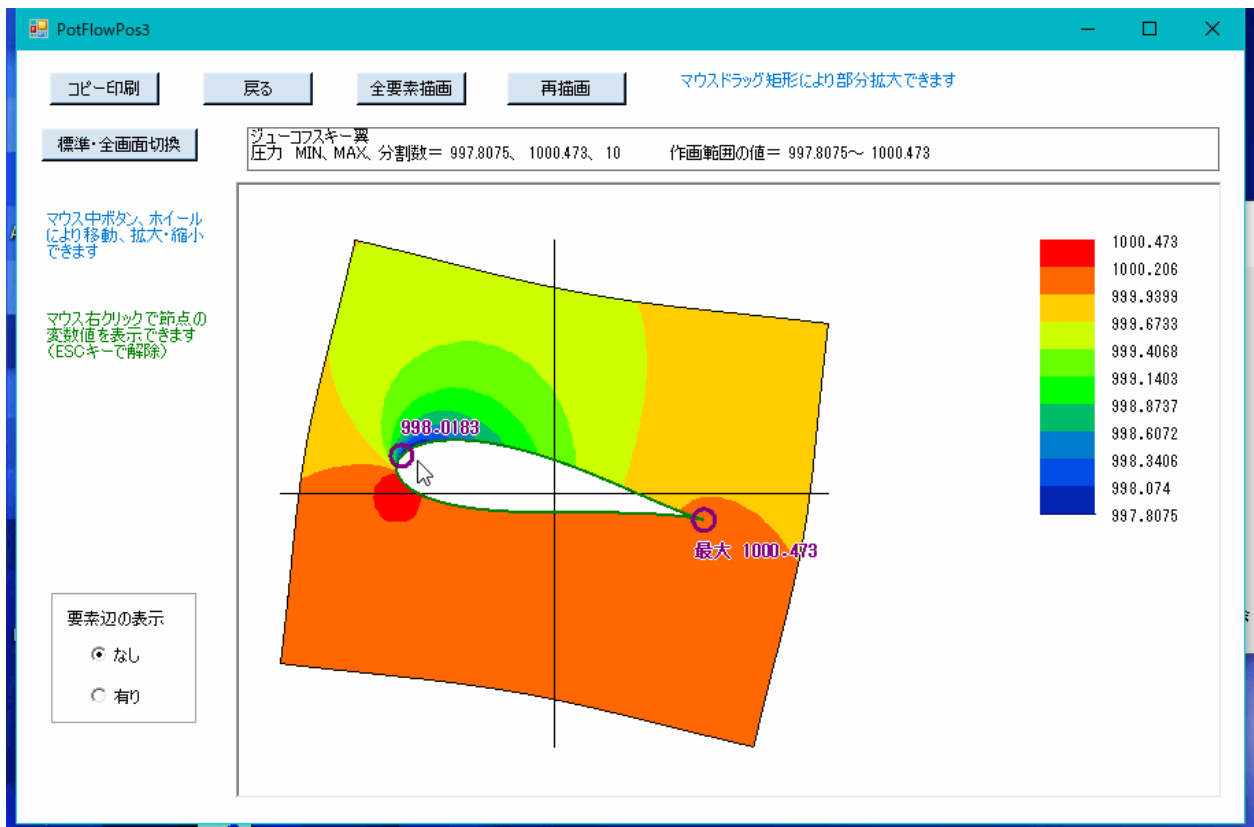


図7-13 圧力の等高線図（マウス右クリックの節点の変数値表示有り）

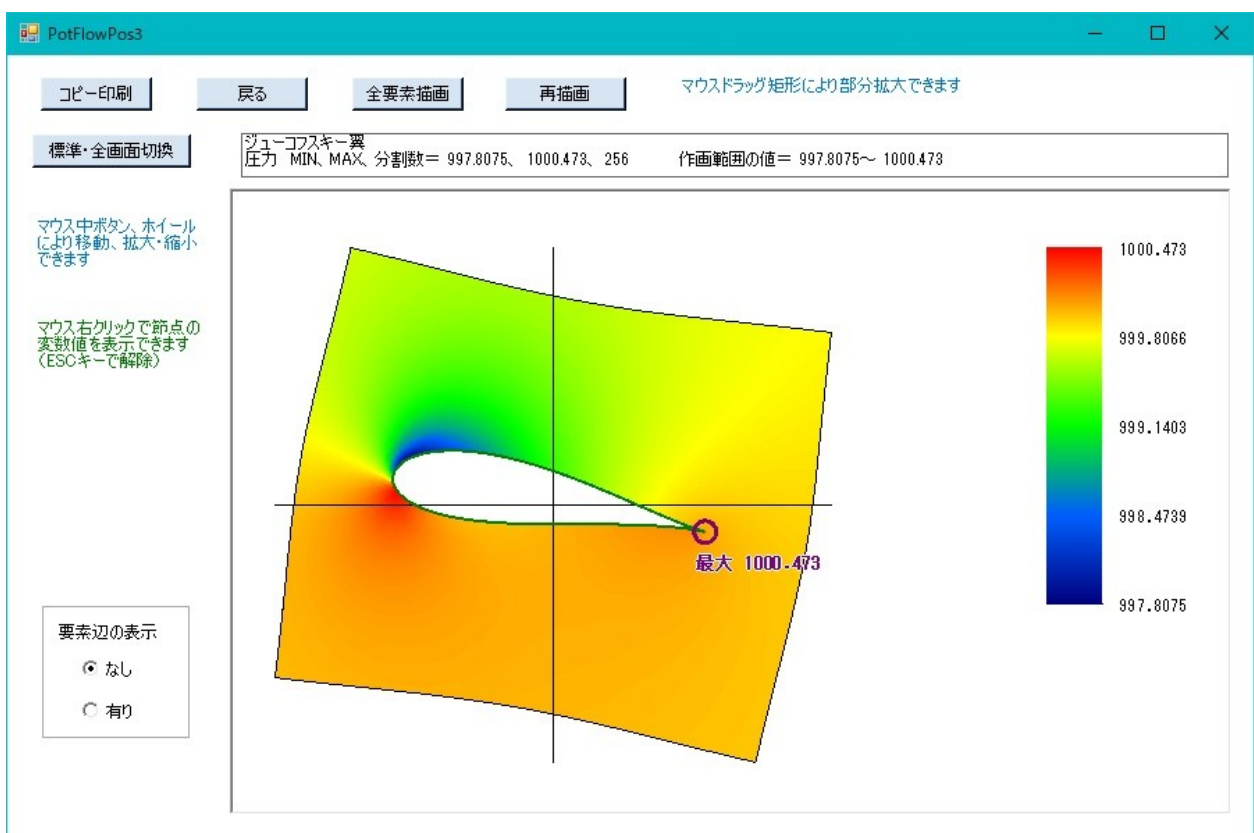


図7-14 圧力のグラデーション等高線図

7.7 解析結果の主要値表示

図7-15に主要値表示の画面を示します。主要値データをクリップボードにコピーするかどうかは、「はい」または「いいえ」をクリックします。その後は立ち上げ時のメニュー画面に戻ります。

◇クリップボードにコピーされたデータは、他のソフトで貼り付け利用できます。

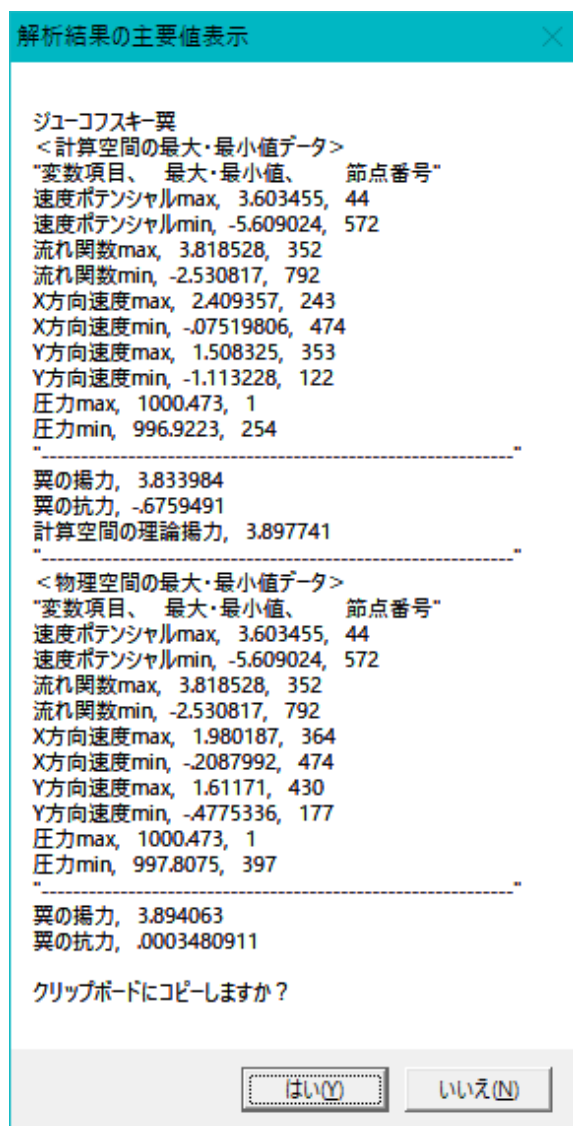


図7-15 解析結果の主要値表示の画面

7.8 翼データの出力

コモンダイアログでファイルを保存する画面となり、翼データファイルを設定すると、データが書き出されます。デフォルトのファイル名は、解析データファイルのベース名（拡張子を削除した部分）の後に「J」が付加されたもので、拡張子は同じく「.dat」となります。

図7-16に翼データファイルの出力例を示します。

```

“プログラム名”, “JoukoWingData”
“ジューコフスキー翼”
“節点数”, 80
“節点データ (節点番号、X座標、Y座標) ”
1,      1. 969615,    -. 3472964
2,      1. 961092,    -. 3449072
3,      1. 935923,    -. 3373094
4,      1. 894879,    -. 3239866
5,      1. 838913,    -. 3046132
6,      1. 769117,    -. 2790647
7,      1. 686677,    -. 2474177
8,      1. 592824,    -. 2099379
9,      1. 488803,    -. 1670606
10,     1. 375842,    -. 1193647
. . . . .
. . . . .
71,     1. 157861,    -. 2605484
72,     1. 300219,    -. 2672563
73,     1. 432474,    -. 2757154
74,     1. 553039,    -. 2857074
75,     1. 660428,    -. 296835
76,     1. 753306,    -. 3085302
77,     1. 830544,    -. 3200752
78,     1. 891255,    -. 3306364
79,     1. 934829,    -. 339307
80,     1. 960953,    -. 3451591
“翼弦長”, 4. 110954

```

図7-16 翼データファイルの出力例

7.9 翼形状の作画

図7-17に翼形状の作画画面例を示します。画面での操作等は4.5節の仕様図と同様です。

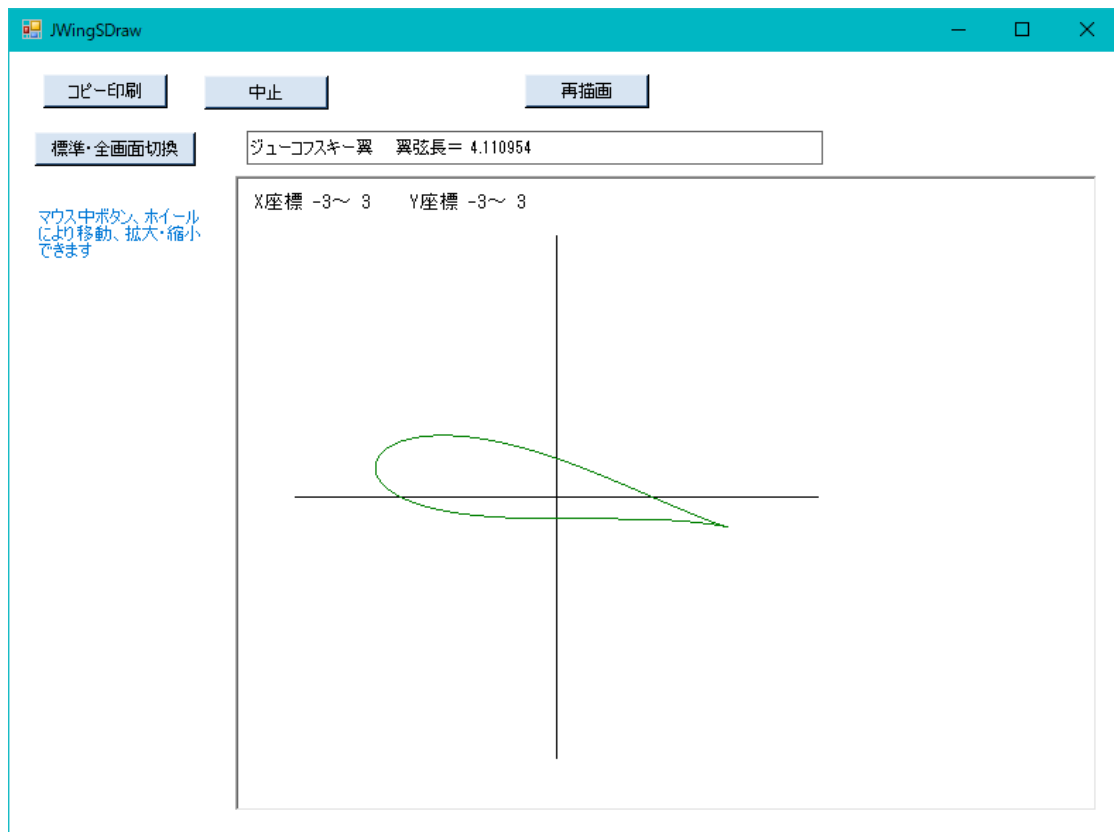


図7-17 翼形状の作画画面例

[参考文献]

<A> BASIC言語

- A1) 「Microsoft Visual Basic プログラミング ガイド」、
マイクロソフト (株)、1997
- A2) 「実力アップ Visual Basic.NET 基礎編」、川口 輝久、
(株) 技術評論社、2003
- A3) 「Visual Basic 応用プログラミング」、林 晴比古、
ソフトバンク (株)、1997
- A4) 「プログラミング Visual Basic.Net Vol.2 活用編」、Francesco Balena、
(株) ドキュメントシステム 訳、日経BPソフトプレス、2002
- A5) 「Visual Basic 2005 [実践]プログラミングテクニック」、谷尻 かおり、
技術評論社、2007

 数値計算・グラフィックス

- B1) 「数学公式・数表ハンドブック」、スピゲル 著、氏家 勝巳 訳、
マグローヒル ブック (株)、1984
- B2) 「Visual Basicによる工学計算プログラム」、黒田 英夫、
CQ出版社、2001
- B3) 「Visual Basicによる数値解析プログラム」、黒田 英夫、
CQ出版社、2002
- B4) 「コンピュータグラフィックス講義」、青木 由直、
コロナ社、2000
- B5) 「線形計算」、名取 亮、
朝倉書店、1993

<C> 有限要素法・差分法・工学一般

- C1) 「マトリックス有限要素法」、O.C.Zienkiewicz 他、吉識 雅夫 監訳、
(株) 培風館、1970
- C2) 「有限要素プログラミング」、E.Hinton 他、川井 忠彦 監訳、
丸善 (株)、1981
- C3) 「マイコンによる有限要素解析」、戸川 隼人、
(株) 培風館、1982
- C4) 「流れと熱伝導の有限要素法入門」、矢川 元基、
(株) 培風館、1983
- C5) 「有限要素法による熱応力・クリープ・熱伝導解析」、矢川 元基 他、
(株) サイエンス社、1987
- C6) 機械工学便覧A5「流体力学」、日本機械学会編、
日本機械学会、1986
- C7) 「続・有限要素法による流れのシミュレーション」、
日本計算工学会流れの有限要素法研究員会編、シュプリンガー・ジャパン、2008
- C8) 「流体力学 非圧縮性流体の流れ学」、中山 司、
森北出版 (株)、2015
- C9) BLUE BACKS「高校数学でわかる流体力学」、竹内 淳、
講談社、2014