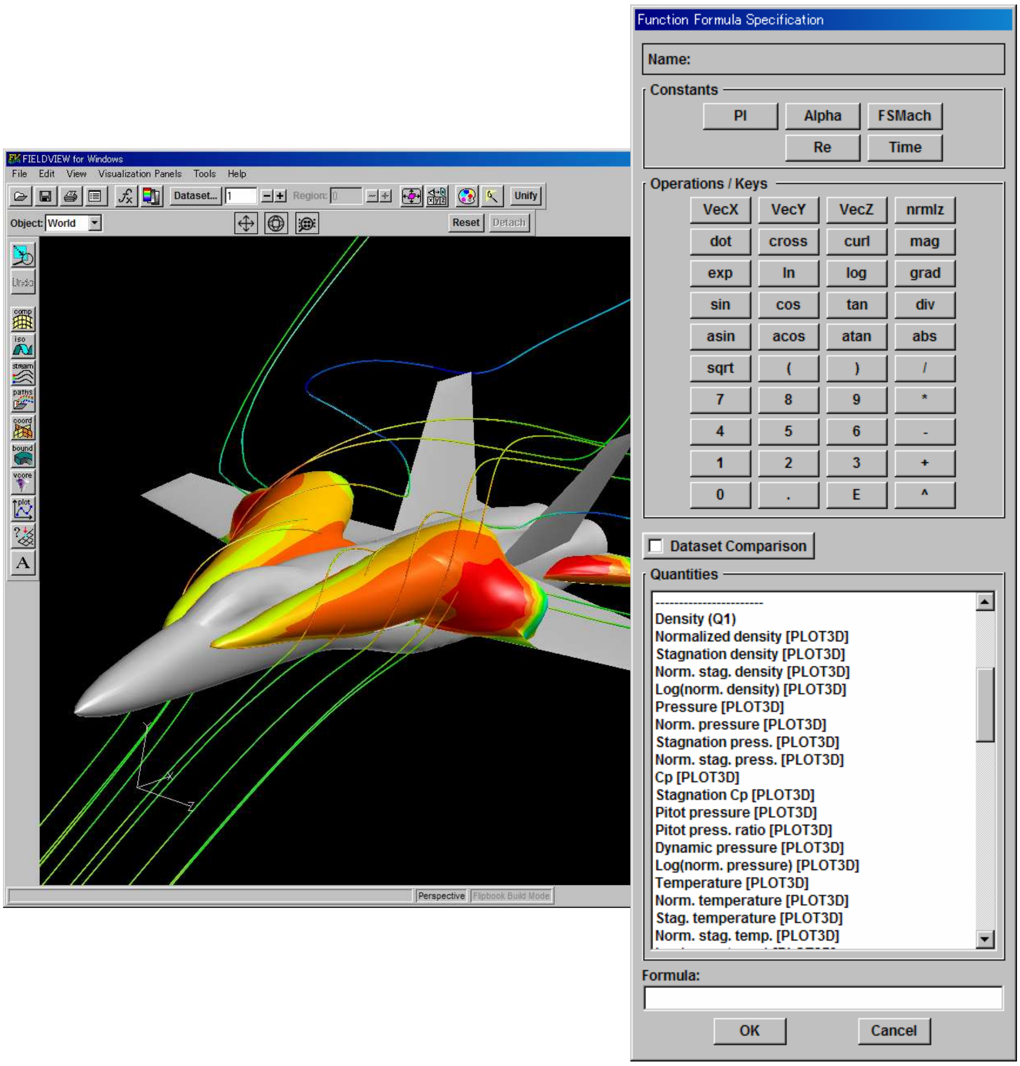
FIELDVIEW

関数自動計算機能



2010 年 12 月版

株式会社　ヴァイナス
技術１部

VINAS
Visual Integration & Numerical Analysis Systems

はじめに

FIELDVIEW では、約 70 種の関数を自動計算する機能が搭載されています。基本的には構造格子 Plot3D フォーマットの Q ファイルをもとに算出されますが、FIELDVIEW-Unstructured フォーマットの非構造格子にも適用することが可能です。

1. 自動計算関数 一覧

下表の Q1～Q5 までの関数を定義することで、以下のような関数が自動計算されます。

※Plot3D フォーマットの Q ファイルを読み込めない場合は、FIELDVIEW のユーザ定義関数パネルを用いて Q1～Q5 までの関数を作成します。

表 1　スカラー関数

関数番号	関数名	英語表記	日本語表記
100	Density(Q1)	Density	密度
101	Normalized density	Normalized density	正規化密度
102	Stagnation density	Stagnation density	よどみ点密度
103	Norm.stag.density	Normalized stagnation density	正規化よどみ点密度
104	Log(norm.density)	Log(normalized density)	対数（正規化密度）
110	Pressure	Pressure	圧力
111	Norm. pressure	Normalized pressure	正規化圧力
112	Stagnation press.	Stagnation pressure	よどみ点圧力
113	Norm. stag. press.	Normalized stagnation pressure	正規化よどみ点圧力
114	Cp	Pressure Coefficient	圧力係数
115	Stagnation Cp	Stagnation Pressure Coefficient	よどみ点圧力
116	Pitot pressure	Pitot pressure	ピトー圧
117	Pitot press. ratio	Pitot pressure ratio	ピトー圧比
118	Dynamic pressure	Dynamic pressure	動圧
119	Log(norm. pressure)	Log(normalized pressure)	対数（正規化圧力）
120	Temperature	Temperature	温度
121	Norm. temperature	Normalized temperature	正規化温度
122	Stag. temperature	Stagnation temperature	よどみ点温度
123	Norm. stag. temp	Normalized stagnation temperature	正規化よどみ点温度
124	Log(norm. temp.)	Log (normalized temperature)	対数（正規化温度）
130	Enthalpy	Enthalpy	エンタルピー
131	Norm. enthalpy	Normalized enthalpy	正規化エンタルピー
132	Stag. enthalpy	Stagnation enthalpy	よどみ点エンタルピー
133	Norm.stag.enthalpy	Normalized stagnation enthalpy	正規化よどみ点エンタルピー
140	(Internal)energy	(Internal)energy	内部エネルギー
141	Norm. int. energy	Normalized internal energy	正規化内部エネルギー
142	Stagnation energy	Stagnation energy	よどみ点エネルギー
143	Norm. stag. energy	Normalized stagnation energy	正規化よどみ点エネルギー
144	Kinetic energy	Kinetic energy	運動エネルギー
145	Norm. kin. energy	Normalized kinetic energy	正規化運動エネルギー
150	u-velocity	Velosity (x-direction)	速度ベクトルの x 成分
151	v-velocity	Velosity (y-direction)	速度ベクトルの y 成分
152	w-velocity	Velosity (z-direction)	速度ベクトルの z 成分
153	Velocity Magnitude	Velocity Magnitude	速度ベクトルの大きさ

154	Mach number	Mach number	マッハ数
155	Speed of sound	Speed of sound	音速
156	Cross flow velocity	Cross flow velocity	横断流速度の絶対値
157	Div. of velocity	Divergence of velocity	速度の発散
160	x-Momentum(Q2)	x-Momentum	運動量ベクトルの x 成分
161	y-Momentum(Q3)	y-Momentum	運動量ベクトルの y 成分
162	z-Momentum(Q4)	z-Momentum	運動量ベクトルの z 成分
163	Stag. energy per unit volume (Q5)	Stagnation energy per unit volume (Q5)	単位体積当たりのよどみ点エネルギー
170	Entropy	Entropy	エントロピー
171	Entropy measure s1	Entropy measure s1	エントロピーの基準値 s1
180	Vortisity (x-dir)	Vortisity (x-direction)	渦度ベクトルの x 成分
181	Vortisity (y-dir)	Vortisity (y-direction)	渦度ベクトルの y 成分
182	Vorticity (z-dir)	Vortisity (z-direction)	渦度ベクトルの z 成分
183	Vorticity Magnitude	Vorticity Magnitude	渦度の大きさ
184	Swirl	Swirl	スワール
185	Vel.×Vort. mag.	Velocity×Vorticity magnitude	速度×渦度の大きさ
186	Helicity density	Helicity density	ヘリシティ
187	Relative helicity	Relative helicity	相対ヘリシティ
188	Filter.rel.helicity	Filtered relative helicity	フィルタリングされた相対ヘリシティ
190	Shock function	Shock function	衝撃波関数
191	Filter. shock func.	Filtered shock function	フィルタリングされた衝撃波関数
192	Press gradient mag.	Pressure gradient magnitude	圧力勾配の大きさ
193	Dens.gradient mag.	Density gradient magnitude	密度勾配の大きさ

表 2　ベクトル関数

関数番号	関数名	英語表記	日本語表記
200	Velocity Vectors	Velocity Vectors	速度ベクトル
201	Vorticity Vectors	Vorticity Vectors	渦度ベクトル
202	Momentum Vectors	Momentum Vectors	運動量ベクトル
203	Pert. vel. Vectors	Perturbation velocity Vectors	攪乱速度ベクトル
204	Vel.×Vort. Vectors	Velosity×Vorticity Vectors	速度×渦度　ベクトル
210	Press.grad. Vectors	Pressure gradient Vectors	圧力勾配ベクトル
211	Dens. grad. Vectors	Density gradient Vectors	密度勾配ベクトル

2.　関数の計算式と解説

本章では主な関数の計算式について解説します。この章で用いられる記号は「表 3 記号一覧」をご覧ください。

表 3　記号一覧

記号	単位	説明	記号	単位	説明
γ		比熱比	M		マッハ数
c_p	J/kgK	定圧比熱	C_p		圧力係数
c_v	J/kgK	定積比熱	p_p	Pa	ピトー圧
R	J/kgK	気体定数	T	K	温度
$( )_\infty$		一様流	v	m^3/kg	比体積
$( )_0$		よどみ点	h	J/kg	エンタルピー
ρ	kg/m^3	密度	e_i	J/kg	内部エネルギー
c	m/s	音速	e_0	J/kg	よどみ点エネルギー
p	Pa	圧力	e_k	J/kg	運動エネルギー
V	m/s	速度	s	J/kgK	エントロピー

1.　正規化

気体の定圧比熱と定積比熱との比を比熱比 γ といいます。

$$\gamma=\frac{c_p}{c_v}$$

c_p：定圧比熱、c_v：定積比熱

気体は空気としているので、比熱比は空気の値です。

$\gamma = 1.4$　　（比熱比）

気体を空気と仮定していますが、気体状数は１とします。

$R = 1$　　：気体定数

関数の計算において次に示す状態量を仮定しています。

$\rho_\infty = 1$　　：一様流密度

$c_\infty = 1$　　：一様流音速

$p_\infty = \dfrac{1}{\gamma}$　　：一様流圧力

$|V|_\infty = M_\infty c_\infty$　　：一様流速度の絶対値

図１に示すように物体から十分離れた物体の影響が無視できる流れを一様流、物体表面で、流線が途切れて速度がゼロになる点をよどみ点と呼びます。

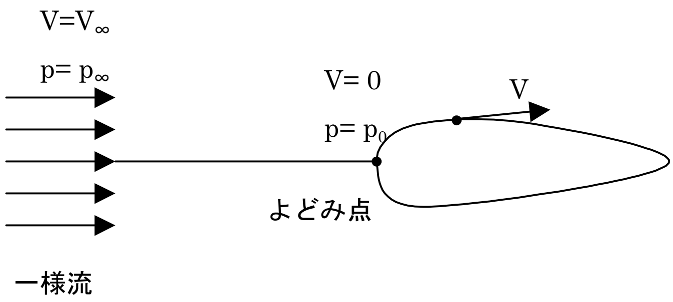


図１　一様流とよどみ点

2.　関数の定義

密度（Density）

FIELDVIEW では密度を Q1 と表記します。

$$\rho = Q1$$

$$\rho_\infty = 1$$

$$\rho_0 = \rho\left[1+\frac{\gamma-1}{2}M^2\right]^{\frac{1}{\gamma-1}}$$ ：よどみ点密度

γ ：比熱比、M：マッハ数

圧力（Pressure）

$$p = (\gamma-1)\rho\left[e_0-\frac{1}{2}V^2\right]$$ ：圧力

e_0：よどみ点エネルギー

$$p_\infty = \frac{1}{\gamma}$$ ：一様流圧力

$$p_0 = p\left[1+\frac{\gamma-1}{2}M^2\right]^{\frac{\gamma}{\gamma-1}}$$ ：よどみ点圧力

一般に空気力学では、物体表面の圧力分布を表わすために相対圧力を一様流れの動圧で割って無次元化された圧力定数が用いられます。

$$C_p = \frac{p-p_\infty}{\frac{1}{2}\rho V_\infty^2}$$ ：圧力定数

$$C_{p0} = \frac{p_0-p_{0\infty}}{\frac{1}{2}\rho_\infty V_\infty^2}$$ ：よどみ点圧力定数

マッハ数が１より小さい場合ピトー圧は、よどみ点圧力と等しくなります。マッハ数が１より大きい

場合は、図２に示した衝撃波下流の全圧に等しくなります。

$$M < 1, \quad p_p = p_0$$
$$M > 1, \quad p_p = p_{0y}$$
：ピトー圧

pitot-pressure ratio $= \dfrac{p_p}{p_\infty}$　　：ピトー圧比

参考）レイリーのピトー管公式

$$\frac{p_{0y}}{p_x} = \frac{p_{oy}}{p_{0x}}\frac{p_{0x}}{p_x} = \frac{\left(\dfrac{\gamma+1}{2}M_x{}^2\right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}}}{\left(\dfrac{2\gamma}{\gamma+1}M_x{}^2 - \dfrac{\gamma-1}{\gamma+1}\right)^{\frac{1}{\gamma-1}}}$$

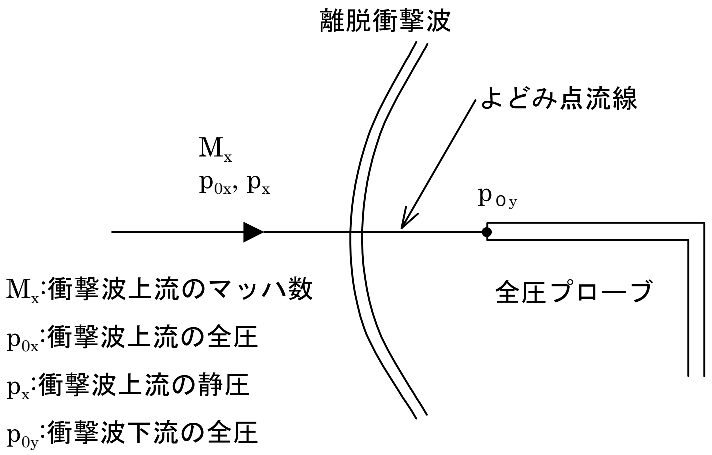


図２　ピトー圧

動圧（Dynamic pressure）

ベルヌーイの定理より、一本の流線に沿って次の式が成り立ちます。

$$p + \frac{1}{2}\rho V^2 + \rho g h = const$$

g：重力加速度、h：水平な基準面から測った高さ

上式の左辺第２項は、流体が運動しているために生じる圧力なので、動圧と呼びます。

$q = \dfrac{1}{2}\rho V^2$ ＝ 単位体積当たりの運動エネルギー

温度（Temperature）

温度は完全気体を仮定して次の式で表わします。

$T = \dfrac{p}{\rho R}$　　：温度

$$\frac{T}{T_\infty}=\frac{\dfrac{p}{p_\infty}}{\dfrac{\rho}{\rho_\infty}}$$ ：正規化温度

$$T_0=T\left(1+\frac{\gamma-1}{2}M^2\right)$$ ：よどみ点温度

次の完全気体の状態方程式（ボイル･シャールの法則）に厳密に従う気体を仮想して完全気体といいます。

$$pv=\frac{p}{\rho}=RT$$

式中のｖは、比体積で単位質量の気体の占める体積を表わします。従って、$v=\dfrac{1}{\rho}$ の関係が成り立ちます。

エンタルピー（Enthalpy）

気体の状態を表わす量の一つで、気体の持つ熱量を意味します。

$$h=e_i+pv=e_i+\frac{p}{\rho}$$

完全気体を仮定していますので、エンタルピーは次のような式で計算されます。

$$h=\gamma\left(e_0-\frac{1}{2}V^2\right)$$
$$=\gamma e_i$$ ：局所エンタルピー
$$=\frac{\gamma}{\gamma-1}\left(\frac{p}{\rho}\right)$$

$$h_\infty=\gamma e_{i\infty}$$
$$=\frac{\gamma}{\gamma-1}\left(\frac{p_\infty}{\rho_\infty}\right)$$ ：一様流エンタルピー

$$h_0=h+\frac{1}{2}V^2$$
$$=\gamma e_0-\frac{\gamma-1}{2}V^2$$ ：よどみ点エンタルピー
$$=e_0+\frac{p}{\rho}$$

エネルギー（Energy）

気体分子は、熱運動をしているので運動エネルギーを持ち、分子間力により蓄えられたポテンシャル･エネルギーを持っています。これらのエネルギーの全分子についての総和が内部エネルギーとなります。

$$e_i = e_0 - \frac{1}{2}V^2 = \frac{1}{\gamma - 1}\left(\frac{p}{\rho}\right)$$

：内部エネルギー

$$e_{i\infty} = \frac{1}{\gamma - 1}\left(\frac{p_\infty}{\rho_\infty}\right)$$

：正規化内部エネルギー

$$e_0 = \frac{Q5}{\rho}$$

：よどみ点エネルギー

$$e_{0\infty} = \frac{1}{\gamma - 1}\left(\frac{p_\infty}{\rho_\infty}\right) + \frac{1}{2}V_\infty^{\ 2}$$

：正規化よどみ点エネルギー

$$e_k = \frac{1}{2}V^2 = \frac{q}{\rho}$$

：運動エネルギー

マッハ数（Mach number）

高速空気力学では、圧縮性の影響は、マッハ数 M に依存するので、これを基準として次のように速度を分類します。

M>0.8　亜音速

0.8<M<1.2　遷音速

1.2<M　　超音速

マッハ数が１より非常に小さい場合は、空気を非圧縮性流体として取り扱うことが出来ます。

マッハ数が５より大きい場合は、特に極超音速と呼びます。

$$M = \frac{V}{c}$$

V：速度、c：音速

$$c = \sqrt{\gamma \frac{p}{\rho}}$$

横断流速度の大きさ（Closs flow velocity）

速度ベクトルの z 平面への射影成分で、次の式で計算されます。

$$Closs\ \ flow\ velocity = \sqrt{v^2 + w^2}$$

エントロピー（Entropy）

気体の状態を表わす量の一つで、気体の内部エネルギーの変化をその変化が生じている温度で割った値で定義します。または、運動している気体が一定温度 T で保たれるのに必要な熱を dQ としたときに次式で定義される量です。

$$dS = \frac{dQ}{T}$$

dQ：周囲から系へ向かう熱

T：系の温度

エントロピーは次の式で、計算されます。

$$s = c_v \ln\left\{ \frac{\dfrac{p}{p_\infty}}{\left(\dfrac{\rho}{\rho_\infty}\right)^{\gamma}} \right\}$$

スワール（Swirl）

流体の回転を示す量の一つで次の式で表わされます。

$$swirl = \frac{\omega \cdot V}{\rho V^2}$$

ヘリシティ（Helicity）

流体の回転を示す量の一つで、次の式で計算されます。

$$Helicity\ density = V \cdot \varpi$$

このスカラー量の符号の変化により主渦と 2 次渦を区別することができます。また渦の回転方向も評価することができます。

相対ヘリシティ（Relative helicity）

主流に対して垂直な空間断面において、相対ヘリシティが最大（１に近い値）となる点が渦中心となります。各空間断面の相対ヘリシティの最大値をとる点を繋ぐと渦中心軸となります。

$$Relative\ helicity = \frac{V \cdot \omega}{|V||\omega|}$$

フィルタリングされた相対ヘリシティ

$|V \cdot \omega| \geqq filter$　ならば　$Filtered\ relative\ helicity = \cos\varphi$

$|V \cdot \omega| < filter$　ならば　$Filtered\ relative\ helicity = 0$

$$filter = 0.1V_{\inf}^2$$

渦度（Vorticity）

微小領域中の流体の自転を表わす量です。

$$vorticity = (\omega_1, \omega_2, \omega_3) = \nabla \times V$$

V = (u,v,w)：速度

$$\omega_1 = \xi_y w_\xi + \eta_y w_\eta + \zeta_y w_\zeta - \left(\xi_z v_\xi + \eta_z v_\eta + \zeta_z v_\zeta\right)$$

$$= \frac{\partial w}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial z}$$ ：渦度の x 成分

$$\omega_2 = \xi_z u_\xi + \eta_z u_\eta + \zeta_z u_\zeta - \left(\xi_x w_\xi + \eta_x w_\eta + \zeta_x w_\zeta\right)$$

$$= \frac{\partial u}{\partial z} - \frac{\partial w}{\partial x}$$ ：渦度の y 成分

$$\omega_3 = \xi_x v_\xi + \eta_x v_\eta + \zeta_x v_\zeta - \left(\xi_y u_\xi + \eta_y u_\eta + \zeta_y u_\zeta\right)$$

$$= \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y}$$ ：渦度の z 成分

擾乱速度（Perturbation-velocity）

静止した空気中を物体運動したとき物体周りの空気の乱れを擾乱と呼びますが、物体周りの速度 V の一様流れの速度 V_∞に対する相対速度を擾乱速度とします。

$$V' = V - V_\infty$$

衝撃波関数（shock function）

衝撃波関数は次のような式で計算されます。この関数値が１となる位置に、衝撃波が発生していると評価することができます。

$$Shock\ \ function = \frac{V}{c} \cdot \frac{grad(p)}{|grad(p)|}$$

V：速度ベクトル, c：音速

フィルタリングされた衝撃波関数（Filtered shock function）

衝撃波関数を次式で示すフィルターを通した値です。

|grad(p)|<0.1 ならば *Shock function* = 0

0.1<|grad(p)| ならば $Shock\ \ function = \frac{V}{c} \cdot \frac{grad(p)}{|grad(p)|}$

衝撃波上流において|grad(p)|の値が０に近い値をとることで衝撃波関数が不自然な振動を生じるときがあります。この振動を表示せずに衝撃波関数を評価するときにこの関数を用います。

参考文献

生井武文，松尾一泰　共著，「機械工学基礎講座：圧縮性流体の力学」理工学社(1980)

Yuval Levy, David Degani and Arnan Seginer, “Graphical Visualization of Vortical Flows by Means of Helicity,” AIAA JOUNAL, Vol. 28, NO. 8, Aug. 1990, pp. 1347-1352.