

高速流解析ソフトウェア Advance/FrontFlow/FOCUSと 流体－構造の連成解析機能の紹介

中森 一郎* 原田 昌紀* 塩谷 仁*

Overview of Advance/FrontFlow/FOCUS and Coupled Simulation of Fluid/Structure

Ichiro Nakamori*, Masanori Harada*, Hitoshi Shiotani*

高速流解析ソフトウェア Advance/FrontFlow/FOCUS はアドバンスソフト株式会社が開発した圧縮性流体専用の解析ソフトウェアである。われわれは Advance/FrontFlow/FOCUS を用いた解析を数多く手がけてきた。本項では、われわれの経験に基づき Advance/FrontFlow/FOCUS の解説を行う。

1. はじめに

火炎を伴う流れでは、化学反応に伴う発熱により温度場のみならず圧力場や密度場が大きく影響を受ける。燃焼反応を扱う手法としては、流れの支配方程式と素反応式を厳密に扱う詳細反応モデルがあり、これは当社の Advance/FrontFlow/red に実装がされている。この手法は、高い精度を有する予測情報を提供する可能性があるものの、火炎面近傍においてその内部構造を解像できるほどの計算格子を必要とする。このため、一般的に計算時間が膨大になる。

一方、火炎面の内部を詳細には解かず、これを不連続面とみなして定式化する手法も古くから研究がなされている。この扱いでは、火炎面の前後での発熱量や火炎面の伝播速度をどのようにモデル化するかによってシミュレーションの予測精度が左右される。メリットとしては、デフラグレーション前後の関係式から適切に発熱量と伝播速度が与えられると、火炎を含む流れ場を比較的短時間で得ることができるという特長を有する。

火炎面モデルでは、これを不連続面として扱うために、安定でかつ解像度の高い数値計算法を併用する必要がある。そこで、本報では、5次精度の Weighted Essentially Non-Oscillatory (WENO) 補間を用い、与えられた格子解像度内においてでき

る限り数値粘性を排除することとしている。

本論では、火炎面モデルを実装したソフトウェア Advance/FrontFlow/FOCUS による流れの解析結果について述べることとする。また、流体構造の連成解析についても言及し、簡単なサンプル計算を示すこととする。

2. 支配方程式

2.1. 基礎方程式

流体解析における方程式は、質量保存式、運動量保存式、エネルギー保存式および化学種成分保存式となる。なお、FOCUS では方程式を保存系で扱い、密度 ρ 、運動量 ρu 、全エネルギー e_t 、化学種濃度 ρc を未知数として計算を行う。そのため、保存量は正確に保存され、衝撃波など不連続を伴う現象を精度良く解くことができる。なお、化学種濃度について、本解析では化学反応に火炎面モデルを使用するため、個々の化学種に対する保存ではなく、既燃ガスと未燃ガスの2成分系で扱うことができる。

種々の保存式は下記のように表せる。

質量保存式

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u_j)}{\partial x_j} = 0 \quad (1)$$

運動量保存式

*アドバンスソフト株式会社 技術第3部

3rd Technical Division, AdvanceSoft Corporation

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ji}}{\partial x_j} \quad (2)$$

ここで、

$$\tau_{ij} = \left(\mu' - \frac{2}{3} \mu \right) \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \delta_{ij} + \mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (3)$$

エネルギー保存式

$$\begin{aligned} \frac{\partial e_t}{\partial t} + \frac{\partial \{ (e_t + p) u_j \}}{\partial x_j} &= \frac{\partial (\tau_{ij} u_j)}{\partial x_j} - \frac{\partial q_j}{\partial x_j} \\ &+ \rho \sum_{k=1}^N f_{k,j} \left(u_j Y_k - D_k \frac{\partial Y_k}{\partial x_j} \right) \end{aligned} \quad (4)$$

ここで、

$$e_t = e + \frac{1}{2} \rho u_i^2 \quad (5)$$

$$q_j = -\lambda \frac{\partial T}{\partial x_j} - \rho \sum_{k=1}^N h_k D_k \frac{\partial Y_k}{\partial x_j} \quad (6)$$

である。

[乱流モデル]

本解析では、乱流燃焼速度のモデル化に乱流強度が必要となる。ここでは、乱流モデルとして同様の爆発解析で実績のある[1]標準 $k-\varepsilon$ モデルを使用する。

乱流エネルギー k の輸送式

$$\begin{aligned} \frac{\partial \bar{\rho} k}{\partial t} + \frac{\partial \bar{\rho} k \tilde{u}_j}{\partial x_j} &= P_k + \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ \left(\bar{\mu} + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right\} \\ &- \rho \varepsilon - 2 \bar{\mu} \left(\frac{\partial^2 \sqrt{k}}{\partial x_j^2} \right)^2 \end{aligned} \quad (7)$$

ここで、

$$P_k = \left\{ \mu_t \left(\frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \tilde{u}_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \frac{\partial \tilde{u}_m}{\partial x_m} \right) - \frac{2}{3} \bar{\rho} k \delta_{ij} \right\} \frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial x_j} \quad (8)$$

$$\mu_t = C_\mu f_\mu \bar{\rho} \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (9)$$

$$f_\mu = \exp \left(\frac{-3.4}{\left(1 + \frac{R_t}{50} \right)^2} \right), R_t = \frac{k^2}{\nu \varepsilon} \quad (10)$$

エネルギー散逸率 ε の輸送式

$$\begin{aligned} \frac{\partial \bar{\rho} \varepsilon}{\partial t} + \frac{\partial \bar{\rho} \varepsilon \tilde{u}_j}{\partial x_j} &= C_{\varepsilon 1} f_1 \frac{\varepsilon}{k} P_k \\ &+ \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ \left(\bar{\mu} + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right\} \\ &- C_{\varepsilon 2} f_2 \rho \frac{\varepsilon^2}{k} - 2 \tilde{\mu} \mu_t \left(\frac{\partial^2 \tilde{u}_i}{\partial x_j^2} \right)^2 \end{aligned} \quad (11)$$

ここで、

$$f_1 = 1.0, f_2 = 1.0 - 0.3 \exp(-R_t^2) \quad (12)$$

なお、 $\sigma_k, \sigma_\varepsilon, C_{\varepsilon 1}, C_{\varepsilon 2}, C_\mu$ はモデル定数で、標準 $k-\varepsilon$ モデルでは以下の通りとなる。

$$\sigma_k = 1.0, \sigma_\varepsilon = 1.3, C_{\varepsilon 1} = 1.44, C_{\varepsilon 2} = 1.92, C_\mu = 0.09 \quad (13)$$

[反応モデル]

化学反応は火炎面モデルを使用している。予混合燃焼における火炎伝播速度は火炎面の構造に依存するため、これを運動方程式と反応速度式で予測するためには火炎面の構造を詳細に表現しうだけの格子解像度が必要となる。一方、火炎面モデルは火炎面を不連続なデフラグレーション面として取り扱い、その面の輸送式を解くことにより火炎伝播を表現する[2]。火炎面の輸送は燃焼速度により算出されるため、乱流予混合燃焼の場合は乱流燃焼速度の予測が必要となるが、火炎面の詳細構造を考慮する必要がないことから格子解像度の影響は小さく、大規模な爆発解析に適用し得るモデルになる[1]。

本モデルでは、火炎面の輸送を解くため、以下の既燃ガスに対する保存式を用い、生成・消滅量を燃焼速度によってモデル化する。

$$\frac{\partial(\rho c)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho c u_j)}{\partial x_j} = \dot{\rho}_B \quad (14)$$

$$\begin{aligned}\dot{\rho}_B &= \rho u_f |\nabla c| & 0 \leq c < 1 \\ \dot{\rho}_B &= 0 & c \geq 1\end{aligned}\quad (15)$$

ここで、 u_f は乱流燃焼速度 S_t であり、既燃気体の質量分率 c および上流側の未燃気体の物理量の関数である[2]。

さらに、 S_t は層流燃焼速度 S_l の関数としてモデル化され、たとえば次式のように書ける。

$$S_t = S_l \left\{ 1 + k_l \left(\frac{u'}{S_l} \right)^n \right\} \quad (16)$$

また、エネルギー式は、全エネルギー e に対して次のように書ける。

$$\frac{\partial(e)}{\partial t} + \frac{\partial(e+p)u_j}{\partial x_j} = E_t \dot{\rho}_B \quad (17)$$

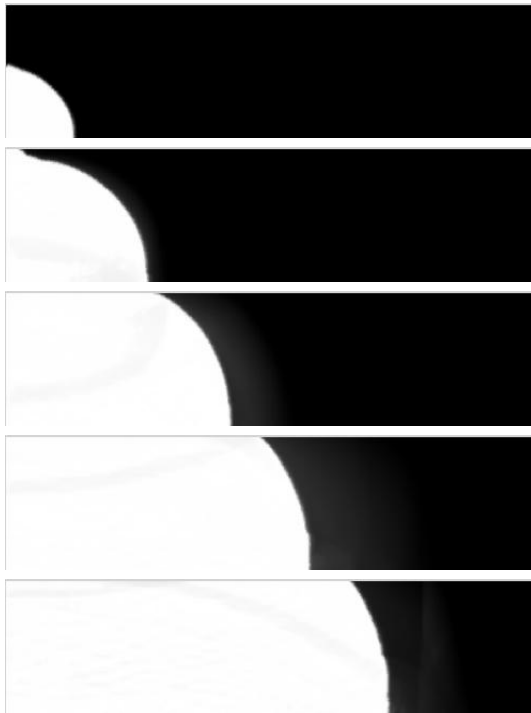


図 1 火炎の伝播の様子（上から順番に $t=0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0$ ）

ここでは高野[2]による火炎モデルを用いた場合の計算例を以下に示す。単位体積当りの反応熱 $E_t = 5$ の燃焼性の気体が領域全体を満たし、図 1 の左隅で着火するものとする。まず、ホイヘンスの原理にしたがって同心円状に燃焼面が拡大し、さらに右方向へ進行する様子が見てとれる。また、同時刻の圧

力場を可視化した図 2 から、圧力波は燃焼面に先行して伝播し、また天井からの反射波と干渉し合うことでさらに強い圧力上昇が確認される。壁面上での圧力の時間変化（図 3）にも同様の傾向が反映されている。

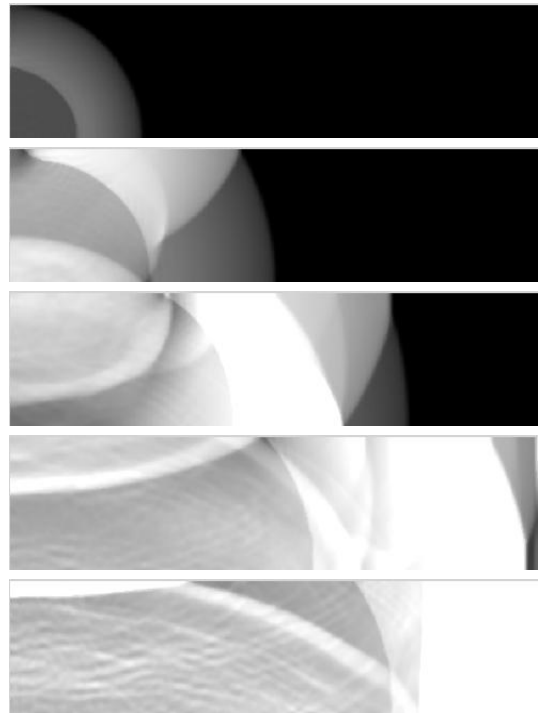


図 2 圧力波の伝播の様子（上から順番に $t = 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0$ ）

2.2. 構造解析

流体と構造の連成解析を実施する場合、構造の変形の度合いが非常に大きい場合を想定し、

DYNA3D2000 を用いた連成解析を当社では実施してきている。DYNA3D2000 は、3 次元のソリッドおよび梁・シェル構造に対して、時系列の動的応答を解析することを目的とした、陽解法を利用した非線形有限要素法のプログラムである。DYNA3D2000 は、四半世紀の間に、米国で LLNL と産業界で利用され、主として、非弾性と接触を含む解析に利用されてきた。要素の定式化は、1 次元トラスと梁、2 次元の 3 節点 3 角形シェルおよび 4 節点 4 角形シェル要素、および 3 次元の連続要素から構成される。弾性、塑性、熱の効果等を含む多くの材料モデルが利用可能である。また、接触解析も可能である。

接触解析に関して、DYNA3D 2000 のスライディング面と接触面の考え方は、節点と面の概念で定式化されている。スレーブ節点がマスター面に貫通しないような定式化である。ただし、マスターとスレーブの対称性は保たれるようなアルゴリズムとなっている。

また、破壊のモデルについては、各種のモデルが利用可能となっている。まず、1 つめの機能として、要素剛性を小さくすること、または、ある基準に達したら要素の応力を 0 にする方法が備わっている。つぎに、破壊基準に基づき、ソリッドまたはシェル要素を削除する方法がある。第 3 の方法として、あらかじめ定義された線上を split する方法があり、節点のペアを指定して、ある破壊基準に基づきすべての要素境界を離す方法もある。また、境界条件は、亀裂のある対称面やスライディング境界も設定できる。

破壊モデルのある弾塑性材料は、種々のデータで定義されている。これらのモデルは、通常の変位型弾塑性モデルに、2 つの破壊基準を導入したモデルとなっている。このモデルで破壊基準に達する前は、通常の変位型弾塑性モデルと同じ動作をする。ここでは、有効塑性歪による破壊基準がモデルとして用意されており、有効塑性歪が与えられた基準を超える

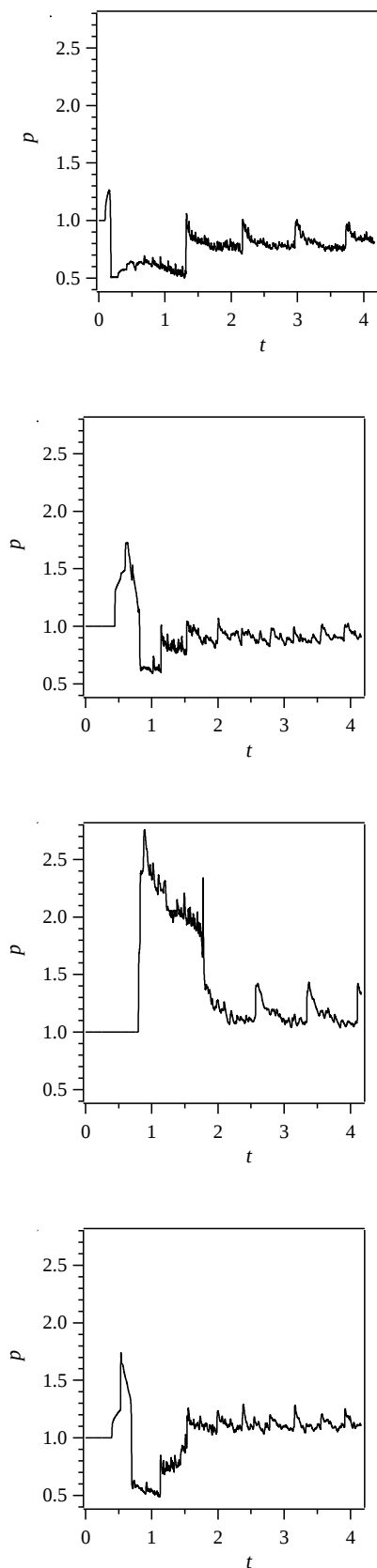


図 3 初期圧で無次元化された表面圧力の時間変化（上から順番に左面中央、天井面中央、右面中央、床面中央の位置でサンプリング）

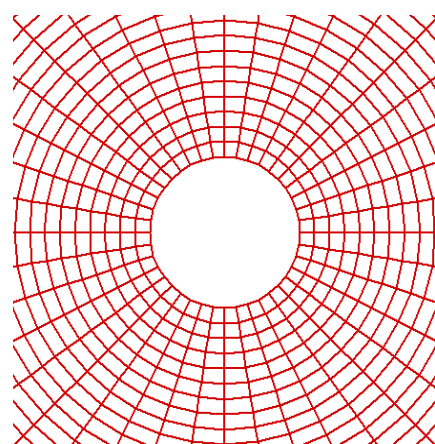
と要素が削除される。このモデルは、弾塑性材料の脆性破壊（応力基準）または延性破壊（歪基準）の概略を表現する場合に有効である。

2.3. 流体－構造連成解析

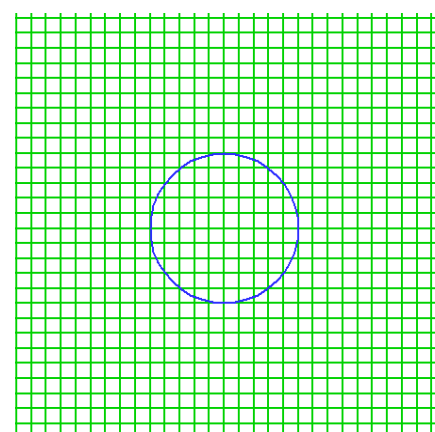
Advance/FrontFlow/FOCUS は Immersed Boundary 法（境界埋め込み法）によりモデル形状の取り込みを行っている。流体解析でよく使用されるのは境界適合格子（図 4(a)）であるが、Immersed Boundary 法では、予め作成した格子の上に物体の形状データを取り込み、物体境界を計算格子に埋め込む（図 4(b)）。この場合、格子形状と物体境界は必ずしも一致しないが、境界面に隣接する流体セルの速度ベクトル V_i を壁面に対する垂直成分 V_n と平行成分 V_p に分解し、 V_n を反転させたベクトル V_j を仮想セルに与えることで、取り込んだ形状を保持する（図 5 参照）。

また、境界の座標と移動速度を与えることで、移動境界問題にも適用が可能で、計算格子が変形しないので物体の大幅な移動や変形を伴う問題への適用性に優れている。

図 6 は Advance/FrontFlow/FOCUS の Immersed boundary 法による移動境界問題の解析事例である。格子解像度は半円の直径を 10 分割する程度の比較的粗い格子であるが、境界面を曲面形状として認識し、解析ができることが示されている。



(a) 境界適合格子



(b) Immersed boundary 法

図 4 境界適合格子と Immersed boundary 法の計算格子比較

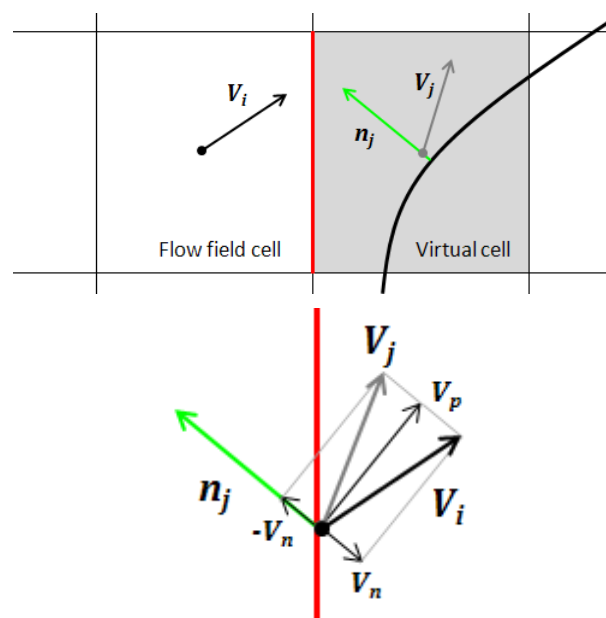


図 5 Immersed boundary 法における境界面の処理方法（滑り壁の場合）

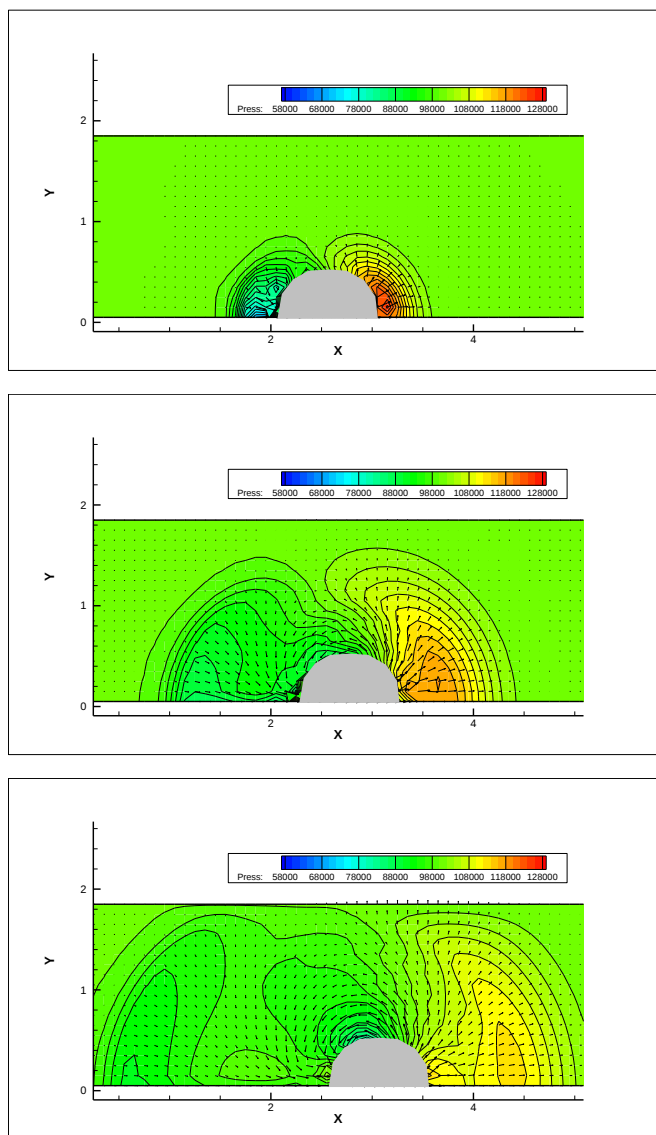


図 6 Immersed boundary 法による移動境界問題の解析事例（移動半円周囲の流れ、右向きに速度 100m/s で移動を開始する半円周囲の圧力および速度ベクトル分布）

流体－構造連成解析では、流体解析からは構造物表面の圧力分布、構造解析からは変形後の座標と境界面の移動速度の情報が必要となる（図 7 参照）。Advance/FrontFlow/FOCUS では、専用の連成ソフトウェアにより流体－構造解析ソフトウェア間でデータの受け渡しを行っている。流体解析と構造解析は同じ時間刻みで解析を行い、毎ステップ情報の受け渡しを行うことも可能である。

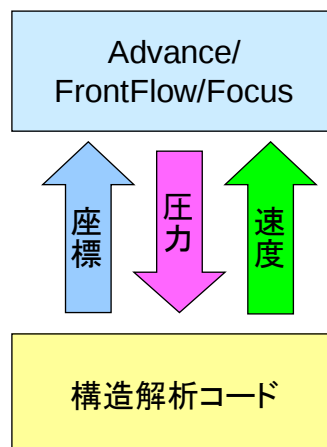


図 7 流体－構造連成のデータの受け渡し

3. おわりに

本報告では、当社における燃焼モデルと圧縮性流体ソルバ Advance/FrontFlow/FOCUS の開発、およびそれと関係する構造連成解析の手法、ならびに構造解析ソルバとして使用実績のある DYNA3D 2000 の概要について述べた。

4. 参考文献

- [1] 高橋邦彦ほか、「実規模 LP ガス漏洩・爆発評価システムの開発」, Sci. Tech. Energetic Materials, Vol. 65, No. 4, pp.116-124 (2004)
- [2] 高野泰斉,「火炎を伴う気流の差分計算モデル」, 日本航空宇宙学会誌, 第 36 巻, 第 411 号, pp.186-191 (1988)
- [3] 斎藤寛泰ほか,「水素－空気爆燃の野外実験」, Sci. Tech. Energetic Materials, Vol. 65, No. 4, pp.140-146 (2004)
- [4] 武野計二,「高圧水素の燃焼実験および数値解析」, 福岡水素エネルギー戦略会議 研究分科会資料