

PLUG の妥当性確認について

この資料では、PLUG コードの概要、プラグ応答及びナトリウム噴出の解析における重要現象のモデル化について説明した上で、PLUG コードの妥当性確認について述べる。なお、ここでは他の計算コードの説明と同様に、「妥当性確認」という用語を用いるが、内容としては「検証及び妥当性確認」の検証の部分が中心となっている。PLUG コードは複雑な物理現象や詳細なモデルを扱わない簡易コードであるため、プラグ応答及びナトリウム噴出の解析に必要となるモデルの検証を行っておけば、同コードの適用性及び妥当性が確認できるものと判断される。

1. PLUG コードの概要

PLUG コードは、原子炉容器の遮へいプラグを構成する複数のプラグとそれらを固定又は連結するボルトの運動をモデル化するとともに、遮へいプラグ上下の圧力差によるプラグ間隙を通じた格納容器床上へのナトリウムの噴出量を評価するための計算コードである。

PLUG コードでは、種々の遮へいプラグを質点として扱い、連結ボルトを弾塑性体としてモデル化し、各プラグの1次元の運動方程式を連成させて解くことによりその相對運動を計算する。また、原子炉容器内と格納容器床上との圧力差を用いて、ベルヌーイの式から遮へいプラグ間の相對変位により生じる間隙から噴出するナトリウム量を計算する。

2. 重要現象のモデル化

格納容器破損防止措置の有効性評価において、PLUG コードは事象グループ「炉心流量喪失時原子炉停止機能喪失 (ULOF)」の機械的応答過程における格納容器床上へのナトリウム噴出量の解析に使用される。格納容器床上へ噴出するナトリウム量は、有効性評価の評価項目（「その3 2.4.6 有効性を評価するための評価項目の設定」を参照）のうち、(3)②「格納容器床上へ噴出するナトリウムの燃焼等に対して、格納容器健全性が維持できること」に関わる重要なパラメータである。PLUG コードでは、この計算に必要な重要現象を以下のようにモデル化している。

- (1) 遮へいプラグを構成する複数のプラグ（大回転プラグ、小回転プラグ及び炉心上部機構）、各プラグ間及び大回転プラグとソールプレートとの間の連結ボルトを全てモデル化する。
- (2) プラグ下面の圧力履歴、格納容器床上圧力、各プラグに働く重力による全てのプラグの相對運動を計算し、各プラグの変位及び生じるプラグ間の全ての間隙と間隙の継続時間を計算する。ボルトは弾塑性体としてモデル化され、その応力-ひずみ関係に区分線形関数を用いる。また、プラグ下面の圧力の低下によるプラグの着座と間隙の消滅を計算する。さらに、プラグが衝突する際には反発係数を用いて反発後の速度を計算する。
- (3) プラグ間に生じる間隙と間隙の継続時間を基に、プラグ上下の圧力差による原子炉容器内のナトリウムの間隙内への侵入量及びプラグ上面からのナトリウムの噴出量を計算する。ナトリウムの噴出流路となるプラグ間隙部は垂直環状流路、水平矩形流路及びエルボとしてモデル化し、

摩擦損失及び形状損失を考慮する。

3. PLUG コードの妥当性確認

3.1. 妥当性確認の方法

PLUG コードによるプラグ応答及びナトリウム噴出の解析の妥当性確認を目的として、簡単な体系を用いて基本的な機能が確認できる解析条件を検討し、以下に示す 7 ケースの解析ケースを選定した。これらの解析を通じて、ボルト及びプラグの動的応答の解析、ナトリウム噴出量の解析及びプラグの衝突解析の妥当性を確認した。妥当性の確認は、各解析ケースにおける理論解を導出し、これと解析結果とを比較することにより行った。

- ・ボルト及びプラグの動的応答の解析の妥当性の確認

Case-1 弾性解析

Case-2 弾塑性解析

- ・ナトリウム噴出量の解析の妥当性の確認

Case-3 垂直方向の流路を流れるナトリウムの噴出量の解析

Case-4 水平方向の流路を流れるナトリウムの噴出量の解析

Case-5 入口部及び曲がり部を流れるナトリウムの噴出量の解析

- ・プラグの衝突解析の妥当性の確認

case-6 互いに独立したプラグの衝突解析

case-7 一体となったプラグの衝突解析

Case-1～5 については、プラグがボルトにより固定された条件においてステップ状の圧力を与えた場合の応答を解析することとした。Case-6、7 についてはプラグに初速度を与えて衝突させ、その挙動を解析することとした。

3.2. 妥当性確認の結果

妥当性確認の結果を整理して表 1 に示す。Case-1 から Case-7 のすべてについて、理論値と計算値とは良く一致しており、これにより解析の妥当性を確認した。なお、各ケースの解析の詳細については付録に記す。

- ・ Case-1 ではボルトの変形が弾性範囲に収まる程度のステップ状の圧力をプラグ下面に作用させた際の応答を解析し、その弾性応答の解析の妥当性を確認した。
- ・ Case-2 ではボルトの変形が弾性範囲を超えるステップ状の圧力をプラグ下面に作用させた際の応答を解析し、その弾塑性応答の解析の妥当性を確認した。
- ・ Case-3 では Case-1 と同じ解析条件の基で、垂直方向の流路を流れるナトリウムの噴出量を解析し、その噴出量の解析の妥当性を確認した。
- ・ Case-4 では Case-1 と同じ解析条件の基で、水平方向の流路を流れるナトリウムの噴出量を解析し、その噴出量の解析の妥当性を確認した。
- ・ Case-5 では Case-1 と同じ解析条件の基で、入口部及び曲がり部を流れるナトリウムの噴出量を解析し、その噴出量の解析の妥当性を確認した。
- ・ Case-6 では独立した 3 つのプラグに初速度を与えて剛壁に衝突させる解析を行い、その

反発挙動の解析の妥当性を確認した。

- Case-7 では一体となって移動する 3 つのプラグに初速度を与えて剛壁に衝突させる解析を行い、その反発挙動の解析の妥当性を確認した。

4. まとめ

簡単な体系を用いて PLUG コードを用いたプラグ応答及びナトリウム噴出の解析に使用するモデルの妥当性が確認できる解析条件として 7 つの解析ケースを選定し、解析を実施した。これらの解析を通じて、プラグの動的応答の解析及びナトリウム噴出の解析への適用性と妥当性を確認した。

表 1 PLUG コードの妥当性確認の内容とその結果

ケース番号	確認の内容	理論値と計算値の差	確認結果
1	プラグの運動とボルトの弾性挙動の解析の妥当性を確認する。	4%以下	良好
2	プラグの運動とボルトの弾塑性挙動の解析の妥当性を確認する。	0.1%以下	良好
3	垂直流路を噴出するナトリウムの流量の解析の妥当性を確認する。	0.01%以下	良好
4	水平流路を噴出するナトリウムの流量の解析の妥当性を確認する。	0.02%以下	良好
5	入口部及び曲がり部を流れるナトリウムの噴出量の解析の妥当性を確認する。	0.01%以下	良好
6	衝突するプラグ同士の反発挙動の解析の妥当性を確認する（個別に衝突する場合）。	0.1%以下	良好
7	衝突するプラグ同士の反発挙動の解析の妥当性を確認する（一体となって衝突する場合）。	0.1%以下	良好

PLUG コードの妥当性確認の具体的内容

1. 妥当性確認の方法

PLUG コードによるプラグ応答及びナトリウム噴出解析の妥当性確認を目的として、簡単な体系を用いて基本的な機能が確認できる解析条件を検討し、以下に示す 7 ケースの解析ケースを選定した。これらの解析を通じて、ボルト及びプラグの動的応答の解析、ナトリウム噴出量の解析及びプラグの衝突解析の妥当性を確認する。妥当性の確認は、各解析ケースに対する理論解を導出し、これと解析結果とを比較することにより行う。

- ・ボルト及びプラグの動的応答の解析の妥当性の確認
 - Case-1 弾性解析
 - Case-2 弾塑性解析
- ・ナトリウム噴出量の解析の妥当性の確認
 - Case-3 垂直方向の流路を流れるナトリウムの噴出量の解析
 - Case-4 水平方向の流路を流れるナトリウムの噴出量の解析
 - Case-5 入口部及び曲がり部を流れるナトリウムの噴出量の解析
- ・プラグの衝突解析の妥当性の確認
 - case-6 互いに独立したプラグの衝突解析
 - case-7 一体となったプラグの衝突解析

2. ボルト及びプラグの動的応答の解析の妥当性の確認

2.1. CASE-1 弾性解析

1) 対象とする解析条件

ここでは付図 2.1-1 に示すようにプラグがボルトにより固定された条件において、付図 2.1-2 に示すステップ状の圧力を与えた場合の応答について検討する。付表 2.1-1 に解析に必要なとなるプラグ及びボルトの幾何形状及び材料特性を示す。

2) 解析の妥当性の確認方法

プラグの運動方程式を解き理論解を算出してプラグ変位の時刻歴を求め、これを PLUG コードによる計算値と比較して解析の妥当性を確認する。

3) 理論値の算出

外力として付図 2.1-2 に示すような圧力パルスが負荷された場合、プラグとボルトの運動は次の微分方程式で表される。

$$M\ddot{x} = P_1 S_P - \frac{E_1 S_V}{l} x - Mg \quad \dots (A2.1-1)$$

ここで

- M : プラグの質量 (kg)
- x : プラグの変位 (m)

- P_1 : プラグに作用する圧力 (Pa)
 S_p : プラグの受圧面積 (m²)
 E_1 : ボルトのヤング率 (Pa)
 S_V : ボルトの有効断面積 (m²)
 l : ボルトの有効長 (m)
 g : 重力加速度 (m/s²)
 t : 時刻 (s)

上式の右辺第1項は外力、第2項はボルトの抗力、第3項は重力を表す。境界条件は以下である。

$$t = t_0 \text{ のとき、 } x = 0 \text{ かつ } \dot{x} = 0 \quad \dots (A2.1-2)$$

ここで

- t_0 : パルス状圧力が立ち上がる時刻 (s)

このとき、

$$\omega_1^2 = \frac{E_1 S_V}{Ml} \quad \dots (A2.1-3)$$

$$\beta_1 = \frac{P_1 S_p}{M} - g \quad \dots (A2.1-4)$$

とおくと (A2.1-1) 式は以下のようになる。

$$\ddot{x} + \omega_1^2 x = \beta_1 \quad \dots (A2.1-5)$$

(A2.1-5) 式の理論解は、次式により与えられる。

$$x = \frac{\beta_1}{\omega_1^2} (1 - \cos \omega_1 (t - t_0)) \quad \dots (A2.1-6)$$

(A2.1-6) 式は単振動曲線を描くが、その振幅と周期は以下となる。

振幅 :
$$\frac{\beta_1}{\omega_1^2} = \left(\frac{P_1 S_p}{M} - g \right) \frac{Ml}{E_1 S_V} \quad \dots (A2.1-7)$$

周期 :
$$\frac{2\pi}{\omega_1} = 2\pi \left(\frac{Ml}{E_1 S_V} \right)^{1/2} \quad \dots (A2.1-8)$$

ボルトの変形が弾性範囲に収まるための圧力の条件は以下となる。

$$P_1 \leq \frac{S_V}{2S_p} \sigma_Y + \frac{Mg}{S_p} \quad \dots (A2.1-9)$$

(A2.1-9) 式に付表 2.1-1 に示した数値を代入すると以下を得る。

$$P_1 \leq 5.745 \times 10^6 \text{ (Pa)} \quad \dots (A2.1-10)$$

負荷される圧力が 5.745×10^6 Pa より小さい場合、ボルトは弾性変形をする。 $P_1 = 5.0 \times 10^6$ (Pa) とした場合、ボルトとプラグは以下の式で表される単振動運動を行う。

$$\text{振幅 (m)} : \left(\frac{P_1 S_P}{M} - g \right) \frac{Ml}{E_1 S_V} = 3.12 \times 10^{-4} \quad \dots (A2.1-11)$$

$$\text{最大速度 (m/s)} : \left(\frac{P_1 S_P}{M} - g \right) \sqrt{\frac{Ml}{E_1 S_V}} = 0.201 \quad \dots (A2.1-12)$$

$$\text{最大加速度 (m/s}^2\text{)} : \frac{P_1 S_P}{M} - g = 129.3 \quad \dots (A2.1-13)$$

4) 理論値と PLUG コードによる計算値との比較

付図 2.1-3~2.1-10 にボルトの応力(SI)、伸び(XBOLT)、ひずみ(EP)、塑性ひずみ(PS)、ボルトの応力(SI)－ひずみ(EP)関係、プラグの変位(XD)、速度(XV)、加速度(XA)をそれぞれ示す。付図 2.1-8、2.1-9、及び 2.1-10 には理論値の時刻歴を重ねて示した。付表 2.1-2 にプラグの最大変位、最大速度及び最大加速度について、理論値と PLUG コードによる計算値とを比較して示す。理論値と計算値の差は 4%以内である。この差は時間刻み幅(タイムステップ)を小さくすることでさらに小さくなる傾向にある。

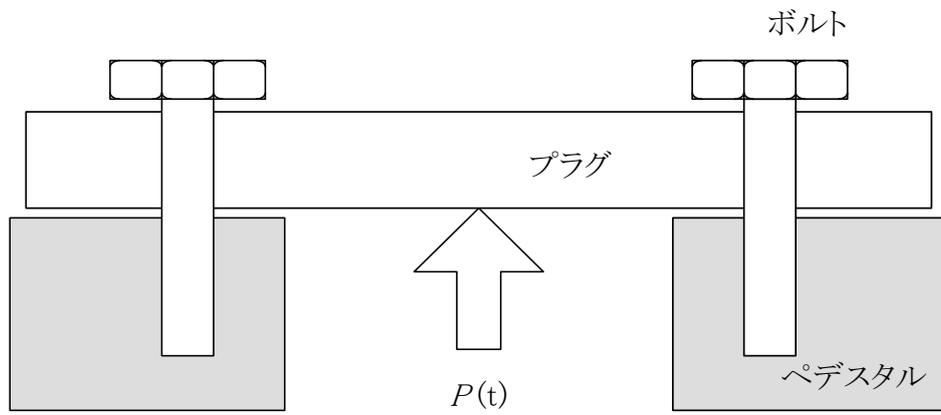
以上から、ボルトの変形が弾性範囲内にある場合におけるプラグ応答の PLUG コードによる解析の妥当性が確認できる。

付表 2.1-1 解析に必要となるプラグ及びボルトの幾何形状及び材料特性 (Case-1)

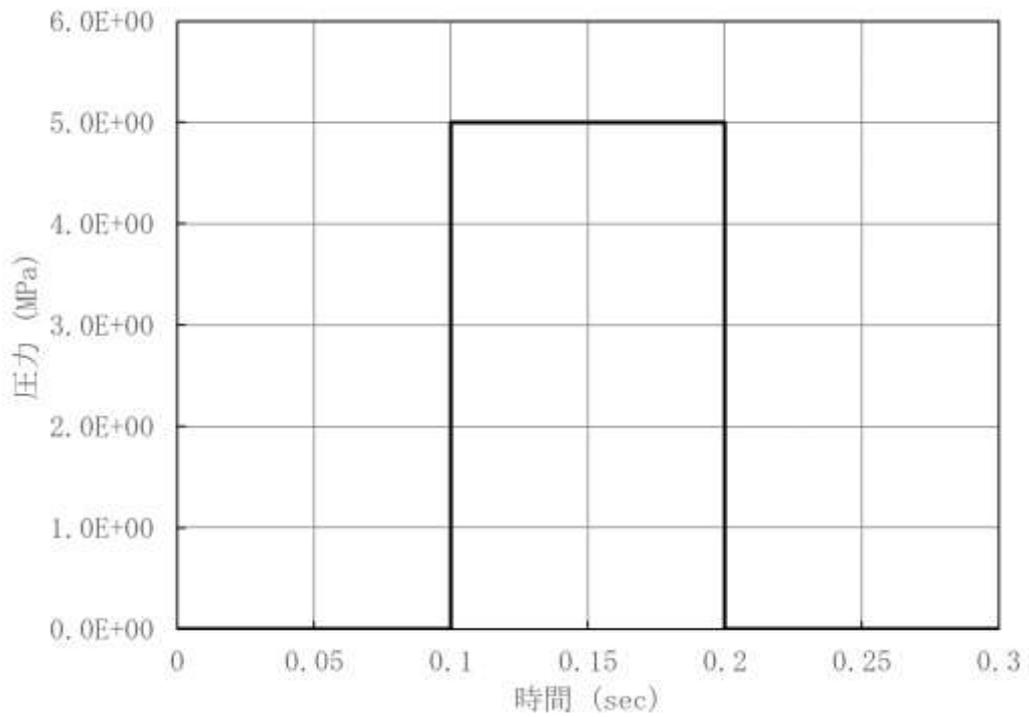
	項目	変数名	値 (単位)
ボルト	初期締付力	—	0.0
	ヤング率	E_1	21000 (kg/mm ²)=2.06×10 ¹¹ (Pa)
	有効長	l	0.19 (m)
	有効断面積	S_V	0.2157 (m ²)
	降伏応力	σ_Y	80 (kg/mm ²)=7.85×10 ⁸ (Pa)
	UTS	σ_u	95 (kg/mm ²)=9.32×10 ⁸ (Pa)
	降伏ひずみ	ϵ_Y	3.81×10 ⁻³
	破断ひずみ	ϵ_u	0.15
プラグ	質量	M	5.638×10 ⁵ (kg)
	受圧断面積	S_P	15.69 (m ²)

付表 2.1-2 理論値と PLUG コードによる計算値との比較 (Case-1)

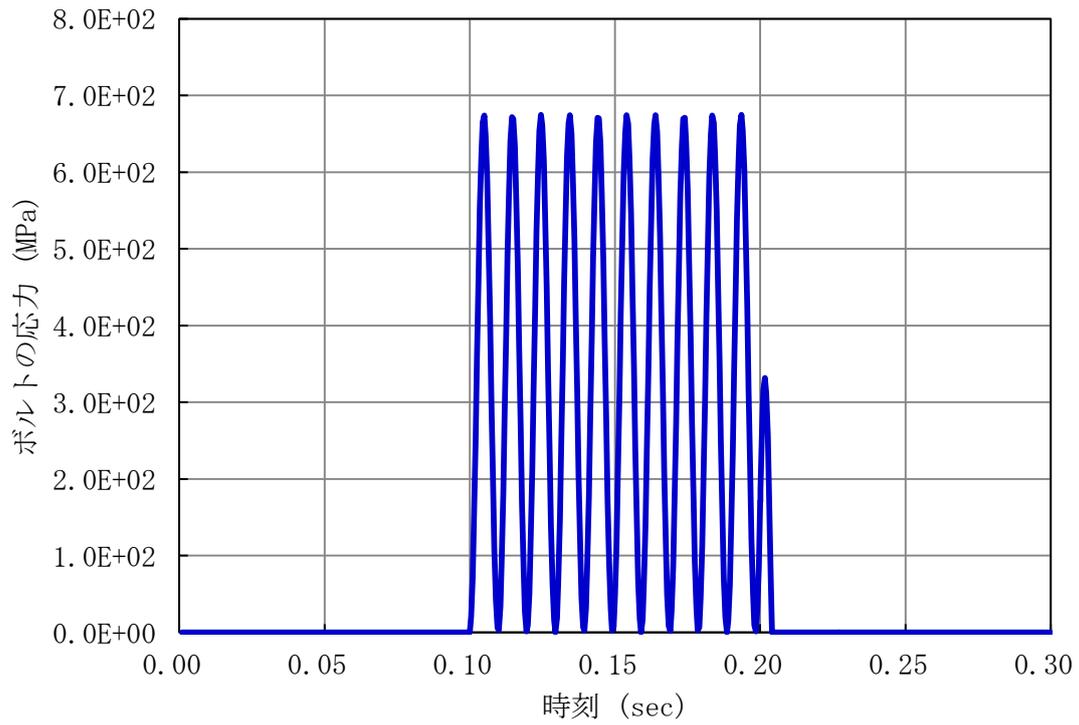
項目	理論値	計算値	理論値との差
プラグの最大変位	6.24×10 ⁻⁴ m	6.22×10 ⁻⁴ m	0.19 %
プラグの最大速度	0.201 m/s	0.206 m/s	-2.81 %
プラグの最大加速度	129.3 m/s ²	133.9 m/s ²	-3.53 %



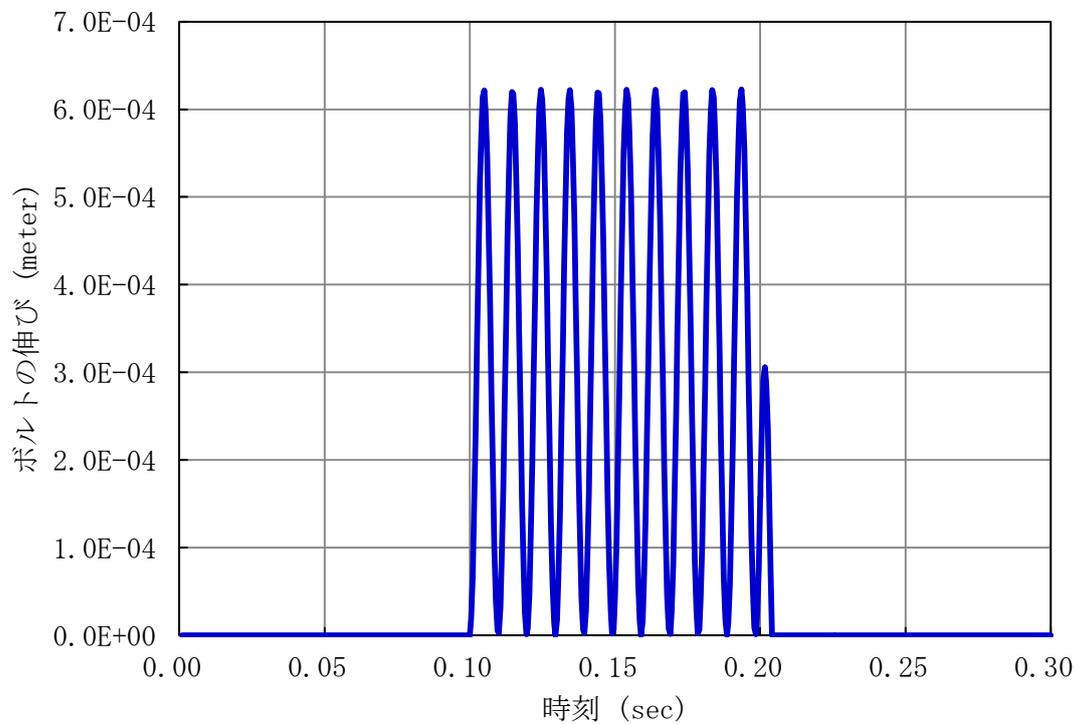
付図 2.1-1 弾性解析の体系 (Case-1)



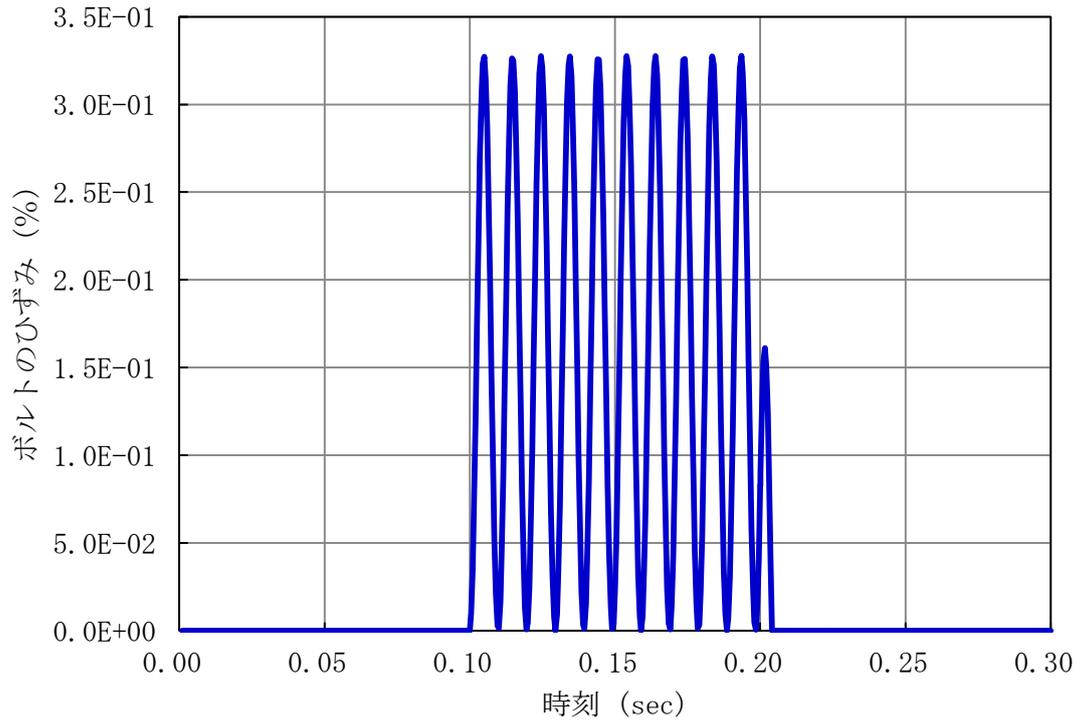
付図 2.1-2 弾性解析の圧力履歴 (Case-1)



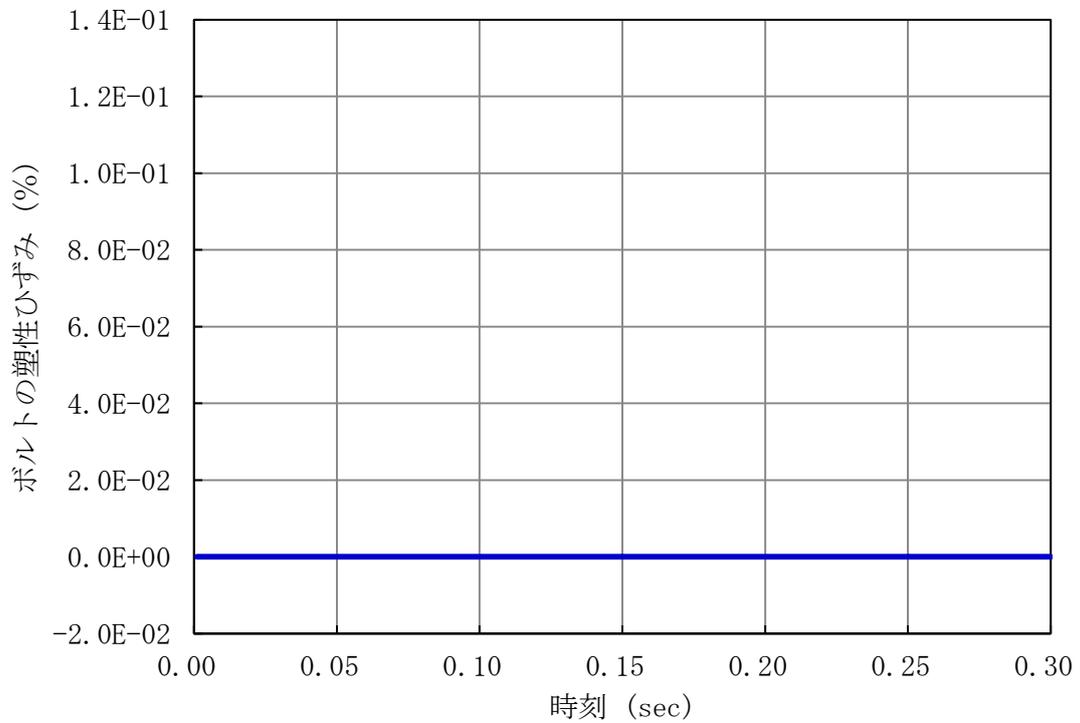
付図 2.1-3 弾性解析のボルトの応力(SI) (Case-1)



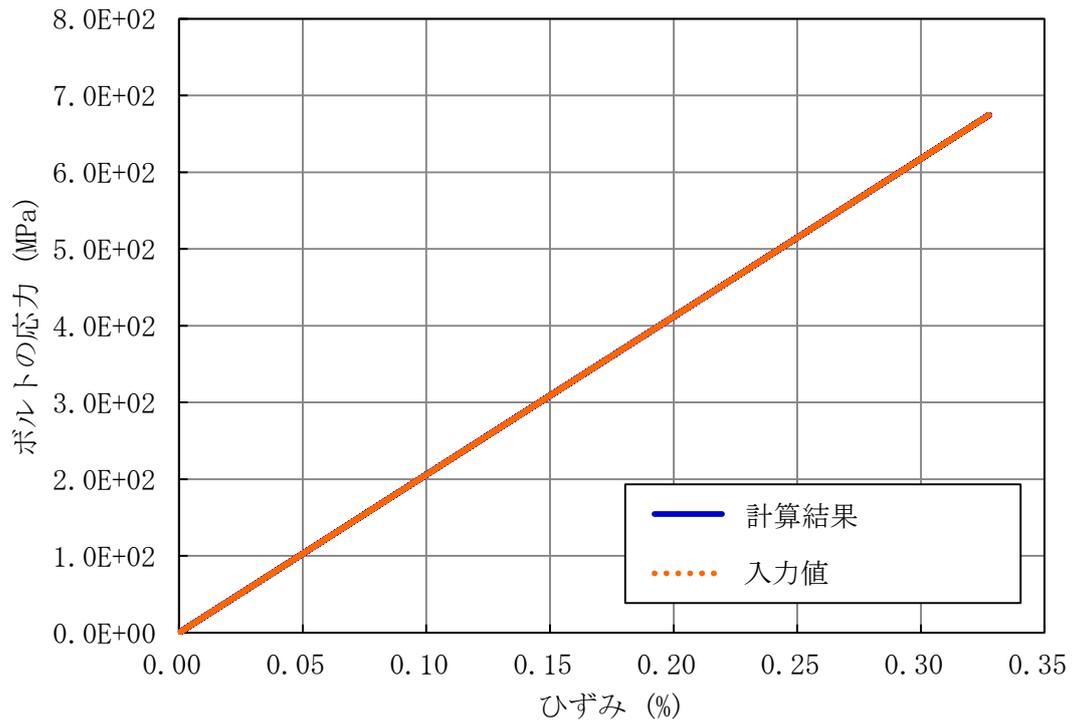
付図 2.1-4 弾性解析のボルトの伸び(XBOLT) (Case-1)



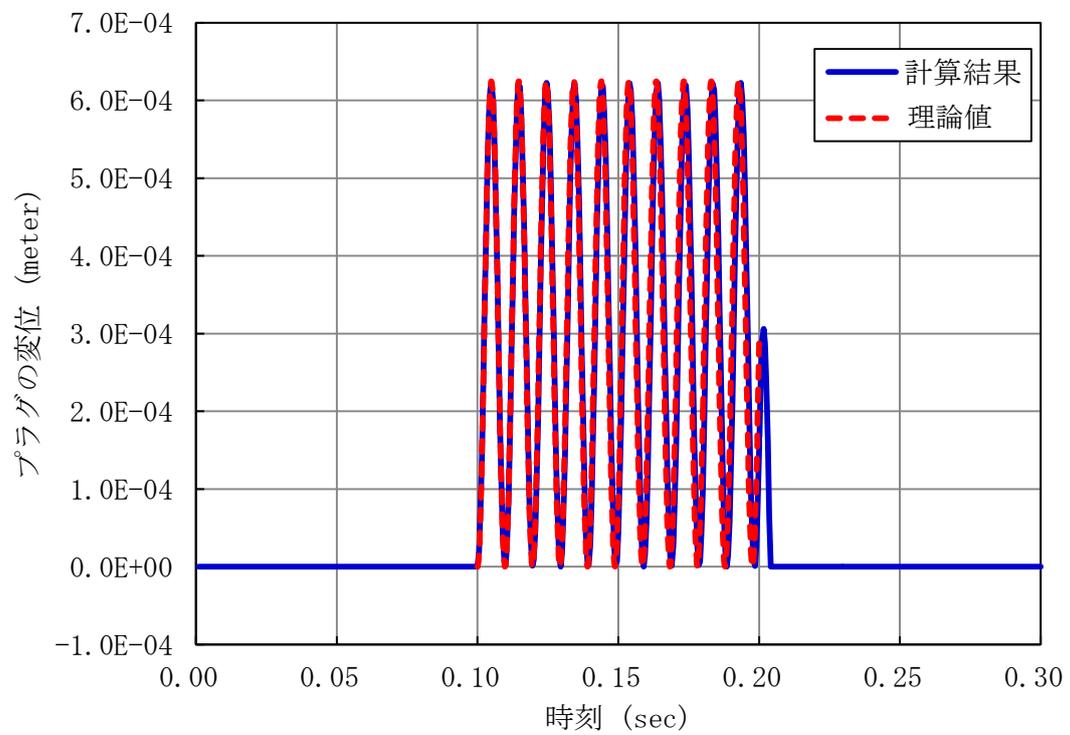
付図 2.1-5 弾性解析のボルトのひずみ (EP) (Case-1)



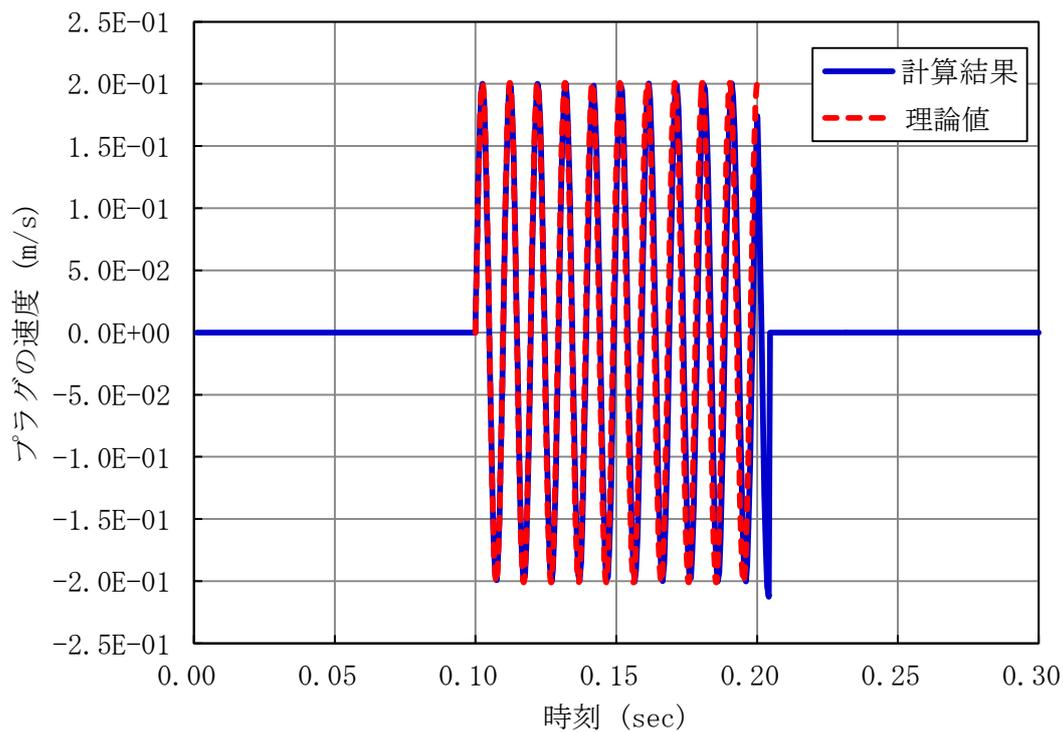
付図 2.1-6 弾性解析のボルトの塑性ひずみ (PS) (Case-1)



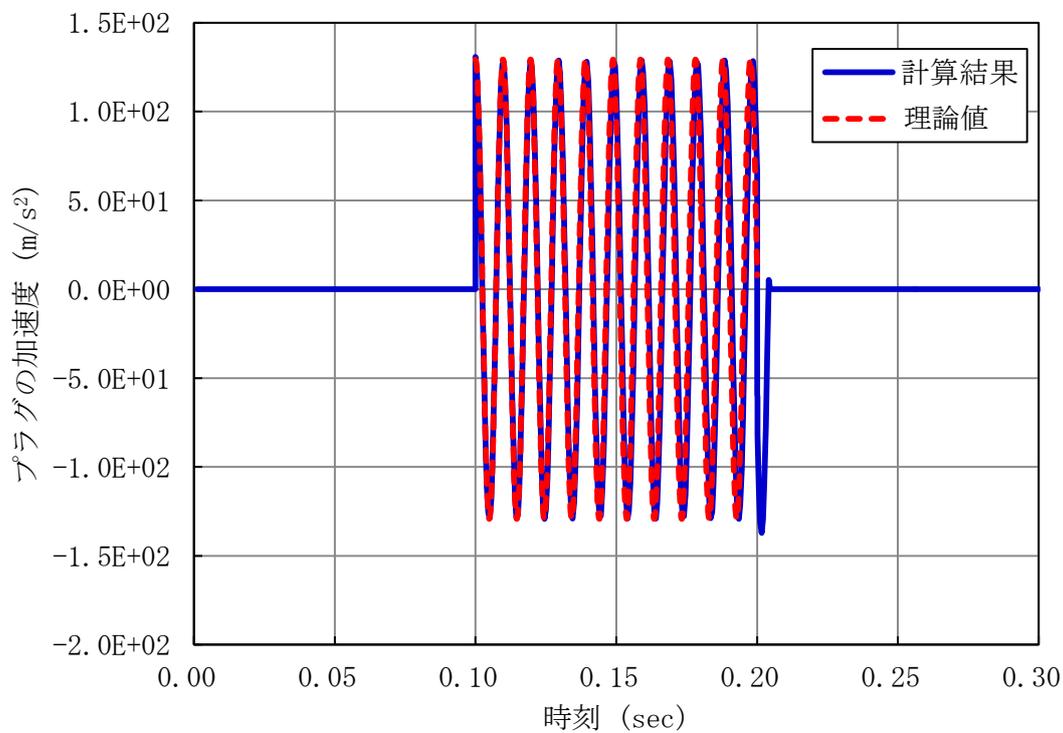
付図 2.1-7 弾性解析のボルトの応力(SI)－ひずみ(EP)関係(Case-1)



付図 2.1-8 弾性解析のプラグの変位(XD) (Case-1)



付図 2.1-9 弾性解析のプラグの速度(XV) (Case-1)



付図 2.1-10 弾性解析のプラグの加速度(XA) (Case-1)

2.2. CASE-2 弾塑性解析

1) 対象とする解析条件

ここでは Case-1 弾性解析と同じ解析体系（付図 2.1-1 参照）を用いて、作用する圧力を増大させることによりボルトが塑性変形する場合の応答について検討する。

2) 妥当性の確認方法

プラグの運動方程式を解き理論解を算出してプラグ変位の時刻歴を求め、これを PLUG コードによる計算値と比較して解析の妥当性を確認する。ただし、理論解はボルトが変形を開始して応力が増大している間のものしか得られないので、ボルトの変形が開始してからプラグが最大変位に至るまでの間で理論値と計算値との比較を行う。

3) 理論値の算出

(A2.1-10)式で与えられる P_1 よりも大きい圧力 P_2 がプラグに負荷されると、ボルトは塑性変形する。以降では変数の添え字を弾性領域：1、塑性領域：2として区別する（例えば、変位 x については弾性領域での値を x_1 、塑性領域での値を x_2 とする）。

[弾性領域]

弾性領域の解は、前述の(A2.1-6)式でと同様、次式で与えられる。

$$x_1 = \frac{\beta_1}{\omega_1^2} (1 - \cos \omega_1(t - t_0)) \quad \dots (A2.2-1)$$

ただし、

$$\omega_1^2 = \frac{E_1 S_V}{Ml} \quad \dots (A2.2-2a)$$

$$\beta_1 = \frac{P_2 S_P}{M} - g \quad \dots (A2.2-2b)$$

である。

[塑性領域]

ボルトが塑性変形する場合のプラグとボルトの運動は次の微分方程式で表される。

$$M\ddot{x}_2 = P_2 S_P - \frac{E_1 S_V}{l} x_1 - \frac{E_2 S_V}{l} (x_2 - x_1) - Mg \quad \dots (A2.2-3)$$

ただし

$$x_1 \leq x_2, \quad x_1 \text{は定数}$$

上式の右辺第1項は外部からの圧力による外力、第2項はボルトの弾性変形による抗力、第3項はボルトの塑性変形による抗力、第4項は重力を表す。弾性変形の場合と違い、ボルトの抗力が弾性変形による抗力と塑性変形による抗力のふたつの抗力の影響を考慮しなければならない。この式を変形すると

$$\ddot{x}_2 + \omega_2^2 x_2 = \beta_2 - (\omega_1^2 - \omega_2^2)x_1 \quad \dots (A2.2-4)$$

を得る。

初期条件は、降伏点Aにおいて

$$x_2 = x_1 \text{ かつ } \dot{x}_2 = \dot{x}_1 \quad \dots (A2.2-5)$$

である。ただし、

$$\omega_1^2 = \frac{E_1 S_V}{Ml} \quad \dots (A2.2-6a)$$

$$\omega_2^2 = \frac{E_2 S_V}{Ml} \quad \dots (A2.2-6b)$$

$$\beta_2 = \frac{P_2 S_P}{M} - g \quad \dots (A2.2-6c)$$

$$x_1 = \frac{\sigma_Y l}{E_1} \quad \dots (A2.2-6d)$$

である。ここでの x_1 は降伏点でのボルトの変位である。

(A2.2-4)式のような定数係数2階非斉次線形微分方程式は、その斉次方程式：

$$\ddot{x}_2 + \omega_2^2 x_2 = 0 \quad \dots (A2.2-7)$$

の一般解を求め、それに(A2.2-4)式の特解を加えることにより、その一般解が得られる。

(A2.2-7)式の一般解は、

$$C_1 \sin \omega_2 t + C_2 \cos \omega_2 t \quad \dots (A2.2-8)$$

であり、(A2.2-4)式の特解は、観察から容易に

$$\frac{\beta_2 - (\omega_1^2 - \omega_2^2)x_1}{\omega_2^2} \quad \dots (A2.2-9)$$

であることがわかるので、(A2.2-4)式の一般解として

$$x_2 = C_1 \sin \omega_2 t + C_2 \cos \omega_2 t + \gamma \quad \dots (A2.2-10)$$

を得る。ただし、 C_1 と C_2 は積分定数であり、 γ は(A2.2-9)式に等しい。

弾性領域から塑性領域に移るA点における変位と速度の連続性、すなわち(A2.2-5)式から次のふたつの式を得る。

$$(x_{2A} =) C_1 \sin \omega_2 t_0 + C_2 \cos \omega_2 t_0 + \gamma = x_{1A} \quad \dots (A2.2-11a)$$

$$(\dot{x}_{2A} =) C_1 \omega_2 \cos \omega_2 t_0 - C_2 \omega_2 \sin \omega_2 t_0 = \dot{x}_{1A} \quad \dots (A2.2-11b)$$

ここで、

$$x_{1A} = \frac{\beta_2}{\omega_1^2} (1 - \cos \omega_1 t_0) \quad \dots (A2. 2-12a)$$

$$\dot{x}_{1A} = \frac{\beta_2}{\omega_1} \sin \omega_1 t_0 \quad \dots (A2. 2-12b)$$

t_0 : 降伏点Aに到達する時刻

である。積分定数 C_1 と C_2 は、(A2. 2-11)式から求めることができる。

$$C_1 = (x_{1A} - \gamma) \sin \omega_2 t_0 + \frac{\dot{x}_{1A}}{\omega_2} \cos \omega_2 t_0 \quad \dots (A2. 2-13a)$$

$$C_2 = (x_{1A} - \gamma) \cos \omega_2 t_0 - \frac{\dot{x}_{1A}}{\omega_2} \sin \omega_2 t_0 \quad \dots (A2. 2-13b)$$

次にプラグの塑性領域における最大変位を求める。(A2. 2-10)式から、

$$\begin{aligned} x_2 &= \sqrt{C_1^2 + C_2^2} \sin(\omega_2 t + \alpha) t + \gamma \\ &\leq \sqrt{C_1^2 + C_2^2} + \gamma \end{aligned} \quad \dots (A2. 2-14)$$

ここで、

$$\cos \alpha = \frac{C_1}{\sqrt{C_1^2 + C_2^2}} \quad \dots (A2. 2-15a)$$

$$\sin \alpha = \frac{C_2}{\sqrt{C_1^2 + C_2^2}} \quad \dots (A2. 2-15b)$$

である。したがって、塑性領域の最大変位 $(x_2)_{max}$ として

$$\begin{aligned} (x_2)_{max} &= \sqrt{C_1^2 + C_2^2} + \gamma \\ &= \sqrt{(x_{1A} - \gamma)^2 + \frac{\dot{x}_{1A}^2}{\omega_2^2}} + \gamma \end{aligned} \quad \dots (A2. 2-16)$$

を得る。

付表 2. 1-1 に示したプラグおよびボルトの諸データ、および外圧 $P_2 = 7 \times 10^6$ (Pa) を (A2. 2-16) 式に代入すると

$$(x_2)_{max} = 9.427 \times 10^{-4} \text{ (m)} \quad \dots (A2. 2-17)$$

を得る。

4) 理論値と PLUG コードによる計算値との比較

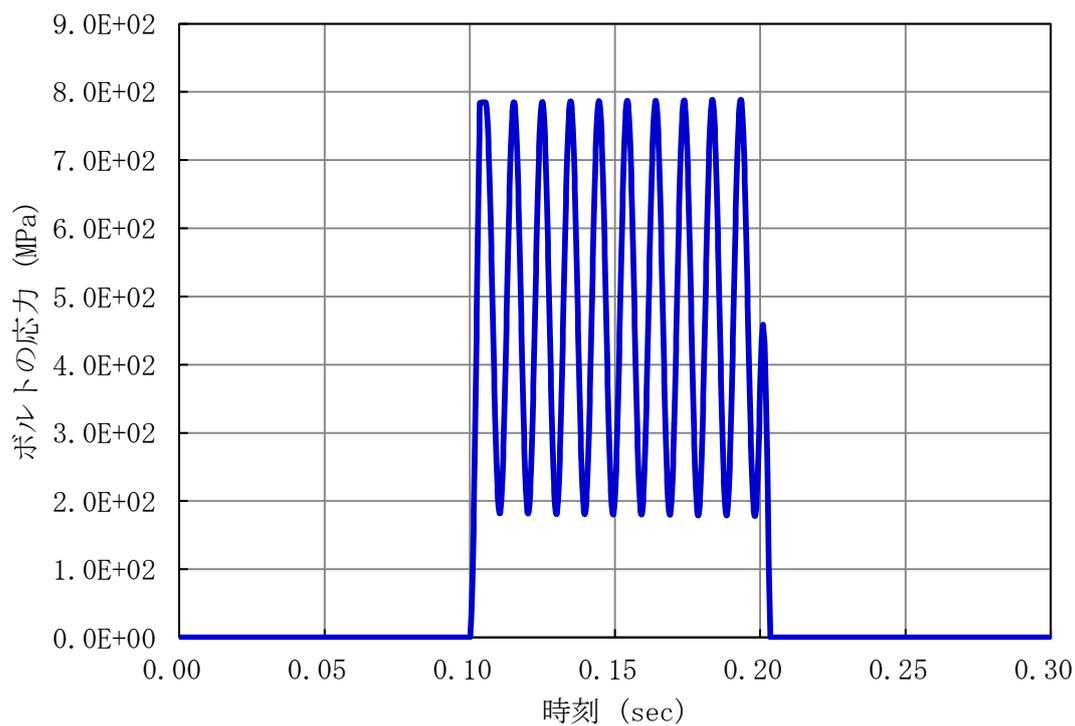
付図 2. 2-1~2. 2-8 にボルトの応力(SI)、伸び(XBOLT)、ひずみ(EP)、塑性ひずみ(PS)、ボルトの応力(SI)－ひずみ(EP)関係、プラグの変位(XD)、速度(XV)、加速度(XA)をそれぞれ示す。付図 2. 2-6、

2.2-7 及び 2.2-8 には理論値を重ねて示した。ただし、理論値の表示領域は弾性状態から塑性状態に至り、最大変位を記録するまでとした。付表 2.2-1 にプラグの最大変位について、理論値と PLUG コードによる計算値とを比較して示す。理論値と計算値とは良く一致している。

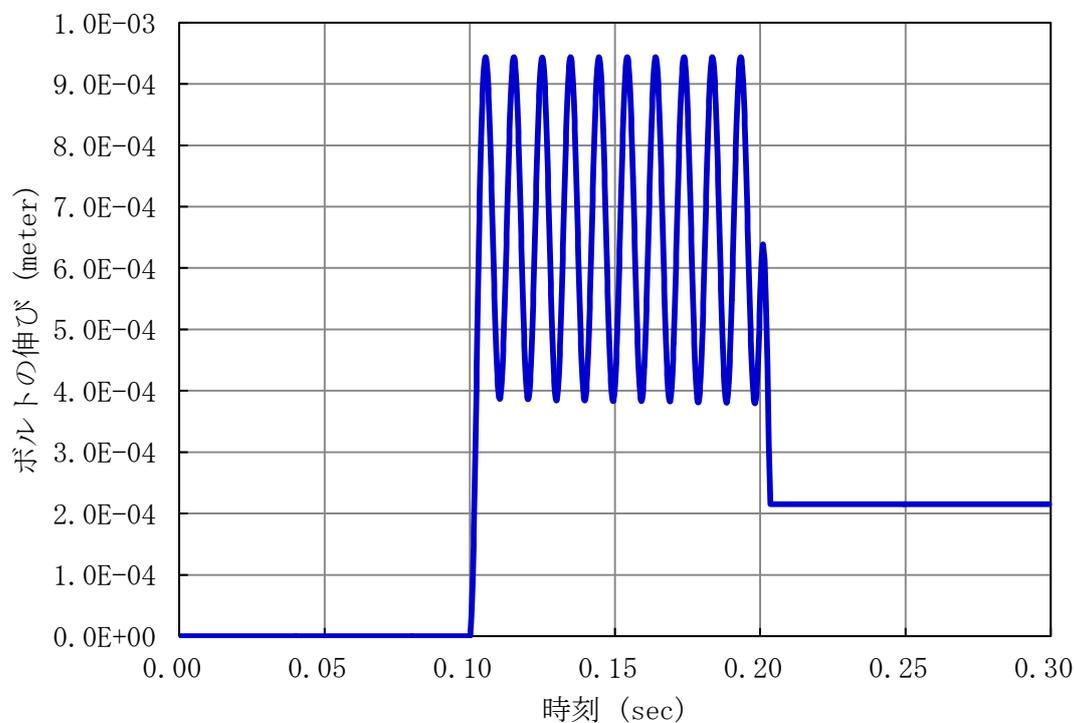
以上から、ボルトの変形が弾性範囲を超えた場合におけるプラグ応答の PLUG コードによる解析の妥当性が確認できる。

付表 2.2-1 理論値と PLUG コードによる計算値との比較 (Case-2)

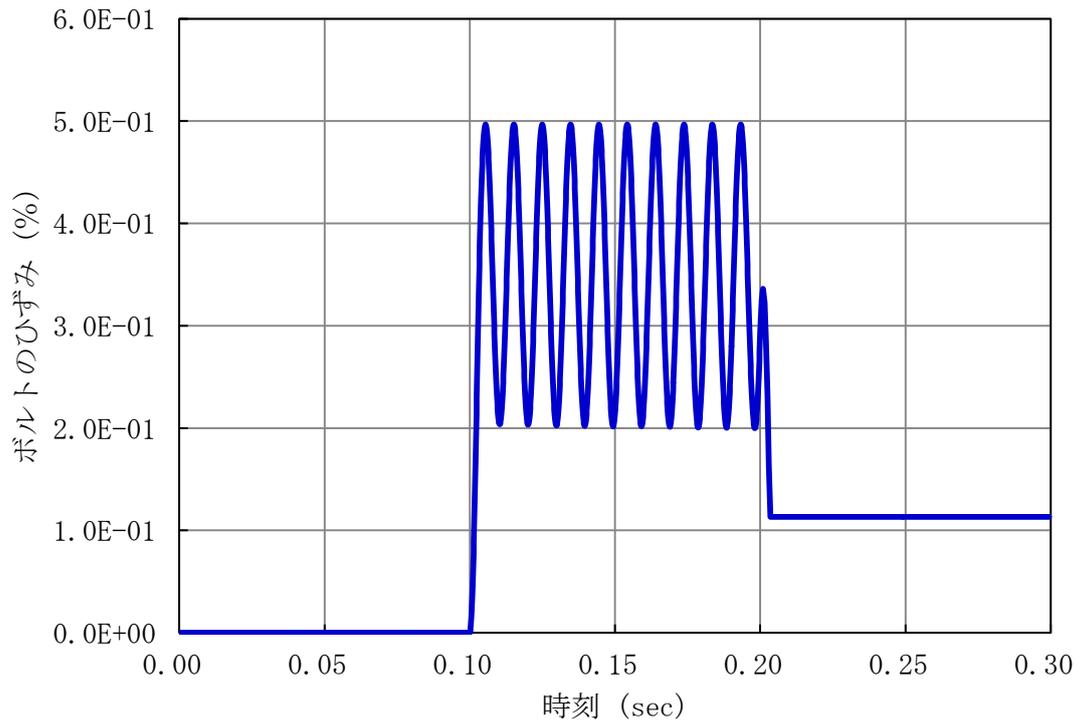
項目	理論値	計算値	理論値との差
プラグの最大変位	$9.427 \times 10^{-4} \text{ m}$	$9.436 \times 10^{-4} \text{ m}$	-0.09 %



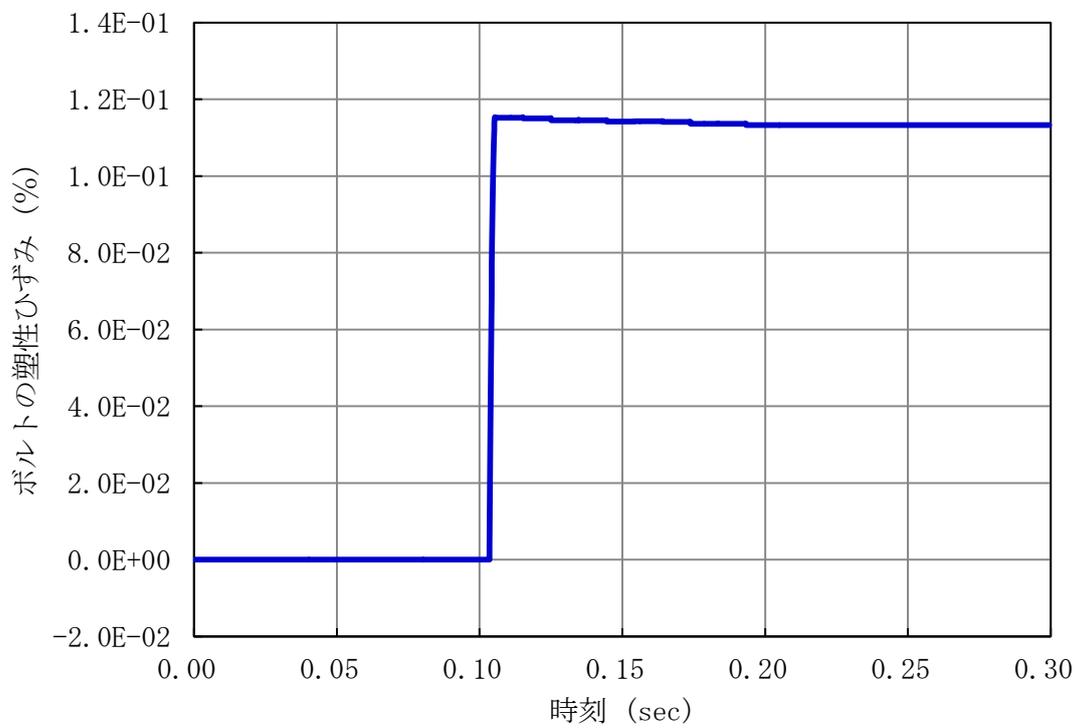
付図 2.2-1 弾塑性解析のボルトの応力(SI) (Case-2)



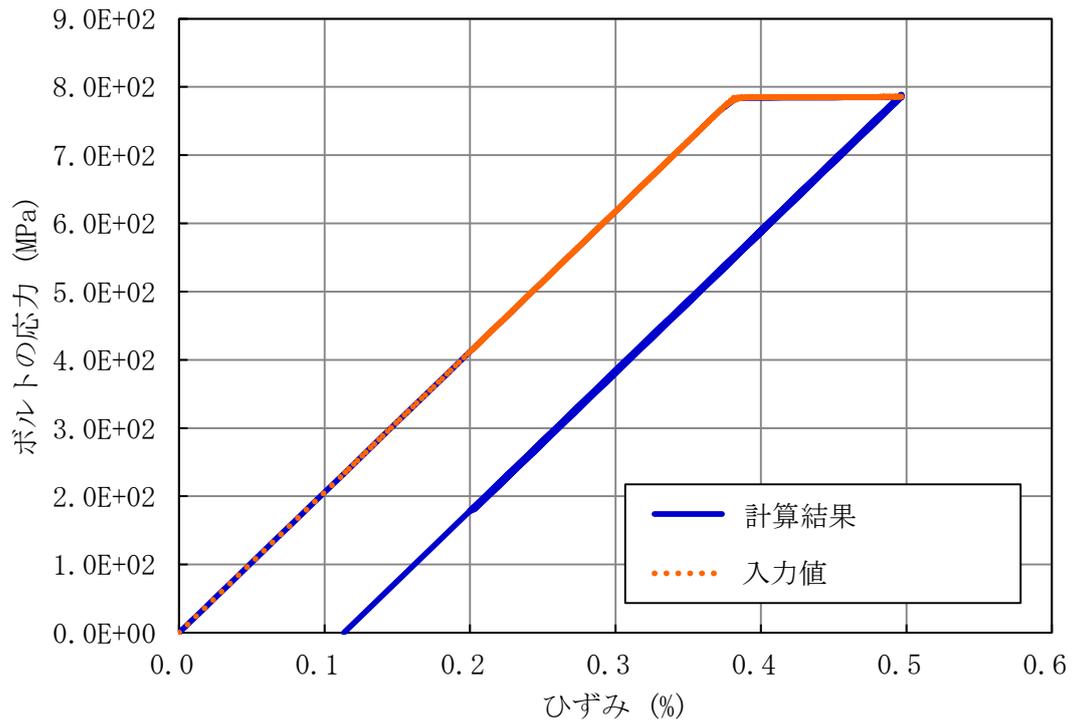
付図 2.2-2 弾塑性解析のボルトの伸び(XBOLT) (Case-2)



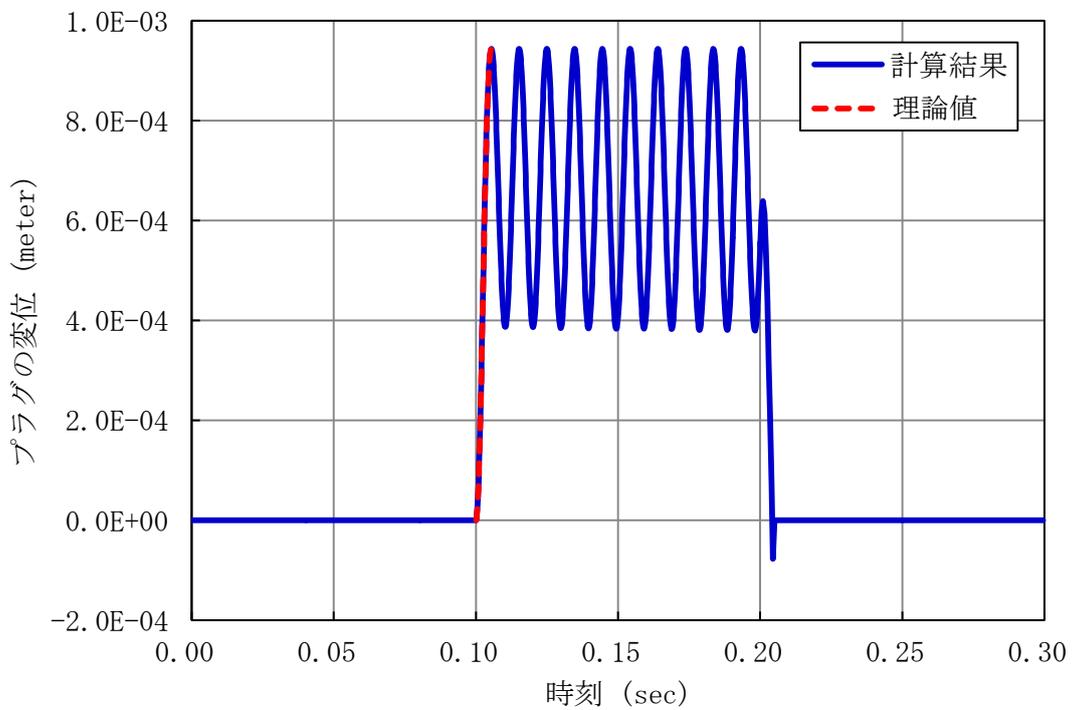
付図 2.2-3 弾塑性解析のボルトのひずみ(EP) (Case-2)



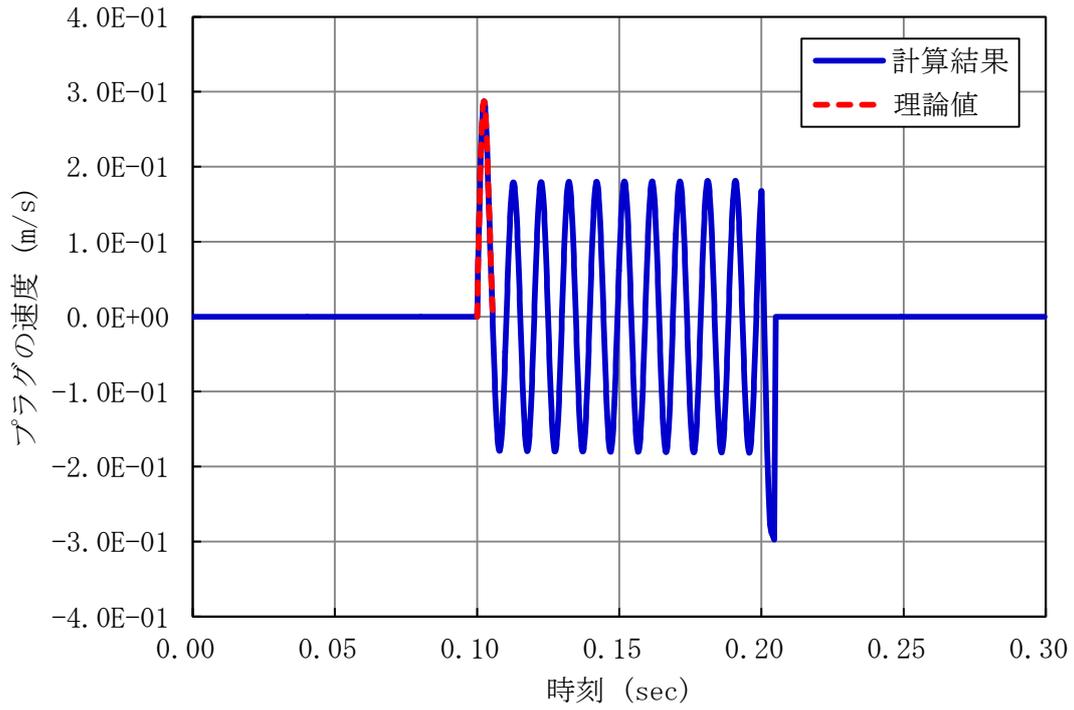
付図 2.2-4 弾塑性解析のボルトの塑性ひずみ(PS) (Case-2)



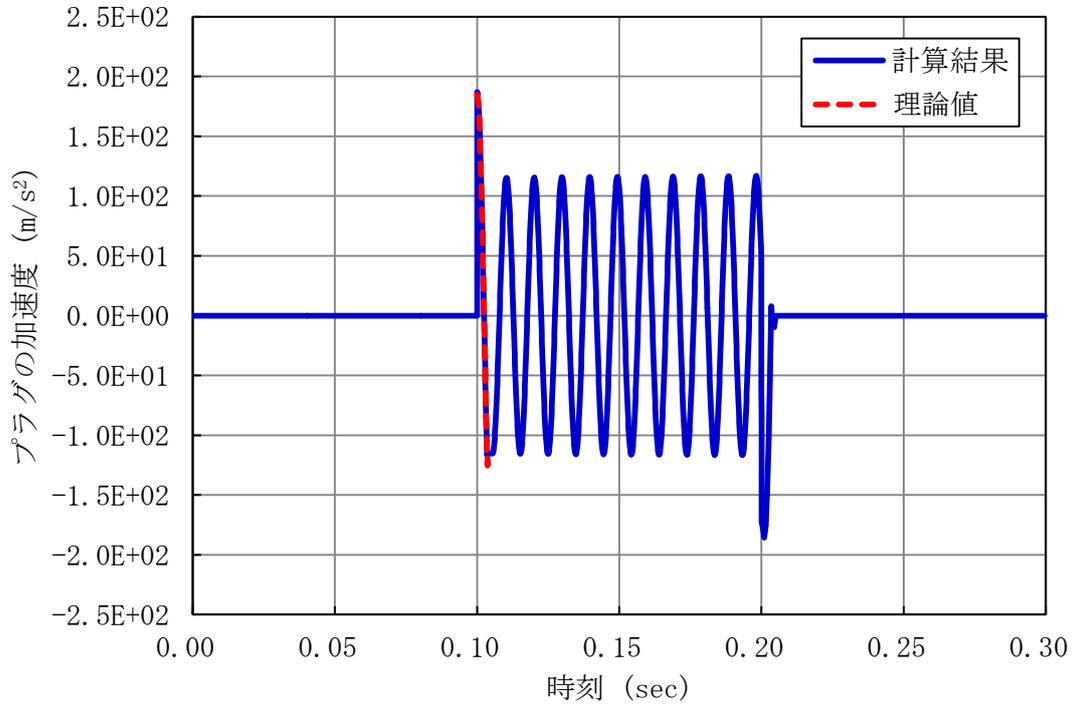
付図 2.2-5 弾塑性解析のボルトの応力(SI)－ひずみ(EP)関係(Case-2)



付図 2.2-6 弾塑性解析のプラグの変位(XD) (Case-2)



付図 2.2-7 弾塑性解析のプラグの速度(XV) (Case-2)



付図 2.2-8 弾塑性解析のプラグの加速度(XA) (Case-2)

3. ナトリウム噴出量の解析の妥当性の確認

3.1. 基礎方程式

PLUG コードでは、一つのプラグ間隙をいくつかの区分流路の組み合わせとしてモデル化する。垂直な流路部分は環状流路として、水平な流路部分は矩形の流路として、また垂直流路と水平流路の接続部は曲がり流路（エルボ）としてモデル化する（付図 3.1-1 参照）。

簡単のため次の①～③を仮定すると、プラグ間隙部を流れるナトリウム流はベルヌーイの方程式（等温系における定常のエネルギー保存式）に従うため、N 個の区分流路を持つプラグ間隙部における入口（原子炉容器内）と出口（プラグ上面）との圧力差は(A3.1-1)式で表される。

- ①プラグ間隙部の流れは定常流である
- ②液体ナトリウムは非圧縮性・非粘性の流体として扱うことができる
- ③流れは乱流または流れ方向に一様の流速分布を持つ。

$$P_{in} - P_{out} = \frac{1}{2}\rho(V_{out}^2 - V_{in}^2) + \rho g(H_{out} - H_{in}) + \sum_{n=1,N} \Delta F_n \quad \dots (A3.1-1)$$

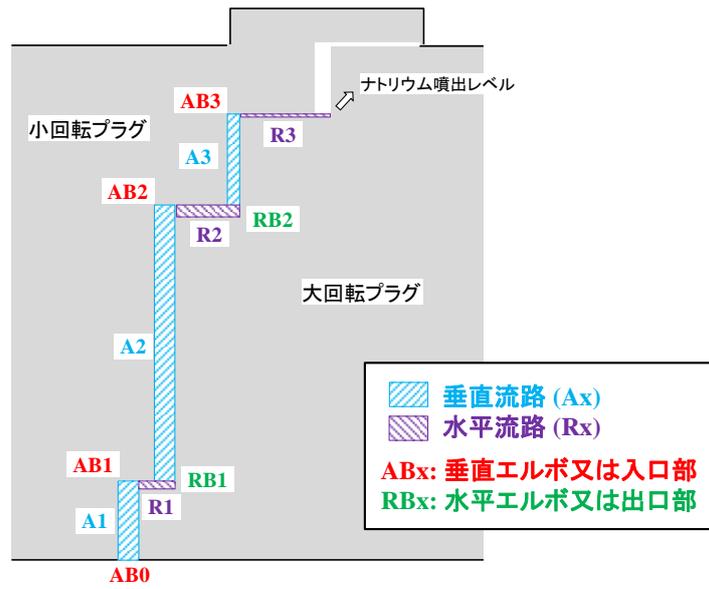
ここで

- P : 圧力 (Pa)
- ρ : 密度 (kg/m³)
- V : 流速 (m/s)
- g : 重力加速度 (m/s²)
- H : 基準面からの高さ (m)
- ΔF_n : 区分流路 n における摩擦損失または形状損失 (Pa)
- in : プラグ間隙部の入口（原子炉容器内）を示す添え字
- out : プラグ間隙部の出口（プラグ上面）を示す添え字
- N : 区分流路の数

入口側の断面を炉上部プレナム部の流路断面積の大きい位置にとると、 $V_{in} \cong 0$ となる。 $\Delta H = H_{out} - H_{in}$ とおくと(A3.1-1)式は以下のようなになる。

$$P_{in} - P_{out} = \frac{1}{2}\rho V_{out}^2 + \rho g \Delta H + \sum_{n=1,N} \Delta F_n \quad \dots (A3.1-2)$$

(A3.1-2)式の左辺は PLUG コードの入力として与えられる。右辺は質量流量の関数となる。PLUG コードでは、各タイムステップにおいて(A3.1-2)式を解くことにより、当該タイムステップにおける流量を得る。各区分流路の摩擦損失または形状損失 ΔF_n は相関式を用いて計算する。



付図 3. 1-1 PLUG コードにおける流路のモデル化の例 (大回転プラグ及び小回転プラグの間隙部)

3.2. CASE-3 垂直方向の流路を流れるナトリウムの噴出量の解析

1) 対象とする解析条件

ここでは付図 3.2-1 に示すような、垂直方向の環状流路が一つだけある流動解析の体系を想定し、Case-1 と同じプラグ及びボルトの動的応答解析の体系に対して Case-1 と同じ圧力履歴を与えた場合のナトリウムの噴出量について検討する。垂直流路は付図 3.2-1 に示すように同心二重円管としてモデル化する。

2) 解析の妥当性の確認方法

Case-3 の解析体系における流路長さは 2.715(m) であるところ、Case-1 のプラグの動的応答解析の結果から得られたプラグの変位は 1(mm) 以下であることから、垂直流路の長さ L は不変であるとして差し支え無い。従ってここでは、プラグが静止した状態において垂直流路を噴出するナトリウムの流量を理論的に計算した値（理論値）と、PLUG コードによる計算値とを比較して解析の妥当性を確認する。

3) 理論値

付図 3.2-1 の垂直流路を想定した場合の基礎方程式は、摩擦損失にダルシー・ワイズバッハの式を用いて以下に書き換えられる。

$$P_{in} - P_{out} = \frac{1}{2} \rho V^2 + \rho g L + \Delta P \quad \dots (A3.2-1)$$

$$\Delta P = \lambda \frac{L}{D_h} \frac{\rho V^2}{2} \quad \dots (A3.2-2)$$

ここで

V : 出口部における噴出ナトリウムの流速 (m/s)

ρ : 密度 (kg/m³)

g : 重力加速度 (m/s²)

L : 流路長さ (m)

ΔP : 摩擦損失 (Pa)

λ : 摩擦係数 (-)

D_h : 水力等価直径 (m)

同心二重円管の水力等価直径 D_h 、レイノルズ数 Re および当該流路の摩擦係数は以下の式で計算される^[1]。

水力等価直径 :

$$D_h = \frac{4S}{\Pi_0} = \frac{4\pi(D_0^2 - D_i^2)/4}{\pi(D_0 + D_i)} = D_0 - D_i \quad \dots (A3.2-3)$$

レイノルズ数 :

$$Re = \frac{\rho V D_h}{\mu} = \frac{\rho V (D_0 - D_i)}{\mu} \quad \dots (A3.2-3)$$

摩擦係数 :

$Re \leq Re_{crit-l}$ の場合：

$$\lambda = \frac{64}{Re} \frac{(D_o - D_i)^2}{D_o^2 + D_i^2 - (D_o - D_i)/[\ln(D_o/D_i)]} \quad \dots (A3.2-5a)$$

$Re_{crit-t} \leq Re$ の場合：

$$\lambda = 0.3051 \cdot Re^{-\frac{1}{4}} \cdot f(\varepsilon) \quad \dots (A3.2-5b)$$

$$f(\varepsilon) = 1.056 + 0.02 \log_{10}(\varepsilon - 0.0015) \quad \dots (A3.2-5c)$$

$$\varepsilon = \frac{D_i}{D_o} \quad \dots (A3.2-5d)$$

$Re_{crit-l} \leq Re \leq Re_{crit-t}$ の場合：

λ は $\lambda|_{Re=Re_{crit-l}}$ と $\lambda|_{Re=Re_{crit-t}}$ との間で直線内挿

ここで

S : 流路断面積 (m²)

Π_0 : 濡れぶち長さ (m)

D_o : 流路直径 (外側) (m)

D_i : 流路直径 (内側) (m)

μ : 粘度 (Pa*s)

Re_{crit-l} : 層流域の上限レイノルズ数 (=2000)

Re_{crit-t} : 乱流域の下限レイノルズ数 (=4000)

乱流を仮定し整理すると (A3.2-1) 式は以下に書き換えられる。

$$P_{in} - P_{out} = \frac{1}{2} \rho V^2 + \rho g L + 0.3051 \cdot \left(\frac{\rho V D_h}{\mu} \right)^{-\frac{1}{4}} \cdot f(\varepsilon) * \frac{L}{D_h} \frac{\rho V^2}{2} \quad \dots (A3.2-6a)$$

$$f(\varepsilon) = 1.056 + 0.02 \log_{10}(\varepsilon - 0.0015) \quad \dots (A3.2-6b)$$

$$\varepsilon = \frac{D_i}{D_o} \quad \dots (A3.2-6c)$$

(A3.2-6) 式を V について整理すると次式を得る。

$$\frac{1}{2} \rho V^2 + 0.3051 \cdot \left(\frac{\rho D_h}{\mu} \right)^{-\frac{1}{4}} \cdot f(\varepsilon) \cdot \frac{\rho L}{2 D_h} \cdot V^{\frac{7}{4}} - P_{in} + P_{out} + \rho g L = 0 \quad \dots (A3.2-7)$$

Case-1 においてプラグ下面に作用する圧力は $P_{in} = 5.0 \times 10^6$ (Pa) であるので、外圧をゼロとし、付表 3.2-1 に示した流路の幾何形状及びナトリウムの物性値を (A3.2-7) 式に代入して整理すると次式を得る。

$$388.8 * V^2 + 354.656 * V^{\frac{7}{4}} - 4.97929 \times 10^6 = 0 \quad \dots (A3.2-8)$$

ここでは (A3.2-8) 式を数値的に解くことにより V を得る。以下の関数 $F(V)$ を定義すると、関数 $F(V)$ のプロットは付図 3.2-2 のようになり、同図から $F(V) \approx 0$ となる V が得られる。

$$F(V) = 388.8 * V^2 + 354.656 * V^{\frac{7}{4}} - 4.97929 \times 10^6 \quad \dots (A3.2-9)$$

噴出ナトリウムの流速： $V = 99.6891$ (m/s)
噴出ナトリウムの質量流量： $W = \rho VS = 3.28767 \times 10^4$ (kg/s)

また、この時のレイノルズ数は(A3.2-4)式より

$$Re = 6.5014 \times 10^6$$

であり乱流であることが確認できる。

3) 理論値と PLUG コードによる計算値との比較

付図 3.2-3 及び 3.2-4 に噴出ナトリウムの流速(VS)、噴出ナトリウムの質量流量(W)の PLUG コードによる計算値をそれぞれ示す。付表 3.2-2 に理論値と PLUG コードによる計算値との比較を示す。理論値と計算値とは良く一致している。

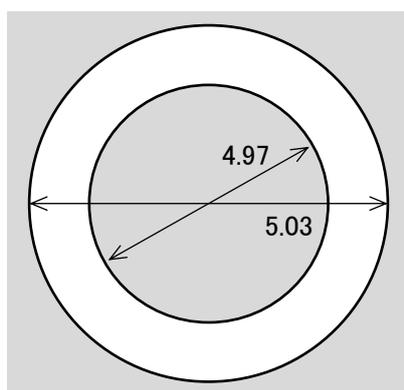
以上から、垂直方向の流路を流れるナトリウムの噴出量の PLUG コードによる解析の妥当性が確認できる。

付表 3. 2-1 解析に必要となる流路の幾何形状及びナトリウムの物性値 (Case-3)

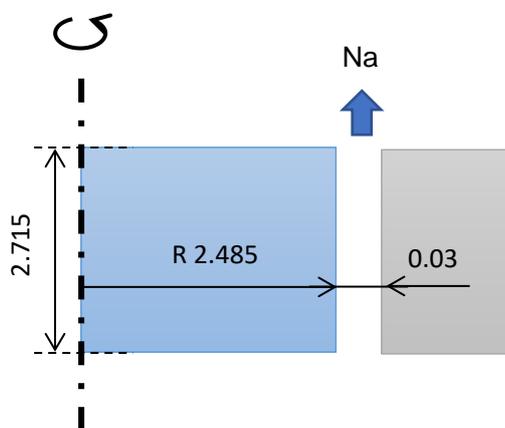
記号	意味	数値	単位
ρ	ナトリウム密度	777. 6	kg/m ³
ν	ナトリウム動粘度係数	7.2×10^{-7}	m ² /s
μ	ナトリウム粘度	7.154×10^{-4}	Pa*s
D_o	流路直径 (外側)	4. 53	m
D_i	流路直径 (内側)	4. 47	m
D_h	水力等価直径	0. 06	m
ε	D_i/D_o	0. 986755	-
L	流路長さ	2. 715	m
S	流路断面積	0. 424115	m ²
P_{in}	プラグ下面に作用する圧力	5.0×10^6	Pa
P_{out}	外圧	0. 0	Pa
g	重力加速度	9. 81	m/s

付表 3. 2-2 理論値と PLUG コードによる計算値との比較 (Case-3)

項目	理論値	計算値	理論値との差
噴出ナトリウムの流速	99. 6891 m/s	99. 6900 m/s	1e-3 %
噴出ナトリウムの質量流量	$3. 28767 \times 10^4$ kg/s	$3. 28800 \times 10^4$ kg/s	1e-2 %

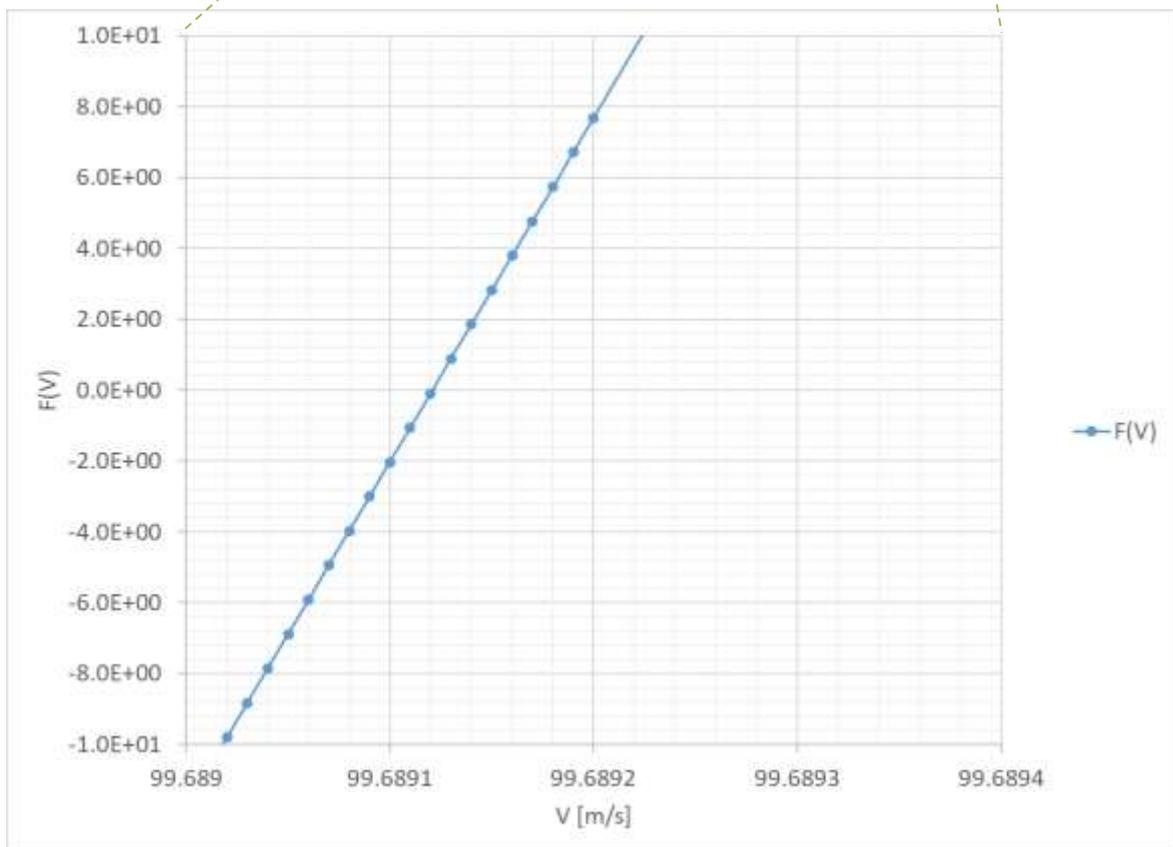
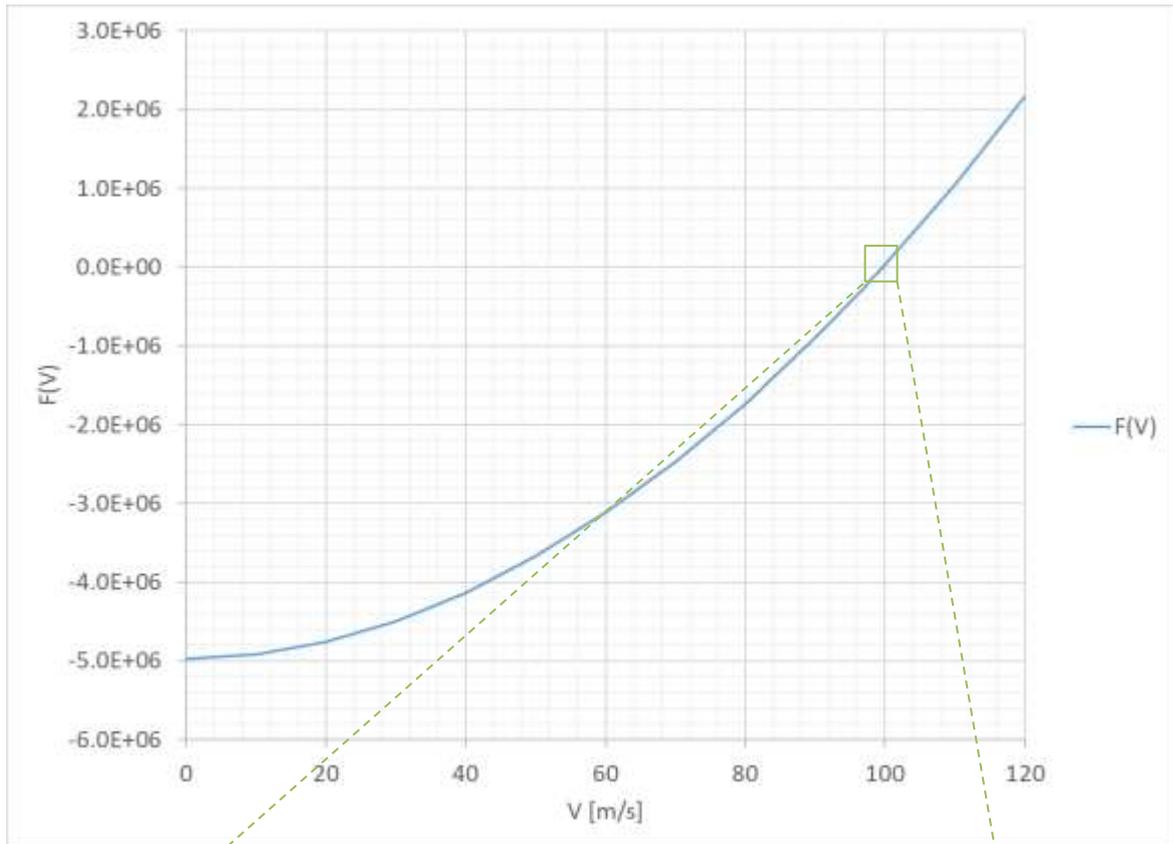


(a) 水平断面

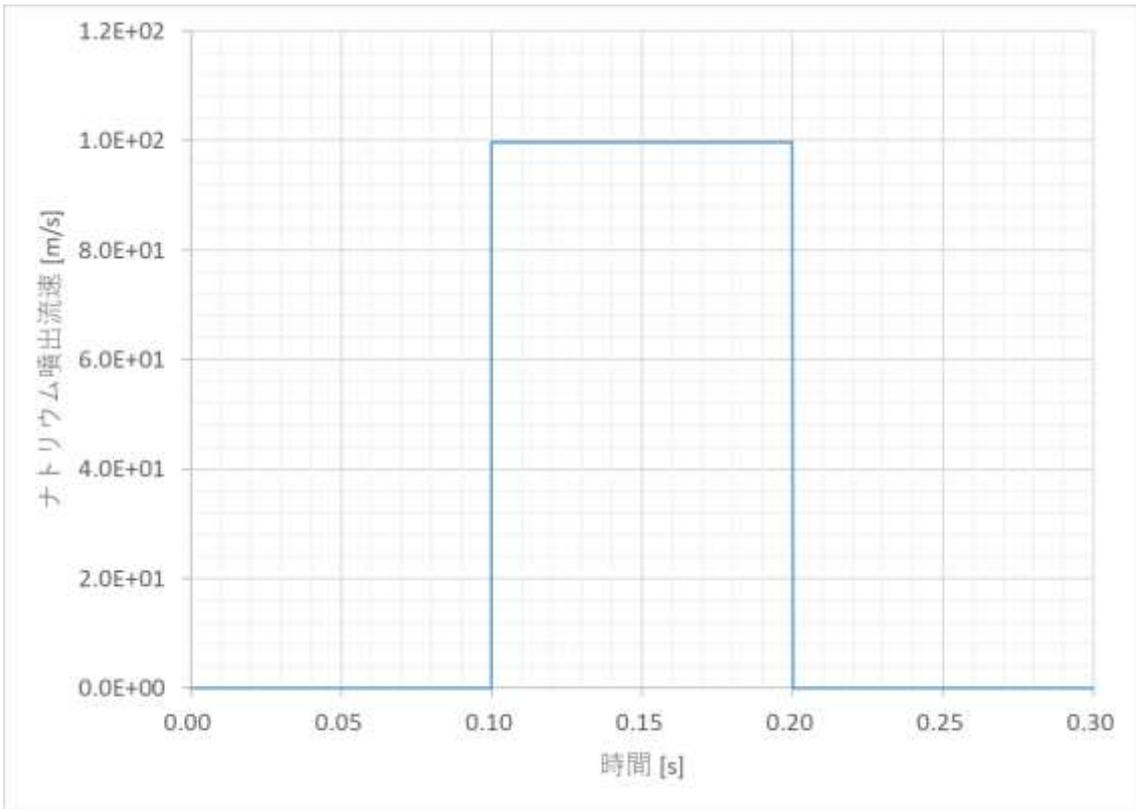


(b) 垂直断面

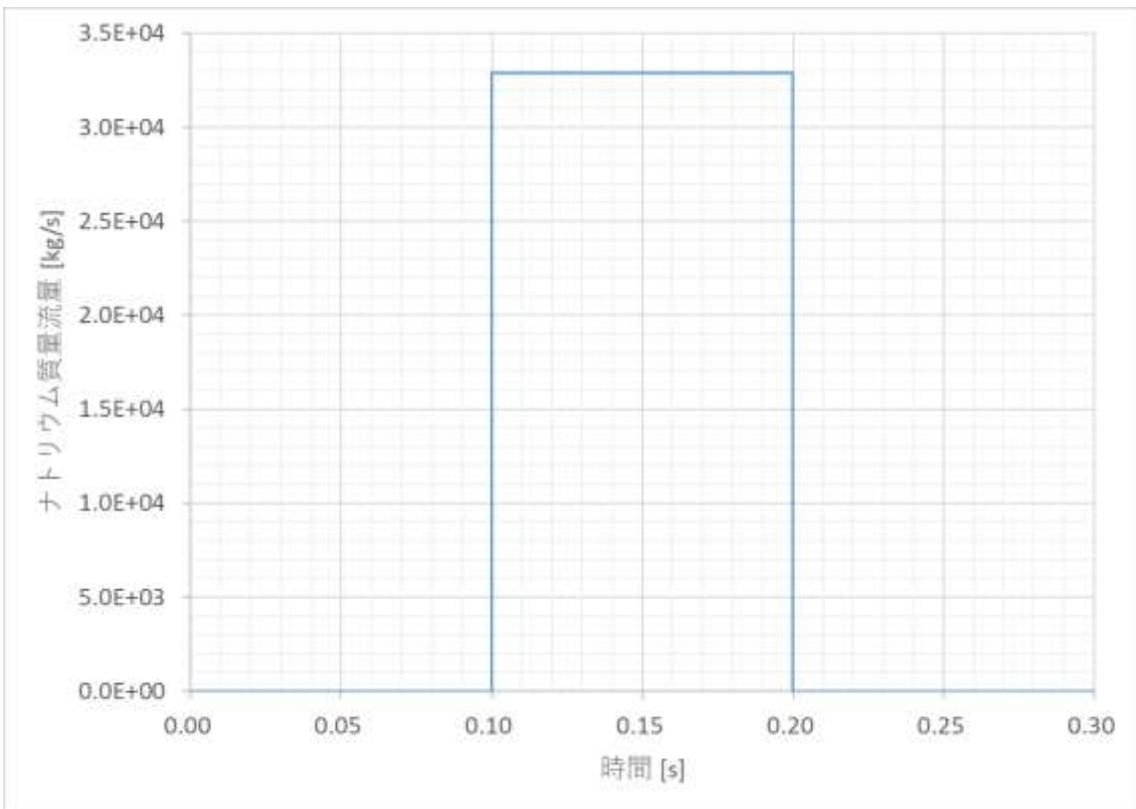
付図 3.2-1 垂直方向の流路を流れるナトリウムの噴出量の解析の体系 (Case-3)



付図 3.2-2 関数 $F(V)$ のプロット (Case-3)



付図 3.2-3 噴出ナトリウムの流速 (Case-3)



付図 3.2-4 噴出ナトリウムの質量流量 (Case-3)

3.3. CASE-4 水平方向の流路を流れるナトリウムの噴出量の解析

1) 対象とする解析条件

ここでは付図 3.3-1 に示すような水平流路をもつ流動解析の体系を想定し、Case-1 と同じプラグ及びボルトの動的応答解析の体系に対して Case-1 と同じ圧力履歴を与えた場合のナトリウムの噴出量について検討する。水平流路は付図 3.3-1 に示すように矩形流路としてモデル化する。流路の長さには大円及び小円の半径差を与える。流路の幅については流動抵抗が小さくなるよう、大円の周長を与える。水平流路の摩擦損失のみを確認するため、便宜上、(A3.1-2) 式の ΔH をゼロとした解析を行う。

2) 解析の妥当性の確認方法

付図 3.3-1 に示す解析体系においてプラグが運動すると、流路高さが動的に変化する。ここでは流路高さが最大となる時点における噴出ナトリウムの流量の理論値を、PLUG コードによる計算値と比較して解析の妥当性を確認する。

3) 理論値

付図 3.3-1 の水平流路を想定した場合の基礎方程式は、(A3.1-2) 式の $\Delta H = 0$ として摩擦損失にダルシー・ワイズバッハの式を用いて以下に書き換えられる。

$$P_{in} - P_{out} = \frac{1}{2} \rho V^2 + \Delta P \quad \dots (A3.3-1a)$$

$$\Delta P = \lambda \frac{L}{D_h} \frac{\rho V^2}{2} \quad \dots (A3.3-1b)$$

ここで

V : 出口部における噴出ナトリウムの流速 (m/s)

ρ : 密度 (kg/m³)

L : 流路長さ (m)

ΔP : 摩擦損失 (Pa)

λ : 摩擦係数 (-)

D_h : 水力等価直径 (m)

水力等価直径 D_h 、レイノルズ数 Re および当該流路の摩擦係数は以下の式で計算される^[2]。

水力等価直径 :

$$D_h = \frac{4S}{\Pi_0} = \frac{4ah}{2a+2h} = \frac{2ah}{a+h} \quad \dots (A3.3-2)$$

レイノルズ数 :

$$Re = \frac{\rho V D_h}{\mu} = \frac{2\rho V a h}{\mu(a+h)} \quad \dots (A3.3-3)$$

摩擦係数 :

$Re \leq Re_{crit-l}$ の場合 :

$$\lambda = \frac{64}{Re} \cdot k \quad \dots (A3.3-4a)$$

$$k = \frac{3/2}{(1 + \varepsilon)^2} \cdot \left[1 - \frac{192\varepsilon}{\pi^5} \left\{ \tanh\left(\frac{\pi}{2\varepsilon}\right) + \frac{1}{3^5} \tanh\left(\frac{3\pi}{2\varepsilon}\right) \right\} \right]^{-1} \quad \dots (A3.3-4b)$$

$$\varepsilon = \frac{h}{a} \quad \dots (A3.3-4c)$$

$Re_{crit-t} \leq Re$ の場合：

$$\lambda = 0.3164 \cdot Re^{-\frac{1}{4}} \quad \dots (A3.3-4d)$$

$Re_{crit-l} \leq Re \leq Re_{crit-t}$ の場合：

λ は $\lambda|_{Re=Re_{crit-l}}$ と $\lambda|_{Re=Re_{crit-t}}$ との間で直線内挿

ここで

S : 流路断面積 (m²)

Π_0 : 濡れぶち長さ (m)

a : 水平流路幅 ($a = \pi D_o$ 、 D_o は大円の直径) (m)

b : 水平流路高さ※ (m)

L : 水平流路長さ ($L = \frac{D_o - D_i}{2}$ 、 D_i は小円の直径) (m)

ρ : ナトリウム密度 (kg/s)

μ : ナトリウム粘度 (Pa*s)

V : ナトリウム流速 (m/s)

Re_{crit-l} : 層流域の上限レイノルズ数 (=2000)

Re_{crit-t} : 乱流域の下限レイノルズ数 (=4000)

※ プラグの動的応答により変化する。

乱流状態における矩形流路の摩擦係数を与える式はいくつか存在するが、ここでは保守的に円管に対するそれ(A3.3-4d式)を用いることとした。これは、あるレイノルズ数を与えた場合に、円管の摩擦係数が他の(より複雑な)相関式から得られる摩擦係数よりも小さくなることから、円管に対する摩擦係数式を用いる方が保守的であると判断したことによる。

乱流を仮定して整理すると、(A3.3-1)式は以下に書き換えられる。

$$P_{in} - P_{out} = \frac{1}{2} \rho V^2 + 0.3164 \cdot \left(\frac{2\rho Vab}{\mu(a+b)} \right)^{-\frac{1}{4}} \cdot \frac{L}{D_h} \frac{\rho V^2}{2} \quad \dots (A3.3-5)$$

ここで b はプラグの動的応答により変化する変数である。

(A3.3-5)式を V について整理すると次式を得る。

$$\frac{1}{2} \rho V^2 + 0.3164 \cdot \left(\frac{2\rho ab}{\mu(a+b)} \right)^{-\frac{1}{4}} \cdot \frac{\rho L}{2D_h} \cdot V^{\frac{7}{4}} - P_{in} + P_{out} = 0 \quad \dots (A3.3-6)$$

Case-1におけるプラグの動的応答は付図2.1-8のとおりであり、最大変位は $b_{max} = 6.24 \times 10^{-4}$ (m)である。このときプラグ下面に作用する圧力は $P_{in} = 5.0 \times 10^6$ (Pa)であるので、外圧をゼロとし、付表3.3-1に示した流路の幾何形状及びナトリウムの物性値を(A3.3-6)式に代入して整理すると、プラグの最大変位における噴出ナトリウムの流速 V に関する次式を得る。

$$388.8 * V^2 + 7715.31 * V^{\frac{7}{4}} - 5.0 \times 10^6 = 0 \quad \dots (A3.3-7)$$

ここで(A3.3-7)式を数値的に解くことによりVを得る。以下の関数 $F(V)$ を定義すると、関数 $F(V)$ のプロットは付図3.3-2のようになり、同図から $F(V) \approx 0$ となるVが得られる。

$$F(V) = 388.8 * V^2 + 7715.31 * V^{\frac{7}{4}} - 5.0 \times 10^6 \quad \dots (A3.3-8)$$

噴出ナトリウムの流速 : $V = 37.7937$ (m/s)

噴出ナトリウムの質量流量 : $W = \rho SV = 3.41061 \times 10^2$ (kg/s)

また、この時のレイノルズ数は(A3.3-3)式より

$$Re = 5.12663 \times 10^4 \quad \dots (A3.3-9)$$

であり乱流であることが確認できる。

4) 理論値 PLUG コードによる計算値との比較

付図3.3-3及び3.3-4に噴出ナトリウムの流速(VS)、噴出ナトリウムの質量流量(W)のPLUGコードによる計算値をそれぞれ示す。付表3.3-2に理論値とPLUGコードによる計算値との比較を示す。理論値と計算値とはよく一致している。

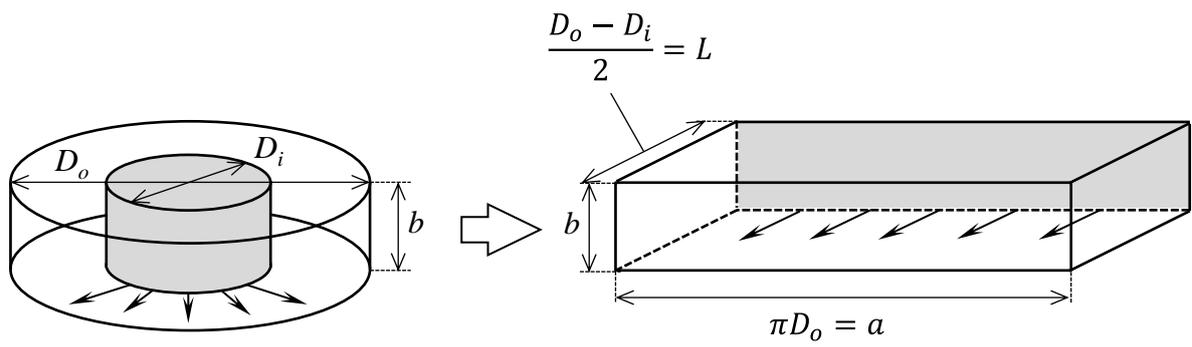
以上から、水平方向の流路を流れるナトリウムの噴出量のPLUGコードによる解析の妥当性が確認できる。

付表 3. 3-1 解析に必要となる流路の幾何形状及びナトリウムの物性値 (Case-4)

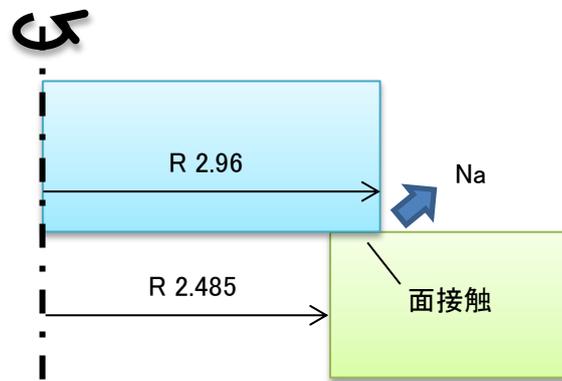
記号	意味	数値	単位
ρ	ナトリウム密度	777. 6	kg/m ³
ν	ナトリウム動粘度係数	7.2×10^{-7}	m ² /s
μ	ナトリウム粘度	7.154×10^{-4}	Pa*s
a	水平流路の幅 (=大円周)	18. 5982	m
b_{max}	水平流路高さの最大値	6.24×10^{-4}	m
D_h	水力等価直径	1.248×10^{-3}	m
L	流路長さ	0. 475	m
S	流路断面積	1.1605×10^{-3}	m ²
P_{in}	プラグ下面に作用する圧力	5.0×10^6	Pa
P_{out}	外圧	0. 0	Pa
g	重力加速度	9. 81	m/s

付表 3. 3-2 理論値と PLUG コードによる計算値との比較 (Case-4)

項目	理論値	計算値	理論値との差
噴出ナトリウムの流速	37. 7937 m/s	37. 7900 m/s	-1e-2 %
噴出ナトリウムの質量流量	$3. 41061 \times 10^2$ kg/s	$3. 41000 \times 10^2$ kg/s	-1. 8e-2 %

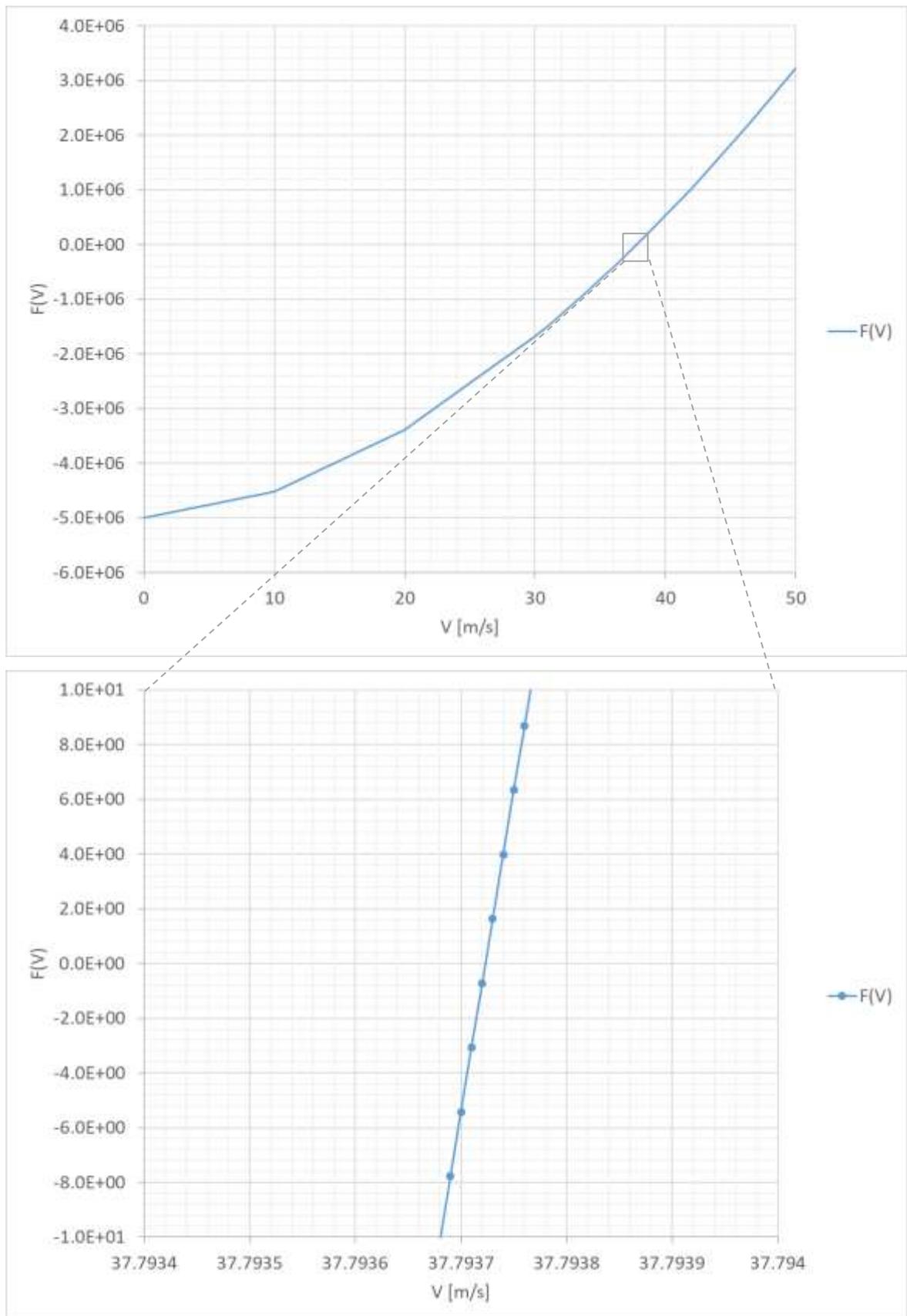


(a) 水平流路のモデル化

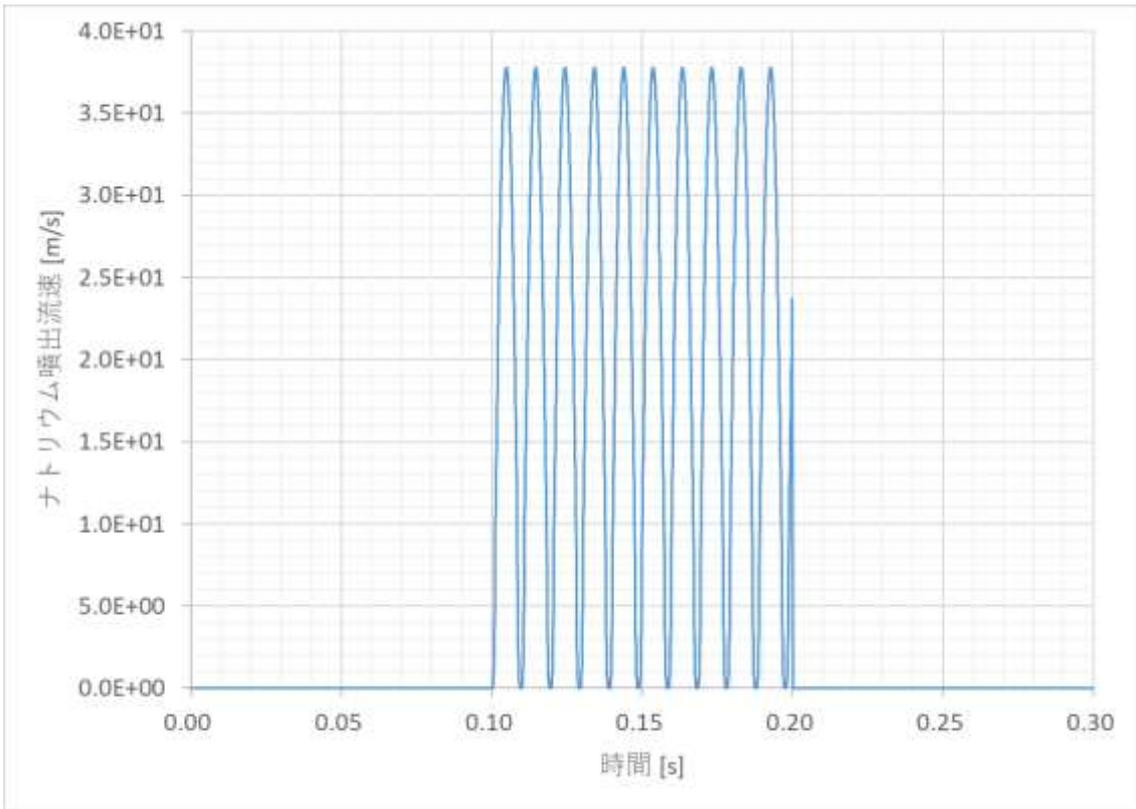


(b) 垂直断面

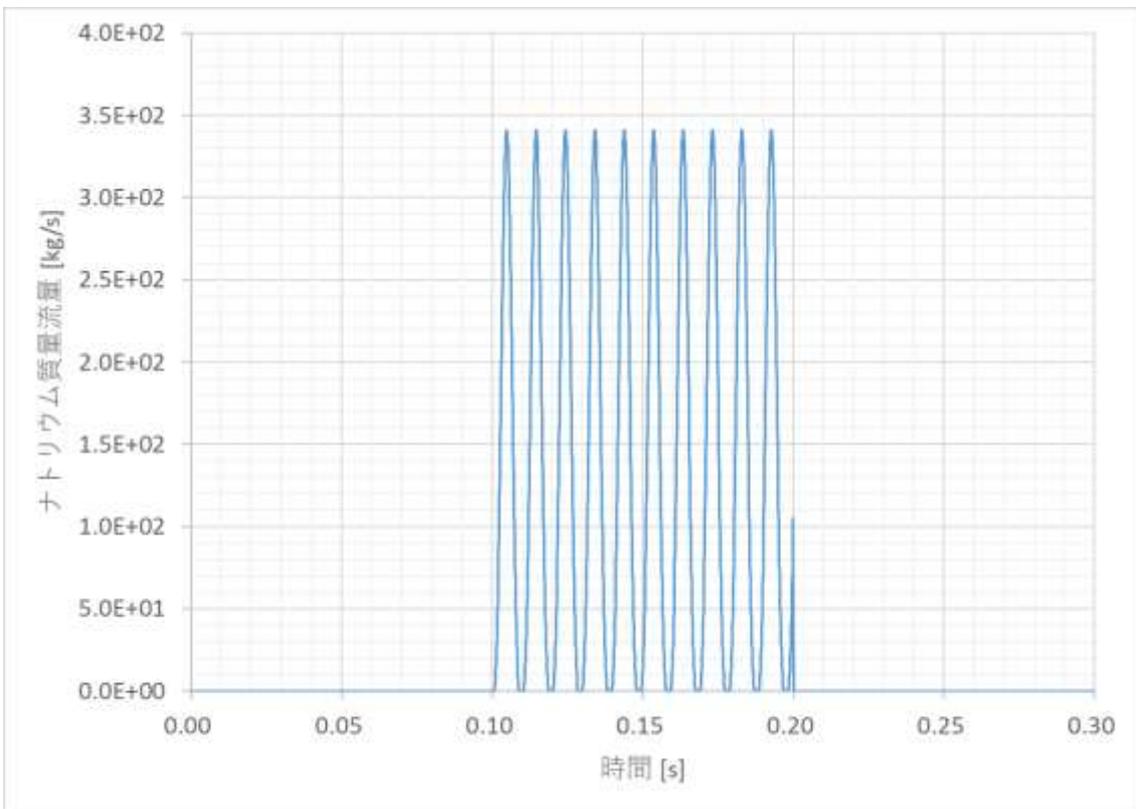
付図 3.3-1 水平方向の流路を流れるナトリウムの噴出量の解析の体系 (Case-4)



付図 3.3-2 関数 $F(V)$ のプロット (Case-4)



付図 3.3-3 噴出ナトリウムの流速 (Case-4)



付図 3.3-4 噴出ナトリウムの質量流量 (Case-4)

3.4. CASE-5 入口部及び曲がり部を流れるナトリウムの噴出量の解析

1) 対象とする解析条件

ここでは付図 3.4-1 に示すような、垂直方向の環状流路と水平方法の流路を組み合わせた流動解析の体系を想定し、Case-1 と同じプラグ及びボルトの動的応答解析の体系に対して Case-1 と同じ圧力履歴を与えた場合のナトリウムの噴出量について検討する。入口部及び曲がり部の形状損失のみを確認するため、便宜上、垂直路及び水平流路の長さをゼロとする。

2) 解析の妥当性の確認方法

付図 3.4-1 に示す解析体系においてプラグが運動すると、流路高さが動的に変化する。ここでは流路高さが最大となる時点における噴出ナトリウムの流量の理論値を、PLUG コードによる計算値と比較して解析の妥当性を確認する。

3) 理論値

付図 3.4-1 の流路を想定した場合の基礎方程式は、(A3.1-2)式の $\Delta H = 0$ として摩擦損失にダルシー・ワイズバッハの式を用いて以下に書き換えられる。

$$P_{in} - P_{out} = \frac{1}{2} \rho V^2 + \Delta P \quad \dots (A3.4-1)$$

$$\Delta P = \sum \zeta \frac{\rho V^2}{2} \quad \dots (A3.4-2)$$

ここで

V : 流速 (m/s)

ρ : 密度 (kg/m³)

ΔP : 摩擦損失 (Pa)

ζ : 損失係数 (-)

(A3.4-2)式における曲がり部の流速の計算に当たっては上流側の流路断面積が、入口部の流速の計算に当たっては絞り後の流路断面積がそれぞれ用いられる。損失係数を与える式はいくつか存在するが、PLUG コードでは各要素の損失係数を入力で与える。なお、出口部における圧力損失はないものとして損失係数ゼロを与える。

付図 3.4-1 に示される管路を想定し、入口部及び曲がり部に抵抗が発生し、出口での抵抗がないとすると、(A3.4-1)式は以下に書き換えられる。

$$P_{in} - P_{out} = \frac{1}{2} \rho V_{out}^2 + \Delta P_1 + \Delta P_2 \quad \dots (A3.4-3a)$$

$$\Delta P_1 = \zeta_1 \frac{\rho V_1^2}{2} \quad \dots (A3.4-3b)$$

$$\Delta P_2 = \zeta_2 \frac{\rho V_1^2}{2} \quad \dots (A3.4-3c)$$

ここで

V_{out} : 出口部におけるナトリウムの流速 (m/s)

- ΔP_1 : 入口部の圧力損失 (Pa)
 ΔP_2 : 曲がり部の圧力損失 (Pa)
 V_1 : 入口部及び曲がり部におけるナトリウムの流速¹ (m/s)
 ζ_1 : 入口部の抵抗係数 (-)
 ζ_2 : ベンド部の抵抗係数 (-)

また、系は連続した流れなので体積流量は一定である。したがって

$$Q = V_{out} * S_{out} = V_1 * S_1 \quad \dots (A3.4-4a)$$

$$S_{out} = \pi D_3 * b \quad \dots (A3.4-4b)$$

$$S_1 = \frac{\pi(D_2^2 - D_1^2)}{4} \quad \dots (A3.4-4c)$$

ここで

- Q : 体積流量 (m³)
 S_{out} : 出口部の流路断面積 (m²)
 S_1 : 入口部の流路断面積 (m²)
 D_3 : 出口部の直径 (m)
 b : 出口部の流路高さ※ (m)
 D_2 : 入口部の直径 (外側) (m)
 D_1 : 入口部の直径 (内側) (m)

※ プラグの動的応答により変化する。

(A3.4-4)式を V_1 に関して整理すると次式を得る。

$$V_1 = \frac{4bD_3}{D_2^2 - D_1^2} * V_{out} \quad \dots (A3.4-5)$$

(A3.4-5)式を(A3.4-3)式に代入し、 V_{out} に関して整理すると次式を得る。

$$\left(1 + (\zeta_1 + \zeta_2) \left(\frac{4bD_3}{D_2^2 - D_1^2}\right)^2\right) \frac{\rho}{2} V_{out}^2 - P_{in} + P_{out} = 0 \quad \dots (A3.4-6)$$

(A3.4-6)式は V_{out} についての二次方程式であるので、これを解くと

$$V_{out} = \pm \sqrt{\frac{2(P_{in} - P_{out})}{\rho \left(1 + (\zeta_1 + \zeta_2) \left(\frac{4bD_3}{D_2^2 - D_1^2}\right)^2\right)}} \quad \dots (A3.4-7)$$

V_{out} は $P_{in} - P_{out}$ の符号と同一であるので

$$V_{out} = \sqrt{\frac{2(P_{in} - P_{out})}{\rho \left(1 + (\zeta_1 + \zeta_2) \left(\frac{4bD_3}{D_2^2 - D_1^2}\right)^2\right)}} \quad \dots (A3.4-8)$$

¹ ここで想定している図 3.4-1 の体系では入口部の流路断面積と曲がり部の流路断面積は等しくなるため、両流路断面における流速は同じとなる。

Case-1 におけるプラグの動的応答は付図 2.1-8 のとおりであり、最大変位は $b_{max} = 6.24 \times 10^{-4}$ (mm) である。このときプラグ下面に作用する圧力は $P_{in} = 5.0 \times 10^6$ (Pa) であるので、外圧をゼロとして (A3.4-8) 式に付表 3.4-1 に示す流路の幾何形状及びナトリウムの物性値を代入すると、プラグの最大変位における噴出ナトリウムの流速 V_{out} 及び質量流量 W_{out} が得られる。

$$V_{out} = \sqrt{\frac{2 * 5.0 \times 10^6}{777.6 * \left(1 + (0.1 + 0.1) \left(\frac{4 * 6.24 \times 10^{-4} * 5.92}{4.53^2 - 4.47^2}\right)^2\right)}} \quad \dots (A3.4-9)$$

$$W_{out} = \rho V_{out} S_{out} \quad \dots (A3.4-10)$$

噴出ナトリウムの流速 : $V_{out} = 113.394$ (m/s)

噴出ナトリウムの質量流量 : $W_{out} = 1023.30$ (kg/s)

4) 理論値と PLUG コードによる計算値との比較

付図 3.4-2～3.4-3 に噴出ナトリウムの流速 (VS)、及び質量流量 (W) の時刻歴をそれぞれ示す。付表 3.4-2 に理論値と PLUG コードによる計算値との比較を示す。理論値と計算値とはよく一致している。

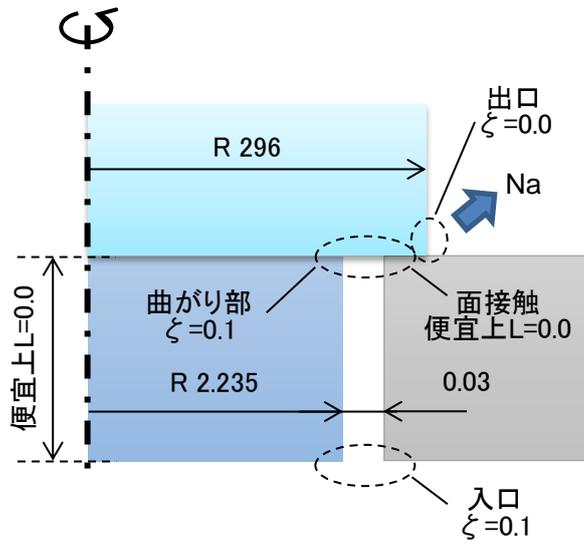
以上から、入口部及び曲がり部を流れるナトリウムの噴出量の PLUG コードによる解析の妥当性が確認できる。

付表 3. 4-1 解析に必要となる流路の幾何形状及びナトリウムの物性値 (Case-5)

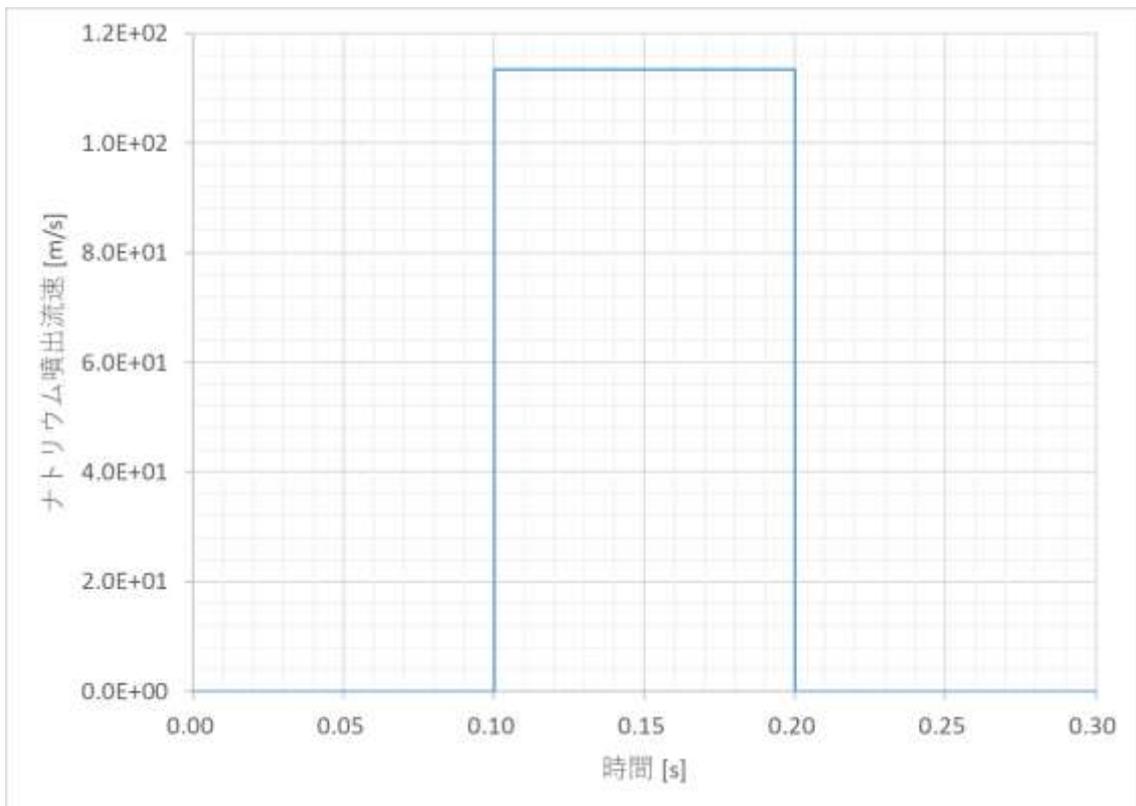
記号	意味	数値	単位
ρ	ナトリウム密度	777. 6	kg/m ³
ν	ナトリウム動粘度係数	7.2×10^{-7}	m ² /s
μ	ナトリウム粘度	7.154×10^{-4}	Pa*s
ζ_1	入口損失係数	0. 1	-
ζ_2	曲がり部損失係数	0. 1	-
b_{max}	水平流路高さの最大値	6.24×10^{-4}	m
D_1	流路入口部直径(内側)	4. 47	m
D_2	流路入口部直径(外側)	4. 53	m
D_3	流路出口部直径	5. 92	m
S_{out}	流路出口部面積	1.1605×10^{-3}	m ²
P_{in}	プラグ下面に作用する圧力	5.0×10^6	Pa
P_{out}	外圧	0. 0	Pa
g	重力加速度	9. 81	m/s

付表 3. 4-2 理論値と PLUG コードによる計算値との比較 (Case-5)

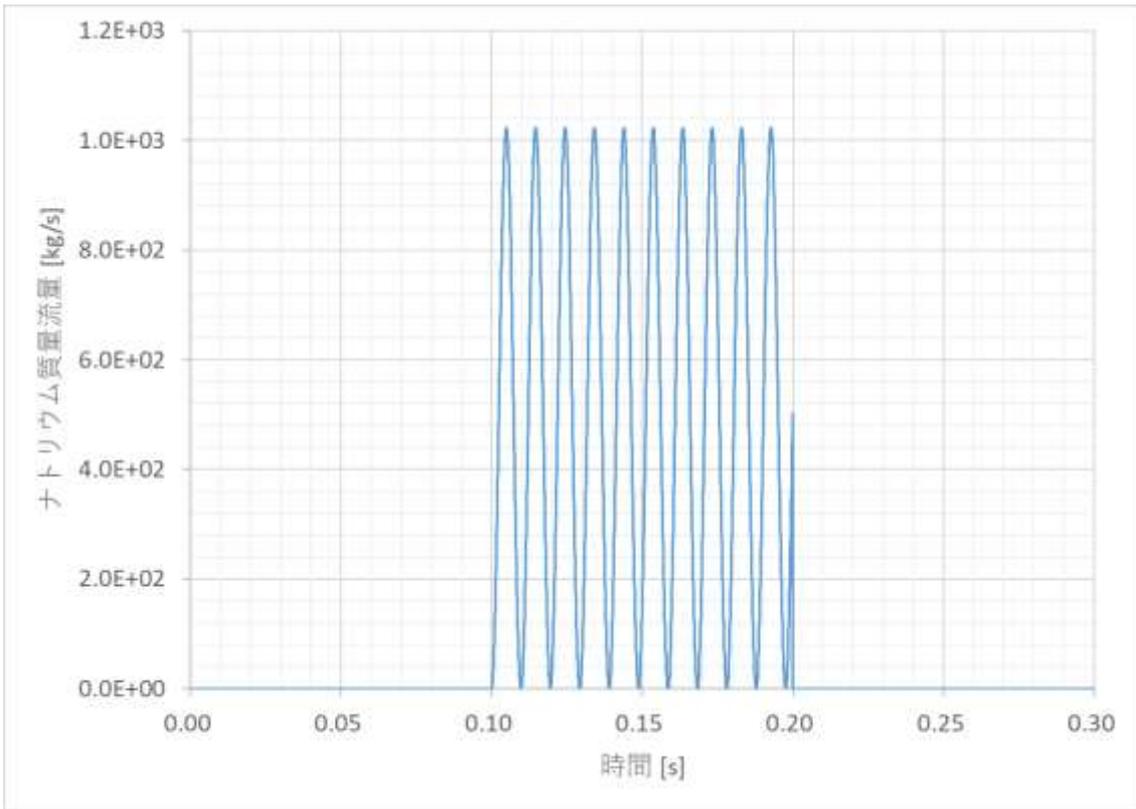
項目	理論値	計算値	理論値との差
噴出ナトリウムの流速	113. 394 m/s	113. 400 m/s	5. 3e-3 %
噴出ナトリウムの質量流量	1203. 09 kg/s	1203. 00 kg/s	-7. 5e-3 %



付図 3. 4-1 入口部及び曲がり部を流れるナトリウムの噴出量の解析の体系 (Case-5)



付図 3. 4-2 噴出ナトリウムの流速 (Case-5)



付図 3.4-3 噴出ナトリウムの質量流量(Case-5)

4. プラグの衝突解析の妥当性の確認

4.1. CASE-6 互いに独立したプラグの衝突解析

1) 対象とする解析条件

ここでは付図 4.1-1 に示すように初速度 1m/s の 3 つのプラグが 10cm 間隔で無重力空間の一直線上を並進して剛壁に衝突する際の応答について検討する。付表 4.1-1 に解析に必要となるプラグの質量、初期における剛壁からの距離及び初速度を示す。プラグ間の質量差による影響を検証するため、プラグ 2 はプラグ 1 の 5 倍の質量、プラグ 3 は同 8 倍の質量とする。なお、プラグが衝突する際の反発係数は、いずれのプラグの組み合わせの場合でも一律に 0.9 とする。

付図 4.1-1 に示す状態(IV)はこれ以上衝突が生じない終状態を想定する。すなわち、状態(IV)における各プラグの速度の関係は以下となる。

$$V_3''' < V_2''' < V_1''' \quad \dots (A4.1-1)$$

2) 解析の妥当性の確認方法

プラグの一次元の衝突の式を解き理論解を算出して衝突後のプラグの速度を求め、これを PLUG コードによる計算値と比較して解析の妥当性を確認する。

3) 理論値の算出

1 次元の衝突の式より、物体 a および b が衝突したときの衝突後の速度は以下の式で表される。

$$V_a' = \frac{em_b(V_b - V_a) + m_a V_a + m_b V_b}{m_a + m_b} \quad \dots (A4.1-2)$$

$$V_b' = \frac{em_a(V_a - V_b) + m_a V_a + m_b V_b}{m_a + m_b} \quad \dots (A4.1-3)$$

ここで

V_a' : 物体 a の衝突後の速度 (m/s)

V_b' : 物体 b の衝突後の速度 (m/s)

V_a : 物体 a の衝突前の速度 (m/s)

V_b : 物体 b の衝突前の速度 (m/s)

m_a : 物体 a の質量 (kg)

m_b : 物体 b の質量 (kg)

e : 物体間の反発係数

である。また、剛壁部における衝突の式は

$$V_a' = -eV_a \quad \dots (A4.1-4)$$

である。

■状態(II)における各プラグの速度

付図 4.1-1 の状態(II)においては、プラグ 3 が剛壁と衝突する。

$$V_3' = -eV_3 = -0.9 * (-1) = 0.9 \quad \dots (A4.1-5)$$

したがって状態(II)における各プラグの速度は以下の通りとなる。

$$\begin{aligned} V_1' : & \text{プラグ 1 の速度} & = -1 \text{ (m/s)} \\ V_2' : & \text{プラグ 2 の速度} & = -1 \text{ (m/s)} \\ V_3' : & \text{プラグ 3 の速度} & = 0.9 \text{ (m/s)} \end{aligned}$$

■状態(III)における各プラグの速度

付図 4.1-1 の状態(III)においては、プラグ 2 がプラグ 3 と衝突する。

$$\begin{aligned} V_2'' &= \frac{em_3(V_3' - V_3') + m_2V_2' + m_3V_3'}{m_2 + m_3} \\ &= \frac{0.9 * 8m(0.9 - (-1)) + 5m * (-1) + 8m * 0.9}{5m + 8m} \quad \dots (A4.1-6) \\ &= 1.22154 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} V_3'' &= \frac{em_2(V_2' - V_3') + m_2V_2' + m_3V_3'}{m_2 + m_3} \\ &= \frac{0.9 * 5m(-1 - 0.9) + 5m * (-1) + 8m * 0.9}{5m + 8m} \quad \dots (A4.1-7) \\ &= -0.488462 \end{aligned}$$

したがって状態(III)における各プラグの速度は以下の通りとなる。

$$\begin{aligned} V_1'' : & \text{プラグ 1 の速度} & = -1 \text{ (m/s)} \\ V_2'' : & \text{プラグ 2 の速度} & = 1.22154 \text{ (m/s)} \\ V_3'' : & \text{プラグ 3 の速度} & = -0.488462 \text{ (m/s)} \end{aligned}$$

■状態(IV) における各プラグの速度

付図 4.1-1 の状態(IV)においては、プラグ 1 がプラグ 2 と、またプラグ 3 が剛壁とそれぞれ衝突する。

$$\begin{aligned} V_1''' &= \frac{em_2(V_2'' - V_1'') + m_1V_1'' + m_2V_2''}{m_1 + m_2} \\ &= \frac{0.9 * 5m(1.22154 - (-1)) + m(-1) + 5m * 1.22154}{m + 5m} \quad \dots (A4.1-8) \\ &= 2.51744 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} V_2''' &= \frac{em_1(V_1'' - V_2'') + m_1V_1'' + m_2V_2''}{m_1 + m_2} \\ &= \frac{0.9 * m((-1) - 1.22154) + m(-1) + 5m * 1.22154}{m + 5m} \quad \dots (A4.1-9) \end{aligned}$$

$$= 0.518052$$

$$\begin{aligned} V_3''' &= -eV_3'' = -0.9 * (-0.488462) \\ &= 0.439616 \end{aligned} \quad \dots (A4.1-10)$$

したがって状態(IV)における各プラグの速度は以下の通りとなる。

$$\begin{aligned} V_1''' &: \text{プラグ 1 の速度} &= 2.51744 \text{ (m/s)} \\ V_2''' &: \text{プラグ 2 の速度} &= 0.518052 \text{ (m/s)} \\ V_3''' &: \text{プラグ 3 の速度} &= 0.439616 \text{ (m/s)} \end{aligned}$$

4) 理論値と PLUG コードによる計算値との比較

付図 4.1-2~4.1-3 にプラグの変位(XD)、速度(XV)をそれぞれ示す。付表 4.1-2 に付図 4.1-1 に示す4つの状態におけるプラグの速度について、理論値と PLUG コードによる計算値とを比較して示す。理論値と計算値の差は1%以内である。

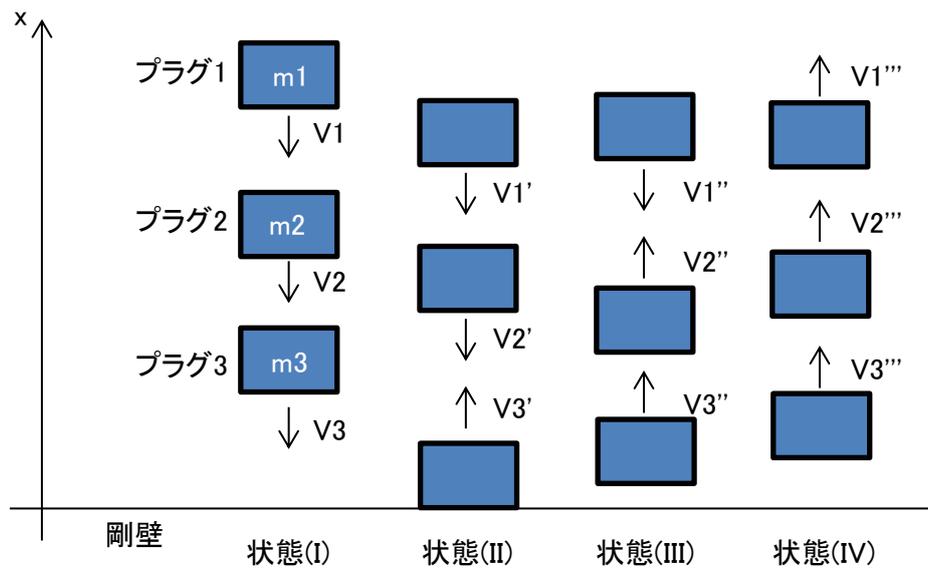
以上から、互いに独立したプラグが非同時に剛壁に衝突する場合におけるプラグの応答の PLUG コードによる解析の妥当性が確認できる。

付表 4.1-1 解析に必要なプラグの質量・初期における剛壁からの距離及び初速度 (Case-6)

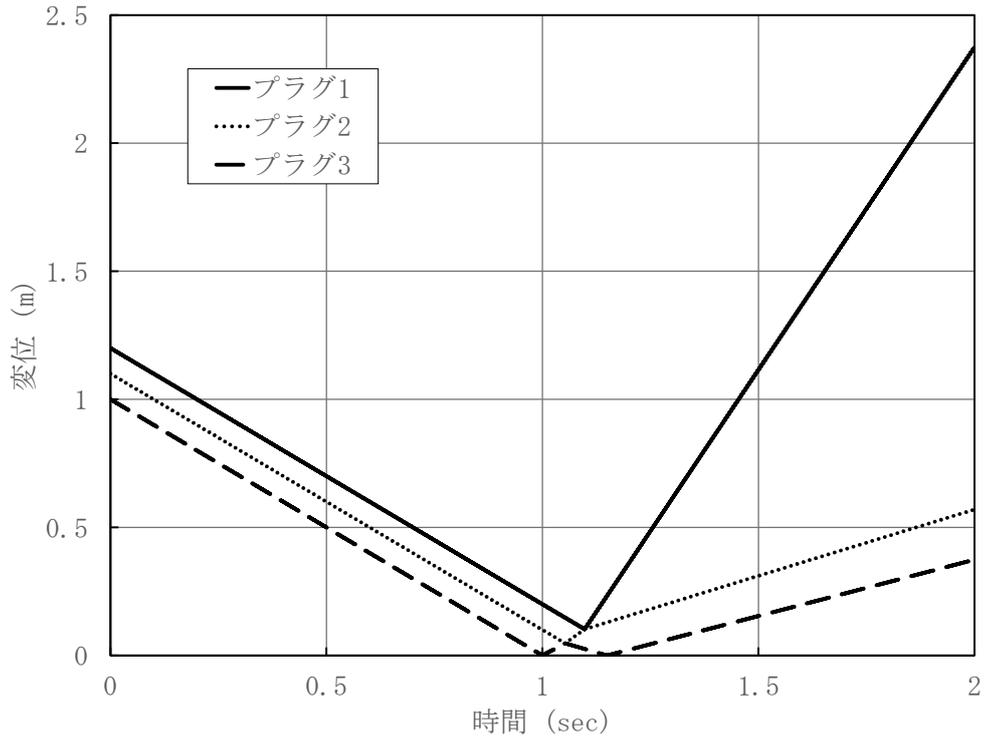
項目	質量 (kg)	初期における剛壁からの距離 (m)	初速度 (m/s)
プラグ 1 質量	5.638×10^5	1.2	-1.0
プラグ 2 質量	2.819×10^6	1.1	-1.0
プラグ 3 質量	4.510×10^6	1.0	-1.0

付表 4.1-2 理論値と PLUG コードによる計算値との比較 (Case-6)

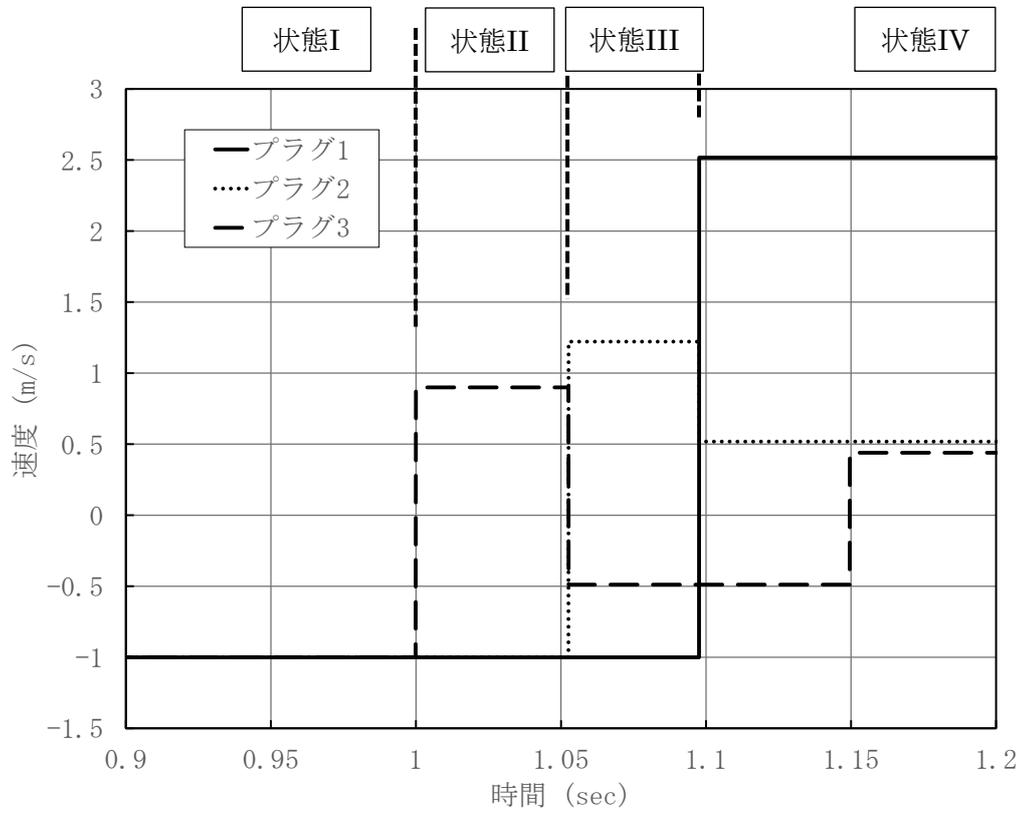
状態	項目	理論値 (m/s)	計算値 (m/s)	理論値との差
II	プラグ 1 の速度	-1	-1	0%
	プラグ 2 の速度	-1	-1	0%
	プラグ 3 の速度	0.9	0.9	0%
III	プラグ 1 の速度	-1	-1	0%
	プラグ 2 の速度	1.22154	1.22200	0.038%
	プラグ 3 の速度	-0.488462	-0.488500	7.8e-3%
IV	プラグ 1 の速度	2.51744	2.51700	-0.017%
	プラグ 2 の速度	0.518052	0.51800	-0.01%
	プラグ 3 の速度	0.439616	0.439600	-0.0036%



付図 4.1-1 互いに独立したプラグの衝突解析のイメージ (Case-6)



付図 4. 1-2 互いに独立したプラグの衝突解析のプラグの変位 (XD) (Case-6)



付図 4. 1-3 互いに独立したプラグの衝突解析のプラグの速度 (XV) (Case-6)

4.2. CASE-7 一体となったプラグの衝突解析

1) 対象とする解析条件

ここでは付図 4.2-1 に示すように初速度 1m/s の 3 つのプラグが一体となって無重力空間の一直線上を進み剛壁に衝突する際の応答について検討する。付表 4.2-1 に解析に必要となるプラグの質量、初期における剛壁からの距離及び初速度を示す。プラグ間の質量差による影響を検証するため、プラグ 2 はプラグ 1 の 5 倍の質量、プラグ 3 は同 8 倍の質量とする (CASE-6 と同様)。なお、プラグが衝突する際の反発係数は、いずれのプラグの組み合わせの場合でも一律に 0.9 とする。

付図 4.1-1 に示す状態(IV)はこれ以上衝突が生じない終状態を想定する。すなわち、状態(IV)における各プラグの速度の関係は以下となる。

$$V_3''' < V_2''' < V_1''' \quad \dots (A4.2-1)$$

2) 解析の妥当性の確認方法

プラグの一次元の衝突の式を解き理論解を算出して衝突後のプラグの速度を求め、これを PLUG コードによる計算値と比較して解析の妥当性を確認する。

3) 理論値の算出

複数のプラグ (ここでは三つ) が一体となって移動し剛壁に衝突する場合、まず剛壁に一番近い側のプラグ (プラグ 3) が剛壁に衝突して反発する。次いでプラグ 2 がプラグ 3 と衝突して反発し、最後にプラグ 1 がプラグ 2 に衝突して反発する。この反発の過程において、最終的に (A4.2-1) 式を満たす速度となった時点で反発が終了する。この過程における衝突後の各プラグの速度の計算方法は Case-6 の場合と同じである。

したがって状態(IV)における各プラグの速度は以下の通りとなる。

V_1''' :	プラグ 1 の速度	= 2.51744 (m/s)
V_2''' :	プラグ 2 の速度	= 0.518052 (m/s)
V_3''' :	プラグ 3 の速度	= 0.439616 (m/s)

4) 理論値と PLUG コードによる計算値との比較

付図 4.2-2~4.2-3 にプラグの変位 (XD)、速度 (XV) をそれぞれ示す。付表 4.2-2 に付図 4.2-1 に示す状態(IV)のプラグの速度について、理論値と PLUG コードによる計算値とを比較して示す。理論値と計算値の差は 1%以内である。

以上から、プラグ間に相対変位がなく一体となった状態で剛壁に衝突した場合におけるプラグ応答の PLUG コードによる解析の妥当性が確認できる。

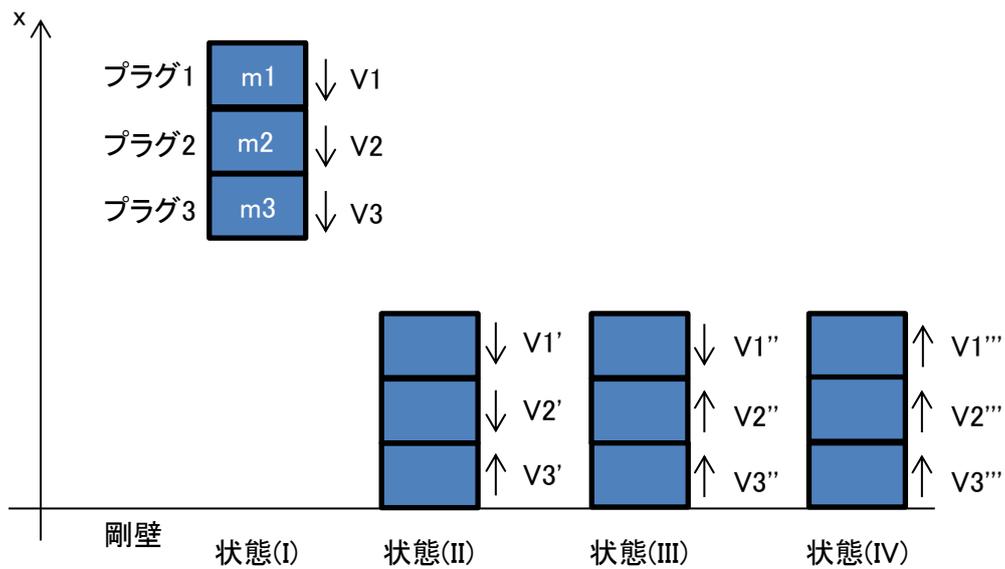
なお、このケースの場合は Case-6 の場合と異なり、PLUG コードでは状態 I から IV までの衝突挙動を 1 ステップ内で計算する。すなわち、プラグ間に相対変位がなく一体となって剛壁に衝突する場合は、プラグ間に相対変位がある状態と同じ反発計算を反復計算により 1 ステップ内で行う。

付表 4.2-1 解析に必要となるプラグの質量・初期における剛壁からの距離及び初速度 (Case-7)

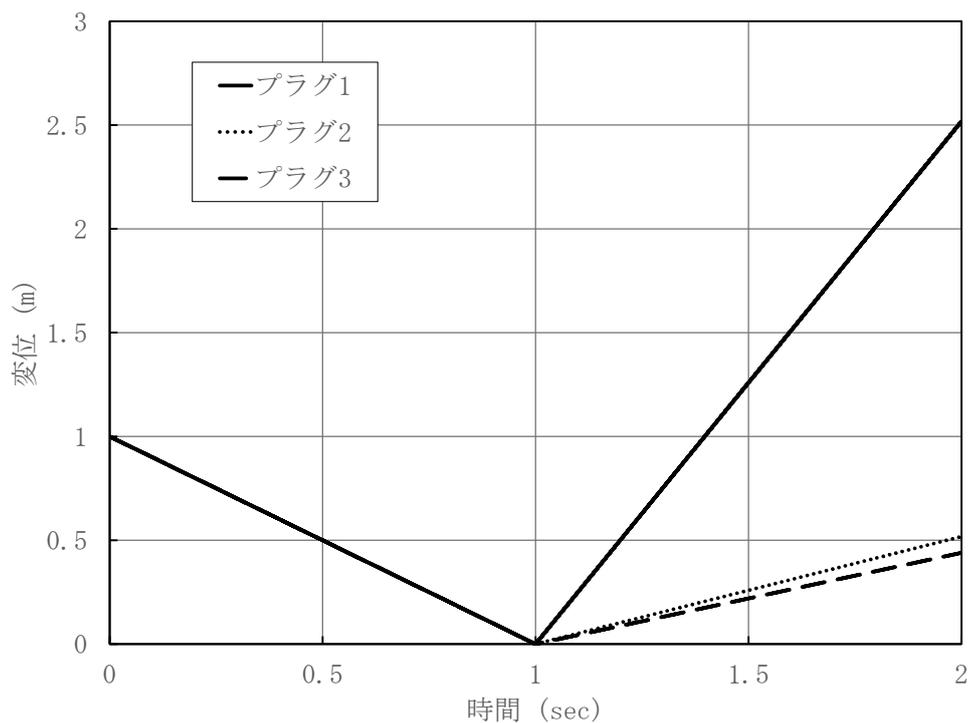
項目	質量 (kg)	初期における剛壁からの距離 (m)	初速度 (m/s)
プラグ 1 質量	5.638×10^5	1.0	-1.0
プラグ 2 質量	2.819×10^6	1.0	-1.0
プラグ 3 質量	4.510×10^6	1.0	-1.0

付表 4.2-2 理論値と PLUG コードによる計算値との比較 (Case-6)

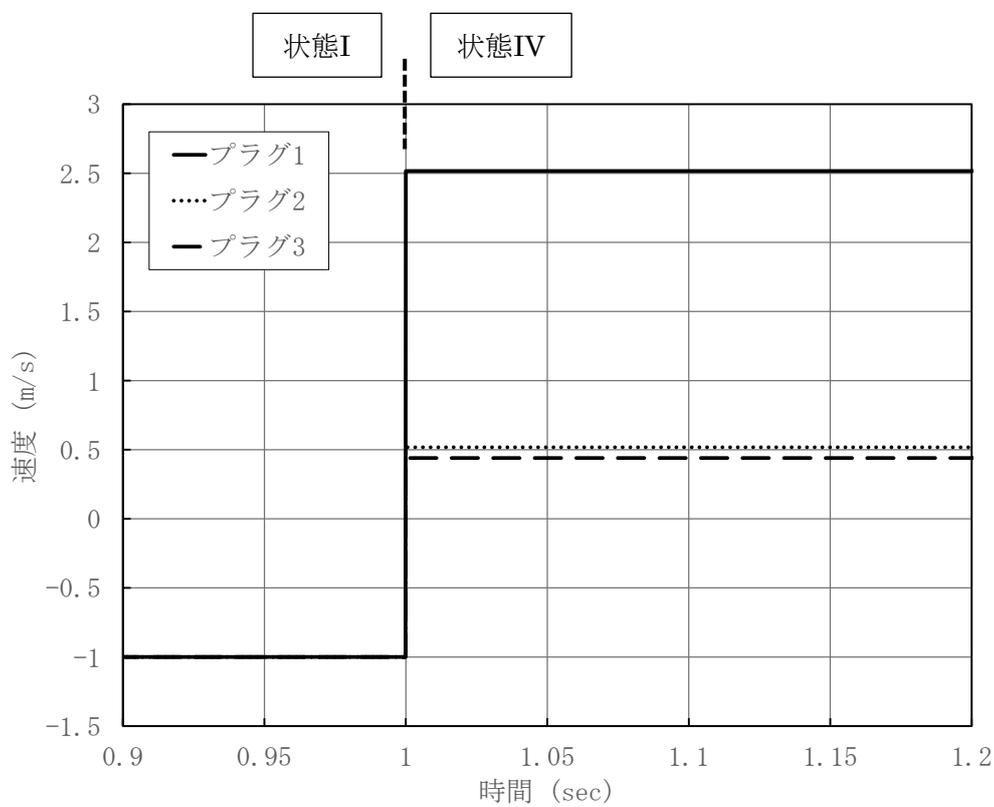
状態	項目	理論値 (m/s)	計算値 (m/s)	理論値との差
II	プラグ 1 の速度	-1	-	-
	プラグ 2 の速度	-1	-	-
	プラグ 3 の速度	0.9	-	-
III	プラグ 1 の速度	-1	-	-
	プラグ 2 の速度	1.22154	-	-
	プラグ 3 の速度	-0.488462	-	-
IV	プラグ 1 の速度	2.51744	2.51700	-0.017%
	プラグ 2 の速度	0.518052	0.51800	-0.01%
	プラグ 3 の速度	0.439616	0.439600	-0.0036%



付図 4.2-1 一体となったプラグの衝突解析のイメージ (Case-7)



付図 4.2-2 一体となったプラグの衝突解析のプラグの変位(XD) (Case-7)



付図 4.2-3 一体となったプラグの衝突解析のプラグの速度(XV) (Case-7)

8. 参考文献

- [1] 「技術資料 管路・ダクトの流動抵抗」、日本機械学会、1979年1月.
- [2] 「機械工学便覧」、日本機械学会、2014年3月.