

地震荷重によるタンクの座屈に関する研究

Study on Vessels' Seismic Buckling

東京電力 技術開発研究所 田中 良彦 Yoshihiko TANAKA
東京電力 技術開発研究所 高木 愛夫 Yoshio TAKAGI
東京電力 技術開発研究所 鈴木 俊一 Shunichi SUZUKI Member
テプ°システムズ 原子力エンジニアリング部 小川 博志 Hiroshi OGAWA

Inspection on Kashiwazaki-Kariwa Nuclear Power Station after the Niigataken Chuetsu-oki Earthquake in 2007 observed obvious buckling in some fluid storage vessels, the filtrate tanks and de-ionized Water tanks. All vessels with buckling belong to Seismic class C. Contrary the other vessels such as Diesel tanks showed no damage. Those phenomena presumably are brought about by differences in the vessels' condition (Vessels geometries, Fluid weight, etc.,) and the seismic load on each vessel.

In this study, the elephant's foot buckling occurred on the filtrate tank was simulated by FEM analysis of the large displacement elastic-plastic model with the recorded time history of seismic acceleration. The same analysis on the diesel was conducted tank to see that no damage took place also in the analysis.

Keywords: *Buckling, Tank, SeismicLoad, Elastic-plastic analysis*

1. 緒言

新潟県中越沖地震後に、東京電力柏崎刈羽原子力発電所で実施された設備点検の結果、耐震Cクラス機器であるろ過水タンク、純水タンクの一部に座屈等の損傷が生じたことが明らかになった。これらの損傷については、現地を視察した学識者らによる、詳しい調査を実施すべきとの指摘を受けている。また、座屈や崩壊等、外見から容易に識別しうるほど大規模な変形を伴った構造物の損傷現象を評価・検討することは、当該事象の再発防止のみならず、発電用原子力設備の構造強度評価技術に関する知見の拡充という意義においても重要性が高い。

そこで“中越沖地震後の原子炉機器の健全性評価委員会” [1]における検討事項の一環として、有限要素法解析（FEM解析）による円筒形容器の座屈挙動のシミュレーションを実施した。

2. 座屈解析の方法

地震動による円筒タンクの座屈は、下記 1)～5) の特徴を伴うことが多く、解析対象としての難易度は一般に高い。

- 1) 地震荷重の方向が非対称であるため 3 次元の解析モデルを必要とすることが多い
- 2) 座屈による変形を模擬するために、大変形弾塑性解析を必要とする
- 3) 地震動であるため動的解析を必要とする
- 4) 内部流体の液圧の効果を考慮するために固-液連成解析を必要とする
- 5) タンクの支持構造が損傷した場合、座屈と支持構造損傷の時系列的な前後関係が不明であることが多く、境界条件の設定が困難となる。

そこで、座屈を生じた複数のタンクから比較的解析条件設定の容易なものを選定し、かつ、地震動は観測記録の内、一方向のみ与える等、解析条件をやや単純化することにより、象脚座屈の解析を実施した。

3. 評価対象

柏崎刈羽原子力発電所の No.3 ろ過水タンクの基部に生じた象脚座屈を対象として検討を行った。ろ過水タンクは 4 基あり、全てに何らかの変形が観測されたが、解析におけるタンク基部の拘束条件設定が最も容易（基礎ボルトの損傷が軽微）であると推測されることから、No.3 ろ過水タンクを選定した。同タンクの損傷状況を Fig.1 に示す。タンク基部の高さ 30cm～40cm 範囲に全周に渡って断続的に象脚座屈が生じている。

連絡先: 田中良彦, 〒230-8510 神奈川県横浜市鶴見区江ヶ崎町 4-1, 東京電力 技術開発研究所
電話: 045-613-1111
e-mail: tanaka.yoshi@tepcoco.jp

尚、損傷の程度としては、全周・連続的な座屈と漏水を生じた No. 4 ろ過水タンクの方がより重篤である。しかしながら、同タンクについては、著しく損傷した支持構造部の解析モデル化が容易ではなく、解析結果に対する不確定性の増加が懸念された。そこで、検討の初段階である本研究においては、No. 3 ろ過水タンクを対象とした。

いずれのタンクの座屈も、設計時の想定を超える地震荷重による象脚座屈であることは共通であることから、再発防止のための損傷要因は共通であると考えられる。

4. 解析モデル

解析モデルを Fig. 2 に示す。No. 3 ろ過水タンクの 1/2 対称モデルを解析モデルとした。タンクの側板と底板部分には 4 辺形シェル要素、内部流体部分には 6 面体流体要素を用いた。解析用ソフトウェアとして FINAS Ver. 18.0 を使用した。実現象における座屈の進行と基礎ボルト伸びの時刻歴は不明であるため、本解析では座屈が先に生じたと想定して、タンク基部を完全拘束した。

また、耐震クラスの異なる機器の座屈挙動を比較する目的で、柏崎刈羽原子力発電所 7 号機の軽油タンク (A s クラス相当) についても同様の解析を行うこととし、モデルを作成した。

尚、いずれもタンクについても、構造及び流体から成る全体の減衰比を 7% に想定した。

No. 3 ろ過水タンクと 7 号機軽油タンクの比較を Table 1 に示す。タンクの高さ、径、板厚、流体比重等の違いにより、相対的には前者の方が座屈しやすい特性であることが示唆されている。

5. 解析用地震動

解析モデルに付与する地震動として、No. 3 ろ過水タンクに近接する大湊側観測小屋で観測された NS 方向の地震動を与えた。No. 3 ろ過水タンクの固有振動数 8.1Hz に対する応答倍率が EW 方向よりも高かったことによる。また、地震動の観測記録は 200 秒間であるが、本解析では最大加速度 (+954cm/s² と -964cm/s², 北向きが+) を含む時間帯 (35.18 秒~36.02 秒) の地震動だけを与える条件とした。Fig. 3 に示す通り、時刻 35.66 秒に +954cm/s²、時刻 35.75 秒に -964cm/s² の最大加

速度を生じている。

尚、参照用の 7 号機軽油タンクについても、異なる耐震クラスのタンクの挙動を直接比較するために、仮想的に同一の地震動を与えた。

6. 材料特性

No. 3 ろ過水タンクの材料は SS400 鋼、7 号機軽油タンクの材料は SM400B 鋼であるが、日本機械学会の建設・設計規格 [2] においては、両鋼種の強度特性は同じである。解析に用いた材料特性を Table 2 に示す (2 鋼種共通)。尚、弾塑性構成則は α リセットを考慮した移動硬化則を用いた。

7. 解析結果

No. 3 ろ過水タンクの解析結果として変形と相当応力コンター図を Fig. 4 に示す。時刻 35.77 秒において、象脚座屈が発生している。座屈の形態に比してメッシュサイズがやや大きめと思われるが、象脚座屈の形態を再現している。7 号機軽油タンクのコンター図も Fig. 5 に示すが、座屈は認められない。形状等の条件の違いが両タンクに異なる挙動をもたらしたことがわかる。

No. 3 ろ過水タンクの基部 (座屈頂部近傍) における入力加速度と変位 (入力に対する応答) の時刻歴を Fig. 6 に示す。時刻 35.66 秒の北向きの最大加速度と時刻 35.75 秒の南向きの最大加速度による“両振り”の大負荷が作用した直後の 35.77 秒において、急激に変位が増加し、その後入力加速度が元の水準に戻っても変位は 35.66 秒以前の水準には戻らない。すなわち、35.77 秒において象脚座屈が生じている。一方、Fig. 7 の通り、7 号機軽油タンクの基部には有意な変位の増加がみられない。

以上により、象脚座屈の発生メカニズムについて、地震による交番荷重回数の増加と共に少しずつ変形が進行したのではなく、時刻歴中の卓越した両振り荷重により、一気に変形が発生・進行した可能性が高いことがわかった。

8. まとめ

新潟県中越沖地震により、東京電力柏崎刈羽原子力発電所のタンクに生じた座屈のシミュレーション解析を実施し、以下の成果を得た。

(1) 耐震Cクラスのタンクの挙動

No.3 ろ過水タンク（耐震Cクラス）を対象とした大変形弾塑性解析により、実際と同じ象脚座屈の再現に成功した。

により、変形が一気に発生・進行する可能性があることを確認した。

参考文献

(2) 耐震Asクラスのタンクの挙動

一方、7号機軽油タンク（Asクラス相当）については、同じ条件の解析を行っても座屈は発生しないことを確認した。

[1] 野本敏治, “日本原子力技術協会における「中越沖地震後の原子炉機器の健全性評価委員会」の検討状況について”, 保全学, Vol. 7, No. 2 (2008)

(3) 象脚座屈発生メカニズム

地震による交番荷重回数の増加と共に少しずつ変形が進行するのではなく、一連の地震動の時刻歴に含まれる卓越した両振り荷重の作用

[2] 日本機械学会, 発電用原子力設備規格 建設・設計規格(2005年版) JSME S NC1-2005

Table 1 No.3 ろ過水タンクと7号機軽油タンクの比較

	地震による座屈	半径 m	高さ m	液面高さ m	流体比重	板厚 mm	屋根重量* ton
5号機側ろ過水タンク	発生した	4.9	12.1	10.1	1.00	6, 7	約7
7号機軽油タンク	発生せず	5.3	9.5	7.5*	0.87	9	約6
備考				*設計値			*付属物含む

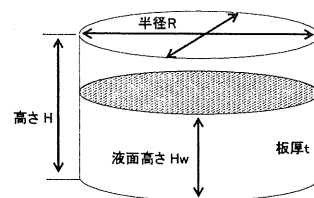


Table.2 解析に用いた材料特性

項目	単位	ろ過水タンク	軽油タンク	備考
材質		SS400 鋼	SM400B 鋼	JSME S NC1-2005 規格では同特性
ヤング率(E)	N/mm ²	203,000 1,015,000(屋根)	203,000 2,030,000(屋根)	屋根は補強材の剛性を考慮した推定値
ポアソン比(ν)	—	0.26	0.26	JSME S NC1-2005
降伏応力(Sy)	N/mm ²	215	215	JSME S NC1-2005
引張強さ(UTS)	N/mm ²	400	400	JSME S NC1-2005
加工硬化係数(H')	N/mm ²	4500	4500	引張強さ時ひずみを 5%と想定して算出
密度(ρ)	kg/m ³	8030	8030	

注 1: 補強材の剛性を考慮した値(推定値)

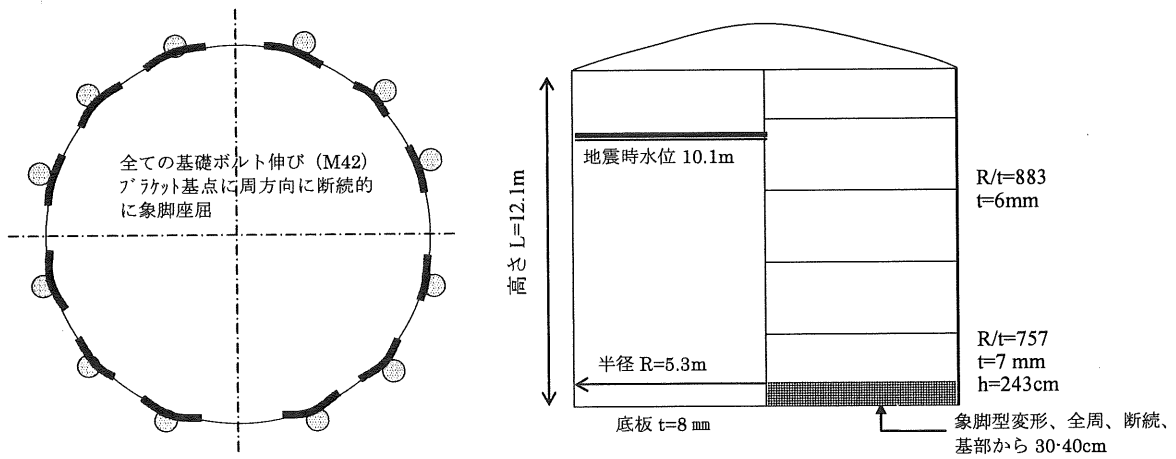


Fig. 1 No.3 ろ過水タンクの損傷状況図

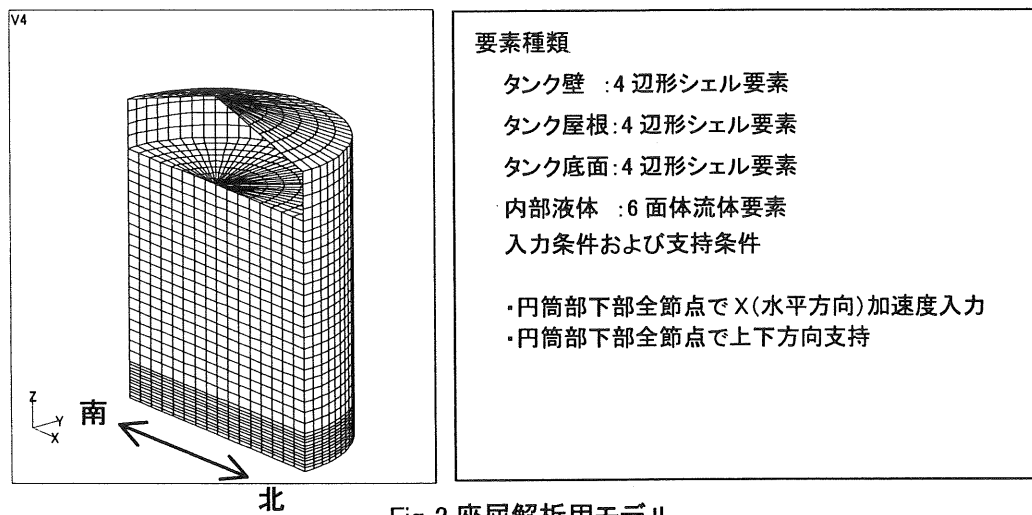


Fig.2 座屈解析用モデル

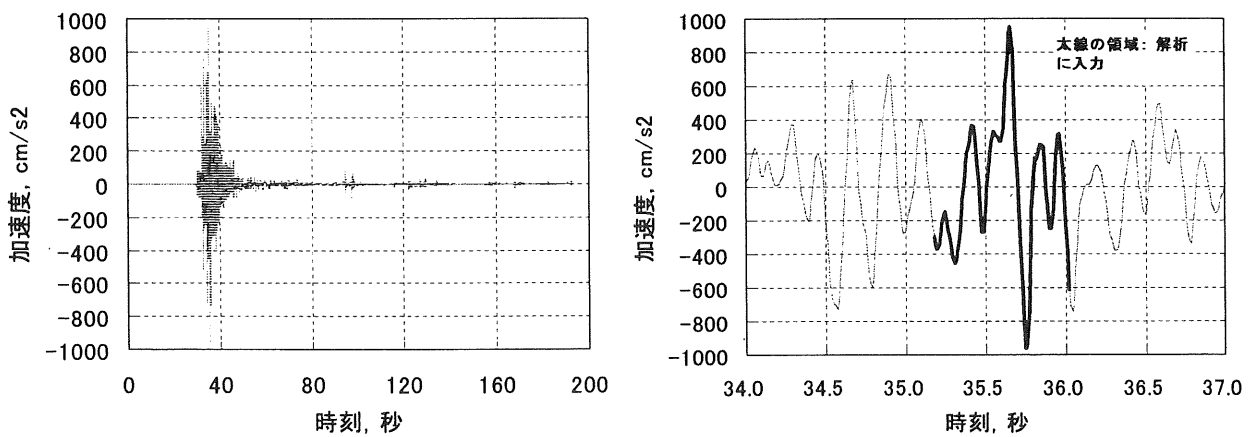


Fig. 3 座屈解析に用いた入力地震波(大湊側観測小屋、NS 方向)

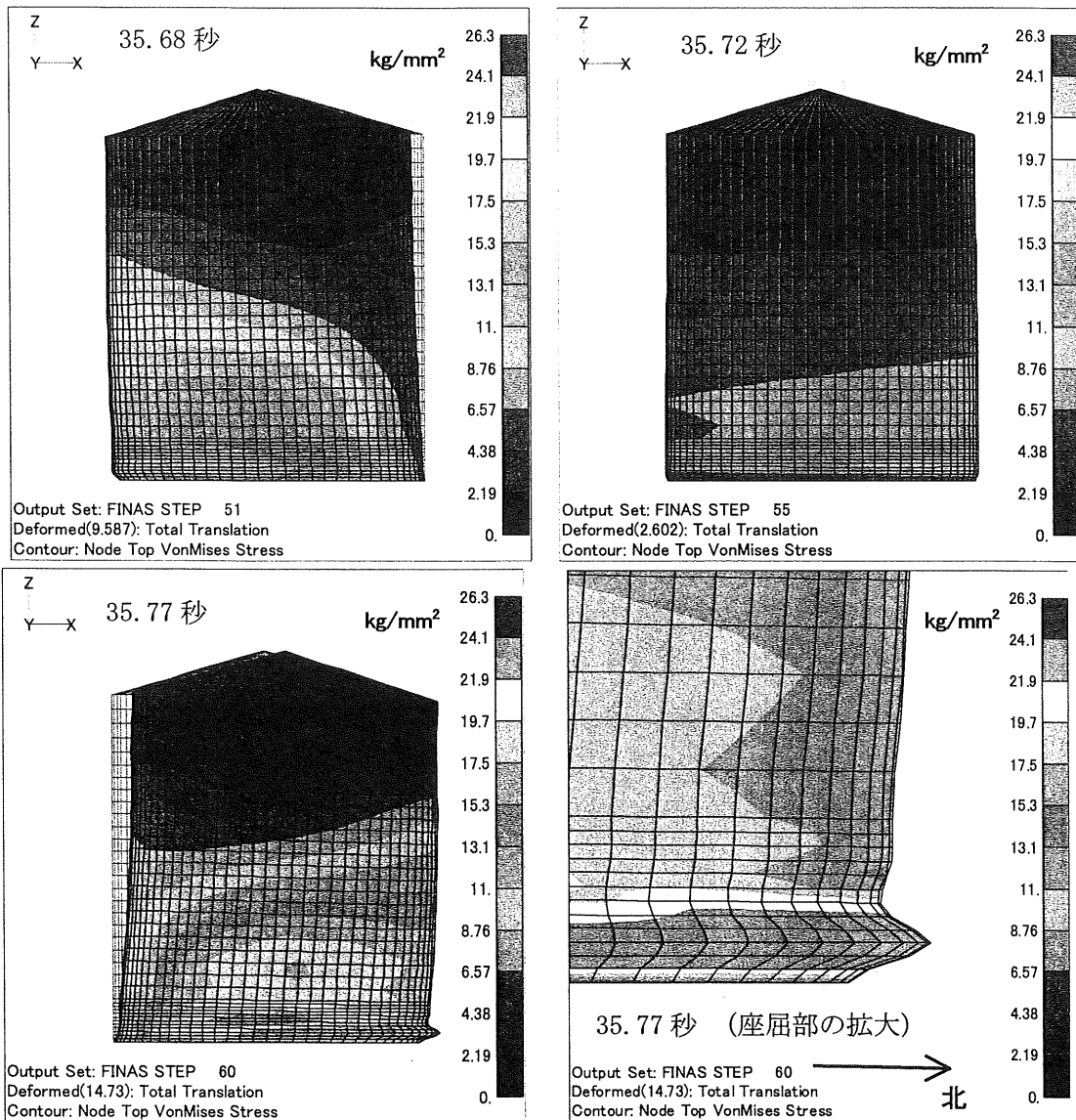


Fig.. 4 No.3 ろ過水タンクの解析結果(コンター図, 座屈が生じている)

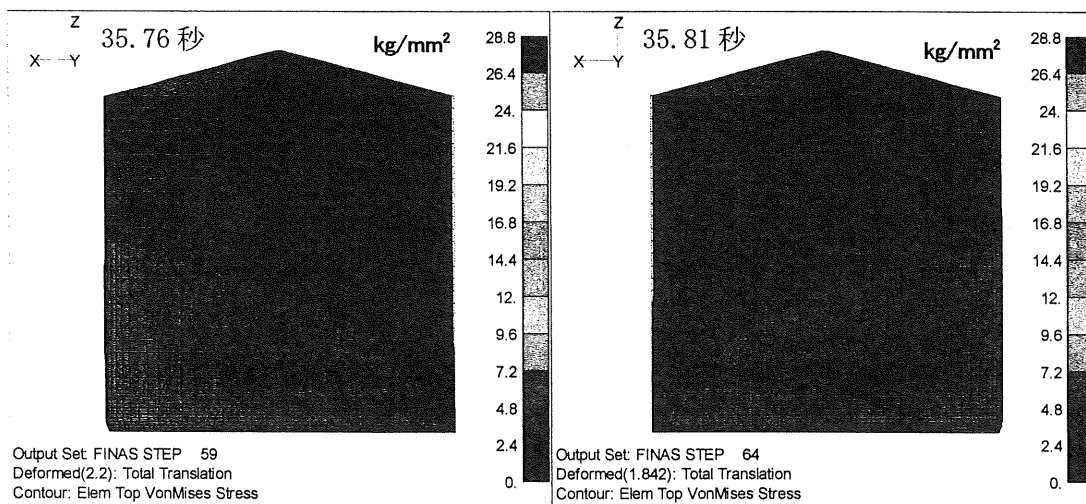


Fig.. 5 7号機軽油タンクの解析結果(コンター図, 座屈は生じない)

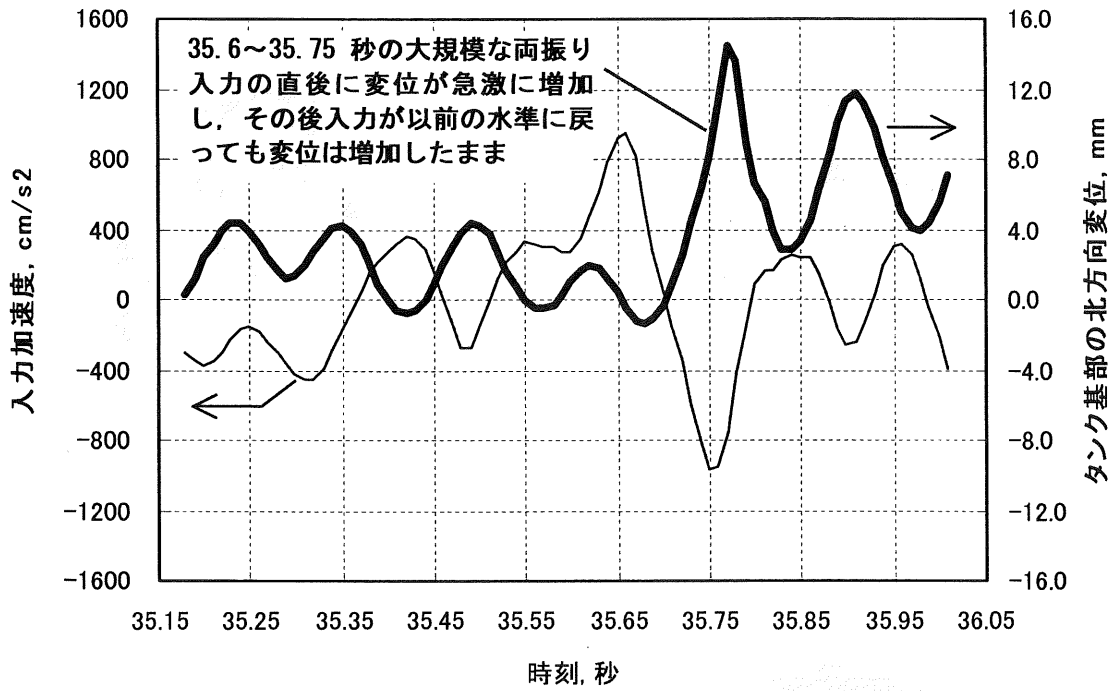


Fig. 6 No.3 ろ過水タンクの解析結果：入力加速度とタンク基部(座屈発生部位)の変位の時刻歴

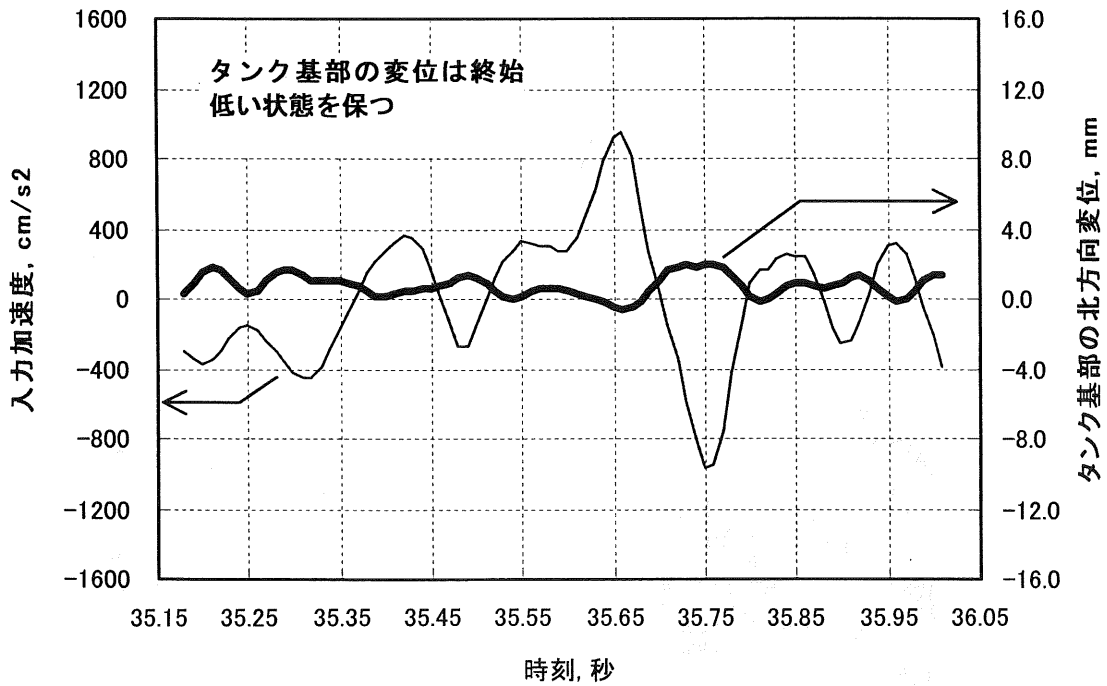


Fig.7 7号機軽油タンクの解析結果：入力加速度とタンク基部の変位の時刻歴