１Ｆ技術会合（第３０回）
資料１－２

地震時のタンク滑動に関する検討

2026年10月27日

TEPCO

東京電力ホールディングス株式会社

コメントリスト

検討会	指摘事項	回答内容
第9回1F技術会合 (2023年4月25日)	地震時のタンク滑動の要因分析（鉛直地震動の影響を含む）を実施すること。	本資料にて，検討結果を報告する。

目次

１．タンク滑動評価の経緯・目的
２．地震時のタンク滑動状況
３．前回技術会合での報告内容について
４.１　タンク滑動解析の概要
４.２　タンクの解析モデル
４.３　解析ケースについて
４.４　摩擦係数の設定，スロッシング考慮について
５．入力地震動
６．解析ケース
７．解析結果
８．考察
９．まとめ

【添付資料】
添付１．既報告の解析で確認された問題の調査
添付２．解析モデルの妥当性検証
添付３．入力地震動の算出方法
添付４．地震動の速度応答スペクトル
添付５．解析結果（タンクの回転，浮き上がり量）
添付６．タンク設置時の滑動量評価
添付７．地震時のタンク滑動状況

１．タンク滑動評価の経緯・目的

TEPCO

- 2021年2月13日／2022年3月16日の福島県沖地震（以下，2021.2.13地震，2022.3.16地震という）において，タンクエリアに設置された複数のタンクで設置時の評価値（57.5mm）を上回る滑動量が確認された。

- 第９回１Ｆ技術会合（2023年4月25日）において，タンクが大きく滑動した原因分析を行うようコメントを受けた。
  「地震時のタンク滑動の要因分析（鉛直地震動の影響を含む）を実施すること」

- 本検討は上記のコメントを受け，タンクの滑動量が設置時の評価値を上回った原因を明らかにし，耐震評価の知見を拡充する目的で実施している。※

  ※：D エリアは 2021.2.13 地震および 2022.3.16 地震によるタンクの滑動量が大きいエリアとして，地震時の地表面加速度を観測しており，監視・評価検討会にて議論されてきたことから，主に D エリアを例に本検討を行う。

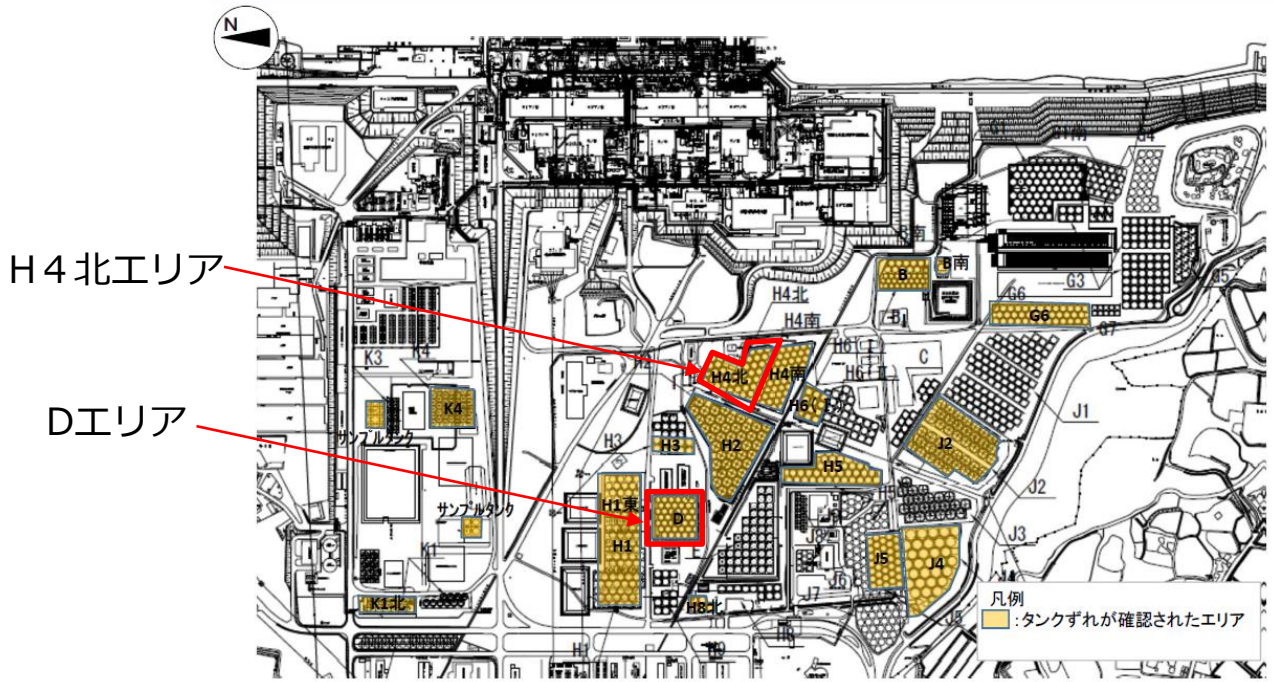
- なお，既設のタンクに関しては，タンクが評価値を上回る滑動をした場合でも，問題が生じないよう対策を実施済みである。
  ・対策例：連結弁常時閉，地震時に自動的に連結弁を全閉する駆動部を設置，など

2．地震時のタンク滑動状況

- 2021年2月13日の地震
  - 1074基のうち53基のタンクで滑動が確認された。
  - Ｄ，Ｈ４エリアで滑動したタンクが多くあり，Ｄエリアで最大滑動量（約190mm）が確認された。

- 2022年3月16日の地震
  - 1074基のうち160基のタンクで滑動が確認された。
  - 多くのエリアでタンク滑動が確認され，Ｄエリアで最大滑動量（約200mm）が確認された。

（参考）タンクエリア全体のタンク位置ずれ状況マップ



特定原子力施設監視・評価検討会
（第99回）資料１－１　より抜粋

（参考）タンク設置時の滑動量評価

TEPCO

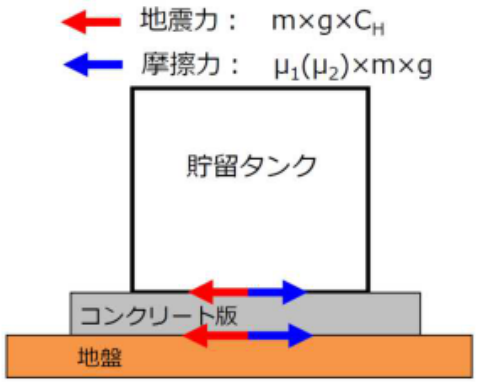
- タンク設置時に滑動量の評価を実施しているが、2月13日の地震ではDエリアのタンクにおいて、評価値を上回る滑動量（最大で190mm）が確認された。
- 評価値を上回った滑動の原因については、鉛直方向の地震力やタンク構造等の差異による影響などが考えられるが、詳細は検討中。
  - 耐震Bクラス機器の設計震度に対する評価

    水平方向の設計震度（0.36）と比較して、鋼材とコンクリートの摩擦係数（0.4）およびコンクリートと地盤の摩擦係数（0.46）の方が大きいことから、耐震Bクラス機器に対する設計震度ではタンクは滑動しないと評価していた。

  - 基準地震動Ssに対する評価（参考で実施※）

    基準地震動Ssの水平方向の加速度だけを用いて、簡易的な手法で滑動量を算出し、57.5mmと評価していた。

    ※：RO濃縮水を貯留していることから、基準地震動Ssによる評価を参考で実施
    評価条件，評価手法に関しては，添付6を参照。



- なお、タンク設置時より、耐震Bクラス機器の設計震度を超える地震動によるタンクの滑動を想定し、設計上や運用上で考慮している。
  - ＜設計＞可撓性のある連結管でタンク間を連結する。
  - ＜運用＞貯留用タンクは満水後に連結弁を「閉」とする

3．前回技術会合での報告内容について

第26回１Ｆ技術会合（2025年7月8日）において，以下のとおり検討結果の中間報告を行った。

- タンク底板の摩擦係数，スロッシングが滑動に与える影響は大きいと考えられる。
- タンクの水位が滑動に影響を与える可能性がある。
- 2022.3.16解析波と2011.3.11解析波による滑動量に，大きな差はない。

また，解析評価上の問題点として以下が確認されたため，評価モデルの妥当性検証を実施することとした。

- 片側の波高が高い状態が続く。
- 大きなスロッシング挙動により波が分裂する。
- 内部流体がタンクから漏れ出る。

前回報告後，モデルの妥当性検証を実施した結果は以下のとおり。（添付１，２参照）

- タンク胴板の法線方向の設定が誤っていたため，正しく修正したところ，前回確認された解析上の問題点は解消された。
- 解析における摩擦係数設定パラメータが適切でなかったことにより，静止摩擦力が効いておらず，常に動摩擦力が作用している状態となっていたため，パラメータを調整し設定どおりの静止摩擦力が作用するよう修正した。
- 空タンクの固有周期，スロッシング周期，スロッシング波高は，理論値との比較により妥当なモデル化ができていることを確認した。

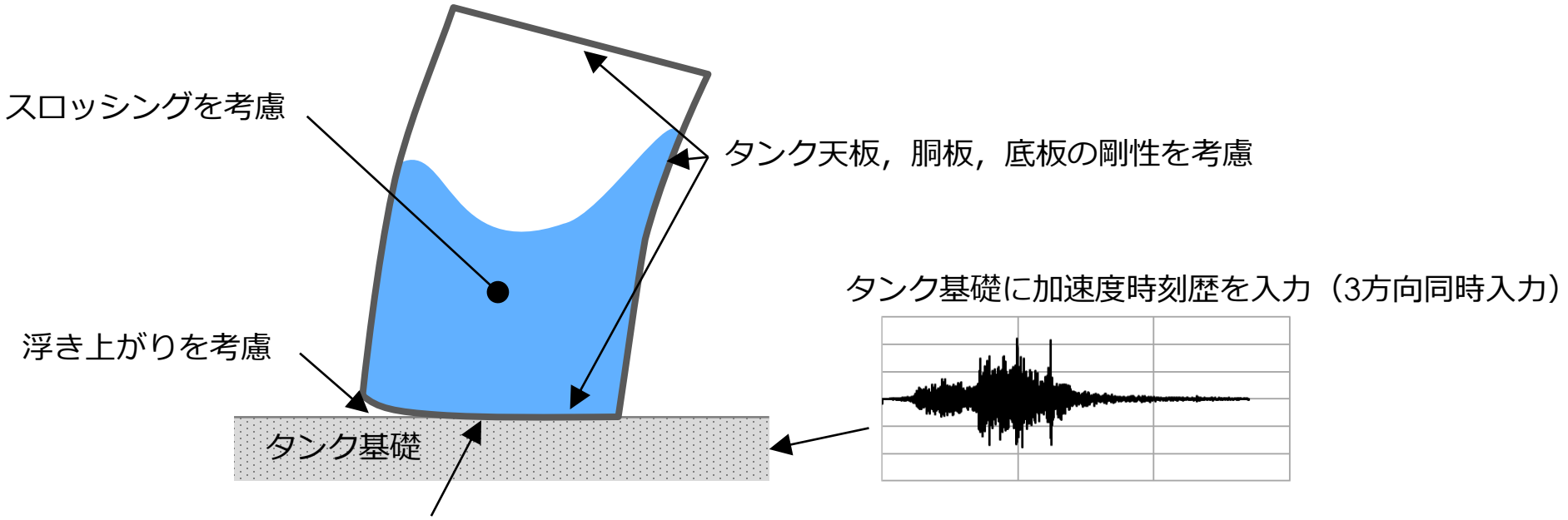
上記のとおり，前回報告時の解析モデルには一部誤りが含まれており，評価結果が正しくない可能性があることから，前回報告した評価ケースも含めて解析を実施した。

4.1　タンク滑動解析の概要

- タンクの滑動解析概要：
  　タンクが大きく滑動した原因分析のため，滑動に影響を与えると思われる現象をモデル化し，地震加速度時刻歴を入力とした３次元非線形時刻歴応答解析を実施。

- 解析モデル：
  - ・タンクを３次元シェルによりモデル化
  - ・内包水のスロッシングを考慮
  - ・タンク底板と基礎表面間の滑り，摩擦力を考慮
  - ・タンク底板の基礎表面からの浮き上がりを考慮

- 解析コード：
  - ・LS-DYNA ver.R13.1.1



※：実際の地震時にタンク基礎の滑りが確認されなかったことから，タンク基礎と地盤の滑りは考慮しない

4.2　タンクの解析モデル（Dエリア）

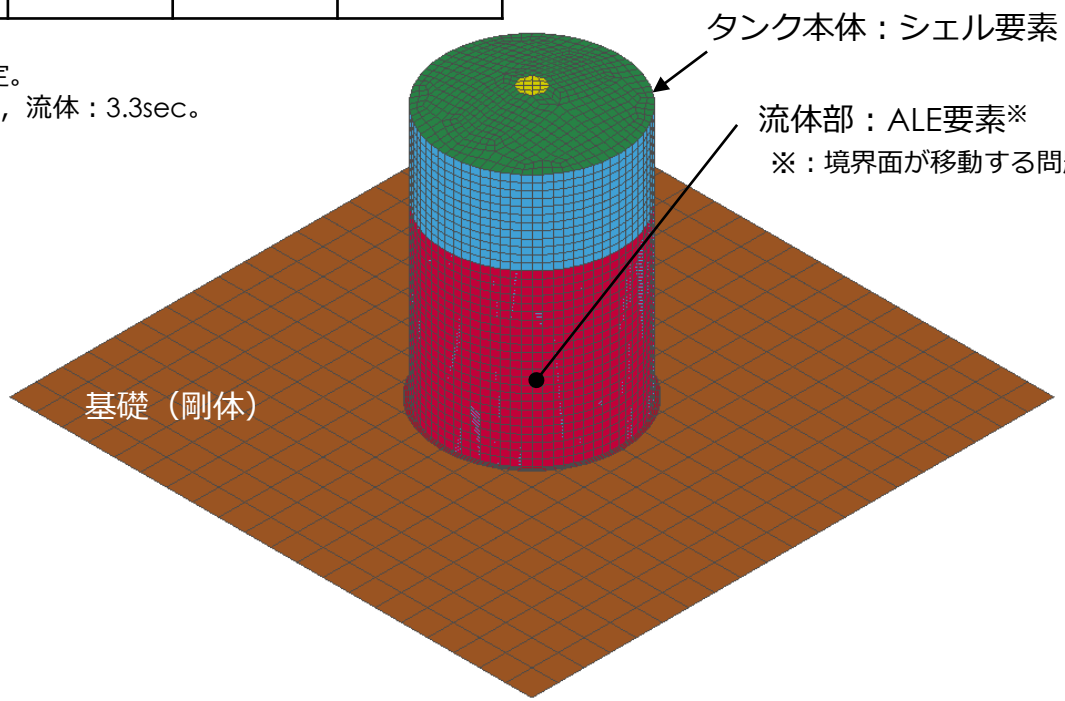
■ 解析モデル詳細

Dエリア

タンク内径：10000mm
タンク高さ：15600mm
水位　　：9766mm（ 2022.3.16 地震時の最大滑動タンクの水位）
物性値　　：下表に示すとおり。

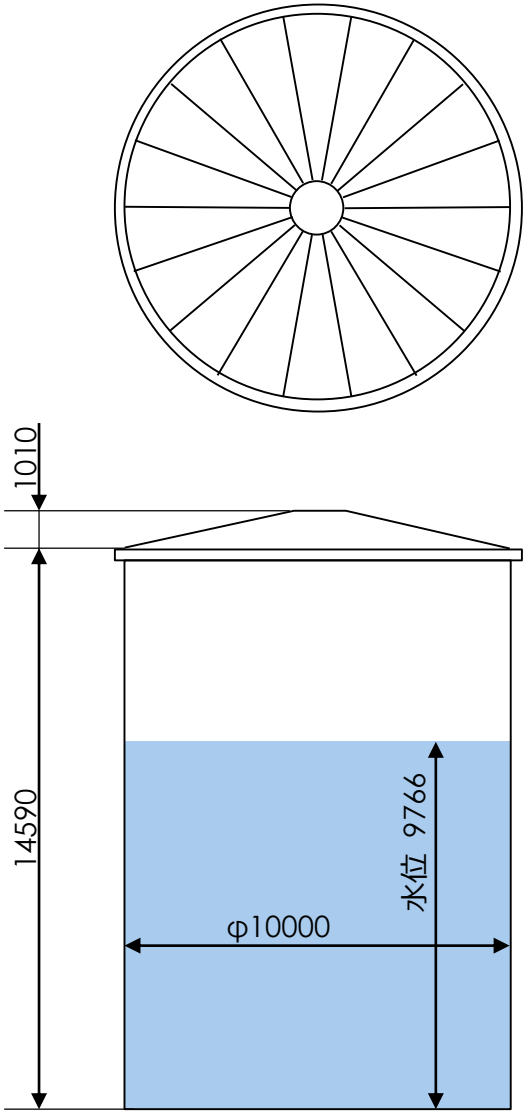
	密度 [t/mm³]	ヤング率 [MPa]	ポアソン比 [-]	粘性係数 [Pa・s]	減衰比※
タンク	7.85e-9	202350	0.3	–	1%
流体	1.0e-9	–	–	0	0.5%

※：JEAG4601-1991追補版の値。
解析では質量比例型減衰として設定。
設定固有周期は，タンク：0.07sec，流体：3.3sec。



4.2　タンクの解析モデル（Dエリア）

■ Dエリアタンク構造図



基本仕様

タンク容量		1000 m^3
主要寸法	内　径	10000 mm
	胴板厚さ	15 mm
	底板厚さ	25 mm
	高　さ	15600 mm
材料	胴板・底板	SS400
水位※		9766mm

※： 2022.3.16 地震時の最大滑動タンクの水位

4.2　タンクの解析モデル（H４北エリア）

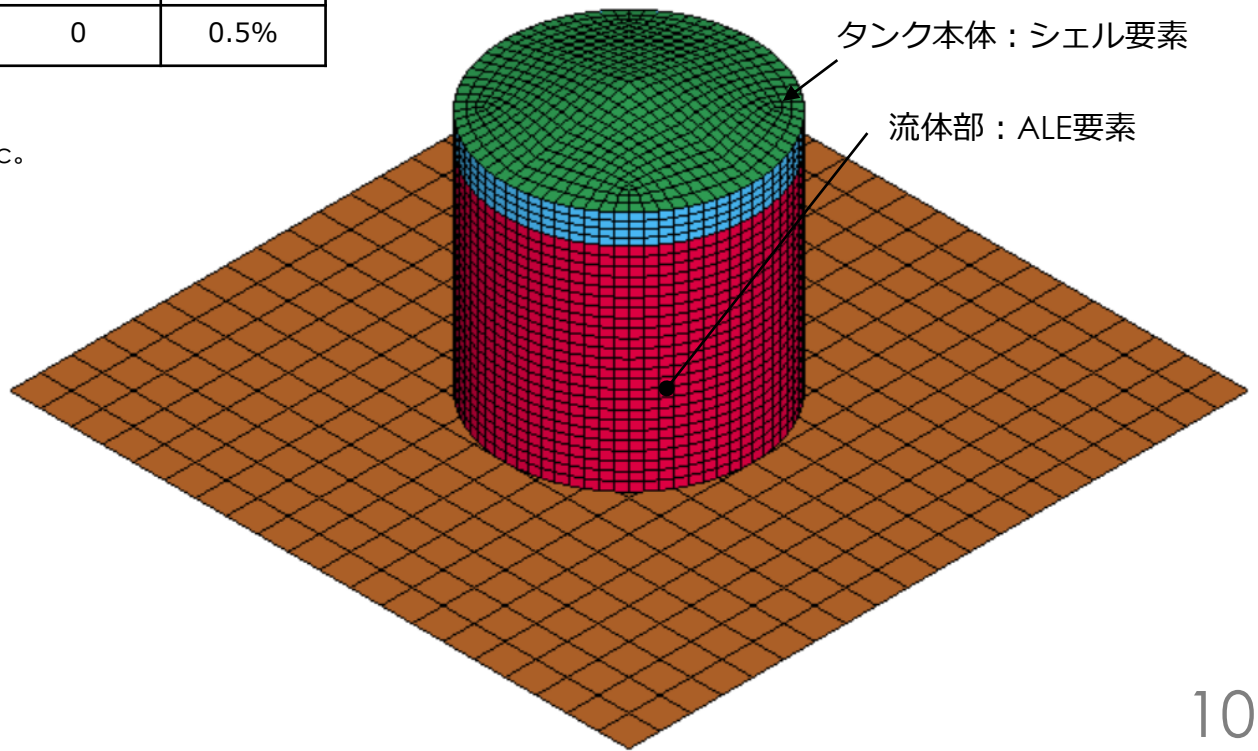
■ 解析モデル詳細

H4北エリア

タンク内径：12000mm
タンク高さ：12920mm
水位　　：10269mm（ 2022.3.16 地震時の最大滑動タンクの水位）
物性値　　：下表に示すとおり。

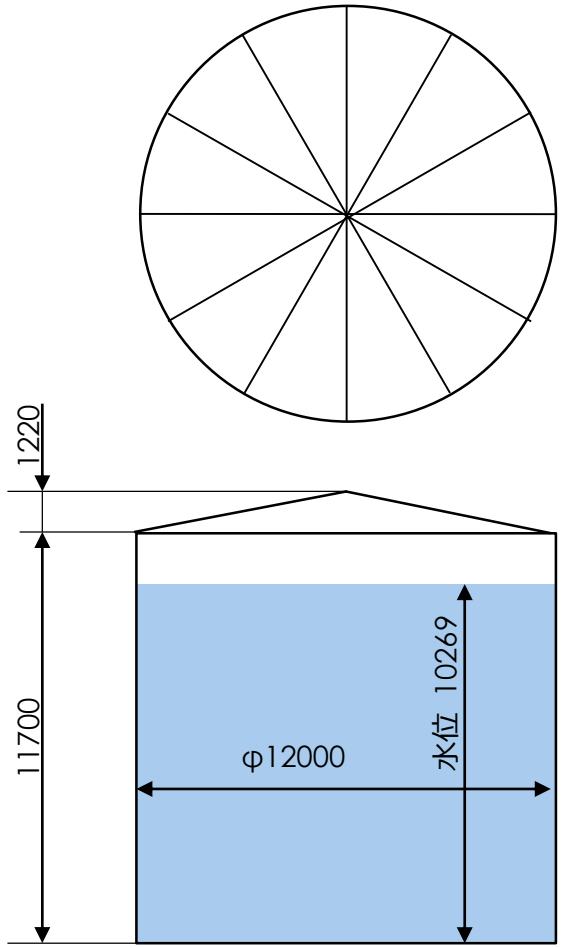
	密度 [t/mm^3]	ヤング率 [MPa]	ポアソン比 [-]	粘性係数 [Pa・s]	減衰比※
タンク	7.85e-9	202350	0.3	–	1%
流体	1.0e-9	–	–	0	0.5%

※：JEAG4601-1991追補版の値。
解析では質量比例型減衰として設定。
設定固有周期は，タンク：0.08sec，流体：3.6sec。



4.2　タンクの解析モデル（H４北エリア）

■ H4北エリアタンク構造図



基本仕様

タンク容量		1200m^3
主要寸法	内　　径	12000mm
	胴板厚さ	12mm
	底板厚さ	12mm
	高　　さ	12920mm
材料	胴板・底板	SM400A
水位		10269mm

※： 2022.3.16 地震時の最大滑動タンクの水位

4.3　解析ケースについて

TEPCO

■ タンクが大きく滑動した原因を分析するため，解析ケース毎に入力地震動や摩擦係数の設定を変えた解析を行う。各ケースの目的，評価条件は以下のとおり。（６．解析ケース　参照）

解析ケース	目的	評価条件
①	2021.2.13地震および2022.3.16地震の際に，最も滑動したタンクを対象とした評価を実施し，地震時に確認された滑動量と比較する。また，本ケースをベースケースとする。	地震動は2022.3.16地震（はぎとり波による解析波），タンク形状はＤエリアのタンク，水位は最も滑動したタンクの水位，静止摩擦係数は設計で用いる0.4，動摩擦係数は0.3として解析を実施。
②～⑥	静止摩擦係数と動摩擦係数が滑動に与える影響を確認する。	静止摩擦係数は0.4～0.7，動摩擦係数は0.15～0.3の範囲で値を変え，他の条件はケース①と同じ条件にて解析を実施。
⑦	摩擦がかなり小さい状況を想定した解析を行い，滑動量を確認する。	静止摩擦係数，動摩擦係数とも0.15とし，他の条件はケース①と同じ条件にて解析を実施。
⑧	地震動の違いによる影響を確認する。また，福島第一原子力発電所で観測された過去最大の地震による滑動量を確認する。	地震動は2011年3月11日の東北地方太平洋沖地震（はぎとり波による解析波）とし，他の条件はケース①と同じ条件にて解析を実施。
⑨	地震動の作成方法の違い（はぎとり波による解析波／観測波）による影響を確認する。観測記録を入力波として用いた評価を実施し，地震時に確認された滑動量と比較する。	地震動は2022.3.16地震時のH4北エリアの観測波，タンク形状はH4北エリアのタンク，水位はH4北エリアで最も滑動したタンクの水位，摩擦係数はケース①と同じ条件にて解析を実施。

4.4　摩擦係数の設定，スロッシング考慮について

TEPCO

■ 摩擦係数の設定

　ベースケースの摩擦係数は，以下のように設定した。

　タンク底板とタンク基礎の摩擦係数に関しては，鋼構造設計規準※に基づき，鋼材とコンクリートとの静止摩擦係数を0.4とした。

　動摩擦係数は文献等に明確な記載が見つからなかったため，静止摩擦係数より小さい0.3とした。

※：鋼構造設計規準 -許容応力度設計法- 第４版「17.2 露出柱脚（４）せん断力」に以下のように記載されている。

「露出柱脚に作用するせん断力は，ベースプレート下面とモルタルまたはコンクリートとの摩擦力，またはアンカーボルトの抵抗力によって伝達するものとして算定する．この場合，摩擦係数は0.4とする．」

摩擦係数0.4の根拠は当該文献中の解説に記載はないが，アンカーボルトを安全に設計するために，実験等で得られている値の下限値を設定していると考えられる。

このため本検討では，静止摩擦係数のベースケースとして0.4を設定し，ケース②～⑥のパラメータスタディでは0.4より大きい値を設定した。

■ スロッシングの考慮

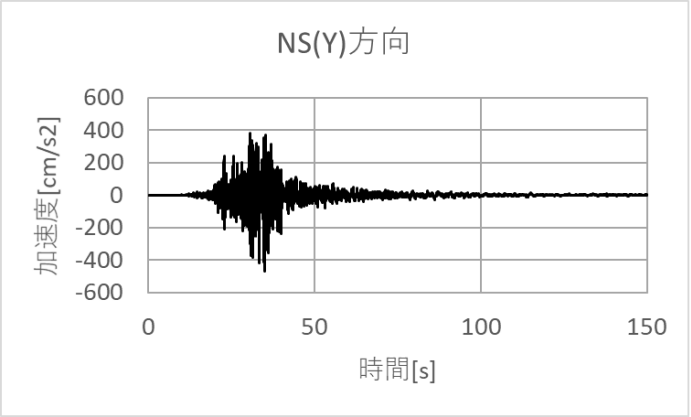
　実際に地震が発生した際には，スロッシングの程度の大小はあっても，スロッシングが全く生じないことは無いため，全てのケースでスロッシングを考慮したモデルを用いて評価した。

5．入力地震動

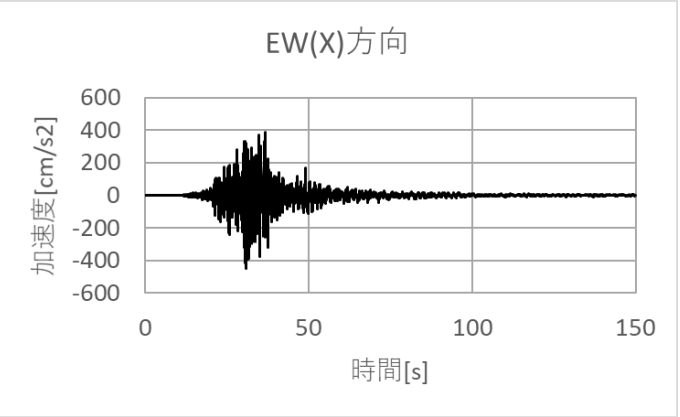
■ 入力地震動：2022.3.16解析波（Dエリア）※

※： 2022.3.16 地震のはぎとり波（自由地盤系南地点の観測記録による）から作成した Dエリア基礎表面の地震動。
入力地震動の算出方法については添付３参照。

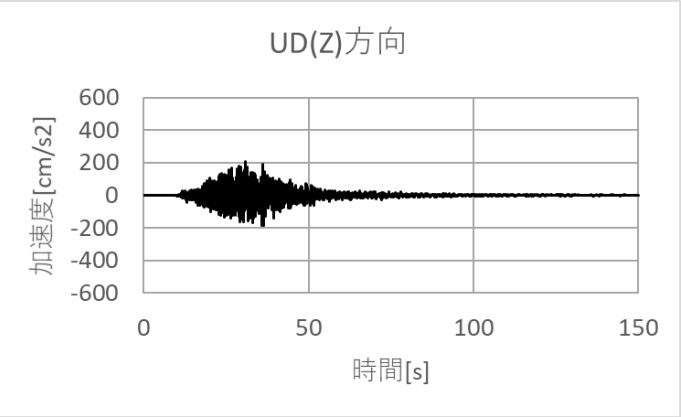
・時刻歴波形（解析時間削減のため最初の40秒を削除。また，タンク内の水を静定させるため，地震動が無い10秒を初めに追加。）



最大加速度：467gal

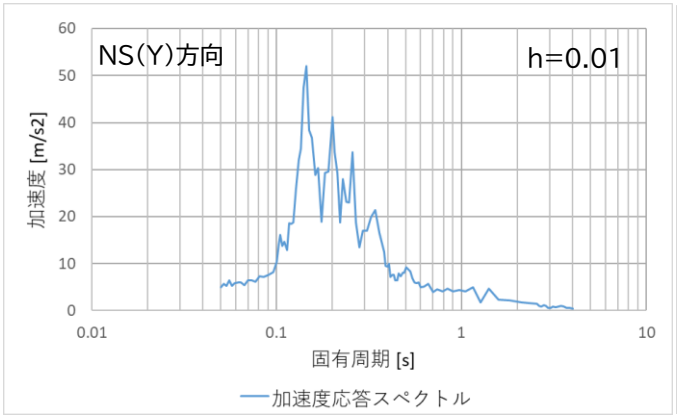


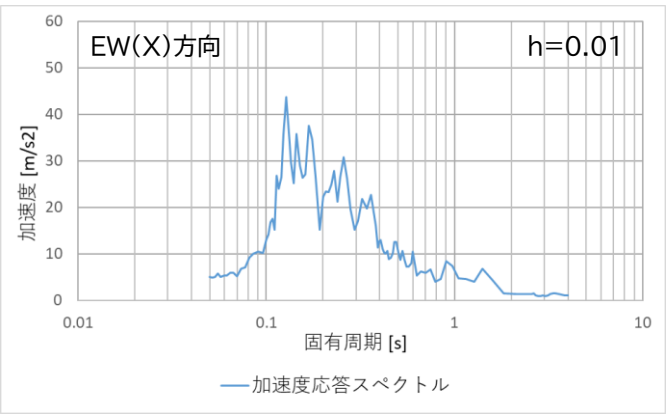
最大加速度：449gal

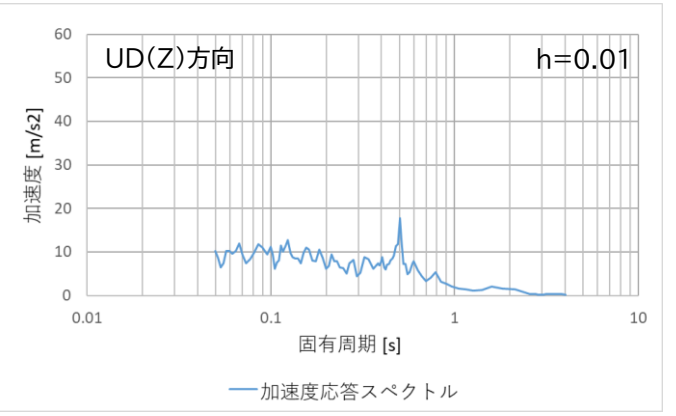


最大加速度：209gal

・加速度応答スペクトル





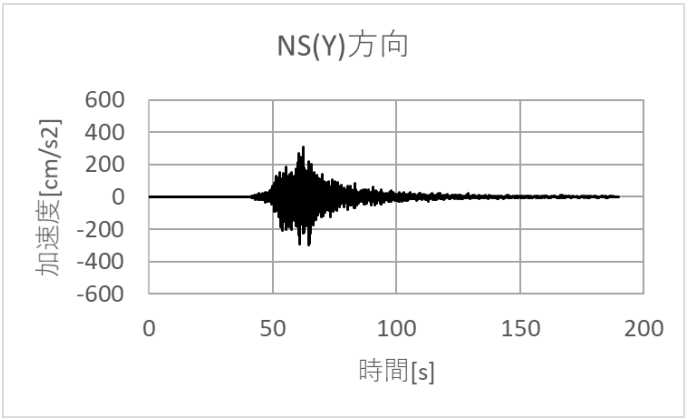


5．入力地震動

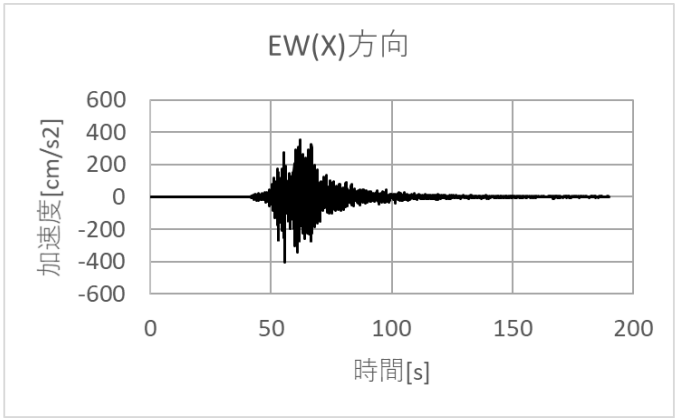
■ 入力地震動：2022.3.16観測波（H4北エリア）※

※：H4北エリアに設置された地震計で観測した地震動。

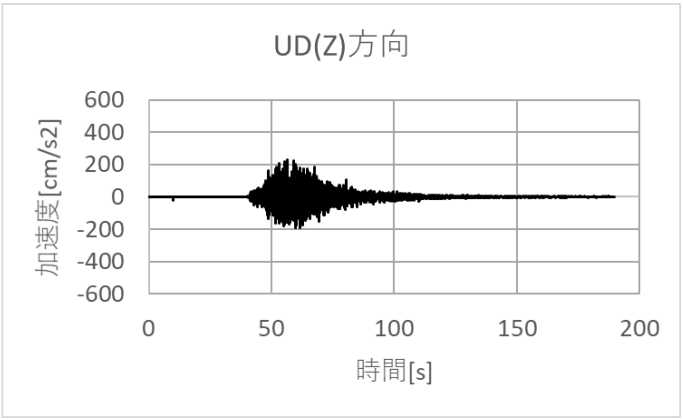
・時刻歴波形（１ケースのみのため，解析時間削減目的の削除無し。タンク内の水を静定させるため，地震動が無い10秒を初めに追加。）



最大加速度：306gal

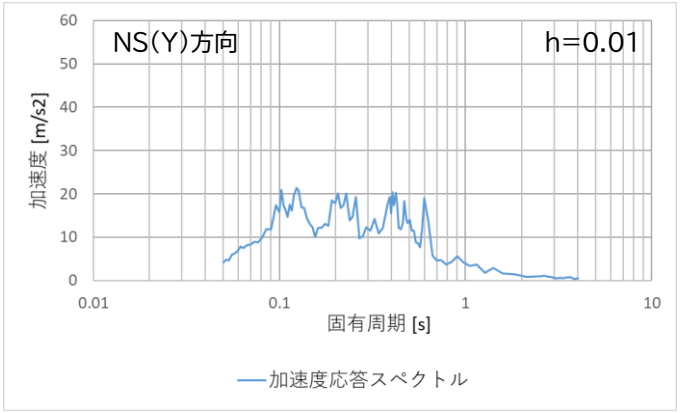


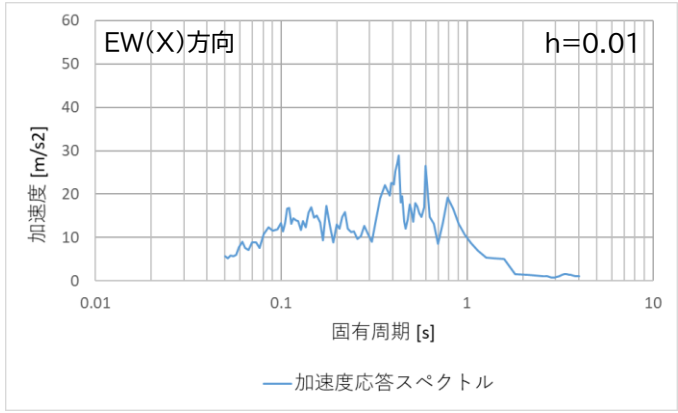
最大加速度：406gal

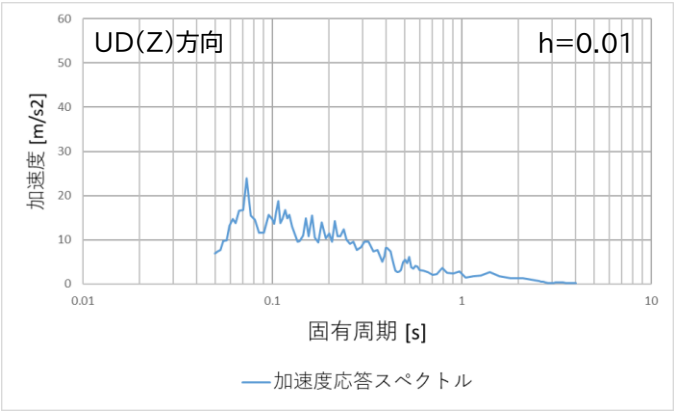


最大加速度：229gal

・加速度応答スペクトル





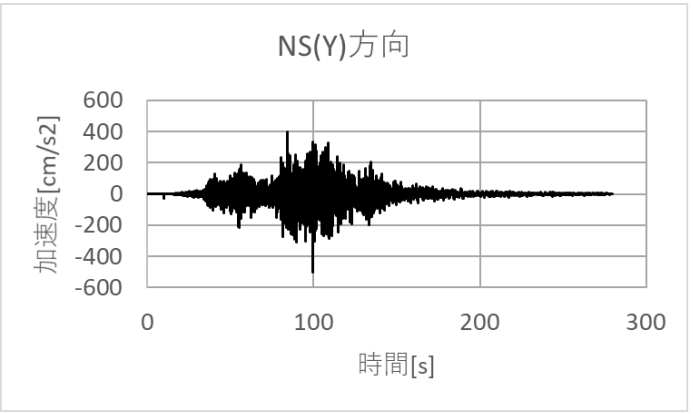


5．入力地震動

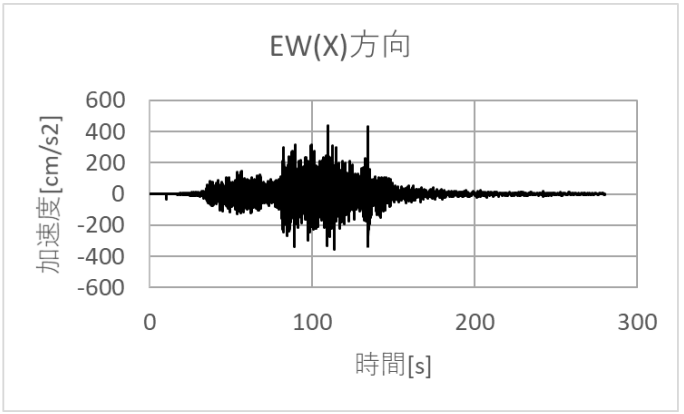
■ 入力地震動：2011.3.11解析波（Dエリア）※

※： 2011年3月11日の東北地方太平洋沖地震のはぎとり波から作成した Dエリア基礎表面の地震動。
入力地震動の算出方法については添付３参照。

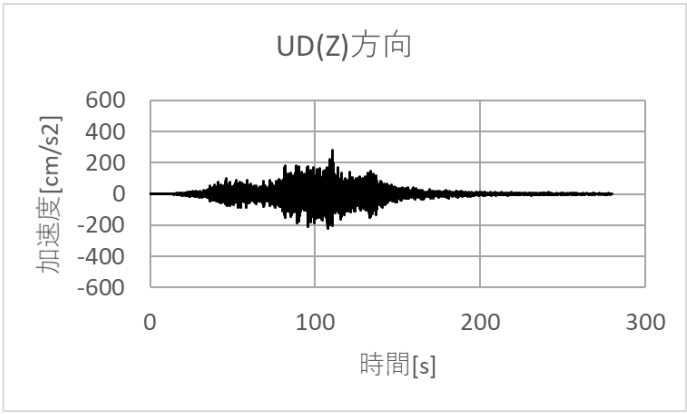
・時刻歴波形（タンク内の水を静定させるため地震動が無い10秒を初めに追加。）



最大加速度：499gal

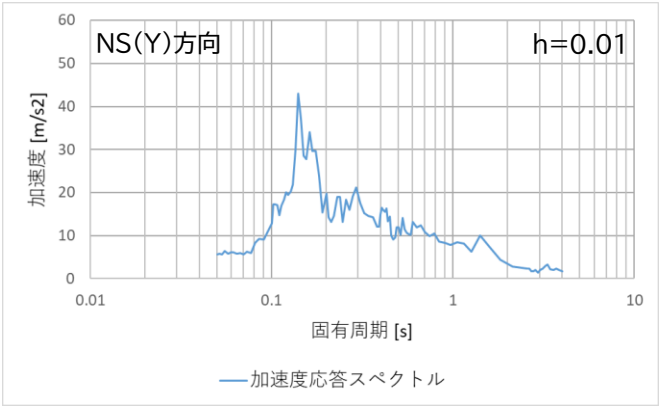


最大加速度：441gal

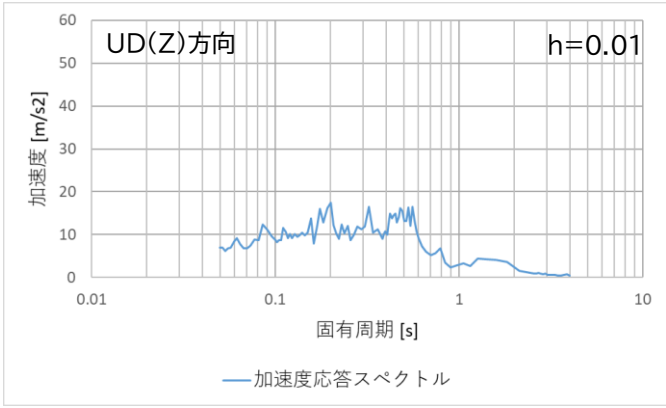


最大加速度：283gal

・加速度応答スペクトル







6．解析ケース

		①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨
タンク形状	Dエリアタンク	●	●	●	●	●	●	●	●	
	H4北エリアタンク									●
水位	最大滑動時の水位（Dエリア)	●	●	●	●	●	●	●	●	
	最大滑動時の水位（H4北エリア)									●
地震動	2022.3.16解析波（Dエリア）	●	●	●	●	●	●	●		
	2011.3.11解析波（Dエリア）								●	
	2022.3.16観測波(H4北エリア*)									●
摩擦係数	静止摩擦係数μ_s 0.4 動摩擦係数μ_d 0.3	●							●	●
	静止摩擦係数μ_s 0.5 動摩擦係数μ_d 0.3		●							
	静止摩擦係数μ_s 0.6 動摩擦係数μ_d 0.3			●						
	静止摩擦係数μ_s 0.7 動摩擦係数μ_d 0.3				●					
	静止摩擦係数μ_s 0.4 動摩擦係数μ_d 0.15					●				
	静止摩擦係数μ_s 0.4 動摩擦係数μ_d 0.2						●			
	静止摩擦係数μ_s 0.15 動摩擦係数μ_d 0.15							●		
各ケースの目的		基本ケース	摩擦係数の違いによる影響						地震動の違いによる影響	地震動作成方法の違いによる影響

＊2022.3.16解析波と2022.3.16観測波の比較はどちらもDエリアで実施するのが最善であるが，2022.3.16 地震時にDエリア地震計にタンク雨水カバーが衝突し，正しい観測波を記録できていないことから，H4北エリア地震計の観測波を使用した。

7．解析結果

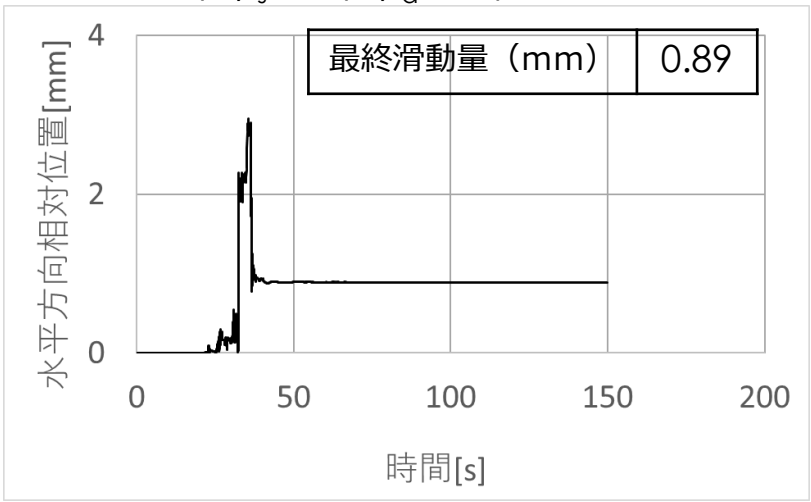
		①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨
タンク形状	Dエリアタンク	●	●	●	●	●	●	●	●	
	H4北エリアタンク									●
水位	最大滑動時の水位（Dエリア)	●	●	●	●	●	●	●	●	
	最大滑動時の水位（H4北エリア)									●
地震動	2022.3.16解析波（Dエリア）	●	●	●	●	●	●	●		
	2011.3.11解析波（Dエリア）								●	
	2022.3.16観測波(H4北エリア)									●
摩擦係数	静止摩擦係数μ_s 0.4 動摩擦係数μ_d 0.3	●							●	●
	静止摩擦係数μ_s 0.5 動摩擦係数μ_d 0.3		●							
	静止摩擦係数μ_s 0.6 動摩擦係数μ_d 0.3			●						
	静止摩擦係数μ_s 0.7 動摩擦係数μ_d 0.3				●					
	静止摩擦係数μ_s 0.4 動摩擦係数μ_d 0.15					●				
	静止摩擦係数μ_s 0.4 動摩擦係数μ_d 0.2						●			
	静止摩擦係数μ_s 0.15 動摩擦係数μ_d 0.15							●		
最終滑動量（mm）		**0.89**	**0.52**	**0.37**	**0.47**	**32.69**	**4.81**	**10.78**	**9.27**	**1.51**
道のり移動距離(mm)		**21.26**	**11.80**	**8.22**	**7.39**	**61.32**	**38.15**	**401.16**	**40.57**	**22.57**

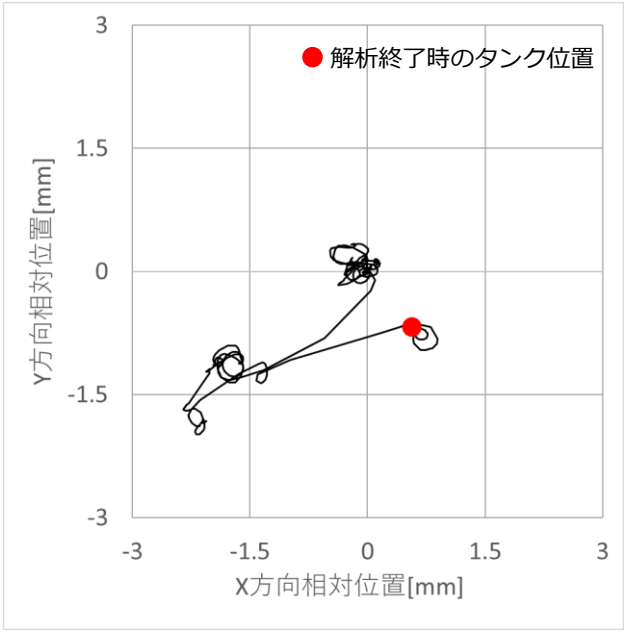
※　最終滑動量　　：解析開始時のタンク位置と解析終了時のタンク位置を，直線で結んだ距離。
　　道のり移動距離：解析開始から解析終了まで，タンクが移動した道のりの長さ。（移動経路に沿った長さ）

7．解析結果（滑動量）

ケース①

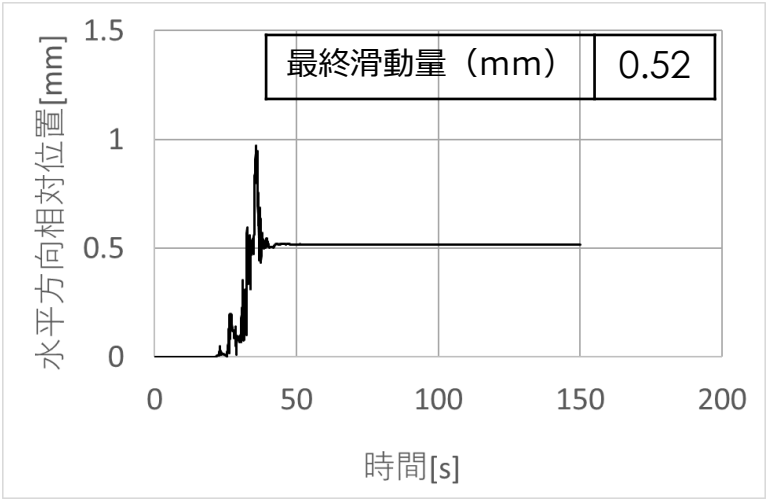
（Dエリア，μ_s=0.4，μ_d=0.3，2022.3.16解析波）

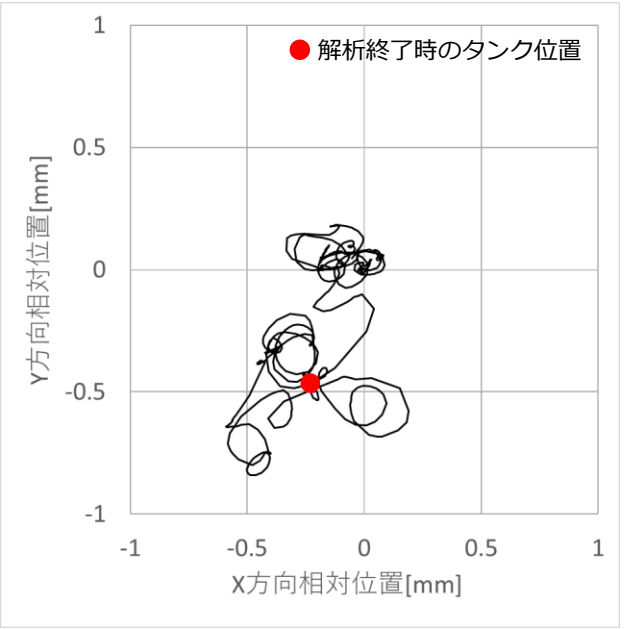




ケース②

（Dエリア，μ_s=0.5，μ_d=0.3，2022.3.16解析波）

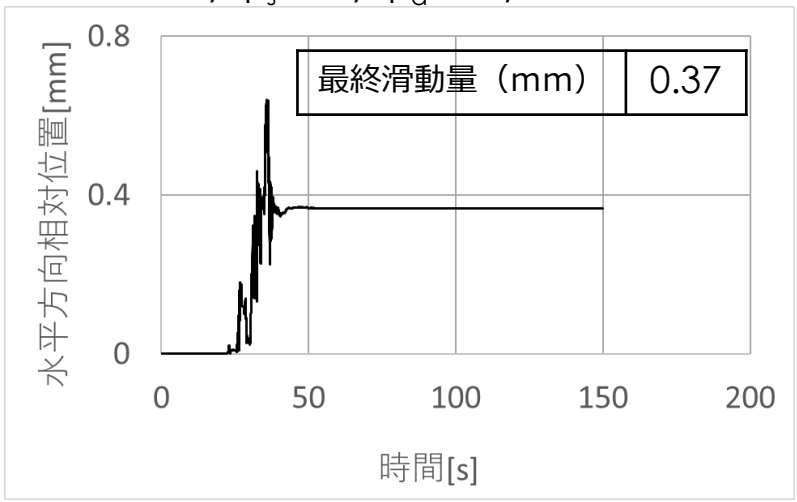


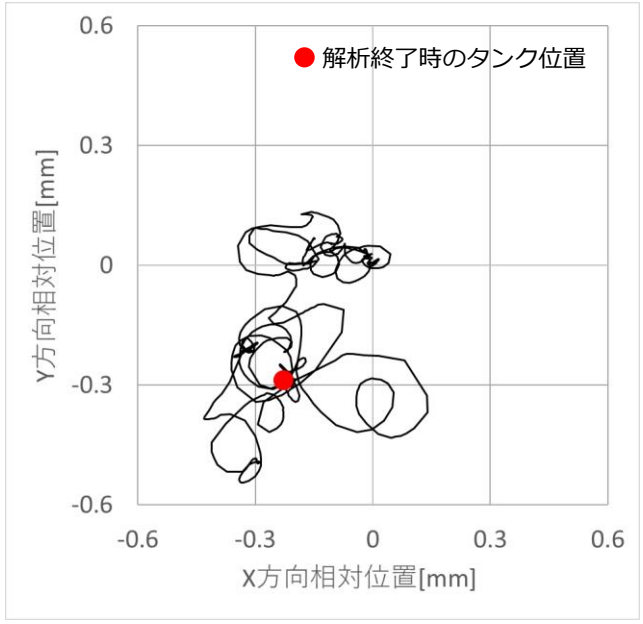


7．解析結果（滑動量）

ケース③

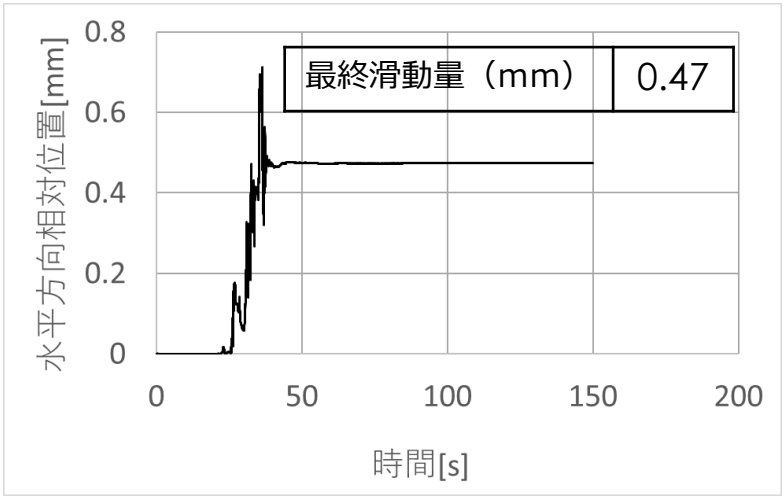
（Dエリア，μ_s=0.6，μ_d=0.3，2022.3.16解析波）

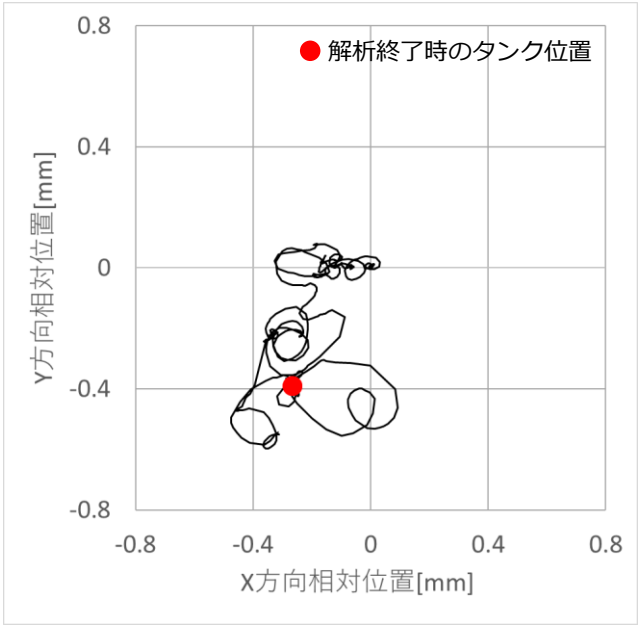




ケース④

（Dエリア，μ_s=0.7，μ_d=0.3，2022.3.16解析波）

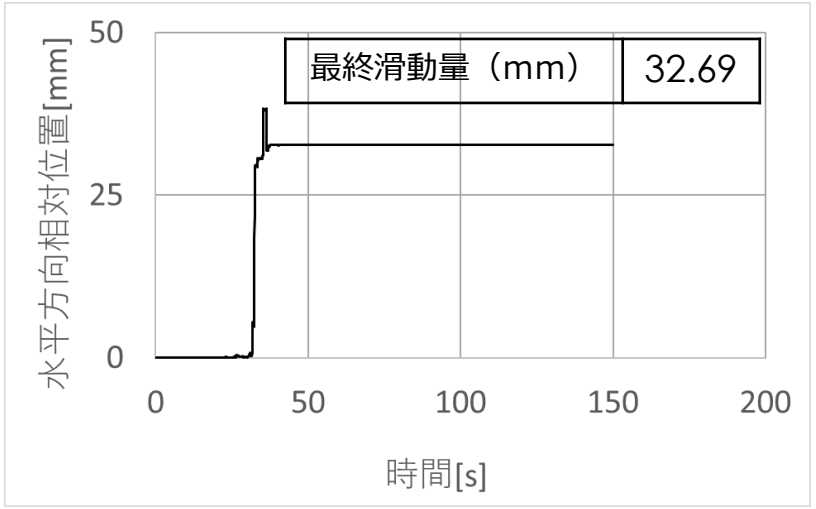


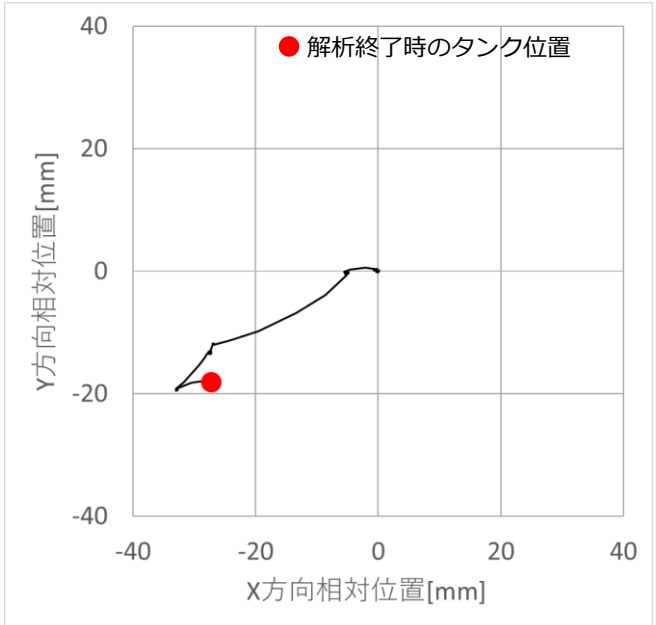


7．解析結果（滑動量）

ケース⑤

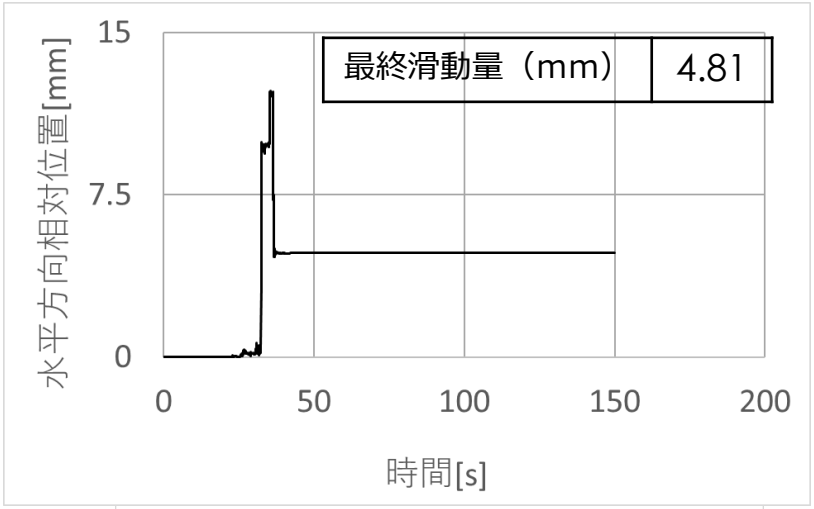
（Dエリア，μ_s=0.4，μ_d=0.15，2022.3.16解析波）

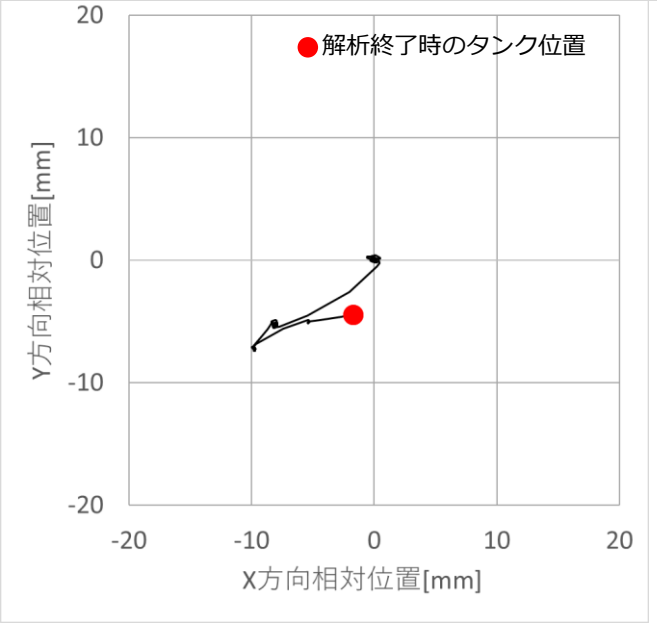




ケース⑥

（Dエリア，μ_s=0.4，μ_d=0.2，2022.3.16解析波）

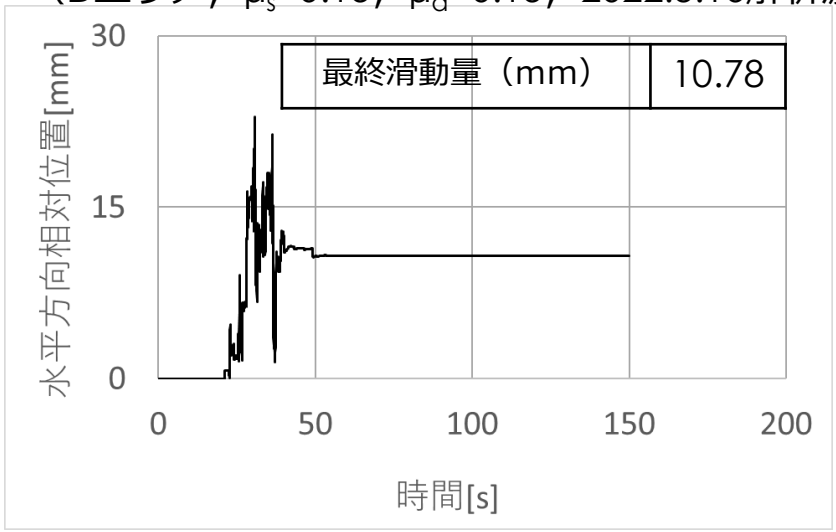


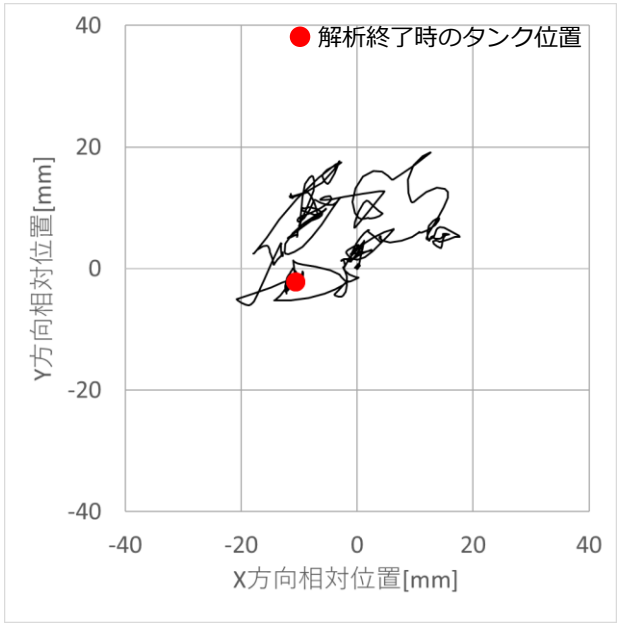


7．解析結果（滑動量）

ケース⑦

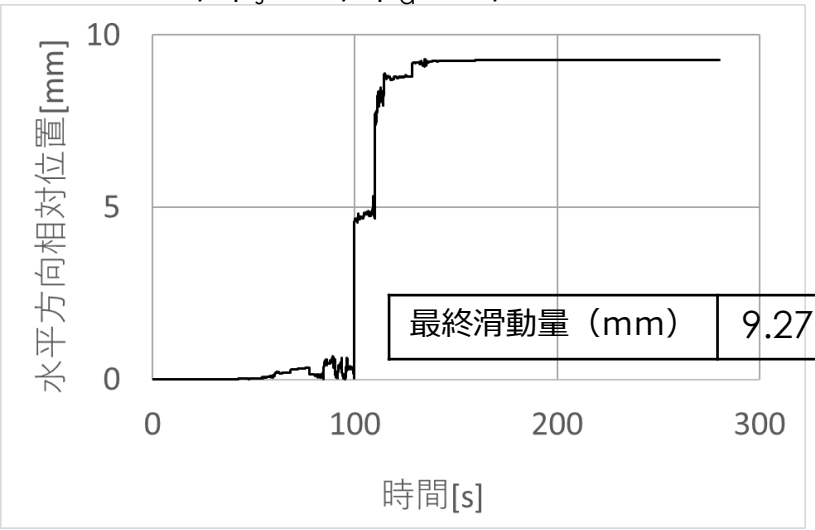
（Dエリア，μ_s=0.15，μ_d=0.15，2022.3.16解析波）

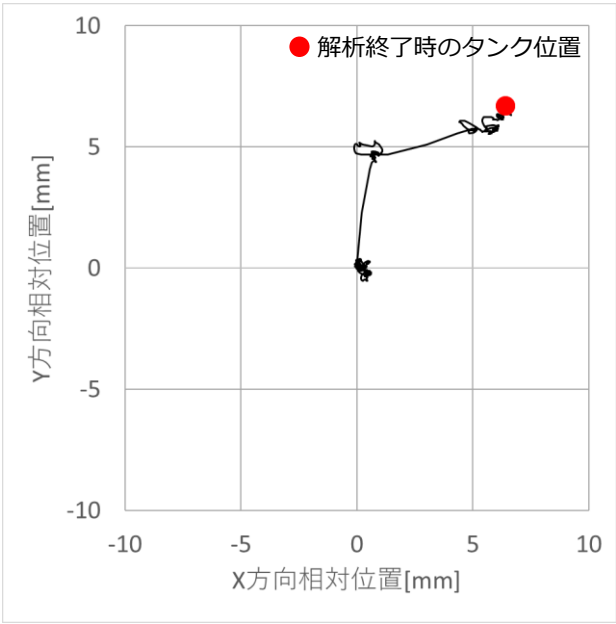




ケース⑧

（Dエリア，μ_s=0.4，μ_d=0.3，2011.3.11解析波）

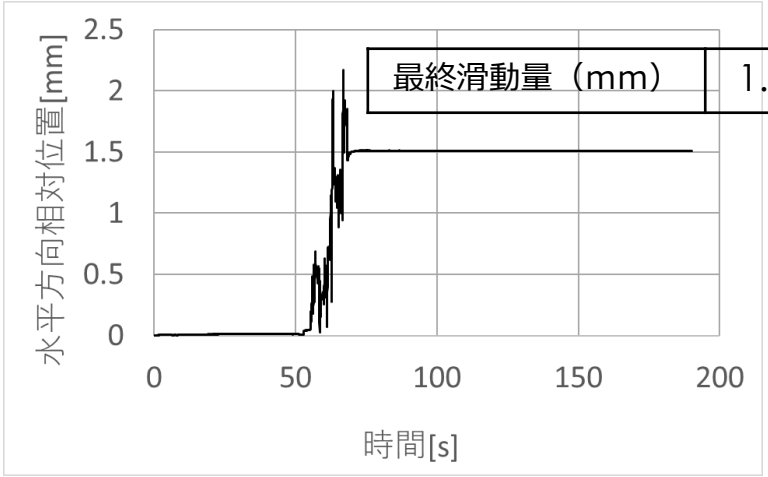


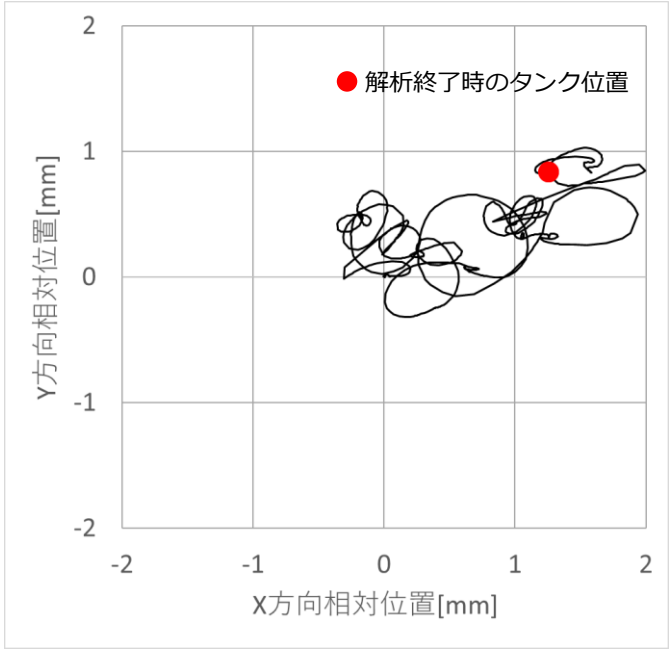


7．解析結果（滑動量）

ケース⑨

（H4北エリア，μ_s=0.4，μ_d=0.3，2022.3.16観測波）

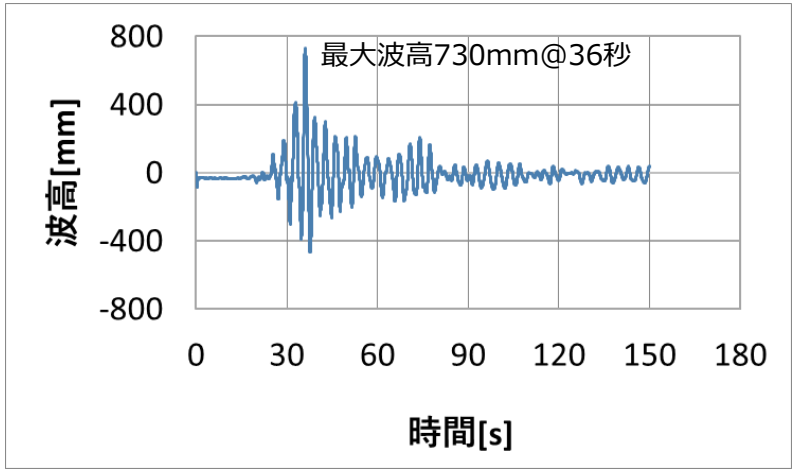




7．解析結果（スロッシング波高）

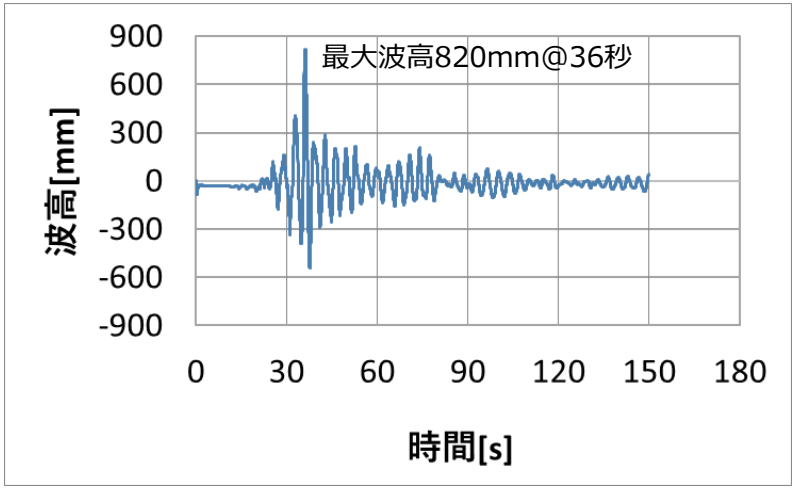
ケース①

（Dエリア，μ_s=0.4，μ_d=0.3，2022.3.16解析波）



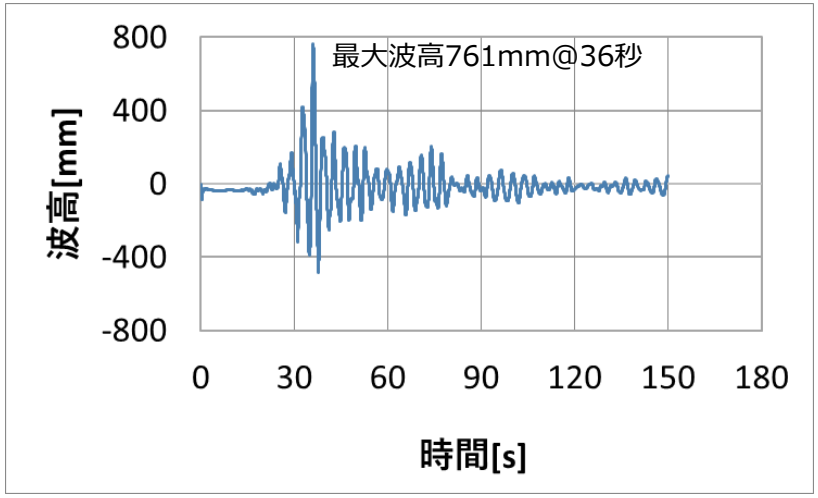
ケース②

（Dエリア，μ_s=0.5，μ_d=0.3，2022.3.16解析波）



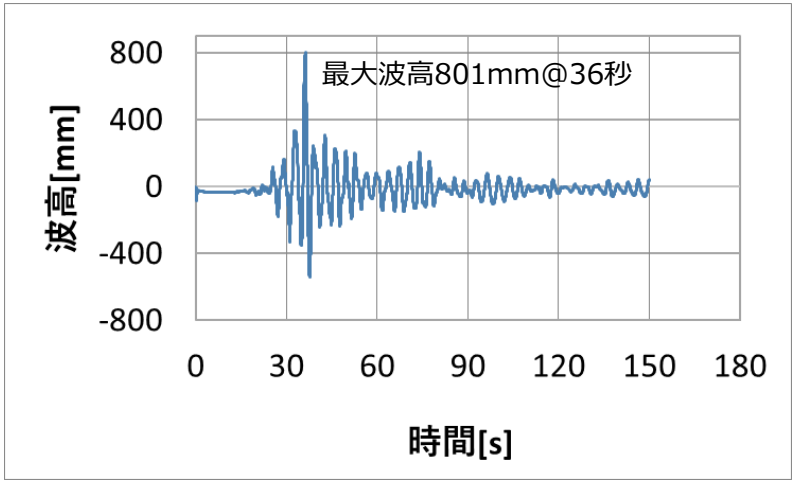
ケース③

（Dエリア，μ_s=0.6，μ_d=0.3，2022.3.16解析波）



ケース④

（Dエリア，μ_s=0.7，μ_d=0.3，2022.3.16解析波）

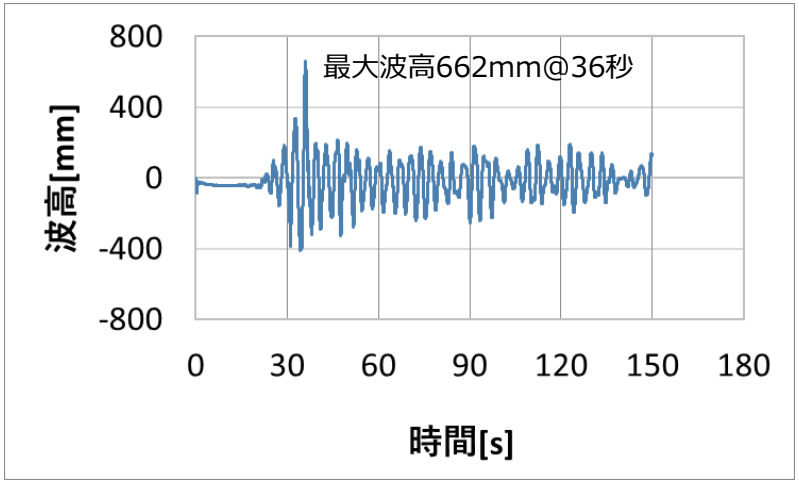


7．解析結果（スロッシング波高）

TEPCO

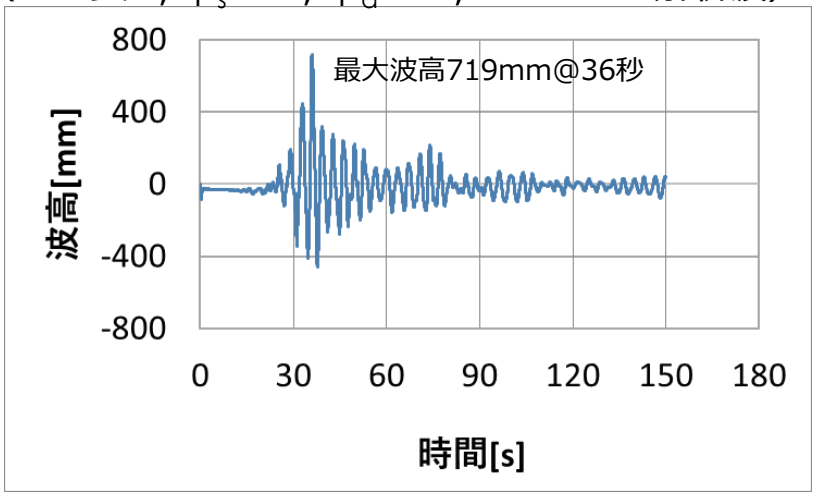
ケース⑤

（Dエリア，μ_s=0.4，μ_d=0.15，2022.3.16解析波）



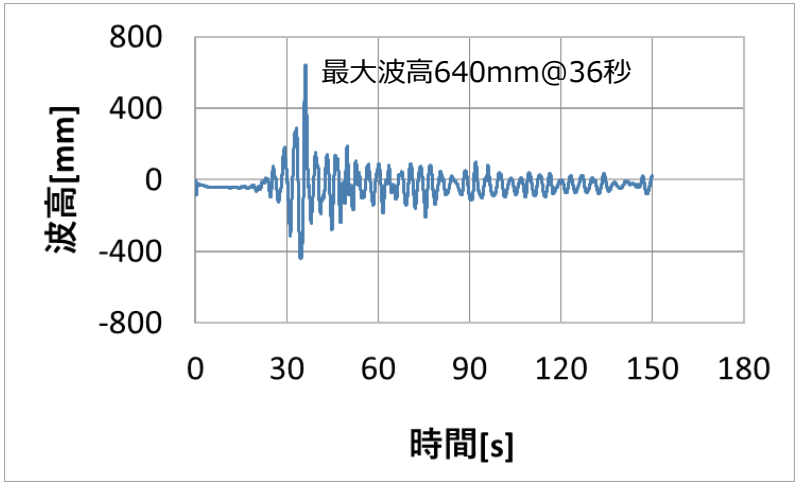
ケース⑥

（Dエリア，μ_s=0.4，μ_d=0.2，2022.3.16解析波）



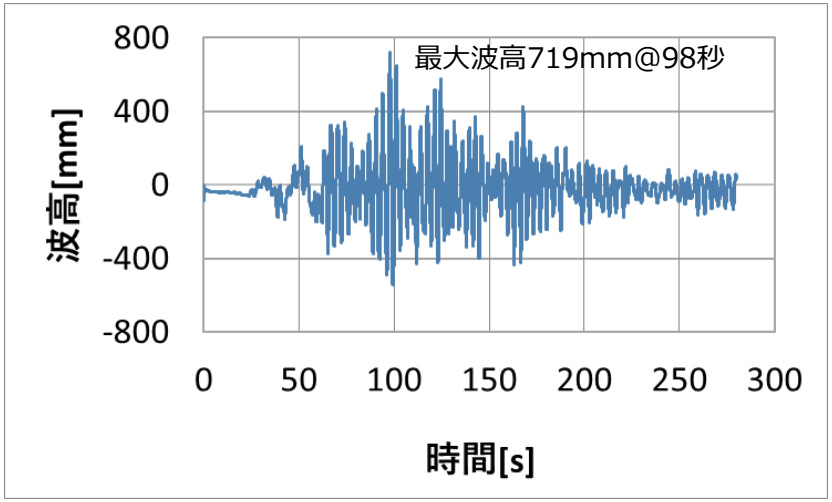
ケース⑦

（Dエリア，μ_s=0.15，μ_d=0.15，2022.3.16解析波）



ケース⑧

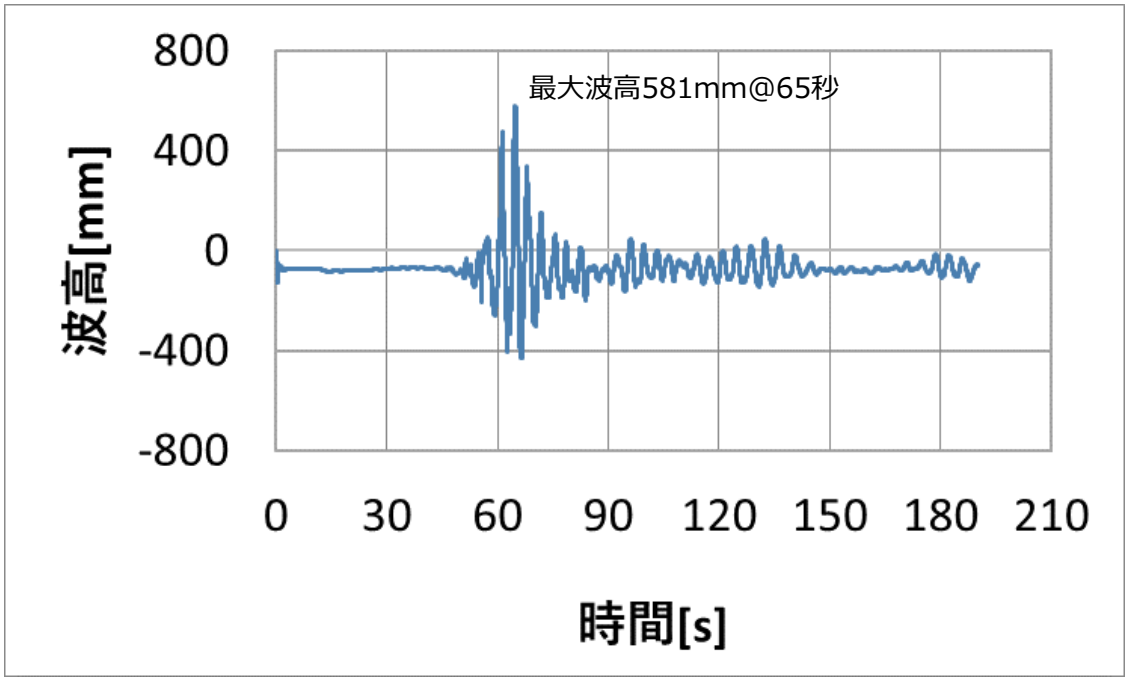
（Dエリア，μ_s=0.4，μ_d=0.3，2011.3.11解析波）



7．解析結果（スロッシング波高）

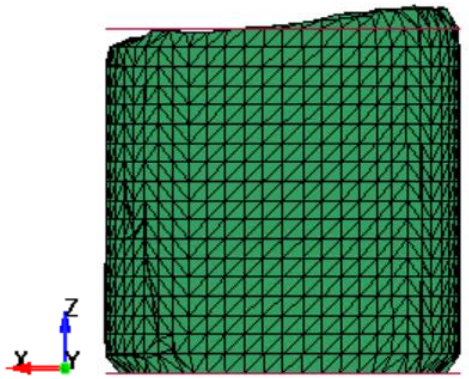
ケース⑨

（H4北エリア，μ_s=0.4，μ_d=0.3，2022.3.16観測波）



ケース①

<最大波高発生時のスロッシング状態>



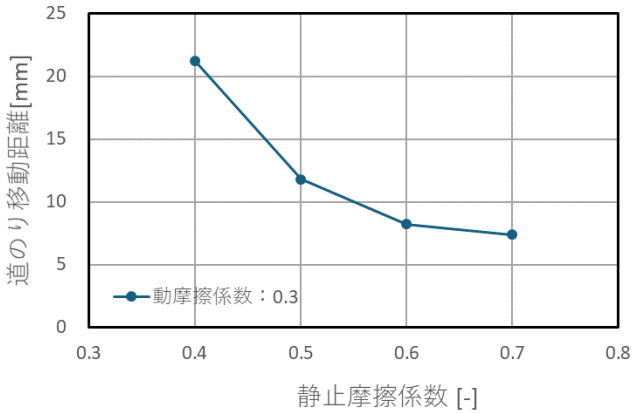
最大波高730mm@36秒

スロッシング最大波高まとめ

	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨
波高[mm]	730	820	761	801	662	719	640	719	581

※スロッシングにより液面がタンク天板に到達しないことを確認済み

8．考察１　静止摩擦係数の影響（ケース①～④の比較）



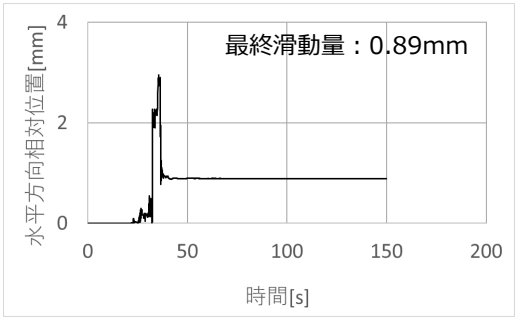
- ✓ 右図は，ケース①～④の結果から，
静止摩擦係数の違いによる
道のり移動距離への影響をまとめたものである。

- ✓ 静止摩擦係数が小さいほど，
道のり移動距離が大きくなることが確認できる。

- ✓ 静止摩擦係数を0.4から0.7に上げても滑動し始める時刻は変わらなかった。これは， 2022.3.16 地震の初期の加速度が大きく，静止摩擦係数を変えても地震動が摩擦力を上回るタイミングが変わらないことが原因と考えられる。

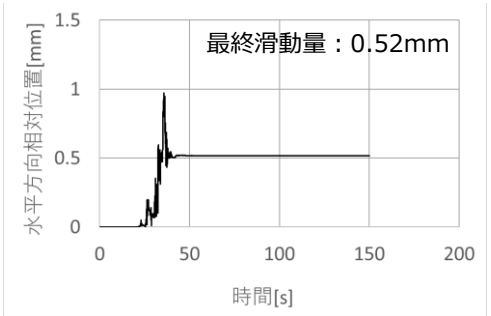
- ✓ ケース①～④では，最終滑動量はケース①の約1mmが最大値，道のり移動距離はケース①の約21mmが最大値となっており，実際に観測された滑動量の最大値200mmに届いていない。

- ✓ 前回技術会合（第26回）での報告では，地震動が大きくなる前から滑動し始めるケース（前回のケース③）や，地震動が小さくなっても滑動し続けるケース（ほぼ全ケース）があったが，今回の解析では静止摩擦係数が設定どおり効くようになったため，このような不自然な滑動は発生していない。



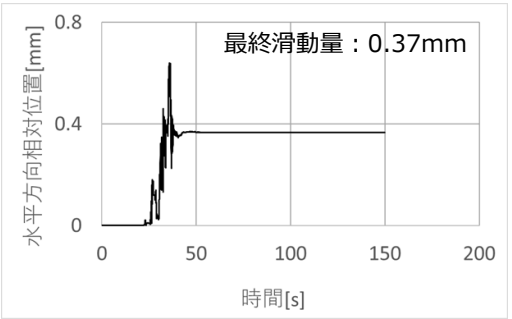
ケース①

(μ_s=0.4，μ_d=0.3)



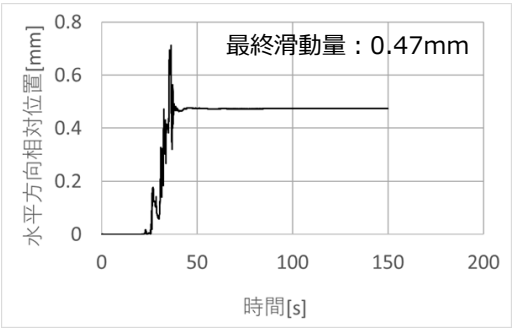
ケース②

(μ_s=0.5，μ_d=0.3)



ケース③

(μ_s=0.6，μ_d=0.3)

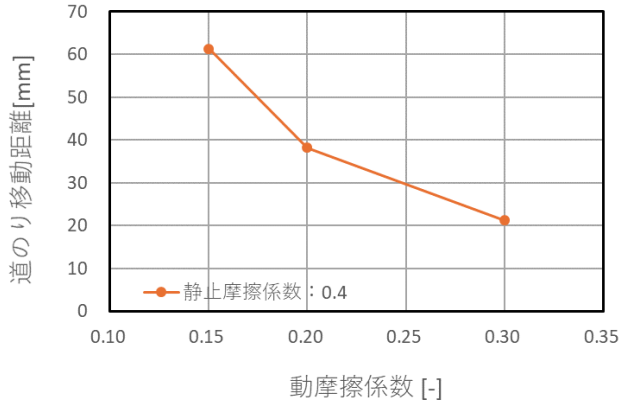


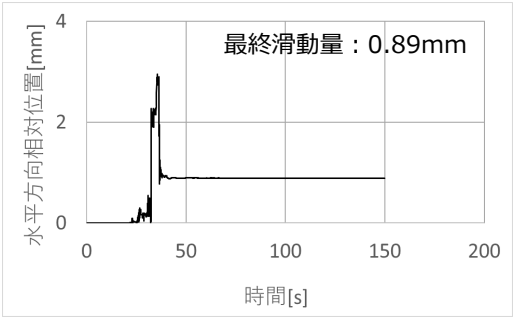
ケース④

(μ_s=0.7，μ_d=0.3)

8．考察２　動摩擦係数の影響（ケース①,⑤,⑥の比較）

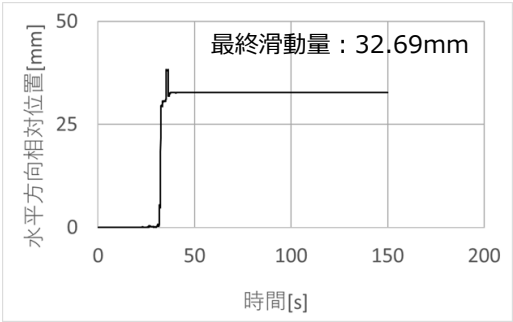
- ✓ 右図は，ケース①⑤⑥の結果から，
  動摩擦係数の違いによる
  道のり移動距離への影響をまとめたものである。
- ✓ 動摩擦係数が小さいほど
  道のり移動距離が大きくなることが確認できる。
- ✓ 静止摩擦係数を変えていないため，滑動し始める時刻は変わっていない。
- ✓ ケース①～⑥より滑動量に摩擦力が大きく影響していることが確認できる。
- ✓ 最も大きく滑動したケース⑤でも，最終滑動量は約33mm，道のり移動距離は約61mmとなり，実際に観測された滑動量の最大値200mmに届いていない。





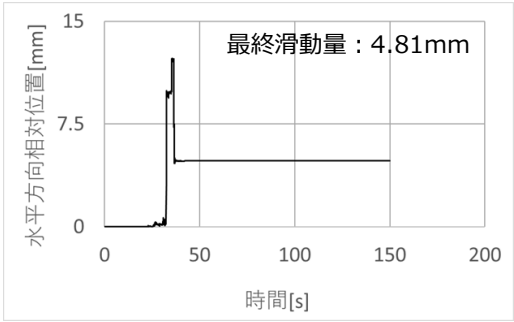
ケース①

(μ_s=0.4，μ_d=0.3)



ケース⑤

(μ_s=0.4，μ_d=0.15)



ケース⑥

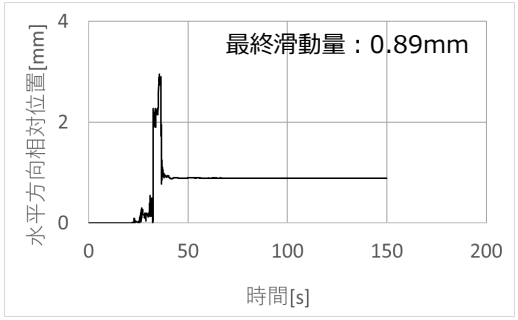
(μ_s=0.4，μ_d=0.2)

8．考察３　静/動摩擦係数を小さくした場合（ケース⑦）

- ✓ ケース①～⑥より，摩擦力が大きく影響していることが確認されたため，静止摩擦係数，動摩擦係数とも極端に小さくした解析を実施した。

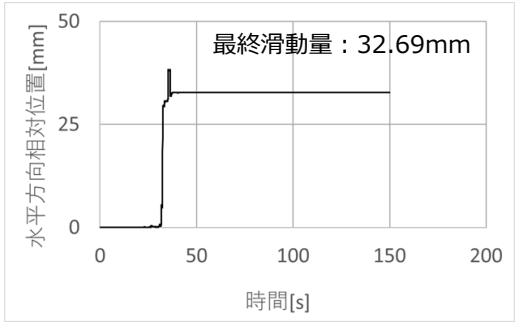
- ✓ ケース⑤と⑦を比較すると，道のり移動距離はケース⑦の方が大きいが，最終滑動量はケース⑤の方が大きくなっている。この理由については，
  - 道のり移動距離は，静止摩擦係数が小さいほど（タンクが滑動し始めるタイミングが早いほど），動摩擦係数が小さいほど（タンクが滑動している間の摩擦力が小さいほど），大きくなると考えられる。
  - 一方，最終滑動量は，摩擦力の大小だけではなく，加速度が入力されるタイミングによっても影響を受けると考えられる。
  - ケース⑤は，初めの位置から大きく離れたタイミングで，加速度の向きや摩擦力により滑動が抑えられたため，初めの位置から大きく離れた位置で滑動が停止したと考えられる。

- ✓ ケース⑦では，最終滑動量は約11mmであるが，道のり移動距離が約401mmとなり，実際に観測された滑動量の最大値200mmを大きく上回る結果となった。
  タンク底板の摩擦力が低下した状態であれば滑動量が200mmに達する可能性があることが確認できた。



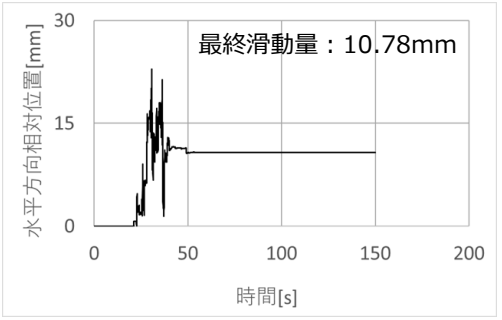
ケース①

（μ_s=0.4，μ_d=0.3）



ケース⑤

（μ_s=0.4，μ_d=0.15）

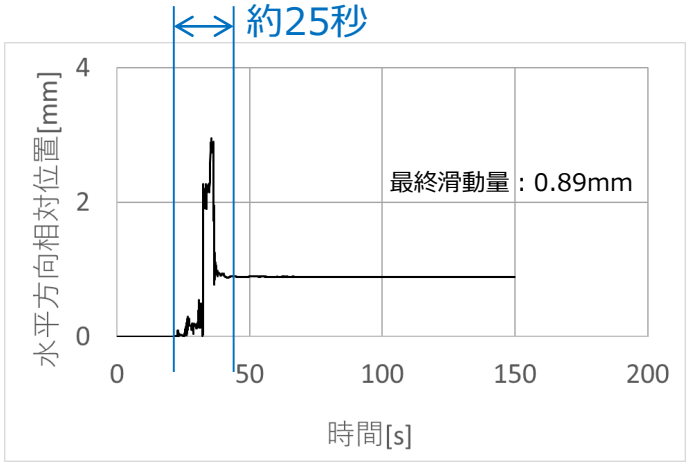


ケース⑦

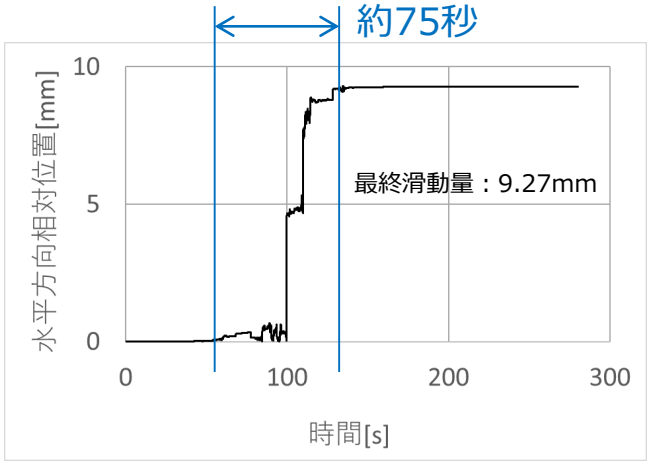
（μ_s=0.15，μ_d=0.15）

8．考察４　地震動の影響（2022.3.16解析波,2011.3.11解析波）

- ✓ 2022.3.16解析波（ケース①），2011.3.11解析波（ケース⑧）による結果を比較した。
- ✓ ケース①と⑧では，水平方向相対位置のグラフ，軌跡の形状とも，異なっている。
  入力地震動が異なるため，加速度の大きさや入力タイミング，地震動の継続時間が異なっており，当然の結果と考えられる。
- ✓ 2011.3.11解析波による水平方向相対位置のグラフ，軌跡を見ると，いったん大きく滑動した後，もう一度大きく滑動している様子が確認できる。
  地震動の時刻歴波形を見ても，100秒程度で加速度がいったん落ち着く時間帯があるため，この影響が表れていると考えられる。
- ✓ 道のり移動距離を比較すると，2011.3.11解析波は，2022.3.16解析波の約２倍になっている。
  水平方向相対位置のグラフを見ると，タンクが滑動している時間長さが2011.3.11解析波では約３倍程度になっている。地震動が長時間継続し，滑動が長時間継続した結果，道のり移動距離が約2倍になったと考えられる。



ケース①（2022.3.16解析波）



ケース⑧（2011.3.11解析波）

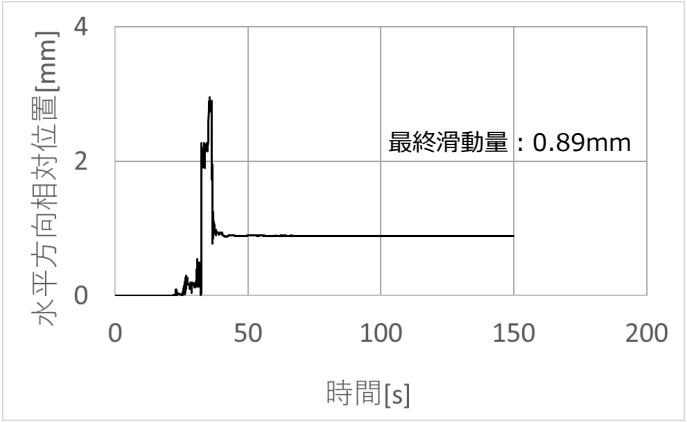
8．考察５　地震動の影響（2022.3.16解析波,2022.3.16観測波）

- ✓ 2022.3.16解析波@Ｄエリア（ケース①），2022.3.16観測波@Ｈ４北エリア（ケース⑨）による結果を比較した。ケース⑨では，地震動を観測記録に変えただけでなく，タンク形状もＨ４北エリアのタンクに変更している。

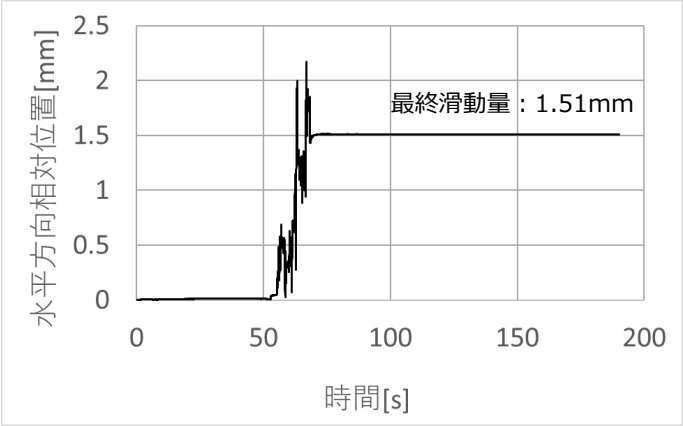
- ✓ ケース⑨の道のり移動距離は，ケース①とほとんど変わらない。2022.3.16解析波と2022.3.16観測波では，地震波の形状がほぼ同等であり，タンクが滑動している時間も同等であるため，妥当な結果と考えられる。
ケース①と⑨では滑動開始時刻が異なっているが，地震動の最初の40秒の削除有無が異なることによるものである。

- ✓ 解析波（ケース①）と観測波（ケース⑨）を用いた結果を比較すると，最終滑動量，道のり移動距離ともほとんど変わりはなく，滑動量への影響はないと考えられる。

- ✓ H4北エリアで実際に観測された地震動を用いても，Ｈ４北エリアの3.16地震時の滑動量（50mm）を再現することはできなかった。



ケース①（2022.3.16解析波）



ケース⑨（2022.3.16観測波）

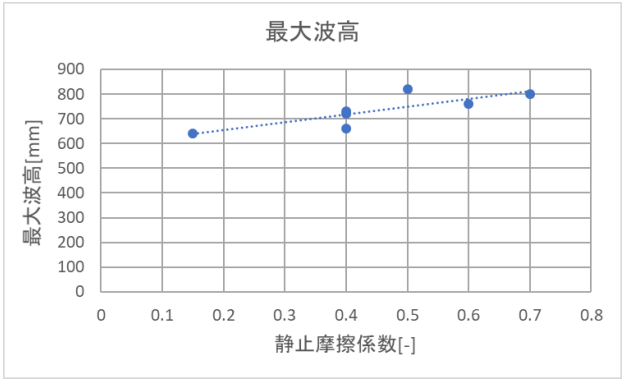
8．考察６　スロッシング波高の影響

- ✓ 最大波高が発生したポイントでの波高の時刻歴変化（p.24～26参照）を比較すると，2022.3.16解析波，または2022.3.16観測波を用いているケース①～⑦，⑨は，波の形状，最大波高を観測した時刻とも類似しており，振幅の大きさが違う程度となっている。

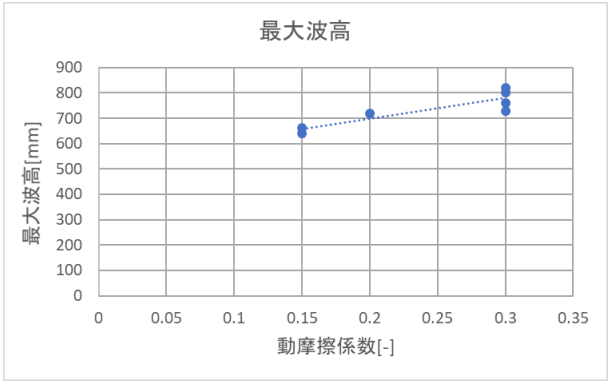
- ✓ 2011.3.11解析波を用いたケース⑧では，波高が激しく上下している様子が確認できる。2011.3.11解析波の速度応答スペクトル（添付４参照）は，スロッシング周期帯（3.3sec）が2022.3.16解析波／観測波よりかなり大きく，この影響と思われる。

- ✓ 下図は，地震動とタンク形状が同条件のケース①～⑦で，最大波高と静摩擦，動摩擦，道のり移動距離の相関をプロットしたものである。これを見ると，静止摩擦係数／動摩擦係数が大きいほど，最大波高が大きくなるような傾向がわずかに確認できる。また，最大波高が高いほど，道のり移動距離が短くなるような傾向もわずかに確認できる。
  摩擦力が大きい方がタンクにより大きな水平力がかかるため，最大波高が高くなったと考えられる。一方，これまでの考察から，摩擦力が大きい方が道のり移動距離は小さくなる傾向があるため，最大波高と道のり移動距離はわずかに逆の相関があるものと考えられる。

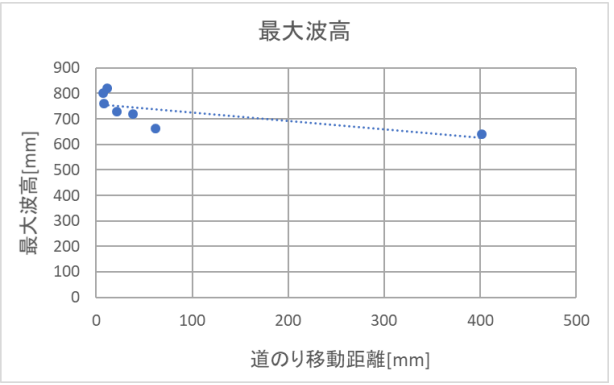
- ✓ 考察１～３で示したように，静止摩擦係数／動摩擦係数による道のり移動距離への影響が大きく，スロッシングの最大波高による影響はほとんど無いと考えられる。
  今回評価したケースでは，スロッシングによるタンク内包水の表面の傾きは，角度10 度程度（半径5m，最高水位約80cm）が最大であったため，影響が小さかったものと考えられる。もっと激しくスロッシングした場合は，波高と滑動の関連がみられる可能性がある。



静止摩擦係数



動摩擦係数



道のり移動距離

8．考察７　タンクの回転，底板の浮き上がりについて

TEPCO

■ タンクの回転について

- ✓ 解析によるタンクの回転を出力した結果を，添付５に示す。
- ✓ 2021.2.13地震， 2022.3.16 地震の際，わずかに回転したタンクがあったが，解析ではタンクの回転は再現できなかった。
- ✓ 今回の解析では，タンク底板の摩擦力を不均一にするような設定はしなかったが，タンク底板に摩擦力が大きい部分と小さい部分が存在するような状況であれば回転する挙動が生じる可能性がある。

■ タンク底板の浮き上がりについて

- ✓ 解析によるタンク底板の浮き上がりを出力した結果（浮き上がり最大時のコンター）を，添付５に示す。
- ✓ 2021.2.13地震， 2022.3.16 地震の際に，実際にどの程度浮き上がったかは不明だが，タンク底板の端が浮き上がった可能性があることが分かった。
- ✓ 静止摩擦係数が大きい方がより大きな水平力が作用するため，浮き上がり量が大きくなる傾向があると考えられる。
- ✓ 2022.3.16 地震のような大きな地震時においても，タンク底板の大部分が基礎に接した安定した状態を維持していることが確認できた。

9．まとめ（1／2）

■ 前ページまでの考察をまとめると，

- ✓ タンク底板と基礎表面の摩擦力は，滑動量に大きく影響する。
- ✓ 地震動の継続時間が長いほど，滑動量が増加する可能性がある。
- ✓ 解析波と観測波による滑動量への影響は，ほとんど無い。
- ✓ スロッシングの最大波高による滑動量への影響は，ほとんど無い。

■ 2021.2.13地震， 2022.3.16 地震において，タンク設置時の評価値（57.5mm）を上回る滑動量が確認された原因について

解析と実際に乖離があるとすれば，入力した地震動と摩擦力の２つだが，今回の結果から評価に用いた地震動が原因ではないと考えられる。

タンク底板と基礎表面の摩擦力が低下した状態であれば，滑動量が200mmに達する可能性があることが確認されたため，大きな滑動が確認されたタンクは，何らかの理由により摩擦力が小さくなっていたことが原因と考えられる。

9．まとめ（2／2）

■ タンク底板の摩擦力が低下する要因について

- 要因の一つとして，タンク底板と基礎の間に水が存在したことが考えられる。
- タンクを解体した際に，タンク底板と基礎の間に水があったことが確認されている。タンク底板と基礎の間に水が不均一に分布していたとすれば，水があるところでは摩擦係数が非常に小さくなるため，タンクの滑動や回転に寄与した可能性がある。
- また，水が存在したとすれば，地震動によるタンク挙動の影響を受けて水の場所が地震の最中に移動したと考えられ，水の移動に合わせて摩擦係数が小さくなる範囲や場所が変化したと考えられるが，そのような状況を解析で再現することは非常に困難である。
- 解析による裏付けは得られていないが，水の存在による摩擦係数の低下により，評価値を上回る滑動が発生した可能性があると考えられる。

■ 新設するタンクの設計方針について

タンクが大きく滑動した場合，連結配管の損傷による漏えいが発生する可能性がある。
これを防止するため，以下のような設計とする。

・滑動が影響しない設計例： 連結弁常時閉，地震時に自動的に全閉する連結弁の設置
・滑動を防止する設計例： タンクを基礎に固定（比較的小型のタンクの場合）

【添付資料】

１．既報告の解析で確認された問題の調査
２．解析モデルの妥当性検証
３．入力地震動の算出方法
４．地震動の速度応答スペクトル
５．解析結果（タンクの回転，浮き上がり量）
６．タンク設置時の滑動量評価
７．地震時のタンク滑動状況

添付１．既報告の解析で確認された問題の調査

【確認された問題】

一部の解析を実施した際に，以下のような不自然な内部流体の挙動が確認され，正しい結果が得られなかった。

・片側の波高のみ高い状態が続いてしまう。
・大きなスロッシング挙動により波が分裂してしまう。
・内部流体がタンクから漏れ出てしまう。

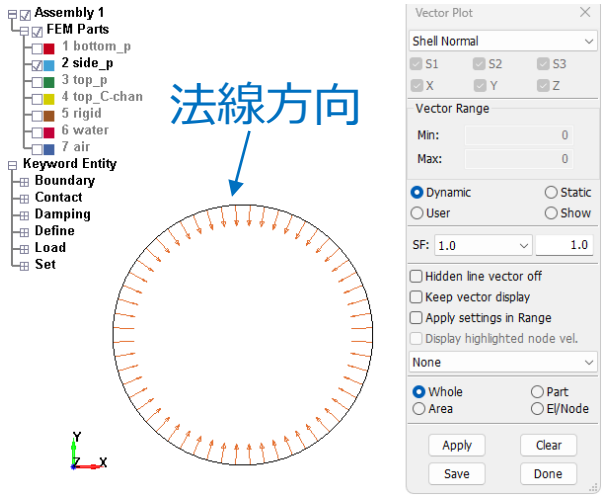
⇩

以下の設定を修正した結果，不自然な内部流体の挙動が無いことを確認した。

・タンク胴板の法線方向が間違っており正しい向きに修正※

タンク胴板の法線の向きにより胴板と流体の相対位置を指定する。
本件では流体はタンクの内側に存在するため
胴板の法線方向を内側に向ける必要があった。

※：Dエリアタンクのモデルでは正しい向きであったが，H4北エリアタンクのモデルでは間違った向きとなっていた。



添付２．解析モデルの妥当性検証

■ 妥当性確認の実施項目一覧

・摩擦力のモデル化方法

・静止摩擦係数の設定

・動摩擦係数の設定

・空タンクの固有周期の確認

・スロッシング周期の確認

・スロッシング波高の確認

添付２．解析モデルの妥当性検証

■ 摩擦力のモデル化方法

既報告の解析において，加速度が小さいタイミングで滑動し始める結果となっており，静止摩擦力が正常に効いていない可能性が高い結果であった。そこで解析において，タンクに作用する摩擦力を出力して確認したところ，摩擦力が常に動摩擦係数で計算されている状態であることが確認された。

⇩

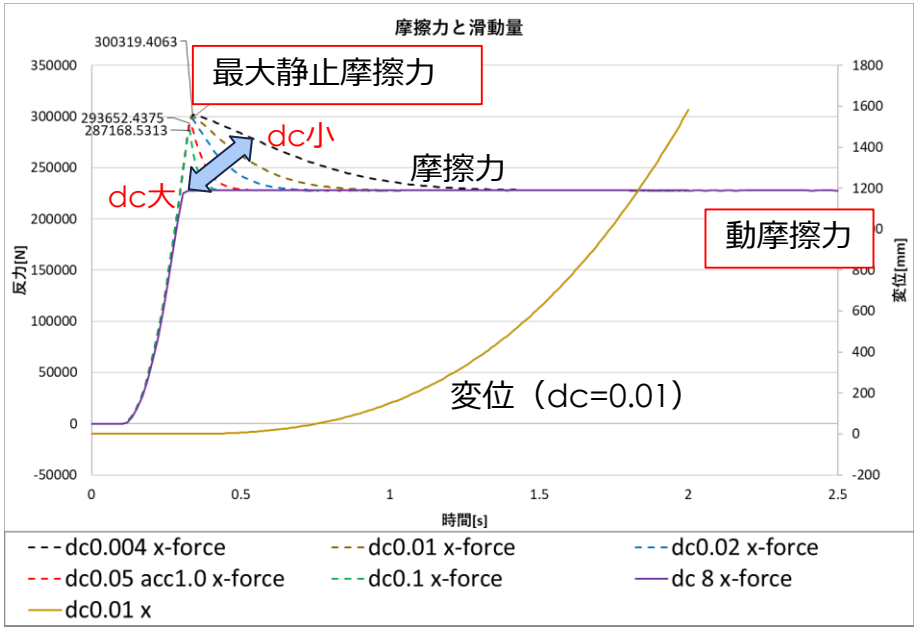
最大静止摩擦力・動摩擦力の理論値と一致するよう，解析コードの摩擦係数設定パラメータを調整し，静止摩擦力・動摩擦力が正しく計算されることを確認した。

<u>解析コードの摩擦係数設定パラメータ</u>

前回技術会合（第26回）での解析では，解析コードの摩擦係数設定パラメータが衝突解析でよく用いられる値（dc=8）となっており，静止摩擦力がほとんど効かない状態になっていた。
右図のグラフは，タンク底板を一定増加する荷重で引っ張った際の，摩擦力と変位をプロットしたものである。
dcが大きいと（紫の線：dc=8），摩擦力は最大静止摩擦力に達していないが，dcを小さくすると（黒の点線：dc=0.004），摩擦力が最大静止摩擦力まで上昇した後，徐々に動摩擦力に漸近していく様子が確認できる。

<u>パラメータ設定方法</u>

最大静止摩擦力の理論値と解析値の誤差１％以内，かつ，静止摩擦から動摩擦への切り替わりが素早く行われるパラメータ（dc=0.01）に設定した。



添付２．解析モデルの妥当性検証

■ 静止摩擦係数の設定

理論式から求めた最大静止摩擦力と，解析結果から求めた最大静止摩擦力を比較する。

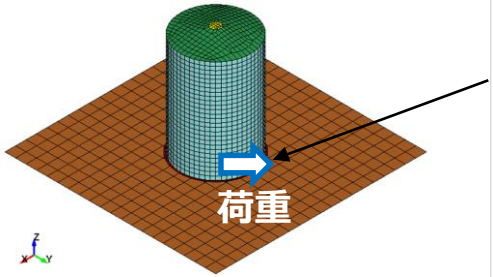
・理論式から求めた最大静止摩擦力：303718（N）

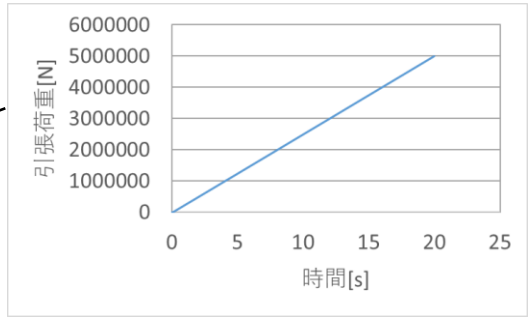
$$\mu_s mg = 0.4 \times 77400 \times 9.81 = 303718$$

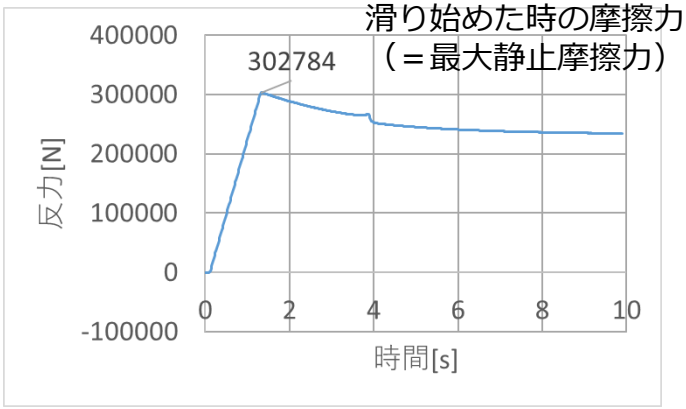
μ_s：静止摩擦係数0.4
m：空タンク質量77400（kg）
g：重力加速度9.81（m/s²）

・解析から求めた最大静止摩擦力：302784（N）

タンク底板を一定増加する荷重で引っ張った際にタンクが滑り始めたときの摩擦力を求めた。







摩擦力の時刻歴変化

・結果比較

理論値：303718（N）
解析値：302784（N）
} 誤差0.3%

添付２．解析モデルの妥当性検証

■ 動摩擦係数の設定

理論式から求めた動摩擦力と，解析結果から求めた動摩擦力を比較する。

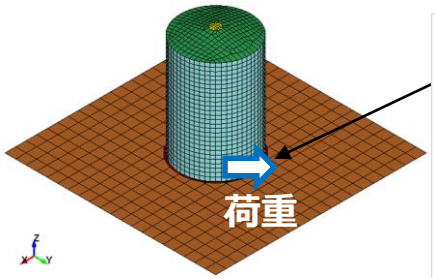
・理論式から求めた動摩擦力：227788（N）

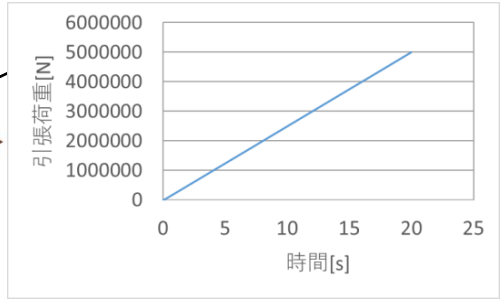
$$\mu_d mg = 0.3 \times 77400 \times 9.81 = 227788$$

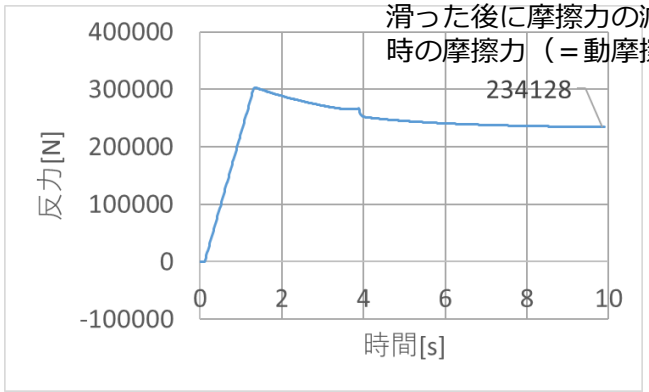
μ_d：動摩擦係数0.3
m：空タンク質量77400（kg）
g：重力加速度9.81（m/s^2）

・解析から求めた動摩擦力：234128（N）

タンク底板を一定増加する荷重で引っ張った際にタンクが滑り始めた後，摩擦力の減少が止まった時の摩擦力を解析により求めた。







摩擦力の時刻歴変化

・結果比較

理論値：227788（N）
解析値：234128（N）
} 誤差3%

添付２．解析モデルの妥当性検証

■ 空タンクの固有周期の確認

理論式による空タンクの固有周期と，解析により算出した固有周期を比較する。

・理論式により求めた固有周期：0.034秒

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{m_e}{1000k}} = 0.034[s]$$

k：ばね定数2076737.11（N/mm）
m_e：タンク空質量（底板を除く）60500（kg）

ここで，曲げ及びせん断変形によるばね定数kは以下による。

$$k = \frac{1}{\frac{l_g^{\,3}}{3EI} + \frac{l_g}{GA_e}}$$

l_g：タンク底板を除いた重心高さ8129[mm]
E：胴の縦弾性係数202350[MPa]
I：胴の断面二次モーメント5.92×10^{12}[mm^4]
G：胴のせん断弾性係数77827[MPa]
A_e：胴の有効せん断断面積314630.5 [mm^2]
D_i：タンク内径1.00×10^4 [mm]
t：タンク胴板厚さ15 [mm]

胴の断面性能は次による。

$$I = \frac{\pi}{8}(D_i + t)^3 t$$

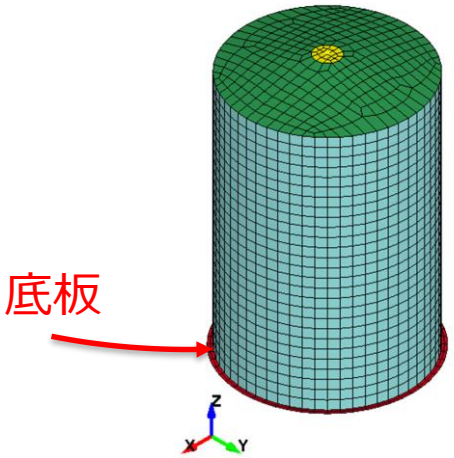
$$A_e = \frac{2}{3}\pi(D_i + t)t$$

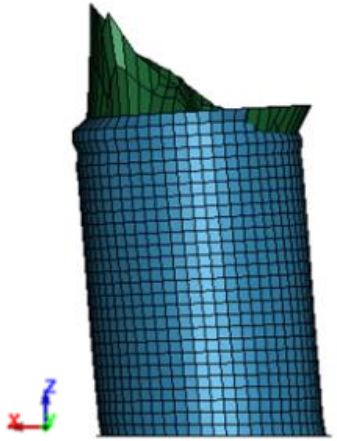
添付２．解析モデルの妥当性検証

■ 空タンクの固有周期の確認

・解析により算出した固有周期：0.039秒

タンク底板を完全拘束し，固有値解析を行い固有振動数を確認した。





X方向支配振動モード

	固有振動数 [Hz]	固有周期 [s]	有効質量（X）[ton]
X方向支配振動モード	25.95	0.039	29.29

・結果比較

理論値：0.034秒
解析値：0.039秒
} 誤差15%

添付２．解析モデルの妥当性検証

【参考】タンクの固有周期（スロッシング考慮）

タンクのスロッシング評価で用いられるハウスナーモデルでは，衝撃圧と振動圧に分けて考えている。内包水のうち衝撃圧に関わる質量はタンクとほぼ一体になって動くと考え，Dエリアのタンクの固有周期を算出すると以下のとおり。

タンク水位の上から1.5Rの高さまでの内包水を自由水，それより下の内包水を固定水とする。

$$h_0' = 1.5R \quad , \quad h_0'' = h - h_0'$$

自由水の等価質量，等価重心高さは，

$$W_1' = \frac{tanh(\sqrt{3}\frac{R}{h_0'})}{\sqrt{3}\frac{R}{h_0'}} W_0' \quad , \quad h_1' = \frac{3}{8}h_0'$$

固定水の等価質量，等価重心高さは，

$$W_1'' = W_0'' \quad , \quad h_1'' = \frac{1}{2}h_0''$$

衝撃圧の等価質量，等価重心高さは，

$$W_1 = W_1' + W_1'' + m_e$$

$$h_1 = \frac{W_1' \times (h_1' + h_0'') + W_1'' \times h_1'' + m_e \times \frac{H}{2}}{W_1}$$

R	：タンク半径(mm)	5000 mm
H	：タンク高さ(mm)	14590 mm
m_e	：空タンク質量(kg)	77400 kg
h	：タンク水位(mm)	9766 mm
h_0'	：自由水の高さ(mm)	
h_0''	：固定水の高さ(mm)	
h_1'	：自由水の等価重心高さ(mm)	
h_1''	：固定水の等価重心高さ(mm)	
h_1	：衝撃圧の等価重心高さ(mm)	
W_0'	：自由水の質量(kg)	
W_0''	：固定水の質量(kg)	
W_1'	：自由水の等価質量(kg)	
W_1''	：固定水の等価質量(kg)	
W_1	：衝撃圧の等価質量(kg)	
K	：曲げ・せん断 ばね定数(N/mm)	
K_1	：曲げ ばね定数(N/mm)	
K_2	：せん断 ばね定数(N/mm)	
E	：ヤング率(MPa)	202350 MPa
G	：せん断弾性係数(MPa)	77827 MPa
I	：断面２次モーメント(mm^4)	5.9170×10^{12} mm^4
Ae	：有効せん断断面積(mm^2)	314630 mm^2
T	：固有周期(s)	

（次ページへつづく）

添付２．解析モデルの妥当性検証

タンクのばね定数（曲げ＋せん断）は，曲げとせん断のばね定数より，

$$K = \frac{1}{\frac{1}{K_1} + \frac{1}{K_2}} \qquad \begin{cases} K_1 = \dfrac{3E \cdot I}{h_1^3} \\ K_2 = \dfrac{G \cdot Ae}{h_1} \end{cases}$$

以上より，内包水の衝撃圧による質量とタンクの連成固有周期は，

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{W_1}{K \cdot 10^3}} \fallingdotseq 0.07$$

添付２．解析モデルの妥当性検証

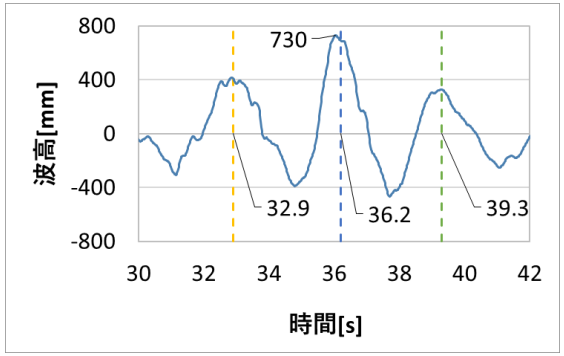
■ スロッシング周期の確認
理論式によるスロッシング周期と，解析により出力した波高の時刻歴変化から求めたスロッシング周期を比較する。

・理論式（速度ポテンシャル理論）により求めた固有周期：3.3秒

$$T_s = 2\pi\sqrt{\frac{D}{3.68g}\coth\left(\frac{3.68H}{D}\right)}$$

T_s：スロッシング固有周期 3.3[s]
D：タンク内径 10[m]
H：水の水位 9.766[m]
g：重力加速度 9.81[m/s^2]

・解析により算出した固有周期：3.2秒
Dエリアの2022.3.16解析波を用いた解析から求めた波高の時刻歴変化から，スロッシング周期を求めた。



$$T_{s1} = 36.2 - 32.9 = 3.3[s]$$
$$T_{s2} = 39.3 - 36.2 = 3.1[s]$$
$$T_S = \frac{3.3 + 3.1}{2} = 3.2[s]$$

※波高が最大となった時刻（36.2秒）周辺のデータを用いて算出

・結果比較

理論値：3.3秒
解析値：3.2秒
} 誤差3%

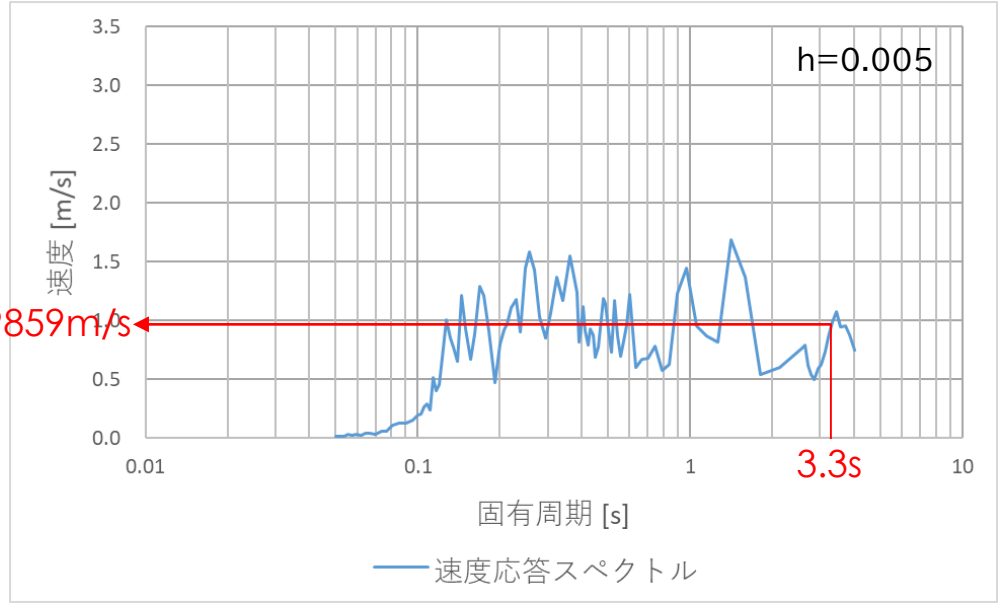
添付２．解析モデルの妥当性検証

■ スロッシング波高の確認
理論式によるスロッシング波高と，解析により出力した波高を比較する。

・理論式（速度ポテンシャル理論）によるスロッシング波高：801mm

$$\eta = 0.837\left(\frac{D}{2g}\right)\left(\frac{2\pi}{T_s}\right)S_v$$

D ：タンク内径 10 [m]
g：重力加速度 9.81[m/s^2]
T_s：スロッシング固有周期 3.3[s]
S_v：入力地震動における速度応答スペクトルの最大値 EW※ 0.9859[m/s]



速度応答スペクトル（2022.3.16解析波@Ｄエリア，EW方向）

※：解析により出力した最大波高がEW方向であったため，EW方向の速度応答スペクトルを用いている。

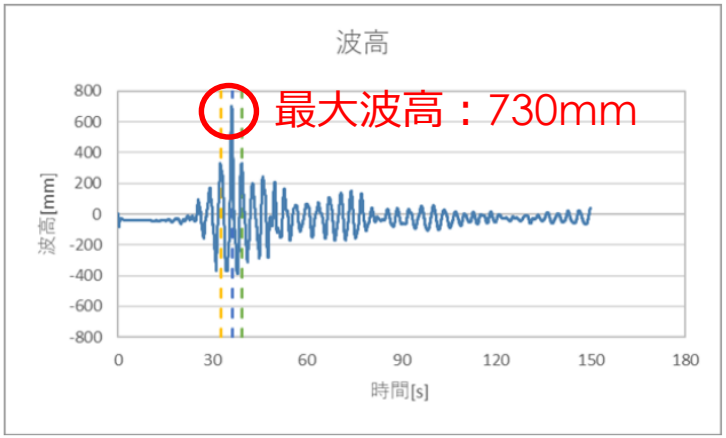
本来，水平1方向のみの地震動入力（EW方向入力）による解析結果と比較すべきだが，３方向同時入力の解析結果と比較して検証を実施した理由は以下のとおり。

- ３方向同時入力の場合，鉛直方向の地震動はスロッシングにはほとんど影響を与えず，ＮＳ方向の地震動によるスロッシングと，ＥＷ方向の地震動によるスロッシングが重ねあわされた状態になると考えられる。
- 今回検証に用いた３方向同時入力の解析によるスロッシングは，最大波高が発生した位置がタンクの東端であり，ＮＳ方向の地震動によるスロッシングが生じていないタイミング（南端，北端の波高がほぼ0m）で最大波高が発生しているため，ＥＷ方向の地震動から理論式で算定した波高との比較により妥当性が確認できると判断した。

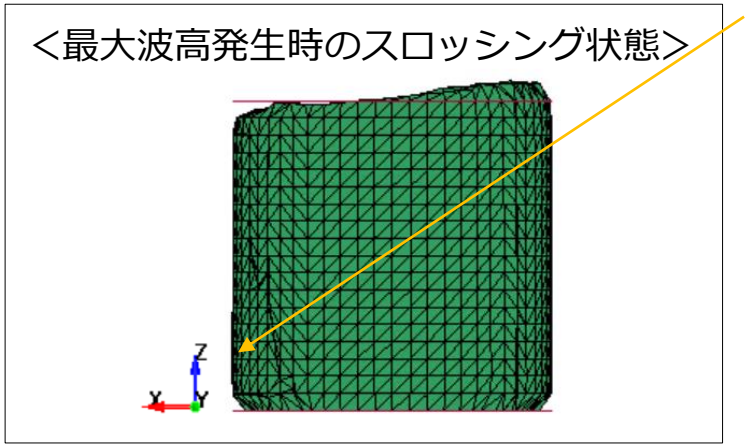
添付２．解析モデルの妥当性検証

■ スロッシング波高の確認

・ Dエリアの2022.3.16解析波を用いた解析により算出したスロッシング波高：730mm

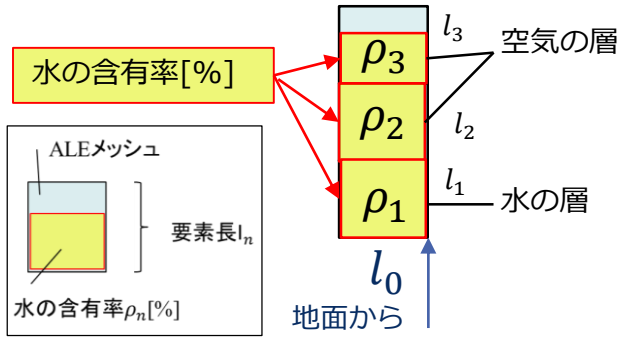


<最大波高発生時のスロッシング状態>



タンク基部が膨らんで見えるが，実際には膨らんでいない。
流体を計算するメッシュは，タンクを計算する構造メッシュとは直接つながれていない別のメッシュになっている。
LS-DYNAでは流体の表面を正確に表示する手段がなく，流体が実際よりも過度に変形しているように見える表示になる場合がある。

<波高算出方法イメージ図>



$h = \rho_1 l_1 + \rho_2 l_2 + \rho_3 l_3 + l_0 - h_0$

$\rho_{1\sim3}$:要素ごとの水の含有率[%]

$l_{1\sim3}$:要素長

l_0:地面から水の２層目までの高さ

h_0:水の初期水位

・結果比較

理論値：801mm

解析値：730mm※

} 誤差9%

※：ベースケース（ケース①）のモデル化が妥当であることを確認したうえで他のケースの解析に着手したため，ケース①の解析値と理論値を比較している。（水のモデル化方法は全ケース同じ。）
なお，摩擦係数が大きく滑動量が少ないケース③④の最大波高は，それぞれ761mm，801mmとなっており，理論値801mmに近い値となっていることを確認した。

添付３．入力地震動の算出方法

■　入力地震動の算出方法

①自由地盤系南地点GS4(T.P.-201.4m(O.P.-200.0m))の2022.3.16 地震時の観測記録から，解放基盤表面(T.P.-197.4m(O.P.-196.0m))のはぎとり波を作成。（はぎとり波に関しては，次ページを参照）

②作成したはぎとり波を，Dエリア地盤モデルの解放基盤表面に地震動として入力し，１次元地震応答解析により基礎表面加速度を算出（下図参照）。

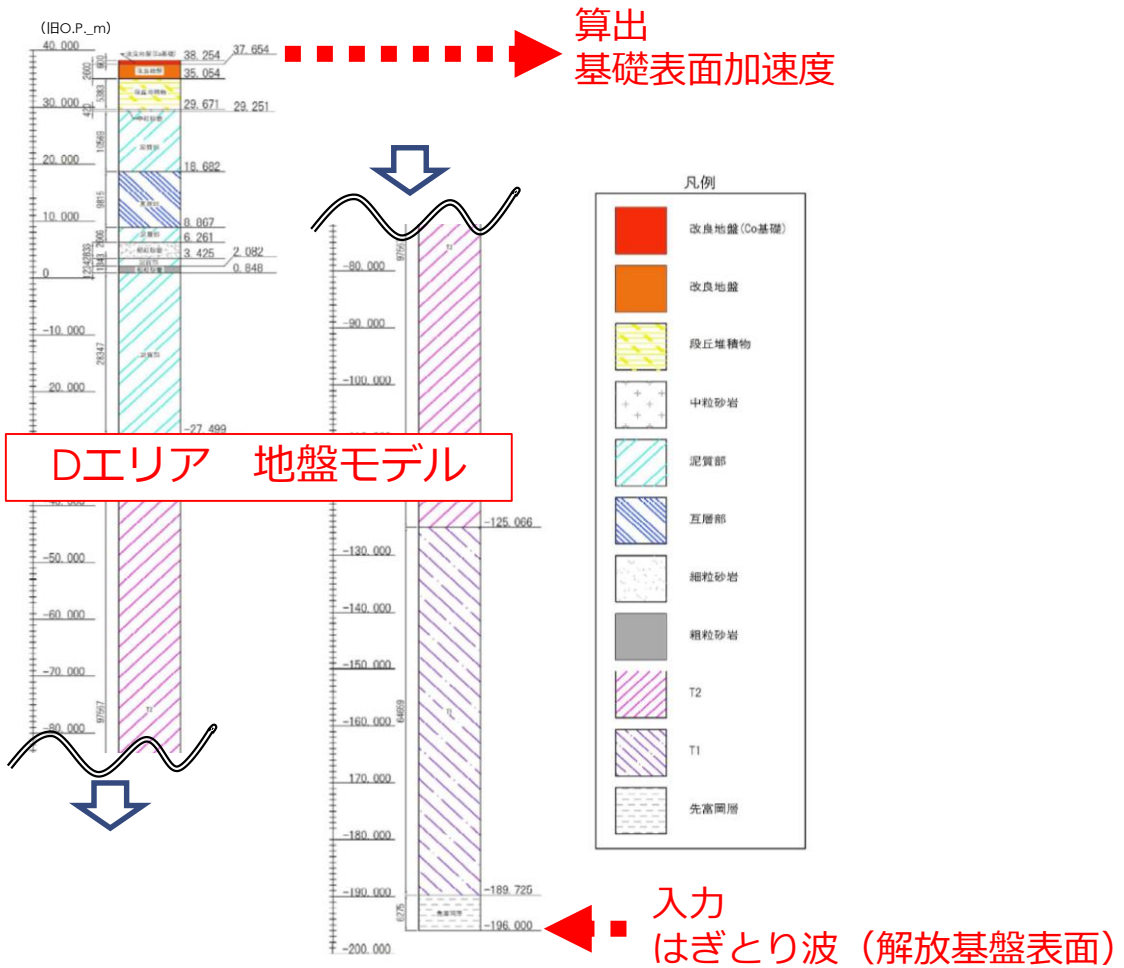
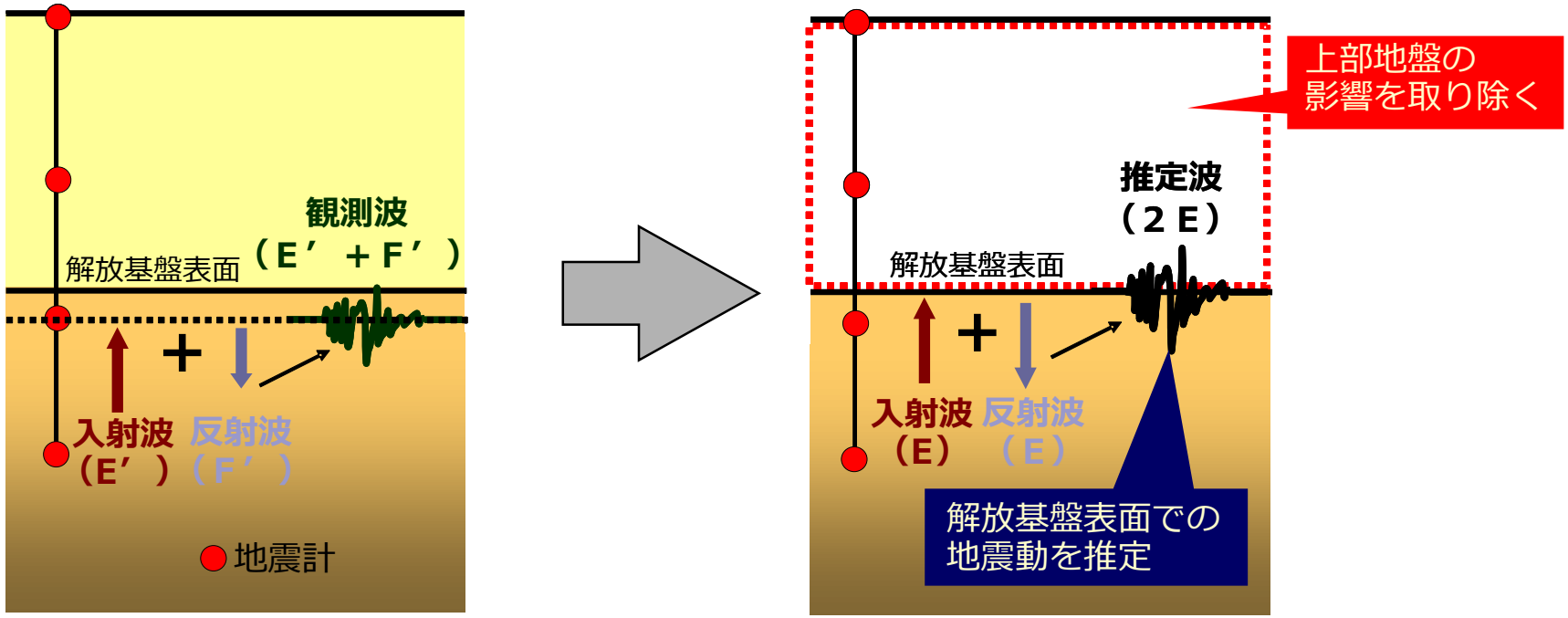


図　Dエリア地震応答解析（1次元地震応答解析）

添付３．入力地震動の算出方法（はぎとり波について）

特定原子力施設監視・評価検討会（第１００回）資料２－２
「解放基盤表面の地震動（はぎとり波）および３号機地震観測記録（卓越周期の推移）について」より抜粋

地盤中の記録から，上部地盤の影響を取り除き，解放基盤表面の地震動を推定する。
なお，解放基盤表面の地震動を「はぎとり波」と呼ぶ。

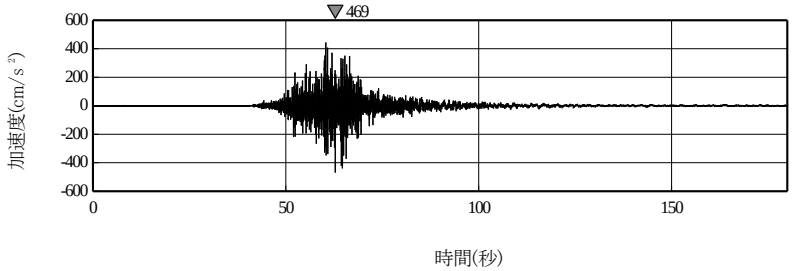


はぎとり解析の概念図

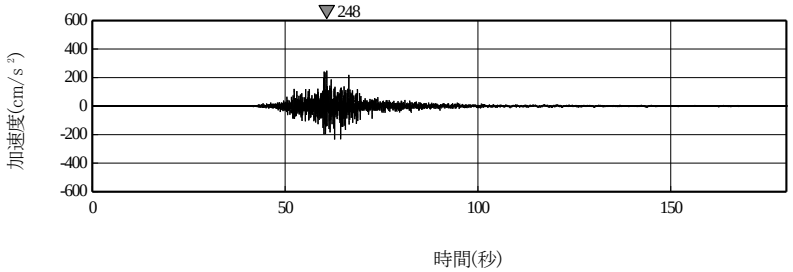
添付３．入力地震動の算出方法（2022.3.16地震の はぎとり波の推定）

特定原子力施設監視・評価検討会（第１００回）資料２－２
「解放基盤表面の地震動（はぎとり波）および３号機地震観測記録（卓越周期の推移）について」より抜粋

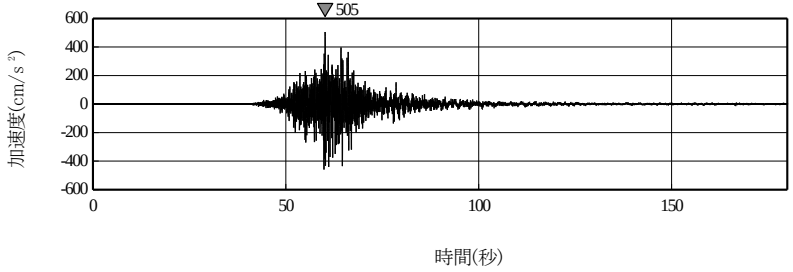
解放基盤表面（O.P.-196m）に最も近いO.P.-200mの位置に設置されている地震計の記録を用いて，はぎとり波を推定。



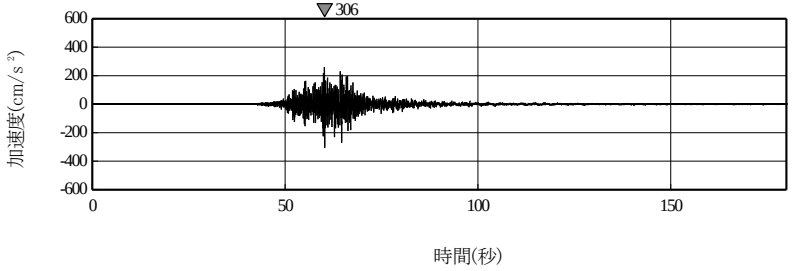
はぎとり波（NS方向）



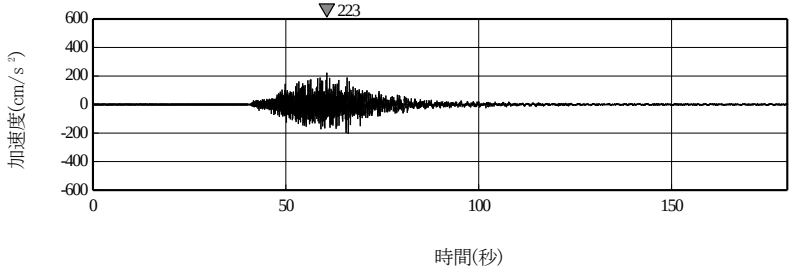
O.P.-200m観測記録（NS方向）



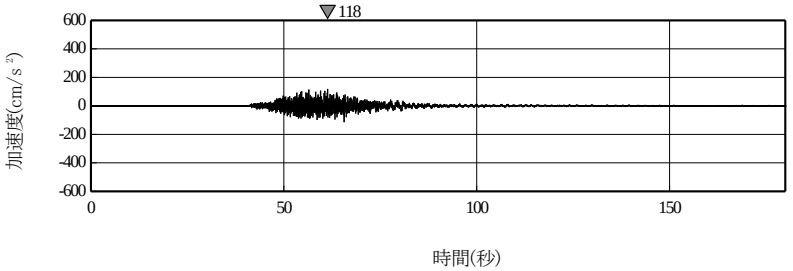
はぎとり波（EW方向）



O.P.-200m観測記録（EW方向）



はぎとり波（UD方向）

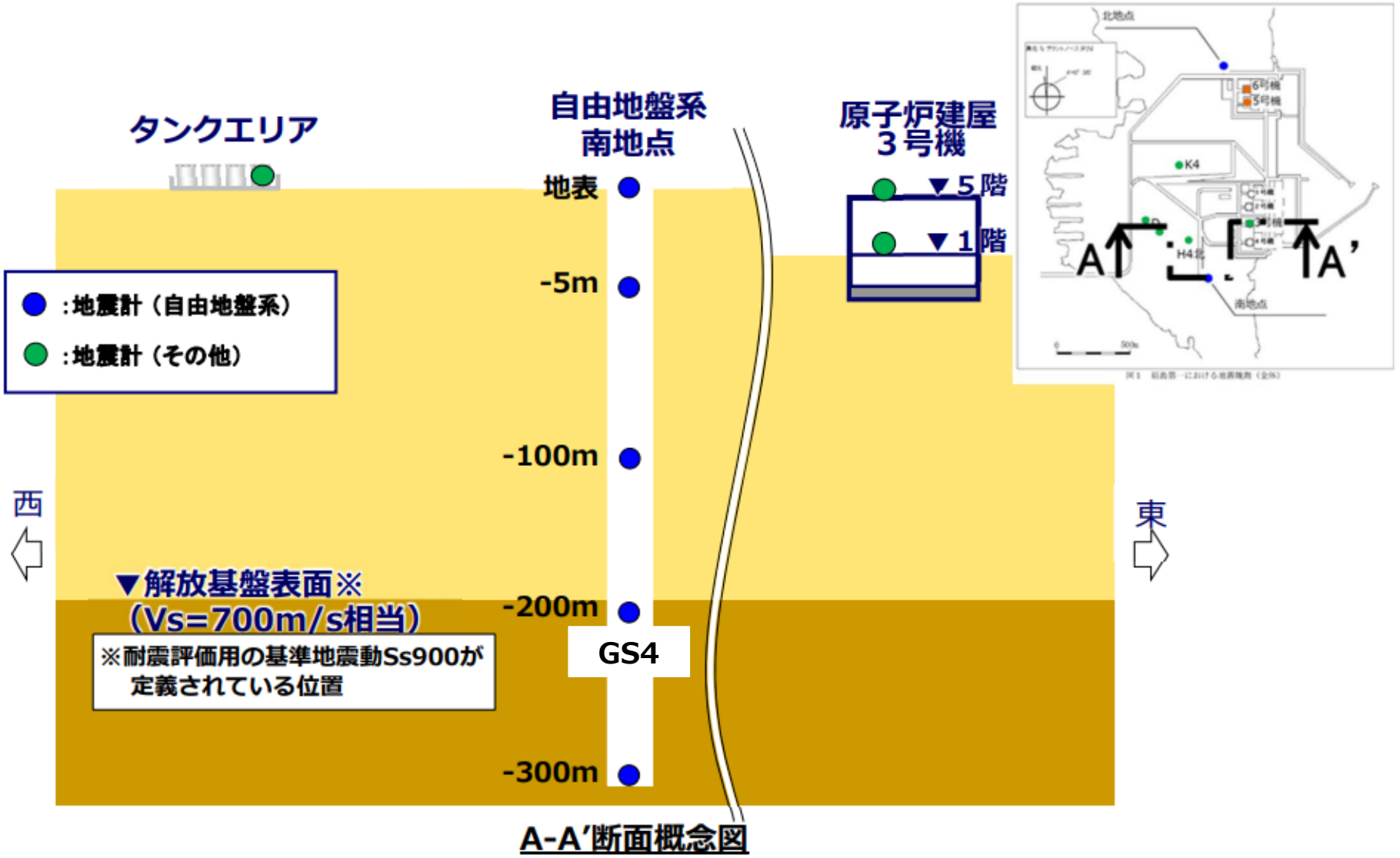


O.P.-200m観測記録（UD方向）

添付３．入力地震動の算出方法（はぎとり波の推定で用いた地震観測地点）

TEPCO

■ 福島第一原子力発電所における地震観測箇所のうち，自由地盤系，その他の設置場所は以下のとおり。

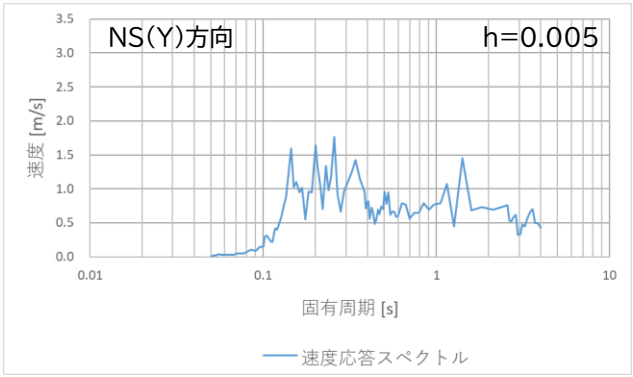


A-A’断面概念図

添付４．地震動の速度応答スペクトル

TEPCO

2022.3.16解析波（Dエリア）



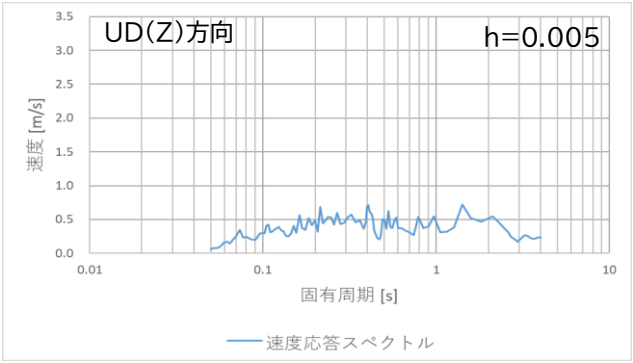




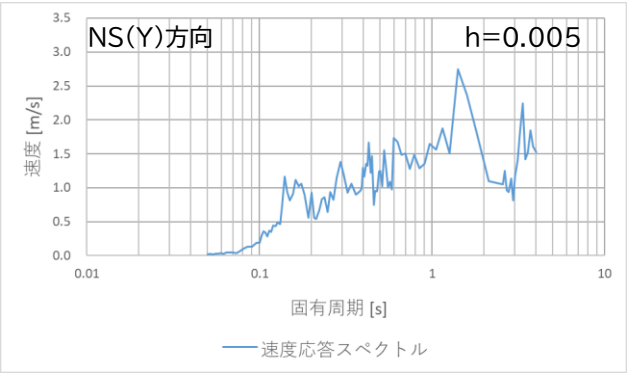
2022.3.16観測波（H4北エリア）

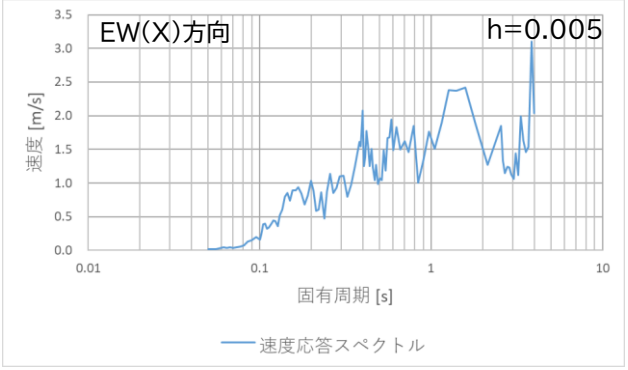


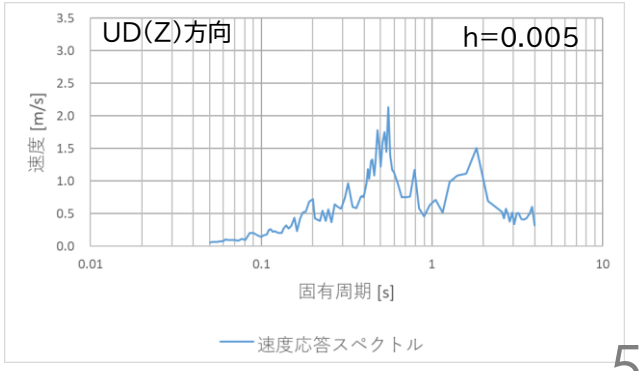




2011.3.11解析波（Dエリア）

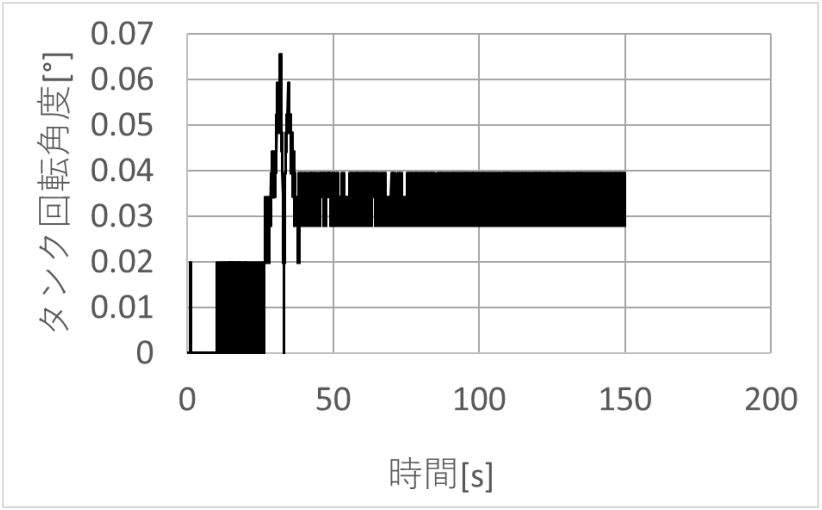




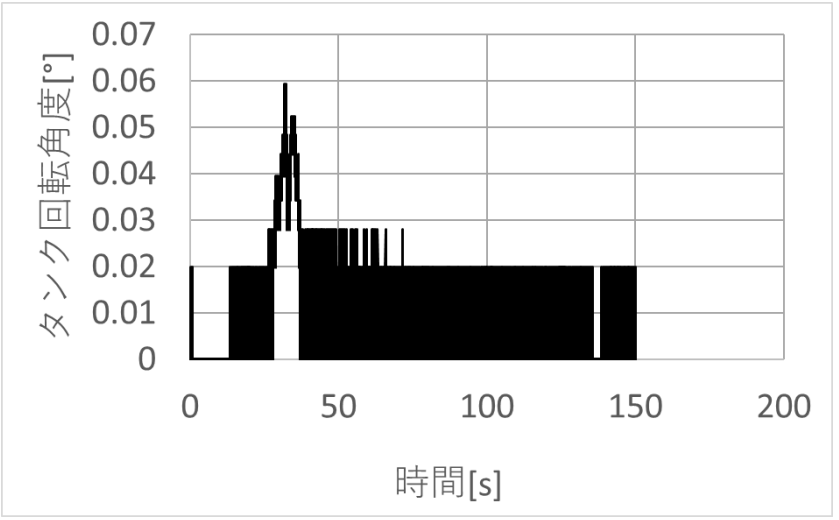


添付５．解析結果（タンクの回転）

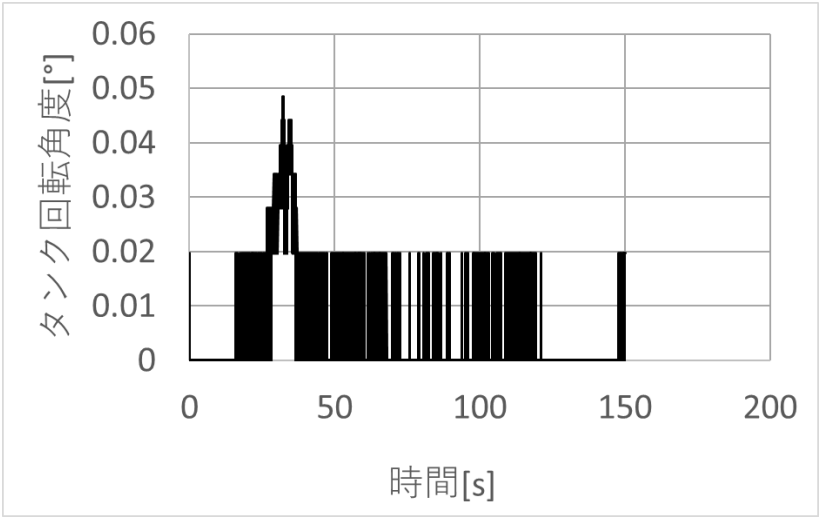
ケース①



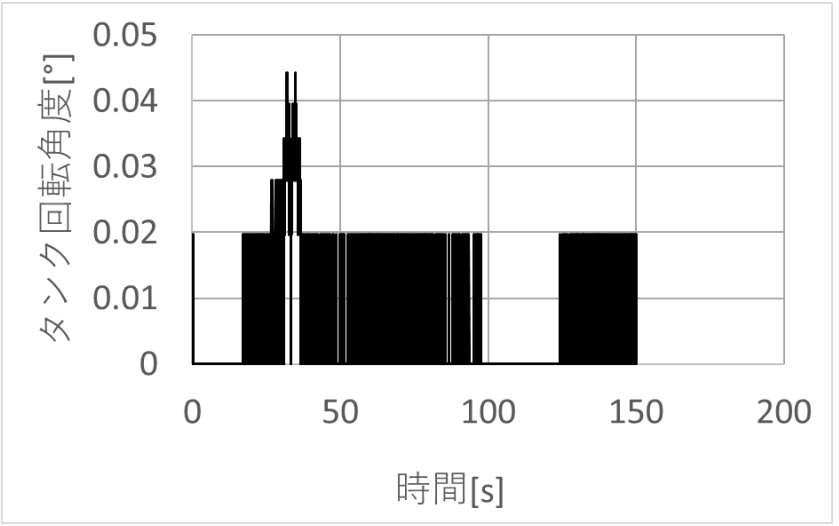
ケース②



ケース③

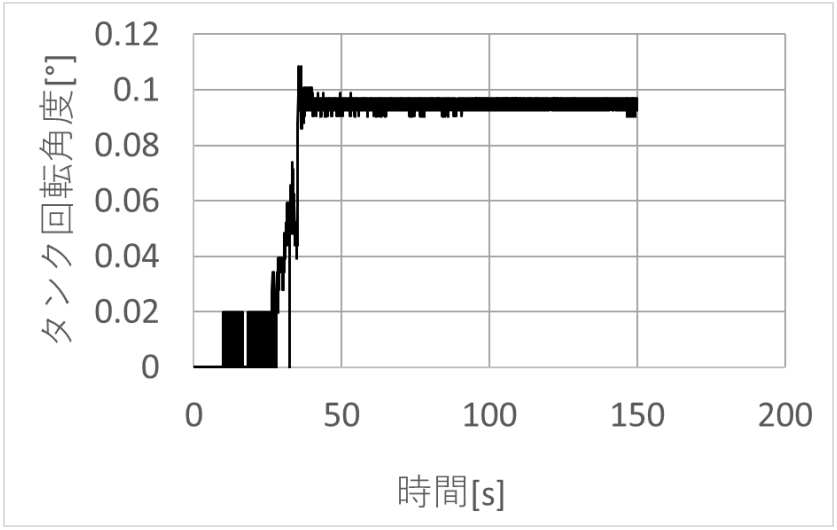


ケース④

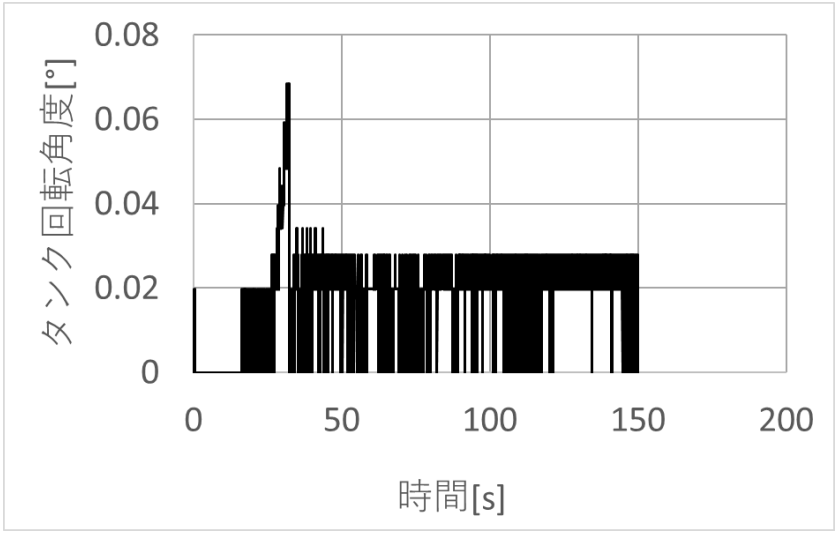


添付５．解析結果（タンクの回転）

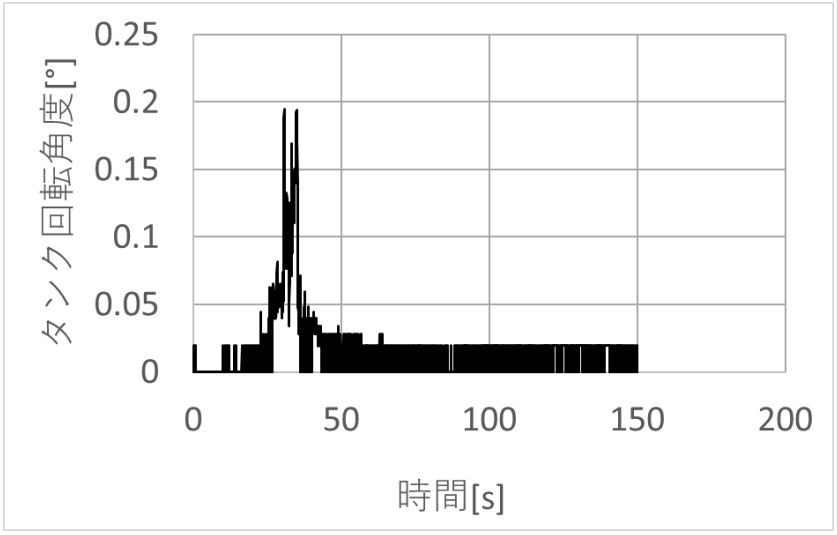
ケース⑤



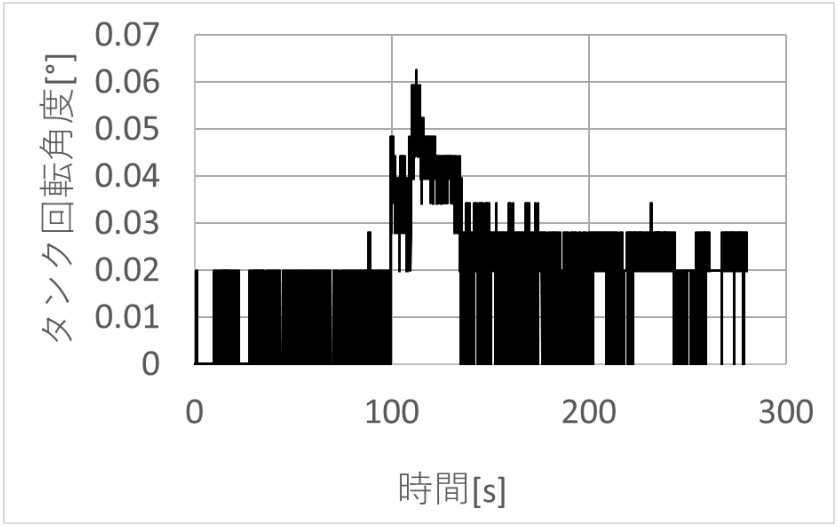
ケース⑥



ケース⑦

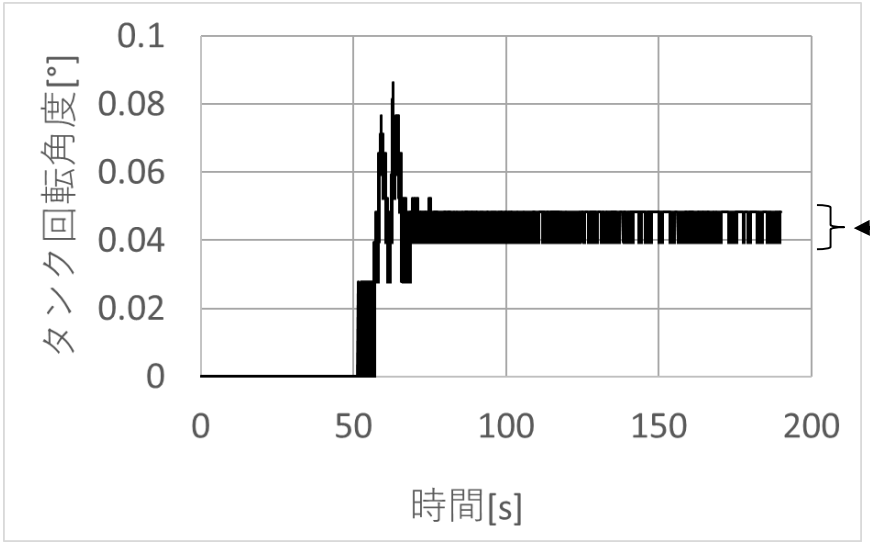


ケース⑧



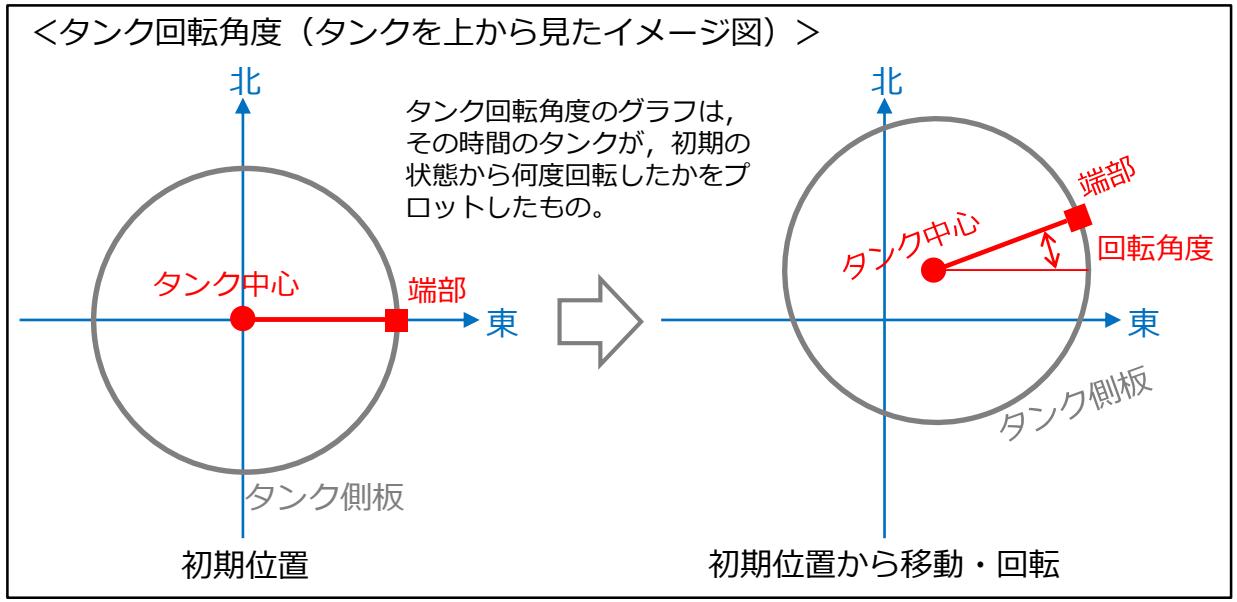
添付５．解析結果（タンクの回転）

ケース⑨



きりのいい数値で頭打ちした角度で往復しているように見える部分があるが，回転振動はしていない。
LS-DYNA特有のノイズレベルの微小振動によるものと考えられる。
ケース①～⑧も同様。

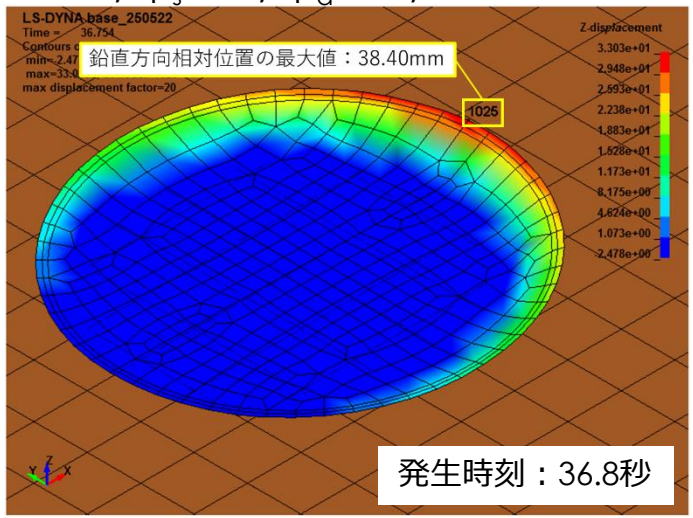
<タンク回転角度（タンクを上から見たイメージ図）>



添付５．解析結果（タンクの浮き上がり量）

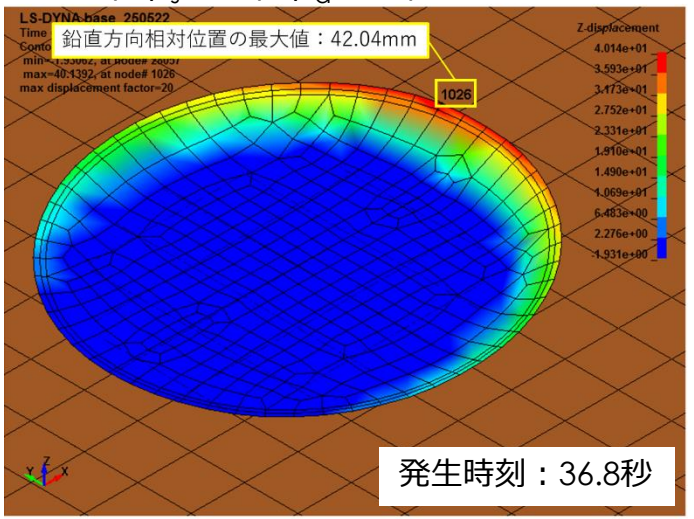
ケース①

（Dエリア，μ_s=0.4，μ_d=0.3，2022.3.16解析波）



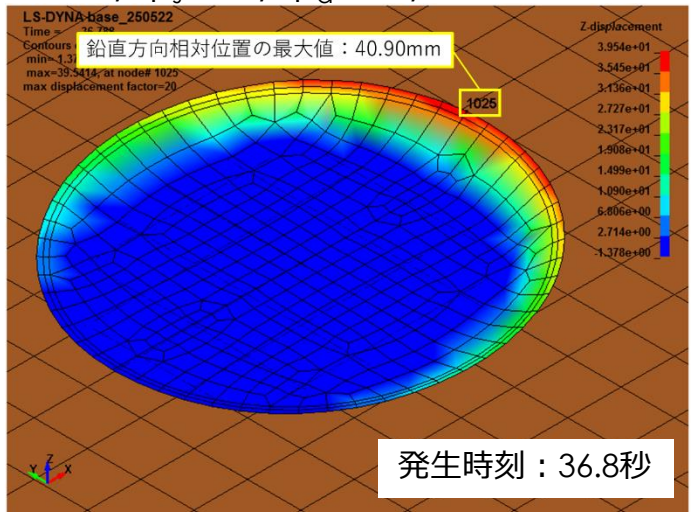
ケース②

（Dエリア，μ_s=0.5，μ_d=0.3，2022.3.16解析波）



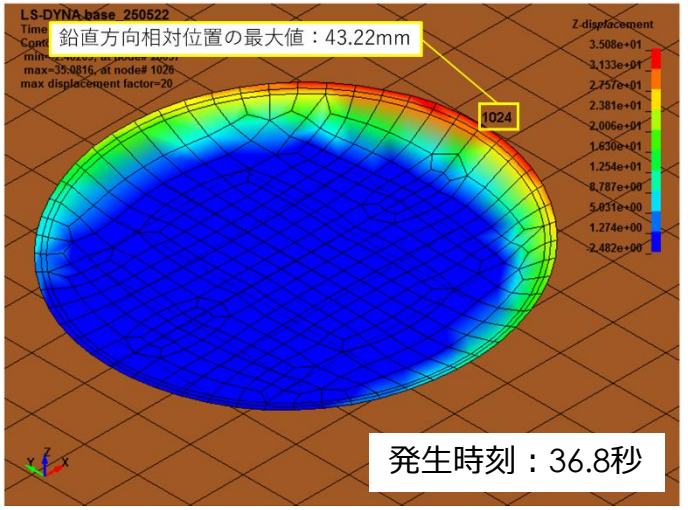
ケース③

（Dエリア，μ_s=0.6，μ_d=0.3，2022.3.16解析波）



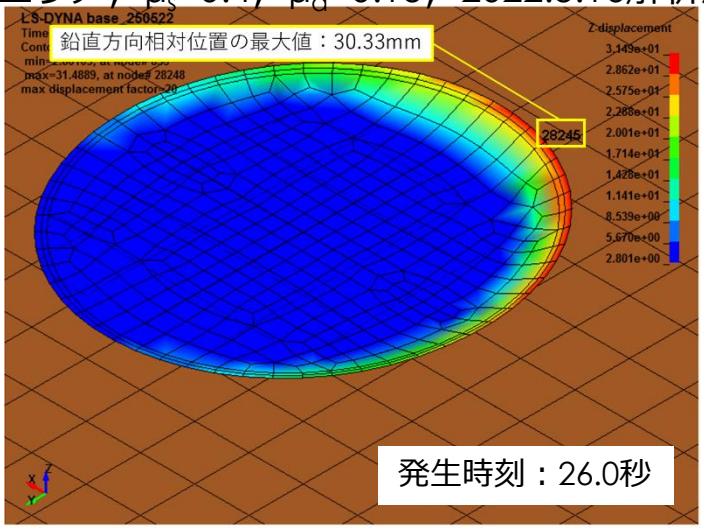
ケース④

（Dエリア，μ_s=0.7，μ_d=0.3，2022.3.16解析波）

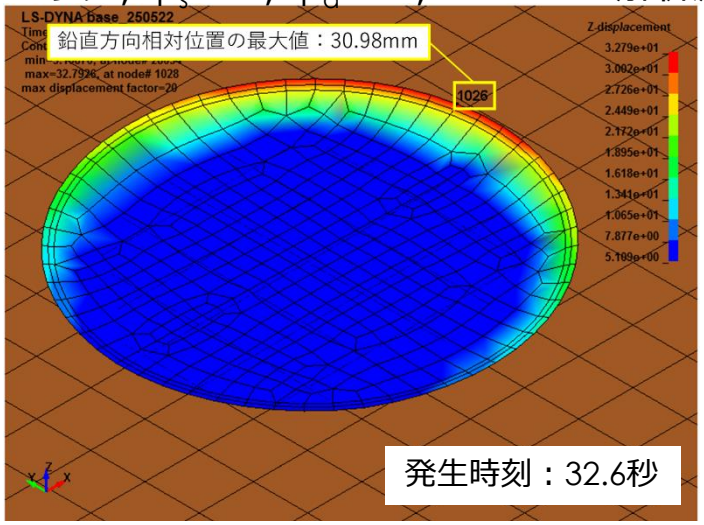


添付５．解析結果（タンクの浮き上がり量）

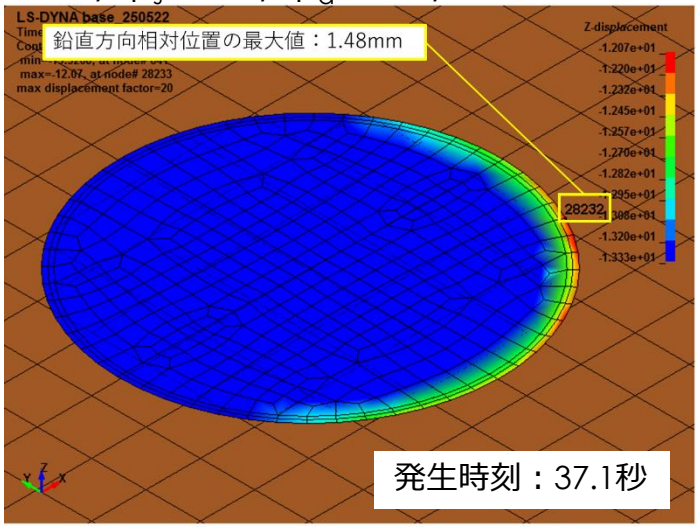
ケース⑤
（Dエリア，μ_s=0.4，μ_d=0.15，2022.3.16解析波）



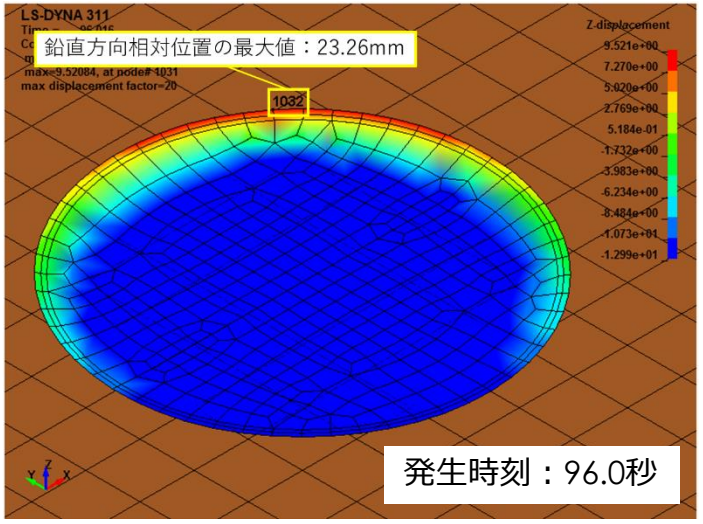
ケース⑥
（Dエリア，μ_s=0.4，μ_d=0.2，2022.3.16解析波）



ケース⑦
（Dエリア，μ_s=0.15，μ_d=0.15，2022.3.16解析波）



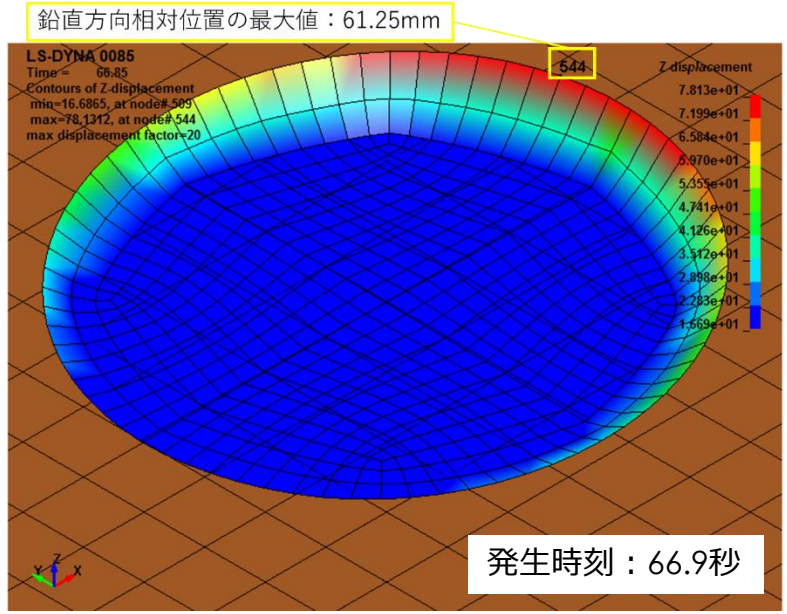
ケース⑧
（Dエリア，μ_s=0.4，μ_d=0.3，2011.3.11解析波）



添付５．解析結果（タンクの浮き上がり量）

ケース⑨

（H4北エリア，μ_s=0.4，μ_d=0.3，2022.3.16観測波）



添付６．タンク設置時の滑動量評価

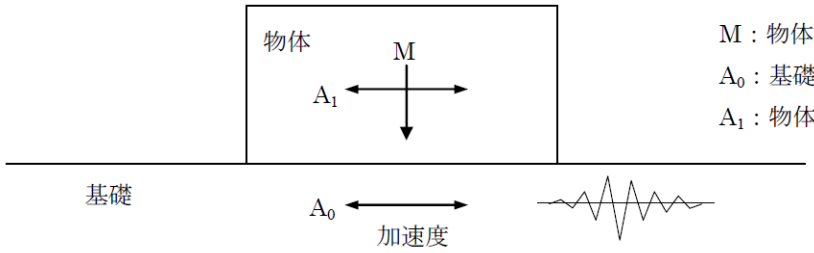
- Ｇ６エリアにタンクを新設する際，2018年当時の基準地震動Ｓｓ（Ｓｓ６００）に対する滑動量の評価を参考で実施している。

- 基準地震動Ｓｓ（Ｓｓ６００）における，タンク設置エリアの水平方向の応答加速度時刻歴を用いてタンクの滑動量を算出。

- 滑動量の算出は，各時刻の応答加速度と摩擦係数との関係（静止摩擦係数を超えると滑り始め，動摩擦係数以下になるまで滑るという仮定）に基づき，変位差を積算する（道のり移動距離を算出する）ことで実施。評価の詳細は次ページ参照。

添付６．タンク設置時の滑動量評価

2015年1月23日面談資料抜粋



M：物体の質量
A_0：基礎の加速度
A_1：物体の加速度

Ⅰ：入力加速度が低く，$A_0 < A_s$ なので，すべりは生じない．

Ⅱ：入力加速度が少し上がり，$A_d < A_0$ ではあるが，$A_0 < A_s$ なので，滑りは生じない．

Ⅲ：入力加速度がさらに上がり，波形のピークでは $A_s < A_0$ となっているが，$A_0 = A_s$ の時点まではすべりは生じない．なおかつ，ここまでのⅠ～Ⅲの過程では基礎と物体にすべりは生じず，連続体なので加速度も一致している（$A_0 = A_1$）．

Ⅳ：$A_s < A_0$ となるので，物体に伝わる加速度 A_1 は A_d まで低下する．したがって，物体と基礎の加速度に差が生じるので，速度差 v_r と変位差 d_r も生じる．この変位差が滑りである．

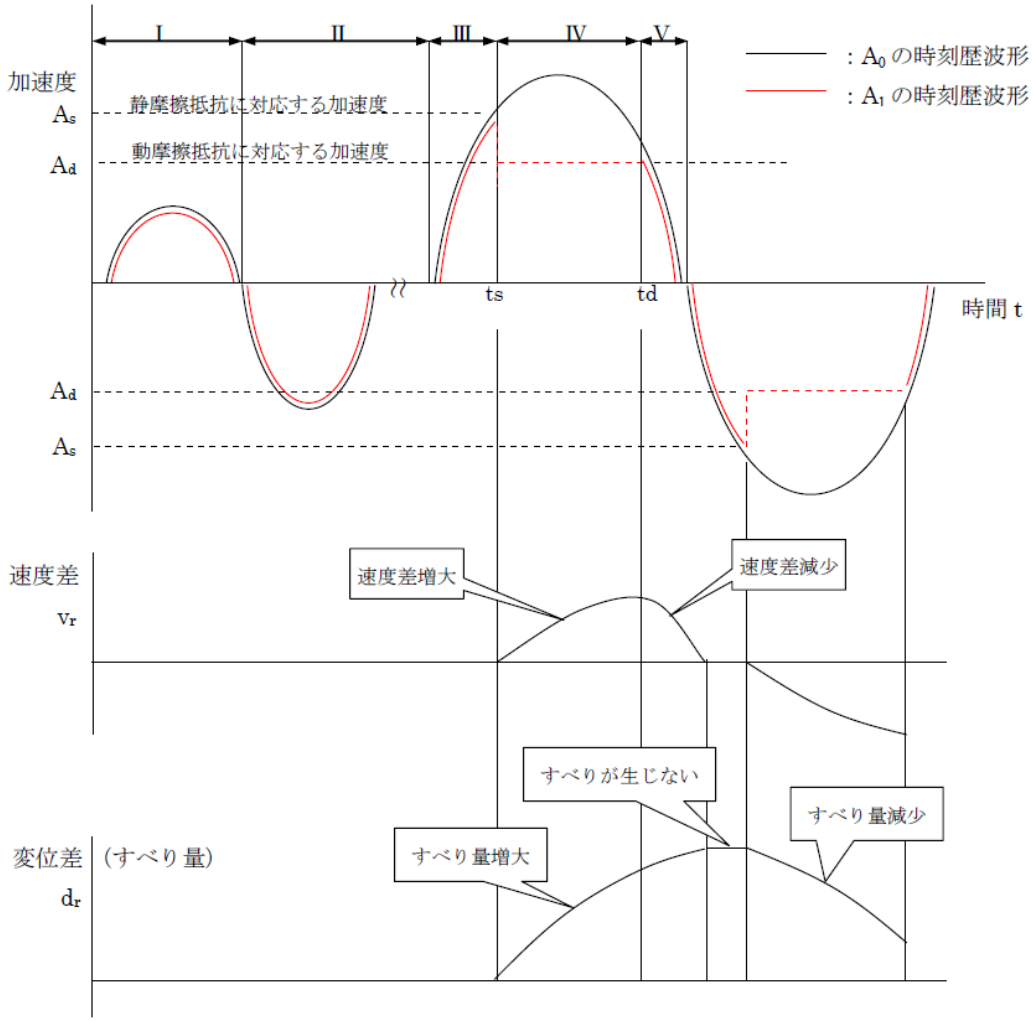
$$v_r = \int_{ts}^{td} (A_0 - A_1)dt = \int_{ts}^{td} (A_0 - A_d)dt$$

$$d_r = \int_{ts}^{td} v_r dt = \int_{ts}^{td} \left(\int_{ts}^{td} (A_0 - A_d)dt \right) dt$$

なお，t_s は加速度差が生じ始める時刻，t_d は加速度差がゼロとなる時刻である．t_d において速度差がゼロになるとは限らない．

Ⅴ：入力加速度が下がって $A_0 < A_d$ となり，基礎と物体は同じ加速度となる．

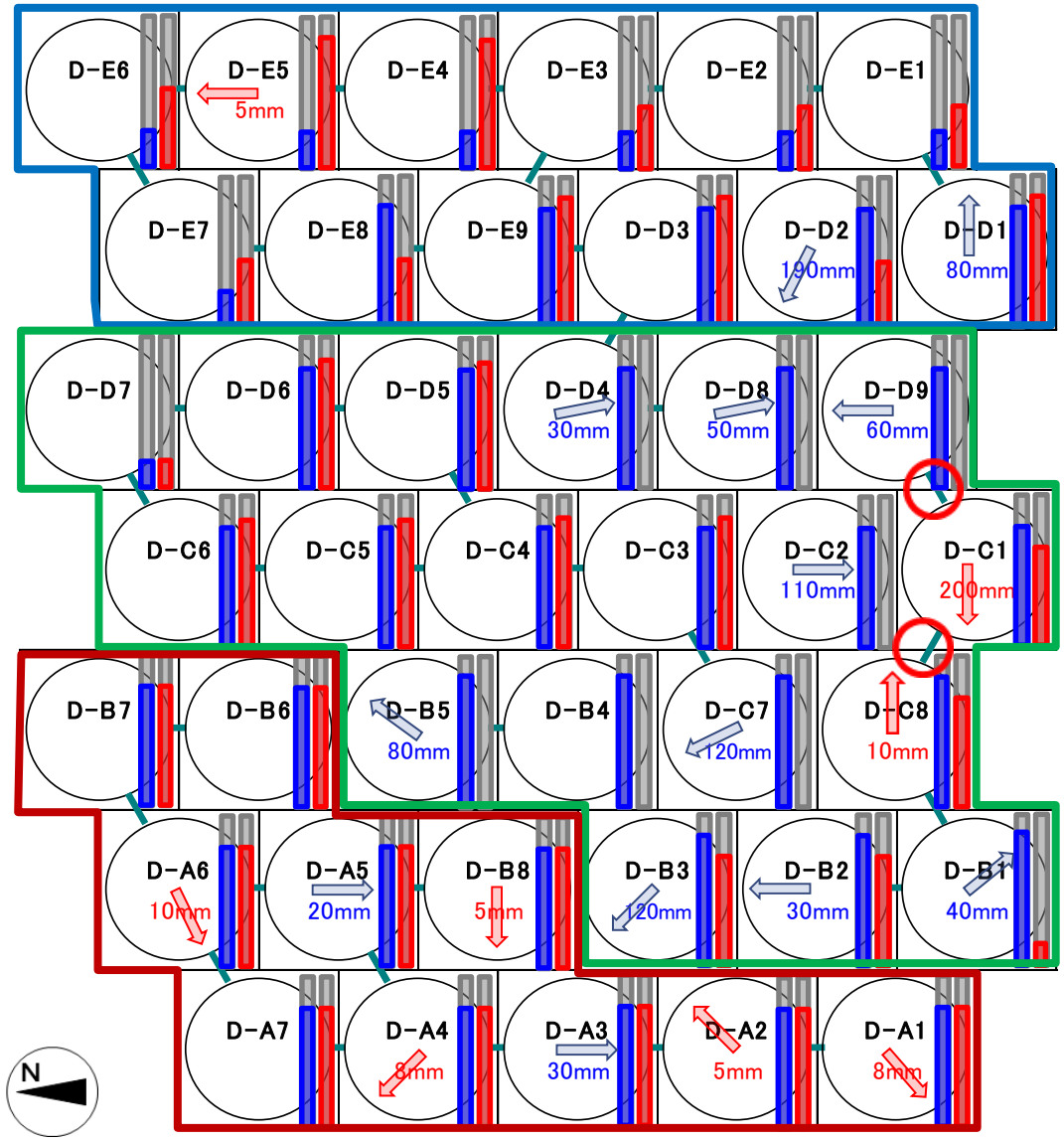
上記のⅠ～Ⅴのサイクルを繰り返して滑り量を計算する．



添付７．地震時のタンク滑動状況

Ｄエリアタンクの滑動状況

特定原子力施設監視・評価検討会（第９９回）資料１－１
「3月16日地震発生後の福島第一原子力発電所の状況について」より抜粋（一部追記）



「凡例」
⇨：2021.2.13地震によるずれ方向
⇨：2022.3.16地震によるずれ方向
数値：ずれ量
○：連結管メーカ推奨変位値超過
：タンク水位（2.13地震の時点）
：タンク水位（3.16地震の時点）

RO淡水
Ｓｒ処理水
濃縮廃液

添付７．地震時のタンク滑動状況

2021.2.13地震によるDエリアタンクの滑動



D2タンクの滑動，防水塗装損傷（堰内に少量の雨水が滞留）