

研 究 期 報

No. 112

令和 2 年 6 月

四 国 電 力 株 式 会 社
四 国 電 力 送 配 電 株 式 会 社
株 式 会 社 四 国 総 合 研 究 所

研 究 期 報 1 1 2 号 目 次

地震時における建物挙動解析ツール(SwingAnalyzer)の開発.....	1
Development of the earthquake vibration analysis system.	
四国東部における中央構造線活断層系の断層帯の性状	8
Characteristics of the fault zone of the Median Tectonic Line active fault system in eastern Shikoku	
歪センサによる高温環境下配管内圧力監視技術に関する研究.....	17
Study on pressure monitoring technology in the piping under the high temperature environment using strain sensor	
矩形水槽における非線型スロッシング波高の評価.....	22
Evaluation of Nonlinear Sloshing Wave Height in Rectangular Tank	

地震時における建物挙動解析ツール(SwingAnalyzer)の開発

目 的

電力事業者の様に地域住民の生命にも関わる重要なインフラの運用を担う企業は、巨大地震被災後のインフラ復旧を迅速に進めるため、強い地震動による各種施設の被害状況を短期間かつ高精度に判定する必要がある。

著者らは、地震時における中高層建物の各階の加速度を高精度かつ簡易に計測することのできる無線式加速度多点同期モニタリングシステム(SwingMinder)の開発を行い、これまでに四国内を中心に約 20 棟の建物への実配備を完了しているが、巨大地震発生時には多数の建物から大量の加速度データがクラウドサーバに送信・蓄積されるため、この大量の加速度データを迅速に解析し、被災した建物の被害度を診断するための自動解析システムが不可欠である。

開発の第一段階として、必要なデータ処理メカニズムを、開発・検証するためのツール(機能検証プロトタイプ)として SwingAnalyzer を開発し、地震時に実建物で計測された加速度データの解析を行った。

主な成果

1. SwingAnalyzer の開発

地震時に計測された加速度データ蓄積用のクラウドサーバから、建物単位で任意の期間の加速度データを時間軸の揃った CSV 形式で抽出する加速度データ抽出ソフトウェア、ならびに、抽出した加速度データを数値演算処理し、時刻歴変位など建物の挙動状況を 2D および 3D アニメーション表示により可視化するソフトウェアで構成される SwingAnalyzer を開発した。

2. SwingAnalyzer による実建物の振動解析結果

開発した SwingAnalyzer を使用して、徳島市内の 9 階建の建物で観測された地震動加速度を解析し、算出した各フロアの変位から建物全体が振動する様子を詳細に再現することに成功した。

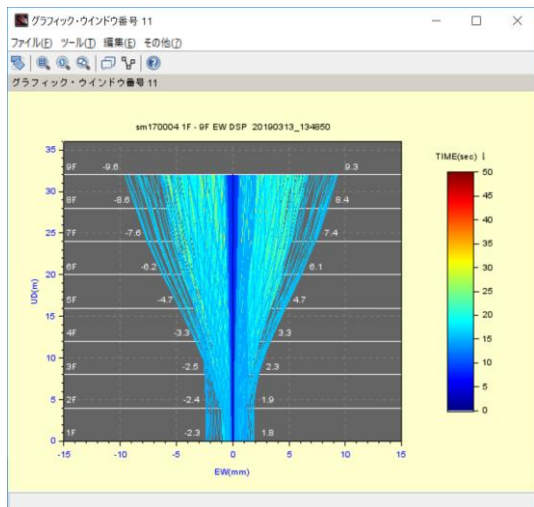


図 1 東西(EW)方向への時系列変位

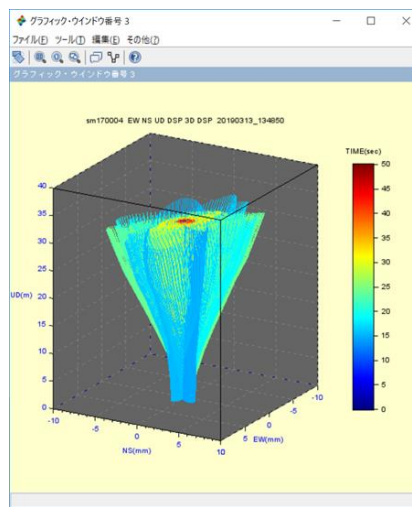


図 2 仮想中心軸の時系列変位

研究担当者	中西 美一，仲田 誉 (株式会社四国総合研究所 電子アグリ技術部) 山崎 崇寛 (株式会社四国総合研究所 土木技術部) 天野 雄一朗 (四国電力株式会社 土木建築部)
キーワード	地震振動，自動解析，可視化
問い合わせ先	株式会社四国総合研究所 企画部 TEL 087-843-8111 (代表) E-mail jigyo_kanri@ssken.co.jp http://www.ssken.co.jp/

[無断転載を禁ず]

四国東部における中央構造線活断層系の断層帯の性状

目 的

四国東部における中央構造線活断層系の断層帯の性状は、未だに不明な点が多い。今回、我々は四国東部で中央構造線活断層系の断層露頭を発見し、断層帯の性状を記載した。そこで、その断層帯の性状を報告するとともに、断層露頭発見の意義と中央構造線活断層系の断層活動についてまとめる。

主な成果

1. 箸蔵露頭および加茂露頭での中央構造線活断層系の断層帯の性状

箸蔵露頭は、箸蔵橋の工事に伴って、鮎苦谷川に沿って露出した断層露頭であり、約 150 m 以上にわたり、ほぼ連続的に断層帯が観察される。ここでは、鮮新統～更新統財田層相当の礫層と白亜系和泉層群とが接しており、断層コア内部には、これら 2 つの地層起源の断層ガウジに加えて、三波川変成岩類起源の断層ガウジを挟在する (Fig. 1)。加茂露頭は、平成 30 年 7 月豪雨で、吉野川河床に露出した約 30 m×約 20 m の断層露頭であり、断層ガウジ化あるいは断層角礫化した和泉層群と三波川変成岩類が直接接する (Fig. 2)。また、加茂露頭では応力解析に用いる剪断センスや剪断方向等の剪断面に関する情報を取得した。

2. 中央構造線活断層系の断層露頭発見の意義

四国中部～西部では、中央構造線に沿って中新統石鎚層群が分布するため、和泉層群と三波川変成岩類の境界が不明瞭である。また、四国地域では中央構造線および中央構造線活断層系に沿って高速道路が建設されており、それらの断層露頭の保存状況は良好ではない。そのため、今回報告した中央構造線活断層系の断層帯の性状と今後の分析は、中央構造線活断層系の断層活動の理解や断層の活動性評価に大きく貢献する。また、徳島県では活断層上の建築物に関する条例が制定されており、活断層の正確な位置情報は、地域の地震防災を考える上で重要である。

3. 四国東部の中央構造線活断層系の断層活動

四国東部では、中央構造線活断層系は、第四紀前期に活発な逆断層運動をした後、第四紀後期には右横ずれ運動が優勢になったことが知られている（植木・満塩，1998；岡田，1968）。本研究で、露頭から取得した剪断面の卓越方向から推定された中央構造線活断層系の運動方向は、右横ずれ運動センスであることがわかった。また、これらの剪断面の情報に基づいた応力解析によれば、断層帯の応力場は、逆断層型応力場、逆断層～横ずれ断層型応力場であった（Fig. 3）。これは、この断層帯が中央構造線活断層系の逆断層～右横ずれ断層運動を記録していることを意味する。さらに、露頭情報から推定された応力場は、近年の地震データから推定された広域応力場ともよく一致する。



Fig.1 Occurrences of the fault core and the main fault in the Hashikura outcrop.

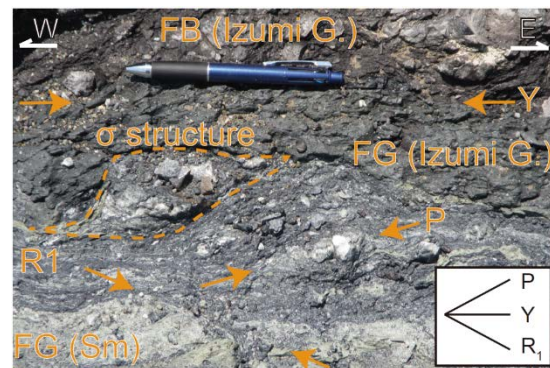


Fig.2 Occurrences of the fault zone in the Kamo outcrop.

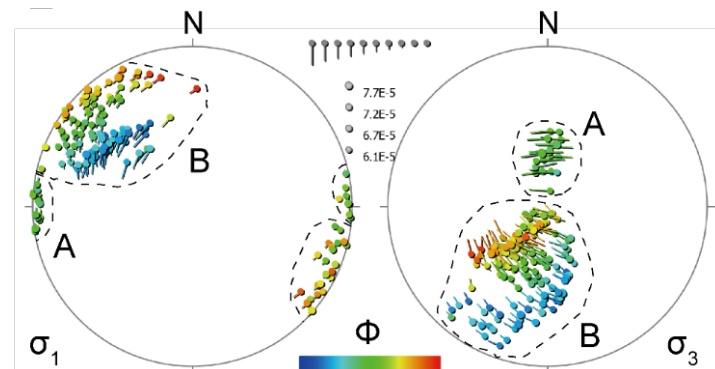


Fig.3 Stress fields estimated using slip data from the faults of the fault zone of the MTLAFS in the Kamo outcrop.

研究担当者	内田嗣人，池田倫治 (株式会社四国総合研究所 土木技術部)
キーワード	中央構造線，中央構造線活断層系，断層帯，応力解析，地震災害
問い合わせ先	株式会社四国総合研究所 企画部 TEL 087-843-8111 (代表) E-mail jigyo_kanri@ssken.co.jp http://www.ssken.co.jp/

[無断転載を禁ず]

歪センサによる高温環境下配管内圧力監視技術に関する研究

目 的

原子力発電所の設備保全において、様々な環境下における設備の状態を正確に監視することは重要である。しかし、過酷事故等による 100℃を超えるような特殊な高温環境下では、耐熱型の圧力計であっても圧力監視が困難となる可能性がある。

この問題に対する解決手段として、高温に対応した歪センサを使用した電気抵抗歪測定により、高温環境下の配管内の圧力を高精度かつ長期間監視するための技術について検討を行った。

主な成果

1. 歪センサによる高温環境下配管内圧力の短期監視実験

高温環境下（最高 190℃）での一次冷却材サンプリング配管内の圧力（最高 21MPa）監視を模擬するとともに、接着型の歪センサ（耐熱 250℃）を用いることで溶接による配管改造が不要等の特徴を有する実験装置を構築した。

本装置を用いて歪センサによる高温環境下における配管内圧力の監視実験を実施した結果、歪センサを加熱しながら接着する際に定着用治具を適用することで接着不良を低減できることや、適切な温度エージング処理方法を適用することで約 2 時間の連続試験において常温時とほぼ同じ±2%の精度で配管内圧力が監視できることを確認した。

2. 歪センサによる高温環境下配管内圧力の長期監視実験

過酷事故等が発生した場合、長期にわたって高温環境下における配管内圧力監視が必要になることが想定される。そこで、190℃の高温環境下かつ配管内圧力を 21MPa に維持した状態で長期監視実験を実施した結果、歪センサや接着部を高温環境下に長時間曝したことによる材質劣化等の影響と思われる誤差が徐々に増大するが、30 日以内であれば±20%未満の精度で配管内圧力を監視できることを確認した。

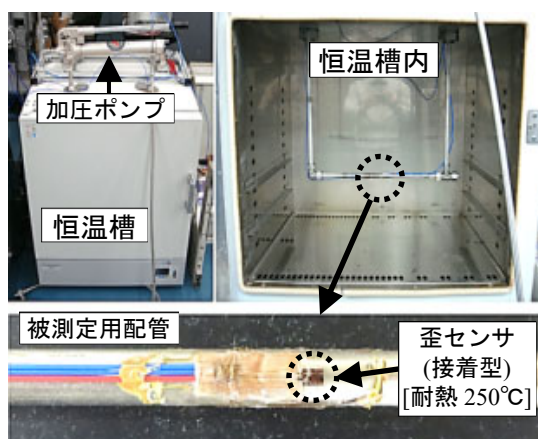


図 1 配管内圧力測定実験の状況

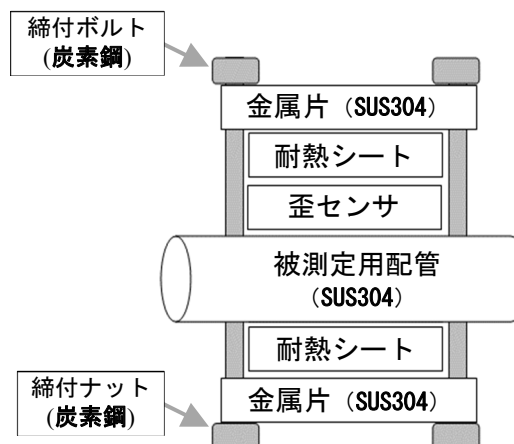


図 2 歪センサ定着用治具

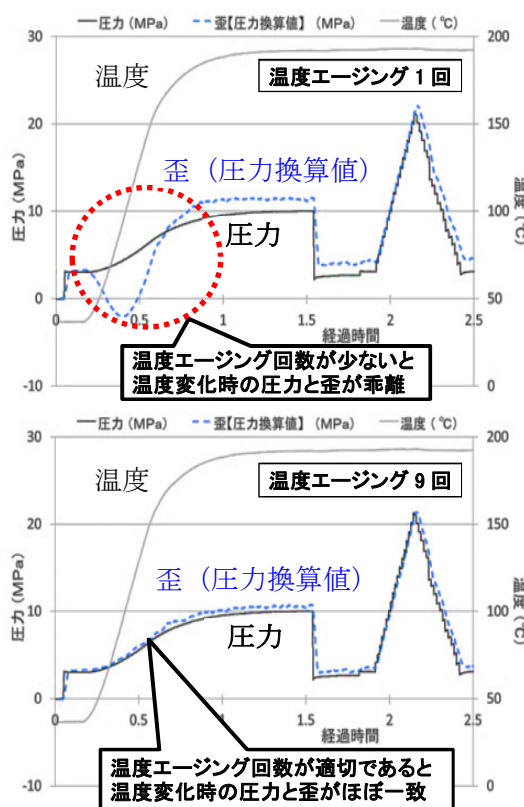


図 3 配管内圧力の連続測定実験 (約 2 時間)

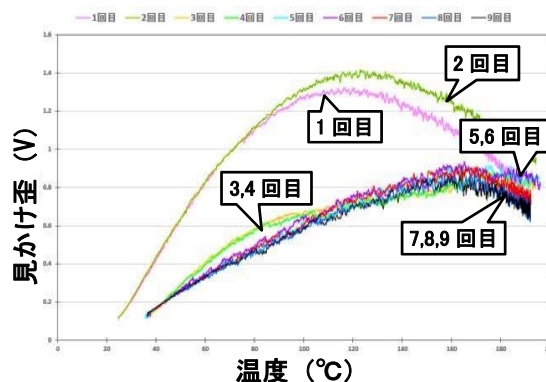


図 4 温度エージング回数と見かけ歪

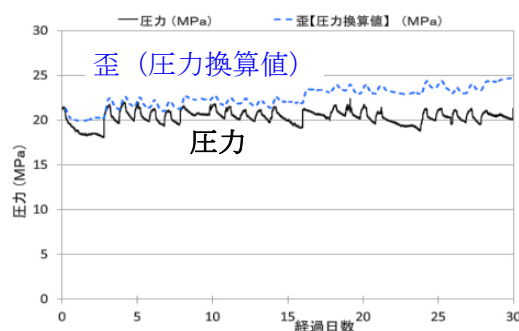


図 5 配管内圧力の長期監視結果 (190℃環境下で 30 日間監視)

研究担当者	白石浩造, 高瀬浩行 (株式会社四国総合研究所 産業応用技術部)
キーワード	歪センサ, 高温環境下, 配管, 圧力監視, 見かけ歪, 定着用治具, 温度エージング
問い合わせ先	株式会社四国総合研究所 企画部 TEL 087-843-8111 (代表) E-mail jigyo_kanri@ssken.co.jp http://www.ssken.co.jp/

[無断転載を禁ず]

矩形水槽における非線型スロッシング波高の評価

目 的

液体貯槽やタンクにおいて、地震時に発生するスロッシングは防災上重要な問題である。周期的に加振した矩形水槽中に生じるスロッシング波高推定において、非線形性を考慮した理論を実験によって検証した。また、スロッシング現象の数値解析として粒子法を採用し、解析結果を角振動数応答理論および実験結果と比較することによって、数値解析の妥当性を確認した。

主な成果

1. 矩形水槽におけるスロッシング実験

幅 L の矩形水槽を加振台に載せ、幅方向へ正弦波加振を行った。加振振動数、水位 H を変化させ、その応答を観察した。水深が浅い場合 ($H/L=0.1$) では津波のような進行波、深い場合 ($H/L=0.6$) では幅中央が節、壁面で腹となる定常波が観察された。また、水深によって波の挙動が異なることが確認された (図 1)。

2. スロッシング波高の理論解の補正

矩形水槽に周期的な外力を加えた場合、波高が最大となる角振動数は固有角振動数とは異なることが知られている。波高を評価するための Miles の背骨曲線 (応答曲線の中心部の曲線) は、 H/L が大きい場合は実験値とよく合うが、 H/L が小さい場合、誤差が大きくなることがわかった。そこで、 H/L の値によらず実験値のピークに背骨曲線が接近する補正式を考案し、その補正式を適用することで、実験値とよく合うことを確認した。これにより、スロッシングによる最大波高を計算で予想することができた。

3. 粒子法による数値解析

実験で使用した矩形水槽を 2 次元でモデル化し、粒子法による解析を行った。その結果、水深が浅い場合は進行波、深い場合は定常波となる特性も解析でよく再現できた (図 2)。また、スロッシング波高は、理論式および実験値と比較的良く一致し、解析の妥当性が確認できた (図 3)。



図1 実験結果 (左 : $H/L=0.1$ 、右 : $H/L=0.6$)

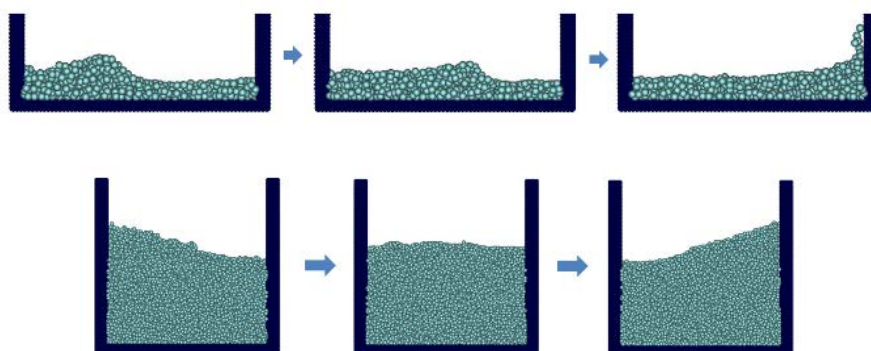


図2 解析結果 (上 : $H/L=0.1$ 、下 : $H/L=0.6$)

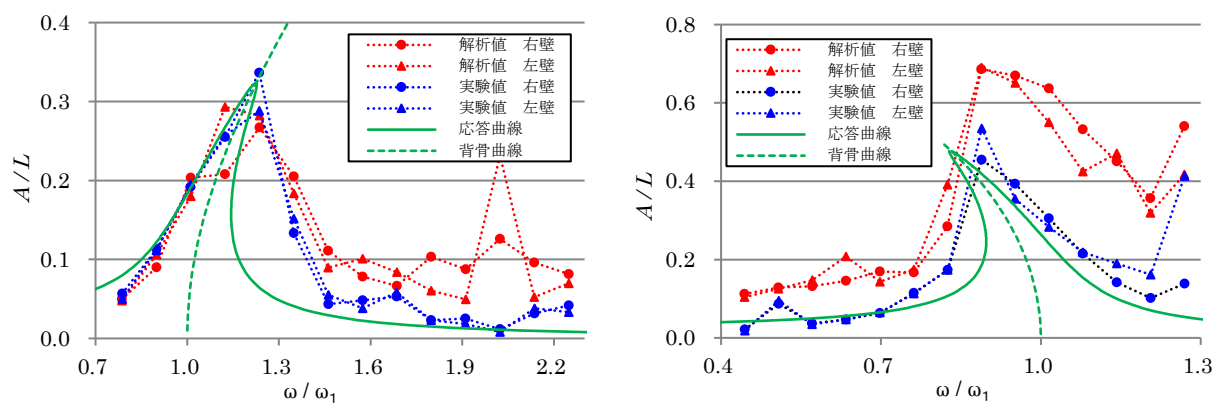


図3 波高の比較 (左 : $H/L=0.1$ 、右 : $H/L=0.6$)

研究担当者	小川口深雪，野口新二 (株式会社四国総合研究所 エネルギー技術部)
キーワード	スロッシング，矩形水槽，非線型，固有振動数，応答曲線，背骨曲線，Miles, Duffing 方程式，補正式，粒子法，MPS 法
問い合わせ先	株式会社四国総合研究所 企画部 TEL 087-843-8111 (代表) E-mail jigyo_kanri@ssken.co.jp http://www.ssken.co.jp/

[無断転載を禁ず]

地震時における建物挙動解析ツール(SwingAnalyzer)の開発

(株)四国総合研究所 電子アグリ技術部	中西 美一
(株)四国総合研究所 電子アグリ技術部	仲田 誉
(株)四国総合研究所 土木技術部	山崎 崇寛
四国電力(株) 土木建築部	天野 雄一郎

キーワード： 地震動
自動解析
可視化

Key Words : Earthquake Vibration
Automatic Analysis
Visualization

Development of the earthquake vibration analysis system.

Shikoku Research Institute, Inc., Electronics and Agri-Technology Department

Yoshikazu Nakanishi, Homare Nakata

Shikoku Research Institute, Inc., Civil Engineering Department

Takahiro Yamasaki

Shikoku Electric Co., Civil & Architectural Engineering Department

Yuichiro Amano

Abstract

Operators of important infrastructure such as electric companies owe responsibility to re-start devastated infrastructure after big earthquake as soon as possible. Automated facility damage evaluation technology is essential to re-start various facilities affected by big earthquake smoothly to keep our society to be safe.

We have been developing modern earthquake vibration monitoring system which is called SwingMinder, and already installed them on more than 20 buildings mainly in Shikoku Island.

If mega-scale earthquake happens, each SwingMinder sends large volume measurement data to the cloud server within approximately five minutes. Highly automated data analysis system is required to evaluate many facilities' damage quickly. In this article, we describe newly developed earthquake vibration analysis software system which is called SwingAnalyzer.

1. はじめに

電力事業者の様に地域住民の生命にも関わる重要なインフラの運用を担う企業は、巨大地震被災後のインフラ復旧を迅速に進めるため、強い地震動による各種施設の被害状況を短期間かつ高精度に判定する必要がある。

著者らは、中高層建物の地震による加速度を高精度かつ簡易に計測することのできる無線式加速度多点同期モニタリングシステム(SwingMinder)の開発を行い¹⁾、これまでに四国内を中心に約20棟の建物への実配備を完了している。

SwingMinderは従来の加速度計とは異なり、無線通信の利便性を生かして、建物の全てのフロアに加速度センサを設置することを基本としているため²⁾、10階建ての建物での60秒間の加速度データ量は36万点となる。また、巨大地震発生時には多数の建物から大量の加速度データがクラウドサーバに送信・蓄積されるため、この大量の加速度データを迅速に解析し、被災した建物の被害度を診断するための自動解析システムが不可欠である。

本稿では、地震時における建物被害の自動解析システム(以下、自動解析システム)の構築に必要な各種データ処理メカニズムを、開発・検証するためのツール(機能検証プロトタイプ)として開発したSwingAnalyzerの概要、ならびに、それを用いて、実際の地震時において建物で計測された加速度データを解析した事例について報告する。

2. SwingAnalyzerの概要

SwingAnalyzerの開発目的は、実際の建物で地震時に計測された加速度データを様々なデータ処理メカニズムで解析・評価することにより、適用したメカニズムの妥当性を検証すると共に、より高精度で高効率な解析メカニズムの開発を行うことにある。

SwingAnalyzerは、地震時に計測された加速度データ蓄積用のクラウドサーバから、建物単位で任意の期間の加速度データを時間軸の揃ったCSV形式で抽出する加速度データ抽出ソフトウェア、ならびに、抽出した加速度データを数値演算処理し、時刻歴変位など建物の挙動状況を2Dおよび3Dアニメーション表示により可視化するソフトウェアで構成されている。

2.1 クラウドサーバからのデータ抽出

SwingMinderでは無線通信による高精度な時刻同期メカニズムにより、同一建物内では、各フロアに設置した加速度センサユニットの内部時計はおおよそ±0.1msec以内に同期しており、また、加速度データのタイムスタンプは±3msec以内に同期しているが、計測自体は個々のセンサで独立して行われるため、加速度データの収録の開始と終了の時刻は各フロアで10秒の倍数で異なることがある。

クラウドサーバから解析対象期間の加速度データをCSV抽出する際は、バイナリ形式で保存されたフロア別の加速度データファイルからデータを読み込み、時間軸を共有する建物全体のデータを含む1つのCSVデータとして抽出する必要がある。抽出処理の高速化のため、SwingMinderのデータ構造を効率よく処理できるソフトウェアをJava言語で開発し、クラウドサーバ上で実行させている。

また、インターネット経由で上記ソフトウェアを操作するため、PHPおよびJavaScript言語で記述したWEBインターフェースを開発しており、CSVデータの抽出はWEBブラウザからの簡単な操作で行えるようになっている。

2.2 データ処理と可視化

クラウドサーバから抽出した加速度データの解析および可視化は手元のPCで行っており、オープンソースの優れた数値解析パッケージであり、解析結果の可視化機能も充実しているScilabを使用している。

データ処理の基本は単純な数値積分であるが、大量の行列演算を高速に実行するため、PCにはある程度のCPU性能と8GB程度のメモリが必要である。

加速度計測データには様々なノイズが含まれているため、適切な数値フィルタ処理によるノイズ除去が必要である。SwingMinderで使用しているMEMS型加速度センサには、電気的な高周波ノイズとシリコンばねのヒステリシスに起因すると思われる低周波ノイズが大きいという欠点がある。高周波ノイズは積分処理により除去されるため変位の計算値には大きな影響を与えないが、低周波ノイズは適切なハイパスフィルタにより十分に除去

しておかないと、変位の基準線が時間経過と共にドリフトする基線ドリフトと呼ばれる現象が発生する。

ハイパスフィルタを通して基線ドリフトが残る場合は、ローパスフィルタで基線ドリフト成分を抽出した上で高次式に近似し、変位の計算値からドリフト成分を除去する基線補正と呼ばれる操作を行う。

現時点では適切な数値フィルタを完全自動で生成することは難しく、高精度な(確からしい)解析結果を得るためには解析結果を評価しながらフィルタ種別を選択し、フィルタ定数を微調整することが必要となっている。

解析ソフトウェアは Scilab のスクリプト形式で記述しており、現時点では解析結果の妥当性を評価して、都度手作業でスクリプトを修正しながら解析を行っているが、解析例を積み重ねることにより、現在手作業で行っている修正を順次自動化できる見通しである。

加速度データは東西(EW)/南北(NS)/上下(UD)の3軸で計測されるため、各軸の単純な時刻歴グラフを見ただけでは建物全体の振動状況を直観的に把握することが難しく、また、建物の構造破壊が発生した場合に予測される時刻歴変位の不連続性を見つけることは非常に難しい。

そこで、加速度から算出された各フロアの時刻歴変位を EW/NS 平面、および、EW/NS/UD 空間上にマップし、アニメーション表示により可視化することとした。

直観的に理解し易いように、各フロアの加速度センサが上下方向に直線的に配置されていると仮定し、センサ間を結んだ直線(仮想中心軸)の平面的および空間的曲がり具合を時刻歴描画することで、建物全体の時刻歴変位を表現する可視化手法を開発した。可視化処理においては、Scilab の高度な 2D および 3D グラフィクス機能が大いに役立っている。

2.3 自動解析システムへの発展

SwingAnalyzer では、クラウドサーバからダウンロードした加速度データを、手元の PC 上で動作させるソフトウェアで処理・可視化する2段階の方式としているが、自動解析システムではデータ処理と可視化データの生成もクラウドサーバ上で

行えるようにする予定である。

そうすることで、地震発生後 10 分以内に自動解析を完了し、手元のスマホやタブレット端末で解析結果を参照できるようになるため、建物の被害度判定の大幅な迅速化が期待される。

3. SwingAnalyzer によるデータ解析事例

SwingMinder の実運用を開始して約 2 年が経過しており、これまでに複数の実建物における加速度の計測に成功している。

ここでは、平成 31 年 3 月 13 日の紀伊水道を震源地とする M5.2 の地震発生時に、徳島市内の 9 階建の建物で計測された加速度データの SwingAnalyzer による解析例を示す。

SwingMinder のセンサユニットは 3 軸(EW/NS/UD)の加速度データを常時 200Hz で計測しているが、データ送信を低速の 920MHz_MultiHop 無線通信に依存しているため、その全てをクラウドサーバへ送信することはできない。そこで、10 秒毎に過去 10 秒間の計測データを評価し、有意な加速度が含まれない場合は、その 10 秒間の最大加速度、平均加速度、ならびに、重力加速度の計測値から算出される EW/NS 方向への水平傾斜角のみを 10 秒間代表データとしてクラウドサーバへ送信する仕様としている。

このデータ評価中も加速度計測は高い時刻同期精度を維持して継続する必要があるため、センサユニットには高効率で時間揺らぎの小さな並列データ処理メカニズムを独自開発し搭載している。

3.1 10 秒間代表データの評価

図 1 は地震発生当日の上記代表データの推移を示したグラフである。

午前 8 時頃から各軸の 10 秒間最大加速度が大きくなっているのは、空調機の稼働により床面に設置したポリカーボネート製のセンサユニットボックスが振動したためであると思われる。

13 時 48 分に地震が発生したことを示す大きな加速度が記録されている。地震発生中に計測された加速度データは 5 分以内に高松市内に設置されているクラウドサーバへ送信・蓄積されるようになっている。

水平傾斜角の算出分解能は 0.01° と高く、微かな床面の傾きを高精度に計測可能である。有意な

加速度を含まない場合でも、前述の空調機の稼働による振動など、計測した加速度には様々なノイズが含まれるため、水平傾斜角は 10 秒間の加速度計測値の平均値(2,000 データの平均値)から算出することで 0.01° という高分解能を得ることに成功している。



図 1. 10 秒間代表データの推移

3.2 加速度データの解析と評価

図 2 は地震発生中に記録された各フロアの EW および NS 方向の加速度データである。

加速度データは 4～9 階では 60 秒間記録されていたが、1～3 階では 10 秒間の最大加速度が加速度記録のトリガレベルを下回った時点から、予め設定したポストトリガ時間の経過後に順次記録が停止している。本解析事例では、ポストトリガ時間を 10 秒としていたため、記録の停止が早すぎたと考えられたことから、現在はポストトリガ時間を 30 秒としている。一方、加速度の記録は最初のトリガ検知が発生した 10 秒間の 10 秒前から始まり、この最初の 10 秒間をプレトリガ時間と呼んでいる。プレトリガ時間はセンサユニットのメモリ容量の制限により 10 秒間固定となっている。

従来の加速度計測システムは有線接続方式であるため、加速度センサを既設の建物の全フロアに設置することは困難であり、無線式の加速度計で実際の地震時において建物の 9 フロアで加速度を同時計測した例は少なく、以下に示す解析結果についても解析事例が非常に少ないものである。

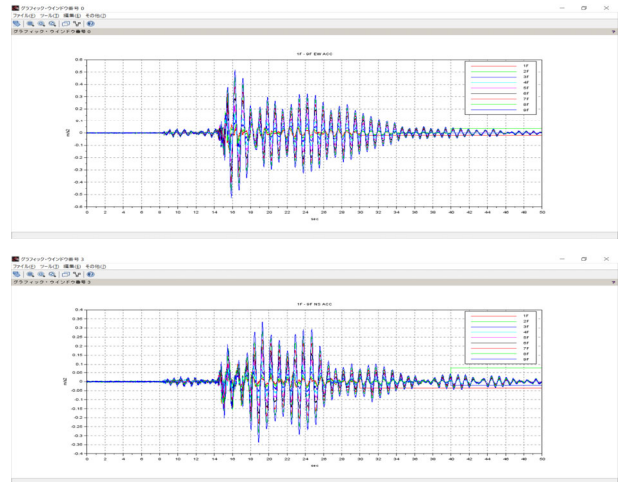


図 2. 地震時に計測された加速度(EW:上,NS:下)

図 3 は記録された EW 方向の加速度の 14～20 秒の間を時間軸に拡大したものであるが、各フロアで記録された加速度の位相がきれいに揃っていることから、各フロアに設置した SwingMinder センサユニットの内部時計は高精度に同期できていたことが分かる。時刻同期の精度が悪いと後述する層間変形角の計算誤差が大きくなり、地震動が建物に与えたダメージの判定精度が低下するため、時刻同期精度を常に高精度に維持できることは極めて重要である。

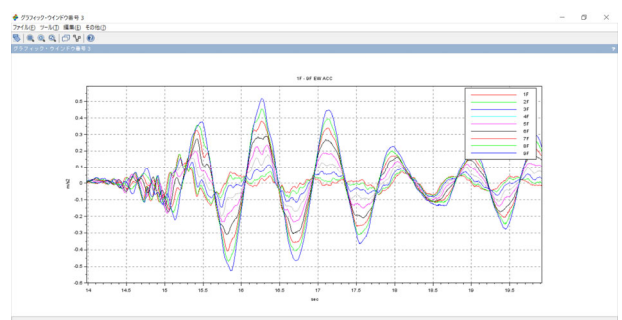


図 3. EW 方向加速度の時間軸拡大(14～20 秒)

3.3 変位データの評価

図 4 は、計測された加速度を 2 回積分することで得られた、各フロアの EW 方向の時刻歴変位である。加速度から変位を算出する場合、加速度データに混入している低周波ノイズを適切に除去しないと、誤差が蓄積され地震後に変位がゼロに戻らない基線ドリフトが発生するが、図 4 では地震後に全てのフロアで変位がゼロに収束しており、フィルタ処理が適切であったことが伺える。

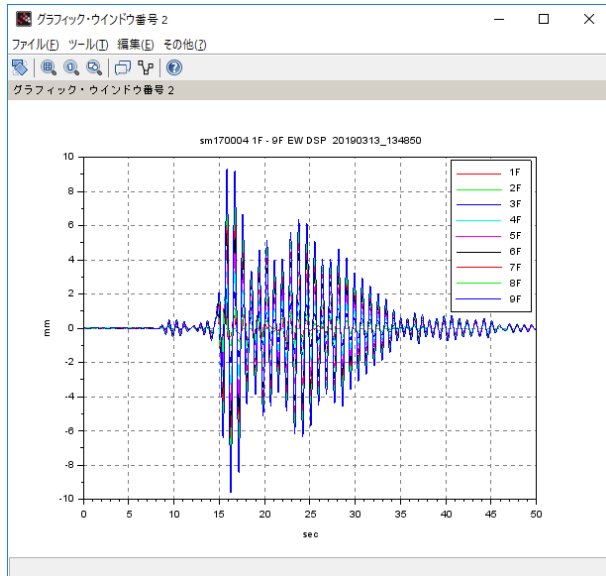


図 4. 各フロアの EW 方向の時刻歴変位

図 5 は、各フロアの EW 方向の時刻歴変位を仮想中心軸上にマップし、建物中心軸の EW 方向への変位の様子を時刻歴表示(時間の前半と後半が分かり易いように、時刻歴を逆にして描画)したものである。水平方向のスケールの単位は mm で上下方向は m であるので、水平方向の変位は 1,400 倍程度誇張して表現されている。

図 5 は図 4 と同じデータから生成された図であるが、建物全体が弓なりに変形している様子が伺え、加速度波形記録の開始から約 16 秒後に 9 階フロアで最大変位の -9.6mm を記録したことが分かる。

なお、加速度から算出した変位の精度については、SwingMinder の開発時に繰り返し実施したモックアップによる加振試験において、加速度から算出した変位とワイヤ変位計、レーザ変位計による変位計測値が必要十分な精度で一致していることを確認している²⁾。

図 6 は各フロア間の EW 方向の変位差(層間変位)を時刻歴表示したものである。図 5 同様に水平方向の変位差は 3,800 倍程度誇張されて表現されている。

変位差の最大値は 5 階と 6 階の間で記録されており、その値は 1.6mm であったことが分かる。この建物の階高は 4,000mm であり、最大層間変形角は $1/2,500\text{rad}$ となる。一般に、地震被災後の建物の安全性は層間変形角が設計上の安全限界を超えたかどうかで判定されることが多いため、変位差

0 点の両側に安全限界を示す垂線を引けば、損傷の可能性のあるフロア間構造を自動判定可能になると思われる。

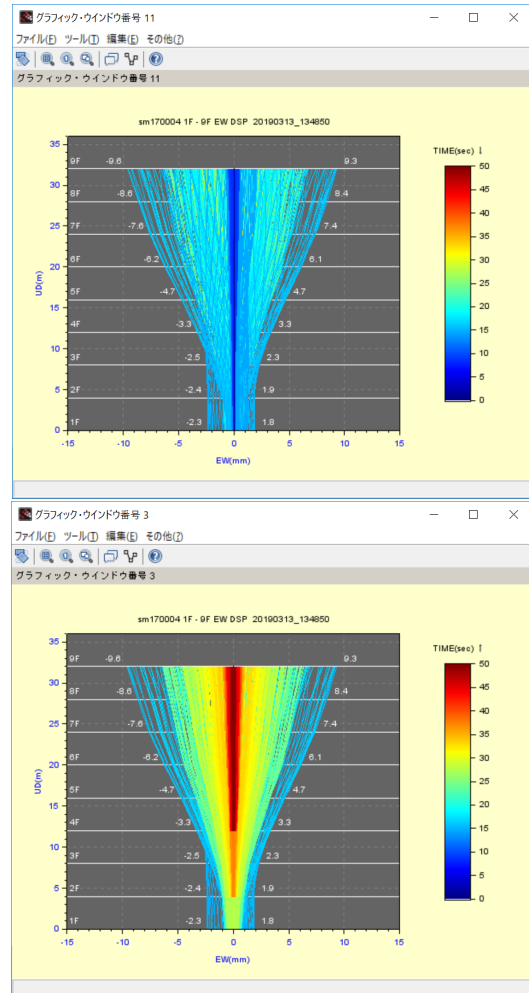


図 5. EW 方向仮想中心軸の時刻歴変位

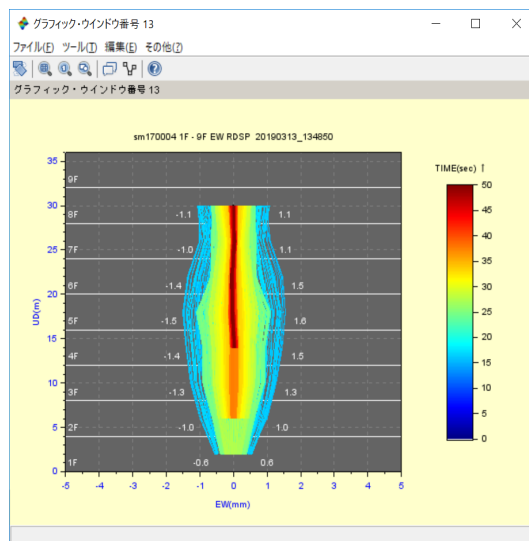


図 6. EW 方向の時刻歴層間変位

図 7 は EW/NS/UD 各軸の時刻歴変位である。図 8 はそれを 3D 空間中に配置した仮想中心軸上にマップし、建物の空間的変位の様子を時刻歴表示したものである。図 5 と同様に水平方向のスケールの単位は mm で上下方向は m である。

図 7 からは建物全体の時刻歴変位を直観的に読み取することは困難であるが、図 8 からは地震発生中に建物が時間経過と共にどのように振動したかを容易に把握できる。また、図 8 は 3D 描画であるので、PC 画面上でマウス操作により自由に回転・拡大でき、図 9 は上方から見た様子である。

図 8 および図 9 から、建物の上層部が楕円状に回転しつつ、さらに、時間経過とともに楕円の軸が回転している様子が伺える。

建物全体が終始滑らかに変位していることから、建物の骨格構造が弾性を維持できており、構造破壊が発生しなかったことが示唆される。変位の連続性から構造破壊の有無を判定できる可能性があると思われるが、現時点では変位の連続性と構造破壊の関係を示す十分なデータがなく今後の研究課題である。

変位量が最上階においても中心軸から 10mm 以内と小さかったにも拘わらず、建物全体の時刻歴変位に不自然さは見られない。これは、各フロアに設置した加速度センサの精度が必要十分に確保されており、また、内部時計も高精度に同期していたためであると考えられる。

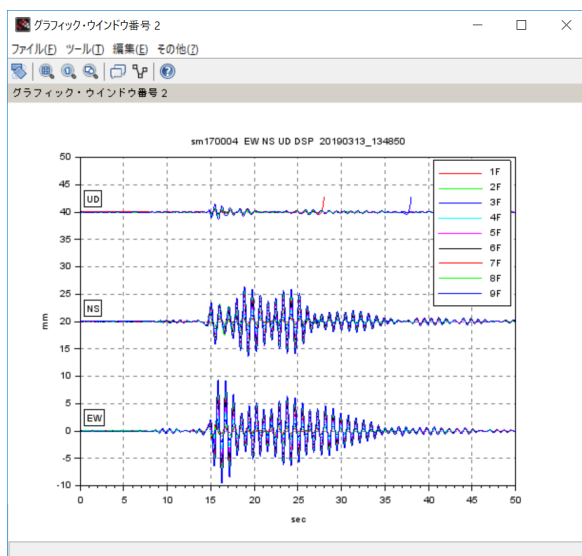


図 7. 3 軸(EW/NS/UD)の時刻歴変位

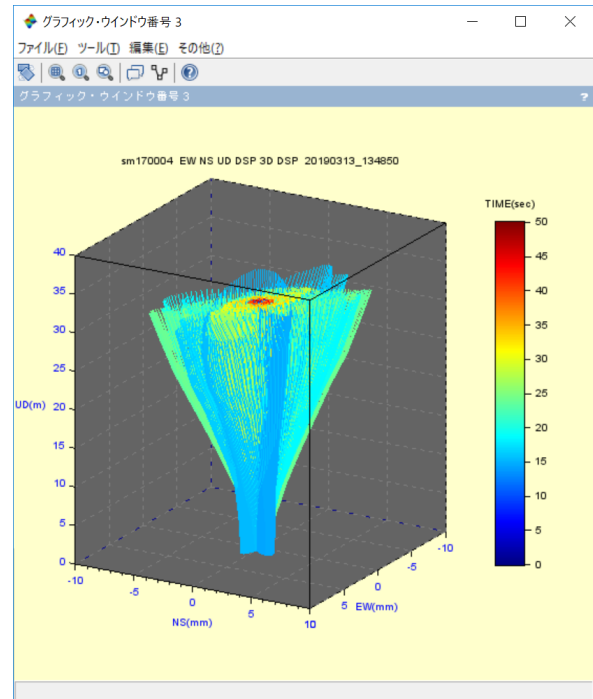


図 8. 仮想中心軸の空間的時刻歴変位

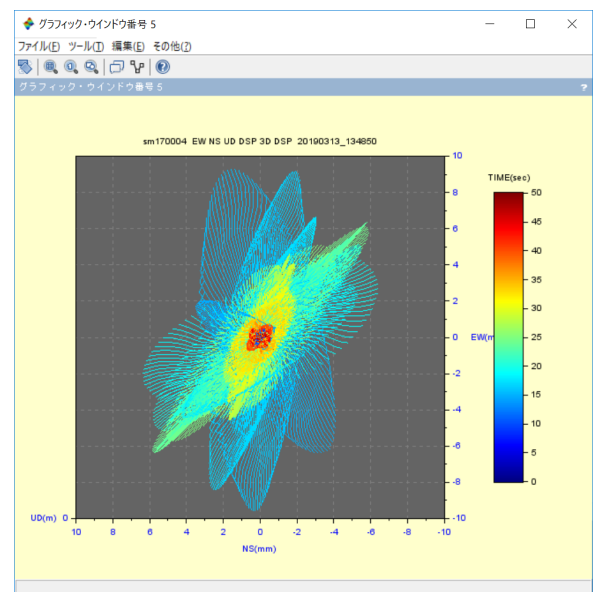


図 9. 上方から見た仮想中心軸の時刻歴変位

なお、SwingMinder で使用している MEMS 型加速度センサのゲイン誤差は±5%程度と大きいので、センサユニット毎に各計測軸の正負方向で重力加速度(9.8m/s^2)を正確に計測できるように、ソフトウェアによるゲイン補正値を設定している。²⁾

一方、MEMS 型センサには初期値のばらつきは大きいものの、感知部の質量が非常に小さく、長期間の重力暴露による経年変化が少ないという優れ

た特性もあり，地震時における建物の加速度計測のように，初期精度よりも経年変化の小ささが重要な用途にはその低コスト性も併せて適している。

4. まとめ

開発した SwingAnalyzer は機能検証用プロトタイプという位置づけながら，地震時に実建物で計測された加速度の解析結果から，被災建物の被害度判定にある程度有効であることが確認できた。

今後は，より少ない労力でより高精度な解析結果が得られるように，SwingAnalyzer に搭載した解析メカニズムを洗練するとともに，その成果をベースに自動解析システムの構築を進める予定である。

【謝辞】

本研究は，四国電力(株)土木建築部殿，ならびに，新規事業部殿より委託を受け実施したものである。

最後に，本研究の推進に多大なるご協力を頂いた関係各位に深く感謝いたします。

【参考文献】

- 1) 天野雄一郎他：無線式振動モニタリングシステム SwingMinder の開発, 四国電力・四国総合研究所研究期報 NO.109 , 2018
- 2) 山崎崇寛他：構造ヘルスモニタリングへの適用を目的とした無線式加速度計測システムの開発－既存建物への導入に向けた検討－, 日本建築学会構造系論文集, Vol.84 No.765, 1389-1399, 2019.11

四国東部における中央構造線活断層系の断層帯の性状

(株)四国総合研究所 土木技術部 内田 嗣人
(株)四国総合研究所 土木技術部 池田 倫治

キーワード： 中央構造線
中央構造線活断層系
断層帯
応力解析
地震災害

Key Words : Median Tectonic Line
Median Tectonic Line active fault system
Fault zone
Stress inversion
Earthquake disasters

Characteristics of the fault zone of the Median Tectonic Line active fault system in eastern Shikoku

Shikoku Research Institute, Inc., Civil Engineering Department
Hideto Uchida, Michiharu Ikeda

Abstract

The Median Tectonic Line active fault system (MTLAFS) is one of the longest dextral active faults in Japan. It is related to the Median Tectonic Line (MTL), which divides southwest Japan into the Inner and Outer zone. The characteristics of the fault zone of the MTLAFS are important to understand the fault behavior. Additionally, the detailed location of the MTLAFS will contribute to the mitigation of earthquake disasters in the local area. We found two outcrops of the exhumed fault zones of the MTLAFS and report characteristics of the fault zones in this study. We also discuss the structures and kinematics of the MTLAFS in eastern Shikoku based on the information obtained from these outcrops.

The fault zone is composed of fault core and fault damage zone. The fault core consists of fault gouge originated from Saita Formation, Izumi Group and Sanbagawa metamorphic rocks in the Hashikura outcrop. The fault damage zone is composed of fault breccia, cataclasite and weakly deformed rock originated from Izumi Group are also observed in the Hashikura outcrop. On the other hand, fault gouge and fault breccia originated from the Izumi Group and Sanbagawa metamorphic rocks are observed in the fault zone of the MTLAFS in the Kamo outcrop. The orientations of shear planes ($Y-P-R_1$) in the fault zones in both outcrops indicate the dextral slip sense. Furthermore, stress fields estimated using stress inversion from slip data of shear planes in the Kamo outcrop show reverse and strike-slip to reverse faulting stress regime. These stress fields reflect the fault activities of the MTLAFS in the Quaternary. Moreover, these stress regimes inferred from the geological data are concordant with the present regional stress estimated from the earthquake data in eastern Shikoku.

1. はじめに

中央構造線は西南日本を内帯と外帯に分ける長大な地質境界断層である。その起源は、前期白亜紀頃の鹿塩時階^{1),2)}とされ、それ以降活動時期の異なる複数の運動時階(市ノ川時階, 先碓部時階, 碓部時階, 石鎚時階など)が報告されている³⁾。これらの断層活動は、中央構造線周辺の岩石に記録されており、その詳細を明らかにすることは、中央構造線の活動史の解明に大きく貢献する。なお、本稿では、地質境界としての中央構造線を「中央構造線」、活断層としての中央構造線を「中央構造線活断層系」と記述する。

四国地域では、中央構造線は領家帯の和泉層群と三波川変成岩類の境界として認定され、四国地域を東西に横断している (Fig. 1a)。また中央構造線活断層系が、その中央構造線と並走するように分布している⁴⁾。四国西部では、中央構造線活断層系は、湾曲して分布する中央構造線の北側を通過するが、四国東部では、両断層は直線性がよく、かつほとんど一致して分布する (Fig. 1a)。中央構造線活断層系の断層露頭から、最近の断層活動に関する情報を検出することは、断層の活動性を評価する上で重要であり、活断層露頭の報告は、その地域の地震防災にも貢献すると考えられる。今回、我々は四国東部の2か所で中央構造線活断層系の断層露頭を発見し、その性状を観察したので、報告する。

2. 調査地域の地質

調査地域周辺には、吉野川を挟んで北側に和泉層群が分布し、南側には三波川変成岩類が分布している。また吉野川に沿って、両地層をおおって第四系が分布している (Fig. 1b)。

和泉層群は、四国西部から近畿地方まで、中央構造線の北側に沿って分布する後期白亜紀の海成層であり、主に砂岩泥岩互層で構成され、礫岩、凝灰岩層を少量伴う。和泉層群の堆積年代は、西部から東部に向かって若くなり、後期白亜紀の中央構造線の左横ずれ運動に伴って生じた、ブルーパート堆積盆の堆積物であると解釈されている⁵⁾。

三波川変成岩類は、低温高压型変成作用を被った変成岩であり、調査地域周辺における三波川変成岩類の変成作用の時期は後期白亜紀であると推定されている⁶⁾。調査地域の三波川変成岩類は、

主に泥質片岩、塩基性片岩、および珪質片岩で構成され、その原岩は主に海溝に沈み込んだ海洋性地殻表層物質であると考えられる⁷⁾。

第四系は、上部鮮新統～中部更新統の三豊層群、中部更新統～完新統の段丘堆積物、および上部更新統～完新統の沖積層に大別される⁷⁾。また、三豊層群は、和泉層群起源の堆積岩の礫と結晶片岩、花崗岩、安山岩、および珪質岩の礫を含む砂礫層から成る財田層、アルコーズ質の砂層、およびシルト層から成る神田層、高瀬層、和泉層群起源の堆積岩の礫から成る焼尾層に区分される⁷⁾。段丘堆積物は、中部～上部更新統の高位および中位段丘堆積物と上部更新統～完新統の低位段丘堆積物に分けられ、いずれも河成層である。沖積層は、崖錐堆積物や現河床堆積物などである。

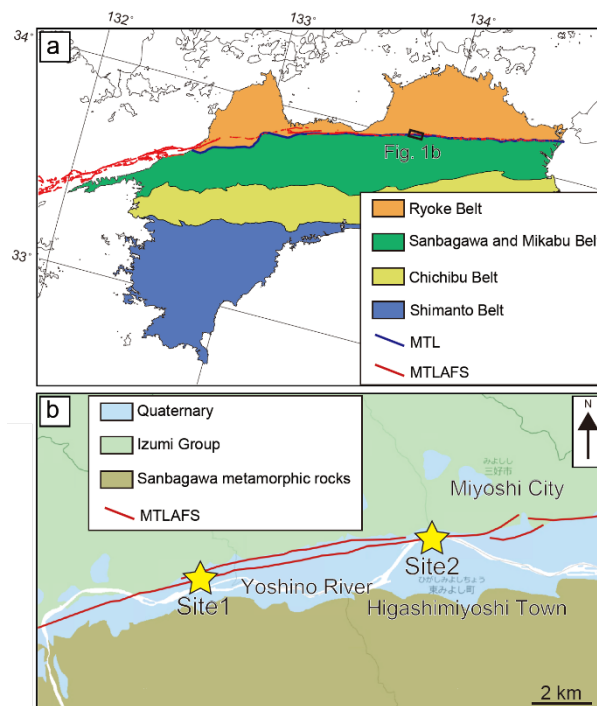


Fig.1 (a) Geological map in Shikoku area. MTL : Median Tectonic Line, MTLAFS : Median Tectonic Line active fault system. (b) Simplified geological map and locations of the study areas. Modified after Matsuura et al (2002)⁸⁾. Site1 is Hashikura outcrop (34°02'12.1"N, 133°50'15.6"E) and Site2 is Kamo outcrop (34°02'58.2"N, 133°55'43.0"E) on the map.

3. 中央構造線活断層系の産状

3.1 Site1 箸蔵露頭

箸蔵露頭は、2018–2019 年の箸蔵橋の工事に伴って、鮎苦谷川に沿って露出した断層帯の露頭である。約 150 m 以上にわたり、断層コア (Fault core) および断層破碎帯 (Fault damage zone) から成る断層帯がほぼ連続的に観察される (Fig. 2)。

(1) 断層帯の産状

ここでは、和泉層群の堆積岩と三豊層群の財田層相当の礫層が、中央構造線活断層系で接している産状が観察される (Fig. 3)。断層コアは、幅約 4 m もの断層ガウジ (Fault gouge) であり、周辺の断層破碎帯は、断層角礫 (Fault breccia)、カタクレーサイト (Cataclasite)、割れ目が発達する弱破碎岩 (Weakly deformed rocks) から成る (Figs. 2 and 3)。

断層コアは、主に和泉層群起源の泥岩、三波川変成岩類起源の泥質片岩、塩基性片岩および財田層起源の礫層から成る断層ガウジによって構成される (Fig. 3a)。黒色を呈する和泉層群の泥岩起源の断層ガウジは塊状で、明瞭な剪断面の発達認められない (Fig. 3b)。一方で、三波川変成岩類起源の断層ガウジは、青灰色～黄白色を呈し、和泉層群起源の断層ガウジ内に、幅 1–20 cm 程度でレンズ状に挟在される。礫層起源の断層ガウジは、幅約 20 cm であり、黄褐色～灰緑色を呈する (Fig. 3a)。内部の礫径は、長軸 1–15 cm であり、その長軸は剪断面と同方向に配列している (Fig. 3a)。

断層角礫は、主に灰白色～白色を呈する和泉層群起源の砂岩から成り、泥岩起源の断層角礫は少量である。断層角礫は主に約 10 cm 未満の破碎岩片から成り、手でボロボロに崩れる。しばしば主断層面と同方向の剪断面が確認される (Fig. 3c)。

カタクレーサイトは、砂岩の場合、ブーディン状になっているものの、一部に原岩の組織を残している (Fig. 3d)。泥岩は破碎されて、細粒で固結している。カタクレーサイト帯に発達する剪断面には、砂岩の層理面を延性変形させる産状も観察される。

主断層面から約 80 m 地点、約 110 m 地点で観察される弱破碎岩には、母岩の砂泥互層の構造が観察されるものの、多数の割れ目の発達も認められ

る。このことは中央構造線の断層活動の影響がこの周辺にまで及んでいることを意味する。(Figs. 3e and f)

(2) 断層帯の内部構造

主断層の姿勢は、 $N77^{\circ}E67^{\circ}N$ である (Fig. 3a)。断層帯には明瞭な複合面構造が発達しており、観察された Y 面、P 面、 R_1 面の情報をそれぞれステレオネット上に示した (Fig. 4)。Y 面は、 $N79^{\circ}E71^{\circ}N$ に集中し、P 面は、 $N58^{\circ}E64^{\circ}N$ に卓越、また R_1 面は $N67^{\circ}W88^{\circ}N$ に卓越している (Fig. 4)。これらの卓越方向は、Rutter et al. (1986) による断層帯の複合面構造と断層運動センスの関係⁹⁾に基づくと、右横ずれ運動センスを反映していることがわかる (Fig. 5)。

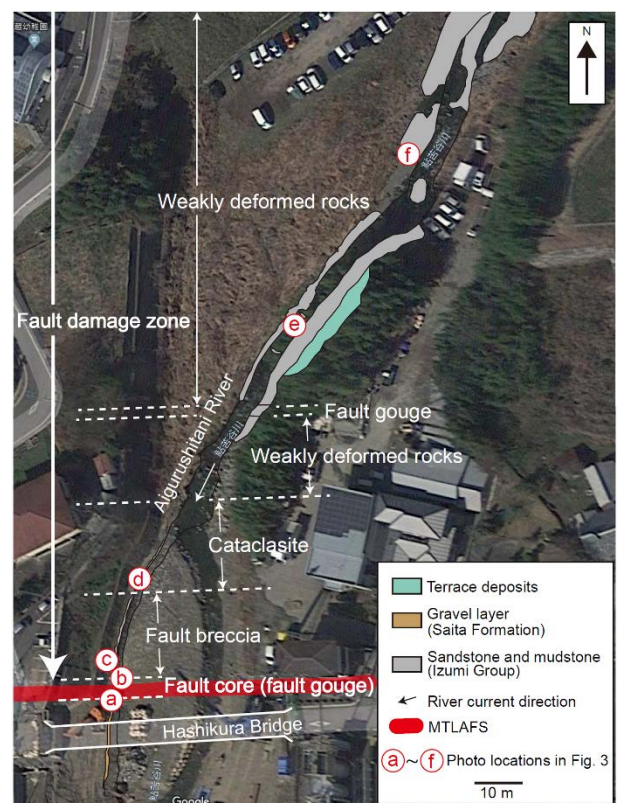


Fig.2 Geological route map of the fault core and fault damage zone in the Hashikura outcrop. The base map is from Google map.

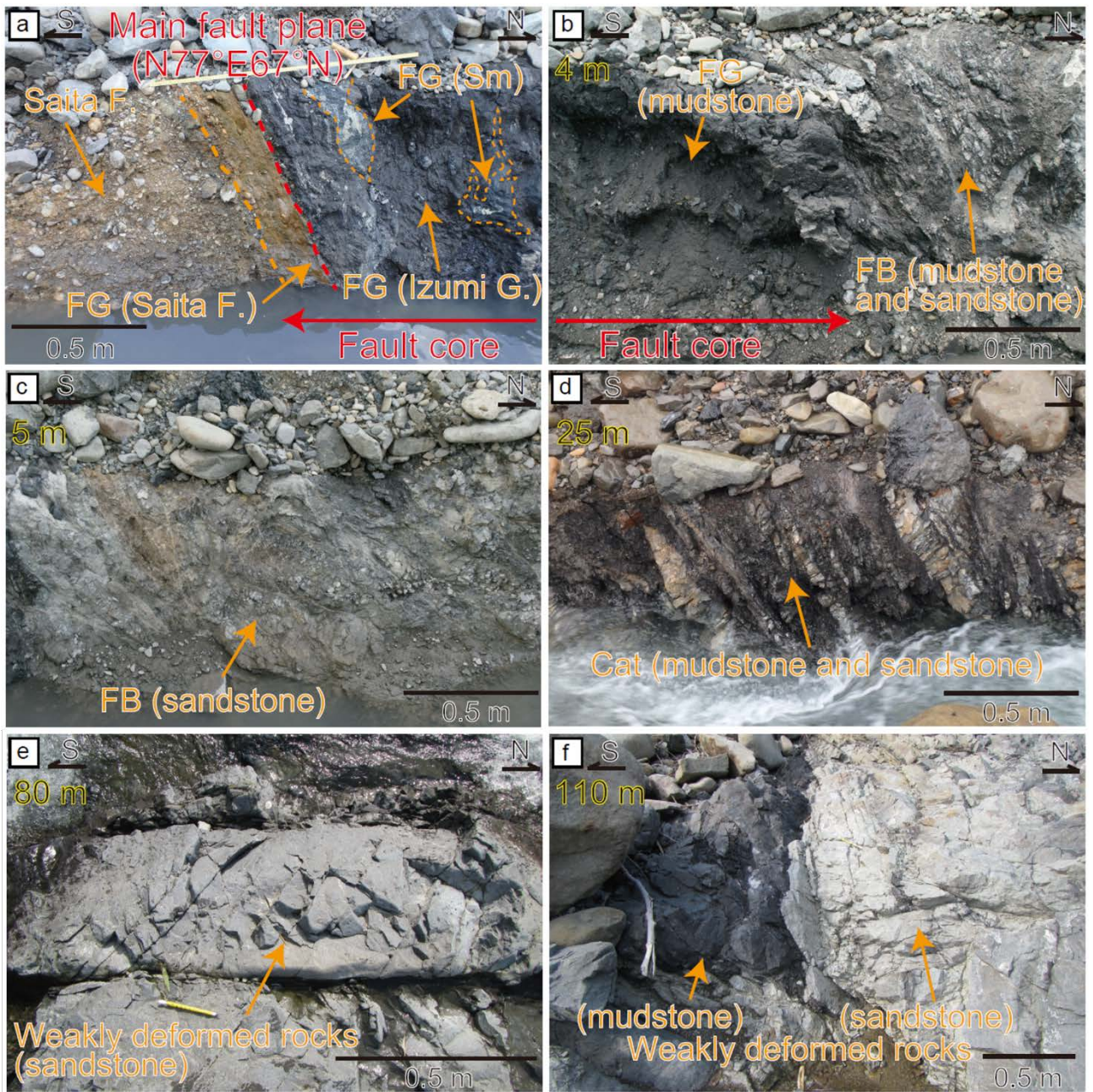


Fig.3 Occurrences of the fault core and fault damage zone of the MTLAFS in the Hashikura outcrop. (a) The main fault plane and fault gouge originated from the Saita Formation, Izumi Group and Sanbagawa metamorphic rocks (Sm). (b) The fault gouge from mudstone of the Izumi Group and the fault breccia from mudstone and sandstone (2.5 m distance from the main fault plane). (c) Fault breccia from sandstone (5 m distance from the main fault plane). (d) Cataclasite from mudstone and sandstone (25 m distance from the main fault plane). (e) Weakly deformed rocks from sandstone (80 m distance from the main fault plane). (f) Weakly deformed rocks from mudstone and sandstone (110 m distance from the main fault plane). FG : fault gouge, FB : fault breccia, Cat : cataclasite.

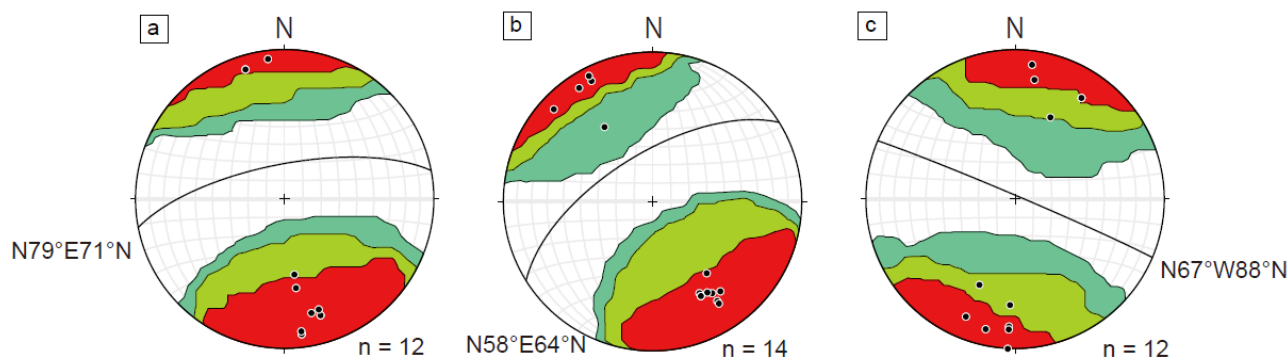


Fig.4 The predominant directions of each shear plane in the Hashikura outcrop. (a) Orientation of Y-plane. (b) Orientation of P-plane. (c) Orientation of R_1 -plane. The different colors represent the difference at contour interval of 2σ .

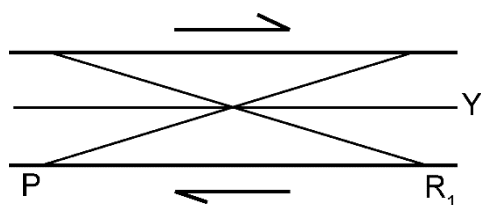


Fig.5 Schematic illustration of a structural relation of shear planes in the fault zone. Modified from Rutter et al. (1986)⁹⁾.

3.2 Site2 加茂露頭

加茂露頭は、平成 30 年 7 月豪雨で、吉野川河床に露出した約 30 m×約 20 m の断層帯の露頭である (Fig. 6)。

(1) 断層帯の産状

ここでは、和泉層群の堆積岩と三波川変成岩類が接している産状が観察される (Figs. 6 and 7a)。本露頭は、変動地形学的に判読された中央構造線活断層系のリニアメントの延長上に位置する。すなわち、本露頭では中央構造線と中央構造線活断層系が地表で一致して分布していると考えられる。

断層帯は、主に和泉層群の泥岩起源の断層ガウジ、和泉層群の砂岩および泥岩起源の断層角礫、三波川変成岩類の塩基性片岩、および泥質片岩起源の断層ガウジから成る。和泉層群起源の断層ガウジは、主断層に沿って幅約 10 cm で観察され、青黒色を呈する (Fig. 7b)。また、三波川変成岩類起源の断層ガウジは、原岩によって様々な色を呈しており、泥質片岩起源だと青灰色、塩基性片岩起源だと明緑灰色であると考えられる。その中に

は、破碎岩片の P 面に沿った配列や R_1 面が明瞭に発達しており、岩片の回転を伴う σ 組織も観察される (Figs. 7b and c)。一方、和泉層群の断層角礫帯で観察される 0.3–20 cm 程度の黒色の一部の破碎岩片は、よく円磨されている。また断層角礫帯には明瞭な剪断面は発達していない (Fig. 7d)。

(2) 断層帯の内部構造

主断層の姿勢は、 $N63^\circ E40^\circ N$ である (Fig. 6)。露頭で観察された Y 面、P 面、 R_1 面の情報をステレオネット上に示した (Fig. 8)。Y 面の卓越方向は、 $N60^\circ E62^\circ N$ (Fig. 8a)、P 面の卓越方向は、 $N43^\circ E54^\circ N$ (Fig. 8b)、 R_1 面の卓越方向は、 $N74^\circ W90^\circ$ (Fig. 8c) である。これらの卓越方向からも、右横ずれ運動を反映していると考えられる (Fig. 5)。

(3) 断層帯の応力場

加茂露頭では、剪断方向、剪断センスが分かるデータが複数得られた。その断層スリップデータを Fig. 9a に示している。この図では、断層面の極がステレオネット上で示され、矢印は下盤の滑り方向を表している。剪断センスが不明なデータは、矢印ではなく、線分で示されている¹⁰⁾。本研究で得られた 14 個のデータを元に、Hough 法¹¹⁾による応力逆解析プログラムを用いて、応力場を推定した。その結果、検出された応力場は 2 種類であり、A：東西方向に σ_1 、鉛直に近い σ_3 を持つ逆断層型応力場、B：北西–南東方向の σ_1 、鉛直～南西方向の σ_3 を持つ横ずれ～逆断層型応力場であることが分かった (Fig. 9b)。

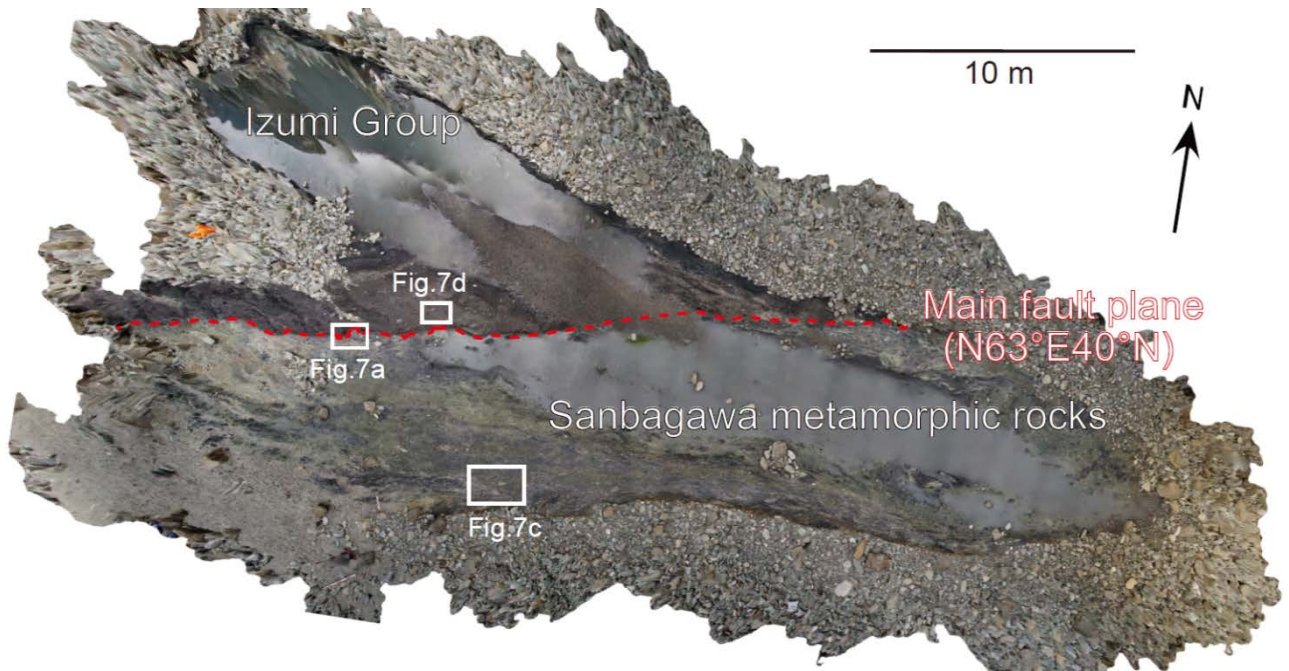


Fig.6 Overall picture of the fault damage zone of the MTLAFS in the Kamo outcrop.

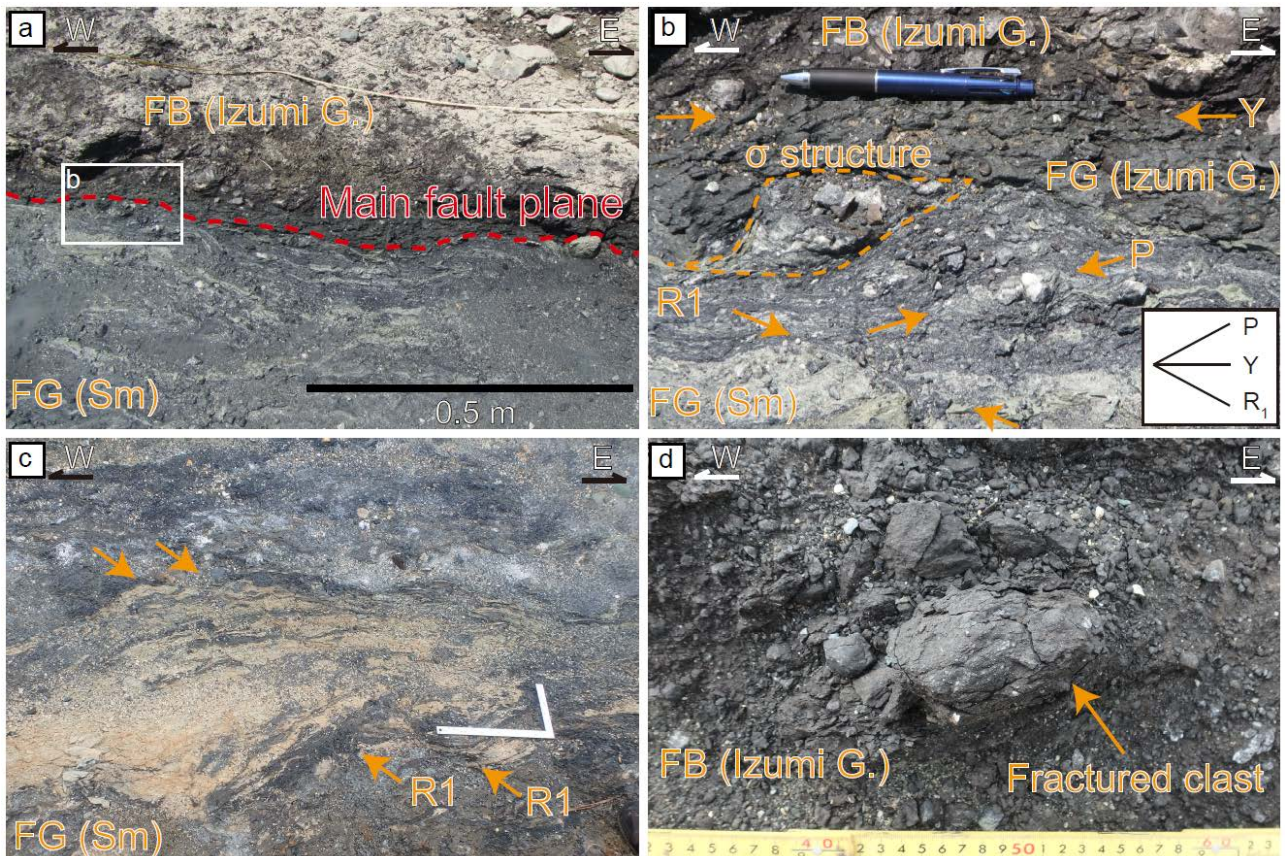


Fig.7 Occurrences of the fault zone of the MTLAFS in the Kamo outcrop. (a) Photograph of the main fault plane of the MTL. (b) Closed up photograph around the main fault plane. Y : main fault plane, P : P-foliation, R₁ : Riedel shear. (c) Photograph of fault gouge from the Sanbagawa metamorphic rocks. (d) Photograph of fault breccia from the Izumi Group. FG : fault gouge, FB : fault breccia.

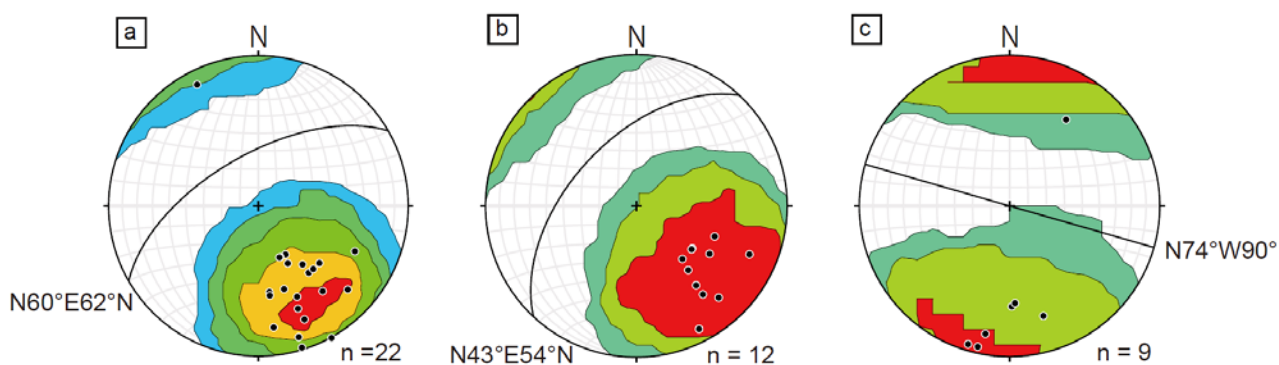


Fig.8 The predominant directions of each shear plane in the Kamo outcrop. (a) Orientation of Y-plane. (b) Orientation of P-plane. (c) Orientation of R_1 -plane. The different colors represent the difference at contour interval of 2σ .

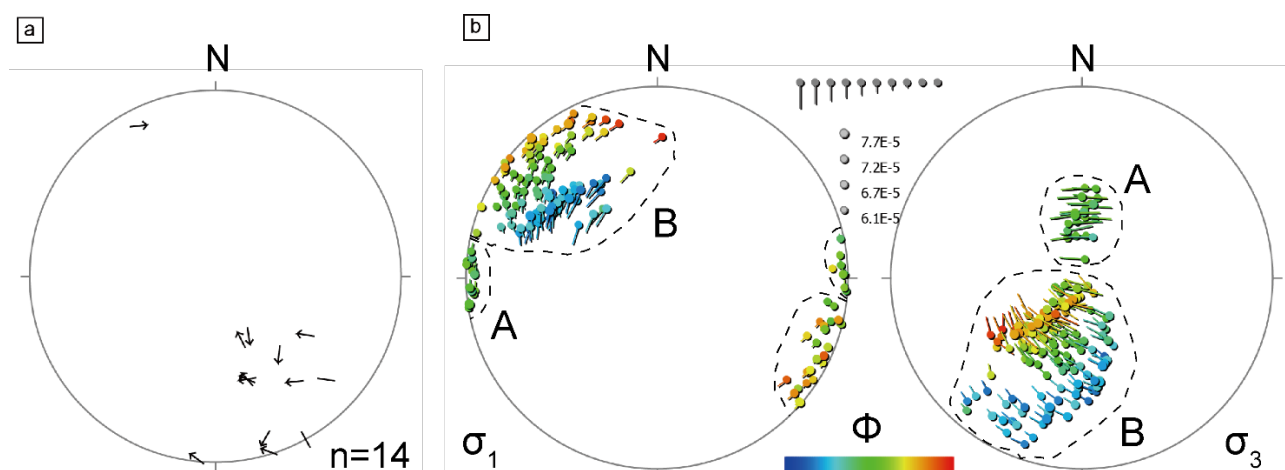


Fig.9 Stress fields estimated using slip data from the faults of the fault zone in the Kamo outcrop. (a) Tangent lineation diagram (Twiss and Gefell, 1990)¹²⁾ of the full ($n=12$) and line-only ($N=2$) fault-slip data obtained from the minor faults. (b) Results of Hough transform inverse method (Yamaji et al. 2006), with estimated stresses being shown in lower-hemisphere stereograms. The color of the symbols indicates the value of the stress ratio, $\Phi = (\sigma_2 - \sigma_3) / (\sigma_1 - \sigma_3)$.

4. 考察

4.1 中央構造線活断層系の断層露頭発見の意義

我々は2か所の中央構造線活断層系の断層露頭を報告した。Site1 箸蔵露頭では、財田層相当の礫層と、和泉層群とが接しており、断層コアは和泉層群および財田層起源の断層ガウジで構成されている (Fig. 3)。その内部には、三波川変成岩類起源の断層ガウジも挟在する (Fig. 3)。一方で、Site2 加茂露頭では、和泉層群と三波川変成岩類が直接接する (Figs. 6 and 7)。

四国地域では、一般に、中央構造線および中央構造線活断層系に沿って高速道路が建設されてお

り、その建設工事に伴い一時的に断層露頭が露出したが、現在は観察できない¹³⁾。そのため、中央構造線および中央構造線活断層系の断層露頭の保存は限定的であり、新規の露頭報告も少ない。さらに、四国中部～西部では、中央構造線に沿って石鎚層群が分布しており¹⁴⁾、和泉層群と三波川変成岩類の境界は不明瞭であることが多い。今回、我々が報告した箸蔵露頭および加茂露頭は、活断層トレースと一致し、断層帯中の構造や接する礫層の様相からも、第四紀以降、ごく最近まで活動している痕跡を残している活断層露頭である。今回報告した記載に基づいて、今後、断層帯から得

られた断層岩の分析を行うことで、中央構造線の活動性評価に資する情報が得られることが期待される。

また、徳島県では、条例で「特定活断層調査区域」が指定されており、中央構造線活断層系の直上に、多数の人が利用する建築物や危険物を貯蔵する施設などの特定施設を建設しないよう定められている。そのため、中央構造線活断層系の正確な位置情報は、地域における地震防災に大きく貢献する。

4.2 四国東部の中央構造線活断層系の活動

中央構造線は、第四紀以降も中央構造線活断層系として、継続して活動しているが、その活動は四国内で一様ではない。例えば、四国西部では、中央構造線の北側に中央構造線活断層系が分布している。一方で、四国東部では、中央構造線と中央構造線活断層系はほとんど一致している。これら分布形態の違いは、第四紀以降の応力場と断層の活動環境の違いを反映していると考えられている⁴⁾。

本調査地域周辺での中央構造線の活動は、三豊層群財田層の結晶片岩礫の分布などから、前期鮮新世～中期更新世に逆断層運動が優勢であったと考えられている¹⁵⁾。また、岡田(1968)¹⁶⁾によれば、約3万年前以降の池田断層の右横ずれ変位速度は約7 m/千年、南低下の上下変位速度は約1.7 m/千年と求められており、右横ずれ運動がおおよそ4:1の割合で優勢であるとしている。

ここで、箸蔵露頭および加茂露頭で計測した剪断面に着目すると、その複合面構造(Y-P-R₁)の関係は、右横ずれ運動センスを示しており、剪断面の配列は、第四紀以降の右横ずれ卓越の運動方向を反映していることが分かる(Figs. 4 and 8)。一方で、箸蔵露頭で観察された礫層起源の断層ガウジは、後期鮮新統～前期更新統の財田層堆積後に、主断層面に沿って継続的に断層活動が繰り返されていたことを示唆する。さらに、断層ガウジ中の礫の長軸が断層面に沿って、縦方向に配列していることから、縦ずれ変位の影響を受けていると考えられる(Fig. 3)。さらに、中央構造線活断層系の断層帯中の剪断面より推定された応力場はA:東西圧縮の逆断層型応力場、B:北西-南東圧縮の逆断層～横ずれ断層型応力場である(Fig. 9)。

得られた2種類の応力場の順序関係は不明であるが、これらの応力場は前期鮮新世～中期更新世の逆断層運動が優勢であった時期の応力場、もしくは第四紀後期の逆断層運動を伴う右横ずれ断層運動を引き起こした応力場を反映している可能性がある。

M≤5.0の地震データからインバージョン解析によって、求められた日本列島の深度10 km付近の応力場のうち、四国東部の広域的な応力場は、東西圧縮および北西-南東圧縮の横ずれ断層型応力場であるが、本調査地域周辺では、部分的に逆断層型応力場が混在している¹⁷⁾。このように、地震インバージョン解析から推定された地下の応力場と、今回地表の断層露頭より取得した情報から推定された応力場は調和的である。このことは、本露頭で観察された断層帯は、最近の中央構造線活断層系が活動した記録をよく保存していることを示している。

5. まとめ

今回、我々は中央構造線活断層系の2か所の断層露頭(箸蔵露頭および加茂露頭)を報告した。箸蔵露頭では、和泉層群と第四紀礫層が中央構造線活断層系で接しており、断層帯の連続的な変化を観察できる。加茂露頭では、和泉層群と三波川変成岩類が中央構造線活断層系で境される。

箸蔵露頭および加茂露頭の、断層帯中の剪断面の卓越方向からは、おおよそ右横ずれ運動センスが読み取れる。しかし、加茂露頭では、横ずれ断層型に加えて逆断層型応力場も示しており、第四紀の中央構造線活断層系の運動方向と調和的である。また本調査結果は、地震インバージョン解析により推定された広域応力場とも一致している。

四国地域では、中央構造線活断層系の性状を観察できる露頭が限られ、その性状は不明な点が多い。そのため中央構造線活断層系の新たな断層露頭の情報は、中央構造線活断層系の断層活動を考える上で、極めて重要である。また、徳島県では、条例で「特定活断層調査区域」が指定されており、中央構造線活断層系の詳細な位置情報は、地震防災上重要であると考えられる。

今後、今回報告した断層露頭において、詳細な観察と分析を行い、さらに詳細な中央構造線活断層系の活動性評価に資する情報を取得したい。

【謝辞】

本研究を実施するにあたり、徳島大学の村田明広名誉教授には、加茂露頭と周辺の中央構造線について現地でご教授頂いた。三好市役所観光戦略課の殿谷梓氏、東みよし町文化財保護審議会の藤枝主市氏、島尾明良氏には、現地調査にご同行頂き、有益な議論をして頂いた。また、本研究は、四国電力(株)土木建築部殿より委託を受け実施したものである。ここに、記して感謝申し上げます。

【参考文献】

- 1) Kobayashi T (1941) : 「The Sakawa orogenic cycle and its bearing on the Japanese Island」, Jour. Fac. Sci. Univ. Tokyo, Sec. 2, 5, 219-578.
- 2) 高木秀雄 (1997) : 「中部地方領家帯のマイロナイト化の時期」, 月刊地球, 19, 111-116.
- 3) Kubota Y and Takeshita T (2008) : 「Paleocene large - scale normal faulting along the Median Tectonic Line, western Shikoku, Japan.」, Island Arc, 17, 129-151.
- 4) 池田倫治, 後藤秀昭, 堤浩之 (2017) : 「四国西部の中央構造線断層帯の地形と地質」, 地質学雑誌, 123, 7, 445-470.
- 5) Noda A and Toshimitsu (2009) : 「Backward stacking of submarine channel-fan successions controlled by strike-slip faulting: The Izumi Group (Cretaceous), southwest Japan.」, Lithosphere, 1, 41-59.
- 6) Wallis, S. R., Anczkiewicz, R., Endo, S., Aoya, M., Platt, J. P., Thirlwall, M., and Hirata, T. (2009) : 「Plate movements, ductile deformation and geochronology of the Sanbagawa belt, SW Japan: tectonic significance of 89 – 88 Ma Lu– Hf eclogite ages. 」, Journal of Metamorphic Geology, 27, p. 93 – 105.
- 7) 野田篤, 植木岳雪, 川畑博, 松浦浩久, 青矢睦月 (2017) : 「観音寺の地質. 地域地質研究報告 (5 万分の 1 地質図幅)」, 産総研地質調査総合センター, 96p.
- 8) 松浦浩久, 栗本史雄, 吉田史郎, 斎藤文紀, 牧本博, 利光誠一, 巖谷敏光, 駒澤正夫, 広島俊男 (2002) : 「岡山及丸亀の地質. 地域地質研究報告 (20 万分の 1 地質図幅)」, 産総研地質調査総合センター.
- 9) Rutter, EH., Maddock, R. H., Hall, S. H., White, S. H. (1986) : 「Comparative microstructures of natural and experimentally produced clay-bearing fault gouges.」, Pure Appl Geophys 124, 3-30.
- 10) Sato K (2006) : 「Incorporation of incomplete fault-slip data into stress tensor inversion.」, Tectonophysics, 421, 319-330.
- 11) Yamaji A, Otsubo, M, Sato, K (2006) : 「Paleostress analysis using the Hough transform for separating stresses from heterogeneous fault-slip data」, J. Struct. Geol., 28, 980-990.
- 12) Twiss R. J. and Gefell, M. J. (1990) : 「Curved slickenfibers: a new brittle shear sense indicator with application to a sheared serpentinite」, J. Struct. Geol., 12, 471-481.
- 13) 高橋治郎 (1992) : 「中央構造線の破碎帯」, 破碎帯の工学的性質に関するシンポジウム 発表論文集, 社団法人土質工学会, 5-8.
- 14) 田村栄治・長谷川修一・渡辺弘樹・宮田和幸・谷田部龍一・内田純二 (2007) : 「中央構造線沿いの熱水変質に起因する地すべり」, 地すべり, 44, 222-236.
- 15) 植木岳雪・満塩大洸 (1998) : 「阿讃山地の隆起過程: 鮮新～更新統三豊層群を指標にして」, 地質学雑誌, 104, 247-267.
- 16) 岡田篤正 (1968) : 「阿波池田付近の中央構造線の新期断層運動」, 第四紀研究, 7, 15-26.
- 17) Terakawa T and Matsu'ura M (2010) : 「The 3-D tectonic stress fields in and around Japan inverted from centroid moment tensor data of seismic events」, Tectonics, 29, TC6008.

歪センサによる高温環境下配管内圧力監視技術に関する研究

(株)四国総合研究所 産業応用技術部 白石 浩造
(株)四国総合研究所 産業応用技術部 高瀬 浩行

キーワード： 歪センサ
高温環境下
配管
圧力監視
見かけ歪
定着用治具
温度エージング

Key Words : Strain sensor
Under high temperature environment
Piping
Pressure monitoring
Apparent strain
Jig for the fixation
Temperature aging

Study on pressure monitoring technology in the piping under the high temperature environment using strain sensor

Shikoku Research Institute, Inc., Industry Application Technology Department
Kozo Shiraishi, Hiroyuki Takase

Abstract

In the maintenance of nuclear power plants, it is important to accurately monitor the condition of the equipment under various environments. However, even heat-resistant pressure gauges may be difficult to monitor under the high temperature environments such as those above 100°C due to severe accidents. As a solution to this problem, pressure monitoring technology in the piping under the high temperature and the high pressure environment with high accuracy and for a long period of time was investigated by measuring electrical resistance strain using a strain sensor corresponding to high temperature.

An experimental apparatus was assembled to simulate the pressure monitoring (maximum 21MPa) in the primary coolant sampling pipe under the high temperature environment (maximum 190°C), and to use a strain sensor (heat resistant 250°C) of the adhesive type, which does not require any modification of the pipe by welding, etc. As a result, we confirmed that the pressure in the piping could be monitored with an accuracy of $\pm 2\%$, which is almost the same as that at room temperature, during a continuous test of about 2 hours by applying a jig for the fixation and an appropriate temperature aging method.

In the case of a severe accident, the pressure in the piping may need to be monitored under the high temperature environment for a long time. Therefore, we conducted long-term experiments under the high temperature environment of 190°C and the pressure in the pipe was maintained at 21 MPa. As a result, we confirmed that the pressure in the pipe can be monitored within 30 days with an accuracy of less than $\pm 20\%$.

1. はじめに

原子力発電所の設備保全において、様々な環境下における設備の状態を正確に監視することは重要である。しかし、過酷事故等による 100℃を超えるような特殊な高温環境下では、耐熱型の圧力計であっても圧力監視が困難となる可能性がある。このため、高温環境下においても配管内の圧力監視が可能となれば、過酷事故発生時等におけるプラント状態をより詳細に把握することが可能となる。

そこで、過酷事故等におけるプラント内部の状態を想定し、高温に対応した歪センサを使用した電気抵抗歪測定により、高温環境下の配管（一次冷却材系統配管等）内の圧力を高精度かつ長期間監視するための技術について検討を行った。

2. 電気抵抗歪測定の概要

2.1 電気抵抗歪測定の原理

歪センサの例を図 1 に示す。

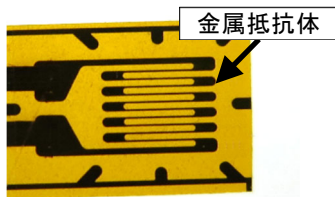


図 1 歪センサの例（箔ゲージ）

歪測定はその目的によって狭域範囲測定と広域範囲測定に分類される。電気抵抗歪測定は前者に属し、歪値 ε が 10^{-6} の分解能において動的・静的歪測定が可能、かつ安価で取扱いが容易である。そのため、最も広く使用されている歪測定方法である。測定は歪センサ（種類：箔ゲージ、半導体ゲージ、線ゲージ等）を被測定物の表面に専用接着剤または点溶接器にて設置することにより、被測定物に生じた歪は接着剤等の設置面を介して歪センサ内部の金属抵抗体（歪受感部）に伝わり、外部からの力（引張力、圧縮力）に対し、金属抵抗体の電気抵抗が変化（増加、減少）する。ここで、力が加わる前の金属抵抗体の電気抵抗値を R 、抵抗値変化を ΔR とすると、金属抵抗体に生じた歪値 ε は以下の関係式で表すことができる。

$$\frac{\Delta R}{R} = K_s \cdot \varepsilon \quad (1)$$

(K_s : 金属抵抗体材質による定数、ゲージ率)

式(1)における歪値 ε による抵抗値の変化分 ΔR は前述のように非常に微小であるため、図 2 に示すホイートストンブリッジ回路によって ΔR を電圧変化に変換することができる。

ここで、ホイートストンブリッジ回路における平衡状態時の各抵抗値を R_1, R_2, R_3, R_4 とし、その 1 辺 R_1 を歪センサ（1 ゲージ法）とした場合、ブリッジの印加電圧値を E とすると、被測定物に生じた歪値 ε に対して生じる出力電圧値 e_0 は以下の比例式で表される。

$$e_0 = \frac{1}{4} \cdot K_s \cdot \varepsilon \cdot E \quad (2)$$

(ホイートストンブリッジ回路、1 ゲージ法)

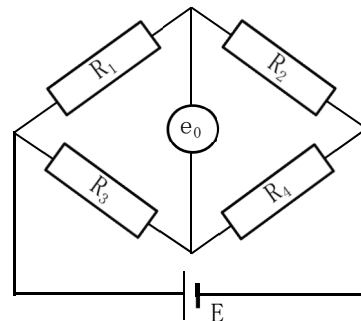


図 2 ホイートストンブリッジ回路

2.2 歪センサによる配管内圧力測定

配管内圧力 P により配管表面の周方向に生じる応力 σ を評価する式には通常薄肉円筒式と厚肉円筒式が用いられ、2 つの評価式は以下のように表すことができる¹⁾。

$$\text{薄肉円筒式 : } P = \frac{r_2 - r_1}{r_1} \sigma \quad (3)$$

$$\text{厚肉円筒式 : } P = \frac{r_2^2 - r_1^2}{2r_1^2} \sigma \quad (4)$$

ここで、 r_1 （内径）、 r_2 （外径）は固定値であるため、式(3)、式(4)のいずれの場合も、配管内の圧力 P は配管表面の周方向応力 σ に比例することがわかる。したがって、配管周方向の応力 σ が測定できるように歪センサを設置することで、歪値 ε から配管内圧力 P が測定できる。

2.3 電気抵抗歪測定における問題点

被測定物に設置された歪センサは外力による歪が生じていない無負荷状態においても零点が変動（見かけ歪によるドリフトが発生）する場合がある。見かけ歪の要因の例を以下に示す。

- ・ 接着剤の硬化不足（接着不良）
- ・ 接着剤や歪センサの吸湿
- ・ 歪センサにおいて発生するジュール熱
- ・ 温度環境（100℃以上）

このため、歪を高精度に測定するには見かけ歪の要因を取り除く必要がある。特に、100℃以上の高温環境下に対応した歪センサは耐熱性を高めるため Cu-Ni や Ni-Cr、および Pt-W 等の合金が歪受感部材に使用されている。合金の特性上、温度による見かけ歪は $\pm 0.01\%/^{\circ}\text{C}$ 程度であるため、ほとんど温度変動のない常温環境下では無視できるが、急激な温度上昇を伴う場合は見かけ歪の発生を無視できなくなる。このため、本実験における重要な課題は温度変動が激しい高温環境下での見かけ歪の除去手法にある。

3. 配管内圧力監視技術の検討

3.1 実験装置と圧力監視手順

図 3 に配管内圧力監視実験の状況を示す。これは高温環境下（最高 190℃）での一次冷却材サンプリング配管内の圧力（最高 21MPa）監視を模擬するために構築した実験装置であり、本装置では接着型の歪センサ（耐熱 250℃）を用いることで溶接等による配管改造が不要等の特徴を有する。

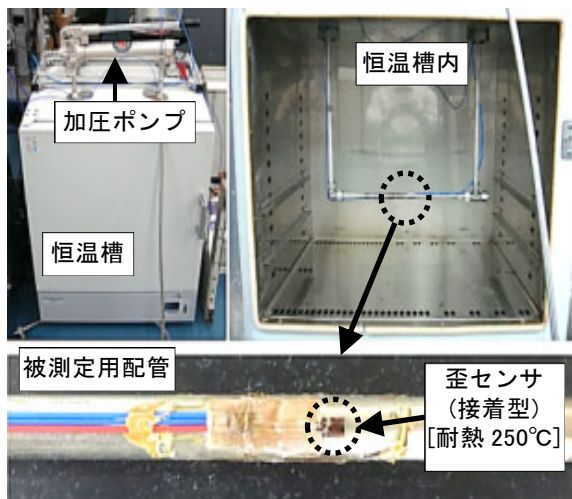


図 3 配管内圧力測定実験の状況

ここで、本装置を使用した実験における配管内の圧力測定では急激な温度変化による見かけ歪を取り除くため、以下の手順とした。

- ・ 恒温槽内（常温～190℃）に被測定用配管（一次冷却材サンプリング配管 SUS304 と同仕様）

を設置

- ・ 恒温槽上部の加圧ポンプにより配管内の水圧を調整（3～21MPa）
- ・ 配管表面に歪センサ（接着型）を設置
- ・ 配管の内部圧力、温度、表面歪データを採取
- ・ 事前に導出した圧力と歪、および温度と見かけ歪の関係式を用いて、測定した表面歪から見かけ歪を取り除いた後に圧力に換算

3.2 高精度歪測定のためのセンサの接着方法

高温接着型の歪センサは接着剤が完全に硬化するまで数時間連続して加熱する必要がある。この時、接着不良を防止し、かつ高精度な歪測定を実現するためには、加熱中に歪センサを均等に加圧（外側から締付固定）する処理方法が重要となる。そこで、図 4 に示す歪センサを均等に定着させるための治具を用いることとした。

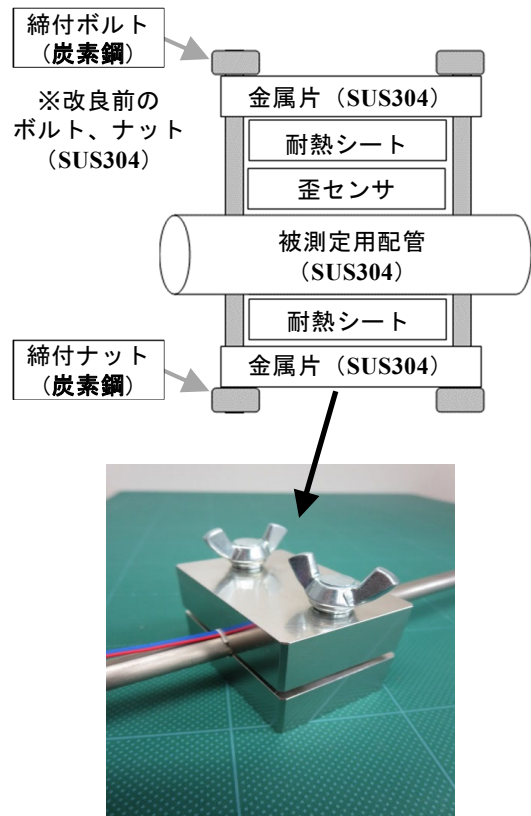


図 4 歪センサ定着用治具

当初は金属片、締付部ともに被測定用配管と同じ SUS304 としていたが、加熱後に締付部が緩むことによる接着不良が多発した。そこで、締付部の材質を SUS304（膨張係数： $17.3 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ ）

から炭素鋼（膨張係数： $10.8 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ ）に変更したところ、接着不良の発生率が約 60%から約 10%に減少することがわかった。

3.3 高精度歪測定のための温度エージング処理

3.2 項で述べた歪センサの接着を実施するとともに、3.1 項の圧力監視手順による様々な温度や圧力条件における配管内の圧力測定実験を行った結果、事前に温度エージング（歪センサや接着部を常温～190℃に曝す処理）を実施することで測定精度が大幅に向上することがわかった。

ただし、図 5 上に示すように温度エージング 1 回では温度変化時における圧力と歪との乖離幅が大きいことがわかった。そこで、図 6 に示すように温度エージングの回数と見かけ歪の関係を調査した結果、温度エージング回数が増加するほど温度と見かけ歪との関係が安定し、7～9 回実施したところで、ほぼ収束することがわかった。

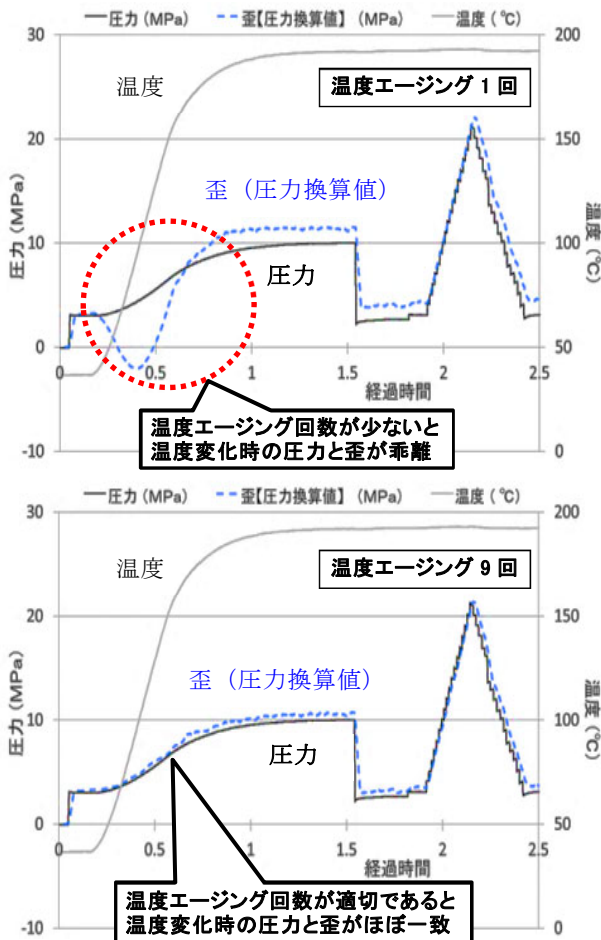


図 5 配管内圧力の連続測定実験（約 2 時間）

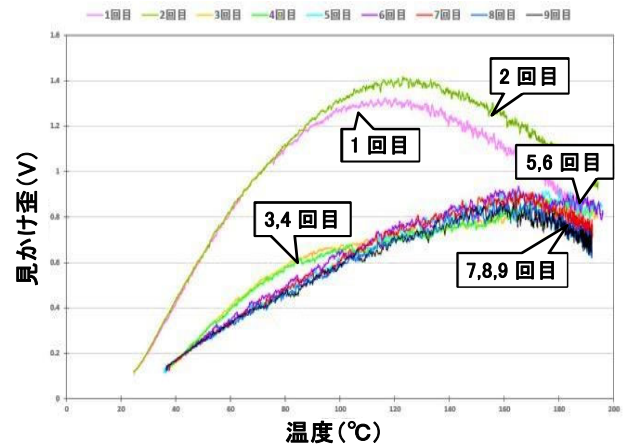


図 6 温度エージング回数に対する見かけ歪

その結果、図 5 下に示すように温度エージングを 9 回実施した場合には、圧力と歪（圧力換算値）がほぼ一致し、約 2 時間の連続試験において常温時とほぼ同じ $\pm 2\%$ の精度で配管内圧力が測定できることを確認した。

3.4 各温度、各歪値における圧力換算係数の確認

各温度や各歪の組合せにおいて見かけ歪除去後の圧力換算係数が変化すると仮定した場合、図 5 と異なる測定条件下では $\pm 2\%$ の測定精度が得られない可能性がある。そこで、各温度、各歪における配管内圧力を測定した結果を図 7 に示す。

同図より図 6 と同様に各温度に対して見かけ歪が発生するが、温度を固定した状態かつ見かけ歪（切片）を除去した後の歪と圧力は比例関係にあり、かつ比例定数（傾き）は温度にかかわらずほぼ一定であることがわかる。したがって、各温度や各歪の組合せにおける圧力換算係数は一定であり、図 5 と異なる測定条件下でも測定精度を低下させる要因とはならないことがわかった。

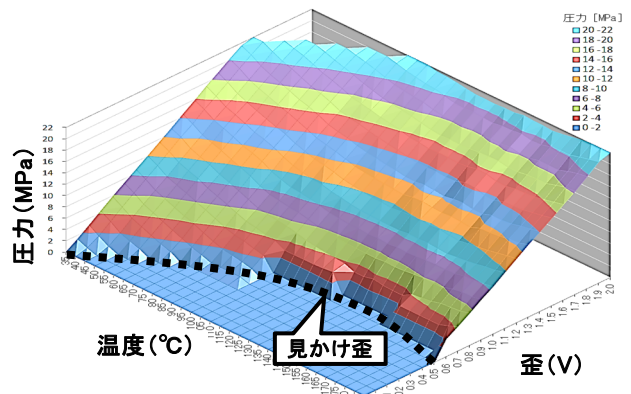


図 7 各温度、各歪における配管内圧力測定値

以上の結果からも、温度による見かけ歪の除去が歪センサによる配管内圧力測定精度において最も重要な要素であることが再確認できた。

3.5 歪センサによる配管内圧力の長期監視実験

過酷事故等が発生した場合、長期にわたって高温環境下における配管内圧力監視が必要になることが想定される。そこで、190℃の高温環境下かつ配管内圧力を 21MPa に維持した状態で長期監視実験を実施した結果を図 8 に示す。同図より、歪センサや接着部を高温環境下に長時間曝したことによる材質劣化等の影響と思われる測定誤差が徐々に増大するが、30 日以内であれば±20%未満の精度で配管内圧力を測定できることを確認した。

なお、高温環境下に長時間曝したことによる材質劣化等の影響については、温度エージングの適用時間や回数等を増加させることで、より安定化する可能性がある。このため、配管内圧力の長期監視が必要な場合については、最適な温度エージング方法や回数等についてさらなる検討を進める必要があると思われる。

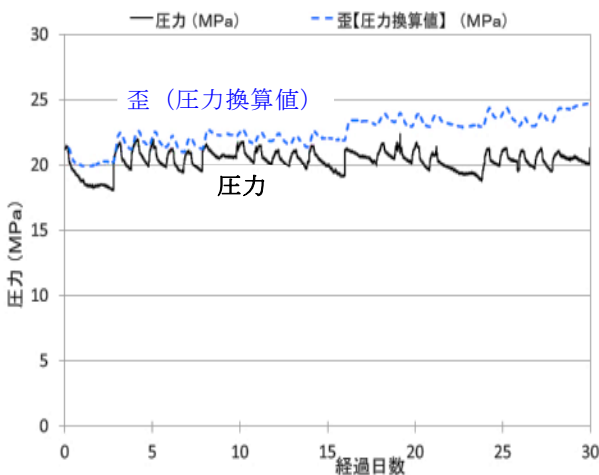


図 8 配管内圧力の長期監視結果
(190℃環境下で 30 日間監視)

4. 考察

本研究では高温に対応した歪センサにより、高温環境下において配管内圧力が高精度に測定できることを確認した。ただし、圧力測定の安定度や測定精度をさらに向上させるためには対象物や温度・圧力条件に応じた最適な固定方法の選定

や、最適な温度エージング方法や回数が重要であることを確認した。

特に、現場配管への歪センサ接着や、その後の温度エージングを実施する際には、配管ごと加熱する必要があるため、現場配管の効率的かつ安定的な加熱・保温方法についても検討を実施する必要がある。

また、歪センサについては高い耐放射線性を有することが一般的に知られているが、接着材質によっては放射線による劣化等が生じる可能性があるため、高放射線下における接着部を含めた歪の測定精度についても確認しておく必要があると思われる。

5. まとめ

本研究では過酷事故等による 100℃を超えるような高温環境下においても、高温に対応した歪センサを活用することにより、配管等を改造せずに配管内の圧力が長期間にわたって高精度に測定できることを確認した。

また、本検討結果は高温環境下に限らず適用できるため、プラント状態監視の多様化が期待でき、トラブルの未然防止やトラブル発生時における原因究明等にも役立つ可能性があると思われる。さらに、監視装置を簡便かつ安価に構築できることから、プラント監視の効率化やコスト低減が期待できる。

【謝辞】

本研究は、四国電力(株)原子力本部殿より委託を受け実施したものであり、ご協力いただいた関係各位に深く感謝いたします。

【参考文献】

- 1) 前川 晃、辻 峰史、高橋 常夫、加藤 稔：「配管表面ひずみを用いた管内圧力脈動の測定方法の考察」, INSS JOURNAL Vol.20 NT-3, pp.56-71, 2013

矩形水槽における非線型スロッシング波高の評価

(株)四国総合研究所 エネルギー技術部 小川口 深雪
(株)四国総合研究所 エネルギー技術部 野口 新二

キーワード: スロッシング
矩形水槽
非線型
固有振動数
応答曲線
背骨曲線
Miles
Duffing 方程式
補正式
粒子法
MPS 法

Key Words: sloshing
rectangular tank
non-linear
natural frequency
response curve
backbone curve
Miles
Duffing equation
correction formula
particle method
Moving Particle
Semi-implicit method

Evaluation of Nonlinear Sloshing Wave Height in Rectangular Tank

Shikoku Research Institute, Inc., Energy Engineering Department
Miyuki Ogawaguchi, Shinji Noguchi

Abstract

We have verified a non-linear theory for estimating the sloshing wave height in a rectangular tank by experiments. A rectangular tank with width L and water level H was sine-wave excited in the width direction. As a result, a traveling wave was observed when the H/L was small, and a standing wave was observed when the H/L was large, and it was confirmed that the wave behavior was different depending on the water depth. By comparing the Miles's backbone curve (the curve at the center of the response curve) with the experimental value to evaluate the wave height, it was found that the error from the experimental value was increase when H/L was small. Therefore, we proposed a correction formula and could reduce the error from the experimental value over H/L in all regions. Moreover, by applying the Duffing equation to the correction formula, we were able to calculate the response curve.

The results of applying the Moving Particle Semi-implicit (MPS) method to sloshing analysis were in good agreement with the corrected theoretical formula and experimental values, and the validity of the analysis was confirmed. From the both sides of analysis and theory, it was possible to estimate the maximum wave height with high accuracy. By improving the analysis accuracy, it is possible to study flooding without simulated experiments, and cost reduction can be expected.

1. はじめに

液体貯槽やタンクにおいて、地震時に発生するスロッシングは防災上重要な問題である。スロッシングの解析は、液面変動が微小の場合は線型理論を適用できるが、水滴の飛び散りや、溢流が生じるほどの大きな変位の場合には非線型性を考慮する必要性が出てくる。そのため、周期的に加振した矩形水槽中に生じるスロッシング波高推定において、非線形性を考慮した理論を実験によって検証した。また、スロッシング現象の数値解析として粒子法を採用し、解析結果を角振動数応答理論および実験結果と比較することによって、数値解析の妥当性を確認した。

2. 非線形スロッシングの理論解

矩形水槽中の液体変動が小さく理想的な場合、液体の1次固有角振動数(2次元) ω_1 は(1)式で求められる。

$$\omega_1 = \sqrt{\frac{g\pi}{L} \tanh \frac{H}{L}} \pi \quad \dots (1)$$

ここで、 L は矩形水槽の幅、 H は液体の高さ、 g は重力加速度である。(1)式より固有角振動数 ω_1 は、液体の種類に関係なく、 H と L の比 H/L によって決まることがわかる。

矩形水槽に周期的な外力(角振動数 ω) を加えた場合、波高が最大となる角振動数は固有角振動数 ω_1 とは異なることが知られている。図1に示すように、角振動数比と波高の関係を示す応答曲線と背骨曲線(応答曲線の中心部の曲線)をプロットすると、共振ピークは H/L の値によって ω_1 より大きい値(赤線)や小さい値(青線)になる。

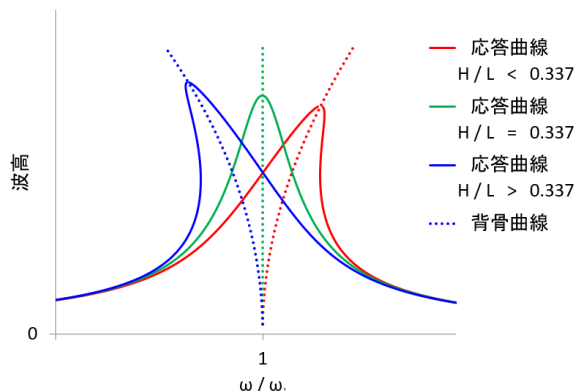


図1 応答曲線と背骨曲線

非線型スロッシングにおける背骨曲線は、Miles によって(2)式で与えられており¹⁾、スロッシングの波高は固有角振動数 ω_1 と外力の角振動数 ω の比によって変化する。ここで、 A は波の振幅である。

$$\left(\frac{\omega}{\omega_1}\right)^2 = 1 + \frac{1}{32} \left(\frac{\pi A}{L}\right)^2 (9T^{-4} - 12T^{-2} - 3 - 2T^2) \\ T = \tanh(H/L)\pi \quad \dots (2)$$

3. 実験方法および結果

3.1 実験方法

幅 $L = 0.30\text{m}$ の水の入った矩形水槽を加振台に載せ、幅方向へ水平加振する(図2)。加振する大きさは $x(t) = 0.015 \cdot \sin \omega t$ とした。ここで、 x は幅方向の移動量、 t は時刻である。

加振振動数 ($f = \omega/2\pi$) は、 $0.7\text{Hz} \sim 2.0\text{Hz}$ まで 0.1Hz 刻みで変化させ、その応答を観察した。ビデオカメラで撮影した画像から、振動数ごとに壁面における液面変位の最大値 $2A$ を計測した(図3)。

スロッシングは水深によって挙動が異なることが知られているため、実験では表1のように水深 H を $0.03 \sim 0.18\text{m}$ まで変化させた7ケースを実施した。

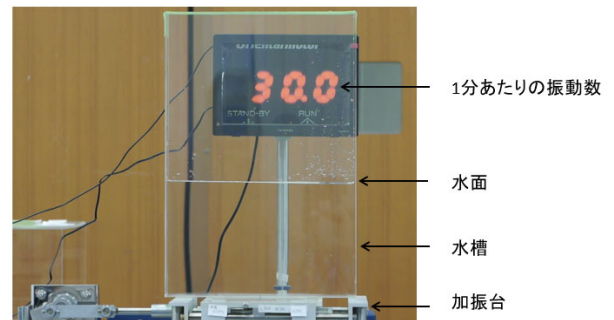


図2 実験装置

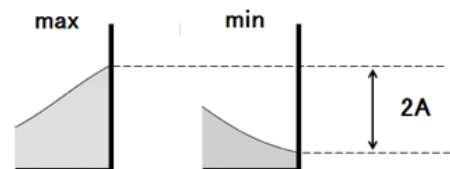


図3 液面変位の最大値

表 1 実験条件

case	H(m)	H/L	ω_1 (rad/s)
1	0.03	0.1	5.59
2	0.06	0.2	7.56
3	0.09	0.3	8.70
4	0.10	0.34	8.95
5	0.12	0.4	9.37
6	0.15	0.5	9.70
7	0.18	0.6	9.90

3.2 実験結果

波の様子を図 4 に示す。水深が浅い場合 ($H/L=0.1$) では津波のような進行波、深い場合 ($H/L=0.6$) では幅中央で節となり壁面で腹となる定常波が観察された。上方向に運動する波が尖り、下方向に運動する波は平坦になるという、非線形の特徴が出ていることがわかる。水深によって波の挙動が異なることが確認された。



$H/L=0.1$ 進行波



$H/L=0.6$ 定常波

図 4 進行波と定常波の観察

次に、液面変位の最大値を幅 L で除した無次元値と角振動数比を整理し、Miles の背骨曲線と比較した結果を図 5 示す。

実験における波高のピークは、 $H/L=0.34$ を境に $\omega/\omega_1 = 1$ の右側から左側に変化している。また、 H/L が小さい場合は波が小さく、 $H/L=0.34$ において波が最大となる。水平加振した矩形水槽の最大波高は、 H/L の値（つまり中の水の量）と外力の角振動数に拠ることがわかる。

Miles の式(2)は、 H/L が小さい場合 ($H/L=0.1$ 、 0.2) には、実験と大きくずれている。しかし、 H/L が大きくなると、実験との差は小さくなっていく。

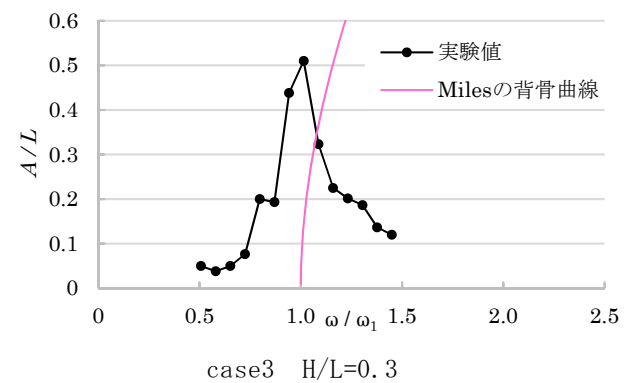
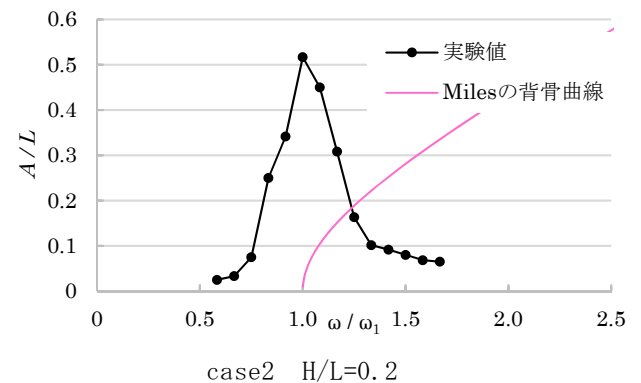
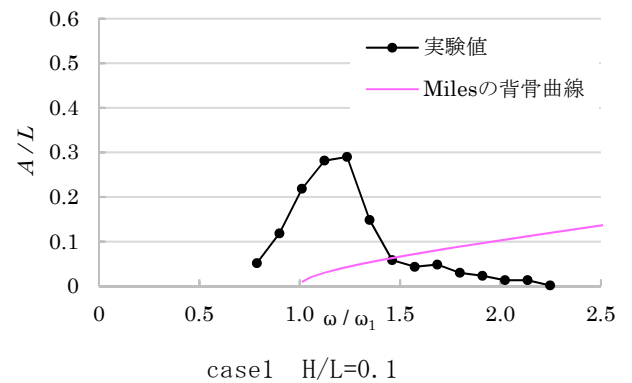


図 5 実験結果および背骨曲線 (case1~3)

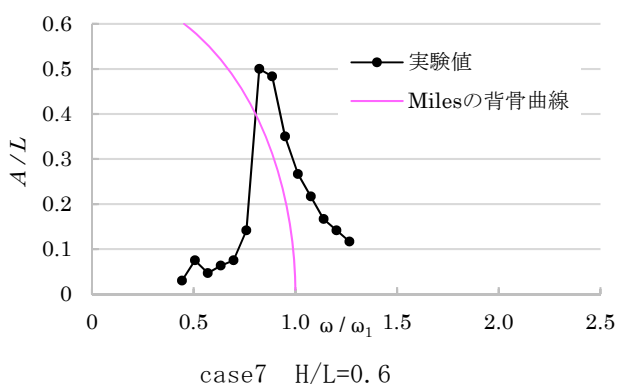
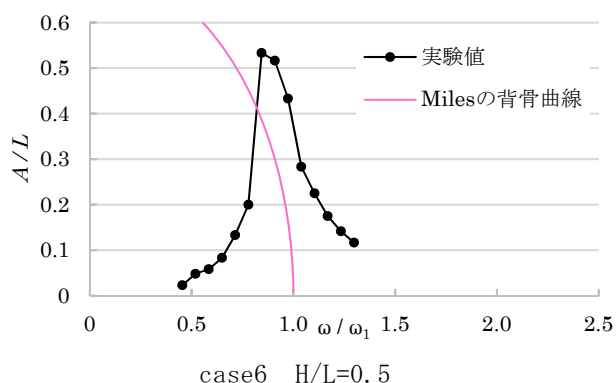
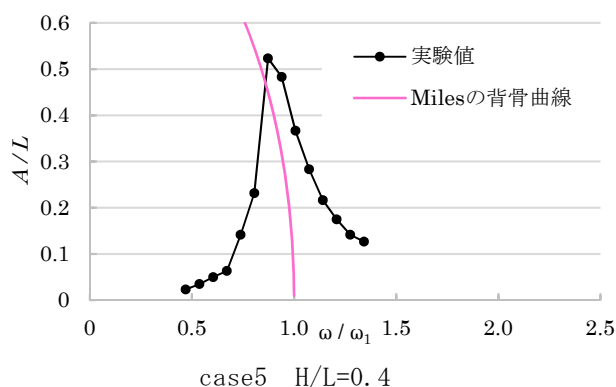
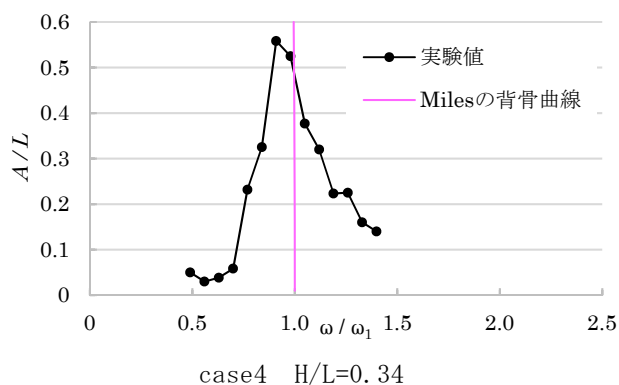
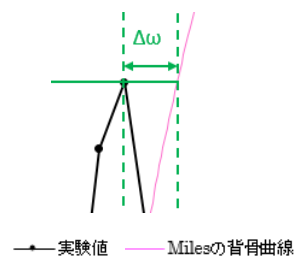


図5 実験結果および背骨曲線 (case4~7)

4. Miles の背骨曲線の補正

4.1 Miles の式と誤差

Miles の背骨曲線と実験値の比較を数値的に行った。実験値における最大振幅となる ω/ω_1 と、Miles の背骨曲線から求めた ω/ω_1 との差を図6のように誤差 $\Delta\omega$ とした。


 図6 誤差 $\Delta\omega$

H/L と $\Delta\omega$ の関係を求め、図7に示す。 H/L が小さい場合は誤差が加速的に大きくなるのがわかる。

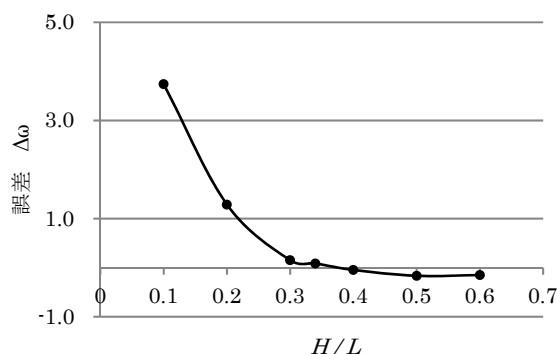


図7 実験値と Miles の背骨曲線との誤差

4.2 Miles の式の補正

Miles の背骨曲線は H/L が大きい場合は実験値とよく合うが、 H/L が小さい場合、誤差が大きい。そこで、 H/L の値によらず実験値のピークに背骨曲線が接近するような以下の補正式を考えた²⁾。

$$\left(\frac{\omega}{\omega_1}\right)^2 = 1 + \frac{1}{32} \left(\frac{\pi A}{L}\right)^2 (9T^{-4} - 12T^{-2} - 3 - 2T^2) \times \alpha_1 \left(\frac{H}{L}\right)^{\alpha_2} \quad \dots (3)$$

実験値と補正式との誤差が最小になるように α_1 、 α_2 を決定する。図8に示すように、 $\alpha_2 = 1, 2, 3$ と変化させると、 $\alpha_2 = 2$ のとき誤差を最小化できることがわかった。その後、誤差がすべての H/L にわたって最小となる α_1 を求め、(4)式のように定数を決定した。これにより、3以上あった誤差を約0.1以下に低減できた。

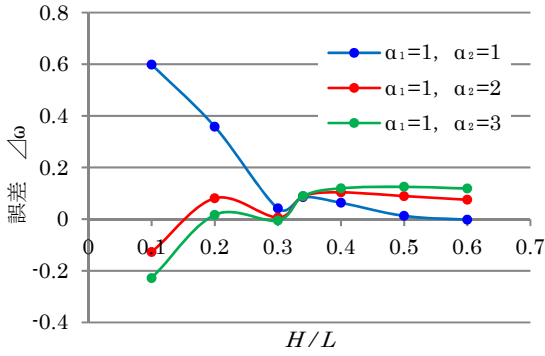


図8 補正式による実験値と背骨曲線との誤差の低減

$$\left(\frac{\omega}{\omega_1}\right)^2 = 1 + \frac{1}{32} \left(\frac{\pi A}{L}\right)^2 (9T^{-4} - 12T^{-2} - 3 - 2T^2) \times C$$

$$C = 1.7 \times \left(\frac{H}{L}\right)^2 \quad \dots (4)$$

また、非線型作用を考慮するために、1自由度の非線形ばね復元力を導入した Duffing 方程式を解くことで角振動数比 ω/ω_1 と振幅の関係式³⁾を(5)式のように表すことができる。ここで、 β はばねの特性を表したものである。

$$\left(\frac{\omega}{\omega_1}\right)^2 = 1 + \frac{3}{4} \beta A^2 - 2\zeta^2$$

$$\pm \sqrt{\left(1 + \frac{3}{4} \beta A^2 - 2\zeta^2\right)^2 - \left\{\left(1 + \frac{3}{4} \beta A^2\right)^2 - \frac{1}{A^2}\right\}}$$

$$\dots (5)$$

この式を(4)と比較することで、 β と H/L の関係を導くことができる。

$$\beta = \frac{1}{24} \left(\frac{\pi}{L}\right)^2 (9T^{-4} - 12T^{-2} - 3 - 2T^2) \times C$$

$$T = \tanh(H/L)\pi \quad \dots (6)$$

ここで、 ζ は減衰比である。本稿においては、加振停止後に液面が自由振動する波形から対数減衰率をもとめ、 $\zeta = 0.042$ とした。

スロッシングにおける非線型性は、この β に含まれている。 $\beta = 0$ となるのは、 $H/L \cong 0.34$ のときであり、これが線型応答に対応する。 $\beta > 0$ の

場合、変位とともにばね定数が大きくなるハードスプリング特性を示し、 $\beta < 0$ の場合、その逆のソフトスプリング特性を示す。水位が $H/L \cong 0.34$ より大きい小さいかによって背骨曲線の向きが変わり、スロッシングの挙動が変化することになる。

次に、補正後の背骨曲線と応答曲線を実験値と比較したものを図9、10に示す。 H/L によらず実験値と補正後の背骨曲線および応答特性の傾向がよく合っていることがわかる。これにより、スロッシングによる最大波高を計算で予想することができた。

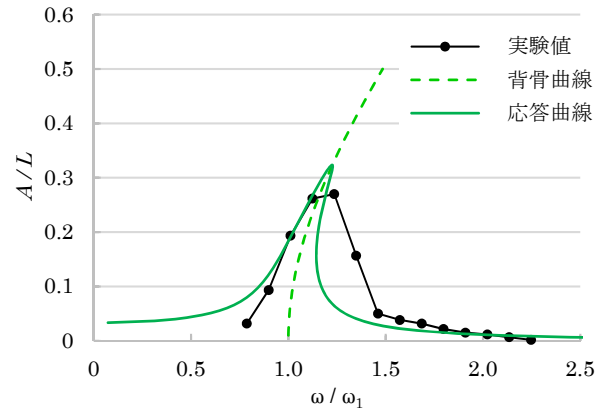


図9 $H/L=0.1$ の場合の応答特性

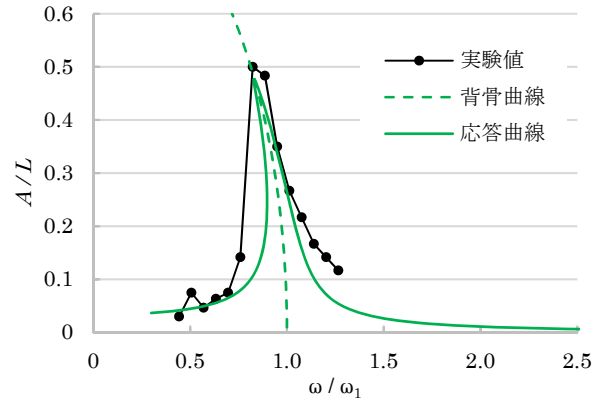


図10 $H/L=0.6$ の場合の応答特性

5. 粒子法による解析

5.1 粒子法とは⁴⁾

従来の流体解析手法（格子法）は、圧力や流速などの物理量を計算するために、メッシュと呼ばれる計算格子を用いる。メッシュは初期状態において流体が存在する領域だけでなく、流体が流動していく可能性もある領域も含めて、あらかじめ

設定しておく必要がある。流体は1つのメッシュから隣接するメッシュへと流動していき、このときメッシュごとに質量や運動量などの流入量、流出量が計算される。

格子法は流体の流れや飛散を予測して事前に解析領域を設定する必要があり、複雑な形状の解析にはメッシュを細かく設定する必要があること、およびメッシュの大変形を伴う解析ではメッシュが潰れ、計算が異常終了する可能性があるなどの理由から、水滴の飛び散りのような解析をすることが難しい。

一方、流体そのものを粒子としてモデル化する粒子法は、格子法では困難とされていた水滴の飛び散りの解析が可能である。

5.2 粒子法による解析⁵⁾

実験で使用した矩形水槽を2次元でモデル化し、粒子法による解析を行った。計算開始直後の衝撃圧の影響を避けるため、10秒後の静水圧分布や自由表面形状を初期条件として計算を行った。実験結果と同様に、水深が浅い場合は進行波となり、深い場合は定常波となる特性も解析でよく再現できている(図11)。

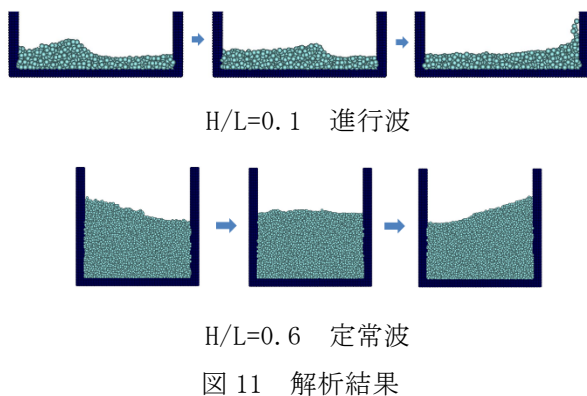


図12、図13に補正後の背骨曲線と応答曲線、実験値および解析値を比較して示す。波高値は実験値と比較的一致した。また、共振する角振動数が固有角振動数より大きくなるハードスプリング($H/L=0.1$)、固有角振動数より小さくなるソフトスプリング($H/L=0.6$)の特性がよく表わされている。

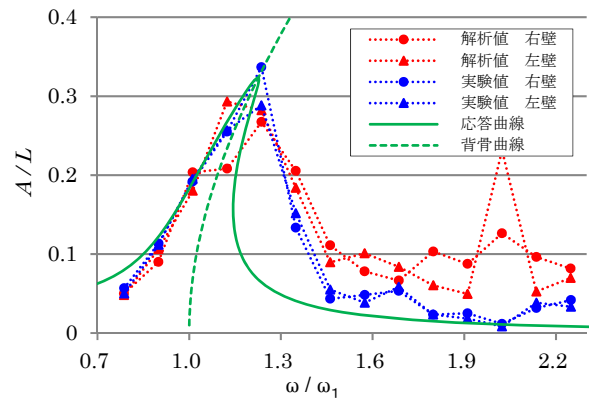


図12 角振動数と振幅の関係 ($H/L=0.1$)

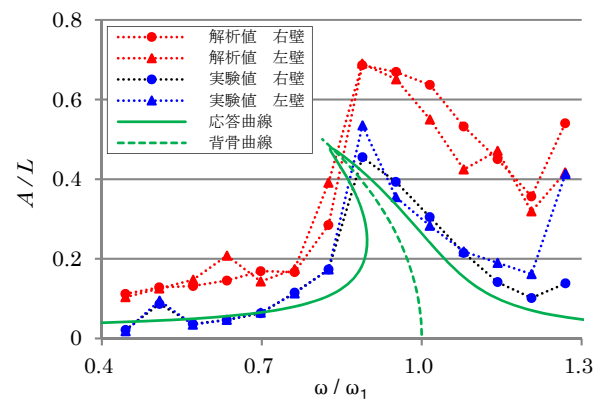


図13 角振動数と振幅の関係 ($H/L=0.6$)

6. まとめ

非線型スロッシングの角振動数応答に関して、実験値とMilesの式との比較を行った。その結果、Milesの式では H/L が小さい場合、実験値との誤差が大きくなることがわかった。そこで、Milesの式を補正した式を適用することで、実験値との誤差を小さくすることができた。また、Duffing方程式をその補正式に適用することで、応答曲線を計算で求めることができた。

粒子法を矩形水槽における非線型スロッシング解析に適用した結果、理論式および実験値と比較的良好一致し、解析の妥当性が確認できた。解析、理論の両面から、高い精度で最大波高を推定できる見込みが得られた。さらに解析精度を高めていけば、今後は模擬実験を実施することなく、溢水対策の評価が可能となり、コスト低減が期待できる。

【謝辞】

本研究は、四国電力㈱殿より委託を受け実施したもので、ご協力いただいた関係各位に深く感謝いたします。

【参考文献】

- 1) Miles, J.W. : Nonlinear Surface Waves in Closed Basins, J.of Fluid Mechanics, vol.75, part 3, pp419-448, 1976
- 2) 小川口深雪, 岩田正純 : 矩形水槽における非線形スロッシングの理論式の背骨曲線の補正, 平成 30 年度土木学会関西支部年次学術講演会
- 3) 小松敬治 : スロッシング, 森北出版, 2015
- 4) 越塚誠一, 柴田和也, 室戸浩平 : 粒子法入門, 丸善, 2014
- 5) 粒子法コードユーザーグループ

最後に執筆者、編集ならびに審査にあたられた方々のご協力に対して厚くお礼申し上げます。

研 究 期 報 第 112 号 (無断転載を禁ず)

編集兼発行人 堀 田 宏 司
(株)四国総合研究所

発 行 (株)四国総合研究所
〒761-0192
香川県高松市屋島西町 2109 番地 8
T E L (087) 843-8111
E-mail jigyo_kanri@ssken.co.jp