火力発電プラント配管の破断余寿命診断のデジタルツイン

Digital Twin for Fracture Life Expectancy Diagnosis of Thermal Power Plant Pipe

大阪府立大学	高橋 陸	Riku TAKAHASHI	Student-member
大阪府立大学	木谷 悠二	Yuji KITANI	Student-member
大阪府立大学	小野 進	Susumu ONO	Non-member
中国電力株式会社	西田 秀高	Hidetaka NISHIDA	Non-member
電力中央研究所	西ノ入 聡	Satoshi NISHINOIRI	Non-member
大阪府立大学	生島 一樹	Kazuki IKUSHIMA	Non-member
大阪府立大学	柴原 正和	Masakazu SHIBAHARA	Non-member

In recent years, there has been a growing demand for power generation from renewable energy sources. However, power generation from renewable energy sources is characterized by the fact that it is highly dependent on weather conditions, and thermal power generation requires large changes in output to adjust power. The sudden changes in temperature and strain that occur during this process have a significant impact on the remaining life of the equipment. In this study, we developed a system to identify internal damage in piping from temperature and strain measurements at a small number of measurement points by using a digital twin.

Keywords: Digital Twin, Life Expectancy Diagnosis, Creep, Thermal Power Plant, Pipe

1. 緒言

近年、世界的に地球温暖化を抑制することが持続可能 な社会の実現の目標の一つに掲げられており、エネルギ ー分野においても再生可能エネルギーの導入によって CO2排出量を抑制することが求められている.ただし, 再生可能エネルギーによる発電は天候の影響を大きく受 け,供給量が不安定になるという特徴を持ち,それによ り従来安定的な電力の供給を行ってきた原子力発電や火 力発電は電力供給の負荷調整機能としての役割を新たに 担うことが想定されている.ただし,起動停止時や負荷 変動時に生じる急激な温度・ひずみの変化は伝熱管のク リープ破断などを引き起こし,配管の余寿命に大きく影 響する.現状では配管全体の劣化,き裂などをオンライ ンで監視可能な技術は確立されていない.そのため本研 究では大規模解析手法とデータ同化手法を統合すること

連絡先:高橋 陸、〒599-8531、大阪府堺市中区学園町 1番1号、大阪府立大学工学研究科 E-mail: r_takahashi@marine.osakafu-u.ac.jp により,限られた計測データから高温下における配管全体の力学的な状態をデジタル空間上で再現することにより,リアルタイムで予測する手法の開発を行った.

2. 大規模解析手法

2.1 大規模クリープ解析技術の開発

まず実構造物に適用可能である大規模なクリープ解析 技術の開発を行った.ボイラ配管などの大規模構造物の



Fig.1 Flow of creep analysis by IEFEM

詳細な熱伝導解析や熱応力解析を行うためには有限要素 法(FEM)によって大規模な有限要素モデルを取り扱う 必要がある.ただし従来の一般的なFEM解析である静 的陰解法は解析時間が要素数の三倍に比例して大きくな る特徴を持ち,リアルタイムでの解析は実質的に不可能 となる.そこで本研究では柴原,生島らが開発した理想 化陽解法FEM(IEFEM)[1]を解析手法として用いた. IEFEMは動的陽解法であり,陽解法の長所である高速計 算能力を有しながら陰解法なみに高精度で解を求めるこ とが可能な手法となっている.本研究においてIEFEM にクリープ解析を組み込んだ.計算フローをFig.1に示 す.まず初めに外荷重などの負荷を弾塑性解析によって 計算した後,クリープ弾塑性解析を行っている.

2.2 クリープ解析の精度検証

次に IEFEM を用いたクリープ解析の精度検証を行 う. 文献[2]の試験体を参考にして周溶接継手管の八分の ーモデルを用いて解析を行った. モデル図を Fig.2 に示 す. 要素数, 節点数はそれぞれ 74,918 および 81,019 と なっている. クリープひずみの時間増分は次に示すノー トン則に従うとした.

$$\dot{\bar{\varepsilon}}^c = A\bar{\sigma}^n \tag{1}$$



Fig.2 Analysis model



ここでをにはクリープひずみ速度, A, nは材料に依存す る係数である.用いた材料は改良9Cr-1Mo鋼であり,材 料定数をFig.3に示す.試験体の溶接金属部(WM部), 熱影響部(HAZ部),母材原質部(BM部)における A, nの値はTable1に示すような値に設定した.このモ デルに対しTable2で示すような文献と同様な二つの条 件によって温度,内圧及び軸力を付与してクリープ解析 を行い,文献値との比較を行った.解析条件1,2にお ける肉厚中央部の溶接金属から母材にかけての周方向,

Table 1 Creep coefficient of material

	$\dot{arepsilon}^c = A \bar{\sigma}^n$			
	A	n		
BM	F 20 × 10-18	6.53		
HAZ	5.39 × 10			
WM	3.75×10^{-18}	6.53		

Table 2 Analysis condition

No.	Temperature (°C)	Internal pressure (MPa)	Tensile stress (MPa)	Time(h)
1	650	24.35	0	6536
2	650	24.35	35	1088







軸方向、中心線方向のクリープひずみについて、IEFEM による計算結果と文献値の比較を Fig.4 に示す.結果から IEFEM による計算結果と文献値のクリープひずみ分 布がおおむね一致するという結果が得られた.

Physical quantity



3. データ同化手法

3.1 データ同化手法の概要

本解析手法に統合したデータ同化の説明を行う.デー タ同化とは統計的な予測手法とFEM等の物理モデルに よる予測手法を統合し,より信頼性の高い実現象の予測 を行うことを可能にする手法である.統計的な手法は実 計測に基づくので実現象に近い予測を行うことができる が,計測値が得られていない現象の予測が困難であるの に対し,物理モデルによる予測は設定した境界条件が現 実と異なっていた場合に予測が実現象と乖離してしまう 特徴を持つ.データ同化によりそれらの特徴を補完する ような予測を行うことで少数の計測データから実現象全 体の予測を精度良く行うことが可能となる.

3.2 アンサンブルカルマンフィルタ

次に本解析で用いたデータ同化手法である, アンサン ブルカルマンフィルタ[3]の説明を行う. アンサンブルカ ルマンフィルタの概念図を Fig.6 に示す. アンサンブル カルマンフィルタではまず初めに推定する物理量の初期 値に対して摂動を与えた粒子を m 個 (**X⁰**,...**X^m**) 用意 する. これらを FEM により時間発展させる.

$$\boldsymbol{X}^{f(i)} = f\left(\boldsymbol{X}^{(i)}\right) \tag{2}$$

次に各粒子に対しその時間において得られた計測値のデ ータを反映することでデータ同化値を算出する.具体的 なフィルタリング式を式(3)に示す.

$$x_{t}^{a} = x_{t}^{f} + K_{t}(y_{t}^{o} - H_{t}x_{t}^{f})$$
(3)

ここで添え字のaはデータ同化(assimilation)を意味し,f は予測(forecast), oは計測(observation),tは時間ステップ を示す.この式は計測値とIEFEMで得られた予測値と の差に対し K_t による重み付けを行うことで時刻tにおけ るデータ同化値 x_t^a が得られることを示している. H_t は FEMの値から計測値に相当する物理量を取り出す行列 である.ここで理論上最も確からしいデータ同化値が得 られるときの K_t はカルマンゲインと呼ばれ,アンサンブ ルカルマンフィルタでは次式のように計算される.

$$K_t = V_t H_t^T (H_t V_t H_t^T + R)^{-1}$$
(4)

式(4)のRは計測値の分散値を表す.また、 V_t はアン サンブルメンバーの分散で次式のように計算される.

$$V_t = \frac{1}{N-1} \sum_{k=1}^m \left(\hat{x}_t^k - \bar{x}_t \right) \left(\hat{x}_t^k - \bar{x}_t \right)^T \qquad (5)$$

式(5) で \hat{x}_{t}^{k} はm個発生させた各アンサンブルメンバ ーの値, \bar{x}_{t} はアンサンブル平均となっている.式(1)で得 られたデータ同化値 x_{t}^{a} を時刻 t+1 での予測値 x_{t}^{f} とするこ とで式(2)から(5)を逐次的に処理し,全時間にお けるデータ同化値を得ることができる.

4. クリープ現象のデジタルツインの検証

4.1 検証方法

大規模クリープ解析技術とデータ同化手法を統合したデ ジタルツイン技術の検証を行った.検証にはFig.7 に示す 試験片モデルを用いる.要素数,節点数はそれぞれ 107,856 および 113,731 である.ここで材料定数は 2 章に おける改良 9Cr-1Mo 鋼と同じとした.検証方法としては 650℃の状態において軸方向に引っ張りの荷重を加えた 解析を行い,これを順解析とする.荷重は中央部における 最終的な応力が 200Mpa となるように与えた.時刻 t= 2000 s および t=4000 s における応力状態を Fig.8 に示す. 図から試験片中央部に高い応力が発生していることが分 かる.次に加えられた荷重を未知として計測データを試 験片中央1点における z 方向ひずみのみとしてデータ同 化を行い,試験片に働いた荷重および応力,変形状態が順 解析通りに推定できるかについて検証を行った.このよ



うに現実では把握不能な真値データを順解析によって数値的に作成しておくことで、デジタルツイン技術の妥当性検証が可能となる.

4.2 検証結果

検証結果について示す.荷重の時間履歴,全ひずみの結 果について Fig.9, Fig.10 に示す. Fig.10 の結果からクリ ープひずみが発生することによって全ひずみが非線形的 に増加しているが,荷重,全ひずみに関して良好に推定で きているのが分かった.よって計測データが限られてい たとしても本手法によって実構造物全体の物理的な状態 を把握することができると考えられる.

5. 結言

本研究では、火力発電プラント配管における破断余寿命 診断を目標として大規模クリープ解析とデータ同化手法 を統合したデジタルツイン技術を開発し、数値検討にお ける妥当性の検証を行った.以下に得られた知見を示す.

1) 理想化陽解法 FEM (IEFEM) にクリープ解析を導入 することで実構造物に適用可能な大規模クリープ解



析技術の開発を行った.また文献値との比較を行い, 本解析技術が妥当であることを確認した.

- 開発した大規模クリープ解析技術に対し、データ同 化手法であるアンサンブルカルマンフィルタを統合 することでデジタルツイン技術を構築した.
- 3) 構築したデジタルツイン技術の検証を行った。検証 結果から少数の計測点によってクリープ現象を仮想 空間上で再現可能であることを示した。

参考文献

- [1] 生島一樹、伊藤真介、柴原正和"GPUを用いた 並列化理想化陽解法 FEM の開発"、溶接学会論文 集、第 31 巻、第 1 号、2013、pp.23-32.
- [2] 緒方隆志、光枝利紀、酒井裕史"改良 Cr-1Mo鋼 周溶接継手管の内圧クリープ破断に及ぼす軸引張力 の影響"、日本機械学会論文集、Vol.81、No.827、 2015、 pp.1-12.
- [3] J. L. Anderson: An Ensemble Adjustment Kalman Filter for Data Assimilation: Geophysical Fluid Dynamics Laboratory, Princeton, New Jersey, Vol.7(2001), No.11

謝辞

この成果は、国立研究開発法人新エネルギー・産業技 術総合開発機構(NEDO)の助成事業(JPNP14004) (JPNP16002)の結果得られたものです。