

# 水車ステーベーンの余寿命解析

平松 洋一 \*  
Yoichi Hiramatsu

関西電力株式会社殿と当社は共同で、ステーベーンに代表される金属疲労を伴う水車部材の残存寿命評価法の開発に取り組んできた。本稿では、これまで専ら予防保全的に設備更新等が行われることが多かった水車ステーベーンのような部材に対し、合理的なメンテナンスを行う上で必要となる部材劣化の進展具合や残存寿命を精度良く評価する技術を紹介する。

キーワード：水車ステーベーン、NDI、欠陥、変動応力、余寿命解析、き裂進展、延命化

## 1. はじめに

水車ステーベーンのような部材の健全性および残存寿命（余寿命）を評価する上で重要な技術として、「非破壊検査による欠陥検出精度の向上」と「残存寿命評価精度の向上」があり、前稿「水車工事へのUPA適用」では「欠陥検出精度の向上」に関する当社の取り組みを紹介した。

のみならず当社では関西電力(株)殿との共同研究<sup>1)</sup>として「残存寿命評価精度の向上」にも取り組んでおり、非破壊検査で得られた欠陥状況等の知見に基づき、合理的で費用対効果の良い水車メンテナンスに生かせる技術を開発し、引き続き改良に取り組んでいる（図1に本技術紹介範囲の位置付けを示す）。

水車部材の劣化診断に関する技術としてはこれまで、電気学会技術報告の残存寿命評価手法<sup>2)</sup>（以

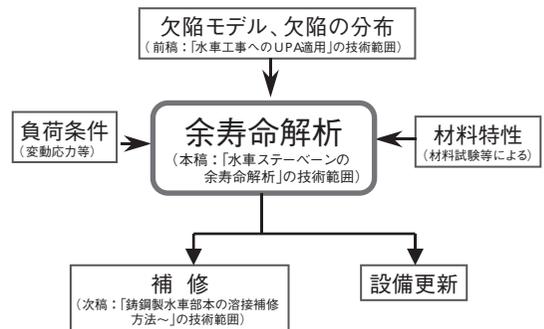


図1 余寿命解析の技術的位置付け

下、本稿では電気学会方式と略称する）が使われることが一般的であったが、この方式は複数の欠陥が隣接して存在するような場合、それら欠陥群を包含する大きな欠陥とみなして評価しており、往々にして余寿命を保守的に（実際の余寿命よりも短く）見積ってしまう傾向がある。

そのためこの方式では過剰メンテナンスを招き

\* 研究開発事業部 試験・解析技術部 数値解析グループ 次長

かねず、安心ではあるが、「メンテナンスコストが掛かる」という短所をもっていた。そこで当社では欠陥個々の性格および相互の干渉を電気学会方式より厳密に取り扱い、更に要素技術を確立するためテストピースによる疲労き裂進展試験による検証を踏まえて、独自の余寿命解析手法（以下、新方式という）を開発した。本稿ではその一端を紹介するため先ず、電気学会方式と新方式の違いについて述べ、次に電気学会方式と新方式の各々により推定したテストピースの余寿命を材料試験（疲労き裂進展試験）結果と比較し、新方式の妥当性を検証する。

## 2. 電気学会方式と新方式

### (1) 欠陥のモデル化

電気学会の方式では検出欠陥をモデル化する方法および形状寸法の読み取り方として、ASME<sup>3)</sup>の基本的な考え方を踏襲している。すなわち隣接する複数欠陥を一体化した単一欠陥としてモデル化してしまうため、実態よりも大きな欠陥と見なして評価している。そしてこのモデル化は欠陥/き裂が進展してもその取り扱いは基本的には同一のままである。

これに対し当社で取り組んでいる方式は、より実態に近いモデル化を行うため、近接する複数欠陥の相互の干渉を次項(2)のように考慮しつつ、先ずは個々の欠陥としてモデル化する手法を取る。次にき裂の成長に応じて、欠陥/き裂が「孤立しつづける」、「繋がってしまう」という過程を経て最終的に脆性破壊や破断に至る（寿命が尽きる）段階まで欠陥/き裂の進展を追跡する。

### (2) 欠陥/き裂同士の相互干渉

き裂同士の相互干渉に関する研究例としては複数貫通き裂について理論解の報告例があるものの、複数表面き裂に関する報告例は見当たらない。

そこで実機ステーブーンに存在する代表的欠陥として「同一平面に存在する2個の表面き裂」を想定し、FEM解析でその部材応力の状態を求めてみた。その結果、き裂同士の距離が近づくに従い、互いのき裂の干渉効果が急激に大きくなることが分かった。そこで、様々な大きさのき裂を想定し、き裂寸法の「長さ」と「深さ」、そしてき裂が生じている部材（母材）の「幅」と「厚さ」の比をパラメータにしてFEM解析でパラメータスタディーを行い、干渉効果の度合いをデータベースとして整備することとした。現状、幾つかの特殊例を除き、そのデータベース整備は完了に近づきつつある。

### (3) ソフトウェアとしての整備

このデータベースを有効利用できるよう、余寿命解析を目的としたき裂進展計算ソフトウェアのシステム開発を同時に進めている。

先ず最初に電気学会方式の計算ロジックをC言語でプログラム化し、さらにデータ入力用のGUI（Graphical User Interface）も備えて、ソフトウェア「DenCrack」を作成した。DenCrackは、一様変動応力場のもとで4タイプのき裂すなわち、半だ円表面き裂、内在だ円、板厚貫通、片側貫通に対応したき裂進展計算を行うもので、電気学会方式そのものをソフトウェア化したものである。

続いて、DenCrackに残留応力や任意応力を考慮できるように発展させたソフトウェア「IIC-Crack1」、「IIC-Crack2」を整備した。

現在は(2)で述べたFEM解析の知見を折り込むことでデータベースの強化に努めており、このデータベースを利用できる、「IIC-Crackシリーズ」を更に強化した解析ソフトウェア「SimCrackシリーズ」（関西電力(株)殿との共同研究）の開発を続けている。「SimCrackシリーズ」は強化されたデータベースを利用すること

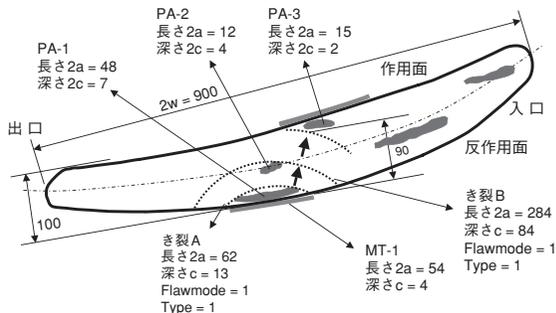
により、様々な欠陥 / き裂同士の組み合わせに対応が可能である。

### 3. 新方式の検証

#### (1) ソフトウェアのあらまし

次に実機ステーパーンの欠陥に対するき裂進展計算の適用例を示す。最初に行うことはステーパーンの非破壊検査情報から解析対象である欠陥を選定することであり、一般的には、より深い欠陥を選ぶ。図2に示す例の場合、磁粉探傷法で発見されたMT-1という表面欠陥を選んだ。MT-1のすぐ近くにフェーズドアレイ法でPA-1という内在欠陥も検出されているが、「距離が十分に近い」ので、MT-1とPA-1を一つにまとめて、半円形の仮想き裂「き裂A」を作る。き裂Aは、ステーパーンの変動応力を受けて進展し、PA-2に突き当たり、その時点で、新たなき裂として「き裂B」を考える。き裂Bは更に進展しPA-3に突き当たって遂には板厚貫通（寿命が尽きた）となる。

このき裂進展プロセスをソフトウェアで計算するため、き裂の寸法を図3に示すように定義した。このき裂進展追跡で要する負荷回数分かるので、負荷周期との関係から余寿命が推定できることになる。図4は、計算条件とき裂寸法のデータをソフトウェアに入力する画面である。図5のグラフは、き裂Aがき裂Bまで



<計算条件>変動応力 = 34 MPa、平均応力 = 68 MPa、材質 = SC  
<結果>き裂A→き裂Bの繰返し数N1 = 7,829,190、き裂B→PA-3の繰返し数N2 = 0

図3 余寿命解析のモデル化 (2/2)

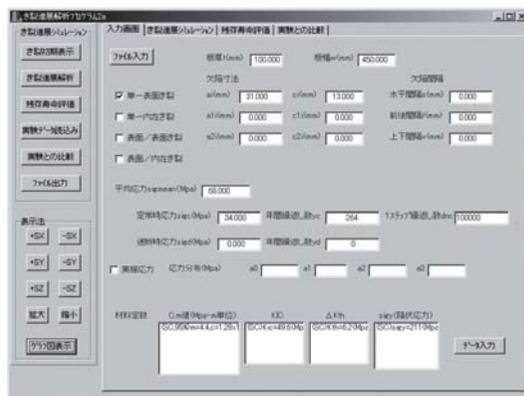


図4 ソフトウェアのデータ入力画面

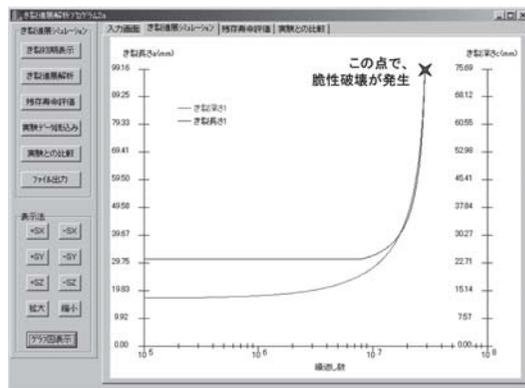
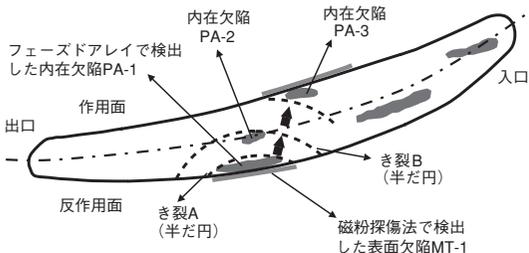


図5 き裂進展の計算結果 (1/2)



<欠陥のモデル化>  
Step 1: MT-1と近隣のPA-1を一体化して、き裂Aを作る  
Step 2: き裂AがPA-2まで進展(ΔT1が求まる)、一体化したものをき裂Bとする  
Step 3: き裂BがPA-3まで進展(ΔT2が求まる)、板厚貫通となる(寿命 = ΔT1 + ΔT2)

図2 余寿命解析のモデル化 (1/2)

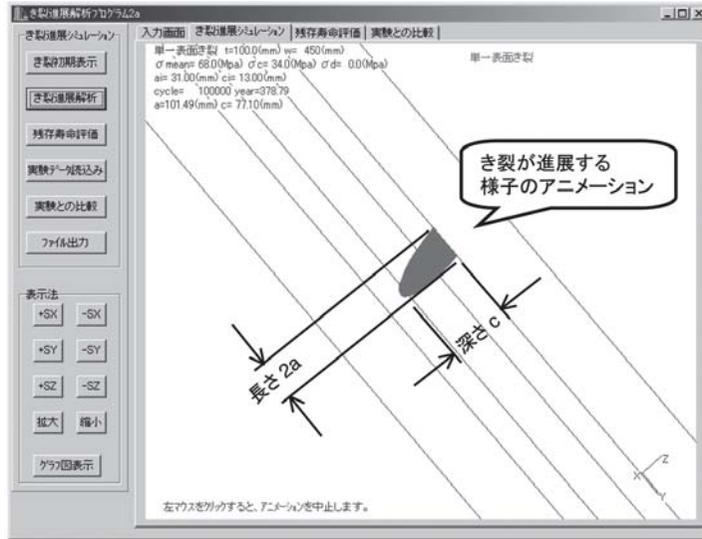


図6 き裂進展の計算結果 (2/2)

進展した時の計算結果であり、き裂寸法と繰返し数の関係が示されている。き裂進展の過程は、図6のような簡単なアニメーション画でも確認できる。

## (2) 精度検証

この新方式の SimCrack シリーズで推定した余寿命を、テストピース（コンパクト試験片）による材料試験（疲労破壊試験）との結果なら

びに電気学会方式によるものと比較し、推定精度を検証する。ここでの余寿命とはあらかじめ与えた欠陥を持つテストピースに繰り返し一定負荷を与え、欠陥から生じた亀裂がある一定量に達した時点での負荷の繰返し回数を指すものとし、SimCrack シリーズでも同様の現象をシミュレーションして比較している。図7に横軸に材料試験結果から求めた余寿命を横軸に

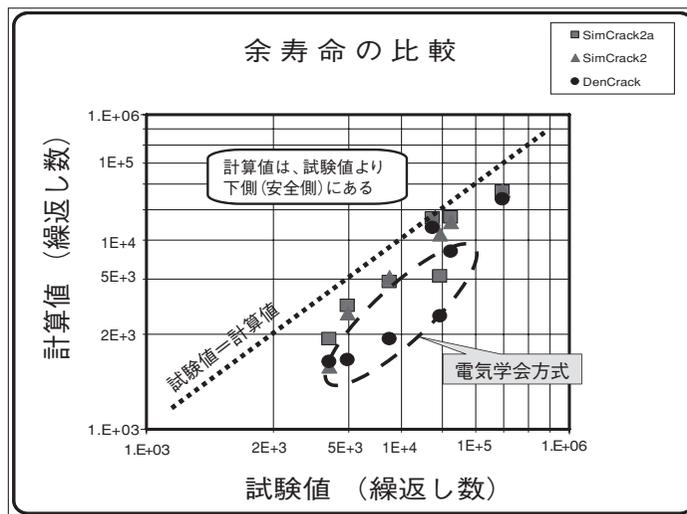


図7 余寿命の計算値と試験値

とり、この新方式による余寿命を縦軸にとって SimCrack シリーズの推定値を四角ならびに三角マークで示した。本図には点線で試験値＝計算値となる線も目安として併せて記すが、この点線より右下側にあれば実際（試験値）より短命側（安全側）に推定していることになる。本図によれば新方式による余寿命（四角、三角マーク）は総じて実際より安全側に推定していることが分かる。また DenCrack による電気学会方式による余寿命（丸マーク）も同図中に示すが、新方式の方が概ね延命側に評価しており、新方式が電気学会方式に対して過剰安全となっていないことがこの図より分かり、新方式の有効性が確認できる。

#### 4. まとめ

水車部位のメンテナンスを費用対効果の点から合理的に行うには、設備の劣化度合いを的確に把握することと、その劣化がどのように今後進んでいくかを把握することが重要である。そこで当社は、水車の検査にフェーズドアレイ UT を適用（前稿）したことのみならず、き裂進展プロセスを見直して新たなモデル化を行って、残存寿命（余寿命）評価に用いることのできるき裂進展解析手法を開発し、ソフトウェアとして整備した。そしてこのソフトウェアの特徴と実機ステーションに適用した例を紹介し、電気学会方式と比較してその有効性を示した。

当社では今後とも、欠陥間干渉のデータベースを充実させ多種多様な欠陥状況に対応できるように適用性の向上と、実機検証の蓄積による高い残存寿命の予測精度と信頼性の向上を目指し、開発を続けていく予定である。

#### 5. 謝 辞

最後に本稿で紹介した技術の最新の部分（SimCrack シリーズ）は、関西電力(株)殿との共同研究の成果であることを付記し、ご指導を賜った関西電力(株)殿の青山順氏、奥出邦夫氏、松本康寛氏ならびに多くの関係者の方々に心より深甚なる謝意を表します。

#### 参考文献

- 1) 青山順、奥出邦夫、中山英治、飯田伊佐務、水力発電設備における水車主要部位の新しい残存寿命評価手法の開発、ターボ機械 第34巻第6号（2006年）
- 2) 水車発電機器の劣化評価調査専門委員会、水力発電設備の現状と劣化診断技術－水車および水車発電機の主要部位について－、電気学会技術報告（Ⅱ部）、第308号（1989年）
- 3) ASME Boiler and Pressure Vessel Committee Subcommittee on Nuclear Power, Rules for Inservice Inspection of Nuclear Power Plant Components, ASME Boiler and Pressure Vessel Code, An International Code, Section XI (2001-7), 22-33



研究開発事業部  
試験・解析技術部 数値解析グループ  
次長

平松 洋一

TEL. 045-759-2127

FAX. 045-759-2282