

表面き裂解析プログラム (SCANP) の特長とその適用性評価

Features of surface crack analysis program “SCANP” and its applicability evaluation

電力中央研究所	永井 政貴	Masaki NAGAI	
電力中央研究所	三浦 直樹	Naoki MIURA	Member
横浜国立大学	白鳥 正樹	Masaki SHIRATORI	

Stress intensity factor is an important parameter to determine crack growth behavior due to fatigue or stress corrosion cracking (SCC). A number of stress intensity factor solutions have been proposed for various types of cracks. Shiratori has developed the surface crack analysis program, by which stress intensity factor for a crack under an arbitrary stress distribution can be calculated and the crack growth analysis can be performed. We have developed “Surface Crack ANalysis Program (SCANP)”, in which an extension of applicable range of stress intensity factor solutions, extensions of crack growth analysis functions and an improvement of program’s operability are performed based on Shiratori’s original program. In this study, we introduce features of the SCANP. In addition, in order to evaluate the applicability of the SCANP for the flaw evaluation, a comparison between the stress intensity factor solution obtained by the SCANP and other solutions is performed.

Keywords: Structural Integrity Assessment, Stress intensity factor, Linear Elastic Fracture Mechanics, Crack Growth Analysis, Influence Function Method

1. 緒言

応力拡大係数は、小規模降伏条件下におけるき裂先端近傍の応力場を一義的に決定し、脆性破壊の開始、疲労き裂や応力腐食割れのき裂進展挙動を規定する重要な破壊力学パラメータである。その有用性の高さから、様々な構造形状、き裂形状、および負荷応力に応じた応力拡大係数解が提案されている。

白鳥は、有限要素法解析によりき裂面上の節点の一つに単位分布力を与えたときの応力拡大係数（これを影響係数と呼ぶ）を求め、この解析を繰り返すことにより、き裂面上の全ての節点について影響係数を求め、重ね合わせの原理に基づいて任意分布力を受けるき裂の応力拡大係数を評価する手法を開発した[1]。また、様々な構造およびき裂形状について影響係数を求め、これらをデータベースとして実装した「表面き裂解析プログラム」（以下、旧プログラムと記す）を整備した[2]。同プログラムは、任意分布力を受けるき裂の応力拡大係数の計算、疲労き裂進展解析および応力腐食割れき裂進展解析が実施

できる。当研究所では、上記プログラムをベースに、応力拡大係数解の適用範囲の拡張、き裂進展解析機能の拡張、およびプログラムの操作性の向上を図った「表面き裂解析プログラム (Surface Crack ANalysis Program: SCANP®)」を開発した[3]。一方、SCANP で利用できる応力拡大係数解の適用性については、一部の解について既存解との比較を通じて検証された結果が報告されているものの[4-6]、実用性が高いと考えられる円筒中の周方向き裂に関しては、その適用性の確認が十分でなかった。

本発表では、開発した「表面き裂解析プログラム (SCANP)」の特長について述べるとともに、円筒中の周方向き裂の応力拡大係数解の適用性評価について述べる。

2. 表面き裂解析プログラム (SCANP) の特長

2.1 影響関数法

影響関数法[1]では、き裂面に任意分布力が作用する問題の応力拡大係数を求めておくことで、重ね合わせの原理に基づき、任意分布力が負荷された弾性体中のき裂の応力拡大係数を計算することができる。いま、二次元の二次の形状関数で表せる単位分布力を、き裂面上の節点 j に与えることを考える。これは図1に示すように、節点 j で1、他の節点で零となるような単位分布力である。この

連絡先:永井政貴, 〒240-0196 神奈川県横須賀市長坂2-6-1, 電力中央研究所 材料科学研究所 構造材料領域
E-mail: nagai@criepi.denken.or.jp

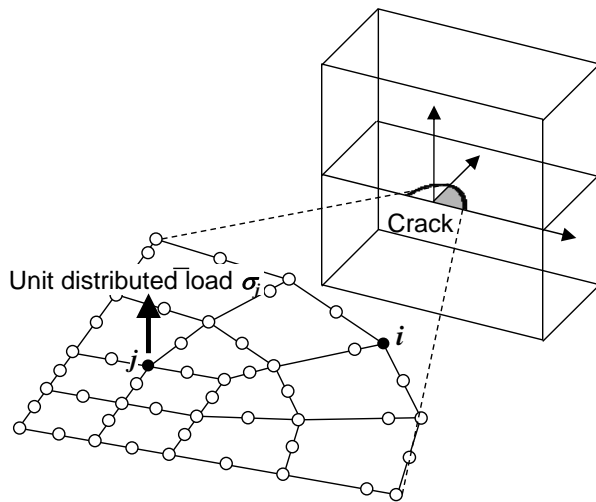


Fig. 1 Definition of influence coefficients

とき、き裂前縁上の節点*i*の応力拡大係数を K_{ij} とすると、き裂面に任意分布力が作用したときのき裂前縁上の節点*i*の応力拡大係数 K_i は、次式で与えられる。

$$K_i = \sum_{j=1}^n K_{ij} \sigma_j \quad (1)$$

ここで、 n はき裂面上の節点数、 σ_j は節点*j*における分布力の値を示す。有限要素法解析によりあらかじめ K_{ij} を求めておくことで、式(1)からき裂面に任意分布力が作用する問題の応力拡大係数が求められる。SCANPでは、表面き裂に関しては最深点と表面点の K_{ij} をデータベースとして蓄積している。

2.2 旧プログラムからの主な変更点

SCANPは、旧プログラムをベースに表1に示す応力拡大係数解の適用範囲の拡張、き裂進展解析機能の拡張、

およびプログラムの操作性の向上を図っている。

応力拡大係数解の適用範囲の拡張に関しては、平板中の半だ円表面き裂のデータベースの更新と追加、平板中の内部き裂のデータベースの更新、日本機械学会維持規格2012年版[7]に採録された応力拡大係数解の追加、および任意の管厚比の円筒中の周方向き裂について応力拡大係数が計算できるように拡張した。

き裂進展解析機能の拡張に関しては、維持規格2012年度版に採録された疲労き裂進展速度式および応力腐食割れき裂進展速度式の追加、実用上とあまり用いられない疲労き裂進展速度式の削除、および平板中の内部き裂の疲労き裂進展解析機能の追加を行った。

プログラムの操作性の向上に関しては、旧プログラムは解析対象の違いに応じた独立した7つのプログラムの集合体であったので、これを統合して操作性の改善を図った。また、バッチ処理機能の追加、FITNET Revision MK8 [8]に採録された溶接残留応力分布式の追加を行った。

2.3 表面き裂解析プログラム (CA P) の概要

SCANPでは、き裂を有する構造が荷重を受けるとき、き裂の応力拡大係数を影響関数法に基づき計算する。また、計算した応力拡大係数を用いて疲労き裂進展解析および応力腐食割れき裂進展解析を行う。図2に、平板中の半だ円表面き裂の疲労き裂進展解析を例に、実際にディスプレイ上に表示されるプログラムを示す。

き裂進展解析では、進展するき裂は常に半だ円形状を保持すると仮定し、最深点および表面点の応力拡大係数からき裂進展則に従い進展量を計算し、深さ方向と長さ

Table1 Classification of modifications in CA P

改良の種類	旧プログラム	SCANP
1. 応力拡大係数解の適用範囲と種類	<p><u>平板中の半だ円表面き裂</u> $0.1 \leq a/t \leq 0.8, 0.1 \leq a/c \leq 2.0$</p> <p><u>平板中の内部き裂</u> $0.1 \leq a/d \leq 0.8, 0.2 \leq a/c \leq 2.0, d/t = 0.5$</p> <p><u>円筒中の周方向半だ円き裂</u> $R_i/t = 5/3, 2.5, 5, 10$</p>	<p><u>平板中の半だ円表面き裂</u> $0.025 \leq a/t \leq 0.8, 0.1 \leq a/c \leq 8.0$</p> <p><u>平板中の内部き裂</u> $0.1 \leq a/d \leq 0.8, 0.2 \leq a/c \leq 1.0, 0.2 \leq d/t \leq 0.5$</p> <p><u>円筒中の周方向き裂</u> $5/3 \leq R_i/t \leq 10$</p> <p>維持規格2012年度版に採録された応力拡大係数解</p>
2. き裂進展解析機能	<p><u>疲労き裂進展速度式</u> Paris則, Walkerの式, Formanの式, 下限界近傍まで適用できる式</p> <p><u>応力腐食割れき裂進展速度式</u> BWRの配管および炉内構造物用オーステナイト系ステンレス鋼の速度式</p>	<p><u>疲労き裂進展速度式</u> Paris則, Walkerの式, JSME維持規格2012年度版に採録された式, 事例規格に採録された式</p> <p><u>応力腐食割れき裂進展速度式</u> JSME維持規格2012年度版に採録された式, 事例規格に採録された式</p> <p>平板中の内部き裂の疲労き裂進展解析機能</p>
3. プログラムの操作性	解析対象(構造形状, き裂進展モード)の違いに応じた独立した7つのプログラムの集合体	<ul style="list-style-type: none"> 独立した7プログラムの統合 バッチ処理機能の追加 残留応力分布式の追加

a: き裂深さ, c: き裂半長, t: 板厚, R_i : 内半径, d: 板表面から内部き裂の中心までの距離

方向にき裂を進展させる。また、き裂面に作用する任意分布力は、入力の簡便さから5次多項式として与える。

3. 応力拡大係数解の適用性評価

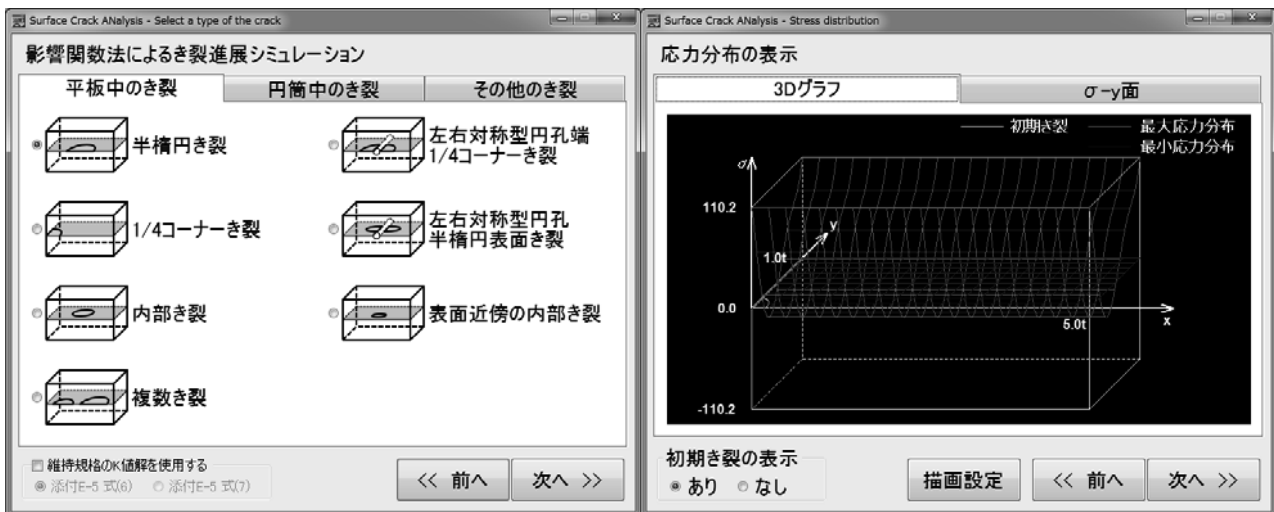
SCANP で利用できる応力拡大係数の適用性については、数値解析解との比較や適用対象が同じである既存の解との比較を通じて検証がなされて結果が報告されている[4-6]。しかしながら、実用性が高いと考えられる円筒中の周方向半だ円表面き裂および貫通き裂に関しては、その適用性の評価が十分にされていない。そこで、既往の応力拡大係数解との体系的な比較を通じて、SCANP に実装された円筒中の周方向き裂の応力拡大係数の適用性評価を行った。

ここでは、図3に示す円筒中の周方向貫通き裂の応力拡大係数を比較した結果を示す。比較対象とする解は、CEAの解[9]、APIの解[10]およびZahoorの解[11]とする。

全周に対するき裂長さの比 $c/\pi R_i$ の変化に伴う補正係数の推移を比較した結果を図4に示す。なお、管厚比 R/t は、SCANPの適用範囲が狭く相対的に厚肉な円筒の解しかないため、 $R/t = 10$ とした。CEAの解による補正係数を基準とした場合、APIの解の補正係数は、全周に対するき裂長さの比 $c/\pi R_i$ が大きいときに、相対的な差が10%を超える場合がある。一方、SCANPの解およびZahoorの解の補正係数はCEAの解とよく一致している。したがって、円筒中の周方向貫通き裂に対するSCANPの解は構造健全性評価への適用するにあたり、十分な妥当性を有していると考えられる。円筒中の周方向半だ円き裂に関しては既報[3]を参照されたい。

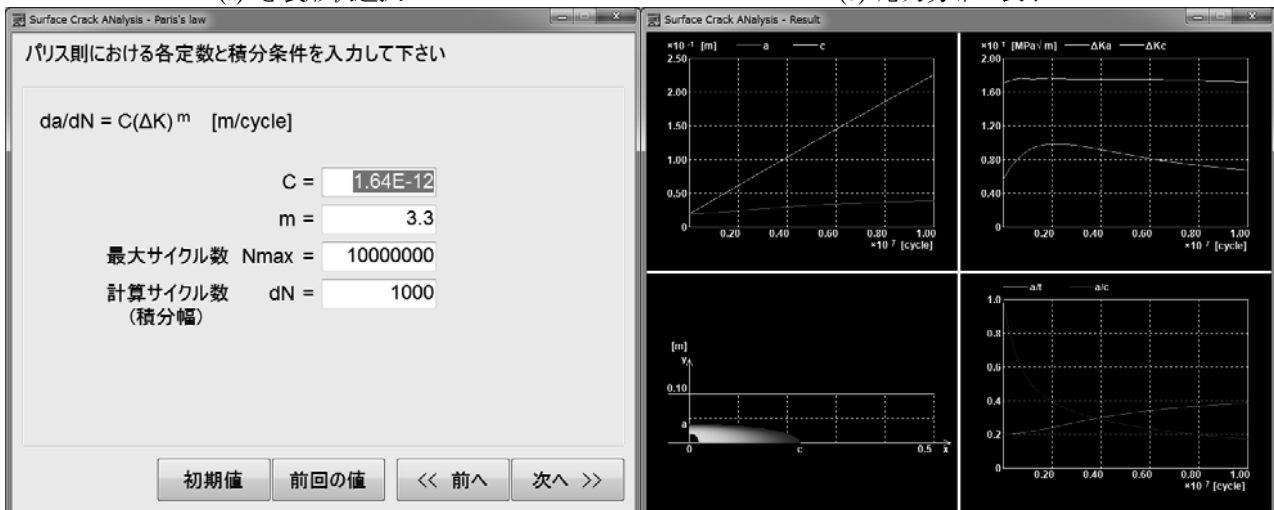
4. 結 言

本研究では、当研究所で開発した「表面き裂解析プログラム(SCANP)」について、その基礎となる影響関数法、



(a) き裂形状選択

(b) 応力分布の表示



(c) 疲労き裂進展解析の条件入力

(d) 疲労き裂進展解析の結果

Fig.2 xample analy ed by CA P

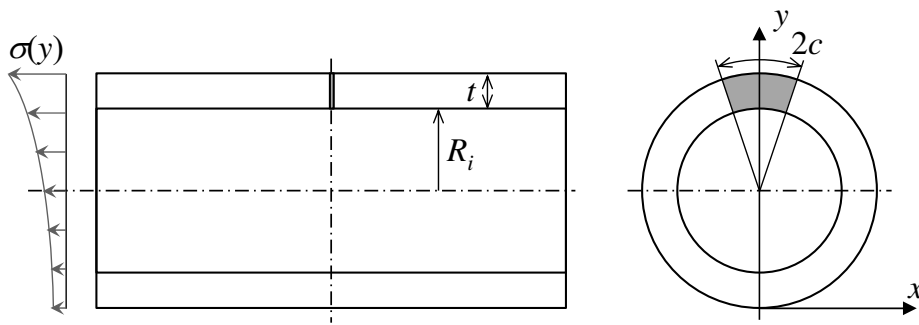


Fig. 3 Circumferentially through all crack in cylinder

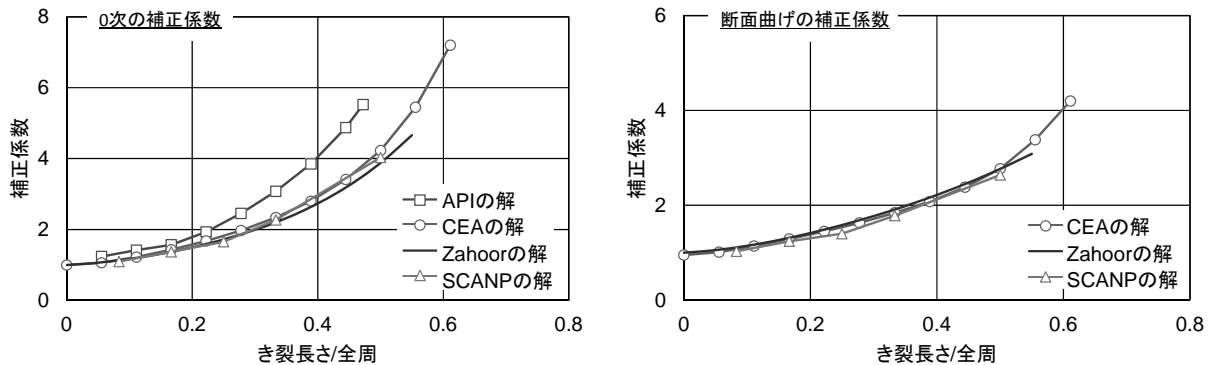


Fig. 4 Comparison of normalized stress intensity factor solutions for circumferentially through all crack in cylinder

旧プログラムとの違い、SCANPの概要等のプログラムの特長を示した。また、実用性が高いと考えられる円筒中の周方向半円き裂の応力拡大係数について、SCANPで計算される解と対照し得る代表的な応力拡大係数解について比較を行い、その適用性を検討した。その結果、円筒中の周方向貫通き裂については、対照解とよく一致することを確認した。

参考文献

- [1] Shiratori, M., "Analysis of Stress Intensity Factors for Surface Cracks Subjected to Arbitrary Distributed Surface Stresses", Bulletin of the Faculty of Engineering, Yokohama National University, Vol. 35, 1986, pp. 1-25.
- [2] 松下久雄, 小俣重雄, 松田宏之, 白鳥正樹, 吉川直紀, 岩松史則, "表面疲労き裂進展解析ソフトSCAN-微小き裂, 複数き裂, 内部き裂バージョンの開発-", 日本海事協会誌, No. 266, 2004, pp. 18-35.
- [3] 永井政貴, 三浦直樹, 白鳥正樹, "表面き裂解析プログラム(SCANP)の開発", 電力中央研究所研究報告, Q15011, 2016.
- [4] Miyazaki, K., Iwamatsu, F., Nakanishi, S., and Shiratori, M., "Stress Intensity Factor Solution for Subsurface Flaw Estimated by Influence Function Method," PVP2006- ICPVT11-93138, 2006, pp. 1-17.
- [5] 三浦直樹, 永井政, 高橋由紀夫, "欠陥評価に用いる応力拡大係数解の適用性検討", 電力中央研究所研究報告, Q13002, 2014.
- [6] 三浦直樹, "原子炉容器ノズルコーナーき裂に対する破壊評価法に関する検討", 電力中央研究所研究報告, Q14001, 2014.
- [7] 日本機械学会, "発電用原子力規格 維持規格(2012年版)," JSME S-NA1-2012, 2012.
- [8] FITNET Fitness-for-Service (FFS) Annex, Revision MK8, 2008.
- [9] Chapuliot, S., "Formulaire de KI pour les tubes comportant un défaut de surface semi-elliptique longitudinal ou circonferentiel, interne ou externe," Rapport CEA-R-5900, 2000.
- [10] American Petroleum Institute, "Recommended Practice for Fitness-For- Service," API Recommended Practice 579, 2000.
- [11] Zahoor, A., "Closed form expressions for fracture mechanics analysis of cracked pipes", Transactions of the ASME, Journal of Pressure Vessel Technology, Vol. 107, pp. 203-205, 1985.