

JAERI-Data/Code

2005-007



JP0550490



確率論的破壊力学解析コードPASCAL-SC
及びPASCAL-EQの使用手引き

2005年 9月

伊藤 裕人・鬼沢 邦雄・柴田 勝之

日本原子力研究所
Japan Atomic Energy Research Institute

本レポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。

入手の問合せは、日本原子力研究所研究情報部研究情報課（〒319-1195 茨城県那珂郡東海村）あて、お申し越しください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-1195 茨城県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費頒布をおこなっております。

This report is issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Research Information Division, Department of Intellectual Resources, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1195, Japan.

確率論的破壊力学解析コード PASCAL-SC 及び PASCAL-EQ の使用手引き

日本原子力研究所東海研究所安全性試験研究センター原子炉安全工学部

伊藤 裕人^{*}・鬼沢 邦雄・柴田 勝之

(2005 年 8 月 5 日受理)

軽水炉構造機器の健全性に関する研究の一環として、確率論的破壊力学解析コードである PASCAL-SC(PFM Analysis of Structural Components in Aging LWR – Stress Corrosion Cracking)及び PASCAL-EQ(PFM Analysis of Structural Components in Aging LWR – EarthQuake)を開発した。これら両コードは、安全上重要な配管溶接部の破損確率をモンテカルロ法により評価するものである。PASCAL-SC は経年劣化事象として応力腐食割れ(SCC)を対象とし、また PASCAL-EQ は地震荷重等による疲労き裂進展を対象としたコードである。これらのコードは、破壊力学の最新の知見や計算機能性向上を踏まえ、非定常な地震荷重によるき裂進展が評価可能であると同時に、応力拡大係数や破断判定法に最近の破壊力学的知見が盛り込まれている。また、GUI による入力データ作成、解析(計算)実行、解析結果のグラフ描画が可能であり、操作性の向上も図られている。本報告書は、PASCAL-SC 及び PASCAL-EQ の使用方法と解析理論及び手法をまとめたものである。

User's Manuals of Probabilistic Fracture Mechanics Codes PASCAL-SC and PASCAL-EQ

Hiroto ITOH^{*}, Kunio ONIZAWA and Katsuyuki SHIBATA

Department of Reactor Safety Research
Nuclear Safety Research Center
Tokai Research Establishment
Japan Atomic Energy Research Institute
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received August 5, 2005)

As a part of the aging and structural integrity research for LWR components, new PFM (Probabilistic Fracture Mechanics) codes PASCAL-SC(PFM Analysis of Structural Components in Aging LWR – Stress Corrosion Cracking) and PASCAL-EQ(PFM Analysis of Structural Components in Aging LWR – EarthQuake) have been developed. These codes evaluate the failure probability of an aged welded joint by Monte Carlo method. PASCAL-SC treats Stress Corrosion Cracking (SCC) in piping, while PASCAL-EQ takes fatigue crack growth by seismic load into account. The development of these codes has been aimed to improve the accuracy and reliability of analysis by introducing new analysis and methodologies and algorithms considering the recent development in the fracture mechanics methodologies and computer performance. The crack growth by an irregular stress due to seismic load in detail is considered in these codes. They also involves recent stress intensity factors and fracture criteria. In addition, a user's friendly operations of a GUI (Graphical User Interface) which generates input data, supports calculations and plots results is introduced.

This report provides the user's manual and theoretical background of these codes.

Keywords: Probabilistic Fracture Mechanics, Structural Integrity, Failure Probability, Welded Joint, Seismic Load, Stress Corrosion Cracking, Fatigue

^{*} On loan from Advanced Algorithm & Systems

目 次

1	はじめに	1
2	評価内容及び解析手法	2
2.1	評価内容及び特徴	2
2.2	PASCAL-SC の解析モデル	3
2.3	PASCAL-EQ の解析モデル	18
2.4	プログラムの流れ	26
3	プログラムの動作環境	28
4	使用方法	28
4.1	使用する実行ファイル	28
4.2	初期設定方法	28
4.3	起動	29
4.4	入力データ作成システム	30
4.5	プログラム実行システム	88
4.6	結果表示システム	93
4.7	サンプル問題	111
5	まとめ	117
	謝辞	117
	参考文献	118

Contents

1	Introduction-----	1
2	Basic Theories and Methodologies-----	2
2.1	Evaluation Contents and Characteristic of Codes-----	2
2.2	Analysis Model of PASCAL-SC-----	3
2.3	Analysis Model of PASCAL-EQ-----	18
2.4	Analysis Flow-----	26
3	Specification of Hard Ware-----	28
4	User's Manual-----	28
4.1	Execution Files-----	28
4.2	Install-----	28
4.3	Start Up-----	29
4.4	Generation of Input Data-----	30
4.5	Program Execution-----	88
4.6	Plotting Results-----	93
4.7	Sample Problem-----	111
5	Summary-----	117
	Acknowledgement-----	117
	References-----	118

表 リスト

表 2-1 PASCAL-SC の主な評価内容	2
表 2-2 PASCAL-EQ の主な評価内容	2
表 2-3 本コードの主な特徴	3
表 2-4 ダメージパラメータ各定数の数値(SUS316NG)	5
表 2-5 $\log t_f$ の期待値に関する定数(SUS316NG)	5
表 2-6 $\log t_f$ の標準偏差に関する定数	5
表 2-7 き裂初期進展の進展速度に関する定数(SUS316NG)	7
表 2-8 応力拡大係数によるき裂進展速度	7
表 2-9 疲労き裂進展速度[m/cycle]	8
表 3-1 プログラム動作環境	28
表 4-1 実行時に必要なファイル	28
表 4-2 入力ファイルの拡張子	30
表 4-3 パスファイル A の名称	89
表 4-4 PASCAL-SC 計算結果出力ファイル	99
表 4-5 SCC き裂発生・進展解析出力ファイル	100
表 4-6 1 き裂 SCC 進展解析	101
表 4-7 1 き裂地震時進展解析出力ファイル例	102
表 4-8 SCC 地震荷重負荷時破損確率解析出力ファイル例(破損確率)	103
表 4-9 SCC 地震荷重負荷時破損確率解析出力ファイル例(流動応力セル情報)	104
表 4-10 PASCAL-EQ の出力ファイル例	107
表 4-11 主な解析条件(PASCAL-SC)	111
表 4-12 GUI で作成した試解析の入力データ(PASCAL-SC)	111
表 4-13 主な解析条件(PASCAL-EQ)	114
表 4-14 GUI で作成したサンプル問題の入力データ(PASCAL-EQ)	115

図 リスト

図 2-1 応力腐食割れの 3 つの影響因子	3
図 2-2 き裂合体の模式図	8
図 2-3 地震荷重の模式図	9
図 2-4 流量のデータテーブル作成手順模式図	13
図 2-5 管内表面周方向半梢円き裂の座標系	14
図 2-6 貫通き裂模式図	17
図 2-7 平板中の半梢円表面き裂	20
図 2-8 き裂の模式図	22
図 2-9 PASCAL-SC のフロー図	26
図 2-10 PASCAL-EQ のフロー図	27
図 4-1 GUI のメイン・ダイアログ	29
図 4-2 PASCAL-SC の解析種類選択ダイアログ	31
図 4-3 新規データ作成/既存データ編集ダイアログ	32
図 4-4 コマンドライン 1 (サンプリング) ダイアログ	32
図 4-5 既存入力データ編集ダイアログ	32
図 4-6 既存入力データの編集(サンプリング)	33
図 4-7 警告ダイアログ	33
図 4-8 地震波選択ダイアログ(地震波解析をしない場合)	33
図 4-9 地震波選択ダイアログ(地震波を使用する場合)	34
図 4-10 地震波ファイルの指定	34
図 4-11 地震波リスト作成ダイアログ	35
図 4-12 入力データ保存ダイアログ	35
図 4-13 PASCAL-EQ の入力ダイアログ(コマンドライン 1)	63
図 4-14 PASCAL-EQ のコマンドライン 23 ダイアログ(isquare=0)	63
図 4-15 PASCAL-EQ の地震波ファイル選択ダイアログ	64
図 4-16 PASCAL-SC の実行システム・ダイアログ	88
図 4-17 PASCAL-SC の実行システム・ダイアログ(連続解析)	89
図 4-18 PASCAL-EQ の実行ダイアログ	91
図 4-19 PASCAL-EQ の実行ダイアログ(連続解析)	92
図 4-20 PASCAL-SC 結果表示ダイアログ	93
図 4-21 PASCAL-SC 結果表示ダイアログ(SCC き裂サイズ分布(2 次元グラフ)選択)	94
図 4-22 PASCAL-SC グラフ詳細設定(SCC き裂サイズ分布)	95
図 4-23 PASCAL-SC 結果表示ダイアログ(SCC き裂サイズ分布(3 次元グラフ)選択)	96
図 4-24 PASCAL-EQ 結果表示ダイアログ(結果ファイル選択前)	105
図 4-25 PASCAL-EQ グラフ詳細設定ダイアログ	106
図 4-26 PASCAL-EQ 再描画ダイアログ	106
図 4-27 サンプル問題で負荷した地震応力(PASCAL-SC)	113
図 4-28 サンプル問題で用いた溶接残留応力分布(PASCAL-SC)	113
図 4-29 破断確率(PASCAL-SC)	114
図 4-30 サンプル問題で負荷した地震応力(PASCAL-EQ)	116
図 4-31 破断・漏えい確率(PASCAL-EQ)	116

1 はじめに

軽水型発電炉の長期間運転に対するニーズが増大する中で、構造機器の健全性確保は重要な課題である。構造機器の信頼性評価には、より合理的な評価手法として確率論的破壊力学(PFM)解析が近年用いられ、その有用性が示されている¹⁾。原研においても、原子炉圧力容器を対象とした信頼性評価 PFM コード PASCAL(PFM Analysis of Structural Components in Aging LWR)を開発している²⁾。

圧力バウンダリ配管は、原子炉圧力容器と並んで安全上重要な構造機器であり、その信頼性評価は重要である。米国においては既に配管溶接部の信頼性を評価する PFM 解析コード PRAISE(Piping Reliability Analysis Including Seismic Events)が LLNL により開発され利用されている³⁾。しかし、より精度が高く現実的な配管の健全性を評価するには最近の知見や評価手法を取り入れた PFM 解析コードが必要である。

そこで、PRAISE をベースとして地震荷重等による疲労き裂進展に特化した PASCAL-EQ(PFM Analysis of Structural Components in Aging LWR – EarthQuake)を開発した。その後、経年劣化事象として応力腐食割れ(SCC)に関する最近の知見を反映するため、新たに PASCAL-SC(PFM Analysis of Structural Components in Aging LWR – Stress Corrosion Cracking)を開発した。

これらのコードは GUI(グラフィカル・ユーザー・インターフェイス)によって、入力データの作成、解析(計算)実行、解析結果のグラフ表示が可能となっており、より利用しやすい PFM 解析コードとなっている。

本報告書では、解析モデル及び使用方法を述べる。

2 評価内容及び解析手法

PASCAL-SC 及び PASCAL-EQ の評価内容・特徴及び基礎理論・解析手法の概略を以下に示す。

2.1 評価内容及び特徴

PASCAL-SC 及び PASCAL-EQ の主な評価内容を表 2-1, 表 2-2に、主な特徴を表 2-3に示す。

表 2-1 PASCAL-SC の主な評価内容

評価項目	内容	
解析対象	配管溶接部(1 溶接線)の破損確率	
き裂(複数)	き裂発生	応力腐食割れ(SCC)による発生
	き裂形状	内表面半楕円き裂
	き裂合体	日本機械学会維持規格
	劣化事象	応力腐食割れ(SCC)による進展・合体
		地震応力によるき裂進展・合体
		運転応力によるき裂進展・合体
確率計算	確率変数	SCC によるき裂発生時刻・場所, SCC 及び疲労によるき裂進展速度, 流動応力
	確率計算手法	階層別モンテカルロ法(流動応力)
破壊力学評価	応力拡大係数	半楕円き裂(未貫通)に対する Bergman の応力拡大係数
		半楕円き裂(未貫通)に対する ASME の応力拡大係数
		無限長き裂に対する PASCAL の応力拡大係数
		半楕円き裂(貫通)に対する Sander の応力拡大係数
	破断クライテリア	極限荷重評価法(日本機械学会維持規格)

表 2-2 PASCAL-EQ の主な評価内容

評価項目	内容	
解析対象	配管溶接部の破損確率	
き裂(单一)	き裂発生	初期き裂
	き裂形状	内表面半楕円き裂
	劣化事象	地震応力によるき裂進展
		運転応力によるき裂進展
確率計算	確率変数	初期き裂のサイズ, 疲労によるき裂進展速度, 流動応力
	確率計算手法	階層別モンテカルロ法(初期き裂サイズ)
破壊力学評価	応力拡大係数	半楕円き裂(未貫通)に対する Harris の応力拡大係数
		半楕円き裂(未貫通)に対する Newman-Raju の応力拡大係数
		半楕円き裂(未貫通)に対する Bergman の応力拡大係数
		半楕円き裂(貫通)に対する Forman の応力拡大係数
		半楕円き裂(貫通)に対する Sander の応力拡大係数
		半楕円き裂(貫通)に対する Adams の応力拡大係数
	破断クライテリア	塑性崩壊基準(Net-Section)
		J 積分
		G 係数法(NUPEC)
		Z 係数法(日本機械学会維持規格)
	2 パラメータ評価法	

表 2-3 本コードの主な特徴

項目	PASCAL-SC	PASCAL-EQ
地震荷重によるき裂進展評価	非定常な地震荷重によるき裂進展をより詳細に評価可能	
き裂進展速度	日本機械学会維持規格を参考	
応力拡大係数	ASME, Bergman, PASCAL, Sander 等, 最近の応力拡大係数でき裂進展を評価	Newman-Raju, Bergman, Forman, Sander 等, 最近の応力拡大係数でき裂進展を評価
破断クライテリア	最近の破断クライテリアである極限荷重評価法を用いた破断判定	
サンプリング方法	層別モンテカルロ法による効率的な確率変数サンプリング	
操作性	GUIによる操作性の向上	

2.2 PASCAL-SC の解析モデル

2.2.1 応力腐食割れ

応力腐食割れ (SCC: Stress Corrosion Cracking) の発生は図 2-1 に示すように、負荷応力、残留応力、材料の機械的性質などの力学因子、水質、温度、pH、電位、溶存酸素濃度などの環境因子、及び化学組成、熱処理、偏析、欠陥構造などの材料因子の 3 つの因子の組み合わせにより生じる複雑な現象である。

応力腐食割れによるき裂発生及びき裂発生直後のき裂進展については、PC-PRAISE に導入されている LLNL 研究所・Harris らのモデル³⁾を採用した。

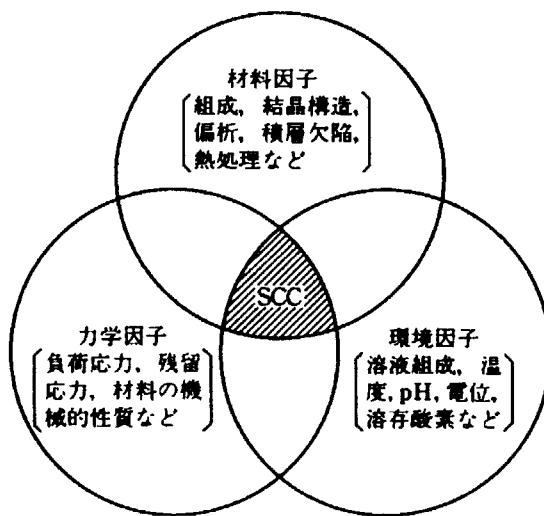


図 2-1 応力腐食割れの 3 つの影響因子

2.2.1.1 き裂の発生モデル

① ダメージ・パラメータ

応力腐食割れを評価するために、図 2-1に示す 3 つの影響因子を考慮したダメージ・パラメータ D を以下のように定義する。

$$D = f_1 \text{ (材料因子)} \cdot f_2 \text{ (環境因子)} \cdot f_3 \text{ (力学因子)} \quad (2-1)$$

各影響因子を以下に示す。

$$f_1 = C_1 (P_a)^{C_2} \quad (2-2)$$

$$f_2 = O_2^{C_3} \exp\left[\frac{C_4}{(T + 273)}\right] \log(C_5 \gamma^{C_6}) \quad (2-3)$$

力学因子の影響関数 f_3 については定荷重 (CL: Constant Load Condition) と定ひずみ速度 (CERT: Constant Strain Rate Condition) の条件を分けて定義している。

定ひずみ速度 (CERT) の場合 :

$$f_{3\varepsilon} = \dot{\varepsilon}^{C_7} \quad (2-4)$$

定荷重 (CL) の場合 :

$$f_{3\sigma} = (C_8 \sigma^{C_9})^{C_7} \quad (2-5)$$

以上の各式で、

P_a : 材料の鋭敏化度 (C/cm^2)

O_2 : 酸素の成分 (ppm)

T : 温度 ($^\circ\text{C}$)

$\dot{\varepsilon}$: ひずみ速度 (sec^{-1})

σ : 負荷応力 (ksi)

γ : 水の導電率 ($\mu \text{s}/\text{cm}$)

である。

式(2-4)と式(2-5)に対応し、ダメージ・パラメータ D も 2 通りの定義が可能である。

定ひずみ速度 (CERT) の場合 :

$$D_\varepsilon = f_1 \cdot f_2 \cdot f_{3\varepsilon} \quad (2-6)$$

定荷重 (CL) の場合 :

$$D_\sigma = f_1 \cdot f_2 \cdot f_{3\sigma} \quad (2-7)$$

実験データに関する分析から、 $C_1 \sim C_9$ の各定数が求められ表 2-4に示す値が提案されている³⁾。

表 2-4 ダメージパラメータ各定数の数値(SUS316NG)

C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6	C_7	C_8	C_9
1.879	0.0	0.24	-1123.	4.0	0.35	0.49	2.21×10^{-15}	6.0

② 応力腐食割れの発生時間

応力腐食割れによるき裂の発生時間は、式(2-6)と式(2-7)によって定義されるダメージパラメータで評価される。

実験データに関する統計処理から、応力腐食割れの発生時間は対数正規分布になっていることが分かっている。発生時間を t_f とすれば、 $\log t_f$ の期待値は以下の式で表現できる。

$$\log t_f \text{の期待値} = B_0 + B_1 \log(D) \quad (2-8)$$

ここで、ダメージパラメータ D は、CERT の場合は $D=D_e$ 、CL の場合は $D=D_o$ となる。また、 B_0 、 B_1 は統計処理から得られる定数である。

材料 SUS316 について得られた定数を表 2-5 に示す。

表 2-5 $\log t_f$ の期待値に関する定数(SUS316NG)

CERT		CL	
B_0	B_1	B_0	B_1
-0.65	-0.76	-7.72	-5.39

式(2-8)と同様に、実験データに関する統計処理の結果、 $\log t_f$ の標準偏差に関する評価式も得られ、次式の形となる。式中のパラメータを表 2-6 に示す。

$$\log t_f \text{の標準偏差} = B_2 + B_3 \log(D) \quad (2-9)$$

表 2-6 $\log t_f$ の標準偏差に関する定数

D_e の範囲	CERT		CL	
	B_2	B_3	B_2	B_3
$D_e < -3.96$	32744	0	32744*	0*
$-3.96 \leq D_e < -3.32$	-0.7461	-0.2731	-0.7461*	-0.2731*
$D_e > -3.32$	0.16056	0.0	0.16056*	0.0*

注*: CL の場合は実験データが少ないため、CERT の値を使用

③ プラント実機の運転状況のシミュレーション

式(2-8)と式(2-9)はき裂発生時間の評価モデルであるが、これらはダメージパラメータによって定ひずみ速度 (CERT) の場合と定荷重 (CL) の場合に対応している。しかし、実際のプラント

実機の運転状況は複雑で、時々刻々に変化している。

これについて、LLNL 研究所はプラントの実機運転を 2 つの状態に分けて、起動・停止を定ひずみ速度 (CERT) 状態とし、安定運転時を定荷重 (CL) 状態としている。それぞれの状態について、き裂発生時間に関するダメージパラメータを計算し、それらを組み合わせて累積時間を評価している。

④ 材料の鋭敏化度

材料鋭敏化度は応力腐食割れの重要なパラメータであり、その評価モデルについては、文献記述データに関する収集・整理から得られている。材料の鋭敏化度はワイブル分布に従うと仮定している。以下にそのワイブル分布式とパラメータを示す。

$$P(Pa < x) = 1 - \exp\left(-\left(\frac{x}{b}\right)^c\right) \quad (2-10)$$

$$b = 17.3 C/cm^2, \quad c = 1.05$$

⑤ 発生したき裂の初期寸法

応力腐食割れによって発生したき裂の初期寸法については、その深さと長さを独立に評価している。深さ a を 0.001(in.) に固定しているが、長さ b を対数正規分布としている。その分布パラメータを以下に示す。

b の平均値 : 1/16 in.

$\ln(b)$ の標準偏差 : 0.08 (b が 1 in. よりも大きいき裂の累積確率 = 10^{-2})

⑥ 複数き裂の発生

式(2-1)～式(2-9)に示した評価モデルは、実験室における板厚 2 in. の試験片による実験から得られたデータを基にしたモデルである。従って、実際の配管系について計算を行う場合、溶接線の長さを 2 in. の長さで複数のセグメントに分けて、別々のセグメントで応力腐食割れによるき裂発生・進展を評価する必要がある。各セグメントにおいては、応力を一定とするが、き裂の発生時間を独立に評価する。このことにより、評価対象となっている溶接部には、複数のき裂が同時に存在することもあり得る。

2.2.1.2 き裂進展モデル

応力腐食割れにより発生したき裂の進展は 2 つの段階に分けられる。1 つはき裂が発生後の初期段階での進展である。この段階でのき裂の進展は、前述のダメージパラメータに依存し、破壊力学的パラメータには依存しないものと仮定される。き裂の進展が一定の条件を満たした場合に、破壊力学パラメータに依存する進展に切り替える。

① き裂の初期進展

き裂が発生後の初期段階での進展則は式(2-6)及び式(2-7)で定義されたダメージパラメータによって規定されている。実験データに関する統計処理から、き裂進展速度 \dot{a} はダメージパラメータとの間に、以下の関係式が得られている。

$$\log(\dot{a}) = F + G \log(D) \quad (2-11)$$

ここで、 G は定数、 F は正規分布に従う変数、き裂進展速度 \dot{a} は in./day である。
 F と G の値を表 2-7に示す。

表 2-7 き裂初期進展の進展速度に関する定数(SUS316NG)

CERT		CL	
F_ϵ	G_ϵ	F_σ	G_σ
平均値 −0.0227	標準偏差 0.2052	平均値 −0.0227	標準偏差 0.63136

② 破壊力学パラメータに依存するき裂進展

破壊力学パラメータに依存するき裂進展速度は日本機械学会維持規格⁴⁾の低炭素含有量オーステナイト系ステンレス鋼を参考にした対数正規分布に従う式を用いた(表 2-8)。

表 2-8 応力拡大係数によるき裂進展速度

進展速度[mm/sec]	
平均値 (K:応力拡大係数[MPa \sqrt{m}])	$7.04 \times 10^{-12} K^{2.161}$ ($13.7 \leq K \leq 117.7$) 2.0×10^{-9} ($K < 13.7$) 2.1×10^{-7} ($K > 117.7$)
標準偏差 σ	$\text{Log}_e \sigma = 0.7983$

③ き裂進展モデルの切り替え基準

き裂の進展は、その進展について、初期の進展（この方式を a と記す）から破壊力学パラメータに依存する進展（この方式を b と記す）に切り替わる。

この切り替え基準を以下に示す。

- SCC により発生したき裂は初期の段階で方式 a に従って進展する。
- 進展方式 b の進展速度が方式 a の進展速度を上回った時点から、方式 b に従って進展する。その後は進展速度は逆転しても、進展方式は b のままで変更しない。
- き裂深さがある閾値(入力データで指定)より深くなったら、方式 b に従って進展する。

④ き裂の合体

日本機械学会維持規格⁴⁾の方法を用いた。図 2-2において $S \leq 0$ の場合にき裂は合体し、合体後は深さが $\max(a_1, a_2)$ 、全長が $L_1 + L_2$ のき裂となる。ただし、全てのき裂は同一平面上に存在するものとする。

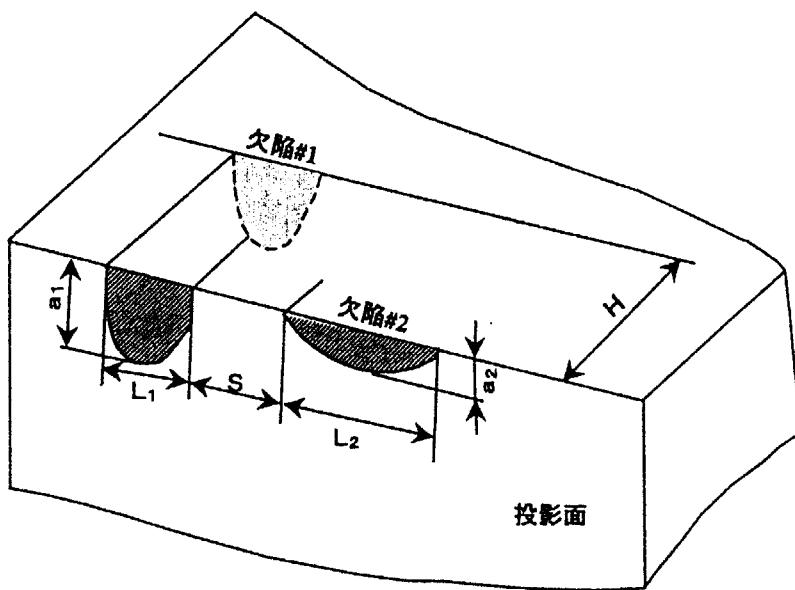


図 2-2 き裂合体の模式図

2.2.2 疲労き裂進展

疲労によるき裂進展速度は、日本機械学会維持規格⁴⁾を参考にした対数正規分布に従う式を用いた(表 2-9)。

表 2-9 疲労き裂進展速度[m/cycle]

平均値	$1.59 \times 10^{-12} \Delta K^3 / (1-R)^{2.12}$
ΔK :応力拡大係数範囲[MPa \sqrt{m}]	
R : 応力比	
標準偏差 σ	$\text{Log}_e \sigma = 0.355$

2.2.3 応力

配管溶接部に負荷される応力は溶接残留応力、運転応力、地震応力、過渡事象による応力を膜応力及び曲げ応力で評価する。

2.2.3.1 溶接残留応力

溶接残留応力の膜応力分布は以下の多項式で評価する。

$$\sigma(x/t) = \sum_i A_i (x/t)^i$$

ここで、 x は内表面から肉厚方向の位置、 t は肉厚である。

ASME の応力拡大係数(2.2.6.2節)を用いる場合は 4 次式、Bergman の応力拡大係数(2.2.6.1節)を用

いる場合は3次式で評価する。Bergmanの応力拡大係数を使用する際には、曲げ応力も評価できる。

2.2.3.2 運転応力

プラント運転時に配管溶接部に負荷される応力として自重、内圧、熱応力の膜及び曲げ応力を考慮し、それらの和を運転応力として評価する。尚、曲げ応力を考慮していない応力拡大係数を使用する際には、膜応力と曲げ応力の和を膜応力として評価する。

2.2.3.3 地震応力

地震応力については図 2-3に示す非定常的ピーク応力が評価可能である。各地震荷重応力ペア($\sigma_{\min}(i)$ と $\sigma_{\max}(i)$ の応力ペア)毎に運転応力を加味して疲労き裂進展・合体の評価及び破損判定を実施する。

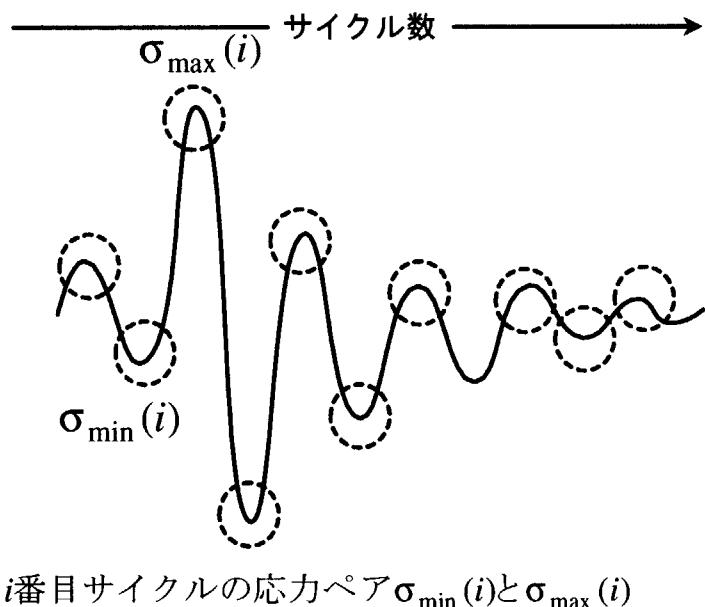


図 2-3 地震荷重の模式図

2.2.3.4 過渡事象による応力

過渡事象による応力は最大応力と最小応力のペアとそのサイクル数によって指定され、き裂が存在する場合には疲労によるき裂進展・合体(地震応力の場合と同様)を考慮する。

2.2.4 破断判定方法

破断判定方法には日本機械学会維持規格⁴⁾の極限荷重評価法を用いた。
周方向欠陥の負荷応力と塑性崩壊発生時における欠陥深さの関係は、

$$P_b' = \frac{2\sigma_f}{\pi} (2\sin\beta - \frac{a}{t}\sin\theta) \quad \beta = \frac{1}{2}(\pi - \frac{a}{t}\theta - \pi\frac{P_m}{\sigma_f}) \quad (\theta + \beta \leq \pi \text{ の場合}) \quad (2-12)$$

で与えられる。ここで、 P_b' は塑性崩壊時の曲げ応力、 σ_f は流動応力、 a は欠陥深さ、 t は管の肉厚、 P_m は一次一般膜応力、 θ は欠陥角度である。

塑性崩壊時の曲げ応力を以下のように負荷応力と安全率を含む次式で与え、これが式(2-12)に等しくなった場合に破断したと判定する(PFMでは通常安全率を1と考える)。

$$P_b' = P_b + P_e$$

ただし、 P_b は一次曲げ応力、 P_e は熱膨張応力である。

2.2.5 漏えい

PASCAL-SCでは、配管肉厚の8割までき裂が進展した場合は漏えい(き裂貫通)とし、漏えい量を評価している。これは、配管肉厚の8割まで到達したき裂の応力拡大係数の評価が困難であるためである。採用している漏えい量評価法を以下に示す。

2.2.5.1 柴田らの漏えい量評価

柴田らの漏えい量評価⁸⁾は、き裂開口面積を①Tada-Parisの方法で評価し、漏えい量を②漏えい量の計算方法(Henryのサブクール水モデル或いはMoodyのスリップモデル)で評価する。プログラムでは図2-4に示す手順で、内圧 P_0 が0~120[Kg/cm²]、パラメータ α_0 が0.5~120を計算区間として求めめた流量Gのデータテーブルを使用し計算時間の短縮を図っている。

① Tada-Parisの方法によるき裂開口面積評価

配管に生じる円周方向貫通き裂のき裂開口面積は、Tada-Parisの方法を用いて計算する。

曲げと軸力をうける配管のき裂開口面積は、膜応力による寄与成分 A_t と曲げによる寄与成分 A_b によって評価できる。

$$A_{total} = A_t + A_b \quad (2-13)$$

これに対して、 A_t と A_b はそれぞれ次のように計算できる。

$$\begin{aligned} A_t &= \frac{\sigma_t}{E} (\pi R^2) I_t(\theta) \\ A_b &= \frac{\sigma_b}{E} (\pi R^2) I_b(\theta) \end{aligned} \quad (2-14)$$

ここで、 E はヤング率、 θ はき裂円周角の半分である。また、 $I_t(\theta)$ と $I_b(\theta)$ は無次元量で、次のように近似される。

$$I_t(\theta) = 2\theta^2 \left[1 + \left(\frac{\theta}{\pi} \right)^{3/2} \left\{ 8.6 - 13.3 \left(\frac{\theta}{\pi} \right) + 24 \left(\frac{\theta}{\pi} \right)^2 \right. \right. \\ \left. \left. + \left(\frac{\theta}{\pi} \right)^3 \left\{ 22.5 - 75 \left(\frac{\theta}{\pi} \right) + 205.7 \left(\frac{\theta}{\pi} \right)^2 \right. \right. \right. \\ \left. \left. \left. - 247.5 \left(\frac{\theta}{\pi} \right)^3 + 242 \left(\frac{\theta}{\pi} \right)^4 \right\} \right] \quad \left(0 < \theta < \frac{100^\circ}{180^\circ} \pi \right) \quad (2-15)$$

$$I_b(\theta) = 2\theta^2 \left[1 + \left(\frac{\theta}{\pi} \right)^{3/2} \left\{ 8.2 - 12.7 \left(\frac{\theta}{\pi} \right) + 19.3 \left(\frac{\theta}{\pi} \right)^2 \right. \right. \\ \left. \left. + \left(\frac{\theta}{\pi} \right)^3 \left\{ 20.4 - 68 \left(\frac{\theta}{\pi} \right) + 165.2 \left(\frac{\theta}{\pi} \right)^2 \right. \right. \right. \\ \left. \left. \left. - 187.2 \left(\frac{\theta}{\pi} \right)^3 + 146.7 \left(\frac{\theta}{\pi} \right)^4 \right\} \right] \quad \left(0 < \theta < \frac{100^\circ}{180^\circ} \pi \right) \quad (2-16)$$

なお、き裂先端の塑性域を考慮したき裂開口面積は、上記各式中の θ のかわりに次式で示される θ_{eff} を用いて計算する。

$$\theta_{\text{eff}} = \theta + \frac{(K_t + K_b)^2}{2\pi R \sigma_f^2} \quad (2-17)$$

ここで、 K_t , K_b はそれぞれ膜応力と曲げ応力による応力拡大係数である。

② 漏えい量の計算方法

き裂からの漏えい量は臨界モデルを用いて計算し、一次系配管内の加圧水については Henry のサブクール水モデル、飽和水及び飽和蒸気については Moody のスリップモデルを用いている。尚、PASCAL-SC には Moody のスリップモデルのみ導入されている。

・Henry モデル

Henry によれば、臨界流 G_c (kg/sec · m²) は

$$G_c^2 = \left\{ \frac{xv_g}{\gamma P} - \left(v_g - v_{l_0} \right) \frac{dx}{dP} \right\}_E^{-1} \quad (2-18)$$

となる。ここで、 x はクオリティ、 v は比容積 (m³/kg)、 P は圧力 (Pa)、 γ は断熱定数である。

また添え字としては、 g : 気相、 l : 液相、 l_0 : 初期入り口液相、 E は出口面である。

出口面でのクオリティ変化は非平衡パラメータ N を用いて、

$$\left[\frac{dx}{dP} \right]_E = N \frac{dx_E}{dp} \quad (2-19)$$

で与える。 x_E は熱平衡時の出口面クオリティである。

ただし、出口面における圧力は上記臨界流量時にき裂流路内での入り口損失、加速損失及び摩擦損失を考慮することにより求める。

・Moody モデル

このモデルは以下に示す各式を連立させて解き、臨界流量 G_c を与える。

$$\int_{P_2(h_0, G_c)}^{P_1} \Gamma(P, h_0, G_c) dP = \frac{fL}{D_h} \quad (2-20)$$

ここで、 Γ は次式で表される圧力とエンタルピー、質量流速の関数である。また、 L はき裂深さである。

$$\Gamma = \frac{2G_c \left[\left(\frac{\partial a}{\partial x} \right)_P \frac{\left(\frac{\partial b}{\partial P} \right)_x + G_c^2 \left(\frac{\partial b}{\partial P} \right)_x}{\left(\frac{\partial b}{\partial x} \right)_P + G_c^2 \left(\frac{\partial b}{\partial x} \right)_P} - \left(\frac{\partial a}{\partial P} \right)_x \right] - 2}{v_l \left[1 + \left(\frac{1}{K} \frac{v_g}{v_l} - 1 \right) x \right]^2 G_c^2} \quad (2-21)$$

また、上式中の a, b, c はそれぞれ次式で定義される。

$$\begin{aligned} a &= [K(1-x)v_l + xv_g] \left[x + (1-x)/K \right] \\ b &= h_l + h_{lg} \\ c &= [K(1-x)v_l + xv_g]^2 \left[x + (1-x)/K^2 \right] \\ K &= \left(\frac{v_g}{v_l} \right)^{1/3} \end{aligned} \quad (2-22)$$

ここで、 h はエンタルピー、 K は気相と液相の流速比、 P は圧力、 x はクオリティである。また添え字としては、 g は気相、 l は液相、 l_g は液相から気相への相変化、0 は配管内、1 は入口面、2 は出口面である。

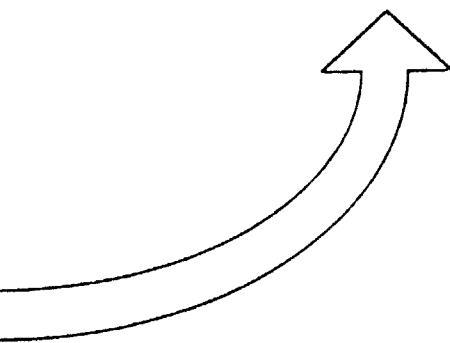
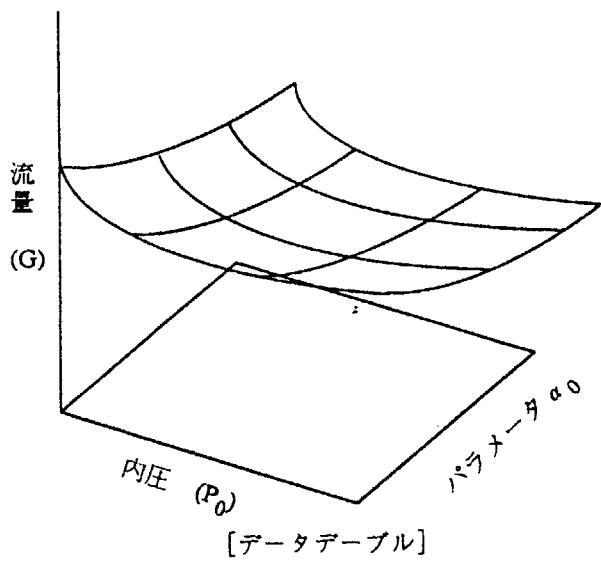
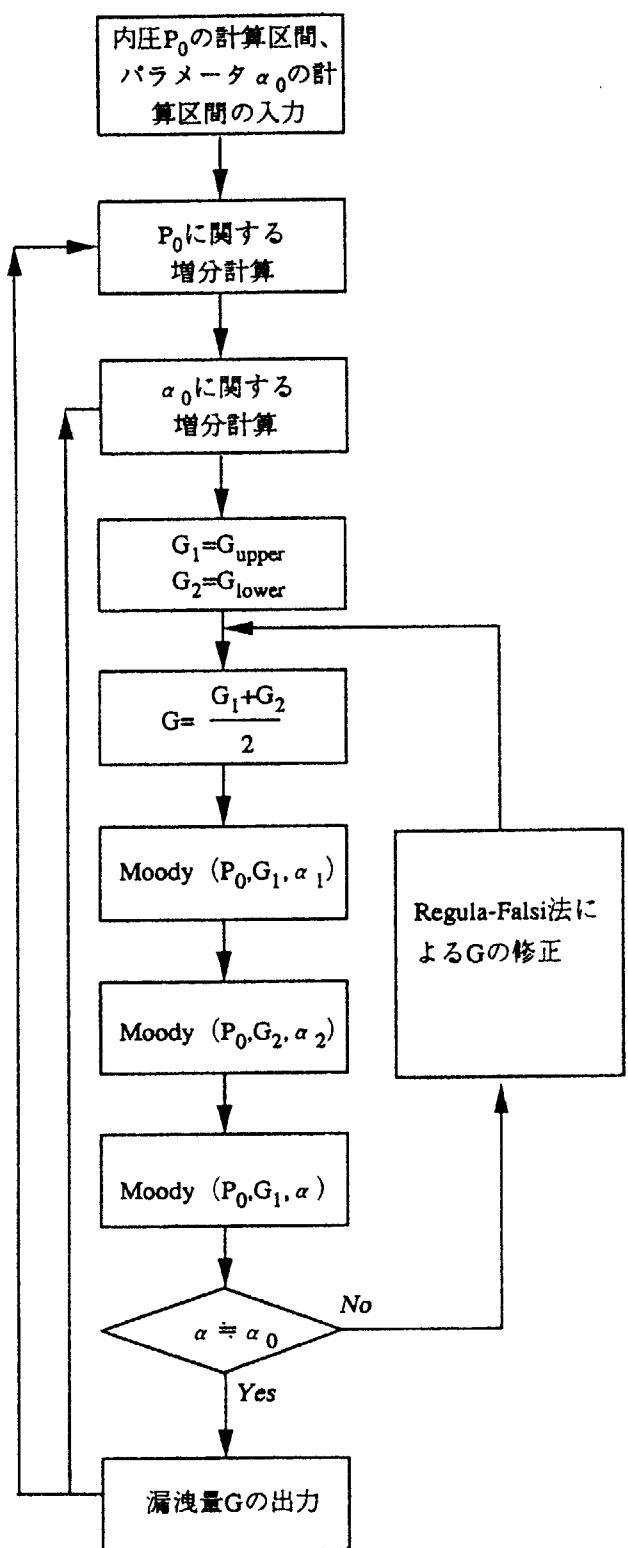


図 2-4 流量のデータテーブル作成手順模式図

2.2.6 応力拡大係数

2.2.6.1 Bergman の応力拡大係数

Bergman によって円筒形構造物における表面き裂の応力拡大係数が与えられている⁵⁾. 応力分布としては管壁肉厚方向の 3 次応力分布及び曲げ応力を考慮している.

応力拡大係数を計算する際の座標系を図 2-5に示す. 応力分布は管壁方向について式(2-23)に示す 3 次応力分布を考慮し, 曲げ荷重について式(2-24)に示す分布を考慮する.

$$\sigma = \sigma_0 + \sigma \frac{u}{a} + \sigma_2 \left(\frac{u}{a} \right)^2 + \sigma_3 \left(\frac{u}{a} \right)^3 \quad (2-23)$$

$$\sigma = \sigma_4 \frac{y}{R_i + t} + \sigma_5 \frac{x}{R_i + t} \quad (2-24)$$

ただし, a はき裂深さ, R_i は管の内半径, t は管の肉厚, u は $r-R_i$ で定義された局部座標系である.

以上の応力分布に対して, 応力拡大係数 K_I は以下の式で与えられている.

$$K_I = \sqrt{\pi a} \sigma_i f_i \quad (2-25)$$

ここで, f_i は無次元応力拡大係数で, 以下に示すき裂先端位置を表す角度 ϕ の 6 次関数として整理されている.

$$f_i = A_0 + A_1 \frac{2\phi}{\pi} + A_2 \left(\frac{2\phi}{\pi} \right)^2 + A_3 \left(\frac{2\phi}{\pi} \right)^3 + A_4 \left(\frac{2\phi}{\pi} \right)^4 + A_5 \left(\frac{2\phi}{\pi} \right)^5 + A_6 \left(\frac{2\phi}{\pi} \right)^6 \quad (2-26)$$

き裂先端の最深点では $2\phi/\pi=1$, 表面では $2\phi/\pi=0$ となる.

Bergman は式(2-23)と式(2-24)に示した 6 つの荷重形式について, 式(2-26)に示す 7 つの係数を求めており, 各係数はデータテーブルの形式で与えられている.

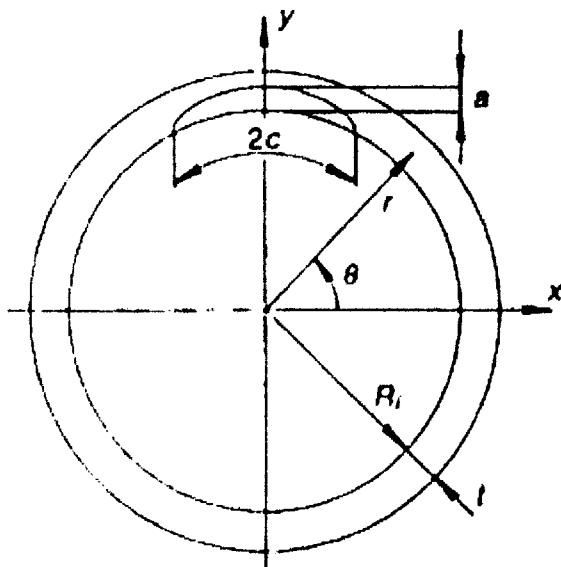


図 2-5 管内表面周方向半楕円き裂の座標系

2.2.6.2 ASME の応力拡大係数

ASME では平板に表面き裂が存在する場合の応力拡大係数算出式が与えられている⁶⁾. 膜応力分布 σ が以下の 4 次式で与えられた場合,

$$\sigma(x/a) = A_0 + A_1(x/a) + A_2(x/a)^2 + A_3(x/a)^3 + A_4(x/a)^4$$

応力拡大係数 K_I は式(2-27)で表される.

$$K_I = \sum_0^4 A_i G_i \left(\frac{\pi a}{Q}\right)^{0.5} \quad (2-27)$$

$$Q = E_k^2 - q_y$$

$$E_k^2 \equiv 1 + 4.593(a/l)^{1.65}$$

$$q_y = \frac{\left(\sum_i A_i G_i\right)}{6\sigma_{ys}^2}$$

ここで, a はき裂深さ, l はき裂長さ, Q は欠陥形状パラメータ, q_y は塑性域補正係数, σ_{ys} は降伏応力, G_i は異なる応力場に対する係数である. 係数 G_i はデータテーブル形式で与えられている.

2.2.6.3 PASCAL の応力拡大係数

原研で開発された PASCAL では, 円筒形構造物における周方向全周き裂について独自の応力拡大係数を求めている²⁾. この応力拡大係数は(き裂深さ)/(配管肉厚)が 0.95 以下で適用可能である.

容器または管の肉厚方向における応力分布が式(2-28)に示す 3 次多項式で表せるものと仮定している.

$$\sigma(\xi) = A_0 + A_1\xi + A_2\xi^2 + A_3\xi^3 \quad (2-28)$$

ただし, $\xi = \sqrt{x/t}$, x は容器内表面までの距離, t は肉厚である.

応力拡大係数 K_I は式(2-29)から求める.

$$K_I = \sqrt{\pi a} \left(A_0 F_0 + \frac{2\xi}{\pi} A_1 F_1 + \frac{\xi^2}{2} A_2 F_2 + \frac{4\xi^3}{3\pi} A_3 F_3 \right) \quad (2-29)$$

ただし, $\xi = \sqrt{x/t}$, a はき裂の深さ, t は容肉厚である.

また, F は応力拡大係数の補正係数で, 以下のように与えられている.

・ $a/t \leq 0.7$ の場合は :

$$\begin{aligned} F_0 &= 0.6820\xi^4 - 1.8283\xi^3 + 3.4051\xi^2 + 0.0209\xi + 1.1215 \\ F_1 &= 1.2402\xi^4 - 2.2730\xi^3 + 2.5718\xi^2 - 0.0578\xi + 1.0727 \\ F_2 &= 1.2458\xi^4 - 2.1560\xi^3 + 2.0896\xi^2 - 0.0852\xi + 1.0518 \\ F_3 &= 1.7599\xi^4 - 2.9822\xi^3 + 2.3602\xi^2 - 0.2277\xi + 1.0483 \end{aligned} \quad (2-30)$$

・ $0.95 > a/t > 0.7$ の場合は :

$$\begin{aligned} F_0 &= 4729.3333\xi^5 - 17919.6364\xi^4 + 27100.4530\xi^3 - 20442.3042\xi^2 + 7692.5106\xi - 1153.4967 \\ F_1 &= 2688.0000\xi^5 - 10106.3636\xi^4 + 15174.8303\xi^3 - 11369.3741\xi^2 + 4250.9351\xi - 633.0513 \\ F_2 &= 2828.0000\xi^5 - 10694.7000\xi^4 + 16149.2500\xi^3 - 12166.6400\xi^2 + 4573.2209\xi - 684.7300 \\ F_3 &= 2165.3333\xi^5 - 8157.7576\xi^4 + 12274.3576\xi^3 - 9215.6389\xi^2 + 3452.5589\xi - 515.0376 \end{aligned} \quad (2-31)$$

2.2.6.4 Sander の応力拡大係数

Sander は円筒形構造物に軸力 P 及びモーメント M が加わる場合の貫通き裂(図 2-6)の応力拡大係数の解を与えていている⁷⁾.

軸力 P 加わる場合の解として、次式を与えている。

$$\begin{aligned} K_I &= \frac{P}{2\pi R t} \sqrt{\pi(R\theta)} F(\theta) \\ F(\theta) &= 1.0 + 7.5\left(\frac{\theta}{\pi}\right)^{3/2} - 15.0\left(\frac{\theta}{\pi}\right)^{5/2} + 33.0\left(\frac{\theta}{\pi}\right)^{7/2} \end{aligned} \quad (2-32)$$

また、曲げモーメント M が加わる場合の解として、次式を与えている。

$$\begin{aligned} K_I &= \frac{M}{\pi R^2 t} \sqrt{\pi(R\theta)} F(\theta) \\ F(\theta) &= 1.0 + 6.8\left(\frac{\theta}{\pi}\right)^{3/2} - 13.6\left(\frac{\theta}{\pi}\right)^{5/2} + 20.0\left(\frac{\theta}{\pi}\right)^{7/2} \end{aligned} \quad (2-33)$$

ただし、 R は平均半径、 t は板厚、 θ はき裂半角である。

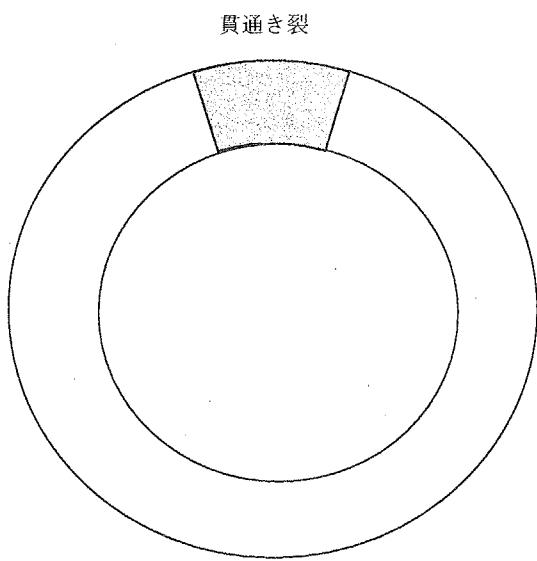


図 2-6 貫通き裂模式図

2.3 PASCAL-EQ の解析モデル

PASCAL-EQ は PRAISE³⁾に応力拡大係数評価手法の追加や漏えい量評価の改良、地震応力評価手法の改良、疲労き裂進展速度評価モデルの追加、最近の応力拡大係数計算手法の追加、破壊クライテリアの追加を実施して開発したものである。

以下に PASCAL-EQ の改良点及び追加機能について示す。

2.3.1 PASCAL-EQ の改良点及び追加機能

2.3.1.1 疲労き裂進展評価式のパラメータ指定

ASME Section XI の疲労き裂進展評価式において、上限値を用いる場合や傾きを変更する等、種々の評価ができるように式(2-34)の指指数部(m_1, m_2)、係数部(C_1, C_2)、評価区間(X_1, X_2)の値を直接入力データで指定できるようにした。

$$\frac{da}{dN} = \begin{cases} C_1(\Delta K)^{m_1} & (X_1 < \Delta K \leq X_2) \\ C_2(\Delta K)^{m_2} & (X_2 < \Delta K) \end{cases} \quad (2-34)$$

ここで、 da/dN はき裂進展速度、 ΔK は応力拡大係数範囲である。

2.3.1.2 応力拡大係数の評価式及び選択機能

未貫通き裂に対する Newman-Raju の応力拡大係数や、貫通き裂に対する Forman の応力拡大係数や Sander の応力拡大係数(2.2.6.4節)、Adams の応力拡大係数を導入した。

また、様々な応力拡大係数評価式の組み合わせが自由に評価できる機能を追加するとともに、評価式の膜応力と曲げ応力の評価部分にそれぞれ寄与率を入力データで直接指定できる機能を追加した。指定方法については PASCAL-EQ 入力データ(コマンドライン 2 及び 5)を参照のこと。

以下に Newman-Raju の応力拡大係数と Forman の応力拡大係数の概略を示す。

- Newman-Raju の応力拡大係数

Newman-Raju の解⁹⁾は図 2-7に示す平板に存在する半楕円表面き裂に対して提案されたもので、保守側の評価として、圧力容器及び配管系についても良く用いられている。この応力拡大係数は次式で与えられる。

$$K = (\sigma_m + H\sigma_b)\sqrt{\pi a/QF} \quad (2-35)$$

ここで、

$$Q = 1 + 1.464(a/b)^{1.65}$$

$$F = \left[M_1 + M_2 \left(\frac{a}{h} \right)^2 + M_3 \left(\frac{a}{h} \right)^4 \right] g f_\phi f_\omega$$

$$H = H_1 + (H_2 - H_1) \sin^P \phi$$

$$M_1 = 1.13 - 0.09(a/b)$$

$$M_2 = -0.54 + 0.89/(0.2 + a/b)$$

$$M_3 = 0.5 - 1.0/(0.65 + a/b) + 14(1.0 - a/b)^{24}$$

$$g = 1 + \left[0.1 + 0.35 \left(\frac{a}{h} \right)^2 \right] (1 - \sin \phi)^2$$

$$f_\phi = \left[\left(\frac{a}{b} \right)^2 \cos^2 \phi + \sin^2 \phi \right]^{1/4} \quad (2-36)$$

$$f_\omega = \left[\sec \left(\frac{\pi b}{2W} \sqrt{\frac{a}{h}} \right) \right]^{1/2}$$

$$p = 0.2 + \left(\frac{a}{b} \right) + 0.6 \left(\frac{a}{h} \right)$$

$$H_1 = 1 - 0.34 \left(\frac{a}{h} \right) - 0.11 \left(\frac{a}{b} \right) \left(\frac{a}{h} \right)$$

$$H_2 = 1 + G_1 \left(\frac{a}{h} \right) + G_2 \left(\frac{a}{h} \right)^2$$

$$G_1 = 1.22 - 0.12(a/b)$$

$$G_2 = 0.55 - 1.05 \left(\frac{a}{b} \right)^{0.75} + 0.47 \left(\frac{a}{b} \right)^{1.5}$$

ただし、 σ_m は膜応力、 σ_b は曲げ応力、 h は板厚、 ϕ は計算点の位置である。

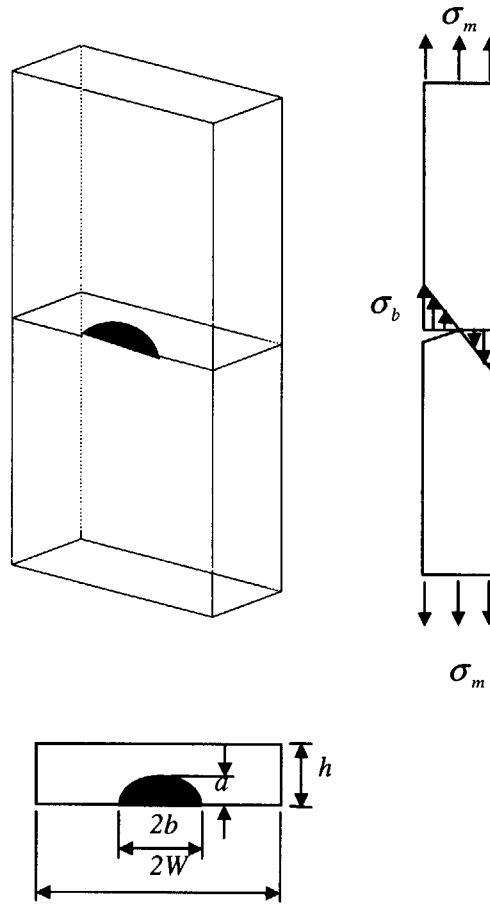


図 2-7 平板中の半楕円表面き裂

Newman-Raju の応力拡大係数の適用範囲は

$$0.2 \leq a/h \leq 0.8, \quad 0.2 \leq a/b \leq 2.0$$

とされている。

- Forman の応力拡大係数

Forman は膜応力及び曲げ応力を考慮する場合の応力拡大係数の解を以下のように与えている¹⁰⁾.

$$\begin{aligned} K &= K_m + K_b \\ &= (\sigma_m F_m + \sigma_b F_b) \sqrt{\pi b} \end{aligned} \tag{2-37}$$

ただし、 K_m は膜応力による応力拡大係数、 K_b は曲げ応力による応力拡大係数である。 F_m 、 F_b はそれぞれ K_m 、 K_b に対する補正係数で以下のように指定されている。

$$\begin{aligned} F_m &= (I_m / 2\pi\theta)^{1/2} \\ F_b &= (I_b / 2\pi\theta)^{1/2} \end{aligned} \tag{2-38}$$

$$I_m = \varepsilon^{-1} \theta^2 [g(\theta) + \pi c^2 / \lambda - 2\sqrt{2}]$$

$$I_b = \varepsilon^{-1} \theta^2 \left[2\sqrt{2} \left(\frac{\sin \theta}{\theta} \mu \right)^2 + \pi c^2 / \lambda - 2\sqrt{2} \right]$$

$$c = \begin{cases} 1 + \frac{\pi}{16} \lambda^2 - 0.0293 \lambda^3 & \lambda \leq 1 \\ \left(\frac{2\sqrt{2}}{\pi} \lambda \right)^{0.5} + \left(\frac{0.179}{\lambda} \right)^{0.885} & \lambda > 1 \end{cases}$$

$$\lambda = \frac{\theta}{2\varepsilon}$$

$$\mu = 1 + \frac{\sqrt{2}}{4} \frac{\theta + \theta \cot^2 \theta - \cot \theta}{\cot[2\theta \cot \theta + \sqrt{2}] + \sqrt{2} \cot \theta}$$

$$g(\theta) = 2\sqrt{2} \left(1 + \frac{1 + \theta \cot \theta}{2\theta \cot \theta + \sqrt{2}\theta \cot[(\pi - \theta)/\sqrt{2}]} \right)^2$$

$$\varepsilon^2 = \left(\frac{t}{R} \right) [12(1-\nu^2)]^{-1/2}$$

ただし、 θ は貫通き裂半角、 R は配管の平均半径、 t は肉厚、 ν はポアソン比である。

2.3.1.3 漏えい量評価

柴田らの漏えい量評価(2.2.5.1節)を導入するとともに、計算式より求めた流量のデータテーブルを使用し計算時間の短縮を図っている。

2.3.1.4 日本機械学会維持規格の疲労き裂進展速度モデルの追加

日本機械学会維持規格⁴⁾に規定されているオーステナイト系ステンレス鋼に対する疲労き裂進展速度モデルを決定論的評価モデルと確率論的評価モデルの両方を考慮して導入した。

大気中及び内部き裂の疲労き裂進展速度の評価モデルは式(2-39)で与える。

$$\frac{da}{dN} = \begin{cases} 10^H \times 18.61 \times 10^{-3} \times \Delta K^{3.3} & R \leq 0 \\ 10^H \times 10^{-3} \times (18.61 + 33.5R) \times \Delta K^{3.3} & 0 < R \leq 0.79 \\ 10^H \times 10^{-3} \times (-806.85 + 1078.96R) \times \Delta K^{3.3} & 0.79 < R < 1.0 \end{cases} \quad (2-39)$$

ただし、 R は応力比、速度の単位は m/cycle、応力拡大係数の単位は MPa \sqrt{m} である。また、

$$H = -10.009 + 8.12 \times 10^{-4} T_F - 1.13 \times 10^{-6} T_F^2 + 1.02 \times 10^{-9} T_F^3$$

$$T_F = 1.8T_C + 32$$

である。

BWR 一次水質環境中の疲労き裂進展速度は次式で安全側に評価している。

$$\frac{da}{dN} = \frac{8.17 \times 10^{-12} t_r^{0.5} \Delta K^{3.0}}{(1-R)^{2.12}} \quad (2-40)$$

ただし、 t_r は負荷上昇時間 (sec) で、 t_r は 1 よりも小さいときは 1 とし、 t_r は定義できない場合は 1000 とする。また、疲労き裂進展速度の単位は m/cycle、応力拡大係数の単位は MPa \sqrt{m} であ

る。 $R<0$ の場合は、 $\Delta K=K_{max}$ とする。

既存ステンレス鋼の疲労き裂進展速度の確率モデルを参考にして、維持規格の疲労き裂進展速度に以下の修正ファクター Q を乗じることによって、その確率論的評価モデルを考慮できるようにした。

$$Q = \exp(a + bC_F) \quad (2-41)$$

さらに、

$$a=0, \quad b=1.0473$$

の場合は、維持規格の疲労き裂進展速度モデルは対数正規分布に従う確率論的モデルとなり、その平均値は式(2-39)及び式(2-40)に示す値で、標準偏差は既存ステンレス鋼の疲労き裂進展速度モデルと同じ値になる。

2.3.1.5 応力拡大係数算出式

PASCAL-EQ では、未貫通き裂に対しては Harris 式の改良版及び Raju-Newman の式、貫通き裂に対しては、Forman 式、Adams の式及び Sander の式が導入されており、これらの任意の組合せにより未貫通き裂から貫通き裂に至る評価が可能となっている。

これらの応力拡大係数評価式に加えて、Bergman により提案されている半楕円状内表面き裂に対する応力拡大係数評価式(2.2.6.1節)及び日本機械学会維持規格⁴⁾の表面欠陥に対する算出法を選択できる。後者については膜応力 σ_m と曲げ応力 σ_b が図 2-8 のき裂がある材料に作用している場合、日本機械学会維持規格の応力拡大係数 K は以下のように評価される⁴⁾。

$$K = (\sigma_m M_m + \sigma_b M_b) \sqrt{\frac{\pi a}{Q}} \quad (2-42)$$

ただし、

$$Q = 1 + 4.593(a/l)^{1.65} - q_y$$

$$M_m = G_0 \quad (2-43)$$

$$M_b = G_0 - 2\left(\frac{a}{t}\right)G_1$$

ここで、 a はき裂深さ、 l はき裂全長、 t は肉厚であり、き裂進展の場合は $q_y=0$ である。また、係数 G_0 及び G_1 の値はデータテーブル形式で与えられている。

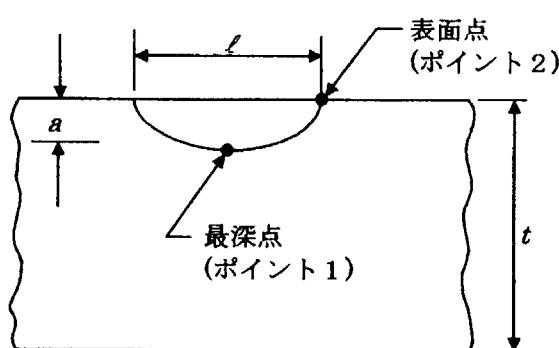


図 2-8 き裂の模式図

2.3.1.6 応力の評価法

定格運転応力、過渡事象の応力、地震応力等について、1次応力と2次応力及び膜応力と曲げ応力を評価できるように改良を施した。

2.3.1.7 地震応力評価法

PRAISE では等振幅の地震応力のみが評価可能であったが、2.2.3.3節に示した非定常な地震応力が評価できるように改良を施した。

2.3.1.8 破壊クライテリア

PRAISE に破断判定方法として2.2.4節に示した日本機械学会維持規格⁴⁾の極限荷重評価法、Z係数法(弾塑性破壊力学評価法)、2パラメータ評価法及びG係数法を追加した。各評価法の概略を以下に示す。

(1) Z係数法

Z係数は鋼管の材料によってその評価式が異なる⁴⁾。

- ・ステンレス鋼管

オーステナイト系ステンレス鋼管についてZ係数は下記に従う。

ガス・タングステン・アーク溶接(GTAW)及び被覆アーク溶接(SMAW)において：

$$Z = 0.292 \log\left(\frac{OD}{25}\right) + 0.986 \quad (2-44)$$

SAW 及びフェライト量 20%未満の铸造オーステナイト系ステンレス鋼管において：

$$Z = 0.350 \log\left(\frac{OD}{25}\right) + 1.215 \quad (2-45)$$

ここで、OD は配管の呼び径 (A) である。

- ・炭素鋼钢管

炭素鋼钢管についてZ係数は下記に従う。

$$Z = 0.2885 \log\left(\frac{OD}{25}\right) + 0.9573 \quad (2-46)$$

上記Zに対応し、Z係数評価基準は以下に示す形となる。

曲げ応力の限界条件は

$$\sigma_b \geq \sigma_L \quad (2-47)$$

であり、ここで σ_L は限界曲げ応力である。配管断面の中立角 β は

$$\beta = \frac{1}{2} \left(\pi - \alpha\theta - \pi \frac{\sigma_m}{\sigma_f} \right) \quad (2-48)$$

で計算できる。 $\beta \leq \pi - \theta$ ならば、限界曲げ応力は

$$\sigma_L = \frac{1}{Z} \cdot \frac{2}{\pi} \sigma_f (2 \sin \beta - \alpha \sin \theta) \quad (2-49)$$

となる。また、 $\beta > \pi - \theta$ ならば β は次式で求められる。

$$\beta = \frac{\pi}{2 - \alpha} \left(1 - \alpha - \frac{\sigma_m}{\sigma_f} \right) \quad (2-50)$$

その場合は、限界曲げ応力は

$$\sigma_L = \frac{1}{Z} \cdot \frac{2}{\pi} \sigma_f (2 - \alpha) \sin \beta \quad (2-51)$$

となる。

(2) G 係数法

弾塑性破壊力学から得られた延性不安定破壊荷重は、通常、管の極限荷重より小さい。極限荷重と延性不安定破壊荷重の比で定義された G 係数は次式で表される¹¹⁾。

$$G = \begin{cases} 1 & 2 \leq OD < 6 \\ \max(1, (0.692 - 0.0115OD + (0.188 \\ + 0.0104OD) \log\left(\frac{180}{\pi}\theta\right)) & OD \geq 6 \end{cases} \quad (2-52)$$

ここで、OD は配管の呼び径(A)である。

これに対して、G 係数評価基準は以下のように表される。

$$\sigma_b \geq \sigma_L \quad (2-53)$$

ここで、 σ_L は限界曲げ応力である。前述の配管断面の中立角 β が、

$$\beta = \frac{1}{2} \left(\pi - \alpha\theta - \pi \frac{\sigma_m}{\sigma_f} \right) \quad (2-54)$$

で定義されるときは限界曲げ応力は、

$$\sigma_L = \frac{1}{G} \cdot \frac{2}{\pi} \sigma_f (2 \sin \beta - \alpha \sin \theta) \quad (2-55)$$

となる。また配管断面の中立角 β が、

$$\beta = \frac{1}{2 - \alpha} \left(1 - \alpha - \frac{\sigma_m}{\sigma_f} \right) \quad (2-56)$$

で定義されるときは、限界曲げ応力は

$$\sigma_L = \frac{1}{G} \cdot \frac{2}{\pi} \sigma_f (2 - \alpha) \sin \beta \quad (2-57)$$

となる。

(3) 2 パラメータ評価法

2 パラメータ評価法⁴⁾は、オーステナイト系ステンレス鋼管及びフェライト鋼管の破壊評価に適用するものである。以下に評価手順の概略を示す。

① 管材料の諸特性の入力

解析に必要な温度での実際の管材料諸特性、即ち縦弾性係数、J-R 曲線(規定されたき裂進展量 Δa に対する延性き裂進展に対する J 積分破壊抵抗と Δa の関係を表す曲線)及び応力-ひずみ曲線を求める。

② 破壊評価曲線(FAC)の設定

材料の応力-ひずみ曲線、管形状、欠陥形状等をもとに破壊評価曲線(FAC)を設定する。

③ 限界荷重のカットオフ(Src)の設定

対象とする周方向欠陥または軸方向欠陥の形状に対して、許容状態 A, B, C 及び D のそれぞれに対し、負荷応力をもとに適切な限界荷重のカットオフ Src を計算する。

④ 評価点の座標(Kr' , Sr')の設定

評価期間末期における平面欠陥の予測寸法に対し、許容状態 A, B, C 及び D それぞれについて評価点を次のように求める。周方向欠陥については、管応力の一次一般膜応力、一次曲げ応力、熱膨張応力に対する破壊評価線図上の評価点座標(Kr' , Sr')を求める。 (Kr', Sr') は延性き裂進展量 Δa が逐次増加させることごとに計算する。

⑤ 管の供用の許容性（健全性）の判定

④で求めた評価点座標を破壊評価線図上にプロットし、少なくとも 1 つ以上の評価点が FAC の下側及び極限荷重のカットオフ以下にあるかどうかにより、評価期間末期までの管の供用が許容できるか否かを判断する。

2.4 プログラムの流れ

PASCAL-SC 及び PASCAL-EQ のフロー図を、図 2-9及び図 2-10に示す。

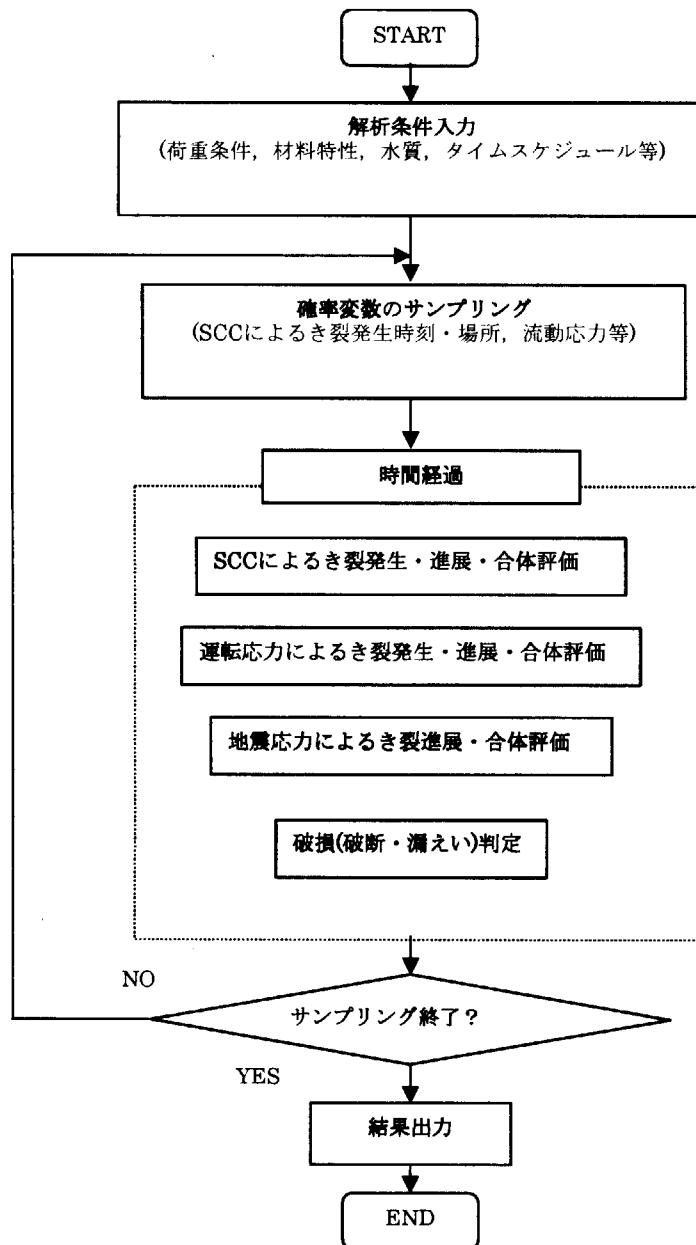


図 2-9 PASCAL-SC のフロー図

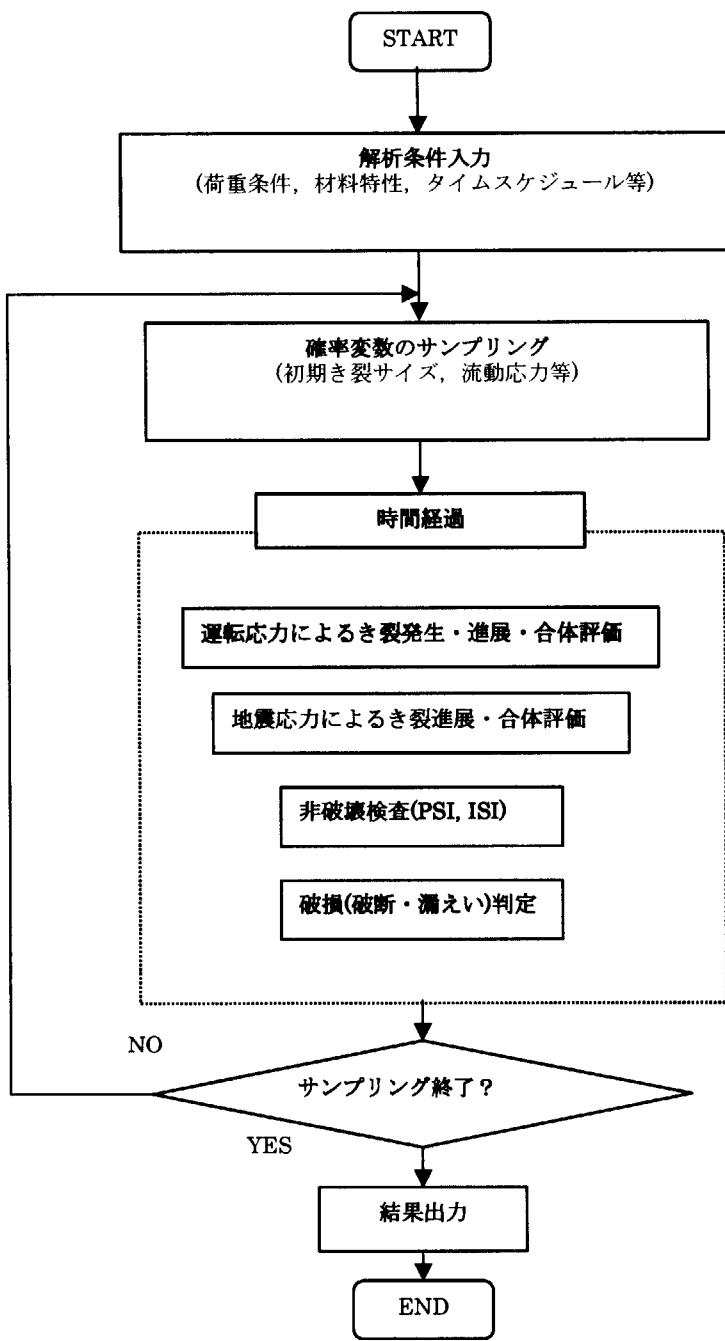


図 2-10 PASCAL-EQ のフロー図

3 プログラムの動作環境

PASCAL-SC は C++, PASCAL-EQ は FORTRAN77, GUI 部分は MS Visual C++ の各言語で開発されている。開発は以下の環境を想定し、計算機のハードウェアに依存しないように留意した。

表 3-1 プログラム動作環境

計算機	パーソナルコンピュータ
OS	Windows 2000 以上
CPU	Pentium 4 以上
メモリ	128 MB 以上
HDD	500 MB 以上
これまでに、OS に関しては Windows 2000, Windows XP, CPU に関しては Pentium 4 について動作を確認した。	

4 使用方法

PASCAL-SC 及び PASCAL-EQ の入力データ作成、実行、実行結果の表示は入出力実行支援 GUI(以後、単に GUI という)で行う。

GUI は以下の 3 システムから構成されている。

- 入力データ作成システム

入力データファイルの作成を行う。

- プログラム実行システム

入力ファイルを実行モジュールに渡し、解析(計算)を行う。複数ファイルの同時実行、パラメータ刻みを変えた場合の連続実行が可能である。

- 結果表示システム

プログラム実行システムで作成された出力結果をグラフ化する。その際、バックエンドプログラムとして gnuplot¹²⁾(Windows 版 Ver4.0 以上)を使用する。

4.1 使用する実行ファイル

表 4-1 に実行時に必要なファイルを示す。

表 4-1 実行時に必要なファイル

ファイル内容	ファイル名	備考
GUI 実行ファイル	PascalSystem.exe	
PASCAL-SC 実行ファイル	pascal_sc.exe	名称固定
PASCAL-EQ 実行ファイル	pascal_eq.exe	
gnuplot 実行ファイル	wgnuplot.exe	名称固定 Windows 版 Ver4.0 以上

4.2 初期設定方法

入出力実行支援 GUI の設定方法を以下に示す。この設定は PC インストール時に一度だけ行えよ。

- (1) 最初にフォルダを作成し、この中に GUI の実行ファイル(PascalSystem.exe)を置く。ここではフォルダを以下のように作成したと仮定する。

C:¥¥pascal

フォルダへのパスに日本語、スペースの混じったものは使用できない。半角英数文字のみで指定する。

- (2) 同じフォルダ内に pascal.config という名前でファイルを作成する。このファイルを GUI の設定ファイルとして起動時に読み込む。

- (3) pascal.config ファイルを開き以下の 5 行を書き込み保存する。

sc_bat_path C:¥¥pascal

sc_exe_path C:¥¥cygwin¥¥home¥¥kumada¥¥mydoc¥¥PASCAL¥¥PASCAL_SC

eq_bat_path C:¥¥pascal

eq_exe_path C:¥¥cygwin¥¥home¥¥kumada¥¥mydoc¥¥PASCAL-EQ

gnu_exe_path C:¥¥cygwin¥¥usr¥¥local¥¥gp400win32¥¥gnuplot¥¥bin

1 行目の sc_bat_path と 3 行目の eq_bat_path には GUI の実行ファイル(PascalSystem.exe)を含むフォルダを指定する。2 行目の sc_exe_path には PASCAL-SC の実行ファイル(pascal_sc.exe)の存在するフォルダへのパスを指定する。4 行目の eq_exe_path には PASCAL-EQ の実行ファイル(pascal_eq.exe)の存在するフォルダへのパスを指定する。実行ファイル名は PASCAL-SC に対しては pascal_sc.exe、PASCAL-EQ に対しては pascal_eq.exe と指定しなければならない。4 行目の gnu_exe_path には wgnuplot.exe(gnuplot の実行ファイル)が存在するフォルダへのパスを指定する。尚、各行の途中に改行は入れないこと。

4.3 起動

PascalSystem.exe をダブルクリックすると図 4-1 のメイン・ダイアログが起動する。

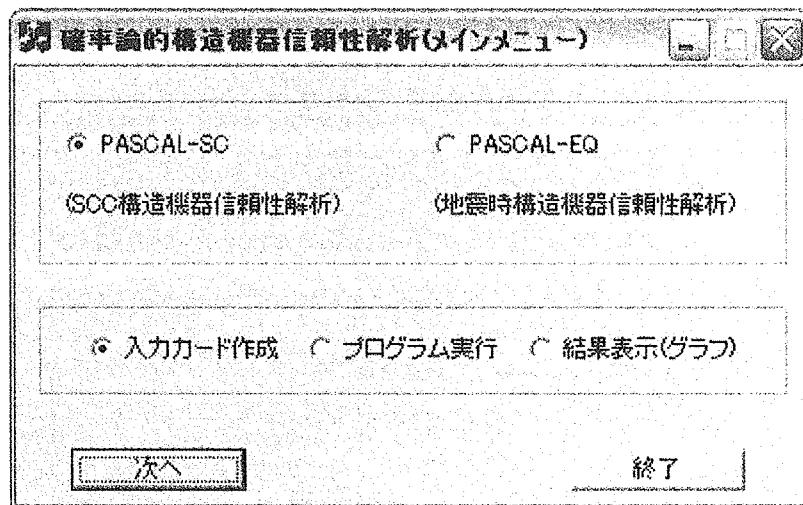


図 4-1 GUI のメイン・ダイアログ

4.4 入力データ作成システム

入力データ作成システムでは、プログラムや解析内容によって入力ファイルの保存フォルダ及び拡張子を表 4-2のように区別している。入力データ・ファイルの拡張子を解析内容と一致させる必要がある。

表 4-2 入力ファイルの拡張子

プログラム	解析内容	保存フォルダ	拡張子
PASCAL-SC	SCC き裂発生・進展解析	PASCAL-SC/scc	.scc_idat
	1 き裂 SCC 進展解析	PASCAL-SC/one_crack_scc	.one_crack_scc_idat
	1 き裂地震時進展解析	PASCAL-SC/one_crack_eq	.one_crack_eq_idat
	SCC 地震荷重負荷時 破損確率解析	PASCAL-SC/scc_eq_prob	.scc_eq_prob_idat
PASCAL-EQ	地震荷重負荷時破損 確率解析	PASCAL-EQ	.eq_idat

4.4.1 PASCAL-SC 入力データ作成システム

- ・メイン・ダイアログ内のラジオボタン「PASCAL-SC」と「入力カード作成」を選択し「次へ」ボタンをクリックすると図 4-2のダイアログに移動する。
- ・作成したい解析種類の入力ファイルをラジオボタンから選択する。ここでは一番最初にある「SCC き裂発生・進展解析」を選択している。「次へ」ボタンをクリックすると図 4-3へ移動する。
- ・新規入力データ作成であれば図 4-3の「新規データ作成」ラジオボタンを選択し「次へ」ボタンを押す。図 4-4のダイアログへ移動する。
- ・既存データ編集を行う場合には図 4-3で「既存データ編集」ラジオボタンを選択する。すると「ファイル名」エディットボックスと「参照」ボタンが有効になるので編集したいファイルを選択する(図 4-5)。
- ・「次へ」ボタンを押すと既存データを表示する(図 4-6)。他のデータについても順次書き換えていくことができる。
- ・データ欄が空白のまま「次へ」ボタンを押すと図 4-7のダイアログを表示し警告する。
- ・入力作業を進めて行くと、解析種類が「SCC き裂発生・進展解析」「1 き裂 SCC 進展解析」の場合、地震波選択ダイアログ(図 4-8)に到達する。このダイアログでは地震波解析を使用しないので何も入力できない。「次へ」ボタンを押す。
- ・一方、解析種類が「1 き裂地震時進展解析」「地震荷重負荷時破損確率解析」の場合、図 4-9 のダイアログに到達する。図 4-9は既存データ編集時の画面である。ファイル内に書かれている地震波ファイル、応力ファクタ、解析数が表示される。地震波ファイルが複数の場合はリストボックス内で選択されている(網がけされている)ファイルの応力ファクタ(応力へ乗じる倍率)が表示される。新規作成であればこれらの欄は空白である。
- ・新たに地震波ファイルを選択するには地震波ファイルという表記の右側にある「参照」ボタンをクリックする。するとファイル読み込みダイアログが開き複数個のファイルを選択すること

ができる。選択された地震波ファイルはリストボックス内に表示される。このリストボックスに表示された順にリストファイルに書き込む。マウスでファイル名をドラッグすることにより順番を変えることができる(図 4-10)。

- ・各地震波ファイルに対応する応力ファクタ(応力へ乗じる倍率)は地震波ファイルをリストボックス内で選択してから「応力ファクタ」エディットボックスに書き込む。
- ・新たに解析する地震波のリストファイルを作成するのであれば、リストファイルという表記の右側にある「参照」ボタンを押してファイル名を入力する(図 4-11)。
- ・地震波解析選択ダイアログの「次へ」ボタンをクリックすると保存ダイアログへ移動する。既存入力ファイル編集の場合、最初に選択したファイル名が保存ファイル名欄に表示される(図 4-12)。変更したい時は「参照」ボタンで保存先ファイル名を指定し「保存」ボタンで保存する。
- ・各コマンドラインダイアログの右上の「X」ボタンを押すとメイン・ダイアログへ移動する。その際、入力内容は全て破棄される。
- ・図 4-2で「戻る」ボタンを押すと一つ前に開いていた画面に戻る。

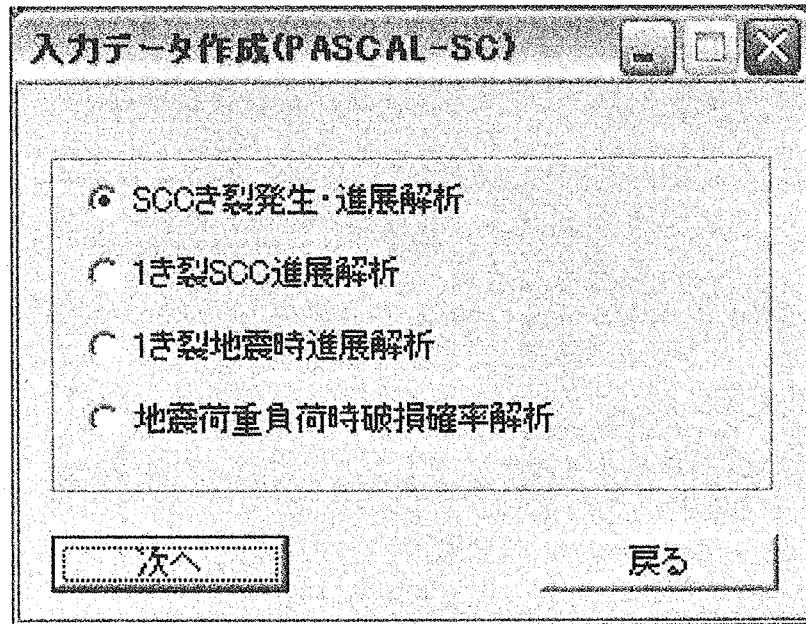


図 4-2 PASCAL-SC の解析種類選択ダイアログ

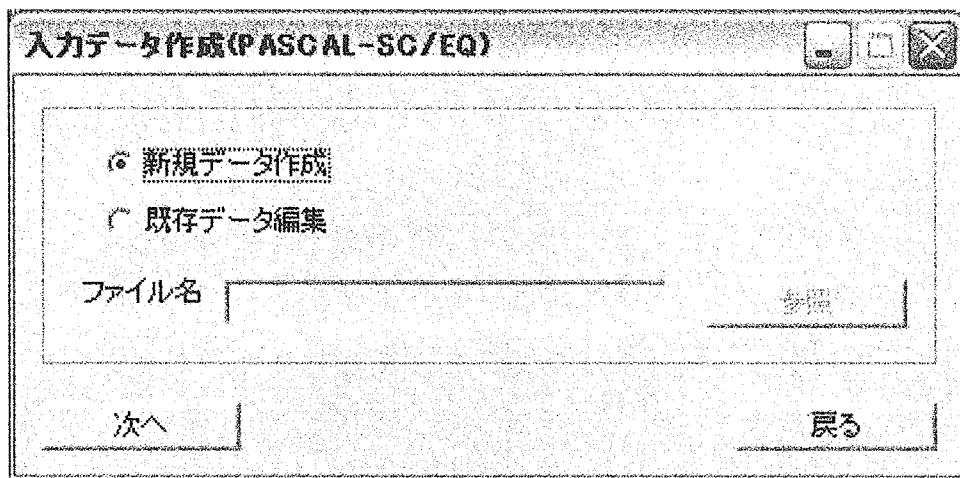


図 4-3 新規データ作成/既存データ編集ダイアログ

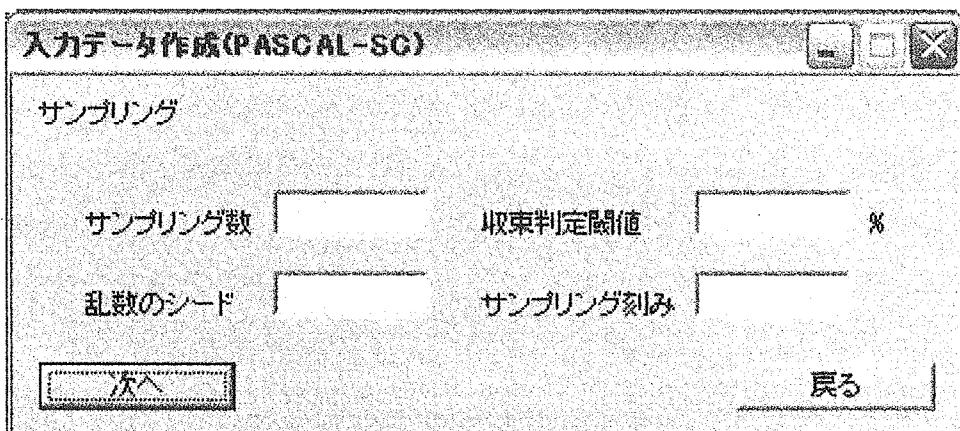


図 4-4 コマンドライン 1 (サンプリング)ダイアログ

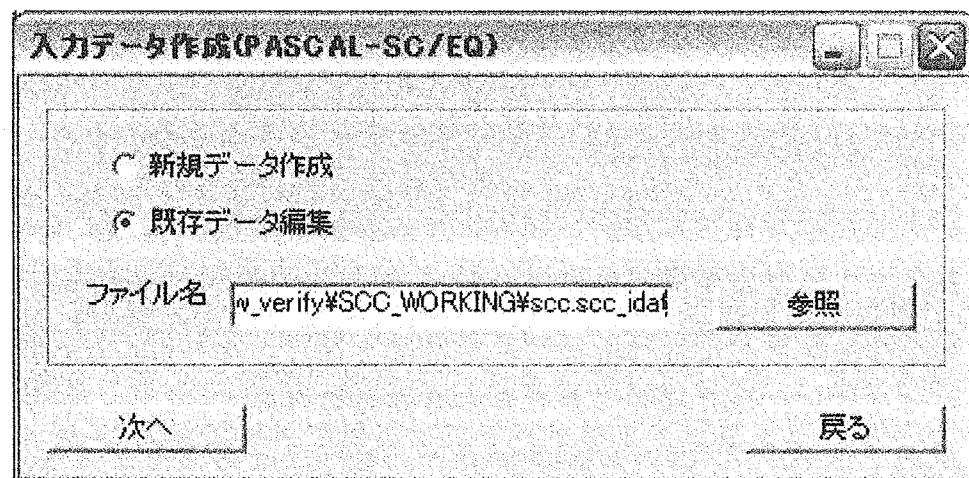


図 4-5 既存入力データ編集ダイアログ

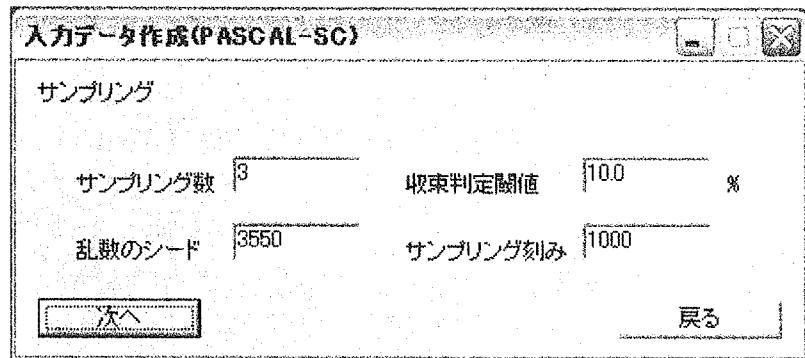


図 4-6 既存入力データの編集(サンプリング)

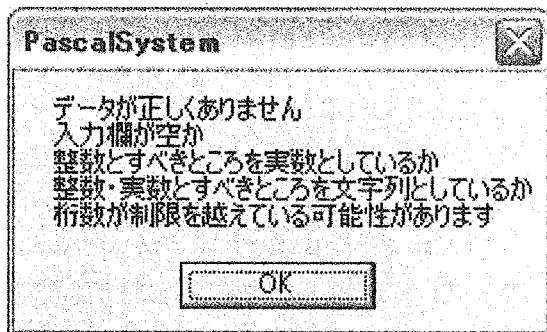


図 4-7 警告ダイアログ

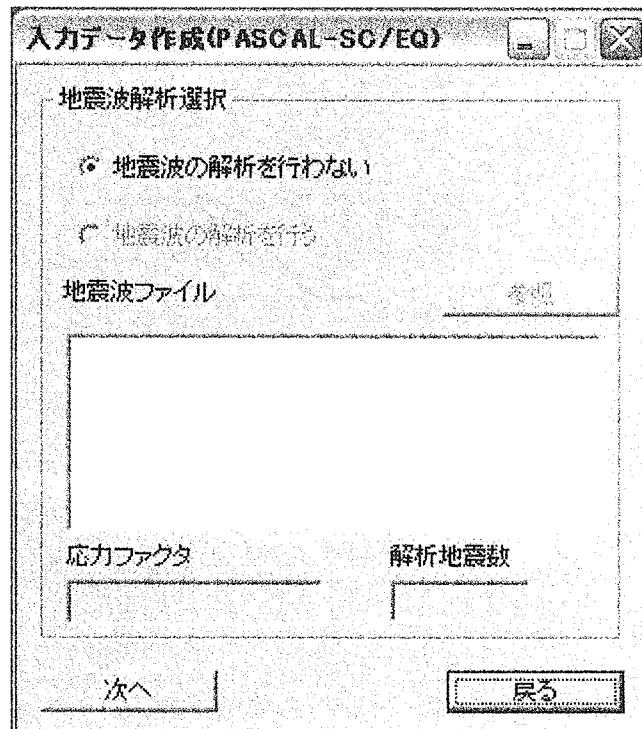


図 4-8 地震波選択ダイアログ(地震波解析をしない場合)

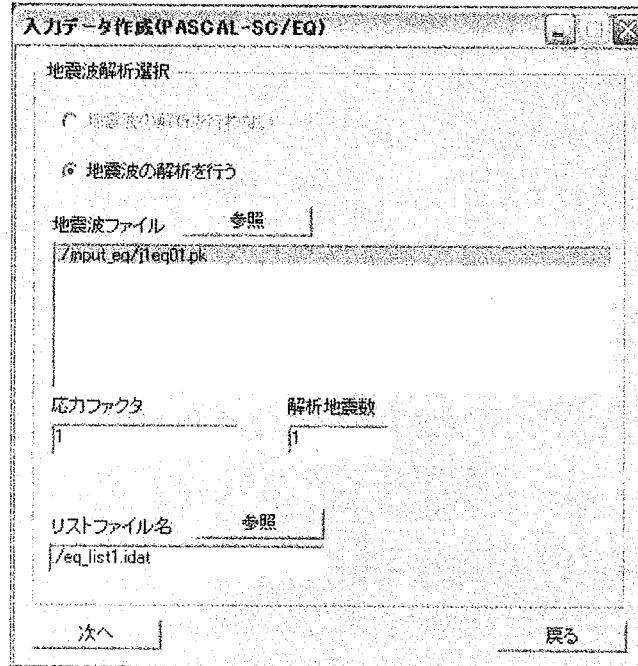


図 4-9 地震波選択ダイアログ(地震波を使用する場合)

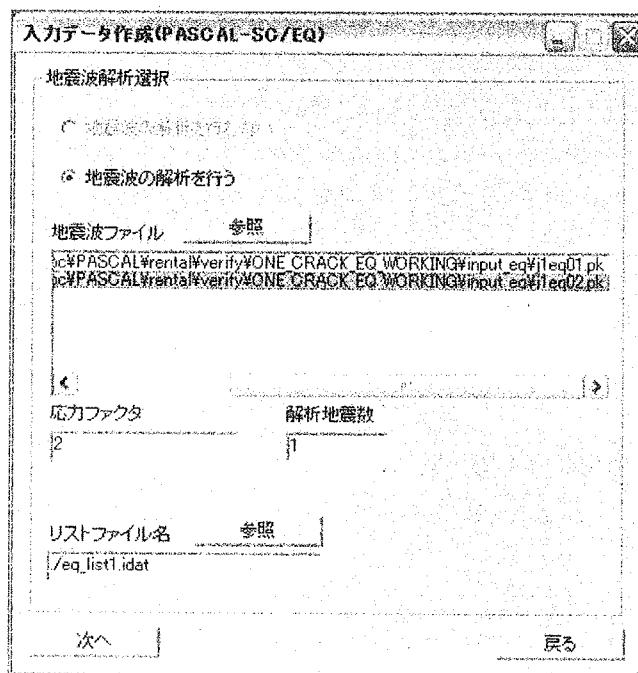


図 4-10 地震波ファイルの指定

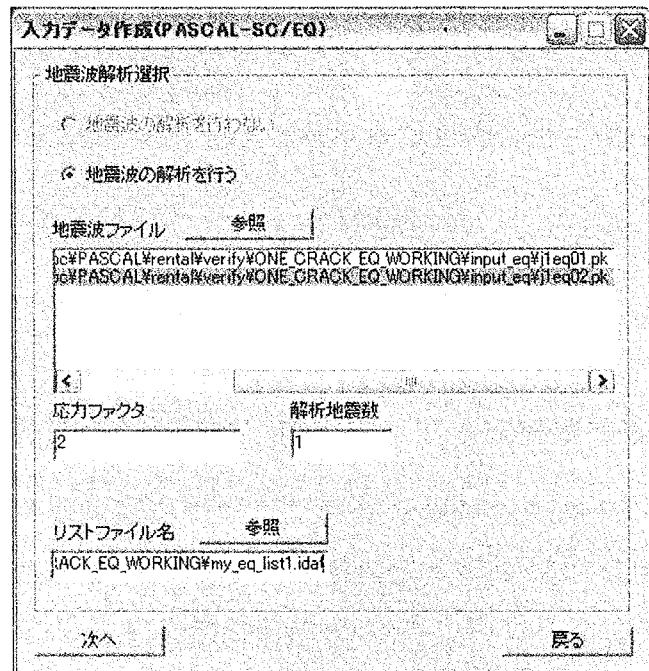


図 4-11 地震波リスト作成ダイアログ

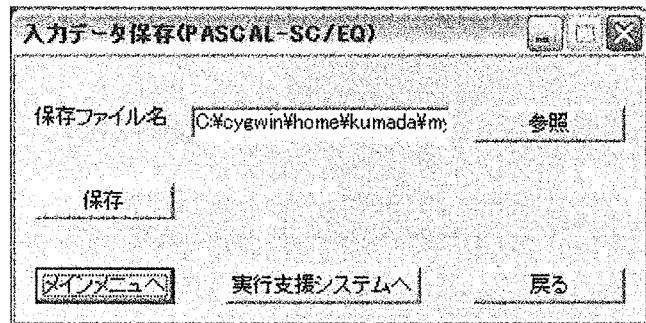


図 4-12 入力データ保存ダイアログ

4.4.2 PASCAL-SC の入力データ全項目

図 4-4や図 4-6から開始する入力データの全項目を解析種類毎に以下に示す。また、地震波リストファイル及び地震ファイルフォーマットの内容も合わせて示す。尚、各コマンドラインの内容は 1 行に記述する。

(1) SCC き裂発生・進展解析の入力データ項目

コマンドライン 1 (サンプリング)

内容	単位	型	備考
サンプリング数		unsigned long	0 より大きい値を指定
乱数のシード		unsigned long	0 を指定した場合は実行時刻に設定
収束判定閾値	%	double	値は使用しない
サンプリング刻み		unsigned long	値は使用しない

コマンドライン 2 (配管)

内容	単位	型	備考
配管内半径	mm	double	
配管肉厚	mm	double	

コマンドライン3 (材料)

内容	単位	型	備考
材料種類		std::string	現在は SUS316NG のみ
ヤング率	N/mm ²	double	
流動応力 (ワイブル分布 形状母数)		double	値は使用しない
流動応力 (ワイブル分布 尺度母数)	MPa	double	値は使用しない
流動応力 (ワイブル分布 位置パラメータ)	MPa	double	値は使用しない
流動応力 (セル分割するワ イブル分布の 累積分布関数閾値)		double	値は使用しない
流動応力 セル分割数		int	値は使用しない
流動応力 サンプリング時 セル幅		int	値は使用しない

コマンドライン4 (応力)

内容	単位	型	備考
自重(膜応力)	MPa	double	
自重(曲げ応力)	MPa	double	
熱膨張応力 (膜応力)	MPa	double	
熱膨張応力 (曲げ応力)	MPa	double	
内圧による応力 (膜応力)	MPa	double	
内圧による応力 (曲げ応力)	MPa	double	

コマンドライン5 (応力)

内容	単位	型	備考
溶接残留応力分布種類		std::string	Bergman : Bergman(膜応力3次式, 曲げ応力) ASME : ASME(膜応力4次式) ※応力拡大係数種類と対応させなければなら ない (BergmanPascal 応力拡大係数を使用する 際には Bergman を, ASME の応力拡大係数を 使用する際には ASME を指定)
溶接残留応力分布種類が Bergman の場合			
溶接残留応力分布の係数 σ_0	MPa	double	
溶接残留応力分布の係数 σ_1	MPa	double	溶接残留応力 σ の入力フォーマット $\sigma(u/t) = C(\sigma_0 + \sigma_1(u/t) + \sigma_2(u/t)^2 + \sigma_3(u/t)^3)$ $\sigma(\text{曲げ}) = \sigma_4 y/(R+t) + \sigma_5 x/(R+t)$
溶接残留応力分布の係数 σ_2	MPa	double	u 内表面から肉厚方向へ向かう局所座標 x, y デカルト座標 t 肉厚 R 内半径 C 不確かさを表す定数(正規分布)
溶接残留応力分布の係数 σ_3	MPa	double	
溶接残留応力分布の係数 σ_4	MPa	double	
溶接残留応力分布の係数 σ_5	MPa	double	
溶接残留応力分布種類が ASME の場合			
溶接残留応力分布の係数 σ_0	MPa	double	
溶接残留応力分布の係数 σ_1	MPa	double	溶接残留応力 σ の入力フォーマット $\sigma(u/t) =$ $C(\sigma_0 + \sigma_1(u/t) + \sigma_2(u/t)^2 + \sigma_3(u/t)^3 + \sigma_4(u/t)^4)$
溶接残留応力分布の係数 σ_2	MPa	double	u 内表面から肉厚方向へ向かう局所座標 t 肉厚 R 内半径 C 不確かさを表す定数(正規分布)
溶接残留応力分布の係数 σ_3	MPa	double	
溶接残留応力分布の係数 σ_4	MPa	double	

コマンドライン 6 (応力)

内容	単位	型	備考
溶接残留応力の不確さをあらわす定数の平均値		double	正規分布
溶接残留応力の不確さをあらわす定数の標準偏差	%	double	正規分布(平均値に対する割合)
溶接残留応力の不確さをあらわす定数の下限値		double	
溶接残留応力の不確さをあらわす定数の上限値		double	

コマンドライン 7 (タイムスケジュール : 供用期間)

内容	単位	型	備考
ライフタイム	year	double	供用期間

コマンドライン 8 (タイムスケジュール : SCC)

内容	単位	型	備考
実行フラグ		std::string	この解析では”e”(実行する)を指定
SCC き裂進展評価開始時刻	year	double	
SCC き裂進展評価終了時刻	year	double	
SCC き裂進展評価時間刻み	year	double	定荷重運転時間刻み
SCC き裂進展評価時間刻み	hour	double	定ひずみ速度運転時間刻み

コマンドライン9 (タイムスケジュール：単独の破損評価)

(※現在このカードのデータ値は使用していない。但し、実行フラグ及び開始・終了・刻み時刻は任意の値を指定する)

内容	単位	型	備考
実行フラグ		std::string	”x”(実行しない)を指定
破損評価 開始時刻	year	double	
破損評価 終了時刻	year	double	
破損評価時間刻み	year	double	

コマンドライン10 (タイムスケジュール：地震発生時刻)

内容	単位	型	備考
実行フラグ		std::string	この解析では”x”(実行しない)を指定
地震発生 開始時刻	year	double	
地震発生 終了時刻	year	double	
地震発生時間刻み	year	double	

コマンドライン 11 (タイムスケジュール：非破壊検査)

(※現在このカードのデータ値は使用していない。但し、実行フラグ及び開始・終了・刻み時刻は任意の値を指定する)

内容	単位	型	備考
実行フラグ		std::string	”x”(実行しない)を指定
非破壊検査 開始時刻	year	double	
非破壊検査 終了時刻	year	double	
非破壊検査時間刻 み	year	double	

コマンドライン 12 (タイムスケジュール：過渡事象)

内容	単位	型	備考
実行フラグ		std::string	この解析では”x”(実行しない)を指定
過渡事象 開始時刻	year	double	
過渡事象 終了時刻	year	double	
過渡事象時間刻み	year	double	

コマンドライン 13 (タイムスケジュール：途中経過出力)

内容	単位	型	備考
実行フラグ		std::string	この解析では”e”(実行する)を指定
途中経過出力 開始時刻	year	double	
途中経過出力終了 時刻	year	double	
途中経過出力時間 刻み	year	double	
途中経過出力時間 刻み	hour	double	SCC 途中経過出力用(負の数を指定した場合は、前項の途中経過出力時間刻みのみ使用)

コマンドライン 14 (運転状態)

内容	単位	型	備考
定荷重運転時 誘電率	$\mu\text{ s/cm}$	double	
定荷重運転時 水温	°C	double	
定荷重運転時 溶存酸素濃度	ppm	double	
定ひずみ速度運転時 誘電率	$\mu\text{ s/cm}$	double	
定ひずみ速度運転時 水温	°C	double	
定ひずみ速度運転時 溶存酸素濃度	ppm	double	

コマンドライン 15 (SCC き裂進展)

内容	単位	型	備考
SCC き裂発生種類		std::string	この解析では Praise の方法 ("praise") を指定
SCC き裂深さ閾値	mm	double	ダメージパラメータから応力拡大係数によるき裂進展に移行するき裂深さ閾値
SCC き裂進展速度 係数平均値		double	$\exp(X)$ の値 X を指定
SCC き裂進展速度 係数標準偏差		double	$\exp(X)$ の値 X を指定

コマンドライン 16 (疲労き裂進展)

内容	単位	型	備考
Paris 則係数 平均値		double	10^X の値 X を指定(対数正規分布) (この解析では値は使用しない)
Paris 則係数 標準偏差		double	10^X の値 X を指定(対数正規分布) (この解析では値は使用しない)
Paris 則係数 指数		double	この解析では値は使用しない

コマンドライン 17 (過渡事象)

内容	単位	型	備考
最小ピーク応力	MPa	double	この解析では値は使用しない
最大ピーク応力	MPa	double	この解析では値は使用しない
サイクル数		int	この解析では値は使用しない

コマンドライン 18 (応力拡大係数)

内容	単位	型	備考
応力拡大係数種類		std::string	BergmanPascal: Bergman と Pascal の応力拡大係数 ASME : ASME の応力拡大係数
降伏応力	MPa	double	ASME の場合のみ値を使用

(2) 1き裂 SCC 進展解析の入力データ項目

コマンドライン 1~14 及び 16~18 は SCC き裂発生・進展解析の入力データと同様である。

SCC き裂発生・進展解析のコマンドラインで、以下のようにコマンドライン 15 を変更し、コマンドライン 19 を追加する。

コマンドライン 15 (SCC き裂進展)

内容	単位	型	備考
SCC き裂発生種類		std::string	この解析では 1き裂("one_crack")を指定
SCC き裂深さ閾値	mm	double	ダメージパラメータから応力拡大係数によるき裂進展に移行するき裂深さ閾値
SCC き裂進展速度 係数平均値		double	$\exp(X)$ の値 X を指定
SCC き裂進展速度 係数標準偏差		double	$\exp(X)$ の値 X を指定

コマンドライン 19 (き裂サンプリングサイズ)

内容	単位	型	備考
き裂深さサンプリング最小サイズ	mm	double	
き裂深さサンプリング最大サイズ	mm	double	
き裂深さサンプリング刻み	mm	double	
き裂長さサンプリング最小サイズ	mm	double	
き裂長さサンプリング最大サイズ	mm	double	
き裂長さサンプリング刻み	mm	double	

(3) 1き裂地震とき裂進展解析の入力データ項目

コマンドライン1 (配管)

内容	単位	型	備考
配管内半径	mm	double	
配管肉厚	mm	double	

コマンドライン2 (応力)

内容	単位	型	備考
自重(膜応力)	MPa	double	
自重(曲げ応力)	MPa	double	
熱膨張応力 (膜応力)	MPa	double	
熱膨張応力 (曲げ応力)	MPa	double	
内圧による応力 (膜応力)	MPa	double	
内圧による応力 (曲げ応力)	MPa	double	

コマンドライン3 (応力)

内容	単位	型	備考
溶接残留応力分布種類		std::string	Bergman : Bergman(膜応力3次式, 曲げ応力) ASME : ASME(膜4次式)

コマンドライン4 (疲労き裂進展)

内容	単位	型	備考
Paris則係数平均値		double	10^X の値 X を指定(対数正規分布)
Paris則係数標準偏差		double	10^X の値 X を指定(対数正規分布)
Paris則係数指数		double	き裂進展速度～ ΔK^m の m (ΔK :応力拡大係数範囲)

コマンドライン5 (疲労き裂進展)

内容	単位	型	備考
き裂深さサンプリング最小サイズ	mm	double	
き裂深さサンプリング最大サイズ	mm	double	
き裂深さサンプリング刻み	mm	double	
き裂長さサンプリング最小サイズ	mm	double	
き裂長さサンプリング最大サイズ	mm	double	
き裂長さサンプリング刻み	mm	double	

コマンドライン 6 (応力拡大係数)

内容	単位	型	備考
応力拡大係数種類		std::string	BergmanPascal: Bergman と Pascal の応力拡大係数 ASME : ASME の応力拡大係数
降伏応力	MPa	double	ASME の場合のみ値を使用

コマンドライン 7 (地震負荷応力)

内容	単位	型	備考
地震荷重リストファイル名		std::string	

(4) SCC 地震荷重負荷時破損確率解析の入力データ項目

コマンドライン 1 (サンプリング)

内容	単位	型	備考
サンプリング数		unsigned long	0を指定した場合は収束判定を行い 収束するまでサンプリング
乱数のシード		unsigned long	0を指定した場合は実行時刻に設定
収束判定閾値	%	double	95%信頼区間が収まる破断確率平均値に対する割合 (サンプリング数で0を指定した場合のみ使用)
サンプリング刻み		unsigned long	<ul style="list-style-type: none"> ・サンプリング数で0を指定した場合は収束判定を行うサンプリング刻み数 ・サンプリング数で0より大きい値を指定した場合は途中経過を出力するサンプリング刻み数

コマンドライン 2 (配管)

内容	単位	型	備考
配管内半径	mm	double	
配管肉厚	mm	double	

コマンドライン3 (材料)

内容	単位	型	備考
材料種類		std::string	現在は SUS316NG のみ
ヤング率	N/mm ²	double	
流動応力 (ワイブル分布 形状母数)		double	
流動応力 (ワイブル分布 尺度母数)	MPa	double	
流動応力 (ワイブル分布 位置パラメータ)	MPa	double	
流動応力 (セル分割するワイ ブル分布の 累積分布関数閾値)		double	[0, 1]の値を指定
流動応力 セル分割数		int	
流動応力 サンプリング時セル 幅		int	

※流動応力は階層別モンテカルロ法でサンプリングしている。ワイブル分布の下限値から累積分布関数閾値で指定した範囲をセル分割数で分割する。全てのセルから3つずつ流動応力をサンプリングした結果(リハーサル)を基にサンプリングするセルの中心を決めて、サンプリング時セル幅を標準偏差とする正規分布に従って実際のサンプリングを行う。

コマンドライン4 (応力)

内容	単位	型	備考
自重(膜応力)	MPa	double	
自重(曲げ応力)	MPa	double	
熱膨張応力 (膜応力)	MPa	double	
熱膨張応力 (曲げ応力)	MPa	double	
内圧による応力 (膜応力)	MPa	double	
内圧による応力 (曲げ応力)	MPa	double	

コマンドライン5 (応力)

内容	単位	型	備考
溶接残留応力分布種類		std::string	Bergman : Bergman(膜応力3次式, 曲げ応力) ASME : ASME(膜応力4次式) ※応力拡大係数種類と対応させなければならない(BergmanPascal 応力拡大係数を使用する際には Bergman を, ASME の応力拡大係数を使用する際には ASME を指定)

溶接残留応力分布種類が Bergman の場合

溶接残留応力分布の係数 σ_0	MPa	double	溶接残留応力 σ の入力フォーマット $\sigma(u/t) = C(\sigma_0 + \sigma_1(u/t) + \sigma_2(u/t)^2 + \sigma_3(u/t)^3)$ $\sigma(\text{曲げ}) = \sigma_4 y/(R+t) + \sigma_5 x/(R+t)$ u 内表面から肉厚方向へ向かう局所座標 x, y デカルト座標 t 肉厚 R 内半径 C 不確かさを表す定数(正規分布)
溶接残留応力分布の係数 σ_1	MPa	double	
溶接残留応力分布の係数 σ_2	MPa	double	
溶接残留応力分布の係数 σ_3	MPa	double	
溶接残留応力分布の係数 σ_4	MPa	double	
溶接残留応力分布の係数 σ_5	MPa	double	

溶接残留応力分布種類が ASME の場合

溶接残留応力分布の係数 σ_0	MPa	double	溶接残留応力 σ の入力フォーマット $\sigma(u/t) = C(\sigma_0 + \sigma_1(u/t) + \sigma_2(u/t)^2 + \sigma_3(u/t)^3 + \sigma_4(u/t)^4)$ <p> <u>u</u> 内表面から肉厚方向へ向かう局所座標 <u>t</u> 肉厚 <u>R</u> 内半径 <u>C</u> 不確かさを表す定数(正規分布) </p>
溶接残留応力分布の係数 σ_1	MPa	double	
溶接残留応力分布の係数 σ_2	MPa	double	
溶接残留応力分布の係数 σ_3	MPa	double	
溶接残留応力分布の係数 σ_4	MPa	double	

コマンドライン 6 (応力)

内容	単位	型	備考
溶接残留応力の不確さをあらわす定数の平均値		double	正規分布
溶接残留応力の不確さをあらわす定数の標準偏差	%	double	正規分布(平均値に対する割合)
溶接残留応力の不確さをあらわす定数の下限値		double	
溶接残留応力の不確さをあらわす定数の上限値		double	

コマンドライン 7 (タイムスケジュール : 供用期間)

内容	単位	型	備考
ライフタイム	year	double	

コマンドライン 8 (タイムスケジュール : SCC)

内容	単位	型	備考
実行フラグ		std::string	この解析では” e” (実行する)を指定
SCC き裂進展評価 開始時刻	year	double	
SCC き裂進展評価 終了時刻	year	double	
SCC き裂進展評価 時間刻み	year	double	定荷重運転時間刻み
SCC き裂進展評価 時間刻み	hour	double	定ひずみ速度運転時間刻み

コマンドライン 9 (タイムスケジュール : 単独の破損評価)

(※現在このカードのデータ値は使用していない。但し、実行フラグ及び開始・終了・刻み時刻は任意の値を指定する)

内容	単位	型	備考
実行フラグ		std::string	” x” (実行しない)を指定
破損評価 開始時刻	year	double	
破損評価 終了時刻	year	double	
破損評価時間刻み	year	double	

コマンドライン 10 (タイムスケジュール：地震発生時刻)

内容	単位	型	備考
実行フラグ		std::string	実行する場合は”e”， 実行しない場合は”x”を指定
地震発生開始時刻	year	double	
地震発生終了時刻	year	double	
地震発生時間刻み	year	double	

コマンドライン 11 (タイムスケジュール：非破壊検査)

(※現在このカードのデータ値は使用していない。但し、実行フラグ及び開始・終了・刻み時刻は任意の値を指定する)

内容	単位	型	備考
実行フラグ		std::string	”x”(実行しない)を指定
非破壊検査開始時刻	year	double	
非破壊検査終了時刻	year	double	
非破壊検査時間刻み	year	double	

コマンドライン 12 (タイムスケジュール：過渡事象)

内容	単位	型	備考
実行フラグ		std::string	実行する場合は”e”， 実行しない場合は”x”を指定
過渡事象 開始時刻	year	double	
過渡事象 終了時刻	year	double	
過渡事象時間刻み	year	double	

コマンドライン 13 (タイムスケジュール：途中経過出力)

内容	単位	型	備考
実行フラグ		std::string	この解析では”x”(実行しない)を指定
途中経過出力 開始時刻	year	double	
途中経過出力終了 時刻	year	double	
途中経過出力時間 刻み	year	double	
途中経過出力時間 刻み	hour	double	SCC 途中経過出力用(負の数を指定した場合は、前項の途中経過出力時間刻みのみ使用)

コマンドライン 14 (運転状態)

内容	単位	型	備考
定荷重運転時 誘電率	$\mu\text{s}/\text{cm}$	double	

定荷重運転時 水温	°C	double	
定荷重運転時 溶存酸素濃度	ppm	double	
定ひずみ速度運転時 誘電率	$\mu\text{ s/cm}$	double	
定ひずみ速度運転時 水温	°C	double	
定ひずみ速度運転時 溶存酸素濃度	ppm	double	SCC 途中経過出力用

コマンドライン 15 (SCC き裂進展)

内容	単位	型	備考
SCC き裂発生種類		std::string	この解析では Praise の方法 ("praise") を指定
SCC き裂深さ閾値	mm	double	ダメージパラメータから応力拡大係数によるき裂進展に移行するき裂深さ閾値
SCC き裂進展速度 係数平均値		double	$\exp(X)$ の値 X を指定
SCC き裂進展速度 係数標準偏差		double	$\exp(X)$ の値 X を指定

コマンドライン 16 (疲労き裂進展)

内容	単位	型	備考
Paris 則係数 平均値		double	10^X の値 X を指定(対数正規分布)
Paris 則係数 標準偏差		double	10^X の値 X を指定(対数正規分布)

Paris 則係数 指数		double	き裂進展速度～ ΔK^m の m (ΔK :応力拡大係数範囲)
-----------------	--	--------	---

コマンドライン 17 (過渡事象)

内容	単位	型	備考
最小ピーク応力	MPa	double	
最大ピーク応力	MPa	double	
サイクル数		int	

コマンドライン 18 (応力拡大係数)

内容	単位	型	備考
応力拡大係数種類		std::string	BergmanPascal: Bergman と Pascal の応力拡大係数 ASME : ASME の応力拡大係数
降伏応力	MPa	double	ASME の場合のみ値を使用

コマンドライン 19 (漏えい)

内容	単位	型	備考
漏えいの検出限界値	gpm	double	
大漏えいの検出限界値	gpm	double	
定格運転時の管の内圧	kg/cm ²	double	
貫通き裂の表面粗さ	mm	double	NIKRADSE の式に用いる
差圧	kg/cm ²	double	
流体のクオリティ 無次元数		double	0 (水) を指定 (水蒸気は指定できない)

コマンドライン 20 (破断判定)

内容	単位	型	備考
安全率		double	通常は 1 を指定

コマンドライン 21 (地震負荷応力)

内容	単位	型	備考
地震荷重リストフ イル名		std::string	

(5) 地震荷重リストファイル及び地震荷重ファイルフォーマット

(a) 地震荷重リストファイル

1行目

内容	単位	型	備考
解析地震波数		int	上からいくつの地震波を解析するかを指定

2行目以降の各行

内容	単位	型	備考
地震波ファイル名		std::string	パスを含めた地震波ファイル名
ファクター		double	応力集中を考慮する場合に用いる応力へ乗じるファクター(倍率). 通常は1を指定

地震荷重リストファイルの例を以下に示す。

```
1
./input_eq1/j1eq01.pk 1
./input_eq1/equal.pk 1
```

(b) 地震荷重ファイルフォーマット

地震荷重ファイル名の最初は文字で開始し、拡張子は*.pkと指定する。ファイル1行目は凡例を示したコメント行である。

2行目以降の各行

内容	単位	型	備考
サイクル番号		int	パスを含めた地震波ファイル名
時刻		double	応力集中を考慮する場合に用いる応力へ乗じるファクター(倍率). 通常は1を指定

応力	MPa	double	全応力
膜応力	MPa	double	全応力の膜応力成分
曲げ応力	MPa	double	全応力の曲げ応力成分
膜応力比率		double	膜応力/応力
曲げ応力比率		double	曲げ応力/応力

ファイル内容例を以下に示す。

(n: サイクル番号, pt: 時刻[sec], pk_sx: 応力[MPa], pk_sm: 膜応力[MPa],

pk_sb: 曲げ応力[MPa], r_mx: 膜応力比率, r_bx: 曲げ応力比率)

#n	pt	pk_sx	pk_sm	pk_sb	r_mx	r_bx
1	1.	0.000000E+00	0.000000E+00	0.000000E+00	0.000000E+00	0.000000E+00
2	2.	0.513079E+00	-0.647530E-01	0.577832E+00	-0.126205E+00	0.112620E+01
3	3.	-0.268304E-01	0.287122E-02	-0.297016E-01	-0.107014E+00	0.110701E+01

(以下省略)

4.4.3 PASCAL-EQ 入力データ作成システム

PASCAL-EQ の入力データ作成は PASCAL-SC の場合と同様である。

- ・メイン・ダイアログ(図 4-1)内のラジオボタン「PASCAL-EQ」と「入力カード作成」を選択すると図 4-3へ移動する。
- ・PASCAL-SC の場合と同様に「新規データ作成」と「既存データ編集」を選択することができる。
- ・図 4-3で既存データ編集を選択し、編集したいファイルを開き、「次へ」ボタンを押すと図 4-13 のダイアログへ移動する。
- ・図 4-3で「新規データ作成」を選択した場合、入力欄は空である。
- ・データ欄に入力された値が不正な場合は図 4-7を表示する。PASCAL-SCの場合と同じように「次へ」ボタンを押すことにより順次データを入力していくことができる。
- ・入力してはいけないデータ欄は無効な状態で表示される。また、繰り返し入力する必要のあるコマンドラインについては必要な回数だけ入力を要求する。例えば、コマンドライン3の”セルの定義”を0, ”き裂平面のセル数”を20 と指定した場合、コマンドライン23 は図 4-14のように表示される”繰り返し総数”が必要な回数である。”現在の繰り返し数”はスピンボタンで上下させることができる。
- ・コマンドライン37/38 はダイアログを表示しない。これらのデータは地震波ファイルを読み込んだとき自動的に内部で処理する。

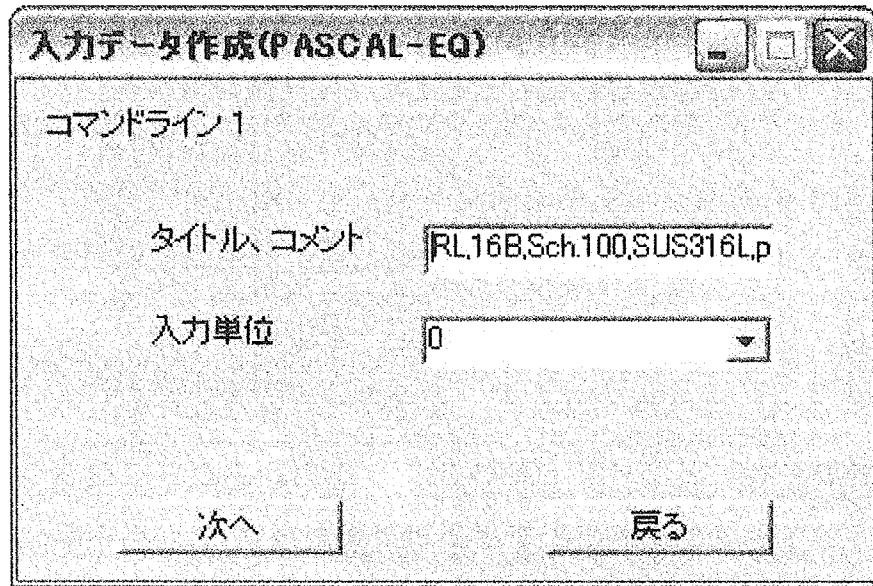


図 4-13 PASCAL-EQ の入力ダイアログ(コマンドライン 1)

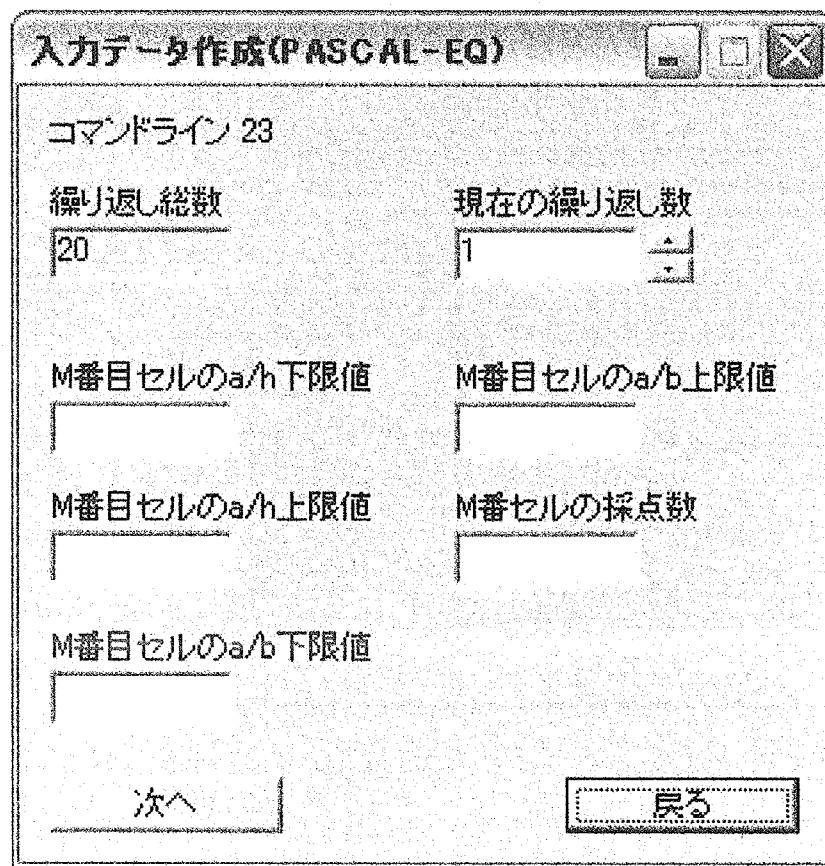


図 4-14 PASCAL-EQ のコマンドライン 23 ダイアログ(isquare=0)

- ・入力を進めていくと図 4-15のダイアログに到達する。図 4-15はPASCAL-SCと同じものであるが、PASCAL-EQ の入力ファイルには地震波ファイル、地震波リストファイル名が記載されていないため、これらを表示しない。必要な地震波ファイル数はコマンドライン3 のneqint に相当するのでこれを”解析地震数”として表示する。
- ・地震波ファイルという表記の右側にある「参照」ボタンを押して地震波ファイルを読み込むことができる。リストファイル名は選択できない。
- ・図 4-15で「次へ」ボタンを押すと保存ダイアログ図 4-12へ移動する。PASCAL-SCと同様な操作により入力データをファイルに保存することができる。このとき、直前のダイアログで選択した地震波ファイルの内容は指定のフォーマットに変換され、保存ファイルに書き込まれる。
- ・各コマンドラインダイアログの右上の「X」ボタンを押すとメイン・ダイアログへ移動する。その際、作業内容は全て破棄される。
- ・図 4-3で「戻る」ボタンを押すと一つ前に開いていた画面に戻る。

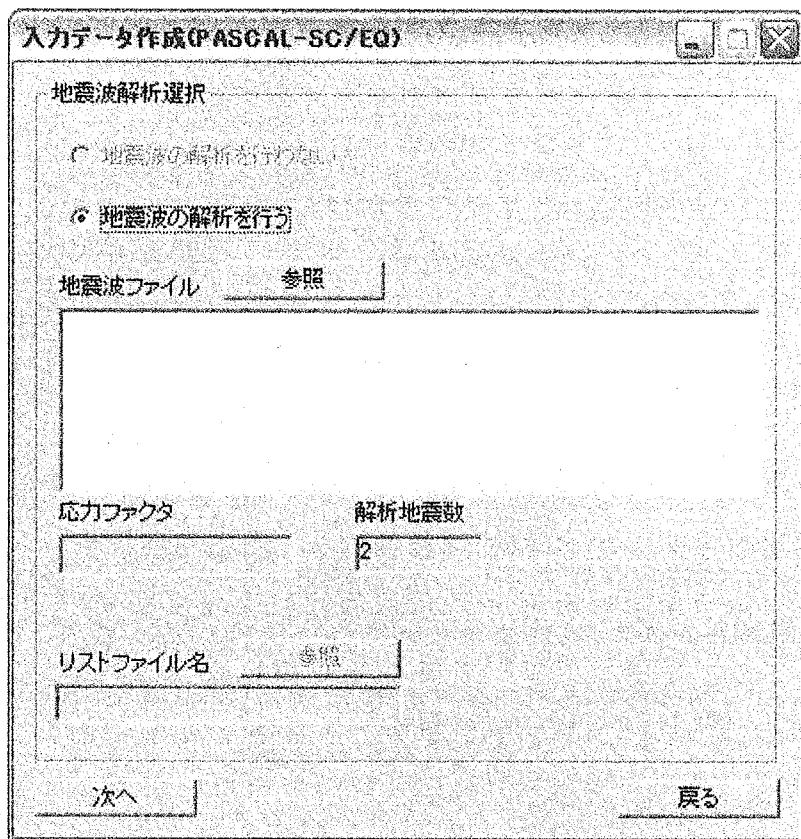


図 4-15 PASCAL-EQ の地震波ファイル選択ダイアログ

4.4.4 PASCAL-EQ の入力データ全項目

図 4-13から開始する PASCAL-EQ 入力データの全項目を以下に示す。尚、各コマンドラインの内容は 1 行に記述する。

コマンドライン 1

常に入力

カラム 数	変数名	フォーマット	単位系	内 容
1-76	TITLE	A76		タイトル, コメント
77-80	IUNIT	I4		入力単位系 0: 単位系欄に "*" がある変数に対して kgf, mm 単位系で入力する。 1: 単位系欄に "*" がある変数に対して klb, inch 単位で入力する。 (それ以外の変数については、内容欄の説明に 従って入力する)

コマンドライン2

常に入力

カラム 数	変数名	フォーマット	単位系	内 容
1-5	INCIAT	I5		0:初期き裂問題 1:SCCによるき裂発生問題 2:両方
6-10	IFAILC	I5		破壊基準 0:塑性崩壊基準 1: J_{IC} , dJ/da による判定基準 2:両方 3:NUPEC の G 係数で補正し EPRI の正味応力概念 (IFAILC=3 は NWMNRJ=1, 2 の時有効) 4:維持規格 Z 係数法(ステンレス鋼 GTAW, SMAW) 5:維持規格 Z 係数法(ステンレス鋼 SAW) 6:維持規格 Z 係数法(炭素鋼) 10:維持規格 2 パラメータ評価法(ステンレス鋼) 11:維持規格 2 パラメータ評価法(炭素鋼)
11-15	ICRACKS	I5		SCC の発生位置 (INCIAT ≥ 0 の時のみ)
16-20	IREPLS	I5		SCC の採点数
21-25	NWMNRJ	I5		応力拡大係数式の選択(2桁の整数) NWMNRJ の値と応力拡大係数の関係については次のページの表を参照
26-30	IREPAR	I5		0:漏えいしき裂が検出されると完全な溶接部に修復される 1:漏えいしき裂が検出されると計算は次のサンプルへ移る INCIAT=1 ならば強制的に IREPAR=1 となる
31-40	BNDRY	F10.3		a/h の上限 例: >1:全領域の初期き裂を考慮する ≤ 0 :初期き裂なし
41-45	ISF	I5		0:オーステナイト系決定論モデルまたは確率論的モデル(KONPRP で選択する) 1:フェライト系, 炭素鋼, き裂進展則:ASME Section XI 評価モデルまたは確率モデル(KONPRP で選択する) 2:フェライト系, 炭素鋼, き裂進展則:ASME Section XI のバイリニア決定論式 3:オーステナイト系ステンレス鋼, 維持規格の1次水質環境中評価式 4:オーステナイト系ステンレス鋼, 維持規格の空気中評価式

コマンドライン 2

(続き)

46-50	ILEAK	I5	0, 1: 従来の漏えい量評価式による漏えい量計算 2 : Tada-Paris と Moody の評価モデルによる漏えい量計算 3 : 組み込んだデータテーブルによる漏えい量計算 4 : プリプロセッサ FLEAK から生成したデータテーブル LEAK.DAT による漏えい量計算
51-55	MTTYPE	I5	材料の種類, SCC 用 1:SUS304 2:SUS316NG
56-62	ISEED	I7	乱数発生の種
63-70	ISEEDRS	I7	乱数発生の種
71-75	IREMED	I5	IHSI 等の改善操作の回数 (4 以下)

表 NWMNRJ の値と応力拡大係数の関係

NWMNRJ の値	応力拡大係数	
	未貫通き裂	貫通き裂
0	Harris の式 (従来)	Forman の式 (従来)
11	Harris の式 (改)	Forman の式 (改)
12	Harris の式 (改)	Adams の式
13	Harris の式 (改)	Sander の式
21	Newman-Raju の式	Forman の式 (改)
22	Newman-Raju の式	Adams の式
23	Newman-Raju の式	Sander の式
31	Bergman の解	Forman の式 (改)
32	Bergman の解	Adams の式
33	Bergman の解	Sander の式
41	維持規格の解	Forman の式 (改)
42	維持規格の解	Adams の式
43	維持規格の解	Sander の式

コマンドライン3

常に入力

カラム数	変数名	フォーマット	単位系	内 容
1-5	NTRIES	I5		き裂平面各セルからの採点数 <0:ABS (NTRIES) が採点数 =0:使用不可 >0:ユーザ入力 NTRIES×NUMTRY (コマンドライン23) がこのセルの採点数となる
6-10	ISQUARE	I5		セルの定義 0:ユーザが座標値を入力 1:コードによる均一セルの生成 2:INCIAT=1 の時
11-15	KTYPES	I5		過渡事象数, 応力の入力形態 KTYPES>0:オジナル通りの入力 過渡事象数 : KTYPES 応力入力形態: ΔT , g ファクター, KTYPES<0 過渡事象数 : -KTYPES 応力入力形態: σ_{\max} , σ_{\min}
16-20	KRKDIS	I5		初期き裂分布 1: 深さ : 対数正規分布 アスペクト比 : 対数正規分布 2: 深さ : 対数正規分布 アスペクト比 : 指数分布 3: 深さ : 指数分布 アスペクト比 : 対数正規分布 4: 深さ : 指数分布 アスペクト比 : 指数分布
21-25	NEVAL	I5		破損確率の評価時間 <0:ABS (NEVAL) 年毎に評価 >0:評価時間の設定数
26-30	NINSPT	I5		供用中検査の回数

コマンドライン 3

(続き)

カラム数	変数名	フォーマット	単位系	内 容
31-35	NQUAKE	I5		地震のオプション 0:地震事象なし 1:地震事象あり, き裂蓄積せず 2:地震事象あり, き裂蓄積する 3:地震応力詳細評価法, き裂蓄積せず
36-40	IDEBUG	I5		デバッグのオプション 0:通常の出力 1:デバッグ用出力
41-45	KONPRP	I5		疲労き裂進展則パラメータ取扱い ISF=0 の場合 (ステンレス鋼系, MATPRO で定義) : 0:C は対数正規分布 1:C は定数 ISF=1 の場合 (炭素鋼, CRKSIZ で定義) : 0:ASME 評価式をベースとした 確率論的モデル C_F は平均値が 0, 標準偏差が 1 の正規分布 1:ASME 評価式をベースとした 決定論的モデル C_F は 0.0 2:ASME 評価モデル
46-50	NEQINT	I5		地震クラス数 (NQUAKE=1 の時) 地震発生回数 (NQUAKE=2 の時) 地震動の数 (NQUAKE=3 の時)
51-55	MCELLS	I5		き裂平面のセル数 ISQUARE=1 の時無視
56-60	KNSFL0	I5		流動応力のオプション 0:正規分布 1:定数

コマンドライン3

(続き)

カラム数	変数名	フォーマット	単位系	内 容
61-65	NSKIP	I5		>0:指標ファンクションを NSKIP回毎に出力する ≤0:指標ファンクションは 出力しない
66-70	NPSI	I5		供用前超音波検査のオプション 0:供用前検査は設定しない 1:供用前検査を設定する
71-75	ISCC	I5		SCC オプション 1:SCCのみ 0:疲労のみ -1:両方
76-80	ISIGRS	I5		残留応力の定義 0:残留応力は考慮しない 1:残留応力の分布係数をユーザが入力する 2:大口径配管に関する残留応力評価 3:中口径配管に関する残留応力評価 4:小口径配管に関する残留応力評価 5:IHSI 残留応力の評価 内外表面の残留応力をユーザが入力する 6:IHSI, MSIP 残留応力の評価 期待値と標準偏差をユーザが入力する

コマンドライン4

NWMNRJ (コマンドライン2) ≠ 0 の時のみ、応力拡大係数に対する寄与比率
応力拡大係数は次の式で評価する。

$$K_b = ALFAB * K_{b,m} + BETAB * K_{b,b}$$

$$K_a = ALFAA * K_{a,m} + BETAA * K_{a,b}$$

ここで、

K_b : 貫通前き裂の応力拡大係数

$K_{b,m}$: 貫通前き裂の膜応力による応力拡大係数

$K_{b,b}$: 貫通前き裂の曲げ応力による応力拡大係数

K_a : 貫通後き裂の応力拡大係数

$K_{a,m}$: 貫通後き裂の膜応力による応力拡大係数

$K_{a,b}$: 貫通後き裂の曲げ応力による応力拡大係数

カラム数	変数名	フォーマット	単位系	内 容
1-10	ALFAB	E10. 3		貫通前き裂の膜応力成分の係数
11-20	BETAB	E10. 3		貫通前き裂の曲応力成分の係数
21-30	ALFAA	E10. 3		貫通後き裂の膜応力成分の係数
31-40	BETAA	E10. 3		貫通後き裂の曲応力成分の係数

コマンドライン5

ISIGRS (コマンドライン3) = 1 の時のみ

カラム数	変数名	フォーマット	単位系	内 容
1-5	KKA	I5		K_a に対する残留応力の寄与を決定する多項式中の a/b 項の数
6-10	LLA	I5		K_a に対する残留応力の寄与を決定する多項式中の a/h 項の数
11-15	KKB	I5		K_b に対する残留応力の寄与を決定する多項式中の a/b 項の数
16-20	LLB	I5		K_b に対する残留応力の寄与を決定する多項式中の a/h 項の数

コマンドライン6

ISIGRS (コマンドライン3) =5 の時のみ

カラム数	変数名	フォーマット	単位系	内 容
1-10	RSIN	E10. 3	*	内表面の残留応力
11-20	ROUT	E10. 3	*	外表面の残留応力

コマンドライン7

ISIGRS (コマンドライン3) =6 の時のみ

カラム数	変数名	フォーマット	単位系	内 容
1-10	RSINM	E10. 3	*	残留応力の中央値
11-20	RSINSD	E10. 3	*	残留応力の標準偏差

コマンドライン8

常に入力

カラム数	変数名	フォーマット	単位系	内 容
1-10	THRIZN	E10. 3		解析年数 (年)
11-20	DTSCC	E10. 3		SCC 成長を計算する時間ステップ (年)
21-25	ICTYPE	I5		き裂の方向オプション 0:周方向き裂 1:長さ方向き裂
26-30	IPTYPE	I5		0:厚いオーステナイト系配管 1:厚いフェライト系配管 2:薄いオーステナイト系配管
31-40	EPST	E10. 0		ユーザ入力の ϵ パラメータ
41-50	ASTAR	E10. 0	*	ユーザ入力のき裂検出確率が 50% 時のき裂深さ
51-60	TRANSD	E10. 0		転換直径, ディフォルト値=1.0 (inch)
61-70	ANUU	E10. 0		ユーザ入力の ν 値

デフォルト値

IPTYPE	EPST	ASTAR	ANUU
0	0	0.5×THICK	1.6
1	0.005	0.25	3.0
2	0.005	0.25	1.33

コマンドライン 9

常に入力

カラム数	変数名	フォーマット	単位系	内 容
1-10	THICK	E10.3	*	配管の肉厚
11-20	RIN	E10.3	*	配管の内径
21-30	ELOVRR	E10.3		L/R 比 J-T 基準以外の時, 不要
31-40	ODIA	E10.3		IFAILC ≥ 3 のとき必要 IFAILC=3 : 呼び径 (B) IFAILC ≥ 4 : 呼び径 (A)

コマンドライン 10

ISF=0 の場合, ステンレス鋼モデル

カラム数	変数名	フォーマット	単位系	内 容
1-10	THRHL	E10.3		き裂進展しきい値 Δk_{th} (ksi-in $^{1/2}$)
11-20	EMXPMU	E10.3		き裂進展則の指數 m
21-30	CONSMU	E10.3		き裂進展則の定数パラメータ KONPRP(コマンドライン 3)=1 のとき, 定数值 KONPRP=0 のとき, 対数正規分布の中央値
31-40	CONS90	E10.3		き裂進展則の定数パラメータ 確率 90% のときの C の値 KONPRP=0 のときのみ必要
41-50	EMXPSD	E10.3		き裂進展則の指數 m の標準偏差 (正規分布) EMXPSD=0 のときは, m は一定

コマンドライン 10

ISF=1 の場合の炭素鋼確率モデル

カラム数	変数名	フォーマット	単位系	内 容
1-10	THRHL	E10. 3		き裂進展しきい値 Δk_{th} (ksi-in ^{1/2})

コマンドライン 10

ISF=2 の場合、バイリニアの決定論モデル

カラム数	変数名	フォーマット	単位系	内 容
1-10	FX1	E10. 3		き裂進展しきい値 Δk_{th} (ksi-in ^{1/2})
11-20	FX2	E10. 3		疲労き裂進展速度曲線の傾き変更点の横座標 (ksi-in ^{1/2})
21-30	FM1	E10. 3		傾き変更前の疲労き裂進展速度曲線の指数
31-40	FM2	E10. 3		傾き変更後の疲労き裂進展速度曲線の指数
41-50	ALF1	E10. 3		傾き変更前の疲労き裂進展速度曲線の係数
51-60	ALF2	E10. 3		傾き変更後の疲労き裂進展速度曲線の係数

コマンドライン 10

ISF=3 の場合、維持規格ステンレス 1 次水質環境中の疲労き裂進展速度モデル

カラム数	変数名	フォーマット	単位系	内 容
1-10	THRDSUS	E10. 3		き裂進展しきい値 Δk_{th} (MPa-m ^{1/2})
11-20	TRSUS	E10. 3		負荷上昇時間 (sec) 1よりも小さいときは 1 とする 定義できない場合は 1000 とする
21-30	ISFSUS	I10		決定論か確率論モデルの選択 ISFSUS=0 : 決定論的評価モデル ISFSUS=1 : 確率論的評価モデル
31-40	CONZA	E10. 3		ISFSUS=1 の時に、確率論的評価モデルを定義するために入力する必要がある
41-50	CONZB	E10. 3		ISFSUS=1 の時に、確率論的評価モデルを定義するために入力する必要がある

注 :

ISFSUS=1 の場合は維持規格の疲労き裂進展速度に以下の修正ファクター Q を乗じることによって、その確率論的評価モデルを考慮できるように定義した。

$$Q = \exp \left\{ \left[-\frac{CONZB^2}{2} - CONZA \cdot CONZB \right] + CONZB \cdot C_F \right\}$$

ここで、CONZA は疲労き裂進展速度の下方修正倍数、CONZB は疲労き裂進展速度の係数 C の対数値 ln(C) の標準偏差である。また、 C_F は平均値が 0、標準偏差が 1.0 の正規分布関数を表す。

LLNL ステンレス鋼の疲労き裂進展速度評価モデルに関しては、

$$CONZB=1.0473$$

である。

コマンドライン 10

ISF=4 の場合、維持規格ステンレス空気中の疲労き裂進展速度モデル

カラム数	変数名	フォーマット	単位系	内 容
1-10	THRDSUS	E10. 3		き裂進展しきい値 Δk_{th} (MPa-m ^{1/2})
11-20	TCSUS	E10. 3		温度 (°C)
21-30	ISFSUS	I10		決定論か確率論モデルの選択 ISFSUS=0 : 決定論的評価モデル ISFSUS=1 : 確率論的評価モデル
31-40	CONZA	E10. 3		ISFSUS=1 の時に、確率論的評価モデルを定義するために入力する必要がある
41-50	CONZB	E10. 3		ISFSUS=1 の時に、確率論的評価モデルを定義するために入力する必要がある

注 :

ISFSUS=1 の場合は維持規格の疲労き裂進展速度に以下の修正ファクター Q を乗じることによって、その確率論的評価モデルを考慮できるように定義した.

$$Q = \exp \left\{ \left[-\frac{CONZB^2}{2} - CONZA \cdot CONZB \right] + CONZB \cdot C_F \right\}$$

ここで、CONZA は疲労き裂進展速度の下方修正倍数、CONZB は疲労き裂進展速度の係数 C の対数値 ln(C) の標準偏差である。また、 C_F は平均値が 0、標準偏差が 1.0 の正規分布関数を表す。

LLNL ステンレス鋼の疲労き裂進展速度評価モデルに関しては、

$$CONZB=1.0473$$

である。

コマンドライン 1 1

ISCC (コマンドライン 3) ≠ 0 あるいは INCIAT (コマンドライン 2) ≠ 0 の時のみ

カラム数	変数名	フォーマット	単位系	内 容
1-10	OSTART	F10. 5		起動時の O ₂ 濃度 (ppm)
11-20	OSTEDY	F10. 5		定格状態での O ₂ 濃度 (ppm)
21-30	TFSTDY	F10. 5		定格状態での温度 (° F)
31-40	DURATN	F10. 5		起動事象の継続時間 (hour)
41-50	CONDUC	F10. 5		熱伝導率 (μ s/cm)

コマンドライン 1 2

常に入力

カラム数	変数名	フォーマット	単位系	内 容
1-10	SFLOMU	E10. 4	*	流動応力の平均値
11-20	SFLOSD	E10. 4	*	流動応力の標準偏差
21-30	XJIC	E10. 4		J _{IC} (in-kips/in ²), IFAILC(コマンドライン 2)=1, 2 の時のみ必要
31-40	DJDAMT	E10. 4		dJ/dα (in ksi), IFAILC=1, 2 の時のみ必要
41-50	SIG0	E10. 4	*	降伏応力 IFAILC=1, 2 の時のみ必要
51-60	DEE	E10. 4		材料の加工硬化定数 D (ε = (σ /D) ⁿ) IFAILC=1, 2 の時のみ必要
61-70	YOUNGS	E10. 4	*	ヤング率
71-80	XN	E10. 4		材料の加工硬化指数 n (ε = (σ /D) ⁿ) IFAILC=1, 2 の時のみ必要

コマンドライン 1 3

常に入力

カラム数	変数名	フォーマット	単位系	内 容
1-10	SULTMU	E10. 0	*	引張り強さの平均値
11-20	SULTSD	E10. 0	*	≥ 0 : 引張り強さの標準偏差 < 0 : 引張り強さは定数
21-25	IULT	I5		配管破断確率の内挿指標 ABS (IULT) は内挿点 > 0 : 線形的内挿 < 0 : 対数的内挿

コマンドライン 1 4

IFAILC=10 または IFAILC=11 (2パラメータ評価法の適用時) のみ

カラム数	変数名	フォーマット	単位系	内 容
1-10	TWOPE	E10. 0	*	2パラメータ評価法を適用する際のヤング率
11-20	TWOPU	E10. 0	*	2パラメータ評価法を適用する際の ポアソン比
21-30	TWOPSY	E10. 0	*	2パラメータ評価法を適用する際の降伏応力

コマンドライン 1 5

IFAILC=10 または IFAILC=11 (2パラメータ評価法の適用時) のみ

カラム数	変数名	フォーマット	単位系	内 容
1-10	I2PARA	I10		J-R 曲線のタイプ 1 : 指数曲線 2 : 2次曲線
11-20	TWOPC1	E10. 0		係数 C1
21-30	TWOPC2	E10. 0		係数 C2
31-40	DAMAX	E10. 0		この値を超えると, J は一定値 (最大値) となる (単位 : mm)

注: 本プログラムで考慮できる J-R 曲線のタイプ

$$J = C_1 (\Delta a)^{C_2} \quad (1)$$

$$\Delta a = C_1 J + C_2 J^2 \quad (2)$$

コマンドライン 1 6

IFAILC=10 または IFAILC=11 (2パラメータ評価法の適用時) のみ

カラム数	変数名	フォーマット	単位系	内 容
1-10	DA_DEPTH	E10. 0	*	き裂進展する際のき裂深さ方向の進展刻み
11-20	DB LENG	E10. 0	*	き裂進展する際のき裂長さ方向の進展刻み

コマンドライン 1 7

INCIAT (コマンドライン 2) ≠ 1かつ KRKDIS (コマンドライン 3) = 1, 2 の時のみ

カラム数	変数名	フォーマット	単位系	内 容
1-10	AMEDIN	E10. 3		き裂深さの中央値 (inch) (対数正規分布)
11-20	ASIGMA	E10. 3		き裂深さの標準偏差 (inch) (対数正規分布)

コマンドライン 1 8

INCIAT (コマンドライン 2) ≠ 1かつ KRKDIS (コマンドライン 3) = 3, 4 の時のみ

カラム数	変数名	フォーマット	単位系	内 容
1-10	ALAMDA	E10. 3		き裂深さのパラメータ (in^{-1}) (指数分布)

コマンドライン 1 9

INCIAT (コマンドライン 2) ≠ 1かつ KRKDIS (コマンドライン 3) = 1, 3 の時のみ

カラム数	変数名	フォーマット	単位系	内 容
1-10	BOAMED	E10. 3		き裂アスペクト比の中央値 (対数正規分布)
11-20	BOASIG	E10. 3		き裂アスペクト比の標準偏差 (対数正規分布)

コマンドライン 2 0

INCIAT (コマンドライン 2) ≠ 1かつKRKDIS (コマンドライン 3) = 2, 4 の時のみ

カラム数	変数名	フォーマット	単位系	内 容
1-10	BOALDA	E10. 3		き裂アスペクト比のパラメータ (指数分布)

コマンドライン 2 1

NEVAL (コマンドライン 3) > 0 の時のみ

カラム数	変数名	フォーマット	単位系	内 容
1-80	TEVAL	8E10. 3		評価時間 (年)

コマンドライン 2 2

NINSPT (コマンドライン 3) > 0 の時のみ

カラム数	変数名	フォーマット	単位系	内 容
1-80	TINSPT	8E10. 3		供用中検査の実施時期 (年)

コマンドライン 2 3

常に入力

カラム 数	変数名	フォーマット	単位系	内 容
1-10	FNDLEK	E10. 3		漏えいの検出限界値 (gpm)
11-20	ALKBIG	E10. 3		大規模漏えいの検出限界値 (gpm)
21-30	EPSLEK	E10. 3		NIKRADSE の式に用いる貫通き裂の表面粗さ (mm), ILEAK (コマンドライン 2) > 1 の時のみ必要
31-40	QX0	E10. 3		流体のクオリティ無欠元数, ILEAK=2 の時のみ必要 (注: 飽和蒸気を計算する場合 1 とすると収束しない。 0.9999 として計算のこと)

41-50	DPO	E10. 3		差圧 (kg/cm ²), ILEAK=2 の時のみ必要 (注: 値が小さいほど計算精度 がよい)
51-60	SPVM	E10. 3		未使用
61-70	PRSS	E10. 3		定格運転時の管の内圧 (kg/cm ²) ILEAK>1 の時のみ必要

コマンドライン 2 4

ISQUARE (コマンドライン 3) ≠ 0 の時のみ

カラム数	変数名	フォーマット	単位系	内 容
1-5	NAOH	I5		a/h 座標の分割数
6-10	NAOB	I5		a/b 座標の分割数
11-20	AOHLOW	E10. 3		a/h 座標の下限値
21-30	AOHUP	E10. 3		a/h 座標の上限値
31-40	AOBLFT	E10. 3		a/b 座標の下限値
41-50	AOBRGT	E10. 3		a/b 座標の上限値

コマンドライン 2 5

ISQUARE (コマンドライン 3) = 0 の時のみ。セルの数だけ入力

カラム数	変数名	フォーマット	単位系	内 容
1-10	AOHSIZ(M, 1)	E10. 4		M 番セルの a/h 下限座標
11-20	AOHSIZ(M, 2)	E10. 4		M 番セルの a/h 上限座標
21-30	AOBSIZ(M, 1)	E10. 4		M 番セルの a/b 下限座標
31-40	AOBSIZ(M, 2)	E10. 4		M 番セルの a/b 上限座標
41-50	NUMTRY	I10		M 番セルの採点数

コマンドライン 2 6

ISQARE (コマンドライン 3) ≠ 0かつNTRIES (コマンドライン 3) > 0 時のみ

カラム数	変数名	フォーマット	単位系	内 容
1-50	NUMTRY (M)	5I10		M 番セルの採点数

コマンドライン 2 7

常に入力

カラム数	変数名	フォーマット	単位系	内 容
1-10	SIGCLD	E10. 3	*	自重応力
11-20	SGDWTE	E10. 3	*	常格運転時の自重と熱膨張による応力
21-30	OPPRES	E10. 3	*	IUNIT (コマンドライン 1) = 0 の時、内圧による配管長さ方向の応力 IUNIT=1 の時、内圧
31-40	PRFPRS	E10. 3	*	IUNIT=0 の時は、水圧試験の静水圧による配管長さ方向の応力 IUNIT=1 の時は、水圧試験の静水圧の値 水圧試験を考慮しないなら、任意の負数を入力する
41-50	SIGVIB	E10. 3	*	高サイクル振動を考慮するときのピークからピークまでの応力振動値
51-60	VBTHLD	E10. 3		振動モデルに関するパラメータ R* (Section3.9 of NUREG-2301)
61-70	SBCLD	E10. 3	*	自重による曲げ応力
71-80	SBPRS	E10. 3	*	内圧による曲げ応力
81-90	SBDC	E10. 3	*	熱膨張による曲げ応力
91-100	SBPRF	E10. 3	*	水圧試験による曲げ応力

コマンドライン 28

常に入力。コマンドライン 29 とセットにして入力する。

過渡事象が複数の荷重パターンの組み合わせで構成される場合、荷重パターンの数だけコマンドライン 28 を入力する。

カラム数	変数名	フォーマット	単位系	内 容
1-5	NCYBLK(K)	I5		ブロッキング・ファクタ
6-20	BLAMDA(K)	F15.10		過渡事象の発生時間 >0 : BLAMDA(K) 年毎に均一間隔で発生 <0 : BLAMDA(K) を平均値としてポアソン分布的に発生 SCC を考慮する場合、常に正の値を入力しなければならない
21-30	TEMP(K)	F10.5		過渡事象中の温度変動幅 (° F) (使用せず)
31-80	TITLE(K)	A50		過渡事象に関するコメント

コマンドライン 29

常に入力

カラム数	変数名	フォーマット	単位系	内 容
1-10	SIGMAX(I, K)	F10.5	*	荷重パターン I の 1 次膜応力の最大値
11-20	SIGMIN(I, K)	F10.5	*	荷重パターン I の 1 次膜応力の最小値
21-25	ID1	I5		過渡事象の識別ナンバーで、この数値が同じであれば、同一事象内の荷重パターンであると見なされる。
26-35	SBMAX(I, K)	F10.5	*	荷重パターン I の 1 次曲げ応力の最大値 NWMNRJ (コマンドライン 2) ≠ 0 のときのみ有効
36-45	SBMIN(I, K)	F10.5	*	荷重パターン I の 1 次曲げ応力の最小値 NWMNRJ (コマンドライン 2) ≠ 0 のときのみ有効

46-55	SG2MAX	F10. 5	*	荷重パターン I の 2 次膜応力の最大値
56-65	SG2MIN	F10. 5	*	荷重パターン I の 2 次膜応力の最小値
66-75	SB2MAX	F10. 5	*	荷重パターン I の 2 次曲げ応力の最大値 NWMNRJ (コマンドライン 2) ≠ 0 のときのみ有効
76-85	SB2MIN	F10. 5	*	荷重パターン I の 2 次曲げ応力の最小値 NWMNRJ (コマンドライン 2) ≠ 0 のときのみ有効

コマンドライン 3 0

常に入力

カラム数	変数名	フォーマット	単位系	内 容
1-2	ABLK	A2		「##」の入力により、過渡事象データの終了を示す。

コマンドライン 3 1

ISIGRS (コマンドライン 3) = 1 の時のみ

カラム数	変数名	フォーマット	単位系	内 容
1-80	B(L, K)	8E10. 3		K_a に対する残留応力の寄与を決める多項式の係数 (Equation5-5 of NUREG-5864)

コマンドライン 3 2

ISIGRS (コマンドライン 3) = 1 の時のみ

カラム数	変数名	フォーマット	単位系	内 容
1-80	B(L, K)	8E10. 3		K_b に対する残留応力の寄与を決める多項式の係数 (Equation5-5 of NUREG-5864)

コマンドライン 3 3

NQUAKE (コマンドライン 3) =1, または NQUAKE=2 の場合

カラム数	変数名	フォーマット	単位系	内 容
1-80	NEQCLS(N)	16I15		N 番目地震クラスに含まれる地震動の数.

コマンドライン 3 4

NQUAKE (コマンドライン 3) =2かつ NEVAL (コマンドライン 3) <0 の時のみ

カラム数	変数名	フォーマット	単位系	内 容
1-80	IEQTIM(N)	8I10		N 番目地震の発生時期 (評価回数の値)

コマンドライン 3 5

NQUAKE (コマンドライン 3) =2かつ NEVAL (コマンドライン 3) >0 の時のみ

カラム数	変数名	フォーマット	単位系	内 容
1-80	EQTIME(N)	8E10. 3		N 番目地震の発生時間 (年)

コマンドライン 3 6

NQUAKE (コマンドライン 3) =1, または NQUAKE=2 の場合

各地震事象に対して、コマンドライン 31 で入力した NEQCLS の値の和の数だけこのラインのデータを入力する。

カラム数	変数名	フォーマット	単位系	内 容
1-10	NCYCEQ	I10		同一振幅のサイクル数
11-20	SIGEQ	F10. 3	*	膜応力振幅
21-30	SGEQMX	F10. 3	*	地震による膜応力サイクル時刻歴の最大値
31-80	TITLE	5A10		この地震に関するコメント
81-90	SIGEBMX	F10. 3	*	曲げ応力振幅
91-100	SIGEBMIN	F10. 3	*	地震による曲げ応力サイクル時刻歴の最大値

コマンドライン 3 7

NQUAKE (コマンドライン 3) =3 の時のみ

各地震動に対して、応力サイクルの数及び地震動のタイトルを入力する。

カラム数	変数名	フォーマット	単位系	内 容
1-5	NEQCLS(N)	I5		N番目地震の応力サイクル数
6-50	TITLE	6A8		この地震に関するコメント

コマンドライン 3 8

NQUAKE (コマンドライン 3) =3 の時のみ

コマンドライン 37 の応力サイクル数だけ応力データを入力する。

カラム数	変数名	フォーマット	単位系	内 容
1-10	NCYCEQ	I10		下記応力データを持つ応力サイクルの数 (現在では 1 と入力する)
11-20	SIGEQ	E10. 3	*	この応力サイクルの最大膜成分
21-30	SGEQMX	E10. 3	*	この応力サイクルの最小膜成分
31-40	SIGEBMX	E10. 3	*	この応力サイクルの最大曲げ成分
41-50	SIGEBMIN	E10. 3	*	この応力サイクルの最小曲げ成分

※GUI は PASCAL-SC の地震荷重ファイルフォーマットから PASCAL-EQ 用の地震荷重フォーマットに変換して地震荷重部分を設定する。PASCAL-EQ では膜応力と曲げ応力の最大・最小の関係が一致していかなければならない。

コマンドライン 3 9

IREMED (コマンドライン 2) > 0 の時のみ

カラム数	変数名	フォーマット	単位系	内 容
1-10	RTIME(I)	E10. 4		以下の変数に変化が生じる時間 (年)
11-20	THICKS(I)	E10. 4	*	配管肉厚
21-30	OSTARS(I)	E10. 4		起動時の O_2 の濃度
31-40	OSTDYS(I)	E10. 4		定格状態の O_2 の濃度
41-50	CONDUS(I)	E10. 4		熱伝導率
51-60	SGCLDS(I)	E10. 4	*	自重応力
61-70	SDWTES(I)	E10. 4	*	自重及び熱膨張による応力
71-80	SGVIBS(I)	E10. 4	*	多サイクル振動のピークから ピークまでの値

コマンドライン 4 0

IREMED (コマンドライン 2) > 0 の時のみ

カラム数	変数名	フォーマット	単位系	内 容
1-10	ISIGRX(I)	I10		IHSI または MSIP 残留応力フラグ
11-20	RSINMS(I)	E10. 4	*	配管内部表面の平均応力 (IHSI または MSIP の応力)
21-30	RSISDS(I)	E10. 4	*	配管内部表面の応力標準偏差 (IHSI または MSIP の応力)

4.5 プログラム実行システム

4.5.1 PASCAL-SC 実行システム

- ・実行システム(図 4-16)へ移動するには、PASCAL-SC保存ダイアログ(図 4-12)の「実行支援システムへ」ボタンを押すか、メインダイアログ(図 4-1)で「PASCAL-SC」ラジオボタンと「プログラム実行」ラジオボタンを選択して「次へ」ボタンを押す。実行したいファイルの種類をラジオボタングループから選択し、「参照」ボタンを押す。するとファイル読み込みダイアログが開くので必要なだけファイルを選択する。選択された入力ファイルは「入力カードファイル」エディットボックス内に表示される。
- ・図 4-16で「選択した入力カードについて解析」ラジオボタンを選択し「解析実行」ボタンを押すと計算(解析)が始まる。その際、MS-DOS のコマンドプロンプトが起動する。

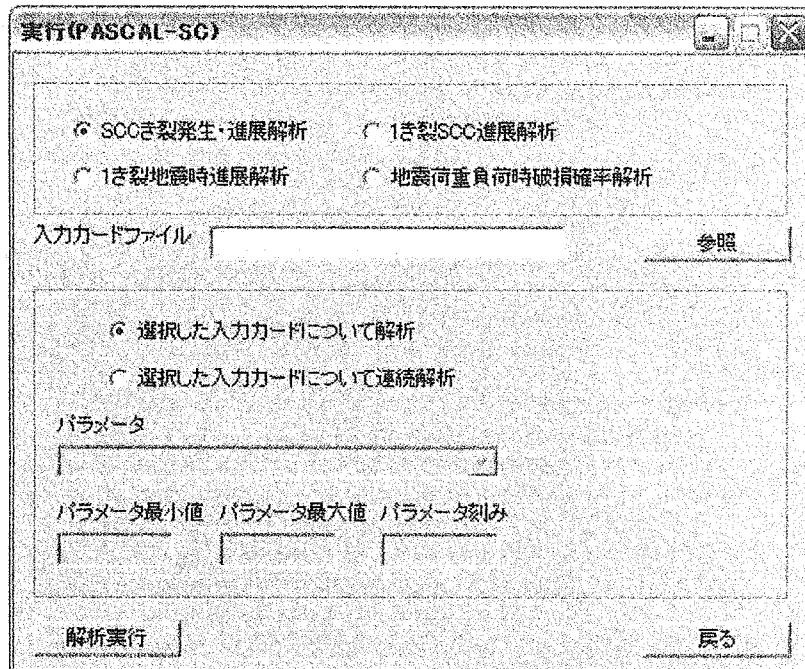


図 4-16 PASCAL-SC の実行システム・ダイアログ

- ・入力ファイルのあるフォルダ(入力フォルダ) 内に新規フォルダが作成され、その中に計算結果が収められる。新規フォルダの名前は以下の書式に従う。
`result_[入力ファイル名]`
 例えば入力ファイルが `scc_b.scc_idat` の場合、その計算結果は `result_scc_b.scc_idat` という名前のフォルダ内に収められる。複数の入力ファイルを選択した場合、複数の計算結果フォルダが作成される。
- ・「選択した入力カードについて連続解析」ラジオボタンを選択すると「パラメータ」コンボボックスが有効になり可変にできるパラメータを選択することができる(図 4-17)。選択したパラ

メータの最小値、最大値、刻みを入力する。パラメータ値を入力後、「解析実行」ボタンを押すと、まず最初に必要な入力ファイルを入力フォルダ内に自動作成する。図 4-17 の例の場合、収束判定閾値を 3, 3.5, 4 と変えるので 3 つの入力ファイルが新たに作成される。作成されるファイル名は以下の書式に従う。

[入力ファイル名]_x_[パラメータ識別子]

ここで x は 0 から始まる整数である。入力ファイル名が scc_b.scc_idat なら以下の 3 つが作成される。

- scc_b.scc_idat_0_smp_conv_jdge → 収束判定閾値 = 3 としたもの
- scc_b.scc_idat_1_smp_conv_jdge → 収束判定閾値 = 3.5 としたもの
- scc_b.scc_idat_2_smp_conv_jdge → 収束判定閾値 = 4 としたもの

これら 3 つの入力ファイルについて計算を行う。

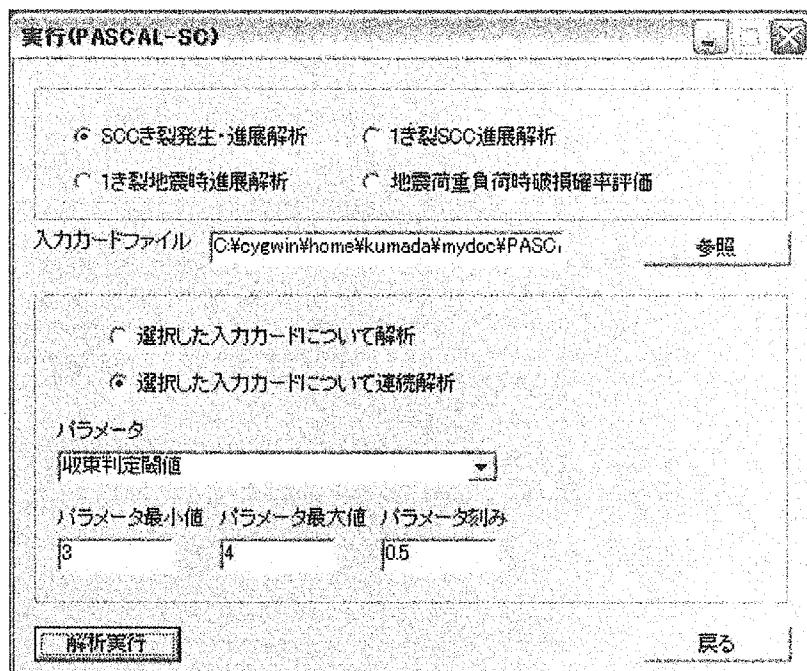


図 4-17 PASCAL-SC の実行システム・ダイアログ(連続解析)

- ・各結果フォルダ内にはパスファイルAと呼ぶファイルが作成される。パスファイルAには表 4-3 の種類がある。

表 4-3 パスファイルAの名称

解析内容	パスファイルAの名称
SCC き裂発生・進展解析	path_file_scc
1 き裂 SCC 進展解析	path_file_one_crack_scc
1 き裂地震時進展解析	path_file_one_crack_eq
SCC 地震荷重負荷時破損確率解析	path_file_scc_eq_prob

- ・上記パスファイルA以外にパスファイルBと呼ぶファイルを入力フォルダ内に生成する。パスファイルBは以下の命名規則に従う。

[入力ファイル名].[パラメータ識別子].seq_path_file

結果表示出力システム(PASCAL-SC)で3次元グラフを描画する場合、パスファイルBが入力ファイルとなる。(パスファイルAをユーザが選択することはない)

4.5.2 PASCAL-SC のコマンドラインからの実行

GUI を使用せずに PASCAL-SC を実行する場合には、4.4.2節の入力データをテキストファイルで作成すれば、DOS コマンドラインでファイル名を指定して以下のように実行できる。

pascal_sc.exe オプション < 入力データファイル

オプション	解析内容
scc	SCC き裂発生・進展解析
one_crack_scc	1き裂 SCC 進展解析
one_crack_eq	1き裂地震時進展解析
scc_eq_prob	SCC に地震荷重を負荷した場合の破損確率評価

テキストファイルで入力カードを作成する際には以下の規則がある。

- ・#の含まれる行(行頭でなくても良い)はコメントとなる。
- ・同じ行の各データは1つ以上のスペースで区切る。

4.5.3 PASCAL-EQ 実行システム

- ・図 4-12の保存ダイアログの「実行支援システムへ」ボタンを押すか、図 4-1のメイン・ダイアログで「PASCAL-EQ」ラジオボタンと「プログラム実行」ラジオボタンを選択して「次へ」ボタンを押すとのPASCAL-EQ 実行ダイアログに移動する(図 4-18)。「参照」ボタンを押すとファイル読み込みダイアログが開くので必要なだけ入力ファイルを選択する。選択されたファイルは「入力カードファイル」エディットボックス内に表示される。
- ・「選択した入力カードについて」を選択し「解析実行」ボタンを押すと計算が始まる。結果は PASCAL-SC と同様に以下の書式に従うフォルダ内に収められる。

result_[入力ファイル名]

このフォルダ内のファイルeq.out が計算結果である。

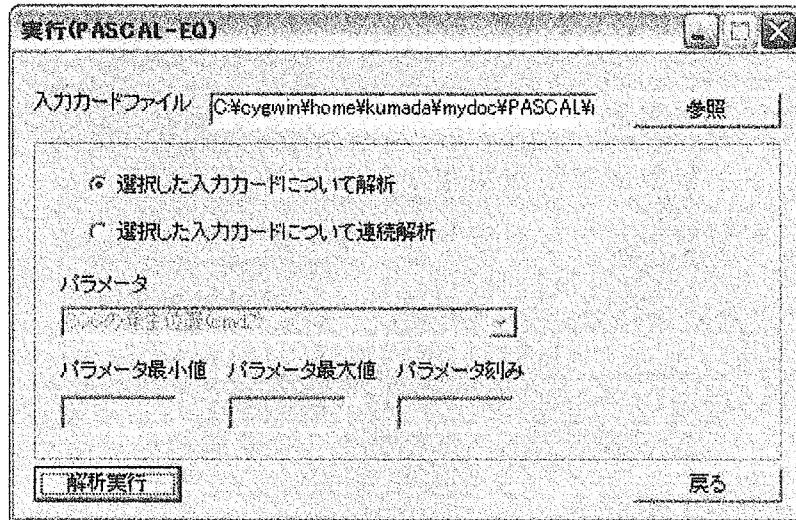


図 4-18 PASCAL-EQ の実行ダイアログ

- 「選択した入力カードについて連続解析」ラジオボタンを選択すると「パラメータ」コンボボックスが有効になり可変にできるパラメータを選択することができる(図 4-19)。選択したパラメータの最小値、最大値、刻みを入力する。パラメータ値を入力後、「解析実行」ボタンを押すと連続解析が始まる。
- 結果はPASCAL-SCと同じ書式に従うフォルダ内に収められる。元の入力ファイル名が eq_n_z.eq_idat である図2.19 の場合、以下の 3 つのフォルダが作成される。

result_eq_n_z.eq_idat_0_cmd2_iseed 亂数発生の種(iseed,cmd2) = 100

result_eq_n_z.eq_idat_1_cmd2_iseed 亂数発生の種(iseed,cmd2) = 105

result_eq_n_z.eq_idat_2_cmd2_iseed 亂数発生の種(iseed,cmd2) = 110

ここでフォルダ名に現れる以下の 3 つのファイルは自動的に作成された入力ファイルに相当する。

eq_n_z.eq_idat_0_cmd2_iseed

eq_n_z.eq_idat_1_cmd2_iseed

eq_n_z.eq_idat_2_cmd2_iseed

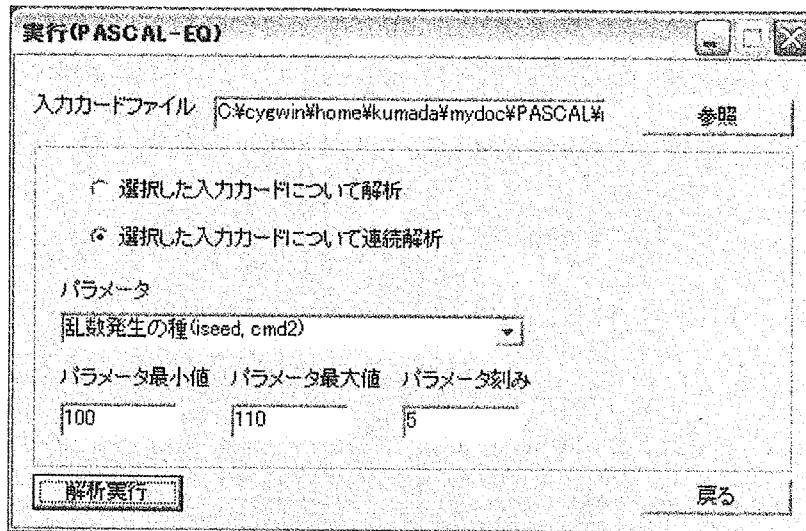


図 4-19 PASCAL-EQ の実行ダイアログ(連続解析)

4.5.4 PASCAL-EQ のコマンドラインからの実行

GUI を使用しないで PASCAL-EQ を実行するには、4.4.4節の入力データをテキストファイルで作成すれば、DOS コマンドラインでファイル名を指定して以下のように実行できる。

```
pascal_eq.exe < 入力データファイル > 出力ファイル
```

4.6 結果表示システム

4.6.1 PASCAL-SC 結果表示システム

- ・メインダイアログ(図 4-1) で「PASCAL-SC」ラジオボタンと「結果表示」ラジオボタンを選択して「次へ」ボタンを押すと図 4-20のダイアログに移動する。
 - ・図 4-20のダイアログ上段には選択できるファイルの種類が表示されている。
 - ・各グラフは「連続解析結果表示」ラジオボタンを選択することにより 3 次元グラフとなる。このとき新たに追加される軸はパラメータ軸となる。このパラメータ軸は任意の座標軸に指定することができる。4.5.1節で示したように3次元グラフを描画するときはパスファイルBを入力ファイルとする。パスファイルBには各結果フォルダ内にあるパスファイルAのファイル名が記載されている。さらにパスファイルAには結果フォルダ内の全てのファイル名が記載されている。2次元、3次元のグラフに関わらず、グラフ描画の基本的な処理手順は以下の通りである。
- (1) ファイルを選択する。
 - (2) 「グラフ詳細設定」ボタンを押して詳細設定を行う。
 - (3) 「グラフ描画」ボタンによりグラフを描画する。
 - (4) 「保存されたファイルの描画」ボタンで、保存されたグラフ・解析条件を再描画する。

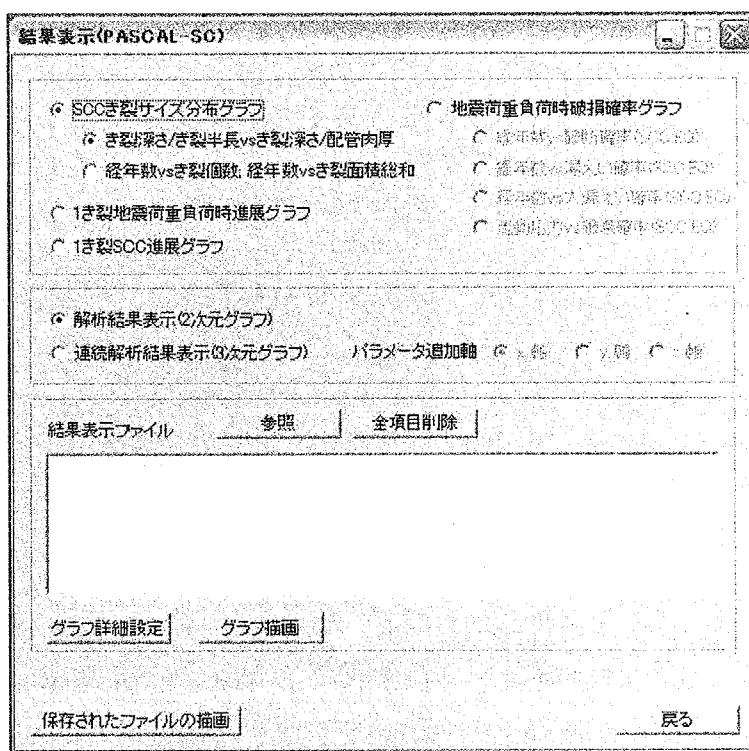


図 4-20 PASCAL-SC 結果表示ダイアログ

(a) SCCき裂サイズ分布グラフ(き裂深さ/き裂半長vs き裂深さ/配管肉厚)

(1) 2次元グラフ

- ・図 4-20で「SCC き裂サイズ分布グラフ」ラジオボタン、「き裂深さ/き裂半長vs き裂深さ/配管肉厚」ラジオボタン、「解析結果表示」ラジオボタンを選択後「参照」ボタンを押してファイルを選択する(図 4-21)。このとき選択できるファイルはプログラム実行システムの作成した結果フォルダ内のファイルNscc.dat(N は整数)である。この例ではプログラム実行システムの作成したresult_scc_b.scc_idat_0_pipe_thickフォルダ内の3つのファイルを選択している。リストボックス内のファイルの順番はマウスで変えることができる。
- ・「グラフ詳細設定」ボタンを押すと図 4-22の詳細設定ダイアログが現れる。このダイアログ上段にあるリストボックスには選択したファイル名が表示されている。その右側には凡例としてファイル名が表示されている。リストボックス内でファイルを選択し、エディットボックス内に好みの凡例名を入力する。

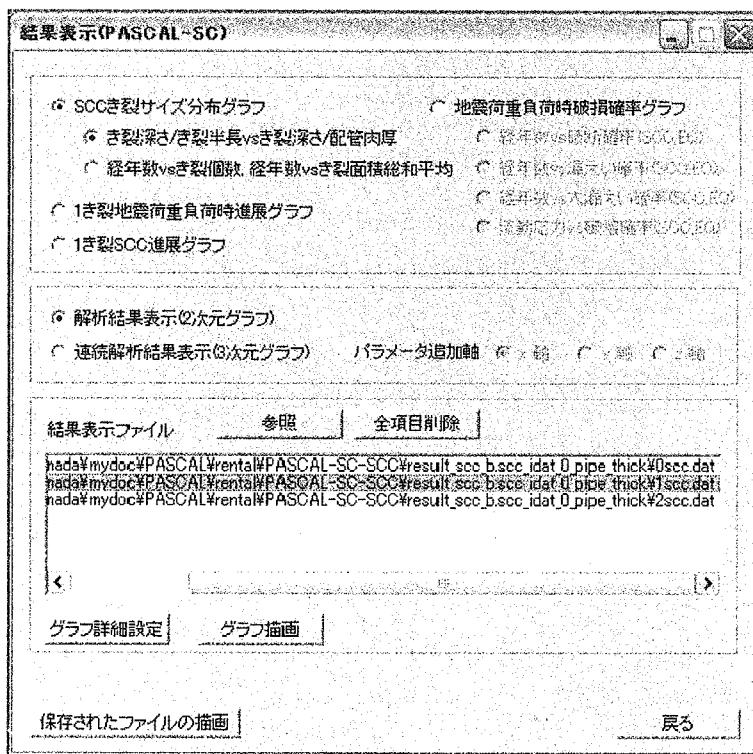


図 4-21 PASCAL-SC 結果表示ダイアログ(SCC き裂サイズ分布(2 次元グラフ)選択)

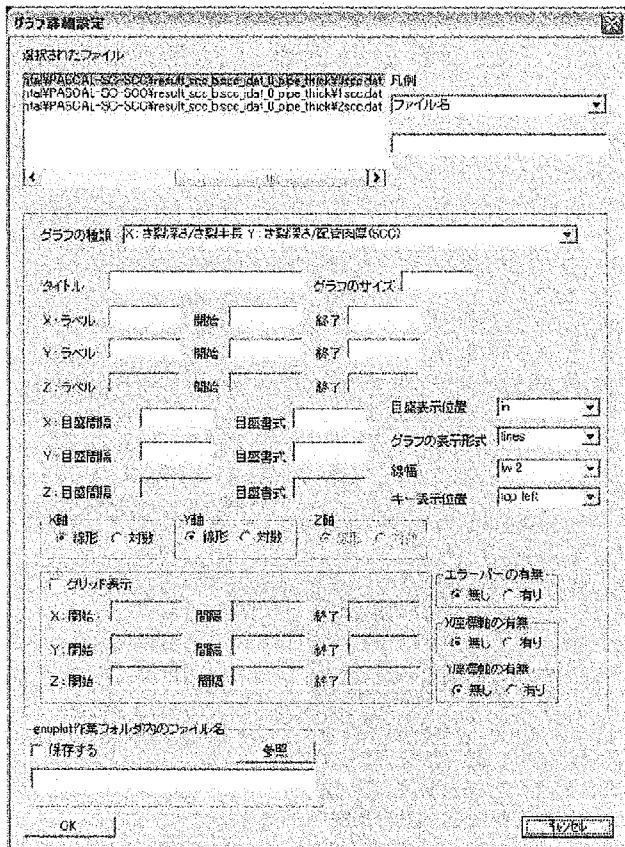


図 4-22 PASCAL-SC グラフ詳細設定(SCC き裂サイズ分布)

- 「グラフの種類」コンボボックスには現在描画できるグラフの種類が表示される。
- 「グラフの種類」コンボボックスより下にある詳細設定は全てこの一種類のグラフに適用される。ファイル単位で詳細設定を変更することはできない。
- このグラフはたくさんの点の集まりとなるので「グラフの表示形式」コンボボックスからpointsを選択しておく。
- また、「キー表示位置」コンボボックスからtop rightを選択する。
- 詳細設定ダイアログの一番下にある「参照」ボタンを押してgnuplot作業フォルダ内に新規ファイルを作成する。さらに、「保存する」チェックボタンをチェックする。このときグラフが保存される。(PASCAL-SCではプログラム実行システムにおいて既に解析条件が保存されているので、結果表示システムで解析条件を保存することはない)
- 図 4-22でグラフの詳細を設定した後「OK」ボタンを押すと図 4-21に戻る。図 4-21にある「グラフ描画」ボタンを押すと解析条件とグラフが表示される。

(2) 3 次元グラフ

- 図 4-20で「SCC き裂サイズ分布グラフ」ラジオボタン、「き裂深さ/き裂半長 vs き裂深さ/配管肉厚」ラジオボタン、「連続解析結果表示」ラジオボタンを選択後「参照」ボタンを押し

てファイルを選択する。このとき選択できるファイルはパスファイル B(4.5.1節)である(図 4-23)。

- ・「グラフ詳細設定」ボタンを押すとこれまでと同様に詳細設定ダイアログが開く。
- ・3次元の場合、凡例は指定できない。
- ・「グラフの種類」コンボボックスにはき裂深さ/き裂半長: き裂深さ/配管肉厚: パラメータ(SCC)のみ表示される。2次元の場合と同じように「グラフの表示形式」をpoints, 「キー表示位置」をtop rightとする。「gnuplot作業用ファイルフォルダ内のファイル名」をusr.plt と指定し「OK」ボタンを押す。
- ・図 4-21で「グラフ描画」ボタンを押すとグラフが表示される。グラフと同時に描画される解析条件は連続解析であるので複数枚表示される。

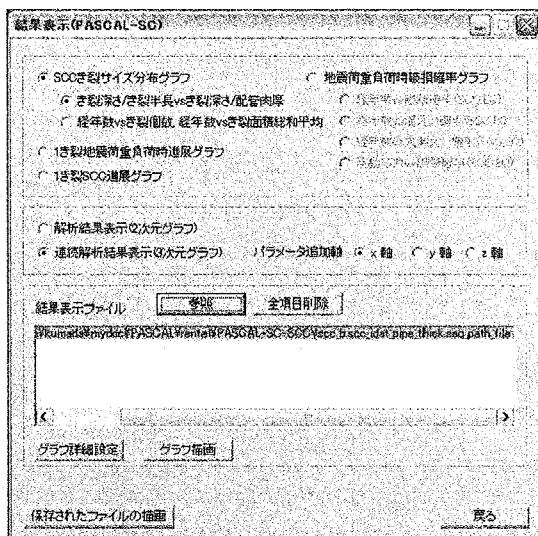


図 4-23 PASCAL-SC 結果表示ダイアログ(SCC き裂サイズ分布(3 次元グラフ)選択)

(b) SCC き裂サイズ分布グラフ(経年数vs き裂個数, 経年数vs き裂面積総和平均)

(1) 2 次元グラフ

- ・図 4-20で「SCC き裂サイズ分布グラフ」ラジオボタン、「経年数vs き裂個数, 経年数vs き裂面積総和平均」ラジオボタン、「解析結果表示」ラジオボタンを選択後「参照」ボタンを押してファイルを選択する。選択できるファイル名はNscc.idat である。その後、「グラフ詳細設定」ボタンを押すと図 4-22と同様のダイアログが現れる。凡例の扱いはSCC き裂サイズ分布2次元グラフ(き裂深さ/き裂半長vs き裂深さ/配管肉厚)と同様である。「グラフの種類」コンボボックスにから描画したい種類を選択し各項目を設定後、「OK」ボタンを押した後、図 4-20に戻り「グラフ描画」ボタンを押すとグラフが表示される。
- ・経年数vs き裂面積総和平均を選択したときのみエラーバーが有効となる。

(2) 3次元グラフ

- ・図 4-20で「SCC き裂サイズ分布グラフ」ラジオボタン, 「経年数 vs き裂個数, 経年数 vs き裂面積総和平均」ラジオボタン, 「連続解析結果表示」ラジオボタンを選択後「参照」ボタンを押してファイルを選択する。選択するパスファイルBはSCC き裂サイズ分布3次元グラフ(き裂深さ/き裂半長 vs き裂深さ/配管肉厚)の場合と同様である。その後、「グラフ詳細設定」ボタンを押すと図 4-22と同様な詳細設定ダイアログが現れる。
- ・「グラフの種類」コンボボックスからグラフの種類を選択し, 各項目を設定した後「OK」ボタンを押すと図 4-20に戻る。図 4-20で「グラフ描画」ボタンを押すと描画する。尚, グラフでファイルごとの凡例の指定はできない。

(c) 1き裂地震荷重負荷時進展グラフ

(1) 2次元グラフ

- ・図 4-20で「1き裂地震荷重負荷時進展グラフ」ラジオボタン, 「解析結果表示」ラジオボタンを選択後「参照」ボタンを押してファイルを選択する。選択できるファイルはプログラム実行システムが作成したNX.csv ファイルである。ここでNは初期き裂サイズを識別する整数, Xは地震波ファイル名である。その後, 「グラフ詳細設定」ダイアログで「gnuplot作業用ファイルフォルダ内のファイル名」を入力する。このグラフは地震波ファイル毎にグラフを作成するため, ファイル単位の凡例指定はできない。
- ・「OK」ボタンを押して図 4-20に戻った後, 「グラフ描画」ボタンを押すと描画する。凡例として初期き裂サイズが表示され, タイトルに地震波ファイル名が付加される。

(2) 3次元グラフ

- ・図 4-20で「1き裂地震荷重負荷時進展グラフ」ラジオボタン, 「連続解析結果表示」ラジオボタンを選択後「参照」ボタンを押してファイルを選択する。選択できるファイルはプログラム実行システムが作成したパスファイル B(4.5.1節)である。次に「グラフ詳細設定」ダイアログで「gnuplot 作業用ファイルフォルダ内のファイル名」を入力する。尚, 凡例の指定はできない。
- ・「OK」ボタンを押して図 4-20に戻った後, 「グラフ描画」ボタンを押すと描画する。

(d) 1き裂 SCC 進展グラフ

(1) 2次元グラフ

- ・図 4-20で「1き裂SCC 進展グラフ」ラジオボタン, 「解析結果表示」ラジオボタンを選択後「参照」ボタンを押してファイルを選択する。選択できるファイルはプログラム実行システムが作成したdepNlenMcrack scc.dat ファイルである。ここで(N, M)は初期き裂サイズである。その後, 「グラフ詳細設定」ダイアログで「gnuplot作業用ファイルフォルダ内のファイル名」を指定する。 「OK」ボタンを押して図 4-20に戻った後, 「グラフ描画」ボタンを押すとグラフが表示される。

(2) 3次元グラフ

- ・図 4-20で「1き裂 SCC 進展グラフ」ラジオボタン、「連続解析結果表示」ラジオボタンを選択後「参照」ボタンを押してファイルを選択する。選択できるファイルはプログラム実行システムが作成したパスファイルB(4.5.1節)である。
「グラフ詳細設定」ダイアログで「gnuplot作業用ファイルフォルダ内のファイル名」を入力する。尚、凡例の指定はできない。「OK」ボタンを押して図 4-20に戻った後、「グラフ描画」ボタンを押すとグラフを表示する。

(e) 地震荷重負荷時破損確率グラフ(経年数 vs 破断確率)

(1) 2次元グラフ

- ・図 4-20で「地震荷重負荷時破損確率グラフ」ラジオボタン、「経年数 vs 破断確率」ラジオボタン、「解析結果表示」ラジオボタンを選択後「参照」ボタンを押してファイルを選択する。選択できるファイルはプログラム実行システムが作成した X prob.dat ファイルである。ここで X は地震波ファイル名である。その後、「グラフ詳細設定」ダイアログで「gnuplot 作業用ファイルフォルダ内のファイル名」を入力する。
- ・「グラフの種類」コンボボックスには以下の2種類のグラフ名がある
 - X: 経年数Y: 破断確率(SCC EQ PROB)[SCC]
 - X: 経年数Y: 破断確率(SCC EQ PROB)[EQ]
 「グラフの種類」コンボボックスより下にあるgnuplot オプションはこれら2つのグラフについて別々に設定することができる。また、これら2つのグラフは同時描画される。「OK」ボタンを押して図 4-20に戻った、「グラフ描画」ボタンを押すとグラフが描画される。
- ・経年数vs漏えい確率、経年数vs大漏えい確率についても手順は同様である。ラジオボタンの選択を変更した場合は、この変更を反映させるため「グラフ詳細設定」ボタンを押す必要がある。

(2) 3次元グラフ

- ・図 4-20で「地震荷重負荷時破損確率グラフ」ラジオボタン、「経年数 vs 破断確率」ラジオボタン、「連続解析結果表示」ラジオボタンを選択後「参照」ボタンを押してファイルを選択する。選択できるファイルはプログラム実行システムが作成したパスファイルB(4.5.1節)である。その後、「グラフ詳細設定」ダイアログで「gnuplot 作業用ファイルフォルダ内のファイル名」を入力する。尚、凡例の入力はできない。

「グラフの種類」コンボボックスには2種類のグラフがある。

- 経年数: 破断確率: パラメータ(SCC EQ PROB)[SCC]
- 経年数: 破断確率: パラメータ(SCC EQ PROB)[EQ]

これらのグラフについては別々にgnuplot オプションを設定することができる。「OK」ボタンを押して図 4-20に戻った、「グラフ描画」ボタンを押すとグラフが描画される。

- ・経年数vs 漏えい確率、経年数vs 大漏えい確率についても手順は同様である。ラジオボタンの

選択を変更した場合は、この変更を反映させるため「グラフ詳細設定」ボタンを押す必要がある。

(f) 地震荷重負荷時破損確率(流動応力 vs 破壊確率)

(1) 2次元グラフ

- 「地震荷重負荷時破損確率グラフ」ラジオボタン、「流動応力 vs 破壊確率」ラジオボタン、「解析結果表示」ラジオボタンを選択後「参照」ボタンを押してファイルを選択する。選択できるファイルはプログラム実行システムが作成したX cell.csv ファイルである。ここでXは地震波ファイル名である。その後、「グラフ詳細設定」ダイアログでgnuplot作業用ファイルフォルダ内のファイル名」を入力する。
- 「OK」ボタンを押して図 4-20に戻った後、「グラフ描画」ボタンを押すと描画する。

(2) 3次元グラフ

- 図 4-20で「地震荷重負荷時破損確率グラフ」ラジオボタン、「流動応力vs 破壊確率」ラジオボタン、「連続解析結果表示」ラジオボタンを選択後「参照」ボタンを押してファイルを選択する。選択できるファイルはプログラム実行システムが作成したパスファイルB(4.5.1節)である。その後、「グラフ詳細設定」ダイアログで「gnuplot作業用ファイルフォルダ内のファイル名」を入力しする。尚、凡例の入力はできない。「グラフの種類」コンボボックスには2つの名前が表示される。詳細設定はこれら2つのグラフに対し別々に設定することができる。また、2つのグラフは同時描画される。「OK」ボタンを押して図 4-20に戻った後、「グラフ描画」ボタンを押すとグラフを描画する。

4.6.2 PASCAL-SC の計算結果ファイル

PASCAL-SC を実行すると、計算結果はファイルにテキスト形式で出力される。GUI は出力されたテキストファイルから集計・描画している。各オプションの計算結果は表 4-4の通りである。各オプションの出力ファイル例を以下の表 4-5～表 4-9に示す。

表 4-4 PASCAL-SC 計算結果出力ファイル

解析内容	解析結果	出力ファイル名
SCC き裂発生・進展解析	各サンプリング毎の き裂サイズデータ	Xsc.dat (X:サンプリング番号)
1き裂 SCC 進展解析	1き裂 SCC 進展状況	depXlenY.dat (X:初期き裂深さ, Y:初期き裂半長)
1き裂地震時進展解析	1き裂地震時進展状況	NX.csv (N:通し番号, X 地震波名)
SCC 地震荷重負荷時破損確率 解析	破損確率	X_prob.dat (X:地震波ファイル名)
	流動応力セル情報データ	X_cell.csv (X:地震波ファイル名)

	破損確率途中経過	X_prob_in_progress.csv (X:地震波ファイル名)
--	----------	--

※解析条件は

“解析オプション”+“_analysis_codition.dat”

ファイルへ出力される。

・SCC き裂発生・進展解析

SCC によるき裂発生・進展状況を出力する。

表 4-5 SCC き裂発生・進展解析出力ファイル

```
----- stress
sigcl total 0.19 memb -0.13 bend 0.32
thermal total -5.8 memb -0.81 bend -4.99
sigprs total 131.251 memb 23.2709 bend 107.98
sighot total 125.641 memb 22.3309 bend 103.31
residual_stress_coef (including sighot) 220.923 -838.059 687.129 -125.113 103.31 0
----- cracks
eval time = 0 crack_num 0 max_depth 0 length_sum 0
eval time = 10 crack_num 1 max_depth 5.07761 length_sum 5.73096
depth 5.077613 length 5.730957 center 96.339805
eval time = 20.000000 crack_num 7 max_depth 14.672162 length_sum 70.266616
depth 14.672162 length 15.991963 center 96.339805
depth 6.485517 length 8.907026 center 188.897304
depth 0.039984 length 0.547829 center 291.368809
depth 6.498131 length 7.323840 center 310.562397
depth 6.209963 length 7.346965 center 528.528914
depth 6.371547 length 8.643341 center 582.663768
depth 9.411876 length 21.505651 center 820.543589
(途中省略)
eval time = 60.000000 crack_num 8 max_depth 20.320000 length_sum 332.454285
depth 20.320000 length 36.911573 center 96.339805
depth 12.299437 length 43.493525 center 202.564193
depth 12.312052 length 34.543400 center 304.444770
depth 5.455452 length 21.472455 center 382.504002
depth 12.185468 length 100.528791 center 534.590116
depth 5.570513 length 20.830364 center 663.355434
depth 5.724076 length 21.269803 center 754.500521
depth 15.225796 length 53.404375 center 831.522703
```

凡例			
sigcl	自重[MPa]	residual_stress_coef	残留応力係数 (運転応力含) (左から σ_0 , σ_1)
thermal	熱応力[MPa]	eval time	評価時刻[year]
sighot	運転応力[MPa]	depth	き裂深さ[mm]
length	き裂半長[mm]	max_depth	最大深さ[mm]
crack_num	き裂個数	center	き裂中心座標
length_sum	き裂半長の和[mm]		

・1き裂 SCC 進展解析

1き裂のSCCによる進展状況を出力する。

表 4-6 1き裂 SCC 進展解析

stress									
sigcl _d	total	0.19	memb	-0.13	bend	0.32			
thermal	total	-5.61	memb	-0.94	bend	-4.67			
sigprs	total	54.54	memb	9.67	bend	44.87			
sighot	total	49.12	memb	8.6	bend	40.52			
residual_stress_coef (including sighot) 209.201 -846.534 694.078 -126.378 40.52 0									
cracks									
#eval_time	depth[mm]	length[mm]	center	aoh	aob	velo_flg	dep_velo[mm/day]	len_velo[mm/day]	
dep_K	len_K								
0.0.102652	1.002652	0.004041	0.102381	420.502177	0	0.007073	0.007073	0.000000	0.000000
0.001027	0.408400	1.308400	0.016079	0.312137	420.502177	0	0.104726	0.104726	0.000000
0.000000									
0.100000	0.408590	1.308464	0.016086	0.312266	420.502177	1	0.000507	0.000173	19.498422
3.567825									
(後省略)									

凡例

sigcl _d	自重[MPa]	residual_stress_coef	残留応力係数 (運転応力含) (左から σ_0 , σ_1 ...)
thermal	熱応力[MPa]	eval time	評価時刻[year]
sighot	運転応力[MPa]	depth	き裂深さ[mm]
length	き裂半長[mm]	center	き裂中心座標
aoh	き裂深さ/配管肉厚	aob	き裂深さ/き裂半長
velo_flg	き裂進展速度フラグ	dep_velo	深さ方向き裂進展速度[mm/day]
len_velo	長さ方向き裂進展速度[mm/day]	dep_K	深さ方向応力拡大係数[MPa*sqrt(m)]
len_K	長さ方向応力拡大係数[MPa*sqrt(m)]		

・1き裂地震時進展解析

地震によるき裂進展状況を出力する。

表 4-7 1き裂地震時進展解析出力ファイル例

```
#initial crack size
#depth [mm], length [mm], aoh, aob, center_pos
0.1, 1, 0.003937007874015749, 0.1, 420.5021766829938,
#sig_min [MPa], sig_min_c0 (memb), sig_min_c4 (bend), sig_max [MPa], sig_max_c0 (memb),
sig_max_c4 (bend), depth_velo[mm/cyc], length_velo[mm/cyc], Kmin_depth, Kmin_length,
Kmax_depth, Kmax_length, depth [mm], length [mm], aoh, aob, center_pos
50.11999999999999, 8.69999999999999, 41.42, 59.12, 9.6, 49.52,
1.936653757167189e-010, 1.694055884083296e-011, 0.7342641968231964,
0.3244554550982832, 0.8640893143625076, 0.382482989938751, 0.1, 1,
0.003937007874015749, 0.1, 420.5021766829938,
50.11999999999999, 8.69999999999999, 41.42, 59.12, 9.6, 49.52,
1.936653762455944e-010, 1.69405589164082e-011, 0.734264197493619,
0.3244554555849629, 0.8640893151505696, 0.3824829905105993, 0.1000000001936654,
1.00000000001694, 0.003937007881640369, 0.1000000001919713, 420.5021766829938,
(後省略)
```

凡例			
sigclid	自重[MPa]	eval time	評価時刻[year]
thermal	熱応力[MPa]	depth	き裂深さ[mm]
sighot	運転応力[MPa]	center_pos	き裂中心座標
length	き裂半長[mm]	sig_min_c0 (memb),	最小膜応力[MPa]
sig_min	最小応力[MPa]	sig_max	最大応力[MPa]
sig_min_c4 (bend)	最小曲げ応力[MPa]	sig_max_c4 (bend)	最大曲げ応力[MPa]
sig_max_c0 (memb)	最大膜応力[MPa]	length_velo	長さ 方 向 速 度 [mm/cycle]
depth_velo	深さ 方 向 速 度 [mm/cycle]	Kmin_length	長さ 方 向 最 小 応 力 拡 大 係 数 [MPa*sqrt(m)]
Kmin_depth	深さ 方 向 最 小 応 力 拡 大 係 数 [MPa*sqrt(m)]	Kmax_length	長さ 方 向 最 大 応 力 拡 大 係 数 [MPa*sqrt(m)]
Kmax_depth	深さ 方 向 最 大 応 力 拡 大 係 数 [MPa*sqrt(m)]		

(6) SCC 地震荷重負荷時破損確率解析

地震荷重負荷時の破損確率を出力する。

(a) 破損確率

表 4-8 SCC 地震荷重負荷時破損確率解析出力ファイル例(破損確率)

```
***** eval time 0
----- scc -----
sampling_number 1001500
leak 0.000000000000000e+000 0.000000000000000e+000
blek 0.000000000000000e+000 0.000000000000000e+000
loca 0.000000000000000e+000 0.000000000000000e+000

----- eq -----
sampling_number 1001500
leak 0.000000000000000e+000 0.000000000000000e+000
blek 0.000000000000000e+000 0.000000000000000e+000
loca 0.000000000000000e+000 0.000000000000000e+000

----- pair prob -----
sampling_number 1001500
safe->safe 8.9999607145598937e-001 0.000000000000000e+000
safe->leak 0.000000000000000e+000 0.000000000000000e+000
safe->blek 0.000000000000000e+000 0.000000000000000e+000
safe->loca 0.000000000000000e+000 0.000000000000000e+000
leak->leak 0.000000000000000e+000 0.000000000000000e+000
leak->blek 0.000000000000000e+000 0.000000000000000e+000
leak->loca 0.000000000000000e+000 0.000000000000000e+000
blek->blek 0.000000000000000e+000 0.000000000000000e+000
blek->loca 0.000000000000000e+000 0.000000000000000e+000
loca->loca 0.000000000000000e+000 0.000000000000000e+000
```

(後省略)

凡例

eval time	評価時刻 [year]	leak	漏えい
blek	大漏えい	loca	破断
safe	安全	scc	scc 時の確率
eq	地震時の確率		

(b) 流動応力セル情報

流動応力を階層別モンテカルロ法でサンプリングする際、セルで分割する。各セルのサンプリングに関する情報を出力する。

表 4-9 SCC 地震荷重負荷時破損確率解析出力ファイル例(流動応力セル情報)

```
#### eval_time, =, 0
#cell_th, sflow, weight, scc_leak, scc_bleak, scc_loca, scc_smp, eq_leak, eq_bleak,
eq_loca, eq_smp
0, 327.557, 1.7242e-005, 0, 0, 0, 53226, 0, 0, 0, 53226
1, 327.672, 4.91928e-005, 0, 0, 0, 52893, 0, 0, 0, 52893
2, 327.787, 7.77828e-005, 0, 0, 0, 52089, 0, 0, 0, 52089
3, 327.902, 0.000105032, 0, 0, 0, 51561, 0, 0, 0, 51561
4, 328.016, 0.000131395, 0, 0, 0, 50802, 0, 0, 0, 50802
5, 328.131, 0.000157097, 0, 0, 0, 49804, 0, 0, 0, 49804
6, 328.246, 0.00018227, 0, 0, 0, 48422, 0, 0, 0, 48422
7, 328.361, 0.000207001, 0, 0, 0, 46971, 0, 0, 0, 46971
8, 328.475, 0.000231354, 0, 0, 0, 45295, 0, 0, 0, 45295
9, 328.59, 0.000255374, 0, 0, 0, 43749, 0, 0, 0, 43749
10, 328.705, 0.000279098, 0, 0, 0, 41692, 0, 0, 0, 41692
11, 328.819, 0.000302552, 0, 0, 0, 39661, 0, 0, 0, 39661
12, 328.934, 0.000325761, 0, 0, 0, 37657, 0, 0, 0, 37657
13, 329.049, 0.000348742, 0, 0, 0, 35478, 0, 0, 0, 35478
14, 329.164, 0.000371511, 0, 0, 0, 33342, 0, 0, 0, 33342
15, 329.278, 0.000394081, 0, 0, 0, 30730, 0, 0, 0, 30730
(後省略)
```

凡例

cell_th	セル番号	sflow	流動応力
weight	重み	scc_leak	SCC 時漏えい回数
scc_bleak	SCC 時大漏えい回数	scc_loca	SCC 時破断回数
scc_smp	SCC 時サンプリング回数	eq_leak	地震時漏えい回数
eq_bleak	地震時大漏えい回数	eq_loca	地震時破断回数
eq_smp	地震時サンプリング回数		

(c) 破損確率途中経過

出力ファイルは破損確率(表 4-8)のデータフォーマットと同じである。

4.6.3 PASCAL-EQ 結果表示システム

一連の手順(1)~(6)を以下に記す。

- (1) メインダイアログ(図 4-1)で「PASCAL-EQ」ラジオボタンと「結果表示」ラジオボタンを選択して「次へ」ボタンを押すと図 4-24のダイアログに移動する。
- (2) 「参照」ボタンでプログラム実行システム(PASCAL-EQ)の作成したファイルの選択を行う。
eq.out という名前のファイルを選ぶことができる。選択されたファイルはリストボックスに表示される。ファイルは複数個選択することができる。「全項目削除」ボタンで、リストボックスからファイルを全て削除することができる。
次に「グラフ詳細設定」ボタンを押すと図 4-25のダイアログが開く。
- (3) 図 4-25の一番下にある「参照」ボタンを押してファイル名を指定する。新規フォルダ内のファイルを指定することを推奨する。ファイル名は任意である。この作業は必ず行う必要がある。
gnuplot 関連のファイルは全てこの中に作られる。また、「保存する」チェックボックスをチェックするときグラフと解析条件は保存される。
- (4) 他はなにもせず「OK」ボタンを押し、図 4-24に戻る。「グラフ描画」ボタンを押すとグラフが描画される。
- (5) グラフが複数作成された場合は、"hit return to continue"ダイアログで「OK」ボタンを押していく順にグラフが表示されていく。表示順番は地震発生あり、地震発生なし、セルの順である。
ただし、入力ファイル中に存在しないグラフは表示されない。
- (6) グラフとは別に解析条件が別ダイアログで開く。

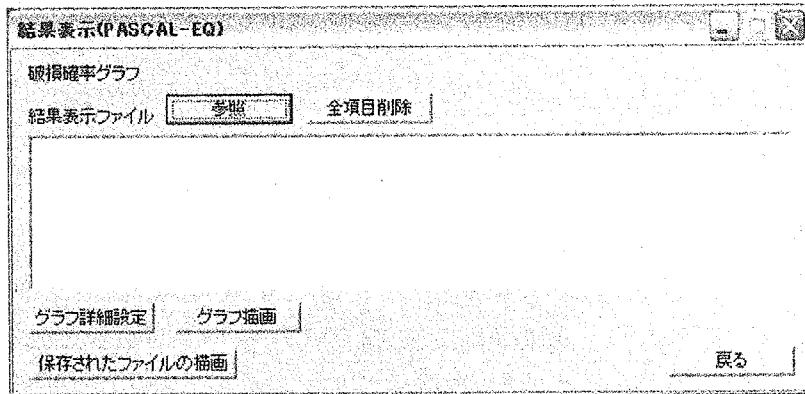


図 4-24 PASCAL-EQ 結果表示ダイアログ(結果ファイル選択前)

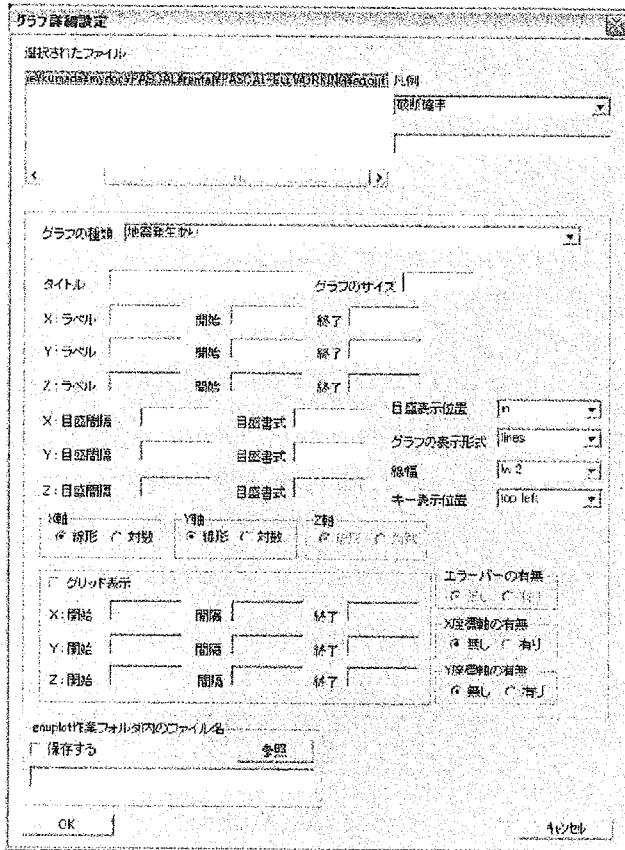


図 4-25 PASCAL-EQ グラフ詳細設定ダイアログ

- ・図 4-24のダイアログにある「保存されたファイルの描画」ボタンを押すと図 4-26のダイアログが起動する。
- ・予め保存してある gnuplot 形式のファイル、解析条件ファイルを「参照」ボタンを押して選択し、「描画」ボタンを押すとグラフと解析条件が描画される。

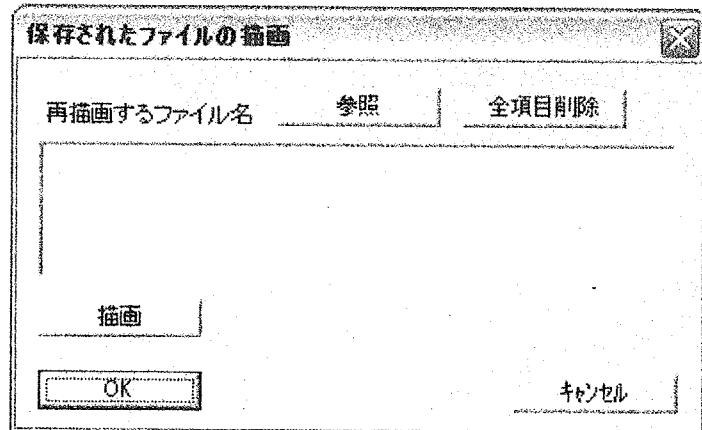


図 4-26 PASCAL-EQ 再描画ダイアログ

4.6.4 PASCAL-EQ の計算結果ファイル

PASCAL-EQ を実行すると、解析結果は解析条件とともに画面に表示される。GUI は画面出力された結果をテキストファイルに落し、集計・描画している。表 4-10に出力結果例を示す。

表 4-10 PASCAL-EQ の出力ファイル例

```
***** new seed (l, r)      111      7225 *****
1
--- RL, 16B, Sch. 100, SUS316L, prob1, Harris
circumferential crack analysis
parameters that determine non-detection probability
  epst = 0.000E+00
  astar = 0.516
  transducer diameter = 1.00000 inches
  anuu = 1.600

pre-existing cracks only
fatigue crack growth only
leakers will be repaired
failure criteria = net section stress formula by JSME
                  and modification factor Z by JSME for ferrite steel

pipe dimensions
  wall thickness = 1.03 inches
  inside radius = 6.97 inches
  l/h ratio = 0.00
  l/r ratio = 0.00
  area of pipe = 48.51 sq. inches
  flow area of pipe = 152.56 sq. inches
  nominal diameter= 400.00 A

initial crack size distribution
crack depth is exponential
  parameter = 4.0650
aspect ratio is log-normal
  median = 1.3360
  shape parameter = 0.5380
  normalization constant = 1.4187

about stress intensity factors
when crack depth < wall thickness,
  stress intensity factors are calculated by Newman-Raju
```

crack depth reaches 80% of wall thickness
 -> through wall crack
 when crack depth > wall thickness,
 stress intensity factors are calculated by Sander
 alfab= 1.000
 betab= 1.000
 alfaa= 1.000
 betaa= 1.000

fatigue crack growth parameters

0 crack growth law parameters for stainless steel
 growth law exponent is fixed
 exponent = 4.00
 growth law constant is log-normally distributed
 median = 0.9140E-11
 90-th percent = 0.3500E-10
 threshold = 4.600

flow stress normally distributed

mean = 0.4491E+02
 standard deviation = 0.4294E+01

distribution parameters for ultimate stress in pipe

mean = 0.6810E+02
 standard deviation = 0.4806E+01
 standard deviation = 0.0 means the ultimate stress is constant
 interpolation flag = 0 (iult) for whole pipe break probability
 abs (iult) is the number of interpolation points
 if iult .gt. 0 linear interpolation
 if iult .eq. 0 no interpolation
 if iult .lt. 0 logarithmic interpolation

pipe loading values

membrane stress (ksi) due to cold deadweight =	0.00
membrane stress (ksi) due to dwght + thermal =	0.00
membrane stress (ksi) due to thermal =	0.00
operating pressure (ksi) =	22.01
membrane stress (ksi) due to oper. pressure =	22.01
membrane stress (ksi) due to dwght + op presr =	22.01
membrane stress (ksi) due to dwt+thml+op pres =	22.01
bending stress (ksi) due to cold deadweight =	0.00
bending stress (ksi) due to oper. pressure =	0.00
bending stress (ksi) due to thermal =	0.00
proof pressure (ksi) =	5.50
membrane stress (ksi) due to dwght + prf pres =	5.50
bending stress (ksi) due to proof pressure =	0.00

hydrostatic proof test is modelled

leak detection and definition parameters

detectable leak (gpm) =*****
 big leak (gpm) =*****

no residual stresses are modelled

no vibratory stresses are modelled

seismic stress information

No. of seismic no.	Numb. of stress cycle cycle	max. membrane	min. membrane	max. bending	min. bending
1	1	3.1284E-01	-3.1284E-01	0.0000E+00	0.0000E+00
(途中省略)					
99	1	4.1238E-01	-2.4174E-01	0.0000E+00	0.0000E+00

pre-service ultrasonic inspection is modelled

time intervals

plant lifetime =	40.0 years
endpoints of intervals at	0.0 1.0 2.0 3.0 4.0 years
(途中省略)	
endpoints of intervals at	40.0

no in-service inspections are modelled

skip parameter for indicator function printout is -5

normal output requested

number of transient types = 1

type 1 Transient number : A , 1
 poisson stochastic with mean time 0.143 years/event
 max delta temp = 286.0 blocking factor = 1.0

loading stresses for transients

load-controlled stress transient (ksi)	bending stress (ksi)	disp-controlled stress membrane stress (ksi)	bending stress (ksi)
type no.	max.	min.	max.
min.	max.	min.	max.
1	2.201E+01	0.000E+00	0.000E+00
0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00

1

- - - summary of cells in sample space - - -

- - - uniform mesh - - -

cell	aoh1	aoh2	aob1	aob2	probability	samples	leaks	b-leaks	locas
1	0.9500	1.0000	0.0000	0.0500	0.1247323E-08	9999	9613	9613	9613

(途中省略)

400 0.0000 0.0500 0.9500 1.0000 0.9184061E-02 9999 0 0 0

sum of cell probabilities = 0.1000000E+01

1

--- RL, 16B, Sch. 100, SUS316L, prob1, Harris

--- results without earthquakes ---

seismic class information

0 0.0000E+00 0.000 0 0.0000

probability of failure for uncracked pipe and interpolated values

sultmu sultsd iult

0.68100E+02 0.48064E+01 0

stress(1)

0.22013E+02

pbreak(1)

0.45361E-21

time avg leak avg big leak avg loca sigma leak sigma big leak sigma loca
0.0 2.03003E-03 7.49006E-06 7.49006E-06 2.02044E-07 4.23380E-08 4.23380E-08

(途中省略)

40.0 2.32484E-03 6.46999E-05 6.46999E-05 1.37013E-06 3.59065E-07 3.59065E-07

1

--- RL, 16B, Sch. 100, SUS316L, prob1, Harris

--- results including seismic events ---

seismic class information

seismic: 1 stress cycle: 99 title: 2NE OBE

probability of failure for uncracked pipe and interpolated values

sultmu sultsd iult

0.68100E+02 0.48064E+01 0

stress(1)

0.22013E+02

pbreak(1)

0.45361E-21

time avg leak avg big leak avg loca sigma leak sigma big leak sigma loca
0.0 2.13726E-03 1.67609E-04 1.67609E-04 7.23781E-06 7.23962E-06 7.23962E-06

(途中省略)

40.0 2.42866E-03 2.54438E-04 2.54438E-04 7.37215E-06 7.26491E-06 7.26491E-06

4.7 サンプル問題

PASCAL-SC 及び PASCAL-EQ で破損確率を計算するサンプル問題について試解析を実施した。主な解析条件及び結果を以下に示す。

4.7.1 PASCAL-SC

PASCAL-SC で実施した条件(表 4-11), GUI で作成した入力データ(表 4-12), 解析結果(図 4-29)を示す。

表 4-11 主な解析条件(PASCAL-SC)

評価項目	解析条件
配管寸法	内半径 : 133.85mm ; 肉厚 : 25.4mm
配管材質	SUS316NG
評価年数	評価年数 : 60 年 ; 評価時間間隔 : 10 年
SCC 発生・初期き裂進展モデル	PRAISE の方法
応力拡大係数	き裂貫通前 : ASME の式 ; き裂貫通後 : Sander の式
疲労き裂進展速度	日本機械学会維持規格
破壊基準	日本機械学会維持規格 極限荷重評価法 流動応力(ワイブル分布) 下限値 : 327.5MPa
漏えい検出量	漏えい : 1gpm, 大漏えい : 5gpm
定格応力	運転時応力 : 147 MPa
過渡事象	考慮しない
非破壊検査	考慮しない
地震事象	考慮する(図 4-27参照)
溶接残留応力	膜応力 σ (図 4-28参照) : $\sigma(x/t) = 207 - 14041(x/t) + 18997(x/t)^2 - 17679(x/t)^3 - 46992(x/t)^4$ x:内表面からの距離, t:配管肉厚 曲げ応力 : 0

表 4-12 GUI で作成した試解析の入力データ(PASCAL-SC)

```
# ----- sampling
# <sampling_number>, seed, converge_ratio[%], <conv_judge_step>
1000000 3550 5.0 50000
# ----- pipe size
# rin [mm], thick [mm]
133.85 25.4
# ----- material
# kind, young_ratio [N/(mm)^2], alpha, beta, gamma [MPa], cum_range, cell_num
<cell_width>
SUS316NG 176400.0 1.89 36.9 327.5 0.95 500 30
# ----- stress
#sigcl (cold-shutdown condition) [MPa], thermal [MPa], oppres (通常運転圧による応力) [MPa]
```

```

0.0 0.0 0.0 0.0 98.0 49.0
ASME 207 -1404.11 1899.71 -176.785 -469.923
# residual stress fractuation (<av>, sd%, <lower_limit>, <upper_limit>)
1.0 0.0 0.6 1.4
# ----- time schedule
# life time (end)
60.0
# SCC growth (e or x, start[year] end[year] step[year], another_step[hour])
e 0 60.0 0.1 9.0
# eval (e or x, start[year] end[year] step[year])
x 0 60.0 10.0
# earthquake (e or x, start[year] end[year] step[year])
e 0 60.0 10.0
# inspection (e or x, start[year] end step[year])
x 0 60.0 10.0
# transient (e or x, start[year] end step[year])
x 0 60.0 10.0
# output (e or x, start[year] , end[year], step[year], another_step[hour])
x 0 60.0 0.1 9.0
# ----- operation status
# CL誘電率 [μs/cm] CL水温 [°C] CL酸素濃度 [ppm] CERT誘電率 [μs/cm] CERT水温
[°C] CERT酸素濃度 [ppm]
0.2 287.77 0.2 0.2 131.639 0.8
# ----- SCC crack growth
# crack_init_kind velcity_switch_depth [mm] k_velo_av, k_velo_sd (exp)
praise 0.3 -25.68 0.798313
# ----- fatigue
# coef (log10(av)), coef (log10(sd)) exponent
-11.798208 0.355215 3.0
# transient
0 0 0
# sif kind
ASME 211.25
# ----- leak
# detectable leak rate [gpm], big leak threshold [gpm], inside pressure [Kg/cm^2]
# crack open area roughness [mm], pressure difference [Kg/cm^2], quality
1.0 5.0 71.7 0.3 0.2 0
# ----- break
# safety ratio
1.0
# ----- earthquake
# eq list file
./eqlist.idat

```

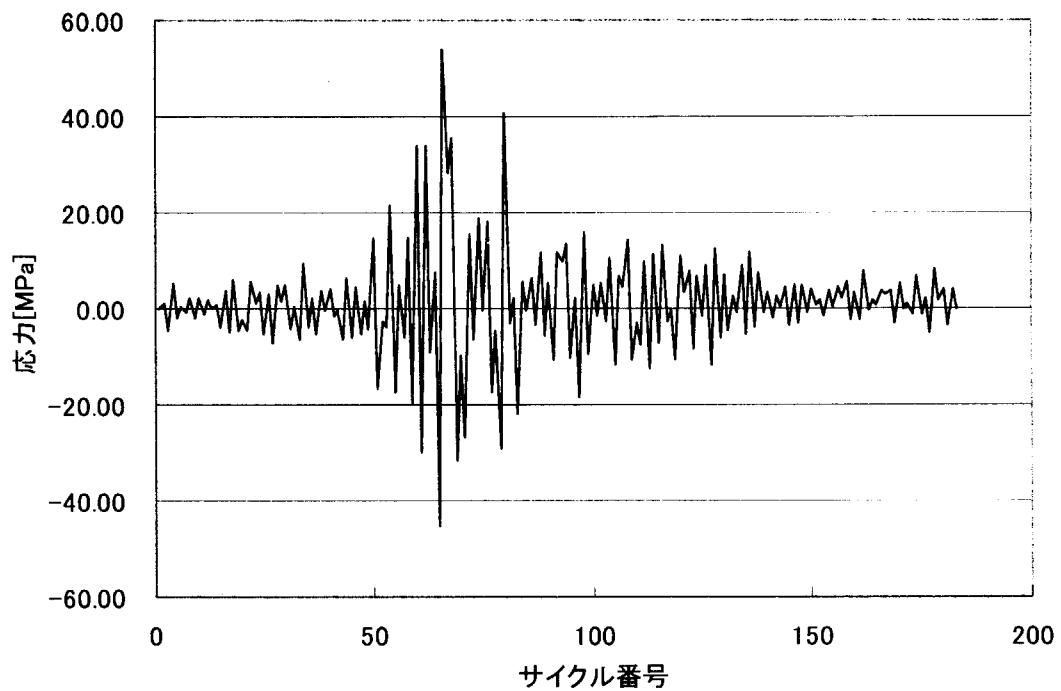


図 4-27 サンプル問題で負荷した地震応力(PASCAL-SC)

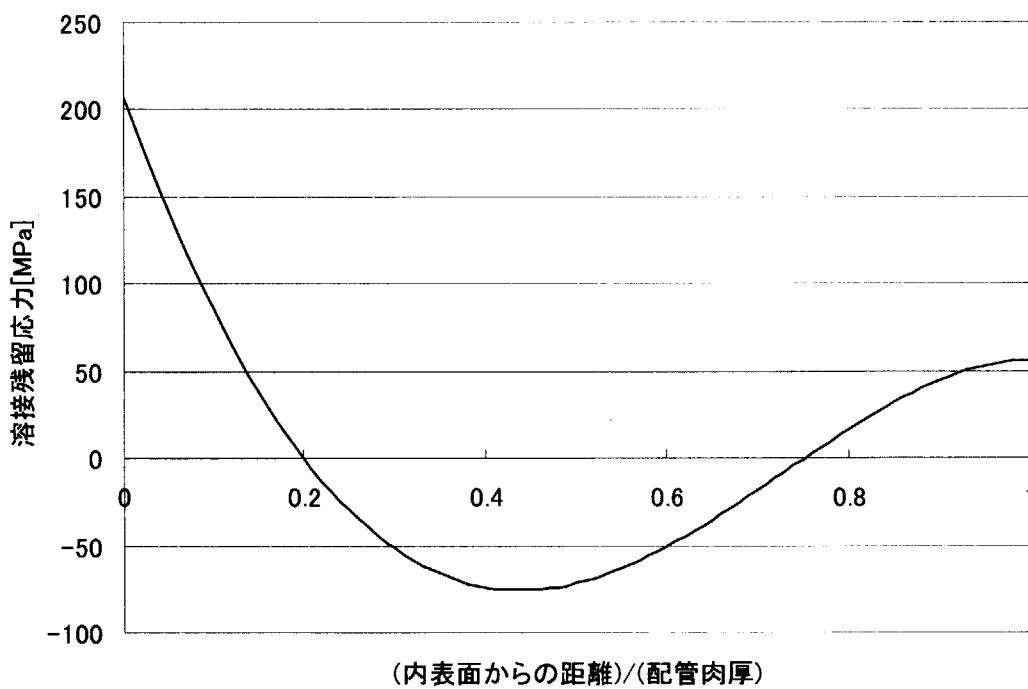


図 4-28 サンプル問題で用いた溶接残留応力分布(PASCAL-SC)

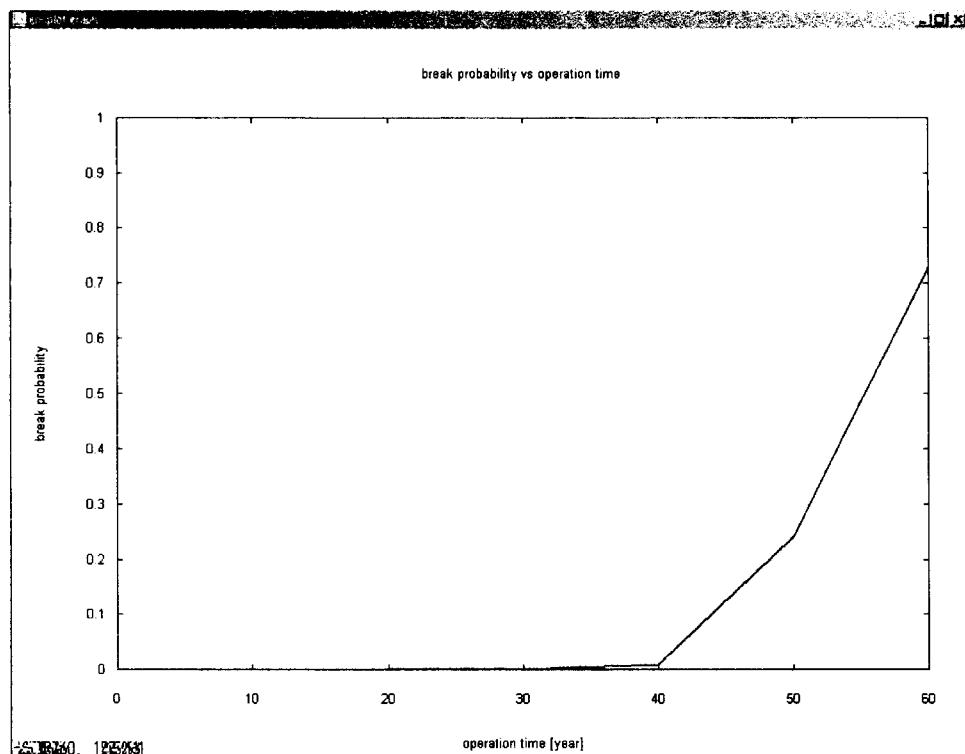


図 4-29 破断確率(PASCAL-SC)

4.7.2 PASCAL-EQ

PASCAL-EQ で実施したサンプル問題の条件(表 4-13), GUI で作成した入力データ(表 4-14), 解析結果(図 4-31)を示す.

表 4-13 主な解析条件(PASCAL-EQ)

評価項目	解析条件
配管寸法	内半径 : 177mm ; 肉厚 : 26.2mm
配管材質	SUS316L
評価年数	評価年数 : 40 年 ; 評価時間間隔 : 1 年
応力拡大係数	き裂貫通前 : Bergman の式 ; き裂貫通後 : Forman 式
疲労き裂進展速度	LLNL のステンレス鋼確率モデル
破壊基準	Z 係数法 流動応力平均値 : 31.58 kg/mm^2 ; 標準偏差 : 3.02
漏えい検出量	無限大 ($1e50 \text{ gpm}$)
き裂深さ分布	指数分布 ; 平均値 : 4.065 in^{-1}
き裂アスペクト比	対数正規分布 ; 平均値 : 1.336 ; 標準偏差 : 0.538
初期き裂平面	均等分割 a/h 方向 20 分割 ; a/b 方向 20 分割 ; 各セルの採点数 : 100
定格応力	運転時応力(膜応力のみ) : 15.48 kg/mm^2
過渡事象	事象タイプ : 起動・停止 (I-1) 発生頻度 : 7 回 / 年

	最大膜応力 : 15.48 kg/mm ² 最小膜応力=最大曲げ応力=最小曲げ応力=0.0 応力比 : 0
水圧試験	考慮 ; 水圧による管軸方向応力(膜応力のみ) : 3.87 kg/mm ²
非破壊検査	PSI を考慮 ; ISI を考慮しない
地震事象	考慮する(図 4-30参照)
残留応力	考慮しない

表 4-14 GUI で作成したサンプル問題の入力データ(PASCAL-EQ)

```

RL, 16B, Sch. 100, SUS316L, prob1, Harris          0
 0   6   0   0   23   0   1.100   0   0   1   111   7225   0
-9999   1   -1   3   -1   0   3   0   0   1   196   0   -5   1   0   0
  1.00   1.00   1.00   1.00
  40.0    0    0    0    0
  26.2   177.0    0   400.0
  4.6     4.0  9.14e-12  3.5e-11
 31.58   3.02    0    0
 47.89   3.38    0
 4.065
 1.336   0.538
 1.0e50  1.0e50    0    0
 20   20    0.0    1.0    0.0
 0.000   0.000   15.480   3.870
 0
 1  -0.1428571429 286.00000 Transient number : A , 1
 15.48000  0.00000   1      0      0      0      0      0
 0
##  

 992NE OBE
 1     0.22   -0.22    0.00    0.00
 1    -0.00   -0.45    0.00    0.00
 1     0.24   -0.11    0.00    0.00
 1     0.13     0.01    0.00    0.00
 (途中省略)
 1     0.42   -0.15    0.00    0.00
 1     0.02   -0.20    0.00    0.00
 1     0.12   -0.09    0.00    0.00
 1     0.27   -0.09    0.00    0.00
 1     0.04   -0.06    0.00    0.00
 1     0.15   -0.06    0.00    0.00
 1     0.29   -0.17    0.00    0.00

```

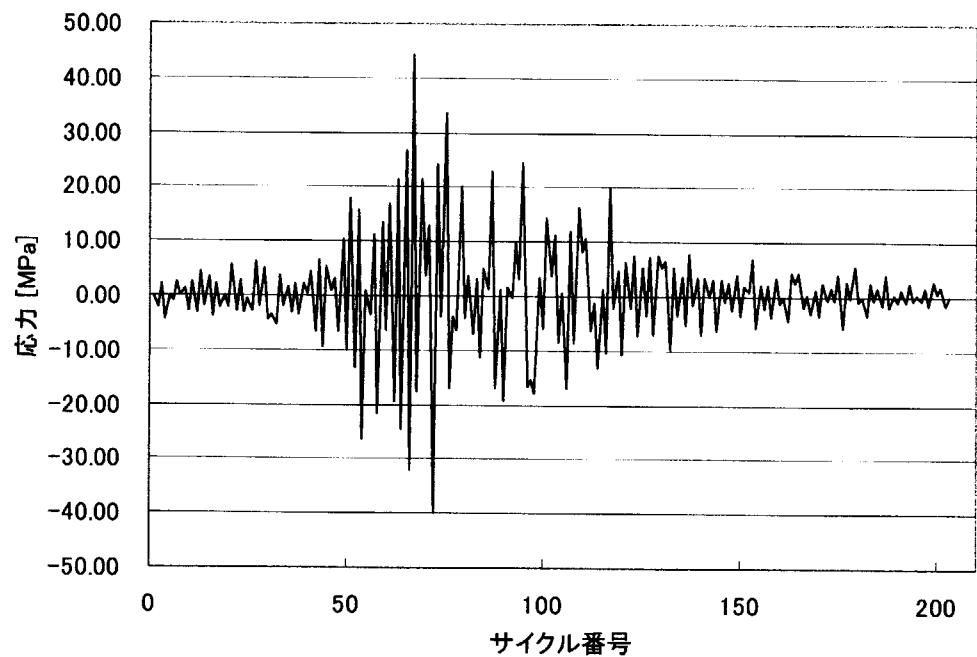


図 4-30 サンプル問題で負荷した地震応力(PASCAL-EQ)

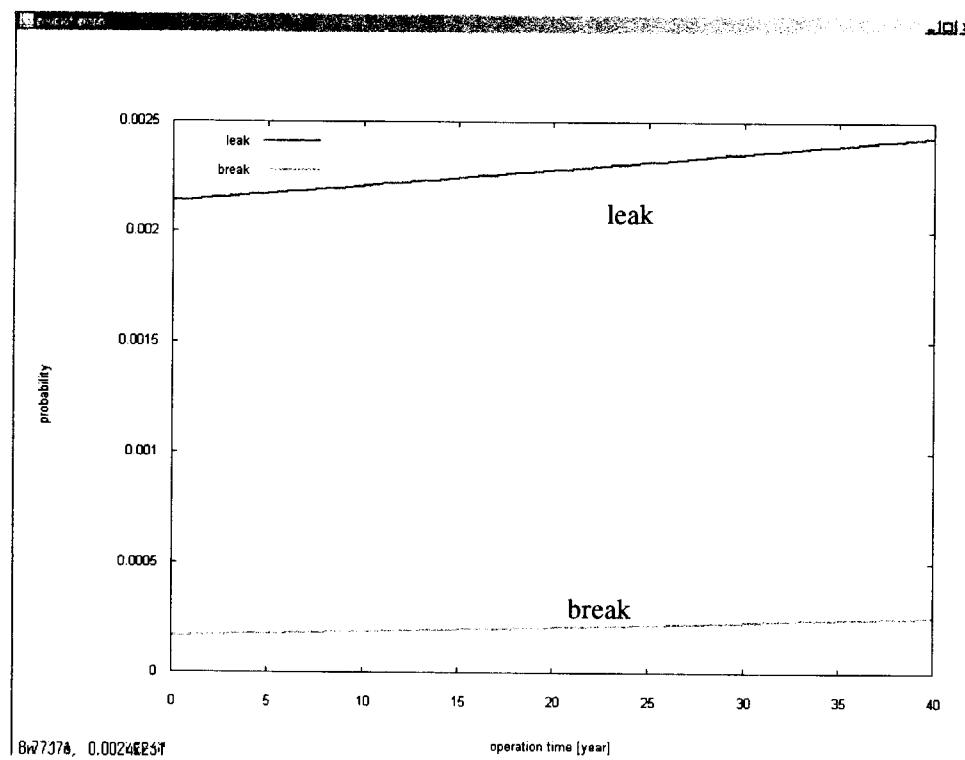


図 4-31 破断・漏えい確率(PASCAL-EQ)

5 まとめ

本報告書は、SCC を対象とした PASCAL-SC 及び地震荷重等による疲労き裂進展を対象とした PASCAL-EQ の使用法を中心に解析理論及び手法を取りまとめたものである。両確率論的破壊力学解析コードとも、非定常な地震荷重によるき裂進展が評価可能であると同時に、応力拡大係数や破断判定法等に最近の破壊力学的知見が盛り込まれている。さらに、GUI による入力データ作成、解析(計算)実行、解析結果のグラフ描画が可能であり、操作性の向上も図られている。本コードにより、安全上重要な配管溶接部の破損確率が最近の破壊力学的知見により評価可能である。

謝辞

本コード開発を進めるにあたり、平野雅司原子炉安全工学部部長、鈴木雅秀原子炉安全工学部次長兼機器信頼性研究室長、みずほ情報総研株式会社の李銀生氏、加藤大輔氏、アドバンストアルゴリズム&システムズの熊田聖也氏から多大な御協力を賜った。ここに謝意を表します。

参考文献

- 1) G. Yagawa, Y. Kanto, S. Yoshimura, et al., Probabilistic fracture mechanics analysis of nuclear structural components: a review of recent Japanese activities, Nuclear Engineering and Design, 207, 269-286 (2001).
- 2) 柴田勝之, 鬼沢邦雄, 李 銀生 他 "確率論的破壊力学コードPASCALの開発と使用手引き" JAERI-Data/Code 2001-11.
- 3) D.O.Harris, D.D.D Dedhia, S.C.Lu, Theoretical and User's Manual for pc-PRAISE, A Probabilistic Fracture Mechanics Computer Code for Piping Reliability Analysis, NUREG/CR-5864 , UCRL-ID-109798 (1992).
- 4) 発電用原子力設備規格, 維持規格, 日本機械学会, 2002年10月.
- 5) M. Bergman, Stress Intensity Factors for Circumferential Surface Cracks in Pipes, Fatigue Fract. Engng Mater. Struct., Vol.18, No.10, p1155(1995).
- 6) Russel C. Cipolla, Darrell R. Lee, TECHNICAL BASIS FOR EQUATIONS FOR STRESS INTENSITY FACTOR COEFFICIENTS IN ASME SECTION XI APPENDIX A, PVP-Vol.480, p301 (2004).
- 7) J. L. Sanders, Jr, Circumferential Through-Cracks in Cylindrical Shell under Combined Bending and Tension, ASME J. Appl. Mech., Vol.50, p221 (1983).
- 8) 篠川・柴田・磯崎, 貫通き裂からの冷却材漏洩量計算プログラムの作成, 日本原子力研究所研究報告書 JAERI-M90-050 (1990).
- 9) T. Fett, D. Munz, and J. Neumann: Local stress intensity factor for surface cracks in plates under power-shaped stress distribution, Eng. Frac. Mech. Vol.36, No.4, p647(1990).
- 10) R. G. Forman: Stress Intensity Factors for Circumferential Through Cracks in Hollow Cylinders Subjected to Combined Tension and Bending Loads, Engineering Fracture Mechanics, Vol.21, No.3, p563, (1985).
- 11) Y. Asada, K. Takumi, et al: Development of Criteria for Protection Against Pipe Breaks in LWR Plants, International Journal of Pressure Vessels and Piping, Vol.93, p95-111(1990).
- 12) gnuplot ホームページ <http://www.gnuplot.info/index.html>

国際単位系(SI)と換算表

表1 SI基本単位および補助単位

量	名称	記号
長さ	メートル	m
質量	キログラム	kg
時間	秒	s
電流	アンペア	A
熱力学温度	ケルビン	K
物質量	モル	mol
光强度	カンデラ	cd
平面角	ラジアン	rad
立体角	ステラジアン	sr

表3 固有の名称をもつSI組立単位

量	名称	記号	他のSI単位による表現
周波数	ヘルツ	Hz	s ⁻¹
力	ニュートン	N	m·kg/s ²
圧力、応力	パスカル	Pa	N/m ²
エネルギー、仕事、熱量	ジュール	J	N·m
功率、放射束	ワット	W	J/s
電気量、電荷	クーロン	C	A·s
電位、電圧、起電力	ボルト	V	W/A
静電容量	ファラード	F	C/V
電気抵抗	オーム	Ω	V/A
コンダクタンス	ジーメンス	S	A/V
磁束密度	ウェーバ	Wb	V·s
磁束密度	テスラ	T	Wb/m ²
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A
セルシウス温度	セルシウス度	°C	
光束度	ルーメン	lm	cd·sr
照度	ルクス	lx	lm/m ²
放射能	ベクレル	Bq	s ⁻¹
吸収線量	グレイ	Gy	J/kg
線量当量	シーベルト	Sv	J/kg

表2 SIと併用される単位

名称	記号
分、時、日	min, h, d
度、分、秒	°, ', "
リットル	L, l
トン	t
電子ボルト	eV
原子質量単位	u

$$1 \text{ eV} = 1.60218 \times 10^{-19} \text{ J}$$

$$1 \text{ u} = 1.66054 \times 10^{-27} \text{ kg}$$

表5 SI接頭語

倍数	接頭語	記号
10^{18}	エクサ	E
10^{15}	ペタ	P
10^{12}	テラ	T
10^9	ギガ	G
10^6	メガ	M
10^3	キロ	k
10^2	ヘクト	h
10^1	デカ	da
10^{-1}	デシ	d
10^{-2}	センチ	c
10^{-3}	ミリ	m
10^{-6}	マイクロ	μ
10^{-9}	ナノ	n
10^{-12}	ピコ	p
10^{-15}	フェムト	f
10^{-18}	アト	a

(注)

- 表1～5は「国際単位系」第5版、国際度量衡局1985年刊行による。ただし、1eVおよび1uの値はCODATAの1986年推奨値によった。
- 表4には海里、ノット、アール、ヘクタールも含まれているが日常の単位なのでここでは省略した。
- barは、JISでは流体の圧力を表わす場合に限り表2のカテゴリーに分類されている。
- EC閣僚理事会指令ではbar、barnおよび「血圧の単位」mmHgを表2のカテゴリーに入れている。

換算表

力	N(=10 ⁵ dyn)	kgf	lbf
	1	0.101972	0.224809
9.80665		1	2.20462
4.44822		0.453592	1

$$\text{粘度 } 1 \text{ Pa}\cdot\text{s} = 10 \text{ P(ポアズ)} (\text{g}/(\text{cm}\cdot\text{s}))$$

$$\text{動粘度 } 1 \text{ m}^2/\text{s} = 10^4 \text{ St(ストークス)} (\text{cm}^2/\text{s})$$

圧	MPa(=10 bar)	kgf/cm ²	atm	mmHg(Torr)	lbf/in ² (psi)
力	1	10.1972	9.86923	7.50062 × 10 ³	145.038
	0.0980665	1	0.967841	735.559	14.2233
	0.101325	1.03323	1	760	14.6959
	1.33322 × 10 ⁻⁴	1.35951 × 10 ⁻³	1.31579 × 10 ⁻³	1	1.93368 × 10 ⁻²
	6.89476 × 10 ⁻³	7.03070 × 10 ⁻²	6.80460 × 10 ⁻²	51.7149	1

エネルギー・仕事・熱量	J(=10 ⁷ erg)	kgf·m	kW·h	cal(計量法)	Btu	ft · lbf	eV
	1	0.101972	2.77778 × 10 ⁻⁷	0.238889	9.47813 × 10 ⁻⁴	0.737562	6.24150×10^{18}
9.80665		1	2.72407 × 10 ⁻⁶	2.34270	9.29487 × 10 ⁻³	7.23301	6.12082×10^{19}
3.6 × 10 ⁶	3.67098 × 10 ⁵	1	8.59999 × 10 ⁵	3412.13	2.65522 × 10 ⁶	2.24694 × 10 ²⁵	$= 4.1868 \text{ J(国際蒸気表)}$
4.18605	0.426858	1.16279 × 10 ⁻⁶	1	3.96759 × 10 ⁻³	3.08747	2.61272 × 10 ¹⁹	仕事率 1 PS(仏馬力)
1055.06	107.586	2.93072 × 10 ⁻⁴	252.042	1	778.172	6.58515 × 10 ²¹	$= 75 \text{ kgf}\cdot\text{m/s}$
1.35582	0.138255	3.76616 × 10 ⁻⁷	0.323890	1.28506 × 10 ⁻³	1	8.46233 × 10 ¹⁸	$= 735.499 \text{ W}$
1.60218 × 10 ⁻¹⁹	1.63377 × 10 ⁻²⁰	4.45050 × 10 ⁻²⁶	3.82743 × 10 ⁻²⁰	1.51857 × 10 ⁻¹²	1.18171 × 10 ⁻¹⁹	1	

放射能	Bq	Ci
	1	2.70270 × 10 ⁻¹¹
	3.7×10^{10}	1

吸収線量	Gy	rad
	1	100
	0.01	1

照 射 線 量	C/kg	R
	1	3876
	2.58×10^{-4}	1

線 量 当 量	Sv	rem
	1	100
	0.01	1

(86年12月26日現在)

確率論的破壊力学解析コードPASCAL-SC及びPASCAL-EQの使用手引き

R100

白度90%再生紙を使用しています