

JAERI-M  
90-050

貫通き裂からの冷却材漏洩量計算  
プログラムの作成

1990年3月

篠川 英利・柴田 勝之・磯崎 敏邦

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

JAERI-M 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、日本原子力研究所技術情報部情報資料課（〒319-11茨城県那珂郡東海村）  
あて、お申しこしください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-11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。

JAERI-M reports are issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Information Division, Department  
of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun,  
Ibaraki-ken 319-11, Japan.

© Japan Atomic Energy Research Institute, 1990

---

編集兼発行 日本原子力研究所  
印 刷 日立高速印刷株式会社

貫通き裂からの冷却材漏洩量計算プログラムの作成

日本原子力研究所東海研究所原子炉安全工学部

篠川 英利・柴田 勝之<sup>+</sup>・磯崎 敏邦

(1990年2月9日受理)

軽水型原子力プラントで使用する配管の構造安全設計基準へLBB概念を導入するための研究が各国で活発に行なわれている。LBBの成立性を検討するためには、冷却材の漏洩量評価が不可欠な項目のひとつであり、そのためには、き裂の大きさと配管に加わる応力状態と冷却材漏洩量との関係を明らかにする事が必要である。冷却材が二相流となり、狭隙部より漏洩する量を評価するための1次元流体モデルとしては、HENRYの速度平衡・熱非平衡モデルとMOODYの速度非平衡・熱平衡モデルとがある。このたび、当研究所においてHENRYの臨界流モデルとMOODYのスリップモデルを用いて冷却材漏洩量の計算が行なえるプログラムを作成した。

Development of Leak Analysis Programs from Through-Wall-Crack

Hidetoshi SHINOKAWA, Katsuyuki SHIBATA<sup>+</sup>  
and Toshikuni ISOZAKI

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

(Received February 9, 1990)

To introduce Leak-Before-Break (LBB) concept into the piping design standard of the LWR pressure boundary piping, LBB research programs are actively conducted in many nuclear electricity countries. It is one of the most important items to evaluate leak rate through the pipe wall crack to shut down a nuclear power plant safely.

At JAERI, a test on the leak rate from a cracked pipe under BWR or PWR operating condition has been carried out from 1987 till 1989. This test is planned to measure the leak flow through circumferential fatigue cracks in 4-, 6-and, 12-inch diameter pipes and through slit specimens.

On the other hands, it is necessary to predict and analyse the leak flow through a crack for applying the result of the tests to the structural design standard including the LBB concept.

This report describes the some computer programs that calculate crack-opening-area, the crack length, and the flow rate through SCC or fatigue cracks. In these programs, a crack-opening-displacement calculation is available based on modified Tada-Paris equation when pipe geometries and pipe stress conditions are given. The leakage rate calculation is based on Henry's homogeneous nonequilibrium critical flow model and Moody's slip model with several modifications to account for friction and fluid conditions.

---

+ Department of Research Reactor Operation

Keywords : Light Water Reactor, Leak Rate, Leak Before Break, Computer Program, Fatigue Crack, Slit Specimen, Tada-Paris, Henry's Model, Moody's Slip Model, Critical Flow

## 目 次

1.はじめに .....	1
2.漏洩量計算プログラムの概要 .....	2
3.き裂開口面積及び開口変位の計算 .....	5
3.1 き裂開口面積 .....	5
3.2 Sanderによる近似解 .....	7
3.3 き裂開口変位 .....	8
4. MOODYの二相流モデル .....	9
4.1 二相流モデルの特性 .....	9
4.2 連続の式 .....	10
4.3 二相流全体に対するエネルギー式 .....	10
4.4 運動量保存則 .....	10
4.5 き裂に沿う圧力損失の考慮 .....	12
4.6 圧力損失の種類 .....	13
4.7 二相臨界時の速度比 .....	15
4.8 き裂内のクオリティ変化 .....	16
4.9 二相臨界流量 $G_c$ の算出法及び計算プログラム .....	18
5. HENRYの臨界流モデル .....	19
5.1 基礎理論 .....	19
5.1.1 質量保存則 .....	19
5.1.2 運動量保存則 .....	21
5.1.3 き裂に沿った圧力損失 .....	21
5.1.4 出口圧力と臨界質量速度との関係 .....	23
5.2 2相臨界質量速度 $G_c$ .....	24
6. 漏洩量算出法及び計算プログラム .....	26
6.1 MOODYモデルによる配管き裂からの漏洩量計算プログラム .....	26
6.2 HENRYモデルによる配管き裂からの漏洩量計算プログラム .....	31
6.3 与えられた漏洩量を有する配管き裂角度の計算プログラム (MOODYの二相流モデルによる計算) .....	34
6.4 与えられた漏洩量を有する配管き裂角度の計算プログラム (HENRYの臨界流モデルによる計算) .....	37
6.5 長方形スリットからの漏洩量計算プログラム (MOODYの二相流モデルによる計算) .....	40
6.6 長方形スリットからの漏洩量計算プログラム (HENRYの臨界流モデルによる計算) .....	43

7. 考 察 .....	46
8. 結 論 .....	52
9. 今後の課題 .....	52
参考文献 .....	53
付録A リークレート解析プログラム入力マニュアル .....	56
A.1 配管き裂の大きさを与えた場合の漏洩量計算プログラム (MOODYの二相流モデルによる解析) .....	56
A.2 配管き裂の大きさを与えた場合の漏洩量計算プログラム (HENRYの臨界流モデルによる解析) .....	58
A.3 漏洩量から配管き裂の大きさを求めるプログラム (MOODYの二相流モデルによる解析) .....	60
A.4 漏洩量から配管き裂の大きさを求めるプログラム (HENRYの臨界流モデルによる解析) .....	61
A.5 長方形スリットからの漏洩量計算プログラム (MOODYの二相流モデルによる解析) .....	63
A.6 長方形スリットからの漏洩量計算プログラム (HENRYの臨界流モデルによる解析) .....	64
付録B プログラムリスト .....	66
B.1 配管き裂の大きさを与えた場合の漏洩量計算プログラム (MOODYのスリップモデルによる解析) .....	66
B.2 配管き裂の大きさを与えた場合の漏洩量計算プログラム (HENRYの臨界流モデルによる解析) .....	71
B.3 漏洩量から配管き裂の大きさを求めるプログラム (MOODYのスリップモデルによる解析) .....	80
B.4 漏洩量から配管き裂の大きさを求めるプログラム (HENRYの臨界流モデルによる解析) .....	85
B.5 長方形スリットからの漏洩量計算プログラム (MOODYのスリップモデルによる解析) .....	94
B.6 長方形スリットからの漏洩量計算プログラム (HENRYの臨界流モデルによる解析) .....	98

## Contents

1. Introduction .....	1
2. Abstract of leak rate calculation programm .....	2
3. Calculation of crack-opening-area and displacement .....	5
3.1 Crack-opening-area .....	5
3.2 Approximate solution by Sander .....	7
3.3 Crack-opening-displacent .....	8
4. Two-phase-flow model by Moody .....	9
4.1 Characteristic of two-phase-flow .....	9
4.2 Continuity equation .....	10
4.3 Energy equation of two-phase-flow .....	10
4.4 Momentum equation .....	10
4.5 Consideration of pressure drop through a crack .....	12
4.6 Pressure drop .....	13
4.7 Slip ratio through a crack .....	15
4.8 Change of the quality through a crack .....	16
4.9 Calculation of two-phase critical flow rate ( $G_c$ ) and computer program .....	18
5. Critical flow model by Henry .....	19
5.1 Basic theory .....	19
5.1.1 Continuity equation .....	19
5.1.2 Momentum equation .....	21
5.1.3 Pressure drop through a crack .....	21
5.1.4 Relations between exit pressure and critical flow rate .....	23
5.2 Two-phase critical flow rate $G_c$ .....	24
6. Calculation of leak rate and development of computer program .....	26
6.1 Computer program to calculate the leak rate through a cracked piping based on Moody model .....	26
6.2 Computer program to calculate the leak rate through a cracked piping based on Henry model .....	31
6.3 Computer program to calculate the crack angle under a given flow rate (Moody model) .....	34
6.4 Computer program to calculate the crack angle under a given flow rate (Henry model) .....	37
6.5 Computer program to calculate the leak rate through a rectangular slit based on Moody model .....	40

6.6 Computer program to calculate the leak rate through a rectangular slit based on Henry model .....	43
7. Discussion .....	46
8. Conclusion .....	52
9. Future work .....	52
Reference .....	53
Appendix A Input manual for leak rate analysis programs .....	56
A.1 In case of chapter 6.1 .....	56
A.2 In case of chapter 6.2 .....	58
A.3 In case of chapter 6.3 .....	60
A.4 In case of chapter 6.4 .....	61
A.5 In case of chapter 6.5 .....	63
A.6 In case of chapter 6.6 .....	64
Appendix B Lists of the source programs .....	66
B.1 In case of chapter 6.1 .....	66
B.2 In case of chapter 6.2 .....	71
B.3 In case of chapter 6.3 .....	80
B.4 In case of chapter 6.4 .....	85
B.5 In case of chapter 6.5 .....	94
B.6 In case of chapter 6.6 .....	98

## 記 号 一 覧

A	= 流路断面積 ( $= A_g + A_f$ )
$A_c$	= き裂出口面積
$A_i$	= $z = 12 D_h$ におけるき裂面積
$A_o$	= き裂入口面積
$l_c$	= き裂長さ
C	= orifice 縮流係数
COA	= き裂開口面積
COA <sub>b</sub>	= き裂開口面積の曲げによる寄与成分
COA <sub>t</sub>	= き裂開口面積の内圧による寄与成分
COD	= き裂開口変位
$D_h$	= 水力学的直径
E	= 縦弾性係数
f	= 管摩擦係数
$F_{in}$	= 気液相間の摩擦力
$F_{wall}$	= 液相と壁面間の摩擦力
G	= 2相流質量速度 ( $= \rho u$ )
$\bar{G}$	= 平均質量速度
$G_c$	= 出口における臨界質量速度
$G_o$	= 入口における臨界質量速度
h	= 比エンタルピ
$h_o$	= よどみ点エンタルピ
K	= すべり比 ( $= u_g / u_1$ )
$K_{total}$	= 応力拡大係数
$K_t$	= 軸力による応力拡大係数
$K_b$	= 曲げによる応力拡大係数
L	= き裂深さ
M	= 曲げモーメント
P	= 軸力
$P_c$	= 出口圧力
$P_o$	= よどみ点圧力
$P_{zcr}$	= 臨界圧
$\Delta P_a$	= 加速度項による圧力損失

$\Delta P_f$	= 管摩擦による圧力損失
$\Delta P_1$	= 入口圧力損失
$\Delta P_{\text{total}}$	= $\Delta P_{\text{acc}} + \Delta P_{\text{area}} + \Delta P_f + \Delta P_1$
$q$	= 外部から与えられるエネルギー
$R$	= 配管平均半径
$R_h$	= 水力学的半径 ( $= D_h / 2$ )
$R_z$	= 10点平均粗さ
$S$	= 比エントロピ
$S_m$	= 設計応力強さ
$S_{\max}$	= エントロビの極大値
$T$	= 温度
$\bar{U}$	= 平均速度
UTS	= 引張強さ
$v$	= 2相混相比容積 ( $= 1 / \rho = xv_g + (1 - x)v_1$ )
$v_{gc}$	= 出口における蒸気相比容積
$v_{gi}$	= $z = 12D_h$ における蒸気相比容積
$v_{lc}$	= 出口における液相比容積
$v_{l0}$	= 入口における液相比容積
$v_m$	= 二相流の平均比体積
$W_c$	= 質量流量
$W_g$	= 蒸気相質量流量
$W_l$	= 液相質量流量
$x$	= クオリティ ( $= W_g / (W_g + W_l)$ )
$x_c$	= 出口におけるクオリティ
YS	= 降伏応力
$z$	= き裂深さ方向座標
$\alpha$	= ボイド率
$r$	= ポリトロープ指数 ( $= c_p / c_v = 1.33$ )
$\rho$	= 2相流密度
$\tau$	= 壁面のせん断応力
$\sigma_b$	= 曲げ応力
$\sigma_t$	= 軸応力
$\theta$	= き裂半角

## List of Nomenclatures and Abbreviations

A	= Flow Sectional Area
$A_c$	= Cross-Sectional Area of Exit Plane
$A_i$	= Cross-Sectional Area at ( $Z=12D_h$ )
$A_0$	= Cross-Sectional Area of Entrance Plane
$l_c$	= Crack Length
C	= Entrance Loss Coefficient
COA	= Crack Opening Area
$COA_b$	= Crack Opening Area due to Bending Moment
$COA_t$	= Crack Opening Area due to Axial Force
COD	= Crack Opening Displacement
$D_h$	= Hydraulic Diameter
E	= Young's Modulus
f	= Friction Factor
$F_{in}$	= Friction between Vapor and Liquid
$F_{wall}$	= Friction between Wall and Liquid
G	= Two Phase Fluid Mass Flux
$\bar{G}$	= Average Mass Flux
$G_c$	= Critical Mass Flux of Exit Plane
$G_0$	= Critical Mass Flux of Entrance Plane
h	= Specific Enthalpy
$h_0$	= Stagnation Enthalpy
K	= Slip Ratio
$K_{total}$	= Total Stress Intensity Factor
$K_t$	= Stress Intensity Factor due to Axial Force
$K_h$	= Stress Intensity Factor due to Bending Moment
L	= Crack Depth
M	= Bending Moment
P	= Axial Force
$P_c$	= Exit Pressure
$P_0$	= Stagnation Pressure
$P_{2cr}$	= Critical Pressure
$\Delta P_a$	= Pressure Loss due to Acceleration
$\Delta P_f$	= Pressure Loss due to Friction

$\Delta P_1$	= Entrance Pressure Loss
$\Delta P_{\text{total}}$	= $\Delta P_{\text{acc}} + \Delta P_{\text{area}} + \Delta P_f + \Delta P_1$
$q$	= External Energy
$R$	= Mean Pipe Radius
$R_z$	= Average Surface Roughness
$R_h$	= Hydraulic Radius ( $= D_h / 2$ )
$S$	= Specific Entropy
$S_m$	= Maximum Allowable Stress Intensity
$S_{\max}$	= Maximum Entropy
$T$	= Temperature
$U$	= Mean Velocity
UTS	= Ultimate Tensile Strength
$v$	= Specific Volume for Mixture Flow
$v_{gc}$	= Specific Volume of Vapor at Exit Plane
$v_{gi}$	= Specific Volume of Vapor at ( $Z=12D_h$ )
$v_{lc}$	= Specific Volume of Liquid at Exit Plane
$v_{10}$	= Specific Volume of Liquid at Entrance Plane
$v_m$	= Specific Average Volume for Mixture Flow
$w_c$	= Leak Rate
$w_g$	= Vapor Leak Rate
$w_l$	= Liquid Leak Rate
$x$	= Quality
$x_c$	= Quality of Exit Plane
YS	= Yield Stress
$z$	= Direction of Crack Depth
$\alpha$	= Void Fraction
$\gamma$	= Ratio of Specific Heats, $(C_p / C_v)$
$\rho$	= Two Phase Flow Density
$\tau$	= Shear Stress
$\sigma_b$	= Bending Stress
$\sigma_t$	= Axial Stress
$\theta$	= Half Angle of Circumferential through Wall Crack

## 1. はじめに

現在、日本を含む各国の研究機関では軽水型原子力発電所で使用する配管の健全性を評価する研究が進められている。その研究の一つとして、圧力配管にき裂が生じた場合の漏洩量の評価研究がある。即ち、溶接時に生じる気泡等、何らかの原因により配管表面または内部に初期欠陥が存在した場合、その場所で応力の集中が起こり、それが地震・ポンプの振動・内圧の変動・配管の温度変化等の繰り返し荷重によって進展し、貫通き裂に至る。その後さらに亀裂は同方向に進展し、配管としては最悪の状態である全断面破断に至る可能性がある。

この配管破断シナリオにおいて、き裂が貫通したのち、全断面破断に至る前に、冷却材が貫通亀裂より漏れ出てくるのを発見し、き裂の生じた配管を交換すれば全断面破断に至る事はない。これがLBB概念（LBB : Leak Before Break という）である。この概念を確立させるためには、き裂の大きさと配管に加わる応力状態と冷却材漏洩量との関係を明らかにする事が重要である。一方、現実の軽水型原子力発電所では、プラント出力・BWR／PWRの違いまたは使用箇所により、様々な口径・肉厚・材質の配管が使用されており、その時々の応力レベルも様々である。この多種多様な条件に対応するため、必要な計算条件を与えるだけで、漏洩量の計算を行う事ができるプログラムを開発する事は、研究を効率的に進める上で大へん重要なことである。

本報告書では、漏洩量の計算を行うために以下の6種類のプログラムを作成したのでそれらを取纏め体系化してここに報告する。

- (1) 配管貫通き裂からの漏洩量を計算するプログラム  
(MOODYの二相流モデルによる計算)
- (2) 配管貫通き裂からの漏洩量を計算するプログラム  
(HENRYの臨界流モデルによる計算)
- (3) 与えられた漏洩量を有する配管き裂角度の計算プログラム  
(MOODYの二相流モデルによる計算)
- (4) 与えられた漏洩量を有する配管き裂角度の計算プログラム  
(HENRYの臨界流モデルによる計算)
- (5) 長方形スリットからの漏洩量計算プログラム  
(MOODYの二相流モデルによる計算)
- (6) 長方形スリットからの漏洩量計算プログラム  
(HENRYの臨界流モデルによる計算)

## 2. 漏洩量計算プログラムの概要

今回作成した漏洩量評価プログラムの概略を Fig. 2.1 ~ 2.3 に示す。

き裂からの漏洩量は、臨界流モデルに依って基本的に (2.1) の式で計算される。

$$W_c = C \cdot G_c \cdot C_O.A \quad (2.1)$$

$C_O.A$  は測定値を入力するかまたは、Tada-Parisの式で計算する。

$G_c$  は臨界流量で HENRY モデルまたは、MOODY モデルを用いて計算する。

これらの流体モデルには、計算できる流体状態に Table 2.1 に示す様な制限がある。

(2.1) 式中の  $C_O.A$  を先に求める事で  $W_c$  を得るか (Fig. 2.1, Fig. 2.3) または  $W_c$  を入力する事で、 $C_O.A$  を求める事もできる様、プログラムを作成した。 (Fig. 2.2)

このうち、Fig. 2.1, 2 は、配管の円周方向貫通き裂からの漏洩を対象としたプログラムである。Fig. 2.1 は、形状データとして、配管口径・肉厚・き裂角度・材料データとして、ヤング率、降伏応力、荷重条件として内圧・曲げ応力を入力する事によりき裂から生ずる漏洩量を計算するプログラムである。それに対し、Fig. 2.2 は、逆に配管仕様と内圧、曲げ応力及び漏洩量を与える事により、その漏洩量を生ずるき裂角度を求めるプログラムである。

いっぽう Fig. 2.3 は、長方形スリットからの漏洩を対象としたプログラムである。

Fig. 2.1 ~ 2.3 において、漏洩率の求め方に MOODY の理論と HENRY の理論との 2 とおりの理論で解ける様にしたので 6 とおりのプログラムとなった。

Table 2.1 内部流体状態と使用できる流体モデルの制限

内部流体状態	流体モデル	HENRY	MOODY
未臨界流		×	×
サブクール水	○	×	
飽和水	○	○	
湿り蒸気	×	○	
加熱蒸気	×	×	

○ : 解析可能

× : 解析不可能

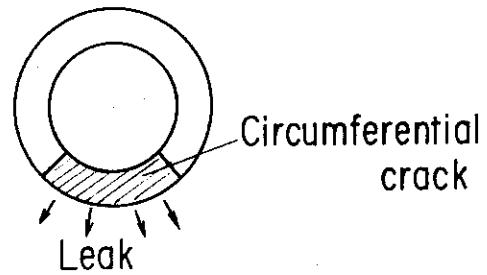
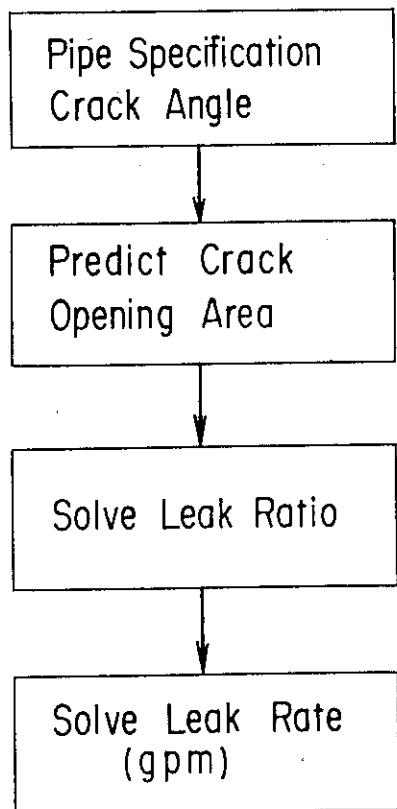


Fig. 2.1 The flow Chart to Solve Leak Rate through a crack

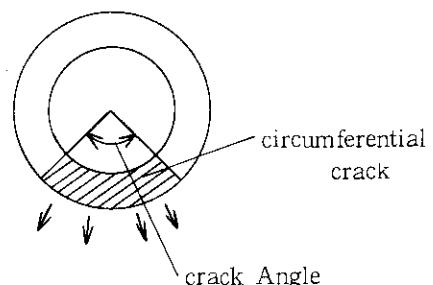
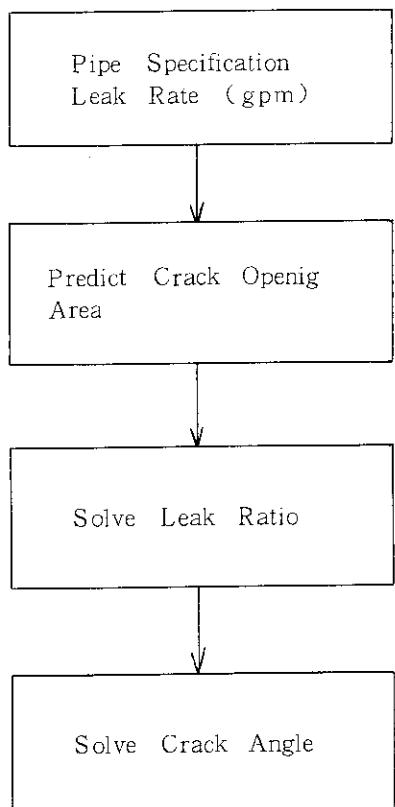


Fig. 2.2 The flow Chart to Solve a Creack Angle

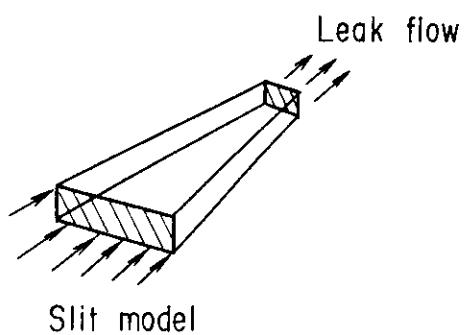
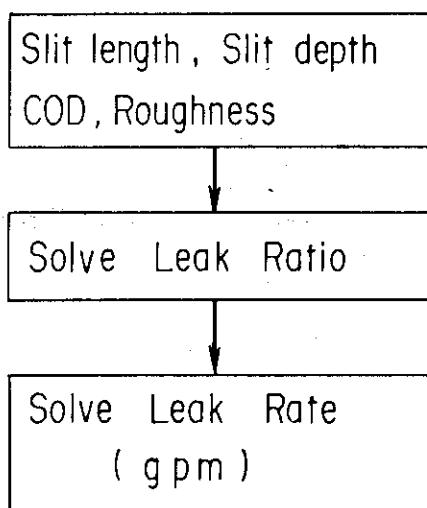


Fig. 2.3 The flow chart to Solve Leak rate through a slit

### 3. き裂開口面積及び開口変位の計算

漏洩量は臨界流量とき裂開口面積との積で示されることから、漏洩量を知るにはまず、き裂開口面積を知る必要がある。本章では本プログラムに使用したき裂開口面積の求め方について説明する。

#### 3.1 き裂開口面積<sup>(16)</sup>

配管に生じるき裂は、Fig. 3.1 のように円周方向の貫通き裂とし、き裂開口面積は、Tada-Paris の式を用いて計算を行う。

曲げと軸力をうける配管のき裂開口面積は、内圧による寄与成分 COA<sub>t</sub> と曲げによる寄与成分 COA<sub>b</sub> とに分けられ、便宜的に次のような形で表わされる。

$$\begin{aligned} \text{COA}_t &= \frac{\sigma t}{E} (\pi R^2) I_t(\theta) \\ \text{COA}_b &= \frac{\sigma b}{E} (\pi R^2) I_b(\theta) \end{aligned} \quad (3.1)$$

ここで、 $I_t(\theta)$  と  $I_b(\theta)$  は無次元量である。まだ、配管半径  $R$  と板厚  $t$  は、およそ  $R/t = 10$  の関係にあるとする。ここで、 $I_t(\theta)$  及び  $I_b(\theta)$  は各々次のように近似される。

$$\begin{aligned} I_t(\theta) &= 2\theta^2 [1 + \left(\frac{\theta}{\pi}\right)^{3/2} \{8.6 - 13.3 \left(\frac{\theta}{\pi}\right) + 24 \left(\frac{\theta}{\pi}\right)^2 \\ &\quad + \left(\frac{\theta}{\pi}\right)^3 \{22.5 - 75 \left(\frac{\theta}{\pi}\right) + 205.7 \left(\frac{\theta}{\pi}\right)^2 \\ &\quad - 247.5 \left(\frac{\theta}{\pi}\right)^3 + 242 \left(\frac{\theta}{\pi}\right)^4\}] \quad (0 < \theta < \frac{100^\circ}{180^\circ} \pi) \end{aligned} \quad (3.2)$$

$$\begin{aligned} I_b(\theta) &= 2\theta^2 [1 + \left(\frac{\theta}{\pi}\right)^{3/2} \{8.2 - 12.7 \left(\frac{\theta}{\pi}\right) + 19.3 \left(\frac{\theta}{\pi}\right)^2\} \\ &\quad + \left(\frac{\theta}{\pi}\right)^3 \{20.4 - 68 \left(\frac{\theta}{\pi}\right) + 165.2 \left(\frac{\theta}{\pi}\right)^2 \\ &\quad - 187.2 \left(\frac{\theta}{\pi}\right)^3 + 146.7 \left(\frac{\theta}{\pi}\right)^4\}] \quad (0 < \theta < \frac{100^\circ}{180^\circ} \pi) \end{aligned} \quad (3.3)$$

曲げと軸力が作用したときのき裂開口面積は

$$\text{COA} = \text{COA}_t + \text{COA}_b \quad (3.4)$$

として与えられる。

き裂先端の塑性域を考慮したき裂開口面積は、(3.1)式の $\theta$ のかわりに次式で示される $\theta_{\text{eff}}$ を用い(3.5)式で計算する。

$$\theta_{\text{eff}} = \theta + \frac{K^2 \text{total}}{2\pi R \sigma_y^2} \quad (3.5)$$

ここで、

$$\sigma_y = \frac{3YS + UTS}{4} \quad (3.6)$$

$$K_{\text{total}} = K_b + K_t \quad (3.7)$$

Tadaらは、 $\sigma_y$ に降伏応力を使用しているが、これを使うと実験値よりき裂が開き過ぎる事が指摘されている。これを補正するため、(3.6)式を使用する事が柴田ら<sup>(20)</sup>により提案されており、本報の例題計算ではこの値を使用した。

$K_t$ ,  $K_b$ の計算は、(3.8)式によって行なう。

$$\begin{aligned} K_t &= \sigma_t \sqrt{\pi R \theta F_t(\theta)} \\ K_b &= \sigma_b \sqrt{\pi R \theta F_b(\theta)} \end{aligned} \quad (3.8)$$

ここで $\sigma_t$ ,  $\sigma_b$ は、(3.9)式で与えられる。

また、 $F_t(\theta)$ ,  $F_b(\theta)$ は無次元数で Sanderによる近似解<sup>(16)</sup>(3.10)式を使用する。

$$\begin{aligned} \sigma_t &= \frac{P}{2\pi R t} \\ \sigma_b &= \frac{M}{\pi R^2 t} \end{aligned} \quad (3.9)$$

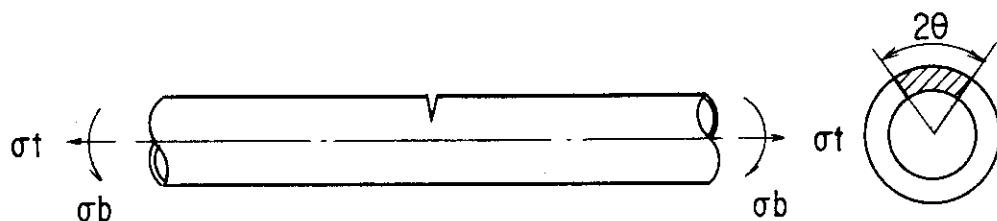


Fig. 3.1 The pipe with a crack subjected both to bending stress and axial force

3.2 Sanderによる近似解<sup>(16)</sup>

(3.8) 式に示した  $F_t(\theta)$ ,  $F_b(\theta)$  の値は、半径・肉厚の比が  $R/t=10$  のところで Sander によって計算されている。その値を Table 3.1 に示す。

この値をもとにして (3.10) 式に示す近似式を導いている。この (3.10) 式による誤差は 2 ~ 3 % 程度である。

$$\begin{aligned} F_t(\theta) &= 1 + 7.5 \left( \frac{\theta}{\pi} \right)^{3/2} - 15 \left( \frac{\theta}{\pi} \right)^{5/2} + 33 \left( \frac{\theta}{\pi} \right)^{7/2} \\ F_b(\theta) &= 1 + 6.8 \left( \frac{\theta}{\pi} \right)^{3/2} - 13.6 \left( \frac{\theta}{\pi} \right)^{5/2} + 20 \left( \frac{\theta}{\pi} \right)^{7/2} \quad (3.10) \\ (0 < \theta < \frac{100^\circ}{180} \pi) \end{aligned}$$

Table 3.1  $F_t(\theta)$  and  $F_b(\theta)$  for  $R/t=10$  (16)

$\theta$	$F_t(\theta)$	$F_b(\theta)$
0°	1.000	1.000
9	1.039	1.037
18	1.151	1.140
27	1.314	1.278
36	1.505	1.425
45	1.725	1.580
54	1.987	1.747
63	2.305	1.934
72	2.702	2.154
81	3.209	2.406
90	3.872	2.760
99	4.764	3.209
108	6.003	3.827

## 3.3 き裂開口変位

(3.4) 式で求めたき裂開口面積を基に、き裂形状を橢円と決定し、き裂開口変位(COD)を算出する。(Fig. 3.2)

$$C O D = \frac{2 C O A}{\pi \cdot \theta \cdot R} \quad (3.11)$$

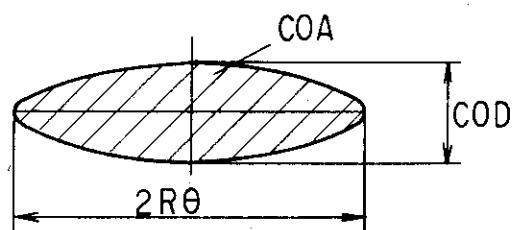


Fig. 3.2. Crack Opening Area and  
Crack Opening Displacement

## 4. M O O D Y の二相流モデル (17)

配管き裂から生じる臨界流量をM O O D Yの二相流モデルを用いて求める。

## 4.1 二相流モデルの特性

Moodyの二相流モデルは、スリップモデルとも呼ばれ流路断面上で気相と液相が完全に分離し各相間に相対速度を有するものである。Fig.4-1にモデルの模式図を示す。

このモデルは、以下の特性を仮定している。

- 1) 流路面積は一定で、外部とは断熱されている。
- 2) 定常流である。
- 3) エントレインメントなしの環状分離流で液相が流路壁と接触している。
- 4) いずれの断面に於いても液相、気相共に熱力学的な平衡状態にある。
- 5) き裂内における流速は、二相共、流路方向に一定である。

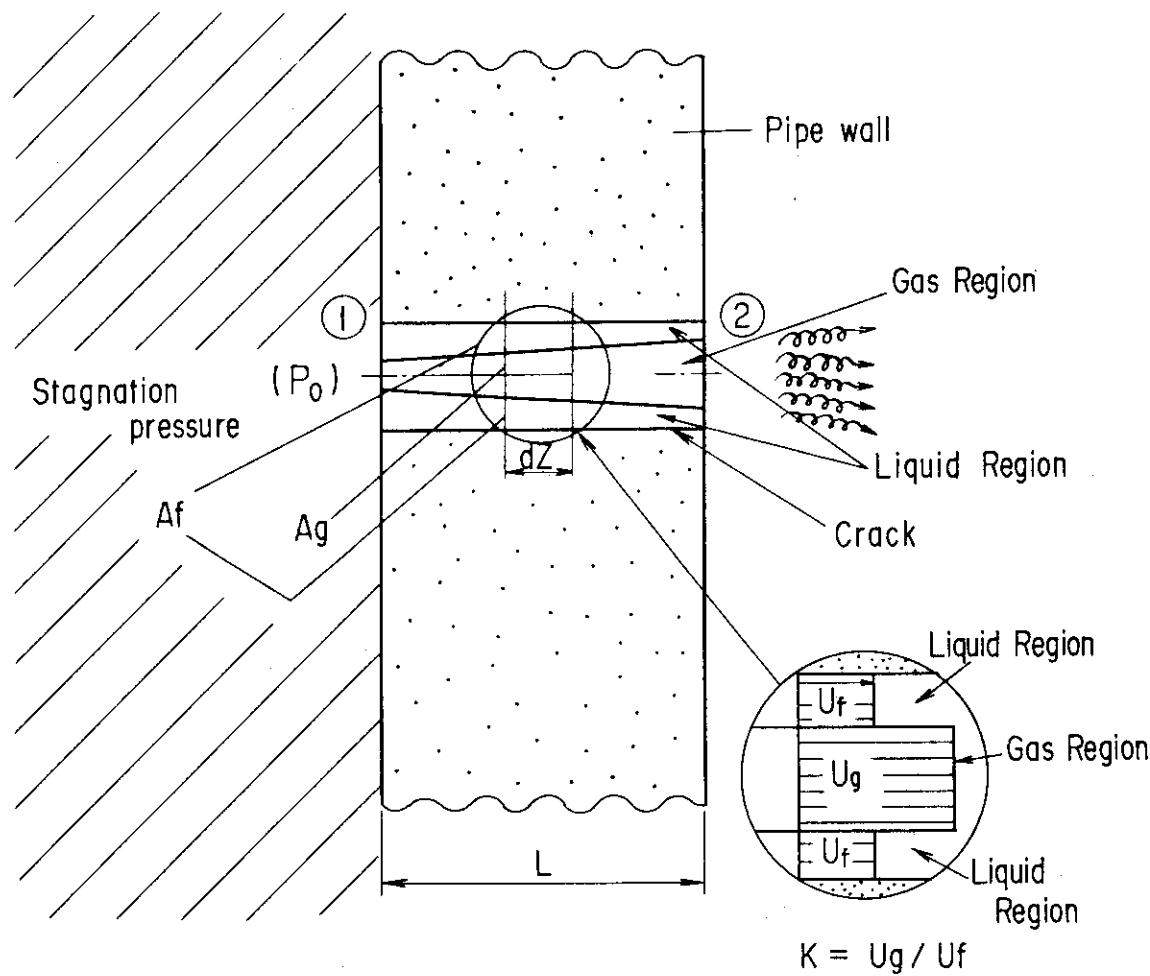


Fig. 4.1 Moody's slip model

#### 4.2 連続の式

流体の連続性から二相流の単位面積当りの質量流量Gは、流路内において一定である。

従って、

$$G = \frac{W}{A} = \frac{a}{x} \frac{U_g}{V_g} = \frac{1-a}{1-x} \frac{U_f}{V_f} \quad (4.1)$$

但し、

$$x : クオリティ \quad x = \frac{W_g}{W_f + W_g} = \frac{W_g}{W} \quad (4.2)$$

$$\alpha : 蒸気ボイド率 \quad \alpha = \frac{A_g}{A_f + A_g} = \frac{A_g}{A} \quad (4.3)$$

K : 液相と気相との速度比

$$K = U_g / U_f \quad (4.4)$$

#### 4.3 二相流全体に対するエネルギー式<sup>(12),(15)</sup>

流路は外部と断熱されている ( $q = 0$ ) ためエンタルピーは摩擦の有無に関係なく流路に沿って一定であるから、

$$h_o = h + \frac{G^2}{2} \{ x U_g^2 + (1-x) U_f^2 \} \quad (4.5)$$

である。速度比  $K = U_g / U_f$  を用いて (4.5) 式を表わすと、

$$h_o = \{ h_f + x (h_g - h_f) \} + \frac{G^2}{2} \{ x V_g + K (1-x) V_f \}^2 \times \left( x + \frac{1-x}{K^2} \right) \quad (4.6)$$

となる。

#### 4.4 運動量保存則

流路中で摩擦損失が有る場合、流体の運動方程式は以下の通りである。

基礎運動方程式は、

$$\frac{\partial (\rho U A)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho U^2 A)}{\partial z} = - \frac{\partial (P A)}{\partial z} - A_f \frac{\rho U^2}{2 D h} \quad (4.7)$$

となる。流路に沿って単位長さ当りの運動量を考えた場合、流れは定常流であるとの仮定から

$$\frac{\partial (\rho U A)}{\partial t} = 0 \text{ となり、 (4.7) 式は、}$$

$$\frac{\partial (P A)}{\partial Z} + \frac{\partial (\rho U^2 A)}{\partial Z} + A_f \frac{\rho U^2}{2 D h} = 0 \quad (4.8)$$

となる。

(4.8) 式を  $G = \rho U$  で書き換える、整理すると次式が得られる。

$$G^2 \frac{d}{dZ} (1/\rho) - \frac{G^2}{\rho A} \frac{dA}{dZ} = -\frac{1}{A} \frac{d(PA)}{dZ} - \frac{(f/\rho) G^2}{2 Dh} \quad (4.9)$$

一定流路面積を仮定しているので、左辺第2項は  $dA/dZ = 0$  となり、

$$G^2 \frac{d}{dZ} (1/\rho) = -\frac{dP}{dZ} - \frac{(f/\rho) G^2}{2 Dh} \quad (4.10)$$

が得られる。

(4.10) 式の左辺は密度変化により生じる加速度項であり、右辺は外力項である。右辺第1項および等2項は、圧力勾配および摩擦損失である。

ここで (4.7) 式から (4.10) 式の導入法ならびに  $\rho$ ,  $U$  の物理的意味を説明する。

Moodyモデルは本来二相流であるものを単相流に簡略化し、取扱っていることが以下の説明からわかる。各相について、運動量保存則を考えてみる。蒸気相運動量式は定常流のもとでは、

$$\frac{d}{dZ} \rho_g U_g^2 A_g = -\frac{d}{dZ} (PA_g) + F_{in} \quad (4.11)$$

液相運動量式は、

$$\frac{d}{dZ} \rho_f U_f^2 A_f = -\frac{d}{dZ} (PA_f) - F_{in} + F_{wall} \quad (4.12)$$

ここに  $F_{in}$  は蒸気相と液相間で生じる相間摩擦力、 $F_{wall}$  は液相が管壁から受ける摩擦力である。4.1節の3) 項の特性から液相のみが管壁と接しているので、管摩擦の項は液相のみについて考慮すればよい。(4.11) 式と (4.12) 式の和をとれば、 $A = A_g + A_f$  であるから、

$$\frac{d}{dZ} (\rho_g U_g^2 A_g + \rho_f U_f^2 A_f) = -\frac{d}{dZ} (PA) + F_{wall} \quad (4.13)$$

ここで、

$$\rho_g U_g^2 A_g + \rho_f U_f^2 A_f = \rho U^2 A \quad (4.14)$$

とおく。さらに (3.1) 式において、

$$W = AG = \rho_g U_g A_g + \rho_f U_f A_f = \rho U A \quad (4.15)$$

とする。(3.14), (3.15) 式は辺々を  $A$  で除して、

$$\begin{aligned} \rho U^2 &= \rho_g U_g^2 \alpha + \rho_f U_f^2 (1 - \alpha) \\ \rho U &= \rho_g U_g \alpha + \rho_f U_f (1 - \alpha) \end{aligned} \quad (4.16)$$

と書き直される。(3.16) と (3.1) 式を用いて、

$$\begin{aligned} \frac{1}{\rho} &= x^2 \left[ \frac{1}{\rho_g \alpha} + \frac{\rho_f U_f^2 (1 - \alpha)}{(\rho_g U_g \alpha)^2} \right] \\ &= x^2 \frac{V_g}{\alpha} + (1 - x)^2 \frac{V_f}{1 - \alpha} \end{aligned} \quad (4.17)$$

が得られる。この  $1/\rho$  が後出の (3.21) 式の  $V_m$  となる。

#### 4.5 き裂に沿う圧力損失の考慮

き裂を通路と考え、摩擦を考慮した場合の二相流の運動方程式は (4.10) 式より、

$$\frac{dP}{dZ} + \Delta P_a + \Delta P_f = 0 \quad (4.18)$$

で与えられる。但し、 $\Delta P_a$  は加速損失、 $\Delta P_f$  は摩擦損失であり、

$$\Delta P_a = G^2 \frac{d}{dZ} \left( \frac{1}{\rho} \right)$$

$$\Delta P_f = \frac{f / \rho}{2 D h} G^2$$

である。

加速損失  $\Delta P_a$  は、気液二相分離流モデルの運動量バランスと二相流の連続の式より、

$$\Delta P_a = G^2 \frac{d}{dZ} \left[ \frac{x^2 V_g}{\alpha} + \frac{(1-x)^2 V_f}{1-\alpha} \right] \quad (4.19)$$

となる。

さらに、(4.1)～(4.4)式より蒸気ボイド率  $\alpha$  は、

$$\alpha = \frac{1}{1 + K \left( \frac{1-x}{x} \right) \frac{V_f}{V_g}} \quad (4.20)$$

となる。

(4.19) および (4.20) 式より、

$$\begin{aligned} \Delta P_a &= G^2 \frac{d}{dZ} \left[ \{ K(1-x)V_f + xV_g \} \left( x + \frac{1-x}{K} \right) \right] \\ &= G^2 \frac{d}{dZ} [V_m] \end{aligned} \quad (4.21)$$

が得られる。ここで、

$$\begin{aligned} \frac{1}{\rho} = V_m &= \left[ \frac{x^2 V_g}{\alpha} + \frac{(1-x)^2 V_f}{1-\alpha} \right] \\ &= \left[ \{ K(1-x)V_f + xV_g \} \left( x + \frac{1-x}{K} \right) \right] \end{aligned}$$

であり、二相流を単相流に簡略化したことにより得られる二相流の比体積を代表する値である。

摩擦損失  $\Delta P_f$  は、

$$\Delta P_f = \frac{f}{Dh} \cdot \frac{G^2}{2} \cdot \frac{1}{\rho} = \frac{f}{Dh} \cdot \frac{G^2}{2} \cdot V \quad (4.22)$$

であり、 $V = V_f + x(V_g - V_f)$  を代入すると、

$$\Delta P_f = \frac{f}{Dh} \cdot \frac{G^2}{2} \{ V_f + x(V_g - V_f) \} \quad (4.23)$$

が得られる。

(4.21), (4.23) 式より運動方程式は、

$$dP + G^2 dV_m + \frac{f}{Dh} \cdot \frac{G^2}{2} V dZ = 0 \quad (4.24)$$

となる。

(4.24) 式を基本として、以下に単位面積当りの二相臨界流量  $G_c$  を求める。

#### 4.6 圧力損失の種類

狭隙部を通過する流体の受ける圧力損失の種類には、以下の 3 とおりが考えられる。

##### (1) 管摩擦 (Fig.4-2)

き裂表面の粗さに依存する圧力損失で、ここでは表面粗さが十分粗い事を考慮してニクラゼの式を用いて管摩擦係数  $f$  を求める。

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 2 \log \left( \frac{R_h}{2} \right) + 1.74 \quad (4.25)$$

この  $f$  が (4.7) 式中で使用される。

##### (2) き裂入口部の縮流

流れがよどみ点から狭隙部入口で収縮し、再び狭隙部内で広がる事により圧力の損失が起こる。圧力損失は入口のかどの丸味に依存する。 (Fig.4-3)

##### (3) き裂破面のうねり (Fig.4-4)

き裂が入口から出口に至るまでに折れ曲がり、その折れ曲がり（うねり）部を流体が通過する事により圧力損失が生じる。

以上 3 つの圧力損失項目のうち、(2), (3)のき裂入口部の縮流及びき裂破面のうねりについては、今回作成した M O O D Y の臨界流モデルの漏洩量計算プログラムには反映されていない。



Fig. 4.2 Friction factor

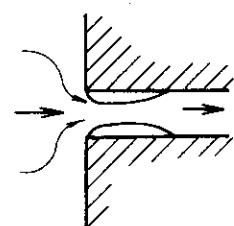


Fig. 4.3 Orifice contraction at the inlet

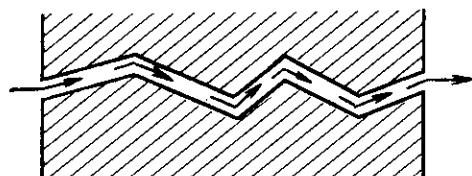


Fig. 4.4 Turns in the crack path

## 4.7 二相臨界時の速度比

Moodyは、管摩擦を考慮せず二相流全体が等エンタルピ変化流れをする場合の二相臨界流量を  $G_c$  となる場合の、液相と気相との速度比は各相の比体積の 3 乗根に等しいと考え、

$$K = U_g / U_f = (V_g / V_f)^{1/3} \quad (4.26)$$

を提案している。(Fig.4-5)

これは、速度比  $K$  と圧力  $P$  とは独立であると仮定し、

$$dG = (2G/2P)_K dP + (2G/2K)_P dK = 0 \quad (4.27)$$

において流量  $G$  が極大となるための必要条件

$$(2G/2P)_K = 0$$

$$(2G/2K)_P = 0$$

から定まる。

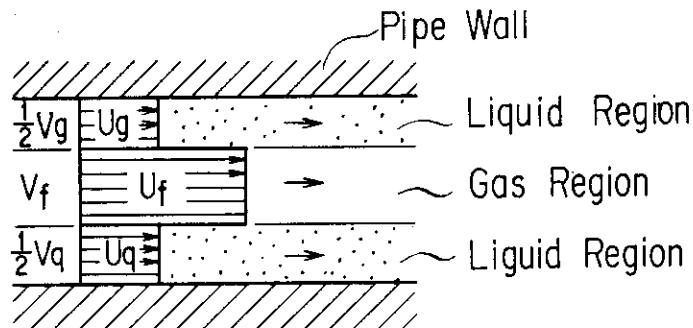


Fig. 4.5 Slip Ratio

4.8 き裂内のクオリティ変化<sup>(15)</sup>

流路内のクオリティ変化は、(4.6)式に示す二相流全体のエネルギー式より以下のように求められる。

流路面積を一定と仮定してるので流量Gは流路内で一定である。従って、(4.6)式を、Moodyの提案している速度比( $K = (V_g/V_f)^{1/3}$ )を用いて、クオリティxについて整理すると以下の様になる。

$$\begin{aligned} & \left(1 - \frac{1}{K^2}\right) \left(1 - K \frac{V_f}{V_g}\right)^2 x^3 \\ & + \left(1 - K \frac{V_f}{V_g}\right) \left\{ 2K \frac{V_f}{V_g} + \frac{1}{K^2} \left(1 - 3K \frac{V_f}{V_g}\right) \right\} x^2 \\ & + \left[ \left\{ \frac{2}{K} \frac{V_f}{V_g} \left(1 - \frac{V_f}{V_g} K\right) + (K^2 - 1) \left(\frac{V_f}{V_g}\right)^2 \right\} + \frac{h_g - h_f}{V_g^2} \frac{1}{G^2/2} \right] x \\ & = \frac{h_g - h_f}{V_g^2} \frac{1}{G^2/2} - \left(\frac{V_f}{V_g}\right)^2 \end{aligned} \quad (4.28)$$

(4.28)式に示すクオリティxの3次式の各係数は流量Gと圧力Pのみの関数であるから、GとPを与えることによりクオリティxを決定できる。

Fig. 4-6に、一例として、流量G = 17146 kg/m<sup>2</sup>sの場合の圧力に対するクオリティ変化を示す。

流路内部の圧力降下に伴うエントロピ変化をFig. 4-7に示す。Fig. 4-7は、横軸にエントロピS、縦軸に圧力Pを示し、ある流量Gを与えた場合の流路に沿ったエントロピ変化を示す。例えば、G = 17146 kg/m<sup>2</sup>sの場合、圧力P = 21.8 kg/cm<sup>2</sup>aまで降下した時、エントロピは極大を示す。

臨界条件は、

$$dS/dP = 0 \quad (4.29)$$

であるから、エントロピ極大のときの圧力が臨界圧P<sub>zcr</sub>となる。

但し、エントロピSはクオリティxの関係であり、

$$S = S_f + x (S_g - S_f) \quad (4.30)$$

で与えられる。

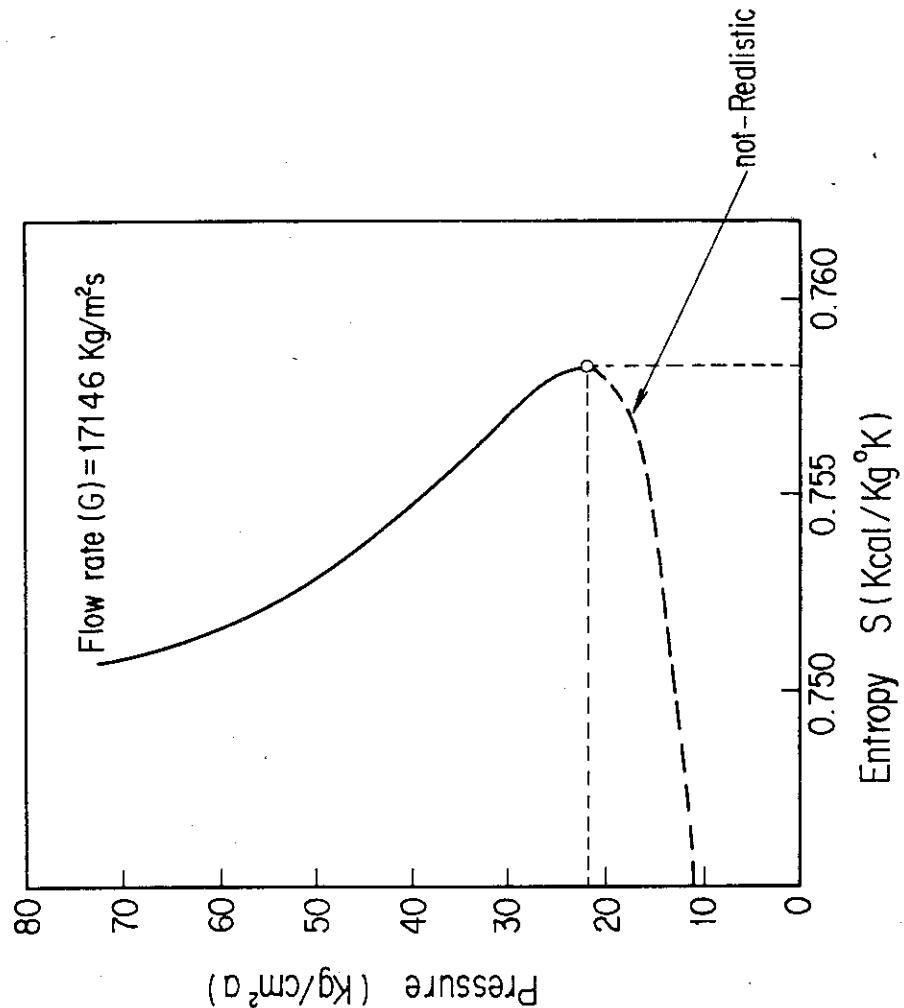


Fig. 4.6 Relationship between quality and pressure at  $G = 17146 \text{ Kg/m}^2\text{s}$

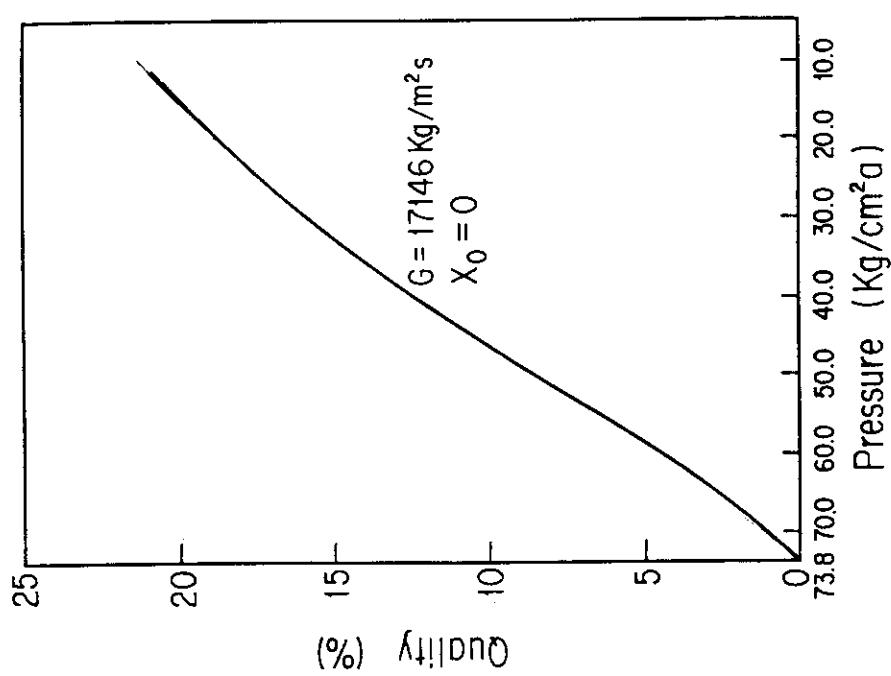


Fig. 4.7 Relationship between entropy and pressure

4.9 二相臨界流量  $G_c$  の算出法及び計算プログラム<sup>(17)</sup>

二相臨界流量  $G_c$  は、運動方程式（4.24）式、クオリティ変化を示す（4.28）式、臨界条件（4.30）式を用い以下のように算出できる。

（4.24）式を変形すると、

$$dZ = -\frac{Dh}{f} \left( \frac{1}{G^2/2} - \frac{dP}{V} + 2 \frac{dV_m}{V} \right)$$

この式を流路入口1から出口2まで積分し、き裂深さ（板厚）しが次の様に求められる。

$$L = \int_1^2 dZ = - \int \frac{Dh}{f} \left( \frac{1}{G^2/2} - \frac{dP}{V} + 2 \frac{dV_m}{V} \right) \quad (4.31)$$

（4.31）式をき裂形状  $L/Dh$  と管摩擦係数  $f$  により無次元化すると、

$$\frac{f}{Dh} L = \frac{1}{G^2/2} \int_{P_2}^{P_1} \frac{dP}{V} - 2 \int_{P_1}^{P_2} \frac{dV_m}{V} \quad (4.32)$$

となる。

ある臨界流量  $G_c$  とよどみ点圧力  $P_c$  を与えれば、流路に沿って  $\Delta P$  だけ圧力が降下した位置での速度比  $K$  が（4.26）式より得られ、一方クオリティ  $x$  も（4.26）式より求まる。さらに、求められたクオリティから、その位置での状態量  $T$ ,  $V$ ,  $h$ ,  $S$ ,  $V_m$  が求まる。

流路に沿って以上のパラメータが求まれば、（4.32）式の右辺第1項および第2項の数値積分が実行できるので、流路に沿った  $fL/Dh$  が定まる。臨界条件は、（4.29）式により与えられるので、 $S_{max}$  の位置を求めれば、その点が臨界流量  $G_c$  となったときの出口条件となる。

以上の様にして任意の  $G_c$ ,  $P_c$  を与えれば、このときの流路条件  $fL/Dh$  および流路に沿ったすべての状態量が定まる。

## 5. H E N R Y の臨界流モデル

### 5.1 基礎理論<sup>(4)(5)(14)</sup>

き裂を流れる流体は二相流となるが、配管に存在する初期流体はサブクール水もしくは飽和水とする。水力学的直径  $D_h$  を

$$D_h = \frac{4 \times \text{き裂面積}}{\text{き裂周長}} \quad (5.1)$$

で定義する。漏洩率研究では  $L/D_h$  が重要なパラメータとなる。また、き裂表面粗さは漏洩率に影響を与えること大である。

Fig.5.1, 5.2 にき裂を通過する二相流の状態を模式的に示す。き裂に沿って以下に示す3個の領域を定める。

$$\text{領域 } 1 : 0 \leq L/D_h \leq 3$$

この領域では液体ジェットが形成され、その周りを蒸気がとり囲む。

$$\text{領域 } 2 : 3 \leq L/D_h \leq 12$$

この領域では蒸気泡が形成される。 $L/D_h \leq 12$  まではき裂に沿っての圧力は一定である。

$$\text{領域 } 3 : L/D_h \geq 12$$

液体ジェットは二相混相流になる。き裂に沿って圧力は  $p_e$  に向かって減少する。

Fig.5-3 に本報で考察する所のすばまりき裂 (convergent crack) の寸法を示す。き裂について以下の仮定を設ける。

- (1) COD は  $L$  や  $2c$  と比較して小さい。
- (2) き裂面積は流れに沿ってゆるやかに減少していく。
- (3) 液体ジェットは  $L/D_h = 12$  で完全に崩壊し、この点までは圧力分布は平坦である。
- (4) 液相は非圧縮性流体とする。
- (5)  $0 \leq z \leq 12 D_h$  では相変化はなく、 $x = 0$  とする。

#### 5.1.1 質量保存則

流路面積が変化するとき裂を流れる二相流の質量保存則は

$$G A = \text{const} \quad (5.2)$$

もしくは  $z$  で微分して

$$\frac{\partial G}{\partial z} + \frac{G}{A} \frac{\partial A}{\partial z} = 0 \quad (5.3)$$

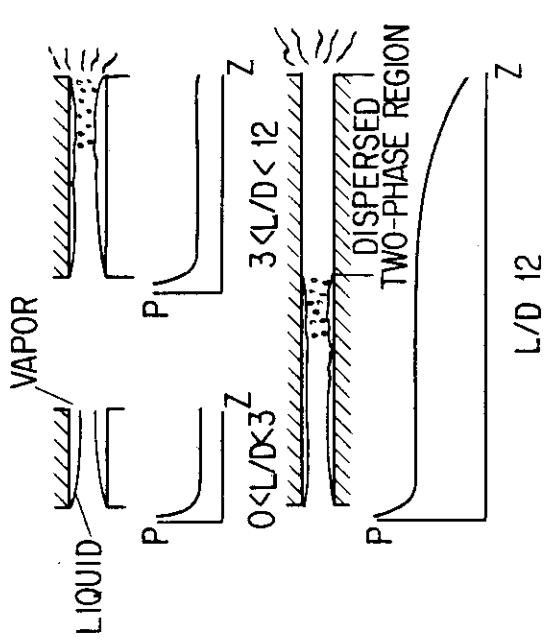


Fig. 5.1 Flow patterns characterizing the diarge of saturated or subcooled liquid through sharp entrance geometries

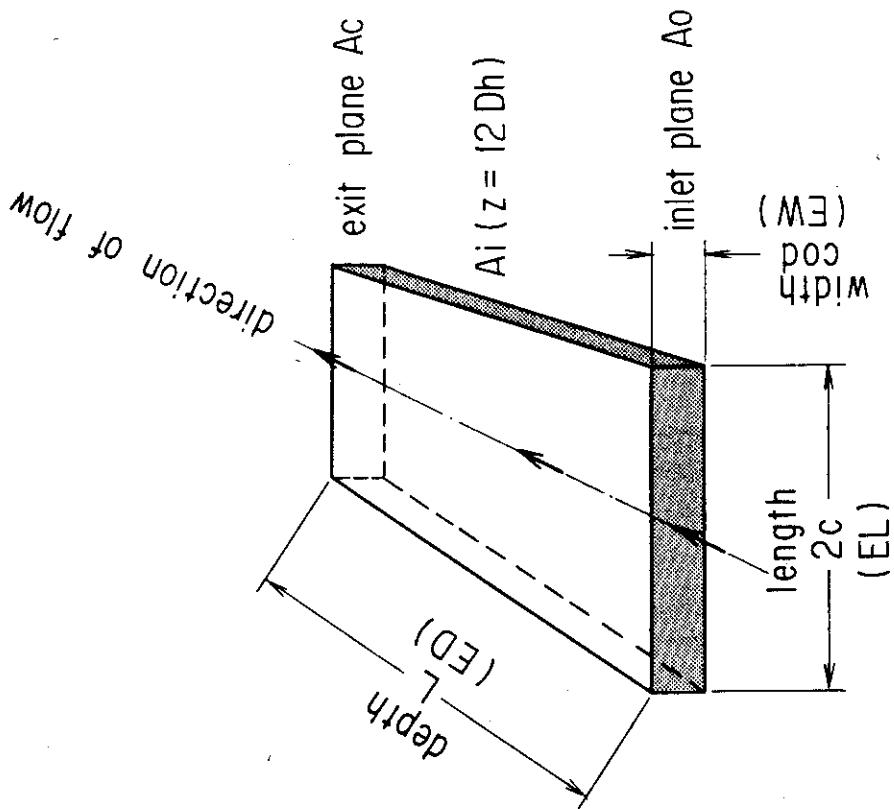


Fig. 5.2 Assumed flow pattern development and axial pressure distribution for  $L/D = 12$

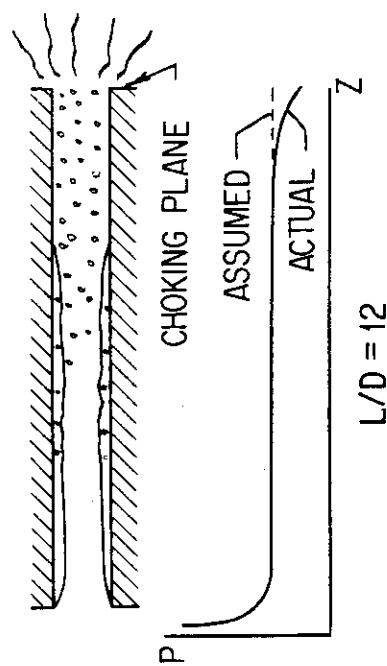


Fig. 5.3 Slit Model

## 5.1.2 運動量保存則

運動量保存の式は

$$G^2 \frac{d}{dz} (1/\rho) - \frac{G^2}{\rho A} \frac{dA}{dz} = - \frac{d(pA)}{Adz} - \frac{(f/\rho)G^2}{2D_h} \quad (5.4)$$

(5.4) は以下のようにして求まる。き裂に沿って単位長さ当たり運動量を考えると、流れが定常流であるから  $\frac{\partial(\rho u A)}{\partial t} = 0$  として

$$\frac{d(\rho u^2 A)}{dz} = - \frac{d(pA)}{dz} - Af \frac{\rho u^2}{2 D_h} \quad (5.5)$$

となる。(5.5) の左辺は密度変化と面積変化によって生じる加速度項、右辺は外力項であって第一項は圧力勾配、第二項は摩擦損失である。摩擦損失の実験式として管長 L における圧力損失を

$$\Delta p = f \frac{1}{2 D_h} \rho u^2 \quad (5.6)$$

で与えれば、単位長さについて生じる摩擦力は  $\frac{Af}{2 D_h} \rho u^2$  で与えられる。これが右辺第2項

である。(5.5) を  $G = \rho u$  を用いて書き変えると加速度項は

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho u^2 A)}{\partial z} &= \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{G^2 A}{\rho} \right) \\ &= G^2 A \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{1}{\rho} \right) + \frac{2GA}{\rho} \frac{\partial G}{\partial z} + \frac{G^2}{\rho} \frac{\partial A}{\partial z} \end{aligned} \quad (5.7)$$

(5.3) を (5.7) に代入すると

$$\frac{\partial(\rho u^2 A)}{\partial z} = G^2 A \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{1}{\rho} \right) - \frac{G^2}{\rho} \frac{\partial A}{\partial z} \quad (5.8)$$

これが (5.4) の左辺となる。質量速度 G は A の関数として質量保存則より

$$G = G_c A_c / A \quad (5.9)$$

で与えられ  $G_c$  は後に定める。

## 5.1.3 き裂に沿った圧力損失

(5.4) を出口 ( $z = L$ ) から入口 ( $z = 0$ ) まで  $z$  について積分し、き裂に沿った圧力損失を定める。

$$\Delta p_{total} = \Delta p_1 + \Delta p_{acc} + \Delta p_{area} + \Delta p_f \quad (5.10)$$

と書いて右辺の各成分を順次定めてみる。まず  $\Delta p_1$  は、入口損失であって (5.2) を用いれば

$$\Delta p_1 = \frac{G_0^2 v_{10}}{2 C^2} = \frac{G_c^2 v_{10}}{2 C^2} \left( \frac{A_c}{A_0} \right) \quad (5.11)$$

となる。

加速度項のうち密度変化による圧力降下は(5.4)の第1項で表示される。

$$\begin{aligned}\Delta p_{acc} &= \int_0^L G^2 \frac{d}{dz} (1/\rho) dz \\ &= \int_0^L G^2 \frac{d}{dz} \{(1-x)v_i + xv_g\} dz\end{aligned}\quad (5.12)$$

(5.12)において仮定(5.4)を考慮すれば  $dv_{10}/dz = 0$  となるので

$$\begin{aligned}\Delta p_{acc} &= \int_0^{12D} G^2 \frac{d v_{10}}{dz} dz + \int_{12D}^L G^2 \frac{d}{dz} \{(1-x)v_{10} + xv_g\} dz \\ &= \bar{G}^2 [(1-x)v_{10} + xv_g]_{v(12D)}^{(L)} \\ &= \bar{G}^2 \{(1-x_c)v_{10} + x_c v_{gc} - v_{10}\} \\ &= \bar{G}^2 \{x_c(v_{gc} - v_{10})\}\end{aligned}\quad (5.13)$$

(5.13)において  $x(z=12D) = 0$  および  $v_{10} = v_{10}$  (非圧縮性)を使用した。 $\bar{G}$  は平均値である

$$\bar{G}^2 = \frac{G_i^2 + G_c^2}{2} = \frac{G_c^2}{2} \{1 + (A_c/A_i)^2\} \quad (5.14)$$

よって(5.13)は最終的に

$$\Delta p_{acc} = \frac{G_c^2}{2} \{1 + (A_c/A_i)^2\} \{x_c(v_{gc} - v_{10})\} \quad (5.15)$$

となる。

次に加速度項のうち面積変化による圧力降下を求める(5.4)の第2項より

$$\begin{aligned}\Delta p_{area} &= \int_0^L \frac{G^2}{\rho A} \frac{dA}{dz} dz \\ &= \int_{A_0}^{A_c} \frac{G^2 v}{A} dA \\ &= G_c^2 A_c^2 \int_{A_0}^{A_c} \frac{v}{A^3} dA \\ &= \frac{G_c^2}{2} [v_{10} \{-1 + (\frac{A_c}{A_0})^2\} + \bar{x}(\bar{v}_g - v_{10}) \{-1 + (\frac{A_c}{A_i})^2\}]\end{aligned}\quad (5.16)$$

(5.16)の第3式において

$$\int_{A_0}^{A_c} \frac{v}{A^3} dA = \int_{A_0}^{A_i} \frac{v_{10}}{A^3} dA + \int_{A_i}^{A_c} \frac{v_{10} + x(v_g - v_{10})}{A^3} dA$$

とし、右辺第2項の積分計算において  $v_g(A), x(A)$  のままで積分不能なので

$$\bar{x} = \frac{\int_{12D}^L x dz}{\int_{12D}^L dz}$$

および

$$\bar{v}_g = \frac{v_{gc} + v_{gi}}{2} \quad (5.17)$$

なる平均的値を使用して  $x(v_g - v_{10})$  の項を積分の外に出した。

最後に管摩擦による圧力降下は (5.4) の第4項で表示され、

$$\begin{aligned} \Delta p_f &= \int_0^L \frac{f}{\rho} \frac{G^2}{2 D_h} dz \\ &= \frac{f}{2 D_h} \int_0^L G^2 v dz \\ &= \frac{f}{2 D_h} \int_0^L G^2 \{x v_g + (1-x)v_{10}\} dz \\ &= \frac{f \bar{G}^2}{2} [(\bar{x} \bar{v}_g + (1-\bar{x})v_{10})(L/D_h - 12)] \end{aligned} \quad (5.18)$$

となる。  $D_h$  は  $z$  に依存せず一定とみなしているので積分の外に出してある。

管摩擦係数  $f$  は

$$f = \tau / (\frac{1}{8} \rho U^2) \quad (5.19)$$

で与えられる。き裂の表面は十分荒いと考えられるので Nikradse の式 (4.25) を用いて評価する。

#### 5.1.4 出口圧力と臨界質量速度との関係

以上で (5.10) で定義した 4 個の圧力損失項が定まった。き裂出口における圧力は出口における質量速度の関数であるから

$$\begin{aligned} p_c &= p_0 - \Delta p_{total} = F(G_c) \\ &= p_0 - \frac{G_c^2}{2} \left[ \frac{v_{10}}{C^2} \left( \frac{A_c}{A_0} \right)^2 + \left\{ 1 + \left( \frac{A_c}{A_i} \right)^2 \right\} \{ x_c (v_{gc} - v_{10}) \} \right. \\ &\quad \left. + v_{10} \left\{ 1 - \left( \frac{A_c}{A_0} \right)^2 \right\} + \bar{x} (\bar{v}_g - v_{10}) \left\{ 1 - \left( \frac{A_c}{A_i} \right)^2 \right\} \right. \\ &\quad \left. + f \{ \bar{x} \bar{v}_g + (1-\bar{x})v_{10} \} (L/D_h - 12) \right] \end{aligned} \quad (5.20)$$

となる。 (5.20)において  $p_c$  を求めるには  $G_c$  が既知でなくてはならない。次章でこの  $G_c$  を求める。

5.2 2相臨界質量速度  $G_c^{(4)(5)(14)}$ 

$G_c$  を求めるに当って以下の仮定を設ける。

- (1) き裂中の流れは低クオリティ、高圧とする。
- (2) その結果、流れは均質となり  $u_g/u_1 = 1$  となる。
- (3)  $0 \leq L/D_h \leq 12$  では  $x = 0$

この仮定のもとに  $G_c$  は

$$G_c^2 = - \left[ x \frac{dv_g}{dp} + (v_g - v_1) \frac{dx}{dp} \right]_e^{-1} \quad (5.21)$$

と表わせる。ここで下添字 e は出口における状態量を示している。

$L/D_h \geq 12$  の領域では相間質量移行率が無視できなくなる。かつ Fig.5-1, Fig.5-2 に示したように圧力が急激に降下してくるようになる。Henry は一定面積流路内における 1 成分臨界流の相間質量移行率に関する実験式を提示した (11)。これを用いれば  $L/D_h \geq 12$  の領域において

$$\frac{dx}{dp} = N \frac{dx_e}{dp} \quad (5.22)$$

となる。ここに

$$N = 20.0 x_e \quad x_e < 0.05$$

$$N = 1.0 \quad x_e \geq 0.05$$

$$x_e = \left\{ \frac{s_0 - s_e}{s_g - s_1} \right\}_e$$

これを微分して

$$\frac{dx_e}{dp} = - \left[ \frac{(1-x) \frac{ds_1}{dp} + x \frac{ds_g}{dp}}{s_g - s_1} \right]_e \quad (5.23)$$

であって添字 E は熱力学的平衡状態を示しており、すべての状態量やその微分値は、上流側よりみ点状態を固定したままで熱力学的平衡条件から定まるこを示している。

さらに蒸気相の圧縮性は等温変化のもとで

$$\frac{dv_g}{dp} = - \frac{v_g}{p \gamma} \quad (5.24)$$

$$\gamma = c_p/c_v$$

で与えられる。(5.22), (5.24) を (5.21) に代入すれば

$$G_c^2 = \left[ x \frac{v_g}{p \gamma} - (v_g - v_{10}) N \frac{dx_e}{dp} \right]_e^{-1} \quad (5.25)$$

となる。

混相体のクオリティ  $x$  は指数関数的に緩和するとして

$$x = B (x_{LT} - x) d(z / D_h - 12) \quad (5.26)$$

としてみる。ここに

$$B = 0.0523$$

$$x_{LT} = N x_E \quad (5.27)$$

である。(5.26) を  $z = 12 D_h$  ( $x = 0$ ) と  $z = L$  ( $x = x_e$ ) との間で積分すると

$$x = x_{LT} [1 - \exp\{-\frac{B}{D_h}(z - L)\}] + x_e \exp\{-\frac{B}{D_h}(z - L)\} \quad (5.28)$$

となり、 $z = 12 D_h$  で  $x = 0$  なる条件を(5.28) に代入すれば

$$x_e = x_{LT} [1 - \exp\{-B(L / D_h - 12)\}] \quad (5.29)$$

が得られる。また(5.28) を  $z = 12 D_h$  と  $z = L$  の間で積分してこの区間における平均クオリティを求める

$$\begin{aligned} \bar{x} &= \frac{1}{L - 12 D_h} \int_{12 D_h}^L x dz \\ &= x_{LT} - \frac{x_e}{B} \frac{1}{L / D_h - 12} \end{aligned} \quad (5.30)$$

が得られる。

最終的に(5.20) と(5.25) とを同時に満足する  $G_c$  を見い出せばよい。それには出口圧力を変化させてくり返し計算で  $G_c$  をもとめる。必要となるデータはき裂形状とよどみ点圧力、温度である。

また流れが臨界流に達していない場合は单相流非圧縮性流れの式から

$$p_0 - p_B = \frac{1}{2} \rho u^2 \quad (5.31)$$

$$G = \rho u \sqrt{\dot{\epsilon}}$$

$$G = \sqrt{2 \rho (p_0 - p_B)} \quad (5.32)$$

となる。

## 6. 漏洩量算出法及び計算プログラム

### 6.1 MOODYモデルによる配管き裂からの漏洩量計算プログラム<sup>(15)(17)</sup>

配管に生じた円周き裂からの冷却材の漏洩量を計算するプログラムを作成した。臨界流量の計算には、MOODYの二相流モデルを用いている。

入力データは配管口径、肉厚、内圧、 $\sigma_y$ 、き裂角度内部流体のクオリティ、温度、曲げ応力、き裂部表面粗さである。

出力は、漏洩量円周き裂の開口変位、き裂開口面積エントロピ、エンタルピ、である。

Table 6.1 に例題計算による出力リストを示す。

計算手順を Fig. 6.3 及び Fig. 6.4 のフローチャートに示す。計算手順をフローチャートに従って説明すると次のようになる。

#### (1) \*<sup>1</sup>C O A, C O D 及び $\alpha_0$ の計算 (Fig. 6.1)

き裂用度及び配管口径、肉厚、 $\sigma_y$ 、 $P_b$ 、 $P_0$  を入力する事により C O A 及び C O D を Tada-Paris の式を用いて求め、管摩擦を考慮して流路条件  $\alpha_0$  を定める。

#### (2) 単位流路面積当りの臨界流量 G の算出

臨界流量の計算は、サブルーチン "MOODY" (Fig. 6.4) で行なう。サブルーチン "MOODY" は、臨界流量 G を与える事により、流路条件  $\alpha$  が得られるプログラムなので、 $\alpha_0$  となる時の G を挿み打ち法を用いて求める。

#### (3) 漏洩 W の計算

$W = C O A \cdot G$  から求める。

#### (4) サブルーチン "MOODY"

サブルーチン "MOODY" は、よどみ点圧力  $P_0$  と臨界流量 G を入力し、流路条件  $\alpha$  を求めるプログラムである。ある臨界流量 G とよどみ点圧力  $P_0$  を与えれば、流路に沿って  $\Delta P$  だけ圧力が下降した位置での速度比  $K_1$  が (4.26) 式より得られる。一方クオリティ X も (4.28式) より求まる。さらに、求められたクオリティから、その位置での状態量 T, V, h, S, Vm が求まる。

流路に沿って以上のパラメータが求まれば、(4.32) 式の右辺第 1 項および第 2 項の数値積分が実行できるので、流路に沿った  $fL/Dh$  が定まる。臨界条件は、(4.29) 式により求まる。エントロピが減少する事は實際にはありえないで  $S_{max}$  の位置を求めれば、その点が臨界流量 G の時の出口条件となる。(Fig. 6.2)

\* 1 : 説明文のかっこ内の番号はフローチャートの左端の番号に合わせてある。

Table 6.1 MOOD Y モデルによる配管き裂からの漏洩量計算  
プログラム 計算例・出力リスト

CASE 25 HOODY'S MODEL WATER SUS304 1GPM BWR 24B

DIAMETER= 609.60000 MM  
 THICKNESS= 31.00000 MM  
 SIGMAY= 34.15000 KG/MM<sup>2</sup>  
 E = 18000.00000  
 THETA = 17.35000 DEG  
 PRESS = 69.00000 KG/CM<sup>2</sup>  
 PB = 0.0 KG/MM<sup>2</sup>  
 PM = 2.88387 KG/MM<sup>2</sup>  
 PB+PM = 2.88387 KG/MM<sup>2</sup>

I= 346 ENTROPY MAX DOES NOT EXIST

I= 346 ENTROPY MAX DOES NOT EXIST

I= 346 ENTROPY MAX DOES NOT EXIST

QX0= 0.0  
 EPS= 0.03000 MM  
 CDEPTH= 31.00000 MM  
 DP = 0.20000 KG/CM<sup>2</sup>  
 COD= 0.07047 MM  
 ALPHAO= 54.25319  
 ALPHA= 54.25434  
 G = 6733.10808 KG/M<sup>2</sup>S  
 CDA= 9.69731 MM<sup>2</sup>  
 W = 0.06529 KG/S  
 W = 1.04526 GPH AT 60 DEG

P0 = 700330.000  
 T0 = 284.504  
 G = 6733.10808  
 QX0 = 0.0  
 DP = 2000.000  
 PMIN= 10330.000  
 PC = 90330.000  
 SMAX= 0.76528  
 ALPHA= 54.254

NO	PRESS	QUALITY	V	ENT H	ENT HL	ENT HG	ENT S	ENT SL	ENT SG	VL	VG	VM
1	698330.	0.001	0.1360-02	301.07	300.84	662.88	0.743	0.742	1.392	0.135D-02	0.281D-01	0.135D-02
2	696330.	0.001	0.1380-02	301.07	300.60	662.94	0.743	0.742	1.392	0.135D-02	0.281D-01	0.136D-02
3	694330.	0.002	0.1400-02	301.07	300.35	662.99	0.743	0.742	1.392	0.135D-02	0.282D-01	0.137D-02
4	692330.	0.003	0.1420-02	301.07	300.11	663.05	0.743	0.741	1.393	0.134D-02	0.283D-01	0.138D-02
5	690330.	0.003	0.143D-02	301.07	299.86	663.11	0.743	0.741	1.393	0.134D-02	0.284D-01	0.138D-02
6	688330.	0.004	0.1450-02	301.07	299.61	663.17	0.743	0.740	1.393	0.134D-02	0.285D-01	0.139D-02
7	686330.	0.005	0.147D-02	301.07	299.37	663.22	0.743	0.740	1.394	0.134D-02	0.286D-01	0.140D-02
8	684330.	0.005	0.149D-02	301.07	299.12	663.28	0.743	0.739	1.394	0.134D-02	0.287D-01	0.140D-02
9	682330.	0.006	0.151D-02	301.07	298.87	663.33	0.743	0.739	1.395	0.134D-02	0.288D-01	0.141D-02
10	680330.	0.007	0.153D-02	301.07	298.63	663.39	0.743	0.738	1.395	0.134D-02	0.289D-01	0.142D-02
11	678330.	0.007	0.154D-02	301.07	298.38	663.45	0.743	0.738	1.395	0.134D-02	0.290D-01	0.143D-02
12	676330.	0.008	0.156D-02	301.07	298.13	663.50	0.743	0.738	1.396	0.134D-02	0.291D-01	0.143D-02
13	674330.	0.009	0.158D-02	301.07	297.88	663.56	0.743	0.737	1.396	0.134D-02	0.292D-01	0.144D-02
14	672330.	0.009	0.160D-02	301.07	297.63	663.61	0.743	0.737	1.396	0.134D-02	0.293D-01	0.145D-02
15	670330.	0.010	0.162D-02	301.07	297.38	663.67	0.743	0.736	1.397	0.134D-02	0.294D-01	0.146D-02
16	668330.	0.011	0.164D-02	301.07	297.13	663.72	0.743	0.736	1.397	0.134D-02	0.294D-01	0.146D-02
17	666330.	0.011	0.166D-02	301.07	296.88	663.78	0.743	0.735	1.397	0.134D-02	0.295D-01	0.147D-02
18	664330.	0.012	0.168D-02	301.07	296.63	663.83	0.743	0.735	1.398	0.134D-02	0.296D-01	0.148D-02
19	662330.	0.013	0.170D-02	301.07	296.38	663.89	0.743	0.735	1.398	0.133D-02	0.297D-01	0.149D-02
20	660330.	0.013	0.172D-02	301.07	296.13	663.94	0.743	0.734	1.398	0.133D-02	0.298D-01	0.149D-02
21	658330.	0.014	0.174D-02	301.07	295.88	663.99	0.743	0.734	1.399	0.133D-02	0.299D-01	0.150D-02
22	656330.	0.015	0.176D-02	301.07	295.62	664.05	0.743	0.733	1.399	0.133D-02	0.300D-01	0.151D-02
23	654330.	0.015	0.178D-02	301.07	295.37	664.10	0.743	0.733	1.399	0.133D-02	0.301D-01	0.152D-02
24	652330.	0.016	0.180D-02	301.07	295.12	664.15	0.743	0.732	1.400	0.133D-02	0.302D-01	0.153D-02
25	650330.	0.017	0.182D-02	301.07	294.86	664.21	0.743	0.732	1.400	0.133D-02	0.303D-01	0.153D-02
26	648330.	0.017	0.184D-02	301.07	294.61	664.26	0.743	0.731	1.400	0.133D-02	0.304D-01	0.154D-02
27	646330.	0.018	0.186D-02	301.07	294.35	664.31	0.743	0.731	1.401	0.133D-02	0.306D-01	0.155D-02
28	644330.	0.019	0.188D-02	301.07	294.10	664.36	0.743	0.731	1.401	0.133D-02	0.307D-01	0.156D-02
29	642330.	0.020	0.190D-02	301.07	293.84	664.42	0.743	0.730	1.401	0.133D-02	0.308D-01	0.157D-02
30	640330.	0.020	0.192D-02	301.07	293.59	664.47	0.743	0.730	1.402	0.133D-02	0.309D-01	0.158D-02
31	638330.	0.021	0.195D-02	301.07	293.33	664.52	0.743	0.729	1.402	0.133D-02	0.310D-01	0.158D-02
32	636330.	0.022	0.197D-02	301.07	293.07	664.57	0.743	0.729	1.403	0.133D-02	0.311D-01	0.159D-02
33	634330.	0.022	0.199D-02	301.07	292.82	664.62	0.743	0.728	1.403	0.133D-02	0.312D-01	0.160D-02
34	632330.	0.023	0.201D-02	301.07	292.56	664.68	0.743	0.728	1.403	0.133D-02	0.313D-01	0.161D-02

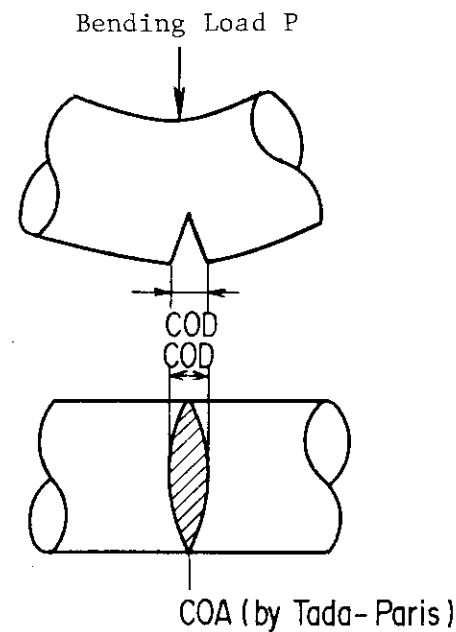


Fig. 6.1 Circumferential Crack and  
Crack opening area

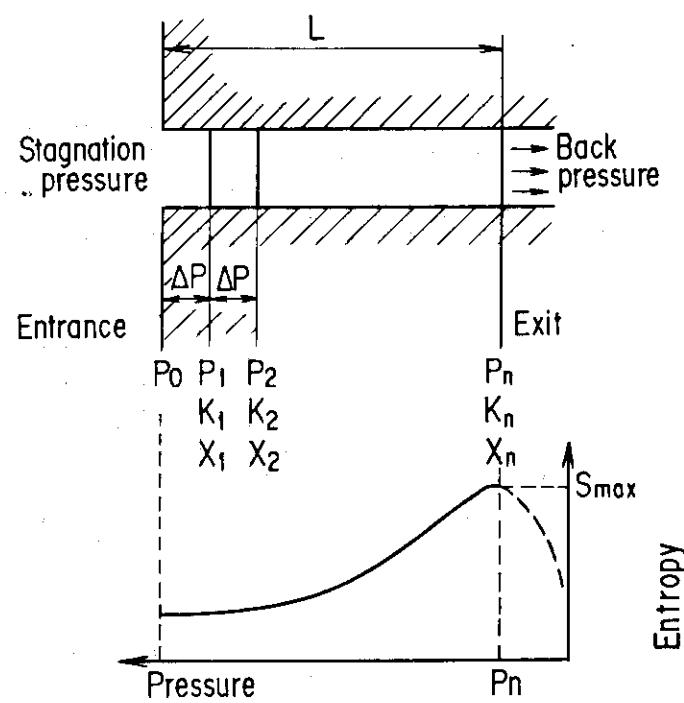


Fig. 6.2 Entropy and pressure

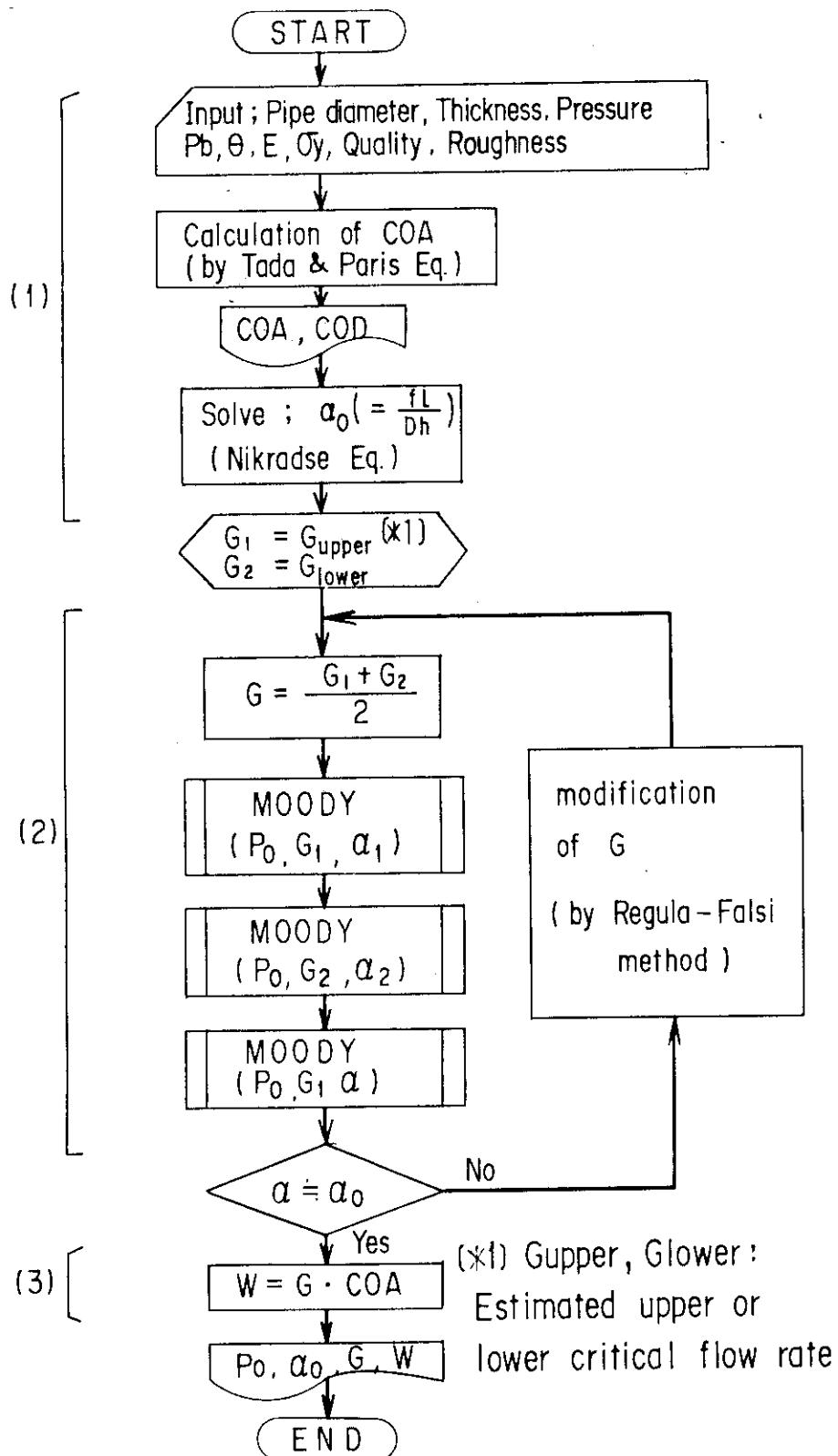


Fig. 6.3 Flow diagram to solve the leak rate through a pipe crack  
(Moody Model)

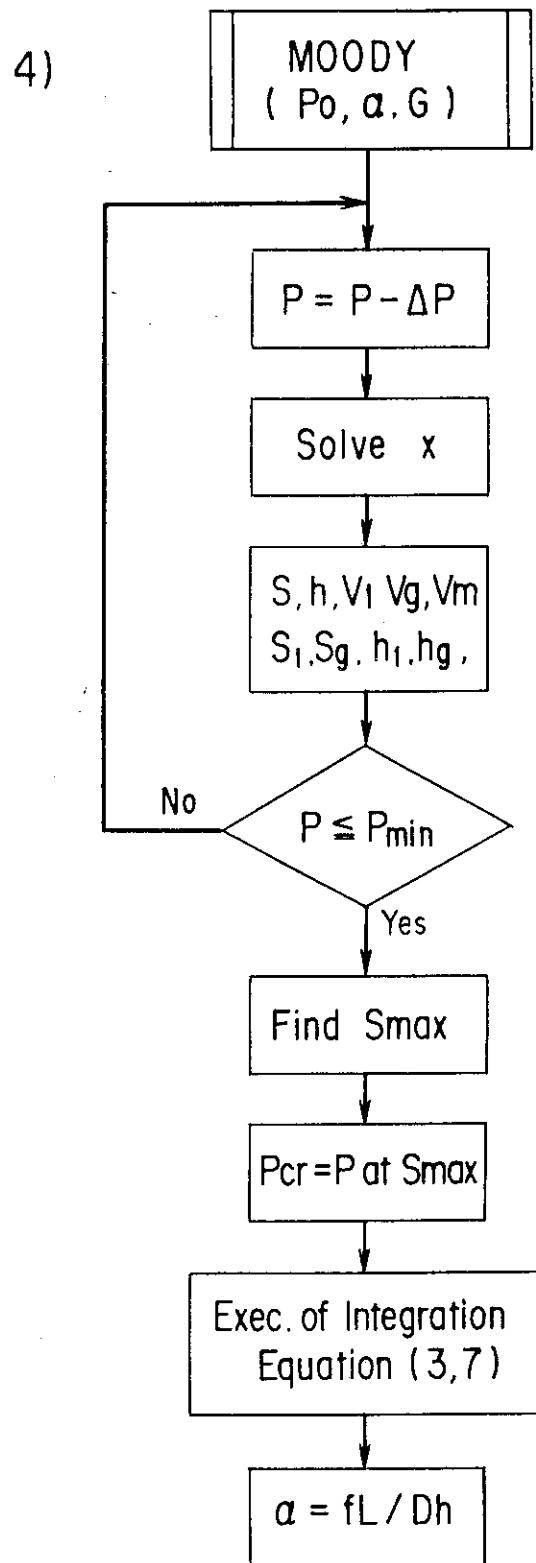


Fig. 6.4 Flow diagram to calculate  
 $fL/Dh$  for given  $G_c$

## 6.2 HENRYモデルによる配管き裂からの漏洩量計算プログラム

このプログラムはHENRYの臨界流モデルを用い同時にTada-ParisによるCOAを評価することによってき裂からの漏洩量を計算する。入力データは配管の外径、肉厚、 $\sigma_y$ 、き裂角度、き裂部表面粗さ、曲げ応力、内圧及び背圧である。また、出力は、亀裂部からの臨界流量、出口における流体のクオリティ、漏洩量、COD、COAである。なお、このプログラムでは、MOODYのプログラムとは異なり、配管壁内でのき裂の折れ曲がりによる圧力損失効果をも考慮する事ができる。(Fig. 6.6)

Table 6.2 に例題計算による出力リストを示す。

また、計算手順を示したフローチャートをFig. 6.5 に示す。

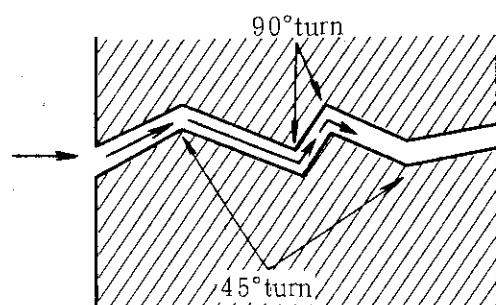


Fig. 6.6 Turns in the crack path

Table 6.2 HENRY の臨界流モデルによる配管き裂からの漏洩量計算  
プログラム計算例・出力リスト

CASE 1 ASS-1 4B SCH 80 SUS304 DWR SATURATED WATER

DIAMETER= 112.70000 MM  
 THICKNESS= 8.00000 MM  
 SIGMAY= 34.15000 KG/MM<sup>2</sup>  
 E = 18000.00000  
 THETA = 42.00000 DEG  
 PRESS = 70.36600 KG/CM<sup>2</sup>G  
 PB = 0.0 KG/MM<sup>2</sup>  
 PM = 1.74007 KG/MM<sup>2</sup>  
 PB+PM = 1.74007 KG/MM<sup>2</sup>

S.I.F AND CRACK OPENING AREA BY PARIS-TADA EQ.  
 THETA TETAEFF PM PB FT FB SIFT SIFB SIF  
 0.7330 0.7356 1.7401 0.0 1.653 1.531 31.467 0.0 31.4668

IT IB AREAT AREAB AREA COD  
 2.10769 2.01378 1.7275 0.0 1.7275 0.028879

\*\*\* STAGNATION PROPERTIES \*\*\*

PRESSURE(P0)= 71. KGF/CM<sup>2</sup>A  
 TEMPERATURE(T0)= 285.8 C  
 INPUT INDICATOR(IN)= 2 ---> INITIALLY SATURATED LIQUID, INPUT PRESSURE ONLY  
 BACK PRESSURE(PD)= 1.0 KGF/CM<sup>2</sup>A

\*\*\*\*\* CRACK GEOMETRY \*\*\*\*\*

2C= 76.16269 MM  
 EQUIVARENT COD= 0.02268 MM  
 DEPTH= 8.80 MM  
 HYDR. DIA.= 0.04535 MM  
 DEPTH/HYDR. DIA.= 194.0  
 ROUGHNESS HEIGHT= 0.30000-01 MM  
 AREA= 1.7275 MM\*\*2  
 PERIMETER= 152.37 MM  
 AREA RATIO(AE/A0)= 1.00  
 NO. OF 90 DEGREE TURN= 0  
 NO. OF 45 DEGREE TURN= 0  
 THRESHOLD VALUE = 0.00100

\*\*\*\*\* OUTPUT \*\*\*\*\*

CRITICAL MASS FLUX = 0.5224D+03 KG/MM<sup>2</sup>/SEC  
 = 0.8280D-02 GPM/MM<sup>2</sup>  
 LEAK RATE = 0.9025D-03 KG/SEC = 0.01430 GPM  
 PRESSURE AT EXIT PLANE = 1.1 KGF/CM<sup>2</sup>  
 QUALITY AT EXIT PLANE = 0.2991  
 QUALITY AT BACK PRESSURE = 0.3012

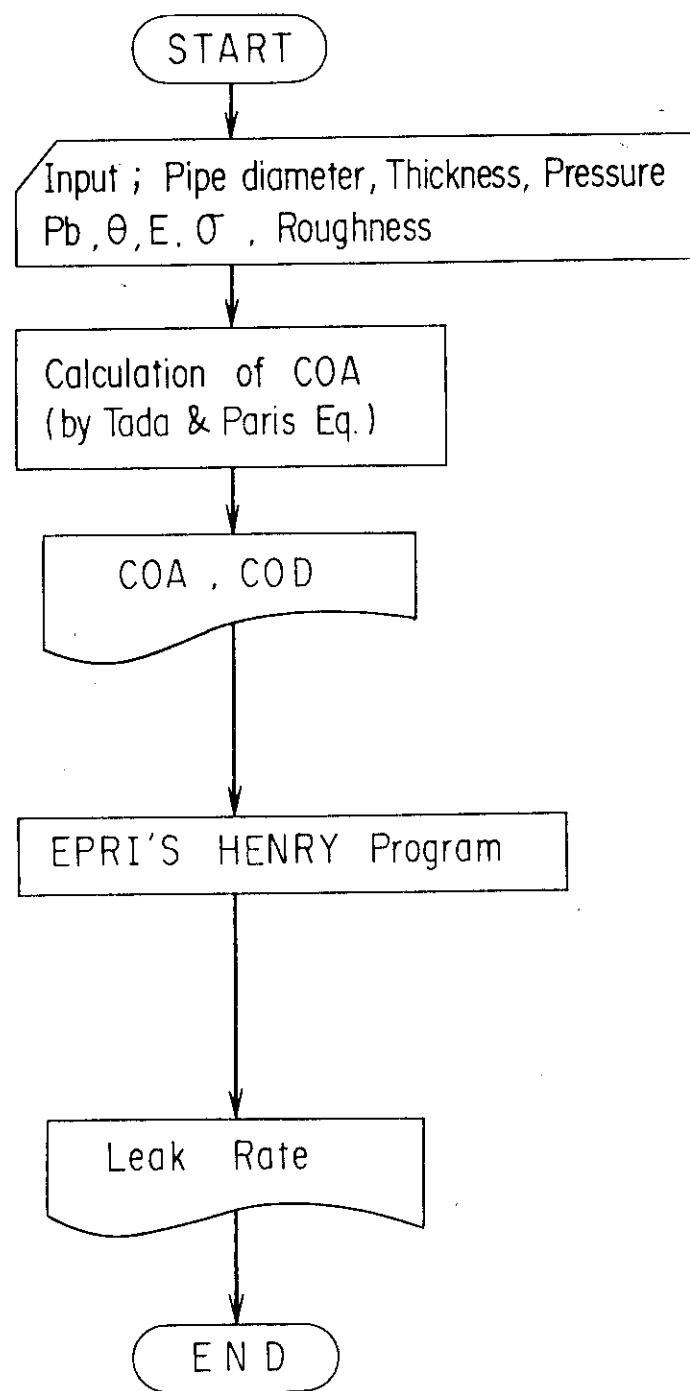


Fig. 6.5 Flow diagram to solve the leak rate through a pipe crack (Henry Model)

### 6.3 与えられた漏洩量を有する配管き裂角度の計算プログラム (MODYの二相流モデルによる計算)

このプログラムは 6.1, 6.2 とは逆に漏洩量を既知としてそれを与えるき裂寸法を求めるプログラムである。臨界流モデルとしては MODY モデルを使用した。

入力データは、配管口径、肉厚、内圧、 $\sigma_y$ 、内部流体のクオリティ、温度、曲げ応力、き裂部表面粗さ、漏洩量である。

出力は、円周き裂のき裂角度、円周き裂の開口変位、開口面積、エントロピー、エンタルピである。

Table 6.3 に例題計算による出力リストを示す。

計算手順を示したフローチャートを Fig. 6.7 に示す。

Table 6.3 与えられた漏洩量を有する配管き裂角度の計算プログラム  
(MOODYの二相流モデルによる計算) 計算例

CASE 98 MOODY PB=0 STEAM STS42 1GPM BWR 20B SCH160

DIAMETER= 508.00000 MM  
THICKNESS= 50.00000 MM  
SIGMAY= 48.30000 KG/MM<sup>2</sup>  
E = 18200.00000  
THETA = 45.20276 DEG  
PRESS = 69.00000 KG/CM<sup>2</sup>  
PB = 0.0 KG/MM<sup>2</sup>  
PM = 1.25393 KG/MM<sup>2</sup>  
PB+PM = 1.25393 KG/MM<sup>2</sup>

QX0= 0.99990  
EPS= 0.03000 MM  
CDEPTH= 50.00000 MM  
DP = 0.20000 KG/CM<sup>2</sup>  
COD= 0.10332 MM  
ALPHAO= 45.42555  
ALPHA1= 45.44380  
G = 2130.44961 KG/M<sup>2</sup>S  
COA= 29.32048 MM<sup>2</sup>  
W = 0.06247 KG/S  
V = 1.00000 GPM AT 60 DEG

S.I.F AND CRACK OPENING AREA BY PARIS-TADA EQ.  
THETA TETAEFF PM PB FT FB SIFT SIFB SIF  
0.7940 0.7948 1.2539 0.0 1.739 1.590 52.119 0.0 52.1193

NO	PRESS	QUALITY	V	AREAT		AREAB		AREA		VG	VM					
				ENT	H	ENT	HL	ENT	IG	ENT	S	EN	SL	ENT	SG	VL
1	698330.	0.999	0.2800-01	662.36	300.84	662.88	1.391	0.742		1.392	0.1350-02	0.2810-01	0.2800-01			
2	698330.	0.998	0.2810-01	662.36	300.60	662.94	1.391	0.742		1.392	0.1350-02	0.2810-01	0.2810-01			
3	694330.	0.998	0.2820-01	662.36	300.35	662.99	1.391	0.742		1.392	0.1350-02	0.2820-01	0.2820-01			
4	692330.	0.998	0.2830-01	662.35	300.11	663.05	1.392	0.741		1.393	0.134D-02	0.2830-01	0.2820-01			
5	690330.	0.998	0.2840-01	662.35	299.86	663.11	1.392	0.741		1.393	0.134D-02	0.2840-01	0.2830-01			
6	688330.	0.998	0.2840-01	662.35	299.61	663.17	1.392	0.740		1.393	0.134D-02	0.2850-01	0.2840-01			
7	686330.	0.998	0.2850-01	662.35	299.37	663.22	1.392	0.740		1.394	0.134D-02	0.2860-01	0.2850-01			
8	684330.	0.997	0.2860-01	662.34	299.12	663.28	1.392	0.739		1.394	0.134D-02	0.2870-01	0.2860-01			
9	682330.	0.997	0.2870-01	662.34	298.87	663.33	1.393	0.739		1.395	0.134D-02	0.2880-01	0.2870-01			
10	680330.	0.997	0.2880-01	662.34	298.63	663.39	1.393	0.738		1.395	0.134D-02	0.2890-01	0.2870-01			
11	678330.	0.997	0.2890-01	662.33	298.38	663.45	1.393	0.738		1.395	0.134D-02	0.2900-01	0.2880-01			
12	676330.	0.997	0.2900-01	662.33	298.13	663.50	1.393	0.738		1.396	0.134D-02	0.2910-01	0.2890-01			
13	674330.	0.997	0.2910-01	662.33	297.88	663.56	1.394	0.737		1.396	0.134D-02	0.2920-01	0.2900-01			
14	672330.	0.996	0.2920-01	662.33	297.63	663.61	1.394	0.737		1.396	0.134D-02	0.2930-01	0.2910-01			
15	670330.	0.996	0.2920-01	662.32	297.38	663.67	1.394	0.736		1.397	0.134D-02	0.2940-01	0.2920-01			
16	668330.	0.996	0.2930-01	662.32	297.13	663.72	1.394	0.736		1.397	0.134D-02	0.2940-01	0.2930-01			
17	666330.	0.996	0.2940-01	662.32	296.88	663.78	1.395	0.735		1.397	0.134D-02	0.2950-01	0.2940-01			
18	664330.	0.996	0.2950-01	662.31	296.63	663.83	1.395	0.735		1.398	0.134D-02	0.2960-01	0.2950-01			
19	662330.	0.996	0.2960-01	662.31	296.38	663.89	1.395	0.735		1.398	0.133D-02	0.2970-01	0.2960-01			
20	660330.	0.996	0.2970-01	662.31	296.13	663.94	1.395	0.734		1.398	0.133D-02	0.2980-01	0.2960-01			
21	658330.	0.995	0.2980-01	662.31	295.88	663.99	1.396	0.734		1.399	0.133D-02	0.2990-01	0.2980-01			
22	656330.	0.995	0.2990-01	662.30	295.62	664.05	1.396	0.733		1.399	0.133D-02	0.3000-01	0.2980-01			
23	654330.	0.995	0.3000-01	662.30	295.37	664.10	1.396	0.733		1.399	0.133D-02	0.3010-01	0.2990-01			
24	652330.	0.995	0.3010-01	662.30	295.12	664.15	1.396	0.732		1.400	0.133D-02	0.3020-01	0.3000-01			
25	650330.	0.995	0.3020-01	662.29	294.86	664.21	1.397	0.732		1.400	0.133D-02	0.3030-01	0.3010-01			
26	648330.	0.995	0.3030-01	662.29	294.61	664.26	1.397	0.731		1.400	0.133D-02	0.3040-01	0.3020-01			
27	646330.	0.995	0.3040-01	662.29	294.35	664.31	1.397	0.731		1.401	0.133D-02	0.3060-01	0.3030-01			
28	644330.	0.994	0.3050-01	662.28	294.10	664.36	1.397	0.731		1.401	0.133D-02	0.3070-01	0.3040-01			
29	642330.	0.994	0.3060-01	662.28	293.84	664.41	1.398	0.730		1.401	0.133D-02	0.3080-01	0.3050-01			
30	640330.	0.994	0.3070-01	662.28	293.59	664.47	1.398	0.730		1.402	0.133D-02	0.3090-01	0.3060-01			
31	638330.	0.994	0.3080-01	662.27	293.33	664.52	1.398	0.729		1.402	0.133D-02	0.3100-01	0.3070-01			
32	636330.	0.994	0.3090-01	662.27	293.07	664.57	1.398	0.729		1.403	0.133D-02	0.3110-01	0.3080-01			
33	634330.	0.994	0.3100-01	662.27	292.82	664.62	1.399	0.728		1.403	0.133D-02	0.3120-01	0.3090-01			
34	632330.	0.994	0.3110-01	662.26	292.56	664.68	1.399	0.728		1.403	0.133D-02	0.3130-01	0.3110-01			
35	630330.	0.993	0.3120-01	662.26	292.30	664.73	1.399	0.727		1.404	0.132D-02	0.3140-01	0.3120-01			
36	628330.	0.993	0.3130-01	662.26	292.04	664.78	1.399	0.727		1.404	0.132D-02	0.3150-01	0.3120-01			
37	626330.	0.993	0.3140-01	662.25	291.78	664.83	1.400	0.726		1.404	0.132D-02	0.3160-01	0.3130-01			
38	624330.	0.993	0.3150-01	662.25	291.52	664.88	1.400	0.726		1.405	0.132D-02	0.3170-01	0.3140-01			
39	622330.	0.993	0.3160-01	662.25	291.26	664.93	1.400	0.726		1.405	0.132D-02	0.3180-01	0.3150-01			
40	620330.	0.993	0.3170-01	662.24	291.00	664.98	1.400	0.725		1.405	0.132D-02	0.3200-01	0.3160-01			
41	618330.	0.993	0.3180-01	662.24	290.74	665.03	1.401	0.725		1.406	0.132D-02	0.3210-01	0.3170-01			
42	616330.	0.992	0.3190-01	662.24	290.48	665.08	1.401	0.724		1.406	0.132D-02	0.3220-01	0.3180-01			
43	614330.	0.992	0.3210-01	662.23	290.21	665.13	1.401	0.724		1.407	0.132D-02	0.3230-01	0.3190-01			
44	612330.	0.992	0.3220-01	662.23	289.95	665.18	1.402	0.723		1.407	0.132D-02	0.3240-01	0.3200-01			
45	610330.	0.992	0.3230-01	662.22	289.69	665.22	1.402	0.723		1.407	0.132D-02	0.3250-01	0.3210-01			

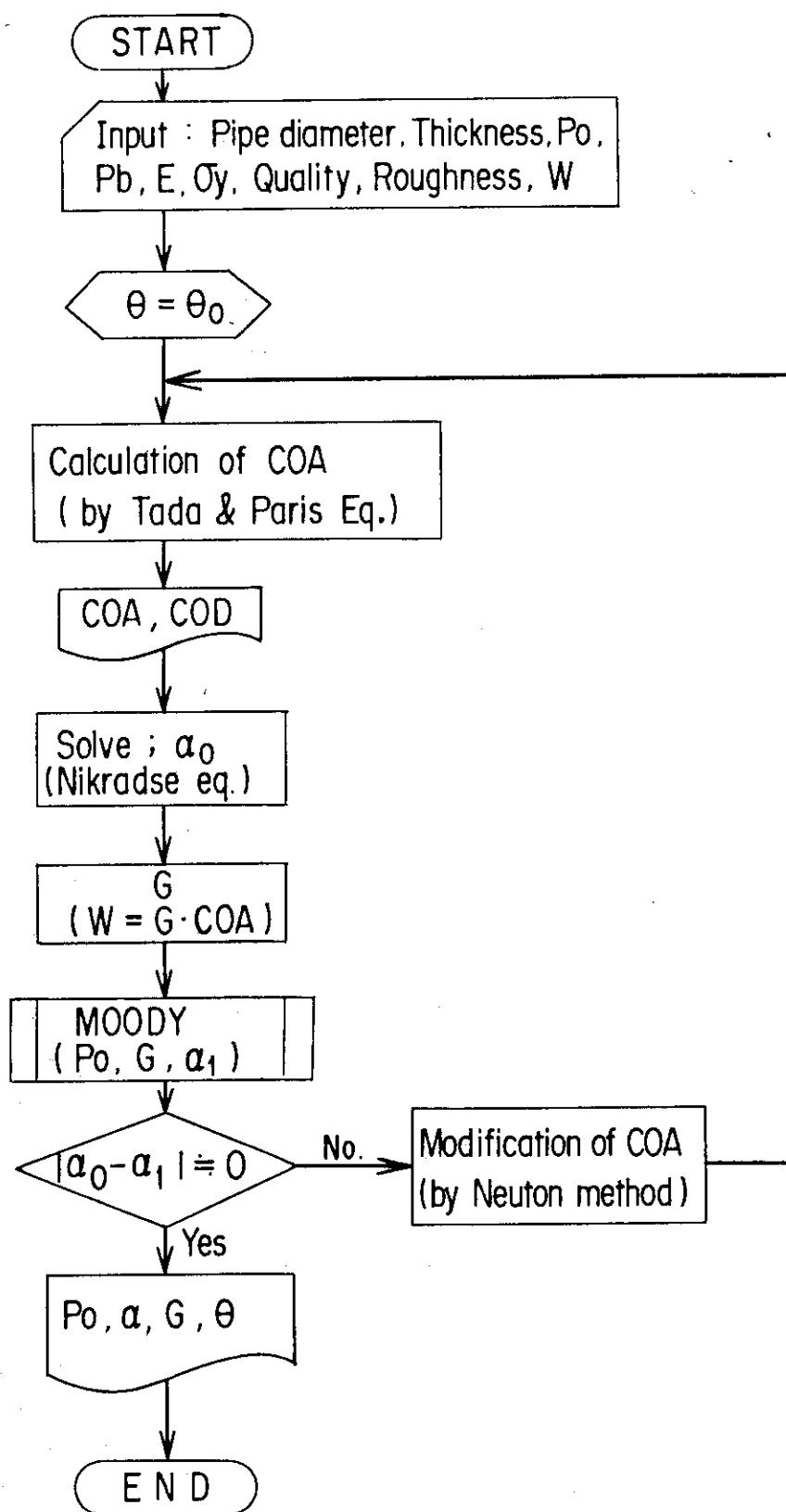


Fig. 6.7 Flow diagram to solve the crack angle  
(Moody Model)

#### 6.4 与えられた漏洩量を有する配管き裂角度の計算プログラム（HENRYの臨界流モデルによる計算）

6.3と同様、漏洩量を入力する事により、それを与えるき裂の大きさを求めるプログラムである。この時、配管の外径・肉厚・ $\sigma_y$ 、き裂部表面粗さ、曲げ応力、内圧、背圧、配管壁内部でのき裂の折れ曲がり数も同時に入力する。

Table 6.4に例題計算による出力リストを示す。

計算手順を示したフローチャートをFig. 6.8に示す。

Table 6.4 与えられた漏洩量を有する配管き裂角度の計算プログラム  
(HENRYの臨界流モデルによる計算) 計算例

CASE 8 HENRY PB=0 SATURATED WATER STS42 5GPM BWR 288 SCH80

S.I.F AND CRACK OPENING AREA BY PARIS-TADA EQ.  
THETA TETAEFF PM PD PI FB SIFT SIFB SIF  
0.5527 0.5548 2.9279 0.0 1.434 1.371 101.690 0.0 101.6896

IT	IB	AREAT	AREAB	AREA	COD
0.98483	0.95829	56.7790	0.0	56.7790	0.193618

DIAMETER= 711.20000 MM  
THICKNESS= 35.70000 MM  
SIGMAY= 48.30000 KG/MM<sup>2</sup>  
E = 18200.00000  
THETA = 31.67011 DEG  
PRESS = 68.99600 KG/CM<sup>2</sup>G  
PB = 0.0 KG/MM<sup>2</sup>  
PM = 2.92792 KG/MM<sup>2</sup>  
PB+PM = 2.92792 KG/MM<sup>2</sup>

\*\*\*\*\* HENRY MODEL \*\*\*\*\*

\*\* STAGNATION PROPERTIES \*\*\*

PRESSURE(P0)= 70. KGF/CM<sup>2A</sup>

TEMPERATURE(T0)= 284.5 C

INPUT INDICATOR(IN)= 2 --> INITIALLY SATURATED LIQUID, INPUT PRESSURE ONLY

BACK PRESSURE(PB)= 1.0 KGF/CM<sup>2A</sup>

\*\*\*\*\* CRACK GEOMETRY \*\*\*\*\*

ZC= 373.38108 MM

EQUIVARIANT COD= 0.19362 MM

DEPTH= 35.70 MM

HYDR. DIA.= 0.30401 MM

DEPTH/HYDR. DIA.= 117.4

ROUGHNESS HEIGHT= 0.30000-01 MM

AREA= 56.7790 MM\*\*2

PERIMETER= 747.07 MM

AREA RATIO(AE/A0)= 1.00

NO. OF 90 DEGREE TURN= 0

NO. OF 45 DEGREE TURN= 0

THRESHOLD VALUE = 0.00500

\*\*\*\*\* OUTPUT \*\*\*\*\*

CRITICAL MASS FLUX = 0.5556D+04 KG/M\*\*2/SEC

= 0.8807D-01 GPM/MM\*\*2

LEAK RATE = 0.3155D+00 KG/SEC = 5.00031 GPM

PRESSURE AT EXIT PLANE = 11.7 KGF/CM<sup>2</sup>

QUALITY AT EXIT PLANE = 0.2096

QUALITY AT BACK PRESSURE = 0.3491

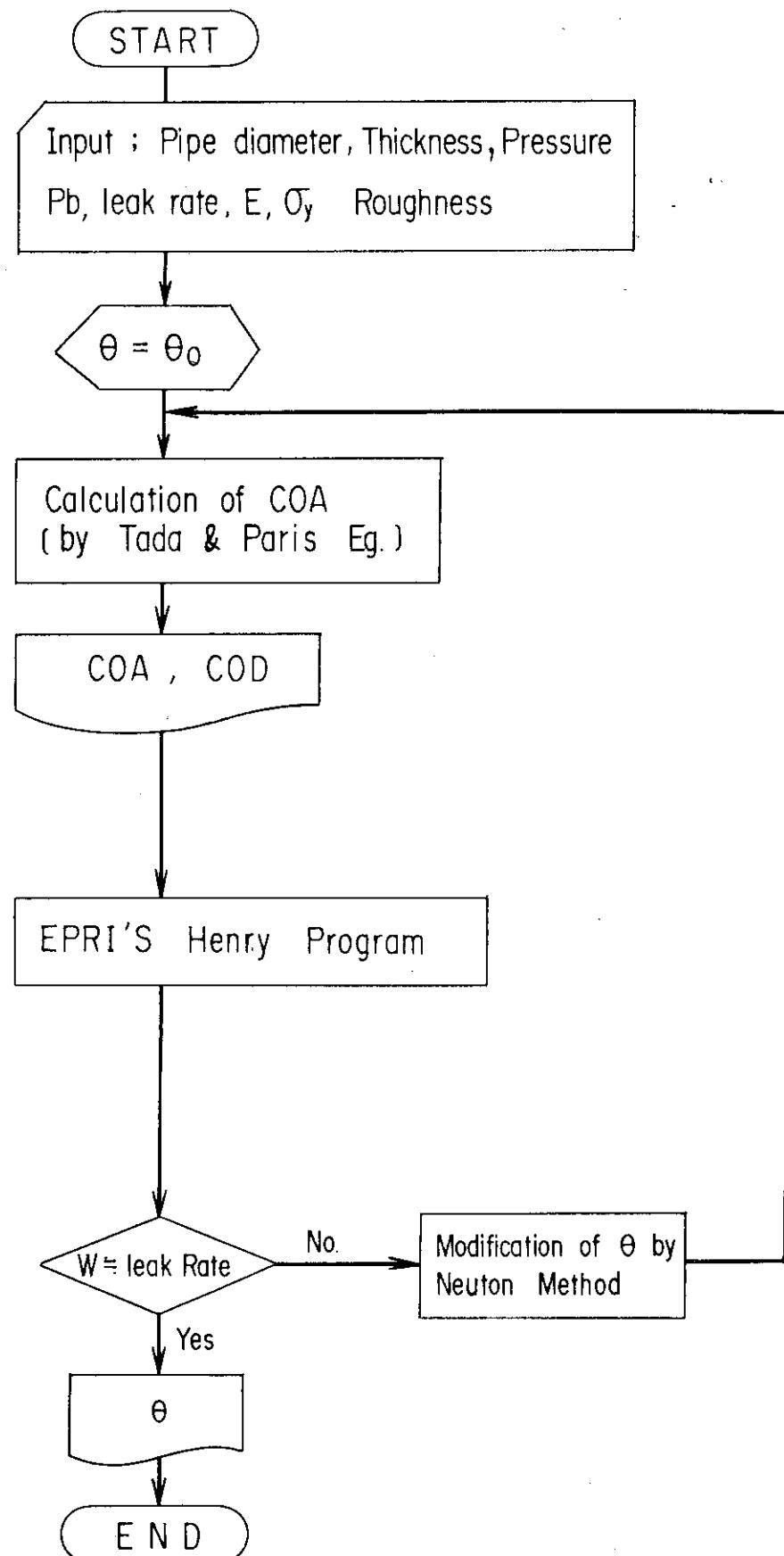


Fig. 6.8 Flow diagram to solve the crack angle (Henry Model)

## 6.5 長方形スリットからの漏洩量計算プログラム (MOODYの二相流モデルによる計算)

このプログラムは、長方形スリットの長さ、開口変位、表面粗さ、内圧を入力する事により、スリットから生じる内部流体の漏洩量を計算するプログラムである。漏洩率の計算にはMOODYの二相流モデルを用いている。

Table 6.5 に例題計算による出力リストを示す。

計算手順を示したフローチャートをFig. 6.10に示す。

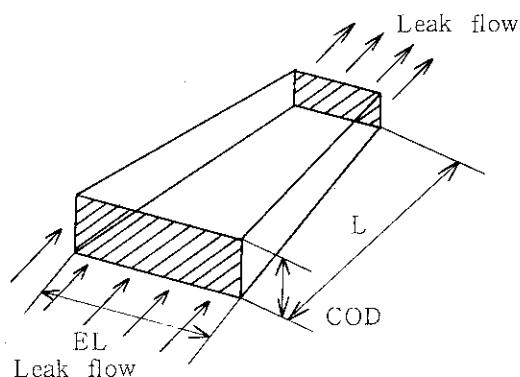


Fig. 6.9 Slit Model

Table 6.5 長方形スリットからの漏洩量計算プログラム  
(MOODYの二相流モデル) の計算例

## NO 1 MOODY' BASIC

LENGTH(2C)= 40.00000 MM  
PRESSURE = 70.00000KGF/CM2

I= 351 ENTROPY MAX DOES NOT EXIST  
I= 351 ENTROPY MAX DOES NOT EXIST  
I= 351 ENTROPY MAX DOES NOT EXIST  
I= 351 ENTROPY MAX DOES NOT EXIST

QX0= 0.0  
EPS= 0.03000 MM  
CDEPTH= 37.00000 MM  
DP = 0.20000 KG/CM2  
COD= 0.10000 MM  
ALPHAO= 77.59198  
ALPHA= 77.59002  
G = 5718.60155 KG/M2S  
COA= 4.00000 MM2  
W = 0.02287 KG/S  
W = 0.36619 GPM AT 60 DEG

P0 = 710330.000  
T0 = 285.460  
G = 5718.60155  
QX0 = 0.0  
DP = 2000.000  
PMIN= 10330.000  
PC = 78330.000  
SHAX= 0.77118  
ALPHA= 77.590

NO	PRESS	QUALITY	V	ENT H	ENT III	ENT HG	ENT S	EN SL	ENT SG	VL	VG	VM
1	708330.	0.001	0.137D-02	302.29	302.06	662.59	0.745	0.744	1.390	0.135D-02	0.276D-01	0.136D-02
2	706330.	0.001	0.138D-02	302.29	301.81	662.65	0.745	0.744	1.390	0.135D-02	0.277D-01	0.136D-02
3	704330.	0.002	0.140D-02	302.29	301.57	662.71	0.745	0.744	1.391	0.135D-02	0.278D-01	0.137D-02
4	702330.	0.003	0.142D-02	302.29	301.33	662.76	0.745	0.743	1.391	0.135D-02	0.279D-01	0.138D-02
5	700330.	0.003	0.144D-02	302.29	301.08	662.82	0.745	0.743	1.391	0.135D-02	0.280D-01	0.138D-02
6	698330.	0.004	0.145D-02	302.29	300.84	662.88	0.745	0.742	1.392	0.135D-02	0.281D-01	0.139D-02
7	696330.	0.005	0.147D-02	302.29	300.60	662.94	0.745	0.742	1.392	0.135D-02	0.281D-01	0.140D-02
8	694330.	0.005	0.149D-02	302.29	300.35	662.99	0.745	0.742	1.392	0.135D-02	0.282D-01	0.141D-02
9	692330.	0.006	0.151D-02	302.29	300.11	663.05	0.745	0.741	1.393	0.134D-02	0.283D-01	0.141D-02
10	690330.	0.007	0.152D-02	302.29	299.86	663.11	0.745	0.741	1.393	0.134D-02	0.284D-01	0.142D-02
11	688330.	0.007	0.154D-02	302.29	299.51	663.17	0.745	0.740	1.393	0.134D-02	0.285D-01	0.143D-02
12	686330.	0.008	0.156D-02	302.29	299.37	663.22	0.745	0.740	1.394	0.134D-02	0.286D-01	0.143D-02
13	684330.	0.009	0.158D-02	302.29	299.12	663.28	0.745	0.739	1.394	0.134D-02	0.287D-01	0.144D-02
14	682330.	0.009	0.160D-02	302.29	298.87	663.33	0.745	0.739	1.395	0.134D-02	0.288D-01	0.144D-02
15	680330.	0.010	0.162D-02	302.29	298.63	663.39	0.745	0.738	1.395	0.134D-02	0.289D-01	0.146D-02
16	678330.	0.011	0.164D-02	302.29	298.30	663.45	0.745	0.738	1.395	0.134D-02	0.290D-01	0.146D-02
17	676330.	0.011	0.165D-02	302.29	298.13	663.50	0.745	0.738	1.396	0.134D-02	0.291D-01	0.147D-02
18	674330.	0.012	0.167D-02	302.29	297.88	663.56	0.745	0.737	1.396	0.134D-02	0.292D-01	0.148D-02
19	672330.	0.013	0.169D-02	302.29	297.63	663.61	0.745	0.737	1.396	0.134D-02	0.293D-01	0.149D-02
20	670330.	0.013	0.171D-02	302.29	297.38	663.67	0.745	0.736	1.397	0.134D-02	0.294D-01	0.150D-02
21	668330.	0.014	0.173D-02	302.29	297.13	663.72	0.745	0.736	1.397	0.134D-02	0.294D-01	0.151D-02
22	666330.	0.015	0.175D-02	302.29	296.88	663.78	0.745	0.735	1.397	0.134D-02	0.295D-01	0.151D-02
23	664330.	0.015	0.177D-02	302.29	296.63	663.83	0.745	0.735	1.398	0.134D-02	0.296D-01	0.152D-02
24	662330.	0.016	0.179D-02	302.29	296.38	663.89	0.745	0.735	1.398	0.133D-02	0.297D-01	0.153D-02
25	660330.	0.017	0.181D-02	302.29	296.13	663.94	0.745	0.734	1.398	0.133D-02	0.298D-01	0.153D-02
26	658330.	0.017	0.183D-02	302.29	295.88	663.99	0.745	0.734	1.399	0.133D-02	0.299D-01	0.154D-02
27	656330.	0.018	0.185D-02	302.29	295.62	664.05	0.745	0.733	1.399	0.133D-02	0.300D-01	0.155D-02
28	654330.	0.019	0.187D-02	302.29	295.37	664.10	0.745	0.733	1.399	0.133D-02	0.301D-01	0.156D-02
29	652330.	0.019	0.189D-02	302.29	295.12	664.15	0.745	0.732	1.400	0.133D-02	0.302D-01	0.157D-02
30	650330.	0.020	0.191D-02	302.29	294.86	664.21	0.745	0.732	1.400	0.133D-02	0.303D-01	0.158D-02
31	648330.	0.021	0.194D-02	302.29	294.61	664.26	0.745	0.731	1.400	0.133D-02	0.304D-01	0.158D-02
32	646330.	0.021	0.196D-02	302.29	294.35	664.31	0.745	0.731	1.401	0.133D-02	0.306D-01	0.159D-02
33	644330.	0.022	0.198D-02	302.29	294.10	664.36	0.745	0.731	1.401	0.133D-02	0.307D-01	0.160D-02
34	642330.	0.023	0.200D-02	302.29	293.84	664.42	0.745	0.730	1.401	0.133D-02	0.308D-01	0.161D-02
35	640330.	0.023	0.202D-02	302.29	293.59	664.47	0.745	0.730	1.402	0.133D-02	0.309D-01	0.162D-02
36	638330.	0.024	0.204D-02	302.29	293.33	664.52	0.745	0.729	1.402	0.133D-02	0.310D-01	0.163D-02
37	636330.	0.025	0.206D-02	302.29	293.07	664.57	0.745	0.729	1.403	0.133D-02	0.311D-01	0.164D-02
38	634330.	0.025	0.209D-02	302.29	292.82	664.62	0.745	0.728	1.403	0.133D-02	0.312D-01	0.164D-02
39	632330.	0.026	0.211D-02	302.29	292.56	664.68	0.745	0.728	1.403	0.133D-02	0.313D-01	0.165D-02

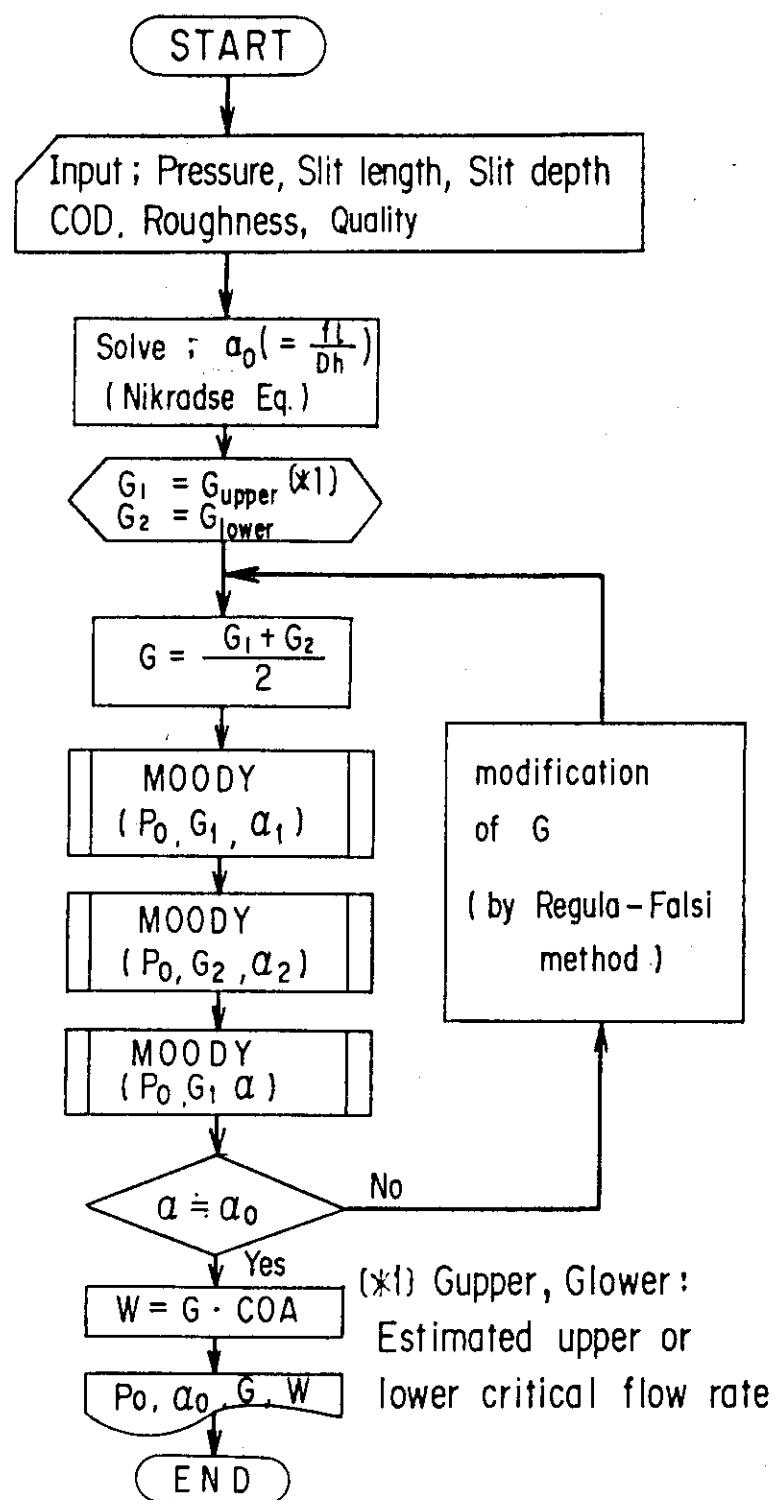


Fig. 6.10 Flow diagram to solve the leak rate through a slit  
(Moody Model)

## 6.6 長方形スリットからの漏洩量計算プログラム（HENRYの臨界流モデルによる計算）

6.5と同様、長方形スリットからの漏洩量を計算するプログラムである。漏洩率の計算には HENRYの臨界流モデルを用いている。

Table 6.6に例題計算による出力リストを示す。

Fig. 6.11に計算手順を示したフローチャートを示す。

Table 6.6 長方形スリットからの漏洩量計算プログラム  
(HENRYの臨界流モデル) の計算例

FUNDAMENTAL EX. K8802A

\*\*\* STAGNATION PROPERTIES \*\*\*

PRESSURE(P0)= 5980. KPA

TEMPERATURE(T0)= 258.0 C

INPUT INDICATOR(IN)= 3 ---> INITIALLY SUBCOOLED LIQUID, INPUT BOTH TEMPERATURE AND PRESSURE

BACK PRESSURE(PB)= 610.0 KPA

\*\*\*\*\* CRACK GEOMETRY \*\*\*\*\*

2C= 4.00000 CM

COD= 0.05000 CM

DEPTH= 3.70 CM

HYDR. DIA.= 0.09877 CM

DEPTH/HYDR. DIA.= 37.5

ROUGHNESS HEIGHT= 0.50000-04 CM

AREA= 0.2000 CM\*\*2

PERIMETER= 8.10 CM

AREA RATIO(AE/A0)= 1.00

NO. OF 90 DEGREE TURN= 0

NO. OF 45 DEGREE TURN= 0

THRESHOLD VALUE = 0.01000

\*\*\*\*\* OUTPUT \*\*\*\*\*

CRITICAL MASS FLUX = 0.2848D+05 KG/M\*\*2/SEC

= 0.4515D+00 GPM/NM\*\*2

LEAK RATE = 0.5697D+00 KG/SEC

PRESSURE AT EXIT PLANE = 3823.0 KPA

QUALITY AT EXIT PLANE = 0.0110

QUALITY AT BACK PRESSURE = 0.2017

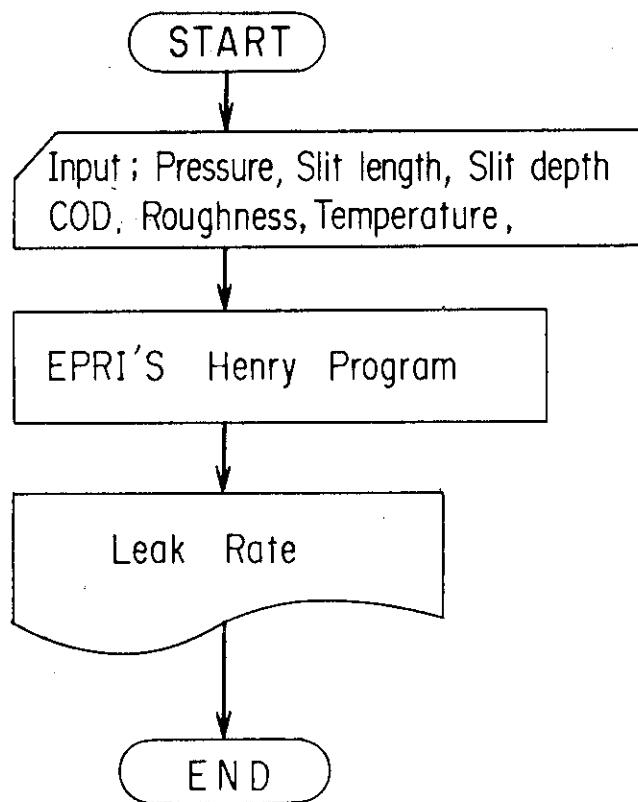


Fig. 6.11 Flow diagram to solve Leak rate through a slit  
(Henry Model)

## 7. 考 察

### (1) 曲げ荷重をパラメータとした場合の試験値との漏洩量比較

今回作成したプログラムを用いて行った計算例をFig. 7. 1～7. 5に示す。どのプログラム共、一応の計算は行えている。

Fig. 7. 1は、試験値との比較である。4インチ口径S T S 42炭素鋼Sch 80配管に内圧7 MPaの飽和水が内包されている状態で、亀裂角度83°の円周亀裂のある配管に曲げ応力を加えた時の冷却材漏洩量を、MOODYモデルとHENRYモデルによる計算値と試験結果とを比較した。この試験の場合には、試験体配管に内圧だけが加わった場合には試験の方が漏洩量が多く、曲げを加えて行くに従い計算の方が流量の増え方が大きく、ある所で計算値の方が試験値を上回る傾向が見られた。次に、MOODYモデルとHENRYモデルによる漏洩量とを比較すると、MOODYモデルを使用した方が2～3割程度、多くなった。

この計算プログラムでどの位の精度で流量を予測できるのか、今後、なるべく多くの試験ケースとの比較で調査するのが良いと思われる。

### (2) 漏洩量を既知した場合のき裂角度

Fig. 7. 2は、曲げ応力がなく、内圧のみが加わっている場合で、漏洩量が1 GPM及び5 GPMとなる場合の配管口径と亀裂角度との関係を示した例である。何れの曲線共、試験値よりも大きなき裂角度となっている。

曲線を見ると、配管口径が大きくなる程、同じ漏洩量を生じる亀裂角度が小さくなる事が分かる。漏洩率の計算には、MOODYの二相流モデルを用いている。これと同じ計算をHENRYの臨界流モデルを用いて行ったのがFig. 7. 3である。Fig. 7. 4には、1 GPMの漏洩量につき、HENRYのモデルとMOODYのモデルを使用した場合とで、必要となる亀裂角度を比較した。HENRYのモデルを使用した方が亀裂角度で20～30パーセント程度、MOODYのモデルを使用した時よりも大きな亀裂角度が必要な事が分かる。

### (3) 長方形スリット内を冷却材が通過する場合

また、長方形スリット内を冷却材が通過する場合につき、HENRYモデルMOODYモデルを使用した場合の亀裂開口変位と漏洩量との比較をFig. 7. 5に示す。この場合も、配管亀裂と同様、MOODYのモデルの方が多くの漏洩量を示している。

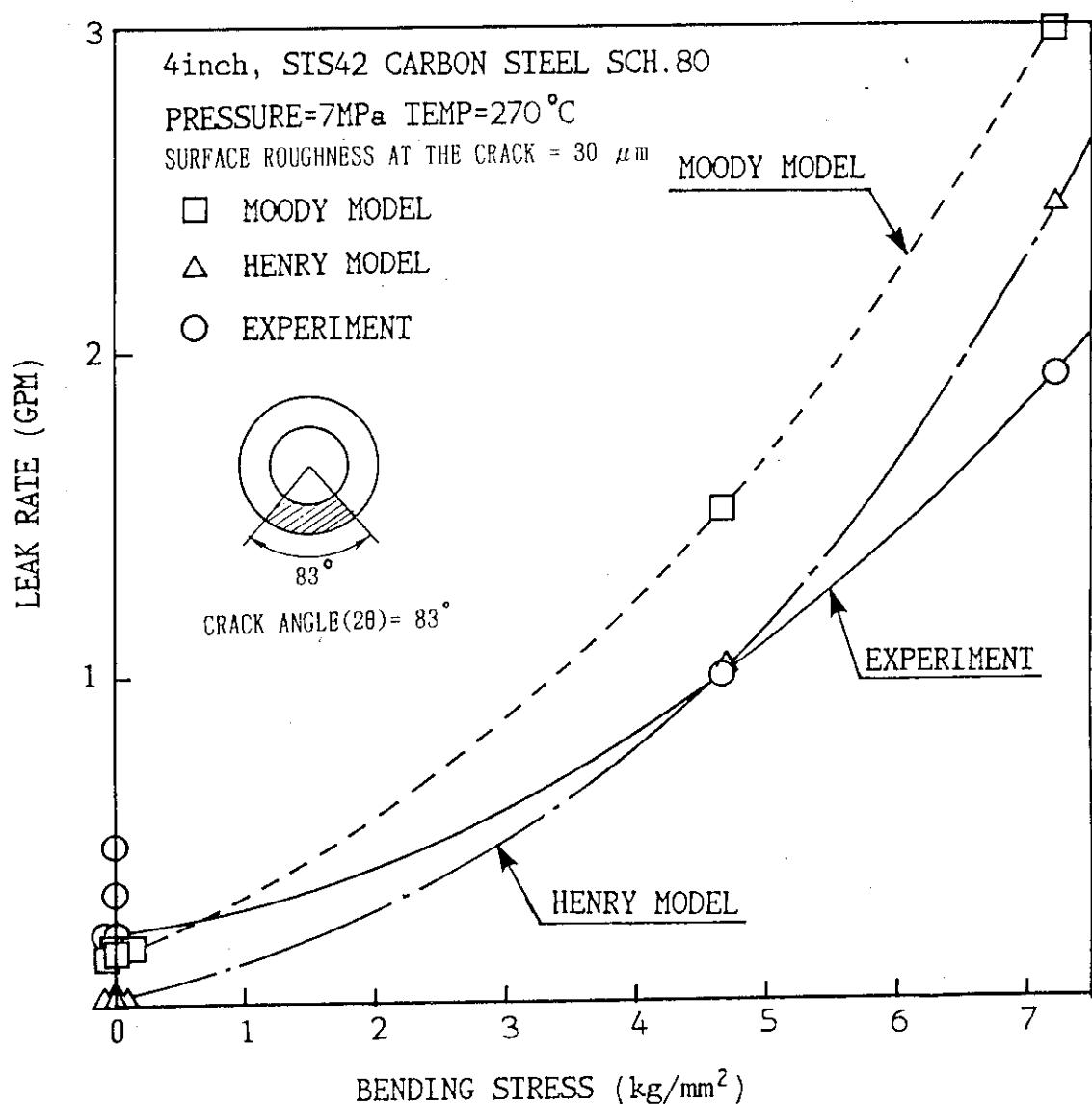


Fig. 7.1 COMPARISON OF LEAK RATE AMONG EXPERIMENT,  
 HENRY MODEL AND MOODY MODEL

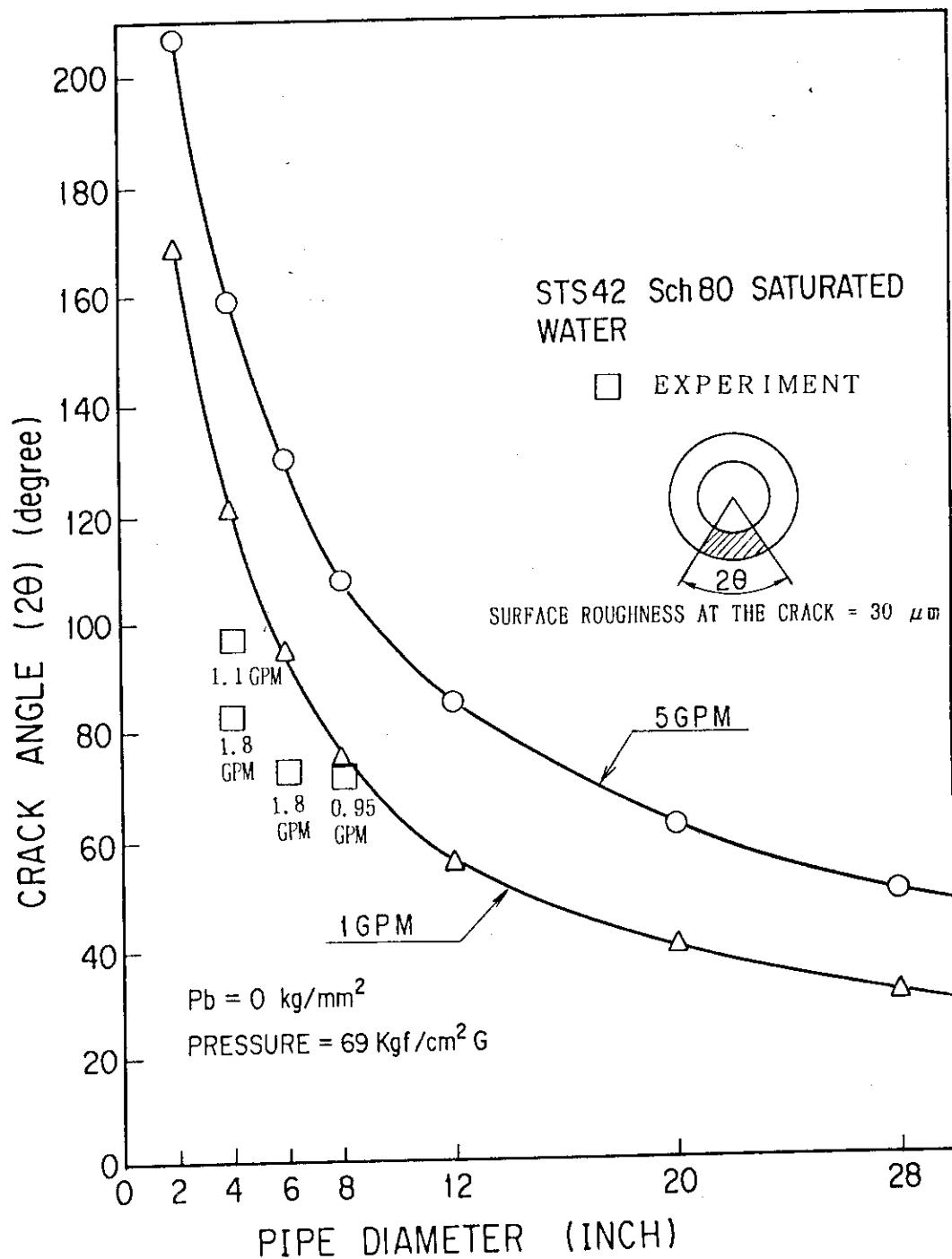


Fig. 7.2 CONSTANT LEAK RATE CURVE (MOODY MODEL)

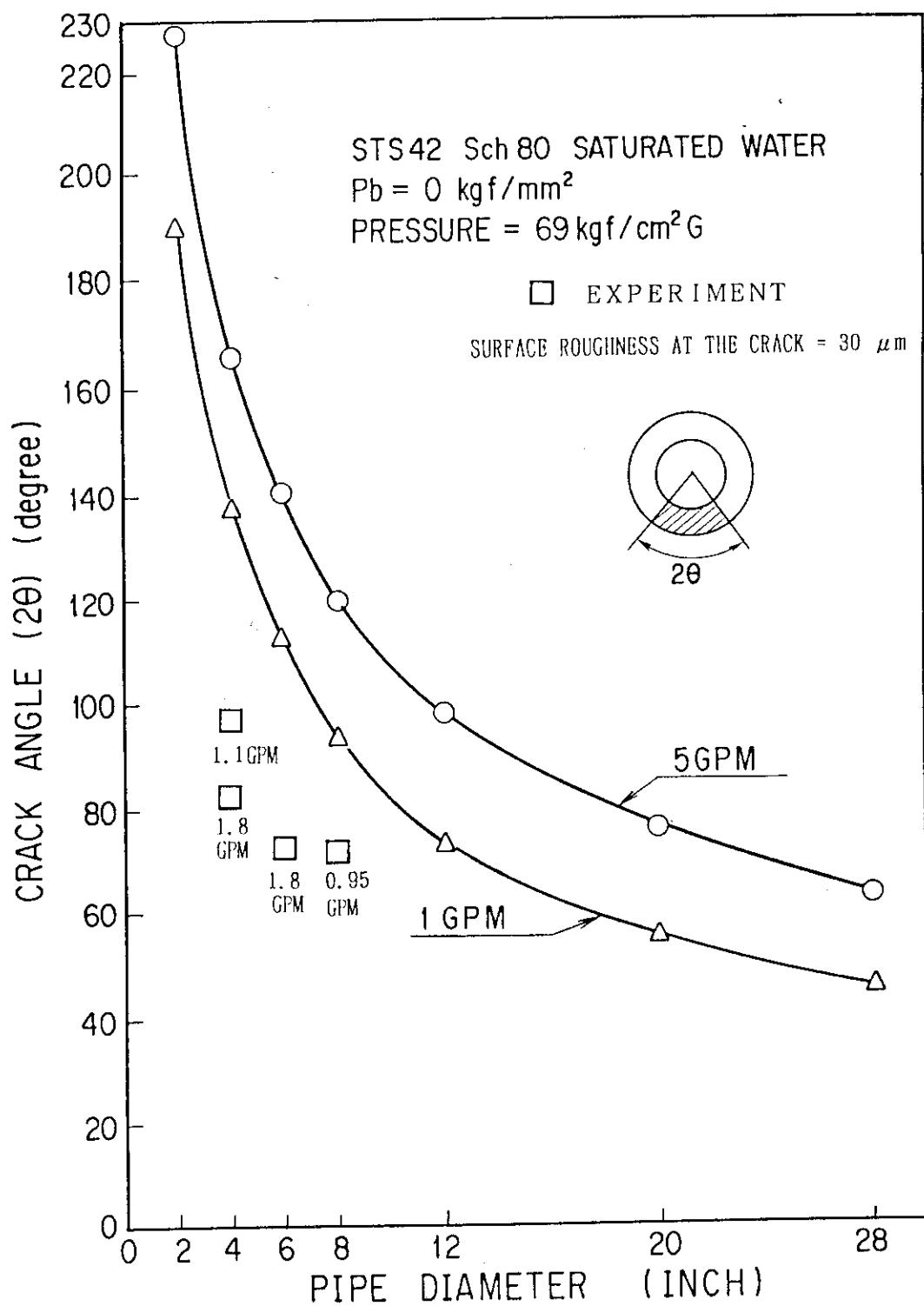


Fig. 7.3 CONSTANT LEAK RATE CURVE (HENRY MODEL)

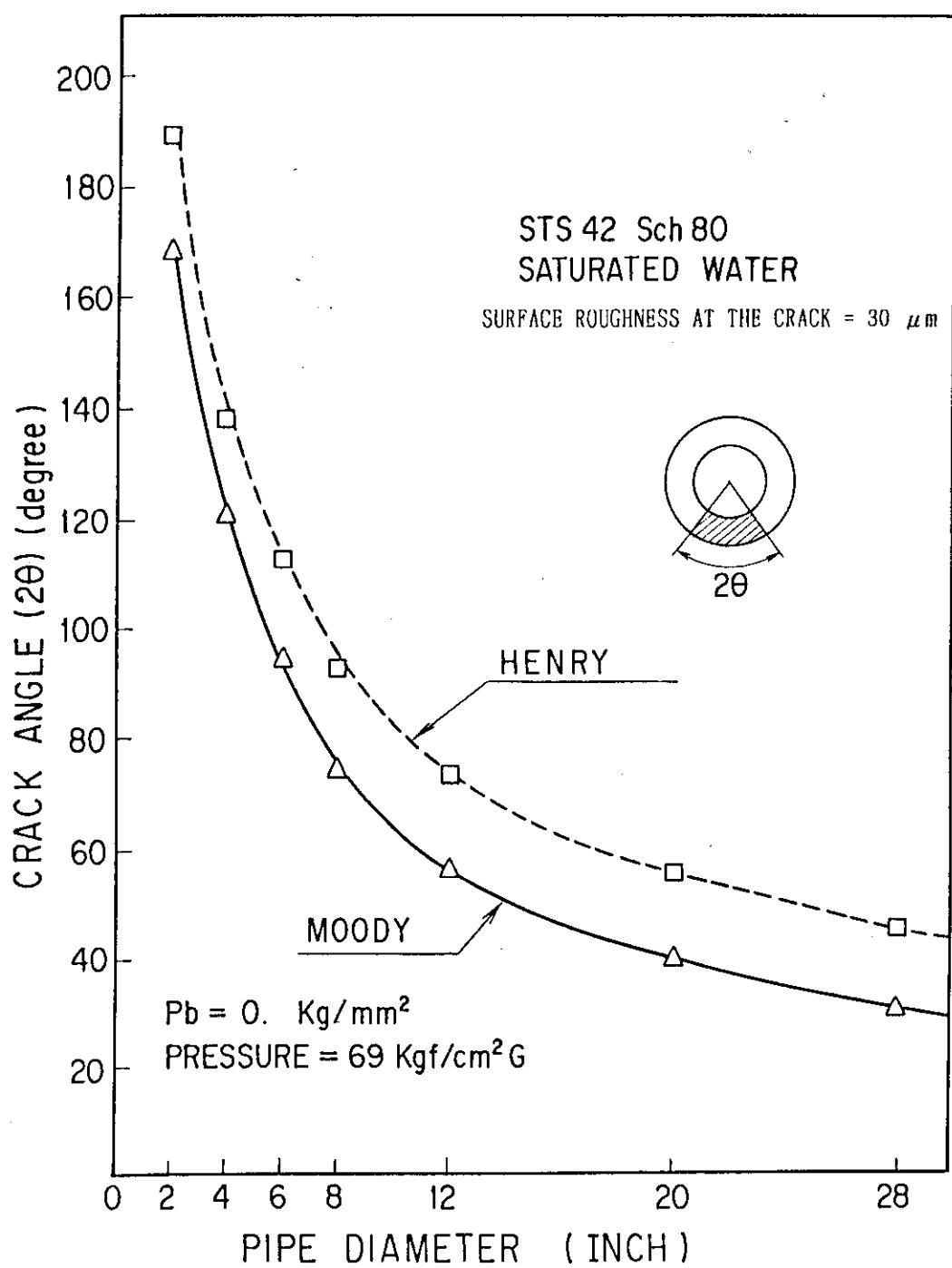


Fig. 7.4 1GPM LEAK RATE CURVE

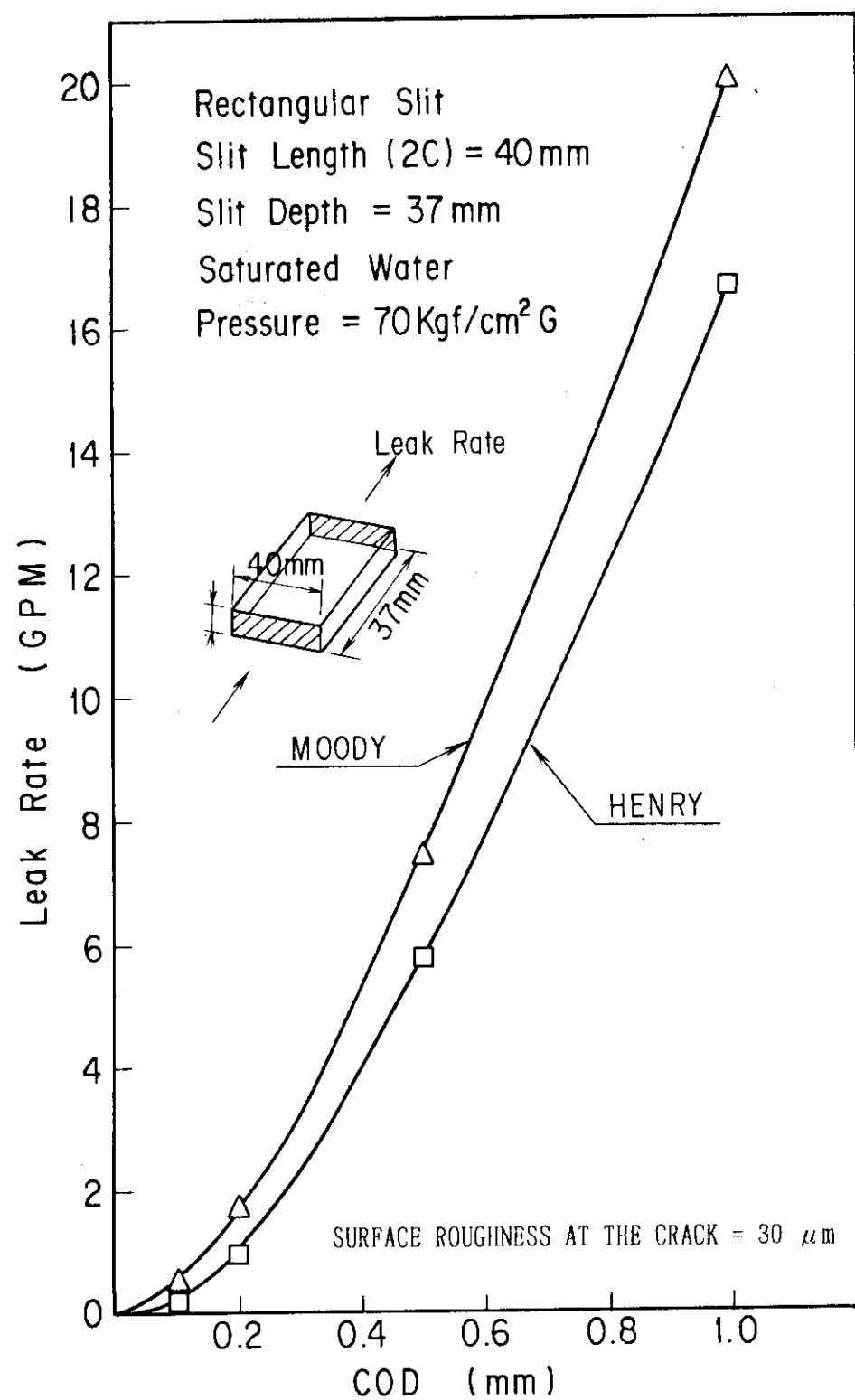


Fig. 7.5 Crack Opening Displacement and Leak Rate

## 8. 結論

以上、今回作成したプログラムを使用した解析結果と試験値とを比較すると、1) どのプログラムを使用しても、内圧のみの掛かった場合には、試験値よりも漏洩量が少なくなる。2) 曲げ荷重の大きな場合には、試験値よりも多くなる。と言う傾向はあるものの、どの場合においても一応の計算は行えているので、プログラムの作成には成功したと言える。

## 9. 今後の課題

MOODYのプログラムには、原研のリークレート試験を行うに当たっては、必要でなかつたので、今回は、以下の機能が作成されていない。

今後、必要があれば機能を追加するものとする。

- (1) 入口縮流部での流動抵抗
- (2) 亀裂内部のうねりの考慮
- (3) 入口と出口との亀裂開口面積の差

貫通亀裂の配管内面と外面との開口面積は、同じとは限らない。Fig. 9.1 のように亀裂の貫通初期段階では、初期亀裂のある側の方が大きいというのが一般的である。しかし、亀裂の貫通後は、貫通表面での亀裂は急速に広がり、Fig. 9.2 のようになる事、並びに、リークレート試験では、Fig. 9.1 の亀裂面積に差のある場合の試験は行わないので、今回作成のプログラムにはその機能を持たせなかった。

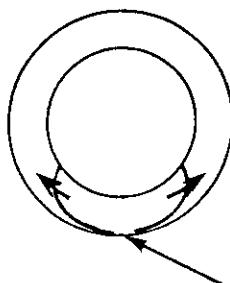


Fig. 9.1 配管き裂の進展

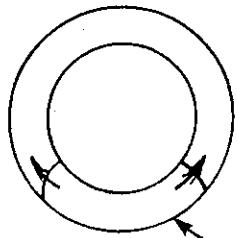


Fig. 9.2 配管き裂の進展

## 8. 結論

以上、今回作成したプログラムを使用した解析結果と試験値とを比較すると、1) どのプログラムを使用しても、内圧のみの掛かった場合には、試験値よりも漏洩量が少なくなる。2) 曲げ荷重の大きな場合には、試験値よりも多くなる。と言う傾向はあるものの、どの場合においても一応の計算は行えているので、プログラムの作成には成功したと言える。

## 9. 今後の課題

MOODYのプログラムには、原研のリークレート試験を行うに当たっては、必要でなかったので、今回は、以下の機能が作成されていない。

今後、必要があれば機能を追加するものとする。

- (1) 入口縮流部での流動抵抗
- (2) 亀裂内部のうねりの考慮
- (3) 入口と出口との亀裂開口面積の差

貫通亀裂の配管内面と外面との開口面積は、同じとは限らない。Fig. 9.1 のように亀裂の貫通初期段階では、初期亀裂のある側の方が大きいというのが一般的である。しかし、亀裂の貫通後は、貫通表面での亀裂は急速に広がり、Fig. 9.2 のようになる事、並びに、リークレート試験では、Fig. 9.1 の亀裂面積に差のある場合の試験は行わないので、今回作成のプログラムにはその機能を持たせなかった。

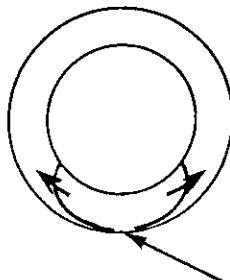


Fig. 9.1 配管き裂の進展

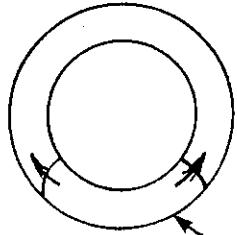


Fig. 9.2 配管き裂の進展

## 参 考 文 献

- (1) RSC Guidelines Chapter 21. 1, version 3 / 1984
- (2) Code of Federal Regulations 10, Part 50 General Design Criterion 4, Jan. 1, 1986
- (3) Federal Register Vol. 51, No 141, July 23, 1986, Proposed Rules
- (4) R.Collo et al.: "Two - Phase Flow Through Intergranular Stress Corrosion Cracks and Resulting Acoustic Emission", E R R I N P - 3540 - L D, 1984
- (5) R.E.Henry : "The Two - Phase Critical Discharge of Initially Saturated or Subcooled Liquid", Nuclear Science and Engineering, Vol.41, 1970
- (6) C.N.Amos and V.E.Schrock : "Critical Discharge of Initially Subcooled Water Through Slits", NUREG/CR - 3475, LBL - 16363, 1983
- (7) C.N.Amos and V.E.Schrock: "Two - Phase Critical Flow in Slits", Nuclear Science and Engineering, Vol 88, P 261 - 274 1984
- (8) H.John, J.Reimann and G.Eisele : "Kritische Leckströmung aus rauhen Rissen in Druckbehältern", KfK 4192
- (9) P.Pana :"Eine modifizierte Bernoulli - Gleichung für die Berechnung der Strömungs- svorgänge in unterkühlten Wassergebiet", IRS-W-18, 1975
- (10) P.Pana :"Berechnung der stationären Massenstromdichte von Wasserdampfgemischen und der auftretenden Rückstoßkräfte", IRS-W-24, 1976.
- (11) T.Yano et.al. :"Leak Flow Rate from through- wall Crack in pipe", 1987 ASME • JSME Thermal Engineering Joint Conference, March 1987
- (12) F.J.Moody :"Maximum Two-phase Vessel Blowdown From Pipes", Journal of Heat Transfer Tran. ASME Series C, P 285 - 295, August 1966
- (13) D.Abdollahian and B.Chexal :"Calculation of Leak Rates Through Cracks in Pipes and Tubes", E P R I N P - 3395, Dec. 1983
- (14) 磯崎他 : "米国電力研究所コードによる漏洩率評価解析", JAERI-M 87-121, 1987
- (15) 赤川 : "気液二相流", コロナ社, 1974
- (16) P.C.Paris and H.Tada :"The Application of Fracture Proof Design Methods Using Tearing Instability Theory to Nuclear Piping Postulating Circumferential Through Wall Cracks", NUREG/CR - 3464, 1983
- (17) 中城, 柴田, 磯崎ほか, "Moody の臨界流モデルによる配管き裂からの冷却材漏洩率評価法" JAERI-M 88-039 (1988)
- (18) M.E.Mayfield, et al."Cold Leg Integrity Evaluation", NUREG/CR - 1319 R 5, February (1980)
- (19) 矢野, 松島, 岡本, "配管貫通欠陥からの流出流量", 第23回日本伝熱シンポジウム講演論文集, B 313 (1986).

- (20) K. Shibata et al."Progress and Evaluation of Test Results on JAERI'S Ductile Pipe Fracture Test Program", The 4th Japanese-German Joint Seminar on Structural Strength and NDE Problems in Nuclear Engineering September (1988)
- (21) K. Shibata, S. Miyazono, T. Kaneko, N. Yokoyama, "Ductile Fracture Behavior of Circumferentially Cracked TYPE 304 Stainless Steel Piping under Bending Load" Nuclear Engineering and Design vol.94 (1986).
- (22) 柴田, 金子, 横山ほか, "周方向欠陥を有するSUS304鋼配管の延性破壊挙動とLBB評価" 圧力技術24巻5号 (1986).
- (23) 柴田, 大場, 川村ほか, "貫通または未貫通欠陥を有する6インチ口径SUS304鋼配管およびSUS42炭素鋼配管の延性破壊挙動," JAERI-M 86-078 (1986).
- (24) 金子, 柴田, 大場, ほか, "軽水炉配管材の延性破壊に関する研究", JAERI-M 85-064 (1986).
- (25) 安田, 柴田, 大場, ほか, "軽水路配管材の延性破壊に関する研究(第2報)," JAERI-M 86-098 (1986)
- (26) R.E. Henry, H.K. Fauske, "The Two-Phase Critical Flow of One-Component Mixtures in Nozzles, Orifices, and Short Tubes," J. of Heat Transfer, Trans. of the ASME, May (1971).
- (27) T. Yano, et al., "Evaluation of leak flow rate and jet impingement related to leak before break," Nucl. Eng. Design, to be appeared.
- (28) F. Erdogan, "Ductile Fracture Theories for Pressure Riser Pipes and Containers," International Journal of Pressure Vessels and Piping, 4, 1976, pp. 253-283.
- (29) Evaluation of Flaws in Austenitic Steel Piping. Prepared by the ASME Section XI Task Group on Piping. Flaw Evaluation. Palo Alto, Calif.: Electric Power Research Institute, July 1986. NP-4690-SR.
- (30) B. Chexal, D. Abdollahian, and D.M. Norris, "Analytical Prediction of Single Phase and Two-Phase Flow Thru Cracks in Pipes and Tubes." Presented at the 22nd ASME/AICHE National Heat Transfer Conference, Niagara Falls, New York, August 5-8, 1984.
- (31) A. Zahoor, H.S. Mehta, S. Yukawa, R.M. Gamble, and S. Ranganath, "Evaluation of Flaws in Carbon Steel Piping." Palo Alto, Calif.: Electric Power Research Institute October 1986. NP-4824M. A revision is being prepared by EPRI.
- (32) K. Kishida, A. Zahoor, and D.M. Norris, "Crack-Opening Displacement Calculation Methodology for Circumferentially Through-Wall Cracked Pipes." Palo Alto, Calif.: Electric Power Research Institute, August 1987. Inpress.
- (33) J.H. McFarren et al. "RETRAN-02 A Program for Transient Thermal-Hydraulic Analysis of Complex Fluid Flow Systems. NP-1850, Vol. 1. Equations and Numerics." Palo Alto, Calif.: Electric Power Research Institute, May 1981.

- (34) C.A.Meyer, R.B.McClintock, G.J.Silvestri, and R.C.Spencer." ASME Steam Tables." Published by the American Society of Mechanical Engineers, New York, Fifth Edition, 1983.
- (35) D.M.Norris and B.Chexal."Leak - Before - Break in High Energy Balance of Plant Piping." ERI Report (in press), Palo Alto, California, October 1986.
- (36) J.M.Bloom and S.N.Malik."Procedure for the Assessment of the Integrity of Nuclear Pressure Vessels and Piping Containing Defects." Palo Alto, Calif.: Electric Power Research institute, June 1982. NP-2431.
- (37) R.B.Chafee."TOP DRAWER." Computation Research Group, Memo CG-TM №189, Stanford Linear Accelerator Center, Palo Alto, California, 1979.
- (38) D.M.Norris, A.Okamoto, B.Chexal, and T.Griesbach."PICEP:Pipe Crack Evaluation Program." Palo Alto, Calif. :Electric Power Research Institute, August 1984. NP-3596-SR.
- (39) D.M.Norris and B.Chexal. "PICEP: Pipe Crack Evaluation Program (Revision 1)" Palo Alto, Calif :Electric Power Research Insfitute, December 1987. NP-3596-SR
- (40) T.Isozaki, K.Shibata, H.Shinokawa and S.Miyazono,"Leak Late Test Results from a through-wall-Fatigue-Cracked Piping under 4-Points Bending Load and BWR Conditions", presented at NEA/CSNI-COG Specialist Meeting on Leak - Before - Break in Water Reactor Piping and Vessels, Toronto, Canada, 1989.10
- (41) rough slits, Int. J. Multiphase flow, vol.14 o. 2(1988).
- (41) Y.Tanaka, K.Matsumoto, T.Narabayashi, Experimental studies on high temperature water leak rates through pipe cracks, presented at The 4 th Japanese - German Joint seminor on Structural strength and NDE problems in nuclear engineering, p 383-402 (1988).

## 付録A リークレート解析プログラム入力マニュアル

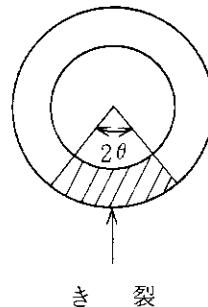
## A. 1 配管き裂の大きさを与えた場合の漏洩量計算プログラム (M O O D Y の二相流モデルによる解析)

## 1. Card 1 (4 A 20)

カラム数	Variable	記入事項
(1) 1 ~80	TITLE (J)	タイトル名等の計算条件のめやすとなる記述を任意に入力

## 2. Card 2 (4 F 10.3, F 10.0)

カラム数	Variable	記入事項
(1) 1 ~10	DIA	配管外径 (mm)
(2) 11 ~20	S Y	き裂開口面積評価用の Tada-Paris の式に用いるための降伏応力 (kgf/mm <sup>2</sup> )
(3) 21 ~30	P B	曲げ応力 (kgf/mm <sup>2</sup> )
(4) 31 ~40	THETAD	円周方向き裂のき裂角度 (度)。 半角 $\theta$ で入力を行なう



(5) 41 ~50 E 縦弾性係数 (kgf/mm<sup>2</sup>)

## 3. Card 3 (5 F 10.3)

カラム数	Variable	記入事項
(1) 1 ~10	P 0	配管内圧 (ゲージ圧で入力する) (kgf/cm <sup>2</sup> G)
(2) 11 ~20	E P S	NIKRADSE の式に用いるき裂部表面粗さ(mm)
(3) 21 ~30	C D	配管肉厚 (mm)

- (4) 31 ~ 40 Q X  $\bar{O}$  内部流体のクオリティ（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）無次元数
- (5) 41 ~ 50 D P  $\bar{O}$  入口圧力から出口圧力に向けて段階的に圧力を下げて計算していくための差圧。  
△Pを小さくとる事によって計算精度を良くする事ができる。

A. 2 配管き裂の大きさを与えた場合の漏洩量計算プログラム (HENRYの臨界流モデルによる解析)

1. Card 1 (4 A 20)

カラム数	Variable	記入事項
(1) 1 ~80	TITLE (J)	タイトル名等の計算条件のめやすとなる記述を任意に入力

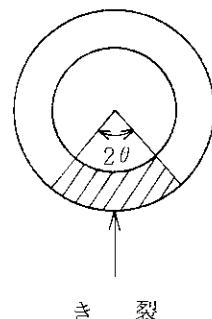
2. Card 2 (I /, F 9.4, 6 F 10.3)

カラム数	Variable	記入事項
(1) 1	I N	I N = 1 とすると、き裂入口における流体を入力温度での飽和流体として計算する。(クオリティは、その温度での圧力が飽和圧以上か以下かで判断する。) I N = 2 とすると、き裂入口における流体を入力圧力での飽和流体として計算する。(クオリティは、その圧力での温度が飽和温度以上か以下かで判断する。) I N = 3 とすると、サブクール水として認識し、温度・圧力の両方で計算を行なう
(2) 2 ~10	BEND	配管に作用する曲げ応力 (kgf/mm <sup>2</sup> )
(3) 11 ~20	P 0	配管内圧 (kgf/cm <sup>2</sup> A) (絶対圧で入力する)
(4) 21 ~30	T 0	配管内部流体温度 (°C)
(5) 31 ~40	P B	背圧 (環境圧力)(kgf/cm <sup>2</sup> A)(絶対圧で入力する)
(6) 41 ~50	THRESH	収束させるための許容誤差 オリジナルは 0.001, 収束しない時はこれを大きくとる。
(7) 51 ~60	E	縦弾性係数 (kgf/mm <sup>2</sup> )
(8) 61 ~70	S Y	き裂開口面積評価用のTada-Parisの式に用いるための降伏応力 (kgf/mm <sup>2</sup> )

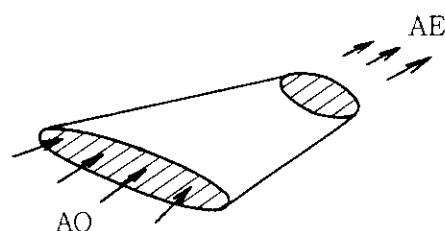
3. Card 3 (5 F 10.5, 2 I 10)

カラム数	Variable	記入事項
(1) 1 ~10	DIA	配管内径 (mm)

(2) 11~20 THE TAD 円周方向き裂のき裂角度(度)  
半角 $\theta$ で入力を行なう

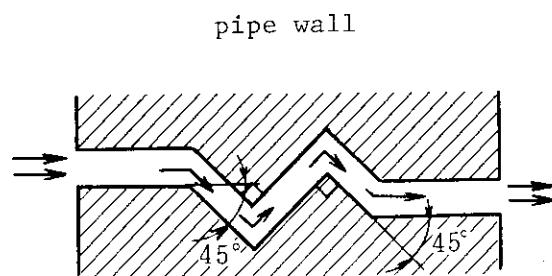


(3) 21~30 E D 配管肉厚(mm)  
(4) 31~40 E K NIKRADSE の式に用いるき裂部表面粗さ(mm)  
(5) 41~50 A R 流体の入口面積に対する出口面積の比 AE/A0



ellipse shaped model

(6) 51~60 N 1 き裂経路における 90° 曲がりの数



Turns in a crack path

(7) 61~70 N 2 き裂経路における 45° 曲がりの数

A. 3 漏洩量から配管き裂の大きさを求めるプログラム (M O O D Y の二相流モデルによる  
解析)

1. Card 1 (4 A 20)

カラム数	Variable	記入事項
(1) 1 ~80	TITLE (J)	タイトル名等の計算条件のめやすとなる記述を任意に入力

2. Card 2 (4 F 10.3, F 10.0)

カラム数	Variable	記入事項
(1) 1 ~10	DIA	配管外径 (mm)
(2) 11 ~20	S Y	き裂開口面積評価用の Tada-Paris の式に用いるための降伏応力 (kgf/mm <sup>2</sup> )
(3) 21 ~30	P B	配管に作用する曲げ応力 (kgf/mm <sup>2</sup> )
(4) 31 ~40	W G	漏洩量 (GPM) (60°Gの凝縮水に換算した流量で与える。)
(5) 41 ~50	E	縦弾性係数 (kgf/mm <sup>2</sup> )

3. Card 3 (5 F 10.3)

カラム数	Variable	記入事項
(1) 1 ~10	P 0	配管内圧 (ゲージ圧で入力する) (kgf/cm <sup>2</sup> G)
(2) 11 ~20	E P S	NIKRADSE の式に用いるき裂部表面粗さ(mm)
(3) 21 ~30	C D	配管肉厚 (mm)
(4) 31 ~40	Q X O	内部流体のクオリティ (注; 飽和蒸気を計算する場合 1.0 とすると収束しない。0.9999 として計算のこと) 無次元数
(5) 41 ~50	D P O	入口圧力から出口圧力に向けて段階的に圧力を下げて計算していくための差圧, さし絵中の△P, △P を小さくとる事によって計算精度を良くする事ができる

A . 4 漏洩量から配管き裂の大きさを求めるプログラム (HENRYの臨界流モデルによる  
解析)

## 1. Card 1 (4 A 20)

	カラム数	Variable	記入事項
(1)	1 ~80	TITLE (J)	タイトル名等の計算条件のめやすとなる記述を任 意に入力

## 2. Card 2 (I 1, F 9.4, 6 F 10.3)

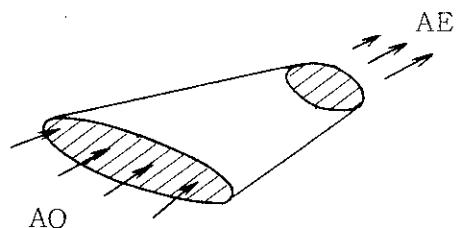
	カラム数	Variable	記入事項
(1)	1	I N	I N = 1 とすると、き裂入口における流体を入力 温度での飽和流体として計算する。(クオリティは、 その温度での圧力が飽和圧以上か以下かで判断する。)  I N = 2 とすると、き裂入口における流体を入力 圧力での飽和流体として計算する。(クオリティは、 その圧力での温度が飽和温度以上か以下かで判断す る。)  I N = 3 とすると、サブクール水として認識し、 温度・圧力の両方で計算を行なう
(2)	2 ~10	BEND	配管に作用する曲げ応力 (kgf/mm <sup>2</sup> )
(3)	11 ~20	P 0	配管内圧 (kgf/cm <sup>2</sup> A) (絶対圧で入力する)
(4)	21 ~30	T 0	配管内部流体温度 (°C)
(5)	31 ~40	P B	背圧 (環境圧力)(kgf/cm <sup>2</sup> A)(絶対圧で入力する)
(6)	41 ~50	THRESH	収束させるための許容誤差 オリジナルは 0.001, 収束しない時はこれを大 くとる。
(7)	51 ~60	E	縦弾性係数 (kgf/mm <sup>2</sup> )
(8)	61 ~70	S Y	き裂開口面積評価用の Tada-Paris の式に用いる ための降伏応力 (kgf/mm <sup>2</sup> )

## 3. Card 3 (5 F 10.5, 2 I 10)

	カラム数	Variable	記入事項
(1)	1 ~10	D I A	配管内径 (mm)
(2)	11 ~20	W	漏洩量 (G P M) (60°Cの凝水に換算した流量で 与える)
(3)	21 ~30	E D	配管肉厚 (mm)
(4)	31 ~40	E K	NIKRADSE の式に用いるき裂部表面粗さ(mm)

(5) 41 ~ 50

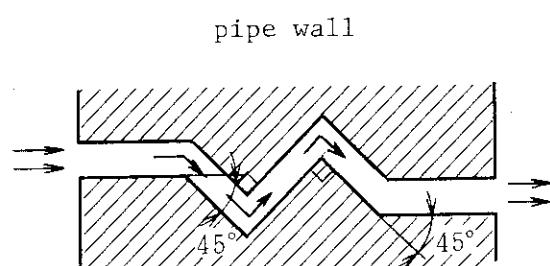
A R

流体の入口面積に対する出口面積の比  $A_E/A_O$ 

ellipse shaped model

(6) 51 ~ 60

N 1

き裂経路における  $90^\circ$  曲がりの数

Turns in a crack path

(7) 61 ~ 70

N 2

き裂経路における  $45^\circ$  曲がりの数

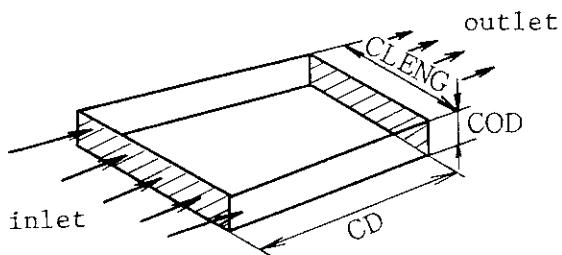
## A. 5 長方形スリットからの漏洩量計算プログラム (MOODYの二相流モデルによる解析)

## 1. Card 1 (4 A 20)

カラム数	Variable	記入事項
(1) 1 ~ 80	TITLE (J)	タイトル名等の計算条件のめやすとなる記述を任意に入力

## 2. Card 2 (2 F 10.4)

カラム数	Variable	記入事項
(1) 1 ~ 10	COD	き裂部開口変位 (mm)



Rectangular

(2) 11 ~ 20	CLENG	き裂長さ (mm)
-------------	-------	-----------

## 3. Card 3 (5 F 10.3)

カラム数	Variable	記入事項
(1) 1 ~ 10	P0	スリット入口圧力ゲージ圧で入力する (kgf/cm <sup>2</sup> G)
(2) 11 ~ 20	EPS	NIKRADSE の式に用いるスリット部表面粗さ (mm)
(3) 21 ~ 30	CD	き裂深さ (mm)
(4) 31 ~ 40	QXO	スリット入口での内部流体のクオリティ (注: 鮧和蒸気を計算する場合 1.0 とすると収束しない。 0.9999 として計算のこと) 無次元数
(5) 41 ~ 50	DPO	入口圧力かや出口圧力に向けて段階的に圧力を下げて計算していくための差圧△Pを小さくとる事によって計算精度を上げる事ができる

## A. 6 長方形スリットからの漏洩量計算プログラム (HENRYの臨界流モデルによる解析)

## 1. Card 1 (4 A 20)

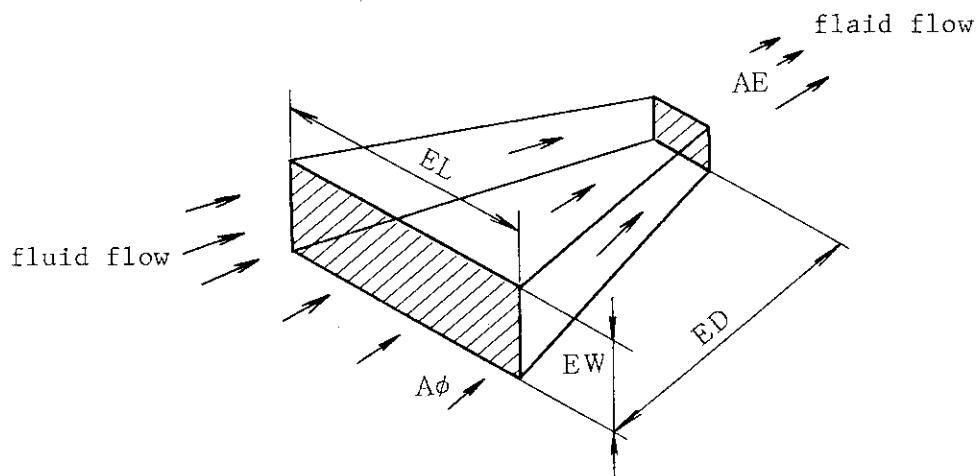
	カラム数	Variable	記入事項
(1)	1 ~80	TITLE (J)	タイトル名等の計算条件のめやすとなる記述を任意に入力

## 2. Card 2 (I 10, 4 F 10.2)

	カラム数	Variable	記入事項
(1)	1 ~10	I N	$I N = 1$ とすると、き裂入口における流体を入力温度での飽和流体として計算する。(クオリティは、その温度での圧力が飽和圧以上か以下かで判断する。) $I N = 2$ とすると、き裂入口における流体を入力圧力での飽和流体として計算する。(クオリティは、その圧力での温度が飽和温度以上か以下かで判断する。) $I N = 3$ とすると、サブクール水と圧力の両方で計算を行なう
(2)	11 ~20	P 0	入口圧力 (KPa) (絶対圧で入力する)
(3)	21 ~30	T 0	入口温度 ( $^{\circ}$ C)
(4)	31 ~40	P B	背圧 (環境圧力)(KPa)(絶対圧で入力する)
(5)	41 ~50	THRESH	収束させるための許容誤差オリジナルは 0.001 , 収束しない時はこれを大きくとる

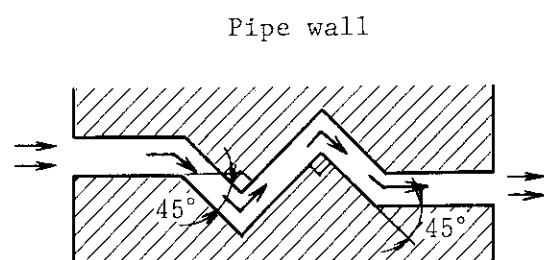
## 3. Card 3 (5 F 10.5, 2 I 10)

	カラム数	Variable	記入事項
(1)	1 ~10	E L	き裂長さ (cm)
(2)	11 ~20	E W	き裂開口変位 (cm)
(3)	21 ~30	E D	き裂深さ (cm)



Rectangular slit model

- (4) 31 ~ 40 E K NIKRADSE の式に用いるき裂表面粗さ(cm)  
 (5) 41 ~ 50 A R 入口スリット部面積と出口スリット部面積との比,  
 $A_E / A_O$  無次元数  
 (6) 51 ~ 60 N 1 き裂経路における 90° 曲がりの数



Turns in the crack path

- (7) 61 ~ 70 N 2 き裂経路における 45° 曲がりの数

## 付録B プログラムリスト

## B . 1 配管き裂の大きさを与えた場合の漏洩量計算プログラム（M O O D Yのスリップモデルによる解析）





```

000034      PC=P(I)
000035      3 CONTINUE
000036      WRITE(6,606) I
000037      606 FORMAT(//,5X,4H I= ,I4,27H ENTROPY MAX DOES NOT EXIST)
000038      1 CALL INTEG(S1,S2,P0,IMAX,V,P,VM,VO,VMO)
000039      ALPHA=2.0*9.80665/G**2*S1-2.0*S2
000040      IF(ICONT.EQ.1) GO TO 999
000041      WRITE(6,601) P0,TEMPO,G,QXO,DP,PMIN,PC,SMAX,ALPHA
000042      601 FORMAT(//,10X,10H P0 = , F15.3,
000043           1     //,10X,10H TO = , F10.3,
000044           2     //,10X,10H G = , F15.5,
000045           3     //,10X,10H QXO = , F10.3,
000046           4     //,10X,10H DP = , F10.3,
000047           5     //,10X,10H PMIN= , F10.3,
000048           6     //,10X,10H PC = , F10.3,
000049           7     //,10X,10H SMAX= , F15.5,
000050           8     //,10X,10H ALPHA= , F10.3,/)
000051      WRITE(6,602)
000052      602 FORMAT( 4H NO , 7H PRESS,10H QUALITY ,6H V ,
000053           1             8H ENT H ,8H ENT HL ,8H ENT HG ,
000054           2             6HENT S ,7H EN SL ,8H ENT SG ,
000055           3             9H VL ,6H VG ,8H VM)
000056      DO 5 J=1,I
000057      5 WRITE(6,603)J,P(J),QX(J),V(J),
000058           1     H(J),HL(J),HG(J),S(J),SL(J),SG(J),VL(J),VG(J),VM(J)
000059      603 FORMAT( I4,F9.0,F6.3, E10.3, 3F7.2,2F6.3, F7.3,3E10.3)
000060      999 RETURN
000061      END
000062      SUBROUTINE QLTY(QX,SR,VL,VG,HL,HG,H0,G)
000063      IMPLICIT REAL*8(A-H,O-Z)
000064      GRAV= 9.80665
000065      AA= 1.0/426.858
000066      A = (1.0-1.0/SR**2)*(1.0-2.0*SR*VL/VG+SR**2*(VL/VG)**2)
000067      B = (1.0-2.0*SR*VL/VG+SR**2*(VL/VG)**2)/SR**2+
000068           1   2.0*(1.0-1.0/SR**2)*SR*VL/VG*(1.0-VL/VG*SR)
000069      C = 2.0/SR*VL/VG*(1.0-VL/VG*SR)+(SR**2-1.0)*(VL/VG)**2+
000070           1   (HG-HL)/(VG**2*AA*G**2)*2.0*GRAV
000071      D = -(H0-HL)/(VG**2*AA*G**2)*2.0*GRAV+(VL/VG)**2
000072      C     AA=1/427 KCAL/KG-M
000073      C     SOLVE AX**3+BX**2+CX+D=0
000074      C     0<=X<=1
000075      X1=-0.1
000076      X2=1.0
000077      X=(X1+X2)/2.0
000078      2 Y1=A*X1**3+B*X1**2+C*X1+D
000079      Y2=A*X2**3+B*X2**2+C*X2+D
000080      Y=A*X**3+B*X**2+C*X+D
000081      IF(Y1*Y.LE.0.0) X2=X
000082      IF(Y2*Y.LE.0.0) X1=X
000083      XN=(X1+X2)/2.0
000084      IF(Y1*Y2.GT.0.0) GO TO 3
000085      EPS=ABS((X-XN)/XN)
000086      IF(EPS.LE.1.0E-6) GO TO 1
000087      X=XN
000088      GO TO 2
000089      3 WRITE(6,601) Y1,Y,Y2
000090      601 FORMAT(/20X,10H F(X1)= ,E15.5,/
000091           1     20X,10H F(X) = ,E15.5,/
000092           2     20X,10H F(X2)= ,E15.5,/
000093           3     20X,30H EQ.CAN NOT BE SOLVED
000094      1 CONTINUE
000095      X=XN

```

```
000027      QX=X
000028      IF(QX.LT.0.0) QX=0.0
000029      RETURN
000030      END
000001      SUBROUTINE INTEG(S1,S2,P0,IMAX,V,P,VM,VO,VM0)
000002      IMPLICIT REAL*8(A-H,O-Z)
000003      DIMENSION V(999),P(999),VM(999)
000004      S1=0.0
000005      S2=0.0
000006      DO 1 I=2, IMAX
000007      DP=P(I)-P(I-1)
000008      DVM=VM(I)-VM(I-1)
000009      VX=(V(I-1)+V(I))/2.0
000010      S1=S1+DP/VX
000011      S2=S2+DVM/VX
000012      1 CONTINUE
000013      DS11=(P(1)-P0)*2.0/(V(1)+VO)
000014      DS21=(VM(1)-VM0)*2.0/(V(1)+VO)
000015      S1=S1+DS11
000016      S2=S2+DS21
000017      S1=-S1
000018      RETURN
000019      END
SPECIFIED OPTIONS: OPTIMIZE(2),LINECOUNT(0),NOS,ELM(MOODY6),SOURCE
END OF COMPILEMENT
```

B . 2 配管き裂の大きさを与えた場合の漏洩量計算プログラム (HENRYの臨界流モデルによる解析)

```

C
C      EPRI'S PROGRAMM FOR LEAK RATE THROUGH CRACKS
C
C      V. 1.0  '87-6-9 BY I.HASHIGUCHI
C      V. 2.0  '88-9-13 BY H.SHINOKAWA
C          CONNECTION OF TADA&PARIS EQUATION
C
C *** THE INPUT TO THE PROGRAM ***
C
C FIRST CARD
C     TITLE CARD
C
C SECOND CARD
C IN=1 --> INITIALLY SATURATED LIQUID, INPUT TEMERATURE ONLY
C IN=2 --> INITIALLY SATURATED LIQUID, INPUT PRESSURE ONLY
C IN=3 --> INITIALLY SUBCOOLED LIQUID, INPUT BOTH TEMERATURE AND PRESSURE
C BEND = BENDING STRESS (KGF/MM2)
C PO = STAGNATION PRESSURE (KGF/CM2)
C TO = STAGNATION TEMPERATURE (C)
C PB = BACK PRESSURE (KGF/CM2)
C THRESH = THRESHOLD VALUE, ORIGINAL VALUE = 1.E-3
C E = YOUNG'S MODULUS (KGF/MM2)
C SY = SIGMA Y ( KGFM/MM2 )
C
C THIRD CARD
C DIA= PIPE DIAMETER (MM)
C THETAD = CRAK ANGLE (DEGREE)
C ED = PIPE WALL THICKNESS (MM)
C EK = THE HEIGHT OF PROTRUSION OF THE ROUGHNESS GRAIN FROM THE MEAN
C SURFACE (MM)
C AR = AREA RATIO = AE/AO
C N1 = NUMBER OF 90 DEGREES TURNS IN THE CRACK PATH
C N2 = NUMBER OF 45 DEGREES TURNS IN THE CRACK PATH
C
C *** JAERI'S STEAM TABLE ***
C
C STEAMZ(P,T,V,H,S,INDEX)
C INDEX=0 --> SUBCOOLED WATER OR SUPERHEATED STEAM, INPUT BOTH PRESSURE
C           AND TEMPERATURE
C INDEX=1 --> SATURATED STEAM, INPUT TEMPERATURE
C INDEX=2 --> SATURATED STEAM, INPUT PRESSURE
C INDEX=3 --> SATURATED WATER, INPUT TEMPERATURE
C INDEX=4 --> SATURATED WATER, INPUT PRESSURE
C
000001    IMPLICIT REAL*8 (A-H,O-Z)
000002    DIMENSION TITLE(20)
000003    COMMON /PP/ PO,TO,XLD,FF,AR,IN,CD,DH,THETA
C
000004    CD      = 0.61
000005    PAI     = 3.141592654
000006    THETA   = 0.5*PAI
C
000007    1KPA= 1000N/M**2= 1000KG/M/S**2= 1000/9.8*E-4 KGF/CM**2
000008    = 1000*E-4/9.8/0.07031 LBF/IN**2= 1000/6890.4 LBF/IN**2
C
000009    PCV    = 6.894757E+3
000010    NSTEP  = 200
C
000009    1 READ (9,14,END=1000) (TITLE(J),J=1,20)
000010    READ (9,10) IN,BEND,PO,TO,PB,THRESH,E,SY

```

```

000011      READ(9,15) DIA,THETAD,ED,EK,AR,N1,N2
000012      WRITE(6,14) (TITLE(J),J=1,20)
000013      WRITE(6,10) IN,BEND,PO,TO,PB,THRESH,E,SY
000014      WRITE(6,15) DIA,THETAD,ED,EK,AR,N1,N2
000015      WRITE(6,599) (TITLE(J),J=1,20)

C
000016      R=(DIA-ED)/2.0
000017      P1=PO-PB
000018      PM = P1* (R-0.5*ED)**2/ED/R *0.005
000019      PBPM=BEND+PM
000020      WRITE(6,403) DIA,ED,SY,E,THETAD,P1,BEND,PM,PBPM
000021      403 FORMAT(/,10X, 10HDIAMETER= ,F15.5,3H MM,/1
1           ,10X, 10HTHICKNESS= ,F15.5,7H MM   ,/
2           ,10X, 10H SIGMAY=  ,F15.5,7H KG/MM2,/1
3           ,10X, 10H E =  ,F15.5,/1
4           ,10X, 10H THETA = ,F15.5,4H DEG,/1
5           ,10X, 10H PRESS = ,F15.5,8H KG/CM2,/1
6           ,10X, 10H PB =  ,F15.5,7H KG/MM2,/1
7           ,10X, 10H PM =  ,F15.5,7H KG/MM2,/1
8           ,10X, 10H PB+PM = ,F15.5,7H KG/MM2)

000022      CALL COAP(PM,R,SY,E,THETAD,BEND,AREA,999)
000023      EW=114.59156*AREA/(PAI*THETAD*R)
000024      WRITE(6,598) EW
000025      EW=PAI*EW/4.
000026      PO = 98066.5*PO/PCV
000027      TO = 1.8*TO+32.
000028      PB = 98066.5*PB/PCV
000029      EL=PAI*R*THETAD/90.
000030      EL = EL/25.4
000031      EW = EW/25.4
000032      ED = ED/25.4
000033      EK = EK/25.4
000034      IK = 0
000035      AREA = EW*EL
000036      PER = 2.* (EW+EL)
000037      AREA = AREA/144.
000038      PER = PER/12.
000039      ED = ED/12.
000040      EK = EK/12.
000041      DH = 4.*AREA/PER
000042      XLD = ED/DH+50.*N1+26.*N2
000043      IF(XLD.LE.12.) GO TO 400
000044      RK = DH/2./EK
000045      FF = 1.0/(2.*DLOG10(RK)+1.74)**2

C
C
000046      IF(IN.EQ.1) THEN
000047      TEMP = TO
000048      TEMP= (TEMP-32.0)*0.5555556
000049      PRESS = PSAT(TEMP)
000050      PO = PRESS*14.223133
000051      ENDIF

C
000052      DP = (PO-PB)/FLOAT(NSTEP)
000053      PL = PB
000054      30 CALL PR(PL,PCC,PT,GC,XE,XT,IC)
000055      IF(IC.EQ.2) GO TO 55
000056      IF(IC.NE.3) GO TO 40
000057      IK = IK+1
000058      PL = PL+DP
000059      IF(IK.LT.NSTEP) GO TO 30
000060      GO TO 55

```

```

000061      40 PD1 = PL-PCC
000062      NM2 = NSTEP-IK
C
000063      DO 50 I=1,NM2
000064      PH = PL+DP
000065      CALL PR(PH,PCC,PT,GC,XE,XT,IC)
000066      IF(IC.EQ.2) GO TO 55
000067      PD2 = PH-PCC
000068      IF((PD1*PD2).LT.0.) GO TO 100
000069      PL = PH
000070      PD1 = PD2
000071      50 CONTINUE
C
000072      55 PRINT 75,PO,TO,PB
000073      GO TO 400
000074      100 CONTINUE
000075      PDL = PD1
000076      PDH = PD2
C
000077      DO 200 I=1,50
000078      PX = (PH*PDL-PL*PDH)/(PDL-PDH)
000079      CALL PR(PX,PCC,PT,GC,XE,XT,IC)
000080      PDX = PX-PCC
C
000081      IF(ABS(PDX).LT.THRESH) GO TO 300
C *** THRESHOLD VALUE WAS CHANGED BY HASH ***
C *** THRESHOLD VALUE WAS CHANGED BY ISO 62.02.06 ***
C           IF(ABS(PDX).LT.1.E-3) GO TO 300
C           IF(ABS(PDX).LT.5.E-3) GO TO 300
C           IF(ABS(PDX).LT.1.E-2) GO TO 300
C
000082      IF((PDX*PDH).GT.0.) GO TO 250
C
000083      PDL = PDX
000084      PL = PX
000085      GO TO 200
000086      250 PDH = PDX
000087      PH = PX
000088      200 CONTINUE
C
000089      PRINT 220,PL,PH,PDL,PDH
000090      GO TO 1000
000091      300 CONTINUE
000092      EN = PCC/PO
000093      GM = AREA*GC
000094      AREA = 144.*AREA
000095      PER = 12.*PER
000096      ED = 12.*ED
000097      EK = 12.*EK
C
C
000098      PRESS = PCC
C
000099      CALL JAERI(PRESS,TEMP,VOLG,ENTAG,ENTOG,2)
000100      CALL JAERI(PRESS,TEMP,VOLF,ENTAF,ENTOF,4)
C
000101      PCC = PRESS
000102      TS2 = TEMP
000103      H1 = ENTAF
000104      H2 = ENTAG
000105      HHE = XT*H2+(1.-XT)*H1
000106      GO TO 500

```

```

000107      400 CONTINUE
C
000108      PRESS = PO
000109      TEMP  = TO
000110      GO TO (11,12,13),IN
C
000111      11 CALL JAERI(PRESS,TEMP,VOLF,ENTAF,ENTOF,3)
000112      GO TO 2000
000113      12 CALL JAERI(PRESS,TEMP,VOLF,ENTAF,ENTOF,4)
000114      GO TO 2000
000115      13 CALL JAERI(PRESS,TEMP,VOLF,ENTAF,ENTOF,0)
000116      2000 CONTINUE
C
000117      PO   = PRESS
000118      TO   = TEMP
000119      VLO  = VOLF
C
C      !!!!!!! NO CHOKING !!!!!!
C      G**2 = 2*RO*(PO-PB) = 2*(LBM/FT**3)*LBF/IN**2
C      = 2*LBM/FT**3*(32.15LBM*FT/S**2)/IN**2
C      = 2*32.15*LBM**2/(FT/12)**2/S**2
C      = 2*32.15*144*(LBM*S/FT**2)**2
C      = 9264.96*(LBM*S/FT**2)**2
C
000120      GC2  = 9266.112*(PO-PB)/VLO
000121      GC   = SQRT(GC2)
000122      GM   = AREA*GC
000123      PCC  = PB
000124      XT   = 0.
000125      XA   = 0.
000126      AREA  = 144.*AREA
000127      PER   = 12.*PER
000128      ED    = 12.*ED
000129      EK    = 12.*EK
000130      GO TO 510
C
000131      500 CONTINUE
C
000132      PRESS = PB
C
000133      CALL JAERI(PRESS,TEMP,VOLG,ENTAG,ENTOG,2)
000134      CALL JAERI(PRESS,TEMP,VOLF,ENTAF,ENTOF,4)
C
000135      PB   = PRESS
000136      TSA  = TEMP
000137      H1   = ENTAF
000138      H2   = ENTAG
000139      XA  = (HHE-H1)/(H2-H1)
C
000140      510 PRINT 600
000141      PO = PO*PCV/98066.5
000142      PRINT 605,PO
000143      TO = (TO-32.)/1.8
000144      PRINT 610,TO
000145      GO TO (520,530,540),IN
000146      520 PRINT 615,IN
000147      GO TO 550
000148      530 PRINT 616,IN
000149      GO TO 550
000150      540 PRINT 617,IN
000151      550 PB = PB*PCV/98066.5
000152      PRINT 620,PB

```

```

000153      PRINT 650
000154      EL = 25.4*EL
000155      PRINT 710,EL
000156      EW = 25.4*EW
000157      PRINT 720,EW
000158      ED = ED*25.4
000159      PRINT 670,ED
000160      DH = DH*25.4*12.
000161      PRINT 730,DH
000162      PRINT 695,XLD
000163      EK = EK*25.4
000164      PRINT 675,EK
000165      AREA = AREA*25.4**2
000166      PRINT 660,AREA
000167      PER = PER*25.4
000168      PRINT 665,PER
000169      PRINT 680,AR
000170      PRINT 685,N1
000171      PRINT 690,N2
000172      PRINT 700,THRESH
000173      PRINT 750
C
C      1 LBM/(FT**2*S) = 4.88243 KG/(M**2*S)
C
000174      GC = GC*4.8825
000175      GALLON= GC*60.0/3.78543*1.E-6
000176      PRINT 770,GC,GALLON
000177      GM = GM*0.4536
000178      GG = GALLON*AREA
000179      PRINT 800,GM,GG
000180      PCC = PCC*PCV/98066.5
000181      PRINT 850,PCC
000182      PRINT 900,XT
000183      PRINT 950,XA
C
000184      14 FORMAT(1H ,20A4)
000185      *10 FORMAT(1H ,I1,F9.4,6F10.3)
000186      15 FORMAT(1H ,5F10.5,2I10)
000187      75 FORMAT('-',10X,'*** FLOW IS NOT CHOKED FOR THIS CASE ***',
           13F10.2)
000188      220 FORMAT('-',*** FAIL TO CONVERGENCE. ***'/' *** TRY TO INPUT MUCH
           *LARGER THRESHOLD VALUE ***',4F15.4)
000189      598 FORMAT('+',45X,F10.6)
000190      599 FORMAT('1',20A4)
000191      600 FORMAT('0','*** STAGNATION PROPERTIES ***',//)
000192      605 FORMAT('0','PRESSURE(PO)=',F10.0,2X,'KGF/CM2A')
000193      610 FORMAT('0','TEMPERATURE(T0)=',F10.1,2X,'C')
000194      615 FORMAT('0','INPUT INDICATOR(IN)=',I5,' --> INITIALLY SATURATED LI
           *QUID,INPUT TEMPERATURE ONLY')
000195      616 FORMAT('0','INPUT INDICATOR(IN)=',I5,' --> INITIALLY SATURATED LI
           *QUID,INPUT PRESSURE ONLY')
000196      617 FORMAT('0','INPUT INDICATOR(IN)=',I5,' --> INITIALLY SUBCOOLED LI
           *QUID,INPUT BOTH TEMPERATURE AND PRESSURE')
000197      620 FORMAT('0','BACK PRESSURE(PB)=',F10.1,2X,'KGF/CM2A',//)
000198      650 FORMAT('0','***** CRACK GEOMETRY *****',//)
000199      660 FORMAT('0','AREA=',F10.4,2X,'MM**2')
000200      665 FORMAT('0','PERIMETER=',F10.2,2X,'MM')
000201      670 FORMAT('0','DEPTH=',F10.2,2X,'MM')
000202      675 FORMAT('0','ROUGHNESS HEIGHT=',E12.4,2X,'MM')
000203      680 FORMAT('0','AREA RATIO(AE/AO)=',F10.2)
000204      685 FORMAT('0','NO. OF 90 DEGREE TURN=',I10)
000205      690 FORMAT('0','NO. OF 45 DEGREE TURN=',I10)

```



```

C
C
000001      SUBROUTINE PR(PCK,PCC,PT,GC,XE,XT,IC)
C
C IN=1 --> INITIALLY SATURATED LIQUID, INPUT TEMERATURE ONLY
C IN=2 --> INITIALLY SATURATED LIQUID, INPUT PRESSURE ONLY
C IN=3 --> INITIALLY SUBCOOLED LIQUID, INPUT BOTH TEMERATURE AND PRESSURE
C
000002      IMPLICIT REAL*8 (A-H,O-Z)
000003      COMMON /PP/ PO,TO,XLD,FF,AR,IN,CD,DH,THETA
C
000004      IC = 1
C
C      KAPPA=CP/CV
C
000005      AKAPPA = 1.33
000006      B   = 0.0523
C
000007      PRESS = PO
000008      TEMP  = TO
000009      GO TO (1,2,3),IN
C
C      INPUT TEMPERATURE ONLY !!!
C
000010      1 CALL JAERI(PRESS,TEMP,VOLF,ENTAF,SLO,3)
000011      PO = PRESS
000012      VLO = VOLF
000013      GO TO 1000
C
C      INPUT PRESSURE ONLY !!!
C
000014      2 CALL JAERI(PRESS,TEMP,VOLF,ENTAF,SLO,4)
000015      TO = TEMP
000016      VLO = VOLF
000017      GO TO 1000
C
C      INPUT BOTH PRESSURE AND TEMPERATURE !!!
C
000018      3 CALL JAERI(PRESS,TEMP,VOLF,ENTAF,SLO,0)
000019      VLO = VOLF
C
000020      1000 CONTINUE
C
000021      PRESS = PCK
C
000022      CALL JAERI(PRESS,TEMP,VOLG,ENTAG,SGC,2)
000023      CALL JAERI(PRESS,TEMP,VOLF,ENTAF,SLC,4)
C
000024      PCK = PRESS
000025      TS  = TEMP
000026      VGC = VOLG
000027      XE  = (SLO-SLC)/(SGC-SLC)
000028      CN  = 1.0
000029      IF(XE.LT.0.05) CN=20.*XE
000030      XT  = CN*XE*(1.-EXP(-B*(XLD-12.)))
000031      XM  = CN*XE-XT/B/(XLD-12.)
000032      200 PC1 = PCK-0.5
000033      PC2 = PCK+0.5
C
000034      PRESS = PC1
C
000035      CALL JAERI(PRESS,TEMP,VOLG,ENTAG,SG1,2)

```

```

000036      CALL JAERI(PRESS,TEMP,VOLF,ENTAF,SL1,4)
C
000037      PRESS = PC2
C
000038      CALL JAERI(PRESS,TEMP,VOLG,ENTAG,SG2,2)
000039      CALL JAERI(PRESS,TEMP,VOLF,ENTAF,SL2,4)
000040      TS = TEMP
000041      DSL = SL2-SL1
000042      DSG = SG2-SG1
000043      DXE = -((1.-XE)*DSL+XE*DSG)/(SGC-SLC)
000044      GC2 = (XT*VGC/PCK/AKAPPA-(VGC-VLO)*CN*DXE)/32.174/144.
000045      GC2 = 1./GC2
000046      IF (GC2.GT.0.) GO TO 50
000047      IC = 3
000048      RETURN
C
000049      50 GC=SQRT(GC2)
000050      DPT = GC2*VLO/2./CD**2/32.174/144.*AR**2
000051      PT = P0-DPT
000052      IF (PT.GT.3.) GO TO 100
000053      IC = 2
000054      RETURN
C
000055      100 CONTINUE
C
000056      PRESS = PT
C
000057      CALL JAERI(PRESS,TEMP,VOLG,ENTAG,S,2)
C
000058      PT = PRESS
000059      TS = TEMP
000060      VGT = VOLG
000061      VGM = (VGT+VGC)/2.
000062      AI = (1.-12.*(1.-AR)/XLD)/AR
000063      GM2 = GC2*(1.+1./AI**2)/2.
C
C      ACCELERATIONAL PRESSURE DROP
000064      DPA = GM2*XT*(VGC-VLO)
C
C      FRICTIONAL PRESSURE DROP
000065      DPF = FF*(XLD-12.)*GM2*((1.-XM)*VLO+XM*VGM)/2.
C
C      PRESSURE DROP DUE TO AREA CHANGE
000066      DPAA = GC2*(VLO*(1.-AR**2)+XM*(VGM-VLO)*(1.-1./AI**2))/2.
C
C      ?????????????? NICHT VERSTEHEN ??????????????
000067      DPG = 0.5*(1./VLO+1./(XT*VGC+(1.-XT)*VLO))*XLD*DH*SIN(THETA)/144.
C      ?????????????? NICHT VERSTEHEN ??????????????
C
C      TOTAL PRESSURE DROP THROUGH CRACK
000068      PCC = PT-(DPA+DPF+DPAA)/32.174/144.-DPG
C
000069      RETURN
000070      END
C
000001      SUBROUTINE JAERI(PUSA,TUSA,VUSA,HUSA,SUSA,INDEX)
000002      IMPLICIT REAL*8 (A-H,O-Z)
C
C      JAPAN <---- USA
C
000003      PJAP = 0.070308*PUSA
000004      TJAP = 0.555556*(TUSA-32.)

```

```
000005      VJAP = 0.062427*VUSA
000006      HJAP = 0.555556*HUSA
000007      SJAP = 0.555556*SUSA
C
000008      CALL STEAMZ(PJAP,TJAP,VJAP,HJAP,SJAP,INDEX)
C
C      USA <---- JAPAN
C
000009      PUSA = 14.223133*PJAP
000010      TUSA = 1.8*TJAP+32.
000011      VUSA = 16.0187*VJAP
000012      HUSA = 1.8*HJAP
000013      SUSA = 1.8*SJAP
C
000014      RETURN
000015      END
SPECIFIED OPTIONS: OPTIMIZE(2),LINECOUNT(0),NOS,ELM(HENRY1),SOURCE,DEBUG(SUBCHK),ALIGNC,NOMAP
END OF COMPILATION
```

### B. 3 漏洩量から配管き裂の大きさを求めるプログラム（MODYのスリップモデルによる解析）

```

000025      COD=114.59156*COA/(PAI*THETAD*R)
000026      F=1.0/(2.0*DLOG10((PAI*COD)/(4.0*EPS))+1.74)**2.0
000027      ALPHA0=(2.0*F*CD)/(PAI*COD)
C      WRITE(6,602) ALPHA0
000028      G=(W*1.0D+6)/COA
000029      LCONT=999
000030      CALL MOODY(P1,G,QX0,DP,PMIN,ALPHA1,IMAX,LCONT)
000031      DAO=ALPHA1-ALPHA0
000032      IF(LCONT.EQ.1) THETAD=THETAD-5.0
000033      IF(DABS(DAO)-0.05) 30,30,20
000034      20 THETA1=THETAD+0.05
000035      CALL COAP(PM,R,SY,E,THETA1,PB,COA,1)
000036      COD=114.59156*COA/(PAI*THETA1*R)
000037      F=1.0/(2.0*DLOG10((PAI*COD)/(4.0*EPS))+1.74)**2.0
000038      ALPHA0=(2.0*F*CD)/(PAI*COD)
C      WRITE(6,602) ALPHA0
C 602 FORMAT(1H,40X,10H ALPHA= ,F15.3)
000039      G=(W*1.0D+6)/COA
000040      LCONT=999
000041      ICONT=1
000042      CALL MOODY(P1,G,QX0,DP,PMIN,ALPHA1,IMAX,LCONT)
000043      DA1=ALPHA1-ALPHA0
000044      IF(DABS(DA1)-0.05) 70,70,60
000045      70 THETAD=THETA1
000046      GO TO 30
000047      60 THETAD=THETA1-(DA1*0.05/(DA1-DAO))
000048      IF(LCONT.EQ.1) THETAD=THETA1-5.0
C      WRITE(6,601) THETAD
C 601 FORMAT(1H ,10H THETAD= ,F10.3)
000049      10 CONTINUE
000050      WRITE(6,600)
000051      600 FORMAT(/,43H MAIN LOOP REITERATION IS OVER.NO SOLUTION)
000052      30 PBPM=PB+PM
000053      WRITE(6,402) (TITLE(J),J=1,20)
000054      402 FORMAT(1H1,/,20X,20A4/)
000055      WRITE(6,403) DIA,CD,SY,E,THETAD,PO,PB,PM,PBPM
000056      403 FORMAT(/,10X, 10HDIAMETER= ,F15.5,3H MM,/,
1           ,10X, 10HTHICKNESS= ,F15.5,7H MM   ,/
2           ,10X, 10H SIGMAY= ,F15.5,7H KG/MM2,/,
3           ,10X, 10H E = ,F15.5,/,
4           ,10X, 10H THETA = ,F15.5,4H DEG,/,
5           ,10X, 10H PRESS = ,F15.5,8H KG/CM2G,/,
6           ,10X, 10H PB = ,F15.5,7H KG/MM2,/,
7           ,10X, 10H PM = ,F15.5,7H KG/MM2,/,
8           ,10X, 10H PB+PM = ,F15.5,7H KG/MM2)
000057      WRITE(6,702) QX0,EPS,CD,DPO,COD,ALPHA0,ALPHA1,G,COA,W,WG
000058      702 FORMAT(/,10X,10H QX0= ,F15.5,
1           ,/10X,10H EPS= ,F15.5,7H MM   ,
2           ,/10X,10H CDEPTH= ,F15.5,7H MM   ,
3           ,/10X,10H DP = ,F15.5,7H KG/CM2,
4           ,/10X,10H COD= ,F15.5,7H MM   ,
5           ,/10X,10H ALPHA0= ,F15.5,
6           ,/10X,10H ALPHA1= ,F15.5,
7           ,/10X,10H G = ,F15.5,7H KG/M2S,
8           ,/10X,10H COA= ,F15.5,7H MM2 ,
9           ,/10X,10H W = ,F15.5,7H KG/S ,
A           ,/10X,10H W = ,F15.5,14H GPM AT 60 DEG)
000059      CALL COAP(PM,R,SY,E,THETA1,PB,COA,999)
000060      WRITE(6,604)
000061      604 FORMAT( 4H NO , 7H PRESS,10H QUALITY ,6H V ,
1           8H ENT H ,8H ENT HL ,8H ENT HG ,
2           6HENT S ,7H EN SL ,8H ENT SG ,

```



```

1           HL(999),QX(999),S(999),SG(999),SL(999),SR(999),
2           TEMP(999)
000004     PO=PO/10000.0
000005     PS=PO
000006     TS=TSAT(PS)
000007     TEMPO=TS
C     WRITE(6,604) G,P(I)
C 604 FORMAT(10H      G=   , F15.5,10H    P(I)1 =, F15.5)
000008     CALL STEAMZ(PO,TEMPO,VGO,HGO,SGO,2)
000009     CALL STEAMZ(PO,TEMPO,VLO,HLO,SL0,4)
000010     PO=PO*10000.0
000011     HO=HLO+QX0*(HGO-HLO)
000012     VO=VLO
000013     VMO=VLO
000014     N=(PO-PMIN)/DP
000015     DO 3 I=1,N
000016     P(I)=PO-DP*FLOAT(I)
000017     P(I)=P(I)/10000.0
000018     PS=P(I)
000019     TS=TSAT(PS)
000020     TEMP(I)=TS
C     WRITE(6,605) G,P(I)
C 605 FORMAT(10H      G=   , F15.5,10H    P(I)2 =, F15.5)
000021     CALL STEAMZ(P(I),TEMP(I),VG(I),HG(I),SG(I),2)  注)
000022     CALL STEAMZ(P(I),TEMP(I),VL(I),HL(I),SL(I),4)
000023     P(I)=P(I)*10000.0
000024     SR(I)=(VG(I)/VL(I))**((1.0/3.0))
000025     CALL QLTY(QX(I),SR(I),VL(I),VG(I),HL(I),HG(I),HO,G,LCONT)
000026     V(I)=VL(I)+QX(I)*(VG(I)-VL(I))
000027     H(I)=HL(I)+QX(I)*(HG(I)-HL(I))
000028     S(I)=SL(I)+QX(I)*(SG(I)-SL(I))
000029     VM(I)=(SR(I)*(1.0-QX(I))*VL(I)+QX(I)*VG(I))*1
          (QX(I)+(1.0-QX(I))/SR(I))
C     FIND SMAX DEFINE P-CRITICAL
C
000030     IF(I-1)4,4,2
000031     2 IF(S(I).LT.SMAX) GO TO 1
000032     4 SMAX=S(I)
000033     IMAX=I
000034     PC=P(I)
000035     3 CONTINUE
000036     WRITE(6,606) I
000037     606 FORMAT(//,5X,4H I= ,I4,27H ENTROPY MAX DOES NOT EXIST)
000038     LCONT=1
000039     1 CALL INTEG(S1,S2,PO,IMAX,V,P,VM,VO,VMO)
000040     ALPHA=2.0*9.80665/G**2*S1-2.0*S2
C     IF(ICONT.EQ.1) GO TO 999
C     WRITE(6,601) PO,TEMPO,G,QX0,DP,PMIN,PC,SMAX,ALPHA
C 601 FORMAT(//,10X,10H    PO =   , F15.3,
C     1     //,10X,10H    TO =   , F10.3,
C     2     //,10X,10H    G =   , F15.5,
C     3     //,10X,10H    QX0 =   , F10.3,
C     4     //,10X,10H    DP =   , F10.3,
C     5     //,10X,10H    PMIN=   , F10.3,
C     6     //,10X,10H    PC =   , F10.3,
C     7     //,10X,10H    SMAX=   , F15.5,
C     8     //,10X,10H    ALPHA=   , F10.3,/)
000041     999 RETURN
000042     END
000001     SUBROUTINE QLTY(QX,SR,VL,VG,HL,HG,HO,G,LCONT)
000002     IMPLICIT REAL*8(A-H,O-Z)
000003     GRAV= 9.80665

```

```

000004      AA= 1.0/426.858
000005      A = (1.0-1.0/SR**2)*(1.0-2.0*SR*VL/VG+SR**2*(VL/VG)**2)
000006      B = (1.0-2.0*SR*VL/VG+SR**2*(VL/VG)**2)/SR**2+
000007      1   2.0*(1.0-1.0/SR**2)*SR*VL/VG*(1.0-VL/VG*SR)
000008      C = 2.0/SR*VL/VG*(1.0-VL/VG*SR)+(SR**2-1.0)*(VL/VG)**2+
000009      1   (HG-HL)/(VG**2*AA*G**2)*2.0*GRAV
000010      D = -(H0-HL)/(VG**2*AA*G**2)*2.0*GRAV+(VL/VG)**2
000011      C      AA=1/427      KCAL/KG-M
000012      C      SOLVE  AX**3+BX**2+CX+D=0
000013      C      0<=X<=1
000014      X1=-0.1
000015      X2=1.0
000016      X=(X1+X2)/2.0
000017      2 Y1=A*X1**3+B*X1**2+C*X1+D
000018      2 Y2=A*X2**3+B*X2**2+C*X2+D
000019      Y=A*X**3+B*X**2+C*X+D
000020      IF(Y1*Y.LE.0.0) X2=X
000021      IF(Y2*Y.LE.0.0) X1=X
000022      XN=(X1+X2)/2.0
000023      IF(Y1*Y2.GT.0.0) GO TO 3
000024      EPS=ABS((X-XN)/XN)
000025      IF(EPS.LE.1.0E-6) GO TO 1
000026      X=XN
000027      GO TO 2
000028      3 LCONT=1
000029      WRITE(6,601) Y1,Y,Y2
000030      601 FORMAT(/20X,10H F(X1)= ,E15.5,,,
000031          1     20X,10H F(X) = ,E15.5,,,
000032          2     20X,10H F(X2)= ,E15.5,,,
000033          3     20X,30H EQ.CAN NOT BE SOLVED
000034      1 CONTINUE
000035      X=XN
000036      QX=X
000037      IF(QX.LT.0.0) QX=0.0
000038      RETURN
000039      END
000040      SUBROUTINE INTEG(S1,S2,P0,IMAX,V,P,VM,VO,VMO)
000041      IMPLICIT REAL*8(A-H,O-Z)
000042      DIMENSION V(999),P(999),VM(999)
000043      S1=0.0
000044      S2=0.0
000045      DO 1 I=2, IMAX
000046      DP=P(I)-P(I-1)
000047      DVM=VM(I)-VM(I-1)
000048      VX=(V(I-1)+V(I))/2.0
000049      S1=S1+DP/VX
000050      S2=S2+DVM/VX
000051      1 CONTINUE
000052      DS11=(P(1)-P0)*2.0/(V(1)+VO)
000053      DS21=(VM(1)-VMO)*2.0/(V(1)+VO)
000054      S1=S1+DS11
000055      S2=S2+DS21
000056      S1=-S1
000057      RETURN
000058      END
000059

```

B . 4 漏洩量から配管き裂の大きさを求めるプログラム（HENRYの臨界流モデルによる解析）

```

C
C MODIFICATION OF EPRI'S PROGRAMM FOR LEAK RATE THROUGH CRACKS
C CALCULATION OF CRACK ANGLE WHEN LEAK RATE IS GIVEN
C
C V. 1.0 '88. 9.19. BY H.SHINOKAWA
C
C *** THE INPUT TO THE PROGRAM ***
C
C FIRST CARD
C   TITLE CARD
C
C SECOND CARD
C IN=1 --> INITIALLY SATURATED LIQUID, INPUT TEMERATURE ONLY
C IN=2 --> INITIALLY SATURATED LIQUID, INPUT PRESSURE ONLY
C IN=3 --> INITIALLY SUBCOOLED LIQUID, INPUT BOTH TEMERATURE AND PRESSURE
C BEND = BENDING STRESS (KGF/MM2)
C PO = STAGNATION PRESSURE (KGF/CM2)
C TO = STAGNATION TEMPERATURE (C)
C PB = BACK PRESSURE (KGF/CM2)
C THRESH = THERSHHOLD VALUE, ORIGINAL VALUE = 1.E-3
C E = YOUNG'S MODULUS (KGFM/MM2)
C SY = SIGMA Y ( KGFM/MM2 )
C
C THIRD CARD
C DIA= PIPE DIAMETER (MM)
C W = LEAK RATE ( GPM )
C ED = PIPE WALL THICKNESS (MM)
C EK = THE HEIGHT OF PROTRUSION OF THE ROUGHNESS GRAIN FROM THE MEAN
C SURFACE (MM)
C AR = AREA RATIO = AE/AO
C N1 = NUMBER OF 90 DEGREES TURNS IN THE CRACK PATH
C N2 = NUMBER OF 45 DEGREES TURNS IN THE CRACK PATH
C
C           *** JAERI'S STEAM TABLE ***
C
C STEAMZ(P,T,V,H,S,INDEX)
C INDEX=0 --> SUBCOOLED WATER OR SUPERHEATED STEAM, INPUT BOTH PRESSURE
C AND TEMPERATURE
C INDEX=1 --> SATURATED STEAM, INPUT TEMPERATURE
C INDEX=2 --> SATURATED STEAM, INPUT PRESSURE
C INDEX=3 --> SATURATED WATER, INPUT TEMPERATURE
C INDEX=4 --> SATURATED WATER, INPUT PRESSURE
C
000001 IMPLICIT REAL*8 (A-H,O-Z)
000002 DIMENSION TITLE(20)
000003 COMMON /BL1/EL,EW,GM,PCC,XT,XA,PER,GC,GALLON
000004 COMMON /PP/ PO,TO,XLD,FF,AR,IN,CD,DH,THETA
C
000005 1 READ (9,14,END=1000) (TITLE(J),J=1,20)
000006 READ (9,10) IN,BEND,PO,TO,PB,THRESH,E,SY
000007 READ(9,15) DIA,W,ED,EK,AR,N1,N2
000008 WRITE(6,14) (TITLE(J),J=1,20)
000009 WRITE(6,10) IN,BEND,PO,TO,PB,THRESH,E,SY
000010 WRITE(6,15) DIA,W,ED,EK,AR,N1,N2
000011 WRITE(6,599) (TITLE(J),J=1,20)
C
000012 PAI = 3.141592654
000013 R=(DIA-ED)/2.0
000014 P1=PO-PB
000015 PM = P1* (R-0.5*ED)**2/ED/R *0.005

```

```

000016      PBPM=BEND+PM
C
C IF FLOW IS CHOICKED, THE INITIAL CRACK ANGLE SHOULD BE
C     CHANGED TO ANOTHER SUITABLE ONE .
C
000017      THETAD=80.
000018      DO 399 I=1,10
000019      CALL COAP(PM,R,SY,E,THETAD,BEND,AREA,1)
000020      CALL HENRY(AREA,PB,THRESH,ED,EK,N1,N2,GG,R,
1          THETAD)
000021      IF(DABS(W-GG)-0.01) 402,402,401
000022 401 G1=GG
000023      THETAD=THETAD+0.05
000024      CALL COAP(PM,R,SY,E,THETAD,BEND,AREA,1)
000025      CALL HENRY(AREA,PB,THRESH,ED,EK,N1,N2,GG,R,
1          THETAD)
000026      IF(DABS(W-GG)-0.01) 402,402,400
000027 400 THETAD=THETAD-((GG-W)*0.05/(GG-G1))
000028 399 CONTINUE
000029      WRITE(6,398)
000030      398 FORMAT(/,43H MAIN LOOP REITERATION IS OVER.NO SOLUTION)
000031      402 CALL COAP(PM,R,SY,E,THETAD,BEND,AREA,999)
000032      EW=114.59156*AREA/(PAI*THETAD*R)
000033      WRITE(6,598) EW
000034      WRITE(6,403) DIA,ED,SY,E,THETAD,P1,BEND,PM,PBPM
000035 403 FORMAT(/,10X, 10HDIAMETER= ,F15.5,3H MM//,
1          ,10X, 10HTHICKNESS=,F15.5,7H MM   //,
2          ,10X, 10H SIGMAY= ,F15.5,7H KG/MM2//,
3          ,10X, 10H E = ,F15.5,/,
4          ,10X, 10H THETA = ,F15.5,4H DEG//,
5          ,10X, 10H PRESS = ,F15.5,8H KG/CM2G//,
6          ,10X, 10H PB = ,F15.5,7H KG/MM2//,
7          ,10X, 10H PM = ,F15.5,7H KG/MM2//,
8          ,10X, 10H PB+PM = ,F15.5,7H KG/MM2)
000036      PRINT 600
000037      PRINT 605,PO
000038      PRINT 610,TO
000039      GO TO (520,530,540),IN
000040 520 PRINT 615,IN
000041      GO TO 550
000042 530 PRINT 616,IN
000043      GO TO 550
000044 540 PRINT 617,IN
000045 550 PRINT 620,PB
000046      PRINT 650
000047      PRINT 710,EL
000048      PRINT 720,EW
000049      PRINT 670,ED
000050      PRINT 730,DH
000051      PRINT 695,XLD
000052      PRINT 675,EK
000053      PRINT 660,AREA
000054      PRINT 665,PER
000055      PRINT 680,AR
000056      PRINT 685,N1
000057      PRINT 690,N2
000058      PRINT 700,THRESH
000059      PRINT 750
C
C      1 LBM/(FT**2*S) = 4.88243 KG/(M**2*S)
C
000060      PRINT 770,GC,GALLON

```

```

000061      PRINT 800,GM,GG
000062      PRINT 850,PCC
000063      PRINT 900,XT
000064      PRINT 950,XA
C
000065      14 FORMAT(1H ,20A4)
000066      10 FORMAT(1H ,I1,F9.4,6F10.3)
000067      15 FORMAT(1H ,5F10.5,2I10)
000068      598 FORMAT('+',45X,F10.6)
000069      599 FORMAT('1',20A4)
000070      600 FORMAT('0','**** HENRY MODEL *****',/
1           '*** STAGNATION PROPERTIES ***',/)
000071      605 FORMAT('0','PRESSURE(P0)=',F10.0,2X,'KGF/CM2A')
000072      610 FORMAT('0','TEMPERATURE(T0)=',F10.1,2X,'C')
000073      615 FORMAT('0','INPUT INDICATOR(IN)=',I5,' ---> INITIALLY SATURATED LI
*QUID, INPUT TEMPERATURE ONLY')
000074      616 FORMAT('0','INPUT INDICATOR(IN)=',I5,' ---> INITIALLY SATURATED LI
*QUID, INPUT PRESSURE ONLY')
000075      617 FORMAT('0','INPUT INDICATOR(IN)=',I5,' ---> INITIALLY SUBCOOLED LI
*QUID, INPUT BOTH TEMPERATURE AND PRESSURE')
000076      620 FORMAT('0','BACK PRESSURE(PB)=',F10.1,2X,'KGF/CM2A',/)
000077      650 FORMAT('0','**** CRACK GEOMETRY *****',/)
000078      660 FORMAT('0','AREA=',F10.4,2X,'MM**2')
000079      665 FORMAT('0','PERIMETER=',F10.2,2X,'MM')
000080      670 FORMAT('0','DEPTH=',F10.2,2X,'MM')
000081      675 FORMAT('0','ROUGHNESS HEIGHT=',E12.4,2X,'MM')
000082      680 FORMAT('0','AREA RATIO(AE/A0)=',F10.2)
000083      685 FORMAT('0','NO. OF 90 DEGREE TURN=',I10)
000084      690 FORMAT('0','NO. OF 45 DEGREE TURN=',I10)
000085      695 FORMAT('0','DEPTH/HYDR. DIA.=',F10.1,)
000086      700 FORMAT('0','THRESHOLD VALUE =',F10.5,/)
000087      710 FORMAT('0','2C=',F10.5,2X,'MM')
000088      720 FORMAT('0','EQUIVARENT COD=',F10.5,2X,'MM')
000089      730 FORMAT('0','HYDR. DIA.=',F10.5,2X,'MM')
000090      750 FORMAT('0','**** OUTPUT *****',/)
000091      770 FORMAT('0','CRITICAL MASS FLUX =', E15.4,2X,'KG/M**2 SEC'/
1           '0', '=' , E15.4,2X,'GPM/MM**2')
000092      800 FORMAT('0','LEAK RATE =', E15.4,2X,'KG/SEC =',F10.5,2X,'GPM')
000093      850 FORMAT('0','PRESSURE AT EXIT PLANE =',F10.1,2X,'KGF/CM2')
000094      900 FORMAT('0','QUALITY AT EXIT PLANE =',F10.4)
000095      950 FORMAT('0','QUALITY AT BACK PRESSURE =',F10.4)
000096      GO TO 1
000097      1000 STOP
000098      END
CCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCC
CCC                                         CC
000001      SUBROUTINE HENRY(AREA,PB,THRESH,ED,EK,N1,N2,GG,R,
1           THETAD)
CCC                                         CC
CCC                                         CC
CCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCC
000002      IMPLICIT REAL*8 (A-H,O-Z)
000003      COMMON /BL1/EL,EW,GM,PCC,XT,XA,PER,GC,GALLON
000004      COMMON /PP/ PO,TO,XLD,FF,AR,IN,CD,DH,THETA
C
000005      CD     = 0.61
000006      PAI    = 3.141592654
000007      THETA = 0.5*PAI
C
C      1KPA= 1000N/M**2= 1000KG/M/S**2= 1000/9.8*E-4 KGF/CM**2
C      = 1000*E-4/9.8/0.07031 LBF/IN**2= 1000/6890.4 LBF/IN**2
C

```

```

000008      PCV    = 6.894757E+3
000009      NSTEP  = 200
000010      EW=114.59156*AREA/(PAI*THETAD*R)
000011      EW=PAI*EW/4.
000012      PO  = 98066.5*PO/PCV
000013      TO  = 1.8*T0+32.
000014      PB  = 98066.5*PB/PCV
000015      EL=PAI*R*THETAD/90.
000016      EL  = EL/25.4
000017      EW  = EW/25.4
000018      ED  = ED/25.4
000019      EK  = EK/25.4
000020      IK  = 0
000021      AREA  = EW*EL
000022      PER   = 2.* (EW+EL)
000023      AREA  = AREA/(304.8**2)
000024      PER   = PER/12.
000025      ED   = ED/12.
000026      EK   = EK/12.
000027      DH   = 4.*AREA/PER
000028      XLD  = ED/DH+50.*N1+26.*N2
000029      IF(XLD.LE.12.) GO TO 400
000030      RK  = DH/2./EK
000031      FF  = 1.0/(2.*DLOG10(RK)+1.74)**2
C
C
000032      IF(IN.EQ.1) THEN
000033      TEMP = TO
000034      TEMP= (TEMP-32.0)*0.5555556
000035      PRESS = PSAT(TEMP)
000036      PO  = PRESS*14.223133
000037      ENDIF
C
000038      DP = (PO-PB)/FLOAT(NSTEP)
000039      PL = PB
000040      30 CALL PR(PL,PCC,PT,GC,XE,XT,IC)
000041      IF(IC.EQ.2) GO TO 55
000042      IF(IC.NE.3) GO TO 40
000043      IK = IK+1
000044      PL = PL+DP
000045      IF(IK.LT.NSTEP) GO TO 30
000046      GO TO 55
000047      40 PD1 = PL-PCC
000048      NM2 = NSTEP-IK
C
000049      DO 50 I=1,NM2
000050      PH = PL+DP
000051      CALL PR(PH,PCC,PT,GC,XE,XT,IC)
000052      IF(IC.EQ.2) GO TO 55
000053      PD2 = PH-PCC
000054      IF((PD1*PD2).LT.0.) GO TO 100
000055      PL = PH
000056      PD1 = PD2
000057      50 CONTINUE
C
000058      55 PRINT 75,PO,TO,PB
000059      75 FORMAT('-',10X,'*** FLOW IS NOT CHOKED FOR THIS CASE ***',
13F10.2)
000060      GO TO 400
000061      100 CONTINUE
000062      PDL = PD1
000063      PDH = PD2

```

```

C
000064      DO 200 I=1,50
000065          PX = (PH*PDL-PL*PDH)/(PDL-PDH)
000066          CALL PR(PX,PCC,PT/GC/XE,XT,IC)
000067          PDX = PX-PCC
C
000068      IF(ABS(PDX).LT.THRESH) GO TO 300
C *** THRESHOLD VALUE WAS CHANGED BY HASH ***
C *** THRESHOLD VALUE WAS CHANGED BY ISO 62.02.06 ***
C           IF(ABS(PDX).LT.1.E-3) GO TO 300
C           IF(ABS(PDX).LT.5.E-3) GO TO 300
C           IF(ABS(PDX).LT.1.E-2) GO TO 300
C
000069      IF((PDX*PDH).GT.0.) GO TO 250
C
000070          PDL = PDX
000071          PL = PX
000072          GO TO 200
000073 250 PDH = PDX
000074          PH = PX
000075 200 CONTINUE
C
000076      PRINT 220,PL,PH,PDL,PDH
000077 220 FORMAT('-',*** FAIL TO CONVERGENCE. ***'/' *** TRY TO INPUT MUCH
*LARGER THRESHOLD VALUE ***',4F15.4)
000078          GO TO 1000
000079 300 CONTINUE
000080          EN = PCC/PO
000081          GM = AREA*GC
000082          AREA = 144.*AREA
000083          PER = 12.*PER
000084          ED = 12.*ED
000085          EK = 12.*EK
C
C
000086      PRESS = PCC
C
000087      CALL JAERI(PRESS,TEMP,VOLG,ENTAG,ENTOG,2)
000088      CALL JAERI(PRESS,TEMP,VOLF,ENTAF,ENTOF,4)
C
000089          PCC = PRESS
000090          TS2 = TEMP
000091          H1 = ENTAF
000092          H2 = ENTAG
000093          HHE = XT*H2+(1.-XT)*H1
000094          GO TO 500
000095 400 CONTINUE
C
000096          PRESS = PO
000097          TEMP = TO
000098          GO TO (11,12,13),IN
C
000099 11 CALL JAERI(PRESS,TEMP,VOLF,ENTAF,ENTOF,3)
000100          GO TO 2000
000101 12 CALL JAERI(PRESS,TEMP,VOLF,ENTAF,ENTOF,4)
000102          GO TO 2000
000103 13 CALL JAERI(PRESS,TEMP,VOLF,ENTAF,ENTOF,0)
000104 2000 CONTINUE
C
000105          PO = PRESS
000106          TO = TEMP
000107          VLO = VOLF

```



```

000006      FT = 1.0 + 7.5* THN**1.5 - 15.0 * THN**2.5 + 33.0 *THN**3.5
000007      FB = 1.0 + 6.8* THN**1.5 - 13.6 * THN**2.5 + 20.0 *THN**3.5
000008      SIFT = PM*DSQRT(PAI*R*THETA) * FT
000009      SIFB = PB*DSQRT(PAI*R*THETA) * FB
000010      SIF = SIFT + SIFB
000011      THEFF = THETA + SIF**2/(2.0*PAI*R*SY**2)
000012      TN = THEFF/PAI
000013      AIT = 2.0*THEFF**2*(1.0
1           + TN**1.5*(8.6-13.3*TN + 24.0*TN**2)
2           + TN**3.0*(22.5-75.0*TN+ 205.7*TN**2
3           -247.5*TN**3 +242.0*TN**4) )
C      AIB = (3.0 + COS(THEFF))*0.25 * AIT
000014      AIB = 2.0*THEFF**2 * (1.0
1           + TN**1.5 *(8.2-12.7*TN +19.3*TN**2)
2           + TN**3.0 *(20.4-68.0*TN+165.2*TN**2
3           -187.2* TN**3+146.7 *TN**4 ) )
000015      AT = PM/E * PAI*R**2 * AIT
000016      AB = PB/E * PAI*R**2 * AIB
000017      COA=AT + AB
000018      IF(ICONT.EQ.1) GO TO 999
000019      WRITE(6,400)
000020      400 FORMAT(/, 5OH S.I.F AND CRACK OPENING AREA BY PARIS-TADA EQ. /,
1 5OH THETA TETAEFF PM PB FT FB ,
2 2X,25H SIFT SIFB SIF )
000021      WRITE(6,401) THETA,THEFF,PM,PB,FT,FB,SIFT,
1           SIFB,SIF
000022      401 FORMAT( 2X,2F8.4,2F8.4,3F8.3,2F8.4)
000023      WRITE(6,404)
000024      404 FORMAT(/,1H,4X,45H IT IB AREAT AREAB AREA COD)
000025      WRITE(6,405) AIT,AIB,AT,AB,COA
000026      405 FORMAT( 2X,2F8.5,3F8.4)
000027      999 RETURN
000028      END
C
C
C
C
000001      SUBROUTINE PR(PCK,PCC,PT,GC,XE,XT,IC)
C
C IN=1 --> INITIALLY SATURATED LIQUID, INPUT TEMERATURE ONLY
C IN=2 --> INITIALLY SATURATED LIQUID, INPUT PRESSURE ONLY
C IN=3 --> INITIALLY SUBCOOLED LIQUID, INPUT BOTH TEMERATURE AND PRESSURE
C
000002      IMPLICIT REAL*8 (A-H,O-Z)
000003      COMMON /PP/ P0,TO,XLD,FF,AR,IN,CD,DH,THETA
C
000004      IC = 1
C
C KAPPA=CP/CV
C
000005      AKAPPA = 1.33
000006      B = 0.0523
C
000007      PRESS = P0
000008      TEMP = TO
000009      GO TO (1,2,3),IN
C
C INPUT TEMPERATURE ONLY !!!
C
000010      1 CALL JAERI(PRESS,TEMP,VOLF,ENTAF,SLO,3)
000011      P0 = PRESS
000012      VLO = VOLF

```

```

000013      GO TO 1000
C
C      INPUT PRESSURE ONLY !!!
C
000014      2 CALL JAERI(PRESS,TEMP,VOLF,ENTAF,SLO,4)
000015      TO = TEMP
000016      VLO = VOLF
000017      GO TO 1000
C
C      INPUT BOTH PRESSURE AND TEMPERATURE !!!
C
000018      3 CALL JAERI(PRESS,TEMP,VOLF,ENTAF,SLO,0)
000019      VLO = VOLF
C
000020      1000 CONTINUE
C
000021      PRESS = PCK
C
000022      CALL JAERI(PRESS,TEMP,VOLG,ENTAG,SGC,2)
000023      CALL JAERI(PRESS,TEMP,VOLF,ENTAF,SLC,4)
C
000024      PCK = PRESS
000025      TS = TEMP
000026      VGC = VOLG
000027      XE = (SLO-SLC)/(SGC-SLC)
000028      CN = 1.0
000029      IF(XE.LT.0.05) CN=20.*XE
000030      XT = CN*XE*(1.-EXP(-B*(XLD-12.)))
000031      XM = CN*XE-XT/B/(XLD-12.)
000032      200 PC1 = PCK-0.5,
000033      PC2 = PCK+0.5
C
000034      PRESS = PC1
C
000035      CALL JAERI(PRESS,TEMP,VOLG,ENTAG,SG1,2)
000036      CALL JAERI(PRESS,TEMP,VOLF,ENTAF,SL1,4)
C
000037      PRESS = PC2
C
000038      CALL JAERI(PRESS,TEMP,VOLG,ENTAG,SG2,2)
000039      CALL JAERI(PRESS,TEMP,VOLF,ENTAF,SL2,4)
000040      TS = TEMP
000041      DSL = SL2-SL1
000042      DSG = SG2-SG1
000043      DXE = -((1.-XE)*DSL+XE*DSG)/(SGC-SLC)
000044      GC2 = (XT*VGC/PCK/AKAPPA-(VGC-VLO)*CN*DYE)/32.174/144.
000045      GC2 = 1./GC2
000046      IF (GC2.GT.0.) GO TO 50
000047      IC = 3
000048      RETURN
C
000049      50 GC=SQRT(GC2)
000050      DPT = GC2*VLO/2./CD**2/32.174/144.*AR**2
000051      PT = P0-DPT
000052      IF (PT.GT.3.) GO TO 100
000053      IC = 2
000054      RETURN
C
000055      100 CONTINUE
C
000056      PRESS = PT
C

```

```

000057      CALL JAERI(PRESS,TEMP,VOLG,ENTAG,S,2)
C
000058      PT  = PRESS
000059      TS  = TEMP
000060      VGT = VOLG
000061      VGM = (VGT+VGC)/2.
000062      AI  = (1.-12.*(1.-AR)/XLD)/AR
000063      GM2 = GC2*(1.+1./AI**2)/2.
C
C      ACCELERATIONAL PRESSURE DROP
000064      DPA = GM2*XT*(VGC-VLO)
C
C      FRICTIONAL PRESSURE DROP
000065      DPF = FF*(XLD-12.)*GM2*((1.-XM)*VLO+XM*VGM)/2.
C
C      PRESSURE DROP DUE TO AREA CHANGE
000066      DPAA = GC2*(VLO*(1.-AR**2)+XM*(VGM-VLO)*(1.-1./AI**2))/2.
C
C      ?????????????? NICHT VERSTEHEN ??????????????
000067      DPG = 0.5*(1./VLO+1./(XT*VGC+(1.-XT)*VLO))*XLD*DH*SIN(THETA)/144.
C      ?????????????? NICHT VERSTEHEN ??????????????
C
C      TOTAL PRESSURE DROP THROUGH CRACK
000068      PCC = PT-(DPA+DPF+DPAA)/32.174/144.-DPG
C
000069      RETURN
000070      END
C
000001      SUBROUTINE JAERI(PUSA,TUSA,VUSA,HUSA,SUSA,INDEX)
000002      IMPLICIT REAL*8 (A-H,O-Z)
C
C      JAPAN <---- USA
C
000003      PJAP = 0.070308*PUSA
000004      TJAP = 0.555556*(TUSA-32.)
000005      VJAP = 0.062427*VUSA
000006      HJAP = 0.555556*HUSA
000007      SJAP = 0.555556*SUSA
C
000008      CALL STEAMZ(PJAP,TJAP,VJAP,HJAP,SJAP,INDEX)
C
C      USA <---- JAPAN
C
000009      PUSA = 14.223133*PJAP
000010      TUSA = 1.8*TJAP+32.
000011      VUSA = 16.0187*VJAP
000012      HUSA = 1.8*HJAP
000013      SUSA = 1.8*SJAP
C
000014      RETURN
000015      END
SPECIFIED OPTIONS: OPTIMIZE(2),LINECOUNT(0),NOS,ELM(HENRY2),SOURCE,DEBUG(SUBCHK),ALIGNC,NOMAP
END OF COMPILATION

```

#### B. 5 長方形スリットからの漏洩量計算プログラム（MOODYのスリップモデルによる解析）



```

000030      IF(I-1>4,4,2
000031      2 IF(S(I).LT.SMAX) GO TO 1
000032      4 SMAX=S(I)
000033      IMAX=I
000034      PC=P(I)
000035      3 CONTINUE
000036      WRITE(6,606) I
000037      606 FORMAT(1,5X,4H I= ,I4,27H ENTROPY MAX DOES NOT EXIST)
000038      1 CALL INTEG(S1,S2,P0,IMAX,V,P,VM,VO,VMO)
000039      ALPHA=2.0*9.80665/G**2*S1-2.0*S2
000040      IF(ICONT.EQ.1) GO TO 999
000041      WRITE(6,601) P0,TEMPO,G,QX0,DP,PMIN,PC,SMAX,ALPHA
000042      601 FORMAT(1,10X,10H P0 = , F15.3,
000043           1     //,10X,10H TO = , F10.3,
000044           2     //,10X,10H G = , F15.5,
000045           3     //,10X,10H QX0 = , F10.3,
000046           4     //,10X,10H DP = , F10.3,
000047           5     //,10X,10H PMIN= , F10.3,
000048           6     //,10X,10H PC = , F10.3,
000049           7     //,10X,10H SMAX= , F15.5,
000050           8     //,10X,10H ALPHA= , F10.3,/)
000051      WRITE(6,602)
000052      602 FORMAT( 4H NO , 7H PRESS,10H QUALITY ,6H V ,
000053           1           8H ENT H ,8H ENT HL ,8H ENT HG ,
000054           2           6HEN T S ,7H EN SL ,8H ENT SG ,
000055           3           9H VL ,6H VG ,8H VM)
000056      DO 5 J=1,I
000057      5 WRITE(6,603)J,P(J),QX(J),V(J),
000058           1     H(J),HL(J),HG(J),S(J),SL(J),SG(J),VL(J),VG(J),VM(J)
000059      603 FORMAT( I4,F9.0,F6.3, E10.3, 3F7.2,2F6.3, F7.3,3E10.3)
000060      999 RETURN
000061      END
000062      SUBROUTINE QLTY(QX,SR,VL,VG,HL,HG,H0,G)
000063      IMPLICIT REAL*8(A-H,O-Z)
000064      GRAV= 9.80665
000065      AA= 1.0/426.858
000066      A = (1.0-1.0/SR**2)*(1.0-2.0*SR*VL/VG+SR**2*(VL/VG)**2)
000067      B = (1.0-2.0*SR*VL/VG+SR**2*(VL/VG)**2)/SR**2+
000068           1   2.0*(1.0-1.0/SR**2)*SR*VL/VG*(1.0-VL/VG*SR)
000069      C = 2.0/SR*VL/VG*(1.0-VL/VG*SR)+(SR**2-1.0)*(VL/VG)**2+
000070           1   (HG-HL)/(VG**2*AA*G**2)*2.0*GRAV
000071      D = -(H0-HL)/(VG**2*AA*G**2)*2.0*GRAV+(VL/VG)**2
000072      AA=1/427    KCAL/KG-M
000073      SOLVE AX**3+BX**2+CX+D=0
000074      0<=X<=1
000075      X1=-0.1
000076      X2=1.0
000077      X=(X1+X2)/2.0
000078      2 Y1=A*X1**3+B*X1**2+C*X1+D
000079      Y2=A*X2**3+B*X2**2+C*X2+D
000080      Y=A*X**3+B*X**2+C*X+D
000081      IF(Y1*Y.LE.0.0) X2=X
000082      IF(Y2*Y.LE.0.0) X1=X
000083      XN=(X1+X2)/2.0
000084      IF(Y1*Y2.GT.0.0) GO TO 3
000085      EPS=ABS((X-XN)/XN)
000086      IF(EPS.LE.1.0E-6) GO TO 1
000087      X=XN
000088      GO TO 2
000089      3 WRITE(6,601) Y1,Y,Y2
000090      601 FORMAT(1,20X,10H F(X1)= ,E15.5,/,
000091           1           20X,10H F(X) = ,E15.5,/

```

```
2      20X,10H F(X2)=      ,E15.5,/,  
3      20X,30H EQ.CAN NOT BE SOLVED  
000025 1 CONTINUE  
000026   X=XN  
000027   QX=X  
000028   IF(QX.LT.0.0) QX=0.0  
000029   RETURN  
000030   END  
000001   SUBROUTINE INTEG(S1,S2,P0,IMAX,V,P,VM,VO,VM0)  
000002   IMPLICIT REAL*8(A-H,O-Z)  
000003   DIMENSION V(999),P(999),VM(999)  
000004   S1=0.0  
000005   S2=0.0  
000006   DO 1 I=2, IMAX  
000007   DP=P(I)-P(I-1)  
000008   DVM=VM(I)-VM(I-1)  
000009   VX=(V(I-1)+V(I))/2.0  
000010   S1=S1+DP/VX  
000011   S2=S2+DVM/VX  
000012 1 CONTINUE  
000013   DS11=(P(1)-P0)*2.0/(V(1)+VO)  
000014   DS21=(VM(1)-VM0)*2.0/(V(1)+VO)  
000015   S1=S1+DS11  
000016   S2=S2+DS21  
000017   S1=-S1  
000018   RETURN  
000019   END  
SPECIFIED OPTIONS: OPTIMIZE(2),LINECOUNT(0),NOS,ELM(MOODY9),SOURCE  
END OF COMPILATION
```

## B . 6 長方形スリットからの漏洩量計算プログラム (HENRYの臨界流モデルによる解析)

```

C      EPRI'S PROGRAMM FOR LEAK RATE THROUGH CRACKS
C      COPIED FROM EPRI NP3540-LD APRIL 1984 ON 1986.03.04 ISO
C      LEAK.FORT(JAERI) COPIED FROM J9215.LEAK.FORT(JAERI1)
.C          ON 1987. 6. 9. BY HASH
C      ****
C      *** COMPLETED ON 62. 4. 8. ***
C      ****
C
C *** THE INPUT TO THE PROGRAM ***
C
C FIRST CARD
C     TITLE CARD
C
C SECOND CARD
C IN=1 --> INITIALLY SATURATED LIQUID, INPUT TEMERATURE ONLY
C IN=2 --> INITIALLY SATURATED LIQUID, INPUT PRESSURE ONLY
C IN=3 --> INITIALLY SUBCOOLED LIQUID, INPUT BOTH TEMERATURE AND PRESSURE
C PO = STAGNATION PRESSURE (KPA)
C TO = STAGNATION TEMPERATURE (C)
C PB = BACK PRESSURE (KPA)
C THRESH = THERSHOLD VALUE, ORIGINAL VALUE = 1.E-3
C
C THIRD CARD
C EL = CRACK LENGTH, ZC (CM)
C EW = CRACK-OPENING DISPLACEMENT, COD (CM)
C ED = CRACK DEPTH, L (CM)
C EK = THE HEIGHT OF PROTRUSION OF THE ROUGHNESS GRAIN FROM THE MEAN
C SURFACE (CM)
C AR = AREA RATIO = AE/AO
C N1 = NUMBER OF 90 DEGREES TURNS IN THE CRACK PATH
C N2 = NUMBER OF 45 DEGREES TURNS IN THE CRACK PATH
C
C     *** JAERI'S STEAM TABLE ***
C
C STEAMZ(P,T,V,H,S,INDEX)
C INDEX=0 --> SUBCOOLED WATER OR SUPERHEATED STEAM, INPUT BOTH PRESSURE
C           AND TEMPERATURE
C INDEX=1 --> SATURATED STEAM, INPUT TEMPERATURE
C INDEX=2 --> SATURATED STEAM, INPUT PRESSURE
C INDEX=3 --> SATURATED WATER, INPUT TEMPERATURE
C INDEX=4 --> SATURATED WATER, INPUT PRESSURE
C
000001    IMPLICIT REAL*8 (A-H,O-Z)
000002    DIMENSION TITLE(20)
000003    COMMON /PP/ PO,TO,XLD,FF,AR,IN,CD,DH,THETA
C
000004    CD      = 0.61
000005    PAI     = 3.141592654
000006    THETA   = 0.5*PAI
C
C 1KPA= 1000N/M**2= 1000KG/M/S**2= 1000/9.8*E-4 KGF/CM**2
C = 1000*E-4/9.8/0.07031 LBF/IN**2= 1000/6890.4 LBF/IN**2
C
000007    PCV     = 6.894757E+3
000008    NSTEP   = 200
C
000009    1 READ (9,14,END=1000) (TITLE(J),J=1,20)
000010    READ (9,10) IN,PO,TO,PB,THRESH
000011    READ(9,15) EL,EW,ED,EK,AR,N1,N2
000012    WRITE(6,14) (TITLE(J),J=1,20)

```

```

000013      WRITE(6,10) IN,PO,TO,PB,THRESH
000014      WRITE(6,15) EL,EW,ED,EK,AR,N1,N2
C
000015      PO = 1.E3*PO/PCV
000016      TO = 1.8*TO+32.
000017      PB = 1.E3*PB/PCV
000018      EL = EL/2.54
000019      EW = EW/2.54
000020      ED = ED/2.54
000021      EK = EK/2.54
000022      IK = 0
000023      AREA = EW*EL
000024      PER = 2.* (EW+EL)
000025      AREA = AREA/144.
000026      PER = PER/12.
000027      ED = ED/12.
000028      EK = EK/12.
000029      DH = 4.*AREA/PER
000030      XLD = ED/DH+50.*N1+26.*N2
000031      IF(XLD.LE.12.) GO TO 400
000032      RK = DH/4./EK
000033      FF = 1.0/(2.*DLOG10(RK)+1.74)**2
C
C
000034      IF(IN.EQ.1) THEN
000035      TEMP = TO
000036      TEMP= (TEMP-32.0)*0.5555556
000037      PRESS = PSAT(TEMP)
000038      PO = PRESS*14.223133
000039      ENDIF
C
000040      DP = (PO-PB)/FLOAT(NSTEP)
000041      PL = PB
000042      30 CALL PR(PL,PCC,PT,GC,XE,XT,IC)
000043      IF(IC.EQ.2) GO TO 55
000044      IF(IC.NE.3) GO TO 40
000045      IK = IK+1
000046      PL = PL+DP
000047      IF(IK.LT.NSTEP) GO TO 30
000048      GO TO 55
000049      40 PD1 = PL-PCC
000050      NM2 = NSTEP-IK
C
000051      DO 50 I=1,NM2
000052      PH = PL+DP
000053      CALL PR(PH,PCC,PT,GC,XE,XT,IC)
000054      IF(IC.EQ.2) GO TO 55
000055      PD2 = PH-PCC
000056      IF((PD1*PD2).LT.0.) GO TO 100
000057      PL = PH
000058      PD1 = PD2
000059      50 CONTINUE
C
000060      55 PRINT 75,PO,TO,PB
000061      GO TO 400
000062      100 CONTINUE
000063      PDL = PD1
000064      PDH = PD2
C
000065      DO 200 I=1,50
000066      PX = (PH*PDL-PL*PDH)/(PDL-PDH)
000067      CALL PR(PX,PCC,PT,GC,XE,XT,IC)

```

```

000068      PDX = PX-PCC
C
000069      IF(ABS(PDX).LT.THRESH) GO TO 300
C *** THRESHOLD VALUE WAS CHANGED BY HASH ***
C *** THRESHOLD VALUE WAS CHANGED BY ISO 62.02.06 ***
C      IF(ABS(PDX).LT.1.E-3) GO TO 300
C      IF(ABS(PDX).LT.5.E-3) GO TO 300
C      IF(ABS(PDX).LT.1.E-2) GO TO 300
C
000070      IF((PDX*PDH).GT.0.) GO TO 250
C
000071      PDL = PDX
000072      PL = PX
000073      GO TO 200
000074      250 PDH = PDX
000075      PH = PX
000076      200 CONTINUE
C
000077      PRINT 220,PL,PH,PDL,PDH
000078      GO TO 1000
000079      300 CONTINUE
000080      EN = PCC/PO
000081      GM = AREA*GC
000082      AREA = 144.*AREA
000083      PER = 12.*PER
000084      ED = 12.*ED
000085      EK = 12.*EK
C
C
000086      PRESS = PCC
C
000087      CALL JAERI(PRESS,TEMP,VOLG,ENTAG,ENTOG,2)
000088      CALL JAERI(PRESS,TEMP,VOLF,ENTAF,ENTOF,4)
C
000089      PCC = PRESS
000090      TS2 = TEMP
000091      H1 = ENTAF
000092      H2 = ENTAG
000093      HHE = XT*H2+(1.-XT)*H1
000094      GO TO 500
000095      400 CONTINUE
C
000096      PRESS = PO
000097      TEMP = TO
000098      GO TO (11,12,13),IN
C
000099      11 CALL JAERI(PRESS,TEMP,VOLF,ENTAF,ENTOF,3)
000100      GO TO 2000
000101      12 CALL JAERI(PRESS,TEMP,VOLF,ENTAF,ENTOF,4)
000102      GO TO 2000
000103      13 CALL JAERI(PRESS,TEMP,VOLF,ENTAF,ENTOF,0)
000104      2000 CONTINUE
C
000105      PO = PRESS
000106      TO = TEMP
000107      VLO = VOLF
C
C      !!!!!!! NO CHOKING !!!!
C      G**2 = 2*RO*(PO-PB) = 2*(LBM/FT**3)*LBF/IN**2
C      = 2*LBM/FT**3*(32.15LBM*FT/S**2)/IN**2
C      = 2*32.15*LBM**2/(FT/12)**2/S**2
C      = 2*32.15*144*(LBM*S/FT**2)**2

```

```

C          = 9264.96*(LBM*S/FT**2)**2
C
000108    GC2   = 9266.112*(PO-PB)/VLO
000109    GC   = SQRT(GC2)
000110    GM   = AREA*GC
000111    PCC  = PB
000112    XT   = 0.
000113    XA   = 0.
000114    AREA  = 144.*AREA
000115    PER   = 12.*PER
000116    ED   = 12.*ED
000117    EK   = 12.*EK
000118    GO TO 510
C
000119    500 CONTINUE
C
000120    PRESS = PB
C
000121    CALL JAERI(PRESS,TEMP,VOLG,ENTAG,ENTOG,2)
000122    CALL JAERI(PRESS,TEMP,VOLF,ENTAF,ENTOF,4)
C
000123    PB   = PRESS
000124    TSA  = TEMP
000125    H1   = ENTAG
000126    H2   = ENTAG
000127    XA   = (HHE-H1)/(H2-H1)
C
000128    510 PRINT 600
000129    PO   = PO*PCV*1.E-3
000130    PRINT 605,PO
000131    TO   = (TO-32.)/1.8
000132    PRINT 610,TO
000133    GO TO (520,530,540),IN
000134    520 PRINT 615,IN
000135    GO TO 550
000136    530 PRINT 616,IN
000137    GO TO 550
000138    540 PRINT 617,IN
000139    550 PB = PB*PCV*1.E-3
000140    PRINT 620,PB
000141    PRINT 650
000142    EL   = 2.54*EL
000143    PRINT 710,EL
000144    EW   = 2.54*EW
000145    PRINT 720,EW
000146    ED   = ED*2.54
000147    PRINT 670,ED
000148    DH   = DH*2.54*12.
000149    PRINT 730,DH
000150    PRINT 695,XLD
000151    EK   = EK*2.54
000152    PRINT 675,EK
000153    AREA  = AREA*2.54**2
000154    PRINT 660,AREA
000155    PER   = PER*2.54
000156    PRINT 665,PER
000157    PRINT 680,AR
000158    PRINT 685,N1
000159    PRINT 690,N2
000160    PRINT 700,THRESH
000161    PRINT 750
C

```

```

C      1 LBM/(FT**2*S) = 4.88243 KG/(M**2*S)
C
000162  GC = GC*4.8825
000163  GALLON= GC*60.0/3.78543*1.E-6
000164  PRINT 770,GC,GALLON
000165  GM = GM*0.4536
000166  PRINT 800,GM
000167  PCC = PCC*PCV*1.E-3
000168  PRINT 850,PCC
000169  PRINT 900,XT
000170  PRINT 950,XA
000171  GO TO 1
C
000172  14 FORMAT(1H ,20A4)
000173  10 FORMAT(I10,4F10.2)
000174  15 FORMAT(5F10.5,2I10)
000175  75 FORMAT('-',10X,'*** FLOW IS NOT CHOKED FOR THIS CASE ***',
13F10.2)
000176  220 FORMAT('-',10X,'*** FAIL TO CONVERGENCE. ***'/' *** TRY TO INPUT MUCH
*LARGER THRESHOLD VALUE ***',4F15.4)
000177  600 FORMAT('1','*** STAGNATION PROPERTIES ***',//)
000178  605 FORMAT('0','PRESSURE(P0)=',F10.0,2X,'KPA')
000179  610 FORMAT('0','TEMPERATURE(T0)=',F10.1,2X,'C')
000180  615 FORMAT('0','INPUT INDICATOR(IN)=',I5,' --> INITIALLY SATURATED LI
*QUID,INPUT TEMPERATURE ONLY')
000181  616 FORMAT('0','INPUT INDICATOR(IN)=',I5,' --> INITIALLY SATURATED LI
*QUID,INPUT PRESSURE ONLY')
000182  617 FORMAT('0','INPUT INDICATOR(IN)=',I5,' --> INITIALLY SUBCOOLED LI
*QUID,INPUT BOTH TEMPERATURE AND PRESSURE')
000183  620 FORMAT('0','BACK PRESSURE(PB)=',F10.1,2X,'KPA',//)
000184  650 FORMAT('0','***** CRACK GEOMETRY *****',//)
000185  660 FORMAT('0','AREA=',F10.4,2X,'CM**2')
000186  665 FORMAT('0','PERIMETER=',F10.2,2X,'CM')
000187  670 FORMAT('0','DEPTH=',F10.2,2X,'CM')
000188  675 FORMAT('0','ROUGHNESS HEIGHT=',E12.4,2X,'CM')
000189  680 FORMAT('0','AREA RATIO(AE/AO)=',F10.2)
000190  685 FORMAT('0','NO. OF 90 DEGREE TURN=',I10)
000191  690 FORMAT('0','NO. OF 45 DEGREE TURN=',I10)
000192  695 FORMAT('0','DEPTH/HYDR. DIA.=',F10.1,)
000193  700 FORMAT('0','THRESHOLD VALUE =',F10.5,//)
000194  710 FORMAT('0',' 2C=',F10.5,2X,'CM')
000195  720 FORMAT('0','COD=',F10.5,2X,'CM')
000196  730 FORMAT('0','HYDR. DIA.=',F10.5,2X,'CM')
000197  750 FORMAT('0','***** OUTPUT *****',//)
000198  770 FORMAT('0','CRITICAL MASS FLUX =', E15.4,2X,'KG/M**2 SEC'/
1      '0',           '=', E15.4,2X,'GPM/MM**2')
000199  800 FORMAT('0','LEAK RATE =', E15.4,2X,'KG/SEC')
000200  850 FORMAT('0','PRESSURE AT EXIT PLANE =',F10.1,2X,'KPA')
000201  900 FORMAT('0','QUALITY AT EXIT PLANE =',F10.4)
000202  950 FORMAT('0','QUALITY AT BACK PRESSURE =',F10.4)
C
000203  1000 STOP
000204  END
C
C
C
C
000001  SUBROUTINE PR(PCK,PCC,PT,GC,XE,XT,IC)
C
C IN=1 --> INITIALLY SATURATED LIQUID,INPUT TEMERATURE ONLY
C IN=2 --> INITIALLY SATURATED LIQUID,INPUT PRESSURE ONLY
C IN=3 --> INITIALLY SUBCOOLED LIQUID,INPUT BOTH TEMERATURE AND PRESSURE

```

```

C
000002      IMPLICIT REAL*8 (A-H,O-Z)
000003      COMMON /PP/ P0,TO,XLD,FF,AR,IN,CD,DH,THETA
C
000004      IC = 1
C
C      KAPPA=CP/CV
C
000005      AKAPPA = 1.33
000006      B = 0.0523
C
000007      PRESS = P0
000008      TEMP = TO
000009      GO TO (1,2,3),IN
C
C      INPUT TEMPERATURE ONLY !!!
C
000010      1 CALL JAERI(PRESS,TEMP,VOLF,ENTAF,SLO,3)
000011      P0 = PRESS
000012      VLO = VOLF
000013      GO TO 1000
C
C      INPUT PRESSURE ONLY !!!
C
000014      2 CALL JAERI(PRESS,TEMP,VOLF,ENTAF,SLO,4)
000015      TO = TEMP
000016      VLO = VOLF
000017      GO TO 1000
C
C      INPUT BOTH PRESSURE AND TEMPERATURE !!!
C
000018      3 CALL JAERI(PRESS,TEMP,VOLF,ENTAF,SLO,0)
000019      VLO = VOLF
C
000020      1000 CONTINUE
C
000021      PRESS = PCK
C
000022      CALL JAERI(PRESS,TEMP,VOLG,ENTAG,SGC,2)
000023      CALL JAERI(PRESS,TEMP,VOLF,ENTAF,SLC,4)
C
000024      PCK = PRESS
000025      TS = TEMP
000026      VGC = VOLG
000027      XE = (SLO-SLC)/(SGC-SLC)
000028      CN = 1.0
000029      IF(XE.LT.0.05) CN=20.*XE
000030      XT = CN*XE*(1.-EXP(-B*(XLD-12.)))
000031      XM = CN*XE-XT/B/(XLD-12.)
000032      200 PC1 = PCK-0.5
000033      PC2 = PCK+0.5
C
000034      PRESS = PC1
C
000035      CALL JAERI(PRESS,TEMP,VOLG,ENTAG,SG1,2)
000036      CALL JAERI(PRESS,TEMP,VOLF,ENTAF,SL1,4)
C
000037      PRESS = PC2
C
000038      CALL JAERI(PRESS,TEMP,VOLG,ENTAG,SG2,2)
000039      CALL JAERI(PRESS,TEMP,VOLF,ENTAF,SL2,4)
000040      TS = TEMP

```

```

000041      DSL = SL2-SL1
000042      DSG = SG2-SG1
000043      DXE = -( $(1.-XE)*DSL+XE*DSG$ )/(SGC-SLC)
000044      GC2 = ( $XT*VGC/PCK/AKAPPA-(VGC-VLO)*CN*DXE$ )/32.174/144.
000045      GC2 = 1./GC2
000046      IF (GC2.GT.0.) GO TO 50
000047      IC = 3
000048      RETURN
C
000049      50 GC=SQRT(GC2)
000050      DPT = GC2*VLO/2./CD**2/32.174/144.*AR**2
000051      PT = PO-DPT
000052      IF (PT.GT.3.) GO TO 100
000053      IC = 2
000054      RETURN
C
000055      100 CONTINUE
C
000056      PRESS = PT
C
000057      CALL JAERI(PRESS,TEMP,VOLG,ENTAG,S,2)
C
000058      PT = PRESS
000059      TS = TEMP
000060      VGT = VOLG
000061      VGM = (VGT+VGC)/2.
000062      AI = (1.-12.* $(1.-AR)/XLD$ )/AR
000063      GM2 = GC2*(1.+1./AI**2)/2.
C
C      ACCELERATIONAL PRESSURE DROP
000064      DPA = GM2*XT*(VGC-VLO)
C
C      FRICTIONAL PRESSURE DROP
000065      DPF = FF*(XLD-12.)*GM2*((1.-XM)*VLO+XM*VGM)/2.
C
C      PRESSURE DROP DUE TO AREA CHANGE
000066      DPAA = GC2*(VLO*(1.-AR**2)+XM*(VGM-VLO)*(1.-1./AI**2))/2.
C
C      ?????????????? NICHT VERSTEHEN ??????????????
000067      DPG = 0.5*(1./VLO+1./( $XT*VGC+(1.-XT)*VLO$ ))*XLD*DH*SIN(THETA)/144.
C      ?????????????? NICHT VERSTEHEN ??????????????
C
C      TOTAL PRESSURE DROP THROUGH CRACK
000068      PCC = PT-(DPA+DPF+DPAA)/32.174/144.-DPG
C
000069      RETURN
000070      END
C
000001      SUBROUTINE JAERI(PUSA,TUSA,VUSA,HUSA,SUSA,INDEX)
000002      IMPLICIT REAL*8 (A-H,O-Z)
C
C      JAPAN <---- USA
C
000003      PJAP = 0.070308*PUSA
000004      TJAP = 0.555556*(TUSA-32.)
000005      VJAP = 0.062427*VUSA
000006      HJAP = 0.555556*HUSA
000007      SJAP = 0.555556*SUSA
C
000008      CALL STEAMZ(PJAP,TJAP,VJAP,HJAP,SJAP,INDEX) 注)
C
C      USA <---- JAPAN

```

```
C
000009    PUSA   = 14.223133*PJAP
000010    TUSA   = 1.8*TJAP+32.
000011    VUSA   = 16.0187*VJAP
000012    HUSA   = 1.8*HJAP
000013    SUSA   = 1.8*SJAP
C
000014    RETURN
000015    END
SPECIFIED OPTIONS: OPTIMIZE(2),LINECOUNT(0),NOS,ELM(HENRY3),SOURCE,DEBUG(SUBCHK),ALIGNC,NOMAP
END OF COMPILATION
```

## 注記 S T E A M Z

S T E A M Z は、日本機械学会発行の蒸気表（1967年）に記述されている Gibbs 関数, Helmholtz および飽和線から誘導される状態量及びその微分量を計算するサブルーチンである。原研においては小林健介らによってライブラリ化されている。その説明は以下のとおりである。

## 〔1〕機能

圧力と温度を与えて、比容積、エンタルピ、エントロピーを得る倍精度計算を行う。

C A L L    S T E A M Z ( P<sub>D</sub>, T<sub>D</sub>, V<sub>D</sub>, H<sub>D</sub>, S<sub>D</sub>, N )

ここで

P<sub>D</sub> ; 圧力 [kg/cm<sup>2</sup>] (0 < P ≤ 1019.72)

(温度基準の飽和量を計算するとき、飽和圧力が出力される)

T<sub>D</sub> ; 溫度 [°C] (0.01 ≤ T ≤ 800)

(圧力基準の飽和量を計算するとき、飽和温度が出力される)

V<sub>D</sub> ; 比容積 [M<sup>3</sup>/kg]

H<sub>D</sub> ; エンタルピ [Kcal/kg]

S<sub>D</sub> ; エントロピー [Kcal/kg °K]

である。