

LDIによる局部減肉を考慮した配管系の耐震安全性評価（その2） —LDIによる局部減肉形状の検討—

Seismic safety evaluation of piping system with local wall thinning by LDI (Part 2)
-Evaluation of local thinning shape by LDI-

(財)電力中央研究所	森田 良	Ryo MORITA	Non-Member
(財)電力中央研究所	酒井 理哉	Michiya SAKAI	Non-Member
中部電力株式会社	尾西 重信	Shigenobu ONISHI	Member
中部電力株式会社	釘本 三男	Mitsuo KUGIMOTO	Member
(財)電力中央研究所	稲田 文夫	Fumio INADA	Non-Member
(財)電力中央研究所	松浦 真一	Shin-ichi MATSUURA	Non-Member

For seismic safety of piping system with local thinning surface by liquid droplet impingement erosion (LDI), hybrid tests ?? were conducted to the piping with locally-thinned elbow. In this presentation, determination method of the thinning shape on the elbow is developed.

To determine the thinning shape by LDI, droplet behavior at the elbow is calculated in various flow and piping size conditions, and collision point and velocity for each droplet is evaluated. Then, the relationship between collision conditions and thinning rate is assumed from existing knowledge and thinning shape is determined. The evaluated thinning shape is compared with actual LDI case for the validation of the method, and the method is confirmed.

Keywords: Liquid Droplet Impingement Erosion (LDI), Thinning Shape, Droplet Behavior

1. 背景

発電プラントの運用・管理において重要な課題となっている配管減肉現象の内の液滴衝撃エロージョン(LDI, Fig.1)は、高速蒸気流中に混ざった液滴が配管表面に衝突する事で生じる衝撃力で損傷する現象であり、流動因子が大きな支配因子となっている。また、LDIは大規模な配管破断が生じる可能性は低いが、FACに比べて局所的な分布を持つ減肉形状となりやすい。

また、減肉配管における耐震評価について、現状では全周減肉を模擬した体系での評価を行っているが、LDIの発生が考えられる蒸気配管系などにおいて全周減肉を模擬する事で、実際とは異なる評価結果を与える可能性があると考えられる。

そこで、本研究では、LDIが発生しやすいエルボ部について、局所減肉を模擬した体系での耐震評価試験を実施し、その強度評価を行う事とした。本発表では、エルボ部における液滴の挙動評価を基にした、LDIを仮定したエルボ部の減肉面形状の決定手法について述べる。

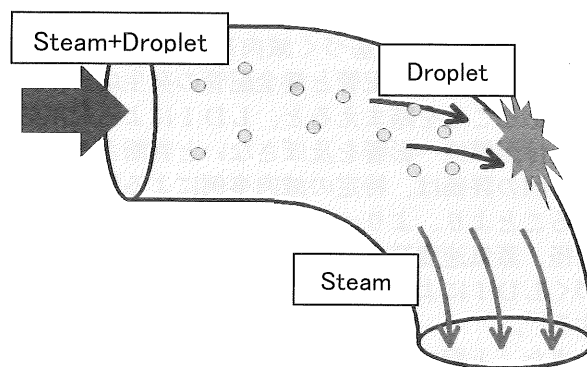


Fig.1 Schematics of LDI

2. 減肉面形状の評価手法

ここでは減肉面形状の評価手法について述べる。

2.1 減肉面形状の評価の流れ

前述の通り、LDIは液滴の衝突によって生じる現象のため、本研究では Fig.2 のようなフローで LDIによる減肉面形状を評価する事とした。

まず、エルボ部における液滴の挙動を評価する。エルボ部に流入する各液滴について、蒸気から力を受けて液滴の挙動が決定されると考え、逐次時間進行計算を実施し、その液滴が壁面のどの位置に衝突するか(あるいは衝突せずに通過するか)を計算する。

連絡先: 森田 良, 〒201-8511 東京都狛江市
岩戸北 2-11-1, (財)電力中央研究所, 電話:
03-3480-2111, E-mail: ryo@criepi.denken.or.jp

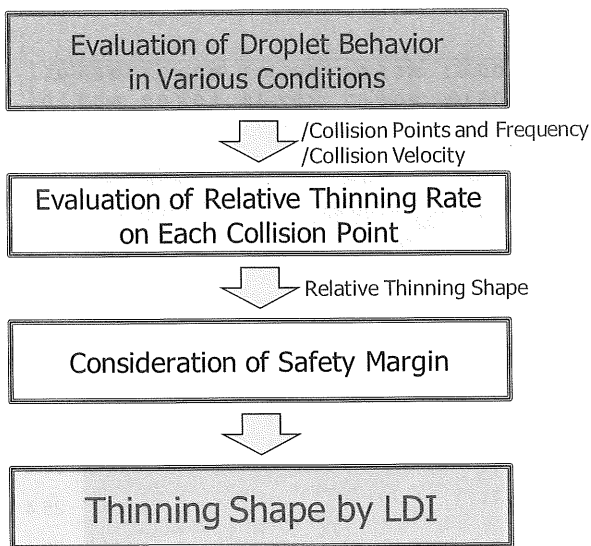


Fig.2 Flowchart of LDI Thinning Shape Determination

次に、液滴が衝突した各位置における減肉量を計算し、減肉面の形状を評価する。LDI による減肉については、これまでに様々な研究⁽¹⁾⁻⁽⁷⁾がされており、流速と減肉量との関係⁽¹⁾や、衝突条件と減肉量との間のモデル式などが提案されている⁽²⁾。本研究ではこれらを用いて評価する事とした。

これらの減肉面形状評価を様々な流動・配管径条件において実施し、それらの減肉面形状を包絡する面を考慮する事で、発電所の任意の系のエルボ部での減肉面形状と仮定する事が可能となる。更に、必要に応じて安全率を考え、LDI による減肉面形状とする事とした。

2.2 液滴の挙動評価

エルボ部における液滴の挙動評価には、液滴の衝突位置を評価する必要があるため、3次元計算によって流れ場を求めて液滴の挙動を評価する必要がある。しかし、3次元計算は計算時間を必要とし、配管系全体を評価するためには数日、エルボ部のみであっても数時間程度の計算時間が必要となる。しかし、本研究では、様々な条件において減肉面形状を評価する必要があるため、Fig.3 および以下に示すような近似的な評価手法によって液滴の挙動を評価する事とした。

- ① 流入条件として、エルボ部の形状・流入部における流速 U ・圧力 p を与える。
- ② 蒸気は一様流入とし、エルボ部に沿って変化すると仮定して、
流れ方向速度： $U_\theta = U$
半径方向速度： $U_r = 0$
とする。
- ③ 液滴は流入配管断面を微小区間に分け、それぞれの位置から液滴を飛ばしてその挙動を評価する。

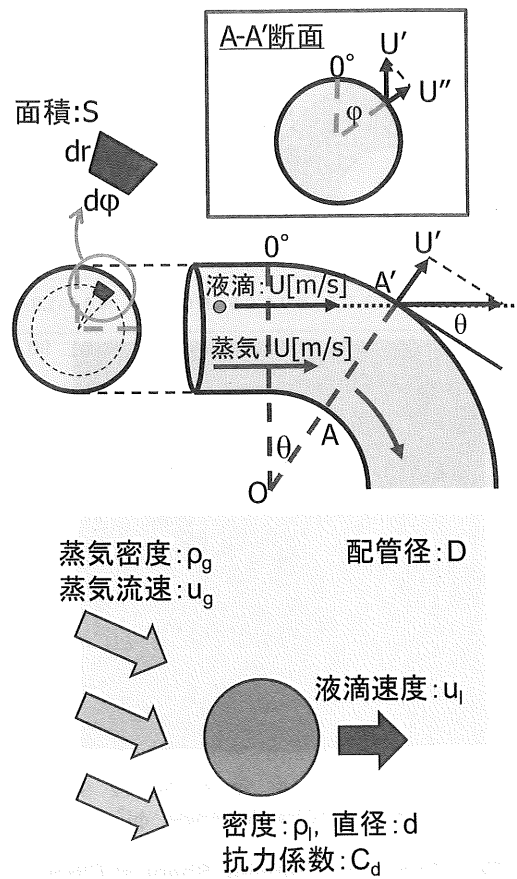


Fig.3 Concept of Droplet Behavior Evaluation

- ④ 液滴の流入流速は蒸気流速と同じと仮定し、その後は蒸気からの抗力による挙動変化を計算し、エルボ部に衝突する位置を評価する。
- ⑤ 液滴がエルボ部に衝突する場合、その位置と衝突流速(壁面に垂直な成分 V'')を求める。
上記の近似手法は②以外は3次元計算による詳細評価と変わらないが、計算速度は桁違いに早くなる。

2.3 減肉面形状の算出

前節の近似的な液滴挙動評価により、エルボ部における液滴衝突位置と衝突流速が得られる。これらから減肉面形状(エルボ部における減肉率の分布)を求めるためには、衝突条件から減肉率を評価するモデルが必要となる。そこで、本研究では、Sanchez らが提案した減肉率のモデル式⁽²⁾を基に、各衝突位置における減肉率を評価し、減肉面形状を得る事とした。Sanchez 式は、式中に流速の4乗・流量の1乗の項が含まれたモデルであり、液滴の衝突流速が大きな支配因子となっている。これは他の研究⁽¹⁾においても同様の傾向となっている。

このようにして得られる減肉面形状を、様々な流動・配管径条件において計算し、それらを合成

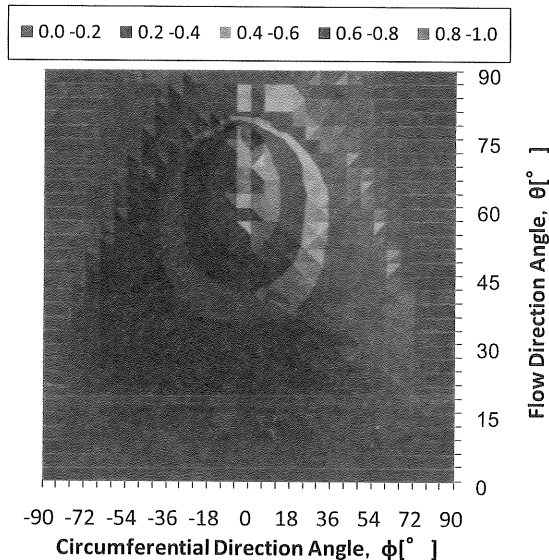
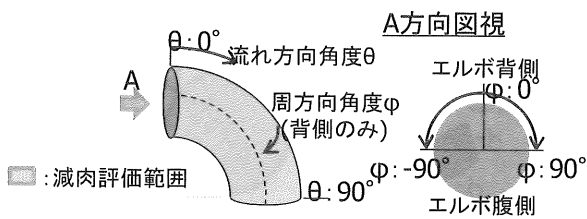


Fig.4 Evaluated Thinning Shape at Elbow (Relative)

する事で、発電所における種々の配管系に適用出来る可能性を持つ減肉面形状を作成する事とした。

まず、減肉面形状評価のパラメータとなる流動条件及び配管径について、その理由共に以下に示す。

- ・ 流入速度：100, 200, 400m/s
理由：エロージョンが発生する下限の流速(エロージョン限界流速)に関する知見⁽⁷⁾から、100m/s以上とし、液滴は早くても音速(約450m/s)以下であることを考えて、400m/s以下とした。
- ・ 流入圧力：0.005, 0.01, 0.1, 1.0, 7.0MPa (7.0MPaのみ全圧条件として考慮)
理由：復水器条件からBWR主蒸気条件の間とした。
- ・ 液滴径：1.0, 2.0, 5.0, 10, 20, 50μm
理由：電力中央研究所における液滴径計測実験⁽⁸⁾では、1~20μmの範囲に平均液滴径があり、平均径の2倍以内に99%の液滴が含まれていたため
- ・ 配管径：50, 100, 150, 300, 400A
理由：実機発電所における湿り蒸気が配管系である抽気系・ベント系の配管径を模擬するため

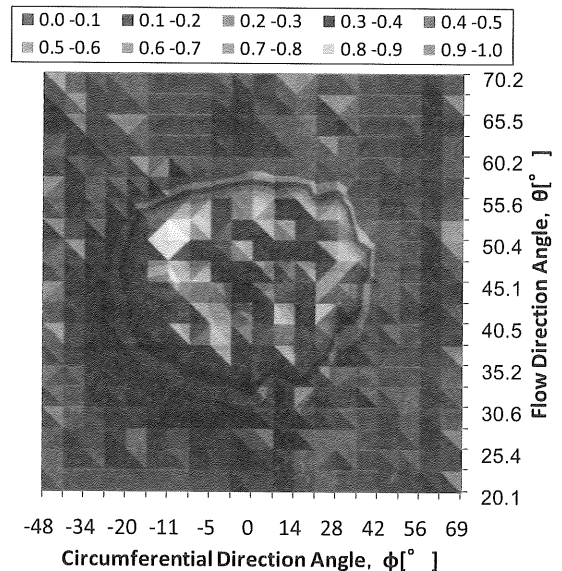


Fig.5 Thinning Shape at Elbow on Actual Plant (Relative, Vent Line)

これらのパラメータの全ての組み合わせで減肉面形状を計算し、その包絡面として得られたものがFig.4となる。図は、エルボ部の背側を流れ方向(θ)・周方向(ϕ)に30分割し、それぞれの分割位置に衝突した液滴の個数・衝突流速から算出されている。また、各位置における減肉率は最大減肉量となる値で相対化している。

図から、減肉面は流れ方向 60° ・周方向 0° 付近にピークを持った形状となっている事が分かる。次節では、この減肉面形状の妥当性について評価を行う事とする。

2.4 減肉面形状の比較

前節で得られた減肉面形状(Fig.4)は、発電所の配管系において考えられる条件をなるべく網羅するようにして得られているが、その妥当性について評価する必要がある。そこで、ここでは実際のLDIによる減肉配管の計測値と比較を行い、その妥当性を検証する事とした。

Fig.5に発電所のエルボ部の肉厚実測値を基に算出した減肉率(相対値)の分布を示す。系統はベント系であり、部位はオリフィスの下流第1エルボ部である。

この部位に対して、3次元計算を用いた詳細な液滴挙動評価を適用した結果をFig.6に示す。流動計算結果(Fig.6(a))から、エルボ部の流速分布は複雑で有る事が分かる。また、この流速分布を用いて評価した減肉面形状は、定量的に良く一致している事が分かる(Fig.6(b)-(c))。前述の通り、本研究で用いた近似手法による減肉面形状評価は、3次元計算による詳細評価とは流速分布の与え方(2.2節の

②)以外は同一であるため、液滴の挙動計算方法や減肉率の評価方法については妥当性が確認出来たと言える。

次に、2.3 節で得られた近似手法による減肉面形状との比較を行った。Fig.7 に配管流れ方向断面の減肉率分布の比較結果を示す。図には、得られた減肉面形状に安全率 2 を考慮した形状(Fig.8)も併せて示す。

図から、近似手法によって得られた減肉面形状は、実測値よりも概ね保守側の評価となっている事が分かる。しかし、流れ方向 45° 近傍において若干非保守側となっている箇所がある事が分かる。そこで、安全率 2 を考慮した形状と比較すると、全て保守側の評価となっている事が分かる。

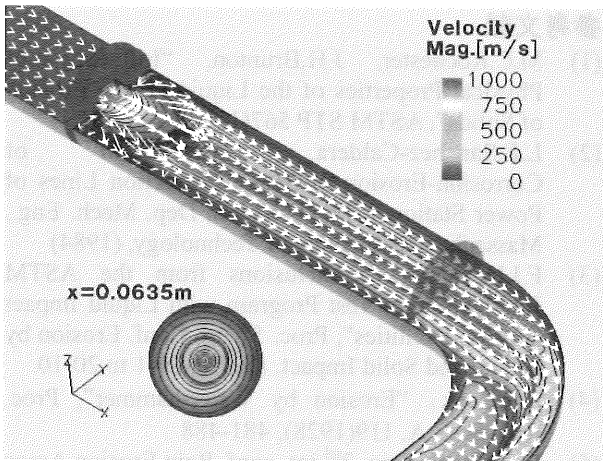
この安全率 2 を考慮した減肉面形状は、対象とした計測値に対して、相対的な減肉率が 0.1 以上の領域において保守側の評価となったため、得られた減肉面形状に対して安全率 2 を考慮した形状を、局所減肉した配管の耐震評価に用いる事とした。

3. まとめ

局所減肉した配管の耐震安全性の評価のため、LDI を模擬した減肉面形状を提案した。近似手法を用いて発電所における様々な流動・配管条件での減肉面形状を評価し、その包絡面を取る事で減肉面形状とし、更に、実測値との比較から、安全率 2 を考慮する事で実測値を保守側に評価出来る事が分かったため、得られた減肉面形状に対して安全率 2 を考慮した形状を、局所減肉した配管の耐震評価に用いる事とした。

参考文献

- (1) M.C.Rochester, J.H.Brunton, "Influence of Physical Properties of the Liquid on the Erosion of Solids", ASTM STP 567(1974), 128-151
- (2) L.E.Sanchez-Caldera, "Mechanism of Corrosion-Erosion in Steam Extraction Lines of Power Stations", Ph.D. Thesis, Dep. Mech. Eng., Massachusetts Institute of Technology, (1984)
- (3) F.J.Heymann, "Conclusions from the ASTM Interlaboratory Test Program with Liquid Impact Erosion Facilities", Proc. 5th Int. Conf. Erosion by Liquid and Solid Impact, (1979), 20-1 to 20-10
- (4) S.S.Cook, "Erosion by Water-hammer", Proc. Roy. Soc., A, 119(1928), 481-488
- (5) O.G.Engel, Proc. 2nd int. conf. Rain Erosion Assoc. Phenom., 741(1967)
- (6) W.D.Pouchot, ASTM STP 474(1970), 383
- (7) T.Shimogaya, M.Takemoto, "Erosion of Metals in High Speed Mist Flow Evaluation of Threshold Velocity by Acoustic Emission System", 10th Int. Congress on Metallic Corrosion, vol.4, Sessions 14-19(1987), 4047-4054
- (8) 森田良, 「液滴衝撃エロージョンに関わる流動特性の解明(その 2)ー流動評価技術の高度化ー」, 電力中央研究所報告, L07016, (2008)



(a) Velocity Distribution with 3D Flow Calculation

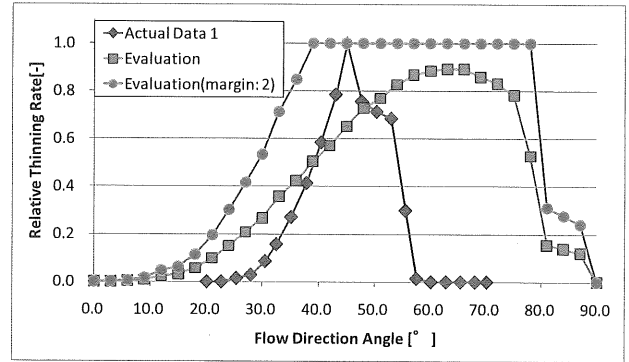
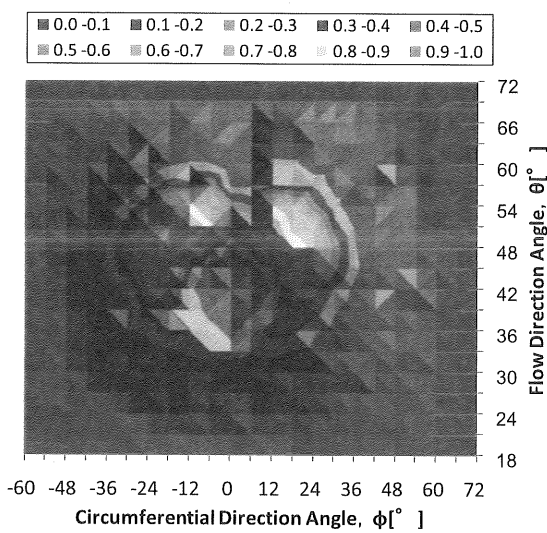


Fig.7 Comparison of Thinning Rate Profile (Relative, Present Method)



(b) Thinning Shape at Elbow

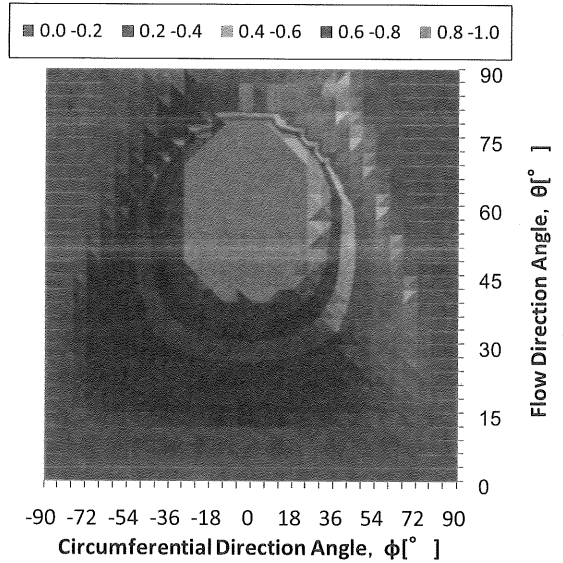
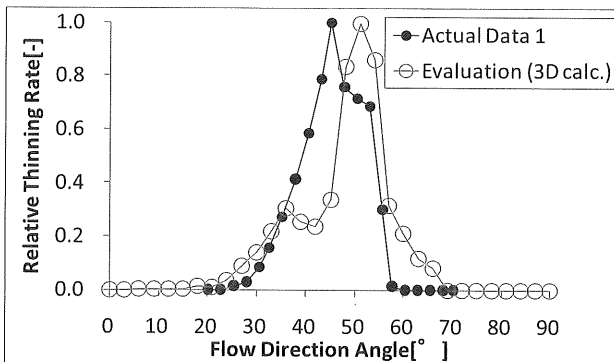


Fig.8 Evaluated Thinning Shape at Elbow (Relative, Safety Margin: 2)



(c) Comparison of Thinning Rate Profile

Fig.6 Evaluated Thinning Shape at Elbow obtained from 3D Calculation Method