



NRA JAPAN

PODモデルにおける回帰係数の不確かさがPFM解析に及ぼす影響

原子力規制委員会原子力規制庁長官官房技術基盤グループ
システム安全研究部門 ○水田航平、橋倉靖明、小嶋正義

背景

- 原子力発電所の供用期間中検査(In-service Inspection: ISI)では超音波探傷試験が行われ、欠陥検出確率(Probability of Detection: POD)は国内既往研究でデータが取得されている[1]。
- PODはモデル式(PODモデル: PODの結果を同定した近似式)が提案され、確率論的破壊力学(Probabilistic Fracture Mechanics: PFM)解析への入力データとして適用されている。
- 電気事業者はPFMにより原子炉圧力容器、配管等における溶接継手の非破壊試験の試験程度の見直しを検討していくこととしている[2]。
- 技術基盤課及び専門検査部門からPFM解析結果の信頼性(リスク及び統計的な評価・議論を除く)に関する知見拡充及び試験程度の妥当性確認の手引き等整備に係る調査の依頼があった。

目的

- PODモデル式における回帰係数の不確かさと回帰係数決定に用いる欠陥検出結果の取扱いがPFM解析へ及ぼす影響について調査する。
 - PFM解析結果の信頼性確認を行う際の着目点(データの不確かさや代表性等)を検討する。
- ※本研究はPFM解析手法の高度化や精緻化を目指すものではない。電気事業者による試験程度の見直し結果に対する妥当性確認のための手引き作成に資することを目的としている。

PODデータおよびPODモデル式

JNES UTS事業[1]データより抜粋(350A配管)

○: 検出
×: 非検出

欠陥高さ a (mm)	検査員A	検査員B	検査員C	検査員D	検査員E	検査員F	POD 平均
2.0	○	○	○	○	○	○	1
2.1	○	○	○	○	○	○	1
3.9	○	○	○	○	○	○	1
2.4	○	○	○	○	○	○	1
2.0	○	○	○	○	○	○	1
2.4	○	○	○	○	○	○	1
0.6	○	×	×	×	×	×	0.17
3.6	○	○	○	○	○	○	1
3.3	○	○	○	○	○	○	1
1.4	○	○	○	○	○	○	1
2.7	○	○	○	○	○	○	1
0.7	×	×	×	×	×	×	0

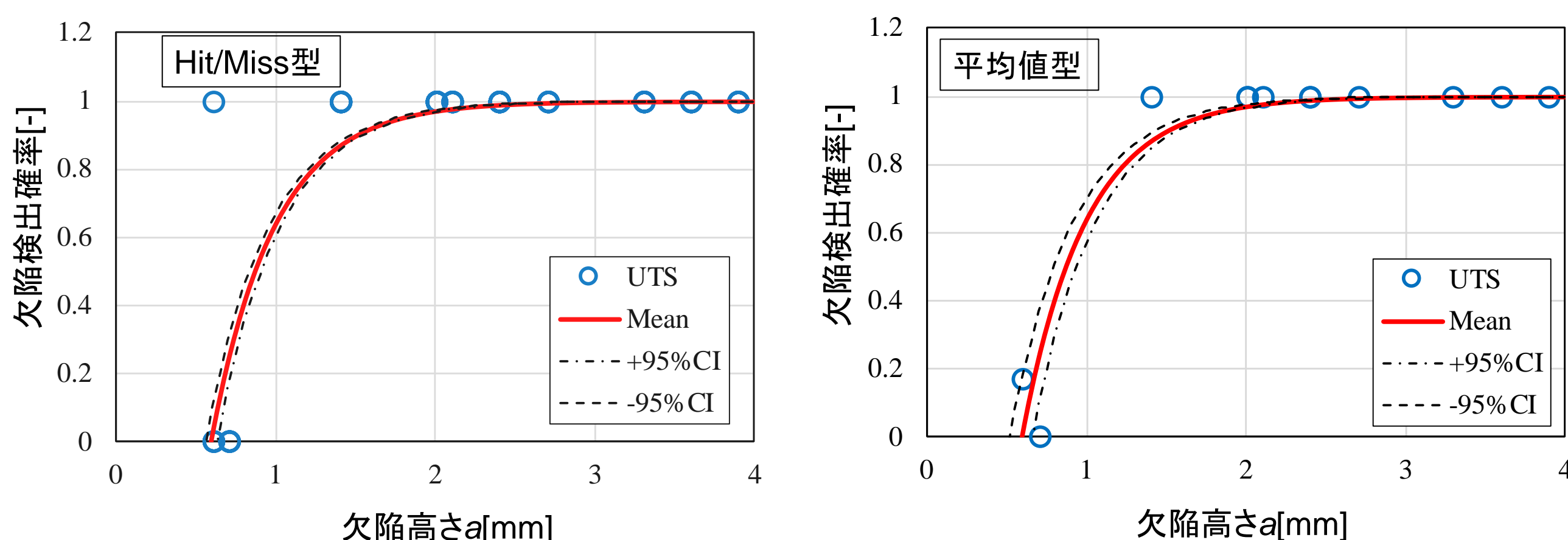
Hit/Missデータ型[3] 72データ

平均値 12データ

- Hit/Missデータ型および平均値型に対して指数関数モデル[4]で係数を決定
- プロファイル尤度法により各係数の95%信頼限界を算出

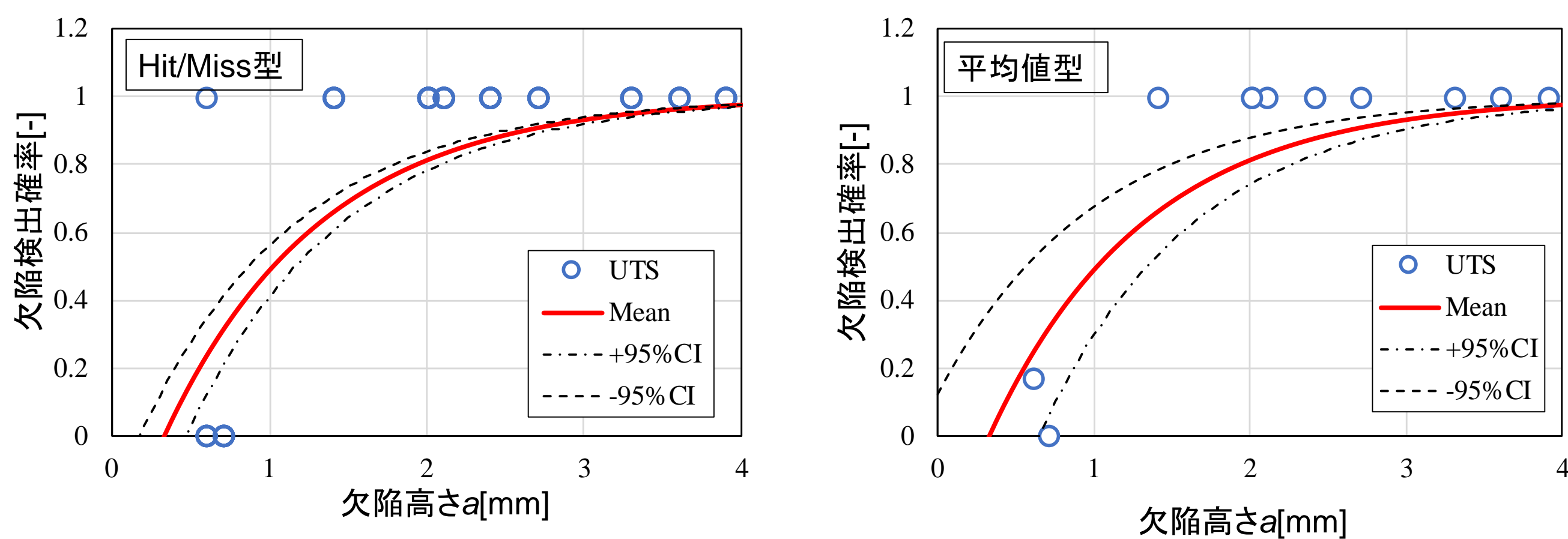
$$POD(a) = 1 - \exp[-\alpha(a - \beta)] \quad \alpha: \text{検査員の能力}, \beta: \text{検出限界}$$

データ数の影響(係数βの95%信頼限界)



→ データ数が多いHit/Missデータ型の方が信頼幅が狭い(ばらつきが小)

回帰係数固定の影響(係数βの95%信頼限界、α=1 [4]の場合)

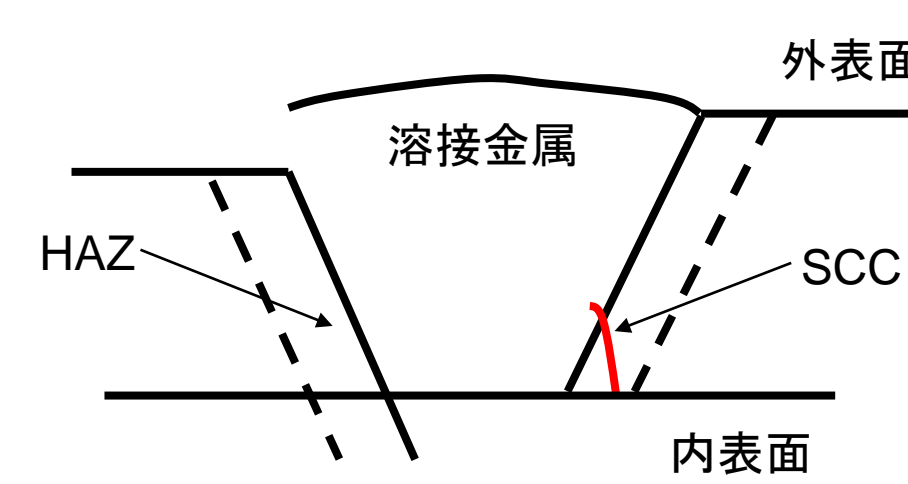


→ 回帰係数を固定すると信頼幅が広がる

PFM解析

- 算出したPOD式を入力し、累積破損確率への影響を調査

対象: 原子炉再循環系配管

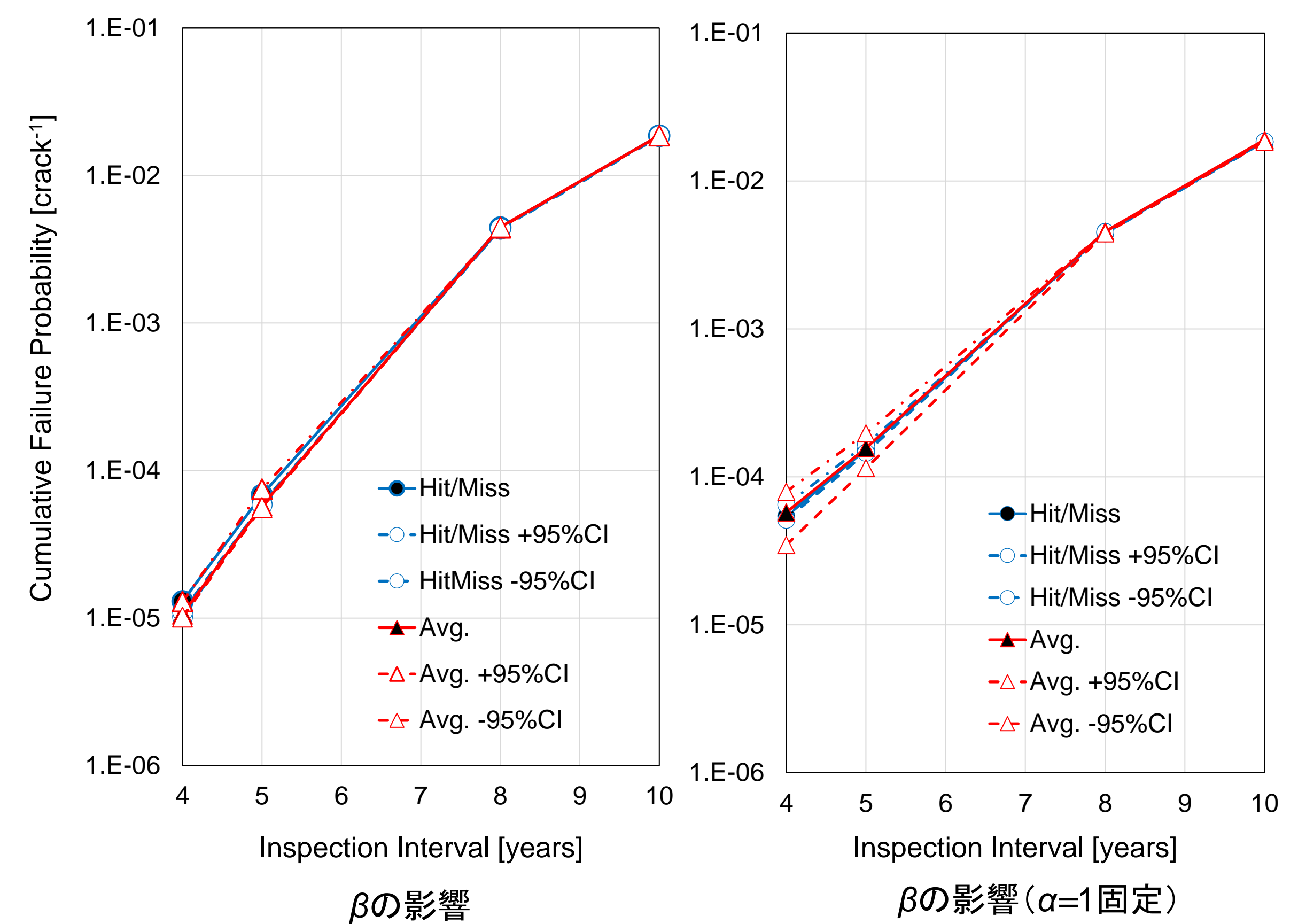


配管仕様

対象配管	400A
配管径	406.4mm
厚さ	26.2mm
材料	低炭素系ステンレス鋼SUS316

応力拡大係数算出式[5]	JSME維持規格2012年版
PODモデル	$POD(a) = 1 - \exp[-\alpha(a - \beta)]$ → 中央値および95%信頼限界
初期欠陥寸法	高さ0.01 mm、長さ0.02 mm
ISI間隔	4、5、8、10年(運転期間40年)
亀裂進展速度[6]	da/dt = CK ^m m=2.161 HAZ内 K<0 C=0 K≥0 μ _{CHAZ} = 9.018 × 10 ⁻¹⁴ 、σ _{CHAZ} = 0.303 (対数正規分布) 溶接金属内 K<0 C=0 K≥0 μ _{CWM} = 1.017 × 10 ⁻¹⁴ 、σ _{CWM} = 1.120 (対数正規分布)
運転荷重 [6]	内圧 p = 9.0 MPa 膜応力 σ _m = 34.9 MPa 曲げ応力 σ _b = 10.0 MPa 熱応力 σ _e = 40.0 MPa

結果: 累積破損確率



→ データ数が少ない平均値型の方がばらつきが大きくなる
→ 係数の固定は累積破損確率やばらつきに影響する

まとめ

- PODモデルの回帰係数の決定にはデータ数が多いHit/Missデータ型を用いる方が不確かさを低減することができる。
- PODモデルの不確かさを低減させることが、PFM解析結果(累積破損確率)の信頼性向上には重要である。
- PFMに入力されるモデル式の根拠(データや回帰分析の条件等)を確認する事が信頼性確認には重要である。

参考文献

- 独立行政法人 原子力安全基盤機構, “平成16年度 原子力発電施設検査技術実証事業に関する報告書(超音波探傷試験における欠陥検出性及びサイジング精度の確認に関するもの)[総括版]”, 2005, 05基材報-0001(2/2).
- 原子力規制委員会, “第10回(原子炉圧力容器の溶接継手の試験程度等)新規制要件に関する事業者意見の聴取に係る会合”, 2019.
- 山本敏弘, “POD分析に使用するデータが前提とする仮定”, 溶接・非破壊検査技術センター技術レビュー, 一般財団法人 発電設備技術検査協会, Vol.15, 2019, pp.11-20.
- H. Machida, “Reliability Assessment of PLR Piping Based on Domestic SCC Data”, The ASME 2007 Pressure Vessels and Piping Division Conference, PVP2007-26059 (2007).
- 原子力専門委員会 発電用設備規格委員会, “発電用原子力設備規格 維持規格(2012年版)”, 一般社団法人 日本機械学会, JSME S NA1-2012.
- M. Arakawa et al., “Benchmark Analysis on the Failure Probability Assessment of Piping with Stress Corrosion Cracks”, The ASME 2011 Pressure & Piping Division Conference, PVP2011-57498 (2011).