

PTS 評価用破壊靱性遷移曲線のマージン M_p と M_k

	①破壊靱性データのばらつきのみの場合	② T_{r30} に基づく破壊靱性遷移曲線	③ T_0 に基づく破壊靱性遷移曲線
マージン設定のイメージ図	<p>メジアン</p> <p>5%</p> <p>破壊靱性データのばらつき</p> <p>ワイブル分布</p> <p>$1.65\sigma_M$</p> <p>温度 70MPa√m で 40.2°C ⇒ $\sigma_M = 24^\circ\text{C}$ に設定</p>	<p>脆化予測における不確かさ σ</p> <p>正規分布の温度誤差</p> <p>メジアン</p> <p>5%</p> <p>マージン含 5%</p> <p>$1.65\sqrt{\sigma_M^2 + \sigma^2}$</p> <p>$1.65\sigma_M$</p> <p>$M_p$</p> <p>温度</p>	<p>T_0 設定における不確かさ σ_{T_0} + 脆化予測における不確かさ σ</p> <p>正規分布の温度誤差</p> <p>メジアン</p> <p>5%</p> <p>マージン含 5%</p> <p>$1.65\sqrt{\sigma_M^2 + \sigma_{T_0}^2 + \sigma^2}$</p> <p>$1.65\sigma_M$</p> <p>$M_k$</p> <p>温度</p>
破壊靱性データのばらつき (σ_M)	<p>マスターカーブの 5%信頼下限の式を使用することにより考慮 (注: M_p と M_k の設定にあたっては、他のばらつきと組み合わせるため、PTS 事象の K_I と接する 70MPa√m でのメジアンカーブと 5%カーブの温度差 (40.2°C) が $1.65\sigma_M$ であると仮定し (正規分布の 5%信頼下限はメジアン + 1.65σ (図 1 参照)), 破壊靱性データの温度方向のばらつきの標準偏差 σ_M を 24°C に設定)</p>		
脆化予測における不確かさ (σ)	—	<p>JEAC4201-2007(2013 年追補版)の国内脆化予測法の監視試験データに対する予測誤差(補正無し)の標準偏差 σ (9.5°C) を使用</p>	
T_0 の設定における不確かさ (σ_{T_0})	—	—	<p>破壊靱性データ数及び $K_{Jc(\text{med})}$ に基づく σ_{T_0} の式で計算</p> $\sigma_{T_0} = \frac{(K_{Jc(\text{med})} - 20)}{(K_{Jc(\text{med})} - 30)} \times \frac{14.7}{\sqrt{r}}$
5%信頼下限の式を使用する場合の追加のマージン (M_p 及び M_k)	—	<p>正規分布の 5%信頼下限はメジアン + 1.65σ であり (図 1 参照), 誤差伝播の法則に基づく σ_M 及び σ を考慮したばらつきから, 5%信頼下限を使用することによる破壊靱性データのばらつき (σ_M) を差し引き設定</p> $M_p = 1.65 \times (\sqrt{\sigma_M^2 + \sigma^2} - \sigma_M) \cong 3.0 (^\circ\text{C})$	<p>正規分布の 5%信頼下限はメジアン + 1.65σ であり (図 1 参照), 誤差伝播の法則に基づく σ_M, σ 及び σ_{T_0} を考慮したばらつきから, 5%信頼下限を使用することによる破壊靱性データのばらつき (σ_M) を差し引き設定</p> $M_k = 1.65 \times (\sqrt{\sigma_M^2 + \sigma_{T_0}^2 + \sigma^2} - \sigma_M)$

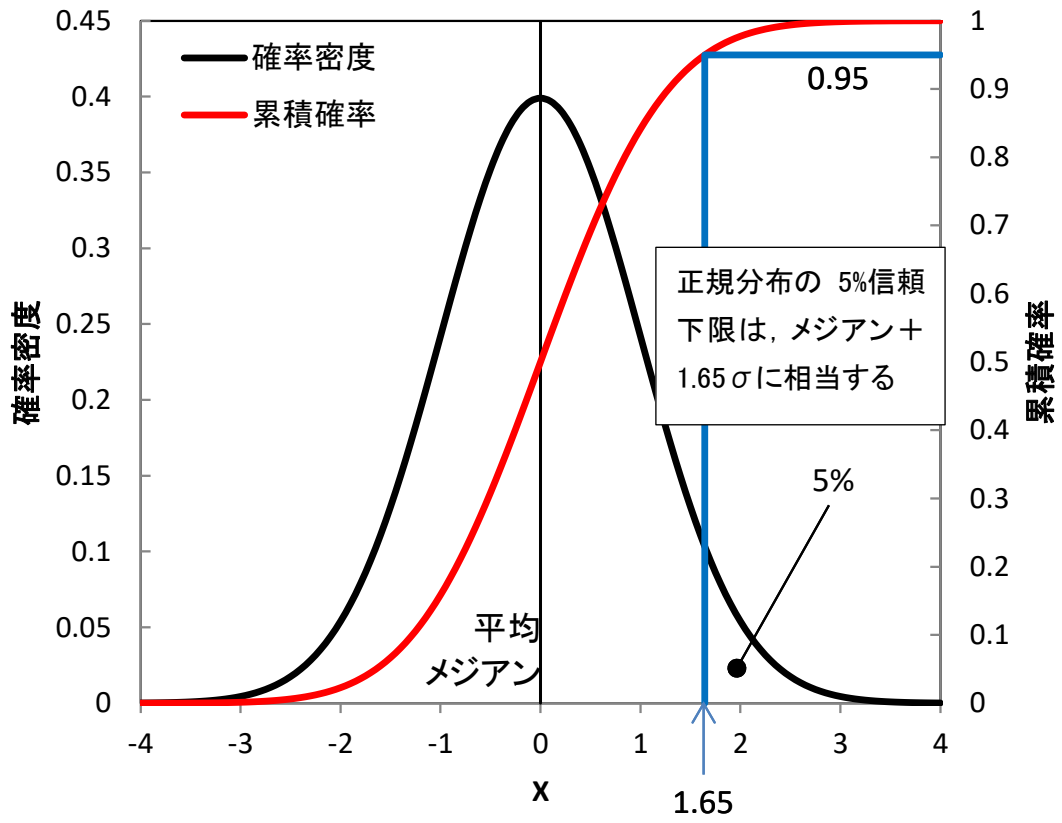


図 1 標準正規分布

(2) (8)式における ΔT_t 及び M_p 並びに(10)式における M_k を算出したプロセスについて、詳細が分かるような資料を提示して下さい。説明には、(10)式でマージンを 2 乗和平方根で表せるとした技術的根拠、 σ_M 、 σ 、 σ_{T_0} の設定根拠と計算プロセスが分かる資料を含んで下さい。

回答(2)

a. ΔT_t を算出したプロセス

第2回検討チーム会合資料 2-1「PTS 評価用破壊靱性遷移曲線について」の P7 に示した通り、 T_{r30} に基づく破壊靱性遷移曲線の評価式((8)式)は 5%信頼下限のマスターカーブの式において、 T_0 を $T_{r30} + \Delta T_t$ に置き換えて設定したものです。 ΔT_t については、同資料の P9 に示したとおり、高照射領域($5 \times 10^{19} \text{n/cm}^2$ 以上)の破壊靱性データに対して、圧延材、鍛鋼品、溶接金属のそれぞれについてメジアンカーブにフィットするように最尤推定法により求めました。 ΔT_t の具体的な算出手順については同資料の添付 5 に示したとおりです。

b. M_p を算出したプロセス

PTS 評価用破壊靱性遷移曲線は、 T_{r30} 実測値をベースに設定したものであり、 T_{r30} の値として評価時期の照射量を考慮して算出した T_{r30} 予測値を用いる場合には、予測に伴う不確実さ(予測誤差)を考慮して適切な温度マージン(M_p と呼称)を付加する必要があります(図 2-1)。

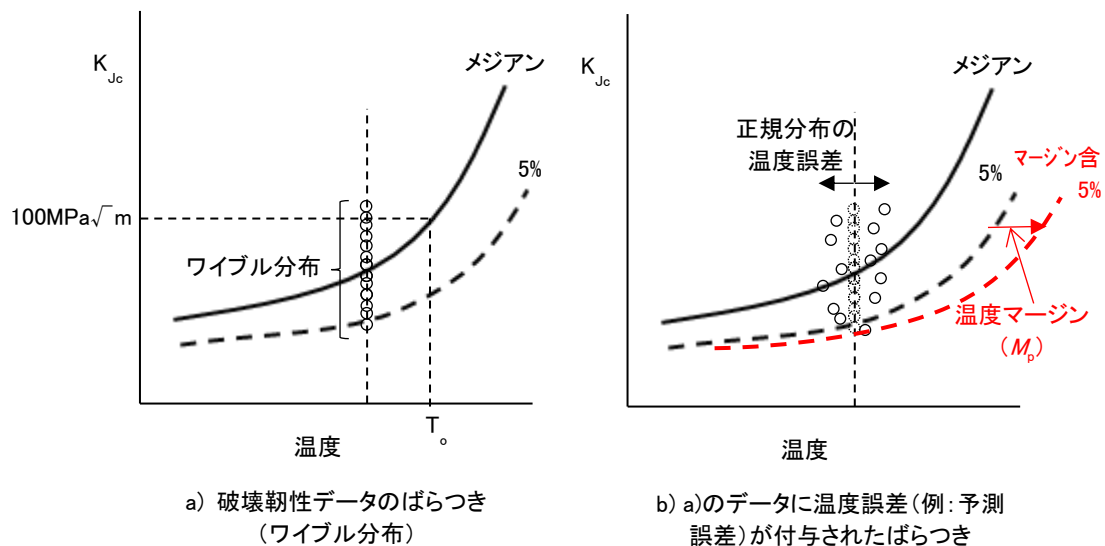


図 2-1 脆化予測による予測誤差を考慮したマージン (M_p)

M_p の値については、1)に示す誤差伝播の法則から設定した M_p の妥当性を、2)に示すモンテカルロ計算及び3)に示す脆化予測法により予測した $T_{r,30}$ 予測値で整理した照射後破壊靱性データが破壊靱性遷移曲線を上回る確率と Wallin の評価法による破損確率を確認することにより、3°Cと設定しました。

1) 誤差伝播の法則による M_p の設定

- a) マスターカーブのワイブル分布に従う破壊靱性のばらつきを他のばらつきと同列に扱えるように温度軸方向の正規分布(標準偏差: σ_M)に置き換えました。図 2-2 より、PTS 評価の K_I と接する付近の $K_{Jc} = 70\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ での $K_{Jc(\text{med})}$ と 5%信頼下限の $K_{Jc(0.05)}$ の温度差は 40.2°Cであり、正規分布の 5%信頼下限はメジアン+1.65 σ であることから、破壊靱性のばらつきの温度軸方向の標準偏差 σ_M を 24°C (40.2÷1.65 = 24.4 を切り捨て)に設定しました。

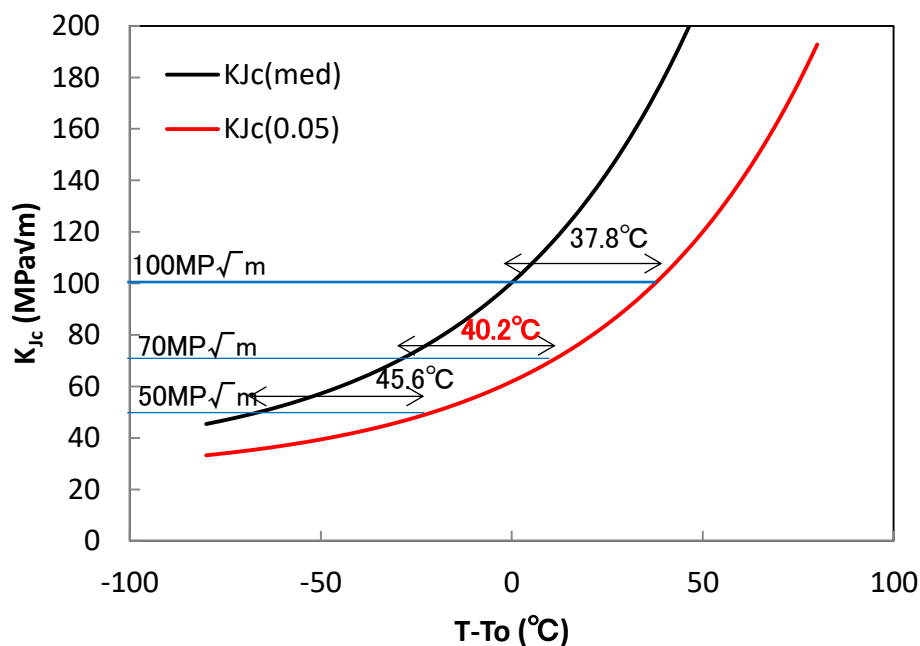


図 2-2 マスターカーブの $K_{Jc(\text{med})}$ と $K_{Jc(0.05)}$ の温度差

- b) a)により温度軸方向の正規分布に置き換えた破壊靱性のばらつき(標準偏差: σ_M)に脆化予測による予測誤差(標準偏差: σ)が加わることによる 5%信頼下限カーブ(メジアン+1.65 σ 相当)に対する追加のマージン M_p として、誤差伝播の法則から以下の式で設定しました。ここで、 σ については、JEAC4201-2007 [2013 年追補版]の脆化予測法による予測残差の標準偏差から 9.5°Cとしました。

$$M_p = 1.65 \times (\sqrt{\sigma_M^2 + \sigma^2} - \sigma_M) = 1.65 \times (\sqrt{24^2 + 9.5^2} - 24) = 2.99 \approx 3.0 (\text{°C})$$

2) モンテカルロ計算による M_p の妥当性の確認

第 2 回検討チーム会合資料 2-1「PTS 評価用破壊靱性遷移曲線について」の P10,11 に示した通り、破壊靱性のばらつきと脆化予測による予測誤差を与えた 100 万回のモンテカルロ計算を行った結果、設定した $M_p: 3^{\circ}\text{C}$ を考慮することにより 5%信頼下限を下回る確率が概ね 5%となり、適切に評価できることを確認しました(表 2-1)。

表 2-1 モンテカルロ計算による破壊靱性データが 5%信頼下限カーブを下回る確率

T-T ₀ (°C)	5%信頼下限カーブを下回る確率		
	予測誤差が無い場合	予測誤差がある場合	予測誤差がある場合にマージン 3°Cを考慮した場合
-50	5.00	5.79	4.90
0	5.00	6.04	4.98
+50	5.02	6.19	5.05

3) 照射後破壊靱性データによる M_p の妥当性の確認

第 2 回検討チーム会合資料 2-1「PTS 評価用破壊靱性遷移曲線について」の P12 ~ 14 に示した通り、脆化予測法により予測した T_{r30} 予測値で整理した照射後破壊靱性データの破壊靱性遷移曲線を上回る確率及び Wallin の評価方法による破損確率を求めた結果、設定した $M_p: 3^{\circ}\text{C}$ を考慮した T_{r30} 予測値を用いれば、PTS 評価用破壊靱性遷移曲線が 5%信頼下限として適切に設定できることを確認しました(表 2-2)。

表 2-2 照射後破壊靱性データによる信頼性評価結果

破壊靱性遷移曲線		対象データ		遷移曲線を上回る確率 (%)	Wallin の評価方法
材料	ΔT_t (°C)	全データ	遷移曲線を上回るデータ数		破損確率(%)
母材(圧延材)	-15	230	223	97.0	4.1
母材(鍛鋼品)	8	259	257	99.2	0.9
溶接金属	14	117	116	99.1	0.9

c. M_k を算出したプロセス

(10)式における M_k についても, b. 1) a)と同様の考え方で誤差伝播の法則により以下の式で設定しました。

$$M_p = 1.65 \times (\sqrt{\sigma_M^2 + \sigma_{T_0}^2 + \sigma^2} - \sigma_M) = 1.65 \times (\sqrt{24^2 + \sigma_{T_0}^2 + 9.5^2} - 24) (\text{°C})$$

ただし, ここでは b. 1) a)とは異なり, 破壊靱性試験により直接 T_0 を設定していることから, T_0 決定に用いた有効な試験片個数を踏まえてRF-2100の(2)式により σ_{T_0} を計算することとしています。