

資料4-3

「原子炉圧力容器に対する供用期間中の破壊靱性の確認方法等の技術評価に関する  
検討チーム 第四回会合における日本電気協会への説明依頼事項」に対する回答

令和元年11月22日  
(一社)日本電気協会  
原子力規格委員会

標記につきましては、以下の通り回答いたします。

○説明依頼事項

2. JEAC4216-2015「フェライト鋼の破壊靱性参照温度  $T_0$  決定のための試験方法」に関する追加質問

次の(1)～(6)について、説明してください。

- (1) 適用試験片に関し、根拠資料が規格に記載されていないものについて、 $T_0$  測定のための試験片としても適切であるとした技術的根拠を説明して下さい。
- (2) Mini-C(T)試験片について、加工精度に関し、異なる者が加工した場合の  $T_0$  算出に与える影響について評価した内容<sup>1</sup>を説明して下さい。
- (3) 資料3-3の図1-2で試験片ごとに得られた参照温度に有意な差がないとしたことを統計的に説明して下さい。
- (4) JEAC4216 は、ASTM E1921 を参考に作成したとのことである<sup>2</sup>が、資料3-3の(1)式に示された標準偏差の式は ASTM E1921 と異なる。その理由と(1)式の導出過程を説明して下さい。
- (5) 単一温度法の場合、必要な試験片の個数  $T-T_0$  の範囲に応じて 6～8 個としたことについて、温度範囲と必要個数に対応して同等の  $T_0$  が得られるかどうかについて評価した内容を説明して下さい。同様に、複数温度試験法において、必要データ数を規定する際に重み係数を用いていますが、これについて評価した内容を説明してください。これらの説明の際、同じ試験片個数の要求を Mini-C(T)試験片に対して適用することについて検討した内容を含んでください。
- (6) 複数温度法から得られる  $T_0$  と単一温度法で得られる  $T_0$  が同等であるかについて、評価した内容について説明して下さい。

1 シミュレーションにより確認したとのこと

2 JEAC4216-2015「(解説 MCT-1100)適用範囲」

## ○回答

(1) 適用試験片に関し、根拠資料が規格に記載されていないものについて、 $T_c$  測定のための試験片としても適切であるとした技術的根拠を説明して下さい。

### 回答(1)

JEAC4216-2015 には 3 種類の C(T)試験片(タイプ I, タイプ II, タイプ III), 外形が円形の DC(T)試験片, Mini-C(T)試験片および 2 種類の SE(B)試験片が規定されています。これまで採用の妥当性について技術根拠を示してきた Mini-C(T)試験片を除く試験片は, 全て ASTM International におけるマスターカーブ法規格 ASTM E1921 に採用されているものです。

タイプ I はもともと ASTM E399 規格に採用された試験片であり, これを用いることの技術根拠として文献[1-3]が示されています。

タイプ II とタイプ III は, タイプ I の外形寸法は保持したまま, 荷重線で開口変位を測定するための切り欠きを設けた形状となっています。これらの試験片形状について技術根拠文献は示されていませんが, 破壊靱性試験における実績がある(have been used successfully for fracture toughness testing)ものとして E1921 および E1820 に採用されています。

DC(T)試験片および SE(B)試験片は, もともと ASTM E399 規格に採用された試験片であり, その技術根拠として, それぞれ文献[4]および文献[5]が示されています。

試験片形状が影響を及ぼす応力拡大係数の算出において ASTM E1921 と JEAC4216 は同等であり, 上記の技術根拠は JEAC4216 での評価にも当てはまるため, 採用に支障なしと判断しました。

Mini-C(T)試験片の機械ノッチ先端の曲率(R), 形状, ノッチ幅の影響については, Takamizawa らが3次元弾塑性有限要素解析により検討しています[6]。0.6mm の疲労予亀裂導入後の塑性域範囲は, 試験片板幅の全体にわたり, 予亀裂導入の初期に形成される塑性域範囲を上回り, 機械ノッチの影響が残存しないことを示しています(図 1-1)。

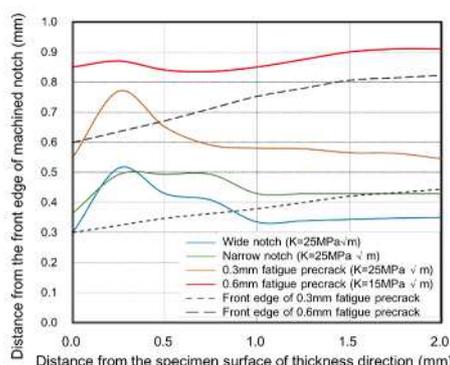


図 1-1 機械ノッチ前方の塑性域範囲と予亀裂前方の塑性域範囲の比較[6]

(2) Mini-C(T)試験片について、加工精度に関し、異なる者が加工した場合の  $T_c$  算出に与える影響について評価した内容を説明して下さい。

回答(2)

「異なる者が加工」した場合でも、その使用する加工機や加工者の技量などによって(1)微小な寸法の差、(2)加工面の仕上げ状態の差、が生じ、これが亀裂先端近傍における応力・歪み分布(応力拡大係数)に大きな影響を及ぼさないよう、寸法公差および表面仕上げの要求が規定されています。

寸法公差の範囲内で異なる寸法で作成された場合においても、その差異が応力拡大係数に及ぼす影響が小さいことについては、既に第3回検討チーム会合資料 3-3 回答(5)にて説明しました。

仕上げについては、これまで多くの破壊靱性試験規格(ASTM E1921, E1820, JIS G0564:1999, ISO 12737:2010)で採用されてきたものに準ずる要求としています。なお、破壊靱性試験片では、ノッチの先端から疲労予亀裂を導入します。切削、研削、ワイヤカットなど、試験片加工に用いられる通常の加工技術では表面加工層の影響は高々0.1~0.2mm であることから、最低でも0.6mmの疲労予亀裂が導入されることで表面加工層の影響範囲は超えており、影響することはありません。

(3) 資料3-3の図1-2で試験片ごとに得られた参照温度に有意な差がないとしたことを統計的に説明して下さい。

回答(3)

第3回検討チーム会合資料 3-3 図 1-2 に使用された 4T-C(T), 2T-C(T), 1T-C(T), 0.4T-C(T)および Mini-C(T)試験片による破壊靱性について、文献[7]に記載のデータに基づいて、電気協会にて Mini-C(T)試験片とより大型の試験片による  $T_o$  の統計的検定を行いました。まず、各試験片で得られた 1T 相当の破壊靱性  $K_{Jc}$  が  $K_{Jc(\text{med})}$  であるとみなし、 $T_o$  の暫定値  $T_{oQ}$  を次式により求めました。

$$T_{oQ} = T - \left( \frac{1}{0.019} \right) \ln \left[ \frac{K_{Jc(\text{med})} - 30}{70} \right]$$

試験片寸法ごとの  $T_{oQ}$  のデータセットの分布に有意水準 0.05 で有意差が有るか、分布の関数系に制限のないノンパラメトリックな方法であり、二つの母集団の分布の相違を検定できる、2標本のコルモゴロフ-スミルノフ検定 (K-S 検定)により、検定しました。

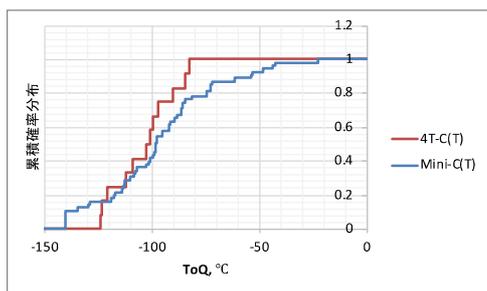
#### 検定の詳細

帰無仮説:「二つの母集団の分布が同一である」

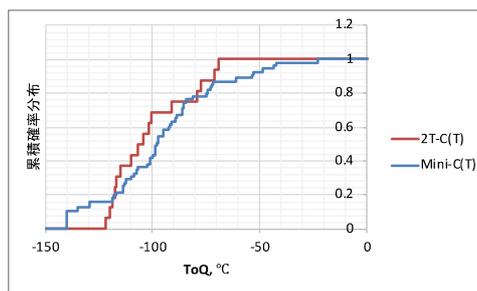
手順:異なる試験片寸法から得られる二つ  $T_{oQ}$  の母集団を想定し、それぞれからサンプルサイズ  $n_1, n_2$  の標本を抽出したとします。これらから累積分布関数  $S_{n1}(x), S_{n2}(y)$  を求め、それを同じグラフ上にステップ関数としてプロット(図 3-1)します。プロット間の差  $|S_{n1}(x) - S_{n2}(y)|$  の最大値  $D$  を計算します。この最大値を統計検定量として用い、有意水準 0.05 と K-S 検定の棄却最大値  $\rho$  値とを比較します。

結果:表 3-1 に異なる 2 寸法の試験片のデータセットにおける  $D$  およびこれに対する  $\rho$  値を示します。これらの算出には統計解析ソフトウェア R version 3.6.1 [8]を用いました。 $\rho$  値はいずれの比較ケースでも 0.05 を上回りました。

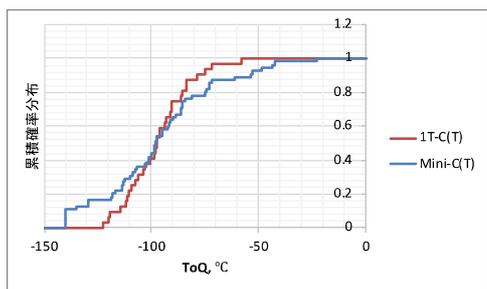
結論:二変数のコルモゴロフ-スミルノフ検定により、Mini-C(T)試験片とより大きな試験片(0.4T, 1T, 2T, 4T)の  $T_{oQ}$  の分布をそれぞれ比較した結果、いずれのケースにおいても、「二つの母集団の分布が同一である」とする帰無仮説は採択されました。



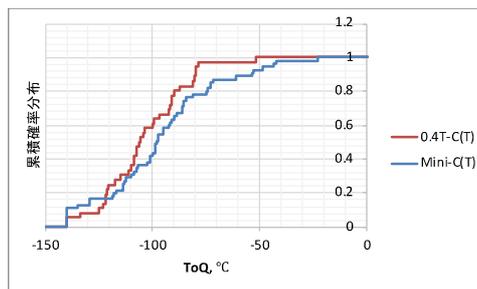
(1) Mini-C(T)と4T-C(T)試験片の比較



(2) Mini-C(T)と2T-C(T)試験片の比較



(3) Mini-C(T)と1T-C(T)試験片の比較



(4) Mini-C(T)と0.4T-C(T)試験片の比較

図 3-1  $T_{oQ}$ と累積分布関数の関係

表 3-1 K-S 検定結果

データセット 1	データセット 2	$D$	$p$	有意水準	帰無仮説の採否
4T-C(T)	Mini-C(T)	0.236	0.641	0.05	採択
2T-C(T)	Mini-C(T)	0.269	0.330	0.05	採択
1T-C(T)	Mini-C(T)	0.166	0.634	0.05	採択
0.4T-C(T)	Mini-C(T)	0.220	0.244	0.05	採択

(4) JEAC4216 は、ASTM E1921 を参考に作成したとのことであるが、資料3-3の(1)式に示された標準偏差の式は ASTM E1921 と異なる。その理由と(1)式の導出過程を説明して下さい。

回答(4)

参照温度の分布の評価式については、三浦らが詳細な導出過程とともに提案[9]しています。これを元に同文献の著者らが  $\sigma_o$  の導出過程を取りまとめた資料(破壊靱性検討会での議論に先立ち、下部 WG での検討のために提供されたもの)を添付します。同資料の式(7)が JEAC4206-2016, RF-2100 の式(2)に採用された  $\sigma_o$  です。

ASTM E1921 における参照温度  $T_o$  の標準偏差は、同様の考え方に基いており、元々は同様の式を用いていると考えられます。しかし、規格化にあたって、より簡易的な評価を目指したものと思われ、試験片数の影響について、JEAC4206 のような関数ではなく、図 4-1(灰色線)に示す 3 ステップの段階的変化として  $\sigma_o$  を与えるようになっていました。元となる式による線(黒色線)と比べると、とくに破壊靱性が高い場合に  $\sigma_o$  を大きく見積もる[9]ようになっていました。JEAC4206 においては、式(2)を評価で直接用いることに手順上の困難さはないと判断し、そのまま採用いたしました。従って、JEAC4206 における  $\sigma_o$  の算出は、ASTM E1921 のそれより、技術根拠をより正確に反映したものといえます。

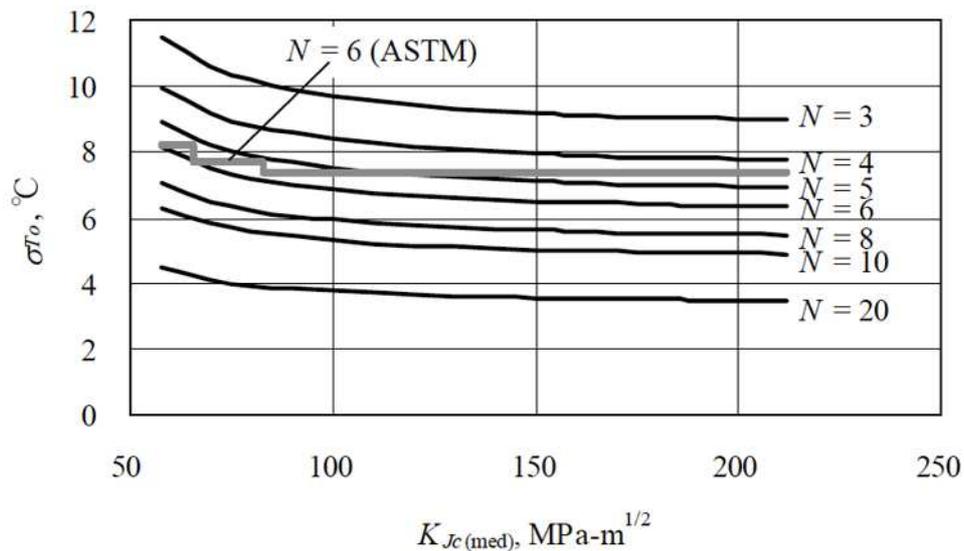


図 4-1 破壊靱性の中間値  $K_{Jc(med)}$  と  $T_o$  の標準偏差の関係における JEAC4206(黒線)と ASTM E1921(灰色線)の比較 [9]

(5) 単一温度法の場合、必要な試験片の個数  $T-T_0$  の範囲に応じて 6~8 個としたことについて、温度範囲と必要個数に対応して同等の  $T_0$  が得られるかどうかについて評価した内容を説明して下さい。同様に、複数温度試験法において、必要データ数を規定する際に重み係数を用いていますが、これについて評価した内容を説明してください。これらの説明の際、同じ試験片個数の要求を Mini-C(T)試験片に対して適用することについて検討した内容を含んでください。

回答(5)

マスターカーブ法では、低温域でカーブの勾配が小さくなるため、評価された  $T_0$  の信頼性が低下します。これを補い、いずれの試験温度でも同等の信頼性を得られるように本規定が設けられており、また、複数温度法における重み係数も同じ考え方によって設けられ、低温においては多くの試験片を求める要求となっています。具体的な温度制限と必要個数については、ASTM E1921 の規定を JEAC4216 に採択したものです。マスターカーブの形状は ASTM E1921 および JEAC4216 で同一であり、両規格で  $T_0$  の信頼性に差がないことから、JEAC4216 の制定時に追加の技術検証は行っていません。ただし、ASTM E1921 でも、本規定について明確な技術根拠は示されていないようです。

参考情報として、最近の ASTM E08 会議 (ASTM E1921 の改定を議論する規格会議) に  $T_0$  評価の信頼性を試験片数ごとに示したものの [10] を図 5-1 に示します。ASTM E1921 および JEAC4216 において必要試験片個数が変化する  $T-T_0 = -15^\circ\text{C}$ 、 $-35^\circ\text{C}$ 、 $-50^\circ\text{C}$  の位置 (それぞれ、試験片の要求数が 6→7 個、7→8 個、試験温度の下限となる点) に着目すると、 $T_0$  の信頼性 87.5% 以上を満たす評価となっているようです。

また、 $T_0$  の信頼性は試験片寸法によらないことから、Mini-C(T)試験片に対して適用できない理由はありません。

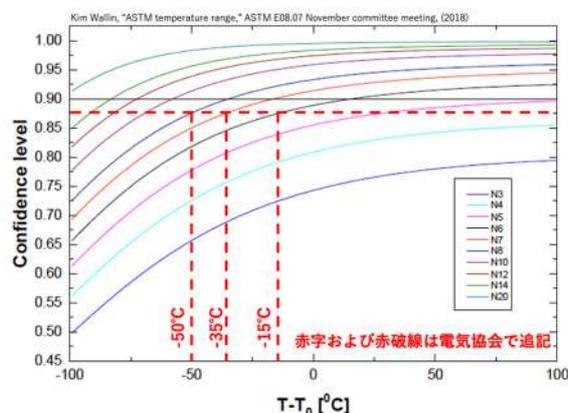


図 5-1  $T_0$  評価の信頼性に及ぼす試験温度および試験片数の影響 [10]

(6) 複数温度法から得られる  $T_0$  と単一温度法で得られる  $T_0$  が同等であるかについて、評価した内容について説明して下さい。

回答(6)

第3回検討チーム会合資料 3-3 回答(3)にて複数温度試験法は単一温度試験法と理論的に同一であり、また試験温度  $T = T_0 \pm 50^\circ\text{C}$  の範囲では、原子炉圧力容器鋼について両者が同等の  $T_0$  推定結果を与えることを示しました。従って、単一温度試験法で評価可能です。

三浦ら[9]は、国産圧力容器鋼について様々な温度で  $T_0$  を評価し、 $T = T_0 \pm 50^\circ\text{C}$  の範囲では、試験温度によらず同等の結果が得られることを示しています(図 6-1)。同結果に基づき複数温度試験法および単一温度試験法で算出された  $T_0$  は図 6-2 のとおりです。

Wallin は、文献[11]において3温度以上の複数温度試験法で評価することを推奨しています。これは実用材料においてマスターカーブの温度依存性曲線(経験式)が統計的に分布する可能性があることから、より良い評価のために推奨しているものであり、単一温度試験法で  $T_0$  を評価することを否定するものではありません。

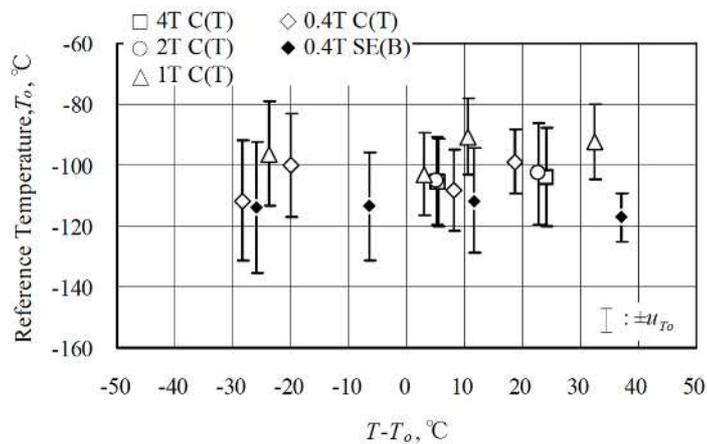


図 6-1 国産圧力容器鋼に対するマスターカーブ評価の試験温度依存性[9]

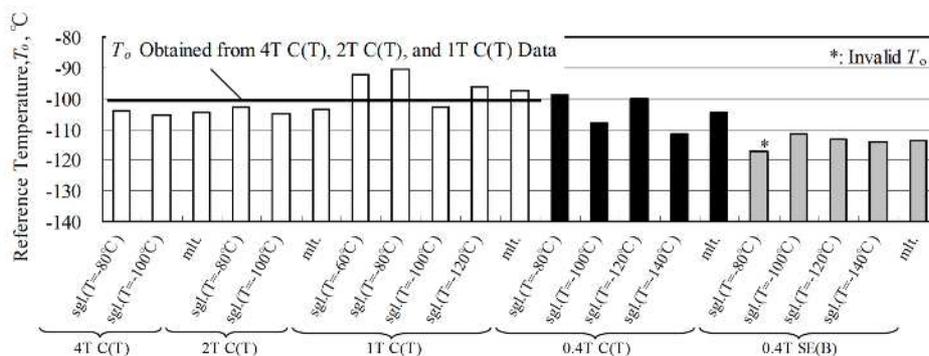


図 6-2 複数温度試験法(mlt.)と単一温度試験法(sgl.)の参照温度評価結果比較[9]

## 【文献】

- [1] Srawley, J. E., “Wide Range Stress Intensity Factor Expressions for ASTM E399 Standard Fracture Toughness Specimens,” *International Journal of Fracture*, Vol 12, June 1976, p. 475.
- [2] Newman, J. C., “Stress Analysis of Compact Specimens Including the Effects of Pin Loading,” *ASTM STP 560*, 1974, p. 105.
- [3] Kapp, J. A., “Improved Wide Range Expressions for Displacements and Inverse Displacements for Standard Fracture Mechanics Specimens,” *Journal of Testing and Evaluation*, JTEVA, Vol 19, No. 1, January 1991, pp. 45–54.
- [4] Underwood, J. H., Newman, J. C., Jr., and Seeley, R. R., “A Proposed Standard Round Compact Specimen for Plane Strain Fracture Toughness Testing,” *Journal of Testing and Evaluation*, Vol.8, No. 6, November 1980, p. 308–313.
- [5] Freese, C. E. and Baratta, F. I., “Single Edge–Crack Stress Intensity Factor Solutions,” *Engineering Fracture Mechanics*, Vol 73, 2006, pp. 616–625.
- [6] Takamizawa, H., Tobita, T., Ohtsu T., Katsuyama, J., Nishiyama, Y., Onizawa, K., “Finite Element Analysis on the Application of Mini-C(T) Test Specimens for Fracture Toughness Evaluation,” *Procs., ASME 2015 Pressure Vessels & Piping Conference*, 2015, PVP2015–45412
- [7] 三浦, 曾根田, “国産原子炉圧力容器鋼に対するマスターカーブ破壊靱性評価法への小型試験片の適用性検討,” *電力中央研究所研究報告*, Q07304, (2008)
- [8] R Core Team, “R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing,” Vienna, Austria. URL <https://www.R-project.org/>, (2019).
- [9] 三浦, 曾根田, “マスターカーブ法による破壊靱性値曲線の合理的設定法の提案,” *電力中央研究所研究報告*, Q07305, (2008)
- [10] Wallin, Kim, “ASTM temperature range,” *ASTM E08.07 November committee meeting*, (2018)
- [11] Wallin, Kim, “Master Curve analysis of ductile to brittle transition region fracture toughness round robin data,” *VTT Publications 367*, (1998)

## 参照温度のばらつきに関する検討

電力中央研究所

$K_{Jc}$ の母集団から有限個のサンプルを抽出してその中間値  $K_{Jc(med)}$ を推定するとき、統計量としての  $\hat{K}_{Jc(med)}$  の確率分布は一般に陽な形に記述できない。しかしながら、指数パラメータ  $b$  が 3~5 程度のワイブル分布では  $K_{Jc(med)}$  と  $K_{Jc}$  の母平均とが良く一致することから、統計量として  $\hat{K}_{Jc(med)}$  に代えて標本平均  $\hat{K}_{Jc}$  を考えることが可能である。サンプル数がある程度以上であれば、 $K_{Jc}$  の母集団の分布特性によらず  $\hat{K}_{Jc(med)}$  の分布は中心極限定理により正規分布に従うことが期待される。さらに、 $b$  が 3~5 程度のワイブル分布それ自体が正規分布にきわめて近いという事実から、サンプル数がある程度大きいという制約なしに(中心極限定理によることなく)、やはり  $\hat{K}_{Jc(med)}$  が正規分布に従うことが期待される。以上の考察に基づけば、サンプル数  $N$  に対する  $\hat{K}_{Jc(med)} - K_{min}$  は平均が  $\mu_{KJc}$ 、標準偏差が  $\sigma_{KJc} / \sqrt{N}$  の正規分布にほぼしたがうと予想される。ここで、

$$\mu_{KJc} = (K_o - K_{min}) \Gamma(1/b + 1) \quad (1)$$

$$\sigma_{KJc}^2 = (K_o - K_{min})^2 [\Gamma(2/b + 1) - \Gamma^2(1/b + 1)] \quad (2)$$

である。

次に、参照温度  $T_o$  の推定について考える。 $T_o$  と  $K_{Jc(med)}$  の関係は、

$$T_o = T - \left( \frac{1}{0.019} \right) \ln \left[ \frac{K_{Jc(med)} - 30}{70} \right] \quad (3)$$

で与えられるが、その関係は非線形であって、やはり  $T_o$  の推定値  $\hat{T}_o$  の分布は既知の確率分布で表すことができない。ただし、 $K_{Jc(med)}$  の狭い範囲を考えれば、その限定された範囲内においてマスターカーブを直線で近似できると考えることが可能で、 $\hat{K}_{Jc(med)}$  の一次関数として与えられる  $\hat{T}_o$  はやはり正規分布にしたがうことになる。その平均  $\mu_{T_o}$  は式(3)中の  $K_{Jc(med)}$  に  $\hat{K}_{Jc(med)}$  の標準偏差  $\mu_{KJc} + K_{min}$  を代入して、

$$\mu_{T_o} = T - \left( \frac{1}{0.019} \right) \ln \left[ \frac{\mu_{KJc} + K_{min} - 30}{70} \right] = T - \left( \frac{1}{0.019} \right) \ln \left[ \frac{\mu_{KJc} - 10}{70} \right] \quad (4)$$

標準偏差  $\sigma_{T_o}$  は  $\hat{K}_{Jc(med)}$  の標準偏差に対し誤差の伝播を考えて、

$$\sigma_{T_o} = \left| \frac{\partial T_o}{\partial K_{Jc(med)}} \right| \frac{\sigma_{KJc}}{\sqrt{N}} = \frac{1}{0.019(\mu_{KJc} - 10)} \frac{\sigma_{KJc}}{\sqrt{N}} \quad (5)$$

により得られる。これら式に含まれる $\mu_{K_{Jc}}$ 、 $\sigma_{K_{Jc}}$ はいずれも $K_o$ のみの関数であり、さらに $K_{Jc(med)}$ と $K_o$ とは一意に関係付けられることから、上述の式の具体的な評価式が次のように整理できる。

$$\mu_{T_o} = T - \left( \frac{1}{0.019} \right) \ln \left[ \frac{K_{Jc(med)} - 30}{70} \right] \quad (6)$$

$$\sigma_{T_o} = \frac{K_{Jc(med)} - 20}{K_{Jc(med)} - 30} \frac{14.7}{\sqrt{N}} \quad (7)$$

式(6)は標本平均が母平均の最良推定値であることを示すものであり、これは式(3)で表されるマスターカーブにほかならない。式(7)に基づく $K_{Jc(med)}$ と $\sigma_{T_o}$ の関係から、 $K_{Jc(med)}$ が大きくなるほど $T_o$ のばらつきは漸減し、また $N$ が大きくなるほど $T_o$ のばらつきが小さくなる傾向にあることがわかる。

上述の議論において、各評価式に現れる(近似的な)諸定数はワイブル分布の指数パラメータ $b$ が4であることを部分的に前提としている。一方、限られたサンプルから得られる標本に対する $b$ が4となるわけではなく、とくにサンプル数が小さいときに4からの乖離が大きくなることが知られている(図1参照)。この場合、サンプルから推定される母集団の $b$ が4である保証があるとは言えない。そこで、ワイブル分布にしたがう $K_{Jc}$ の母集団の $b$ が4からずれていると仮定したときの $T_o$ の標準偏差がサンプル数によりどう変動するかをモンテカルロ法により調べた。母集団の分布特性として、 $K_{min} = 20 \text{ MPa m}^{1/2}$ 、 $K_{Jc(med)} = 100 \text{ MPa m}^{1/2}$ 、 $T_o = -100^\circ\text{C}$ と仮定し、 $b$ を2から6まで変化させた。一条件について100回の繰返しを行って得られた $T_o$ の標準偏差を式(7)により予測される $\sigma_{T_o}$ と比較した結果を図2に示す。 $\sigma_{T_o}$ は $b$ の値によらずサンプル数の増加に伴い減少する。また、サンプル数が同一のとき、 $b$ が大きくなるにつれて $\sigma_{T_o}$ は低下する。式(7)による $\sigma_{T_o}$ の予測値(図中の実線)と比較すると、 $b=3$ のときの $\sigma_{T_o}$ は予測値をわずかに(1ないし2℃程度)上回るものの、 $b$ が4以上のときはいずれの場合も予測値を下回っており、かつ $b$ に対する依存性は低下している。このことより、母集団の $b$ が3以上の場合には式(7)による $\sigma_{T_o}$ の予測が概ね妥当であると考えられる。

なお、母集団の $b$ が4と異なる場合には、式(1)および(2)から明らかなようにその分布特性が変わり、厳密には式(7)中の定数が変わる。

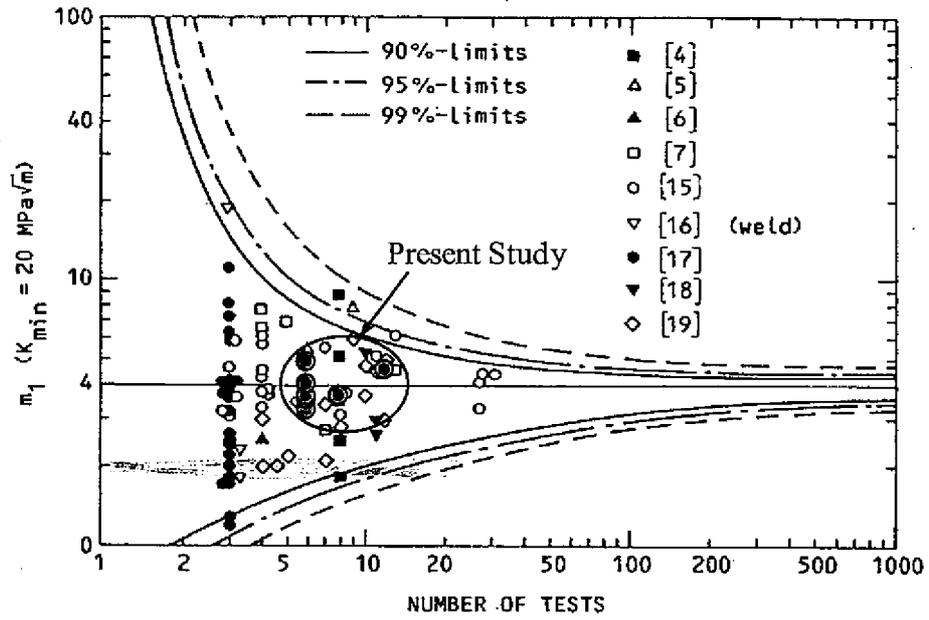


図1 指数パラメータと試験片数の関係(Wallin, 1991)

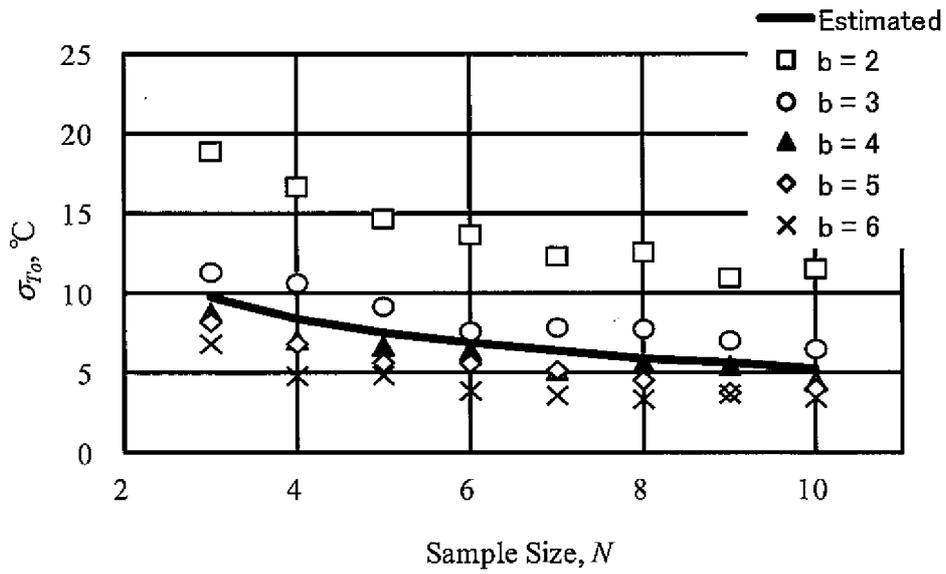


図2 参照温度の標準偏差と試験片数の関係