

論点整理と 取り纏めの方向性に関する 事務局提案

令和3年11月15日
供用適性評価規格委員会
高度化検討分科会 事務局

p-M法とAPI法の論点整理

- ① M_s の定義／参照応力の定義
- ② 局部崩壊か全体崩壊か（塑性崩壊条件の定義）
- ③ 温度依存性の考慮（許容基準の考え方）

論点①Msの定義／参照応力の定義

論点の説明

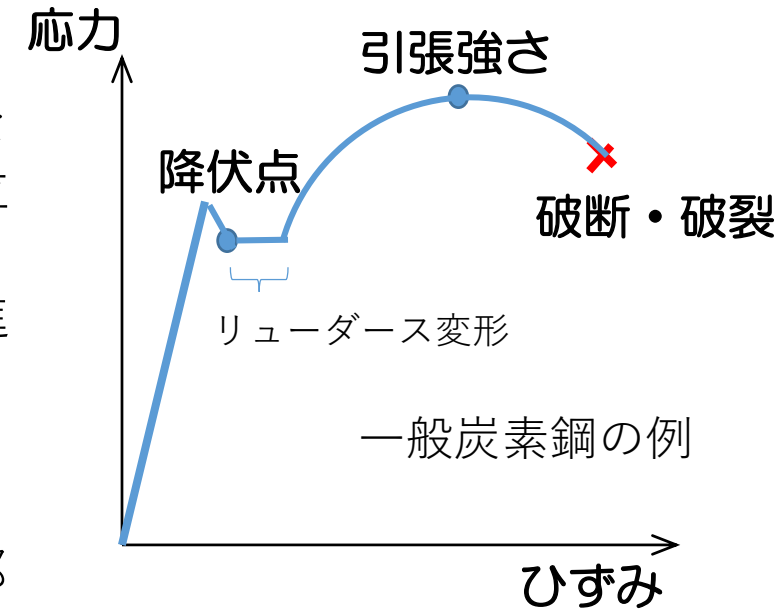
○金属材料に応力を加えるとひずみ（変形）は応力に比例して大きくなるが、右図のように**一般炭素鋼では**、材料の上降伏点を超えると転位が動くために耐荷能が低下して（軟らかくなり）**下降伏点を示し（＝降伏）**、リュウダース変形をした後に加工硬化を伴いながら変形が進行し、**極限を示した後（＝引張強さ）、破断する**。

高合金鋼など材料によっては、明確な降伏点を示さないものもある。

○金属材料でできた配管等に減肉等の欠陥があると、損傷の無い健全部に比べ、断面積が減少する分、応力が健全部より大きくなる。

○F F Sは欠陥がある場合であっても配管等の健全性が保たれるかどうかを評価する方法であるため、評価に際して、欠陥の有無やその程度が適切に反映されることが必要。

○**欠陥評価式は、健全部の応力を補正して欠陥にかかる応力を評価するもの**であるが、p-M法とA P I法の欠陥評価式は、健全部の応力の補正において、減肉等による断面積の減少や、バルジング効果（＝円筒上の欠陥は内圧により余計に膨れる効果）の**反映の仕方に違いがある**ことに留意が必要。



論点②局部崩壊か全体崩壊か (塑性崩壊条件の定義)

論点の説明

○減肉を有する内圧容器の典型的な塑性崩壊挙動は、

①減肉部の内面（底部）降伏→

②減肉部の全断面降伏→

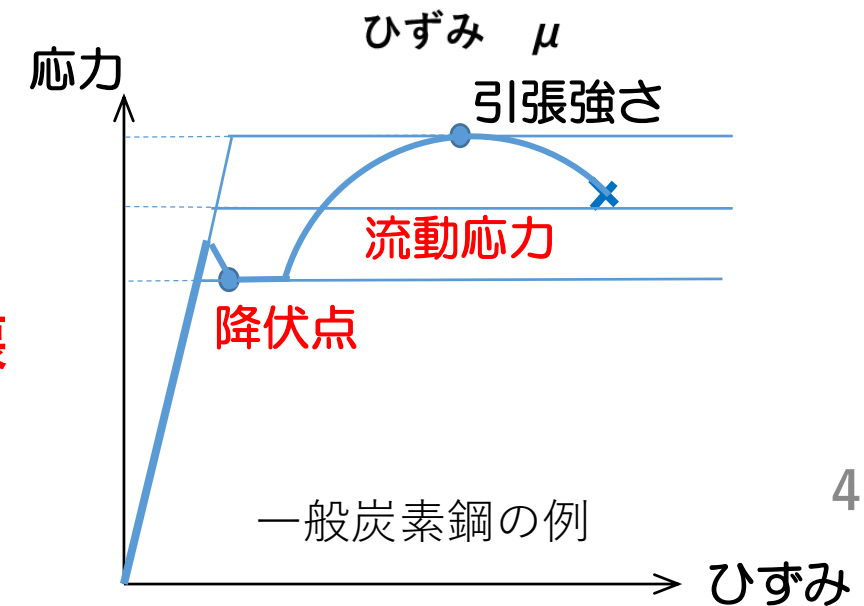
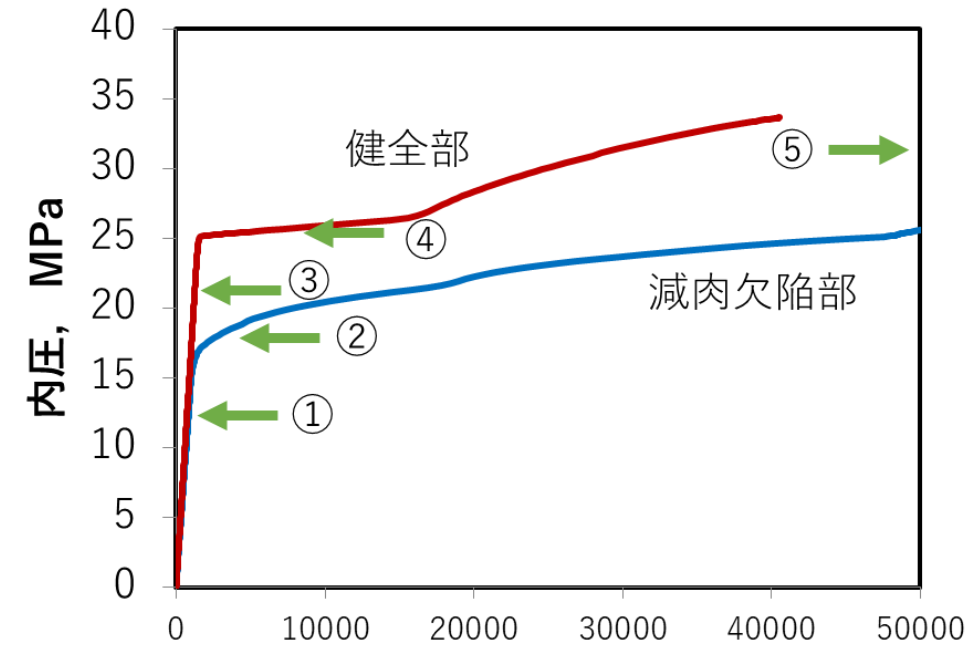
③健全部の内面（底部）降伏→

④健全部の全断面降伏の順に進み、

最終的には**⑤減肉部の破裂に至る**。

(⑤は減肉欠陥部と健全部の破裂は同時同圧である。)

○この論点は、両者が材料の損傷の**どの段階を塑性崩壊として参照応力を検証しているかに違いがある**。



論点①Msの定義／参照応力の定義

p-M法

欠陥評価式
(参照応力)

$$\sigma_{\text{ref}} = \frac{M_S^{\text{Chell}}}{(1-\alpha)} \sigma_m$$

- σ_m : 健全部に作用する応力
- M_S^{Chell} : **バルジング（膨れ）係数
(=形状補正係数)**
- $1/(1-\alpha)$: 断面積減少による増分
ただし $\alpha = a_{\text{eff}}/t$
 a_{eff} : 欠陥深さ、 t : 健全部の厚さ

p-M法では、**Msはバルジング係数**であり、**断面積減少による増分はMsに含まれていない**と考えた定義である。

API法

欠陥評価式
(参照応力)

$$\sigma_{\text{ref}} = M_S^{\text{Kiefner}} \sigma_m : \text{応力表記}$$
$$(RSF = \frac{1}{M_S^{\text{Kiefner}}} : \text{RSF表記})$$

- σ_m : 健全部に作用する応力
- M_S^{Kiefner} : $\frac{\text{健全容器の限界圧力}}{\text{表面キズのある容器の限界圧力}}$
- API法では M_S^{Kiefner} は**欠陥の有無による円筒の限界荷重の比 (=断面積の比) に等しく、バルジングファクターではないとしている。**ただし、 M_S^{Kiefner} は内径が大のとき平板に近づくため1になる。

API法では、Msは**限界荷重の比 (=断面積の比)**であり、バルジング係数ではない。

Msの定義
が異なる

- p-M法とAPI法では、内圧に対する減肉評価（周方向応力の評価）において、健全部に作用する応力を補正する係数**Msを異なる意味で用いていることが最大の違い**である。
 - 両者の違いは、**参照応力の算定結果の差異として現れ**、検証するモデルの範囲ではAPI法の方が応力を小さく評価する。なお、論点③の許容基準ではAPI法の方が常温では保守的となる。
 - 両者による判定結果（合否判定）においては、**条件によって許容される欠陥に有意な差**が生じる。
- ⇒ **両者の違いや特徴を十分に理解**した上で、いずれの評価法を適用するか**事業者が判断することが重要。**

論点②局部崩壊か全体崩壊か（塑性崩壊条件の定義）

p-M法

- **p-M法の参照応力は②減肉部の全断面降伏（降伏点ベース）**を基準としたもの
- 参照応力が**減肉部の全断面降伏データ**と合うことで検証（＝減肉部の全断面降伏を予測できるかどうか）
- 減肉部の全断面降伏を防止するための評価である。全断面降伏を限界とする考え方は設計における極限荷重解析と同じである。

API法

- **API法の参照応力は⑤減肉部の全断面降伏を基準としたもの（流動応力ベース＝一般的には破裂に相当）**
- 参照応力が**破裂試験データ**と合うことで検証（＝破裂圧力を予測できるかどうか）
- 破裂する限界に対して比較的大きな裕度を取り、破裂することを防止するための評価である。
- 参照応力は破裂圧力よりも十分低い実使用圧力の範囲で算定する。

- ・ p-M法とAPI法では、内圧に対する減肉評価（周方向応力の評価）において、参照応力を求めるための基準とする**減肉部の全断面降伏を考えるための材料物性値が異なることに大きな違い**がある（p-M法は材料の降伏強さ、API法は流動応力（＝材料の引張強さと降伏強さの平均））。
- ・ 両者の違いは、減肉部を含め**考える全断面降伏する範囲の違い**に現れる。API法の方が減肉部の塑性崩壊挙動と一緒に考えている健全部の範囲が大きい。
- ・ 以上の違いが、論点①の欠陥評価式とその算定結果が両者で異なることの主な理由である。

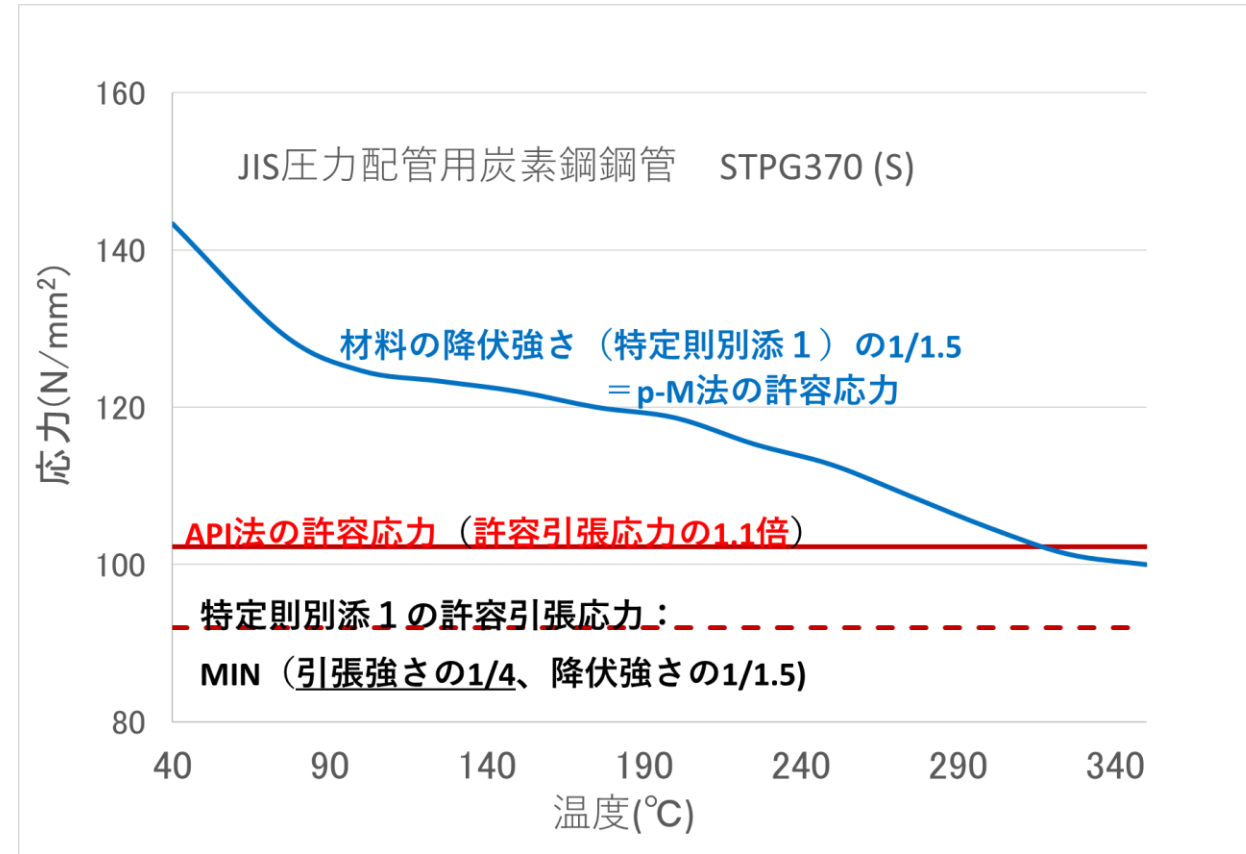
⇒ **両者の違いや特徴を十分に理解**した上で、いずれの評価法を適用するか**事業者が判断することが重要**。

論点③温度依存性の考慮（許容基準の考え方）

論点の説明

○金属材料は温度が上昇すると軟化しやすくなり、降伏点に至る応力（=降伏強さ）も小さくなる。全断面降伏も高温では起こりやすくなる。

○この論点は、両者の許容基準が、**温度上昇による降伏強さの低下の反映の仕方に違いがある。**



API法の許容応力とp-M法の許容応力の温度依存性

参考：**設計上の許容応力**（特定則別添1：一般炭素鋼の場合）

$$\text{MIN} \left(\frac{\text{引張強さ}}{4}, \frac{\text{降伏点}}{1.5} \right) \quad \text{引張強さ、降伏点はそれぞれ常温及び設計温度のJIS等規格の規定値}$$

論点③温度依存性の考慮（許容基準の考え方）

p-M法

- p-M法は減肉部の残厚が全断面降伏することを防止することを目的とした**参照応力の算定を行い、降伏点（常温及び設計温度）の1/1.5まで許容する**考え方である。
- 設計温度における降伏点の温度依存性は考慮されている。

API法

- API法は減肉部が全断面降伏（流動応力ベース＝一般的には破裂に相当）することを防止することを目的とした**参照応力の算定を行い、設計上の許容応力の1.1倍（=RSFの許容値0.9の逆数）まで許容する**考え方である。
- 温度依存性は評価の基準点となる健全容器と欠陥のある容器のバースト破壊圧力において考慮されている。

- ・ p-M法とAPI法では、内圧に対する減肉評価（周方向応力の評価）において、**参照応力の算定結果の許容基準に違い**がある（p-M法は降伏強さの1/1.5倍以内、API法は許容応力の1.1倍以内）。
- ・ 一般炭素鋼においてはp-M法の許容基準は高温ではAPI法より保守的であり、常温ではAPI法の許容基準がp-M法より保守的である。
- ・ 論点①の参照応力による算定結果の両者による違いと、本論点③の許容基準の違いがあるため、いずれかの評価法が常に保守的な結果を与えるというわけではなく、条件によって異なっている。

⇒ **両者の違いや特徴を十分に理解**した上で、いずれの評価法を適用するか**事業者が判断することが重要**。

p-M法及びAPI法を両論併記する際に留意すべき事項（案）

- いずれかの評価法を適用するかは、各論点①～③を含めた両評価法の違いや特徴を十分に理解した上で、事業者の責任において判断すること。