靭性が高い材料ほど、靭性を測れない

— 平面ひずみ破壊靭性が成り立つのに要る試験片の厚みは $2.5(K_{IC}/\sigma_y)^2$ で、高強度鋼なら **2.78** mm だが、オーステナイト系ステンレスでは **3600.00** mm になる（**1296.000000** 倍） — 測りたい材料ほど、測れない — [論文566]

山岸 勇輝 (Yuuki YAMAGISHI)
Yamagishi Complexity Torus Lab, Japan｜山岸勇輝ラボ
2026年9月

— *From thinking to syncing.* —

要旨

破壊靭性は材料の定数として表に載っている。本稿が示すのは、それが定数として意味を持つには試験片に最小の厚みが要り、その厚みが靭性の二乗で増えるので、いちばん知りたい材料でいちばん測りにくくなることである。新しい定理も法則も主張しない。 第一に、要る厚みは K_{IC}/σ_y だけで決まる——K も σ_y も **2** 倍にすれば、要る厚みは変わらない（**12** 桁）（第2節）。 第二に、これが本稿の芯である。材料によって **1296.000000** 倍も違う——高強度鋼の **2.78 mm** から、オーステナイト系ステンレスの **3600.00 mm** まで（第2節）。 第三に、硬くて脆い材料ほど測りやすい——高強度鋼もアルミ合金も **10 mm** 未満で足りる（第2節）。 第四に、強靭な材料は **1 m** を超える——そんな試験片は作れないし、作れても意味がない（第2節）。 第五に、要る厚みは塑性域の一定倍である——五つの材料すべてで $15\pi = 47.123890$ 倍、材料に依らない（第3節）。 第六に、分離子は、塑性域が試験片に対して小さいかどうかである——小さくなければ、K が一つの数で場を代表しなくなる（第4節）。 キーワード：破壊靭性、平面ひずみ、寸法条件、塑性域、破壊靭性試験。

本稿の射程（射程注記）：新しい定理も法則も主張しない——平面ひずみ破壊靭性の寸法条件も、塑性域の大きさの式も規格に載っている。材料を評価しない——挙げた五つの値は代表値であって、特定の鋼種・処理の測定値ではない。順序と桁を見るために置いた。弾塑性破壊力学を扱わない——寸法条件を満たせない材料には J 積分や CTOD という別の道具がある。本稿はその存在を理由として述べるだけで、中身に立ち入らない。試験の手順を論じない——予き裂の入れ方も、荷重の記録も、妥当性の他の判定（最大荷重比など）も扱わない。温度と速度を入れない——鋼の靭性は温度で大きく変わり、遷移温度の下では条件が緩む。本稿は一つの温度での値だけを見る。塑性域の式の係数を主張しない——$1/(6\pi)$ は平面ひずみでよく使われる形で、$1/(2\pi)$（平面応力）とは異なる。第3節の **47.123890** はこの選び方に依る。「規格が厳しすぎる」とは書かない——条件は K が一つの数で場を代表するために要るのであって、緩めれば測れるようになるのではなく、測っているものが別のものになる。既刊との関係：論文344 は強度が材料の定数ではなく体積の関数だと示した——そこでは測った値が試験片の大きさとともに動いた。本稿の破壊靭性は逆で、ある厚みを超えれば大きさに依らなくなる。ただしその厚みが実用の寸法を超える材料がある。「定数になる条件がある」と「条件が満たせない」は別のことで、両方が起きている。論文262 は「壊れる」が三つあり強度では決まらないと示し、傷が決める破壊をグリフィスの式で扱った——あちらは表面エネルギーから壊れる条件を出し、こちらはその条件を測る道具の側の限界を扱う。同じ破壊を、片方は理屈から、片方は測定から見ている。論文565 は寿命を決めているのが最初のきずで終わりの大きさではないと示した——あちらの終端は、まさに本稿の破壊靭性が決める長さである。あちらは「その値が寿命をあまり動かさない」と言い、こちらは「その値がそもそも測りにくい」と言う。二つ合わせると、靭性は測りにくく、しかも測れても寿命をあまり動かさない。論文300 は同根か別根かが判定できると示した——「要る厚みが 1296 倍違う」と「厚みが塑性域の一定倍である」は同根である。加えたのは、五つの材料で要る厚みを並べ、幅を **1296.000000** 倍と測ったこと、厚みが K/σ_y だけで決まることを 12 桁で確かめ、逆算でも戻したこと、要る厚みが塑性域の 15π 倍であることを五材料すべてで確かめたこと、分離子を「塑性域が試験片に対して小さいか」に置いたことである。

1. 記法と問い

設定：平面ひずみ破壊靭性 K_{IC} が材料の定数として意味を持つには、試験片の厚み B が

$$B \geq 2.5\left(\frac{K_{IC}}{\sigma_y}\right)^2$$

を満たさなければならない。σ_y は降伏応力である。この条件を満たさない試験片で測ると、値は厚みとともに変わってしまう。

> **観察 1.1**
>
> 条件は二乗で効く。靭性が 2 倍なら、要る厚みは 4 倍である——そして降伏が半分なら、やはり 4 倍になる。

> **観察 1.2**
>
> 靭性が高く降伏が低い材料は、両方から効かれる。強靭な材料とは、まさにその組み合わせである——だから、良い材料ほど条件が厳しくなる。

問い：実際に、どれだけの厚みが要るのか。

2. 材料によって 1296 倍違う

計算 **2.1**：五つの材料の代表値で、要る厚みを出した。

材料	K_{IC}（MPa$\sqrt{\text{m}}$）	σ_y（MPa）	要る厚み
高強度鋼	**50**	**1500**	**2.78** mm
アルミ合金	**25**	**500**	**6.25** mm
チタン合金	**60**	**900**	**11.11** mm
低合金鋼（圧力容器）	**200**	**500**	**400.00** mm
オーステナイト系ステンレス	**300**	**250**	**3600.00** mm

> **観察 2.2**
>
> これが本稿の芯である。**2.78 mm** から **3600.00 mm** まで、**1296.000000** 倍の幅がある——1200 より大きく 1400 より小さい。実測してから挟んだ。

> **観察 2.3**
>
> 硬くて脆い材料ほど測りやすい。高強度鋼は **2.78 mm**、アルミ合金は **6.25 mm** で、どちらもふつうの試験片で足りる——壊れやすい材料の壊れにくさは、簡単に測れる。

> **観察 2.4**
>
> 強靭な材料は 1 m を超える。オーステナイト系ステンレスで **3600.00 mm**——3.6 m の試験片は作れないし、作ったとしても、その厚みでの挙動は薄い実物とは別物である。測れないというより、測る意味が薄い。

> **観察 2.5**
>
> 条件は比だけで決まる。K も σ_y も 2 倍にすると、要る厚みは変わらない（12 桁）——単位を変えても動かないので、これは検査になる。逆算で K/σ_y が戻ることも確かめた。

> **観察 2.6**
>
> 向きも確かめた。降伏を固定して靭性を上げれば厚みが増え、靭性を固定して降伏を下げても増える——どちらか一方でも逆向きなら、式が違う。

3. 要る厚みは、塑性域の一定倍である

計算 3.1：き裂先端の塑性域の大きさを $r_y = \dfrac{1}{6\pi}\left(\dfrac{K_{IC}}{\sigma_y}\right)^2$ として、要る厚みとの比を出した。

材料	塑性域 r_y	厚み ÷ 塑性域
高強度鋼	**0.0589** mm	**47.123890**
アルミ合金	**0.1326** mm	**47.123890**
チタン合金	**0.2358** mm	**47.123890**
低合金鋼	**8.4883** mm	**47.123890**
オーステナイト系ステンレス	**76.3944** mm	**47.123890**

観察 3.2

五つとも同じ値になる。差は 10^{-9} 未満——材料に依らない。要る厚みは「絶対の長さ」ではなく、「塑性域の何倍か」を言っている。

観察 3.3

その値は 15π である。$2.5 \div \frac{1}{6\pi} = 15\pi = 47.123890$——本稿の計算とは無関係に定まる数との突合せである。47 より大きく 48 より小さい。

観察 3.4

だから条件の意味がはっきりする。「厚みが $2.5(K/\sigma_y)^2$ 以上」は、「塑性域が試験片の 47 分の 1 以下」と同じことである——数字の 2.5 に意味があるのではなく、塑性域が十分に小さいことに意味がある。

観察 3.5

塑性域の大きさ自体が桁で違う。高強度鋼の $0.0589\ \mathrm{mm}$ から、オーステナイト系ステンレスの $76.3944\ \mathrm{mm}$ まで——後者では、き裂先端の「小さな塑性域」が $7\ \mathrm{cm}$ もある。それはもはや小さくない。

4. 分離子

観察 4.1

分離子は、塑性域が試験片に対して小さいかどうかである。小さければ、き裂先端の場は K という一つの数で代表できる——小さくなければ代表できず、K_{IC} は「材料の定数」ではなくなる。条件は測定の都合ではなく、K という概念が成り立つ範囲の定義である。

観察 4.2

だから「規格が厳しすぎる」とは言えない。条件を緩めれば測れるようになるのではない——測っているものが別のものになる。だから緩める代わりに、J 積分や CTOD という別の量が使われる。本稿はその存在を理由として述べるだけで、中身に立ち入らない。

観察 4.3

論文344 とは向きが逆である。あちらは強度が体積の関数で、測った値が試験片の大きさとともに動くと示した——こちらの破壊靭性は、ある厚みを超えれば大きさに依らなくなる。ただしその厚みが実用の寸法を超える材料がある。「定数になる条件がある」ことと「条件が満たせない」ことは別で、ここでは両方が起きている。

観察 4.4

論文565 と合わせると、二重の意味で報われない。あちらは終端（＝靭性が決める長さ）を 2 倍にしても寿命が 1.048244 倍にしかならないと示した——こちらはその靭性がそもそも測りにくいと言う。測るのが難しく、測れても寿命をあまり動かさない。だからといって靭性が要らないのではない——決めているのは「いつ突然壊れるか」であって、そちらは寿命の長さとは別の問いである。

観察 4.5

論文262 とは見る場所が違う。あちらはグリフィスの式で、表面エネルギーから壊れる条件を出した——こちらは、その条件を測る道具の側の限界を扱う。同じ破壊を、片方は理屈から、片方は測定から見ている。

観察 4.6

論文300 の基準では同根である。「要る厚みが 1296 倍違う」と「厚みが塑性域の一定倍である」は、どちらも $(K/\sigma_y)^2$ 一つから出る——比が同じなら厚みも同じで、比が違えば二乗で開く。

5. 点呼と結び

1. 高強度鋼 **2.78 mm**（計算 2.1）：ふつうの試験片で足りる。
2. オーステナイト系ステンレス **3600.00 mm**（計算 2.1）：**3.6 m**。
3. 幅 **1296.000000** 倍（観察 2.2）：本稿の芯・実測してから挟んだ。
4. K も σ_y も **2** 倍なら同じ（観察 2.5）：比だけで決まる・**12** 桁。
5. 塑性域との比 **47.123890**（計算 3.1）：五材料すべてで同じ。
6. それは 15π（観察 3.3）：独立に解ける値との突合せ。
7. 塑性域が **76.3944 mm**（観察 3.5）：「小さな塑性域」が **7 cm**。
8. 分離子は塑性域が小さいか（観察 4.1）：K が成り立つ範囲の定義。
9. 論文344 とは向きが逆（観察 4.3）：定数になる条件があり、満たせない。
10. 論文565 と合わせて二重（観察 4.4）：測りにくく、効きも小さい。

結び：破壊靭性は材料の定数として表に載っている。ところがそれが定数として意味を持つには、試験片に最小の厚みが要る——$B \geq 2.5(K_{IC}/\sigma_y)^2$ という条件は二乗で効くので、靭性が **2** 倍なら要る厚みは **4** 倍、降伏が半分でもやはり **4** 倍になる。強靭な材料とは靭性が高く降伏が低い組み合わせだから、良い材料ほど条件が厳しくなる。実際、高強度鋼の **2.78 mm** からオーステナイト系ステンレスの **3600.00 mm** まで **1296.000000** 倍の幅がある——1200 より大きく 1400 より小さく、実測してから挟んだ。壊れやすい材料の壊れにくさは簡単に測れ、**3.6 m** の試験片は作れない。作ったとしても、その厚みでの挙動は薄い実物とは別物である。条件は比だけで決まり、K も σ_y も **2** 倍にすれば要る厚みは変わらない（**12** 桁）。しかもこの厚みは、どの材料でも塑性域の一定倍である——五つの材料すべてで **47.123890** 倍、差は 10^{-9} 未満で、材料に依らない。その値は 15π であって、本稿の計算とは無関係に定まる数との突合せになっている。だから条件の意味がはっきりする——「厚みが $2.5(K/\sigma_y)^2$ 以上」は「塑性域が試験片の **47** 分の **1** 以下」と同じことで、**2.5** という数字に意味があるのではなく、塑性域が十分に小さいことに意味がある。その塑性域自体も桁で違い、高強度鋼の **0.0589 mm** に対しオーステナイト系ステンレスでは **76.3944 mm**——「小さな塑性域」が **7 cm** もある。それはもはや小さくない。分離子は、塑性域が試験片に対して小さいかどうかである——小さければき裂先端の場は K という一つの数で代表でき、小さくなければ代表できず、K_{IC} は「材料の定数」ではなくなる。条件は測定の都合ではなく、K という概念が成り立つ範囲の定義である。だから「規格が厳しすぎる」とは言えない——緩めれば測れるようになるのではなく、測っているものが別のものになる。緩める代わりに J 積分や CTOD という別の量が使われる。論文300 の基準では、「要る厚みが 1296 倍違う」と「厚みが塑性域の一定倍である」はどちらも $(K/\sigma_y)^2$ 一つから出る同根である。既刊との位置——論文344 は強度が体積の関数で、測った値が試験片の大きさとともに動くと示した。こちらは逆に、ある厚みを超えれば大きさに依らなくなる——ただしその厚みが実用の寸法を超える材料がある。「定数になる条件がある」ことと「条件が満たせない」ことは別で、ここでは両方が起きている。論文565 と合わせると二重に報われない。あちらは終端を **2** 倍にしても寿命が **1.048244** 倍にしかならないと示し、こちらはその靭性がそもそも測りにくいと言う。それでも靭性が要らないのではない——決めているのは「いつ突然壊れるか」であって、寿命の長さとは別の問いである。論文262 はグリフィスの式で表面エネルギーから壊れる条件を出したが、こちらはその条件を測る道具の側の限界を扱う。同じ破壊

を、片方は理屈から、片方は測定から見ている。正直に言えば——材料を評価していない。挙げた五つの値は代表値であって特定の鋼種・処理の測定値ではなく、順序と桁を見るために置いた。弾塑性破壊力学には立ち入らず、J 積分や CTOD は存在を理由として述べただけである。試験の手順も、予き裂の入れ方も、妥当性の他の判定も扱っていない。温度と速度も入れておらず、鋼の靭性は温度で大きく変わって遷移温度の下では条件が緩む。塑性域の式の係数 $1/(6\pi)$ は平面ひずみでよく使われる形で、平面応力の $1/(2\pi)$ とは異なるから、**47.123890** はこの選び方に依る。

参考文献

1. Anderson, T. L. (2017). *Fracture Mechanics: Fundamentals and Applications* (4th ed.). CRC Press.
2. Ashby, M. F., & Jones, D. R. H. (2012). *Engineering Materials 1* (4th ed.). Butterworth-Heinemann.
3. ASTM E399 (2020). *Standard Test Method for Linear-Elastic Plane-Strain Fracture Toughness of Metallic Materials*. ASTM International.
4. Irwin, G. R. (1957). *Analysis of Stresses and Strains Near the End of a Crack Traversing a Plate*. Journal of Applied Mechanics.
5. 山岸勇輝 (2026).『「壊れる」は三つあり、強度では決まらない』[論文262]. Zenodo. 10.5281/zenodo.22169671
6. 山岸勇輝 (2026).『三百本目の点呼 ── 同根か別根かは、判定できる』[論文300]. Zenodo. 10.5281/zenodo.22171914
7. 山岸勇輝 (2026).『強度は材料の定数ではなく、体積の関数である』[論文344]. Zenodo. 10.5281/zenodo.22682232
8. 山岸勇輝 (2026).『寿命を決めているのは最初のきずで、終わりの大きさではない』[論文565]. Zenodo. 10.5281/zenodo.23014261

山岸 勇輝 (Yuuki YAMAGISHI)

© 2026 Yamagishi Complexity Torus Lab, Japan · Licensed under Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0)