

壊しているのは失われた鉄ではなく、置き換わって太った錆である

— 半径 8 mm の鉄筋が 0.1 mm 侵食されると、失われた鉄 4.995132 mm^2 が体積比 4 の錆 19.980529 mm^2 になり、半径方向に **0.292768 mm** 膨らむ — かぶり 30 mm をひび割れさせる侵食はわずか **0.001000 mm** — 体積比を 1 にすると膨張がちょうどゼロになる — [論文476]

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

鉄筋が錆びると細くなって弱る、と思われている。本稿が示すのは、壊しているのは細くなることではなく、太ることである——**0.001000 mm** の侵食で、かぶりがひび割れる。新しい定理も法則も主張しない。第一に、侵食 0.1 mm で失われる鉄は 4.995132 mm^2 (単位長さあたり) である (第2節)。第二に、体積比 4 ならそれが 19.980529 mm^2 の錆になり、 14.985397 mm^2 増える (第2節)。第三に、これが本稿の芯である。かぶり 30 mm をひび割れさせる侵食は **0.001000 mm** しかない (第3節)。第四に、体積比を 1 にすると、膨張がちょうど **0.000000000000 mm** になる (第2節)。第五に、体積比 2.0 なら **0.003001 mm**、6.4 なら **0.000556 mm** と、要る侵食が逆に動く (第3節)。第六に、分離子は「断面が減ることか、体積が増えることか」である (第4節)。キーワード：鉄筋の腐食、錆の体積膨張、コンクリートのひび割れ、かぶり、ピリング・ベドワース比。

本稿の射程（射程注記）：新しい定理も法則も主張しない——鉄の腐食生成物の体積膨張、かぶりコンクリートのひび割れはすべて既知である。構造を評価しない——耐力、余寿命、補修の要否は主題ではない。実際の判断は専門の調査による。腐食速度を扱わない——何年で 0.001 mm 進むかは主題ではない。中性化、塩害、電気化学は扱わない。力学を単純化する——膨張をかぶり厚で割った量をひずみと置いた。実際は三次元の応力場で、円周方向の引張が効く。数値は代表値である——体積比 2 から 6.4、引張破壊ひずみ 100 マイクロひずみは代表値であり、実測ではない。既刊との関係：論文475 は入れた分子の九割が界面に来ていないことを示した——そこでも、目的の違いで同じ操作の評価が変わった。論文300 は同根か別根かが判定できることを示した——「断面の減少」と「体積の膨張」は、その基準で別根である。論文454 は荷重が 3 乗で増えても必要幅が 1 乗で済むことを示した——そこでも、幾何が答えを決めていた。加えたのは、四つの腐食生成物の体積比を並べたこと、失われた鉄と錆の体積を出したこと、半径方向の膨張を 0.292768 mm と出したこと、体積比 1 で膨張が厳密にゼロになることを確かめたこと、ひび割れに要る侵食を二分法で 0.001000 mm と出して逆算したこと、分離子を「断面か体積か」に置いたことである。

1. 記法と問い

設定：半径 r の鉄筋が厚さ δ だけ侵食されるとき、単位長さあたり失われる鉄の断面積は

$$V_{\text{lost}} = \pi(r^2 - (r - \delta)^2)$$

である。腐食生成物の体積比を κ とすると、錆の体積は κV_{lost} になる。錆が外側に積もるとして、外半径 R は

$$\pi(R^2 - (r - \delta)^2) = \kappa V_{\text{lost}}$$

から決まり、半径方向の膨張は $R - r$ である。以下 $r = 8 \text{ mm}$ 、かぶり 30 mm、コンクリートの引張破壊ひずみ 100 マイクロひずみとする。

観察 1.1

鉄筋が錆びると細くなって弱る、と思われている。断面が減れば耐力が減る——自然な理屈である。

観察 1.2

だが錆は消えてなくなる。同じ場所に、もっと大きな体積で残る——周りを押しのける。

問い：どちらが先に効くのか。

2. 錆は 4 倍に太る

計算 2.1：四つの腐食生成物について、鉄に対する体積比を並べる。

生成物	体積比
Fe_3O_4	2.0000
Fe_2O_3	2.2000
$\text{Fe}(\text{OH})_3$	4.0000
含水の水酸化物	6.4000

観察 2.2

どれも 1 より大きい。2.0 から 6.4 まで——鉄は錆びると必ず太る。

計算 2.3：半径 8 mm の鉄筋が 0.1 mm 侵食されたときの体積を出す（体積比 4）。

量	値 [mm ²]
失われた鉄	4.995132
生じた錆	19.980529
増加分	14.985397

観察 2.4

増加分は、失われた鉄の 3 倍である。 $\kappa - 1 = 3$ ——閉じた式と厳密に一致する。

計算 2.5：その体積増加を、半径方向の膨張に直す。

0.292768 mm である。

観察 2.6

侵食した **0.1 mm** より大きい。**2.93** 倍——細くなるどころか、外側は太っている。

観察 2.7

体積比を **1** にすると、膨張がちょうど **0.000000000000 mm** になる。鋳が鉄と同じ体積なら、外半径は変わらない——境目であり、式が正しく置かれていることの確認でもある。

3. ひび割れに要る侵食は **0.001000 mm**

計算 3.1：膨張をかぶり厚で割った量が **100** マイクロひずみに達する侵食を、二分法で求める。

0.001000 mm である（逆算してひずみが 1.000000×10^{-4} に戻る）。

観察 3.2

1 マイクロメートルである。目に見えない——断面の減少としては **0.025** パーセントにすぎない。

観察 3.3

その時点で、耐力はほとんど減っていない。**0.025** パーセントの断面欠損——だがコンクリートは割れている。

計算 3.4：体積比を変えて、ひび割れに要る侵食を出す。

体積比	ひび割れに要る侵食 [mm]
2.0	0.003001
4.0	0.001000
6.4	0.000556

観察 3.5

体積比が大きいほど、要る侵食が少ない。2.0 と 6.4 で 5.40 倍——どの生成物ができるかが、寿命を決めている。

観察 3.6

そしてひび割れると、水と酸素が入りやすくなる。腐食が速まり、さらに膨らむ——正の帰還がかかる。

観察 3.7

だから点検で見るべきは、鉄筋の細さではなくコンクリートのひびである。細さは最後まで測れない——ひびは、はるかに早く出る。

4. 分離子

分離子：断面が減ることか、体積が増えることか。

観察 4.1

断面が減ることなら、失われた量に比例して弱る。0.025 パーセントなら 0.025 パーセント——ゆっくり進む。

観察 4.2

体積が増えることなら、押しのける先が壊れる。かぶりの厚さが上限を決める——はるかに早く来る。

観察 4.3

これは論文300 の基準で別根である。どちらも「鉄筋の腐食による劣化」と呼ばれる——一方は鉄の量、一方は鉄とかぶりの組の量である。

観察 4.4

論文454 と同じ場所にいる。そこでは荷重と抵抗の両側を見なければ答えが出なかった——ここでは失われた側と増えた側の両方を見なければならない。どちらも、片側だけでは誤る。

観察 4.5

論文475 とも重なる。そこでは同じ操作が、目的によって有効にも無駄にもなった——ここでは同じ腐食が、耐力の話としては軽微で、かぶりの話としては致命的である。

観察 4.6

そしてかぶりを厚くすると、要る侵食が増える。ひずみが膨張をかぶり厚で割った量だから——かぶりは、腐食を防ぐだけでなく、膨張を受け止める余地でもある。

観察 4.7

正直に言えば——力学を単純化した。膨張をかぶり厚で割った量をひずみと置いたが、実際は三次元の応力場で、円周方向の引張が効く—— 0.001000 mm という値はこの近似に依るが、体積比が 1 を超えるかぎり膨張が起きるという結論は、幾何だけから出ており、近似に依らない。

5. 点呼と結び

1. 体積比は **2.0** から **6.4** (計算 2.1) : どれも 1 より大きい。
2. 失われた鉄は **4.995132 mm^2** (計算 2.3) : 侵食 **0.1 mm** で。
3. 錆は **19.980529 mm^2** (計算 2.3) : 増加は **14.985397**。
4. 増加は失われた鉄の **3 倍** (観察 2.4) : $\kappa - 1$ と厳密に一致。
5. 半径方向に **0.292768 mm** (計算 2.5) : 侵食の **2.93 倍**。
6. 体積比 1 で厳密にゼロ (観察 2.7) : 境目の確認。
7. ひび割れに **0.001000 mm** (計算 3.1) : 本稿の芯。
8. 断面欠損は **0.025 %** (観察 3.2) : 耐力はほぼ無傷。
9. 体積比で **5.40 倍**動く (観察 3.5) : 生成物が寿命を決める。

10. 分離子は断面か体積か（観察 4.3）：論文300 の基準で別根。

結び：鉄筋が錆びると細くなって弱る、と思われている——断面が減れば耐力が減る、という自然な理屈である。だが錆は消えてなくなる。同じ場所にもっと大きな体積で残り、周りを押しのける。錆は太る——腐食生成物の体積比は 2.0 から 6.4 まであり、どれも 1 より大きい。鉄は錆びると必ず太る。半径 8 mm の鉄筋が 0.1 mm 侵食されると、失われた鉄 4.995132 mm^2 が体積比 4 で 19.980529 mm^2 の錆になり、 14.985397 mm^2 増える。増加分は失われた鉄の 3 倍で、閉じた式 $\kappa - 1$ と厳密に一致する。半径方向の膨張は 0.292768 mm 、侵食した 0.1 mm の 2.93 倍である。細くなるどころか、外側は太っている。体積比を 1 にすると膨張はちょうど $0.000000000000 \text{ mm}$ になる。錆が鉄と同じ体積なら外半径は変わらない——境目であり、式の確認でもある。そしてひび割れは、驚くほど早く来る——かぶり 30 mm をひび割れさせる侵食は 0.001000 mm 、すなわち 1 マイクロメートルしかない。逆算してひずみが 1.000000×10^{-4} に戻ることも確かめた。断面の減少としては 0.025 パーセントにすぎず、その時点で耐力はほとんど減っていない。だがコンクリートは割れている。体積比を変えると、要る侵食は 2.0 で 0.003001 mm 、6.4 で 0.000556 mm と 5.40 倍動く。どの生成物ができるかが、寿命を決めている。そしてひび割れると水と酸素が入りやすくなり、腐食が速まってさらに膨らむ。正の帰還がかかる。だから点検で見べきは鉄筋の細さではなくコンクリートのひびである。細さは最後まで測れず、ひびははるかに早く出る。分けているものは一つ——断面が減ることか、体積が増えることか。断面が減ることなら失われた量に比例して弱り、0.025 パーセントなら 0.025 パーセントで、ゆっくり進む。体積が増えることなら押しのける先が壊れ、かぶりの厚さが上限を決めて、はるかに早く来る。論文300 の基準で別根であり、一方は鉄の量、一方は鉄とかぶりの組の量である。論文454 と同じ場所にいて、そこでは荷重と抵抗の両側を見なければ答えが出なかった。どちらも、片側だけでは誤る。論文475 と重なり、そこでは同じ操作が目的によって有効にも無駄にもなった。ここでは同じ腐食が、耐力の話としては軽微で、かぶりの話としては致命的である。そしてかぶりを厚くすると要る侵食が増える。ひずみが膨張をかぶり厚で割った量だからで、かぶりは腐食を防ぐだけでなく、膨張を受け止める余地でもある。正直に言えば——力学を単純化した。膨張をかぶり厚で割った量をひずみと置いたが、実際は三次元の応力場で円周方向の引張が効く。 0.001000 mm という値はこの近似に依るが、体積比が 1 を超えるかぎり膨張が起きるという結論は幾何だけから出ており、近似に依らない。

参考文献

1. Pilling, N. B., & Bedworth, R. E. (1923). The Oxidation of Metals at High Temperatures. *Journal of the Institute of Metals*.
2. Tuutti, K. (1982). *Corrosion of Steel in Concrete*. Swedish Cement and Concrete Research Institute.
3. Broomfield, J. P. (2007). *Corrosion of Steel in Concrete* (2nd ed.). Taylor & Francis.
4. 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
5. 山岸勇輝 (2026). 『水圧は二乗で増えるのに、堤体の幅は比例でよい』 [論文454]. Zenodo. 10.5281/zenodo.22732989
6. 山岸勇輝 (2026). 『入れた分子の九割が、界面には来ていない』 [論文475]. Zenodo. 10.5281/zenodo.22733613

— *From thinking to syncing.* —

山岸 勇輝 (Yuuki YAMAGISHI)

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