同じ酸化膜でも、止め所を決めているのが自分か電圧かで、厚さは四桁変わる

— アルミニウムの自然酸化は自分で **3** nm ほどで止まるのに、陽極酸化の膜厚は電圧に正比例し、**100** V で **140.000000** nm になる — 分離子は、膜の成長を止めているのが自分の成長か、外から与えた電位か — [論文714]

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

アルミニウムの表面には、何もしなくても酸化膜ができる。同じ酸化膜を電気で作ると、厚さが四桁変わる。止め所を内側が決める場合と外側が決める場合を、同じ単位で並べて数える。新しい定理も法則も主張しない。 第一に、自然酸化は自分で止まる——膜ができると酸素の通り道が塞がるので、**3 nm** ほどで成長が止まる（第2節）。 第二に、陽極酸化では電圧が止め所を決める——およそ **1.4 nm/V** で正比例し、**15 V** で **21.000000 nm**、100 V で **140.000000 nm** になる（第2節）。 第三に、比例は厳密である——100 V の膜厚は 1 V のちょうど **100.000000** 倍で、設計量が化学から電気に移る（第2節）。 第四に、これが本稿の芯である。隔たりは四桁ある——硬質皮膜の 50000 nm は自然酸化の **16666.666667** 倍で、比例則だけで出すには **35714.285714 V** が要る（第3節）。 第五に、逆から見ると隔たりはもっと鮮明である——自然酸化の厚さに対応する電圧は **2.142857 V** しかなく、乾電池一本にも満たない（第3節）。 第六に、分離子は、止め所が内側にあるか外側にあるかである——内側なら厚さは決まってしまい、外側なら選べる（第4節）。 キーワード：陽極酸化、不動態、自己制限、膜厚と電圧、止め所の所在、桁の隔たり。

> 本稿の射程（射程注記）：新しい定理も法則も主張しない——不動態の自己制限も、陽極酸化の膜厚が電圧に比例することも、いずれも既知である（コッホ 1961、シュレシンガー＆パウノヴィッチ 2010）。多孔質皮膜の成長機構を導出しない——バリア層と多孔層の分かれ方には立ち入らない。比例則だけを使い、硬質皮膜がそれだけでは説明できないことを明示する。**1.4 nm/V** は代表値である——材料と電解液で動く。実在の処理条件は主張しない。封孔処理と着色を扱わない——膜の用途の側は論じない。腐食速度を論じない——膜が何をどれだけ防ぐかは扱わない。既刊との関係：論文441 は、最も反応しやすい金属が最も錆びないことを示した——そこでは反応しやすい金属ほど自分で薄い膜を作って止まることが利点だった。ここではその止め所を外から電圧で置き換える。同じ「酸化膜」が、止め所の所在だけで四桁ひらく。加えたのは、電圧ごとの膜厚を並べたこと、比例が厳密であることを **100.000000** 倍という形で示したこと、硬質皮膜と自然酸化の隔たりを **16666.666667** 倍と数にしたこと、自然酸化に対応する電圧が **2.142857 V** しかないことを示したこと、分離子を「止め所の所在」に置いたことである。

1. 記法と問い

設定：陽極酸化の膜厚は、印加した電圧にほぼ比例する。自然酸化は電圧を与えないので、膜自身が成長を止める。

$$d_{\text{陽極}} = kV, \qquad k \simeq 1.4\ \text{nm/V}, \qquad d_{\text{自然}} \simeq 3\ \text{nm}$$

k は電解液と材料で動く代表値である。以下では k を固定して、電圧だけを動かす。

問い：同じ「酸化膜」という言葉の下で、厚さはどれだけ違いうるのか。

2. 電圧が止め所を決める

計算 2.1：電圧ごとの膜厚を出した。

電圧	膜厚	自然酸化に対する倍率
1 V	**1.400000** nm	**0.466667**
15 V	**21.000000** nm	**7.000000**
100 V	**140.000000** nm	**46.666667**
500 V	**700.000000** nm	—

> **観察 2.2**
>
> 比例は厳密である。100 V の膜厚は 1 V のちょうど 100.000000 倍になる——1 V あたり何ナノメートルという一つの数だけで、厚さが言える。

> **観察 2.3**
>
> だから設計量が化学から電気に移る。どんな膜が欲しいかは、電源の目盛で指定できる——自然酸化では、厚さは選ぶものではなく、できてしまうものだった。

> **観察 2.4**
>
> ただし 1 V では自然酸化に届かない。1 V の膜は自然酸化の 0.466667 倍しかなく、15 V でようやく 7.000000 倍になる——電圧を与えれば必ず厚くなるわけではない。

3. 隔たりは四桁ある

計算 3.1：硬質陽極酸化では 50000 nm（50 µm）ほどの膜を作る。自然酸化の 3 nm と比べた。

量	値
硬質／自然酸化の厚さの比	**16666.666667**
その厚さを比例則だけで出すのに要る電圧	**35714.285714** V
自然酸化の厚さに対応する電圧	**2.142857** V

> **観察 3.2**
>
> これが本稿の芯である。四桁の隔たりが、材料ではなく止め所から出ている。金属も酸化物も同じで、違うのは成長を止めているものだけである——同じ元素の同じ酸化物が、16666.666667 倍ひらく。

観察 3.3

比例則は途中で足りなくなる。**35714.285714 V** という値は現実の装置では出せない——硬質皮膜が実際に作れるのは、膜が多孔質になって電圧に依らず伸びる道があるからで、比例則の外に出ている。

観察 3.4

逆から見ると隔たりはもっと鮮明である。自然酸化の厚さに対応する電圧は **2.142857 V** しかない——乾電池一本にも満たない電位が、何もしなくてもできる膜の「設定値」にあたる。

観察 3.5

だから「酸化膜がある」という言い方は、厚さについて何も言っていない。**3 nm** と **50000 nm** は、どちらも同じ名で呼ばれる——どちらの機構でできたかを言わないかぎり、四桁の幅が残る。

4. 分離子

観察 4.1

分離子は、膜の成長を止めているのが自分の成長か、外から与えた電位かである。内側なら厚さは決まってしまい、外側なら選べる——止め所を外に出すことが、この技術の中身である。

観察 4.2

論文**441** と並べる。**441** は、最も反応しやすい金属が最も錆びないことを示した——そこでは自分で止まる膜が利点だった。ここでは同じ自己制限が厚さの上限にもなっていて、外すと四桁伸びる。自己制限の、利点の側と限界の側である。

観察 4.3

言わないこと。多孔質皮膜の機構も、封孔処理も、腐食速度も扱わず、**1.4 nm/V** は代表値として固定した——示したのは、止め所の所在が厚さに何桁効くかである。

5. 点呼と結び

1. 自然酸化は **3 nm**（第1節）：自分で止まる。
2. **15 V** で **21.000000 nm**（計算 2.1）：電圧が止め所。
3. **100 V** で **140.000000 nm**（計算 2.1）：正比例。
4. **100.000000** 倍ちょうど（観察 2.2）：比例は厳密。
5. **1 V** は **0.466667** 倍（計算 2.1）：自然酸化に届かない。
6. **15 V** は **7.000000** 倍（計算 2.1）：ここで超える。
7. 硬質は **16666.666667** 倍（計算 3.1）：本稿の芯。
8. 要る電圧 **35714.285714 V**（計算 3.1）：比例則の外。
9. 自然酸化は **2.142857 V** 相当（計算 3.1）：電池一本未満。
10. 内側か、外側か（観察 4.1）：分離子・論文**441**。

結び：同じ酸化膜でも、止め所を決めているのが自分か電圧かで、厚さは四桁変わる。アルミニウムの自然酸化は膜自身が酸素の道を塞いで **3 nm** ほどで止まるが、陽極酸化の膜厚はおよそ **1.4 nm/V** で電圧に正比例し、**15 V** で **21.000000 nm**、**100 V** で **140.000000 nm** になる。比例は厳密で、**100 V** は **1 V** のちょうど **100.000000** 倍である——厚さを指定する量が、化学から電源の目盛に移る。そして硬質皮膜の **50000 nm** は自然酸化の **16666.666667** 倍で、比例則だけで出すには **35714.285714 V** が要る——現実の装置では出せない値であり、硬質皮膜が作れるのは膜が多孔質になって比例則の外へ出るからである。逆に、自然酸化の厚さに対応する電圧は **2.142857 V** しかない——乾電池一本にも満たない電位が、何もしなくてもできる膜の設定値にあたる。分離子は、膜の成長を止めているのが自分の成長か、外から与えた電位かである。既刊との位置——論文**441** では自分で止まる膜が利点だった。ここでは同じ自己制限が厚さの上限でもある。正直に言えば——多孔質皮膜の機構も封孔処理も扱わず、**1.4 nm/V** は代表値として固定した。

参考文献

1. Cabrera, N., & Mott, N. F. (1949). Theory of the oxidation of metals. *Reports on Progress in Physics*.
2. Schlesinger, M., & Paunovic, M. (2010). *Modern Electroplating*. Wiley.
3. 山岸勇輝 (2026).『最も反応しやすい金属が、最も錆びない』[論文441]. Zenodo. 10.5281/zenodo.22732392

— 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)