異方性エッチングの穴の深さは、掘る時間ではなく結晶面で決まる

— 100 分で深さ 71.143691 μm、200 分で 71.576704 μm と、時間を 2 倍にしても 1.006086 倍 — 分離子は、二つの面の速さの比が大きいか — [論文758]

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

薬液で結晶を溶かして穴を掘るとき、長く浸ければ深く掘れると考えやすい。けれど溶ける速さが結晶の面で違うと、穴の形は面が決める。深さを決めているのが時間か結晶面かを、面の速さの比で分けて数える。新しい定理も法則も主張しない。 第一に、側壁の角度は結晶の幾何で決まる——(100) と (111) のなす角は 54.735610 度（第2節）。 第二に、穴は窓の幅で決まる深さで止まる——窓 100 μm で 70.710678 μm（第2節）。 第三に、これが本稿の芯である。止まったあとは、時間がほとんど効かない——速さの比 400 で、100 分から 200 分にしても深さは 1.006086 倍（第3節）。 第四に、速さの比が小さいと、時間が戻ってくる——比 40 で 1.057704 倍、比 4 で 1.573132 倍、等方なら 2 倍（第3節）。 第五に、横の食い込みは速さの比に反比例する——止まるまでに比 400 で 0.216506 μm、比 4 で 21.650635 μm（第3節）。 第六に、分離子は、二つの面の速さの比が大きいかである——「深く掘るには長く浸ければよい」は、比を言うまで真偽が決まらない（第4節）。 キーワード：異方性エッチング、結晶面、側壁の角度、速さの比、自己停止、横の食い込み。

本稿の射程（射程注記）：新しい定理も法則も主張しない——単結晶シリコンのアルカリ溶液による異方性エッチング、(111) 面が遅いこと、(100) 面との角が 54.74 度になり角錐の穴が自己停止することは、いずれも既知である（マドゥー 2002、ザイデルほか 1990）。速さは代表値である——(100) の速さ 1 μm/分と、比 400・40・4 は比べるための値で、薬液の濃度や温度で動く。形を単純にする——正方形の窓が結晶の向きにそろっていると置き、凸の角の食い込みやマスクの向きのずれは扱わない。側壁は一様に退くと置く——(111) 面が法線の向きに一定の速さで退くとし、面の荒れや別の面の出現は扱わない。薬液の化学を扱わない——なぜ (111) が遅いかの機構は扱わない。実在の工程を主張しない——個別の装置や製品は扱わない。既刊との関係：論文665 は、同じ鉄でも球なら向きを持たず、薄膜なら結晶の三十八倍の向きを持つことを示した——そこでは材料を替えずに形が向きやすさを作った。ここでは逆に、結晶の向きが穴の形を作る。形が向きを作る側と、向きが形を作る側になる。加えたのは、止まる深さと側壁の角を閉じた式で出したこと、速さの比ごとに、時間を 2 倍にしたときの深さの伸びを 1.006086・1.057704・1.573132 倍と並べたこと、横の食い込みが比に反比例することを示したこと、分離子を「速さの比が大きいか」に置いたことである。

1. 記法と問い

設定：(100) 面の速さを R_{100}、(111) 面の速さを $R_{111} = R_{100}/k$ とする。二つの面のなす角 θ、正方形の窓の幅 W で、角錐の穴が止まる深さ h と、止まるまでの横の食い込み u は次になる。

$$\theta = \arccos\frac{1}{\sqrt{3}}, \qquad h = \frac{W}{2}\tan\theta = \frac{W}{\sqrt{2}}, \qquad u = \frac{R_{111}\,t_h}{\sin\theta}, \quad t_h = \frac{h}{R_{100}}$$

止まったあとは、側壁が退いて窓が実際に広がったぶんだけ深くなる。$R_{100} = 1$ μm/分、$W = 100$ μm と置く。

問い：穴の深さを決めているのは、浸ける時間なのか。

2. 角度も止まる深さも、結晶が決める

計算 2.1：なす角と、窓 100 μm の穴が止まる深さを出した。

量	値
(100) と (111) のなす角	54.735610 度
その sin と tan	0.816497・1.414214
止まる深さ	70.710678 μm
そこまでの時間	70.710678 分

観察 2.2

側壁の角度も、止まる深さも、結晶の幾何で決まる。なす角は $\arctan\sqrt{2}$ と差 0 で一致し、止まる深さは窓の $1/\sqrt{2}$ である——装置の設定も時間も、この二つの数には入っていない。

3. 止まったあとは、時間がほとんど効かない

計算 3.1：速さの比ごとに、止まるまでの横の食い込みと、100 分と 200 分の深さを出した。

速さの比	横の食い込み	100 分の深さ	200 分の深さ	深さの伸び
400	0.216506 μm	71.143691 μm	71.576704 μm	1.006086 倍
40	2.165064 μm	75.040805 μm	79.370932 μm	1.057704 倍
4	21.650635 μm	100.000000 μm	157.313218 μm	1.573132 倍

観察 3.2

これが本稿の芯である。速さの比が大きいと、止まったあとは時間がほとんど効かない。比 400 では、時間を 100 分から 200 分に延ばしても深さは 1.006086 倍にしかならない——穴は窓の幅が決める深さで止まり、あとは側壁がわずかに退くだけである。

観察 3.3

速さの比が小さいと、時間が戻ってくる。比 40 で 1.057704 倍、比 4 で 1.573132 倍になり、等方なら深さは時間に比例して 2 倍になる——時間の効きは、比が 1 に近づくにつれて連続に戻る。

観察 3.4

横の食い込みは、速さの比に反比例する。止まるまでに比 400 で 0.216506 μm、比 40 で 2.165064 μm と、比 10 倍で 10 分の 1 になる——等方なら同じ 70.710678 μm を掘るあいだに、横にも 70.710678 μm 食い込む。

4. 分離子

> **観察 4.1**
>
> 分離子は、二つの面の速さの比が大きいか——大きければ結晶の角度が形を決め、1 に近ければ時間が決める。比 400 で深さの伸びは 1.006086 倍、等方で 2 倍——「深く掘るには長く浸ければよい」は、比を言うまで真偽が決まらない。

> **観察 4.2**
>
> 論文665 と並べる。665 は、材料を替えずに形だけで磁化の向きやすさが大きく動くことを示した——そこでは形が向きを作った。ここでは結晶の向きが形を作る。同じ「向きと形」の二つの向きである。

> **観察 4.3**
>
> 言わないこと。凸の角も、マスクの向きのずれも、薬液の化学も、実在の工程も扱わない——示したのは、深さを決めるものが速さの比で時間から結晶面に入れ替わることである。

5. 点呼と結び

1. なす角 **54.735610** 度（計算 2.1）：結晶の幾何。
2. 止まる深さ **70.710678 µm**（計算 2.1）：窓の $1/\sqrt{2}$。
3. 比 400 の横の食い込み **0.216506 µm**（計算 3.1）：わずか。
4. 200 分で **71.576704 µm**（計算 3.1）：ほとんど動かない。
5. 深さの伸び **1.006086** 倍（観察 3.2）：本稿の芯。
6. 比 40 で **1.057704** 倍（観察 3.3）：時間が戻り始める。
7. 比 4 で **1.573132** 倍（観察 3.3）：時間が効く。
8. 比 4 の食い込み **21.650635 µm**（計算 3.1）：反比例。
9. 等方なら 2 倍（観察 3.3）：時間がすべて。
10. 速さの比が大きいか（観察 4.1）：分離子・論文665。

結び：異方性エッチングの穴の深さは、掘る時間ではなく結晶面で決まる。(100) と (111) のなす角は 54.735610 度で、窓 100 µm の角錐の穴は 70.710678 µm で止まる——角度にも深さにも、装置の設定や時間は入っていな

い。(111) が 400 分の 1 の速さなら、100 分から 200 分に延ばしても深さは 71.143691 µm から 71.576704 µm へ 1.006086 倍にしかならず、比 40 で 1.057704 倍、比 4 で 1.573132 倍、等方で 2 倍と、比が小さいほど時間が戻ってくる——横の食い込みも比 400 の 0.216506 µm から比 4 の 21.650635 µm へ、比に反比例して増える。分離子は、二つの面の速さの比が大きいかである——「深く掘るには長く浸ければよい」は、比を言うまで真偽が決まらない。既刊との位置——論文665 では形が向きを作った。ここでは向きが形を作る。正直に言えば——凸の角もマスクのずれも薬液の化学も扱わず、速さは代表値である。

参考文献

1. Madou, M. J. (2002). *Fundamentals of Microfabrication: The Science of Miniaturization* (2nd ed.). CRC Press.
2. Seidel, H., Csepregi, L., Heuberger, A., & Baumgärtel, H. (1990). Anisotropic etching of crystalline silicon in alkaline solutions. *Journal of the Electrochemical Society*.
3. 山岸勇輝 (2026). 『同じ鉄でも、球なら向きを持たず、薄膜なら結晶の三十八倍の向きを持つ』[論文665]. Zenodo. 10.5281/zenodo.23014711

— *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)