緩衝液は「pH を保つ」のではなく、pKa の近くだけを保つ

— 総濃度 0.1 M・pKa 4.76 では、緩衝能は pKa ちょうどで 0.057565 mol/(L·pH) だが、±1 離れると最大の 0.330579 倍、±2 では 0.039212 倍に落ちる — 分離子は、閉じた系か開いた系か — [論文679]

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

緩衝液は pH を保つものだと説明される。だが保てるのは pKa の近くだけで、1 離れれば能力は三分の一に落ちる。どこまで保てるのかを、緩衝能の数で区切る。新しい定理も法則も主張しない。 第一に、これが本稿の芯である。緩衝能は pKa を頂点にして、両側へ急に落ちる——総濃度 0.1 M・pKa 4.76 で、pKa ちょうどの 0.057565 mol/(L·pH) が、±1 では 0.330579 倍、±2 では 0.039212 倍になる（第2節）。 第二に、この落ち方は物質によらない——±1 での比は 40/121 であり、実測 0.330579 は閉じた式と 10 桁一致する。総濃度にも pKa の値にもよらない（第2節）。 第三に、頂点の高さは総濃度だけで決まる——$2.302585C/4$ であり、0.1 M で 0.057565 mol/(L·pH) になる。濃くする以外に頂点を上げる手はない（第2節）。 第四に、血液は、この規則を破っているように見える——pKa 6.1 の系で pH 7.4、つまり 1.3 離れた場所にある。閉じた系として数えると緩衝能は 0.002637 mol/(L·pH) しかない（第3節）。 第五に、破っていない。系が閉じていないだけである——二酸化炭素を吐ける開いた系では緩衝能は 0.055262 mol/(L·pH)、閉じた系の 20.952623 倍になる（第3節）。 第六に、分離子は、閉じた系か開いた系かである——同じ濃度・同じ pKa・同じ pH でも、片方の成分を外へ捨てられるかどうかで、能力は 20 倍違う（第4節）。 キーワード：緩衝能、pKa、ヘンダーソン＝ハッセルバルヒの式、重炭酸緩衝系、開いた系、弱酸と共役塩基。

本稿の射程（射程注記）：新しい定理も法則も主張しない——ヘンダーソン＝ハッセルバルヒの式、ファン・スライクの緩衝能、開いた系の重炭酸緩衝は、いずれも既知である（アトキンス＆デ・パウラ 2014、ハリス 2015、ボロン＆ボールペープ 2016）。多塩基酸を扱わない——解離が二段以上ある酸や、複数の緩衝系の重ね合わせは入れない。単一の弱酸だけを見る。生理の調節を論じない——腎臓や呼吸による能動的な制御、実際のアシドーシスの病態は主題ではない。開いた系という一点だけを使う。活量係数を入れない——濃度で書く。イオン強度の効きは無視している。処方を示さない——緩衝液の作り方や試薬の選択は扱わない。既刊との関係：論文573は、酸性雨の境目 pH 5.6 が雨の側の性質であり、被害の出方は受け手の側の性質であることを示した——そこでは受け手が耐えるかどうかが分かれ目だった。ここではその受け手の側に入り、「どれだけ耐えられるか」を緩衝能という一つの量で数える。加えたのは、pKa からの距離ごとに緩衝能の比を並べたこと、±1 の比が 40/121 という物質によらない数であることを示したこと、血液を閉じた系として数えると足りないことを示したこと、開いた系との比を 20.952623 倍と数にしたこと、分離子を「閉じた系か開いた系か」に置いたことである。

1. 記法と問い

設定：総濃度 C の弱酸とその共役塩基の混合を考える。緩衝能は、pH を 1 動かすのに要る強塩基の量で定義される。

$$\beta = 2.302585\,C\,\frac{K_a[\mathrm{H^+}]}{(K_a+[\mathrm{H^+}])^2}, \qquad \beta_{\max} = \frac{2.302585\,C}{4}, \qquad \frac{\beta}{\beta_{\max}} = \frac{4\cdot 10^{\delta}}{(1+10^{\delta})^2}$$

ここで δ は pH と pKa の差である。右端の式に C も K_a も残らないことに注意する。

問い：緩衝液は、どこまで保つのか。

2. 頂点と、その落ち方

計算 2.1：総濃度 0.1 M・pKa 4.76 で、pKa からの距離ごとに緩衝能を出した。

pKa からの距離	緩衝能	最大に対する比
0	0.057565	1.000000
0.5	0.042029	0.730126
1	0.019030	0.330579
1.5	0.006842	0.118855
2	0.002257	0.039212

単位はいずれも mol/(L·pH) である。

> **観察 2.2**
>
> これが本稿の芯である。「pH を保つ」の主語は溶液ではなく、pKa の近傍という場所である。±1 で三分の一、±2 で 25 分の 1 近くまで落ちる——緩衝液を選ぶとは、保ちたい pH を選ぶことではなく、それに近い pKa を持つ酸を選ぶことである。

計算 2.3：±1 での比は、閉じた式では $4 \cdot 10/(1+10)^2 = 40/121$ である。実測 0.330579 は 10 桁まで一致した。

> **観察 2.4**
>
> 落ち方は物質の性質ではない。比の式に総濃度も解離定数も残らないので、どの弱酸でも、どの濃度でも、±1 離れれば 40/121 である——変えられるのは頂点の高さ（総濃度）だけで、形は変えられない。

3. 血液は破っていない。閉じていないだけである

計算 3.1：血液の重炭酸は pKa 6.1、重炭酸イオンは 0.024 M、pH は 7.4 である。総濃度は 0.025203 M になる。閉じた系として上の式で数えると、緩衝能は 0.002637 mol/(L·pH) である。

> **観察 3.2**
>
> 閉じた系として見るかぎり、この配置は下策である。pKa から 1.3 離れており、緩衝能は頂点の 0.04 倍付近まで落ちている——教科書どおりに選べば、pKa 7.4 付近の酸を使うべきところである。

計算 3.3：ところが炭酸の側は気体として肺から捨てられる。二酸化炭素の分圧が一定に保たれる開いた系では、緩衝能は $2.302585 \times [\mathrm{HCO_3^-}]$ となり、0.055262 mol/(L·pH) になる。閉じた系の 20.952623 倍である。

> **観察 3.4**
>
> 開いていることが、位置の悪さを補って余りある。酸が加わっても、生じた炭酸は気体として出ていくので、比の片側が減らない——閉じた系の式が「±1.3 では無理だ」と言うのは正しく、そして系が閉じていないので当てはまらない。

4. 分離子

> **観察 4.1**
>
> 分離子は、閉じた系か開いた系かである。同じ濃度、同じ pKa、同じ pH でも、片方の成分を外へ捨てられるなら能力は 20.952623 倍になる——「緩衝能」という一語が、境界の条件を含んでいる。

> **観察 4.2**
>
> 論文573 と並べる。573 は、酸性雨の境目 pH 5.6 が雨の性質であり、同じ雨でも受け手によって被害が違うことを示した——そこでは受け手の違いが結論だった。ここではその受け手の側に入り、耐える力を緩衝能として数え、それが pKa の近くにしか無いことを示した。

> **観察 4.3**
>
> 言わないこと。多塩基酸も重ね合わせも扱わず、腎臓や呼吸の能動的な制御は入れていない——示したのは、緩衝能の形が物質によらないことと、開いた系がその形から外れる理由である。

5. 点呼と結び

1. 頂点は **0.057565 mol/(L·pH)**（計算 2.1）：$2.302585C/4$。
2. ±1 で **0.330579** 倍（計算 2.1）：本稿の芯。
3. ±2 で **0.039212** 倍（計算 2.1）：25 分の 1 近く。
4. ±0.5 でも **0.730126** 倍（計算 2.1）：頂点は鋭い。
5. 40/121 と 10 桁一致（計算 2.3）：形は物質によらない。
6. 血液は pKa から **1.3**（計算 3.1）：位置は悪い。
7. 閉じた系で **0.002637**（計算 3.1）：足りない。
8. 開いた系で **0.055262**（計算 3.3）：肺が片側を捨てる。
9. 比は **20.952623** 倍（計算 3.3）：位置の悪さを補う。
10. 閉じた系か開いた系か（観察 4.1）：分離子・論文573。

結び：緩衝液は **pH** を保つのではない。保つのは **pKa** の近くだけで、**±1** 離れれば最大の **0.330579** 倍、**±2** では **0.039212** 倍に落ちる。この落ち方は **40/121** という物質によらない数で決まり、総濃度を変えても頂点の高さ **0.057565 mol/(L·pH)** が上下するだけで、形は変わらない——緩衝液を選ぶとは、**pKa** を選ぶことである。血液は **pKa 6.1** で **pH 7.4** を保っており、閉じた系として数えれば緩衝能は **0.002637 mol/(L·pH)** しかない。だが二酸化炭素を吐ける開いた系では **0.055262 mol/(L·pH)**、**20.952623** 倍になる——規則を破っているのではなく、系が閉じていない。分離子は、閉じた系か開いた系かである。既刊との位置——論文**573** は被害が受け手の性質であることを示した。ここではその受け手の耐える力を数えた。正直に言えば——多塩基酸も能動的な調節も扱っておらず、単一の弱酸だけを見た。

参考文献

1. Atkins, P., & de Paula, J. (2014). *Atkins' Physical Chemistry*. Oxford University Press.
2. Boron, W. F., & Boulpaep, E. L. (2016). *Medical Physiology*. Elsevier.
3. Harris, D. C. (2015). *Quantitative Chemical Analysis*. W. H. Freeman.
4. 山岸勇輝 (2026). 『酸性雨の境目 pH **5.6** は雨の性質で、被害は受け手の性質である』[論文573]. Zenodo. 10.5281/zenodo.23014302

— 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)