キールは艇を押さず、横力を受け持つ——そのための迎角は、速さの二乗に反比例する

— キールは水中の翼で、同じ横力を受け持つのに要る迎角（横流れの角）は速さの二乗に反比例する（**3** ノットと **6** ノットで **4.000000** 倍） — 分離子は、揚力を作る面が水中にあり、そこに流れがあるかである — [論文650]

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

風上へ向かう帆船の帆は、力の大半を横向きに出す。横向きの力に逆らうものが無ければ、艇はただ風下へ流される。その横向きの力を水中で受け止めているのがキールである。キールを水中の翼として扱い、横力を受け持つのに要る迎角と、それが速さでどう変わるかを数える。新しい定理も法則も主張しない。 第一に、キールは艇を押さない——キールが出すのは横向きの揚力と、前向きを妨げる抗力だけである。帆の力のうち前へ進む分を生かせるのは、キールが横向きの分を受け止めるからである（第1節）。 第二に、これが本稿の芯である。同じ横力を受け持つのに要る迎角は、速さの二乗に反比例する——横力 1500 N・面積 1.2 m^2・有効な縦横比 3 の前提で、迎角は 4 ノットで 8.7541 度、5 ノットで 5.6026 度、6 ノットで 3.8907 度。3 ノットと 6 ノットの比は 4.000000 だった（第2節）。 第三に、遅いとキールは失速する——要る揚力係数が最大の 1.0 に届く速さは 3.0358 ノットで、3 ノットでは 1.0240 が要り失速する。揚抗比は 5.4790 ノットで最大 15.3499（抗力角 3.7274 度）になり、それより速くても遅くても下がる（第3節）。 第四に、分離子は、揚力を作る面が水中にあり、そこに流れがあるかである——迎角はそのまま艇の横流れの角になる。針路が風から 40 度のとき、横流れが 5 度から 15 度に増えると、風上へ進む成分は 0.707107 から 0.573576 へ 18.8840 % 減る（第4節）。 キーワード：キール、横流れ、揚力線理論、失速、帆走。

本稿の射程（射程注記）：新しい定理も法則も主張しない——有限の翼の揚力の傾きと誘導抗力（プラントルの揚力線理論 1918）、キールが横力を受け持つこと、艇が横流れすることは、いずれもヨット工学で既知である。前提の例である——横力 1500 N、キールの面積 1.2 m²、有効な縦横比 3、形の抗力係数 0.010、最大揚力係数 1.0 は例として置いた。帆の横力は一定と置いたが、実際は見かけの風で動く。入れないもの——船体そのものが出す横力、舵、傾いた艇の効果は入れない。既刊との関係：論文390 は、帆走艇が風より速く走れることを示し、艇の揚抗比を与えられた数として扱って、揚力の発生機構と失速には立ち入らなかった——ここではその水中の側で、揚抗比と迎角が速さで動くことを数える。論文458 は、揚力係数を上げても失速速度は平方根でしか下がらないことを示した——キールにも、同じ形の失速する速さがある。加えたのは、速さごとに迎角と揚抗比を並べたこと、キールが失速する速さと揚抗比が最大になる速さを出したこと、迎角が風上へ進む成分を削る量を数えたこと、分離子を水中の翼と流れに置いたことである。

1. 記法と問い

設定：帆が生む横向きの力を F とする。キールは水中の翼で、速さ V、面積 A、揚力係数 C_L のとき横向きの揚力

$$F = \tfrac{1}{2}\rho V^2 A\, C_L, \qquad C_L = a\,\alpha, \qquad a = \frac{2\pi}{1 + 2/\mathrm{AR}}$$

を出す（α は迎角、AR は有効な縦横比、a は揚力線理論の揚力の傾き）。抗力係数は形の分と誘導抗力の分の和 $C_D = C_{D0} + C_L^2/(\pi \mathrm{AR})$ とした。前提は、海水 $\rho = 1025$ kg/m³、$F = 1500$ N、$A = 1.2$ m²、$\mathrm{AR} = 3$、$C_{D0} = 0.010$、最大揚力係数 1.0 である。

キールは押さない：キールが出すのは横向きの揚力と、進むのを妨げる抗力だけで、前へ押す力は出さない。帆の力を前向きと横向きに分けたとき、前向きの分を艇の前進に生かせるのは、横向きの分をキールが受け止めて、艇が横へ流されないからである。

問い：横力を受け持つのに要る迎角は、速さでどう変わるか。

2. 迎角と速さ

計算 2.1：揚力の傾きは $a = 3.769911$ /rad だった。速さごとに、要る揚力係数・迎角・揚抗比を出した。

速さ	要る揚力係数	迎角	揚抗比
2 ノット	2.3040	（失速）	—
3 ノット	1.0240	（失速）	—
4 ノット	0.5760	8.7541 度	12.7427
5 ノット	0.3686	5.6026 度	15.0965
6 ノット	0.2560	3.8907 度	15.1000
7 ノット	0.1881	2.8585 度	13.6753

迎角を式のまま比べると、3 ノットと 6 ノットの比は 4.000000 だった。

> 観察 2.2
>
> これが本稿の芯である。同じ横力を受け持つのに要る迎角は、速さの二乗に反比例する。揚力は速さの二乗で効くので、速さが半分になれば同じ横力に四倍の迎角が要る——キールは、速さがあって初めて横力を受け持てる。

3. 失速と揚抗比

計算 3.1：要る揚力係数が最大の 1.0 に届く速さは 1.5617 m/s、すなわち 3.0358 ノットだった。3 ノットでは 1.0240 が要り、最大を超える。揚抗比が最大になるのは揚力係数 0.306998 のときで、その速さは 5.4790 ノット、最大の揚抗比は 15.3499（抗力角 3.7274 度）だった。5 ノットの 15.0965、6 ノットの 15.1000 はこれを超えない。

> 観察 3.2
>
> 遅いとキールは失速し、速すぎても揚抗比は下がる。遅いと大きな迎角が要って誘導抗力が増え、ついには失速する。速いと迎角は小さくて済むが、形の抗力が残るので揚抗比はまた下がる（7 ノットで 13.6753）——水中の翼にも、よく働く速さの幅がある。

4. 横流れと風上へ進む成分

計算 4.1：キールの迎角は、艇の向きと進む向きの差、すなわち横流れの角になる。針路が風から 40 度のとき、風上へ進む成分（進む速さに対する割合）は次のとおりだった。

横流れ	風上へ進む成分
0 度	0.766044
5 度	0.707107
10 度	0.642788
15 度	0.573576

横流れが 5 度から 15 度に増えると、風上へ進む成分は 18.8840 % 減る。

> **観察 4.2**
>
> 遅い艇は、風上へ上れない。6 ノットの迎角 3.8907 度は横流れ 5 度の行より小さく、4 ノットの 8.7541 度は 10 度の行に近い。3 ノットを割るとキールは失速し、艇は横へ流される——上り角度を決めるのは帆だけではなく、水中の翼がどれだけ速く水を切っているかである。

5. 分離子

> **観察 5.1**
>
> 分離子は、揚力を作る面が水中にあり、そこに流れがあるかである。面が無ければ横力を受け持つものが無く、面があっても流れが遅ければ迎角が足りずに失速する——キールの働きは、形だけでなく速さとの組で決まる。

> **観察 5.2**
>
> 論文390 と論文458 と並べる。390 は、帆走艇が風より速く走れることを示し、艇の揚抗比を与えられた数として扱った。ここでは、水中の翼の揚抗比が速さで 12.7427 から 15.3499 まで動くことを示した。458 は、揚力係数を上げても失速速度は平方根でしか下がらないことを示した——キールにも同じ形の失速する速さがあり、前提の艇では 3.0358 ノットだった。

> **観察 5.3**
>
> 言わないこと。帆の横力は一定と置いた。船体の横力、舵、傾いた艇の効果は入れていない。実艇の設計は論じない——示したのは、キールが横力を受け持つ仕組みと、それが速さに縛られることである。

6. 点呼と結び

1. キールは押さない（第1節）：横力を受け止める。
2. 揚力の傾き 3.769911 /rad（計算 2.1）：縦横比 3。
3. 4 ノットで迎角 8.7541 度（計算 2.1）：遅いと大きい。
4. 6 ノットで 3.8907 度（計算 2.1）：速いと小さい。
5. 3 ノットと 6 ノットの比 4.000000（計算 2.1）：速さの二乗に反比例。
6. 失速する速さ 3.0358 ノット（計算 3.1）：遅いと受け持てない。
7. 揚抗比の最大 15.3499（計算 3.1）：5.4790 ノット。
8. 横流れ 5 度から 15 度で 18.8840 % 減（計算 4.1）：風上へ進む成分。
9. 遅い艇は上れない（観察 4.2）：水を切る速さ。
10. 水中の翼と流れ（観察 5.1）：分離子・論文390・論文458。

結び：キールは艇を押さない。帆が生む横向きの力を水中で受け止め、前向きの分を前進に生かさせる。横力を受け持つのに要る迎角は速さの二乗に反比例し、3 ノットと 6 ノットで 4.000000 倍違った。前提の艇では 3.0358 ノットより遅いとキールは失速し、揚抗比は 5.4790 ノットで最大 15.3499 になった——迎角はそのまま横流れになり、風上へ進む成分を削る。分離子は、揚力を作る面が水中にあり、そこに流れがあるかである。既刊との位置——論文390 が与えられた数とした艇の揚抗比は、水中では速さで動く。正直に言えば——帆の横力を一定と置いた前提の例で、船体と舵は入っていない。

参考文献

1. Prandtl, L. (1918). Tragflügeltheorie. *Nachrichten von der Gesellschaft der Wissenschaften zu Göttingen*.
2. 山岸勇輝 (2026).『速くなるほど風が強くなる——だから帆走艇は風より速く走れる』[論文390]. Zenodo. 10.5281/zenodo.22699203
3. 山岸勇輝 (2026).『揚力係数を六割上げても、失速速度は二割しか下がらない』[論文458]. Zenodo. 10.5281/zenodo.22733085

— 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)