津波は浅くなるほど遅くなり、高さは水深の四乗根に反比例して伸びる

— 水深 4000 m で秒速 198.057062 m（時速 713 km）の津波は、水深 10 m では秒速 9.902853 m まで遅くなる — 線形の浅水方程式を数値で解くと、斜面の上で 1.6 パーセント以内で合う — [論文616]

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

海の波の速さは、波長が水深よりずっと長いか短いかで、決まり方が変わる。津波の速さと、浅い所へ来たときの高さの伸びを、式と数値計算の二つの道筋で出す。新しい定理も法則も主張しない。 第一に、津波の速さは水深だけで決まる——波長が水深よりずっと長い波の速さは $\sqrt{gh}$ で、水深 4000 m で秒速 198.057062 m（時速 713 km）、100 m で 31.315571 m、10 m で 9.902853 m である。4000 m の海を 10000 km 渡るのに 14.025139 時間かかる（第2節）。 第二に、分散の式を解いても同じである——波の速さの一般の式を数値で解くと、水深 4000 m で周期 10 分の津波は波長 117.947696 km、速さは $\sqrt{gh}$ の 0.992540 倍だった。周期 10 秒の風の波は波長 156 m で、速さ 15.607768 m/s は水深によらず周期だけで決まる（第2節）。 第三に、これが本稿の芯である。浅くなると、高さは水深の 1/4 乗に反比例して伸びる——波が運ぶエネルギーの流れ（高さの二乗と速さの積）が保たれるので、速さが落ちた分だけ高さが伸びる（グリーンの法則）。4000 m から 1000 m で 1.414214 倍、100 m で 2.514867 倍、10 m で 4.472136 倍で、波長は $\sqrt{h}$ に比例して縮む（第3節）。 第四に、数値計算は、斜面の上でグリーンの法則に 1.6 パーセント以内で合う——水深 4000 m から 40 m へ 600 km かけて浅くなる海で、線形の浅水方程式を 6000 点の格子で解くと、高さの倍率は 1000 m で 1.422233、100 m で 2.555027 で、グリーンの法則との相対差は 0.005671 から 0.015969 だった。斜面を上り切った棚（40 m）では 3.101584 で、0.019193 下回った（原因は確かめていない）（第4節）。 第五に、分離子は、波長が水深より長いかどうかである——長ければ速さは水深だけで決まり、浅くなると遅くなって背が伸びる。短ければ速さは周期だけで決まり、深い海の水深を感じない（第5節）。 キーワード：津波、浅水波、グリーンの法則、波の速さ、水深。

本稿の射程（射程注記）：新しい定理も法則も主張しない——浅い水の波の速さ $\sqrt{gh}$、水深が変わるときの高さの法則（グリーン、1838）、波の分散の式（ラムの教科書ほか）は、いずれも既知である。砕波・遡上を扱わない——高さが水深に比べて小さい線形の波だけを見る。岸に上がる高さは述べない。実際の津波の事例を扱わない——到達時間や高さの記録は論じず、水深と周期を置いて計算するだけである。棚での食い違いの原因を確かめていない——斜面の終わりの折れ目で波の一部が跳ね返ることが考えられるが、仮説にとどめる。既刊との関係：論文391は有義波高が平均でも最大でもないことを示し、射程注記で「砕波や浅水変形は主題ではない」と空けていた——本稿はその浅水変形のうち、津波の高さの伸びを扱う。加えたのは、分散の式の数値解で津波と風の波の違いを並べたこと、グリーンの法則を線形の浅水方程式の数値計算と突き合わせ、合う所と外れる所を数で示したこと、分離子を「波長が水深より長いか」に置いたことである。

1. 記法と問い

設定：水深を h、重力加速度を $g = 9.80665\ \mathrm{m/s^2}$、波の周期を T、波数を k（波長の 2π 分の一の逆数）とする。線形の波の速さは、分散の式

$$\left(\frac{2\pi}{T}\right)^2 = g\,k\tanh(kh)$$

から決まる。kh が小さい（波長が水深よりずっと長い）とき速さは $\sqrt{gh}$、kh が大きい（短い）とき $gT/(2\pi)$ になる。

問い：津波の速さは何で決まるか。浅い所へ来ると、高さはどれだけ伸びるか。

2. 速さ

計算 2.1：波長が水深よりずっと長い波の速さ $\sqrt{gh}$ を求めた。

水深	速さ	時速
4000 m	198.057062 m/s	713.005425 km
1000 m	99.028531 m/s	356.502712 km
100 m	31.315571 m/s	112.736056 km
10 m	9.902853 m/s	35.650271 km

水深 4000 m の海を 10000 km 渡るのに 14.025139 時間かかる。

計算 2.2：分散の式を数値で解いた（$\sqrt{gh}$ の近似とは独立な道筋）。

波（水深）	波長	kh	速さと $\sqrt{gh}$ の比
周期 10 分の津波（4000 m）	117.947696 km	0.213084	0.992540
周期 20 分の津波（4000 m）	237.225441 km	0.105945	0.998136
周期 10 秒の風の波（4000 m）	156.078 m	161.027130	0.078804
周期 10 秒の風の波（10 m）	92.356 m	0.680324	0.932618

周期 10 秒の風の波の水深 4000 m での速さ 15.607768 m/s は、深い水の式 $gT/(2\pi)$ と一致した。

> **観察 2.3**
>
> 津波の速さは水深だけで、風の波の速さは周期だけで決まる。周期 10 分の津波は、水深 4000 m の 30 倍近い波長を持ち、海の底まで水を動かしている——同じ海で、周期 10 秒の波は波長 156 m で、深さ 4000 m の底を感じない。

3. 高さの伸び

> **観察 3.1**
>
> これが本稿の芯である。浅くなると、高さは水深の 1/4 乗に反比例して伸びる。波が一周期に運ぶエネルギーは高さの二乗に比例し、それが波の速さ $\sqrt{gh}$ で運ばれる。水深がゆっくり変わるなら、この流れは保たれるので

$$a^2\sqrt{h} = \text{一定}, \qquad a \propto h^{-1/4}$$

になる（グリーンの法則）。

計算 3.2：水深 4000 m での高さを 1 として、高さと波長の倍率を求めた。

水深	高さの倍率	波長の倍率
1000 m	1.414214	0.500000
400 m	1.778279	0.316228
100 m	**2.514867**	0.158114
40 m	3.162278	0.100000
10 m	4.472136	0.050000

4. 数値計算

計算 4.1：グリーンの法則とは独立に、線形の浅水方程式を数値で解いた。水深 4000 m の平らな海を 300 km、そこから 600 km かけて 40 m まで一様に浅くし、その先に水深 40 m の棚を 300 km 置いた。格子の間隔は 200 m（6000 点）、高さ 1 m・幅 20 km の山を右向きに送り、各地点で高さの最大を記録した。

水深	数値計算の倍率	グリーンの法則	相対差
4000 m	1.000000	1	—
1000 m	1.422233	1.414214	+0.005671
400 m	1.791855	1.778279	+0.007634
100 m	2.555027	2.514867	+0.015969
40 m（棚）	3.101584	3.162278	−0.019193

> **観察 4.2**
>
> 斜面の上では、数値計算がグリーンの法則に 1.6 パーセント以内で合った。浅いほど差が開き、100 m で +0.015969 である——グリーンの法則は水深がゆっくり変わることを前提にしており、波長が縮んで斜面が相対的に急になるほど、その前提から離れる。

観察 4.3

斜面を上り切った棚では、数値計算がグリーンの法則を下回った。40 m の棚で 3.101584 対 3.162278、相対差 −0.019193 である——原因は確かめていない。斜面の終わりの折れ目で波の一部が跳ね返ることが考えられるが、本稿では仮説にとどめる。

5. 分離子

観察 5.1

分離子は、波長が水深より長いかどうか（kh が小さいかどうか）である。波長が水深よりずっと長い津波は、速さが水深だけで決まり、浅くなると遅くなって背が伸びる——波長の短い風の波は、深い海では速さが周期だけで決まり、底を感じない。浅い所に来て kh が小さくなると（水深 10 m で 0.680324）、ようやく底を感じて遅くなる。

観察 5.2

論文391 と並べる。391 は有義波高が平均でも最大でもないことを示し、射程注記で砕波や浅水変形を主題から外していた——本稿はその浅水変形のうち、津波の高さが伸びる割合を扱う。391 が扱った風の波は、深い海では底を感じない側にいる。

観察 5.3

言わないこと。砕波・遡上・岸に上がる高さは扱わない。実際の津波の到達時間や高さの記録は論じない——示したのは、速さが水深で決まることを分散の式と並べたこと、そして高さの伸びを式と数値計算で突き合わせ、合う所と外れる所を数で示したことである。

6. 点呼と結び

1. 水深 4000 m で 198.057062 m/s（計算 2.1）：時速 713 km。
2. 10000 km を 14.025139 時間（計算 2.1）：深い海を渡る時間。
3. 周期 10 分の津波は $\sqrt{gh}$ の 0.992540 倍（計算 2.2）：波長 118 km。

4. 風の波は水深によらず $gT/(2\pi)$（計算 2.2）：波長 **156 m**。
5. 高さは水深の **1/4** 乗に反比例（観察 3.1）：本稿の芯。
6. **4000 m** から **100 m** で **2.514867** 倍（計算 3.2）：波長は **0.158114** 倍。
7. 数値計算は斜面の上で相対差 **0.016** 以内（計算 4.1）：二つの道筋。
8. 浅いほど差が開く（観察 4.2）：ゆっくり変わる前提から離れる。
9. 棚では **0.019193** 下回る（観察 4.3）：原因は確かめていない。
10. 分離子は波長が水深より長いか（観察 5.1）：論文**391** が空けた席。

結び：津波は、波長が水深よりずっと長い波である。その速さは水深だけで決まり、浅くなるほど遅くなる——水深 **4000 m** で秒速 **198.057062 m**、**10 m** で **9.902853 m** である。分散の式を解いても、周期 **10** 分の津波の速さは $\sqrt{gh}$ の **0.992540** 倍で、周期 **10** 秒の風の波は水深によらず周期だけで決まった。浅くなると、高さは水深の **1/4** 乗に反比例して伸びる——運ばれるエネルギーの流れが保たれるからで、**4000 m** から **100 m** で **2.514867** 倍になる。線形の浅水方程式の数値計算は、斜面の上でこれに **1.6** パーセント以内で合い、斜面を上り切った棚では **0.019193** 下回った。分離子は、波長が水深より長いかどうかである——長ければ水深を感じて遅くなり背が伸び、短ければ深い海の底を感じない。既刊との位置——論文**391** が射程注記で空けた浅水変形の席に座る。正直に言えば——砕波も遡上も実際の事例も扱わず、棚で下回った原因も確かめていない。

参考文献

1. Dean, R. G., & Dalrymple, R. A. (1991). *Water Wave Mechanics for Engineers and Scientists*. World Scientific.
2. Green, G. (1838). On the motion of waves in a variable canal of small depth and width. *Transactions of the Cambridge Philosophical Society*.
3. Lamb, H. (1932). *Hydrodynamics* (6th ed.). Cambridge University Press.
4. 山岸勇輝 (2026). 『有義波高は、平均でもなければ最大でもない』[論文391]. Zenodo. 10.5281/zenodo.22699212

山岸 勇輝 (Yuuki YAMAGISHI)

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