

〔連載〕流体力学への招待：日常生活に見られる流体現象

海の波と波動の不思議

京都大学防災研究所

森 信 人*

The Wonder of Ocean Waves

*Nobuhito Mori, Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University

*E-mail for correspondence: mori@oceanwave.jp

1 はじめに

この記事は、流体力学を一般の人、特に中学生・高校生を対象とした啓発のためにまとめた一連のシリーズの1つです。今回は、波動現象、特に海の波をターゲットに解説します。波と流れの違い、海の波、津波をメインに取り上げました。流体力学会誌の読者の方には、当たり前のことを当たり前に解説していますが、周りの一般の方に読んでいただいて、波動現象の面白さと実社会との関係について知見が広がればと思います。

2 波と流れの違いはなに？

海の波は何千キロも遠くから伝わってくることを知っていますか？ 図1のように、池に石を投げ入れると波紋が広がります。これは波（波動）と呼ばれる現象です。水の運動を大きく分けると波と流れに分けることができます。日常で見かけるこの2つの現象の例として、海の波と川の流れがあげられます。それでは波と流れは何が違うのでしょうか。

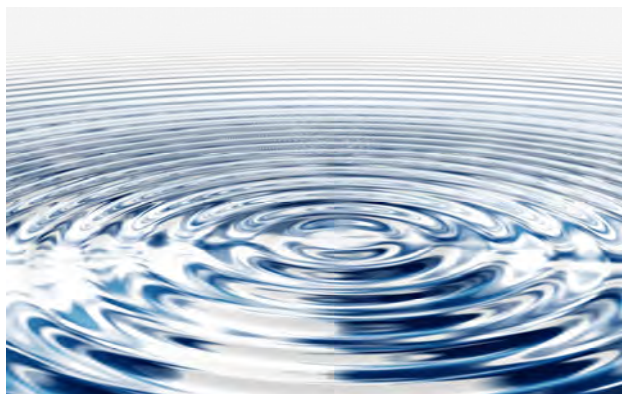


図1 水の波紋

川の流れは、水そのものとその運動エネルギー（水の速度の2乗）と一緒に上流から下流に伝わります（図2参照）。一方、海の波は、運動エネルギーは伝わるのですが、水そのものは大きく動かずにその場所に留まる現象です。もし、中に水と同じ質量で非常に小さな粒子を入れたとすると、川の流れではこの粒子は水の流れる速度と同じ速度で下流に流れていきます。一方、海の波ではこの粒子は波の長さ程度で振動しますが、波の進行方向に移動することなく、波の形だけが遠くに伝わっていきます。このようにエネルギーのみ伝わって行く現象が波の特徴です。

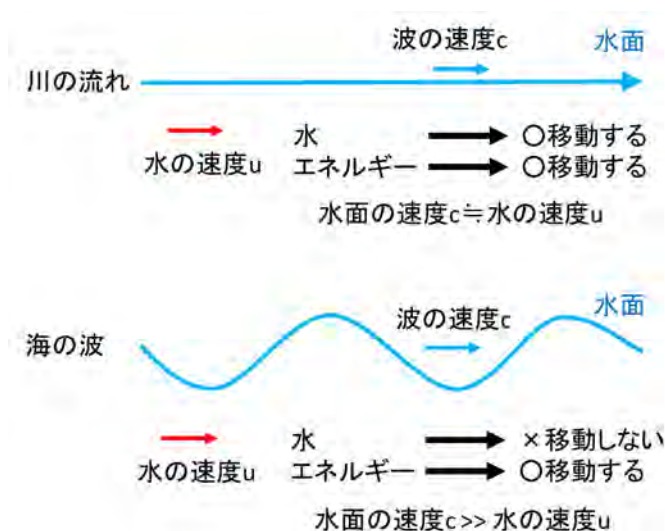


図2 波と流れの違い

波の現象は、日常生活や自然界の様々な場所で観察することができます。例えば、私達の声、つまり音波も波の1つです。もし音が流れだとするとうなるでしょうか。人が喋ると音の伝わる方向に向かって、空気が流れ

て風が起きることになります。もしこれが本当ならば、コンサートで合唱団が歌うと大風が吹き大変なことになりますが、実際にはこんなことは起きません。音は波なので、声という空気圧の変化は伝わってきますが、空気そのものは流れません。このため話していても音は聞こえますが、風は起きないのです。



図3 海の波とサーファー

3 ハワイの波はどこから来る？

ハワイはサーファーのパラダイスです(図3)。ハワイはサーフィンに適した、波の長さが長い波が年間を通して存在するため、サーフスポットとして有名です。なぜハワイには大きな波がいつもあるのでしょうか？ 海の波は冬のアリューシャン列島のような高緯度域の嵐で作られることが多く、気候の良い低緯度のハワイの付近で大きな嵐はあまり頻繁に存在しません。それではハワイにやって来る波はどこから来るのでしょうか？

波は、流れと比べて非常に遠くに伝わるすることができます。これは、エネルギーのみが伝わり、水は大きく動かないという波という現象の性質によるものです。ハワイの夏は南半球の冬なので、南極海は大嵐で大きな波が作られます。周期15秒の海の波は時速84kmで進みます。これは高速道路の自動車とほぼ同じ速度です。ハワイと南極圏の距離は約5000kmなので、南極海の嵐で作られた周期15秒の波は2.5日でハワイの南の海岸に到着します。長い距離を伝わってくる間に、波の周期が揃い、サーフィンに適した大きくかつ周期の長い波になります。一方、ハワイの冬は、遠くアラスカ沖のアリューシャン列島付近の大嵐で大きな波が作られます。アラスカ沖で作られた波は、遮るものがないので、やはりハワイの北の海岸にやってきます。結果としてハワイでは年間を通してサーフィンに適した周期の長い波が存在します。図4は、年間を通して海の波の高さとハワイの関係です。赤道から亜熱帯域までは風が弱く、一般的に大きな波は起きません。このためハワイのように、温かい海域にも関わらず、年間を通して北半球と南半球の両方から波が

来る場所はあまり多くありません。日本の場合は、オーストラリアがブロックしているため南極海の波はやってこず、穏やかな夏の海が作られています。サーファーにとっては残念なことですが。

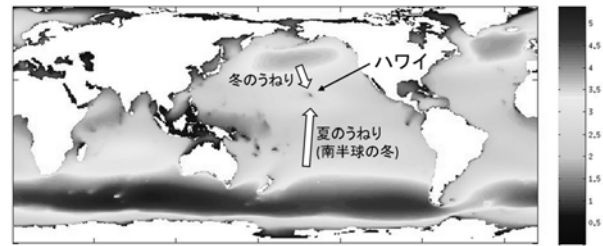


図4 ハワイにやって来る波の向き。図の濃さは年間を通して波の高さ(単位メートル)

それでは、波の伝わる速度はどのように決まるのでしょうか。波の伝わる速度(位相速度と呼ばれます)は、波の形(山や谷)が伝わる速度であり、一般に速度は距離÷時間で定義されます。波の空間的な長さである波長 L と時間的な長さである周期 T を使うと速度 $c=L/T$ (=波長÷周期)で定義されます。この波長 L と周期 T の関係は勝手に決まるわけではなく、媒質の特性(例えば密度)と復元力によって物理法則に基づいて決まります。波長 L と周期 T の関係が一定の場合、波の伝わる速度も一定になります。例えば音波は媒質の圧力振動が伝わる横波の波動現象です。空気中を伝わる音波の速は約340[m/s]です。音速 c は波長 L にも周期 T にも変化しません。しかし、音速は媒質の密度に依存します。例えば、水中では音速は1.5km/sと4.4倍速くなります。このため、スキューバダイビングなどで海の中で船のスクリー音を聞くと、すごく近くからの音に聞こえますが、目で見ると空気中の音の速度のイメージからすると思ったより遠くに船が見えるということになります。

海の波の伝わる速度 c [m/s]は、 $1.56 \cdot \text{周期}[\text{秒}]$ で表されます。これからわかるように、水深が大きい場所を進む海の波の速度は、周期 T が長いほど速く進みます。このように、海の波は長い周期ほど速く進むため、最初に異なる周期の波が集まっても、遠くに伝わるに従って周期毎に速度が異なるために、伝わるに従って周期・波長が揃っていきます。このため、遠くから伝わってくる波(うねり)は周期が揃って非常に綺麗な波形となります。

4 津波が沿岸で急成長するのはなぜ？

津波はめったに起きませんが、一度起こると甚大な被害を引き起こす災害です。巨大な津波はなぜ起こるのでしょうか。

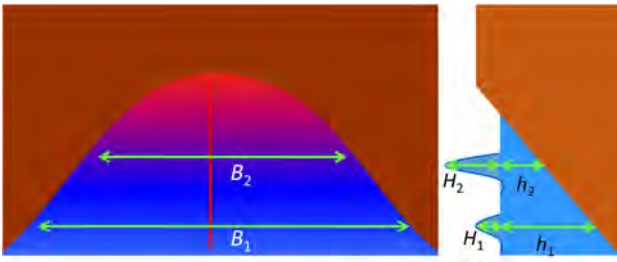


図5 津波の局所的な増幅。図面の下から上に津波が伝わっている（左：湾を上からみた場合、右：湾の縦断面をみた場合）。

津波も波なので、津波の特徴は波の特性から理解することができます。津波の幅 1m あたりのエネルギーは（津波の速度）×（津波の高さ²）に比例します。もし図5のように、津波が湾の入り口で幅 B_1 で水深 h_1 の場所から幅 B_2 で水深 h_2 の場所に伝わったとすると津波の高さ H はどうなるでしょうか。津波の速度は、水深が浅くなると速度が小さくなります。このため、湾の幅が狭くなるに従い、幅 1m あたりのエネルギーは増え、浅くなるための速度変化で津波の高さが変化します。これを踏まえると、図5のような、湾の幅の変化を考えた場合、場所1と2における津波の高さ H_1 と H_2 について以下の式が成り立ちます。

$$\frac{H_2}{H_1} = \left(\frac{h_1}{h_2}\right)^{1/4} \left(\frac{B_1}{B_2}\right)^{1/2} \quad (1)$$

これより、湾の幅が狭くなるとその比の 1/2 乗、水深が浅くなるとその比の 1/4 で波高が増幅することがわかります。この関係は、純粋に湾の幅や水深といった地形による津波の高さの増幅を表すものです。式(1)の関係は、地形的な特性だけで決まるので、津波が増幅しやすい湾はその予め決まっていることとなります。2011年東北地方太平洋沖地震で見られた湾毎の被害の違いは、波としての津波の特性が反映されていました。

津波の高さの変化に対して、伝わる速度の特徴はどうでしょうか。津波を起こす海の深いところで断層が非常に大きいため、水深 h （太平洋の平均水深 4000m）に比べて波の波長 L （断層の長さ数十～数百キロ）が非常に長いという特徴があります。津波の進む速度 c は $c \cong \sqrt{9.8h}$ であらわされます。

例えばチリなので起こって太平洋を伝わる津波の速度は、太平洋の平均水深を 4000m とすると時速 713km となるので、23.5 時間ほどで遠いチリから日本にたどり着くこととなります。また、津波は岸に近づくと大きく

速度を落としますが、水深 50m でも時速 80km あるので、車でも津波が見えてから逃げることは困難です。このため、津波の到着時間を正しくすることは避難する上で重要です。

津波の速度で示したように、津波の進む速度は、水深（海底地形）だけで決まります。つまり、震源から陸までの水深がわかれば、予め到達時間を推定することは難しくありません。一方で、津波の高さは断層がどの程度動いたかによるので、津波の高さを素早く正確に推定することは難しいです。

5 緊急地震速報はどのような仕組み？

海の波とは違う話になりますが、先の津波に関連する波動で、地震があります。地震が起こると、携帯電話、テレビ、ラジオから緊急地震速報²⁾が伝えられます。緊急地震速報は、本震が起こる数秒から数十秒前に流れ、減災にとっても効果的な情報です。緊急地震速報は、地震の波の現象をうまく使った予報の仕組みです。

波の振動する向きは、波の伝わる方向に垂直な場合と平行な場合があります。図6に示すように波の振動の向きが、垂直な場合を横波、平行な場合を縦波といいます。海の波や津波は横波ですが、縦波と横波は、両方存在する場合と片方のみが存在する場合があります。

地震によって起こる波の中で、主な揺れを起こす岩盤中を伝わる地震波を実体波と言いますが、実体波には縦波と横波が両方存在します。地震波の縦波（Primary wave：第1波）は地盤の密度が進行方向に変化する疎密波であり、横波（Secondary wave：第2波）は岩盤の歪みが伝わることによる弾性波です。

地震としての揺れは横波のほうが遥かに大きく、縦波の方は細かく弱い揺れになります。ところが、弾性波よりも疎密波の方が早く伝わります。このため、地震波の横波の速度は 3-4km/s であるのに対し、縦波の速度が 5-7km/s と速いため、縦波のほうが先に伝わります。この縦波と横波の速度の差を利用して、地震の大きな揺れ

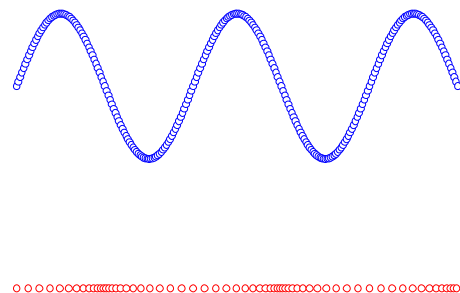


図6 横波（上）と縦波（下）の違い

の到着を直前に知らせるのが緊急地震速報です。縦波の方が速く伝わりますが、後から到着する横波のほうが建物を揺らす力が大きいため、縦波を先に検知し、即時警報を配信する仕組みです。

緊急地震速報は、実際に起こった地震の横波を検知して警報を出すため、ハズレの少ない非常に正確な警報になります。しかし、縦波と横波の到着時間の差を利用するため、震源からある程度の距離がないと、時間差が無いためにすぐに横波が着いてしまうことになります。

このため、南海・東南海トラフなどの海溝型地震など、陸から震源が離れている場合にとっても有効な即時警報です。緊急地震速報は、地震波の持つ複数の波の特性を活かした優れた実用的な仕組みです。

引用文献

- 1) 永田 豊：ハワイの波は南極から，丸善，152p.
- 2) 気象庁：緊急地震速報について，
<https://www.data.jma.go.jp/svd/cew/data/nc/>