

# 定常波による水槽の重さの不思議Ⅱ

熊本県立宇土高等学校 千代森 颯真 川上 悠 舩田 崇光

## 要旨

我々は、水が入った容器を運ぶ際、波の発生によって運びにくく感じることに疑問を抱いた。そこで、水波実験器を用意し、定常波を起こし、様々な波長の定常波における水槽の重さ(秤の針)の変化をカメラで撮影し、1/30 s ごとに調べた。その結果、『水槽の重さの振動数=定常波の振動数×2』という規則性を発見した。これは、定常波の「腹」、及び「節」のどこの位置で測定しても同じ結果が得られた。また、水槽の重さの変化と定常波の波形との関係を、力積と運動量に基づいて考察したところ、水槽の重さ(台秤に及ぼす力)は、波形が「水平」の時に最大、「山」・「谷」の時に最小となり、水が振動する時の水槽の重さは静時よりも平均的に増加していることが分かった。以上の結

果から、波が発生する容器は運びにくく感じると結論付けた。  
また、ばねの単振動のように理想的に振動する波のエネルギーは、 $[2\pi^2mf^2A^2]$ と表せることから、 $f^2A^2$ を波の「エネルギー係数 $e$ 」と定義し、さらに秤に及ぼす力とエネルギーの関係を調べた。その結果、台秤に及ぼす力と波が持つエネルギーには高い相関関係があること、そして、波のエネルギー係数 $e$ と水槽の重さの増減値 $\Delta N$ は「 $e=k\Delta N$ 」という式で表せることを突き止めた。液体の振動を抑制すれば、輸送車両への負荷軽減や運転の安全性向上、タイヤの摩耗による微粒子の排出抑制などが期待できる。

## 動機と目的

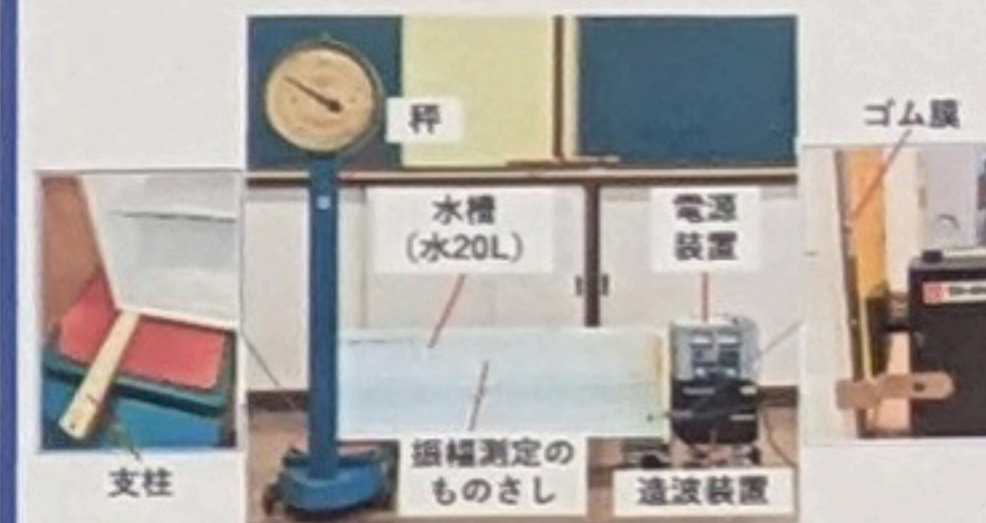
(1) 研究の動機  
灯油のポリタンクを運ぶ際、波が起ると手に周期的な負担がかり、運びにくくなることに疑問を抱いた。波の発生によって同様の現象が起こる事例があるのかなど、インターネットで調べたところ、液体を輸送する車体は、タイヤの摩耗や車体下部の部品の損傷が起こりやすいということを知った。  
そこで、振動する液体の運びにくさを調べるために、水槽(水波実験器)に定常波をつくり、定常波の振動と水槽の重さの変化の様子を調べた。その結果、水槽の重さの振動数は、水面波の振動数よりもさらに高い振動数が発生することを発見した。  
(2) 目的  
水面波の振動数と水槽の重さの振動数の関係性を調べ、現象のメカニズムを解明する。



【図1】液肥を運ぶトラックのタンクの水面波

## 方法

水波実験器(市販)を使って定常波を起こし、波長を変化(1波長, 1.5波長, 2波長, 2.5波長)させたときの、定常波の振動と水槽の重さの変化を調べた。  
●準備物【図2】  
・水(約20L) ・水波実験器(島津理科社; WWT-1000) ・台秤(アナログ体重計) ・スローカメラ(iPhone) ・支柱(水槽を1点で支える木材) ・ものさし(振動測定用)  
●作る波長に合わせて電圧を調整し、遠波装置でゴム膜を一定間隔で押し、水槽内に定常波を発生させる。



【図2】水面波の定常波をつくる水波実験器



【図3】動画スロー再生アプリについて  
最小0.03秒ごとにコマ送りできるアプリ

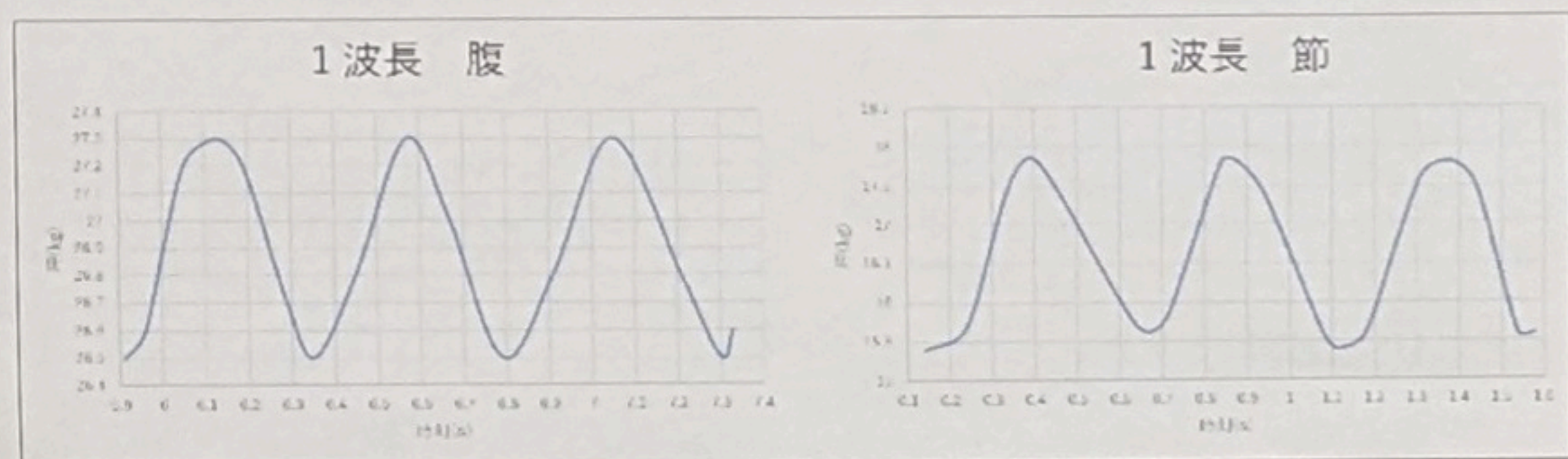
## 結果1(昨年)

<仮説> 重心の移動で重さが増減し、腹の位置は増減するが、節では変化しない。

【図4】【図5】より、定常波の「腹」、及び、「節」のどこの位置で支柱で支えて測定しても、水槽の重さは同様に変化することを確認できた。



【図4】「節」の位置に支柱を設置し、測定した時の様子

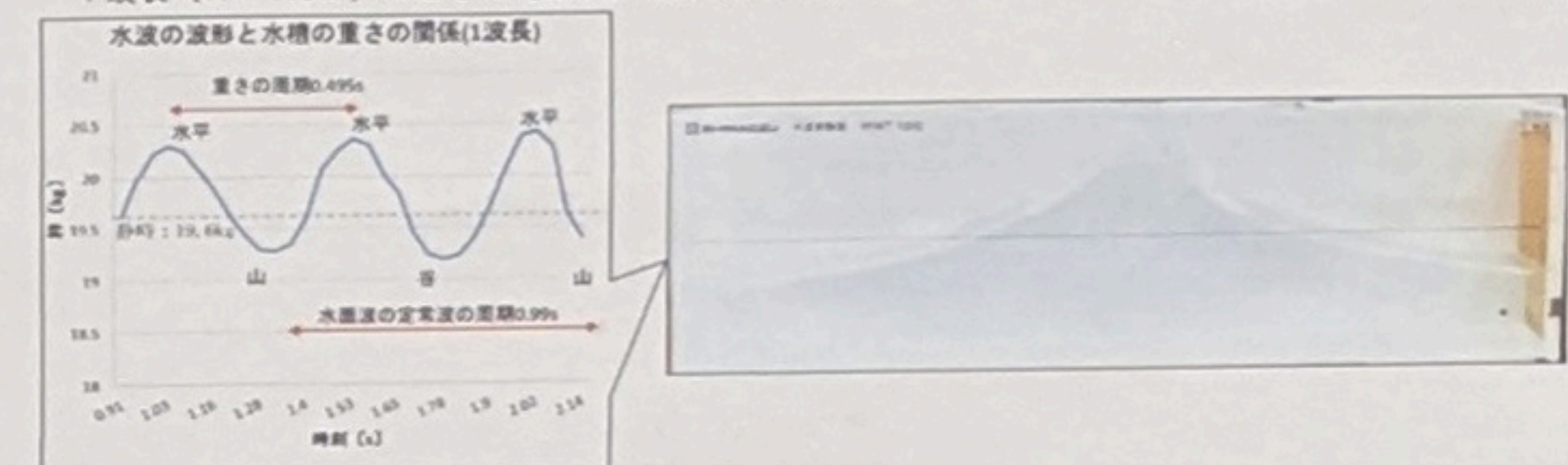


【図5】1波長の「腹」(左)と「節」(右)の測定結果

腹、節どちらでも水槽の重さの増減が確認でき、単なる重心の移動で振動数が増えるわけではなさそう！(仮説が不成立) → 水槽の重さの振動数が増える原因を探る！

## <本実験>水面と台秤の針の周期を調べる。

1波長(λ=1.0m)のときは【図6】【図7】が得られた。



【図6】水波の波形と水槽の重さの関係(1波長)

| 時刻[s]  | 0.91  | 0.95  | 0.99  | 1.03  | 1.08  | 1.12  | 1.16  | 1.2   | 1.24  | 1.28  | 1.32  | 1.36  |
|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 重さ[kg] | 19.62 | 19.98 | 20.22 | 20.30 | 20.25 | 20.07 | 19.90 | 19.65 | 19.45 | 19.30 | 19.28 | 19.35 |
|        | 1.4   | 1.45  | 1.49  | 1.53  | 1.57  | 1.61  | 1.65  | 1.69  | 1.73  | 1.78  | 1.81  | 1.86  |
|        | 19.60 | 20.08 | 20.25 | 20.36 | 20.30 | 20.20 | 19.85 | 19.45 | 19.25 | 19.2  | 19.23 | 19.4  |
|        | 1.9   | 1.94  | 1.98  | 2.02  | 2.06  | 2.1   | 2.14  |       |       |       |       |       |
|        | 19.7  | 20.08 | 20.38 | 20.42 | 20.28 | 19.65 | 19.4  |       |       |       |       |       |

【図7】時刻(s)における水槽の重さ(kg)(1波長)

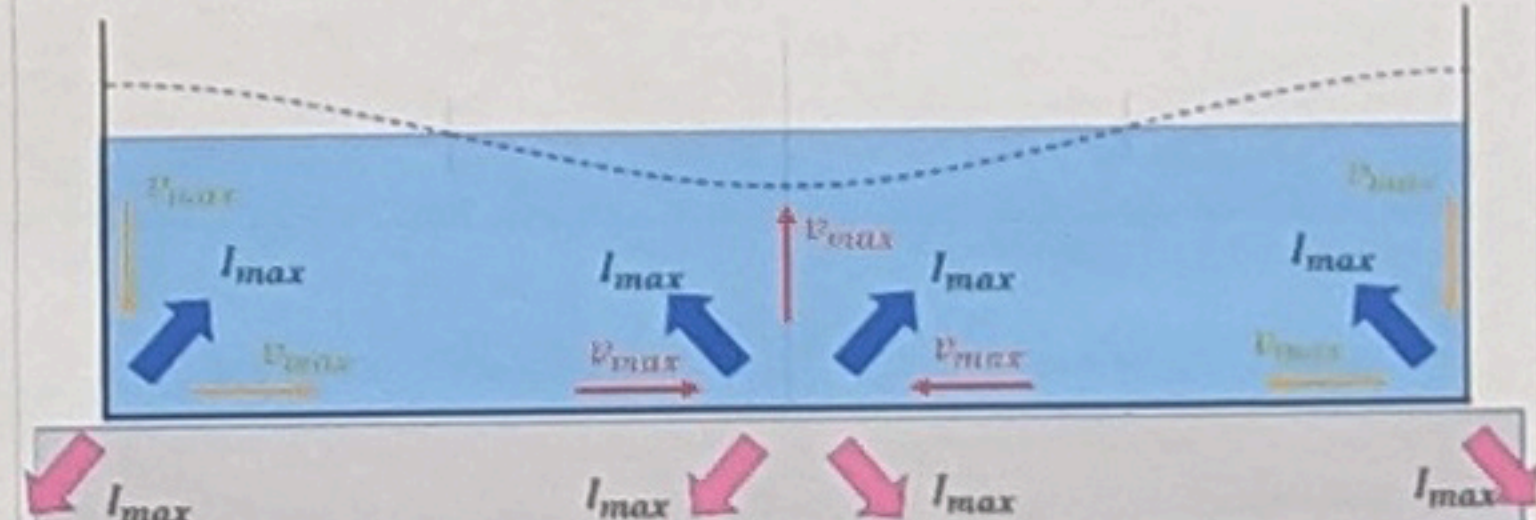
定常波の波長を変えても、水面の振動の周期に対して台秤の針の周期が2倍であることが判明！

## 考察

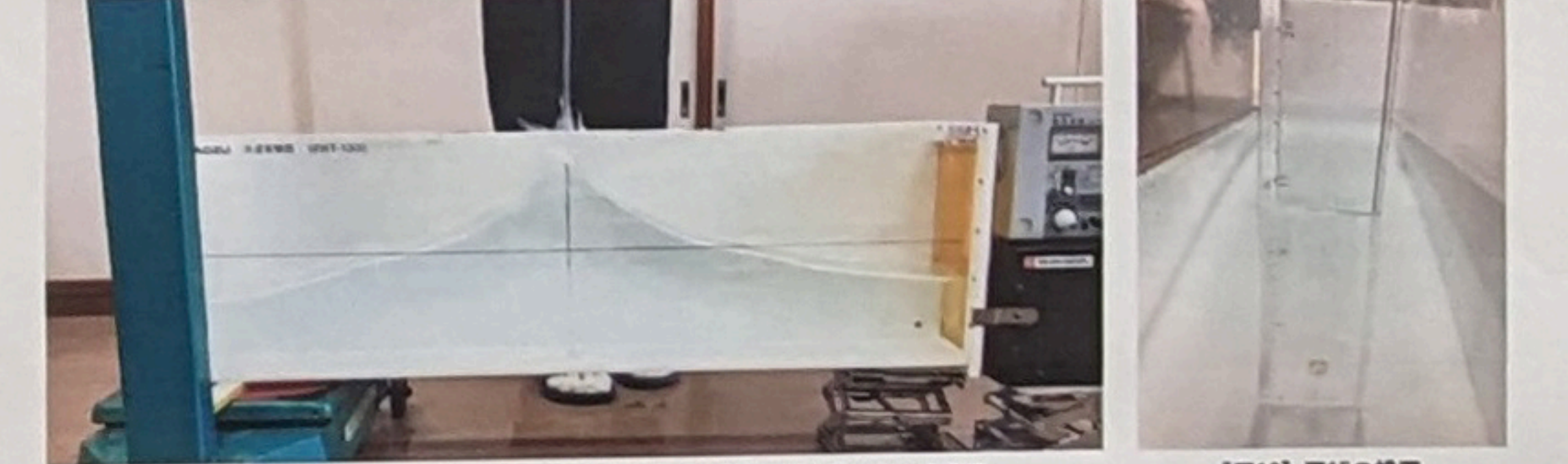
### ① 水槽の重さ(台秤に及ぼす力)が変化するメカニズム <昨年>

波形が「水平」の時に水槽の重さは最大、「山」「谷」の時に最小となる原因を考察した。

●水槽の重さが最大になる原因  
【図14】は、水槽の中央部の波形が「谷」から「水平」になった瞬間を示している。この時、水の流れは最大であるため、運動量は最大となる。水の進路は水槽の壁によって左右直角に曲げられることになり、水槽の中央底部では、進行方向が真逆な水がぶつかり合い、上部に向かって曲げられる(【図15】ものさしで実際に確認)。その結果、水は水槽から力積(斜め上方向矢印)を受け、その反作用(斜め下方向矢印)が台秤にかかることができる。つまり、台秤には本来の水槽の重さに加え、力積の反作用が余計な負荷として影響を及ぼすことで、瞬間的に基準の重さよりも大きくなってしまふと考えられる。波形が「山」から「水平」になった瞬間も同様に考えられる。

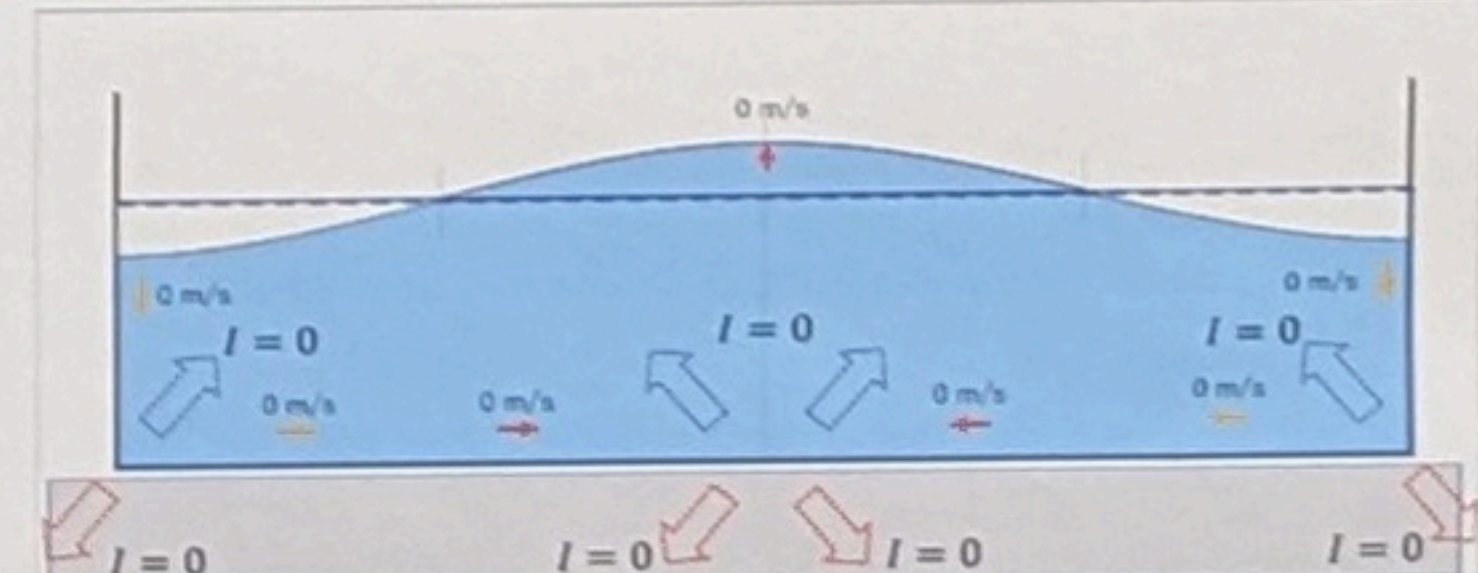


【図14】1波長の腹にものさしを入れ、水の流れを確認している様子



【図15】【図16】のように、水槽内に定常波(1波長)を起こしている時に、「腹」、または、「節」にものさしを入れて、水槽内の水の流れを調べた。  
「腹」にものさしを入れたとき、定常波は乱れなかった。一方で、「節」にものさしを入れたとき、定常波は乱れた。したがって、【図14】の水の流れが正しく示されていることを確認した。

●水槽の重さが最小になる原因  
【図17】は、水槽の中央部の波形が「水平」から「山」になった瞬間を示している。この瞬間、全体の水の動きはゼロとなるため、水が水槽から受ける力積(斜め上方向矢印)は0となり、その反作用(斜め下方向矢印)も0となる。また、静時ラインを超える水は一瞬、無重量状態となるため、水槽の重さが最小となると考えられる。波形が「水平」から「谷」になった瞬間も同様に考えられる。



【図17】中央部の波形が「水平」から「山」になった瞬間

### ② 台秤に及ぼす力の検証 <今年>

台秤に及ぼす力がどの程度であるかを解明するために、基準値からの増加割合(α)、及び、減少割合(β)を調査したところ、以下のデータが得られた。

| 1波長(静時19.6kg)のα, β(最大)                            |                                                  |
|---------------------------------------------------|--------------------------------------------------|
| $\alpha_1 = \frac{20.36 - 19.6}{19.6} = 3.9\%$    | $\beta_1 = \frac{19.6 - 19.2}{19.6} = 2.0\%$     |
| 1.5波長(静時20.5kg)のα, β(最大)                          |                                                  |
| $\alpha_{1.5} = \frac{22.1 - 20.5}{20.5} = 7.8\%$ | $\beta_{1.5} = \frac{20.5 - 19.5}{20.5} = 4.9\%$ |

【図18】台秤に及ぼす力の増加・減少割合

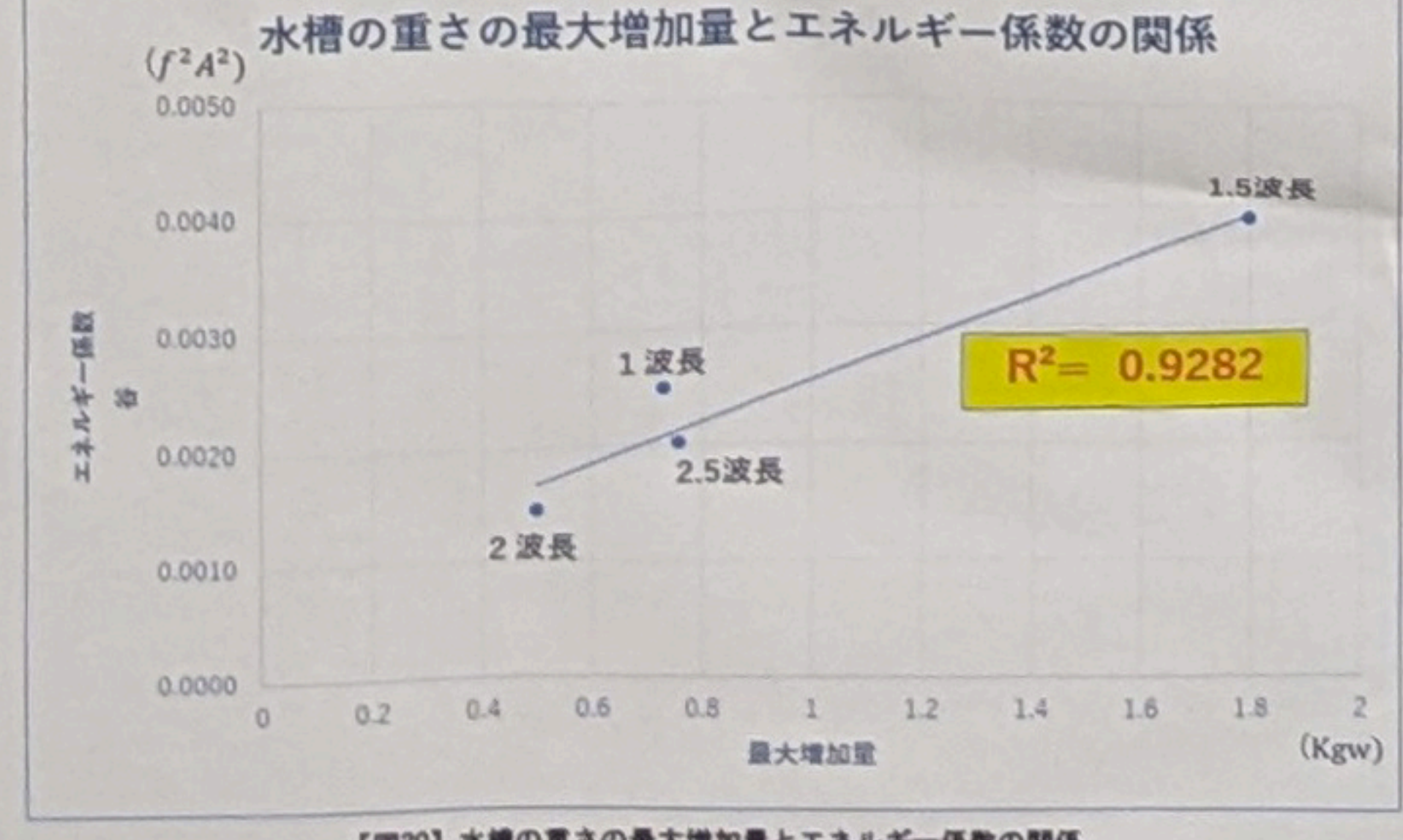
【図18】より、いずれも、α>βであることが分かった。  
したがって、水面が振動している時、水槽の重さは静時よりも平均的に大きくなっていると考えられる。

静時の液体の重さ < 振動する液体の重さ

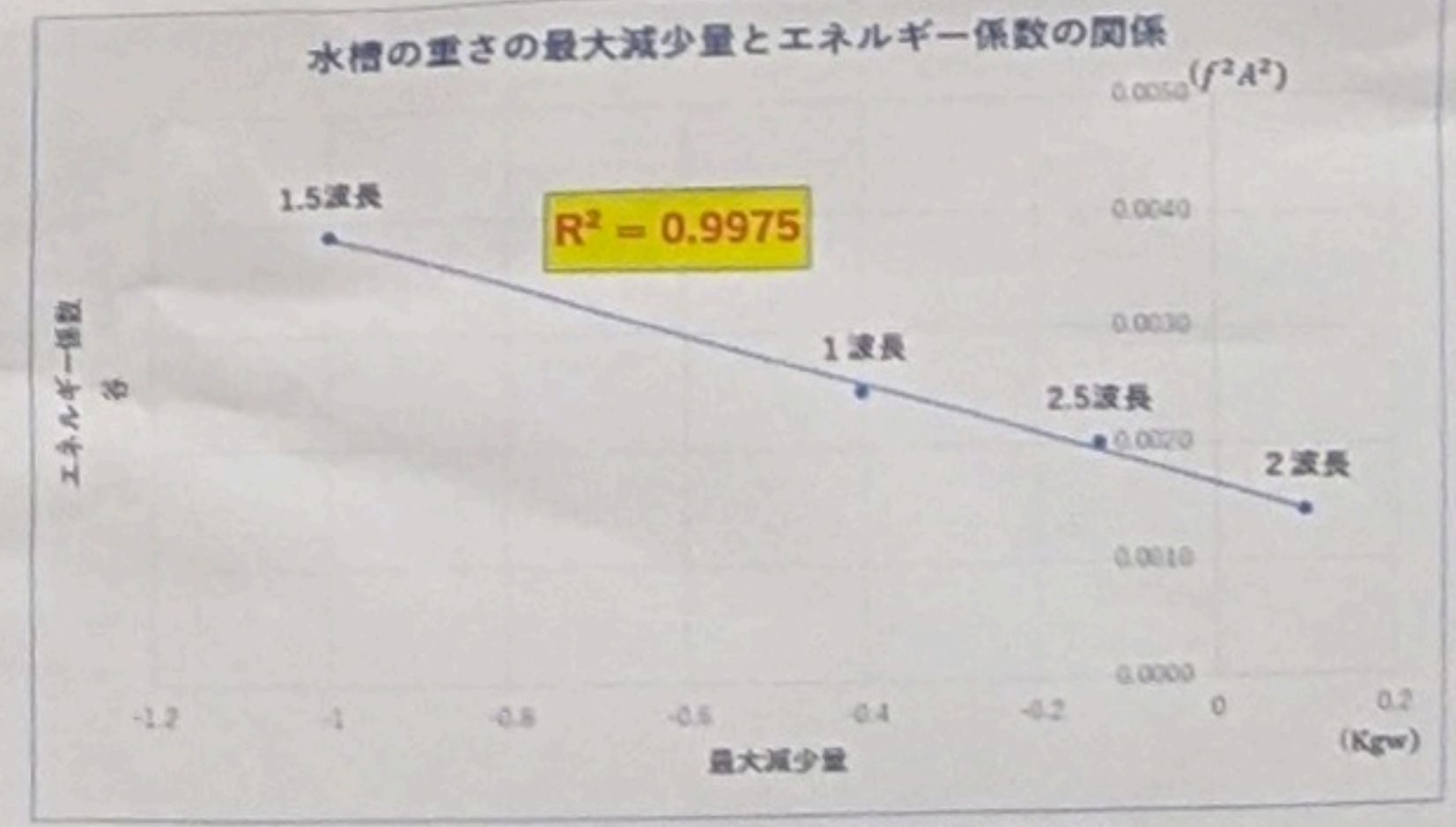
## 波のエネルギーによる検証(今年)

波が持つエネルギーを求めることで、水槽の重さが増減するメカニズムを単に力積(反作用)という概念で示すだけでなく、数値による説明によって、より分かりやすく、そして、これまでの考察の信頼性を高めることができると考えた。  
そこで、ばねの単振動のように理想的に振動する波のエネルギーは、「 $2\pi^2mf^2A^2$ 」と表せることから、エネルギーの算出を試みた。しかし、水面波は形状が絶えず変化するため、ある瞬間の質量mを求める手法が考えられず、本公式を用いてエネルギー値(J)を出すことは困難であると判断した。  
したがって、波(単振動)のエネルギーは、振動数fの2乗と振幅Aの2乗に比例することから、各波長における振動数と振幅を読み取り、 $f^2A^2$ と水槽の重さの増減値の相関関係を示すことができると考えた。  
【条件】  
・基準(静時)の重さは16.6kgとする。  
・振幅は、水槽の基準ライン(黒線)から山・谷までの距離とする。  
・ $f^2A^2$ では、谷の振幅を用いることとする。  
→谷は、比較的乱れが小さい曲線状の波形が形成されており、振幅のばらつきが小さいが、山は、水が勢いよく衝突するために、とがった波形が形成され、振幅のばらつきが大きくなってしまふ。したがって、山の振幅では、正確な関係性を示すことが困難であると判断した。  
・振動数fの2乗×振幅Aの2乗 $f^2A^2$ を「エネルギー係数」と呼ぶことにした。

$f^2A^2$ と最大増加量、及び、最大減少量をそれぞれグラフにすると、【図20】【図21】が得られた。



【図20】水槽の重さの最大増加量とエネルギー係数の関係



【図21】水槽の重さの最大減少量とエネルギー係数の関係

【図20】【図21】より、水槽の重さの増加・減少とエネルギー係数は、高い相関関係が得られた。これにより、振動する波のエネルギー係数をe、水槽の重さの増減値をΔNとすると、以下の式で表せることを新たに突き止めた。

$$e = k\Delta N \quad (k: \text{係数})$$

## 結論・展望

- ① 水槽の重さの振動数は、水面波の定常波の振動数の2倍となることを発見した。
- ② 水槽内で定常波が生じている時、水は水槽から力積を受け、その反作用が台秤に余計な負荷として与えていることを突き止めた。
- ③ 水面が振動している時、水槽の重さは静時よりも平均的に大きくなることを発見した。
- ④ 水槽の重さの増加・減少とエネルギー係数には、高い相関関係がある。
- ⑤ 振動する液体の水槽の重さは静止時よりも増加するため、液体の振動を抑制すれば、車両への負荷軽減や運転の安全性向上、タイヤの摩耗による微粒子の排出抑制が期待できる。

## 謝辞、参考文献

本研究を行うにあたって、本校物理科の梶尾滝宏先生、岩山真大先生には、研究活動全般においてご指導・ご助言をいただきました。  
また、熊本県/九州高等学校生徒理科研究発表大会や日本物理学会Jr.セッションなどの大会参加時には、多くの先生・大学教授の方々からご助言をいただきました。  
たくさんの方々によるご指導・ご助言、心より感謝申し上げます。