

QBO 実験と内部重力波の可視化

福岡大学理学部 乙部直人 (Otobe, Naohito)

要旨

赤道上空で観測される QBO は、平均流と波動の相互作用の典型的な例である。赤道上に存在する 2 つの波、西進するヤナイ・マルヤマ波と東進するウォーレス・カウスキー波が上層へ伝わるあいだに運動量を落とし平均流を変化させる。また、平均流は波動の伝わりかたに影響を与える。このように相互作用することが、平均流が約 2 年で西風から東風、そして再び西風へと変わるという現象を作り出している。

このメカニズムにより説明されるという論文が、Lindzen と Holton によって 1968 年に書かれ、1972 年に更新されている。

Plumb と McEwan はこのようなメカニズムで QBO が生じているのか確認するため、室内で水槽を用いて 1978 年に実験をした。その結果、水槽に入射された内部重力波の周期に比べて非常に大きな周期を持っている流れ場の振動を作り出すことに成功し、Holton と Lindzen の説明を実験的に確かめた。

今回は、この水槽実験 (以後 QBO 実験) を追試した。それと同時に QBO 実験中の水槽内を伝わる内部重力波を可視化した。

1 QBO 実験

1.1 実験装置

図 1: 実験装置

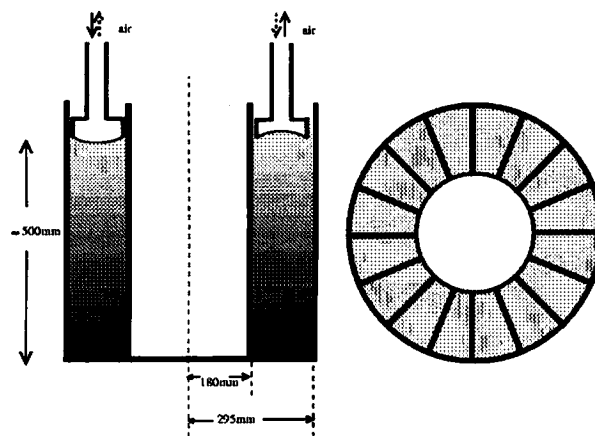


図 1 のような外径 295mm、内径 180mm のドーナツ型円形水槽を使用する。食塩を使い深さ約 500mm の安定成層した塩水を作る。今回使用した成層の強さは Brunt-Väisälä 振動数で約 1.4(/s) 程度である。ここに、図 1 の右図のように 16 室に分けられたドーナツ型のふたをかぶせる。このふたには薄い飴ゴムが張られている。ふたの反対側にはホースにつながれていて、それらは 1 室おきにつながっているため、空気を送り込むと 1 室おきに連動してふくらませたり逆にへこませたりできる。このホースをそれぞれ別のピストンにつなぐことによって張られた膜を空気駆動で振動させ内部重力波を発生させる。この空気を送り込むピストンはコンピュータで制御されており今回は sin 型の定在波を発生させている。

表 1: 実験結果 Amplitude は造波装置のピストンの振幅, QBO 周期は流れを定点で観測して出した値

$\omega (/s)$	Amplitude (cm)	QBO 周期 (min)
0.39	13	45
0.4	10	—
0.4	11	—
0.4	12	70,90,120 ^a
0.4	13	50,55,55,70,80,80,90
0.42	10	—
0.42	12	—
0.42	13	80
0.5	13	—,240

^a減衰して半周期で終了

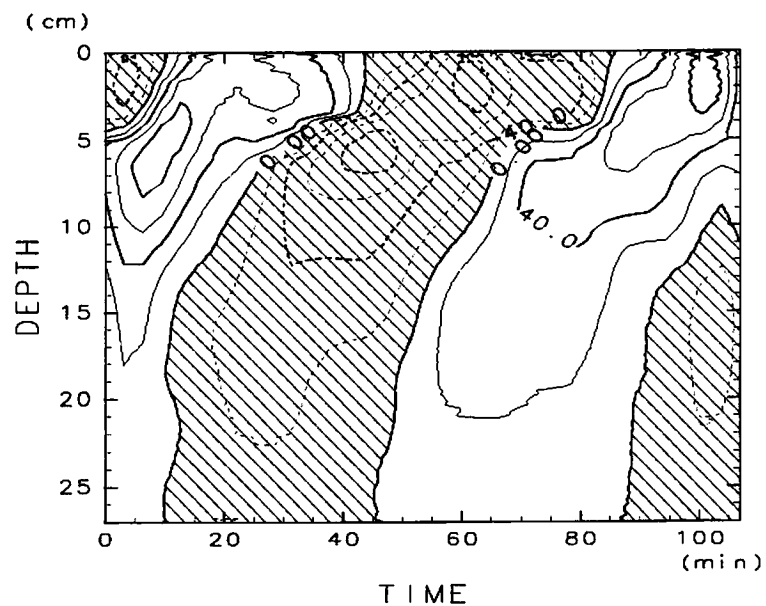
1.2 実験結果

ω や膜の振幅をいろいろ変えて実験を行った。その結果を表 1 に示しておく。膜の実際の振幅は、正確には計れないため振幅は膜へ空気を送り込んでいるピストンの振幅である。また参考として、膜の振幅は約 6–7mm 程度である。

1.3 流れ

ビデオを使い各時間毎の浮きの動きを読み取る。そのようにして、より細かく流速データをとった例を示しておく。この例における振幅はピストン 13cm で振動数は $0.4(s^{-1})$ である。

図 2: 平均流の時間変化



波源である上部から遠い下方より流速の反転が生じている様子が見て取られる。流れの反転周期は、およそ 80 分程度であった。

2 流れの中での内部重力波の可視化

2.1 モアレ法

よく似た周期の縞模様やトーンパターンを重ねるとき角度に応じて本来は存在しない模様があらわれる。この現象はモアレとよばれており、意図的に作ることも難しいものではない。これを利用して、透明な塩水の中の波を可視化する。

ここではその方法を具体的に説明する。

2.1.1 モアレ源

図 3 の様に水槽の 1 番内側に中に縞模様の板を入れる。今回使用したのは 22.5Line/in , 50% の水平の縞である。この縞模様を水槽越しに見ると、水槽内が安定成層している液体であれば縞模様は歪んでみえるが、依然として平行な縞模様を保っている。さらに、その成層がリニアであったとすると平行な縞模様の間隔も一定になる。しかし、水槽内の流体の成層に擾乱が生じている場合には平行な縞模様が曲がってみえる。

水槽が直方体の場合には水槽の前方にカメラとの距離に応じた縞模様を準備し、内部に擾乱が存在しないときにはモアレが生じないように調整しておくことで、波を可視化することができるが、円筒形的水槽ではそもそもモアレが生じないように調整することが困難である。

そこで、一枚のストライプパターンだけで、モアレを生じさせる方法を考案し、内部重力波の可視化を行った。

2.1.2 写真

通常の場合、波によってゆがめられたものと通常のままの縞模様とが重なってモアレを生じさせる。今回は、通常のを準備することができないので、歪んだ画像だけからモアレを生じさせなくてはならない。

造波装置と連動してお互いに逆位相になっている瞬間の写真を 2 重露光で撮る。この 2 枚を合成してモアレを生じさせることを考える。

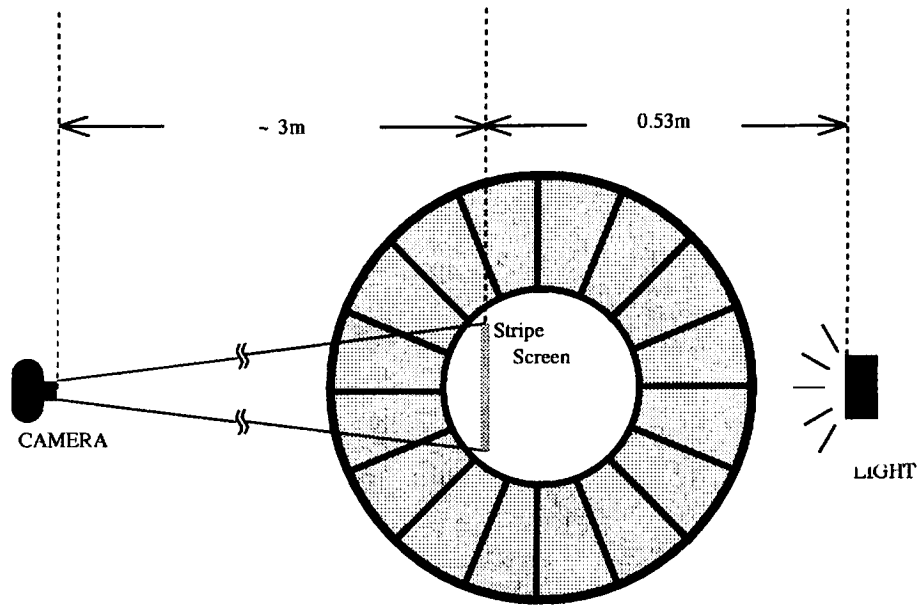
赤いフラッシュと青いフラッシュを使用しデジタル処理によって分離できるようにしておく。ここで、1 枚のフィルムに同時に露光させるのは位置合わせに非常にセンシティブであるからである。

2.1.3 デジタル処理

2 重写しになっている写真をまず、3 色*256 階調のデジタルデータとして取り込んだのちに赤と青のプレーンに分ける。この 2 枚がそれぞれ、互いに逆位相な状態のデータである。フラッシュのむらやハイパスフィルターを通して消した後、それぞれの強さの差の絶対値を取ると、もとの縞模様と比べて大きなスケールの模様が見える。

ここで、擾乱による歪みだけが取り出されたことになる。ただし、単純な密度の揺らぎの大きさ ρ' ではなく、 $\partial\rho'/\partial z$ に比例したコンターマップになっている。

図 3: 撮影装置の模式図



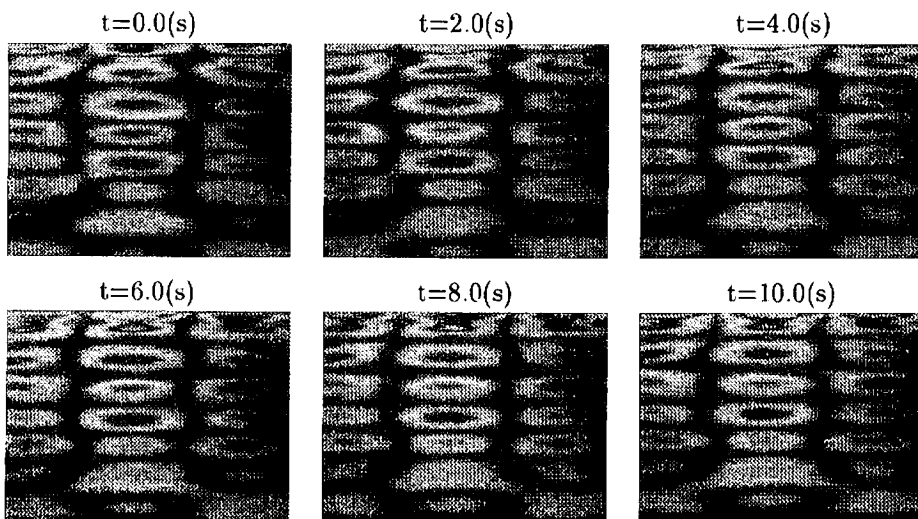
2.2 結果

モアレ法によって波面が伝わっていく様子がえられた。そのうち特徴的な2種類を示す。

この2つの例については内部重力波の振動数に比べて写真を取る間隔の方が短くなる。モアレを作って波面を見るためには、写真をとる間隔は波の振動数の半分よりも長くなくてはならぬが、それでは波面を見ることはできない。

そこで、短い時間の間には流速は変化しないものとして、次の波面の同位相のものを使うことで波面が伝わっていく様子を見ることとする。

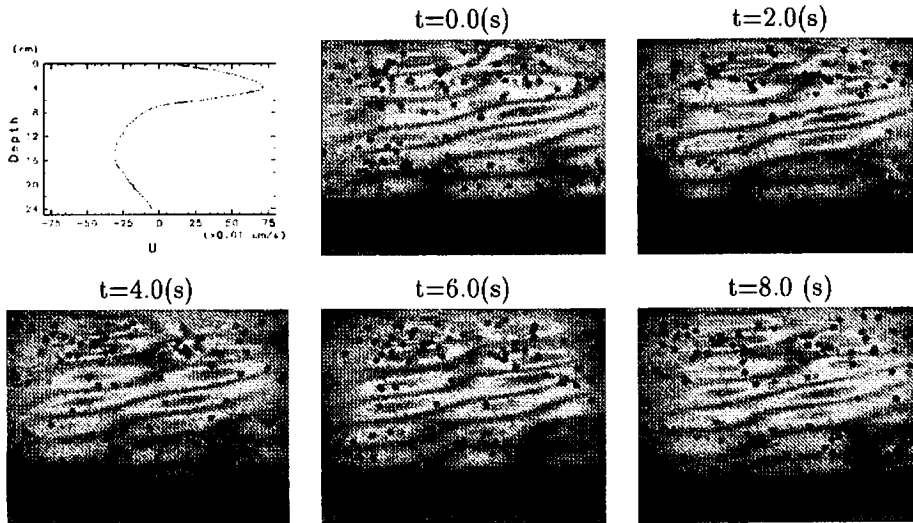
2.2.1 流れがないとき



まず、一つめは流れが存在しないときの内部重力波の様子である。定在波が下から上へと伝播しているこ

とがわかる。

2.2.2 シアーがあるとき



2つめは、平均流が存在する場合である。平均流により内部重力波がゆがめられ、また、選択的に伝播している様子がわかる。流れの最大になるあたりで、同じ向きの位相速度を持つ波が減衰して、下方には逆の位相速度を持つ波のみが主に伝播していることがわかる。

実験パラメータは表 2 に示しておく。

表 2: 実験時に使用した実験パラメータ

$$\begin{aligned}\omega &= 0.4 (/s) \\ T &= 15.7 (s) \\ c^a &= 1.18 (\text{cm/s})\end{aligned}$$

^aCritical level

3 結論

3.1 QBO 実験

実験は成功し、QBO に似た現象は確認された。実験パラメータは十分調べつくしたとはいえないが、それでも幾つかのことは確認することができる。

1. 膜の振幅が小さいといけない
2. ω が大きいといけない

まず、最初だがこれは十分なエネルギーを持っている必要があるということである。これは十分に予想通りのことである。ただし、今回は装置の都合上これ以上大きな振幅を与えられなかったが、あまり大きな波は造波装置の幾何学的な制限により上限はあるものと思われる。つまり入射した波がふくらんだ膜の影響を受ける可能性があるということである。

次に、入射波の振動数 ω が、変化することによる影響であるがこれは、群速度の向きが変わることによる影響である。波が運ぶ運動エネルギーが ω が大きいと波の群速度の方向がより鉛直下向きへと立ってしまい、水槽の深くにまで到達するようになる。その結果運動エネルギーが加速に必要なだけ供給されなくなり、平均流が減衰し、QBO 様の振動が起きないと思われる。

3.2 内部重力波の可視化

モアレ法により内部重力波は可視化された。これをみると、平均流があるとその平均流に流されるものの、2つある内部重力波はともに、下のほうにまで伝わっているように見える。ただし、減衰すると予想される向きの位相速度を持つ波は、振幅が小さくなっていることが確認された。

参考文献

- [1] Plumb, R.A., 1977: The interaction of two internal waves with the mean flow : Implications for the theory of the quasi-biennial oscillation. *J. Atmos. Sci.*, 34, 1847–1858
- [2] Plumb, R.A., and A.D. McEwan, 1978: The instability of a forced standing wave in a viscous stratified fluid : A laboratory analogue of the quasi-biennial oscillation. *J. Atmos. Sci.*, 35, 1827–1839
- [3] 酒井 敏, 地球流体実験集, http://dennou.gaia.h.kyoto-u.ac.jp/library/gfd_exp/index.htm
- [4] 乙部直人, 酒井敏, 余田成男, 塩谷雅人, 1998: QBO 実験における内部重力波の可視化と WKB 解析, 流れマルチメディア, http://nagare.gaia.h.kyoto-u.ac.jp/mm/98/otobe/index_ja.htm