

回転円筒水槽内の流れと温度分布* の液晶による立体的観測

田 島 俊 彦**・川 平 浩 二***

要 旨

円筒水槽の半径方向に温度差を与えた流体を回転させ流体の流速や温度分布を測定する回転円筒水槽実験において、流れと温度の可視化のためにカイラルネマチック液晶を用いて流速と温度分布の立体的観測方法を見つけた。三重水槽を硬質ガラスで作し、暗室の中で横から水平スリット光を当て上から回転円盤に固定されたビデオカメラで撮影すると、液晶粒子の動きから流速が、色から温度が同時に観測出来た。水平スリット光を上下動させて流体の色々な高さの断面を撮影すると、流れと温度分布の三次元的構造を調べられる。実験の結果、極めて鮮明な映像がとれて、この方法で流れと温度の立体的構造を同時に観測することが可能であることが分かった。ここでは、実験方法の解説と初期的実験結果について報告する。

1. はじめに

Hide (1953, 1958) によって始められた回転円筒水槽実験では、これまでに実験装置の改良とともに多くの測定結果が報告され解析されている (宇加治・玉木1985, 瓜生1988, 木村1979, 1989)。代表的な実験方法としては、観測する流体の表面にアルミ粉を浮かべその動きを追って流体の流れを観測するものである。この方法では、流体の表面上の流れしか見ることが出来ない。流体内の流れの模様を見るには、染料を注入して観測したり、ポリスチレンの微粒子を流体内に浮遊させスリット光を用いて各層の流れを微粒子の運動から観測する方法等がある (Douglas *et al.*, 1972, Hide and Mason, 1975)。一方、温度については、サーミスタ等の温度プローブを流体内に適当に配置して直接測定するという方法が取られている (Kaiser, 1970, Ketchum, 1972, Hide *et al.*, 1977, Matsuwo *et al.*, 1976, 1977, Pfeffer *et al.*, 1980)。この方法は、定量的に精度の良いデータが得ら

れ、また計算機による解析も出来る利点がある反面、たくさんの温度プローブを挿入すると流れを乱してしまうおそれがある。

我々は、流体の流れと温度を同時に可視化する手段として、カイラルネマチック液晶 (佐藤 1984) に注目した。この液晶は温度で色が変化し、その反応速度は1/100秒以下である。また、水の比重に極めて近い比重の液晶を得ることができ、水に入ると多くの液晶粒子が長時間水中に浮遊している。これらの性質は、この液晶を流体に注入すると、液晶粒子の動きと色から流速と温度分布の同時観測が可能であることを示している。

白色光を流体に横から当てる必要性から三重水槽を硬質ガラスで用意した。粒子の大きさが30~50 μm のこの液晶を水に入れ、暗室の中で横から水平スリット光を当てると、光が当たる水平断面の液晶粒子の動きから流速が、色から温度が測定出来た。こうして、水平スリット光を上下動させて色々な高さの水平断面を回転円盤に固定されたビデオカメラで撮影すると、流れと温度分布の三次元的構造を調べられる。

実験の結果、予想以上に鮮明な映像がとれて、流れと温度の立体的構造の同時観測が可能となった。こうして得られるビデオ化された映像は、一定の定量的測定を可能にするが、実感として把握できる定性的な観測に優れ、視覚教材としても有効であると考えられる。ここでは、実験方法の解説と初期的実験結果及び液晶を用いる

* Three dimensional measurement of fluid velocity and temperature distribution in the rotating annulus experiment by means of liquid crystae.

** Toshihiko Tajima, 国立富山工業高等専門学校

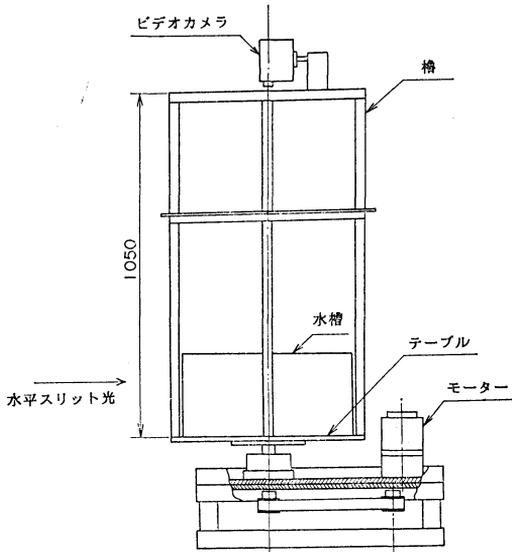
*** Kouji Kawahira, 国立富山工業高等専門学校

——1990年12月14日受領——

——1991年4月11日受理——

第1表 カイラルネマチック
液晶の特性

カイラルネマチック液晶	
直径	30~50 μm
感温範囲	19.5~32.0°C
温度と色の関係	
19.5°C 以下	無色
19.5~20.5°C	赤色
20.5~22.0°C	緑色
22.0~32.0°C	青色
32.0°C 以上	無色



第1図 実験装置全体図

点での問題点について報告する。

2. 実験装置

実験装置の全体図は第1図に示した。この装置には温度調節のための装置はない。ビデオカメラ(ビクターGR-S55)は回転円盤の上に組まれた槽の上に固定され、水槽を上から撮影する。又、水槽の横には水平なスリット光を300Wのハロゲンライト2個で投光するプロジェクターを置いてある。水平スリットは上下に移動が可能である。三重水槽は硬質ガラスで作られ、その寸法は第2図に示した。この実験で用いたカイラルネマチック液晶の特性については、第1表に示した。

3. 実験内容

観測する中間槽の水の深さ d が10, 15cmの場合についてそれぞれ回転角速度 Ω が1.05 rad/s (10 rpm), 2.10 rad/s (20 rpm)で実験を行った。実験開始時に、外側の槽に約80°Cの熱水、内側の槽には氷水を入れるが、今回の装置では温度調節していないため、特に外側の高温槽の温度が比較的速く下がり、約40°C位になってしまう。一方内側の槽の氷水の温度は比較的安定していて約5~6°Cに落ち着いている。それにもかかわらず、ビデオカメラで撮影された映像で見ると、中間槽の水の流れや温度分布はかなり安定している。

観測される水に入れる液晶の量は極めて微妙で、何度も繰返し試みて鮮明な色が得られる量を探した。水に液

晶を多量に入れると、水が白く濁り、水中の液晶の色を鮮明にとらえることが出来ない。水に混合されている液晶を用いているため、注入する液晶の適量を表現するのはむづかしい。ここでは、水が白く濁らない程度まで極めて少量づつ加えていき、鮮明な色が得られるまで注入する方法を取った。

実験は暗室で行われ、水平スリット光をいろいろな高さ h (水槽の底から計って)に取り、ビデオカメラにより撮影した。この時用いたスリット光の幅は水槽に当たった所で計っておよそ5mmである。

4. 実験結果

写真1から写真5までは、ビデオカメラにより撮影した画面がどのようなものであるかを示すために、テレビで再生した画面をカメラで撮影した写真である。この写真では液晶の粒子を識別するのは多少困難であるが、テレビの画面では極めてはっきりと粒子を追うことができる。従って、流れについては、蛇行するジェット流、低温領域や高温領域の渦の運動はもちろん、ジェット流の外側の流れの一部が低温領域の渦に巻き込まれる等の細かい運動まで見ることが出来る。写真1から写真3までは波動状態の写真である。例えば写真3では、内壁側に19.5°C~22.0°C(赤色から緑色)の渦の低温領域があり、ジェット流を挟んで外側に22.0°C以上の渦の高温領域があるのがはっきりと分かる。写真4は波数6の波動状態(写真2)を形成する直前の過渡の状態である。この写真から、22.0°C以上の高温領域(青色)と19.5°C以下の低温領域(無色、ただし、回転円盤が黒色のため黒く見えている。)とがはっきり分離し、高温領域と低温領域にそれぞれ6個の渦を形成しながら波動状態に移行していく様子が分かる。テレビ画面で連続的に観察すると、渦が形成される過程や、6つの波数の安

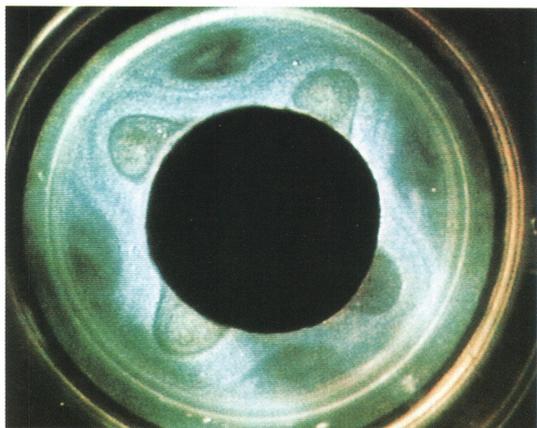


写真1 $d=10\text{cm}$, $\Omega=1.05\text{rad/s}$ の場合で, $h=6\text{cm}$ 水平断面における波動状態

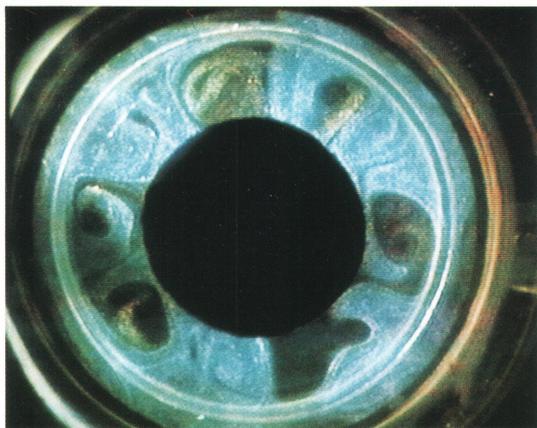


写真4 $d=10\text{cm}$, $\Omega=2.10\text{rad/s}$ の場合で, $h=8\text{cm}$ 水平断面における過渡的状态

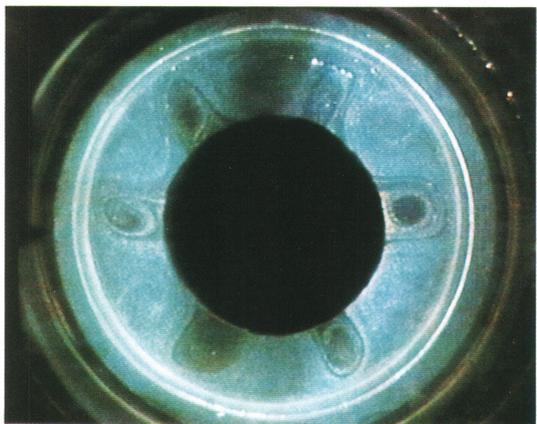


写真2 $d=10\text{cm}$, $\Omega=2.10\text{rad/s}$ の場合で, $h=8\text{cm}$ 水平断面における波動状態

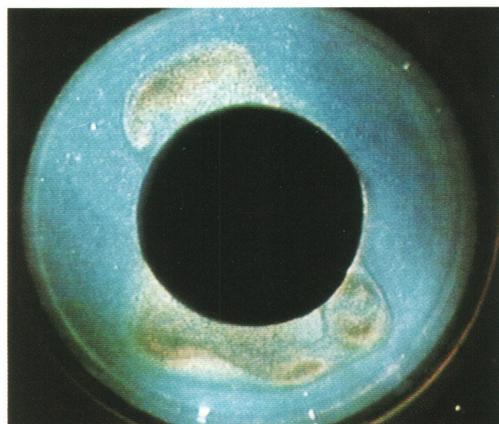


写真5 $d=15\text{cm}$, $\Omega=1.05\text{rad/s}$ の場合で, $h=14\text{cm}$ 水平断面における過渡的状态

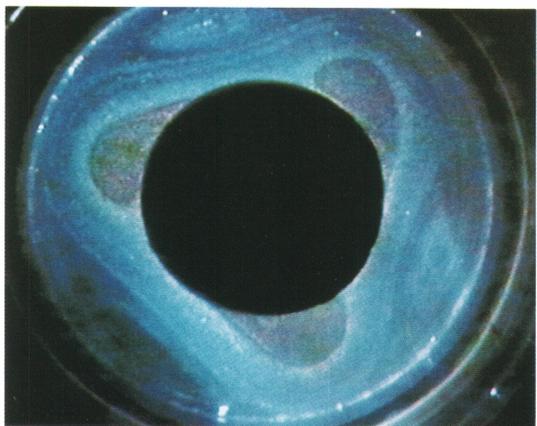


写真3 $d=15\text{cm}$, $\Omega=1.05\text{rad/s}$ の場合で, $h=8\text{cm}$ 水平断面における波動状態

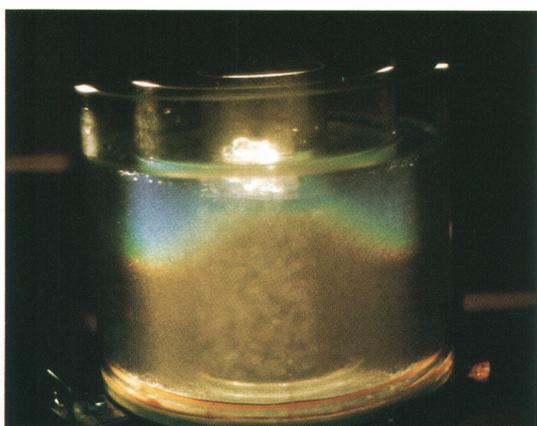
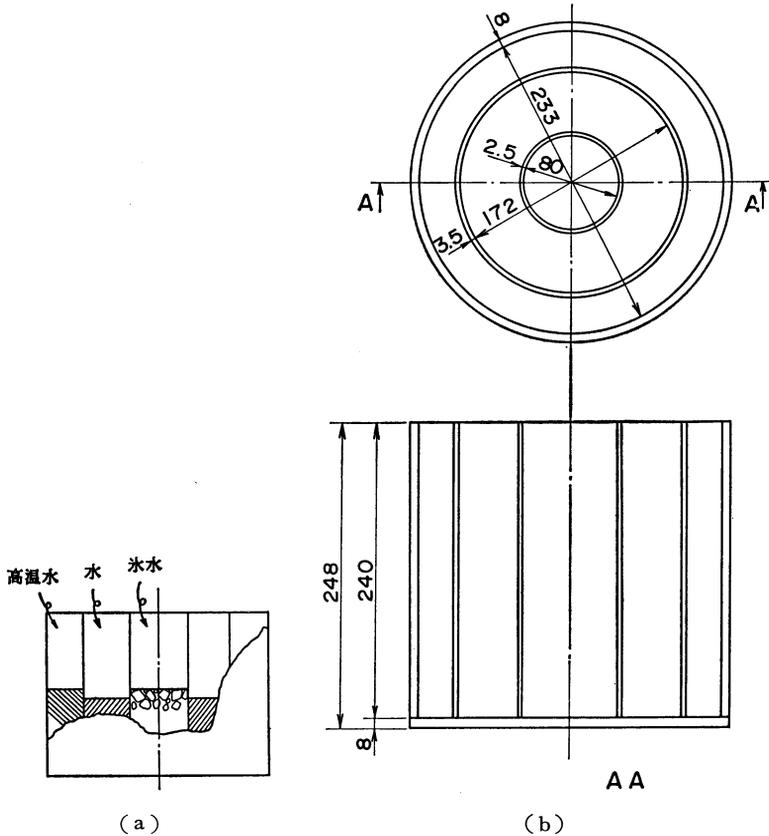


写真6 $d=15\text{cm}$, $\Omega=1.05\text{rad/s}$ の場合の垂直断面



第2図 水槽, (a) 全体図, (b) 寸法 (単位: mm)

定状態に落ち着く様子が見れる。写真5は波数3の波動状態(写真3)を形成する直前の過渡的状态である。約 20°C の低温領域(赤色)がゆっくりと波形を形成していく。また、過渡的現象として、波数が転移する場面も詳細に見ることが出来る。

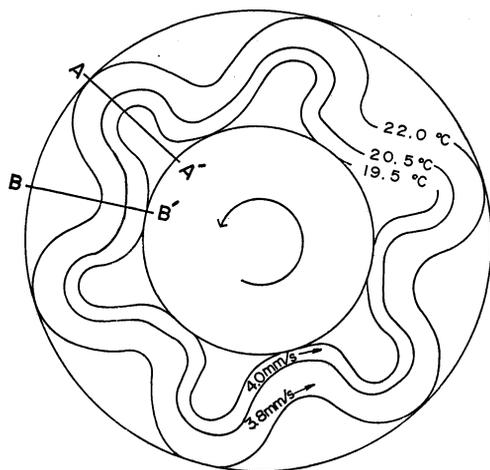
一方、液晶の色から判断する温度の観測についても、写真を見て分かるように極めてはっきりと色を識別出来る。しかし、第1表から分かるように、今回用いた液晶はその感温範囲約 12°C の中でそのほとんどの高温側約 10°C の範囲で青色を示す。もちろん、詳細に見れば、同じ青色でも高温になればなるほど暗い青になる。しかし、青色の明暗から温度を読み取るのは極めてむづかしい。従って、今回用いた液晶ではせいぜい $2\sim 3^{\circ}\text{C}$ の幅の温度分布しか有効に測定できない。このことは、この種の液晶に共通の性質から来ることで、液晶を用いて温度分布を測定する場合の難点であると言える。

第3図と第4図は、ここの実験で行われた水深と回転

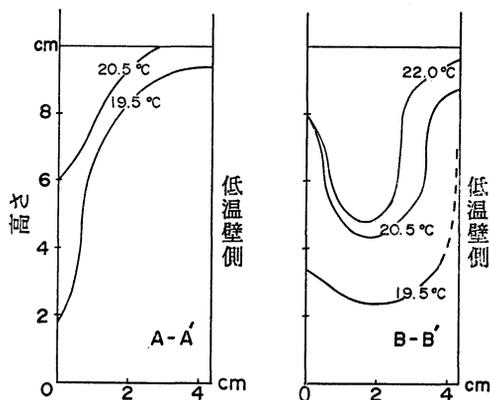
数での定常流の定量的解析の中から、ある高さの断面における流速と温度の等値線及びある鉛直断面の温度分布を二例示したものである。特に、鉛直断面の温度分布は水平断面図に示されたA-A', B-B'線を鉛直に切った断面における分布である。第2表は以上の結果を数値の面だけで表にまとめたものである。この表の最下段におけるドリフト角速度とは、波形全体が水槽に相対的に回転円盤と同じ方向に回転していて、その回転角速度を示す。この特徴は、西風の帯状風に流される傾圧不安定波の様子と類似しており、これまでの回転水槽実験で確認されている(瓜生, 1988)。

5. まとめ

今回採用した実験方法の特徴は、①硬質ガラスの水槽、②液晶を流れと温度の可視化に用いたこと、③スリット光を用いて色々な断面を、④回転円盤に固定したS-VHSビデオカメラで撮影したことにある。この方法により、流体の運動と温度を立体的に実時間で運動状

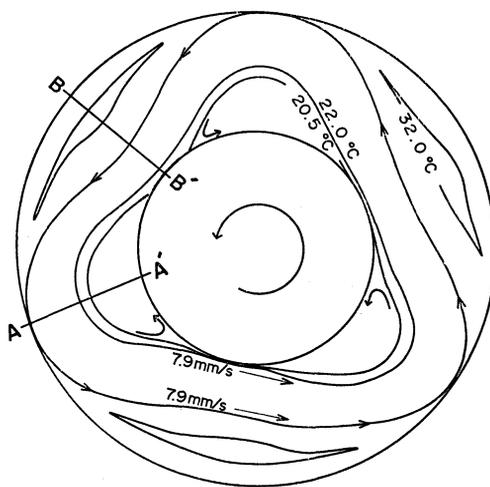


第3図 (a)

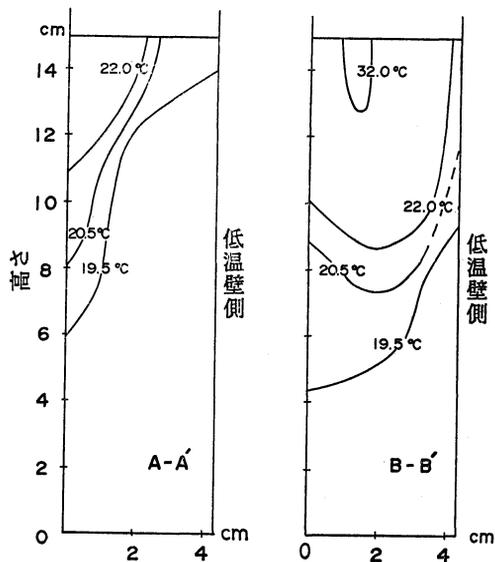


第3図 (b)

第3図 $d=10\text{ cm}$, $\Omega=2.10\text{ rad/s}$, (a) $h=8\text{ cm}$ 水平断面の流速と等温線, (b) 垂直断面の等温線



第4図 (a)



第4図 (b)

第4図 $d=15\text{ cm}$, $\Omega=1.05\text{ rad/s}$, (a) $h=14\text{ cm}$ 水平断面の流速と等温線, (b) 垂直断面の等温線

態で観測することが出来、また、何度でも繰返し再生して詳細に調べる事が可能となった。特に、従来困難であった、水中の流れと温度分布を同時に見る事が出来るようになったことは大きい前進である。今回の実験方法は、これまで調べられてきた流れの構造や力学をビデオの動的映像として詳細に実証することを可能にし、同時に、ビデオ化された映像は視覚教材として大気大循環等の理解のために役立つであろう。

液晶を用いるこの方法の難点は、第4章で述べたように、液晶の有効感温範囲が小さいことである。我々は現在この難点を解決する方法を実験中であるが、少なくとも約 2°C の精度でなら有効感温範囲をかなり広げることが出来ることが分かってきた。従って、液晶を用いる方法は、温度プローブを用いる場合に比べて精度は悪いが、定量的な面においても解析に値するデータを出せる実験方法になると期待できる。

第2表 測定値のまとめ

(流速はジェット流の両端の流速を示し、測定が困難であった所は数値が与えられていない。)

項目	水深	1.05 rad/s (10 rpm)			2.10 rad/s (20 rpm)			
		高さ cm	内側 mm/s	外側 mm/s	高さ cm	内側 mm/s	外側 mm/s	
波数	10 cm	4			5			
	15 cm	3			4			
流速	10 cm	8	6.1	4.8	8	4.0	3.8	
		6	6.1	6.1	6	4.0	3.0	
		4	3.0	2.2	4	---	---	
	15 cm	14	7.9	7.9	14	5.9	5.0	
		12	7.2	7.1	12	5.2	4.7	
		10	6.6	6.2	10	5.8	4.7	
		8	6.1	5.5	8	4.6	2.8	
	6	---	2.6	6	1.9	1.3		
	ドリフト 角速度	10 cm	0.021 rad/s			0.018 rad/s		
		15 cm	0.032 rad/s			0.010 rad/s		

この論文の方法を用いて液体の垂直断面の流れと温度分布を直接観測することも可能である。スリット光を上から垂直に流体に当て横からビデオカメラで撮影すると流体の垂直断面の様子を直接見ることが出来る。この一例を写真6に示した。このときのスリット光は内壁と外壁の中間の位置にある。低温領域と高温領域の境界を示す22°Cの等温線が水平断面で見たとときの低温領域の凸部で上に盛り上っている(写真6参照)。ビデオ撮影による垂直断面の連続的観察から、流体の上から見てジェット流が安定して見える状態で、この盛り上がりが過渡的ではあるが周期的に上下運動しているのが確認されている。この温度分布の上下運動はいずれは収まっていくのであるが、周期的に長く(15分以上)続く点は興味のあるところである。この現象を含め、垂直断面の観測結果の詳細については、次の論文で報告したい。

我々のこれまでの課題は、液晶を用いて立体的観測方法を作ることにあつた。そのため、ここの実験では、高温槽、低温槽の温度制御等の観測流体に対する重要な境界条件の設定をすることが考えられていない。そのため、我々の現在の実験装置では、解析に値する実験データを数値として得ることは出来ない。今後新しい本格的実験装置の製作とともにこの点を考慮していくつもりである。

6. 謝 辞

この論文を書くにあたり、実験装置の製作と実験に協力していただいた、岩本謙治(綿不二越)、上野 崇(日本アイ・ピー・エム)、塚田泰弘(国際電気)、塚本好孝

(オリンパス光学)、畑崎晃盛(日本電気エンジニアリング)、牧野安良(三菱電気)、山崎 明(長岡技術科学大学)の方々特に感謝します。

文 献

Douglas, H.A., R. Hide and P.J. Mason, 1972: An investigation of the structure of baroclinic waves using three-level streak photography. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 98, 247-263.

Hide, R., 1953: Some experiments on thermal convection in a rotating liquid. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 79, 161.

———, 1958: An experimental study of thermal convection in a rotating fluid. *Phil. Trans. Roy. Soc. London, A* 250, 441-478.

———, and P.J. Mason, 1975: Sloping convection in a rotating fluid. *Adv. Phys.*, 24, 47-100.

———, and R.A. Plumb, 1977: Thermal convection in a rotating fluid subject to a horizontal temperature gradient: Spatial and temporal characteristics of fully developed baroclinic waves. *J. Atmos. Sci.*, 34, 930-950.

Kaiser, J.A.C., 1970: Rotating deep annulus convection part 2. Wave instabilities, vertical stratification and associated theories. *Tellus*, 22, 275-287.

Ketchum, C.B., 1972: An experimental study of baroclinic annulus waves at large Taylor number. *J. Atmos. Sci.*, 29, 665-679.

木村竜治, 1979: 流れの科学, 東海大学出版会.

———, 1989: 流れをはかる, 日本規格協会.

Matsuwo, N., M. Uryu and R. Sawada, 1976: An experimental study on the internal structures of baroclinic waves in a rotating annulus: Part I. Thermal structure. *J. Meteor. Soc. Japan* 54, 339-350.

———, and ———, 1977: An experimental study on the internal structure of baroclinic waves in a rotating annulus: Part II. Dynamical structure. *J. Meteor. Soc. Japan* 55, 248-259.

Pfeffer, R.L., G. Buzyna and R. Kung, 1980: Time-dependent modes of behavior of thermally driven rotating fluids. *J. Atmos. Sci.*, 37, 2129-2149.

佐藤 進, 1984: 液晶とその応用, 産業図書株式会社.

宇加治一雄・玉木克美, 1985: 傾圧不安定波の回転水槽実験. 気象研究ノート, 第152号, 90-104.

瓜生道也, 1988: II部 室内実験, 菊地勝弘・瓜生道也・北林興二著, 実験気象学入門. 第二期気象学のプロムナード 10, 東京堂出版, 101-143.