

流体実験による渦巻銀河の渦状構造の研究

津田裕也

理工学研究科 物理学専攻 修士課程

11M1002

要旨

本研究は宇宙における流体を実験室規模で再現するシミュレーション研究である。論文中ではこの実験方法を LEC: Laboratory Experiment of Cosmic Hydrodynamics と呼ぶ。この造語は 1980 年代祖父江義明と藤本光昭によって提唱された。この LEC を使い本論文では渦巻銀河の渦状構造の研究を行った。以後 LEC によって再現された渦巻銀河を LEC 銀河と呼ぶことにする、また研究にともなって開発した流体実験装置を LEC 装置と仮称する。

本論文では渦巻銀河の力学的構造や進化過程に焦点をあて、まだ確立されていない銀河の進化論の解明を目的としている。

— 目次 —

要旨 P. 1

I 目的 P. 4

II 銀河について P. 5

II.1 銀河 P.5

II.2 渦巻銀河 P.6

II.3 渦巻銀河の構造 P.7

II.4 巻き込みの困難 P.8

II.5 渦巻銀河の密度波理論 P.10

II.6 渦巻銀河の衝撃波理論 P.10

II.7 渦巻銀河の形態分類 P.11

II.8 グランドデザインアーム銀河
とフロキュレント銀河 P.12

II.9 渦巻銀河の未解決問題 P.13

III 自然現象の中の渦について P. 14

III.1 鳴門の渦と台風 P.14

III.2 自然界における様々な渦 P.14

IV 理論 P. 15

IV.1 銀河を流体近似する方法 P.15

IV.2 実験装置の中の流体 P.15

V 実験装置 P. 10

V.1 必要とされる装置の機能 P.18

V.2 1号機 P.18

V.3 2号機 P.24

V.4 3号機 P.26

VI 実験方法と実験の様子 P. 27

VI.1 1号機 P.27

VI.2 2号機 P.39

VI.3 3号機 P.48

VII 実験結果と考察 P. 64

VII.1 1号機 P.64

VII.2 2号機 P.66

VII.3 3号機 P.69

VIII まとめ P. 71

IX 今後 P. 71

X 謝辞 P. 72

I X 参考 P. 73

I 目的

銀河における渦状の構造は度々海上面にできる渦や台風などといった現象に似ているという紹介がされる.実際に我々の住む銀河や近傍の銀河も観測によって渦状の構造が確認されている.今日まで銀河の渦状構造について様々なアプローチによる研究が成されてきたが,銀河の始まりから終わり,またその構造全体を記述するような定説は確立されていない.

そこで本研究では,実際に実験室内に定常的な渦状構造を発生させる水槽を設け,その水槽内の渦状構造を観察することで,現在描かれている銀河構造の理解に役立てる.また水槽内の渦状構造から,銀河の力学的構造の理解に適用できる現象を探すことを行った.

まずII章において,これまでなされてきた渦巻銀河についての理解とその未解決の問題についてふれる.III章では流体の中の渦現象について記述し,IV章でそれら銀河の渦巻と自然現象の中の渦を比較するための理論について記述する.

V章からは本研究のために制作した流体実験装置についてふれる.V章でIV章までの理論をどのようにして実験装置で再現するか記述し,VI章で理論にもとづき行った実験の結果を示す.そしてVII章でこれらの実験から得られた結果から考えられる渦巻銀河の新たな知見について考察する.

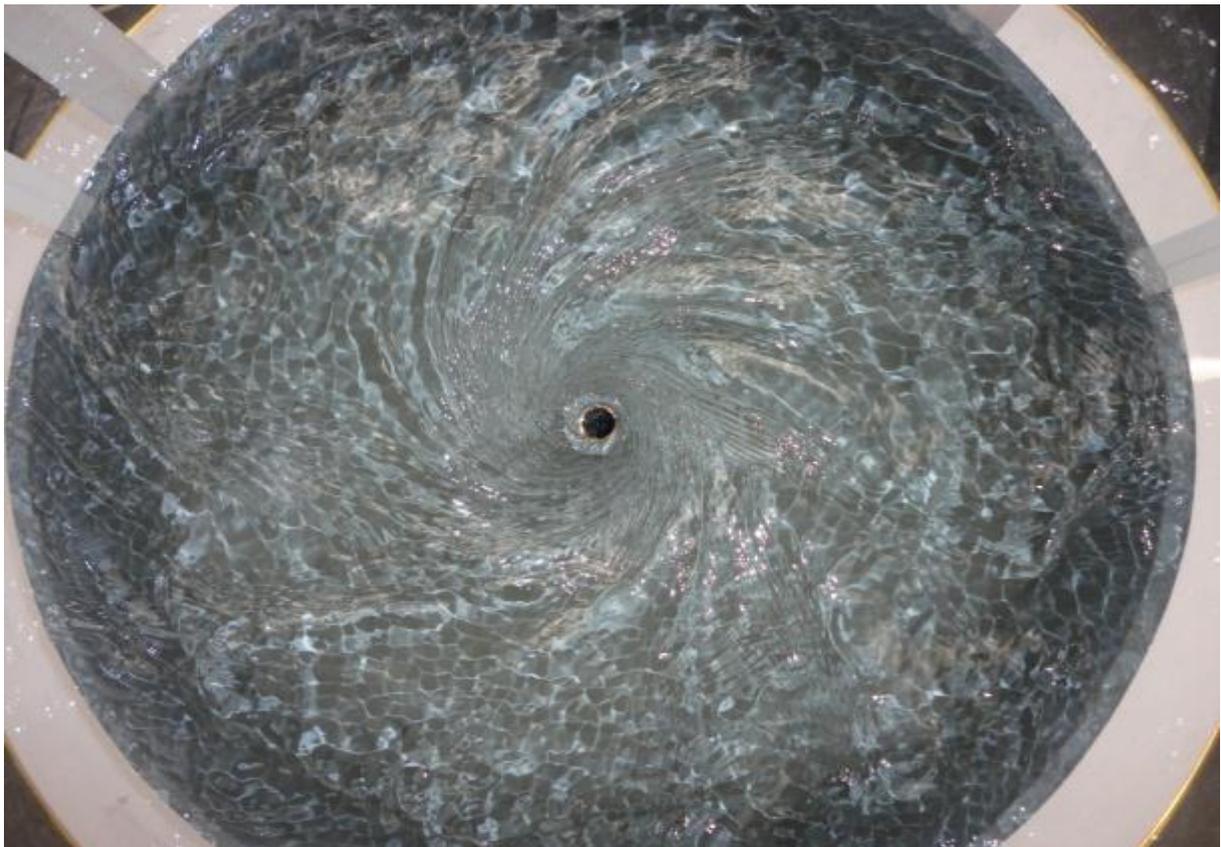


図.1 円形の水槽の中に発生する渦巻模様の表面波

II 銀河について

本論に入る前に銀河の基礎的な理解をまとめる。

II.1 銀河

銀河とは無数の星の集団のことであり,形成している星の数は10億個から1兆個とされている.我々の住む太陽系も大きな銀河構造の中にあり,我々の属する銀河を単に銀河系と呼ぶ.銀河系の隣にはM31,アンドロメダ星雲があり,このアンドロメダ星雲も銀河である.

銀河はそれぞれ様々な形をしており,規模や形によって分類され最も一般的な分類図としてハッブル分類が知られている.



図.2 我々の銀河系の隣の銀河 アンドロメダ星雲

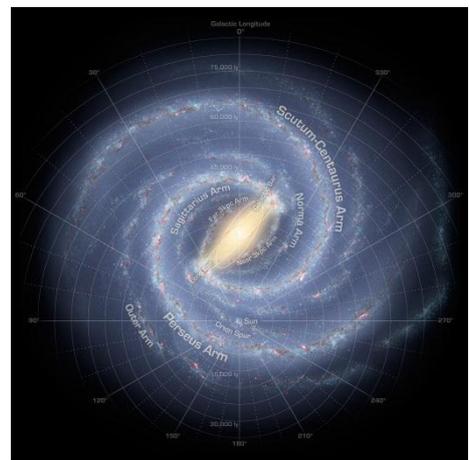


図.3 銀河系の俯瞰図(想像図)



図.4 おとめ座銀河団の中の銀河達 画像中心は楕円銀河M86 (NGC4406)

II.2 渦巻銀河

様々な銀河の中でとくに本研究に関連する銀河が渦状構造を持つ渦巻銀河である.代表的な渦巻銀河として NGC5194(M51)画像を示す.



図.7 二本の卓越した渦状腕を持つ M51

銀河系の隣アンドロメダ星雲(図.2)も,この渦状構造を持っていることを直接観測することができ.また我々の銀河系(図.3)も同じ渦状構造を持った銀河であることが電波による中性水素ガスの分布の観測などから知られている.

II.3 渦巻銀河の構造

銀河には大きく分けて5つの構造がある.

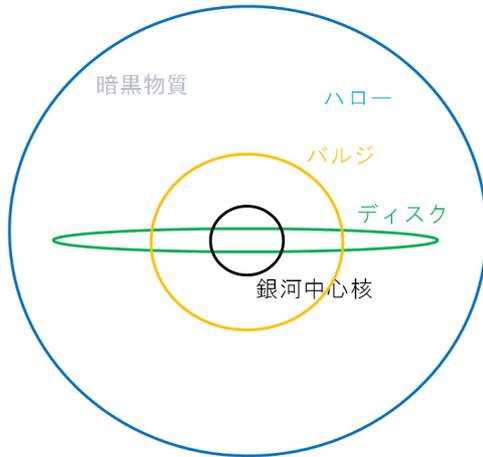


図.5 円盤銀河の構造

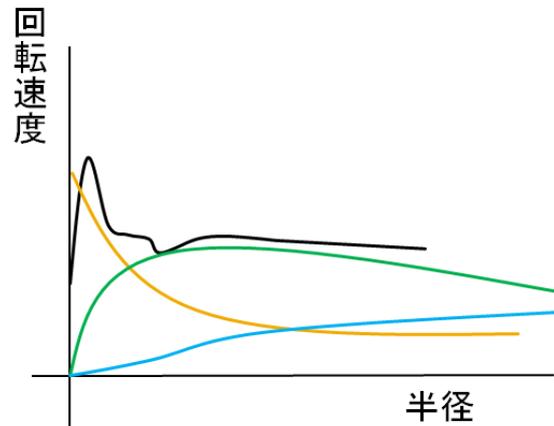


図.6 各構造の半径方向の回転速度の変化

規模の小さい順に銀河中心核,バルジ,ディスク,ハロー,そしてこれらとは別に暗黒物質と呼ばれる質量が銀河の構造を形成していると考えられている.

本研究の対象である渦状構造は,この中のディスク部分に当たる.ディスクはその名の通り厚さの薄い円盤で,大部分が星で形成されている.太陽系もディスク上にあり比較的外側,中心から8kpcのところにある.

ディスクを形成している物質は大部分が星で,残り数パーセントはガスである.個々の星は円軌道に近い軌道で中心核まわりをまわっており,これによってディスク全体が中心核まわりを回っていることになり,星はそのまわりにランダム運動していると見ることができる.

星やガスのランダム運動の速度はディスクの回転速度と比べて小さいので,ディスクの構造は,回転による遠心力と中心方向に向かう重力とのつり合いで決まっているという近似を置くことができる.

II.4 巻き込みの困難

この渦状構造は二本の渦状に巻き込んだ腕によってできている。この腕を考えるとときに初めにぶつかる問題として「巻き込みのジレンマ」が挙げられる。

ディスクが回転している間、腕はいつも同じ星やガスで形成されているわけではないと考えられる。これはディスクが微分回転をしているためで、外側が一回転する間に内側が何回転もしてしまうのである。

しかし、太陽近傍の回転周期は観測により三億年ほどと知られており、銀河の年齢が約百億年であるため、これまでに何十回転もしているはずであり、内側と外側の回転のズレによって銀河の腕は非常に固く巻き込まれてしまっているはずである。しかし実際にはそうはなっていない(図.8)、このジレンマを巻き込みの困難と呼ぶ。

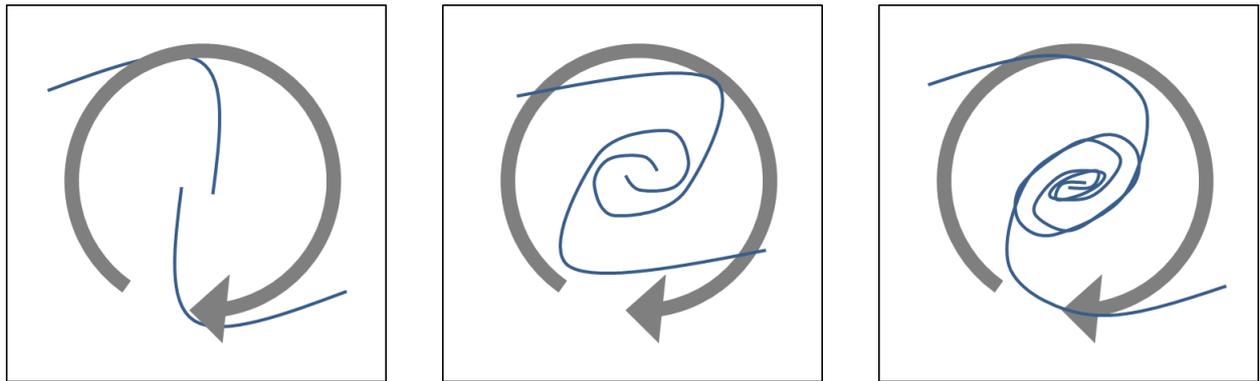


図.7 巻き込みの困難 外側より内側の回転速度が速いので、やがて中心がきつく巻き込まれてしまう。



図.8 我々の銀河系に近いM33 理論的には何十回転もしているはずなので中心は巻き込まれているはずだが、実際はそうはなっていない。

この困難は、渦状腕は波のパターンであると考えることによって取り除かれる。すなわち、ディスクが微分回転をしても、その上に剛体的な回転する波を考えることによって巻き込みのジレンマを解決することができる。例えば水面にできる波を考えると、波が様々な方向に伝わっているがそれを形成している水自体はその場で振動しているだけで波のパターンと同じ方向に進んでいるわけではない。

ディスクを形成している星は銀河の中心まわりをある角速度で円運動すると同時に動径方向に振動している、これはディスクの中の星が円運動からわずかにずれた軌道を描くことで、銀河面の垂直方向に単振動しているとみなすことができるからである。その振動のパターンによって描かれる軌道は閉じることがないが、外の系からその軌道模様を観察すると、軌道模様自体がある角速度で回転しているように見える。

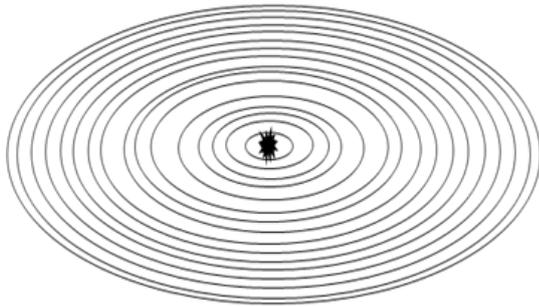


図. 9 同心円上の星の軌道

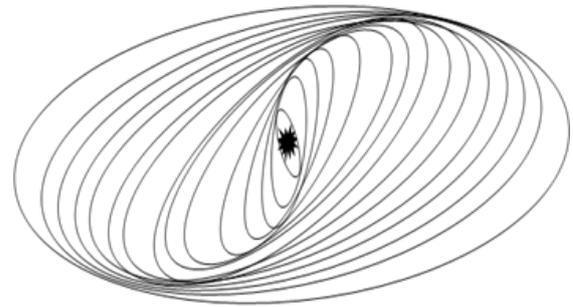


図. 10 個々の星の軌道をシフトさせると腕ができる

図によって示すと、まず図.9 のように長軸が同じ方向を向いた楕円軌道上を運動する星が集まったディスクを考える。ディスクは長軸方向に少し伸びた形を保ち、多くの銀河に見られるような腕の構造は見られない。

次に図.10 のように楕円軌道の長軸を軌道の半径とともに反時計周りにシフトさせてみる。すると軌道に密な部分が生じ腕の構造が現れる、つまりこの剛体的とも言える波のパターンである。これ自体が回転して見えるということである。

II.5 渦巻銀河の密度波理論

銀河のディスクにおける渦状構造を形成している波は、密度変化を伴うものなので「密度波」である。

ディスクは主に無衝突の星からできているので、密度波無衝突の星の回転プラズマ中での、自己重力の影響を考慮した縦波と考えることができる。

この考えに基づいて星の空間分布から渦状構造を理解する試みがされたが、星の振る舞いによる非線形的な波は振幅が小さく銀河全体の渦状構造と結びつけることはできなかった。つまり銀河の渦状構造は星以外のガスの系によって形成されていることになり、電波観測によるガスの分布によって腕の構造が強く観測されるのは、そこにガスが集まっているからだということが明らかになった。

ガスの密な部分ができる過程は容易に説明することができる。まず、振幅は小さいながら星の楕円軌道による振動のパターンがあるとする、ディスクはほとんど星によって形成されているので、ガスは近似的に星の系によってできた重力ポテンシャルの場の中を運動することになる。しかし、ガスの運動速度は小さいので、星の重力によって作られた窪みに簡単に落ち込むが這い上がることはできないため、ガスの密度の高い部分が形成されることになる。このように形成されたガスの密な腕の部分は不連続面となっており、強く圧縮されたガスの領域において星の生成がされていると考えられる。

II.6 渦巻銀河の衝撃波理論

銀河の渦状構造において、ガスの系が星の重力に引かれ楕円軌道を取りその過程で不連続面が発生することは前節で述べた。銀河のディスクを形成するガスが星の圧力によって速度が乱された時、その速度の違いによって衝撃波が起こっていると考えられる。ガスの流れの性質は、速度が音速以下か以上かで大きく異なる。音速に満たない亜音速の場合、ガスの流れが乱されると乱れは音波となり四方に広がりスムーズに流れることができる。一方、音速を超えている場合は流れが速いので上流に下流の情報が伝わらないため、ガスの乱れがあると上流から来た流れはそこにぶつかり不連続に変化する。この不連続が銀河の渦状構造における衝撃波である。

II.7 渦巻銀河の形態分類

渦巻銀河についての研究はその力学的構造だけではなく,様々の種類の形態をもつことから形態学的研究も行われてきた.最も良く使用される分類がハッブル分類(図.11)である,このハッブル分類の中で渦巻銀河はS0とSa~Sc,またS0~SBcが渦巻銀河であるが,このハッブル分類表のS0~SaあるいはS0~SBaという並びは,渦巻銀河の進化を表しているわけではないことに注意する.またE0~E7の楕円銀河が円盤銀河に進化するというでもない.

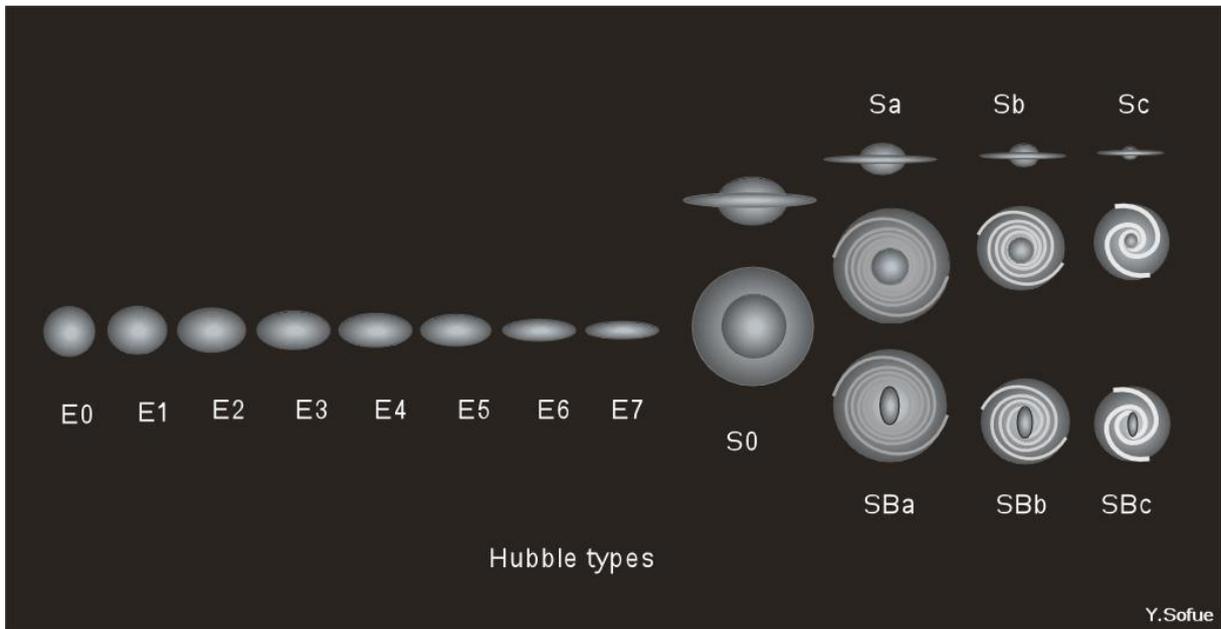


図.11 ハッブル分類

II.8 グランドデザインアーム銀河とフロキュレント銀河

次に楕円銀河を含んだハッブルによる分類ではなく,エルメグリーンによる渦巻銀河のみを分類した.アームクラス分類について紹介する.

DESCRIPTION OF ARM CLASSES FOR SPIRAL GALAXIES	
Arm Class	Description
1.....	Chaotic, fragmented, unsymmetric arms
2.....	Fragmented spiral arm pieces with no regular pattern
3.....	Fragmented arms uniformly distributed around the galactic center
4.....	Only one prominent arm; otherwise fragmented arms
5.....	Two symmetric, short arms in the inner regions; irregular outer arms
6.....	Two symmetric inner arms; feathery ringlike outer structure
7.....	Two symmetric, long outer arms; feathery or irregular inner arms
8.....	Tightly wrapped ringlike arms
9.....	Two symmetric inner arms; multiple long and continuous outer arms
10.....	No longer used; previously denoted barred galaxies
11.....	No longer used; previously denoted galaxies with close companions
12.....	Two long symmetric arms dominating the optical disk

表.1 エルメグリーンによる渦巻銀河の分類

まずエルメグリーンは様々な形態を持つたくさんの渦巻銀河を表.1のように12段階に分類した.ここで最も高いレベルである12~7に当たる渦巻銀河はグランドデザインアーム(Grand designed arm)銀河とよばれるM51に代表されるような卓越した二本腕を持つ銀河達である.これに対し1~6に当たる渦巻銀河はフロキュレント銀河と呼ばれる,Floculentは毛羽立ったなどの意味がある.代表的なグランドデザインアーム銀河とフロキュレントアーム銀河として,NGC1300とNGC4414がある.



図.12 グランドデザインアーム銀河 NGC1300



図.13 フロキュレントアーム銀河 NGC4414

II.9 銀河の未解決問題

密度波による銀河構造の説明は観測から得られる結果と良く一致する.しかしながら,なぜ渦状の模様を描くのか,その腕はなぜ二本なのかといった基本的な問題を解決しているわけではない.図.14はエルメグリーンによるアームクラス分類と渦巻銀河の大きさをプロットしたものである,この図からは顕著な相関は見られない.そして現在もアームクラスと相関を持つような物理量,また物理的環境条件は見つかっていない.このように銀河の渦状構造の研究は宇宙物理学において重要な課題である.

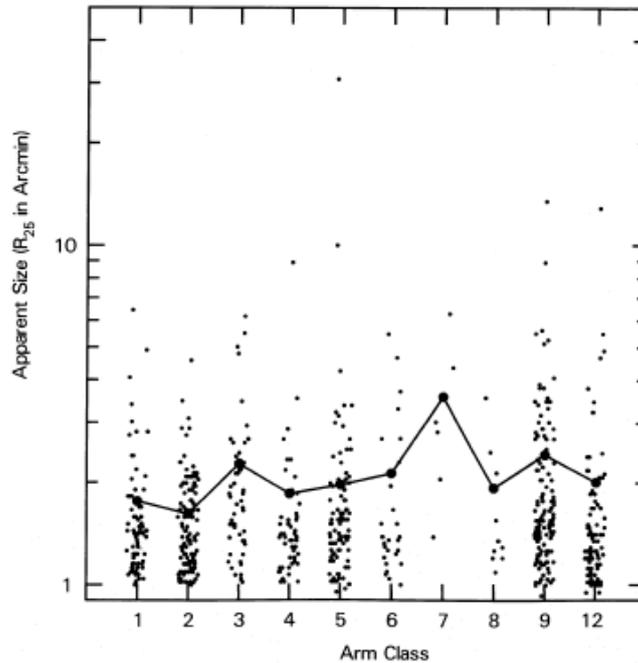


図.14 縦軸が渦巻銀河の大きさ横軸がアームクラス

III 自然現象の中の渦について

自然現象の中で発生する流体の渦について,その性質と構造について簡単にまとめる.

III.1 鳴門の渦と台風

渦巻銀河と似ている渦現象として海面上に発生する渦と台風がある.海面上の渦は二つの異なる海流の速度差によって発生し,台風は上昇気流が地球の自転によって角速度を持つことで発生している.また,海面の渦を構成しているのは海水であり,台風は積乱雲,水蒸気によって構成されている.



図. 15 海面に発生する渦巻模様

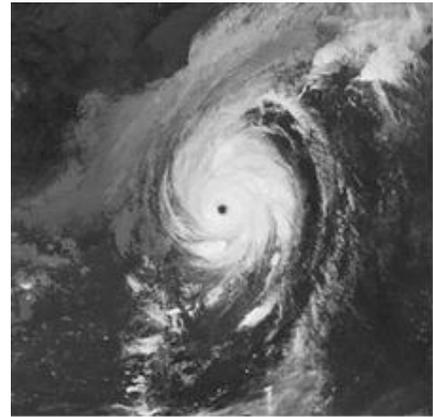


図. 16 渦巻の形をした台風

III.2 自然界における様々な渦

鳴門の渦や台風の他にも,自然界には様々な渦が存在する.その渦と大きさを示す.

様々な渦現象	直径
液体ヘリウムにおける量子化された渦	10^{-8}cm
乱流の中の小さな渦	0.1cm
昆虫の作り出す渦	
葉の後の渦	0.1~10cm
街路上でのつむじ風	
渦巻(鳴門の渦)	1~10m
塵旋風	
旋風および水上竜巻	100~1000km
対流雲	
ハリケーン	100~2000km
海流の循環	
大気の循環	2000~5000km
惑星大気	
木星の大赤斑	
土星の環	5000~ 10^5km
太陽の黒点	
星の内部の回転	
銀河	

表. 2 自然界の渦と大きさ

これらの渦は構成する物質や支配する力は異なるが渦としての共通の特性を持っている.本研究ではその渦としての特性を実験装置内にできる渦と銀河の渦状構造を比較するものである.

IV 理論

これまで紹介してきた渦巻銀河と実験装置内に発生する渦とを比較する方法について記述する。

IV.1 銀河を流体近似する方法

銀河の渦は星間ガスの密度によるものだというを前章で述べた。そこで銀河の中の星の速度分散を流体の圧力とみなすことにより銀河の運動の基本方程式を得ることができる。

銀河回転面に準じた円筒座標系での表記を採用し、密度 ρ 、圧力 P 、重力ポテンシャル φ 、速度 \mathbf{u} の流体として銀河を考えると、

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \rho \nabla \mathbf{u} = 0. \tag{1}$$

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} = -\nabla \varphi - \frac{1}{\rho} \nabla P. \tag{2}$$

$$P = c^2 \rho. \tag{3}$$

$$\Delta \varphi(\mathbf{r}) = 4\pi G \rho(\mathbf{r}). \tag{4}$$

を得る。ここで c は光速である、(1)式は流体の連続の式、(2)式は運動方程式、(3)式は状態方程式、(4)式は重力場を記述するポアソン方程式である。

この方程式系は変数が6個(密度、圧力、重力ポテンシャルと運動速度ベクトルの3成分)、方程式が6本(②式は3成分)であり、初期値境界値問題として解くことができる。

IV.2 実験装置の中の流体

前述の銀河の流体近似の方程式の各変数が、流体実験装置においてどのような状態変数に対応するか考えてみる。

まず(1)~(4)式にある変数と、その変数が実験装置の中の渦の物理量との対応を表.3に示す。

銀河の流体近似変数	装置の中で対応する物理量
ρ_G : 星間ガスの密度	ρ_{Lec} : 液体の密度 → 一定
\mathbf{u}_G : 星間ガスの速度	\mathbf{u}_{Lec} : 流体の速度
φ_G : 重力ポテンシャル	×: 重力の再現はできない
P_G : 星の速度分散による圧力	P_{Lec} : 大気圧

表. 3

さらに簡単な図を使って,それぞれの対応関係を示す.

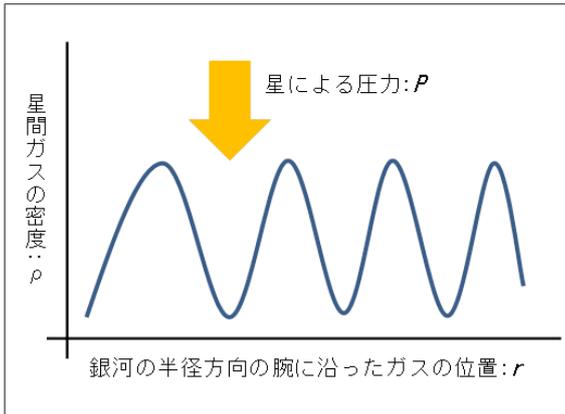


図. 17 渦巻銀河のガス流の振る舞い

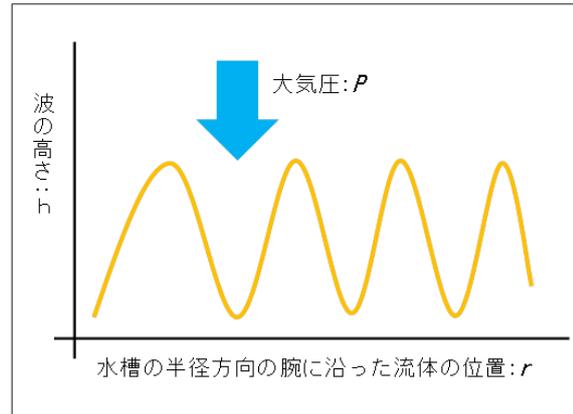


図. 18 LEC 装置の中の流体の振る舞い

II 章の中で銀河の渦状腕は星間ガス密度によって形成されていることを示した.図.17 は銀河円盤の恒星の圧力で星間ガスの密度が起伏する様子を表している,密度の高くなっている部分は渦状腕として観測される.これに対して図.18 は LEC 装置の中に発生する表面波がその運動と大気圧とのつり合いにおいて起伏する様子である.渦巻銀河において密度高くなっている部分に対応するのが表面波として観測される波の高さである.

ところで表.3 の φ_{Lec} に対応する物理量が実験装置からは得られていない.これは実際の銀河は重力場によって形成されているが,想定している 1 m 程度の水槽の中で重力場を再現することはできないのである.

しかし,この問題は実験装置の形状を工夫することで解決することができる.

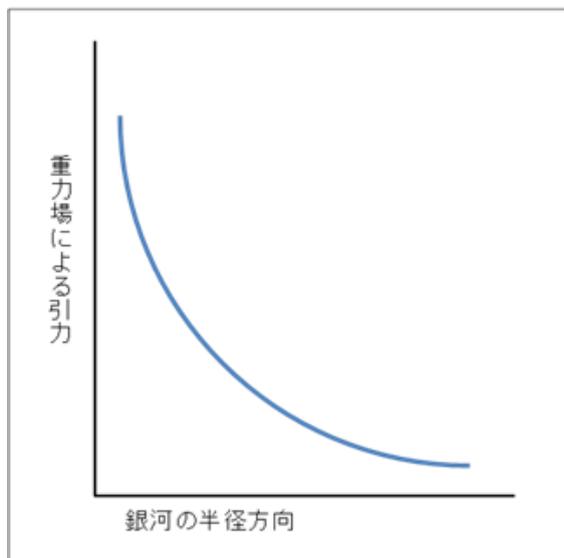


図. 19 渦巻銀河の星間ガスに働く引力

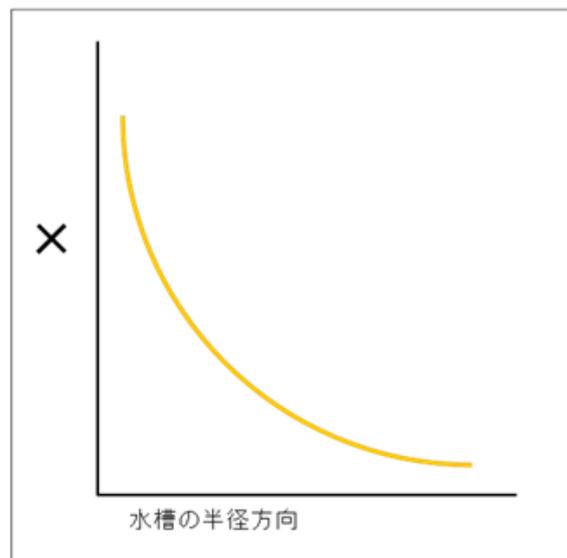


図. 20 LEC 装置では重力場を再現できない

図.19 のように渦巻銀河の重力場は中心に近づくほど指数関数的に強くなる.この重力場に対応させる引力をつくるために LEC 装置の底面に図.20 のように中心に近づくほど急になる勾配を設けることで,水槽の中を流れる流

体は渦巻銀河のガス流体のように半径が小さくなるほど中心に引き寄せられる力が強くなるのである。

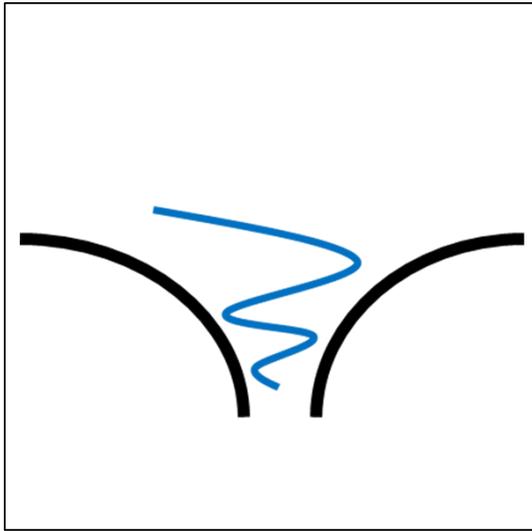


図. 21 水槽の排出口に近づくほど勾配をきつくする

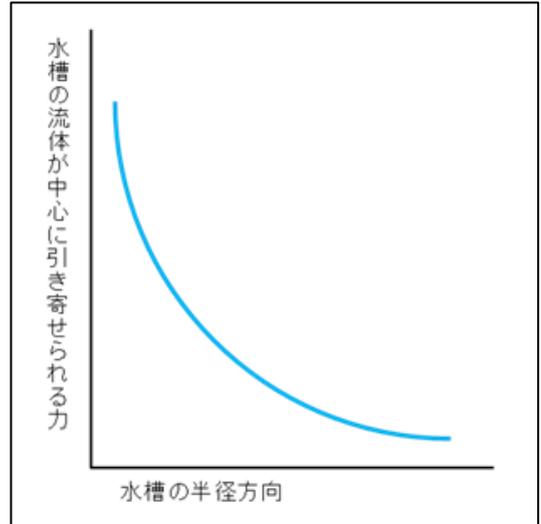


図. 22 渦巻銀河と流体を対応できる

このようにして表.3 に出てくる LEC 装置内で必要とされる物理量は、 ρ_{Lec} が使用する液体の密度として一定の値が得られ、 u_{Lec} が流体の速度として得られ、 P_{Lec} は大気圧で一定の値、得られていなかった φ_{Lec} も装置を工夫することで対応付けることができた。

また図.18の縦軸になっている(1)式の ρ に対応する波の高さも図.23のように LEC 装置内の表面波の高さを直接測ることで得られる。

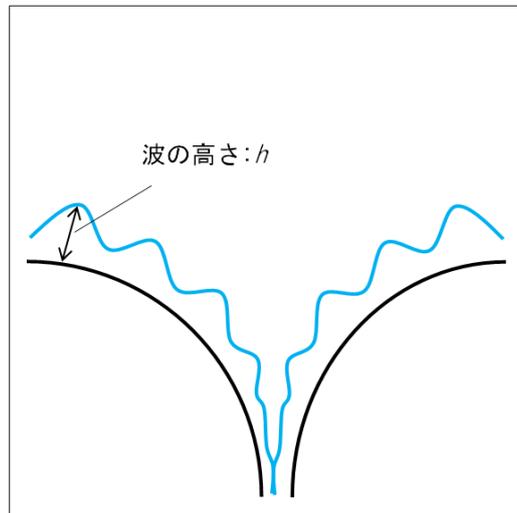


図. 23

これらの物理諸量に注意して LEC 装置の設計を行った.次章ではこれまでに作成した LEC 実験装置の詳細について紹介する。

V 実験装置について

この章では実際に実験室内に銀河の流体構造を再現するために作成した流体実験装置 LEC 装置第 1 号機から 3 号機までの紹介をする.各実験装置による実験の方法については次章VI章に記載してある.

V.1 装置に必要な性能

流体実験装置を作成するにあたって,装置に求められる性能を考える必要がある.LEC 装置とは宇宙における流体を実験室内の規模で再現することを指しているが,本研究において注目している渦巻銀河の渦状構造を再現するためには「定常的な渦」を装置の中で再現する必要がある.よって実験装置に求められる機能は,

- ・一定の速度で循環する回転流を作ることができる.
- ・その回転流によって定常的な渦模様を発生させることができる.

の二点がまず必要になる条件である.実験室内規模でこのような装置か作成場合次の二通りの方法が考えられる.

一つは図.24 のように円形の水槽を回転させ,その中の流体に角運動量を与える方法である.この方法は LEC 実験の最も初期のころビーカーと轆轤(ろくろ)を使って作成されている.

もう一つの方法が図.25 のように装置は回転させずに,角運動量を持った流体を流し込むことで回転流を作る方法である.

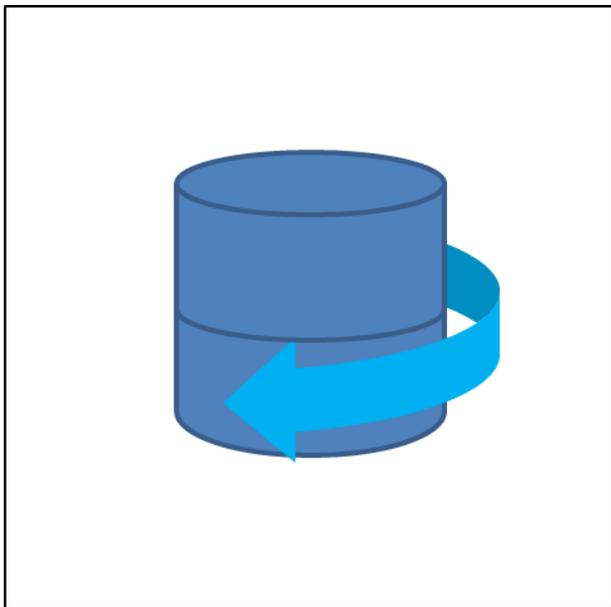


図.24 装置自体を回転させる

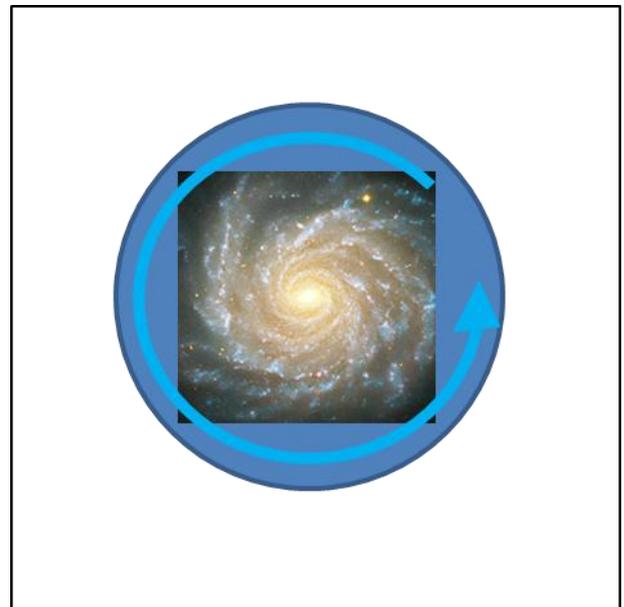


図.25 装置は回転させず回転流を流す(採用した方法)

実際の渦巻銀河は銀河自体が回転しているので,前者の方が再現性は高いと考えられる.しかしながらより微細な渦の構造などを知るために,設計段階で直径 1m 程度の水槽を想定しており,今回はこの二つの方法の内,装置は回転させない方法を選んだ.

この円形の水槽の中で一定の回転流を発生させる装置を作成するにあたって注目したのが,市販されている素

麵流し器である.多少手は加わっているが,実験装置として改造する前の状態が図.26 である.常に回転流が発生するように工夫された装置ではあるが,内壁が設けられてあり,また通常使用方法である水道蛇口からの流量では流速が十分ではないので,LEC 装置として使用できるように改良した.



図. 26 1号機の基になった市販の素麺流し器

V.2 1号機(2010年8月作成)

前節にある通り,市販の家庭用素麺流し器を改良して作成したものである.



図.27 1号機



图. 28

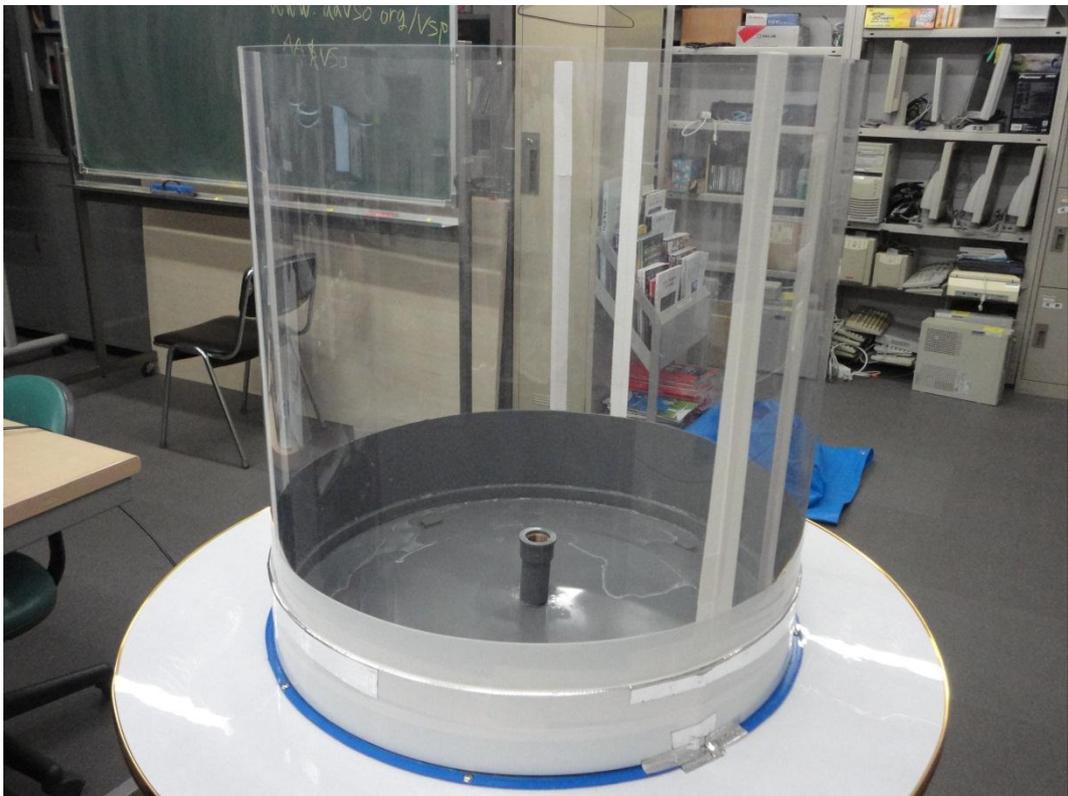


图. 29



图. 30



图. 31

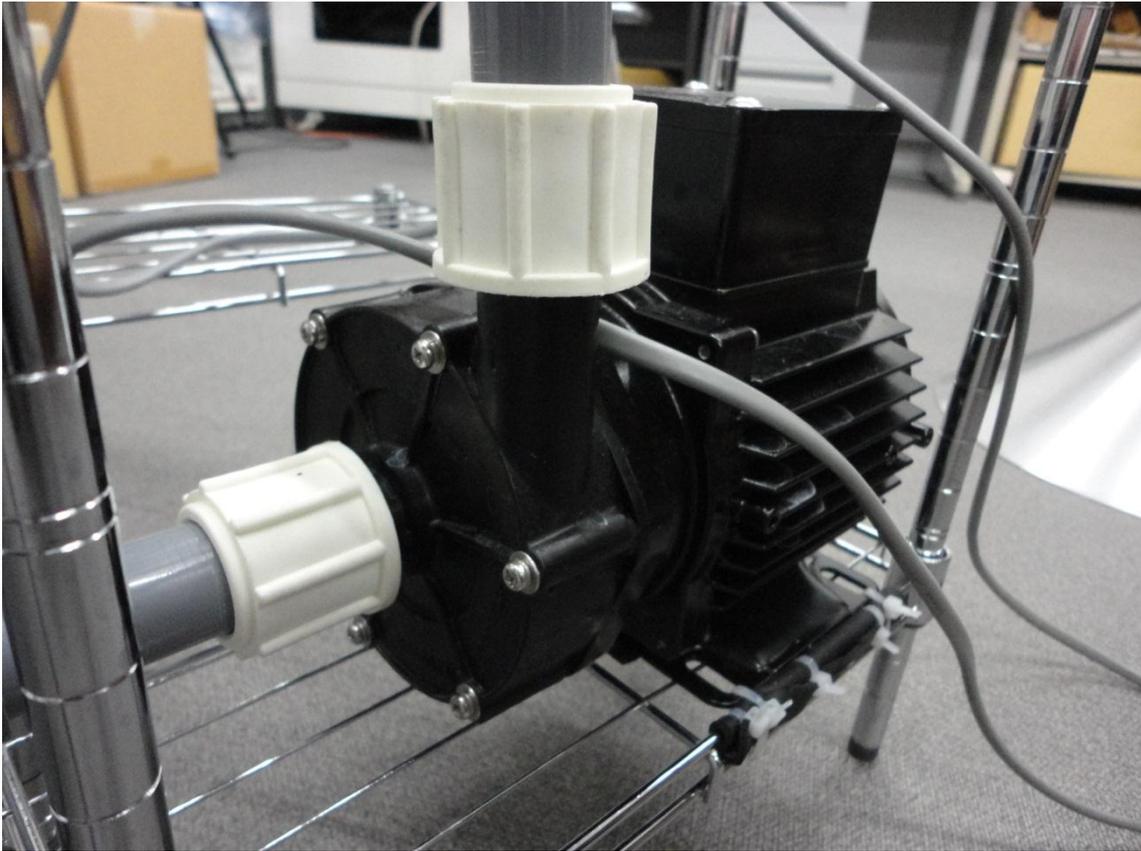


図. 32

・実験使用した三相マグネットポンプ PMD641

最大で毎分 72 リットルの水を送り出すことが可能。本実験中は最大出力で使用しているが、水流の勢いを出すために射出口をしぼっているため、毎秒約 5 リットル程度の水が水槽内に送られている

V.3 2号機(2011年8月作成)



図. 33



图. 34



图. 35

V.4 3号機(2012年4月作成)



图. 36

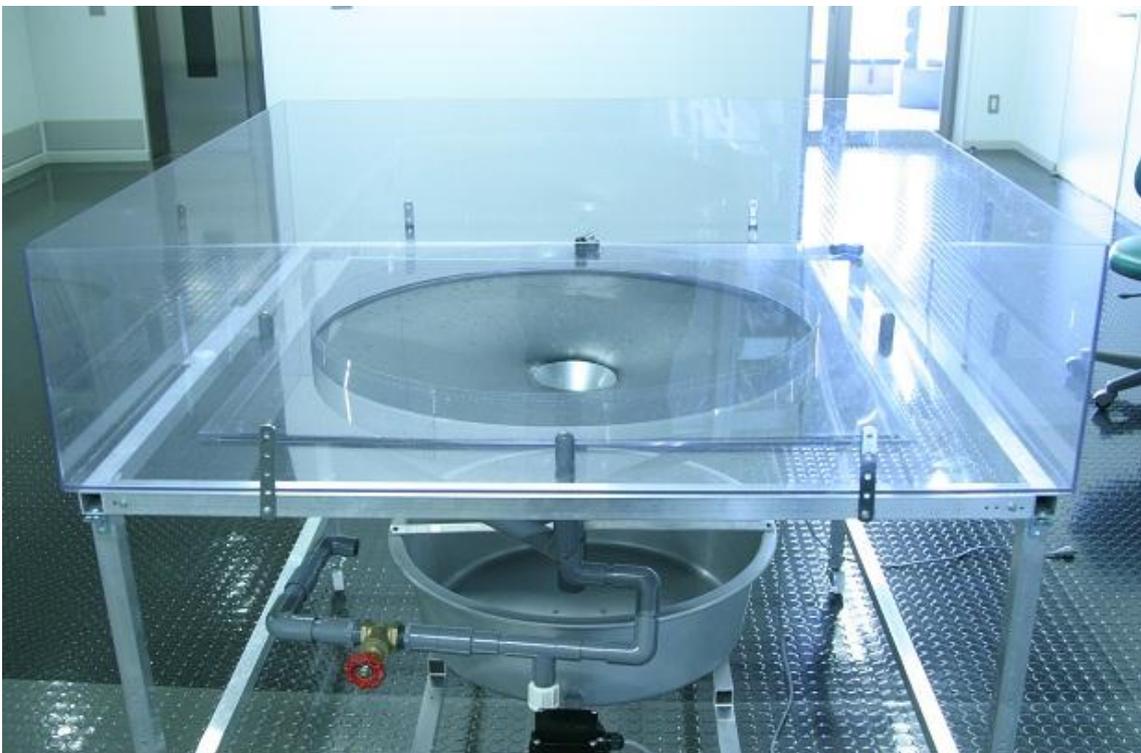


图. 37

VI 実験の方法と様子

この章では1号機から3号機の実験の様子を装置ごとに紹介する。

VI.1 1号機

1号機は装置として操作できる部分は流量である。使用しているポンプは最大で毎分720の液体を吸い上げることができる、この流量をバルブの操作によって360まで下げることができる。

実験ではポンプは常に最大の出力で使用した。



図. 38



图. 39



图. 40



图. 41



图. 42

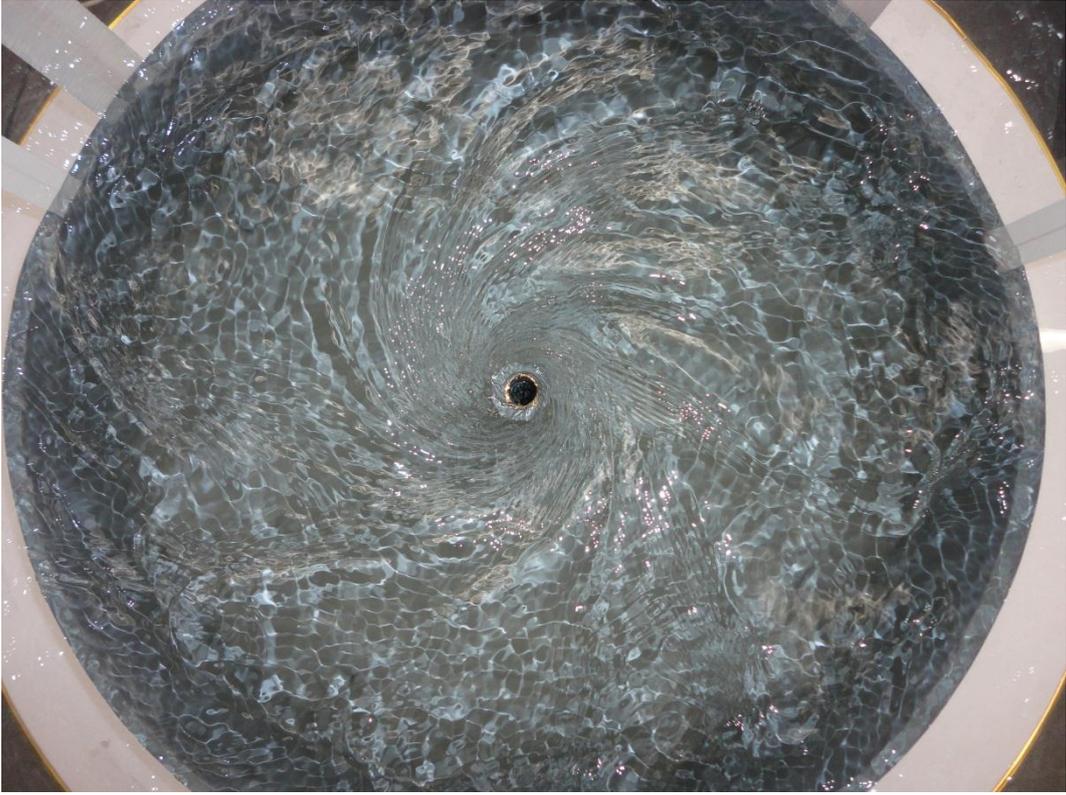


图. 43



图. 44



图. 45



图. 46

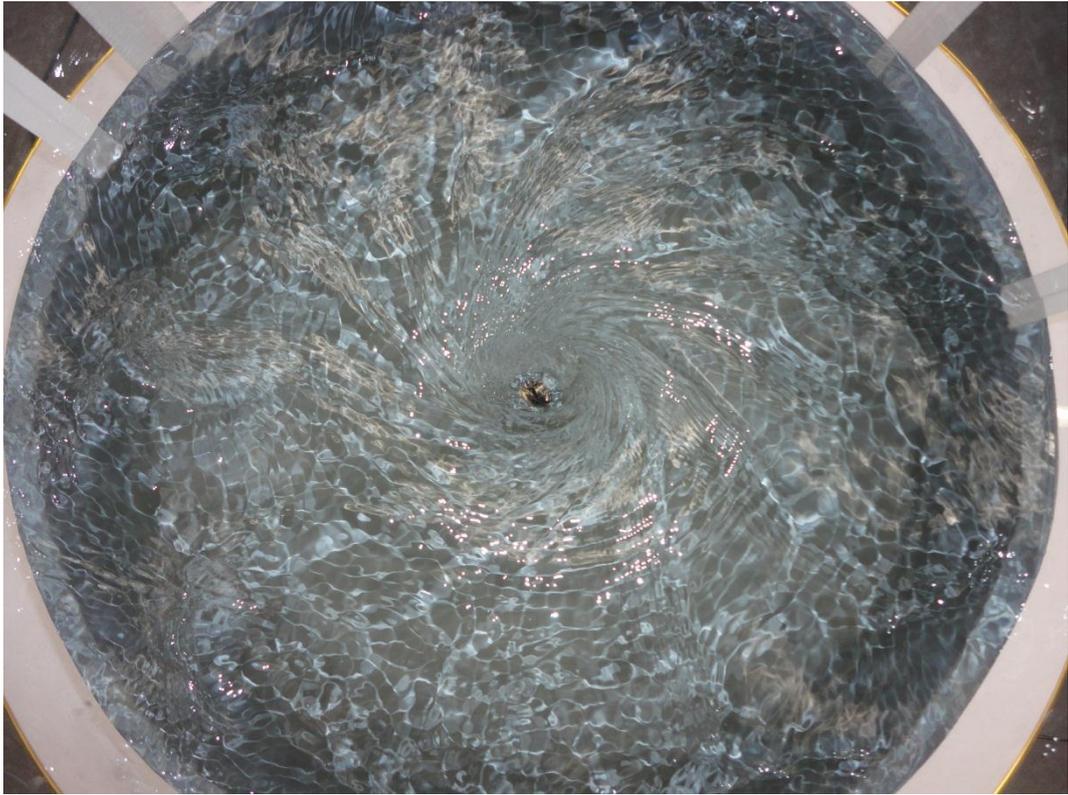


图. 47

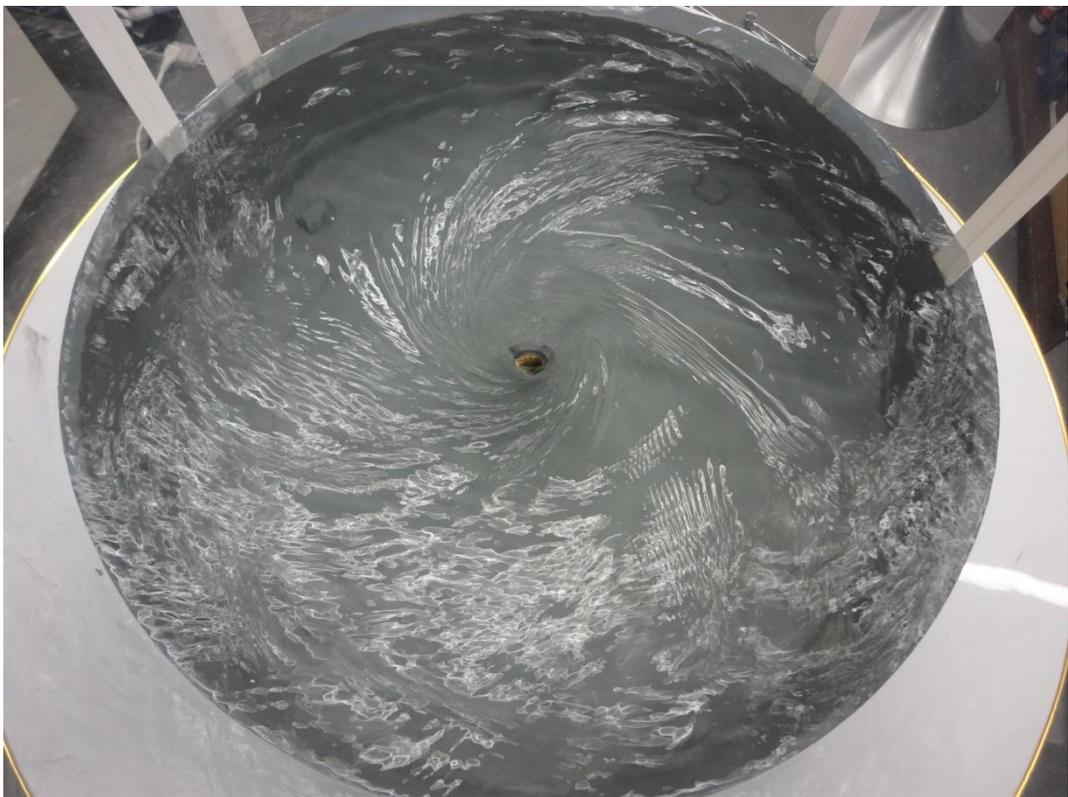


图. 48



图. 49



图. 50



图. 51

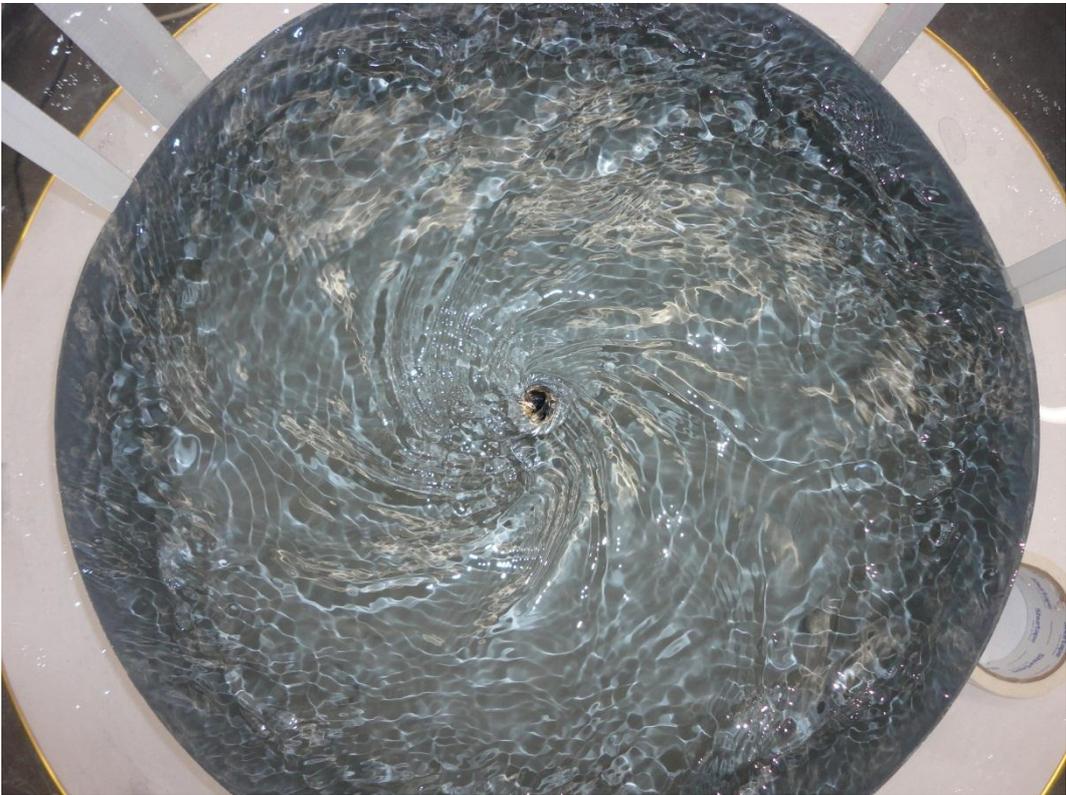


图. 52



图. 53



图. 54



图. 55



图. 56



图. 57

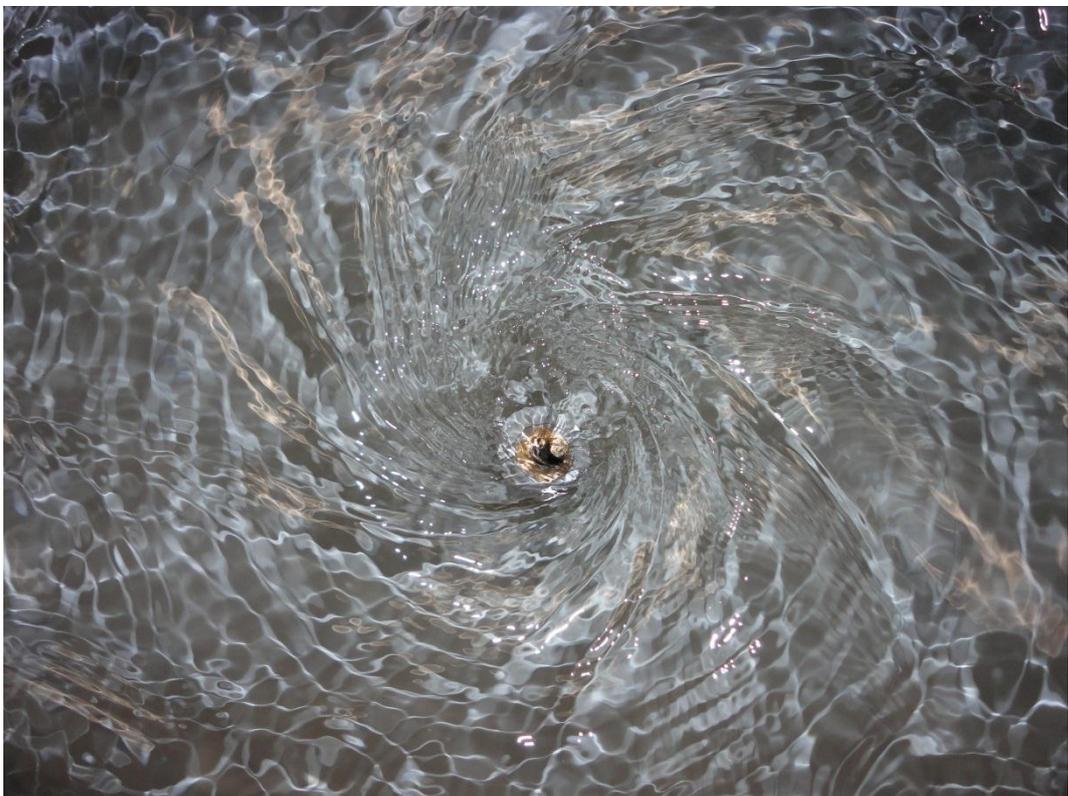


图. 58



图. 59



图. 60

VI.2 二号機

二号機は一号機と同じように流量の調整の他に後付けの内壁を使用しているため、内壁の形状すなわち装置の水槽部分の形状を変えることができるようになっている。図.53 のような円形の内壁と図.54 のような楕円形の内壁と使い実験を行った。

ポンプの出力は強い方が渦の形状がきれいに現れるので、二号機においてもポンプの出力は最大にして実験を行った。

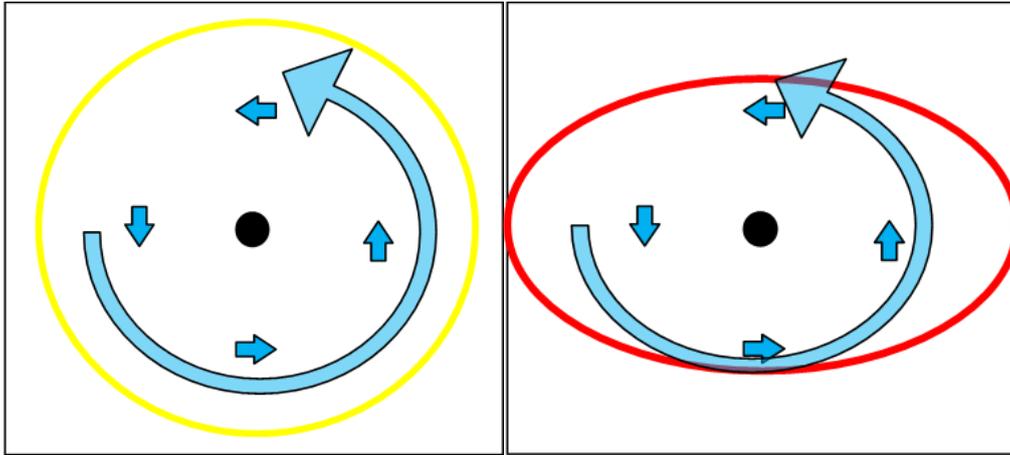


図. 61

図. 62



図. 63

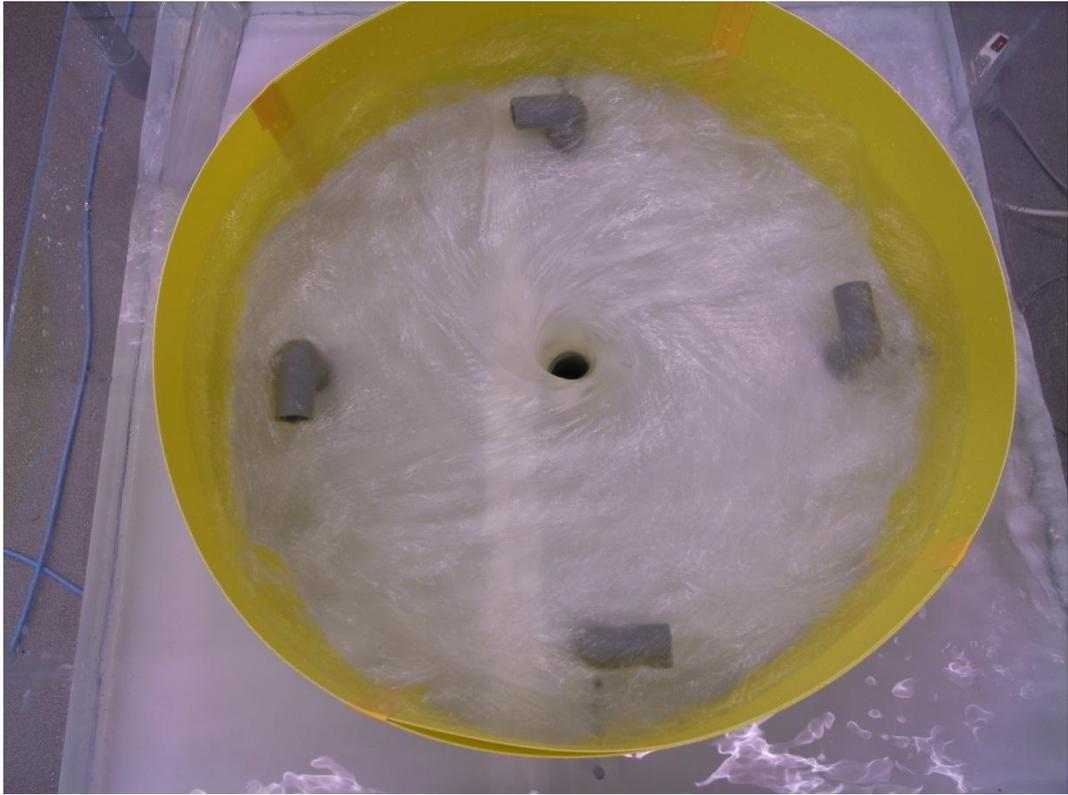


图. 64

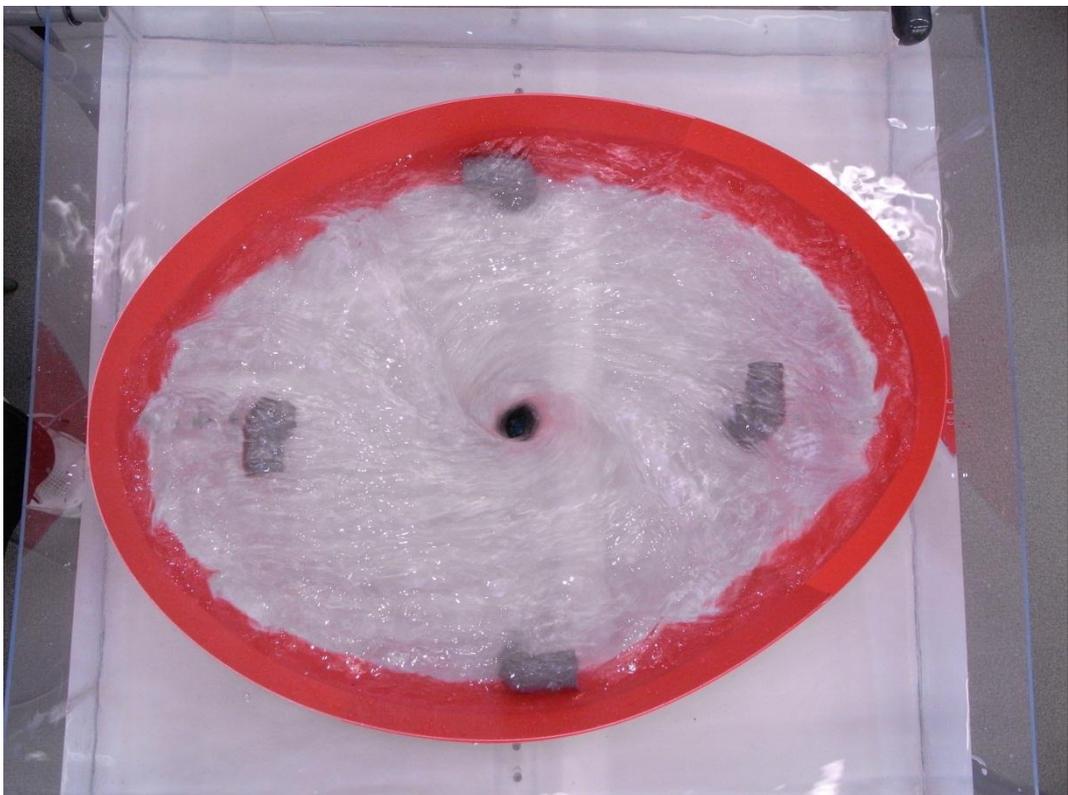


图. 65

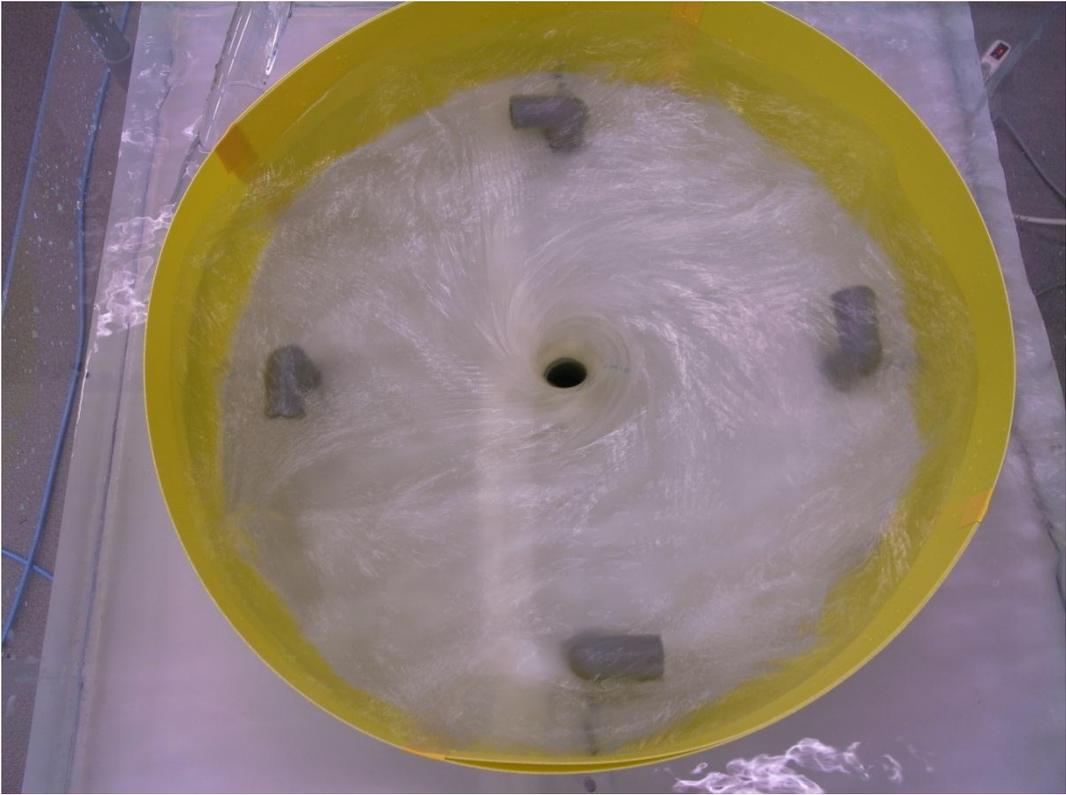


图. 66

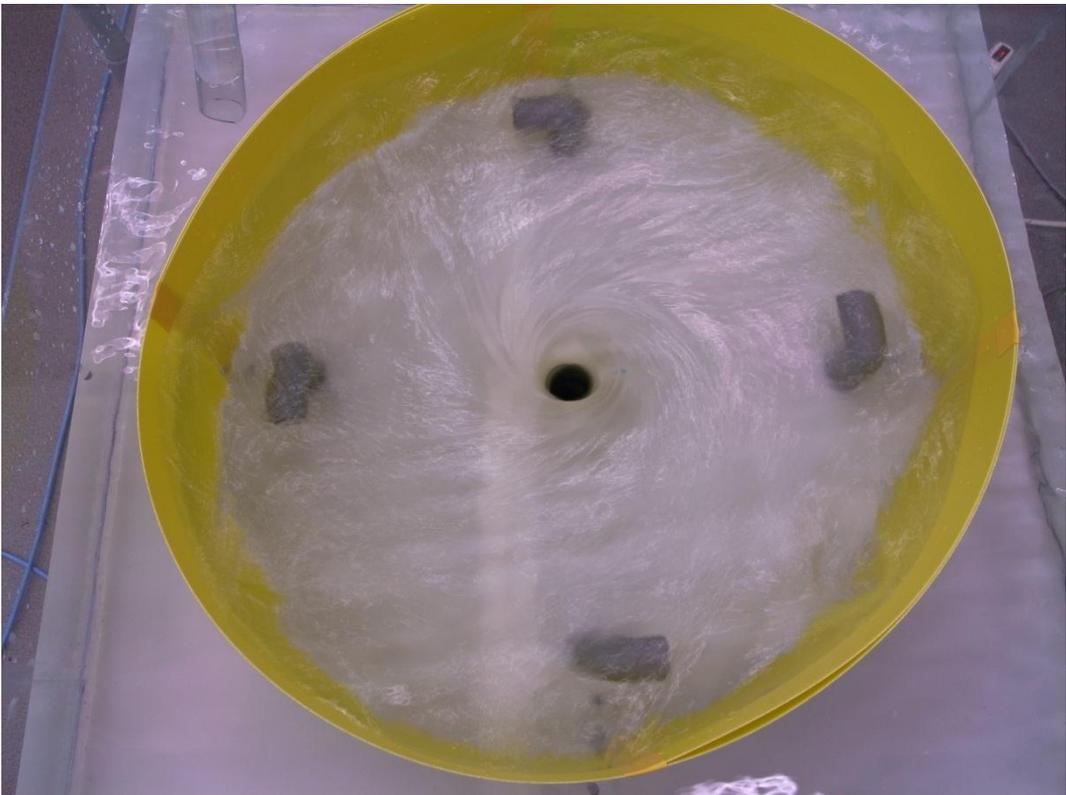


图. 67

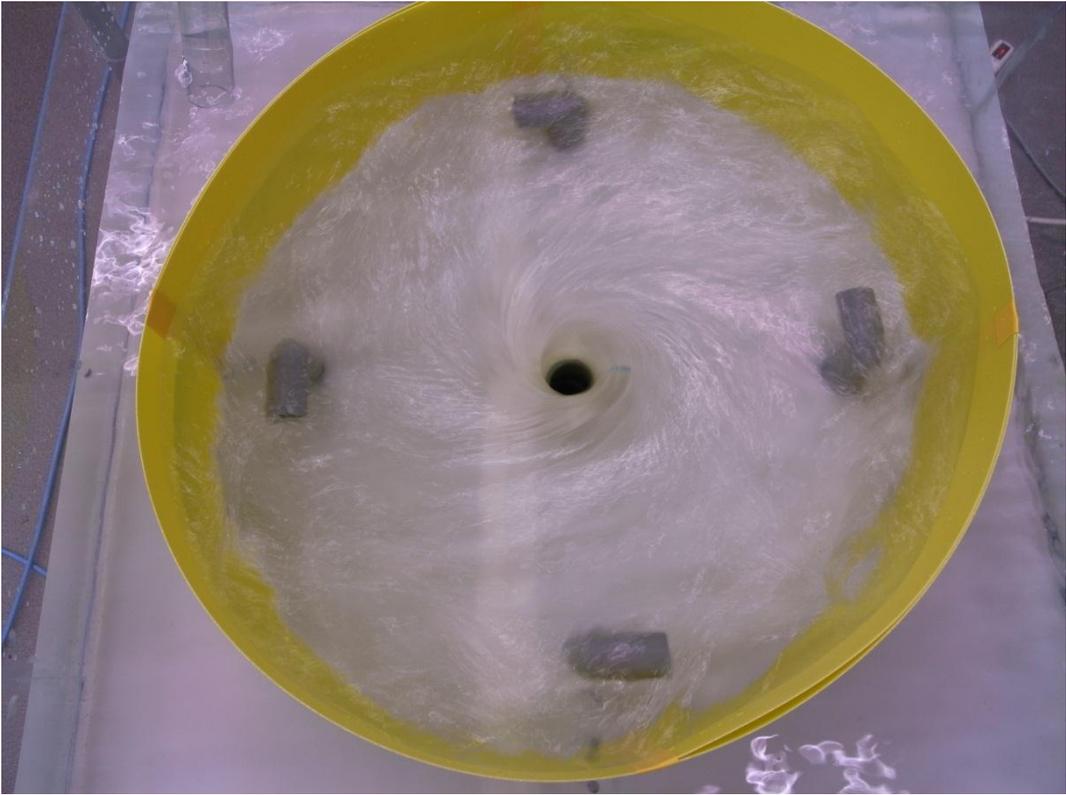


图. 68



图. 69



图. 70

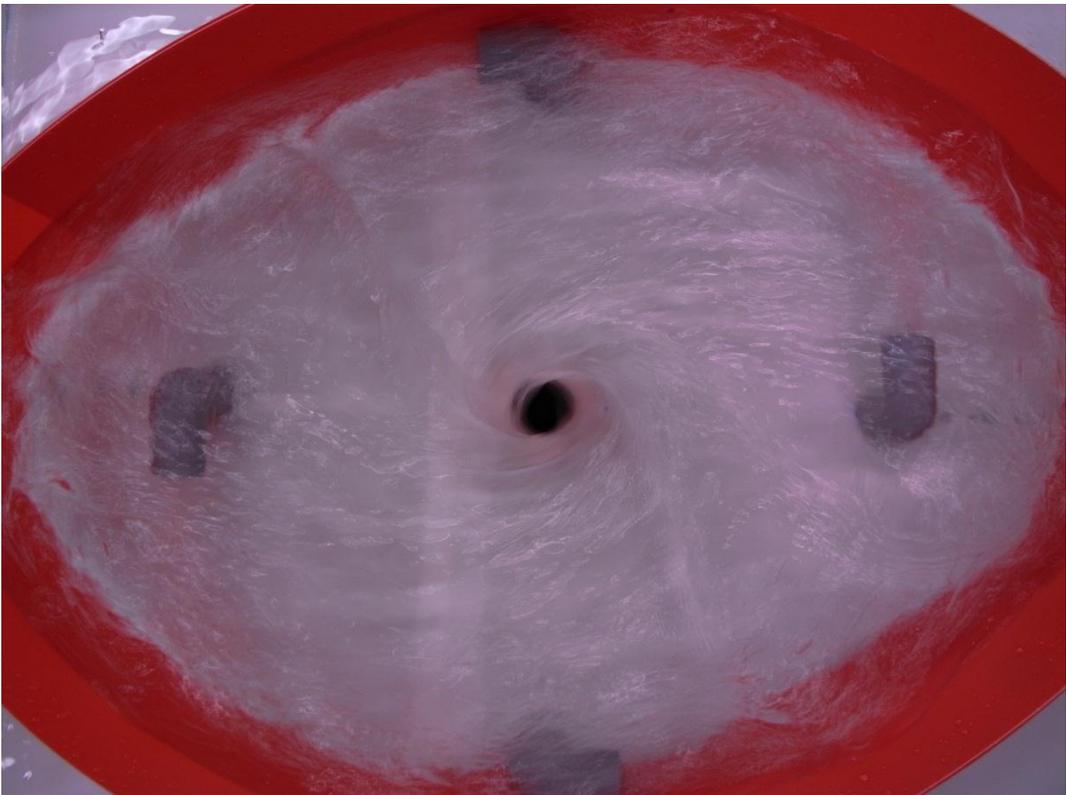


图. 71

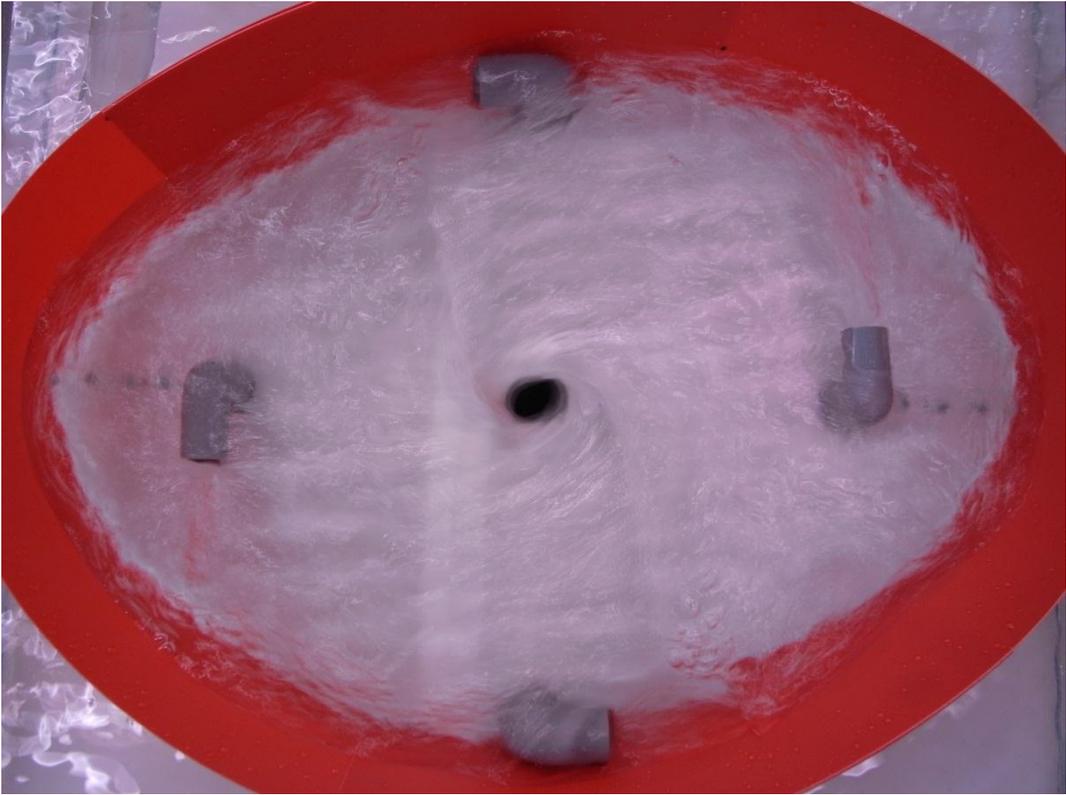


图. 72



图. 73



图. 74



图. 75

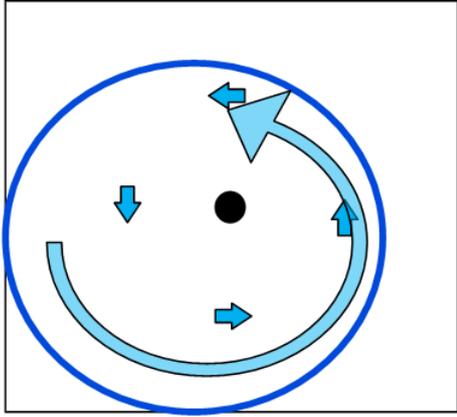


图. 76

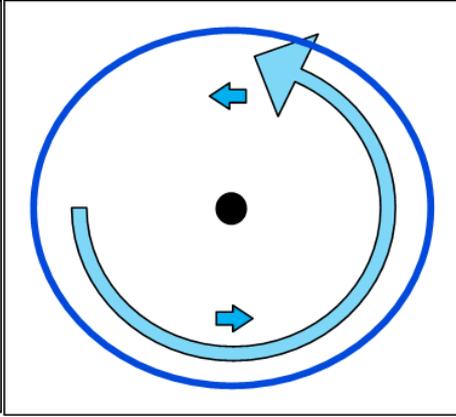


图. 77

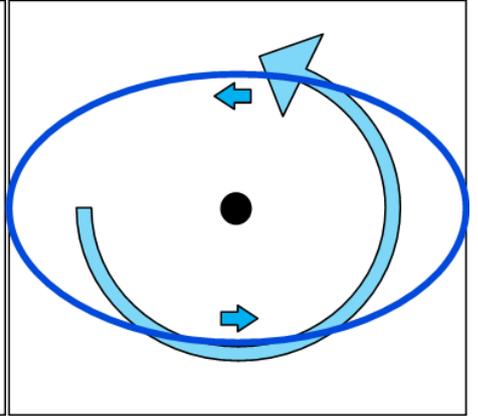


图. 78



图. 79



图. 80

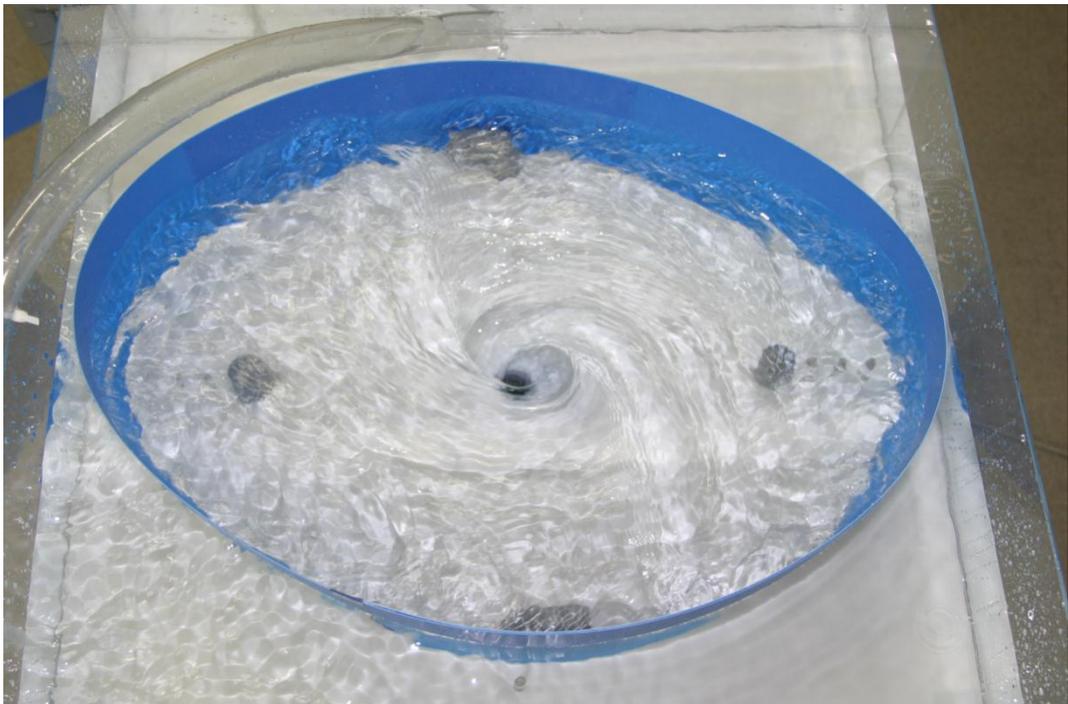


图. 81

VI.3 3号機

3号機の特徴は水槽の底面に重力ポテンシャルを再現できるようになっていることである。この新たな機能によって、降着円盤の実験も行えるようになった。3号機ではこの降着円盤の実験を主に行った。1号機, 2号機の渦巻銀河の実験では角運動量を持った水流を均等にするために射出口を4か所設けていたが, 降着円盤の実験では射出口を1か所だけにしている。

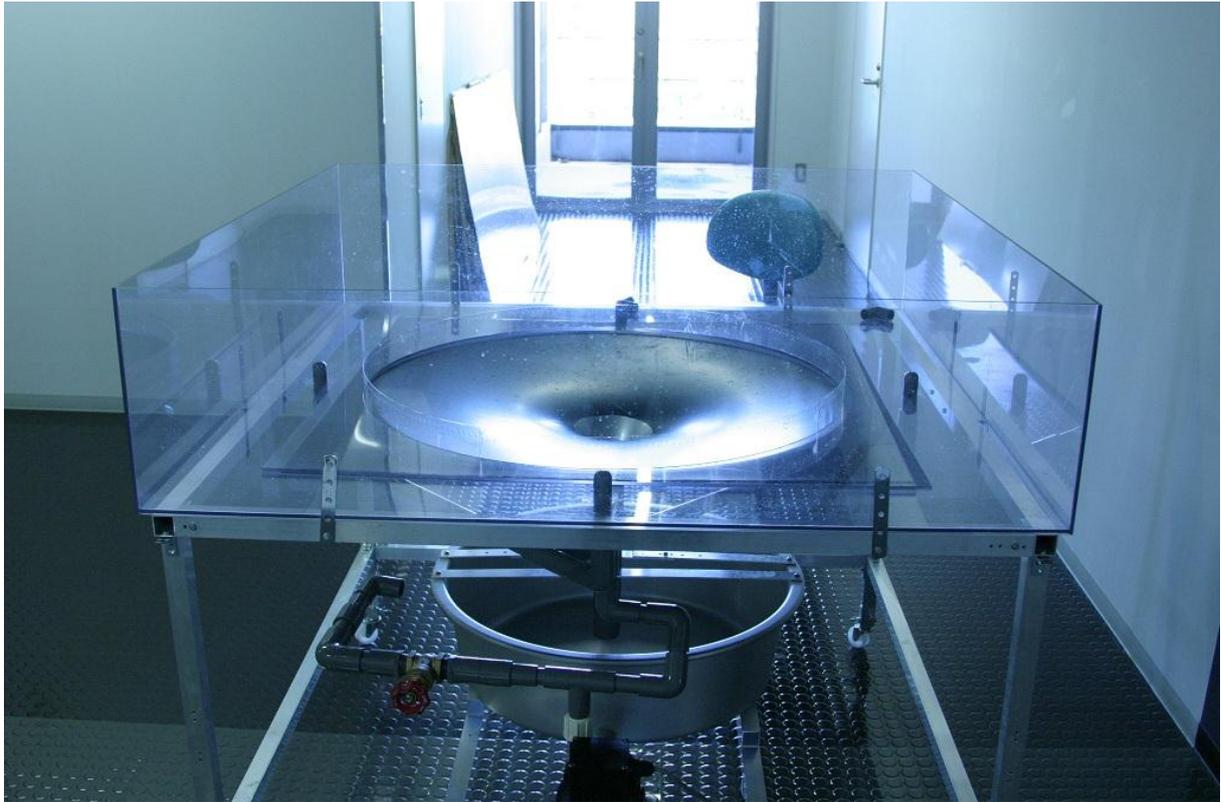


図. 82

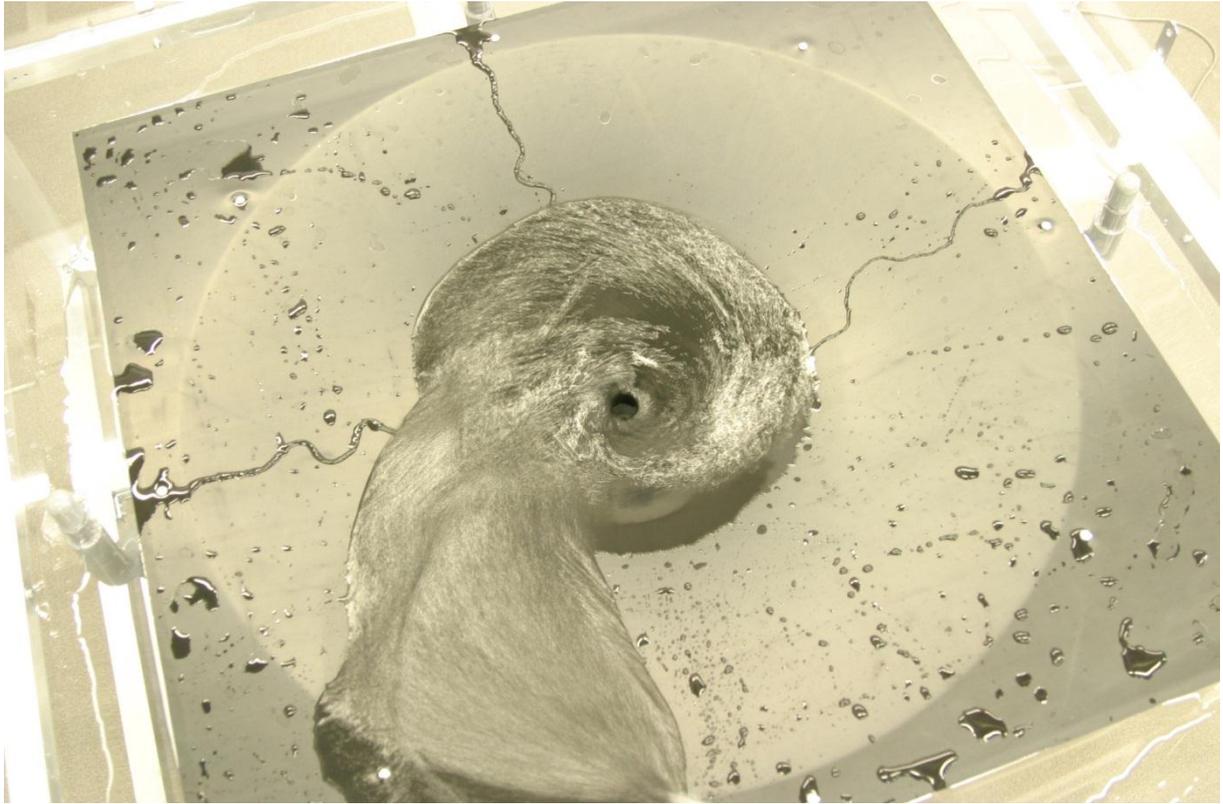


图. 83

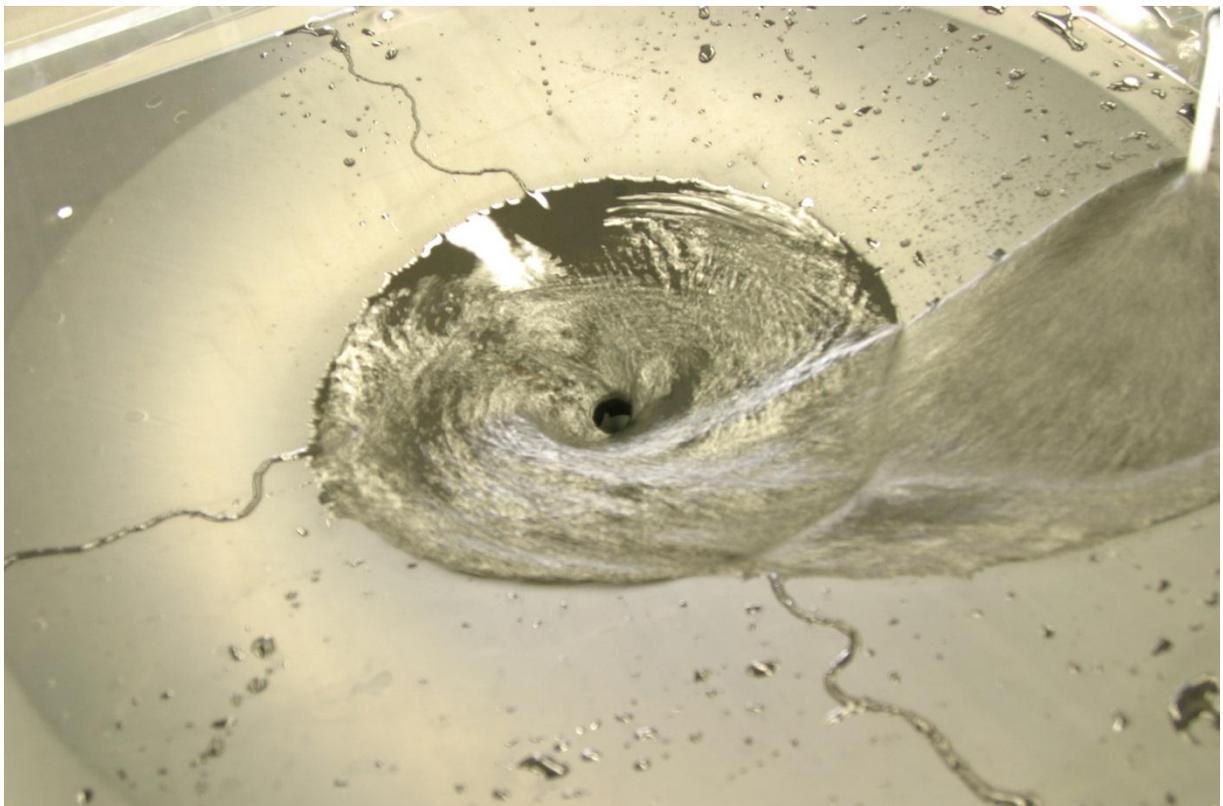


图. 84

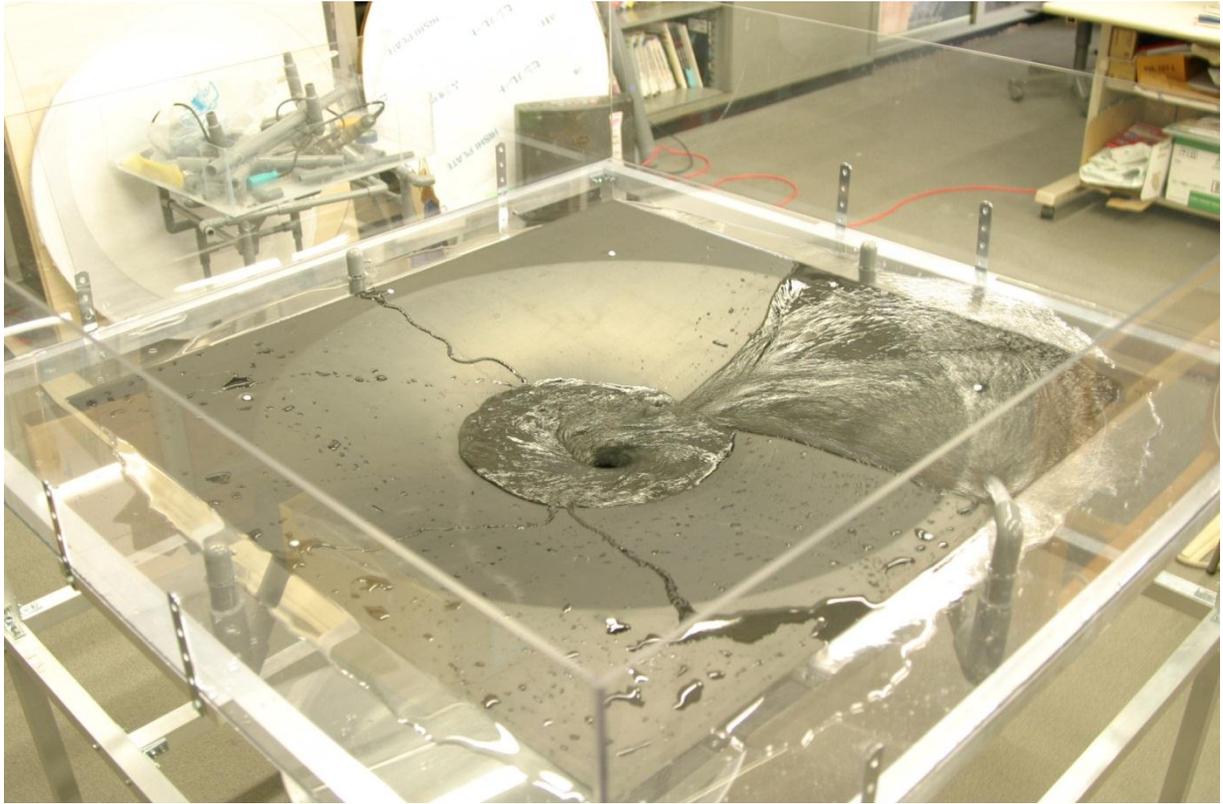


图. 85

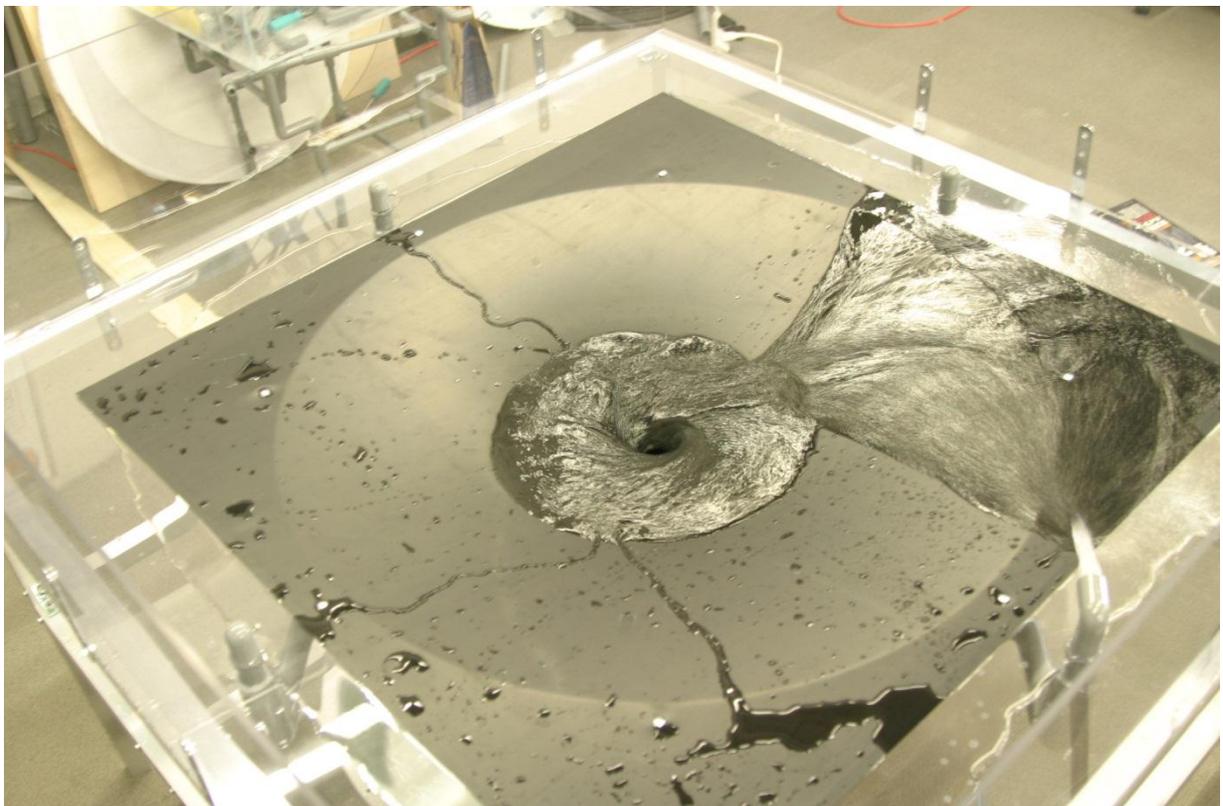


图. 86

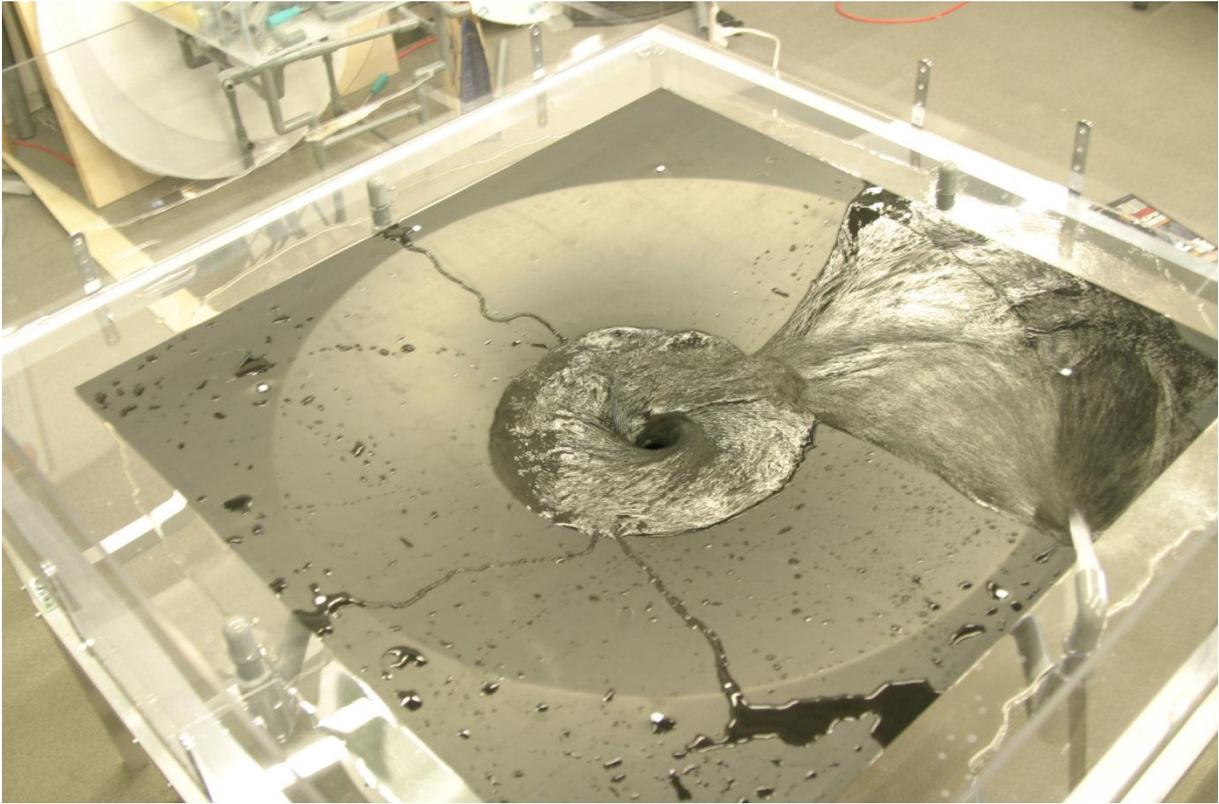


图. 87

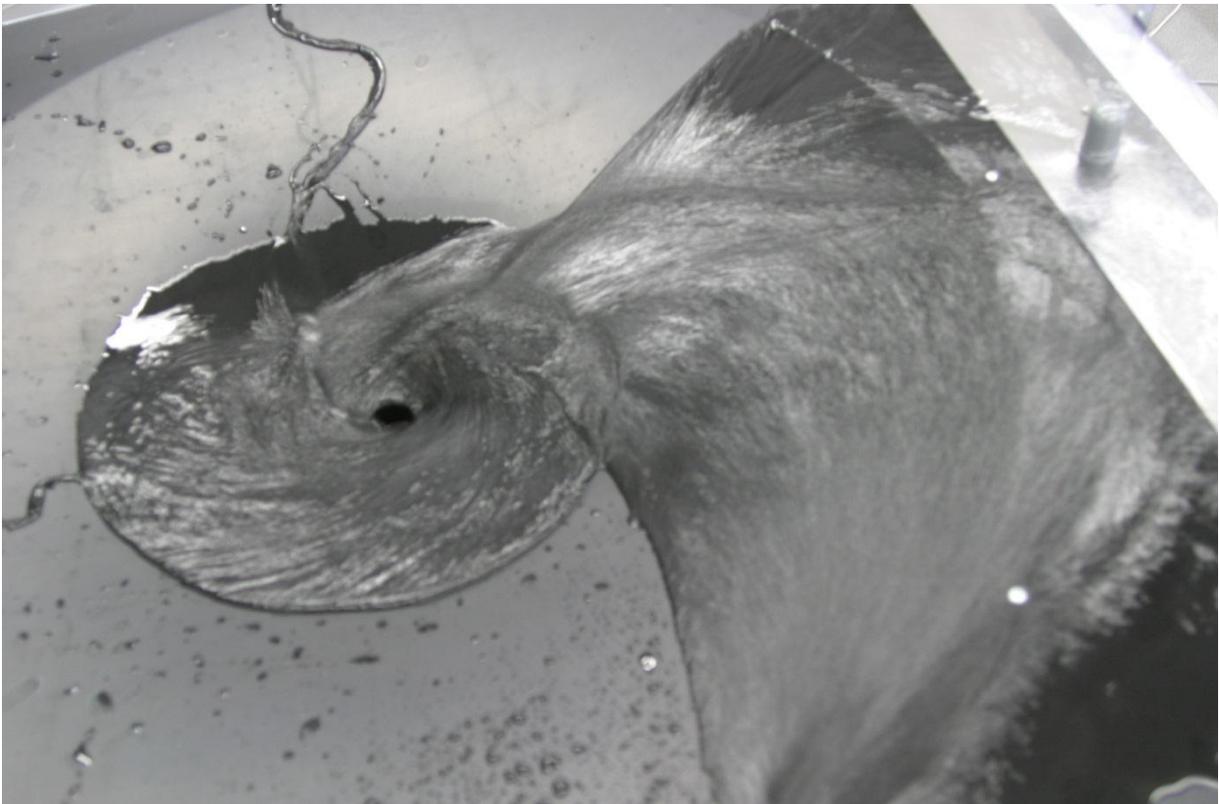


图. 88

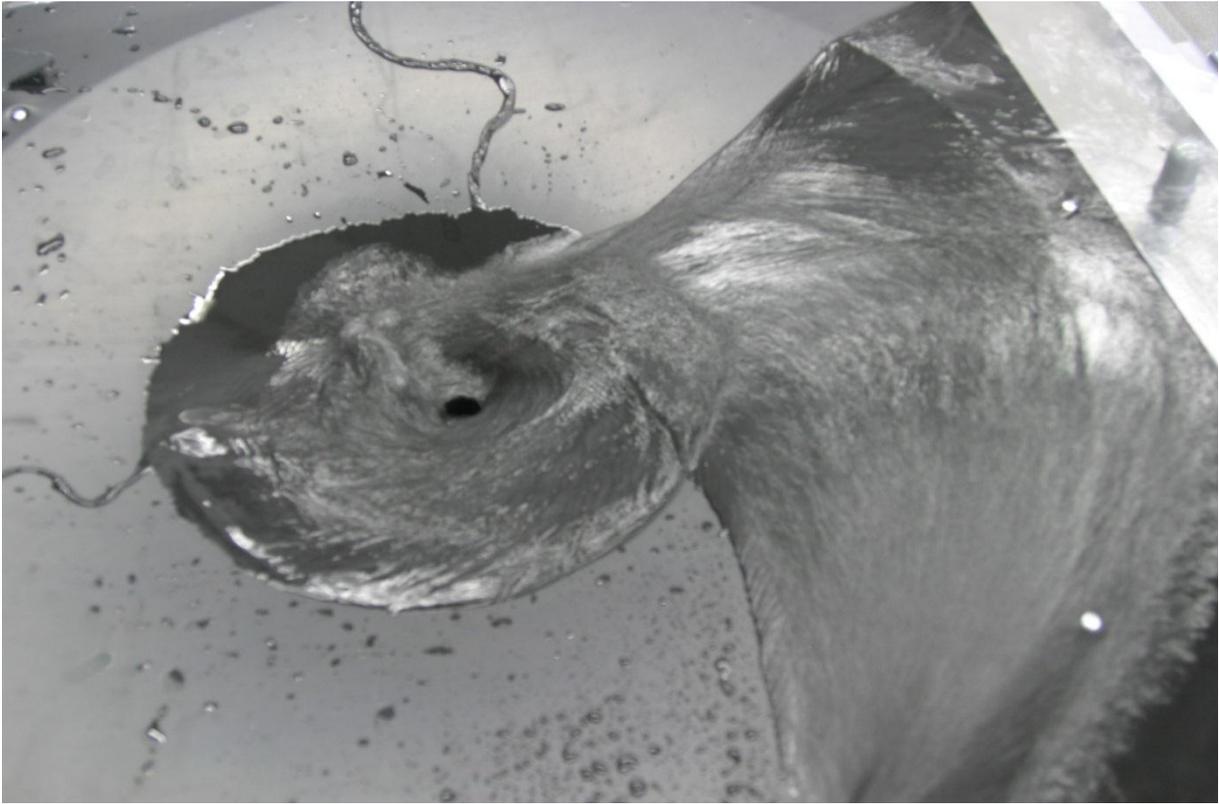


图. 89

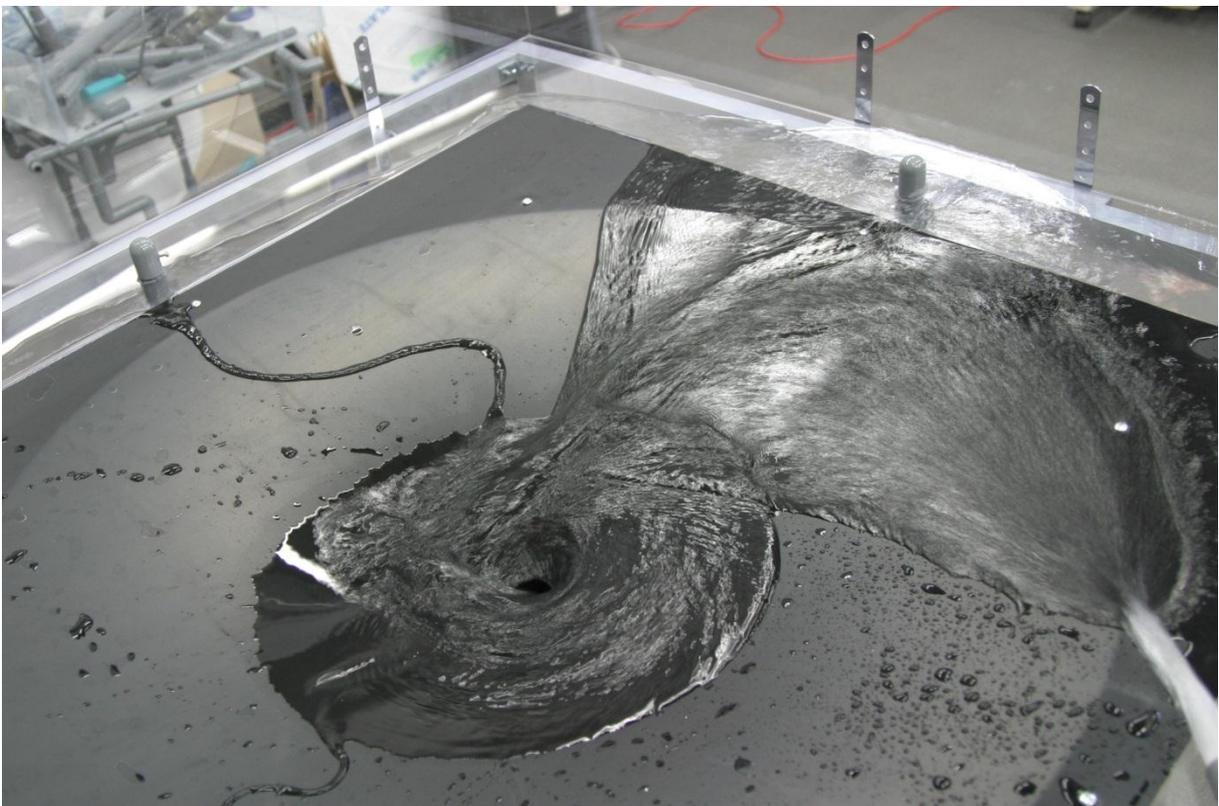


图. 90

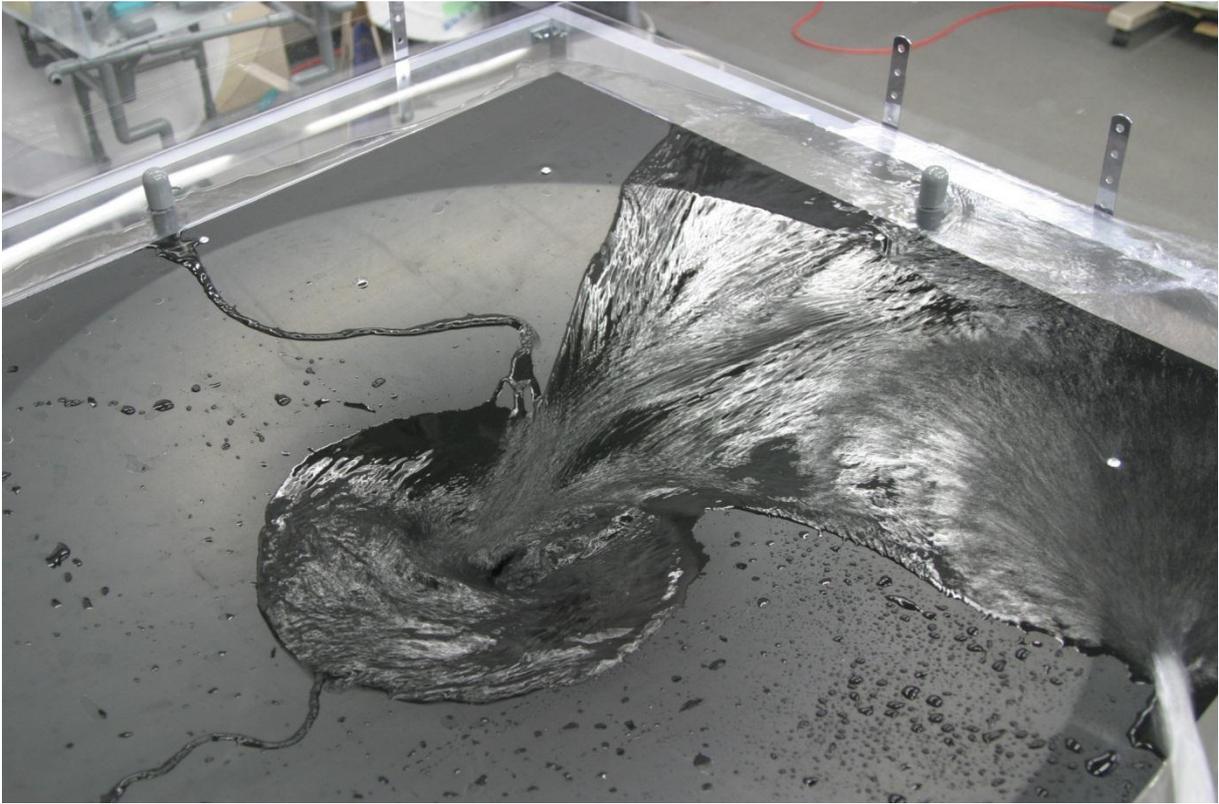


图. 91

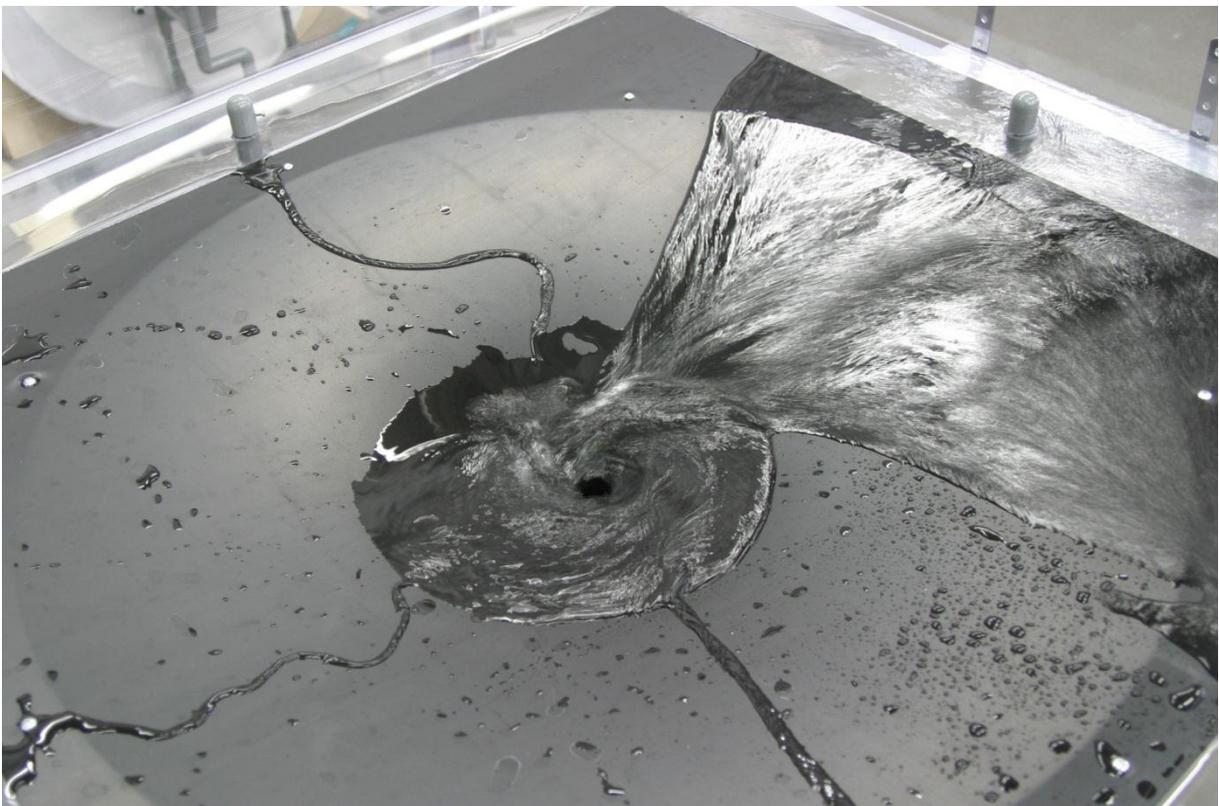


图. 92

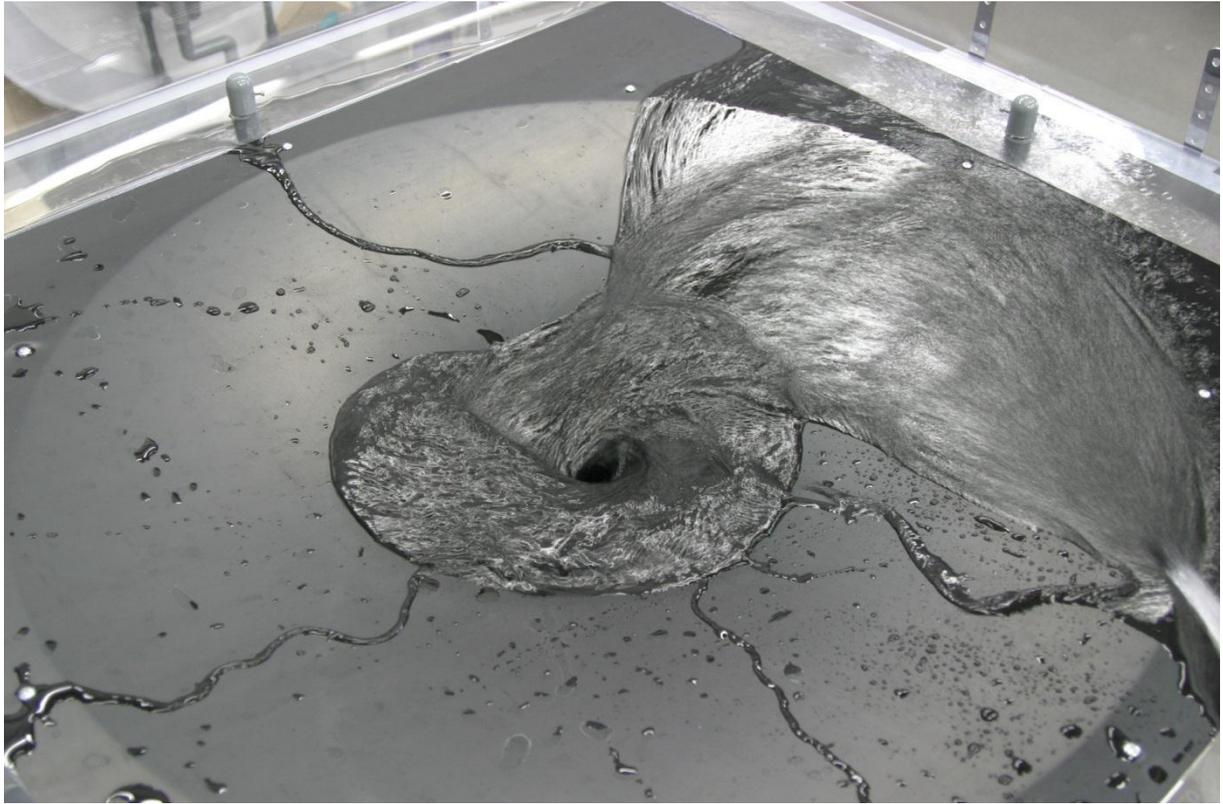


图. 93

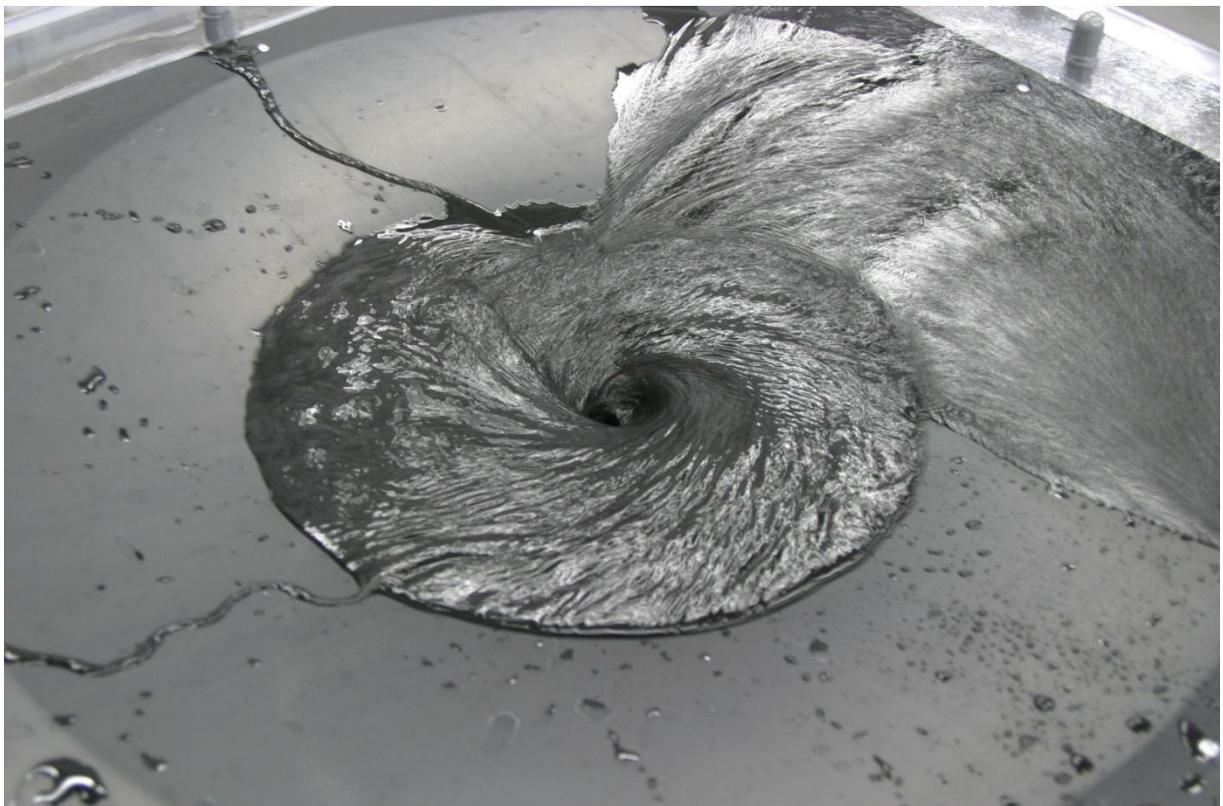


图. 94

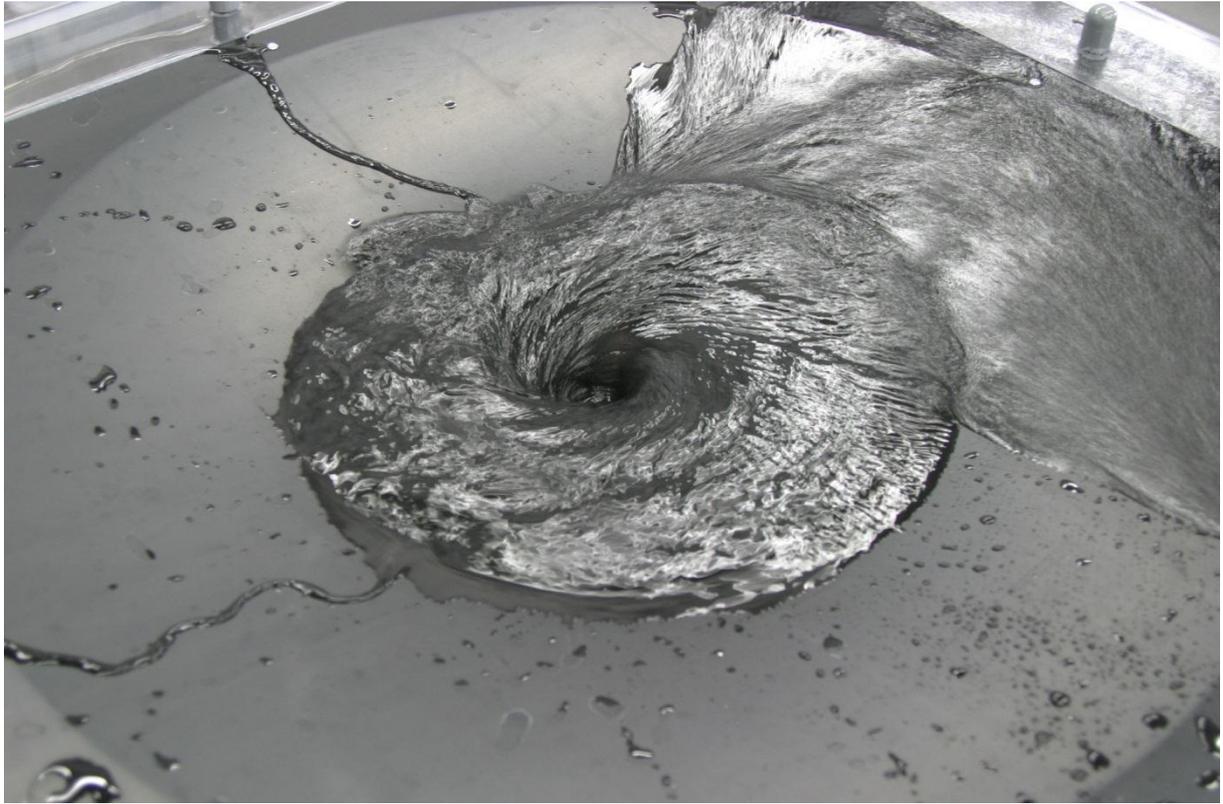


图. 95

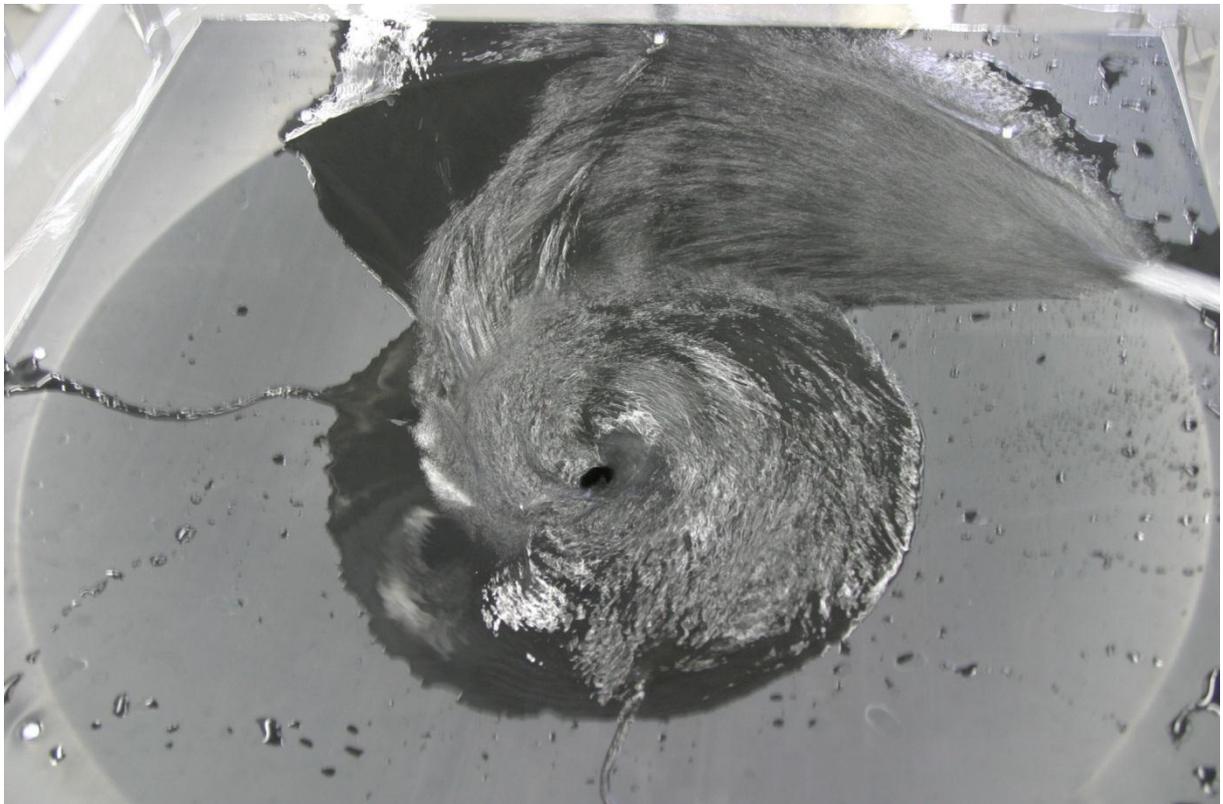


图. 96

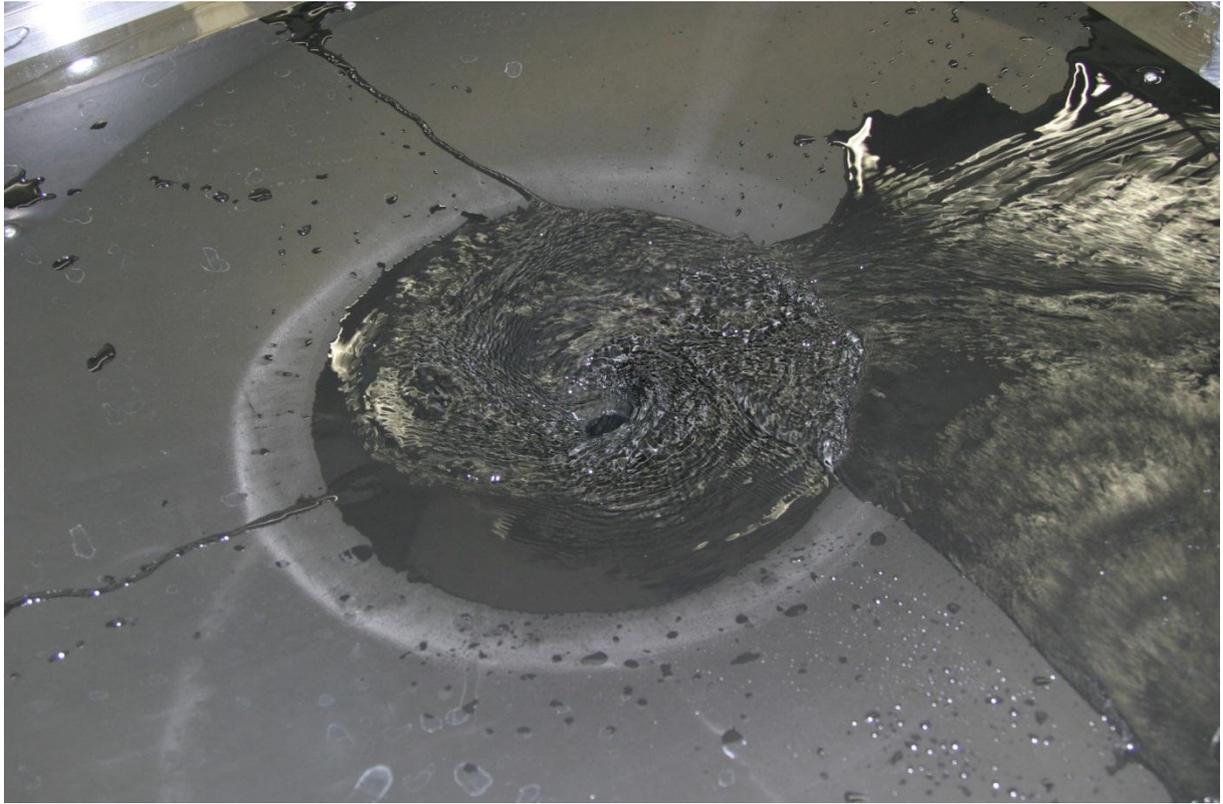


图. 97

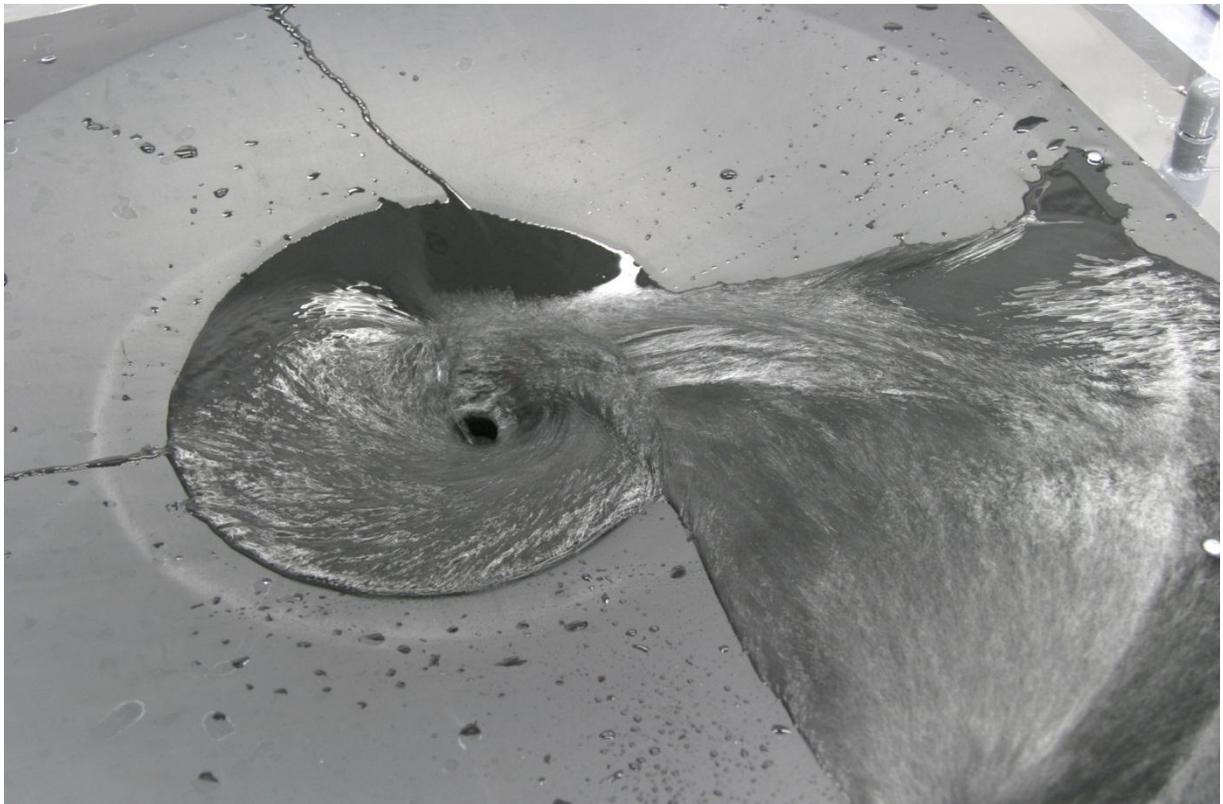


图. 98

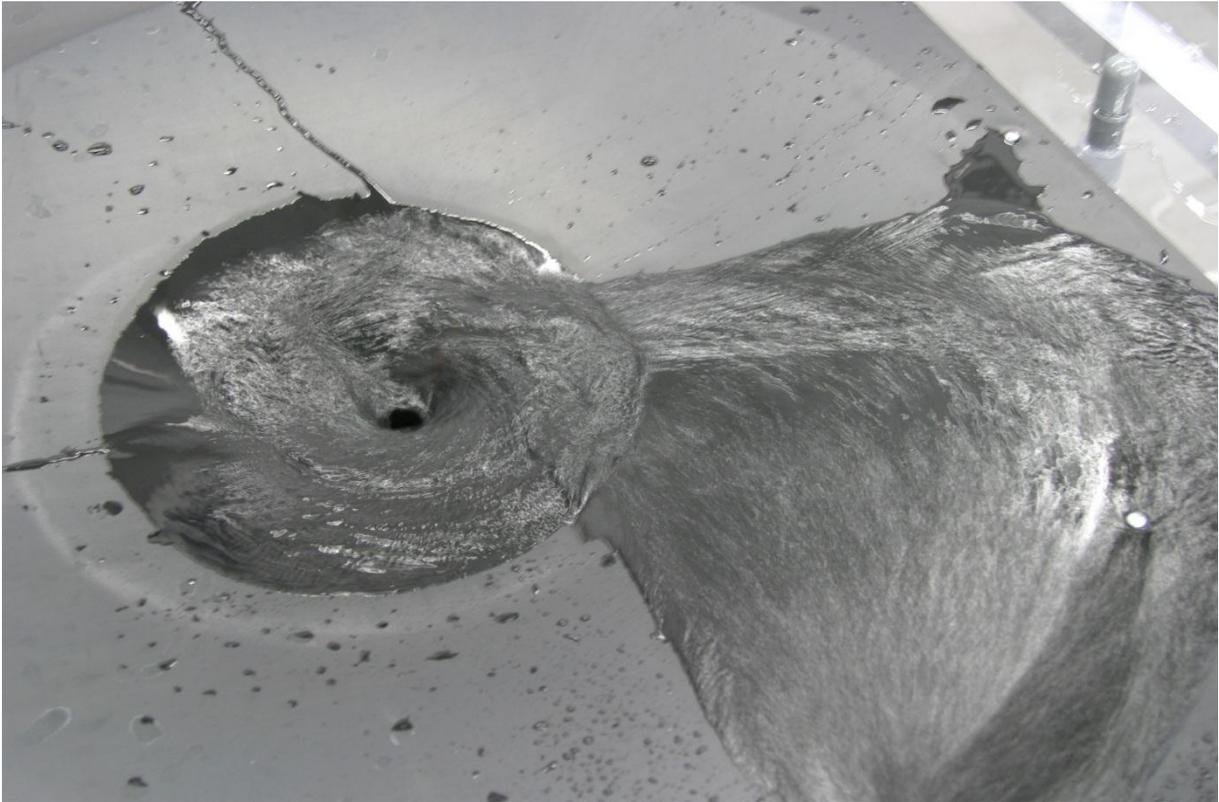


图. 99

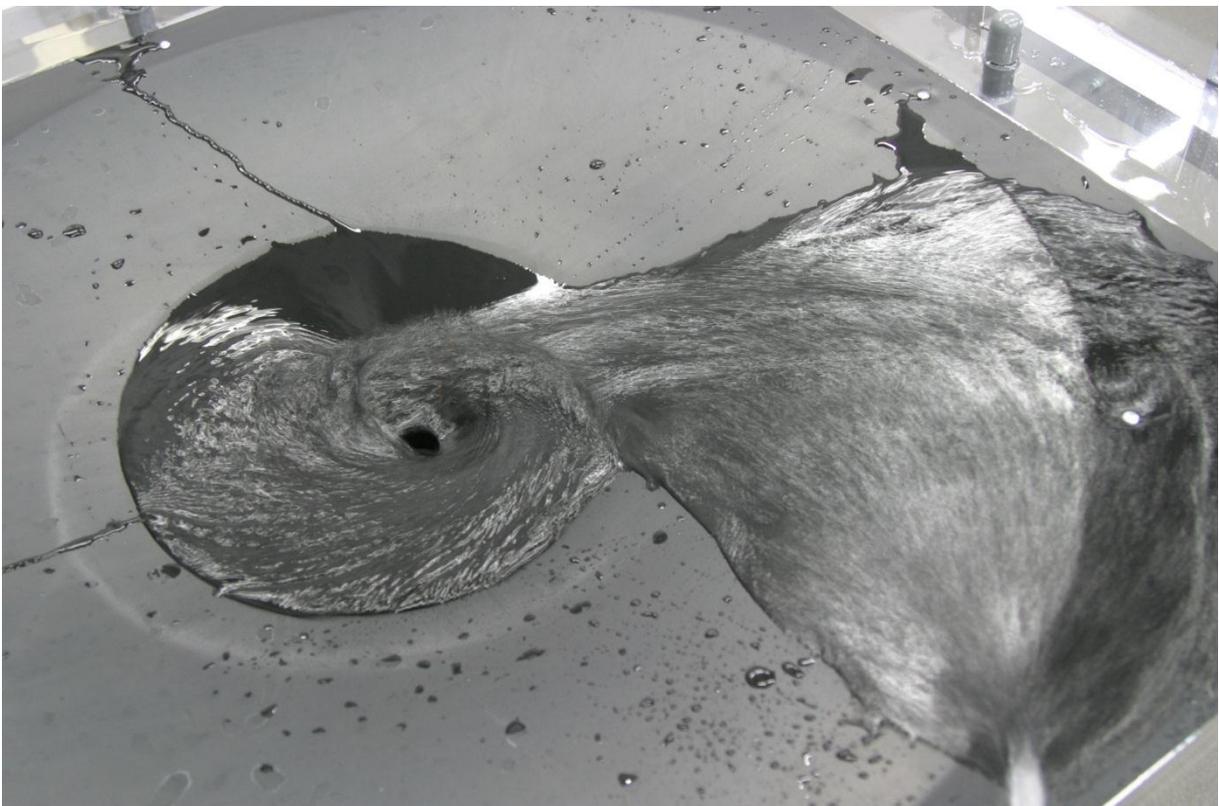


图. 100

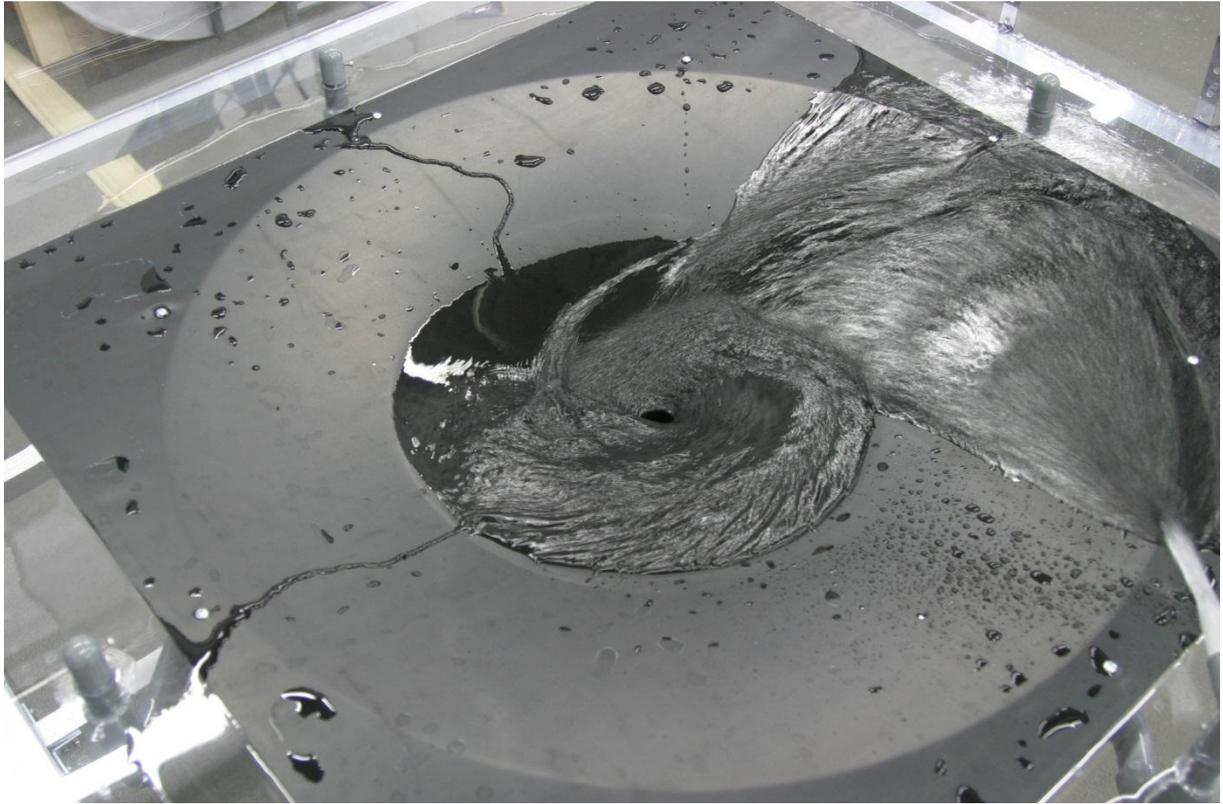


图. 101

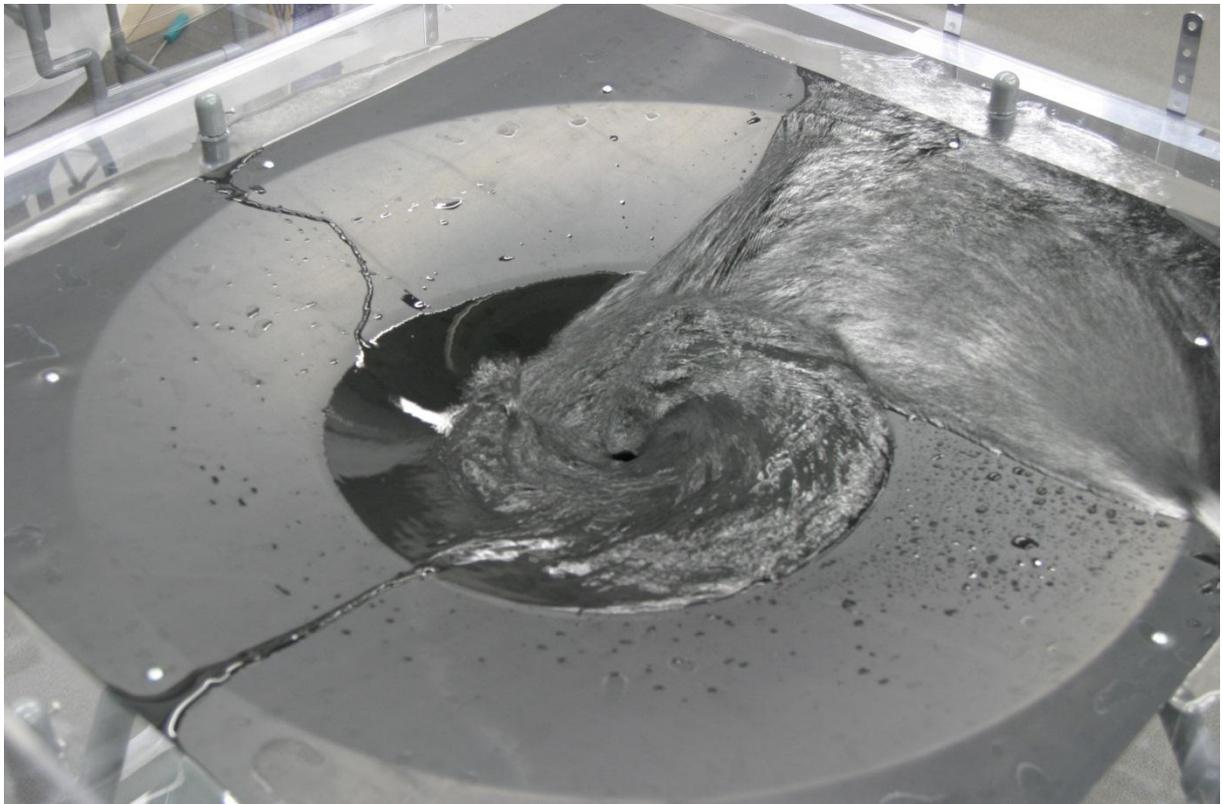


图. 102

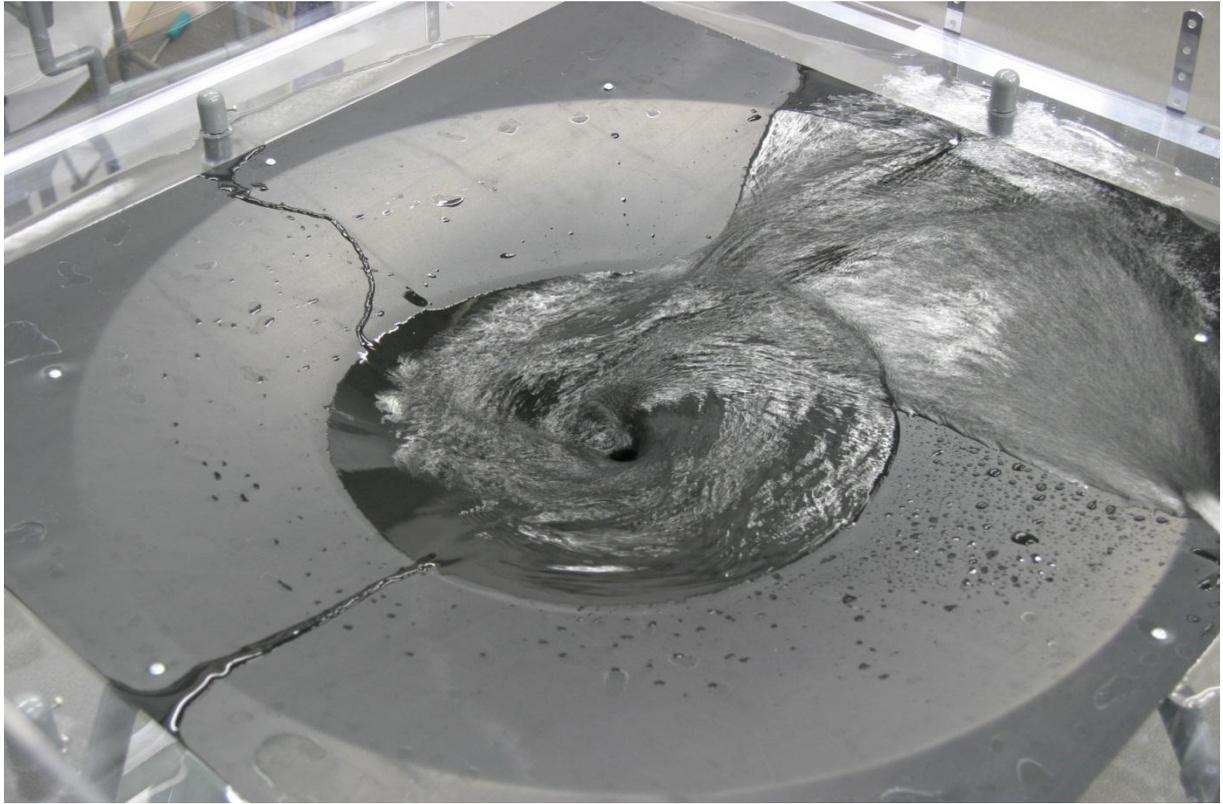


图. 103

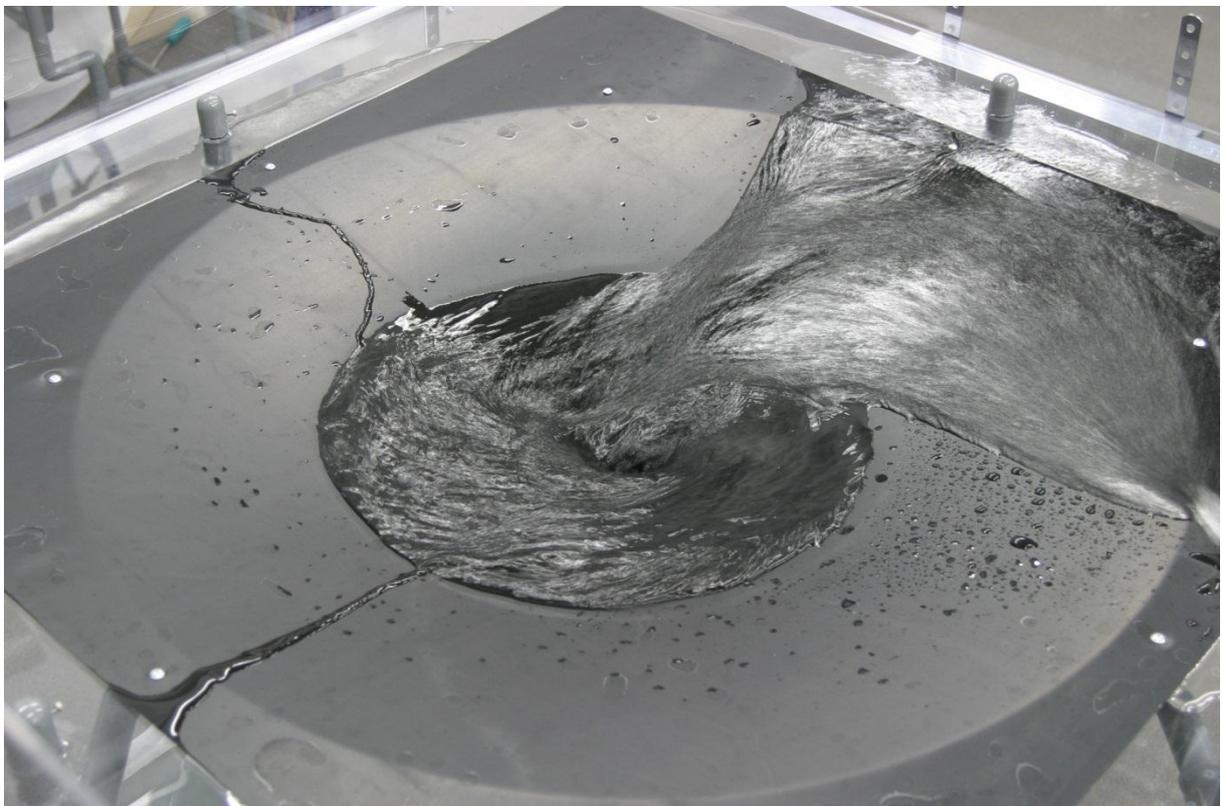


图. 104



图. 105



图. 106



图. 107

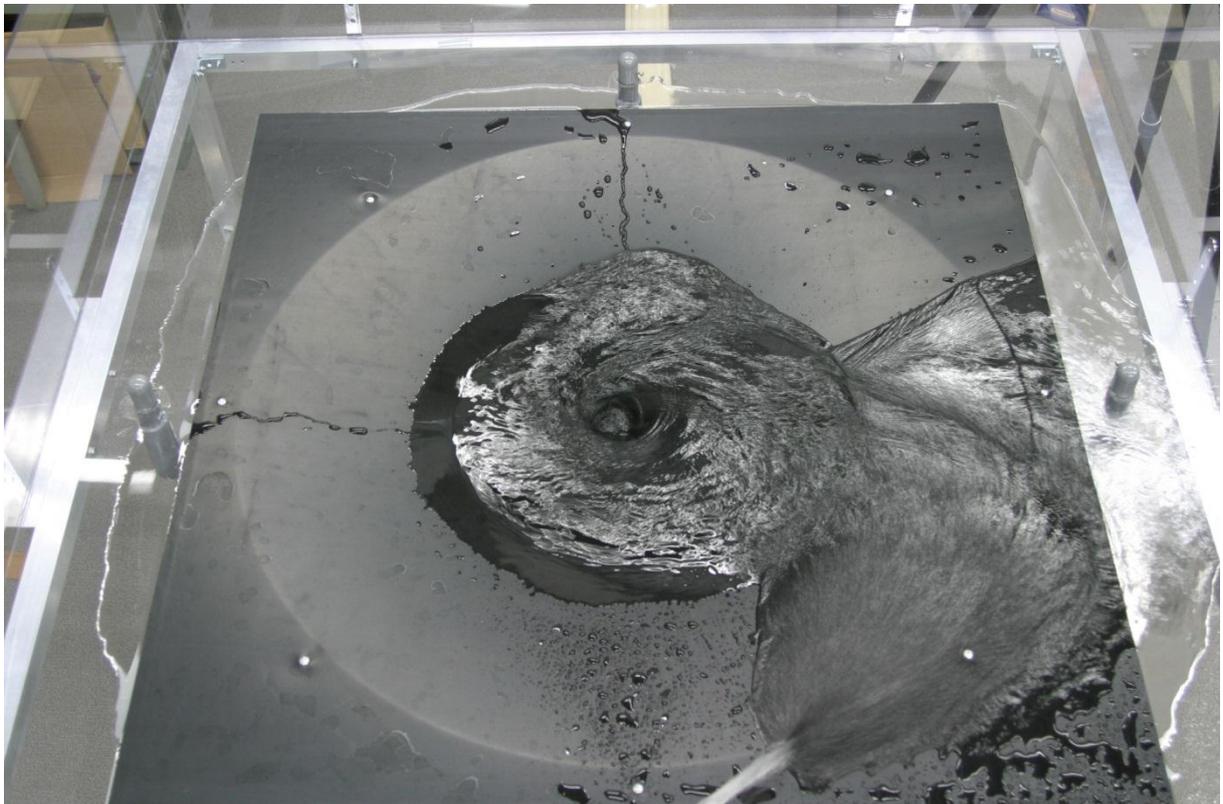


图. 108

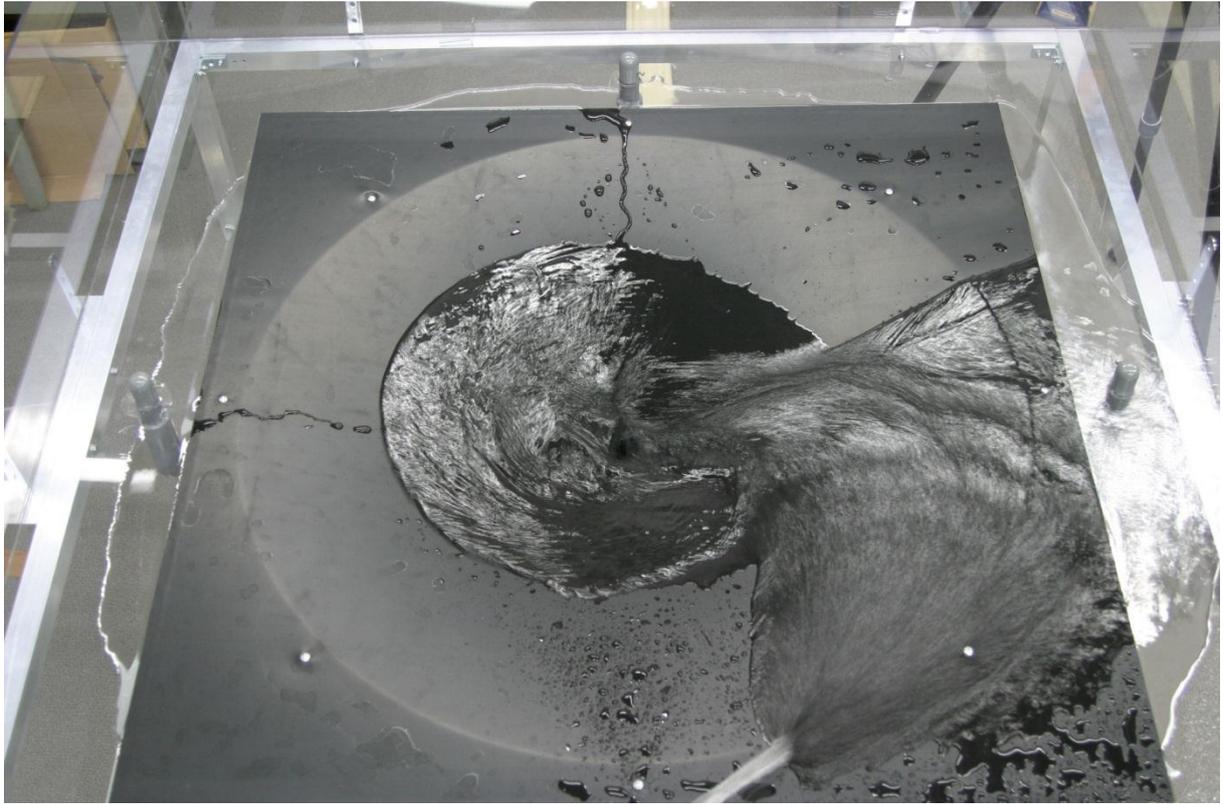


图. 109

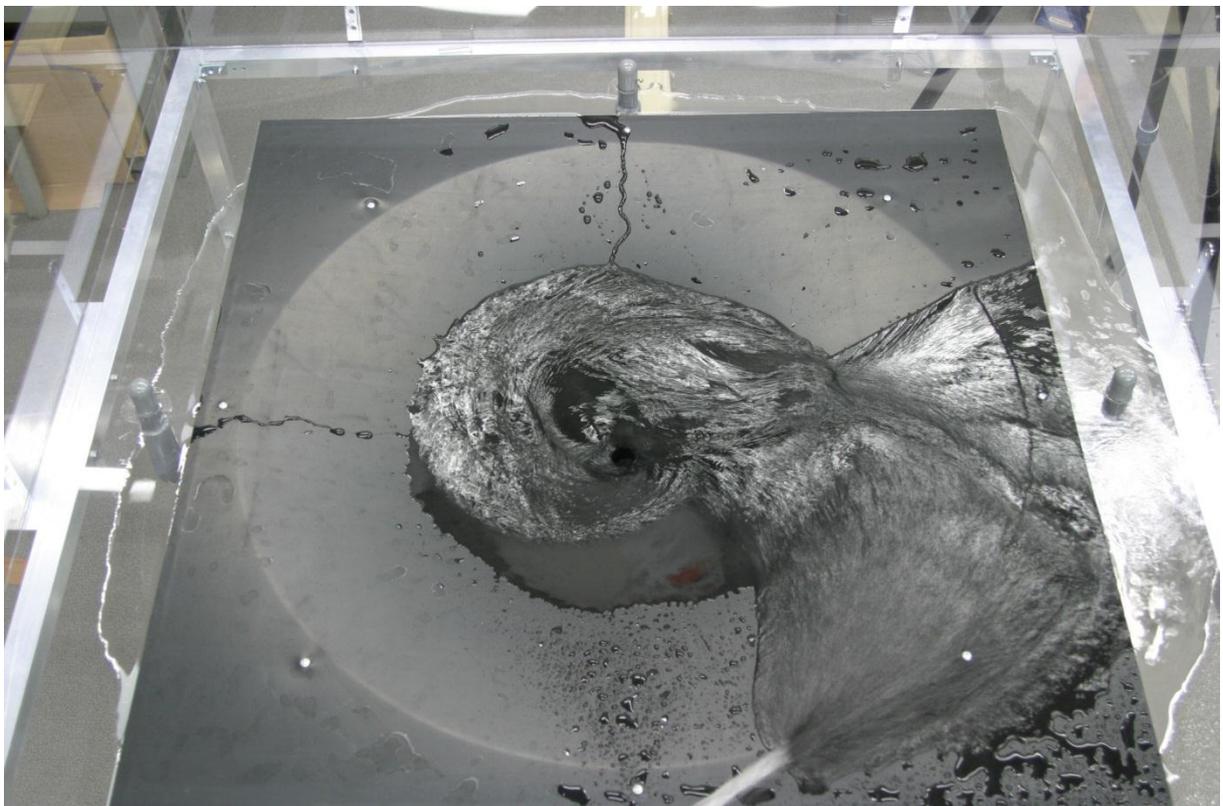


图. 110

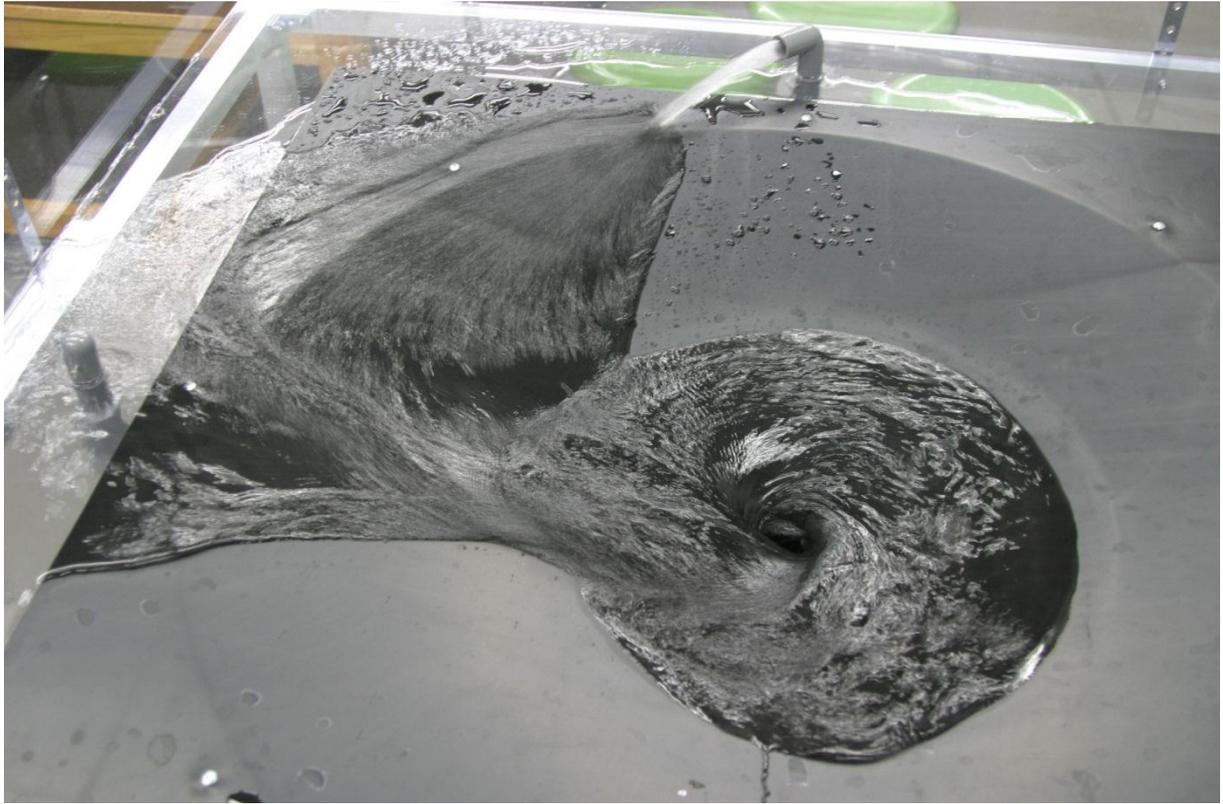


图. 111



图. 112

VII 実験結果と考察

実験結果として得られた流体の様子をそれぞれ見ていく.

VII.1 1号機 —LEC 銀河と渦巻銀河の密度波—

1号機に発生した表面波と実際の渦巻銀河を画像で比べてみる.



図. 112 M101 (NGC5457)



図. 113 1号機の表面波

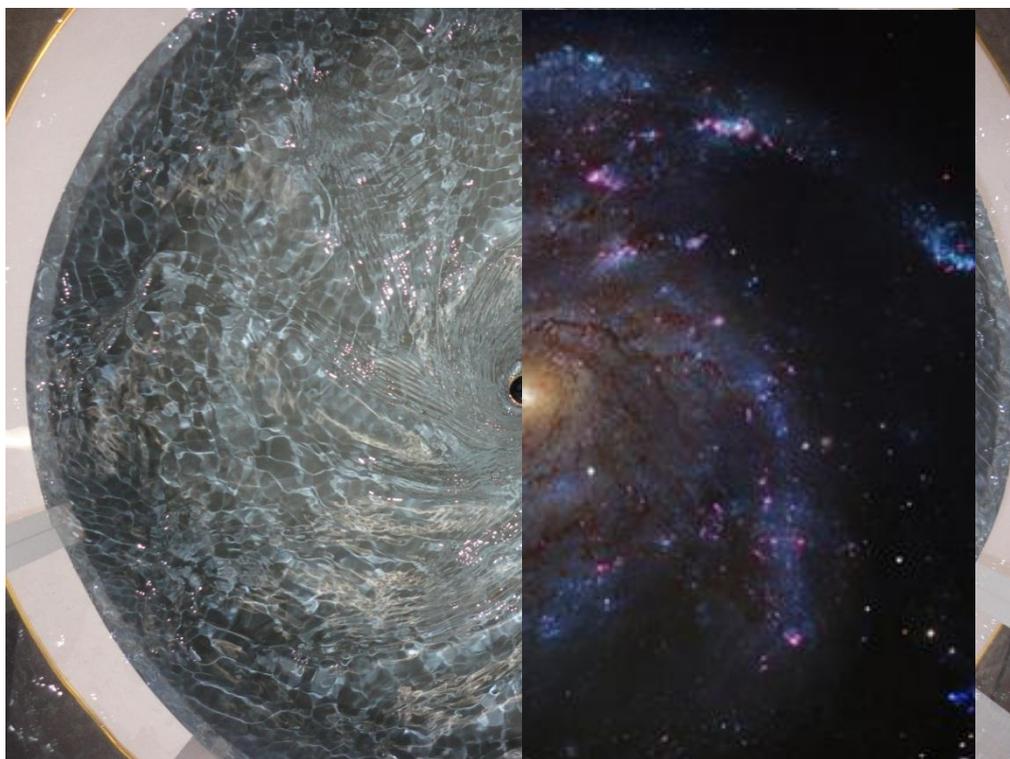


図. 114 銀河と表面波を重ねて比較する

図.114 を見てみると,装置で発生させた表面波の腕の形が実際の渦巻銀河に非常に似ていることがわかる,表面波として銀河の形を再現するという目的は達成されていると言える.また実験中の表面波の腕は回転しながらもその構造を維持し続けていた.これはⅡ章で紹介した渦巻銀河の巻き込みの困難を回避している.

腕の構造の他にも,注意深く LEC 銀河を観察すると波の微細な構造があることがわかる.



図. 115 腕はきつく巻き込まれず一定の形状を保つ



図. 116 腕と腕の間にも細かい波ができる

この1号機により LEC 銀河の表面波は確かに実際の渦巻銀河と比較できるような振る舞いをする事がわかった.また表面に浮遊物を流すことによって表面波を形成している流体が毎秒数 m 程度の速度を持っていることも知ることができる.

Ⅶ.2 2号機 —LEC 銀河と銀河衝撃波—

2号機の実験では回転流の軌道を変えることで,2種類の表面波を発生させることができた.

この2種類の表面波をⅡ章6節に出てきたフロキュレントアーム銀河とグランドデザインアーム銀河と比較してみる.



図. 117 フロキュレントアーム銀河 NGC3982

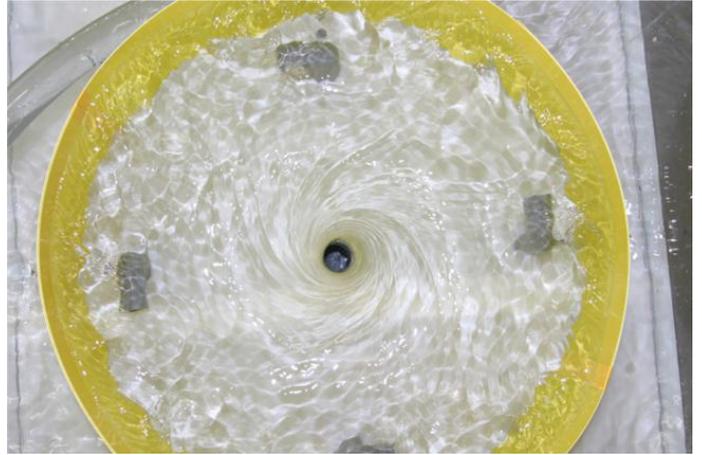


図. 118 円形の水槽に発生する表面波



図. 119 グランドデザインアーム銀河 NGC1300



図. 120 楕円形の水槽に発生する表面波

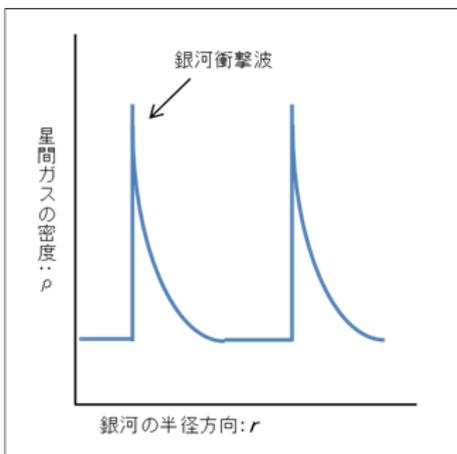


図. 121 衝撃波面は密度が急激に高くなる

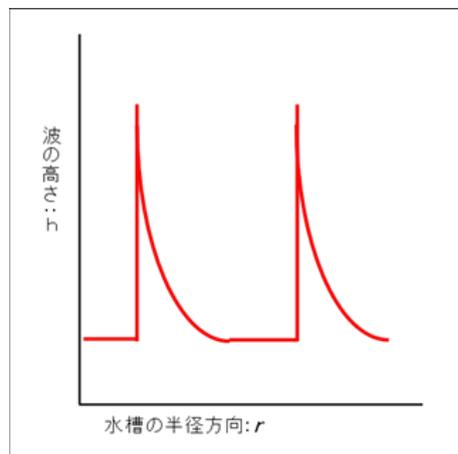


図. 122 楕円の LEC 銀河でも同じことが言える

ここで注目すべきはグランドデザインアーム銀河を再現できていると考えられる赤い楕円の軌道を持つ LEC 銀河の表面波である。

楕円形の LEC 銀河の二本の腕は二つの異なった速度の流れが衝突することで発生している。これは II 章で紹介したグランドデザインアーム銀河における銀河衝撃波と非常に構造が似ている。図.121 は実際の渦巻銀河で考えられている衝撃波の振る舞いである。衝撃波が発生している箇所は密度が非線形に高くなっている。この現象と同じことが起きていると考えられる。



図. 123 LEC 銀河の衝撃波

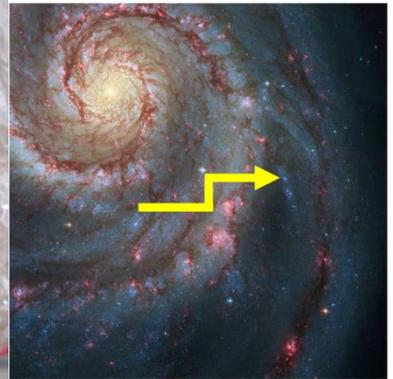


図. 124 渦巻銀河の衝撃波

LEC 銀河の二本腕は M51 のような単なる渦巻銀河の腕と見ることができ、NGC1300 のような棒状渦巻銀河の棒状構造として見ることもできる。



図. 125 棒状渦巻銀河の棒構造



図. 126 棒構造に対応している

また軌道を楕円することで腕の本数を変えることができたのも大きな成果である。

水槽を円形にした場合,表面に現れる渦の腕は無数に見え軸対称な形となるが,水槽を楕円形にすると二本の腕が卓越して現れる.この現象は,実際の銀河において近傍の天体からの重力で円盤の軌道が乱されている状態と対応させて論じることができる。

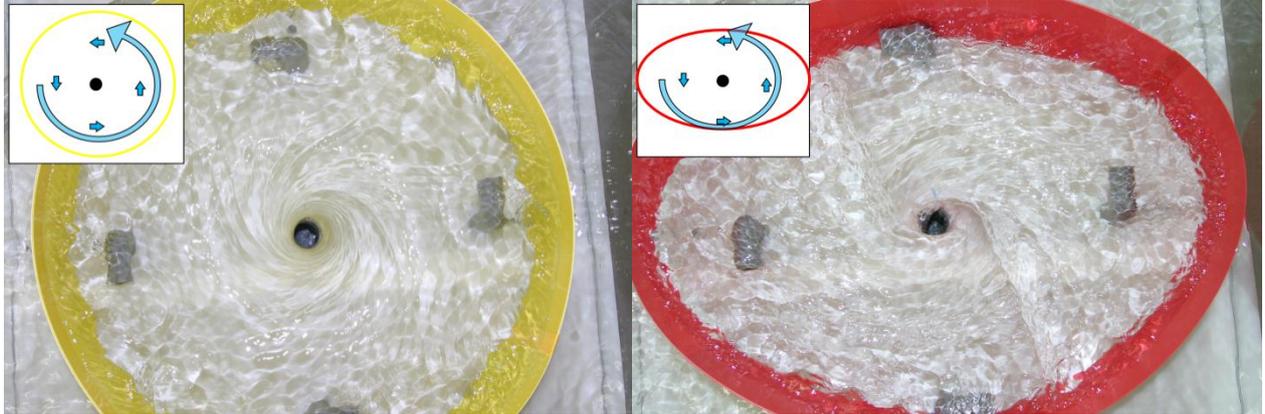


図. 127

図. 128

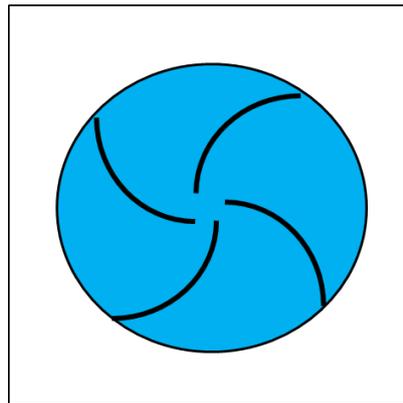


図. 129

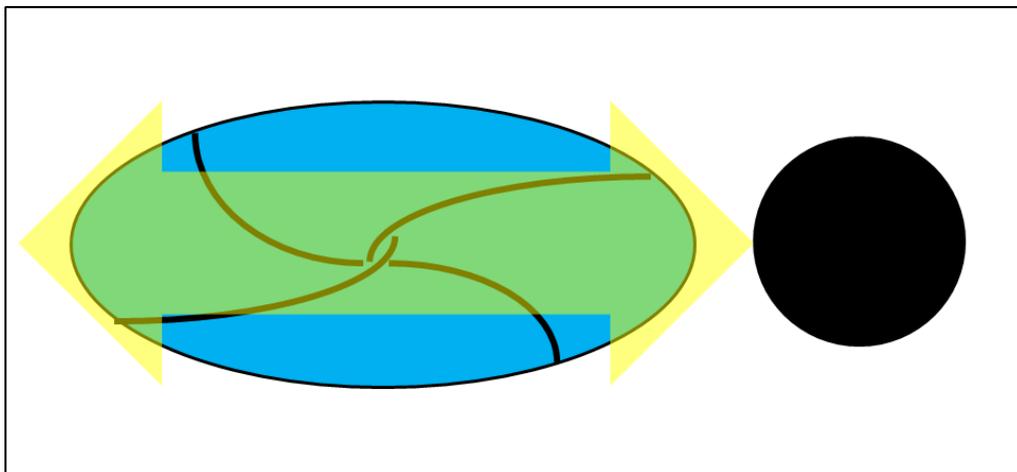


図. 130

Ⅶ.3 3号機—LEC降着円盤—

3号機の実験では,1号機と2号機と違い降着円盤の再現実験のみ行った.渦巻銀河の実験も試みたが水槽の大きさに対してポンプの出力が足りずこれまでのような渦を再現することはできなかった.

渦状構造の研究という本論から少し外れるが,実験で再現した LEC 降着円盤について考察する.

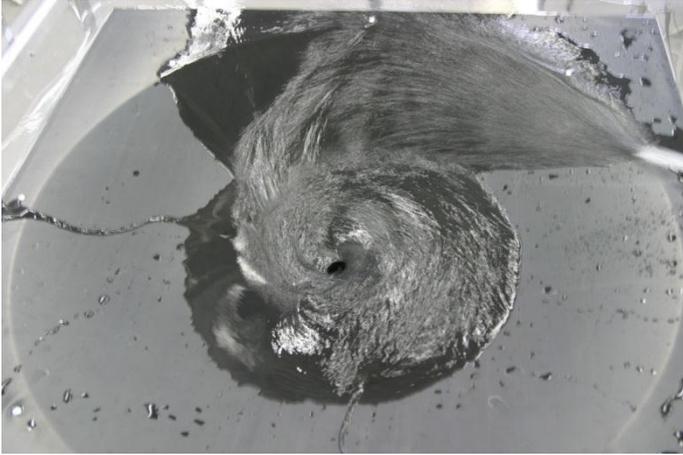


図. 131 3号機で再現した降着円盤

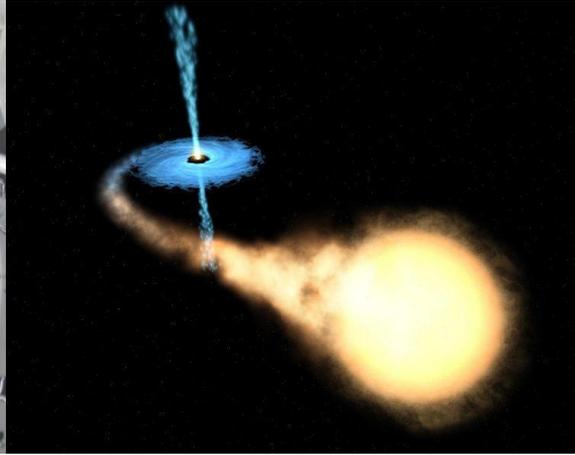


図. 132 天体における降着円盤(想像図)

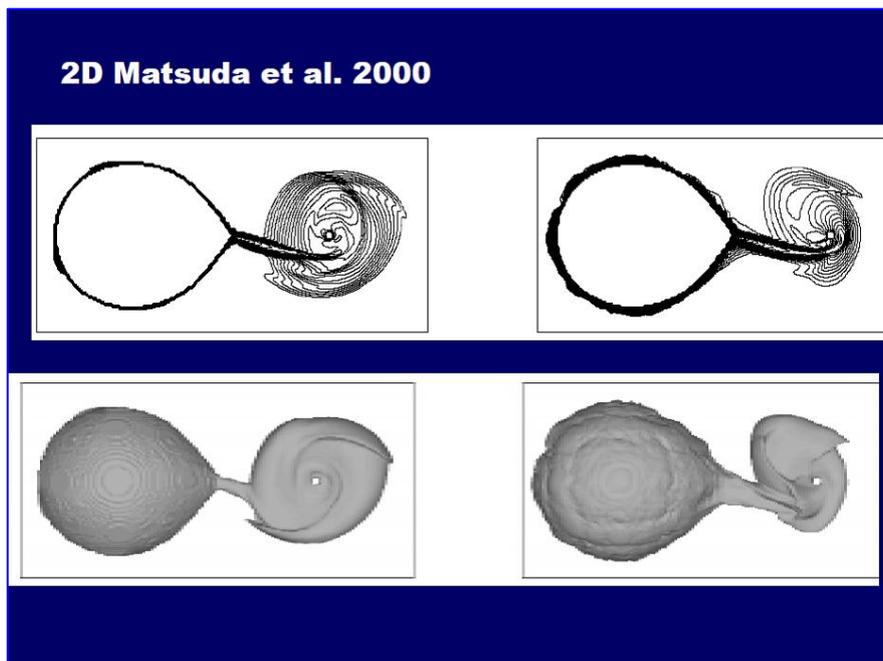


図. 133 シミュレーションによる降着円盤

降着円盤とは図.132のようにブラックホールなど強い重力源に近傍の天体の星間ガスが回転しながら落ちていく現象である.実際観測されるのはガスが降着する際に放射される X 線などである.図.133はシミュレーションによる降着円盤である,渦巻銀河のような衝撃波が発生していることがわかる.

この降着円盤が重力ポテンシャルを再現した底面を持つ3号機に再現できている.この LEC 降着円盤には,これまでの実験にも見られた不連続面による衝撃波の構造の他に,一定の回転流を流しているにも関わらず,突然 LEC 降着円盤が振動する様子が観察された.これは LEC 実験によって初めて得られた現象である.

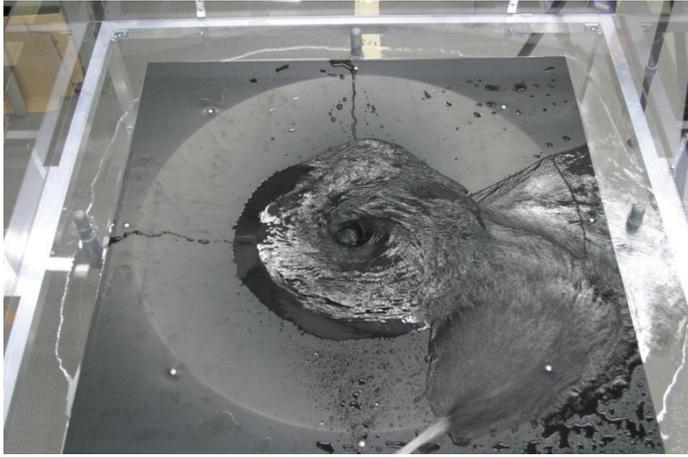


図. 134

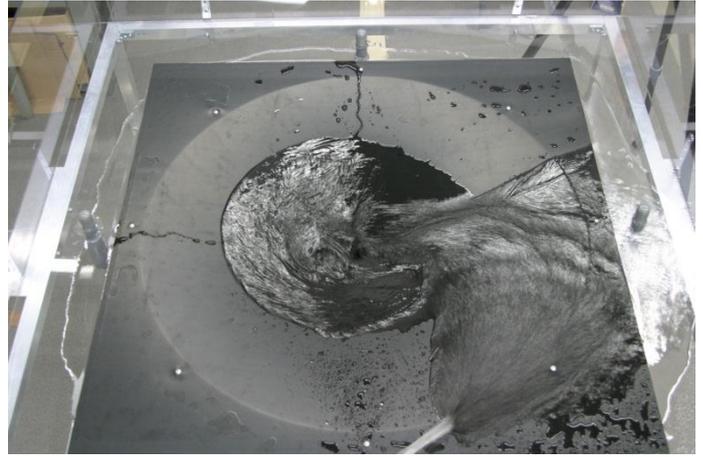


図. 135

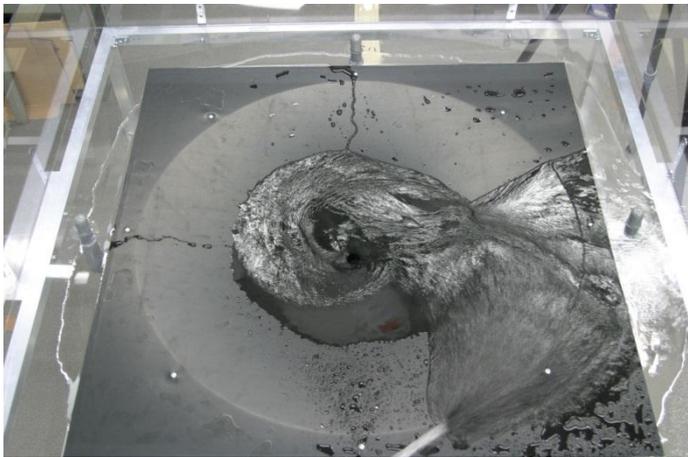


図. 136

図.134～136 は LEC 降着円盤の連続写真である.渦巻銀河のような腕の構造を形成していた中心部分があるタイミングで崩れ振動する現象が起きている.

VIII まとめ

これまでの LEC 実験を通して以下の知見が得られた。

- ・水槽の表面波は渦巻銀河と同じように巻き込まれることなく腕の形状を維持することができる。
- ・この表面波は流体として近似された渦巻銀河と理論的にもよく一致する。
- ・水槽の形を変え回転流の軌道を歪めることでフロキュレントアーム銀河だけでなく、グランドデザインアーム銀河も再現することができる。
- ・LEC 実験で再現した降着円盤には不安定振動が見られ、これは降着円盤に対する新たな理解につながる。

IX 今後

3号機での渦巻銀河の再現ができていないように、LEC 実験装置自体にまだまだたくさんの課題が残っている。また LEC 銀河の波の高さの計測もまだ実現していない。これらを踏まえ装置の改良をしていかなければならない。

将来的には図.127 のようにコリオリ力を再現するため LEC 装置全体を回転させる必要もあるだろう。

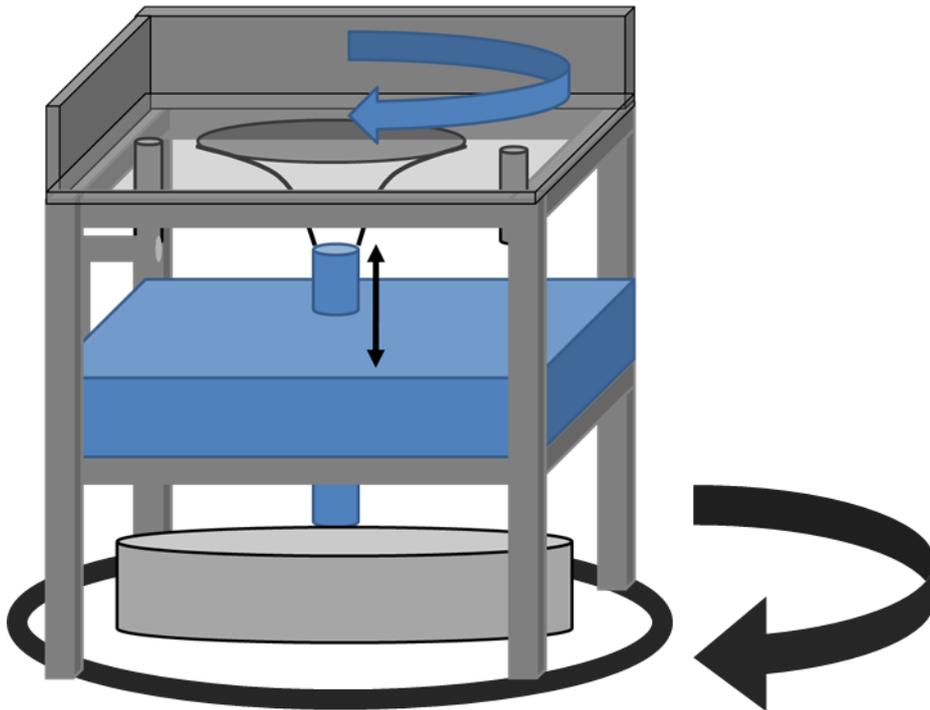


図. 137

X 謝辞

この宇宙流体実験:LEC というテーマは筆者が学部生の頃から取り組んできた研究で,300年の歴史を持つ天文学の中でも極めて特異で類をあまり見ないものでしょう.それゆえに苦労も多かったけれど,その分得るものも多かったように思います.

そんなテーマを与えてくださった祖父江義明先生には心より感謝しております.このテーマを通して自然現象に科学的に向き合う姿勢を学びました.ありがとうございました.

また,学会等においてご意見を下さったたくさんの方々にも感謝いたします.厳しい意見もありましたがその一つ一つがこの研究テーマの支えになりました.特に積極的に意見,また助言を下さった総合研究大学大学院の坂井さん.ありがとうございました.

同研究室メンバー及び大学の事務関係者の方々にも感謝したいと思います.皆様の存在があったからこそ,ここまで来れたという想いです.ありがとうございました.

X I 参考

- ・ 日本評論社 モダンアストロノミーシリーズ 4 巻 銀河 I
同 5 巻 銀河 II
祖父江義明 有本信雄 家正則
- ・ 朝倉書店 自然と工学における渦
大橋 秀雄
- ・ 山海堂 渦学
小川 明
- ・