

カオス水車モデルにおける「ゆらぎ」の類型 ——「ゆらぎ」の相転移——

井手口 敬

序

ブリゴジンらの散逸構造理論で、熱力学系に関して「ゆらぎ」による均衡からの乖離が、システムの運動を発散させて解体させるのではなく、むしろ積極的に新たな構造を作り上げる契機として理解されるようになった^{#1)}。

この考え方は、複雑系における自己組織化の問題や、広くは、新自由主義の考え方と結びついて新たな思想を生み出そうとしている。

しかし、ミクロな「ゆらぎ」がマクロな構造を形成するという説明は、具体的には理解しがたい。そこで、本論では、CGのカオス水車モデル^{#2)}を利用しながら、ミクロな「ゆらぎ」とは如何なるものか？ 如何にしてミクロな「ゆらぎ」がマクロな構造を作り上げていくのかを考察してみたい。

以下、本論ではCGカオス水車の実験を通して「ゆらぎ」を具体的に把握し、類型化しながら、ミクロな「ゆらぎ」がマクロな構造を生み出していくプロセスについて考察する。

I. ミクロな「ゆらぎ」が生み出す秩序

本章では、カオス水車の運動形態に見られるミクロな「ゆらぎ」の生成メカニズムとそれがマクロな秩序（＝ある種の平衡状態）を生み出す過程について考察する。

このカオス水車は、水車への注水量（＝1秒間の注水量）、漏水量（＝水車のかごに開いた穴の直径で示される）、及び水車の減衰率と言う3つ変数を組み合わせることで様々な運動形態を示す。本論では、カオスの辺縁領域^{#3)}について、水車の減衰率の軸に沿って考察してみたい。

この水車の回転速度の時間的变化は、回転の加速度（＝X軸）と回転速度（＝Y軸）の座標空間上に様々なアトラクターを形成する。ここでは、これら様々なアトラクターの形態に注目しながらカオス辺縁における「ゆらぎ」の類型化を中心として考察したい^{#4)}。

実験1) 高速回転における見えない「ゆらぎ」—マイクロな「ゆらぎ」—

カオス水車は、注水量 5 cc/秒、かごに開いた穴の直径 2 mm、水車の減衰率 $4.0^{#5)}$ のときにカオス運動を見せる $^{#6)}$ 。

実験1)では、減衰率を0.4と極めて低く設定してみた。この実験では、カオス水車は高速で回転する。図1は、その実験結果を示したものである。この水車は30秒間に36回転以上の等速的回転運動形態を示している。

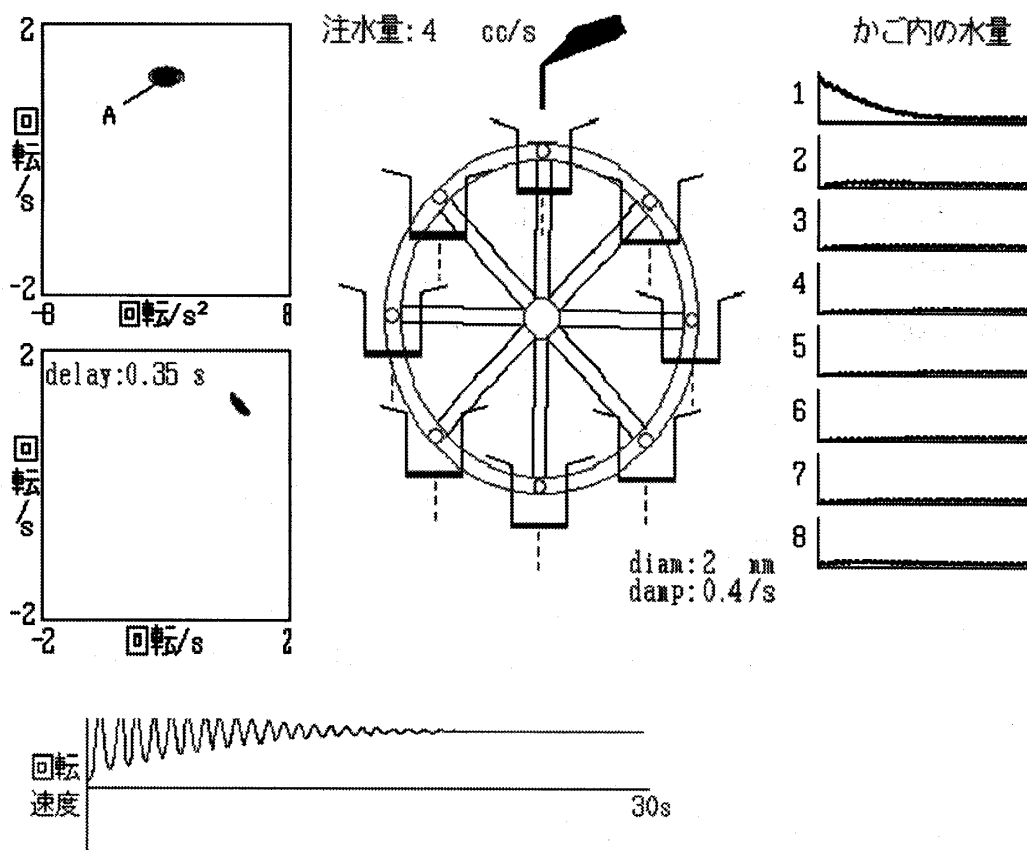


図1 実験データ：注水量 4 cc/秒，穴の直径 2 mm，減衰率0.4

図中の回転速度の時間的变化に注目してみたい。

最初の20秒間に明瞭な振動が見られるが、これは、No. 1のかごを満杯にして回転速度の初期値を $0.1^{#7)}$ とした影響によるもので、この「ゆらぎ」は時間の経過に伴って次第に小さくなり、理論的に1分以上経過するとアトラクターは1点に収斂していく。結果的に見ると、この実験では、水車は等速回転運動の形態を示すことになる。

すなわち、回転の加速度 (= X軸) と速度 (= Y軸) の座標空間に表されている楕円状のアトラクターは最初の15秒間の「ゆらぎ」によるもので、30秒以後のアトラクターは、図中の点Aに収斂していく。換言すれば、注水量 4 cc/秒，穴の直径 2 mm，減衰率0.4とした実験では、水車の運動は等速回転運動に収斂していくので、図示できる

「ゆらぎ」は見られない。

次にNo.1～No.8のかご内の水量変化に注目すると、8つのかごの水量は、僅かではあるが振動しているのが分かる。

これは、第1に、連続的に注入されている水を回転する8つのかごで不連続に受給していることに起因している。しかし、高速で回転しているために注水時間が短く、各かごへの注水の絶対量は少なくなっている。

第2に、かごに開いた穴の直径が2 mm程度であるために漏水量が比較的少なく、注水量と漏水量との差の関係で表される水量の振動は極めて小さい。

第3に、回転速度が速いために、8つのかごに見られる水量の分布にはあまり偏りが見られないことから、これによる振動は極めて小さいものとなっている。

第4に、8つのかご内の水量が極めて低位であるため、かごの水深に起因する漏水の非線形性は弱いものとなっている。

これらの結果、この実験では、回転速度の時間的変化図に見られるように明瞭な「ゆらぎ」は認められない。換言すれば、加速度と速度との座標軸で表されるアトラクターは、極めて小さな点に過ぎないのである。

次に、かご内の水量の振動が極めて大きくなる実験を試みたい。

実験2) 中位の高速回転運動に見られる「ゆらぎ」—マクロな「ゆらぎ」—

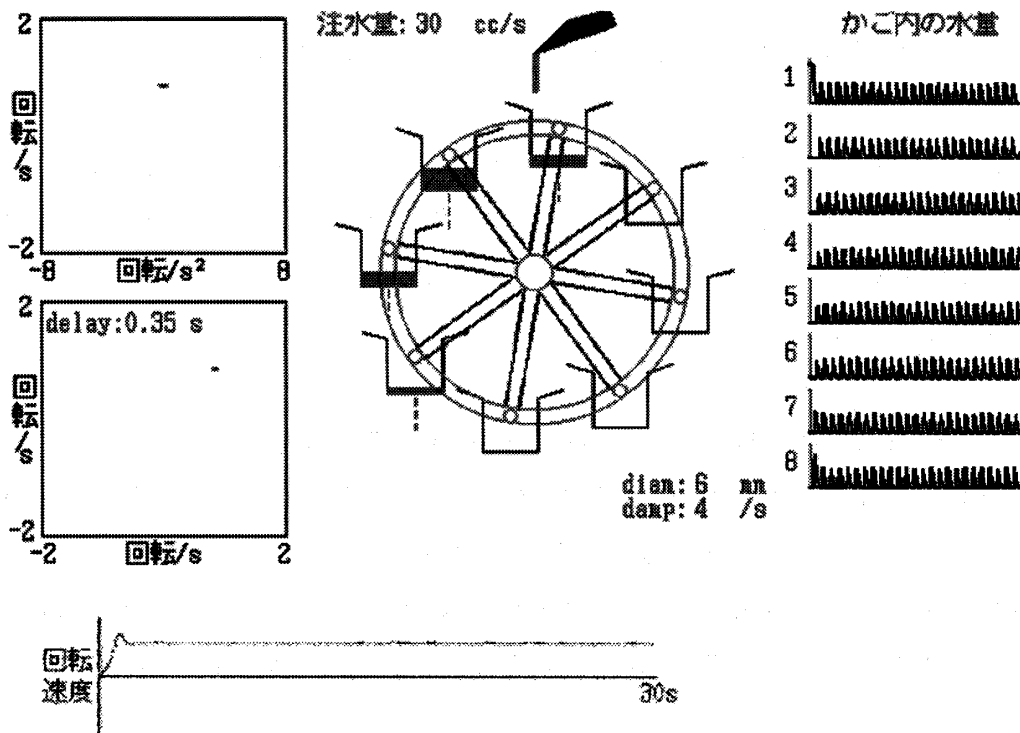


図2 実験データ：注水量30cc/秒，穴の直径6 mm，減衰率4.0

この実験では、カオス領域から少し離れた値、注水量30cc/秒、穴の直径6mm、減衰率は4に設定してある。この設定では減衰率が相対的に高い水準にあるため、回転速度が中位となり、かご一つ当たりの注水時間が長いために注水量は多くなる。反面、かごの穴の直径は6mmと実験1)の3倍に設定してあるためにかごの中の水量は短時間で減少する。結果として、8つのかごの水量は、それぞれかなり大きく振動していることが分かる。さらに、漏れによる急激な水量の減少は、実験1)と比較して強い非線形性を与え、加えて、多量の漏水は8つのかごにおける水量分布を水車の左半分に偏らせることになる。その結果、回転速度の図に表されているように、僅かではあるが回転速度に「ゆらぎ」が認められるようになる。すなわち、実験1)では、点に過ぎなかったアトラクターが、実験2)では小さな菱形状のアトラクターとして示される。これはかごの中の水量の構造的に生み出される振動に、漏水による非線形性が加えられ、水車の回転運動におけるフィードバック過程を通して増幅され、図示できるマクロな「ゆらぎ」が生み出されたことを示している。

以上、要点を整理すると、カオス水車に見られる「ゆらぎ」は、次の5つの要因で形成されていることが分かる。

第1に、連続的に注がれる水を8つの回転するかごで不連続に受給していることによってかごへの注水量に振動が生じる。

第2に、かごに開いている穴から水が漏れることで、注水量と漏水量との関係に振動が生じる。

第3に、各かごの水量変化は、漏水によって生じる非線形性を水車の回転力に与える。

第4に、8つのかご全体における水量分布は、水車の回転速度に複雑な振動を生じさせると共に、水車の回転運動における速度変化のフィードバック過程を通じて「ゆらぎ」を増幅させ、アトラクター図や水車の回転速度図に示されるようなマクロな「ゆらぎ」が生じたのである。

実験3) ミクロな「ゆらぎ」とマクロな「ゆらぎ」の比較考察

この実験3)は、カオス縁辺領域におけるアトラクターの相転移における減衰率の影響について、2つの減衰率に基づいて比較考察するものである。

注水量5cc/秒、穴の直径2mm、減衰率0.5の実験では、この水車は上部のアトラクターに示されているように、点Aへと収斂し、ミクロな「ゆらぎ」を呈するだけである。

これに対して、注水量5cc/秒、穴の直径2mm、減衰率0.56の場合は、下部のアト

ラクターが示すように秩序的な振動形態が見られる。このアトラクターは、回転運動における最大のものである。極めて限られた値域での運動形態を示しており、秩序性の高さを伺わせる。上部に見られたマイクロな「ゆらぎ」は、減衰率の僅かな変化によって全く異なったアトラクターを呈するようになる。換言すれば、等速的回転運動に秩序的な振動が組み込まれた運動形態へと相転移を見せたのである。

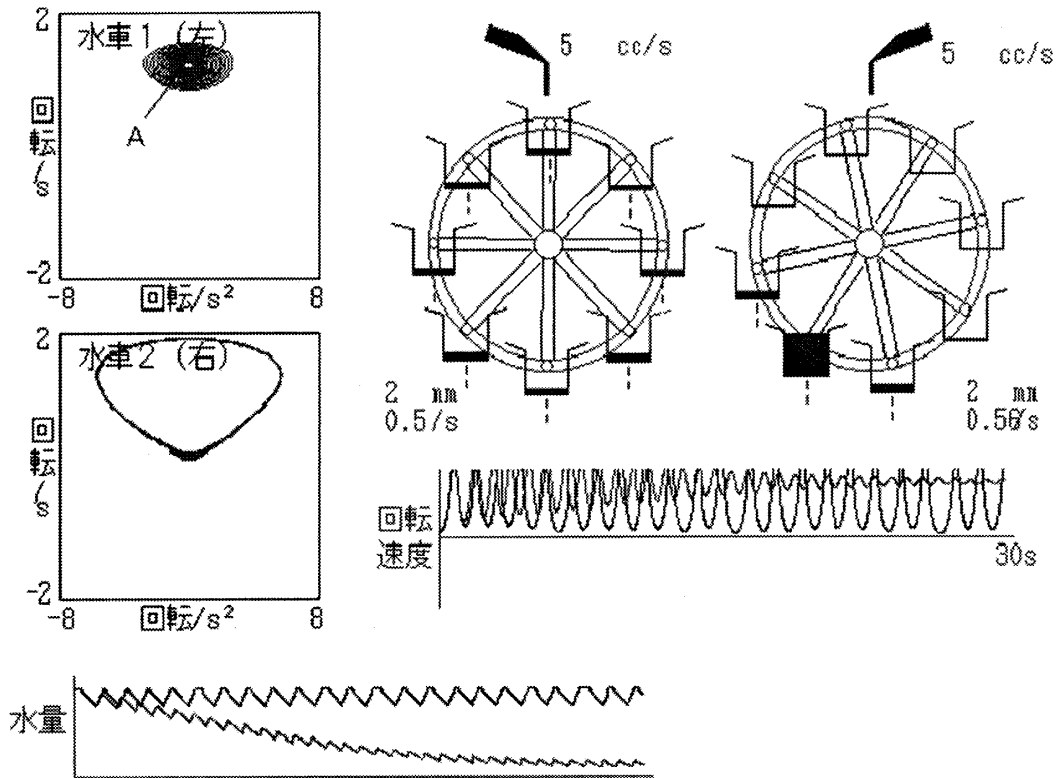


図3 ミクロな「ゆらぎ」とマクロな「ゆらぎ」の比較実験

実験4) 秩序的振動の中の新たな「ゆらぎ」—第2のマクロな「ゆらぎ」—

図4は、秩序ある振動が見られる、注水量5 cc/秒、穴の直径2 mm、減衰率0.56の実験結果を示したものである。

この実験では、各かごの水量の振動は比較的小さい。しかし、回転の加速度 (= X軸) と回転速度 (Y軸) とで表されたアトラクターを見ると、このカオス水車の回転運動における回転速度が正の領域における最大級のアトラクターを示している。

すなわち、No.1のかごにはかなりの水量が見られるが、他のNo.2~7のかごには殆ど水が溜まっていない。このことが回転運動に極めて大きな振動を生み出し、加えてNo.1のかごにおける漏水の大きな非線形性が回転運動におけるフィードバック過程を通して増幅され、図中のA, Bに見られるマクロな「ゆらぎ」を生み出す要因となっている。

また、図4のアトラクターは、回転運動が振動運動へと相転移を見せる極限的状态を示していると言える。この水車は、現在、左回転運動をしているが、回転速度の図に見られるように、回転速度が限りなく「0」に近い状況が生まれており、この部分にみられるマクロな「ゆらぎ」が、次の実験5)で見られる回転運動から振動運動への相転移を生み出すことになる。

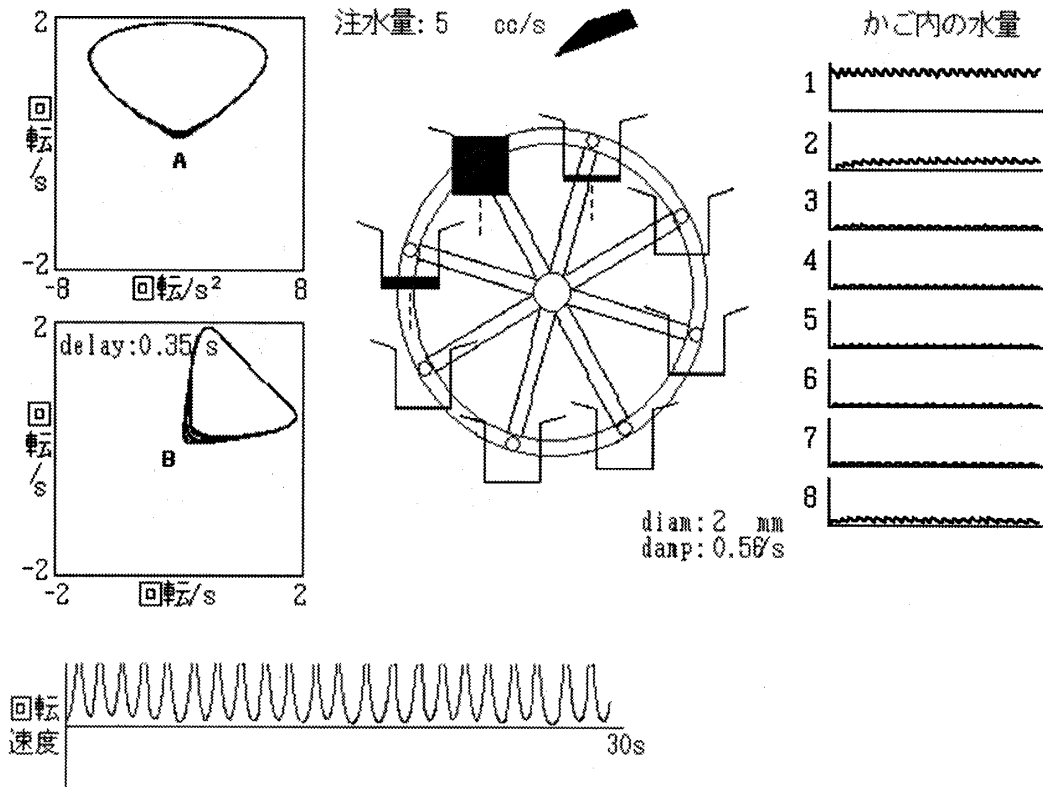


図4 実験データ：注水量 5 cc/秒，穴の直径 2 mm，減衰率 0.56

実験5) 回転運動から振動運動へ—臨界的「ゆらぎ」—

実験4)では、減衰率を0.56に設定していたが、実験5)では、100分の1ポイント上げて0.57に設定した。すると、これまで回転運動をしていた水車は、回転速度の図に見られるように、何回かの左回転運動をした後に、右回転運動にシフトし、このような運動の繰り返しを見せ始めたのである。実験4)の回転速度「0」付近に見られた「ゆらぎ」は、回転運動の臨界点を越えて振動運動への相転移を生み出したのである。

アトラクターの形態変化で説明すると、実験4)の場合、アトラクターは上部(=左回転)に限られていたが、実験5)の場合は、アトラクターは下部(=右回転)にも拡大し、結果として、連続回転性の強い回転運動が左右に振動する運動形態へと転移したことを示している。回転運動の振動内に生じた第2のミクロな「ゆらぎ」が、水車の左右の振動運動と言う新たな運動形態を生み出したのである。

なお、この実験で注目したいもう一つの点は、回転速度の図に見られるように、連続的回転運動の中に左右1回転ずつの単振動が含まれていることである。実験5)の水車の運動においては、一部分に過ぎなかった運動形態が、次の実験6)では、主たる運動として秩序的振動運動を展開することになる。

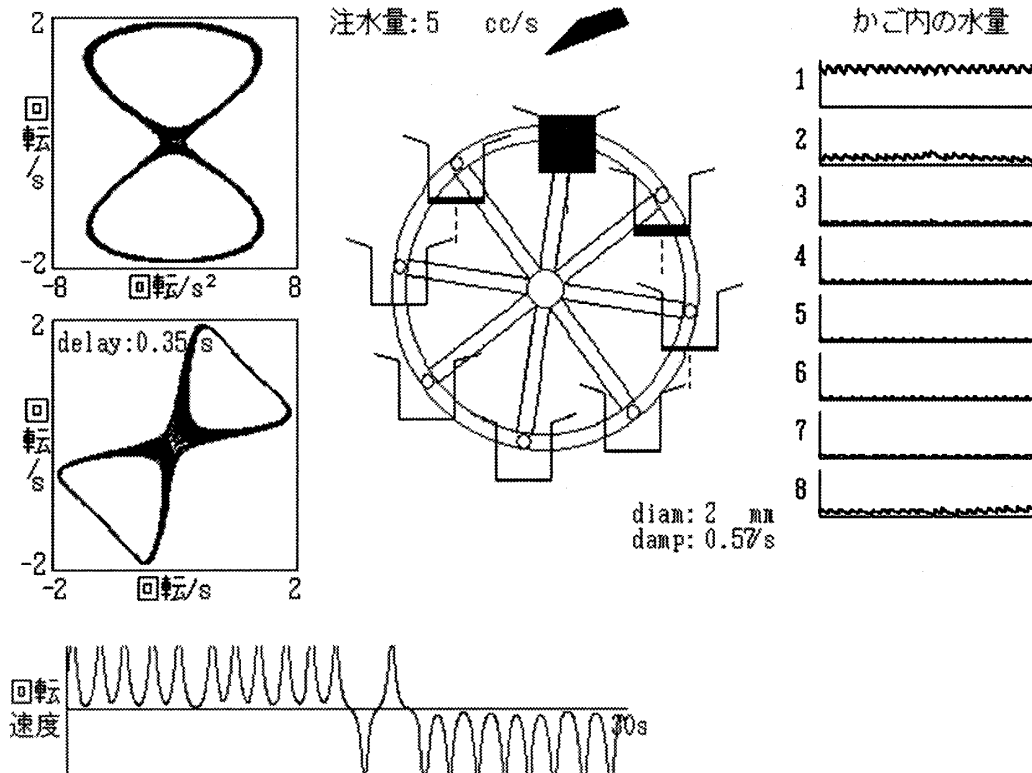


図5 実験データ：注水量 5 cc/秒，穴の直径 2 mm，減衰率 0.57

実験6) 秩序的振動運動—マイクロな「ゆらぎ」が生み出したマクロな構造—

実験5)では、連続性の強い回転運動が、時折、左右の振動運動に移る不安定な運動形態が見られた。ある意味では、この実験に見られる運動形態は、回転運動と振動運動との間の最大の「ゆらぎ」の形態を示していると言える。すなわち、構造的なマイクロな「ゆらぎ」が回転運動のマクロな「ゆらぎ」を生み出し、そのマクロな「ゆらぎ」の中に生じた第2のマクロな「ゆらぎ」が回転運動と振動運動とが明瞭に分化しながらも共存している臨界的「ゆらぎ」へと移行した形態であるとも言えるかもしれない。

この実験6)では、減衰率を更に上昇させて1.0に設定した。すると水車は、摩擦の増大によって連続的な回転力を失い、振動運動を安定化させて、秩序ある単振動運動を生み出したのである。回転速度の推移を見ても、次の実験7)と比較して歪みは小さく、高い安定性を示していることが認められる。

また、8つのかごの水量分布を見ると、各かごがそれぞれに秩序ある振動を見せていることが分かる。文学的表現が許されるならば、図6の8つのかごの水量変動は見事な機能分化を示しており、振動運動の秩序あるパターンは、部分の整然とした機能分化に支えられているとすることが出来る。部分と全体との調和のある美しさに思わず感動した次第である。

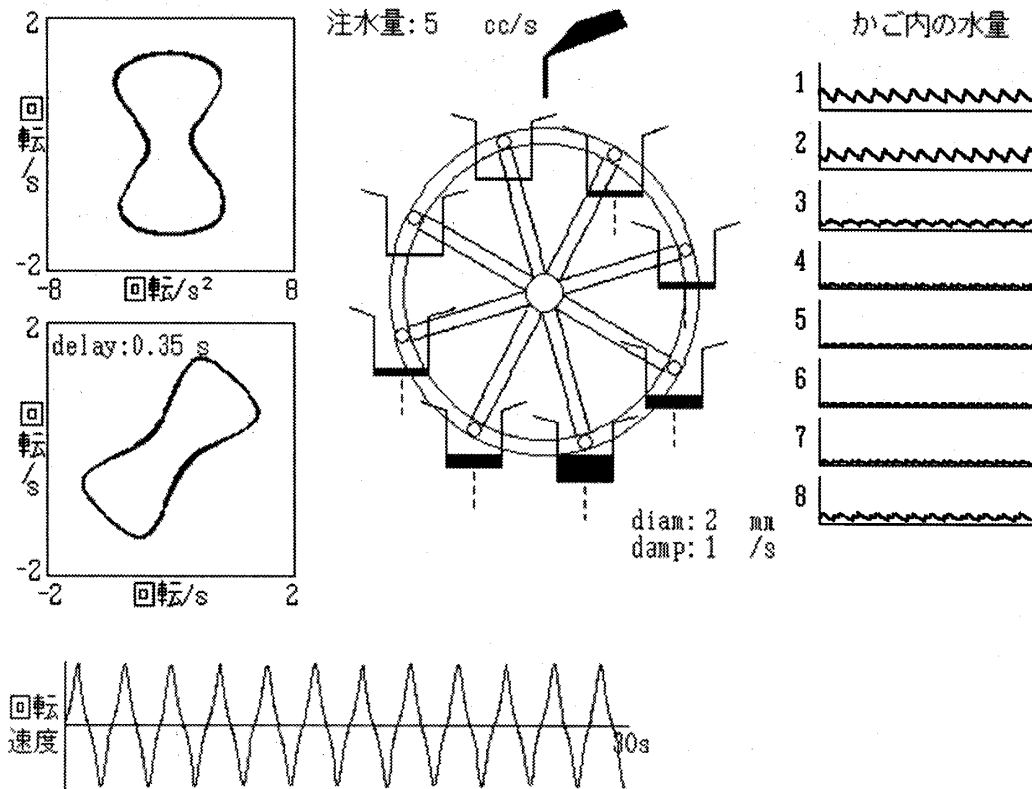


図6 実験データ：注水量 5 cc/秒，穴の直径 2 mm，減衰率 1.0

ちなみに、アトラクターの回転速度「0」付近の括れが小さくなっていることは、連続的な回転運動性は弱化していること、すなわち、回転運動からの非平衡性が高められていることを示している。

以上、減衰率を変化させながら、カオス水車の回転運動におけるマイクロな「ゆらぎ」が新たな構造、すなわち秩序ある振動運動を生み出す過程を見てきた。

II. 「ゆらぎ」の他の諸相

前章では、システム特有の構造的振動が重力的作用によって非線形性を与えられ、水車の回転運動におけるフィードバック過程を通して増幅されたマイクロな「ゆらぎ」がマクロな「ゆらぎ」を生み出し、更にマクロな「ゆらぎ」の中に生じた第2の「ゆ

「ゆらぎ」が新たな相転移を生み出す過程について考察した。本章では、マイクロな「ゆらぎ」が生み出すその他の様相について考察して見たい。

実験7) 振動運動に見られる「ゆらぎ」の増大—誤差的「ゆらぎ」—

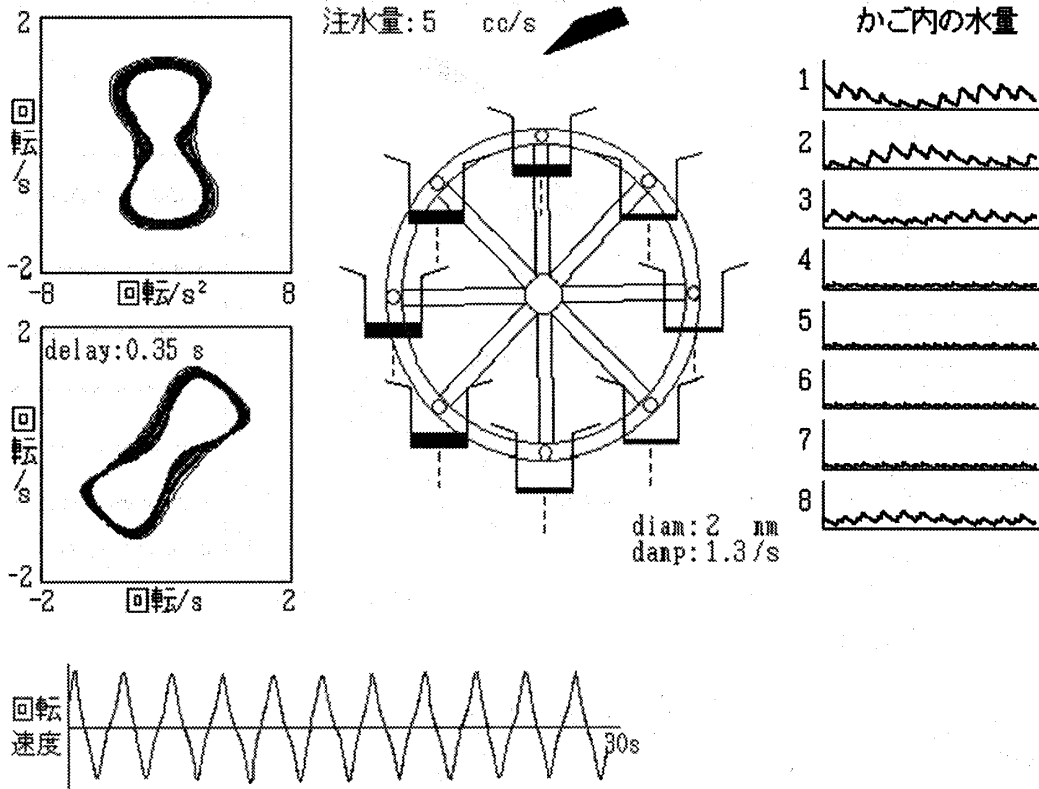


図7 実験データ：注水量 5 cc/秒，穴の直径 2 mm，減衰率 1.28

実験6)は、回転運動における「ゆらぎ」が振動運動と言う新たな運動形態を生み出したものであったが、この実験7)では、秩序的振動運動を示す領域において摩擦の増大が秩序からの「バラツキ」とも言うべき「ゆらぎ」の相を見ることができる。換言すれば、秩序的運動を不安定化させる「ゆらぎ」、言わば、誤差的「ゆらぎ」が見られるのである。この「ゆらぎ」は、秩序的運動に対して誤差の変動作用を及ぼしていると言える。

また、この実験に見られる「ゆらぎ」は、初期値への鋭敏な領域での「ゆらぎ」であるとも言える^{*)}。

この水車の運動をより長時間に渡って観察すれば、実験6)の例のように、この振動運動は、ある程度まで安定していくものと考えられるからである。この領域を特別に設定した理由は、前述したように、この「ゆらぎ」がNo.1とNo.2と言う初期値と関係の深いかごの水量の振動により生じていること。また、次の実験8)では、減衰

率を1.28から1.6へと引き続き増大させたにも拘らず、引き続き安定した振動運動が見られ、注水量5 cc/秒、穴の直径2 mmで、減衰率1.0~2.0の付近は、全体として安定した振動運動の領域を構成しているからである。

実験8) 秩序運動への「ゆらぎ」の縮減—安定した秩序領域における「ゆらぎ」—

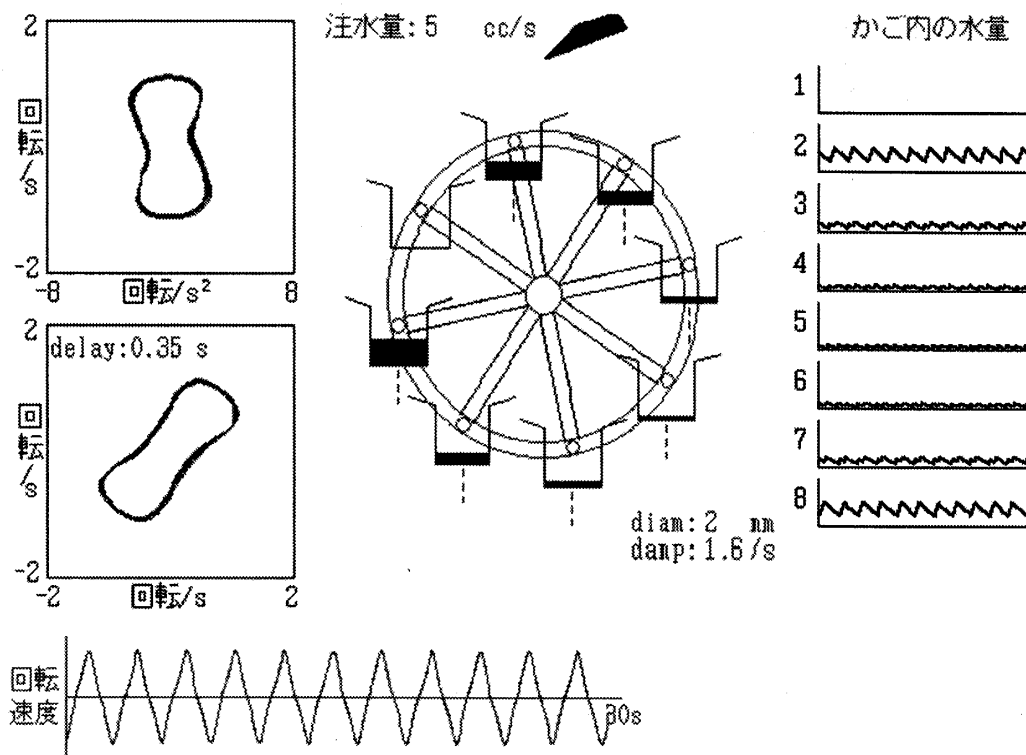


図8 実験データ：注水量5 cc/秒，穴の直径2 mm，減衰率1.6

実験8)では、摩擦の更なる増大によって実験7)に見られた「ゆらぎ」は、極めて小さくなる。図8のアトラクターに注目すると、中央部のくびれは、実験7)の事例よりも更に小さくなっており⁹⁾、アトラクター自体も、より小さくなっている¹⁰⁾ことが分かる。これは、極めて安定性の強い、秩序的運動形態であると言える。

実験6)の場合と同様に、8つのかごの水量変化は見事な機能分化を見せている。特に、No.1のかごには注水の機会がなく、その両側のかごにおける水量分布は、逆に、比較的大きな振動を見せている。より高い安定性が認められる。

しかし、更に一層減衰率を増大させると、この秩序的な振動運動にも新たな様相が現れてくる。

実験9) 秩序的運動を不安定にさせる「ゆらぎ」
 — 振動運動と回転運動を分化させる「ゆらぎ」 —

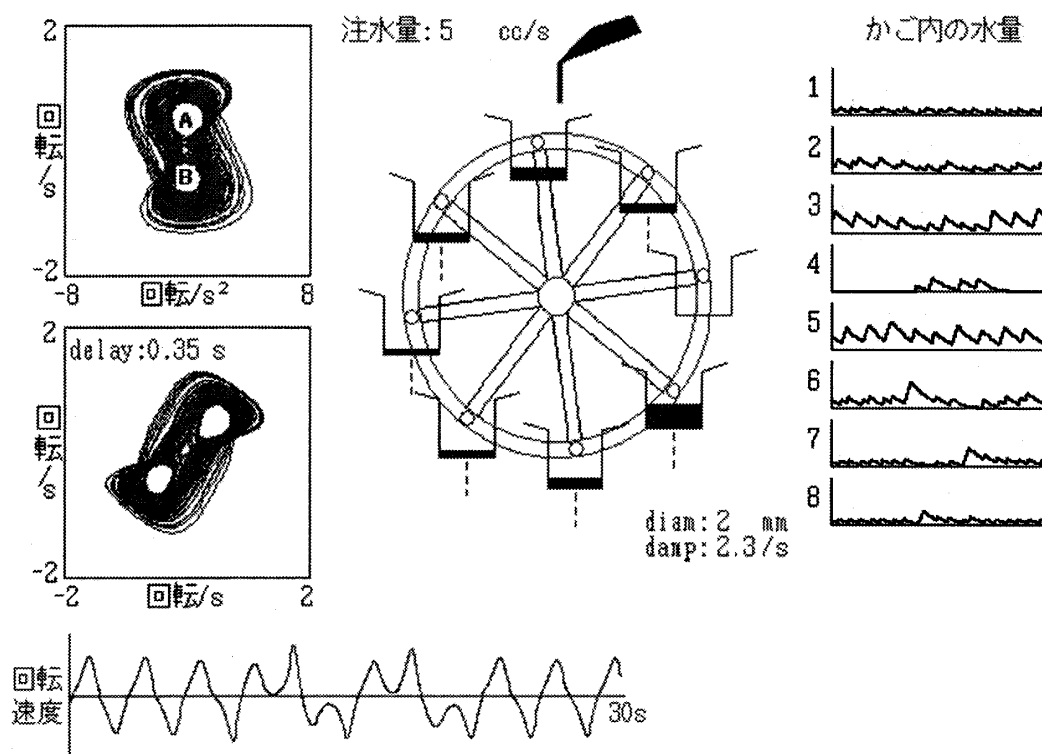


図9 実験データ：注水量 5 cc/秒，穴の直径 2 mm，減衰率 2.3

実験8)では、実験7)からの「ゆらぎ」の縮減が見られた。しかし、実験9)では、「ゆらぎ」は、秩序ある運動の安定性を弱め、左右1～2回転ずつの振動運動を織り込んだ、新たに複雑な振動運動を見せるようになる。前述の振動運動のアトラクターに見られた空隙(=図中のA, B)は更に小さなものとなり、回転速度の図も振動運動が不安定になっていることを表している。しかし、全体としてのアトラクターの形態は、何等かの秩序性の存在を伺わせる^{注11)}。

ちなみに、回転速度の変化図の10～20秒間で見られる左右2回転ずつの秩序的振動運動の形態は、注水量25cc/秒，穴の直径3.2mm，減衰率3.2の領域で見られる^{注12)}。

実験10) カオス運動を進展させる「ゆらぎ」

—エルゴード性を高める「ゆらぎ」—

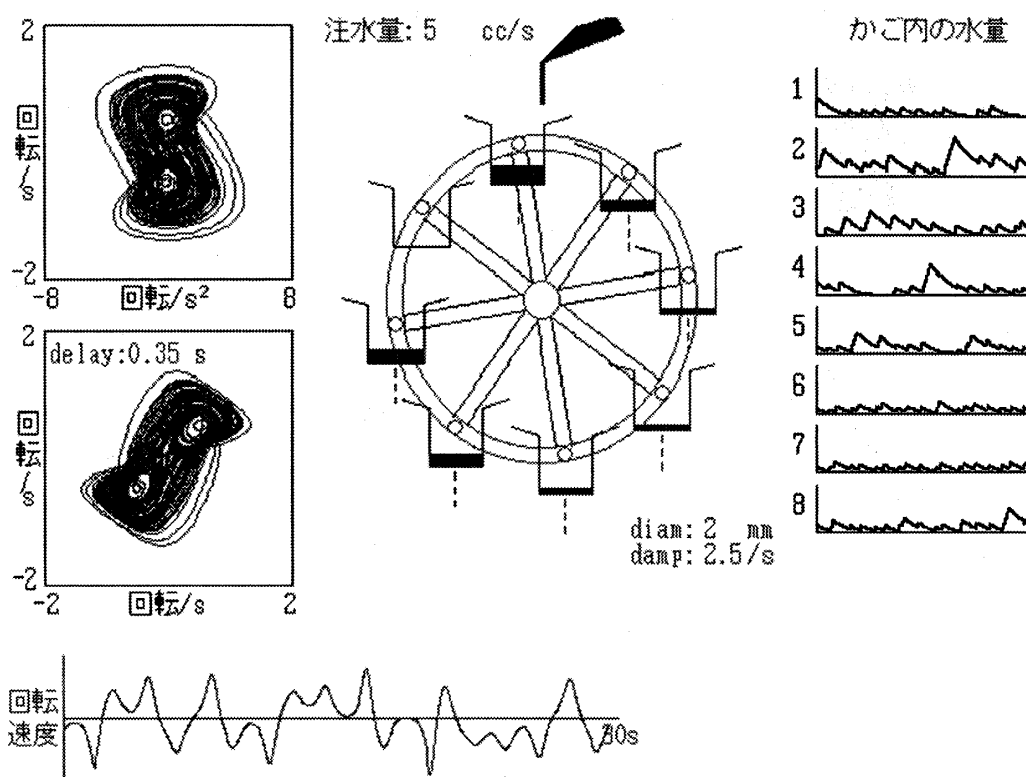


図10 実験データ：注水量 5 cc/秒，穴の直径 2 mm，減衰率 2.5

実験10) では、振動運動と回転運動が複雑に絡み合ったカオス的な運動が見られ始める。

実験9) に見られたアトラクター内部の二つの明瞭な空隙は消滅し、エルゴード性が高まっていることが分る。これは、回転速度の図に見られるように、1～3回転程度の回転運動が左右交互に現れ、より複雑な運動形態を見せ始めたことを反映したものである。回転速度の変化図を暫く観察すると、短時間で形成されたアトラクターでも、上下の幾何学的対称性が高いことが認められる。このことは、短時間に、左右の回転運動に類似したパターンが見られることを反映している。この点は、次の実験11) と対照的である。ある意味で、平衡からの誤差的「ゆらぎ」の形態を示していると言えることができる^{註13)}。

実験11) エルゴード性を進展させる「ゆらぎ」

—対称性の解体を生み出す「ゆらぎ」—

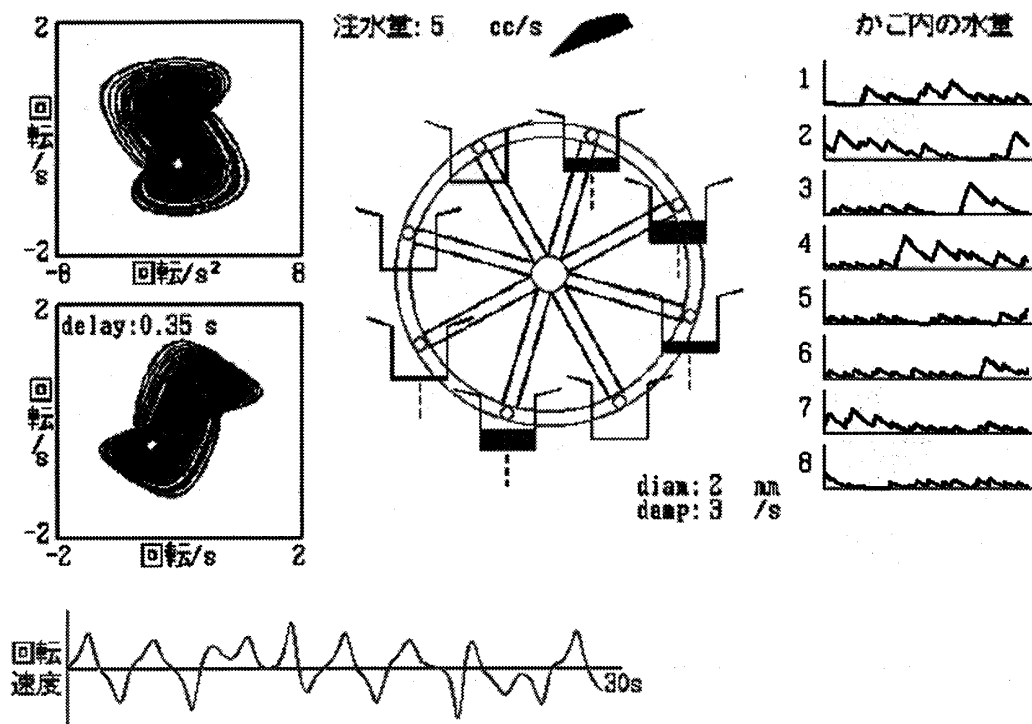


図11 実験データ：注水量 5 cc/秒，穴の直径 2 mm，減衰率3.0

実験11) は，実験10) に比べて，かなりの長時間後のアトラクターを示したものであるが，それにも拘らず上部と下部との幾何学的対称性が悪いことが認められる。実験10) では，比較的短時間で左右の回転運動に類似した運動パターンが見られたのに対して，実験11) では，その様な対称性が弱化していることが認められる。すなわち，左右の回転運動における非対称性が増大しており，この実験ではこれまでの所，特に，左回転における運動形態に大きな「ゆらぎ」が存在していることが分る。

換言すれば，秩序性を解体するエルゴード性の進展は，左右の振動運動の対称性を弱化させると言うことができる。

実験12) カオス運動化を進展させる「ゆらぎ」

—高いエルゴード性を示す「ゆらぎ」—

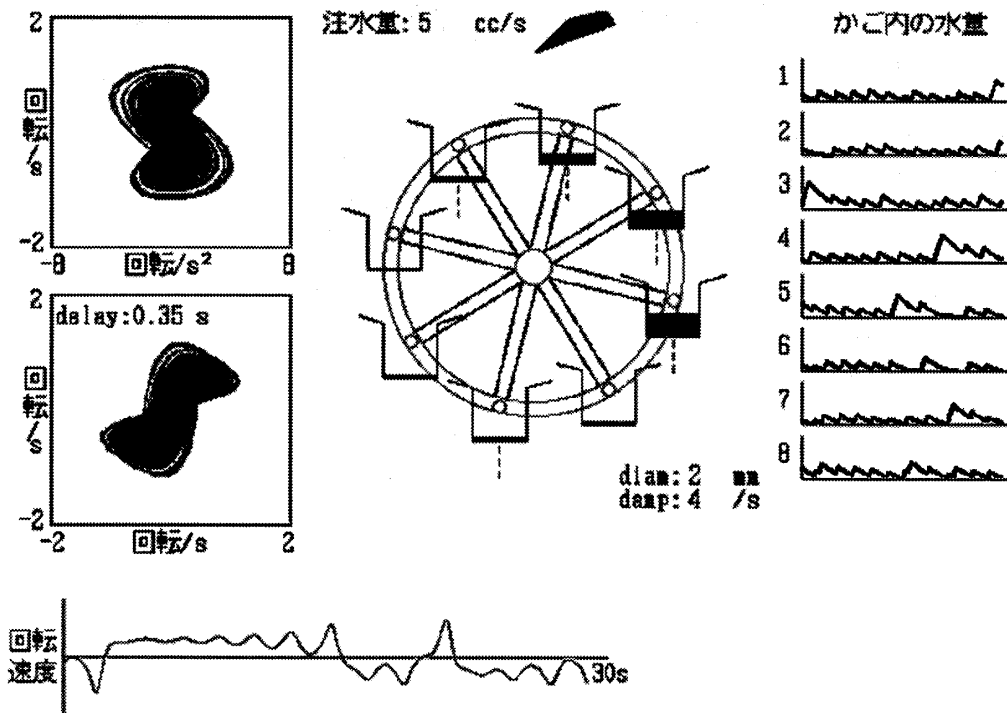


図12 実験データ：注水量 5 cc/秒，穴の直径 2 mm，減衰率 4.0

実験12) は実験11) には見られなかった上下のアトラクターの対称性の良さが認められる。加えて，アトラクター内部の空隙が無く，強いエルゴード性が示されている。ただし，アトラクターの外周部分における空隙は，その内部との連続性の悪さを示しているが，この原因は不明である。これがカオス運動特有のものであるのか，やがては時間がこの空隙を埋めるようなエルゴード性の残余であるのかと言う疑問が残る^{註14)}。これについては，別の機会に報告したい。

実験13) カオス運動からの離脱をもたらす「ゆらぎ」

—秩序を生み出す「ゆらぎ」(A)—

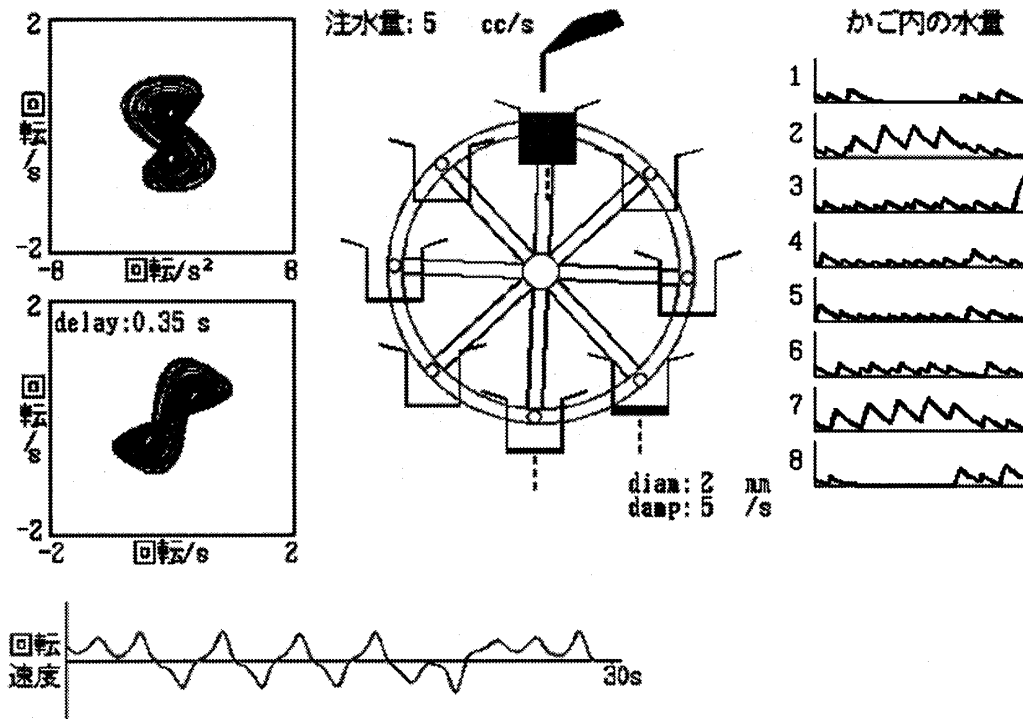


図13 実験データ：注水量 5 cc/秒，穴の直径 2 mm，減衰率5.0

カオス運動が見られる状態から更に減衰率を増大させると，図13のようなアトラクターが形成される。比較的エルゴード性の高いカオス的なアトラクターの中に，明らかな密度差と空隙が認められる。

密度の低い外周部は，左右の振動運動を反映したものであり，密度の濃い内部のアトラクターは，回転運動が卓越していることを示している。換言すれば，このアトラクターは，水車の運動が，不安定な振動運動に時折 2～3 回の回転運動が組み込まれた複合的運動形態であることを示している。

この実験において，減衰率の増大はカオス運動特有のエルゴード性を縮減させ，秩序を生み出すことが認められる。換言すれば，摩擦の増大が「ゆらぎ」を縮減させて秩序形成，すなわち，振動運動と回転運動を分化させるように見えるのである。前述した「ゆらぎ」の増幅による秩序の形成と本実験における「ゆらぎ」の縮減による秩序の形成の興味深い二面性が認められる。

実験14) 回転運動と振動運動の分化を進展させる「ゆらぎ」

—秩序を生み出す「ゆらぎ」(B)—

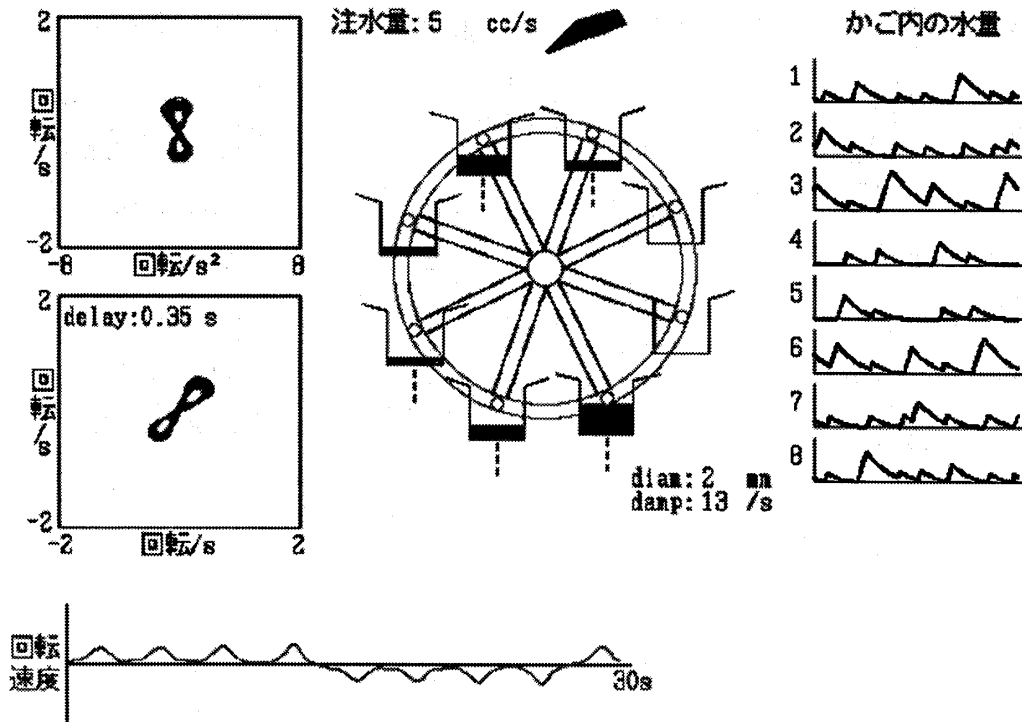


図14 実験データ：注水量 5 cc/秒，穴の直径 2 mm，減衰率13.0

実験14) では、減衰率を5.0から13.0へと大幅に増大させてみた。すると、実験13) アトラクターの「ゆらぎ」の部分が削ぎ落とされたかのようなスリムなアトラクターが形成された。この運動形態は、図14の回転速度の時間的变化に見られるように、実験4)と同様、回転運動と振動運動との臨界的運動形態とみなすことができるが、他面、秩序性の高さも伺わせる。

カオス運動のエルゴード性の強さが縮減されるに伴って、次第に振動運動や回転運動が分化し、振動運動性を保ちながらも回転運動性をも有する運動形態として、このようなアトラクターが形成されているのである。換言すれば、この運動形態は、カオス運動領域の辺縁における連続性の高い回転運動とその左右への振動運動を共生させる秩序的運動の複合的形態を示すものと考えられる。

実験15) 回転運動を卓越化させる「ゆらぎ」

— 振動運動を弱める「ゆらぎ」 —

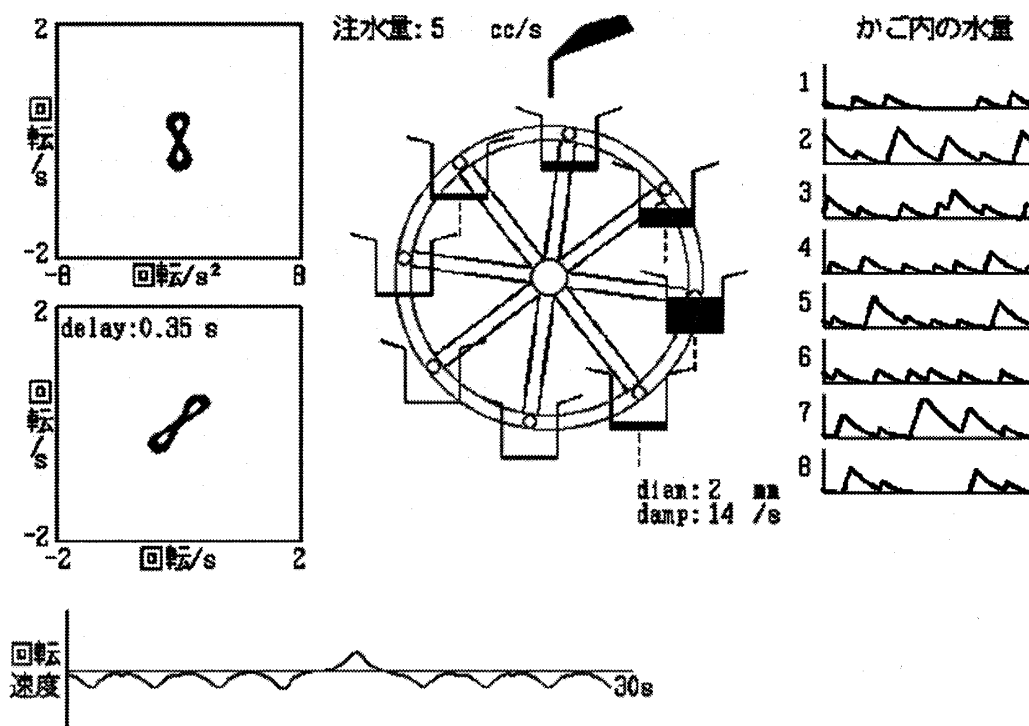


図15 実験データ：注水量 5 cc/秒，穴の直径 2 mm，減衰率14.0

実験15) は，減衰率を更に1.0ポイント上げたものである。

アトラクターの形態としては，実験14) と実験15) は極めて類似しているが，時間的対象性に関しては，両者は全く相違する。

実験14) の場合，運動形態は短時間における対称性が強いのに比して，実験15) の場合は，長時間に渡っての対称性が強いのである。具体的に言えば，実験14) では，左4回転後に右に4回転する回転運動が短期間に繰り返されるのに対して，実験15) では，暫くの間，右4回転の回転運動が卓越し，その後，暫く左4回転の回転運動が卓越するのである。

実験15) では，連続性の高い左右の振動運動は減衰率の増大によって弱められ，図15の回転速度の図に見られるように，次第に一方方向での回転運動が卓越するようになるのである。言うなれば，振動運動は，むしろ「ゆらぎ」の部分へと後退してしまうことになる。

実験16) 回転運動への回帰をもたらす「ゆらぎ」

— 一回転運動を生み出す「ゆらぎ」 —

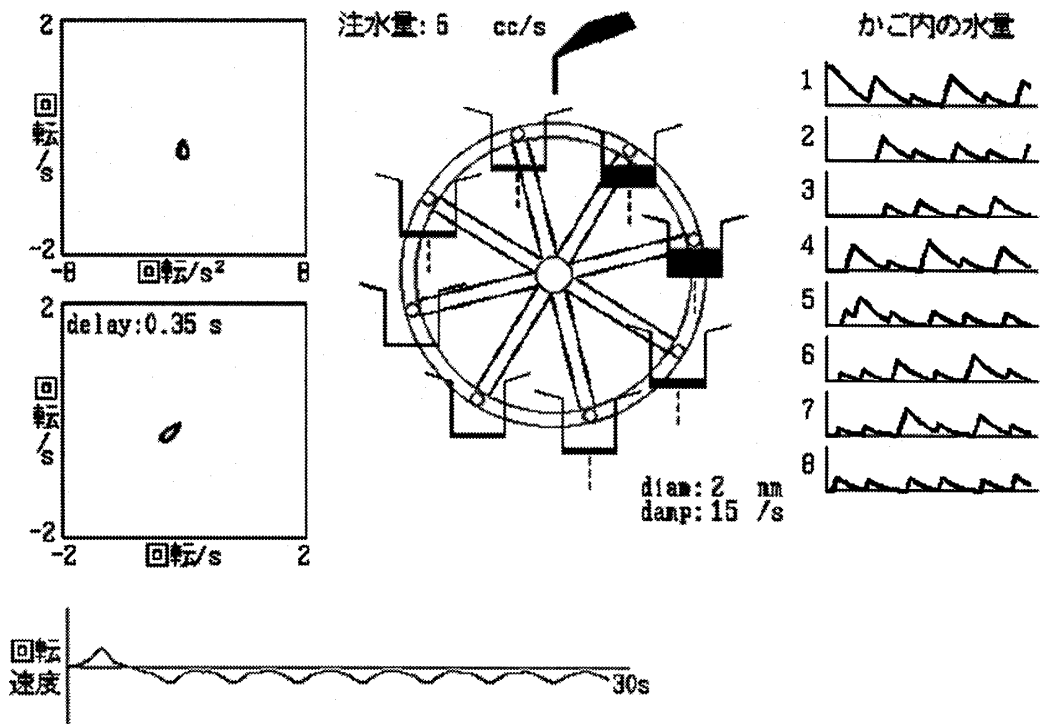


図16 実験データ：注水量 5 cc/秒，穴の直径 2 mm，減衰率15.0

実験16) に見られるように，更に減衰率を増大させると，左右の振動運動の対称性がなくなり，振動運動は回転運動へと相転移を見せる。実験15) に見られた振動運動は回転運動へと相転移したのである。この水車の運動は，回転速度の図から見る限り，最終的には，「ゆらぎ」の極めて少ない等速的回転運動へと収斂していくものと予測される。

実験17) 再び振動運動を生み出す「ゆらぎ」

—不安定な振動運動を生み出す「ゆらぎ」—

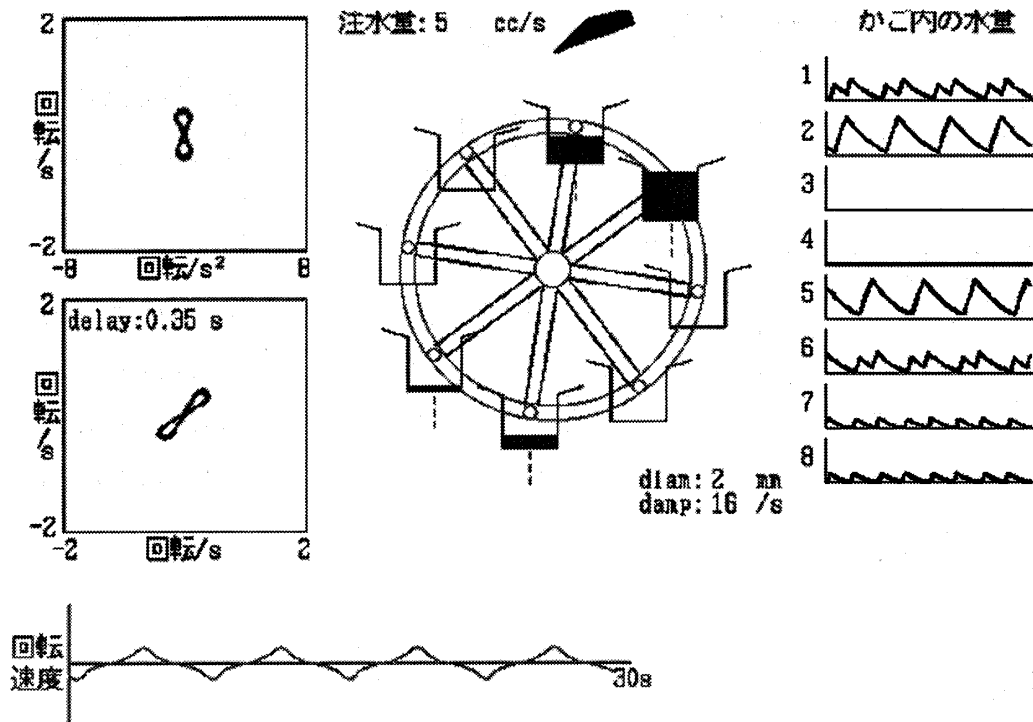


図17 実験データ：注水量 5 cc/秒，穴の直径 2 mm，減衰率16.3

回転運動に相転移した後，更に減衰率を上げると，再び振動運動が現れる。実験17)は，このことを示している。この運動の特徴は振動数が極めて少ないことである。これまで見てきた振動運動は，水車回転面の重力軸の下部での安定を求める振動であり，各かごの水量が十分で，回転速度の大幅な変動が見られたのに比して，この水車運動の場合は，回転面における重力軸の上部で見られる，言わば不安定な振動運動である。すなわち，高い減衰率が回転速度を低下させることによって注水量と漏水量との振動が増幅され，この増幅された振動は，水車の回転によるフィードバック機構を通じて「ゆらぎ」を生み出し，この「ゆらぎ」の増幅が水車の不安定な振動運動を生み出したと言えるのである。

この点からすると，減衰率が注水量と漏水量との「ゆらぎ」を極めて大きく増幅させる領域があり，その領域では，回転運動が振動運動へと相転移し易くなるのであろう。

実験18) 振動運動を安定化させる「ゆらぎ」

—高い減衰率領域で秩序を生み出す「ゆらぎ」—

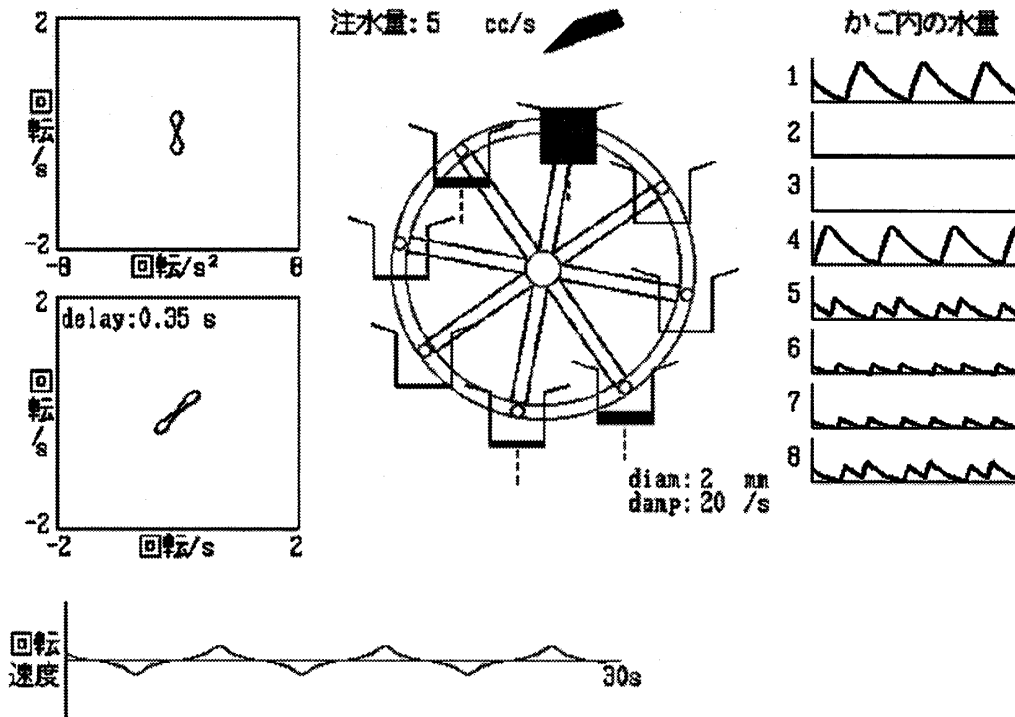


図18 実験データ：注水量 5 cc/秒，穴の直径 2 mm，減衰率 20.0

実験18) のように、減衰率がさらに高い領域では、漏水量が相対的に増大する結果、隣接するかごの水量が反対方向への回転運動を生み出し易い状況が見られる。言わば、回転運動が一時的に弱まる瞬間に、振動運動がそれを上回る状況が生まれ、回転運動が振動運動へと転移するという極めて微妙な領域が存在するのである。実験18) は、実験17) よりも安定した運動形態を示しているが、回転速度が「0」付近での「ゆらぎ」は比較的大きいと言することができる。

実験19) 再び回転運動を生み出す「ゆらぎ」

—低速の回転運動を生み出す「ゆらぎ」—

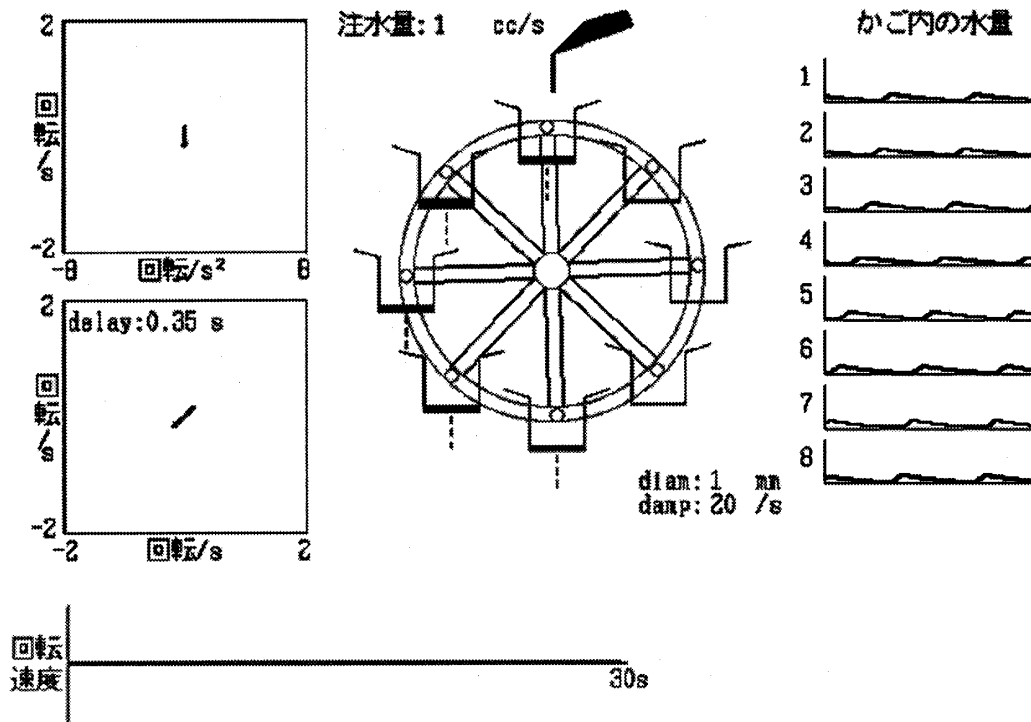


図19 実験データ：注水量 1 cc/秒，穴の直径 1 mm，減衰率 20.0

減衰率がより高い領域 (=減衰率20) では、この水車は再び回転運動へと相転移を見せる。ただし、これまで実験してきた、カオスの周辺すなわち、注水量 5 cc/秒、穴の直径 2 mm の水準では、振動運動が回転運動に転移する領域は存在しない。そこで、この実験では、注水量 1 cc、穴の直径 1 mm という水準に切り変えて、高い減衰率が回転運動を生み出すとすることを確認することにした。したがって、この実験は、上述までの実験とは入力データに連続性を欠くことをここに明記しておく。

実験20) 停止運動に至る「ゆらぎ」

— 「ゆらぎ」の秩序形成力の喪失—

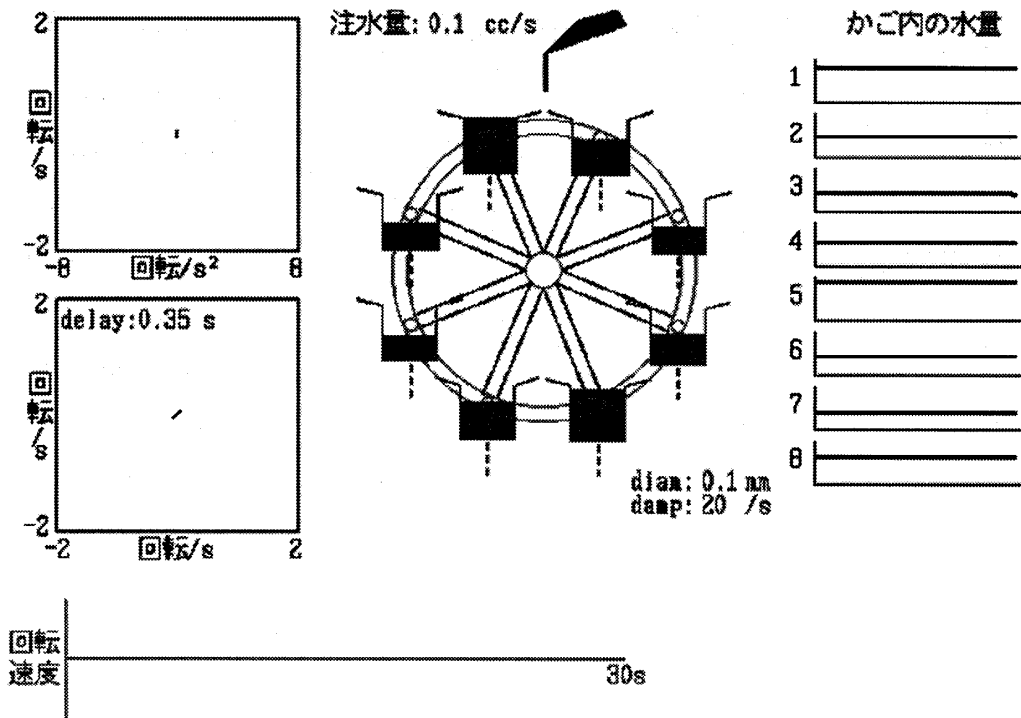


図20 実験データ：注水量0.1cc/秒，穴の直径0.1mm，減衰率20.0

実験19)と同様に，カオスの周辺領域には，減衰率の増大によって停止運動に至る領域は存在しない。そこで，減衰率の増大が停止運動を見せることを確認する意味で，注水量0.1cc/秒，穴の直径0.1mm，摩擦係数20に設定して水車の運動を観察した。

この実験に見られるように，外見上，この水車は停止しているように見える。しかし，実際には，この様に注水量と穴の直径が低い水準でも水車を減衰率の増大で停止させるのは困難である。

この実験では，水車は，理論上10分以上この状態で停止している。これは，一つには，このかごが限界以上の注水量を与えられたときには，その分が無視されるということに起因している。しかし，この領域の近くに水車が停止する領域があることは容易に予測できる。反面，この水車は，より時間を掛ければ，極めて不安定な振動運動を見せることも推測できる。

このモデルでは，前述したように，減衰率を20以上に設定する実験が出来ないので，摩擦による停止運動領域の詳細な検討は出来ないが，注水量が極めて少ないか，もしくは，漏水量が極めて大きい領域でカオス水車が停止することは容易に予測できるという意味で実験したものである。

以上、アトラクターの類型化を試みながら、マイクロな「ゆらぎ」がマクロな秩序的運動（＝回転運動・振動運動）を生み出すプロセスについて考察してきた。

まとめにかえて

マイクロな「ゆらぎ」がマクロな秩序を生み出す過程についてカオス水車モデルに基づいて実験し考察してきた。

マイクロな「ゆらぎ」は、水車の持つ構造が生み出したものであった。マイクロな「ゆらぎ」は、連続的に注入される水を回転する8つのかごで不連続に受給することで生まれるかごの中の水量の振動が、かごに開いた穴からの漏水との関係で増幅され、かごに蓄えられた水が重力によって回転運動に変換される過程で運動に非線形性が与えられ、回転速度の振動へと変換された振動が、再び各かごへの注水量と漏水量の振動へとフィードバックされることで生み出されるものであった。また、各かごの水量のマイクロな振動とは別に、8つのかごへの水量分布が重力による回転・振動運動に大きな影響を及ぼすことは、マクロな「ゆらぎ」は、単にマイクロな「ゆらぎ」の総和とは異なる構造を作り上げているとも言える。

不連続性を生み出す差分方程式、フィードバック・システム、一般的な振動運動などが見せる「カオス」は、この水車運動にも見られたが、その構造はほぼ同じものであった。

カオス水車は、減衰率の変化に応じて、停止—回転—振動—カオス—振動—回転—振動の各運動へ相転移を見せた。

カオス運動にいたるまでの過程では、「ゆらぎ」の増幅がマクロな構造、すなわち秩序を作り上げたが、カオス運動以降の過程では、「ゆらぎ」が縮減し、それに伴って振動運動や回転運動を分化させることで相転移が見られたことは、興味深かった。

さらに、秩序相の周辺では、「ゆらぎ」は、秩序を解体させる様な作用を及ぼしたが、基本的には、平衡からの「バラつき」、すなわち、誤差的変動を生み出すものとしての「ゆらぎ」の作用であった。

最後に、「ゆらぎ」が生み出すカオス水車のアトラクターの相転移は、「システム（＝生命を含む）の進化の過程と密接な関係があるのではないか？」と言う感想を述べてまとめに代えたい。

注

- 注1) 混沌からの秩序 (1993) I. プリゴジン みみず書房
- 注2) 複雑系・カオス・量子 (1997) 科学シミュレーション研究会 pp.13-52
なお、水車の運動方程式については、p.40を参照
- 注3) 自己組織化 (1995) 吉田民人 ミネルバ書房 pp.213-222
第4章 カオス辺縁とリゾーム
生命秩序の起源を自己組織化と選択とが接合するカオス辺縁領域求める考え方による。
多様性を生み出すカオス (1994) 金子邦彦 日経サイエンス
生命系の恒常性を説明する「ホメオカオス」の考え方 参照
- 注4) カオス水車モデルにおけるアトラクターの形態とその類型化については、複雑系の研究—カオス辺縁におけるアトラクターの形態とその類型化— (2002) 井手口敬 九州産業大学 国際文化学部紀要24号 pp.1-17参照
- 注5) 減衰率が4であると言うことは、4分の1秒で回転速度がはじめの約2.7分の1遅くなることを意味する。
2.718…と言う数はオイラー定数と呼ばれる定数であり、振動現象や回転現象の計算ではよく現れる。減衰率が大きいほど、抵抗が大きすぎてすぐに水車の回転が遅くなることを意味する。
- 注6) カオス水車モデルにおけるカオス領域については、前掲 注4) p.9参照
- 注7) このカオス水車の初速値は、0.5と0.2の2種類で設定されているが、この報告では、回転の初速値を毎秒0.1回転として統一している。
- 注8) かご内の水量の変化図に見られるように、この実験における水車運動の「ゆらぎ」は、運動を起動させたNo.1のかごを中心として生じていることが分る。
- 注9) 連続的回転運動領域から遠いことを意味する。
- 注10) 速度変化の小さい運動領域を形成していることを意味する。
- 注11) No.1のかごの水量変化は小さく、初期値への鋭敏性は見られない。
初期値への鋭敏性は、かごの穴の直径が小さく、漏水量が少ない条件下で生じる。
換言すれば、漏水量が多いシステムにおいては、複雑な運動は生じにくいと言える。
- 注12) 詳細については、前掲 注4) のpp.10~11を参照
- 注13) 実験7) に見られる「ゆらぎ」が平面的、低次元的なものであるとすれば、実験10) は立体的、多次元的な「ゆらぎ」の形態を示していると言える。
広い意味での、時間的対称性 (=短期的, 長期的) の相違に基づいている。
- 注14) 特に、最外周部に見られるフラクタル的構造を示す部分は、かなりの長時間を経た後に現れたものであり、この後、長時間後においてもこの空洞部分は埋められることがない点は興味深い。

参考文献

- 複雑系の研究—アトラクターの類型— (2002) 井手口敬 九州産業大学国際文化学 紀要24号 pp.1-17
- 複雑系による科学革命 (1997) J. キャスティ 講談社
- 混沌からの秩序 (1993) I. プリゴジン みみず書房
- 多様性を生み出すカオス (1994) 金子邦彦 日経サイエンス
- 自己組織化 (1995) 吉田民人 ミネルバ書房

カオス水車モデルにおける「ゆらぎ」の類型

混沌の力 (1994) 今田高俊 講談社

複雑系・カオス・量子 (1997) 科学シミュレーション研究会 BLUE BACKS

カオスの素顔 (1991) N. ホール BLUE BACKS

複雑系を解く確率モデル (1997) 香取真理 BLUE BACKS

「複雑系」とは何か (1996) 吉永良正 講談社現代新書

カオスの紡ぐ夢の中で (1998) 金子邦彦 小学館文庫

多様性を生み出すカオス (1994) 金子邦彦 日経サイエンス