卒業論文

オリフィスからの発泡挙動に関する研究

通し番号 1－ 75　完

平成 12 年 2 月 4 日 提出

指導教官 庄司正弘教授

80212 小島 亮祐

目次

第 1 章 序論

１－１　はじめに
１－２　本研究の目的

第 2 章　　実験

２－１　実験の目的とその仕様
２－２　実験方法および実験条件

第 3 章　カオスについて

３－１　時系列データとパワースペクトル
３－２　相関次元

第 4 章　実験結果

４－１　流速変動波形とパワースペクトル
４－２　離脱時間
４－３　アトラクター
４－４　相関次元

第 5 章　考察

５－１　径 2.0mmについての考察
５－２　径 0.5mmについての考察
５－３　2 つの径についての相違点

第 6 章　結論

６－１　結論
６－２　今後の課題

参考文献
謝辞

第１章　序論

１－１　はじめに

１－２　本研究の目的

１－１　はじめに

沸騰現象は日常いたるところで見られる現象である．しかしながらその現象には様々な効果がいくつも重なり合っているため複雑なモノとなっている．気泡生成を用いた熱機関の利用は火力や原子力発電などの発電設備や、蒸気機関など幅広く工学に利用されている．そこで沸騰現象解明の基礎実験として、水―空気系での熱を伴わない連続気泡生成過程の実験、解析的研究はとても重要な実験であると思われる．さらに近年、浄化装置における曝気など連続的に生成される気泡同士の干渉やそこに伴う流体の流れを利用した機械設備なども重要に成りつつあるため、連続気泡生成過程を理解することは非常に有用であると思われる．
次に複雑な現象を扱う実験において非線型挙動、カオス解析を利用した研究結果が報告されつつある現状において、気泡生成プロセスのように不規則複雑な振る舞いをする現象にもカオス解析を利用してみることは非常に有効である．過去の連続気泡の解析、実験においてカオス解析が有用であることは報告されている．

１－２　本研究の目的

ガラス管から水中に空気泡を送ることで周囲の水に与える影響を流速計によって測定する．過去の実験において連続気泡の生成実験は既に報告されているため、今回の実験では一歩先に進んだ研究を行う．気泡を流量一定にして液体中に流していくと気泡は単周期で発生し続けるわけではなく、発泡し始める時間が変わったり、気泡同士の合体が起こったりする．本実験ではそのような気泡挙動の存在を確認し、現象を理解することを目的とする．1 つは連続気泡生成過程がカオス系の現象である可能性があるので、カオス解析を行うことによって、もう一つは視覚的な現象観察を行い、現象の理解をする．
また流量を連続的に変化させて、気泡の形状が分岐していくルートを明確にする．

第 2 章　実験

２－１　実験の目的とその仕様

２－２　実験装置および実験条件

２－１　実験の目的とその仕様

本実験では様々な空気流量のもとで流量を固定した場合に空気泡がオリフィスから離脱していく様を観察し、オリフィスまわりの水の流速変動を記録する．流速変動は熱線プローブによって計測、またビデオ撮影による視覚的な観察も行う．つぎに連続的に流量を落としていき、変動を記録する．以下のような仕様で実験を行う．

試験液体として蒸留処理した水道水を数日間密閉保管したものを使用する．
試験気体については流量計を用いて送気管の流量を一定に保つ．
空気放出口のガラス管の径は 2.0mm、0.5mm のものを使用する．

２－２ 実験装置及び実験条件

実験装置

実験装置の概略図を図 2.1　に、テストセクションを図 2.2　に示す．その際の詳細は表 に示す通りである．オリフィスの開口部の角は C0.1 である．

表２．１ プローブの配置距離

オリフィス径(mm)	高さＬ(mm)	プローブ位置 X(mm)	プローブ位置Z(mm)
0.5	20	3.0	0.5
2.0	10	2.0	0.5

実験装置系

水槽

送気管を通して送られてきた空気が出ていく水を溜めてある所.

コンプレッサ

空気を圧縮してためておいたもの、空気を気泡として送気管を通して送るためのもの.

送気管

コンプレッサからの空気をオリフィスまで導くための管、ビニールにより作られている．流量計で空気の流量が測定できるようになっている．

計測系

ホットフィルムプローブ

気泡まわりの流速変動を抵抗変動として信号にする．

流量計

コンプレッサから出る空気流量を測定する．

熱線流速計（21-1312ＫＡＮＯＭＡＸ）

プローブ付近の流速変動を電圧変動とし出力する．オリフィス付近の水の流速変動を測定する．

デジタルレコーダ TEACDR-F1

流速計からのアナログ出力信号をデジダル出力によって記録する．サンプリング周波数５ kHz で 20 秒間記録した．

観察系

高速度ビデオ（フォトロンＨＶＣ-１１Ｂ）

撮影速度は 648frame/sec で約 2 秒間．オリフィスからの気泡離脱過程を撮影する．デジタルレコーダからのトリガ信号により圧力変動波形との同期を行う．

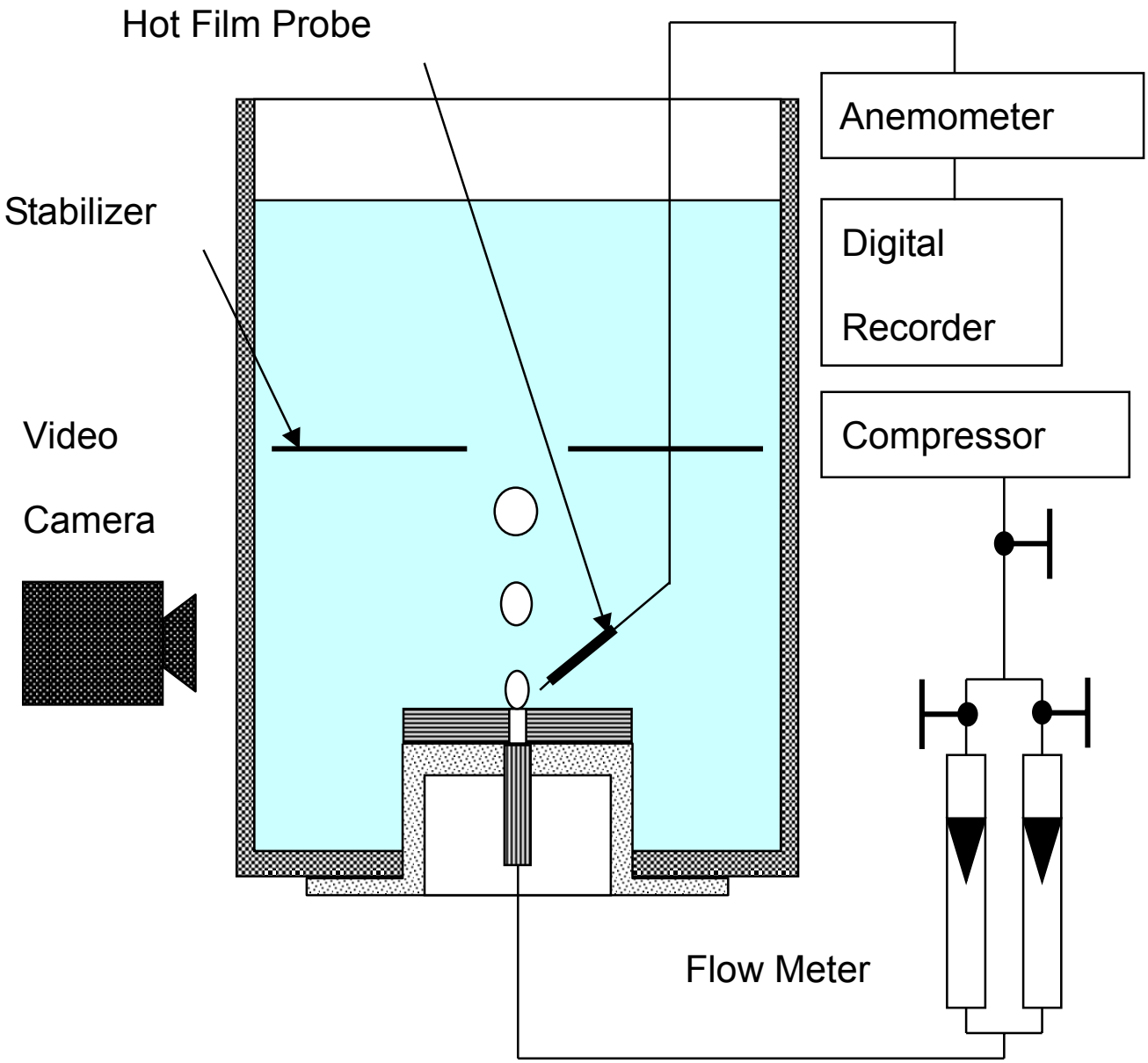

Hot Film Probe
Anemometer
Stabilizer
Digital
Recorder
Video
Camera
Compressor
Flow Meter

図２．１　実験装置概略図

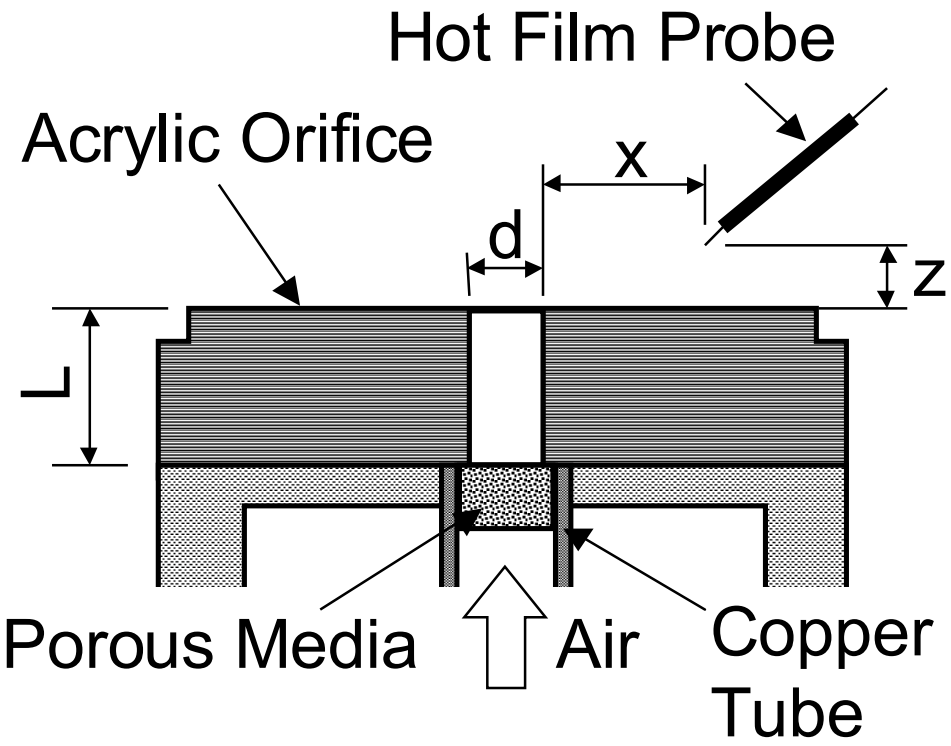


図２．２　実験装置テストセクション図

実験手順

実験は以下の手順で行う．

準備

コンプレッサで空気を圧縮する．

テストセクションを水槽に取り付ける．

気体をある程度流しておき、水槽に蒸留水を入れる．

高速ビデオカメラを気泡発生部に焦点を合わせセットする．

流速計を立ちあげる．

デジタルレコーダとオシロスコープをセットする．

本実験

送気管に空気を送る．

空気流量を調節.

熱線流速計の出力をデジタルレコーダで記録してそれと高速ビデオカメラを同期させて撮影する．

本実験終了後

コンプレッサの空気泡を止める．デジタルレコーダとオシロスコープの電源を切る．

熱線流速計を止めて電源を切る．高速ビデオカメラの電源を切る．水槽から水を捨てる．

テストセクション部を水槽から取り外す.

第 3 章　カオスについて

３－１　時系列データとパワースペクトル

３－２　相関次元

３－１　時系列データとパワースペクトル

時系列データ

ある 1 変数 x(t)の時刻$t_i = kdt(k = 1,2,3,\cdots)$における値を記録していく．このようにして等間隔な変動の値を記録していったデータと時系列データという．

今回の実験では気泡まわりの流速変動を記録していく．

パワースペクトル

非線形過程からの信号を高速フーリエ変換（ＦＦＴ）し、その振幅係数の大きさをとったものをパワースペクトルという．

周期運動をしている系では鋭いピークが現れる．周期ｎの軌道のパワースペクトルは主振動数とその倍音を示す離散的なピークの集まりからなる．周期運動では全てのピークは主ピークと有理数の関係にある．また対照的にカオティックな運動は豊かなスペクトル構造をもった広い帯状のパワースペクトルを持っている．ただし純粋にランダムな或いは雑音のプロセスも同じように広い帯のパワースペクトルをもつのでノイズとカオスを区別する方法はない．

３－２　相関次元

埋め込み空間

遅れ時間τを最適に決定すると時系列データ x(t)を埋め込み定理によってｎ次元位相空間に再構成できることを Takens らが示した．時系列ｘ(t)と遅れ時間τについてベクトル

（　$x(t_i), x(t_i+\tau), \cdots, x(t_i+(m-1))$　）

で構成されるm次元位相図は

$m \geq 2n+1$

の時にはｎ個の独立変数の測定から構成された位相空間図と同じ性質を持っている．従って多次元位相空間が実験データのような単一変数の測定から構成することができる．

膨大な時系列データを独立したｎ個の変数を用いてｎ次元位相図を構成するために使用することができる．

遅れ時間τの決定

つぎに最適なｎ次元位相空間を構築するために遅れ時間τの最適な決定をしなければならない．ノイズを含むデータをもちいる場合には遅れ時間τを最適化しなければならない．

決定の根拠となっているものは相互情報量の値である．元の波形の時系列を S、時間τだけ遅らした時系列を Q とする．それぞれの事象ｓ、ｑについてある事象ｓが起こった時、事象ｑをどのくらい予測できるのかを示したものである．

ここで相互情報量が極小となる場合のτを最適な遅れ時間τとする．

遅れ時間τが決定できれば 3 次元位相図を描ける．また相関次元解析に使用する．

相関次元

非整数次元の解析には通常の線や面、立体の場合よりも高度な次元の概念が必要となる．そこでこれらアトラクターのフラクタル次元を求める. フラクタル次元の値はその系を支配している次元の大きさを示してくれる. その系の独立変数の値はフラクタル次元よりも大きくなくてはならないため、フラクタル次元を決定できればその系の次元をおおよそ知ることができる．そこで本実験データの次元解析に相関次元を利用する．

埋め込み次元は１から 15 まで使用し、それらの次元に対し相関次元を計算した．相関関数は次の関数によって定義されている．

$$C(r) \equiv \lim_{N\to\infty} \frac{1}{N(N-1)} \sum_{\substack{i,j=1 \\ i\neq j}}^{N} \theta(r - \|x_i - x_j\|)$$

ここでθはヘビサイド関数である．

$\theta(z) = 1(z \geq 0)$ その他のｚについては 0 である

ここで重要なことは相関関数Ｃ（ｒ）が適当に小さなｒの累乗に比例することである．

$C(r) \propto r^{\nu}$

そこでそれぞれの埋め込み次元mについて計算し、mを増加させていった時収束していくものが相関次元、すなわちフラクタル次元となる．

第４章　実験結果

４－１　流速変動波形とパワースペクトル

４－２　気泡離脱時間

４－３　相関次元

４－４　アトラクター

４－４　分岐図

４－１　流速変動波形とパワースペクトル

流量固定データからの結果

本実験ではオリフィス径 2.0mm、0.5mm それぞれについて熱線流速計からの時系列データを流量固定して数点記録した．サンプリング周波数５ｋHz で 10 万点記録した．

そのうち特徴的な挙動を示した数点について時系列データとパワースペクトルを示す．

表 4.1　計測流量一覧

0.5mm				2.0mm			
番号	流量 (cc/min)	番号	流量 (cc/min)	番号	流量 (cc/min)	番号	流量 (cc/min)
1	6	13	88	22	150	34	490
2	10	14	95	23	230	35	650
3	20	15	100	24	300	36	780
4	25	16	110	25	315	37	840
5	30	17	120	26	325	38	1000
6	32	18	135	27	335	39	1400
7	36	19	170	28	340		
8	37	20	200	29	350		
9	38	21	250	30	355		
10	50			31	375		
11	68			32	400		
12	75			33	420		

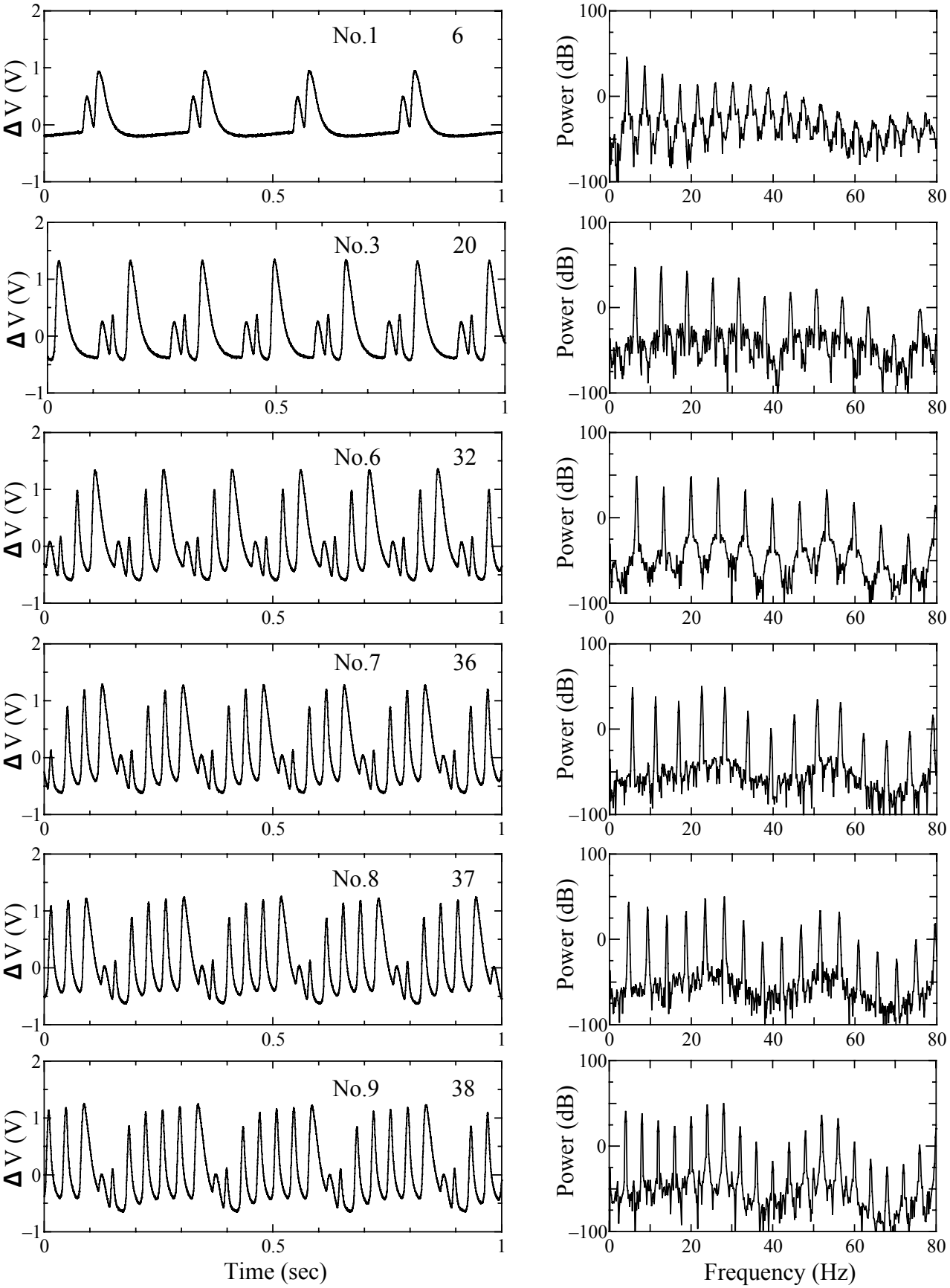


図 4.1.1　径 0.5mm流速変動波形とパワースペクトル

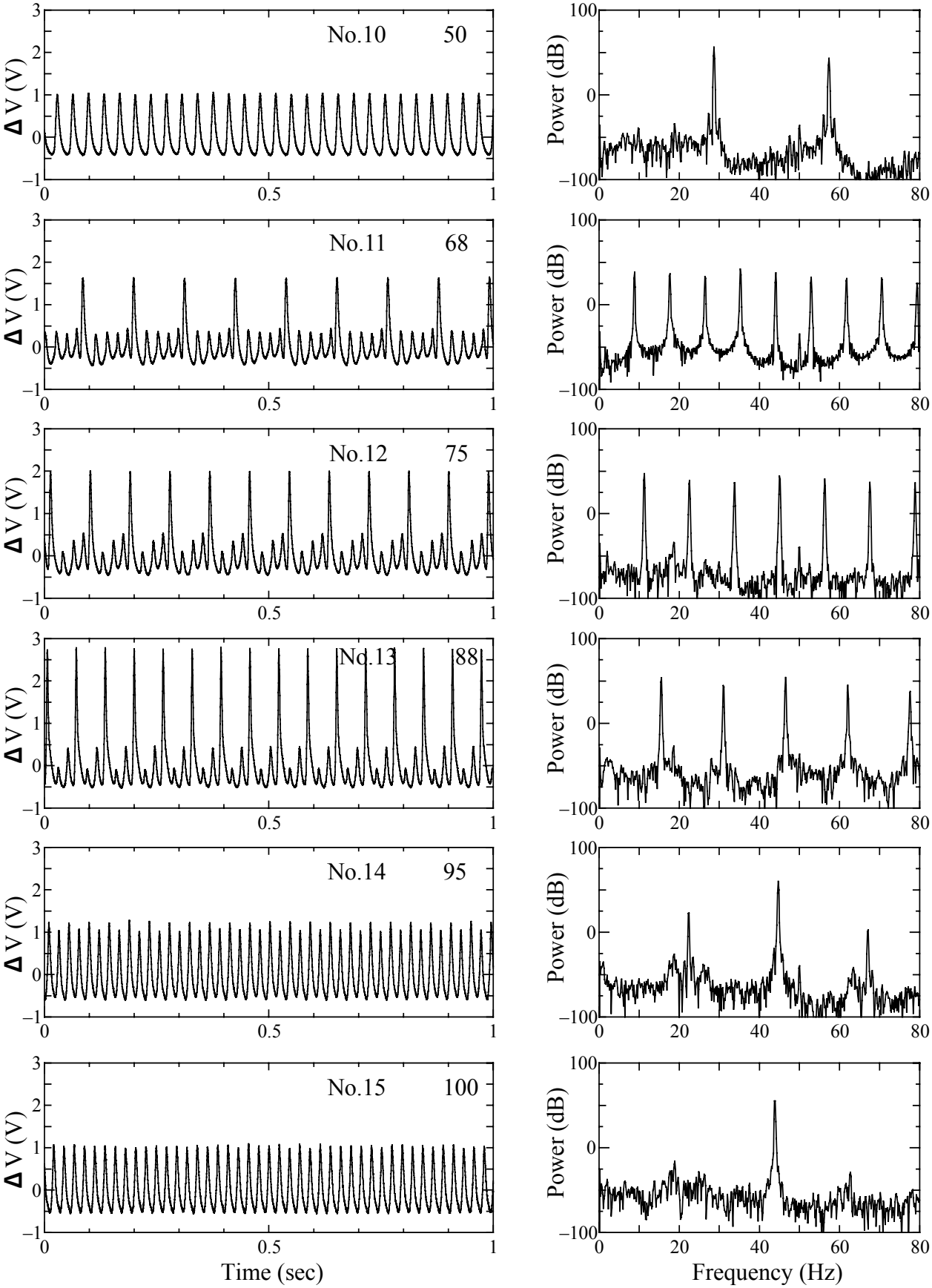


図 4.1.1　径 0.5mm流速変動波形とパワースペクトル

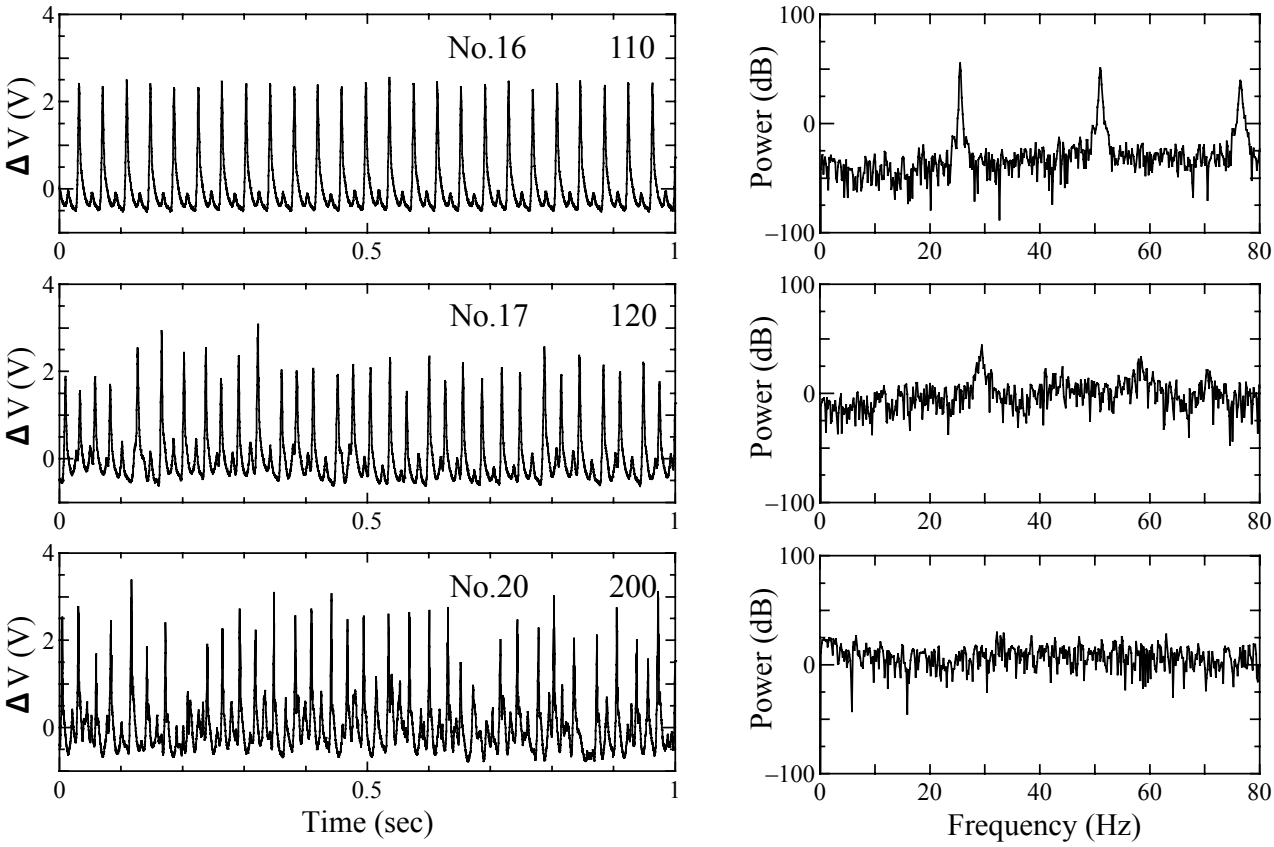


図 4.1.1　径 0.5mm流速変動波形とパワースペクトル

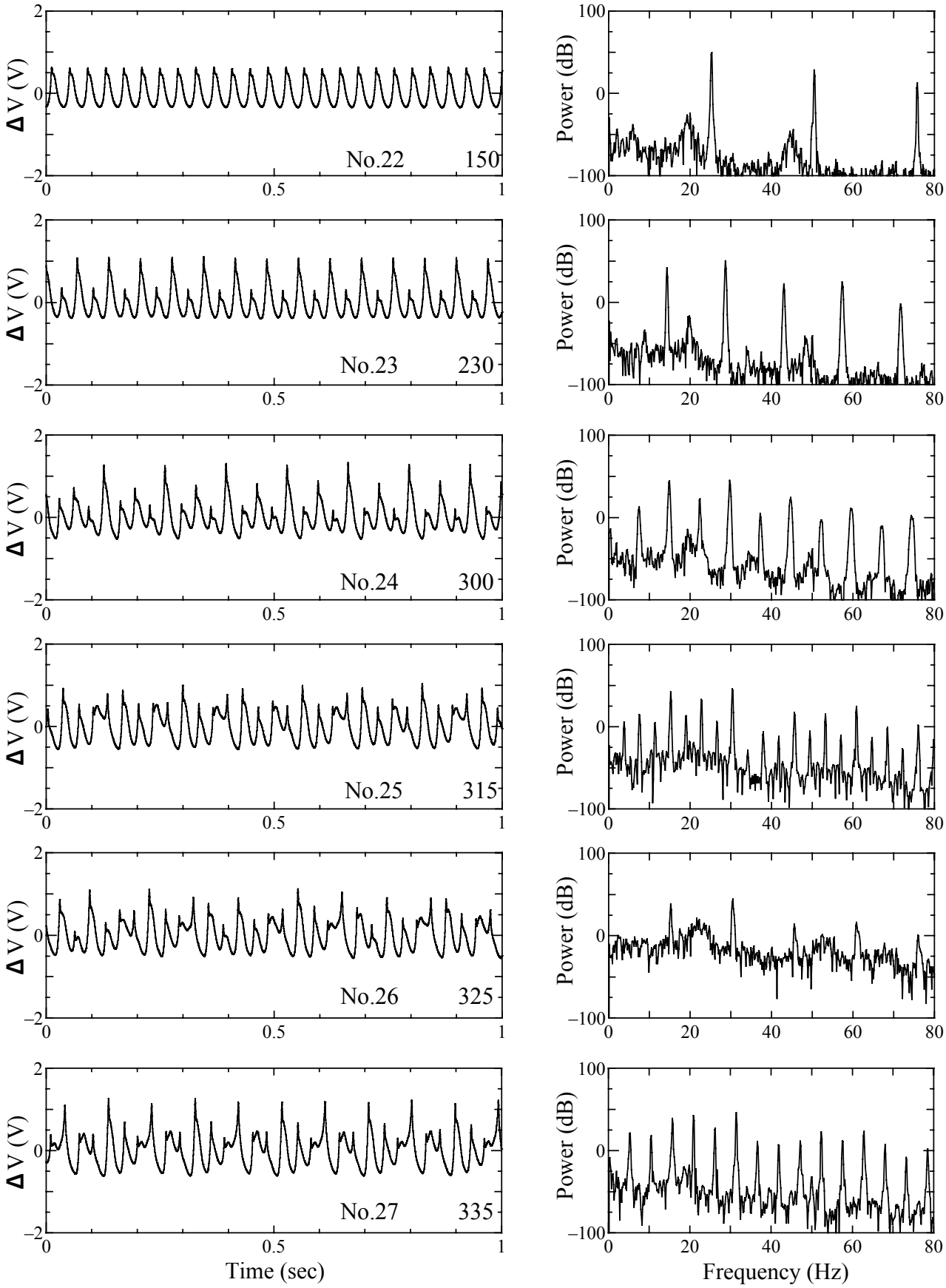


図 4.1.2　径 2.0mm流速変動波形とパワースペクトル

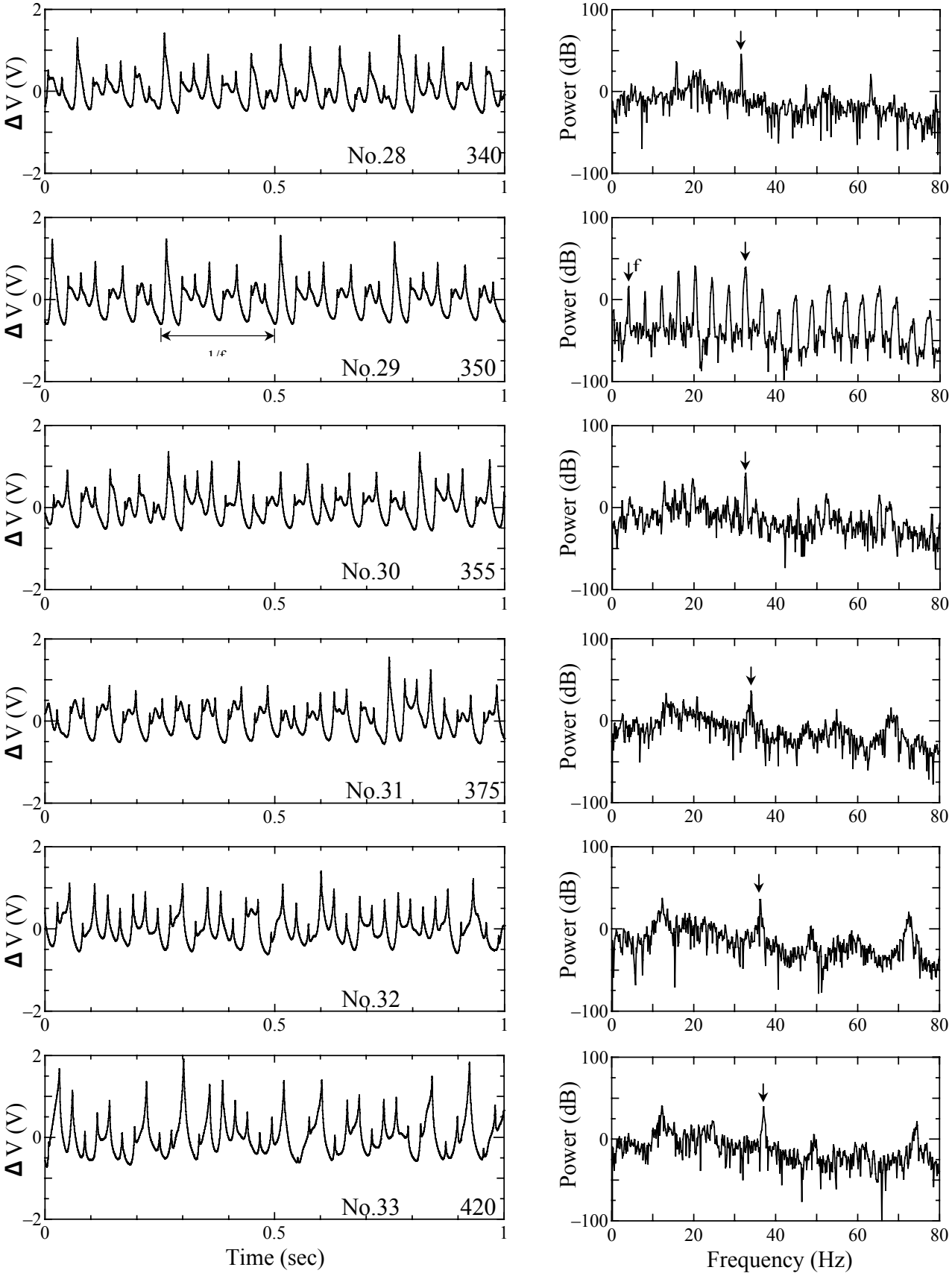


図 4.1.2　径 2.0mm流速変動波形とパワースペクトル

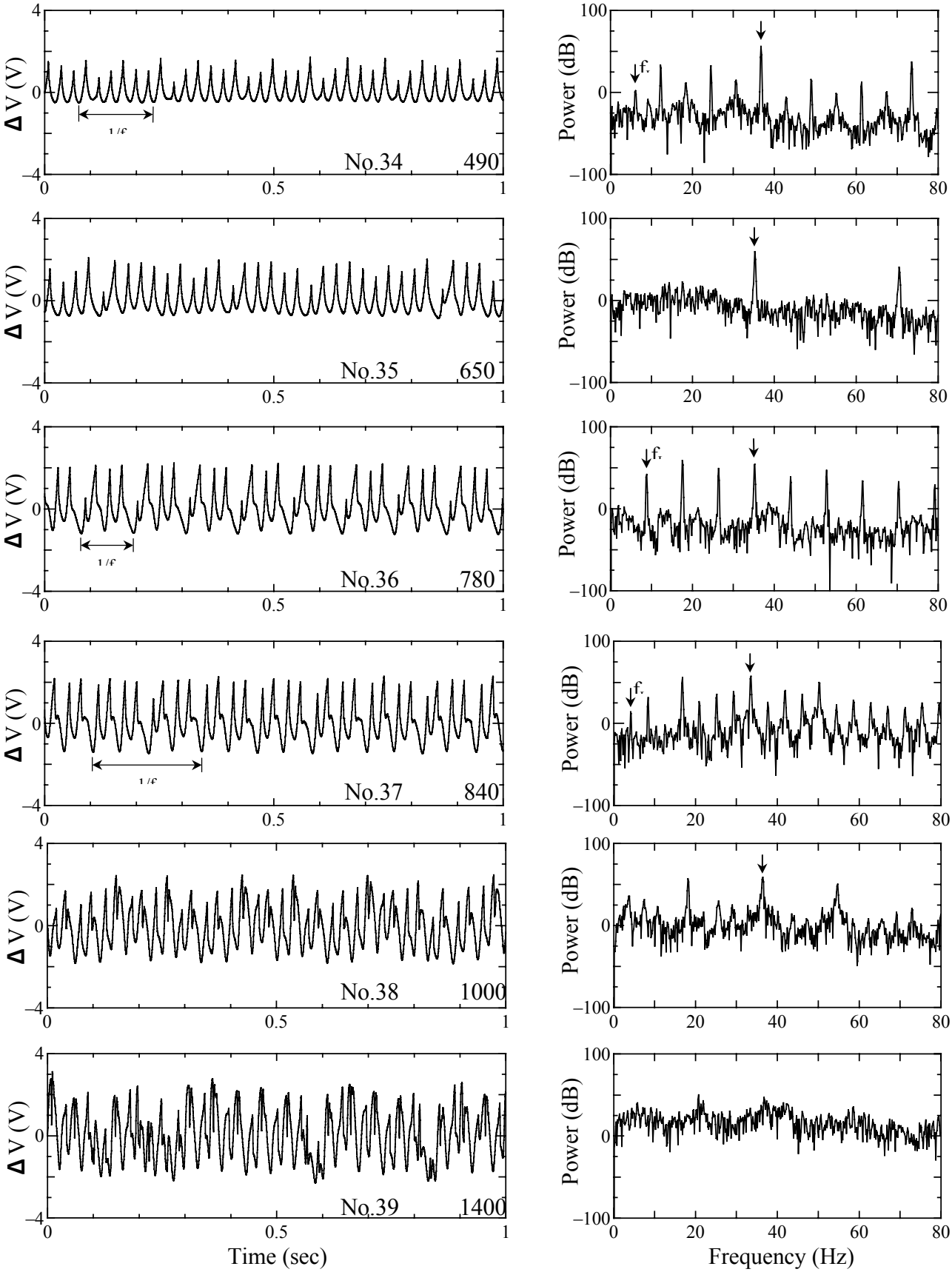
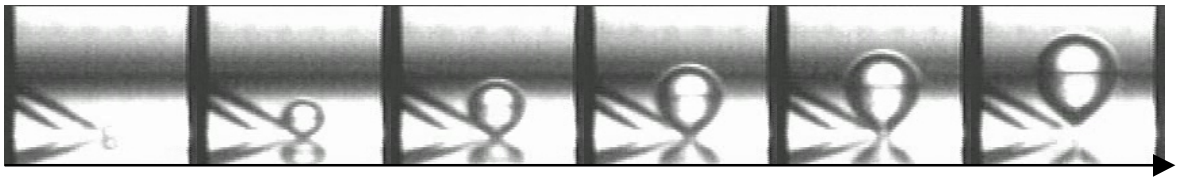


図 4. 1 .2　径 2.0mm流速変動波形とパワースペクトル

単周期



合体

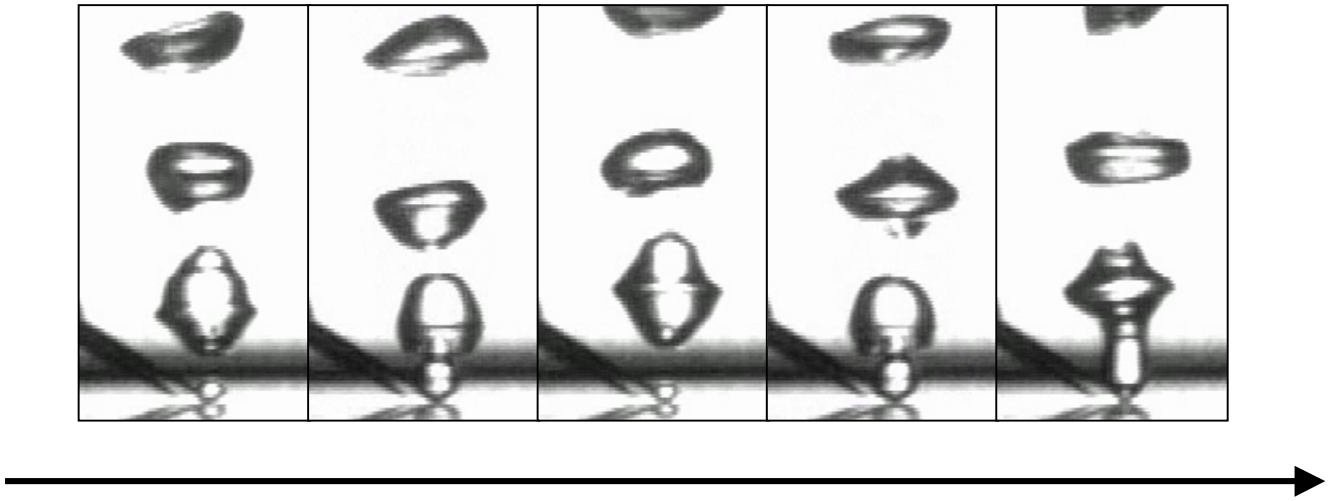
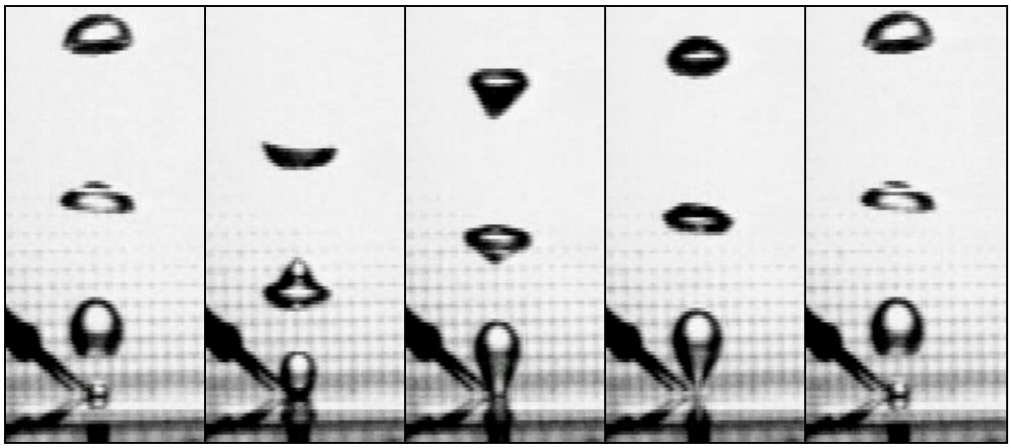


図 4.1.3　0.5mm 径発泡挙動

単周期



2 周期

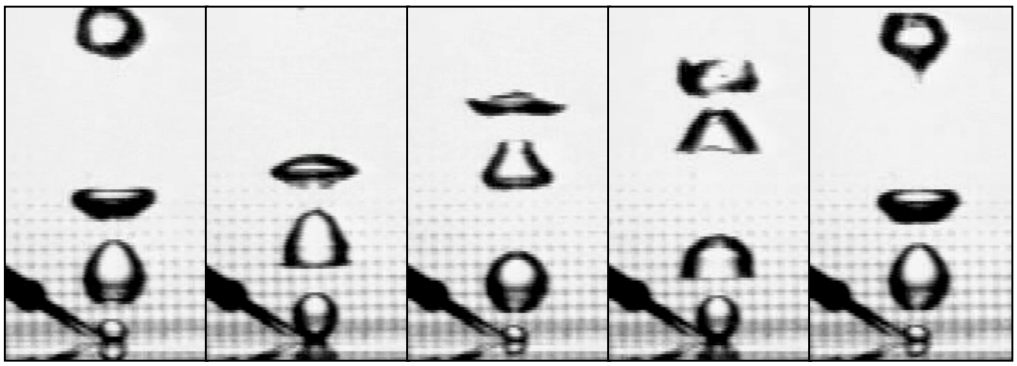
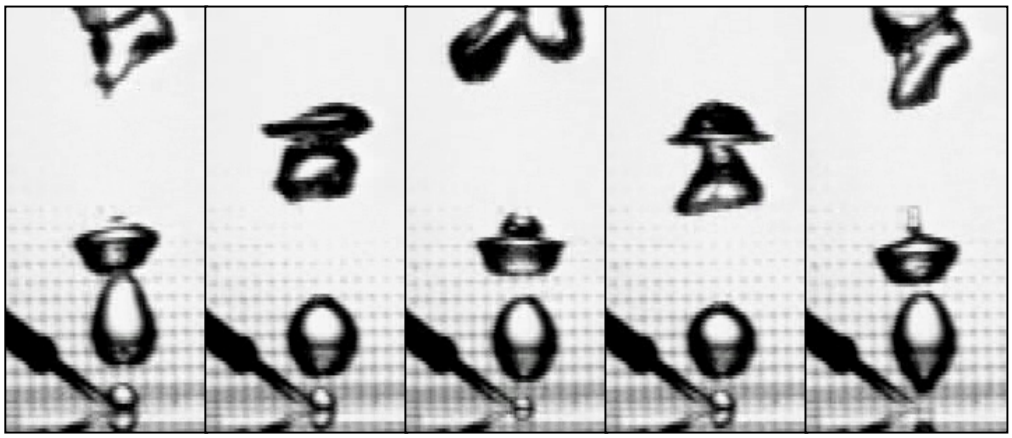
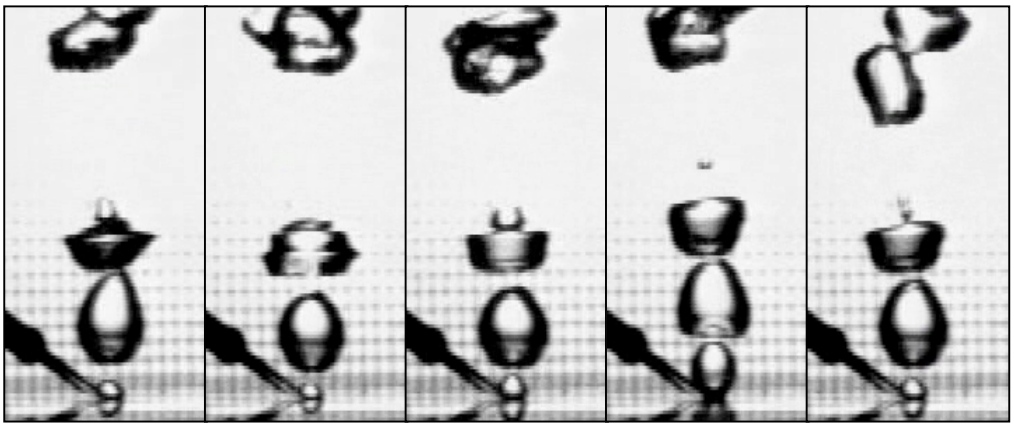


図 4.1.4　2.0mm 径発泡挙動

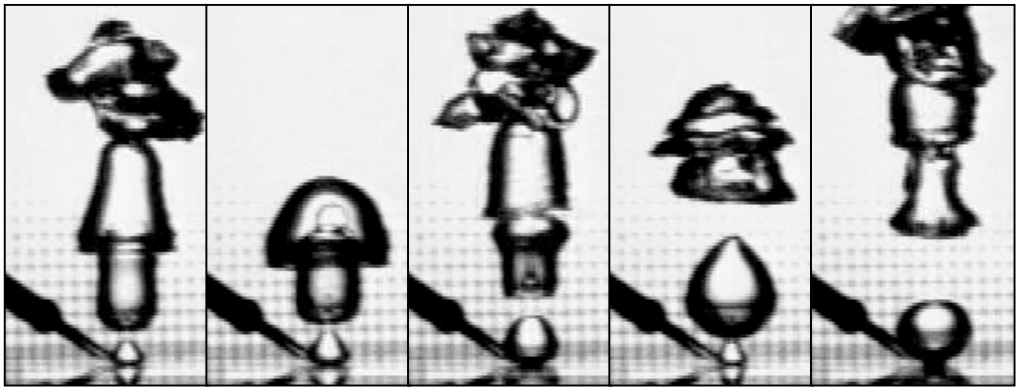
4 周期



8 周期



非周期的



0 →

図 4.1.4　2.0mm 径発泡挙動

４－２　気泡離脱時間

図 4.2 に特徴点における離脱の瞬間と流速変動波形の関係を示す．図中の f はその流量における波形の繰り返しの最小単位を示す．なお 500cc/min 以降については離脱の瞬間が判別不能になったのでプロットしていない

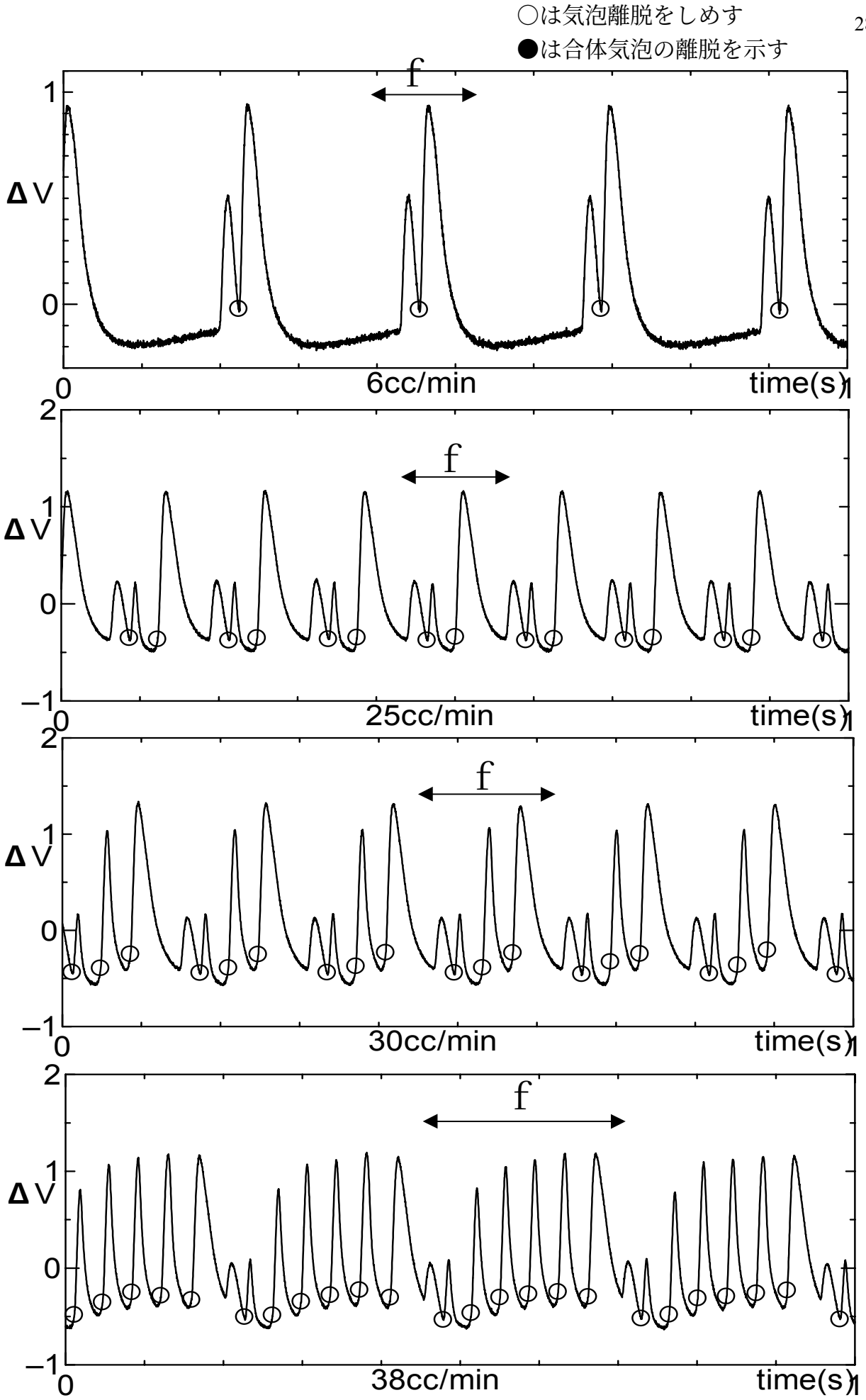


図 4.2.1　0.5mm 波形と離脱時間

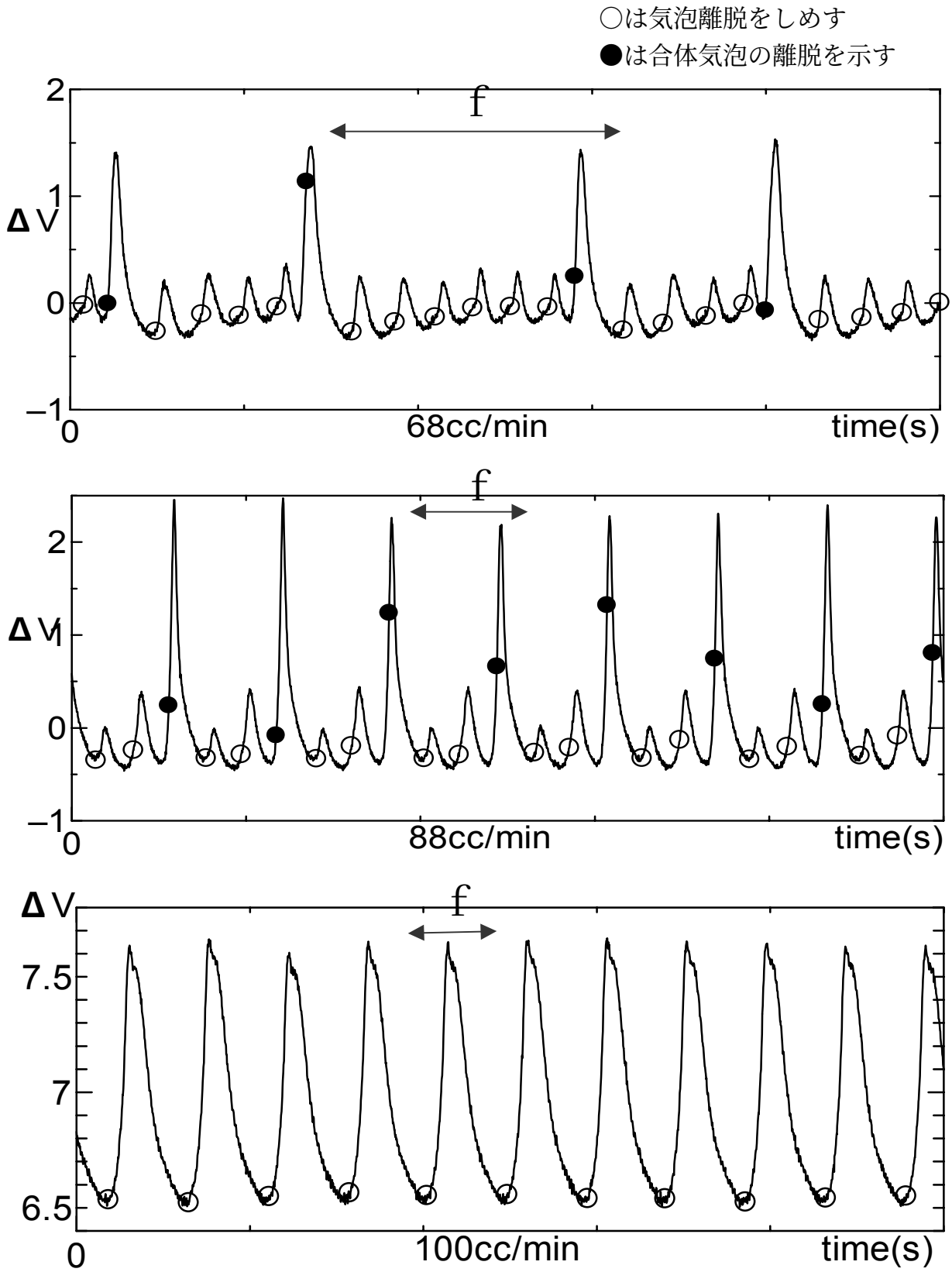


図 4.2.1 波形と離脱時間

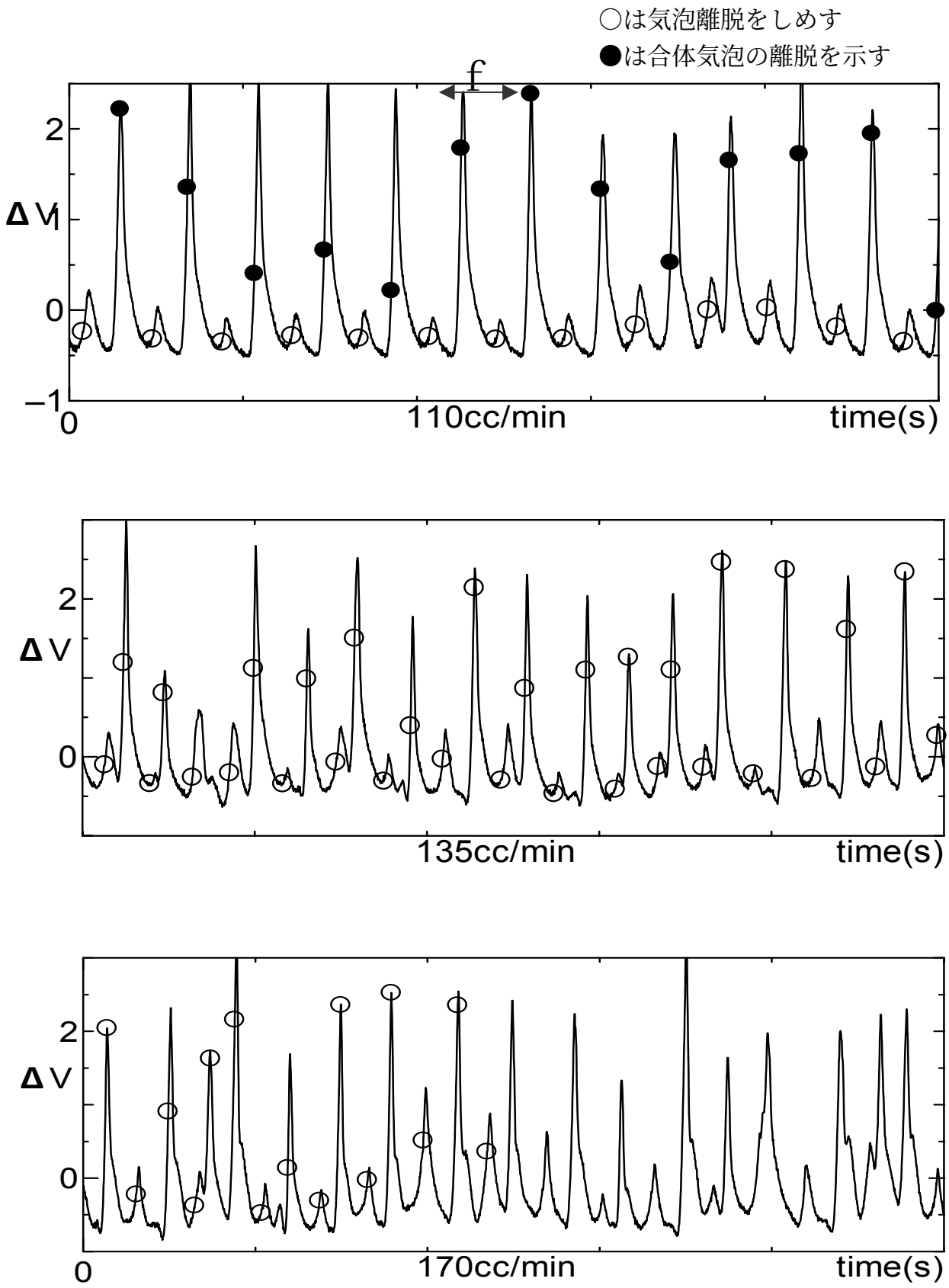


図 4.2.1　波形と離脱時間

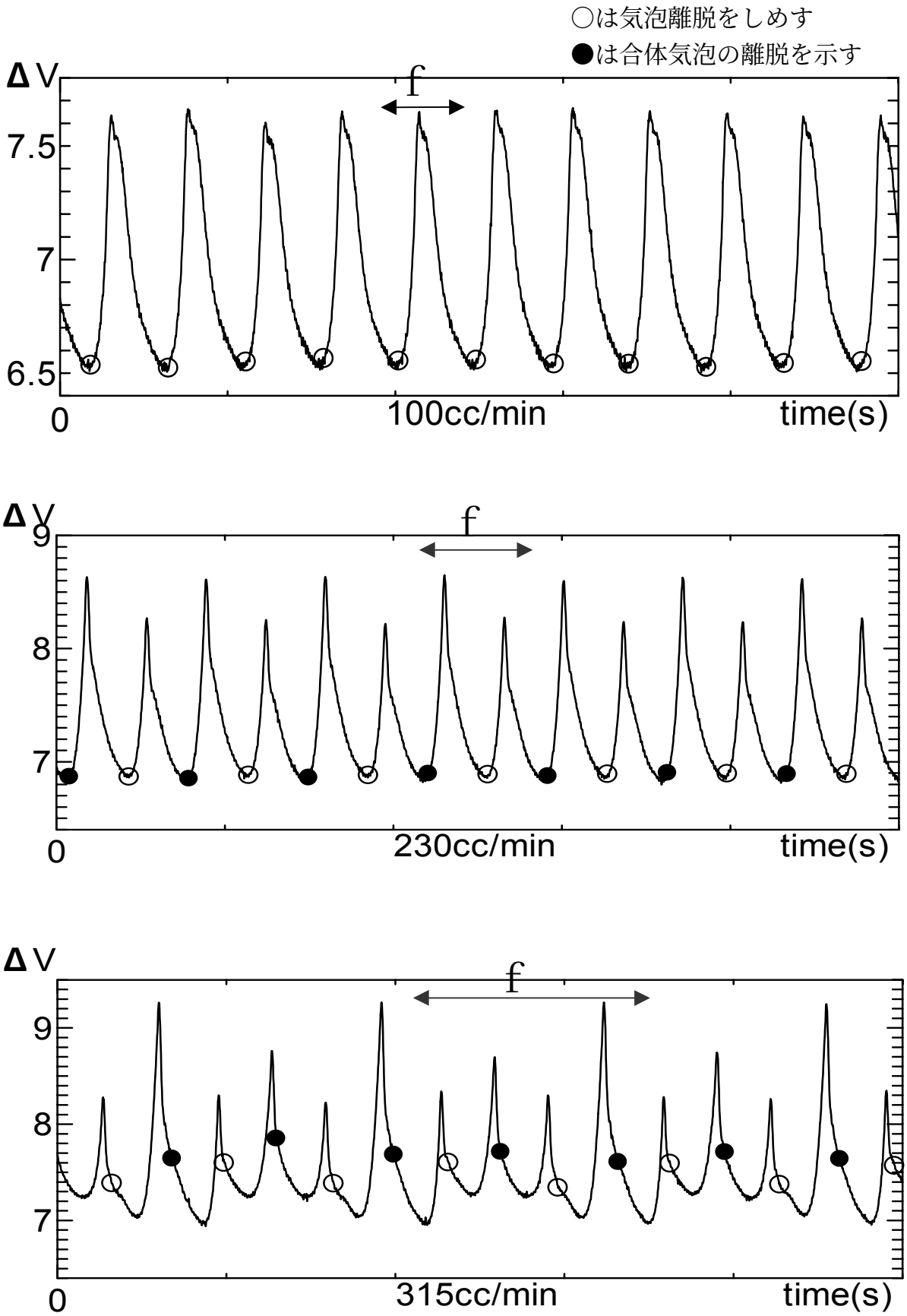


図 4.2.2　波形と離脱時間

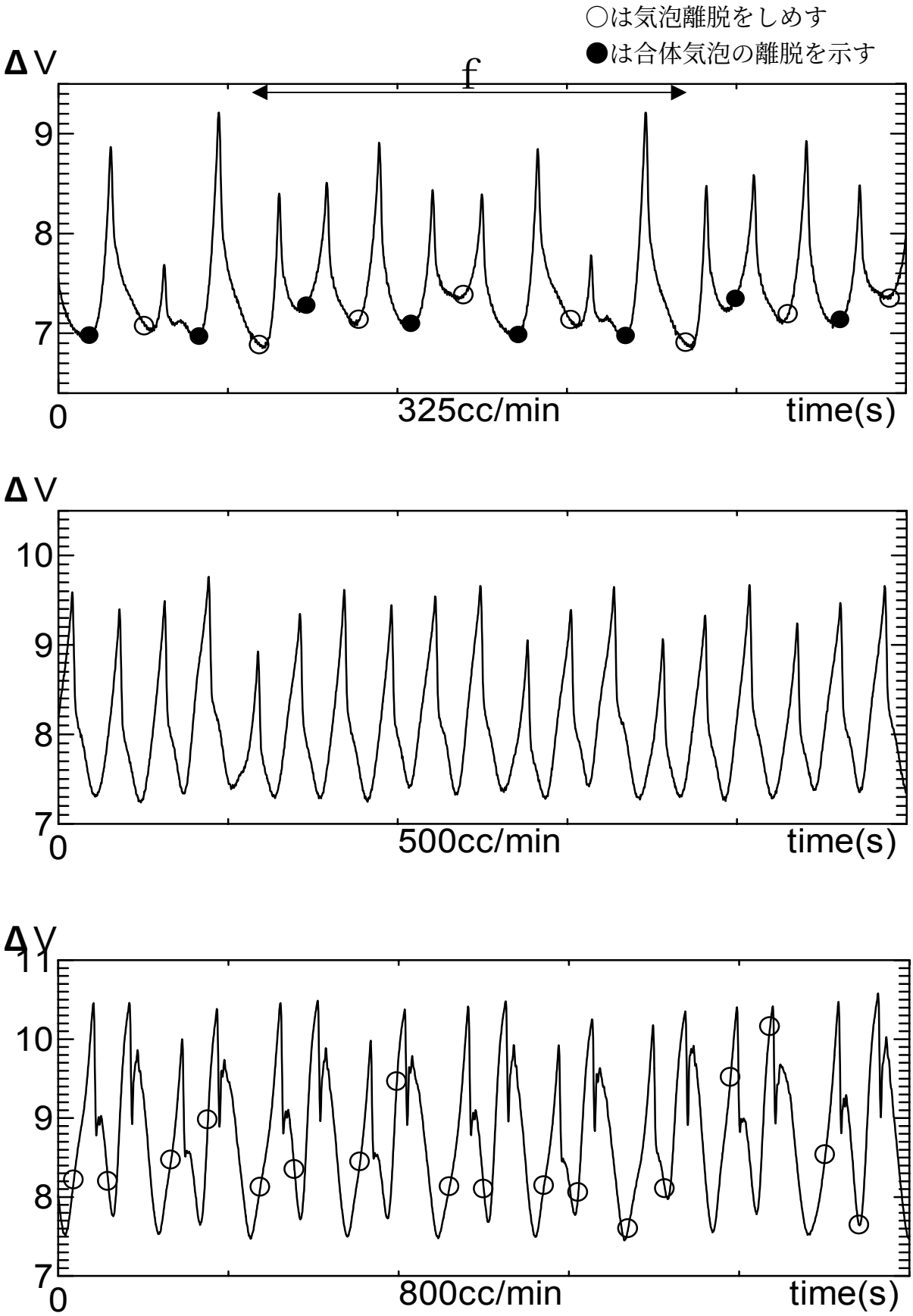


図 4.4.2　波形と離脱時間

４－４ アトラクター

時系列データから 3 次元位相空間にアトラクターを再構成する．0.5mm、2.0mm とも相互情報量の極小値を計算した結果τ＝２５と設定した. アトラクターについては典型的な波形をしめす領域を数点抜き出して構成する.

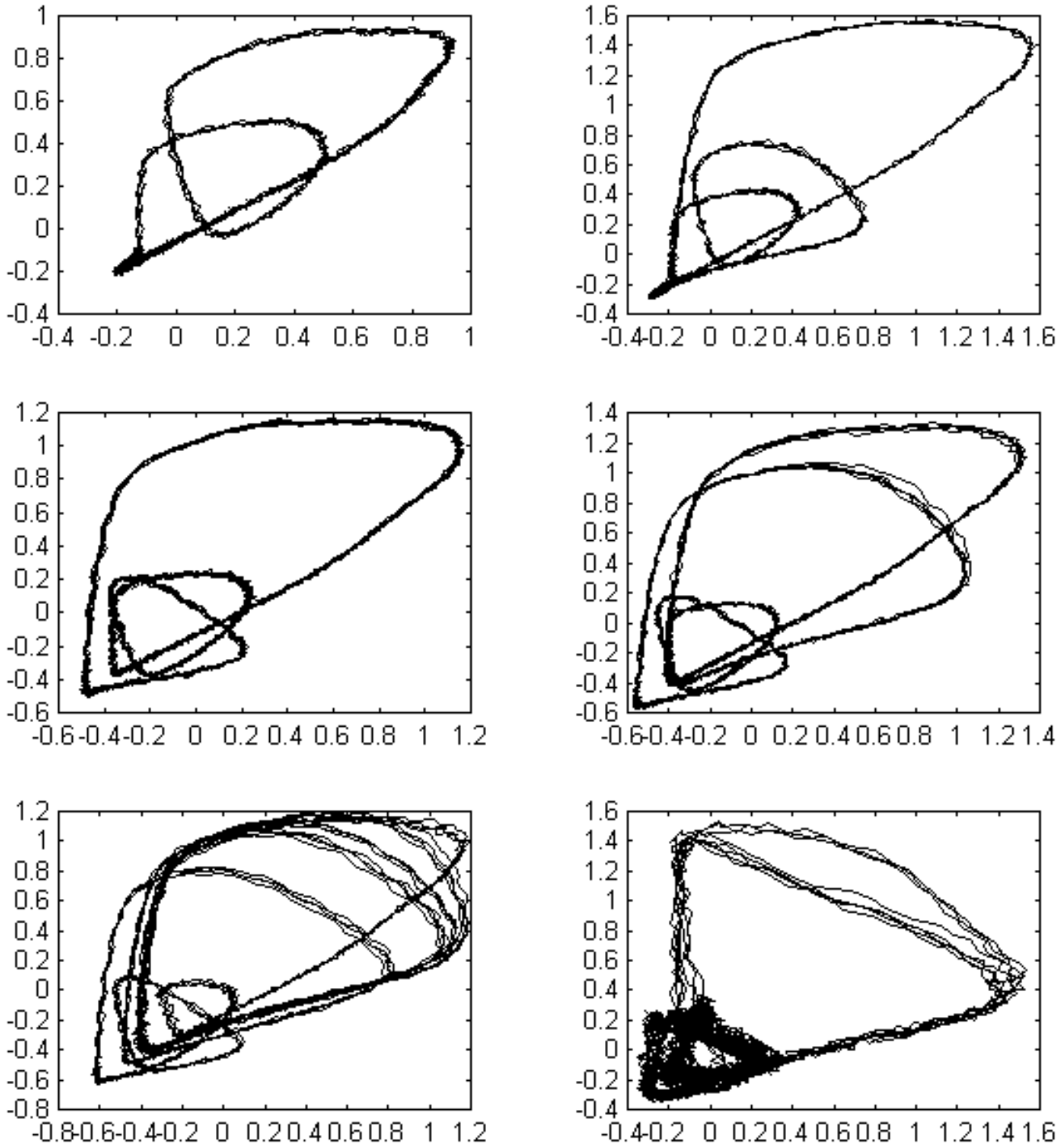


図 4.4.1　0.5mm 径アトラクター

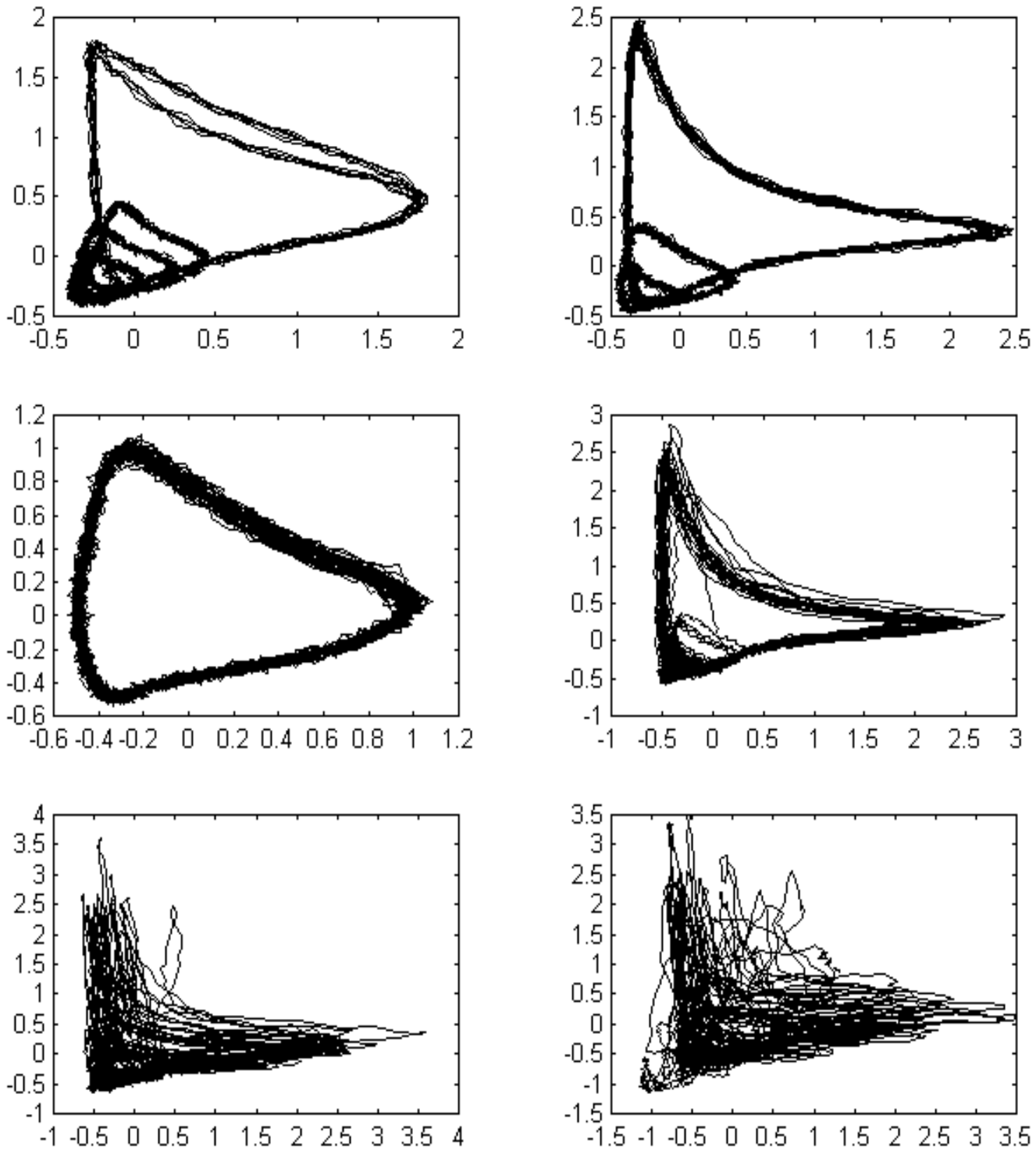


図 4.4.1　0.5mmアトラクター

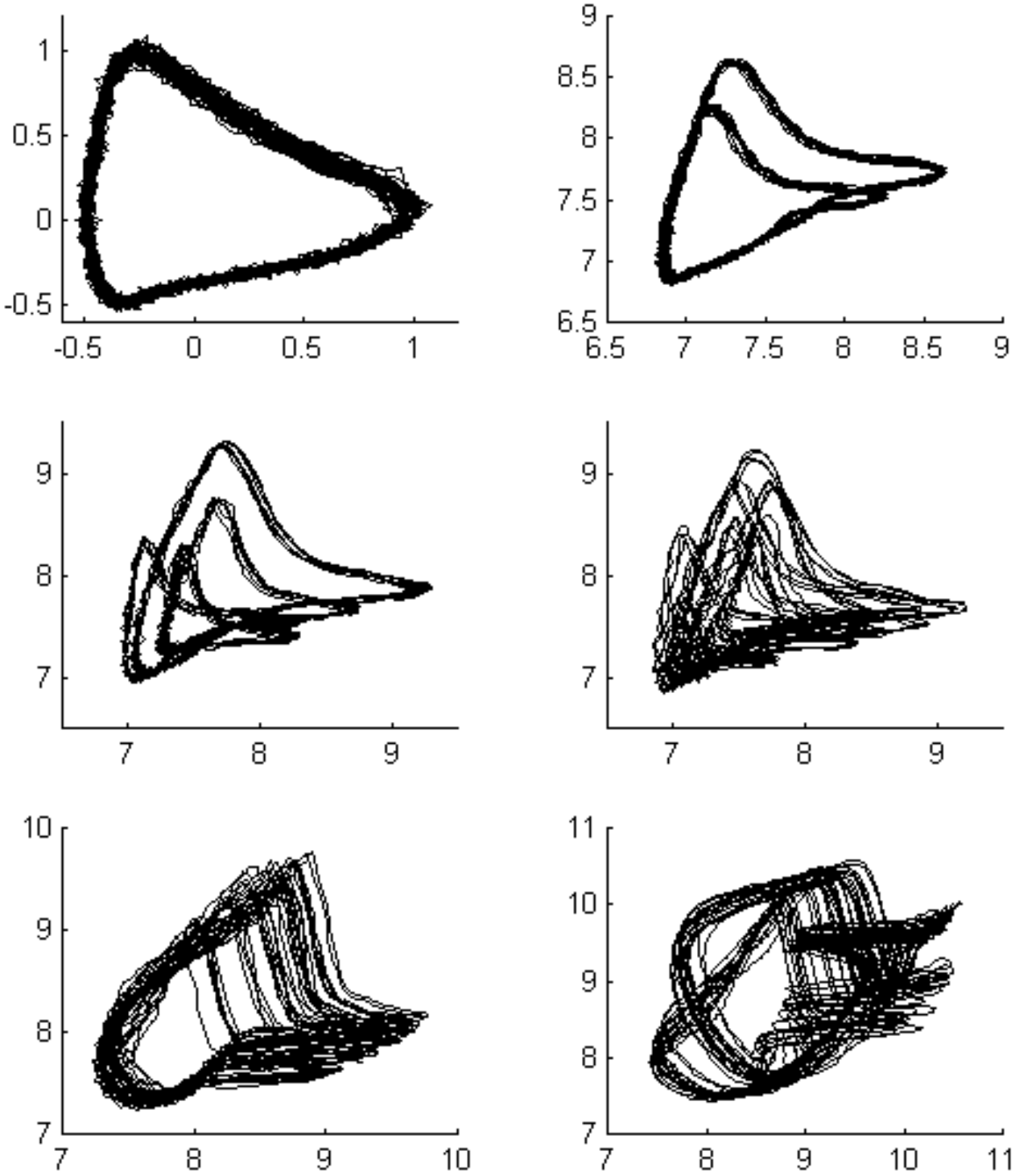


図 4.4.2　2.0mmアトラクター

４－３　相関次元

相関次元についても特徴点について計算し求める.

表 4.4　計測した相関次元一覧

0.5mm			2.0mm		
流量（cc/min）	周期	相関次元	流量（cc/min）	周期	相関次元
6cc/min	1	計測不能	150cc/min	1	1.1
10cc/min	1	計測不能	230cc/min	2	1.2
25cc/min	3	2.0	315c/min	4	2.1
30cc/min	3	1.35	325c/min	8	2.2
38cc/min	6	1.50	335cc/min	6	1.7
68cc/min	5	1.00	350cc/min	8	2.8
75cc/min	1	1.6	500cc/min	ﾅｼ	
100cc/min	2	1.00	800cc/min	ﾅｼ	
110cc/min	ﾅｼ	1.5			
250cc/min		収束せず			

上図の傾きが収束しているところの傾きを計算したのが相関次元である.
下図から収束している点を取って計算する.
次に図 4.4.3　によって 2.0mm について 100cc/min から 1000cc/min までの相関次元をグラフ上に示してみる.

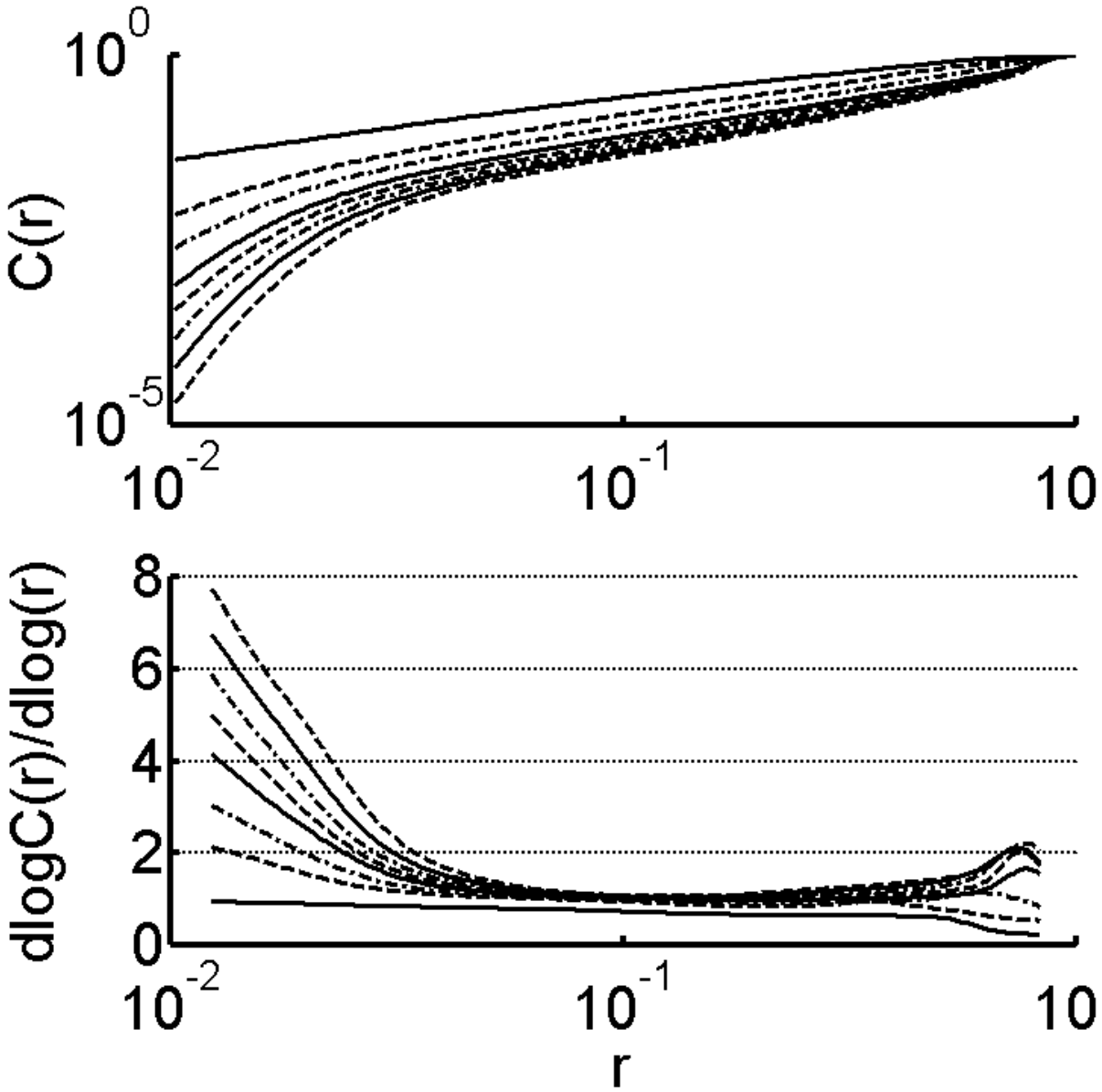


図 4.3.2　2.0mm相関次元とフラクタル次元（200cc/min）

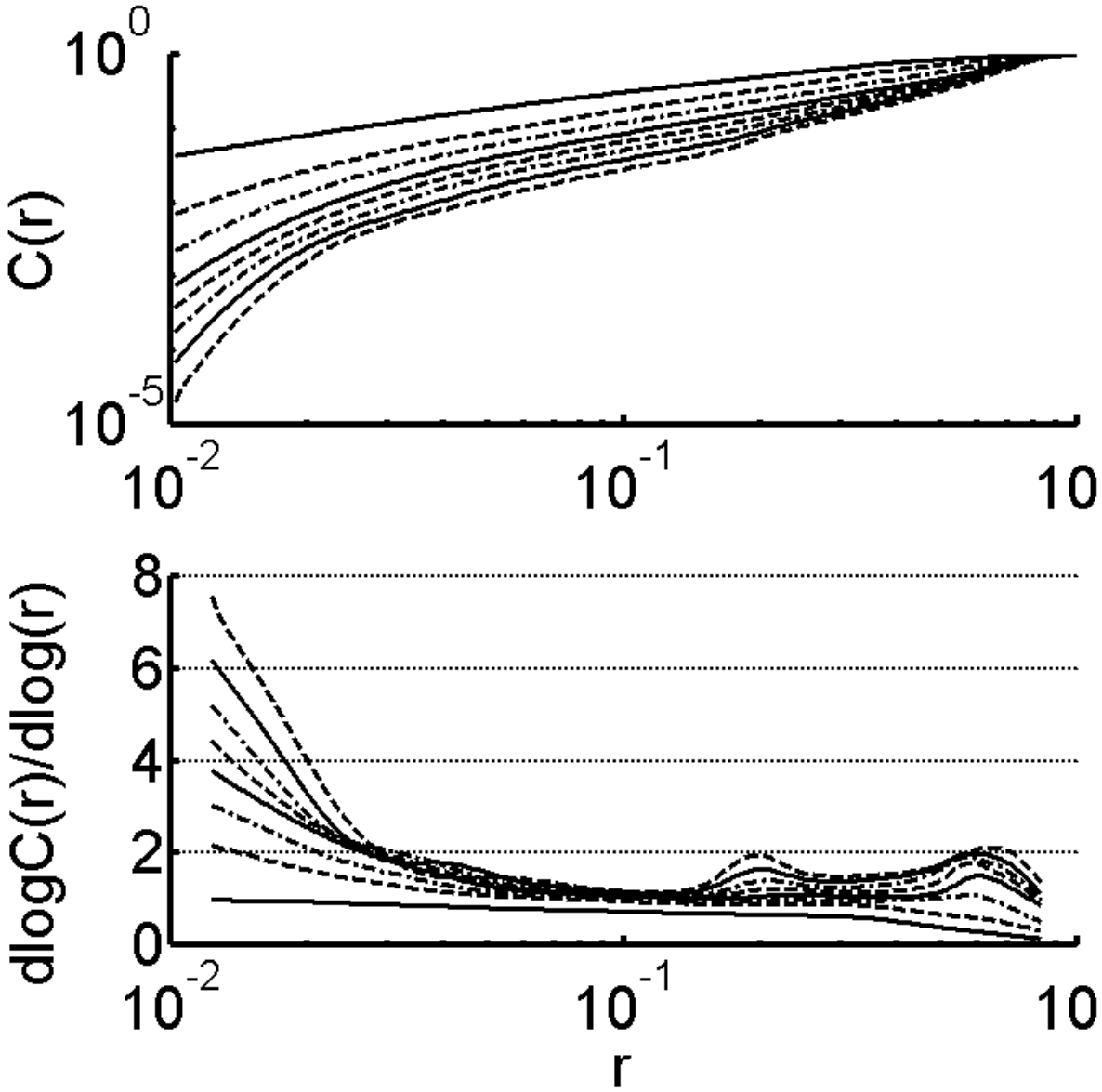


図 4.3.2　2.0mm相関次元とフラクタル次元（230cc/min）

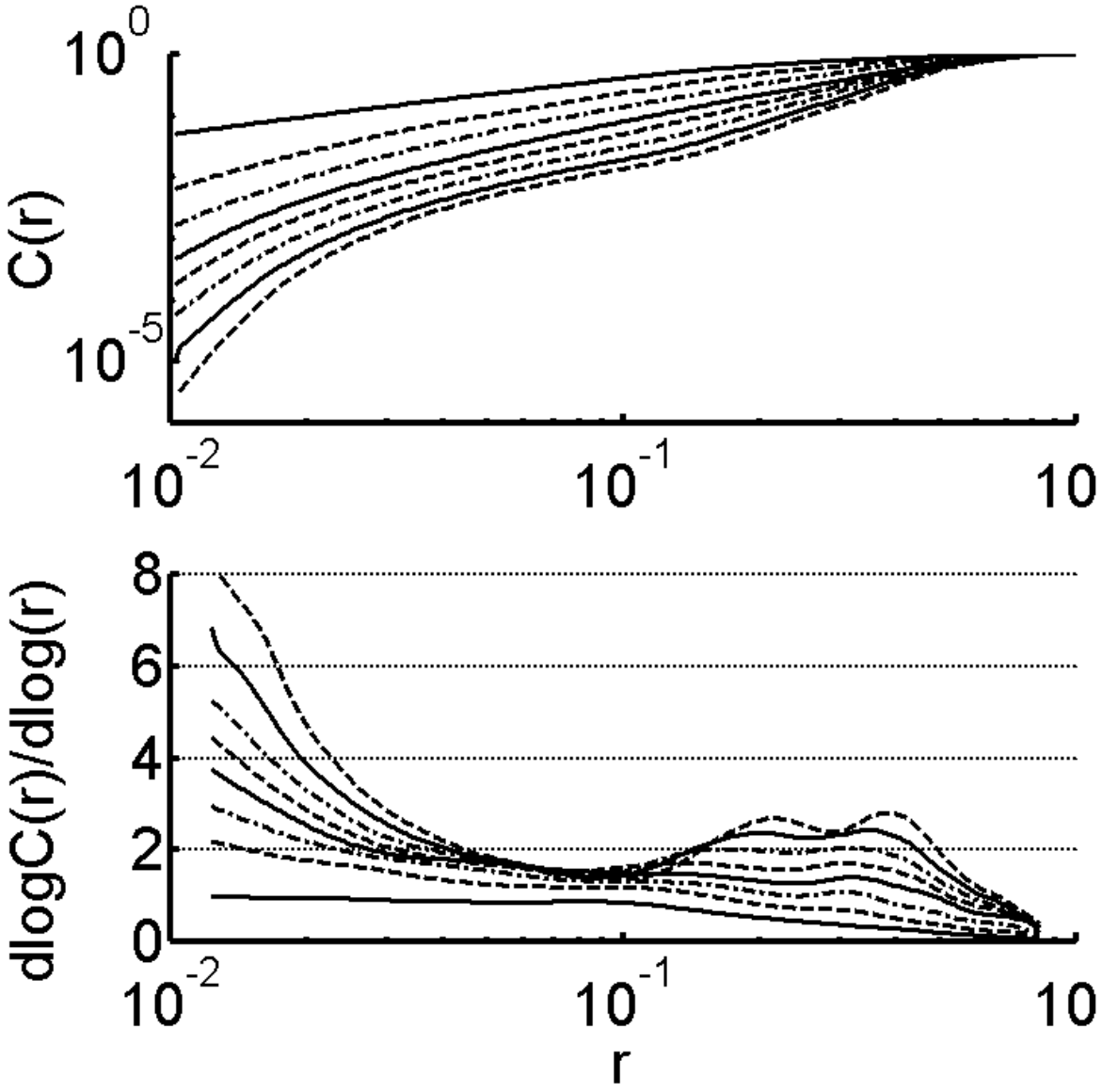


図 4.3.2　2.0mm 相関次元とフラクタル次元(310cc/min)

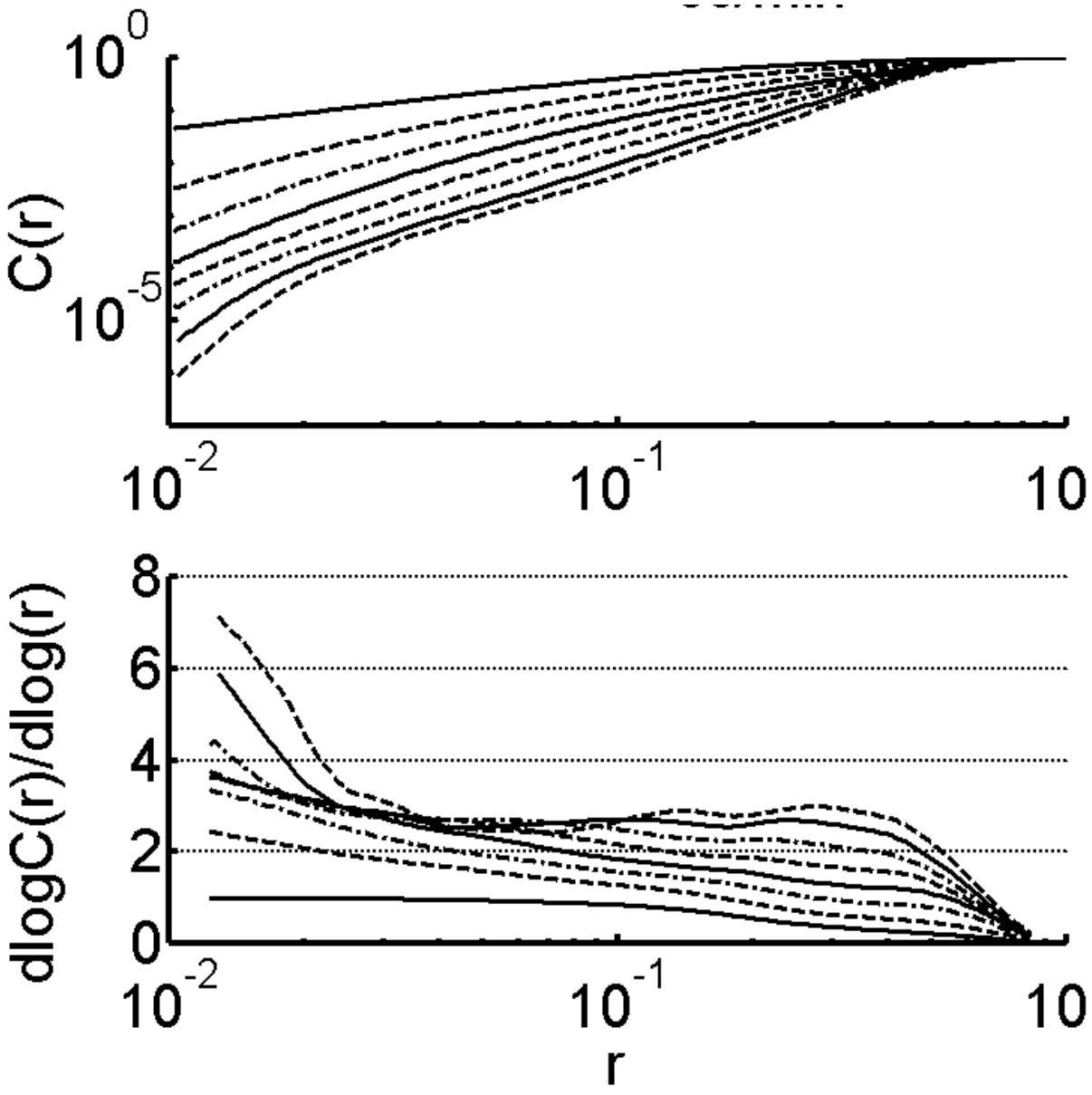


図 4.3.2mm　2.0mm 相関関数とフラクタル次元(320cc/min)

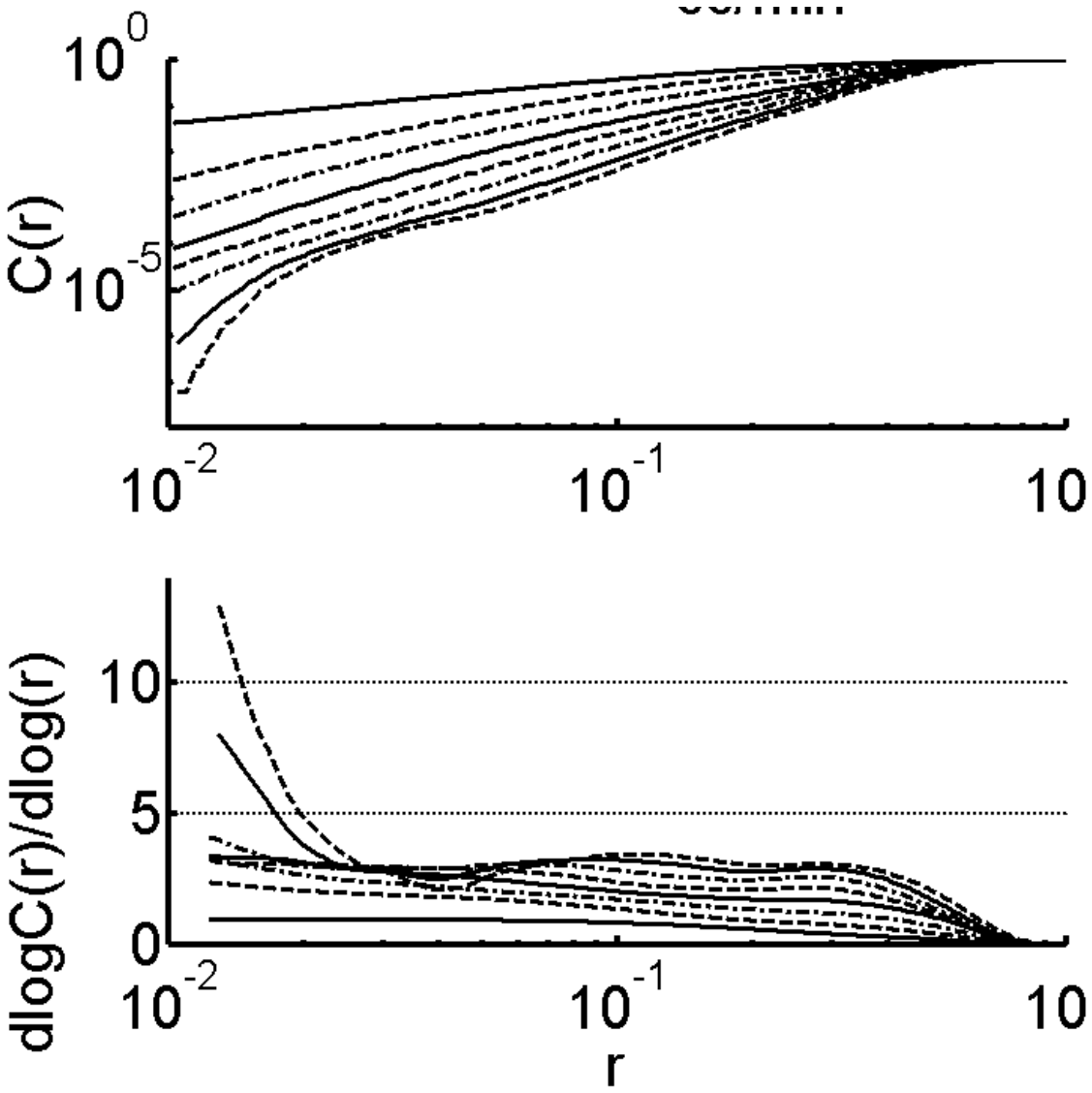


図 4.3.2　2.0mm 相関関数とフラクタル次元（400cc/min）

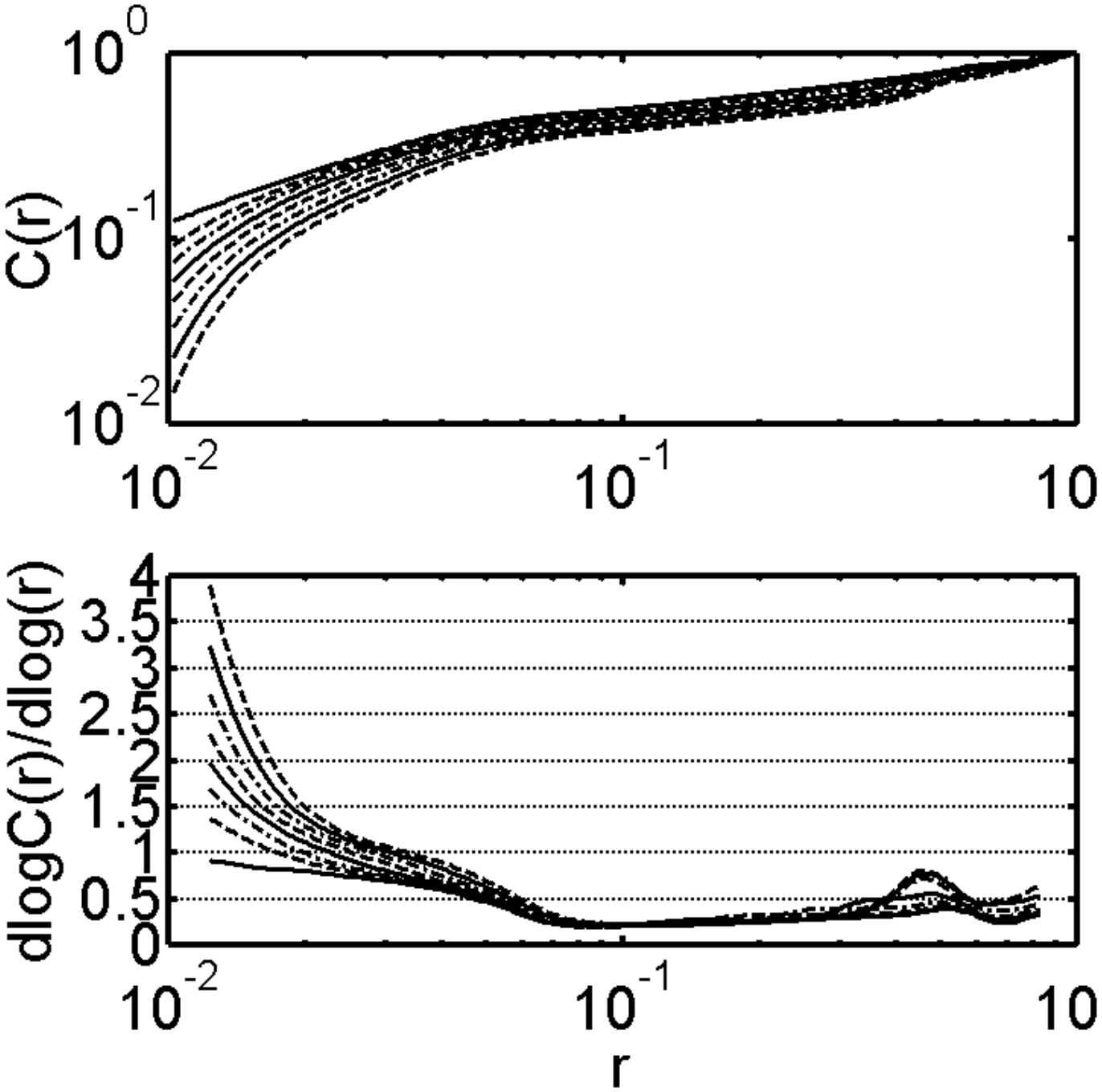


図 4.3.1　0.5mm 相関関数とフラクタル次元(6cc/min)

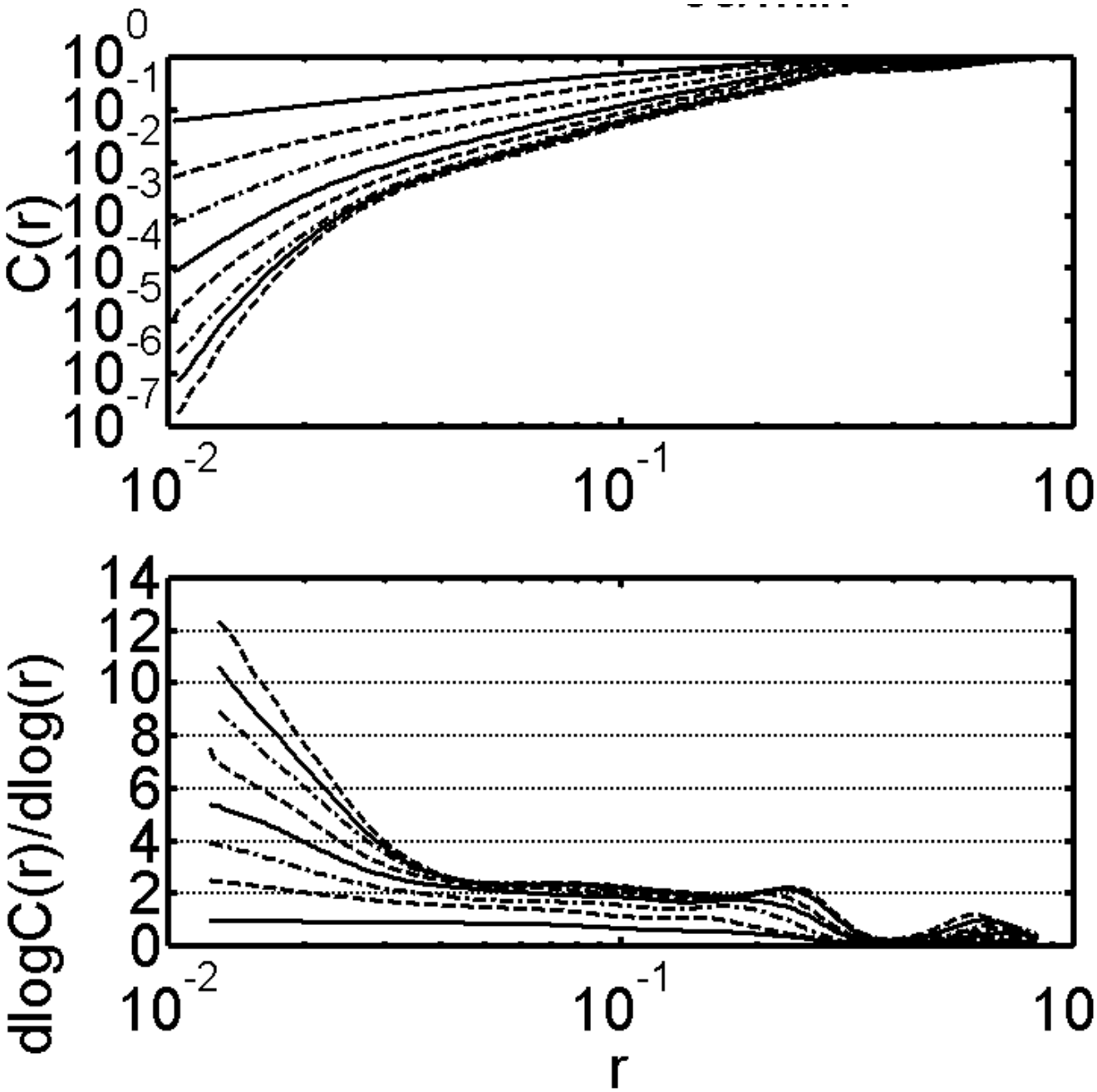


図 4.3.1　0.5mm 相関関数とフラクタル次元(25cc/min)

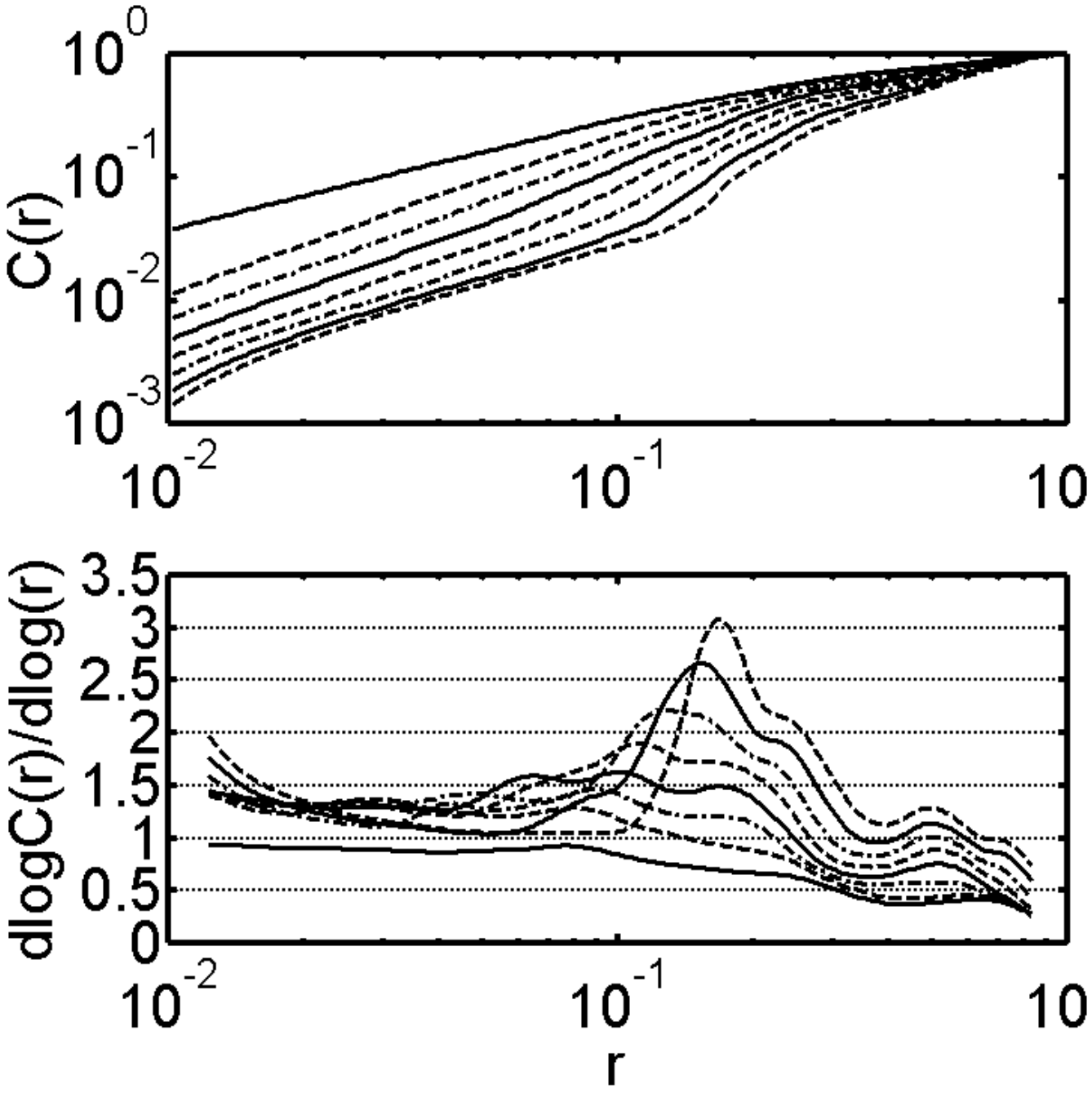


図 4.3.1　0.5mm 相関関数とフラクタル次元(30cc/min)

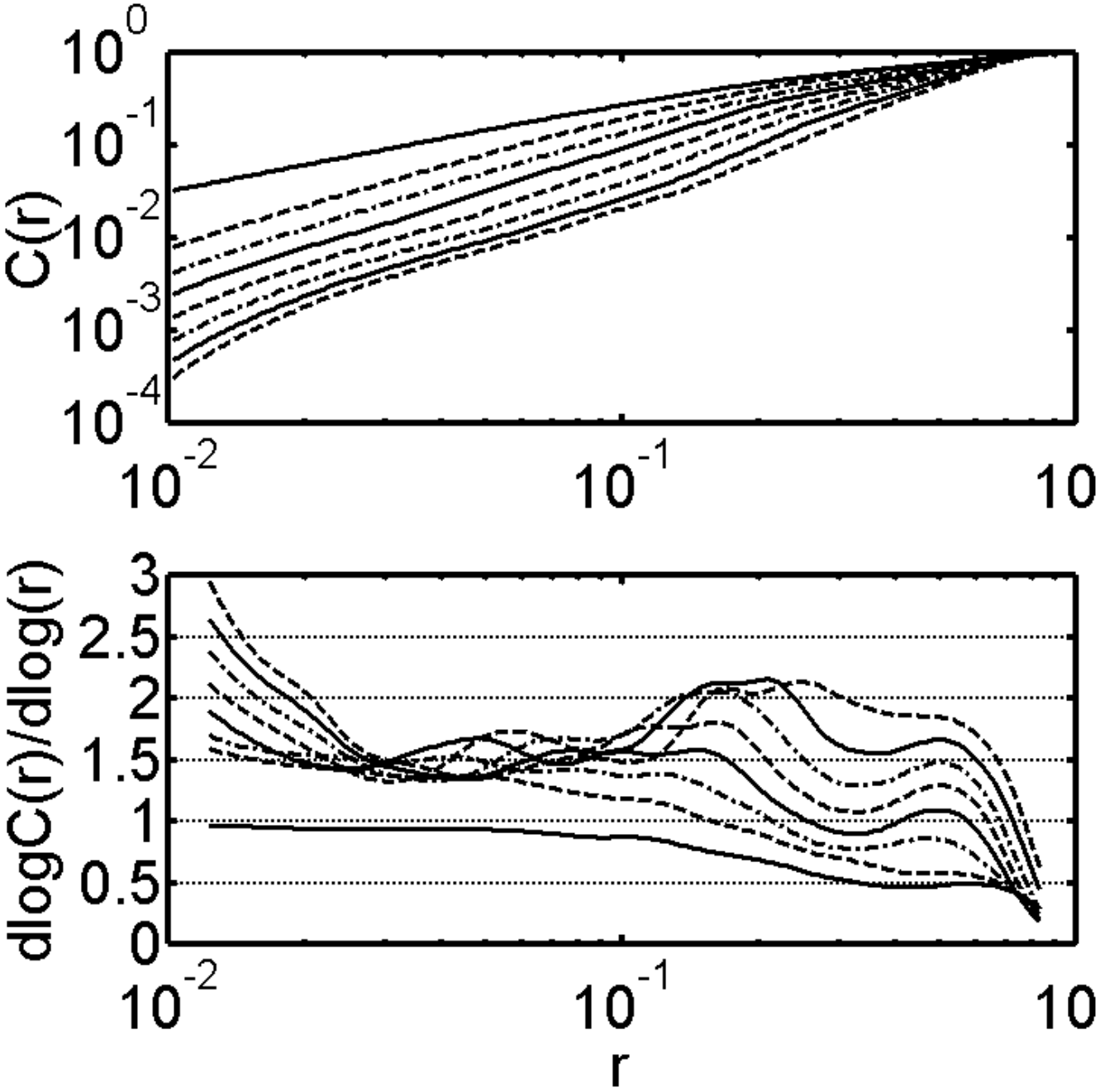


図 4.3.1　0.5mm 相関関数とフラクタル次元(38cc/min)

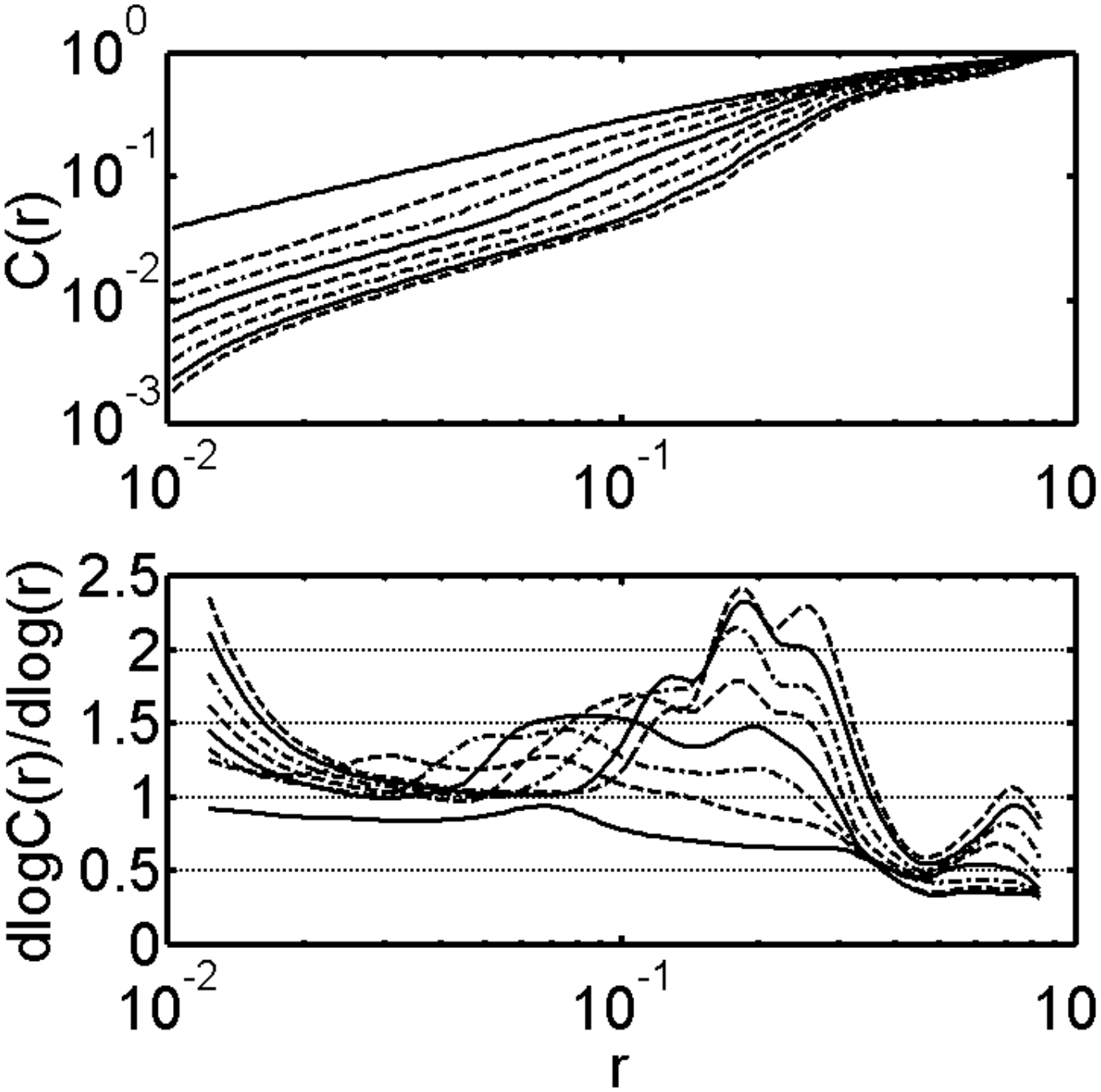


図 4.3.1　0.5mm 相関関数とフラクタル次元(68cc/min)

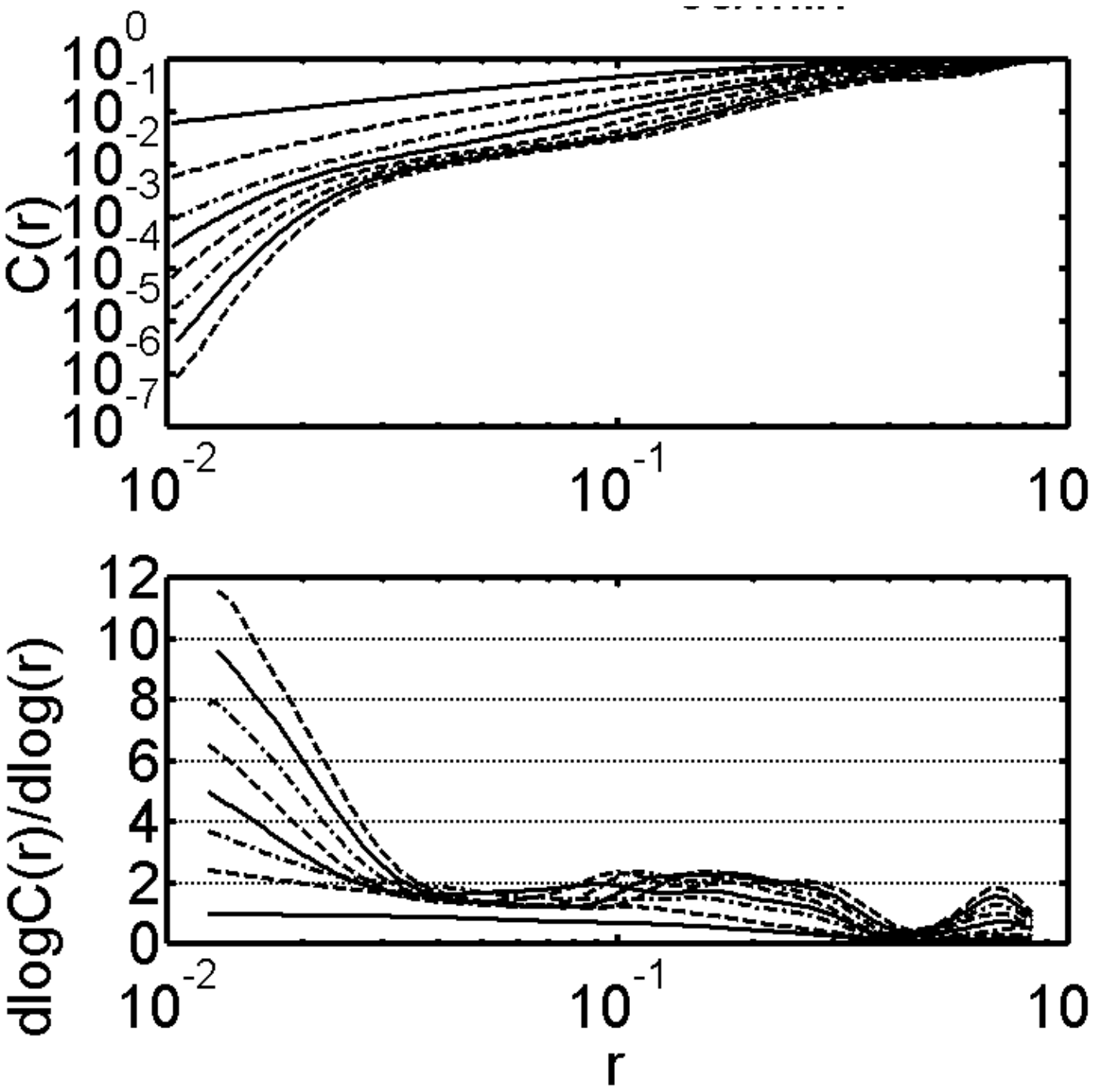


図 4.3.1　0.5mm 相関関数とフラクタル次元(75cc/min)

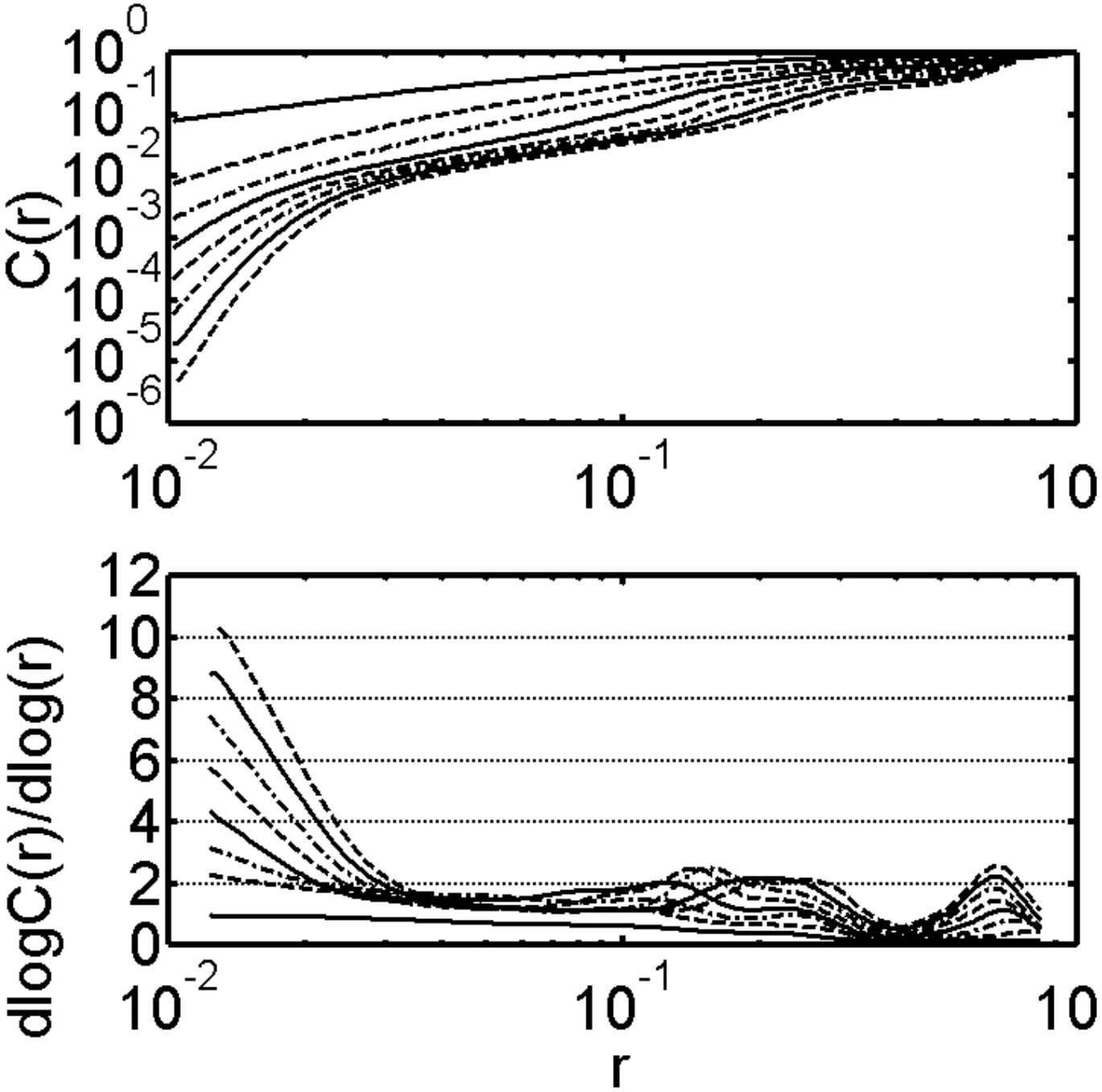


図 4.3.1　0.5mm 相関関数とフラクタル次元(88cc/min)

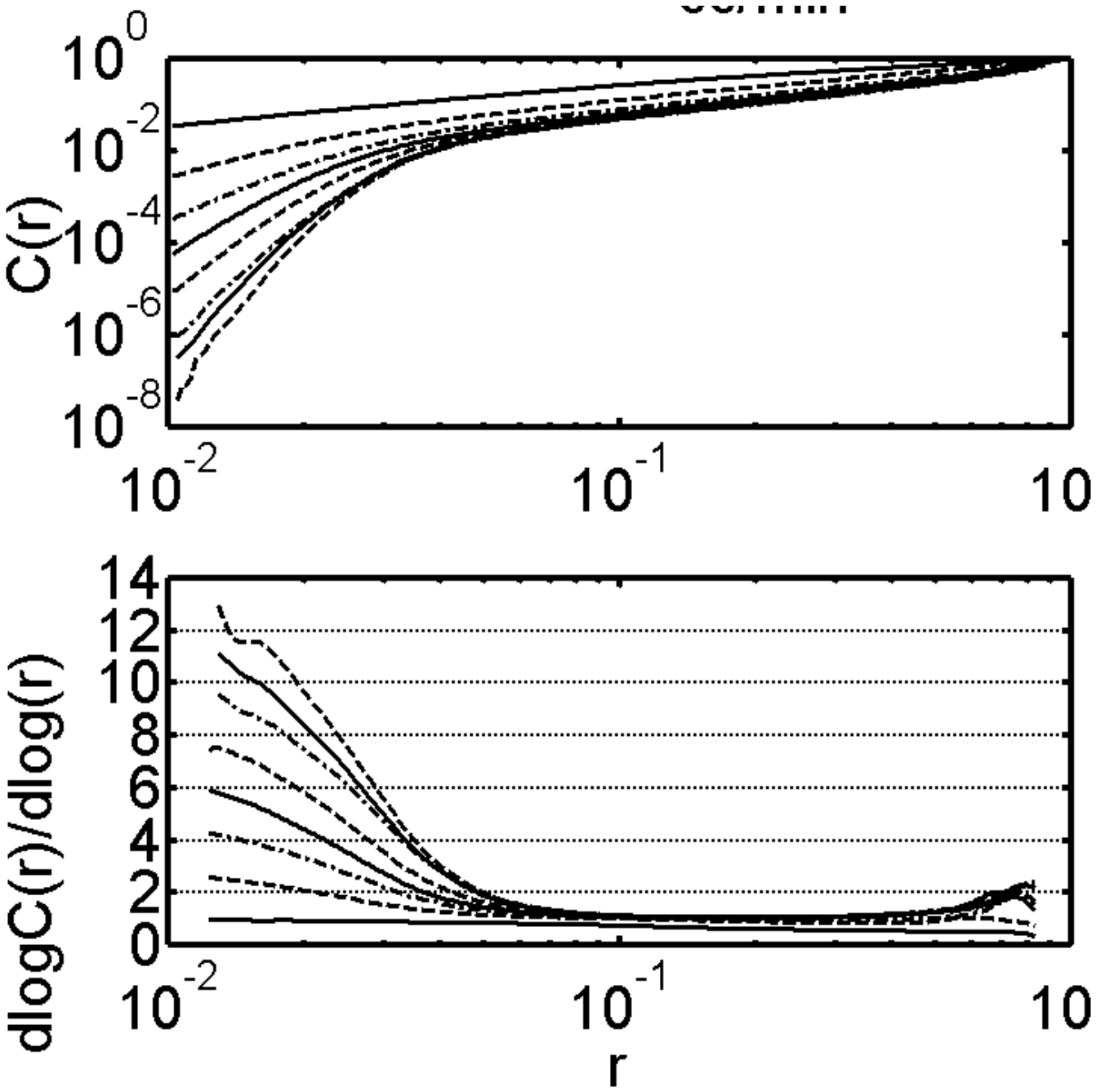


図 4.3.1　0.5mm 相関関数とフラクタル次元(100cc/min)

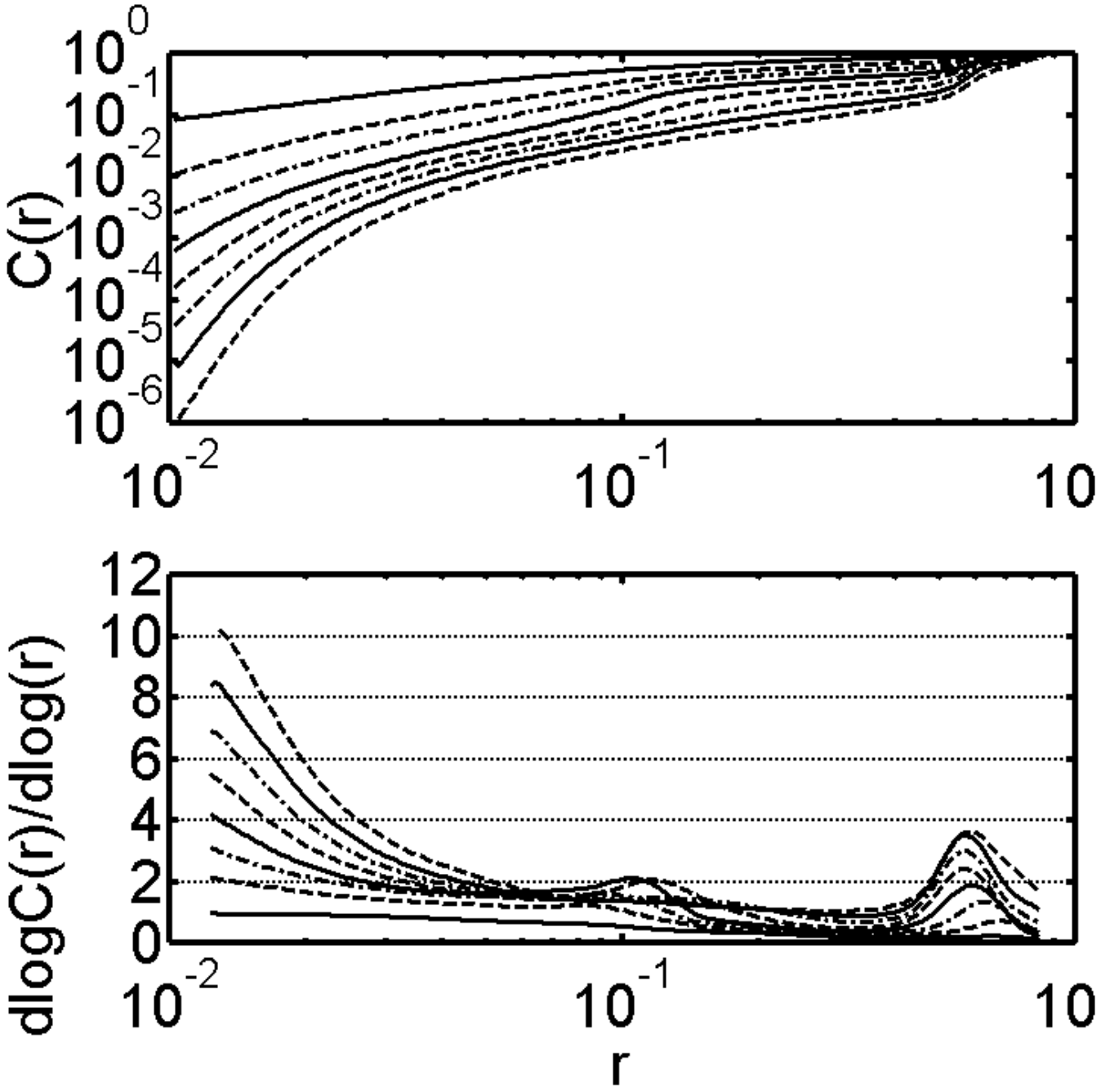


図 4.3.1　0.5mm 相関関数とフラクタル次元(110cc/min)

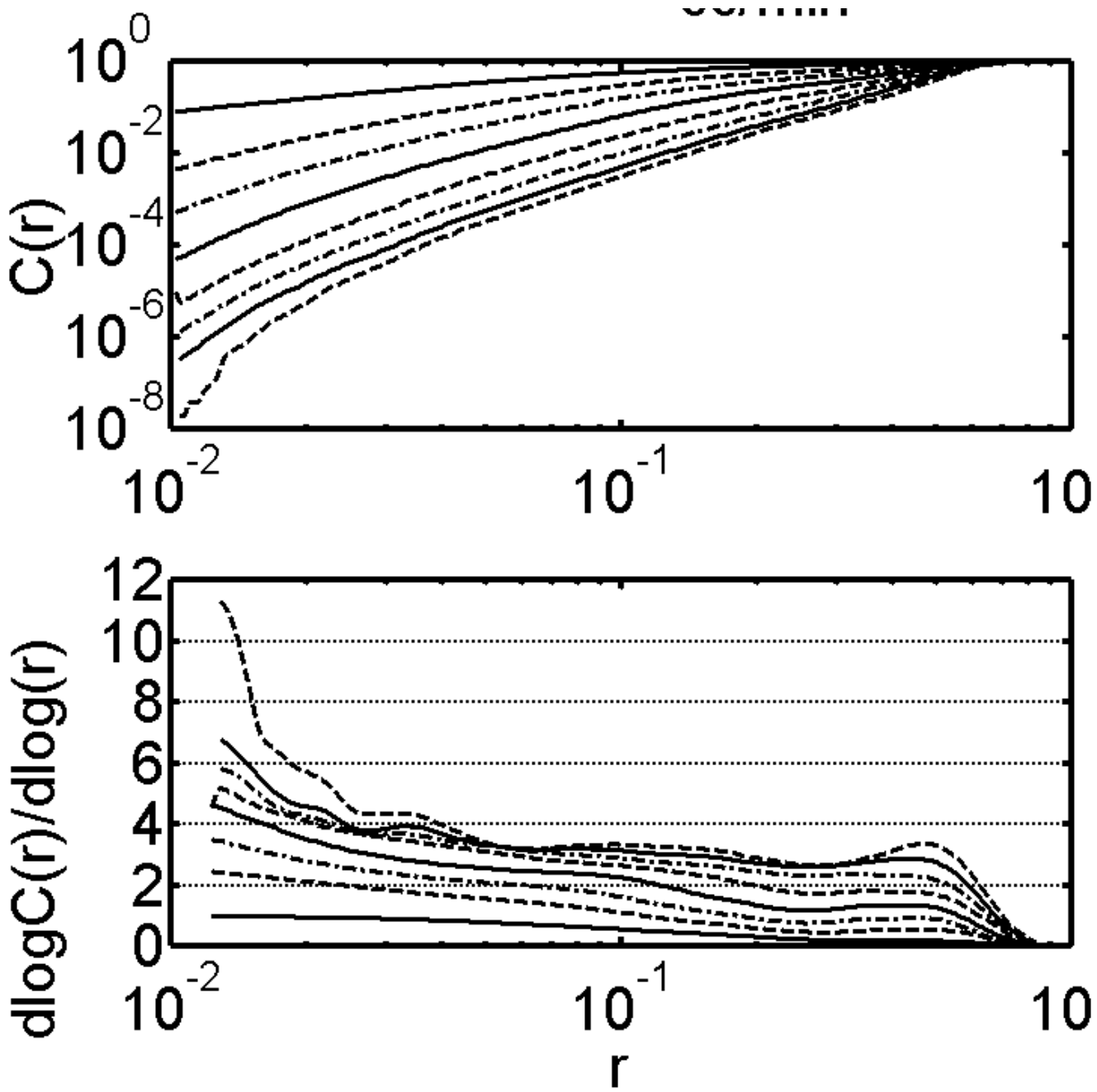


図 4.3.1　0.5mm 相関関数とフラクタル次元(135cc/min)

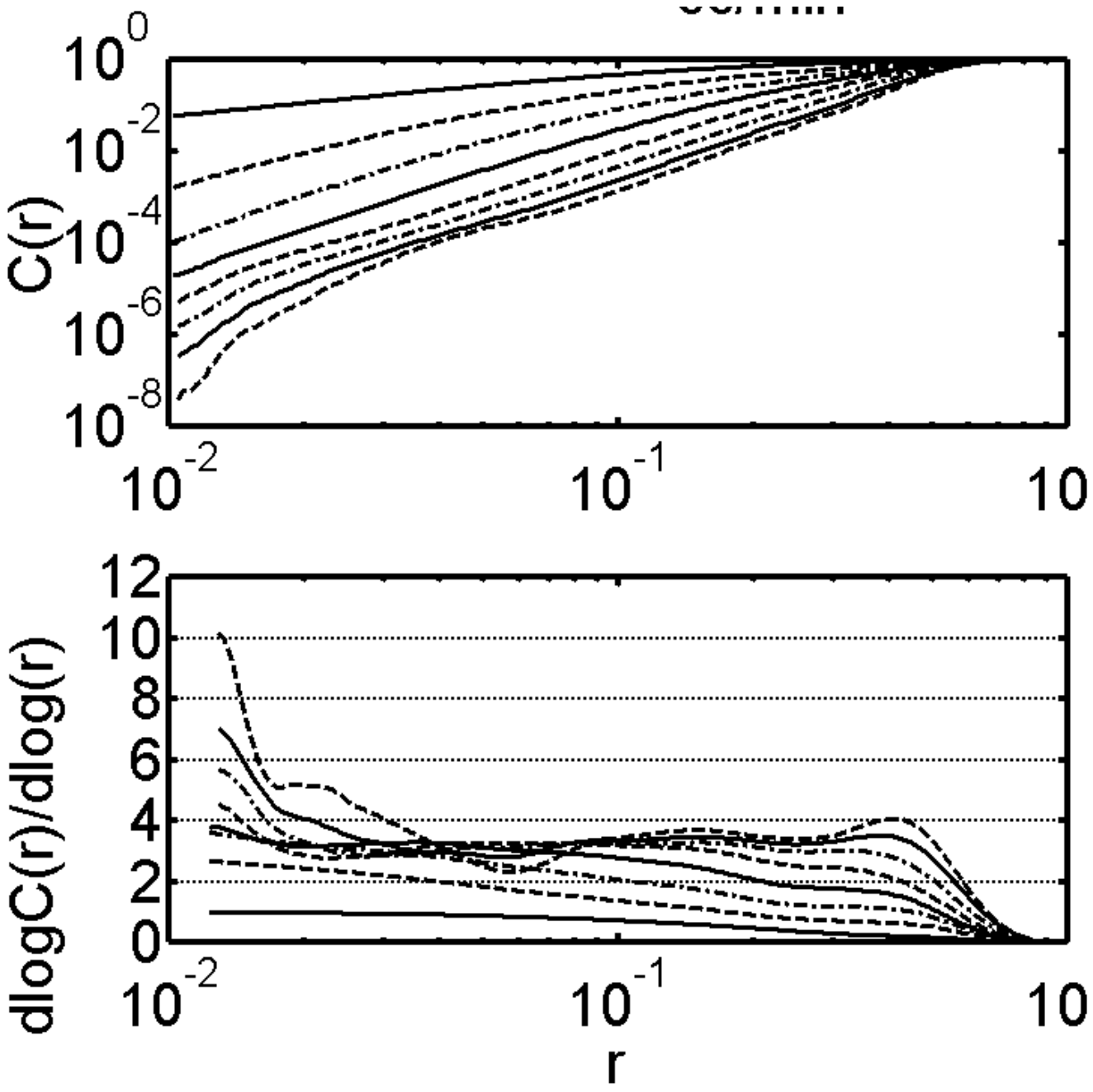


図 4.3.1　0.5mm 相関関数とフラクタル次元(170cc/min)

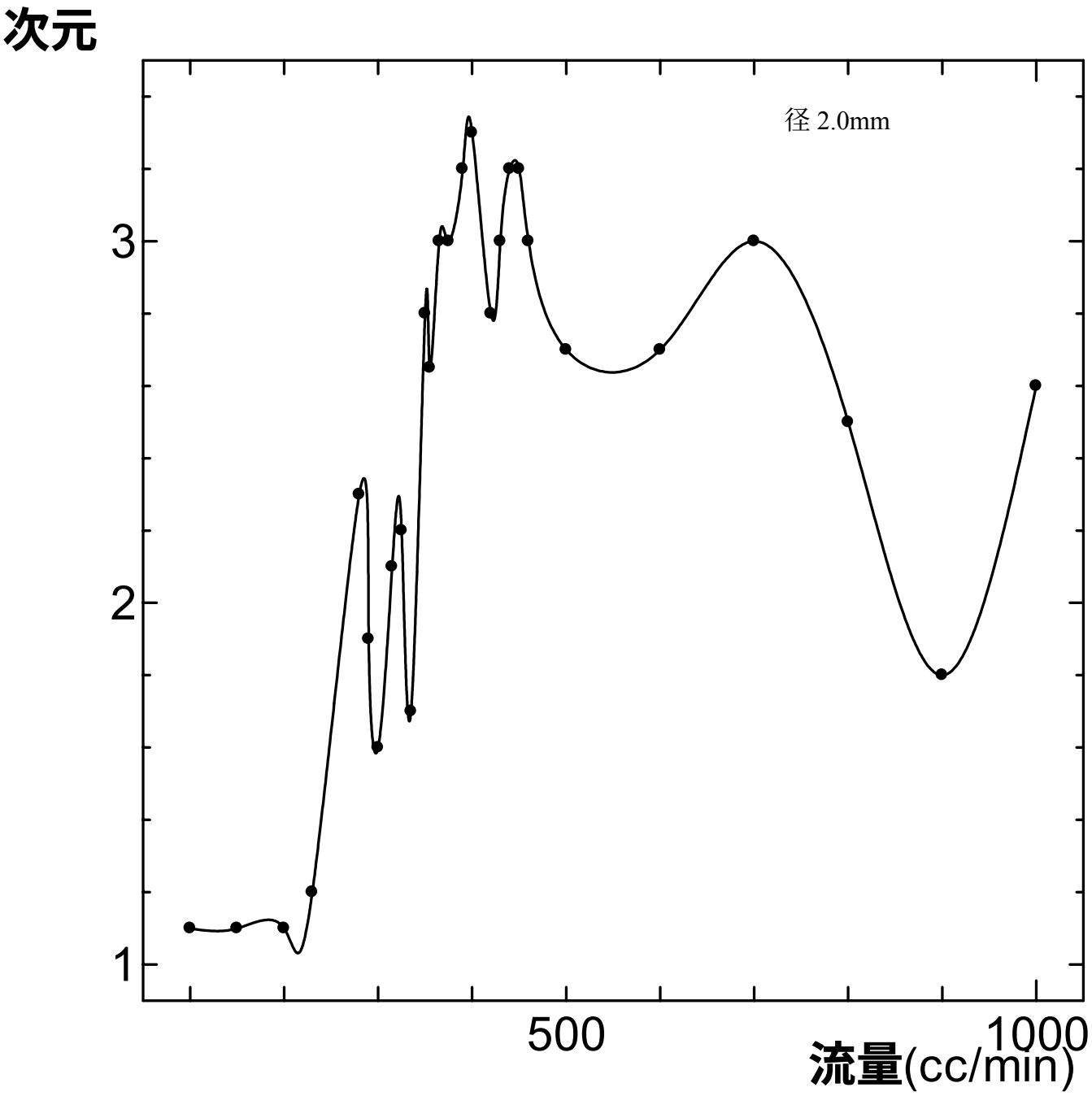


図 4.4.3　フラクタル次元

４－５　分岐図

spectrogram を使用する．連続的に流量を変化させていったときの結果

本実験ではオリフィス径 2.0mm、0.5mmそれぞれについてコンプレッサーからの空気流量を連続的に単調減少させ、それとともに系に送り込まれる流量を自然な形でゆっくり落としていく．サンプリング周波数５ｋＨｚでそれぞれ 90 分近い時系列データとなった．また分岐図については流速変動過程がどのように進んでいくかを明確に示している図を利用する．すなわち横軸流量、縦軸パワースペクトルをとることとする．2.0mm、0.5mmの分岐図についてはそれぞれ図　、図に示す．横軸の流量については実験中細かく時間と流量計の値をチェックし、グラフにする場合に時間を流量に置き換えてつくっているため、若干の誤差を含んでいる．

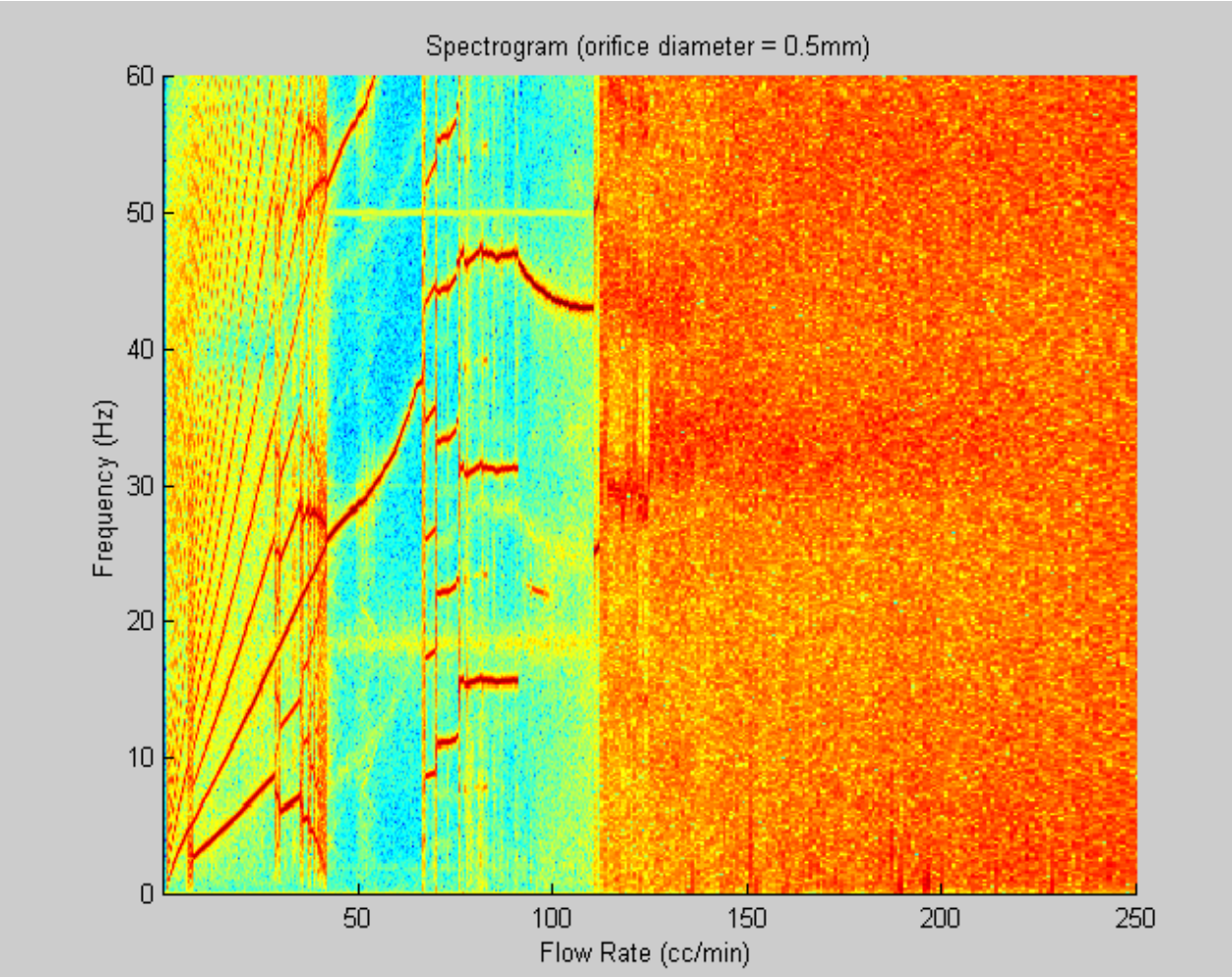
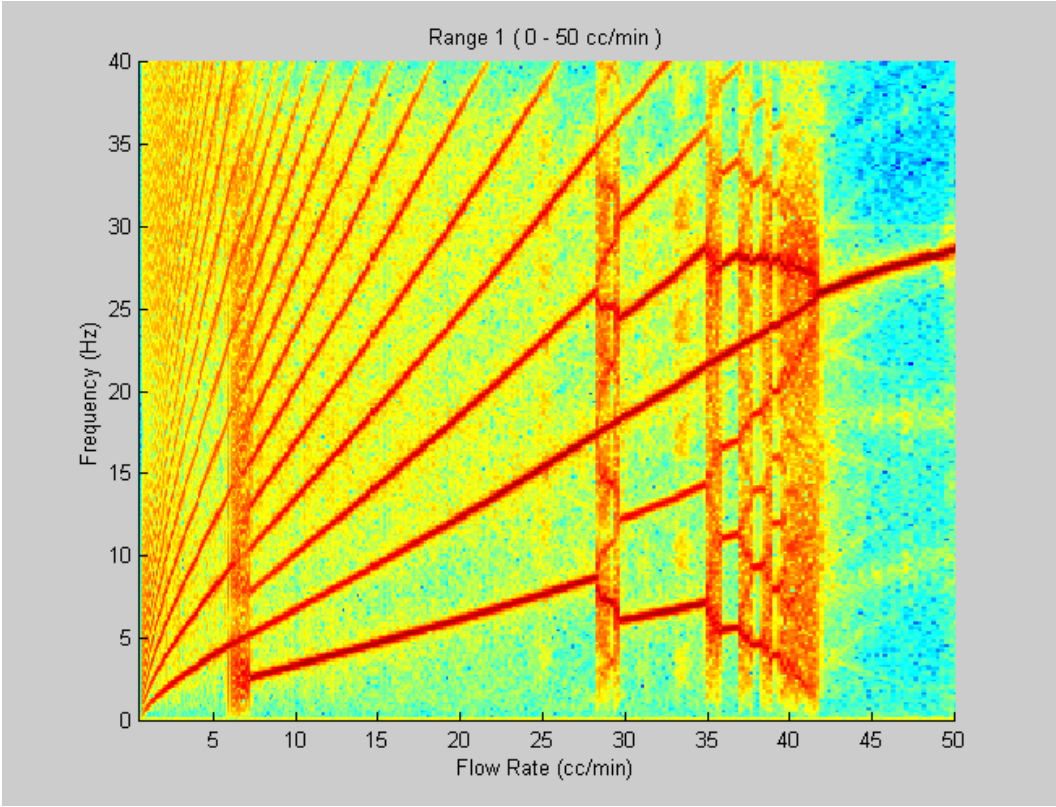


図 4.5　spectrogram



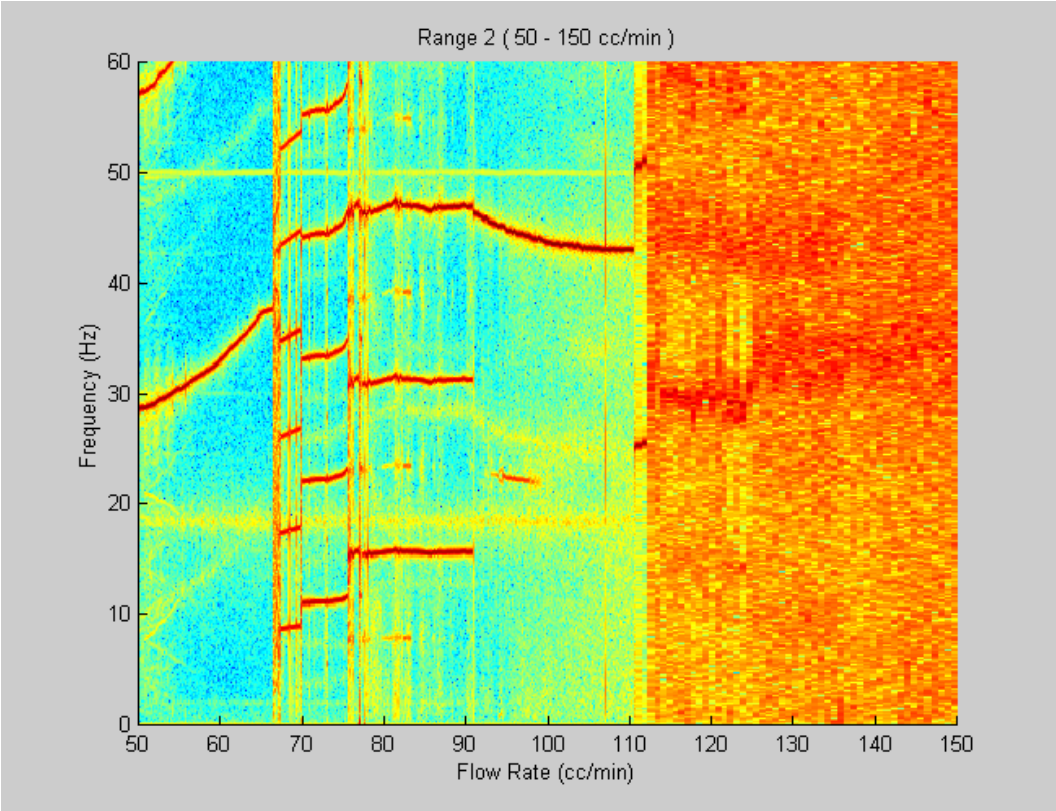


図 4.5　spectrogram

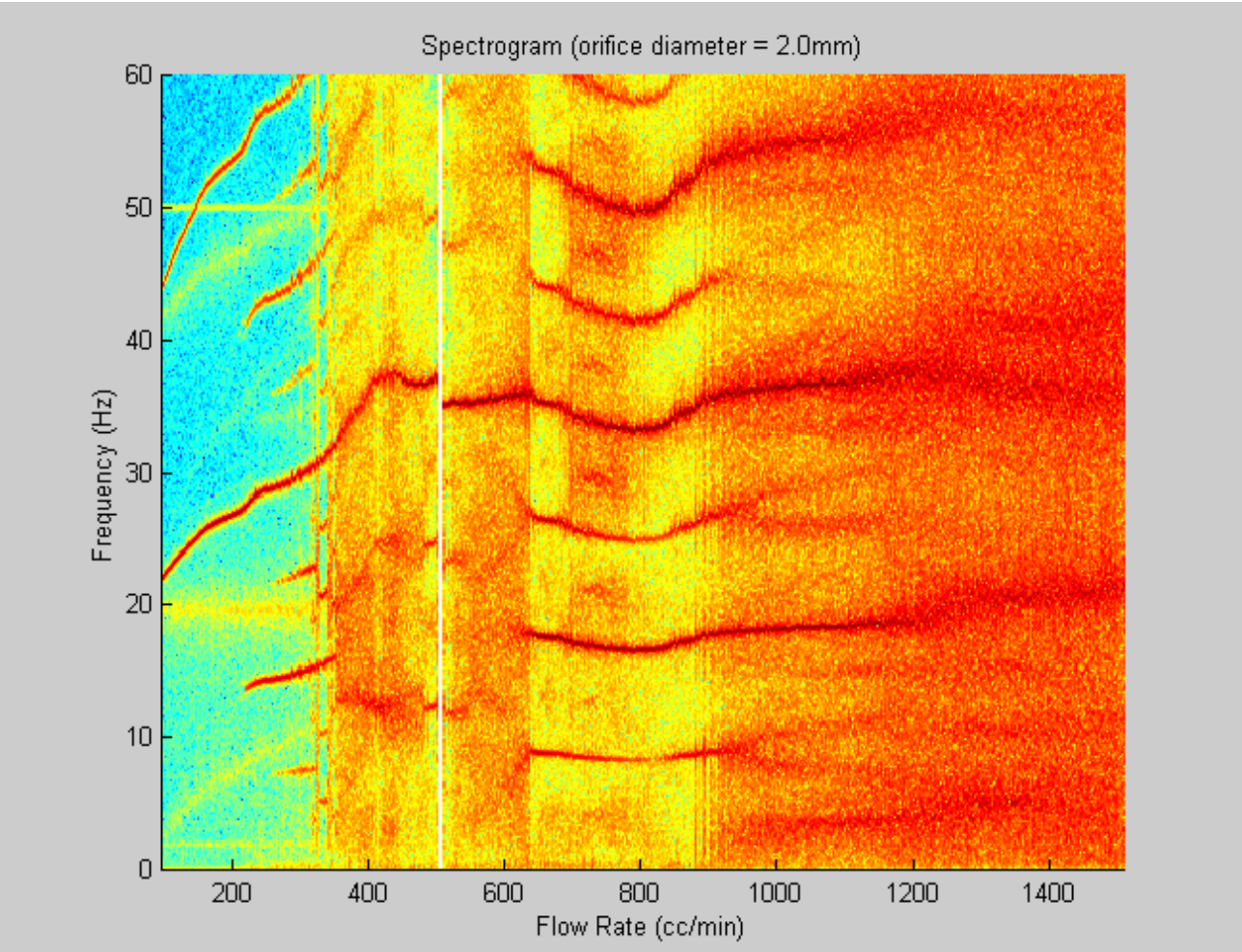
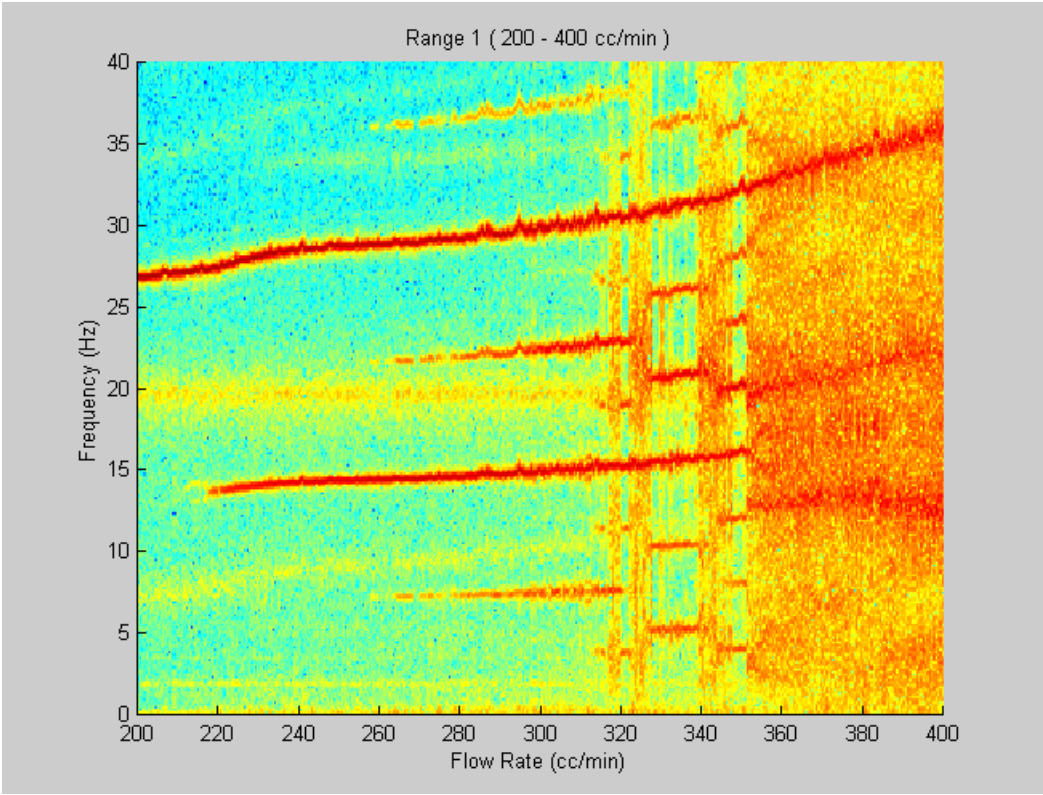


図 4.5　spectrogram



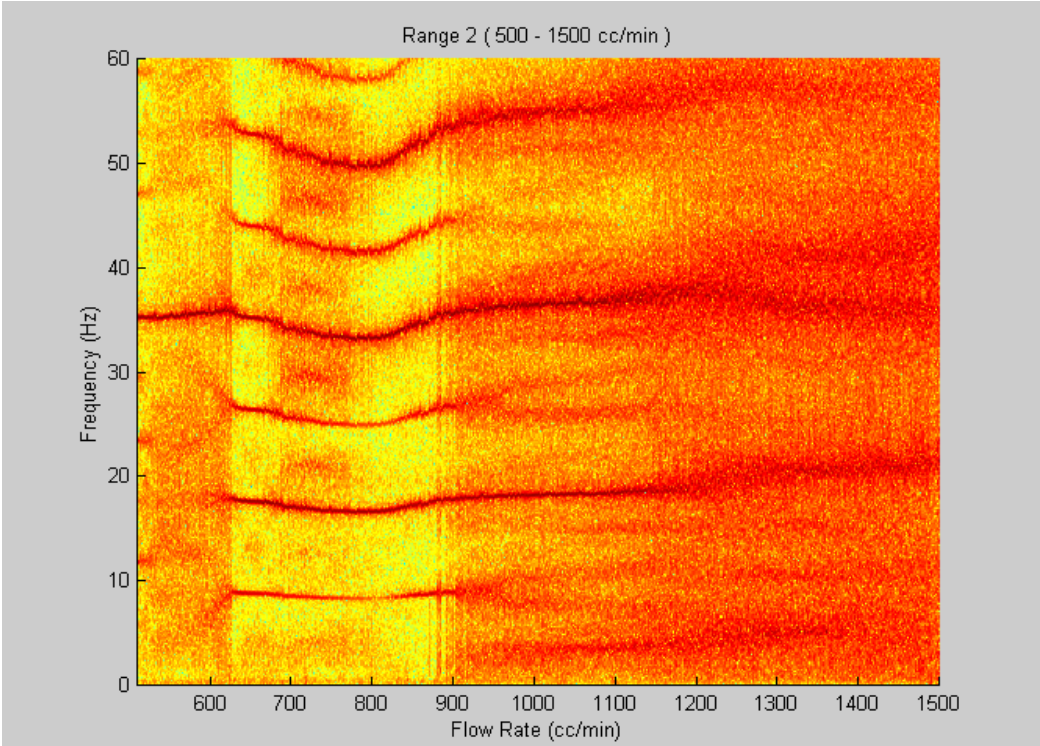


図 4.5　spectrogram

第 5 章　考察

５－１　径 2.0mmについての考察

５－２　径 0.5mmについての考察

５－３　二つの径についての相違点

５－４　分岐図からの考察

５－１　径 2.0mmについての考察

オリフィス径 0.5mmについてビデオ撮影から得られることと、波形を観察することで得られることの両面から現象を考察する．

図4.11と図4.1.2　に示す時系列データを観察しその波形パターンから次のつの領域に分けて考察する．

表５．１

パターン	番号	流量(cc/min)
A	22～23	100～230
B	23～24	230～300
C	24～26	300～325
D	26	325
E	26～38	325~800
F	38～	800～

領域Ａについて

単周期運動．アトラクターについてはきれいな円を描く．ビデオによる視覚的名現象もごく基本的な気泡

領域Ｂについて

2 周期運動．図 4.1.2 no.23 のパワースペクトルについても基本周期の 1/2 の所にピークがあらわれる．気泡が合体する．気泡離脱に関する流量変動の影響が２つの気泡の合体による流量変動の影響よりも小さいためではないか．通常離脱の瞬間が極小値をしめすがこの径では極小値は気泡の合体の影響が卓越しているため離脱の瞬間とわずかにずれを生じるていると思われる．アトラクターは大きな円と小さな円を回る．周期２の運動を示す形状であるおそらくアトラクターの大きな円が流速変動波形の大きなピークを示し、小さな円が小さなピークをあらわしているのではないかと思われる．

領域Ｃについて

4 周期運動．図 4.1.2　no.23 よりパワースペクトルについても基本周期の 1/2,1/4 のところにあらわれる．アトラクターも４周まわりもとの位置にきれいに帰ってくることが示されている．

ビデオによる観察では気泡離脱の瞬間だけ見ていれば 2 周期とたいした違いが見えないが十分離れた所で引き合った 2 つの気泡が縦に並ぶ時と横に並ぶ場合が交互にあらわれる．（図 4.1.2(b)4 周期の 3,5 フレーム）

領域Ｄについて

8 周期運動．図 4.1.2 no.26 のパワースペクトルも基本周波数のちょうど 1/8 のところに鋭いピークがあらわれる．実験では流量固定すると流量がなかなか安定せずに現象を見つけるのが難しい．ビデオによる視覚的な現象としては気泡 8 つに 1 つ小さな気泡が離脱後しばらくして飛び出すことが観察できた．（図 4.1.2(b) 8 周期 4 フレーム）アトラクターは不明瞭であるが７～８個の円を描いて戻ってきている．４周期のアトラクターのうち最も小さい円から二つに分岐した円が小さくて見えずらくなっているがおそらく８周であるはずではある．

領域Ｅについて

周期運動領域と非周期運動をくりかえしながら変遷していく．今回確認できたものは 2 周期や 4 周期、6 周期である．大部分はスペクトルであらわすと鋭いピークは観察されない．離脱の瞬間と流速変動の関係について考えてみてもあまり関係がないように見える．むしろ気体がもつ慣性力の影響と一つ前の気体の引き込み力が卓越していると思われる．ただし時系列データのピークの数と離脱の数については常にほぼ同数の関係がありこの領域では慣性力と引き込みによって気泡が強制的にオリフィスから離脱しているように見える．実際気泡 1 つ 1 つの大きさのばらつきが大きくなっている．500cc/min のアトラクターは周期的な構成からカオスへの遷移の途中の形状ではないかと思われる．

領域Ｆについて

図 4.1.2 no.36 のパワースペクトルにおいてはほとんどがピークの判別の難しいものであった．波形においても周期性は見られなかった．アトラクターは複雑な形になっていて判別が難しい．

spectrogram についての考察

spectrogram を考察する場合にまず本実験を始める前から予想されていたカオス的な現象との比較検証を通して今回の実験の特性を探ろうと思う.

Ravleiah-Benard Convection　について

典型的なカオス的な挙動を示すものとしてレイリーベナール対流をあげることができる. 図　に示したように２枚の熱伝導性のよい平行な平板間に流体を挟み込んで置き、下板の温度を上板のそれより高くするとき起こる. 下面と上面の間の温度差ΔT がある臨海値ΔT_1を超えると対流起こる. その中のある一点で起こっている変動をとりだすと図　のよう時系列データを得ることができる. まず基本周期があらわれ、単周期運をするが、そのうち 1/2ｆ（Ｈｚ）のところにわずかに値の小さいピーがあらわれる. 更にその半分、半分と周期が倍になっていく様が明らかある.

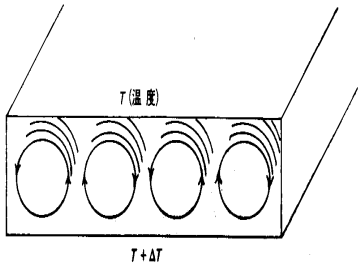


図 5.1.1

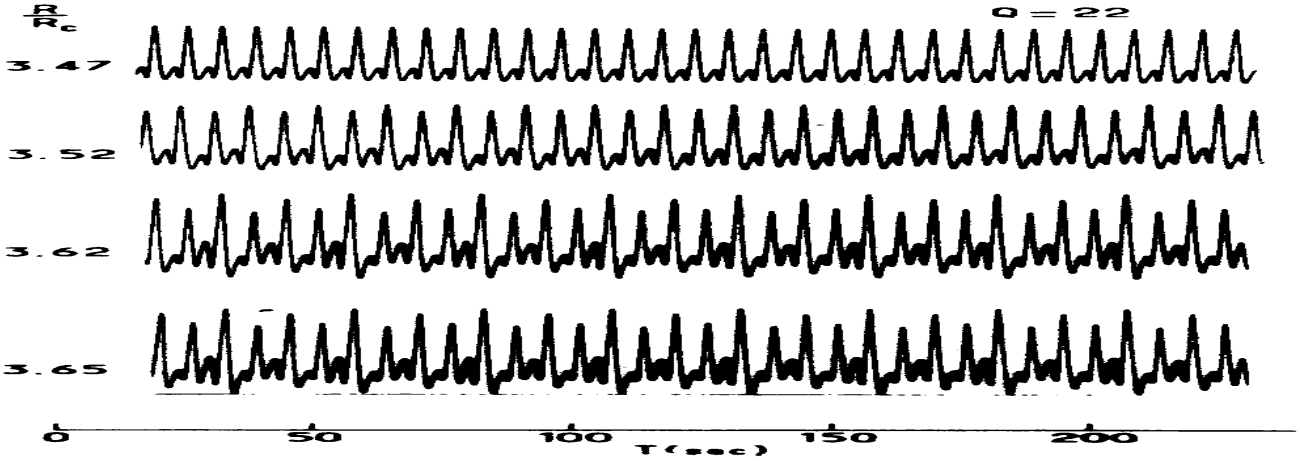


図 5.1.2

2.0mm径との比較について

2.0mm径のパワースペクトルを見るとRavleiah-Benard Convectionのものと非常に似通っていることがわかる．計測しているのが装置のある一点であるから対流のうちどの部分に当たるかは不明であるが2.0mm径の流速変動はRavleiah-Benard Convection 流れと似通った場所があるのではないかと推測できる．Ravleiah-Benard Convection がカオス的な挙動を示すといわれていることからこの実験についてもカオス的な挙動である可能性がある．

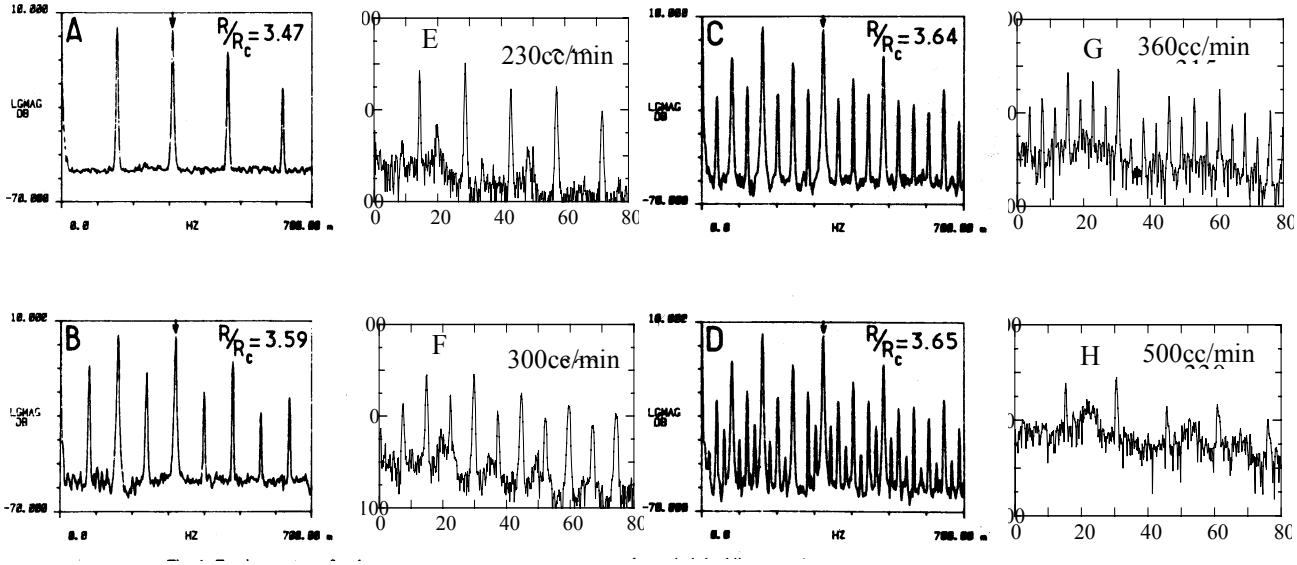


図 ABCD Ravleiah-Benard パワースペクトル
EFGH 本実験のパワースペクトル

spectrogramのしめすものはまさに周期倍分岐ルートのひとつを示していると思われる．単周期から2周期、4周期、8周期その後広い幅を持ったスペクトル分布を持つ領域へと遷移していく．単周期は領域A,2周期が領域B、4周期が領域C、8周期が領域D、カオス領域が領域E,Fに対応していることが明確にspectrogramから読み取れる．また鋭いピークを持たない領域がしばらく続いているときに突然周期的な領域があらわれる場所がある．カオス領域の窓と呼ばれる領域である．実際カオスの分岐図を書いた場合従来のカオスモデルで存在するといわれていたのは3周期や6周期であるが本実験では6周期を確認することができた．単周期のころから8周期になるまで1本の基本周波数が通っている．これが気泡離脱周期に関する周波数ではないかと思われる．また20Hz付近のピークは常に存在する．これらは気泡を流さずに時系列データを取った場合にも現れたため気泡離脱過程による周波数ではない．20Hz付近のピークは近くで常に回っていたファンの影響だと推測する．

相関次元の考察

表 4.3 に示した相関次元は特徴点の相関次元である．当然単周期は次元１である．実際求めてみると単周期、2 周期はほぼ 1 に近い値がでたのでこの計算方法の有効性はあるといえる．また 4 周期の領域の相関次元については 1.6 ぐらいであり８周期については 2.１程度であった．しかし 6 周期を経てもう一度あらわれる 8 周期に関しては相関次元が 2.8 と大きく上がっている．周期の数と相関次元に関しては 1 対 1 の対応があるわけではないと言える．ただし 4 周期に対して 1.6、6 周期に対して 1.7、8 周期に対して初めに出てくる方の値は 2.1 と言うように周期数に比例して値が変わるのは偶然ではないと思われる．後から出てくる 8 周期はそれまでの現象と大きく異なる運動が加わってもう一度 8 周期に戻っていくのかもしれない．次に全体的な相関次元の推移を図 5.1 をみて考えてみると単調ではないが 500cc/min までは流量が増えると相関次元も増加していく．しかしそれ以上流量が大きくなるとむしろ次元がさがっていくこと、不安定になることがわかる．全体的にこの径については次元は 4 以下と言うように比較的低次元な系であった．

相関次元と分岐図の比較をしてみる。図 5.1 の分岐図において特徴的な領域によって①～④にわけてみた結果、相関次元においても同じように特徴的な領域によって分類することが可能であった。相関次元と流速変動波形のパワースペクトルに密接な関係があることが分かる。

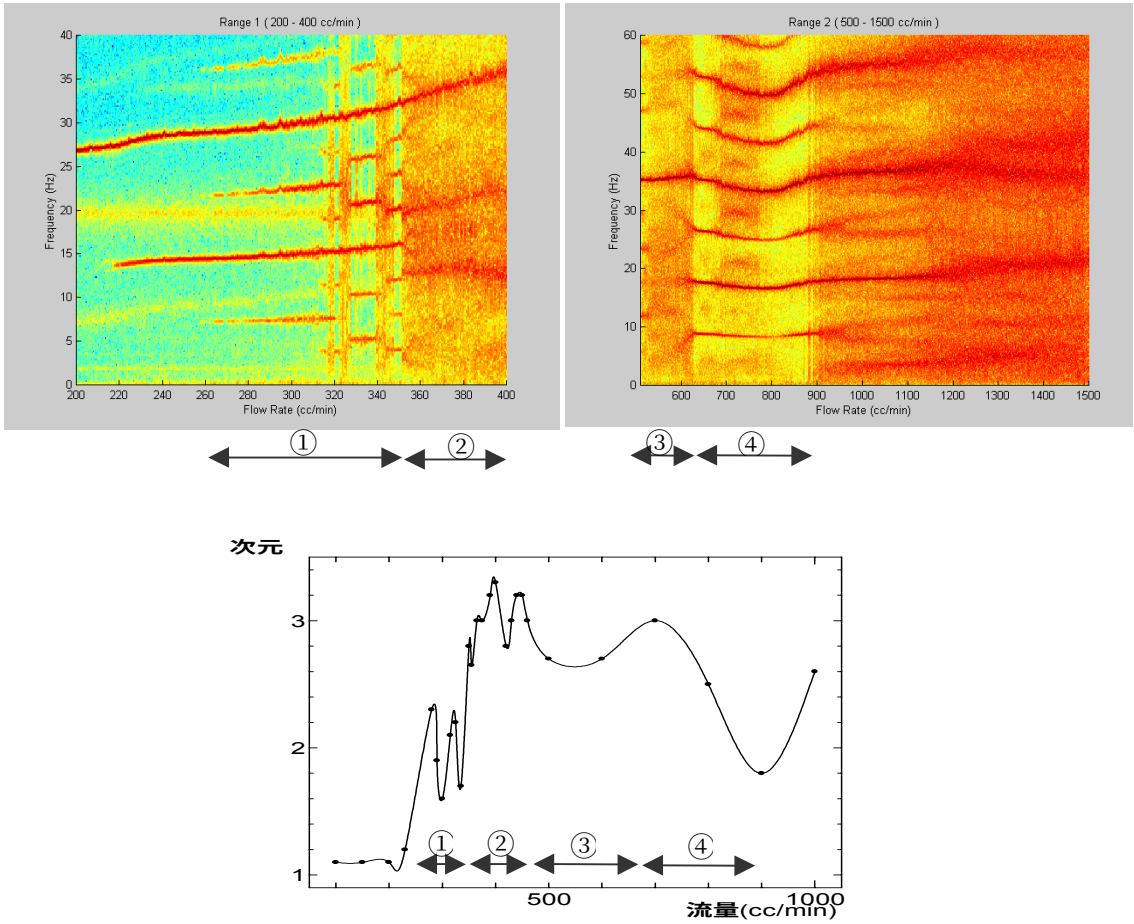


図 5.1　相関次元と分岐図の対応関係

５－２　径 0.5mmについての考察

オリフィス径 2.0mmについてビデオ撮影から得られることと、波形を観察することで得られることの両面から現象を考察する．

図 4.1.1 に示す時系列データを観察しその波形パターンから次の７つの領域に分けて考察する．

表 5.2

領域	番号	流量(cc/min)
A	1	6
B	1~6	6～50
C	6	50
D	6～10	50～100
E	10	100
F	10~	100～

領域Ａについて

完全な単周期となっているうえに気泡間隔が大きいので気泡同士の干渉はほぼない．よって基本的な離脱による波形が得られる．図 4.1.1　を見ると流速変動波形のピークとピークの間の極小値に離脱が起こっている．2.0mm で見たように単周期なら 1 つの気泡が離脱する時には波形は 1 つの山でしかないはずなのにこの領域では離脱後は波形が逆に正の方向に成長して 1 つの離脱に対して 2 つのピークをつくりだしている．現象的には単周期であるのだが波形の形状からもわかるとおりアトラクターには 2 周期が現れる．

領域Ｂについて

２～６個の気泡がまとまって離脱していき、しばらく何もでない時間を経た後また気泡がまとまって出てくる．まとまって気泡が連続ででてくるときの現象は気泡同士が干渉したり、引き込み合ったりしてはいない．視覚的に観察可能な領域では特に領域 A と現象は変わらない．次に図 4.28(a)　上のパターンｆを考える．まずｆの左端の 2 山は気泡が膨らんでいく力がプローブに流速変動として伝わった結果である．ｆ全体の波形を見ると山のピークの高さが最初のピークよりもだんだん大きくなることが分かる．視覚的には全く干渉や引き込みは起こっていないのだが波形から確実に干渉しあっていることが分かる．しかも隣り合う気泡同士だけでなく２つ３つ離れた気泡にも影響が及んでいるでいることが波形のピークの高さから分かる．パワースペクトルから読み取れることは等間隔に並んだスペクトルのもっとも周波数の小さいピークはｆの周波数であること．離脱時間から時系列データについて山の数 ＝ 脱気泡数＋１という規則性が見つかる．さらにつぎの極大値と離脱の瞬間のΔＶを取ってみるとその差はほぼ一定という規則性がある．アトラクターの形状から考えて 3 周期の形であ

る．

領域Ｃについて

単周期に戻っていく. 気泡がオリフィスか出てくるときに流量を変動させる影響がほとんどきかなくなる．

領域Ｄについて

５～２つに 1 回気泡の合体がおこっている. 68cc/min の波形については一つの合体によるピークと 4 かもしくは６からなる小さなピークで構成されている．決して周期的な状態ではないがこれは 50cc/min の示す単周期からの変遷を示している．１つの気泡が合体し始めるとその後流の影響が、少なくなり、続いて発生する気泡のピークに影響を及ぼしその後の波形が単周期から変遷していくと思われる．アトラクターについて 68cc/min 以外は周期的であるのできれいに波形の山の数とおなじだけアトラクターが円を描いている．

領域Ｅについて

単周期に戻っていく

領域Ｆについて

明確な周期性が見られなくなる. カオスの説明で述べたようにカオティックな領域ではないかと思われる．200cc/min まで流量があがると明確なピークは完全になくなる．気泡離脱に関しても明確な判別が不能となる．アトラクターについては明らかな円を描くところがなくなり、円を描く動きがまったくみられない．アトラクターの種類からも周期運動からカオス領域に遷移したことが読み取れる．

分岐図からの考察

カオスによく見られる周期倍分岐を示すようなものとは異なる．この条件から考察する場合にもっとも興味深いのは流量の非常に小さいところである．気泡が組をなして離脱していく領域がまず現われ、一瞬短周期になるのだがまたすぐにこんどは何個かに 1 つの割合で合体が起こり始める．それ以上流量を上げるとカオティックな領域に入っていき、読み取ることは難しくなる．今まで述べてきたようなカオス的な明らかな挙動かどうかは判別することが難しい．ただし流量の小さい単純領域で単周期ではない挙動が現れたことはと今まで考察してきたような引き込みや反流の影響以外の力が加わっていると思われる．オリフィスよりも上の液体の流速変動や引き込みが引き起こした現象ではなくてオリフィス下の圧力変動により単周期ではない挙動があらわれたのではないかと思われる．実際オリフィス下での圧力を高くすることができなかった 2.0mm ではこのような現象は現れなかった．

相関次元からの考察

2.0mm と同様に単周期については次元が 1 と出るはずであるが、表 4.3 から分かる通り 1 以下となってしまって測定が不能であった. というのは気泡離脱の数が少なくて時系列データの半分以上は流速変動 0 であったからであり、この結果は理解できる. この現象ではごく小さい流量の５～５０cc/min あたりでは単周期であっても波形は二つ現れるために相関次元の解析は適していない. 流量を段々上げていくとともに次元も徐々にふえていくが 50cc/min で単周期に戻ると再び１にもどる. 同様に１００cc/min までいくと再び１になる. その後は明確に相関次元が収束していく領域がなくなる. 全体的な傾向はつかむことが困難な系である. 波形からの直接的な関係は見出すことができなかった.

5－3　2つの径についての相違点

ここまで考察してきた通り二つのオリフィス径の違うアクリル板上からの気泡の発泡挙動は大きく異なることが明らかである．そこで2つの径についての相違点を考察する．

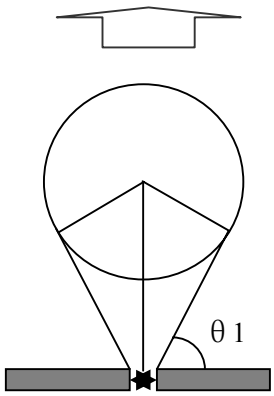
単周期における離脱の瞬間について

離脱の瞬間については2つの径の大きさによって大きく異なる．0.5mm径が流速変動波形の極小値に対して多少遅れて離脱している．逆に2.0mm径では極小値に対して多少早目に離脱している．このことに考察については以下のとおりである．

力学的なバランスを考える

まずこの流量における気泡の体積を測ってみた所ほとんど変わらなかった. つまり表面張力と浮力の力が卓越している領域であり、その釣り合いからなっている．表面張力は　$\pi d\rho\cos\theta$ であらわされる．θ については図5.3であらわされている

次に気泡の運動を２ステージに分けるとすると成長過程と離脱過程になる. 成長過程では気泡自体が大きくなっていて上昇しない. 離脱過程は気泡の成長は終わり上昇している段階である．実際ビデオからの観察により0.5mm径の成長過程は2.0mmのそれよりも低い位置で行われている．すなわち気泡の重心が低い．よって気泡が上昇した場合に顕著に $\cos\theta$ は劇的に小さくなっていく. すなわち気泡が上昇すればするほど下に引く力が減っていくためどんどん加速していく．するころには2.0mm径に比べて上昇速度が速いことになる．すなわち液体の流入が始まっている段階にあり、流速変動波形が増加していることになる．2.0mm　については逆になる．以上のことにより0.5mmでは離脱が波形の左、2.0mmでは波形の右に離脱時間がずれるのではないかと思われる．



$F_\sigma = \pi d\cos\theta$

$F_b = (\rho_i - \rho_g)gV_B(t)$

成長ステージ

$F_\sigma = F_b$

離脱ステージ

$F_\sigma \le F_b$

図5.3 離脱の力の釣り合い

第6章　　結論

６－１　結論

６－２　今後の課題

６－１　結論

本研究により以下の結論を得た

単一オリフィスから発生する気泡挙動について様々な角度から考察することによって気泡が規則性を持って発泡していることを発見し実験的に明らかにすることができた.
またカオス解析をおこなうことによって気泡離脱に関して周期倍分岐の存在を確認し、カオス的な変動が存在している可能性を示すことができた.

６－２　今後の課題

今後の課題として以下の点について課題を残した

１ オリフィス径の大きさがどのような影響を及ぼすか
２ 出口付近の気泡生成中の圧力変動が発泡挙動にどのような影響を及ぼすか
３実際の沸騰現象との比較検討

参考文献

1 Harry L.SWINNG ,”OBSERVATIONS OF ORDER AND CHAOS IN NONLINEAR SYSTEMS
2 A. LIBCHABER, S. FAUVE and C. LAROCHE,”TWO-PARAMETER STUDY OF THE ROUTES TO CHAOS
3 F.Takens,”Dynamical System and turbulence””, Lecture Note in Mathematics898,ed

謝辞

本論文の作成にあたり、親身になってご指導下さった庄司正弘教授、心から感謝いたします．いろいろ大変な時期でありながら方針などの面でのご指導は大変ありがたいものでした．また数々のご指導や協力をしてくださった横谷助手、井上助手、渡辺技官に感謝いたします．実験で何度も分からないことを具体的なアドバイスを与えて下さいました．高木さん、徐さん、伊藤さん、王さんには様々なことで全く無知な自分にいろいろ知識や助言をいただきお世話になりました．4 年生の福田君、陳君には時には励ましてくれたり、いろいろ教えてくれたりと存在を頼もしく感じました．留学生の姜さん、連さん、張くんは短い間でしたがお世話になりました．直接同じ実験を行うということで大変なご迷惑をおかけした阿部さんには大変感謝しております．知識についても実験についても本当に何も知らない自分に大変苦労なさっていたと思うのですが嫌な顔一つせず丁寧に我慢強くご指導くださり、なおかつ失敗を何度もフォローしていただきありがとうございました．就職してもがんばってください．

以上

通し番号 1－75 完

卒業論文

平成 12 年 2 月 4 日提出

80212　小島亮祐