同軸二重円筒間の自然対流場の準定常性とカオス性*

石田 秀士^{*1}, 五味 学^{*2}, 木本 日出夫^{*1}Quasi-static and Chaotic Characteristics of the Natural Convection
Field Between Concentric Vertical AnnuliHideshi ISHIDA^{*3}, Manabu GOMI and Hideo KIMOTO^{*3} Osaka University, Graduate School of Engineering Science,
1-3 Machikaneyama-cho, Toyonaka, Osaka, 560-8531 Japan

In this study unsteady and chaotic characteristics of the thermal convection fields between concentric annuli were experimentally examined, and they were compared with the previously reported fields in a vertical slot. The inner cylinder was heated by a embedded heater and the outer one was cooled by temperature-controlled cold water, and the 84 wt% glycerol-water solution was used for the present test fluid. The main results are as follows: (1) The region where the characteristic frequency of temperature-variation is detected is located at the upper portion of the region where the secondary cells exist. (2) The time scale of the temperature change at which auto-correlation function becomes 1/e is relatively small in the secondary-cell region, and this corresponds to the result of the natural convection field in a vertical slot. (3) The significant chaotic characteristics in the temperature-variation are determined in almost the same region where the characteristic frequency of temperature-variation is detected, which is peculiar to the field of the present study.

Key Words: Natural Convection, Experimental Analysis, Vertical Annulus, Quasi-Steady, Chaotic Characteristics, Secondary Cells

1. 緒 言

密閉された鉛直同軸二重円筒間内部の自然対流場は圧力容器や、原子炉とその外部シールド間の熱対流場等の物理モデルとしてこれまで数多くの研究が行われている。これらの多くは実用的見地から熱伝達面での壁表面平均ヌセルト数を重点的に扱っており^{1,2)}、系内の熱対流場を扱ったものは比較的少ない。

Fujii ら³⁾は内円筒において発熱量一定とした場合について、可視化により伝熱面近傍の流れ場を4通りに分類した上で局所グラスホフ数(局所レイレー数)の変化に伴う時間平均局所ヌセルト数の変化や時間平均温度場について詳細に検討している。また熱対流場の定性的傾向についてはブシネスク近似を用いて数多くの数値計算が行われており、半径比(=外円筒半径/内円筒半径)やアスペクト比が変化した場合の流れ場の変

化が論じられている⁴⁾ほか、検査流体に水を用いた場合、最大密度線を境にして内円筒、外円筒側にそれぞれ逆回転の渦領域が発生し⁵⁾、それぞれが鉛直方向に2次流れセルを伴って振動することが知られている⁶⁾。しかしながら同軸二重円筒間の熱対流場の非定常特性については定性的傾向はともかく定量的に扱っているものは見あたらない。またプラントル数による影響や物性値の温度変化が非定常特性に与える影響について検討しているものも皆無である。

一方非定常特性の一つとして近年熱対流場のカオス性について数多くの報告がある。このカオス性の存在は現象のヒステリシス⁷⁾や不安定性⁸⁾と関係があり、またこのカオス性や非定常特性から求まる幾何学特性は現象の分類や流れのモード変化を分析する上で非常に有効であることが明らかとなっている⁹⁾。

静止した密閉容器槽内部のカオス性を扱った例として、著者ら¹⁰⁾は鉛直平行平板間の自然対流場において作業流体に高プラントル数のグリセリン水溶液を用いた場合について実験的に調べ、グラスホフ数を大きくした場合に発生する2次流れセルの空間的な存在領域が温度場の非定常状態が観察される領域にほぼ対応し、

* 原稿受付 2000年7月13日。

^{*1} 正員, 大阪大学大学院基礎工学研究科 (〒560-8531 豊中市待兼山町1-3)。^{*2} 大阪大学大学院。

E-mail: ishida@me.es.osaka u. ac.jp

またその領域の内部に温度場のカオス的変動が見られる領域が存在することを明らかにした。また温度場の時間変動スケールは高さ方向に減少し、カオス性についても比較的槽内下部でピークが観察されるとそのあとは高さ方向に減少することが明らかとなった。この鉛直平行平板間の流れ場は同軸二重円筒間の流れ場について半径比を0の極限にとった場合に相当しており、上記の性質が内円筒半径が有限の同軸二重円筒間内や別の温度境界条件下でどのように変化するかは興味深いところである。

そこで本研究においては作業流体に高プラントル数溶液であるグリセリン水溶液を用い、内円筒を一定発熱のヒーターで加熱した場合に、内外円筒間内に形成される自然対流場の準定常性並びにカオス性について定量的に調べ、鉛直平行平板間の自然対流場との比較検討を行った。

2. 記 号

- a : 熱拡散係数
- C_p : 定圧比熱
- f : 無次元周波数
- g : 重力加速度
- Gr : グラスホフ数
- H : 水溶液の高さ
- k : 熱伝導率
- K : 半径比($=R_o/R_i$)
- L : 代表長さ($=R_o - R_i$)
- Pr : プラントル数
- q : 加熱量
- r : 無次元半径方向座標($=R/L$)
- R : 半径, 半径方向座標
- Ra : レイリー数
- t : 無次元時間
- T : (無次元)温度
- V : 速度
- z : 無次元鉛直方向座標($=Z/L$)
- Z : 鉛直方向座標
- α : アスペクト比($=H/L$)
- β : 体膨張係数
- ΔT : 無次元温度振幅
- θ : 周方向角度
- Θ : 代表温度差($=qL/k$)
- λ : 最大リアプノフ指数
- μ : 粘性係数
- ν : 動粘性率
- ρ : 密度
- τ : 自己相関係数から求まる時間スケール

添字

- i : 内円筒, いずれかの温度測定点
- max : 最大値
- min : 最小値

- o : 外円筒
- 0~11 : 温度測定点

3. 実験装置及び方法

3.1 実験装置及び測定方法 実験装置の概略図と座標軸を図1に示す。本実験においては検査体積(テストセクション)を直径34.1mmのヒーターが埋め込まれた直径50.0mmの真鍮製内円筒と厚さ3.6mm内径132.4mmのガラス製外円筒からなる同軸二重円筒間内にとる。それぞれの円筒はポリアセタール製の台座の上に固定されているが、上端は大気開放にすることで上部から検査体積内部への操作を可能にしている。本実験では内外円筒の直径は変化させないので半径比 K (=外円筒内径 R_o /内円筒半径 R_i)は2.65一定である。

Fig. 1 Experimental setup and coordinate definition

外円筒はアクリル製冷却水槽内部に設置しているが、実験中は冷却水を水槽と空冷式冷却装置との間で循環させ、その水を水槽内に設置した温度調節用ヒーターにより加熱することで水槽内温度 T_o を 10°C 一定(誤差 $\pm 0.2^\circ\text{C}$)に保った。また内円筒内部のヒーターに一定電圧をかけることで内円筒の発熱量を一定に保ったが、その電圧はボルトスライダを用いて調節した。作業流体には84wt%グリセリン水溶液を用い、水溶液の高さ $H=450\text{mm}$ を一定に保つことで図1の斜線で示される半径方向の検査面のアスペクト比 α ($=H/L$, $L=R_o-R_i$)を10.9一定に保った。

本実験では温度の測定のため17本の素線径0.1mmの銅・コンスタンタン熱電対を取り付けた線状测温プローブをテストセクション上部から円筒間中央($R=(R_i+R_o)/2$)に挿入し、 $2 \leq Z \leq 450\text{mm}$ の範囲の温度の定点観測($100 \leq Z \leq 450\text{mm}$ では25mm間隔)を行った。

その際それぞれの熱電対の起電力をデジタルマルチメータで増幅し、その電圧値を GP-IB バスを介してパソコンに 5 秒間隔で取り込み記録並びにデータ処理を行った。また検査流体にアルミ粉を混入させ、透明な冷却水槽外部からハロゲンランプ-光学スリット系を用いてある R-Z 断面に照射することで自然対流場を可視化し、それを同じく外部からデジタルカメラで一定時間間隔で撮影した。

3.2 実験条件 本実験では参照温度を水槽内温度 T_0 としてこれを 10°C 一定に保つことで作業流体のプラントル数 $Pr=1.8\times 10^3$ 一定に保ち、内円筒の単位面積当たりの加熱量 q を変化させることで次式で定義される代表温度差 Θ に基づくグラスホフ数 Gr

$$Gr = \frac{g\beta\Theta L^3}{\nu^2}, \Theta = qL/k \quad (1)$$

を 6 通りに変化させた。対応するレイリー数 $Ra(=Gr\times Pr)$ はそれぞれ $Ra=1.4, 2.0, 2.2, 2.6, 3.2$ そして 4.3×10^6 である。ここでグリセリン水溶液の物性値は Segur¹¹⁾ によった。

実験に際しては加熱量 $q=0$ で水槽内温度 $T_0=10^\circ\text{C}$ 一定に保ち、このまま長時間放置することでテストセクション内で一様に温度 $T=10^\circ\text{C}$ 、速度 $V=0$ を実現し、これを初期条件とした。そして実験開始時にヒーター加熱量を上記の所定の値にセット・維持し、約 22 時間の連続実験を行った。

実験に先立って周方向角度 $\theta=0, 180^\circ$ の二つの R-Z 断面において同時に流れ場を可視化し、さらに両断面において同時に温度場を測定することであらかじめ熱対流場の周方向一様性を確認している。また実験に使用する熱電対に対しても誤差が $\pm 0.1^\circ\text{C}$ 以内に収まるよう較正した上で、それらの応答性についても問題のないことを確認している⁸⁾。

Fig.2 Estimated heat flux on the inner cylinder

また、ヒータを真鍮内円筒にはめ込むことによる内円筒表面での一定発熱条件からのズレを考察するため、数値解析による予備検討を行った。計算の際はブシネスク近似を施した粘性の温度変化を考慮しない基礎式に対して周方向の一様性を仮定して二次元化した上でそれを有限差分法により 2 次精度で離散化して数値解

を得た。数値解析結果については高さ方向の 2 次流れセルの生成や高さ方向の温度レベルの一致等の実験結果との対応を確認している。

$Ra=3.2\times 10^6$ のケースについて実際の真鍮内表面での熱流束と、ヒータの総発熱量から換算される内表面で熱流束一定とした場合の熱流束との比を図 2 に示している。この図に示すとおり熱流束は高さ方向にほぼ一様で、無次元高さ $z(=Z/L)$ について $0.5 < z < 10.5$ の範囲では実際の熱流束が一定熱流束条件下での熱流束と比較して誤差 30% の範囲内におさまっており、多くは誤差 10% 以内である。このことから本実験結果はほぼ内円筒表面で熱流束一定とした場合の実験結果とみなすことができる。

4. 実験結果

4.1 熱対流場の定性的傾向 実験開始直後からの無次元温度の時間変化の例として $Ra=3.2\times 10^6$ の場合について図 3 に示している。以下で扱う無次元量は基本的に実次元の物理量を代表長さ L 、熱拡散係数 a 、代表温度差 Θ で無次元化したものであり、無次元温度としては実次元温度から水槽温度 T_0 を差し引いたものを Θ で割ったものを採用した。

Fig. 3 Temperature-variation at measuring points

図中で $T_1 \sim T_{11}$ はそれぞれ $Z=100\text{mm}$ から 350mm (無次元座標 z で $2.43 \sim 8.50$) まで 25mm 間隔 11 点の各測定点での無次元温度を示しており、 $T_{\max}$ は $Z=H$ (作業流体の自由表面上) での無次元温度を示している。図で示されているとおり、作業流体内部の測定点での温度は無次元時間 $t=1$ 以降でほぼ一定となり、測定点によっては時間平均値の周りで温度変動が見られる。図 4 にこの状態での可視化画像を示しているが、鉛直方向に渦列 (2 次流れセル) が形成されており、それらが移動 ($t=0.998, 1.06$), 生成 ($t=1.13$), 合体 ($t=1.19$) を繰り返しているものの、2 次流れセルの総数はほとんど変化していない。このような状態を既報¹⁰⁾と同様本研究では準定常状態と定義した。

Table 1 The range of z where the secondary cells exist

$Ra \times 10^{-6}$	1.4	2.0	2.2	2.6	3.2	4.3
Lower Limit [z]	-	5.6	4.4	4.1	3.0	1.7
Upper Limit [z]	-	7.8	7.5	7.3	7.9	7.5
Secondary Cell Number	0	1	1-2	2-3	3-4	3-4

Fig. 4 Visualized flow pattern with time
($Ra=3.2 \times 10^6$)

本研究では準定常状態における可視化画像から鉛直方向に2次流れセルの存在が認められる範囲を調べた。その結果を表1に示しているが、レイレー数が大きくなるにつれて、2次流れセル発生範囲の上限がほぼ一定なのに対し、下限が下方へ移動している。この結果は側壁温度を固定した鉛直平行平板間の自然対流場¹⁰⁾では中心から上下方向に2次セル発生範囲が広がる傾向を示すのとは大きく異なっているが、これは一定発熱により高さ方向の温度変化(粘性変化)が大きいのと、またたとえ物性値、側壁温度共に一定であっても同軸二重円筒間内の二次元熱対流場は中心対称とはならないことの両方の影響であると考えられる。

Fig. 5 Amplitude of temperature at the measuring points for various Ra

また準定常状態における各測定点での温度 T_i の時間変動の最大値 $T_{i_{\max}}$ 及び最小値 $T_{i_{\min}}$ から温度の無次元

Table 2 The measuring points where the characteristic frequency is detected

z [-]	$Ra \times 10^{-6}$			
	2.2	2.6	3.2	4.3
2.4	-	-	-	-
3.0	-	-	-	○
3.6	-	-	-	○
4.3	-	-	-	○
4.9	-	-	-	○
5.5	○	○	-	○
6.1	○	○	○	○
6.7	○	○	○	○
7.3	○	-	○	○
7.9	-	-	○	○
8.5	-	-	-	○
9.1	-	-	-	○
9.7	-	-	-	○

(○: detected, -: not detected)

変動振幅 $\Delta T (=T_{i_{\max}} - T_{i_{\min}})$ を求めた。結果を図5に示している。この図に示しているとおり、温度変動振幅は高さ方向に大きくなる傾向があり、2次流れセルの存在する領域(表1)と温度振幅が大きい領域との対応は見られない。 $Ra=4.3 \times 10^6$ においては温度振幅が高さ方向に最大値をとったあと減少するという他のケースと異なった傾向が認められるが、これは鉛直平行平板間で観察されるトラベリングウェーブ¹²⁾を伴う流れへの遷移の前兆現象であると考えられる。しかしながら本研究においては $Ra=3.2 \times 10^6$ の場合と比較して、予想される流れのモード変化を可視化画像上で確認することはできなかった。

4.2 周波数分析 次に温度場の自励振動の特徴を定量的に把握するため準定常状態における温度データの周波数分析を行った。代表的な例として $Ra=4.3 \times 10^6$ 、 $z=4.85$ における温度のパワースペクトルを図6に示している。この例では無次元周波数 $f=6$ 付近でノイズとは明らかに異なる比較的大きなパワースペクトルが検出されているが、このような温度変動に特徴的な周波数の存在が確認された測定点を表2に"○"で示している。表には示していないがこれらの特徴周波数の多くは3~6の間に分布している。

表1と表2を比較すると特徴周波数の存在する領域は2次セル発生領域の上部にほぼ対応していることが分かる。この結果は既報¹⁰⁾において側壁温度を固定した鉛直平行平板間の自然対流場では特徴的な周波数の存在領域が2次セル発生領域にほぼ対応するという事実と異なっており、本実験条件下で特有の性質である。

また表1、表2によると $Ra=4.3 \times 10^6$ のケースでは2次セル発生領域の上部にも特徴周波数が存在する領域が確認されている。このケースでは2次セル発生領域

域の上限近傍で特徴周波数が3から0.5まで減少し、 $z=8.5\sim 9.7$ においてほぼ0.5一定である。これは前節で述べた高さ方向の流れの構造の変化による影響と考えられる。

Fig. 6 Power Spectrum ($Ra=4.3\times 10^6$ and $z=4.85$)

4.3 ACFによる時間スケールの算出 次に温度変動の時間スケールを捉える別の方法として、既報¹⁰⁾と同じ方法により準定常状態における温度の時系列データから自己相関係数(ACF: Auto-Correlation Function)が $1/e$ になるスケール τ を求めた。後述の最大リアプノフ指数の計算の際に問題となる温度変動の高周波ノイズの影響を避けるため、計算にはあらかじめ測定データに対して既報⁸⁾で用いた一階微分方程式に基づくローパスフィルタ¹³⁾(遮断周波数 $f=20$)を施した時系列データを用いた。結果を図7に示している。

Fig. 7 The time scale τ at which auto-correlation function becomes $1/e$ for various Ra

表1と図7を比較すると2次流れセルが存在する領域では高さの増大に伴って τ は下に凸の変化をしており、極小値は前節の特徴周波数の逆数のオーダーにほぼ等しくなっている。その他の領域では τ は比較的大きい。これは既報¹⁰⁾の鉛直平行平板間の自然対流場において2次流れセルの存在する領域で τ が小さくなる事実と対応している。また $Ra\times 10^{-6}=2.0, 3.2, 4.3$ のケースでは $z=2$ 近傍で τ が小さくなっているが、この領域ではもともと温度振幅が実次元で 0.3°C 程度で極めて小さくノイズによる影響が考えられる。

また $Ra=4.3\times 10^6$ のケースでは他のケースと異なり、2次セル発生領域の上部で τ は比較的小さい値($\tau\leq 0.6$)に維持されている。

4.4 最大リアプノフ指数 最後に準定常状態における温度の時系列データから力学系の初期値に対する鋭敏な依存性を判別する指標である最大リアプノフ指数 λ を求めた。計算手法としてはWolf¹⁴⁾の方法を採用し、時系列データには前節と同じく準定常状態の測定データに対してローパスフィルタを施したものを使用した。

既報¹⁰⁾と同様、最小探索スケールと最大探索スケールにはそれぞれ熱電対の誤差である 0.1°C とその3倍(0.3°C)を用いた。このことにより τ で問題となった温度変動のノイズの影響を抑えることができる。次に埋め込み次元、遅れ時間、発展時間は既報¹⁰⁾と同様ある最適値の周りで λ がほぼ一定であること(stationarity)を確認し、それらの値の平均値とばらつきから λ の確定値とその誤差範囲(確率50%で変動する範囲)を計算した。遅れ時間を変化させる際は基本的に既報と同じくACFが $1/e$ になるスケール τ を基準とし、その値に対する倍率をパラメータにとったが、 $\tau>0.5$ のケースについてはその基準スケールとして $\tau=0.5$ に固定した。このような基準時間スケールを用いることにより $Ra=1.4\times 10^6, 2.0\times 10^6$ において埋め込み次元を変化させた場合を除き、 λ のstationarityを確認した。

Fig. 8 The largest Lyapunov exponents for various Ra

以上の方法により λ とその誤差範囲を計算した結果を図8に誤差線付きで示している。 $\lambda>0$ でかつ誤差範囲内部に $\lambda=0$ の点が存在しないケースを有意なカオス性ありと判断するならば、有意なカオス性は2次流れセルが存在する5つのケースのうち、 $Ra\times 10^{-6}=2.6, 3.2, 4.3$ の3つのケースで検出され、表1と図8を比較するとその範囲は例外を除き2次流れセルが存在する領域の最上部に位置しており、この領域は表2によると特徴周波数が検出される領域にほぼ対応している。この結果はカオス性が検出される領域が2次流れセルの存在する領域に含まれるという点では鉛直平行平板間の自然対流場の結果と一致する。また既報¹⁰⁾の鉛直平

行平板間の結果と同じく、 λ は高さ方向にいったん最大値をとったあと減少している。

またこの結果を図5の温度振幅の定性的傾向と比較すると2次流れセルの存在領域の上部では温度振幅が十分大きく、多くのケースで高さ方向に増大しているにも関わらずカオス性は小さくなっているということになり、これは既報¹⁰⁾の鉛直平行平板間の自然対流場においてカオス性の大きい領域と温度振幅の大きい領域は対応が見られたという結果と異なっている。これは主として一定発熱条件に基づく相違であると考えられるが、カオス性は本来時間変動特性の一種であって、その変動の振幅(変動エネルギー)とは無関係であるということを示す物理現象の例として注目される。

図8で $Ra=1.4 \times 10^6$, 2.0×10^6 のケースのうちいくつかの測定点でのデータについて有意なカオス性が検出されている(特に $Ra=2.0 \times 10^6$ で $z=8.5, 9.1, 9.7$ のケース)が、これらのケースでは元々温度振幅が極めて小さく、また対応する位置に2次流れセルは存在しないため物理的にカオス性が検出させる理由は考えられない。完全にランダムな時系列データは無限自由度を有しており、有限の埋め込み次元では解析が不可能であるが、これらのケースで埋め込み次元に対して stationarity が確認できなかった事実を考慮すると、上述の結果はノイズの影響によるものと思われる。

また $Ra=4.13 \times 10^6$ では2次流れセルの上部でも有意なカオス性が検出されているが、これは4.1, 4.2節で指摘した流れの構造変化によるものと考えられ、4.3節で示した τ が2次流れセルの上部で比較的小さい値を保っているという事実に対応している。

5. 結 言

本論文では内円筒にヒータを埋め込んで加熱し、外円筒を温度一定で冷却することにより、グリセリン水溶液を注入した円筒間内部に生じる熱対流場の周波数特性、時間変動スケール並びにカオス性について実験的な検討を行い、既報の鉛直平行平板間の結果と比較考察を行った。主たる結果は以下の通りである。

- (1) レイリー数を大きくするに連れて2次流れセルが発生する領域は広くなるが、その上限はほぼ一定で下限が下方へ移動し、側壁温度一定の鉛直平行平板間でみられた中心対称性は見られない。
- (2) 場に特有な温度変動の周波数成分が検出される領域は2次流れセルが存在する領域の最上部に偏る。この点についても2次流れセルの存在領域と特徴周波数の検出される領域がほぼ一致する鉛直平行

平板間の結果と異なる。

- (3) 2次流れセルが観察されるレイリー数のケースでは2次流れセルが存在する領域内部でACFが1/eになるスケール τ が高さ方向にいったん減少したあと増加する傾向があり、その値は2次流れセルの存在領域内部で全体的に小さくなるがこれは鉛直平行平板間の自然対流場の結果と対応する。
- (4) 有意な温度変動のカオス性が検出される領域は2次流れセルの存在する領域の最上部に位置し、これは特徴周波数の検出される領域にほぼ一致する。この結果はカオス性が検出される領域が2次流れセルの存在する領域に含まれるという点では鉛直平行平板間の自然対流場の結果と一致する。

文 献

- 1) Prasad, V. and Kulacki, F. A., Free Convective Heat Transfer in a Liquid-Filled Vertical Annulus, ASME J. Heat Transfer, 107(1985), 596-602
- 2) Keyhani, M., Kulacki, F. A. and Christensen, R. N., Free Convection in a Vertical Annulus with Constant Heat Flux on the Inner Wall, ASME J. Heat Transfer, 105(1983), 454-459
- 3) Fujii, T. et al., Experiments on Natural-Convection Heat Transfer from the Outer Surface of a Vertical Cylinder to Liquids, Int. J. Heat Mass Transfer, 13(1970), 753-787
- 4) Khan, J. A. and Kumar, R., Natural Convection in Vertical Annuli: A Numerical Study for Constant Heat Flux on the Inner Wall, ASME J. Heat Transfer, 111(1989), 909-915
- 5) Ho, C. J. and Lin, Y. H., Natural Convection of Cold Water in a Vertical Annulus With Constant Heat Flux on the Inner Wall, ASME J. Heat Transfer, 112(1990), 117-123
- 6) Ho, C. J. and Tu, F. J., Transition to Oscillatory Natural Convection of Cold Water in a Vertical Annulus, Int. J. Heat Mass Transfer, 41(1998), 1559-1572
- 7) 石田秀士・木本日出夫, 容器内自然対流場における平均熱伝達特性に対する加振の影響, 機論 B, 65(1999), 2413-2419
- 8) 石田秀士・吉岡剛・山下隆之・木本日出夫, 水平加熱体上方の自然対流場の安定性とカオス性, 66(2000), 1845-1852
- 9) 石田秀士・木本日出夫, 容器内の振動熱対流場における平均熱伝達率の時系列データから再構築されるアトラクタの幾何学構造, 機論 B, 65(1999), 2420-2425
- 10) 石田秀士・久禮一樹・木本日出夫, 鉛直平行平板間の自然対流場の準定常性とカオス性, 機論 B, 65(1999), 761-767
- 11) Segur, J. B., Physical Properties of Glycerol and its Solutions, Glycerol(ed. Miner, C. S. and Dalton, N. N.), 238-334, Reinhold
- 12) Wakitani, S., Experiments on Convective Instability of Large Prandtl Number Fluids in a Vertical Slot, ASME J. Heat Transfer, 116(1994), 120-126
- 13) Lawkins, W. F., Daw, C. S., Downing, D. J. and Clapp N. E., Jr., Role of low-pass filtering in the process of attractor reconstruction from experimental chaotic time series, Phys. Rev. E, 47(1993), 2520-2535
- 14) Wolf, A., Swift, J. B., Swinney, H. L. and Vastano, J. A., Determining Lyapunov Exponents From a Time Series, Physica 16D, (1985), 285-317