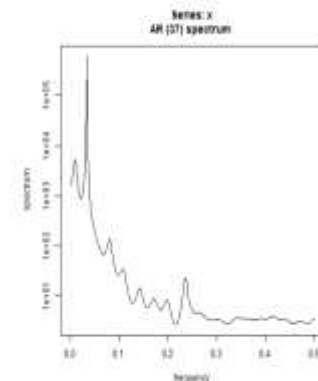
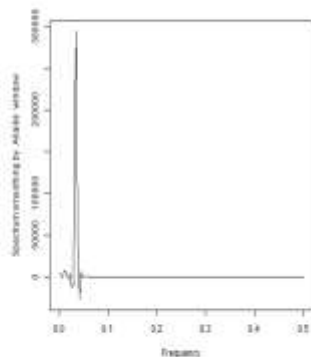
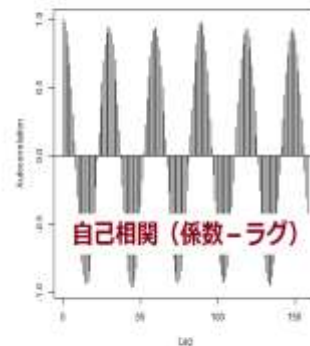
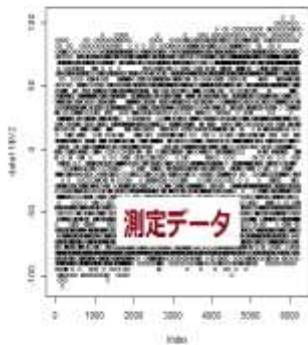
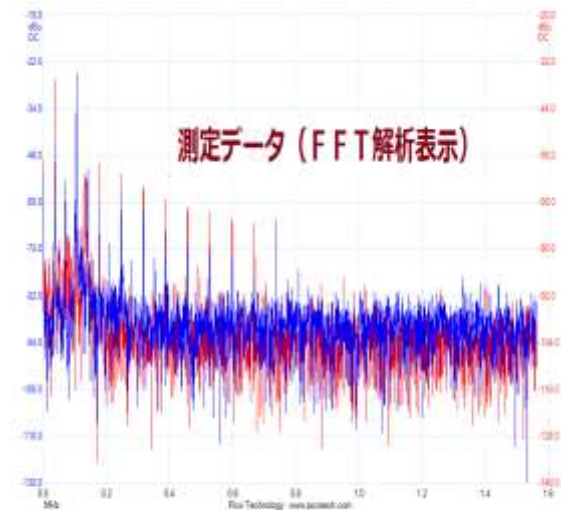
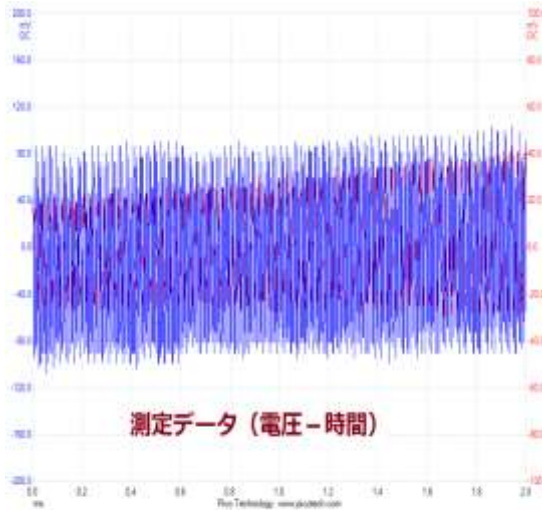


# ＜超音波の音圧測定・解析＞ ( ( 2016.7.12 公開 ) )

2014.8.23 超音波システム研究所 齊木

測定データ ( サンプルング時間 3種類 ) に対して  
以下の3種類の解析により  
超音波の伝搬状態を評価 (超音波システム研究所 **オリジナル技術**) します



## 理論的背景

### 統計解析

#### 「ダイナミックシステムの統計的解析と制御」

赤池 弘次/共著 中川 東一郎/共著:サイエンス社

#### 「生体のゆらぎとリズム コンピュータ解析入門」和田 孝雄/著:講談社

### 音・振動

#### 「音の世界」 W.Hブラッグ 創元科学業書(1951)

#### 「波動論」 鬼頭 史城 (著) 出版社: オーム社 (1954年)

#### 「振動とはなにかーなぜ起こり、どう克服するか」

リチャード・ビジョップ著(ブルーバックスB-471)

### 弾性波動

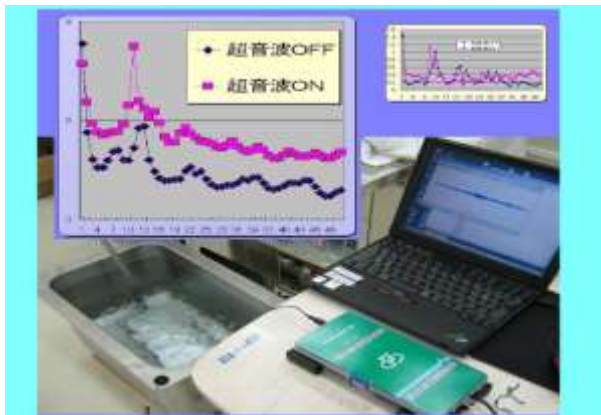
#### 「弾性波動論の基本」 田治米 鏡二 (著) 槇書店 (1994/10)

#### 「弾性波動論」佐藤 泰夫 (著) 岩波書店 (1978/03)

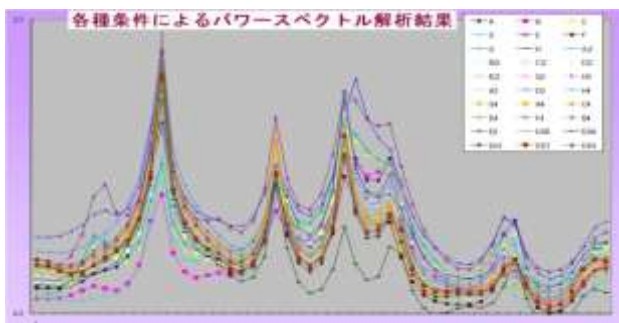
### 流体力学

#### 「内部流れ学と流体機械」妹尾 泰利 (著) 養賢堂 (1973)

#### 「流体力学」日野 幹雄 (著) 朝倉書店 (1974/03)

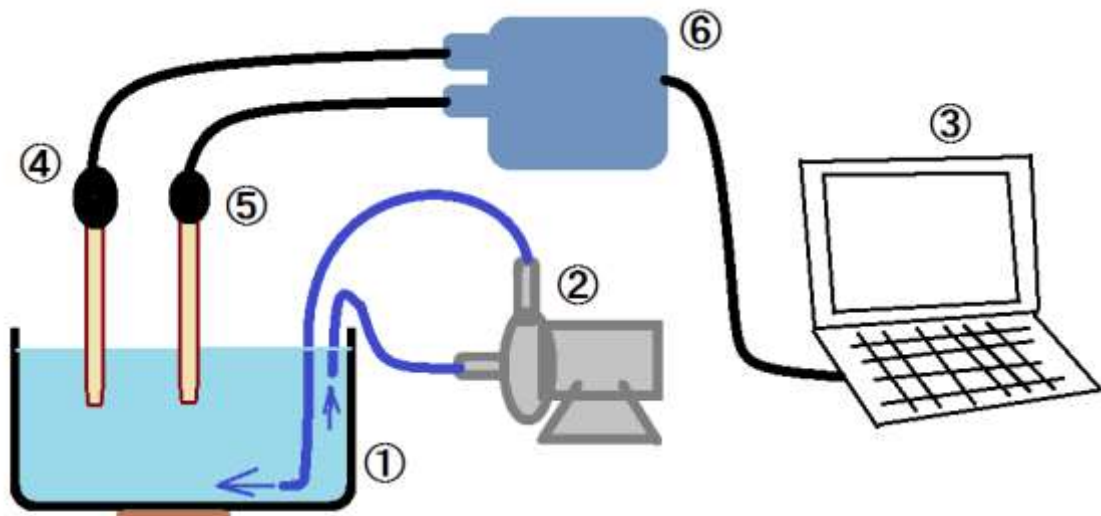


図のように、各種の受信信号を解析して水槽の特徴を確認します



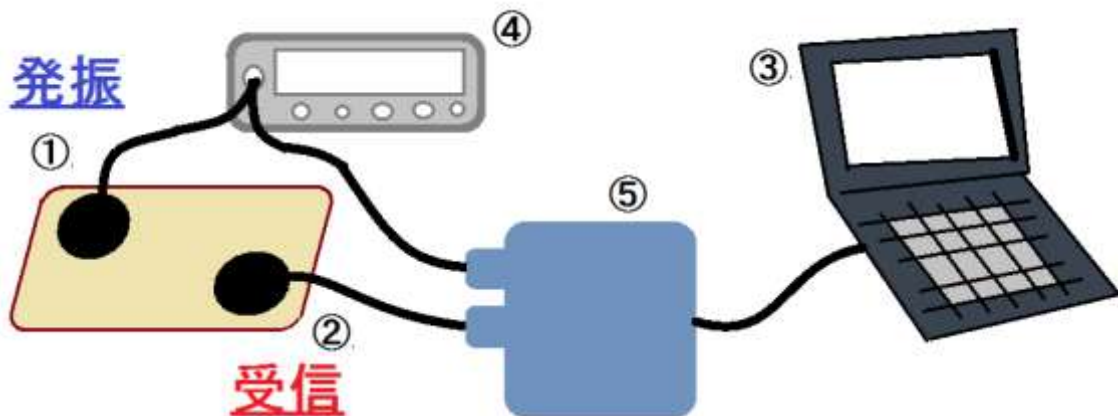
図のように超音波の伝搬状態は条件により、高い周波数のスペクトルグラフになります

## 実験概要



- ①超音波洗浄器    ②ギアポンプ    ③パソコン  
④超音波プローブ    ⑤超音波プローブ  
⑥デジタルオシロスコープ

## <<プローブに取り付けた材料の音響特性の比較>>



- ①超音波プローブ    ②超音波プローブ    ③パソコン  
④ファンクションジェネレータ    ⑤デジタルオシロスコープ

## <<材料の表面を伝搬する超音波の伝搬特性>>

## バイスペクトル

バイスペクトルは以下のように

周波数  $f_1$ ,  $f_2$ ,  $f_1 + f_2$  のスペクトルの積で表すことができる。

$$B(f_1, f_2) = X(f_1)Y(f_2)Z(f_1 + f_2)$$

主要周波数が  $f_1$  であるとき、

$f_1 + f_1 = f_2$ ,  $f_1 + f_2 = f_3$  で表される  $f_2$ ,  $f_3$  という周波数成分が存在すればバイスペクトルは値をもつ。

これは主要周波数  $f_1$  の整数倍の周波数成分を持つことと同等であるので、バイスペクトルを評価することにより、高調波の存在を評価できる。

詳しい説明は専門書・・・を読んで確認してください

## 解析ソフト **TIMSAC for R package**

統計数理研究所 2012 年 10 月

TIMSAC(TIME Series Analysis and Control program)は、統計数理研究所で開発された時系列データの解析、予測、制御のための総合的プログラムパッケージである。オリジナルTIMSAC(TIMASAC-72)は1972年に発表され、その後、TIMSACシリーズとしてTIMSAC-74, TIMSAC-78, TIMSAC-84がComputer Science Monographに発表された。工業プロセスの最適制御、経済変動の分析等広い分野で実際に利用されている。TIMSACの特徴としては、情報量規準の考え方をういた時系列解析プログラムであることが挙げられる。TIMSAC-72ではFPE(Final Prediction Error), TIMSAC-74以降ではAIC(Akaike Information Criterion), TIMSAC-78のベイズ型モデルではABIC(Akaike Bayesian Information Criterion)も用いられている。

TIMSACはFORTRANで書かれたプログラムであるが、最近その一部のプログラムの計算処理機能をライブラリ化したWindowsのためのDLL(Dynamic Link Library)とLinuxのためのShared Libraryを作成された。ユーザーが作成したFORTRAN, C, Javaのプログラムにこのライブラリをリンクすることにより、より扱いやすい環境が実現された。

一方、Rはフリーな統計処理言語かつ環境である。Rは配列演算を基本に設計されているため多次元配列の扱いに適している上、グラフィック関数も豊富であり、かつFORTRANやCのサブルーチンを簡単に呼び出せるインタフェースを備えている。TIMSACのRパッケージは、R言語を用いてTIMSACのサブルーチンを呼び出し、必要であればその解析結果等をグラフィック表示する関数群である。実際にRの中で呼び出されるライブラリは、Rの拡張としてパッケージを構築する際に前述のライブラリと同じソースからgfortran, gccを使って作成されたものである。

また最新版では「FORTRAN77 時系列解析プログラミング」(北川源四郎著/岩波書店)のプログラムをソースとした関数も付け加えられており、特に時変係数ARモデルの時変分散と時変AR係数を推定する関数(tvvar, tvar)についてはOpenMPを使った拡張パッケージtimsacOMPを利用して並列処理も可能である。

<http://jasp.ism.ac.jp/ism/timsac/>

# 自己相関

## 2. 自己相関関数 (ACF: Autocorrelation Function)

### 2.1 自己相関関数の定義

時間的または空間的に離れた2点で関係の強さを関数で表します。例えば、ブラウン運動はランダムな動きなので数秒後には元の位置を忘れることは良く知られている。この場合、相関がほとんどないという。定量的に相関の強さを調べることができたら、波の重ね合わせである音の解析に応用できる。音の時間的特徴を表すために自己相関関数  $G(\tau)$  を定義する。

$$G(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} p(t)p(t+\tau)dt \quad (2 \cdot 1)$$

$$G(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} P(\omega)e^{i\omega\tau}d\omega \quad (2 \cdot 2)$$

$$P(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} G(\tau)e^{-i\omega\tau}d\tau \quad (2 \cdot 3)$$

音の時間関数  $p(t)$  とする。ここで、 $\tau$  は遅れ時間、 $T$  は積分区間です。(2・3) 式のように、信号のパワースペクトルを  $P(\omega)$  は、自己相関関数  $G(\tau)$  のフーリエ変換から求めることができます。また、 $G(\tau)$  はパワースペクトルの逆フーリエ変換の計算で求められる。このように、 $G(\tau)$  とパワースペクトルは数学的に関係がある。

また、(2・1) 式を離散データ  $p(k)$  に適用すると、

$$G(L) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} p(k) \cdot p(k+L) \quad (L = 0, 1, 2, \dots, N-1) \quad (2 \cdot 4)$$

となる。次に、周波数 ( $f = 1\text{Hz}$ ) の波を考える。積分区間  $T$  の長さの信号  $p(t)$  を切り出すと、時間  $\tau$  だけ遅れた信号は  $p(t+\tau)$  となる。(図 2・1)。もし  $p(t)$  と  $p(t+\tau)$  の振幅が大きく、同様な繰り返し成分があれば、2つの信号の相関値  $G(\tau)$  は大きくなる。つまり、自己相関関数は信号自体にどの程度の類似性があるかを表す関数といえる。

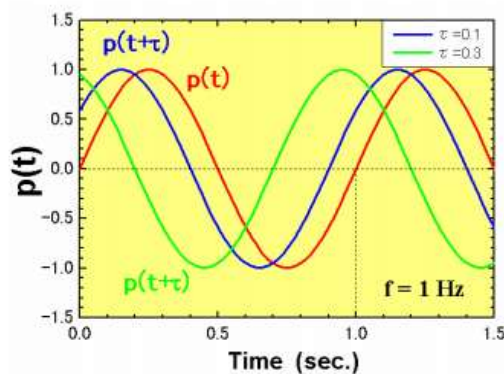


図 2・1  $p(t) = \sin(\omega t)$

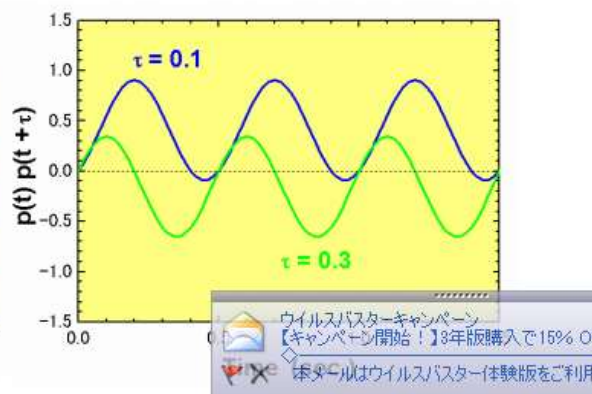


図 2・2  $p(t) \times p(t+\tau)$

## 参考

[http://www.nda.ac.jp/cc/mse/\\_development/Abe/ACF.pdf](http://www.nda.ac.jp/cc/mse/_development/Abe/ACF.pdf)

<実験用具>

1 : 超音波テスター



■SSP-model2011 本体 [仕様]	
分解能	8bit
チャンネル数	2ch
帯域幅	25MHz
サンプリング周波数	1ch時 200Ms/s, 2ch時 100Ms/s
PC接続コネクタ	USB
プローブ接続コネクタ	BNC
本体寸法	ケース部 :W320×D230×H64
重量	1.42kg
電源	AC 100V
周波数	50/60Hz

超音波プローブ (実験用タイプ)

品番 120B25 : タイプC

コード長さ 1000mm

接続部 BNC

## 2: 超音波発振器(ファンクションジェネレータ)



超音波発振装置

### ◆ファンクション・ジェネレータ

- ・サイン・スクエア・三角・ランプ・パルス・鋸波(発振波形)
- ・0.02Hz~2MHz  
(1、10、100、1k、10k、100k、1MHzレンジ)
- ・精度±5%(フルスケール)
- ・出力電圧20V<sub>p-p</sub>(端子開放時)、10V<sub>p-p</sub>(50Ω負荷時)

## 3: 超音波洗浄器(超音波洗浄実験用)



【サイズ】(約)縦12×横20×高さ14cm 【重量】約780g 【水量】600ml  
【電源】AC110-120V・50/60Hz 【超音波周波数】42,000Hz 【消費電力】26W

## 4: 小型・脱気マイクロバブル発生ポンプ(装置)



(超音波システム研究所オリジナル製品)

## 5: その他



シリコンオイルコンパウンド TSK5200-100

補足:言葉の説明

**自己回帰モデル**(Autoregressive model, AR model)とは

時系列データが  $x_1, x_2, x_3, \dots, x_N$  のように得られるとします。このデータ系列を(1)式のように、今現在の値を現在より前の値を重みづけして足し合わせ(線形和)ることで表現してみよう、というのが時系列データの自己回帰モデルです。別の表現をすると、時系列データは、(1)式に従って生成されたものとみなして、それにふさわしい(1)式のパラメータ を求めてみよう、というものです。

$$x_s = \sum_{j=1}^M a_j x_{s-j} + \varepsilon_s \quad (1)$$

**パワースペクトル密度**とは(PSD; Power Spectral Density とは)

$$\lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} |x(t)|^2 dt = \int_{-\infty}^{\infty} S(\omega) d\omega \quad (1)$$

(1)式がパワーとスペクトルに関するもっとも基本となる関係式です。まず、“パワー”とは、“信号  $x(t)$ の2乗”で定義される量です。(1)式の左辺は、時間幅を無限大まで延ばしていった時の、信号  $x(t)$ のパワーの時間平均を表しています。言い換えると、“単位時間当たりの信号  $x(t)$ のパワー”であり、時間  $t$ の単位として秒を採ると、1秒あたりの平均パワーを表わすことになります。一方、(1)の右辺は、左辺で定義した単位時間あたりのパワーを、“周波数の世界で分析したい”という意向の表明になります。気持ちとしては、“パワー全体を、規則的な周期を持つ波にばらばらに分解してしまおう”、そして、“様々な周波数の波をすべて並べあげて、各々の周波数の波がどのくらいづつ寄与することでパワー全体を構成しているかを表現してみよう”と言った感じですが、この“各々の周波数の波がパワー全体に寄与している割合を示す量”が  $S(\omega)$ であり、パワースペクトル密度(PSD; Power Spectral Density)と呼ばれる量なのです。

ちなみに、 $\omega$ は角速度で、周波数  $f(=1 / T)$ と比例関係にある変数でした( $\omega = 2 \pi / T$ )。角速度より周波数の方が一般的になじみのある言葉と思われるので、ここでは角速度と言わずに周波数と言っておきますが、正確には角速度  $\omega$ です。



## 自己相関関数とウィーナー・ヒンチン(Wiener Khintchine)の定理

ここでは、パワースペクトル密度  $S(\omega)$  を実際に算出する時に使われる、信号  $x(t)$  の自己相関関数と、ウィーナーヒンチンの公式の解説をします。

$$C(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} x(t)x(t+\tau)dt \quad (6)$$

(6)式は、信号  $x(t)$  の自己相関関数の定義です。(1)式の左辺に定義された、信号  $x(t)$  のパワーと似た形をしていますが、すこしだけ異なっており、信号  $x(t)$  と、 $\tau$ (タウ)だけ少し先の信号  $x(t+\tau)$  を掛けたものを所定の時間範囲にわたって足し合わせています。自己相関関数  $C(\tau)$  は、掛け合わせる信号の時間差である  $\tau$  の関数であって、時間  $t$  の関数ではないところに注意してください。

通常、自己相関関数は、信号の周期的な構造を捉えるために利用されます。(6)式をよく観察するとわかるように、信号  $x(t)$  が周期  $T_1$  をもつ信号なら、 $\tau$  が  $T_1$  の倍数に近いとこで自己相関関数の値が大きくなります。

次に、(6)式を、(2)式と(3)式を使って式変形します。変形過程は省略して結果を示すと以下になります。

$$C(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{|X(\omega)|^2}{T} e^{i\omega\tau} d\omega \quad (7)$$

(7)式の右辺と、(4)式の右辺を見比べるとよく似ていて  $e^{i\omega\tau}$  だけが異なっています。実際に、 $\tau=0$  の条件下では、 $C(\tau)$  は(4)式の左辺で定義したパワーと同一になるし、 $e^{i\omega\tau}$  は1になるので、(7)式は(4)式とまったく同一になります。つまり、(4)式は、(7)式で  $\tau=0$  とした場合の特別ケースの関係式なのです。

ここで、パワースペクトル密度の実体を示した(5)式を思い出します。(7)式にも(5)式に相当する部分があるのがわかります。(5)式を使って(7)式を整理します。

$$C(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} S(\omega)e^{i\omega\tau} d\omega \quad (8)$$

(8)式は、信号  $x(t)$  のパワースペクトル密度  $S(\omega)$  と自己相関関数  $C(\tau)$  の関係式になっています。(8)式と(3)式を比べてみると同じ形をしています。つまり、(8)式は、自己相関関数  $C(\tau)$  の逆フーリエ変換になっているのです。ということは、対応するフーリエ変換もあるわけで、以下になります。

$$S(\omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} C(\tau)e^{-i\omega\tau} d\tau \quad (9)$$

この(8)式と(9)式で示された、

**パワースペクトル密度  $S(\omega)$ と自己相関関数  $C(\tau)$ の関係式の組を、ウィーナー・ヒンチン(Wiener Khintchine)の公式と呼びます。**

ウィーナー・ヒンチンの公式が示している事とご利益を確認します。まず、自己相関関数  $C(\tau)$ とパワースペクトル密度  $S(\omega)$ がフーリエ変換の関係にあることから、**自己相関関数  $C(\tau)$ とパワースペクトル密度  $S(\omega)$ のもつ情報の"価値"は同じ**であるということです。片方が得られると自動的にもう一方も得ることができます。言いかえると、同じものを、時間と周波数という別々の側面から見ているだけだ、という事です。そして、実用上の御利益は、(9)式で示されるように、**自己相関関数  $C(\tau)$ を計算してフーリエ変換すると、パワースペクトル密度  $S(\omega)$ が得られる**という事です。

参考

[http://hclab.sakura.ne.jp/stress\\_nervous\\_psd.html](http://hclab.sakura.ne.jp/stress_nervous_psd.html)

[http://hclab.sakura.ne.jp/stress\\_nervous\\_ar.html](http://hclab.sakura.ne.jp/stress_nervous_ar.html)

[http://hclab.sakura.ne.jp/stress\\_nervous\\_ar\\_aic.html](http://hclab.sakura.ne.jp/stress_nervous_ar_aic.html)

フィードバック解析になぜ多変量自己回帰モデルが有効か

--数式の理解へ向けて-- 第10章 "生体内フィードバック解析" p175 - p183

<http://www.uinet.or.jp/~ishiyasu/wada/essence/essence.html>

赤池統計学の世界

[http://www.ism.ac.jp/akaikememorial/pdf/Akaike\\_Statistical\\_World.pdf](http://www.ism.ac.jp/akaikememorial/pdf/Akaike_Statistical_World.pdf)

<http://cpis.soken.ac.jp/project/publication/journal/no.12/doc/20-25.pdf>

<http://youtu.be/QAugnIK74Tw>

参考書籍（初級 概略の理解でも参考になります）

超音波プローブの応用に簡単で低価格の  
大変参考になる書籍です

**叩いて超音波で見る**—非線形効果を利用した計測 佐藤 拓宋（著）  
出版社: コロナ社（1995/06）



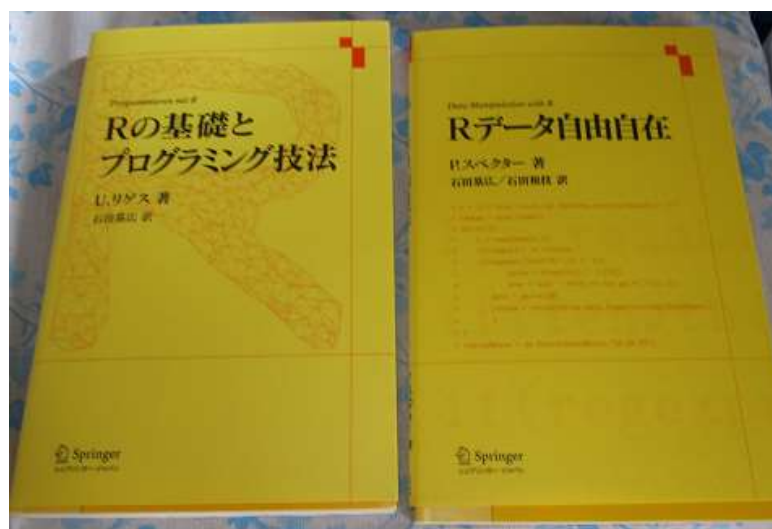
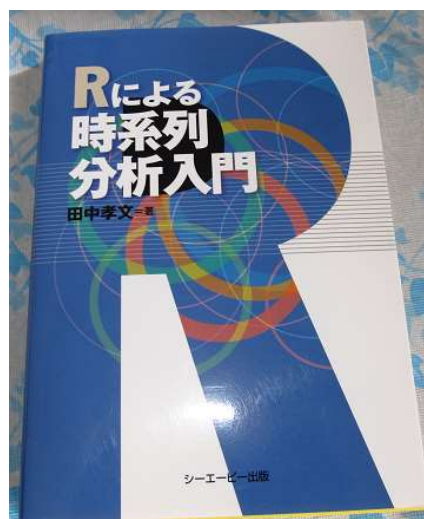
**Rによる時系列分析入門** : 田中 孝文/著 シーエーピー出版



## 参考資料(中級 操作を理解することで概要がつかめると考えます)

### 統計解析ソフト「R」

- 1) Rによる統計解析の基礎  
:中澤 港/著 ピアソン・エデュケーション
- 2) Rによる統計解析ハンドブック 第2版  
:訳者 大門 貴志 他 メディカル・パブリケーションズ
- 3) Rによる時系列分析入門  
:田中 孝文/著 シーエーピー出版
- 4) Rの基礎とプログラミング技法  
:U.リグス/著 石田 基広/訳 シュプリンガー・ジャパン
- 5) R データ自由自在  
:P.スペクター/著 石田基広/石田和枝 訳 シュプリンガー・ジャパン



## 参考書籍(上級 深い理解のためには熟読が必要です)

### 1: 解析

#### 3) 不規則信号論と動特性推定

宮川 洋 (著), 佐藤拓宋 (著), 茅 陽一 (著)

出版社: コロナ社 (1969)

#### 4) 赤池情報量規準 AIC—モデリング・予測・知識発見

赤池 弘次 (著), 室田 一雄 (編さん), 土谷 隆 (編さん)

出版社: 共立出版 (2007/07)

#### 5) ダイナミックシステムの統計的解析と制御

赤池 弘次 (著), 中川 東一郎 (著)

出版社: サイエンス社(1972)

### 2: シミュレーション

#### 「波動解析と境界要素法」

福井 卓雄 小林 昭一 京都大学学術出版会 (2000/03)

### 3: 弾性波動

「弾性波動論の基本」 田治米 鏡二 (著) 槇書店 (1994/10)

「弾性波動論」 佐藤 泰夫 (著) 岩波書店 (1978/03)



### 4: 流体力学

「内部流れ学と流体機械」 妹尾 泰利 (著) 養賢堂 (1973)

「流体力学」 日野 幹雄 (著) 朝倉書店 (1992/12)

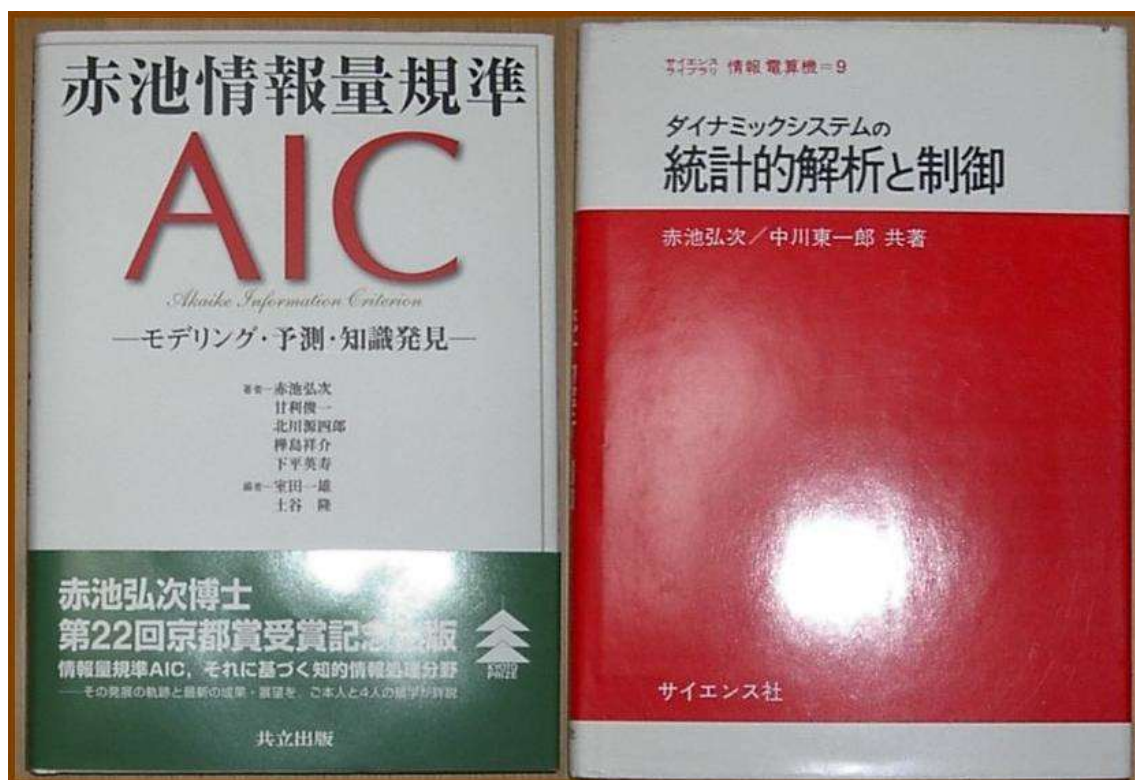
「噴流工学」 社河内敏彦 (著) 森北出版 (2004/03)

### 5: 超音波

「やさしい超音波工学—拡がる新応用の開拓」

川端 昭 (編著), 高橋 貞行 (著) 一ノ瀬 昇 (著)

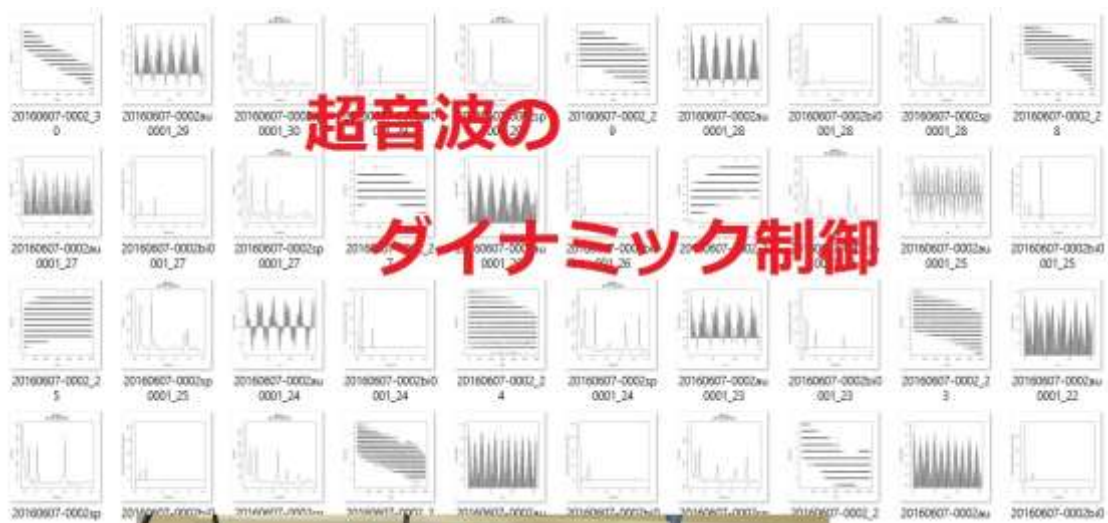
工業調査会 増補版 (1998/01)



「バイブル(写真右)」とされている書籍です

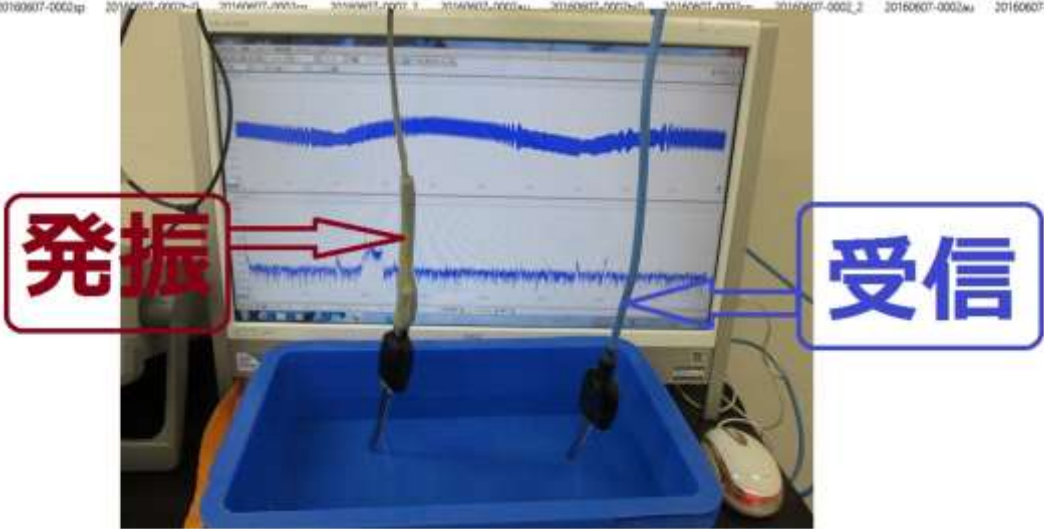
実用的ですが、読みこなすには十分な努力が必要です

理解すると、ほとんどの統計書籍は読めるようになります



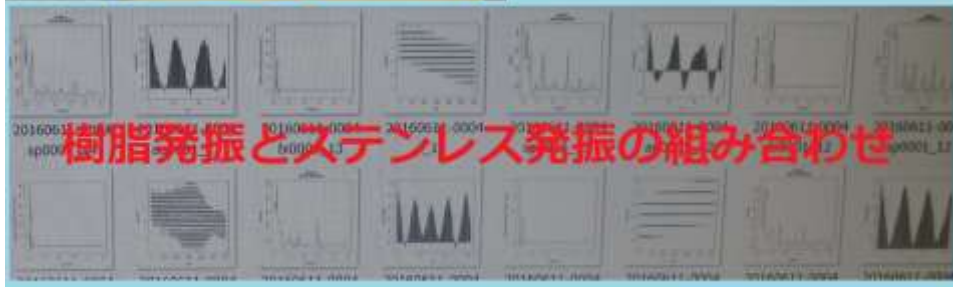
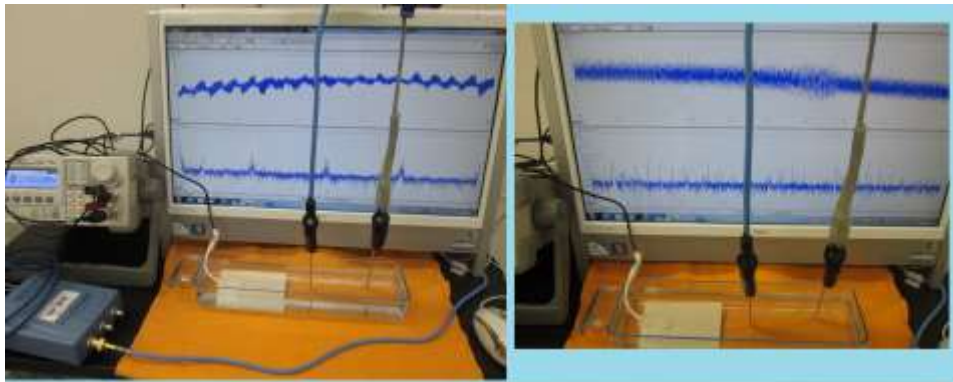
**超音波の**

**ダイナミック制御**



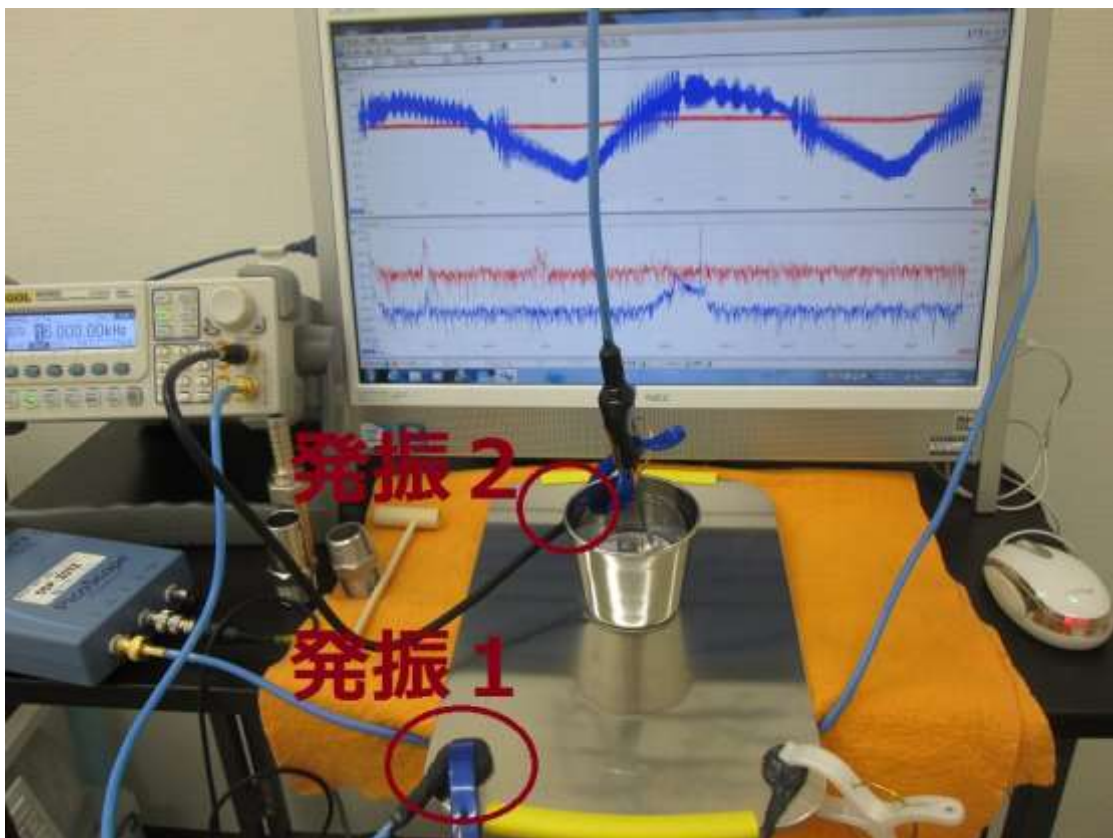
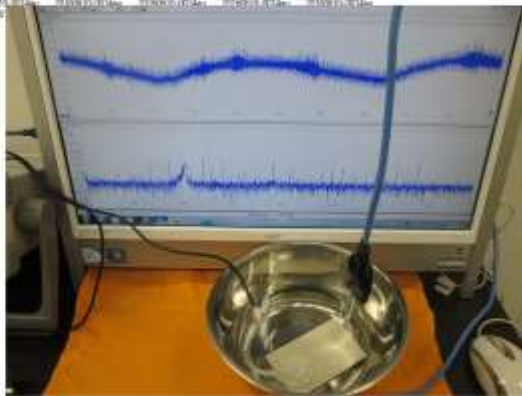
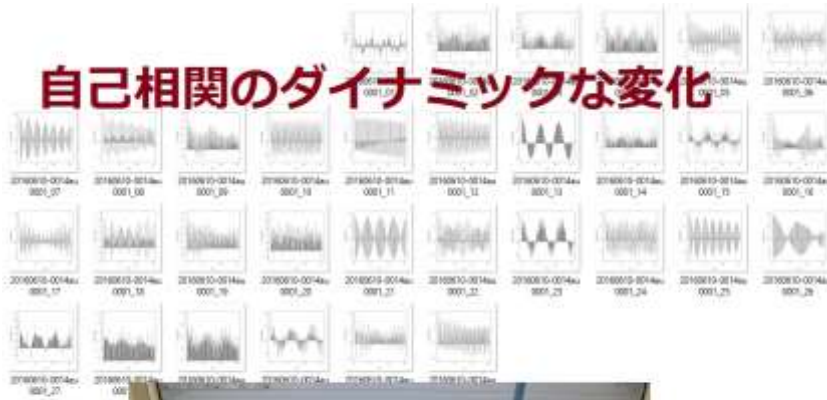
**発振**

**受信**



**樹脂発振とステンレス発振の組み合わせ**

# 自己相関のダイナミックな変化



以上