4. 非定常スペクトル解析

犬塚 博
(静岡大学工学部)

Spectral Analysis of Non-Stationary Data

INUZUKA Hiroshi
Faculty of Engineering, Shizuoka University, Hamamatsu 432-8561, Japan

(Received 29 June 1998)

Abstract

The spectral analyses of non-stationary data for plasma experiments are reviewed for beginners. It is shown that, when compared to the conventional Fast Fourier Transform (FFT), better time- and frequency-resolved spectra of the non-stationary data can be obtained using the Wigner distribution and Wavelet transform. However, artificial spectral peaks called cross-components appear in the Wigner distribution of multi-component signals. Some elimination methods for the cross-components are introduced. The basic theory and the image of the Wavelet transform are explained, and its time and frequency resolutions are compared with the FFT and the Wigner distribution.

Keywords:

spectral analysis, Wigner distribution, wavelet analysis, fast fourier transform, non-stationary signal, cross-component

4.1 はじめに

前章で，高速フーリエ変換法（FFT: Fast Fourier Transform）は各種スペクトル解析法の中でも機械的に実行することが可能であり，初心者にも比較的簡単に用いることができる基本的スペクトル解析法であることを紹介した．しかし，フーリエ変換法ではうまくスペクトル解析ができない場合も存在する．その代表的なものが時間的にスペクトルの性質が変化する非定常信号である．一般に時間に対して何らかの変化があるからこそ測定する必要性が生ずるのであり，プラズマの揺動解析においてもその解析対象は定常であるよりは非定常信号である場合が多い．そのような信号のスペクトル解析を行う場合には，FFT よりも「ウィグナー分布」[1-7]や「ウェーブレット解析」[7-15]等の初めから非定常な信号を対象とした非定常スペクトル解析法を用いる方が物理的な情報をより豊富に含んだ結果が得られる．そこで，本章ではそれらいくつかの非定常スペクトル解析法を紹介するとともに，FFT と比較しての得失を明らかにする．

なお，本講座は「入門講座」であるので，大学の研究室に配属された卒研生から修士の学生を対象と考え，できる限りわかりやすく概要を紹介することを心がける．したがって，問題をかなり単純化している部分もあるので，より厳密で詳細な内容については引用文献を参考にされたい．

author's e-mail: tehinuz@eng.shizuoka.ac.jp

4.2 高速フーリエ変換法の限界

FFT は，本質的に解析対象が定常信号であることを仮定するスペクトル解析法である．Wiener-Khinthine

の定理より，パワースペクトル S_f は計測データ $x(t)$ の自己相関関数 $R_{xx}(\tau)$ のフーリエ変換で表される．

$$R_{xx}(\tau)=\lim_{T\to\infty}\frac{1}{2T}\int_{-T}^{T}x(t)\cdot x(t+\tau)\mathrm{d}t \qquad (1)$$

$$S_f=\int_{-\infty}^{\infty}R_{xx}(\tau)\exp(-\mathrm{j}2\pi f\tau)\mathrm{d}\tau \qquad (2)$$

(1)式のように自己相関関数を求める際に時間平均操作がなされるので，その結果として得られるスペクトルも解析区間の中で時間平均されたスペクトルとなる．したがって，(2)式に示されるように時間 t に依存しないスペクトルしか得られない．これでは解析区間の途中でスペクトルが変化したとしてもその情報を得ることはまったくできない．

そこで，FFT を使っても何とかスペクトルの時間的変化の情報を得るための手法が工夫された．それは解析区間を短い区間に区分してそれぞれの小区間ごとに FFT を行う手法である．これは，短時間（ショートタイム）FFT とか，区分 FFT 等いくつかの名前で呼ばれている[7]．この手法によって定常スペクトル解析法である FFT を使ってもスペクトルの時間変化に関する情報がある程度得られる．しかし，データ数を N，サンプリング周期を Δt とすると FFT の周波数分解能は $1/(N\Delta t)$ [Hz] となり時間分解能は $N\Delta t$ [s] であるので，あまり短い時間区間で FFT を実行すると周波数分解能が悪くなってしまう．逆に解析の時間幅を長くすると，それだけ細かな時間変化を追えなくなってしまう．これは本質的に FFT の時間分解能と周波数分解能の間にトレードオフの関係があるためである．

実際の例でその様子を見てみよう．Fig. 1 はチャープ信号と呼ばれる波形である．これは周波数が時間に比例して増加する信号であり，当然，非定常信号である．しかし，周波数が変化するとしても，ある時刻の瞬時周波数は何か一つ周波数が決まり非常に鋭いスペクトルになるはずである．それを時間変化に関する情報が得られるように短い区間に分けてショートタイム FFT 解析する．その結果が Fig. 2 である．なお，図中の f_n はサンプリング周波数の半分の周波数である Nyquist 周波数である．スペクトルは予想に反し非常に幅広のものとして求まってしまっている．これは，FFT ではあくまでスペクトルの時間平均として求まるので，その解析区間の時間内で変化しているピーク周波数が全部平均化され表されるからである．それらの結果として，FFT の場合は幅広のスペクトルが求まっても，それが本当に同時に多くの周波数成分が存在する広がったスペクトルであるのか，それとも，線スペクトルのピーク周波数が時間的に変化しているのか，本質的に区別できない．これでは分解能が悪く，それぞれの時刻のピーク周波数も精度良く求めることができない．また，時刻 $t=200$ 以前では信号の振幅が0であるにもかかわらず，すでにスペクトルにはピークが現れてしまっている．これではどの時刻から信号がスタートするのか誤った理解をまねきかねない．このように周波数分解能・時間分解能ともに問題がある．

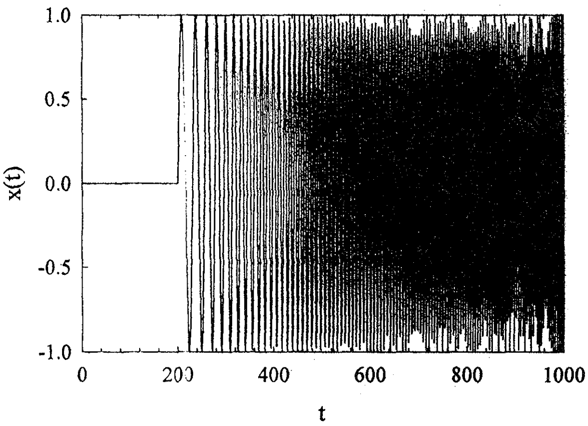

Fig. 1　A waveform of the chirp signal.

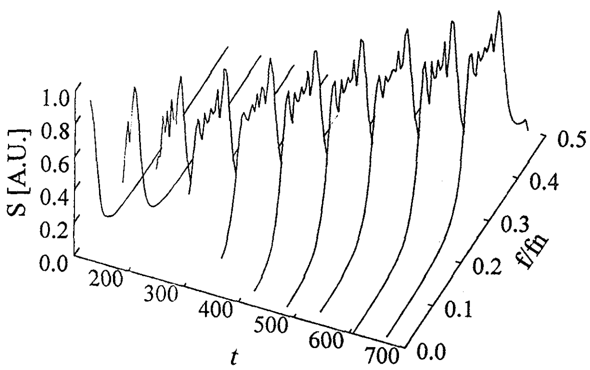

Fig. 2　Time resolved frequency spectra calculated by the FFT using a rectangular window, where the data length N = 256.

4.3　ウィグナー分布

そのような現状から，非定常信号のスペクトル解析にはそれに特化した特別のスペクトル解析法がいくつか考案されている．それらは FFT が解析区間の時間平均スペクトルとして時間依存性のないスペクトルを求めるの

に対し，時刻 t の依存性も残して解析区間内での時間変化の情報が得られる手法である．

このような非定常信号の解析法として最も有名なものの一つがウィグナー分布である．これは1932年に Wigner が提案し[1]，1980年代に Claasen, Mecklenbrauker によって再発見がなされた[2-4]本質的に非定常な信号を対象としたスペクトル解析法である．時間関数 $x(t)$ の自己ウィグナー分布 $W(t,f)$ は次のように定義される．

$$R(t,\tau)=x\left(t+\frac{\tau}{2}\right)x^*\left(t-\frac{\tau}{2}\right) \tag{3}$$

$$W(t,f)=\int_{-\infty}^{\infty}R(t,\tau)\exp(-\mathrm{j}2\pi f\tau)\mathrm{d}\tau \tag{4}$$

ここで＊は複素共役を表す．$R(t,\tau)$ は拡張された自己相関関数と呼ばれ，(1)式の通常の自己相関関数から時間平均操作を省いたものである．この定義を用いることは，後で述べるクロス項と呼ばれる問題を引き起こす原因となるが，反面，時間依存性が残るので，それをフーリエ変換したウィグナー分布も時間依存性を持った関数となる．したがって，時間変化に関する情報が得られることとなる．そもそも，周波数スペクトルの定義は，(1)，(2)式を使って関数 $x(t)$ の自己相関関数をフーリエ変換したものである．したがって，それとは異なる定義の拡張された自己相関関数をフーリエ変換して求めるウィグナー分布はあくまでウィグナー分布であり厳密には周波数スペクトルが求められるわけではない．周波数スペクトルとは異なるものが求められるからこそ意味があるのであり，その結果が物理現象の解釈に役立つものであれば，限界を認識して周波数スペクトルの類似物として利用することは意味のあることである．

サンプリングされたデータを取り扱い可能とするためにフーリエ変換を DFT に変換したのと同様に，ウィグナー分布を離散化して離散ウィグナー分布が定義される．

$$u_n(m)=2x(n+m)w(m)x^*(n-m)w^*(-m) \tag{5}$$

$$W(n,k)=\sum_{m=-N/2+1}^{N/2}u_n(m)\exp\left(-\mathrm{j}\frac{2\pi mk}{N}\right) \tag{6}$$

ここで $w(m)$ は区間 $-n/2\leqq m\leqq n/2$ の窓関数である．(6)式は(5)式の DFT の形となっており，その計算に FFT を用い高速化することができる．ただし，FFT と異なり $k=0$ が直流成分となり，$k=N$ が正の最高周波数である Nyquist 周波数に対応する．この式によって計算される Fig. 1 のチャープ信号のウィグナー分布を Fig. 3 に示す．このように直感と一致する時間的に変化する鋭いピークのスペクトルが得られる．この図から各時刻のピーク周波数を精度良く求めることも容易であり，また，信号のスタート時刻もかなりよく現実を反映している．これらで示されるように，ウィグナー分布はその高い時間・周波数分解能が特長である．

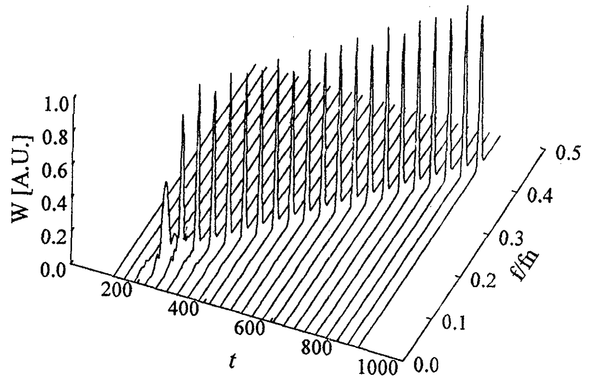

Fig. 3　Time resolved Wigner distributions of the chirp signal of Fig. 1, where the data length N = 256.

(4)式で定義されるアナログでのウィグナー分布では無限時間のデータを用いるのでアナログでのフーリエ変換同様に周波数分解は無限小となる．しかし，離散データの場合は，(6)式を用い有限区間データに対し FFT を使って計算するので周波数分解能は $1/(2N\Delta t)$ となる．しかし，時間分解能は FFT のように $N\Delta t$ で制約されることはない．たとえば，ある時刻でのみ値を持つデルタ関数型の関数を考えてみよう．FFT で解析すると解析区間 $N\Delta t$ に入っている限りその影響は出るが，ウィグナー分布では，その時刻以外の拡張された自己相関関数の値が 0 となるので影響は現れない．したがって，理想的にはスペクトルが時間方向に広がらず，時間分解能はサンプリング間隔 Δt 程度となる．

プラズマの揺動解析においてはスペクトル全体の形も重要であるが，とくにピークの周波数・高さ・半値幅等が重要な物理的情報を与える場合が多い．したがって，スペクトル解析ではそれらが正しく求まることが特に重要である．それらを FFT とウィグナー分布で比較した．テスト信号としては非定常信号である周波数が正弦波状に変化する FM 波 $x(t)=\sin[0.5\pi t-5\cos(2\pi\times0.01t)]$ を用いた．FFT での解析結果を Fig. 4 に，ウィグナー分布での結果を Fig. 5 に示す．(a) の図中の丸はピーク周波数を，それに付いた縦棒は半値幅を表す．正弦波状に変化する実線は瞬時周波数の理論値を示す．(b) は理論値と比較したピークの高さを表す．FFT ではこのように周波数が激しく変動するような信号では，スペクトル

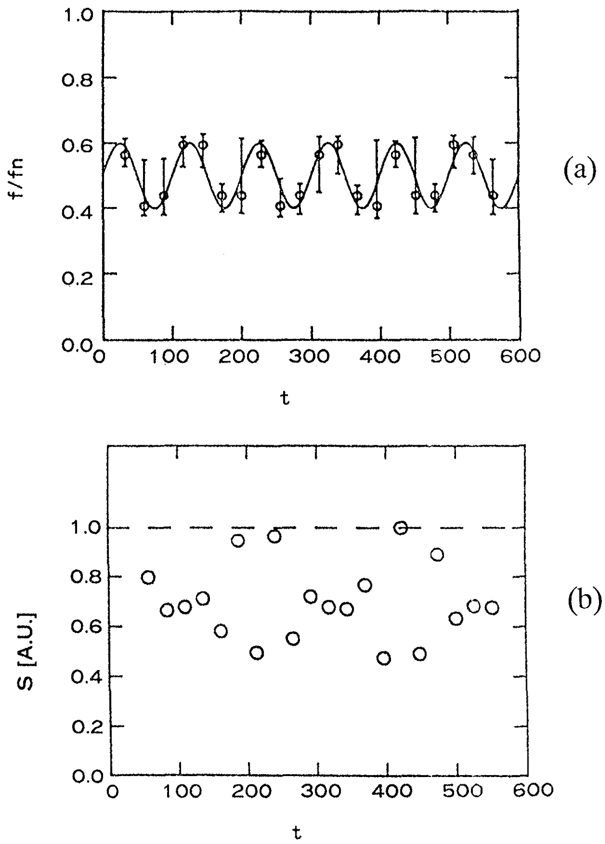

Fig. 4　Frequency spectra of the FM signal calculated by the FFT. (a) The peak frequency and the half amplitude level. (b) The peak amplitude normalized by the true level.

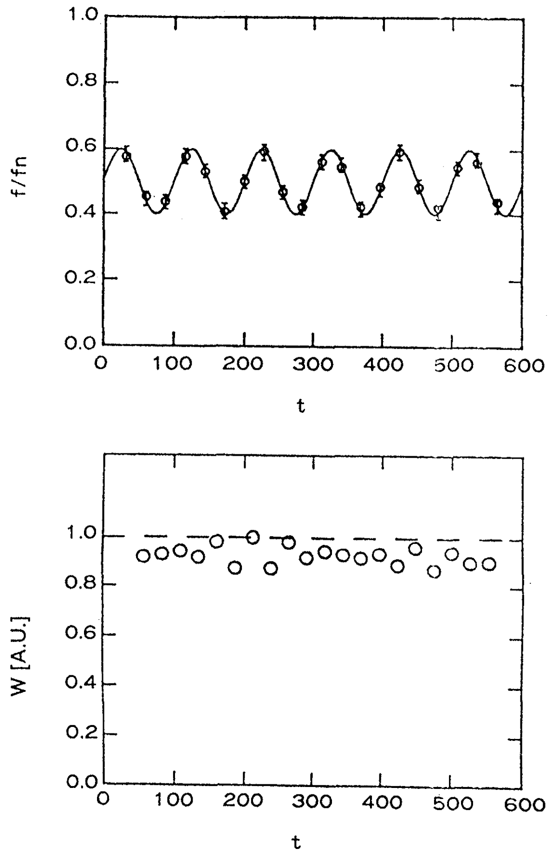

Fig. 5　Wigner distributions of the FM signal. (a) The peak frequency and the half amplitude level. (b) The peak amplitude normalized by the true level.

の幅が広がるとともに，時間・周波数平面上のピークの位置や高さも不正確なものとなってしまう．一方，ウィグナー分布ではそのような信号の場合でも，正確なスペクトルを高い分解能で求めることができる．

しかし，ウィグナー分布には重大な欠点が一つ存在する．それがクロス項と呼ばれる問題である．これは複数の成分を持つ信号の場合に真のピークとピークの中央に偽のピークが現れる現象である．クロス項は正負に激しく振動するがFFTの場合なら時間平均が行われるので平滑化される．一方，ウィグナー分布では時間平均操作が省略されているので，クロス項はほとんど真のピークと同じ高さを持つ．Fig. 6は２つの周波数成分を持つ定常正弦波信号のウィグナー分布を求めた例である．真のピークのちょうど真ん中に正負に振動するクロス項成分が見える．このようにクロス項は，時間・周波数平面上の真のピークとピークのすべての組み合わせで発生し，両者の中央に偽のピークを発現させる．

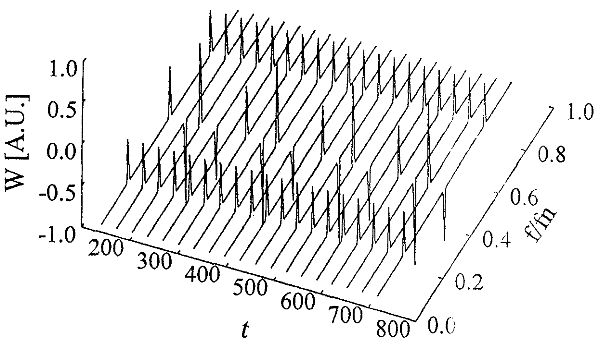

Fig. 6　Real parts of the Wigner distribution of the stationary signal $x(t) = \sin(2\pi \times 0.1t) + \sin(2\pi \times 0.4t)$. There are two actual peaks and cross-components between actual peaks.

クロス項と真のピークが離れている場合は，クロス項の影響はそれほど問題ないが，クロス項と真のピークが重なっていたりすぐ近くにある場合には，真のピークの高さや形状を変えてしまうので問題である．したがって，ウィグナー分布は，比較的周波数成分が少なくて複雑な

クロス項成分が現れないような場合や，FFT 等何らかの他のスペクトル解析法をあらかじめ用いて真のピークのおおよそのピーク周波数がわかっている状態で，さらに精度良くピーク周波数を求めたい場合などに用いられる．

クロス項自体を減少させたり抑制しようという試みもいくつかなされている．その中で，最も有名なのが解析信号の利用である．実数データの場合，負の周波数成分は正の周波数成分の複素共役なので冗長な部分である．そこで，負の周波数成分のスペクトルを 0 に加工すれば，真のピークの数が半分になるのでクロス項の数も半減する．データ $x(n)$ の解析信号 $x_a(n)$ は次式で求められる[2].

$$x_a(n)=x(n)+\mathrm{j}\sum_{m\neq n}x(m)\frac{\sin^2[\pi(n-m)/2]}{\pi(n-m)/2} \qquad (7)$$

これは何ら情報を損なうことなくクロス項の数を減らすことができるので，ウィグナー分布を計算する場合の標準的な前処理として行われる．しかし，数が半減するだけなので，さらにクロス項の影響を減少させる手法としては平滑化フィルタを用いる手法がある[16,17]．しかし，クロス項を抑制すればするほど，肝心の時間・周波数分解能が悪化する欠点を持っている，FFT 等の他のスペクトル解析の結果を使って真のピークと偽のピークを弁別し偽のピークだけを除去する手法もある[6]．しかし，真のピークとクロス項が近接して存在する場合は分離が不可能である．周波数成分が 1 つの信号に限定した場合は完全にクロス項を除去する手法も提案されている[18].

なお，ウィグナー分布のプログラムについては，サンプルプログラムを掲載した文献もあるのでそれを参考にされたい[7].

4.4　ウェーブレット変換

そのような状況の中で，最近，にわかに注目を集めているのがウェーブレット変換である．これは本質的に非定常信号の解析法でありながら，ウィグナー分布等で問題となる偽のピークを発生させるような欠点もなく，また，比較的，機械的に用いることが可能である．したがって，欠点の少ない非定常信号解析法として様々な分野での応用が始まっている．

"wavelet" とは，英語でさざ波の意味で，直訳すると「さざ波変換」となる．フーリエ変換が，解析対象の波形を正規直交系である基本波の整数倍の周波数の定常正弦波の重ね合わせとして表すのに対し，ウェーブレット変換では，非定常なある時刻の前後でのみ振幅を持つような基本波形の重ね合わせとして表す．元々，一部の時刻にしか存在しない非定常信号を定常な正弦波を使って関数展開しようというところに無理があり，非定常な波形を非定常基本波の重ね合わせとして表すのはまったく自然であるといえる．

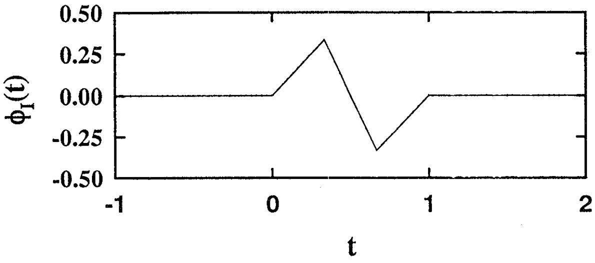

Fig. 7　A Morlet wavelet.

ウェーブレットは，石油探査の技師であった Morlet が考案したものが最初である[8]．人工地震を起こして地殻を調べる場合に，フーリエ変換での分解能の不足に直面し，Fig. 7 のような波形 $\phi_I(t)$ と観測データの相互相関から反射波の到達時刻を決めた．その結果，反射波の到達時刻の測定精度が改善できることがわかった．このことから，ウェーブレット変換は，最初，遅延時間や反射時間の測定にもっぱら用いられた．$\phi_I(t)$ は一般にはマザーウェーブレットとかアナライジングウェーブレットと呼ばれ，何も Fig. 7 の形に限定されたものではなく，ある時刻の付近にのみ信号が局在し平均値が 0 の波形であればどのようなものでも構わない．

このマザーウェーブレット $\phi_I(t)$ にスケールファクタ a と時間シフト b の変換を施す．スケールファクタ a の変換は波形を x 方向に伸縮することに対応する．時間シフト b は波形を局在させる時刻を変化させる．こうして，次式を用いて $\phi_I(t)$ よりウェーブレット基底関数 $\phi_J(t)$ を生成する．

$$\phi_J(t)=\frac{1}{\sqrt{a}}\phi_I\left(\frac{t-b}{a}\right) \qquad (8)$$

フーリエ変換では，それぞれの周波数の正弦波の係数であるスペクトルを正弦波と計測データの相関を計算することにより求めた．ウェーブレット変換でも同様で，この生成された各 a,b についてのウェーブレット基底関数 $\phi_J(t)$ と観測データ $x(t)$ の相関を求める．

$$w(a,b)=\int_{-\infty}^{\infty}x(t)\phi_J(t)^*\mathrm{d}t \qquad (9)$$

これがウェーブレット変換と呼ばれる．式(9)の a の逆

数がフーリエ変換の周波数に，b が時刻に対応する．したがって，$1/a$ と b を変数とする二次元平面上に $w(a,b)$ の大きさをプロットすれば，それが時間・周波数平面上のスペクトルに対応するものとなる．ウェーブレット変換もウィグナー分布同様に求まるのはスペクトルそのものではなく，あくまでウェーブレット変換であることに注意が必要である．また，(8)式を使って求めた多くのウェーブレット基底関数はそのままでは直交関数系とはならない．したがって，直接，FFTでのスペクトルと関係づけることは難しい．

FFTでもウィグナー分布でも周波数分解能は周波数によらず一定であった．しかし，(8)式を用いるウェーブレット変換では周波数分解能は周波数に対して変化する．すなわち，周波数が低いところでは分解能が高く，周波数が高いところでは分解能が低くなる対数的性質を持つ分解能となる．これは物理的・工学的にはむしろより望ましい性質である．多くの場合に精度は真の値に対する絶対誤差の比で表されるので，値自体が大きいところでは分解能が悪くなっても構わない．むしろ，FFT等では，低い周波数領域で十分な周波数分解能を確保するため，高周波領域で過剰に細かく計算していることになる．ウェーブレット変換での時間分解能は，周波数分解能の逆で周波数が低いところでは分解能が低く，周波数高いところでは分解能が高くなる．すなわち，FFTと同様に時間分解と周波数分解の積が一定であるという性質を持っている．

ウェーブレット変換を用いる場合は，どのマザーウェーブレットを用いるかを選択せねばならない．マザーウェーブレットの種類としては代表的なものだけでも「Morletウェーブレット」,「フレンチハット」,「メキシカンハット」,「Daubechiesウェーブレット」,「Symletウェーブレット」,「Gabor関数」等，今では無数に考案されている．当然，どのマザーウェーブレットを用いるかで結果には大きな違いが発生する．中でも「Daubechies」,「Symlet」ウェーブレットは直交ウェーブレットなので，直交関数展開が可能であり画像データ圧縮等に用いられる．

ウェーブレット解析をスペクトル解析に用いる場合には，多くの場合にGabor関数が採用される．これは，比較的，フーリエ変換の周波数スペクトルに物理的に対応させやすい結果が得られるためである．Gabor関数 $\phi_G(t)$ は，

$$\phi_G(\mathrm{t}) = \frac{1}{2\sqrt{\pi\sigma}}\ \exp\left(-\frac{t^2}{\sigma^2}\right)\exp(-\mathrm{j}t) \tag{10}$$

で表され，包絡線が指数関数的に減衰する複素正弦波である[11]．ここで，σ はあらかじめ与えることが必要なパラメータで，σ の値が大きいほど周波数分解能が上がり，小さいほど時間分解能が上がる．したがって，Gabor関数を用いる場合は解析データに対応して σ の調整が欠かせない．いくつかの σ の値に対するGabor関数の形状をFig. 8に，Gabor関数を使ってFig. 1のチャープ信号をウェーブレット解析した結果をFig. 9に示す．周波数分解能に周波数依存性があるのがよくわかる．

多くのマザーウェーブレットは $-\infty$ から ∞ の時刻の範囲で定義されている．したがって，まともに(9)式を使って相関関数を計算すると膨大な計算時間が必要となる．そのため，ウェーブレット変換は多大な計算時間を要するとの誤解が生じている．しかし，多くのマザーウェーブレットは，(10)式に示されるように $t=0$ に近い所でのみ大きな値を持ち，それ以外ではほとんど0である．したがって，結果に影響が出ないことを確認しながら適当な所で演算を打ち切ってやれば演算時間はそれほどFFTと大差はない．さらに，一般的にウェーブレット変換の演算を高速化する高速ウェーブレット変換アル

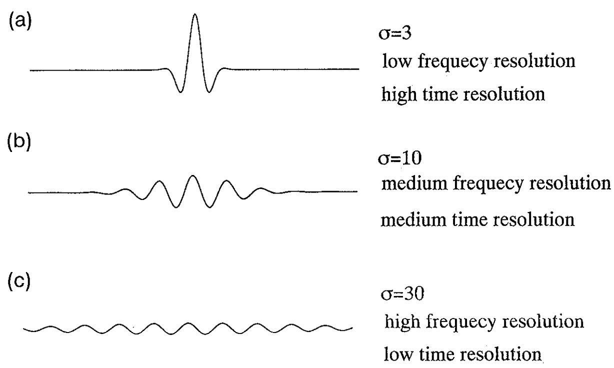

Fig. 8　Real parts of the Gabor wavelets, (a) σ = 3, (b) σ = 10, and (c) σ = 30.

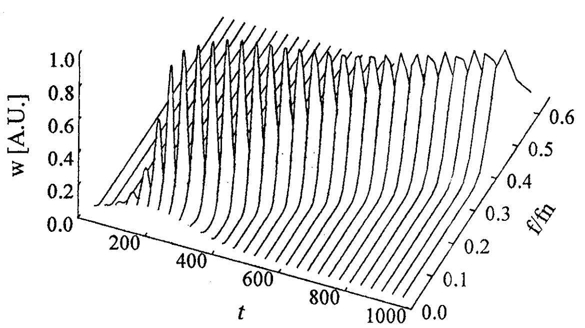

Fig. 9　A wavelet transform of the chirp signal of Fig. 1.

ゴリズムも提案されている[14]．ウェーブレット変換のプログラムも多くの文献にサンプルプログラムが掲載されているので，それらを参考にされたい[10-14]．

ウェーブレット変換は，時間・周波数分解能の点ではウィグナー分布に劣る．また，どのマザーウェーブレットを使うか選ぶ必要があること，そして求められたウェーブレット変換の結果とスペクトルをどう物理的に結びつけるかという点で若干扱いにくい面を持っている．しかし，ウィグナー分布のクロス項のような大きな欠点がないので，その点では使いやすい非定常スペクトル解析法といえる．ウェーブレットは，数学・理学・工学等の分野で注目されており，基礎および応用に関する多くの研究が現在進展している．プラズマ理工学の分野でも，乱流波動のスペクトル解析や[19]，反射計における密度分布再構成等に応用され[20]，最近ではウェーブレット変換を用いた解析結果も散見されるようになってきた．

4.5　まとめ

代表的な非定常スペクトル解析法であるウィグナー分布とウェーブレット変換を紹介した．いずれも，FFTに比べて得失を持っているので，対象が定常信号と近似できる場合はFFTが機械的に扱えて問題も少ない．しかし，非定常信号の場合にはFFTでは正しい結果が得られない場合もある．そのような場合の中でもそれほど高い時間・周波数分解能が必要ではないスペクトル解析の場合は，大きな欠点のないウェーブレット変換を用いるのが適当である．時間・周波数分解能が特に重要なスペクトル解析の場合には，欠点であるクロス項の問題が顕在化しないように工夫してウィグナー分布も試してみる価値がある．このように，どちらの非定常スペクトル解析法も一般的に用い得るスペクトル解析法ではないが，特別な場合に大いに威力を発揮し物理的理解に資するデータを提供してくれるスペクトル解析法である．

参考文献

[1] E. Wigner, Phys. Rev. **40**, 749 (1932).
[2] T.A.C.M. Claasen and W.F.G. Mecklenbrauker, Philips J. Res. **35**, 217 (1980).
[3] T.A.C.M. Claasen and W.F.G. Mecklenbrauker, Philips J. Res. **35**, 276 (1980).
[4] T.A.C.M. Claasen and W.F.G. Mecklenbrauker, Philips J. Res. **35**, 372 (1980).
[5] 河浦淳一，鈴木英男，小野隆彦：日経エレクトロニクス **423**, 163 (1987).
[6] 犬塚　博，永井孝佳，築島隆繁：核融合研究 **60**, 217 (1988).
[7] 南慶一郎，河田　聡：インターフェース **1**, 110 (1994).
[8] J. Morlet, G. Arens, I. Fourgeou and D. Giard, Geophysics **47**, 203 (1982).
[9] C.K. Chui：ウェーブレット入門（東京電機大学出版局，東京，1993）.
[10] D.E. Newland, *An Introduction to Random Vibrations, Spectral & Wavelet Analysis 3rd* Ed., (Longman Scientific & Technical, New York, 1993).
[11] 榊原　進：ウェーブレットビギナーズガイド（東京電気大学出版局，東京，1995）.
[12] 安部素嗣，安藤　繁：インターフェース **2**, 137 (1995).
[13] 貴家仁志：よくわかるディジタル画像処理（ＣＱ出版社，東京，1996）.
[14] 芦野隆一，山本鎮男：ウェーブレット解析－誕生・発展・応用－（共立出版，東京，1997）.
[15] R.K. Young,：ウェーブレット　信号処理とシステム推定への応用（トッパン，東京，1997）.
[16] J.C. Andieux, M.R. Feix, G. Mourgues, P. Bertrand, B. Izzar and V.T. Nguyen, IEEE Trans. ASSP, ASSP-35, 764 (1987).
[17] M. Sun, C.C. Li, L.N. Sakhar and R.J. Sclabassi, *Proc. IEEE 1989 Conf. ASSP* (Glasgow,1989) p.2230.
[18] H. Inuzuka, T. Ishiguro and S. Mizuno, *Proc. IEEE 1994 Conf. IMTC*, Hamamatsu (1994) **2**, p.717.
[19] B.Ph. van Milligen, C. Hidalgo and E. Sanchez, Phys. Rev. Lett. **74**, 395 (1995).
[20] L.G. Bruskin, A. Mase, T. Tokugawa, N. Oyama, A. Itakura and T. Tamano, Rev. Sci. Instrum. **69**, 425 (1998).