

稼働電気機器の消費電流波形のウェーブレット解析

葛目 幸一*

Residential Electricity Consumption Current Waveform Analysis by Wavelet Transform

Koichi Kuzume*

Abstract

To realize the low carbon emission society, the importance of the renewable electric generator and power conservation is recognized. The EMS (Energy Management System) which enables to actively manage both the power demand and consumption is focused. It is required to disaggregation of individual electric appliances and to estimate the amount of power consumption. Now we are devoting to research on the development of a new algorithm to estimate the working appliances by using their power current data. In this research the wavelet packet transform is used for analyzing power consumption current. There are several kinds of wavelet transform methods, such as discrete wavelet and dyadic wavelet transform. The dependence of the wavelet methods and cost functions on effective representation of the power consumption current signal is surveyed.

1. はじめに

地球温暖化防止の観点から、再生可能エネルギーの利用や節電の重要性が認識され、有限のエネルギーを需給バランスをとりながら有効に供給するEMS (Energy Management System) が注目されている。EMSでは、エネルギーの消費構造を把握し予測することができれば、電気機器の計画的な運転の立案が可能となるとともに、待機電力などの無駄なエネルギー消費を抽出する上でも非常に重要である。エネルギーの消費構造を把握する手段として、各々の電気機器の消費電流を計測し、稼働状況を推定する研究が行われている。稼働中の電気機器の消費電流をセンシングする方法として、電気機器ごとにセンサを設置するマルチセンシング法とスマートメータなど分電盤の電流のみを計測し、消費電流源の識別を行うシングルセンシング法がある。マルチセンシング法の欠点は、機器ごとにセンサデバイスの設置が必要で、設置に手間やコストがかかる等の問題があり、シングルセンシング法の方が望ましい。

シングルセンシング法において、分電盤での消費電流データをもとに電気機器の稼働状況を把握する先行研究として、実効値電流から自己組織化

マップ (SOM) を用いて識別する方法や消費電流波形の実効値や平均値、最大値等の特徴パラメータを識別に利用する方法が提案されている[1-3]。しかし、識別精度が低かったり、識別可能な機器に制約がある等の問題があり、未だ実用化には至っていない。

上記の背景をふまえ、現在、信号識別能力に優れた「学習能力を持つウェーブレットパケット」を提案し、「消費電流波形から稼働機器の識別と消費電力量を推定するシステム」を開発する研究を行っている。(図1参照)

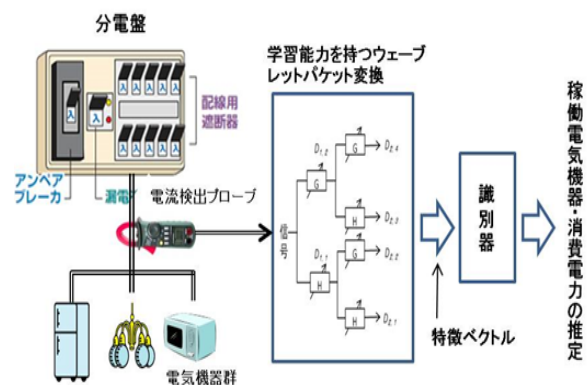


図1 識別推定システムの概略図

* (所属) 情報工学科

稼働電気機器の消費電流波形のウェーブレット解析
(葛目)

近年、信号の変化を検出する方法として、ウェーブレット変換が注目されている。ウェーブレット変換を用いることで、信号がどの時刻で、どの程度の高周波成分や低周波成分を含んでいるかを知ることができる。これにより、時間的に突発的、非定常的に変化する信号に対して周波数スペクトル解析が可能となる。ウェーブレット変換は、低周波フィルタ h と高周波フィルタ g とからなる直交フィルタにより、信号の帯域を2分割する変換である。しかしながら、低周波成分のみを分解する通常の離散ウェーブレット変換では周波数分解能が低く、またシフト普遍性を持たない等の欠点がある。そこで、*Wickerhauser* らは低周波成分のみならず高周波成分も分解するシフト不変性を持つウェーブレットパケット(WP)変換を提案し、指紋データの圧縮や雑音除去、ベアリングの損傷検出などに応用した[4]。しかし、使用するウェーブレットは、*Haar*, *Coifman*, *Daubechies* 等の既存のウェーブレットをもとに、信号に適応して最適基底ウェーブレットを組み立てる手法で、必ずしも信号の特徴を反映したウェーブレットになっていない。

本研究では、消費電流データの特徴を明らかにすることを目的に、電気ポットの消費電流波形を電力テスターで測定し、ウェーブレットパケット解析をおこなった。解析では、ダウンサンプリング型のウェーブレットパケット変換と *Dyadic* 型のウェーブレットパケット変換により、ウェーブレット変換係数のエネルギー分布やウェーブレット最良基底のツリー構造について、ウェーブレット関数の依存性の検討を行なった。

第2章では、ウェーブレット変換の概要、第3章では、電力テスターによる消費電流計測法、第4章では、実験結果と考察、結論・今後の課題を第5章で述べる。なお、本研究では、ウェーブレット変換等の全ての数値計算は、*Wolfram Research* 社の *Mathematica Ver. 9.0* を用いて行なった。

2. ウェーブレット変換

2.1 離散ウェーブレット変換

一般に2進離散ウェーブレット変換の分解公式は(1)式、(2)式、逆変換公式は(3)式で与えられる。ただし、 C_0 は原信号、 C_j は j 回ウェーブレット分解したときの低周波成分、 d_j は j 回ウェーブレット分解したときの高周波成分を表している。離散ウェーブレット変換は、低周波成分の信号に低域通過フィルタ h と高域通過フィルタ g のコンボリュー

ションをとりファクタ2のダウンサンプリングを行うことで計算できる[5]。

① ウェーブレット変換公式

$$c_j[n] = \sum_k c_{j-1}[k]h[k-2n]. \quad (1)$$

$$d_j[n] = \sum_k c_{j-1}[k]g[k-2n]. \quad (2)$$

② ウェーブレット逆変換公式

$$c_j[n] = \frac{1}{2} \left(\sum_l c_{j-1}[l]h[n-2l] + \sum_l d_{j-1}[l]g[n-2l] \right) \quad (3)$$

2.2 Dyadic ウェーブレット変換 (Stationary Wavelet 変換)

Dyadic ウェーブレット変換は、前述の離散ウェーブレット変換と基本的には同様の計算を行うが、ダウンサンプリング処理を行わないためシステムは時不変 (time invariant) となり、信号の特徴をより高精度に捉えることが期待できる。

① Dyadic ウェーブレット変換公式

$$c_j[n] = \sum_k c_{j-1}[n+2^j k]h[k] \quad (4)$$

$$d_j[n] = \sum_k c_{j-1}[n+2^j k]g[k-2n] \quad (5)$$

② Dyadic ウェーブレット逆変換公式

$$c_j[n] = \frac{1}{2} \left(\sum_k c_{j-1}[k]h[n+2^j k] + \sum_k d_{j-1}[k]g[n2^j k] \right) \quad (6)$$

2.3 離散ウェーブレットパケット変換

通常の離散ウェーブレット変換は、低周波分解フィルタで分解された低周波成分を1/2にダウンサンプリングしたのち、さらに高周波分解フィルタと低周波分解フィルタで繰り返しフィルタリングする処理である。それゆえ周波数解析が、オクターブ解析となり、信号の周波数解析能力が十分に得られない。そこで、*Wickerhauser* らは、低周波成分に加え高周波成分も分解する離散ウェーブレットパケット変換を提案した。図2(a)に、解像度3のウェーブレット

パケット変換のツリー構造を示す。図のシャドウイングされたフィルタ処理が、通常の離散ウェーブレット変換で、図全体が離散ウェーブレットパケット変換を示している。図中の矢印は、ダウンサンプリング処理を表す。また、右端の0~7の数値は、周波数帯域に対応し、0 {0 0 0} は、最も低い周波数帯域 ($0 \sim F_s/16$ [Hz]) , 7 {1 1 1} は最も高い周波数帯域 ($7F_s/16 \sim F_s/2$ [Hz]) を示す。ただし、 F_s はシステムのサンプリング周波数である。この場合、信号は8つの周波数帯域に分解される。正規直交分解フィルタを使用すると原信号のエネルギーノルムとウェーブレット展開係数のノルムが等しくなる。

2. 4 Dyadic ウェーブレットパケット変換

Dyadic ウェーブレットパケット変換は、Stationary ウェーブレットパケット変換とも呼ばれ、離散ウェーブレットパケット変換のように分解された信号成分をダウンサンプリングすることなく、分解フィルタ g, h を用いて繰り返し分解する処理である。図2に、Dyadic ウェーブレット変換と Dyadic ウェーブレットパケット変換のツリー構造を示す。シャドウされた変換プロセスが、Dyadic ウェーブレット変換である。Dyadic ウェーブレット変換は、ダウンサンプリング処理を含まないため、原信号のシフトに対して不変性を持ち、信号の特徴をより詳細に捉えることができる特徴を持つ。一方、エネルギーノルムは保存されない。

3. 消費電流波形の計測

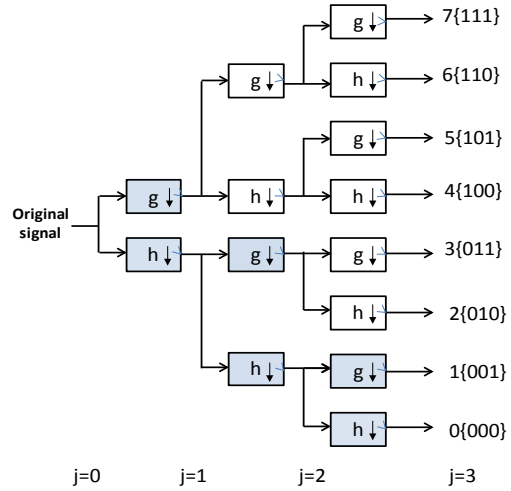
消費電流の計測には、Hioki 社製の電力品質計測装置(クランプオンパワーテスター3169)を用いた。サンプリング周期は、10秒、計測時間は約3時間である。図3に計測時の様子を示す。消費電流は、付属のクランプ型電流センサを用いたが、使用した電力品質テスターは電力の品質評価に用いる主な指標である、電圧、電流、皮相電力、力率、周波数精度などを計測し、記憶する機能も持っている。なお、研究では、保温機能つき電気ポットの消費電流を測定し、図4に測定結果を示す。消費電流波形の変化からわかるように、電気ポットは保温時には、短い周期で電源の ON/OFF を繰り返していることがわかる。

4. 実験結果

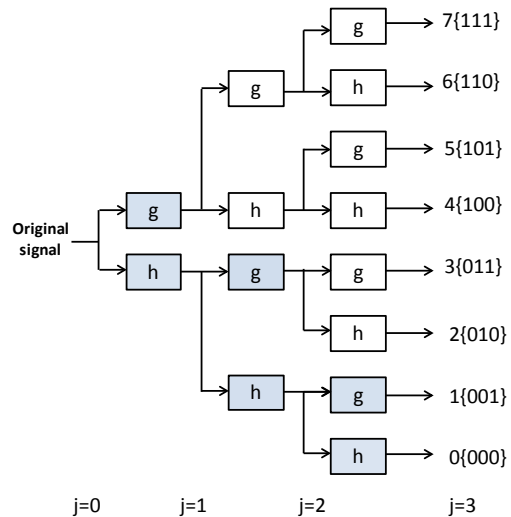
4. 1 ウェーブレット解析のパラメータ

信号のウェーブレット解析を行う場合、様々な選択肢(パラメータ)があり、応用目的に応じてパラメ

ータを選択する必要がある。本研究では、稼働電気機器の消費電流波形の特徴を効果的に捉えるためのパラメータを求めるために、次に示す項目について検討した。



(a) Discrete wavelet packet 変換のツリー構造



(b) Dyadic wavelet packet 変換ツリー構造

図2 Dyadic ウェーブレット変換と Dyadic ウェーブレットパケット変換のツリー構造

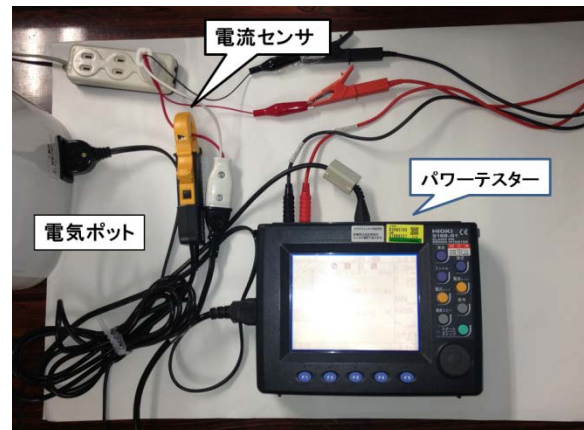


図3 消費電流の計測の様子

稼働電気機器の消費電流波形のウェーブレット解析
(葛目)

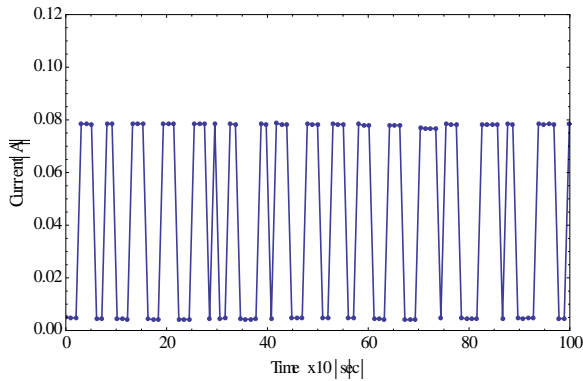


図4 保温機能付き電気ポットの消費電流波形の測定結果の一例

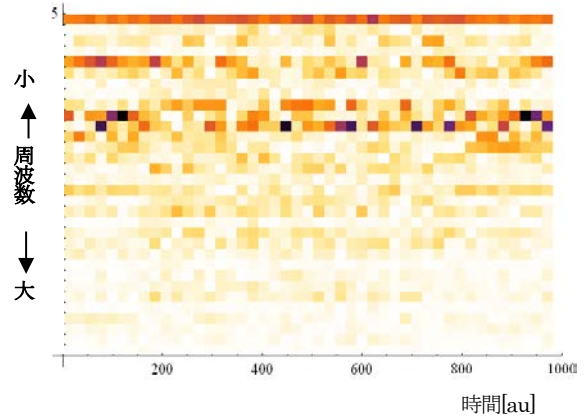


図6 離散 Wavelet Scalogram (Biorthogonal Spline Wavelet [3,7])

- ① ウェーブレット変換の種類
 - 離散ウェーブレットパッケージ変換
 - Dyadic ウェーブレットパッケージ変換
- ② ウェーブレット関数の種類
 - Haar, Daubechies Family のウェーブレット
 - Biorthogonal Spline Family のウェーブレット
- ③ 評価指標
 - ウェーブレットパッケージ変換係数のエネルギー比の分布
 - ウェーブレット Best Basis により最適分解ツリー
 - 評価関数 (Shannon のエントロピー関数と Norm1)

4. 2 離散ウェーブレット変換

図5に電気ポットの消費電流波形(図4)に対して離散ウェーブレット変換したときの各解像度におけるウェーブレット変換係数の計算結果を示す。

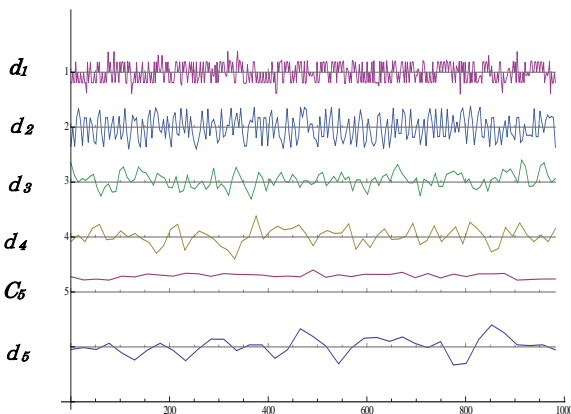


図5 離散ウェーブレット変換によるウェーブレット変換係数の計算結果の一例

4. 3 ウェーブレットパッケージ変換係数のエネルギー分布

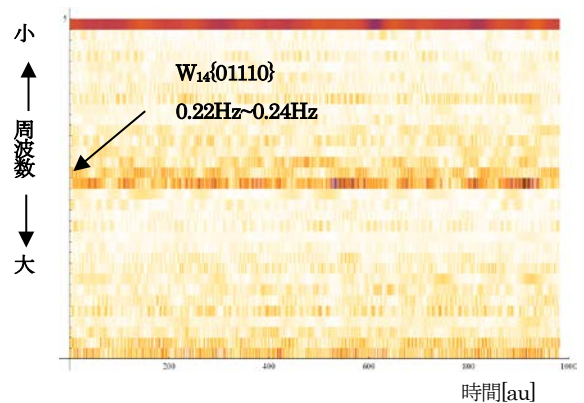


図7 Dyadic Wavelet Scalogram (Biorthogonal Spline Wavelet[3,7])

図6, 図7はそれぞれ離散ウェーブレットパッケージ変換, Dyadic ウェーブレットパッケージ変換のスカログラムである。ウェーブレットスカログラムとは、ウェーブレット変換係数の2乗値の分布を、時間-周波数の平面上に2次元のカラーイメージで表示した図である。縦軸の下方で周波数が高くなる。解析結果からわかるように、電気ポットの消費電流波形は、全測定時間にわたり約0.22~0.24 [Hz] の周波数成分を多く含んでいることがわかる。

図8, 図10に Biorthogonal Spline family の離散ウェーブレットパッケージ変換の解像度5 ($j=5$) における変換係数のエネルギー分布の計算結果を示す。この図からわかるように $W_{11} = 11 \{01110\}$ で大きな値となり、図7の結果と一致する。一方、Daubechies Family によるウェーブレット変換係数のエネルギーの分布は W_{11} にピークはあるものの、その値は小さい(図9, 図11参照)。以上のことより、解析に使用するウェーブレット関数の種類によりエネルギー分布が大きく異なることが明らかとなった。

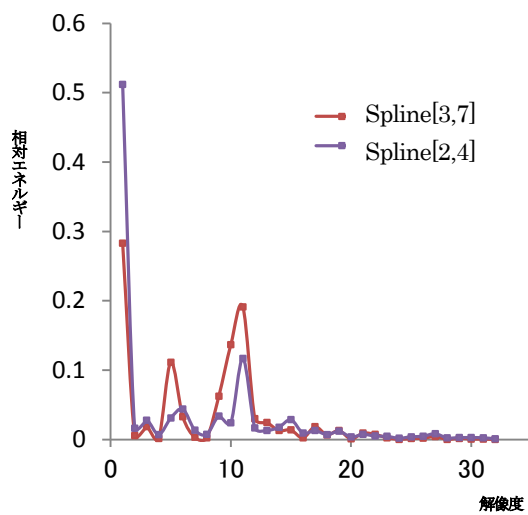


図 8 離散ウェーブレットパケット変換係数のエネルギー分布 (Discrete spline wavelet family)

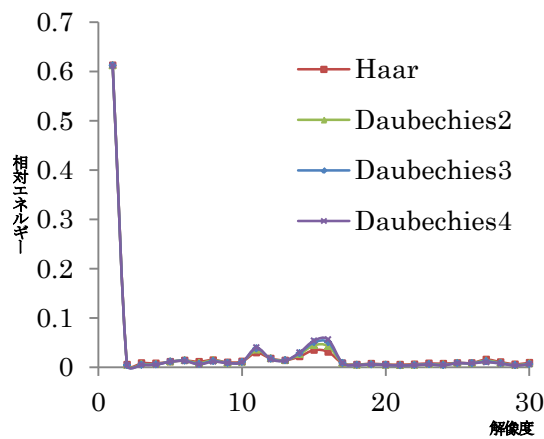


図 9 離散ウェーブレットパケット変換係数のエネルギー分布 (Discrete Daubechies wavelet family)

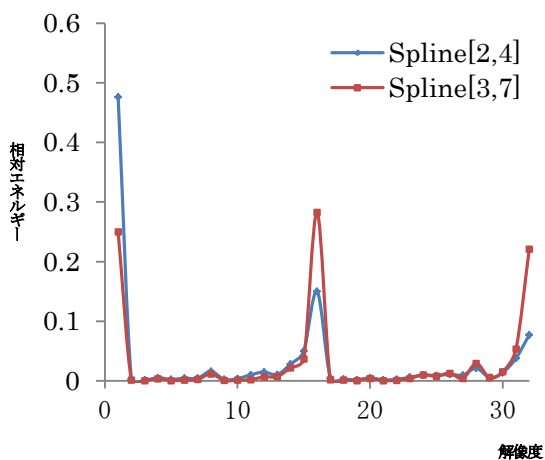


図 10 Spline Dyadic Wavelet packet 変換によるエネルギー分析結果

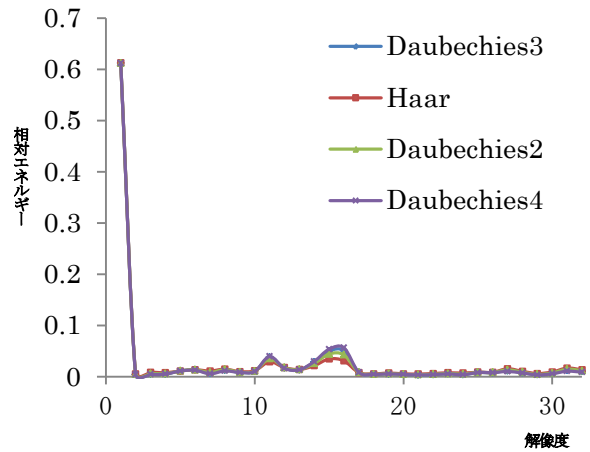


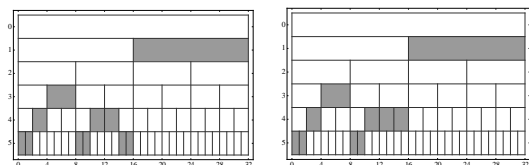
図 11 Daubechies family Dyadic Wavelet Packet 変換によるエネルギー分析結果

4. 4 ウェーブレットパケット変換の最適基底

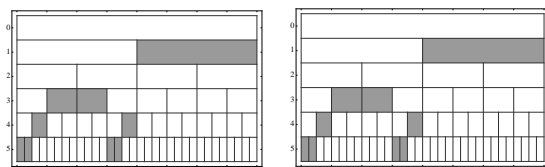
信号の特徴を効率よく表す指標として、与えられたコスト (評価関数) を最小にする最適ウェーブレット基底の集合がある. この考え方は、ウェーブレット変換を利用したデータ圧縮に広く応用されている. 図 1 2 にコスト関数として、下式の *Shannon Entropy* (7) 式と *Norm 1* (8) 式を採用し、ウェーブレットの種類を変えた時の最適基底を示す. 最適基底はコスト関数とウェーブレットに依存することがわかる.

$$Cost_{shannon} = -\sum_n d[n]^2 \log(d[n]^2) \quad (7)$$

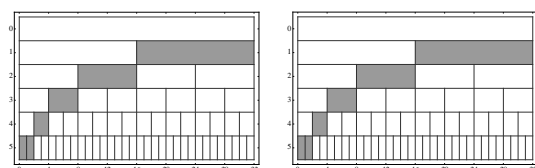
$$Cost_{norm} = \sum_n |d[n]| \quad (8)$$



Shannon Entropy Norm 1
(a) Haar Wavelet Packet



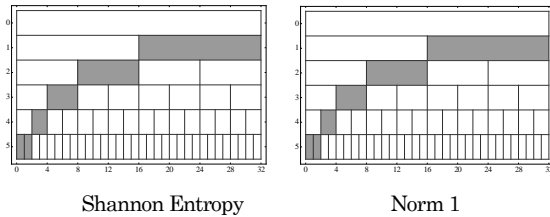
Shannon Entropy Norm 1
(b) Daubechies2 wavelet packet



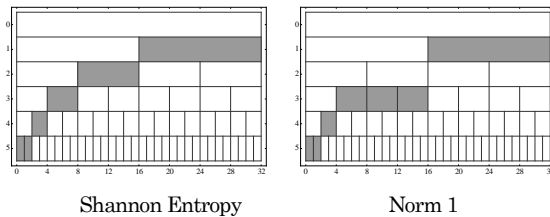
Shannon Entropy Norm 1

稼働電気機器の消費電流波形のウェーブレット解析
(葛目)

(c) Daubechies3 wavelet packet



(d) Daubechies4 wavelet packet



(e) Biorthogonal Spline wavelet[2,4] packet

図 1 2 ウェーブレットパケット変換の評価関数を最小にする最適ウェーブレット基底

5. 結論と今後の課題

EMS の実現のため、稼働中の電気機器の識別と消費電力量を分電盤の電流波形から高精度に推定することを目的にウェーブレットパケット変換の応用の可能性について検討した。まず、保温機能付き電気ポットの消費電流波形を計測し、7種のウェーブレット関数を用いて、離散ウェーブレットパケット変換と *Dyadic* ウェーブレットパケット変換を行い、信号の特徴抽出を周波数解析により検討した。信号の特徴抽出に、ウェーブレット変換係数のエネルギー分布を用いた場合、*Biorthogonal Spline* ウェーブレット[3, 7]が最も有効であった。

次にウェーブレットパケット変換で2種類のコスト関数を定義し、コストを最小にするウェーブレット最良基底ツリーを計算により求めた。最良基底ツリーもコスト関数とウェーブレット関数に大きく依存することが明らかになった。

今後は、様々な電気機器個別の消費電流データについて、ウェーブレットパケット解析し、データの蓄積を行い、消費電流データの特徴に適応したリフティングウェーブレットの設計法の検討を行う予定である。

参考文献

- [1] 岩船他: 住宅用分電電流データを用いた機器稼働状況推定手法, 電気学会論文誌B, pp. 542-549, Vol. 131 No. 7, 2011
- [2] 岩船由美子, 荻本和彦他: 分電盤計測に基づく

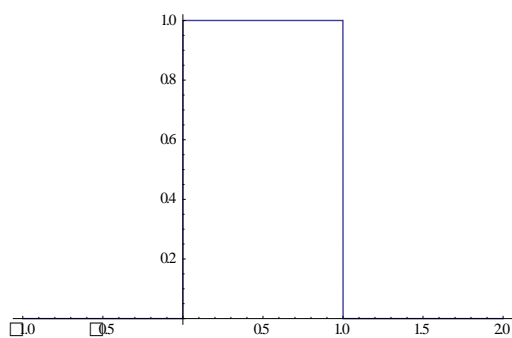
住宅用電力消費パターン分析手法, 電気学会論文誌C, pp. 1086-1093, Vol. 133 No. 5, 2013.

[3] Markus Weiss, Adrian Helfenstein 他: Leveraging smart meter data to recognize home appliances, PP.190-197, The proc. of IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications, Lugano, March (2012) .

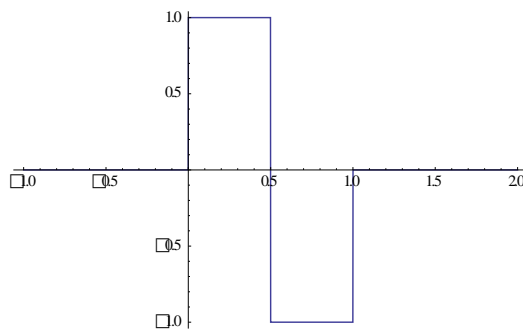
[4] Wickerhauser 他: Entropy-Based algorithms for best basis selection, pp.713-718, IEEE Transaction on Information Theory, Vol.38.No.2, March, (1992)

[5] S.Sakakibara: Beginner's guide of Wavelet", Tokyo Denki University Press (1995) (in Japanese)
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 (1995).

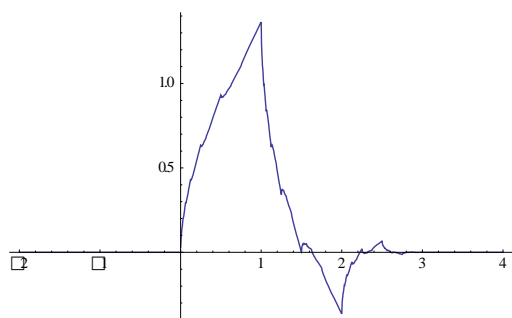
付録 本研究の解析に用いた Wavelet



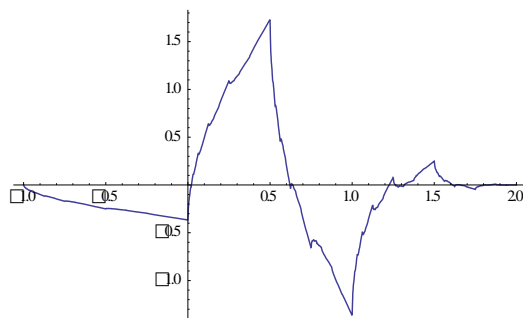
Haar wavelet scaling function



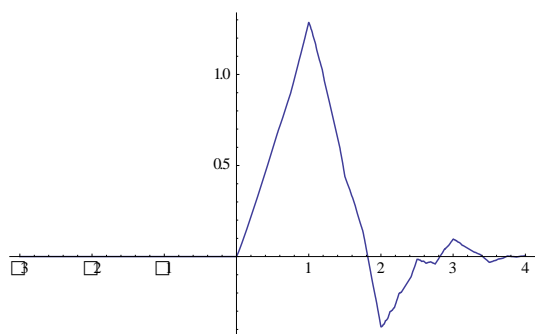
Haar wavelet function



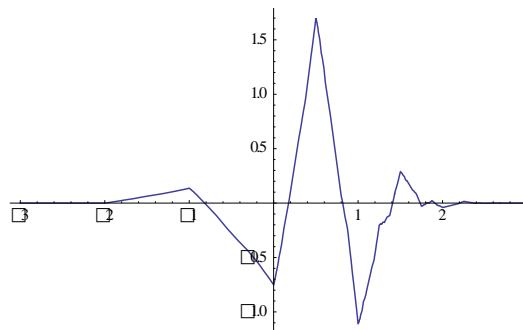
Daubechies-2 scaling function



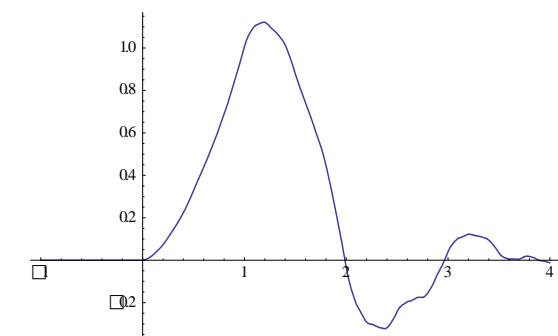
Daubechies-2 wavelet function



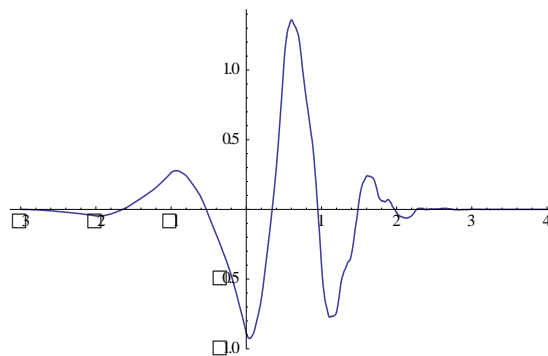
Daubechies-3 scaling function



Daubechies-3 wavelet function

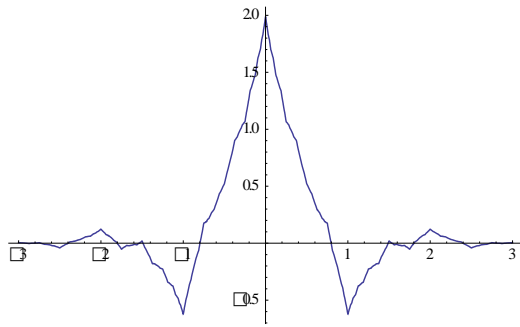


Daubechies-4 scaling function

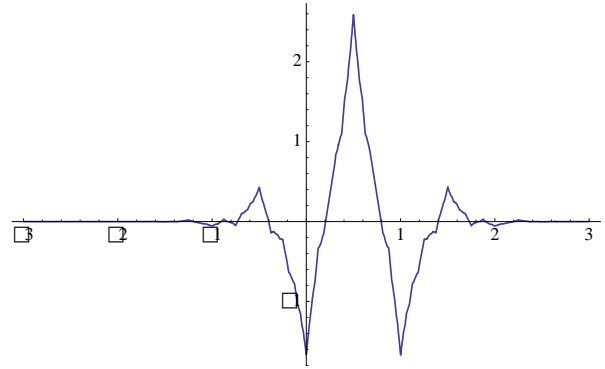


Daubechies-4 wavelet function

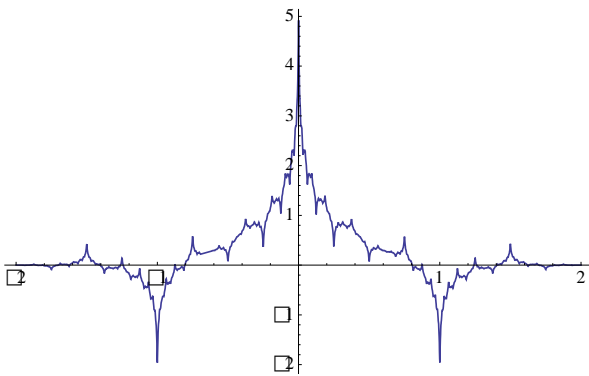
稼働電気機器の消費電流波形のウェーブレット解析
(葛目)



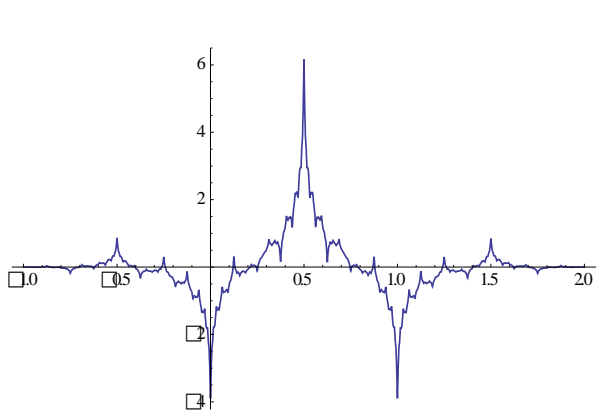
Biorthogonal Spline [2,4]scaling function



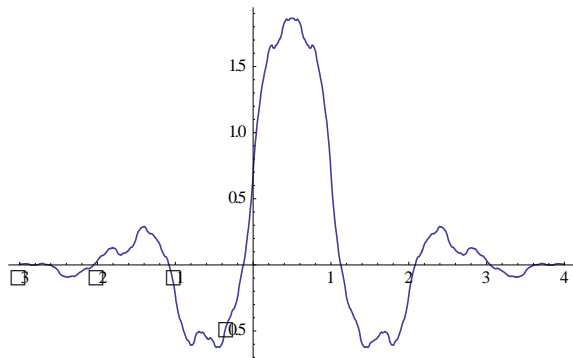
Biorthogonal Spline [2,4]wavelet function



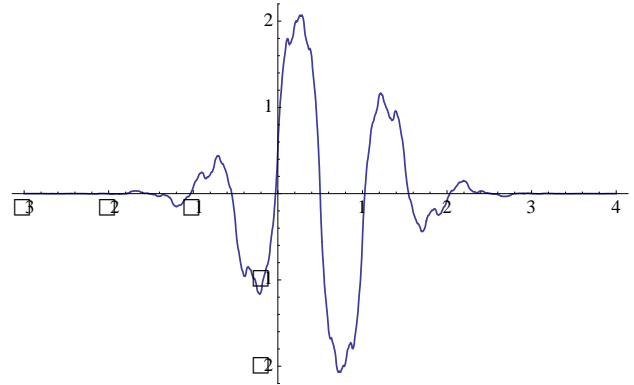
Biorthogonal Spline [2,2]scaling function



Biorthogonal Spline [2,2]wavelet function



Biorthogonal Spline [3,7]scaling function



Biorthogonal Spline [3,7]wavelet function