ウェーブレット変換によるCT型濃度計の 高精度化について

On the Increase of Resolution of CT-Type Concentration Meter
By Application of Wavelet Transform Technique

日野幹雄¹

By Mikio Hino

¹正会員 工博 中央大学総合政策学部(〒192-0393, 東京都八王子市東中野 742)

We first analyzed the reason of error accompanied in the CT-type laser concentration meter, to conclude that pulse-like error signals are caused by laser light which passes through the space between fine spray particles of tracer without decay. A technique is proposed to eliminate these error signals by application of wavelet transform.

The wavelet transform technique is further applied to the inverse problem of estimating the concentration field from the information of decay rates of laser light at receivers.

Key Words : CT-scan, 2D instantaneous concentration-meter, inverse problem, virtual load method, wavelet

1. はじめに

変動現象の時間一周波数域での解析法であるウェーブレット解析は, 最近画像解析や信号処理への応用がすすんでいる^{1,2)}. 本論文ではウェーブレット解析をCT型濃度計の誤信号除去に利用した結果を報告する.

われわれが開発に取り組んでいるCT型濃度計は, レーザ光の放射源と検出部が高々あるいは二対で, それらを回転しないこと, ほぼ瞬時(100ms以内)に必要なデータを取得できること, そして安価であることを目標にしている³⁾. この点で, 医用CTスキャンとは違った難しさがある(日野, 1997³⁾; 日野, 佐藤 1998⁴⁾).

この測定機は, 原理的にはとくに難しいものではないが, 実用上かなりの困難さに遭遇した. それらは, 受光信号に重畳する誤差と, 複雑な行列逆行列演算に伴う数値計算誤差の拡大の可能性である.

もう一つのハード的な問題である高速スキャンについても解決を得たが, これについては別に報告した(日野・佐藤・吉田・村本 1999⁵⁾).

本論文では, われわれが開発に取り組んでいるCT型濃度計の誤差の要因を分析し, その最大のものが, 受光信号に混じるパルス状の誤信

号であることを指摘した. この誤信号の除去に, ウェーブレット変換を応用し, 計測の精度を上げる方法について述べた. この際, 濃度場表現にはこれまでと同様に仮想荷重法を用いた.

さらに, 濃度場の表現にもウェーブレット変換を応用する方法について検討した. 連続的に変化する場の表現には, より少ないパラメータで場を表現できる点で仮想荷重法が有利であるが, 不連続的な場の表現にはウェーブレット法が適している.

2. 受光量パルスの測定誤差要因とその除去法 についての検討

濃度場を透過して receiver に入射するレーザー光の信号トレースには, 時折鋭いパルス状の信号が現れる(佐藤・吉田・村本・日野 投稿中, 図4⁶⁾). これは, 前報告⁴⁾で用いた噴霧器ジェットの場合には, 濃度場が微粒子によって形成されているので, 微粒子径がレーザー光の太さと同程度もしくはそれ以下の場合, もしくは微粒子濃度が低い場合に, レーザ光が微粒子間をあまり妨げられずに receiver に達するからである. これに対しては, 次のような除去法が考えられる.

(i)機械的除去法-1: 射出源においてレーザー光の幅を広げる方法. この方法は, 逆に計測の空間分解能

を低下させる。

(ii)機械的除去法-2: 数回の瞬間的計測の平均値を採る方法。この方法は計測の時間分解能の低下をもたらす。この平均化法は7)的にも可能である。

(iii)最小二乗法: 最も広く用いられている方法で、この研究でも使用してきた。

(iv)数値フィルター: 高周波数カットや低周波数カットなど標準的な手法を用いることも考えられる。

(v)ウェーブレット法: 最近、時間一周波数域での不規則信号の解析や図形処理・画像圧縮などに盛んに応用されている方法で、ある周波数以下の変動やあるレベル以下の信号を除くのに用いられる²⁾。

3. 受光量列ベクトルの誤信号除去へのウェーブレット変換の応用

(1) 1次元ウェーブレット変換による方法: 受光量列ベクトル $R (= \ln(I_0(x)/I(x)))$, I_0, I は光源および受光点での光強度) を離散系ウェーブレットで表す。

$$R = W_N \cdot S_1 \quad (1)$$

ここに、 $N=n \times m$, n は emitter 数, m は receiver 数。これに逆ウェーブレット変換を施せば、ウェーブレット・スペクトル S_1 は、次のようになる。

$$S_1 = W_N^T \cdot R \quad (2)$$

ここに、ウェーブレット W_N の逆行列 W_N^{-1} が W_N^T であること

$$W_N^{-1} = W_N^T \quad (3)$$

を利用している。

上式の S_1 に、次の(3)に述べる高周波数カットや高レベルカットの操作を行えば、雑音信号を除いたウェーブレット・スペクトル $S_{1\text{ clean}}$ が得られ、これを式(4)により逆変換すれば $R_{2\text{ clean}}$ となる。

$$R_{2\text{ clean}} = W_N \cdot S_{1\text{ clean}} \quad (4)$$

(2) 二次元ウェーブレット変換による方法: 一つの emitter からの receiver 列への信号は、(濃度場が連続的ならば) 連続的に変化する。受光量列ベクトル R は本来1つの emitter から receiver 列への信号列を行列として、emitter の数だけ並べた (n,m) 行列 $RR_{n,m}$ であるから、これに2次元ウェーブレット変換を施す方法もある。そこで、 $RR_{n,m}$ を2次元ウェーブレット変換により表現すると、

$$RR_{n,m} = W_n^T \cdot S_2 \cdot W_m \quad (5)$$

となる。この逆2次元ウェーブレット変換によりウェーブレット・スペクトル S_2 は

$$S_2 = W_n \cdot [R_{n,m}] \cdot W_m^T \quad (6)$$

そこで、 S_2 に対して次の(3)に述べる方法で高周波数カットや高レベルカットの操作を行えば、雑音信号を除いたウェーブレット・スペクトル $S_{2\text{ clean}}$ が得られ、これを式(7)により逆変換すれば $R_{2\text{ clean}}$ となる。

$$R_{2\text{ clean}} = W_n^T \cdot S_{2\text{ clean}} \cdot W_m \quad (7)$$

(3) ウェーブレット変換による誤信号の除去法

ウェーブレット手法を応用して、誤信号を除く方法はいくつか考えられる。というよりも、誤信号や雑音の性質によって方法を選定すべきであろう。

スパイク状の誤信号: スパイク状の誤信号の場合には、ウェーブレット・スペクトル $S_1(i)$ を expansion matrix (emat (i, j)) (詳しくは、斎藤 1996²⁾) に変換する。emat (i, j) は、 $x=i \Delta x$ 点での level 2^{**j} (order) の成分を表す。行列 emat (i, j (order)+1) において、ある点の近傍点より大きな成分を誤信号と考えて、emat (i, j) を零と置くか、ないしは小さな値に置き換えるなどの処理をする。

雑音: 誤信号がランダム・ノイズの場合は、emat (i, j) の値がある臨界値より小さい成分を零と置く。この方法は、ウェーブレットによる雑音除去の標準的な方法である。

4. 濃度場表現へのウェーブレット変換の導入

これまでの報告では、濃度場を二重フーリエ級数や仮想荷重法で表現し、フーリエ係数(k_x, k_y)や仮想荷重[w_p]を受光ベクトルから逆推定する方法を用いてきた。ここでは、濃度場の表現に直接ウェーブレット変換を用いる方法と仮想荷重法にウェーブレット変換を用いる方法について検討する(図-1)。

(1) 二次元ウェーブレット変換による濃度場表現: 濃度場の二次元ウェーブレット変換とその逆変換は、それぞれ次式で表される。

$$C = W_n^T \cdot S_2 \cdot W_m \quad (8)$$

$$S_2 = W_n \cdot C \cdot W_m^T \quad (9)$$

しかし、式(8), (9)の表現を濃度場の逆推定に用いることはできなく、次のように一次元ウェーブレット表現とする必要がある。

(2) 濃度場一次元ウェーブレット変換による表現: 濃度場を表す行列 $[C_{ij}]$ は列ベクトル $[C_i]$ として表現する必要がある。というのは、射出光は場の任意の点を通るので、濃度場から受光量ベクトルへ変換するには、 C を列ベクトル表現としなければならないから。ここに、記号に一つの添字 i の付いたもの (C_i など) は列ベクトルを、二つの添字 (i, j) を付したものは、行列を意味する。従って、受光量列ベクトル R_i は次のように書かれる。

$$R_i = A_r \cdot C_i \quad (10)$$

さてここで、列ベクトル C_i を離散ウェーブレット変換により次のように表す。

$$C_i = W_n^T \cdot S_{c,i} \quad (11)$$

図-1: 仮想荷重法とウェーブレット法におけるウェーブレット変換の応用

Suppression/removal of spike-type noise by WLT

図-2: 第一エミッターから受光誤信号除去 (スパイク型)

Suppression/removal of random noise by WLT

図-3: 第一エミッターから受光誤信号除去 (ランダム型)

ここに、 $N=n*m$ (n : emitter の数, m : receiver の数).
 なお、ここに用いたウェーブレット・スペクトル S_{ci} は先に用いた式(1)の S_i とは異なるので注意.

(a)受光データからウェーブレット・スペクトル S_{wi} を求める:
 式(10)に式(11)を代入すると,

$$R = A_r \cdot W_N^T \cdot S_{ci} \quad (12)$$

変換行列 A_r は非正方行列であることを考慮して、変形を行うと、ウェーブレット・スペクトル S_{ci} は次のように求まる。ただし、 R には 3(1)に述べた方法による R_{clean} を用いる。また、ウェーブレット W_N の逆行列は W_N^T であることを用いる。

$$S_{ci} = W_N \cdot [A_r^T \cdot A_r]^{-1} \cdot A_r^T \cdot R_{clean} \quad (13)$$

この S_{ci} について、必要があれば 3(1)と同様に高レベル高周波の成分を除去した後、式(11)より濃度場を推定する。

(b)ウェーブレットの応用には、(i)受光 R について式(4)により直接行うのと、(ii)誤信号を含んだままで式(13)により S_{ci} を求める段階で行うのと2つの用い方が考えられる (図-1)。

(3) 仮想荷重 w_p の表現にウェーブレット変換を用いる方法

仮想荷重法の利点は、推定パラメータの数が少なくてもすむこと、場を仮想の弾性平板の撓みに置き換えているので、実際の場をイメージし易いという点にある。

また、濃度場を $n * m$ の格子点で表すとき、ウェーブレット変換のパラメータは $n * m$ であるが、仮想荷重法ではパラメータ数をこれより少なくできる。

濃度場列ベクトルは、

$$C_i = G_c \cdot w_p \quad (14)$$

受光量ベクトル R は、

$$\begin{aligned} R_i &= A_r \cdot C_i \\ &= A_r \cdot G_c \cdot w_p \\ &= GG_r \cdot w_p \end{aligned} \quad (15)$$

ここで、 w_p をウェーブレット変換により

$$w_p = W_w^T \cdot S_w \quad (16)$$

と表せば、 S_w は式(15)、(16)より

$$S_w = W_w \cdot [GG_r^T \cdot GG_r]^{-1} \cdot [GG_r^T \cdot R] \quad (17)$$

受光量ベクトル R_i から式(17)によりウェーブレットスペクトル S_w を求め、これから高レベル高周波数の成分を除去し、式(16)により w_p を求める。その結果を式(14)に代入すれば濃度場 C を逆推定できる。

5. 適用例

前節に CT 型濃度計の様々な方法の誤差除去法と高精度化法について述べた。試作機は現在のところ emitter と receiver 数がそれぞれ 12 個である。離散ウェーブレット変換は2のべき乗個の変数について行われ

図-4: 濃度場 (直値) のコンター

るから実質8点である。これでは誤信号検出のための点数が少なく、実測データでは不十分であるので⁹⁾、上述の理論の適用性の検討はすべて receiver 数を 32 個としたシミュレーション・データについて行った。ウェーブレット関数には、Haar, Mexican hat, French hat, Daubechies, Meyer など様々の提案があるが、本論文の例では原理や処理の途中プロセスを (計算者、つまり著者が) 理解できるように最も単純な Haar 関数を用いた。実際のデータについて検討した結果、図-1に示した様々なウェーブレット変換の適用法のうち、受光量ベクトルの誤差信号を除く方法 (3(1)の方法) を利用すれば十分であることがわかった。

(1) ノイズの除去効果

図-2, 3はそれぞれ第一エミッターからの受光部 (32 点) に関するスパイク状ノイズとランダム・ノイズ型の誤信号に対するウェーブレットによる除去の効果を示している。除去効果を誇張するために、ノイズ・レベルは $R (= \log I_0 / \log I)$ にして 50% とかなり高くしてある。雑信号レベルがこの位高いと、式(15)の逆演算により誤差が増幅され、逆推定される仮想荷重 w_p は全くデタラメな値となる。図中、 R_{pure} は雑音なしの受光量、 R_{cl} はウェーブレットによる雑音除去処理後の受光量である。雑信号を完全に除去するわけには行かないが、いずれの場合もかなりの程度の除去はできている。とくにランダム・ノイズ型では除去効果が高い。

(2) 濃度場の逆推定

図-4は濃度場のシミュレーション・データ (真値)、図-5, 6

図-5 : 誤信号のない場合の逆推定濃度コンター

図-6 : 誤信号のない場合の逆推定誤差コンター

図-7 : 逆推定濃度コンター, 誤信号 (スパイク型)

図-8 : 逆推定誤差コンター, 誤信号 (スパイク型)

図-9 : 逆推定濃度コンター, 誤信号 (ランダム型)

図-10 : 逆推定誤差コンター, 誤信号 (ランダム型)

は仮想荷重法 (+最小二乗法)による逆推定の濃度コンターと推定誤差のコンター図である。受光量に誤差がないこの場合の逆推定は十分満足すべき結果を与えている。図-7.8と図-9.10はそれぞれスパイク状ノイズ(5%)とランダムノイズ(10%)が受光量に含まれる場合の逆推定濃度と誤差のコンター図である。スパイク状のノイズが混入する場合でも、ノイズがある程度除去されるとまずまずの結果を与えている。ランダムノイズの場合には逆推定の精度は十分である。

6. 結論

CT 型濃度計の解析演算系にウェーブレットを応用する方法について検討し、次の結論を得た。

(1) CT 型濃度計による計測誤差要因を分析し、それが逆推定のための複雑な行列演算によるよりは、レーザービームが細すぎることによるパルス状誤信号であることを述べ、ウェーブレットを応用した除去方法を検討した。

(パルス状誤信号の除去には、レーザービームを太くする、時間平均を採るといった機械的な方法もある。しかしこれらの方法では、空間分解能や時間分解能の低下というトレードオフ関係が生じる。)

(2) ウェーブレットの利用には、次の3つの方法が考えられる。

- ・受光量の誤信号の除去にウェーブレットを応用する。
- ・濃度場の表現に直接ウェーブレット変換を応用する。

・濃度場を仮想荷重法で表現し(この方がパラメータ数を減らすことが可能)、仮想荷重にウェーブレット変換を利用する。

(3) 受光誤信号の除去・圧縮に対してウェーブレット法を適用し、十分の効果があることを示した。

(4) 誤信号のある場合の濃度場の逆推定濃度と推定誤差について、十分であることを例により示した。

参考文献

- 1) 榊原進：ウェーブレット，ビギナーズガイド，東京電機大学出版局，1995。
- 2) 斎藤兆古：Mathematica によるウェーブレット変換，朝倉書店，1996。
- 3) 日野幹雄：CT 型レーザー土砂濃度計（土砂濃度 2.3 次元瞬間像の計測システム）の開発，平成 8 年度科研報告書，1997。
- 4) 日野幹雄・佐藤行成：CT 型レーザー濃度計—仮想荷重法の応用による逆問題の解，水工学論文集，第 42 巻，pp.565-570，1998。
- 5) 日野幹雄・佐藤行成・吉田偉和正・村本龍夫：高速スキャン CT 型 2D 瞬間レーザー濃度計の試作および実測例，第 54 回年次学術講演会講演概要集，第 II 部，1999。
- 6) 佐藤行成・吉田偉和正・村本龍夫・日野幹雄：高速スキャン CT 型 2 次元レーザー濃度計—試作装置および実測例—，水工学論文集，第 44 巻（発表予定），2000。

(1999.9.30 受付)