

CT型レーザー土砂濃度計の開発

Development of CT-type 2D-Sediment Concentration
Meter using Laser Light

日野 幹雄*

by Mikio Hino

Laser-beams or -sheets is applied as detection sources of a flow with solute or particle suspension. The concentration field is estimated inversely from the integrated information of the light intensity attenuation by means of CT-scan technology. The instrument can measure quasi-instantaneously and quasi-continuously a 2D concentration distribution of sediment.

The principle of the inverse estimation of concentration, the design of the instrument and a preliminary test result are described.

This research aims at (1) the practicability to handle in laboratories and fields, (2) a lower price at which common users can purchase easily, and (3) compactness without disturbing the flow field.

Key words : 2D concentration meter, sediment, CT-scan, computer tomography, inverse estimation

1. 序論

(a) 土砂濃度計の現状

土砂濃度の分布を求めることは、水理学、河川工学、海岸工学において重要な測定項目である。最近は、乱流輸送における乱流の coherent 運動の重要性が明らかにされて来ており、土砂輸送もこうした観点から研究することが必要であろう。しかし、現在は吸引式サンプラーによって平均濃度を求めるか、狭い間隙間の光量の減衰から一点での平均土砂濃度や高々その点の濃度変動を求めるのに止まっている。2次元のあるいは3次元の平均土砂濃度分布や土砂濃度分布の r. m. s. の分布は、このような測定を順次断面全体について行って求めているに過ぎない。

最近進歩の著しい種々の可視化法を利用すれば、土砂濃度の瞬間的平面分布を求めることも簡単であるように思われるが、少なくとも定量的測定例はないようである。

(b) 他分野での逆推定法、リモートセンシング法

空間的な状態を直接測定するためには、空間に多数のセンサーを配置しなければならない。しかし、これでは場を乱してしまうし、多数の計器を配置することは費用の点からも難しい。このような方法としては、ホットワイヤ流速計のような超小型の計器を名人芸的に10本位配置した例（孤田・半田 1993, 日野・孟 1993）がある程度である。流体中に多数のトレーサー粒子を放出し、粒子の微小時間間隔の間の変位から流速場を求めるPIVは、センサーであるトレーサー粒子が場を乱さない方法であるが、コンピューターの高

*正会員 工博 中央大学 総合政策学部 教授（〒192-03 東京都八王子市東中野 742）

性能化と解析技術の進歩することによって可能になった。流速や濃度などの空間的な分布を場を乱さずに求めるには、間接的な方法、非挿入形式（医学分野では非侵襲という語が使われているが、良い用語とは思われない）、リモートセンシング式あるいは逆推定問題として行うことが一般的である。

逆推定法として最初に現れた計測・検査法は、レーダーであろうか。そういう意味からすると、コウモリ（自らの発射音）やフクロウあるいはクジラ（海中音）、ガラガラヘビ（熱）など動物界には多くのリモート・センサーの例を見いだすことが出来る。これらについての簡単な review は日野他(1991)に記した。

逆推定法として最も早く普及し広く知られているのは、医学分野におけるX線-C T スキャンである。現在は、ポジトロンCTやMRI (Magnetic Resonance Imaging) など広く一般に利用されている。

気象分野では、レーダー、レーザ・レーダ（ライダー）による雲や浮遊物濃度の計測、超音波レーダーによる風速・気温分布の測定などすでに早くから実用化がなされている。海洋学の分野でも海中に超音波発信源を配置して、流速分布を求める装置（フローワイヤ）が実用化されている。

地震学の分野では、実際に起こる地震波の多数の観測所での記録から地球内部構造の探査が行われるようになり、地球内部構造についてプルーフ・モデルという新しい発見がなされた。

(c) 土砂濃度分布を求める際の問題点

以上のように、医学分野、気象分野をはじめ様々な分野において、逆推定法による計測法が実用化されているのに反し、土砂濃度分布については著者の知る限り「未だし」の状況にある。その理由を著者なりに列挙してみると次のようになる。

- ・ 水中計測である。
- ・ 大型の装置は無理。
- ・ 濃度場のコントラストが低く、分布が複雑。
- ・ 濃度場が刻々変化する。
- ・ 高価な投資に見合うだけの効用はない。

(d) 医用超音波探症機・金属探傷機の流用

近頃大抵の人が受診する人間ドックでは、超音波による内臓の検査が行われる。著者はかつて、発信器も小型で手頃である医用超音波探症機を使ってテスト・データを採ったことがある。金属材料内の探傷にも超音波法が用いられている。金属の場合は超音波の減衰が早く、この金属探傷用超音波計を借用してテストを行ったこともあった。しかし、いずれの場合もあまり良い結果は得られなかった。

2. 設計の方針

CTスキャンの方式の土砂濃度の瞬間的平面分布計を試作するに当たって、まず次の事項を方針とした。

- ・ 小型で取り扱いが容易である。
- ・ 研究者が購入しうる程度に廉価である。
- ・ 原理が簡単である。
- ・ 瞬時に測定ができる。
- ・ 計測機が流れの場を乱さない。

これらの条件を満たす source（探査波源）や機構について次に検討した。

(a) 探査波源

土砂濃度分布逆推定の source としては、X線、 γ 線、超音波、レーザー光などが考えられる。これらのうち、X線や γ 線あるいはNMRでは装置が大型・高価になるので考慮外とし、簡易でかつLDVや試作した密度計などで取り扱いに慣れているレーザー光を用いることにした。将来的には、レーザー方式で成功すれば、原理や機構はそのままにして超音波方式で製作することもできるし、超音波の場合には、レーザー光と違って、source から receiver までの伝達時間、あるいは反射体からの反射時間の計測も可能であるから、

レーザー光とは別の方式を使用することもできよう。

(b) 機構

逆推定の原理は、次節に述べるように source と receiver 間を探索線が通過する間に受ける媒質の性質・状態の集積情報を逆問題として解くものであるから、医用の X-C T のように一対ないし数対の source - receiver を対象空間の回りにぐるりと一回転させて、あらゆる方向からみた集積情報を採る法が有利である。反面この場合には source - receiver を回転させることで機構が複雑になること、もし機械的に回転させるとすると瞬時計測とはならないこと、およびこれらの機構が流れ場を乱すことなどを考えて、図-1 のように四辺形の相対する二辺の一方に M 個の source、対する辺に N 個の receiver を配置する方式とした。もし、集積情報を増したい場合には、他の相対する二辺上にも同じく source と receiver を配置すれば良いであろう（レーザー源やアームが流れ場を少々乱すがこれらは小さいのでその影響は少ない）。

Source 辺上には M 個のレーザー光の発光源を配置し、各 source からは直線状あるいは扇状にレーザーシート光を短時間発光させ、それを N 個の receiver で同時に受ける。扇状レーザーシートよりは、レーザー光を順次 receiver で受ける形式の方が、レーザー光の減衰が少ないこと、逆問題としてのデータ解析が容易であるという利点がある。反面、前者ではレーザー光の放射方向を順次切り替えるという問題が生じる。

このレーザー光源の発光を順次短時間で切り替えることにより、 $M \times N$ 個の集積データが得られる。この一回の走査はほぼ瞬時に行われる。

この一連の操作を繰り返すと時間的にも近接した濃度の平面分布の時間変化を求めることができる。

超音波を利用する場合： レーザー光を利用する場合には、数 10cm という短い距離間の光の伝達速度を計測することは難しい（最新の技術によれば、全く不可能ではないらしい）が、波源が超音波の場合には source と receiver 間の伝達時間を識別することができるから、この点を利用した計測法も考えられる。

超音波を利用する場合には、source (emitter) と receiver を同じ側に配置し、source から発信した超音波が反射物から反射してくる信号をとる方法もある。気象観測で用いられる超音波風速・温度計がそれである。

3. 計測の原理

実際には問題を複雑にするいくつかの要因が絡んでくるけれども、ここでは条件をできるだけ単純化して計測の原理を述べる。逆推定の原理は特に新しいものではなく、数学の初歩的問題である。

まず、2 次元的濃度場を二重フーリエ級数によって、式(1)のように表す。

$$C(x, y) = \iint f(K_x, K_y) \cdot \exp \{2\pi i (K_x x + K_y y)\} dK_x dK_y \quad (1a)$$

$$= \sum_{K_x, K_y} f(k_x, k_y) \cdot \exp \{2\pi i (k_x x / L_x + k_y y / L_y)\} \Delta K_x \Delta K_y \quad (1b)$$

ここに波数は離散化し、 $K_x = k_x \Delta K_x$ 、 $K_y = k_y \Delta K_y$ としている。ここに、 $\Delta K_x = 1/L_x$ 、 $\Delta K_y = 1/L_y$ 、 $L_x \cdot L_y$ は場を表す基本フーリエ波の波長、 $k_x \cdot k_y$ は $(\pm 0, 1, 2, \dots)$ の整数値である。

このような濃度場にレーザー光が入射するとき、その光量 (I) の減衰は次式によって表される。

$$dI / d\ell = -\lambda C(x, y) \cdot I \quad (2)$$

ここに、 ℓ : 光路の距離、 λ : 光量の減衰係数。実際には λ は土砂粒子の関数であるとか、粒子群中での光の反射・散乱などを考えなければならないが、まずは単純にグロスで考え、かつ一定とする。 ℓ と射出角 θ および距離 x の関係は、

$$\ell \cos \theta = x \quad (3)$$

式(2), (3)より次の関係が導かれる.

$$\ell n(I_0 / I(L, y)) = \int \lambda C(x, y) dx / \cos \theta \quad (4)$$

式の展開の便宜のために, 上式の左辺を λ で割ってこれを $i(y)$ を置き, さらに差分近似をすると

$$i(y) = \sum C(x, y) \Delta x / \cos \theta \quad (5)$$

となる. ここに,

$$i(y) = (1/\lambda) \ell n(I_0 / I(L, y)) \quad (6)$$

さて, 間隔 L だけ隔たった相対する二直線上に, それぞれ M 個の発射点 ($x=0, y=y_{1,m}, m=1, 2, \dots, M$) と N 個の受光点 ($x=L, y=y_{2,n}; n=1, 2, \dots, N$) を配置する. いま, 第 m 番目の発射点 ($0, y_{1,m}$) から受光点 ($L, y_{2,n}$) にレーザー光線が広がることなく平行光として照射された状態を考える. 式(5)に式(1)を代入して整理すると, 未知のフーリエ級数 $f(k_x, k_y)$ について次の連立一次方程式を得る. 簡単に書けば,

$$\mathbf{A} \cdot \mathbf{f} = \mathbf{i} \quad (7)$$

ここに, matrix $\mathbf{A}$ の要素は次式で表される.

$$A(k_x, k_y) = \int_0^L \exp(2\pi i k_x x / L_x) \cdot \exp(2\pi i k_y (y_1 + x \tan \theta) / L_y) dx / \cos \theta \quad (8)$$

ここに, $y_{1,m}$ は m 番目の発光源の y 座標, $y_{2,n}$ は n 番目の受光点の y 座標.

受光量 i は, 一つの発光点 $y_{1,m}$ に対してそれぞれの受光点 $y_{2,n}$ で受光量 $i(y_{1,m}, y_{2,n})$ が変わる. 集積情報である $M \times N$ 個の $i(y)$ が得られる ($M=m$ の最大個数, $N=n$ の最大個数). したがって, 土砂濃度場の二重フーリエ級数を $k_{x\max}, k_{y\max}$ で打ち切るとき,

$$(2k_{x\max}+1) \times (2k_{y\max}+1) \leq M \times N \quad (9)$$

であれば, 式(7)を解き, 逆問題の解としてフーリエ級数の係数 $f(k_x, k_y)$ が求まる.

4. 2次元濃度場の逆推定法のシミュレーション・データによる検討

(a) 検討方法

計算プログラムが理論通りに実行されるかどうかを, いきなり実際の濃度場から得られる実験データで検証するのは, 必ずしも適当ではない. 理論では(濃度)場は二重フーリエ級数で表されるとしているから, a)まず, そのテスト(プログラムのdebugを含めた)をする必要がある. b)次に, そのような場に集中光を透過させた場合の受光点での光強度のデータから, 場を逆推定しうるかをテストすることが必要である. この場合には様々な方向からのさまざまな波長のフーリエ成分波で表される濃度場を通過した受光強度(いわば場の積分情報)から, 成分波の波長と方向を検出できるか否かを調べなければならない. 後に具体的に示すように, 条件によっては解を求めるための連立一次方程式の行列がsingularとなって解が求まらない場合もある. 理論的には, 3で述べた通りなのだが, 実際に, どの程度の精度で可能なかをコンピュータ・シミュレーションで次のようにして調べる.

- (i) $C(x, y)$ をある関数形で与える.
- (ii) 式(1)の逆フーリエ変換により, フーリエ係数 $f(k_x, k_y)$ を求める.
- (iii) 式(4)(5)により, 光の減衰データを作る.
- (iv) 式(8)により行列 A を求める.

(v) 式(7)を解いて、フーリエ係数 $f(k_x, k_y)$ を求める。

(vi) この $f(k_x, k_y)$ を式(1)に代入し、与えた関数形と比較する。

(b) 検討により見出された問題点(光強度情報の独立性)と対策および解決 : 理論の妥当性の検討は、一番単純な一成分波の場合から始めた。発光源・受光点は最初共に x 軸に垂直に y 軸に平行に配置した。つまり、 $x_{2j} = x_2 = \text{一定}$ とした。しかし、成分波が y 軸方向 $f(0, k_y)$ の場合は逆推定がうまくできるが、成分波が x 軸方向 $f(k_x, 0)$ の場合には、行列 A が singular となりうまく逆推定ができないことがわかった。

この理由には、式(8)で $k_y = 0$ の場合に、積分項 $\{ \exp(-2\pi i k_x x_{2j}) - 1 \}$ の値は j の値のいかんにかかわらずすべて等しくなって、たとえ光路を斜めにして互いに別方向を採っても、情報の独立性が無くなるためである。

対策 : このような情報の独立性の喪失を避けるために、発光源列と受光点列とは平行でなくなるようにした。場合によっては、独立情報の量を増すために、 x 軸方向にも新たな発光源列、受光点列を配置しなくてはならないとも考えたが、実際にはその必要はなかった。

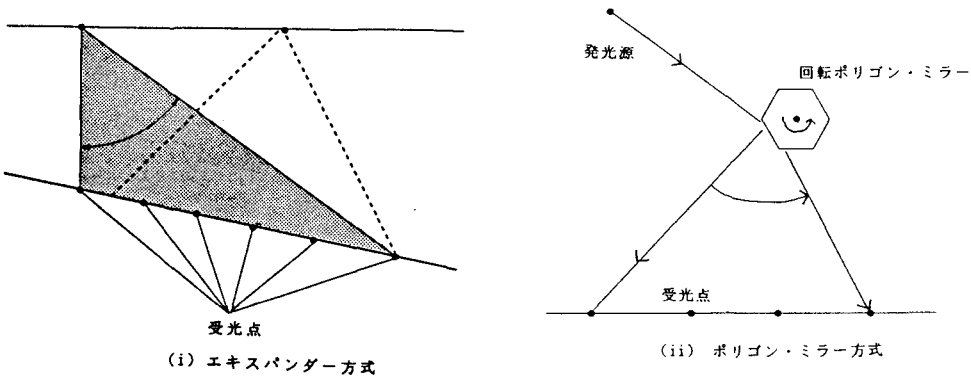


図-1 : レーザー線照射機構

(c) シミュレーション実験の結果 : 成分波を $1 \times 1, 2 \times 2, \dots$ と増やし、 9×9 までの種々のケースについて調べたが、成分波数を増やしても極めて精度良く成分波の強さ $f(k_x, k_y)$ および濃度場 $C(x_i, y_i)$ を逆推定できることをたしかめた。その一部の例を表に示す。ここに、フーリエ成分は、 $k_x = -4, \dots, 4, k_y = -4, \dots, 4, k_{x\max} \times k_{y\max} = 9 \times 9$ 、濃度 $C(I, J)$ を表す場の格子数 $I_{\max} \times J_{\max} = 17 \times 17$ 。この表には、まずシミュレーション場を作るために与えた波数番号 (k_x, k_y) $[=KX, KY]$ に対する真の成分波の強さ $f(k_x, k_y)$ $[=F]$ と逆推定値 $f(k_x, k_y)$ $[=F_{est}]$ を示し、次に、濃度場の真値(シミュレーションデータ) $C(x_i, y_i)$ $[C_{real}]$ と逆推定場 $C(x_i, y_i)$ $[C_{est}]$ の一部を示してある。

濃度場を与えた場合のシミュレーション・テスト : 上に述べたのは、濃度場の表す成分波の強さ $f(k_x, k_y)$ を与えて、二重フーリエ級数により場 $C(x, y)$ を作って、 $f(k_x, k_y)$ および $C(x, y)$ を正しく逆推定しうるかを検討した。

(注) 本論文の詳細については、文献 7) を参照されたい。なおこの文献には、二重フーリエ級数展開法の他に、著者が以前に提案した仮想荷重法の応用についても述べられている。弾性平板の Green 関数には直交性はないものの、あらゆる(級数の上限までの)波数を含んでいること、少ない項数でより複雑な分布が表せること、虚数部が現れないことのために実用上は仮想荷重法の方が適している。

表-1 : シミュレーション・データによる推定精度の検討の例

prescribed F					estimated Fest				
(KX, KY)=	-4	-4	F=	0.200E+00 0.000E+00	Fest=	0.200E+00	-0.825E-09		
(KX, KY)=	-4	-3	F=	0.300E+00 0.000E+00	Fest=	0.300E+00	-0.700E-09		
(KX, KY)=	-4	-2	F=	0.400E+00 0.000E+00	Fest=	0.400E+00	0.322E-08		
(KX, KY)=	-4	-1	F=	0.500E+00 0.000E+00	Fest=	0.500E+00	-0.390E-08		
(KX, KY)=	-4	0	F=	0.000E+00 0.000E+00	Fest=	-0.288E-08	0.448E-09		
(KX, KY)=	-4	1	F=	0.000E+00 0.000E+00	Fest=	0.693E-08	0.164E-09		
(KX, KY)=	-4	2	F=	0.000E+00 0.000E+00	Fest=	-0.292E-08	0.456E-09		
(KX, KY)=	-4	3	F=	0.000E+00 0.000E+00	Fest=	0.108E-09	-0.200E-08		
(KX, KY)=	-4	4	F=	0.000E+00 0.000E+00	Fest=	0.147E-08	-0.535E-09		
(KX, KY)=	-3	-4	F=	0.100E+00 0.000E+00	Fest=	0.100E+00	0.397E-10		
(KX, KY)=	-3	-3	F=	0.150E+00 0.000E+00	Fest=	0.150E+00	0.130E-08		

C-Field mesh (IMAX, JMAX)=									
(I, J)=	1	1	: Creal=	0.9500D+01 : Cest=	0.9500D+01	-0.4678D-08			
(I, J)=	1	2	: Creal=	0.5086D+01 : Cest=	0.5086D+01	-0.3922D-08			
(I, J)=	1	3	: Creal=	-0.7183D-01 : Cest=	-0.7183D-01	-0.5215D-08			
(I, J)=	1	4	: Creal=	0.6094D+00 : Cest=	0.6094D+00	-0.6802D-08			
(I, J)=	1	5	: Creal=	0.7246D+00 : Cest=	0.7246D+00	0.3170D-09			
(I, J)=	1	6	: Creal=	-0.1770D+01 : Cest=	-0.1770D+01	0.4045D-08			
(I, J)=	1	7	: Creal=	-0.2710D+01 : Cest=	-0.2710D+01	0.9742D-09			
(I, J)=	1	8	: Creal=	-0.2712D+01 : Cest=	-0.2712D+01	0.5980D-08			
(I, J)=	1	9	: Creal=	-0.1901D+01 : Cest=	-0.1901D+01	0.9190D-08			
(I, J)=	1	10	: Creal=	0.5995D+00 : Cest=	0.5995D+00	-0.3350D-08			
(I, J)=	1	11	: Creal=	0.7176D+00 : Cest=	0.7176D+00	-0.1075D-07			
(I, J)=	1	12	: Creal=	-0.1801D+00 : Cest=	-0.1801D+00	-0.2705D-08			
(I, J)=	1	13	: Creal=	0.4637D+01 : Cest=	0.4637D+01	-0.2479D-10			
(I, J)=	1	14	: Creal=	0.9478D+01 : Cest=	0.9478D+01	-0.4532D-08			

結語

土砂濃度分布、とくに空間的瞬間分布を求めることは、水理・河川・海岸のいずれの分野においても重要な課題である。しかし、現在は精々一点での濃度変動を求めているに過ぎない。

一方、平面的ないしは空間的な物質分布、状態分布を求めることは、最近では医学用のX線CTスキャンやMRIをはじめ、気象学・海洋学・地震学など諸分野で普通に行われていることである。

本論文は、X-CTなどと同じ逆推定原理により、機構的に簡易で價格的にも廉価なレーザーによる土砂濃度平面分布計の試作過程とシミュレーション実験の結果について述べたものである。今更、CT方式かという声もあるかもしれないけれども、実際のところ土砂濃度の平面内分布測定計は、今までのところ無かった。一応の試作が完成したので報告した。

参考文献

- (1) 日野幹雄(1991)・日向博文・村本竜雄： 密度場の光学的非接触測定法の開発，東工大・土木工学科研究報告 No.43, 133-146.
- (2) 今里悠一・大橋昭南(1993)： 医用画像処理，昭晃堂.
- (3) 石井吉徳(1988)： 地殻の物理学，東大出版.
- (4) 笠原順三・友田好文(1993)： コンピューター地球科学，東大出版.
- (5) 村山信彦(1983)： これからの気象観測－地上観測から宇宙からの気象観測まで，気象学のプロムナード 12，東京堂出版.
- (6) 佐々宏一・芦田 譲・菅野 強(1993)： 建設・防災技術者のための物理探査，森北出版.
- (7) 日野幹雄(1997)： 二次元土砂濃度分布計の開発(仮題)，文部省科学研究費・基盤研究(A)(試験)報告書(印刷予定)。