

CT型レーザ土砂濃度二次元分布計の試作

Development of a Prototype of Laser CT Scanning Profiler
for Measuring 2-D Sediment Concentration Distributions

佐藤行成*・常見 亮**・日野幹雄***

By Yukinari SATO, Akira TSUNEMI and Mikio HINO

A prototype of measuring instrument using a laser CT scanning method, was developed for nearly instantaneous spatial concentration distributions of turbid liquids, such as sediment, in a cross-sectional plane field, which may be one of the very important factors to solve problems in hydraulics, rivers, coastal engineering, etc. The instrument was constituted of a scanning multipoint laser light transmitting unit, a photo detection array unit, a control unit, and a personal computer with signal and data processing software based on the principle of the inverse estimation. Some laboratory test for a real concentration field proved the usefulness of the instrument.

Keywords: Computer Tomography, sediment concentration,
laser CT method, 2-D distribution measurement

1. はじめに

土砂濃度分布, とくにその空間瞬時分布を求めることは, 水理・河川・海岸工学などの分野において重要である。著者らは, 医学分野において用いられているX線-CT(X-ray Computer Tomography)スキャンやMRI(Magnetic Resonance Imaging)などと同様な逆推定原理の手法を採り入れた, より簡易な機構で, 廉価, かつ瞬時計測が可能な, レーザによる土砂濃度の2次元平面分布計の開発を提案した¹⁾。

本論文では, この提案で示したCTスキャン方式による開発技術に基づいて作製した, レーザ光による土砂濃度2次元分布計の試作装置の実例, および, 本試作装置を使用して得られた実際の水中濃度場での測定結果例について述べ, 本方法・装置の有効性の検証, ならびに, 今後の実用化へ向けての技術的検討を行ったので報告する。

* 工博 日本科学工業(株) 研究部

** 日本科学工業(株) 研究部

(〒565 大阪府吹田市清水2-1)

*** 正会員 工博 中央大学教授 総合政策学部

(〒192-03 東京都八王子市東中野742-1)

2. 計測の原理および方法

レーザ光を探查波源(source)とするCTスキャン方式による土砂濃度2次元分布を逆推定の原理によって求める方法については、日野が提案しているが¹⁾、ここでは後述の試作装置および実験結果の説明上、その概要について記することにする。

図-1にモデル系を示すように、未知の2次元土砂濃度場 $C(x, y)$ に複数位置 $y_{1,m}$ ($m=1, 2, \dots, M$) のレーザ光(source)を照射し、濃度と光路に応じて透過・減衰される点列 $y_{2,n}$ ($n=1, 2, \dots, N$) (receiver)での受光量 $i(m, n)$ を検知し、以下に示す方法で濃度 $C(x, y)$ を推算する。

未知の2次元濃度変動場 $C(x, y)$ が、二重フーリエ級数によって次式で表されるとする。

$$C(x, y) = \sum \sum f(k_x, k_y) \cdot \exp[-2\pi i(k_x x + k_y y)] \tag{1}$$

未知のフーリエ係数成分 $f(k_x, k_y)$ は、次の連立一次方程式(matrix eq.)から、逆問題の解として決定される。

$$[A] \cdot [f] = [i] \tag{2}$$

ここに、

$$i(y_{1,m}, y_{2,n}) = (1/\lambda) \ln(I_0/I(L, y)) \tag{3}$$

なお、 $y_{1,m}$ 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 座標を表し、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 $y_{2,n}$ での相対的な受光量 $i(y_{1,m}, y_{2,n})$ として検出される。 λ は光量の減衰係数、 I_0 は入射光量、 $I(L, y)$ は実測される受光光量を意味する。

また、マトリクス A の要素は次式で与えられる。

$$A(k_x, k_y) = \int_0^{L_x} \exp(2\pi i k_x x / L_x) \cdot \exp(2\pi i k_y (y_1 + x \tan \theta) / L_y) dx / \cos \theta \tag{4}$$

これらの式(3)(4)中、 L は発光点 $P(x_{1,m}, y_{1,m})$ と受光点 $Q(x_{2,n}, y_{2,n})$ を結ぶ光路長、 L_x および L_y は、 L の x 方向長さ、 y 方向長さ、すなわち求める対象場の大きさを表す。 θ は x 軸と光路のなす角度を意味する(図-1参照)。

したがって、各入射光量 I_0 に対する受光光量 I を測定することにより、式(2)、(3)、(4)から、未知のフーリエ級数の係数 $f(k_x, k_y)$ を求め、これらを用いて式(1)によって濃度 $C(x, y)$ を推算することができる。

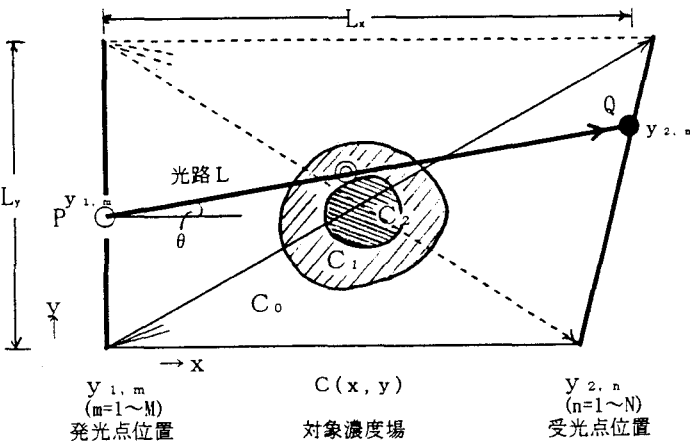


図-1 2次元濃度測定場の座標系と発光・受光系の関係

なお、2次元濃度場を逆推定の原理により推算する手法としては、上記のフーリエ係数による方法の他に、Green関数(影響関数)を用いた“仮想荷重法(Virtual plate/load method)”²⁾も考えられ、ここでも一部実験データを使用して試みたが、その算出手法の理論については省略する。

3. 試作計測装置

C Tスキャン方式による土砂濃度の瞬間2次元分布計測装置を試作するに当たっては、・小型で取り扱いが容易であること、・原理が簡単であること、・できるだけ瞬時に測定ができること、などを考慮し、まず、光源に半導体レーザ、受光素子にP I Nフォトダイオード・アレイを用いて試作を行った。

複数個(M)の発光源を対象濃度場に照射し、複数個(N)の受光素子で透過・減衰する光量を検知する方法としては、光を各方向に広げて照射する方法(エキスパンダー方式)と、ビーム状の光束により照射方向を順次振る方法(ビームスキャン方式)が考えられる。エキスパンダー方式は、一つの発光源からの光をシート状に広げて射出するので、受光点でどの発光源からの光を受光しているかを区別するために、発光時間を瞬時に次々と切り替える必要がある。また、ビームスキャン方式では、発光源数はあまり多くしないで、射出方向を変化(スキャン)する機構をできるだけ単純化する必要がある。機構的には、エキスパンダー方式が簡単で、また、瞬時性も達成しやすいと考えられるが、土砂濃度場での光の減衰が大きい場合には、微弱な光量を精度よく検出する工夫が必要となる。また、ビームスキャン方式では、できるだけ高速でビーム方向を変化させる機構が必要となる。

本論文では、受光光量の検出の容易さの点から、まず、後者のビームスキャン方式により試作した計測装置の概略および試験結果について述べる。図-2に、試作したビームスキャン方式のレーザ土砂濃度2次元分布計測装置の構成例を示す。本試作装置は、複数(M=5~9)の半導体レーザを光源とする送光部とフォトダイオードアレイ(N=11)からなる受光部(受光角度調整可能)、送光ビームを所望の方向に振らせる機構部(ステッピングモータ使用)、動作コントロール/信号処理回路、および、逆推定により濃度場を算出し、表示するためのパーソナルコンピュータから構成される。測定の空間分解能を上げるために、もう1対の送光・受光セットを増設することも可能になっている。

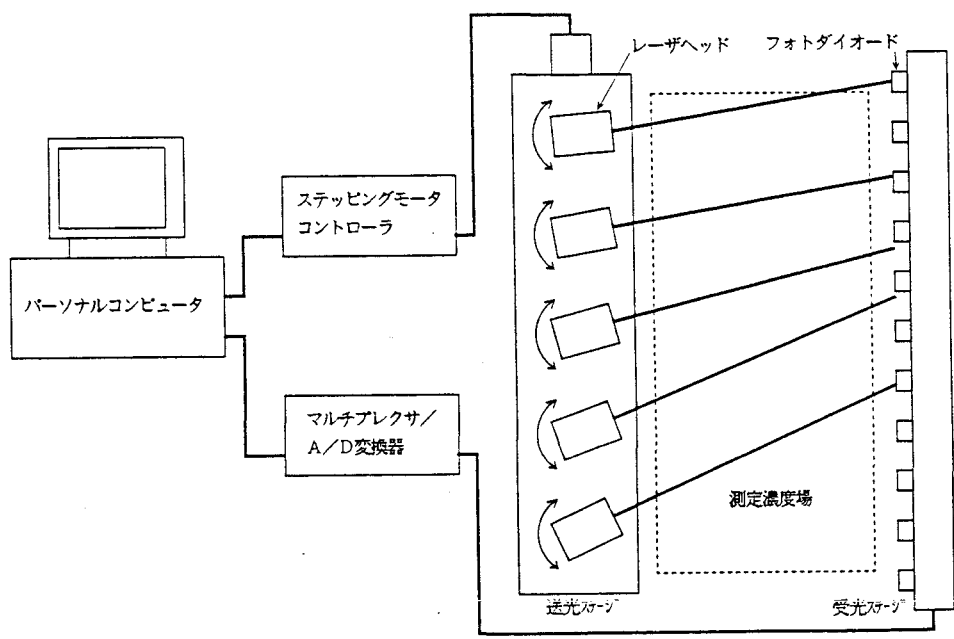


図-2 試作レーザ土砂濃度2次元分布計測装置の構成例

4. 実験結果

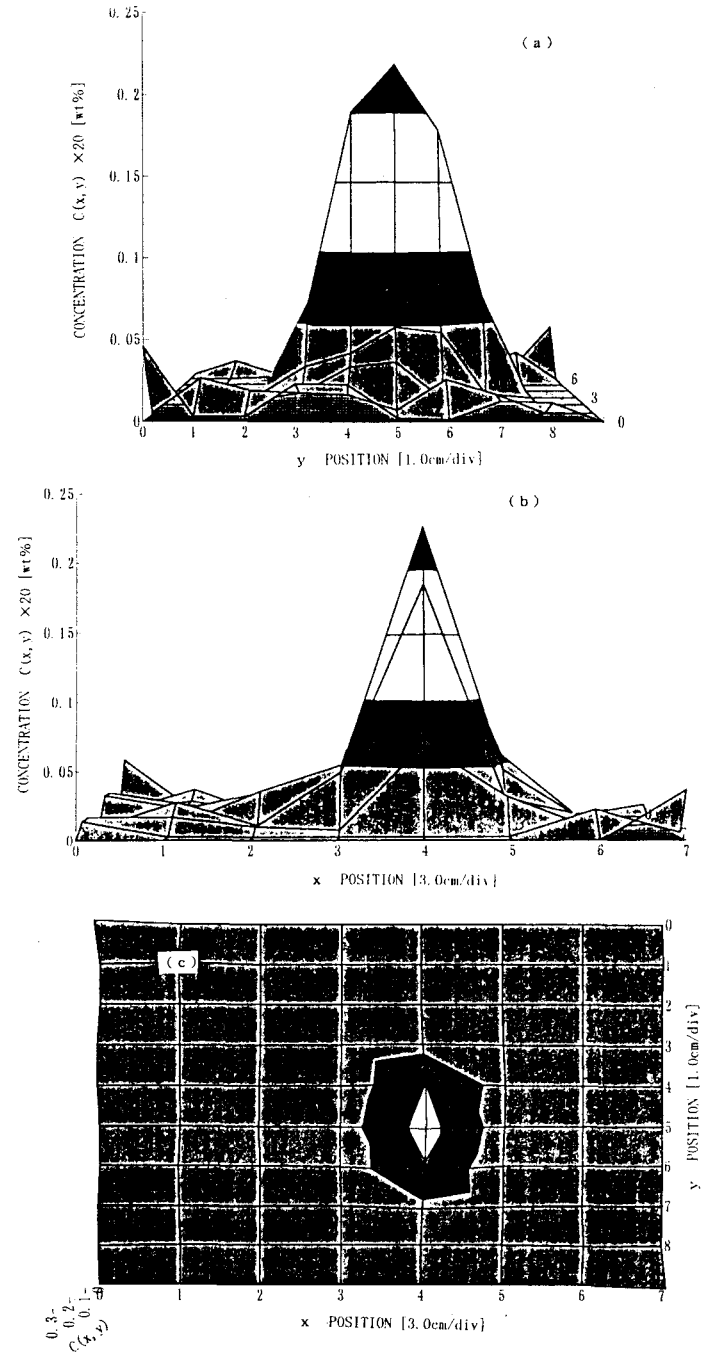
本試作計測装置を用いて、水中のモデル濃度場で実測を行い濃度場を計算し、それらの結果から本装置の有効性を確認した。以下に得られた濃度場の2次元・3次元表示例を示す。これらの実験条件を表-1に示す。

図-3は、ほぼ2重円筒（内直径25mm、外直径55mm、透明薄膜樹脂製）とみなせる測定場内に市販のカオリン（JISに規定されている水の汚濁度を定める標準物質）の水溶液を入れて作成した既知のモデル濃度場に対して、本装置・逆推定法により算出した結果の例を示すものである。空間分解能や厳密な精度などの点に関してはまだ十分に検討してはいないが、実験的に与えた濃度場とほぼ同様な2次元濃度分布が算出されることが確認された。同図（a）は、y軸方向からみた相対濃度分布、同様に、（b）はx軸方向からみた相対濃度分布、また、（c）は2次元平面上の等濃度分布（濃度コンター）を表す。これらの図中、濃淡で分けられた部分は、ほぼ等しい濃度分布領域を表している。図（c）から、作成した2重円筒内の濃度分布が得られていることが推定される。

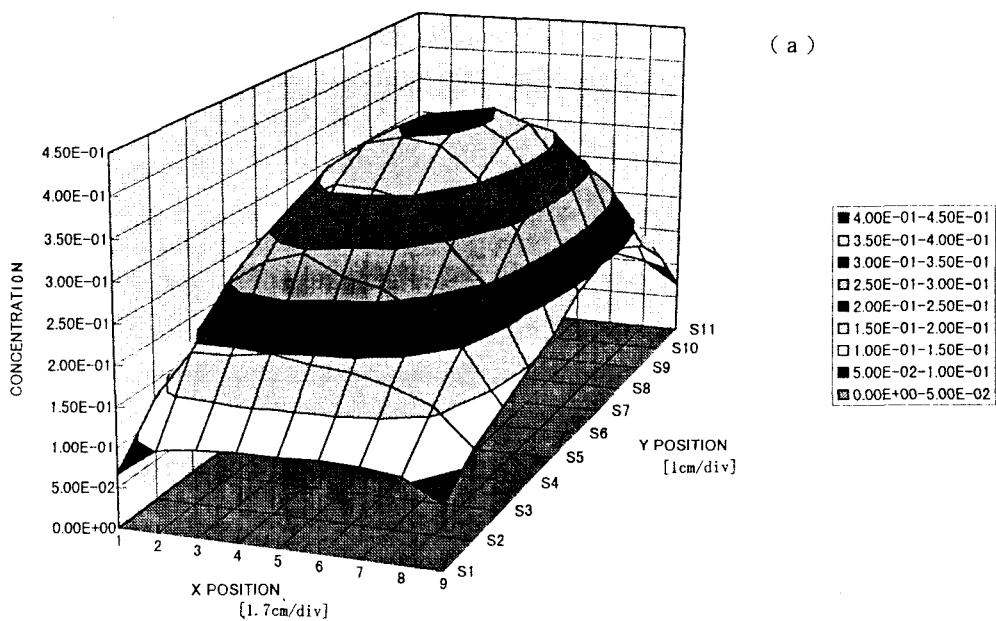
図-3 試作計測装置による2次元濃度場の実測結果の例

表-1 実験条件

測定対象濃度場	カオリン水溶液 $C_0 = 0 \text{ ppm}$ $C_1 = 50 \text{ ppm}$ $C_2 = 100 \text{ ppm}$ 測定場サイズ (LxLy) = 200x100 mm
送光系	光源: LD (波長780nm, 出力5mW, 光束径約1.5mm) M=5~9, 間隔10mm
受光系	PINフォトダイオード (N=11個), 間隔10mm



2-D CONCENTRATION PROFILE



2-D CONCENTRATION PROFILE

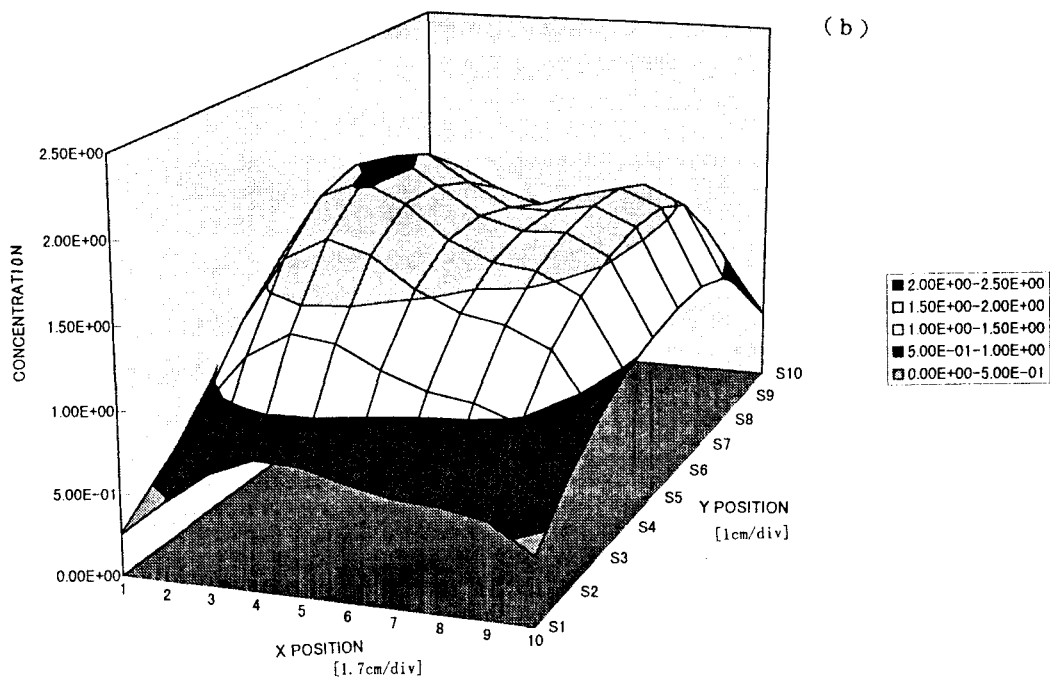


図-4 試作計測装置による2次元濃度場の実測結果例

また、図－4には、任意の濃度場の実測結果の3次元表示例を示す。同図中の濃淡は、右枠に示す相対濃度値の範囲を意味している。実験場は透明アクリル製の矩形ダクト(100×150mm)の水溶液(カオリンなどで濃度調整)で行った。上図(a)は、円筒内の2次元濃度分布、下図(b)は二つの高濃度場を有するように調整した2次元濃度分布の推算値を表す。なお、いずれの場合も縦軸の濃度値は相対的な値であり、絶対濃度値に換算するには、減衰係数や、既知濃度に対して較正が必要となる。

5. おわりに

レーザーを光源とするCTスキャン方式の非挿入式簡易型の土砂濃度瞬時2次元分布計測装置を試作し、実際の濃度場での実測を行い、本計測方法・計測装置の有効性を確認した。今後商品化等の実用化に当たっては、測定の間分解能や精度、あるいは、計測の迅速性、また、操作性、コストパフォーマンスなどなお検討すべき問題点はあるものの、実現されれば、種々の分野での応用が期待されるところである。

参考文献

- 1) 日野幹雄, CT型レーザー土砂濃度計の開発, 第41回水理講演会発表予定, (1997).
- 2) 日野幹雄, 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)(1997).