

高速スキャンCT型2次元レーザ濃度計 —試作装置および実測例—

CT-TYPE 2D LASER CONCENTRATION METER BY HIGH-SPEED SCANNING METHOD
— A PROTOTYPE OF THE INSTRUMENT AND SOME MEASURED DATA —

佐藤 行成¹・吉田 偉和正²・村本 龍夫³・日野 幹雄⁴

Yukinari SATO, Iwamasa YOSHIDA, Tatsuo MURAMOTO and Mikio HINO

¹正会員 工博 (株)カノマックス技術研究所 副社長 (〒565-0805 大阪府吹田市清水 2-1)

²非会員 (株)カノマックス技術研究所 研究員 (同上)

³非会員 (株)カノマックス技術研究所 研究員 (同上)

⁴正会員 工博 中央大学教授 総合政策学部 (〒192-0351 東京都八王子市東中野 742-1)

A CT-type laser concentration meter for measuring 2-dimensional profile by solution of the inverse problem, has been proposed and developed (Hino, *et al.*, 1997, 1998). In these papers, the ‘virtual-load’ method has been applied to solve a system of simultaneous linear equations ($\mathbf{A} \cdot \mathbf{w} = \mathbf{R}$), and then numerical simulation and laboratory experiments have confirmed the usefulness of the method by using a stepping motor for scanning laser beams.

In this paper, optical scanning and signal processing systems are improved for a practical high-speed CT concentration meter, also based on the virtual-load method. A prototype of the meter, using laser light sheets of 12 emitter set and photodiode array of 12 receiver set without mechanical moving parts, is developed and confirmed to measure 2D concentration profiles in approximately real time (order of ms).

Key Words : Concentration meter, CT-scan, Inverse problem, Laser measurement, High-speed scan

1. はじめに

著者らは、ここ数年来、CT型2Dレーザ濃度計の開発とその実用化に取り組んでいる。すなわち、レーザ光を光源に用いたCTスキャン型の土砂等の2次元瞬間濃度分布測定器の開発を提案^{1,2)}し、二重フーリエ級数法および仮想荷重法を導入した2次元濃度場の展開による逆問題の解析から濃度分布を求める計測法の理論的・実験的検証を行った^{3~6)}。ただし、レーザ光の射出方法がステップモータによる機械的な切替方式であったため、得られる濃度分布の瞬時性と機械的な故障等に問題があることがわかった。そこで今回は、同じく仮想荷重法展開の逆推定手法に基づく、より実用的な瞬時の濃度分布

計測器の実現のために、新たなレーザ光の射光方式（扇形レーザ光シート拡散方式）を採用し、受光信号処理等に高速処理を行うことを試みた。その結果、msオーダーの記録・測定が可能となったので、その試作装置および実測例について報告する。

2. 濃度場の解析方法

2次元濃度場 $C(x, y)$ にレーザ光が入射するとき、その受光量 I の減衰は、次式によって表される。

$$dI/ds = -\lambda C(x, y) \cdot I \quad (1)$$

ここで、 s : 光路に沿っての距離、 λ : 受光量の減衰係数。いま、複数の発光点 (x_1, y_1) から x 軸上にある距離

を隔てて多点の受光点 (x_2, y_2) で減衰光を受光する場合、その受光量 R は、光路に沿う濃度の積分値として得られる。

$$R(y_1, y_2) = \int C(x, y) ds \\ = \int C(x, y_1 + x \tan \theta) dx / \cos \theta \quad (2)$$

$$R(y_1, y_2) = (\lambda)^{-1} \ln(I/I_0) \quad (3)$$

ここで、 I_0 は、濃度による減衰が無視できる場合の参照受光量（光強度）。また、 θ は、 x 軸と探索光路 s の成す角度（射出角度）で、

$$\tan \theta = (y_2 - y_1) / x_2 \quad (4)$$

したがって、受光点座標は次式で表される。

$$x_2 = s \cos \theta, \quad y_2 = y_1 + x \tan \theta \quad (5)$$

いま、任意の2次元濃度場 $C(x, y)$ を、ある関数 $G(x, y; \xi, \eta)$ 、もしくは、これを離散化し $G(x, y; i, j)$ の二重級数展開として次のように表す。

$$C(x, y) = \sum w_p(i, j) G(x, y; i, j) \quad (6)$$

$$C(I, J) = \sum w_p(i, j) G(I, J; i, j) \quad (7)$$

通常の場合、関数 $G(x, y; i, j)$ は二重フーリエ級数展開の基底関数で、基底関数系は直交系として表すことが多い。しかしながら、日野ら^{4,5)} が示したように、受光量値 R に計測誤差が混入する場合には、二重フーリエ展開法では適切な解を得るまでに至らなかった。ここでは、日野ら^{4,5)} と同様に、関数 G を弾性平板の Green 関数とする“仮想荷重法”を用いる。

すなわち、 $G(x, y; i, j)$ は、次式の Green 関数で表されるとする。

$$G(x, y; i, j) = 4/(\pi^2 ab) \sum_{m=1}^{m_{\max}} \sum_{n=1}^{n_{\max}} [\sin(m \pi x/a) \cdot \sin(n \pi y/b) \\ \cdot \sin(m \pi i/a) \cdot \sin(n \pi j/b) / (m^2/a^2 + n^2/b^2)] \quad (8)$$

このとき、式(6)(7)の係数 w_p は、濃度場 C を弾性平板の撓みとみなすときに平板上に与える“仮想荷重”に相当する。

式(2)、(3)に式(7)を代入して整理すれば、次の行列表示が得られる。

$$[GG][w] = [R] \quad (9)$$

ここに、

$$GG = \int G(x, y_1 + x \tan \theta; \xi, \eta) dx / \cos \theta \quad (10)$$

受光量データ $[R]$ を用いて、式(9)から連立一次方程式の解として、荷重行列 $[w]$ が求まり、さらに、式(7)に代入することによって濃度分布 C が算出できる。

なお、 $[R]$ に測定誤差が含まれていても、適切な $[w]$ の解が求まり、正しい濃度 C が推定できるように、濃度場の計算メッシュ数（発光点数 $\times$ 受光点数； $(I \times J)_{\max}$ ）が、仮想荷重点数 $(i \times j)_{\max}$ より十分に大きく設定し、より有効な最小自乗法を適用することが必要である。

3. レーザ射光方式

日野^{1, 2)} が提案したように、レーザ光による濃度場への射光方式には、いくつかの方式が考えられる。その中で、ステップ・モータを用いてレーザビームを順次メカニカルに射出方向を切り替えて行く方式については、すでに実験的に検証を行い、装置、測定結果および問題点について報告した^{4, 5)}。

今回は新たに、レーザ光の射光方式として、多点ほぼ同時に射光できる、扇形レーザ光シート拡散方式を採用し、高速スキャンが可能となった。

ここでは、これら2つのレーザ射光方式に関して比較検討を行ったのでその結果について述べる。

(1) ステップ・モータ方式

一列に多数個配列したレーザ光源の射出方向をステップ・モータを用いて次々に切り替えて受光素子にビームを入射させるこの方式は、指向性の高い強力なレーザ光を濃度場に射出しうるので、低濃度から高濃度の広い濃度範囲の測定が可能となる。反面、スキャン（走査）の周期を短くするには、射出方向の切り替えによる機械的な故障と、射出・受光信号の電気的同期処理の点において問題がある。

(2) 扇形シート状射光方式

上記の方式に対して、すでに提案^{1, 2)} されている、レーザ光をシリンドリカル・レンズ等を用いて扇形のシート状に射出する方式では、個々の受光点での光強度は弱くなるものの、機械的な可動部分を全く有しないので、故障の心配はない。また、射出光源（半導体レーザ）の機械的切り替えがないため、射出・受光信号の同期処理が容易で、ほぼ連続的計測が可能となる。

今回採用した本方式の詳細については、後述する。

4. 高速スキャンCT濃度計試作装置

CT濃度計信号処理の高速化のために、メカニカルな可動方式に依らない多点レーザシート光を瞬時に濃度場に照射し、多点のフォトダイオードで受光して得られる透過減衰光信号を高速でデジタル処理し、前述の逆推定法により濃度分布を求めるシステムを試作した。

(1) 発光射出源機構

本システムは、測定部、発光受光信号制御・処理インターフェース、およびパーソナルコンピュータより構成される。図-1に本試作装置のシステムブロック図を、また、写真-1に測定部（発光・受光系）の外観図（上蓋を外した）を示す。測定部（510×300mm）では、レーザ

シート発光部（12チャンネル）と受光フォトダイオード・アレイ（12チャンネル）が一定距離を挟んで平行に設置され、水中での実験にも適用できるように光学ガラス窓を用い、耐水性を有する金属枠で保護されている。個々の半導体レーザ（出力 30mW；波長 685nm）は、コリメータレンズおよびシリンジカル・レンズと一体化され、広がり角度約 40°（水中で約 32°）、厚さ約 0.3～0.4mm の光強度一様な扇形シート光を発振するように調整されている。濃度場への照射時間は、適切な受光信号出力および取込み速度とも関連し、ここでは最短 1.76ms（12チャンネルの場合）である。発光源レーザは、順次位相をもって点滅を切り替える。すなわち、第 i 番目のレーザ光源は扇形状に拡がって全受光フォトダイオードに向けて同時に射出され、 Δt 時間発光した後に次の第 $(i+1)$ 番目のレーザ光源が発光する。

(2) 受光処理機構

一方、受光側のフォトダイオードは、それぞれの発光レーザダイオードからの信号を連続的に受光し、それが何番目の発光点からの透過光であるかを判断し、デジタル信号として記憶すればよい。このため、濃度場を一スキャンするのに要する時間 T_s は、（各発光レーザ・ダイオードの発光時間 T_e ） $\times$ （発光レーザダイオードの数 M ）となり、ms オーダの短い周期（12チャンネルの場合、約 21ms）で可能となる。これによって、ほぼ瞬時の2次元濃度分布の連続的測定が可能となった。なお、今回の実験では、透過減衰光 I および基準参照光 I_0 の安定性、精度をできるだけ上げるため、約 100ms に走査時間を設定した。

図-2 に、レーザシート光（Emitter）発光と受光フォトダイオード・アレイ（Receiver）による受光信号の取り込みのタイミングチャートを示す。また、図-3 には、実測例（走査受光信号）を示す。各発光点位置（横軸 Emitter No. $i=1\sim12$ ）からの射出光に対して、各受光点（Receiver No.）で受光した信号値を示す。

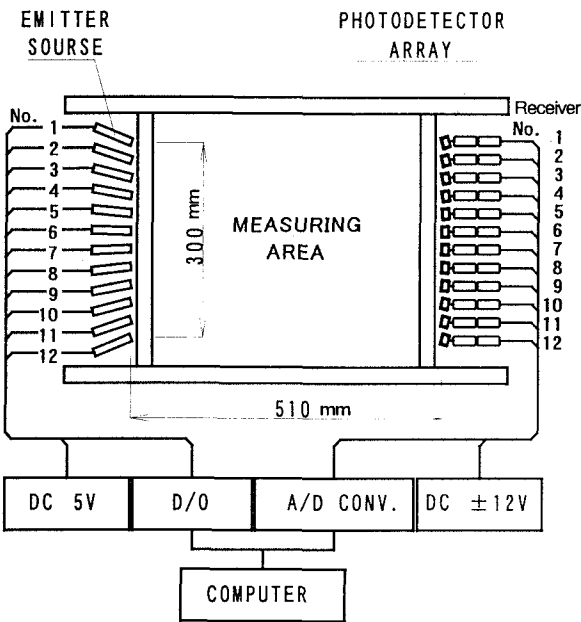


図-1 高速スキャン CT 濃度計システムブロック図

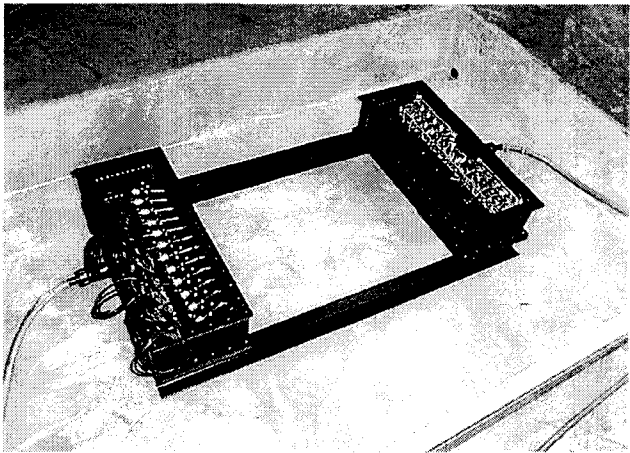


写真-1 高速スキャン CT 濃度計測定部の外観

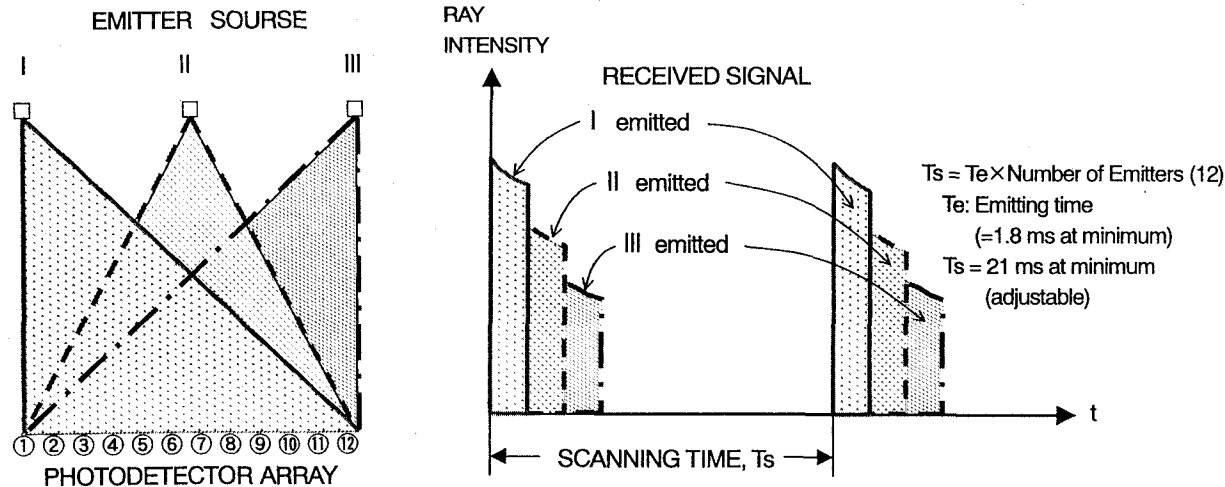


図-2 レーザ発光・受光信号のタイミングチャート

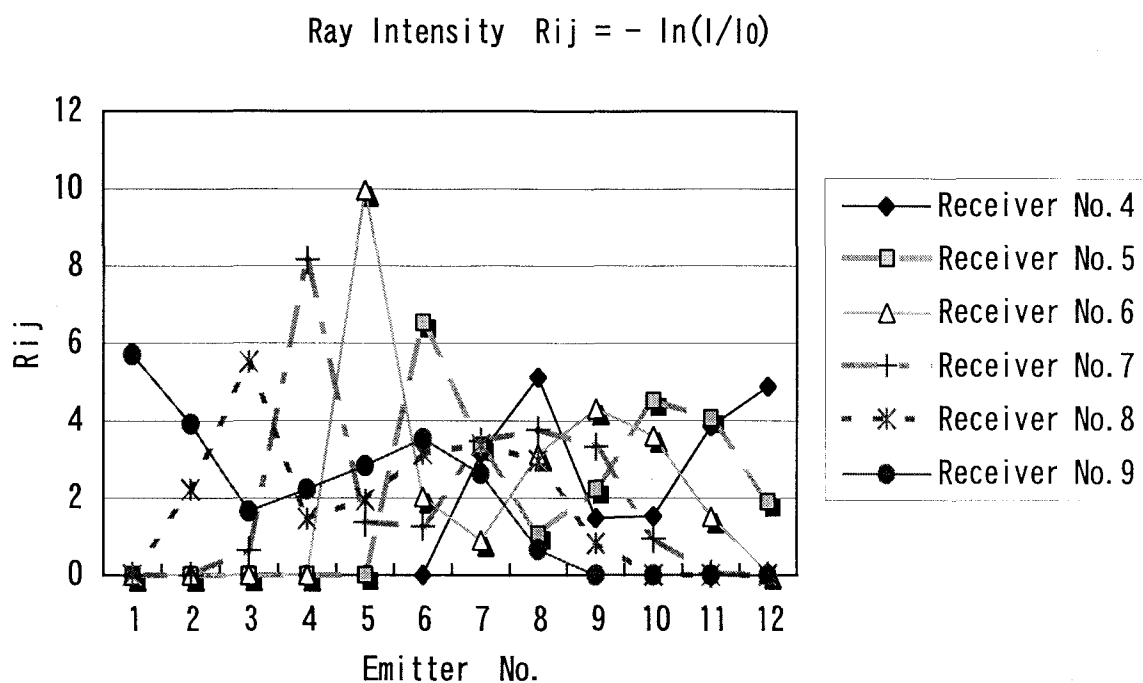


図-3 実測例 (走査受光信号)

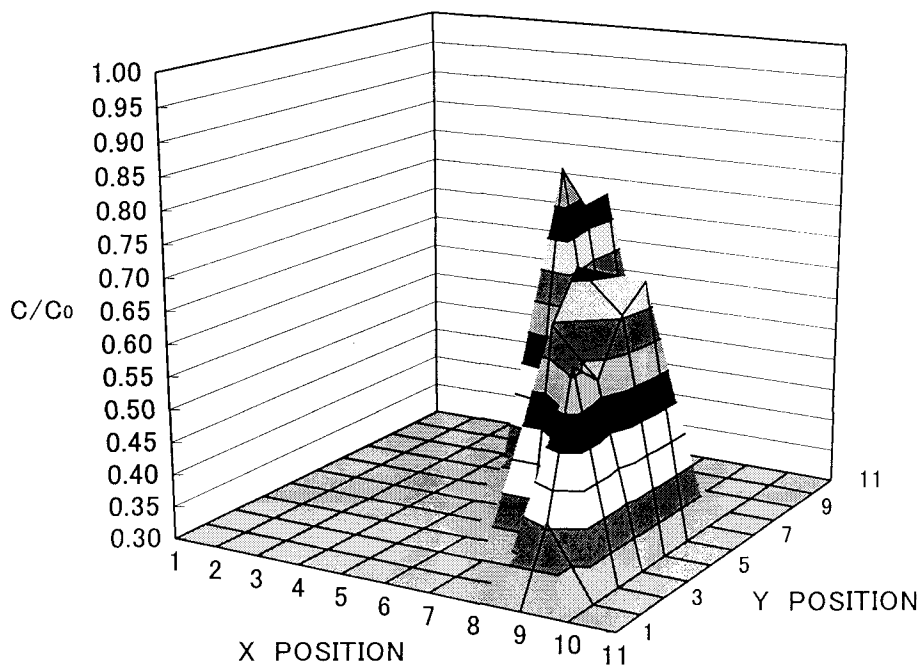


図-4 実測例 (空気中での噴霧水滴の濃度分布)

Concentration profile estimated by real data ; R(12x12)

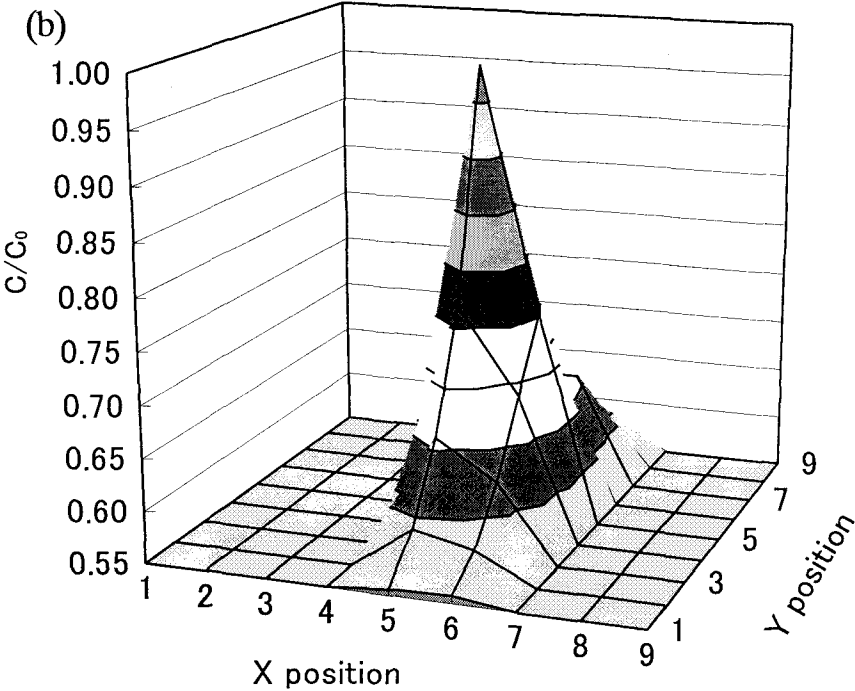
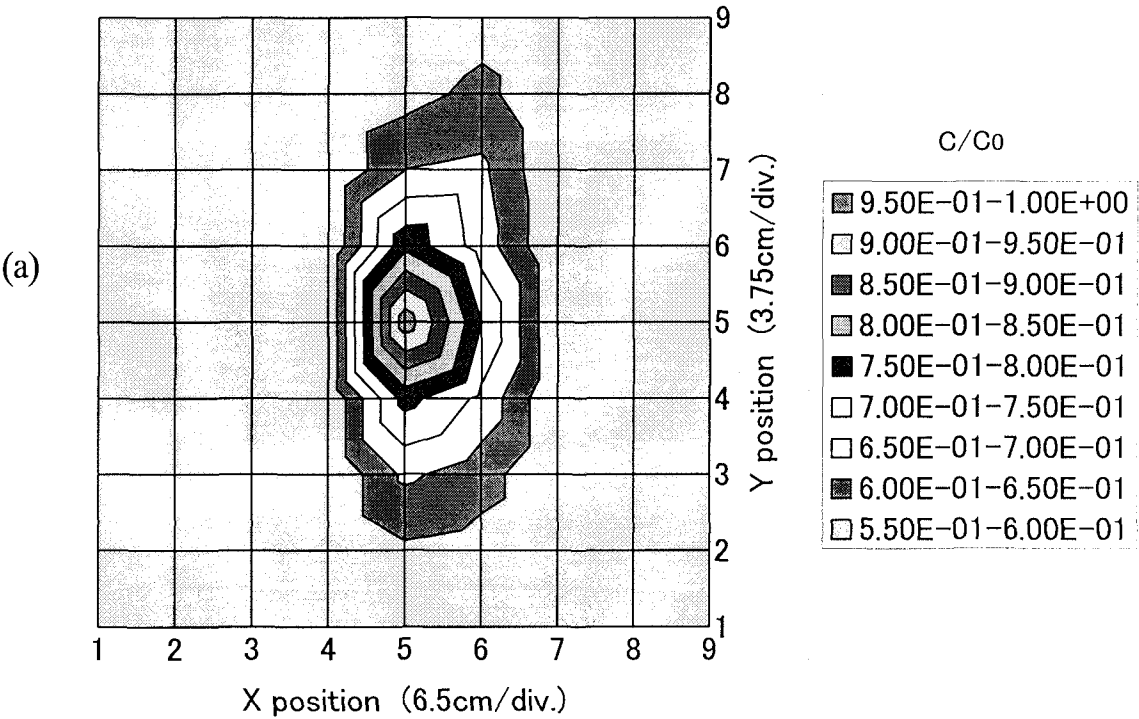


図-5 実測例（空気中での噴霧水滴の濃度分布）

5. 実測例

図-4 および図-5 に、本試作装置を用いて求めた 2 次元濃度分布の実測結果について例示する。これらの結果は、発光点 12×受光点 12 の場合に、仮想荷重法逆推定のアルゴリズム（仮想荷重点数 7×7，最小自乗法）を用いて算出された。なおここには、高速処理の確認に重点を置き、空気中での実験（静止空気中に超音波加湿器より測定断面にほぼ垂直に噴霧した微細な水滴の濃度分布，平均流速約 1m/s 以上）での測定結果を示す。図-4 は、ノズル径約 50mm φ 出口近傍（20 回走査平均）の相対濃度分布を示す（図-3 に例示した受光量データを用いて算出）。同様に、図-5 は、測定部中心位置でノズル径約 30mm φ 出口から数倍の距離での相対濃度分布の結果例（100 回平均）（(a)：等濃度コンタ，(b)低濃度部をカットした場合の 2 次元濃度分布）を示す。

なお，ここでは，受光信号データに含まれるノイズ成分（散乱光などの影響による）を除去し，適切な濃度分布値を求めるために，20 回ないし 100 回の走査平均値のデータを例示したが，今後はこれらのノイズ成分の除去等に改善を行うことにより，精度向上と瞬時（1 回走査）濃度分布を求めたい。

これらの結果から，試作した CT 型レーザ濃度計によって，妥当な 2 次元瞬時濃度分布が測定できることを確認した。

6. おわりに

以上，今回採り入れた多点扇形レーザ光シート射出方式による，高速スキャン CT 型レーザ濃度分布計につい

て，実験的に検討を行った結果，仮想荷重法逆推定により，ほぼ瞬時の 2 次元濃度場が測定できることがわかった。今後，測定分解能や精度の向上を実現し，より複雑な濃度場への適用などを行い，本システムの実用化を推進したい。

参考文献

- 1) 日野幹雄（1997a）：CT 型レーザ土砂濃度分布計（土砂濃度 2，3 次元瞬間分布像の計測システム）の開発，文部省科学研究費，基盤研究(A)（試験）報告書。
- 2) 日野幹雄（1997b）：CT 型レーザ土砂濃度計の開発，水工学論文集，第 41 巻，1085-1090。
- 3) 佐藤行成，常見亮，日野幹雄（1997）：CT 型レーザ土砂濃度二次元分布計の試作，水工学論文集，第 41 巻，1091-1096。
- 4) 日野幹雄，佐藤行成（1998）：CT 型レーザ濃度計 — 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，565-570。
- 5) Hino, M., and Sato, Y. (1998): CT-type 2D Laser Concentration Meter with No Rotating Parts – Application of ‘Virtual-Load’ method to an inverse problem -, Proc. 9th Int. Symposium on Appl. Laser Tech. to Fluid Mech., Lisbon-Portugal.
- 6) 日野幹雄，佐藤行成，吉田偉和正，村本龍夫（1999）：高速スキャン CT 型 2D 瞬間レーザ濃度計の試作および実測例，土木学会第 54 回年次学術講演会論文集，II -288。
- 7) 日野幹雄（1975）：仮想法の提案と解説，東京工業大学土木工学科研究報告，No.18。
- 8) 日野幹雄，宮永洋一（1975）：グリーン関数および仮想法による波力と波の回折計算，土木学会論文報告集，No.237，51-82。

(1999. 9. 30 受付)