

高速ビデオカメラとMLSを用いた風波界面近傍での渦の時空間挙動の解明

A study on Behavior of Vortices near Wind Wave Surfaces by Using High-speed Video Camera and MLS

竹原幸生¹・江藤剛治²・重松孝昌³・Vu Truong Son DAO⁴

Kohsei TAKEHARA, T. Goji ETOH, Takaaki SHIGEMATSU and Vu Truong Son DAO

Behavior of vortices near the wind wave surface is measured by using three high-speed video cameras and the Moving Least Square (MLS) method for vorticity estimations. The high-speed video cameras can increase the sampling rate and the MLS method can estimate accurate vorticity profile from randomly distributed velocity profiles. The Particle Tracking Velocimetry, PTV, is applied to measure two dimensional flow fields close to the interface in detail. The vortices are generated at the surfaces by the interaction between the wind shear and wind waves. The generated vortices separate from the surface and fall down to the bulk water. The generated vortex increases their spatial scale by uniting the other vortex.

1. はじめに

界面近傍の微細な乱れ構造は気-液間の気体輸送現象を規定する重要な要因の1つである。特に、大気-海洋の間の気体輸送に大きく影響を及ぼす風波の気-水界面近傍の乱れ構造は、地球規模での温暖化問題等を考えるうえで重要な因子となる。Tobaら(1975)は可視化による水表面近傍の流れ構造の解明を試みているが、乱れが大きく、詳細な解明までには至っていない。また、風波界面近傍の流れ場を計測しようとする、界面が移動するため従来の計測法では計測自身が困難であった。よって、これまでの研究では界面から十分に離れた位置での計測結果を基に界面近傍の流れ構造が議論されてきた。

近年の流れ場計測法として、画像解析を援用した速度計測法(Image Velocimetry, IV)がある。最も一般的なのが粒子画像速度計測法(Particle Image Velocimetry, PIV)である(Adrian, 1990)。流れの中に微小なトレーサー粒子を多数混入させ、ビデオカメラでトレーサー粒子の移動を計測し、流速ベクトルを求める。近年、水工学の分野でもPIVを用いた研究が活発に行われている(例えば、藤田ら, 1996)。

PIVによる流れ場計測法の利点は、以下の点である。

- ①画像中の多点の流速を同時に計測可能
- ②移動境界極近傍まで計測が可能

著者らは、PIVの1つである粒子追跡法(Particle

Tracking Velocimetry, PTV)としてカルマンフィルター理論と χ^2 検定を用いたアルゴリズムを開発した(竹原ら, 1996)。また、提案した手法を種々の流れ場計測に適用し、その有効性を示してきた。PTVの利点は空間解像度が高いことである。特に、PTVは相関法PIVに比べて空間解像度が低いという認識がこれまでであったが、粒子1個1個を追跡するため、原理的に相関法PIVなどに比べて空間解像度が高いことを示した(Takeharaら, 2000)。

著者らは開発したPTVを用いて風波界面近傍の流れ場の計測を行い、気体輸送現象に関連する詳細な流れ場を明らかにしてきた(竹原ら, 2002; 大塚ら, 2003)。しかし、流れ構造の時空間的な構造を明らかにするには、以下の2点の問題点があった。

①計測機器上の問題

一般的にPTVで用いられる計測装置では、1/15秒毎に2枚1組の画像を得ることができる。この場合、流速データのサンプリングレートは15Hzとなる。表面近傍では微細な渦構造が支配的で拡大撮影により計測するため、15Hzのサンプリングレートでは渦構造の追跡が困難である。

②データ処理上の問題

風波界面近傍の流れ場は波面の運動によるオービタルモーションが卓越しているため、渦運動を流速分布の計測結果から高精度に抽出する必要がある。

①に関しては高速ビデオカメラを用いることにより、サンプリングレートを上げることができる。また、高速撮影でも十分な光量を確保するために、高出力のレーザーが必要となる。

②に関しては、渦抽出として渦度を用いるのが一般的である。PTVではトレーサー粒子が存在する位置で流速ベクトルが求まるため、ランダムな流速分布となつてし

1 正 会 員 博(工)近畿大学准教授理工学部社会環境工学科
2 正 会 員 工博 近畿大学教授理工学部社会環境工学科
3 正 会 員 博(工)大阪市立大学准教授大学院工学研究科都市系専攻
4 Msc. 近畿大学大学院総合理工学研究科環境系工学専攻

まう。ランダムな流速分布から高精度に渦度を推定する方法が必要となる。

本研究では、上記の問題点を解決するために、高速ビデオカメラと高出力YAGレーザーを用いてサンプリングプレートを上向きさせた。また、高精度渦度推定法として著者らが提案しているMoving Least Square (MLS) 法を用いた渦度推定法を用いた。この方法ではPTV計測により得られたランダム点上の流速分布から格子点上に流速値を変換することなく、直接、渦度を推定することができる。さらに、計測結果より風波による大気-海洋間の気体輸送に関する界面近傍の渦の特徴的な時空間的な挙動を抽出する。

2. MLSを用いたPTV計測値から直接渦度推定法

(1) 手法の概略

PTVの結果であるランダムな流速分布を用いる場合、一般的に格子データに変換した後に渦度を求める。いずれの格子点変換法を用いるにしても変換に伴う誤差が生じる。格子点に変換された流速値から、さらに渦度等の微分値を求めると誤差が増幅されてしまう。

著者らは、PTVで求められるランダムな流速分布から直接渦度を推定する方法としてMLS (Moving Least Square) 法を用いる方法を提案している (竹原ら, 2008)。以下に概略を説明する。

数値シミュレーション分野でMeshless法の1つとして提案されているMLS法がある (例えば、矢川ら, 1997)。MLSではランダムな位置に存在する誤差を含んだ流速や圧力等の物理量に対して、着目点回りで最小自乗法により多項式を当てはめ、着目点での物理量やその空間微係数等の最適値を求め、数値計算を行う方法である。

図-1に示すように、MLSでは着目している点周辺に設定した小領域内で多項式を当てはめ、流速値等の物理量とその空間微分値を求める。提案した渦度推定法では、以下のような2次関数を当てはめる。

$$\begin{cases} u(x, y) = a_u x^2 + b_u xy + c_u y^2 + d_u x + e_u y + f_u \\ v(x, y) = a_v x^2 + b_v xy + c_v y^2 + d_v x + e_v y + f_v \end{cases} \quad (1)$$

ここで、 $(a_u, b_u, c_u, d_u, e_u, f_u)$, $(a_v, b_v, c_v, d_v, e_v, f_v)$ は係数であり、小領域内の流速値から最小自乗法により求める。MLS法では、任意の点における流速値ばかりでなく、式(1)より空間微分値も求めることができる。本研究で対象としている渦度は、適合された2次曲面式(1)より次式として求められる。

$$\omega = \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} = (2a_v x + b_v y + d_v) - (2c_u x + b_u y + e_u) \quad (2)$$

(2) MLSにおける2次関数適合領域

MLSの2次曲線当てはめに影響を及ぼす誤差には大き

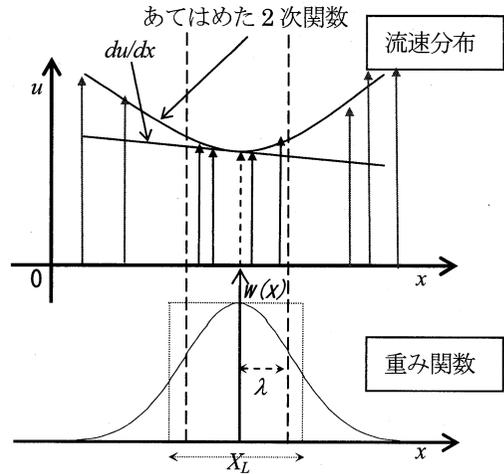


図-1 MLSによる微係数の推定法の概念図

く分けて、ランダム誤差とシフト誤差の2つがある。

ランダム誤差は流速値に必ず含まれる誤差である。数値計算であれば、打ち切り誤差、離散化誤差や乱流モデルでは表現できない小さな渦運動などによる誤差等が考えられる。PTVでは、トレーサー粒子の追従性による誤差、画像計測における粒子位置の計測誤差、画像の撮影時間間隔による離散化誤差等が考えられる。

シフト誤差はMLSにおける2次関数の適合に伴う誤差であり、適合領域が広すぎると2次関数では表現できない3次以上の項の影響が生じ、誤差を生じる。

適合領域を狭くすれば、2次関数の適合精度が上がるが、適合領域が狭くなりすぎるとデータ数が少なくなり、ランダム誤差の影響を大きく受ける。すなわち、適合領域サイズにはランダム誤差とシフト誤差のトレードオフがあり、最適な適合領域サイズを求める必要がある。

MLSの多項式適合にはガウス分布の重み付き最小自乗法を用いた。適合させる領域はガウス分布の標準偏差 λ により規定されるとして、次元解析およびモンテカルロシミュレーションにより最適適合領域の推定式を次式のように求めた (竹原ら, 2008)。

$$\begin{cases} \lambda_{opt} = \beta_T \cdot [\delta_3]_{ave}^{-1/4} \cdot \rho^{-1/8} S_r^{1/4} \\ \beta_T = 0.6274 \end{cases} \quad (3)$$

ここで、 ρ は粒子密度 (particle/pixel²)、 S_r はランダム誤差の標準偏差 (pixel/ ΔT)、 δ_3 は3次の微係数 ($1/(\Delta T \cdot \text{pixel}^2)$)、 β_T は無次元定数である。

(3) MLSにおける渦度推定法と格子変換・循環法による渦度推定法の精度比較

MLSを用いた渦度推定法との精度比較のために格子変換・循環法による渦度推定法による推定結果と比較した。格子変換・循環法では、ランダム点上の流速分布場から格子点上の流速分布場へ変換 (格子変換) した後、

渦度と循環の関係式を用いて推定する方法（循環法）であり、PIVによる計測結果から渦度を求める最も一般的な方法である（竹原ら，2008）。

以下のようなシミュレーションにより，MLSを用いた渦度推定法と格子変換・循環法との精度比較を行った。

粒子を画像サイズ1024×1024（pixel）内に一様乱数により発生させた。粒子の個数は500，および1000～10000個の範囲で1000個間隔の11種類とした。また，発生させた粒子にサンプリング時間間隔 ΔT の間の移動量 $\Delta \xi$ ， $\Delta \psi$ を以下の式で与えた。

$$\left. \begin{aligned} \Delta \xi(x, y) &= A \sin(2\pi x / L) \sin(2\pi y / L) \\ \Delta \psi(x, y) &= A \cos(2\pi x / L) \cos(2\pi y / L) \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

ここで， L は渦のサイズを決定するパラメータで，渦の大きさは $L/2$ となり，今回のシミュレーションでは $L/2=512$ （pixel）とした。また， A はサンプリング時間間隔 ΔT での最大移動量であり，今回は一般的なPTVで計測される最大の移動距離である $A=10$ （pixel/ ΔT ）とした。

図-2に各粒子密度に対する，2つの渦度の推定法による相対誤差の比較を行った結果を示す。図中の白抜き印が格子変換および循環法による結果であり，黒塗りの印がMLSを用いた方法の結果である。同じ形の印はランダム誤差が同じ条件を意味している。

図-2より，いずれのランダム誤差，および粒子密度の条件に対しても，今回提案したMLSを用いた渦度推定法の相対誤差が，格子変換・循環法の相対誤差の1/2～1/3となっている。MLSを用いた渦度推定法が高精度である理由として，MLSはランダムな流速分布から直接渦度を推定できる点が上げられる。格子変換・循環法では，ランダムな流速分布から格子点状の流速分布に変換する段階で誤差が生じ，さらに循環法による渦度推定においても誤差が生じる。それに対して，MLSを用いた渦度推定法では，格子変換せずに微係数を求めることができ，誤差の発生する機会が少ない。

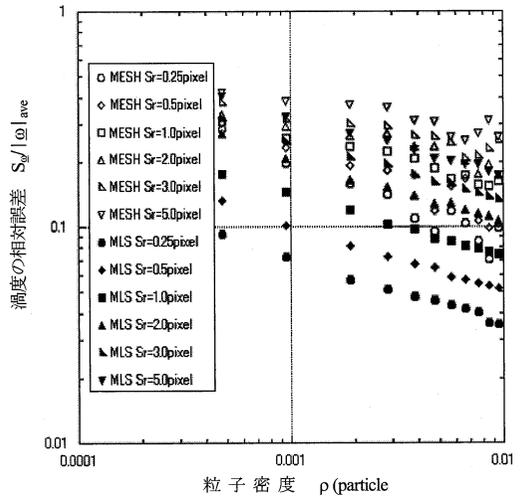


図-2 MLSを用いた渦度推定法と格子変換および循環法による渦度推定法の精度比較

3. 実験方法および実験装置

実験には，近畿大学水工学実験棟の風洞水槽（長さ16 m，高さ0.5m，幅0.5m）を用いた（図-3参照）。送風装置によって風を吹かせ，人工的に風波を発生させることができる。端部には，反射波をなくすために消波装置を設置している。水深は0.32mに設定し，送風口から7.5mの位置に計測区間を設定した。平均風速は $U=14.0$ m/secであった。

照明として，イエナオプティック社製8W高出力YAGレーザーの連続光を使用した。レーザー光は，2次元の撮影断面を照射するため，シリンダカルレンズを用いて，シート状に広げて照射した。トレーサーとしてナイロン12粒子（平均粒径 $50 \mu\text{m}$ ，比重1.02）を用いた。

高速ビデオカメラはフォトン社製を使用した。解像度は， 1280×1024 pixelsで1000fpsまで撮影が可能である。今回の計測では125fps，シャッタースピード1/250secの条件で撮影を行った。撮影した画像は白黒デジタル画像（8bit）としてコンピュータに記録される。連続1000枚の撮影を行い，そのうちの500枚（4秒間）の処理を行っ

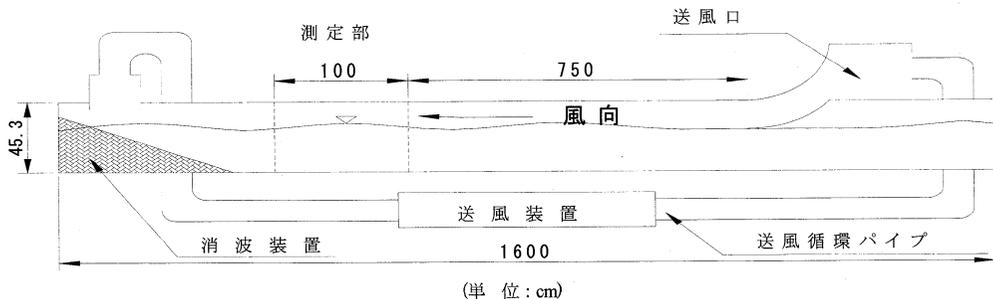


図-3 実験に用いた風洞水槽

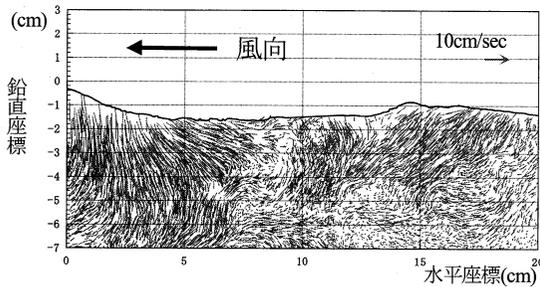


図-4 PPTVによる風波界面近傍の流速計測結果例

た。

風波は、振幅方向に比べて進行方向に長いので、横長に広く計測する必要がある。今回は、水表面近傍の詳細な計測を行うために、2台の高速ビデオカメラを波の進行方向に水平に並べ、水表面近傍を拡大、かつ広範囲に計測を行った。風波は3次元性があるため、手前の波が写り込まないように下方から見上げるように撮影した。また、水面を決定するために1台高速ビデオカメラを使用した。3台の高速ビデオカメラは完全に同期が取られている。水面位置の決定には、水溶性の蛍光染料（フルオレセイン）を用いた。フルオレセインはレーザー光によって強く蛍光を発する。発光している部分と背景では輝度値が大きく異なるため、水面上方から撮影した画像から輝度値の変化が最も大きい部分を水表面と決定した。

4. 実験結果及び考察

PTVによる風波界面近傍の計測結果の例を図-4に示す。水表面極近傍まで精密に流速を計測できているのがわかる。静水面における水表面位置を0cmとした。矢印は風の向きを表わしている。PTVで追跡した粒子数は約8000個である。水表面近傍までトレーサーが写っており、詳細に風波水表面下の連続する水運動の様子を表わすことができている。風による吹送流と水面波動によるオービタルモーションが重なり影響しあっているため複雑な運動となっている。特に水表面近傍の水粒子運動ではオービタルモーションが卓越しているため、渦運動などの組織的な構造を流速ベクトル分布から抽出するのは困難であった。

MLSを用いた渦度推定法により求めた風波界面近傍の渦度分布図から風波界面近傍の特徴的な渦の時空間的挙動を示す。特徴的な現象として、水表面近傍で生じた渦が下方に輸送されている現象の例を図-5に示す。時計回りを黒色で反時計回りを白色で表わしている。計測結果では、時計回り、および反時計回りの両方の渦が水表面から下方に剥れていく現象が確認された。図-5中に矢印で示している領域では、反時計回りの渦が風波の波峰背面で発生し、時間の経過とともに水表面からはがれ、

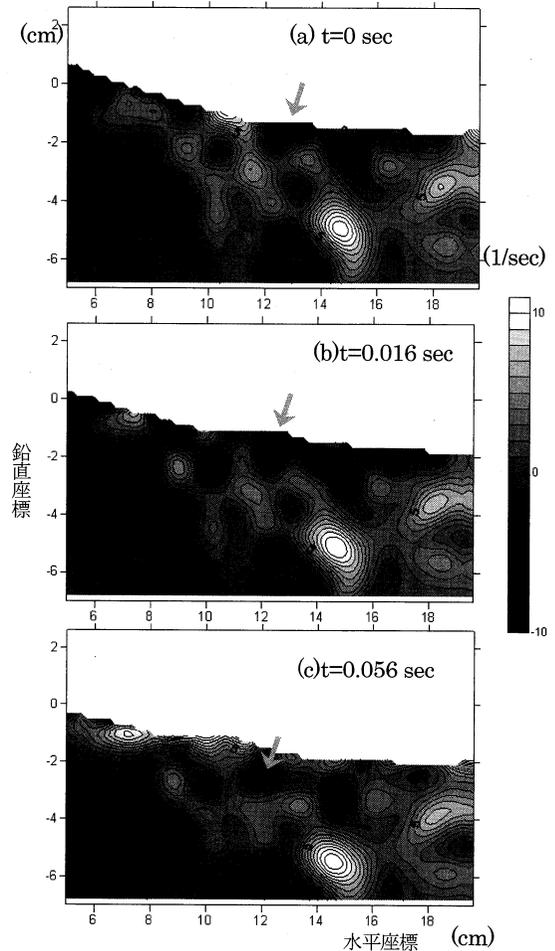


図-5 風波界面から渦が発生し、下方に移動している現象の例(MLS法によりPTVの流速計測結果から渦度を推定)

下方に移動している様子が確認できる。この渦運動は、風波界面で生じるダウンバーストに関連した現象と考えられ、水表面での気体輸送に重要な役割を担っている。

図-6,7は、図-5中で示した矢印の渦に着目して渦中心位置と中心渦度の時系列変化を示したものである。追跡開始は図-5の(c)の時点で、追跡時間は連続20コマ(0.16秒間)である。渦は風波の波動運動との相互作用により複雑な運動となっているが、下方に移動していく様子が分かる。また、下方に進むにつれて、徐々に中心渦度が増していることも分かる。

また、水表面から剥れた渦は下方に移動して行く過程で周囲の渦と合体しながらその空間スケールを増していく様子が観察された。図-8に矢印で示す反時計回りの2つの渦が合体していく挙動を示す。さらに幾度かの合体を繰り返しながら、渦スケールを増大して様子が観察された。

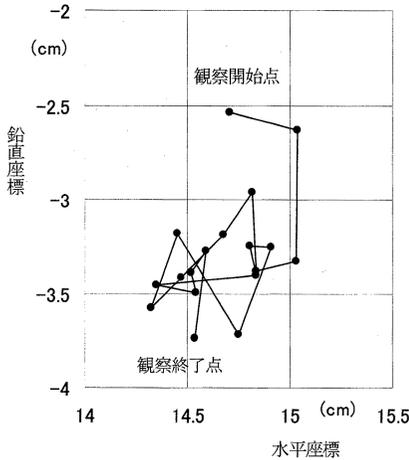


図-6 渦中心位置の移動
(水表面から剥れる時計回りの渦に着目。下方に移動しているのが分かる.)

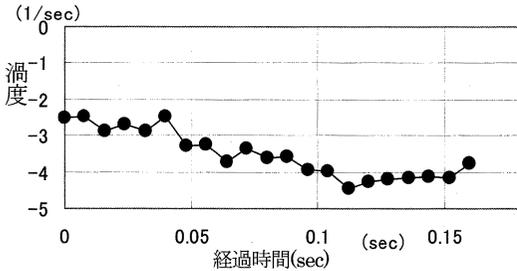


図-7 渦中心の渦度の経時変化 (水面から剥れた渦が発達している。図-6に示した渦に対応する.)

5. まとめ

本研究では、風波による水表面での気体輸送現象の解明を目的として、高速ビデオカメラとMLSによる渦度推定法を用いることにより、風波界面近傍の渦構造を明らかにすることを試みた。本研究により得られた主要な結果を以下に示す。

- ① MLSにより、PTVにより計測された風波界面近傍の流速分布からMLSにより渦度を高精度に求めた。
- ② 渦度分布の時系列データより、風波界面で生じた渦が下方に輸送される現象の存在を示した。これはダウンバーストに関連する現象と考えられる。
- ③ 水表面で発生した渦は、下方に移動するに従い、徐々に渦度を増していく。
- ④ 水表面から剥れた渦は下方に移動する過程で、近傍の渦と合体し、空間スケールを増していく。

謝辞：本研究を行うにあたり、科学研究費補助金基盤研究 (B) (代表、竹原幸生) の補助を受けたことを記し、謝意を表す。

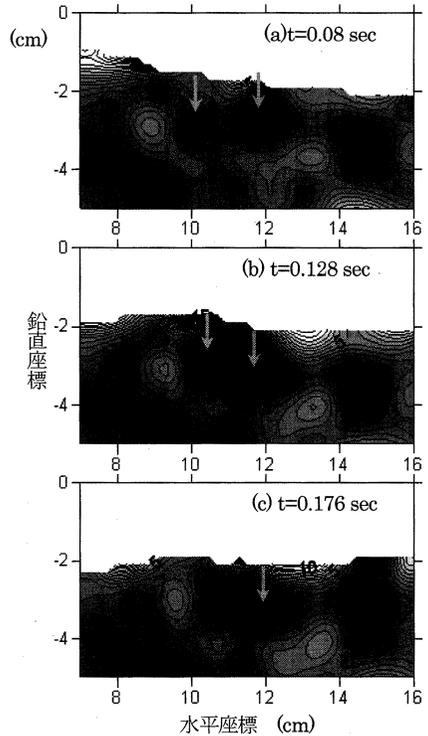


図-8 渦の合体過程の例
(時刻は図-5(a)を基準としている.)

参考文献

Adrian, R.J. (1990): Particle-imaging technique for experimental fluid mechanics, Annual Review of Fluid Mechanics, 23, 261.

大塚直・竹原幸生・水谷夏樹・辻本剛三・江藤剛治・高野保英 (2003): 風波によるマイクロブレイキング現象の画像計測, 海岸学論文集, 第50巻, pp.86-90.

竹原幸生・江藤剛治・村田滋・道奥康治 (1996): PTVのための新アルゴリズムの開発, 土木学会論文集, No.533/II-34, pp.107-126.

竹原幸生・真木正弘・辻本剛三・江藤剛治・高野保英 (2002): 風波発生時における水表面近傍の気流・水流のPTV同時計測, 海岸工学論文集, 第49巻, pp.66-70.

Takehara, K., R.J. Adrian, G.T. Etoh and K.T. Christensen (2000): A Kalman tracker for super-resolution PIV, Experiments in Fluids, pp.S34-S41.

竹原幸生・江藤剛治 (2008): MLSを導入したPTVによる渦度推定法の提案と風波流速場への適用, 土木学会論文集, 投稿中.

Toba, Y., M. Tokuda, K. Okuda and S. Kawai (1975): Forced convection accompanying wind waves, Journal of Oceanographical Society of Japan, Vol.31, pp192-198.

藤田一郎・神田徹・門脇正夫・森田卓光 (1996): 開水路凹部流れのPIVおよびLESによる乱流解析, 土木学会論文集, No.539, II-35, pp.79-88.

矢川元基・酒井譲 (1997): メッシュレス計算法, 機械の研究, 第49巻, 第1号, pp.103-110.