31 超音波によるベクトル速度計測

— 超音波 C V 法 —

日立製作所中央研究所 片倉景義

桐蔭学園横浜大学 奥島基良

METHOD FOR ULTRASONIC FLOW VECTOR MEASUREMENT

Kageyoshi KATAKURA¹ and Motoyoshi OKUJIMA²

A new method (Ultrasonic Computed Velocimetry) to measure complete vector components of flow velocity is proposed. Using this method, it is possible to measure both of the flow velocity components along and transverse to the beam axis. This method is able to simultaneously measure the signs and magnitude of the flow velocity components. Reflected ultrasound waves are used together with fully linear signal processing procedures. The first step of the method is Fourier transformation of the received signals in the direction of the transducer array. The second step is also a Fourier transformation but in the polar axis directions. These two steps provide the two velocity components along and transverse to the beam axis. Detailed procedure and result of numerical simulation are presented.

1. 研究の背景

超音波により運動流体等の対象物速度を計測する手法に、ドプラ効果を利用する方式が広く用いられているが、この方式によると超音波の進行方向の速度成分のみが計測可能でありこれに直交する方向の速度成分は計測出来ない。このため従来から、直交方向速度成分を計測可能とするために、複数の方向から超音波を照射する方法^{1) 2) 3)}、反射スเปックル画像の二次元移動を計測する手法⁴⁾、反射信号に空間的変調を施す方法⁵⁾などが検討されている。しかし、それらの方式には非線形処理に起因する種々の問題点を有している。そこでこれら各方向成分を有するベクトル量としての速度を、線形処理のみにより、計測可能とする方式を検討することとした。ここに述べる方式は、配列受波器により反射信号を受信し、この受信信号をまず配列方向にフーリエ変換し、ついで、これらを回転方向に対してフーリエ変換することにより、超音波ビームに並行な方向とそれに直交する方向の両方の速度成分を同時に計測可能とする方式である。この方式は線形処理であるため、最適処理が可能であり、また、複数反射体の同定にも問題は生じない。この方式は、複数組の計測値から計算により2あるいは3次元的な速度計測値を与えることから、X線断層写真法(X線CT)に倣い”超

¹Cent. Res. Lab., Hitachi Ltd. Kokubunji Tokyo 185 Japan

²Toin Univ. of Yokohama, Kuroganecho Yokohama 225 Japan

音波 CV" (UCV: Ultrasound Computed Velocimetry) あるいは単に CV と呼ぶ事にす
 る。この CV について、部分的には、すでに報告したが^{6) 7) 8) 9) 10)}、ここではその全体像を
 まとめて紹介する。

2. CV の概略の動作

CV においては、超音波信号を時刻 $t (= p T_0)$ を対象に向け送波し、反射波を配列形
 受波器により受波する。ここで、超音波パルスの送信時間間隔を T_0 とする。この受信信号
 は、受信時刻 t 、配列素子位置 x の関数である $s(x, t)$ となる。計算の手順は、まず $s(x, t)$
 を配列方向 x につきフーリエ変換し、 $R_1(\omega, t)$ とする。ここで、 $\tan \eta = \omega / t$ なる角度
 η を導入する。ついで、 $R_1(\omega, t)$ をこの角度 η の関数 $R_1(\eta, t)$ とみなし、送波時刻 t に
 関するフーリエ変換をおこない $R_2(\eta, \mu)$ とする。この $R_2(\eta, \mu)$ は、横軸が横方向の速
 度成分、縦軸が距離方向の速度成分に対応する二次元分布となり、その最大位置までのベク
 トルが対象物速度の方向と大きさを与えることになる。

3. 動作解析

CV の速度分解能を理論的に解析する。図 1 に示す座標系において、反射体が送受波器配
 列 TR の正面を通過する時刻を時間の原点とする。この時刻における反射体までの距離を R
 とする。また、反射体の半径方向の速度成分を δ_0 (m/sec)、回転方向の角速度を ϵ_0 (rad/
 sec) とする。 p 番目の送信時刻 $t (= p T_0)$ における反射体までの距離 r_s と方位 θ は、

$$r_s = R + \delta_0 t, \quad \theta = \epsilon_0 t$$

である。ここで波面の凹面分は遅延回路により平面に補正可能であることから、遠距離音場
 で近似すると、位置 x に存在する素子までの超音波伝搬距離 r および対応する位相回転量 ϕ
 は、 k を波数として

$$r = r_s + r_x = 2 r_s - x \sin \theta \approx 2 r_s - x \theta$$

$$\phi = k r = k (2 r_s - x \theta)$$

$$= k (2 (R + \delta_0 t) - x \epsilon_0 t)$$

となる。ここで、一定距離 R 項を除外すると

$$\phi = k (2 \delta_0 t - x \epsilon_0 t) = 2 k \delta_0 t - u \epsilon_0 t$$

$$u = k x$$

となる。このため、位置 x に存在する素子受信信号は

$$s = a(u) b(t) \exp(-j \phi)$$

$$= a(u) b(t) \exp(-j (2 k \delta_0 t - u \epsilon_0 t))$$

ここで $a(u)$ 、 $b(t)$ はそれぞれ口径方向あるいは送
 波時刻方向の重み係数である。この受信信号 s の u に
 関するフーリエ変換 $R_1(\omega, t)$ は

$$R_1(\omega, t) = F_u \{ s \} = b(t) \exp(-2 j k \delta_0 t) A(\omega - \epsilon_0 t)$$

となる。ここで、 $F_u \{ \}$ は変数 u に関するフーリエ変換を示し、 $A(\omega)$ は

$A(\omega) = F_u \{ a(u) \}$ である。ここで、 $\omega - t$ 平面における原点を通り勾配が η なる直
 線を導入すると、 $\tan \eta = \omega / t$ であり、 $R_1(\omega, t)$ は η 、 t の関数として

図 1 座標系

$$R_1(\eta, t) = R_1(\omega, t) = b(t) \exp(-2jk\delta_0 t) A\{(\tan \eta - \epsilon_0)t\}$$

$$= b(t) \exp(-2jk\delta_0 t) A(\gamma t)$$

となる。ここで、 $\gamma = \tan \eta - \epsilon_0$ である。次に、 $R_1(\eta, t)$ を送波時刻 t に関してフーリエ変換すると最終結果である $R_2(\eta, \mu)$ は

$$R_2(\eta, \mu) = F_t\{R_1(\eta, t)\} = F_t\{b(t) \exp(-2jk\delta_0 t)\} = C(\mu + 2k\delta_0)$$

$$C(\mu) = F_t\{b(t)\}, \quad b(t) = A(\gamma t)$$

となる。このため、処理結果は、2種類の重み関数 $a(u)$ 、 $b(t)$ のみにより定まることとなる。一般的に重み関数 $a(u)$ 、 $b(t)$ は、直流成分が主体的である。このため、通常

$$A(0) \geq A(\omega), \quad C(0) \geq C(\mu)$$

である。従って、 $R_2(\eta, \mu)$ は、 $\gamma = 0$ ($\tan \eta_0 - \epsilon_0 = 0$) であり且つ $\mu_0 + 2k\delta_0 = 0$ なる位置 (η_0, μ_0) に最大出力を示す。この η_0, μ_0 から、速度成分 ϵ_0, δ_0 が

$$\epsilon_0 = \tan \eta_0, \quad \delta_0 = -\mu_0 / (2k)$$

と求まる。このような方式における速度分解能は、 $a(u)$ 、 $b(t)$ を具体的に与えることにより定まる。ここで、これらを口径 D 計測の総時間長 T なる一様分布とすると、方位方向の角速度分解能 $\Delta \epsilon$ および距離方向速度分解能 $\Delta \delta$ はそれぞれ次式により与えられる。

$$\Delta \epsilon = 2\lambda / (DT), \quad \Delta \delta = \lambda / (2T)$$

4. 計算機シミュレーション

原理動作の確認を目的として、HITAC 2050 /32E によるシミュレーションを行なった。複数の運動物体に対する結果を図2に示す。この物体は、それぞれの横方向速度が $+50 \text{ cm/s}$ と -50 cm/s (一は左向き方向) なる二個の反射体であり、距離方向速度はいずれも 5 cm/s である。これらが正面を 5 cm の距離で交差しながら横切るように設定した。ここで、(A) が $|R_1(\omega, t)|$ であり (B) が $|R_2(\eta, \mu)|$ である。超音波周波数 3.5 MHz 、配列ピッチ 0.5 mm 、素子数 64 個である。それぞれに対応する位置に大きな出力として得られ、線形処理であることから、目的位置以外への不要信号の出現は全く見られない。

速度分解能についてもシミュレーションを行なった。図3に、 $\Delta \epsilon = 2\lambda / (DT)$ に相当する、方位方向速度成分 12.5 rad/sec を有する場合の分析結果を示す。この速度は、予想されたように、併記した固定反射体と充分

分離可能であった。図4に、 $\Delta \delta = \lambda / (2T)$ に相当する、距離方向速度成分 25 mm/s

図2 複数反射体に対する分析結果

ec を有する場合の

析結果を示す。この場合も、図5に示す、固定反射体と充分分離可能である。計測条件はいずれも、波長0.5mm、口径8mm、計測時間10msecであり、重み関数はいずれも一様重みとした。

5. おわりに

新しい速度計測手法につき、その動作解析および計算機シミュレーションによる性能確認を行った。今後、実験による動作確認を進め、実用化を進めたい。

6. 参考文献

- (1) 高山、吉村、古嶋；日超医講演論文集 40-A-57, 397-398 (May1982)
- (2) 北畠、千原、田辺；日超医講演論文集 40-A-56, 395-396 (May1982)
- (3) 原田、岡田、河西；日超医講演論文集 53-74, 253-254 (Nov.1988)
- (4) 金沢、秋山、中島；日超医講演論文集 50-A-63, 307-308 (June1987)
- (5) Ikuo Sakai, Yasuhiro Nakamura and Masami Kawabuchi; USP4979513 (Oct.1988)
- (6) 片倉、奥島、須山、園田；音響学会講演論文集 1-8-6, 843-844 (Mar.1992)
- (7) 片倉、奥島；日超医講演論文集 60-231, 521-522 (May1992)
- (8) 片倉、奥島；音響学会講演論文集 1-8-13, 993-994 (Oct.1992)
- (9) K.Katakura and M.Okujima; Proc. 1992 IEEE SU-Symp. in press (Oct.1992)
- (10) 片倉、奥島；音響学会講演論文集 (May.1993)。

図3 方位方向分解能限界速度

図4 距離方向分解能限界速度

図5 固定反射体分析結果