超音波パルスドップラー式流速分布計測法を利用した
管路内流速分布及び流量計測実験*手塚 健一^{*1}, 森 治嗣^{*2}, 鈴木 武志^{*3}
浜田 翔^{*4}, 木倉 宏成^{*5}, 有富 正憲^{*6}Velocity Profile Measurements in a Pipe Flow Using
Ultrasonic Pulse Doppler MethodKenichi TEZUKA^{*7}, Michitsugu MORI, Takeshi SUZUKI,
Sho HAMADA, Hiroshige KIKURA and Masanori ARITOMI^{*7} Tokyo Electric Power Company,

4-1 Egasaki-cho, Tsurumi-ku, Yokohama-shi, Kanagawa, 230-850 Japan

In order to improve thermal efficiency and optimize plant operation at electric power plants, ultrasonic pulse Doppler method is being developed to attain the high accuracy in flow rate measurements. Ultrasound waves are emitted into fluid from ultrasonic transducer mounted on the outer surface of a pipe. Waves are bounced back at the surface of ultrasound reflectors flowing in fluid. By detecting Doppler shift frequency of those waves velocity profiles along the ultrasound beam path can be obtained. Integration of those instantaneous velocity profiles gives us the flow rate in a pipe. In this report, the series of velocity profile measurements are summarized with field tests at an actual power plant for the downstream of an elbow with micro bubbles generated for ultrasonic reflectors.

Key Words: Pulse Doppler, Pipe Flow, Ultrasonic, Micro Bubble, Flowrate

1. 緒 言

発電設備の効率的な運用や機器の運転状態監視及び周辺環境への負荷低減等の観点から、プロセス系統の高精度流量計測技術が求められている。発電設備は配管口径・流量が大きい場合、従来の流量計で流量計測を行う場合、流量補正係数の設定が困難で高精度の流量計測が期待できない場合も多く、配管内の流速分布の乱れの影響を受け計測に誤差が含まれてしまう⁽¹⁾。このような背景から、配管に超音波振動子を設置して内部流体の流速分布を直接計測する超音波パルスドップラー式流速分布計測法(UDM: Ultrasonic Pulse Doppler Method)の実機適用化を進めてきた⁽²⁾。今回、実機発電プラントの流量計測に向けた基礎研究として、(1)エルボ下流における流速分布計測、(2)マイクロバブル発生用ノズルの試験、並びに(3)実機流

量計測実験、を行った結果について報告する。

2. エルボ下流の管路内流速分布計測

実験装置を図1に示す。本装置は水循環系、テスト部ならびに計測装置によって構成され、タンクに供給された水はポンプによって、電磁流量計を介してテスト流路に流入し、タンクへと循環する。テスト流路は内径φ75 mm、外径φ85 mm、全長4 mの亚克力製水平円管であり、水温は冷却水を用いて $20 \pm 0.5^\circ\text{C}$ に設定した。計測部は超音波トランスデューサー(TDX; 2 MHz)、亚克力製配管(外径85 mm、内径75 mm、肉厚5 mm)から構成される。超音波透過率を考慮して、TDXと配管を水でカップリングした。管レイノルズ数は $Re = 3.7 \times 10^5$ で一定とした。超音

Fig. 1 Schematic diagram of flow loop

* 原稿受付 2008年10月1日。

^{*1} 正員, 東京電力(株) (☎ 230-8510 鶴見区江ヶ崎町4-1)。^{*2} 正員, フェロー, 東京電力(株) (☎ 330-0074 さいたま市北浦和5-14-2)。^{*3} 東京電力(株)。^{*4} 芝浦工業大学工学部 (☎ 135-8548 東京都江東区豊州3-7-5)。^{*5} 正員, 東京工業大学原子炉工学研究所 (☎ 152-8550 東京都目黒区大岡山2-12-1)。^{*6} 正員, フェロー, 東京工業大学原子炉工学研究所。

E-mail: tezuka.kenichi@tepc.co.jp

Fig. 2 Photo of ultrasonic transducers mounted on pipe

Fig. 3 Time averaged velocity profiles in a pipe at horizontal diameter position of 5D from an elbow

Fig. 4 Time averaged velocity profiles in a pipe at horizontal diameter position of 19D from an elbow

波振動子(TDX)は中心周波数2 MHzであり、図2のようにテスト円管の中心軸を通り、それぞれ円周方向に対して120°の等間隔となるよう3箇所に設置した。

エルボの影響をみるため、測定位置をエルボからの距離を変化させて計測を行った。それぞれの測定位置に対する平均流速分布を図3~5に示す。図3~5中、それぞれの計測結果をUnder, Left, Rightと表記する。

エルボ直下では流れ場が大きく乱れているが、 $L=19D$ では、ほぼ3測線が一致し、 $L=40D$ ではほぼ発達した流れになっている。なお、超音波パルスの測定

Fig. 5 Time averaged velocity profiles in a pipe at horizontal diameter position of 40D from an elbow

Fig. 6 Photo of micro bubble jet flow from venturi nozzle

Fig. 7 Bubble diameter distributions at 50 cm from venturi nozzle with the throat diameter of 5 mm under different jet velocities

体積の影響により、 $x/d=1$ において速度がゼロにはなっていない。

3. ノズル型マイクロバブル発生装置

マイクロバブル発生方法については様々な方式が提案されているが⁽³⁾⁽⁴⁾、構造が簡単なノズル型マイクロバブル発生装置を検証した。ノズルを幅50 cmの矩形水路に沈め、流れ方向に噴出するバブルを高速度カメラで観察した結果を図6に示す。バブルはスロート部で間歇的に発生し、ジェットとなって出口に流出している。

気泡径と個数密度はDynaflow社製の音響式気泡径分布計測装置ABS®を用いて、ノズル噴射速度を3種類変化させて計測を行った。その結果を図7に示す。

Fig. 8 Velocity profile of bubble jet flow generated by venturi nozzle with throat diameter of 5 mm at different points from nozzle outlet

Fig. 9 Schematic Diagram of flowrate measurement for steel penstock at hydropower plant

ノズル設置の曲がりのため速度分布が右に偏っているが、実験結果から、気泡径 $10\sim 30\ \mu\text{m}$ 、個数密度数千個/ cm^3 の気泡塊が間歇的にノズルから噴出していることがわかる。図8に噴流の状態をUDMにて計測した結果を示す。計測は発信周波数 $0.5\ \text{MHz}$ 、直径 $60\ \text{mm}$ の超音波振動子を用いて、ノズルから $50\ \text{cm}$ と $120\ \text{cm}$ の2箇所で行い、噴流の広がり具合と主流との速度関係を検証した。

噴流幅を見ると $50\ \text{cm}$ から $120\ \text{cm}$ になるに従い、徐々に拡散し、主流とほぼ同速度となり、噴流速度が卓越することによる主流への影響はあまりないことがわかる。さらには、UDMの計測では一般に波長の $1/4\sim 1/2$ のトレーサー粒子が最適といわれているが、超音波の波長 ($3\ \text{mm}$)に比べて十分小さい気泡 ($10\ \mu\text{m}$)でも、速度分布がきちんと捉えられていることから計測に適することが判明した。これらの結果から、ノズル型マイクロバブル発生装置が実機計測に使用できることを確認した。

4. 発電プラントの流速分布計測

実機大口径配管の計測実験を行った。計測試験は定格出力約 $2\ 000\ \text{kW}$ の小規模実機水力発電所で実施した。設置されている水圧鉄管口径は $1.3\ \text{m}$ 、定格流量は約 $2.4\ \text{m}^3/\text{s}$ 、内部流体は河川水である。エルボ角度は 30° となっている。水圧鉄管経路の概略を図9に示す。

Fig. 10 Velocity profiles of steel penstock with two measuring line system at hydropower plant

水圧鉄管入口から直管部約 $24\ \text{m}$ ($19D$: 直径の 19 倍相当)に円周方向は配管水平面位置に2箇所、各々が向かい合うようにし、楔角度 34° で取り付けた。超音波反射体を確保するため、水槽から超音波反射体となるキャビテーション気泡を注入した。また、偏流の影響を見るため、円周方向に取り付けた2箇所の振動子(振動子A及び振動子B)で同時刻計測を行った。得られた流速分布の結果を図10に示す。

配管全体にわたって流速分布を取得できており、この結果、適切な気泡を確保する事により大口径水圧鉄管流量計測が可能であることを確認できた。

5. 結 語

今回、エルボ下流の偏流場における流速分布計測、並びにノズル型マイクロバブル発生装置を考案し、実機発電プラントの大流量配管内流速分布計測実験を行った。それらの結果から、超音波反射体として適切なマイクロバブルを注入することにより、実機大口径配管においても流量計測をすることが可能であるとの知見を得た。今後さらなる高精度化を目指した開発を進めていく。

文 献

- (1) Mattingly, G., Pipeflow Downstream of a Reducer and Its Effects on Flowmeters, *Flow Measurement and Instrument*, Vol. 5, No. 3 (1994), pp. 181-187.
- (2) Kikura, H. et al., Development of Plus Ultrasonic Doppler Method for Flow Rate Measurement off Power Plant, *Proceedings of ICONE10-22574*, (2002), [CD-ROM].
- (3) Sadatomi, M. et al., Performance of a New Micro-Bubble Generator with a Spherical Body in a Flowing Water Tube, *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 29, No. 5 (2005), pp. 615-623.
- (4) Soyama, H. et al., High-Speed Observation of Ultra-high-Speed Submerged Water Jet, *Experiment Thermal and Fluid Science*, Vol. 12, No. 4 (1996), pp. 411-416.