B101 自由液面における Toms 効果の可視化

東京大学 岡本 孝司^{*}、馬場 昌法、班目 春樹

Visualization on the Toms effect at free surface

Koji OKAMOTO^{*}, Masanori BABA^{*} and Haruki MADARAME^{*}

The turbulence reduction by the polymer-solution at free surface is experimentally investigated. The water or polymer-solution jet flew horizontally from the circular nozzle which was set beneath the free surface. The interaction between the jet and the free surface caused the small waves on the free surface. The movement of the surface was measured by the water level meter. The characteristics of the free surface with and without polymer-solution were evaluated using the measured data and visualized images. The free surface with polymer-solution was more stable than that of pure water. The jet and free surface were visualized by the laser light sheet. The shear reduction by the polymer-solution were found to play the important role on the free surface turbulence.

1. 序論

原子力発電プラントをはじめ各種プラントにおいて、配管による流体輸送は配管内の流動状態が複雑になることから様々な問題を抱えている。特に流れが乱流状態にある場合には圧力損失が大きく、流動抵抗の低減に工学的な関心が寄せられている。管壁摩擦の低減にはリブレットや弾性管、鎖状高分子の添加～Toms 効果～などが挙げられるが、高分子の微量添加による摩擦低減は数十%にものぼり、様々な流動状態や実験体系に関する研究が報告されている⁽¹⁾。しかしながら、気液二相流や固液二相流など実用的に重要な多相流に関する研究は少ない。特に自由液面を境界面として含む系は、工業上、多くの分野で見られ、LMFBRをはじめ、原子力分野に関しても例外ではない。純水の自由液面における界面乱流を扱った研究には Walker ら⁽²⁾の水平噴流—自由液面系実験がある。これは自由液面直下に噴流を平行に噴出させて、液面近傍に発生した乱流構造について検討を行なっている。しかし、高分子溶液を用いた実験はない。

本研究では、自由液面（気液界面）において鎖状高分子希釈溶液を用い、Toms 効果によって乱流の発達が抑制されるのか実験的検証を行ない、メカニズムを解明する手がかりを得ることを目的としている。これまでの実験的研究から、Toms 効果が発生するための条件として強いせん断応力が流れのなかに存在することが挙げられる。界面乱流を誘起するために、本研究では自由液面下に液体の噴流を流し、液面の応答を計測した。なお、水中には水噴流、高分子溶液中には高分子溶液噴流を自由液面下、液面と平行に噴出させる。この時液面下の噴流流速を測定し、自由液面近傍の乱れ強度分布を求め、Toms 効果が界面乱流を抑制する機構をとらえる。なお、これは Walker ら⁽²⁾と同様の実験である。

また、本研究においては、液面下の流れをレーザシートによって可視化するとともに、デジタルビデオカメラに記録した。デジタルビデオカメラは、DCT (Discrete Cosine

^{*} Nuclear Engineering Research Lab., University of Tokyo, Tokai-mura, Ibaraki

Transform) というアルゴリズムで画像圧縮を行っており、記録されている画像データは高周波成分がカットされる。粒子画像流速測定法などで用いられる粒子画像には不適当であるが、定性的な流れを捉えることは可能であると考えられる。そこで、本研究ではデジタルビデオカメラで画像を録画し、定性的な流れが把握できるかどうかの確認も実施した。

2. 実験

実験に用いた高分子溶液の作成方法はまず、プラスチック製容器に蓄えた水道水に粉末状の高分子（ポリアクリルアミド：平均分子量 1000 万）を散布後、24 時間ほど静置する。静置している間は数回ゆっくりと攪はんする。なお、本実験における高分子溶液の濃度は、10~100[wppm] に調整されている。

本実験においては気液界面の現象を取り扱うため、希釈高分子溶液の表面張力の測定をウィルヘルミー式表面張力計により実施した。いずれの濃度における値もほぼ一定値を示しており、溶媒（水道水）の値に等しい。従って、鎖状高分子の微量添加（0~200[wppm]）により溶液の表面張力は変化していないことを確認した。この結果は Rosehart ら⁽⁴⁾の実験結果と同じである。

実験装置全体図を図 1 に示す。水道水及び高分子溶液は、大きさ $1200 \times 600 \times 300$ [mm] のアクリル製水槽に蓄えられている。噴流用の水道水及び高分子溶液（100[wppm]）は円筒型タンクに蓄えられ、水槽液面下に平行に設置されたノズル（内径 $d = 5.0$ [mm]）から噴出される。ノズルの中心と液面との距離（ h ）は 5.0 [mm] とした（ $h/d = 1$ ）。溶液噴流の速度はレーザードップラー流速計（LDV）を用いて測定した。噴流に対して自由液面が応答した結果である液位変動を、静電容量式水位計で測定した。

液面の可視化のために、タンク下部に光源を設置し拡散シートを通し光を拡散させる。斜めより液面を撮影する事により、液面の凹凸が明るさの変化として捉えられる。撮影には通常のカメラを用いた。また、噴流と自由液面の相互作用を可視化するため、Ar レーザのシート光をタンク下部より、ノズルに平行な鉛直断面に照射した。噴流に $60\mu\text{m}$ の粒子を混入する事により、噴流と自由液面を可視化する事ができる。粒子画像はデジタルビデオカメラ（Sony DCR-DX1000）に記録し、IEEE1394 インターフェースを用い、直接デジタルデータをコンピュータに取り込んだ。

Figure 1: Schematics of experimental setup

Figure 2: Fluctuation of free surface

Figure 3: Velocity distribution. [(a)Water/(b)Polymer]

3. 実験結果と考察

水道水、高分子溶液噴流それぞれの実験条件（噴流流入流速：1.8～2.1[m/s] ($Re \approx 6000 \sim 7000$)）における実験結果を示す。液位変動データを図2に、噴流の速度分布を図3にそれぞれ示す。高分子溶液の場合の方が水の場合に比べて波立ちが抑えられている。また、流速も高分子噴流の方が高速であり、減衰が抑えられていることが判る。流速分布は高分子溶液の方が上方に偏っている。このため、自由液面近傍における剪断は、水噴流に比べ高分子噴流の方が大きい。しかしながら、自由液面の波立ちは水噴流の方が大きく表れている。図4に拡散光によって自由液面の波立ちを可視化した写真を示す。液位変動データにも表れていたが、水道水の方が高分子に比べて、波立ちが大きく、波長も短い事が判る。

図5は、噴流の可視化画像である。水噴流の拡散角度は高分子噴流の拡散角度よりも大きい事が判る。噴流はタンク内の静止流体と相互作用し、渦を形成する。水噴流の場合はこの乱流拡散が大きく、自由液面近傍にも大きな影響を与えている事がわかる。これに対し、高分子噴流の場合は、噴流があまり拡散せずかたまりとなって流れている。すなわち、乱流拡散が抑制されている。このため、自由液面近傍に与える影響も比較的少なく、波立ちも抑えられているものと考えられる。また、噴流の乱流拡散が抑制されている事から、図3に示すような減衰の遅い、かつ、液面に寄った流れとなっている事が説明できる。

水道水と高分子溶液で噴流のエネルギーは同程度であるのに、高分子溶液の場合、液面近傍の乱れが抑えられている。これは、高分子による乱れの緩和効果が噴流に働くとともに、自由液面に対しても同様に作用していると考えられる。

また、図5は、デジタルビデオカメラのデジタルデータを直接画像化したものであり、この画像は不可逆な画像圧縮がなされている。このような粒子画像であっても、図に示されるように、比較的正確に粒子像が再構築されている。粒子画像の定性的な比較には、デジタルビデオカメラを用いても、情報の欠損は無視し得ると考えられる。

4. 結論

水道水と高分子溶液の各自由液面に噴流を用いて乱れを与え、界面乱流に対する Toms 効果の影響を観測した。その結果、水道水と比較して高分子溶液の場合、乱流拡散が

抑えられ液面付近の乱れ強度が低下する事がわかった。この結果、液面の波立ちが抑えられる。

参考文献

- (1) P.S.Virk,1975,*AChEJ.*,**21**,625
- (2) D.T.Walker,1995,*JFM.*,**291**,223
- (3) J.W.Hoyt,1972,*J.Basic Eng.*,**94-2**,258
- (4) R.G.Rosehart,1972,*AChEJ.*,**18-4**,744

Figure 4: Surface shape in liquid jet experiment

Figure 5: Visualized jet near the free surface