

■ 解 説 ■

流体輸送における所要動力低減技術

Reduction of Pumping Power with Polymer Additives for the Fluid Transport

薄井 洋基*
Hiromoto Usui

1. はじめに

高分子添加剤の混入による流体輸送時の所要動力の低減効果が Toms¹⁾ により確認されて以来、既に約35年が経過した。この間、多方面での応用が検討され、またその原因究明のために基礎研究が続けられている。しかしながら、1970年代後半になって米国海軍が船舶・魚雷への抗力減少効果の応用の為の研究を打ち切った頃から、日本における抗力減少効果の研究者数は漸減し、最近では著者を含め数名の研究者が、化学工学・機械工学の分野で研究を続けているにすぎない。ところが国外では一時よりは論文数は少なくなったものの、依然として活発な研究が続けられている。1979年にはトランスアラスカパイプライン(TAPS)において高分子注入による抗力減少効果の本格的な応用が開始され²⁾、その他の実用的な応用例も続々と報告され始めている。高分子添加剤による抗力減少効果は、省エネルギーの面からも有望な現象であり、上述のような国内・国外の事情をふまえて、現時点において抗力減少効果の応用の現状と展望を述べる事は意義のある事と考え、筆を取る事とした。

本稿においては最初に従来への抗力減少効果の研究を概説し、次にこの現象の応用の現状を紹介する。更に最近の研究の新しい動向を簡単に述べ、抗力減少効果の展望としたい。

2. 抗力減少効果の概説

1948年、A. B. Toms¹⁾ により発見された高分子溶液の抗力減少効果はトムズ効果とも呼ばれ、管内乱流において極く微量の高分子添加物が劇的な摩擦抵抗の減少をきたす現象をいう。例として水溶性高分子(ポリエチレンオキサイド)を罍のオーダーで水中に添加した場合の摩擦係数の測定値を図-1に示す³⁾。ここで、

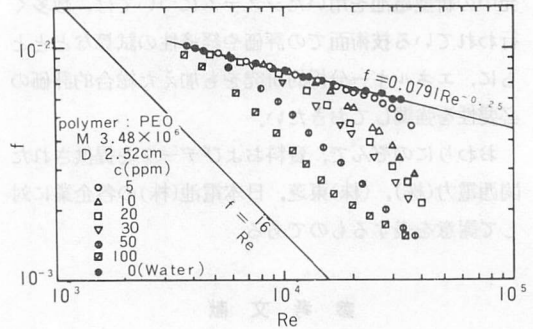


図-1 高分子添加による抗力減少の例

Reは溶液粘度基準のレイノルズ数であり、fはファニングの摩擦係数である。高分子を添加した事による溶液の粘度増加は高々数パーセントであり、摩擦係数は一定流量における圧力損失に比例すると考えてよいので、図-1に示された結果より同一流量の流体を輸送しようとする時、高分子を添加すれば所要動力が数10%も低減される事がわかる。この効果の原因については当初いろいろな仮説がたてられたが、現在では希薄高分子溶液の持つ粘弾性が管内流における壁乱流と相互干渉し、乱れの発生を抑制する為であるという事が一般に認められている^{4,5)}。希薄高分子溶液の乱流構造については、特に伸長粘性とバースティング現象との関連について精力的な研究が続けられているが^{6,7)}、本稿ではその詳細な記述は省略する。

ところで図-1に示した様な顕著な抗力減少効果を引き起こす為には、どの様な条件が高分子に必要なのであろうか。この条件としては次の様な事項が必要条件であることが確認されている。(1)直鎖状分子である事、(2)分子量が 10^6 以上、望ましくは 10^7 程度である事、(3)機械的・化学的に安定で劣化しない事、(4)溶媒との親和性が良く、可溶で分子が溶液中で良く広がる事、等が必要である。以上の様な条件を満たす高分子は溶媒が水であっても原油であっても、容易に見つけ出す事ができる。しかしながら、この現象の原因が添加高

* 山口大学工学部化学工学科・助教
〒755 宇部市常盤台 2557

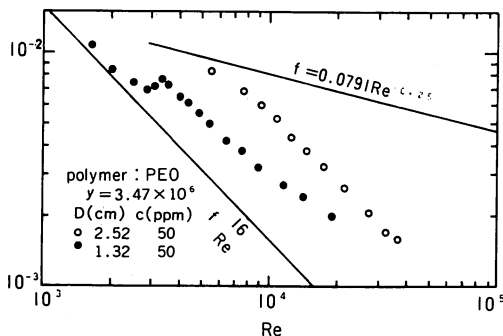


図-2 抗力減少における管径効果

子と乱流渦との相互干渉にある事から容易に理解できる様に、管径が大きくなった時に乱流渦は大きくなるにもかかわらず、高分子は同一の大きさのままなので抗力減少効果の程度に差が生じる事が予想される。これは実用化の際にスケールアップが容易に行われぬ事を意味している。管径を変化させた場合の抗力減少効果のあらわれ方の一例を図-2に示す³⁾。この例からもわかる様に管径が大きくなると同一流量では抗力減少効果は小さくなる事がわかる。即ち、パイプライン輸送等の大口径管の場合には、通常用いられている高分子を添加したのでは余り大きい効果は望めない、これを一般に管径効果と呼んでいる。大口径管については添加高分子の濃度を高めるか、特殊な高分子を使用する必要がある。異なった添加剤の使用例としては繊維または繊維と高分子の混合物による方法^{8, 9, 10)}、コンゴレッド等の染料により水溶性高分子を架橋させる方法¹¹⁾等が提案されている。これらの方法は実用化までには至っていないようであるが以下に抗力減少効果の応用の現状を述べる。

3. 抗力減少効果の応用の現状

抗力減少効果の応用は大別して二つの範疇に入る。それは溶媒が水であるか(water base)、油であるか(oil base)による。溶媒が原油である場合はトランスアラスカパイプライン(TAPS)における実施例が良い例である²⁾。ChemLink Petroleum, Inc.のFLO Pipeline Booster¹¹⁾(組成は不明)又は、Conoco Inc.のCDR 102 Flow Improver¹³⁾(組成は不明)等が使われているようである。この場合直径1,219mm, 数10ppmの高分子添加で最高30%の流量増加が報告されている。また海底油田の採掘現場でも、計画量よりも採掘量が多くなった場合には、新たにパイプラインを設置するよりも、高分子添加剤を用いて既

存の施設で輸送量を増加する方が経済的な場合が多いので多用される傾向にある¹³⁾。パイプライン輸送における抗力減少用高分子の需要は、今後増加するものと予想される。

溶媒が水の場合の応用例としては、最近のSellin等¹⁴⁾の総説に詳しく述べられている。主な応用例としてSellin¹⁵⁾による洪水時の下水の排水能力を抗力減少効果により高めようとする試みがある。

Sellin等は1981年よりプリストル市(英国)の下水道(管径300mm)において降水時のみ高分子添加が行われる自動処理システムを稼働させている。添加高分子としてWSR 301(ポリエチレンオキシド, ユニオンカーバイド社製)又はSEPARAN AP-302(ポリアクリルアミド, ダウケミカル社製)を用いて、高分子濃度が数10ppmの時、図-3に示すように顕著な流量増加

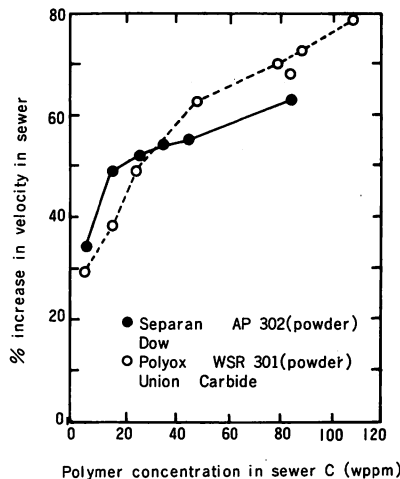


図-3 Sellin¹⁵⁾による下水処理時の流量増加

を得ている。既存の下水施設の容量が不足して来た場合に、新しく下水管を埋設するよりも大量降水時のみ微量の高分子を添加する方が経済的である場合が多いので、今後、この方面での抗力減少効果の応用は更に検討されるべきであろう。

石炭等の水力輸送における所要動力低減の為の試みもかなり報告されている。固体粒子濃度が余り高くない状態(20~30wt%/slurry)で添加高分子濃度が100ppm程度の場合、20~40%の所要動力低減が報告されている^{16, 17, 18)}。一例としてGolda¹⁷⁾の実験結果を図-4に示す。Csは石炭濃度であり縦軸、DRは($^{4P}N - ^{4P} \text{polym.}$) / $^{4P}N \times 100(\%)$ で定義され、 ^{4P}N は高分子をを添加しない場合の圧力の損失、 $^{4P} \text{polym.}$ は同一流量において高分子を添加した場合の圧力損失で

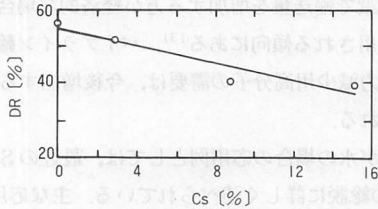


図-4 石炭の水力輸送時における抗力減少効果（参考文献19）より引用

ある。高分子添加剤としては、200 μ mのポリアクリルアミド（商品名セパランAP45、ダウケミカル社）が用いられている。スラリー輸送における抗力減少効果の応用は未だ基礎研究の段階で、実用化された例は見当たらないが、石炭スラリーの長距離・大量輸送が良く検討される昨今、高分子添加の効果を考慮に入れる事も、今後重要な研究課題になるものと思われる。

その他の例として噴流に対する高分子添加剤の影響が挙げられる。管内流における圧力損失の低下は噴流吐出圧の上昇をもたらす、噴流出口速度を上昇させる。これは消防における噴流の到達距離の増加を意味しており、特に都市部における高層ビルの消火に役立つと考えられる。この技術は実際にニューヨーク市、ハンブルグ市等において採用されている¹⁴⁾。また、高分子添加剤は吐出後の噴流の構造にも大きく影響することがわかっている²⁰⁾。図-5は筆者が撮影した噴流の写真で高分子添加剤の影響を示している²¹⁾。使用高分子はポリエチレンオキサイドであり、周囲流体は噴流内部

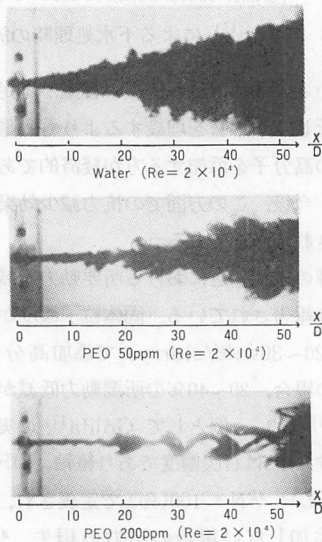


図-5 乱流噴流に及ぼす高分子添加剤の影響

と同じ流体である。このような噴流における高分子添加剤の働きは未だ良く理解されていないが、空气中に吐出された場合の応用として Jet Cutting がある。この場合も理由は明らかにされていないが、顕著な能力アップが観察されている²²⁾。また Jet 表面からの液滴の分散が極端に抑制されることから、航空機の燃料中に高分子を添加する事が検討され始めている²³⁾。即ち航空機事故の際の死傷者の大半は燃料が微粒化し、それに引火した事によっている。そこで墜落時に燃料系から噴出したものが微粒化しない様に高分子を添加しようと言うものである。ただし、この場合はジェットエンジン中での点火性能にも添加高分子が影響するので、実用化されていないが、将来興味ある応用例になる可能性はある。

以上、高分子添加による抗力減少効果の現在までの応用例について述べてきたが、ほとんどの実用化がここ数年の内に実施されたものである。我国ではまだ応用例がほとんど見当たらないが、今後、多方面で検討される事を望んで止まない。

4. 抗力減少効果の研究の新しい動向

本節では最近の抗力減少効果における新しい研究動向を述べることにする。抗力減少効果の原因が、添加した高分子と乱流渦との相互作用にあると言う事は第2節で述べたが、具体的に乱流渦又は高分子がどのような影響を受けるかを検討する必要がある。乱流渦又は壁乱流の構造の変化については、既に多くの報告例^{25,26,27)}が見られ、概略、以下の様な諸点で各研究者の意見が一致している。i) 高分子添加により乱れは減衰する。ii) 高分子添加により層流底層・遷移層の厚さが増大する。iii) パースティング周期が大きくなり、その空間的スケールは増大している。一方高分子の変形はそれを検出する事が非常に困難であるので、実際の管内乱流においては観察が不可能である。ところが、壁乱流の構造中、エジェクションプロセスに含まれる伸長流動が高分子と相互作用を持つ可能性が指摘されて以来、伸長流動における希薄高分子の特性値の測定が精力的に進められてきている^{27,28,29)}。最近では多孔質物体内を希薄高分子溶液が通過する場合に伸長流動をする結果圧力損失が非常に大きくなるという結果が注目され、伸長流動と分子パラメータの相関を得ようとする試みが、多くの研究者により続けられている^{31,32)}。今後、伸長流動における分子特性パラメータの把握と乱流構造の詳細な研究が、抗力減少効果の原因究明に

必要であると考える。

最近増加してきた新しい研究動向として、高分子の劣化に関するものが挙げられる。パイプライン輸送の際は輸送区間が長距離の為、高分子鎖が途中で切れて効果が半減する場合がある。そこで機械的、又は化学的劣化の過程を詳細に研究して、実用の際の指針にしようという目的で多数の目的が提出されるようになってきた^{32, 33, 34)}。特に機械的劣化については多くの研究報告が見られるが、せん断の与え方が各研究者により異なるので、今後実験方法の統一、試料の共通化等が検討されるべきであろう。いずれにしても劣化の定量的な評価方法を確立して、更に劣化に強く、しかも抗力減少効果の大きい高分子を合成することが、この現象の応用範囲の拡大に直接つながってくるものと思われる。

実際のパイプライン輸送における抗力減少効果の応用では、均一な希薄高分子溶液を使用するのではなく、濃厚高分子溶液又は粉末状高分子をパイプ中に注入する方法がとられる。ところが、濃厚高分子溶液を注入した場合、溶媒とすぐ混合するのではなく、かなり太い糸状のまま、乱流渦と相互干渉しながら下流へ流れて行く事が報告されている³⁵⁾。この場合、抗力減少効果は均一な希薄高分子溶液と同程度であるが、乱流渦との干渉の仕方は、かなり異っている事が明らかになっている³⁶⁾。即ち、壁乱流中のバースティングプロセスと個々の高分子が干渉するのではなく、管中心部での太い糸状高分子濃厚溶液と乱流核中の乱れ渦とが相互干渉を主に行っており、それが壁乱流に間接的に影響を及ぼしていると解釈されるデータが示されている。高分子濃厚溶液の注入方法(管内のどの部分に、どの様な形状で注入するのか)により、抗力減少効果のあらわれ方に差が出ると予想されるが、各種の注入方法についても検討され始めている³⁷⁾。糸状高分子溶液の注入による抗力減少効果は、今後その実用的価値と、他方ではその乱流制御の新たな可能性の為に、より注目されるべき現象であると考えられる。

5. おわりに

高分子添加による乱流抗力減少効果の応用の現状と将来の展望について述べてきた。この現象は通常の流体輸送と比較すると極端な抗力減少を生じるので我国において多くの研究者の注目を集めたが、反面、実用化するのが困難であるとわくと現象自体まで見捨てられる傾向にあった。その様な状況の中で本稿で述べ

たような具体的な応用例が実施されるようになった事は、抗力減少効果の研究者にとって力強い援護射撃であり、また工業界全般の注意を喚起するに足るものであろう。本稿で述べられなかった、いくつかの新しい応用面にも精力的な研究が続けられており、今後新技術として発展する可能性も大きい。しかしながら、我国における研究は先に述べたように、細々と続けられているという表現が妥当であるのが現状である。最近(1984年6~7月)にヨーロッパで二つの抗力減少効果に関する国際会議が開催された。(IUTM Symp. on Effect of Polymer Additives on Velocity and Temperature Fields, Univ. of Essen, West Germany 及び 3rd Int. Conf. on Drag Reduction (IAHR 主催, Univ. of Bristol, U. K.))。これらの会議の約80件の発表論文中、我国からの発表は、わずか2件であった。本展望が、今後の我国における抗力減少効果の研究の発展に少しでも役立てば幸いに思う。また大学の研究室のみでなく、企業においても、より効果的な添加高分子の開発等、抗力減少効果の実用化に注意が向けられる事を願って止まない。

参 考 文 献

- 1) A. B. Toms; Proc. 1st Int. Congress on Rheol. vol. 2, 135(1948)
- 2) E. D. Burger, L. G. Chorn and T. K. Perkins; J. Rheology, 24, 603(1980)
- 3) T. Mizushima, H. Usui and T. Yoshida; J. Chem. Eng. Japan, 7, 162(1974)
- 4) J. L. Lumley; J. Polym. Sci. 7, 263(1973)
- 5) P. S. Virk; AIChE. J. 21, 625(1975)
- 6) T. Mizushima and H. Usui, Phys. Fluids, 20, S100(1977)
- 7) B. U. Achia and D. W. Thompson; J. Fluid Mech., 81, 439(1977)
- 8) D. D. Kale and A. B. Metzner; AIChE. J., 22, 669(1976)
- 9) 薄井洋基, 佐野雄二, 藤瀬繁雄; 化学工学論文集, 6, 141(1980)
- 10) 加藤宏, 水沼博, 日本機械学会論文集, 48, 1066(1982)
- 11) N. S. Berman, R. B. Berger and J. R. Leis; J. Rheol. 24; 571(1980)
- 12) J. F. Motier, D. J. Prilutski, Z. J. Shanti and R. J. Kostelnik; Proc. 3rd Int. Conf. on Drag Reduction, ed. by R. H. J. Sellin and R. T. Moses, Univ. of Bristol, U. K., F3(1984)
- 13) W. R. Beaty 他4名; ibid, F1(1984)
- 14) R. H. J. Sellin, J. W. Hoyt, J. Pollert and O. Scrivener; J. Hydraul. Res. 20, 235(1982)
- 15) R. H. J. Sellin; Proc. 3rd Int. Conf. on Drag Reduction, ed. by R. H. J. Sellin and R. T. Moses, Univ. of Bristol,

- U. K., 13 (1984)
- 16) M. Poreh, J. L. Zakin, A. Brosh and M. Warshavsky; J. Hydraulics Dev., Proc. ASCE, 100, HY12, 1863 (1974)
- 17) G. Gust; J. Fluid Mech., 75, 29(1976)
- 18) H. Fujimoto and T. Tagori; Proc. 1st Jap. Towing Tank Conf., April(1974)
- 19) J. Golda; Proc. 3rd Int. Conf. on Drag Reduction, ed. by R. H. J. Sellin and R. T. Moses, Univ. of Bristol, U. K., D2(1984)
- 20) J. W. Hoyt and J. J. Taylor; J. Fluid Eng., 101, 304 (1979)
- 21) H. Usui, Y. Sano, T. Kawata and K. Sakai; Tech. Rep. Yamaguchi Univ., 2, 399(1980)
- 22) M. P. du Plessis and M. Hashish; Trans. ASME, J. Engineering for Industry, 100, 452(1978)
- 23) J. W. Hoyt; private communication
- 24) M. M. Reishman and W. G. Tiederman; J. Fluid Mech., 70, 369(1975)
- 25) H. Usui and Y. Sano; AIChE. Journal, 29, 611(1983)
- 26) C. Berner and O. Scrivener; Prog. Astronaut. Aeronaut., 72, 290(1980)
- 27) H. Usui and Y. Sano; Phys. Fluids, 24, 214(1981)
- 28) D. F. James and J. H. Saringer; J. Fluid Mech., 97, 655(1980)
- 29) D. F. James; Proc. IUTAM Symp. on "Effect of polymer additives on velocity and temperature fields", ed. by B. Gampert, Univ. Essen, West Germany (1984)
- 30) L. G. Leal; *ibid*(1984)
- 31) R. Haas and F. Durst; Rheologica Acta, 21, 566(1982)
- 32) W. M. Kulike; Proc. IUTAM Symp. on "Effect of polymer additives on velocity and temperature fields, ed. by B. Gampert, Univ. Essen, West Germany (1984)
- 33) M. N. Layec-Raphalen; Proc 3rd Int. Symp. on Drag Reduction, ed. by R. H. J. Sellin and R. T. Moses, Univ. Bristol, U. K., E1 (1984)
- 34) G. K. Patterson, *ibid*, E4(1984)
- 35) H. W. Bewersdorff; Rheologica Acta, 21, 587 (1982)
- 36) N. S. Berman and P. K. Sinha; Proc. 3rd Int. Symp. on Drag Reduction, ed. by R. H. J. Sellin and R. T. Moses, Univ. Bristol, U. K. B3(1984)
- 37) D. H. Fruman, *ibid*, B7(1984)

話の泉

原子力発電とウランウムの濃縮 (その1)

原子力発電は多くの議論の中において着々と計画、建設運転され、多くの実績を蓄積し遂に我が国の総発電量の20%にも達しており、中でも関西電力では30%ともいわれている。

原子力発電はウラン(U)の核分裂反応による膨大な発熱を、適切なコントロールによって極めて徐々に行ない、その熱でボイラーを沸かし発電するもので、もしこの分裂反応を外部からコントロールしない場合には一瞬にして核分裂が起こり、文字通り原爆となる。Uはかつては原子量の最大なものといわれており、自然界(鉱石、将来は海水中?)から U^{238} と U^{235} の混合した金属として製錬されるが、その中で核分裂を起こす U^{235} は0.7%に過ぎず、残りの99.3%は U^{238} である。

原子力発電所で熱源として使用されるウランウムの燃料としては0.7%の濃度では発熱は利用できず、少なくとも U^{235} が数%以上の濃度に濃縮されなくてはならない。

U^{235} の濃縮技術としては、もともと同一元素で単に原子量の僅かに異なる U^{238} と U^{235} とを分離することで理論的にみても決して容易ではない。化学的性質は同じで分離する方法はなく、物理的性質においては極めて僅かの原子量の差があるだけで、その僅かの差を利用して分離しなければならない。

分離法としては原子量の僅かの量のすなわち

分離法としては原子量の僅かの量のすなわち $238/235=1.013$ (1.3%)の差を利用する方法で、その一つは気体の六弗化ウラン(UF_6)の状態で半透膜(例えばテフロン)を透過する場合、その透過速度は原子量の $\frac{1}{2}$ 乗に反比例するという法則に基づき、 U^{235} の方がそれだけ多く透過(濃縮)するからこの透過を何回も繰返すことによって逐次濃縮される。広島に落とされた原爆はこの方法によって作られたものといわれている。 (F)

(注) その2は31ページ