

# ポリマーサンプリングにおける ワイゼンベルグ効果の検討

石崎 崇大<sup>1\*</sup>・谷 和夫<sup>2</sup>

<sup>1</sup>横浜国立大学大学院 工学府 社会空間システム学専攻 (〒240-8501 横浜市保土ヶ谷区常盤台79-5)

<sup>2</sup>横浜国立大学大学院 工学研究院 (〒240-8501 神奈川県横浜市保土ヶ谷区常盤台79-5)

\*E-mail: d08gc119@ynu.ac.jp

破碎帯や風化した岩盤から乱れが少ない試料を採取するために開発されたポリマーサンプリングにおいて、掘削中のコアにはワイゼンベルグ効果により拘束圧が作用していると考えられる。しかし、ポリマー溶液の濃度とワイゼンベルグ効果の関係などはまだ明らかにされていない。そこで、水溶性ポリマー濃度  $C_{pi}=0-10\%$  と高吸水性ポリマー濃度  $C_{pa}=0.0-0.15\%$  を添加した水溶液中で回転子の軸への上昇高さを計測してワイゼンベルグ効果の大きさを評価した。その結果、水溶性ポリマー濃度の増加に伴いポリマーの上昇高さが  $C_{pi}=6\%$  までは増大し、それ以上ではほぼ一定となるので、 $C_{pi}=4-6\%$  が効果的なことが分かった。また、高吸水性ポリマーの影響はほとんど見られなかった。

**Key Words :** polymer, sampling, Weissenberg effect, undisturbed specimen

## 1. はじめに

### (1) 背景

岩壁の安定性を評価するために破碎帯や風化ないし変質して弱くなった部分から乱れが少ない試料を水溶性ポリマーの濃厚溶液を用いたポリマーサンプリングによって採取することができる。柳沢 他(2003)は、掘削中にコアに作用する拘束圧を増加させて乱れを防止する効果としてワイゼンベルグ効果が大きく貢献していると推測した。ワイゼンベルグ効果とは、非ニュートン粘性流体に特徴的な性質(法線応力効果)で、高分子化合物溶液などの粘弾性液体に丸棒を立てて回転させた時に、この丸棒の周りに粘液が上昇してくる現象として観察される(増田, 1987)。また、ポリマーサンプリングの効果を高めるために高吸水性ポリマーを添加する方法が提案された(佐藤, 2009)。

しかし、水溶性ポリマー濃度  $C_p$  と高吸水性ポリマー濃度  $C_{pa}$  の組み合わせがワイゼンベルグ効果にどれほど影響を及ぼすのかは検討されていない。一方、このポリマーサンプリングによっても、海沿いに立地する発電所の敷地内の砂地盤で乱れが少ない試料を採取することができなかつた事例があった。この原因として、地盤内に流れている電流や地下水中の塩分が影響していると考えられる。

そこで、ワイゼンベルグ効果に及ぼす水溶性ポリマー及び高吸水性ポリマーの濃度、塩分濃度、電気の影響を検討することとした。

### (2) 目的

水溶性ポリマーのみを添加した水溶液、水溶性ポリマーに高吸水性ポリマーを添加した水溶液、さらに水溶性ポリマーと塩を添加した水溶液のワイゼンベルグ効果の大きさを明らかにする。さらに、上記の水溶液のワイゼンベルグ効果に及ぼす電気の大きさの影響も明らかにする。

検討項目と検討の範囲を以下に列挙する。

- ①水溶性ポリマー濃度  $C_p=0, 2, 4, 6, 8, 10\%$
- ②高吸水性ポリマー濃度  $C_{pa}(C_p=0, 4\%$  に対して  $C_{pa}=0.00, 0.05, 0.10, 0.15\%$ )
- ③塩分濃度  $C_{sr}=0.0, 2.6\%$
- ④電圧の大きさ  $E=0, 1, 10, 18V$
- ⑤回転速度  $R=360, 700rpm$
- ⑥回転子の直径  $d=30, 40mm$

なお、ワイゼンベルグ効果の直接的な指標であるポリマーの上昇高さ  $h$  の他に、ポリマーの回転域の径  $\phi$  も関連する項目として計測した。

## 2. 試験の方法

ワイゼンベルグ効果(法線応力効果)によるサンプリング中にコアの側面に作用する拘束圧を評価するために、ポリマー溶液中に回転子を入れて軸回りにポリマー溶液が上昇する高さ $h$ を計測した。

### (1) 試験装置

試験装置の概要と実験の様子を図-1と写真-1に示す。

ボール盤：回転子を回転するためのベンチドリル((株)日立工機, DE-4300, 回転数360, 700, 1200, 2400rpm)。

円筒容器：内径190mm, 高さ $h=194$ mmの亚克力製。

回転子：原位置ベーンせん断試験のベーン形状を参考に、十字の羽(高さ50mm, 直径 $d=30, 40$ mm)によってポリマーが直径10mmの回転軸を上昇する高さ $h$ を計測するための器具。

直流電源：電圧 $E$ を水溶液中に流すために用いる電源(KIKUSUI, PMC18-5A, 最高電圧20V)。

テスター：直流電源から流れる電圧 $E$ に対して、溶液中の抵抗値を調べるために用いる計器(SANWA, PC20)。

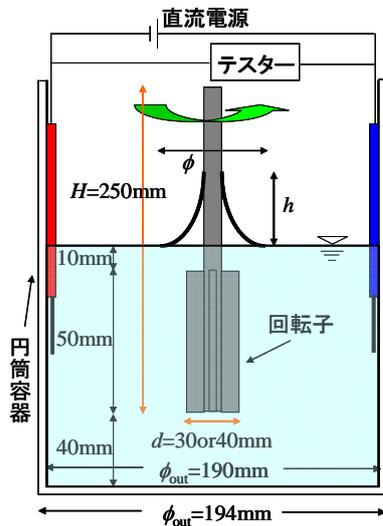


図-1 試験装置の概要(単位:mm)



写真-1 試験装置

### (2) 使用する試料の材料

水溶性ポリマー：ポリアクリルアミドを主成分とするボーリング泥水用の増粘剤((株)テルナイト製, イージードリル)を用いる(テルナイト, 2004)。ポリマーサンプリングでは質量濃度 $C_{pl}=3-5\%$ で用いる。

高吸水性ポリマー：アクリル酸ソーダ重合体((株)ナリカ, P70-3790-02)を主成分とし、紙オムツなどに使用されており、吸水能力が質量比1000倍で長期間に渡って水分を保持することができる(増田, 1987)。質量濃度 $C_{pa}<0.10\%$ では飽和状態まで吸水する。

塩：観賞魚用の人工海水((株)マリン・テック製, SEALIFE)を用いた。

### (3) 試料の作製方法

円筒容器の中に高さ100mmまで水道水を2860g入れた後、設定した各試料の濃度に相当する質量のポリマーと塩を入れて十分に攪拌する。

### (4) 計測の方法

攪拌用の回転子( $d=30, 40$ mm)をボール盤に取り付けた後、羽根の上端が液面下10mmの深さとなるようにセットする。電気抵抗の測定と直流電流を流すために必要な銅線を円筒容器の対角位置の内側面に設置する。

室温 $T=25-28^{\circ}\text{C}$ において、直流電源を用いて所定の電圧( $E=0, 1, 10, 18\text{V}$ )を流し、テスターで抵抗値が一定になることを確認する。

その後、回転数 $R=360\text{rpm}$ 又は $700\text{rpm}$ で回転子を回転させ、時間 $t$ の経過に伴ったポリマーの上昇高さ $h$ を軸に2mm毎に刻んだ目盛りを目視で10分間計測( $t=0-30(\text{s}):5(\text{s})$ 毎,  $30-60(\text{s}):10(\text{s})$ 毎,  $60-120(\text{s}):20(\text{s})$ 毎,  $120-300(\text{s}):30(\text{s})$ 毎,  $300-600(\text{s}):60(\text{s})$ 毎)する。その後、液面上で確認することができるポリマー溶液の回転域の径 $\phi$ を定規で計測し、水溶液の抵抗値もテスターで計測する。

### (5) 結果の整理方法

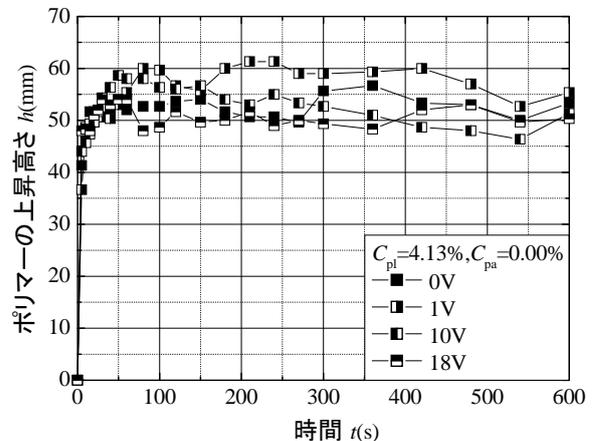


図-2 ポリマーの上昇高さ $h$ と時間 $t$ の関係  
( $R=360\text{rpm}$ ,  $C_{pl}=4\%$ ,  $C_{pa}=0\%$ ,  $C_{sa}=0\%$ )

ポリマーの上昇高さ $h$ と回転開始からの時間 $t$ の関係の例を図-2に示す。 $t=50$ (s)において $h$ は急増し、それ以後はほぼ定常状態に至る。よって、以後の分析では $t=50$ - $600$ (s)間に計測した $h$ の平均値 $h_{av}$ をワイゼンベルグ効果の大きさを表す代表値とした。

### (6) 試験ケース

試験ケースの一覧を表1に示す。基本ケースは、 $d=30$ mm,  $R=360$ rpm,  $C_{pi}=0.0, 4.0\%$ ,  $C_{ps}=0.0\%$ ,  $C_{sa}=0.0\%$ とし、 $E=0, 1, 10, 18$ Vについて $h$ - $t$ 関係と $\phi$ を計測した。

この基本ケースに対して、各検討項目を調べるための実験条件を以下のように定めた。

- ・水溶性ポリマー濃度 $C_{pi}=0, 2, 4, 6, 8, 10\%$ (ポリマーサンプリングが一般に $C_{pi}=3$ - $5\%$ で行なわれていることを考慮して)
- ・高吸水性ポリマー濃度 $C_{pa}=0.00, 0.05, 0.10, 0.15\%$ (質量比で最大1000倍の吸水性の効果があることを考慮して)
- ・塩分濃度 $C_{sa}=0.0, 2.6\%$ (海水が $C_{sa}=3.5\%$ であることを考慮して、海岸付近の地下水を模擬して)

さらに、回転条件の影響を見るため、回転子の羽の直径 $d=40$ mm, 回転数 $700$ rpmと変化した場合についても計測した。また、各条件についてばらつきを考慮するため3回の計測を行い、15ケース\*3回の計測を行なった。

## 3. ワイゼンベルグ効果の大きさ

### (1) 水溶性ポリマー濃度 $C_{pi}$ の影響

$d=30$ mm,  $R=360$ rpm,  $C_{ps}=0.0\%$ ,  $C_{sa}=0.0\%$ で水溶性ポリマー濃度 $C_{pi}=0$ - $10\%$ に変化させた実験の結果を図-3に示す。 $C_{pi}$ の増加に伴い、ポリマーの上昇高さの平均値 $h_{av}$ が $0.0 \leq C_{pi} \leq 6.0\%$ にかけて $h_{av}=10$ mmから $h_{av}=66$ mmまで $76$ mm上昇し、 $11$ - $12$ mm/%の高率で増大した。しかし、 $6.0 \leq C_{pi} \leq 10.0\%$ では $h_{av}=8.1$ mmの変化に留まり、 $C_{pi} \leq 6.0\%$ と比較するとその上昇率 $2$ mm/%は急減する。そのため、ワイゼンベルグ効果を効率よく高めるという観点からは $C_{pi}=4.0$ - $6.0\%$ が好適である。

表-1 試験ケースの一覧

回転子の羽根の直径 $d$ (mm)	30	30	40
回転子の回転数 $R$ (rpm)	360	700	360
濃度(%) ( $C_{pi}, C_{ps}, C_{sa}$ )	(0,0,0) <sup>注1</sup> , (2,0,0), (4,0,0) <sup>注1</sup> , (6,0,0), (8,0,0), (10,0,0), (0,0.05,0), (0,0.10,0), (0,0.15,0), (4,0.05,0), (4,0.10,0), (4,0.15,0), (4,0.2,0)	(2,0,0), (4,0,0)	(4,0,0)

注1: 基本ケース

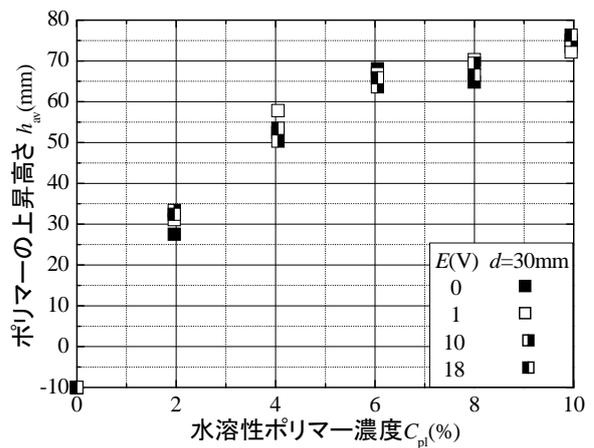


図-3 水溶性ポリマー濃度 $C_{pi}$ の影響  
( $d=30$ mm,  $R=360$ rpm,  $C_{ps}=0.0\%$ ,  $C_{sa}=0.0\%$ )

### (2) 高吸水性ポリマー濃度 $C_{pa}$ の影響

$d=30$ mm,  $R=360$ rpm, 水溶性ポリマー濃度 $C_{pi}=0.0\%$ と $4.0\%$ ,  $C_{sa}=0.0\%$ で高吸水性ポリマー濃度 $C_{pa}=0.00$ - $0.15\%$ に変化させた実験の結果を図-4に示す。各 $C_{pa}$ の関係に対して回帰直線を示した。

ワイゼンベルグ効果が強く見られる $C_{pi}=4.0\%$ では、高吸水性ポリマー濃度 $C_{pa}$ が $0\%$ から $0.15\%$ に増加すると $h_{av}=55$ mmから $47$ mmに低下し、高吸水性ポリマーの添加はワイゼンベルグ効果をやや抑制するようである。

また、ワイゼンベルグ効果が見られない高吸水性ポリマーのみを添加した場合( $C_{pi}=0.0\%$ )では、 $C_{pa}$ に依存することなく $h_{av}=10$ mmで一定となった。そのため、高吸水性ポリマー単独ではワイゼンベルグ効果は期待できないことが分かった。

### (3) 人工海水濃度 $C_{sa}$ の影響

$d=30$ mm,  $R=360$ rpm, 水溶性ポリマー濃度 $C_{pi}=4.0\%$ で塩分濃度 $C_{sa}=0.0$ - $2.6\%$ に変化させた実験の結果を図-5に示す。人工海水を添加( $C_{sa}=2.6\%$ )したことによって、ポリマーの上昇高さ $h_{av}$ は $2.1$ mm増加した。よって、地下水の塩分

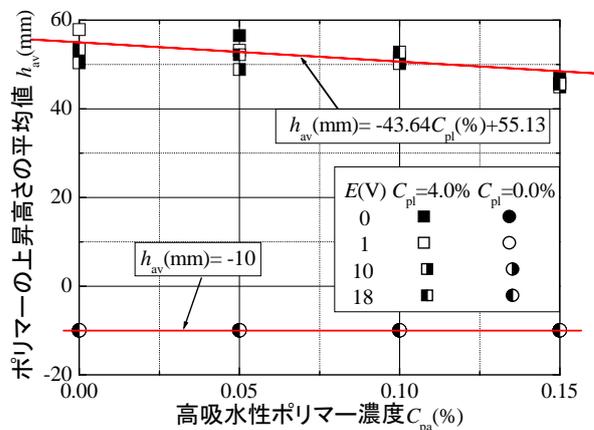


図-4 高吸水性ポリマー濃度 $C_{pa}$ の影響( $C_{pi}=0.0$ - $4.0\%$ )  
( $d=30$ mm,  $R=360$ rpm,  $C_{sa}=0.0\%$ )

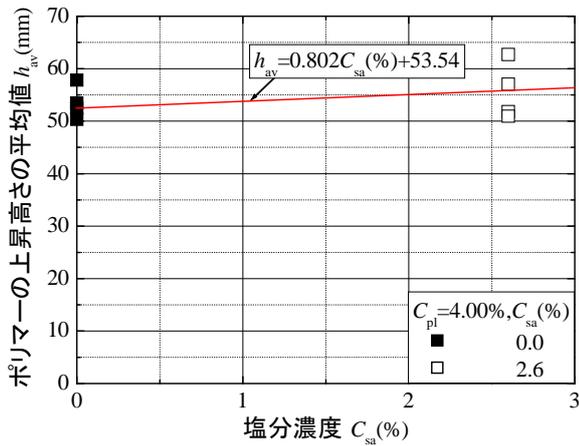


図-5 塩分濃度  $C_{sa}$  の影響

( $d=30\text{mm}, R=360\text{rpm}, C_{pl}=4.0\%, C_{sr}=0.0\%$ )

がポリマーサンプリングにおけるワイゼンベルグ効果を抑制することはなく、海底ないし海岸近傍でもワイゼンベルグ効果が十分に期待できることが分かった。

#### (4) 電圧の大きさ $E$ の影響

電圧  $E$  の増加がポリマーの上昇高さ  $h_{av}$  に及ぼす影響について  $d=30\text{mm}, R=360\text{rpm}$  で得られた実験の結果を図-6-8

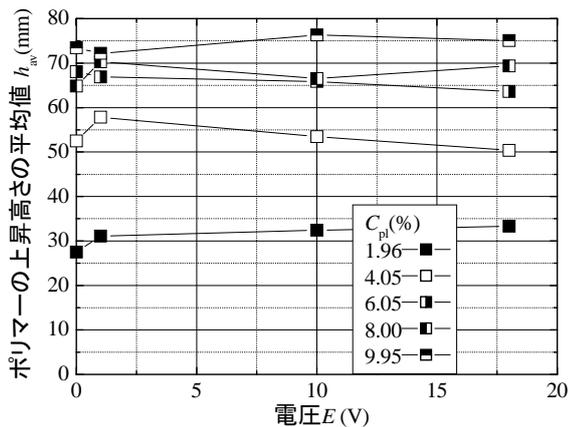


図-6  $h_{av}$  と電圧  $E$  の関係

( $d=30\text{mm}, R=360\text{rpm}, C_{pr}=0.0\%, C_{sr}=0.0\%$ )

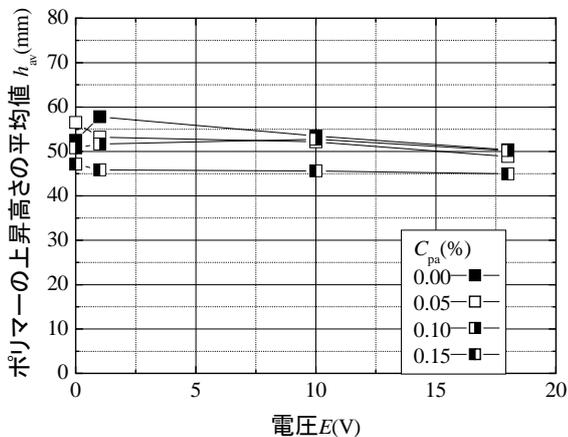


図-7  $h_{av}$  と電圧  $E$  の関係

( $d=30\text{mm}, R=360\text{rpm}, C_{pl}=4.0\%, C_{sr}=0.0\%$ )

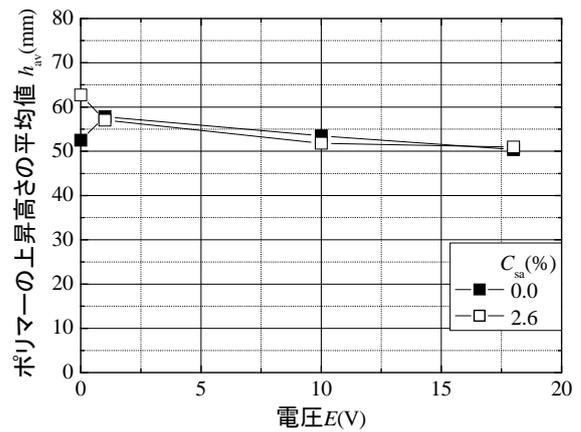


図-8  $h_{av}$  と電圧  $E$  の関係

( $d=30\text{mm}, R=360\text{rpm}, C_{pl}=4.0\%, C_{pr}=0.0\%$ )

に示す。  $C_{pr}=0.0\%, C_{sr}=0.0\%$  の場合に水溶性ポリマー濃度  $C_{pl}$  の影響を図-6、水溶性ポリマー濃度  $C_{pl}=4.0\%, C_{sr}=0.0\%$  の場合に高吸水性ポリマー濃度  $C_{pa}$  の影響を図-7、水溶性ポリマー濃度  $C_{pl}=4.0\%, C_{pr}=0.0\%$  の場合に塩分濃度  $C_{sa}$  の影響を図-8に示す。

電圧  $E$  の変化 (0-18V) によってポリマーの上昇高さ  $h_{av}$  の変化は最大で10mmであり、  $C_{pl} > 4\%$  における  $h_{av} > 50\text{mm}$  を考慮するとポリマーサンプリングへの影響は小さいと思われる。

#### (5) 回転数 $R$ の大きさの影響

$d=30\text{mm}$ , 水溶性ポリマー濃度  $C_{pl}=4.0\%, C_{pr}=0.0\%, C_{sr}=0.0\%$  で回転数  $R=360, 700\text{rpm}$  に変化させた実験の結果を図-9に示す。  $h_{av}$  は  $R$  にほぼ比例するが、上に凸のやや非線形な関係である。よって、サンプリング時のビットないしコアパレルの回転数を上げればワイゼンベルグ効果を増大することができることが分かった。

#### (6) 回転子の大きさの影響

$R=360\text{rpm}, C_{pr}=0.0\%, C_{sr}=0.0\%$  で同じ水溶性ポリマー濃度

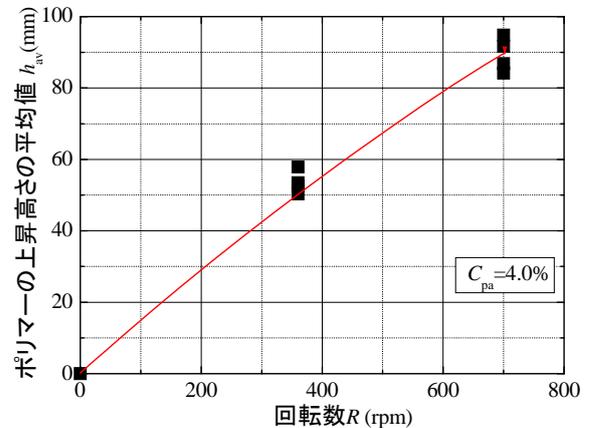


図-9  $h_{av}$  と電圧  $E$  の関係

( $d=30\text{mm}, R=360\text{rpm}, C_{pl}=4.0\%, C_{sr}=0.0\%$ )

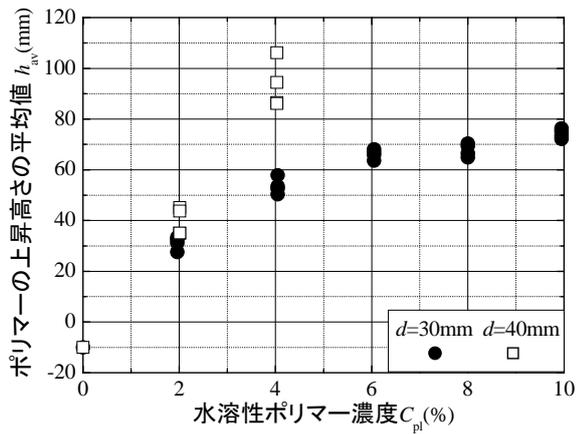


図-10 回転子の羽根の直径の影響( $C_{pi}=0.0\%$ ,  $C_{si}=0.0\%$ )

$C_{pi}=0.0, 2.0, 4.0\%$ に対して、回転子の羽の直径 $d=30, 40\text{mm}$ 変化させたときの実験の結果を図-10に示す。 $C_{pi}=2.0, 4.0\%$ において大きい回転子( $d=40\text{mm}$ )の方が小さい回転子( $d=30\text{mm}$ )より $h_{av}$ が10-40mm程度高かった。大きい回転子の方が回転軸より遠方のポリマー溶液まで回転させることが可能であるため、 $h_{av}$ が高く計測されたと推測される。

#### (7) ポリマーの回転域の径 $\phi$ の大きさの影響

$R=360\text{rpm}$ ,  $C_{pi}=0.0\%$ ,  $C_{si}=0.0\%$ で水溶性ポリマー濃度 $C_{pi}=2.0-10.0\%$ に変化させた実験の結果を図11に示す。なお、 $C_{pi}=0.0\%$ の際にはワイゼンベルグ効果が認められなかった( $h<0\text{mm}$ )ので軸周りに明確な回転域が確認できなかった。水溶性ポリマー濃度 $C_{pi}$ が2.0%から10%にまで大きくなる間に $\phi$ は5.6cmから7.5cmに増大した。このことは、 $d=30\text{mm}$ については、図-3と図-10にも示すように $C_{pi}$ の増大に伴ってワイゼンベルグ効果、すなわち法線方向応力が大きくなっていることに対応している。 $d=40\text{mm}$ の方が $d=30\text{mm}$ よりも回転域は10-20%大きく、図-10に示す $h_{av}$ に関する傾向と調和的である。

$d=30\text{mm}$ ,  $R=360\text{rpm}$ ,  $C_{pi}=0.0, 4.0\%$ ,  $C_{si}=0.0\%$ で高吸水性ポリマー濃度 $C_{pi}=0.0-0.15\%$ に変化させた実験の結果を図-12

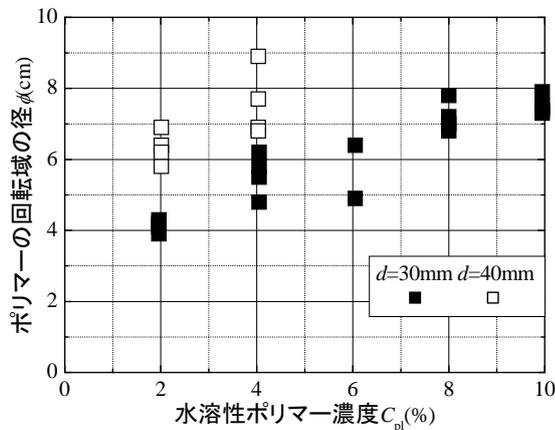


図-11  $\phi$ と $C_{pi}$ の関係

( $R=360\text{rpm}$ ,  $C_{pi}=0.0\%$ ,  $C_{si}=0.0\%$ )

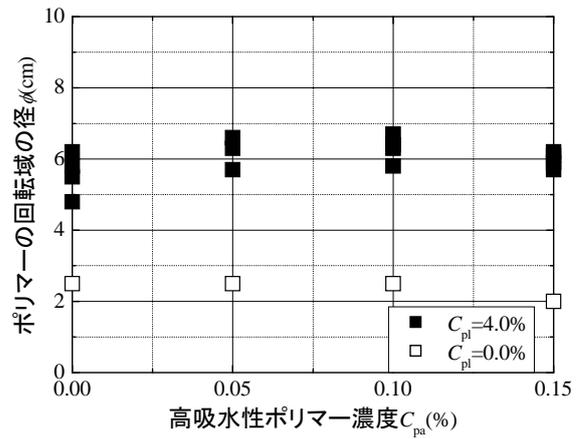


図-12  $\phi$ と $C_{pa}$ の関係

( $d=30\text{mm}$ ,  $R=360\text{rpm}$ ,  $C_{pi}=0.0, 4.0\%$ ,  $C_{si}=0.0\%$ )

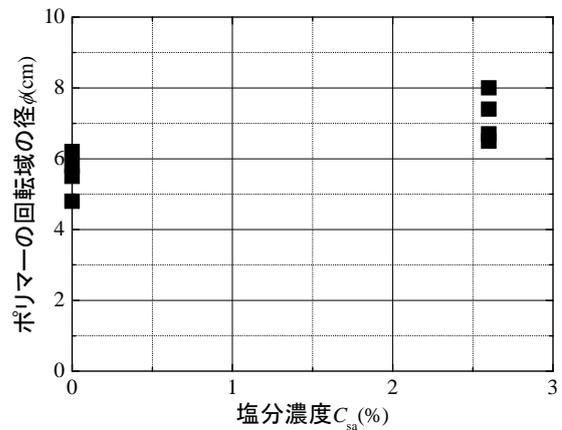


図-13  $\phi$ と $C_{sa}$ の関係

( $d=30\text{mm}$ ,  $R=360\text{rpm}$ ,  $C_{pi}=4.0\%$ ,  $C_{pi}=0.0\%$ )

に示す。高吸水性ポリマーの添加による $\phi$ の変化はほとんどなかった。よって、図-4にも示すように高吸水性ポリマーによるワイゼンベルグ効果の増大は期待できないと思われる。

$d=30\text{mm}$ ,  $R=360\text{rpm}$ ,  $C_{pi}=4.0\%$ ,  $C_{pi}=0.0\%$ で塩分濃度 $C_{sa}=0.0-2.6\%$ に変化させた実験の結果を図-13に示す。 $C_{sa}=0.0\%$ では $\phi=5.6\text{cm}$ となったのに対し、 $C_{sa}=2.6\%$ では $\phi=7.2\text{cm}$ と約20%増大した。図-5に示すように、3%程度の塩分によってワイゼンベルグ効果が数%向上することに対応していると推測される。

## 4. 結論

容器内に調整したポリマー溶液中で先端に十字羽を設けた回転子を回転させ、その際に回転子の軸に上昇するポリマー溶液の高さを計測して、ワイゼンベルグ効果の大きさを評価した。その結果、ワイゼンベルグ効果に及ぼす水溶性ポリマー濃度 $C_p$ 、高吸水性ポリマー濃度 $C_{pa}$ 、塩分濃度 $C_s$ 、電圧 $E$ の影響について以下のことが分かった。

- 1)水溶性ポリマーの上昇高さが $0.0\% < C_p < 6.0\%$ の範囲においてワイゼンベルグ効果(法線応力効果)は大きく増加し、 $6.0\% < C_p < 10.0\%$ の範囲では増加率は低下する。よって、経済性を考慮すると $4.0\% < C_p < 6.0\%$ が最もポリマーサンプリングに効果的である。
- 2)高吸水性ポリマーの濃度 $0.00\% \leq C_{pa} \leq 0.15\%$ において、ワイゼンベルグ効果は影響を受けないか、またはやや抑制される。よって、高吸水性ポリマーがサンプリングに効果的な要因はワイゼンベルグ効果以外である。
- 3)塩分濃度 $C_s$ を2.6%とした人工海水では淡水に比べてワイゼンベルグ効果が数%程度強くなる。したがって、ポリマーサンプリングは海底、海岸近傍でも充分に適用が可能である。
- 4)今回検討した全溶液に対し、電圧 $E=0-18V$ の範囲内において、通電はワイゼンベルグ効果に影響がなかった。よって、発電所の構内でポリマーサンプリングが不調であった理由として、地電流の影響は小さいと思われる。

5)回転数 $R$ を360rpmと700rpmで比較したところ、700rpmの方が大きくなり、また回転子の直径( $d=30,40mm$ )が大きいほどワイゼンベルグ効果が強くなる。

## 5. 今後の課題

今後の課題を以下に述べる。

- 1)高吸水性ポリマーがポリマーサンプリングの性能向上に効果的な理由として、被膜形成効果に着目してポリマーの付着具合を検討する必要がある。
- 2)計測したポリマーの上昇高さが、ポリマーサンプリング中にコアがワイゼンベルグ効果(法線応力効果)によりコアの側面に作用する拘束圧としてどの程度の大きさに相当するのかを明らかにする必要がある。

## 参考文献

- 1)佐藤あすみ:砂地盤における乱れの少ないサンプリングに関する実験的検討, 横浜国大修士論文, 2009.
- 2)(株)テルナイト:水溶性ポリマー, 2004.
- 3)増田房義:高吸水性ポリマー, 高分子学会編, 1987.
- 4)柳沢希美, 谷和夫, 金子進, 酒井運雄:水溶性ポリマーを使用した新しいサンプリング方法のメカニズム, 第33回岩盤力学に関するシンポジウム, pp. 49-56, 2004.

# STUDY OF WEISSENBERG EFFECT FOR POLYMER SAMPLING

Takahiro ISHIZAKI and Kazuo TANI

One of the mechanisms of polymer sampling which enable quality samples even from heavily weathered rocks or fractured zones in rock masses was suggested as Weissenberg effect of the water-soluble polymer as a typical non-Newtonian fluid. A series of model tests were conducted to measure the climbing height of the polymer solutions along a cruciform rotator to evaluate the influence of the concentration of the polymers and salinity on the Weissenberg effect. The results demonstrated that the marked Weissenberg effect was observed with high concentration of 4-6% for the water-soluble polymer, whereas practically no effect was found for super-absorbent polymer and salinity.