

博士論文

地下水流向流速の簡易計測装置の開発に関する研究

(Development of a simple measurement device for groundwater flow velocity)

2021年 1月

小野 文也

山口大学大学院 創成科学研究科

## 目次

第1章	序論	
1.1	本研究の背景	1
1.2	既存の地下水流向流速計測方法	2
	(1) トレーサー法 (多孔式)	3
	(2) 水位測定法(多孔式)	3
	(3) 熱量法 (単孔式)	4
	(4) 電位差法 (単孔式)	4
	(5) 粒子追跡法 (単孔式)	5
1.3	本研究の位置づけ	5
1.4	ペーパーディスク型地下水流向流速計(PDV)	6
1.5	新型 PDV の考案	9
	(1) 7本ロッド型単ドット式 PDV	10
	(2) 3本ロッド型単ドット式 PDV	11
	(3) 4本ロッド型単ドット式 PDV	12
1.6	本研究の目的	13
1.7	本論文の構成	13
1.8	まとめ	15
	参考文献	16
第2章	新型 PDV のセンサ内の流向流速分布	
2.1	はじめに	17
2.2	研究方法	18
	2.2.1 水平2次元地下水浸透流計算による PDV センサ内部流速 分布計算方法	18
	2.2.2 地盤の透水係数による補正係数の算出方法	22
	2.2.3 観測井挿入時に発生する鉛直流の影響確認方法	23

2.3	研究結果	24
2.3.1	水平2次元地下水浸透流計算によるPDVセンサ内部流速分布	24
	(1) 65mm径, 50mm径ロッド無し計算結果	24
	(2) 65mm径用7本ロッド型計算結果	24
	(3) 50mm径用3本ロッド型計算結果	32
	(4) 50mm径用4本ロッド型計算結果	36
	(5) 観測孔内部の流速の変動係数	39
	(6) 透水係数による補正	39
2.3.2	観測井挿入時に発生する鉛直流の影響	41
2.4	まとめ	41
	参考文献	42
第3章	計測原理の解明	
3.1	はじめに	43
3.2	研究方法	43
3.2.1	テーリング発生過程の観察実験方法	43
3.3	研究結果	45
3.3.1	テーリング発生過程の観察実験結果	45
3.4	まとめ	51
	参考文献	51
第4章	水質が測定に与える影響の解明	
4.1	はじめに	52
4.2	研究方法	52
4.2.1	インクの溶出特性把握のためのバッチ試験	52
	(1) インクの溶出実験方法	52
	(2) インクの吸着実験方法	55
4.2.2	テーリング発生に水温・水質が与える影響確認方法	55
4.3	研究結果	58
4.3.1	インクの溶出特性把握のためのバッチ試験結果	58

4.3.2	テーリング発生に水温・水質が与える影響確認結果	62
4.4	補正方法の提案	68
4.4.1	補正係数の算出方法	68
4.4.2	補正係数の算出結果	69
4.5	まとめ	69
4.5.1	インクの溶出特性把握のためのバッチ試験	69
4.5.2	テーリング発生に水温・水質が与える影響確認	70
4.5.2	補正方法の検討	70
	参考文献	70
第5章	PDVの検定と画像解析によるノイズ除去	
5.1	はじめに	71
5.2	研究方法	71
5.2.1	複数チャンネルを用いた領域分割	71
	(1) PDVの検定方法	71
	(2) 画像取得方法	73
	(3) ノイズ除去用データの取得方法	74
5.2.2	単一チャンネルを用いた検定直線の作成方法	75
5.2.3	流向の推定方法	76
5.2.4	単一チャンネルの流速の推定方法	76
5.3	研究結果	77
5.3.1	ペーパーディスクの輝度取得結果	77
5.3.2	R,Bチャンネルを用いた検定直線の作成	80
	(1) 測定時間5分の検定直線	80
	(2) 測定時間15分の検定直線	80
	(3) 測定時間30分の検定直線	81
	(4) 測定時間60分の検定直線	82
5.3.3	単一チャンネルを用いた検定直線	82
	(1) 測定時間5分の検定直線	82
	(2) 測定時間15分の検定直線	83
	(3) 測定時間30分の検定直線	84
	(4) 測定時間60分の検定直線	84

5.3.4	検定直線の比較	85
5.3.5	流向の測定精度	85
5.4	まとめ	87
	参考文献	88
第6章 単ドット式PDVの現地検証		
6.1	はじめに	89
6.2	研究方法	89
6.2.1	研究対象地域	89
6.2.2	透水係数測定方法	90
6.2.3	熱量式流速計(GFD)との比較試験	91
6.2.4	PDVによる一斉計測方法	91
6.2.5	地下水位の解析方法	92
6.2.6	PDVの解析方法	92
6.2.7	PDVの測定結果の補正方法	93
6.3	研究結果	94
6.3.1	透水係数測定結果	94
6.3.2	熱量式流速計との比較試験結果	95
6.3.3	PDVによる流向流速測定結果	97
6.4	まとめ	102
	参考文献	102
第7章 目視による迅速な計測方法の確立		
7.1	はじめに	103
7.2	目視におけるテーリング長の定義について	103
7.3	研究方法	104
7.3.1	官能試験用サンプルの取得方法	104
7.3.2	テーリング判定用基準紙の作成方法	104
	(1) 可視相当閾値の算出(官能試験A)	104
	(2) 可視相当閾値の推定および定規による測定(能試験B)	105

	(3) テーリング判定用基準紙の作成方法	107
7.3.3	流速測定スケールの作成	109
7.3.4	流速測定スケールを用いた目視による流向流速測定方法 (官能試験 C)	109
	(1) 目視による流速測定スケールを用いた流速測定	109
	(2) 目視による流向測定方法	110
7.3.5	官能試験結果の評価方法	111
7.4	研究結果	111
7.4.1	官能試験用サンプルの取得結果	111
7.4.2	目視による流向流速測定結果 (官能試験 C)	113
	(1) 目視による流速測定スケールを用いた流速測定結果	113
	(2) 目視による流向測定結果	115
7.5	まとめ	117
	参考文献	117
第 8 章	結論	
8.1	総括	118
8.2	PDV の運用方法	120
	(1) 目視による概略計測	120
	(2) 画像解析を用いた精密計測方法	120
	謝辞	121

## 第1章 序論

### 1.1 本研究の背景

環境基本法で列挙されている大気汚染、水質汚濁、土壌汚染、騒音、振動、悪臭、地盤沈下は典型七公害と呼ばれる。その中でも土壌汚染とそれに伴う地下水汚染は今日においても深刻な社会問題として存在している。近年では東京都の築地市場移転に関連した豊洲化学工場跡地でベンゼン、シアン化合物、砒素、鉛、水銀、六価クロム、カドミウムによる土壌・地下水汚染、東北太平洋沖地震で発生した津波による海水などによる土壌・地下水汚染、また福島第一原子力発電所から放出された放射性物質による土壌・地下水汚染は記憶に新しい。

日本では1960年代後半に表面化した水俣病をはじめとする四大公害病を契機に様々な法整備が行われた。土壌・地下水汚染に関連する法令整備をあげると1956年に工業用水法が施行された。その後、工場および事業者は公共用水域に排出する水と地下浸透する水が規制され、過失の有無にかかわらず人の健康に係る被害が生じた場合に損害賠償責任を定めた水質汚濁防止法が1970年に制定された。水質汚濁防止法は時代とともに改正を続け規制の強化、新たな排水基準の設定など整備がすすめられ公共用水域の保全を担ってきた。

排水基準により規定される物質は、人の健康に係る被害を生ずる恐れのある物質（有害物質）を含む排水に係る項目と水の汚濁状態を示す生活環境項目に分かれている。有害物質については27項目の基準が設定されており、有害物質を排出するすべての特定事業場に基準が適用される。生活環境項目については、15項目の基準が設定されている。さらに排水基準に関しては国が定める一律排水基準、都道府県が条例によって定めるより厳しい上乘せ排水基準、事業所ごとの基準のみでは環境基準の達成が困難な地域において一定規模以上の事業場に適用される総量規制基準があり、地域差などを考慮した規制項目を設けている<sup>1)</sup>。しかし工場、事業者が汚染原因と推定される地下水汚染事例は継続的に報告され平成16～20年の間では増加傾向にある<sup>2)</sup>（表1-1）。平成30年度には概況調査を実施した井戸3206本の内5.6%にあたる181本で環境基準超過が見られた。報告された基準超過項目を図1-1に示す<sup>3)</sup>。

このような現状にありながら土壌・地下水汚染の報告事例が減少しない背景には、地下水の特殊性があるといえる。地下水は表流水と比べ流速が非常に小さく、汚染物質が地表から地下に浸透してから非常に長期間滞留し土壌に吸着され蓄積される。そのため汚染発生時期の特定が困難になりやすく責任の所在を明確にすることが難しい。人の健康保護を第一として汚染範囲の推定や対策を講じる際は、汚染が発覚してから100年程度を目安とする必要がある<sup>4)</sup>のも表流水と異なる点といえる。地盤内を流れる地下水は非常に公共性が高いものである。しかし、地下水の管理のために厳しい規制を設けることは土地の所有者の私有財産に制限をかけてしまう恐れがある。これは地下水の公水論、私水論が法的に決着してないことから解釈や多様な立場において判断が分かれるところである。

土壌・地下水汚染が発生する背景にはこれらの要素があり、さらに地下水は河川水と違い地質が不均質な地盤内を流れ不可視であることから、流動状況の解明が非常に難しく膨大な時間と経済的負担が伴う。土壌・地下水汚染が発生した際には汚染物質を使用している事業所の調査を行

い、地盤内の地下水流動場の調査を行って早急に汚染の拡大を防ぎ、飲料水の確保を行う必要がある。

さらに土壌・地下水汚染と一口に言っても汚染物質は産業の発展や社会構造によって変化し、汚染物質によって挙動が様々で化学的性状により影響範囲や汚染の拡大スピード、対策の方法などが大きく異なる。主な汚染物質をあげると病原性微生物、重金属類、有機化合物、硝酸性窒素、放射性物質が挙げられる。他に近年ではパーソナルケア製品（PPCPs：Pharmaceuticals and Personal Care Products）による環境汚染や生態系への影響が懸念されている<sup>5)</sup>。

このような汚染物質が地下水に溶出した場合に有害物質を含む地下水が到達し得る範囲（以下「一定の範囲」という）は、同一の有害物質であってもそれぞれの場所における地下水の流向・流速に関する諸条件により大きく異なる<sup>4)</sup>。そこで個々の事例ごとに「一定の範囲」は有害物質や地域特性ごとに柔軟に対応できることが必要であるが、「一定の範囲」を設定するには地下水の流向・流速の把握が必要である。そこで地下水の流向流速を計測する必要性が高まってきたことにより様々な計測方法が開発されてきた。

表 1-1 工場・事業所が汚染原因と推定される地下水汚染事例の推移<sup>2)</sup>

年度	H16	H17	H18	H19	H20
事例数	974	1049	1123	1187	1234

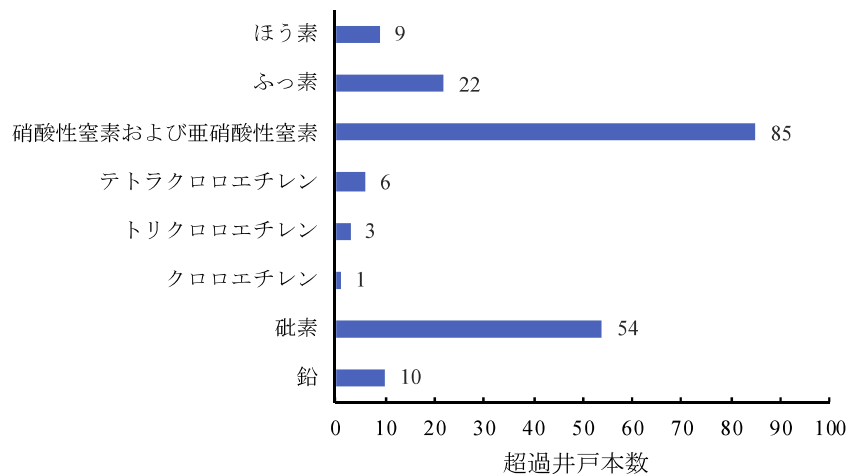


図 1-1 平成 30 年度環境基準超過項目（地下水）<sup>3)</sup>

## 1.2 既存の地下水流向流速計測方法

地下水流向流速の計測方法は、複数の観測井で測定を行う多孔式と単一の観測井で測定を行う単孔式の 2 種類に大別できる。多孔式の計測方法にはトレーサー法や水位測定方法がある。単孔式では様々な計測原理の地下水流向流速計が開発されてきた。この章では主に地盤工学会基準に



における「単孔を利用した地下水流向流速測定」<sup>6)</sup>と環境省の「環境影響評価における技術レビュー」<sup>7)</sup>の中から地下水流向流速の計測方法の例をいくつか示す。

### (1) トレーサー法（多孔式）<sup>7)</sup>

多孔式のトレーサー法による地下水流動調査は、電解質（食塩・塩化アンモニウム）、染料（フロレッセン）、同位体（<sup>222</sup>Rn, <sup>3</sup>H, <sup>14</sup>C, <sup>2</sup>H, <sup>18</sup>O 等）の人工の指標物をトレーサーとして地下水中に投入し、周囲に設置した観測孔などでその濃度を検出し、地下水の流向や流速を把握する手法である。測定が必要条件として、トレーサーが地下水と同一の挙動をとり、移動過程での吸着・沈殿が少ないこと、ごく低濃度まで検出が可能であり天然に存在量が少ないことなどがあげられる。また、毒性がない物質であることも必須条件といえる<sup>6)</sup>。測定には多地点でのサンプル採取が必要でありその同時性も重要であることから、測定する観測井の数だけ測定人員が必要となる。トレーサーの種類によっては観測井内に投入する量が多くなることで地下水位に影響を与え正確な計測が出来なくなるため、地下水の揚水とトレーサーの投入を調整し行わなければならない。

トレーサー法では、有効間隙率を把握していなくても対象地盤中の実流速が測定可能であるが、調査対象地域の水質だけでなく地形、地質条件も十分に考慮してトレーサーを選定する必要があり、観測データの取り扱いに経験が必要などの課題がある。対象地域によっては少人数では計測が不可能であり、総じて計測の費用が高額になる計測方法であるといえる。

### (2) 水位測定法（多孔式）<sup>8)</sup>

水位測定による地下水流向流速の推定では、3点以上の観測井でほぼ同時刻に水位を測定し水位等高線から流向を推定し、流速は測定した水位差から動水勾配を求めダルシー則より推定を行うものである。地下水位の測定方法は多数あり、自記計測可能な水位計を用いることで少人数でも計測が可能である。地下水観測井は可能であれば30m程度以下の間隔を持って配置された3本以上の観測井群が望ましいとされている。観測地点を多くすることによって高い流向精度が得られる。周囲地盤高から地下水流向がある程度予想できる。また、周囲の動水勾配や透水係数などの透水層の情報がある場合などにおいては、それらを参考に適切な位置に観測井を設定することが望ましい。水位測定法は間接的に地下水のダルシー流速の推定を行うものであり、対象地盤における透水層の面的広がりや把握していないと実際と大きく異なる推定結果となる恐れがある。また、流速については透水係数を事前に把握するか計測を行う必要がある。しかし、飽和透水係数は室内試験と現地透水試験の結果に1~3オーダーの開きがある事例の報告<sup>9)</sup>もあり用いる透水係数は注意が必要である。

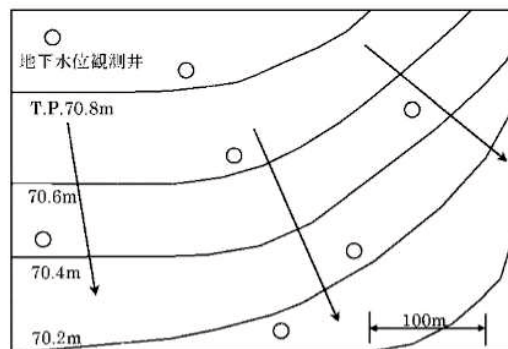


図 1-2 水位測定法による流向の推定モデル<sup>8)</sup>

### (3) 熱量法(単孔式)

熱量法を用いた地下水流向流速計は測定器に内蔵したヒーターにより地下水を温め、測定器の円周上に設置された温度センサで地下水の温度を観測するものである(図 1-3)<sup>10)</sup>。温度の円周上の分布から流向、温度の標準偏差から流速を求めることができる。地下水における主な加熱因子は地下水自体であり、地下水温の季節的变化はあるが日変化は大きくないことから、加熱平衡量や熱の移流拡散から流向流速測定が可能である。

装置を観測井に挿入後水温が安定するまで1時間程度測定が行えないため測定1回のサイクルに加熱に1時間、冷却に1時間で合わせて2時間必要である。比較的小さい孔径で計測が可能であるが適用できる流速範囲が狭い(0.01~1.0 cm/min)。また、地下水温が急激に変化するような場では測定が難しいことが予想される。装置が非常に高価であるといった課題がある。

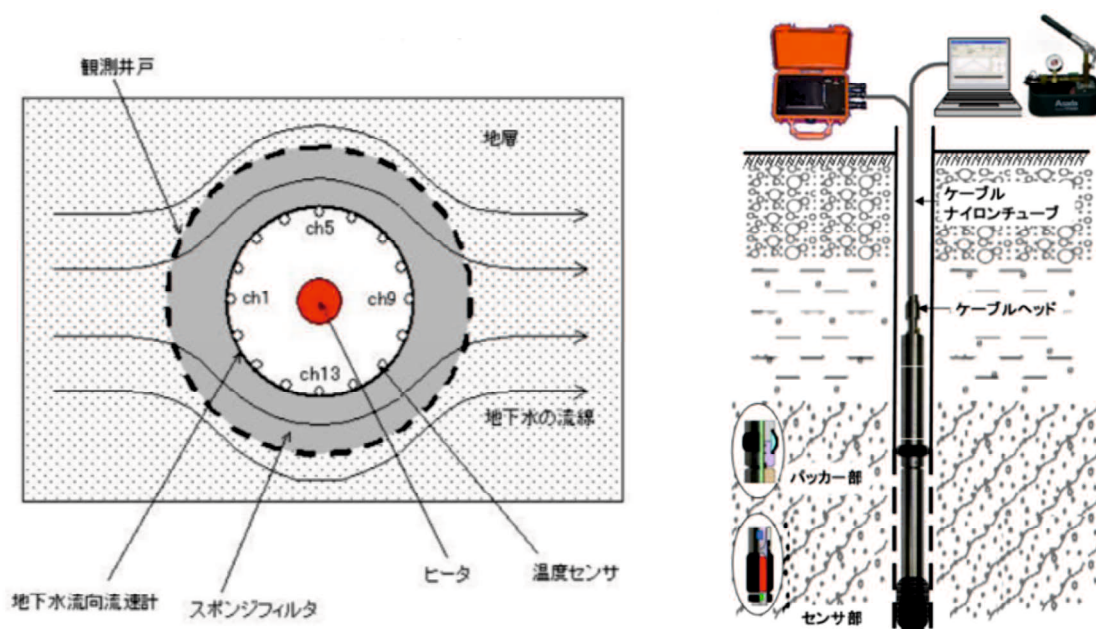


図 1-3 熱量式地下水流向流速計センサ概要<sup>10)</sup>

### (4) 電位差法(単孔式)

計測原理はセンサ部にφ2 mm のガラスビーズを充填したゾンデがあり、センサ中心に地下水と比抵抗の異なる溶液(蒸留水、食塩水など)を測定地盤内に注入し、測定機器の円周上に設置された電気抵抗検出器にて電気抵抗を観測し、注入した溶液の希釈状況の変化から流速流向を求める。他の方法でセンサ部中心にトレーサー放流口から NaCl 溶液を注入し移動を周囲の電極で自動的に検出する測定器、プローブ周辺に伝導率センサを配置し電気伝導度の上昇から流速を求める装置<sup>11)</sup>が開発されている。

電位差法では低流速の測定が可能( $1 \times 10^{-6} \sim 1 \times 10^{-2}$  cm/s)で流向精度が良い( $\pm 7.5\%$ )<sup>12)</sup>が、装置が複雑であること、対象とする地下水の電気伝導度によっては測定ができないことなどの課題がある。

### (5) 粒子追跡法（単孔式）

測定機に赤外線カメラを内蔵し、観測井内を移動する微粒子を撮影し、微粒子の移動速度、方向から流向流速を求めるものである。小さい孔径から測定ができ、機材によっては高流速でも測定ができる。また、映像をビデオで記録でき後で再測定が可能であるが、地下水が懸濁していると使用できない。そのため計測を行う観測井内の揚水洗浄が必要であり、周辺の地下水流動場に影響を与えるため1~2週間前に洗浄を行う必要がある。図1-4に粒子追跡法の地下水流向流速計センサ概要<sup>13)</sup>を示す。2020年現在購入できる装置であり筆者が調査したところで価格は250~300万円程度であった。

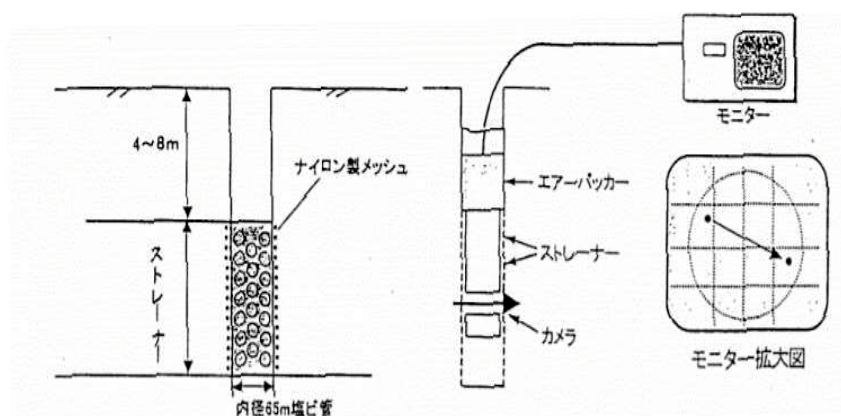


図 1-4 粒子追跡法の地下水流向流速計センサ概要<sup>11)</sup>

### 1.3 本研究の位置づけ

土壌・地下水汚染が発生した対象地域に適切な深度、箇所に観測井が設けてある状況は稀である。そのため対象地域の地理情報、水文データやボーリングデータをもとに汚染水が流れる帯水層を把握して、観測井を設置することになる。多孔式では測定のためには複数の観測井が必要となるため削孔費用は高額になり測定にも長時間を要し、コストや期間の面で現実的ではない。

一方、単孔式の地下水流向流速計は一つの観測井で計測が可能のため、削孔のコストは多孔式と比較すると低く測定時間は比較的短時間である。しかし、構造が複雑であるため装置自体が非常に高価となり電源が必要となる事から、複数ヶ所の測定を行う際は一つの装置で複数の観測井を一つ一つ計測する必要があり同時性が確保できないといった問題点がある。

例として JFE アドバンテック株式会社の熱量法地下水流向流速計 GFD4 を挙げる。2014年9月30日でGFD4の販売も中止されたため現在はレンタルあるいは委託による測定が主に行われている。レンタルの費用は1週間で10万円前後であり個人で単孔式地下水流向流速計を所有し計測に用いることは困難な現状である。このような現状から安価な地下水流向流速計があれば、複数台の装置を用いた多地点同時観測が可能となる。そこで本研究では無電源かつ迅速な地下水流向流速計として使用できるペーパーディスク型地下水流向流速計（以下PDVとする）の開発を目的とする。地下水流向流速計測方法の体系における、本研究で開発する方法の位置づけを図1-5に示す。PDVは単孔式の地下水流向流速計における簡易測定法という新たな項目に分類される。

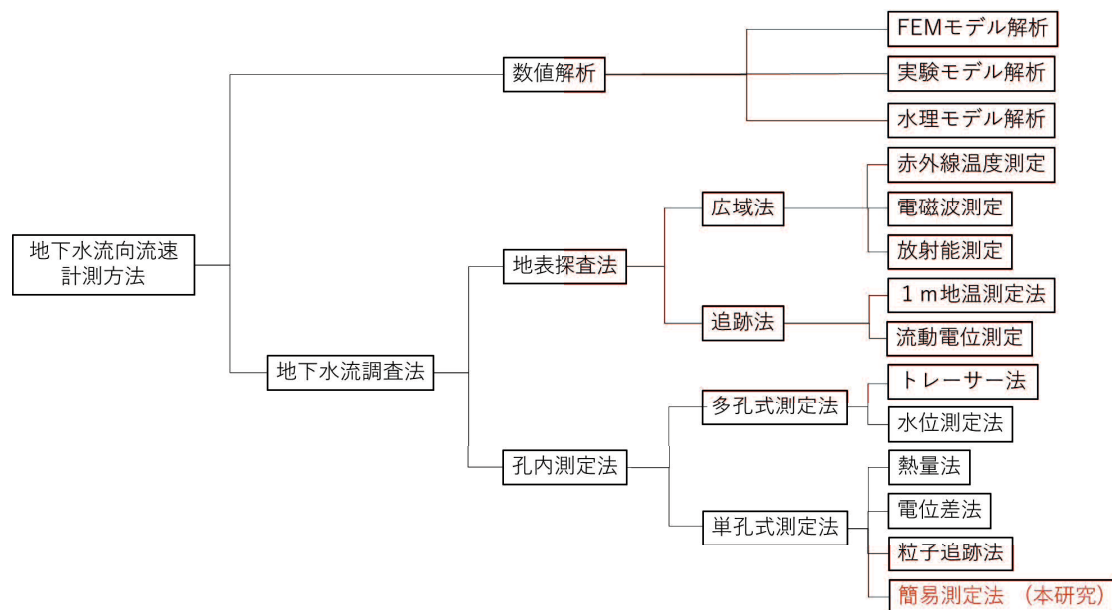


図 1-5 本研究で開発する方法の位置づけ (平山<sup>12)</sup> の図を改変)

#### 1.4 ペーパーディスク型地下水流向流速計(PDV)

電源を必要としない装置として野田，山本はペーパーディスク型地下水流向流速計（PDV）を2009年に発明した（特許第5471624号）<sup>14),15)</sup>。図1-6~10にリング式PDVを示す。PDVは染料インクの移流拡散を利用したものであり画用紙にインクジェットプリンターを用いて円を印刷したものの上下を透水性スポンジで挟みセンサとするものである。

PDVの測定手順（図1-11）は以下のようである。

- a) 絶乾状態の二つのスポンジの間にペーパーディスクを挟む。
- b) 方位を確かめ，ストレーナにセンサ部分が当たるまでゆっくり本体を観測井に挿入する。
- c) 所定の時間静置する。
- d) 本体をゆっくり引き上げてスポンジとペーパーディスクを取り出す。
- e) ペーパーディスクを乾燥後，スキャンして電子化する。

測定を行う際はストレーナ部分に静置前にドットからインクが溶出しないように絶乾状態の透水性スポンジを使用する必要がある。そのため連続で測定を行う際は透水性スポンジの使用は一度のみとなる。また，ペーパーを乾燥させる際はドットからのインクの溶出が起これないように表面の水分を除去し乾燥させる。

観測井に設置の際は，管頭からストレーナ区間までの距離をあらかじめ確認し所定深度までロッドを継ぎ足し，ロッドの最上部に円盤形のストッパーを設置しストレーナ区間からセンサが外れないよう計測を行う。ロッドの長さからストレーナ区間に設置できない場合はストッパーと観測井の間にスペーサーを設置し深度の調整を行なう。印刷されたドットから溶出した染料インクが透水体内を移動する水塊によって輸送され軌跡（テーリング）を紙面で捉えることで地下水の流向及び流速を測定することができる。室内実験水槽を用いて装置の検定を行い，流速を変化させた際のテーリング変化の関係から流速算出用の検定直線を作成する。流向は印刷したドットか

らテーリングの移動方向を流向として求める。既往の研究では流速を算出に用いる検定直線の決定係数は0.76、流向の二乗平均平方根誤差 RMSE は 37.5°程度という結果が得られている。

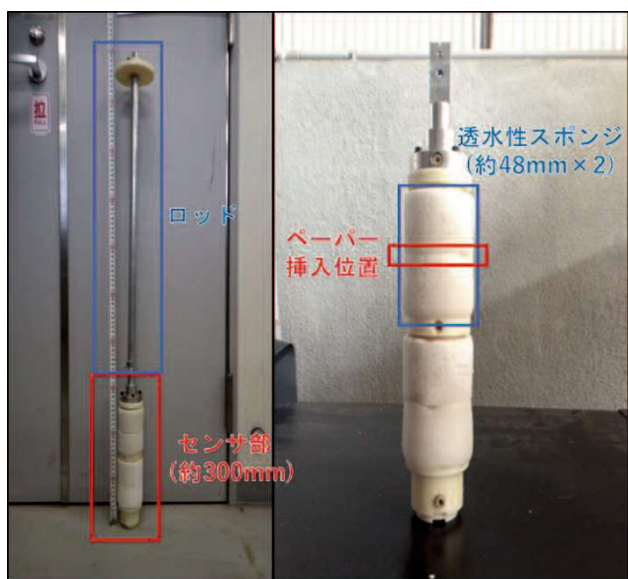


図 1-6 リング式 PDV (左：装置全体, 右：センサ部分)

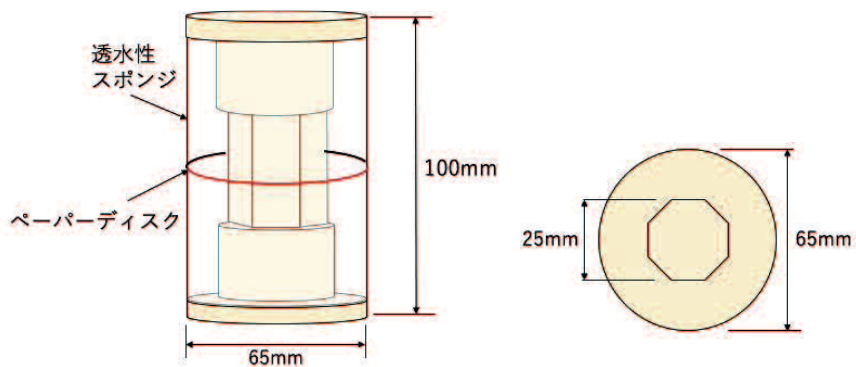


図 1-7 リング式 PDV 概要図 (左：装置全体, 右：センサ断面)

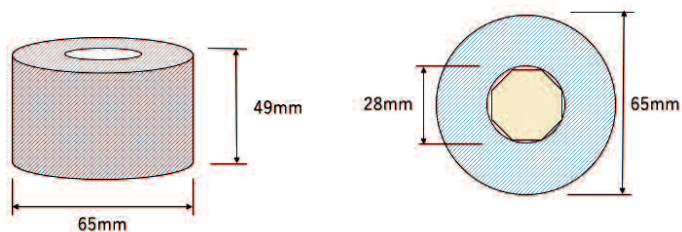


図 1-8 透水性スポンジ概要図 (左：側面, 右：断面)

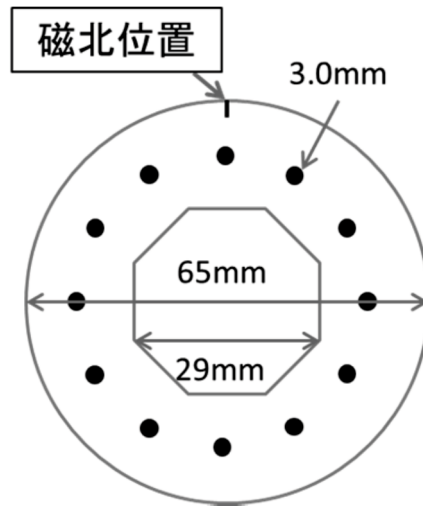


図 1-9 リング式ペーパーディスク概要図

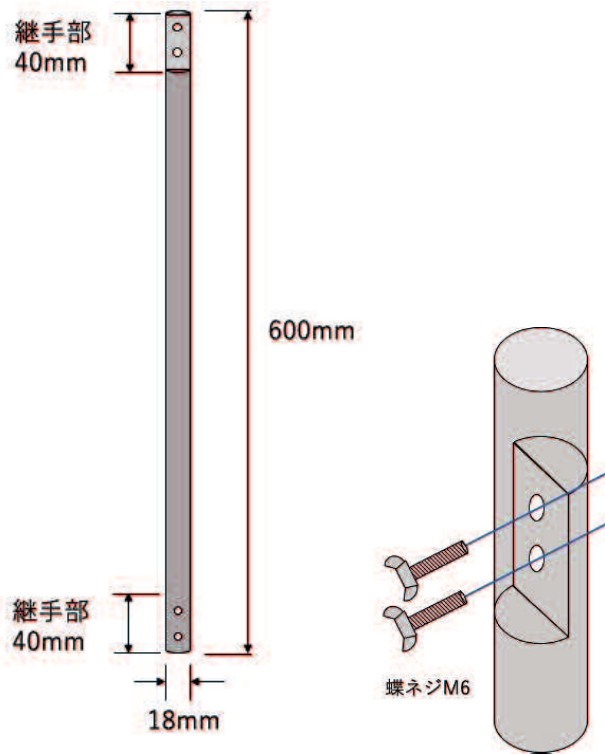


図1-10 ロッド概要図（左：ロッド寸法図，右：ロッド継手部詳細）

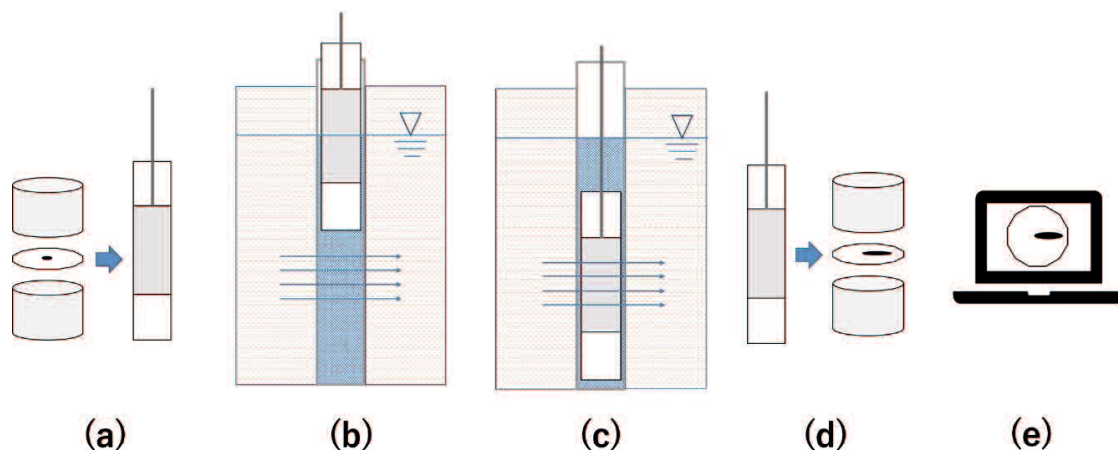
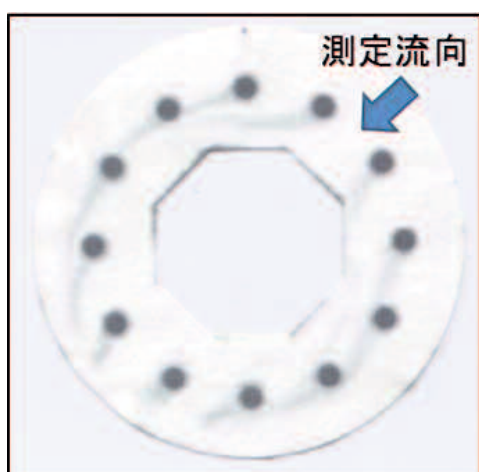


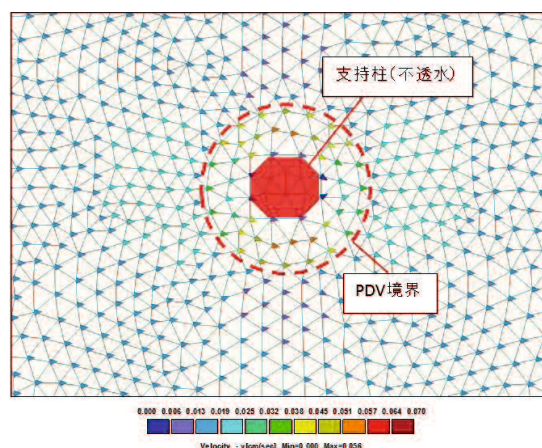
図 1-11 PDV の測定手順, a)~e)の説明は本文中に記載

### 1.5 新型 PDV の考案

電源を必要としない簡易計測方法であるリング式 PDV には装置の構造に問題があった。測定の際にリング状のペーパーディスクの上下を透水性スポンジで挟んだものをセンサとして用いていたが、装置の中心に不透水の支柱があったためセンサ内を移動する水塊の挙動に影響を及ぼし、流線が大きく曲がった。地下水流動計算ソフト HYDRUS3D を用いてセンサ内部の流向流速を水平 2 次元で再現計算を行った結果、PDV の中心に配置した支柱によって最大 25°程度流向が変化することが確認された (図 1-12)。そこでリング式 PDV の問題点を解決した新型 PDV を考案した。センサ中心部にあったロッドをセンサ外周に配置し、ペーパーディスクは中心に 1 点ドットを印刷したものを使用する単ドット式 PDV を考案した。単ドット式 PDV は形状、材質、ペーパーディスクの設置方法から以下の 3 種類に分けられる。



左：テーリングが屈曲したリング式ペーパーディスク



Project pdv65mmdaiki  
Results, Velocity, Time 1 - 86400 sec

右：リング式PDV内部の流向流速変化

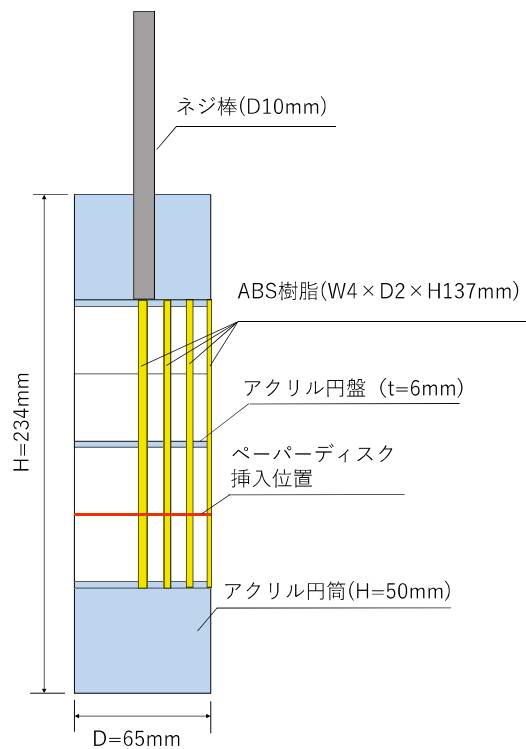
図1-12 リング式PDVの問題点

(1) 7本ロッド型単ドット式PDV

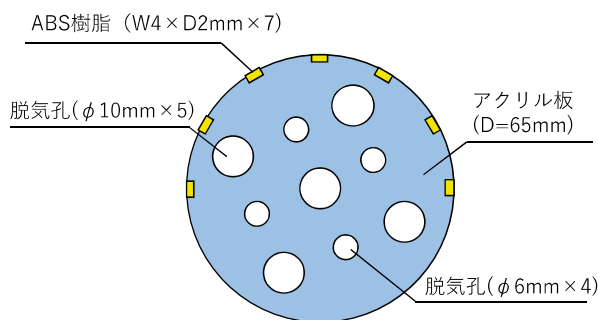
7本ロッド型単ドット式PDVは塩化ビニル管φ67mm（以下VP65とする）用に作製した。図1-13に7本ロッド型単ドット式PDVの概要図を示す。センサ部分に透水性スポンジを用いセンサ部分の上下はアクリル円筒を配置した。透水性スポンジ保持のためのABS樹脂のロッドを装置の外周の片側に7本配置しアクリル板に鉛直方向への空気抜き用の穴を設けた。透水性スポンジは円筒形のものを作製し、柱と接する部分は溝を切ったものを使用した。12角形のペーパーディスクの上下を透水性スポンジで挟んだものをロッドが配置されていない側面から差し込むことでセンサ部にセットした。



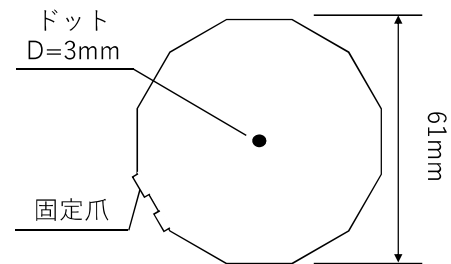
左：7本ロッド型単ドット式PDV



右：7本ロッド型単ドット式PDV側面図



7本ロッド型単ドット式PDV断面図



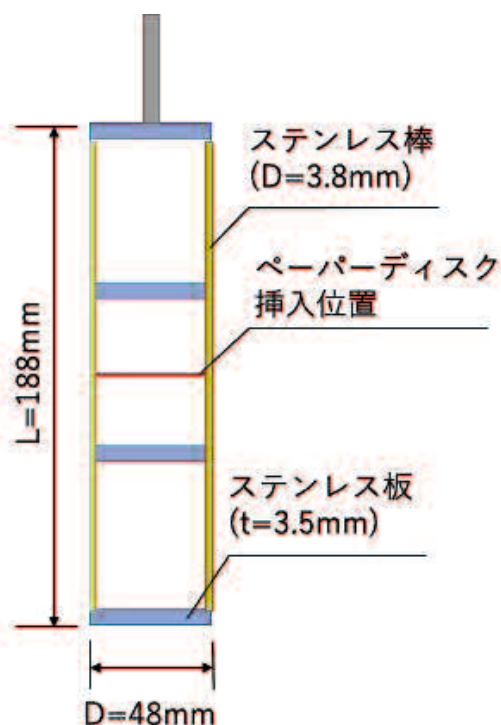
7本ロッド型ペーパーディスク

図 1-13 7本ロッド型単ドット式PDV概要



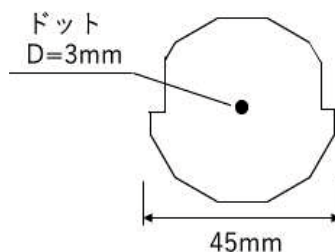
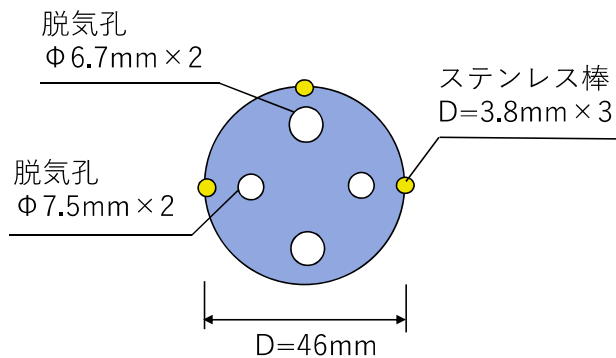
(2) 3本ロッド型単ドット式 PDV

3本ロッド型単ドット式 PDV は塩化ビニル管  $\phi 51\text{ mm}$  (以下 VP50 とする) 用に作製した. 図 1-14 に 3本ロッド型単ドット式 PDV 概要図を示す. 材質はステンレスで構成した. 透水性スポンジ保持のためにステンレス棒を装置の外周の片側に 3本配置しステンレス板に鉛直方向への空気抜き用の穴を設けた. 透水性スポンジは溝を切り, 柱が配置されていない側面から挿入しセンサ部にセットする.



左 : 3本ロッド型単ドット式 PDV

右 : 3本ロッド型単ドット式 PDV 側面図



左 : 3本ロッド型単ドット式 PDV 断面図

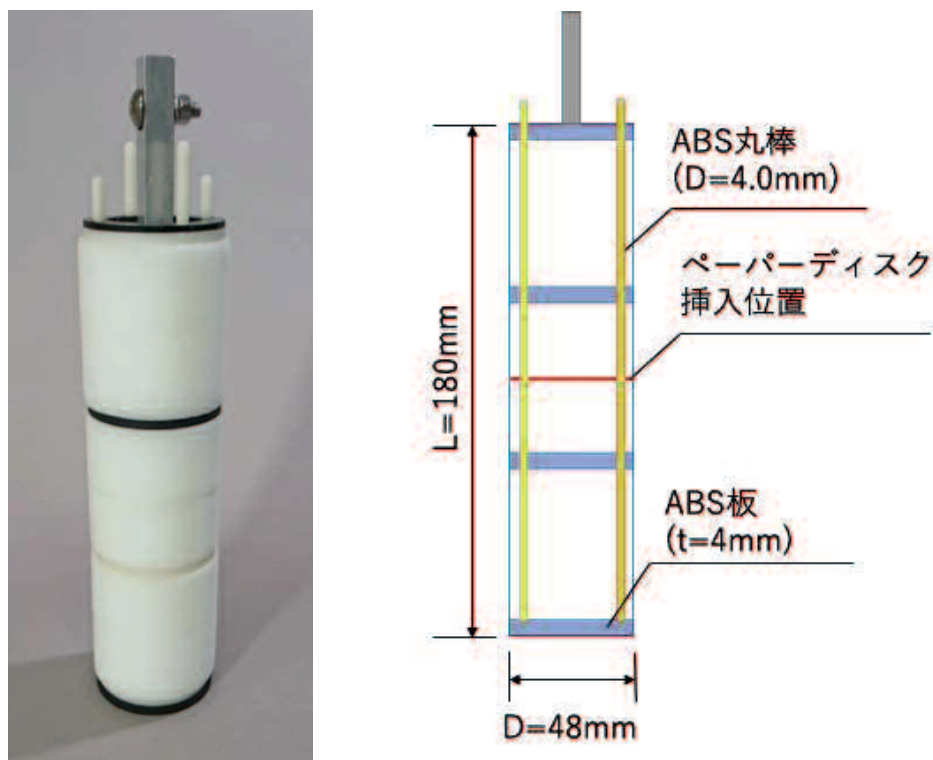
右 : 3本ロッド型単ドット式 PDV 用ペーパーディスク

図 1-14 3本ロッド型単ドット式 PDV

### (3) 4本ロッド型単ドット式 PDV

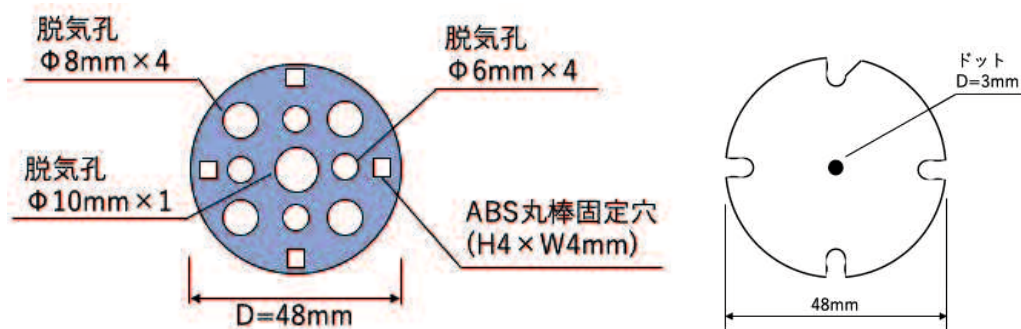
4本ロッド型単ドット式 PDV は VP50 用に作製した。図 1-15 に 4本ロッド型単ドット式 PDV を示す。透水性スポンジ保持のため外周に等間隔で ABS 樹脂丸棒を 4本配置した。丸棒は ABS 板と接する側面に固定用の溝を切った。丸棒の配置箇所に穴をあけた透水性スポンジと同箇所に溝を切ったペーパーディスクを鉛直方向に差し込みセンサ部分に設置した。ABS 板にあけた固定用の溝と丸棒の溝をかみ合わせることで固定した。

装置の構造上の強度やペーパーディスクのセンサ部への設置方法の容易さ、取り出す際にペーパーディスクの損傷が少ないといった観点から 4本ロッド型を 2020 年現在は測定に使用している。



左：4本ロッド型単ドット式 PDV

右：4本ロッド型単ドット式 PDV 側面図



左：4本ロッド型単ドット式 PDV 断面図

右：4本ロッド型単ドット式 PDV 用ペーパーディスク

図 1-15 4本ロッド型 PDV 概要図

## 1.6 本研究の目的

新型 PDV を用いて地下水流向流速計測を行うにあたり以下の問題点を解決する必要がある。

### a) 新型 PDV のセンサ流速に対するダルシー流速の補正係数が不明であること

観測井内部の透水係数が周辺地盤の透水係数と比較して大きい場合、流速が増加することが明らかとなっている。既存の地下水流向流速計については周辺透水係数の変化に伴う補正が行われている。本研究で考案した新型 PDV についても PDV のロッドがセンサ内部の流向流速に影響を与えるため同様に補正を行う必要がある。

### b) 測定原理が明らかになっていないこと

PDV は、画用紙に印刷した染料インクが水中に溶出し輸送されることによってテーリングが発生していると考えられていた。しかし観測井内にセンサをセットした状態ではインクの輸送過程を観察できないため、テーリングの発生過程を明らかにする必要がある。

### c) 水質によってテーリングが変化すること

テーリングの発生は、溶出した染料インクが輸送されることによって発生する。そのため現地計測を行う際に室内実験とは水質が異なるため、インクの溶出量が増減しテーリングの発生に影響があることが考えられる。

### d) ペーパーディスクに汚れが付着し解析が困難となること

PDV は流向流速を求める際に、計測後のペーパーディスクの画像解析を行う。しかし、現地計測では地下水の着色や細かい粒子がペーパーディスク上に残り画像解析の障害となる。

### e) 現地検証が行われていないこと

新型 PDV を用いた現地計測を行っていない。他の計測方法と比較検証を行い、PDV で現地計測が可能であるか確認を行う必要がある。

### f) 流向流速の測定値が現地で得られないこと

PDV は計測後のペーパーディスクを電子化し画像解析を行わなければ流向流速の測定値が得られない。現地計測を行う際は、計測結果をもとに測定箇所の変更や追加を行う場合がある。そのため現地で計測結果が得られない場合、効率的な現地調査が行えない。

これらの問題点を解決し、地下水流向流速の簡易計測方法を確立することを本研究の目的とした。

## 1.7 本論文の構成

本論文は、第 1 章から第 8 章で構成される。本論の構成を図 1-16 に示す。

### 【第 1 章 序論】

本章では、地下水汚染の発生している現状から地下水流向流速計測の必要性和既存の装置の問題点を整理した。既存の単孔式地下水流向流速計は装置が高価、計測に電源が必要という問題点がある。これらを解決するため無電源かつ迅速に計測可能なリング式 PDV を開発したが、リング式 PDV にはセンサ内部の流向流速に構造的な問題点があった。そこで新たに単ドット式 PDV を考案した。

本研究では単ドット式 PDV の構造の検討、測定原理の解明、現地検証等をおこない、地下水流向流速の簡易計測方法を確立することを目的とした。

## 【第2章 新型 PDV のセンサ内の流向流速分布】

第1章で示したとおり、リング式 PDV には流線への影響が大きいという構造的な問題点があった。この問題を解決するために単ドット式 PDV を考案した。単ドット式 PDV のセンサ部分における流向流速の分布を確認するために、地下水流動計算ソフト HYDRUS3D を用いて再現計算を行った。また、周辺の透水係数変化が孔内流速に与える影響を再現計算で確認し、透水係数の変化による補正係数を求めることを目的とした。

## 【第3章 計測原理の解明】

PDV は染料インクが溶出し紙面に残ったテーリングから流向流速を求めるものである。しかし、染料インクの溶出から輸送、テーリングの発生過程は明らかになっていない。そこで簡易実験水槽を用いてテーリングの発生過程について観察実験を行い、計測原理を解明することを目的とした。

## 【第4章 水質が測定に与える影響の解明】

PDV は染料インクがスポンジ内部に溶出し輸送されることでテーリングが発生することが第3章で確認された。また、染料インクの溶出量が水質に依存することが考えられる。特に現地計測と室内実験で条件が異なる可能性が高く染料インクの溶出に影響を及ぼすと考えられるのが pH と水温である。pH と水温によるインクの溶出特性を明らかにするために溶出試験を行い、pH と水温による補正係数を求めることを目的とした。

## 【第5章 PDV の検定と画像解析によるノイズ除去】

PDV は検定直線を用いてテーリング長をダルシー流速に変換する。テーリング長は電子化したペーパーディスクを一定の閾値で二値化処理し画像解析により幾何的に求めるものである。しかし、従来の単一チャンネルを用いた画像解析手法では現地計測の際に水質条件のほかに地下水の着色や浮遊粒子の付着によるペーパーディスクの汚れが画像解析の障害になることが予想された。そこでペーパーディスクを画像解析する際に問題となる汚れやノイズを除去するために、複数チャンネルを用いた画像解析手法を新たに確立した。PDV の検定を行い複数チャンネルと単一チャンネルを用いて検定直線を取得することを目的とした。

## 【第6章 現地検証】

本章では PDV の現地検証を北海道サロベツ湿原において実施した。現地検証では熱量式地下水流向流速計の測定結果および現地の地下水位コンターから取得した流向流速と PDV の測定結果を比較し有用性を確認することを目的とした。

## 【第7章 目視による迅速な計測方法の確立】

PDV は計測結果を得るためにペーパーディスクを電子化して画像解析を行う必要があるため、現場では計測値を確認できない。そこで、官能試験を行いテーリングの形状を目視で読み取ることが可能であるか確認を行った。テーリングの長さを目視で読み取り流速に変換する定規を作製し、現地で画像解析を用いることなく流向流速を取得する手法の確立を目的とした。

## 【第8章 結論】

本章では本研究で得られた結果から PDV の実用化における知見と課題を整理し、本論文の結論とした。

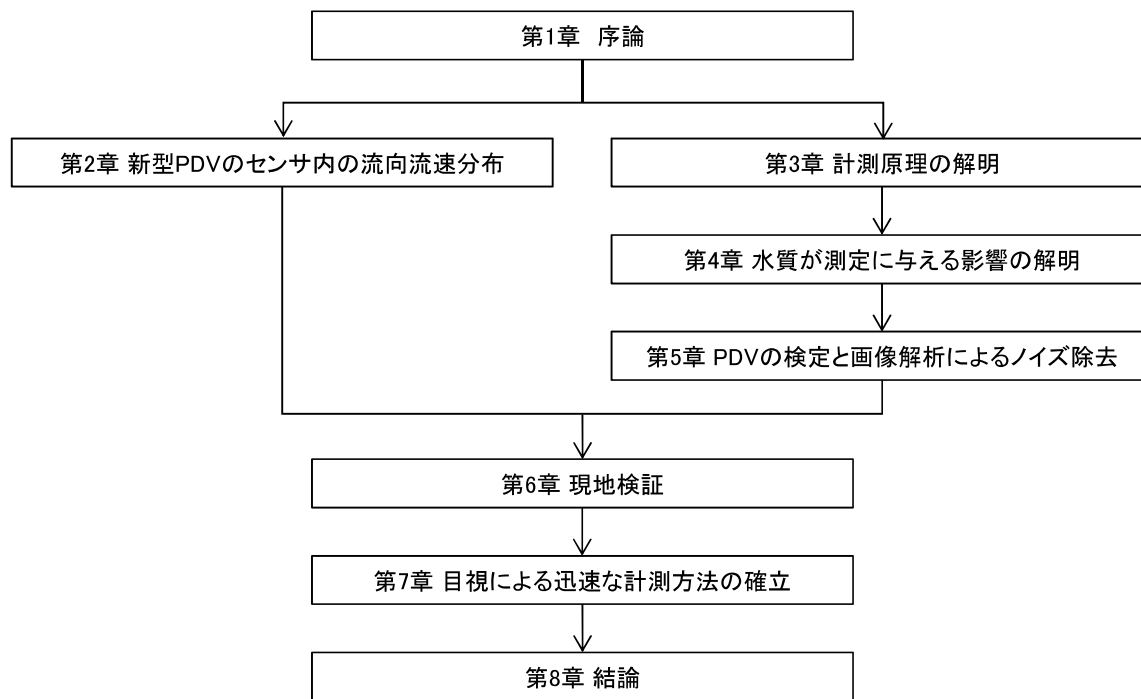


図 1-16 本研究の流れ

## 1.8 まとめ

今日においても地下水・土壌汚染は深刻な社会問題として存在している。近年では東京都の築地市場移転に関連した豊洲化学工場跡地の土壌・地下水汚染，東北太平洋沖地震で発生した津波による海水などによる土壌・地下水汚染，福島第一原子力発電所から放出された放射性物質による土壌・地下水汚染が記憶に新しい。

地下水・土壌汚染を防止するために水質汚濁防止法など法整備が行われ，時代に沿って新たな規制項目を設けることや各自治体において独自の排出制限を設けることで水環境の保全を担ってきた。しかし，工場・事業所が汚染原因と推定される地下水汚染事例は増加傾向にある。これは地下水の流れは地上から観察が困難であり流速が非常に遅いという特殊性によるものである。そこで様々な地下水の流向流速計測方法が開発されてきた。その中でも単孔式地下水流向流速計は単一の観測井で地下水の流向流速を計測が可能であり，多孔式に比べ計測が容易である。しかし，計測の際に電源を必要であり装置が非常に高価であるという問題点があった。

既存の単孔式地下水流向流速計の問題点を解決した簡易な計測方法としてペーパーディスク型地下水流向流速計（PDV）が2009年に発明された<sup>13)</sup>。PDVは画用紙に印刷した染料インクが水に溶出し輸送された軌跡から流向流速を推定する装置である。しかし旧式のリング型PDVは装置中心に配置された不透水の支柱によって流線が大きく屈曲した。そこで本研究において新型の単ドット式PDVを考案した。単ドット式PDVでは，従来装置中心に配置していた支柱を外周上に複数配置することで，ドットを装置中心に配置することが可能となった。

本研究では，単ドット式PDVの構造検討，測定原理の解明，水質が測定に与える影響の解明，PDVの検定と画像解析によるノイズの除去方法を確立し，新型PDVを用いた地下水流向流速計

測方法を確立することを目的とし、その後現地検証を行い PDV の有用性を確認するとともに、現地計測の際に測定値をすぐに得るための目視による計測手法を確立することを目的とした。

#### 参考文献

- 1) 環境省:効果的な公害防止取組促進方策検討会(第1回)配布資料 資料 2-2 水質汚濁防止法関係資料, 2007.8.30, [https://www.env.go.jp/air/info/pp\\_kentou/pem01/mat02\\_2.pdf](https://www.env.go.jp/air/info/pp_kentou/pem01/mat02_2.pdf) (参照 2020.12.29).
- 2) 環境省中央環境審議会水環境部会:工場・事業場が汚染原因と推定される地下水汚染事例の汚染原因行為等の実態について, 2011, [https://www.env.go.jp/council/09water/y0914-05/mat04\\_4.pdf](https://www.env.go.jp/council/09water/y0914-05/mat04_4.pdf) (参照 2018.3.31).
- 3) 環境省水・大気環境局土壌環境課:平成 30 年度地下水質測定結果, 2020.2. <https://www.env.go.jp/press/files/jp/113347.pdf> (参照 2020.11.20).
- 4) 環境省水・大気環境局土壌環境課:特定有害物質を含む地下水が到達し得る「一定の範囲」の考え方, 2011.8, [https://www.env.go.jp/water/dojo/gl\\_ex-me/pdf/11\\_appendix-1.pdf](https://www.env.go.jp/water/dojo/gl_ex-me/pdf/11_appendix-1.pdf) (参照 2018.3.31).
- 5) 田瀬則夫:わが国における地下水汚染の現状と課題, 安全工学会, vol.51, No.5, pp.290-296, 2012.
- 6) 地盤工学会単孔を利用した地下水流向流速測定方法の基準委員会編:新規制定地盤工学会基準・同解説 単孔を利用した地下水流向流速測定方法, 地盤工学会, pp.2-24, 2016.3.
- 7) 環境省:大気・水・環境負荷分野の環境影響評価技術検討会報告書 大気・水・環境負荷分野の環境影響評価技術(III)〈環境保全措置・評価・事後調査の進め方〉, 2002.10. [http://assess.env.go.jp/files/0\\_db/seika/0086\\_01/3/chap5\\_4.html#12](http://assess.env.go.jp/files/0_db/seika/0086_01/3/chap5_4.html#12) (参照 2018.3.31).
- 8) 環境省:地下水の流向の把握について, 地下水汚染の未然防止のための構造と点検・管理に関するマニュアル(第 1.1版), 2013.6, [https://www.env.go.jp/water/chikasui/conf/mizen\\_boushi/com08/mat05-2.pdf](https://www.env.go.jp/water/chikasui/conf/mizen_boushi/com08/mat05-2.pdf) (参照 2018.3.31).
- 9) 小高猛司, 李圭太, 久保裕一, 石原雅規, 譙熙晨, 梅村逸遊, 御手洗翔太, 顧峻滔:河川堤防盛土の原位置 透水特性に関する考察, 第 5 回河川堤防技術シンポジウム論文集, pp.64-67, 2017.
- 10) 岩澤昇, 五江渕通:GFD4 型地下水流向流速計の開発とその適用例, 全地連「技術 e-フォーラム 2006」名古屋, pp.115, 2006.
- 11) Trevor C. Osorno, J.F. Devlin, Rubina Firdous, An In-Well Point Velocity Probe for the rapid determination of groundwater velocity at the centimeter-scale, Journal of Hydrology, Volume 557, Pages 539-546, 2018.
- 12) 平山光信:6.地下水動態の計測, 6.2 地下水の流速・流向の計測法, 地下水学会誌, vol.36, No.3, pp.305-314, 1994.
- 13) 山田啓一, 荒川創:CCD カメラによる孔内流向流速測定と流速の垂直分布について, 地下水学会誌, vol.41, No.3, pp.193-201, 1991.
- 14) 野田敏雄, 山本浩一:ペーパーディスク型地下水流向流速計の開発, 環境工学論文集, vol.47, pp.685-690, 2010.
- 15) 小野文也, 山本浩一, 対馬幸太郎, 大石正行, 神野有生, 関根雅彦:ペーパーディスク型地下水流向流速計を用いた海岸砂州地下水の挙動の観測, 土木学会論文集 G(環境), vol.70, No.7, pp.III\_355-363, 2014.

## 第2章 新型 PDV のセンサ内の流向流速分布

### 2.1 はじめに

既往のリング式 PDV<sup>1)</sup> は装置中心に配置したロッドによって流線がロッドを中心に屈曲するという構造上の問題点があった。そこでセンサ外周に複数のロッドを配することでセンサ中央部に空間を設けた、かご型のセンサ構造を考案した<sup>2)</sup>。かご型のセンサ構造ではペーパー中央にドットを一点だけ配置することが可能になった。この方式の PDV センサを本研究では単ドット式 PDV センサと呼ぶ。本章ではこの単ドット式 PDV センサ中心におけるテーリングの発生する方向を明らかにすることに加え、観測孔内と地盤内の流速の違いを補正するためにセンサ内部の流向流速分布について水平 2 次元地下水浸透流計算を行った。

一般的に地盤内の観測孔が多孔質で満たされていない空隙であった場合、地盤から孔内に集中するような地下水の流れが発生することが知られており、孔内においては流速が増し、地盤内のダルシー流速に比較して約 3 倍の流速になることが 2 次元定常地下水流計算により理論的に示されている<sup>3)</sup>。したがってセンサ内部が空洞となるタイプの地下水流向流速計の場合は孔内流速からダルシー流速を求めるための補正係数が考慮されている<sup>4)</sup>。ダルシー流速を  $V_d$ 、孔内流速を  $V_0$  とすると、それらの関係は式(2-1)のようになる。

$$V_d = \beta V_0 \quad (2-1)$$

ここで  $\beta$  は補正係数である。補正係数は孔内を多孔質で満たさず、空隙である電位差方式においては 0.159~5.556 の値が用いられている<sup>4)</sup>。

一方、孔内が砂やスポンジなどの多孔質で充填された観測孔と地盤内の流速の比も同様に理論的に明らかになっており<sup>5)</sup>、式(2-2)となる。PDV のセンサ部には多孔質のスポンジを用いるため、式(2-2)が適用できるケースとなる。孔内の透水係数が地盤内よりも高い場合は地盤内の透水係数を低下させていくと  $V_0/V_d$  は最大 2 倍となる。

$$\frac{V_0}{V_d} = \frac{2k_0}{(k + k_0)} \quad (2-2)$$

ここで、 $k$  : 地盤内透水係数 (m/s)、 $k_0$  : 孔内透水係数 (m/s)、 $V_d$  : 地盤内のダルシー流速 (m/s)、 $V_0$  : 孔内流速 (m/s) である。従って補正係数  $\beta$  は式(2-3)で表される<sup>5)</sup>。

$$\beta = \frac{(k + k_0)}{2k_0} \quad (2-3)$$

しかし、PDV はセンサのロッドが  $\beta$  に影響を及ぼす可能性があるため、ロッドを考慮した補正係数を、透水係数を変化させながら再現計算を行って求めた。

そのほか、観測井内に PDV を挿入する際にインクが溶出し鉛直方向の地下水の流動によりテー

リングが発生していることが予想された。そこで観測井内に挿入した際の鉛直方向の地下水の流動を模した再現実験を行いテーリング発生への影響の有無の確認を行った。

## 2.2 研究方法

### 2.2.1 水平2次元地下水浸透流計算によるPDVセンサ内部流速分布計算方法

PDVのセンサ内部の流向流速の計算を行うため水平2次元浸透流の数値計算を行った。作製した計算モデル全景を図2-1、センサ付近の拡大図を図2-2に示す。計算領域はPDVの検定に使用する室内実験水槽と同様の全長0.9m、幅0.38mとし、砂層内の中心にPDVセンサを配置したモデルを作製した。FEM解析を行うモデル内のメッシュは要素間の間隔を最大1cmとし、ロッド周辺は形状を表現するためにメッシュは1cmより小さくした。砂層部は珪砂5号で充填されているものとした。透水係数は珪砂5号を $1.3 \times 10^{-3}$  m/s、センサ部の透水性スポンジを $1.3 \times 10^{-2}$  m/sとした。ロッド部分は透水係数を $1.0 \times 10^{-10}$  m/sとして見かけ上不透水とみなした。境界条件は短辺についてノイマン型条件（既知流量境界）を適用し、モデルの長辺は不透水と設定し画面上の左から右に向けて1.0 cm/minの流速を発生させた（図2-3）。作製したPDVセンサ付近のメッシュの詳細を図2-4～8に示す。また、流向に対するロッドの配置によって流線に与える影響が変化するため、流向に対してロッドを45°毎に回転させたモデル（表2-1）を作製し計算を行った。

地下水浸透流計算に用いられた基礎方程式<sup>6)</sup>を式(2-4)に示す。

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( T \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( T \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( T \frac{\partial h}{\partial z} \right) + Q - S_s \frac{\partial h}{\partial t} = 0 \quad (2-4)$$

$T$ : 帯水層の透水量係数 ( $L T^{-1}$ )、 $h$ : 水頭 (L)、 $S_s$ : 比貯留係数 ( $L^{-1}$ )、 $Q$ : 単位体積当たりの部分的な注水あるいは吸い込み ( $T^{-1}$ )、 $x, y, z$ : 空間座標 (L)、 $t$ : 時間 (T)、である。この式をガラーキン有限要素法で解いた。計算には土中水分・熱・溶質移動予測モデルHYDRUS-3D<sup>6)</sup>を用いた。ただし今回は平面定常2次元計算のため、左辺第3項、第4項、第5項は0である。



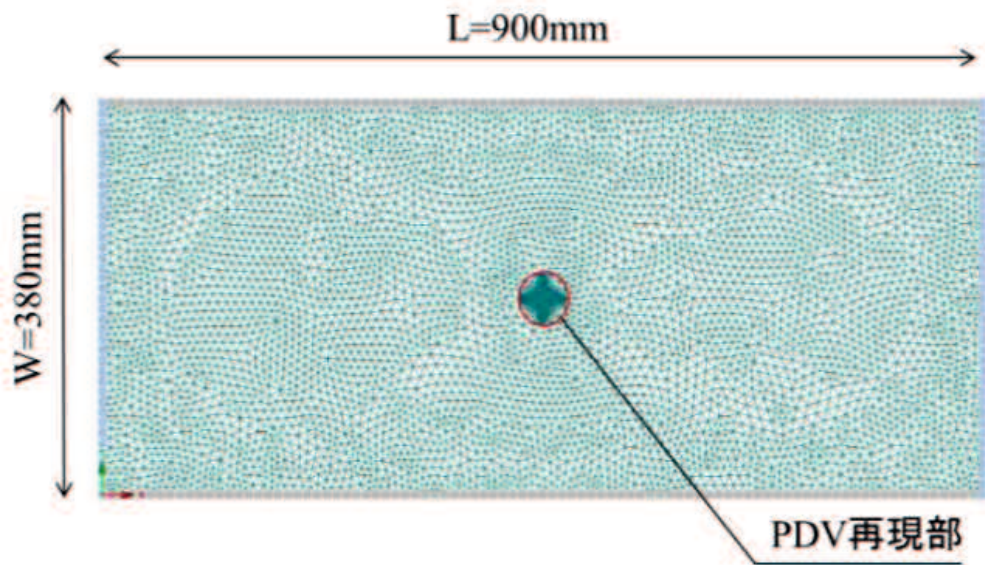


図 2-1 解析モデル全景

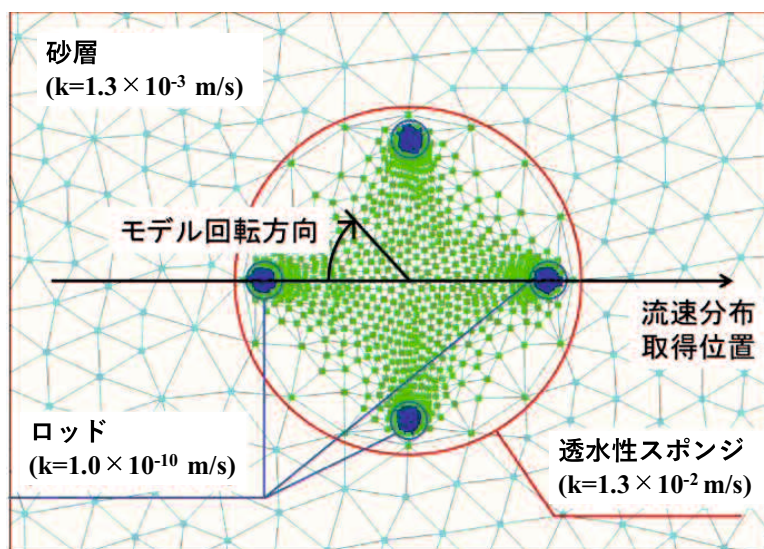


図 2-2 PDV センサ付近のメッシュ詳細図

(要素の透水係数; 水色:  $k=1.3 \times 10^{-3}$  m/s, 緑:  $k=1.3 \times 10^{-2}$  m/s, 青:  $k=1.0 \times 10^{-10}$  m/s)

表 2-1 流動計算モデルのロッド数と回転角に関する計算条件一覧

外径	ロッド本数	回転角度		
65mm	7本	0°	45°	90°
50mm	4本	0°	45°	-
50mm	3本	0°	45°	90°
65mm	-	0°	-	-
50mm	-	0°	-	-

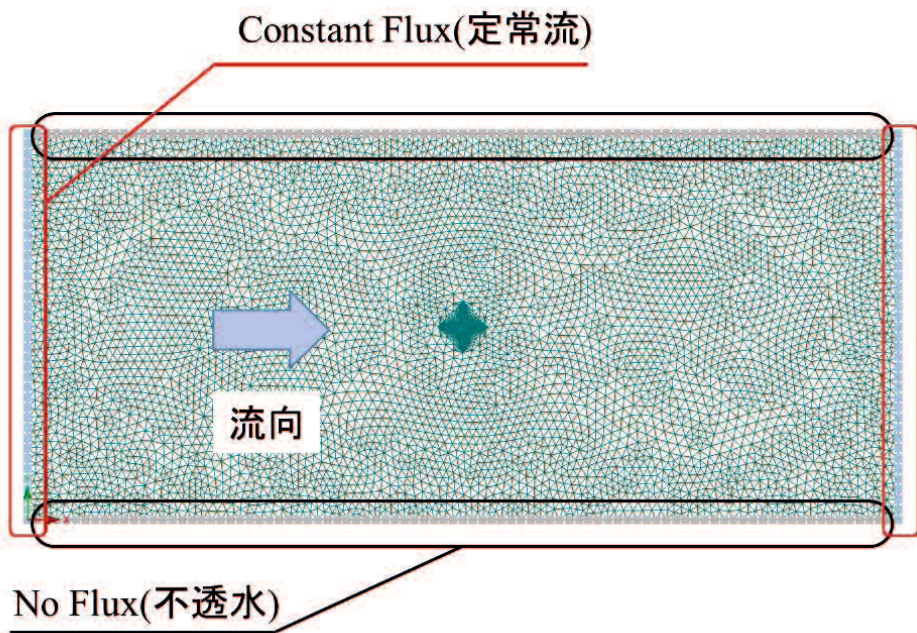
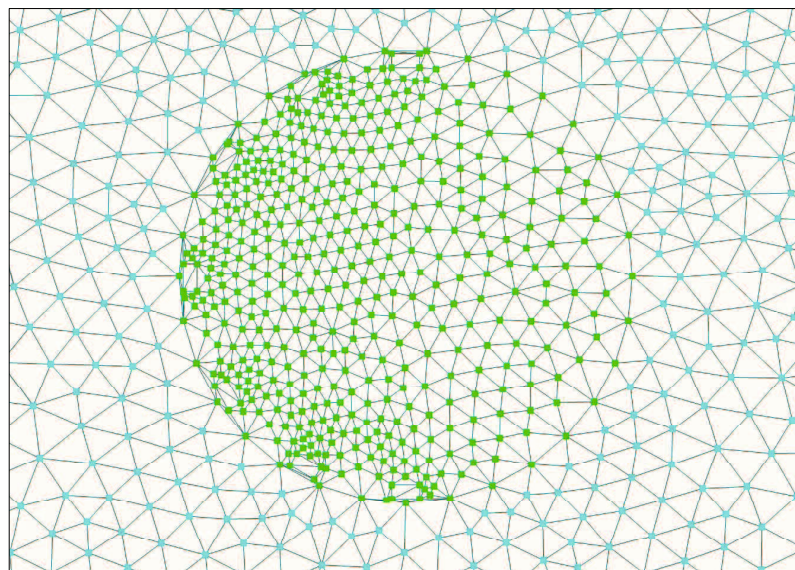
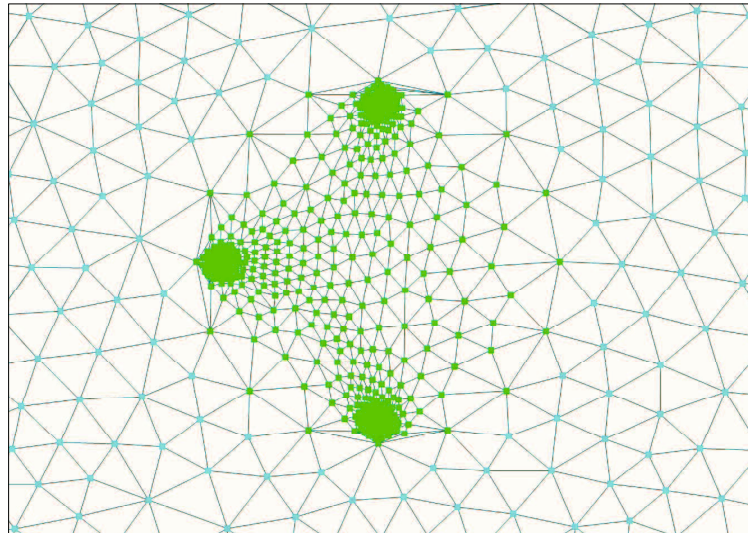


図 2-3 モデルの境界条件と流向方向



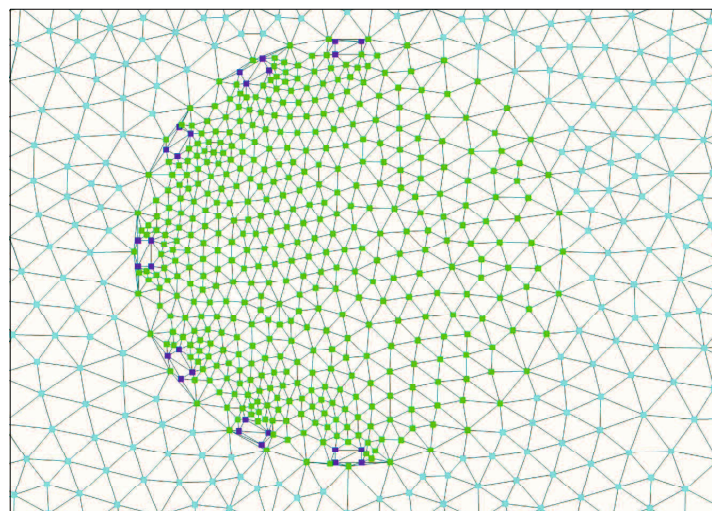
Project pdv65mm'CE-(V0.001)  
Domain Properties, Material Distribution

図 2-4 砂層, 透水性スポンジの 2 層モデルのメッシュ詳細図(65 mm 径ロッド無し)



Project pdv50mmdaiki'CE-2'(V0.001)  
Domain Properties, Material Distribution

図 2-5 砂層, 透水性スポンジの 2 層モデルのメッシュ詳細図(50 mm 径ロッド無し)



Project pdv65mm'CE-L\_ro45  
Domain Properties, Material Distribution

図 2-6 砂層, 透水性スポンジ, ロッドの 3 層モデルのメッシュ詳細図(65 mm 径ロッド 7 本)

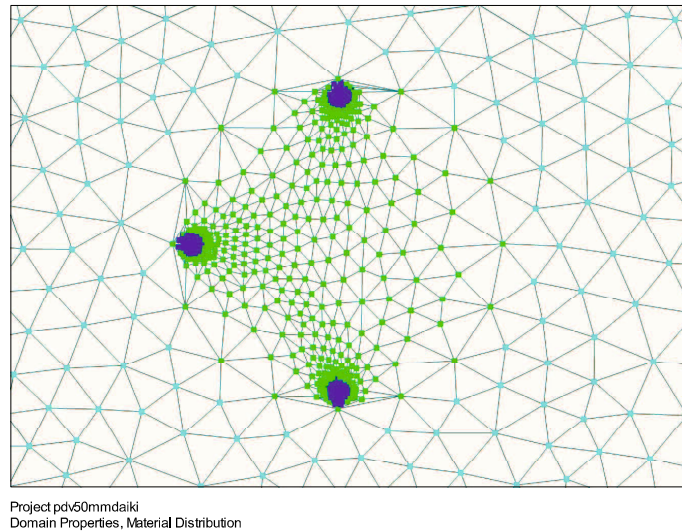


図 2-7 砂層, 透水性スポンジ, ロッドの 3 層モデルのメッシュ詳細図(50 mm 径ロッド 3 本)

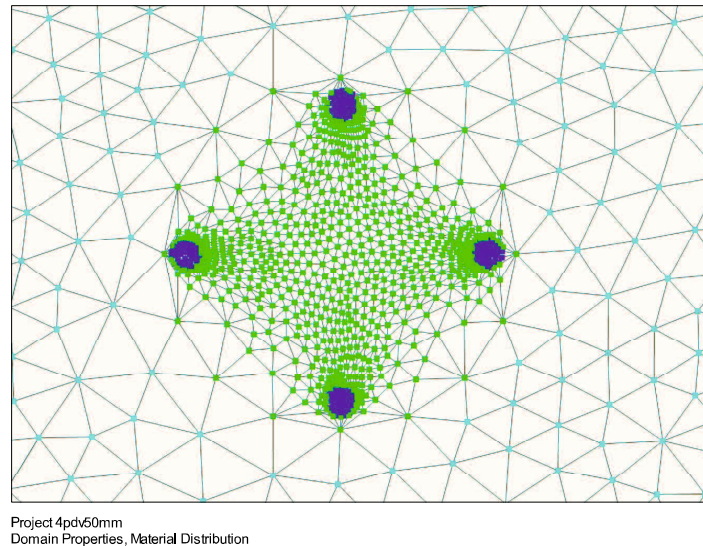


図 2-8 砂層, 透水性スポンジ, ロッドの 3 層モデルのメッシュ詳細図(50 mm 径ロッド 4 本)

## 2.2.2 地盤の透水係数による補正係数の算出方法

前述のとおり，地盤内と観測孔内では流速が変化することが知られている<sup>5)</sup>。式(2-3)より理論上の補正は可能であるが地盤と孔内の透水係数の違いの他に装置内のロッドの影響で理論上の補正と一致しない事が考えられた。そこで孔外透水係数を  $k=6.5 \times 10^{-4} \text{ m/s}$ ,  $1.3 \times 10^{-3} \text{ m/s}$ ,  $2.6 \times 10^{-3} \text{ m/s}$  の 3 パターン，ダルシー流速を  $0.0167 \text{ cm/s}$  ( $1 \text{ cm/min}$ ) とし，50 mm 径ロッド無しモデル(図 2-5)と現地検証で使用する 50 mm 径用 PDV(図 2-7, 図 2-8)のモデルを用いて再現計算を行った。PDV は装置外周にロッドが複数本配置されているため再現計算の際は表 2-1 における外径 50 mm と同様に流向に対してセンサを  $0^\circ$  と  $45^\circ$  の 2 パターンを計算した。モデルごとに中心流速を平均し，PDV のセンサ部に使用するスポンジと同様の透水係数  $1.3 \times 10^{-2} \text{ m/s}$  を基準とし補正係数  $\beta$  を求めた。

### 2.2.3 観測井挿入時に発生する鉛直流の影響確認方法

PDV の計測はセンサを対象の深度まで挿入してから一定時間静置することにより計測を行う。しかし、インクの溶出は PDV を観測井に挿入し地下水に浸漬した時点から始まるため、センサを挿入する際、センサを通過する水流が生じると考えられる。そこで観測井内に挿入した際に発生する鉛直流を再現した室内実験装置を作製しテーリング発生の有無を確認した。実験装置の概要図を図 2-9 に示す。実験装置には VP50 塩化ビニルパイプと 50mm 径用 4 本ロッド型 PDV を用いた。塩化ビニルパイプの底部にホースをつなぎ、水を送り鉛直方向の上昇流を発生させ、PDV を静置した。PDV の見かけの挿入速度は水の鉛直方向の流速とし、連続式から式(2-5)より求めた。

$$Q/A=V \quad (2-5)$$

ここで、 $Q$ ：ポンプ流量、 $A$ ：50 mm パイプ内断面積、 $V$ ：鉛直方向の流速である。鉛直方向の流速と計測時間から見かけの PDV 挿入深度を式(2-6)より求めた。

$$D = V \cdot t \quad (2-6)$$

ここで、 $V$ ：鉛直方向の流速、 $t$ ：計測時間 (s)、 $D$ ：想定挿入深度 (cm) である。

今回の実験では鉛直流速は 8.7 cm/s、計測時間 60 s、想定深度は 522 cm で計測を行った。計測後のペーパーディスクを乾燥後電子化し、電子化した画像を RGB 分解し閾値 G225 以下（テーリング用）と G100 以下（ドット用）で二値化画像を取得した。二値化画像を粒子解析しドットの面積と楕円形の長径を取得した。溶出前の初期のドット面積は直径 3 mm の円であるため面積は 7.07 mm<sup>2</sup>である。

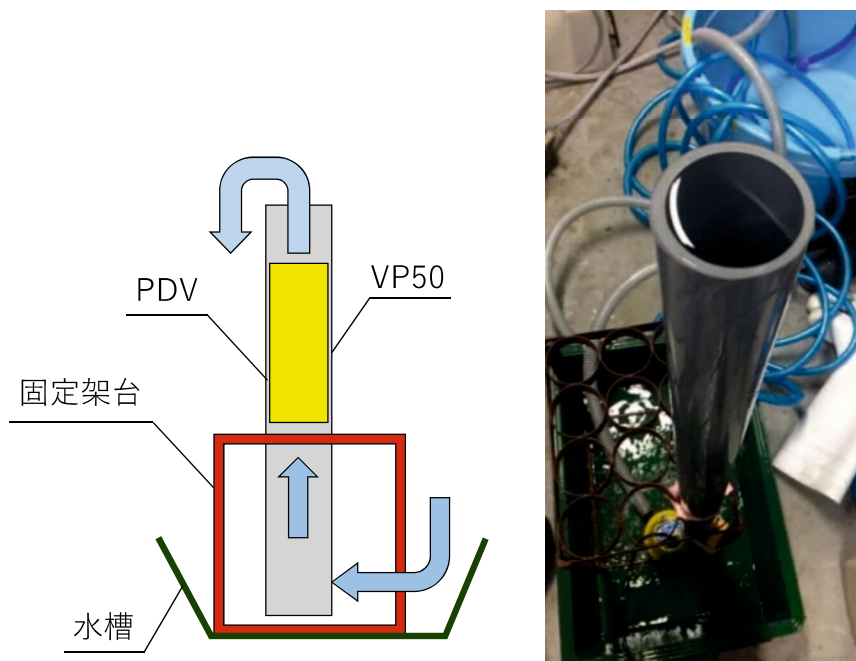


図 2-9 管内挿入実験装置概要図（左）、鉛直流を発生させた状況（右）

## 2.3 研究結果

### 2.3.1 水平2次元地下水浸透流計算によるPDVセンサ内部流速分布

#### (1) 65 mm 径, 50 mm 径ロッド無し計算結果

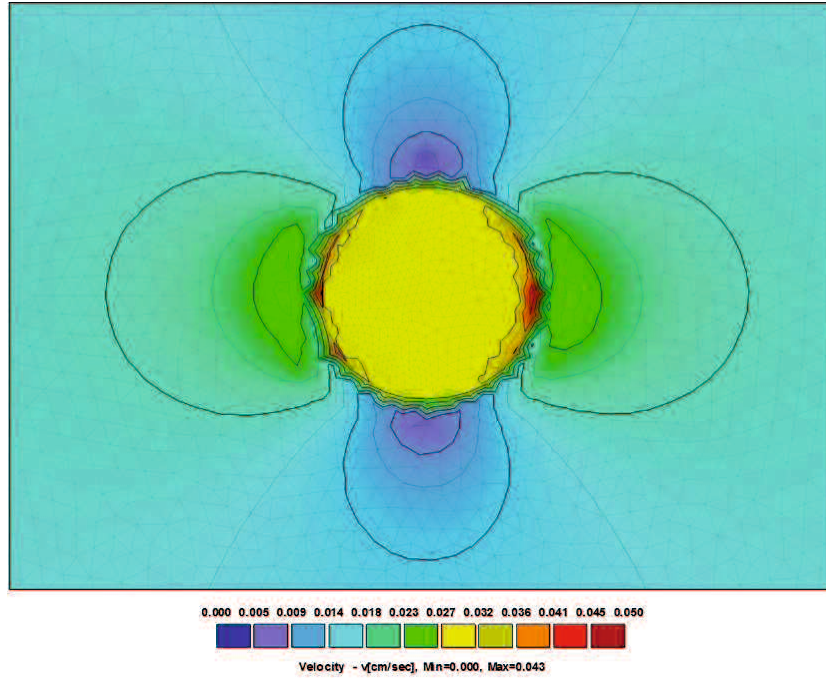
ロッドを配置せずに作製したモデルの計算結果を図 2-10,11 に示す。65 mm 径, 50 mm 径ともに砂層と透水性スポンジの境界付近で流速が大きく増加した。境界付近で増加した流速は透水性スポンジ内部で減少するが砂層内の流速と同程度になることはなく、周辺地盤内の流速より増加した。また、砂層と透水性スポンジの境界付近では透水性スポンジ内に流入するように流向が変化していることが確認できた。透水性スポンジ内部では流向は砂層内部の流向と大きく変化がないことも確認された。

実験砂槽を模擬したモデルの中心断面を見るため、PDV センサの中心を通る線上 ( $y=190$  mm) の流速分布を取得した。65 mm 径および 50 mm 径のロッド無しの流速分布計算結果を図 2-12 に示す。砂層と透水性スポンジの境界では流速が約 2 倍に増加した。また、PDV の中心付近 ( $x: 440\sim 460$  mm) の平均流速では砂層のダルシー流速 1.0 cm/min 時で 65 mm 径が 1.88 cm/min, 50 mm 径が 1.95 cm/min と、砂層のダルシー流速を基準とした増速率は 1.88~1.95 であり、かつ 50 mm 径の流速が 65 mm 径のそれに比べ 1.04 倍大きくなった。同じ数値モデルを用いて設定流速を 1.0 cm/min から 0.01 cm/min に変更し再計算した (図 2-13) ところ、設定流速 0.01 cm/min では透水性スポンジ中心付近で流速が安定しないが 65 mm 径が 0.018 cm/min, 50 mm 径が 0.0179 cm/min となり増速率は 1.80, 設定流速 1.0 cm/min と比べやや減少した。

#### (2) 65 mm 径用 7 本ロッド型計算結果

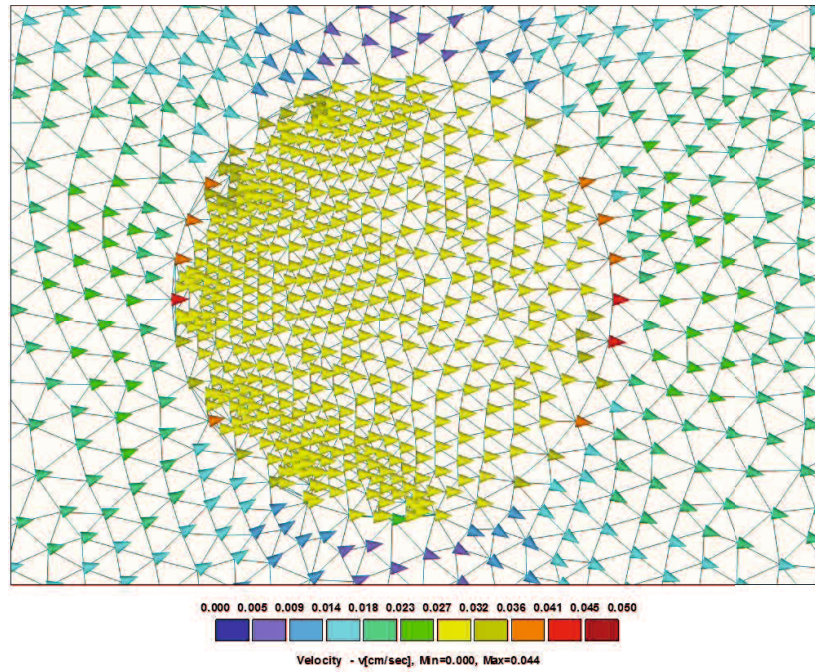
図 2-14 に 65 mm 径用 7 本ロッド型単ドット式 PDV の流速分布計算結果を示す。PDV の中心付近 ( $x: 440\sim 460$  mm) の平均流速は回転角  $0^\circ$  時で 1.89 cm/min, 回転角  $45^\circ$  時で 1.79 cm/min, 回転角  $90^\circ$  時で 1.86 cm/min となった。7 本ロッド型ではロッドの配置によっては最大で 6.9 % の流速差が発生することが明らかとなった。また、図 2-12 と同様に砂層と透水性スポンジの境界で流速が 2 倍程度に増加する結果が得られた。PDV 中心部の流速はロッドが PDV 中心と砂層の中心線にある回転角  $0^\circ$  と  $90^\circ$  に比べ回転角  $45^\circ$  の場合の方が PDV 内の流速が小さくなる計算結果となった。流速分布を取得した回転角  $0^\circ$  と  $90^\circ$  においてロッドの近傍を水塊が通過する際にロッドによって通過する断面が狭まるため流速が増加するためだと考えられる。

図 2-15,16,17 に 65 mm 径用 7 本ロッド型単ドット式 PDV のモデル計算結果を示す。PDV と砂層の境界の上下流で流速が大きく増加する結果となった。回転角  $90^\circ$  の計算結果がもっとも境界部で流速が増加したが、PDV の中心部の流速は境界付近の流速の変化による影響を 1.0 cm/min の条件では大きく受けないことが確認できた。また、ロッドの近傍では不透水のロッドを迂回するように流向が大きく変化していることが確認できるが、モデルの PDV の中心部付近流向には影響がないことが確認できた。



Project pdv65mm'CE-3  
Results, Velocity, Time 1 - 86400 sec

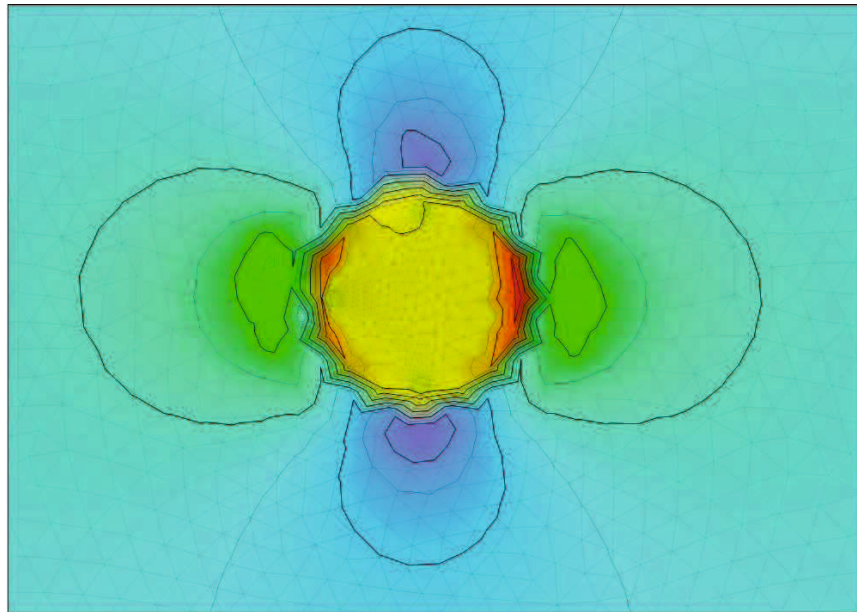
a) 流速分布



Project pdv65mm'CE-3  
Results, Velocity, Time 1 - 86400 sec

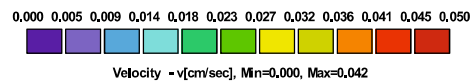
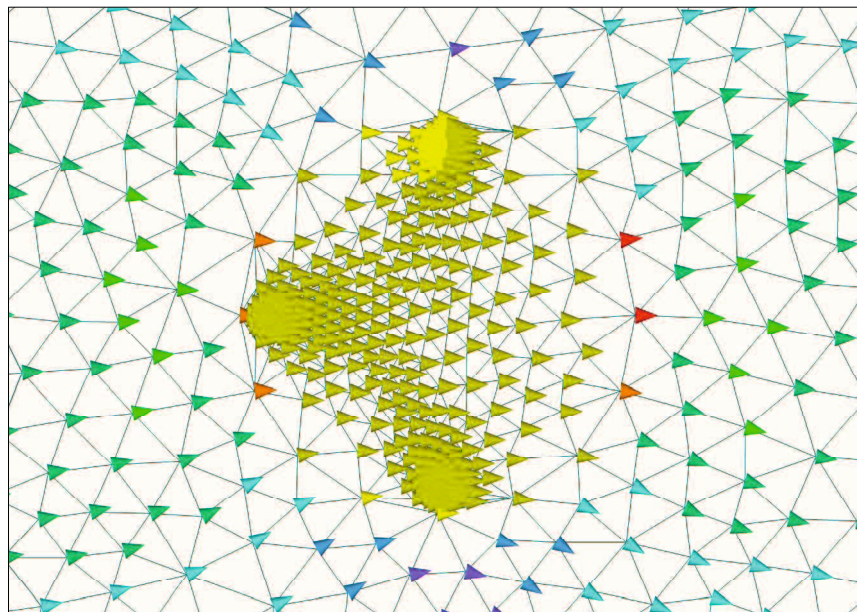
b) 流速ベクトル

図 2-10 モデル計算結果 (65 mm 径ロッド無, 設定流速  $V=0.0167 \text{ cm/s} = 1 \text{ cm/min}$ )



Project pdv50mmdaiki'CE-<sup>3</sup>  
Results, Velocity, Time 1 - 86400 sec

a) 流速分布



Project pdv50mmdaiki'CE-<sup>3</sup>  
Results, Velocity, Time 1 - 86400 sec

b) 流速ベクトル

図 2-11 モデル計算結果 (50 mm 径ロッド無, 設定流速  $V=0.0167$  cm/s = 1cm/min)



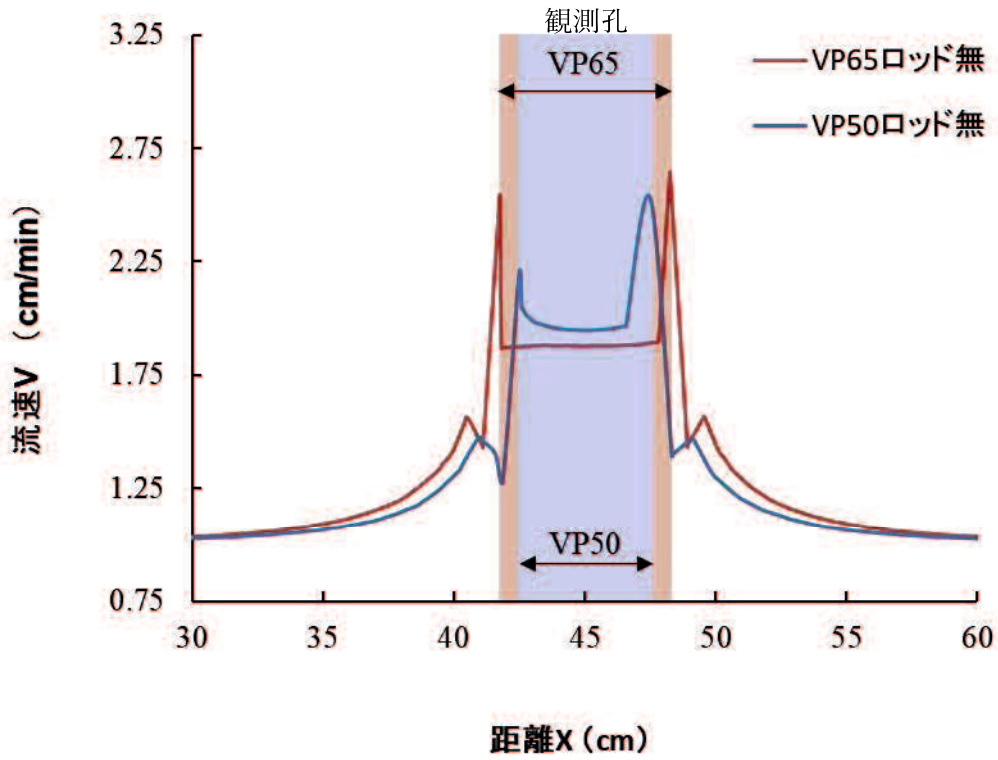


図 2-12 ロッド無しの場合のセンサ中央部の流下方向の流速分布計算結果(設定流速  $V=1$  cm/min)

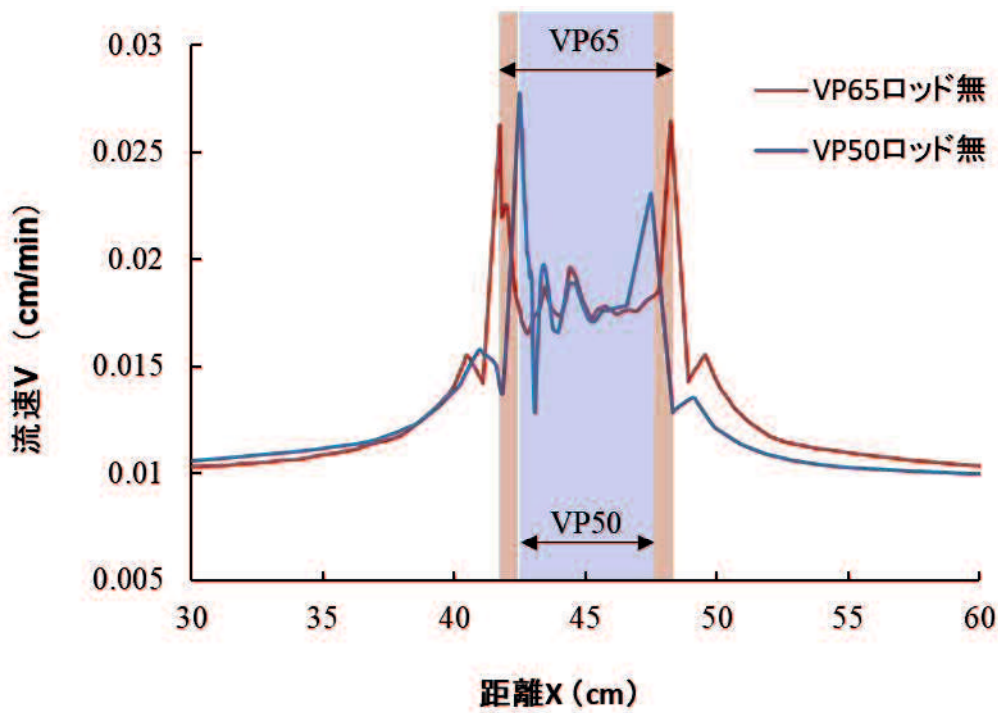


図 2-13 ロッド無しの場合のセンサ中央部の流下方向の流速分布計算結果(設定流速  $V=0.01$  cm/min)

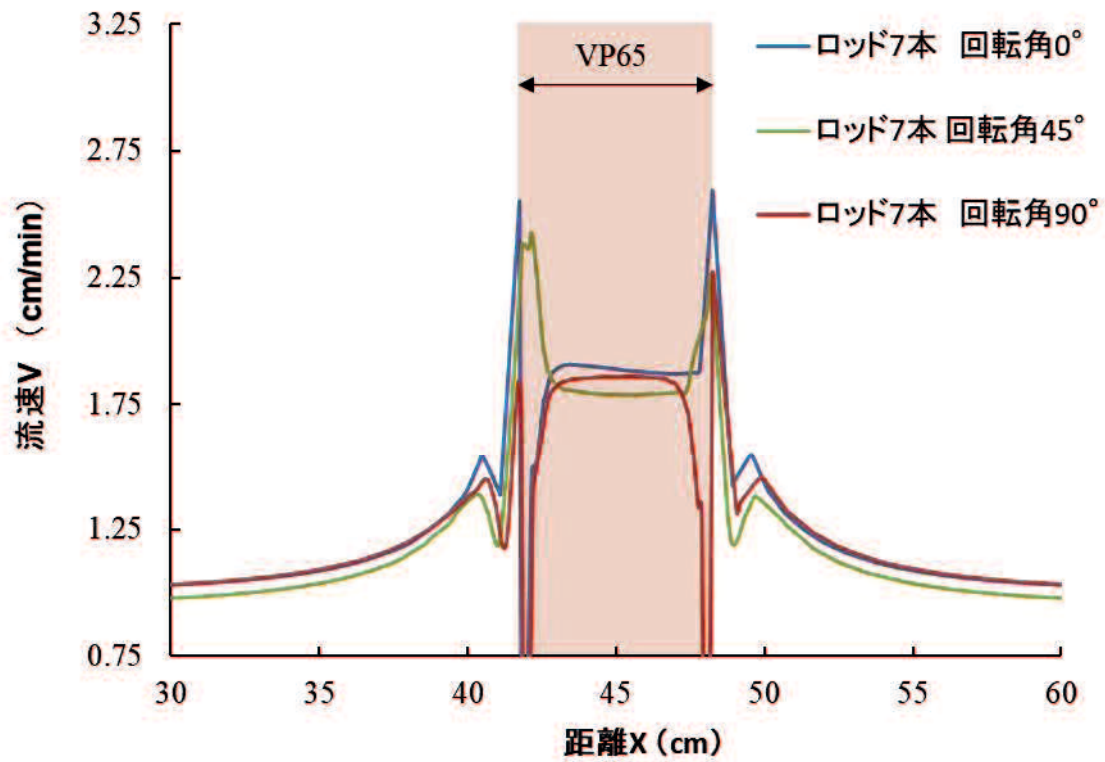
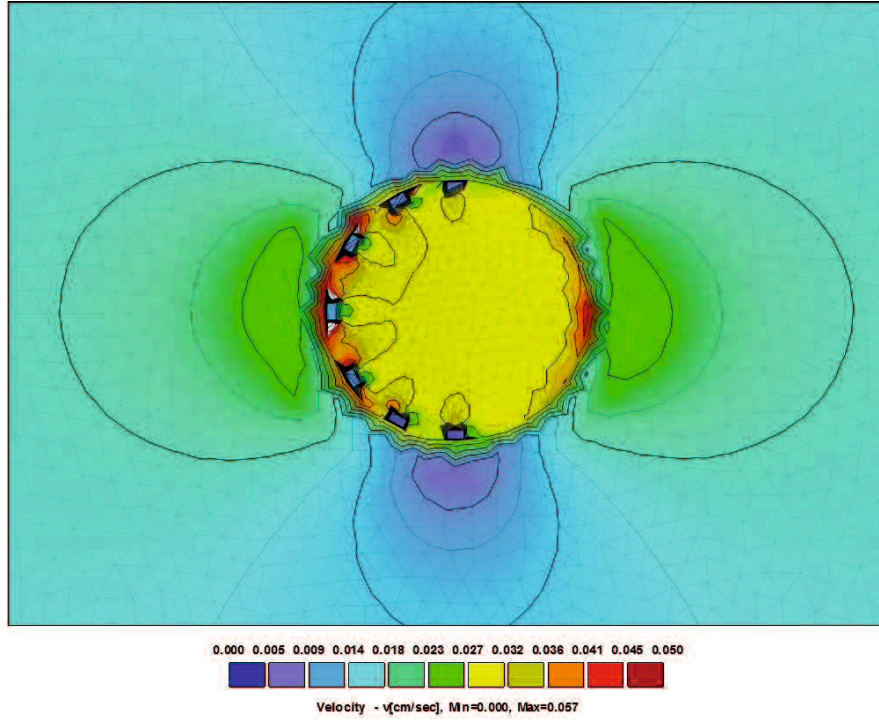
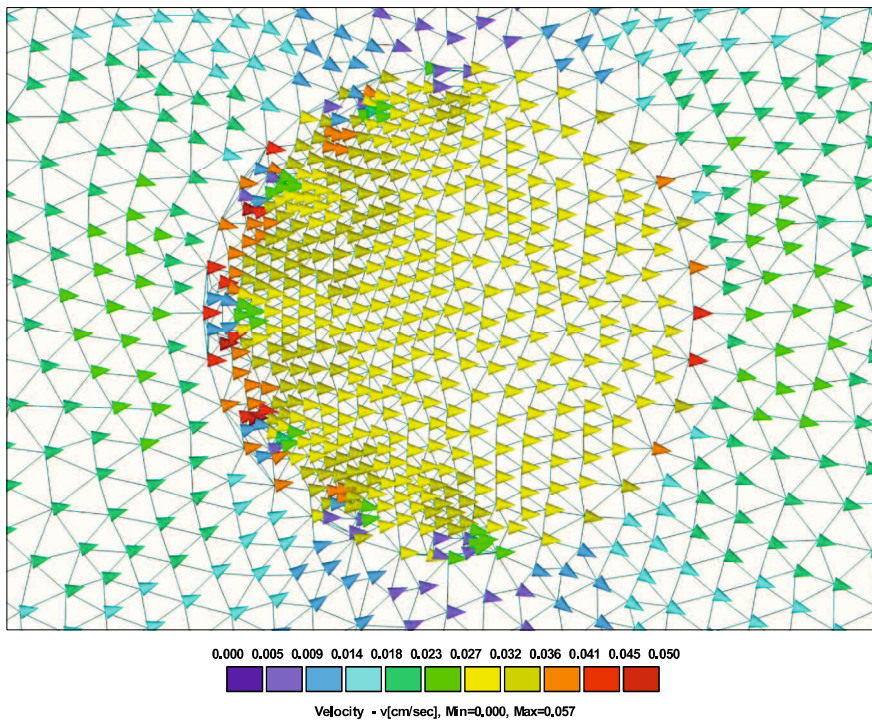


図 2-14 65 mm 径, 7 本ロッド型 PDV のセンサ中央部の流下方向流速分布計算結果  
(設定流速  $V=1$  cm/min)

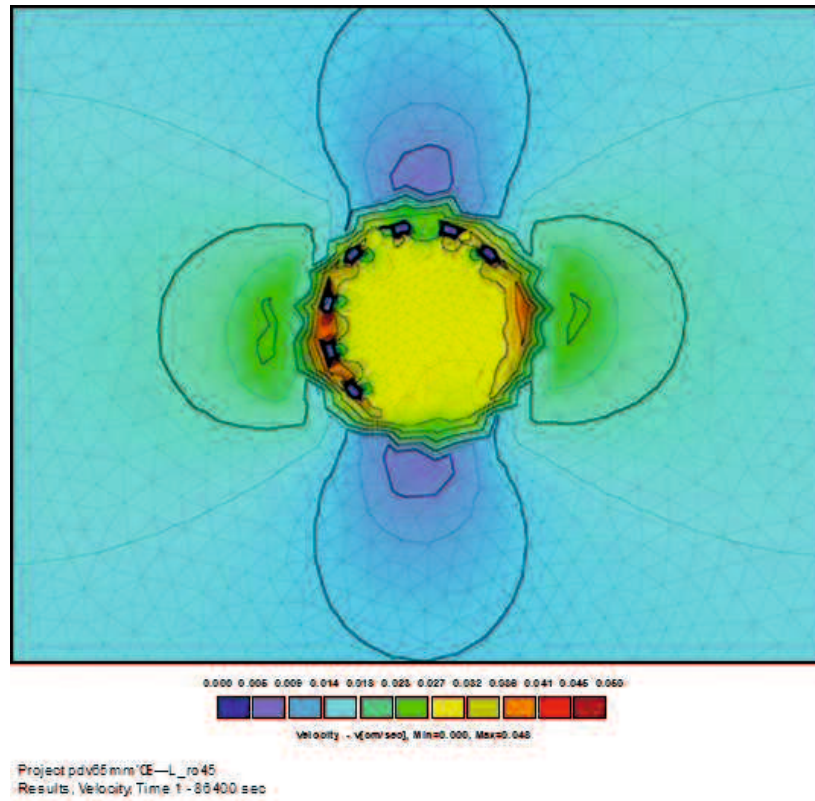


a) 流速分布

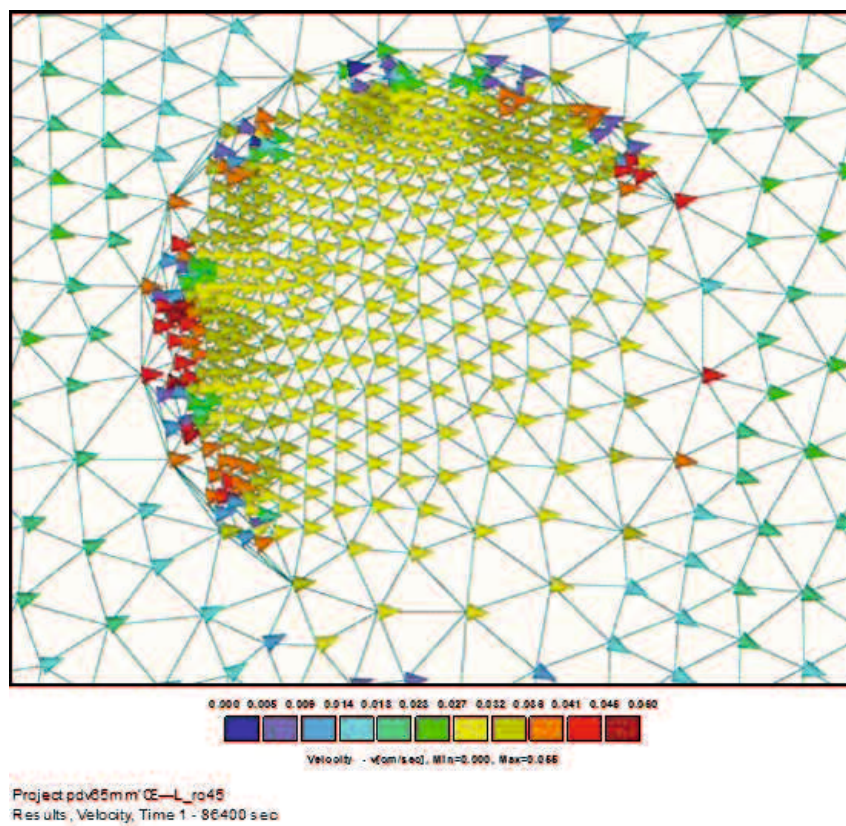


b) 流速ベクトル

図 2-15 モデル計算結果 (65 mm 径用 7 本ロッド型回転角  $0^\circ$  , 設定流速  $V=0.0167$  cm/s)

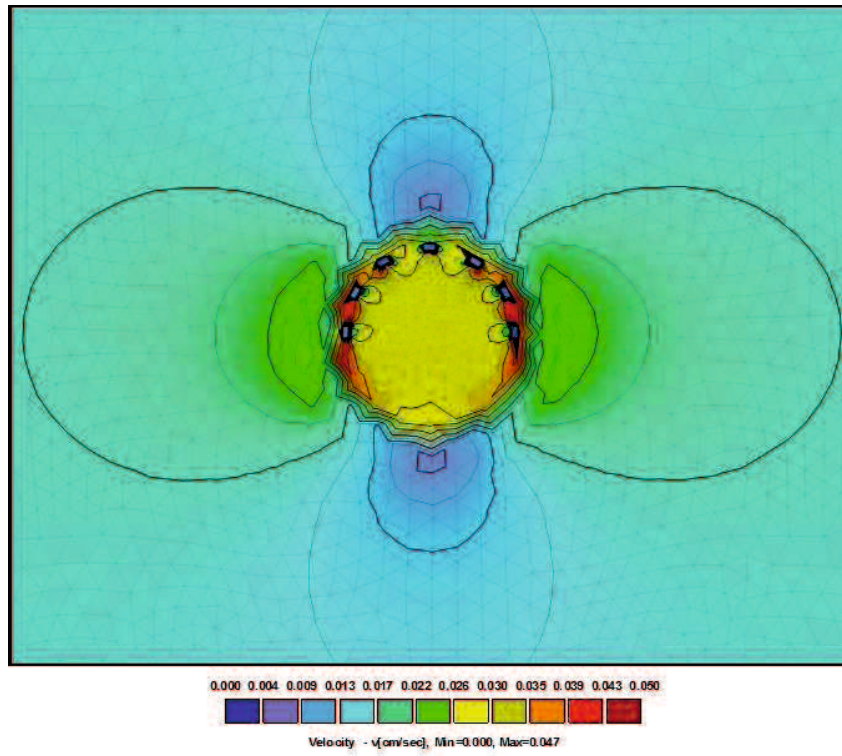


a) 流速分布



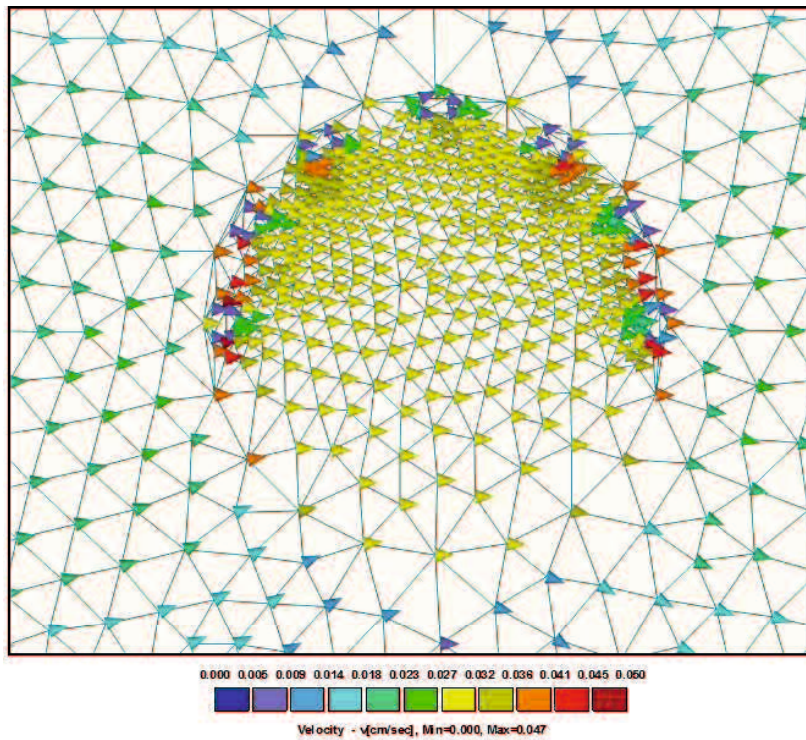
b) 流速ベクトル

図 2-16 モデル計算結果 (65 mm 径用 7 本ロッド型回転角 45°, 設定流速  $V=0.0167$  cm/s)



Project pdv65mm'CE-L\_ro90  
Results, Velocity, Time 1 - 86400 sec

a) 流速分布



Project pdv65mm'CE-L\_ro90  
Results, Velocity, Time 1 - 86400 sec

b) 流速ベクトル

図 2-17 モデル計算結果 (65 mm 径用 7 本ロッド型回転角 90° , 設定流速 V=0.0167 cm/s)

### (3) 50 mm 径用 3 本ロッド型計算結果

図 2-18 に 50 mm 径用 3 本ロッド型 PDV の流速分布計算結果を示す。PDV 中心付近 (x:440~460 mm) の平均流速は回転角  $0^\circ$  が 1.97 cm/min, 回転角  $45^\circ$  で 1.97 cm/min, 回転角  $90^\circ$  で 1.84 cm/min となった。50 mm 径用 3 本ロッド型ではロッドの配置で最大で 6.5% の流速差が発生することが確認された。図 2-12 と同様に 50 mm 径用 3 本ロッド型でも砂層部と透水性スポンジの境界で流速が増加し, PDV の中心付近では流速が設定流速の 2 倍程度となった。PDV 中心部の流速はロッド 7 本型と異なりロッドが下流側に配置された回転角  $90^\circ$  が最も PDV 内の流速が減少する計算結果となった。

図 2-19, 20, 21 に 2 次元地下水流動計算による 50 mm 径用 3 本ロッド型 PDV モデルの計算結果を示す。PDV と砂層の境界で上流, 下流ともに流速が大きく増加する結果となった。回転角  $90^\circ$  の計算結果が最も境界部で流速が増加したが PDV の中心部の流速は境界付近の流速の変化による影響を 1.0 cm/min の条件では大きく受けないことが確認できた。また, ロッドの近傍では不透水のロッドを迂回するように流向が大きく変化していることが確認できるがモデルの PDV の中心部付近の流向には影響がないことが確認できた。

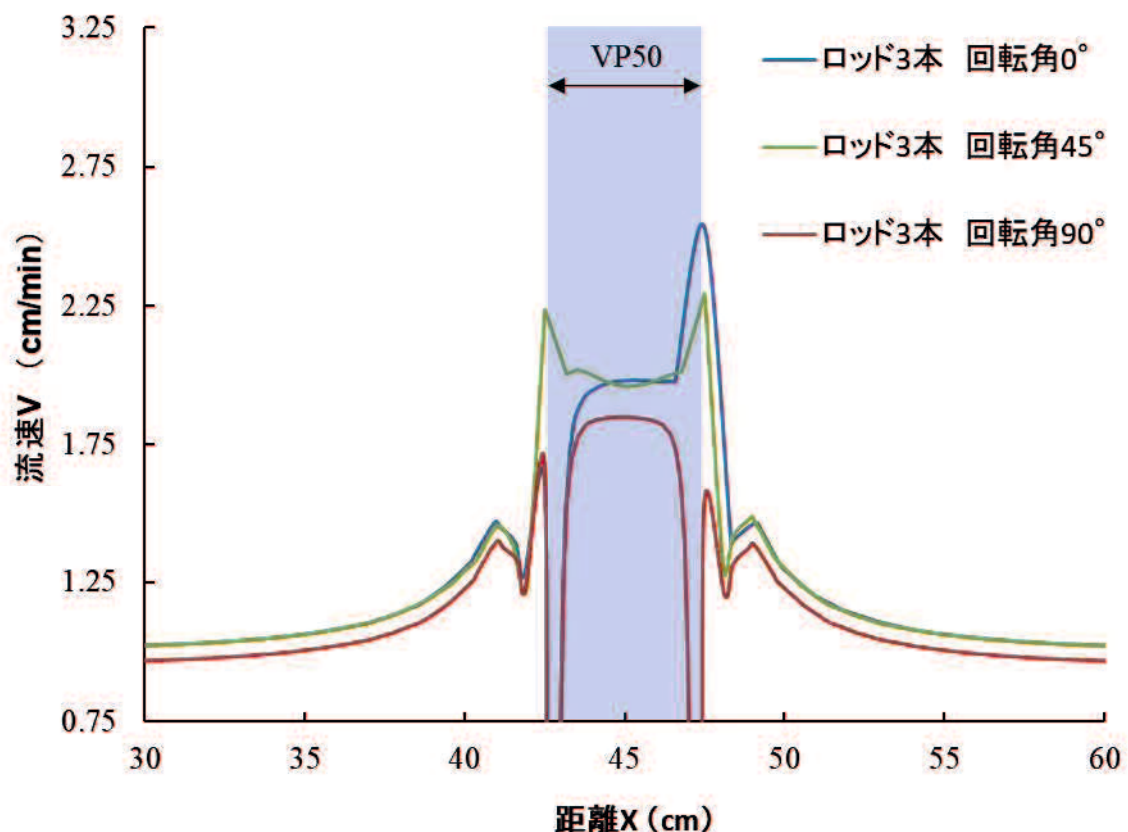
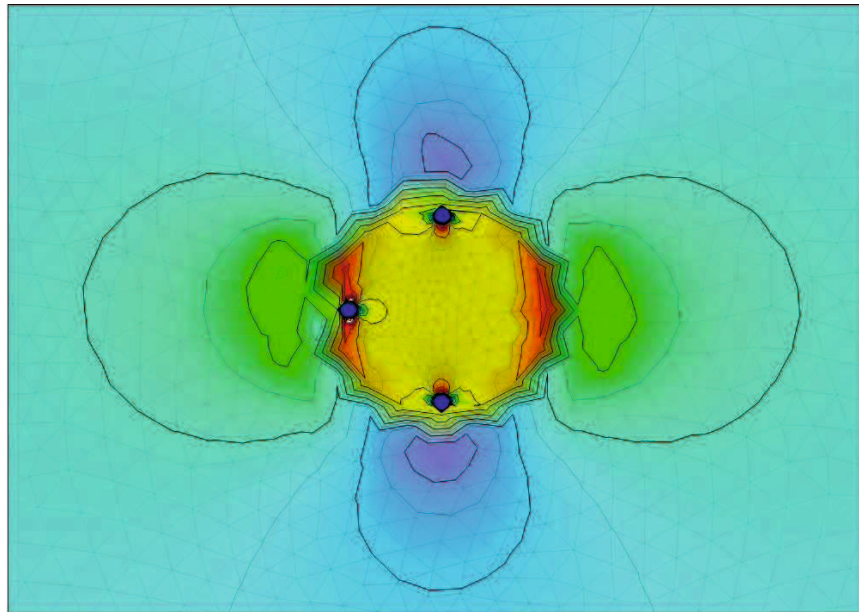
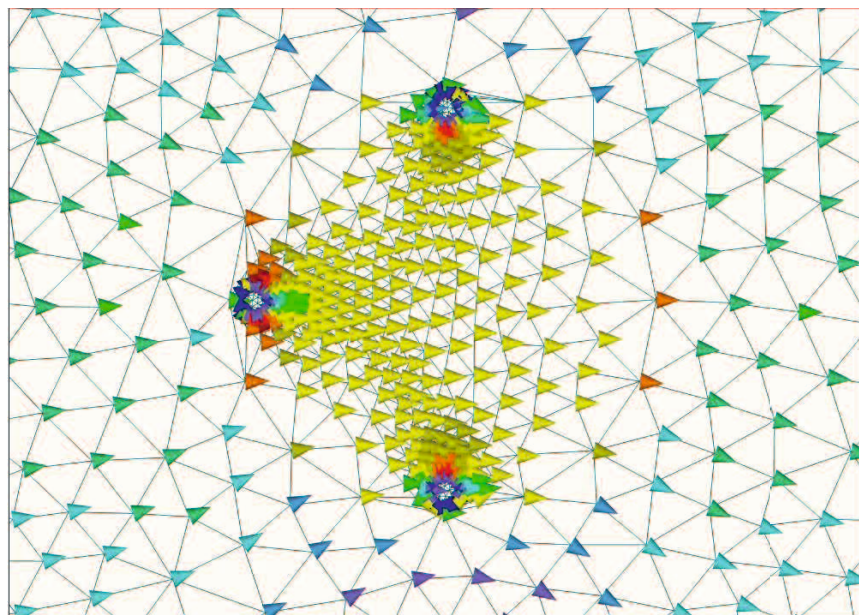


図 2-18 50 mm 径用 3 本ロッド型 PDV の流速分布計算結果 (設定流速  $V=0.0167$  cm/s)



Project pdv50mmdaiki  
Results, Velocity, Time 1 - 86400 sec

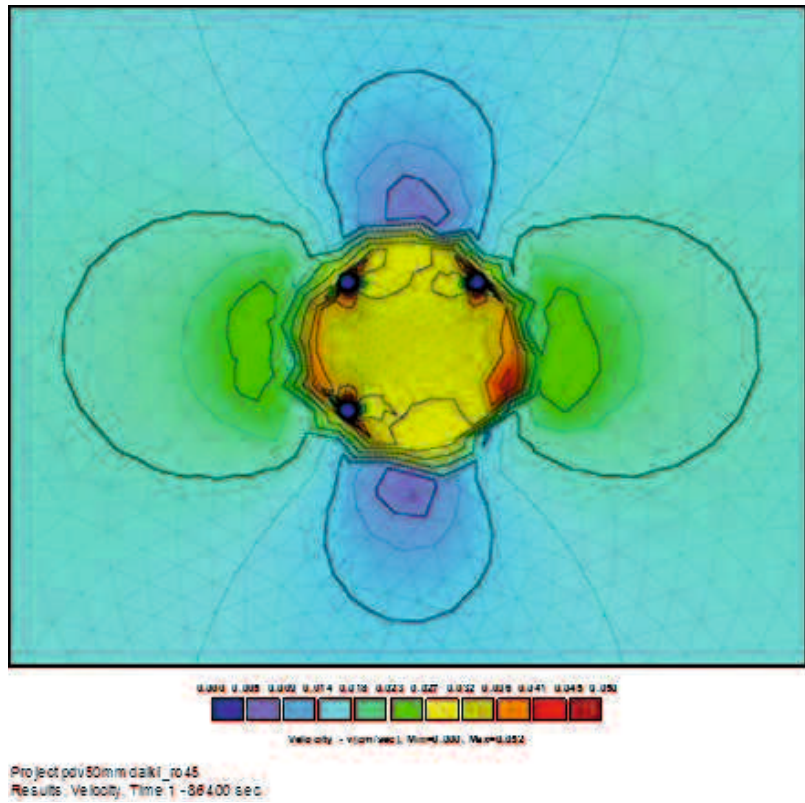
a) 流速分布



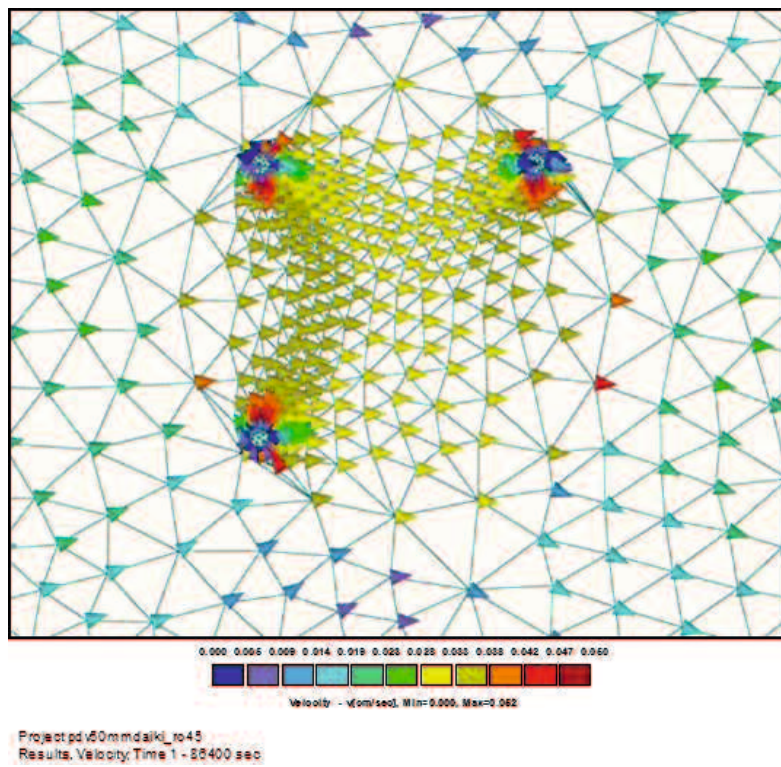
Project pdv50mmdaiki  
Results, Velocity, Time 1 - 86400 sec

b) 流速ベクトル

図 2-19 モデル計算結果 (50 mm 径用 3 本ロッド型回転角 0°, 設定流速  $V=0.0167$  cm/s)



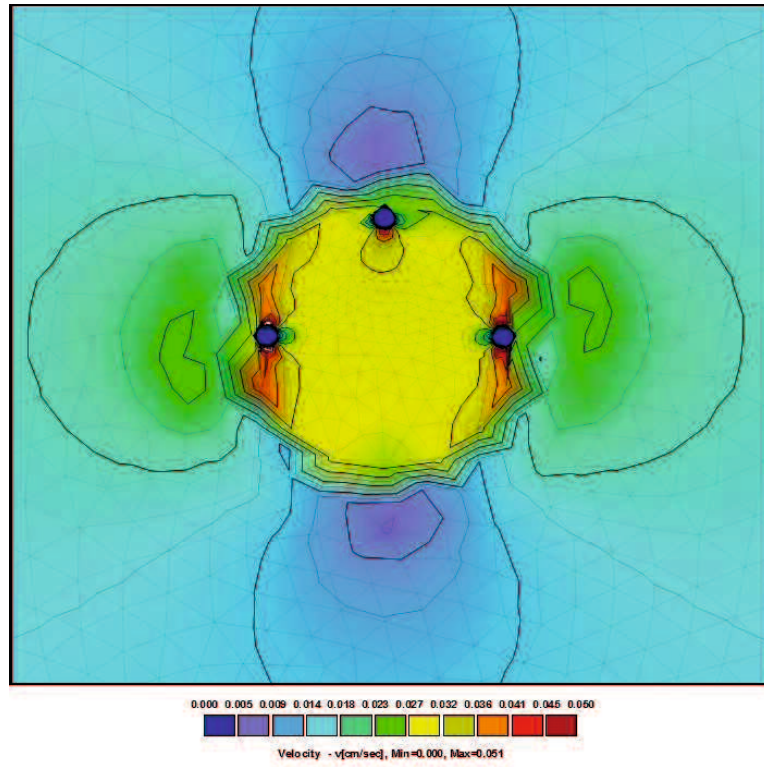
a) 流速分布



b) 流速ベクトル

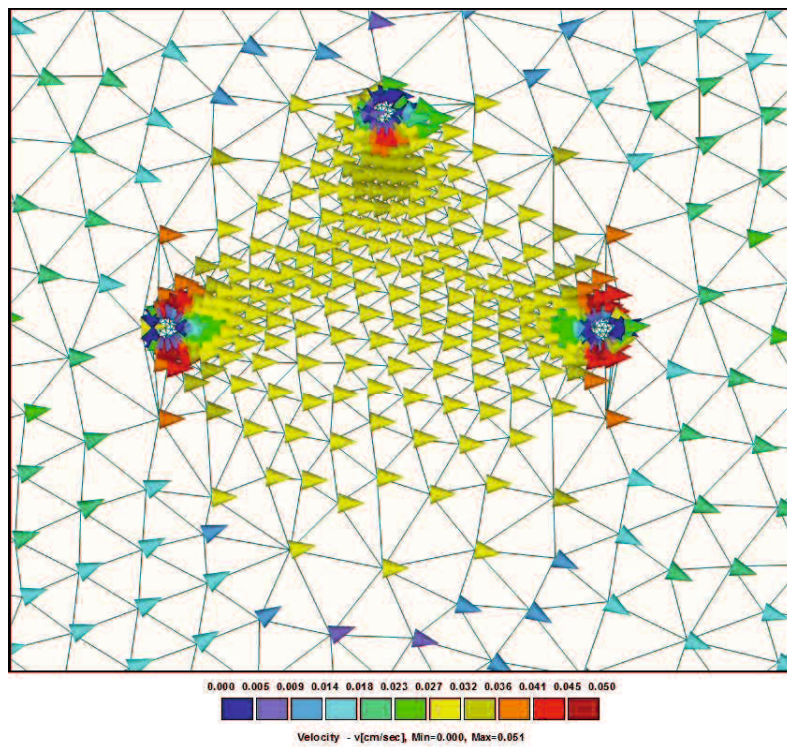
図 2-20 モデル計算結果 (50 mm 径用 3 本ロッド型回転角 45°, 設定流速  $V=0.0167$  cm/s)





Project pdv50mmdaiki\_ro90  
Results, Velocity, Time 1 - 86400 sec

a) 流速分布



Project pdv50mmdaiki\_ro90  
Results, Velocity, Time 1 - 86400 sec

b) 流速ベクトル

図 2-21 モデル計算結果 (50 mm 径用 3 本ロッド回転角 90°, 設定流速  $V=0.0167$  cm/s)

#### (4) 50 mm 径用 4 本ロッド型計算結果

図 2-22 に 50 mm 径用 4 本ロッド型 PDV の流速分布計算結果を示す。作製したモデルにおける PDV の中心付近 ( $x=440\sim 460$  mm) の間の平均流速は回転角  $0^\circ$  が 1.96 cm/min, 回転角  $45^\circ$  で 2.07 cm/min となった。50 mm 径用 4 本ロッド型ではロッドの配置で最大で 5.3 %の流速差が発生することが確認された。50 mm 径用 4 本ロッド型では回転角  $45^\circ$  の場合, PDV 中心から下流側で流速が増加する結果となった。

図 2-23, 24 に 50 mm 径用 4 本ロッド型 PDV のモデル計算結果を示す。PDV と砂層の境界で上流, 下流ともに流速が増加する傾向は 7 本ロッド型, 3 本ロッド型と同様であるが回転角  $45^\circ$  では PDV 中心から下流にかけて流速が増加し最大で 2.85 cm/min となった。

流向に関してはその他の計算結果と同様にロッドの近傍では不透水のロッドを迂回するように流向が大きく変化するが PDV の中心付近の流向には影響がないことが確認できた。

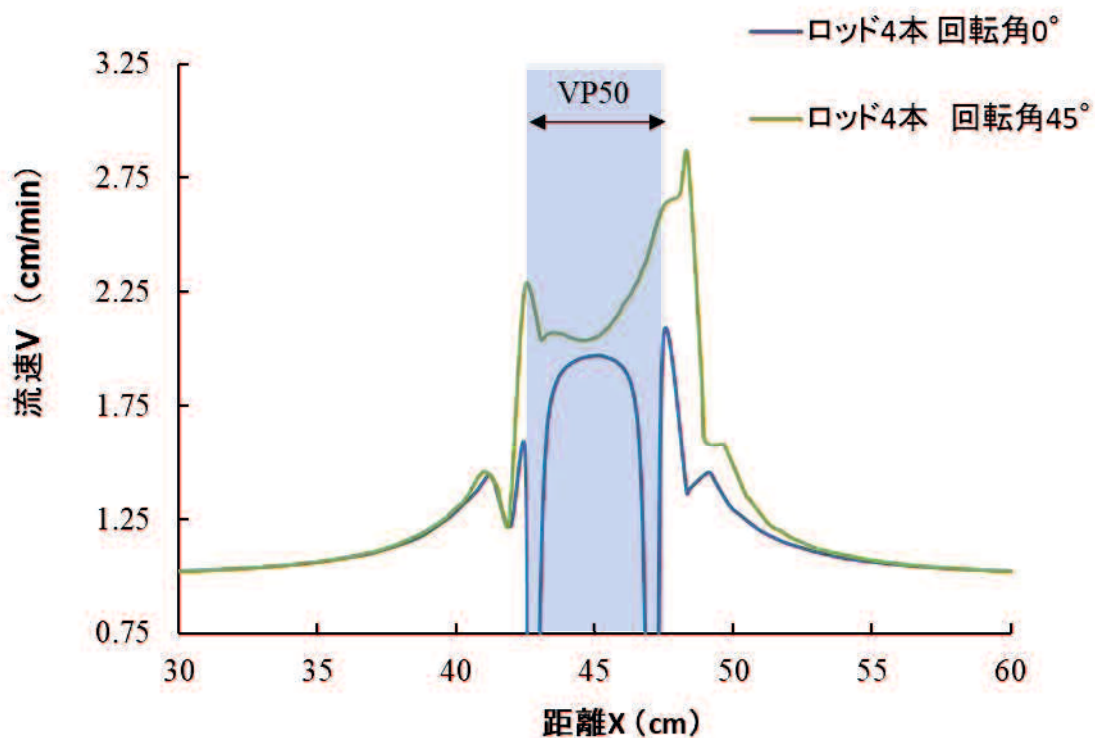
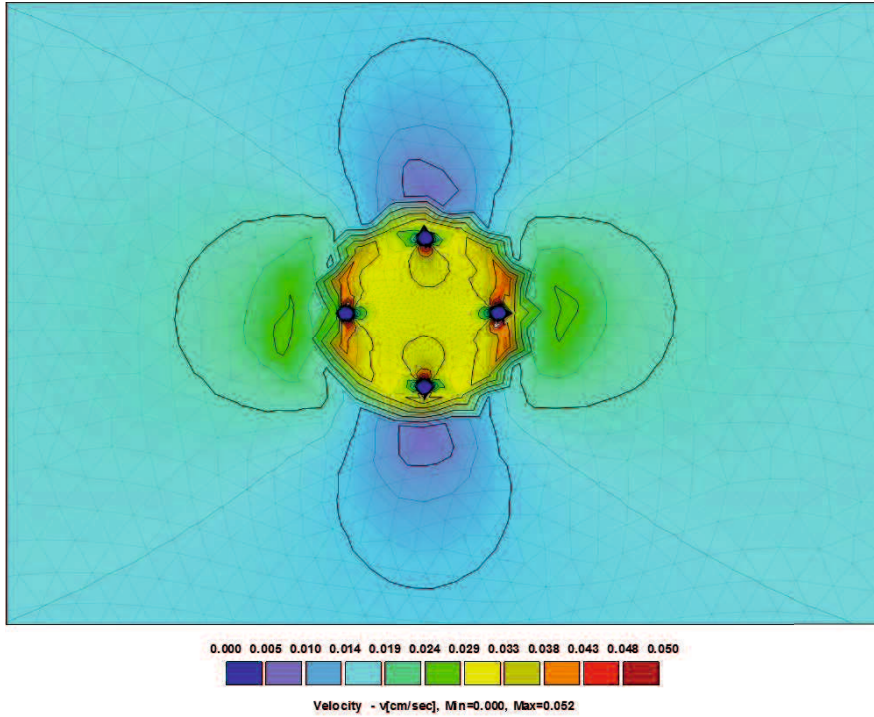
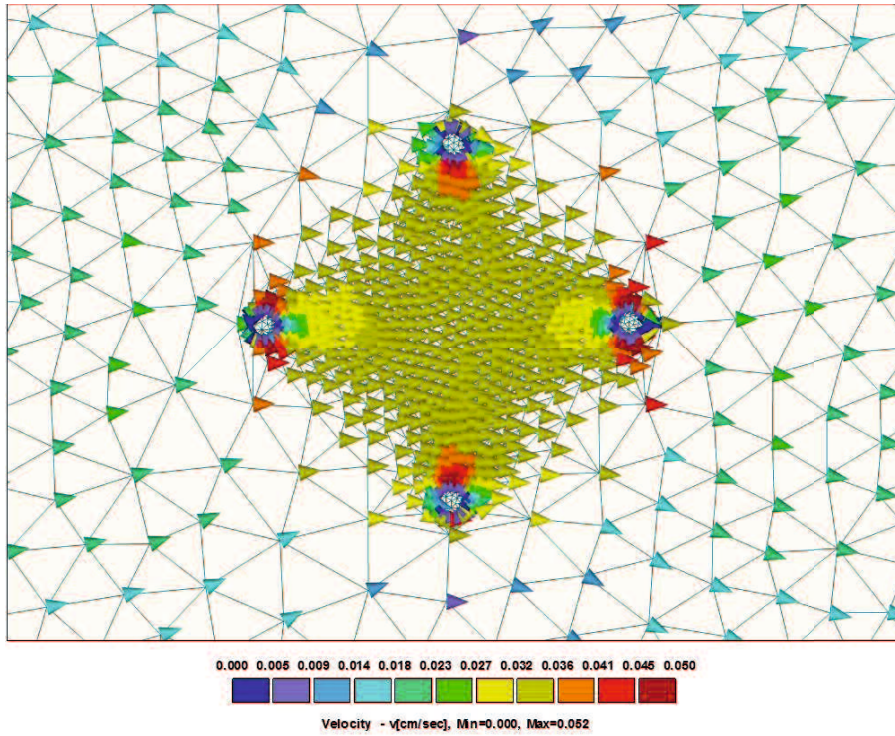


図 2-22 50 mm 径用 4 本ロッド型 PDV の流速分布計算結果 (設定流速  $V=0.0167$  cm/s)



Project 4pdv50mm  
Results, Velocity, Time 1 - 86400 sec

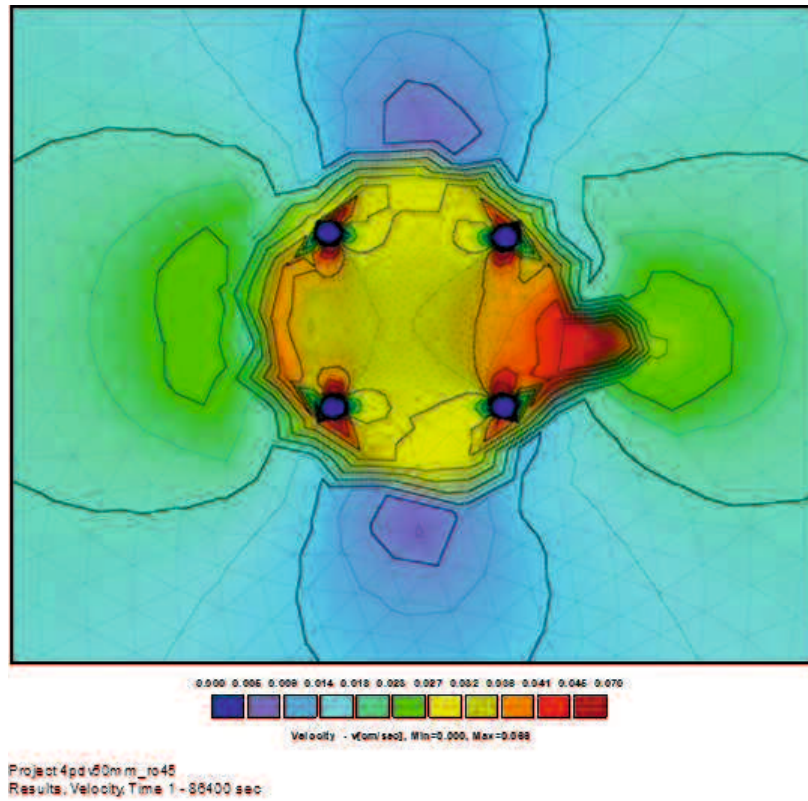
a) 流速分布



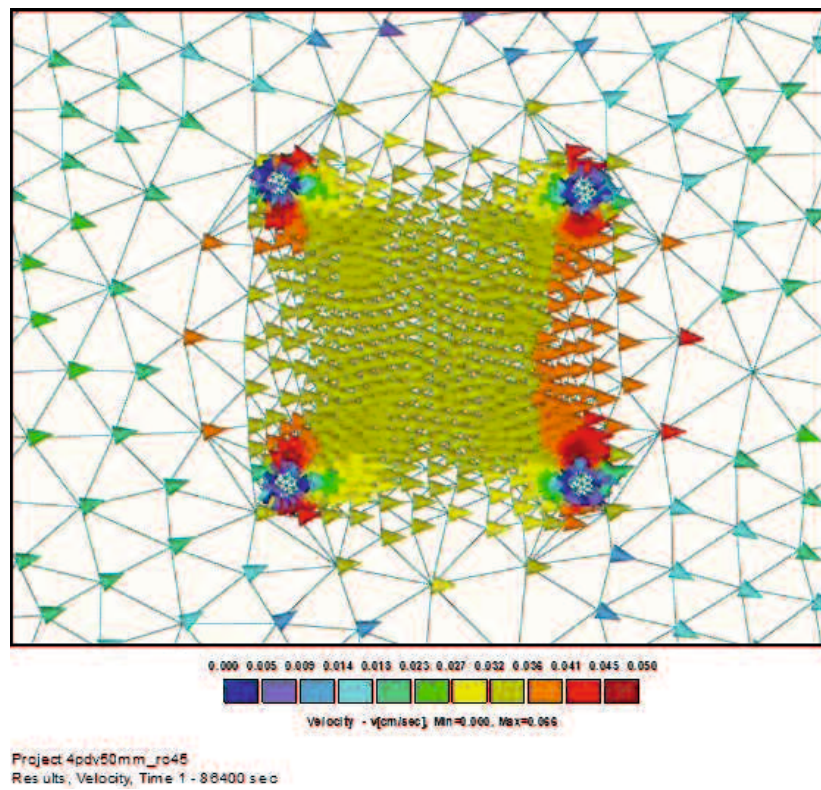
Project 4pdv50mm  
Results, Velocity, Time 1 - 86400 sec

b) 流速ベクトル

図 2-23 モデル計算結果 (50 mm 径用 4 本ロッド型 回転角 0°, 設定流速  $V=0.0167$  cm/s)



a) 流速分布



b) 流速ベクトル

図 2-24 モデル計算結果 (50 mm 径用 3 本ロッド型 回転角 45°, 設定流速  $V=0.0167$  cm/s)

(5) 観測孔内部の流速の変動係数

図 2-14, 18, 22 に示す作製したモデルの中心を通過する直線において取得した流速分布から中心軸を通過する流下方向流速成分に対して変動係数を計算した。変動係数は式(2-7)より求めた。

$$CV = \frac{\sigma_i}{x_i} \times 100 \quad (2-7)$$

ここで、 $CV$ ：変動係数（%）， $\sigma_i$ ：PDV 中心からの距離ごとの流速標準偏差， $x_i$ ；PDV 中心からの距離ごとの流速平均値（cm/min）である。

表 2-2 より PDV センサ中心付近では変動係数は小さく、流速の標準偏差が小さいことがわかる。PDV センサ中心から離れるにつれて変動係数が上昇する。65 mm 径用 7 本ロッド型では中心からの距離±2.5 cm、50 mm 径用 3 本ロッド型、4 本ロッド型では±1.8 cm を超えると変動係数が大きくなる結果となった。65 mm 径では中心から 3 cm、50 mm 径では中心から 2 cm まで離れるとロッドの影響により流速の変化が大きくなることを表している。50 mm 径用 3 本ロッド型の回転角 45°では流速分布を取得した測線上にロッドがないため、変動係数が透水性スポンジと砂層の境界付近での流速変化の影響範囲までは変動係数が上昇しない。また、50 mm 径用 4 本ロッド型回転角 0°が±1.8 cm で変動係数 10 %を超える結果となった。これは流速分布を取得した測線上の上流と下流ともにロッドがあるため、ロッドによる流速変化が与える影響が他のパターンと比べ大きいと考えられた。次いで 50 mm 径のロッド 3 本型回転角 45°の変動係数の上昇が大きくなった。測線上にあるロッドの本数は同数だが測線上にないロッド本数が少ないことから、ロッドの本数が多いほど PDV 内部の流速分布への影響が大きくなることが確認された。

表 2-2 PDV 中心からの距離と流速の変動係数

中心からの距離 cm	変動係数(%)							
	65mm径用7本ロッド			50mm径用3本ロッド			50mm径用4本ロッド	
	0°	45°	90°	0°	45°	90°	0°	45°
±1	0.40	0.15	0.03	0.50	0.50	0.28	0.80	1.82
±1.5	0.56	0.23	0.15	1.50	0.95	1.44	2.98	3.04
±1.8	0.62	0.37	0.20	4.50	0.98	4.68	10.08	3.93
±2.0	0.62	0.64	0.49	20.90	0.97	18.14	33.76	28.07
±2.5	2.00	2.40	3.07	-	4.27	-	-	-
±3.0	12.54	9.33	18.37	-	10.32	-	-	-

(6) 透水係数による補正

式(2-3)より孔内透水係数  $k_0=1.3 \times 10^{-2}$  m/s における理論上の補正係数は式(2-8)で表される。

$$\beta_0 = 38.462k + 0.5 \quad (2-8)$$

ここで、 $\beta_0$ ： $k_0=1.3 \times 10^{-2}$  (m/s)における理論上の補正係数、 $k$ ：孔外透水係数 (m/s)である。再現計算の結果から得られた PDV センサ中心部の流速に対して補正係数  $\beta$  を式(2-1)から求め

た。補正係数と孔外透水係数の関係を図 2-25、補正係数の近似式を表 2-3 に示す。図 2-25 より理論と同様の直線性が確認できた。表 2-3 に  $\beta$  の近似式をまとめた。補正係数  $\beta$  は孔外透水係数  $k$  (m/s) が  $k \gg k_0$  の条件では一定値に近づくことがわかる。また、ロッド数が多いほど、また径が小さいと理論値よりも  $\beta$  が減少することがわかる。さらに現地透水係数により流速の補正を行う式を作製した。PDV の検定を行う際の孔外透水係数は  $1.30 \times 10^{-3}$  m/s であるため、孔外透水係数が変化した場合の補正式は 4 本ロッド型の場合式 (2-9)、3 本ロッド型の場合式(2-10)となる。

$$V_d = \frac{ak + b}{0.491} V_{PDV} \quad (2-9)$$

$$V_d = \frac{ak + b}{0.519} V_{PDV} \quad (2-10)$$

ここで、 $V_d$ : ダルシー流速 (cm/min),  $k$ : 孔外透水係数  $V_{PDV}$ : PDV を用いた流速の計測結果 (cm/min) となる。

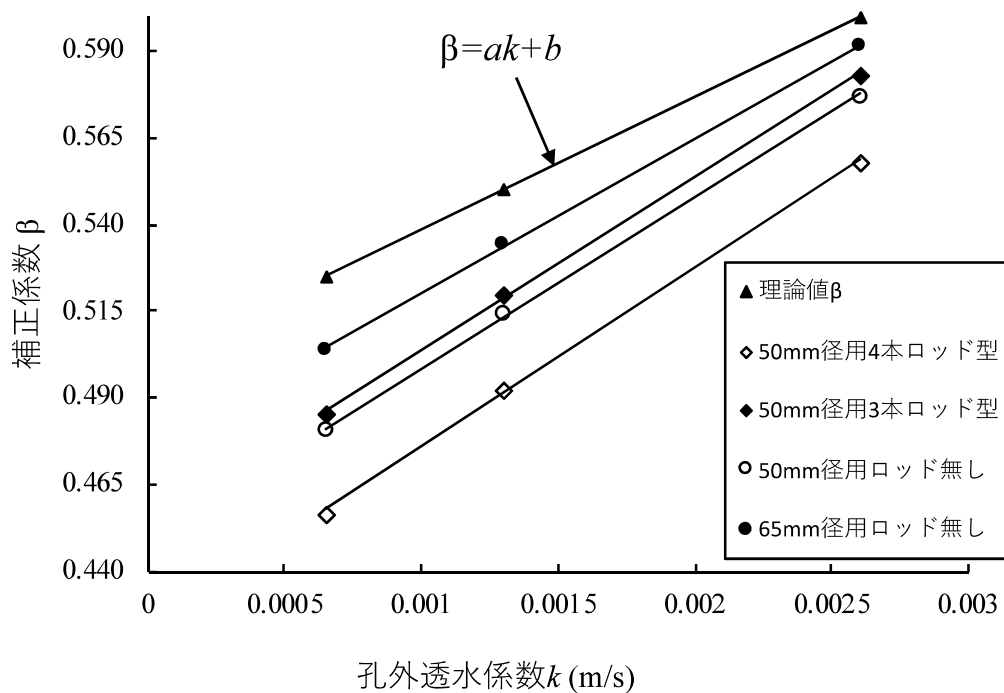


図 2-25 孔外透水係数  $k$  と補正係数  $\beta$  の関係

表 2-3 補正係数 $\beta$ の近似式

	$a$	$b$	$R^2$
理論値	38.46	0.5	-
50mm径用4本ロッド	51.44	0.4246	0.999
50mm径用3本ロッド	49.88	0.4538	0.999
65mm径ロッド無し	44.61	0.4755	0.999
50mm径ロッド無し	49.22	0.4495	0.999

### 2.3.2 観測井挿入時に発生する鉛直流の影響

管内挿入実験で取得したペーパーディスクを図 2-26 に示す。目視ではペーパーディスク上にはドットからインクの溶出によるテーリングの発生は確認できない。画像解析を行った結果、溶出後のインクを楕円とした際の長径は 3.8 mm，インク面積は 10.7 mm<sup>2</sup>であった。また，ドット抽出用閾値（G100）で二値化した場合とテーリング抽出用閾値（G225）で二値化した場合のそれぞれの重心位置は，ドット中心を原点  $(x, y) = (0, 0)$  とすると  $(x, y) = (0.01 \text{ mm}, -0.02 \text{ mm})$  と，重心位置に変動がほとんどないことが確認されテーリングが発生していないといえる。よって PDV を観測井内に挿入する際に，発生する鉛直方向の流動ではテーリングの発生は見られないことが確認された。

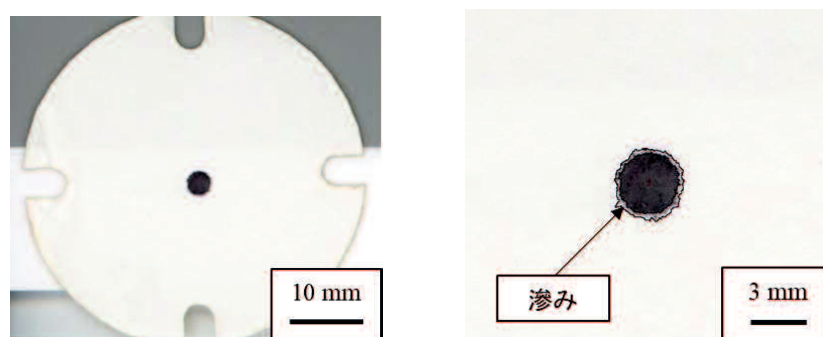


図 2-26 管内挿入実験で取得したペーパーディスク（左：計測後のペーパーディスク，右：二値化後のドット）

## 2.4 まとめ

本章ではペーパーディスクの中心に一つのドットを配置した単ドット式 PDV の内部の流向流速を水平 2 次元地下水浸透流計算により計算し，補正係数を算出した。外周にロッドを複数本配置したセンサ形状としたため，そのロッド群が流向流速に与える影響を 2 次元地下水浸透流解析により明らかにした。具体的にはロッドがない場合とロッドがある場合のモデルを作製し再現計算を行った。ロッドがない場合でも砂層から観測井内の透水性スポンジに地下水が流入する際に周辺地盤と観測井の透水係数の差によって観測井内の流速が最大で約 2 倍に増加し，上流側の境界付近で砂層内部に流れ込むような流向の変化が見られた。これは理論的にも確認されている現状

であり計算結果と一致した。

ロッドを配置したモデルではロッド近傍で流向が変化するが、センサ中心部ではその影響がみられず外部の流向と一致することが確認された。

また、ロッドの配置ごとに PDV 中心からの流速変動係数を算出した。その結果 PDV 中心付近では流速が安定しており PDV 中心から $\pm 1.5$  cm までは変動係数が 5 %未満となった。ただし装置の外径が小さくなるにつれてロッドとの間隔が狭くなるため、50 mm 径用 4 本ロッド型単ドット式 PDV では中心から $\pm 1.8$  cm 以上では変動係数の増加が顕著となった。変動係数が悪化していない範囲においてテーリングから流速を求められると考えられる。

多孔質で充填された観測孔では孔内の流速と孔外の流速が透水係数により変化する現象がある。孔外の透水係数による PDV 流速の補正を行うために孔外の透水係数を変化させた場合の流速変化の再現計算を行い、3 本ロッド、4 本ロッドの補正係数を求めた。補正係数  $\beta$  は透水係数  $k(\text{m/s})$  の一次関数となり、ロッド本数が多くなるほど、また観測井口径が小さくなるほど理論値よりも小さくなった。

そのほか、センサ挿入時のテーリングに及ぼす影響について実験した。PDV は計測の際、センサ部分が対象ストレーナ部分の深度まで達してから一定時間静置し計測を行う。しかし、インクの溶出は PDV を観測井に挿入しペーパーが地下水に浸漬した時点から始まっていると考えられ、ストレーナ部に到達するまでに意図しないテーリングが発生する可能性が考えられた。そこで観測井内に挿入した際に発生する鉛直流を再現した室内実験装置を作製しテーリング発生の有無を確認した。現状の最大想定深度程度の 522 cm を 60 秒で挿入する状態を再現して計測を行った結果、ドットの大きさ、重心位置に大きな変化は見られなかった。このことから地下水に浸漬してから 60 秒、深度約 5 m 程度では影響がないと見てよく、現地計測では同程度の深度、または浸漬からストレーナへの設置までの時間が 60 秒程度であれば計測に影響がないことが明らかとなった。しかしながら 5 m より大きな深度、60 秒よりも長い時間の事前浸漬時間においてはその影響が不明なため、深度が大きい場における計測の課題となる。

## 参考文献

- 1) 小野文也, 山本浩一, 対馬幸太郎, 大石正行, 神野有生, 関根雅彦: ペーパーディスク型地下水流向流速計を用いた海岸砂州地下水の挙動の観測, 土木学会論文集 G (環境), vol.70, No.7, pp.III\_355-363, 2014.
- 2) 山本浩一, 小野文也, 神野有生, 関根雅彦: 単ドット式ペーパーディスク型地下水流向流速計の開発, 土木学会論文集 B1 (水工学), 72 巻, 4 号, pp.I\_907-912, 2016.
- 3) 佐野理: 多孔性媒質中に穿った円柱上の空洞を過ぎる粘性流-単孔法による地下水測定への応用, ながれ, No.2, pp.252-259, 1983.
- 4) 地盤工学会単孔を利用した地下水流向流速測定方法の基準委員会編: 新規制定地盤工学会基準・同解説 単孔を利用した地下水流向流速測定方法, 地盤工学会, pp.2-24, 2016.3.
- 5) 南勲: 多孔性パイプを使用した地下水流速の定点電気測定法, 農業土木研究別冊第 1 号, pp.39-43, 1960.
- 6) Šimůnek, J., M. Th. van Genuchten, and M. Šejna: The HYDRUS Software Package for Simulating Two- and Three Dimensional Movement of Water, Heat, and Multiple Solutes in Variably Saturated Porous Media, Technical Manual, Version 2.0, PC Progress, Prague, Czech Republic, pp.258, 2012.



## 第3章 計測原理の解明

### 3.1 はじめに

PDV は溶出した染料インクが地下水の流れによってテーリングが紙面上に残り，テーリングの発生方向と距離から流向流速を推定する装置である．しかし，計測中の染料インクの輸送は砂層内部にセンサが配置されることから確認することができない．そのため染料インクの溶出から輸送の過程が明らかになっていない．輸送過程の解明はテーリングの発生を予測するとともに，安定した計測を行うために不可欠である．

そこで本来は砂層内部に PDV を配置するため観察を行うことができないため，センサ部を模した簡易実験水槽を作成し，側面からのインクの輸送過程を観察する実験を行った．

### 3.2 研究方法

#### 3.2.1 テーリング発生過程の観察実験方法

テーリングの発生過程として考えられるのは a) ドットから透水性スポンジにインクが溶出し，移流・拡散によって透水性スポンジ内を移動しながら紙面上へ沈降・定着する，b) 紙面内の繊維間を溶出インクが移動する 2 通りである．しかし，計測中にセンサ内部のインクの挙動を周辺の地下水流動に影響を与えずに確認することは困難である．

そこで PDV のセンサ部分を模した小型の観察水槽を作成した．**図 3-1** に簡易実験水槽の概要を示す．簡易実験水槽は厚さ 10 mm のアクリル板を使用した．水槽の中央に PDV に使用するものと同じ透水性スポンジ（メラミンスポンジ）を配置し，透水性スポンジの両端はアクリル板に 6 mm 円孔を千鳥配置したスクリーンを配置した．スクリーンの設置は開口率 20 % である．

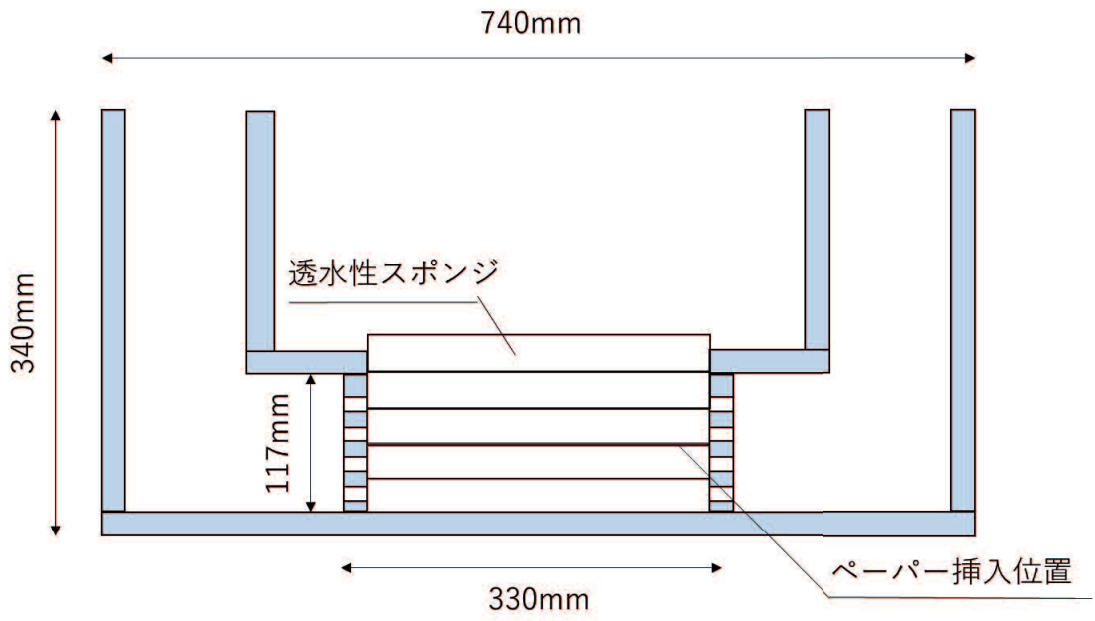
**図 3-2** に観察用ペーパーを示す．観察用ペーパーは長さ 29 cm，幅 10 cm の画用紙上に 3 mm 幅でインクを印刷し，インクから 5 cm 下流にアクリル塗料を塗布した観察用ペーパー A．インク上に透明アクリル塗料を塗布した観察用ペーパー B を作成した．

計測の際はペリスタリックポンプ（Iuchi 製 CTP-100）を使用し水槽内の水を循環させ流速を発生させた．水槽内の連続式より式 (3-1) を用いてダルシー流速を算出した．

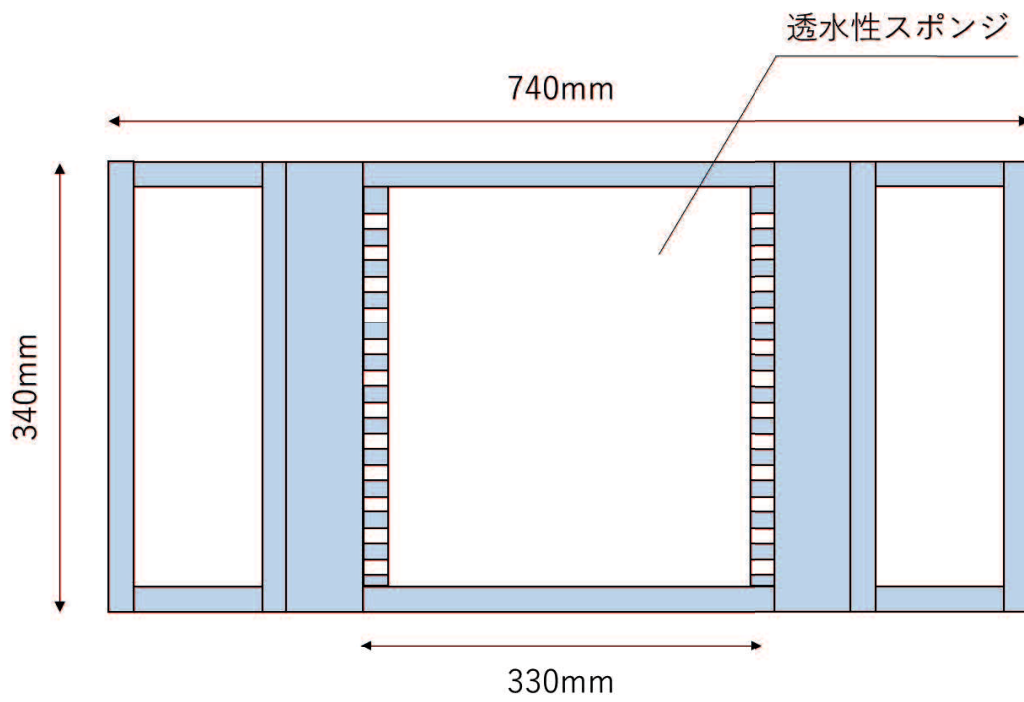
$$Q = AV \quad (3-1)$$

ここで， $V$ ：ダルシー流速 (cm/min)， $Q$ ：ポンプ流量 (mL/min)， $A$ ：水槽断面積 (cm<sup>2</sup>) である．

観察実験では設定流速  $V=0.29$  cm/min，計測時間 90 分として簡易実験水槽側面から 10 秒ごとにインターバル撮影を行いインターバル画像から 5，10，20，30，45，60，90 分の画像を抽出し，抽出した画像からインク輸送距離を計測した．観察実験は試験ペーパーごとに各一回行った．

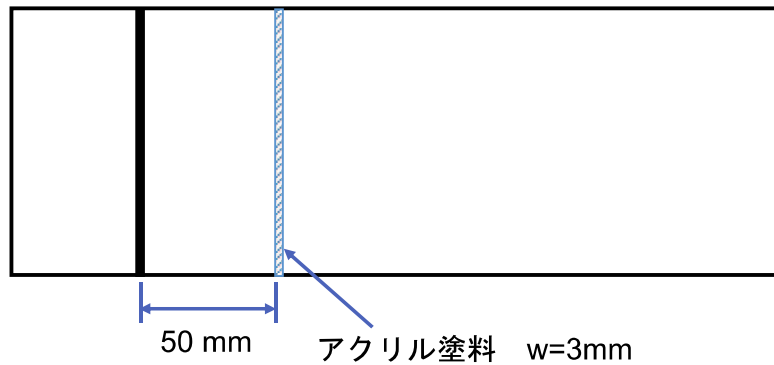


断面図

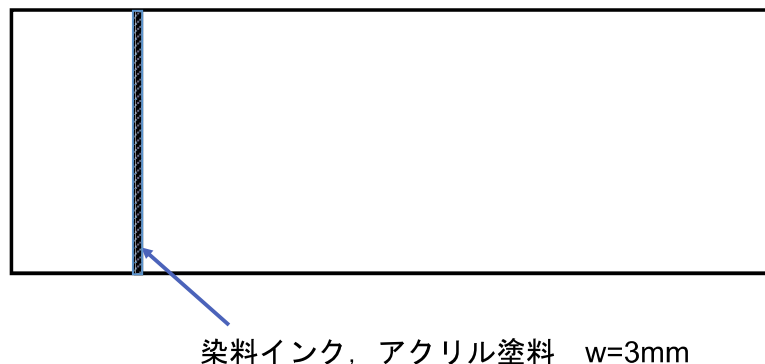


平面図

図 3-1 簡易実験水槽



観察用ペーパーA（下流 5cm にアクリル塗料塗布）



観察用ペーパーB（インク上にアクリル塗料塗布）

図 3-2 観察用ペーパー概要図

### 3.3 研究結果

#### 3.3.1 テーリング発生過程の観察実験結果

図 3-3~10 に試験紙 A における，簡易実験水槽壁面のインターバル撮影の撮影画像を示す．インターバル画像からスポンジ内へインクが溶出し流動方向へ移動していることが確認できる．

図 3-11 に計測時間 90 分後の試験紙 A を示す．アクリル塗料塗布部は非塗布部と比較してインクの定着量が少ない結果となった．また試験紙と透水性スポンジ間の気泡によってインクが定着していない部位が確認された．そのため，透水性スポンジと画用紙の間に空気等が貯留されている場合に溶出したインクが紙面に接しないため再吸着，あるいは付着せずテーリングが発生しない，またはテーリングの一部が欠損した状態となる可能性が考えられた．

図 3-12 に計測時間 90 分後の試験紙 B のインターバル画像，図 3-13 に計測時間 90 分後の試験紙 B を示す．インク上にアクリル塗料を塗布した場合，染料インクの溶出は観察できず計測後の試験紙にもテーリングの発生は確認できなかった．このことからテーリングは紙面内を移動したインクの軌跡ではないことが確認された．このことから溶出したインクは透水性スポンジ内を輸送された後に透水性スポンジと接している紙面に再度吸着，あるいは付着することでテーリング

が発生していると考えられた(図 3-14).

図 3-15 に試験紙 A, B のインターバル画像から取得したインクの輸送距離と時間の関係を示す. 試験紙 A では溶出したインクの移動距離は計測時間に比例し, かつ高い正の相関関係があった ( $R^2=0.9958$ ). したがってテーリング長と流速に比例関係が成立することが示された. インターバル画像による染料インクの輸送距離は計測時間 90 分で 6.67 cm となった. スポンジ内部で計測中に流速が一樣であるとする設定流速 0.29 cm/min で 90 分間計測した場合水塊の実輸送距離は 26.1 cm となる. インクの移動距離に対する水塊の移動距離の比を取ったものを遅延係数と定義して式 (3-2) で定義する.

$$\alpha = \frac{L_w}{L_{ink}} \quad (3-2)$$

ここで,  $\alpha$ : 遅延係数,  $L_{ink}$ : ある流速, 計測時間におけるインクの移動距離 (cm),  $L_w$ : ある流速, 計測時間における水塊の移動距離 (cm) である.

この遅延係数はスポンジ内での吸着位夜遅れを移動距離の比から表したものである<sup>1)</sup>. 式 (3-2) より遅延係数  $\alpha$  は 3.9 となった. 遅延係数  $\alpha$  から想定される流速と計測時間から式 (3-3) より発生テーリング長を予測できる.

$$L_{ink} = \frac{Vt}{\alpha} \quad (3-3)$$

ここで,  $L_{ink}$ : ある流速, 計測時間におけるインクの移動距離 (cm),  $\alpha$ : 遅延係数,  $V$ : 想定流速 (cm/min),  $t$ : 計測時間 (min) である.



図 3-3 テーリング発生過程観察実験 試験紙 A : t=0 min 後

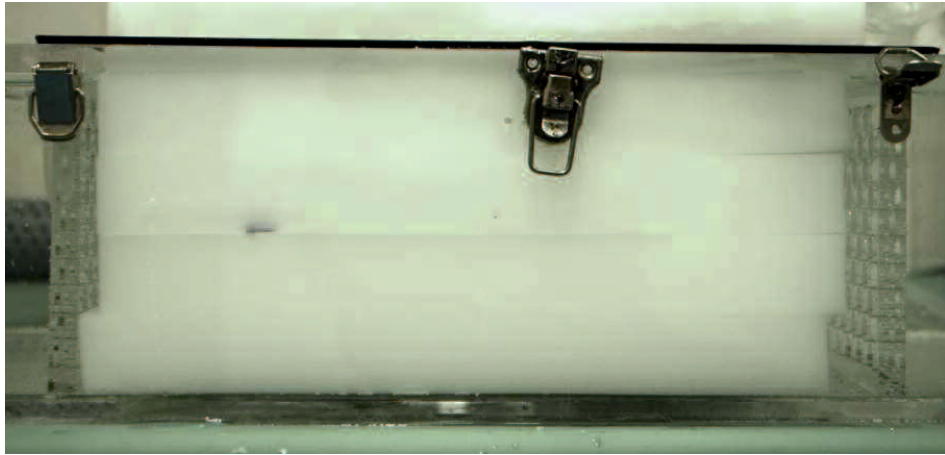


図 3-4 テーリング発生過程観察実験 試験紙 A : t=5 min 後

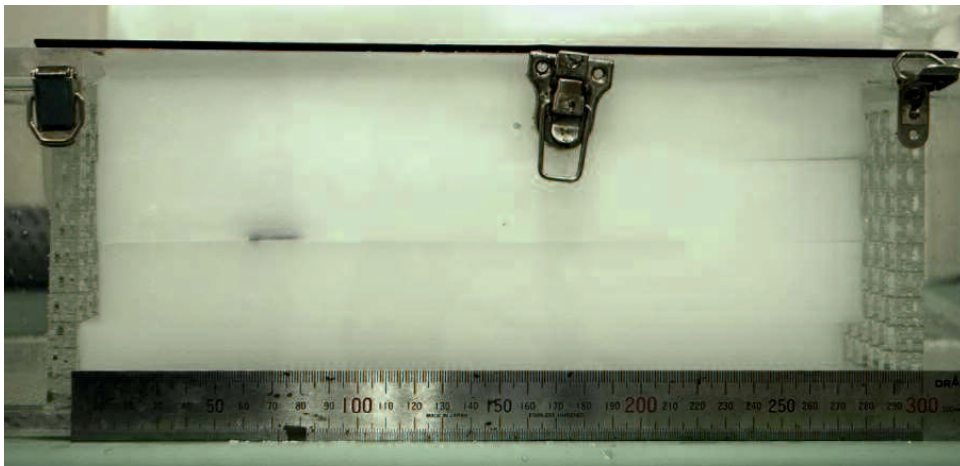


図 3-5 テーリング発生過程観察実験 試験紙 A : t=10 min 後

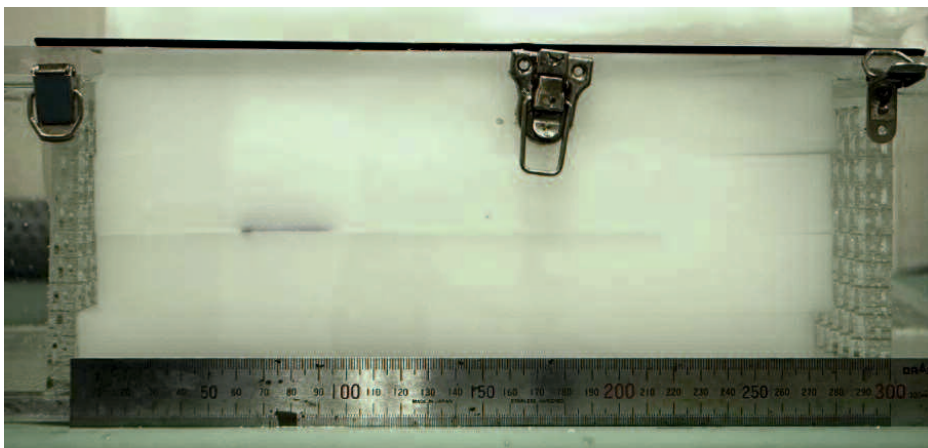


図 3-6 テーリング発生過程観察実験 試験紙 A : t=20 min 後

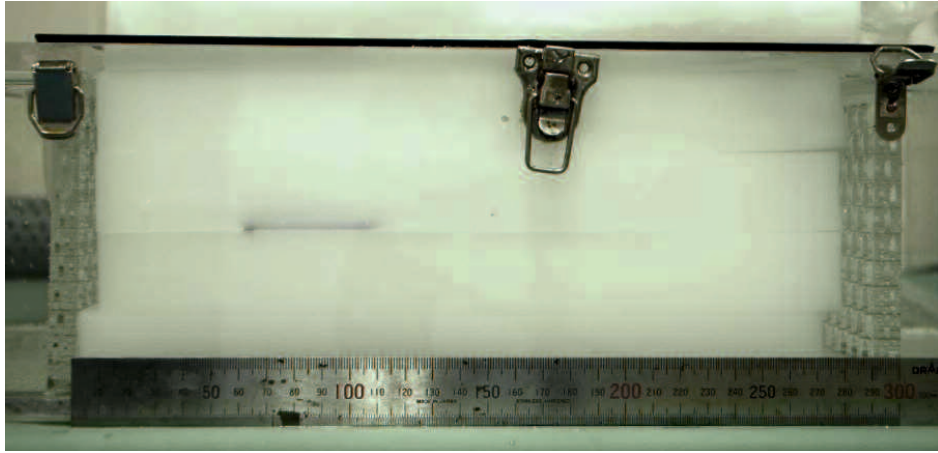


図 3-7 テーリング発生過程観察実験 試験紙 A : t=30 min 後

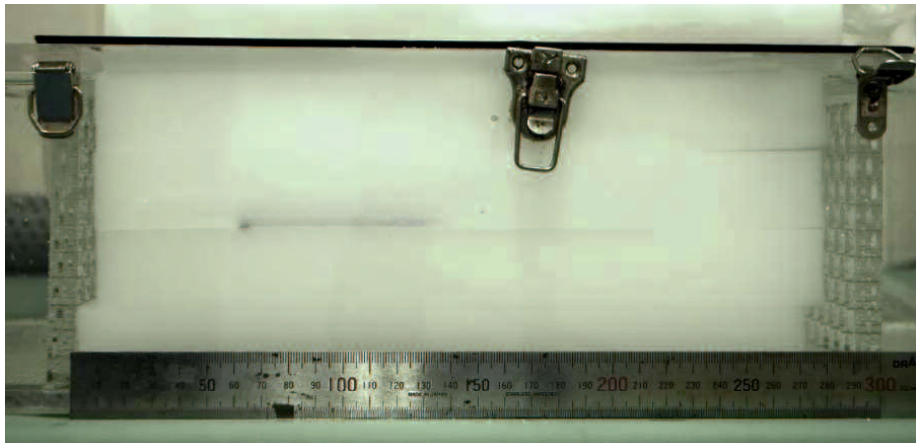


図 3-8 テーリング発生過程観察実験 試験紙 A : t=45 min 後

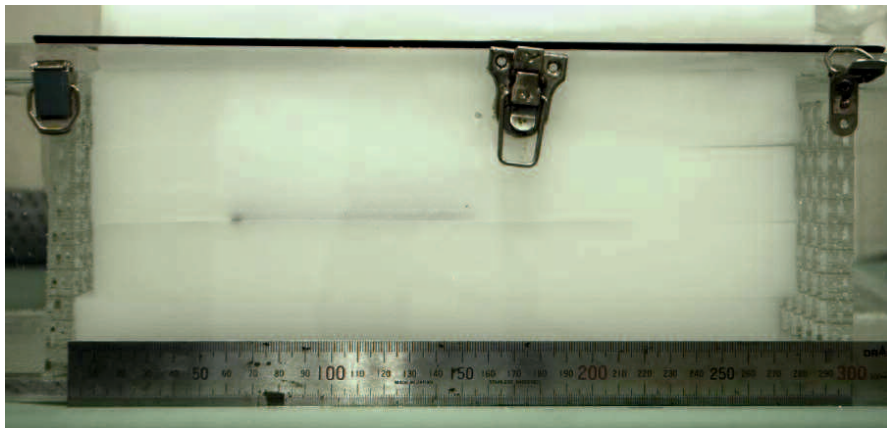


図 3-9 テーリング発生過程観察実験 試験紙 A : t=60 min 後

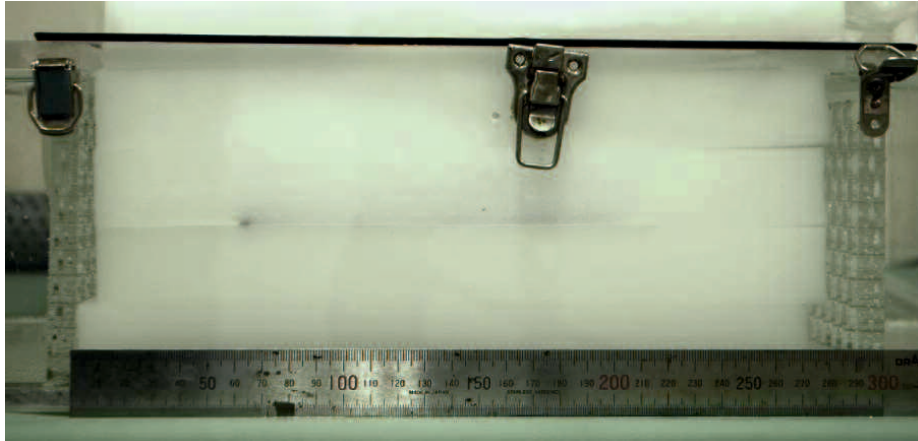
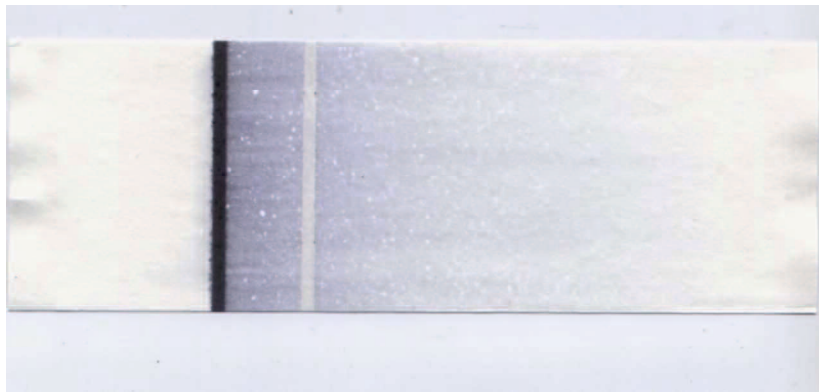


図 3-10 テーリング発生過程観察実験 試験紙 A : t=90 min 後



(a) 全景



(b) テーリング拡大図

図 3-11 計測後の試験紙 A

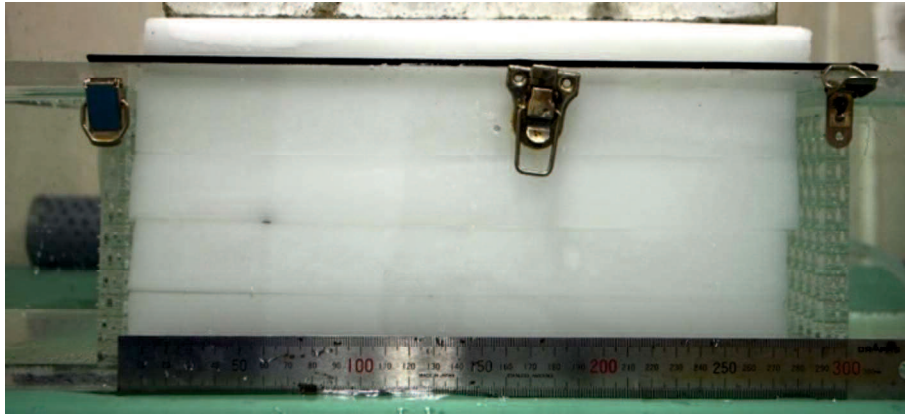


図 3-12 テーリング発生過程観察実験 試験紙 B : t=90 min

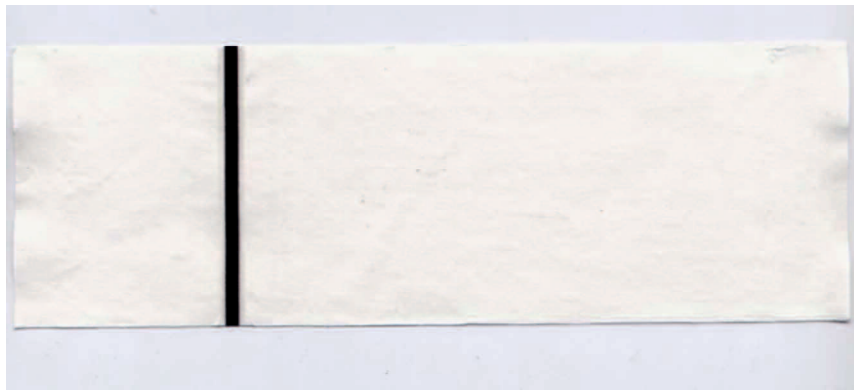


図 3-13 90min 計測後の試験紙 B

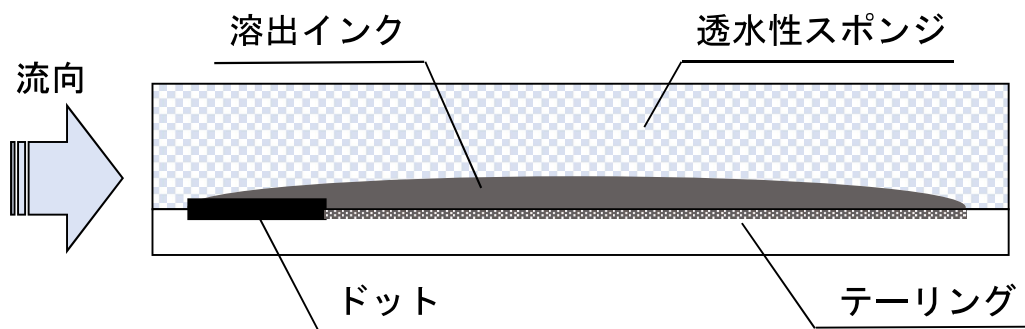


図 3-14 PDV の測定原理



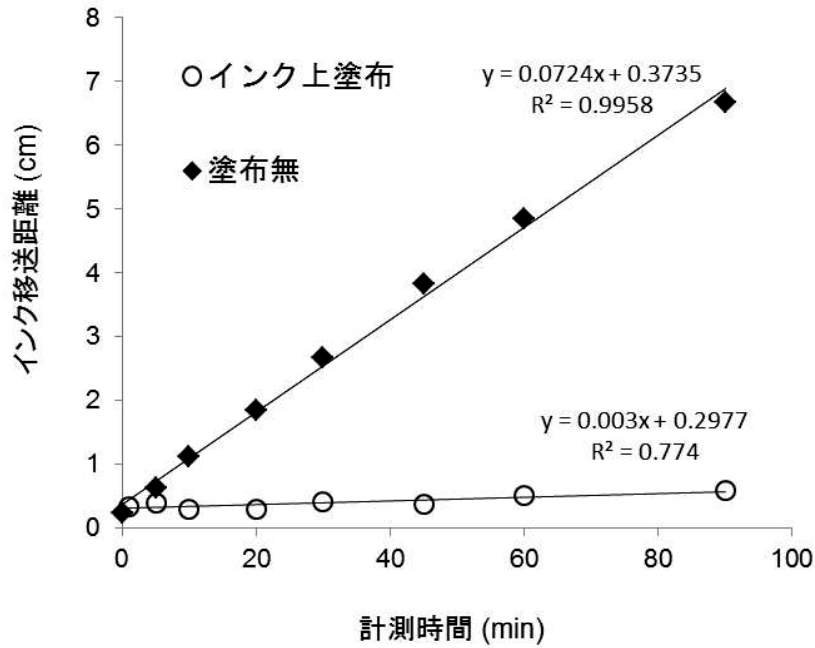


図 3-15 計測時間とインク輸送距離の関係 (流速  $V=0.29$  cm/min)

### 3.4 まとめ

PDV の計測原理を明らかとするために簡易室内実験砂水槽を作成しテーリング発生過程を明らかにするために観察実験を行った。

観察実験の結果、インクは水に浸漬した後に透水性スポンジ内に溶出しスポンジ内の水の流れによって移流・拡散している事が確認された。また、観察用ペーパーにアクリル塗料によって紙面にインクが接触しない箇所ではテーリングが発生しないことから、透水性スポンジと画用紙と接している個所にインクが染着することでテーリングが発生していることが確認できた。従って、透水性スポンジと画用紙の間に空気が貯留されていた場合、インクがペーパーに染着しないためテーリングが発生しないことが確認できた。

観察実験から溶出したインクは、実際の水塊の移動速度に対してインクの移動速度低下することが確認された。水塊の移動速度に対するインクの移動速度の比を遅延係数と定義した場合、インクの遅延係数は  $\alpha=3.9$  となった。インクの移動速度と地下水の流速が比例関係にあることから、地下水の流速をテーリング長で計測することの妥当性が示された。

### 参考文献

- 1) 西垣誠, 菱谷智幸, 橋本学, 河野伊一郎: 飽和・不飽和領域における物質移動を伴う密度依存地下水流の数値解析手法に関する研究, 土木学会論文集, No.511, III-30, pp.135-144, 1995.3.

## 第4章 水質が測定に与える影響の解明

### 4.1 はじめに

第3章ではPDVの計測原理を明らかにした。溶出した染料インクがスポンジ内部を輸送され画用紙に染着する機構によりテーリングが発生することが明らかになった。従ってインクの溶出量によってテーリング長が変化することが考えられる。しかし、PDVの現地計測時には室内実験からの水質の変化によって溶出条件が変化することが考えられる。そこで、水質の変化によるインクの溶出特性の変化およびインクの溶出量の変化がテーリングの発生に与える影響を明らかにし、水質による補正係数を提案することを目的とした。

### 4.2 研究方法

#### 4.2.1 インクの溶出特性把握のためのバッチ試験

PDVで現地計測を行う際、対象地域ごとに測定条件が変化する。本研究で用いた染料インク（Canon BCI-6BK）の分子構造は企業秘密であり詳細は明らかではないが、一般的にインクジェットプリンタのインクの種類は直接染料である。直接染料の染着に関しては重要な因子として温度、塩濃度、pHがある<sup>1)</sup>。このうち塩濃度が高濃度であると染着率が高く、さらに塩濃度が高くなると、あるところで染料が塩析を生じるとされるが、本測定装置は主に淡水で使用されることを想定していることから、pHと水温について検討した。しかしながら海水での使用を想定した場合は塩類濃度についても今後検討する必要がある。

自然の地下水のpHは、例えば地下水を含む名水100選のpHは5.6～7.6の範囲（平均6.7）にあり、ほぼ中性である<sup>2)</sup>。しかし熱帯泥炭地ではpH3程度が観測される<sup>3)</sup>ほか北方泥炭地の地下水においてもpH4.0～4.7と酸性になる<sup>4)</sup>。反対にアルカリ側としては地下水のpHが9以上になる場合として、管理型最終処分場においてはpHが10に達する場合がある<sup>5)</sup>。したがって強酸性を示す温泉水等の特殊条件を除き、現地観測を考えた場合、pHの範囲は3～10を考えれば十分であるといえる。

##### (1)インクの溶出実験方法

pHと水温に着目し、各値の違いによって生じるインクの溶出量の差を把握するためバッチ試験を行った。本実験で用いたインク溶出試験用紙を図4-1に示す。インクの塗布面積は10 cm<sup>2</sup> (2.5 cm×4 cm)としインクジェットプリンタ（Canon Pixus 950i）を用いて作成した。pHによるインク溶出量の比較では塩酸と水酸化ナトリウムを水道水で希釈しpHを調整した溶液（試験溶液A）20 mlに試験用紙を浸漬した。このとき、水温は室温とした。水温によるインク溶出量の比較では蒸留水40 ml（試験溶液B）を恒温水槽で水温を10, 20, 30℃の3パターンに変化させた。それぞれの溶液にインク溶出試験用紙を一定時間（5, 30, 60分）浸漬させた後に試験用紙を取出し、インクが溶出した溶液は吸光光度計を用いて吸光度を測定した。実験条件を表4-1に示す。

試験用紙は乾燥後フラットベツトスキャナを用いて電子化した。電子化の際の取得条件は600 dpi, 露光-1, ハイライト255, シヤドウ60とした。露光, ハイライト, シヤドウはソフト固有のパラメータであり画像の階調や明るさを制御するが、電子化の際にそれらは固定条件とした。ガ

ンマ値は1とすることで画像の階調を直線とした。画像解析ソフト ImageJ を用いてインク塗布部分のグレースケールの輝度を取得した。その際、使用するスキャナの種類によってはスキャン時の設定を固定した場合でも同様の画像が得られない可能性があるためスキャナごとに補正を行った。図 4-2 に示すマンセル表色系のカラーチャートのうちグレーの 6 カラム ( $MV=9.5, 8, 6.5, 5, 3.5, 2$ ) をペーパーディスクと同様の設定で電子化した。電子化したマンセル表色系カラーチャートのグレー値とマンセル明度の関係を図 4-3 に示す。マンセル明度  $MV$  とグレー値  $GV$  の関係は式(4-1)となった。スキャナごとの特性による電子化画像の輝度の変化を補正する際はマンセル表色系カラーチャートを電子化し式(4-1)から補正を行うことができる。

$$GV = 37.127MV - 116.68 \quad (4-1)$$

インクの溶出量は印刷面の輝度の増加に比例するものとして式(4-2)で求めた。

$$\Delta M_{dot} = C_i A \frac{B - B_i}{B_p - B_i} \quad (4-2)$$

ここで、 $\Delta M_{dot}$ : 印刷面からのインク溶出量 (mg),  $C_i$ : 初期印刷面のインク面濃度 ( $\text{mg}/\text{cm}^2$ ),  $A$ : 印刷面面積 ( $\text{cm}^2$ ),  $B$ : 溶出試験後の印刷面の輝度,  $B_i$ : 溶出試験前の印刷面の輝度,  $B_p$ : 非印刷面の輝度である。式 (4-1) は、インク溶出量がインク印刷部の輝度の増加量に比例すると仮定したインク溶出モデル式である。予備実験から  $C_i=0.6325$  ( $\text{mg}/\text{cm}^2$ ),  $B=4.6$ ,  $B_p=241$  であった。また、式(4-3)にインク溶出後の溶液の吸光度から溶出インク濃度をあらわせば

$$C_s = \frac{\Delta M_{dot}}{V} = kAbs \quad (4-3)$$

ここで、 $C_s$ : 試験溶液のインク濃度 ( $\text{mg}/\text{cm}^3$ ),  $V$ : 試験溶液の液量 (ml),  $k$ : 吸光度を濃度に換算する係数,  $Abs$ : 溶出試験後の試験溶液の吸光度である。式(4-3)を変換し、式(4-4)より換算係数  $k$  ( $\text{mg}/\text{cm}^3$ ) を求めた。

$$k = \frac{\Delta M_{dot}}{VAbs} \quad (4-4)$$

溶出試験後のドット部の輝度の増加量から、印刷面に残留しているインクの面濃度  $C_r$  ( $\text{mg}/\text{cm}^2$ ) を推定した。

$$C_r = C_i A \frac{B_p - B}{B_p - B_i} \quad (4-5)$$

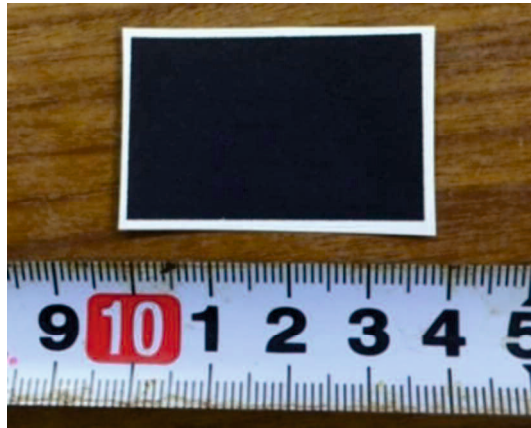


図 4-1 インク 溶出試験用紙

表 4-1 バッチ試験における測定条件

No.	pH	溶媒	水温 (°C)	溶液量(ml)
1	3	水道水	25	20
2	4	水道水	25	20
3	5	水道水	25	20
4	6	水道水	25	20
5	7	水道水	25	20
6	8	水道水	25	20
7	9	水道水	25	20
8	10	水道水	25	20
9	7	蒸留水	10	40
10	7	蒸留水	20	40
11	7	蒸留水	30	40

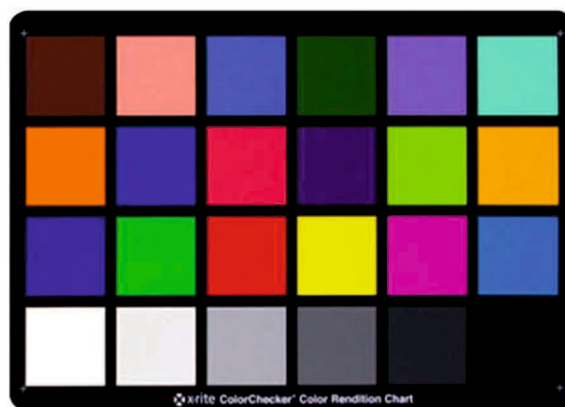


図 4-2 マンセル表色系カラーチャート(x-rite color checker Classic), このうちグレーのカラムを使用した

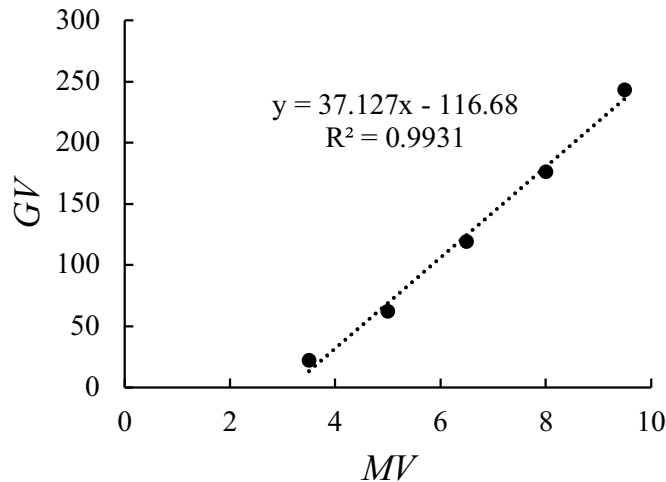


図 4-3 マンセル明度  $MV$  と本研究のスキャン条件( $H=255, S=60$ )で取得したグレー値  $GV$  の関係

## (2)インクの吸着実験方法

溶出したインクがペーパーディスクに吸着される特性を把握するため、ペーパーディスクのインクへの吸着試験を行った。一定の吸光度で作成したインク溶液 20 ml に縦 30 mm、横 30 mm の画用紙を一定時間 (5, 15, 30, 45, 60 分) インク溶液に浸漬させた。その後ビーカーから吸着試験用紙を取り出し吸着試験後の溶液の吸光度を測定した吸光度は 0.214, 0.444, 0.676, 0.806 で計測を行った。吸着試験前後の吸光度の差に、式(4-4)で示した係数  $k$  を乗ずることで、式 (4-6) より画用紙への単位面積当たりのインク吸着量  $C_a$  ( $\text{mg}/\text{cm}^2$ ) を求めた。

$$C_a = \frac{k\Delta AbsV}{2A} \quad (4-6)$$

ここで、 $\Delta Abs$  : 吸着試験前後の吸光度の差、 $A$  試験用紙の面積 ( $\text{cm}^2$ ) である。インク溶液の作成は、蒸留水を用いて水温  $20^\circ\text{C}$  の条件で作成した。係数  $k$  は式 (4-4) で求めたものを用いた。次に吸着試験後の試験用紙の輝度を測定し、ペーパーディスクへの単位面積当たりインク吸着量  $C_a$  との相関関係を求めた。

吸着試験用紙を乾燥後、4.2.1(1)で示した方法で電子化し吸着用紙を画像解析し定着したインクがテーリングとして判別される下限の吸着インク面濃度を調べた。

### 4.2.2 テーリング発生に水温・水質が与える影響確認方法

インクの溶出量の違いが与えるテーリング発生への影響を、実際に実験砂槽を用いて異なる水質条件で求めた。水温の設定については水槽内に投げ込み式ヒーターを、水質 (pH) の調整については塩酸と水酸化ナトリウムを用いた。ここで、同計測条件において水温は $\pm 1.5^\circ\text{C}$ 、pH は $\pm 0.2$ 程度の差が生じている。計測時間は 60 分、設定ダルシー流速  $V_d$  は  $0.05 \text{ cm}/\text{min}$  とし、各条件で 5 回ずつサンプルを取得した。図 4-4 に示す実験砂槽を用いて PDV の検定を行った。図 4-5 に実験砂槽の概要図を示す。実験砂槽の諸元を表 4-2、水質の設定条件を表 4-3 に示す。

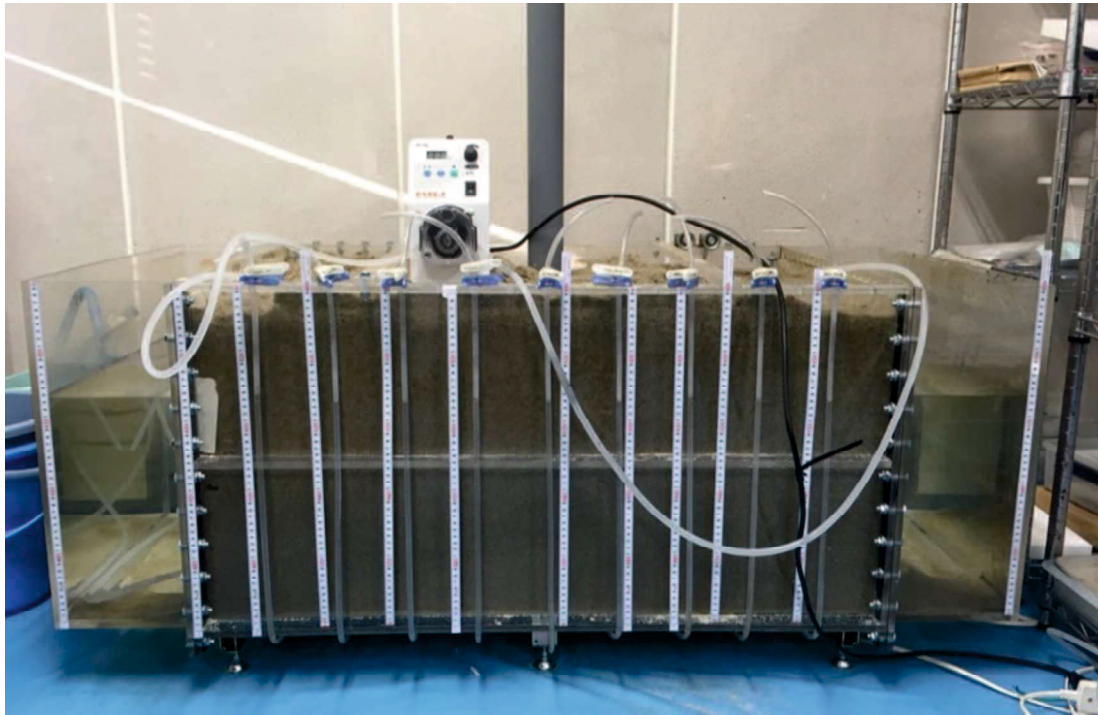


图 4-4 室内实验砂槽

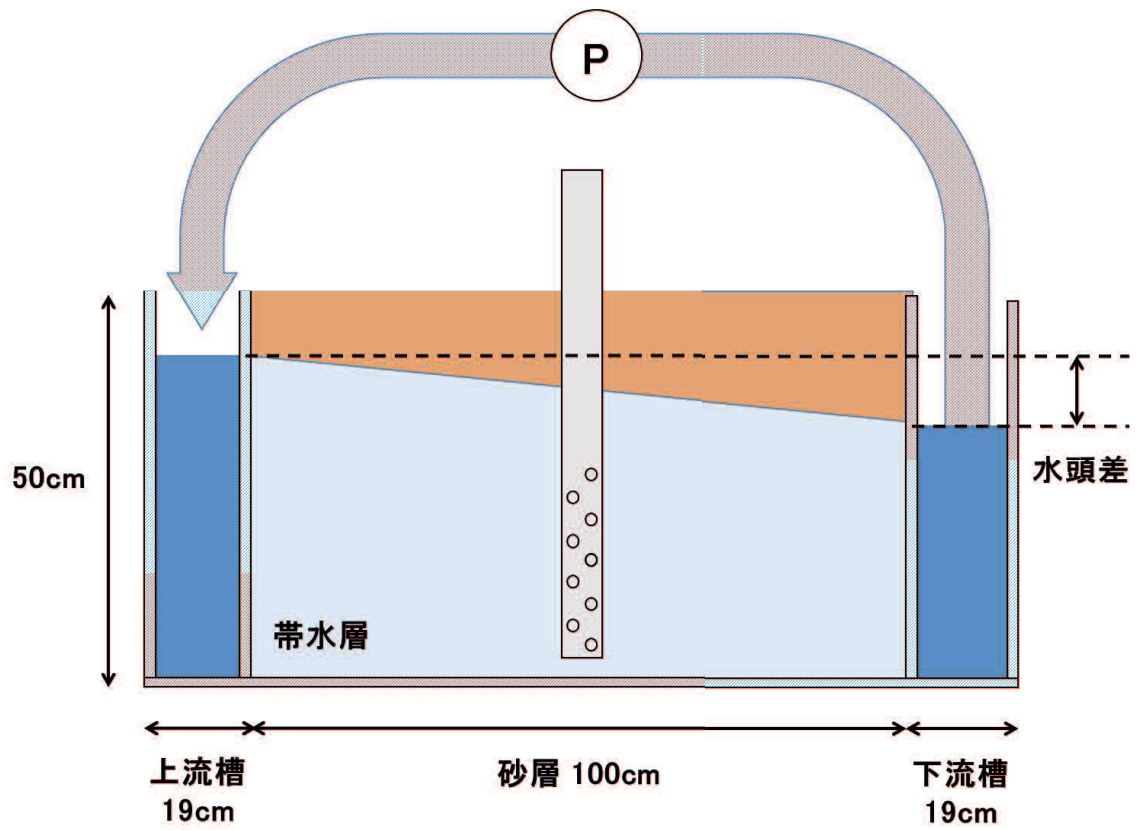


图 4-5 室内实验砂槽概要

表 4-2 室内実験砂槽の諸元

項目	数値
水槽奥行	60cm
パイプ内径	51mm
ストレーナ形状	6mm円孔
ストレーナ開口率	20.80%
砂の種類	珪砂5号
透水係数	0.214cm/s

表 4-3 実験砂槽の設定条件

水温 (°C)	pH
10	7.5 (水道水)
20	7.5 (水道水)
30	7.5 (水道水)
20	3.1
20	5.2
20	9.1
20	10.2

取得した画像からテーリング発生方向の輝度分布を取得し、式 (4-6)、式 (4-7) の初期ドット及びテーリングの輝度をインク面濃度に変換する関係式より、ペーパーディスク上のインク面濃度分布を求めた。

$$Csd = -0.001977B + 0.6253 \quad (4-7)$$

$$Cst = -0.00000349B + 0.00832 \quad (4-8)$$

ここで、 $Csd$ : ドットの面濃度( $\text{mg}/\text{cm}^2$ )、 $Cst$ : テーリングの面濃度( $\text{mg}/\text{cm}^2$ )、 $B$ : 輝度である。  
式 (4-6) は 4.2.1(1)、式 (4-7) は 4.2.1(2)の実験結果より導出した経験式である。図 4-6 にペーパーディスク上の輝度分布取得のイメージを示す。

測定後のペーパーディスクは乾燥後フラットヘッドスキャナを用いて 4.2.1(1)に示した方法で電子化し、画像をオープンソースの画像解析ソフト ImageJ を用いて測定前のドットと測定後のテーリングごとに RGB カラーモデルを用いて二値化処理を行った。取得した画像は RGB 分解し、G (Green) の 225 (マンセル明度 9.2) 以下の輝度を閾値として抽出したものをテーリング、100 (マンセル明度 5.8) 以下の輝度を閾値として抽出したものをドットとして二値化処理を行った。閾値の選定にあたっては、閾値を変化させて検量線を作成し、最も決定係数が高かったものを採用した。計測時間によってはテーリング全体が薄くなり、一定の閾値では初期ドットが抽出でき

ないことがあった。その際には輝度 100~150 (マンセル明度 5.8~7.2) の範囲で 10 段階ずつ変化させ、直径 3mm の円の面積に近くまた真円度が高い画像を初期ドットとして選定した。画像を二値化後フェレ径、近似楕円体近似長径、重心移動距離、ドット端部からテーリング終端までの距離を取得後、各計測条件で比較を行った。加えて式 (4-9) よりテーリングの  $x$  軸方向の平均定着インク濃度を導出した。

$$C_{aver} = \frac{\sum_{i=1}^n C_i \Delta x}{L} \quad (4-9)$$

ここで、 $C_{aver}$ :  $x$  方向の平均定着インク濃度 ( $\text{mg}/\text{cm}^2$ )、 $C_i$ :  $x=0$  における定着インク濃度 ( $\text{mg}/\text{cm}^2$ )、 $\Delta x$ : セルの刻み幅 (cm)、 $L$ : ドット端部からテーリング終端までの距離 (cm) である。

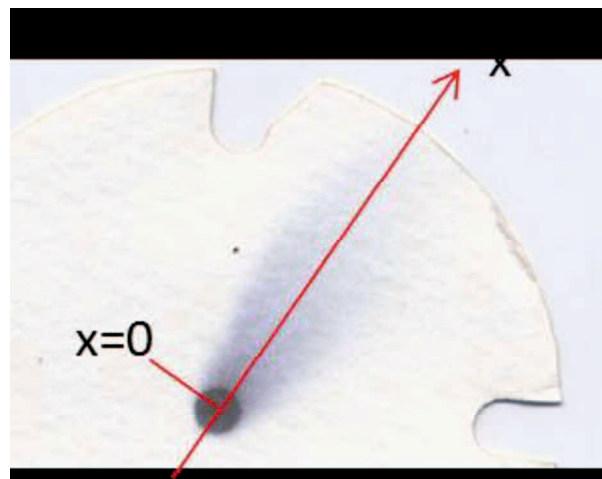


図 4-6 テーリングの輝度分布取得のイメージ

## 4.3 研究結果

### 4.3.1 インクの溶出特性把握のためのバッチ試験結果

図 4-7 に各浸漬時間におけるインク溶出量の pH 依存性を示す。pH の違いによってインクの溶出量に、浸漬時間 5 分と 30 分では約 2 倍、5 分と 60 分では約 3 倍の差が生じた。溶液が酸性域と塩基性域である場合は、中性域である場合と比較してインクの溶出量が大きくなることが示された。かつ酸性域では pH が低下しても pH が 6 以下では初期ドットからのインクの溶出量は増加せず、反対に塩基性域では pH の上昇に従ってインクの溶出量が増加することが示された。

図 4-8 に各浸漬時間における初期ドットからのインク溶出量の水温依存性を示す。水温の違いによってインクの溶出量に、浸漬時間 5 分では 1.4 倍、30 分では 1.6 倍、60 分では 1.7 倍の差が生じ、水温が高いほど初期ドットからのインクの溶出量が大きいたことが示された。

図 4-9~11 に各浸漬時間における試験溶液 A のインク溶出試験後の吸光度の計測結果のコンター図を示す。pH3 の溶液以外では照射波長 570 nm で吸光度のピークをとることが示された。これは同時に pH 3 のような弱酸性下では溶出したインクは変質し吸光波長が変化、すなわちインクの



色に変化が発生することが分かる。カラープリンタ用水性染料では化合物の窒素原子によって最大吸収波長が変化するため pH に依存し染料の最大吸収波長が変化するという研究結果がある<sup>6)</sup>。ペーパーディスクで用いる染料インクが同種の染料を用いているかはインクの化合物について企業秘密であり確認はできないが、pH がインクの化合物に影響を与えていることが本実験でも確認された。

表 4-4 に各試験溶液の係数  $k$  を示す。図 4-12 にドットの輝度の増加量とドットとして残留しているインクの濃度 ( $\text{mg}/\text{cm}^2$ ) の関係を示す。インクの濃度と輝度の増加は高い線形関係が得られた。

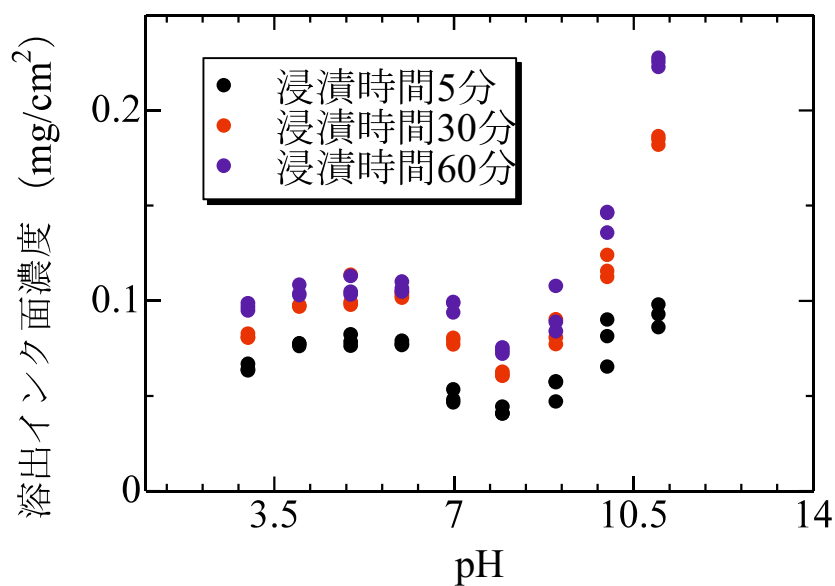


図 4-7 溶出インク面濃度 ( $\text{mg}/\text{cm}^2$ ) の pH 依存性

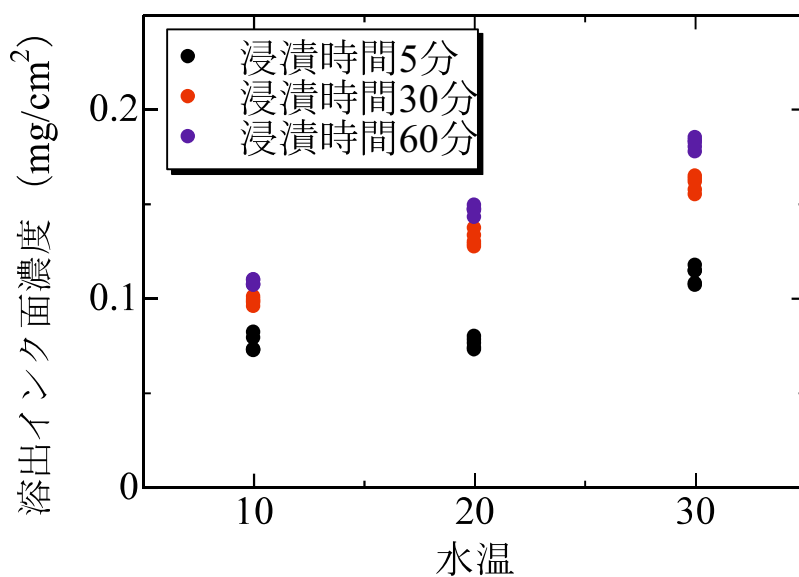


図 4-8 溶出インク面濃度 ( $\text{mg}/\text{cm}^2$ ) の水温依存性

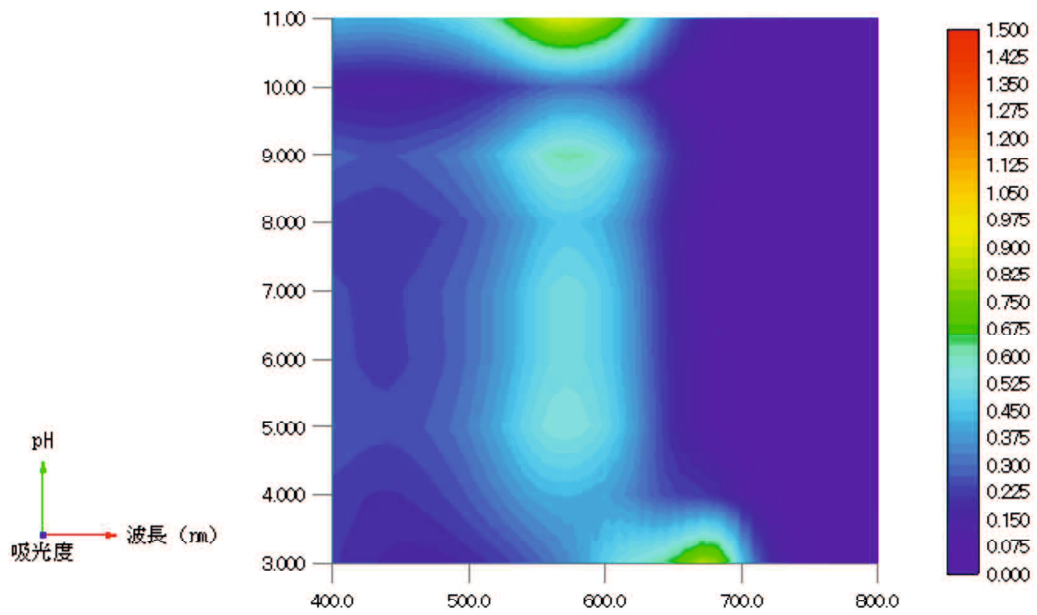


図 4-9 溶出試験後の試験溶液の吸光度（浸漬時間 5 分）

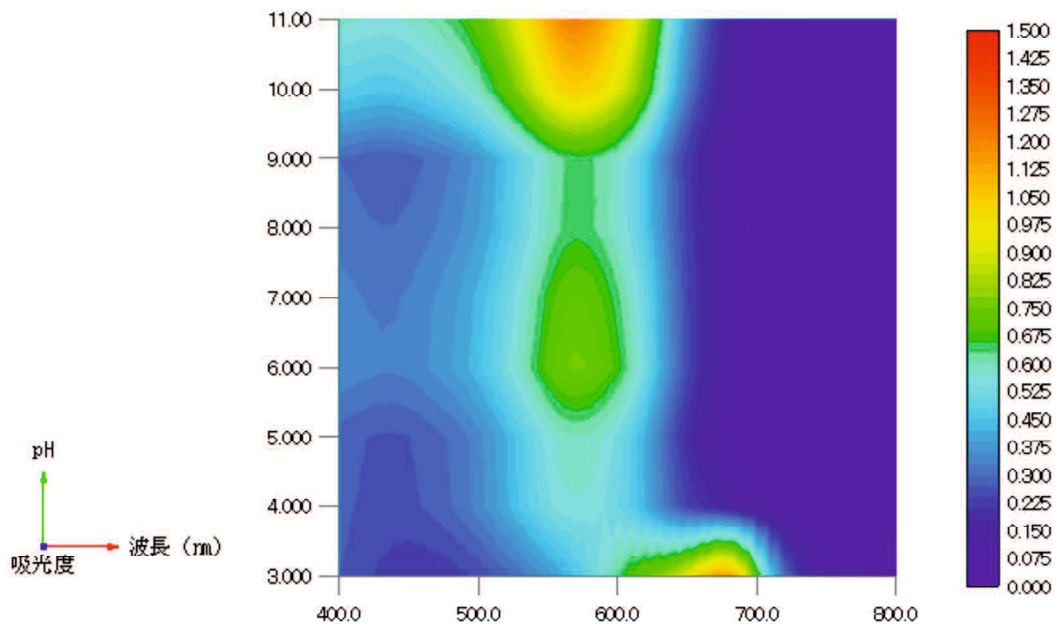


図 4-10 インク溶出試験後の試験溶液の吸光度（浸漬時間 30 分）

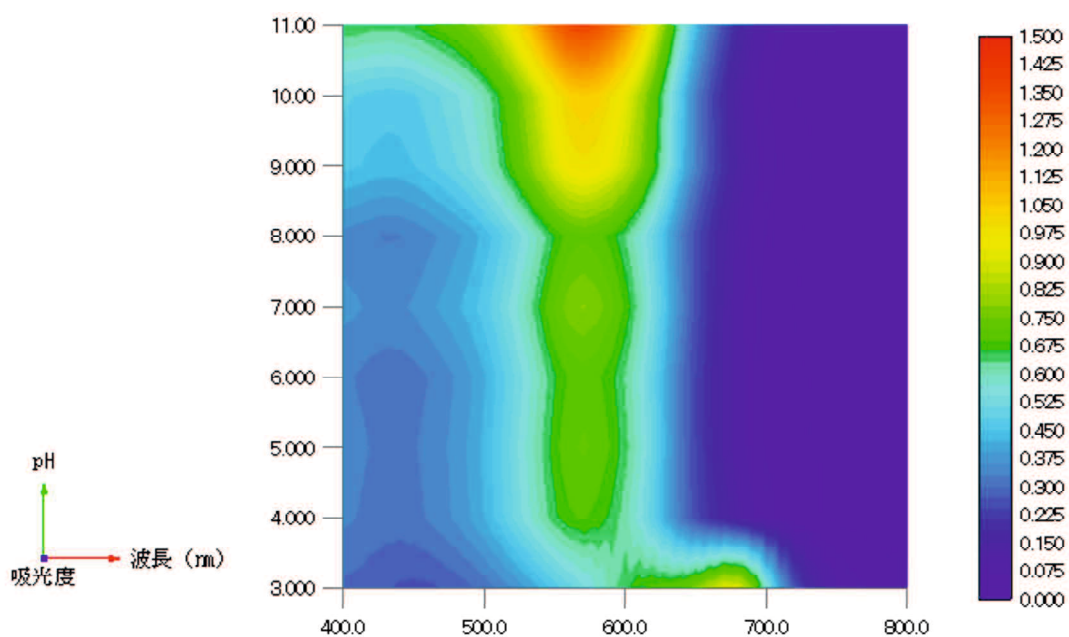


図 4-11 インク溶出試験後の試験溶液の吸光度（浸漬時間 60 分）

表 4-4 各計測条件における係数  $k$

pH	水温(°C)	係数 $k$
3	20	0.0848
4	20	0.0806
5	20	0.0776
6	20	0.0712
7	20	0.0581
8	20	0.0498
9	20	0.0500
10	20	0.0654
11	20	0.0786
7	10	0.0582
7	20	0.0587
7	30	0.0776

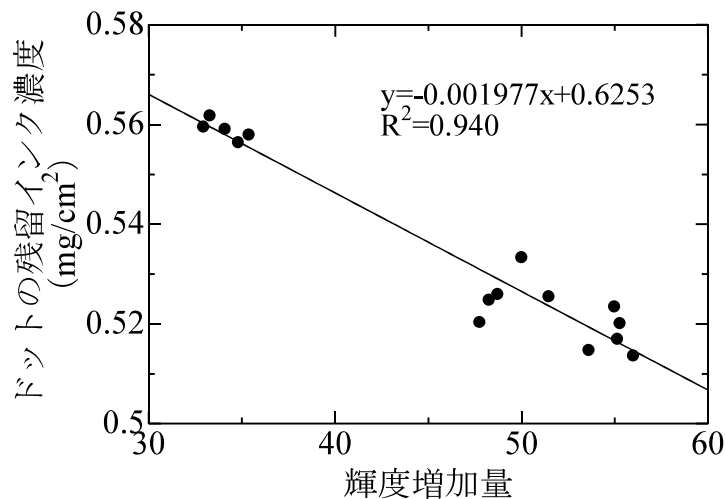


図 4-12 ドット部における輝度増加量と残留インク面濃度 (mg/cm<sup>2</sup>) の関係

#### 4.3.2 テーリング発生に水温・水質が与える影響確認結果

図 4-13 に吸着試験後の試験用紙の輝度とペーパーディスクへの単位面積当たりインク吸着量 (mg/cm<sup>2</sup>) の関係と、吸光度 0.214 (インク濃度 0.0126 mg/cm<sup>3</sup>) の溶液を用いた実験結果を除いた場合の結果を示す。表 4-5 に取得した検量線と決定係数を示す。吸光度が 0.214 の溶液を用いた吸着試験では、試験前後の吸光度の差が使用した吸光光度計の計測可能な最大桁数 3 桁を下回り、計測不可能であったためデータから除外した。よって、テーリングの輝度から定着インク濃度 (mg/cm<sup>2</sup>) への変換式には表 4-5 の吸光度 0.214 を除いたグリーンの式を用いることとした。またテーリングの抽出は、画像化したペーパーディスクを RGB 分解し、G (Green) の 225 以下の輝度を閾値としてテーリングを抽出することから、テーリングとして抽出可能な定着インク濃度を  $4.275 \times 10^{-4}$  mg/cm<sup>2</sup> 以上とした。

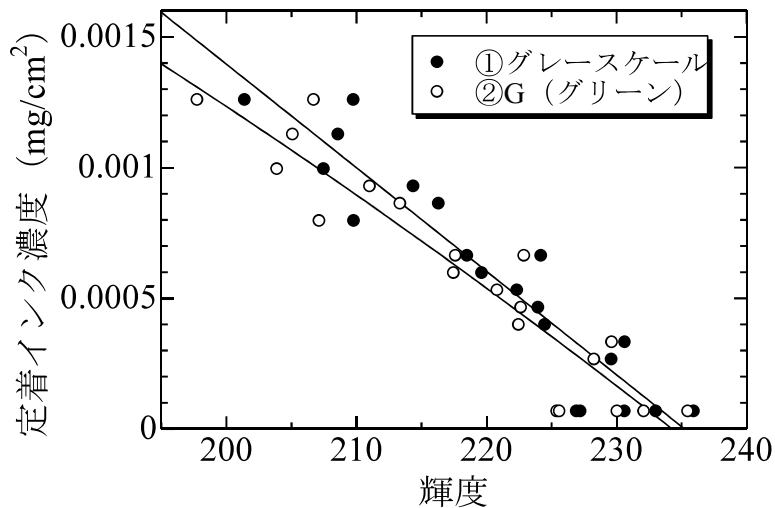
図 4-14~20 に各計測条件で取得したテーリングの濃度分布 (mg/cm<sup>2</sup>) を示す。図 4-21, 22 に各水温、水質条件で取得した 5 つのサンプルの定着インクの面濃度分布平均値の比較を示す。x=0 は初期ドットの中心であり、-1.5<x<1.5 (mm) は初期ドットを、1.5<x はテーリングを示している。

図 4-23, 24 に各計測条件で取得したテーリング長の平均値と誤差範囲を示す。表 4-6 に各計測条件における x 方向のテーリングの平均濃度  $C_{aver}$  を示す。

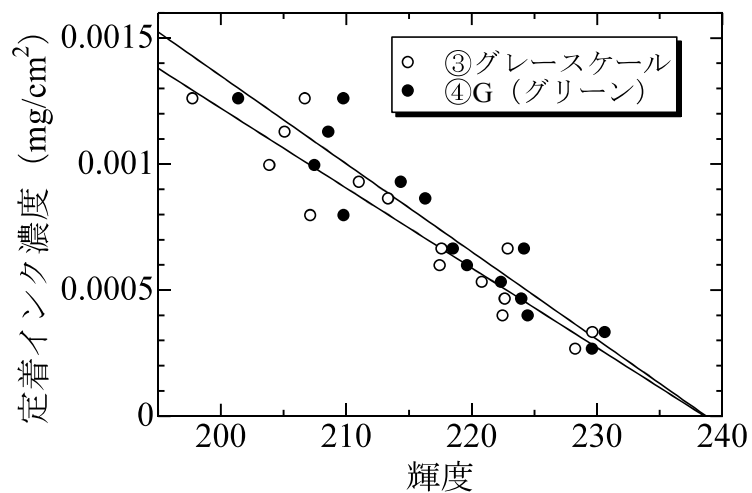
実験に水道水を用いた場合、図 4-21 より、水温の上昇に伴ってドット部の残留インク濃度が低下し透水性スポンジへのインク溶出量が増加した。この傾向は 4.2.1 のバッチ試験の結果とも整合している。しかしテーリング部の定着インク濃度分布の差は極めて小さく、また図 4-23 より各計測条件におけるテーリング長の平均値の差が標準偏差以下であった。よって、同水質条件下においては、水温がテーリングの発生に与える影響は小さいことが示された。

次に水温を  $20 \pm 2^\circ\text{C}$  で一定とし、pH を変化させた場合、図 4-22 より pH の上昇に伴ってドット部の残留インク濃度が低下し、透水性スポンジへのインクの溶出量が増加した。しかし pH=10.2 の塩基性条件下では、ドットからのインク溶出量が大いにも関わらずテーリングのインク面濃度は

他の計測条件と比較して小さくなった。インクの到達距離は他の計測条件と大差ないが、定着インク濃度が低いいためテーリング長としては短くなった。pHの増加によって紙からのインクの溶出量が増加し、逆に紙への吸着量が減少したためであると考えられた。一方、pH=3.1の酸性条件下では、ドットの残留インク濃度が高くスポンジ相へのインクの溶出量が少ないことが分かる。表4-6より、pH=3.1の酸性条件ではテーリングのx方向の平均定着インク濃度は大きいことから、テーリング長の減少はインクの溶出量が少ないことによるものであると考えられた。



(a) 全データ (n=20)

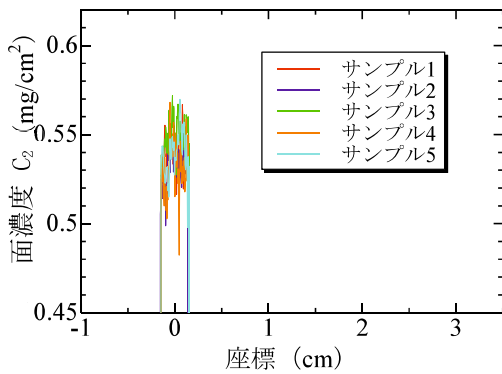


(b) 吸光度 0.214 を除く (n=15)

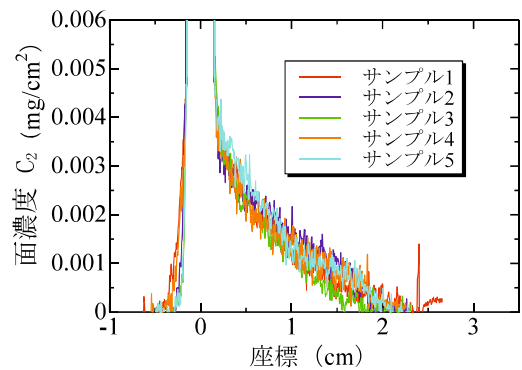
図 4-13 インク吸着面輝度とペーパーディスクの単位面積当たりインク吸着量 (mg/cm<sup>2</sup>) の関係

表 4-5 取得した検量線と決定係数

スケール	データ数	検量線	決定係数
グレイ	全データ	$y=-0.0000396x+0.00932$	0.879
グリーン	全データ	$y=-0.0000360x+0.00845$	0.879
グレイ	吸光度0.214 を除く	$y=-0.0000349x+0.00832$	0.873
グリーン	吸光度0.214 を除く	$y=-0.0000317x+0.00756$	0.877

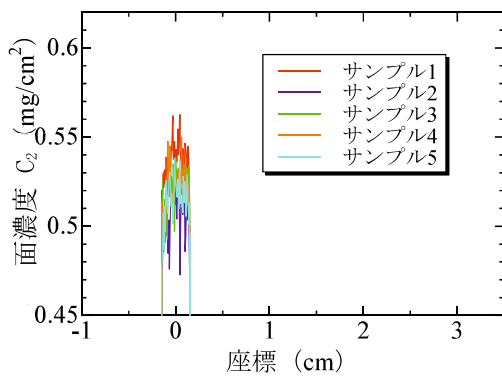


(a) ドット部

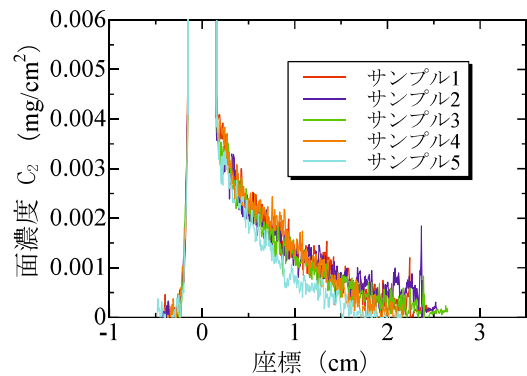


(b) テーリング部

図 4-14 ドット, テーリングの面濃度分布 (10°C, pH=7.5,  $v_D = 0.05$  cm/min, 計測時間 60 分)

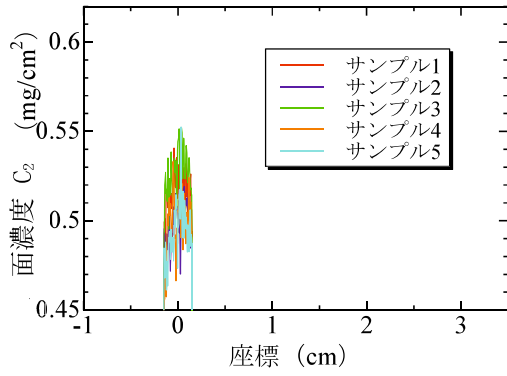


(a) ドット部

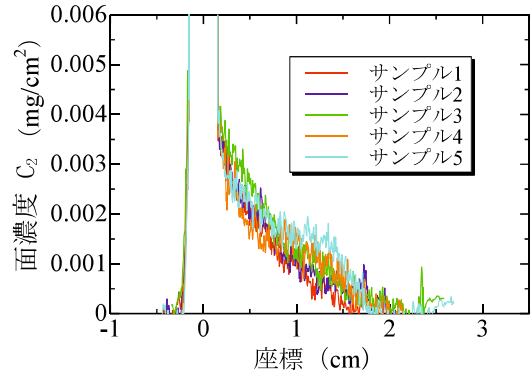


(b) テーリング部

図 4-15 ドット, テーリングの面濃度分布 (20°C, pH=7.5,  $v_D = 0.05$  cm/min, 計測時間 60 分)

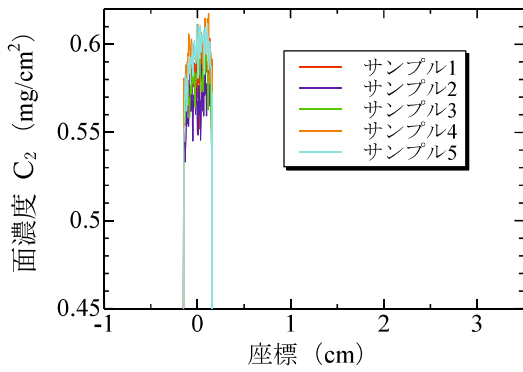


(a) ドット部

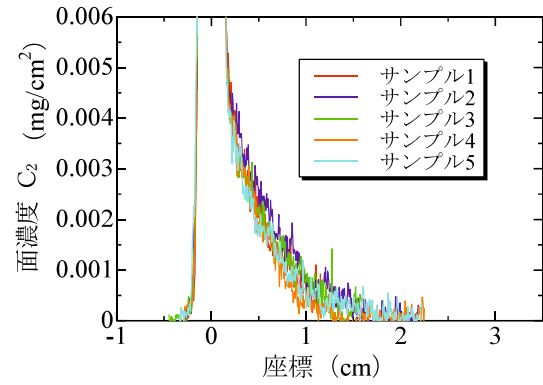


(b) テーリング部

図 4-16 ドット, テーリングの面濃度分布 (30°C, pH=7.5,  $v_D = 0.05$  cm/min, 計測時間 60 分)

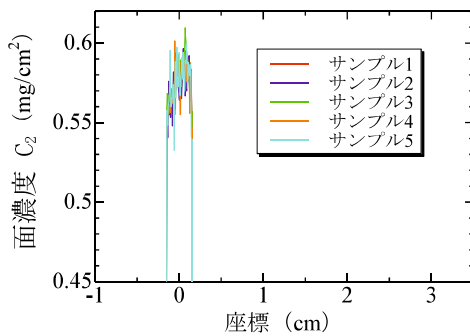


(a) ドット部

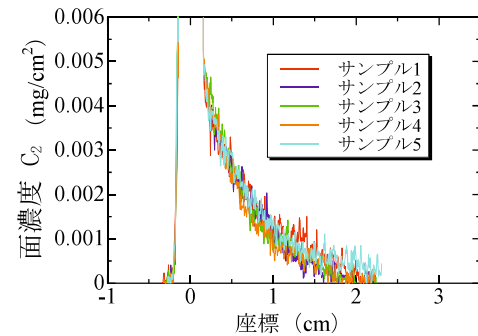


(b) テーリング部

図 4-17 ドット, テーリングの面濃度分布 (20°C, pH=3.1,  $v_D = 0.05$  cm/min, 計測時間 60 分)

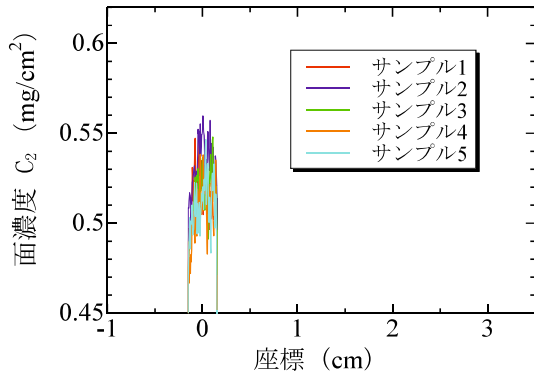


(a) ドット部

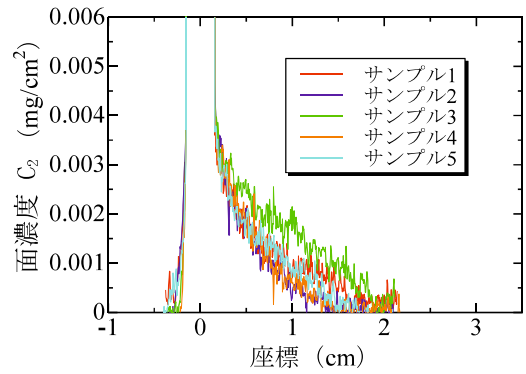


(b) テーリング部

図 4-18 ドット, テーリングの面濃度分布 (20°C, pH=5.1,  $v_D = 0.05$  cm/min, 計測時間 60 分)

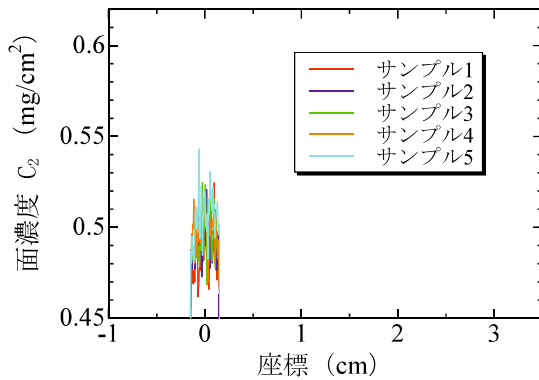


(a) ドット部

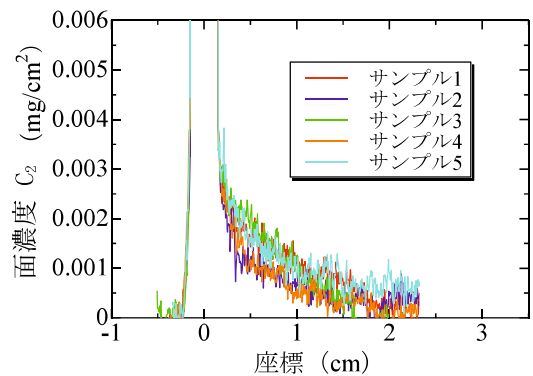


(b) テーリング部

図 4-19 ドット, テーリングの面濃度分布 (20°C, pH=9.1,  $v_D = 0.05$  cm/min, 計測時間 60 分)

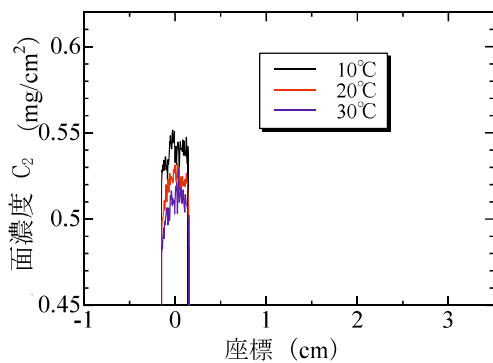


(a) ドット部

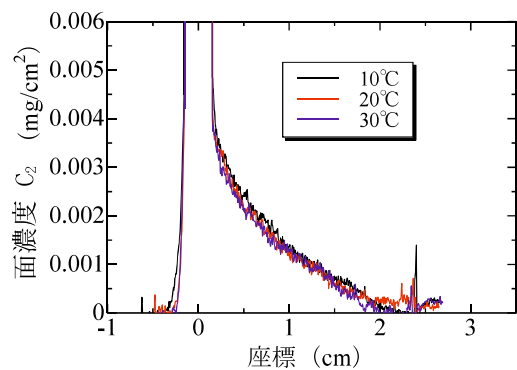


(b) テーリング部

図 4-20 ドット, テーリングの面濃度分布 (20°C, pH=10.2,  $v_D = 0.05$  cm/min, 計測時間 60 分)



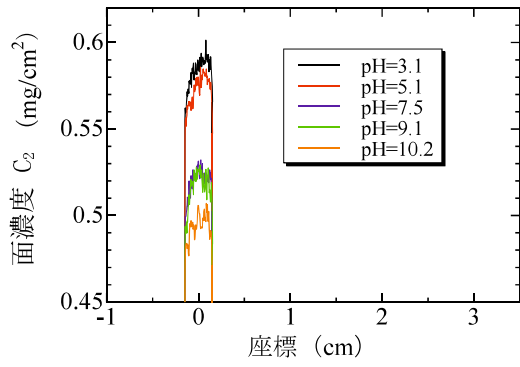
(a) ドット部



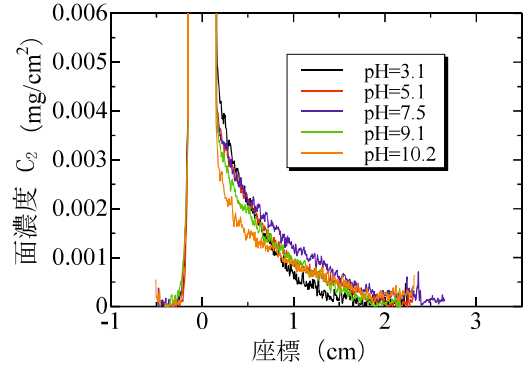
(b) テーリング部

図 4-21 各設定水温におけるドット, テーリング面濃度分布の平均値の比較 ( $v_D = 0.05$  cm/min, 計測時間 60 分)



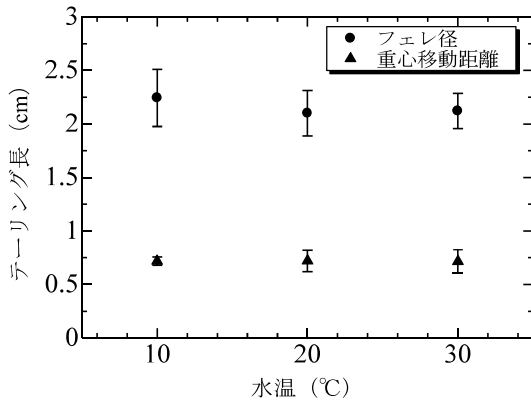


(a) ドット部

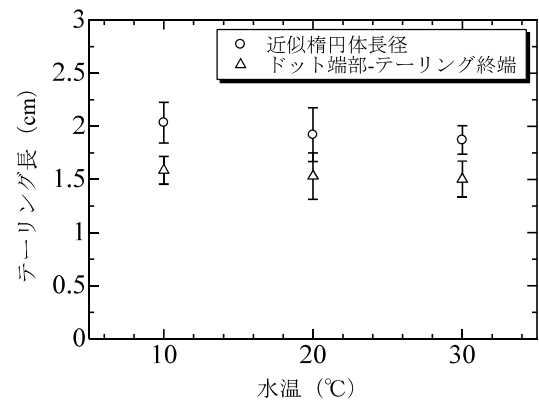


(b) テーリング部

図 4-22 各設定 pH におけるドット，テーリング面濃度分布の平均値の比較 ( $v_D=0.05$  cm/min, 計測時間 60 分)

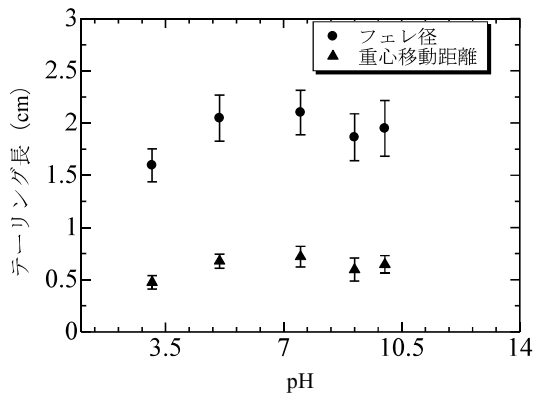


(a) フェレ径，重心移動

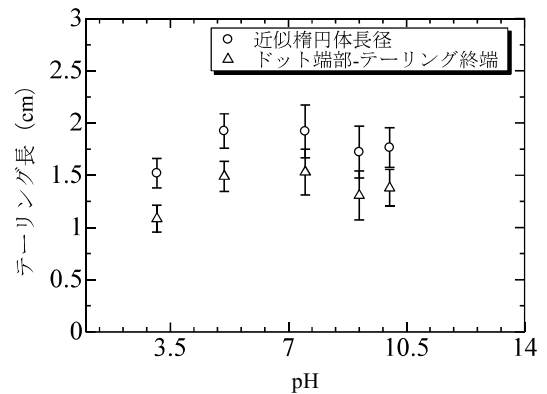


(b) 近似楕円体長径，ドット端部からテーリング終端までの距離

図 4-23 水温変更時におけるテーリング発生長と計測誤差範囲 ( $v_D=0.05$  cm/min, 計測時間 60 分)



(a) フェレ径，重心移動距離



(b) 近似楕円体長径，ドット端部からテーリング終端までの距離

図 4-24 pH 変更時におけるテーリング発生長と計測誤差範囲 ( $v_D=0.05$  cm/min, 計測時間 60 分)

表 4-6 各計測条件における x 方向のテーリングの平均濃度  $C_{aver}$

水温 (°C)	pH	$C_{aver}$ (mg/cm <sup>2</sup> )
10	7.5 (水道水)	$1.69 \times 10^{-3}$
20	7.5 (水道水)	$1.61 \times 10^{-3}$
30	7.5 (水道水)	$1.58 \times 10^{-3}$
20	3.1	$1.92 \times 10^{-3}$
20	5.2	$1.70 \times 10^{-3}$
20	9.1	$1.56 \times 10^{-3}$
20	10.2	$1.26 \times 10^{-3}$

#### 4.4 補正方法の提案

PDV の計測においては地下水の水温の違いによる計測結果の補正は必要性が低いことが示されたものの、水質 (pH) の違いはテーリングの発生長に影響を与えることが示された。よって地下水の pH を変数とする PDV の計測結果の補正方法に関する検討を行った。

##### 4.4.1 補正係数の算出方法

表 4-9 に水質変更実験で取得した各テーリング長の平均値の二次曲線  $f(\text{pH})$  を示す。また各テーリング長の補正計算は検定時の pH は 7.5 であることから、式 (4-10) を用いる。

$$L_s = \frac{f(7.5)}{f(\text{pH})} L \quad (4-10)$$

このとき、 $L_s$  : pH 補正計算後のテーリング長 (cm)、 $L$  : 補正計算前のテーリング長 (cm)  
 pH : 計測現場の pH である。

表 4-9 水質変更実験で取得した各テーリング長の平均値の二次曲線と決定係数 (計測時間 60 分)

テーリング長	概要	$f(x)$	決定係数
フェレ径	全データ	$f(x) = -0.0293x^2 + 0.4173x + 0.6145$	0.820
近似楕円体長径	全データ	$f(x) = -0.0267x^2 + 0.3701x + 0.6606$	0.815
重心移動距離	全データ	$f(x) = -0.0136x^2 + 0.1945x + 0.0146$	0.808
ドット端部-テーリング終端	全データ	$f(x) = -0.0269x^2 + 0.3795x + 0.1949$	0.814
フェレ径	pH=9.2 を除く	$f(x) = -0.0296x^2 + 0.4345x + 0.5526$	0.968
近似楕円体長径	pH=9.2 を除く	$f(x) = -0.0270x^2 + 0.3833x + 0.6129$	0.939
重心移動距離	pH=9.2 を除く	$f(x) = -0.0138x^2 + 0.2034x + 0.0176$	0.986
ドット端部-テーリング終端	pH=9.2 を除く	$f(x) = -0.0272x^2 + 0.3951x + 0.0139$	0.968

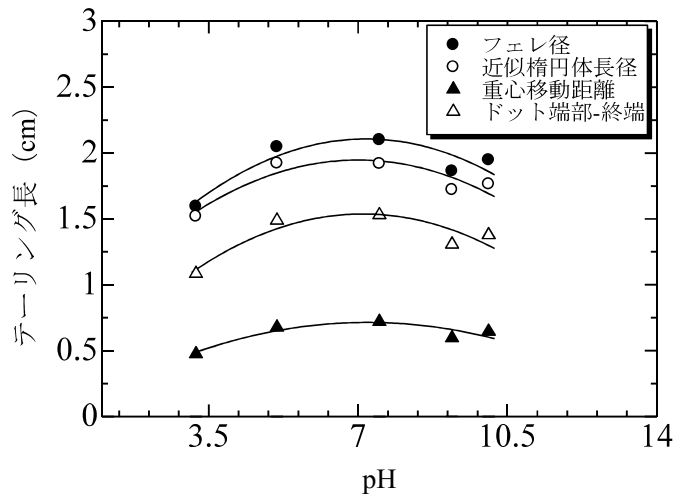


図 4-25 水質変更実験で取得した各テールリング長の平均値の二次曲線

#### 4.4.2 補正係数の算出結果

表 4-7 に計測時間 60 分における各テールリング長の補正係数を示す。ここで、検量線作成に用いた実験水槽内の pH は 7.5 としている。これらの補正係数をテールリングの測定長に乘じ、作成した検量線を用いて流速に換算することで、計測現場の地下水の水質を考慮した PDV の計測が可能となった。

表 4-7 各テールリング長の補正係数 (計測時間 60 分)

テールリング長	$f(7.5)/f(\text{pH})$							
	pH3	pH4	pH5	pH6	pH7	pH8	pH9	pH10
フェレ径	1.308	1.155	1.065	1.016	0.998	1.009	1.050	1.128
近似楕円体長径	1.264	1.129	1.049	1.008	0.996	1.011	1.058	1.144
重心移動距離	1.489	1.232	1.095	1.024	0.998	1.012	1.068	1.181
ドット端部-テールリング終端	1.400	1.191	1.076	1.016	0.997	1.012	1.067	1.175

#### 4.5 まとめ

##### 4.5.1 インクの溶出特性把握のためのバッチ試験

現地計測する際に地下水の水質条件は、PDV のインクの溶出特性に影響を与えることが考えられた。そこでインクの溶出特性を把握するためにバッチ試験を行った。測定項目として水温と pH の変化による影響を測定した。バッチ試験用の溶出試験紙を水温、pH を調整した溶液に一定時間浸漬させることで溶出したインク濃度を測定した。その結果、インクの溶出量は浸漬時間が長いほど増加するとともに、水質が酸性、またはアルカリ性である場合に溶出量が増加した。酸性域では pH=6.0 以下となる場合は溶出量が変化しなくなった。高水温でインクの溶出量は増加し、浸漬時間 60 分において 10°C に比べ 30°C で 1.7 倍となった。

#### 4.5.2 テーリング発生に水温・水質が与える影響

実際に pH・水温を変化させ室内実験砂槽で PDV の計測を行った。その結果、水温を上昇させた場合はインクの溶出量が増加してバッチ試験の結果と一致したが重心移動距離の変化は極めて小さくテーリングに与える影響は小さかった。しかし、pH を変化させた場合は酸性側・アルカリ性側でテーリング長が減少することが明らかになった。

#### 4.5.3 補正方法の検討

pH の変化とテーリング長の関係から室内検定に使用する水道水の pH=7.5 を基準とした補正関数が得られ、pH についてテーリング長を補正する係数を提案した。PDV で現地計測を行う際に pH を計測することによって測定結果を補正する事が可能となった。

#### 参考文献

- 1) ケムテックス社技術資料：染料各論, <https://www.chemtex.co.jp/seihin/senryo/technology/pdf/kakuron.pdf>, (参照 2020.10.1)。
- 2) 日本地下水学会編：地下水水質の基礎, 理工図書, pp.167, 2002.
- 3) M. Könönen, J. Jauhiainen, P. Straková, J. Heinonsalo, R. Laiho, K. Kusin, S. Limin, H. Vasander: Deforested and drained tropical peatland sites show poorer peat substrate quality and lower microbial biomass and activity than unmanaged swamp forest, *Soil Biology and Biochemistry*, Volume 123, pp.229-241, 2018.
- 4) 橋治国, 堀田暁子, 川村哲司, 行木美弥: 高層湿原地下水の水質とその涵養, 環境工学研究論文集, pp.91-98, 1994.
- 5) 田中宏和, 香村一夫: 管理型最終処分場の安定化における塩類溶出特性 (その 2), 廃棄物資源循環学会論文誌, Vol.28, pp.114-127, 2017.
- 6) 川島保彦: カラープリント用水溶性染料, 日本写真学会誌, 55 巻, 3 号, pp.205-210, 1992.

## 第5章 PDVの検定と画像解析によるノイズ除去

### 5.1 はじめに

ペーパーディスク型地下水流向流速計 (PDV) を用いて流向・流速を求めるための既往の方法はペーパー上に残されたテーリングを電子化し、単一のチャンネルを用いる方法で画像解析を行っていた。しかし、この方法では現地計測において電子化を行ったペーパーディスクを画像解析する際、ペーパーディスクに付着した泥炭粒子や着色がノイズとなりテーリングとノイズを分離して二値化することが困難となる場合があった。テーリングのノイズとの分離は測定精度の向上、現地計測の適用範囲を広げるためにも重要である。そこで、本章では単ドット式 PDV の検定を行うとともに画像解析で複数チャンネルを用いた二値化手法により検定直線を作成し、ペーパーの汚れに強いテーリング長取得方法を新規開発することを目的とした。

### 5.2 研究方法

#### 5.2.1 複数チャンネルを用いた領域分割

##### (1) PDV の検定方法

本研究では 1.5 に示した 50 mm 径用 3 本ロッド型単ドット式 PDV を用いた。測定手順は 1.4 に示した方法を用いて室内実験砂槽でサンプルの取得を行った。用いた室内実験砂槽を図 5-1 に示す。室内実験砂槽は下流槽から上流槽にペリスタリックポンプを用いて水を循環させることで水頭差をつけることで砂槽内に流速を発生させた。室内実験砂槽の概要図を図 5-2、砂槽の諸元を表 5-1 に示す。砂槽部の透水係数は  $k=1.3 \times 10^{-3} \text{ m/s}$  であった。ストレーナは底面から 37 cm の区間に千鳥格子で配置したもので VP50 では開口率が 20.9% である。



図 5-1 室内実験砂槽

実験砂槽内のダルシー流速を連続式より式(5-1)を用いて算出した。

$$V = Q/A \quad (5-1)$$

ここで、 $V$ ：ダルシー流速(cm/min)、 $Q$ ：ポンプ流量(mL/min)、 $A$ ：砂槽断面積(cm<sup>2</sup>)である。本研究では設定流速ごとに流量の違う2種類のペリスタリックポンプを使用した。吐出可能流量はそれぞれ 0.03~4.50 cm<sup>3</sup>/s (CTP-100)、0.67~58.3 cm<sup>3</sup>/s (Solinst model410)である。

設定流向は90°とした。設定流速は測定時間5分で0.1、0.3、0.5、0.7、1.0 cm/minの5パターン各流速で各3回、測定時間15分で0.1、0.2、0.3、0.4、0.5 cm/minの5パターン各流速で3回、測定時間30分で0.02、0.03、0.05、0.06、0.07、0.08、0.1、0.12 cm/minの10パターンで各3回、測定時間60分で0.01、0.02、0.03、0.04、0.05、0.06 cm/minの6パターンで各3回測定を行った。測定時間と設定流速の一覧を表5-2に示す。

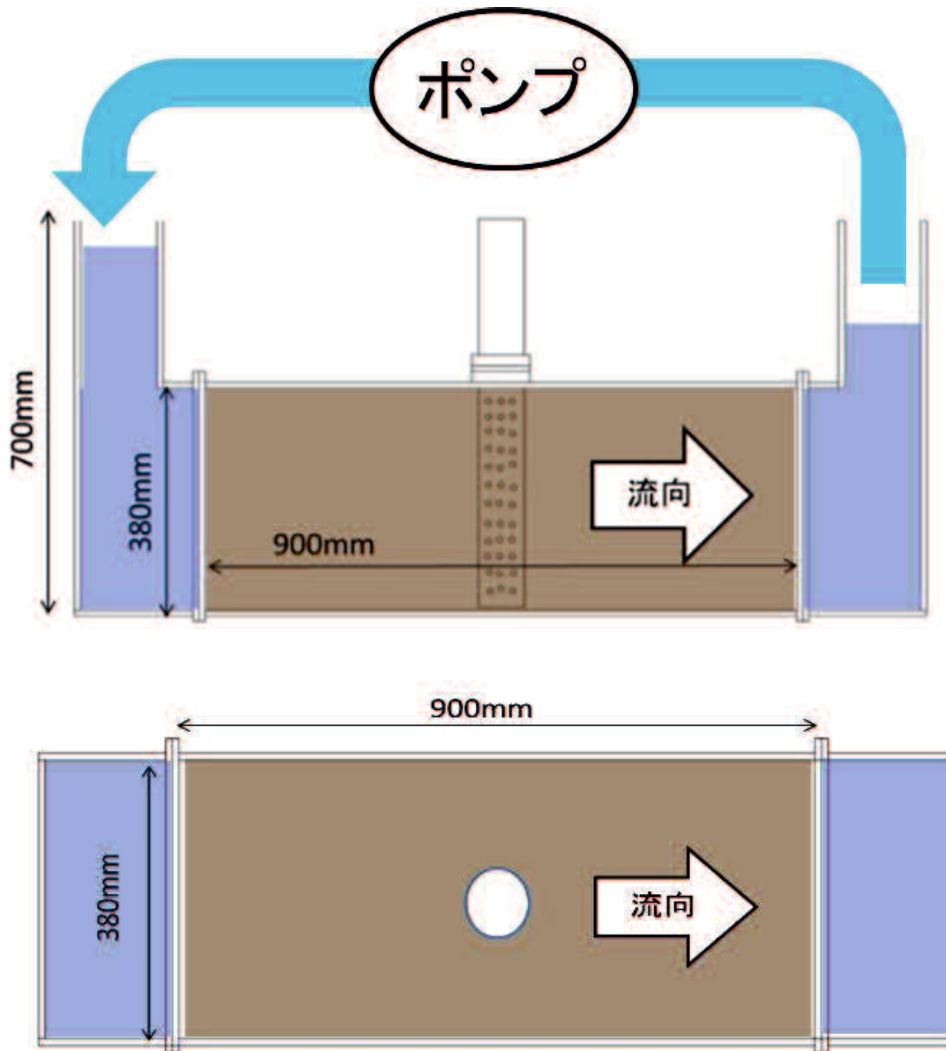


図 5-2 室内実験砂槽概要 (上：断面図 下：平面図)

表 5-1 室内実験砂槽の諸元

項目	諸元
砂充填部(mm)	幅380×高さ380×長さ900
パイプ内径	51mm
ストレーナ形状	6mm円孔
ストレーナ開口率	20.90%
砂の種類	珪砂 5号
透水係数	$1.3 \times 10^{-3}$ m/s
ストレーナ区間	370 mm

表 5-2 設定流速と測定時間一覧

設定流速 (cm/min)	測定時間(min)			
	5	15	30	60
0.01				○
0.02			○	○
0.03			○	○
0.04				○
0.05			○	○
0.06			○	○
0.07			○	
0.08			○	
0.1	○	○	○	
0.12			○	
0.2		○		
0.3	○	○		
0.4		○		
0.5	○	○		
0.7	○			
1	○			

## (2) 画像取得方法

測定後のペーパーディスクを乾燥後、フラッドベッドスキャナ（EPSON 製 GT-7000U）を用いて第 4 章に示した方法で電子化した。電子化する際の条件は 600 dpi、露光-1、ハイライト 225、シャドウ 60 とした。露光、ハイライト、シャドウはソフト固有のパラメータであり、画像の階調や明るさを制御するが、電子化の際にそれらは固定条件とした。これにより画像の明るさに関係なく同一条件でスキャンできる。またガンマ値は 1 とすることで画像の階調を直線とした。

## (3) ノイズ除去用データの取得方法

画像解析によるノイズの除去のためペーパーディスクにおけるテーリング部、ドット部、バックグラウンドの輝度を取得した。輝度の取得は計 8 回行った現地調査で取得したペーパーディス

ク 233 枚と室内実験で取得した 88 枚，合計 321 枚を使用した．現地計測で取得したペーパーディスクの内訳を表 5-3 に示す．インドネシア共和国リアウ州ブンカリス島と北海道天塩郡サロベツ湿原は泥炭地，山口県山口市樫野川河口干潟は海岸砂州で計測を行った．

取得したペーパーディスクは 4.2.1(1) のスキャン条件で電子化し輝度を取得した．ドット部は直径 3 mm 円，紙面部は泥炭などの汚れの付着やテーリングが発生していないバックグラウンド部を 1 cm<sup>2</sup>，テーリングはテーリングの幅に合わせてドットと同程度の面積の輝度をマニュアルで取得した．ペーパーディスク輝度取得範囲を図 5-3 に示す

表 5-3 現地調査日とサンプル数

調査対象地域	日付	サンプル数	
ブンカリス島	2017年9月	36	
	サロベツ湿原	2017年8月	61
		2018年4月	27
		2018年7月	16
樫野川		2018年10月	40
		2018年6月	16
		2018年7月	21
		2018年9月	16

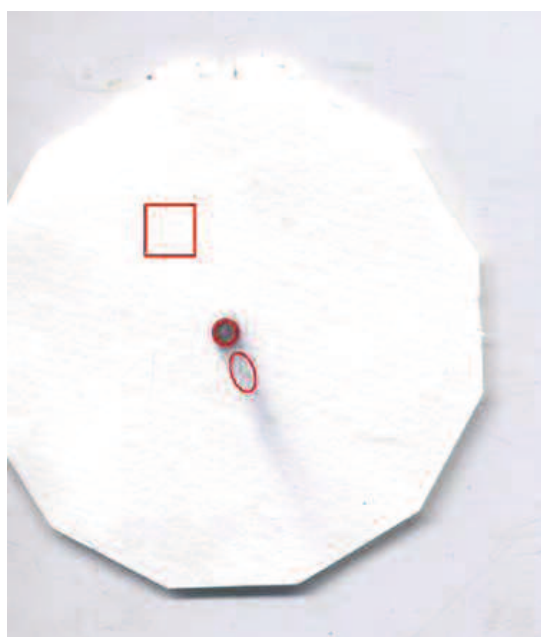


図 5-3 ペーパーディスク輝度取得範囲

### 5.2.2 単一チャンネルを用いた検定直線の作成方法

電子化した画像をオープンソースの画像解析ソフト image-J を用いて測定前のドットと測定後のテーリングごとに RGB カラーモデルを用いて二値化処理を行った．



取得した画像は RGB 分解して G (Green) の 225 以下の輝度をテーリング、100 以下の輝度を初期ドットとして二値化処理を行った。閾値の選定にあたっては、閾値を変化させて検量線を作成して最も決定係数が高かったものを採用した。また、計測時間によってはテーリング全体が薄くなり、一定の閾値では初期ドットが抽出できないことがあったが、その際には閾値 100~150 以下の範囲で 10 段階ずつ変化させ、実験前のドットの面積に近くまた真円度が高くなった画像を初期ドットとして選定した。図 5-4 にテーリングの画像処理過程を示す。

二値化後の画像は画像処理ソフトを用いて粒子解析を行った。ドットは重心位置と面積、真円度を取得し、テーリングは面積、重心位置、テーリングのフェレ径、楕円体近似した際の長径を取得した。初期ドットの重心位置はテーリングの重心移動距離および方位を求めるための基点として用いた。

テーリングについては取得したデータのうちエラーと外れ値の除去を行った。テーリングがペーパーディスクの端部に達しているものは、すでにテーリングが紙面上を越えており、本来のテーリングの全体像を捉えることが出来ていないものとしてエラーとした。また、テーリングの二値化処理を行った際に他の粒子と分離できない場合もエラーとして扱った。外れ値は、測定時間の流速ごとに式(5-2)を満たすサンプルを外れ値として扱った。

$$|x - \mu| > \sigma \quad (5-2)$$

ここで、 $x$  : 測定値、 $\mu$  : 平均値、 $\sigma$  : 標準偏差である。

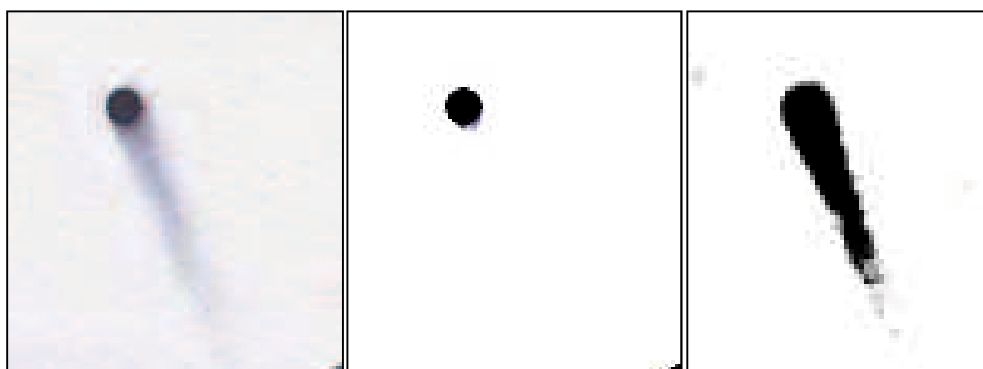


図 5-4 テーリングの画像処理過程【(左) : 8 ビット画像 (中) : ドット抽出後 (右) : テーリング抽出後】

### 5.2.3 流向の推定方法

ペーパーディスクを電子化後、画像解析ソフトで一定の閾値で二値化を行いテーリングとドットの二値化画像を取得、その後 2 枚の画像を粒子解析し取得した重心位置から流向を算出する。

取得した初期ドットの重心の座標  $g(x, y)$  を起点とし、テーリングの重心の座標  $g'(x', y')$  を

終点とするベクトル  $G$  の方位  $\theta$  を流向として定義した (図 5-5)。ドットの重心  $g(x, y)$  は測定前のドットと同様の直径 3 mm の円の面積に最も近く、かつ真円度が 1 に近いものを重心の座標として用いた。

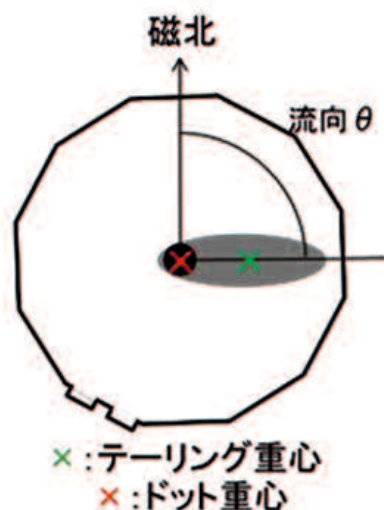


図 5-5 流向の推定方法のイメージ

#### 5.2.4 単一チャンネルを用いた流速の推定方法

流速推定のために本装置の検定を行った。検定方法は、流速を一定の範囲で変化させて流速ごとに複数回測定を行った。測定後、スキャナを用いて電子化したサンプルから画像解析ソフトを用いて、重心のベクトル  $G$  の大きさ、テーリングに外接する長方形の長辺(フェレ径)、テーリングの近似楕円体の長径を取得した。重心のベクトル  $G$  に関してはドットとテーリングの重心位置から取得し式(5-2)を用いて算出した。

$$L = \sqrt{(X' - X)^2 + (Y' - Y)^2} \quad (5-2)$$

ここで、 $L$  : テーリング長(cm)、 $(X, Y)$  : ドットの重心位置、 $(X', Y')$  : テーリングの重心位置である。テーリングに外接する長方形の長辺(フェレ径)、テーリングの近似楕円体の長径の算出に当たっては Image-J の粒子解析機能を利用し取得した。図 5-6 に解析項目のイメージ図を示す。

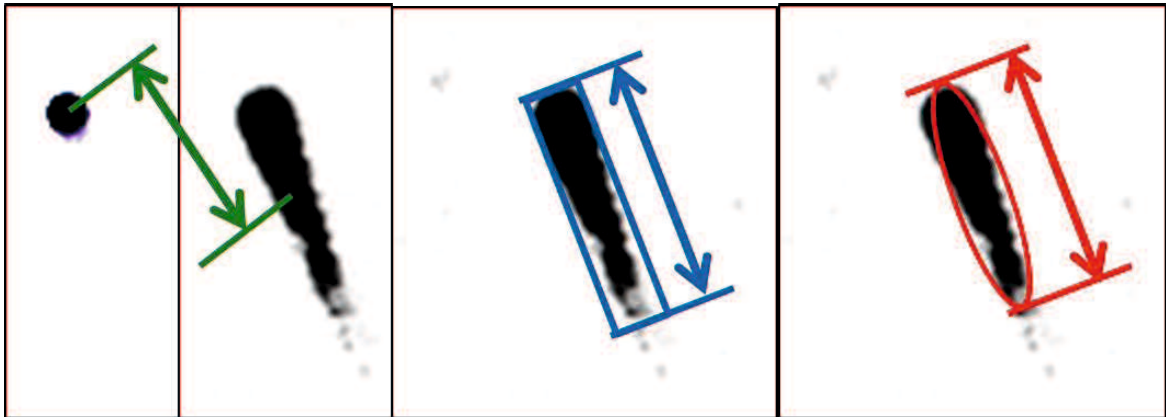


図 5-6 取得パラメータのイメージ(左：重心のベクトルGの大きさ，中：フェレ径，右：近似楕円体長径)

### 5.3 研究結果

#### 5.3.1 ペーパーディスクの輝度取得結果

各ペーパーディスクのドット部，テーリング部，バックグラウンドの RGB 各チャンネルの平均輝度の散布図を図 5-7~9 に示す．散布図を比較すると R-B チャンネルにおけるテーリング部とバックグラウンドの分離が G-B チャンネル， R-G チャンネルを用いたものよりも容易であることがわかる．そこで R と B の輝度を閾値に用いてテーリングとバックグラウンドの分離を行った．テーリングとドットの境界は  $R=100$  にある事がわかることから  $R>100$  をテーリングとした．

テーリングとバックグラウンドの境界線はテーリング部の輝度散布図の近似直線とバックグラウンドの輝度の散布図の近似直線から B 軸方向に等距離の直線とした．得られた直線を式 (5-3) で示す．

$$B = 1.5158R - 117.76 \quad (5-3)$$

ここで，B : Blue のチャンネルの輝度，R : Red のチャンネルの輝度である．

式(5-3)から R-B チャンネルを用いて式(5-4)の条件①に従うものをテーリングとした．抽出される領域を図 5-10 に示した．

$$\textcircled{1} \quad \begin{cases} B > 1.5158R - 117.76 \\ 100 < R < R_{max} \end{cases} \quad (5-4)$$

図 5-11 に R-B チャンネルの二次元閾値を用いた二値化画像，図 5-12 に単一チャンネルで二値化した画像を示す．単一チャンネルでは付着した泥炭や着色によりテーリングがつぶれているのがわかる．一方で二次元閾値を用いた場合はテーリングが鮮明に抽出可能となった．

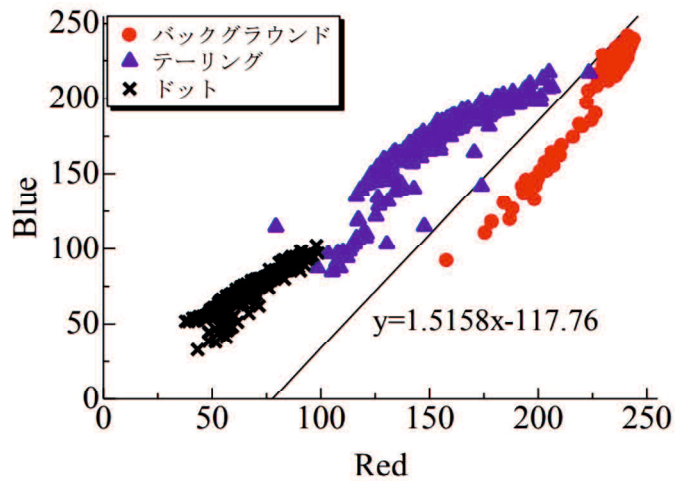


図 5-7 要素ごとの輝度の分布図(Red-Blue)

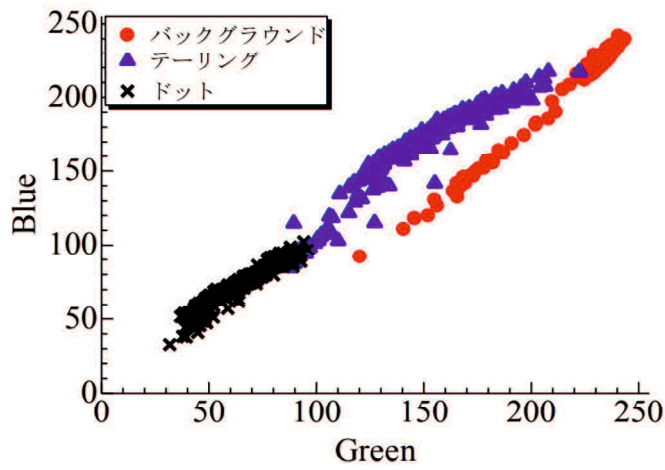


図 5-8 要素ごとの輝度の分布図(Green-Blue)

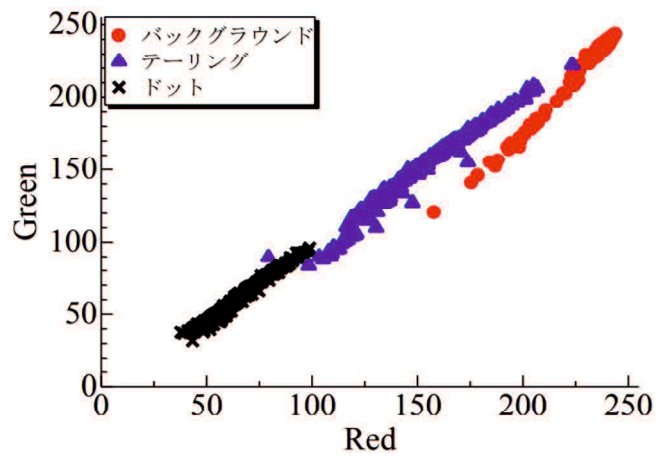


図 5-9 要素ごとの輝度の分布図(Green-Red)

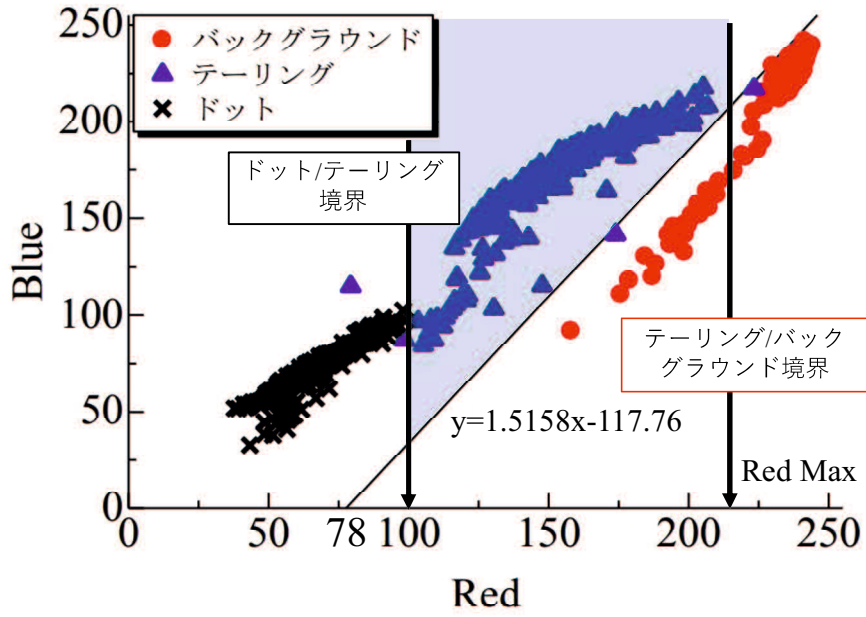


図 5-10 R,B チャンネルを用いた領域分割

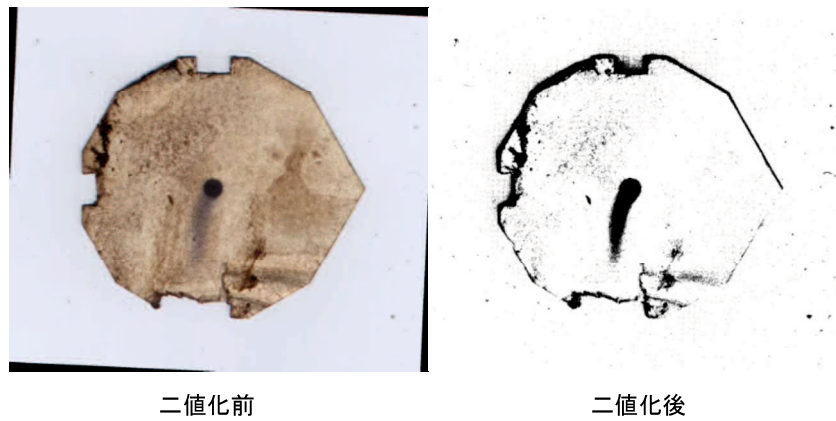


図 5-11 R-B チャンネルの二次元閾値を用いた二値化画像（ブンカリス島における実測ペーパー）

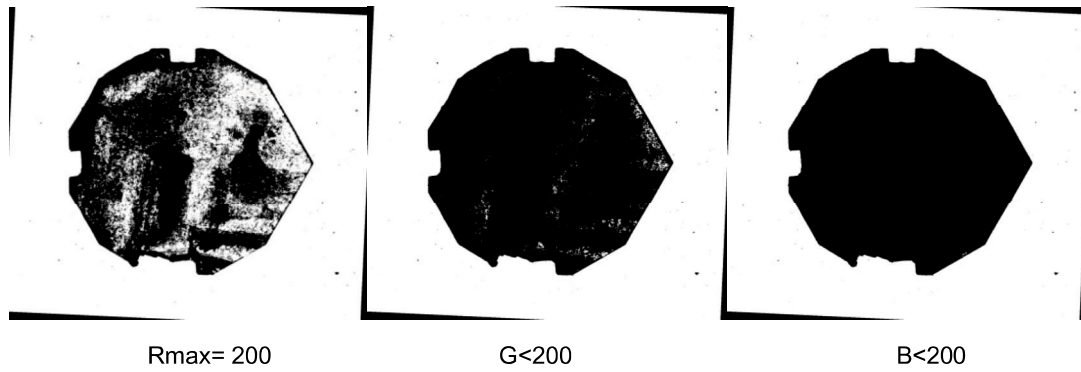


図 5-12 単一チャンネルでの二値化画像（ブンカリス島における実測ペーパー）

### 5.3.2 R,B チャンネルを用いた検定直線の作成

室内実験砂槽を用いて表 5-2 示した測定条件で取得したペーパーディスクを R,B チャンネルで二値化し検定直線を作成した。その際の抽出条件として  $R_{max}=205$ ,  $R_{max}=210$ ,  $R_{max}=215$  の 3 パターンで抽出を行い作成した検定直線の決定係数が最も高いものを使用した。

(1)測定時間 5 分の検定直線

図 5-13 に作成した検定直線を示す。測定時間 5 分で最も決定係数が高くなったのは  $R_{max}=215$  の重心移動距離で作成した検定直線となった。流速算出式を式(5-5)に示す。

$$V_d = \frac{L_g}{0.3976} \tag{5-5}$$

ここで、 $V_d$  : ダルシー流速 (cm/min),  $L_g$  : テーリングの重心移動距離 (cm)である。決定係数は 0.9076 となった。

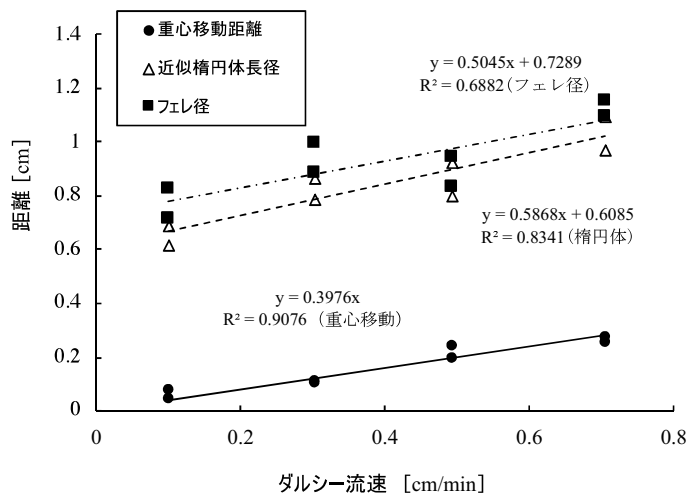


図 5-13 測定時間 5 分におけるダルシー流速とテーリングの関係(二次元閾値,  $R_{max}=215$ )

(2)測定時間 15 分の検定直線

図 5-14 に作成した検定直線を示す。測定時間 15 分で最も決定係数が高くなったのは  $R_{max}=215$  の楕円体近似長径で作成した検定直線となった。流速算出式を式(5-6)に示す。

$$V_d = \frac{L_e - 0.7896}{1.5522} \tag{5-6}$$

ここで、 $V_d$  : ダルシー流速(cm/min),  $L_e$  : テーリングの近似楕円体長径(cm)である。決定係数は 0.7974 となった。

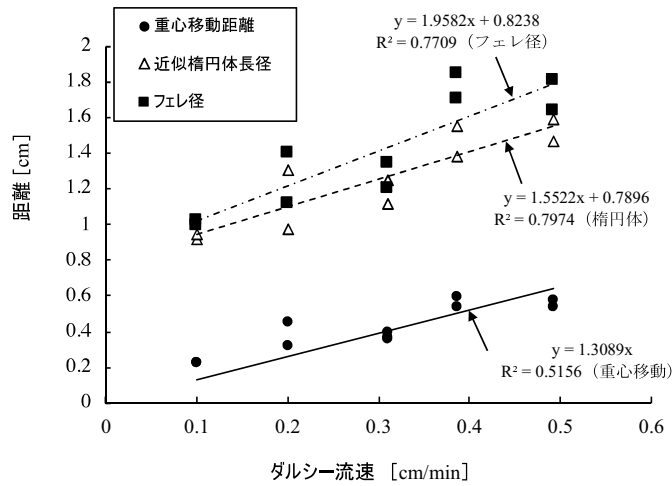


図 5-14 測定時間 15 分におけるダルシー流速とテーリングの関係(二次元閾値,Rmax=215)

### (3)測定時間 30 分の検定直線

図 5-15 に作成した検定直線を示す. 測定時間 30 分で最も決定係数が高くなったのは Rmax=215 のフェレ径で作成した検定直線となった. 流速算出式を式(5-7)に示す.

$$V_d = \frac{L_f - 0.6355}{11.481} \quad (5-7)$$

ここで,  $V_d$ : ダルシー流速(cm/min),  $L_f$ : テーリングのフェレ径(cm)である. 作成した検定直線で決定係数は 0.9602 となった.

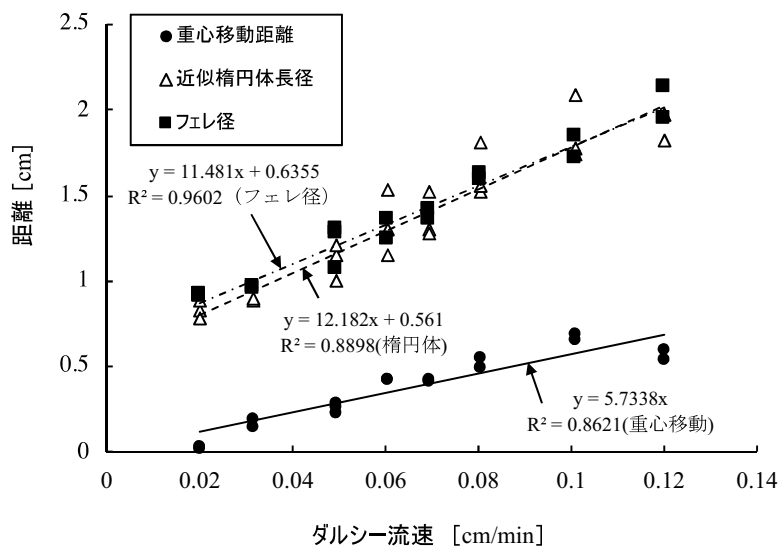


図 5-15 測定時間 30 分におけるダルシー流速とテーリングの関係(二次元閾値,Rmax=215)

### (4) 測定時間 60 分の検定直線

図 5-16 に作成した検定直線を示す. 測定時間 60 分で最も決定係数が高くなったのは Rmax=215 の重心移動距離で作成した検定直線となった. 流速算出式を式(5-8)に示す.

$$V_d = \frac{L_g}{10.403} \quad (5-8)$$

ここで,  $V_d$ : ダルシー流速(cm/min),  $L_g$ : テーリングの重心移動距離(cm)である. 作成した検定直線で決定係数は 0.9602 であった.

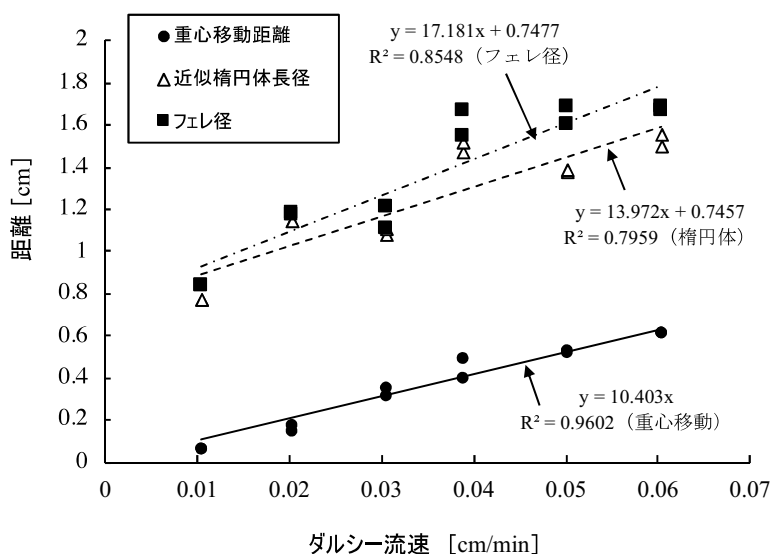


図 5-16 測定時間 60 分におけるダルシー流速とテーリングの関係(二次元閾値,Rmax=215)

### 5.3.3 単一チャンネルを用いた検定直線

#### (1)測定時間 5 分の検定直線

図 5-17 に作成した検定直線を示す. 測定時間 5 分で最も決定係数が高くなったのは近似楕円体長径で作成した検定直線となった. 流速算出式を式(5-9)に示す.

$$V_d = \frac{L_e - 0.6087}{0.8414} \quad (5-9)$$

ここで,  $V_d$ : ダルシー流速(cm/min),  $L_e$ : テーリングの近似楕円体長径(cm)である. 決定係数は 0.9116 となった.



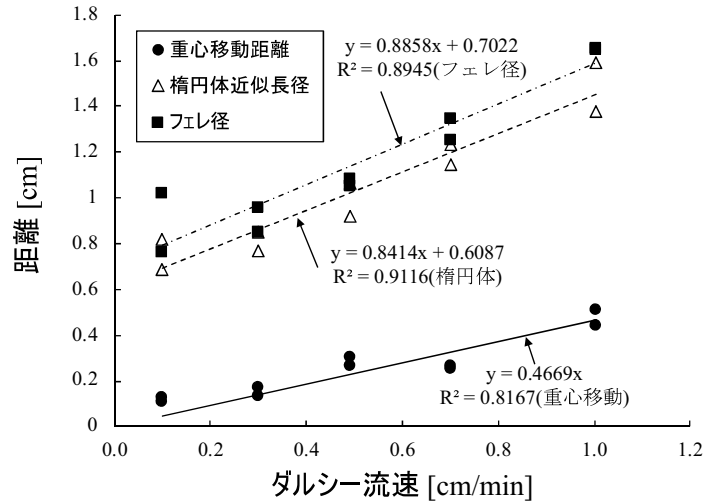


図 5-17 測定時間 5 分におけるダルシー流速とテーリング長の関係(単一チャンネル,  $G < 225$ )

(2)測定時間 15 分の検定直線

図 5-18 に作成した検定直線を示す. 測定時間 15 分で最も決定係数が高くなったのは重心移動距離で作成した検定直線となった. 流速算出式を式(5-10)に示す.

$$V_d = \frac{L_g}{1.8506} \quad (5-10)$$

ここで,  $V_d$ : ダルシー流速(cm/min),  $L_e$ : テーリングの重心移動距離(cm)である. 決定係数は 0.9179 となった.

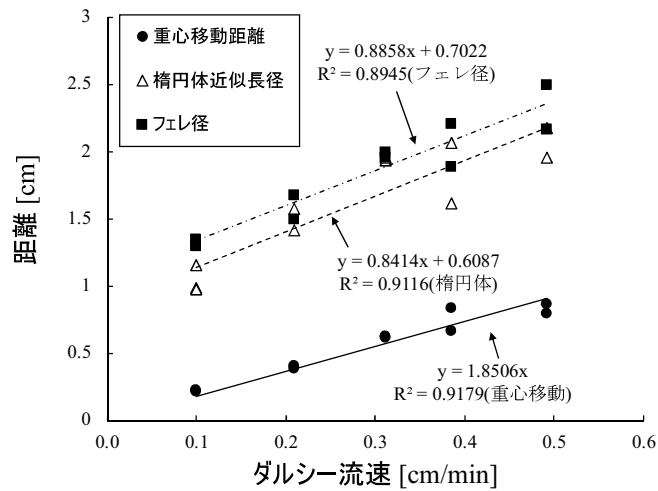


図 5-18 測定時 15 分におけるダルシー流速とテーリング長の関係(単一チャンネル,  $G < 225$ )

(3)測定時間 30 分の検定直線

図 5-19 に作成した検定直線を示す。測定時間 30 分で最も決定係数が高くなったのは近似楕円体長径で作成した検定直線となった。流速算出式を式(5-11)に示す。

$$V_d = \frac{L_e - 0.6026}{13.19} \quad (5-11)$$

ここで、 $V_d$ : ダルシー流速(cm/min),  $L_e$ : テーリングの近似楕円体長径(cm)である。決定係数は 0.9022 となった。

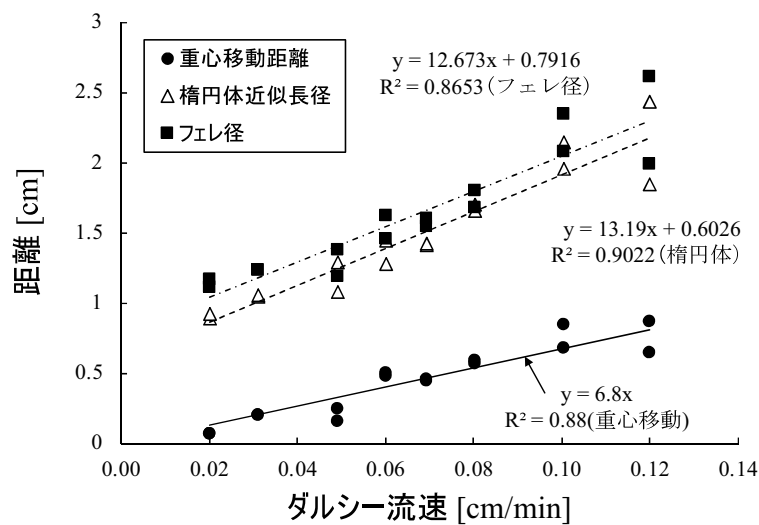


図 5-19 測定時間 30 分におけるダルシー流速とテーリング長の関係(単一チャンネル, G<225)

#### (4)測定時間 60 分の検定直線

図 5-20 に作成した検定直線を示す。測定時間 60 分で最も決定係数が高くなったのは近似楕円体長径で作成した検定直線となった。流速算出式を式(5-12)に示す。

$$V_d = \frac{L_g}{12.751} \quad (5-12)$$

ここで、 $V_d$ : ダルシー流速(cm/min),  $L_e$ : テーリングの重心移動距離 PD(cm)である。決定係数は 0.9433 となった。

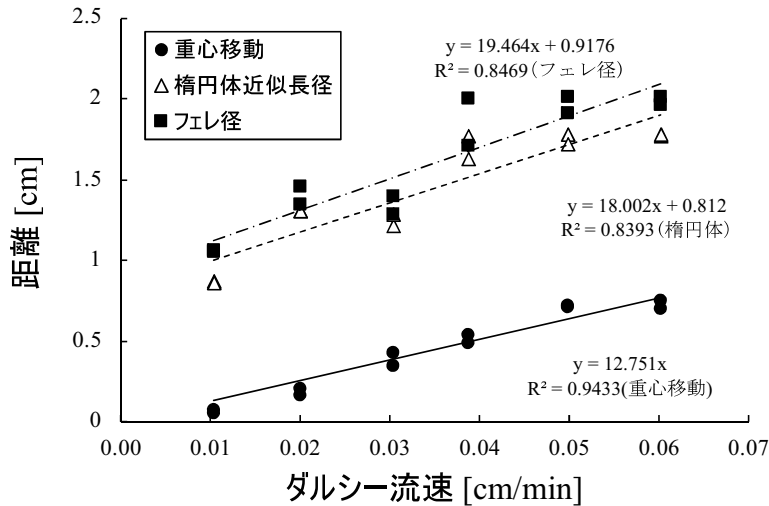


図 5-20 測定時間 60 分におけるダルシー流速とテーリング長の関係(単一チャンネル, G<225)

### 5.3.4 検定直線の比較

表 5-4 に単一チャンネルと R,B チャンネルで作成した検定直線の決定係数を示す。計測時間 15 分を除いて同程度の決定係数となった。ペーパーディスクに汚れが付着した場合には R,B チャンネルによる解析が有効である事が確認された。一方でノイズ除去用データに使用したサンプルの多くは泥炭地由来の腐植質を多く含んだ土壌、有機酸で着色した地下水環境下で計測を行ったものでありインクと似た黒色系の汚れにおいて適応できるものではない。そのためペーパーディスクに泥炭地由来の汚れが見られない場合は単一チャンネルを用いることとした。

表 5-4 単一チャンネルと R,B チャンネルにおける検定直線の決定係数

計測時間 (min)	決定係数R <sup>2</sup>	
	単一チャンネル G<225	R,Bチャンネル R<215
5	0.9116 (楕円体)	0.9076 (重心移動)
15	0.9179 (重心移動)	0.7974 (楕円体)
30	0.9022 (楕円体)	0.9602 (フェレ径)
60	0.9433 (重心移動)	0.9602 (重心移動)

### 5.3.5 流向の測定精度

測定時間ごとのダルシー流速と設定流向との誤差の関係を図 5-21~24 に示す。二次元閾値を使用して解析した場合でも測定時間 5 分、15 分では流向の誤差は小さく 16 方位以上の分解能(誤差 22.5° 以内)とならなかった点は計測時間 5 分で 2 サンプル、測定時間 15 分ではすべてのサンプルが誤差 22.5° 以内となった。しかし、測定時間 30 分と 60 分では低流速域で流向誤差が 90° 以上のサンプルが見られた。低流速域においては テーリング方位は不安定である事がわかる。30 分では 0.05~0.1cm/min では 16 方位以上の測定が可能となった。測定時間 60 分においては各流速 3

回の測定のうち1サンプルのみ誤差が  $22.5^\circ$  以上となる流速の範囲があったがおおむね  $16$  方位以上での測定可能といえる。

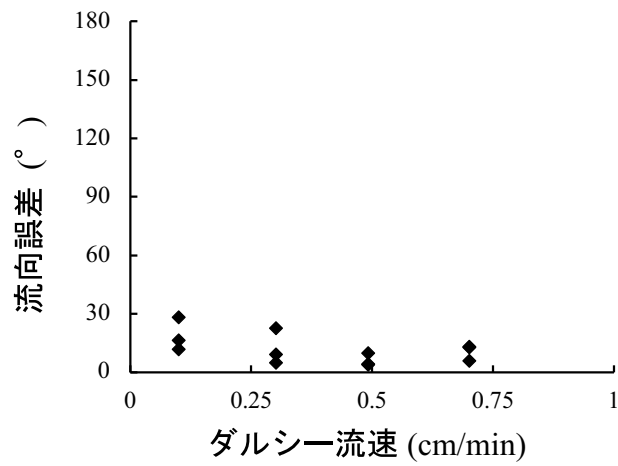


図 5-21 測定時間 5 分におけるダルシー流速と測定誤差の関係

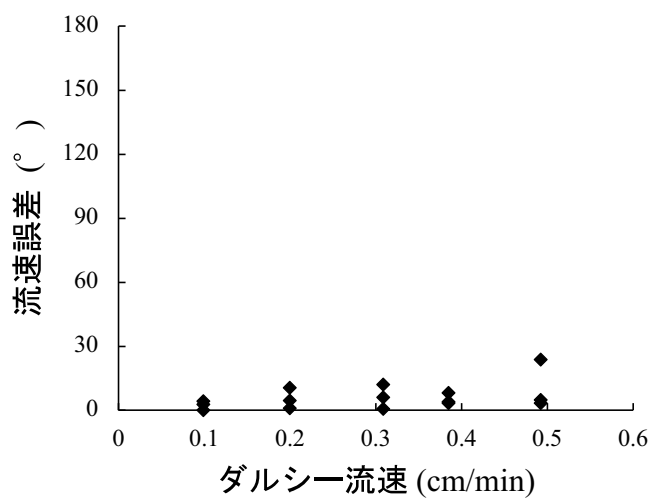


図 5-22 測定時間 15 分におけるダルシー流速と測定誤差の関

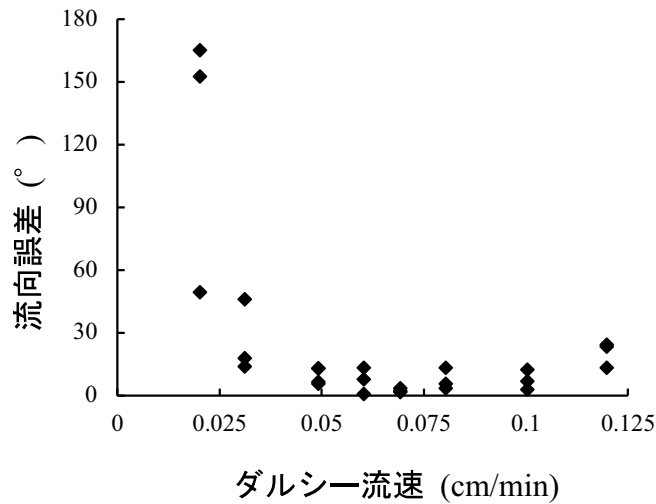


図 5-23 測定時間 30 分におけるダルシー流速と測定誤差の関係

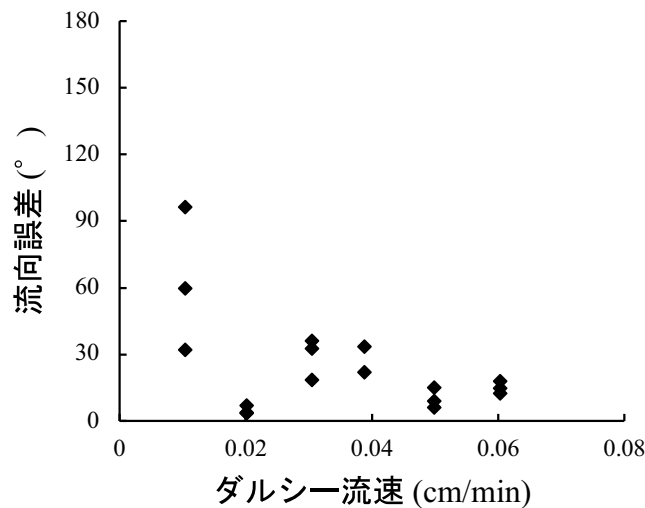


図 5-24 測定時間 60 分におけるダルシー流速と測定誤差の関係

#### 5.4 まとめ

本章では 50mm 径用 3 本ロッド型 PDV の室内実験砂槽を用いた検定を行うとともに、画像解析の障害になっていたペーパーディスクの着色や微粒子といったノイズの除去方法を確立した。

ペーパーディスクのドット部，テーリング部，バックグラウンドの輝度のデータから R-B チャネルを用いてバックグラウンドの分離が可能であると考え，テーリングの輝度分布とバックグラウンドの輝度分布を分ける直線を求めた。この直線から画像を二値化する  $B > 1.5158(R-78)$  を満たす輝度のピクセルのみを抽出することでバックグラウンドのノイズを大幅に低減し二値化処理を行うことが可能となった。

R,Bチャンネルを用いて作成した検定直線と単一チャンネルで作成した検定直線では計測時間15分を除き決定係数に大きな差は見られなかった。このことからR,Bチャンネルによる解析が有効である事が確認された。一方でノイズ除去用データに使用したサンプルの多くは泥炭地由来の腐植質を多く含んだ土壌、有機酸で着色した地下水環境下で計測を行ったものでありインクと似た黒色系の汚れにおいて適応できるものではない。そのためペーパーディスクに泥炭地由来の汚れが見られない場合は単一チャンネルを用いることとした。

流向に関しては測定時間が短い5分、15分では流向誤差は16方位以上の分解能で計測可能であることが確認できた。しかし測定時間60分では流向が90°以上異なるサンプルが存在しており、これは測定精度に問題がある可能性が高く再度、検定を行うことで精度が向上すると考えられた。

#### 参考文献

- 1) 小野文也, 山本浩一, 明石卓也, 神野有生, 関根雅彦: 電源不要かつ迅速な地下水流向流速計測方法の開発, 土木学会論文集C (地圏工学), 72巻, 4号, pp.377-384, 2016.

## 第6章 単ドット式 PDV の現地検証

### 6.1 はじめに

PDV は電源を使用しない簡易な測定方法として開発されたが現地測定に用いた例は少ない。理想的な条件で行う室内実験と異なり自然環境中における地下水質によって測定に影響を受けるため現地適用試験を行い孔外の pH、透水係数の影響を補正し流向流速測定を行い PDV の現地適用性について確認を行った。

### 6.2 研究方法

#### 6.2.1 研究対象地域

サロベツ湿原は北海道天塩郡豊富町に広がる日本最大の高層湿原である<sup>1)</sup> (図 6-1)。サロベツ湿原の高層湿原の下層は泥炭土である。泥炭は有機物の分解速度が遅く植物の遺骸などが十分に分解されず堆積することで形成され、茶褐色をした有機物に富んだ土壌である<sup>2)</sup>。一般に泥炭地の地下水は泥炭由来による腐植質が多く含まれ褐色を呈する (図 6-2)。

北海道天塩郡サロベツ湿原環境省特別実験区 (図 6-1) において地下水流向流速の現地測定を行った。本調査地は旧ビジターセンターのあった上サロベツ原生花園の遊歩道付近であり、遊歩道わきで調査を行った。調査地は泥炭ドームの頂部から辺縁の自然排水が行われる湿地溝を含む。

また、サロベツ川からは 1500 m 程度離れており、標高は 5~6 m でゆるやかに北西に向かって傾斜している。当地には 1993 年に設置された 5 地点の地下水観測井が存在し、東から E 地点 (標高 6.12 m)、W 地点 (標高 5.92 m)、W' 地点 (標高 5.74 m)、WW 地点 (標高 5.24 m)、NC 地点 (標高 4.91 m) と命名されている。E 地点は泥炭ドームの頂部であるが、WW 地点は泥炭ドームの縁辺に位置し、NC 地点は泥炭ドームから地下水が集まる自然排水路となる、本研究では W 地点において PDV と熱量式流向流速計の比較試験、木道周辺で PDV による地下水流向流速の空間分布の一斉調査を行った。W 地点を含む泥炭ドーム部について、地表から 0.2 m 程度はミズゴケで覆われており、0.2 m 以下は泥炭となっている。地下水位の変動から求められた空隙率は地表 0.15 m まで 0.8~0.2 であり、地表面から急激に減少することがわかっている<sup>1)</sup>。



図 6-1 北海道天塩郡サロベツ湿原環境省特別実験区 (Google earth)



図 6-2 サロベツ湿原環境省特別実験区で採水した地下水

### 6.2.2 透水係数測定方法

現地流速を求めるために現地揚水試験を行った。泥炭地盤を含めた透水係数は変水位透水試験<sup>3)</sup>によって求めた。E 地点(No.6), W 地点(No.7), W'地点(No.5), WW 地点(No.2), NC 地点(No.1)の既存の地下水観測井 (VP65, 深度 0.2 m, 0.5 m, 1.0 m, 1.5 m, 2.0 m) を用いたほか, 地盤に 1 インチガス管 (内径 2.76 cm) を刺し, 2.5 m と 3 m の透水係数を求めた。透水係数の算出式を式(6-1), 式(6-2)に示す。

$$a = \frac{\log(s_1 / s_2)}{t_2 - t_1} \quad (6-1)$$

ここで  $s_i$ : 時間  $t_i$  における水位差,  $a$ : 定数とする。式(6-1)で求めた定数  $a$  を用いて式(5-2)より透水係数  $k$  を算出した。

$$k = \frac{(2.3de)^2}{8L} \log\left(\frac{2L}{D}\right) a \quad (6-2)$$

ここで,  $k$ : 透水係数( $\text{m s}^{-1}$ ),  $de$ : 等価内径(m),  $L$ : 試験区間長(m),  $D$ : 試験区間の孔径(m)である。揚水試験では地下水位が再度安定するまでに時間を要するため PDV の計測終了後に行った。その他の透水係数を計測する方法としては現地の土質試料を採取し室内試験を行う方法がある。しかし, 観測井近傍で土質試料を採取した場合, 周辺の地下水流動場に影響を与える可能性がある。観測井から離れた点で行う場合は, ストレーナと同じ透水層を採取する必要がある。

透水係数は測定を行う観測井の位置, 深度, 周辺の土質状況によって 100~1000 倍程度の変化があるため測定は複数地点での計測を行うことが望ましい。透水係数を計測していない測点については近傍の透水係数を用いた。近傍に透水係数の測定点がない場合は 2 地点の透水係数の平均とした(表 6-1)。



表 6-1 透水係数根拠 (NC0.5 は NC 地点 0.5m 深の意)

測点	透水係数根拠	
No.1	NC0.5	
No.2	WW0.5	
No.3	WW0.5-W'0.5	二点平均
No.4	WW0.5-W'0.5	二点平均
No.5	W'0.5	
No.6	E0.2	
No.7	W0.2	
No.8	W'0.5-W0.2	二点平均
No.9	W0.2	
No.10	W'0.5	
No.11	W'0.5-W0.2	二点平均

### 6.2.3 熱量式流速計との比較試験

2017年7月16日～17日, 2018年4月29日～30日, 7月21～22日, 10月6日～7日, 2019年10月12日～14日にW地点において熱量式地下水流向流速計(アレック電子, GFD-3)とPDVの比較実験を行った。GFD-3は, 流速の測定可能範囲が0.01～1.0 cm/minであり, 流向の測定精度は±10°, 流速の測定精度は±10%である。熱量式地下水流向流速計(0.2 m)は, W地点に設置したPDV用の観測井(ストレーナ深度0.2 m)と2 m間隔をあげ設置した。

PDVは50 mm径用3本ロッド型(図6-4)を使用し, 1回の計測時間は60分とした。計測後のペーパーディスクは紙面の状態から単一チャンネル(G215)を用いて二値化処理を行い, 流向流速を求めた。求めた流速は第2章における孔内外の透水係数による補正と第4章におけるpHによる補正を行った。

### 6.2.4 PDVによる一斉計測方法

2017年7月16日～17日にPDV計測地点を(図6-3)に示すNo.1～No.11の計11地点に設置した。このうちNo.1地点はNC地点, No.9地点のNo.1～3地点の地表付近には湿地溝が存在しており湿地溝の水位によって周辺に地下水が流出入している。表6-1に一斉計測時の観測地点の諸元を示す。用いたパイプは内径50 mmの塩化ビニルパイプ(以下VP50とする)であり計測深度は0.17-0.60 mであった。観測井の開口率は20.8%である。P7地点(W地点)には北側にP7-N地点, 南側側にはP7-S地点と隣接して観測井を設けた。また, PDVの計測前にpHと水位計測を行った。観測井の座標と周辺地盤高はRTK-GPSで計測した。透水係数は, 全11の計測地点のうち計6地点で, 観測井に水位計を投入後に時間変化を測定することによる変水位法で測定した。

PDVによる計測を2017年7月16日に2セッション(S1;9:13-13:01, S2;14:55-18:20)をNo.2～11の合計10地点で行った。PDVは50 mm径用3本ロッド型を使用し, 1回の計測時間は60分とした。求めた流速は6.2.3と同様に透水係数とpHによる補正を行った。

### 6.2.5 地下水位の解析方法

PDV の計測結果と比較を行うため水位測定方を用いて流向流速を求めた. No.1~11 の観測井内水位と北西部にある水路水位から Kriging 法を用いて地下水位コンターを作成し動水勾配の最大傾斜方向を流向, また動水勾配と透水係数からダルシー流速を算出した.

### 6.2.6 PDV の解析方法

測定後のペーパーディスクは測定後のペーパーディスクは画用紙で挟み水分を除去した後風乾し, フラッドベッドスキャナ (EPSON GTX-830) を用いて電子化した. 紙面上の汚れが見られなかったことから第 5 章で述べた単一チャンネルにより二値化処理してテーリングを抽出, 重心移動距離から式(5-12)より流速を求めた.



図 6-3 サロベツ湿原 PDV 測定地点



図 6-4 50 mm 径用ロッド 3 本型 PDV(アクリル製)

表 6-2 一斉計測時の観測地点諸元

測点	X[m]	Y[m]	地盤高[m]	地下水位[m]	地下水面深度[m]※	計測深度[m]※
No.1	122773.397	-44732.615	4.99	4.67	-0.32	-0.59
No.2	122776.473	-44710.772	4.94	4.58	-0.36	-0.36
No.3	122791.685	-44670.297	5.47	5.36	-0.12	-0.35
No.4	122799.900	-44634.048	5.58	5.46	-0.12	-0.33
No.5	122810.383	-44598.756	5.70	5.58	-0.13	-0.28
No.6	122883.284	-44252.728	6.05	5.98	-0.08	-0.28
No.7	122847.909	-44425.814	5.91	5.84	-0.07	-0.15
No.8	122956.394	-44593.796	5.62	5.49	-0.13	-0.28
No.9	123029.894	-44500.303	5.68	5.55	-0.13	-0.28
No.10	122860.288	-44610.074	5.70	5.59	-0.11	-0.28
No.11	122831.463	-44520.208	5.83	5.75	-0.08	-0.28

※地盤高を0mとした

測点	水温[°C]	pH	EC[mS/m]	センサ	透水係数k[m/s]※1	透水係数補正	pH補正(Ls/L)
No.1	11.7	4.89	7.79	3本型	$6 \times 10^{-8}$	0.874	1.124
No.2	13.2	5.63	18.89	3本型	$9 \times 10^{-6}$	0.875	1.057
No.3	12.6	5.04	14.15	3本型	$5 \times 10^{-6}$	0.875	1.108
No.4	15.3	6.21	23.3	3本型	$5 \times 10^{-8}$	0.875	1.024
No.5	15.3	5.87	12.08	3本型	$8 \times 10^{-8}$	0.874	1.042
No.6	13.8	3.95	9.99	3本型	$2 \times 10^{-5}$	0.876	1.266
No.7	15.6	3.79	7.39	3本型	$1 \times 10^{-4}$	0.886	1.299
No.8	13.2	4.25	12.54	3本型	$6 \times 10^{-5}$	0.880	1.212
No.9	14.2	4.38	14.88	3本型	$1 \times 10^{-4}$	0.886	1.191
No.10	13.6	4.43	10.81	3本型	$8 \times 10^{-8}$	0.874	1.184
No.11	13.5	4.33	12.94	3本型	$6 \times 10^{-5}$	0.880	1.199

※1 表 6-1 による推定値

## 6.2.7 PDV 測定結果の補正方法

4.4.2 を用いて pH によるテーリング長の補正を行い、周辺地盤との透水係数差による孔内流速の補正を 2.3.1(6)に示したように実施した。現地計測を行った結果の補正フローを図 6-5 示す。

補正を行う際の pH は表 6-2 の値を用い式(4-10)からテーリングの補正を式(6-3)のように行った。

$$L_s = \frac{-0.0138(7.5)^2 + 0.2034(7.5) + 0.0176}{-0.0138pH^2 + 0.2034pH + 0.0176} L \quad (6-3)$$

ここで、 $L_s$ : 測点における pH 補正後のテーリングの重心移動距離、 $pH$ : ある点における地下水の pH、 $L$ : 補正前のテーリングの重心移動距離である。pH による補正を行った後に流速算出には計測時間 60 分における重心移動距離とダルシー流速の関係から作成した式(6-4)を用いて流速を算出した。

$$V_{PDV} = \frac{Ls}{12.751} \quad (6-4)$$

ここで、 $V_{PDV}$ : PDV を用いた計測結果流速(cm/min),  $Ls$ : pH 補正後のテーリングの重心移動距離 (cm)である.

流速補正は透水試験を行った結果から 3 本ロッド, 50 mm の補正係数の式(2-10)を用いて, 計測した深度における透水係数を使用し式(6-5)により算出した.

$$V_d = \frac{51.44k + 0.4246}{0.519} V_{PDV} \quad (6-5)$$

ここで、 $V_d$ :ダルシー流速(cm/min),  $k$ :現地透水係数(m/s),  $V_{PDV}$ : PDV を用いた流速の計測結果 (cm/min)となる.

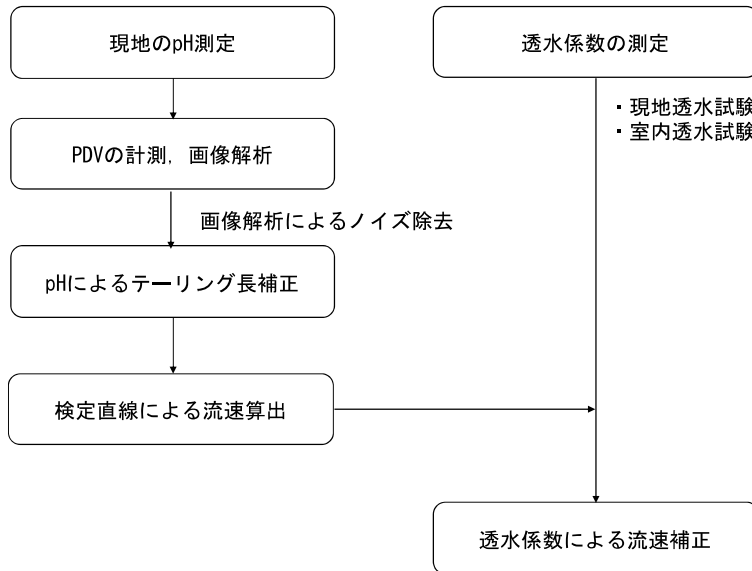


図 6-5 現地計測結果の補正フロー

## 6.3 研究結果

### 6.3.1 透水係数測定結果

表 6-2 に計測した透水係数の計測結果を示す. No.6, No.7 地点では表層の透水係数が  $10^{-5} \sim 10^{-4}$  m/s なのに対し, No.5 地点より西では  $10^{-8} \sim 10^{-6}$  m/s の透水係数となり, 非常に低い. かつ表層から下層まで透水係数が急激に減少する. このような差があるのは No.6, No.7 地点がミズゴケ域で未分解な泥炭を表層に擁するのに対して No.5 地点より西では表層の植生がササであり, やや分解の進んだ泥炭が堆積しており, 空隙率が鉛直方向に急激に低下する<sup>1)</sup>からであるとみられる.

表 6-2 測定地点における透水係数 ( $10^{-8}$ m/s)

深さ/m	E (No.6)	W (No.7)	W' (No.5)	WW (No.2)	NC (No.1)
0.2	1500	12000	-	-	-
0.5	2400	9400	7.6	930	5.7
1	2600	2400	2.6	15	18
1.5	-	620	34	130	800
2	450	610	70	100	180
2.5	92	2	1.4	15	300
3	-	4.8	3.3	1.8	79

### 6.3.2 熱量式流速計(GFD)との比較試験結果

GFD と PDV の流速測定結果を図 6-6 に示す。No.7 地点における深さ 0.2 m 地点の透水係数  $1.2 \times 10^{-4}$  m/s を用いて透水係数の補正を行なった。PDV の測定結果は未補正の場合と透水係数と pH による補正を行なった結果を示した。GFD と PDV の流速測定結果は、決定係数 0.8034 と高く正の相関が見られた。未補正の場合に比べ補正後は僅かに PDV の計測結果が大きくなった。これは GFD がダルシー流速を求める際に孔内外の透水係数差による補正を行わない影響があると考えられる。

測定日と GFD, PDV の流向差を図 6-7 に示す。2018 年 4 月から 10 月の GFD と PDV の流向差は大きく  $160^\circ$  近くの誤差が見られた。2018 年では標準偏差  $52.9^\circ$  , 2019 年では標準偏差  $35.1^\circ$  となった。

図 6-9 に PDV 流速と流向差の関係を示す。流速 0.02 cm/min 付近では流向角差が  $22.5^\circ$  付近となっている点が多く存在するが流速に関係なく誤差が大きい点が存在した。第 5 章で PDV の流向測定精度は計測時間 60 分では流速 0.05~0.06 cm/min で流向誤差は概ね  $\pm 22.5^\circ$  , 0.02~0.06 cm/min では  $\pm 30^\circ$  程度であり 0.01 cm/min では  $\pm 45^\circ$  を超える結果となっている。

このことから流速 0.01 cm/min 付近は低流速なため流向の測定限界以下となり測定精度が低下したため一致しなかったと考えられる。流速 0.02 cm/min 付近では流向流速共に計測結果が GFD と整合したと言える。流速 0.02 cm/min 以上で流向角差が大きくなった測定結果は PDV 自身の誤差によるものの他に PDV と GFD の計測の同時性が保てないことから流向に変化があった、GFD の測定の際に初期の温度平衡が保たれなかったといった要因が考えられる。

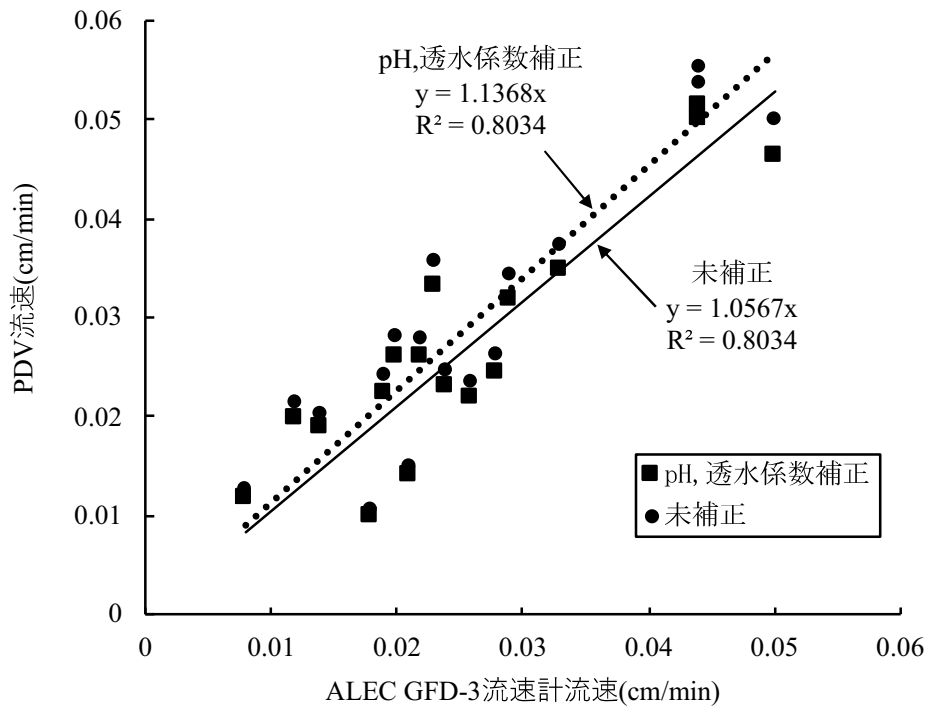


図 6-6 GFD と PDV の流速計測結果の関係

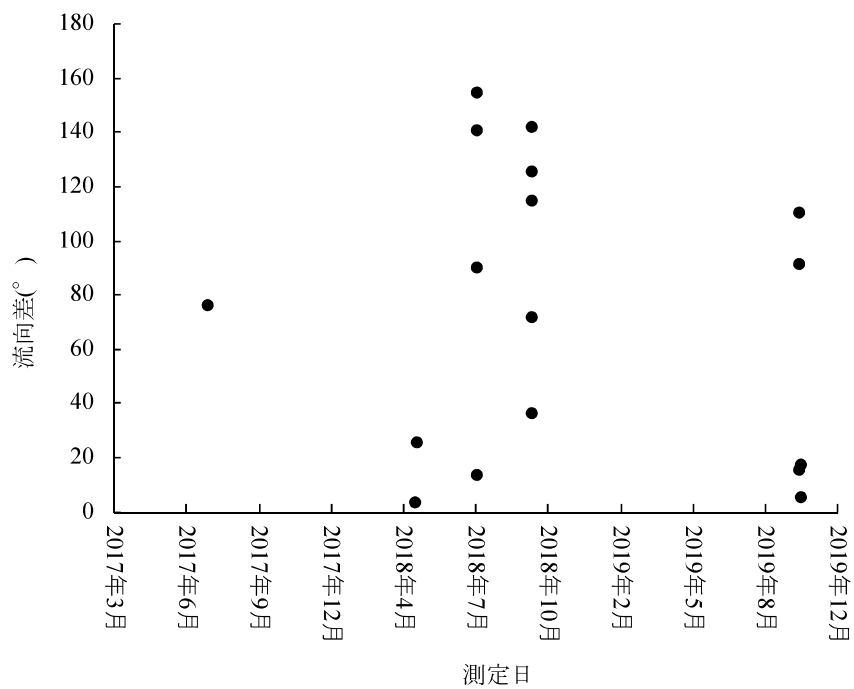


図 6-7 GFD と PDV の流向の差の測定結果

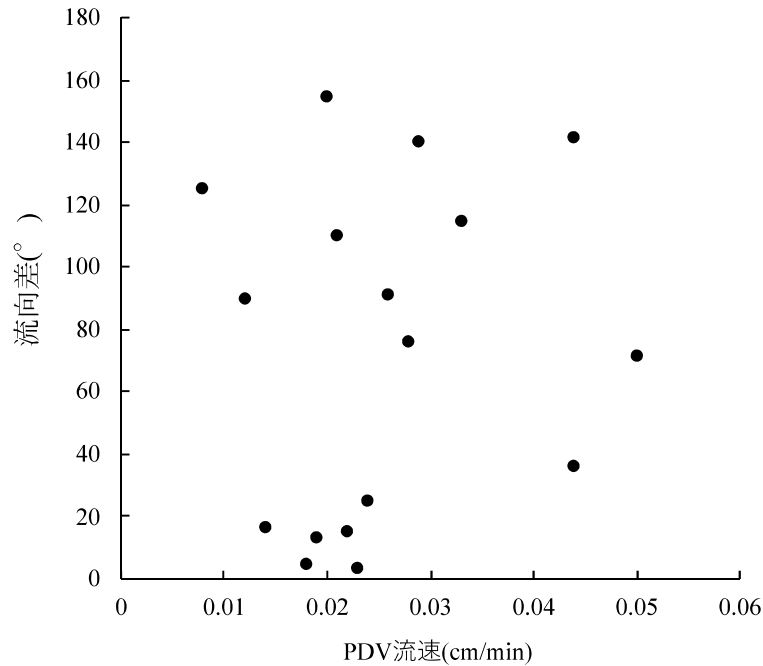


図 6-8 PDV 流速と流向差の関係

### 6.3.3 PDVによる流向流速測定結果

表 6-4 にサロベツ湿原における現地測定結果一覧, 図 6-9~18 に測定したペーパーディスクを示す. Session2 における No.2 地点での PDV の計測は中段ユニットにテーリングが発生しなかったため下段ユニットの結果を採用した.

図 6-18, 19 に地下水位から作成したコンター図を示す. コンターから算出した流向流速は PDV の測定結果と一致しない測点がいくつかみられた. しかし No.5, 7, 11 の流向差は 20°以内であり PDV の計測結果と一致したといえる. そのほかの測点における流向が一致しない原因として現地計測した水位を Kriging 法によって補完する際, 境界付近の No.6, 9 では周辺の水位データが不足しているため流向が一致しなかったと言える. また No.1~4 付近は湿地溝への流出入など地下水位の変化が複雑であるため測定した水位データだけでは局所的な流向の変化を再現できないため流向が一致しなかったと考えられる. 最も PDV の計測結果と整合した No.5, 7, 11 地点では上, 下流にその他の観測点があり緩やかなコンター図が得られている. No.5, 7, 11 付近は実際の地下水流動を再現できている可能性が高く Session1 の No.5 では PDV との流向誤差 10°以内と一致した.

コンター図から得られた局所的な動水勾配と現地透水係数から得られた流速は PDV の計測結果とオーダーが 1 ケタ違う結果となった. サロベツ湿原は土壌表層で鉛直的に透水係数が変化しているといわれている<sup>4)</sup>. このため流速がオーダーで一致しなかったと考えられる. 泥炭の透水係数は  $10^{-5} \sim 10^{-2}$  cm/s の間を取ったという研究報告<sup>2)</sup>もあり表層-20 cm での透水係数は変水位透水試験の結果より高い可能性が考えられた. このように透水係数が大きく変動する場では流速を推定することは非常に困難であるといえ, 流速を直接測定するメリットは大きい.

表 6-4 サロベツ湿原における PDV 測定結果 (2017. 7)

session	測点	流速(cm/min)			流向 (°)		
		コンター	PDV(pH,k補正後)	GFD	コンター	PDV	GFD
1	No.2	0.005	0.012		239.5	37.3	
	No.3	0.006	0.024		247.5	155.8	
	No.4	0.002	0.009		238.1	75.9	
	No.5	0.002	0.028		238.5	249.2	
	No.6	0.000	0.052		6.2	194.4	
	No.7	0.005	0.068	0.028	271.3	228.1	352.3
	No.8	0.014	0.033		299.6	247.6	
	No.9	0.001	0.035		309.2	241.6	
	No.10	0.002	0.046		281.5	228.2	
	No.11	0.001	0.021		255.7	228.2	
	2	No.2	0.006	0.000		214.5	125.0
No.3		0.006	0.025		244.9	321.2	
No.4		0.002	0.016		236.7	311.2	
No.5		0.002	0.022		238.8	250.0	
No.6		0.000	0.028		258.3	200.7	
No.7		0.005	0.034		269.6	253.2	
No.8		0.015	0.025		299.2	170.2	
No.9		0.001	0.049		311.9	277.2	
No.10		0.002	0.041		273.4	336.1	
No.11		0.001	0.034		253.9	259.8	

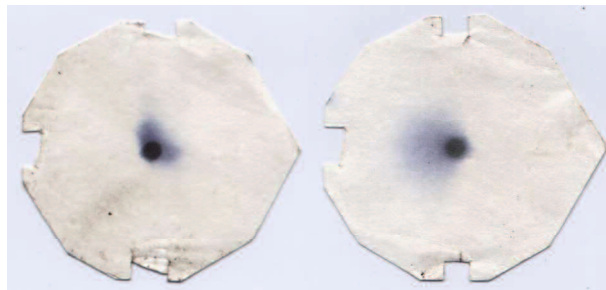


図 6-9 No.2 地点取得ペーパーディスク (左 : Session1, 右 : Session2, 下ユニット)

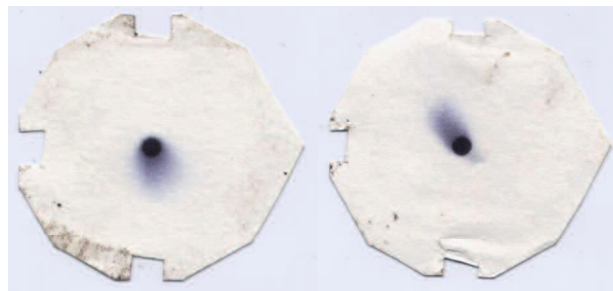


図 6-10 No.3 地点取得ペーパーディスク (左 : Session1, 右 : Session2)



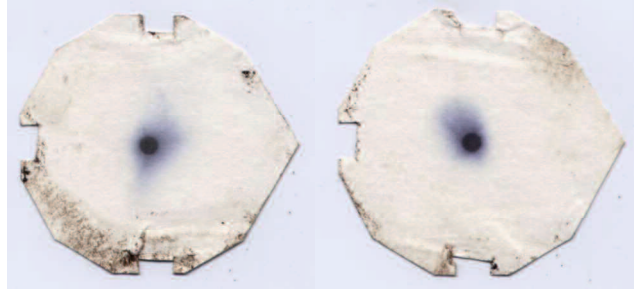


図 6-11 No.4 地点取得ペーパーディスク (左 : Session1, 右 : Session2)

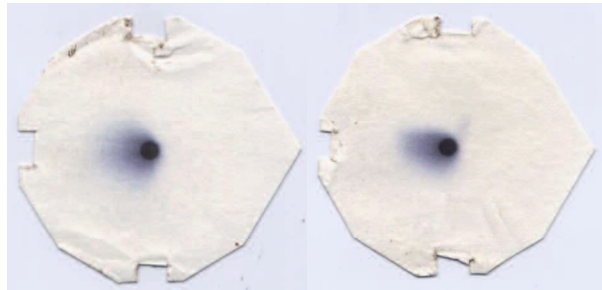


図 6-12 No.5 地点取得ペーパーディスク (左 : Session1, 右 : Session2)

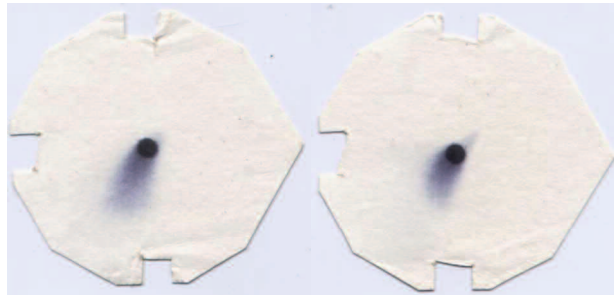


図 6-13 No.6 地点取得ペーパーディスク (左 : Session1, 右 : Session2)



図 6-14 No.7 地点取得ペーパーディスク (左 : Session1, 右 : Session2)

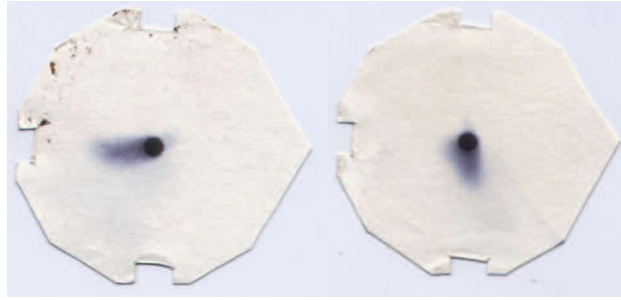


図 6-15 No.8 地点取得ペーパーディスク (左 : Session1, 右 : Session2)

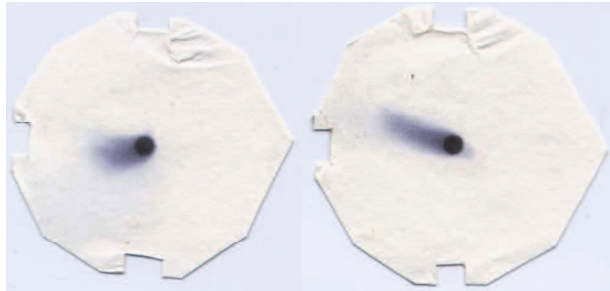


図 6-16 No.9 地点取得ペーパーディスク (左 : Session1, 右 : Session2)

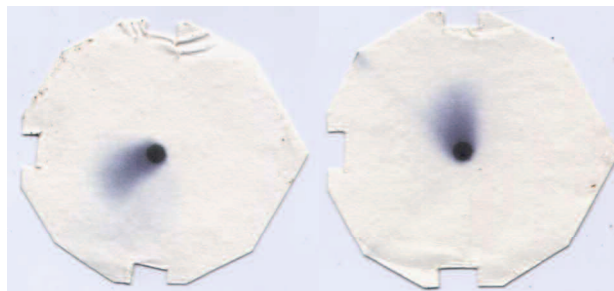


図 6-17 No.10 地点取得ペーパーディスク (左 : Session1, 右 : Session2)

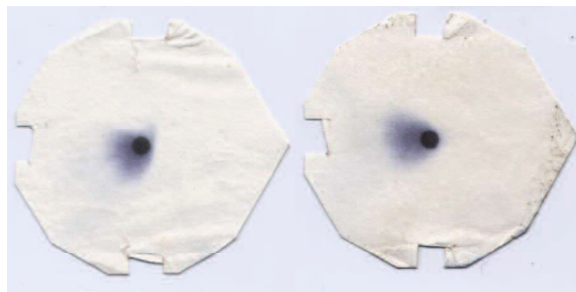


図 6-18 No.11 地点取得ペーパーディスク (左 : Session1, 右 : Session2)

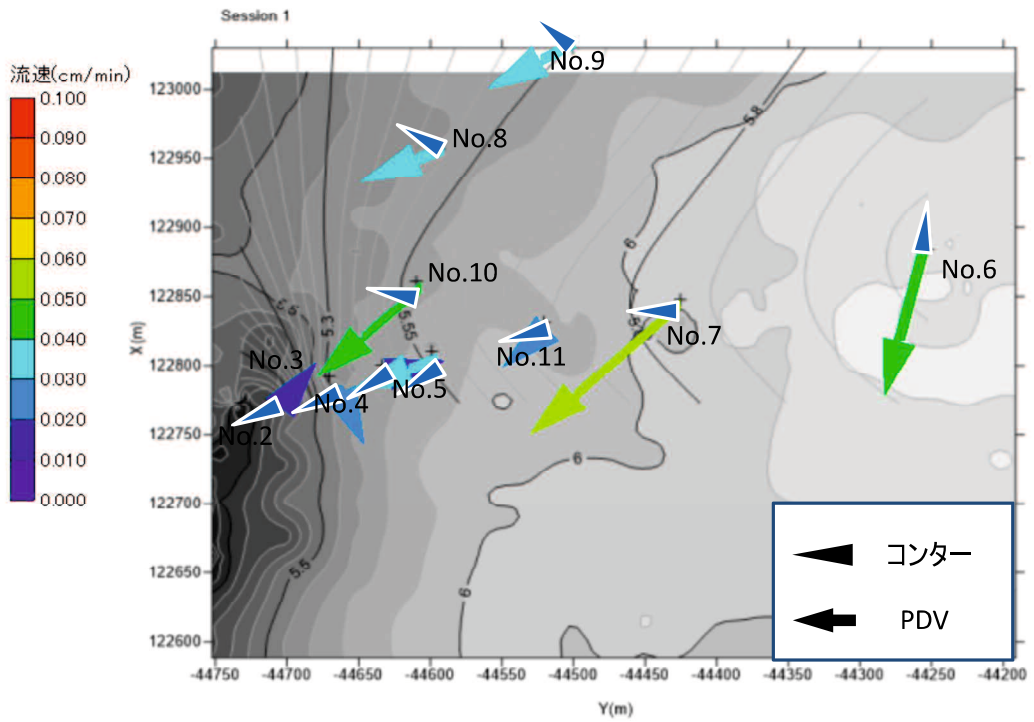


図 6-18 地下水水位コンターと流向流速の測定結果 Session1

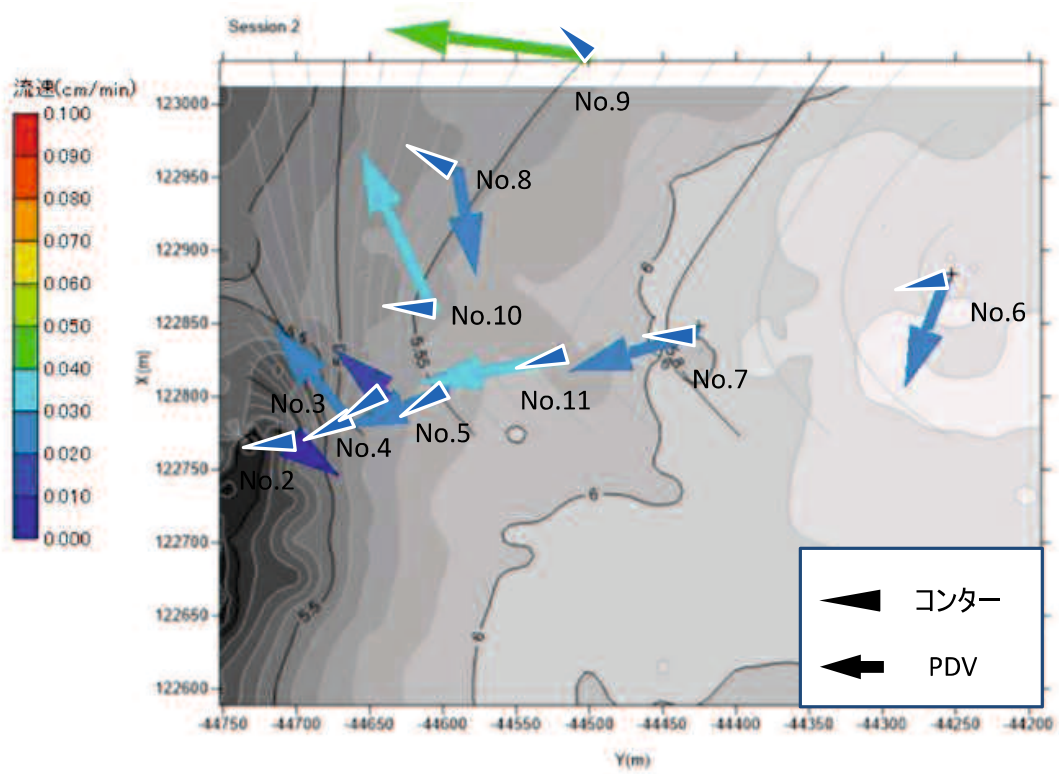


図 6-19 地下水水位コンターと流向流速の推定結果 Session2

## 6.4 まとめ

PDV は電源を使用しない簡易な測定方法として開発されたが現地検証を行った例は少なく、現地計測では地下水質によって測定に影響を受けるため PDV の現地適用性について北海道天塩郡豊富町サロベツ湿原で現地検証を行った。熱量式地下水流向流速計 GFD3 との比較では、流速は高い相関が確認されたが計測結果は PDV がやや高く GFD3 に比べて 1.14 倍程度高区計測された。それぞれの装置のもつ誤差要因の他に、GFD は孔内外の透水係数差による補正を行わないことが原因と考えられた。しかしながら現地の流速 0.02 cm/min 程度の流速においては流向流速共に計測結果が GFD とほぼ整合したと言える。さらに低流速の 0.01 cm/min 付近では流向の誤差が大きくなったが、これは PDV の流向の測定限界以下であるため流向が一致しなかったと考えられた。

さらに PDV による計測と水位測定からコンター図による流向を比較した。その結果、複数の計測地点に囲まれた 3 地点は PDV の計測結果と流向が整合した。このためこれらの点付近は実際の地下水流動に伴う流向を再現できている可能性が高く、Session1 の No.5 地点では PDV との流向誤差が 10°以内ときわめてよく一致した。そのほかの測点で流向はあまり一致しなかったが、これは局所的な水位の変化や周囲の水位データが不足していたことが原因であると考えられた。一方でコンターから算出した流速と PDV で計測された流速はオーダーが合わない結果となった。用いた透水係数が適切ではなかった可能性が高いが、空間的変動が極めて大きい透水係数と動水勾配から正確な地下水流速を推定することは難しく、直接流向流速を測定することが望ましい。

### 参考文献

- 1) 富士田裕子編著：サロベツ湿原と稚咲内砂丘林帯湖沼群，北海道大学出版会，2014.
- 2) 亀山貴宏，坂本孝博，五十嵐敏文，朝倉國臣，若浜洋，石島洋二：サロベツ湿原南部における泥炭の堆積年代とその物理化学的特性および透水特性，地下水学会誌，第 48 卷，第 1 号，pp.3-15，2006.
- 3) 地盤工学会：地盤調査の方法と解説，pp.377-393，2004.
- 4) 岡田操，井上京：泥炭の水理特性を反映した地下水流動モデル，湿地研究，1 巻，p. 3-15，2010.

## 第7章 目視による迅速な計測方法の確立

### 7.1 はじめに

PDVは検定直線から現地で得られたテーリングを解析し、テーリングの発生方向から流向、テーリングの長さから流速を推定するものである。従来の解析方法ではスキャナを用いて画像解析を行わなければ測定結果が得られないため、現地ではすぐに測定結果が得られなかった。現地で測定結果が直ちに得られれば、測定箇所の再選定がすぐに行うことが可能となり地下水流向流速計測の迅速化が可能となる。さらに、測定から解析を一貫して電子機器を使用せずに測定可能となる。本章では目視でテーリングを読み取ることで測定から解析を一貫して電源を使用しない流向流速測定手法開発を目的とする。画像解析では画一的に可能であったテーリングの濃度の読み取りと解析を可能な限り個人差が少なく再現性の高い方法で行う必要がある。

### 7.2 目視におけるテーリング長の定義について

PDVは測定を行ったペーパーディスクを電子化し画像解析から幾何的に重心位置や楕円体近似長径などを求めるものである。しかし目視でこれらのデータを取得することは困難であるため、新たなテーリング項目の定義が必要となった。そこで図7-1に示す $L_s$ を“解析テーリング長”として新規に定義した。解析テーリング長はテーリング最大発生方向の下流ドット端からテーリング端までの長さとした。目視で測定を行った解析テーリング長と比較するため、画像解析で得られたデータを用いて式(7-1)で画像解析による解析テーリング長を算出した。

$$L_s = L_G - \frac{R}{2} + \frac{D}{2} \quad (7-1)$$

ここで $L_s$ :解析テーリング長(cm)、 $L_G$ :重心移動距離(cm)、 $R$ :ドット直径(cm)、 $D$ :楕円体近似長径(cm)である。

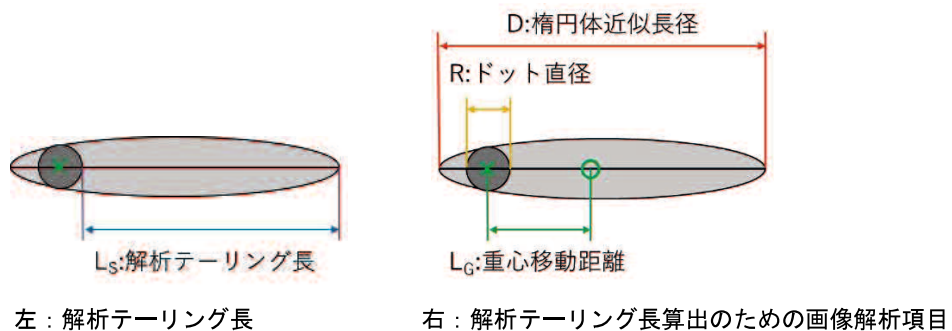


図7-1 目視用解析テーリング長の概要

## 7.3 研究方法

### 7.3.1 官能試験用サンプルの取得方法

テーリングの終点を目視により判定する官能試験を実施するためのサンプルとして50mm径用3本ロッド型PDVを用いて5章で示した室内実験水槽を用いて測定を行った。表7-1に官能試験用サンプル取得条件一覧を示す。設定流向を90°としそれぞれの測定時間と設定流速において各3回測定を行った。取得したペーパーディスクは乾燥後、フラッドヘッドスキャナを用いて電子化し、オープンソースの画像解析ソフトimage-Jを用いて測定前のドットと測定後のテーリングごとにRGBカラーモデルを用いて2値化処理を行った。取得した画像をRGB分解してG (Green) の215以下の輝度をテーリング、100以下の輝度を初期ドットとして2値化処理を行った。2値化した画像を粒子解析し楕円体近似長径、重心移動距離を取得し解析テーリング長を算出した。

表7-1 官能試験用サンプル取得条件

設定流速 (cm/min)	測定時間 (min)		
	5	30	60
0.01			○
0.02		○	○
0.03		○	○
0.04		○	○
0.05			○
0.06		○	○
0.07		○	○
0.08		○	
0.1	○	○	
0.3	○		
0.5	○		
0.7	○		
0.9			
1	○		

### 7.3.2 テーリング判定用基準紙の作成方法

目視でテーリング長判定を行う際の問題としてテーリングの先端のインクの濃度が低くなるため判別が困難となり、読み取りの際に個人差が大きくなってしまふことがある。先行研究では目視で測定したペーパーディスクを用いてテーリングの外径をパネルに読み取ってもらいテーリングと白紙を目視で識別可能な輝度である可視相当閾値を求めたり、以下にその求め方を述べる。

#### (1) 可視相当閾値の算出方法 (官能試験A)

小野らりが求めた可相当閾値の算出方法は以下のとおりである。室内実験水槽で測定時間5分、流速を0.1, 0.3, 0.5, 0.7, 0.9, 1.1, 1.3, 1.5 cm/minの8パターンで各3回測定を行った。乾燥したペ

ーパーディスクを官能分析に供した。官能試験Aは室内の蛍光灯照明下で行い、テーリング部分の判定にペーパーディスクの外形とドットの外形を印刷した透明なフィルムを使用した。(図7-2)。パネルには測定後のペーパーディスクの上からフィルムを被せ目視でテーリングと判定できた部分をフェルトペンで輪郭をフィルムに記録し、スキャナを用いて600 dpiで電子化し、画像解析を行いテーリングと判定された部分の面積とフェレ径を取得した。

## (2) 可視相当閾値の推定および定規による測定方法 (官能試験B)

官能試験で使用したペーパーディスクはあらかじめ電子化・RGB分解してGreenの輝度を190, 200, 210, 220, 225以下の5段階で変化させて2値化を行い、面積とフェレ径を取得した。フェレ径と閾値の関係式と面積と閾値の関係式(図7-3)から、解の公式を用いて官能試験でパネルが判定したフェレ径を閾値に変換した。これを各流速について行い平均したものを可視相当閾値とした。フェレ径から推定した可視相当閾値はGreen 224.4, 面積から推定した可視相当閾値はGreen 223.4となった。表7-2に可視相当閾値の推定結果を示す。しかし、この可視相当閾値から検定直線を作成し、解析テーリング長からこれを流速に変換する定規を作成して17名のパネルを対象に8段階の流速を測定する官能試験Bを行ったところ、図7-4や図7-5のように測定時間が長時間ないし高流速でテーリング長(フェレ径)が増加するにつれSDもRMSEも増大し、判定結果の個人差が大きくなったことがわかった。

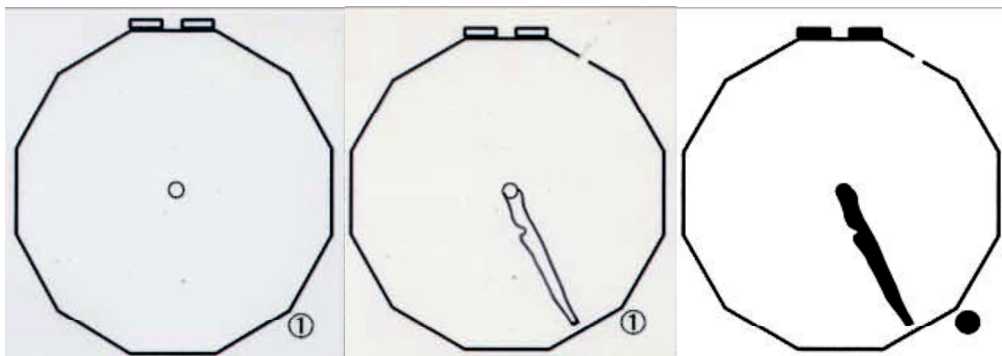


図7-2 官能試験テーリング判定フィルム (左：試験前, 中：試験後, 右：画像解析後)

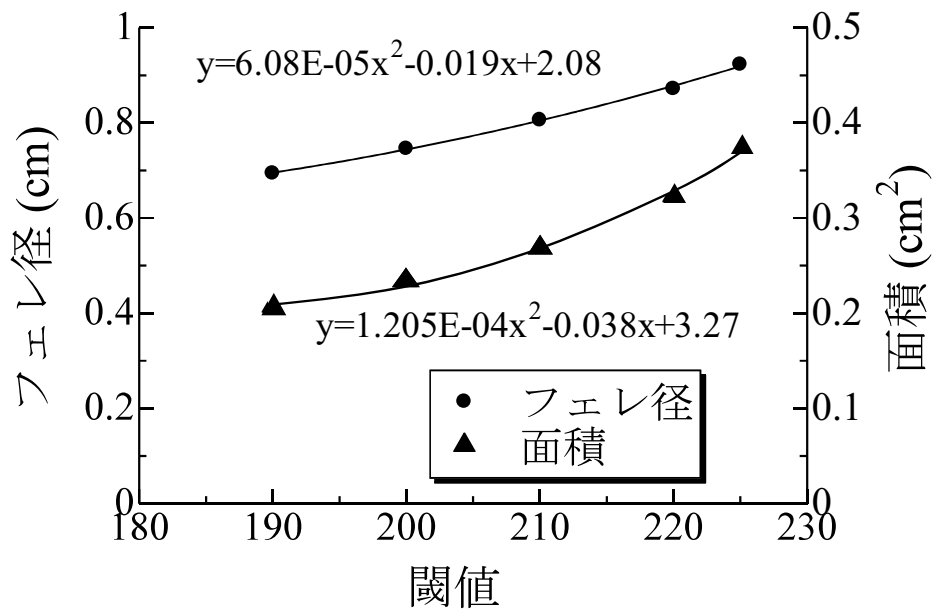


図7-3 官能試験Aにおける流速0.3 cm/minで測定したペーパーディスクのフェレ径, 面積と閾値の関係

表7-2 可視相当閾値の推定結果

	フェレ径	面積
平均値	224.4	223.4
標準偏差	7.88	6.88

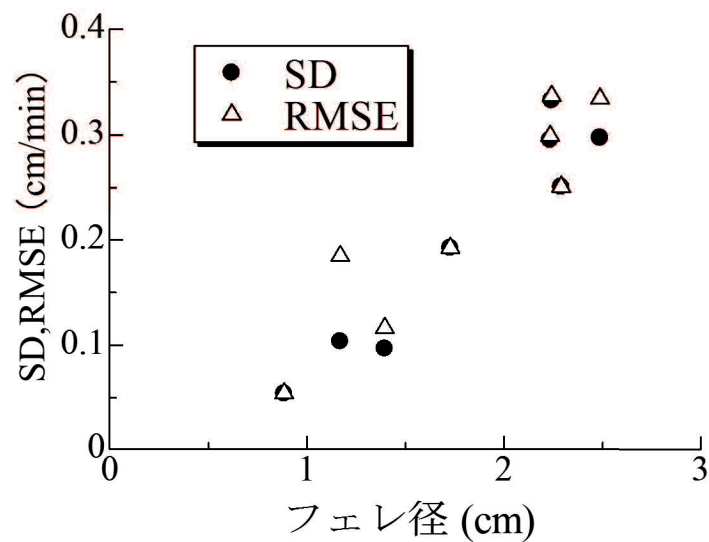


図7-4 官能試験Bによる流速の測定結果の標準偏差(SD)と二乗平均誤差(RMSE) とフェレ径の関係 (流速8段階, パネル17名)



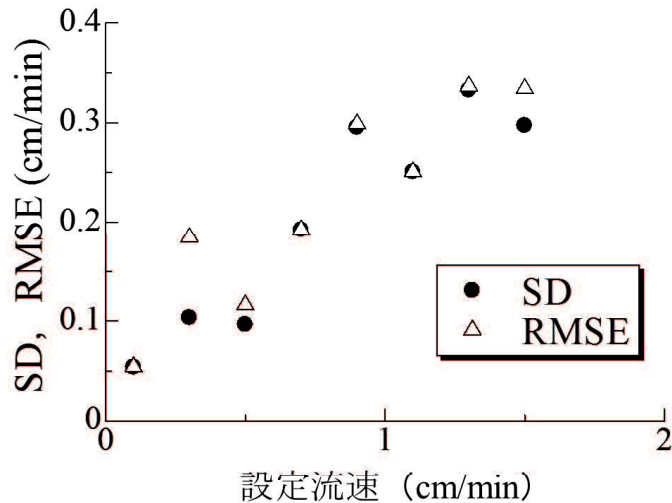


図7-5 官能試験Bによる流速測定結果の標準偏差(SD)と二乗平均誤差(RMSE)と流速の関係  
(流速8段階, パネル17名)

### (3) テーリング判定用基準紙の作成方法

そこで目視判定の個人差を低減するためにテーリングの判定を行う基準となる輝度を印刷した基準紙を作成した。取得した目視用のサンプルからテーリングの終端をヒストグラム機能でRGBの各チャンネルのMode(最頻値)の値をそれぞれ取得しその平均値をテーリング端部の輝度とした(図7-6)。しかし、そのままそれらの輝度をRGBで表現しプリンタで画用紙に出力を行った場合、プリンタの性能や使用するインクによっては色味が変化してしまい、テーリング端部の色とは異なるものとなる。そこで、網羅的にRGB値を組み合わせ出力した画像とテーリング端部の色を比較、テーリング端部に近い色を持つ画像を出力したRGB値を逆探索することにした。RGB値を網羅的に組み合わせ、正方形セルを並べた画像を作成するプログラム(make Color Cells)を作成してRGBを段階的に変化させたセルを網羅的に作成し印刷した(図7-7)。セルは1 cm四方の正方形とし、RGB(200,200,200)からRGB(240,240,240)の範囲で全ての組み合わせを作成した。その画像をプリンタで出力し、フラッドベットスキャナを用いて電子化した。画像解析でセル群の中から基準紙輝度と同じ輝度のセルを選択しこれを基準紙作成用輝度とした。基準紙作成用輝度は、使用するプリンタ固有の色合いの変化によって変動するため、プリンタや出力方法を変更する場合は再度セル群を出力し、電子化後画像解析から適切なセルを選定しなければならない。図7-8に選定されたセルの情報に基づいて作成された基準紙を示す。

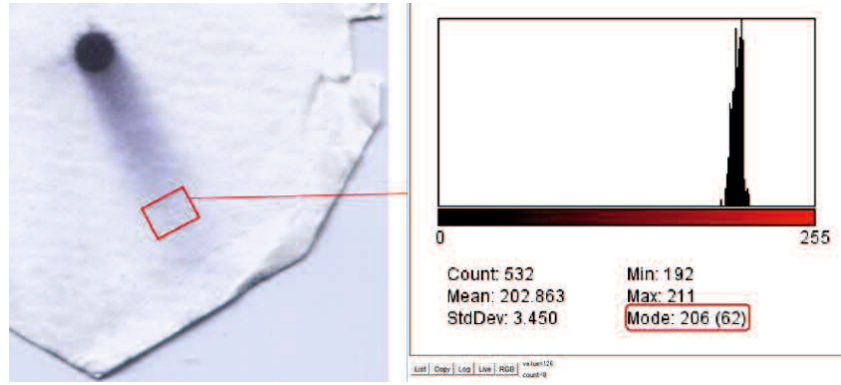


図 7-6 テーリング終端部輝度測定箇所

表 7-3 テーリング終端の輝度の最頻値

	R	G	B
5min	220	214	209
30, 60min	207	215	234



図 7-7 make Color Cells を用いて作成したセル群



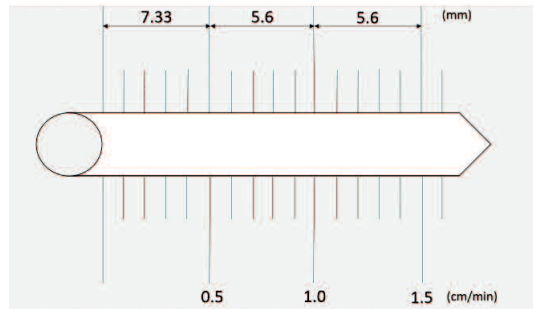
測定時間 5 分 (R : 242, G : 245, B : 245)

測定時間 30 分, 60 分 (R : 237, G : 246, B : 251)

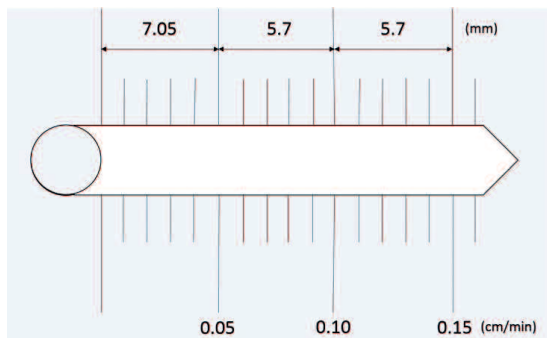
図7-8 選定された輝度の条件に基づいて作られたテーリング判定用基準紙

### 7.3.3 流速測定スケールの作成方法

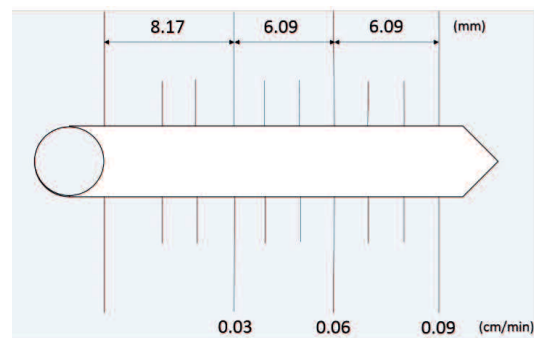
7.3.1で取得した官能試験サンプルの測定時間5, 30, 60分における解析テーリング長と設定流速から検定直線を作成した。検定直線から最小目盛りを測定時間5分で0.1 cm/min, 測定時間30分, 60分では最初目盛りを0.01 cm/minとして目視で読み取ったテーリングを流速に変換する流速測定スケールを作成した。測定の際に基準紙の色とテーリングの色を比較し読み取るために7.3.2で作成した基準紙用輝度で着色した画用紙に目盛りを印刷した。作成した流速スケールを図7-9に示す。



流速測定スケール(測定時間 5分)



流速測定スケール(測定時間 30分)



流速測定スケール定規(測定時間 60分)

図 7-9 目視でテーリング長を測定するための流速測定スケール

### 7.3.4 流速測定スケールを用いた目視による流向流速測定方法（官能試験C）

7.3.1で取得した官能試験用サンプルを官能試験Cに供した。18名のパネルで蛍光灯照明下において官能試験を行った。

#### (1) 目視による流速測定スケールを用いた流速測定方法

作成したスケールを用いて、測定時間5, 30, 60分それぞれの取得したサンプル合計63枚を使用し、20代男女18名のパネルを対象に官能試験を行った。図7-10で示すようにスケールに印刷したドット外形をペーパーディスクのドットにあわせ、目視でテーリングの色が基準紙の色から違うと判断した部分を最小目盛り0.1 cm/minの精度で読み取った。目視による流速の判定には基準紙の

影響を判定するために定規に基準紙を使用した場合と使用しなかった場合に分けた。流速の判定はまず基準紙を使用しない場合で行い，1カ月以上の期間を空け同じパネルに基準紙を使用し試験を行なった。試験の際はサンプルの測定順を変更し，パネルの経験による測定精度の向上がない様に配慮した。

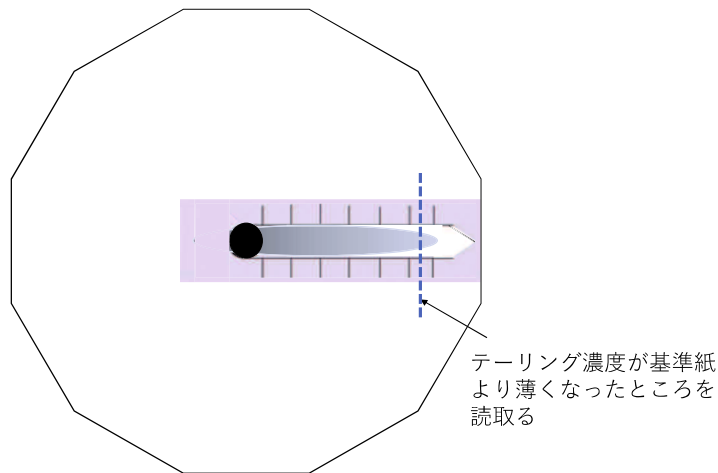


図7-10 流速の目視測定方法

(2) 目視による流向測定方法

流向を，時計回りを正としてテーリングの最大発生方位1°の目盛りまで読み取った。図7-11に，流向の測定手方法を示す。測定の際はコンパスの針を南北線に合わせた。コンパスの本体をテーリングの方向に合わせ，白線上の数値（方位角）を読み取った。

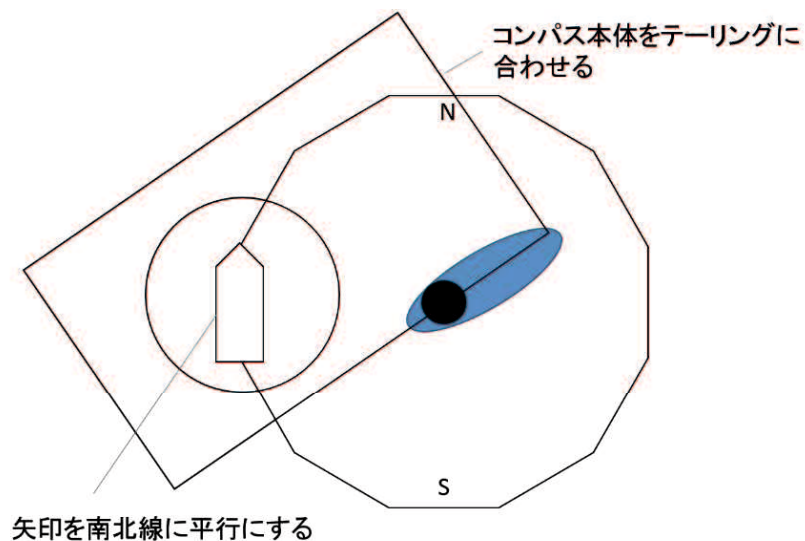


図7-11 流向の目視測定方法

### 7.3.5 官能試験結果の評価方法

目視測定によって取得したデータと画像解析によって取得したデータから標準偏差 (SD) と二乗根平均誤差 (RMSE) を求めた。RMSE の算出式を式(4-2)に示す。

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (V_i - V)^2} \quad (7-2)$$

ここで、 $RMSE$  : 二乗根平均誤差 (cm/min),  $n$  : データ数,  $V_i$  : 目視測定流速(cm/min),  $V$  : 設定流速(cm/min)である。測定誤差を式 (7-3) より求めた。

$$A = \frac{RMSE}{V} \times 100 \quad (7-3)$$

ここで、 $A$  : 測定誤差 (%),  $V$  : 設定流速 (cm/min) である。

## 7.4 研究結果

### 7.4.1 官能試験用サンプルの取得結果

官能試験用サンプルから作成した解析テーリング長とダルシー流速の関係を図7-12~14にそれぞれ示す。近似直線から作成した測定時間5, 30, 60分の流速換算式を式(7-4)~(7-6)に示す。

$$\text{測定時間5分} : L = 1.094v + 0.1880 \quad (7-4)$$

$$\text{測定時間30分} : L = 12.813v + 0.0238 \quad (7-5)$$

$$\text{測定時間60分} : L = 20.317v + 0.2073 \quad (7-6)$$

ここで、 $L$  : 解析テーリング長(cm),  $v$  : ダルシー流速(cm/min)である。測定時間5分で最小目盛を0.1 cm/min, 測定時間30, 60分では最小目盛を0.01 cm/minとして作成した。測定時間5分はドット端から1.9 mmを測定下限とし,ドット外周から1.9 mm間隔をあげ目盛間隔1.1 mm,測定時間30分ではドット外周から目盛間隔1.3 mm, 測定時間60分ではドット外周から2.1 mmを流速0 cm/minとし目盛間隔2.1 mmで流速スケールを作成した。

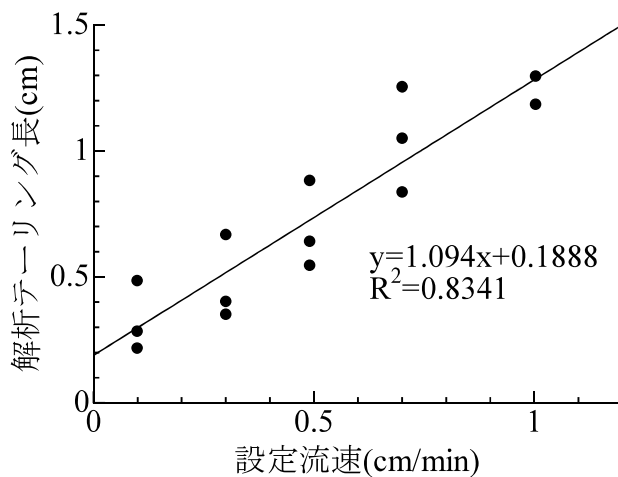


図7-12 測定時間5分における解析テーリング長とダルシー流速の関係

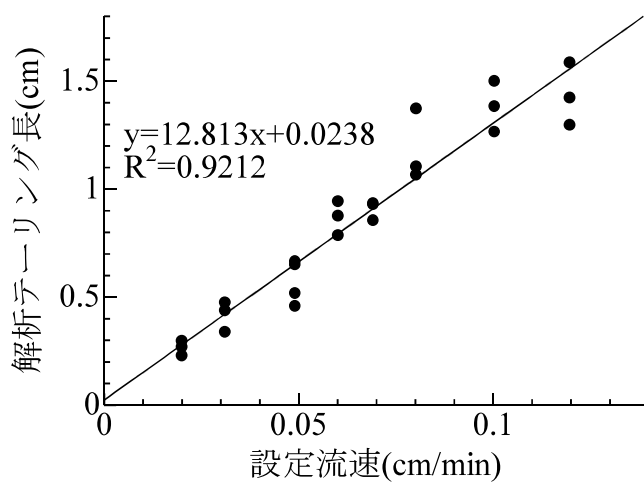


図7-13 測定時間30分における解析テーリング長とダルシー流速の関係

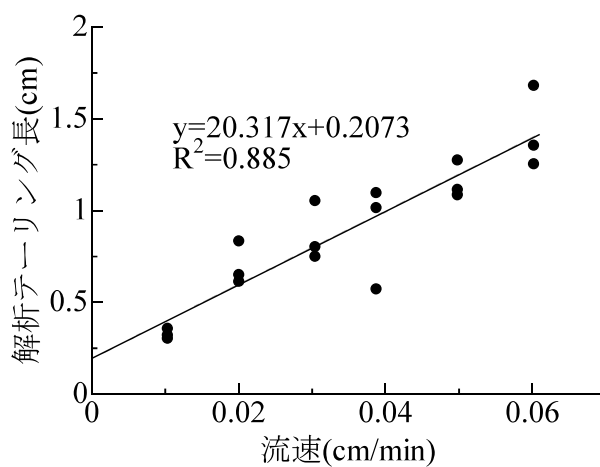


図7-14 測定時間60分における解析テーリング長とダルシー流速の関係

## 7.4.2 目視による流向流速測定結果（官能試験C）

### (1) 目視による流速測定スケールを用いた流速測定結果

図 7-15~17 に各測定時間の流速の目視測定結果の SD, RMSE と設定流速の関係を示した。流速が高くなるほど SD, RMSE が増加した。一方で流速スケールを用いた目視測定ではスケールを用いない場合に比べると SD, RMSE は減少した。図 7-18~20 に各測定時間の測定誤差を示した。流速の測定誤差は、測定時間 5 分における設定流速 0.2 cm/min 以下、測定時間 30 分、60 分における設定流速 0.01 cm/min 以下でそれぞれ 50%以上になった。低流速域ではインクの拡散の影響が大きく、目視測定が困難であったと考えられる。すべての測定時間において流速測定スケールを用いた場合測定誤差が小さくなる結果となった。表 7-5 に流速測定スケールを使用した際の各測定時間における測定可能流速帯と測定精度を示した。

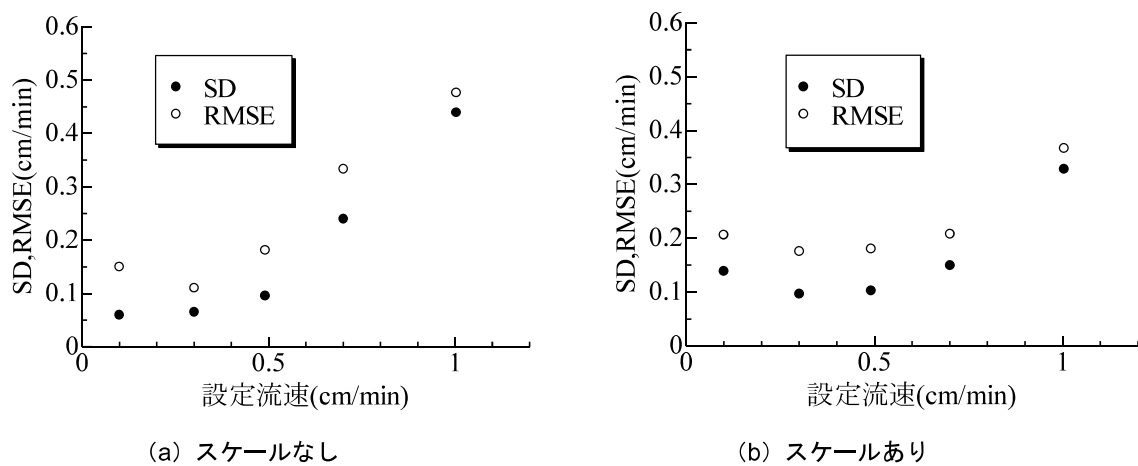


図 7-15 流速の測定結果の SD, RMSE と設定流速の関係（官能試験 C, 測定時間 5 分）

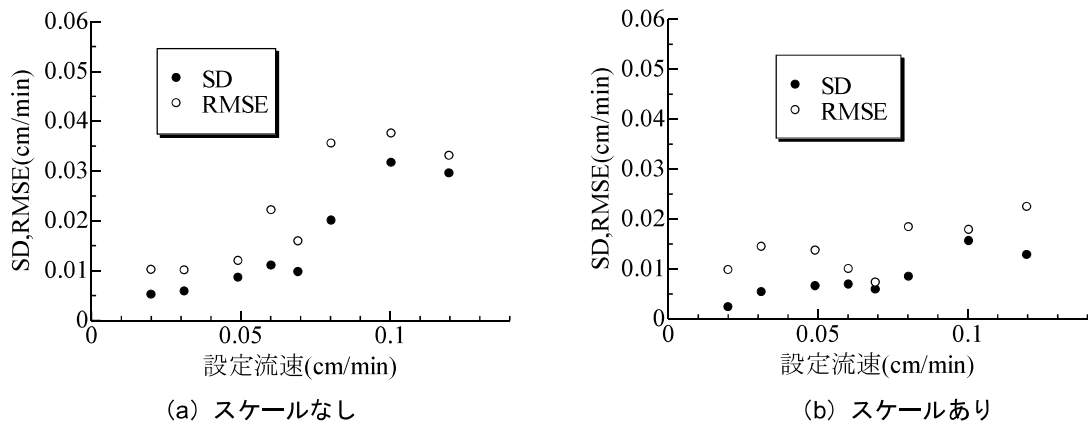


図 7-16 流速の測定結果の SD, RMSE と設定流速の関係（官能試験 C, 測定時間 30 分）

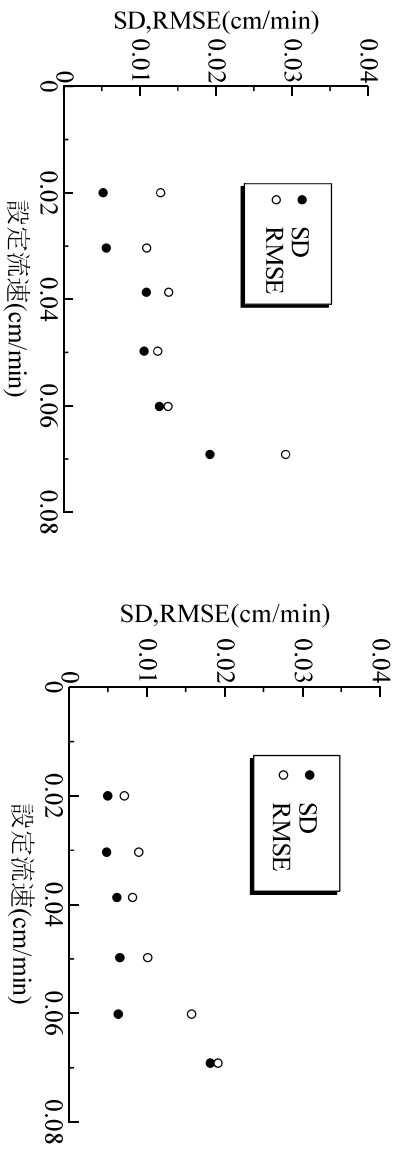


図 7-17 流速の測定結果の SD, RMSE と設定流速の関係 (官能試験 C, 測定時間 60 分)

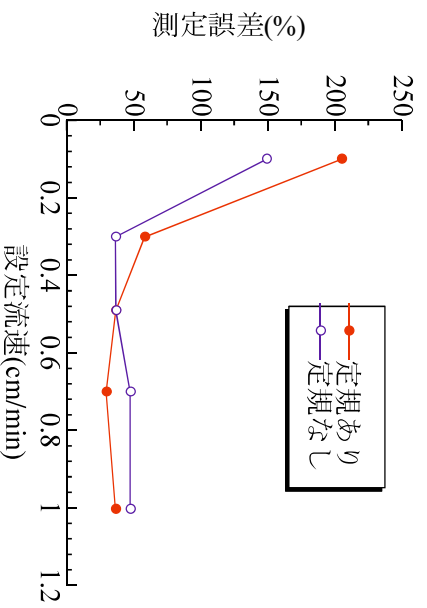


図 7-18 目視による流速の測定誤差 (官能試験 C, 測定時間 5 分)

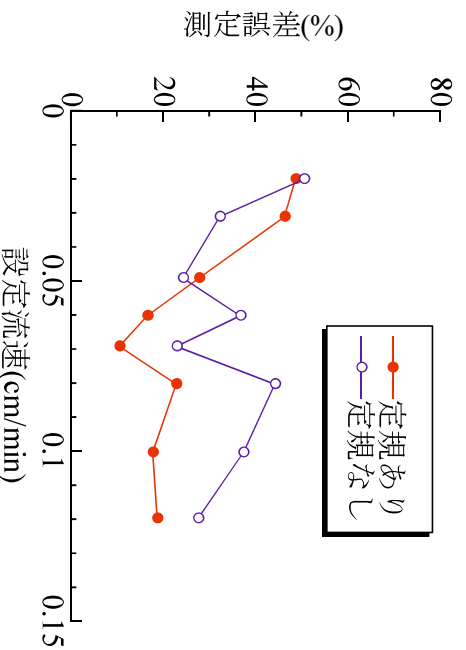


図 7-19 目視による流速の測定誤差 (官能試験 C, 測定時間 30 分)



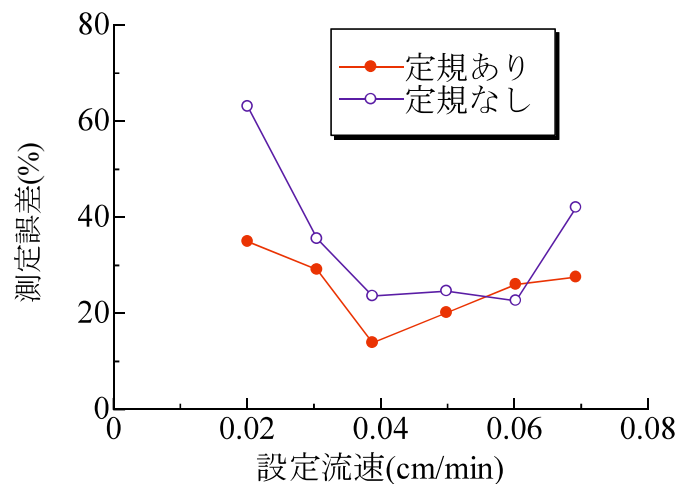


図 7-20 目視による流速の測定誤差（官能試験 C，測定時間 60 分）

表 7-4 各測定時間の測定可能流速帯と測定誤差（スケールあり）

測定時間(min)	測定流速(cm/min)	測定誤差(%)
5	0.4~1.0	40
30	0.04~0.12	30
60	0.03~0.07	30

## (2) 目視による流向測定結果

図 7-21~23 に目視による流向測定結果の SD, RMSE と流速, 解析テーリング長の関係を示した。この際の RMSE は画像解析を行って算出した流向との誤差の評価である。流向の目視測定結果は測定時間 5 分~60 分において、高流速あるいはテーリング長の増大に応じて SD, RMSE が小さくなることが分かった。測定時間 5 分~60 分において解析テーリング長が 0.6 cm 以上の場合にはばらつきが少なく、 $\pm 20^\circ$  以内の精度で測定可能であった。低流速あるいは解析テーリング長が短い場合、パネルが流向を判定する際に基準となるテーリングの最大発生方向を得る事が難しく、それによって測定誤差が増大しパネルごとのばらつきも大きくなったと考えられた。

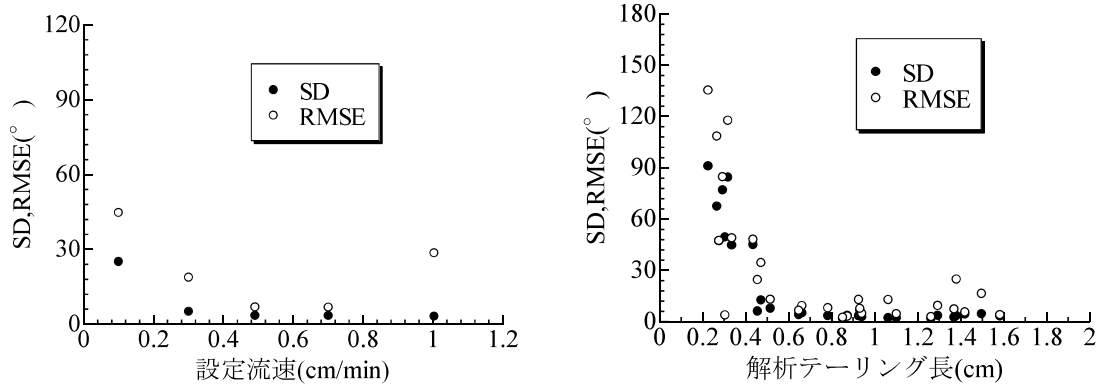


図 7-21 流向の測定結果の SD, RMSE と解析テーリング長の関係 (官能試験 C, 測定時間 5 分)

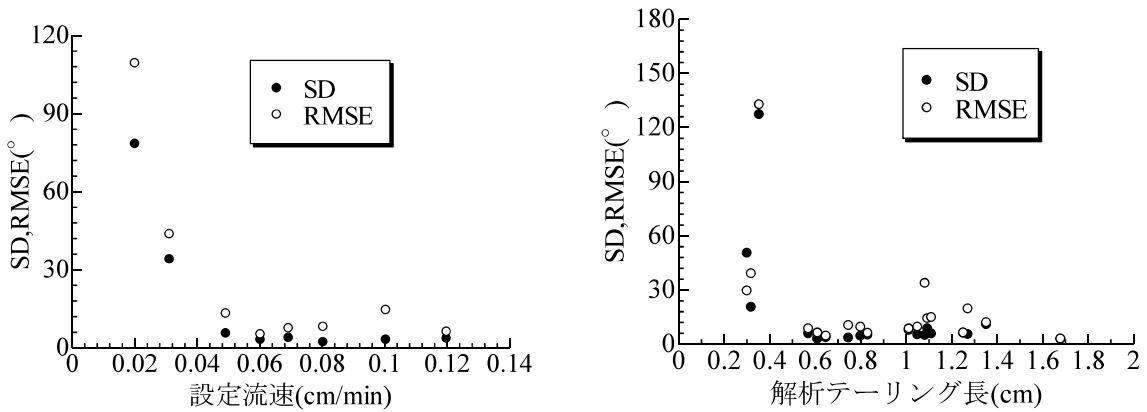


図 7-22 流向の測定結果の SD, RMSE と解析テーリング長の関係 (官能試験 C, 測定時間 30 分)

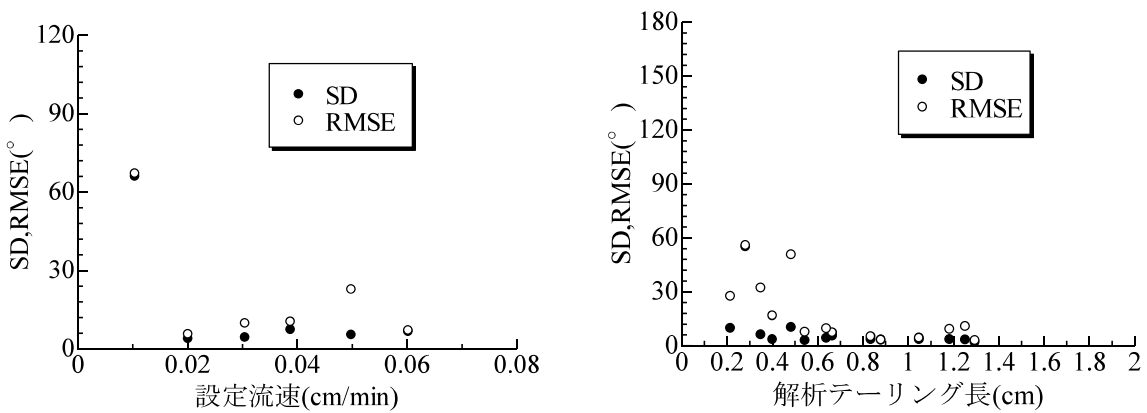


図 7-23 流向の測定結果の SD, RMSE と解析テーリング長の関係 (官能試験 C, 測定時間 60 分)

## 7.5 まとめ

PDVは流向流速の結果を得るためにはペーパーディスクを電子化する必要があり、現地で測定結果が得られないという問題点があった。そこで目視でテーリング長の計測を行い、流向流速を測定する方法を確立した。

目視での測定ではテーリングの最大発生方向とテーリングの伸びを目視で測定を行うが、テーリング終端付近ではインク濃度が低下することで目視による判定が困難となる。そこで、テーリングを判定するために基準紙を作成した。基準紙はテーリング終端の輝度を再現したもので基準紙と実際のテーリングを見比べて判定を行える。これによりパネル毎のテーリングの読み取り誤差を小さくした。また流速を測定する際はテーリングを流速に直接変換出来るスケール（定規）を作成し読み取る手法を確立した。さらにこれを用いて官能試験を行った。

流速は測定時間5分で流速範囲0.4~1.0 cm/minにおいて流速測定誤差は40%、測定時間30分では流速範囲0.04~0.12 cm/minにおいて流速測定誤差が30%。測定時間60分で流速範囲0.03~0.7 cm/minで流速測定誤差が30%であった。流速の判定ではスケールを使用した場合SD、RMSEともに減少したことから基準紙を用いた目視測定の有用性が示された。しかし高流速あるいは長時間の測定を行った場合、基準紙を使用した場合でもテーリングを判別することが困難となる可能性があることが分かった。流向の目視測定では流速が遅い、あるいは解析テーリング長が短い場合においてSDと画像解析基準の流向に対するRMSEが悪化した。目視で流向を測定する際の方位の決定ためにテーリングの最大発生方向を測定者が決定しなければならないが、低流速帯の場合テーリング長が短くなるため、最大発生方向の判別が難しくなることからSD、RMSEともに悪化する結果となったといえる。しかし、限られた測定時間、流速範囲であれば流速の測定誤差±30%程度で8方位以上の分解能で目視による流向流速測定が可能となり、電源が不要な地下水流向流速測定の手法が確立されたといえる。今後の課題として、測定可能範囲の拡大と同程度の流速帯を異なる測定時間で測定する場合の最適化、また、今回の官能試験ではパネルは20代が9割以上を占めていた。テーリングの色を読み取る性質上視力は読み取り精度に関わる大きな要素であると言えるためパネルの人数を増やして行うことが今後の課題である。

### 参考文献

- 1) 小野文也, 山本浩一, 明石卓, 神野有生, 関根雅彦: 電源不要かつ迅速な地下水流向流速計測方法の開発, 土木学会論文集C (地圏工学), 72巻, 4号, pp.377-384, 2016.

## 第8章 結論

### 8.1 総括

本研究では電源を使用しない地下水流向流速の簡易計測装置であるリング式 PDV を改良し新たに単ドット式 PDV の開発を行った。既往の装置ではセンサ内部にある支持柱が流向流速に大きな影響を与える事が確認されていたが単ドット式 PDV では支持柱の断面積を小さくしセンサ外周に配置する事でその影響を低減した。また現地計測における問題点であった透水係数、水質によるテーリング長への影響を、補正係数を導入することで低減させた。ペーパーディスクに付着した汚れによる画像解析上のノイズについては色を利用して除去する手法を新たに開発した。これにより着色や懸濁した地下水での計測における解析不能になる場合が減少した。単ドット型 PDV は現地でも熱量式地下水流向流速計と同等の流速が得られ、両者には高い相関が確認された。さらに現地で迅速に測定を行えるように目視で測定したテーリング長から流速を求めることを可能にした。以下に本論文のまとめを示す。

第1章では研究の背景と既往の研究、既往の地下水流向流速計測技術について概説し、本研究の目的と構成について述べた。

第2章ではペーパーディスクの中心に一つのドットを配置した単ドット式 PDV の内部の流向流速を水平2次元地下水浸透流計算により計算し、センサにおける流速をダルシー流速に変換するための補正係数を算出した。外周にロッドを複数本配置した PDV ではロッド近傍では局所的に流向が変化するが、センサ中心部では外部の流向と一致することが確認された。また、地盤内流向に対するロッドの配置ごとに PDV 中心からの流速の変動係数を算出した。その結果 PDV 中心付近では流速が安定しており PDV 中心から $\pm 1.5\text{cm}$  までは変動係数が5%未満となった。ロッドがない場合でも砂層から観測井内の透水性スポンジに地下水が流入する際に周辺地盤と観測井の透水係数の差によって、観測井内の流速が最大で約2倍に増加し、上流側の境界付近で砂層内部に流れ込むような流向の変化が見られた。これは理論的にも確認されている現状であり計算結果と一致した。ロッドがある場合にはロッドがない場合に比較して補正係数が減少するが、補正係数は透水係数の一次関数で表現することが可能であった。また、ストレーナ部に到達するまでに意図しないテーリングが発生する可能性について検討するため模擬実験を行った。ところ、60秒程度ではドットの大きさ、重心位置に大きな変化は見られなかった。このことから地下水に浸漬してから60秒程度では影響がないとよいことがわかった。

第3章では PDV の計測原理を明らかとするために簡易室内実験を行い、テーリング発生過程を明らかにした。その結果、インクは水に浸漬した後に透水性スポンジ内に溶出しスポンジ内の水の流れによって移流・拡散していることが明らかになった。また、観察用ペーパーにアクリル塗料によって紙面にインクが接触しない箇所ではテーリングが発生しないことから、透水性スポンジと画用紙と接している個所にインクが染着することでテーリングが発生していることが確認された。観察実験から溶出したインクは、実際の水塊の移動速度よりも3.9倍遅くなった。すなわちインクの遅延係数は $\alpha=3.9$ であった。インクの移動速度と地下水の流速は比例関係にあるため地下水の流速をテーリング長で計測することが妥当であることが示された。

第4章ではテーリング長に影響を与える要素としてインクの溶出特性を把握、実際に水温・pHを変化させてテーリングを発生させる実験を行い水質による補正係数を提案した。溶出実験はバッチ試験で行い、テーリング発生に水温・水質が与える影響の確認、水質条件による補正係数の検討を行った。バッチ試験は水温とpHの変化による影響を調べたところ、インクの溶出量は浸漬時間が長いほど増加し、水質が中性からずれるほど溶出量が増加した。また、高水温ではインクの溶出量が増加し、60分間では水温10°Cに比べ30°Cでは1.7倍の溶出量となった。さらに実際の実験砂槽でPDVセンサを用いて水温・pHを変化させながらテーリングを発生させたところ水温の上昇に伴ってインクの溶出量が増加したが、テーリング長はほとんど変化しなかった。pHを変化させた場合の影響の方が高く、酸性側、アルカリ性側ともにテーリングが短縮することが明らかになった、したがってpHの変動に対してテーリング長の補正係数を提案した。補正係数は室内検定に使用する水道水のpH=7.5におけるテーリング長を基準とした。このことによりPDVで現地計測を行う際にpHを取得することによって測定結果を検定砂槽のテーリング長に補正する事が可能となった。

第5章では50mm径用3本ロッド型PDVについて室内実験砂槽を用いた検定を行うとともに、従来の画像解析の障害になっていたペーパーディスクの着色や微粒子といったノイズの除去方法を確立した。ペーパーディスクのドット部、テーリング部、バックグラウンドの輝度のデータからRGBチャンネルのうちRと、Bチャンネルを用いてテーリングとノイズの分離を行う手法を開発した。この手法を用いて作成した検定直線は既往の検定直線と決定係数に大きな差は見られなかった。現地計測の際に避けることが難しい着色や汚れの付着があっても解析が可能で、現地調査の際は単一チャンネルより優れているといえる。特に泥炭由来の赤褐色の汚れが付着したデータについてはノイズの除去が効果的に行われた。単ドット型PDVの流向の誤差は15分以下では16方位以下であったが、低流速となる測定時間60分では流向の誤差が増大した。

第6章では実際に現地測定に用いて既往の流向流速計と比較した。現地測定においては第2章、第4章で開発した補正係数を用いて透水係数、pHの補正を行った。北海道天塩郡サロベツ湿原における熱量式地下水流向流速計(GFD)との比較では、PDVがGFDに比べて10%強過大となった程度であり、流速の相関係数は0.89と高い相関を示した。流向は両者が整合していたとは言い難かった。これは現地の流速が0.02 cm/min程度と低く、両流速計が流向・流向を測定可能な下限付近(0.01 cm/min)程度であったことが原因として考えられる。水位測定から生成したコンター図から生成した流向とPDVによる一斉計測時のPDVによる流向も比較した。その結果、複数の水位計測地点に囲まれた地点ではPDVとコンター図の流向誤差が10°以内できわめてよく一致した。そのほかの測点では流向はあまり一致しなかった。これは局所的な水位の変化や周囲の水位データが不足していたことが原因であると考えられた。コンターから算出した流速とPDVで計測された流速はオーダーが合わなかったが、現地の透水係数の推定が困難であったこと、空間的な透水係数の変動が極めて大きい場では透水係数と動水勾配から正確な地下水流速を推定することが困難であり、直接流向流速を測定することが望ましいことを示した。

第7章ではペーパーディスクを目視で迅速に計測する方法を確立した。スキャナでペーパーディスクを電子化し画像解析することなく現地で計測結果が判明する方法を開発した。目視でバックグラウンド（ペーパーディスク）とテーリングを識別可能な可視相当閾値を求め検定直線を得た。しかし、測定時間が長時間、あるいは高流速帯ではテーリングの濃度が低下し判定結果の個人差が大きくなった。そこで目視測定による個人差を小さくするために基準紙を作成し、テーリングを流速に変換出来る流速スケールを用いて読み取る方法で官能試験を行なった。その結果、50%以上であった測定誤差が30%~40%に減少した。

今後の展望として、方位センサを併用するなどして観測可能な深度を増加させることにより、より広い適用範囲とになるように改良を行う必要がある。

## 8.2 PDVの運用方法

本研究では地下水質と観測井周辺の地盤透水係数による補正を行い、画像解析により流向流速を求める手法と専用の流速スケールを使用して目視により流向流速を求める2つのPDVによる計測を確立した。

画像解析を用いる手法では現地計測を行った際にただちに流向流速がわからないため、測定箇所 の妥当性を評価し、測点数の増設や変更といった判断ができないといった問題があった。しかし、目視による解析手法により現地で流向流速を得ることが可能となった。そこでPDVの運用方法を提案する。

### (1) 目視による概略計測方法

数地点の流向流速から対象領域の地下水流動場を明らかにすることを目的とした場合を仮定する。まず、複数地点の水位差から大まかな流動場を把握したのちPDVによる計測を実施することが望ましい。PDVの測定時間は測定する流速に依存するため、対象地域の透水係数などから大まかな流速が予想できない場合は測定時間60分から行い、テーリングが1.8 cm以内となる測定時間を採用する。

測定時間が確定した後、PDVで同一の観測井で複数回測定を行う。測定後のペーパーディスクを目視で読み取り、テーリングが1.8 cm以内であるか、また流向が安定していることを確認する。目視による流速測定に関しては誤差が30~60%と大きいためこのまま計測結果として採用するかは測定目的によって判断する必要がある。

同一の観測井での流向流速を計測した後に測定を行う観測井を選定、または新たな観測井を設置し、複数箇所を同時にPDVで計測を行うことができれば、地下水流動場が明らかとなる。

### (2) 画像解析を用いた精密計測方法

画像解析を用いる場合、現地でpHを計測できる場合は計測を行う。pHによる補正係数はpH3付近で約1.5倍程度となるが、地下水のpHが3付近となる地域は非常に限定され、pH5~9の範囲である場合はpHによるテーリングの変動係数が10%を超えないため、補正は必ずしも必要ではない。

また、透水係数も可能であれば変水位法などにより測定した方が良いが、珪砂5号の透水係数 $1.3 \times 10^{-3}$  m/sと比べそれ以下の透水係数になる場合、透水係数の補正は86~100%の間にとどまるので透水係数による補正は必ずしも必要はない。しかし、透水係数は珪砂5号よりも極めて

大きくなる場合は別であり，透水係数による補正が必要である．これらの手順で現地計測を行ったペーパーディスクを持ち帰り画像解析を行えば更に詳細な流向流速を再度求めることが可能であり，現地計測の際に電源を使用せず迅速に地下水流動場の計測を行うことができる．

## 謝辞

本研究にあたり多大なご指導ご鞭撻をいただいた山口大学大学院准教授山本浩一氏並びに副査を御担当頂いた関根雅彦先生，今井剛先生，鈴木素之先生，赤松良久先生および諸先生方，実験の補助を行っていただいた水俣勝基氏，明石卓也氏，黒瀬幸那氏，渡邊健一氏，また PDV 実用化に当たり多くの技術支援を行っていただいた大起理化工業株式会社大石正行様にこの場を借りて感謝申し上げます．これから広く一般に普及し地下水環境保全に微力ながら寄与することができれば幸いです