

農地における
湧水処理工法に関する研究

1997

岩手大学大学院
連合農学研究科
生物資源科学専攻
(弘前大学)

加藤 幸

①

農地における
湧水処理工法に関する研究

1997

岩手大学大学院
連合農学研究科
生物環境科学専攻
(弘前大学)

加藤 幸

目 次

I 章 序論

- I - 1 . 緒言 1
- I - 2 . 関連した研究 5
- I - 3 . 本論文の構成と研究の流れ 9

II 章 地下水解析に関する基本事項

- II - 1 . 地下水位の定義に関して 13
- II - 2 . 流れの基礎方程式 14
- II - 3 . 地下水流動解析モデル 16
- II - 4 . 浸透流の解析法とその分類 18

III 章 二次元数値解析による湧水処理工法の検討

- III - 1 . 解析条件と解析方法 26
- III - 2 . 遮断層工法の基礎特性と本章での解析内容 33
- III - 3 . 結果と考察 36
 - (1) 湧水個所の広がり と 地下水位 の 関係 36
 - (2) 遮断率 と 地下水位 の 関係 41
 - (3) 湧水個所の偏り と 地下水位 の 関係 44
 - (4) 効果的な遮断層の設置方法 49
 - (5) 二次元解析のまとめ 52

IV 章 三次元模型実験による湧水処理工法の検討

IV - 1 . 三次元解析の必要性	・・・ 54
IV - 2 . 実験装置と方法	・・・ 54
IV - 3 . 実験の種類	・・・ 60
IV - 4 . 暗渠排水による湧水処理工法の三次元的な検討	
(1) 実験条件	・・・ 67
(2) 結果と考察	
(i) 三次元的な流れの存在	・・・ 67
(ii) 湧水個所と暗渠の距離 (X 方向埋設率) の影響	・・・ 71
(iii) 暗渠の奥行き方向長さ (Y 方向埋設率) の影響	・・・ 84
(iv) 急激な水位効果による影響	・・・ 100
IV - 5 . 遮断層工法による湧水処理	
(1) 実験条件	・・・ 103
(2) 結果と考察	
(i) X 方向遮断率と地下水位の関係	・・・ 112
(ii) Y 方向遮断率と地下水位の関係	・・・ 135
(iii) 最適な遮断層の形状	・・・ 159
IV - 6 . 三次元模型実験のまとめ	・・・ 163

V 章 結論

V - 1 . 二次元 F E M 定常流解析による解析	・・・ 164
V - 2 . 三次元定常浸透模型実験による解析	・・・ 165
(1) 暗渠排水に関する実験	・・・ 166
(2) 遮断層工法に関する実験	・・・ 166
(3) 結論	・・・ 167
V - 3 . 遮断層工法の施工と今後の課題	・・・ 168

I. 序論

I-1. 緒言

近年、中山間地の荒廃が著しく耕作放棄地の増加が著しい。農業センサスに表れた耕作放棄面積の動向によれば、全国の耕地面積の約1割に当たる53万haが放置された状況にあり、この大半を中山間地が占めている⁽⁴¹⁾⁽⁴²⁾。特に、山麓部や谷地田地帯において耕作放棄地の増加傾向が著しく、この理由としては人手不足などのほか、湧水による排水不良、地耐力不足に伴う大型機械使用の制限といった要因があげられる⁽⁴³⁾。このような地域では、労力問題と圃場環境の問題が相互に絡み合い、問題をより深刻なものとしている。

湧水対策の講じられていない農地では排水不良を生じ、農作業に支障を来すほか、作物の生育不良など、営農上の多くの阻害要因を抱えている。また、圃場整備事業等を行う場合、谷地田本流域への対策はとられても、支流域については放置され潰廃につながる場合が多い⁽⁴⁴⁾。

海外では谷地田地帯のような地下水環境は特殊と見られ、農地における湧水処理を直接的に取り上げた研究、報告⁽⁴⁵⁾はきわめて少ない。国内においても、最も効果的な湧水処理工法として知られる縦型暗渠工法を示した堤・竹中の研究⁽⁴⁶⁾を除いては、現場における数件の調査例と工事例の報告⁽⁴⁷⁾⁽⁴⁸⁾⁽⁴⁹⁾⁽⁵⁰⁾⁽⁵¹⁾がある程度で、理論的な解析例の発表はきわめて少ない。

このような点から、有効な湧水処理工法を提示することは谷地田地帯における農地荒廃防止への一つのステップとなり、中山間地農

業の振興につながるといえる。本研究では、以上述べたような問題点解決の一つの重要な施策として、特に農地における湧水処理問題に着目し、研究の展開をはかる。

(1) 湧水のメカニズムと従来の湧水処理工法

湧水現象は、不透水層間の透水層に含まれた地下水が、圧力を受けて被圧地下水となり上部の不透水層を通り抜けて出水する場合に生じる¹⁰⁾。このような現象は、山間部を中心に、丘陵部、平野部、干拓地など様々な地域において見られる。この原因は、丘陵山地域や河川からの伏流水にある。また、干拓地では外水の海水や承水路の淡水が被圧水となり地下水と連動して湧水を引き起こす。

湧水が農地の中にある場合には、地表面が過湿となり、排水不良による作物の生育不良、根腐れなどといった問題を引き起こす。また、湧水は一般に低温であるため、地温の低下や湧出水による冷温障害といった障害につながる。さらに、地盤が難透水性で地中の水みちから湧水がある場合には、地表の水面に藻類が発生するなど作物生育に支障をきたす。

このような問題の解決のためにとられるのが湧水処理工法である。湧水処理工法は、湧水を遮る工法と湧水を排除する工法とに大別される¹⁰⁾¹¹⁾¹²⁾。湧水を遮る工法については、傾斜地の終端部に設けた暗渠により、浸入水をカットする工法がまず考えられる。この工法は、浅い部分の浸透流に対しては効果的である。しかし、深部の浸透流には対処できない、“カマ”に対して効果が得にくいといった難点がある。盛土、置換などにより地盤を改良する工法では、湧水をほぼ完全に防げるものの工事が大規模になり経費がかさむ。加え

て、軟弱地盤は地耐力が著しく小さいために施工機械が制限され、その作業効率も低い。

湧水を排除する工法では、湧水個所に暗渠を密に配置する工法が最も容易である。この工法は簡易であるが、自由地下水面の低下は部分的なもので大きな水位低下は望めない。揚水井により水位の低下を図る工法では、農地内に生じるつぶれ地が農作業効率を低下させるほか、土地の有効利用の面で好ましくない。縦型暗渠により排水する工法は、後述する堤らの報告⁶¹⁾⁶²⁾⁶³⁾に見られるように、湧水個所が明確な場合に有効な工法である。しかし、堤らの指摘のように、低被圧の場合に効果が低下することや、施工費がかさむ点、散在する湧水個所を個別に処理することの限界といった問題を有している。また、ドレーンシート等による面的な排水工法⁶⁴⁾⁷¹⁾では、湧水を面的に処理することは効果的である。しかし、ドレーン全面で排水することが必ずしも必要とはいえないなど改善すべき点がある。

これら工法の特長や問題点の認識の上に立って、本研究では次のような湧水処理工法について検討を加えた。

(2) 研究の目的

湧水は、その性質として発生個所を特定することはきわめて困難であり、ある個所を処理しても他の個所から湧き出すという特徴がある。また、圃場内に湧水が点在する場合には、湧水個所をそれぞれ点としてとらえて個別に処理することには限界があり、面としてとらえて処理する方が効果的である¹⁹⁾²¹⁾。湧水を面的にとらえて処理する工法の提案については、堤ら⁶¹⁾や矢橋ら⁷¹⁾のほかに、いくつかの事例¹⁹⁾がある。

本研究では、面的な湧水処理工法として、湧水個所上に遮断板または遮断シートや、透水性の低い層（遮断層）を設けた湧水処理工法を考えた。この工法は、ある程度の広がりをもたせた遮断層により湧水をとらえ地表面への浸出を防止する。また、遮断層の透水性が小さい場合には、層下面にそった横方向の流れにより、暗渠方向へ導水する効果をもつ。したがって、通常の暗渠に低透水性の層を加えることにより、暗渠排水をより効果的に行うものである。この工法（以後、遮断層工法とする）の概略図をFig. I-1に表した。

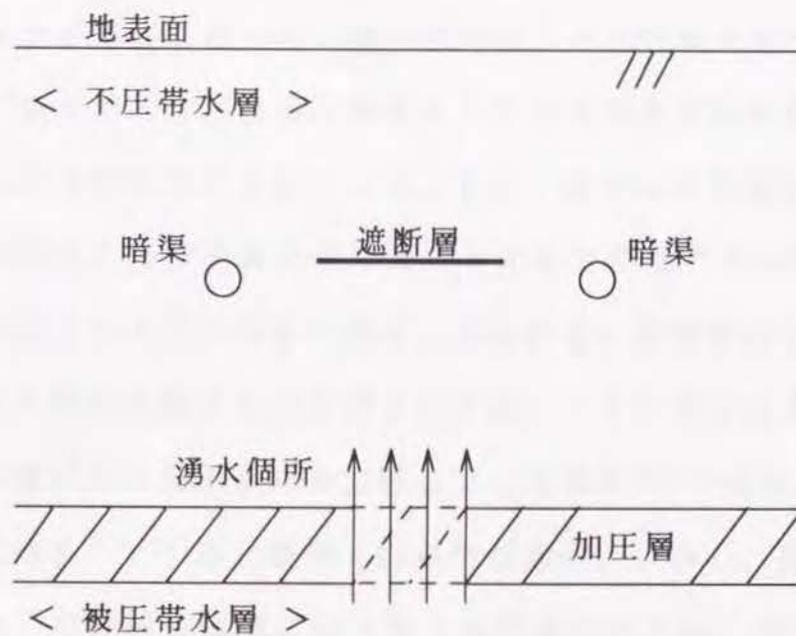


Fig. I-1 遮断層工法の模式図

本論文は、谷地田地帯などの中山間地域における農業振興上のネックの一つとなっている湧水処理対策を取り上げ、有効な対策を示すことでこれらの問題の解決を目指したものである。具体的な手法としては、まず、有限要素法(FEM)による二次元数値解析により上

に示した遮断層工法の基礎特性をとらえた。さらに、その結果に加えて、三次元サンドモデルによる模型実験を行い、上述の遮断層工法の有効性を実証した。

I - 2 . 関連した研究

前述のように、農地における湧水処理工法に関して直接に研究として取り上げたものは比較的少ない。発表事例の大半は、現地調査および工事例を中心とした検討で、解析的な検討例は数例の報告があるのみである。このうち、堤・竹中により示された研究⁵¹⁾は、縦型暗渠工法を提示し、谷地田地帯などにおける湧水処理対策として数多くの研究例で引用されている。また、近年は自然環境の保護という観点から、湿原や植生の保護などの面での地下水処理対策^{20) 21) 27) 28) 29) 35)}が論じられているものが多く見られる。数値解析により浸透流について検討を加えている例としては、フィルダム堤体内の浸潤や掘削工事に伴う地下水対策に関して、河野ら^{24) 25)}や松尾ら^{34) 35)}をはじめ、大西ら^{48) 49) 50) 51)}など数多くの報告がある。しかし、農地における排水対策や自然環境保護に伴う地下水対策の面では、吉田ら^{81) 82)}、塩沢ら⁶¹⁾などわずかである。これらの研究について主なものを以下に示す。

(1) 堤らによる研究

堤・竹中⁵¹⁾は、谷地田の圃場整備について、地理学的側面、ブルドーザーの作業効率や田面沈下などの作業効率的側面、さらに排水対策としての湧水処理工法など様々な角度から検討を行っている。

この中で、現在広く採用されている工法の一つである縦型暗渠工法を提示し、その効果を実証している。同時に、この工法の問題点として、施工費用がかさむこと、縦型暗渠が湧水個所から外れた場合や湧水の被圧が小さい場合に効果が低下する点を指摘している。

さらに堤・足立⁶⁾は、中海干拓地における湧水処理工法について検討を加えている。この中で堤は、湧水の形態を被圧地下水により軟弱へドロ層が押し上げられた「隆起型」と水みちが明らかな「噴出穴型」に区分している。さらに、「隆起型」に対しては面的な処理を、「噴出穴型」に対しては縦型暗渠工法を応用した「豎暗渠」による処理を施している。この研究では、湧水個所の特定が困難な「隆起型」の湧水に対し、面的処理を施している点に大きな特徴がある。

縦型暗渠工法については堤らのほかにも、黒木²¹⁾²²⁾が湧水のメカニズムとそれに対する具体的な設計法、施工法を示している。さらに、黒木は千葉県袖ヶ浦市における湿田改良を事例として縦型暗渠工法施工に伴う地下水環境の変化と乾田化対策としての工法の有効性を明らかにしている。

(2) 現地調査例および工事事例報告

穴瀬ら³⁾は、千葉県北総地区の谷地田地帯の圃場整備について総合的な検討を進めている。この研究では、谷地田の規模調査と農家に対するアンケートから農業経営に占める谷地田の重要性を明らかにしている。加えて、乾田化の過程、その手段としての縦型暗渠工法について述べている。さらに、谷地田地帯の地理的、農業的重要性を示し、湧水（特にカマ）に対する処理の必要性を指摘している。

また、大塚ら⁶²⁾、矢橋ら⁷¹⁾⁷²⁾⁷³⁾などにより、谷地田地帯における圃場整備について排水対策に関する研究⁷⁴⁾が数多く提示されている。このうち、矢橋ら⁷¹⁾による青森県屏風山砂丘丘陵地の泥炭谷地田での湧水処理工法の研究では、湧水を面的にとらえて板状ドレーンにより吸水し、一端で排水するという処理工法を提案している。この研究についても、上述の堤らの研究⁵⁴⁾と同様、湧水の面的な処理という考え方が意義深いものといえる。

永石ら³³⁾³⁴⁾は四国地方の傾斜地における水田、畑の湧水処理、地下水制御について暗渠排水、軟弱地盤の安定処理といった観点からの工事事例を示している。その他、岩間ら⁷⁵⁾、中澤ら⁴⁴⁾は暗渠を用いた湧水処理工法を検討し、ビニルシートや遮断板を暗渠に組み合わせた面的な湧水処理工法について検討を加えている。

近年、自然環境の保全といった観点から、地下水環境の調整を取り上げた研究例も多く見られる。梅田ら⁴¹⁾⁴²⁾⁴³⁾は、サロベツ原野の水文環境特性を分析し、釧路湿原での湿地帯の保全対策を示している。これに関して黒木ら²³⁾は、サロベツ原生花園の植生保全のため、地表面に挿入した遮水シートで保全地域を覆うことで、湿地の乾燥化を防ぐ工法を提示している。さらに黒木は、地下水変動の調査から、この工法の有効性を明らかにしている。この研究で示された遮水シートを活用し、地下水環境の調整をはかるという考え方は、排水対策を考えるうえでも大きな意義が認められる。また、粕淵ら²¹⁾は、美唄湿原の地下水環境と泥炭土に関する調査を実施している。この中で、地下水低下に伴う湿原の乾燥化とそれに伴う地盤沈下、耕地の泥炭基盤の崩壊や内水氾濫といった問題を取り上げ、地下水処理の重要性を指摘している。

(3) 数値解析などによる地下水流動解析

地下水処理を数値解析により検討した例としては、藤縄¹¹⁾、河野、松尾、大西らなど数多くの報告^{11) 20) 41) 70) 85)}がなされている。これらは主に、フィルダム堤体内の浸透流解析^{24) 26) 78)}や地盤掘削時の湧水現象など^{51) 62)}の土木工学的な研究が中心である。進士ら⁵¹⁾の地盤の掘削などの際に遮水壁内に生じる地下水の三次元的浸透流の二次元モデルへの簡素化なども同様な部類といえる。

農業土木の見地から記されたものとしては、塩沢・粕渕ら⁶⁴⁾による研究がある。この研究では、美唄湿原における地下水挙動のデータを基に、一次元定常FEM解析から湿原地盤の性状を理論化している。さらに、湿原における地下水流動機構と排水路による湿原への影響を検討している。この研究は、周辺地域の開発が自然環境に及ぼす影響を解析的に示しており、環境保護の観点からきわめて意義深いものといえる。

吉田ら⁴¹⁾は、飽和-不飽和浸透流解析における数値解析法として、不飽和透水係数や水分特性曲線を必要としない新手法を提示している。この計算法に関しては後に詳述するが、従来法に比較して計算時間や実験に要する手間が大幅に削減されることに大きな意義がある。この他、吉田は⁴¹⁾流線網に関する数値解析法の提案を行っている。さらに、不飽和領域の流れの相似性を考慮し、対応する点での透水係数が等しければ不飽和領域を含めて流れが相似になるという性質を数学的に説明している⁴¹⁾。この他にも、吉田は浸透現象に関して数学的にアプローチした数多くの研究^{14) 16) 77) 18) 79)}を示している。

(4) 湧水処理工法に関する解析的研究

農地での湧水処理について解析的に論じたものとしては、角野・大塚による研究¹¹⁾がある。この研究では、矢橋らの研究¹²⁾などと同様に、湧水を面的にとらえて処理するという考え方を採用している。この工法は、湧水個所に対して遮断板や遮断シートを設け暗渠で排水する形式をとっている。この中で、暗渠と遮断シートの組み合わせ方についていくつかのパターンを検討し、遮断シートの末端部に暗渠を設置すれば、板状ドレーンと同等の湧水処理効果が得られるとしている。

また、著者ら¹³⁾は、角野・大塚の研究¹¹⁾をもとにして、暗渠に透水性の低い層（遮断層）を組み合わせた湧水処理工法を検討している。この中で暗渠は、遮断層と一体にして埋設するよりも、分離して埋設した方が効果的であることを示した。具体的には、暗渠を遮断層の末端部分から本暗渠間隔の10%程度離して埋設した場合に地下水位の平均値が最も低下する。加えて、この条件を満たした場合に、湧水個所の近傍と周辺の地下水位の均衡が保たれることを明らかにした。さらに、遮断層が飽和透水係数の1/100以下程度の透水性を有しても、層を不透水性とした場合と同等の効果が得られることを確認した。

I-3. 本論文の構成と研究の流れ

本論文は、Fig. I-2に示したフローチャートのような構成になっている。具体的な論文の構成について以下に述べる。

既に述べたように、第I章では、中山間地域における農地荒廃の実状とその要因としての湧水の問題を示し、農地における面的な湧水処理工法の意義と必要性について考察した。さらに、湧水処理工法の研究の代表的なものとして、堤ら¹¹⁾¹²⁾の縦型暗渠工法など湧水処理に関する一連の研究について詳述した。そのほか、矢橋ら¹³⁾が示したシートドレーンによる面的な湧水処理工法と、角野ら¹⁴⁾による遮断シートと暗渠を組み合わせた工法の研究は、本研究の基礎となるものであり、これらについてもあらましを示した。

第II章では、本研究を進めるにあたり、湧水をはじめとした浸透流解析の基礎知識を掲げる。初めに、「地下水位」という用語の意味とその曖昧さについて確認し、その定義づけを行う。次に、定常浸透場の解析での基本式、各次元でのモデルについて、それぞれの意味と適切な使用法¹⁵⁾を説明する。さらに、浸透流の解析方法として有限要素法の基礎とサンドモデル実験について確認する。

第III章は、有限要素法による二次元定常流解析により、遮断層工法による湧水処理効果について検討する。この工法に関しては、既に著者ら¹⁶⁾の研究により基礎的な特性が明らかになっている。この章では、まず解析に関する諸元の確認を行ったうえで、湧水個所の広がりや地下水位に及ぼす影響を明らかにする。次に、遮断層工法において必要とされる遮断率を明示する。さらに、湧水個所が暗渠間で不特定な位置となる場合を想定し、遮断層が湧水個所を完全に覆っていない場合の影響を調べる。加えて、不特定の位置にある湧水個所に対して遮断層を設置する場合の最適な条件について検討し、二次元的に見た場合の遮断層工法の有効性を明らかにする。

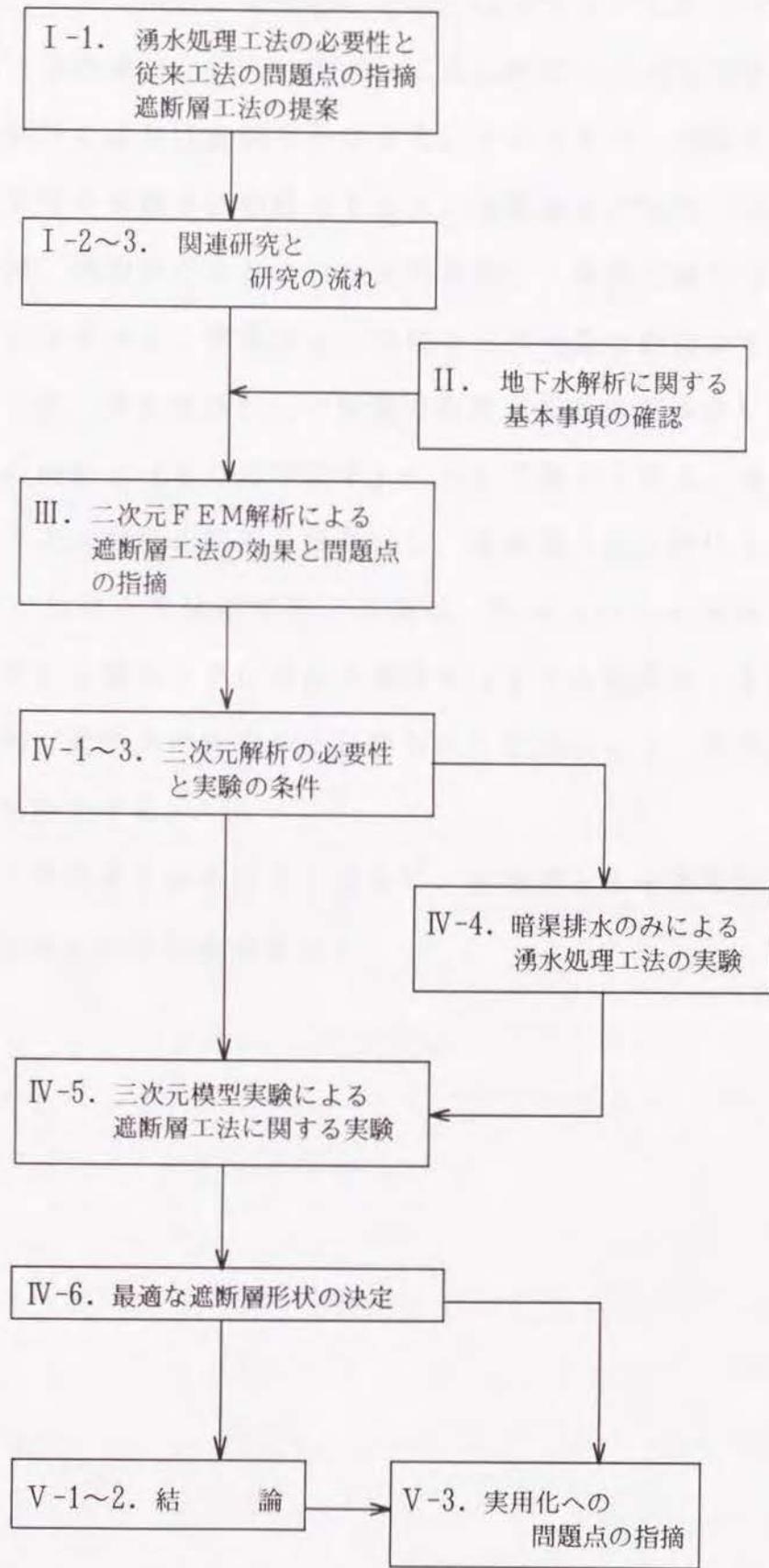


Fig. I-2 本研究の構成

第IV章では、二次元解析の結果をもとに三次元サンドモデル実験による遮断層工法の検討を行う。まず、二次元解析と三次元解析を比較し三次元解析の必要性を明らかにする。そのうえで、実験条件ならびに実験装置や実験方法の諸元を示す。実験結果の検討では、まず、暗渠間隔、埋設深さなどの二次元的要素に、暗渠の奥行き方向長さという要素を考え、暗渠排水の効果を三次元的な観点から解明する。ここでは、湧水個所からの暗渠の距離（X方向埋設率）と、暗渠の奥行き方向長さ（Y方向埋設率）について取り上げる。さらに、第III章の二次元解析の結果を参考とし、遮断層工法の特性を三次元サンドモデルにより検討する。実験は、暗渠方向への遮断率（X方向遮断率）と暗渠と平行方向の遮断率（Y方向遮断率）を変化させ、効果的な遮断条件を求める。得られた結果により、最適な遮断層の形状を決定する。

第V章は、全体のまとめを行うとともに、遮断層工法を実用化するうえでの方向性とその問題点を示す。

II. 地下水解析に関する基本事項

II-1. 地下水位の定義に関して

地下水解析を行う場合、「地下水」「地下水位」について、あらかじめ、その定義を明確にしておくことが必要である。

「地下水」という語句の意味を調べると、「地下に存在する水の総称で、特に、移動可能で水文循環に関与するもの」とされている⁽²¹⁾⁽²²⁾。これは、飽和-不飽和領域を含めた広義な意味合いを示したものである。一方、「地表面下に存在する水」を広義な地下水、「帯水層中に飽和状態で存在する水」あるいは「地下水面より下の飽和領域に存在する水」を狭義な地下水とする定義付けも見られる⁽²³⁾。このように、「地下水」という語句は広義、狭義な意味合いにより、対象となる領域が異なることに注意を払う必要がある。

さらに、「地下水位」という語句は、「大気に接する地下水面の高さ」とされ、一般に自由地下水面の位置を示す語として用いられる。その定義としては、ポテンシャルで表現する場合には、圧力ポテンシャルがゼロとなり、全ポテンシャル(H)が位置ポテンシャル(h)と等しくなる($H=h$)部分とされる⁽²³⁾⁽²⁵⁾⁽³⁰⁾⁽³¹⁾。

しかしながら、Freeze⁽³¹⁾により示されているように、実際の土中水の流れは、自由地下水面上にも毛管現象によって流れが生じており、 $H=h$ をもって自由地下水面とする仮定は厳密には正しくない。また、「地下水位」=「自由地下水面」の関係は、静水や水平流、またはそれに近似される場合においてのみ成立し、傾斜流のように静水圧分布を示さない場合には成り立たない⁽³¹⁾。

多くの地盤において「自由地下水面」＝「地下水位」という考え方は成立するものの、実際には上述のように非常に曖昧な意味を有していることを認識したうえで「地下水位」という語を使い分ける必要がある。

本研究は、定常状態での自由地下水面の高さを中心とした検討であるため、毛管流動による影響は小さいと考えられる。ここでは、「地下水位」という語については、次のように定義する。まず、III章の二次元数値解析では、圧力ポテンシャルが $P=0$ となる、 $H=h$ の等ポテンシャル線をもって地下水位とする。IV章の三次元模型実験では、後に詳述するが、模型圃場表面より挿入したステンレス製金網パイプ内に形成される水面を地下水位として定義する。

II-2. 流れの基礎方程式

地下水の流れが層流の場合、流れは地盤の透水性と動水勾配により支配される。この関係を示したのが、ダルシー則である。ダルシー則は、透水性媒体中の平均的な流れの状態を実験的に、マクロな視点から求めたもので、間隙中の真の流れを厳密にとらえたものではない。したがって、粘性土における亀裂性の浸透やマクロポアによる流れなどは考慮されておらず、地盤における平均的な性状を示すものといえる⁽¹⁾⁽³⁾⁽¹¹⁾⁽¹⁴⁾。具体的な適用範囲は、砂礫質土の場合には、レイノルズ数が1~10程度の層流の範囲でのみ成立し、遷移流や乱流では成り立たない。粘質土では、動水勾配が始動勾配以下であれば流れは生じず、動水勾配が、ある上限値以下の一定範囲にお

いてのみ成り立つ¹¹⁾。このような非ダルシー流れの存在については、井戸近傍の高速流域や地盤沈下を考える場合の粘性土の低速流域においては大きな影響を及ぼす。しかし、一般に、日本国内の地下帯水層ではおむねダルシー則が成り立つ¹¹⁾と考えてよいとされており、本研究でもダルシー則に基づいた検討を行う。

地下水の流れを層流、定常状態とすると、流れの運動方程式は、上述のダルシー則により、

$$u = k_x \frac{\partial H}{\partial x} \quad v = k_y \frac{\partial H}{\partial y} \quad w = k_z \frac{\partial H}{\partial z}$$

u, v, w : X, Y, Z 方向の流速

k_x, k_y, k_z : X, Y, Z 方向の透水係数

H : 全ポテンシャル

として表される。一般に、地下水流動では、流速がきわめて小さいために速度水頭 ($v^2/2g$) は無視される。したがって、上述の全ポテンシャル (H) は、圧力水頭 (P) と位置水頭 (h) の和により表され、

$$H = P + h$$

となる。また、水の圧縮性を無視するならば、連続式は

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0$$

として表される。

この2式より、次のような定常浸透流の基礎方程式が導かれる。

$$k_x \frac{\partial^2 H}{\partial x^2} + k_y \frac{\partial^2 H}{\partial y^2} + k_z \frac{\partial^2 H}{\partial z^2} = 0$$

地盤が均質体であると仮定すれば、各方向への透水性は均一となり透水係数は

$$k_x = k_y = k_z$$

となる。したがって、この時の基礎方程式は、次のように表される。

$$\frac{\partial^2 H}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 H}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 H}{\partial z^2} = 0$$

または、 $\nabla^2 H = 0$

上式は、ラプラス方程式と呼ばれ、定常状態の地下水流動を解析する際の基本式となる¹¹⁾¹³⁾¹⁵⁾。本研究における解析は、このラプラス式に基づいて検討した。

II-3. 地下水流動解析モデル

地下水流動は三次元的に生じている。そのため、解析は対象領域の広がりや水理構造的不均一性を反映できる三次元解析を行うことが望ましい。しかし、三次元解析には、入力データの膨大さや解析精度の問題、調査費用、あるいは計算機のメモリーなどの問題がからみ、経済的、技術的な問題を伴う。そのため、解析の目的にあわせて、1次元または2次元解析も用いられる。各モデルに関する説明¹¹⁾¹³⁾¹⁵⁾¹⁷⁾の要約を以下に示す。

(1)一次元モデル

一方向の流れについて適用される。帯水層の水頭低下に伴う加圧層の圧密沈下予想などに用いられる。

(2)二次元モデル

a) 平面二次元モデル

全体の流れが、水平方向で近似される場合に適用される。広域な地下水流動の平均的把握に適している。

b) 断面二次元モデル

断面の垂直方向には水が出入りしない多層構造では、各層の流れの方向は平面的に同一方向であるという仮定により適用される。複数の成層帯水層の水頭変化を解明するのに適している。

c) 準三次元モデル

① 半透水性の加圧層を考慮した多層構造を取り扱う方法

複数の帯水層と半透水性加圧層からなる地盤構成の地下水流動の解析に用いられる。帯水層内は水平方向の流動であり、加圧層内では水平方向流動は無視される。地盤沈下や地下水開発を検討する場合に適している。

② 地盤の水理定数を地下水位の関数とした多層構造を取り扱う方法

鉛直方向の流動は無視し、Dupuit-Forchheimer仮定をもとに、多層の透水層からなる帯水層での地下水流動を解析する。複数の透水層の水理定数（透水量係数、貯留係数）を地下水位の関数として求め、解析を行う方法である。平面二次元解析に比べて多層構造の水理定数を考慮している点で優れている。広域の地下水流動を平面的にとらえる場合でしかも地下水位の変動量が大きい場合に適している。

③ 鉛直スライス法

三次元の領域を断面二次元でスライスに分割し、スライス内は独立に飽和-不飽和断面二次元解析法により解析を行う方法である。スライス間はダルシー則に従った二次元要素を用いて流量を求め、その流量を用いて断面二次元解析に反映させ、交互に繰り返す。

(3)三次元モデル

三次元領域のすべてに適用されるものである。情報量が膨大となるので、計算機のメモリーやデータの保存といった技術的な問題に加え、それに伴う経済的な負担も大きい。

本論文では、上述の分類のうち、III章では断面二次元モデルによる二次元FEM解析を、IV章では三次元サンドモデルに基づいて検討を行った。

II-4. 浸透流の解析方法とその分類

(1) 解析方法とその分類

浸透流解析は、実験による方法と計算による方法に分類される¹¹⁾¹²⁾。実験による方法には、砂を充てんした実験装置内に浸透流を発生させ、ポテンシャルの分布、流量などを調べるサンドモデル法¹³⁾、ポテンシャル流れと電気の流れの相似性を利用した電気アナログ法、薄層間の粘性流の流れにより検討するHele-Shawモデルなどがある。このほかには、細管網モデル、光弾性モデル、ゴムモデルなどの手法がある。計算による方法には、フローネットなどを用いた図解法、微分方程式、複素関数論を用いた理論解析法、差分法、有限要素法などの数値解析法がある。これらの解析方法を整理するとTable II-1のようになる。

Table II-1 浸透流の解析方法

計算による方法	理論解析法 (微分方程式, 複素関数論)
	図解法 (流線網, ホドグラフ)
	数値解析法 (差分法, 有限要素法, 境界要素法)
	サンドモデル
実験による方法	Hele-Shawモデル
	細管網モデル
	電気相似モデル
	その他 (光弾性モデル, ゴムモデル)

(2) 差分法と有限要素法

浸透流解析では、境界条件が複雑な場合には微分方程式を解くのに高度な数学的手法を必要としたり、あるいは解くことが不可能になるといった問題が生じる。このような場合の近似的な解を求める手法として、数値解析法が用いられる。

このうち、最も多く用いられるのが差分法と有限要素法で、ともに変分原理により導かれ、本質的には等価なものである。両者の主な違いは、差分法が微分方程式の変数がテーラー展開近似に基づいているのに対し、有限要素法は微分方程式を積分方程式形に変換した後に数値解析を行っている点にある。また、計算用のメッシュについても、差分法の計算用メッシュは、等間隔の格子状に組まれるのが一般的である。それに対して有限要素法のメッシュは、任意の形・大きさにより重要な個所を細かく、それほど重要でない個所は粗く組まれるという違いがある。マトリックス演算を行うのは差分法も同様であるが、有限要素法は簡単な線形式を用いるために大行

列の演算を行い易く、複雑な境界条件をもつ場合や局所的な変数変化が見られる場合に有効である^{8) 18) 24) 37) 48) 63) 70)}。

以上のような点において、有限要素法は差分法に比べて汎用性に富む。

(3) FEMによる浸透流解析法

有限要素法(FEM)とは、無限の自由度をもつ連続体や連続場を有限個の要素に分割して、有限の自由度をもつ集合体に近似して取り扱う方法である^{8) 18) 24) 37) 48) 63) 70)}。この手法を二次元浸透流解析に適用する場合には、連続場は、三角形または四角形の要素に分割される。各要素内の透水係数や貯留係数は一定とされ、水頭変化の伝達は節点を通じて行われるとされる。また、各要素内の水頭は位置の一次関数により表される。定常流解析を行う場合に与える境界条件は、境界上でポテンシャル(水頭)が与えられる場合と、境界上で流出・流入の速度(単位流量)が与えられる場合の二つがある。

自由地下水面を有する地下水流動について解析を行う場合には、地下水面の位置と飽和-不飽和領域の関係が重要となる。これらの取り扱い方により、大きく2つの方法に分けられる。一つは、不飽和領域での流れを考慮しない方法で「飽和解析法」と呼ばれる。もう一方は、不飽和領域も含めて考えた方法で「飽和-不飽和解析法」と呼ばれる。

(i) 飽和解析法

地下水面を最上限の流線とし、それ以下の流れを飽和流としてポテンシャル $H (= h + P)$ についてのラプラス式 $\nabla^2 H = 0$ を解く方法である。この手法には二つの問題点がある。第一に、仮定した自

由地下水面が $H=h$ （または、水圧=大気圧）を満足しているか否かでメッシュの組み替えが要求されることにある。第二には、自由地下水面上に存在する、いわゆる“誘導毛管水”による流れ³¹⁾の存在を無視していることにある。

飽和解析法を用いる場合には、自由地下水面以下の飽和流のみを対象とした近似的な解析方法であるということを認識したうえで用いる必要がある。

(ii) 飽和—不飽和解析法

Freeze¹⁰⁾により自由地下水面は流線とは一致しないことが示されている。しかし、不飽和領域は、水分量の変化を原位置で空間的、時間的にとらえることが難しいほか、土質試験法が未確立であったため定量的な把握が容易ではなかった⁴⁰⁾。

近年、ダルシー則が不飽和領域でも成立するとした飽和—不飽和解析の確立¹³⁾⁴⁰⁾⁵⁹⁾によりこの手法が発展した。具体的には、飽和解析では無視されていた毛管流動を考慮に入れ、不飽和領域を含めて解析を行うものである。この方法では、メッシュの組み替えを必要とせず、現在最も実態に即した数値解を得ることができる。

しかし、この解析法は不飽和透水係数 k と土壤水分 θ 、または土壤水分 θ とポテンシャル ϕ の関係、つまり $k=f(\theta)$ 、 $\theta=f(\phi)$ の関係をあらかじめ、実験により求める必要がある。そのため、実験による測定誤差の影響が解析結果に対して、直接的に影響を及ぼす。また、この関係を特性曲線法などにより求めることも可能であるが、様々な仮定条件に基づくため不確実性が大きく問題が残されている。

これらの解析法については、様々な計算法が提案されている。このうち、吉田は⁶⁰⁾飽和—不飽和解析法の簡易的な計算法として次の

ような方法を示している。

(iii) 吉田らの解析法

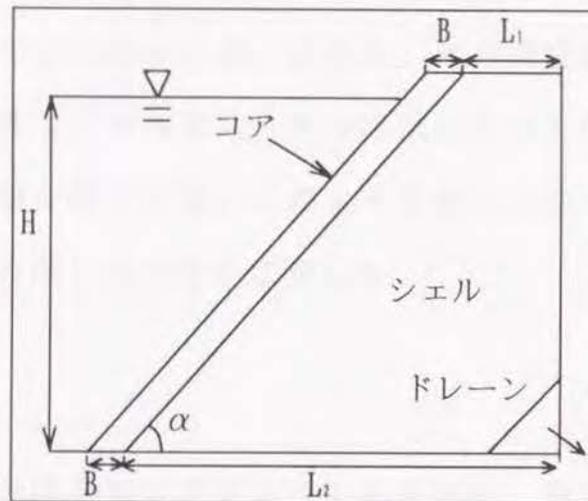
吉田ら¹¹⁾は、ラプラス式 $\nabla^2 H=0$ を自由地下水面上部の不飽和領域を含めた全領域に対して適用する解析法を示している。この方法では、解析領域を自由地下水面以下に限定しないため、自由地下水面を求めるのにメッシュの組み替えを必要としない。そのため、不飽和領域を含む全領域でポテンシャル分布を求めることができる。

この方法は、従来の飽和-不飽和解析のように、不飽和透水係数やそれを求めるための水分特性曲線を必要としない。それにもかかわらず、精度的には上述の飽和-不飽和解析法にかなり近似した結果を得ることができる。自由地下水面は、得られたポテンシャル分布から圧力ポテンシャルが大気圧と等しくなる部分($H=h$)としてある。そのため、毛管流動を含めた形での自由地下水面が容易に求めることができる。このほか、計算に要する時間も少なく、きわめて効率的な解析法といえる。

この解析法の問題点としては、吉田ら¹¹⁾の指摘にあるように、不飽和領域で等ポテンシャル線と流線との角が 90° に近似されない場合に誤差が大きくなることがある。

また、Fig. II-1に示すように均質体での結果に比べ、成層体で層間での透水係数の比が大きくなった場合、解析結果とサンドモデル実験の結果に大きな差が生じている。

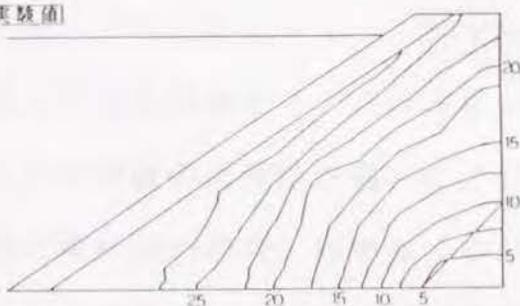
湛水深	H=30cm
堤体の斜角度	$\alpha=33.7^\circ$
堤高	H _t =33cm
シェル部の上底長	L ₁ =6cm
シェル部の下底長	L ₂ =55cm
コア幅	B=5cm



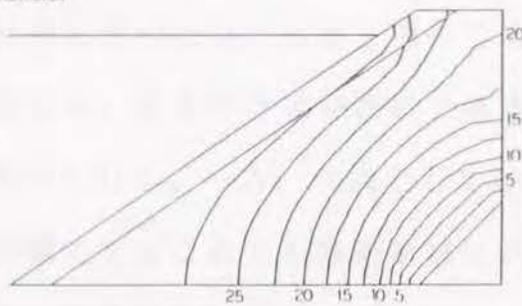
透水係数 (cm/sec)	
コア	1.96×10^{-1}
シェル	1.96×10^{-1}
コア:シェル	1 : 1

* 比較的近似した結果が得られている。

[実験値]



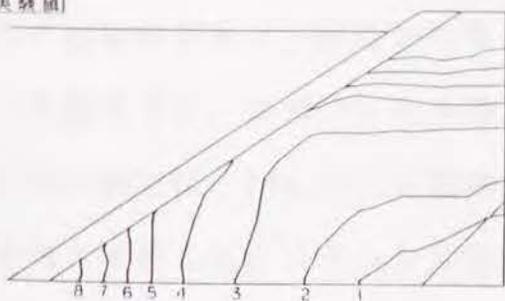
[解析値]



透水係数 (cm/sec)	
コア	2.83×10^{-1}
シェル	1.96×10^{-1}
コア:シェル	1 : 144

* 実験値の方が小さめの値を示している。

[実験値]



[解析値]

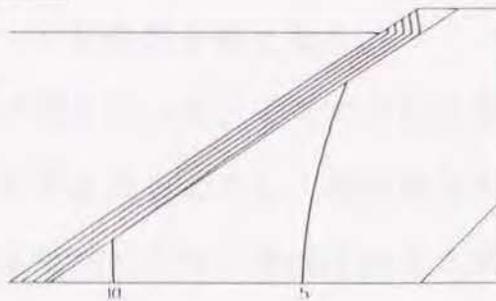


Fig. II-1 模型実験値と吉田らの方法による解析値との比較

しかしながら、本論文では均質な地盤を取り扱うため、このような問題による影響はきわめて小さいといえる。さらに、水分特性曲線の実測などの手間や精度の面でこの方法は、他の手法に比べてきわめて簡便に高精度の解析結果が得られる。このような理由に基づき、本論文でのFEM解析は吉田らの方法を採用した。

(4) サンドモデル実験

サンドモデル実験は、境界条件を満足するように砂を詰め、浸透流を生じさせ、その状況を測定する方法である¹¹⁾。具体的には、マノメータなどによりポテンシャル分布を求めたり、色素を用いて流線の状況を観察する。この方法の利点は、装置の作成が容易であることや実験の再現性が高いことが挙げられる。一方、欠点としては、砂の締め固めの均一性を保つのが困難であることと不飽和領域において毛管現象の影響を強く受けることが挙げられる¹⁴⁾。

二次元模型でのサンドモデル実験では、ポテンシャル値の測定はマノメータ法により行うのが一般的である。しかし、三次元模型の場合には、側面以外での測定にはマノメータでは十分な対応ができない。そのため、三次元模型実験では種々のセンサー類が用いられる。しかし、模型規模が小さい場合には、センサー自体が浸透場を乱す危険性があり、何らかの異なった対応が必要になる。

本研究では、IV章で三次元模型実験を行った。そこでの自由地下水面の測定は、Fig. II-2の概略図に示されるように、地表面から一定深さで挿入したステンレス製測定用パイプ内に形成される水面を測定し、自由地下水面を求めた。この測定法に関する詳細は後述する。

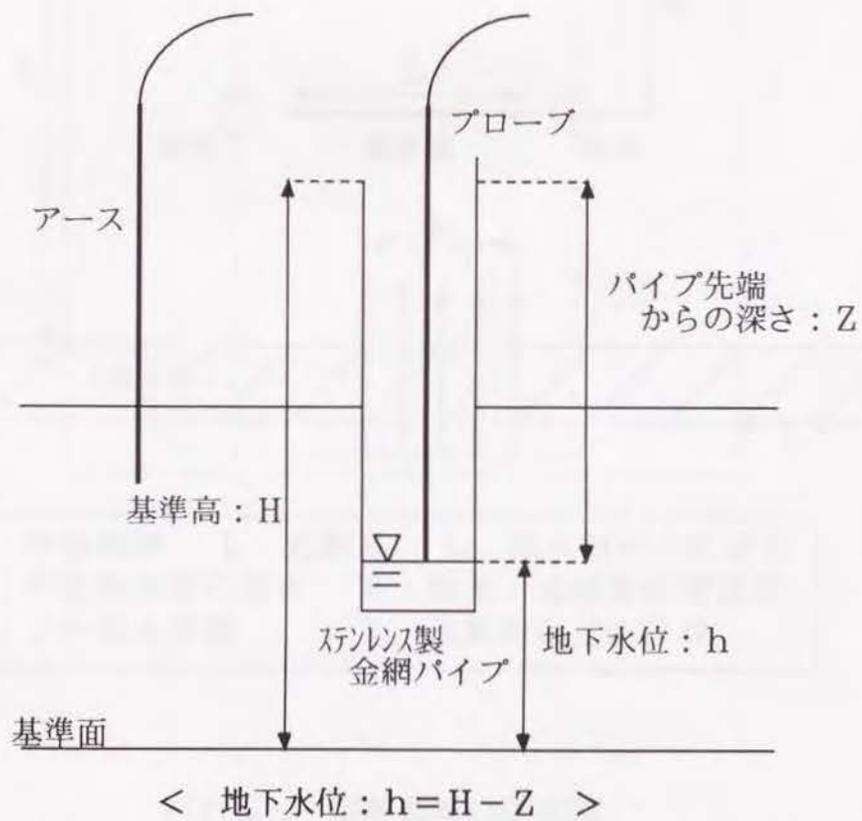
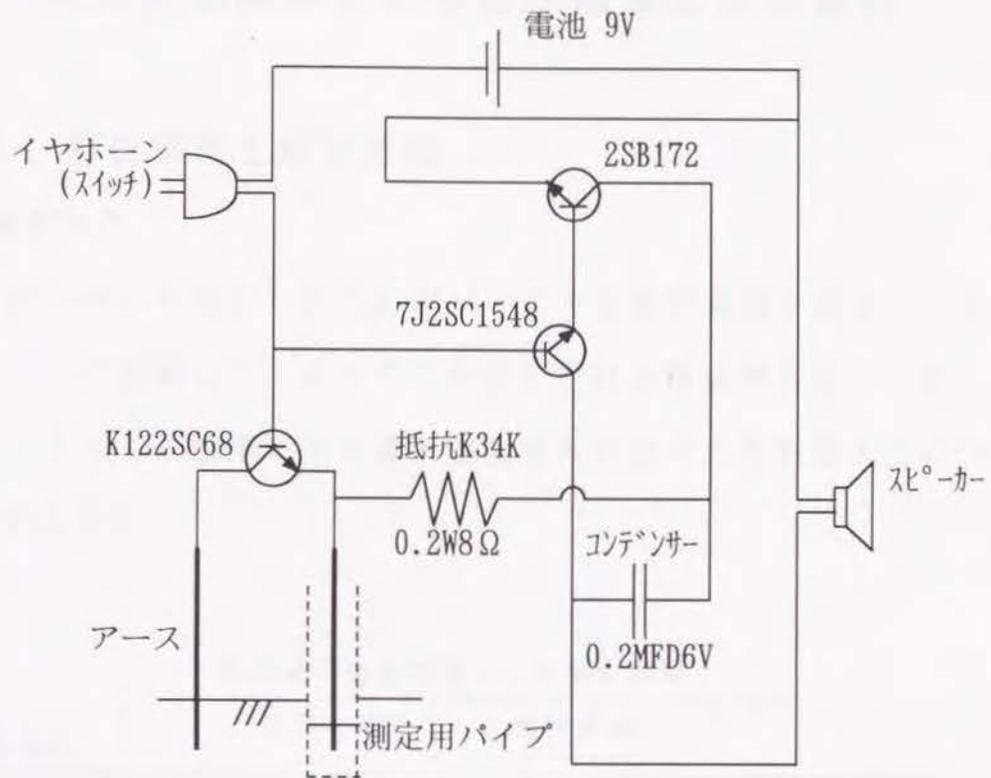


Fig. II-2 水面接触センサー回路図と自由地下水面の測定法