

官民連携新技術研究開発事業 研究成果報告書

研究課題名	FDR 法によるため池堤体の安全管理・危険予測システムの構築
研究開発組合代表社名	NTC コンサルタンツ株式会社

1. 研究目的

日本国内には、大小様々な大きさのため池が数多く存在している。ため池の中には、管理が十分にできていないために、堤体の崩壊等により、下流の人家や農地などに被害をもたらす可能性がある。都市または都市近郊部でこのような災害が発生すれば甚大な被害が予想されるため、適切な管理や補修を行うことは非常に重要である。しかし、全てのため池を短期間に補修することは、物理的にも財政的にも困難であることから、安価で汎用性の高い監視システムを構築することが求められる。当新技術研究開発組合における技術開発の目的は、危険性の高いため池や、災害時に大きな被害が予想されるため池を常時集中管理するシステムを構築することである。

2. 研究内容

2.1 研究概要

本事業全体および計測システムの概要を、それぞれ図1、図2に示す。

2.2 研究項目

(1) FDR 法による推定浸潤面の多点観測に関する研究

土壌水分量計測で従来行われてきた、1つの信号ケーブルで1点だけ観測するシステムを応用し、1つの信号ケーブルを用いて多点での観測システムを構築する。

(2) ため池堤体における土壌水分量の解析技術の確立

前節で得られた多点観測装置をため池堤体に配置することにより、ため池堤体の土壌水分量をメッシュ状に観測し、それらのデータを災害時に対応できるよう、リアルタイムに解析するための技術を確認する。

(3) ため池堤体の現状分析および遠隔監視システムの構築

前節の結果および同時に設置する地下水位計による計測結果を用いて、ため池の安全性に関する現状分析を行うために必要な情報の整理、および、遠隔監視を実施するに当たって必要なシステムの構築を行う。

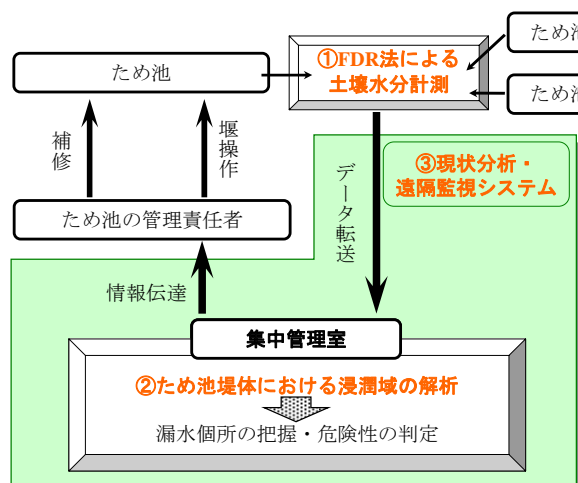


図1 研究の概要

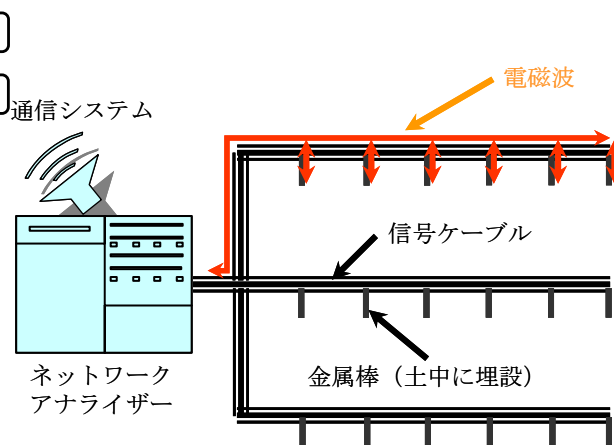


図2 計測システムの概要

3. 目標とする成果

3.1 目標とする成果

本事業における目標成果は、以下のとおりである。

- (1) FDR 法により、信号ケーブルとプローブの結合部における電磁波の反射の強さを測定することにより、プローブ周辺地盤の土壌水分変化を測定する。
- (2) FDR 法による計測データおよび地下水位データより、不飽和帯浸潤域の計測方法を確立する。
- (3) 最新の技術を活用してデータ自動収録システムを構築する。
- (4) 安全管理・危険予測のシステムを構築する。

3.2 従来技術との比較

本研究開発事業において開発した新技術によるシステムと、従来技術である誘電率測定法および観測孔と水位計を組み合わせたシステムとの比較を次項の表 1 に示す。比較したシステムの概要は、以下のとおりである。

(1) 開発した新技術によるシステム	・ 1 本の信号ケーブル（概ね 200m 程度）で多点（約 8 測点、20m ピッチ）の土壌水分計測 ・ 同時に 2 測点（2 標高）の浸潤域計測（地下水位計測） ・ 商用電源や電話回線を用いない、遠隔自動監視システム
(2) 誘電率測定法の従来技術	・ 1 本の信号ケーブル（概ね 60m 程度）で 1 点の土壌水分を測定するシステムで 8 測点の土壌水分計測 ・ 商用電源や電話回線を用いない、遠隔自動監視システム
(3) 深観測孔と水位計による従来技術	・ 1 本の信号ケーブル（概ね 60m 程度）で 1 点の浸潤面を測定するシステムで 8 測点の浸潤面（地下水位）計測 ・ 商用電源や電話回線を用いない、遠隔自動監視システム

4. 研究成果

4.1 研究成果概要（目標とする成果との検証等）

(1) 電磁波反射特性と土壌水分量の関係	室内カラム試験および現地観測を想定した大型の圃場実験により、FDR 法による電磁波反射特性および土壌水分量の関係を明らかにした。
(2) 不飽和帯浸潤域の計測方法	現場に設置した計測機器のデータおよび地下水位計から不飽和帯浸潤域の状態を推定した。
(3) データ自動収録システム	現場に設置した計測機器により、定期的にデータを収集するし、インターネットを通じて管理者がいつでも確認できるシステムの開発を行った。
(4) 安全管理・危険予測システム	(1) および (2) で得られた計測結果に基づいて、安全管理基準および (3) を加えた管理システムの検討を行った。

4.2 実験施設における概要、結果、課題等

4.2.1 FDR 法による計測結果

ネットワークアナライザで得られた VSWR 値の関係から、水分量の計測が可能であることを検証するために、実験室および現場に近い状態を設定して、信号ケーブルに 2 点のプローブ（長さ 50cm）を接続し、地下水深の変化と FDR 法による計測結果を比較した。

前者に関して、実験室において、図 3 に示すカラム内に川砂を入れ、信号ケーブルに長さ 50cm のプローブ 2 本を連結した状態で、それぞれのプローブをタンクに挿入し、カラム下層より水道水を注入した。また、地下水表面が地表面付近まで達した後に、タンク下層から排水した。それぞれの地下水深が安定した状態で、ネットワークアナライザにより計測を行った。

表1 新技術と従来技術の比較表

項目	開発した新技術	従来技術	
工法名	FDR法による土壌水分と地下水位を組み合わせた測定法	土壌水分計による土壌水分測定法	観測孔による地下水位測定法
概要図			
システムの仕様	プローブにステンレス棒、ケーブルに同軸ケーブル、電源に太陽光電池、データ収集にインターネットを使用し、雨量・貯水位・観測孔水位データを含めてリアルタイムで監視出来るシステムを標準装備。 ◎	プローブにステンレス棒、ケーブルに同軸ケーブル、電源にバッテリー、データ収集にデータカード内蔵メモリーカードを使用。データの回収で現地に行く必要がある。データ転送には別途システムの付加が必要。 △	センサーは電気式計器、電源にバッテリー、データ収集にデータカード内蔵メモリーカードを使用。データの回収で現地に行く必要がある。データ転送には別途システムの付加が必要。 ○
土壌水分計測	1本の信号ケーブルで多点(約8測点)計測。 ケーブル長は約200m実証。 ◎	多数本の信号ケーブルで多点計測。 ケーブル長は100mが限度。 ○	土壌水分の計測は出来ない。 ×
地下水位計測	1本の信号ケーブルで1箇所の計測。 1本の信号ケーブルは最大数km延長可能。 ○	地下水位の計測は出来ない。 ×	多数本の信号ケーブルで多点計測。 1本の信号ケーブルは最大数km延長可能。 ○
センサ設置の経済性 (20m ² につき、8カ所)	土壌水分計測器 センサー: 24万円 (3万円/台) ケーブル: 7.2万円 (400円/m×180m) 地下水位計測器 センサー: 40万円 (20万円/台) ケーブル: 7.2万円 (600円/m×120m) オグナー: 2万円 (1万円/孔) 労務費: 4人工 ◎	土壌水分計測器 センサー: 80万円 (10万円/台) ケーブル: 38.4万円 (800円/m×480m) 労務費: 4人工 ○	地下水位計測器 センサー: 160万円 (20万円/台) ケーブル: 8.8万円 (600円/m×480m) オグナー: 8万円 (1万円/孔) 労務費: 4人工 △
センサ設置の施工性	プローブは治具により簡易に設置可能。 観測孔はドリットオグナーにより設置。 信号ケーブルは1本で多点計測。 ○	プローブは注意深い設置が必要がある。 信号ケーブルは多数本で多点計測。 △	観測孔は機械ドリットまたはドリットオグナーにより設置。 信号ケーブルは多数本で多点計測。 △
システムの確実性 データ収集の容易性	土壌水分、地下水位の両面から堤体を評価できること、インターネットを通じてリアルタイムでデータを収集・監視できることから確実性は高い。 ◎	土壌水分のみで堤体を評価すること、データ回収に現地に行く必要があることから、確実性、データ収集の容易性は低い。 △	地下水位のみで堤体を評価すること、データ回収に現地に行く必要があることから、新技術に較べて確実性、データ収集の容易性は劣る。 △
センサの長期耐久性	堤体内に埋設する土壌水分計測用プローブはステンレス棒で耐久性は高い。 ○	堤体内に埋設する土壌水分計測用プローブはステンレス棒で耐久性は高い。 ○	堤体内に埋設するセンサーは電気式であり絶縁による耐久性が低い。 △
ため池適用での 総合評価	土壌水分、地下水位の両面から堤体を評価できること、インターネットを通じてリアルタイムでデータを収集・監視できることから確実性が高く、また施工性、経済性、耐久性(長期自動観測)についても優れる。 ◎	土壌水分のみで堤体を評価すること、データ回収に現地に行く必要があることから、確実性、データ収集の容易性は低く、プローブは注意深い設置が必要があること、信号ケーブルは多数本で多点計測であることから施工性、経済性、耐久性(長期自動観測)が劣る。 △	地下水位のみで堤体を評価すること、データ回収に現地に行く必要があることから、確実性、データ収集の容易性は低く、センサーが電気式であり、絶縁による耐久性が低いこと、信号ケーブルは多数本で多点計測であることから施工性、経済性、耐久性(長期自動観測)が劣る。 △

凡例: ◎: 特に優れている、○: 優れている
△: 他に較べて劣る、×: 技術的に問題がある

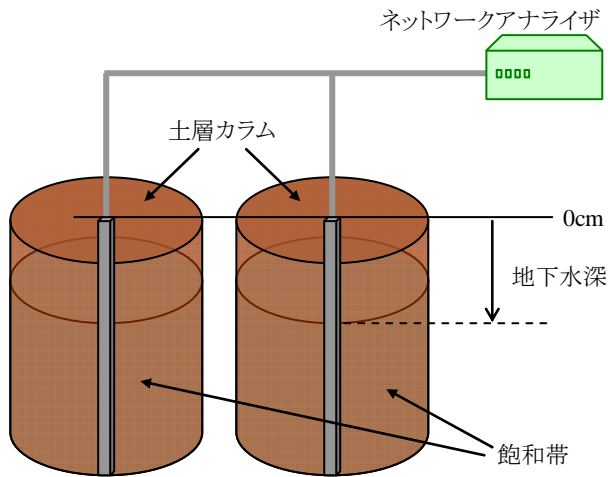


図3 土層カラムおよび計測の概要

測定結果を図4に示す。地下水深の変化とともにVSWRの値が変化することが示された。また、対数関数で近似曲線を求めると、地下水深が地表に近い状態でVSWRの変化が大きくなる傾向が示された。

4.2.2 浸潤域の推定結果

FDR法により土壤中の浸潤域を推定するために、三重県斎宮調整池第2副堤の堤体斜面で現場試験を行った。設置の概要を図5に、ネットワークアナライザからの距離とVSWRの関係を図6に示す。

同図より、信号ケーブルとプローブの接続点において、VSWRが大きくなっていることが分かる。ただし、170m地点にあるP9のプローブの接続点と考えられる地点におけるVSWRは接続点以外の信号ケーブルで生じるVSWRと区別することが困難である。したがって、同システムにおいては、ネットワークアナライザに近い方から8本分の反射を捉えられたと評価できる。

次に、各地点の信号ケーブルとプローブの接続点において得られたVSWRがプローブ周辺の土壌水分量によって変化することを検証した。

結果の一例として、図7にP1~P3の各接続点でのVSWRとWL3の地下水位の変化を示す。

同図によると、8月21日から9月初旬にかけて、地下水位が上昇している際に、VSWR先行して変化している様子が伺える。すなわち、地下水面直上の不飽和帯における水分量の増加に反応してVSWRが変化し、その後飽和帯の上昇に伴って地下水位が上昇したことより水位計の値が変化したと考えられる。したがって、地下水位の上昇過程（浸潤過程）において、本技術の有効性が検証できたと考えられる。

VSWRと地下水位変化の詳細を検討すること、および、安全管理を念頭において、以下では、地下水位の上昇過程における信号ケーブルとプローブの接続点のVSWR値を統計的に整理し、管理上留意すべき状態の判定を試みた。図8には、P1におけるVSWRとWL3の水位を1時間間隔で比較した。なお、図中では地表面をゼロとした地下水深で示しており、信号ケーブルとプローブの接続点はほぼ一致する。

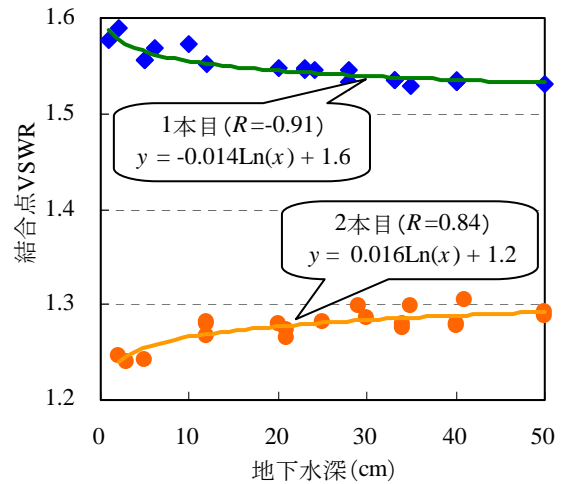


図4 地下水位とVSWRの関係

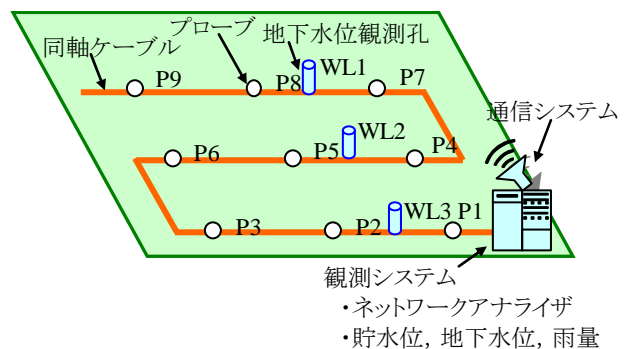


図5 観測システムの概要

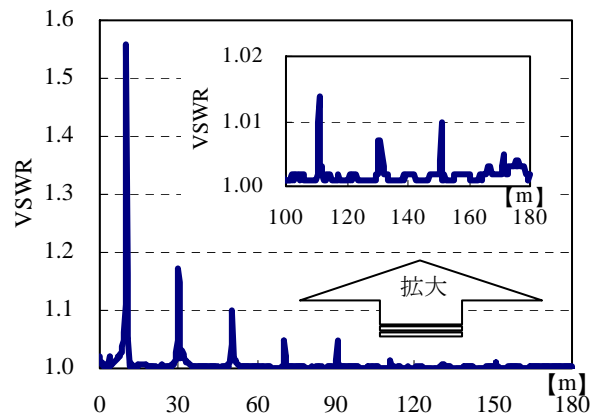


図6 ネットワークアナライザからの距離とVSWRの関係

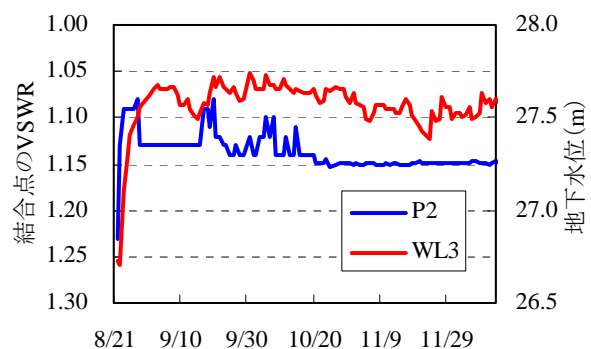


図7 VSWRと地下水位の関係

同図によると、8月22日から VSWR が変化し、8月23日正午からの地下水位が上昇に先だって変化している様子が伺える。すなわち、ため池堤体下部の土壤水分量の増加とともに VSWR が変化し、その後地下水位が上昇していることが図8から判断できると考えられる。したがって、接続点における VSWR を連続的に観測することで、土壤水分変化を地下水位変化より早く捉えることが出来ると考えられる。なお、危険性の判断は、データを蓄積することで、安全性が確保されている状態で得られた VSWR から統計的に行うことができる。

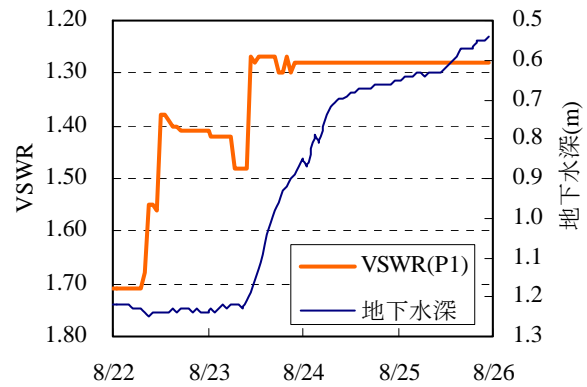


図8 P1のVSWRと地下水深の関係

一例として、図9には、地下水位が上昇を始めた8月23日正午までに得られたP1におけるVSWRの頻度分布を正規分布で近似し、信頼区間を加えた。例えば、8月23日11時にはVSWRが1.27となったが、これは統計的にこれまでの水分状態と同様であることが95%の確率で棄却されることを意味する。実用上は、より多くのデータを収集することにより、現場に適した基準値を設定することが可能となると考えられる。

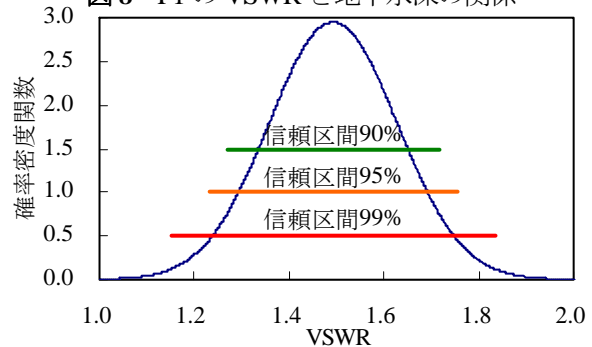


図9 P1におけるVSWRの正規分布

4.2.3 データ自動観測システムの概要

データの自動収集に際しては、予め指定した時間間隔で計測およびデータの収集を行い、データ収集後直ちにWebサイトにアップロードすることにより、遠隔地においてデータの監視が可能なシステムを構築した。測定項目等のシステムの概要は以下の通りである。

- ・ 計測項目 ネットワークアナライザを用いた VSWR 測定 1 ライン
ひずみ、電圧、電流、温度、貯水位計、間隙水圧計、気温計等 最大 12 点
雨量計 (接点信号) 1 点
- ・ データ送信 サーバーへ直接送信 (測定間隔は 10 分~24 時間インターバル可変可)
- ・ データ表示 一覧表 (月報・日報)、履歴図、2 次元解析結果図
- ・ 電 源 ソーラー電源ユニットを装備
- ・ 閲覧のための装置 任意のパソコン (Internet Explorer 等の Web ブラウザソフトを使用)

4.2.4 安全管理システム

安全管理システム構築のための検討項目は以下の通りである。また、次項に関連のフロー図に示す。

A 計器設置前の事前調査	F データ計測	K 異常時の情報収集
B 監視計画	G 集中管理室での計測値整理	L ため池診断 (現地)
C 監視機器の設置	H 評価 (自動)	M 情報転送
D 基準値設定のためのデータ計測	I 安全性診断	
E 管理基準値の設定	J システムの見直し	

4.3 普及活動状況等 (論文, 特許等)

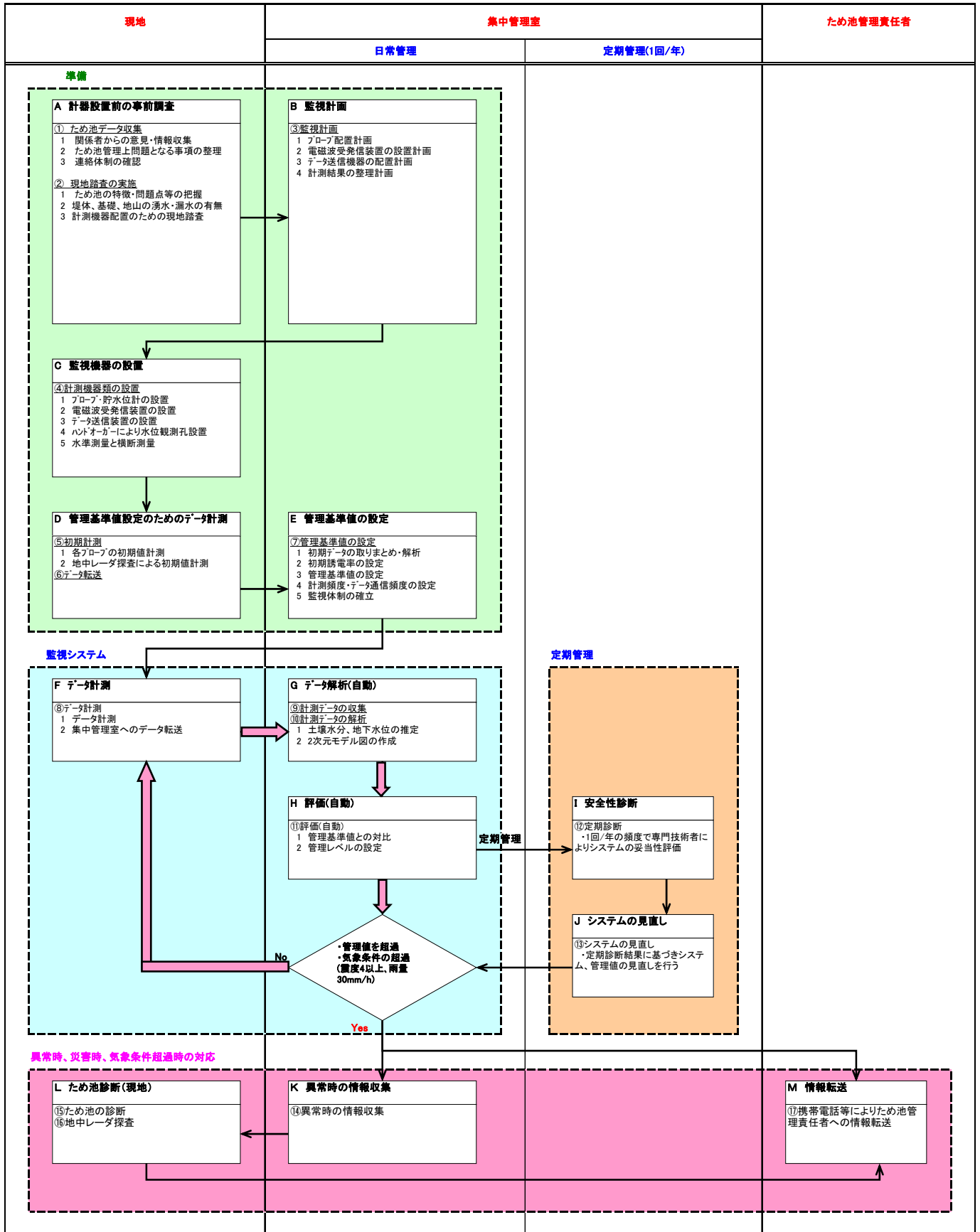
特許: 多点・多層の土壤中の水分濃度分布測定方法及びシステム (出願予定)

口頭発表: 坂田 賢、中村公人、野津俊光、鈴木盛雄、徳富啓二、立野恵一、刑部信吾、毛受亨政、三野 徹 (2008): 地中レーダを用いた土壤中の水分状態の計測, 農業農村工学会京都支部研究発表会

5. 今後の課題

- (1) インピーダンスのマッチングの最適化手法を確立することにより、1本のケーブルにより更なる計測数の増加の可能が考えられる。
- (2) FDR 法では毛管上昇域を考慮した地下水モデルを構築していくことが可能となる。したがって、地下水観測結果を考慮したさらなる安全管理手法の向上が課題である。

FDR法を利用したため池安全管理システムフロー



6. 試験研究機関（農工研、大学等）総括者による意見・評価等

項目	評価結果	備考
研究計画の効率性・妥当性	A	①すでに理論的には完成している FDR、TDR による土壌誘電率計測理論を基礎に、具体的な計測技術に発展させることを目的にしていること、②アンテナ調整用として安価にしかも多量に生産され始めた計測装置の使用を前提としていること、③センサ埋設などの現場測定技術の確立を目指していることなど、応用技術の確立を目指した効率的研究である。
目標の達成度	B	研究計画は妥当性が高いが、中心となるネットワークアナライザーと信号発信、信号解析装置の汎用性に乏しく、それへの対応に終始したために、肝心の研究目標達成に時間切れの感がぬぐえない。 また、目的そのものがまれにしか生じない事象の検出にあるために、実験現場でそのような異常事態の再現が不可能であり、間接的にしか現地実験ができていない。
研究成果の普及可能性	B	研究目標が完全に達成されたとはいいがたいために、一般的な普及はもう少し時間を要すると思われる。しかしながら、ため池のモニタリングに限らず、一般的な地盤災害へ広く応用できることが確認できたので、今後普及の可能性はきわめて高いと考えられる。
研究成果の出来栄	A	地中レーダーによる計測では、電磁波の伝播速度を一定と仮定した解析が行われてきたが、伝播速度の変化による反射波を利用するというレーダー理論の矛盾を、マーカーの設置ということで解決できることを見つけ出したことは、大きな成果である。地中レーダーと本方法を組み合わせることにより、地下の水分分布状況を観測することが可能であることを確認した。
総合コメント： 必ずしも当初目標を完全に達成できたとはいえないが、完成の域に達していると判断される。また、地中レーダー探査法とは互いに欠点を補完しあう技術であり、今後の新たな利用方向を見出したとして評価できる。		

注) 評価結果は、A, B, C のうち「A」を最高点、「C」を最低点として3段で記入する。

7. 研究総括者による自己評価

項目	評価結果	備考
研究計画の効率性・妥当性	A	室内での成果を基に現場で実効性を確認しながら、また必要に応じフィードバックして効率よく研究を進めた。実際にため池現場にも研究活動を行い、実務としての妥当性を確認した。
目標の達成度	B	盛土の複数点計測、計測結果のデータ送信、データ図化等研究の実務性は確認できた。ただ、ため池自体の含水状態が継時的に変化するのには相当な時間を要するので、盛土含水状態の継時と計測結果の動態は今後も計測を続け、長期共用での実行性を確認して行きたい。
研究成果の普及可能性	A	本研究は盛土内の間隙水圧・土圧・変位など工学的な動態を計測するものではなく、それらの動きの予兆となる盛土内の含水状態の変化形態を簡易に計測するものである。事前早期予測の目的では、頻繁にまた急速に事故へと発展する例の多い地すべり地帯については、公共的に需要が高い点で本研究の応用は期待性できる。
研究成果の出来栄	A	計測現場では、計測プローブ及びリード線は地表面直下に埋設できる。地表部には電磁波計測器（ネットワークアナライザー）、データ蓄積・送信機器、それらの電源となるソーラー発電・バッテリーで構成され、これらはコンパクトにまとめ上げることが出来て、ため池の維持管理上支障を与える施設にはならない規模のものであった。
<p>総合コメント</p> <p>本研究は、ため池盛土が浸透水・漏水等によって変調を来たして損傷・崩壊に至る事態を、盛土内の含水状況・変化を把握してその予兆を知る方法の開発である。従来の計測機器とは異なり、工学的動態ではなく、盛土の含水状態を安価に計測し、また同時多数点計測でより立体的に盛土の状態を把握するものである。計測原理は電磁波の送受信によって変化する土の誘電状況を読み取り、盛土の含水状態の推察することになる。盛土の性質・密度飽和度、プローブの長さ、リード線の抵抗性・接続状態などかなり多数の因子によって、盛土の誘電状況が影響される。この微妙な変動の読み取りを特化させたものとしてサイトマスターを利用しているが、この製品は汎用品でないため未だ安価ではない。また機能としても必要以上に複雑であるので、特定機能に集約させた製品の開発が望まれる。これが得られるまでは複数のため池を兼用（ないしはグループ化）して経済性を図ることになるが、安価な製品が開発されれば、個別のため池単位に利用が可能になる。またこの研究の利用は、利用可能な箇所が多くまた初期費用での問題が少ない、地すべり地帯での活用が大いに期待されるところである。</p>		

注) 評価結果は、A, B, Cのうち「A」を最高点、「C」を最低点として3段で記入する。