

平成23年度第3次補正予算事業 戦略的基盤技術高度化支援事業

「画像センサー深度計等を内蔵した低コストボアホールスキャン装置の
実用化開発」

研究開発成果等報告書

平成25年2月

委託者 東北経済産業局
委託先 財団法人 青葉工学振興会

目 次

第1章 研究開発の概要	1
1-1 研究開発の背景・研究目的及び目標	1
1-2 研究体制	4
1-3 成果概要	7
1-4 当該研究開発の連絡窓口	9
第2章 本論	10
2-1 画像センサー深度計の研究開発	10
2-2 方位、傾斜計測部の研究開発	20
2-3 ボアホールスキャン装置のセンシングプローブの研究開発	21
2-4 ボアホール画像スキャン部及びデータ記録部の研究開発	23
2-5 PC側のアプリケーションソフトウェアの研究開発	23
2-6 機器設備等の開発	25
第3章 全体総括	26
3-1 研究開発成果	26
3-2 研究開発後の課題	26
3-3 事業化展開	26

第1章 研究開発の概要

従来のボアホールスキャン装置は、細いボアホールの中に吊下げワイヤと信号ケーブルを合成した太いケーブルを通して地上で操作・制御するため、①長い信号ケーブルにより画像の劣化がある ②深さは繰出し滑車の回転から取るので不正確 ③3次元情報はない ④ケーブル事故の危険が高い ⑤1000万円以上と高価であるなどの問題点を有する。

そこで、これらを解決するため新技術を導入し、

- ・地上の操作は吊下げのみ（細いワイヤ1本で操作は簡単、地上制御器は不要）
- ・制御は簡単で、絡みなどの恐れがない。
- ・画像はプローブ内で解析・保存されるので高画質が確保できる。
- ・高精度の深さ情報と3次元位置情報をプローブ内で独自の画像解析により取得・保存する。
- ・200万円以下の低価格を実現する。

などの性能、仕様、価格を有する新装置を研究開発する。

このことにより、開発するボアホールスキャン装置の設定目標を達成するため、以下の実現を図る。

- (1)プローブ内で画像解析を行い、リサンプリング・合成したボアホール壁画像を保存することで、データ量の削減と高画質を同時に実現する。
- (2)画像センサー深度計を開発し、高精度の深さ情報を実現する。
- (3)地中でのプローブの3次元位置情報を得る3次元磁気方位センサーを導入する。
- (4)これらの解析機能を、直径50mm、最大長1000mmのプローブ内で実現するため回路の小型化を進める。
- (5)1000mまでの実行調査を目標に、101気圧までの耐圧性能と観測持続8時間を実現する。

1-1 研究開発の背景・研究目的及び目標

(1) 研究背景

社会基盤に関連する産業では情報化施工など産業機械及び産業ロボット技術に密接に関連した技術が施工性、安全性、信頼性向上に繋がる。この中で、可視化の重要性は一般に認識され、かつ可視化技術の用途拡大、高精度化のニーズは高い。例えば、トンネル掘削において、先行ボーリングによって、未開削のトンネル前方情報を得て、掘削方法、支保設計を決定する。岩盤の状況を適格に判断しなければ、作業の安全性、トンネルの安定性が損なわれ、多大なコスト、工期を要することになる。先行ボーリングの孔を利用した孔内観察による地層の変化、弱層の状況および観察画像から解析した亀裂の走行、傾斜などの情報は非常に有益な情報であるが、費用が高価なため、いつも、どこでも使用される状況にはない。上記は、トンネル掘削作業に対するボアホールスキャン装置の有効性、使われ方を例示したものであるが、地質調査全般にわたって、ボーリング孔内の観察の重要性が認識され、大規模なプロジェクト（例えば、ダム建設）では実施されてきた。

従来装置は、画像記録装置および深度計が地上部にあり、牽引ワイヤ以外に通信ケーブルが必要のため操作性が悪い。また大深度（500m 以深）の場合、伝送に伴う信号が減衰し、画像の劣化を生じることが知られている。この改善のため、通信ケーブルに光ファイバーを使用した装置も開発されているが、高価である。

この状況をブレークスルーするためには、低コストでかつ操作性のよいボアホールスキャン装置の開発が必要不可欠である。そのための、アイデアが通信ケーブルのケーブルレス化である。ケーブルレス化には無線システムも考えられるが、孔内は地下水で満たされているため、利用できる環境にはない。

（2）研究目的及び目標

安全・安心な住宅・ビル建設等に必要な地質調査等では、ボーリング孔（ボアホール）内の断層・亀裂等を精密で安価に解析するためのボアホールスキャン装置が求められている。現状のボーリング孔内観測装置は高額で取扱や精度上でも多くの問題を抱えており、国内に数千社あるボーリング会社の自社による画像データ取得・解析業務の妨げとなっている。本事業では、プローブ内に独自技術である画像センサー深度計、3次元磁気方位センサーを実装し、組み込みソフトウェア技術で実現するリアルタイム画像処理による画像情報に高精度な深度・方位情報を付加したスキャンデータを内蔵記録可能な小型高性能・低コストで汎用型のボアホールスキャン装置を開発することを目的とする。

本装置は、社会基盤技術として位置づけられる地質調査としてのボーリング調査に、現状では高額で普及していない画像データという高付加価値を与え、ボーリング調査への高信頼性、設計上の安全性を画期的に向上させるものである。また、本装置に組み込む画像処理技術は産業機械や産業ロボット技術分野においても、可視化技術の共通技術として制御等に活用が期待される。

研究開発目標を以下に列記する。

- 1)装置販売価格 200 万円を設定
- 2)画像情報取得の簡便化、装置の操作性の簡便化（画像情報、位置情報をプローブ内に記録、通信ケーブルのケーブルレス化）
- 3)深度計測情報の精度として $\pm 3.0\%$ を確保（画像センサー深度計の開発）
- 4)画像位置情報の正確さ（画像センサー深度計および3次元磁気方位センサーのプローブ内実装）
- 5)ボーリング孔径 56mm での調査が可能なサイズを開発、プローブ径 50mm、長さ 1000 mmを実現（小型化目標）
- 6)1000mまでの実行調査を目標に、101 気圧までの耐圧性能と観測持続8時間を実現

市販の高価格ボアホールカメラ装置に対して、低コストを意識して前方視画像から画像処理により、孔内展開図を作成するソフトウェアを開発する。これは、従来の孔内でカメラを回転させて画像を取得する方法より構造が簡単で装置の価

格を低減させることができるが、撮影画像から孔内展開図を作成することは難しい。本事業で開発する新装置の開発目標と従来装置との相異を表1-1に示す。

表1-1 新装置の開発目標と従来装置との比較

	新技術	従来技術1	従来技術2	従来技術3
装置名称	画像センサー深度計 内蔵 ボアホールスキャン 装置	ボアホールイメージ ングプロセッサ	ボアホールテレビ ュ ア	ボアホールスキャ ナー
特徴	鏡や旋回機構は無い。 画像位置情報を正確 に得ることができる。 安価に導入でき、簡単 な操作で、誰でも使用 できる	正対方向から撮影す ること、孔壁クラッ クの深度と傾斜角を 正しく表示できる。	濁水で目視不可能で も情報が得られる。	強力な照明ビームを 使用するため水の濁 りの影響が少ない。
カメラ機構	前方視	孔壁正対 360 度旋回	孔壁へ超音波照射, 360 度旋回	らせん状に旋回しな がら撮影
経済性 (機器価格)	200 万円以下	1000 万円以上	1000 万円以上	1000 万円以上
現場条件	最小孔径：φ56mm 対応深度：1000m	最小孔径：φ66mm 対応深度：1500m	最小孔径：φ66mm 対応深度：1000m	最小孔径：φ66mm 対応深度：1000m
装置の形態	プローブ	地上制御機，電信 ケーブル，プローブ	地上制御機，電信 ケーブル，プローブ	地上制御機，電信 ケーブル，プローブ
使用セン サー	画像センサー深度 計，3次元磁気方位 センサー	深度カウンタ，磁気 方位センサー	深度カウンタ，磁気 方位センサー	深度カウンタ，磁気 方位センサー

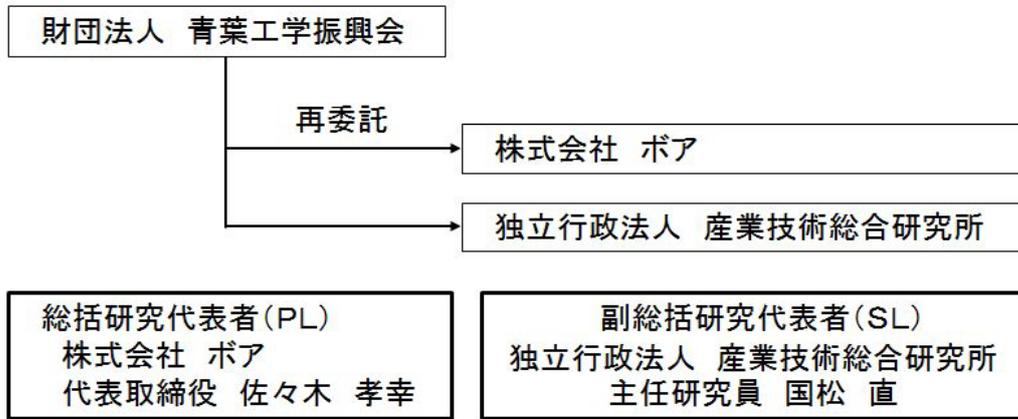
目的及び目標に対する実施結果は概略以下の通りである。

- 1)装置販売価格 200 万円を達成できる見通しができた。
- 2)画像情報、位置情報を装置内の USB メモリに記録，電信ケーブルのケーブルレス化により、画像情報取得の簡便化、装置の操作性の簡便化を図った。
- 3)装置内の画像センサー深度計の開発は、アルゴリズムを作成し、組み込みソフトウェアとして基板に実装したが、動作が不安定な結果となった。このことからアルゴリズムの再開発及び検証や画像位置情報の精度の確認は今後の課題である。
- 4)上記により、装置内への画像センサー深度計及び3次元磁気方位センサーは実装できたが、画像センサー深度計だけの検証や画像位置情報の正確さについての検証は今後の課題である。
- 5)プローブ径 50mm、長さ 965mm の装置を開発した。
- 6)装置の耐水圧実験を実施し、150 大気圧までの耐水圧を確認した。岡山サイトの 750m ボーリング孔にて深度 740m までの実証観測を行った結果、安定した画像を得ることができた。また、装置の連続動作 8 時間を行った結果、動作の異常も見受けられなかった。

1-2 研究体制

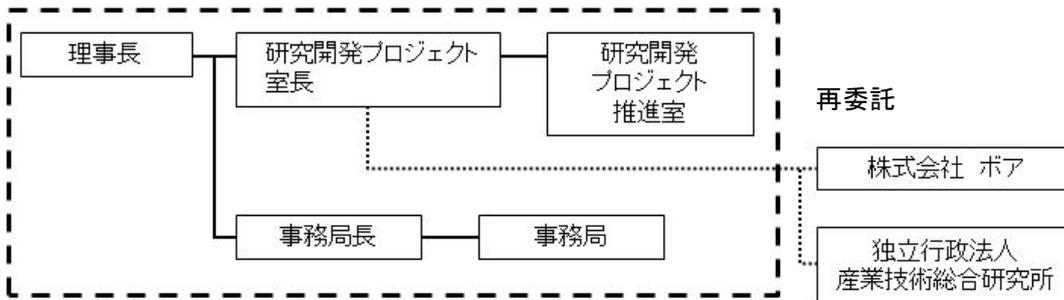
(1) 研究組織及び管理体制

1) 研究組織 (全体)



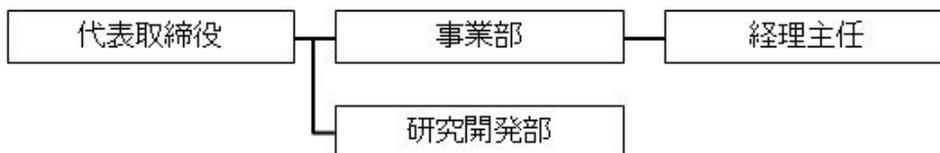
2) 管理体制

① 事業管理者 [財団法人青葉工学会振興会]

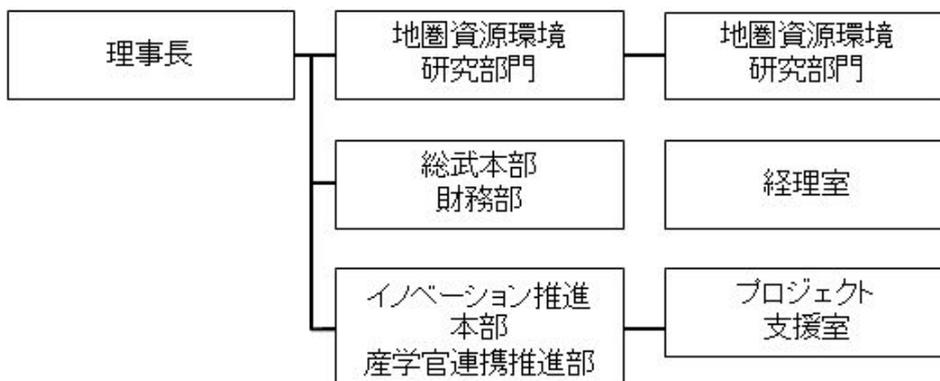


② (再委託先)

株式会社ボア



独立行政法人産業技術総合研究所



(2) 研究者

【事業管理者】財団法人青葉工学振興会

①研究員

氏名	所属・役職
田所 諭	研究員（東北大学大学院情報科学研究科 教授）
竹内 栄二郎	研究員（東北大学大学院情報科学研究科 助教）

②管理員

氏名	所属・役職
霜山 忠男	研究開発プロジェクト推進室 室長
米谷 いし子	事務局 経理主任
櫻井 正彦	研究開発プロジェクト推進室 契約主任
四十川 千秋	研究開発プロジェクト推進室 産学連携アドバイザー
大福 純恵	研究開発プロジェクト推進室 室員

【再委託先（研究員）】

株式会社ボア

氏名	所属・役職
佐々木 孝幸	代表取締役 社長
洪 子泉	研究員
研究補助員	非常勤研究員

独立行政法人産業技術総合研究所

氏名	所属・役職
国松 直	地圏資源環境研究部門 主任研究員
長 秋雄	地圏資源環境研究部門 主任研究員

(3) 経理担当者及び業務管理者の所属、氏名

【事業管理者】財団法人青葉工学振興会

氏名	所属・役職
米谷 いし子	(経理担当者) 事務局 経理主任
霜山 忠男	(業務管理者) 研究開発プロジェクト推進室 室長

【再委託先】

株式会社ボア

氏名	所属・役職
佐々木 文江	(経理担当者) 事業部 経理主任
佐々木 孝幸	(業務管理者) 代表取締役 社長

独立行政法人産業技術総合研究所

氏名	所属・役職
山口 洋二	(経理担当者) 総務本部 財務部 経理室 室長
駒井 武	(業務管理者) 地圏資源環境研究部門 部門長

(4) 他からの指導・協力者名及び指導・協力事項

研究推進会議 委員

氏名	所属・役職	備考
霜山 忠男	財団法人青葉工学振興会 研究開発プロジェクト推進室 室長	委
四十川 千秋	財団法人青葉工学振興会 産学連携アドバイザー (技術担当)	委
佐々木 孝幸	株式会社ボア 代表取締役 社長	PL委
洪 子泉	株式会社ボア 研究開発部 研究員	委
国松 直	独立行政法人産業技術総合研究所 地圏資源環境研究部門 主任研究員	SL
田所 諭	国立大学法人東北大学大学院情報科学研究科 教授	
竹内 栄二郎	国立大学法人東北大学大学院情報科学研究科 助教	
池田 俊雄	社団法人全国地質調査業協会連合会 事務局長	アドバイザー
脇坂 安彦	独立行政法人土木研究所 地質監	アドバイザー
石田 毅	国立大学法人京都大学大学院工学研究科 教授	アドバイザー
鈴木 健一郎	株式会社大林組 技術研究所 主任技師	アドバイザー
中土 宜明	公益財団法人新産業創造研究機構神戸ロボット研究所 所長	アドバイザー
杉山 和稔	三菱マテリアルテクノ株式会社 部長	アドバイザー
五江 通	株式会社ジオファイブ 社長	アドバイザー
切田 篤	独立行政法人産業技術総合研究所 イノベーション推進本部	アドバイザー

アドバイザー 氏名	主な指導・協力事項
池田 俊雄	装置普及に関し地質業界の川下企業からのニーズ、意見集約と助言
脇坂 安彦	画像による地質の特徴、変状判別に関する助言
石田 毅	社会基盤分野全般への展開についての助言
鈴木 健一郎	建設業界への展開についての助言
中土 宜明	産業ロボット分野全般への展開についての助言
杉山 和稔	資源開発業界への展開についての助言
五江 通	市場ニーズと製品開発についての助言
切田 篤	装置製作及びアルゴリズムに関する助言

1-3 成果概要

本研究開発期間中に、計画書の研究項目に従って、設計開発を行い、下記の成果が得られた。

① 画像センサー深度計の研究開発

(株式会社ボア、独立行政法人産業技術総合研究所、財団法人青葉工学振興会)

- ①-1 深度検出アルゴリズムの FPGA 論理回路の実現
- ①-2 並列演算によるパターンマッチング演算の高速化の実現
- ①-3 パターン移動量から深度方向移動量へのアルゴリズムの実現
- ①-4 フィールドでの実証実験
- ①-5 実証実験の結果を踏まえて改良作業

アルゴリズムを作成し、PC 上でプログラムに間違いがないことを確認して組み込みソフトウェアとして基板に実装した。深度算出精度の確認は今後の課題である。画像センサー深度計に必要な画像の取得については、フィールドでの実証実験において装置の総合的な動作確認試験を行い、改良作業を実施し、試作Ⅱ号機を作製した。後述するように、鮮明な展開図作成までは達成している。(70%達成)

② 方位、傾斜計測部の研究開発

(株式会社ボア、独立行政法人産業技術総合研究所)

- ②-1 孔内の方位、走向の計測組み込みソフトウェアの開発
- ②-2 角度計測精度の評価実験

3次元磁気センサーを装置に実装した。方位情報を画像データに組んで展開画像を生成するソフトウェアを開発した。垂直ボーリング孔について、従来機と比較し精度を確認した。傾斜ボーリング孔の場合の検証を今後行う予定である。また、方位角度、走向角度の絶対精度については未検証で、今後の課題である。(80%達成)

③ ボアホールスキャン装置のセンシングプローブの研究開発

(株式会社ボア、財団法人青葉工学振興会)

- ③-1 電子回路設計
- ③-2 基板設計及び試作、装置組立
- ③-3 組み込みソフトウェアの開発
- ③-4 非磁性ステンレス材、ガラス材の選定、強度計算
- ③-5 センシングプローブ筐体の設計、試作
- ③-6 大深度耐水圧試験

ハードウェア（電子関係）及びソフトウェアの両面から設計仕様書を作成し、それに基づいて電子回路図面を設計した。その回路設計図面通りの電子回路基板を設

計し、製作を行い、設計目標（各機能ブロック、I Cの配置及び配線要求）通りの基板を製作した。

材料力学の理論に基づいて目標深度の耐水圧強度を持つプローブの外形構造、ステンレス部と透明部との接続構造、または電子信号及び制御の観点からプローブ内部の電子基板の取付構造を設計し、組み立て、製作を行い、設定した目標（耐水圧、寸法、磁気ノイズの排除、光学の要求、ユーザーインターフェース）を達成した。

最終的に目標とした寸法、プローブ径 50mm、長さ 965mm の装置（試作Ⅱ号機）を開発した。また、装置の耐水圧実証実験を実施し、150 大気圧までの耐水圧を確認した。岡山サイトの 750m ボーリング孔にて深度 740m までの実証観測を行った。プローブの連続動作 8 時間を確認できた。（100%達成）

④ ボアホール画像スキャン部及びデータ記録部の研究開発
（株式会社ボア）

- ④-1 孔内画像より画像の円周展開処理の F P G A 回路化
- ④-2 画像フレームデータ、センサーデータの同期制御機構の開発
- ④-3 画像データ、深度、方位、走向データのファイリング

上記を実施し、画像情報、位置情報を装置内の USB メモリに記録、電信ケーブルのケーブルレス化により、画像情報取得の簡便化、装置の操作性の簡便化を図った。
（100%達成）

⑤ PC 側のアプリケーションソフトウェアの研究開発
（株式会社ボア）

- ⑤-1 PC 側のデータ変換、再生用アプリケーションソフトウェアの開発
- ⑤-2 ボーリング孔の三次元座標計算機能ブロック
- ⑤-3 画像分解能、画質評価の実施

USB メモリに記録された画像情報、センサー情報を PC 上で画像として再生するソフトウェアを開発した。開発した PC 側のアプリケーションソフトウェアで、従来機より 2 倍以上の解像度（分解能）、鮮明な展開画像を確認できた。正確な深度データはまだ得られていないため、ボーリング孔の 3 次元座標の計算機能ブロックはまだ実現していない。（80%達成）

⑥ 機械設備等の開発

（株式会社ボア、独立行政法人産業技術総合研究所、財団法人青葉工学会）

- ⑥-1 ボアホールスキャン装置 2 台の試作
- ⑥-2 水圧試験装置
- ⑥-3 観測環境精度計測用ボーリング削孔工事

初版設計図面通り、試作Ⅰ号機（1台目）を製作した。実機テストを行い、問題点を洗い出し、改良課題を設定した上、試作Ⅱ号機（2台目、写真1-1）を設計、製作した。

試作機の耐水圧及び磁気方位センサーの計測精度を実証するため装置として水圧試験機を製作した。

試作機の実証観測用設備として実証実験用ボーリング孔 200mを登米市石越に掘削した。（100%達成）



写真1-1 試作Ⅱ号機 外観とパネル（右上の写真）

1-4 当該研究開発の連絡窓口

所属	財団法人青葉工学振興会 研究開発プロジェクト推進室
氏名	霜山 忠男
電話	022(795)3862
FAX	022(795)3579
E-mail	shimoyama@eng.tohoku.ac.jp
所属	株式会社 ボア
氏名	佐々木 孝幸
電話	022(349)9920
FAX	022(349)9921
E-mail	sbk.boa@mirror.ocn.ne.jp
所属	独立行政法人産業技術総合研究所 地圏資源環境研究部門
氏名	国松 直
電話	029(861)8289
FAX	029(861)3717
E-mail	s.kunimatsu@aist.go.jp

第2章 本 論

以下に実施計画に記載した実施項目に従って、研究内容及び成果を記述する。

2-1 画像センサー深度計の研究開発（株式会社ボア、独立行政法人産業技術総合研究所、財団法人青葉工学会）

最終的（認定計画終了時）には、岩盤から取り出したコアの長さ（真値）に対し、画像センサー深度計による値との比較において、深度精度誤差3%以内の目標達成を目指す。

2-1-1 深度検出アルゴリズムの FPGA 論理回路の実現

本研究開発は出願した特許の技術に基づき独創の画像センサー深度計を開発し、プローブ内に実装した。

2-1-2 画像データパターンマッチング

(1) 相関演算

時刻 t における画像を I_t とし、時刻 $t+1$ における画像を I_{t+1} とする。 I_t の中に含まれる画像領域 $P^t [x, y; x+m-1, y+n-1]$ と、 I_{t+1} の中に含まれる画像領域 $[x_0, y_0; x_0+M, y_0+N]$ の中の小画像領域 $S^{t+1} [x_1, y_1; x_1+m-1, y_1+n-1]$ の相互相関関数を計算する。

(2) 画像データパターンマッチング

上記相関演算結果から指定パターンに一番近い画像領域を見付けるパターンマッチング処理を行う。

2-1-3 パターン移動量から深度方向移動量へのアルゴリズムの実現

2-1-3-1 パターン移動量から深度方向移動量へのアルゴリズムの実現

パターンマッチングによって、プローブの CCD 面における移動量はドット数によって計測される。

2-1-3-2 深度計測及び姿勢推定の誤差評価と高精度化に関する検討

ボアホールカメラの深度計測の高精度化と、3次元形状復元に向け、シミュレーションにより、現在用いている方法の誤差の評価と、現存する高精度化手法を適用し効果を検証した。

(1) 研究課題の検討

1) 深度計測の高精度化

深度計測の高精度化の実現に向けて、現在のカメラによる深度推定法において生じる誤差要因を明らかにし、少ない計算量で効果的に誤差を削減可能な方法を模索する。深度推定において、画像中マスク位置での移動量は毎回1~5ピクセル程度であり、1ピクセルのズレにより数10%の誤差が生じるため、サブピクセル精度が不可欠である。サブピクセル精度の誤差は、様々な誤差により影響を受けることが想定される。誤差要因の調査に向けて、本研究ではシミュレーションによりセン

サーデータを生成し、それらセンサーデータを用いて推定した深度情報とシミュレーションデータの深度（真値）を比較することで誤差評価を行う。これにより、原理的に生じる誤差を明らかにするとともに、各種精度向上のための方法論を試み、誤差を評価し、効果的な方法を模索する。実機ではシミュレーションに比べ様々な誤差が生じるが、その理論的限界を明らかにする。

2) 姿勢推定の高精度化

姿勢推定の高精度化のため、傾斜センサーや磁気方位センサーの情報を直接用いるのではなく画像移動量から姿勢変化の検出が可能であるかを評価する。これにより、カルマンフィルタ等確率的状態推定手法を用いることで傾斜センサーや磁気方位センサー単体での推定量に比べ推定量の高精度化が可能であるかを検証する。シミュレーション環境を構築し、原理上起こる誤差の要因を特定する。シミュレーション環境では、理想的な条件を設定可能であり、系統的な誤差を含まない処理により推定を行えば誤差0を実現可能なはずである。現状行われている方法の誤差を解析し、誤差要因を明らかにする。また、主要な誤差要因への対処法のうち、ポアホールスキャン装置内に実装が可能で効果の大きい手法を模索する。

(2) シミュレーション環境及び実機実験環境構築

シミュレーションでは、30fps のカメラで 30mm/s で進行した状況を基準として考え、約 1mm 毎に 1m 進行させる（一つにつき約 1000 枚程度）。

画像の生成には pov-ray を利用した。プログラムにより、各位置におけるセンサー情報と pov-ray 用画像生成用ファイルを生成し、画像を生成する。

本装置は z 軸の上下動 1 m と、z 軸まわりの回転の 2 自由度の動作が可能であり、本研究開発で目指す深度推定誤差 3 % を評価可能とするため、機械的変形を含め 1mm 程度で推定可能なよう構成した。実験装置の全体図を写真 2-1 に、回転部を写真 2-2 に、センサーヘッド部を写真 2-3 に示す。



写真 2-1 装置全体 写真 2-2 回転部 写真 2-3 センサーヘッド部

(3) 高精度化のための誤差評価実験

1) 進行速度による誤差とサブピクセル処理による高精度化

進行速度を変更した際の、深度推定誤差の評価を行った。

進行速度が遅い場合、画像間の変化が小さいため、ピクセル分解能の影響から、累積誤差が増加する事が想定される。

実験では、15mm/s,30mm/s,60mm/s で進行したデータを用い、サブピクセル処理有り、無しの場合について誤差を評価した。

サブピクセル処理無しのものでは、15mm/s のものは 10%以上の誤差が生じ、30mm/s および 60mm/s のものは 1.2%程度の誤差が生じた。このことから、低速時に誤差が生じやすい事が確認できた。また、60mm/s のものが 30mm/s と誤差がほぼ同様であったことについては、量子化誤差によるもの以外に、移動量が大きい事による重複部の減少や射影変換による影響が考えられる。

次にサブピクセル処理による、高精度化の可能性について検証を行った。サブピクセル処理後は 15mm/s が 1.3%,30mm/s と 60mm/s が 1.2%と、ほぼ同様の誤差に抑えることが可能であった。サブピクセル処理は、マッチング位置の隣接位置における評価値を用いて行うものであり、これらはマッチング処理時に得られる値を保持するのみで実現可能であることから高速に実行可能であり、かつ容量もさほど必要としないため、ボアホールスキャナへの組み込みが容易である。このことから、サブピクセル処理は本ボアホールスキャン装置に適しているといえる。

2) NCC による精度

正規化相互相関 (NCC:Normalized Cross-Correlation) 法による相関計算を試みた。ボアホールスキャン装置は LED 光源により周囲を照らし画像を取得する。そのため、距離に応じて輝度に差が生じる。累積絶対値誤差 (SAD : Sum of Absolute Difference) による相関では、輝度のむら (マスク内の直流成分) が誤差として生じることが知られている。それに対し NCC は輝度値で正規化を行った後相関をとるため、直流成分の影響を受けにくい。特に、サブピクセル処理では評価値を用いて行うため、この影響を受けると想定される。

NCC を用いて得られた結果、15mm/s では 0.13%、30mm/s では 0.36%と非常に小さい値であった。これらのことから、NCC による輝度むらに対する対策は有効であると考えられる。30mm/s では誤差が増加しているが、これは移動量の増加に伴う重複部の減少や射影による影響と考えられる。

NCC による処理は SAD に比べ処理量は大きい、非常に効果が大きいことがわかる。

3) パノラマ展開による高精度化

射影画像でのブロックマッチングによる移動量推定では、透視投影による誤差が生じ、原理的に誤差が生じる。この問題に対しては、ボアホールの形状に円形を仮定し、パノラマ展開することにより解消可能である。そこで、パノラマ展開した画像を用いてマッチング計算を行い、誤差軽減の検証を行った。

画像に 15mm/s で進行するものを用い、通常のものとはパノラマ展開したものを比較した。また SAD によるサブピクセル処理を適用した。

通常画像では 1.3%、パノラマ展開したものでは 2%と、結果として誤差が射影画像を用いた場合に比べ改善が見られず悪化した。これはパノラマ展開における補間処理が十分でなかったことや、撮影における量子化等による影響が考えられる。

4) 水平位置移動による誤差

ボアホールスキャナはセンターライザーによりカメラを中央に位置するよう拘束する。ここでは、センターライザー等を用いても孔中央からの位置ずれ誤差が生じた場合の深度推定影響について検証する。

実験には 30mm/s で進行しつつ、水平方向に 0mm,1mm,2mm ずらして取得した画像を用いて深度を推定する。深度推定には SAD にサブピクセル処理を加えたものを用いる。結果として、0mm では 1%,1mm では 0.6%、2mm では 0.3%の誤差となった。結果として、ズレ量が大きいほど誤差が低下しているが、これは通常時に生じる誤差と逆の誤差が乗ったためと考えられる。そのため、0mm の状態を基準として調整を行った場合、2mm では 0.7%程度の誤差増加が想定される。

(4) 3次元形状推定のための実験

ボアホール全体の3次元形状の推定を行うためには、ボアホールスキャナの姿勢推定を行う必要がある。センサーには電氣的なノイズや環境に影響されることが想定される。そのため、直接測定値を用いるのではなく、画像移動量による変位の推定を併用しカルマンフィルタによる平滑化を行う。

2-1-4 フィールドでの実証実験

1) 岡山テスト観測 (1回目、2012年11月29日実施)

試作I号機を使用して岡山サイトで150mの深度までテスト観測を行った。



写真2-4 岡山での観測の風景1

写真2-5 岡山での観測風景2

試作I号機製作後、プローブの耐水圧、防水、動作などの検証を目的として観測を行った。取得した展開画像を図2-3に示す。問題点として、以下が確認された。

- a)透明管に曇りが発生し、カメラ視界が不良となった、
- b)透明管の視野内にあるネジ溝等による LED 光源の屈折／反射によって画像データに雲状の帯が確認された（図 2－1 参照）。

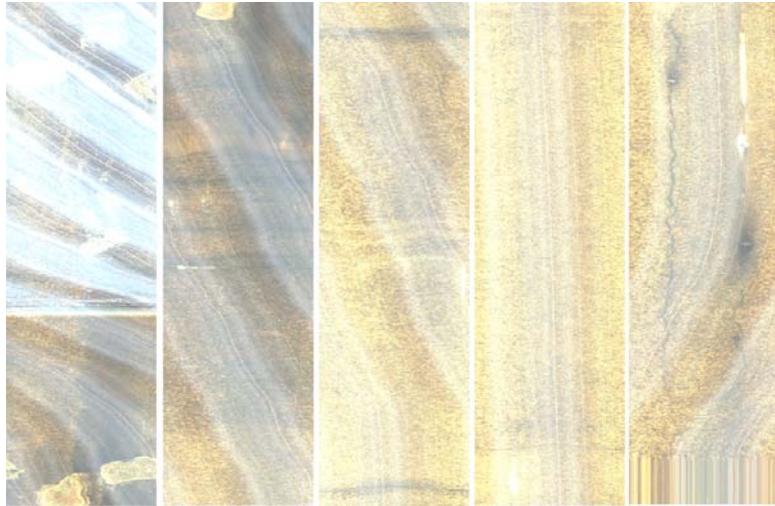


図 2－1 試作 I 号機で取得した岡山孔の展開画像の一部

2) 石越テスト観測（2012 年 12 月 27 日実施）

実験室の結果に岡山テスト観測の結果を加えて、改良を行い、試作 II 号機のプローブを製作した。その装置を用いて石越実験孔で 180m の深度までテスト観測を実施した。

石越実験孔で従来装置と新型試作 II 号機との分解能、画質について比較した。図 2－2，図 2－3 とともにスケール 1:1 で示す。新型機の分解能は従来装置より約 2 倍高くなる。

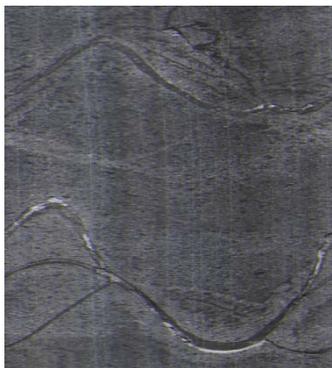


図 2－2 従来機で撮った画像
500 ドット／ライン



図 2－3 試作 II 号機で撮った画像
1184 ドット／ライン

3) 岡山テスト観測（2回目、2013年1月29日～30日実施）

改良した試作Ⅱ号機を使って岡山サイトで2回目のテスト観測を実施した。深度740mまでプローブを降下させた。改良したタイマー機能により観測深度550mから717mまでの観測で約1.5GBの画像ファイルを取得した。

写真2-8は、プローブ降下時のワイヤ深度マーカが深度740mであることを示している。写真2-7は、その後プローブを引上げた時の状況である。

図2-4、図2-5、図2-6、図2-7にいくつかの深度の観測画像を示す。

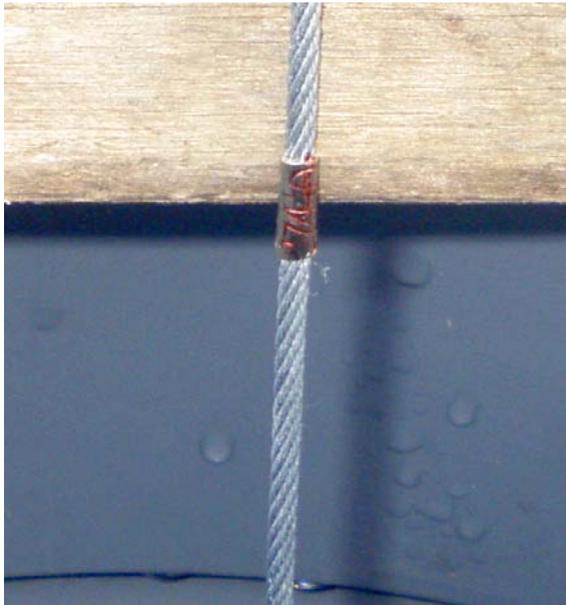


写真2-6 プローブ深度740m
(ワイヤ深度マーカによる)



写真2-7 プローブを引上げた時の状況

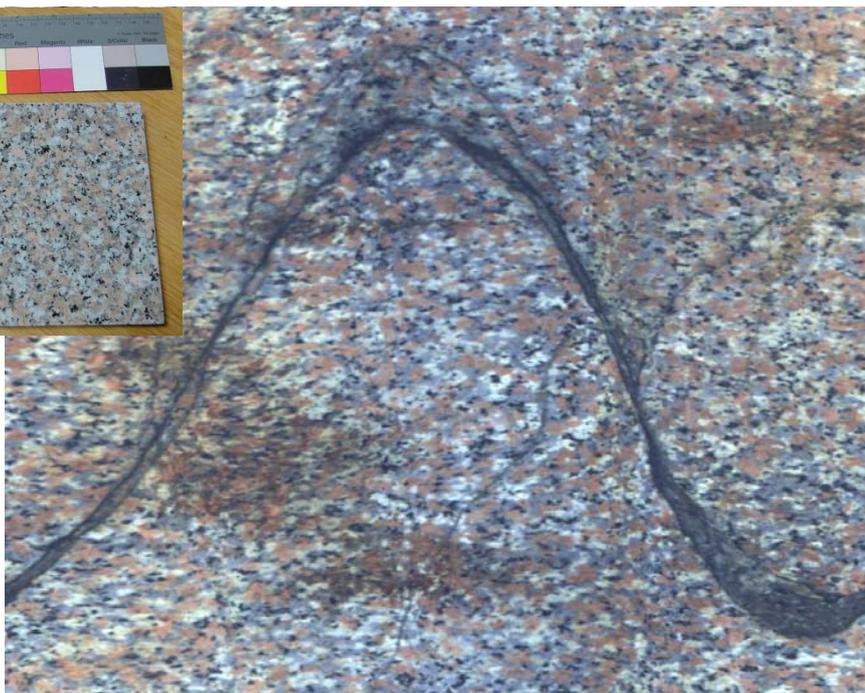


図 2-4 550.5m深度付近の割れ目の観測画像（試作Ⅱ号機使用）
（写真右上にこの展開画像に該当する付近のコア写真を示す）
（写真左上に岡山サイトの岩石サンプル写真を示す）

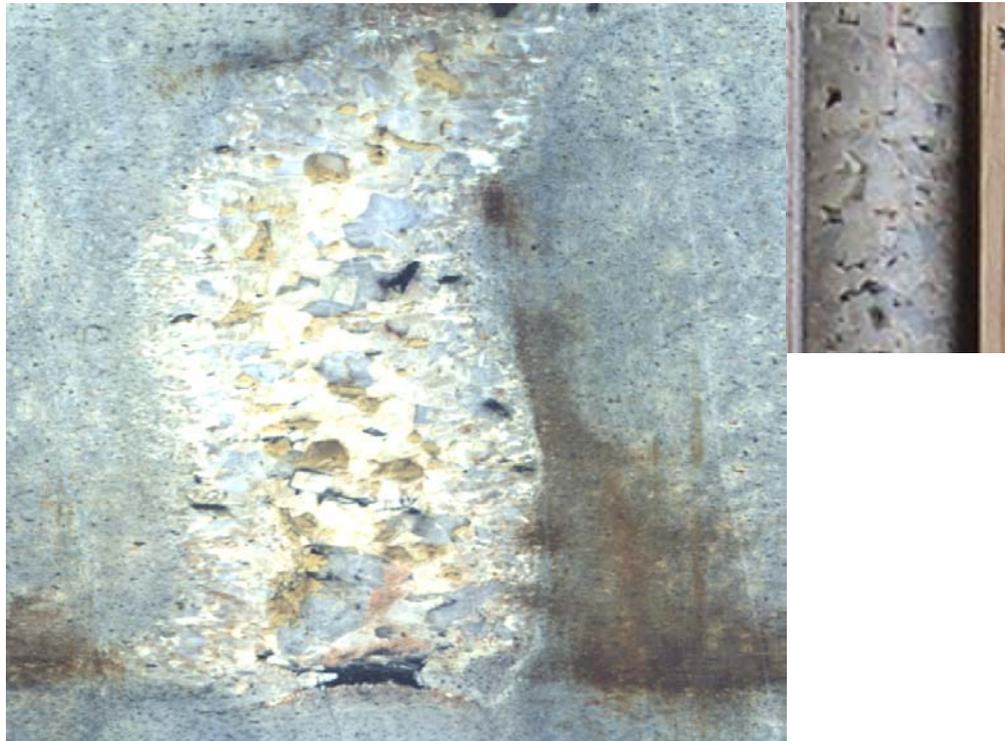


図 2-5 660.2m 深度付近の地層変化の観測画像（試作Ⅱ号機使用）
（写真右上にこの展開画像に該当する付近のコア写真を示す）



図 2 - 6 684.6m深度付近の地層変化の観測画像 (試作 II 号機使用)

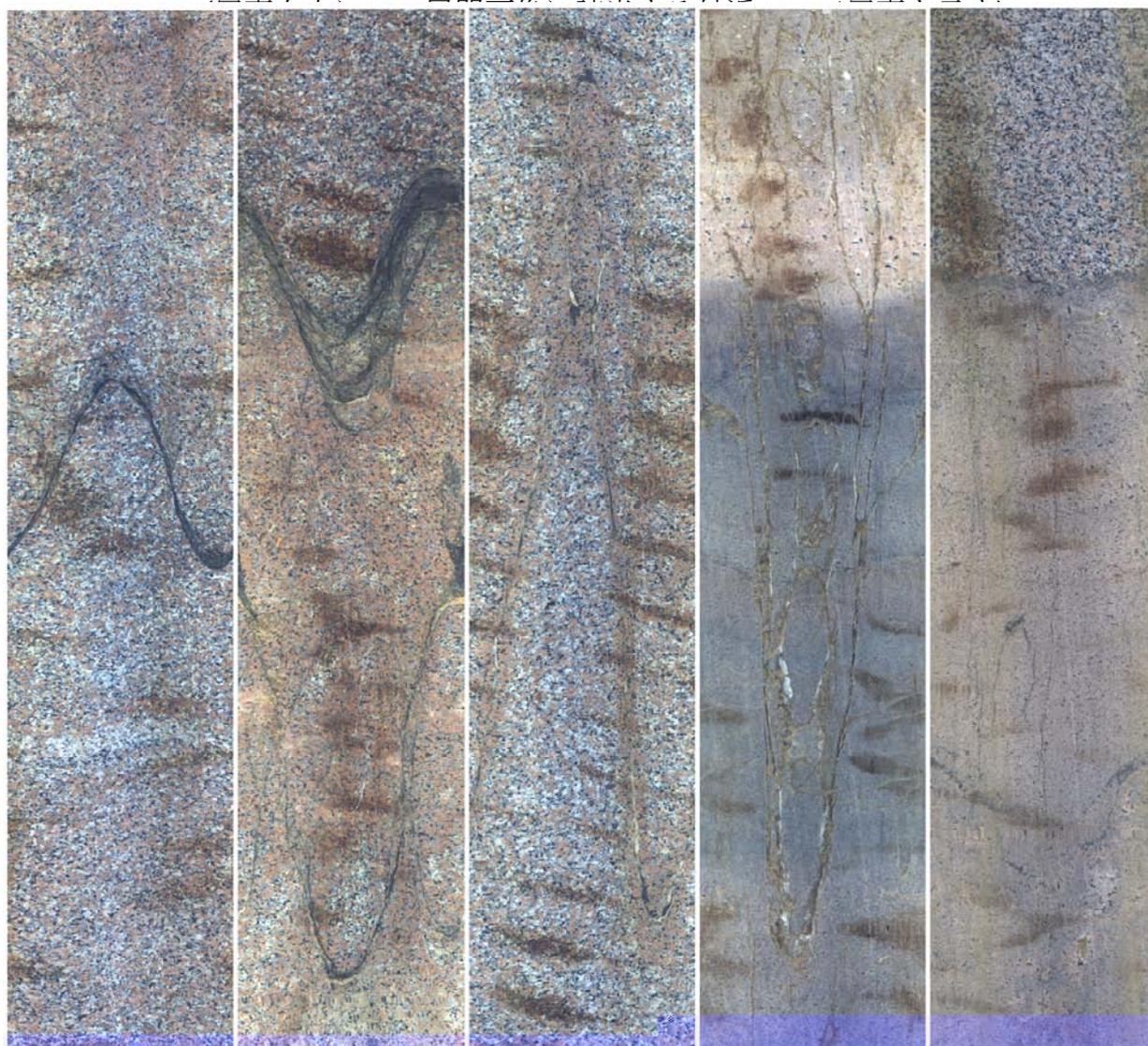


図 2 - 7 試作 II 号機による観測画像

4) つくば北条サイトテスト観測 (2013年1月9日,2月11日に実施)
つくば北条テストサイトにて、4.6m深度まで観測 (試作Ⅱ号機使用) を行った。
写真2-8に観測風景及び図2-8に観測した画像の見本を示す。



写真2-8 つくば北条サイトの
テスト観測風景



図2-8 つくば北条サイト孔内展開画像見本

2-1-5 実証実験の結果を踏まえた改良作業

1) プローブ構造の改良

- ・センターライザー取付機構の追加：観測画像の歪み及び誤差を小さくするため、プローブの揺れを制御し、孔のセンターに保持するセンターライザーをエンドキャップに取り付ける機構を追加した。(写真2-9、写真2-10)



写真2-9 試作I号機
のエンドキャップ

写真2-10 試作II号機のエンドキャップ、
(センターライザー等の治具が取
り付け可能)

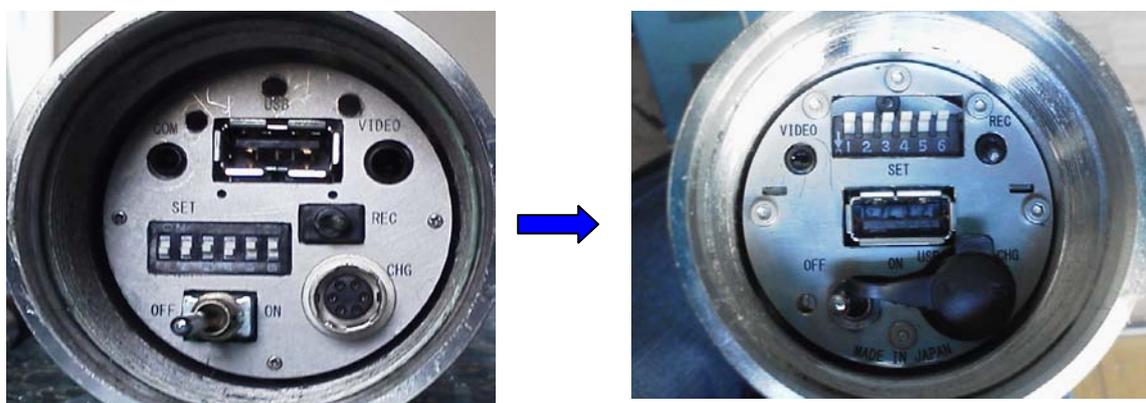
- ・プローブの長さの短縮：(写真2-11)



写真2-11 試作I号機(上)、試作II号機(下)のプローブ外観

2) プローブ操作性の改良

- ・プローブ構造改良に伴い、試作I号機のパネル(写真2-12)から試作II号機のパネル(写真2-13)への変更：スイッチの操作性やUSBメモリの着脱が容易となった。



- ・ ON タイマーに OFF タイマーの追加：設定した時間内での撮影が可能となり、大深度及び特定深度区間の観測が可能となった。
- ・ 自動照明機能の追加：現場でのユーザによる照明設定確認作業が不要となった。
- ・ ランプの色識別及び点滅の追加：ユーザに分かりやすくプローブの動作／設定状況を知らせるように改良した。

3) 電子回路の改良

- ・ 電子回路の省電力化：プローブ動作中に、待機してある IC 部品の電力供給を一時的にやめて必要な時だけ給電を行うように改良を行った。また、LED 発光エネルギーの有効利用のため、LED 電子部品の傾斜半田付けなどの工夫を行った。
- ・ LED 照明の自動制御：照明の明るさの設定は画像の画質に直接大きく影響する。その設定は観測前に行うために、経験等に頼ることになる。自動光量調整機能があれば観測画像の明るさの均一性を保つことができると考えられる。そこで試作 II 号機に自動調光機能を開発した。

4) 画質の改良

- ・ 分解能向上：1048 ドット／ラインから 1184 ドット／ラインへ向上させた。
- ・ プローブ光学環境の改善：透明管の親水処理及び透明管内の光の反射光の影響を除去する工夫を行った。

2-2 方位、傾斜計測部の研究開発（株式会社ボア、独立行政法人産業技術総合研究所）

方位誤差 3 度以内を目標達成するために、3 次元磁気方位センサーを内装し、プローブの姿勢と方向を常に把握するための変換演算として、孔内の方位、走向の計測組込みソフトウェアの開発（②-1）を行い、実施内容①の F P G A 内にロジック化して組み込むとともに、角度計測精度の評価実験（②-2）を実施する。

2-2-1 孔内の方位、走向の計測組込みソフトウェアの開発

- (1) プローブの 3 次元姿勢計算
- (2) 傾斜孔への対応

従来機を使って傾斜孔を観測した場合、傾斜に対する上側を定義しスキャン画像を再構築する手法を採用している。新型プローブの場合、2つの方法が可能である。一つは取得した画像を磁北方向に沿って画像の再構築を行う方法、他方は従来機と同様に上側に沿って画像を構築する方法である。

2-2-2 角度計測精度の評価実験

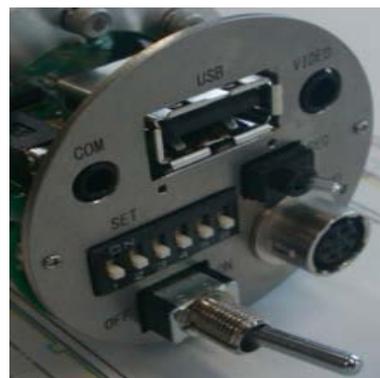
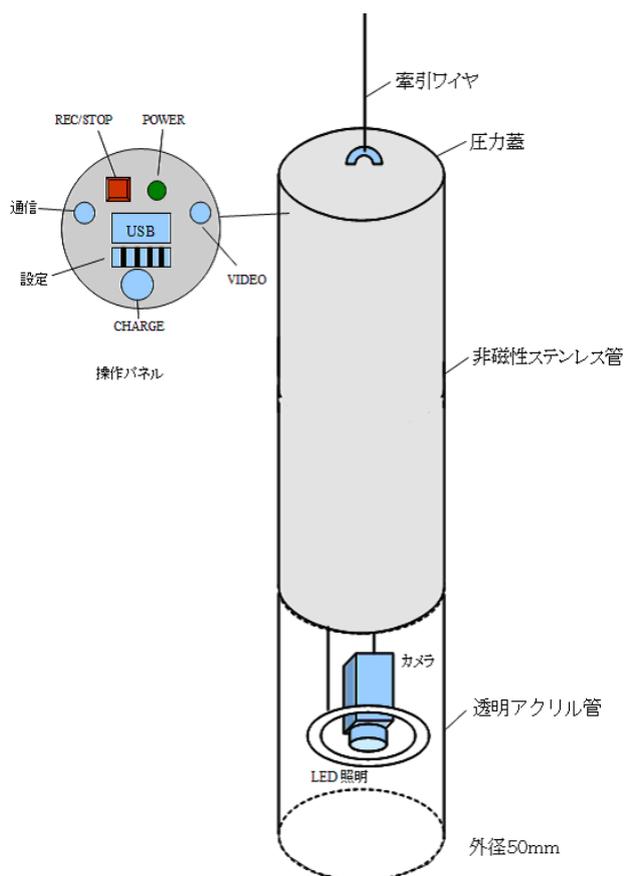
評価実験は未実施であり、本事業で開発した角度調整が可能な水圧試験機及び石

越サイトの斜孔を使用して実験を計画している。

2-3 ボアホールスキャン装置のセンシングプローブの研究開発（株式会社ボア、財団法人青葉工学振興会）

プローブ内の限られた資源で、最大101気圧の水中で8時間の観測を行うため、回路の小型化と低電力化（③-1、③-3）を図る。また、電気・磁気ノイズ、回路の発熱等、十分に配慮した構造設計（③-2）が必要となる。最小直径56mmのボアホールでの観測を実現するため、プローブ直径50mmを目標とする。プローブは最大長1000mm程度となるため、筐体の材質（③-4）、構造設計（③-5）が重要となる。

本研究開発事業に先行して、図2-9に示したイメージの独創的な一体型プローブを考案した。本事業の研究開発を経て写真2-14の通り、試作I号機となる一体型プローブをイメージ通り完成させた。ボアホールスキャン装置のセンシングプローブの開発に当たって、下記に示したシステム設計項目を設け、各設計課題を解決した。



操作パネル外観



図2-9 仕様作成時のプローブイメージ図

写真 2 - 1 4 完成形のプローブ外観 (試作 I 号機)

1) システムの同期

カメラのフレームパルス信号をシステム同期信号として使用し、各センサーの出力がそれに従って制御される。

2) データストリームの制御設計

システムの各構成部において、必要なデータ処理速度を計算し、ハードウェア及びソフトウェアの両方から安定したデータストリーム処理環境を確保する。

3) バッテリーの選定

システム全体の消費電力を実証実験を通して把握することで必要なバッテリー容量、プローブに収納空間を確保する。価格、汎用性と入手性などの要素を考慮した結果、ICR18650 規格品の 2 次電池セルで構成する電池集合体を特注した。

4) 材料強度設計

1000m水深までの環境において、プローブの強度の設計は一つの課題である。内蔵センサーには磁気センサーがあるため、プローブのすべての構成部の材質が非磁性材料であることは必須である。しかも、プローブはステンレス部と透明体のアクリル部とで構成され、両方とも目標の応力強度に満たさなければならない。材料力学の応力強度設計理論に基づき、プローブの円筒形の寸法を決定する。更にそれに基づいて電子回路基板の上限サイズを決定する。

2 - 3 - 1 電子回路設計

主な回路ブロックは、

CPU 及び周辺回路ブロック / FPGA 回路ブロック / データメモリブロック / NTSC エンコーダー回路ブロック / カメラ入力回路ブロック / USB 制御回路ブロック / センサー回路ブロック / ユーザ IF ブロック / LED 駆動回路ブロック / LED ブロック-白色 LED / DC 電源回路ブロック

で構成されている。また、市場での普及において、プローブの操作性も重要なポイントである。複雑な操作なしで使えるようにパネルにあるユーザ操作スイッチ、ランプ等を工夫し、電源スイッチと一つの REC スwitch の 1 回の操作だけでプローブが全自動で動作するように設計した。

2 - 3 - 2 基板設計及び試作、装置組立

電子回路設計及び基板設計製作の段階において、センサーの配置、回路基板上電子部品の配置、取り付け方法などの課題を試行錯誤的に解決した。

2 - 3 - 3 組込みソフトウェアの開発

実施計画項目 (①-1、①-2、①-3)、(②-1) などの画像処理を高速かつ低電力で実現することが最終目的であり、積極的に動作していない部分の給電停止を図るなど、省電力化のためのソフトウェアを開発し、実装した。

2-3-4 非磁性ステンレス材、ガラス材の選定、強度計算

アクリル管のみとアクリル管とステンレス管を接続した2種類の試験体を作製し耐圧試験（100～150気圧）を実施し、強度確認を行った。

2-3-5 センシングプローブ筐体の設計、試作

実施計画書記載の構造を実現し、また、ヘッダーキャップ、エンドキャップ、透明管の長さ、ステンレス管と透明管とのジョイントの力学構造、耐水圧防水機構、及び基板、電子部品等の取り付け金具を設計、試作した。

2-3-6 大深度耐水圧実験

1000m耐水圧（101気圧）試験装置を作製、設置を行った。

圧力チャンバーは3次元の角度変化が取れる構造とし、加圧時の3次元磁気方位センサーのテストも実施する。

2-4 ボアホール画像スキャン部及びデータ記録部の研究（株式会社ボア）

2-4-1 孔内画像より画像の円周展開処理のFPGA回路化

ボアホール画像をスキャンしてセンサーデータとともにUSBに記録するためにカメラデータ変換、円周スキャン、同期機構、データ転送制御機構、及び記録開始/終了処理回路といった機能ブロックは必須であり、ほとんどの部分をFPGA論理回路により設計した。

2-4-2 画像フレームデータ、センサーデータの同期制御機構の開発

PC側でUSBメモリに格納してあるデータから画像として表示できるようにデータの組立てを行う。その際、方位センサーデータが重要である。プローブが記録している時に、各円周スキャン画像データラインにセンサーデータを印加処理を行う。プローブ内の各センサーの動作クロック及びデータ出力周期が異なるため、カメラのデータ出力周期に合わせてメモリバッファを設け、センサーデータを一時的に格納する。

2-4-3 画像データ、深度、方位、走向データのファイリング

FPGA論理回路より生成する画像データ、深度、方位走向角度データはCPU周辺回路を経由してファームウェアのバッファに転送される。さらに組込みOSのファイルシステムの階層において、ファイル形式のデータとして、USBコントローラにDMA方式により転送される。最後にデータパケットごとにUSBメモリに格納される。

2-5 PC側のアプリケーションソフトウェアの研究開発（株式会社ボア）

2-5-1 PC側のデータ変換、再生用アプリケーションソフトウェアの開発

ボーリング孔内観測を行い、プローブの USB メモリに記録されたデータファイルを PC 側にて情報処理を行う。データ変換、再生用アプリケーションソフトウェアの主な機能として下記が挙げられる。

- ・ 展開画像、方位角度の表示機能
- ・ 展開画像の BMP フォーマットファイルへの変換
- ・ プローブの 3 次元姿勢の計算
- ・ ボーリング孔中心軸の 3 次元形状の計算

2-5-2 ボーリング孔の 3 次元座標計算機能ブロック

ボーリング孔の 3 次元座標を算出し、壁画像とともに孔形状を画像で表示するソフトウェアを開発した。

2-5-3 画像分解能、画質評価の実施

アクリルパイプ孔壁に標準テストパターンチャートを貼り付けて観測実験を行い、取得した壁画像により、システムの分解能、画質などを確認する評価実験を行った。

- ・ 模擬孔壁テクスチャーによる仮想亀裂視認性の確認

MS Power Point から選択可能なテクスチャーを 12 種類選択し、各テクスチャーに亀裂をイメージして配置した実寸の線幅（5 種類、配色は 6 段階（表 2-1、図 2-10））による視認性を確認した。

表 2-1 画質評価用テクスチャーのデザイン

仮想亀裂幅（実寸）	亀裂の色	配色（MS Power Point テーマ色）
10mm		①白、背景 1
5mm		②白、背景 1、黒+基本色 25%
2mm		③白、背景 1、黒+基本色 50%
1mm		④黒、テキスト 1、白+基本色 35%
0.5mm		⑤黒、テキスト 1、白+基本色 25%
		⑥黒

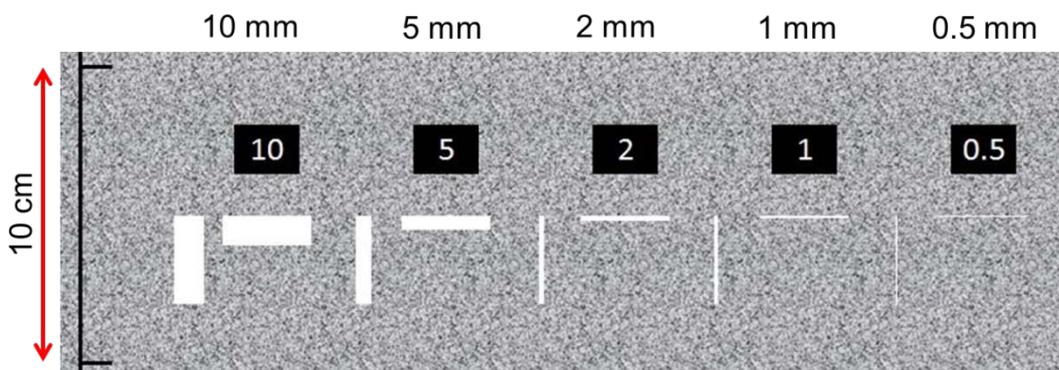


図 2-10 5 種類の幅をもつ線幅画像例（線色：白）

2-6 機器設備等の開発（株式会社ボア、独立行政法人産業技術総合研究所、財団法人青葉工学会）

2-6-1 ボアホールスキャン装置2台の試作
試作I号機とII号機を試作した。（写真1-1を参照）

2-6-2 水圧試験装置
1000m（101気圧）試験装置を製作・設置した。



2-6-3 観測環境精度計測用ボーリング削孔工事
実証実験用200mのボーリング孔を削孔・設置した。
以下の写真は削孔の長さなどの確認状況



第3章 全体総括

3-1 研究開発成果

ボーリング孔内へ装置を挿入することから、目標寸法内（全長 1000mm 以下、φ 50.8mm 以下）に演算基板、カメラ撮影部、電源等の部品を設計、組み立てを行い、ボアホールスキャン装置、試作Ⅰ号機及び試作Ⅱ号機を各 1 台製作した。実機による実証試験によりボーリング孔の孔壁の鮮明な画像を取得することができることを確認した。

残された課題として、装置の深度計測情報の精度 3%の実機による検証が必要であるとともに、深度計測情報と 3次元磁気方位センサー情報とを組み合わせた 3次元座標としての画像位置情報の表示と精度検証が挙げられる。

これらについては、平成 25、26 年度にサポイン事業予算をもとに早急に実施し、平成 27 年度からの事業化に繋げたいと考えている。

3-2 研究開発後の課題

今後の課題として以下が挙げられる。

- (1) 装置の深度計測情報の精度 3%の実機による検証を行う。
- (2) 装置の深度計測情報と 3次元磁気方位センサー情報とを組み合わせた 3次元座標としての画像位置情報の表示と精度検証を行う。
- (3) 画像データの画質の更なる向上について、下記の項目について検討することによって展開画像の画質の更なる向上を図る。
 - ・アクリル透明管の光学特性の改良
 - ・画像処理による画素の位置、輝度値の演算精度の向上
- (4) 今後の製品性能評価データの収集

画像センサー深度計による深度計測情報及び 3次元磁気方位センサー情報を組み合わせた 3次元座標としての位置情報（姿勢）データ処理システムの開発に遅延がみられており、今後も装置開発を継続し、商品性能評価を重ね、精度を高める。

大学、研究機関、民間企業を対象として、装置の性能評価テストを実施する。

3-3 事業化展開

(1) 事業化計画

事業化計画として、装置の販売は行わず、リース方式を採用し、装置により取得された画像解析費用やメンテナンス料等による収益を狙う。

(2) 商品の市場開発普及活動

2013 年 8 月に仙台にて開催予定の The 6th International Symposium on In-Situ Rock Stress（The International Society for Rock Mechanics 主催）のブース展示にエントリーし、株式会社ボアのプローブを世界の研究者に向けた発表を計画している。このような、ブース展での発表や大学、研究機関、民間企業への商品紹介、説明を積極的に行う。