

研 究 報 告

令和 8 年 4 月 23 日

公益財団法人 前田記念工学振興財団

理 事 長 岸 利 治 殿

研究代表者

所 属 : 群馬大学

氏 名 : 斎藤隆泰

研究課題名 : コンクリート非破壊評価のための量子アルゴリズムを用いた次世代トモ
グラフィ理論の開発

助成金額 : 100 万円

研究実施期間 : 自 令和 7 年 4 月 1 日 ~ 至 令和 8 年 3 月 31 日

コンクリート非破壊評価のための量子アルゴリズムを用いた

次世代トモグラフィ理論の開発

Development of Next-Generation Tomography Theory Using Quantum Algorithms

for Non-Destructive Evaluation of Concrete

群馬大学大学院理工学府環境創生部門 准教授 斎藤隆泰

(研究計画ないし研究手法の概略)

【研究の背景と目的】

土木分野では、波動を用いた非破壊評価に関する研究が古くから行われてきた。非破壊評価の最終目的は、検査領域内部構造の推定である。よって非破壊評価の諸問題は計測波形から欠陥を推定する逆問題へ帰着されることとなり、その高度化には効率的・実践的な逆解析手法の開発が必須となる。その点を鑑み、申請者は波動解析や逆解析に対する理論的な研究や、それらの非破壊評価への応用研究（ア）を行ってきた。

非破壊評価の分野における代表的な逆解析手法として、トモグラフィ理論が知られている。トモグラフィ理論(CT: Computed Tomography)は、医療での応用を足掛かりに、コンクリートに対する非破壊評価や地盤探査等の分野で発展してきた逆解析手法である。その原理は、Hounsfield らによって提案され、ノーベル生理学・医学賞を受賞したことで大変有名である。これまでのトモグラフィ理論に関する研究では、波動経路の最適化や、解くべき方程式の高速化に関する研究、最近では機械学習を援用した研究等、高速・高精度化を目的に様々な研究が行われてきたが、医療分野で一般的に CT として知られるような実用化には至っていない。なぜなら、例えば研究代表者が携わる土木分野の場合、波動が伝搬する媒質はコンクリートのような非均質であるばかりか、媒質を弾性体として扱わなければならない、縦波や横波、両者のモード変換も考慮する必要がある。また仮にそれらを考慮できたとしても、最適化や波動経路の計算負荷は、スカラー波を対象とした医療分野でのトモグラフィ理論に比べ圧倒的に高い。現代では、多数の波動送受信点を設け、数多くのデータを一度に取得できるが、その分、同時にトモグラフィ計算を実施するための計算負荷は増加する。実際、医療分野では、検査終了後に取得データを用いたトモグラフィによる逆解析が行われるが、リアルタイム逆解析には程遠い状態である。このように、実用化が進んだトモグラフィ理論においても、数多くの問題が未解決のまま残されている。

そこで本研究では、近年、世界的競争が激化している量子コンピューター（イ）を用いた新たなトモグラフィ理論の開発に挑戦した。量子コンピューターは、これまでの古典コンピューターに比べて、圧倒的な計算効率を引き出せる可能性がある反面、現在我々が使用している古典コンピューターと同様のアルゴリズムを使うことはできない。そのため、量子コンピューター上で高速化が期待できるトモグラフィ理論のためのアルゴリズムを開発する必要がある。本研究では、量子コンピューターのエミュレーターである量子シミュレーターの利用だけでなく、一般に普及されていない実際の量子コンピューターの実機（量子アニーリングマシン）を用い、量子コンピューター上で動作する新しいトモグラフィ理論を構築した。簡単な数値解析例を示し、提案手法の有効性を示した。

【研究手法の概略-使用計算機】

一般的に、量子コンピューティングは現状、量子ゲート方式と量子アニーリング方式に大別される。量子ゲート方式は現在の古典コンピューターのような汎用的なコンピューティングを目的としたものである。一方、量子アニーリング方式は、最適化問題に特化した量子コンピューターである。量子アニーリング方式の量子コンピューターは、カナダの D-Wave 社がクラウドで既に提供を開始している。本研究では、後者の量子アニーリング方式に着目して研究を実施した。

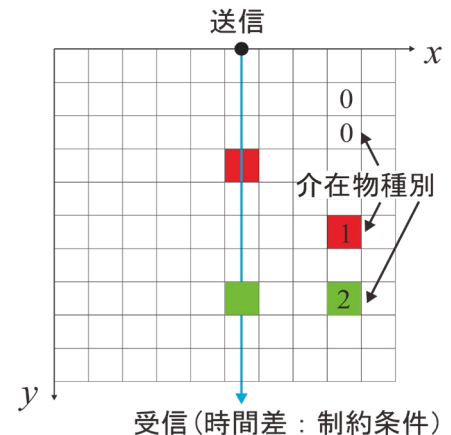


図 1：本研究で提案する新しい
トモグラフィ理論の概念

【研究手法の概略-研究の着眼点】

一般的なトモグラフィ理論では、受信点における波動の到達時間差を用いて、検査対象領域内部の欠陥等の異質介在物を推定する。その際、図 1 に示すように、解析領域全体を複数のセルに分割し、各セルを通過する経路と波動の到達時刻を用いて、通過した経路内のセルが介在物か否かを判定する。例えば、送受信点を結ぶ経路上に介在物等が存在しない場合の経路 S1 に対し、図 1 のような介在物等（赤や緑のセル）が存在する経路 S2 では、母材と介在物中の波動速度が異なるため、波動の到達時刻に時間差が生じる。ただし、1 つの経路 S2 だけでは異質介在物の位置等を特定できないため、別の経路 S3 等を追加することで、異質介在物の位置を特定する。当然、従来のトモグラフィ理論で高解像に異質介在物を特定するには、解析領域に設定したセルを小さく設定する必要がある。また、送受信点を追加し、時間および空間、波動速度に対して適切な離散化を行うことで、各セルにおける波動速度（またはその逆数）に関する大規模な連立方程式を導き、最終的に領域内部の波動速度の分布から、異質介在物のおよその位置等を推定することが必要となる。通常は、未知数に対して十分な数の方程式を立てられないばかりか、解像度を追い求めて計算負荷が増加するため、よって、現行のコンピューターを用いたアルゴリズムでは、計算負荷が極めて大きい。

そこで、本研究では、従来のトモグラフィ理論と同様に、まず、図 1 のように解析対象領域を格子で離散化する。その後、異質介在物の種別を各格子に割り当てることで、領域内部の異質介在物を推定する問題を、各経路で得られる時間差等を制約条件とした、種別番号に対する組み合わせ最適化問題へと帰着させることを考えた。なお、この問題は、仮に古典コンピューターで解く場合、格子が増える毎に組合せ数が指数関数的に増加する組合せ爆発問題（ウ）となる。しかしながら、本研究では量子コンピューターの活用を前提とするため、そのような計算負荷は生じず、むしろ量子コンピューターの性能を活かせる問題となる。なぜなら、量子コンピューターでは、 N 個の量子ビットを用いれば、 2^N 個の情報を量子重ね合わせ状態により同時に表現することができる。つまり、図 1 のような各格子における種別の組み合わせを 1 つずつ探索するのではなく、ある意味並列的に同時に処理できると考えられる。このように従来のトモグラフィ理論を量子コンピューターの特性を最大限活かしたアルゴリズムへと再構築した、次世代の新しい量子ベーストモグラフィ理論を提案し、そのコードを実装する。なお量子コンピューターの性質を活かし、最終的な数値解を一意に定めること

なく確率的に求め、各格子上で各介在物の種別毎の存在確率を割り出すことを行った。

【数値解析例】

本研究で行った数値解析の一例を示す。一般的に、量子コンピューティングでは、これまでの数値解析のように、同一の計算を行ったとしても同一の数値解が得られるとは限らない。量子誤り訂正技術も確立されて

いないため、毎回の計算で数値解に意図しない誤差が含まれる可能性がある。そのため、量子コンピューティングでは、同一の計算を複数回（ショット数と呼ぶ）実行することで、真の解を探索することとなる。なお、量子コンピューティングで難しい点は、特に量子ゲートでは、自身が開発したアルゴリズムが正しいか否かを判定する際に、量子誤りによる誤差が混入する点にある。現在の量子コンピューティングの世界では、自身が作成したアルゴリズムが正しく動作するかを検証するために、量子コンピューターをエミュレートした量子シミュレーターを使ってアルゴリズムの正当性を確認することが多い。この量子シミュレーターでは、量子誤りを制御することが可能である。よって本研究でも、まずは量子シミュレーターを用いて正しい数値解が得られることを確認した後に、実際の量子コンピューターの計算を行う手順を踏むこととする。なお、量子アニーリングに対する量子シミュレーターの計算には Tytan を用いた。

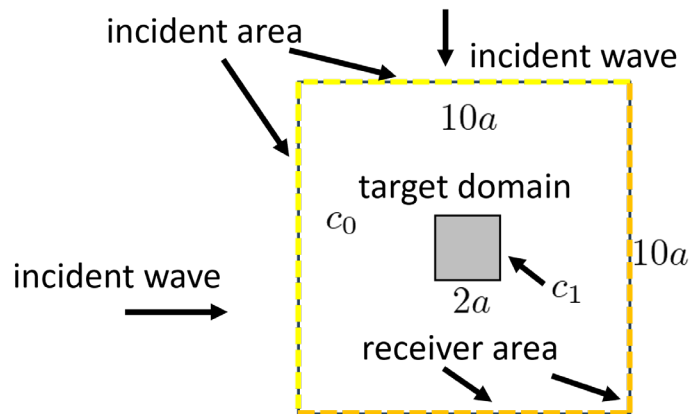


図 2：正方介在物に対するトモグラフィ解析モデル

（実験調査によって得られた新しい知見）

・量子アニーリングシミュレーターによる介在物の推定

まず、図 2 のような簡単な解析モデルに対して、提案手法が成立することを検討した。図 2 は $10a \times 10a$ の検査領域（母材）中に $2a \times 2a$ の介在物が存在する場合の解析モデルを示している。 c_0 や c_1 は母材および介在物中の波動速度であり、ここでは $c_0 = 1$ 、 $c_1 = 2$ としている。ま

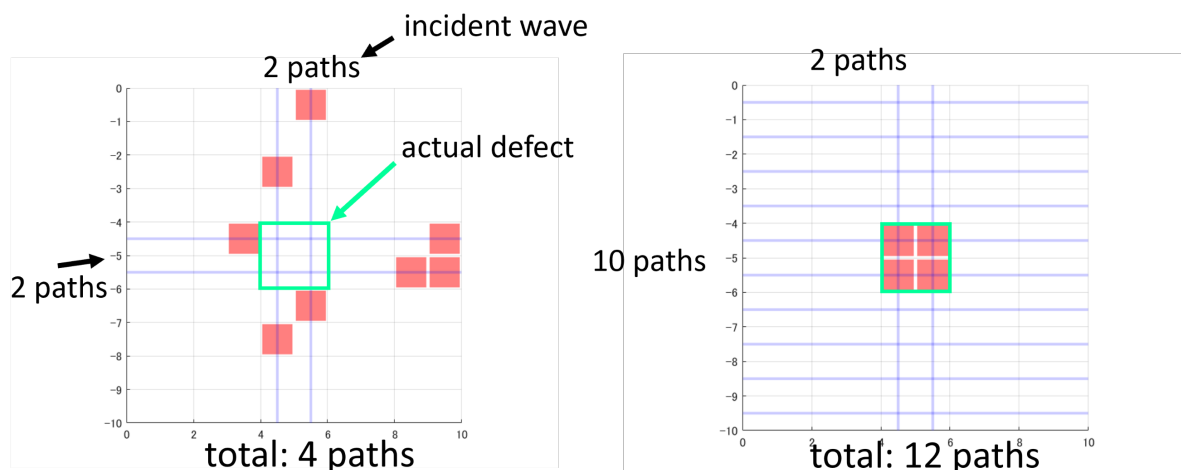


図 3：正方介在物に対するトモグラフィ解析結果

た，入射波は検査領域の左辺および上辺から，対応する右辺，下辺に垂直に入射させるものとした．この場合，波動速度は既知であるため，送受信経路に対する波動の到達時刻は容易に計算することができる．

量子シミュレーターによる図 2 の解析モデルに対する計算結果を図 3 に示す．図 3 の左右の図は，それぞれ波動の送受信の経路（以下，単にパスと

呼ぶ）を 4 パス，12 パスを考えた場合の提案手法における解析結果を示している．なお図 3 左の 4 パスの場合は左辺および上辺から 2 パスずつ，図 3 右の 12 パスの場合は左辺より 10 パス，上辺より 2 パスを考慮した場合の解析結果を示している．なお図 3 中の緑の実線は，逆解析の対象とした実際の介在物を示している．また，青の実線は波動のパスを表していることに注意されたい．なお，解析領域は $10a \times 10a$ の矩形領域に分割し，トモグラフィ解析を行っている．図 3 では量子シミュレーターによる量子アニーリング解析により，最も介在物が存在すると推定された箇所を赤塗で示してある．図 3 左より，4 パスのみを考えて介在物の推定を行った場合，推定結果は実際の介在物位置と大きく異なることがわかる．一方，図 3 右の結果より，パスの数を増やした場合の推定結果は，実際の介在物位置と一致していることがわかる．このように，十分にパスの数を増やせば，正しく介在物を推定できることがわかる．

次に，き裂のような水平欠陥の検出可能性の検討のために，図 4 のようなスリット型介在物に対するトモグラフィ解析を行った．スリットの大きさは $6a \times a$ であり，その他の解析条件は特に断りのない限り，図 2 の場合と同様である．図 4 に対する結果を図 5 に示す．ただし，図 5 の左右のケースでは，それぞれパスを図中の青線で示すように 4 パス，12 パスと設定してある．図 3 左の場合と同様，図 5 左のパスの数が少ない場合の結果は，正しく介在

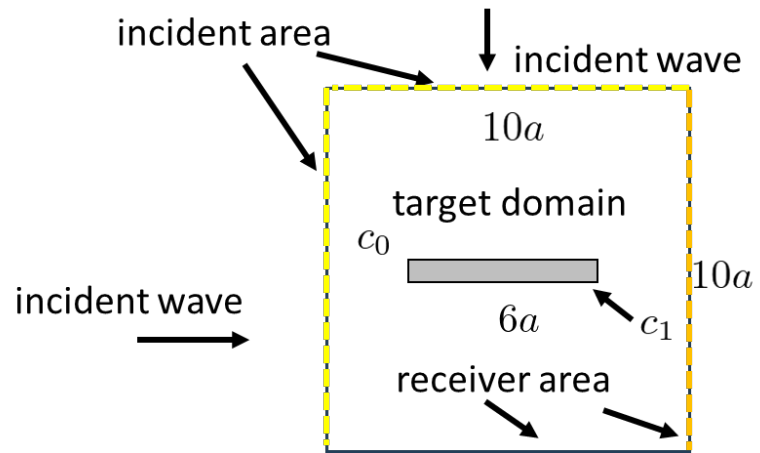


図 4：スリット型介在物に対するトモグラフィ解析モデル

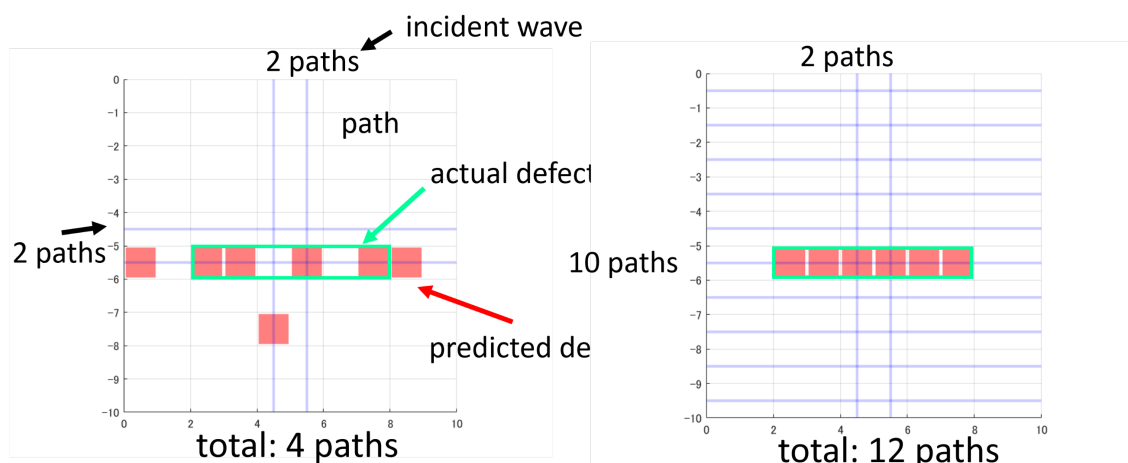


図 5：スリット型介在物に対するトモグラフィ解析結果

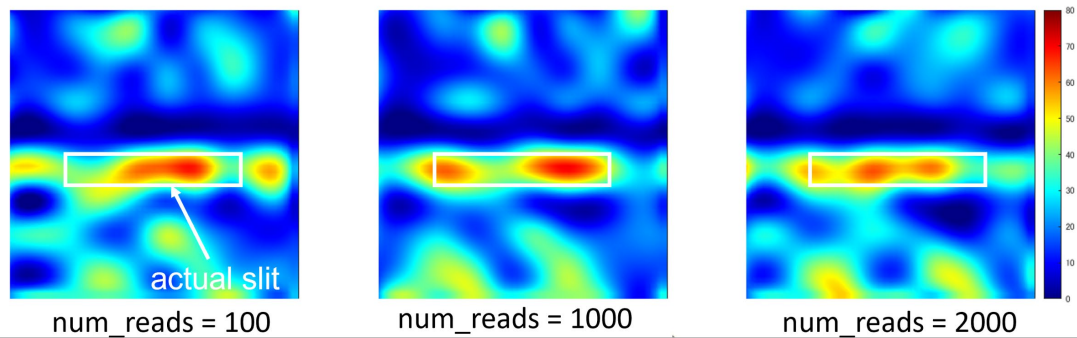


図 6 : D-wave マシンによるスリット型介在物に対するトモグラフィ解析結果

物を推定できていないことがわかる．一方，図 5 右のパスの数を増やした場合の結果は，正しく介在物を推定できていることがわかる．開発した量子アニーリングによるトモグラフィ理論の詳細は本報告では省略するが，量子アニーリングシミュレーターを用いることにより，十分なパスの数を考慮することができれば正しく介在物を推定できることがわかる．

・量子アニーリングマシン（実機）によるスリット型介在物の推定

量子アニーリングシミュレーターで解析の妥当性を確認できたので，実際の量子アニーリングマシン（実機）による解析を行った例を図 6 に示す．解析には D-wave の量子アニーリングマシンを用いた．使用した計算機は D-Wave Systems の量子アニーリングマシン (QPU) D-Wave Sampler であり，量子アニーリング計算を 100 回，1000 回，2000 回独立に計算（図 6 中の num_reads）を実行し，介在物があると判定された箇所をそれぞれの計算実行回数で除して欠陥存在確率を算出した．母材と介在物の条件等は，図 4 と同様とした．図 6 中の各図は，それぞれ量子アニーリング計算を 100 回，1000 回，2000 回独立に計算して求められた，各サブ領域における介在物の存在確率を示している．図 6 中の各図の中央の白実線が実際の介在物を示している．図 6 の 3 つの結果のいずれの場合においても，実際の介在物が存在する付近で介在物の存在確率が大きな値を示していることがわかる．しかしながら，いずれの場合においても，実際の介在物が存在する箇所以外でも所々，大きな値を示していることがわかる．

・新しい知見や考察

現在，古典コンピュータで行われているトモグラフィ解析をはじめとした逆解析手法は，基本的に一意の解を導出するものである．古くから逆問題の分野で発達してきた欠陥形状再構成に有用な逆散乱解析（エ）も，一般的には線形化を施して解を導出している．一方，量子コンピュータで求められる数値解は，図 6 で示したような確率的な解である．量子コンピュータでは，量子重ね合わせに基づき計算が行われ，最終的な観測の場面で解が一つに定まる．そのため，計算で求まる解は，複数の解の候補であり，ショット数で除すれば解の出現確率が求まることとなる．

このような中，例えば土木工学の分野では，解が一意に定まるような事象は必ずしも多くはない．気象予報や地滑り等，様々な要因から不確かさが表れる事象が多い．そのような事象を追跡する計算でも，基本的には差分法や有限要素法，境界要素法等の数値シミュレーシ

ョン手法が多用され、適切な境界条件の下で解の計算を行っている。こうしたことを考えると、量子コンピューターを用いた計算は、単に高速に計算を実行するという目的だけでなく、不確かさを持つ解析にも有効と成り得るのではないかと考える。今回用いた量子アニーリングマシンは、真の量子コンピューターではなく、最適化問題に特化した量子コンピューターである。量子コンピューターの真の実用化は、依然として時間を要するが、真に実用化されてから量子コンピューターの特性を活かした専用のアルゴリズムの開発を実施するのでは、世界的な競争から遅れ、得策ではない。そのため、量子シミュレーターを活用して早期に新しいアルゴリズムを開発しておくべきである。そのような点からも、本研究は1年間という期限ではあるが、一定の成果を残せたものと考ええる。

【まとめと今後の課題】

本研究では、量子アニーリングを用いて新しいトモグラフィ解析に対する定式化を行った。十分なパスを用意できれば、確率的に正しく介在物の推定を行うことができた。今後は、3次元解析への拡張や、FTQC (Fault-Tolerant Quantum Computer: 誤り耐性型量子コンピューター) を用いたトモグラフィ解析を行う予定である。また、本研究で行った逆解析のみならず、量子コンピューターを用いた波動伝搬・散乱現象を扱う順解析手法の開発(オ)も行う予定である。本報告で示さなかったコンクリートモデルに対して行った解析結果等について引き続き対外発表を行っていきたい。

(発表論文)

- [1] 小口泰希, 斎藤隆泰: 量子アニーリングマシンを用いたトモグラフィ解析の基礎的検討, 第53回土木学会関東支部技術研究発表会 2026年3月3日発表, 中央大学
- [2] 斎藤隆泰: 量子コンピューターの計算力学への応用, 株式会社アーク情報システムセミナー, 2025年7月7日発表(招待講演)
- [3] 斎藤隆泰: 量子アルゴリズムを用いた新たなトモグラフィ理論の検討, 第30回計算工学講演会, CD-ROM収録, 2025年6月5日(Keynote講演)
- [4] 斎藤隆泰: 量子アルゴリズムを用いた先進非破壊評価法の検討, 第2回 Quantum CAE研究会 2025年5月8日(招待講演)

(参考文献)

- (ア) 斎藤隆泰・廣瀬壮一: 波動解析や逆問題および非破壊評価におけるAI・データサイエンス活用の動向, AI・データサイエンス論文集, vol.4(3), pp. 852-866, (2023)
- (イ) 藤井啓祐: 驚異の量子コンピュータ: 宇宙最強マシンへの挑戦, 岩波科学ライブラリー, 岩波書店, (2019)
- (ウ) 天谷賢治, 須賀一博, 菊池竜: 0-1 整数制約条件を用いた光 CT 逆問題, 日本機械学会論文集 A 編(722), pp.1437-1442, (2006)
- (エ) 竹田晴彦, 斎藤隆泰, 廣瀬壮一: 等方弾性体・粘弾性体中の空洞に対する線形化 Born 逆散乱解析の適用性の検討, 計算数理工学論文集, vol.21, pp. 89-98, (2021)
- (オ) 斎藤隆泰: 量子アルゴリズムを用いた境界要素法の基礎的検討, AI・データサイエンス論文集, vol.5(3), pp. 669-677, (2024)