

逆問題解析システムの構築業務 仕様書

1. 件名

逆問題解析システムの構築業務

2. 目的及び概要

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構（以下、「原子力機構」という。）においては、放射線計測技術の開発および解析システムの開発を行っている。

本件は、放射線計測結果の解析に使用する、逆問題解析用のプログラムコードの作成を行うものである。

なお本システムの構築にあたっては、原子力機構からの基礎的な教育又は詳細な技術指導を前提とせず、受注者において解析手法の内容を理解した上で、必要な処理フロー、データ構造、計算手順及び入出力仕様を整理し、実装すること。

3. 作業実施場所

受注者が手配する任意の場所とする。

4. 納期

令和 9 年 2 月 26 日

5. 作業内容

5.1. 作業項目

受注者は、以下に示す項目について作業を実施すること。

- (1) プログラムの設計及び構築
- (2) 動作評価試験の実施

5.2. 作業実施内容

(1) プログラムの設計及び構築

受注者は、別紙 2「逆問題解析コード機能仕様」に基づき、放射線計測データから推定対象メッシュ上の線源分布等を推定するための逆問題解析コードを設計及び構築すること。

構築プログラムの構成は、Python 3 を基本として、GUI 上で操作可能な逆問題解析コードを構築すること。コードは Windows で使用することを前提とする。構築するプログラムは、少なくとも以下の処理を実施できる構成とすること。

- 入力データの読み込み
- 解析条件の設定

- 応答係数の算出
- 逆問題解析計算の実行
- 計算進捗及びログの表示
- 解析結果、解析条件及び実行ログの保存

作成するプログラムは、後から機能追加、修正及び保守が容易となるよう、入力処理、解析処理、応答係数計算処理、GUI 処理、出力処理等を可能な範囲で機能ごとに分離した構成とすること。詳細仕様について疑義が生じた場合は、原子力機構担当者と協議の上、設計書に反映すること。

以下に構築内容の詳細を示す。

1) 入力データ読み込み機能

受注者は、解析に必要な入力データを読み込む機能を作成すること。対象とする入力データは、以下を基本とする。

- 計測データ
- 推定位置メッシュデータ
- 検出器応答関数データ
- 推定値の初期値データ

入力データは CSV 形式を基本とし、GUI 上のファイル選択機能により読み込めるものとする。

計測データについては、計測位置座標、姿勢情報、計数率情報、その他解析に必要な情報を読み込めるようにすること。各列のデータ種別については、CSV ファイルのヘッダ情報に基づき判別できる構成とすること。

推定位置メッシュデータについては、推定位置座標及び物質 ID 等を読み込めるようにすること。物質 ID は、減衰計算及び応答係数計算に使用できるものとする。

2) 解析条件設定機能

受注者は、解析に必要な条件を GUI 上で設定できる機能を作成すること。GUI 上で設定する項目は、以下を基本とする。

- 計測データファイル
- 推定位置メッシュデータファイル
- 検出器応答関数データファイル

- 解析モデル
- 反復計算回数
- 推定値の初期値
- 物質 ID ごとの減衰計算条件
- 応答係数の計算条件
- 各解析モデルで使用するパラメータ
- 計算に使用する CPU コア数等の計算条件
- 解析結果の保存先

減衰計算式、重み関数、正則化パラメータ等の具体的な設定内容及び入力方法については、別紙 2「逆問題解析コード機能仕様」に基づき、設計書に定めること。

3) 応答係数算出機能

受注者は、計測点と推定位置の幾何学的位置関係、検出器応答関数、メッシュ通過距離、物質 ID ごとの減衰条件及び空気領域の減衰条件を考慮し、逆問題解析に使用する応答係数を算出する機能を作成すること。

応答係数の定義、算出方法、計算範囲、減衰計算の取扱い及び使用するアルゴリズムの詳細については、別紙 2「逆問題解析コード機能仕様」に基づき、設計書に定めること。

また、応答係数の算出には長時間を要する可能性があるため、算出した応答係数を保存し、反復計算時に再利用できる機能を作成すること。保存形式については、読み込み速度、ファイル容量及び保守性を考慮して受注者が検討し、設計書に記載すること。

4) 逆問題解析計算機能

受注者は、MLEM 法を基本とする逆問題解析計算機能を作成すること。また、別紙 2「逆問題解析コード機能仕様」に示す追加項を選択又は組み合わせで使用できる構成とすること。追加項としては、BG 項、平滑化項、TV 正則化項、時間正則化項等を対象とする。各解析モデルの数式、更新式、パラメータ、組合せ可否及び計算手順については、別紙 2「逆問題解析コード機能仕様」に基づき、原子力機構担当者と協議の上、設計書に定めること。

5) 計算進捗表示及び中断機能

受注者は、解析実行中に、GUI 上で計算状況を確認できる機能を作成すること。表示項目は、以下を基本とする。

- 全体進捗
- 現在実行中の処理内容
- 現在の反復計算回数
- 残り計算ステップ
- 誤差又は収束指標の値

また、反復計算は利用者の操作により途中停止できるものとし、停止時点の解析結果、解析条件及びログを保存できるようにすること。

6) 解析結果出力機能

受注者は、解析結果を指定された保存先に出力する機能を作成すること。出力するデータは、以下を基本とする。

- 推定結果
- 解析に使用した設定条件
- 計測値と推定値から算出した計測点値の誤差
- 計算ログ
- 誤差又は収束指標のグラフ

推定結果には、推定位置座標、推定値及び物質 ID を含めること。出力形式は CSV を基本とし、グラフ等については画像ファイルや CSV ファイルとして保存できるものとする。

7) 計算処理の高速化

受注者は、応答係数算出及び反復計算に係る処理時間の短縮を図るため、並列処理等の合理的な高速化手法を検討し、実装すること。高速化手法の内容、使用する外部ライブラリ等については、設計書に記載すること。

8) 設計書及びプログラムの提出

受注者は、構築前に、プログラム構成、入出力仕様、GUI 構成、解析処理手順、出力仕様、使用ライブラリ及び動作環境を整理した設計書を作成し、原子力機構の確認を受けること。

また、納期日までに、作成したプログラムコード全文、実行に必要なファイル一式、使用方法を示す資料、環境構築手順、入出力ファイル仕様及び保守・改修に必要な情報を提出すること。

(2) 動作評価試験の実施

受注者は、構築した逆問題解析コードについて、原子力機構が貸与する解析評価用データセットを用いて、動作評価試験を実施すること。

動作評価試験では、別紙2「逆問題解析コード機能仕様」及び設計書に基づき、プログラムが所定の機能を有し、正常に動作することを確認すること。確認対象は、以下を基本とする。

- 入力データの読み込み機能
- GUI による解析条件設定機能
- 応答係数算出機能
- 逆問題解析計算機能
- 計算進捗及びログ表示機能
- 解析結果出力機能
- エラー表示又は警告表示機能

受注者は、動作評価試験の実施に先立ち、試験項目、試験条件、使用データ及び確認方法を整理し、原子力機構の確認を受けること。

また、動作評価試験の結果について、試験条件、確認結果、不具合の有無及び対応内容を動作評価報告書として取りまとめ、原子力機構に提出すること。試験において不具合又は仕様不適合が認められた場合は、原子力機構と協議の上、必要な修正を行い、修正後の動作確認結果を報告すること。

6. 業務に必要な資格等

なし。

7. 支給品及び貸与品

7.1. 支給品

なし。

7.2. 貸与品

- (1) 解析評価用データセット 1 式
- (2) その他、業務上、機構が必要であると認めたもの

8. 提出書類

- (1) 総括責任者届 契約締結後速やかに 1 部

- | | | |
|--|-----------------|-----|
| (2) 作業工程表 | 契約締結後速やかに | 1 部 |
| (3) 契約先の資本関係・役員の情報、本契約の実施場所、従事者の所属・専門性（情報セキュリティに係る資格・研修等）・実績及び国籍についての情報を記した書類※ | 契約締結後速やかに | 1 部 |
| (4) 従事者名簿 | 作業開始 2 週間前まで | 1 部 |
| (5) 設計書 | システム構築前までに | 1 部 |
| (6) 動作評価試験要領書 | 動作評価試験前までに | 1 部 |
| (7) 動作評価試験報告書 | 納期日までに | 1 部 |
| (8) 取扱説明書 | 納期日までに | 1 部 |
| (9) 作業日報 | 作業終了後速やかに | 1 式 |
| (10) 委任先又は中小受託事業者等の承認について（機構指定様式） | 作業開始前まで（必要に応じて） | 1 部 |
| (11) 提出図書（1）～(9)の電子媒体（CD 等） | | 1 式 |
| (12) プログラムデータ 納期日までに（CD 等） | | 1 式 |

※提出した内容に変更が生じた場合はその都度提出すること。

上記の書類はすべて日本語で記述することともに、電子ファイルは編集できるファイルで提出すること。

（提出場所）

日本原子力研究開発機構 福島廃炉安全工学研究所

廃炉環境国際共同研究センター 環境モニタリンググループ

（福島県南相馬市原町区萱浜字巢掛場 45-169 福島県環境創造センター）

9. 検収条件

「8. 提出書類」の確認並びに、原子力機構が仕様書の定める業務が実施されたと認めた時を以て、業務完了とする。

10. 適用法規・規程等

受注者は業務の実施にあたって、最新の関係法令等を遵守すること。

11. 特記事項

- (1) 受注者は原子力機構が原子力の研究・開発を行う機関であるため、高い技術力及び高い信頼性を社会的にもとめられていることを認識し、原子力機構の規程等を遵守し安全性に配慮し業務を遂行しうる能力を有する者を従事させること。
- (2) 受注者は業務を実施することにより取得した当該業務及び作業に関する各データ、技術情報、成果その他のすべての資料及び情報を原子力機構の施設外に持ち出し

て発表もしくは公開し、または特定の第三者に対価をうけ、もしくは無償で提供することはできない。ただし、あらかじめ書面により原子力機構の承認を受けた場合はこの限りではない。

- (3) 受注者は異常事態等が発生した場合、原子力機構の指示に従い行動するものとする。また、契約に基づく作業等を起因として異常事態等が発生した場合、受注者がその原因分析や対策検討を行い、主体的に改善するとともに、結果について機構の確認を受けること。
- (4) 本仕様書に記載されている事項および記載の無い事項について疑義が生じた場合は、その都度、受注者と原子力機構担当者が協議し、必要な措置を講じるものとする。

12. 統括責任者

受注者は本契約業務を履行するにあたり、受注者を代理して直接指揮命令する者（以下「総括責任者」という。）及びその代理者を選任し、次の任務に当たらせるものとする。

- (1) 受注者の従事者の労務管理及び作業上の指揮命令
- (2) 本契約業務履行に関する原子力機構との連絡及び調整
- (3) 仕様書に基づく定常外業務の請負処理
- (4) 受注者の従事者の規律秩序の保持並びにその他本契約業務の処理に関する事項。

13. 検査員及び監督員

検査員 一般検査 管財担当課長

監督員 技術検査 環境モニタリンググループ員

14. 産業財産権等

産業財産権等の取扱いについては、別紙1「産業財産権特約条項」に定められたとおりとする。

15. グリーン購入法の推進

- (1) 本契約において、グリーン購入法（国等による環境物品等の調達の推進等に関する法律）に適用する環境物品（事務用品、OA機器等）が発生する場合は、これを採用するものとする。
- (2) 本仕様書に定める提出図書（納入印刷物）については、グリーン購入法の基本方針に定める「紙類」の基準を満たしたものであること。

以 上

別紙 1 「産業財産権特約条項」

(乙が単独で行った発明等の産業財産権の帰属)

第1条 乙は、本契約に関して、乙が単独でなした発明又は考案(以下「発明等」という。)に対する特許権、実用新案権又は意匠権(以下「特許権等」という。)を取得する場合は、単独で出願できるものとする。ただし、出願するときはあらかじめ出願に際して提出すべき書類の写しを添えて甲に通知するものとする。

(乙が単独で行った発明等の特許権等の譲渡等)

第2条 乙は、乙が前条の特許権等を甲以外の第三者に譲渡又は実施許諾する場合には、本特約条項の各条項の規定の適用に支障を与えないよう当該第三者と約定しなければならない。

(乙が単独で行った発明等の特許権等の実施許諾)

第3条 甲は、第1条の発明等に対する特許権等を無償で自ら試験又は研究のために実施することができる。甲が甲のために乙以外の第三者に製作させ、又は業務を代行する第三者に再実施権を許諾する場合は、乙の承諾を得た上で許諾するものとし、その実施条件等は甲、乙協議の上決定する。

(甲及び乙が共同で行った発明等の特許権等の帰属及び管理)

第4条 甲及び乙は、本契約に関して共同でなした発明等に対する特許権等を取得する場合は、共同出願契約を締結し、共同で出願するものとし、出願のための費用は、甲、乙の持分に比例して負担するものとする。

(甲及び乙が共同で行った発明等の特許権等の実施)

第5条 甲は、共同で行った発明等を試験又は研究以外の目的に実施しないものとする。ただし、甲は甲のために乙以外の第三者に製作させ、又は業務を代行する第三者に実施許諾する場合は、無償にて当該第三者に実施許諾することができるものとする。

2 乙が前項の発明等について自ら商業的实施をするときは、甲が自ら商業的实施をしないことにかんがみ、乙の商業的实施の計画を勘案し、事前に実施料等について甲、乙協議の上、別途実施契約を締結するものとする。

(秘密の保持)

第6条 甲及び乙は、第1条及び第4条の発明等の内容を出願により内容が公開される日まで他に漏洩してはならない。ただし、あらかじめ書面により出願を行った者の了解を得た場合はこの限りではない。

(委任・下請負)

第7条 乙は、本契約の全部又は一部を第三者に委任し、又は請け負わせた場合においては、その第三者に対して、本特約条項の各条項の規定を準用するものとし、乙はこのために必要な措置を講じなければならない。

2 乙は、前項の当該第三者が本特約条項に定める事項に違反した場合には、甲に対し全ての責任を負うものとする。

(協議)

第8条 第1条及び第4条の場合において、単独若しくは共同の区別又は共同の範囲等について疑義が生じたときは、甲、乙協議して定めるものとする。

(有効期間)

第9条 本特約条項の有効期限は、本契約締結の日から当該特許権等の消滅する日までとする。

以 上

別紙2 「逆問題解析コード機能仕様」

1. システム概要

本システムは、放射線計測データおよび推定対象メッシュデータを入力し、指定された解析モデルに基づいて線源分布等を推定するための解析システムである。システムは Python 3 を基本として構築し、Windows 上での使用を前提とした、GUI ベースで操作可能な構成とする。

主な機能は、以下の3つで構成する。

- 1) データのインプットと設定
- 2) 解析計算
- 3) 解析結果の加工・出力

なお、作成するプログラムコードは、利用者側で内容を確認・修正・拡張できるよう、コード全文を提供するものとする。

2. 解析で使用するデータ及び機能等について

(1) 計測データ

計測データは CSV 形式で入力する。計測データには、以下の情報が含まれる。

- 計測位置座標：X, Y, Z
- 姿勢情報：ロール、ピッチ、ヨー
- 計数率情報：複数チャンネルまたは複数検出器に対応した計数率
- その他入力情報：ヘッダ名でデータ種別を判別し、解析に使用できるようにする

CSV ファイルは GUI 上のファイルダイアログから選択して読み込めるようにする。CSV の各列は、ヘッダ情報に基づいてデータ種別を判別し、対応するデータとして読み込む。

(2) 推定位置メッシュデータ

推定対象となるメッシュデータは CSV 形式で入力する。メッシュデータには、以下の情報を含むものとする。

- メッシュ位置座標：X, Y, Z

- 座標の定義：メッシュ中央座標、または BOX 頂点座標
- メッシュ物質 ID

メッシュ物質 ID は、減衰計算や応答関数計算に使用する。メッシュが存在しない空間については空気として扱い、空気に対しても減衰計算式を設定できるものとする。

(3) GUI 上で設定する解析条件

入力データの読み込みと併せて、解析に必要な条件を GUI 上で設定できるものとする。設定項目は以下の通りとする。

- 使用する検出器の応答関数（CSV：極座標で管理：ある角度方向 ϕ と θ [deg] に、ある一定距離に 1 B q 線源を置いたときの、各結晶の応答）
- 使用する解析モデル
- 反復計算回数
- 推定値の初期値設定（全てを指定値にする または 推定位置に対する初期値を C S V で読み込んで設定）
- 各物質 ID に対応する減衰計算式
- 各解析モデルで必要となるパラメータ
- 計算に使用する CPU Core 数等、計算高速化に必要なパラメータ
- 解析結果の保存先

減衰計算式については、変数を `x` などとし、Python で評価可能な数式として、テキストボックス等に入力し、解析に反映される形式とする。ここで `x` は、各メッシュまたは各物質領域を通過する距離を表す。例えば「 $=0.123*\exp(-0.12*x)$ 」のように入力することで、式が反映されるようにする。

入力された式は、指定された物質 ID ごとに適用し、メッシュ通過距離に応じた減衰補正に使用する。なお ID が無い空間に関しては、空気とし、その減衰補正の計算式も設定できること。メッシュ通過距離の計算方法は、計算精度及び処理速度を考慮し、受注者が適切な方法を検討し実装すること。採用する計算方法、処理手順、適用範囲及び制限事項については、設計書に記載すること。

(4) 解析機能

解析では、入力された計測データ、推定メッシュデータ、応答関数、減衰計算条件、解析モデル設定を用いて計算を実行する。解析モデルは、反復計算系 MLEM を基本とする。また、MLEM に付随項を追加した解析手法にも対応できる構成とする。反復計算中は、以下の情報を GUI 上で確認できるものとする。

- 現在の反復回数
- 計算進捗
- 誤差等の収束状況

反復計算は、利用者の操作により途中停止可能なものとし、途中停止した場合においても、停止時点の解析結果、解析条件及び計算ログを出力できるものとする。

計測点 (i) と推定位置 (j) の間の応答係数 (Cij) の算出には長時間を要する可能性があるため、プログラムは、応答係数 (Cij) を算出した後に、当該算出結果を用いて反復計算を実行する構成とすること。

算出した応答係数 (Cij) は、反復計算時に再利用できるよう保存可能とすること。保存形式は、バイナリ形式等を含め、読み込み速度、ファイル容量、再利用性及び保守性を考慮した適切な形式を受注者が検討し、実装すること。また、保存した応答係数 (Cij) を読み込み、応答係数の再計算を行わずに反復計算を実行できるものとする。

応答係数算出、減衰計算及び反復計算等の各種計算処理については、処理時間の短縮を図るため、並列処理等の合理的な高速化手法を検討し、実装すること。採用した高速化手法、保存形式、処理手順、動作環境及び制限事項については、設計書に記載すること。

(5) 解析結果の出力

解析結果は、指定した保存先に出力する。出力形式は CSV を基本とし、必要に応じて画像、グラフ、解析ログ等も保存できる構成とする。出力データには、以下の情報を含める。

- 推定結果：推定位置座標：X, Y, Z、推定値、物質 ID (CSV)
- 解析設定条件：各種設定値、使用した応答関数、使用した解析モデル、反復回数等 (CSV)
- 実行ログ：計測値と、推定値から算出した計測ポイントにおける計数率の誤差等 (CSV)

3. 解析モデル詳細について

(1) 共通事項

時刻 t 、反復回数 n 、推定メッシュ j 、測定点 i とする。

$$\hat{y}_{i,t}^{(n)} = \sum_k C_{ik,t} x_{k,t}^{(n)}$$

ここで、

- $y_{i,t}$: 時刻 t の実測値
- $x_{j,t}^{(n)}$: 時刻 t 、反復 n 回目の推定値
- $C_{ij,t}$: 時刻 t における応答関数
- $\hat{y}_{i,t}^{(n)}$: 計算上の予測計数

逐次解析では基本的に、

$$x_{j,t}^{(0)} = x_{j,t-1}^{(\text{final})}$$

とし、次の反復計算に使用する。

応答係数 C_{ij} は、測定点 (i) における計測値に対して、解析点 (j) の推定値がどの程度寄与するかを表す係数とする。 C_{ij} の算出にあたっては、測定点 (i) と解析点 (j) の幾何学的関係から、検出器に対する入射方向を求め、検出器応答関数に基づき角度応答を算出する。また、測定点 (i) と解析点 (j) を結ぶ経路上に存在する各メッシュ又は各物質領域について、通過距離を算出し、物質 ID ごとに設定された減衰計算式に基づき減衰率を算出する。さらに、当該経路のうち、メッシュ又は物質領域を通過しない区間については空気領域として取り扱い、空気領域に対する減衰率を算出する。

以上により、 C_{ij} は、検出器の角度応答、各メッシュ又は各物質領域における減衰率、及び空気領域における減衰率を用いて、以下の考え方により算出する。

$C_{ij} = (\text{検出器の角度応答}) \times (\text{各メッシュ又は各物質領域における減衰率}) \times (\text{空気領域における減衰率})$

ここで、 C_{ij} は、原則として ($0 \leq C_{ij} \leq 1$) の範囲の値とする。

各メッシュ又は各物質領域における減衰計算、及び空気領域における減衰計算を行う範囲については、解析点 (j) の探査範囲として指定できるものとする。

(2) MLEM

反復計算式は以下のとおりである。

$$x_{j,t}^{(n+1)} = x_{j,t}^{(n)} \frac{\sum_i C_{ij,t} \frac{y_{i,t}}{\hat{y}_{i,t}^{(n)}}}{\sum_i C_{ij,t}}$$

ここで x の初期値は、all=指定値、または CSV で指定できるようにする。

(3) MLEM+BG

$$\hat{y}_{i,t}^{(n)} = \sum_k C_{ik,t} x_{k,t}^{(n)} + b_{i,t}$$

反復式は、

$$x_{j,t}^{(n+1)} = x_{j,t}^{(n)} \frac{\sum_i C_{ij,t} \frac{y_{i,t}}{\sum_k C_{ik,t} x_{k,t}^{(n)} + b_{i,t}}}{\sum_i C_{ij,t}}$$

bi に関しては、読み込みデータで「BG」等のヘッダで指定できるようにするか、またはユーザで指定した範囲内の乱数とする（±5 など）。この指定は、固定値以外にも、(k*√計測値) の乱数も指定できるようにし、また乱数は、指定した値を中央値としたガウス分布を基にした確率での乱数生成もできるようにする。ここで+bを行った推定計測値(y)は、0以上の値になるようにする。

(4) 平滑化付き

目的関数を

$$\Phi(x) = \sum_i [\hat{y}_{i,t} - y_{i,t} \log \hat{y}_{i,t}] + \beta R_{\text{smooth}}(x)$$

とし、ここで R は以下となる。

$$R_{\text{smooth}}(x) = \frac{1}{2} \sum_j \sum_{l \in N(j)} w_{jl} (x_{j,t} - x_{l,t})^2$$

$$\frac{\partial R_{\text{smooth}}}{\partial x_{j,t}} = \sum_{l \in N(j)} w_{jl} (x_{j,t} - x_{l,t})$$

これより反復計算式は以下の通り。

$$x_{j,t}^{(n+1)} = x_{j,t}^{(n)} \frac{\sum_i C_{ij,t} \left(\frac{y_{i,t}}{\hat{y}_{i,t}^{(n)}} \right)}{\sum_i C_{ij,t} + \beta \sum_{l \in N(j)} w_{jl} \left(x_{j,t}^{(n)} - x_{l,t}^{(n)} \right)}$$

ここで追加される項の計算は、ある推定値 x_j の回りの推定結果 x を使用し、その差分を積算する。どのぐらいの周辺 x を使用するのかは、ある j からの距離で指定する。 w は距離に則った重み値とし、距離に関係した式を入れる。この式はテキストボックスなどで数式を記入し、反映できる形とする。 β は固定値でパラメータとして設定する。

(5) TV 正則化項付き

こちらでは R は以下となる。

$$R_{TV} = \sum_j \sqrt{(x_{j+1} - x_j)^2 + \epsilon}$$

これより反復計算式は以下の通り。

$$x_{j,t}^{(n+1)} = x_{j,t}^{(n)} \frac{\sum_i C_{ij,t} \frac{y_{i,t}}{\hat{y}_{i,t}^{(n)}}}{\sum_i C_{ij,t} + \beta \frac{\partial R_{TV}}{\partial x_{j,t}}}$$

ここで微分値は以下となる。

$$\frac{\partial R_{TV}}{\partial x_j} = \frac{x_j - x_{j-1}}{\sqrt{(x_j - x_{j-1})^2 + \epsilon}} - \frac{x_{j+1} - x_j}{\sqrt{(x_{j+1} - x_j)^2 + \epsilon}}$$

平滑化は近傍との差の二乗を使用していたが、ここでは絶対値を使用する。

画像では $j+1$ 等となっているが、それが j 近傍の推定値の値と考える。

ϵ は固定値で、設定できるようにする（例： $=10^{-8}$ ）。

(6) 時間正則化項付き

こちらでは R は以下となる。

$$R_{time} = \frac{1}{2} \sum_j \left(x_{j,t} - x_{j,t-1}^{(final)} \right)^2$$

これより反復計算式は以下の通り。

$$x_{j,t}^{(n+1)} = x_{j,t}^{(n)} \frac{\sum_i c_{ij,t} \frac{y_{i,t}}{\hat{y}_{i,t}^{(n)}}}{\sum_i c_{ij,t} + \gamma (x_{j,t}^{(n)} - x_{j,t-1}^{(\text{final})})}$$

ここでは、2 個前の推定値と、1 個前の推定値の差分を使用する。 γ に関しては固定値をパラメータとして設定する。

(7) 一覧

一覧

モデル	逐次式で変わる場所	追加される項
MLEM	初期値のみ	なし
MLEM + BG	予測値 $\hat{y}$	$+b_{i,t}$
平滑化付きMAP-EM	分母	$+\beta \sum_{l \in N(j)} w_{jl}(x_j - x_l)$
TV正則化付きMLEM	分母	$+\beta \frac{\partial R_{\text{TV}}}{\partial x_j}$
時間正則化付きMLEM	分母	$+\gamma(x_{j,t} - x_{j,t-1}^{(\text{final})})$

これらの項は 1 個だけでなく、複数追加できるようにする。

例えば、MLEM+BG、平滑化、時間正則化の場合、項が三つ追加される形になる。

以 上