



Rapid Whole-Body FDG PET/MRI in Oncology Patients: Utility of Combining Bayesian Penalised Likelihood PET Reconstruction and Abbreviated MRI

井上, 純子

(Degree)

博士 (医学)

(Date of Degree)

2024-03-25

(Resource Type)

doctoral thesis

(Report Number)

甲第8778号

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/0100490003>

※ 当コンテンツは神戸大学の学術成果です。無断複製・不正使用等を禁じます。著作権法で認められている範囲内で、適切にご利用ください。



(課程博士関係)

学 位 論 文 の 内 容 要 旨

Rapid Whole-Body FDG PET/MRI in Oncology Patients:
Utility of Combining Bayesian Penalised Likelihood
PET Reconstruction and Abbreviated MRI

担癌患者における BPL PET 再構成による
高速全身 FDG PET/MRI の有用性に関する検討

神戸大学大学院医学研究科医科学専攻
放射線医学
(指導教員：村上卓道教授)

井 上 純 子

【目的】

Positron emission tomography (PET)/magnetic resonance imaging (MRI)の利点は、PET と MRI の同時撮像が可能である上に、MRI の高い組織コントラスト分解能を活かすことができる点である。一方で、MRI の利点を生かすためには局所撮像に十分な時間を要することから、全身を撮像対象とした場合は PET/CT と比較して総検査時間が長くなることが課題であった。そこで、全身 PET/MRI の撮像時間を高速化することにより、検査時間全体の短縮を試みた。一般に PET の収集時間を短縮すると十分なガンマ線の計数が得られず画質が劣化するが、Bayesian Penalized Likelihood (BPL) PET 画像再構成法を用いることにより、定量性と画質を担保しつつ PET 収集時間を短縮することが可能である。これに標準的な MRI プロトコルを短縮化した abbreviated MRI を併用し、全身 PET/MRI の撮像時間の短縮を試みることにした。

本研究の目的は、PET 収集時間を短縮した場合の Time-of-Flight (TOF) BPL 再構成法における至適 β 値をファントムおよび臨床実験で決定することと、至適 β 値下の BPL 再構成法による PET/MRI の診断能が、標準的な PET 収取時間における従来の TOF Ordered Subsets Expectation Maximisation (OSEM)再構成法による PET/MRI の診断能と比較して劣らないことを示すことである。

【方法】

本研究では PET と MRI の同時収集が可能な完全一体型 PET/MRI 装置 (GE HealthCare 社製 SIGNA PET/MR) を使用した。

ファントム実験での至適 β 値の検討では、National Electrical Manufacturers Association (NEMA)ボディファントムを用いて、PET 収集時間を標準的な 1 ベッドあたり 2.5 分とした場合は従来法である OSEM で再構成し、収集時間を 1.5 分や 1.0 分に短縮した場合は β 値を 100-1000 に設定した BPL で再構成して、定性的および定量的な指標、すなわち、 $NEC_{phantom}$ 、5 段階の視覚評価スコア、%バックグラウンド変動性(BV)、コントラストリカバリ(CR)、10mm ホット球のリカバリ係数(RC)を、それぞれ評価した。なお β 値は BPL 法で唯一可変なパラメータで、数値を上げると画像のノイズレベルを下げるができるが、コントラストも低下させるため、至適値の設定が必要である。

臨床実験での至適 β 値の検討では、病理組織学的検査結果または他の画像検査により悪性腫瘍と診断され、全身 FDG PET/MRI を受けた患者 49 例を後方視的に評価した。ファントム実験と同様に、2.5 分収集の場合は OSEM で再構成し、1.5 分または 1.0 分収集の場合は β 値を 100-1000 に設定した BPL で再構成して、画像の定性的および定量的な指標として $NEC_{patient}$ および $NEC_{density}$ 、5 段階の視覚評価スコア、肝臓 signal-to-noise ratio (SNR)、病変部 SUVmax、病変部 signal-to-background ratio (SBR)、病変部 SNR を、それぞれ評価した。なお視覚評価において 2.5 分収集の場合は標準的な MRI 撮像プロトコルと、1.5 分または 1.0 分収集の場合は abbreviated MRI との組み合わせを用いて診断した。

至適 β 値下の BPL 再構成による PET/MRI における診断能の検討では、病変の検出能と良悪性

鑑別診断能について、担癌患者 156 例の画像を 2 人の読影医が視覚的に 5 段階で後方視的に評価した。リファレンススタンダードは、病理組織学的結果または 6 カ月以上後の画像検査結果とした。

【結果】

ファントム実験での至適 β 値の検討では、 NEC_{phantom} は収集時間 1.5 分以上であれば日本のガイドラインの基準値の範囲内であった。 β 値 100-1000 の視覚評価スコア、BV、CR、RC の値からは、収集時間 1.5 分と 1.0 分では β 値 500-800 での BPL が、従来の収集時間 2.5 分の OSEM の値を超えるまたはそれに近い値となっており、至適 β 値となり得ると考えられ、その後の臨床実験では、500、600、700、800 の 4 つの β 値で再構成された BPL を検討に用いることとした。

臨床実験での至適 β 値の検討では、 NEC_{patient} と NEC_{density} は 1.0 分、1.5 分、2.5 分のすべての収集時間で日本のガイドラインの基準値の範囲内であった。平均差の 95%信頼区間を比較したところ、視覚評価スコアについては収集時間 1.5 分の β 値 500-800 での BPL、1.0 分の β 値 600-800 での BPL、肝臓 SNR については収集時間 1.5 分の β 値 500-800 での BPL、1.0 分の β 値 700、800 での BPL の 95%信頼区間が、収集時間 2.5 分の OSEM の非劣性マージンを超えており、優れていた。病変部 SUVmax について、Bland-Altman plot を用いて収集時間 2.5 分の OSEM と比較したところ、収集時間 1.5 分の BPL では β 値 600、1.0 分の BPL では β 値 700 の平均差が最も 0 に近く、優れているという結果になった。病変部 SBR や SNR についても、平均差の 95%信頼区間で比較したところ、収集時間 1.5 分、1.0 分ともに β 値 500-800 の BPL の 95%信頼区間が、収集時間 2.5 分の OSEM の非劣性マージンを超えており、優れていた。

以上より、収集時間 1.5 分の BPL では β 値 500、600、1 分では β 値 600、700 の画像が、従来の収集時間 2.5 分の OSEM と同等という結果になり、1.5 分の場合は β 値 600、1 分の場合は β 値 700 を至適 β 値として設定した BPL を用いて、2 つ目の目的である診断能を評価することとした。

至適 β 値下の BPL 再構成による PET/MRI における診断能の検討では、病変の検出能と良悪性鑑別診断能について、Receiver Operating Characteristic (ROC) 解析で比較したところ、収集時間 1.5 分または 1.0 分の BPL と abbreviated MRI の組み合わせは、2 人の読影医のいずれにおいても、収集時間 2.5 分の OSEM と標準的な MRI プロトコルの組み合わせと比較して有意差を認めなかった。

【結論】

至適 β 値下の TOF BPL と abbreviated MRI を併用することにより、1 ベッドあたり 1.5 分以下で全身 PET/MRI を撮像することができ、かつ病変の検出能や良悪性鑑別診断能は従来の OSEM と標準的な MRI プロトコルを組み合わせた PET/MRI に劣らないと言える。

論文審査の結果の要旨			
受付番号	甲 第 3349 号	氏 名	井上 純子
論文題目 Title of Dissertation	担癌患者における BPL PET 再構成による高速全身 FDG PET/MRI の有用性に関する検討 Rapid Whole-Body FDG PET/MRI in Oncology Patients: Utility of Combining Bayesian Penalised Likelihood PET Reconstruction and Abbreviated MRI		
審査委員 Examiner	主 査 掛 地 吾 弘 Chief Examiner 副 査 丹 生 一 郎 Vice-examiner 副 査 勝 二 郁 夫 Vice-examiner		

(要旨は1, 000字～2, 000字程度)

【目的】 Positron emission tomography (PET)/magnetic resonance imaging (MRI)の利点は、PET とMRIの同時撮像が可能である上に、MRIの高い組織コントラスト分解能を活かすことができる点である。一方で、MRIの利点を生かすためには局所撮像に十分な時間を要することから、全身を撮像対象とした場合はPET/CTと比較して総検査時間が長くなることが課題であった。そこで、全身PET/MRI の撮像時間を高速化することにより、検査時間全体の短縮を試みた。一般にPETの収集時間を短縮すると十分なガンマ線の計数が得られず画質が劣化するが、Bayesian Penalized Likelihood (BPL) PET 画像再構成法を用いることにより、定量性と画質を担保しつつPET 収集時間を短縮することが可能である。これに標準的な MRI プロトコルを短縮化したabbreviated MRI を併用し、全身PET/MRIの撮像時間の短縮を試みることにした。本研究の目的は、PET収集時間を短縮した場合のTime-of-Flight (TOF) BPL再構成法における至適 β 値をファントムおよび臨床実験で決定することと、至適 β 値下の BPL 再構成法によるPET/MRI の診断能が、標準的な PET 収集時間における従来の TOF Ordered Subsets Expectation Maximisation (OSEM)再構成法によるPET/MRIの診断能と比較して劣らないことを示すことである。

【方法】 本研究ではPETとMRIの同時収集が可能な完全一体型PET/MRI装置 (GE HealthCare社製SIGNA PET/MR)を使用した。ファントム実験での至適 β 値の検討では、National Electrical Manufacturers Association (NEMA)ボディファントムを用いて、PET収集時間を標準的な1ベッドあたり2.5分とした場合は従来法であるOSEMで再構成し、収集時間を1.5分や1.0分に短縮した場合は β 値を100-1000に設定したBPLで再構成して、定性的および定量的な指標、すなわち、NECphantom、5段階の視覚評価スコア、%バックグラウンド変動性(BV)、コントラストリカバリ(CR)、10mmホット球のリカバリ係数(RC)を、それぞれ評価した。なお β 値はBPL法で唯一可変なパラメータで、数値を上げると画像のノイズレベルを下げるができるが、コントラストも低下させるため、至適値の設定が必要である。臨床実験での至適 β 値の検討では、病理組織学的検査結果または他の画像検査により悪性腫瘍と診断され、全身FDG PET/MRIを受けた患者49例を後方視的に評価した。ファントム実験と同様に、2.5分収集の場合はOSEMで再構成し、1.5分または1.0分収集の場合は β 値を100-1000に設定した BPL で再構成して、画像の定性的および定量的な指標として NECpatient およびNECdensity、5 段階の視覚評価スコア、肝臓 signal-to-noise ratio (SNR)、病変部SUVmax、病変部signal-to-background ratio (SBR)、病変部 SNR を、それぞれ評価した。なお視覚評価において 2.5 分収集の場合は標準的な MRI 撮像プロトコルと、1.5 分または 1.0 分収集の場合はabbreviated MRI との組み合わせを用いて診断した。至適 β 値下のBPL再構成によるPET/MRIにおける診断能の検討では、病変の検出能と良悪性鑑別診断能について、担癌患者156例の画像を2人の読影医が視覚的に5段階で後方視的に評価した。リファレンススタンダードは、病理組織学的結果または6 カ月以上後の画像検査結果とした。

【結果】 ファントム実験での至適 β 値の検討では、NECphantom は収集時間 1.5 分以上であれば日本のガイドラインの基準値の範囲内であった。 β 値 100-1000 の視覚評価スコア、BV、CR、RC の値からは、収集時間 1.5 分と 1.0 分では β 値 500-800 での BPL が、従来の収集時間 2.5 分の OSEM の値を超えるまたはそれに近い値となっており、至適 β 値となり得ると考えられ、その後の臨床実験では、500、600、700、800 の 4 つの β 値で再構成された BPL を検討に用いることとした。臨床実験での至適 β 値の検討では、NECpatient と NECdensity は 1.0 分、1.5 分、2.5 分のすべての収集時間で日本のガイドラインの基準値の範囲内であった。平均差の 95%信頼区間を比較したところ、視覚評価スコアについては収集時間 1.5 分の β 値 500-800 での BPL、1.0 分の β 値 600-800 での BPL、肝臓 SNR については収集時間 1.5 分の β 値 500-800 での BPL、1.0 分の β 値 700、800 での BPL の 95%信頼区間が、収集時間 2.5 分の OSEM の非劣性マージンを超えており、優れていた。病変部 SUVmax について、Bland-Altman plot を用いて収集時間 2.5 分の OSEM と比較したところ、収集時間 1.5 分の BPL では β 値 600、1.0 分の BPL では β 値 700 の平均差が最も 0 に近く、優れているという結果になった。病変部 SBR や SNR についても、平均差の 95%信頼区間で比較したところ、収集時間 1.5 分、1.0 分ともに β 値 500-800 の BPL の 95%信頼区間が、収集時間 2.5 分の OSEM の非劣性マージンを超えており、優れていた。

以上より、収集時間 1.5 分の BPL では β 値 500、600、1 分では β 値 600、700 の画像が、従来の収集時間 2.5 分の OSEM と同等という結果になり、1.5 分の場合は β 値 600、1 分の場合は β 値 700 を至適 β 値として設定した BPL を用いて、2 つ目の目的である診断能を評価することとした。至適 β 値下の BPL 再構成による PET/MRI における診断能の検討では、病変の検出能と良悪性鑑別診断能について、Receiver Operating Characteristic (ROC) 解析で比較したところ、収集時間 1.5 分または 1.0 分の BPL と abbreviated MRI の組み合わせは、2 人の読影医のいずれにおいても、収集時間 2.5 分の OSEM と標準的な MRI プロトコルの組み合わせと比較して有意差を認めなかった。

【結論】 至適 β 値下の TOF BPL と abbreviated MRI を併用することにより、1 ベッドあたり 1.5 分以下で全身 PET/MRI を撮像することができ、かつ病変の検出能や良悪性鑑別診断能は従来の OSEM と標準的な MRI プロトコルを組み合わせた PET/MRI に劣らないと言える。

以上、本研究は、BPL PET 画像再構成法を用いることにより、定量性と画質を担保しつつ PET 収集時間を短縮することが可能であることを明らかにした。従来法の PET/MRI の診断能と比較して劣らないなど重要な知見を得ており、本研究者は博士（医学）の学位を得る資格があると認める。