

半導体PET-CTにおける回帰分析手法による 体重当たりの投与量と連動した肝SNR予測

Prediction of Liver SNR Linked to Dose per Body Weight by Regression Analysis Method in Semiconductor PET-CT

長瀬 智明*

神奈川県立がんセンター 放射線診断技術科（現 神奈川県立循環器呼吸器病センター 放射線技術科）

Key words: regression analysis, residual analysis, semiconductor PET-CT, liver SNR, normality test

【Abstract】

Objective: In our hospital, the collection time was 60 seconds per bed only for preoperative patients with breast cancer. We found that approximately 40% of patients did not meet the standard value of 10 for liver SNR. We considered whether the hepatic SNR of 10 could be met by allocating the appointment time based on body weight. The relationship between body weight, dose, and hepatic SNR needs to be clarified. The purpose of this study was to examine whether the liver SNR could be predicted by regression analysis. **Methods:** The explanatory variable for the regression analysis was the dose per body weight, and the objective variable was the liver SNR. First, we checked whether the regression equation had a constant term or not. The P-value and AIC of the constant term were calculated, and a graph of residuals was created. Next, the residuals were checked. The normality test, the equal-variance test, and the outlier test were conducted. **Result:** The P-value of the constant term was below the significance level, the AIC was calculated low, and the residuals were scattered evenly. The residual graph maintained normality and equal dispersion. There were no significant outliers. **Conclusion:** A regression line with a constant term can predict liver SNR from dose and weight.

【要 旨】

【目的】 1 bed当たり60秒で収集を行っている患者の約4割で、肝SNRの基準値を満たせていない。体重から予約時間を操作することで、基準値を満たせないか考えた。目的は、回帰分析によって肝SNRが予測可能か調べることである。**【方法】** まず、回帰式の定数項の有無を確認した。定数項のP値、AICを算出し、残差グラフを作成した。次に、残差を確認した。正規性、等分散性の検定、外れ値を確認した。**【結果】** 定数項のP値は有意水準を下回っていた。AICは低く算出され、残差の偏りはなかった。残差グラフは、正規性、等分散性が保たれていた。大きく外れた外れ値はなかった。**【結語】** 定数項を持つ回帰直線で、投与量と体重から肝SNRが予測可能である。

緒 言

当院は positron emission tomography-computed tomography（以下、PET-CT）検査に、検出器に半導体を用いたX線CT組み合わせ型ポジトロンCT装置（以下、半導体PET）（Discovery MI, GE HealthCare, Milwaukee, WI, USA）を用いている。この半導体PETは仕様書より、検出器クリスタル材質はLutetium based scintillator（LBS）であり、計数率特性は280 kcps以上@20.0 kBq/ccである。検査に用いている使用薬剤はデリバリー製剤の2-deoxy-2- ^{18}F fluoro-D-glucose（以下、FDG）（フルオロデオキシグルコース（ ^{18}F ）注射液、日本メジ

フィジックス、東京）の185 MBqである。その検定時刻は10:00、12:30の2検定で、患者一人一人に対して全量投与している。1日当たりの検査件数は最大16件（予備枠もあり）であり、投与間隔は10–15分である。またup take timeは60分としている。そのため投与時刻に対して投与量はおおよそ決まっている（Fig.1）。そうした中で、当院では乳癌術前患者のみ、標準撮像の全身撮像において1 bed当たりの収集時間を1分と固定している。理由は、乳房のみの追加撮像があり、標準撮像と追加撮像を1人あたりに与えられた検査時間内に収めるためである。つまり全身撮像の収集に時間をかけることができない。しかし、その全身撮像において、1 bed当たりの収集時間が1分では約4割（40.8%）の患者でしか『がんFDG-PET/CT撮像法ガイドライン』（以下、ガイドライン）の臨床画像の評価方法の一つとして記載されている肝臓のSignal Noise Ratio（以下、肝SNR）の評価基準の 10^{11} に足りていないことが分かった。

肝SNRは、収集時間を増やすことで向上することが報告されている²⁾。その理由は、計測される信号量が増

NAGASE Tomoaki

Kanagawa Cancer Center, Department of Radiological Diagnosis Technology (Present address: Department of radiological technology, Kanagawa Cardiovascular and Respiratory Center)

* E-mail : nagase.04007@kanagawa-pho.jp

Received November 30, 2025; accepted March 13, 2026

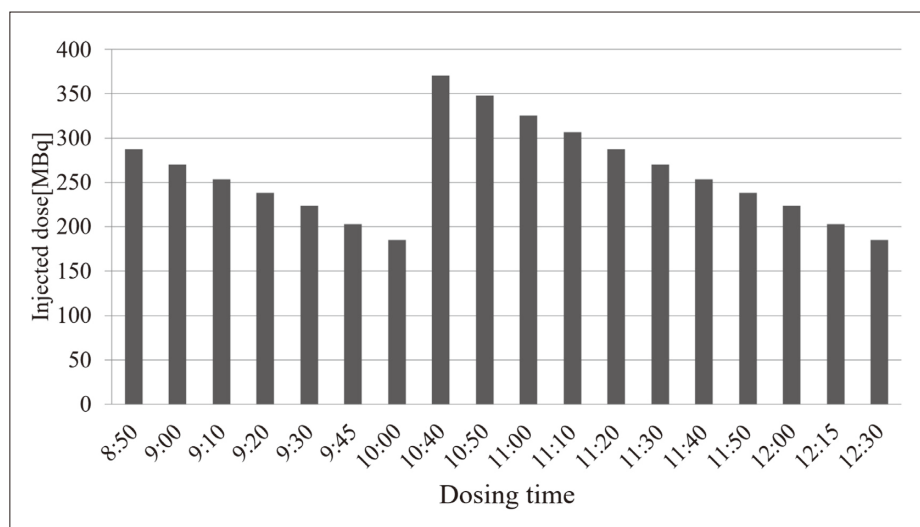


Fig.1 Dosing time and injected dose

加するため、結果として画像の統計雑音が減少するからである²⁾。しかし、過去に報告されたデリバリー製剤の使用施設の問題点³⁾でもあるように、当院でも1日に実施する検査数から求められる1人当たりの収集時間に制限があり、収集時間を増やすことで肝SNRを向上させることができない。またPET-CT機器導入後のファントム試験で再構成条件を読影医と協議の上で決定し、固定した上で臨床使用を開始したため、ファントム試験時から現在の諸条件は変更できない。そこで患者の体重によって予約時間をコントロールすれば、つまり投与量の多い予約枠には高体重の患者を、投与量の少ない予約枠には低体重の患者を入れるようにすれば、より多くの患者の臨床画像で肝SNRの評価基準を満たすことができるのではないかと考えた。

現在の乳癌術前患者の予約は他の患者と同様に、予約枠の空いている所に入る仕組みとなっている。つまり投与量の多い予約枠に低体重の患者が入る場合もあれば、投与量の少ない予約枠に高体重の患者が入る場合もある。これらの過去患者のデータを解析すれば、投与量と体重、肝SNRの関係を明らかにすることができ、より多くの患者の臨床画像で肝SNRを向上させることができるのではと考えた。過去に、肝SNRは体重当たりの投与量と最も強く相関関係があると報告されている²⁾。そこで本研究では、説明変数を体重当たりの投与量、目的変数を肝SNRとした回帰分析を行うこととした。使用機器が半導体PETのため、体重当たりの投与量が少ない領域から多い領域まで直線で回帰していることを前提とした。

回帰分析を行うに当たりいくつかの確認事項があ

る。まず、最小二乗法によって作成される回帰直線の回帰式に定数項を持つか否かである。過去に、説明変数を体重当たりの投与量、目的変数を肝SNRとした散布図において、定数項を持つ回帰式が報告されている³⁾。しかし、回帰式に定数項を持つと、投与量が0 MBqの場合でも肝SNRに値を持つことになってしまう。次に、残差が正規性、等分散性を保っているか否かである⁴⁾。残差とは、実測値と理論値の差のことである⁵⁾。正規性、等分散性が保れている場合は回帰が直線回帰していると見なされるため、予測モデルが単純な回帰直線となり、肝SNRの予測が容易になる。このことは、再構成条件を変えたくない施設、そして1 bed当たりの収集時間を固定し、かつデリバリー製剤のFDGを全量投与している施設、つまり予約枠によって投与量がほぼ決まる施設にとって、体重によって予約枠をコントロールするだけで多くの患者の臨床画像で肝SNRの向上が見込めるという点で、本研究の意義は大きい。

本研究の目的は、再構成条件の変更や収集時間を延長せず、予約の操作をするだけで臨床画像の評価を上げることができるか調べることである。そのために、定数項を持つ回帰式において、定数項を0と見なすことができるか、また投与量と体重から肝SNRが回帰直線によって予測できるかを確認する。

1. 方 法

本研究に使用した対象は、2021年4月から2024年10月までに検査を行った乳癌術前患者147人である。

全て女性であり、連続サンプリングである。ただし、肝に広く転移のある症例は除外している。胸部や腹部の撮像範囲において検討された過去の報告⁶⁻⁹⁾から、再構成条件である β 値は400とした。また過去の報告³⁾と同様、回帰は直線であることを前提とし、説明変数を体重当たりの投与量、目的変数を肝SNRとした回帰直線を作成した。

1-0 肝SNRの算出

肝SNRの算出方法はガイドライン¹⁾を参考にした。まず、肝臓部位に直径約3 cmの円形のRegion of Interest (以下、ROI) を3つ描画した。その際、横隔膜付近、後方肝静脈、肝門部付近は避けた。次に、肝SNRを算出した。なお、肝SNRの算出式は以下の通りである。

$$\text{肝SNR} = C_{\text{liver}} / SD_{\text{liver}} \quad \textcircled{1}$$

ここで、 C_{liver} はROI計数の平均値、 SD_{liver} はROI計数の標準偏差である。

1-1 147人の投与量、体重、体重当たりの投与量、up take time、被検者雑音等価計数 (NEC_{patient} および NEC_{density})

対象患者147人分の投与量、体重、体重当たりの投与量を調べ、最小と最大を確認した。またup take time、被検者雑音等価計数 (Noise Equivalent Count) のうち、測定範囲を正規化したもの (以下、NEC_{patient})¹⁾ と測定範囲の身体体積で割ったもの (以下、NEC_{density})¹⁾ の平均を確認した。なお、NEC_{patient}、NEC_{density}の算出には核医学支援システム (onti, PDR ファーマ、東京) を用いた。

1-2 回帰直線についての分析

1-2-1 有意性の確認

まず、定数項を持つ回帰式と定数項を持たない回帰式を算出した。次に、定数項を持つ回帰式の回帰係数と定数項の検定を行った。帰無仮説：母集団における回帰係数は0である、母集団における定数項は0である、対立仮説：母集団における回帰係数は0ではない、母集団における定数項は0ではない、とし、回帰係数のP値、定数項のP値を算出した。それぞれ有意水準は0.05とした。算出にはExcelデータ分析を用いた。

1-2-2 データの適合度の確認

回帰直線とデータの適合度の判断材料として、決定係数、赤池情報量基準 (Akaike's Information

Criterion (以下、AIC)) を算出した。また残差グラフを作成した。決定係数の算出にはExcelデータ分析を用いた。AICの算出式について、第3項はモデルに含まれる自由パラメーターを表している^{10, 11)}。分かりやすくするために、以下のように定数項を持つ場合と持たない場合とに場合分けをした。

定数項を持つ場合 (自由パラメーター：説明変数、残差、定数項)

$$AIC = n (\log (Se/n) + 1) + 2 (p+2) \quad \textcircled{2}$$

定数項を持たない場合 (自由パラメーター：説明変数、残差)

$$AIC = n (\log (Se/n) + 1) + 2 (p+1) \quad \textcircled{3}$$

n ：サンプルサイズ (147)、 Se ：残差平方和、 p ：説明変数の数 (1)

1-3 残差についての分析

1-3-1 正規性の確認

Shapiro-Wilk検定を行った。帰無仮説：残差は正規分布に従う、対立仮説：残差は正規分布に従わない、とした。有意水準は0.05とした。検定にはEZR (自治医科大学さいたま医療センター、埼玉) を用いた。

1-3-2 等分散性の確認

Breusch-Pagan検定を行った。帰無仮説：残差は等分散、対立仮説：残差は等分散ではない、とした。有意水準は0.05とした。手順は『44の例題で学ぶ計量経済学』¹²⁾を参考にした。まず、誤差の二乗を目的変数、体重当たりの投与量を説明変数として補助回帰直線を作成した。次に、補助回帰直線の決定係数とサンプルサイズを掛け合わせ、検定統計量を算出した。なお、検定統計量の算出式は以下の通りである¹¹⁾。

$$\text{検定統計量} = \text{補助回帰直線の決定係数} \times \text{サンプルサイズ} \quad \textcircled{4}$$

最後に、Excel関数でP値を算出した。なお、P値への算出式は以下の通りである。また自由度は説明変数の数であり、この場合は1である。

$$P \text{ 値} = \text{CHISQ.DIST.RT} (\text{検定統計量}, \text{自由度} (1)) \quad \textcircled{5}$$

1-3-3 外れ値の確認

回帰直線の作成に影響を及ぼすような外れ値の有無を確認した。またSmirnov-Grubbs検定と箱ひげ図で外れ値の個数を確認した。Smirnov-Grubbs検定においてはEZRを用いた。

1-4 倫理的配慮

本研究での過去患者のデータ使用については、当院倫理審査委員会の承認を得ている(2024疫127)。臨床画像を評価した147人の患者には侵襲や介入がないため、同意を取らずにオプトアウトを用いた。

2. 結 果

2-1 147人の投与量, 体重, 体重当たりの投与量, up take time, 被検者雑音等価計数 (NEC_{patient} および NEC_{density})

対象患者147人分の投与量の最小は140.5 MBq, 最大は353.9 MBq, 体重の最小は36 kg, 最大は84 kg, 体重当たりの投与量の最小は1.9 MBq/kg, 最大は7.9 MBq/kgであった (Fig.2, Fig.3, Fig.4)。なお, up take timeの平均は60.1分, NEC_{patient}, NEC_{density}の平均は26.1, 0.502であった。

2-2 回帰直線についての分析

2-2-1 有意性の確認

定数項を持つ回帰式は $Y = 0.8839X + 5.7917$, 定数項を持たない回帰式は $Y = 2.1701X$ であった。回帰式 $Y = 0.8839X + 5.7917$ において, 回帰係数のP値は $9.79E-19$, 定数項のP値は $3.12E-30$ であった。共に対立仮説が採用され, 母集団における回帰係数は0ではない, 母集団における定数項は0ではないと判定された。

2-2-2 データの適合度の確認

定数項を持つ回帰直線, 持たない回帰直線の決定係数はそれぞれ0.4175, 0.9623, AICはそ

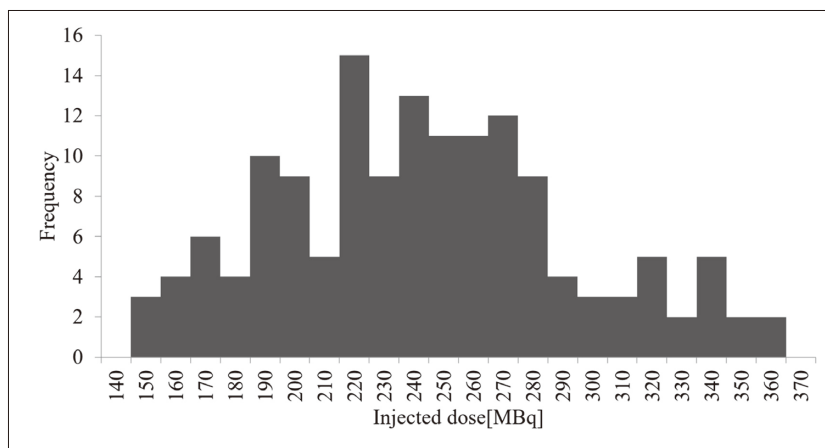


Fig.2 Histogram of injected dose

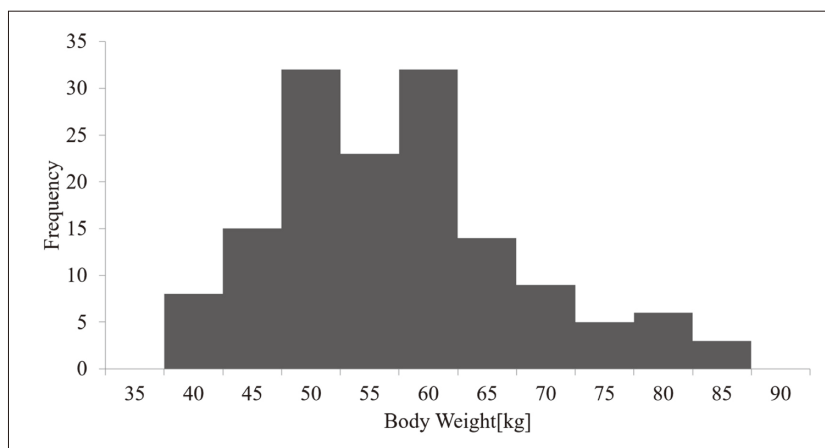


Fig.3 Histogram of body weight

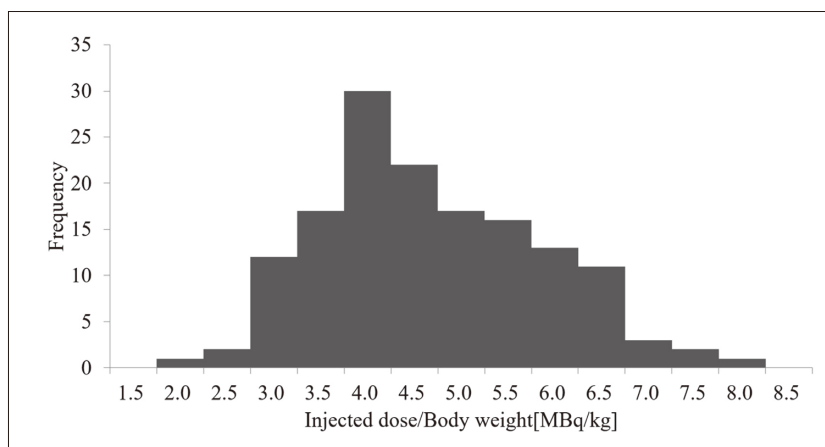


Fig.4 Histogram of injected doses per body weight

Table Comparison of regression lines with and without constant terms

Model	Regression Equation	R ²	AIC
1*	$Y = 0.8839X + 5.7917$	0.4175	469.5
2**	$Y = 2.1701X$	0.9623	590.3

* Regression line with constant term

**Regression line without constant term

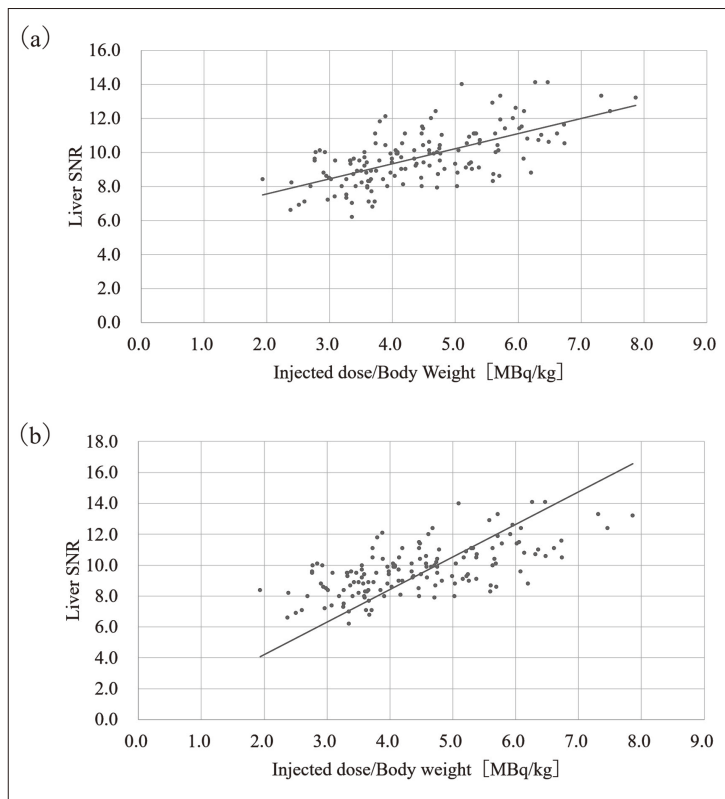


Fig.5 Scatter plot

- (a) Regression line with constant term
(b) Regression line without constant term

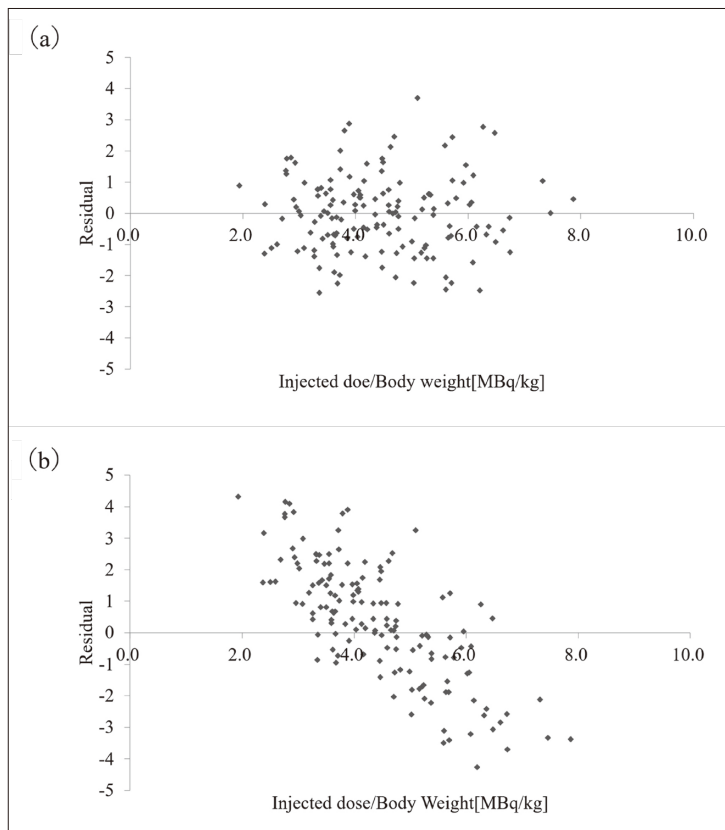


Fig.6 Residual graph

- (a) Regression line with constant term
(b) Regression line without constant term

れぞれ469.5, 590.3であった (Table). 残差が満遍なく散らばっていたのは定数項を持つ回帰直線の方であった (Fig.5, Fig.6). これらの結果から, 残差についての分析は定数項を持つ回帰直線で行った.

2-3 残差についての分析

2-3-1 正規性の確認

P値は0.329であった. 帰無仮説が採用され, 残差は正規分布に従うと判定された (Fig.7).

2-3-2 等分散性の確認

検定統計量は1.611であった. P値 = CHISQ.DIST.RT (1.611,1) より, P値は0.204であった. 帰無仮説が採用され, 残差は等分散と判定された.

2-3-3 外れ値の確認

回帰直線に影響を及ぼすような大きく外れた外れ値はなかった. またSmirnov-Grubbs検定の結果, 外れ値として判定されたものはなかった. 箱ひげ図で検出された外れ値は1個 (低い方に外れた外れ値はなし) であった (Fig.8).

3. 考 察

本研究は, 再構成条件の変更や収集時間を延長しないことを前提としている. 理由は, 再構成条件を協議の上で決定し固定したため, そして1人当たりにかかることができる検査時間が決まっているためである. β 値の増加は微小病変の検出を低下させる報告¹³⁾や, 長時間撮像が必ずしも高品質な画像につながるわけではないという報告¹⁴⁾もある. そのため本研究の目的は, 予約の操作をするだけで臨床画像の評価を上げることができるか調べることである.

肝SNRの予測を回帰直線で行うに当たり, まずは回帰直線が定数項を持つのか否かを調べることから行った. 有意性の確認において, 定数項のP値は3.12E-

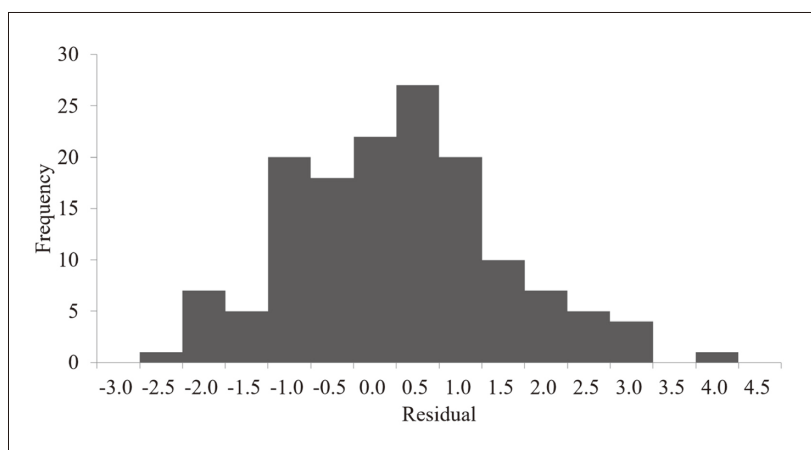


Fig.7 Histogram of residuals

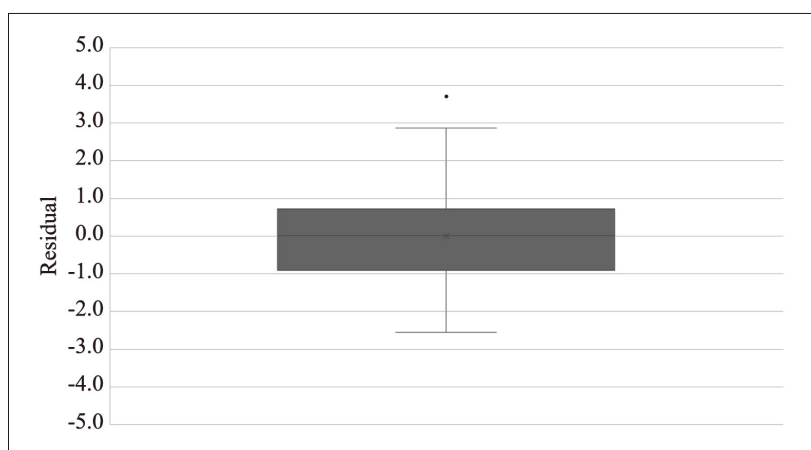


Fig.8 Boxplot of residuals

30であった。定数項が0であると仮定すると、そのような確率は $3.12E-30$ しかない¹⁵⁾。定数項が0である帰無仮説は有意水準0.05で棄却されるため、定数項を0と置くことは適当ではないと考える。

次に、定数項を持つ回帰直線とデータに対する適合度に矛盾がないか確認を行った。2つのパラメーター（回帰係数、定数項）を持つ回帰直線は、1つのパラメーター（回帰係数）しか持たない回帰直線よりも、データに対して適合度が高くなるのは当然である。パラメーターを調整することによってモデルをデータに合わせるからである¹⁶⁾。相対的な評価に用いられ、値の小さい方が適合度が高くなるとされる¹⁷⁾ AICにおいて、値が小さくなったのは定数項を持つ回帰直線であった（Table）。またデータに対して当てはめた予測モデルが正しいときは帰無プロットのようなになる¹⁸⁾ 残差グラフにおいて、帰無プロットのようなになったのは定数項を持つ回帰直線の方であった（Fig.6）。こ

れらは、パラメーター数とデータ適合度の関係に矛盾のない結果となった。一方、決定係数が高くなったのは、定数項を持たない回帰直線であった（Table）。しかし、定数項が0、つまり切片を0とした回帰直線は、決定係数の意味が変わってしまう¹⁹⁾。そしてこの場合の決定係数は、直線の当てはまりの良さを表しているわけではない¹⁹⁾。よってパラメーター数とデータ適合度の関係に矛盾する結果になったのだと考える。これらの結果から、残差の正規性、等分散性の確認を行う回帰直線は、定数項を持つものと判断した。

定数項を持つ回帰直線で残差の正規性、等分散性を確認した。残差に正規性、等分散性が保たれていない場合、回帰直線以外のモデルが考えられるためである。残差の正規性、等分散性は共に保たれていた。P値はそれぞれ0.329、0.204であり、帰無仮説の残差は正規分布に従う、残差は等分散と判定された。しかし、有意水準を0.05としたため、それぞれの検定で第二種の過誤の可能性も否定できない。第二種の過誤を犯さない確率、つまり検出力（検定力）

を上げるには、サンプルサイズを大きくする必要がある²⁰⁾。本研究では事前にサンプルサイズを決めることはせず、半導体PET稼働当初から研究開始とし、研究終了までの期間で連続サンプリングとした。できる限り多くのサンプルを集めることで、検出力（検定力）を上げることに努めた。

最後に外れ値の確認を行った。データ分析の結果全体に影響を及ぼす可能性があるためである²¹⁾。Smirnov-Grubbs検定によって外れ値と判定されたものはなかった。また箱ひげ図によって外れ値判定された外れ値は1個であった。外れ値の検出について、それぞれ定義が異なっている^{21, 22)}。削除するかは、研究している問題の状況に依存している²³⁾。本研究の場合、肝SNRを目的変数としている。肝SNRはROIの位置によって変動しやすい¹⁾。肝SNRの算出は筆者一人で行い、対象患者147人全てROIのサイズも変更していないが、避けるべき肝後方部の肝静脈や肝門部近

くが含まれていた可能性もあり、位置によって誤差を生じたことも考えられる。この外れ値は回帰直線に影響を及ぼすような大きく外れた外れ値ではなかったため、削除することなく、「意味がある」大事な症例の一つとして本研究の回帰直線の生成に含めた。

本研究で算出された回帰式は $Y=0.8839X+5.7917$ 、回帰係数のP値は $9.79E-19$ であった。これは切片のP値の $3.12E-30$ と同様、有意水準の0.05を大きく下回る。そして第一種の過誤も考えにくい。これらの結果から、体重当たりの投与量と肝SNRは無関係ではないことは母集団でも言うことができると考える。

母集団での活用について、緒言で述べた通り、本研究の結果は検査全体の肝SNRの向上に活用できる。仮に投与量370 MBqの予約枠で肝SNRの10を担保したい場合、回帰式の $Y=0.8839X+5.7917$ に $Y=10$ 、 $X=370/\text{体重}$ を代入すると、 $\text{体重}=77.71\text{ kg}$ と算出される。つまり投与量370 MBqの予約枠には体重77.71 kg以下の患者を入れれば、肝SNRの10を担保できる計算となる。本研究の対象患者147人のうち、141人が77.71 kg以下であったため、今回の結果で得られた回帰式に当てはめれば95.9%の患者で肝SNRの10を担保する計算となる。そしてそれは予約枠をコントロールしない従来の40.8%よりも、検査全体の画質の大幅な改善が見込める。NEC_{patient}、NEC_{density}の平均が26.1、0.502であり、大幅にガイドラインの評価基準（NEC_{patient}>13、NEC_{density}>0.2）を超えている点を踏まえると、十分に撮像品質管理に貢献し得るのではないかと考える。しかし、回帰直線の決定係数は0.4175、つまり寄与率は41.75%であった。

寄与率を上げ、さらに撮像品質管理に貢献し得るにはどうすればよいか。この点について、肝SNR算出時の正確性が挙げられる。外れ値が生まれる可能性同様、肝SNRはPET画像の均一性、ROIの設定位置によって誤差を生じる²⁴⁾。ガイドラインでは円形ROIの描画は3つであるが、大数の法則²⁵⁾を考えれば、その試行を増やせば真の値である母平均に近づく²⁵⁾はずである。肝SNRのさらなる正確な算出については今後の検討課題としたい。

リミテーションとして、説明変数である体重当たりの投与量の取得範囲が限られることが挙げられる。回帰分析をする上で、説明変数はできる限り広い範囲であるのが望ましい。得られた説明変数の範囲外の値を回帰式に代入しても値そのものは求められるが、つま

り本研究の場合では、回帰式 $Y=0.8839X+5.7917$ のX（体重当たりの投与量）に得られた説明変数の範囲外の値を代入してもY（肝SNR）が求まるが、数学的に信頼することはできない²⁶⁾ためである。本研究で取得できたのは、最小が1.9 MBq/kg、最大が7.9 MBq/kgであった（Fig.4）。最小の1.9 MBq/kgは、体重84 kgの患者に140.5 MBq投与した症例であった。本研究での体重84 kg以上は全体の4.4%である（Fig.3）。また投与量140.5 MBqは通常の予約枠の投与量ではあり得ず、通常の検査枠外の検査であった（Fig.1）。まれであることが分かる（Fig.2）。そのため説明変数の体重当たりの投与量を1.9 MBq/kgより低い領域、特に0 MBq/kg付近で取得するには限界がある。もし、0 MBq/kg付近で集めることができたなら、回帰が原点を通る曲線であった可能性も考えられる²⁷⁾。一方、体重当たりの投与量が5 MBq/kg以上になると肝SNRが増加しないという過去の報告³⁾がある。過去の報告で用いられた使用機器は本研究で用いた使用機器と異なっており、計数率特性も明らかではない。しかし、半導体PETを用いた本研究で、前提としていた回帰直線で5 MBq/kgより高い領域の7.9 MBq/kgまで正規性、等分散性が確認できたことは評価できると考える。

4. 結 語

定数項を持つ直線回帰式において、定数項のP値は有意水準を大きく下回っており、定数項は0と見なすことはできない。それはAIC、残差グラフと矛盾はなかった。この残差において、正規性、等分散性は保たれていた。また回帰直線に影響を及ぼすような、大きく外れた外れ値はなかった。これらから、定数項を持つ回帰直線で投与量と体重から肝SNRが予測可能である。

利益相反

筆頭者に開示すべき利益相反はない。

発表学会

本研究は、第44回日本核医学技術学会学術大会で発表した。

表の説明

Table 定数項を持つ回帰直線と定数項を持たない回帰直線の比較

図の説明

- Fig.1 投与時間と投与量
 Fig.2 投与量のヒストグラム
 Fig.3 体重のヒストグラム
 Fig.4 体重当たりの投与量のヒストグラム
 Fig.5 散布図
 (a) 定数項を持つ回帰直線 (b) 定数項を持たない回帰直線
 Fig.6 残差グラフ
 (a) 定数項を持つ回帰直線 (b) 定数項を持たない回帰直線
 Fig.7 残差のヒストグラム
 Fig.8 残差の箱ひげ図

参考文献

- 1) 福喜多博義, 他: がんFDG-PET/CT撮像法ガイドライン 第2版. 核医学技術, 33(4), 377-420, 2013.
- 2) 坂井洋登, 他: がんFDG-PET/CT撮像法ガイドラインから見たデリバリーPET施設の問題点. 核医学技術, 30(4), 359-366, 2010.
- 3) 甲谷理温, 他: 肝SNRを用いたデリバリー¹⁸F-FDG使用時のPET画像に影響を及ぼす因子および収集時間の検討. 日放技学誌, 70(8), 784-792, 2014.
- 4) 阿部真人: データ分析に必須の知識・考え方 統計学入門. 174-184, ソシム, 2021.
- 5) 菅 民郎: 例題とExcel演習で学ぶ多変量解析 回帰分析・判別分析・コンジョイント分析編. 19-22, オーム社, 2016.
- 6) Teoh EJ, et al.: Phantom and Clinical Evaluation of the Bayesian Penalized Likelihood Reconstruction Algorithm Q.Clear on an LYSO PET/CT System. J Nucl Med., 56(9), 1447-1452, 2015.
- 7) Teoh EJ, et al.: Novel penalised likelihood reconstruction of PET in the assessment of histologically verified small pulmonary nodules. Eur Radiol., 26(2), 576-584, 2016.
- 8) Messerli M, et al.: Impact of a Bayesian penalized likelihood reconstruction algorithm on image quality in

novel digital PET/CT: clinical implications for the assessment of lung tumors. EJNMMI Physics, 5(1), 27, 2018.

- 9) Gabriel R-L, et al.: Phantom, clinical, and texture indices evaluation and optimization of a penalized-likelihood image reconstruction method (Q.Clear) on a BGO PET/CT scanner. Med Phys., 45(7), 3214-3222, 2018.
- 10) 菅 民郎: 例題とExcel演習で学ぶ多変量解析 回帰分析・判別分析・コンジョイント分析編. 112, オーム社, 2016.
- 11) 坂元慶行, 他: 情報量統計学. 138-142, 共立出版, 1983.
- 12) 唐渡広志: 44の例題で学ぶ計量経済学. 328-331, オーム社, 2013.
- 13) Yang Hong-xing, et al.: Investigation of PET image quality with acquisition time/bed and enhancement of lesion quantification accuracy through deep progressive learning. EJNMMI Physics, 11(7), 1-15, 2024.
- 14) Te Riet J, et al.: Evaluation of a Bayesian penalized likelihood reconstruction algorithm for low-count clinical ¹⁸F-FDG PET/CT. EJNMMI Physics, 32(6), 2019.
- 15) 神永正博, 他: Rで学ぶ確率統計学 多変量統計編. 27-29, 内田老鶴圃, 2019.
- 16) 江崎貴裕: 分析者のためのデータ解釈学入門. 190-196, ソシム, 2020.
- 17) 栗原伸一, 他: 統計学図鑑. 226-232, オーム社, 2017.
- 18) サンフォード・ワイズバーグ: データ解析のための線形回帰 (原著第4版). 221-222, 共立出版, 2024.
- 19) 神永正博, 他: Rで学ぶ確率統計学 多変量統計編. 31-33, 内田老鶴圃, 2019.
- 20) 栗原伸一, 他: 統計学図鑑. 176-183, オーム社, 2017.
- 21) 阿部真人: データ分析に必須の知識・考え方 統計学入門. 48-60, ソシム, 2021.
- 22) 城古雅典, 他: 標準単価フィードバックシステムの構築. 土木学会論文集F4 (建設マネジメント), 69(4), 1_81-1_88, 2013.
- 23) サンフォード・ワイズバーグ: データ解析のための線形回帰 (原著第4版). 230-231, 共立出版, 2024.
- 24) Masuda Y, et al.: Comparison of imaging protocols for ¹⁸F-FDG PET/CT in overweight patients: optimizing scan duration versus administered dose. J Nucl Med., 50(6), 844-848, 2009.
- 25) 栗原伸一, 他: 統計学図鑑. 56-57, オーム社, 2017.
- 26) 末吉正成, 他: EXCELビジネス統計分析 第3版. 93-96, 翔泳社, 2017.
- 27) ジョージ. W. スネデカー, 他: 統計的方法 原書第6版. 161-164, 岩波書店, 1972.