

ISSN 1884-6165

保健科学研究

第 16 卷 第 1 号

Journal of Health Science Research

Vol.16 No.1



保 健 科 学 研 究

J. Health Sci. Res.

2025

保健科学研究

第 16 卷 第 1 号

Journal of Health Science Research

Vol.16 No.1



2025

目次

【原著】

- 寺島 真悟、中野 雄基、駒井 史雄、木村 直希：
Monte Carlo 法で取得したビームデータを用いた Long SAD 法の
全身照射の処方 MU 値及び補償物質厚の推定.....1
- 齋藤 千咲、山崎 晴琉、多喜代健吾、安永知衣里、小山 雛子、北宮 千秋：
看護学生 of 精神保健に関する相談施設および相談先に対する
イメージと不安感の違い.....11
- 柴垣龍之介、工藤 幸清、小山内 暢、對馬 惠、
南島 佑亮、佐々木 稜、成田 知将、森田 竹史：
肺野の逐次近似応用再構成法と深層学習を用いた
CT 画像再構成法の比較：ファントム実験.....17

【報告】

- 小山内 暢、清水真由美、田中 和貴、工藤 幸清、細川 翔太、
對馬 惠、堀内 輝子、木立るり子：
福島第一原子力発電所事故後におけるユズの放射性セシウム濃度と
ドレッシング作製による濃度変化.....27

【その他(印象記)】

- 山中 天聖、門前 暁：
日本放射線影響学会第 67 回大会へ参加した印象記.....35

【原著】

Monte Carlo 法で取得したビームデータを用いた Long SAD 法の全身照射の処方 MU 値及び補償物質厚の推定

寺島 真悟*¹ 中野 雄基*² 駒井 史雄*³ 木村 直希*³

2025 年 1 月 16 日受付, 2025 年 3 月 13 日受理

要旨: Long SAD 法における全身照射 (Total body irradiation; TBI) は, 一般に放射線治療計画装置では対応していない。そのため, ファントムを用いて実際に線量計測を行い処方 MU 値及び体厚を補正する補償物質の厚さを推定する必要がある。本研究では, Monte Carlo 法を用いた線量計算で Long SAD 法におけるファントム測定の実効線減弱係数の算出及びファントムサイズが吸収線量に及ぼす影響を評価した。本研究により, 処方 MU 値を実際の $\pm 1\%$ の精度で推定し, また推定した補償物質厚を用いた線量が施設基準値内である $\pm 3\%$ に収まった。施設における推定値の初期値として本法が利用され, TBI の準備時間の短縮及びそれによる治療スタッフの負担軽減に貢献できた。

キーワード: TBI, Monte Carlo, Long SAD 法, 放射線治療

I. はじめに

造血幹細胞移植は血液腫瘍性疾患や再生不良性貧血などの根治療法として大きな役割を担っている。造血幹細胞移植では, 移植片の拒絶を防ぐ (免疫抑制), 生着環境を確保する (造血抑制), また腫瘍細胞の根絶 (抗腫瘍効果) の 3 つを目的とし, 前処置として化学療法および全身照射 (Total body irradiation; TBI) が行われている¹⁾。TBI は全身に放射線を照射する治療法であり, 照射法は施設の装置や規模などの制約から様々な手法が考案されている^{2,3)}。弘前大学医学部附属病院 (以下, 本学大学病院) は, 線源回転軸間距離 (Source to axis distance; SAD) を患者の身長に応じて 350, 400 cm と長く取り大照射野を形成し全身を照射する Long SAD 法 (左右対向 2 門照射) で TBI が行われる。患者の体位は比較的安楽かつ再現性のある膝屈曲位の仰臥位を採用している。TBI は全身が標的体積であることから, 全身に均一に線量を照射する必要がある。しかしながら, 全身の体厚のばらつき及び不均質組織の存在により均一な照射は難しい。そのため本学大学病院では図 1 のように補償物質 (アクリルや低融点鉛) を治療装置-患者間に部位別に適当な厚さ配置し, 放射線を減弱させることで線量を補正している。このように Long SAD 法による TBI は特殊な追加設備を要さず, 施設の大きさが十分であれば比較的導入することが容易である³⁾。

本学大学病院の TBI はアイソセンタを骨盤部中心とし,

頭部, 頸部, 胸部, 大腿部, 下腿部に補償物質を配置する。線量測定は, TBI 用寝台に板状の水等価ファントムを設置し, ファントムの中心に設置した Farmer 型電離箱を用いて行われる。測定において, ファントムは体の各部位の体厚に相当する厚さのファントムを, 患者の部位に応じたビーム中心の軸外位置に配置される。本学大学病院では準備の段階で各部位の体軸中心で吸収線量が投与線量の $\pm 3\%$ 以内となるよう処方 MU (monitor unit) 値及び補償物質の厚さを決定している。一般的には, TBI 実施時の in vivo 線量測定において $\pm 5\%$ や $\pm 10\%$ 以内などの基準で均一な線量を達成することを目指して行われる^{4,5)}。本学大学病院では, in vivo 線量測定において $\pm 10\%$ 以内を基準としている。

しかし実施にあたり, 処方 MU 値及び補償物質の厚さの決定は一般的に放射線治療計画装置 (Radiation treatment planning system; RTPS) が SAD を長く取る Long SAD に非対応なことから^{2,6)}, 実際に線量測定を行い決定する必要がある。適切な処方 MU 値及び補償物質の厚さを推定するために複数回の長時間の測定が必要となり, TBI に関わる医療スタッフに負担がかかっている。本学大学病院では, 処方 MU 値決定後の補償物質の厚さを決定する際は, 最初に測定時間短縮のため実際の TBI で使用される線量率 (例えば 100 MU/min) の 3 倍の線量率を用い, 処方 MU 値の 1/3 を照射し測定が行われる。補償物質厚を検討し, 適切な線量 (処方線量の 1/3) となるまで測定を繰り返し, 最後に実際の線量率と処方 MU 値を用いて線量の確認を行っている。MU 値の決定及び骨盤部を除く 5 部位 (低融点鉛を用いる胸部含む) の補償物質の厚さを決定する必要があるが, ファントムや線量計のセッティング等の時間等も考慮すると膨大な時間となる。これらの一連の準備は 4 日間にわたり 8 ~ 12 時間程度の時間を要している。本学大学病院ではこれまで様々な手法から推定値を算出することで, 算出値を基

*1 弘前大学 Hirotsaki University

〒036-8564 青森県弘前市本町 66-1

66-1, Hon-cho, Hirotsaki, Aomori, 036-8564, Japan

*2 札幌厚生病院 Sapporo Kosei General Hospital

〒060-0033 北海道札幌市中央区北 3 条東 8-5

8-5, Kita3-jo Higashi, Chuo-ku, Sapporo-shi, Hokkaido, 066-0033, Japan

*3 弘前大学医学部附属病院 Hirotsaki University Hospital

〒036-8563 青森県弘前市本町 53

53, Hon-cho, Hirotsaki, Aomori, 036-8564, Japan

Correspondence Author s-tera@hirotsaki-u.ac.jp (Shingo Terashima)

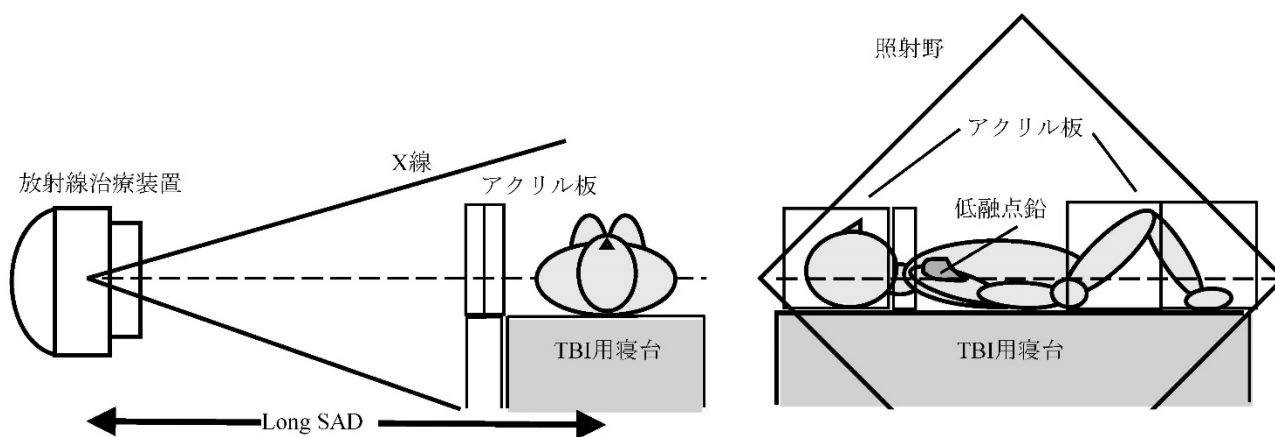


図1 Long SAD 法における TBI での患者、補償物質（アクリル、低融点鉛）、TBI 用寝台の位置関係

に測定を行い、測定回数を減らす検討を行っていた。

商用の RTPS は TBI の線量分布算出に対応していないが、近年では Monte Carlo (MC) 法を用いて精度の良い線量分布が取得可能となっている。臨床現場において治療機のマシンタイムは限られているが、MC 法で再現された精度の良いビームデータを用いることで臨床業務を阻害することなく、大量のデータを取得することが出来た。本研究では、MC 法によるシミュレーションで事前に得られた Long SAD における線量分布を用いて、簡便に処方 MU 値及び補償物質の厚さを精度よく推定可能かを検討した。また TBI の実際の測定における限界であるファントムのサイズによる線量の影響についても検討した。

II. 方法

1. 放射線治療装置のビームモデリング

MC シミュレーションには、医療分野で gold-standard の MC コードツールキットである EGSnrc を用いた。治療装置のビームモデリングをする際に効率よく X 線ビームを作成できる EGSnrc/BEAMnrc を利用し⁷⁾、本学大学病院の TBI で使用される Clinac-iX (Varian Medical Systems, Inc. Palo Alto, CA) の 10 MV X 線用の加速器ヘッドを構築した。加速器ヘッドは Varian 社の Monte Carlo Data Package にしたがってモデリングを行った。モデリングの妥当性は、効率よく線量分布データを取得できる EGSnrc/DOSXYZnrc を用いて以下の条件で行った⁸⁾。Source surface distance (SSD) = 100 cm, 照射野 $A_0 = 40 \times 40$ cm における percent depth dose (PDD) 及び off-axis ratio (OAR) を $64 \times 64 \times 50$ cm の水ファントム (物質: 水, 密度: $\rho = 1.0$ g/cm³) で取得した。最大照射野サイズ (40×40 cm) での測定のため照射野辺縁部が水ファントムの辺縁に近接してしまうため、ビーム中心軸を水ファントム中心から cross-line 方向 (transverse 方向) に -15 cm オフセットして OAR を取得した。計算ボクセルサイズは、計算効率とボクセルサイズの影響による

実測の線量分布の再現性を考慮し決定したため、統一していない。試行粒子数は、ビルドアップ領域や照射野辺縁の分布が急峻な変化をする領域を除きボクセルの相対標準偏差 (以下、統計誤差とする) が 1% 以内となるよう設定した。BEAMnrc での計算効率を向上させる variance reduction テクニックとして光子を分割する directional bremsstrahlung splitting で光子分割数を 1000、追跡中の電子において現在の計算領域外に移動するエネルギーがない場合に、その場で粒子の追跡を中止する electron range rejection では varying ECUTRR (ECUTRR は electron range rejection における電子のエネルギーカットオフの閾値) オプションを選択した。Electron range rejection が適用される最大エネルギーである ESAVE (制動放射線の生成を考慮して決定) は、ターゲットで 0.7 MeV、他の加速器ヘッドの構成部品では 2 MeV とした。粒子の追跡を行う下限値である電子及び光子のカットオフエネルギーはそれぞれ 0.7, 0.01 MeV とした。得られた線量分布は、RTPS に登録されている実測された PDD, OAR の線量分布と比較し、一致するように BEAMnrc の加速電子のパラメータを加速電子の平均エネルギー、サイズは full width at half maximum (FWHM)、平均広がり角度を mean angular spread (MAS) で調整した。また加速電子のエネルギー Spektrum は正規分布でエネルギーの平均値の FWHM の 3% 以内とし、範囲外のエネルギーの電子はカットした。線量分布の評価は 1 次元ガンマ解析ソフト (in-house) を用いて global 正規化において criteria (判定基準) を 2%/2 mm とし、pass rate (合格率) 100% を達成するようコミッショニングを行なった。ガンマ解析とは線量誤差を評価する線量相違と位置誤差を評価する等線量曲線精度を 1 つの指標で表したものである⁹⁾。決定した加速電子パラメータを用いて粒子情報を記録したデータファイルである phase space files (PSF) を SAD100 cm において取得した。以降の Long SAD におけるシミュレーションでは、PSF を用いてシミュレーションを高速化した。

2. TBI で使用する Long SAD における MC 線量 data table の取得

放射線における距離の逆自乗則では、線源からの距離に応じてそのフルエンスが減弱する。例えば 100 cm から 110 cm 位置で考えると、10 cm の変位によりフルエンスは距離の逆自乗則により $(100 \div 110)^2 \approx 83\%$ に減じる。これを 400 cm から 410 cm 位置で考えると、10 cm の変位によりフルエンスは距離の逆自乗則により $(400 \div 410)^2 \approx 95\%$ に減じる。このように Long SAD においては、距離の逆自乗則による放射線のフルエンスの減弱率が減少し、通常の放射線治療における SAD = 100 cm と比較し深部方向及び側方向の線量分布が異なることが考えられる^{6,10)}。MC 法では、実際の Long SAD 法の条件に基づいてコリメータ角度は 45° とし、水等価ファントム WD (京都化学, 京都, 日本) を用いた。ファントムの組成は京都科学のカatalogを参考に作成した (1.018 g/cm^3)。SAD = 350 cm, 400 cm の条件で任意の軸外距離における任意の厚さのファントム中心線量を、軸外距離及びファントム厚をパラメータとして、図 2 のようにシミュレーションにて取得した。軸外距離は 10 cm 毎、水等価ファントム厚は 5 cm 毎に、SAD = 350 cm, 400 cm それぞれで、軸外距離は 0~70 cm, 0~80 cm まで、ファントム厚は 5~35 cm, 5~40 cm までを取得した。ファントムの中心のボクセルサイズは、 $1.0 \times 1.0 \times 0.5 \text{ cm}$ (ビーム軸方向を 0.5 cm) に設定した。入射粒子数は統計誤差が 0.5% 以下となるようにした。Long SAD 法における MC データの妥当性の検証には以前の研究で取得した SAD = 400 cm の深さ 5~20 cm までの OAR のデータを利用した¹⁰⁾。これらのデータは、後方散乱の影響が SAD = 400 cm では 10 cm 程度で飽和するため、深さによらずファントム全体の厚さを 34 cm と一定としていた。比較において深さ 5 cm でシミュレーションのデータに対して後方散乱の影響により 0.3% 程度の過大評価することが予想されるが、その他の深さのデータへの影響は極めて低く、比較対象として問題はない。

ここで EGSnrc によるシミュレーション結果は 1 粒子あたりの吸収線量 (以下、シミュレーション線量を MC 線量とする) として算出される。線量の規格化には以下の式を用いた。

$$F_{MC} = \frac{D_{exp}}{D_{MC} \times MU} \dots (1)$$

F_{MC} は校正係数 (particle/MU), D_{MC} は EGSnrc により算出された MC 線量 (Gy/particle), MU は D_{exp} を処方する MU 値 (MU), D_{exp} は MU により処方されたファントム中心での吸収線量 (Gy) を示す。この校正定数は、SAD = 400 cm, $30 \times 30 \times 28 \text{ cm}$ の直方体水ファントムを用いた線量測定で以前の研究で取得した実測¹⁰⁾ 及び EGSnrc のシミュレーション結果より取得した。

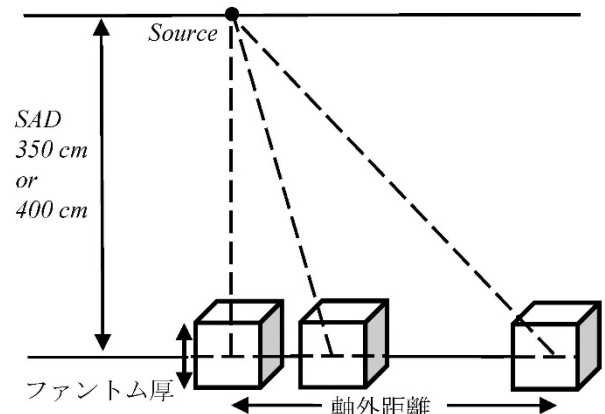


図 2 Long SAD 法における
中心線量取得のための幾何学的配置図

軸外距離と、患者を想定したファントム厚をパラメータとした MC 法で取得されたファントム中心線量のデータ群を、ファントム厚 0.1 cm, 軸外距離 0.5 cm ステップで補間し、線量分布の data table を作成した (以下、MC 線量 data table)。これらの二次元データに対する平滑化及び補間は、SciPy の RectBivariateSpline を用いて行った¹¹⁾。

3. 処方 MU 値の推定と補償物質 (アクリル) 厚の推定

MC 線量 data table より、中心軸の骨盤部の厚さにおける MC 線量 (D_{MC}) を抽出し、(2) 式を用いて処方 MU 値を推定した。ここで MU_{pre} は D_{pre} を処方する MU 値 (MU), D_{MC} は MC 線量 data table より抽出された MC 線量 (Gy/particle), D_{pre} は投与線量 (Gy) を示す。

$$MU_{pre} = \frac{D_{pre}}{D_{MC} \times F_{MC}} \dots (2)$$

MU_{pre} , F_{MC} を (3) 式に用いることで、MC 線量 data table 上の全ての値が、その処方 MU 値における 1 MU あたりの吸収線量の data table へと変換される。この data table を用いて患者の各部位の軸外距離及び厚さを入力することで、各部位における処方 MU 値より投与される吸収線量を算出した。(4) 式より、アクリルの実効線減弱係数を用いて各部位について投与線量にするための補償物質の厚さを算出した。ここで D は MU_{pre} より投与される吸収線量 (Gy), T は補償物質の厚さ (cm), μ_{eff} は補償物質の実効線減弱係数 (cm^{-1}) を示す。

$$D = F_{MC} \times D_{MC} \times MU_{pre} \dots (3)$$

$$T = \frac{1}{\mu_{eff}} \ln\left(\frac{D_{pre}}{D}\right) \dots (4)$$

本研究では、頭部、頸部、大腿部、下腿部に使用する補償物質であるアクリル (物質密度: $\rho = 1.186 \text{ g/cm}^3$) のみを検討し、実効線減弱係数は事前に先行研究で取得されたアクリルの減弱曲線より得られた 0.0394 cm^{-1} を採用した¹¹⁾。取得された処方 MU 値及び各部位の補償物質の厚さの推定精度は、本学大学病院の TBI で実際に患者別に採用した処

方 MU 値及び補償に使用されたアクリル厚との比較で評価した。対象は平成 24 年から平成 30 年 9 月までの本学大学病院で実施された TBI が実施された患者 14 症例とし、P1-P14 とした。データの取り扱い、国立大学法人弘前大学大学院保健学科研究科倫理委員会より承認を得て行なった（整理番号：2017-020）。

4. 実効線減弱係数の評価

また、TBI が行われた患者 14 症例の部位別の水等価ファントムによるアクリル厚決定のための測定結果より、軸外距離別にアクリルの線減弱係数を算出し、評価を行った。簡潔に記載すると、 30×30 cm のファントムを患者の体格に合わせた厚さで配置し、指頭型電離箱で測定したファントムの中心軸線量と、アクリル配置後のファントム中心線量の比の自然対数でとり、アクリル厚で除した値を実効線減弱係数とした。ここで SAD = 350 cm において算出されたアクリルの各実効線減弱係数を SAD = 400 cm に投影することで、SAD = 400 cm における軸外距離の実効線減弱係数とした。

5. 仮想サイズのファントムを用いた線量評価

臨床現場における線量測定では、取り扱いやすい 30×30 cm サイズの水等価ファントムを用いることが多い。しかし、例えば下腿部などの高さが無い部位ではこれら 30×30 cm ファントムでは再現は難しい。臨床では用意しにくい幅及び高さに合わせて直方体水等価ファントムをシミュレーション内で作成し、 30×30 cm サイズのファントムを用いたシミュレーション結果との比較を行った。厚さを 20 cm 一定とし、患者体軸方向を 10, 15, 20 cm 及び背腹方向 20, 30 cm と変化させたファントムを用意し、その中心部の線量をシミュレーションにて取得し比較した。測定を取得するボクセルのサイズは $1.0 \times 1.0 \times 0.5$ cm（ビーム軸方向を 0.5 cm）とし統計誤差が 0.5% 以下になるまで計算させた。

III. 結果

1 ビームモデリングの評価

加速電子のパラメータであるエネルギー、FWHM、MAS は、それぞれ 10.65 MeV、0.135 cm、0.0585 deg とし、シミュレーション結果は実測値と精度よく一致した。PDD、OAR（深さ 10 cm）の線量分布を図 3、4 に示す。PDD のビルドアップ領域で線量の過小評価が観察された。ガンマ解析の評価範囲は PDD ではビルドアップ以降の 4 cm から 33 cm まで、OAR ではビーム中心軸（0cm）から軸外距離 23 cm までとし、PDD、OAR（深さ d = 2.5, 10 cm）共に criteria 2%/2 mm をクリアし 1%/1 mm まで Pass Rate 100% を達成した。

SSD = 400 cm の深さ 5, 10, 15, 20 cm における実測と

EGSnrc の OAR の比較結果を図 5 に示す。測定した全ての深さ、軸外距離で相対誤差は 0~2% 以内に収まった。全ての結果で線量分布が過小評価されていたため、MC 線量 data table の値を SAD = 350, 400 cm においてそれぞれ +1.5, +2% として若干の補正を行った。SAD = 350, 400 cm における OAR の補正值の決定には、MC 線量 data table と同様の測定となる実際の患者の TBI 準備で得られた線量との比較結果を参考にした。ただし、線量分布の比較は中心軸で正規化しており相対誤差は 0% であったため、(2) 式の処方 MU の算出に関しては上記補正は行われなかったようにした。図 6 に一例として P8 の MC 線量 data table を利用し、軸外距離とファントム厚をパラメータとした線量分布のカラーマップを示す。

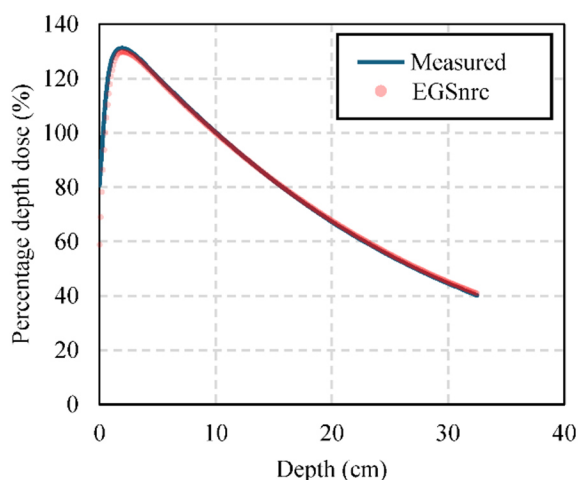


図 3 実測 PDD と EGSnrc で取得した PDD の線量分布 A = 40×40 cm, SSD = 100 cm, 10 cm 深さで規格化。EGSnrc でのボクセルサイズ (X × Y × Z cm) は深さ 3 cm まで $1 \times 1 \times 0.2$ cm, それ以降は深さ 33 cm まで $1 \times 1 \times 0.5$ cm に設定した。

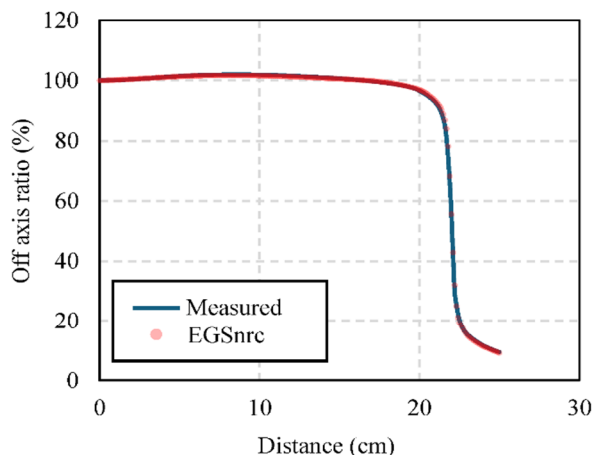


図 4 深さ 10 cm における実測 OAR と EGSnrc で取得した OAR の線量分布

A = 40×40 cm, SSD = 100 cm。EGSnrc でのボクセルサイズ (X × Y × Z cm) は、ビーム中心軸から 19 cm まで $0.5 \times 1 \times 0.5$ cm, それ以降は 25 cm まで $0.2 \times 1.0 \times 0.5$ cm とした。

2. 処方 MU 値及び補償物質の厚さの推定と比較

表 1 に実際に処方された MU 値と本手法で得られた推定処方 MU 値の比較結果を示す。実際の処方 MU に対する本手法で算出された MU 値の相対誤差は±1%以内に収まった。MC 線量 data table を使用した補償物質の厚さにおける比較結果を表 2 に示す。ここで補償物質の厚さについて、本学大学病院における TBI に使用するアクリル厚の最小値

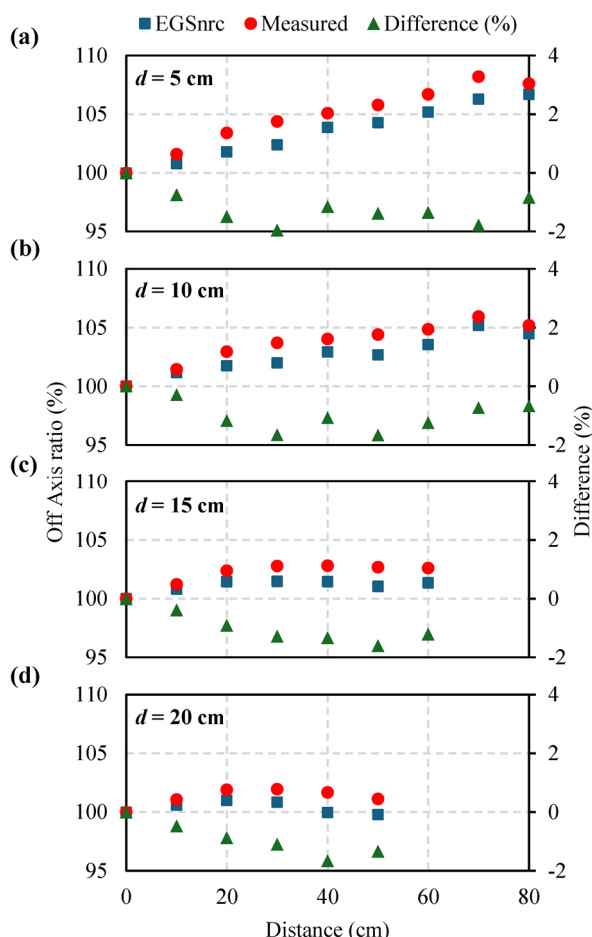


図 5 SSD = 400 cm における実測 OCR と EGSnrc の OAR の比較 (第 1 軸) 及び実測値に対する相対誤差 (第 2 軸) ファントム中心までの深さは (a) 5 cm, (b) 10 cm, (c) 15 cm, (d) 20 cm。

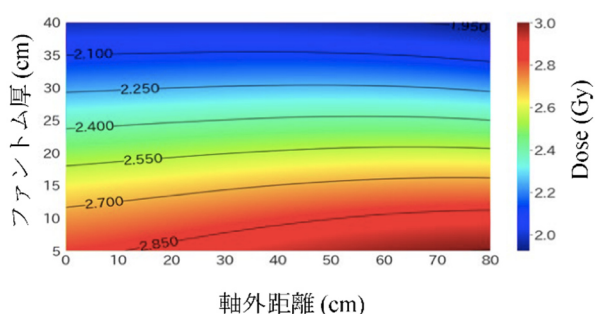


図 6 P8 (処方 MU 値 4153 MU, 投与線量 2 Gy) における MC 線量 data table (カラーマップ表示)

表 1 実際に処方された MU 値と本手法で得られた推定処方 MU 値の比較

SAD	患者 No	投与線量 (Gy)	骨盤部の厚さ (cm)	実際の処方 MU 値	本手法での推定処方 MU 値	相対誤差 (%)
350 cm	P1	2	26	2810	2811	0.04
	P2	1	22.6	1361	1352	-0.66
	P3	2	32.6	3048	3044	-0.13
	P4	2	23	2722	2716	-0.22
	P5	1	21	1330	1329	-0.08
	P6	1.5	19.6	1954	1964	0.51
	P7	2	23	2718	2716	-0.07
400 cm	P8	2	36	4153	4148	-0.12
	P9	2	32.6	3961	3976	0.38
	P10	2	34	4039	4045	0.15
	P11	2	35	4094	4096	0.05
	P12	1.5	38	3209	3190	-0.59
	P13	2	37	4182	4200	0.43
	P14	1.5	32	2962	2960	-0.07

が 0.5 cm であることから 0.5 cm を 1 単位すなわち 1 枚として実際の枚数差を比較した。補正有りの MC 線量 data table を使用した比較結果では SAD = 400 cm の大腿部で最大 3 枚の枚数差が一症例で見られた。最終的には、表 2 の結果に基づき 0.5 cm 単位で補償物質の厚さを切り上げて出力する手法が採用された。SAD = 400 cm の大腿部で最大 2 枚の枚数差が見られるが、その後は概ね枚数差 0 枚となり良く一致する結果となった。

3. 実効線減弱係数の評価

14 症例の TBI におけるアクリル厚決定のための測定より取得されたアクリルの実効線減弱係数の算出結果を図 7 に示す。中心軸付近は変動が大きいですが、軸外距離の増加に依存して実効線減弱係数の値も大きくなる傾向が観察された。

4. ファントムサイズが線量に与える影響

ビーム入射軸方向のファントムの厚さ 20 cm 一定としファントムのサイズが線量にどのような影響を与えるか評価を行った。実際使用するファントムのサイズ 30 × 30 cm を基準とし、サイズを変更した仮想のファントムとのファントム中心線量との相対誤差を表 3 に示す。表 3 より、患者体軸方向を 30 cm とし、背腹方向を 20, 15, 10 cm と変化させたとき、サイズ依存的に中心線量の低下が観察された。

表 2 実際に TBI に使用された補償物質の厚さと本手法で推定された厚さ及びそのファントムの枚数差 (0.5 cm 厚を 1 枚と換算)

SAD	患者 No	頭部			頸部			大腿部			下腿部		
		実際の厚さ (cm)	推定厚 (cm)	枚数差	実際の厚さ (cm)	推定厚 (cm)	枚数差	実際の厚さ (cm)	推定厚 (cm)	枚数差	実際の厚さ (cm)	推定厚 (cm)	枚数差
350 cm	P1	5	5	0	6	5.5	-1	4	4	0	5	5	0
	P2	4	4	0	5.5	5	-1	3.5	3.5	0	4	4.5	1
	P3	6.5	7	1	8	8	0	5.5	5	-1	7.5	7	-1
	P4	4	4	0	5.5	5	-1	3.5	3.5	0	4	4.5	1
	P5	3	3	0	4.5	4.5	0	3	3	0	3.5	3.5	0
	P6	2.5	2.5	0	4	4	0	2.5	2.5	0	3.5	3.5	0
	P7	4	4	0	4.5	4.5	0	2	2	0	3.5	4	1
400 cm	P8	7	7.5	1	9	9	0	6	5	-2	8	7.5	-1
	P9	7	7	0	8	7.5	-1	5.5	5	-1	7	7	0
	P10	7.5	7.5	0	8.5	8	-1	4	3	-2	7.5	7.5	0
	P11	7.5	7.5	0	8	8	0	0	1	2	3.5	3.5	0
	P12	8	8.5	1	9	9	0	2.5	2.5	0	7	7.5	1
	P13	7	7.5	1	8.5	8.5	0	3	2	-2	4.5	4.5	0
	P14	6.5	6.5	0	8	7.5	-1	2	2	0	5	5.5	1

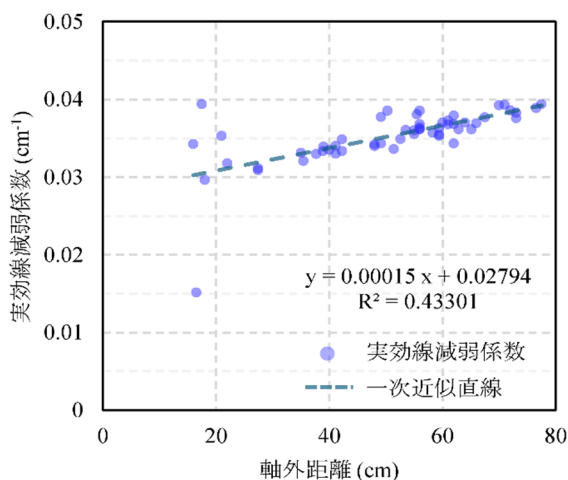


図 7 TBI の準備の結果から取得されたアクリルの線減弱係数

IV. 考察

Long SAD 法を用いた TBI は, RTPS では想定しておらず, 処方 MU 値及び線量を補正するための補償物質の厚さを決め, 実測によりそれらを確認する必要があるため, 準備に非常に長い時間がかかる。本研究では MC 法を用いて Long SAD における線量分布を事前に計算し, そのデータに基づいて処方 MU 値と補償物質の厚さを簡便かつ精度良く推定可能かを検討した。本研究では SSD = 100 cm における実測データを使用し, コミッショニングを行なった。ガンマ解析結果より一般の放射線治療を行う位置ではビームデータ

表 3 ファントムサイズが線量に与える影響

30 × 30 cm のファントムサイズを基準とした場合の相対誤差 (SAD = 400 cm)

		体軸方向の厚さ	
		30 cm	20 cm
背腹方向の厚さ	20 cm	-2.1%	-2.0%
	15 cm	-2.6%	-3.0%
	10 cm	-4.2%	-4.3%

が精度良く再現されていることが確認できた。しかしながら, SAD = 400 cm の実測による OAR と比較したところ軸外で概ね 2% 程度の線量不足が観察された。これはビームを大照射かつ長距離でシミュレーションしたことで, SSD = 100 cm の位置では問題なかったわずかな誤差が拡大してしまったと考えられる。また, ガントリヘッドを 90 度に行っているため, Long SAD を使用したことによりヘッドの垂の影響で X 線ビームが完全な水平ではなく若干斜入していることが考えられる。本研究では本研究では SSD = 400 cm の実測データを取得していたことから, 得られた軸外における吸収線量に対し SAD = 350, 400 cm でそれぞれ 1.5%, 2% の線量を加算し MC 線量 data table を修正した。Akino らの研究でも, SAD = 400 cm において RTPS が算出した

PDD では実測値と比較し-1.9～4.1%の誤差が観察されている⁶⁾。さらに OAR では実測値と RTPS で線量分布形状の乖離が観察され、軸外距離±10 cm の平均値で正規化を行い、Anisotropic Analytical Algorithm, AcurosXB の線量計算アルゴリズムでそれぞれ 1, 1.8%以内となったと報告している。Long SAD におけるコミッショニングはシミュレーション及び実測データの取得に膨大な時間を要し現実的とは言えない。したがって今後は Long SAD での軸外における線量不足の傾向をより明らかにすることで、正確な補正を行い、推定精度を向上させることが必要になると考えられる。

算出された処方 MU 値について SAD = 350, 400 cm でそれぞれ実際に投与された処方 MU 値と比較したところ、最大で相対誤差はそれぞれ-0.66, -0.59%となった。これは本学大学病院の治療部門で定めている許容範囲である 3%以内に十分収まり、十分な推定精度であった。減弱率の計算より、アクリルの厚さによる投与線量の変動は 1 cm (アクリル 2 枚分) 以内であれば概ね±3%以内に収まる。したがって、SAD = 400 cm の大腿部におけるアクリルの 2 枚の枚数差(表 2)であっても 3%の許容範囲内に収まることから、本手法の推定精度は十分であると考えられる。大腿部については、他の部位と比較してアクリルの推定精度がやや低かった。線量分布自体に若干の補正を加えているので、結果的に大腿部が特に誤差が大きくなってしまったことも考えられる。図 7 よりフラットニングフィルタの影響により軸外距離が大きくなるほど線質が軟化し、実効減弱係数が増加している。中心軸付近における実効減弱係数は 0.03 cm⁻¹ 程度であった。本研究では実効減弱係数は 0.0394 cm⁻¹ を採用したことから、中心軸付近の部位すなわち大腿部で特に線減弱係数を過大評価していたことが考えられる。正確な補償物質の推定には、軸外距離で実効減弱係数が変化することを考慮する必要があることがわかった。

本学大学病院では TBI 実施時に測定した 6 部位に関して射入部、射出部に 2 対合計 12 本の半導体検出器を接続し、射入部、射出部の平均値をとることで中心線量を in vivo 測定している。処方線量と in vivo 線量との相対誤差を示す表 4 より本学大学病院のファントムによる TBI 線量測定は背腹方向の厚さに乏しい部位(頭部、頸部、下腿部)で中心線量を過大評価している可能性が示唆された(表 4 では低融点鉛で線量補正を行う胸部を除く 5 部位を記載)。患者データの in vivo 測定結果では、ほとんどの部位で線量が規定値より低く、測定におけるファントムのサイズが影響していることが強く示唆された。本学大学病院での中心線量の許容誤差は±3%であり、さらに誤差を小さくするように補償物質の厚さを決定しているため、in vivo 測定で±10%を超える症例は出ていない。今後さらにアクリル厚の推定精度を向上させるのであれば、測定に用いるファントムのサイズによる影響を補正する必要がある。

表 4 処方線量 (Gy) と実施された TBI における半導体検出器による in vivo (Gy) 線量との相対誤差 (%)

SAD	患者 No	頭部	頸部	骨盤部	大腿部	下腿部
350 cm	P1	-5.1	-3.5	0.0	-2.0	-5.7
	P2	-5.2	-4.5	0.0	-1.4	-6.5
	P3	-6.9	-5.1	0.0	-3.3	-7.6
	P4	-5.2	-4.5	0.0	-1.4	-6.5
	P5	-4.4	-3.8	-0.8	-2.4	-4.3
	P6	-4.9	-3.3	-0.5	-0.7	-4.1
	P7	-4.4	-3.7	3.5	-0.4	-4.9
400 cm	P8	-5.4	-4.7	-0.5	-2.1	-7.5
	P9	-8.1	-6.0	-1.3	-3.5	-5.4
	P10	-4.9	-4.5	0.0	2.0	-5.9
	P11	-3.7	-4.6	0.0	0.0	-4.9
	P12	-5.3	-5.1	-0.5	-0.1	-4.8
	P13	-4.3	-3.8	1.0	3.0	-2.8
	P14	-7.3	-6.4	0.0	-0.4	-3.9

V. 結論

本研究の手法により推定した処方 MU 値及び補償物質の厚さは、本学大学病院の TBI における許容範囲内に収まっており、線量測定の際の初期値として本学大学病院にて使用されている。補償物質なしでの線量も高精度に推定可能であったため、補償物質なしの際の基準線量の推定も含め 1 部位につき 2 回程度の測定は省くことが可能になった。これにより、TBI の準備時間が短縮され、治療スタッフの負担軽減に貢献でき、本研究の目的は達成できた。軸外距離及びファントムの厚さを変化させたデータを Monte Carlo 法を用いた線量計算で網羅的に大量に取得してまとめ、データの補間を行っても十分な精度を担保できた。このことは、実測データのある程度まとめることでデータテーブルを作成可能なことを示している。さらに、Long SAD 法における軸外距離の変化に伴う、線質軟化によるアクリルの実効線減弱係数の変化及び、サイズを変化させた場合のファントムの線量分布の基本的なデータを取得し、それらの特殊な傾向を把握することが出来た。装置更新の際も、同様の手法で TBI の準備時間削減に貢献できると考えられる。

利益相反 開示すべき利益相反はありません。

謝辞 本研究を進めるにあたりご指導・ご協力頂いた弘前大学医学部附属病院放射線部の皆様に感謝申し上げます。

引用文献

- 1) 秋庭健志：造血幹細胞移植前処置としての放射線治療. 日本小児血液・がん学会学術誌, 53(5): 384–90, 2016.
- 2) Nelligan R, Bailey M, et al.: ACPSEM total body irradiation working group. ACPSEM ROSG TBI working group recommendations for quality assurance in total body irradiation. Australas Phys Eng Sci Med, 38(2): 205–15, 2015.
- 3) Giebel S, Miszczyk L, et al.: Extreme heterogeneity of myeloablative total body irradiation techniques in clinical practice: a survey of the Acute Leukemia Working Party of the European Group for Blood and Marrow Transplantation. Cancer, 120(17): 2760–5, 2014.
- 4) Wolden SL, Rabinovitch RA, et al.: American College of Radiology (ACR) and American Society for Radiation Oncology (ASTRO) practice guideline for the performance of total body irradiation (TBI). Am J Clin Oncol, 36(1): 97–101, 2013.
- 5) Wong JYC, Filippi AR, et al.: Total body irradiation: Guidelines from the international lymphoma radiation oncology group (ILROG). Int J Radiat Oncol Biol Phys, 101(3): 521–9, 2018.
- 6) Akino Y, Maruoka S, et al.: Commissioning of total body irradiation using plastic bead bags. J Radiat Res, 61(6): 959–68, 2020.
- 7) Kawrakow I, Rogers DWO, et al.: EGSnrc toolkit for Monte Carlo simulation of ionizing radiation transport. Tech Rep NAVTRADEVCEEN, 2000.
- 8) Kawrakow I, Walters BRB. Efficient photon beam dose calculations using DOSXYZnrc with BEAMnrc. Med Phys, 33(8): 3046–56, 2006.
- 9) Low DA, Harms WB, et al.: A technique for the quantitative evaluation of dose distributions. Med Phys, 25(5): 656–61, 1998.
- 10) 寺島真悟, 駒井史雄, 他: RTPS を用いた全身照射における MU 値及び補償物質の検討. 弘前医学, 70(1): 47–55, 2019.
- 11) Virtanen P, Gommers R, et al.: Author Correction: SciPy 1.0: fundamental algorithms for scientific computing in Python. Nat Methods, 17(3): 352, 2020.

【Original article】

**Estimation of Prescribed MU and Compensator Thickness
for Total Body Irradiation Using the Long SAD Method:
A Study Based on Monte Carlo Simulation**

SHINGO TERASHIMA^{*1} YUKI NAKANO^{*2}
FUMIO KOMAI^{*3} NAOKI KIMURA^{*3}

Received January 16, 2025 ; Accepted March 13, 2025

Abstract: Dose calculation for total body irradiation (TBI) using the long source-to-axis distance (SAD) method is not supported by conventional radiation treatment planning systems. Therefore, it is necessary to measure doses with a phantom and estimate the prescribed monitor unit (MU) as well as the thickness of compensatory material required for body thickness correction. In this study, dose data obtained using phantoms were calculated through Monte Carlo simulation to evaluate the feasibility of estimating the prescribed MU and the thickness of acrylic compensatory material. Additionally, the effective linear attenuation coefficient of the compensatory material (acrylic) for off-axis distances was calculated, and the impact of phantom size on the absorbed dose in the long SAD method was assessed. The prescribed MU value was estimated with an accuracy of $\pm 1\%$ of the actual value, and the dose using estimated compensating material thickness resulted in a dose that remained within the facility standard of $\pm 3\%$. This method was employed as an initial calculation step at our facility, contributing to a reduction in preparation time for TBI and alleviating the workload of the treatment staff.

Keywords: TBI, Monte Carlo, Long SAD, radiation therapy

【原著】

看護学生の精神保健に関する相談施設および相談先に対する イメージと不安感の違い

齋藤 千咲^{*1} 山崎 晴琉^{*1} 多喜代 健吾^{*2}
安永 知衣里^{*2} 小山 雛子^{*2} 北宮 千秋^{*2}

2025 年 3 月 14 日受付, 2025 年 6 月 12 日受理

要旨: 目的: 看護学生の精神科, 心療内科, メンタルヘルスクリニック, 対面カウンセリング, 非対面カウンセリングへのイメージと受診・相談する際の不安感の違いを明らかにすることである。方法: 看護大学生 1~4 年生 330 名を対象に, 無記名自記式質問紙調査を実施した。調査期間は, 2024 年 7~8 月であった。調査項目は基本属性, 上記 5 つの相談施設・相談先へのイメージおよび受診・相談する際の不安感とした。結果: 精神科は他と比較し, 「難しい」, 「不安な」等のイメージを持たれていた。精神科では, 「自身の気持ちや症状について話すことができる」にそう思うとした者が有意に少なく, 「利用したことで周囲からどのように思われるか不安に思う」にそう思うとした者が有意に多かった ($p<.05$)。考察: 精神科を受診する際の不安として, 周囲の目, 気持ちや症状の話しづらさがあり, これらが精神科の否定的なイメージを形成する要因と推察された。

キーワード: 精神科, 心療内科, メンタルヘルスクリニック, カウンセリング, 不安感

I. はじめに

2011 年(平成 23 年)に厚生労働省は, 地域医療の基本方針である医療計画において重点的に取り組むべき疾病としてきた, がん, 脳卒中, 急性心筋梗塞, 糖尿病の 4 大疾病に新たに精神疾患を加えて 5 大疾病とした。その背景にはうつ病や高齢化に伴う認知症の患者数の増加があった¹⁾。精神疾患の増加を防ぐため, 国は精神障害の理解や予防的な観点も含めた精神障害にも対応した地域包括ケアシステムの構築を目指してきた²⁾。しかし, 精神疾患を有する総患者数は平成 23 年から増加し, 令和 2 年には 614.8 万人と 5 大疾病の中で最も多くなっている³⁾。

精神的な問題や課題の解決のために利用できる相談施設や相談先としては, 精神科や心療内科, メンタルヘルスクリニック, 対面や非対面でのカウンセリングなどがある。川上らによると⁴⁾, 何らかの精神障害を抱える地域住民は多いが, そういった障害を患っていないながらも医療機関などに受診・相談しない人が多いことが明らかになっている。また, 精神科受診に際して, ステイグマや治療への不信感などを抱える人々が一定数いること^{5,6)}が報告されている。これらのことから精神科だけでなく, 心療内科やメンタルヘルスクリニック等の相談施設・相談先についても同様に, 受診・相談することへの否定的なイメージや不安感がある

のではないかと考えた。精神疾患は精神病未治療期間(以下 DUP とする)が短いほど予後がよく, 対して DUP が長くなるほど症状が重症化・慢性化するため早期発見が重要である。相談施設・相談先への否定的なイメージや不安感の対象者の受診・相談(早期発見・早期治療)を妨げ, 精神疾患の重症化・慢性化に繋がる可能性がある。

看護学生は, 今後看護職として対象者の思いや考えに合わせて適切な相談施設・相談先を提案することで, 精神疾患の予防, 早期発見・早期治療に重要な役割を担う。そのため, 対象者が相談施設・相談先に対して抱くイメージや不安感を理解することは重要である。対象者を理解するには, まず, 看護学生である自らが持つイメージや不安感を理解することが必要と考えられる。

そこで本研究では看護学生の精神科, 心療内科, メンタルヘルスクリニック, 対面カウンセリング, 非対面カウンセリングのイメージと不安感の違いを明らかにすることを目的とした。

II. 研究方法

1. 対象者と調査方法

A 大学医学部保健学科看護学専攻に在籍する 1~4 年の学生 330 名を対象に, 紙面で無記名自記式質問紙調査を実施した。調査期間は, 2024 年 7~8 月であった。

2. 調査内容

(1) 基本属性

学年, 年齢, 性別とした。

(2) 相談施設・相談先のイメージ

調査対象の相談施設・相談先は精神科, 心療内科, メンタルヘルスクリニック, 対面カウンセリング(以下対面と

*1 弘前大学医学部保健学科看護学専攻
Department of nursing, Division of Health Sciences,
Hirosaki University School of Health Sciences
〒036-8564 青森県弘前市本町 66-1 TEL:0172-33-5111
66-1, Honcho, Hirosaki-shi, Aomori, 036-8564, Japan

*2 弘前大学大学院保健学研究科
Hirosaki University Graduate School of Health Sciences
〒036-8564 青森県弘前市本町 66-1 TEL:0172-33-5111
66-1, Honcho, Hirosaki-shi, Aomori, 036-8564, Japan
Correspondence Author takidai@hirosaki-u.ac.jp (Kengo Takidai)

する)、非対面カウンセリング(電話、チャット等である。以下非対面とする)とした。イメージ対は、「難しいー易しい」など10項目で構成した(表1)。イメージ対は反対語対照語辞典⁷⁾を参考に、精神看護専門の教員と内容を確認し、適切性を検討した上で使用した。10項目について「どちらでもない」を基準に、左右両極に向かって「やや」、「とても」の5段階とした。

表1 相談施設・相談先のイメージ比較に用いたイメージ対

1	難しい	—	易しい	6	冷たい	—	暖かい
2	不安な	—	安心な	7	疎遠な	—	身近な
3	暗い	—	明るい	8	悲観的	—	楽観的
4	無益な	—	有益な	9	不快な	—	快適な
5	恥ずかしい	—	誇らしい	10	緊張した	—	緩んだ

(3) 相談施設・相談先を受診・相談する際の不安感

小池らのメンタルヘルス・リテラシー項目⁸⁾を参考に、「1 そう思わない」～「5 そう思う」の5段階でそれぞれの相談施設・相談先ごとに回答を求めた(表2)。

表2 相談施設・相談先を受診・相談する際の不安感

1	自身の気持ちや症状について話することができる
2	利用したことで周囲からどのように思われるか不安に思う
3	専門家に何を言われるのか不安に思う
4	身近な人(家族、友人等)に利用したいと言にくい
5	馴染みがないところなので不安を感じる
6	利用した結果、思い違い・考えすぎだったらずかしいと思う

3. 分析方法

相談施設・相談先のイメージの比較は、イメージ対で得られた評定値を1点から5点で点数化し、中央値および平均値を求めた。数値が高いほど肯定的なイメージに近づくことを意味する。数値の比較には Friedman の検定、Bonferroni 補正を行なった。有意水準は5%とした。受診・相談する際の不安感の施設ごとの比較には、 χ^2 検定および残差分析を行った。調整済み残差が1.96以上で有意に他の頻度よりも多いと判断し、-1.96以下で有意に他の頻度よりも少ないと判断した。統計解析には IBM SPSS statistics23 を用いた。

4. 倫理的配慮

調査実施の際には、対象者に対して本研究の目的やプライバシーへの配慮、参加の自由について等を記載した説明文書を配布し、口頭で説明を行った。また、質問紙のはじめに研究協力への同意を確認する項目を設け、同意が得られた回答のみを使用した。本研究は弘前大学大学院保健学研究科倫理委員会の承認(HS2024-038)を得て実施した。

III. 結果

1. 回収率

330名中、配布数は288部、回収は222部(回収率77.1%)、有効回答数は220部であった(有効回答率76.4%)。

2. 対象者の基本属性

学年は1年生が41名(18.6%)、2年生が70名(31.8%)、3年生が35名(15.9%)、4年生が74名(33.6%)であった。性別は男性36名(16.4%)、女性182名(82.7%)、無回答2名(0.9%)であった。

3. 各相談施設・相談先のイメージ(表3)

各相談施設・相談先のイメージを見ると、精神科は他の相談施設・相談先に比べて「難しい」、「不安な」、「暗い」、「疎遠な」、「悲観的」、「緊張した」イメージを持たれていた。心療内科はメンタルヘルスクリニック・対面・非対面に比べて「難しい」、「緊張した」イメージを持たれており、対面より「不安な」、「暗い」、「冷たい」、「悲観的」、「不快な」イメージを持たれていた。メンタルヘルスクリニックは対面より「不安な」、「冷たい」、「疎遠な」イメージを持たれていた。非対面は対面より「不安な」、「暗い」、「無益な」、「冷たい」、「疎遠な」イメージを持たれていた。

4. 各相談施設・相談先を受診・相談する際の不安感

「自身の気持ちや症状について話することができる」では、「そう思う」と回答した学生が精神科・心療内科で有意に少なく、対面・非対面では有意に多かった($p<.05$)(表4)。「利用したことで周囲からどのように思われるか不安に思う」では、「そう思う」と回答した学生が精神科で有意に多く、対面では「あまりそう思わない」、非対面では「そう思わない」、「あまりそう思わない」が有意に多かった($p<.05$)(表5)。「専門家に何を言われるのか不安に思う」では、「そう思う」と回答した学生が精神科で有意に多く、対面では「あまりそう思わない」、非対面では「そう思わない」が有意に多かった($p<.05$)(表6)。

IV. 考察

1. 周囲からの目に対する不安や精神疾患と診断される怖さから想起される否定的なイメージは精神科受診を阻害する

精神科を受診する際の不安感を見ると、「利用したことで周囲からどのように思われるか不安」では「そう思う」と回答した学生が有意に多かった。この理由として、精神疾患や精神科に対する偏見やステイグマがある可能性が考えられる。坂本らは⁹⁾、精神疾患に対する社会の偏見は根強く残っていることや精神科を受診することでの偏見を恐れる人もいることを述べている。田中らは¹⁰⁾、看護学生は看護教育の中で得た知識を頼りにそれぞれの看護領域のイメージをするが、精神看護学領域の場合はマスメディアでの報道や家族・近親者からの偏見に基づく意見、噂話に影響

を受けることも少なくないと述べている。これらのことから、看護学生であっても社会一般に流布している偏見やスティグマに影響され、周囲の目を気にしている可能性や周囲から精神的に問題があると思われたくないと考えている可能性がある。宮沢は¹¹⁾、精神障害者が起こした事件や精神科への入院歴や通院歴がある人物が報道されるごとに、精神障害者に対する偏見が助長されると述べている。精神医学や精神看護を学んでいない一般の人は、精神疾患

(患者)や精神科をマスメディアの報道など限られた情報から判断するしかなく、なおさら偏見やスティグマに強く影響され周囲の目を気にする可能性がある。また、精神科では気持ちや症状を話しぶらいと感じている学生が多く、精神科に対する偏見やスティグマ、周囲の目が話しぶらさにも影響している可能性がある。

表 3 相談施設・相談先のイメージ比較 n=220

尺度	①精神科		②心療内科		③メンタルヘルス クリニック		④対面 カウンセリング		⑤非対面 カウンセリング		多重比較
	中央値	平均値	中央値	平均値	中央値	平均値	中央値	平均値	中央値	平均値	
難しいー易しい	2 (	2.20)	2 (	2.75)	3 (	3.14)	4 (	3.40)	4 (	3.53)	①<②~⑤ ②<③~⑤
不安なー安心な	2 (	2.30)	3 (	3.07)	3.5 (	3.27)	4 (	3.65)	3 (	3.22)	①<②~⑤、②<④ ③<④、⑤<④
暗いー明るい	2 (	2.23)	3 (	3.10)	4 (	3.40)	4 (	3.62)	3 (	3.16)	①<②~⑤ ②<④、⑤<④
無益なー有益な	4 (	3.92)	4 (	3.87)	4 (	4.07)	4 (	3.92)	4 (	3.55)	⑤<①~④
恥ずかしいー誇らしい	3 (	2.78)	3 (	2.97)	3 (	2.89)	3 (	2.96)	3 (	2.97)	n.s.
冷たいー暖かい	3 (	3.19)	4 (	3.57)	4 (	3.57)	4 (	3.96)	3 (	3.13)	①<②~④、②<④ ③<④、⑤<②~④
疎遠なー身近な	2 (	2.52)	3 (	3.06)	3 (	3.18)	4 (	3.72)	3 (	3.16)	①<②~⑤、②<④ ③<④、⑤<④
悲観的ー楽観的	2 (	2.42)	3 (	2.98)	3 (	3.23)	3 (	3.41)	3 (	3.21)	①<②~⑤、②<④
不快なー快適な	3 (	3.13)	3 (	3.25)	3 (	3.36)	4 (	3.58)	3 (	3.29)	①<③~⑤、②<④
緊張したー緩んだ	2 (	2.14)	3 (	2.79)	3 (	3.18)	4 (	3.26)	3 (	3.23)	①<②~⑤、②<③~⑤

Friedmanの検定 (p<.05)、Bonferroni補正

表 4 自身の気持ちや症状について話することができる

		そう 思 わ な い	あ ま り そ う 思 わ な い	ど ち ら と も い え な い	や や そ う 思 う	そ う 思 う	n
精神科	度数	6	48	25	103	36	218
	調整済み残差	0.0	4.0	-0.2	1.2	-4.2	
心療内科	度数	4	28	25	114	47	218
	調整済み残差	-0.9	-0.4	-0.2	2.8	-2.3	
メンタルヘルス クリニック	度数	5	27	22	100	61	215
	調整済み残差	-0.4	-0.5	-0.8	0.9	0.2	
対面	度数	7	16	30	76	86	215
	調整済み残差	0.5	-3.0	1.1	-2.8	4.4	
非対面	度数	8	29	26	80	72	215
	調整済み残差	0.9	-0.1	0.1	-2.2	2.0	

χ^2 検定 (p<.05)、残差分析 (調整済み残差 p<.05)

表 6 専門家に何を言われるのか不安に思う

		そう 思 わ な い	あ ま り そ う 思 わ な い	ど ち ら と も い え な い	や や そ う 思 う	そ う 思 う	n
精神科	度数	13	20	14	96	74	218
	調整済み残差	-1.4	-3.0	-2.8	1.5	3.6	
心療内科	度数	15	31	24	95	53	218
	調整済み残差	-0.9	-0.7	-0.4	1.4	-0.1	
メンタルヘルス クリニック	度数	14	29	32	87	53	215
	調整済み残差	-1.1	-1.0	1.5	0.3	0.1	
対面	度数	18	47	31	66	53	215
	調整済み残差	0.0	2.8	1.3	-2.9	0.1	
非対面	度数	30	43	27	83	32	215
	調整済み残差	3.3	1.9	0.4	-0.3	-3.7	

χ^2 検定 (p<.05)、残差分析 (調整済み残差 p<.05)

表 5 利用したことで周囲からどのように思われるか不安に思う

		そう 思 わ な い	あ ま り そ う 思 わ な い	ど ち ら と も い え な い	や や そ う 思 う	そ う 思 う	n
精神科	度数	7	12	12	102	85	218
	調整済み残差	-2.2	-4.3	-3.3	1.5	5.6	
心療内科	度数	11	30	30	96	51	218
	調整済み残差	-1.0	-0.4	0.9	0.6	-0.4	
メンタルヘルス クリニック	度数	6	26	26	112	45	215
	調整済み残差	-2.5	-1.2	0.1	3.2	-1.3	
対面	度数	12	42	31	79	51	215
	調整済み残差	-0.7	2.2	1.3	-1.9	-0.3	
非対面	度数	35	49	30	69	32	215
	調整済み残差	6.4	3.7	1.0	-3.4	-3.6	

χ^2 検定 (p<.05)、残差分析 (調整済み残差 p<.05)

さらに精神科では専門家から何を言われるのか不安に思う学生が多かった。会社員や学生を対象とした先行研究では¹²⁾、精神科や心療内科などの医療機関を受診しない理由の1つとして自分が精神疾患だと知るのが怖いことが挙げられており、精神疾患と診断されることに怖さを感じている人がいることが考えられた。看護学生であっても、精神疾患と診断されることの怖さを感じ専門家からの発言を不安に思う可能性があり、一般の人であればなおさら診断されることに怖さを感じ、専門家からの発言を不安に思うことが推察された。

精神科のイメージは、他の相談施設・相談先より全体的に否定的なイメージに寄っている。精神科に対する偏見やスティグマ、専門家からの発言に不安を感じていることから想起される否定的なイメージは、精神科は受診・相談しにくい場所であるという認識に繋がる可能性がある。特に、一般の人は看護学生より偏見やスティグマに強く影響され、なおさら精神科を受診・相談しにくい場所だと認識する可能性が高いと考えられた。

2. 対面カウンセリングと非対面カウンセリングは他の施設に比べると相談先としての心理的ハードルが低い

カウンセリングでは、自身の気持ちや症状を話すことができると考えている学生が有意に多かった。大学生を対象とした先行研究では¹³⁾、カウンセラーはクライアントの心のケアや精神的なサポートをするために話を聴く、心に寄り添う活動をしていると理解されていること、対面・非対面に関わらずカウンセリングは悩みを傾聴・受容・肯定してもらえするという認識があることが明らかとなっている。実際にカウンセリングはクライアントや患者の話を傾聴・受容し、心情や状況の理解に努めることによって主体的な問題解決をサポートすることとされている¹⁴⁾。看護学生は相手の話を傾聴し、ありのままを受け止めることの重要性や有用性を日々の学習を通して実感しており、そのように実感しているからこそ、傾聴や受容に重きを置くカウンセリングでは気持ちや症状を話しやすいと感じたのではないかと考えられた。特に非対面に関しては、笠木らが¹⁵⁾、コンピューターを介したコミュニケーションでは自己開示が増加することを明らかにしている。非対面では対面によって生じる圧迫感や緊張感が軽減され、自身の気持ちを、時間を気にすることなく整理しながら伝えることができるため話しやすいと感じたと考えられた。また、カウンセリングは対話を行うのみで精神疾患と診断されることはなく、精神科のような偏見やスティグマも少ないと考えられるため、比較的軽い気持ちで症状を話せるということが推測される。さらに、対面では言葉だけではなく非言語的な部分やその場の空気感など感覚的なことも伝わりやすく、非対面では対面によって生じる圧迫感や緊張感が軽減されるなど双方に異なる長所がある。自分の性格に合った方法を選択できるため、カウンセリングは一般の人でも利用しやすい

のではないかと考えられた。

3. 不安感やイメージの違いから推測される受診・相談を促すための看護職の役割

精神科は他の相談施設・相談先より否定的なイメージを持たれており、受診・相談への不安感も強く、受診・相談先としての心理的ハードルが高いと考えられた。一方で、カウンセリングは他の施設と比較して、相談先としての心理的ハードルが低いと考えられた。一般の人は看護学生より精神科などの相談施設や相談先に関する知識は少ないため、未知の領域である故に偏見や周囲からの目に対する不安、気持ちや症状を話すことができるのだろうか、専門家に何を言われるのだろうかなどの不安、否定的なイメージが大きくなる可能性がある。そのため、精神不調者に対してはより心理的ハードルが低いカウンセリングから勧め、その後精神科を受診してもらうなど、相談しやすい施設から利用してもらうことで受診・相談する際の不安が軽減されるのではないかと考えられた。しかし、そもそも施設や相談先ごとで機能や役割は異なっている。そのため、将来看護職として働く際には相談施設・相談先の機能・役割を把握し、精神不調者が持つ不安感やイメージだけではなく、症状や病識などの状態も考慮して適切な相談施設・相談先を勧めることが重要である。

V. 研究の限界

本研究では、1施設の看護大学生のみを対象としたため、対象者の範囲が限定的である。今後は対象者の範囲を拡大し、より多くの対象者の結果を用いた検討が必要と考えられる。

VI. 結語

1. 看護を学んでいる学生であっても、精神科を受診する際の不安感から想起される否定的なイメージによって精神科は受診・相談しにくい場所だと認識されている可能性がある。
2. カウンセリングは傾聴・受容・肯定に重きを置いており、精神疾患と診断されることや精神科のような偏見やスティグマも少ないと考えられるため、看護学生・一般の人々ともに症状を話しやすいと考えられた。
3. 精神不調者に対しては、相談しやすい施設から勧め不安を軽減することが重要である。また、相談施設・相談先の機能・役割を把握し、精神不調者が抱く不安感やイメージだけではなく、状態も考慮して適切な相談施設・相談先を勧めることも重要と考えられた。

利益相反 開示すべき利益相反はありません。

謝辞 ご協力いただいた看護大学生の皆様へ心より感謝申し上げます。

引用文献

- 1) 厚生労働省: 医療計画(精神疾患)について. (検索日: 2024.10.21). https://www.mhlw.go.jp/seisakunitsuite/bunya/kenkou_iryoku/iryoku_iryoku_keikaku/dl/shiryou_a-3.pdf
- 2) 厚生労働省: 精神障害にも対応した地域包括ケアシステムの構築について. (検索日: 2024.11.20). <https://www.mhlw.go.jp/stf/seisakunitsuite/bunya/chiikihoukatsu.html>
- 3) 櫻木章司: 第4回新たな地域医療構想等に関する検討会. (検索日: 2024.10.21). <https://www.mhlw.go.jp/content/10800000/001256794.pdf>
- 4) 川上憲人: こころの健康についての疫学調査に関する研究. 厚生労働科学研究費補助金こころの健康科学研究事業平成18年度総括・分担研究報告書, 1-16, 2007.
- 5) 川本静香: うつ病の受診意欲を妨げる要因について—テキストマイニングを用いた探索的検討—. 対人援助学研究, 4: 16-24, 2016.
- 6) 田中將之, 堀正士: 高校生の精神科受診抵抗要因の分析と自殺予防に関する心理教育の課題. 学校メンタルヘルス, 24(2): 165-175, 2021.
- 7) 北原保雄, 東郷吉男: 反対語対照語辞典新装版. 5-420, 東京堂出版, 東京, 2015.
- 8) 小池春妙, 伊藤義美: メンタルヘルス・リテラシーに関する情報提供が精神科受診意図に与える影響. カウンセリング研究, 45(3): 155-164, 2012.
- 9) 坂本真士, 杉浦朋子, 他: 精神疾患への偏見の形成に与える要因—社会心理学的手法によるアプローチ—. 精神保健研究, 44: 5-13, 1998.
- 10) 田中俊明, 松嶋秀明: 精神看護学実習に学生が抱く不安や偏見についての文献検討. 人間文化: 滋賀県立大学人間文化学部研究報告, 43: 37-45, 2017.
- 11) 宮沢和志: 精神障害者に対する差別・偏見を軽減するために歴史を伝えることは有効か—精神保健福祉行政史を伝えることの有効性をアンケート調査から考察する—. 金城学院大学論集社会科学編, 9(2): 102-125, 2013.
- 12) 山藤奈穂子: 受診しないうつ—うつ病の受診行動—. 医学の歩み, 219(13): 1108-1113, 2006.
- 13) 清水麻莉子, 森田美弥子: カウンセラーに対する知識とイメージの検討—身だしなみや外見に着目して—. 名古屋大学大学院教育発達科学研究科紀要心理発達科学, 63: 119-127, 2016.
- 14) 厚生労働省: カウンセリング/心理療法—ヘルスネット. (検索日: 2024.11.27). <https://www.e-healthnet.mhlw.go.jp/information/dictionary/heart/yk-088.html>
- 15) 笠木理史, 大坊郁夫: CMCと対面場面におけるコミュニケーション特徴に関する研究. 対人社会心理学研究, 3: 93-101, 2003.

【Original article】

Differences in Perceptions and Apprehension Regarding Mental Health Consultation Services among Nursing Students

CHISAKI SAITO^{*1} HARU YAMAZAKI^{*1} KENGO TAKIDAI^{*2}
CHIERI YASUNAGA^{*2} HINAKO OYAMA^{*2} CHIAKI KITAMIYA^{*2}

Received March 14, 2025 ; Accepted June 12, 2025

Abstract: Purpose: This study aimed to clarify the differences in nursing students' perceptions of psychiatry, psychosomatic medicine, mental health clinics, in-person counseling, and online counseling, as well as the anxiety experienced when seeking treatment or counseling. Methods: A survey was conducted with 330 nursing students from years one to four using an anonymous self-administered questionnaire. The survey was conducted between July and August 2024 during which basic demographic information, perceptions of the five types of consultation services listed above, and levels of anxiety related to seeking treatment or counseling were collected. Results: Psychiatric services were perceived as more "difficult" and "unsettling" than other consultation services. Significantly fewer students agreed with the statement "I can talk about my feelings and symptoms" in the context of psychiatric care, while significantly more students expressed concerns about how others would perceive them if they utilized psychiatric services ($p<.05$). Discussion: Anxiety associated with seeking psychiatric treatment includes concerns about others' perceptions and difficulties in discussing feelings and symptoms. These factors likely contribute to the negative perceptions of psychiatric services.

Keywords: Psychiatry, Psychosomatic medicine, Mental health clinics, Counseling, Anxiety

【原著】

肺野の逐次近似応用再構成法と深層学習を用いた CT 画像再構成法の比較：ファントム実験

柴垣 龍之介^{*1} 工藤 幸清^{*2} 小山内 暢^{*2} 對馬 恵^{*2},
南島 佑亮^{*1} 佐々木 稜^{*3} 成田 知将^{*3} 森田 竹史^{*3}

2025 年 3 月 28 日受付, 2025 年 7 月 17 日受理

要旨：近年、深層学習を用いた画像再構成法が computed tomography (CT) 装置に搭載されるようになり、CANON 社製 Aquilion ONE には、従来使用されてきた逐次近似応用再構成法の Adaptive Iterative Dose Reduction 3D (AIDR 3D, レベル L1-L4) に加え、深層学習を用いた Advanced intelligent Clear-IQ Engine (AiCE, レベル L1-L3) が搭載された。そこで、本研究は肺野領域を想定したファントム実験により AIDR 3D と AiCE の画像を比較し、AiCE の有用性を検討した。自作ラインファントムを撮影した各種再構成画像を利用し、信号欠損数とノイズ、コントラスト評価の contrast-to-noise ratio (CNR)、解像特性とノイズ特性の signal-to-noise ratio (SNR) を測定した。その結果、AIDR 3D L1 に比べ AiCE L2 では信号欠損数に違いはなく、ノイズが少なかった。CNR は AiCE L2, AiCE L3 が約 17%, 63% の線量低減効果が示唆され、SNR では高周波数帯 (0.9 cycles/mm) において AiCE L1, AiCE L2, AiCE L3 が約 23%, 49%, 80% の線量低減効果が示唆された。このことから、AIDR 3D L1 と比較して、AiCE L2 はノイズが少なく、信号欠損は同等で、かつ線量低減に寄与する可能性が示唆された。

キーワード：CT, 逐次近似応用再構成法, 深層学習

I. 緒言

Computed tomography (CT) 装置における画像再構成の基本的な方法は、CT で得られた投影データに一度フィルタ処理を行い、画像として逆投影することにより得られる。この方法はフィルタ補正逆投影法 (FBP : filtered back projection) として昔から使用されてきた¹⁾。この方法からより高画質で低被ばくを実現する逐次近似応用再構成法 (IR : iterative reconstruction) が開発された²⁾。各社 IR 法の詳細については公開していない部分があるが、最初に仮の画像を作り、それを投影データと何度も比較・修正しながら、最適な画像を徐々に作っていく方法である。

さらに近年、人工知能 (AI : Artificial Intelligence) の技術の一つである深層学習 (Deep Learning) を用いて設計された画像再構成処理技術が CT 装置に搭載された^{3,4)}。キヤノンメディカルシステムズ株式会社の高精細エリアディテクタ CT には、IR 法である Adaptive Iterative Dose Reduction 3D (AIDR 3D) に加え、Deep Learning を用いた Advanced intelligent Clear-IQ Engine (AiCE) が搭載された³⁾。AIDR 3D は画像再構成の過程で投影データと画像データに対し、ノ

イズ低減を行うことで、必要な信号を保ちつつ、画像ノイズやアーチファクトを除去することが可能であり⁵⁾、AiCE は Deep Learning を用いて作成された Deep Convolutional Neural Network (DCNN) を用いて、ノイズやシグナルを識別する処理を行うことで、分解能を維持しつつ、ノイズを除去することが可能である⁵⁾。両者とも原理は違うが空間分解能を維持しつつ、ノイズを低減することが期待できる。

しかし、AI 技術を使用したディープニューラルネットワークは意思決定プロセスに関する詳細が明らかではないためブラックボックスと呼ばれ、臨床に導入する前には解釈の可能性や透明性の確認が必要である⁶⁾とされている。

また、AIDR 3D, AiCE の処理機構の詳細については非公開であるため、臨床現場では従来から使用されてきた AIDR 3D が主に用いられており、AiCE の導入には慎重な姿勢が見られる。そこで本研究では、AiCE による画像再構成法について、ノイズやシグナルの識別能、コントラストなどの観点から従来法と比較し、臨床に有用な知見を提供することを目的とした。

そこで、肺野関数を用いる肺野の撮影を想定し、胸部ファントムの胸腔内に、自作ラインファントムならびに模擬腫瘍を配置して撮影を行い、AIDR 3D と AiCE による再構成画像について画像評価と線量低減効果の面から比較した。

画像評価として、各再構成法で得られた画像において、実在する物体が正しく描出されているか、あるいは欠損しているかを判定するため、ラインファントムを作製し、ラインの信号欠損数を測定した。さらに、ノイズは物体の識別を困難にする要因であるため、信号欠損数と併せてノイズ量も評価した。

*1 弘前大学医学部保健学科
Hirosaki University School of Health Sciences
〒036-8564 青森県弘前市本町 66-1 TEL:0172-33-5111
66-1, Honcho, Hirosaki-shi, Aomori, 036-8564, Japan

*2 弘前大学大学院保健学研究科
Hirosaki University Graduate School of Health Sciences
〒036-8564 青森県弘前市本町 66-1 TEL:0172-33-5111
66-1, Honcho, Hirosaki-shi, Aomori, 036-8564, Japan

*3 弘前大学医学部附属病院
Hirosaki University Hospital
〒036-8563 青森県弘前市本町 53 TEL:0172-33-5111
53, Honcho, Hirosaki-shi, Aomori, 036-8563, Japan
Correspondence Author kohsei@hirosaki-u.ac.jp (Kohsei Kudo)

線量低減効果を評価するために、線量を変化させて contrast-to-noise ratio (CNR) および signal-to-noise ratio (SNR) を測定した。コントラストは、対象臓器や病変が背景とどれだけ明瞭に区別できるかを示す指標であり、CNR は単なるコントラストに加え、ノイズ (CT 値の標準偏差, SD : standard deviation) の影響下で対象をどれだけ識別できるかを評価する指標である。CNR の測定には模擬腫瘍を使用した。一方、SNR は画像の特定の細かさ (周波数) に対して、どれだけ対象がノイズの中で識別できるかを示す指標であり、高周波領域の SNR が高ければ、細かい構造も見やすい画像であると判断できる。このことから CNR や SNR は、画像再構成法や撮影条件 (管電流等) を比較する際に画質を客観的に評価できる指標であり、被ばく線量を低減しつつも診断に必要な画質が維持されているかを確認するのに有用である。

II. 方法

1. 使用機器

CT 装置は Aquilion ONE (Canon Medical Systems Corporation, Aquilion ONE/INSIGHT Edition TSX-308A, Tochigi, Japan.) を使用し、胸部ファントム (京都科学, 胸部ファントム N-1, Kyoto, Japan.) の胸腔内に自作のラインファントムと模擬腫瘍 (胸部ファントム N-1 に付属の模擬腫瘍, 直径 10mm 球形, CT 値: -800HU, -630HU, +100HU) を配置し撮影を行った。

自作のラインファントムの断面を図 1 に示す。ファントムの外径は約 10cm とし、ナイロン製のラインは直径 0.1, 0.2, 0.3, 1.7mm の 4 種類をそれぞれ 8 本ずつ長さ 10cm として配置した。また、中心にはアクリル製の円柱 (直径 5mm) と外側には 4 本の正四角柱 (一辺 10mm, 長さ 10cm) を支柱として配置した。ラインファントムに使用したナイロンの CT 値については、組成により多少の違いは考えられるが 76HU⁷⁾が目安となるため、ラインと空気の CT 値の差は大きく高コントラスト物質の評価となる。線量低減効果の評価についてはアクリル製の円柱 (直径 5mm, CT 値: 約 120HU⁸⁾) と空気の CNR, SNR による比較を行った。

画像再構成法は、filtered back projection (FBP), 逐次近似応用再構成法の AIDR 3D L1, AIDR 3D L4, ならびに深層学習を用いた AiCE L1, AiCE L2, AiCE L3 を選択し、再構成関数は全て肺野関数を使用した。また、画像再構成の際のノイズ除去等の強さを表すレベル (L1, L2 等) は数値が大きいほどより強い再構成を施すものであり、AIDR 3D L1 (Weak), AIDR 3D L4 (Strong), AiCE L1 (Mild), AiCE L2 (Standard), AiCE L3 (Strong)⁹⁾を意味するが、詳細については非公開である。AIDR 3D は FBP と逐次近似再構成法を組み合わせた逐次近似応用再構成法である。AIDR 3D と AiCE はキャノンメディカルシステムズ株式会社の装置

特有の名称である。

画像評価や線量低減効果の評価には画像解析用ソフトウェア ImageJ (NIH: National Institutes of Health, Bethesda, Maryland, USA, <https://imagej.nih.gov/ij/index.html>) ならびに CT measure Ver. 0.99d¹⁰⁾ (CT measure) を使用した。

本研究は、CT 装置に搭載されている画像再構成法の有効利用を目的としたファントム実験であり、人体の撮影や観察者による視覚評価は行っていない。

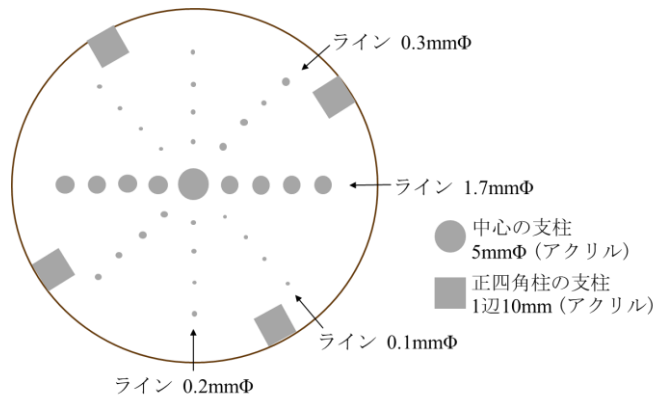


図 1 自作ラインファントムの形状

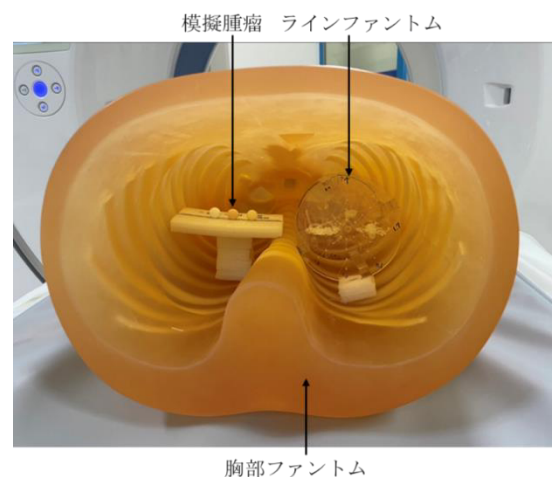


図 2 撮影時の胸部ファントム、ラインファントム、模擬腫瘍の配置

2. 実験方法

1) 画像評価

画像再構成法の違いによる描出能の違いを明らかにするため高い管電流の条件下における信号欠損、ノイズ、CNR の測定を行った。図 2 のように胸部ファントムの胸腔内にラインファントムと模擬腫瘍を配置して撮影した。この際、ラインファントム中心と X 線管回転中心の距離は 58mm であった。スキャン条件は日本放射線技術学会発行の「X 線 CT 撮影における標準化～GALACTIC～ (改訂 2 版)」を参考に表 1 のように決定した¹¹⁾。再構成視野 (display field of view : DFOV) はラインファントムの中心を視野中心とした DFOV10cm, ならびに胸部ファントムの

中心を視野中心とした DFOV30cm の画像を取得した。

ImageJ で取得した画像を読み込み、DFOV10cm では撮影回数 10 回の同スライス面 10 枚の画像を加算平均し、1.7mm 径ラインの CT 値を閾値とし、各画像 10 枚それぞれ 2 値化処理を行った。この 2 値化処理画像に対して、ImageJ のカウント機能を使用し、閾値以上の個数をカウントした。カウントされた数は信号数+ノイズの数に相当する。次に、信号が実在する箇所に予め関心領域 (ROI: region of interest) を設定し、ROI 内に信号がある場合を 1 と数え、信号数とした。カウントされた数は信号数+ノイズの数に相当するため、信号数を差し引くことでノイズの数とした¹²⁾。信号欠損数は、ROI の数 (実在する箇所の数) から信号数を差し引くことで算出した。

なお、ラインファントムの評価における管電流は小焦点の範囲である 270mA とした。

DFOV30cm では、模擬腫瘍の CT 値と空気の CT 値、空気の SD を、ImageJ により測定し、次式で CNR を算出した^{13, 14)}。

$$\text{CNR} = \frac{\text{ROI}(S) - \text{ROI}(B)}{\text{SD}(B)}$$

ROI (S) : 信号領域 (模擬腫瘍) の CT 値

ROI (B) : 無信号領域 (空気) の CT 値

SD (B) : 無信号領域 (空気) の SD

表 1 画像評価のためのスキャン条件

スキャン条件		
スキャン方式	ヘリカルスキャン	
ファントム	胸部ファントム	
	ラインファントム	模擬腫瘍
撮像回数	10	19
DFOV (cm)	10	30
管電流 (mA)	270	380
管電圧 (kV)	120	
画像再構成法	FBP, AIDR 3D (L1, L4), AiCE (L1, L2, L3)	
再構成関数	肺野関数	
スライス厚 (mm)	0.5	
回転時間 (s)	0.5	

2) 線量低減効果の検討

画像再構成法の違いによる線量と CNR, SNR の関係を明らかにするために、管電流を変化させて撮影を行った。スキャン条件は表 1 のラインファントムの条件をもとに行った (表 2 参照)。ファントムの配置は実験方法の 1) 画像評価 (図 2) と同様とし、管電流は全て小焦点の範囲とした。また本研究では、現在臨床で主に用いられている AIDR 3D L1 と AiCE L1, AiCE L2, AiCE L3 の各管電流の再構成画像 10 枚から、CNR と SNR を算出し、線量低減の可能性について検討した。ここでの CNR は ImageJ を使用し、ライ

ンファントム中心支柱と空気の CT 値, SD から算出した。SNR は CT measure を使用して、下式から算出される^{14, 15)}が、算出式の解像特性である MTF (modulation transfer function) はラインファントムの中心支柱 (アクリル製の円柱) の画像から求めることになるため、AIDR 3D や AiCE のような非線形処理では MTF が変動する。そこでアクリル製の円柱を対象としたタスクによる解像特性を MTF と区別して TTF (task transfer function) と表記した¹⁶⁾。また、ノイズ特性は空気の noise power spectrum (NPS) を使用した。なお、TTF は circular edge 法、NPS は radial frequency 法により、CT measure により測定した。

$$\text{SNR} = \sqrt{\frac{C^2 \times \text{MTF}(f)^2}{\text{NPS}(f)}}, \quad C = 1$$

MTF (f) : ラインファントム中心支柱の MTF (今回は TTF)

NPS (f) : ラインファントム無信号領域 (空気) の NPS

C : 機器による定数、今回は C=1 と仮定

表 2 線量低減の検討のためのスキャン条件

スキャン条件	
スキャン方式	ヘリカルスキャン
ファントム	胸部ファントム (ラインファントム)
撮像回数	10
DFOV (cm)	10
管電圧 (kV)	120
管電流 (mA)	10, 15, 35, 90, 180, 270
画像再構成法	FBP, AIDR 3D (L1, L4), AiCE (L1, L2, L3)
再構成関数	肺野関数
スライス厚 (mm)	0.5
回転時間 (s)	0.5

3. 統計解析

統計解析ソフトウェア EZR.R Version 1.63¹⁷⁾を使用し、画像評価におけるラインファントムの 2 値化処理後の 10 枚の画像の信号欠損数とノイズの数について、画像再構成法の違いによる差の統計分析を実施した (有意水準は 0.05)。画像再構成法の 6 群 (FBP, AIDR 3D L1, AIDR 3D L4, AiCE L1, AiCE L2, AiCE L3) について、全群のデータが正規分布に従うか Shapiro-Wilk 検定を行った。

Shapiro-Wilk 検定において、少なくとも 1 群が正規分布に従わない場合 ($p < 0.05$) は、3 群以上の間の比較を Kruskal-Wallis 検定 (2 群ずつの比較を post-hoc 検定、Steel-Dwass の多重比較) にて行った。

Shapiro-Wilk 検定において、全群が正規分布に従う場合 ($p \geq 0.05$) は、Bartlett 検定により 3 群以上の等分散性の検定を行った後、3 群以上の間の平均値の比較を一元配置分散分析 (one-way ANOVA) により行った¹⁸⁾。

III. 結果

1. 画像評価

DFOV10cm について、2 値化処理画像作成の閾値として使用した CT 値を表 3 に示した。この CT 値よりも高いところを赤、低いところをグレイ表示することで 2 値化処理画像を得た。なお、SD は加算前の各画像の SD の二乗和を加算枚数で除した値の平方根を示した。図 3 に 2 値化処理画像の例を示した。画像内には、0.1, 0.2, 0.3, 1.7mm 径ラインがそれぞれ 8 本、5.0mm 径中心支柱 1 本、四角柱の支柱 4 本の合計 37 個が実在する信号になり、信号位置は図 3 に示した ROI である。各画像再構成法の信号欠損数とノイズの数を表 4 に示し、統計解析の結果を表 5 に示した。信号欠損数は、AiCE L3 が最も多く、他の全ての画像再構成法に比べ有意に高かった ($p<0.05$)。また、AiCE L1 が最も信号欠損数が少なかったが、他の画像再構成法の間には有意な差はなかった。ノイズの数は、AiCE L3 が最も少なく、他の全ての画像再構成法に比べ有意に低かった ($p<0.05$)。また、AiCE L1 が最もノイズの数が多く、かつ AIDR 3D L4, AiCE L2, AiCE L3 との画像再構成法の間には有意差があり、ノイズの数が有意に高かった ($p<0.05$)。さらに、AiCE L2 もノイズの数は少なく、特に臨床に使用される AIDR 3D L1 に対して有意にノイズが少なかった ($p<0.05$)。

DFOV30cm について、得られた再構成画像の例を図 4 に示した。各再構成画像 19 枚の模擬腫瘍の CT 値を表 6 に、空気の CT 値を表 7 に示した。なお、CT 値は平均値、SD は二乗和を使用枚数で除した値の平方根を示した。表 6 では模擬腫瘍の CT 値-800HU に対して 2%程度、-630HU では 5%程度、+100HU では 75%程度の差が見られた。一方、空気では表 7 に示す通り CT 値はほぼ同じ値となったが、SD は FBP が一番大きく、AiCE L3 が最も小さかった。表 6 ならびに表 7 から算出した CNR の結果を図 5 に示した。模擬腫瘍の 3 種類とも AiCE L1 と AIDR 3D L4 の CNR がほぼ同等であり、かつ AiCE が AIDR 3D よりも CNR が高かった。

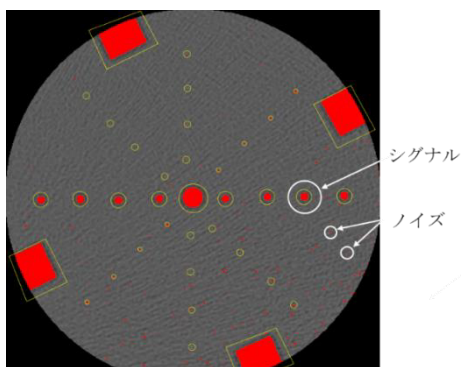


図3 ラインファントムの 2 値化画像の例(DFOV10cm)
画像再構成法は AIDR 3D L1, 閾値より高い CT 値は赤、シグナル位置は黄色の ROI である

表3 2 値化処理の閾値値として用いた 1.7mm 径ラインの CT 値と SD (DFOV10cm)

	CT値	SD
FBP	-821.1	172.2
AIDR 3D L1	-821.2	172.2
AIDR 3D L4	-821.1	172.0
AiCE L1	-821.7	171.4
AiCE L2	-821.0	162.9
AiCE L3	-819.5	161.4

表4 各画像再構成法の 2 値化画像における信号欠損数とノイズの数 (DFOV10cm)

	Lost	Noise
FBP	14.0 ± 2.1	190.0 ± 55.1
AIDR 3D L1	13.9 ± 2.1	174.1 ± 52.5
AIDR 3D L4	14.4 ± 1.9	112.6 ± 32.0
AiCE L1	13.4 ± 2.2	257.2 ± 58.8
AiCE L2	14.8 ± 2.1	98.6 ± 25.3
AiCE L3	19.4 ± 1.3	10.1 ± 6.5

表5 表4 の各画像再構成法における信号欠損数とノイズの数の統計解析結果 (p 値)

	Noise	Lost	Noise	Lost	Noise	Lost
Lost	FBP	AIDR 3D L1	AIDR 3D L4	AiCE L1	AiCE L2	AiCE L3
FBP		0.987	0.025	0.176	0.006	0.001
AIDR 3D L1	0.999		0.079	0.052	0.018	0.001
AIDR 3D L4	0.999	0.995		0.001	0.901	0.001
AiCE L1	0.987	0.995	0.893		0.001	0.001
AiCE L2	0.951	0.931	0.987	0.719		0.001
AiCE L3	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	

表中の 0.001 は $p<0.001$ の場合を含む
下線は $p<0.05$ を表す

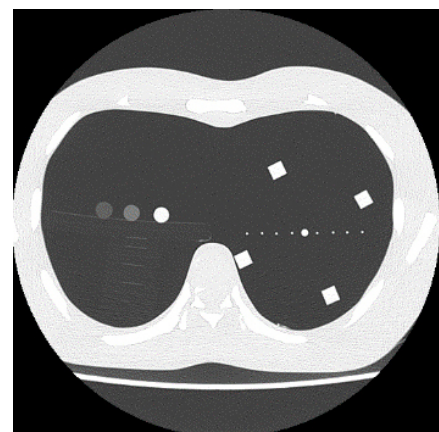


図4 再構成画像の例 (DFOV30cm)
画像再構成法は AIDR 3D L1

表 6 CNR 算出に使用した模擬腫瘍の
各画像再構成法での CT 値と SD (DFOV30cm)

	-800HU		-630HU		+100HU	
	CT値	SD	CT値	SD	CT値	SD
FBP	-810.0	9.2	-654.6	15.3	35.3	52.9
AIDR 3D L1	-810.8	7.6	-654.5	14.3	36.5	51.8
AIDR 3D L4	-812.9	5.3	-656.4	13.3	35.3	51.4
AiCE L1	-811.7	5.7	-654.5	13.7	34.1	51.2
AiCE L2	-812.3	4.4	-655.8	13.0	29.5	49.9
AiCE L3	-815.5	3.6	-659.1	12.5	25.9	49.5

表 7 無信号領域 (空気) の CT 値と SD (DFOV30cm)

	CT値	SD
FBP	-997.5	5.0
AIDR 3D L1	-997.5	4.0
AIDR 3D L4	-997.5	2.4
AiCE L1	-997.8	2.4
AiCE L2	-997.7	1.7
AiCE L3	-997.7	1.4

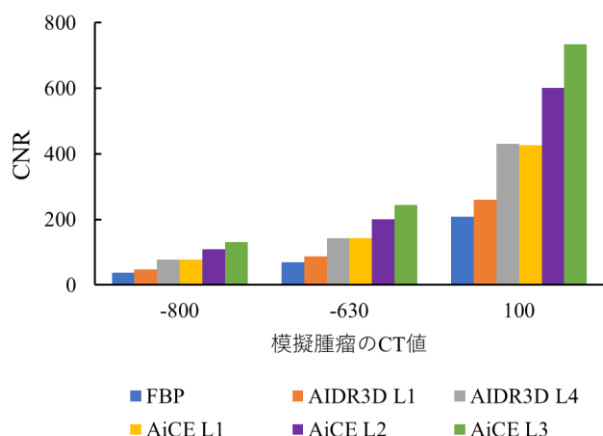


図 5 模擬腫瘍の各画像再構成法での CNR
(DFOV30cm)

2. 線量低減効果の検討

DFOV10cm での CNR を図 6 に示した。いずれも管電流増加に伴い CNR が増加した。AIDR 3D L1 と AiCE L1 が近く、やや AIDR 3D L1 の方が CNR は高い傾向にあった。なお、CNR 算出において、CT 値は平均値、SD は二乗和を使用枚数で除した値の平方根を使用した。図 6 の近似曲線 (2 次の近似式) から CNR が 50 となる各管電流を求めたところ、AIDR 3D L1 : 210mA, AiCE L1 : 245mA, AiCE L2 : 175mA, AiCE L3 : 90mA であった。これより AIDR 3D L1 に対して AiCE L1 では約 117%, AiCE L2 では約 83%, AiCE

L3 では約 37%の管電流で同等の CNR となった。管電流と線量は比例することから AIDR 3D L1 に対して AiCE L2 および AiCE L3 においては線量が少ない条件で CNR が同等であった。ここで、臨床には AIDR 3D L1 が主に使用され、かつ図 6 の AIDR 3D L1 と AIDR 3D L4 の CNR の曲線がほぼ重なったことから以降の AIDR 3D に関しては AIDR 3D L1 のみの評価とした。

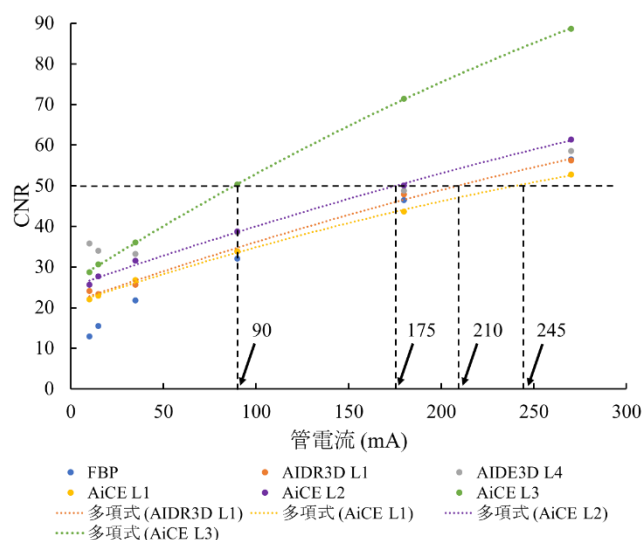


図 6 ラインファントムの中心支柱と空気の CNR
(DFOV10cm)

SNR 算出のための TTF を図 7 に示した。管電流の違いによる TTF の変化について AIDR 3D L1 では低管電流ほど TTF が低下した (図 7A)。AiCE L1, AiCE L2, AiCE L3 においてもそれぞれ低管電流ほど TTF は低下したが、比較的高周波数帯域では高値を示し、10%TTF は 1.5cycles/mm を超えるものが多かった (図 7B)。この TTF と NPS より算出した SNR の結果を空間周波数 0.3, 0.6, 0.9cycles/mm について図 8 に示した。各空間周波数において、管電流依存的に SNR は増加した。

まず 0.3cycles/mm において、AIDR 3D L1 の 270mA の SNR と同等になる AiCE の管電流を AIDR 3D L1 の SNR に近い AiCE の 2 点 (例えば AiCE L1 では 180mA と 270mA の SNR) から直線補間により求めたところ、AiCE L1 : 370mA (270mA に対して 137%相当), AiCE L2 : 288mA (107%), AiCE L3 : 209mA (73%) となり、AiCE L3 のみが 270mA より低くなった。同様に、AIDR 3D L1 の 180mA に対しては、AiCE L1 : 202mA (112%), AiCE L2 : 203mA (113%), AiCE L3 : 142mA (79%) となり、この場合も AiCE L3 のみが 180mA より低くなった。さらに、AIDR 3D L1 の 90mA に対しては、AiCE L1 : 111mA (123%), AiCE L2 : 97mA (108%), AiCE L3 : 67mA (74%) となり、この場合も AiCE L3 のみが 90mA より低くなった。

0.6cycles/mm においても SNR が同等なる管電流の大小関

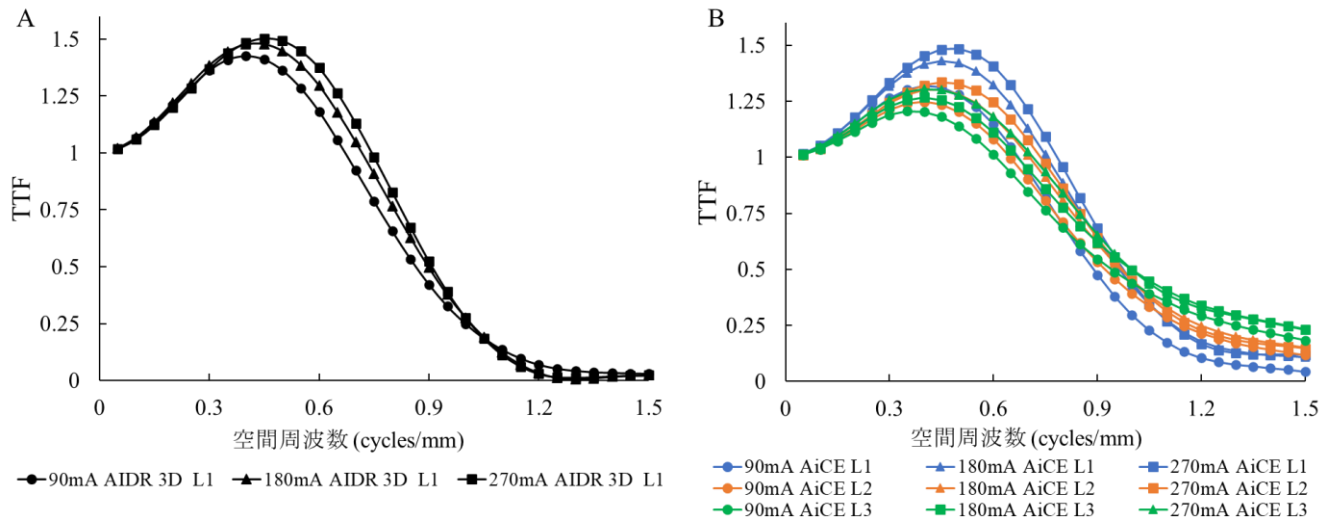


図 7 管電流の違いによる TTF の変化
A: ADR 3D L1, B: AiCE L1, AiCE L2, C: AiCE L3

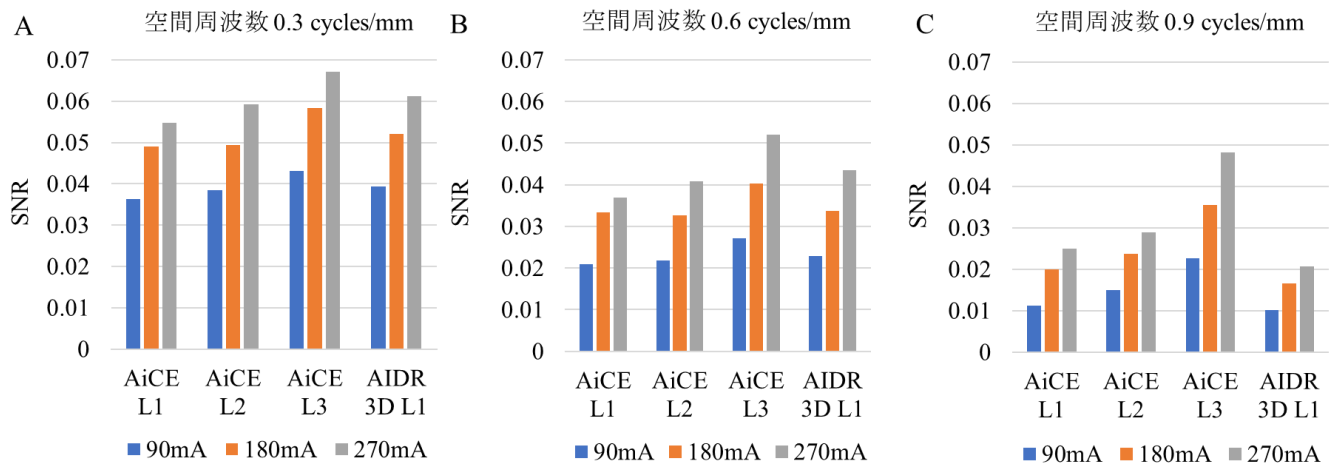


図 8 管電流の違いによる SNR の変化
A: 0.3 cycles/mm, B: 0.6 cycles/mm, C: 0.9 cycles/mm

係は 0.3cycles/mm の結果と同様であり、AiCE L3 のみが ADR 3D L1 よりも管電流が低くなった。ADR 3D L1 の 270mA の SNR では AiCE L1 : 434mA (161%), AiCE L2 : 299mA (111%) AiCE L3 : 204mA (76%), 180mA の SNR では AiCE L1 : 184mA (102%), AiCE L2 : 191mA (106%) AiCE L3 : 136mA (76%), 90mA の SNR では AiCE L1 : 104mA (116%), AiCE L2 : 98mA (109%) AiCE L3 : 61mA (67%) であった。

0.9cycles/mm では ADR 3D L1 の SNR と同等になる AiCE の管電流は ADR 3D L1 より全て低くなった。まず、ADR 3D L1 の 270mA の SNR では、AiCE L1 : 192mA (71%), AiCE L2 : 128mA (47%), AiCE L3 : 75mA (28%) となった。次に、ADR 3D L1 の 180mA の SNR では、AiCE L1 : 144mA (80%), AiCE L2 : 106mA (59%), AiCE L3 : 48mA

(27%) となった。さらに、ADR 3D L1 の 90mA に対しては、AiCE L1 : 79mA (88%), AiCE L2 : 41mA (46%), AiCE L3 : 3.5mA (3.9%) となった。SNR では各空間周波数により結果が異なり、比較的高周波数帯域の 0.9cycles/mm では全ての AiCE が ADR 3D L1 より少ない線量で SNR が同等となった。

IV. 考察

1. 画像評価

DFOV10cm について、信号欠損数は AiCE L3 が有意に多く、ノイズの数は AiCE L3 が有意に少なかった (表 4, 5)。このことは、ノイズの減少に伴い信号も失われる可能性が示唆される。胸部単純 CT 検査においては、胸部異常陰影の性状や微小な結節影の明瞭な描出のため解像特性が重視

される⁸⁾ことから、この点については、AiCE L3 は不向きであると考えられた。一方、他の画像再構成法の信号欠損数には有意差は無く、ノイズの数では AiCE L2 が臨床に使用されている AIDR 3D L1 より有意に低いことが判明した。このことから AiCE L2 が信号欠損数とノイズの数においてバランスが良いと考えられた。信号欠損数について、視覚的には2値化処理前の加算平均画像で0.1mm径ラインを確認することができるが、加算平均前の画像ではノイズとの差別化が難しい。同じ物質でも画像再構成法の違いや物体の大きさ、ノイズ（通常は管電流を増すことでノイズが減少する）等により再構成画像でのCT値は変化する¹⁹⁾ため、1.7mm径のラインでもCT値が-819HUから-822HUの範囲になったと考えられた。また、0.3mm径ライン以上の大きい物体は全て検出されており、信号欠損数は主に0.2mm径ラインの欠損を反映していると考えられた。

また、微小信号とくに0.1mm径ラインの信号欠損が多かった。この原因として、胸部ファントムの肺野領域にラインファントムを配置したことと、設定できるDFOVの最小値が10cmであることがあげられる。坂本らの研究では胸部ファントムを使用せずラインファントムのみのDFOV5cmでの再構成画像から0.1mm径ラインを効率よく検出していた¹²⁾。本研究では胸部ファントムの胸壁や縦郭による吸収、さらに微小信号に対してDFOVが10cmと比較的大きいため、0.1mm径ラインの検出を可能とする十分なCT値が得られなかったと考えられた。

DFOV30cmの模擬腫瘍のCT値の結果（表6）においても画像再構成法の違いによりCT値は異なり¹⁹⁾、+100HUの模擬腫瘍でのCT値の差が大きく、特にAiCE L2, AiCE L3においてCT値が低くなった。SDの結果（表7）においてはAiCE L2, AiCE L3が低く、ラインファントムのノイズの数の結果と一致した。表6、表7から算出されたCNRの結果（図5）では、模擬腫瘍の3種類のいずれにおいてもAIDR 3D L1よりAiCE L1, AiCE L2, AiCE L3のCNRが高く線量低減効果の可能性が示唆された。

2. 線量低減効果の検討

画像評価では管電流一定の条件下で解像力（信号欠損数の評価）、ノイズの数、CNRの評価を行った。しかし、AIDR 3DやAiCEは非線形な処理を用いているため、解像力にも非線形な挙動が見られる^{20,21)}。その結果、管電流の変化によるノイズの変化に加え解像特性も影響を受ける^{22,11)}。さらに、CNRには周波数特性が反映されていない²²⁾ことから、管電流変化によるCNRに加え、周波数特性を反映するTTF, SNRを評価しAIDR 3D L1に対するAiCEの線量低減効果を検討した。

CNRの結果（図6）よりAIDR 3D L1と比較してAiCE L1では線量低減効果を期待できず（約17%増）、AiCE L2では約17%、AiCE L3では約63%の線量低減効果が示唆された。

一方、TTFの結果（図7）よりAIDR 3D L1は線量依存的にTTFが変化した²³⁾が、0.6cycles/mm付近の変化が目立ち、高周波数帯域での変化はあまり見られなかった。線量が高いほどTTFが高くなる点は先行研究と同じ結果であった¹¹⁾。AiCEについても線量依存的にTTFは変化した²⁴⁾が、高周波数帯域が高値を示すなど、TTF変化の特徴が確認できた。AiCE L1, AiCE L2, AiCE L3の相違として、AiCE L1では低中周波数帯域でのTTFが比較的高値であり、AiCE L3では高周波数帯域でのTTFが比較的に高値を示す傾向にあった。ここで、ラインファントムの信号欠損数ではAiCE L3が有意に多かったことから、高周波数帯域のTTFが高値を示す結果と矛盾する。この原因として、0.1mm径ラインは5.0cycles/mm、0.2mm径ラインは2.5cycles/mmに相当し、TTFの最高空間周波数1.5cycles/mmを超えていることが原因であると考えられた。

SNRの結果（図8）について、TTFの変化を考慮し0.3, 0.6, 0.9cycles/mmの空間周波数毎の評価において、空間周波数帯によりAiCEの線量低減効果に違いがあることが判明した。

0.3cycles/mmにおいて、AIDR 3D L1に対してAiCE L3のみが平均約25%の線量低減効果を示した。

0.6cycles/mmにおいても、AIDR 3D L1に対してAiCE L3のみが平均約27%の線量低減効果を示した。

0.9cycles/mmにおいては、AIDR 3D L1に対して、AiCE L1は平均約23%の線量低減効果、AiCE L2は平均約49%の線量低減効果、AiCE L3は平均約80%の線量低減効果を示した。

キヤノンメディカルシステムズ社製CTにおける線量低減効果について、Tatsugamiらは、冠動脈CTAにおいてAiCEがAIDR 3Dより36%の線量低減が可能であるとし²³⁾、McLeavyらは、腹部撮影においてAiCEがAIDR 3Dの43%の線量で撮影できたとし²⁴⁾、Nagayamaらは小児のCTとファントム実験によるCTにおいてAiCEがAIDR 3Dより約50%の線量低減が可能である²⁵⁾と報告している。しかし、AiCEのパラメータ強度であるL1, L2, L3が不明であり、周波数特性についても議論されていない。本研究では、パラメータ強度と空間周波数特性を考慮し、肺野に適用される高周波数帯域に特徴的な肺野関数について、各パラメータ強度の特性を定量的に評価することができた。

本研究の限界として、得られた結果は本研究に使用したCTかつファントムについてのみ適応する点である。AIDR 3DやAiCEは非線形処理の評価であることから結果は対象とする物質に依存するため、本研究に使用したファントムでの結果であり臨床での線量低減効果とは必ずしも合致しない可能性があるという点が挙げられる。また、ラインファントムは長軸方向に変化のない物体であるため、長軸方向の影響は加味しておらず、評価をしていない。このほか、ラインファントムの中心と回転中心の距離が58mmであり、

回転中心からの距離が変化すれば結果が変わる可能性がある¹⁹⁾ことを考慮しなければならない。

V. 結語

従来から臨床で主に使用されている画像再構成法の AIDR 3D L1 と比較して、画像評価では AiCE L2 が信号欠損数に差はなく、ノイズの数が少ないことが示唆された。

CNR の評価では、AiCE L2 および AiCE L3 において線量低減効果が示唆された。SNR の評価では高周波数帯 (0.9 cycles/mm) において AiCE L1, AiCE L2, AiCE L3 の線量低減効果が示唆された。

一方で、AiCE L3 は信号欠損数が有意に多いことが示され、注意が必要であることが示唆された。

以上より、AIDR 3D L1 と比較して、AiCE L2 はノイズが少なく、信号欠損も同等で、かつ線量低減に寄与する可能性が示唆された。

利益相反 開示すべき利益相反はありません。

謝辞 本研究にあたって、ご協力くださった皆様に深く感謝申し上げます。また、本研究は JSPS 科研費 JP21K10366, JP24K13359 の助成を受けたものです。

参考文献

- 市川勝弘: 3. 臨床応用(1)ー CT の画像再構成と画質(FBP 法)ー. 日本放射線技術学会雑誌, 70(6): 595-601, 2014.
- 山崎暁夫, 永澤直樹: CT における逐次近似再構成法の基礎的検討と臨床応用. 日本放射線技術学会雑誌, 68(6): 768-774, 2014.
- キャノンメディカルシステムズ株式会社 News Press Releases. November 27, 2023.
<https://jp.medical.canon/News/PressRelease/Detail/143183-834> (2025.3.23).
- Martin JW, Peter BN: The evolution of image reconstruction for CT—from filtered back projection to artificial intelligence. *European Radiology*, 29: 2185–2195, 2019.
- 伊藤雄也: 次世代CT画像再構成DLRの技術解説. 医用画像情報学会雑誌, 40(2): 24-29, 2023.
- Zohaib S, Henry CW, Avishek C, et al.: Transparency of deep neural networks for medical image analysis: A review of interpretability methods. *Computers in Biology and Medicine*, 140: 1-18, 2022.
- 中川恵一, 青木幸昌, 赤沼篤夫, 他: 直線加速器の超高压 X 線を用いた CT 撮影装置 (超高压 CT) の開発. 日本放射線腫瘍学会誌, 3: 265-276, 1991.
- 藤原誠, 汐月剣志, 河野実月, 他: 胸腹部単純 CT 検査における deep learning reconstruction を用いた小焦点撮影の物理特性. 日本放射線技術学会雑誌, 79(12): 1344-1351, 2023.
- キャノンメディカルシステムズ株式会社. AiCE ディープラーニング再構成: 超高解像度 CT のパワーを日常的な画像診断に活用.
https://global.medical.canon/publication/ct/2019WP_AiCE_Deep_Learning# (2025.6.7).
- Ichikawa K.: CTmeasure. Japanese society of CT technology, Kasumi Minami ku, Hiroshima, JPN.
<https://www.jsct-tech.org/members/software/members.html> (2024.4.1).
- 日本放射線技術学会編: X 線 CT 撮影における標準化～GALACTIC～ (改訂 2 版). 放射線医療技術学叢書 (27) 日本放射線技術学会出版委員会, 26-163, 2015.
- 坂本颯, 工藤幸清, 阿保淳, 他: CT の肺野イメージにおける深層学習を用いた再構成法の有用性に関する基礎的検討: ファントム実験. 保健科学研究, 13(2): 1-9, 2022.
- Urikura A, Hara T: Objective assessment of low-contrast computed tomography images with iterative reconstruction. *Physica Medica*, 32: 992-998, 2016.
- 市川勝弘, 村松禎久: 標準 X 線 CT 画像計測(改訂 2 版). オーム社, 26-134, 2020.
- 滝代航也: 新たな逐次近似画像再構成法の物理的評価. 東北支部雑誌, 26: 2017.
- JSCT Technical Guidelines 2021: IV. Image Evaluation Related. Japanese Society of CT Technology (JSCT), November 2021: 83, 2021.
- 無料統計ソフト EZR のホームページ.
<https://www.jichi.ac.jp/usr/hema/EZR/statmed.html> (2025.6.7).
- 対馬栄輝: R コマンドで簡単! 医療系データ解析. 東京図書株式会社, 168, 2021.
- 和田真一, 大久保真樹, 成田啓廣, 他: CT 画像 3D-PSF の胸部 CT-CAD の QA への応用 (2) CT 画像 3D-PSF 応用と PSF 測定精度検証. *JPN. J. Med. Phys*, 39(2): 42-49, 2019.
- Richard S, Husarik DB, Yadava G, et al: Towards task-based assessment of CT performance: system and object MTF across different reconstruction algorithms. *Med Phys*, 39(7): 4115-4122, 2012.
- 森一生: 近年の X 線 CT 画像の非線形的特性と画質の物理評価について. 東北大医保健学科紀要, 22(1): 7-24, 2013.
- 三浦洋平, 市川勝弘, 原考則, 他: 低線量胸部 CT 画像における低コントラスト分解能の評価. 日本放射線技術学会雑誌, 67(8): 873-879, 2011.
- Tatsugami F, Higaki T, Nakamura Y, et al.: Deep learning-based image restoration algorithm for coronary CT angiography. *Eur Radiol*, 29(10): 5322-5329, 2019.
- McLeavy CM, Chunara MH, Gravell RJ, et al.: The future of CT: deep learning reconstruction. *Clin Radiol*, 76(6): 407-415, 2021.
- Nagayama Y, Goto M, Sakabe D, et al.: Radiation dose reduction for 80-kVp pediatric CT using deep learning-based reconstruction. A Clinical and Phantom Study. *AJR Am J Roentgenol*, 219(2): 315-324, 2022.

【Original article】

Comparison of iterative and deep-learning CT image reconstruction methods for lung fields: A phantom study

RYUNOSUKE SHIBAGAKI^{*1} KOHSEI KUDO^{*2} MINORU OSANAI^{*2}
MEGUMI TSUSHIMA^{*2} YUSUKE MINAMIJIMA^{*1}
RYO SASAKI^{*3} TOMOYUKI NARITA^{*3} TAKESHI MORITA^{*3}

Received March 28, 2025 ; Accepted July 17, 2025

Abstract: Image reconstruction methods using deep learning have been installed in computed tomography (CT) devices. Canon's Aquilion ONE CT is equipped with the Advanced intelligent Clear-IQ Engine (AiCE, L1-L3), an image reconstruction method using deep learning, in addition to Adaptive Iterative Dose Reduction 3D (AIDR 3D, L1-L4), a conventionally used iterative reconstruction method. In this study, we compared images of AIDR 3D and AiCE using a phantom representing a lung field, and examined the utility of AiCE. We measured the number of signals lost and noise, contrast-to-noise ratio (CNR), and signal-to-noise ratio (SNR) using various reconstructed images taken with a homemade line phantom. Evaluation indicated no difference in the number of signals lost and less noise with AiCE L2 compared to AIDR 3D L1. The CNR suggested a dose reduction effect of approximately 17% and 63% for AiCE L2 and AiCE L3 compared to AIDR 3D L1. The SNR suggested dose reduction effects of approximately 23%, 49% and 80% for AiCE L1, AiCE L2 and AiCE L3, respectively, compared to AIDR 3D L1 in the high-frequency band (0.9 cycles/mm). These results suggested that AiCE L2 has less noise and the same signal loss compared to AIDR 3D L1, and is likely to contribute to dose reduction.

Keywords: Computed tomography (CT), Iterative reconstruction method, Deep learning reconstruction method

【報告】

福島第一原子力発電所事故後における ユズの放射性セシウム濃度とドレッシング作製による濃度変化

小山内 暢^{*1} 清水 真由美^{*2} 田中 和貴^{*3} 工藤 幸清^{*1}
細川 翔太^{*1} 對馬 恵^{*1} 堀内 輝子^{*3} 木立 るり子^{*4}

2025 年 3 月 27 日受付, 2025 年 7 月 4 日受理

要旨 : ユズは日本で古くから親しまれてきた柑橘類で, 近年は輸出も盛んになっている。本研究では, 食品中の放射性物質に関する現行の基準値が適用された 2012 年度から 10 年間のモニタリング検査結果を基に, 放射性セシウム濃度を解析した。さらに, 実測で部位別濃度を明らかにし, 調理加工例として, ドレッシング作製による濃度変化も評価した。10 年間の全検体のうち 45.6% でセシウムが検出され, 濃度の中央値は 12 Bq/kg, 95 パーセンタイル値は 49 Bq/kg と低濃度分布が特徴的で, 経年に伴う濃度低下傾向がみられた。実測で全体の濃度が 21.0 Bq/kg であるユズの部位別濃度は, 種子, 果皮, じょう囊膜, 果汁・砂じょうの順に高くそれぞれ 32.0, 24.8, 14.2, 13.2 Bq/kg であった。果汁・砂じょうで作製したドレッシングの果実全体に対する濃度比は 0.27 であった。濃度は喫食部で低く調理加工により大きく低下した。

キーワード : 食品中の放射性物質, ユズ, 放射性セシウム, 食品安全, リスクアナリシス

I. はじめに

2011 年に発生した福島第一原子力発電所事故（以下「原発事故」という。）に伴い, 環境中に放射性物質が拡散された¹⁾。厚生労働省は, 同年 3 月 17 日に食品中の放射性物質に対して暫定規制値を設定した²⁻⁵⁾。その後, 長期的な状況に対応するため, 2012 年 4 月には, 食品中の放射性物質に関する現行の基準値が放射性セシウム (^{134}Cs と ^{137}Cs の合計値) に対して定められた（現在は, 食品衛生基準行政は消費者庁に移管されている）³⁻⁶⁾。現行の基準値の具体的な値としては, 飲料水 10 Bq/kg, 牛乳及び乳児用食品 50 Bq/kg, 一般食品 100 Bq/kg が適用されている。この基準値を基に, 17 都県の地方自治体を中心としたモニタリング検査が実施されている⁷⁾。原発事故以降, 多くの検証がなされ, 食品摂取による内部被ばく線量は十分に小さいことや食品中の放射性物質に関する規制が妥当であったことなどが示され, 我が国の放射性物質に関する食の安全は十分に確保されていると評価されてきた⁸⁻¹³⁾。また, 消費者庁によって継続して実施されている「風評に関する消費者意識の実態調査」においても, 食品中の放射性物質やそのリスクを懸念する人の割合は減少傾向にあることが示されてい

るが^{14,15)}, より一層の安心に向けては, 多角的な観点から検証を続ける必要がある。

ユズはミカン科ミカン属の香酸柑橘類で, 消費量・生産量ともに日本が最大であり, 古くから親しまれてきた¹⁶⁻¹⁸⁾。近年は, 海外での人気も高まり, 欧州をはじめとした各国・地域への輸出が広がりを見せている^{19,20)}。高知県や徳島県が主要なユズの産地ではあるものの²¹⁾, 福島県においてもユズは栽培されており, 地域特産果樹のひとつとして振興品目に掲げられている^{22,23)}。さらに, 自家消費食品等を対象とした放射能簡易検査へのユズの持込みも多く見受けられ²⁴⁾, 住民の関心の高さがうかがえる。原発事故後には, ユズを含む果樹を対象とした放射性セシウムの動態に関する研究も行われてきた²⁵⁻²⁷⁾。ユズは, 果肉や果皮がジャムや菓子作りに用いられ, 果皮が漬物等の風味付けとして使われたりする。さらには果汁を用いた調味料も広く普及しているなど, ユズの喫食方法は多岐にわたる。そのため, ユズの放射性セシウム動態に関するより詳細なデータの蓄積が求められる。

本研究では, 我が国の特産品のひとつであるユズの放射性セシウム動態に関する知見の収集を目的として, モニタリング検査結果を基にユズの果樹全体の放射性セシウム濃度を解析するとともに, 実測によって, 福島県内で採取されたユズの部位別の濃度や調理加工（ドレッシング作製）による濃度変化を評価した。

II. 方法

1. モニタリング検査結果の解析

厚生労働省が, 取りまとめ, ウェブサイト²⁸⁾にて公表しているモニタリング検査結果を用いた。解析対象期間は, 食品中の放射性物質に関する現行の基準値が適用された

*1 弘前大学大学院保健学研究科

Hirosaki University Graduate School of Health Sciences
〒036-8564 青森県弘前市本町 66-1 TEL:0172-33-5111
66-1, Hon-cho, Hirosaki-shi, Aomori, 036-8564, Japan

*2 弘前大学教育学部

Faculty of Education, Hirosaki University
〒036-8560 青森県弘前市文京町 1 TEL:0172-36-2111
1, Bunkyo-cho, Hirosaki-shi, Aomori, 036-8560, Japan

*3 弘前大学被ばく医療総合研究所

Institute of Radiation Emergency Medicine, Hirosaki University
〒036-8564 青森県弘前市本町 66-1 TEL:0172-33-5111
66-1, Hon-cho, Hirosaki-shi, Aomori, 036-8564, Japan

*4 青森中央学院大学看護学部

Faculty of Nursing, Aomori Chuo Gakuin University
〒030-0132 青森県青森市大字横内字神田 12 TEL: 017-728-0131
Correspondence Author ominoru@hirosaki-u.ac.jp (Minoru Osanai)

2012 年度から 10 年間とし、対象地域は限定しなかった。

検査結果は、 ^{134}Cs 、 ^{137}Cs 及びそれらの合計の放射能濃度 (Bq/kg) が採取・購入日、結果判明日、公表日、食品カテゴリ、品目名 (我々の解析では 10 年間で 6670 品目) 等とともに示されている。まず、本研究の前段階として、全品目の検査結果を収集し、合計放射能濃度、採取・購入日のいずれかが記載されていない検査結果は除外した。次に、採取・購入日によって日付を分類し、食品カテゴリが「農産物」で品目名が「ユズ」である検査結果を抽出した。 ^{134}Cs と ^{137}Cs の合計に対して、放射性セシウムの検出率、放射能濃度を解析した。

2. 福島県内で採取されたユズの放射性セシウム濃度測定

試料として、2021 年 12 月に福島県浪江町にて採取されたユズ 20 個 (2,070 g、品種は不明) を用いた。放射能濃度の測定には、CsI シンチレーション検出器を搭載した非破壊方式の放射性セシウム測定装置 FD-08Cs1000-1 レギューム・ライト (クロスレイテクノロジー株式会社) を使用した。測定時間は 30 分とし、検出下限値は 3.1~8.2 Bq/kg であった。

(1) 部位別の放射能濃度解析

ユズの部位別の名称を図 1 に示す。

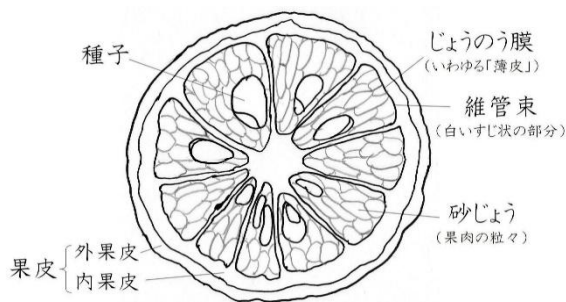


図 1 ユズの部位別の名称

果実全体の放射性セシウム濃度は、測定装置の容積の関係で 4 回に分けて測定した。その後、ユズを果皮 (外果皮と内果皮)、じょうのう膜、果汁・砂じょう、種子に分けた。その際は、果実を上下半分にカットし、丸形のレモン絞り器を用いて、果皮から果汁・砂じょう、じょうのう膜、種子を分離した。つづいて、果汁・砂じょうが残存するじょうのう膜をガーゼで絞り、じょうのう膜と果汁・砂じょうをさらに分離した (図 2)。



図 2 分離後のユズの各部位

その後、部位 (果皮、じょうのう膜、果汁・砂じょう、種子) ごとに放射性セシウム濃度を測定した。

(2) 調理加工 (ドレッシング作製) による濃度変化

調理加工の例として、ユズを用いたドレッシング作製による放射性セシウム濃度の変化を評価した。オリーブオイル (トルコ産) 225 g、ユズの果汁・砂じょう 130 g、醤油 75 g、酢 50 g、すりおろしたユズの果皮 20 g、砂糖及びコショウ適量を混合し、ユズドレッシングとし、放射性セシウム濃度を測定した。ドレッシング作製に用いたユズの果汁・砂じょう及び果皮は、「(1) 部位別の放射能濃度解析」で濃度測定を行ったものを使用した。

III. 結果

1. モニタリング検査結果の解析

各年度のユズの放射性セシウムの検出率 (検査件数に対する放射性セシウムの検出数) を図 3 に示す。なお、本解析では、検出下限値を超えた場合を「検出」として扱った。2012 年度から 2021 年度の全期間における検出率は 45.6% であった。食品中の放射性物質に関する現行の基準値が適用された 2012 年度の検出率は 77.4% であったが、経年変化をみると、検出率は低下傾向にあり、基準値適用 5 年目の 2016 年度以降は、検出率は 40% を下回った。最低検出率は 2020 年度の 11.5% であった。

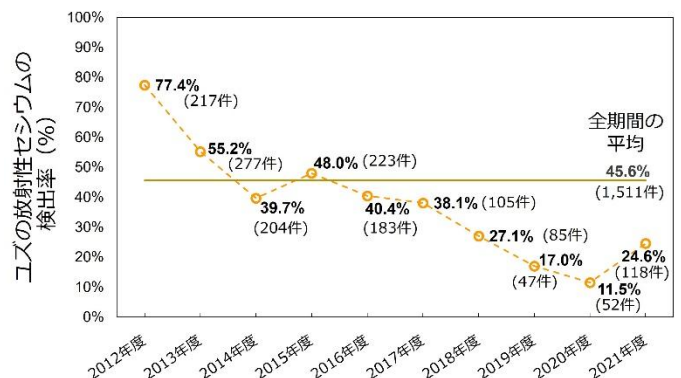


図 3 ユズの放射性セシウムの検出率

検出率に加え、ユズに対するモニタリング検査の実施件数を括弧内に併せて示している

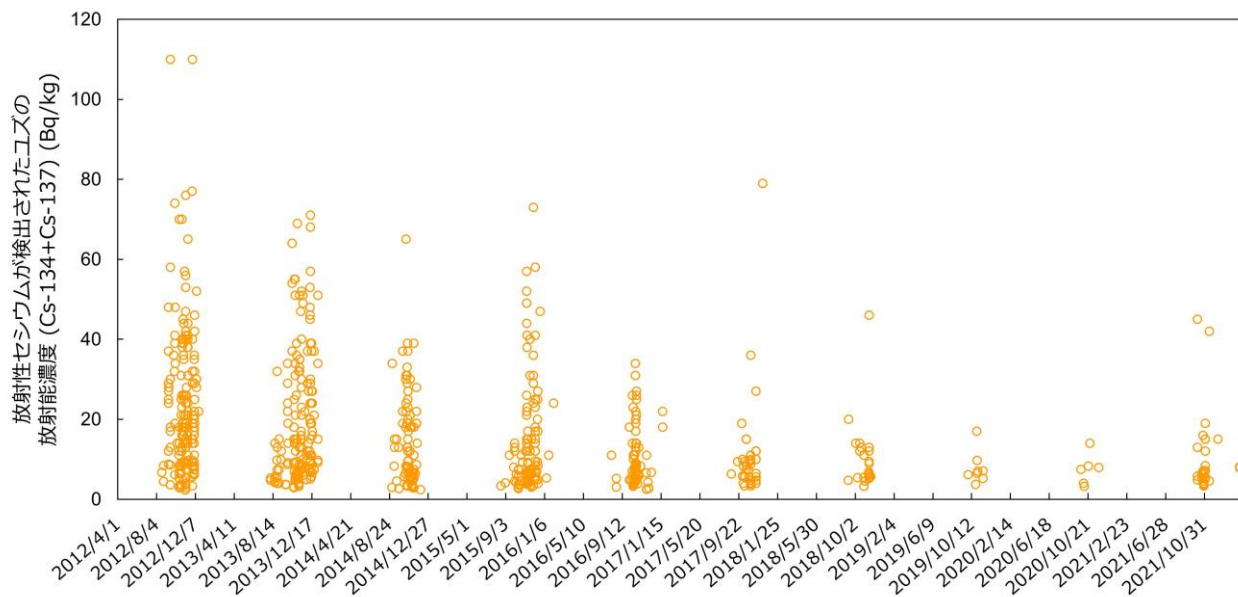


図4 モニタリング検査によるユズの濃度分布

放射性セシウムが検出された試料の濃度分布を示しており、不検出（検出限界値未満）であった試料は含まない。

表1 放射性セシウムが検出されたユズの放射能濃度の中央値と95パーセンタイル値（Bq/kg）

	年度										
	全期間	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
中央値	12	19	14	12	9.3	7.1	8.4	6.8	6.8	7.7	6.9
95パーセンタイル値	49	58	53	37	46	26	27	19	14	13	33

放射性セシウムが検出されたユズの濃度分布を図4に示す。表1には、放射性セシウムが検出されたユズの放射能濃度の中央値、95パーセンタイル値を示す。全期間で基準値を超過したのは2012年度の2件であり、その放射性セシウム濃度は、ともに110 Bq/kgであった。経年とともに、濃度分布の幅は低濃度側に収束する傾向にあった。また、年度別に見た場合、放射性セシウムが検出されたユズの放射能濃度の中央値は、6.8～19 Bq/kg、95パーセンタイル値は13～58 Bq/kgであった。全期間で見ると、放射能濃度の中央値、95パーセンタイル値はそれぞれ12 Bq/kg、49 Bq/kgであった。経年変化をみると、中央値、95パーセンタイル値ともに低下傾向にあった。

2. 部位別の放射能濃度

ユズの部位別の放射性セシウム濃度、検出限界値及び各試料の重量を表2に示す。果実全体の放射性セシウム濃度は、21.0 Bq/kg（重量加重平均値）であった。部位別には、果皮24.8 Bq/kg、じょうのう膜14.2 Bq/kg、果汁・砂じょう13.2 Bq/kg、種子32.0 Bq/kgで、種子の濃度が最も高く、ついで、果皮の濃度が高かった。4部位の中で、じょうのう膜と果汁・砂じょうの濃度は低く、同等であった。果実全体の放射性セシウム濃度に対する各部位の濃度の比（濃度比）は、果皮1.18、じょうのう膜0.68、果汁・砂じょう0.63、種子1.52であった。

表2 ユズの部位別の放射能濃度

	セシウム濃度 (Bq/kg)	検出 限界値 (Bq/kg)	重量(g)	重量加重 平均濃度 (Bq/kg)
果実全体①	19.3	5.1	514	21.0
果実全体②	19.9	5.0	522	
果実全体③	22.4	5.1	512	
果実全体④	22.6	5.0	522	
果皮	24.8	3.1	845	—
じょうのう膜	14.2	4.5	459	—
果汁・砂じょう	13.2	5.9	346	—
種子	32.0	8.2	251	—

3. 調理加工（ドレッシング作製）による濃度変化

果汁・砂じょう及び果皮で作製したドレッシング（重量481 g）の放射性セシウム濃度は、5.8 Bq/kgであり、果実全体に対する濃度比（加工係数）は0.27であった。

IV. 考察

食品中の放射性セシウム濃度は、食品の種類によって大きく異なる。例えば、野生の山菜やきのこ類、野生鳥獣肉は基準値（100 Bq/kg）を超過する割合が高い食品として知られているが、一般に、野生鳥獣肉に比べ、野生の山菜やきのこ類の放射性セシウム濃度は低いことが知られている。

¹²⁾。さらに、調理加工によって、食品中の放射性セシウム濃度は大きく変化することから²⁹⁻³¹⁾、食品の種類別に放射性セシウム濃度分布や調理加工による濃度変化を評価する意義は大きい。本研究では、ユズを対象として、原発事故後の放射性セシウム動態を評価した。

現行の食品中の放射性物質に関する基準値が適用されてからの10年間を対象としたモニタリング検査結果の解析において、ユズの放射性セシウム検出率は11.5～77.4%と決して低くはなかった。しかしながら、放射性セシウム濃度に着目すると、基準超過は2件のみであり、それらの検体の濃度は110 Bq/kgであった。例えば、野生鳥獣肉では数千～数万 Bq/kgのオーダーで放射性セシウムが検出される場合がある¹²⁾ことを踏まえると、ユズの放射能濃度は、さほど高濃度ではなかった。また、放射性セシウムが検出されたユズの放射能濃度の中央値は6.8～19 Bq/kg(95パーセンタイル値は13～58 Bq/kg)であった。さらに、農林水産省による報告書³²⁾では、2015年のユズ果実中の放射性セシウム濃度は30.2～68.6 Bq/kgであったと示されている。また、別のデータ²⁷⁾においても、2012年に基準値を上回る例が示されているが、その濃度は135.6 Bq/kgであった(本研究の対象期間外である2011年の濃度は364.6 Bq/kg)。また、先行研究¹³⁾のデータからは、柑橘類の放射性セシウム濃度は野生鳥獣肉、山菜、きのこ類、魚介類等よりも低いことが読み取れる。以上のことから、原発事故によるユズへの影響は認められるものの(前述の報告書³²⁾では、ユズ樹体内に貯蔵された放射性セシウムの果実への再転流が、果実への影響の主要因であると評価されている)、果実に対する放射能濃度としての影響は顕著ではなかったものと言える。

また、ユズの放射性セシウム検出率(図3)の経年変化に着目すると、低下傾向にあることは確かであるものの、2021年度のように、検出率が過去よりも上昇する場合があった。この検出率の逆転現象は、モニタリング検査の合理化・効率化や検査対象となったユズの産地の違いによって放射能濃度の高いユズが試料として含まれたことが一因であると推察される。

次に、放射性セシウムが検出されたユズの放射能濃度(中央値)の経年変化について考察する。原発事故後の放射性セシウムの理論的な減衰の様子ならびに表1で示したユズの放射能濃度(中央値)の経年変化を合わせて図5に示す。放射性セシウムの理論的な減衰の様子は、2011年の原発事故時に¹³⁴Csと¹³⁷Csが等量で環境中に放出されたものと仮定し、それぞれの物理的半減期(¹³⁴Cs:2.06年,¹³⁷Cs:30.2年³³⁾)を基に、各年における¹³⁴Csと¹³⁷Csの合計の残存率を求め、2012年度を基準として示したものである。2011年に¹³⁴Csと¹³⁷Csが等量(合計1.0)で放出されたと仮定した場合、各年における¹³⁴Csと¹³⁷Cs合計の残存率は以下の式で与えられる。

¹³⁴Csと¹³⁷Csの合計の残存率:

$$0.5 \times e^{-\frac{\ln 2}{2.06}t} + 0.5 \times e^{-\frac{\ln 2}{30.2}t}$$

ただし、 t は経過時間(年)である。また、図5の物理的減衰は、2012年度の残存率を基準(1.0)とし、各年度の残存率をプロットしたものである。

ユズの放射性セシウム濃度も2012年度を基準として示したが、物理的減衰よりも大きく低下しており、カリウム資材の散水処理やカリウムの施肥^{32,34)}、土壌表土の削り取り、ウェザリング等によって、ユズ果実に吸収される放射性セシウムが減少したためであると考えられた。

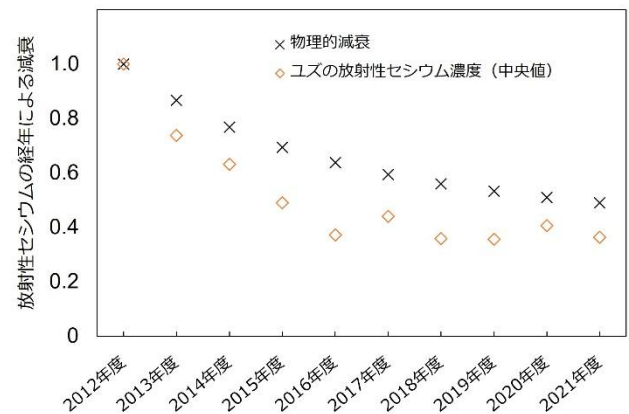


図5 放射性セシウムの物理的減衰ならびにユズの放射能濃度の経年変化

ユズの果実全体に対する各部位の濃度比は、果皮1.18、じょうのう膜0.68、果汁・砂じょう0.63、種子1.52であった。先行研究²⁵⁾においては、果皮、果肉、種子の濃度比が評価されており、それぞれ、1.20、0.66、1.40と示されている。本研究におけるじょうのう膜と果汁・砂じょうが果肉に該当すると考えると、本研究で得られた濃度比は先行研究に概ね一致する。食材として活用される機会が多いであろう果肉の濃度比が最も低く、この点は消費者にとっての安心材料となり得ると考える。また、果皮の濃度比は種子について高いが、一般に、香りづけとしての使用量は少なく、放射性セシウムの摂取量はさほど多くはならないと推察される。また、ユズの果皮をマーマレードジャムに加工する場合、直接的に果皮を喫食することとなるが、ユズマーマレードの作製工程において果皮を水に浸漬するなどして苦みを抜く際に放射性セシウムが流出するため、この場合も、調理加工後の放射性セシウム濃度は果実全体より大幅に小さくなることが知られている²⁵⁾。最も濃度比が高かったユズの種子が直接喫食されることは極めて稀であると考えられるが、種子を調味料に浸漬して用いるレシピが散見されることから、この場合の放射性セシウムの移行に関する検討も望まれる。

セシウムとカリウムは周期表の族が同じ(アルカリ金属

元素)であり、化学的性質が似ていることから、植物による吸収において両者は競合することが知られている(先に述べた、カリウムの施肥もこの原理に基づく)³⁵⁾。文献によると、ユズの部位別のカリウム量(ユズ 100 g 当たり)は、果皮 140 mg、果汁 210 mg と報告されており³⁶⁾、果汁よりも果皮のカリウム量が少ない。本研究では、果汁・砂じょうよりも果皮の放射性セシウム濃度が高い結果が得られており、先の文献によるカリウム量の関係と矛盾する。これは、放射性セシウムとカリウムの吸収経路が異なる(根からの放射性セシウムの果実への取り込みは少なく、樹体からの転流が主要因と考えられている³²⁾)ことが一因として挙げられるが、より詳細な検討が必要である。

本研究では、ユズの調理加工の例として、ユズの果汁・砂じょう及び果皮を用いたドレッシング作製による濃度変化を評価した。ドレッシングの放射性セシウム濃度は 5.8 Bq/kg であり、ユズ果実全体に対するドレッシングの濃度比(加工係数)は 0.27 であった。ドレッシングの放射性セシウム濃度は果実全体の 3 分の 1 未満となった。調理加工によって放射性セシウム濃度が大きく低下するひとつの例であり、現地の住民や消費者に対するリスクコミュニケーション活動の際にひとつの資料として提示できるものと思われる。また、今回のドレッシングの放射性セシウム濃度 5.8 Bq/kg、1 日摂取量 35.7 g (国民健康・栄養調査における「その他の調味料」の平均摂取量)³⁷⁾、線量係数 1.33×10^{-8} Sv/Bq (^{134}Cs , ^{137}Cs それぞれの物理学的半減期による残存率で加重平均した 2021 年度の放射性セシウムに対する線量係数¹³⁾)によって、ユズのドレッシング摂取による年間内部被ばく線量を保守的に見積もると、 1.0×10^{-3} mSv/年となり、内部被ばくへの寄与は十分に小さいことが確認できた。

今回作製したドレッシングの放射性セシウム濃度は 5.8 Bq/kg であった。一方で、作製に用いたユズの果汁・砂じょう及び果皮の放射性セシウム濃度(ユズ以外の調味料等は、放射性セシウムが検出される傾向にないため、放射性セシウム濃度は 0 と仮定)と各材料の重量を基に、ドレッシングの放射性セシウム濃度を計算すると 4.4 Bq/kg であり、実測値のほうが高値を示した。果皮をすりおろす際に、外果皮と内果皮が均等に含まれなかったと同時に、外果皮と内果皮の放射性セシウム濃度が異なった可能性があるため、今後は、果皮を外果皮と内果皮に分けた評価も必要かもしれない。

本研究には他にも研究限界がある。ユズの部位別濃度の評価に当たって、検体を部位別に厳密に分けることは困難であった。さらに、ユズ果実の維管束(白いすじ状の部分)は、果皮とじょうのう膜の両者に含まれていたため、各部位の濃度評価に影響を及ぼした可能性がある。また、原発事故直後には、果実表面に放射性セシウムが付着したと考えられ、その場合には、各部位の濃度比が今回の結果と異

なことが予想される。

V. 結語

本研究では、原発事故後のユズを対象として、放射性セシウム濃度に関する知見を収集した。ユズの放射性セシウム検出率は低くはないものの、濃度自体は高くはなく、検出率や放射性セシウム濃度は低下傾向にあった。部位別には、種子、果皮の濃度が相対的に高く、主に直接的に喫食される果汁の濃度は低かった。また、調理加工(ドレッシング作製)によって、放射性セシウム濃度が大きく低下することが確認できた。

利益相反 開示すべき利益相反はありません。

謝辞 本研究の一部は、福島イノベーション・コースト構想推進機構による大学等の「復興知」を活用した人材育成基盤構築事業の助成を受け、「浪江町の復興をフォローアップする地域人材育成のための保健・環境・防災教育プログラム」の一環として行ったものです。

ユズを提供くださった住民の方、試料準備・ドレッシング調製や放射性セシウムの濃度測定に御協力くださいました、浪江町役場、浪江町の皆様に心より感謝申し上げます。

引用文献

- 1) International Atomic Energy Agency: Technical Volume 1; Description and Context of the Accident, The Fukushima Daiichi Accident. pp.134-163, International Atomic Energy Agency Publishing Section, Vienna, 2015.
- 2) 厚生労働省: 厚生労働省医薬食品局食品安全部長通知(食安発 0317 第 3 号). 放射能汚染された食品の取り扱いについて. 平成 23 年 3 月 17 日:
-Shokuhinanzanbu-Kanshianzenka/3-17.pdf (2025-3-12)
- 3) 厚生労働省: 薬事・食品衛生審議会食品衛生分科会放射性物質対策部会報告書「食品中の放射性物質に係る規格基準の設定について」. 平成 24 年 2 月 23 日:
<https://www.mhlw.go.jp/stf/shingi/2r98520000023nbs-att/2r9852000023ng2.pdf> (2025-3-12)
- 4) Iwaoka K: The current limits for radionuclides in food in Japan. Health Phys, 111(5): 471-478, 2016.
- 5) 山口一郎, 寺田宙, 志村勉, 温泉川肇彦, 牛山明: 東京電力福島第一原子力発電所事故後の食品の放射線安全確保に向けた対策-10 年間の対応のまとめ. 保健医療科学, 70(3): 273-287, 2021.
- 6) 厚生労働省: 厚生労働省医薬食品局食品安全部長通知(食安発 0315 第 1 号). 乳及び乳製品の成分規格等に関する省令の一部を改正する省令、乳及び乳製品の成分規格等に関する省令別表の二の(一)の(1)の規定に基づき厚生労働大臣が定める放射性物質を定める件及び食品、添加物等の規格基準の一部を改正する件について. 平成 24 年 3 月 15 日:
<https://www.mhlw.go.jp/file/04-Houdouhappyou-11135000-Shokuhinanzanbu-Kanshianzenka/3-15.pdf> (2025-3-12)
- 7) 原子力災害対策本部: 検査計画、出荷制限等の品目・区域の設定・解除の考え方. 令和 6 年 3 月 26 日:

- <https://www.mhlw.go.jp/content/001233146.pdf> (2025-3-12)
- 8) Nabeshi H, Tsutsumi T, Imamura M, et al: Continuous estimation of annual committed effective dose of radioactive cesium by market basket study in Japan from 2013 to 2019 after Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant accident. *Food Safety*, 8(4): 97-114, 2020.
 - 9) Yamaguchi I, Takahashi H: Estimating of internal radiation doses due to food consumption and its reduction applying the food regulation after the Fukushima nuclear accident using national food-monitoring data. *Journal of the National Institute of Public Health*, 70(1): 61-75, 2021.
 - 10) 小山内暢, 工藤幸清, 岩岡和輝, 山口一郎, 對馬恵, 齋藤陽子, 細川洋一郎: 福島第一原子力発電所事故に係る食品中の放射性物質に関する現行の基準値の検証—海産物中の規制対象核種による線量への寄与割合に対する仮定の妥当性—. *Radioisotopes*, 66(7): 259-269, 2017.
 - 11) Osanai M, Hirano D, Mitsuhashi S, Kudo K, Hosokawa S, Tsushima M, Iwaoka K, Yamaguchi I, Tsujiguchi T, Hosoda M, Hosokawa Y, Saito Y: Estimation of effect of radiation dose reduction for internal exposure by food regulations under the current criteria for radionuclides in foodstuff in Japan using monitoring results. *Foods*, 10(4): 691, 2021.
 - 12) Osanai M, Noro T, Kimura S, Kudo K, Hosokawa S, Tsushima M, Tsuchiya R, Iwaoka K, Yamaguchi I, Saito Y: Longitudinal verification of post-nuclear accident food regulations in Japan focusing on wild vegetables. *Foods*, 11(8): 1151, 2022.
 - 13) Osanai M, Miura M, Tanaka C, Kudo K, Hosokawa S, Tsushima M, Noro T, Iwaoka K, Hosoda M, Yamaguchi I, Saito Y: Long-term analysis of internal exposure dose-reduction effects by food regulation and food item contribution to dose after the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant accident. *Foods*, 12(6): 1305, 2023.
 - 14) 消費者庁食品と放射能に関する消費者理解増進チーム: 風評に関する消費者意識の実態調査 (第 17 回) 報告書. 令和 6 年 3 月 7 日:
https://www.caa.go.jp/notice/assets/consumer_safety_cms103_2403_07_02.pdf (2025-3-12)
 - 15) 消費者庁. 食品と放射能 Q&A (第 18 版). 令和 6 年 7 月 1 日:
https://www.caa.go.jp/policies/policy/consumer_safety/food_safety_portal/radioactive_substance/assets/consumer_safety_cms203_24_0701_01.pdf (2025-3-12)
 - 16) 沢村正義, 黒岩範久, 栗山敏直, 他: ユズと無核ユズの果実特性について. *日本食品工業学会誌*, 33(11): 773-778, 1986.
 - 17) 野村佳歩, 君羅好史, 山崎優貴, 他: 埼玉県産ゆず果実ホールペーストの成分特徴と機能性. *日本食品保蔵科学会誌*, 47(1): 3-9, 2021.
 - 18) JA 高知県: こうぐり. 2023 12 月号:
<https://ja-kochi.or.jp/root/wp-content/uploads/2023/12/9e1a3d5ce98814c6e535dbdfc73b3516.pdf> (2025-3-12)
 - 19) 日本貿易振興機構: ゆず, 日本産食材ピックアップ, 農林水産物・食品の輸出支援ポータル:
<https://www.jetro.go.jp/agriportal/pickup/yuzu.html> (2025-3-12)
 - 20) 農林水産省: プレスリリース「タイ向け日本産ゆず、きんかんの輸出が解禁! ~日本産かんきつ類の輸出可能品目が拡大しました~」. 令和 7 年 2 月 7 日:
<https://www.maff.go.jp/j/press/syouan/syokubo/attach/pdf/250207-3.pdf>
 - 21) 農林水産省: かんきつ類の果樹, 種類別栽培状況 (都道府県), 令和 3 年産特産果樹生産動態等調査. 令和 6 年 2 月 1 日:
<https://www.e-stat.go.jp/stat-search/files?page=1&layout=datalist&oukei=00500503&tstat=000001020907&cycle=7&year=20210&month=0&tclass1=000001032892&tclass2=000001213907> (2025-3-12)
 - 22) 福島県: 福島県果樹農業振興計画書. 令和 4 年 3 月:
<https://www.pref.fukushima.lg.jp/uploaded/attachment/501307.pdf> (2025-3-12)
 - 23) 農林水産省: 果樹をめぐる情勢. 令和 6 年 10 月:
<https://www.maff.go.jp/j/seisan/ryutu/fruits/attach/pdf/index-184.pdf> (2025-3-12)
 - 24) 浪江町: 令和 3 年度自家消費食品等の放射能簡易分析結果まとめ. 2022 年 4 月 10 日:
<https://warp.ndl.go.jp/info:ndljp/pid/12307202/www.town.namie.fukushima.jp/soshiki/6/30442.html> (2025-3-22)
 - 25) 原子力環境整備促進・資金管理センター: 食品の調理・加工による放射性核種の除去率—我が国の放射性セシウムの除去率データを中心に—. 環境パラメータ・シリーズ 4 増補版 (2013 年). 平成 25 年 12 月改定:
https://www.rwmc.or.jp/library/file/RWMC-TRJ-13001-2_zyokiyoritu_kaitei_honpen.pdf (2025-3-13)
 - 26) 関澤春仁, 山下慎司, 丹治克男, 他: 果実の加工と放射性セシウムの動態. *日本食品科学工学会誌*, 60(12): 718-722, 2013.
 - 27) 渡邊善仁, 遠藤敦史, 南春菜, 他: 果樹の葉及び果実中セシウム 137 濃度の経年変化. 放射線関連支援技術情報:
<https://www.pref.fukushima.lg.jp/uploaded/attachment/438368.pdf> (2025-3-13)
 - 28) 厚生労働省: 月別検査結果. 食品中の放射性物質, 東日本大震災関連情報:
<https://www.mhlw.go.jp/stf/kinkyu/0000045250.html> (2025-3-13)
 - 29) 鍋師裕美, 堤智昭, 植草義徳, 他: 調理による牛肉・山菜類・果実類の放射性セシウム濃度及び総量の変化. *RADIOISOTOPES*, 65(2): 45-58, 2016.
 - 30) 清野嘉之, 赤間亮夫: 日本の山菜 10 種、11 部位のセシウム 137 の食品加工係数と食品加工残存係数: 長期保存のためのレシピが放射性セシウム量を最も減らした. *森林総合研究所研究報告*, 18(4): 369-380, 2019.
 - 31) 桑守豊美, 宮地洋子, 桑守正範, 他: 福島県川内村産食品の放射性セシウム 137 の調理の下処理前の含量および下処理による減少率. *仁愛大学研究紀要人間生活学部篇*, 6: 15-20, 2014.
 - 32) 農林水産省農林水産技術会議事務局: 農地等の放射性物質の除去・低減技術の開発—果樹・茶における放射性物質移行低減対策技術の開発—. プロジェクト研究成果シリーズ 565, 2017 年 3 月
 - 33) 日本アイソトープ協会: アイソトープ手帳 11 版. pp. 63-64, 丸善出版, 東京, 2011.
 - 34) 福島県農林水産部: 放射性物質試験の最新成果情報—ユズの放射性セシウム対策—. *農業技術情報*, 第 27 号, 平成 24 年 5 月 10 日:
<https://www.pref.fukushima.lg.jp/download/1/future-27H240510.pdf> (2025-3-21)
 - 35) 古川純: 土壌から作物へ, セシウムの移行とその要因. *生物工学*, 92: 284-287, 2014.
 - 36) 文部科学省: 食品成分データベース:
<https://fooddb.mext.go.jp/index.pl> (2025-3-22)
 - 37) 厚生労働省: 令和 4 年国民健康・栄養調査報告. 令和 7 年 3 月:
<https://www.mhlw.go.jp/content/001435384.pdf> (2025-3-22)

【Report】

Concentration of radioactive cesium in yuzu citron following the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant accident and its changes with dressings

MINORU OSANAI^{*1} MAYUMI SHIMIZU^{*2} KAZUTAKA TANAKA^{*3}
KOHSEI KUDO^{*1} SHOTA HOSOKAWA^{*1} MEGUMI TSUSHIMA^{*1}
TERUKO HORIUCHI^{*3} RURIKO KIDACHI^{*4}

Received March 27, 2025 ; Accepted July 4, 2025

Abstract: Yuzu citron is a citrus fruit that has long been popular in Japan and, in recent years, exported to several countries. Herein, the radioactive cesium concentrations in yuzu citron were analyzed based on monitoring test results over 10 years from FY2012, when the current standard limits for radioactive materials in food were applied. Furthermore, we measured the cesium concentration in each part of yuzu and evaluated the changes in concentration through dressing preparation as an example of cooking and processing. Radioactive cesium was detected in 45.6% of all yuzu citron samples over the 10-year period. Among them, the median and 95th percentile radioactive cesium concentrations were 12 and 49 Bq/kg, respectively, with a characteristic distribution in the low-concentration range. A decrease trend in concentration was also observed over time. Further, in the actual measurements of this study, the overall cesium concentration in yuzu was 21.0 Bq/kg, with part-specific concentrations of 32.0, 24.8, 14.2, and 13.2 Bq/kg in seeds, rind, segment skin, and juice/pulp, respectively. Moreover, the concentration ratio of the dressing made from juice/pulp to the whole yuzu citron was 0.27. Thus, the concentration was low in the edible portion and decreased significantly through cooking and processing.

Keywords: Radioactive materials in foods, Yuzu citron, Radioactive cesium, Food safety, Risk analysis

【その他（印象記）】

日本放射線影響学会第 67 回大会へ参加した印象記

山中 天聖*1 門前 暁*1,2

2024 年 12 月 17 日受付 2025 年 3 月 18 日受理

要旨：2024 年 9 月，北九州国際会議場で開催された日本放射線影響学会第 67 回大会に，筆者は大学院生として初参加・発表した。本大会は日本放射線事故・災害医学会との合同開催であり，シンポジウムやポスター発表など多様な形式で最先端の研究成果が紹介された。がん治療，放射線防護，災害対応に関する発表では活発な議論が展開され，筆者も自身の研究発表を通じて有意義な意見交換を経験した。また，著名な研究者や若手との交流を通じて多くを学び，放射線生物学への理解を一層深める貴重な機会となった。特に，自身の研究課題の社会的意義や今後の方向性について新たな視点を得られたことは大きな収穫であった。本大会を通じて得られた知見や出会いに感謝し，今後も継続的に学会に参加し，放射線生物学分野への貢献を目指したいと考える。

キーワード：日本放射線影響学会，癌放射線治療，生物学的影響，放射線防護，基礎研究

I. はじめに

2024 年 9 月 25 日から 9 月 28 日にかけて，日本放射線影響学会第 67 回大会が福岡県の北九州国際会議場にて開催され，大学院生である筆者は本学術大会へ初めて参加及び発表した。この「日本放射線影響学会」は，電離放射線が人体や環境に与える影響に関する諸科学の進歩に寄与するとともに，研究者間の連絡と協力を図ることを目的として 1959 年に設立された。以来，67 回目の学術大会となり，本邦の研究者が中心に放射線影響研究の成果を多く報告し続けている。本大会の後半二日間は，第 12 回日本放射線事故・災害医学会との合同大会であった。会場は最寄りの小倉駅から徒歩 3 分ほどの距離にあり，また海岸まで近い北九州国際会議場であった(図 1, 2)。



図 1. 学術大会が開催された北九州国際会議場の建物



図 2. 学術大会会場正面にあるポスターと筆者

本大会では「医療被ばく」，「低線量放射線影響」，「放射線教育」，「原子力・放射線災害対応」の 4 つのテーマが掲げられ，それらを踏まえ「語ろう！放射線-これからの放射線課題のいしずえ-」をスローガンとし，多くの研究者が活発な議論を交わしていた。本稿では，放射線生物学研究に取り組む保健科学分野の学部生，大学院生や若手研究者が，発表や情報収集の場の一つとして参考となるよう筆者らの視点で本学術大会を各日ごとに紹介する。(表 1)。

表 1. 本大会で筆者らが参加したセッション

月/日	形式	時間	セッション名
	—	9:20–9:30	開会式
9/25	AS1	9:35–10:25	放射線応答
	AS2	10:35–11:35	損傷・修復 1
	ランチョンセミナー	11:40–12:50	男女共同参画連携
	AS3	13:00–14:00	損傷・修復 2

*1 弘前大学大学院保健学研究科放射線技術科学領域
Department of Radiation Science, Hirosaki University Graduate School of Health Sciences
〒036-8564 青森県弘前市本町 66-1 TEL:0172-39-5959
66-1, Honcho, Hirosaki, Aomori, 036-8564, Japan
*2 弘前大学生体応答科学研究センター
Research Center for Biomedical Sciences, Hirosaki University
〒036-8564 青森県弘前市本町 66-1 TEL:0172-39-5959
66-1, Honcho, Hirosaki, Aomori, 036-8564, Japan
Correspondence Author monzens@hirosaki-u.ac.jp (Satoru Monzen)

	SY3	15:10–17:10	JRRS, JASTRO 合同企画 放射線治療の現状と生物学的評価
	PS	17:20–18:30	日本放射線影響学会デ ィスカッション
9/26	SY5	9:30–11:30	放射線生物応答を統合 的に理解するための多 彩な生物研究の最前線
	—	14:00–16:30	表彰式・受賞講演
9/27	OS3	9:30–10:30	損傷・修復 2
	WS5	13:00–14:30	ミトコンドリアの変化 は放射線応答にどう影 響するか？
	WS7	16:20–17:40	紫外線生物影響研究の 新たな展開-動物から植 物
	—	18:30–20:30	懇親会
9/28	WS8	13:00–14:30	若い力で推進するゲノ ムストレス研究-放射線 細胞応答研究の未開の 地を目指して-
	—	15:10–15:20	閉会式

※AS; アワードセッション, SY; シンポジウム, PS; ポスターセッション, OS; オーラルセッション, WS; ワークショップ, JRRS; 一般社団法人日本放射線影響学会, JASTRO; 公益社団法人日本放射線腫瘍学会。

II. 学術大会 1 日目 (9 月 25 日)

初日午前において、参加受付を済ませた筆者は、開会式に参加した。大会長の岡崎龍史先生（産業医科大学）のご挨拶を賜り、「大会の 4 つのテーマ・課題を共有して対面での開催、大いに語っていただきたく存じます」というお言葉に鼓舞されながら、続く「アワードセッション 1, 放射線応答」の会場へ移動し、筆者自身の発表に臨んだ。当セッションは筆者を含め 4 演題で構成されていた。多くの大会参加者が会場にいる中、筆者は緊張しながらも、アルファ線が照射された骨芽細胞におけるトランスクリプトーム解析の成果を発表した。その後続く質疑では、座長の他、会場参加者の先生方から質問をいただき、どれも重要な点を指摘され、大変勉強になった（図 3）。

当該セッションが終わると、次は「アワードセッション 2, 損傷・修復 1」へ参加し、放射線による細胞の損傷とその修復による演題が発表されていた。なかでも、DNA 損傷の指標として知られる γ -H2AX を、生体のストレス状態と

疾患リスクの関連性に着目した研究演題が印象深かった。

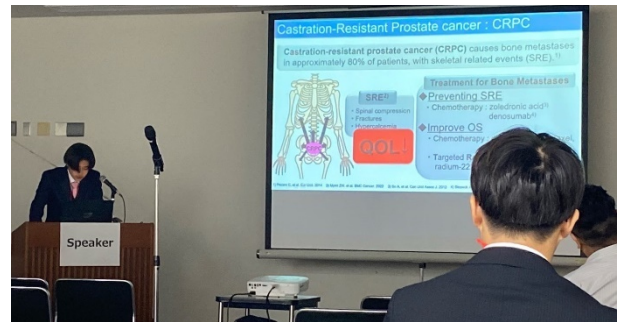


図 3. 筆者の発表の様子

次はランチョンセミナーに参加した。日本放射線影響学会は、男女共同参画学協会連絡会の正式加盟学協会であることから、当セッションはその企画の一つであった。演者は、ご自身が女性であるために苦労した様々な経験を紹介した。また、現在の子育て支援制度のメリットも紹介され、当セッションを通して筆者は、使用できる制度は積極的に利用したいと感じた他、性別に関係なく互いに助け合う柔軟な社会を築く一因である自覚を持ち続けたいとも感じた。

続いて午後は、「アワードセッション 3, 損傷・修復 2」に参加した。このセッションでは、放射線によって生じた DNA 二本鎖切断（Double Strand Break : DSB）を修復する際に必須な特定のタンパクのリン酸化される位置やその機能性に関する研究に取り組む先生からの報告があった。タンパクのリン酸化は、細胞内の分子情報伝達に重要であることを学びつつ、発表された先生方が今後どのように研究を進めていくのか、とても楽しみに感じた。

次に、「シンポジウム 3, 日本放射線影響学会 (JRRS), 日本放射線腫瘍学会 (JASTRO) 合同企画 放射線治療の現状と生物学的評価」のセッションに参加した。国内で活発に活動をされる 2 名の先生より、FLASH 効果に関するご講演があった。FLASH とは超高線量率 (40 [Gy/s] 以上) のことを指し、2014 年に初めて報告されてから、これまで多くの生物効果が国内外から報告されてきた。FLASH は腫瘍へのダメージはそのままに、正常組織へのダメージを軽減する効果が期待される。このメカニズムとして酸素欠乏、ラジカル再結合などが想定されているが、炭素線照射による実験系では不明な点が多く、また、臨床に応用されるには *In Vivo* 実験による知見の蓄積が重要性である。筆者は、放射線治療分野における技術としてとても期待できる分野であると感じた。この他、BNCT や重粒子線治療に関するご講演もあり、教科書で学ぶ以上に興味深い内容だった。

初日の最後は 17:20 からポスター発表のコアタイムがあり、70 を超える演題のもと演者と参加者がポスター前で熱く議論していた（図 4）。当該ポスター会場にて筆者が印象に残った演題に、放射線照射による発癌リスクの上昇に関

する動物実験があった。放射線誘発癌の動物モデルの解析には、近年より高度な技術となってきた遺伝子発現解析や免疫組織化学的解析の他、老化関連因子の解析と、とても複雑かつ巧妙な環境を明らかにしなければならない分野であることを学んだ。



図4 ポスター会場の様子

III. 学術大会2日目(9月26日)

二日目の午前は、「シンポジウム5, 放射線生物応答を統合的に理解するための多彩な生物研究の最前線」を聴講した。DSBはよく知られている放射線による生物影響であるが、修復タンパク群の様々な修飾メカニズムに関する不明な点は未だ多く残っている。当セッションでのご講演された先生方は、放射線による損傷修復経路の選択性、DNAメチル化の関与などのキーワードを飛び交わしながら詳細な内容が講演されていた。また、放射線や熱といった外的ストレスにRNAの領域及び構造が調整され、遺伝子発現の制御に関わる事についても報告されていた。筆者は2024年のノーベル生理学・医学賞の受賞者であるビクター教授らのノンコーディングRNAの一種であるmicroRNAの発見研究に関心を寄せており、今後注目していきたい分野であった。

午後は会員総会や表彰式・受賞講演を聴講した。日本放射線影響学会賞を東京科学大学教授の松本義久先生が「DNA二重鎖切断の認識・修復の分子機構とがん治療への応用を目指した研究」の功績にて受賞され、その講演ではDNA二重鎖切断のセンサーとして機能する「DNA依存性プロテインキナーゼ」がどのように修復に関わるのかについてであった²⁾。本総会で先生の講演を聴講できたことは非常に光栄である。

IV. 学術大会3日目(9月27日)

三日目の午前は、「オーラルセッション3, 損傷・修復2」に参加した。電離放射線性が物質に入射した際、単位距離当たりに物質に与えるエネルギー[keV/μm]を線エネルギー

付与(linear energy transfer: LET)というが、本セッションでは低LET放射線(X線やγ線)と高LET放射線(炭素イオン線やα線)による細胞DNA損傷に対する違いについて、各演題を聴講しながら理解を深めた。その内容の一つに、LETの違いによってその損傷から生じる塩基配列の変位傾向がみられることが報告されており、筆者にとってとても興味深い現象であると感じた。

午後は13:00から開催された「ワークショップ5, ミトコンドリアの変化は放射線応答にどう影響するか?」を聴講した。放射線が照射された細胞では、そのストレスによって主にミトコンドリアから活性酸素種(Reactive Oxygen Species: ROS)が生成され、それに細胞が同応答するかが多くの研究者によって解析が進められている。本セッションでは、ミトコンドリアの基礎的なROS生成メカニズムの解明について、また臨床へ向けた検討など幅広く議論されていた。ROSの応答によって癌細胞の放射線抵抗性が制御されることを説明する演者の先生もいらっしやり、マイクロRNAの発現まで影響を与える内容は大変興味深かった。筆者はミトコンドリアが放射線によって受けるエピジェネティックな影響について今後も注目していきたいと関心がわいた。

学術大会3日目、最後の聴講として、「ワークショップ7, 紫外線生物影響研究の新たな展開-動物から植物に参加した。紫外線によるDNA損傷の修復機構として知られる、ヌクレオチド除去修復について演者からの発表に興味を抱いた。この修復には特定のタンパクが必要であるが、真核生物のゲノムDNAは高度に凝縮していることから、修復タンパクがDNA損傷部位へ効率的にアクセスすることができない。当セッションでは効率的な損傷部位認識を達成するためのメカニズムが説明され議論していた。

日中の活発な議論が終わると、夜は18時30分から懇親会参加の為、会場近くのリーガロイヤルホテルへと移動した(図5)。



図5. 懇親会の様子

以前からお話を伺いたいと思っていた先生や、その研究室の大学院生の皆様、また本学会で初対面となった先生方とお酒を飲みかわしながら交流を深めることができた。フロア内ではジャズの生演奏が披露され、非常にリラックスした雰囲気であった。日中は難しい議論をしていた参加者

らだが、夜は冗談も交えながら垣根の低さを感じ、筆者がこれまで感じたことのない研究環境で大いに親睦を深めることができた。

V. 学術大会 4 日目（9 月 28 日）

大会最終日は、「ワークショップ 8, 若い力で推進するゲノムストレス研究-放射線細胞応答研究の未開の地を目指して-」を聴講した。主に、DSB や癌のイニシエーションについて放射影響の観点から研究が行われていた。一般的に、放射線によって引き起こされる DNA 損傷は、細胞の変異や発がんのリスクが高まるのが放射線疫学あるいは放射線生物学実験にて知見が蓄積されている。しかしながら、それぞれの損傷がどのようにして発がんリスクに関連しているかは不明であった。この問題を本セッションにおいて、放射線が照射された細胞のがん化は、ゲノム不安定性を高める因子の蓄積を介して生じている可能性を実験的に示されていた。総括して、このセッションではこれまでの古典的な経路から、新たな治療に用いられる可能性を示唆する内容の発表もあり主にゲノム領域での放射線影響は今後も関心が高いといえる。

VI. おわりに

筆者にとって、所属グループで過去の発表はあるものの、本学術大会への参加・発表が初めてであり、多くの先生方と意見交換をすることによって自身の成長の糧となった。最新の知見を入手し続けることは研究活動をする上で重要である。また、放射線生物学分野が教科書で学ぶ基礎内容を超えるととても大きな分野であることを思い知らされ、自身の研究領域以外も注目すべき内容ばかりであった。筆者が本稿を寄稿する上で、保健科学分野の大学院生や若手研究者がより多く次の学術大会へ積極的に参加して、多くの意見交換をするべきと強く感じた。

利益相反

開示すべき利益相反はありません。

引用文献

- 1) Weber UA, Scifoni E, Durante M. FLASH radiotherapy with carbon ion beams. Med Phys, 49(3):1974-1992, 2022.
- 2) 一般社団法人日本放射線影響学会ホームページ, 歴代会受賞者. (URL; https://www.jrrs.org/about/winning/winning_gakkai.html) (2025 年 2 月 15 日アクセス)

【Others (conference report)】

Report on the 67th Annual Meeting of Japanese Radiation Research Society

TAKAMASA YAMANAKA^{*1} SATORU MONZEN^{*1, 2}

Received December 17, 2024 ; Accepted March 18, 2025

Abstract: The 67th Annual Meeting of Japanese Radiation Research Society was held at Kitakyushu International Conference Center in Fukuoka prefecture, from September 25 to 28, 2024. The first author participated in this conference meeting as a master course student and had a presentation as author's project report. The conference was jointly held with "the 12th Japanese Association for Radiation Accident / Disaster Medicine." The conference was held in the form of symposiums, award sessions, oral sessions, workshops, and poster sessions. In these sessions, there were many presentations that related to basic research on cancer radiotherapy, radioprotection, radiation epidemiology, and radiation disaster. It was impressive that many participants engaged in active discussions. Authors also had the opportunity to give a presentation and had many opportunities to exchange opinions through discussions. This article explained the content from the perspective of first author and corresponding author. The authors felt that more graduate students and young researchers should actively participate in this conference and exchange many opinions, and continue to contribute to research of radiobiology by actively participating in this scientific conference.

Keywords: Japan Radiation Research Society, Cancer radiotherapy, Biological Effects, Radiation Protection, Basic research.

CONTENTS

【Original article】

Estimation of Prescribed MU and Compensator Thickness for Total Body Irradiation Using the Long SAD Method:
A Study Based on Monte Carlo Simulation

SHINGO TERASHIMA, YUKI NAKANO, FUMIO KOMAI, NAOKI KIMURA 1

Differences in Perceptions and Apprehension Regarding Mental Health Consultation Services
among Nursing Students

CHISAKI SAITO, HARU YAMAZAKI, KENGO TAKIDAI, CHERI YASUNAGA,
HINAKO OYAMA, CHIAKI KITAMIYA 11

Comparison of iterative and deep-learning CT image reconstruction methods for lung fields: A phantom study

RYUNOSUKE SHIBAGAKI, KOHSEI KUDO, MINORU OSANAI, MEGUMI TSUSHIMA,
YUSUKE MINAMIJIMA, RYO SASAKI, TOMOYUKI NARITA, TAKESHI MORITA 17

【Report】

Concentration of radioactive cesium in yuzu citron following the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant accident
and its changes with dressings

MINORU OSANAI, MAYUMI SHIMIZU, KAZUTAKA TANAKA, KOHSEI KUDO, SHOTA HOSOKAWA,
MEGUMI TSUSHIMA, TERUKO HORIUCHI, RURIKO KIDACHI 27

Report on the 67th Annual Meeting of Japanese Radiation Research Society

TAKAMASA YAMANAKA, SATORU MONZEN 35

編集委員（◎は委員長）

◎柳 町 悟 司

柏 崎 勉

奥 野 海良人

中 尾 八重子

三 浦 雅 史

對 馬 恵

三 上 美 咲

松 尾 泉

佐 藤 瑞 穂

菅 原 大 輔

土 屋 涼 子

栗 林 理 人

千 葉 満

保健科学研究 第 16 卷 第 1 号

Journal of Health Science Research Vol.16 No.1

令和 7 年 9 月 30 日 発行（非売品）

編集・発行 保健科学研究編集委員会

〒036-8564 弘前市本町 66 番地 1

電話 0172 (39)5948 Fax 0172 (39) 5948
