

令和 6 年 6 月 12 日現在

機関番号：11301

研究種目：若手研究

研究期間：2021～2023

課題番号：21K15819

研究課題名(和文) インターベンション・ラジオロジーで受ける胎児の被曝線量に関する基礎研究

研究課題名(英文) Basic study on fetal radiation dose received in interventional radiology

研究代表者

松永 雄太 (Matsunaga, Yuta)

東北大学・医学系研究科・大学院非常勤講師

研究者番号：30803019

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円

研究成果の概要(和文)：妊婦が画像下治療(インターベンション・ラジオロジー：IVR)を受けた際における胎児の被曝線量評価を行った。

本研究では、妊婦の下大静脈フィルタ留置中に行われるIVRを想定し、被曝線量について放射線測定機器を使った実測と線量シミュレーションソフトを使ったシミュレーション結果を比較し、精度を確認した。

シミュレーションソフトの結果は胎児の位置が撮影範囲に含まれる範囲に注意が必要であるが、高価な放射線測定器やファントムを持たなくても、シミュレーションソフトにIVR中の撮影条件を入力することで各臓器の線量推定が可能であると言えた。臨床現場でも胎児の被曝線量の推定に活用できると期待している。

研究成果の学術的意義や社会的意義

妊婦の救急疾患に静脈血栓塞栓症がある。妊娠時の静脈血栓塞栓症の発生率は非妊娠時に比べて4-6倍高いと報告されており、本邦での周産期死亡の第3位である。致命的な肺塞栓症を防ぐために、IVRによる下大静脈フィルタを留置することがある。しかし、胎芽・胎児は子供や成人に比べ放射線の影響を受けやすいので、IVRによる被曝が心配される。特に、フィルタを留置する位置は胎児の位置に近いので下大静脈フィルタを留置する時の胎児線量を知ることは重要であると言える。しかし、今までに妊婦の下大静脈フィルタ留置時のシミュレーション結果の精度を確認した研究はなかった。

研究成果の概要(英文)：We evaluated fetal radiation doses to pregnant women undergoing interventional radiology (IVR).

In this study, we assumed that IVR was performed while an inferior vena cava filter was implanted in a pregnant woman, and compared the results of actual measurements using radiation measurement equipment and simulation results using dose simulation software to confirm the accuracy of the radiation doses.

Although the results of the simulation software require attention to the range in which the position of the fetus is included in the imaging range, it is possible to estimate the dose to each organ by inputting the imaging conditions during IVR into the simulation software without expensive radiation measuring instruments or phantoms. We expect that the software can be used to estimate fetal radiation doses in clinical practice.

研究分野：放射線技術学

キーワード：胎児線量 妊婦ファントム 被曝 線量計算ソフトウェア アンギオグラフィ

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

以前より妊婦の頭蓋内出血に関する疫学的調査は多く、一般的にクモ膜下出血は妊娠 10,000 例に対して約 1 例発症し、その内 50-70% が破裂脳動脈瘤が原因と言われている。破裂脳動脈瘤は死亡を来たしてしまう生命予後不良の疾患で早期の診断・治療が求められる。診断には X 線を使った頭部 CT 検査や脳血管撮影が有用で、治療では X 線透視下でコイルによる動脈瘤の塞栓術が行われている。また、静脈血栓塞栓症は周産期に発症しやすいことが知られている。妊娠時の静脈血栓塞栓症の発生率は非妊娠時に比べて 4-6 倍高いと報告されており、本邦での周産期死亡の第 3 位である。静脈血栓塞栓症の診断・治療にも X 線透視下で行われる。

上記のように妊婦の救急疾患に対して、血管造影検査や X 線透視を使った画像下治療(インターベンション・ラジオロジー: IVR)は妊婦の命を救うために重要な手段である。しかし、胎芽・胎児は子供や成人に比べ放射線の影響を受けやすく、被曝時期や被曝線量によって胎芽・胎児死亡(流産)、外表・内臓奇形、発育遅延、精神遅滞、悪性腫瘍、遺伝的影響などが心配されることもあり、今まで妊婦のルーチンによる放射線検査は行われてこなかった。X 線透視下で行われる IVR には被曝の問題は当然、避けられない。胎児や妊婦が受ける被曝線量を正確に把握し、被曝低減に努めることは妊婦に安心して検査・治療を受けてもらうために重要なことである。現在、検査・治療中の撮影条件を入力することで各臓器の線量推定が可能な線量計算ソフトが開発されており、妊婦や胎児の被曝線量管理を線量計算ソフトで行うことがある。しかし、IVR での妊婦・胎児に対する線量計算ソフトの推定結果の精度は確認されていない。実際に測定した結果とソフトで線量推定した結果の精度を確認することで線量計算ソフトを臨床現場でも被曝線量の推定に活用できる。

2. 研究の目的

(1) 本研究の目的は線量計算ソフトの推定結果をファントムによる実測結果と比較し、線量計算ソフトの精度を確認すること。

(2) IVR 透視装置に表示される面積線量(以下、DAP)から胎児と妊婦の実効線量を算出する換算係数を得ること。

3. 研究の方法

(1) 実測と線量計算ソフトの推定結果の比較

実測における使用したアンギオ装置はモノプレーンシステムの Innova IGS630 (GE ヘルスケア社製)で、撮影条件を表 1 に示す。撮影条件は臨床現場で実際に成人の下大静脈フィルタ留置時の条件を参考にした。管電圧、管電流、パルス幅、フィルタはアンギオ装置によって自動的に調整された。市販の成人人体ファントム (Alderson Rando phantom) と、2018 年度における科学研究費助成事業(学術研究助成基金助成金 課題番号: 19K17223)にて設計・開発した腹部ファントム(京都科学株式会社、日本、京都)を組みあわせることで妊娠を模擬した妊娠モデルファントムとした(図 1)。また、この妊娠モデルファントムは腹囲の大きさを 2 種類に変更が可能である¹。この 2 種類のファントムの腹囲は、妊娠中期、妊娠後期の妊婦の腹囲の大きさにそれぞれほぼ対応した(80cm および 95cm)。以下、これらのファントムをそれぞれ Small ファントムおよび Large ファントムとする。両腹部ファントムには線量計を埋め込むための穴が設けられているので、光ケーブル式リアルタイム線量計(RD 1000; トーレック株式会社、以下 RTD)を配置し、表 1 の撮影条件にて照射し、胎児線量を測定した。胎児線量用の RTD は、Small および Large ファントムの臍の高さに埋め込んだ。妊婦の入射表面線量(以下、ESD)測定用の RTD は、Small および Large ファントムの入射面に設置した。各測定はランダム誤差を減らすために 3 回ずつ行った。なお、測定にあたり RTD は各管電圧に対する校正を計量法認定事業者制度 (Japan Calibration Service System: JCSS) のトレーサビリティ体系に準拠した特定二次標準器と校正された 6 cm³ の指頭型電離箱(10×5-6, Radcal Corporation)、電離箱線量計(9015, Radcal Corporation)

を用いて行った。電離箱線量計と RTD は、X 線焦点から等距離の照射野内で互いに隣接する空气中に自由に設置した。この校正手順で補正係数を決定した。

線量計算ソフトの推定は、VirtualDose-IR(Virtual Phantoms Inc)を用いて、妊娠 6 ヶ月と 9 ヶ月の妊婦の ESD と胎児線量を評価した。この線量計算ソフトで選択可能な管電圧は 70、80、90 kV であったため、妊娠 6 ヶ月と 9 ヶ月の妊婦の推定値はそれぞれ 80、90 kV を選択し推定を行った。管電圧の除いた他の条件は、実測で Small および Large のファントムに用いたものと同じとした(表 1)。この計算で使用したビーム方向は実測と同一で後-前方向であった。線量計算ソフトは線量計算のための装置出力測定値として DAP を使用した。

(2)IVR 透視装置に表示される DAP から胎児と妊婦の実効線量を算出する換算係数

妊婦の実効線量の算出は VirtualDose-IR の臓器線量の結果を用いて行われた。この研究では、実効線量は女性臓器のみを用いて導き出した。ただし、国際放射線防護委員会 (ICRP) の勧告²では、平均的な男女患者の実効線量を定義しているが、ICRP は、特に、使用したリスクファクターが基準となる成人集団の平均値であることから、実効線量を個々の患者に適用しないとしている。つまり、この研究で導き出された実効線量は、実際の実効線量の近似値であることに注意する必要がある。なお、胎児の実効線量は VirtualDose-IR で算出された fetal total で代用した。

4 . 研究成果

(1)実測と線量計算ソフトの推定結果の比較

表 2 と 3 は、実測値と線量計算ソフトの値の胎児線量と ESD の比較である。妊娠 6 ヶ月の胎児線量と ESD の値は、実測値に基づいて得られた値と比較して、ソフトウェアベースの値ではそれぞれ 0.84 と 0.87 低かった(表 2)。しかし、9 ヶ月では、実測値と比較して、線量計算ソフトを用いた場合、胎児線量と ESD 値がそれぞれ 0.52 と 0.83 低かった(表 3)。

線量計算ソフトを用いて妊娠 6 ヶ月で得られた胎児線量と ESD の値は、実測値とほぼ同程度であった。同様に、線量計算ソフトを用いた妊娠 9 ヶ月の ESD 値は、実測値と同程度であった。しかし、妊娠 9 ヶ月の胎児線量は、線量計算ソフトを使用した際に実測値と比較して 0.52 と低かった。この違いは、実測と線量計算ソフト使用時の胎児の大きさの違いに関連している。実測の場合、妊娠 6 ヶ月と 9 ヶ月の胎児の大きさの想定は、ほとんど照射野内であった。線量計算ソフトを使用した場合、妊娠 6 ヶ月の胎児の大きさはほぼ照射野内であったが、妊娠 9 ヶ月では胎児の体の一部が照射野外となった。以前の研究³では、VirtualDose-IR ソフトで得られた値を実測値と比較した場合、成人の臓器線量誤差は 30%以内であった。その差が最も大きかったのは、照射野外にある比較的低い線量を受けた臓器であった。照射野外の線量は照射野内の線量より有意に低い。そのため、線量計算ソフトで求めた妊娠 9 ヶ月の胎児線量は、実測の胎児線量よりも低くなった。VirtualDose-IR のような線量計算ソフトを用いて胎児線量を評価する場合、過小評価や過大評価を防ぐために、胎児の体長が照射野内にどれだけ含まれるかに注意する必要がある。

(2)IVR 透視装置に表示される DAP から胎児と妊婦の実効線量を算出する換算係数

妊婦実効線量(mSv)と胎児線量 (mGy) をそれぞれ DAP (mGy・cm²) との比を表 4 と表 5 に示す妊婦実効線量と DAP の比はそれぞれ 7.39×10^{-5} および 7.55×10^{-5} であった。また、胎児線量と DAP の比はそれぞれ 1.25×10^{-4} および 1.02×10^{-4} であった。

いくつかの研究では、空気カーマ値と最大皮膚線量の間に関連関係があると報告している^{4,5}。DAP も経皮的 IVR 手技における最大皮膚線量の指標となる。臨床現場では、空気カーマ値や DAP から最大皮膚線量を推定することができる。しかし、空気カーマ値や DAP あるいは実測値を用いて体内の胎児線量を含む臓器別線量を推定することは困難である。理由として本研究の妊婦と 9 ヶ月の胎児は全身被曝でなく、部分被曝であることが挙げられる。照射野に含まれる臓器の体積または胎児の体積によって妊婦の実効線量と胎児線量は大きく変わってくる。

表 4 と表 5 において、6 ヶ月の胎児は全身被曝のため換算係数による線量推定の可能性があるが、妊婦自身と9 ヶ月の胎児は部分被曝のため、DAP から妊婦の実効線量や胎児線量を推定することは、臨床現場では個人の体格差や解剖学的位置の違いによって照射野に含まれる臓器または胎児の体積が変化する。今後、更なる検討が必要である。

(3)まとめ

線量計算ソフトの推定結果をファントムによる実測結果と比較し、線量計算ソフトの精度を確認した。実測と線量計算ソフト使用時の胎児の大きさの違いは線量結果に関連しており、線量計算ソフトを用いて胎児線量を評価する場合、過小評価や過大評価を防ぐために、胎児の体長が照射野内にどれだけ含まれるかに注意する必要がある。上記を踏まえ、線量計算ソフトを臨床現場でも被曝線量の推定に活用できると期待している。

妊娠6 ヶ月の胎児は全身被曝のため換算係数による線量推定の可能性があるが、妊婦自身と9 ヶ月の胎児は部分被曝になる可能性があるため、IVR 透視装置に表示される DAP から胎児と妊婦の実効線量を算出する換算係数を得るには更なる検討が必要である。

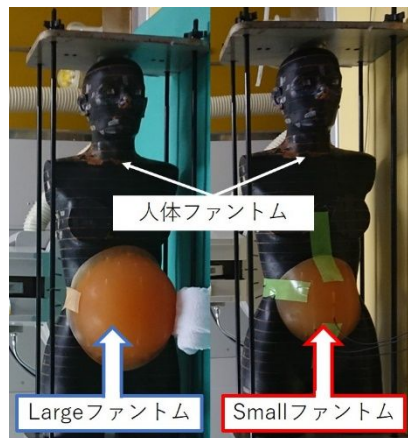


図1 妊婦のモデルファントム

表1 実測時における撮影条件

	Small ファントム	Large ファントム
管電圧(kV)	84	97
管電流(mA)	317.2	283
パルス幅(ms)	64	90
フィルタ(mmCu)	0.1	0.1
DAP (cGy cm ²)	1906.5	1850.5
ビーム方向	後から前	後から前

Matsunaga, Y., Haba, T., Kobayashi, M., Suzuki, S., Asada, Y. and Chida, K. Evaluation of radiation dose for inferior vena cava filter placement during pregnancy: a comparison of dosimetry and dose calculation software. J. Appl. Clin. Med. Phys. 24(2), e13884 (2023). より引用し、一部改変

表2 Small ファントムの実測値と線量計算ソフトから推定した胎児線量(妊娠6ヶ月)とESDの比較

	妊娠6ヶ月 線量計算ソフト(mGy)	Small ファントム 実測(mGy)	比較
胎児線量	2.39	2.84	0.84
妊婦のESD	98.64	113.37	0.87

Matsunaga, Y., Haba, T., Kobayashi, M., Suzuki, S., Asada, Y. and Chida, K. Evaluation of radiation dose for inferior vena cava filter placement during pregnancy: a comparison of dosimetry and dose calculation software. J. Appl. Clin. Med. Phys. 24(2), e13884 (2023). より引用し、一部改変

表3 Large ファントムの実測値と線量計算ソフトから推定した胎児線量(妊娠9ヶ月)とESDの比較

	妊娠9ヶ月 線量計算ソフト(mGy)	Large ファントム 実測(mGy)	比較
胎児線量	1.89	3.63	0.52
妊婦のESD	102.05	122.62	0.83

Matsunaga, Y., Haba, T., Kobayashi, M., Suzuki, S., Asada, Y. and Chida, K. Evaluation of radiation dose for inferior vena cava filter placement during pregnancy: a comparison of dosimetry and dose calculation software. J. Appl. Clin. Med. Phys. 24(2), e13884 (2023). より引用し、一部改変

表4 妊婦実効線量(mSv)とのDAP (mGy・cm²)の比

	DAP(mGy・cm ²)	妊婦実効線量(mSv)	妊婦実効線量/DAP
妊娠6ヶ月	19065	1.41	7.39×10 ⁻⁵
妊娠9ヶ月	18505	1.40	7.55×10 ⁻⁵

表5 胎児線量(mGy)とのDAP (mGy・cm²)の比

	DAP(mGy・cm ²)	胎児線量(mGy)	胎児線量/DAP
妊娠6ヶ月	19065	2.39	1.25×10 ⁻⁴
妊娠9ヶ月	18505	1.89	1.02×10 ⁻⁴

参考文献

1. Matsunaga, Y., Haba, T., Kobayashi, M., Suzuki, S., Asada, Y. and Chida, K. Novel pregnant model phantoms for measurement of foetal radiation dose in x-ray examinations. J. Radiol. Prot. 41(3), N12-N21 (2021).
2. The International Commission on Radiological Protection. The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 103 2007.
3. Huo W, Pi Y, Feng M, et al. VirtualDose-IR: A cloud-based software for reporting organ doses in interventional radiology. Phys Med Biol. 2019;64(9).
4. Chida K, Kagaya Y, Saito H, et al. Total entrance skin dose: an effective indicator of maximum radiation dose to the skin during percutaneous coronary intervention. AJR Am J Roentgenol. 2007;189(4):224-227
5. Neil S, Padgham C, Martin CJ. A study of the relationship between peak skin dose and cumulative air kerma in interventional neuroradiology and cardiology. J Radiol Prot. 2010;30(4):65-9672.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Matsunaga Yuta, Haba Tomonobu, Kobayashi Masanao, Suzuki Shoichi, Asada Yasuki, Chida Koichi	4. 巻 24
2. 論文標題 Evaluation of radiation dose for inferior vena cava filter placement during pregnancy: A comparison of dosimetry and dose calculation software	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Applied Clinical Medical Physics	6. 最初と最後の頁 e13884
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1002/acm2.13884	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Matsunaga Yuta, Haba Tomonobu, Kobayashi Masanao, Suzuki Shoichi, Asada Yasuki, Chida Koichi	4. 巻 41
2. 論文標題 Novel pregnant model phantoms for measurement of foetal radiation dose in x-ray examinations	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Radiological Protection	6. 最初と最後の頁 N12 ~ N21
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1088/1361-6498/ac125c	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Matsunaga Yuta, Haba Tomonobu, Kobayashi Masanao, Suzuki Shoichi, Asada Yasuki, Chida Koichi	4. 巻 200
2. 論文標題 Assessment of fetal radiation exposure in pregnant women undergoing computed tomography and rotational angiography examinations for pelvic trauma	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Radiation Protection Dosimetry	6. 最初と最後の頁 580 ~ 587
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1093/rpd/ncae058	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 2件/うち国際学会 0件）

1. 発表者名 松永雄太
2. 発表標題 水晶体被ばくに関わる法令改正の動向と測定技術
3. 学会等名 CCRT2022 第14回中部放射線医療技術学術大会（招待講演）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 松永雄太
2. 発表標題 医療被ばくにおける実効線量の正しい使い方
3. 学会等名 第3回 放射線影響と防護量の考え方を学ぶWebセミナー（招待講演）
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関