

MAGNETOM Flash

翻訳版

vol.29

[siemens.com/magnetom-world](https://www.siemens.com/magnetom-world)

Page 3

MAGNETOM Flow を選択

Henrik Michaely, M.D.

Page 8

MAGNETOM Flow：新しいワークフロー、
新しい機会

Markus Kopp, M.D.

Page 12

MRI の未来を築く：Mass General Brigham の
高効率外来施設における
ワークフローの最適化と患者中心の設計

*Alexander Herold; Helen L. Piltner; Arhaan
Gupta-Rastogi; Barbara D. Wichtmann, et al.*

Page 17

0.55T での低磁場筋骨格 MRI の可能性
を探る：大型金属インプラントを持つ
患者における予備調査結果

*Hanns-Christian Breit, M.D.; Jan
Vosshenrich, M.D., et al.*

Page 22

Expert Insights: Siemens Healthineers
アプリケーションスペシャリストによる
隠れた逸品

Tricia Thompson

Page 26

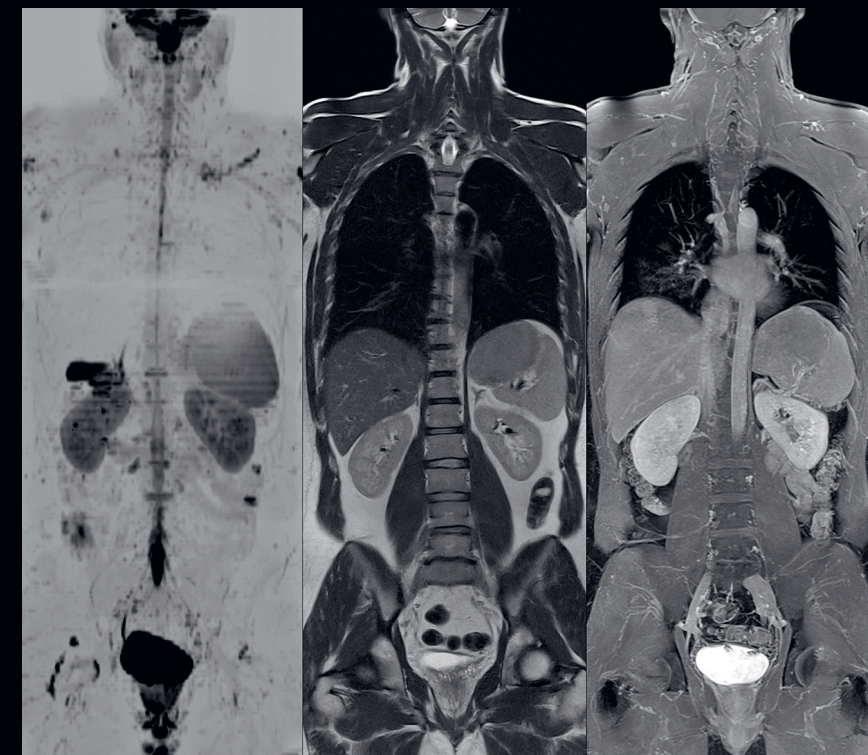
次世代心臓 MRI：複雑な心臓 MRI 検査を
簡便にする AutoMate Cardiac

*Seung Su Yoon; Michaela Schmidt;
Manuela Rick, et al.*

Page 32

深部静脈血栓症における非造影 MR Black-Blood イメージング

Xinyu Wang, M.D.; Yuehong Liu, M.D., et al.



Translated from English to Japanese by Siemens Healthcare K.K. in Japan.

超電導磁石式全身用 MR 装置

MAGNETOM フリー マックス／フリー スター
認証番号：303AABZX00069000

MAGNETOM フロー
認証番号：306AABZX00051000

MAGNETOM シーマ エックス
認証番号：305AABZX00070000

MAGNETOM ヴィーダ
認証番号：229AABZX00082000

MAGNETOM スカイラ
認証番号：222AABZX00033000

MAGNETOM プリズマ
認証番号：225AABZX00152000

MAGNETOM アバント
認証番号：21900BZX00138000

クラス分類：管理医療機器（クラス II）
特定保守管理医療機器：該当
設置管理医療機器：該当

製造販売業者
シーメンスヘルスケア株式会社
〒141-8644
東京都品川区大崎 1-11-1
ゲートシティ大崎ウエストタワー

本冊子に関するお問合せは、下記電話
番号までお願いいたします。
TEL 03-3493-7500

仕様は予告なく変更する場合がありますのでご了承ください。なお、本冊子にはオプションが含まれています。詳しくは担当営業におたずねください。

25021A(2504GPJ3K)

SIEMENS
Healthineers

Contents

3 MAGNETOM Flow を選択

| |
|-----------------------------------|
| Henrik Michaely, M.D. |
| MVZ Radiologie Karlsruhe, Germany |

12 MRIの未来を築く:Mass General Brighamの高効率外来施設におけるワークフローの最適化と患者中心の設計

| |
|---|
| Alexander Herold ^{1,2} ; Helen L. Piltner ^{1,3} ; Arhaan Gupta-Rastogi ¹ ; Barbara D. Wichtmann ⁴ ; Wei-Ching Lo ³ ; Azadeh Tabari ¹ ; Andrew Sharp ¹ ; Sean P. Hartmann ¹ ; Lauren Melski ¹ ; Jeremy Herrington ¹ ; Shivraman Giri ³ ; Waqas Majeed ³ ; Jens Guehring ³ ; Onofrio A. Catalano ¹ ; James A. Brink ¹ ; Oleg Pianykh ¹ ; Mukesh Harisinghani ¹ ; Jad S. Hussein ¹ ; Min Lang ¹ ; Susie Y. Huang ¹ |
| ¹ Department of Radiology, Massachusetts General Hospital, Boston, MA, USA |
| ² Department of Biomedical Imaging and Image-guided Therapy, Medical University of Vienna, Austria |
| ³ Siemens Healthineers, Boston, MA, USA |
| ⁴ Department of Neuroradiology, University Hospital Bonn, Germany |

22 Expert Insights: Siemens Healthineers アプリケーションスペシャリストによる隠れた逸品

| |
|---------------------------------------|
| Tricia Thompson |
| Siemens Healthcare Pty Ltd. Australia |

32 深部静脈血栓症における非造影MR Black-Blood イメージング

| |
|--|
| Xinyu Wang, M.D. ¹ ; Yuehong Liu, M.D. ¹ ; Yichen Tang, M.D. ¹ ; Chen Zhang, Ph.D. ² ; Alto Stemmer ³ ; Qi Yang, M.D., Ph.D. ^{1,4,5} |
| ¹ Department of Radiology, Beijing Chao-yang Hospital, Capital Medical University, Beijing, China |
| ² MR Research Collaboration, Siemens Healthineers, Beijing, China |
| ³ Siemens Healthineers, Erlangen, Germany |
| ⁴ Laboratory for Clinical Medicine, Capital Medical University, Beijing, China |
| ⁵ Key Laboratory of Medical Engineering for Cardiovascular Disease, Ministry of Education, Beijing, China |

8 MAGNETOM Flow:新しいワークフロー、新しい機会

| |
|--|
| Markus Kopp, M.D. |
| Institute of Radiology, Universitätsklinikum Erlangen, Germany |

17 0.55T での低磁場筋骨格 MRI の可能性を探る: 大型金属インプラントを持つ患者における予備調査結果

| |
|--|
| Hanns-Christian Breit, M.D. ¹ ; Jan Vosschenrich, M.D. ¹ ; Martin Clauss, M.D. ^{2,3} ; Markus M. Obmann, M.D. ¹ ; Michael Bach, Ph.D. ¹ ; Dorothee Harder, M.D. ¹ ; Ricardo Donners, M.D. ¹ |
| ¹ Department of Radiology, University Hospital Basel, University of Basel, Switzerland |
| ² Center for Musculoskeletal Infections, University Hospital Basel, University of Basel, Switzerland |
| ³ Department for Orthopedics and Trauma Surgery, University Hospital Basel, University of Basel, Switzerland |

26 次世代心臓MRI:複雑な心臓MRI検査を簡便にする AutoMate Cardiac

| |
|---|
| Seung Su Yoon; Michaela Schmidt; Manuela Rick; Dominik Rupp; Miriam Van de Stadt-Lagemaat; Jens Wetzl |
| Siemens Healthineers, Erlangen, Germany |

MAGNETOM Flow を選択

| |
|-----------------------------------|
| Henrik Michaely, M.D. |
| MVZ Radiologie Karlsruhe, Germany |

MVZ Radiologie Karlsruhe は、ドイツの Karlsruhe にある中規模の放射線科である。5 台の 1.5T MRI 装置、2 台の CT 装置、X 線撮像、マンモグラフィ、超音波検査を備え、13 人の医師が所属し、年間 6 万人の患者に対して約 10 万件の検査を行っている。診療のワークフローは、効率性、画質、画像解析を向上させる人工知能システムを活用し完全にデジタル化・標準化されている。複数のフロアにすべての設備をコンパクトに設置したこの施設は、フル稼働しており、これ以上の増設はできない(図 1)。

そこで 5 年前に、Karlsruhe の本院とは別の土地に、MVZ Radiologie Karlsruhe Privat を独立した施設として開設した。この新しい施設の主な要件は、第一に都市の中心部に位置し、アクセスしやすい場所で、1 台または 2 台の MRI 装置を設置するため十分なスペースと構造上の前提条件が整っていることであった。2 つ目は、高品質の技術設備を整備し、筋骨格系 (MSK)

放射線検査から前立腺 MRI、心臓検査に至るまで最高品質の診療サービスを提供できること。そして 3 つ目は、一般的な診療所とは異なる雰囲気であることである。

これらすべての基準を満たす施設を見つけることは、過去 4 年間にわたって困難を極め、その過程では数多くの挫折があった。Karlsruhe とその周辺の 7 つの場所を綿密に評価したが、最終的にはさまざまな理由ですべて却下された。主な問題は、クエンチパイプの設置が建物の構造、周囲の建物、また既存のテナントと相容れないことだった。例えば、クエンチパイプを設置すると、上の階の窓を自由に開けられなくなるということもあった。さらに、他の建物との距離を最小限にすることが要求されたが、それは時として望ましくないか、単に不可能な場合もあった。構造上の耐荷重不足が却下の決定的要因になったケースはそれほど多くはなかった。



1 ドイツの Karlsruhe にある MVZ Radiologie Karlsruhe の中心施設。MRI 装置 5 台、CT 装置 2 台、従来の X 線装置を備えている。建物は満杯で、この施設でのさらなる装置の増設は不可能である。



2 Ettlingen の古い兵舎にある新しい施設 MVZ Radiology Karlsruhe Privat

私たちが選んだ場所は、Karlsruhe 郊外に位置し、高速道路へのアクセスも良い Ettlingen の古い兵舎（図 2）だった。

19 世紀から 20 世紀にかけて建設された、この古い兵舎は、当初はドイツ軍が使用し、第二次世界大戦後はアメリカ軍に使用された。アメリカ軍が去って以来、この建物は文化遺産として保護されており、急冷パイプを追加するなど外観に変更を加えることは法的に禁じられていた。外観の変更が許可されないことは、MRI 装置を搬入するための搬入口の問題も重要で、既存の窓しかアクセスとして使用できなかった。当時、この兵舎の 1 階のこの場所に、MRI 装置を設置することは不可能だった。

現場調査の過程で、クエンチパイプが不要で、構造的な荷重負荷が最小限の MRI 装置が、当初の要件に最適であることが明らかになった。永久磁石 MRI 装置も検討したが、画質が悪く、重量が重すぎるため却下した。このジレンマの解決策は、Siemens Healthineers との極秘の話し合いの中で浮かび上がった。Siemens 社は、クエンチパイプを使用しないヘリウムフリーシステムの発売が間近に迫っていることを明らかにした。この

情報をもとに、Ettlingen の旧兵舎内にある希望の場所を再検討した。既存の窓は新しいシステムの搬入に十分であり、わずかな構造補強を行えば建物の耐荷重は十分であると判断した。クエンチパイプが不要なため、文化遺産保護の問題が解消し、MRI 装置 MAGNETOM Flow の設置が決定した。調査を開始し、希望する MRI の要件が決定して以来、MRI の撮像と画像再構成において人工知能によるスループットと画質の著しい進歩があった。そのため、MRI 装置は 1 つだけで十分という結論に至った。2 台目の MRI 装置を置く予定であった空きスペースには、Siemens Healthineers の新しい二管球 CT である SOMATOM Pro.Pulse が割り当てられた。これは、診断能力を拡大し、施設の技術的卓越性への取り組みに適合していた。

MRI 装置、CT 装置、鉛シールドの重量を分散させるため、鉄骨と床板で部屋を補強した後、旧兵舎にある既存の窓から、2 台の主要装置は無事に設置された（図 3）。CT の設置は 2 週間、MRI の設置は 4 週間で完了し、搬入、設置、試運転中に大きな問題はなかった。

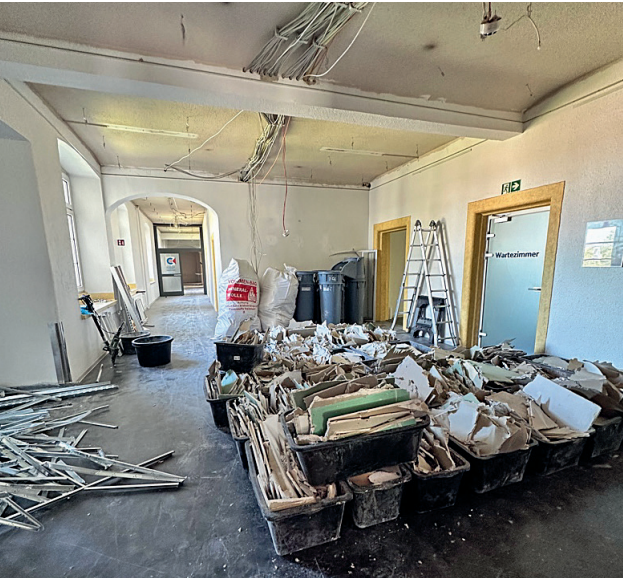


3 外壁を通して1階にMRIとCT装置を搬入している。

MRI は問題なく現場に搬入された。この工事中に、旧兵舎内の残りのレンタルスペースも最新の技術水準にアップグレードされ、専属の個人診療所として使用できるようになった。

約 5 カ月にわたる大規模な解体工事（約 30 トンの瓦礫が撤去された）（図 4）、徹底的な再建、構造補強、主要機器の設置・試運転を経て、新しい診療所は 2024 年 6 月上旬にソフトオープンした（図 5）。この期間中、Siemens Healthineers 社により、当院スタッフの CT および MRI 装置に関するトレーニングが行われた。

MRI 装置を選んだ決定的な理由は、"ヘリウムフリー"で運用できることだった。さらに、開院当初から期待するワークフローが実現可能で、かつ質の高い医療成果を達成するためのシステム構成も重要視した。被検者の快適性も優先事項の1つであった。例えば、新しい BioMatrix contour coils は、被検者にとって快適で解剖学的に適応したコイルセッティングができる。この新しいコイルは、この施設で行う予定の様々な検査において、スタッフが扱いやすい仕様となっている。最も重要な進歩は、検査の質を向上させる自動位置決め、myExam Autopilot テクノロジーを使用した検査の完全自動化、Deep Resolve Boost による画質の向上とスキャン時間の大幅な短縮など、撮像と画像再構成における人工知能の活用である。画質の向上は、MSK や骨盤部（前立腺や女性骨盤など）の MRI 検査において顕著であり、画質



4 解体中の新しい施設。

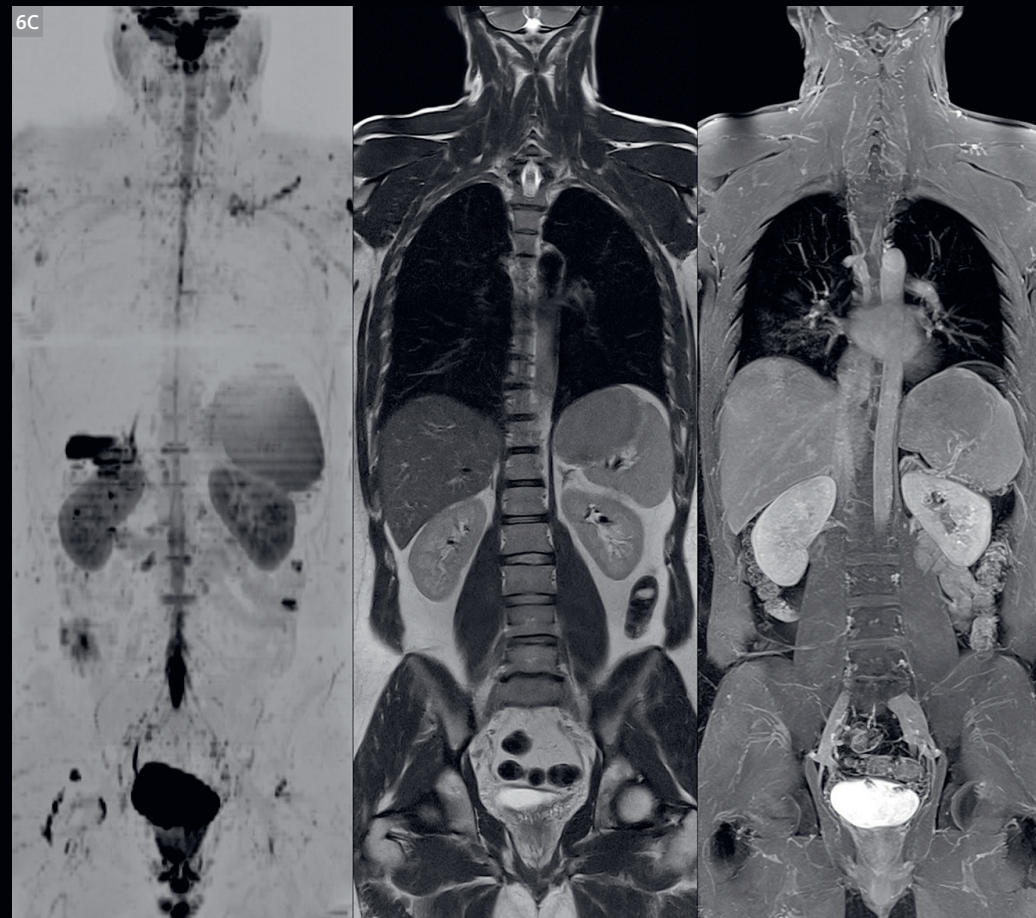
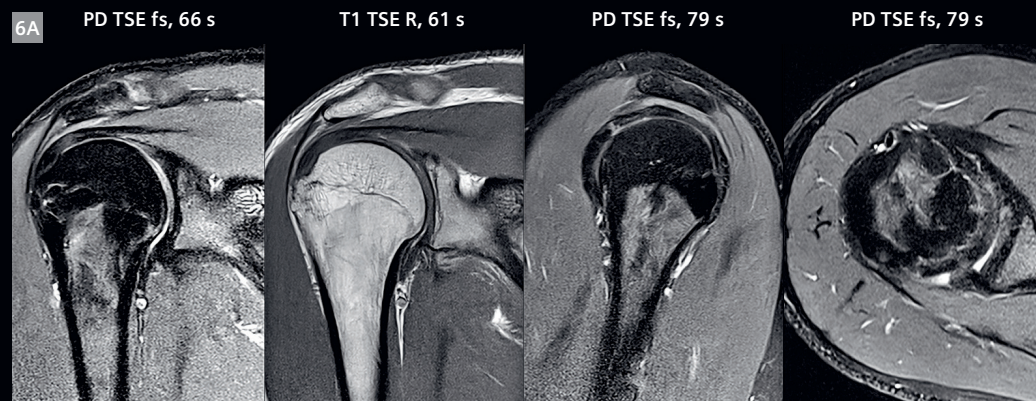
を向上させながら撮像時間を 50% 以上短縮している（図 6）。当施設では、関節の標準シーケンス（脂肪抑制を併用したプロトン密度強調 TSE（PD TSE）の 3 断面、脂肪抑制をしない T1 強調 TSE を 3mm のスライス厚で 6 分以内に撮像しなければならないが、膝、肩、肘、足ではすでに高画質の画像を達成している。改装された旧兵舎の独特な雰囲気と、非常に短い検査時間、そしてこれまでにない快適さを、来院者は高く評価している。こうした迅速な検査と高い快適性が好評を博し、現在ではフォローアップ検査の予約時に、明確にリクエストされるようになっていいる。紹介先の同僚医師も、被検者からの肯定的なフィードバックと優れた画質を認識している。

スピードと使いやすさの向上は、特に心臓 MRI で顕著である。現在、心臓 MRI 検査の所要時間は約 30 分で、1 週間当たりの心臓 MRI 検査件数は 3 倍に増加している。BioMatrix Beat Sensor を含む MAGNETOM Flow の簡単な操作性がなければ、こうした心臓 MRI 検査数の変化はスタッフにも受け入れられなかっただろう。

心臓 MRI 検査は、かつては主に経験豊富な放射線技師によって実施されていたが、現在では経験の浅い技師や医療助手でも十分に実施できるようになり、さまざまなトレーニングレベルのスタッフがこの装置を使用できるようになった。検査のサポー



5 オープン後の新施設（図4と同じ眺め）



6 (6A) 肩関節MRI (空間分解能 $0.3 \times 0.3 \times 3.0 \text{ mm}^3$ 、総撮像時間4分45秒)。(6B) 右の人工股関節置換術を受けた被検者の前立腺MRI。左の先端部の腫瘍はT2 TSE、特にDWI b1400 s/mm^2 (calculated) の画像でよく見える。(6C) 腫瘍の病期分類。b800 s/mm^2 のDWI のCoronal 再構成Inverted表示 (Axical 断面で3回撮像)、HASTE Coronal 画像の2ステップcomposing画像、造影後Dixon VIBEのthin-MIP Coronal 画像の合成画像。

トによりスタッフの負担を軽減するような、さらなる自動化を期待しているが、それによってスタッフが不要になることは絶対ではない。マンモグラフィを除くMRI 撮像の全領域をカバーするMAGNETOM Flow の最初の臨床経験は、圧倒的に肯定的なものだった。MAGNETOM Aera で使用していた以前の撮像プロトコルは、アプリケーションの開始時に Siemens Healthineers によって最適化された形で提供され、現在も日々改良が続けられている。これは、画質と高速化の限界がまだ見えていないことを示している。この装置がユーザーに提供する幅広い技術は、その利点を理解し、日々活用し続けている。

最後に、放射線診療の二酸化炭素排出量を削減する取り組みについて触れておくことも重要である。MAGNETOM Flow の「ヘリウムフリー」設計や、コールドヘッドコンプレッサーをインテリジェントに制御し、スタンバイモードとして電力消費を抑えるEco Power Mode など、最適化された新しいハードウェアを使用することは、極めて重要な要素である。さらに、Deep Resolve 技術は検査時間を短縮し、検査ごとのエネルギー消費量を大幅に削減する。MAGNETOM Flow の実際の消費電力をリアルタイムで監視するため、今後、詳細なモニタリングを実施し、その結果を報告する予定である。



Contact

Professor Henrik J. Michaely, M.D.
MVZ Radiologie Karlsruhe
Karlstraße 104–106
76137 Karlsruhe
Germany
Tel.: +49 0721 932480
michaely@radiologie-karlsruhe.de

MAGNETOM Flow:新しいワークフロー、新しい機会

Markus Kopp, M.D.

Institute of Radiology, Universitätsklinikum Erlangen, Germany

はじめに

多くの被検者にとって、MRI による診断は適切な治療を受けるために不可欠である。世界的に、MRI 装置の数は増え続けているにもかかわらず、多くの被検者が MRI 検査に長い待ち時間を要している。さらに、ほとんどの先進国では医療スタッフ、少なくとも経験豊富な医療スタッフの不足に直面している。このような状況は、治療の遅れ、被検者の転帰の悪化、治療費全体の増加につながる可能性がある。

従来の MRI に挑戦する新しいワークフローの機会

1.5T MAGNETOM Flow プラットフォーム には、検査ワークフローを改善するのに役立ついくつかの高度な機能がある。

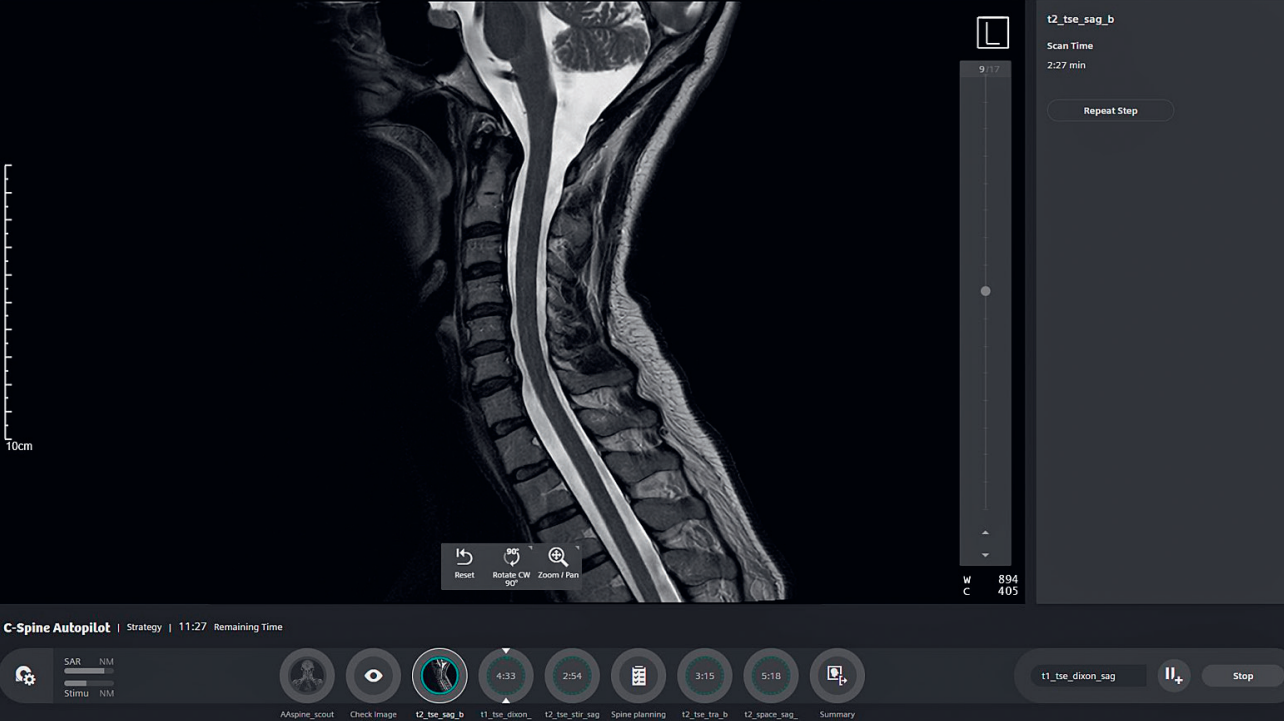
例えば、頭部、脊椎、膝関節などのルーチン検査用の myExam Autopilot ワークフローでは、ワンクリック操作が可能であり、特に経験の浅いスタッフにとって、ワークフローの簡素化と合理化に役立つ。

myExam Autopilot の手順

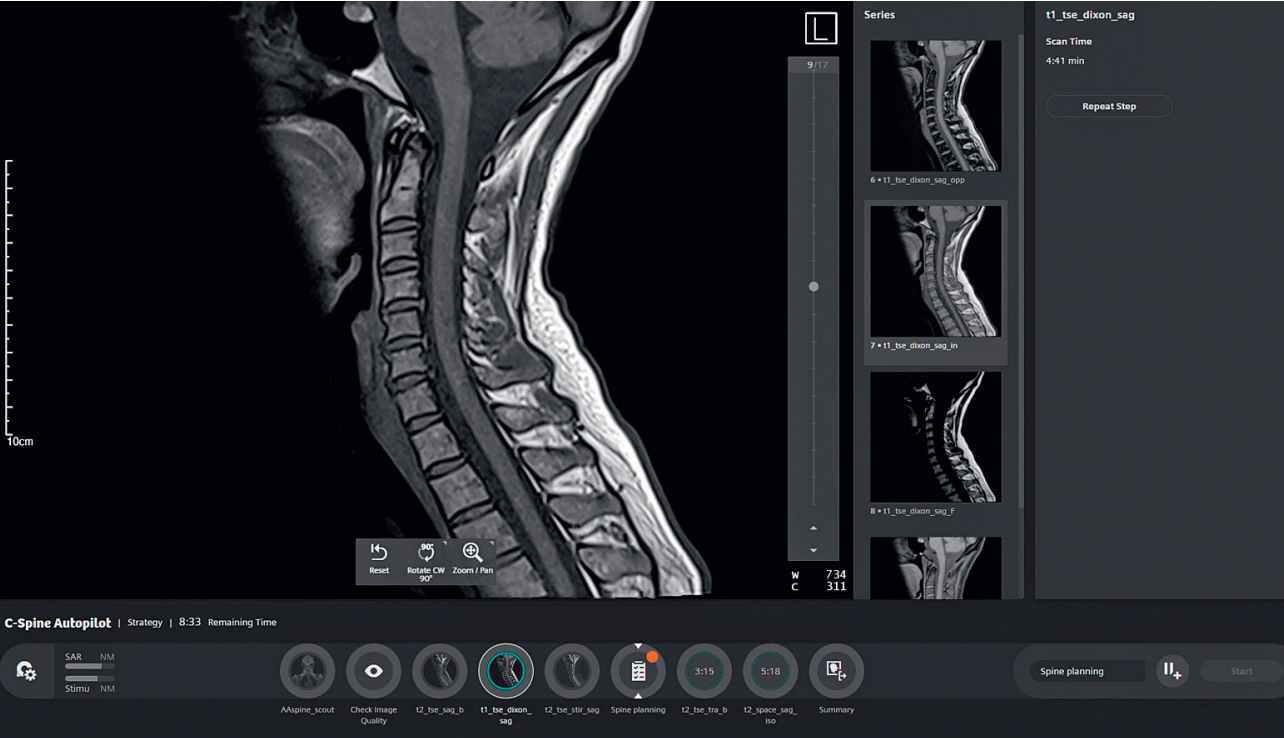
頸椎の myExam Autopilot により、医療スタッフは最小限の操作で検査を行うことができる。Deep Resolve Boost の高速化技術を用いると、撮像時間はすべてのプロトコルで合計約 16 分である。検査手順は、装置がスカウト画像を取得することから始まる。その後、医療スタッフが画質を確認・承認する。その際、FOV に被検者の画像が正しく収まっていることを確認しなければならない (図 1)。

続いて、T2 強調ターボスピネエコー (TSE) Sagittal 画像、T1 強調 TSE Dixon Sagittal 画像、T2 強調 TSE STIR Sagittal 画像が、医療スタッフからの指示なしに開始される。すべての TSE シーケンスは Deep Resolve Boost が使用され、高い信号雑音比 (SNR)、最適化された空間分解能、さらに高倍速の撮像が行われる (図 2)。T1w Dixon Sagittal 画像も、SNR が高く、椎間板と椎骨の描出が改善されている (図 3)。

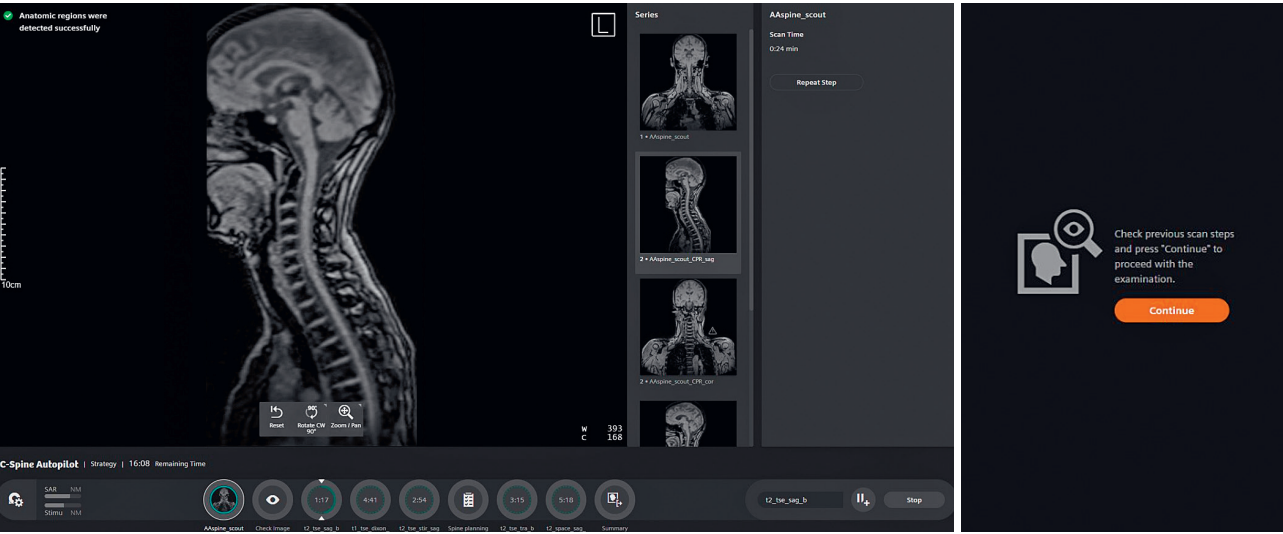
次に、T2w TSE Axial シーケンスの撮像の角度と範囲が、正しく設定されているか医療スタッフが確認する (図 4、5)。



2 Deep Resolve Boostを使用した高倍速撮像により得られたコントラストとSNRが向上した頸椎のT2w TSE Sagittal画像。



3 高いSNRと脊椎解剖学的描出の改善されている

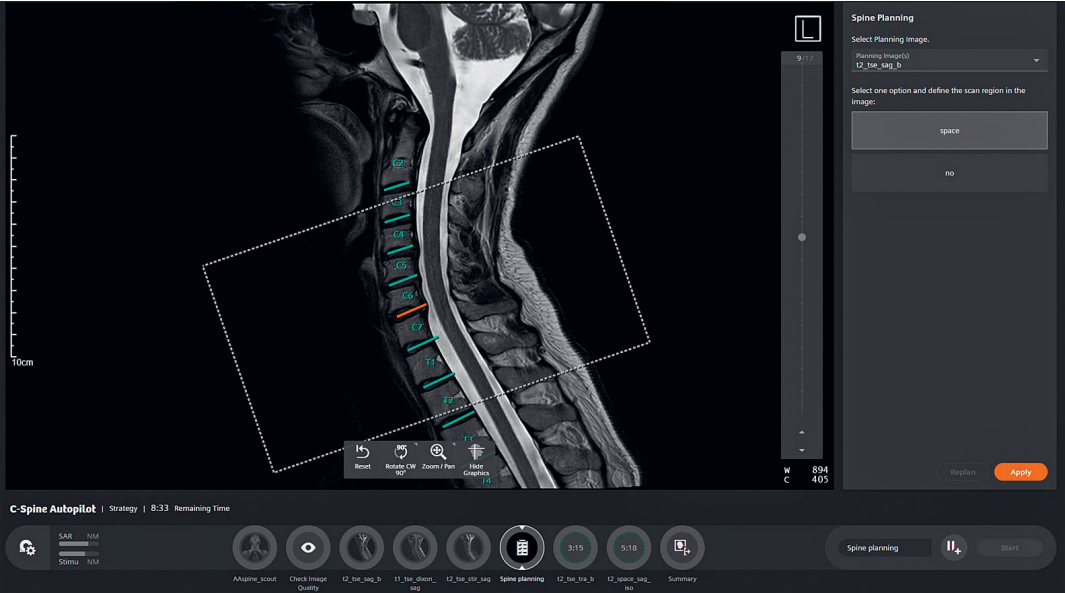


1 スカウト画像の取得と、それに続く適切な画質と患者のポジショニングの確認。

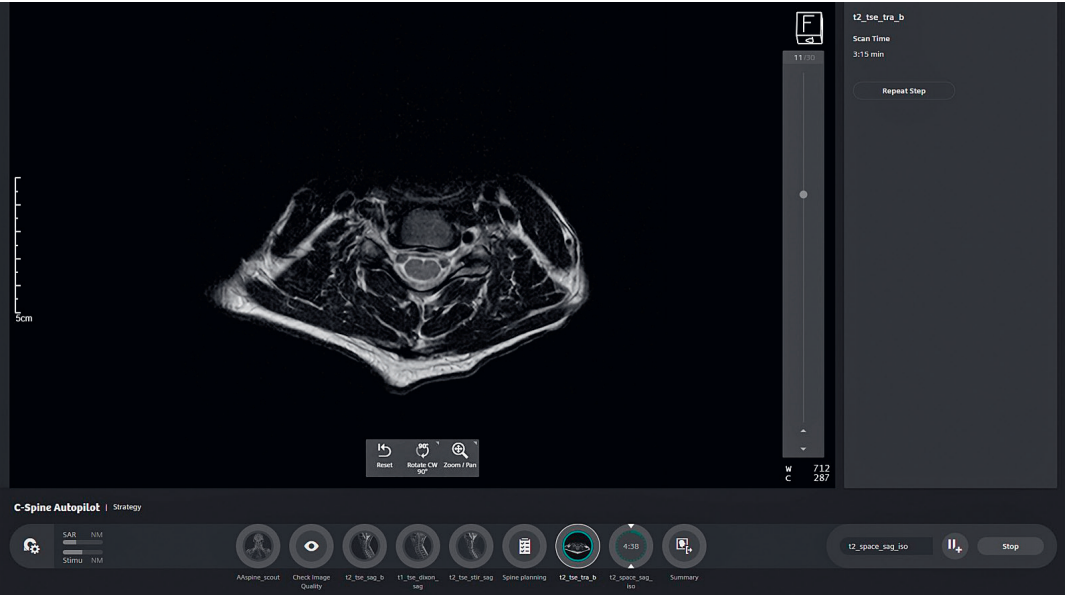
現在では、等方性の T2 強調 SPACE シーケンスを頸椎自動撮像プロトコルに追加し、椎間孔や神経路に合わせた 3 次元でのレトロスペクティブな角度調整を可能にしている（図 6）。従来の T2 強調 TSE シーケンスでは、神経路に対して正確な角度を設定することは、経験豊富な MRI 技師にとっても困難であり、この追加撮像は重要な意味を持つ。

結論

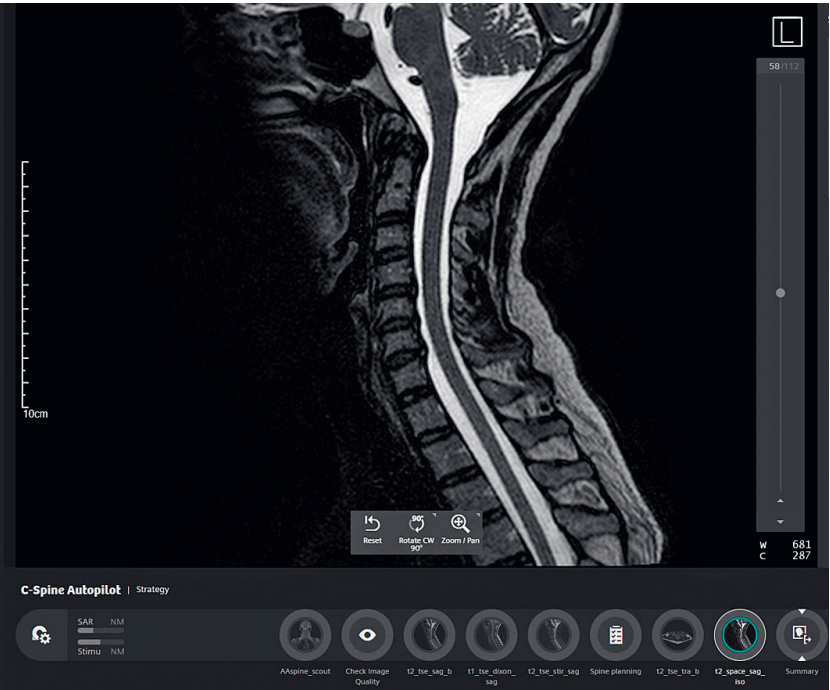
myExam Autopilot 機能は、放射線医療機関の MRI 検査の最適化に有効な機能である。この機能は、全身の MRI 検査ワークフローの煩雑さを軽減し、経験の浅いスタッフでも、画質を低下させることなく MRI の撮像ができるようになる。より経験豊富なスタッフが MRI 検査を実施すれば、待ち時間が短縮され、臨床診断や治療が予定通りに行われる可能性が高くなる。



4 椎間板に対する撮像範囲と角度



5 頸椎の椎間板に合わせて自動的に適切な角度が設定された T2 強調 TSE Axial シーケンス



6 追加した等方性の 3D SPACE シーケンスにより、椎間孔や神経路に合わせた角度の画像をレトロスペクティブで可能にする。



Contact

Markus Kopp, M.D.
Institute of Radiology
Universitätsklinikum Erlangen
Maximiliansplatz 1
91054 Erlangen
Germany
+49(0)9131-8535525
Markus.Kopp@uk-erlangen.de

ここに記載されているSiemens Healthineersの顧客が達成した成果は、顧客独自の環境で達成されたものです。「典型的な」病院はなく、多くの変数（病院の規模、症例構成、IT導入のレベルなど）が考えられるため、他の病院が同じ結果を得られる保証はない。

MRIの未来を築く: Mass General Brighamの高効率 外来施設におけるワークフローの最適化と患者中心の設計

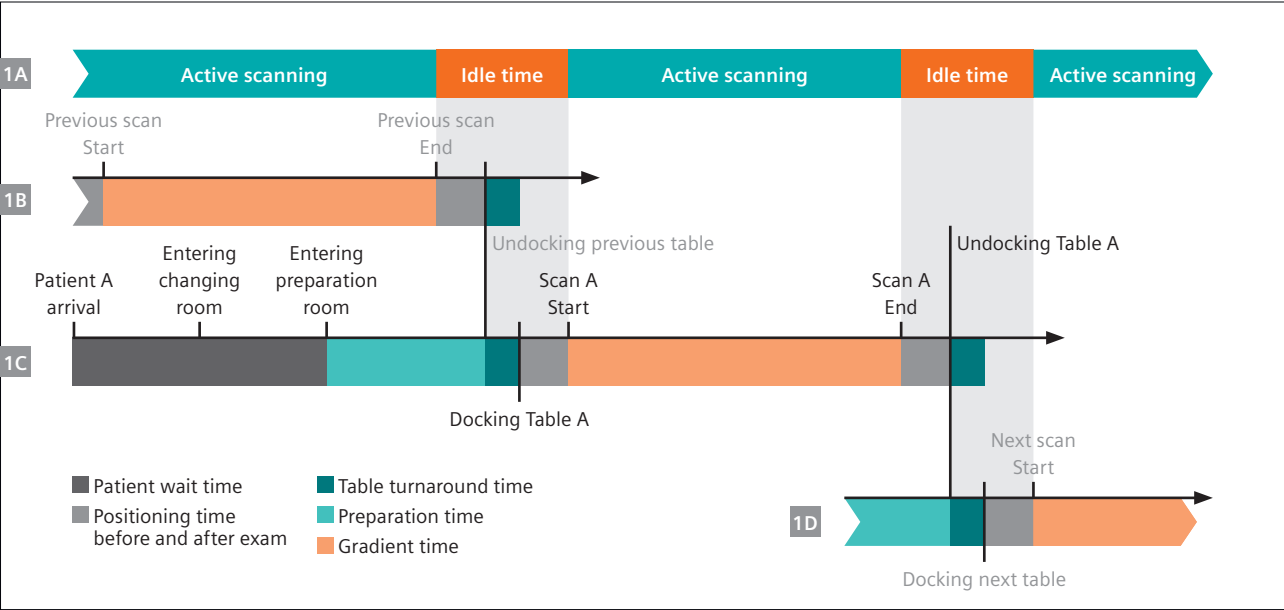
Alexander Herold^{1,2}; Helen L. Piltner^{1,3}; Arhaan Gupta-Rastogi¹; Barbara D. Wichtmann⁴; Wei-Ching Lo³; Azadeh Tabari¹; Andrew Sharp¹; Sean P. Hartmann¹; Lauren Melski¹; Jeremy Herrington¹; Shivraman Giri³; Waqas Majeed³; Jens Guehring³; Onofrio A. Catalano¹; James A. Brink¹; Oleg Pinykh¹; Mukesh Harisinghani¹; Jad S. Husseini¹; Min Lang¹; Susie Y. Huang¹

¹Department of Radiology, Massachusetts General Hospital, Boston, MA, USA
²Department of Biomedical Imaging and Image-guided Therapy, Medical University of Vienna, Austria
³Siemens Healthineers, Boston, MA, USA
⁴Department of Neuroradiology, University Hospital Bonn, Germany

はじめに

磁気共鳴画像 (MRI) 診断に対する世界的な需要の高まり [1] は、世界中の医療システムにとって大きな課題となっており、MRI の待ち時間の長期化や、人員と設備に対する負担の増大につながっている。大規模な MRI 装置の増設やメンテナンスも、スパー

スや設備予算の制約を受けることもある。このような制約を考えると、質の高い医療と運用効率のバランスをとるために、MRI のワークフローと施設設計の最適化に焦点を当てることは重要である。



1 MRI 検査の状況を示す概略図。
(1A) は、スキャン時間 (ベトロールブルー) と非スキャン時間 (オレンジ) を表示する。(1C) は、ある患者 (患者 A) の撮像の一連の流れの概要を示している。MRI の検査サイクルには、以下が含まれる: 患者 A の到着から準備室への入室までの “待ち時間” (Patient wait time, 濃い灰色)、患者 A の準備室への入室と準備室からの退室までの “準備時間” (Preparation time, 薄いベトロールブルー)、前の患者 (1B) の検査が終わり、検査台が装置からアンドッキングされてから、次の患者 A の検査台が MRI 装置にドッキングされるまでの “検査台の回転時間” (Table turnaround time, 濃いベトロールブルー); 検査台が MRI 装置にドッキングされてから患者 A の位置決めをする “ポジショニング時間” (Positioning time, 薄い灰色); 患者の撮像が稼働している時間と定義した実撮像時間 (Gradient time, 薄いオレンジ色)、そして患者 A の検査終了後、それに関連した患者のポジショニング時間と次の検査までの検査台回転時間。

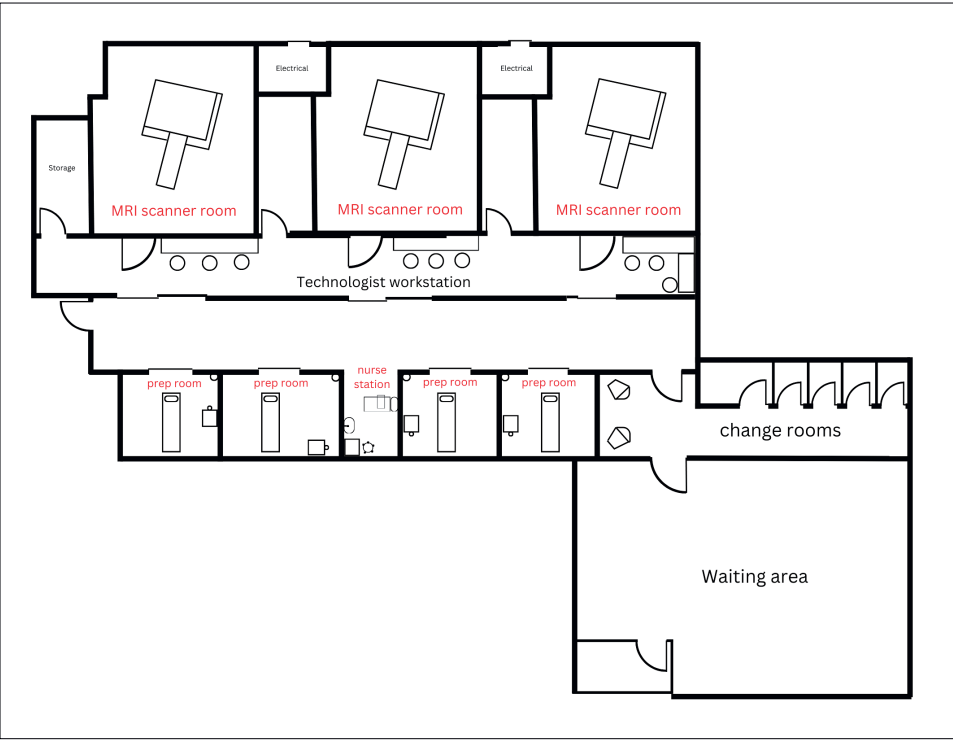
2019 年、Mass General Brigham の放射線科は、治療の質を維持し、向上させながら、より多くの患者への対応、MRI の待ち時間を短縮、患者満足度の向上を目的とした独立型の外来 MRI 施設を設計・建設する 3 年間の取り組みに着手した。このプロセスの一環として、研究チームは、最も時間のかかるプロセスとボトルネックを特定するために、様々な外来画像診断施設における MRI ワークフローを研究した [2, 3]。MRI 検査において、患者の準備時間、検査台の回転時間、MRI 撮像時間の 3 つの重要な工程が、遅れの主な原因として特定された (図 1)。新しい MRI 施設は、ワークフローを合理化して効率性と patient experience を改善することで、これらの遅れが発生する重要な工程に対処するように設計された。

2022 年 3 月、米国 Massachusetts 州 Somerville の Assembly Row に、Mass General Brigham の新しい高効率外来患者用 MRI 施設がオープンした。本稿では、この新しい MRI 施設の設計とワークフロー最適化をレビューし、他の参照となる MRI 施設と比較して、ワークフロー効率の効果を評価する。そして、これらの設計上の選択と運用手順が、MRI サービス提供における主要なパフォーマンス指標にどのような影響を与えるかを検証する。

施設設計

Assembly Row の新しい外来 MRI 施設は、ワークフローの効率性と患者の快適性を最適化した革新的なデザインとレイアウトが特徴である。8,000 平方フィートに及ぶ Assembly Row の画像診断センターには、3T ワイドボア装置 MAGNETOM Vida (Siemens Healthineers, Erlangen, Germany) が 3 台設置されている。MRI 検査室は、ナースステーションを挟んで配置された 4 つの患者準備室の向かい側に位置している。MRI 検査室と患者準備室の間には 9 フィート幅の広々とした廊下がレイアウトされている (図 2、3)。

このレイアウトにより、患者の撮像と、次の患者の準備を同時に行うことができる。各装置には、交換可能なドッキング式検査台が 2 台装備されており、患者間の入れ換えをシームレスで迅速に行うことができる。準備室エリアは、MRI スタッフが患者に対して次の検査の説明を行い、ドッキング式検査台に患者を寝かせ、必要に応じて静脈カテーテルを留置し、次の検査に必要な高周波受信コイルをセッティングするための専用スペースとして機能する。準備室エリアの設計とレイアウトは、多くの時間を費やしていた検査の準備工程を効果的に変化させ、また検査室の外では、MRI 技師と看護スタッフが、患者に対して検査の説明や、質問に答えるなど、患者とプライベートな環境で対話することができる。



2 Assembly Row に新設された外来 MRI 施設の平面図。3 台の MRI 装置を備え、それぞれに 2 台の交換可能なドッキング式検査台が設置されている。4 つの患者準備室が MRI 検査室の向かい側に配置され、9 フィートの廊下で仕切られている。この設計により、患者の準備と撮像を同時に行うことができる [4]。



3 新しい Assembly Row 外来画像診断センターは、高度な技術と最適化されたワークフローを組み合わせている。(3A) 交換可能な検査台を備えたワイドボア MRI 装置。装置は入口の方向へ向けて配置しており、検査台のドッキングをスムーズに行える。(3B) 左側が患者準備室エリア、右側が検査室エリアのある 9 フィートの廊下。このレイアウトにより、患者の準備と MRI 検査を並行して行え、検査間のスムーズな移行が可能になる。

画像提供: Jeremy Herrington および Lauren Melski。

MRI ワークフローにおける検査速度遅延工程の特定

当院の放射線科は、最近 Lang ら [4] によって報告されたように、Assembly Row に独立した外来 MRI 施設を設計・建設するため、2019 年から包括的な 3 年間のプロジェクトに着手した。

より多くの患者に対応し、MRI の待ち時間を短縮し、医療の質を維持・向上させながら患者の満足度を高めるために、革新的な建築デザインと運営プロセスを取り入れることが目標であった。新しい MRI 施設を開始する前に、放射線科医、MRI 技師、技師の管理者で構成されるチームは、Mass General Brigham 内や外部の外来画像診断施設の MRI ワークフローを徹底的に検証した。この分析を通して、彼らは最も時間のかかるプロセスとボトルネックを、患者の準備時間、検査台の回転時間、撮像時間の 3 つの重要な工程が中心であると特定した(定義については図 1 を参照)。新しい MRI 施設は、これらの重要な検査速度遅延工程を解決するために設計された。

患者の準備と検査台の回転時間

従来の MRI 施設では、患者の準備と入れ替えにかかる時間が、多くの場合、非効率的で検査の遅延につながる重要な工程である。慣習的に、1 つのスキャンが終了後、患者は検査室から退出し、検査台が清掃され、それから初めて次の患者が準備のために呼び込まれる、という一連の過程が行われる。この準備

時間には、患者を検査台に座らせ、ヘッドフォンや耳栓を装着し、適切なコイルをセッティングする時間が含まれ、その間、装置は非スキャン状態 (図 1 の Idle time) のままとなる。この方法は、特に移動が不自由な患者において時間を要し、遅れはその後の検査予約に連鎖する。

Assembly Row の新しい画像診断センターは、ワークフローの最適化という革新的な設計によって、こうしたボトルネックに対処している。この画像診断センターは、準備室エリアを設け、ドッキング式の検査台を利用することで、患者を検査台に乗せたり降ろしたりする時間を大幅に短縮する並列作業を可能にしている。ある患者の撮像を行っている間に、技師は別の場所で次の患者のポジショニング、静脈ライン確保やコイルのセッティングなどを効率的に準備することができる。撮像が終了すると、ドッキング式の検査台により、患者の入れ換えをシームレスに行うことができる。このワークフローは、患者の準備と装置の使用を効果的に切り離し、移行時間と装置の非スキャン時間を最小限に抑える。ドッキング式の検査台を使用することで、検査室への出入りが不要となり、移動が難しい患者には特に有効である。さらに、別の検査台での患者を準備している間に、もう 1 つの検査台の清掃作業が検査室の外で行われるため、検査台の清掃もより効率的に行うことができる。

このような革新的な設計によるワークフロー向上の効果は、目を見張るものがある。現在分析中のワークフロー効率の予備的な結果では、Assembly Row の MRI 施設では平均の回転時間

は 4 分で、約 40% の検査での回転時間が 1 分未満であることが示された。これに対し、他の外来 MRI 施設では平均の回転時間は 9 分で、回転時間が 1 分未満の検査は 1% 未満であった。

MR 撮像時間と Deep Resolve の効果

MRI 検査の大半は、撮像時間 (装置が画像を取得する時間) に費やされる。

従来、MRI の効率を向上させるため、パラレルイメージング、多断面同時励起撮像、圧縮センシング [5, 6] などの高速撮像技術を取り入れていたが、これらの技術は撮像時間を短縮するものの、基本的に SNR、空間分解能、コントラストの三者間のトレードオフに制限されていた。画像取得と再構成のパイプラインにディープラーニングを導入することで、高速 MRI 撮像技術の状況は一変した [7]。当院の新しい施設では、Siemens Healthineers 社の Deep Resolve 技術を MRI 検査すべての部位で取り入れている。Deep Resolve の使用経験から、SNR、空間分解能、撮像時間のこれまでのトレードオフの境界を広げながら、より高速な撮像を可能にし、画質を向上させることを示している。

ディープラーニング技術の採用前後の MRI 撮像時間の比較分析により、撮像時間と検査効率の大幅な改善が明らかになった [4]。神経および筋骨格系 MRI 検査では、平均撮像時間は 20 分以下であり、基準施設と比較して 24% ~ 46% の短縮を示し、腹部 MRI 検査では、平均撮像時間は 22 ~ 25 分であり、20% ~ 35% の短縮が示された。これらの結果は、当施設での以前の取り組みと一致しており、最も多く実施されている脳 MRI プロトコルで、いくつかの高速化シーケンスと組み合わせることにより、検査プロトコル全体の時間を最大 40% 短縮することができた [8]。

on-time performance と patient experience

施設設計、ワークフローの最適化、そしてディープラーニングを活用した高速 MRI 技術の組み合わせにより、時間通りの診療と全体的な patient experience の大幅な改善につながった。その結果、Assembly Row の MRI 施設は、予約時間から 5 分以内に検査を開始する割合が 80% であるのに対し、比較対象となる外来 MRI 施設では 63 ~ 66% と、時間厳守に優れていることが実証された。また、Assembly Row の画像診断センターでは、参照施設と比較して平均待ち時間が 6.6 分短縮された。

ワークフロー効率の改善と迅速な患者対応により、多くの MRI 検査が予定より早く終了し、偶然にもこの時間を活用する良い機会が生まれた。当院の技師の管理者は、バーチャル・スキャナ・リソースを導入することで、この空いた時間の有効活用を実現した。このバーチャル・スキャナ・リソースは、検査が予定より早く終了した場合に、検査スケジュールをリアルタイムで調整し、追加検査に対応することを可能にする。これは、特にピーク時の検査能力とスループットを効果的に管理するための第 4 の「バーチャル・スキャナ」を設定できる革新的な手法である。バーチャル・スキャナコンセプトは、3 台の装置の検査数量を超えた検査をスケジュールリングし、特に、脳、膝、肩、非造影の腰椎・頸椎などの検査時間の短いルーチン MRI 検査に使用される。このような短い (すなわち 20 分未満) 検査を、検査の早期終了や利用されていない時間帯によって生じるスケジュールの隙間に戦略的に挿入することで、検査時間のばらつきに対応し、on-time performance を向上させ、患者の待ち時間を短縮することができる。

調査データから、当院システム内の他の外来画像診断施設と比較して、Assembly Row の画像診断センターの患者満足度は高く、患者中心の設計とスケジュールリングの革新が成功していることが明らかになった。Assembly Row の MRI 技師からのフィードバックでは、準備エリアによって得られる時間とスペースが、患者の不安を和らげ、患者と医療従事者間の良好な信頼関係とコミュニケーションにつながっていると、多くの技師がこの利点を認識している。

検査枠と患者スループットへの効果

Assembly Row の画像診断センターに導入された革新的な設計と運営戦略により、効率性と患者スループットが大幅に改善された。最も注目すべきは、同施設が 30 分の予約枠でオープンしたことで、従来、当社の外来 MRI 施設が 45 分の予約枠であったのに対し、33% 短縮したことになる。この調整だけで、1 日の検査数を最大 50% 増加させる可能性がある。ワークフロー改善の効果は、今後発表される論文で報告されるが、比較対象の施設との直接比較期間における施設のパフォーマンスが明確に示される。

結論

当院の高効率 MRI 施設の革新的な設計と運営戦略により、患者のスループットと満足度が大幅に向上した。MRI のワークフ

ローにおける主要なボトルネックである患者の準備、検査台の回転効率、撮像時間に対処し、これら MRI 検査における主要な工程の時間短縮に重点を置くことで、パフォーマンス指標の大幅な改善を達成した。この最適化により、予約枠を 45 分から 30 分に短縮すると同時に、on-time performance と patient experience を改善させることができ、この多面的アプローチの有望性を示している。世界中の医療機関が MRI 検査の需要増に取り組む中、Assembly Row の例は、画質や患者ケアを損なうことなく画像診断ワークフローを最適化するモデルとなる。カスタマイズ可能なワークフローと高速撮技術を備えた施設設計とプロセス改善への統合的アプローチは、リソースの制約が増大する中、画像処診断サービスと patient experience の向上を目指す医療機関が容易に採用できる貴重なテンプレートとして役立つだろう。

Contact

Associate Professor Susie Y. Huang, M.D., Ph.D.
Radiologist in the Division of Neuroradiology
Department of Radiology
Massachusetts General Hospital
Harvard Medical School
55 Fruit St
Boston MA 02114
USA
susie.huang@mgh.harvard.edu



Alexander Johannes Herold, M.D.
Research Fellow in Radiology
Department of Radiology
Massachusetts General Hospital
Harvard Medical School
55 Fruit St
Boston MA 02114
USA
AHEROLD@mgh.harvard.edu



References

1 Smith-Bindman R, Kwan ML, Marlow EC, Theis MK, Bolch W, Cheng SY, et al. Trends in Use of Medical Imaging in US Health Care Systems and in Ontario, Canada, 2000-2016. JAMA.2019;322(9):843–856.

2 Lin DJ, Doshi AM, Fritz J, Recht MP. Designing Clinical MRI for Enhanced Workflow and Value. J Magn Reson Imaging. 2024;60(1):29–39.

3 Recht MP, Block KT, Chandarana H, Friedland J, Mullholland T, Teahan D, et al. Optimization of MRI Turnaround Times Through the Use of Dockable Tables and Innovative Architectural Design Strategies. AJR Am J Roentgenol. 2019;212(4):855–858.

4 Lang M, Lo WC, Sharp A, Hartmann SP, Pianykh OS, Melski LM, et al. Improving Workflow Efficiency at an Outpatient MRI Imaging Facility: A Case Study. J Am Coll Radiol. 2024:S1546–1440(24)00531–3.

5 Del Grande F, Rashidi A, Luna R, Delcogliano M, Stern SE, Dalili D, et al. Five-Minute Five-Sequence Knee MRI Using Combined Simultaneous Multislice and Parallel Imaging Acceleration: Comparison with 10-Minute Parallel Imaging Knee MRI. Radiology. 2021;299(3):635–646.

6 Fritz J, Fritz B, Zhang J, Thawait GK, Joshi DH, Pan L, et al. Simultaneous Multislice Accelerated Turbo Spin Echo Magnetic Resonance Imaging: Comparison and Combination With In-Plane Parallel Imaging Acceleration for High-Resolution Magnetic Resonance Imaging of the Knee. Invest Radiol. 2017;52(9):529–537.

7 Hammernik K, Klatzer T, Kobler E, Recht MP, Sodickson DK, Pock T, et al. Learning a variational network for reconstruction of accelerated MRI data. Magn Reson Med. 2018;79(6):3055–3071.

8 Lang M, Cartmell S, Tabari A, Briggs D, Pianykh O, Kirsch J, et al. Evaluation of the Aggregated Time Savings in Adopting Fast Brain MRI Techniques for Outpatient Brain MRI. Acad Radiol. 2023;30(2):341–348.

0.55T での低磁場筋骨格 MRI の可能性を探る：
大型金属インプラントを持つ患者における予備調査結果

Hanns-Christian Breit, M.D.¹; Jan Vosschenrich, M.D.¹; Martin Clauss, M.D.^{2,3}; Markus M. Obmann, M.D.¹; Michael Bach, Ph.D.¹; Dorothee Harder, M.D.¹; Ricardo Donners, M.D.¹

¹Department of Radiology, University Hospital Basel, University of Basel, Switzerland
²Center for Musculoskeletal Infections, University Hospital Basel, University of Basel, Switzerland
³Department for Orthopedics and Trauma Surgery, University Hospital Basel, University of Basel, Switzerland

はじめに

低磁場 MRI 装置は現在、傾斜磁場やコイルの設計、AI をベースとした画像再構成法の技術革新のおかげで、ルネッサンス期を迎えている [1]。臨床現場で主に使用されている 1.5T および 3T 装置に対する利点としては、撮像およびメンテナンスコストの低減、患者の快適性の向上などが挙げられる [2、3]。さらに、低磁場 MRI 装置の潜在的な利点には、特に金属インプラントを持つ被検者の検査¹において、高い静磁場強度の装置では臨床 上、技術的な制限が生じるケースがあるが 0.55T では磁化率アーチファクトが大幅に軽減できると考えられている。 [4、5]。これは、人工関節置換手術後など、金属インプラントの有病率が上昇する世界的な人口の高齢化を考慮すると、臨床ルーチンにおいて特に関心が高く [6]、MRI 検査の恩恵を受けることが報告されている [7]。

このレポートでは、大型の金属インプラントを持つ被検者の画像診断において、新世代の 0.55T 低磁場 MRI 装置を使用することによる可能性と潜在的な利点についての見解を提示する。

使用機器と方法

被検者集団

3 名の被検者が通常の臨床画像検査に加えて 0.55 T で補完的な MRI 検査を受けた。

MRI 装置

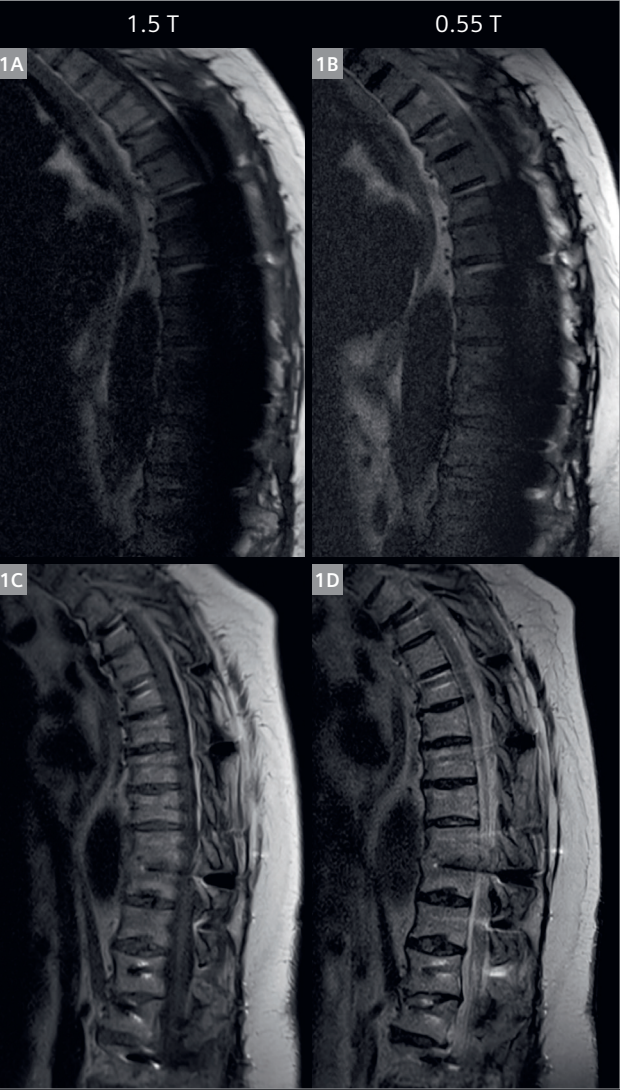
低 磁 場 MRI 装 置 は、0.55T MAGNETOM Free.Max (Siemens Shenzhen Magnetic Resonance Ltd., Shenzhen, China, ボア径 80 cm) を使用し、膝と上肢の検査には、6 ch Flex Coil を使用した。

1.5T 検査には、MAGNETOM Avanto Fit (Siemens Healthcare, Erlangen, Germany, ボア径 60 cm) を使用し、3T 検査には、MAGNETOM Skyra (Siemens Healthcare, Erlangen, Germany, ボア径 70 cm) を使用した。

¹金属製インプラントのMRI検査での制限(もしあれば)は、患者がMRI検査を受ける前に考慮されなければなりません。金属製インプラントを装着した患者のMRI撮像は、特有のリスクを伴います。しかし、特定のインプラントは、条件付きMRI対応で安全であることが規制機関により承認されています。そのようなインプラントについては、先に述べた警告が適用されない場合があります。具体的な条件については、インプラントメーカーにお問い合わせください。

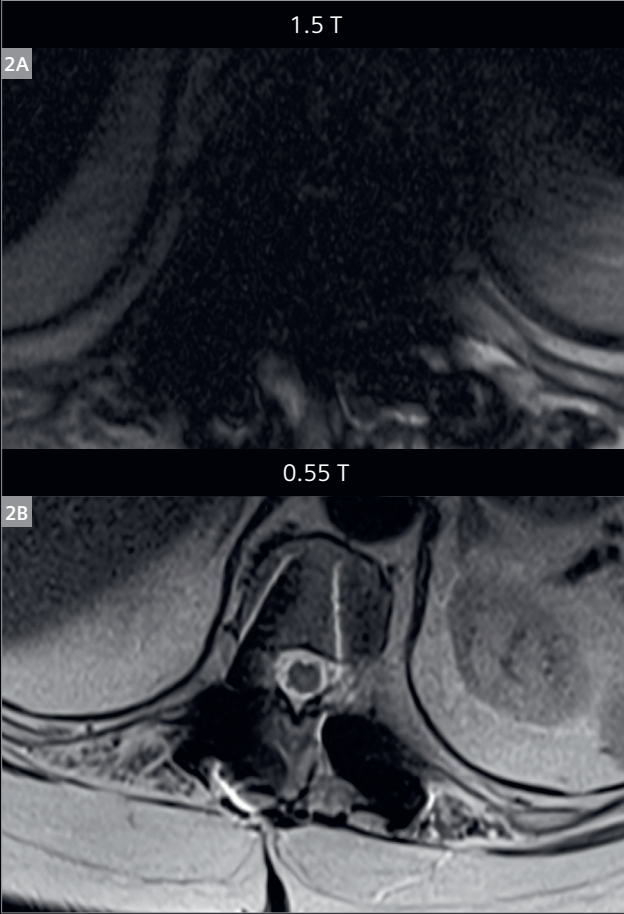
症例 1

以前に胸椎のマルチレベルの減圧術や脊椎固定術などの外科手術を数回受けており、薬物治療では治らない腰痛が主訴の59歳の被検者。硬膜外カテーテル挿入前に脊柱管を評価するために、胸椎のMRI検査が依頼された。そこで1.5Tで通常の検査を実施し、その後0.55Tで補足的なMRI検査を行った。



1 脊髄の外科手術を複数回受けた59歳の被検者に対する、硬膜外鎮痛カテーテル留置前の術前画像。磁化率アーチファクトの重なりにより、脊柱管は1.5TではT2強調(1A)画像でもT1強調(1C)画像でも評価できなかった。アーチファクトは0.55Tでは大幅に低減し高い診断信頼性で評価できた(1B、1D)。

重度の磁化率アーチファクトのため、1.5Tでは、SagittalおよびAxialのT2強調画像、SagittalのT1強調画像でも脊柱管を評価できなかった。0.55Tでは、脊柱管の可視化が大幅に改善された。脊柱管へのアーチファクトの重なりはわずかで、決定的な評価が可能となり、したがって、0.55Tでは、硬膜外鎮痛カテーテル留置が禁忌かどうか、除外診断ができた。1.5Tおよび0.55Tの代表的なスライスを図1および2に示す。



2 図1に示すSagittal画像と同様に、脊柱管の評価は0.55Tで取得したAxial T2強調画像(2B)でのみ可能であり、1.5Tではアーチファクトの重なりにより評価できなかった(2A)。

症例 2

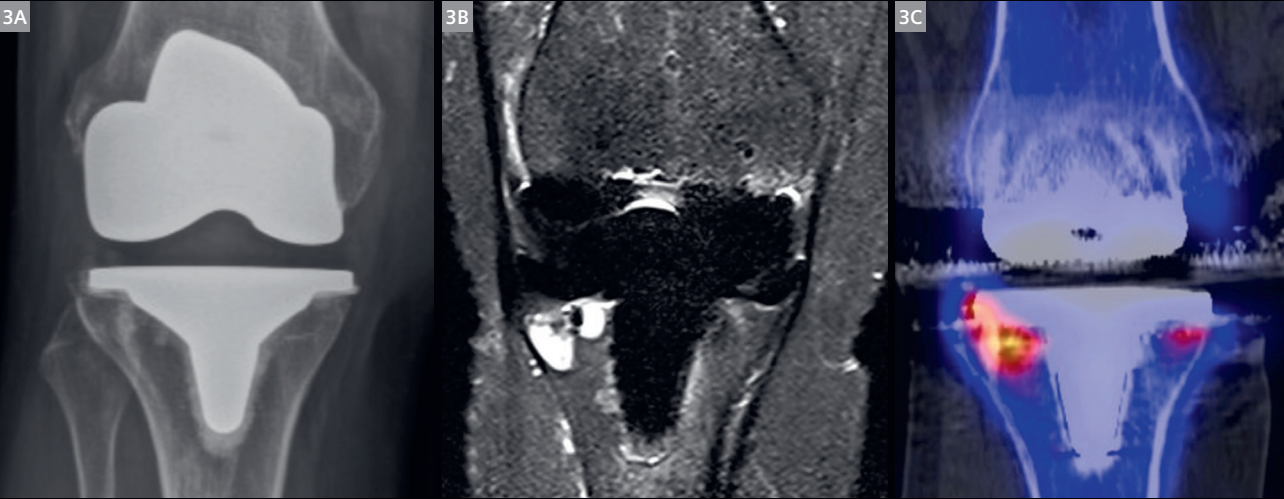
人工膝関節全置換術から5年後に膝の痛みが持続する症状の59歳の女性の被検者。

レントゲン画像では緩みの兆候がなく、異常は見られなかったため、SPECT/CTと0.55Tでの補助的な検査が行われた。

レントゲン画像では、インプラントの緩みやその他の術後合併症の兆候は見られなかったが(図3A)、対照的に、0.55TのMR画像では、外側脛骨面の脛骨インプラントコンポーネント

に隣接して浮腫と考えられる信号変化がみられ、内側脛骨面でも程度は低いもののインプラントの緩みが観察された。

この0.55Tの画像結果は、同部位でトレーサーの取り込みが増加していることを示したSPECT/CT画像の所見と一致していた。これは、認定核医学医師によってインプラントの緩みと診断された(図3B、C)。



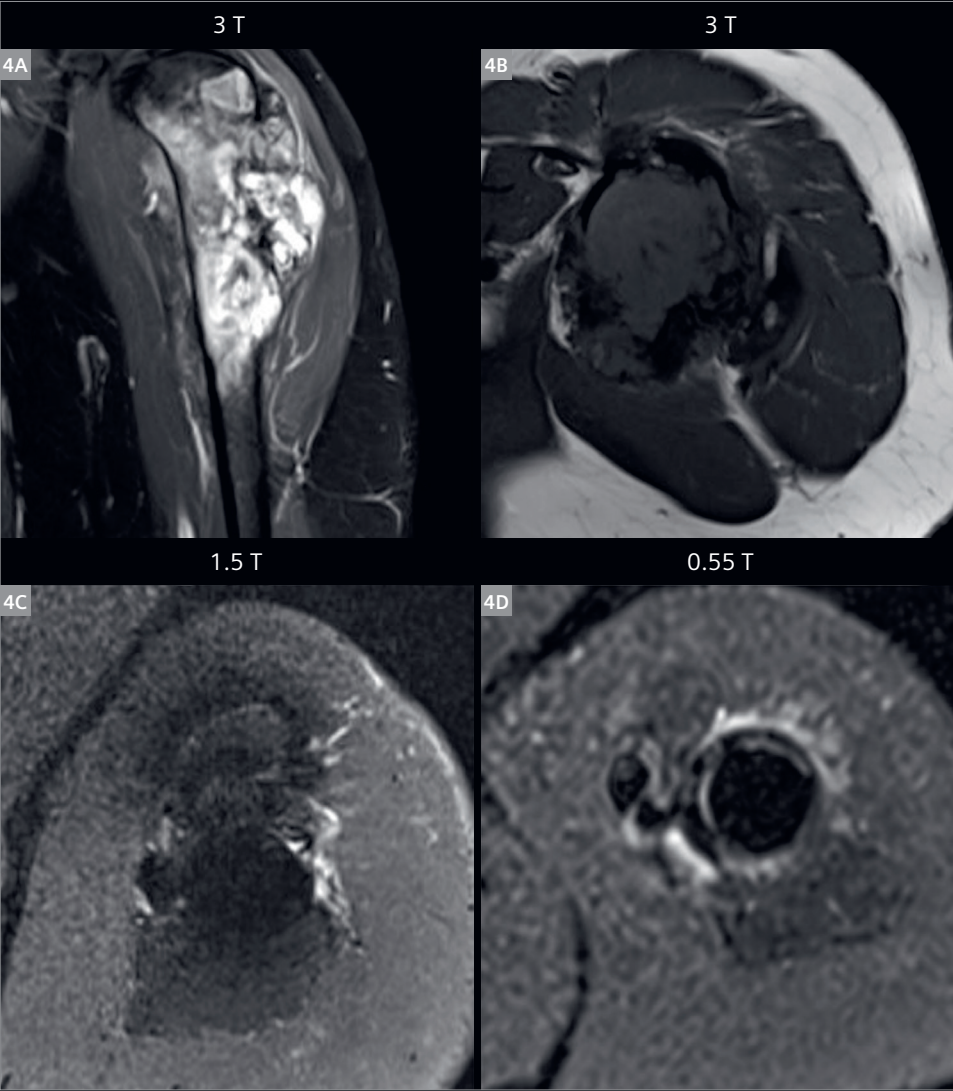
3 膝関節全置換術後5年が経過した現在も膝の痛みが続いている59歳の女性被検者。従来のレントゲン画像(3A)とは異なり、0.55T MR画像(3B)とSPECT/CT画像(3C)の両方で脛骨インプラントコンポーネントの緩みが明らかになった。0.55T MRIでは、膝周囲の靱帯構造の評価も可能であった。

症例 3

2 年前に左上腕骨近位部の骨肉腫を切除し、腫瘍プロテーゼを留置した後、定期的なフォローアップ検査を行っている 39 歳の被検者。

骨肉腫の切除と左上腕骨近位部への腫瘍プロテーゼの移植後、1.5 T での術後定期的なフォローアップ画像検査と追加で 0.55 T MRI 検査が施工された。また、術前画像は 3T で撮像された (図 4A、B)。フォローアップ MRI 検査を比較すると、特に腫瘍プロ

テーゼ シャフトに隣接する軟部組織は、脂肪抑制併用の Axial T2 強調画像で 1.5 T (図 3C) よりも 0.55 T (図 3D) の画像が明瞭に描写できている。骨腫瘍切除後のフォローアップ検査では、磁化率アーチファクトの低減により隣接構造の描写が優れることから、低磁場 MRI ではステムに近い潜在的な局所腫瘍再発をより高い信頼性で診断 (除外診断) ができる。



4 3T (4A、4B) で上腕骨近位部の骨肉腫と診断された 39 歳の被検者。腫瘍切除および腫瘍プロテーゼの移植後、局所腫瘍再発を評価するための脂肪抑制併用 Axial T2 強調画像によるフォローアップ検査は、1.5 T (4C) と比較して 0.55 T (4D) で改善され、ステムに隣接する軟部組織構造の描写が向上した。

考察

金属インプラントのある被検者に対して、最高の画質を得るには、磁場強度に関係なく、撮像プロトコルを注意深く最適化する必要がある。ここで報告した症例では、画像取得に使用したすべての磁場強度に対して、最適化された臨床プロトコルを採用した。ある種のプロトコルは、金属がある場合でも、より強固な撮像を可能性にし、また他の機能は、生じるアーチファクトを補正することも可能である。ただし、金属アーチファクトの補正方法は、多くの場合、SAR を増加する傾向にあり、撮像時間が長くなる。0.55 T で撮像することで、SAR を軽減できると同時に、高いバンド幅のプロトコルを使用することで良好な臨床画像を得ることができる。

この簡単な症例報告は、大型の金属製インプラントを持つ被検者における 0.55 T 低磁場 MRI の可能性を強調している。これは、例えば人工股関節全置換術の被検者において、静磁場強度の高い MRI よりも低磁場 MRI の方が優れていることを概説した最近の文献 [8] と一致している。この我々の症例報告は、広範な胸椎や胸腰椎の脊椎切除術のような、他のタイプの大型金属製インプラントを持つ被検者群における 0.55T MRI の診断上の利点も示唆している。金属製インプラントに関連した磁化率アーチファクトを低減することで、インプラントに隣接する構造や軟部組織の評価が向上し、腫瘍切除後の局所再発を検出する上で特に重要である。さらに、低磁場 MRI の画像は、インプラントのゆるみの検出にも有用であり、人工膝関節全置換術の再手術前に、膝周囲の軟部組織構造の詳細を観察することで、SPECT/CT 画像を補完することができる。

結論として、臨床ルーチンにおける 0.55 T 低磁場 MR イメージングの役割を確立するために、金属インプラントのイメージング、特に大型金属インプラントの症例における潜在的な応用と機会を評価するために、専用の研究を実施する価値があると考えられる。

References

- 1 Runge VM, Heverhagen JT. Advocating the Development of Next-Generation, Advanced-Design Low-Field Magnetic Resonance Systems. Invest Radiol. 2020;55(12):747–753.
- 2 Vosschenrich J, Breit HC, Bach M, Merkle EM. Ökonomische Aspekte der Niederfeld-Magnetresonanztomographie : Anschaffung, Installation und Unterhaltskosten von 0,55 T-Geräten [Economic aspects of low-field magnetic resonance imaging: Acquisition, installation, and maintenance costs of 0.55 T systems]. Radiologe. 2022;62(5):400–404. German. Epub Mar 29
- 3 Rusche T, Vosschenrich J, Winkel DJ, Donners R, Segeroth M, Bach M, et al. More Space, Less Noise—New-generation Low-Field Magnetic Resonance Imaging Systems Can Improve Patient Comfort: A Prospective 0.55 T–1.5 T-Scanner Comparison. J Clin Med. 2022;11(22):6705.
- 4 Farahani K, Sinha U, Sinha S, Chiu LC, Lufkin RB. Effect of field strength on susceptibility artifacts in magnetic resonance imaging. Comput Med Imaging Graph. 1990;14(6):409–413.
- 5 Bernstein MA, Huston III J, Ward HA. Imaging artifacts at 3.0T. J Magn Reson Imaging. 2006;24(4):735–746.
- 6 Abdelaal MS, Restrepo C, Sharkey PF. Global Perspectives on Arthroplasty of Hip and Knee Joints. Orthop Clin North Am. 2020;51(2):169–176.
- 7 Jungmann PM, Agten CA, Pfirrmann CW, Sutter R. Advances in MRI around metal. J Magn Reson Imaging. 2017;46(4):972–991.
- 8 Khodarahmi I, Brinkmann IM, Lin DJ, Bruno M, Johnson PM, Knoll F, et al. New-generation low-field magnetic resonance imaging of hip arthroplasty implants using slice encoding for metal artifact correction: first in vitro experience at 0.55 T and comparison with 1.5 T. Invest Radiol. 2022;57(8):517–526.



Contact

Hanns-Christian Breit, M.D.
University Hospital Basel
Department of Radiology
Spitalstrasse 21
4031 Basel
Switzerland
Tel.: +41 61 328 56 33
hanns-christian.breit@usb.ch

Expert Insights: Siemens Healthineers アプリケーションスペシャリストによる隠れた逸品

Tricia ThompsonがTSEの画質の最適化について語る

Tricia Thompson, MRT(R)(MR)

2002年にカナダでMRT(R)の資格を取得。英国でMRIのトレーニングを受ける機会を得て、2004年から5年間 Derbyに滞在し、英国全土の移動式MRIスキャナに携わり、カナダで2つ目の資格であるMRT(MR)を取得した。

5年間ロンドンの様々な私立病院やクリニックで働いた後、Siemens HealthineersのMRアプリケーションスペシャリストになるためにオーストラリアに移住した。

現在10年目を迎え、特に乳房MRIと乳房生検、放射線治療におけるMR、PET-MRに重点を置く、シニア・アプリケーション&デモ・スペシャリストとして、画質／製品開発に携わっている。

Contact

Tricia Thompson
Siemens Healthcare Pty Ltd. Australia
SHS AP AUS CS CS APP MR
Citylink Business Centre
153 Campbell Street
Bowen Hills QLD 4006
Australia
tricia.thompson@siemens-healthineers.com

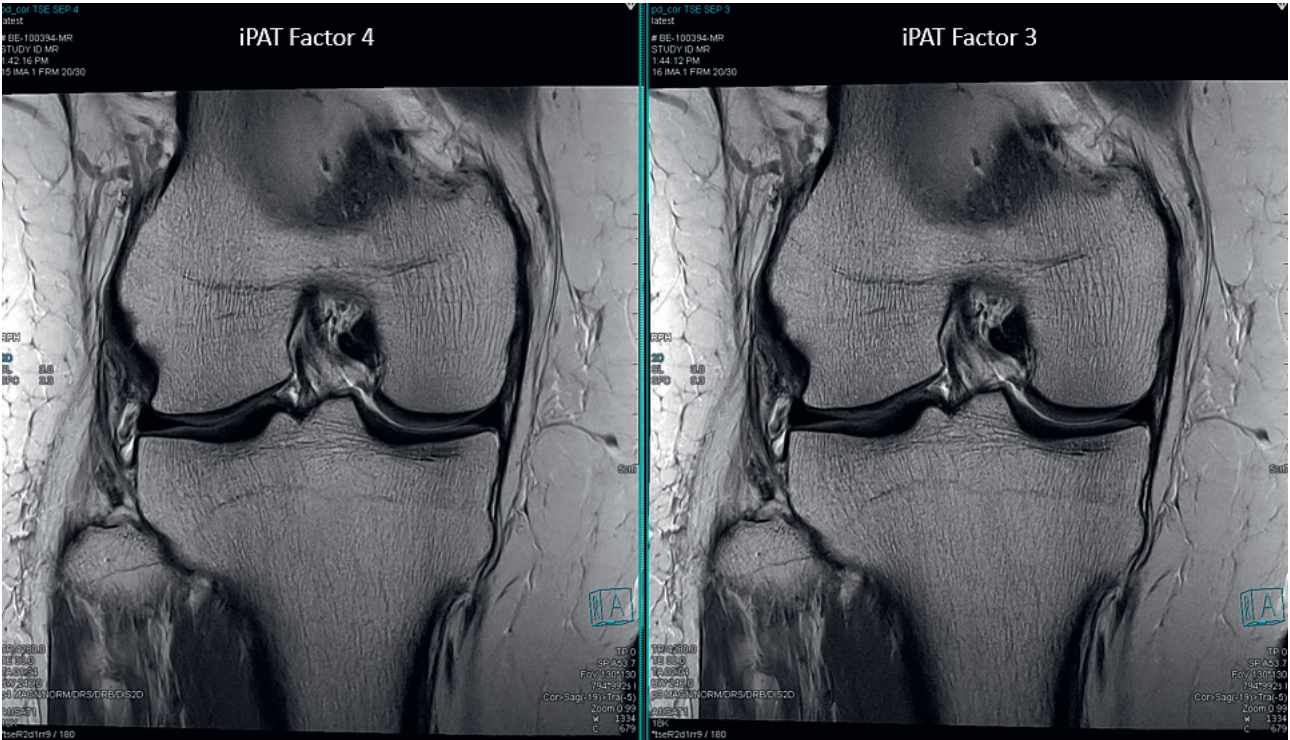


アプリケーションスペシャリストとして、私たちは MAGNETOM ユーザーと積極的に協力し、ニーズに合った撮像時間で最高の画質を目指し、時には、最良の結果を得るために様々なアプローチを適用し、創造性を発揮する必要がある。オーストラリアでは、ほとんどの顧客がノイズのない滑らかな画像よりも高い空間分解能の画像を好む傾向にある。Deep Resolve Boost と Deep Resolve Sharp がリリースされたことで、ターボ・スピン・エコー (TSE) の画質の調整方法が、既存のパラメータを活用するという新しい方法にかわり、調整アプローチを再考する必要がある。ここでは、iPAT ファクター、PAT リファレンススキャンモード、ノイズ除去オプションなど、いくつかの重要なパラメータについて検討する。

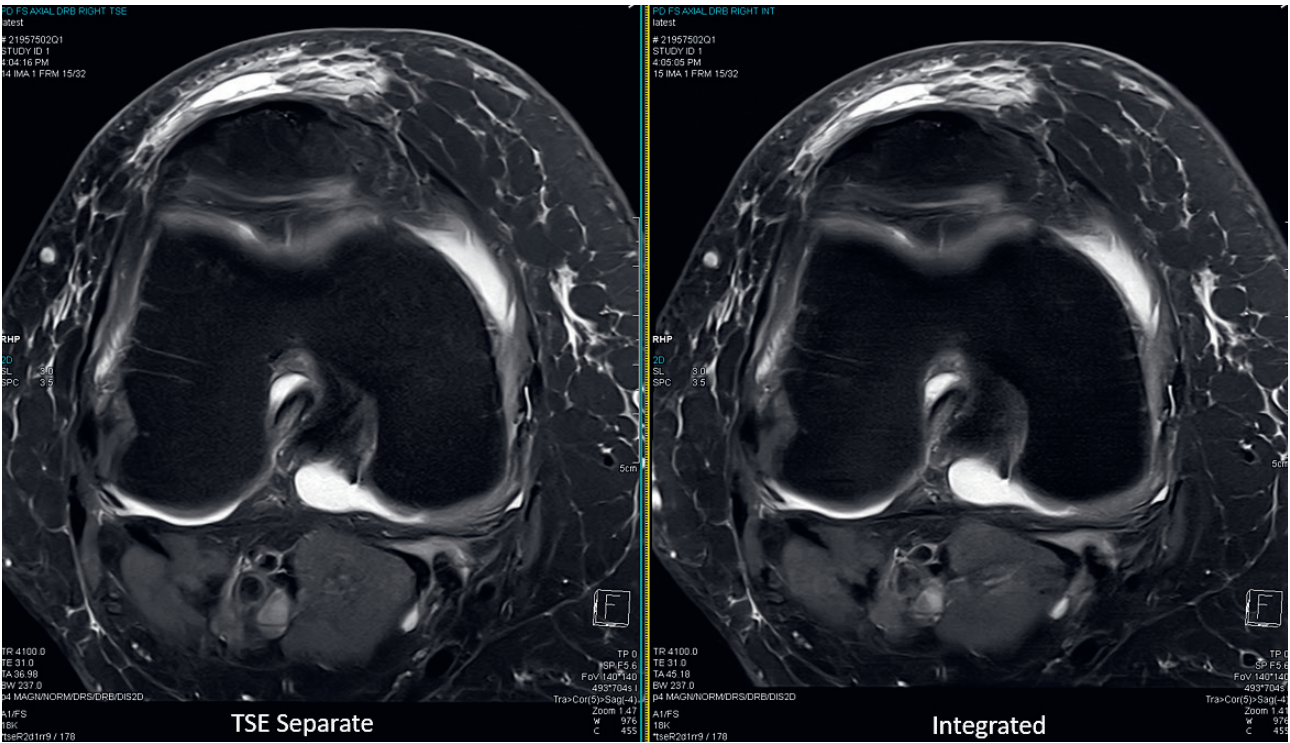
これまで、GRAPPA を使用した際に生じる過剰な画像ノイズのため、高い iPAT ファクターを使用するときには、より保守的な調整を行ってきた。我々のディープラーニング (DL) 技術 Deep Resolve Boost のノイズ除去により、この画像ノイズの問題は低減する。Deep Resolve Boost は DL 再構成アルゴリズムであり、アンダーサンプリングされた生データから高い信号雑音比 (SNR) の画像を再構成するために、多数のデータセットでトレ

ニングされている。このトレーニングされたディープニューラルネットワークは、高倍速化された撮像で動作するように最適化されているため、現在、臨床では iPAT ファクター 4 が日常的に使用されることが多い。iPAT ファクター 4 は、k 空間の全ラインの 4 分の 1 しか取得しないことを意味する (リファレンス スキャンモードによる)。iPAT ファクターを 3 に下げると、撮像時間はやや延長するが、より多くの k 空間ラインが収集されるため、より微細な解剖学的構造の可視化が向上する (図 1)。

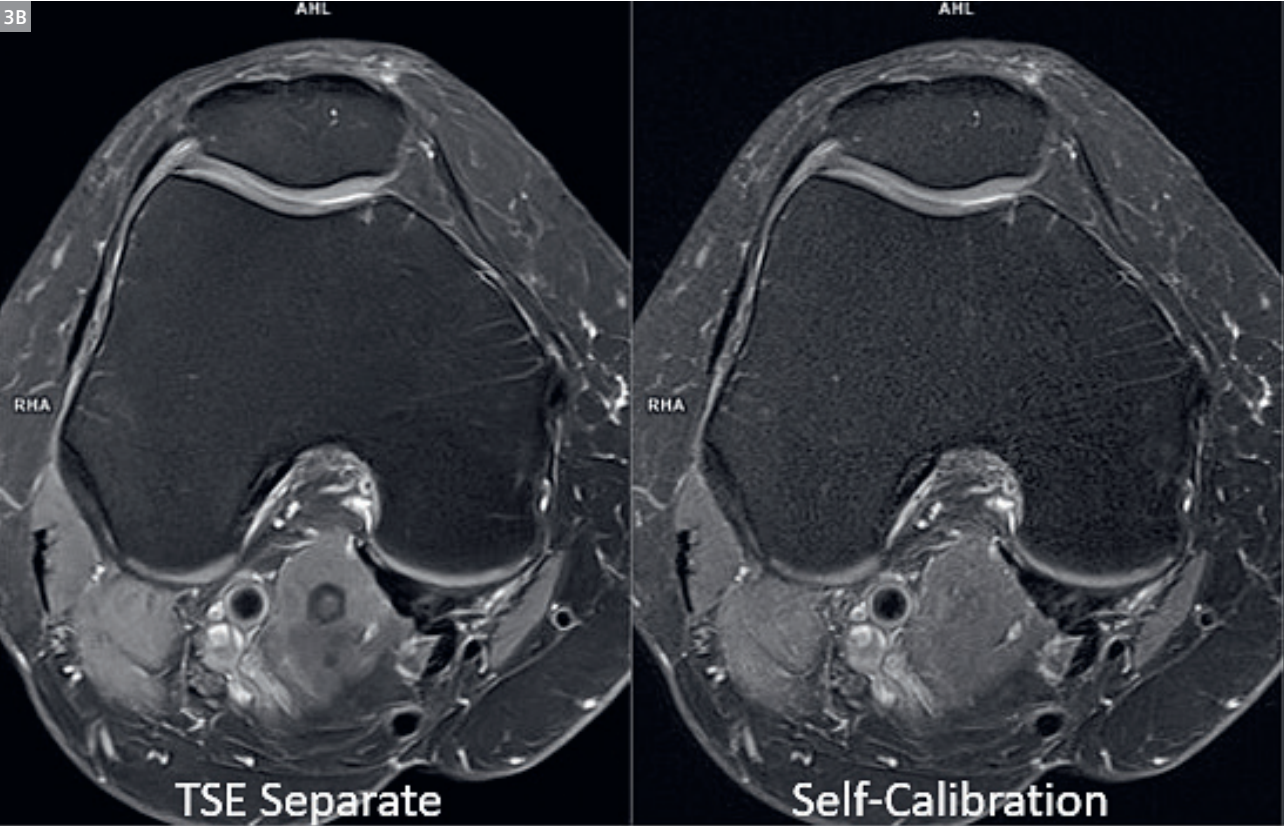
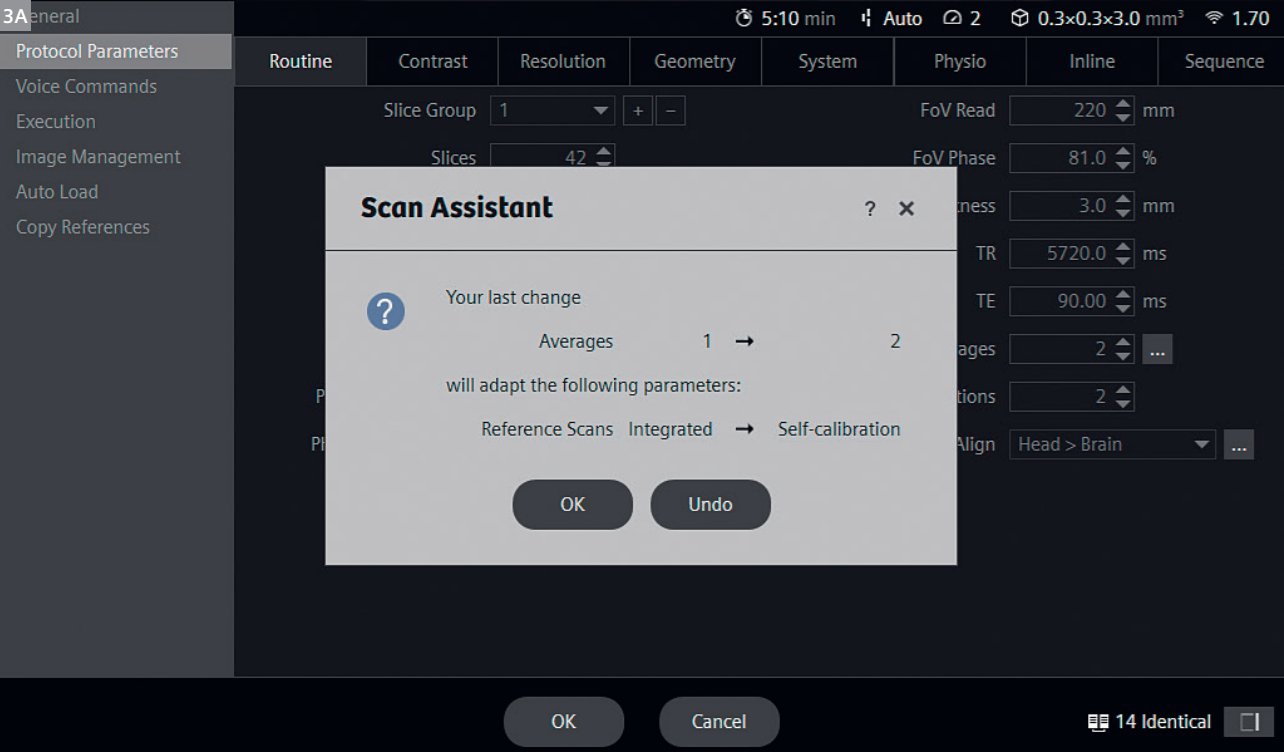
GRAPPA を用いた DL 再構成アルゴリズムでは、PAT リファレンススキャンモードが画像の鮮鋭度に影響を与えることがある。リファレンススキャンは、GRAPPA 再構成中に k 空間内の missing ポイント／ラインを計算するために必要である。簡単な注意事項として、リファレンススキャンモードにはいくつかの種類があり、シーケンスの種類や用途によって異なる。DL TSE では、“Integrated” と “TSE Separate” (多段面同時励起 (SMS) と組み合わせない限り、“TSE Separate” のみ) の 2 つが利用可能である。我々の経験では、TSE Separate の方が滑らかな画像になり、“Integrated” の方が粗い画像になる傾向がある (図 2)。



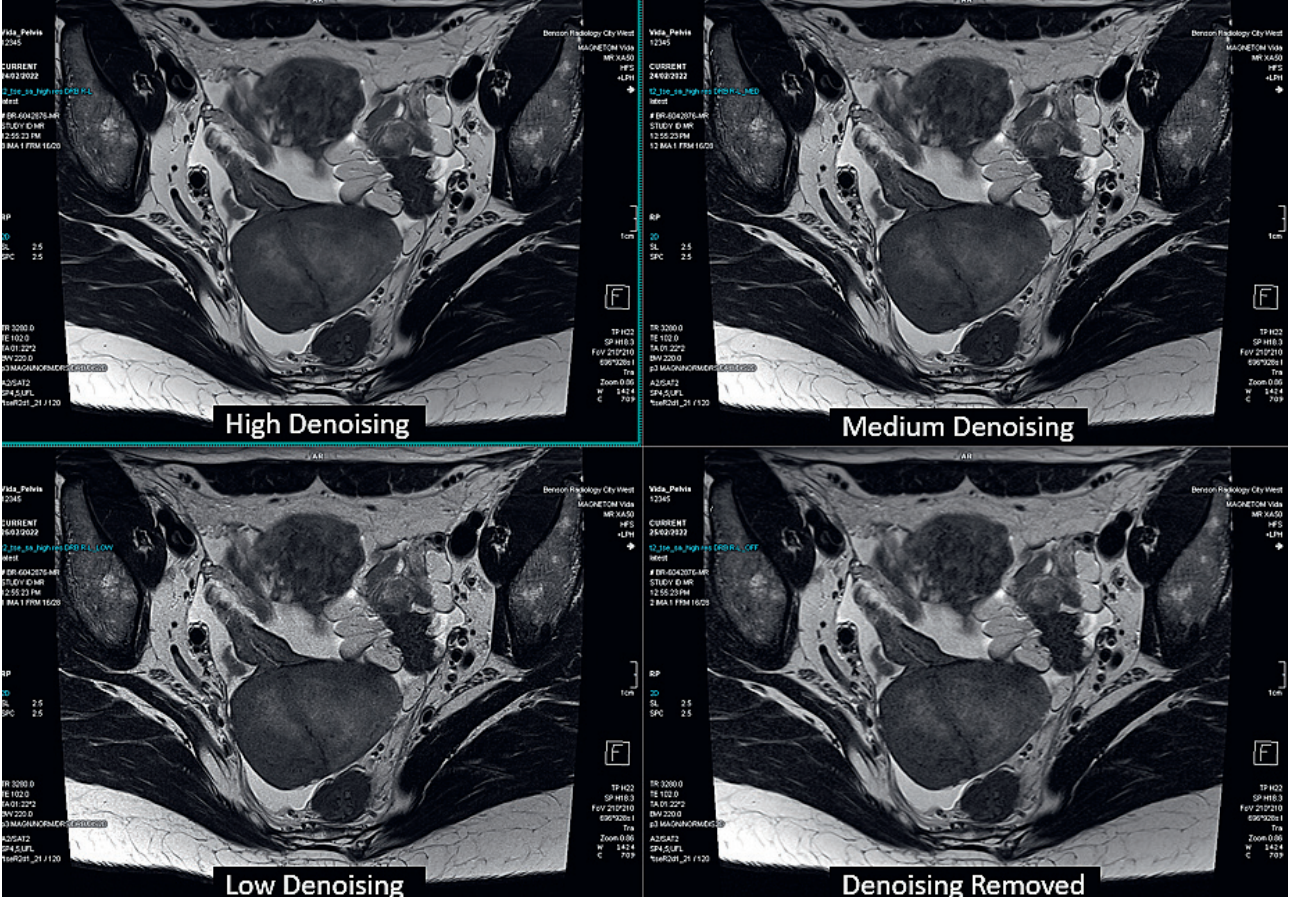
1 3 T MAGNETOM Lumina で取得した Deep Resolve Boost によるノイズ除去。
画像提供: Beyond Radiology (Auckland, New Zealand)



2 3 T MAGNETOM Vida で取得されたリファレンススキャンの違い。
画像提供: Queensland X-Ray (Coorparoo and Brisbane, Australia)



3 図3 (3A) リファレンススキャンモード：Self-Calibrationの設定。
(3B) DL再構成と組み合わせたリファレンススキャンモードの違い。
画像提供：3T MAGNETOM Vida、Queensland X-Ray (Coorparoo and Brisbane, Australia)



4 3T MAGNETOM Vida で撮像したノイズ除去レベルの比較。
画像提供：Benson Radiology(City West, Adelaide, Australia)

リファレンススキャンモード“Integrated”は多少の動きに対してより寛容であるため、前立腺、直腸などの部位によってはTSE Separateよりも適切であることを覚えておく価値がある。syngo MR XA60 以前のバージョンにおいて、Deep Resolve Boostを使用する際に注意すべきもう1つのリファレンススキャンモードがSelf-Calibrationである。このパラメータは加算回数がiPATファクター数以上に設定した場合に自動的に適用される(図3A)。Self-Calibrationモードは、ディープニューラルネットワークがこの種のデータでトレーニングされておらず、ノイズ除去が期待通りに動作しないため、“Integrated”または“TSE Separate”のいずれかを選択する(図3B)。

前述のパラメータに加え、低、中、高のノイズ除去レベルが選択可能である。適用されるノイズ除去の量は、多くの場合、放射線技師の好みに基づいている：ノイズ除去レベルを高くすると、ノイズ除去レベルを低くするよりも滑らかな画像になる。Retrospective Reconstruction ツールを使用すると、1回の撮像で簡単に比較画像を作成することができる(図4)。これはDeep Resolveを適応した撮像でのみ可能で、画像再構成にDeep Resolveをレトロスペクティブに追加することはできないことに注意する。

謝辞

Jonathan Richer、Kylie Martin、Georgia Peisker に特別な感謝を申し上げます。

心臓全体のバウンディングボックスの中心は、計画される心臓の撮像スライスの中心位置決定に使用される。3D Whole Heart Pro の撮像では、サチュレーションバンドが腕の上に設定され、左心室のバウンディングボックスが画像ナビゲータ（iNav）の設定に使用される。呼吸ゲーティング撮像では、肝ドームのランドマークが横隔膜に設定するペンシルビームナビゲータの位置決めに使用される。

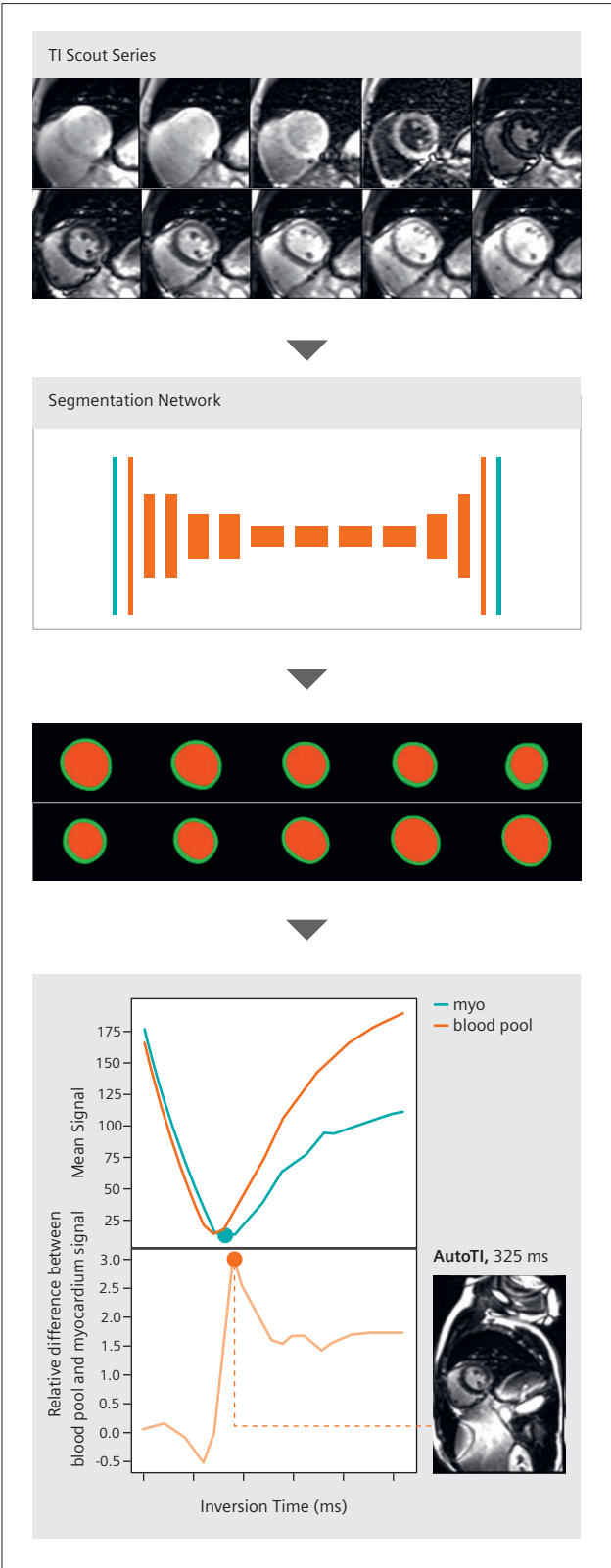
Auto Resting Phase は、心周期の静止期を検出する。これは、4-chamber View のシネ画像に対して関心領域（ROI）のセグメンテーションが行われ、ROI 毎にシネ画像全体にわたる画像レジストレーションに基づいて、心周期の動きが定量化される（図 3）。

関心領域（ROI）を設定するために、左右の心室と心房のための多領域セグメンテーションネットワークと、右冠動脈（RCA）検出ネットワークの 2 つのネットワークがトレーニングされ、セグメンテーションと RCA ランドマーク検出の両方に U Net モデルが使用された。そして、これらの ROI の解剖学的位置と画像レジストレーションを組み合わせ、各 ROI のモーションカーブが計算される。モーションカーブの谷は対応する解剖学的構造の静止期を表し、モーションアーチファクトのない撮像を行うために使用できる。

AutoTI は、TI スカウトで撮像した短軸像から心筋と左室血液プールのセグメンテーションを行い、その後の LGE 撮像に最適な TI を検出する（図 4）。学習された U Net モデルを用いてセグメンテーションを行った後、セグメンテーションマスクを用いて TI スカウト像の各 TI における心筋と血液プールの平均信号強度が計算される。心筋の信号強度曲線から信号が最小となる TI 時間が初期選択される。この初期 TI 時間から短い時間の中で、血液 - 心筋コントラストを最適化するように血液プールと心筋信号の相対差が最も大きくなる TI が最適な TI として最終的に選択される。

臨床評価と共同研究

Auto Resting Phase の最初の評価は Diagnostikum Berlin で行われ、高い評価を得た。Rolf Gebker 医学博士によると、オペレータは自動機能に非常に満足しており、安静相のトリガー遅延を調整する必要はほとんどなかった。ブラジルの Radiologia Clinica de Campinas の Juliano Lara Fernandes 医学博士を含む他の施設のスタッフからのフィードバックから、研究用アプリケーションの一部として配布される前に改良された。



4 Auto TI 機能の概要。

愛媛大学の臨床論文 [1] は、この Auto Resting Phase 機能の利点を、「心臓の静止している時相を手動で検出する場合、専門家は平均 50 秒、経験の浅いオペレータは最大 100 秒かかるが、ニューラルネットワークを用いると、シネ画像を取得するとほぼ同時にその時相を決定した。さらに、その研究では、ルート平均二乗誤差（RMSE）を使用して、専門家のアノテーションと比較した場合、ニューラルネットワークが心臓の静止時間を、経験の少ないオペレーターよりもより正確に検出したことが報告された。

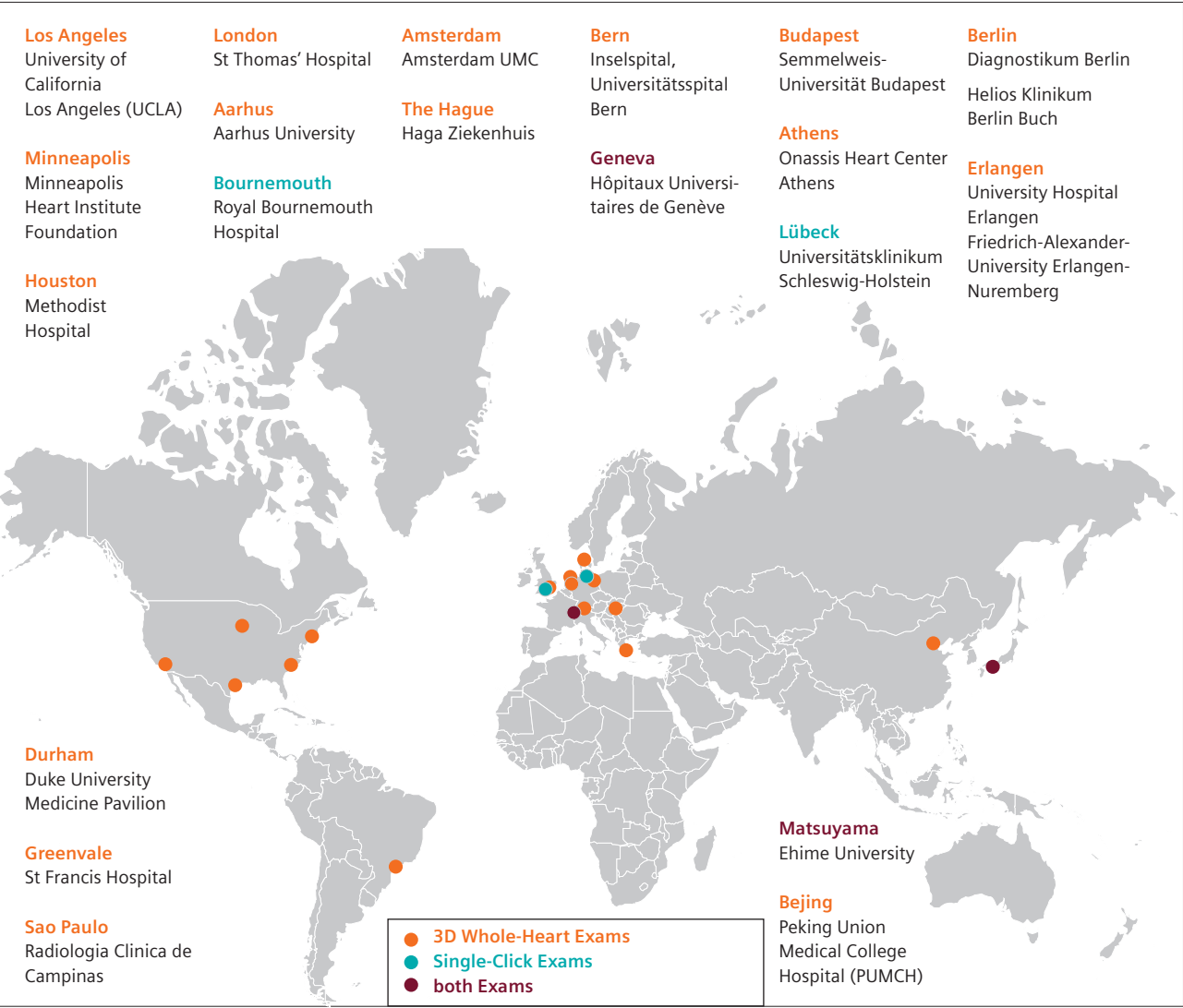
Auto Positioning と AutoTI を含む完全な AutoMate Cardiac プラットフォームは、Numaris X プラットフォーム上の研究用アプリケーションとして展開された。

初期の評価では、オペレータからの支持や検証研究の両面で、有望な結果が得られた。米国ニューヨーク州グリーンベール

にある St.Francis Heart Hospital, DeMatteis Research Center の Jason Craft 医学博士は、「AI スカウトは心筋の静止時間の検出とナビゲータの配置にうまく機能している」とコメントしている。Aarhus 大学の研究 [2] では、正確に心筋の静止時間を自動検出できることが実証され、また Royal Bournemouth Hospital の研究 [3] では、AutoTI を使用した 20 症例すべてにおいて TI を正確に選択したことが実証された。

シングルクリック CMR ワークフロー

我々のチームは、AutoMate Cardiac の各モジュールを基に、他の部位で搭載されている myExam Autopilot を参考に、完全に自動化されたシングルクリック CMR ワークフローの可能性を検討した。現在搭載されていない短軸像のサブセットを自動設定するコンポーネントを組み込み、CMR のための合理的でモジュール化されたシングルクリックのワークフローを開発した。

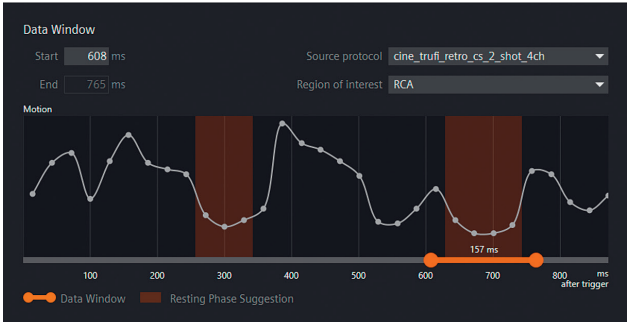


5 3D Whole-Heart およびシングルクリック検査の AI ワークフロー機能を検証するための臨床パートナー。

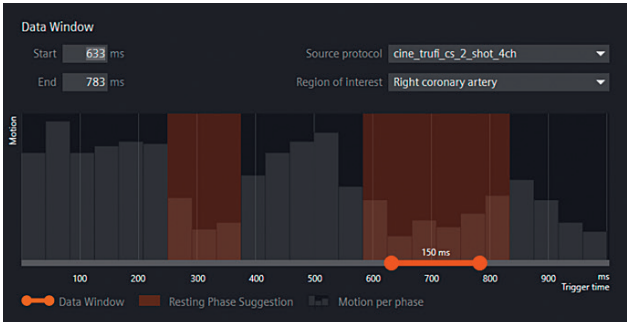
University Hospital Schleswig-Holstein の Campus Lübeck [4]、Royal Bournemouth Hospital [3]、Geneva University Hospitals [5] で実施されたフィージビリティスタディの結果は有望であった。Lübeck では、44 人の患者検査のうち、マニュアル作業が必要だったのはわずか 4 名であり、Bournemouth では、従来の myExam Cardiac Assist とシングルクリック法の比較で、5 分の時間短縮が示された。現在審査中の Geneva の評価では、シングルクリック法は計画ミスが少なく、特に自由呼吸ワークフローにおいて時間短縮できることが示唆されている。

開発から製品まで

研究用コンポーネントを製品に統合するためには、その機能を見直し、スクリーニングして理解し、Cardiac Assist の既存のソフトウェア・コンポーネントのコンテキストに組み込む必要があった。AutoMate Cardiac の新機能を、より少数の構成可能なコンポーネントに統合するというコンセプトのもと、開発が行われた。実際には、8 つの研究用アプリケーションを、製品アプリケーションの中で多様な機能を有する 3 つのアドインに統合することになった。例えば、Resting-phase と AutoTI コンポーネントは、異なるアドインを使用する代わりに、設定によってオン/オフを切り替えるようにし、Auto Positioning コンポーネントは、Cardiac Basic アドインに追加した。



6 動き大きさを折れ線で表現した製品化初期のスクリーンショット。



7 最終の製品版の画面。軸のラベルが再配置され、隣り合う2つのシネ画像間の動きの強さを棒グラフで具体的に示している。

アドインコンポーネントのプロトタイプコードは、製品コードの品質要件を満たすために部分的にリファクタリングされ、自動テストが追加された。製品化にあたっては、ユーザー・インターフェース（UI）のスタイルを変更し、また中国語、フランス語、ドイツ語、日本語、スペイン語など、さまざまな言語にインターフェイス・テキストを対応させるだけでなく、きれいで一貫性のある見た目と操作感を実現した。

製品化の過程で、ワークフローと視覚的要素の細部まで改善された。これには、X 軸と Y 軸の名前を変更するような小さな変更から、Resting-phase データの表現を変更するような大きな変更までが含まれた。Auto Resting Phase のユーザーインターフェースでは、折れ線グラフの代わりに、隣り合うシネ画像間の動きの強度を個別の値として示すことができる棒グラフを採用した。(図 6、図 7)

ユーザーマニュアル

新しい AutoMate Cardiac 検査のワークフローと、新たに実装されたアドインとその設定オプションについては、ユーザーが必要な情報を調べられるように、ユーザーマニュアルに記載する必要があり、英語によるユーザーマニュアルの作成も開発の 1 つに含まれていた。スクリーンショットとテキストから既存のユーザーマニュアルの適切なコンテキストに設定し、最終的なレイアウトとネイティブスピーカーによるチェックの後、世界中のユーザーのニーズに応えるため、プロの翻訳者によって 7 ヶ国語に翻訳された。

アプリケーションスペシャリストおよび社内トレーナー向けトレーニング

非常に複雑な MRI の分野では、社内のトレーナーやアプリケーションスペシャリストは、新しいオプションについて詳しく説明できるよう、新しい機能ごとにトレーニングを受ける必要がある。

AutoMate Cardiac では、スキャン実行の複雑さをセグメンテーションアルゴリズムとアドインの設定に移し Siemens Tree には、適切なアドイン設定とプロトコルの包括的なセットを提供している。ただ、検査を行う施設は非常に多様で、具体的なニーズも千差万別であるため、アプリケーションスペシャリストは、これらの個々の要件に合わせてアドインをカスタマイズする必要がある。そのため利用可能なオプション、相互関係、潜在的な Pitfall を深く理解することが重要となる。トレーニングセンターではマルチプレイヤーを対象に、カスタマーセンターではカスタマーデモを行う担当者を対象に、そして Customer Use Test を行う施設をサポートするアプリケーションスペシャリストを対象に、初期トレーニングを提供することが製品開発の任務となる。

る。このような初期トレーニングで得られた情報は、その後のトレーニング資料の作成に活用される。

Customer Use Test フェーズ

医療機器には、CUT（Customer Use Test）を行うことが義務付けられている¹。CUT は、最終的なリリースの前に、新しいソフトウェアを少数の臨床施設に提供することで、例えば造影剤を使用した検査など、実際の患者のいる臨床環境で新しいオプションを徹底的にテストすることができる。

CUT の段階では、顧客が新しいオプションをどのように使用しているか、直接訪問したときや CUT フェーズ後に公式に行われるフィードバックから、その使用経験を得ることができる。開発段階からコラボレーション・パートナーとして選ばれるような、特定のトピックについて多くの専門知識を持つ研究用アプリケーションのユーザーとは異なり、CUT の顧客は、新しいソフトウェアバージョンですべての部位とすべての新しい機能をテストしなければならないため、何かに特定したユーザーではない。

ソフトウェアバージョン syngo MR XA70A では、新しい AutoMate Cardiac 機能をテストするために 4 つの CUT サイトが選ばれた。2 カ所はドイツ、1 カ所はベルギー、1 カ所はルーマニアにある。そのうち 2 施設は臨床心臓検査に慣れており、1 施設はほとんど実施したことがなく、1 施設は CUT を行うまで実施したことがなかった。

4 つの顧客はすべて AutoMate Cardiac の機能によるサポート機能を利用し、フェーズ後もこの簡素化されたワークフローを継続する予定である。Auto Positioning、AutoTI、Auto Resting Phase の 3 つのコンポーネントの平均評価は 1.68 であった（1 ～ 5 の 5 段階評価、1 が最高得点）。

1 日のオンサイトトレーニングの後、CMR の経験がなかった顧客は Cardiac Assist を使用して包括的な心臓検査を実施できるようになった。CUT フェーズでは、4 人中 3 人の顧客が Cardiac Assist ワークフローと組み合わせて AutoMate Cardiac アドインを使用し、1 人の顧客は AutoMate Cardiac サポートのみを使用した。このテストフェーズでは、AutoMate Cardiac が複雑な

CMR 検査を容易にするために、併用またはスタンドアロンサポートとして使用できることが証明された。

CUT の段階では、新しく実装された機能に深刻な問題はなく、マイナーな問題は、最終リリース前の社内テスト段階で修正された。

まとめ

AutoMate Cardiac は、CMR スキャンの自動化を大きく前進させる機能である。Auto Positioning、AutoTI、Auto Resting Phase のような AI を搭載した機能を通じて、我々はスキャンプロセスを簡素化し、精度を高め、オペレータのばらつきを低減する包括的なツールを開発した。AutoMate Cardiac は、現在進行中の検証と臨床応用の拡大により、CMR 検査を世界的に変革し、自動画像化ソリューションの限界を押し広げることができるだろう。

References

- Ogawa R, Kido T, Shiraishi Y, Yagi Y, Yoon S, Wetzl J, et al. Neural network-based fully automated cardiac resting phase detection algorithm compared with manual detection in patients. Acta Radiologica Open. 2022;11(10):20584601221137772.
- Wood G, Pedersen A, Kunze K, Neji R, Hajhosseiny R, Wetzl J, et al. Automated detection of cardiac rest period for trigger delay calculation for image-based navigator coronary magnetic resonance angiography. J Cardiovasc Magn Reson. 2023;25(1):52.
- McDermott S, Wetzl J, Schmidt M, Benbow M, Yoon S, Geppert C, et al. AI-based Cardiac Scan Automation: A Prospective Comparison of Highly Automated Scan Workflows in 32 Patients. J Cardiovasc Magn Reson. 2024;26(1):100674.
- Haenel A, Wetzl J, Yoon S, Schmidt M, Weißgerber AB, Barkhausen J, et al. Analysis of an AI-based prototype for user-independent automated cardiac MRI (CMR) scanning. Presented at: European Congress of Radiology; March 1–5, 2023; Vienna, Austria.
- Glessgen C, Crowe L, Wetzl J, Schmidt M, Yoon S, Poletti PA, et al. Fully Automated vs. Manual Cardiac MRI: a Single-Center Prospective Evaluation of Quality and Scan Times. European Radiology [in revision].
- Yoon S, Preuhs E, Schmidt M, Forman C, Chitiboi T, Sharma P, et al. Automated Cardiac Resting Phase Detection Targeted on the Right Coronary Artery. Machine Learning for Biomedical Imaging. arXiv. 2023;2:2109.02342.
- Yoon S, Schmidt M, Rick M, Chitiboi T, Sharma P, Emrich T, et al. Validation of a deep learning based automated myocardial inversion time selection for late gadolinium enhancement imaging in a prospective study. Presentation at International Society for Magnetic Resonance in Medicine (ISMRM) 29th Annual Meeting & Exhibition, Virtual.



From left to right: Jens Wetzl, Manuela Rick, Seung Su Yoon, Michaela Schmidt, Miriam Van de Stadt-Lagemaat, Dominik Rupp

Contact

Jens Wetzl
Siemens Healthineers
DI MR RCT CLS CARD
Allee am Roethelheimpark 2
91052 Erlangen
Germany
jens.wetzl@siemens-healthineers.com

Seung Su Yoon
Siemens Healthineers
DI MR R&D SWI AFT APPL
Allee am Roethelheimpark 2
91052 Erlangen
Germany
seungsu.yoon@siemens-healthineers.com

¹ CUT(Customer Use Test)は、日本の薬機法において、義務付けられているものではありません。

深部静脈血栓症における非造影 MR Black-Blood イメージング

Xinyu Wang, M.D.¹; Yuehong Liu, M.D.¹; Yichen Tang, M.D.¹; Chen Zhang, Ph.D.²; Alto Stemmer³; Qi Yang, M.D., Ph.D.^{1,4,5}

¹Department of Radiology, Beijing Chao-yang Hospital, Capital Medical University, Beijing, China
²MR Research Collaboration, Siemens Healthineers, Beijing, China
³Siemens Healthineers, Erlangen, Germany
⁴Laboratory for Clinical Medicine, Capital Medical University, Beijing, China
⁵Key Laboratory of Medical Engineering for Cardiovascular Disease, Ministry of Education, Beijing, China

はじめに

Delay Alternating with Nutation for Tailored Excitation (DANTE) と Sampling Perfection with Application optimized Contrasts using different flip angle Evolution (SPACE) を用いた新しい非造影 T1 強調 MR Black-Blood イメージング (MRBTI) 技術¹ は、深部静脈血栓症 (DVT) を同定および評価に有効である。MRBTI は、血栓内のメトヘモグロビン濃度の各時間的フェーズでの信号の違いに基づいて、サブミリメートル以下の分解能で血栓の病期を同定することができる。この簡単な報告では、急性 DVT 患者における血栓の Black-Blood イメージングの成功例を示す。

使用機器と方法

症例 1 と症例 2 に示した画像は、3T MRI 装置 (MAGNETOM Vida, Siemens Healthineers, Erlangen, Germany) を用い、2 つの 18 ch Body コイルを使用して撮像された。各患者は足をガントリーに向けて (feet first) 仰臥位になり、3-ステーションでの MRI 撮像が行われた。第 1 ステーションは総腸骨静脈から近位大腿静脈まで、第 2 ステーションは大腿静脈から近位膝窩静脈まで、第 3 ステーションは膝窩静脈からふくらはぎの静脈遠位端までをカバーした。すべての症例で DANTE による血液抑制併用 SPACE 研究用シーケンス¹をもちいた非造影 MR Black-Blood イメージング (MRBTI) が施行された。

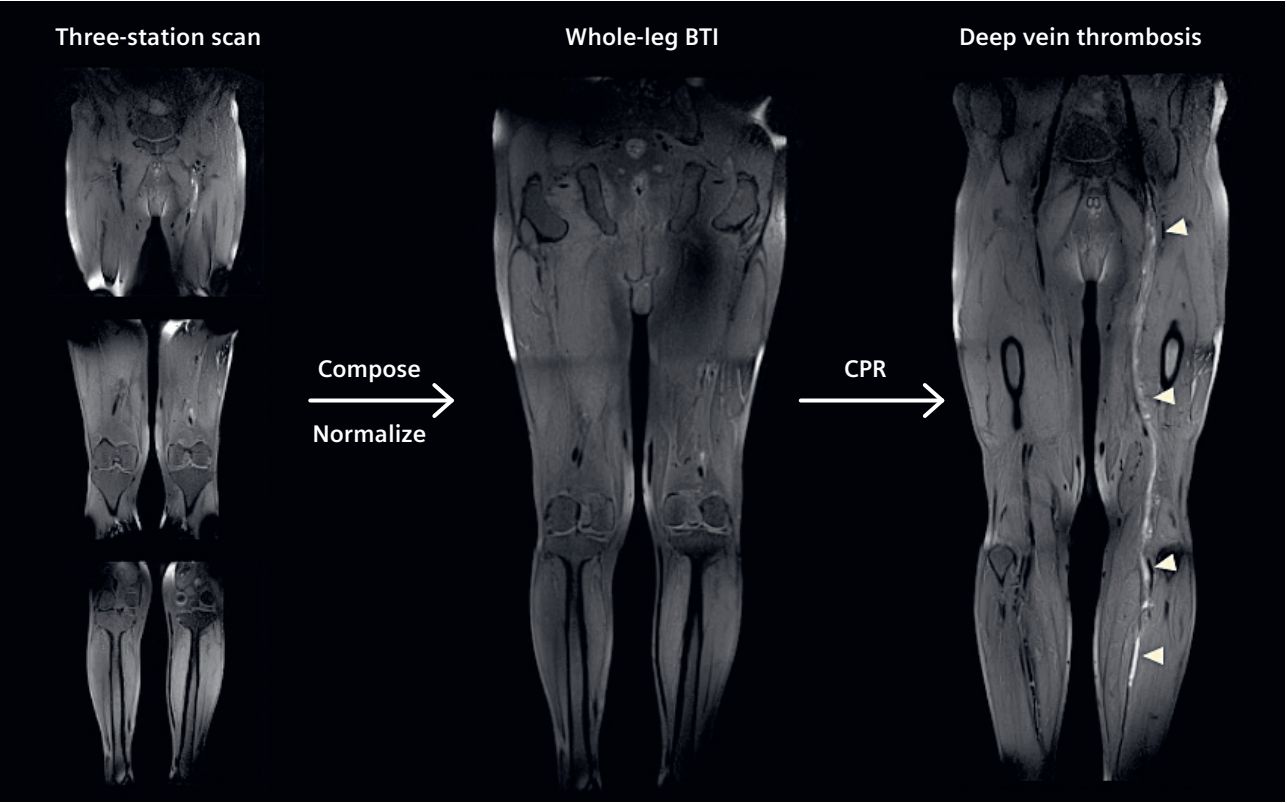
| The following scan parameters were used: | |
|--|---|
| Repetition time (TR) | 700 ms |
| Echo time (TE) | 11 ms |
| FOV | 400 × 400 mm ² |
| Matrix | 352 × 387 |
| Slices per slab | 256 |
| Voxel size | 0.6 × 0.6 × 0.7 mm ³ |
| Blood suppression | DANTE |
| Fat suppression | Water excitation |
| Acceleration mode | Generalized autocalibrating partially parallel acquisition (GRAPPA) |
| Acceleration factor | 4 |
| Bandwidth | 1184 Hz/pixel |
| Number of DANTE pulses | 200 |
| DANTE gradient duration | 1 ms |
| DANTE gradient amplitude | 17 mT/m |
| DANTE radiofrequency pulse flip angle | 15° |
| Scan time for each station | 4 minutes |
| Total scan time | 12 minutes |

表 1 3T MAGNETOM Vida での撮像パラメータ

すべての MR 画像は、後処理ワークステーション (syngo.via, Siemens Healthineers, Forchheim, Germany) を用いて合成され、Horos ソフトウェアバージョン 3.3.6 (Horos Project, Geneva, Switzerland) を用いて、多平面再構成 (MPR) および曲線平面再構成 (CPR) が作成された。血栓の信号特性を評価するため、すべての血栓に対して等信号血栓または高信号血栓の判定を行った。具体的には、血栓の信号強度が隣接する筋肉と比較して同等の信号強度であれば、等信号血栓と定義し、血栓の信号強度が隣接する筋肉の信号強度より有意に高ければ、高信号血栓と定義した。

症例 1

85 歳の男性は、5 日前から左下肢の腫脹と疼痛があり、呼吸困難の症状を伴っていた。入院時の血漿中 D ダイマー値は 5.43mg/L であった。入院後、MRBTI と computed tomography (CT) による造影肺血管撮像 (CTPA) 検査を受けた。MRBTI では、左大腿表在静脈に等信号血栓と中等度高信号血栓が、腓骨静脈、前・後脛骨静脈、腓腹筋静脈、ヒラメ筋静脈に高信号血栓が認められた。特に、遠位の深部静脈血栓の信号強度は近位血栓の信号強度より有意に高く、この症例では血栓はふくらはぎから発生し、徐々に近位静脈に進展したことが示唆された。CTPA の結果は両側肺塞栓症であった。これらの検査結果から、急性肺塞栓症 (PE) を合併した急性近位部 DVT と考えられ、抗凝固療法が必要とされた。



1 症例1

¹ Work in progress. このアプリケーションは現在開発中であり、米国およびその他の国では販売されていません。将来的な利用可能性は保証できません。

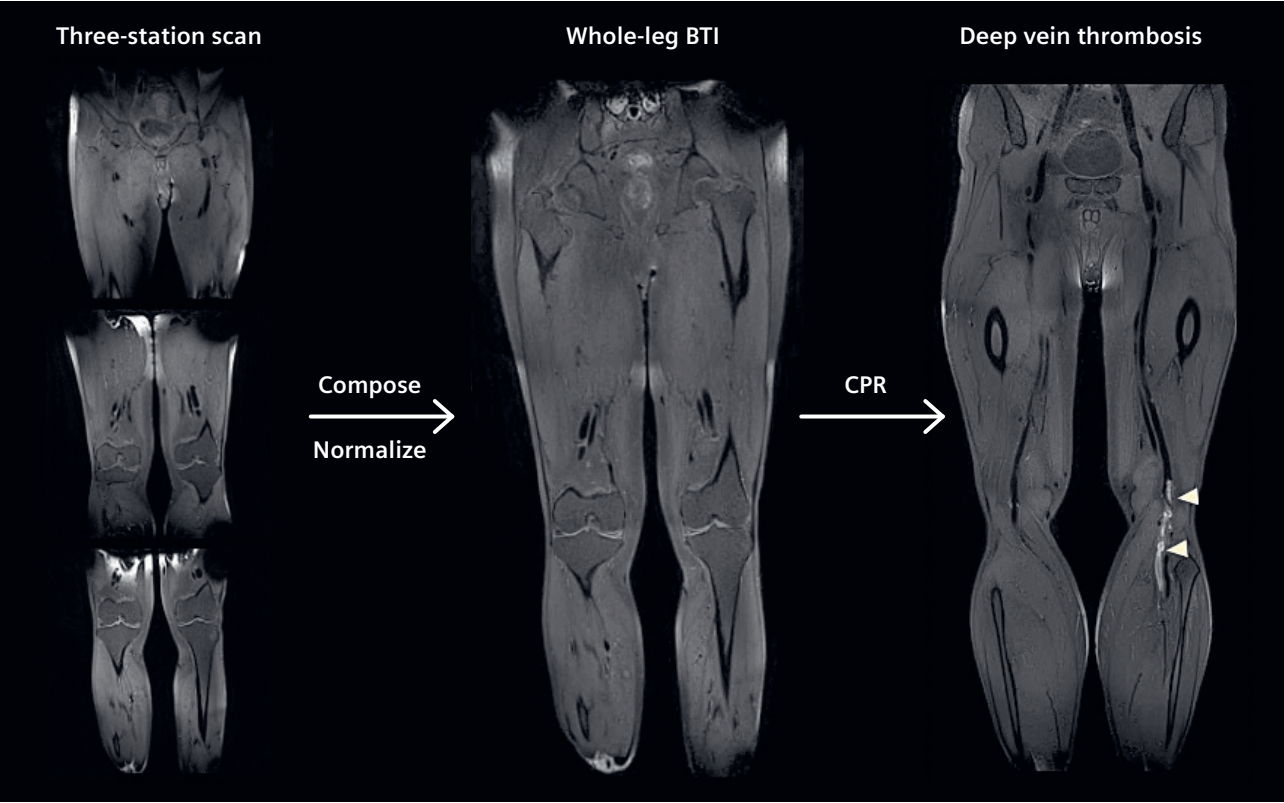
症例 2

52 歳の男性は、左下肢の腫脹と疼痛があり、治療のため来院した。発症前に左膝外傷の既往があった。MRBTI 画像では、左膝窩静脈に高信号の血栓を認めたが、他の静脈内腔に明らかな異常信号は認められなかった。CTPA 検査の結果、急性肺塞栓症は認められなかった。

考察

血液凝固により血栓を形成すると、赤血球中のヘモグロビンは時間の経過とともに一連の特徴的な酸化的变化を起こし、血栓の信号強度が異なる。DVT の初期には、デオキシヘモグロビン

を取り囲むペプチド鎖構造は変化しない。このため、T1 緩和時間を短縮する常磁性効果は得られず、等信号血栓となる。新たに形成された「新鮮な」血栓とみなされる緩い構造のデオキシヘモグロビンが支配的なこの期間は、自然血栓溶解や破裂が起こりやすい。メトヘモグロビンが支配する血栓は高い信号強度を示し、フィブリンの架橋形成とコラーゲン沈着を伴い、破裂に対する抵抗性が高まる。DANTE- SPACE 法は、特にガドリニウム造影の使用が適さない被検者における DVT の診断法として有望である。特に、信号強度の違いから、血栓の形成時期や肺塞栓症のリスクを明らかにすることができる。



2 症例 2

まとめ

DANTE-SPACE 法は、3T での等方性解像度の高速な末梢血管 Black-Blood イメージングを可能にする。これは、狭窄した末梢静脈のように血流が遅い場合でも、良好な血液信号抑制効果を持つことを意味する。近位および遠位 DVT 症例に対して、MRBTI は血栓の発生時期を同定し、急性血栓と慢性血栓を区別するための非侵襲的撮像法として使用することができる。

References

1 Mendichovszky IA, Priest AN, Bowden DJ, Hunter S, Joubert I, Hilborne S, et al. Combined MR direct thrombus imaging and non-contrast magnetic resonance venography reveal the evolution of deep vein thrombosis: a feasibility study. Eur Radiol. 2017;27(6):2326–2332.

2 Zhuang G, Tang C, He X, Liang J, He Z, Ye Y, et al. DANTE-SPACE: a new technical tool for DVT on 1.5T MRI. Int J Cardiovasc Imaging. 2019;35(12):2231–2237.

3 Chen H, He X, Xie G, Liang J, Ye Y, Deng W, et al. Cardiovascular magnetic resonance black-blood thrombus imaging for the diagnosis of acute deep vein thrombosis at 1.5 Tesla. J Cardiovasc Magn Reson. 2018;20(1):42.

4 Treitl KM, Treitl M, Kooijman-Kurfuerst H, Kammer NN, Coppenrath E, Suderland E, et al. Three-dimensional black-blood T1-weighted turbo spin-echo techniques for the diagnosis of deep vein thrombosis in comparison with contrast-enhanced magnetic

resonance imaging: a pilot study. Invest Radiol. 2015;50(6):401–8.

5 Li L, Miller KL, Jezzard P. DANTE-Prepared Pulse Trains: A Novel Approach to Motion-Sensitized and Motion-Suppressed Quantitative Magnetic Resonance Imaging. Magn Reson Med. 2012;68(5):1423–38.

6 Jeong MJ, Kwon H, Noh M, Ko GY, Gwon DI, Lee JS, et al. Relationship of Lower-extremity Deep Venous Thrombosis Density at CT Venography to Acute Pulmonary Embolism and the Risk of Postthrombotic Syndrome. Radiology. 2019;293(3):687–694.

7 Xie G, Chen H, He X, Liang J, Deng W, He Z, et al. Black-blood thrombus imaging (BTI): a contrast-free cardiovascular magnetic resonance approach for the diagnosis of non-acute deep vein thrombosis. J Cardiovasc Magn Reson. 2017;19(1):4.

8 Saha P, Andia ME, Modarai B, Blume U, Humphries J, Patel AS, et al. Magnetic resonance T1 relaxation time of venous thrombus is determined by iron processing and predicts susceptibility to lysis. Circulation. 2013;128(7):729–736.



Contact

Professor Qi Yang, M.D., Ph.D.
Chair, Department of Radiology
Beijing Chaoyang Hospital
Capital Medical University
No. 8 Gongti South Road
Chaoyang District
Beijing 100020
China
yangyangqiqi@gmail.com