

日本放射線腫瘍学会 第35回学術大会 ランチオンセミナー13

日時：2022年11月12日（土）

座長 国立がん研究センター中央病院 放射線治療科 科長 井垣 浩 先生



演題

CyberKnife & Radixact の導入と活用 ～広い選択肢がもたらす個別化戦略と今後の展望～



演者 名古屋大学大学院医学系研究科 量子介入治療学 准教授 川村 麻里子 先生

はじめに

私からは、主にサイバーナイフ、ラディザクトの導入経験を臨床面からご紹介する。

サイバーナイフ導入

当院では従来リニアック2台を用いて3D-CRTおよび高精度放射線治療を実施していた。治療部門エリアの拡張に伴い、2018年にサイバーナイフ、2022年にラディザクトを導入した。現在、年間700例前後の治療を実施している。サイバーナイフでは定位放射線治療（肺、前立腺、肝、脳、再照射など）、ラディザクトではIMRT（頭頸部、前立腺、食道、肺、CSI、TBI（予定））を実施している。

照射野の広さに応じて2種類の機種を使い分けている。サイバーナイフ照射部位の経年変化を図1に示す。前立腺と肝は金マーカーを入れるため煩雑さを感じるが、肺はTumor trackingができるとかなり準備は楽という印象を受ける。

臨床例提示

以下、経験した症例を提示する。

①多発脳転移への定位照射（図2）

こだわると治療時間が伸びるが複雑な計画は作成可能である。腫瘍数が4個くらいまでであれば、照射時間はまず20分を超えない。治療計画含め中1日くらいで治療を開始することが可能である。腫瘍数が5個を超える場

図1 サイバーナイフ照射部位の経年的変化

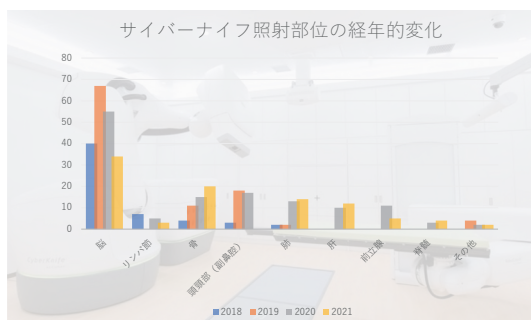


図2 多発脳転移治療例

多発脳転移への定位照射
こだわると治療時間が伸びるが複雑な計画は作成可能

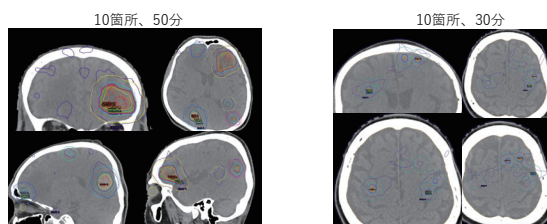
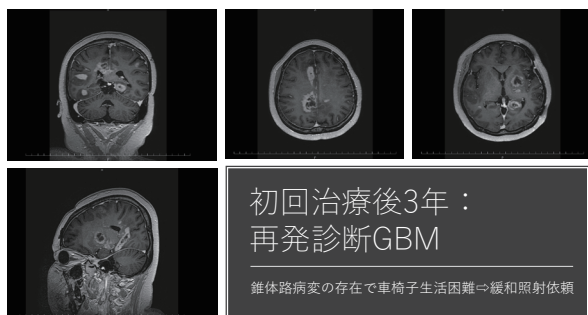
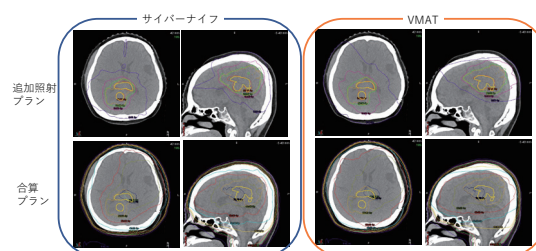


図3 再発GBM治療（左：再発診断画像、右：再照射計画）



再照射：
GBMで60 Gy/30 fr照射後の緩和照射25 Gy/5 fr



合は医学物理士に相談する。中枢型胎児性腫瘍 NOS（初回照射：全脳脊髄腔照射 25.2 Gy/14 fr、腫瘍床局所照射（VMAT 36 Gy/18 fr）を実施）治療 3 年後に再発した GBM への再照射例を提示する（図 3）。近傍に照射歴があるときや、しっかり線量を下げたい箇所が明確な場合、サイバーナイフで作成された線量分布は切れが良く、例えば、この症例のように下の方に流れるようなプランを作成することなども容易である。

②食道癌再照射

寡分割照射以外のサイバーナイフ治療経験例を紹介する（図 4）。本症例は 3D-CRT で治療 1 年後、照射野上縁にリンパ節再発した食道癌症例である。様々な検討の結果、化学放射線療法が選択され、再発リンパ節を含めた領域への再照射を計画した（1 回線量 1.8 Gy/fr）。再照射であり線量集中度が高いサイバーナイフで実施することとしたが、1 回線量が低いため低 MU のビームが多数形成され、低すぎる MU 値は線量精度を下げるため、調整に苦労し

た。胸腔臓器が近接する再照射の症例では、1 回線量を上げることが難しいこともある。よって、通常分割照射線量に特化した最適化アルゴリズムの追加が今後期待される。

③肺癌動体追尾照射

サイバーナイフによる肺定位放射線治療は、腫瘍さえ視認できればマーカーレス治療が可能であり、良い機械だと感じる。当院における肺癌定位照射の一般的なフローを図 5 に示す。サイバーナイフでは天井の直行する角度に配置された X 線管球撮像画像により腫瘍を視認する。視認が良好なケース、および困難なケース（背景肺が高濃度、腫瘍の CT 値が低め、縦隔に隠れる場合など）がある（図 6）。

④椎体以外の骨転移

脛骨への再照射治療計画を図 7 左に示す。椎体や頭蓋骨以外は bone matching ができないので、この症例は体表面にマーカーを貼付した（図 7 右）。このようなケースに対応できるように、Tracking 種別として bone matching アルゴリズムの追加が今後期待される。

図 4 サイバーナイフによる食道癌再照射治療計画

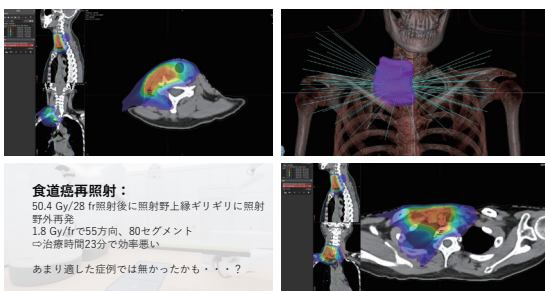


図 5 肺癌動体追尾照射

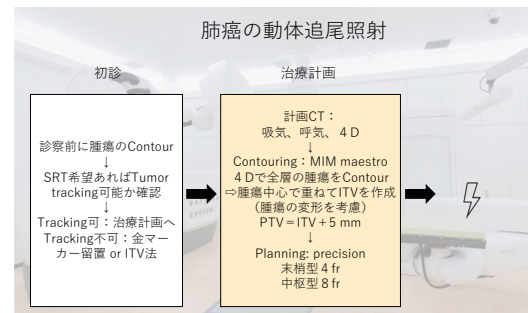


図 6 サイバーナイフ 追尾機能（左：追尾良好例、右：追尾困難例）

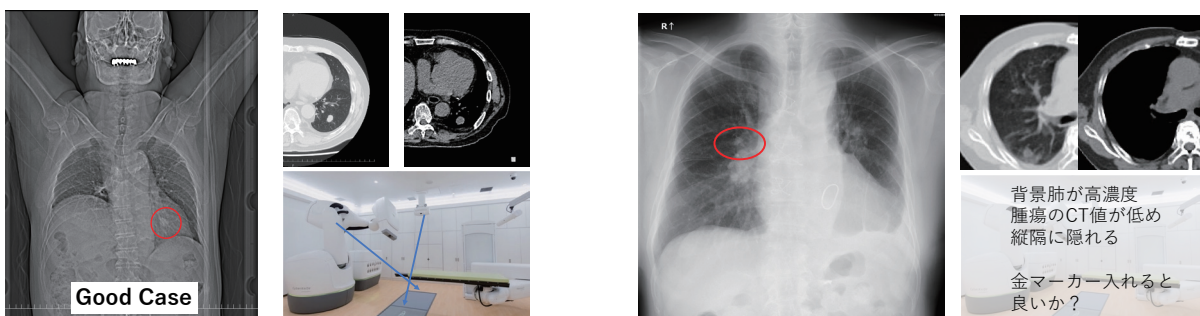


図 7 椎体以外の骨転移治療例



サイバーナイフ治療 小括

以上をまとめると、サイバーナイフ治療は照射角度の自由度が高いことが強みであり、切れの良い治療やマーカレスの腫瘍追尾が可能である。一方、サイバーナイフの弱みに、X線画像のみで位置照合していることがある。前立腺や肝臓など、腸管が近い部位への照射では不安があるが、この点は後述するラディザクトで対応可能である。

ラディザクト導入

当院では昨年1年間で178件のIMRTを実施した。頭頸部腫瘍、脳腫瘍で全体の3/4を占める。ラディザクトでは第一例目として食道癌を治療したが、CT imageによる照合だけで位置合わせを行うことが初めてで、慣れるまで多少苦労した。固定方法の改良でスループットがかなり改善されたが、2D imageによる照合も可能になると、被ばく線量の観点からも有益だと考える。

今までに、ラディザクトを用いて頭頸部25件、食道10件、肺6件、前立腺7件の治療を実施した(図8)。強調したいのは、固定が大切という点である。きれいに固定できると非常にスムーズに治療が進むので、最近はVMATと変わらない時間内で、場合によってはそれよりも早く治療を行えている実感がある。

治療を開始した当初は、照射体積が大きいことから全脳全脊髄照射(CSI)をラディザクトで行うかどうか議論があり、VMAT(最新ではない治療計画装置)とラディザクトで治療計画比較を行った(図9)。治療計画作成はラディザクトの方が早く、また、固定具を新調して固定精度がかなり改善し、CSIの位置合わせも比較的スムーズに実行で

きたため、今後のCSIはラディザクトで実施することになった。ラディザクトの最も好ましい点は、線量均一性が圧倒的に良い点である。100-105% isodoseで評価した場合、105%以上の線量が入る領域はそれほど増加しないが、ラディザクトでは非常に高い線量均一性が保たれている(図10左)。固定具を刷新し、固定精度が向上した後はラディザクトの方が圧倒的に楽で、かつ、治療時間も8分程度と短い。さらに、つなぎ目が不要である。つなぎ目のあるプランはそれだけ危険性がある。つなぎ目をばかすような工夫はするが、5mmずれるだけでも図に示すようなホットスポットが現れるリスクが生じる(図10右)。CSIは、できれば陽子線を実施したいが、タイミングの問題や、対象が大人の場合にはX線で実施せざるを得ないことが多々ある。ラディザクトを導入できた意味は大きいと考える。TBIも将来的に挑戦したい。

まとめ

以上、サイバーナイフとラディザクトの導入経験について紹介した。サイバーナイフとラディザクトの2台運用という状況を仮に想定すれば、現在の当院の状況ほど件数が多くなければ、各患者に最適な高精度治療を提供できるものとする。今の件数であれば、汎用装置が1台あることで、バランスが取れている。ラディザクトのClearRTはとて優越で、ターゲット・リスク臓器の見える化に有用である。両装置の線量率アップや、細かなIGRT機能のバージョンアップ、更には新規部位への適応拡大、Adaptive therapyの実装が期待される。

以上

図8 ラディザクト治療

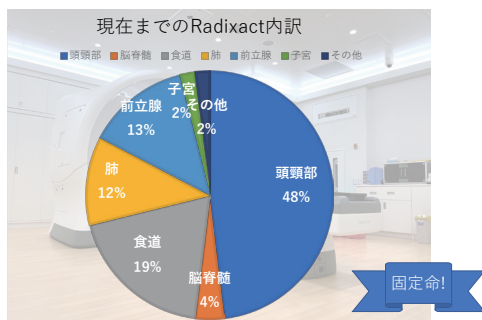


図9 ラディザクトによる全脳全脊髄照射 (CSI)

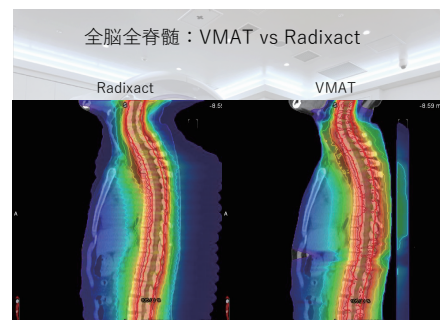
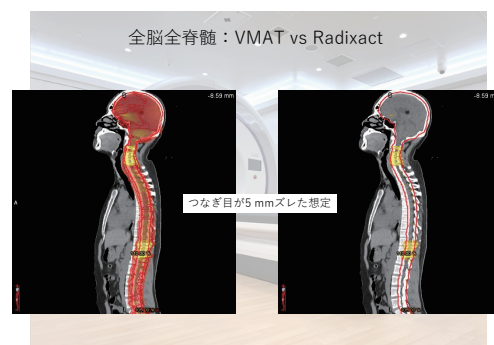
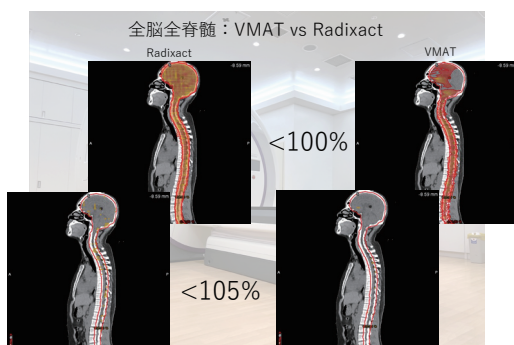


図10 ラディザクトによる全脳全脊髄照射 分布比較



CyberKnife & Radixact の導入と活用 ～広い選択肢がもたらす個別化戦略と今後の展望～



演者 名古屋大学医学部附属病院 放射線科 病院講師 加茂前 健 先生

はじめに

私からは、主にサイバーナイフ、ラディザクトの導入経験を物理・技術面からご紹介する。

CK と RX の組み合わせ (combo) 導入

当院では、実施できない治療をなくすことと、限りあるリソースの中で高度医療を安全に提供することを主眼として、東海地区の「最後の砦」としての機能を果たすべく日常診療を進めている。これらの目的を達成する治療機器として、サイバーナイフおよびラディザクトの組み合わせ導入を実施した。

サイバーナイフおよびラディザクトが得意とする対象疾患のイメージ概略を図 11 に示す。定位放射線治療と IMRT のそれぞれの利点を生かし、汎用装置では困難な症

例も治療を実施できる期待がある。

現在稼働している治療計画装置を列挙する。

Precision ver. 3.3.1.2 — 5 台 (アキュレイ社)

RayStation for TOMO ver. 10.0.1 — 1 台 (レイサーチ社)

Eclipse ver. 13.6 — 4 台 (Varian 社)

RayStation ver. 10.0.1 — 1 台 (レイサーチ社)

MIM Maestro ver. 7.2.3 — 4 台 (MIM Software 社)

治療操作室の全景を図 12 に示す。ここでは診療放射線技師、医学物理士、看護師がそれぞれ適度な距離感を持ちつつ業務を行い、多職種連携が効率的に実行されている。

また、Precision 上でサイバーナイフ、ラディザクトの治療計画比較ができることは想像以上に便利で、どちらのシステムで治療を行うか、計画を比較し、柔軟に対応できる (図 13)。

図 11 サイバーナイフ、ラディザクト併用の狙い

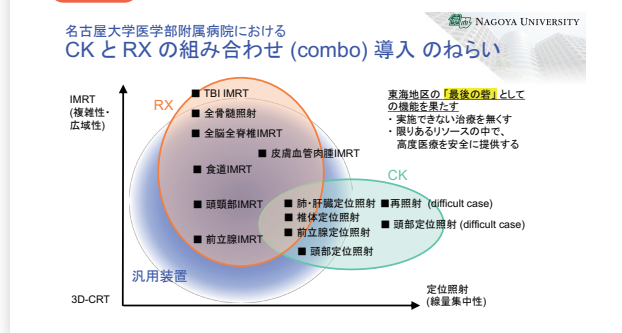
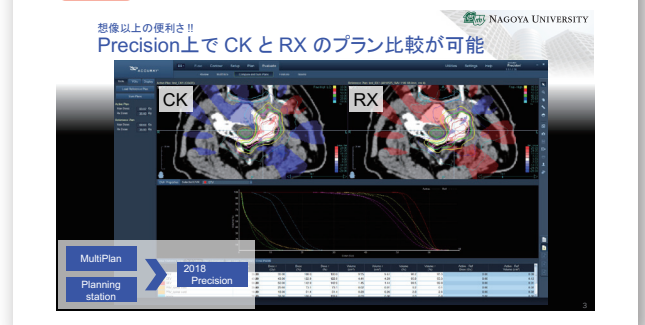


図 12 治療操作室



図 13 Precision 上での治療計画比較



CKとRXの最新機能

以下、サイバーナイフとラディザクトに搭載されている最新機能を①線量分布、②最適化アルゴリズム、③線量計算アルゴリズム、④画像誘導機構、⑤動体追尾機構の順に概説する。

①線量分布の特徴

脳腫瘍治療時のサイバーナイフとラディザクトの線量分布の相違を比較する。自由度の高さとビームの細かさにより、サイバーナイフで周囲正常脳への照射線量が最も少ないことが示唆される (図14左)。

一方、脊椎転移症例では、サイバーナイフでは標的カバー率は高いものの最大線量の高さ、治療時間の長さが露呈する。本比較ではヘリカルトモセラピー照射が標的カバー率、線量集中度、照射時間の点で最もバランスが良い照射であることが示唆された (図14右)。

②最適化アルゴリズム—VOLO、VOLO Ultra

サイバーナイフ、ラディザクトにはそれぞれ最適化アルゴリズムが搭載されている (図15)。VOLO (サイバー

ナイフ) では、線量分布の質の向上と治療計画・照射時間の短縮が図られ、直感的な操作性も向上した。VOLO Ultra (ラディザクト) では、治療計画・照射時間がそれぞれ短縮した。また、従来ではガントリ回転中心からターゲットまでの距離および選択したJaw幅から適切なガントリ回転ピッチを参照テーブルよりマニュアルで選択する必要があったが、VOLO Ultraからはワンクリックで適切なガントリ回転ピッチが自動入力されるようになった。

③線量計算アルゴリズム—MC・FSPB+、CCCS

サイバーナイフ、ラディザクトそれぞれで使用できる線量計算アルゴリズムを図16左に示す。サイバーナイフのマルチリーフコリメータ (MLC) に対して Monte Carlo 法および Finite Size Pencil Beam with Lateral Scaling Option 法の線量計算精度を、不均質密度ファントムを用いて評価した。計算結果と実測値とのずれはどちらも実用上問題のない範囲であった (図16中央)。ラディザクトのアルゴリズム (Collapsed Cone Convolution/Superposition: CCCS) に関しても、計算結果と実測は良い一致を示した (図16右)。

図14 サイバーナイフとラディザクトの線量分布特徴 (左：脳転移、右：脊椎転移)

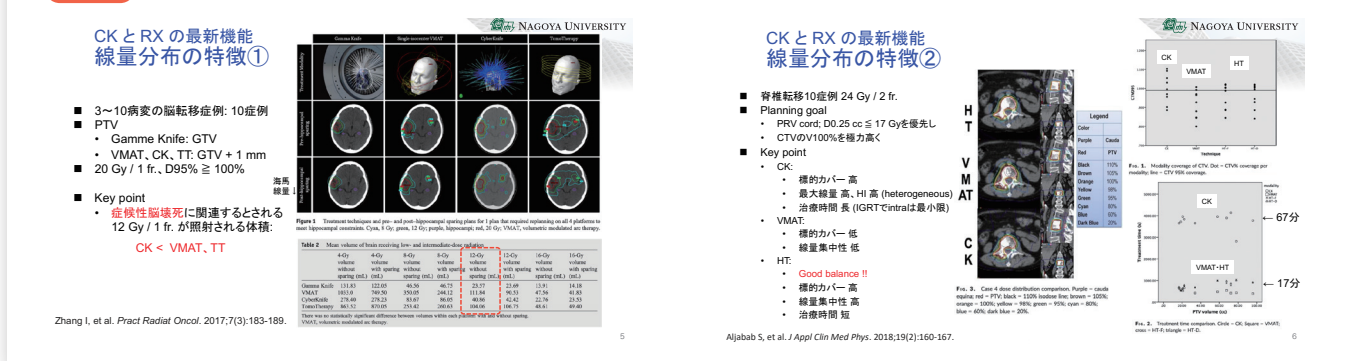


図15 最適化アルゴリズム VOLO / VOLO Ultra (左：サイバーナイフ、右：ラディザクト)

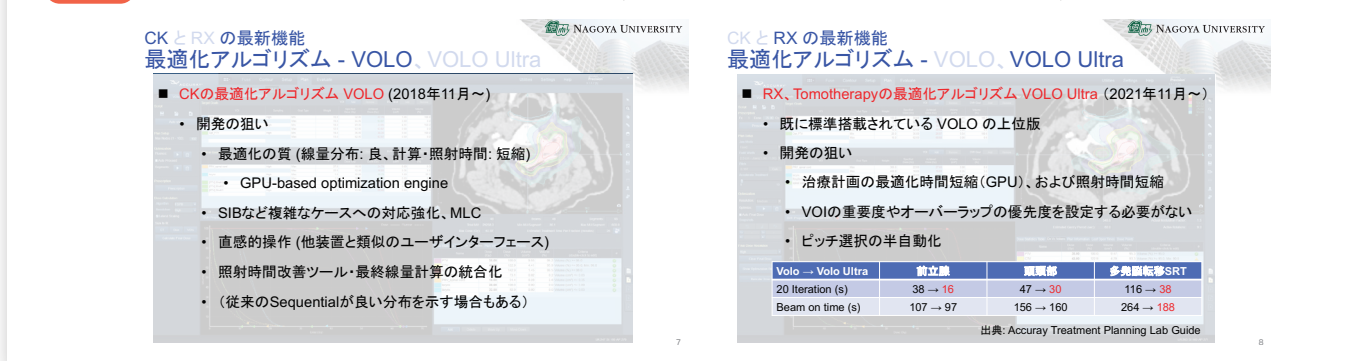
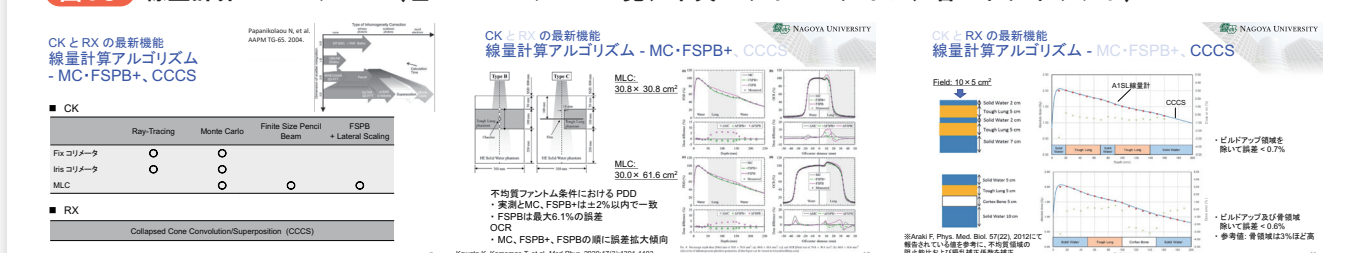


図16 線量計算アルゴリズム (左：アルゴリズム一覧、中央：サイバーナイフ、右：ラディザクト)



④画像誘導機構—TLS、ClearRT・(MVCT)

図17にサイバーナイフ、ラディザクトの画像誘導機構を示す。サイバーナイフでは、直行する角度に配置したX線管球(Target locating system: TLS)を利用し、標的の3次元位置を任意の間隔で取得し、治療計画時からの位置誤差を補正する。ラディザクトでは新たにkVファンビームを利用した画像誘導機構(ClearRT)が実装された。治療用MVビームと直行する位置に配置されたkV

ビームによりCT画像を撮像し、標的の3次元的位置を認識する。治療計画用CTとの対比を図18,19に示す。従来のMVCTから画質が改善され、CBCTでみられるアーチファクトも軽減されていることが示唆される。

ClearRTの撮像時間も平均0.6分程度であり、治療時間は現在概ね10分前後で運用されている(図20)。

⑤動体追尾照射—Synchrony(図21,22)

図21にサイバーナイフとラディザクトの動体追尾機能

図17 画像誘導機構(左:サイバーナイフ、右:ラディザクト)

CKとRXの最新機能
画像誘導機構-TLS、ClearRT・MVCT

■ TLSが任意間隔ごとに撮影し、算出した誤差を、ロボットにフィードバック補正

■ 基本的に寝台による位置補正はしない

■ 部位ごとにトラッキング技法が準備

対象部位	トラッキング技法	特徴
頭蓋内	Skull Tracking	骨構造全体をトラッキングして扱う
脊椎	Spine Tracking	骨構造をトラッキングして扱う
前立腺・軟部組織	Fiducial Tracking	埋め込んだフィジューナルをトラッキングする
肺	Lung Tracking	肺腫瘍そのものをマーカーとして利用する
呼吸性移動を伴う部位	Synchrony Respiratory Modeling	体表マーカーと体内ランドマークを用いる

Target locating system: TLS

CKとRXの最新機能
画像誘導機構-TLS、ClearRT・(MVCT)

ヘリカル kV ファンビーム CT (2021年~)

項目	仕様
方式	連続ヘリカルファンビーム
管電圧	max. 140 kV
検出器	フラットパネル CsI(Tl) 検出器
FOV	27 cm / 44 cm / 50 cm
スキャン長	max. 135 cm
スキャン速度	100 cm/min (max. 1.7 cm/sec)
画像再構成時間	リアルタイム表示
画像均一性	± 1.5 HU以内

図18 ClearRT 画像と他診断・位置合わせ画像の比較(左:副鼻腔、右:胸部)

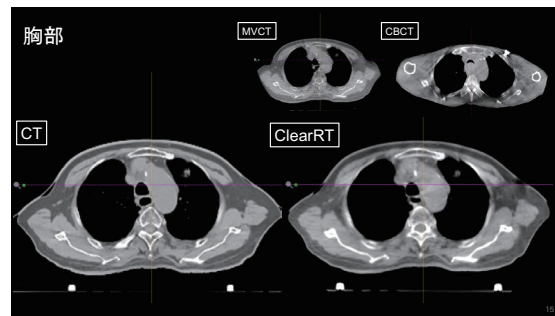
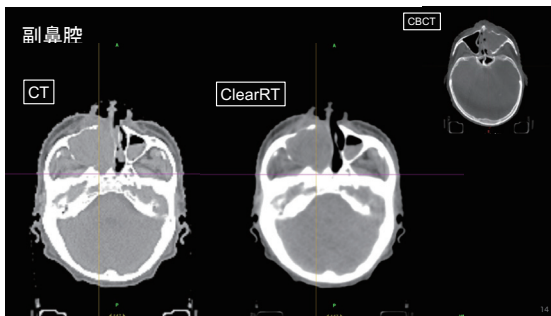


図19 ClearRT 画像と他の診断・位置合わせ画像の比較(骨盤部)

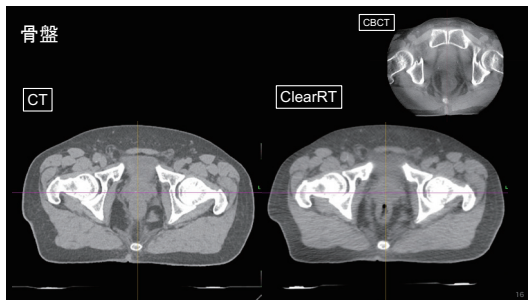


図20 ラディザクト治療時間(自験例)

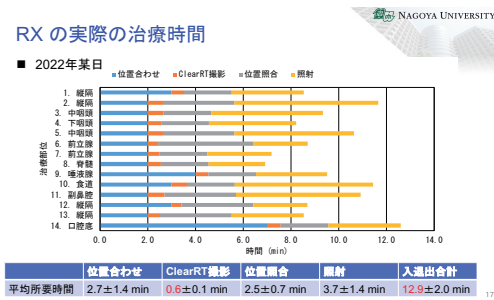


図21 動体追尾機能 Synchrony 概要

CKとRXの最新機能
動体追尾照射-Synchrony

■ Fiducial or Lung (marker-less) Tracking with Respiratory Modeling

ステップ	CK	RX (2019年~)
1. 呼吸波形取得	体架のLEDマーカーと光学カメラ	体架のLEDマーカーと光学カメラ
2. 標的座標取得	2方向同時撮影により取得	複数枚の2D画像と呼吸波形から予測
3. 相関モデル作成	1と2より相関モデルを作成	1と2より相関モデルを作成
4. 追尾照射	ロボット	Jaw と MLC

照射中も相関モデルを更新

図22 サイバーナイフ動体追尾照射 Synchrony

CKとRXの最新機能
動体追尾照射-Synchrony

■ CK + SRS MapCHECK (Sun Nuclear)

P2: Resp. cycle: 4 s
Amplitude: 25 mm

Plan	Algorithm	Absolute position		Relative position	
		Absolute position	Relative position	Absolute position	Relative position
P0	FFPB+	99.3	99.4	99.3	99.3
P1	MC	99.7	99.8	99.2	99.2
P2	FFPB+	99.0	99.0	99.0	99.0
P3	MC	99.0	99.0	99.0	99.0
P4	MC	100.0	100.0	99.4	99.4

均質数体ファントム条件において、追尾時のGamma pass (絶対位置)はMC > 93%, FSPB+ > 98%

フィルムとのGamma pass > 97%より検証はSRS MC+で行

角度依存 (vs A10 microchamber) 0.6%±0.45% (max < 2%)

Kawabata F, Kamomae T, et al. J Appl Clin Med Phys. 2022;23(8):e13645.

(Synchrony) の対比を示す。標的座標取得方法とデリバリーシステムでの追尾方法は異なるものの、呼吸波形と標的座標との相関モデルから標的位置を予測して追尾する機構は共通である。追尾精度も十分に担保されていることを確認している (Kawata et al., Medical Physics, 2020: 47(3): 1391-1403)。

余談になるが、我々の施設における基礎評価の結果、現在ではサイバーナイフの検証は SRS MapCHECK (Sun Nuclear 社) に移行している。また、サイバーナイフで患者 QA を行うには Fiducial marker が必要である。我々は汎用 IMRT ファントム内に挿入可能な板に Fiducial marker を埋没させた XOM system を開発した (Suzuki et al. Physica Medica 91(2021): 121-130.)。これにより、従来では IMRT ファントム表面に Fiducial marker を貼る必要から解放された。興味のある方には詳細ご案内します。

臨床での使い分け

以下、放射線治療装置の使い分けについて、自験例を元

に概説する。

①症例 1 — 頸椎転移 (図 23)

左下葉切除術後の頸椎 (C3) 転移に対し照射依頼があり、サイバーナイフとラディザクトの治療計画を比較した。サイバーナイフ治療計画の方が線量集中性が高く、かつ IGRT で intra-fractional motion も最小限に管理できることが見込まれるため、サイバーナイフ治療を選択した。

②症例 2 — 全脳全脊髄 (図 24)

松果体部胚細胞腫瘍への照射が依頼され、処方線量 25.2 Gy/14 fr + boost 19.8 Gy/11 fr - 25.2 Gy/ 14 fr にて計画した (PTV 約 76 cm)。ラディザクトと従来法を比較した結果を図 24 に示す。従来法では 3 個のアイソセンターを設けて計画をつないだのに対し、ラディザクトでは一つの計画で済み、治療計画時間も非常に短縮された。Beam on time も 8 分程度である。特筆すべきは ClearRT の画像である。治療計画 CT 画像と ClearRT 画像の対比を図 24 下図に示す。76 cm の PTV を含む全範囲を 1 つの画像で位置照合できることには、感動を覚えた。

図 23 頸椎転移線量分布 (左：計算時間比較、右：線量分布比較)

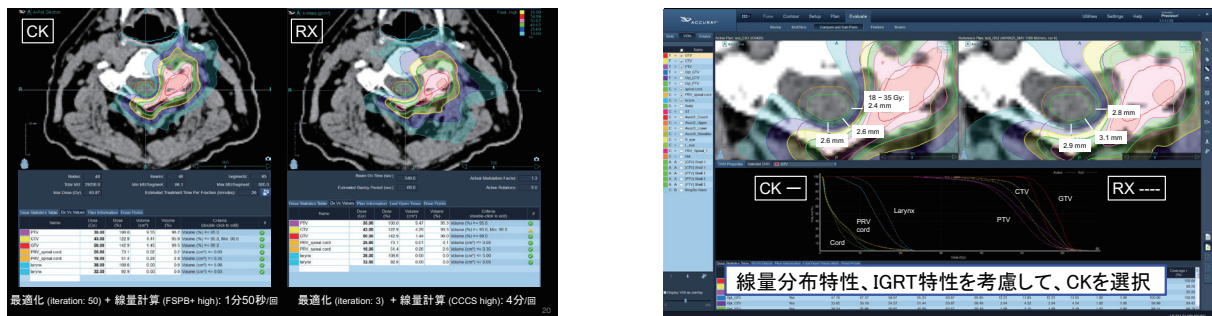
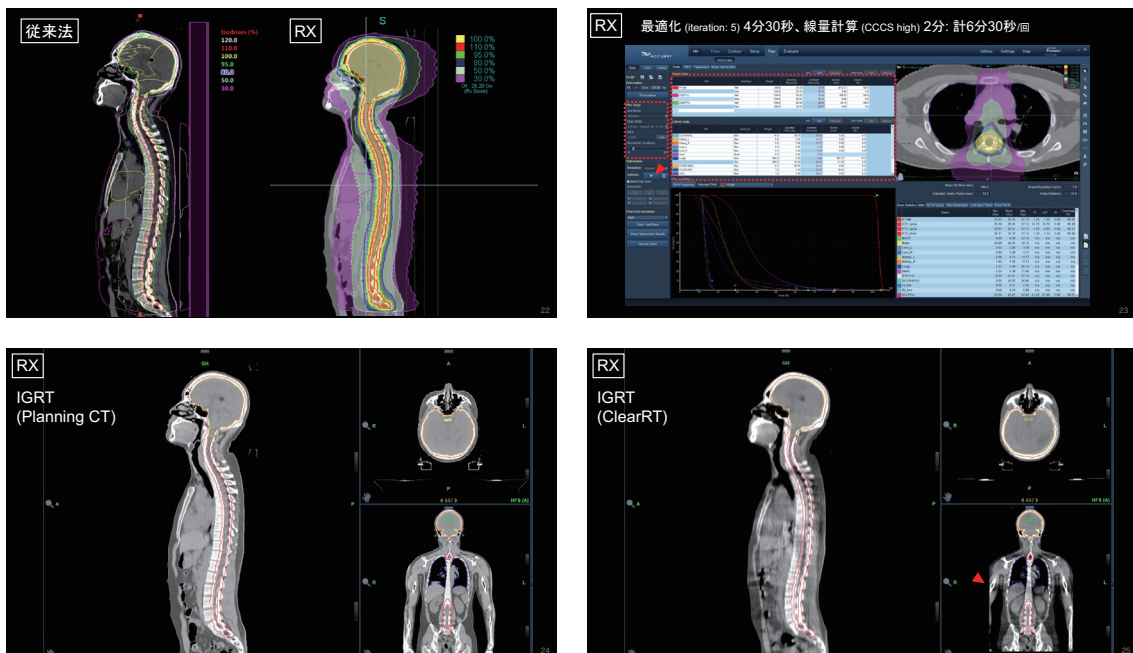


図 24 全脳全脊髄照射

(左上：従来法とラディザクトの対比、右上：ラディザクト計算時間、左下：治療計画 CT、右下：ClearRT)



CSI 実施時の感想だが、ClearRT による IGRT は煩雑性が少ないこと、ラディザクトでは重複照射を避けられ安全性が高いこと、一方で、CT-sim、患者セットアップが重要で、固定具作成、患者セットアップは従来法と同等もしくは更に高い技術が必要との印象を受けた (図 25)。

③症例 3 — 多発脳転移

肺癌脳転移 (10 病変) に対してサイバーナイフによる 3 分割照射の治療計画を検討した (図 26)。最適化と線量計算は 1 回 12 分で完了し、198 本の Beam を用いて 10 病変を治療する計画 (治療時間 50 分) が作成された。頭蓋内治療に対しては頭蓋骨による追尾 (Skull tracking) が実行される。約 1 分間隔で画像照合し、随時ロボットで位置を補正しながら治療される。単一アイソセンターの VMAT に比べると回転誤差の影響が少ない可能性が考えられる (図 27)。

今後への期待

以上、当院に導入したサイバーナイフ、ラディザクトの各治療について、主に物理・技術の面から紹介した。

サイバーナイフとラディザクトは、「特殊装置」から「普通以上の高精度治療装置」に進化し、汎用機の経験・知識を基盤に、使いこなせると考える。

また、CK と RX の組み合わせ (combo) 導入は、お互い長所を生かし、不足を補い合う、とても相性がいいカップルと言える。1 + 1 = 2 で終わらず、3 以上になるポテンシャルを有している。

これまでも驚くべき速さで開発が進んでいる。これまでの開発経緯を踏まえると、サイバーナイフには新しい分野での適応の拡大、ラディザクトへは Surface-guided radiation therapy、On-line adaptive radiotherapy などの機能拡充が将来的には期待される。

以上

図 25 CT シミュレーション、患者セットアップの重要性

CT-sim、患者セットアップの重要性



CSI 実施時の感想

- ClearRTによるIGRTは煩雑性少
- 重複照射にならない; 安全性高
- 固定具作成、患者セットアップは同等か更に高い技術が必要

図 26 多発脳転移治療

症例 3. 多発脳転移

- 肺がん脳転移 10病変
- 3 fr. の定位照射

種類	線量制約 (例)
GTV	V35.3 Gy ≧ 88% D0.01 cc ≧ 44.4 Gy ≧ 46.8 Gy
GTV+2mm	V26.7 Gy ≧ 88%
GTV-2mm	D100% ≧ 42 Gy
Normal brain	D7 cc ≧ 23 Gy D36 cc ≧ 19.6 Gy

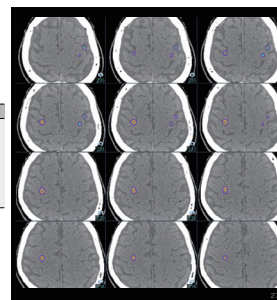
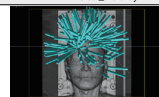
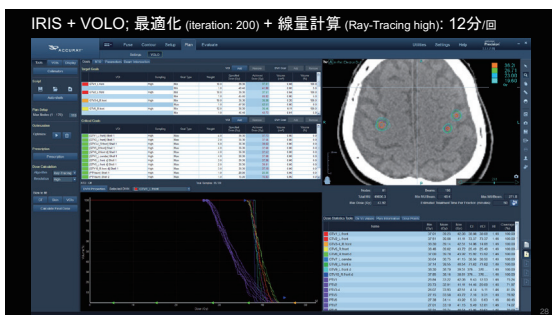
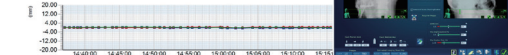


図 27 多発脳転移 (左: 最適化計算、右: Skull tracking)



Skull tracking

■ 補正結果 / inter-fraction



■ 最大補正値 / inter-fraction

Beam	X	Y	Z	Roll	Pitch	Yaw
X	1123	-2.48	0.25	0.10	0.50	-0.40
Y	1114	0.20	0.80	0.30	0.10	0.40
Z	105	0.20	0.10	0.50	-0.10	0.10
Yaw	1114	0.20	0.80	0.30	0	-0.40
Pitch	1114	0.20	0.80	0.30	0	0.40
Roll	1123	-0.40	0.20	-0.10	0.50	0

- 約1分間隔で画像照合し
随時ロボットで補正し治療
歪み補正 最大 0.6 mm
回転補正最大 0.4°
- Single-ic VMATに比べ、
回転誤差の影響が少ない
可能性

放射線治療の安全性について:

放射線療法 (Accuray 製品を通じて実施される放射線療法を含む) における副作用のほとんどは、軽度で一時的なものであり、その多くは疲労、悪心、皮膚刺激などです。しかしながら、重症な副作用を伴う場合もあり、疼痛や正常な身体機能の変化 (例えば、泌尿器や唾液の機能の変化)、生活の質の悪化、永続的な損傷、さらに死亡につながる場合があります。副作用は、放射線治療中または治療直後に生じる可能性も、治療後、年月を経てから生じる場合もあります。副作用の性質や重症度は多くの要因に依存しており、治療対象である腫瘍の大きさや位置、治療手技 (例えば照射線量)、患者の全身症状などに依存することが例として挙げられます。

アクレイ株式会社

〒100-0004 東京都千代田区大手町 2-2-1 新大手町ビル 7 階
TEL:03-6265-1526 / FAX:03-3272-6166
www accuray.co.jp

© 2023 Accuray Incorporated. All Rights Reserved. AJMKT-CRXXS14(2211)(2)-2304

販売名: サイバーナイフ M6 シリーズ
医療機器承認番号: 22600BZX00126000

販売名: ラディザクト
医療機器承認番号: 22900BZX00032000

販売名: Accuray Precision 治療計画システム
医療機器承認番号: 22900BZX00031000

ACCURAY