

The Journal of the Japan Society of Pain Clinicians

日本ペインクリニック学会誌

別冊



日本ペインクリニック学会

◆ 総 説

三叉神経痛に対するサイバーナイフを用いた定位放射線治療

高橋 弘^{*1,2}

要旨 サイバーナイフ（CK）の特徴は、従来の定位放射線治療装置で使用されていたガントリーに代えてロボットが採用され、患者の位置を正確に認識できる病変追尾装置が装備されたことであり、固定がフレームレスとなった。また、治療計画時に一点にビームを収束させる isocentric という方法と、一点に集中させずビーム強度の変化により 3 次元的な線量分布を形成する non-isocentric という 2 通りの照射方法を選択できる。これらの特性はガンマナイフ（GK）とは異なるが、従来 GK が行ってきた特発性三叉神経痛の治療を CK も同様に施行することが可能で、しかも高齢者に発生しやすい三叉神経痛治療において非侵襲的固定のフレームレスであることの利点は大きい。また、個人差の多い三叉神経の走行に対して照射法を選択できる点も有用である。この CK と GK の定位放射線治療の結果を、自験例および最新の報告例から検証してみると、初期除痛効果および治療後合併症としての三叉神経障害に関して大きな相違はみられず、サイバーナイフ定位放射線治療の適応は今後ますます拡大していくものと思われる。

キーワード サイバーナイフ、定位放射線治療、三叉神経痛、フレームレス

（日本ペインクリニック学会誌 Vol.26 No.4, 279～287, 2019）

I はじめに

顔面痛を主訴とする疾患のなかで、三叉神経痛は通常一側性の顔面の発作性疼痛であり、持続時間は短いものの激的な痛みを呈する代表的な疾患である。この三叉神経は橋の中上部腹側面を起始部として三叉神経節から 3 本の感覚神経が分かれ、第 1 枝は顔神経、第 2 枝は上顎神経、第 3 枝のみ運動根と合わさり下顎神経となっている。特発性三叉神経痛の痛みの部位はこの 3 枝、とくに第 2、3 枝に沿って生じることが多い。そして、この三

叉神経痛の原因の多くは神経周囲の蛇行や迷走する血管の圧迫によって生じると考えられている特発性三叉神経痛である。また、原因が血管性圧迫以外の腫瘍など器質性疾患である場合は症候性三叉神経痛として区別されている。

本論文は特発性三叉神経痛に対する定位放射線治療（RS）の有用性を紹介することを目的としたものであるが、この特発性三叉神経痛の治療としては、通常非観血的治療としてカルバマゼピンなどの抗てんかん薬を主体とする薬物療法や神経ブロック療法があり、観血的治療としては脳神経外科による微小血管減圧術がある。しかし、代表的薬物療法剤であるカルバマゼピンは初期には著効を示しても徐々に効果が減弱し、投与量を増加しても最終的には無効になってしまう症例も少なからず存在する¹⁾。また、局所麻酔薬による神経ブロックは通常効果が短く、比較的長期の効果が得られる神経破壊薬や高周波熱凝固による神経ブロックではブロック時からの感覚低下が永く持続することを覚悟しなければならない。観血的治療法の微小血管減圧術は唯一の根治療法であ

利益相反に関する開示：利益相反なし

^{*1} 医療法人景雲会春日居サイバーナイフ・リハビリ病院サイバーナイフセンタールート 20

^{*2} 日本医科大学脳神経外科
(2018 年 10 月 1 日原稿受領／2019 年 8 月 26 日掲載承認)

著者連絡先 高橋 弘
〒406-0014 山梨県笛吹市春日居町国府 436
春日居サイバーナイフ・リハビリ病院サイバーナイフセンタールート 20

り、現在では年齢にかかわらず安全に手術が行われることが可能になってきているとはいえ、やはり高齢初発が多い特発性三叉神経痛患者の中には全身麻酔下での手術を容易には選択できないことが多々ある。

このような状況において、全身麻酔下での手術にリスクのある高齢者や、薬物への抵抗性といったそれまでのいろいろな治療で十分な効果が得られなかった特発性三叉神経痛患者に RS としてのガンマナイフ (Gamma Knife®: GK, エレクタ社) が次第に選択されるようになり、その有効性や安全性が数多く報告されてきている²⁻⁶⁾。

コバルト 60 によるガンマ線を用いた GK は、1951 年に Leksell らにより開発され、本邦には 1990 年に導入されて脳腫瘍や脳動静脈奇形、さらには三叉神経痛の治療オプションとして広く知られるようになった⁷⁻⁹⁾。

一方、ロボットアームの先端にリニアック (線形加速器) を装着して X 線にて GK と同様な RS を行うサイバーナイフ (CyberKnife®: CK, 日本アキュレイ社) が 1980 年代後半より米国スタンフォード大学の脳神経外科医 John Adler らにより開発され、1994 年にはロボット技術と画像誘導技術を結合させたこれまでにないロボット誘導型定位放射線治療装置として実用化された¹⁰⁾。本邦では 1998 年に保険適用となり治療が開始されたが、2003 年に薬事申請上の問題でいったんリコールとなり、2004 年に再導入され現在に至っている。当院でも従来の第 3 世代 CK から格段に機能を向上させた第 4 世代 CK を本邦第 2 号機として導入して臨床使用を行うとともに、サイバーナイフ研究会などの活動を通じて当該機の有効性、安全性についての学術啓発を推進してきた。当初、この CK は頭蓋内病変や頭頸部がんを中心に治療が行われていたが、近年 GK と同様に特発性三叉神経痛にも安全に治療が行われるという報告が数多くなされている¹¹⁻¹⁸⁾。

そこで、本論文ではこの CK の特発性三叉神経痛治療における有効性および安全性について概説する。

II CK の特徴

これまでの定位放射線治療装置で使用されていたガントリーに代えてロボットが採用されたことと、患者の位置を正確に認識できる病変追尾装置 (target locating system: TLS) が装備されたことが CK の最大の特異性である。このロボットアームの先端に装着された小型のリニアックは画像上のアイソセンターを中心として約

6,000 の方向からの照射が可能となり、入射方向の空間的自由度の著しい向上性をもたらした。また、アイソセンター外への照射も可能になり不整形病変への照射を均一な線量分布によってできるようにした。すなわち、CK はビーム中心を変化させながらさまざまな方向のビームを照射することができ、ビームの照射時間を変化させることによって強度変調放射線治療装置としての側面も併せ持つわけである。さらに TLS により動きのある治療中の照射目標をロボットが追尾して照射することを可能にしたことにより、頭蓋内および頭頸部病変に関して侵襲的な固定器具が不要となり分割照射を容易にした。また、肺がんなどの呼吸性移動のある体幹部病変に対しては、TLS に赤外線カメラを組み合わせて病変位置を予測しながら照射する動体追尾照射を実現した。

また CK の治療計画上的特徴は、腫瘍の一点にビームを収束させる isocentric という方法と、一点に集中させずビーム強度の変化により 3 次元的な線量分布を形成する non-isocentric という方法の 2 通りの照射方法を選択できることである (図 1)。isocentric を選択すると、分布は球形で線量勾配が急峻になり病巣周囲の被曝を極力少なくして照射時間を比較的短くできる一方、non-isocentric を選択すると、アイソセンターがないため不整形病変に対しても形状に合わせて均一な線量分布を作成することが容易にできる。

以上の特徴を備えた CK は、体幹部においては肺がん、肝臓がん、前立腺がん、腎がんなどの各種がん疾患を対象とした治療が可能であり、頭蓋内や脊髄脊椎疾患においては、悪性脳腫瘍のみならず良性脳腫瘍¹⁹⁾、血管奇形²⁰⁾、さらには特発性三叉神経痛などの機能性疾患¹¹⁻¹⁸⁾ についての治療にも CK の有用性が明らかにされてきている。

III CK による特発性三叉神経痛治療

特発性三叉神経痛に対する GK による RS (GKS) に引き続いて、リニアックによる RS (LINAC)、そして CK による RS (CKR) が施行されるようになり、2018 年になって 1951 年から 2015 年までの英文論文を渉猟してこれらの治療結果を比較検討した論文が発表された²¹⁾。45 報 5,687 例の GKS, 11 報 511 例の LINAC, 9 報 263 例の CKR の治療結果を評価した結果、初期治療後の疼痛緩和効果発現は、GKS で 66.6~100 % (平均値 84.8 %, 中央値 85.6 %), LINAC で 75~100 % (平均値 87.3 %, 中央値 88.5 %), CKR では 50~100 % (平均値

79.3%, 中央値 79%) ということで CKR の結果は GKS, LINAC の両治療法と比較しても決して劣らないことが明らかとなった。一方, 三叉神経痛に対する RS において最も気になる合併症である知覚障害発生率は GKS で 0~68.8% (平均値 21.7%, 中央値 19.0%), LINAC で 11.4~49.7% (平均値 27.6%, 中央値 28.5%), CKR では 11.8~51.2% (平均値 29.1%, 中央値 18.7%) といずれの方法でも大きな相違はみられなかった。しかし, Barrow Neurological Institute (BNI) facial numbness scores²²⁾ (I : no facial numbness, II :

mild facial numbness, not bothersome, III : facial numbness, somewhat bothersome, IV : facial numbness, very bothersome) III, IV という中等度以上の知覚障害発生率は GKS の 0~17% (平均値 3.1%, 中央値 0%) に対して, CKR では 5.9~12.0% (平均値 9.3%, 中央値 10.0%) と有意に多く認められたと報告された (表 1)。

しかし, この結果を評価するにあたっては十分な注意が必要と考えられる。すなわち, このレビュー論文においては 2015 年までに報告された文献のみが渉猟されており, 2016 年以降の最近の発表論文がまったく含まれ

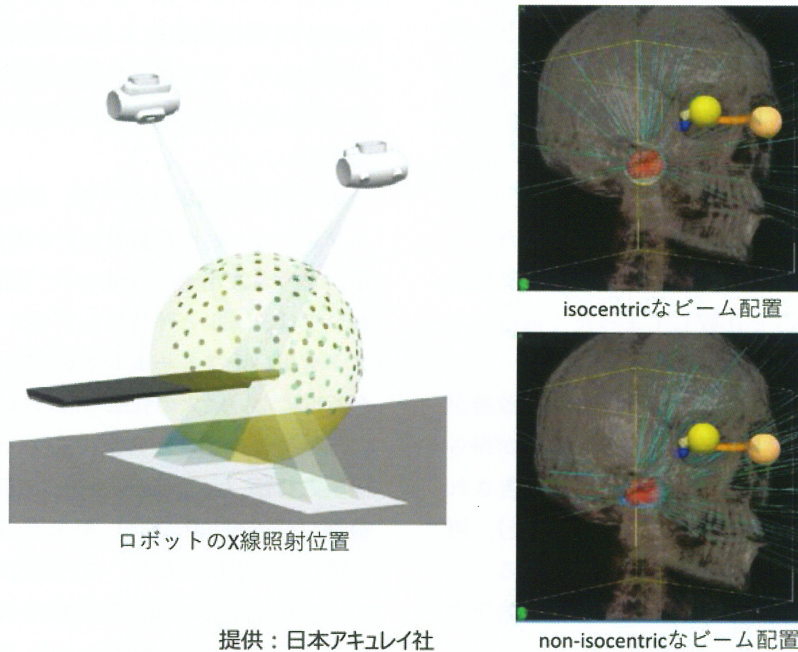


図1 サイバーナイフ治療計画画の特徴

イメージングシステムの中心から半径 65~100 cm の球面上に設定された, 130 以上のポイント (左) から一点にビームを集中させる isocentric 照射 (右上) と, ロボット位置を微調整することで, 最大 6,000 ポイントよりターゲットにまんべんなくビームを照射する non-isocentric 照射 (右下) が選択可能で, 実際には 100 本前後の最適な位置・方向を選択して照射を実行する。

表 1 三叉神経痛定位放射線治療のシステマティック・レビュー

執筆者, 年	治療方法	症例数	経過観察期間 (月)		疼痛緩和効果 (%)		再発 (%)		知覚障害 (%)			
			平均値	中央値	平均値	中央値	平均値	中央値	BNI I~IV	BNI III, IV	平均値	中央値
Tuleasca ら ²¹⁾ , 2018	GKS	5,687	7.1~92	6.7~76	84.8	85.6	24.6	23	21.7	19	3.1	0
	LINAC	511	18~56.5	12~26.6	87.3	88.5	32.2	29	27.6	28.5		
	CKR	263	8~20.4	22~23	79.3	79	25.8	27.2	29.1	18.7	9.3	10.0

GKS : Gamma Knife radiosurgery, LINAC : linear accelerator radiosurgery, CKR : CyberKnife radiosurgery

BNI : Barrow Neurological Institute facial numbness scores²²⁾

ていないということである。また、知覚障害発生率は報告により大きな差がみられるが、これは三叉神経の長さ、太さなどその走行が個々に異なるうえに施設によっての評価基準が微妙に異なることが原因と思われる。このように多施設の報告を比較検討することの困難さは確かにあるが、平均値あるいは中央値を用いた統計学的解析は施設ごとの治療傾向の把握という点で大きな意義があると考えられる。

特発性三叉神経痛に対する CKR としては、ランダム化はされていないが 2018 年に報告された Romanelli らの 138 例を対象とした観察期間中央値 52.4 カ月の前方視的研究¹¹⁾において、CKR 後 6 カ月で 93.5%、12 カ月で 85.8% の患者で疼痛管理が可能となり、初回治療後 3 年での疼痛制御率は 76% であった。知覚障害発生率は 18.1% であったが、そのうち BNI facial numbness score III, IV の発生率はそれぞれ 4.3%、0.7% ということで、結局 III 以上の知覚障害発生率は 5% と報告された。したがって、この論文の結果によれば CKS での三叉神経の知覚障害発生率は GKS と比較してまったく遜色がないことがわかる (表 2)。

RS 後の経過としては、治療後 2~3 週で著明な改善がみられ、おおむね 6~12 カ月で安定した改善効果が得られるのが通常である。そこで、2018 年以前に報告された研究のなかで疼痛緩和効果 (治療後 12 カ月前後)、再発、神経障害の 3 項目に関して発生割合を抽出することが可能であった 7 報 (前方視的研究 1 報、後方視的研究 6 報)¹²⁻¹⁸⁾ を前述の Romanelli らの報告に加えて表 2 に提示した。なお、この表には後述する最近の自験例 5 例のデータも参考までに記載した。表中の自験例を除いた

8 報告から、それぞれの項目の中央値を参考として分析してみると、これらの報告からは CKR 後 1.5 年の経過観察期間で疼痛緩和効果は 87.5% で得られ、再発は 17.2%、知覚障害などの神経障害発現の可能性は 17.6% と言えそうである。

IV 特発性三叉神経痛治療に対する CK 治療の実際

CK 治療では、位置情報を CT 骨条件から得るために、thin slice CT の情報が必須で、情報量が多いが位置ゆがみの生じやすい MRI 画像と融合させて正確な三叉神経の走行を同定する。そのためには、thin slice MRI で heavy T2 強調画像により三叉神経全体を撮像しておく必要があり、さらに三叉神経近傍の血管を鑑別するために MRA とできれば造影 CT 画像を撮像しておくことが望ましい。

次に頭部の固定を行うが、GKR ではこれまでレクセルフレームという頭蓋骨にピン固定する侵襲的な頭部固定がどうしても必要であった (図 2)。しかし、CKS においてはシェルと呼ばれるプラスチック製のフェイスマスクを用いたフレームレスの頭部固定 (図 3) で済むのが GK にない最大の利点と思われる。

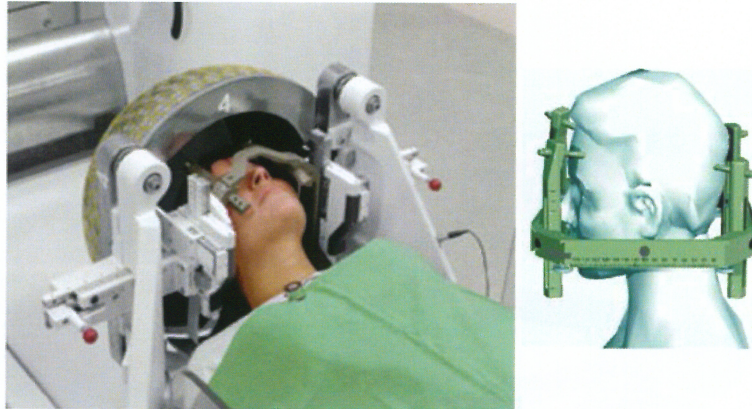
三叉神経は脳幹から出て 2~4 mm のところに三叉神経根入口部 (root entry zone : REZ) といわれる中枢性髄鞘 (oligodendrocyte) が末梢性髄鞘 (Schwann cell) に移行する場所があり、この部位では髄鞘が一部欠如していて圧迫などの機械的刺激を受けやすい。また、oligodendrocytes は Schwann cells よりも放射線感受性が高いことから、REZ は三叉神経痛の RS のターゲットとして適切と考えられている⁶⁾。しかし、REZ をターゲッ

表 2 特発性三叉神経痛に対するサイバーナイフ定位放射線治療の研究

執筆者, 年	症例数	経過観察期間 (月)	疼痛緩和効果 (%)	再発 (%)	神経障害 (%)
Romanelli ら ¹¹⁾ , 2018 [†]	138	52.4 *	85.8	18.6	18.1
Lazzara ら ¹²⁾ , 2013	17	11.8 #	88	28.6	11.8
Tang ら ¹³⁾ , 2011	14	20.4 *	100	0	21.4
Fariselli ら ¹⁴⁾ , 2009 [†]	33	23 *	93.9	33.3	0
Borchers ら ¹⁵⁾ , 2009	46	12.4 #	87	15.6	15.2
Adler ら ¹⁶⁾ , 2009	46	10.5 *	95.7	2.3	17.1
Villavicencio ら ¹⁷⁾ , 2008	95	22 *	63	31	28.4
Lim ら ¹⁸⁾ , 2005	41	11 #	78	15.8	51.2
自験例, 2018	5	42 *	100	0	20

執筆者, 年の[†]は前方視的研究, その他は後方視的研究。

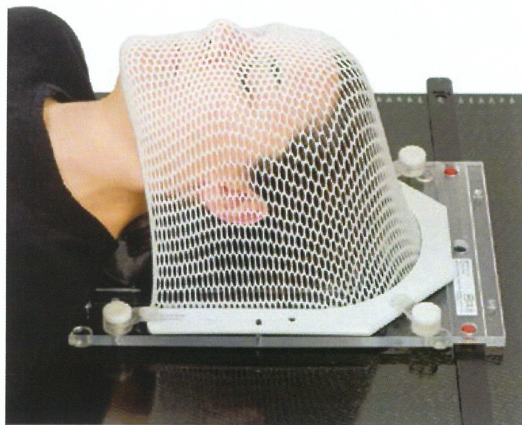
: 平均値, * : 中央値



Department of Neurosurgery at NYU Langone Health Home Pageより転載

図2 ガンマナイフのレクセル頭部固定

ガンマナイフ治療の頭部固定の基本はレクセルフレームで、このフレームは照射時の固定具として用いるのみでなく、頭蓋内の座標系の土台となっている。固定は頭蓋骨に通常4点でピン固定されるが、適切な沈静下でフレーム装着を行うことにより、疼痛のコントロールはある程度可能である。



画像提供：東洋メディック株式会社

図3 サイバーナイフのフレームレス頭部固定

サイバーナイフ治療の頭部固定では、プラスチック製のユニフレーム頭部固定具を加温して軟化した後に仰向けに寝た患者の頭の上に持って行き、顎にユニフレームの端を合わせベースプレートに向けてゆっくりと引き下げる。素早く患者の顔の輪郭に沿って指先で軽く押しながら形状を整えてから冷却すると、ユニフレームは固くなりフレームレスとしての頭部の固定が可能になる。

トとした場合には治療効果は高いと考えられるが、脳幹に近接しているために合併症発生の可能性は高くなることが危惧される。一方、錐体骨三叉神経切痕部にあたるガッセル神経節後部（retrogasserian region：RGR）を治療ターゲットとすると、脳幹からは十分に離れているので脳幹への直接照射が回避されて合併症が起きにくく

なることに加え、三叉神経の描出が不良の場合でも三叉神経切痕部の同定は容易なため、より正確な照射が可能になる利点がある。

CKRでは、通常三叉神経脳幹接合部から3 mm以上離して、遠位へ6 mm神経長部分を描画して照射ターゲットとすることが多く、ターゲットの形状が細長くなることからnon-isocentricでの照射を選択する。しかし、三叉神経長には個人差が多く、三叉神経が短い場合には6 mmの神経長を短縮することや、GKSと同様にisocentricなポイント照射を選択することも可能である。このように、CTおよびMRIにて描出された三叉神経の精密な状態により、照射法を選択できることがGKSと比較したCKRの利点の一つであると考えられる。

治療計画作成においては、通常CKに装備された12種類のコリメータ（図4）の中から5 mmを使用し、REZには60～80 Gy、RGRには70～90 Gy程度を設定する。リスク臓器としては、側頭葉内側、脳幹、VII・VIII脳神経、蝸牛などを必ず描画して、過剰な被曝を抑制する。

ところで、最近5年間に経験した自験例は5例ある（表2）が、いずれも脳槽部を走行する三叉神経長が短めであったので、神経脳幹接合部から3 mm以上離れたREZをターゲットとしてisocentricなポイント照射を選択した。5 mmのコリメータを用いて、計画標的体積の100%に80 Gyを照射し、脳幹部内の被曝は20% isodose line（16 Gy）にとどまるように計画した（図5）。



提供：日本アキュレイ社

図4 サイバーナイフシステム

放射線治療器には、一般的にコリメータと呼ばれる放射線の進路および入射面積を制限する装置が付随している。このコリメータによって放射線が照射される領域（照射野）が規定され、ターゲットに十分な線量を照射しつつ近傍正常組織への照射を抑制することができる。サイバーナイフシステムでは、直径5～60 mmの円形照射野を実現する12種類のコリメータが装備されている。

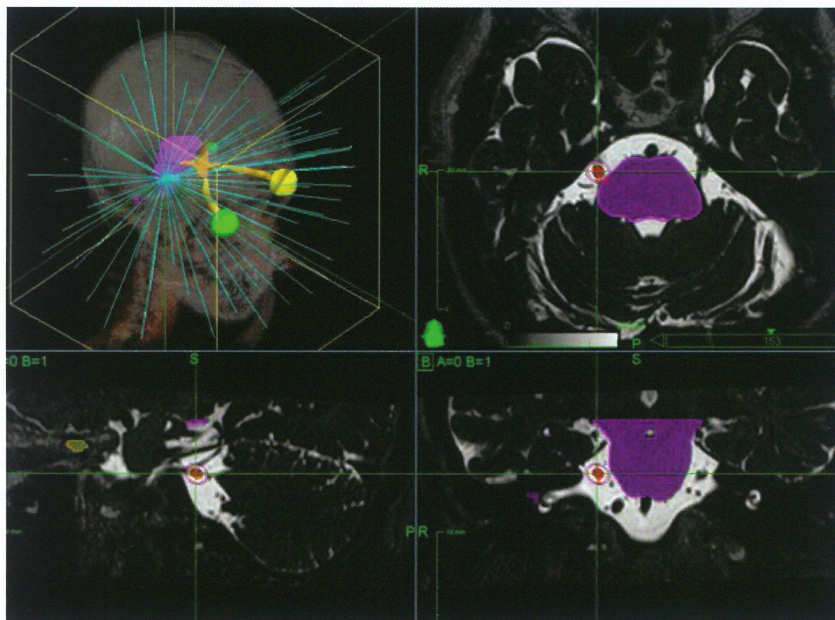


図5 サイバーナイフによる三叉神経痛治療計画（MRI heavy T2強調画像）

三叉神経痛に対するサイバーナイフによる治療計画作成にあたっては、thin sliceで撮像したCTとMRI画像を融合させて三叉神経の正確な走行を同定するが、その際MRIのheavy T2強調画像がとくに有用となる。自験例では、神経脳幹接合部から3 mm以上離れたREZをターゲットとしてisocentricなポイント照射を選択した。5 mmのコリメータを用いて、最大線量80 Gyを照射して脳幹部内の被曝は20% isodose line (16 Gy)にとどまるように計画した。

5例の年齢は67～89歳で中央値は78歳、観察期間は60～1,975日で中央値は1,260日(42カ月)であったが、疼痛は全例で消失した。疼痛消失までの期間は5～60日で平均40日、中央値は45日であった。1例(20%)に顔面のしびれ感が2年後に発生したが、日常生活にはなんら支障のない程度であった。きわめて少数の自験例だが、最近のCKRの報告結果^{11-18,21)}と比較するかぎりほぼ同様な結果であった。また、2001年のMaesawaらのREZをターゲットとした220例のGKSの報告⁵⁾では、中央値2年の経過観察にて2.8年後の除痛効果は75.4%、治療後合併症としての三叉神経障害は10.2%にみられたと述べられており、少数の自験例と直接的な比較はできないが、大きな差異はないものと考えられた。

ところで、現時点で三叉神経痛に対するRS治療の保険適用はまだGKに限られている(2015年7月1日からGKによる定位放射線治療50,000点:3割負担であれば15万円相当)。CKによる三叉神経痛治療は、自由診療のため施設により20～60万円ほどの診療費で施行されているのが現状と思われる。本論文でも述べているように欧米諸国ではすでに治療法として確立されつつあり、本邦では現在保険適用取得についての可能性が模索されている。

V 特発性三叉神経痛治療におけるCK治療の展望

高齢化が急速に進行しているわが国において、高齢者に対する適切な治療指針の確立は喫緊の課題である。そこで、比較的高齢者に初発することの多い特発性三叉神経痛の治療では、治療の有効性と安全性が十分に担保された低侵襲治療の提供がきわめて重要な意味をもつことは言うまでもない。

高線量一括照射をするRSは侵襲性の少ない治療であるが、RSによる三叉神経痛の治癒機序についてはいまだ明らかとはなっていない。しかし、多くの治療経験からいくつかの仮説が立てられている。すなわち、治療後数カ月以内の初期効果については神経と神経との間の異所的接触部位を介するインパルス(ephaptic transmission)の伝達が電気生理学的に阻害されるのではないかという報告^{5,6,23)}があり、その後には生じる遅発効果としては神経軸索の変性^{5,6)}や神経への微小循環系の障害⁶⁾が示唆されている。

低侵襲性治療が期待されるRSにおいて、GKRと異なり非侵襲性のフレームレスという固定法を用いるCKSは、GKRに劣らない有効性と安全性が担保されるなら

ば比較的高齢者が罹患することの多い特発性三叉神経痛の加療におけるCKSの有用性が際立つものと考えられる。また、治療計画として、腫瘍の一点にビームを収束させるisocentricという方法と、一点に集中させずビーム強度の変化により3次元的な線量分布を形成するnon-isocentricという方法の2通りの照射方法を選択できるCKSは、走行に個人差の大きい三叉神経を治療対象としなければならない点で、その有効性に大きな期待が寄せられる。

一方、RS治療後の三叉神経痛の再発時に手術を選択した場合に手術が困難になるという懸念がもたれている。しかし、GKR後の神経血管減圧術時において確かに膜の肥厚、神経と血管の癒着、神経の萎縮/偏位がみられたが、手術そのものには影響はなかったという報告²⁴⁾がすでにされており、また、特発性三叉神経痛においてGKRはその後の手術にはなんら影響がなかったとも報告されている^{25,26)}。CKS後の手術に関しての報告はまだみられないが、治療手技からしてGKRの結果と大きな相違はないものと推察され、特発性三叉神経痛治療において低侵襲性のRS治療を積極的に行うことの不利益さはあまり問題にならないのではないと思われる。

このような状況において、非侵襲性固定に加えて照射法の選択性を兼ね備えたサイバーナイフ定位放射線治療は、従来から施行されてきたガンマナイフ定位放射線治療と比較して遜色のない有効性と安全性を示すことが判明してきており、薬剤抵抗性の三叉神経痛に対する有用な治療法の一つとして広く周知されていくことが今後大いに期待される。

なお、本論文に関して日本アキュレイ社をはじめとする企業との利益相反はない。

文 献

- 1) 長沼芳和. 三叉神経痛治療におけるカルバマゼピンの限界. 日本ペインクリニック学会誌 2017; 24: 149.
- 2) Régis J, Tuleasca C, Resseguier N, et al. Long-term safety and efficacy of Gamma Knife surgery in classical trigeminal neuralgia: a 497-patient historical cohort study. J Neurosurg 2016; 124: 1079-87.
- 3) 富田美穂子, 林 基弘, 石丸純一, 他. 三叉神経痛に対するガンマナイフ治療. 日本口腔科学会雑誌 2009; 58: 1-6.
- 4) 林 基弘, 田村徳子, 堀 智勝. 本態性三叉神経痛に対するガンマナイフ治療. 脳神経外科 2008; 36: 961-76.
- 5) Maesawa S, Salame C, Flickinger JC, et al. Clinical out-

- comes after stereotactic radiosurgery for idiopathic trigeminal neuralgia. *J Neurosurg* 2001; 94: 14-20.
- 6) Kondziolka D, Lunsford LD, Flickinger JC, et al. Stereotactic radiosurgery for trigeminal neuralgia: a multiinstitutional study using the gamma unit. *J Neurosurg* 1996; 84: 940-5.
- 7) Leksell L. Stereotactic radiosurgery. *J Neurol Neurosurg Psychiatry* 1983; 46: 797-803.
- 8) Kondziolka D, Nathoo N, Flickinger JC, et al. Long-term results after radiosurgery for benign intracranial tumors. *Neurosurgery* 2003; 53: 815-22.
- 9) Yen CP, Jain S, Haq IU, et al. Repeat gamma knife surgery for incompletely obliterated cerebral arteriovenous malformations. *Neurosurgery* 2010; 67: 55-64.
- 10) Adler JR Jr, Chang SD, Murphy MJ, et al. The Cyberknife: a frameless robotic system for radiosurgery. *Stereotact Funct Neurosurg* 1997; 69: 124-8.
- 11) Romanelli P, Conti A, Bianchi L, et al. Image-guided robotic radiosurgery for trigeminal neuralgia. *Neurosurgery* 2018; 83: 1023-30.
- 12) Lazzara BM, Ortiz O, Bordia R, et al. CyberKnife radiosurgery in treating trigeminal neuralgia. *J Neurointerv Surg* 2013; 5: 81-5.
- 13) Tang CT, Chang SD, Tseng KY, et al. CyberKnife stereotactic radiosurgical rhizotomy for refractory trigeminal neuralgia. *J Clin Neurosci* 2011; 18: 1449-53.
- 14) Fariselli L, Marras C, De Santis M, et al. CyberKnife radiosurgery as a first treatment for idiopathic trigeminal neuralgia. *Neurosurgery* 2009; 64: A96-101.
- 15) Borchers JD, Yang HJ, Sakamoto GT, et al. CyberKnife stereotactic radiosurgical rhizotomy for trigeminal neuralgia: anatomic and morphological considerations. *Neurosurgery* 2009; 64: A91-5.
- 16) Adler JR, Bower R, Gupta G, et al. Nonisocentric radiosurgical rhizotomy for trigeminal neuralgia. *Neurosurgery* 2009; 64: A84-90.
- 17) Villavicencio AT, Lim M, Burneikiene S, et al. CyberKnife radiosurgery for trigeminal neuralgia treatment: a preliminary multicenter experience. *Neurosurgery* 2008; 62: 647-55.
- 18) Lim M, Villavicencio AT, Burneikiene S, et al. CyberKnife radiosurgery for idiopathic trigeminal neuralgia. *Neurosurg Focus* 2005; 18: E9.
- 19) 高橋 弘. サイバーナイフ IX. 脳腫瘍の治療 脳腫瘍の放射線療法 脳腫瘍学—基礎研究と臨床研究の進歩—. *日本臨牀* 2016; 74 (増刊号 7): 598-603.
- 20) Colombo F, Cavedon C, Casentini L, et al. Early results of CyberKnife radiosurgery for arteriovenous malformations. *J Neurosurg* 2009; 111: 807-19.
- 21) Tuleasca C, Régis J, Sahgal A, et al. Stereotactic radiosurgery for trigeminal neuralgia: a systematic review. *J Neurosurg* 2018; 130: 733-57.
- 22) Rogers CL, Shetter AG, Fiedler JA, et al. Gamma knife radiosurgery for trigeminal neuralgia: the initial experience of The Barrow Neurological Institute. *Int J Radiat Oncol Biol Phys* 2000; 47: 1013-9.
- 23) Young RF, Vermeulen SS, Grimm P, et al. Gamma Knife radiosurgery for treatment of trigeminal neuralgia: idiopathic and tumor related. *Neurology* 1997; 48: 608-14.
- 24) Sekula RF, Frederickson AM, Jannetta PJ, et al. Microvascular decompression after failed Gamma Knife surgery for trigeminal neuralgia: a safe and effective rescue therapy? *J Neurosurg* 2010; 113: 45-52.
- 25) Shetter AG, Zabramski JM, Speiser BL. Microvascular decompression after gamma knife surgery for trigeminal neuralgia: intraoperative findings and treatment outcomes. *J Neurosurg* 2005; 102 (Suppl): 259-61.
- 26) Cheng J, Liu W, Hui X, et al. Microvascular decompression for trigeminal neuralgia in patients with failed gamma knife surgery: Analysis of efficacy and safety. *Clin Neurol Neurosurg* 2017; 161: 88-92.

Stereotactic radiosurgery using CyberKnife for trigeminal neuralgia

Hiroshi TAKAHASHI^{*1,2}

^{*1}CyberKnife Center Route 20, Kasugai CyberKnife and Rehabilitation Hospital

^{*2}Department of Neurological Surgery, Nippon Medical School

CyberKnife, an image-guided robotic radiosurgery, introduces advances in stereotactic radiosurgery for medically resistant trigeminal neuralgia. The frameless CyberKnife radiosurgery (CKR) can deliver either non-isocentric irradiation to an extended segment of the trigeminal nerve or isocentric irradiation to a pinpoint portion of trigeminal nerve. These characteristics of CKR are vastly different from the Gamma Knife radiosurgery (GKS). However, the differences between CKR and GKS regarding the ratio of pain relief to the number of treatments required to achieve it and the frequency of complications, such as hypoesthesia of the trigeminal nerve, were not significant. Radiosurgery does not have the concomitant risks of an open surgery; therefore, CKR should be evaluated as a minimally invasive technique for the management of recurrent trigeminal neuralgia with the goal of reducing nerve injury at the root entry zone or the retrogasserian region.

Keywords: CyberKnife, stereotactic radiosurgery, trigeminal neuralgia, frameless

Journal of Japan Society of Pain Clinicians (JJSPC) Vol.26 No.4, 2019