眼筋麻痺の画像診断

西 田 保 裕

滋賀医科大学眼科学教室

MRI for eye movement

Yasuhiro Nishida

Department of Ophthalmology, Shiga University of Medical Science

要 約

磁気共鳴画像 (MRI) は、コンピュータトモグラフィ (CT) に比べ軟部組織の描出能に優れている。この利点を活かし、我々は眼窩内の外眼筋の観察にMRIを用いてきた。まず、外眼筋の病的な形態変化、すなわち萎縮と腫大の観察に用いた。良好な描出能を活かし、筋の幅や体積の計測も可能であった。次に、MRIではガドリニウム造影剤を用いることで、外眼筋の炎症の程度を評価する事も可能である。この造影法により、甲状腺眼症や外眼筋炎など筋の炎症の程度を臨床評価してきた。また、MRIでは人体で最も高信号に描出されるのが脂肪組織である特徴を活かし、眼窩脂肪組織の副鼻腔内への脱出の発見が容易となり、確実に眼窩ふきぬけ骨折の診断が行えるようになった。最後に、cine mode MRIを用いることで、眼球運動や、それに伴う外眼筋の収縮が眼窩内で直接観察可能となり、眼球運動障害のメカニズムや、外眼筋の機能低下を画像診断的に評価できるようになった。このように、MRIは眼球運動や外眼筋の画像検査に重要な役割を占めるようになった。

別冊請求先 (〒520-2192) 大津市瀬田月輪滋賀医科大学眼科学教室

西 田 保 裕

Tel. 077-548-2276 Fax. 077-548-2279

Key words : eye movement, extra ocular muscle, MRI, enhancement, cine mode MRI

Abstract

The image quality of magnetic resonance imaging (MRI) is much better in the soft tissues than computerized tomography (CT). So, we used MRI for observation of the extraocular muscles in the orbit. First, it was useful for observing changes in muscle shapes, such as atrophy and hypertrophy. Taking advantage of its image quality, a width and a volume of the muscle can be measured. Second was that MRI enabled us to observe the inflammation in the muscle using Gd-DTPA. The status of dysthyroid ophthalmopathy and orbital myositis can be evaluated. Third was that MRI made diagnosis of a blow out fracture easy. The signal intensity of orbital fatty tissue is very high, so it is very easy to detect its herniation into a sinus. Fourth was that MRI enabled us to observe eye movement and muscle contraction in the orbit. This technique called 'cine mode MRI', enables to display the images in a cinegraphic mode for evaluation of eye movement and muscle function. MRI has a great potential for diagnostic examinations of eye movement and the extraocular muscles.

I. 緒 言

近年の医学で著しい発展を遂げている分野の一つとして、画像診断が挙げられる。超音波断層法、computerized tomography (以下CT)、magnetic resonance imaging (以下MRI) など様々な装置が開発され、臨床で汎用されている。一方、眼科では特殊な画像診断装置を用いなくとも、前眼部や眼球内は光学技術を駆使することにより、多くは直接観察可能で、いわば画像診断として最も理想的な分野である。しかし、眼球後方に広がる眼窩スペースは手術による観血的手法によらなければ、直接の観察は不可能で、腫瘍に代表される眼窩内組織の器質的疾患を中心に補助診断として様々な画像診断法が用いられてきた。

一方、斜視や眼球運動障害の分野では、その原因の検索に頭蓋内を中心として画像診断を行なうことが多く、外眼筋自体の評価としては斜視検査・複像検査・EOGなどいわば機能検査が主体で、形態変化を観察することは稀であった。この理由として、外眼筋が他の組織と異なりサイズが小さく、画像診断装置の解像度の点から十分な画質で観察できなかったことが挙げられる。しかし、最近の画像診断技術の進歩により、眼科の分野でもその恩恵を享受できるようになった。本稿では、眼球運動障害の補助診断とし

て、外眼筋のMRI検査を中心に述べたい。

II. 画像診断法と眼窩像

1. CTとMRI (図1、2)

現在、画像診断法としての中核を為すのがCTとMRIである。CTはX線に対する各組織間の吸収値の差を利用して断層像を観察するものである。X線の吸収値が高い組織は濃く(白く)、低い組織は薄く(黒く)描出される。生体組織で最も吸収値が高いのは骨で、吸収値の低い他の軟部組織は薄く描出される。よってこの画像診断法で最も観察に適しているのは骨組織である。一方、軟部組織では、隣接する軟部組織間で骨組織に対するほど吸収値に差がないため、後述するMRIに比べ良好なコントラストが得にくい。また、骨の高いX線吸収値により強いアーティファクトを生じ、隣接する軟部組織の画像にも影響を及ぼす。また装置の構造上、観察できるスライスはほとんどが水平断で、冠状断(前額断)のスライスを得るためには、患者に特殊な体位を指示する必要がある。そして矢状断でのスライスは従来のCT装置では不可能である。

一方MRIは強力な磁場内で生じる磁気共鳴(magnetic resonance)現象を利用し、その信号を検出して生体を観察する画像診断法である。磁気共鳴現象は原子核内で生じ、一般のMRIで

図1. CT画像

著者の水平断CT画像である。上段が軟部組織の条件で、下段が骨組織の条件で描出したものである。上段では、眼球とともに視神経、内・外直筋が観察できる。下段では、骨組織が忠実に描出されている。

は生体で最も多い水分子の水素原子核での信号を検出している。磁気共鳴現象での各組織の信号強度は、水の含有量や存在する水の状態で異なる。すなわち、各組織の生化学的特性を反映して信号の強さは決定される。よって、CTで近いX線吸収値を持つ軟部組織間でも、生化学的組成が異なる場合には極めて良好なコントラストで両者を識別することができる。ただし、CTとは対照的に骨はほぼ無信号となり、骨組織や病変による軟部組織の石灰化は観察できない。いわばMRIは全身の軟部組織の観察に適した画像診断法と言える。またMRIはCTよりも歴史が浅く、国内での臨床応用は10数年前から始まった。当初のMRIはCTに比べ、画質が著しく劣るため用途も限られていた。しかし、昨今の超伝導技術の進歩により、装置には永久磁石から超電導磁石が用いられ、強力で安定した静磁場が得られるようになった。その後、画質は飛躍的

図2. MRIでの磁気共鳴現象

原子核内の陽子は、ある一定の磁場内ですりこぎ状の運動を行う。この運動を歳差運動という。歳差運動は一定の周期を持ち、この周期と一致する周波数のラジオ波をかけると共鳴が起こり、歳差運動の軸は①の方向に倒れる。この現象を磁気共鳴現象と呼ぶ。その後、ラジオ波をオフにすることでエネルギー（信号）を放出しながら歳差運動の軸は②の方向に変化し、もとに戻る。同じ原子でも、その原子が含まれる分子によって信号は異なり、その差を利用して画像化したものがMRIである。

に向上し、今やCTの画質を凌駕するようになった^{1), 2)}。また、様々な撮像方法も近年開発され、病変の所在や形態のみならず、病理学的情報をも得られようになった。さらには、CTと異なり観察するスライスの方に制限が無く、任意の方向のスライスが可能である。このため、組織の三次元的把握が容易になった。

2. 眼窩内のMRI (図3)

眼窩内には眼球・外眼筋・視神経・血管・結合組織・涙腺そして眼窩脂肪が含まれている。生体で最も高信号を示す組織は脂肪組織であり、実際の画像では真っ白に描出される。解剖学的観察で最も汎用されている撮像方法はスピンエコー法であるが、解剖学的観察が目的ならばT1強調画像が一般的である。この条件で眼窩内を撮像すると、高信号の眼窩組織の中に低から中等度の信号を示す他の組織を良好なコントラストで観察することができる^{2) - 6)}。特に外眼筋と眼窩脂肪間のコントラストはCTと比べ、はるかに良好である。水平断では水平直筋の走行が、冠状断では4直筋と上斜筋が同時に観察でき、

図3. 眼窩MRI

著者の眼窩MRIである。上段が水平断、中段が冠状断、下段が矢状断である。①～⑨の組織が詳細に観察することができる。①眼球、②視神経、③内直筋、④外直筋、⑤上直筋、⑥下直筋、⑦上斜筋、⑧下斜筋、⑨上眼瞼挙筋。また矢状断では眼瞼の構造も観察することができる。

前方のスライスでは下斜筋の観察も可能である。矢状断では上下直筋のみならず上眼瞼挙筋の観察も可能である。

Ⅲ. 外眼筋に対するMRIの応用

著者が行ってきた外眼筋へのMRIの応用には、以下の項目がある。すなわち、①外眼筋の形態変化の観察、②外眼筋の病理学的変化の観察、

③眼窩ふきぬけ骨折の観察、④外眼筋機能の観察の4項目である。各項目について画像を中心に述べたい。

1. 外眼筋の形態変化の観察

外眼筋の形態で代表的な変化として、萎縮と腫大がある。いずれの変化も、外眼筋の体積変化である。約3mm以下のスライスを用いると、外眼筋の筋腹の幅や体積も正確に計測可能となる^{5), 7) ~10)}。

a. 外眼筋の萎縮 (図4)

萎縮は、動眼・滑車・外転神経の高度かつ長期の麻痺で生じることが多い。すなわち、麻痺による神経支配の低下で外眼筋は収縮が不良となり、廃用性の萎縮が生じる。高度の萎縮では、筋の収縮能は全く消失しており、我々の計測では正常外眼筋の数分の一となる。このように神経麻痺が生じると、神経のみならず外眼筋にも器質的变化が生じる。一方、外眼筋の変性疾患としては、最近ミトコンドリア遺伝子病として注目されている慢性進行性外眼筋麻痺がある。この疾患は萎縮が全外眼筋で生じ、全方向で眼球運動が障害される¹¹⁾。これら高度な萎縮が画像上で観察されると、眼位矯正の唯一の方法は、健常筋の移動術であり、斜視手術で多用される筋の前後転法では効果が望めないことが多い。

図4. 外眼筋の萎縮

慢性進行性外眼筋麻痺の眼窩冠状断像である。両眼窩内の4直筋と上斜筋の著しい萎縮が認められる。この症例では全方向の眼球運動障害が生じている。

b. 外眼筋の腫大 (図5)

外眼筋の腫大は、筋実質の炎症によって生じ

図5. 外眼筋の腫大

甲状腺眼症の眼窩冠状断である。図4と対照的に、4直筋と上斜筋の著しい腫大が認められる。

る。その代表例が甲状腺眼症と外眼筋炎である。いずれも、腫大による筋の伸展制限のために、はいあい筋の作用方向への運動障害として出現する。甲状腺眼症では、腫大筋が複数であることが多く、下直筋と内直筋が好発筋である。また外眼筋炎は、甲状腺眼症に比べ比較的急性の変化で出現する。短期間で著明な腫大を生じるが、ステロイド剤の投与に良好な反応を示す。外眼筋の形態変化を画像上で捉えることで、治療の効果を判定することが出来る^{5), 9), 10)}。

2. 外眼筋の病理学的変化の観察 (図6)

外眼筋の病理学的変化として代表的なものに炎症が挙げられる。この炎症変化を捉えるために、MRIではガドリニウム造影が用いられている。CTのヨード造影剤とは異なり、アレルギー反応による人体へのショックなどの危険性が極めて低く、安全な造影剤である。この造影剤で外眼筋は、他の骨格筋に比べ非常に高い造影効果を有し、炎症性変化を鋭敏に反映する。眼窩内の造影検査には、脂肪組織の信号強度を抑えて、他の軟部組織の信号強度を相対的に上昇させる脂肪抑制法が撮像条件として適している。正常の外眼筋は周辺で高信号、中心では低信号の、いわゆる二層分布を示す。炎症性変化を示す甲状腺眼症では、信号強度の二層分布も崩れ、外眼筋の信号強度は全体に上昇する。治療としては、ステロイド剤の投与と放射線療法であるが、これらの治療後の消炎効果判定にも、有効な検査法である。

図6. 外眼筋のガドリニウム造影

甲状腺眼症の眼窩冠状断である。脂肪抑制法でガドリニウム造影を行うと、外眼筋造影像の観察が容易となる。本症例では左眼窩内の外眼筋が右に比べ腫大しており、造影により信号も増強している。この信号の亢進は、筋実質の炎症を反映している。

3. 眼窩ふきぬけ骨折の観察 (図7)

外傷により生じる眼球運動障害は麻痺性のものが殆どであるが、機械的運動制限によるものも念頭に置く必要がある。すなわち、眼部周辺の外力により眼窩壁が骨折した際に、外眼筋およびその周囲の眼窩組織が骨折部に嵌頓する。これら嵌頓組織により、主に骨折部と対側方向のひき運動が制限される。眼窩骨は副鼻腔との境界である下壁、内壁が特に薄く、骨折の好発部位となる。よって、下直筋と内直筋の副鼻腔への嵌頓が生じることが多い。外傷での眼球運動障害を検査する際、必ず牽引試験 (forced duction test) で機械的制限の有無を確認し、骨折が疑われた場合は画像診断で迅速に骨折を診断する必要がある。前述のように、MRIでは骨は低信号のために骨折は観察できない。しかし、眼窩壁骨折が生じると、眼窩内組織の嵌頓も生じ、この嵌頓組織は主に外眼筋と眼窩脂肪である。MRIでは眼窩脂肪は高信号で描出され、無信号の副鼻腔に突出しているのが容易に観察できる。よって、眼窩内組織の存在を副鼻腔内で確認することで、骨折の診断は容易となる。眼窩ふきぬけ骨折の有無を検査する方法として、MRIは確実な画像診断法と考える¹²⁾。

4. 外眼筋機能の観察

外眼筋機能の観察には、ヘスチャートや眼球運

図7. 眼窩ふきぬけ骨折

眼部の鈍的外傷により右眼窩下壁が骨折した症例である。CTのように骨折像はMRIで観察できないが、眼窩の下の上顎洞に眼窩脂肪組織が嵌頓しているのが容易に発見できる。眼窩内組織の眼窩外への脱出は眼窩隔壁の破綻を意味し、この所見から骨折を診断することができる。また下直筋も嵌頓方向に偏位しているのが観察できる。

動図そして筋電図などが汎用されている。いずれの方法も、外眼筋の収縮・伸展機能を反映しているわけであるが、その結果はいずれもグラフ化したデータで表現されているのが特徴である。一方、実際の外眼筋収縮運動の観察は、外眼筋が眼窩内に存在するという解剖学的特徴により困難であった。ここで筆者が着目したのは、生体の心臓の収縮運動を観察するために開発されたcine mode MRIであった¹³⁾。心臓は、不随意で収縮するいわば「運動器」で、MRIでの撮像ではこの動きが大きな障害となっていた。特にMRIでは、撮像中の検体の動きは大きなアーティファクトとなるため、通常の撮像方法では心臓の観察は困難であった。cine mode MRIの原型は被検者の心周期に同期させて撮像する方法である。具体的には、被検者の心電図のR波をMRI装置がモニターし、R波をトリガーとして心周期と同期して装置は規則正しく、各位相を撮像する。得られた各位相の画像を個々に観察することもできるが、本法の最大の特徴は各位相の画像を順番に連続再生することで心臓の収縮が動画として観察可能なことである。こ

の撮像方法を筆者は10年前から眼球運動の観察方法として、応用してきた。眼窩内での眼球・外眼筋・視神経の動きが観察され、眼窩内での動画としては世界初の試みであった^{14) - 16)}。筆者らは眼球運動のcine mode MRIとして、2つの方法を考案した。すなわち、眼球運動法(moving eye method)と固視法(fixed eye method)である。両者の方法を具体的に述べる^{5), 8), 15) - 18)}。

1. 眼球運動法(moving eye method)(図8、9)

この方法は心収縮観察のためのcine mode MRIを忠実に再現した方法で、研究当初はこの方法で筆者らも眼球運動を観察していた。撮像中に被検者の心電図をモニターし、R波を撮像のトリガーとする。被検者は命じられた方向の眼球運動を心周期に合わせて行うものである。眼球運動を心周期と同期させるために、装置から周期的に発生する撮像音を聞き、そのリズムに合わせる。撮像に要する眼球運動回数は、画像を構成する画素数で決まり、一回の眼球運動で各位相の画素一列分の画像が構築される。我々は画素数を256×256に設定したために、256回の眼球運動を要した。一周期の眼球運動を13の位相に分割して観察した。図9は各画像を位相順に並べたものである。この画像を連続再生することにより眼球運動を動画として捉えることができる。外眼筋の収縮・伸展と眼球・視神経の動きが、眼窩内で同時に観察することができる

図8. 眼球運動法(moving eye method)

眼球運動法では図のような、一定方向の眼球運動を撮像中に行う。

図9. 眼球運動法でのcine mode MRI

左上から下、右上から下の順で眼球運動の各位相順に連続組写真としている。眼球、視神経の運動、そして内・外直筋の収縮・伸展が眼窩内で同時に観察できる。通常この画像を、テレビモニターで連続再生し、動画として観察する。ただし、動きによるアーティファクトや眼球運動の位相ずれのために、画質は後述する固視法のものより劣る。

2. 固視法 (fixed eye method) (図10、11、12)

この方法の最大の特徴は、眼球運動法と異なり撮像中に眼球運動を必要としないことである。すなわち、眼球運動での各位相の眼位を個々に撮像する方法である。具体的にはMRIのガントリー（撮像時に被検者を入れるトンネル状の空間）の内壁に、各眼位に応じて固視標を貼付し、被検者に視標を固視させて各眼位毎にMRIを撮像する。各眼位毎の撮像時間（固視時間）は数十秒である。そして、得られた各画像を位相順に連続再生し、動画として観察する。図11に実際の画像を示す。

また、被検者が視標を固視しやすいように、後に貼付視標から点光源視標の呈示が可能な視

標装置を試作した^{18), 19)}。MRIのガントリー内には強い静磁場が存在し、この静磁場のためにガントリー内では磁性体の装置は持ち込めず、視標装置も非磁性体にする必要があった。図12に実際の装置を示す。装置はコントロールボックス、光源、視標板の3つの部分からなり、光源には発光ダイオード（LED）を用いた。光源と視標板はライトガイドで連結してLEDからの光を視標板に伝送し、視標板に取り付けたライトガイド断端を点光源視標に用いた。この装置により、老視を有する被検者でも固視の混乱が無く撮像することができるようになった。

3. 眼球運動法と固視法の比較

眼球運動法と固視法で得られた画像を比較すると、明らかに固視法による画質の方が良好である。眼球運動法は実際の眼球運動が必要なために、撮像中に生じる動きのノイズ、すなわちモーションアーティファクトが生じる。また心周期に合わせて眼球運動を行うが、各眼球運動で生じる位相ずれも、画質に大きな影響を与える。一方、固視法では各眼位毎の撮像を個別に行うため、モーションアーティファクトは極めて少なく、眼球運動の位相ずれも生じない。また心収縮運動は不随意運動のため被検者に運動による負担は無いが、眼球運動は随意運動のため、被検者は意図的な運動負担を強いられる。被検者にとって、眼球運動法のように数百回の

図10. 固視法 (fixed eye method)

眼球運動法と異なり、各撮像毎に被検者はガントリー（被検者が検査時に収容されるトンネル状のスペース）内に貼付した視標を固視し、各眼位を撮像する。

図11. 固視法でのcine mode MRI

上から下に各眼位の画像を連続組写真にしている。眼球運動法に比べ、画質は良好で、検査も容易である。

眼球運動を一定の周期で行うことは、苦痛かつ困難である。その後、眼球運動のcine mode MRIには、画質が良好で被検者の負担も少ない固視法を選択した。

図12. 固視法の視標呈示装置

被検者が視標を容易に固視することができるように、点光源視標が呈示可能な視標装置を試作した。LED光源をライトガイドに連結し、もう一方のライトガイド断端をアクリル板に埋め込み、点光源とした。アクリル板は硬質プラスチックの固定板に取り付けられ、ガントリー内の被検者の眼前で視標を呈示する。この装置により老視を有する被検者にも検査を容易に施行することができる。

4. Cine mode MRIの臨床応用

Cine mode MRIは眼窩内にある外眼筋・眼球・視神経の動きを観察できる利点から、眼球運動障害を有する症例に広く用いられてきた。特に、神経麻痺性の眼球運動障害では、外眼筋の収縮能の低下程度をこの方法で観察することができる。また、眼窩ふきぬけ骨折のような機械的制限による眼球運動障害では、動画で観察することで運動障害のメカニズムを理解しやすい^{11), 20)}。さらには、個々の位相で得られた画像で、外眼筋の収縮・伸展機能を、筋幅を計測することで障害の定量的評価も行える。

IV. 最後に

眼科領域の画像診断検査は、従来から眼窩腫瘍や頭蓋内の病変に広く用いられ、病変の有無と位置の確認が目的であった。今回、述べた眼球運動での画像診断は、上記以外の目的に加え、病変による機能的障害を評価するための補助診断という価値も有する。これはMRIを中心に画像診断技術の進歩により可能となった。現在も、MRIは様々な臨床分野で開発・応用されている。昨今、機能画像としてfunctional MRIが導入され神経機能の脳における各中枢が同定されており、眼球運動の分野でも応用が開始されている。MRIは他の画像診断法と異なり、多くの可能性を有する方法である。今後、更なる眼科的応用を期待したい。

参考文献

- 1) Schenck J F, et al: Improved MR imaging of the orbit at 1.5 T with surface coils. Am J Neuroradiol 144: 1033-1036, 1985
- 2) 林 理, 他: Genneral Electric 社製1.5 Tesla 超伝導MRI "SIGNA Advantage" の使用経験. あたらしい眼科 9: 1261-1264, 1992
- 3) 西田保裕: MRIによる眼球運動の画像診断. あたらしい眼科 8: 1857-1866, 1991
- 4) 西田保裕, 他: MRIを用いた眼球運動の研究 3次元フーリエ変換法を用いた眼窩内組織の観察. 神経眼科 8: 412-416, 1991
- 5) 西田保裕: 外眼筋のMRI. あたらしい眼科 12: 1217-1223, 1995
- 6) 西田保裕, 他: MRI, CTの適応と評価. 臨床眼科52: 37-41, 1998
- 7) 西田保裕, 他: MRIを用いた眼球運動の研究 -MRIによる水平外眼筋収縮動態の計測-. 神経眼科 9: 309-315, 1992
- 8) 稲富昭太, 他: 磁気共鳴画像 (MRI) による眼球運動の研究とその応用. 日眼96: 1532-1557, 1992
- 9) 西田保裕, 他: Magnetic resonance imaging による水平外眼筋の体積測定. 日眼97: 827-833, 1993
- 10) Nishida Y. et al: Volume measurement of horizontal extraocular muscles with magnetic resonance imaging. Jap J ophthalmol 40: 439-446, 1996
- 11) 西田保裕, 他: 神経と筋の障害. 丸尾敏夫, 他 (編): 眼科診療プラクティクス43眼球運動とその異常, 57-61, 文光堂, 東京, 1998
- 12) 西田保裕, 他: 眼窩吹きぬけ骨折における magnetic resonance imagingでの画像診断 -その3つの有用性. 日眼103: 229-236, 1999
- 13) Sechtem U, et al: Cine MR imaging: Potential for the evaluation of cardiovascular function. Am J Roentgenol 148: 229-246, 1987
- 14) 西田保裕, 他: MRIを用いた眼球運動の研究 - cine mode MRIによる眼球運動動態の観察 -. 神経眼科 6: 416-421, 1989
- 15) 可児一孝, 他: Cine mode MRI による眼球運動の観察 - 眼窩内側壁骨折による眼球運動障害 -. 眼紀40: 2553-2557, 1989
- 16) Nishida Y, et al: The observation of eye movement using magnetic resonance imaging. Campos E. C. (ed.): Strabismus and ocular motility disorders, 137-142, Macmillan Press, London, 1990
- 17) 稲富昭太, 他: 眼球運動のシネモードMRI. INNERVISION 8: 111-115, 1993
- 18) 西田保裕, 他: Cine mode MRI. 眼科39: 1303-1310, 1997
- 19) 西田保裕, 他: Cine mode MRIにおける視標装置の試作と頭部固定枕の応用. 神経眼科 14: 55-58, 1997
- 20) 石田洋一, 他: 保存的治療で眼球運動障害が軽快した眼窩上壁骨折の1例. 眼臨90: 1301-1305, 1996