

## k 空間と k トラジェクトリ

Twieg DB : The k-trajectory formulation of the NMR imaging process with applications in analysis and synthesis of imaging methods

(Med Phys 1983 ; 10 : 610-621)

Ljunggren S : A simple graphical representation of Fourier-based imaging methods

(J Magn Reson 1983 ; 54 : 338-343)

### はじめに

これらの論文は、MRI における撮像法を統一的に理解するための概念である、k 空間と k トラジェクトリを明確化したという意味で、歴史的な論文である。ただし、「画期的」な論文であるかと言えば、そうではない。しかしながら、MRI の歴史の上で重要な論文であることには間違いない。

以上のような紹介の仕方を行うのには、以下の理由がある。すなわち、現在行われている MRI は、均一な静磁場と線形勾配磁場を用いて、被写体の核磁化の空間分布を、観測された NMR 信号から数学的な処理で求めることを基本としている (Lauterbur)。これは真に、歴史的なブレークスルーであった。Lauterbur は、CW 法で最初の実験を行ったが、パルス法で実験を行ってれば、勾配磁場の下での NMR 信号が、被写体の核磁化分布のフーリエ変換であることは容易に気づいていたし、彼であれば、実験はしていなくとも、この事実は認識していたと思われる。一方、現在、MRI の主流になっているフーリエ映像法は、Ernst らによってパルス法で行われ、彼らの論文には、被写体の核磁化分布は、勾配磁場の下での NMR 信号の多次元フーリエ変換で求められることが示さ

れている。

以上のように、均一な静磁場中における線形勾配磁場の下での NMR 信号が、核磁化分布のフーリエ成分であることは、明瞭に認識されていた。しかしながら、標記の論文が、歴史的な論文であるというのは、それまでに提案されていた主要な MRI の手法を、k 空間と k-trajectory という明確な概念で整理し、特に、それまで理解が困難と思われていたエコー・プランナー法 (EPI) を、明快に解説したからであった。ただし、標記の二つの論文は、取り扱っている内容は似ているものの、「全く独立に発表」され、アプローチもかなり異なっているので、これらを比較しながら紹介したい。

### Twieg の論文の内容

この論文は、1982 年の 10 月 1 日に受理されたので、1983 年の 5 月 16 日に受理された Ljunggren の論文に対して、MRI における様々な撮像法を、k 空間の中における軌跡で統一的に理解したという点では、優先権を有している。また、k-trajectory という言葉を使ったのも、この論文が初めてである。しかしながら、この論文だけが、k 空間に関する代表的論文になっていないのは、k-trajectory の定義が既出

2001 年 12 月 18 日受理

別刷請求先 〒305-8573 茨城県つくば市天王台 1-1-1 筑波大学物理工学系 巨瀬勝美

の論文によるものであり、しかも、k-trajectory の表記が、時間軸を入れたもので、今ではあまり使われないからである (図1(a)).

既出の論文とは、Brown らによって発表された、NMR chemical shift imaging in three dimensions (Proc Natl Acad Sci USA 1982; 79: 3523-3526) である。これは、多次元フーリエ変換による化学シフトイメージング法を、

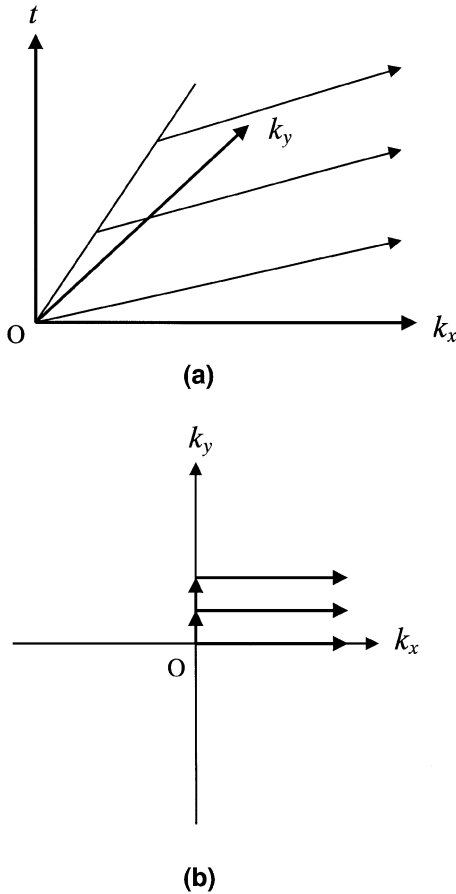


図1. (a)Twieg の論文におけるフーリエ法の k-trajectory.  $k_xk_y$  面に垂直に時間軸  $t$  をとっているため、トラジェクトリの時間的发展は見やすいが、逆にわかりにくくなっている。(b)Ljunggren の論文におけるフーリエ法の k-trajectory. 時間軸はなく、現在広く用いられている形式である。

初めて提唱し、基礎実験の結果とともに報告した、記念碑的な論文である。この論文において、

$$k(t) = -\gamma \int_0^t G(\tau) d\tau \dots\dots\dots (1)$$

という、今では常識となった  $k$  ベクトル (波数) の定義が登場するが、この式が、論文などに現れたのは、これが最初ではないと思われる。この式の存在は、少なからぬ研究者の頭の中には、様々な形で既に存在していたと思われるが、これを明瞭な形で示したことには、大きな意義がある。すなわち、この式を使えば、それまでに提案されていたほとんどの MRI における撮像手法を、統一的に理解できるようになることは、難しいことではなかったと思われるからである。

この論文は、2 段組 12 ページにわたるもので、 $k$  空間と k-trajectory に関することだけではなく、 $k$  空間におけるデジタルサンプリングなどについても、様々な議論がなされている。したがって、決して読みやすい論文ではなく、簡潔に書かれていないことが、この論文の評価を少し低くしていると言えなくもない。

### Ljunggren の論文の内容

この論文は、前に述べたように、Twieg の論文より後に投稿されたが、出版されたのはほぼ同じ時期で、しかも 1 段組で 6 ページと短く、内容も簡潔で明瞭であるため、 $k$  空間と k-trajectory に関する初出の論文として、こちらのみが引用されることも多い。この理由としては、Brown らの論文とは無関係に式(1)を導出していること、数学的な記述が簡潔で明瞭であること、k-trajectory が、現在標準的に使われる時間  $t$  を含まない形で表されていること (図1(b))、さらに、磁気共鳴分野における最も標準的な雑誌である Journal of Magnetic Resonance に発表されていること、などが考えられる。したがって、 $k$  空間に関する説明を原著論

文で勉強したい場合には、こちらの論文が薦められる。

この論文では、この時点までに提案されていたプロジェクション法、フーリエ法、EPIのトラジェクトリが明快に記述してあるのみならず、新たに、スパイラルスキャンが提案されている。スパイラルスキャンは、この論文とは独立に、幾つかのグループにより考案され、1986年にはAhnらのグループによって、初めての実験結果が発表された。

### k空間のコンセプトの限界

k空間は、MRIにおけるイメージング手法を理解するのに万能なコンセプトと思われるかも知れないが、限界もあり、少なくとも次の二つの場合には、k空間の考えだけでは撮像法の理解が困難である。

第一は、複数のRFパルスにより核スピンの励起される場合である。このような例として、

BURST法とFISPなどのSSFP法がある。ただし、前者は、k-trajectoryの方法で理解できる（トラジェクトリは、広いk空間を斜めに横切る一本の直線になる）のに対し、後者の場合には、k-trajectoryの考えだけで理解するのは困難であると言われている。

第二は、複数のRFコイルを用いる、SENSEやSMASHの場合である。これらは、k空間（フーリエ空間）だけで実施される位置の識別手法の限界を乗り越えるために、複数のRFコイルを用いて、実空間における位置の識別手法を活用する手法として提案されたものである。したがって、k空間の考えだけでは、これらの手法を理解することはできない。

以上に述べたように、k空間は、MRIの理解に不可欠な手法であるが、限界もある。しかしながら、k空間とk-trajectoryの基礎を固めた標記の二つの論文は、MRIの歴史に残る文献であることは間違いない。

筑波大学物理工学系  
巨瀬勝美