

# 核スピンを利用したセキュリティ技術



技術解説

赤羽 英夫<sup>\*</sup>, 糸崎 秀夫<sup>\*\*</sup>

Application of nuclear spin to security technology

Key Words : sensing, explosives, NQR, NMR

## 1. はじめに

近年、爆発物を使用したテロ行為が各地で頻繁に発生しており、毎週のようにテレビや新聞などのニュースとなっている。そのため、未然に爆発物を検知する技術の開発は国際的に重要な課題となっている。2001年に米国で発生した9.11同時多発テロ以降、空港での保安検査はより厳重となっている。しかし、それに関わらず、2009年にはオランダ発米国外の飛行機において、爆薬を用いた爆破未遂事件が機内で起きている。金属を含まない固体の爆発物は、衣服等の内部に隠した場合にその検出が困難となり、保安検査で検知されず通過することができた。また、最近では、体内に爆発物を隠匿し、何らかの方法で爆発させる事例も発生しており、体内隠匿の検査技術の開発も強く望まれている。現在国内空港で導入されている固体爆発物の検査技術は、主にX線検査装置となるが、検査方法は形状認識と物質による

X線吸収係数の違いを用いている。そのため、吸収係数が近い物質との区別は困難となる。そこで、物質特定が可能な検査方法として、我々の研究室では、物質から生じる物質透過性が高いMHz帯の電磁波である核四極共鳴信号を非破壊非接触で検出する方法を開発している [1-5]。これまで、核四極共鳴(NQR)法を用いて、地雷探知、靴検査や身体検査などの試作装置を作製している。また、最近では覚せい剤などの不正薬物の検出を目指した装置開発も行っている。

一方、2006年に発生したロンドン旅客機爆破テロ未遂事件において、簡易に入手可能な原料からできる手製液体爆発物が使用された [6]。当時、液体物の検査がなく、機内持ち込みに制限が無かったため、容易に機内へ持ち込むことが可能であった。その後、世界的に航空機への液体物の持ち込みが規制され、現在においてもその規制が継続されている。航空業界からは規制緩和のために液体物検査装置の開発が求められている。欧州においては段階的な緩和を行う方針となっており、2013年4月までに全ての空港に液体爆発物の検知が可能な検査装置を導入することとなっている [7]。しかし、規制緩和で検査が求められる容器の種類には、様々な形状・材質が存在しており、全てに対応できる検査装置は現状において開発されていない。現時点における検査技術を表1に示す。特に、未開封のまま非破壊検査が可能な検査技術が強く求められている。

X線法では原子番号と密度から内容物を特定する。しかし、液体爆発物と安全な液体との区別に困難なものがあるため、現在も継続して研究開発が行われている。誘電率の違いで物質を判別する電磁誘導法では、水溶液と誘電率が近い液体爆発物との検出が困難である。熱伝導法による検査では、容器および液体の熱伝導を用いる方法であるが、内容物自体の



\* Hideo SATO-AKABA

1977年10月生  
大阪大学大学院理学研究科宇宙地球科学  
専攻博士後期課程終了(2004年)  
現在、大阪大学大学院基礎工学研究科シ  
ステム創成専攻 准教授 博士(理学)  
センシング工学  
TEL : 06-6850-6313  
FAX : 06-6850-6312  
E-mail : akaba@ee.es.osaka-u.ac.jp



\*\* Hideo ITOZAKI

1950年10月生  
ノースウェスタン大学(材料科学科)博  
士課程修了(1982年)  
現在、大阪大学大学院基礎工学研究科シ  
ステム創成専攻 教授 PhD 量子機能  
素子工学  
TEL : 06-6850-6310  
FAX : 06-6850-6310  
E-mail : itozaki@ee.es.osaka-u.ac.jp

表1 主な液体爆発物検査技術

方法	検知物性	物質 同定	未開封 容器	透明 容器	金属 容器	画像化	荷物内 検査	価格
X線法	原子番号 密度	×						×
電磁誘導法	誘電率	×			×	×	×	
熱伝導法	熱伝導率	×				×	×	
ガス漏れ探知法	分子質量		×		×	×	×	
ラマン分光法	分子振動				×	×	×	×
近赤外分光法	分子振動				×		×	
低磁場核磁気 共鳴法	核スピン 拡散係数	×						

検査はできないなど課題も多い。ガス漏れ検知法は、容器から漏れた気体を質量分析することにより、爆発物を検知する方式であり、物質を特定することが可能である。しかし、液体など密閉した容器に隠匿された場合において検査することができない課題がある。ラマン分光法や近赤外分光法は、X線法、電磁誘導法などと違い物質固有のスペクトルを取得できることから、物質の同定が可能な非常に強力な技術である。しかし、光を用いるため容器の材質によっては計測が困難となる。

そこで、核磁気共鳴法 (NMR) を用いた技術の研究開発が、現在活発に行なわれている。特に低磁場核磁気共鳴イメージング法 (MRI) を用いた検査装置は、すでに米国の空港において実証試験が実施されている [8]。判別方法は、水素核スピンの NMR 緩和時間や NMR 計測から求まる液体の拡散係数が、液体の種類によって異なることを利用するものである [9-11]。低磁場 MRI 法では、多数のボトルを同時に計測することが可能であるが、比較的大きな磁場コイルが必要となる。また、測定領域が広い一方、実用的な検出感を確保するために、NMR 信号の読み取りとして寒剤を必要とする超伝導量子干渉素子 (SQUID) が使用される。そのため、装置の構成が複雑となり、製造コストもサイズも大きくなることから、実際の運用では問題が多いと予想される。また、核磁気共鳴法であるため、磁性体からなる容器 (鉄缶等) に対しては原理的に測定が困難となる。理想的には一つの技術で、様々な種類の容器内に密閉された内容物を検査することが望ましいが、現状の技術はそこまで達していない。そこで、我々の研究グループでは、透明や半透明の容

器に対して近赤外分光法を用い [12]、光が透過しない容器に対しては、地磁気 NMR 法を利用することを検討している。

本稿では、現在我々の研究グループで開発を進めている爆発物探知用 NQR、地磁気 NMR 技術について紹介する。

## 2. 核スピン共鳴について

核磁気共鳴 (NMR) は、核スピンが磁場を印加されることにより生じたエネルギー準位差に等しい電磁波に共鳴する現象である。また、その共鳴周波数は、磁場に比例するが原子核の種類や、まわりの環境により同じ磁場を印加した場合においても、共鳴する周波数は異なる。高磁場 NMR を用いた液体検査では、この共鳴周波数のずれから、内容物の特定を行うことができる。しかし、金属缶等に隠匿された液体物の検査においては、電磁波の金属板による遮蔽効果を考慮する必要があり、およそ 10kHz 以下での NMR 検出が必要となる。そのため、液体爆発物の検査においては、低磁場での NMR 検出が望ましい。

一方、核四極共鳴 (NQR) は、外部からの磁場印加を必要とせず、電気四極子モーメントを持つ原子核が結晶中に存在する場合に測定することができる。核スピンが 1 以上の原子核は、電気四極子モーメントを持ち、内部の電場勾配によりエネルギー準位差を生じる。原子核は、その準位差にエネルギーが等しい電磁波に共鳴すること、また内部電場勾配は物質により固有であることから、NQR を用いて物質同定を行うことが可能である。ほとんどの爆発物や不正薬物 (表 2) は、核スピンが 1 となる窒素

表2 主要な爆発物、不正薬物のNQR共鳴周波数

物質		NQR共鳴周波数 [MHz]		
爆発物	RDX	5.240	5.192	5.047
		3.458	3.410	3.359
	PETN	0.890	0.495	
		0.870	0.859	0.848
	TNT	0.844	0.842	0.837
		HMT	3.308	
	HMX	3.737	3.623	
硝酸アンモニウム	0.497	0.423		
硝酸カリウム	0.665	0.567	0.559	
麻薬 覚せい剤	コカイン塩酸塩	2.530	0.961	
	ヘロイン	4.026	3.950	
	ヘロイン塩酸塩	1.035		
	MDMA	2.712		
	コデイン	4.028	3.980	
	メタンフェタミン塩酸塩	1.217	0.654	

原子核を含むため、NQRを用いた検査方法の対象となる。

### 3. 地磁気NMRを用いた液体物検知

地磁気 (~ 40  $\mu$ T) は地球上のどこにでも存在し、また磁場均質性 (~ 1 nT/m) も高いことからNMR誕生当初から地磁気を用いたNMR技術の開発が行われてきた。地磁気の均質性が高いため、比較的大きな試料計測空間を提供することも容易である。また、巨大で高価なマグネットを必要としないというメリットがあり安価に製作できる。地磁気ほどの低磁場ではNMR物性の一つである化学シフトが見えなくなり、外部磁場に依存しないスピン・スピン結合のみが現れるという特徴がある。その分解能は少なくとも高磁場NMRより10倍は良いと報告されており、分子の構造解析に使われている [13]。また、生体イメージングに用いられる水素原子核の緩和時間は分子運動によって大きく異なるが、低磁場ではよりその変化が強調されるため高磁場MRIよりもコントラストの良い画像が取得できる [14]。しかしNMRの検出感度は印加磁場に比例して大きくなるため、最近まで超伝導磁石 (1 ~ 20 T) を用いた高磁場NMRの開発の影に隠れ、低磁場NMRの開発は注目されていなかった。近年、高磁場NMR装置開発の研究が飽和するなか、徐々に低磁場NMRの研究が見直されている。その理由は、磁化の分極を高める分極磁場印加法や動的核分極法の開発、さらには磁化の検出感度を高める超伝導干渉素子の開発

などにより、低磁場でのNMRの検出感度が近年飛躍的に伸びていることにある [15]。分極磁場印加法では、数十 mT ほどの磁場をNMR信号受信前に印加してサンプルを磁化させる。これに必要な空芯マグネットはNMR信号取得時に出力がゼロとなる。したがって磁化読み取り磁場として使用しないため、均質な磁場を作るための補正用コイル等は不要となる。

分極磁場印加法を用いた地磁気NMRの原理を図1に示す。液体中の水素原子核による磁化は地磁気下では非常に微弱である。そこで、NMR信号取得前に、地磁気に比べ例えば1000倍程度大きな分極磁場を印加し、その磁化を1000倍増大させる。その後、分極磁場の印加を終了し、均質な地磁気下でNMRの検出を行う。磁化の検出には、90°パルスを用い、自由誘導減衰 (FID) 信号を取得する。図1の破線は磁化の変化を示している。分極磁場下では、分極磁場下縦緩和時間  $T_{1p}$  で磁化が増大する。一方、分極磁場の印加を終了すると、磁化は地磁気下での熱平衡状態へと地磁気下縦緩和時間  $T_{1E}$  で減少していく。

分極磁場印加時間  $p$  の長さにより、水素原子核による磁化の大きさが変化するため、FID信号のピーク強度が変化する。したがって、分極磁場下縦緩和時間  $T_{1p}$  の測定は、分極磁場終了と励起用90°パルスまでの時間  $E$  を一定とし  $p$  を変化した場合のFID信号の増減から推定する。地磁気下縦緩和時間  $T_{1E}$  の測定は、 $p$  を一定とし  $E$  を変化する

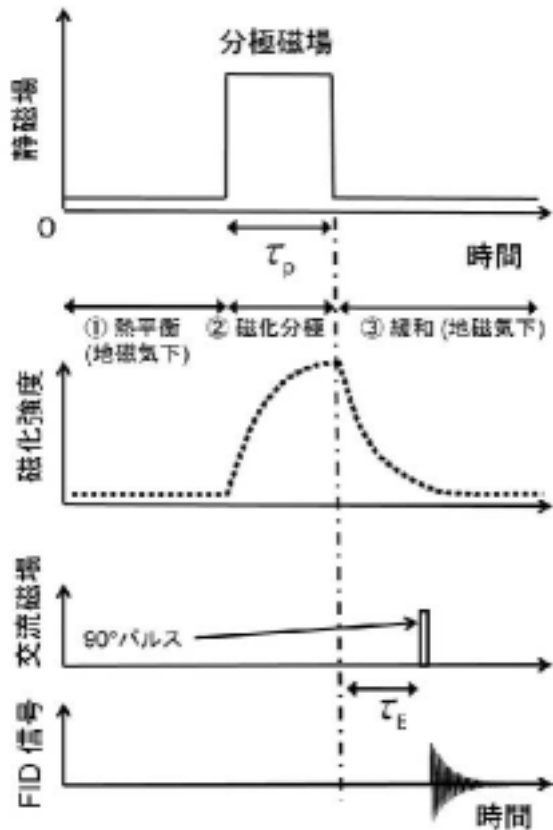


図1 磁場印加に対する核スピンの磁化の時間的変化

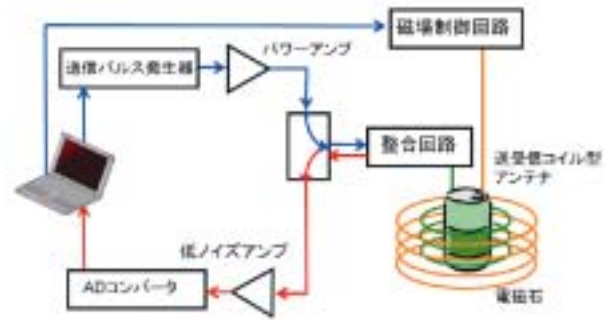


図2 地磁気 NMR 装置の概略図

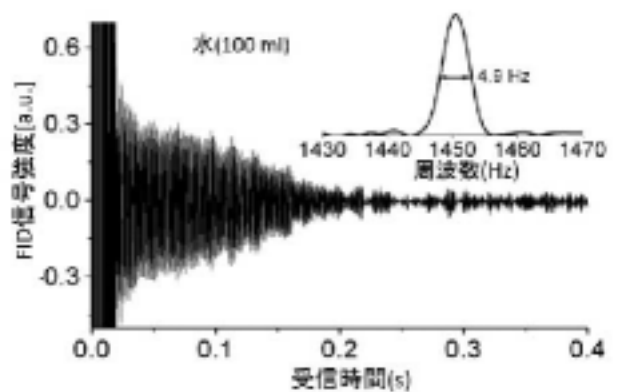


図3 水 (100ml) からの地磁気 NMR 信号

ことで、FID 信号の増減から推定をすることができる。図2に地磁気 NMR 装置の概略図、図3に100mlの水からの NMR 信号を示す。

NMR を用いた液体検査の研究は、液体の拡散係数や高磁場での緩和時間を判別基準に用いて行われている。一般的に、液体物による緩和時間の差は高磁場より低磁場で強調される。それは、緩和時間が分子運動に影響されるからである。水のように分子運動の相関時間が短い液体では、高磁場でのみ磁場依存性を持ち、分子運動の相関時間が長い液体では、低磁場においても磁場依存性をもつ。図4にさまざまな液体における NMR 緩和時間をプロットした。縦軸は、地磁気下縦緩和時間、横軸は分極磁場下縦緩和時間を表す。液体により、これら緩和時間に違いが見られ、0.1 - 3 秒の間に殆どの液体が位置していることがわかる。また、地磁気下での緩和時間が長い液体は、分子運動の相関時間が水などと同様に短く、緩和時間への影響が少ないと推測できる。そのため、分極磁場下においても緩和時間が長くなることはなかった。地磁気下での緩和時間が短く、分極磁場下での緩和時間が長くなるサンプルは、分

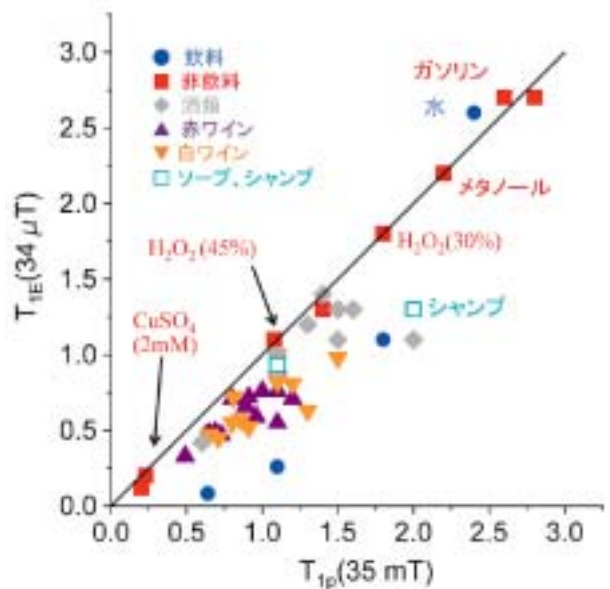


図4 様々な液体の地磁気下 NMR 縦緩和時間  $T_{1E}$  と分極磁場下 NMR 縦緩和時間  $T_{1P}$

子運動の相関時間が長い液体である。緩和時間が地磁気下と分極磁場下で変化しないものに関しては、その緩和機構が溶存酸素などの常磁性体分子や常磁性イオンなどとの衝突により生じる電子スピンの



磁気的な相互作用が主因であると考えられる。液体の種類により、緩和時間が広く分布していることから、予め液体の緩和時間についてデータベースを構築しておけば、検査時に取得された緩和時間とデータベースを比較することから液体の判別が可能になる。

4 . NQR を用いた爆発物、不正薬物検知

次に磁場印加を必要としない核四極共鳴法 (NQR) を用いたセキュリティセンシングについて述べる。NQR の検出には、NQR 共鳴周波数の電磁波を照射し原子核からの応答を計測する方法が用いられる。主に連続波を用いる連続波 (CW-NQR) 法とパルス波を用いるパルス (Pulsed NQR) 法がある。前者は、周波数掃引が可能な方法で、未同定な物質の NQR 周波数探査などの用途に用いられるが、低出力な電磁波を用いるため物質からの応答信号も微弱となる。そのため、センシング応用としては不向きである。それに対して後者の方法は、1kW 程度の高出力電磁波を 100us 程度の時間において照射するため、励起できる帯域幅も広がり、電場勾配により分極している磁化をすべて励起することが可能と

なる。そのため、CW-NQR 法に比べ信号強度が強くなる利点があり、爆発物や不正薬物のセンシング技術として広く用いられている。

図5にNQR送受信装置の概略を示す。NMRとは異なり、マグネットを必要としないことから、コンパクトな設計が可能である。電磁波の送受信には、それぞれの物質に対応したNQR共鳴周波数に共振を持つアンテナを用いる必要がある。NQR信号は極めて微弱なため、磁場ノイズを避けるために電磁波シールドを用いるが、地雷探知、身体検査、靴検査などでは、電磁波シールドを用いることが難しい。そこで、2つのコイルを8の字に組み合わせることでノイズを除去する差分コイルを開発した。一例として、研究室で開発した差分コイル型アンテナを内蔵した地雷探知用プローブ、身体検査用プローブ、靴検査用プローブについて図6に示す。差分コイル型アンテナでは、環境ノイズを23dB程度減衰させることが可能となり、シールド外での計測が可能となっている。

NQR信号強度は、物質中に含まれる対象となる原子核の数、エネルギー準位差、NQR緩和時間など様々な因子に依存する。そのため、対象となる物

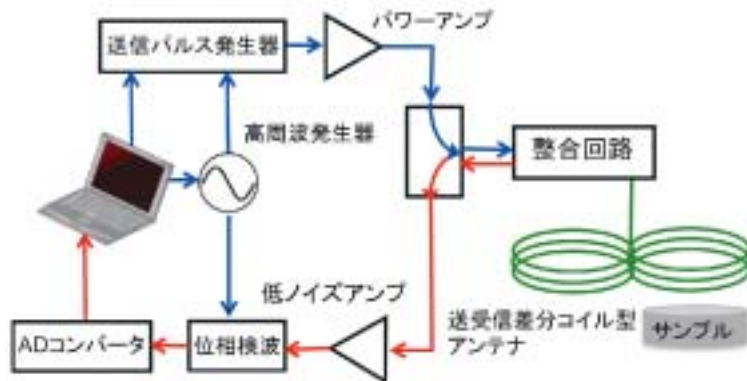


図5 NQR装置の概略図



図6 差分コイル型アンテナを内蔵したNQR地雷探査用プローブ(左)、身体検査用プローブ(中)、靴検査用プローブ

質毎に NQR 特性を調べる必要がある。特に NQR 緩和時間を考慮することで、パースト波の照射方法や NQR 信号の受信方法を調節することが可能となり、飛躍的に信号強度を増加させることができる。図7に、覚せい剤である塩酸メタンフェタミンの NQR 信号を取得した結果を示す。現状では、高性能爆薬である RDX や覚せい剤の検出が数百グラムある場合、数秒から数十秒の時間で検出可能となっている。しかし、TNT や PETN などの爆薬においては、さらに検出時間を要するため検出感度の向上が必要となっており、更なる技術開発が期待されている。

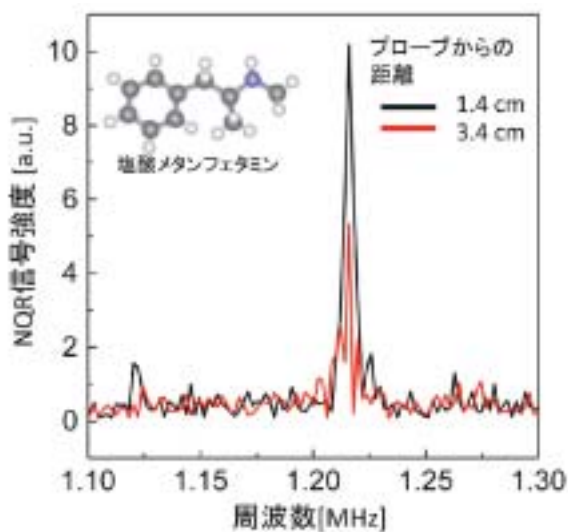


図7 覚せい剤 (塩酸メタンフェタミン) からの NQR 信号

## 5. 終わりに

爆発物、不正薬物の非破壊非接触検知技術として、核スピンを検出する低磁場 NMR や核四極共鳴について紹介した。低磁場 NMR を用いた液体物の検査では、NMR 緩和時間が液体の種類により異なり、また磁場依存性をもつことから、液体物の判別に用いることが可能であることを示した。今後、種々の液体に対して地磁気 NMR 計測を行い、データベースの構築を進める必要がある。核四極共鳴を用いた固体爆発物や不正薬物爆発物の探知においては、検出が難しい爆薬も存在するが、現在導入されている方法では検出が難しいことから、早期の導入を期待したい。また、爆発物を用いた脅威は、航空業界だけでなく、鉄道、バス等の公共交通機関、公共施設、イベント会場など多岐にわたる。そのため、可搬できる小型な検査装置の開発が期待される。

## 謝辞

本研究の一部は、科学技術振興機構 (戦略的創造研究対人地雷の探知技術)、日本学術振興会からの助成により行いました。また、覚せい剤を用いた研究は、財務省関税中央分析所の協力により実施したものです。ここに記して感謝いたします。

## 参考文献

- 1) T. P. Das, E. L. Hahn, "Nuclear Quadrupole Resonance Spectroscopy," Solid State Physics, Supl. 1, Academic Press, NY, (1958)
- 2) A. N. Garroway, M. L. Buess, J. B. Miller, B. H. Suits, A. D. Hibbs, G. A. Barrall, R. Matthews, L.J. Burnett, IEEE T. Geosci. Remote. 39, 1108-1118, (2001)
- 3) G. Ota, and H. Itozaki, Solid State Nucl. Magn. Reson. 30 135-140, (2006)
- 4) D.F. He, M. Tachiki, H. Itozaki, Supercond. Sci. Tech. 20, 232-234, (2007)
- 5) Explosives Detection using Magnetic and Nuclear Resonance Technique, Ed. by J. Fraissard, Jacques and O. Lapina, Springer, (2009)
- 6) Detection of liquid explosive and flammable agents in connection with terrorism, Ed. by H. Schubert and A. Kuznetsov, Springer, (2008)
- 7) Commission regulation (EU) No 297/2010
- 8) A. N. Matlashov, V. S. Zotev, R. H. Kraus, Jr., H. Sandin, A. V. Urbaitis, P. L. Volegov, and M.A. Espy, PIERS Online, 5, 466-470, (2009)
- 9) S. Kumar, Appl. Magn. Reson. 25, 585-597, (2004)
- 10) J. Mauler, E. Danieli, F. Casanova, B. Blümich, in "Explosive detection using magnetic and nuclear resonance techniques", Ed. by J. Fraissard and O. Lapina, Springer, 193-203, (2009)
- 11) A. Gradisek, T. Apih, Appl. Magn. Reson. 38, 485-493, (2010)
- 12) 糸崎秀夫, 山内佑二, 日本赤外線学会誌, 18, 42-46, (2009)
- 13) S. Appelt, H. Kühn, F. W. Häsing, B. Blümich, Nature Phys, 2, 105-109, (2006)
- 14) G. Planinsic, J. Stepisnik, M. G. Kos, J. Magn. Reson. A110, 170-174, (1994)
- 15) J. Stepisnik, Nature, 439, 799-780, (2006)