

3次元らせん軌道ビーム入射のためのパルス状磁場発生装置の開発

PREPERATION OF PAPERS FOR ACCELERATOR CONFERENCES

飯沼裕美^{#,A)}, 阿部充志^{B)}, 佐々木憲一^{A)}, 中山久義^{A)}, 三増俊広^{A)}, 三部勉^{A)}

Hiromi Inuma^{#,A)}, Mitsushi Abe^{B)}, Ken'ichi Sasaki^{A)}, Hisayoshi Nakayama^{A)}, Toshihiro Mimashi^{A)}, Tsutomu Mibe^{A)}

^{A)} High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

^{B)} Hitachi Research Laboratory, Hitachi Ltd.

Abstract

A new experiment for very precise measurements of muon anomalous magnetic moment (g-2) and electron dipole moment (EDM) is planned at J-PARC. We give a brief introduction of this experiment and conceptual design of 3-dimensional spiral beam injection scheme which is the one of key technologies of this experiment. As a first step to prove feasibility of this scheme, we construct a proto-type kicker system. Preliminary results from the test bench work are also shown.

1. はじめに

大強度陽子加速器(J-PARC)の本格始動が始まり、物質・生命科学実験施設(MLF)の大強度ミュオンビームラインを最大限に利用する絶好の機会が到来している。豊富なミュオン源からは、エミッタンスが非常に小さく、かつ十分な強度のミュオンビームを利用できる。現在、高エネルギー加速器研究機構や理化学研究所を中心に、ミュオン異常磁気モーメント(g-2)と電気双極子モーメント(EDM)の超精密測定を行う実験準備を進めている。この実験は素粒子の標準理論を精査、および標準理論を越えた未知の粒子・相互作用の兆候を捉えることを目指し、その成果はノーベル賞級のインパクトを与えるものである。

実験全体の研究協力体制は、世界 7 か国 21 の研究施設が関わり、総勢 100 名弱(日本国内では 70 人ほど)の共同研究者が名を連ねている。現在までに 6 回の全体コラボレーション会議を高エネルギー加速器研究機構つくばキャンパスで開催した。2012 年に State-1 status を素粒子原子核研究所と物質構造科学研究所の PAC(Program Advisory Committee)で得ている。

本論文では、はじめに、「ミュオン異常磁気モーメント(g-2)と電気双極子モーメント(EDM)の超精密測定実験」(以下、J-PARC g-2/EDM 実験)を簡単に紹介し、続いて実験実現に向けた主要な技術的挑戦項目の一つである、3次元らせん軌道入射方式の概要と蓄積ソレノイド磁石の概念設計を述べる。また、垂直キックのためのパルス状の磁場発生装置の試作と磁場の空間・時間分布をテストベンチで測定した結果を報告する。

2. J-PARC g-2/EDM 実験の紹介

μ 粒子の g-2 の超精密測定は、現在最も信頼されている標準理論を越えた新しい物理をプローブするもので、最新の実験結果である米国 BNL の E821 実験[1]では 3- σ (標準偏差)の“新しい物理の兆候”を測定している。 μ 粒子の g-2 超精密測定はインテンシティーフロンティアに代表される実験であり、標準模型を超えた物理の選択肢を狭めるために、LHC などのエネルギーフロンティアと共に相補的に取り組むべきである。 μ 粒子は電子と同様に基本粒子であり、その崩壊はシンプルな信号なので、原子核・素粒子分野に限らず物性分野など広く昔から一般的に使われるプローブである。その一方で、電子より 200 倍重い質量をもつために、標準理論を越えた物理に対する感度は電子の 200² 倍強く、そのシンプルな信号に兆候が潜んでいる筈である。又、 μ 粒子の EDM は CP 対称性の破れを必要とし、その存在そのものが標準理論を越えたものである。現在の上限値は 10⁻¹⁹ e.cm[2]である。

J-PARC g-2/EDM 実験では新物理の有無に決着を付ける為に、E821 実験の精度よりも約 5 倍の向上、0.1ppm を目指している。又、EDM の直接検出も行い、感度を既存の実験結果の 10 倍以上向上させ、10⁻²¹ e-cm のオーダーを目指す。実験では、(1) 高精度な蓄積領域の磁場精度 0.5ppm

(2) 大強度かつ低エミッタンスビーム<1mm-mrad

を目指す。(1)を満足する為には、E821 実験よりもビームの蓄積領域を大幅に小さくする。イメージを Figure 1 に示す。J-PARC g-2/EDM 実験では、ミュオンビーム運動量 300MeV/c、蓄積磁場強度を 3 T とし、軌道半径が 0.33m のコンパクトリングにする計画である。従来型に比べ、蓄積領域の体積は 460 分の 1 になる。このサイズなら、蓄積リングを一つの磁石で構築でき、超高精度な磁場調整が可能になる。

[#] hiromi@post.kek.jp

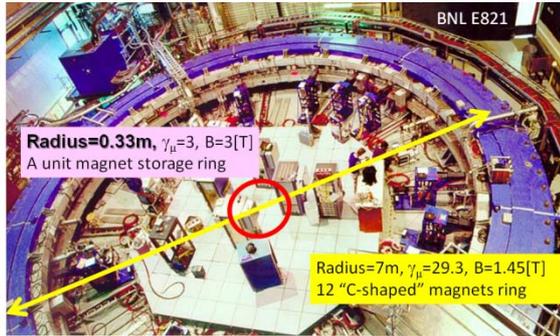


Figure 1: Image of compact ring compared to E821 ring

(2)を実現するために J-PARC/MLF に新しいミュオンビームラインを建設する予定である。完成概略図を Figure 2 に示す。



Figure 2: Image of a new muon beam line at J-PARC

低エミッタンスビームを実現するために、室温標的で作られたミュオンニウム[3]からのミュオンを再加速して利用する。期待されるミュオンの数は 4 万個/ビーム(25Hz)であり、E821 実験の全統計の 300 倍を 1 年で達成する予定である。Table 1 に、J-PARC g-2/EDM 実験の基本パラメータと、E821 実験との比較をまとめる。また、米国 FNAL では、E821 実験の貯蔵リングを再利用する実験が進んでおり、その実験のパラメータも併せて示す。

Table 1: Basic parameters compared to E821 and another new experiment at FNAL

		BNL E821	FNAL	J-PARC g-2/EDM
beam	momentum	3.09 GeV/c		0.3GeV/c
	γ		29.3	3
Storage ring	flux		1.45 T	3T
	Radius		7m	0.33m
	Number of component		12	1
	Beam focus	Electric quadrupoles		Weak focus
	Number of μ^+	5.0E+9	1.8E+11	1.5E+12
	Number of μ^-	3.6E+9		
	Statistical uncertainty	0.46ppm	0.1ppm	0.1ppm

3. 3次元らせん軌道入射の概念設計

3.1 らせん軌道入射とは？

コンパクトリングへの入射は 3 次元的にする必要がある。一般的なビーム入射は蓄積リングと入射ビームラインが同一平面上にある。入射したビームが貯蔵リングを 1 周して入射地点に帰って来る前に水平キックを与えて、reference orbit に乗せる。E821 実験はこの手法を取り、1 周 149 ナノ秒以内に 10mrad の垂直キックを与えている。しかし、これを直径 66cm のコンパクトリングで行おうとすると、Figure 3 の右上の赤線で囲った部分で示すように、1 周 7.4 ナノ秒以内に 60mrad の水平キックを与えねばならない。これは技術的に難しい。

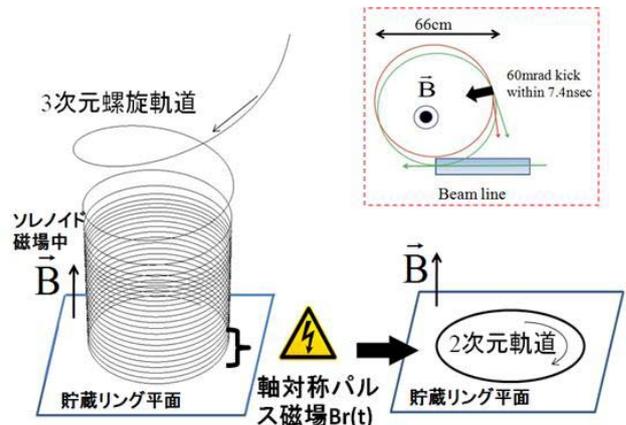


Figure 3: concept of 3-D spiral beam injection

そこで、Figure 3 に示すように、3 次元的な入射手法を新たに考えた。この場合、入射の途中から徐々に垂直方向の運動を弱め、蓄積領域付近では、10mrad 程度の垂直運動を止めることを考える。また、垂直キックは 1 周以内で止める必要はなく、例えば、30 周回する 200 ナノ秒程度の間、パルス磁場を与えればよい。こうしてキッカーの時間・強度のスケールを現実的なものにすることが可能になる。

以上まとめて、コンパクトリングへの入射は、

- 3次元らせん軌道で徐々に垂直運動を弱め、
 - 垂直キックを与えて 2次元平面内に蓄積する、という方式をとることとした。これは、一般的な加速器技術の定石から離れるが、入射機能・蓄積機能を一体化させることができる利点がある。
- また、蓄積貯蔵領域は、弱収束磁場を付加することも検討している。ビームの運動量の広がりや、垂直キックのみで完全に止めない場合を想定しているが、この論文では詳細な議論は割愛する。^{at}

3.2 入射・蓄積部一体型磁石の概念説明

基本的にはソレノイド磁石 1 個で構築する。フリレンジ磁場を積極的に利用し、入射ビームの垂直方向の運動を水平方向に変換する。イメージを Figure 4 に

示す。フリンジ部に入射したビームは磁場に従って徐々に垂直方向の運動を小さくしながら蓄積領域まで誘導される。磁場中の運動なので、ビーム運動量 p は保存する。入射角度 θ のソレノイド軸に沿った変化率とフリンジ磁場 B_R の関係は一意に決まる。

$$\frac{\Delta\theta}{\Delta Z} = \frac{q}{p} \frac{B_R}{\tan\theta} \quad (1)$$

ただし、 q はミューオンの電荷である。更に磁石軸方向の中心付近で垂直キックを与え、ビームを保持する。

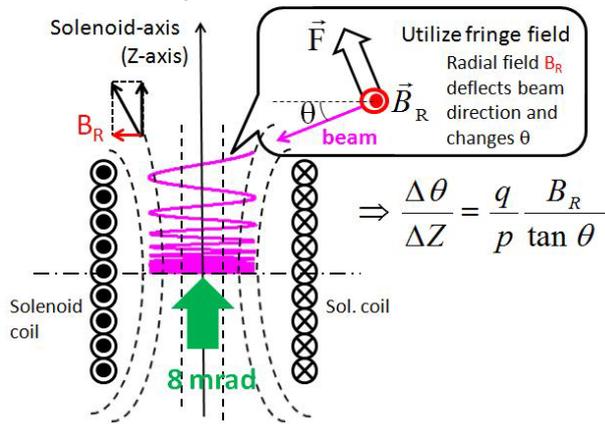


Figure 4: Concept of unit storage ring system

この方式の利点は二つあり、

- 入射部と蓄積部を軸方向に離しつつなめらかにつなぐことができる、
- 一体型構造の磁石を採用可能で蓄積部の誤差磁場を小さくできる、

ことである。一方、難しい点は、

- フリンジ磁場中を通るため、ビーム運動が水平垂直で結合する(X-Y カップリング)、
- ことである。これについては次節で議論する。

Figure 5 にソレノイド磁石を基本にした蓄積磁石案を紹介する。

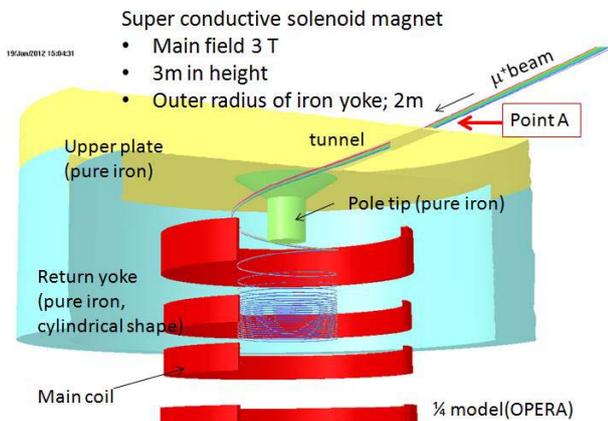


Figure 5: Image of storage ring magnet

ソレノイドコイルを赤色、エンドヨークを黄色、ポールチップを黄緑色、リターンヨークを水色で示す。エンドヨークには、ビームを通すための直径 3cm ほどの丸穴トンネルを開けている。全体の大きさをみると、リターンヨークの外径は 2m である。ソレノイド軸方向の高さは 3m である。蓄積領域半径 0.33m のコンパクトリングだが、中心磁場 3T を 0.5ppm での磁場調整を実現するにはこの大きさが必要になる。実際に、磁石の大きさ、磁場強度、磁場調整の精度は医療用 MRI と同程度であり、既存の技術を応用して製作可能である。

Figure 6 にこのモデルを OPERA-3D で磁場計算した結果を示す。理想的な軌跡に沿った、軸方向、径方向の磁場の分布を軸方向の位置の関数で表示した。

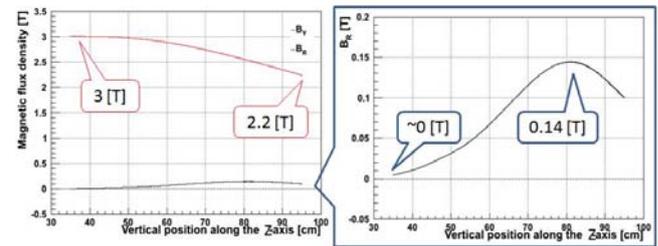


Figure 6: Magnetic field along model trajectory (inside of return yoke)

磁場の仕様決定は理想的ならせん軌道をとることを前提にした。(a)磁場の空間分布がなめらかであること、(b)軸方法磁場 B_z 、径方向磁場 B_r の積が常に正であること、の 2 点が必要である。特に、 B_r の空間分布形状は(1)式で示すように入射角 θ と関わる為、 B_r を決定してから、それを満足するコイル電流の配置、鉄の形状などの磁石設計のパラメータを出した。[4]

3.3 らせん軌道ビームの入射条件

入射可能な軌跡群の条件を議論する。軸対称な磁場なので、基本となる軌跡を軸周りに対称に回転・平行移動した形になる。アクセプタンスの目安は、 ± 10 度の範囲内の回転、および、回転中心が \pm 数 mm 平行にずれた程度である。一例を、Figure 7 に示す。これは、蓄積磁石の外側の地点(Figure 5 に示す、Point A)におけるビーム形状を示している。座標系は、ビーム軌道に沿った回転座標系で Figure 7 の vertical はソレノイド軸と平行な軸を指す。

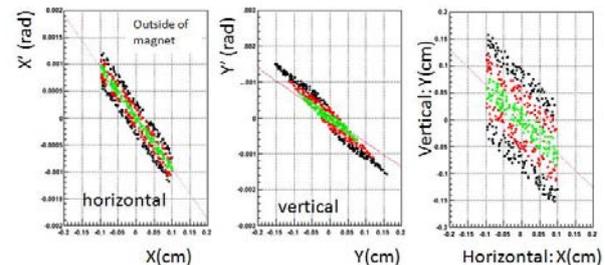


Figure 7: Initial condition of beam at point-A (Figure 5)

この例では、水平垂直方向の断面が 1mm 程度の領域内で適切な水平垂直結合をさせたサンプル軌跡 500 本を求めた（入射のアクセプタンスの上限を現在見積り中である）。赤い直線は水平垂直結合の傾きを示し、Figure 6 で示す磁場分布から解析的に算出できる。又、水平方向、垂直方向の位相空間が互いに関係している様子を見やすくするために、この直線から近い領域を緑、赤の色別の領域で示した。

このように、フリッジ磁場に合うように、ビームの水平垂直運動の結合を正しく調整すれば、入射は可能であることが計算上は明らかになった。次の段階は 3 次元らせん入射の実証実験を行うことである。その第一弾として、垂直キッカー装置を試作したので次に紹介する。

4. 垂直キッカー装置

Figure 3, 4 で述べたように、ソレノイド磁石へ 3 次元らせん軌道で入射したビームは、磁石中心付近で垂直キックを受けて、平面上の 2 次元運動になり、蓄積領域に保持される。具体的にはパルス状のソレノイド軸対称な径方向磁場を用いてビームに対し垂直方向のキックを与える。以下に、垂直キッカーの概念設計を紹介し、キッカー装置のプロトタイプ作成および、テストベンチにおける磁場測定結果を紹介する。

4.1 垂直キッカー概念説明

ソレノイド軸方向のビームの運動量成分の平均値 P_z が時刻 $t=0$ の時の $P_{z0}(<0)$ から、 $t=200$ ナノ秒後までに、式(2)で示す時間分布でゼロにする場合を考える。8mrad の垂直キックを与える事を目標にすると $P_{z0} = -2.4 \text{ MeV}/c$ である。キッカー磁場の時間空間分布は式(3)になる。時刻 $t=200$ ナノ秒以降のキッカー磁場はゼロにする為、半サイン形状にする。

$$p_z(t) = \frac{P_{z0}}{2} [1 + \cos(\omega \times t)] \quad (2)$$

$$B_{kick}(t) = B_{peak} \sin(\omega \times t) \quad (3)$$

ここで、 B_{peak} は軸対称な径方向磁場で、1.5 Gauss、空間均一度は、Figure 8 に示すようなビームが通過する部分に沿って 1%程度あれば良い。

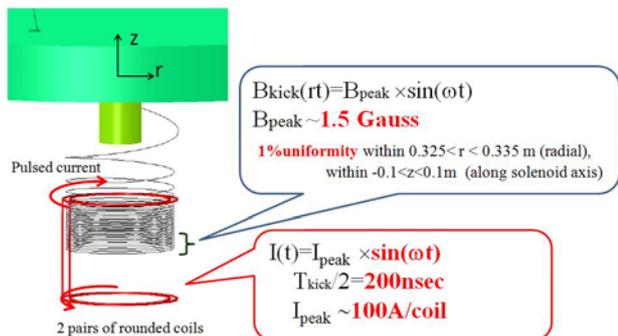


Figure 8: Requirements for kicker

このような軸対称の径方向磁場を作る為には、2ペアの円形コイルが蓄積領域を上下に挟む形で設置すれば良い。

時間パルス状磁場を作るため、コイルに流す電流の時間分布は磁場の時間分布と同じである。

$$I(t) = I_{peak} \sin(\omega \times t) \quad (4)$$

$B_{peak} = 1.5 \text{ gauss}$ を達成するには、 $I_{peak} = 100 \text{ A/coil}$ である。

4.2 キッカー装置の試作

以上の概念設計を基に、原寸サイズの垂直キッカー装置を試作し、テストベンチで磁場の時間・空間分布を測定したので結果を報告する。尚、試作装置製作にあたり、科学研究費 若手 B のサポートを受けている。Figure 9 に原寸大のキッカーコイル（サポート治具を含む）と大電流電源装置を示す。サイラトロンスイッチを使用している。

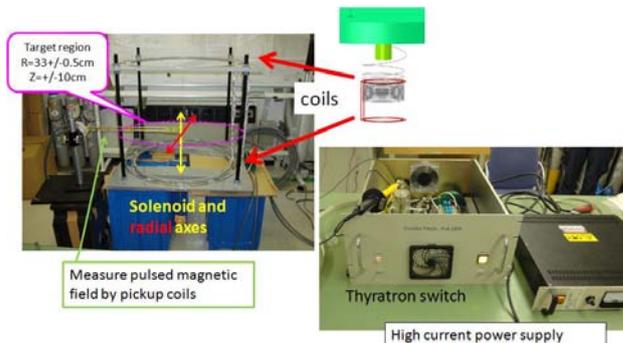


Figure 9: Picture of proto-type kicker and high current power supply

キッカーコイルを流れる電流の時間分布は CT(Current Transformer)で測定している。オシロスコープの画面を Figure 10 に示す。

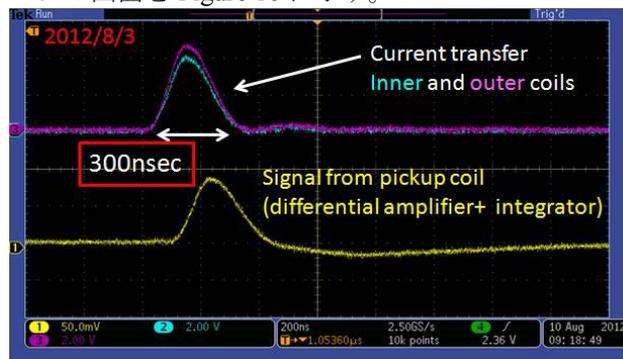


Figure 10: Signals of CT and pickup coil

実際の磁場の時間分布は電流の時間分布と同じであるので、CT の信号が磁場の時間分布を示すと考えて良い。紫色、水色の線が外側、内側コイルに流れる電流の時間分布を示す。半サイン形状のパルス電流が流れていることがわかる。目標は 200 ナノ秒に対し、300 ナノ秒のパルス幅である。信号のピークの高さが若干異なるのは、コイルのインダクタンス

が外側コイル、内側コイルで異なるためである。2つのコイル合わせて 160A を流している。黄色の線は、ピックアップコイルの信号を示す。差動アンプ、積分器を通しての為、時間構造は実際の磁場の時間分布とは異なるが、シグナルのピーク値が、磁場の強さに比例するので、磁場の空間分布測定に使用した。

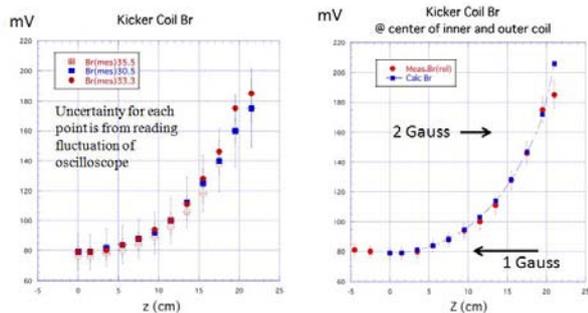


Figure 11: Spatial distribution of kicker field. Comparison with simulation is also shown.

磁場の空間分布測定結果を Figure 11 に示す。横軸は垂直方向の位置(Z)、縦軸はピックアップコイルの信号のピーク値(磁場の強さに比例)を示す。左側の図は、ピックアップコイルの径方向の位置 3 通り ($r=0.305, 0.333, 0.355\text{m}$)の結果を比較している。目標の 1%均一度を議論できる測定精度を達成していないが、5%均一度は達成できているものと考えている。Figure 11 の右側の図は、アンペールの法則から計算した磁場の空間分布との比較を示す。計算結果とも良く合っており、磁場の絶対値は 1~2 ガウスになっていることも確認できた。

このように、テストベンチでは、磁場の時間・空間分布の目標に近い結果を得ることができた。パルス幅を 300 ナノ秒から 200 ナノ秒に細くする努力を続けている。ピーク電流値を上げるのが最も単純な方法だが、主コンデンサの充電電圧を上げることになり、大電流電源の負担が大きく現実的ではない。キッカーコイル付近に、アルミ板などを付加し、コイル全体のインダクタンスを小さくする試み等も行っている。一方で、実際のビームの広がりを見直した、キッカー磁場の時間空間分布の条件を見直す作業も進める予定である。

4. まとめと今後

J-PARC/MLF の大強度ミュオンビームラインを利用した、ミュオン異常磁気モーメント($g-2$)と電気双極子モーメント(EDM)の超精密測定を行う実験準備を進めている。従来の実験とは全く異なる実験手法を採用し、実験精度を大幅に向上し、標準理論を超える物理の探索を目指す。本論文では、実験の概要を紹介し、実験実現のカギとなる技術開発のうちの一つである、3次元らせん軌道入射の概念設計を議論した。続いて、ビーム入射実証実験の第一

弾として、垂直キッカー装置を試作し、テストベンチでの磁場測定結果を報告した。空間時間分布が目標に近いものを得ている事を確認できた。

今後は 3次元らせん軌道入射全体を通しての実証試験を行いたいと考えている。具体的には電子銃を用いてスケールダウンしたテストビームラインを構築する予定である。

参考文献

- [1] G.W. Bennett et al. (Muon $(g-2)$ Collaboration), Phys. Rev. D 73, 072003 (2006).
- [2] G.W. Bennett et al. (Muon $(g-2)$ Collaboration), Phys. Rev. D 80, 052008 (2009).
- [3] P. Bakule et al., arxiv:1306.3810, to be published in Prog. Theor. Exp.Phys.
- [4] Mitsushi Abe, Keiichiro Shibata, 'Consideration on Current and Coil Block Placements with Good Homogeneity for MRI Magnets using Truncated SVD', IEEE Trans. Magn., vol. 49, no. 6, pp. 2873-2880, June. 2013