

氏 名 三 島 研 二

学位（専攻分野） 博士（工学）

学 位 記 番 号 総研大甲第628号

学位授与の日付 平成14年9月30日

学位授与の要件 数物科学研究科 加速器科学専攻

学位規則第4条第1項該当

学 位 論 文 題 目 加速器のアラインメントにおける精密測定の研究

論 文 審 査 委 員 主 査 教授 春日 俊夫  
教授 佐藤 康太郎  
教授 石原 信弘  
教授 遠藤 有聲  
教授 菅原 龍平（高エネルギー加速器研究機構）  
主任研究 野田 耕司（放射線医学総合研究所）  
員

## 論文内容の要旨

加速器のアラインメントの主要な目的は、加速されるビームの軌道を決定する電磁石の設計位置を、設計された座標に要求される精度で配置することである。そのためには、アラインメントの基準となる測量点を高精度に測量し、その結果を基準とすることによって、電磁石が設置される座標を精度よく決定しなければならない。ここでは、加速器としてシンクロトロンを研究対象としている。シンクロトロンの場合、要求されるアラインメント精度は、加速ビームがつくる閉軌道に許容される歪みの大きさから評価される。この軌道歪みは閉軌道歪み (COD, Closed Orbit Distortion) と呼ばれるもので、シンクロトロンの半径方向と垂直方向にそれぞれ  $\pm 1\text{cm}$  とすれば、おおよそ  $\pm 0.1\text{mm(rms)}$  のアラインメント精度が要求される。したがって、アラインメントはシンクロトロンの性能を決める重要な工程である。

このような精度を達成するためには、測量の精度を向上させる必要がある。しかし最高精度の測量機器を採用しても、測量機器にはその精度に方向性があり、測量機器の精度だけに依存する測量ではその実現は極めて困難である。

このような問題を解決するために、測量による座標の標準偏差が式 (1) によって表されることに着目した。

$$m_s = m_o \sqrt{Q} \quad (1)$$

ここに、 $m_s$ : 座標の精度、 $m_o$ : 測定精度、 $\sqrt{Q}$ : 測量の観測方程式から得られるマトリックスの対角要素、である。

測量の精度を向上させるためには、測量機材の精度が劣化する測辺の方向を精度の高い方向の測辺で補わなければならない。すなわち、測量網 (Survey Network) を複雑に組んで測量することが必要となる。測量網を組むことによって、最終的に必要である座標解を得るためには、測定データを最小 2 乗法によって処理しなければならない。その結果、式 (1) に基づく 2 次元的な方向を持った標準偏差 (誤差楕円) で、座標の精度を評価することが可能となる。式 (1) から、座標の精度  $m_s$  を小さくする (精度を向上させる) ためには、測定精度  $m_o$  を小さくし、かつ  $\sqrt{Q}$  を小さくしなければならない。すなわち、座標の精度は測量機器の精度だけではなく、測量網も密接に関連する。

$m_o$  を小さくすることは、測量機器の精度を向上させることである。ここでは、レーザ測距儀であるメコメータを測量機器の研究対象とした。この測距儀の本来の測距精度は  $\pm 0.2\text{mm}$  であるが、レーザ光に変調をかけ、復調する基準となる発信器の精度 ( $10^9$ ) の限界によって、本来の精度が発揮されているとは言い難かった。そこで、機械の外に高精度 ( $10^{12}$ ) の周波数カウンターを本体の発信器 (シンセサイザー) に接続し、距離を測定した瞬間の変調周波数を測定して本体に表示させる距離に周波数補正する方法を導入することで、測定精度  $m_o$  を向上させた。この改善した測定方法によって、工業技術院 (現独立行政法人産業技術総合研究所) 計量研究所のレーザ測距検定棟のレーザ干渉計による検定では  $\pm 0.03\text{mm}$  (室内環境において) の測距精度を実現した。レーザ測距検定棟は 300m 近いトンネルで、温度、気圧などを一定に保つことができる実験施設である。ただし、レーザの光路上の気象条件、致心誤差などによって実質精度は  $\pm 0.13\text{mm}$  程度である。以上のような方法によってメコメータの本来の測距精度を上回る精度がコンスタントに得られるようにした。

他方、 $\sqrt{Q}$  は最小 2 乗法の観測方程式の係数マトリックスが測辺の距離だけで構成され、測量網の幾何学的要素によって決まるので、シンクロトロンが設置される建屋内において視準線が確保でき、しかも測量機器の精度が劣化する方向を補うような効果が期待でき、かつ  $\sqrt{Q}$  が小さくなる測辺を追加することによって、 $\sqrt{Q}$  の値を評価した。

この研究で行った方法を適用することにより、精度の高い測量が可能となり、測量前のシミュレーションを通して  $\sqrt{Q}$  を評価しながら、測量網の最適化を行うことが可能になった。このようなシンクロトロンの測量網のシミュレーション方法は、多角形の測量網で組成することが可能であるシンクロトロンではきわめて有効であり、この方法で十分な事前

評価を行えば，1回の測量に基づく電磁石の精密アラインメントと，アラインメント後の確認測量だけで加速器のアラインメントを完了することが可能となる．

## 論文の審査結果の要旨

三島研二氏の論文は、加速器を構成する電磁石等の各機器の精密設置に先だって行わねばならない精密測量に関するものである。

高エネルギー加速器のサイズは、周長にして数十mから数十kmに及ぶのに対し、加速器を構成する電磁石や加速空洞などの機器設置の許容誤差は、機器の種類やずれの方向にもよるが概ね0.1mm～1mmのオーダーである。加速器を収納する建物に設置された基準点を基準に各機器を設置することがよく行われる。この基準点は測量と位置微調整を繰り返して設計位置に設置するが、当然のことながら設置精度は測量精度に依存する。測量機器の精度には方向依存性があるため、最高精度の機器を用いても機器の精度だけに依存する測量法では要求される精度をどの方向にも実現させることはほとんど不可能である。このため、精度の劣化する方向を補うために、測量網(survey network)を複雑に組んだ測量が必要となる。この方法では、測量網の各辺の距離測定値から各頂点の座標を最小二乗法で求めることになるが、その座標決定の精度 $m_s$ は、

$$m_s = m_0 (Q)^{1/2} \quad (1)$$

で与えられる。ここで $m_0$ は距離測定の精度であり、 $Q$ は測量網によって定まる値である。

三島氏は、測量による精度が(1)により与えられることに着目した。 $m_s$ が小さくなるためには $m_0$ が小さく、 $Q$ が小さくしなければならない。同氏は要求される測量の精度を達成するために①利用したレーザー測距儀の測定精度の向上、②測量網の構成法の研究を行った。①は式(1)の $m_0$ を小さくすることに対応し、②は必要とする $m_s$ を与える $Q$ 値が得られる測量網を構築することに対応する。

同氏は、使用したレーザー測距儀メコメーターの公称測距精度の±0.2mmは同装置の基準発信器精度の限界により制限されており、機器固有の本来の精度が発揮されているとは言い難いことを見いだした。測距儀外に用意した高精度の周波数カウンターにより基準周波数を精密に決定し、距離測定値を補正する方法を導入することにより、測距儀の測定精度を大幅に向上させた。このような改良を行っても、単純な測量網では、全ての方向に対し要求される測量精度を実現することが出来ない。前述のように加速器を収容する建物に設ける基準点の座標を、基準点間の測距によって定めようとする場合、その精度は測距の精度だけでなく測量網(基準点の数、配置、測距する基準点間距離)に依存する。同氏は個々の測量網に対応する $Q$ の値を基準として、その測量網が要求される測量精度を達成出来るか否かを判定する手法を開発した。従来この方法は、測量後の精度の評価に用いられてきたが、同氏は測量網の設計に用いることの有効性を見いだしている。

この手法はタイ王国NSRC(National Synchrotron Research Center)の放射光用加速器SPS(Siam Photon Source)及び文部科学省放射線医学総合研究所の医学用加速器HIMAC(Heavy-ion Medical Accelerator in Chiba)に応用され、要求される測量精度を達成する測量網を構築し、成果を得ている。

これらの2つの加速器は比較的小型のものであったが、大規模な加速器の場合必要とする測量の点数も多くなるので、要求される測量精度を満足する最も単純な測量網をあらかじめ構築しておくことが必要となる。三島氏の研究は加速器機器の精密設置のための測量網の判定基準をあたえるもので、この道を開く重要な礎となるものである。このような判断に基づき、本審査委員会は三島研二氏の学位審査論文を全員一致で合格と判定した。