

氏名 山 本 昌 志

学位（専攻分野） 博士（理学）

学 位 記 番 号 総研大乙第7号

学位授与の日付 平成 6 年 9 月 30日

学位授与の要件 学位規則第4条第2項該当

学 位 論 文 題 目 リニアック加速管の長距離ウェーク場の研究

論文審査委員 主 査 教 授 山 崎 良 成

教 授 高 田 耕 治

教 授 鈴 木 敏 郎

助教授 佐 藤 康 太 郎

助教授 榎 本 收 志

教 授 横 谷 馨

（高エネルギー物理学研究所）

博士論文内容の要旨

より究極の粒子を素粒子論が問題にする従い、それを検証するためより高エネルギーの加速器が必要となっている。電子・陽電子蓄積リングでの高エネルギー化は、もはや限界に達している。そこで、電子・陽電子衝突器として唯一残された方法としてのリニアコライダの研究が各国の研究所で行われている。これは、10[km]程度の長さを持つ線形加速器を2台対向させて両側から電子・陽電子を加速し衝突させる。筆者は日本の Japan Linear Collider(JLC) 計画の一員として加速管内のウェーク場の研究を行った。

JLCでは、この主線系加速器として運転周波数が従来使用されてきたS-バンド(2856[MHz])の丁度4倍の周波数であるX-バンド(11.424[GHz])が予定されている。周波数を上げると加速効率が良くなる反面、ビームを縦・横方向にキックするウェーク場が増大する弊害が生じる。同じ構造(相似形)で同じ長さの加速管の場合、縦方向ウェーク場の大きさは周波数の4乗に、横方向は3乗に比例する。リニアコライダーで多バンチを加速する場合、前方のバンチにより誘起されたウェーク場が長距離まで影響を及ぼし後続のバンチを横方向にキックし、その結果ビームのエミッタンスが増大することが特に深刻な問題である。このように次のバンチまで届くウェーク場を長距離ウェーク場という。この横方向長距離ウェーク場の問題が解決されない限りリニアコライダーにX-バンド加速管は採用されない。

加速管内で発生する長距離ウェーク場は、主に縦方向はその単極モードが横方向はその双極モードから構成される。従って、加速管内のそれらのモードを詳細に計算すれば長距離ウェーク場は分かる。しかし、加速管の構造はビームの入口から出口にわたって微細に変化しているため、通常用いられるメッシュを用いた計算は不可能である。それ故、種々のそれとは異なった方法で加速管内の電磁場を計算する方法が研究されている。これまで得られた結果のうち、 μm オーダーで形状が変化する100程度のセルから構成されるリニアコライダーの加速管の長距離ウェーク場が計算できるのは等価回路モデルのみである。これは、加速セル内の特定のモードがあるカップリングを介して連なっているモデルである。今まで結果では、このモデルで取り入れることができる加速セルのモードは2個までである。実際の加速管では、多くのモードがそれぞれ相互作用をしながらウェーク場を形成しているが、このモデルにこの効果を取り入れることは困難である。

そこで本研究では、より多くの加速セルのモードを取り入れるために、加速セルのディスク孔を磁氣的短絡面とした複数のオープンモードで加速管内の電磁場を級数展開する方法を用いた。実際この方法を用いて、比較的カップリングの大きい加速管を計算すると近似のために物理的に矛盾した結果が得られる。そこで、本研究ではこの近似を物理的矛盾が生じないように取り扱う方法を探ることが重要となり、そして極めて効果的な方法を確

立することができた。この方法を用いて加速管内の電磁場を計算すると、それまでよく行われてきた等価回路による解析に比べ格段に多くのモードを取り入れることができる。加えて、計算されるモードの周波数・電磁場とも精度が格段によい。このオープンモード展開の手法により、リニアコライダーで予定されている加速管内のウェーク場が比較的高いモードまで計算できるようになった。

本研究の成果をまとめると以下の項目のようになる。

- 単加速セル内モード解析。

MAFIA 等で精度よく計算することが困難である加速セル間の任意の位相差の電磁場が計算できるフィールドマッチングを用いて、加速セルの約千個のモードを詳しく計算した。これにより加速セルの理解が深まり、ウェーク場計算の指針を得ることができた。

- オープンモード展開による加速管内の電磁場解析の確立。

周期構造のパスバンドにわたっての電磁場をオープンモードで級数展開する場合の実際的な方法を確立した。これにより、比較的カップリングの大きい加速管の多くのモードが計算できるようになった。この方法を用いると今までよく行われてきた等価回路 (2バンドモデル) による解析よりも多くのモードを計算できる。そしてその精度は格段によいことを示した。加えて、周期構造の解析を基礎として開発したこのオープンモード展開を非周期構造に適用する方法を示した。

- JLC の周波数分散構造のウェーク場の計算。

この開発された方法を用いて、JLC の周波数分散構造内のウェーク場を計算した。

リニア・コライダーの様に長大な電子リニアックに、従来型の加速管を使用すると、ビームによって加速管内に長距離ウェークが誘起される。その結果、エミッタンスが増大し、衝突点において十分にビームを絞れなくなる。そこで、100程度のセルから構成されている加速管の各セルの形状を、 μm の桁で変化させることによって、この長距離ウェークを減衰させる周波数分散型構造が提案された。このような周波数分散型構造の実用化には、長距離ウェークが十分に減衰されうる構造パラメータを見いだす必要がある。しかし、そのために必要な長距離ウェークの計算には、通常用いられるメッシュを用いた方法を適用することが出来ない。それは、周波数分散型構造は、細かく変化する形状の効果が互いに相殺し合う現象を利用しているため、実際の設計に当たっては、格段の長距離ウェークの計算精度が要求されるからである。そのような計算精度を100セル以上にわたる構造において、メッシュの数を増やすことによって実現するのは、現在の計算機容量では不可能である。そこで、電磁場を各セル内のモードで展開し、セル間の開口部を介してモードが結合するというモデルを使用することが考えられる（モード展開法）。実際、モード数2個のモデル計算では、周波数分散型構造が有望であることが既に示されていた。しかし、上述したように長距離ウェークの計算には格段の精度を要するため、モード数2個のみの計算では実際の加速管のパラメータを決定するには不十分と思われる。

本論文は、モードの数を増加させることによって、この計算精度を向上させることを試みたものである。ここでは、いくつかの計算技術上の問題が新たに発見され、その解決法の発見を通じて、この種のモード展開に関する理解が深まるとともに、周波数分散型構造の長距離ウェークの計算法を確立した。

原理的には、各セル内で解いた固有モードは完全直交系をなすので、その電磁場は可算無限個のモードで展開できる。実際の数値計算においては、無限個のモードを取り入れることはできないが、モードの数を増やすことによって、限りなく計算精度を上げることができると予想される。本論文ではまず、フィールド・マッチング法等他の方法で非常に精度よく計算できる周期構造について、モード展開法の有効性、および精度を検証するこ

とを試みた。その結果、開口部での結合を実用的な大きさにすると、有限次元行列の単純な対角化では、モード数を増やすと返って精度が悪くなり、場合によっては非物理的な結果を生ずることがあることが分かった。そこで、行列をエルミート化することによってこの問題の解決を図ったわけであるが、与えられた有限次元の非エルミート行列のエルミート化には任意性がある。本論文の価値は、モード展開法に対して、精度のよい計算結果を得ることのできるエルミート化法を見いだしたことにある。

次に、この方法を周波数分散型構造等一般的な結合空洞構造にも応用できるように拡張している。これらの構造に対しては、本方法の有効性の検証を計算によって行なうことができないので、28セルの低電力周波数分散型構造モデルを製作し、その測定結果と比較することによって検証を行なっている。

今後の課題として、周波数分散型構造における本方法の計算精度の詳細な検討、本方法を使つてのリニア－コライダーの仕様を満たす周波数分散型構造のパラメーターの発見等が残っている。しかし、すでに本論文は、周波数分散型構造の実用的な解析法を初めて見いだしたものであって、リニア－コライダーの実現に大きく貢献するものである。さらに、一般の結合空洞構造の解析にモード展開法を応用する上での実際上の問題点を明確にし、また実用上有効な解決法を見いだしたという点で、モード展開法および結合空洞構造そのものの物理的理解にも大きく寄与するものである。以上の理由から、本審査委員会は、本論文が博士論文として合格であると判断した。