

## 学位論文題名

超電導磁気浮上式鉄道用超電導磁石の  
性能評価方法に関する研究

## 学位論文内容の要旨

日本国有鉄道(国鉄)により1960年代初期に開始された磁気浮上式鉄道の開発は、1966年に発表されたアメリカのPowellとDanbyが提案した超電導を用いるシステムの提案によって進展を見ることとなった。1972年に超電導磁石を搭載したML100により磁気浮上試験に成功した後、1977年からは宮崎実線にてML500の走行試験が開始され、517km/hという当時の鉄道における最高速度を達成した。その後、1997年からは実用化を目指した本格的な走行試験を山梨実験線にて開始し、その結果、2005年3月の「超電導磁気浮上式鉄道実用技術評価委員会」において、「技術開発は大きく前進し、超電導磁気浮上式鉄道について実用化の基盤技術が確立したと判断できる」との評価を受けた。

磁気浮上式鉄道用超電導磁石は、従来の超電導機器には見られない動的な外乱を常に受けるといった特徴を有している。動的な外乱は、超電導磁石に対して大きく2つの影響を与える。ひとつは、超電導のクエンチに対する影響である。これは、超電導コイルに対しては熱的もしくは機械的にある臨界点を越えることによって超電導状態が壊れると考えられているが、このような機器としての限界は従来明らかとなっていない。もう一つは、液体ヘリウムや液体窒素といった低温領域への熱侵入の影響である。これは、静置の熱侵入の他に地上コイルから発生する高調波磁場が超電導磁石内部に侵入して発生させる渦電流発熱やその高調波磁場と超電導磁石の磁場の相互作用により発生する電磁力に起因した発熱が主な原因である。これらの発熱は、超電導磁石に取り付けられている車載冷凍機の能力に大きく影響を及ぼす。

本研究では磁気浮上式鉄道用超電導磁石の性能評価方法を体系化することを目的とした。各種試験方法や解析手法を説明し、ケーススタディとしてそれらの手法をベースにした簡略地上コイル対応超電導磁石の開発について検討してきた。

第1章では、超電導磁気浮上式鉄道の開発の経緯やその構成、超電導磁石の構成内容とその課題ならびに本研究の概要について述べた。

第2章では、超電導磁石の性能評価を概説した。

第一に、超電導コイルのクエンチ現象を評価する目的で行なわれた電磁曲げ試験について説明し、山梨実験線用として開発された超電導コイルの耐クエンチ性能を評価した結果について報告した。種々の超電導コイルの耐クエンチ性について比較検討するとともに、試験装置の限界とクエンチに対する機械的な要因の可能性についても示唆した。また、内槽の発熱を抑制するために表面を低電気抵抗化した場合には、熱負荷増分を減少させるのに効果的であることがわかった。また、数値解析により電氣的要因による熱負荷増分を把握することが可能となった。

第二に、実走行時を定置で模擬するために開発された電磁加振試験について説明し、本試

験方法の経緯や過去に行なわれた各種試験ならびに得られた知見について説明した。超電導磁石が受ける電磁氣的な外乱によって超電導磁石内部において熱負荷が増加する現象は、浮上式鉄道の極低温システムにとって極めて重要な問題である。その問題の解決のために電磁加振試験装置が大いに活用された。これまでの実験や解析により、超電導磁石に対する電磁氣的な影響と発熱メカニズムについて、概ねその現象の理解と解析方法が整理された。

第三に、構造解析による評価方法を説明した。超電導磁石とそれを取りつける台枠とを組み合わせたモデルを作成し、固有値解析や調和応答解析により超電導磁石の振動の挙動を把握することが可能となった。電磁加振試験や実走行との比較を行うことによって、より実際に近いパラメータを設定することが可能となると考えている。また、電磁加振試験と実走行時の比較を行なう際の留意点も構造解析を用いることによって明らかにできると推察される。

第四に、超電導コイルの渦電流発熱の評価を行なった。地上コイルの高調波磁場が超電導磁石内部に侵入した時に発生する渦電流発熱の評価や超電導磁石が種々の振動モードで振動した場合に発生する渦電流発熱評価を行ない、発熱メカニズムや振動モード毎の発熱量の比較を行なった。これらの超電導コイルに発生する電磁氣的な発熱の2つの要因について、種々のパラメータに関する感受性を把握することができた。超電導コイルでの発熱量を実験にて測定する際には、その要因にかかわらず総量としてしか求めることができないが、今回の電磁氣的な解析や別途深度化を図っている機械的な発熱メカニズムとの解明と合わせて、要因ごとの発熱量の推定が可能になったといえる。

第3章では、前章で実施した評価手法のケーススタディーとして、低コストを目的に検討が進められている地上コイルの簡略化に対応した超電導磁石の開発について論じた。簡略地上コイルの特徴を説明し、電磁加振試験装置を用いた定置試験や山梨実験線にコイルを仮設して走行試験を行い、従来の超電導磁石に対する影響を明らかにした。その結果から、開発に向けた課題として、低速度域の透過磁束の問題、振動に起因した特定周波数での共振の問題であると整理した。

第4章では、3章で明確になった課題を解決するために、超電導磁石の改良に向けた対策とその効果について述べた。電磁加振試験時と実走行時の振動について、超電導磁石全体を形状の簡単な梁として考えた新たな評価法の提案を行うとともに、上下方向の荷重支持体の剛性強化ならびに内槽部の歪の均一化による発熱低減や外槽の軌道側板厚の増加による透過磁束対策について提案した。また、左右振動対策として地上コイル側に必要な対策についても論じた。

第5章では、簡略地上コイル対応超電導磁石の構成と特性確認試験について論じた。第4章で提案された対策を反映した超電導磁石の構成を明らかにし、具体的に超電導磁石に改良を施して電磁加振試験や走行試験を実施してその効果を検証した。その結果、今回提案した対策により十分簡略コイル対応超電導磁石が実現可能であることがわかった。また、システムを簡略地上コイルで構成した場合のコストについて、従来のシステムとの比較を行ない、簡略地上コイルの有効性を明らかにした。

最終章である第6章では、本研究で得られた結果を総括し、磁気浮上式鉄道用超電導磁石の性能評価方法で評価した簡略地上コイル対応超電導磁石の有効性を改めて論じている。

本研究により得られた成果は、磁気浮上式鉄道用超電導磁石の性能評価方法を体系化し、磁気浮上式鉄道用超電導磁石の性能評価方法で評価した簡略地上コイル対応超電導磁石の有効性を明らかにしたことである。これにより、超電導磁気浮上式鉄道におけるコスト低減に対して有効な手段が見出せたことはもちろん、今後更なる超電導磁石の開発に際して、本評価方法が応用できるものと考えている。

# 学位論文審査の要旨

主 査 教 授 五十嵐 一  
副 査 教 授 本 間 利 久  
副 査 教 授 山 下 裕  
副 査 教 授 北 裕 幸

学 位 論 文 題 名

## 超電導磁気浮上式鉄道用超電導磁石の 性能評価方法に関する研究

日本国有鉄道(国鉄)により 1960 年代初期に開発が開始された磁気浮上式鉄道は、超電導磁石を用いる方式として世界に唯一のシステムである。1972 年に超電導磁石を用いた磁気浮上試験に成功した後、1977 年からは宮崎実線にて 517km/h という当時の鉄道における最高速度を達成した。1997 年からは実用化を目指した本格的な走行試験を山梨実験線にて開始し、その結果、2005 年 3 月の「超電導磁気浮上式鉄道実用技術評価委員会」において、「技術開発は大きく前進し、超電導磁気浮上式鉄道について実用化の基盤技術が確立したと判断できる」との評価を受けている。

磁気浮上式鉄道用超電導磁石は、従来の超電導機器には見られない動的な外乱を常に受けるといった特徴を有している。動的な外乱は、超電導磁石に対して大きく 2 つの影響を与える。ひとつは、超電導のクエンチに対する影響である。もう一つは、液体ヘリウムや液体窒素といった低温領域への熱侵入の影響である。地上コイルから発生する高調波磁場は、超電導磁石内部での渦電流発熱やその磁場と超電導磁石の磁場の相互作用による電磁力に起因した発熱を生じさせる。これらの発熱は、超電導磁石に取り付けられている車載冷凍機の能力に大きく影響を及ぼす。

本研究では磁気浮上式鉄道用超電導磁石の性能評価方法を体系化することを目的としている。この目的のために、各種試験方法を検討し、さらに試験結果を数値手法により解析している。またケーススタディとしてそれらの手法をベースにした簡略地上コイル対応超電導磁石の開発について検討している。本論文の内容を以下に述べる。

まず第一に、超電導磁石の性能評価を考え、超電導コイルのクエンチ現象を評価する目的で行なわれた電磁曲げ試験について説明し、種々の超電導コイルの耐クエンチ性について比較検討している。

第二に、実走行時を定置で模擬するために開発された電磁加振試験について説明し、各種試験ならびに得られた知見について説明している。超電導磁石が受ける電磁気的外乱によ

って超電導磁石内部において熱負荷が増加する現象は、浮上式鉄道の極低温システムにとって極めて重要な問題である。実験や解析により、超電導磁石に対する電磁氣的な影響と発熱メカニズムについて、概ねその現象の理解と解析方法が整理された。

第三に、構造解析による評価方法を説明した。超電導磁石とそれを取付ける台枠とを組み合わせたモデルを作成し、固有値解析や調和応答解析により超電導磁石の振動の挙動を把握することが可能であることを示した。また、電磁加振試験と実走行時の比較を行なう際の留意点も構造解析を用いることによって明らかになり、後述する簡略地上コイル対応超電導磁石の開発に役立てられた。

第四に、超電導コイルの渦電流発熱の評価を行なっている。地上コイルの高調波磁場が超電導磁石内部に侵入した時に発生する渦電流発熱の評価や超電導磁石が種々の振動モードで振動した場合に発生する渦電流発熱評価を行ない、発熱メカニズムや振動モード毎の発熱量の比較を行なっている。これらの超電導コイルに発生する電磁氣的発熱の2つの要因について、種々のパラメータに関する感受性を把握した。

次に、評価手法のケーススタディとして、低コストを目的に検討が進められている地上コイルの簡略化に対応した超電導磁石の開発について論じている。簡略地上コイルの特徴を説明し、従来の超電導磁石に対する影響を明らかにした。その結果から、低速度域の透過磁束、振動に起因した特定周波数での共振が課題であると整理した。課題を解決するために、超電導磁石の改良に向けた対策とその効果について述べている。電磁加振試験時と実走行時の振動について新たな評価法の提案を行うとともに、上下方向の荷重支持体の剛性強化、内槽容器の歪の均一化による発熱低減ならびに外槽の軌道側板厚の増加による透過磁束対策について提案している。また、左右振動対策として地上コイル側に必要な対策についても論じている。これらの対策を反映した超電導磁石の構成を明らかにし、具体的に超電導磁石に改良を施して電磁加振試験や走行試験を実施してその効果を検証している。その結果、今回提案した対策により簡略地上コイル対応超電導磁石が実現可能であることを示した。

本研究により得られた成果は、磁気浮上式鉄道用超電導磁石の性能評価方法を体系化し、この性能評価方法で評価した簡略地上コイル対応超電導磁石の有効性を明らかにしたことである。これにより、超電導磁気浮上式鉄道におけるコスト低減に対して有効な手段が見出せたことはもちろん、今後更なる超電導磁石の開発に際して、本評価方法が応用できるものと考えられる。

これを要するに、著者は、磁気浮上式鉄道用超電導磁石について性能評価方法の新知見を得たものであり、磁気浮上式鉄道用超電導磁石の開発における効果的な設計法及び性能評価法の確立に貢献するところ大なものがある。よって著者は、北海道大学博士(工学)の学位を授与される資格があるものと認める。