

# 鉄道用超電導ケーブルの要素技術の構築

富田 優\* 福本 祐介\* 石原 篤\*  
鈴木 賢次\* 大崎 博之\*\*

## Case Study of Superconducting Cables for Railway Systems

Masaru TOMITA Yusuke FUKUMOTO Atsushi ISHIHARA  
Kenji SUZUKI Hiroyuki OHSAKI

DC electric railway systems are widely used in Japan, including metropolitan areas. However, they have some problems, such as limited use of regenerative brakes and energy losses. In order to solve those problems, and to attain the essential energy saving of next-generation electric railway systems, we have been studying the feasibility of applying superconducting power cables to DC electric feeder systems. In this study, investigations regarding effective use of regenerative brakes, loss reduction, etc have been carried out on the assumption that the substations concerned are connected with each other by superconducting power cables placed in parallel with the feeder line.

キーワード：超電導き電システム，省エネ，電圧降下，回生エネルギー，送電損失

### 1. はじめに

直流電気鉄道における変電所間隔は、き電方式、線路条件、電気車電流、運転条件、電源事情等によって異なり、車両に電気を送るためのき電線は、電気抵抗があるため流れる電流に応じて電圧が変動（電圧降下・上昇）する<sup>1)</sup>。「鉄道に関する技術上の基準を定める省令」では、「電車線の電圧は、列車の適正な運行を確保するため十分な値に保たれなければならない」と規定されており、電車線の電圧降下は許容し得る範囲内（直流 1500V き電方式では、例えば最低電圧 1000V）としなければならない。このため、変電所間隔は、都市間を結ぶ路線では 10～15km、多くの電流容量を必要とする大都市圏の路線では 3～5km 程度であり、多くの変電所の設置が必要である。

鉄道総研では、超電導ケーブルを鉄道き電線に適用することを想定し開発を始め<sup>2)</sup>、超電導線材の製作および特性評価、それらの結果に基づいた超電導ケーブルのプロトタイプを製作し、各種の特性評価試験を行っている。超電導ケーブルを鉄道のき電線へ適用すると、回生効率の向上、損失の低減、変電所間の負荷平準化や電圧降下の低減による変電所数の削減等が期待できる。また、レールに流れる帰線電流を超電導ケーブルに流すことで双方向通電となり、漏洩磁場が低減できるとともに<sup>3)</sup>、レールから大地への漏れ電流もなくなりレール電位の抑制が

可能であることから、電食の問題も解決できると期待されている。

本稿では、超電導線材の評価をもとに試作した超電導ケーブルの送電特性について報告するとともに、鉄道の電力システムに超電導ケーブルを効果的かつ経済的に導入するためのシステム構成法について数値シミュレーションモデルを構築し、解析したので結果を報告する<sup>4)</sup>。

### 2. 鉄道用超電導ケーブルの製作

#### 2.1 超電導線材の曲げ特性

超電導線材自体の機械特性の把握は、超電導ケーブル製作時の強度設計を行う上で重要なため、超電導線材の曲げ特性について評価を行った。測定サンプルは実用性を考慮し、Bi 系超電導線材の高強度タイプ（Type HT (CA50)）を選定した。本線材は、標準的な Bi 系超電導線材に銅合金をラミネートしたもので、機械的強度、過電流特性に優れている<sup>5)</sup>。

試験はケーブル巻線時における曲げを想定し、超電導線材を円筒治具に螺旋状に巻いて行った。様々な直径をもつ円筒治具に、超電導線材のピッチ長を変えて巻くことで（図 1）、歪曲度を変化させ、各歪曲度において臨界電流値 ( $I_c$ ) を測定し、その変化で機械特性を評価した。円筒治具の直径は、 $\phi 10$  mm,  $\phi 16$  mm,  $\phi 30$  mm のものを使用し、超電導線材は銅線と端子を半田で固定し、絶縁のためにカプトンテープで覆った。 $\phi 16$  mm の場合の通電特性の変化を図 2 に示す。発生電圧が基準値 ( $1\mu$ V/

\* 材料技術研究部 超電導応用研究室

\*\* 東京大学大学院（新領域創成科学研究科）

特集：材料技術

cm) に達した電流値が  $I_c$  であり、ピッチ長が 200 mm 以下で  $I_c$  の低下が認められ、さらにピッチ長を短くしていくと徐々に低下していくことが分かる。各直径における試験結果を図 3 に示す。縦軸は  $I_c$  を曲げなしの臨界電流値  $I_{c0}$  で規格化した値であり、臨界電流値の低下の割合を示す。どの径においてもあるピッチ長を境に  $I_c$  の低下が認められるが、低下の割合は径が小さいほど顕著である。

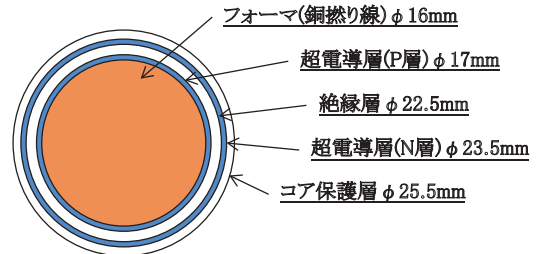
2.2 1.5kA 級超電導ケーブルの製作

超電導線材の曲げ特性評価結果をもとに、1.5kA 級の超電導ケーブルを製作した。1.5 kA を超える電流値を実現するには、超電導線材が 10 本必要であり、密巻構造とするためフォーマ径は  $\phi 16\text{mm}$  とし、超電導線材の巻ピッチは 250mm とした。製作した超電導ケーブルの内部構造および外観を図 4 に示す。超電導線材は、絶縁層を挟み、内側の超電導層 (P 層) に 10 本、外側の超電導層 (N 層) に 14 本巻線した。

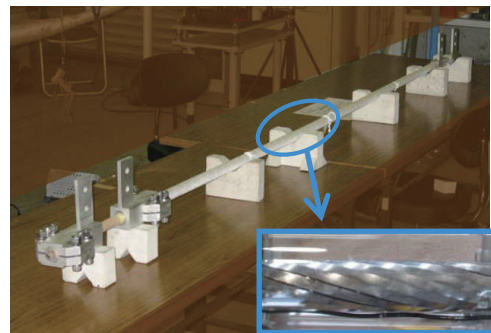
通電試験の結果を図 5 に示す。  $I_c$  は、P 層で 1720A、N 層で 2430A となった。超電導線材 1 本あたりでは 170A

以上となり巻線による超電導線材の臨界電流値の低下は認められなかった。また、P 層と N 層を双方向に通電した結果、漏洩磁場も抑制できていることを確認した (図 6)。

この試験結果をもとに、鉄道用送電線に適用可能な電流容量 10kA を超える超電導ケーブルを開発し、通電試験を進めている。



(a) 内部構造



(b) 外観

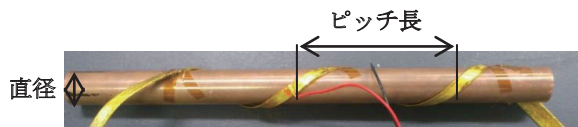


図 1 サンプル外観

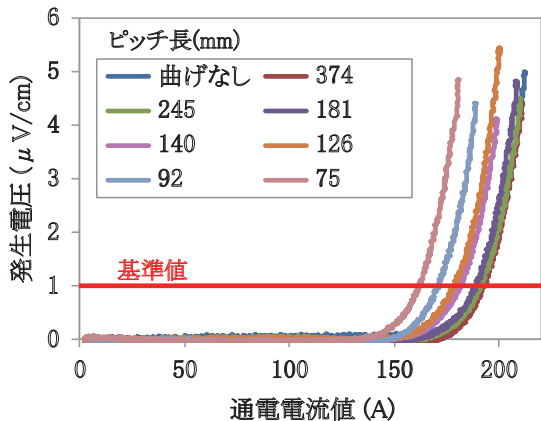


図 2 ピッチ長変化による通電特性 ( $\phi 16\text{mm}$  円筒治具)

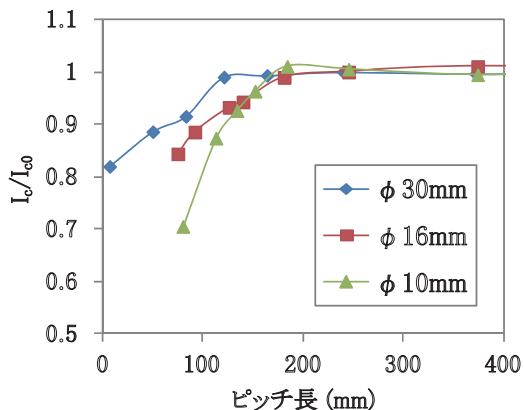


図 3 曲げ試験の結果

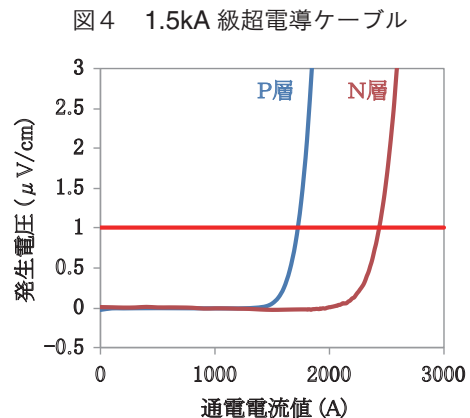


図 5 1.5kA 級超電導ケーブルの通電試験

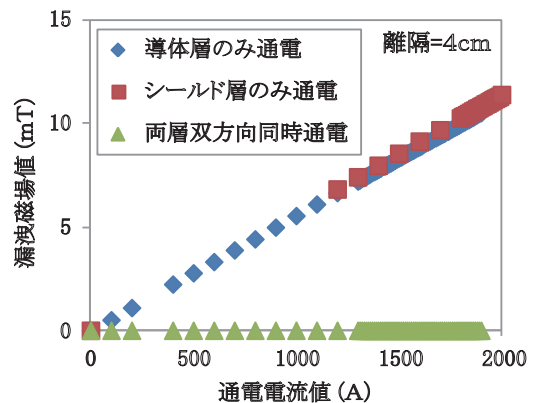


図 6 超電導ケーブルの漏洩磁場の測定

### 3. 超電導ケーブルの鉄道システムへの導入

#### 3.1 超電導ケーブルの導入例

超電導ケーブルを鉄道用電力システムへ導入することにより、変電所の集約、負荷平準化、回生失効および送電損失の低減、電食の抑制等が期待される。図7に導入例を示す。(a)は現在の直流き電システムを示し、(b)は変電所間を超電導ケーブルで結んだ場合で、変電所間の負荷平準化を目的としたものである。(c)は変電所間を結ぶとともに、既設き電線への分岐(き電分岐)を設けたもので、変電所の負荷平準化、回生失効や送電損失の低減、電食の抑制が期待される。(d)は変電所を削減したもので、(e)はき電分岐を複数に増やした場合である。き電分岐を増やすほど、回生失効や送電損失の低減が期待できるが、き電分岐からの熱侵入が増えるため、冷凍負荷が大きくなるといった欠点がある。本稿では解析対象として、(b)に示すき電線と並列に変電所を結ぶ方法について検討を行う。

#### 3.2 解析モデル

超電導ケーブルの導入効果を解析するために、き電システムを電気回路としてモデル化し、目的に応じて電力変換器等の要素をそれに追加する。そのための数値解析ツールとして、理工学分野で幅広く利用されているMATLAB-Simulinkをベースに、電力変換器等を含めた電力システムのモデリングやシミュレーションが可能なツールであるSim Power Systemsを追加して数値解析を行った。

##### (1) モデル路線

超電導ケーブルの導入効果の検証のためのモデル路線として、営業線の路線を参考に、表1に示すように全長26.5kmで24駅ある単線の路線を設定した。平均駅間隔は1km程度で5つの変電所が表2の位置にそれぞれ配置されているものとする。このようなモデル路線全体の概要を図8に示す。電気車はき電線に一定の間隔で接続されたトロリ線からパンタグラフを通じて電流をレールに流す。変電所の定格直流電圧は1500Vとしている。

図9に検討した直流き電系のき電回路モデルを示す。隣り合った2つの変電所間に2編成の電気車が存在する場合を想定している。赤線で書かれている部分は超電

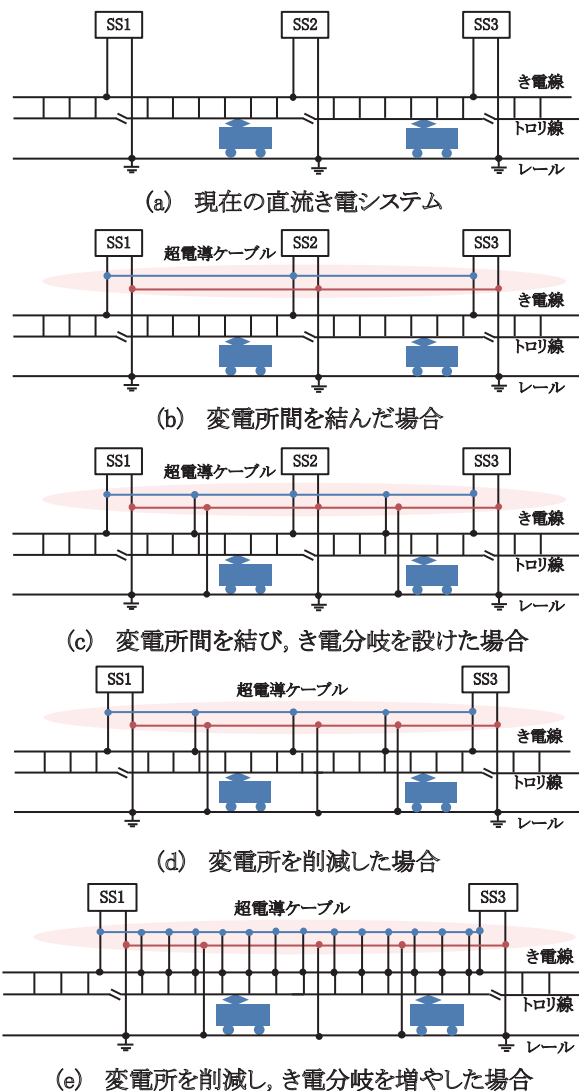


図7 超電導ケーブルの導入例

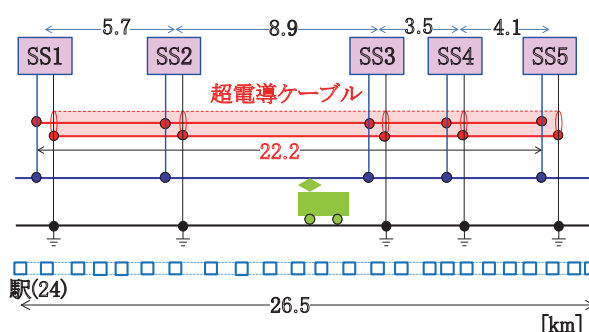


図8 解析モデル路線

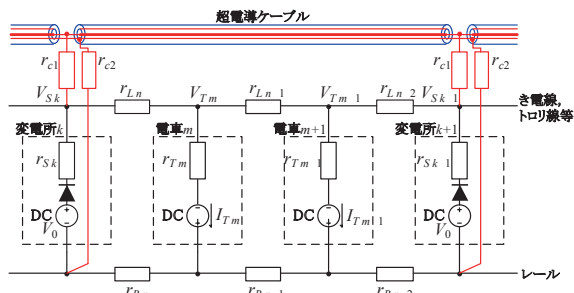
表1 モデル路線上の駅の位置 (全長 26.5km)

駅 No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
距離 km	0	1.7	2.4	3	3.8	5.6	7.4	8.7	9.6	11.3	12.1	13.3	15.4	16.3	17.1	18.5	19.5	20.1	21	21.7	22.5	23.9	25.3	26.5

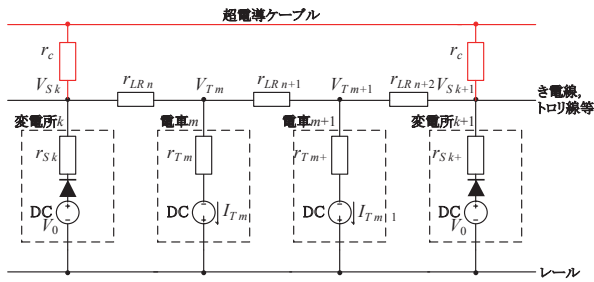
表2 モデル路線上の変電所の位置

変電所 No.	1	2	3	4	5
距離 km	1.7	7.4	16.3	19.8	23.9

特集：材料技術



(a) 近似モデル1



(b) 近似モデル2

図9 直流き電回路のモデル

導ケーブルを適用した場合に追加される要素である。変電所は無負荷電圧  $V_0$  と出力抵抗  $r_s$  で、電気車は制御電流源  $I_T$  と直列抵抗  $r_T$  でモデル化している。図9 (a) の近似モデル1では、き電線やトロリ線等で構成される部分と帰線としてのレールを別々にモデル化し、 $r_L$  と  $r_R$  で表している。ただし、ここではき電線とトロリ線は分離せず、1 導体として単純化した。また、 $r_c$  は超電導ケーブルと銅ケーブルとの接続抵抗であり、接続のための銅ケーブルの電気抵抗も含んでいる。き電線や帰線に対して超電導ケーブルは並列に投入されている。図9 (b) は、レール抵抗をき電線側に含めて、さらに単純化したモデルである。解析ではこの近似モデル2を用いた。

(2) 運行パターン

図10に列車の運行パターンを示す。縦軸が駅1からの距離 (km)、横軸が時間 (秒) であり、斜めに引かれた線それぞれが列車の運行を示している。5分間隔で定期的に列車を運行するパターンであり、5分ごとに同じパターンが繰り返されている。以上により5分間について解析し評価を行えば十分である。グラフの右側に24の駅と5つの変電所の位置を示す。各駅での停車時間は30秒から1分程度となっており、斜めの線上の水平部分は列車の停車を示している。図10に示されている列車群の運行の中から、時刻0sに駅1 (距離0 km) を出発した列車に着目して、その位置、加速度、速度の時間変化を図11に示す。ここでは、加速度  $0.83\text{m/s}^2$  ( $3.0\text{km/h/s}$ )、最大速度  $25\text{m/s}$  ( $90\text{km/h}$ ) と仮定した。駅間距離が短いところでは、最大速度に達することはなく、ある速度まで加速したところで、惰行 (定速運転) し、減速

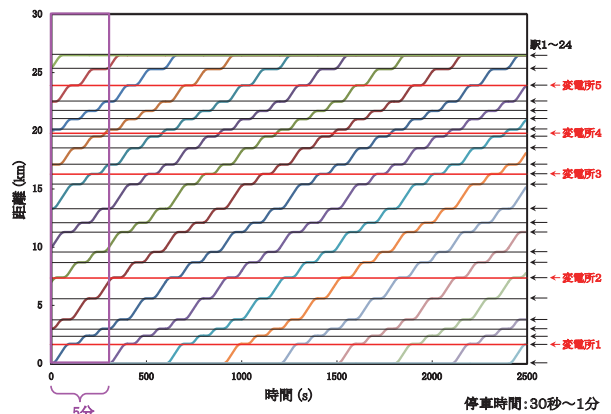


図10 仮定した列車の運行パターン (運行間隔: 5分)

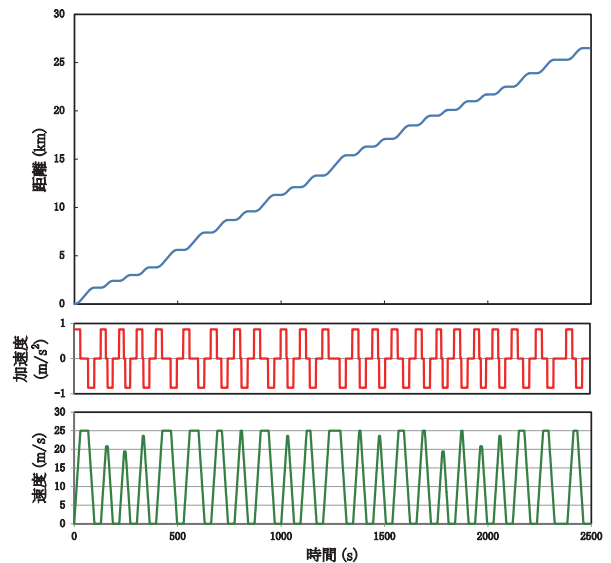


図11 一つの列車に着目した場合の位置、加速度、速度パターン

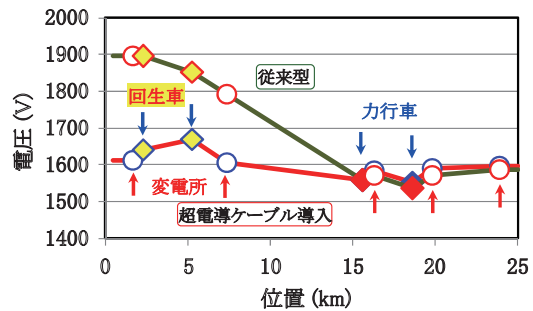


図12 き電線の電圧

するパターンとなっている。

3.3 解析結果

(1) き電電圧

図12はある時刻におけるき電線の電圧分布を示している。従来のき電線では、駅1側 (図の左側) で電圧が大きく上昇し  $1900\text{V}$  に達している (ライン上の5つの○印は変電所を表わす)。変電所の無負荷のき電電圧

は 1590V、電気車のパンタ点電圧の上限は 1900V に設定した。赤色に塗りつぶされた◇印は加速中の列車であり、中程の 2 列車が加速中である。加速中の列車には周辺の変電所等からその列車に電流が流れ込むことになるので、列車のパンタ点電圧は低くなる。黄色に塗りつぶされた◇印は減速中（ブレーキ動作中）の列車であり、左側の 2 列車が減速中である。ブレーキ時にはできるだけ回生ブレーキを使い、回生できない分に対して機械ブレーキを使用する。回生ブレーキ動作中の列車のパンタ点電圧は上昇し、周辺の変電所よりも高くなる。パンタ点電圧の上限を 1900V に設定しているため、パンタ点電圧の上限を超えようとする回生電力に制限がかかって、必要なブレーキ力を全て回生ブレーキでまかなうことができなくなり、その差を機械ブレーキによって補うことになる。結果的にエネルギー損失が増大する。なお、全線に 8 列車が存在する条件であるが、そのうち 4 列車は停車あるいは惰行運転中であり、それらの列車は図 12 中には示していない。図 8 に示したように 5 つの変電所を超電導ケーブルで結ぶことで、き電線電圧はほとんど同一となり、上限に達することは抑制される。

(2) 回生率の向上

図 13 は、運行パターン（位置、加速度、速度）に示した電気車への入出力電力が、時間とともにどのように変化しているかを示している。正の電力が力行（加速）、負の電力がブレーキ（減速）、電力ゼロは惰行運転あるいは停車を表わしている。方形波状になっている線（ブレーキ時は青色の線）が加減速に伴う電力の指令値である。

力行中は指令通りの加速が達成されている。ブレーキ動作中の電力として緑色の線で示されているのは、超電導ケーブルが導入されていない場合の回生ブレーキによる電力であり、赤色で示されているのは、超電導ケーブルが導入された場合の回生ブレーキによる電力である。ブレーキ指令電力と回生ブレーキによる電力の差に対しては機械ブレーキが使われ、列車は指令通りに減速される。最初のブレーキ動作の際には、超電導ケーブル導入の効果はあまり認められないが、2 回目および 3 回目の

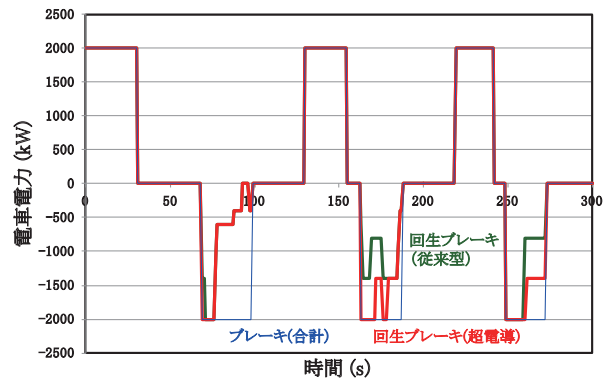


図 13 超電導ケーブルの導入による回生率の向上

ブレーキ動作時には、回生ブレーキによる電力が増大していることが確認できる。なお、1 回目のブレーキ動作時の 80～100 秒にかけて、超電導ケーブルを導入しても回生率の向上が認められないのは、加速中の力行車の数がブレーキ動作中の列車の数よりも少ないか、力行車がないためである。

(3) エネルギーフロー

直流き電回路のエネルギーフローを図 14 に示す。変電所からき電回路（帰線としてのレールも含めて）を通じて電気車に電力が供給され、電気エネルギーが電気車の駆動エネルギーに変換される。その運動エネルギーの一部は制動時に回生エネルギーとしてき電回路に回生され、残りは機械ブレーキによって熱となる。また、走行抵抗も特に高速時には無視できない。変電所やき電線、電気車の中ではジュール損失等のエネルギー損失がある。超電導ケーブルを導入した場合には、き電線のジュール損失の低減、回生率の向上（回生失効の抑制）というエネルギー上のメリットと、機械ブレーキの使用頻度の低下によりブレーキのメンテナンスコストの低減が期待される。また、超電導ケーブルの導入方法によっては、変電所設置数の削減や冗長性（信頼性）の向上等も期待できる（図 15）。一方、超電導ケーブルの損失、端末や接続部、配管からの熱侵入等に対して、超電導ケーブル温度をほぼ一定に保つための冷却電力が必要であり、変

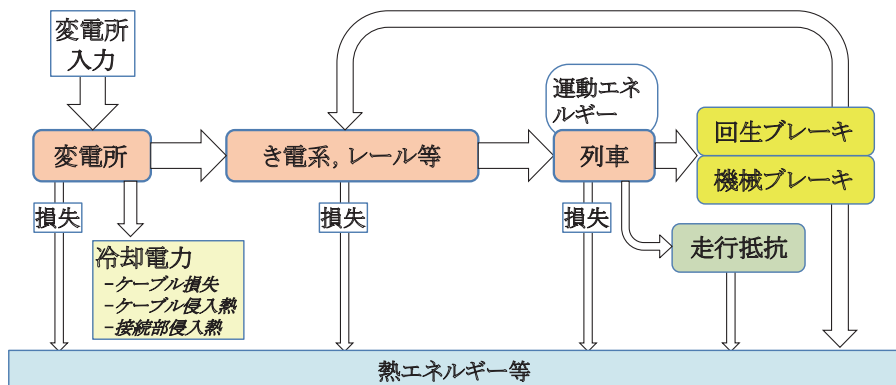


図 14 直流き電系のエネルギーフロー

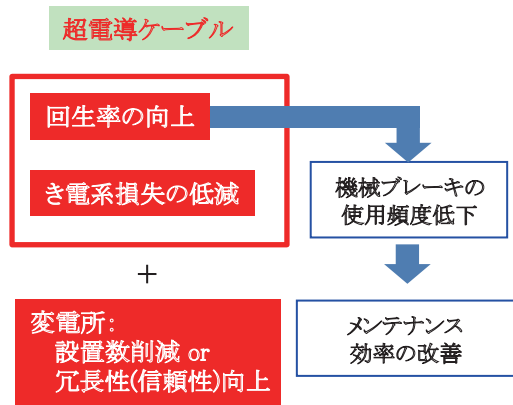


図 15 超電導ケーブル導入のメリット

表 3 エネルギー等の評価

	従来型	超電導ケーブル導入	差異
電気車の加速に必要なエネルギー $W_{total}$ (MJ)	1318	1318	0
変電所入力 $W_{in}$ (MJ)	631	570	-61
回生エネルギー $W_{rg}$ (MJ)	809	912	+103
ジュール損失 $W_{loss}$ (MJ)	122	90	-32
冷却エネルギー $W_{cooling}$ (MJ)	0	74	+74
変電所最大電流 (kA)	2.1	1.3	-0.8
変電所最大電力 (MW)	3.2	2.0	-1.2

$$(W_{total} = W_{in} + W_{rg} - W_{loss} - W_{cooling})$$

電所等から供給することになる。

表 3 に解析に基づく超電導ケーブルの導入効果を定量的に整理する。5 分間隔の列車運行パターンであるため、この 5 分間のエネルギー消費とその間の最大電流や最大電力で評価した。ここで、超電導ケーブルの熱侵入 1kW/km、極低温の超電導ケーブルと常温のき電線を電氣的に接続するケーブル端末部の熱侵入を 0.25kW/1 端末、端末数を 10 基、冷却効率を 0.1 と仮定した。回生率の向上により、回生エネルギーは 103MJ (約 13%) 増加し、ジュール損失は 32MJ (約 26%) 減少した。一方、冷却電力として 74MJ 必要なため、全体で 61MJ の省エネルギー効果となる (5 分間)。また、変電所からの最大電流と最大電力も超電導ケーブルの導入によって大きく低下し、変電所機器の設計上、大きな効果があると予想される。

#### 4. 結論

超電導線材の機械特性の評価を行い、1.5kA 級超電導ケーブルの試作、通電試験を行った。その結果、超電導線材の劣化なく巻線できていることを確認し、双方向通電により漏洩磁場の抑制ができることを確認した。

超電導ケーブルの導入効果を確認するために、1 例として 24 駅、5 変電所の単線の路線を仮定して、直流き電回路の数値解析モデルを構築し解析を行った。今回の条件では、超電導ケーブル導入により従来のき電回路と

比較して、き電電圧変動が抑制され、それに伴って回生率が向上するとともにジュール損失は低下し、変電所入力ベースで 1 割程度の省エネルギーとなることがわかった。この解析モデルにおいては、電気車の駆動・制動特性モデルが単純近似モデルであるため、この結果をもとに、さらにより実車に近いモデルを構築する。いくつかの鉄道路線仕様・条件を仮定して、超電導ケーブルへの要求仕様やシステム全体の最適構成等について、検討を進める。

また、変電所からの最大電流と最大電力も超電導ケーブルの導入によって大きく低下し、変電所間の負荷平準化の可能性が示された。ただし、変電所の電力特性の整合性については今後の課題である。

これらの研究を通して、超電導ケーブルを効果的かつ経済的に導入するためのシステム構成法、および超電導技術による鉄道電力システムの革新に繋げていきたい。

#### 5. おわりに

鉄道総研では、世界に先駆け超電導材料を使用した鉄道用ケーブルの開発を進めている。これまで、鉄道用として使用するための超電導材料の開発を進め、プロトタイプ型のケーブルを製作した。鉄道電力システムへの導入におけるシミュレーション結果と、ケーブル特性試験の結果をもとに、実車両を用いた実証試験向けの超電導ケーブルの設計、製作に着手しており、鉄道事業用として適用可能な超電導ケーブルの実現を目指していく。

#### 謝辞

本研究の一部は、(独) 科学技術振興機構 (JST) の「戦略的イノベーション創出推進プログラム (S-イノベ)」の支援および国土交通省からの補助金を受けて実施している。

#### 文献

- 1) 長谷 伸一：直流電気鉄道の電圧降下を低減する, RRR, Vol.60, No.3, pp.22-25, 2003
- 2) 富田 優, 他：鉄道き電線用の超電導ケーブルの試作, 低温工学・超電導学会概要集, Vol.80, p.181, 2009
- 3) M. Tomita et.al. “Next generation of prototype direct current superconducting cable for railway system” JOURNAL OF APPLIED PHYSICS 109, 063909, 2011.
- 4) 呂 臻, 大崎 博之, 富田 優 他：直流き電鉄道システムへの超電導ケーブルの適用可能性に関する解析, 低温工学・超電導学会概要集, Vol.84, p.87, 2011
- 5) 富田 優, 他：鉄道き電線用超電導ケーブルの線材特性評価, 低温工学・超電導学会概要集, Vol.83, p.138, 2010