

超電導技術を用いたフライホイールでエネルギーを貯める

荒井 有気
 浮上式鉄道技術研究部
 (低温システム研究室 研究員)

清野 寛
 同
 (同 主任研究員)

長嶋 賢
 同
 (同 室長)



あらい ゆうき



せい ひろし



ながしま けん

はじめに

鉄道は他の交通機関と比較して、エネルギー効率が高いことがよく知られています。高効率である理由の一つとして、電気鉄道車両では回生ブレーキが用いられていることが挙げられます。回生ブレーキとは、モーターを発電機としてはたらかせ、運動エネルギーを電気エネルギーに変換することで、減速させることを言います。回生ブレーキで得られた回生エネルギーが他の列車の力行に「リサイクル」されていると言えます(図1(a))。

しかし、実際には、減速中の列車の近くに必ずしも力行中の列車がいるとは限りません。このように、電気負荷がない場合、架線に電気エネルギーを返せなくなり、回生ブレーキは使えなくなる「回生失効」となります(図1(b))。この場合、回生できるはずだった運動エネルギーは、機械ブレーキでの熱エネルギーとして消費されてしまいます。このエネルギーを蓄積しておくことができれば、エネルギー効率の向上や、機械ブレーキのメンテナンス低減に寄

与できると考えられます。蓄電装置を導入した場合の効果について、図1(c)に示します。蓄電装置があれば、減速中の列車の近くに力行中の列車がいなくても、蓄電装置に回生エネルギーを貯めておけるため、回生失効を防げます。貯めたエネルギーは、後に自身が力行するときや、近くに他の力行列車が現れた時に供給すれば、有効利用ができます。

フライホイール蓄電装置

我々が着目したフライホイール蓄電装置とは、余分な電気エネルギーでモーターを回し、フライホイール(はずみ車)の回転エネルギーとして蓄えておく装置です。電気が必要なときは、モーターを発電機としてはたらかせ、回転エネルギーを電気エネルギーとして取り出すことができます。このように、蓄電・放電の際には、フライホイールが加減速するだけです。長寿命という特長があります。また、蓄積されたエネルギーは、回転数の2乗に比例するので、回転数を計測しておけば、容易に正確な蓄電残量に分かる点もメリットです。

フライホイール蓄電装置が利用されているものとしては、まず、無停電電源装置が挙げられます。データセンターのコンピュータや、半導体の製造装置では、わずかな時間の停電や電圧の低下であっても、データの消失や、製品品質への多大な影響があります。そのため、フライホイール蓄電装置を常時電源につなぎ回転させておき、瞬時の停電や電圧の低下が発生した際には、フライホイール蓄電装置からコンピュータや製造装置に電力を供給する対策が取られています。

また、鉄道を対象とした応用としても、ニューヨークの地下鉄¹⁾や京浜急行電鉄²⁾での実例があり、前述したような回生失効対策や省エネルギー

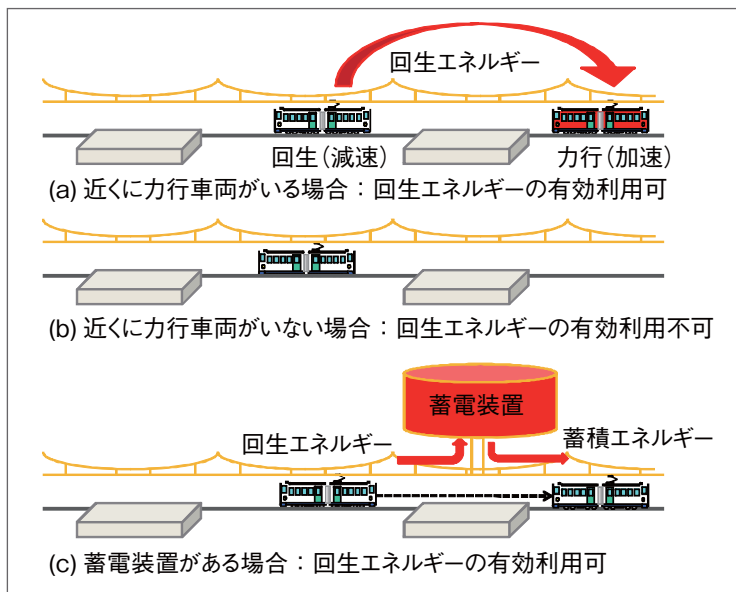


図1 蓄電装置導入の効果

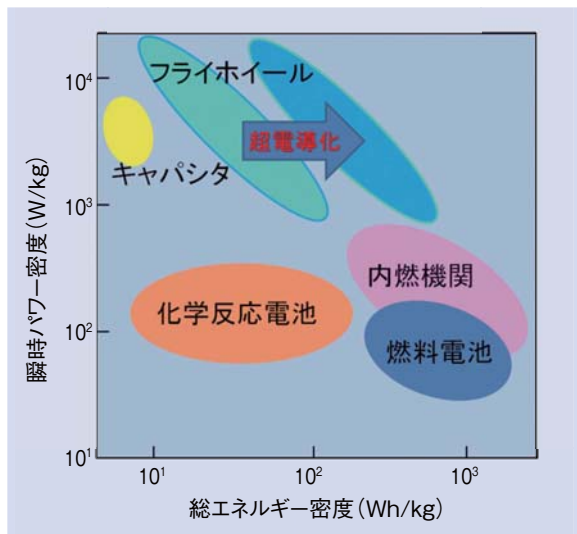


図2 各種装置の特性³⁾

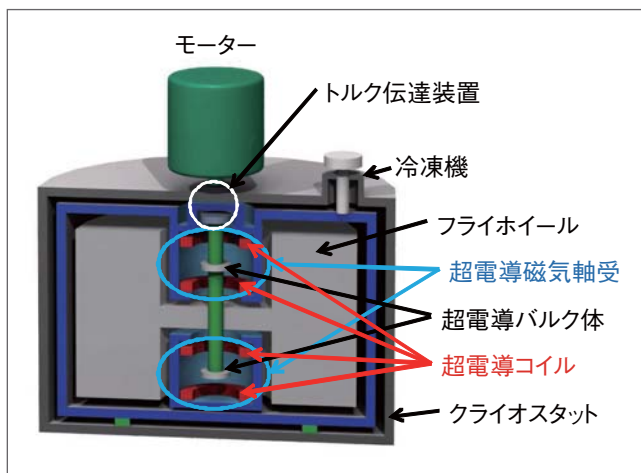


図3 超電導フライホイールイメージ図

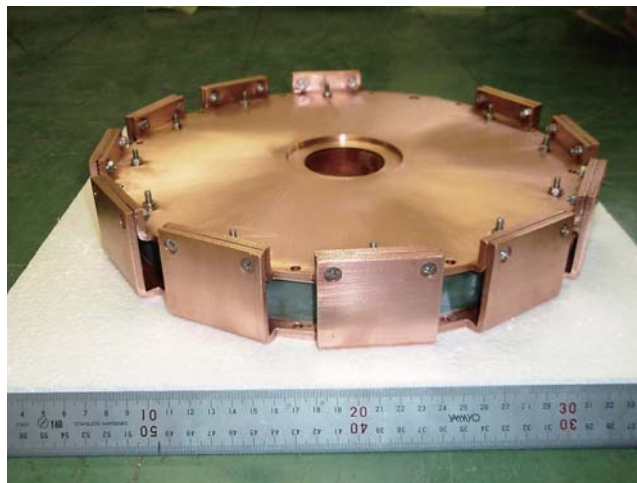


図4 超電導コイル



図5 超電導バルク体

ギー対策に用いられています。

このような、従来のフライホイール蓄電装置では、フライホイールを支える軸受としては、主に、機械軸受を用いたものと制御型磁気軸受を用いたものがあります。前者では機械軸受のメンテナンスが必要なこと、後者では荷重容量が大きく取れないことがデメリットでした。そこで、超電導技術を用いて、軸受を構成して、非接触で大荷重を支持する方式を開発しています。

図2に各種装置(蓄電媒体以外も含む)の総エネルギー密度と瞬間パワー密度の特性を示します。総エネルギー密度が高ければ、よりコンパクトな装置とすることが可能です。また、瞬間パワー密度が高ければ、鉄道のようなピークパワーの高い対象にも対応しやすくなります。従来のフライホイールは高い瞬間パワー密度を持つ一方で、総エネルギー密度が低いという短所がありました。超電導技術を適用することで高い総エネルギー密度を目指しています。

超電導技術を用いたフライホイール蓄電装置

超電導技術を用いたフライホイール蓄電装置(以下、超電導フライホイールと呼びます)としては、冷却が必要な超電導部分は固定側にのみ用い、回転側は永久磁石で構成するものが主に開発されてきました。しかしこれではフライホイールの性能は、永久磁石の磁場強度に制約されてしまいます。そこで我々は回転側にも超電導を用いる装置構成を考えました。そのイメージ図を、図3に示します。軸受は固定側には超電導コイル(図4)、回転側には超電導バルク体(図5)を用います。超電導コイルとは、極低温に冷やすことで電流を抵抗なく流すことができる「超電導線材」を巻いて作られたコイルで、通常のコイルや永久磁石よりも高い磁場を作ることができます。超電導バルク体とは、超電導物質の塊のことです。超電導バルク体には、超電導コイルの磁場の中に配置すると、反発するという性質があります。そのため、冷凍機により両方の超電導部分を臨界

温度以下に冷却した後、超電導コイルに通電すると、フライホイールを径方向・軸方向ともに非接触浮上支持します。

この超電導磁気軸受は、非接触で支持するため、軸受のメンテナンスは不要となります。また、超電導を利用しているため、従来よりも大きな荷重容量が実現できると期待されます。よって、従来のフライホイールよりも高い総エネルギー密度にできると考えられます。

このような超電導フライホイールを構成するには、超電導部分を冷却する必要があるため、クライオスタットと呼ばれる低温容器のなかに入れる必要があります。クライオスタットの壁面を隔てたエネルギーの授受は、永久磁石カップリングを用いたトルク伝達装置⁴⁾で行います。非接触で浮上支持される回転側の超電導バルク体の冷却は、クライオスタット内に封入した希薄ヘリウムガスで行います。希薄ヘリウムガスの圧力を調整することで、フライホイール回転時の風損を抑えた状態で、回転側冷却に必要な伝熱を確保して運用します⁵⁾。

小型超電導フライホイール試験装置

図3に示したイメージの超電導フライホイールの装置構成を実証するために、小型超電導フライホイール試験装置を製作しました。装置の外観写真を図6に示します。外部

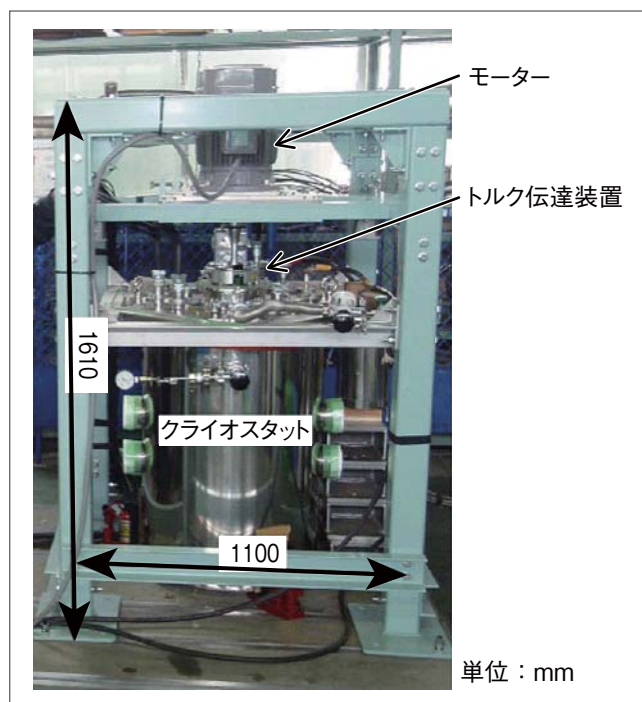


図6 小型超電導フライホイール外観写真

に見えているのは、モーターとそれに接続されたトルク伝達装置およびクライオスタットです。トルク伝達装置は、クライオスタットの壁面を隔てて、内部にも同じものが設置されています。内外1対の永久磁石カップリングを用いて、トルクを伝えることでエネルギーの授受が可能です。内部のトルク伝達装置はフライホイールの軸に接続されており、約52kgのフライホイールを回転駆動させます。このフライホイールの上下には3枚ずつの超電導バルク体が配置されています。この超電導バルク体の周囲には固定側の超電導コイルが1つずつ配置されています。この超電導バルク体と超電導コイルについては、有限要素法による磁場解析を行うことで、径方向・軸方向ともに安定浮上可能な配置を設計しました⁶⁾。なお、回転側の総質量は約60kgです。

この小型超電導フライホイール試験装置は、大きさの点を除いて、目標とするイメージと同じ構成要素を持っているため、本装置で実証や、課題の抽出ができると考えられます。

フライホイールの非接触支持試験

試験はまず、静荷重試験から行いました。超電導コイルに通電されていない初期の状態では、フライホイールは3つの重量計によって接触支持されています。超電導コイルに通電することで発生する浮上力は、この3つの重量計で測定される重さの減少値として計測されます。この時、ト

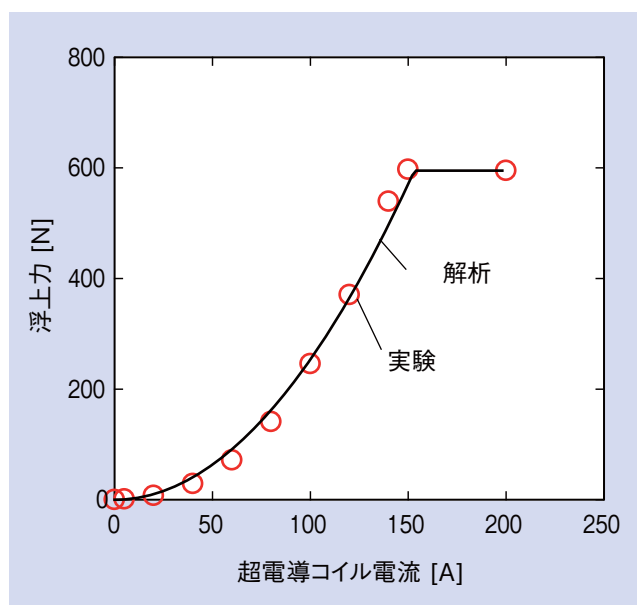


図7 浮上力の実験および解析結果

トルク伝達装置の磁石の吸引力による影響を除くため、クライオスタット外部のトルク伝達装置およびモーターは取り外して測定を実施しています。

測定された浮上力と、本装置を設計するときに行った解析結果⁷⁾を、図7に示します。全領域で、解析結果と測定結果が非常によく一致しています。超電導コイル電流が150A以下の範囲では、どちらの結果も、通電電流の2乗に比例して上昇します。通電電流が150Aで、浮上力が回転側の質量と釣り合った後は、ロードセルの出力は変化しなくなるため、浮上力は一定となります。

このフライホイールの浮上状態としては、安定浮上または不安定浮上の2通りが考えられますが、浮上位置が徐々に変化することにより、設計通りに安定浮上していることを確認しました⁶⁾。

フライホイールの回転試験

次に行った回転試験は、回転駆動する必要があるため、トルク伝達装置およびモーターを取り付けて実施しました。トルク伝達装置の間に、永久磁石による吸引力が90Nほどはたらくため、フライホイールは超電導コイルの通電電流が約130Aで浮上しました。回転試験の際には、余裕分を考え、通電電流は135Aで行いました。この状態で、毎分500回転以上まで徐々に回転数を上げた後、停止する試験をしたときの結果を図8に示します。

回転試験の際、速度や加減速にかかわらず、浮上力が一

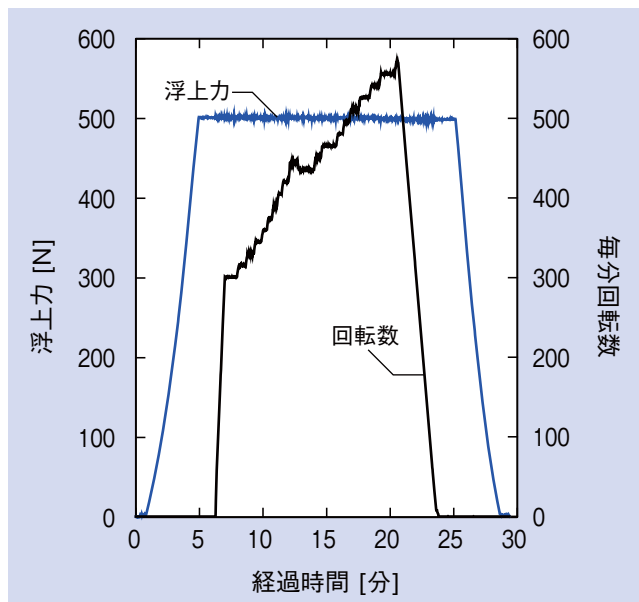


図8 回転試験結果

定で、浮上し続けていることが確認できました。なお、前述のように、トルク伝達装置による吸引力が90Nほどあるため、浮上力は510N程度で浮上しています。試験後に行った分解調査でも、超電導コイルと超電導バルク体を納めた容器が接触することなく回転していたことを確認しました。このことから、設計通り径方向にも安定浮上していることを間接的に確認できました。

おわりに

電気鉄道の回生失効対策として、超電導技術を用いたフライホイールでエネルギーを貯める、超電導フライホイール蓄電装置の開発を進めています。この装置は、超電導コイルと超電導バルク体で軸受を構成して、フライホイールを非接触支持することを目指しています。これにより、従来のフライホイールの長所である長寿命、蓄電残量が容易にわかる、高瞬時パワー密度に加え、高エネルギー密度、軸受メンテナンスフリーが期待されます。

本装置構成を実証するため、小型超電導フライホイール試験装置を試作し、非接触安定浮上支持し、回転可能であることを確認しました。

今後は、実規模のエネルギーを蓄電できるよう、フライホイール質量および回転数の向上を進める予定です。

この研究開発の一部は、国庫補助を受けて実施しました。

RRR

文献

- 1) <http://www.railwaygazette.com/news/single-view/view/new-york-orders-fly-wheel-energy-storage.html>
- 2) 島津，橋：京浜急行電鉄（株）納め電車線用フライホイール発電電動機，三菱電機技報，Vol.63，No.8，pp.60-63
- 3) Science & Technology Review，pp.12-19，1996.4
- 4) 清野他：超電導磁気軸受と永久磁石磁気クラッチの電磁力解析と評価，鉄道総研報告，Vol.24，No.1，pp.29-34
- 5) 清野他：フライホイール用高温超電導バルク体磁気軸受の基礎検討，鉄道総研報告，Vol.22，No.11，pp.35-40
- 6) 荒井他：超電導磁気軸受の浮上・案内力解析および浮上力測定，第19回MAGDAコンファレンスin札幌，pp.367-370
- 7) 荒井他：冷凍機冷却型超電導フライホイール用試験装置の開発，鉄道総研報告，Vol.25，No.3，pp.41-46