

S4-3.

フライホイールと油圧スイッチング変速機搭載のハイブリッド鉄道車両試作と走行実験

Experiment and Analysis of the Hybrid Rail Vehicle which has a Flywheel  
and Hydraulic Switching Transmissions on Board

○機正 伊東 孝彦 (雪ヶ谷制御) 電正 関 純子 (雪ヶ谷制御)

Tkahiko ITOH, Yukigaya Seigyo Institute Co., Ltd. 2-12-12-203 Shinyokohama Kouhokuku Yokohama  
Sumiko SEKI, Yukigaya Seigyo Institute Co., Ltd. 2-12-12-203 Shinyokohama Kouhokuku Yokohama

In this paper, the newly produced rail vehicle that has Hybrid Power System consist of a Flywheel, hydraulic switching transmissions and a thermal engine on board is described. The Newly developed Flywheel wears multi layer of Floating Shrouds to reduce aerodynamic drag force drastically, and the Flywheel is applied to super sonic velocity under the atmospheric environment like as in vacuum container. The Hydraulic Switching Transmission is also made of our original technology that is newly developed by us. The vehicle has 3 pair of 2 independent wheels mounted on a load equalizer type of bogie with steering mechanism, and each wheel is driven by a hydraulic motor. The gauge is set as 1,067mm.

**Key Words:** Floating Shroud, Flywheel, Atmospheric air, Supersonic, Vacuum containers, Hydraulic Switching Transmission

1. はじめに

鉄道車両のエネルギーの節減と、劣悪な軌道上を安全に走行できる Bogie を開発する事を主な目的とした実験を続けており、鉄道動力自走車両を 2 種類各 1 両ずつ製作、走行実験の為に敷設した専用軌道上で実験を行った。

敷設した専用軌道は、Gauge 幅 1,067mm、最小曲率半径 5m 最大勾配 108‰、全長 500m の単線周回軌道である。

第 1 の試作車は電気二重層キャパシタ (EDLC) を電源装置として搭載し<sup>(1)(2)</sup>、電力で走行する。第 2 の試作車は、動力源の内燃機関を搭載し、Accumulator として Flywheel<sup>(3)(4)</sup>を、動力伝達に Fluid Switching Transmission<sup>(5)(6)(7)</sup>を搭載、電力変換を行わずに走行する Hybrid 動力車である。

本論文では、第 2 の試作車に関して述べる。図 1 は軌道上の試作車で、右が第 1 の車両、左が第 2 の車両である。

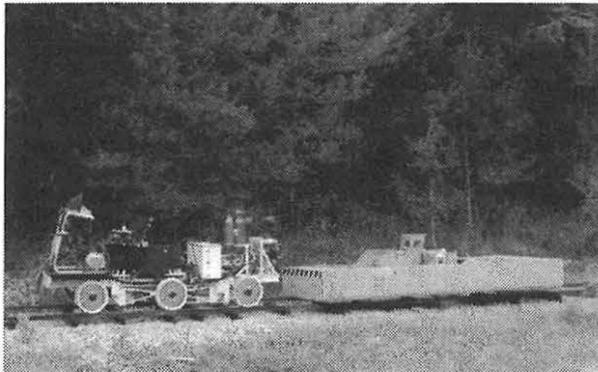


図 1 軌道上の試作車両

2. 車体

車両は軽量化と安全走行を両立すべく設計製作を行った。3 種類の車両を設計して、現在までに 2 両の製作と試験を終えた。設計は何れも 2000 年以前に終了している。

これらの車両重量の数値目標値は、式(1)とする。

$$W_{TARE} < W_{MAX} / 2 \dots\dots\dots (1)$$

但し  $W_{TARE}$  : 空車重量、 $W_{MAX}$  : 定員乗車時の総重量。  
現在の鉄道車両の常識からかけ離れるが、他の交通手段では実現されたものもあり、鉄道でも実現可能な値である。

路面電車や、市街地で運行する鉄道車両は厳しい軌道条件が課せられ、更に厳しくなる事が予想され、これに十分な対応ができなければ鉄道の新たな発展は望めない。

曲率半径 5m の様な極端な条件を与えて脱線に対する安全性の検討も行った。特に空車重量が小さい本プロジェクトにおける車体の脱線対策は重要である。

経験に基づく解析を行った結果、走行車輪の flange は 70 度以上に設定しなくてはならない事が分った。また、将来の在来線への乗入れを考慮して、2000 年当時の在来線のフランジ角度を調査したが、ある特例を除く殆どが 60 度のフランジ角度を使用している事が分り、脱線の危険性を指摘したが、当時は鉄道のフランジ角度の変更は不可能であるとの意見が大勢を占め、危険への関心を示さなかった。

後に、2001 年 3 月、東京都内で脱線による大事故が発生し、フランジ角度に問題がある事が判明し、2004 年に至りフランジ角度を 70 度に変更する方針が決定された。

本実験に使用しているフランジ角度は全て 75 度である。

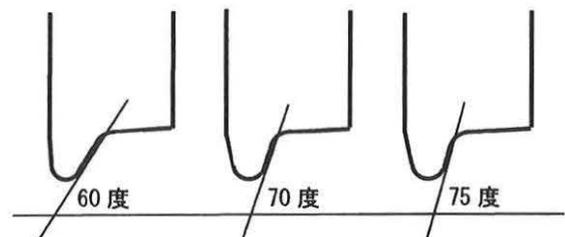


図 2 左から従来型、変更目標、実験中の試作車の車輪

試作した車両は何れもステアリングボギーを備え、曲率半径 5m の曲線を通過する性能を備えるなど、従来の鉄道技術から、かなり逸脱して自動車技術への接近が目立つ。

無連結・単独運行、またはソフト連結をも視野に入れて従来の鉄道技術では消極的であった技術分野にも踏み込んで改良を試みた。運用が車体重量に及ぼす影響は大きい。

Table 1 に試作車両の概要を示す。図 3 は台車図面、図 4 は車体の全景である。図 3 の破線で示した部分は半径 5m の曲線を通過中の操舵の状態を示すものである。

路面電車をも含む悪条件の軌道を安全に走行できる車体を開発すべく、輪重均等化にも配慮して、撓みを積極的に利用した equalizer を設計製作した。但し、図 3 に示した構造は試作 3 機種の中で最も単純な構造であって、高速走行には適しておらず、120km/h 程度を上限と考える。

### 3. フライホイール

搭載されたフライホイール (FW) に顕著な特徴がある。主動力源として 3.5kW のガソリンエンジンを搭載、力行、回生制動の車両走行に要する動力は搭載する新方式の FW に蓄積された運動エネルギーで賄う。FW と駆動車輪の間に新開発も油圧スイッチング変速機(FST)を配置して回生制動の効率向上を図ったハイブリッドシステムを成す。

FW は floating shroud を備え、大気圧下で超音速運転を可能にしたもので、車両に搭載して運用されたのは世界で初めてである。この FW は、真空槽が不要なので今後の車両搭載への普及が期待される。

Table 2 にフライホイール (以下 FW) の概要を示す。

表に記載されたエネルギー密度などの性能を示す値が極めて低い、従来技術の範囲で簡単に製作できる方法を選択したからであって、本形式の FW の性能限界を示すものではなく FW のエネルギー密度は 200Wh/kg に達する。

図 5 は搭載された FW である。フローティング シュラウド (Floating Shrouds : 以下 FS) から成る空気抵抗低減装置<sup>(3)(4)</sup>の下部の半分が示されている。これが真空容器に代って FW の空気抵抗を低減させる装置である。

図 6 は図 5 に示した FW の断面図で、3 層の FS の断面と軸受損失を低減する為の軸受の直列配置が示される。

図 7 は装着された FS 層数と FW の回転数による空気抵抗の変化を示すグラフで、FW の露出運転と FS を 3 層装着した場合の空気抵抗実測値を記入した。

図 7 は FS によって FW の空気抵抗が低減される原理を説明する図である。説明の便宜上、全て無限平行平板と平行空間を仮定して抵抗が低減される原理を示す。

図中の Drag force は FW の表面、FS の内外両面と静止シュラウド表面の単位面積あたりに働く空気抵抗による力を示しており、その値は等しく、FS に挟まれた空気層の両面では力が釣り合っていないなければならない。

FS の層数を  $N$  とすれば、空気層の数は  $N+1$  になる。FW の表面の速度を  $V$  とすれば空気層を挟んで対向する面の相対速度  $v$  は式(1)で表される。

Table 1 Summary of the 2nd Vehicle on running test

Item	Data
Length	3,000mm
Width	1,160mm
Height	870mm
Tare weight	970kg
Gross weight	1,160kg
Bogie	3 axle 6 independent wheel Steering up to 5 meter radius Load equalizer by links and torsion pipes
Drive / Brake Gauge	6 wheel independent drive 1,067mm

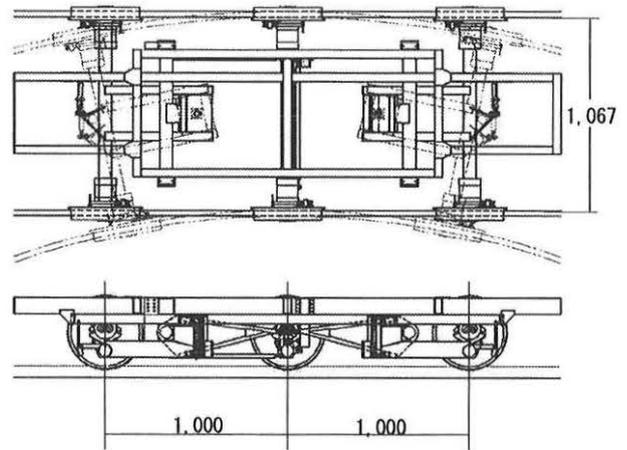


図 3 台車図面

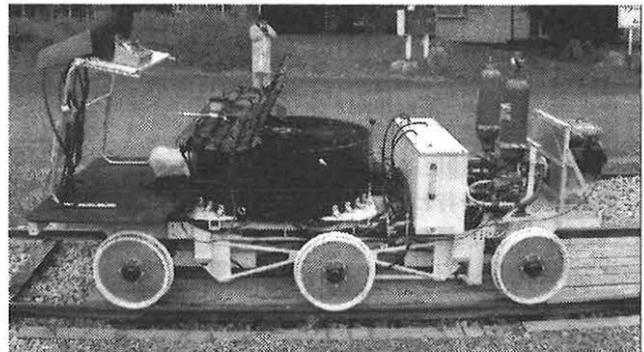


図 4 試作車両の全景

Table 2 Outline of the flywheel

Item	Data
Material	SFNCM100D
Diameter	800mm
Weight	124kg
Moment of inertia	13.0kgm <sup>2</sup>
Bearings	Ball bearings
Revolution range	1,000 to 3,000rpm
Storage capability	642kJ
Energy density	1.44Wh / kg
Power density	0.66kW / kg
Suspension	Gimbals

$$v=V/(N+1) \dots\dots\dots(1)$$

単位面積あたりの空気抵抗による力  $Fd$  は、抵抗係数を  $Cd$  とすると、式(2)で表される。

$$Fd=Cd \times v^2 / 2 = Cd \times \{V/(N+1)\}^2 / 2 \dots\dots\dots(2)$$

FW が空中に露出して回転している場合に受ける空気抵抗  $Ff$  は、式(3)で表されるので  $Fd$  は  $Ff$  に対して式(4)で表される。

$$Ff=Cd \times V^2 \dots\dots\dots(3)$$

$$\therefore Fd=Ff/(N+1) \dots\dots\dots(4)$$

図7は搭載した  $N=3$  のFWが各回転数で受ける空気抵抗を示し、 $N=3$  で  $1/16$  に減少する。実測結果も極めて良好な一致を示した。

空気抵抗が  $1/16$  に減少することは、FWの周囲を  $1/16$  に減圧するのに相当して、実用上の価値は極めて高い。

#### 4. 油圧変速機

試作車は世界に類を見ない高性能の油圧変速機を搭載して、FWと駆動輪の間の、力行と再生制動の動力伝達を行っている。また、油圧変速機の機能の一部を利用して原動機とFW、原動機と駆動輪の間の動力伝達を行っている。

本油圧変速装置は2002年5月、日本フルードパワーシステム学会春季講演会に於いて、筆者等により初めて発表された流体変速機<sup>(5)(6)(7)</sup> (以下、FST) であって、パワーエレクトロニクスに於けるスイッチング技術を油圧制御に取り入れたもので、30倍以上の変速比の可変幅を備え、全域での運転効率がほぼ100%の優れた性能を備えている。

この変速装置は、油圧工学部分野に於いて、今日まで、概念そのものが存在しなかった新しい油圧理論に立脚したもので、FST (Fluid Switching Transmission) の名称で商標登録済みである。

図9はFSTの原理を電気回路に対比させて概念的な理解を援ける目的で掲げたブロック線図で、左側が油圧回路、右側が電気回路である。

左側の油圧制御では作動油の圧力と流量を制御目標値に従って制御し、右側の電力制御では電圧か電流、または両方を制御目標値に一致させるべく制御するスイッチングレギュレーターであって、機能は等価である。

油圧回路、電気回路の何れもスイッチング制御により理論効率100%で任意の制御が可能である。電気回路ではスイッチング技術の発達によって、事実上、3端子レギュレーターが姿を消したが、油圧回路ではリリース弁が未だに圧力制御に用いられ、効率は重視されていない。

また、油圧制御を行う事を諦めてインバータ駆動のモーターで油圧ポンプを駆動する形式が新技術とされる傾向も見られ、自動車のパワーステアリングにも、この方式が採

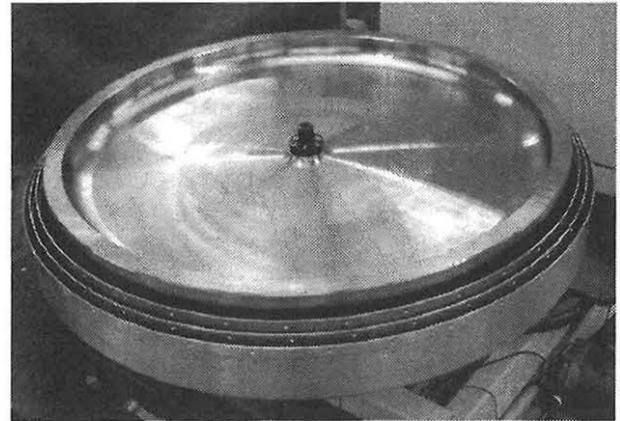


図5 フライホイールと浮動シュラウド (下部の半分)

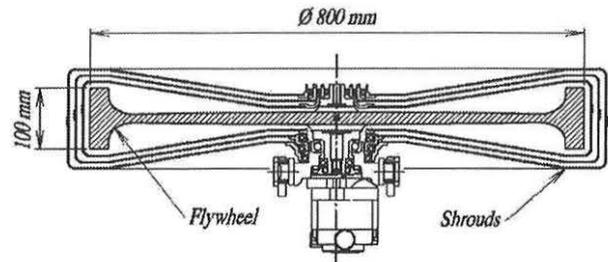


図6 搭載されたフライホイールの断面図

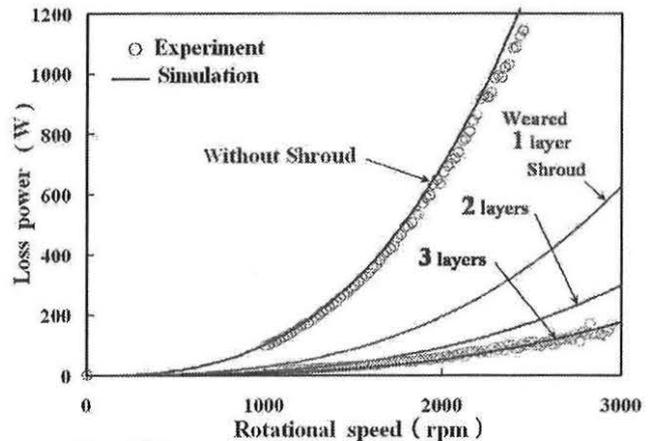


図7 浮動シュラウドの層数と空気抵抗の関係

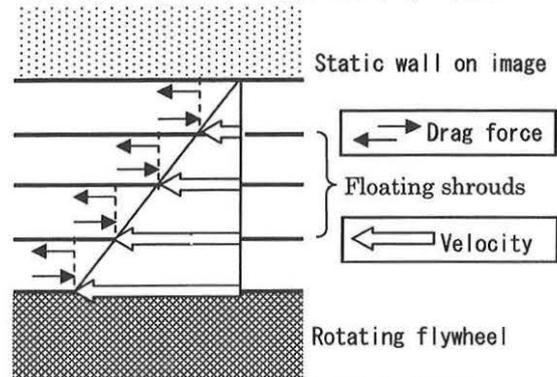


図8 FSを流体力学上の現象として見る

用されつつあるが、油圧技術から見れば退歩である。

図9は油圧、電気、の増圧回路を示すが、油圧技術に於いては、増圧技術と呼べるものが無かったのである。勿論FSTは減圧制御も自在だが、常に、100%の理論効率を保ち、減圧弁による減圧や、減圧弁に代る所謂デューティー弁による効率無視の減圧とは原理的に異なっている。

従来の減圧弁やデューティー弁による減圧操作は、油動力の損失によって行われるがFSTでは減圧と同時に流量が増加するので100%の変換効率が維持される。

FSTの増圧動作を式(5)で表し、電気回路の昇圧動作を式(6)で表すが、明らかに油撃増圧とは異なっている。

$$Q_e - Jd\omega / dt - Q_p(0, I) = 0 \dots\dots\dots(5)$$

$$E_s - Ldi / dt - E_c(0, I) = 0 \dots\dots\dots(6)$$

$Q_e$ : 原動機(エンジン)出力トルク,  $J$ : ポンプ軸周りの慣性モーメント,  $\omega$ : ポンプ軸の角速度,  $Q_p$ : ポンプのトルク,  $E_s$ : 電源電圧,  $L$ : インダクター<sub>1</sub>のインダクタンス,  $I$ : 電流,  $E_c$ : Capacitor<sub>1</sub>の電圧とする。

但し、括弧内の数値は、0は $VS_j$ 開 $S_j$ オンの状態、1は $VS_j$ 閉 $S_j$ オフの状態を表す。

図10, 11, 12は、車両の油圧回路、搭載した試作車、同地点を逆行するEDLC搭載の第1試作車(NHK-TVより)。

5. おわりに

鉄道を追い越して行く技術分野に手を拱いてはならない。歴史と設備を資産として持っている鉄道を利用して省エネルギーと利便性向上を目標に実験をおこなった。

EDLC、FW、モーター、制御回路、油圧変速機などで成果を得たので広く応用の場を開拓して行きたい。

60年来の夢であった脱線しないstaring bogieの設計・製作を楽しめた事に感謝しつつ、第3試作に挑戦する。

6. 参考文献

- (1)伊東, 関, 操舵台車とエネルギー蓄積を備えた LRV, TRANSLOG2002, 公園論文集, No.3302, 2002.12.11
- (2)伊東,蓄エネルギーと架線レス車両の可能性, 鉄道車両と技術, No.89, p.1-12, 2003年9月, レールアンドテック出版
- (3)青山, 伊東, 電力貯蔵用フライホイール, 第8回動力エネルギー技術シンポジウム論文, p365-368, '02.6.18
- (4)伊東,関,634 浮動シュラウドを用いて流体抵抗を低減した超音速フライホイールの実験報告, D&D2003, 長崎, p331, 講演番号 634, 本文はCDROM版
- (5)伊東, 青山他, 油圧技術に於ける新理論の提案, 講演論文集, p34-39, 2002年5月23/24日, フルードパワーシステム春季講演会
- (6)伊東, パルス制御を用いた新方式油圧トランスミッション, 日本フルードパワーシステム学会誌, 2003年5月号
- (7)伊東, 油圧のスイッチングコントロール, 油空圧技術, 2003年7月, p.55-60, 日本工業出版

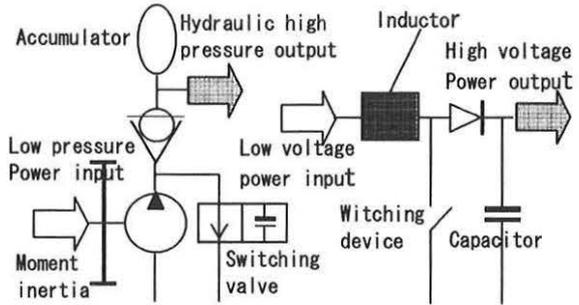


図9 FSTとスイッチング電源との概念対比

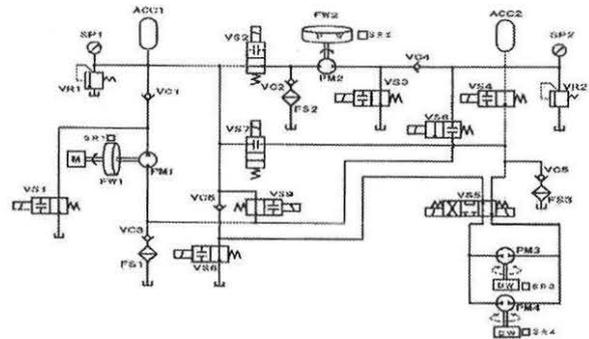


図10 試作車に搭載された変速機の回路図

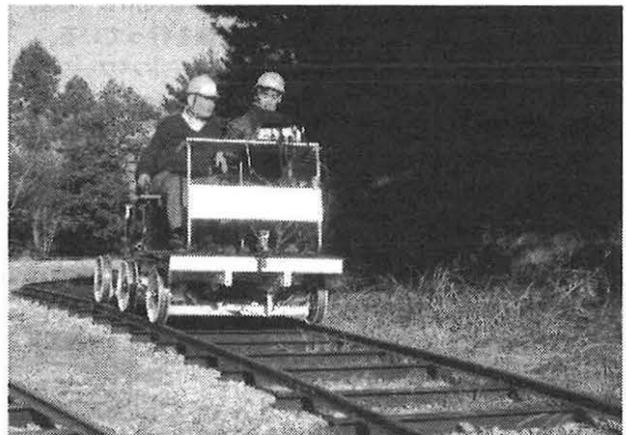


図11 軌道上を走行するフライホイール搭載車



図12 快走! EDCL搭載の超低床電車の台車(NHK)