

1508 乗り物のエネルギー消費量を削減する実験の報告

The experimentation about vehicles to reduce their energy consumption

○ [機] 伊東孝彦 [電] 関 純子 ((株) 雪ヶ谷制御研究所)

Takahiko ITOH, Sumiko SEKI, Yukigaya Institute Co., Ltd

A powered vehicle has the high potential for applications requiring energy-efficient operation without reducing its performance. However, the most persons have thought that the energy-efficient operation decreases performance of a vehicle.

This paper presents experimentation of the energy-efficient operation of vehicles by the way of regenerating brake and light construction of vehicle. The first step have been established as a Trolley-less Tram EDLC on board, and we carry out the second experimentation of a hybrid powered tram which has a thermal engine, flywheel and fluid switching transmission on board.

Key word : LRT, Flywheel worn floating shroud, Fluid switching control(FST),
Electric double layer capacitor, Trolley-less tram, Regenerating brake.

1. はじめに

二酸化炭素問題に代表される省エネルギーの追い風を受けて、鉄道への回帰の動きも見え始めた。

鉄道はエネルギー効率が低い手段として評価される反面、既に敷設されてある軌道上で運用されるので、車両に新たな思想を導入する事に対して抵抗が大きい。

日本の新幹線は軌道と車両を同時に開発して成功した、世界でも稀に見る例ではあるが、一步誤ればどうなったか判らない危険も在った。

第二次大戦の開戦以前に、東海道新幹線のトンネルは一部が掘削されており、今の新幹線はそのルートを走っている。新幹線は旧満鉄の技術が支えた事は知られているが、当時、そのまま順調に新線の開発が進んだら、今日の様な成功は達成できたであろうか。

開発休止期間に電気工学技術と工業材料が、異常に発達したのも幸運であった。事の善悪はさておき、戦争による急速な工業技術の発達と、稼業の途を閉ざされた航空機技術関係者の叡智が新幹線に幸いした。

鉄道車両の耐用年数は長く、新型車両は旧型車両との混走を余儀なくされ、鉄道車両技術の改革を困難にし、これが省エネルギー化を妨げる一因になっている。

鉄道分野を中心にして、乗り物のエネルギー消費量低減を目指す技術の実験過程に関する報告を行う。

企画設計にあたっては自動車、航空機、船舶などの輸送に関わる技術のみならず、工業技術全般に亘る分野から新技術の導入を図った経緯にも触れよう。

2. 輸送とエネルギー消費

輸送には、早く、且つ安全に、が不可欠である。

早くには速く、即ち高速化が求められる事になる。

高速化はエネルギー消費量の増加に見えるが、エネルギー消費を抑制する為には vehicle の低速化と加速性能の制限を行うべきである、との考え方は必ずしも正しくない。

Vehicle の性能維持に必要なエネルギーの消費は避けられな

いが、無駄な消費は許されない。

エネルギーを正確に理解してこそ、初めて乗り物の運動性能を阻害せずに、限りなくエネルギー消費を低減させる事を目指す技術開発が可能になる。

「熱エネルギーに変えないで再使用する」に尽きる。

この様な視座で交通システムに対峙するならば、省エネルギーの余地はまだ大きい、実用レベルでのエネルギー回収が実行されているのは未だに航空機と鉄道輸送のみである。

輸送された人員、貨物には、移動結果によるエネルギーの増減が無いのに、何故エネルギーが消費されるのか？

筆者の昔の経験的学習を紹介する。1939~1940 年頃、東京の地下鉄に乗って幼稚な疑問を感じた。当時は渋谷浅草間を走る銀座線の一系統のみが運行されていた時代である。

デパートのエレベーターで地下に降りて電車に乗るのは不合理ではないか、との疑問を抱いた。“電車が一階フロアに上って来て停車し、再び坂を下って地下を走り、次の駅で坂を登って地上に停車すれば良いではないか”と。

勿論、その頃に自分が省エネルギーの概念をもっていた筈はない、恐らくは、人力、即ち自分の肉体的出力の理解のみで、動力源に対する知識に乏しかった事が発想の出発点であったと、今では想像する。

時は巡り、今は我が国の人力飛行機の記録向上への挑戦を楽しんでいるが、当時としては大変な苦勞をしたと記憶している実験の顛末を Fig.1 にイラストで示す。

積木、鋸台、厚紙等を用いて実験コースを作って、玩具の自動車を走らせたが、結果は惨憺たるもので、上り坂にさえ達しないで玩具の自動車は停った。

子供ながらも、少しは走行抵抗の概念を持っていたし、糸巻が良く転がる事は経験的に理解していた。また、軌道幅が狭すぎるとスネークモーションを起す事も経験的に承知していたので、それなりに慎重に軌道造った。

糸巻は確かに玩具の自動車より良く転がったが、期待した光景から隔たりが大きい。やがて閃いた。

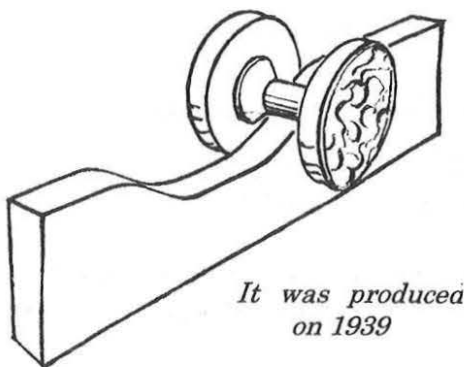


Fig.1 The primary examination to reuse energy

“糸巻が軽いからだ！”

そこで、大きなマヨネーズの瓶の蓋を手に入れ、糸巻きの両端面に接着して粘土を詰め込んだ。

大成功、しかも、加減速の動作が緩慢になって何となく実物の電車が走っているように感じた記憶をもつ。

これが、2003年8月に路上運転を、同10月7日には試験軌道⁽¹⁾⁽²⁾上で運転を始めたフライホイール搭載車⁽³⁾の原型であった。Fig.2に試験軌道上の同車を示す。

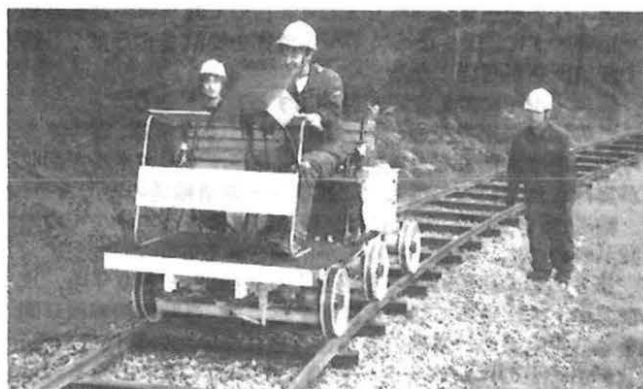


Fig.2 The FW vehicle is climbing 85‰ gradient

Fig.2に示した車両は自動操舵機能を備えている、前輪軸の中央部のリンク機構がステアリング装置の一部である。同車が走行中の試験軌道は、後述するEDLC搭載の試作車の運行試験を行う為に、2001年6月に敷設したもので、全長518mの周回軌道、1067mmゲージである。

同試験軌道は、路面電車解発への対応を考慮して曲率半径5mの曲線を設けてあるので、操舵機能は不可欠である。操舵機構は1945年末に概念設計を行った形式を採用した。

同試作車は170ccのガソリンエンジンとフライホイール(Flywheel 以下FW)のハイブリッド動力システムを搭載している。FWは運転席の下に、エンジンは最後部に搭載されている。また、この車両の動力系の特徴は、電力への変換を行わない事にあり、後述のFSTと呼ばれる高性能の油圧変速機を搭載して運転された世界で初めての車両である。

FW搭載車両の緒元と性能データの詳細は別の論文に報告されているが⁽⁴⁾、同車両には二つの重要な工学上の新理論が適用されている。

本論文では新理論に関わる部分を主題とするが、何れも、日本で誕生した理論を適用して開発された動力装置である。一つは車両駆動の動力源として搭載されている動力蓄積装置、FWであり、他は動力伝達のCVT装置である。

FWは、空気抵抗を除去する為に真空中で運転するものと

されていたが、大気圧の空气中で超音速運転を実現する理論を提唱して、この理論を立証した上で大気環境下で運転される世界に類を見ない高周速FWを試作して搭載した⁽⁵⁾⁽⁶⁾。

1980に発見した空気抵抗低減の原理をFig.3に、2001年に世界で初めて上記理論の正当性を実証した第1号のFW試作機の構造をFig.4に示す。

図では空気抵抗を低減させる浮動シュラウドの上半分を取り外した状態を示し、シュラウドが4枚設けられている事が判る。空気抵抗の理論低減率は約96%である。

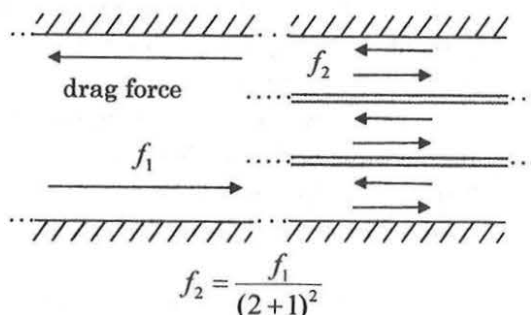


Fig.3 The new theory has been established

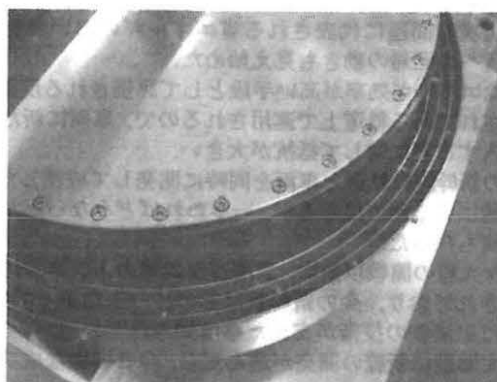


Fig.4 The Flywheel with bottom shrouds

また、本理論による空気抵抗の低減は式(1)で表される。

$$Dn = Do(n+1)^{-2} \quad (1)$$

但し、 Dn : n 枚のシュラウドを持つ回転体の空気抵抗、 Do : 露出した場合の回転体の空気抵抗、 n : シュラウドの数(積層数)である。

第二の特徴は、新理論に基づく油圧スイッチング変速機FST(Fluid Switching Transmission)の搭載である^{(7)~(13)}。この新しい油圧システムを搭載する車両の製造と運転が行われたのは、これも世界で初めての事である。

この油圧回路は2002年に初めて発表された新理論に基づいて設計製作されたものであって、油圧制御理論にスイッチング制御の概念を導入して、自在に油圧と流量を制御する手段としての機能を実証したものである。

1973年、電気回路のスイッチング技術開発が一段落した時点で同技術の油圧制御への技術転用を試みたものである。当時、3機種、12台を試作して実用運転を行い、従来の油圧サーボ・コントロールのエネルギー消費量に対して99.8%を超える削減を実現し、エネルギー消費量を1/500迄低減した。これに適用した油圧制御装置の基本回路がFSTである。

前述のFW風損問題の抜本的解決により、FWの電力応用分野の諸問題は解決されたが、車両の走行など機械的エネルギーとしての利用面で新たな問題が発生した。

FWの運転に利用可能な機械式CVTは未だに存在しない。また、当分は開発される見込みもないのが現状であった。仕方なくに搭載された原動機の出力を電力に変換してFWと車両駆動モーターの入出力制御を行っているが、全ての伝達トルクを電磁力に頼る結果となり、工学的見地からも、多くの不利益が発生して居り、省エネルギーは実現されていない。

鉄道分野に於ける気動車への適用などを想定して簡単なシミュレーションを行えば問題点が明らかになるであろう。

実は、理想的な機械式CVTは30年以前から存在していた。それが前述の油圧スイッチング技術で所謂デューティ弁とは異なり、FWを実務に利用する為には不可欠との判断から2002年に油圧制御に於ける新理論としてFSTを発表した。同時に企画した実験装置がFig.2に示した鉄道車両である。

FSTは変速比幅30倍で100%近い効率で運転され、オーバードライブ運転では効率100%を超える領域も出現する。入力を一定とするFST出力のPV実測例をFig.7に示す。効率100%の理論値線(双曲線)を超える部分があるが、損失量が負になるのは制御回路のバイパス流路形成による。

Fig.5の制御では、制御目標が作動油圧ではない。制御目標は車両の加減速である事が、変速装置の効率を高めている。一定油圧制御システムなどが見受けられるが、閉鎖制御系に於いて特定圧を制御目標とする事は本質的な誤りである。

電力変換も制御目標は電圧ではない。定電圧志向は発送電に於ける制約と、化学電池が齎した錯覚による所が大きい。

架線からの受電は複数の車両が対象で、発送電技術の範疇に属し、架線電圧の定電圧化が必須となる。架線レス鉄道車両が、初めてエネルギー運用の理想形を実現した。

Fig.5の特性を示す新油圧制御理論を適用する事で鉄道技術に於ける気動車に関わる全ての問題が一挙に解決された。

更に、気動車にディーゼルエンジンを搭載する必然性も失われた。FST搭載を考えるなら、原動機としてガスタービンの搭載をも可能にする。前述のFWを併せて搭載する事により従来型電車に優る高効率鉄道車両の実現が可能になった。

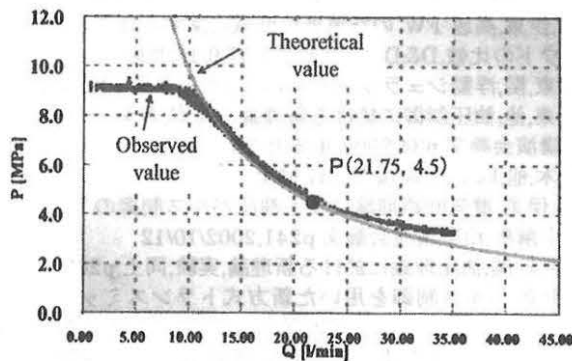


Fig.5 P-Q characteristics of FST

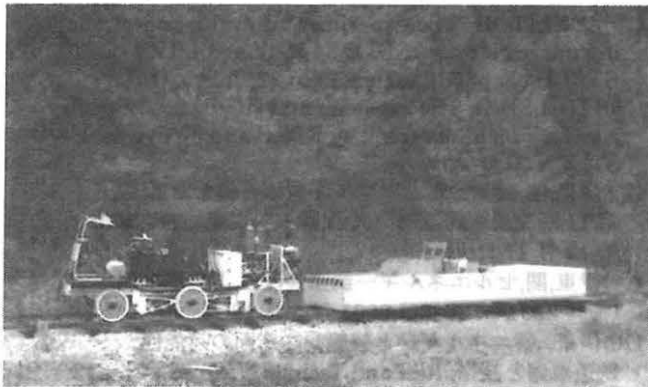


Fig.6 FW vehicle and EDLC vehicle on our Test Track

3. 架線レス電車

鉄道に於ける電動車両の優位性は絶対的であるが、架線を備える電車は工学的に完成された姿なのだろうか。

エジソン以来、花形だった直流モーターは主役の座を降りて、モーターはブラッシレスに移行した今日、架線とパンタグラフの摺動接触で何時まで走り続けるのだろうか。

架線の無い電車が実現されたらどうなるのか？

受電しながら走る電車は給油管を引きずって走る自動車に似ていないか？との疑問を抱く筈である。

停車中に電力の積降しを行い、積み込まれた電力で走行する蓄電装置を搭載した電車は実現可能ではなかろうか。との発想をテーマに蓄電装置の開発と平行して、架線レス電車の可能性に関する研究を行った⁽¹⁴⁾⁽¹⁵⁾。

実験を行った架線レス電車は走行電力源として電気二重層キャパシタ(Electric Double Layer Capacitor : EDLC)を搭載し、停車中に7~10秒の充電を行う。2001年6月に敷設した1067mmゲージ、全長518mの周回軌道で2年間に亘る運用実験で多岐に亘るデータを取得して分析中である。

実験車両は、ステアリングボギーを備えた自社製で、実験線は路面電車への展開にも配慮して半径5mの曲線部を設け、コース内の標高差を7.9m、最大勾配を85‰に設定して敷設して実験を行った。現在は上記実験線に於ける実験を終了したEDLC搭載車両に替わって、前述のFWハイブリッド鉄道車両の実験を行っている。

Fig.6はFWとFSTを搭載した車両(左側)と、既に実験を終えた電気二重層キャパシタ(EDLC)搭載車(右側)が軌道上に並んだ情景、2003年10月8日撮影。

EDLC搭載車両の実験により取得されたデータを基礎にして次の架線レス電車の製造を開始した。EDLC搭載量は総重量の9.87%、計画の初期段階の外観図をFig.7に示す⁽¹⁶⁾。

この架線レス電車も、既に実験を終了したEDLC搭載の第1号試作車と同様に1067mmゲージの軌道で運転を行う。第2号EDLC試作車は在来線の軌道上に於ける走行試験を想定して居り、車両限界内の車両寸法で製作している。

規則などの障壁で、在来線走行試験が困難な場合には、高速走行実験用試験軌道を新規に敷設して走行実験を行う予定である。

第二次試作車に搭載するEDLCの概要をTable 2に示すが、この定格は、2000年に発表した、EDLCの安全運用を保障する補助回路を付加する事により、初めて得られる値であって、従来の技術では実現困難な値である⁽¹⁷⁾⁽¹⁸⁾。

Table The EDLC battery for the next vehicle

Item	Data
Capacitance	235 Farad
Rating voltage	320 V
Series resistance	8.6 mΩ
In/out current	2000A
Energy density	4.83wh/kg
Mass	691.2kg

1983年に、EDLCを大規模エネルギー貯蔵に利用する計画を立案した際に、将来のEDLCが実用化される場合には直列直列接続が前提になる事は明らかで、直列接続されたEDLCの各セル電圧を管理する事が前提になると考え、直ちに問題を解決し、その上でEDLCの開発を開始した。

未だに現存する電圧管理回路の最古の同回路は1987年に製作した試作品である。この回路を併用しない限りはEDLCの本格的な利用は望めない。

Table 1に示したEDLCのデータとTable 2に示す車両データに基づいてシミュレーションを試みればEDLCの能力が明らかになるので、試算される事をお勧めする。

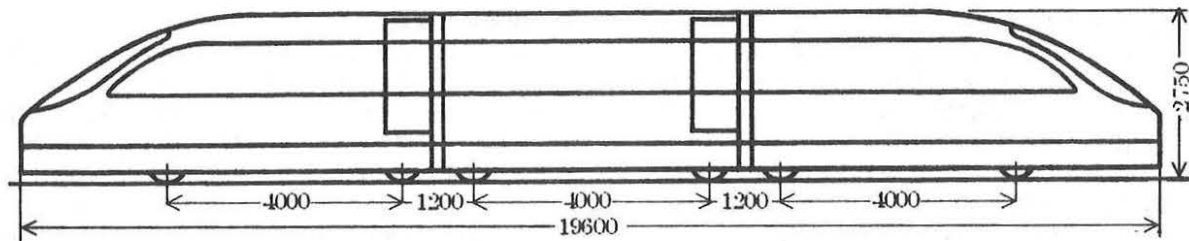


Fig. 7 The second model for LRT which has EDLCs on board

Table 2 Performance of the 2nd Trolley-less vehicle

Item	Dimension
Total mass	7,000kg
Tear mass	3,500kg
Passengers	48
Cruising	120km/h
A distance / one charge	15km
Climbs / one charge	70m

上記、一連の実験により、架線レス電車は容易に実現できる事が明らかにされた。

第3章に於いて、電磁力を利用する場合にトルクの制限を受ける事に触れたが、エネルギー貯蔵装置として、FWを搭載する場合に関する議論であって、EDLCを搭載する場合には判断の基準が異なる。

エネルギーに関わる問題を議論するにあたっては、電気と機械を区別してはならない、両工学分野に亘っての正確な知識と力量が不可欠である。近年は、やや改善の兆しが見られるが、大学教育に於いて電気工学と機械工学がそれぞれ異なった学科として扱われる事が既に問題なのである。

EDLC, FW, 共にこれらを搭載する事により、走行エネルギーの自律管理が可能となり、架線電車に見られる回生失効は原理的に存在しなくなる。

また、車上の系内にエネルギー平準化装置を備える事により、原動機の出特性の影響からも脱出ができ、鉄道車両への、ガスタービン搭載が俄かに現実味を帯びて来る。

EDLC と、FW の開発は、1979 年に弊社に於いてガスタービンの試作を開始した折に、GT の出力特性が、車両駆動に適さない事を承知していたので、小型 GT 開発に平行して、EDLC と FW の開発に着手した経緯がある。

MGT は、1983 年に第 1 号機を運転して以来熱効率向上の研究を継続して居り GT ハイブリッドを次の課題としている。

4. おわりに

乗り物のエネルギー消費量を削減する努力は、駆動・回生装置の効率向上を中心に行われて居り、それなりの成果を上げつつあるが、徹底的な車体軽量化こそ不可欠なのである。

そこで新たな問題に直面する。

EDLC, FW を搭載して走行実験を行った試作車両は何れもフランジ角度 75 度、車両軽量化が省エネルギーの前提だが、工学原理に対する配慮を欠くと車両の安全性が損なわれる。

2000 年 3 月 8 日、東京都内の中目黒で脱線、犠牲者 4 名、フランジ角度にも問題があった。

車体軽量化は、空車時の対横風安全率に注意を要する。Fig. 7 の車両形状は横風対策、特に、盛土や橋梁上に於ける上向き成分を持つ横風による脱線の危険性を低下させる目的で実施したシミュレーションの結果に由来する所が大きい。

1986 年 12 月 28 日、山陰線の餘部鉄橋、横風で脱線転落、犠牲者 6 名、客車の横風への空力対策と重心位置が問題。

1995 年 8 月 10 日、鉄道ではないが、東名高速の上り車線、

御殿場を過ぎて間もない地点、防音壁の設計・施工の誤りが原因で、ガードレールに接触したバスの車体が防音壁によって切断され、切断された部分が搭乗者と共に谷底に墜落、犠牲者 3 名。これは、車体側には全く責任の無い事故ではあるが、車両の軽量化は常識を超える異常な事態に対して何処まで対処すべきかと云う問題を提起した重大な事件である。

しかし、東名バス切断事件は、様々な圧力により真の事故原因は隠蔽されたままで今日に至っている。

乗り物の安全は文明社会に於いては、確保されて然るべき相互信頼によって成立し、更にエネルギー消費量の低減もこの信頼の上に初めて成立する。

地上を走行する車両は、翼が不要であり、高高度飛行を行わない分だけ、飛行機より軽量化する事が可能である。困難を克服して一層の超軽量高効率車両の開発に努めたい。

参考文献

- (1)伊東,関,試験軌道敷設と駅間無給電 LRV 実験報告, J-Rail'01 論文集,p265,2001 年 12 月 12 日,名古屋
- (2)関,伊東,電気二重層キャパシタ電力貯蔵器の EV,LRV 電力源への適合性,J-Rail'01,論文集,p329,2002.11.27,神戸
- (3)鈴木,伊東,他,新油圧制御方式で駆動制御される FW 搭載鉄道車両,山梨講演会論文集,2003.10.25,山梨
- (4)島田,伊東,他,新コンセプトに基づく鉄道車両,論文集前頁
- (5)関,伊東,高速 FW の空気抵抗低減に関する真空と浮動シュラウドの比較,D&D.2003,論文,p97,9/16,長崎
- (6)伊東,関,浮動シュラウド・大気圧下の超音速 FW,p331,同上
- (7)伊東,他,油圧制御に於ける新理論の提案,春季フルードパワー講演会論文,p34,2002 年 5 月 23 日,東京
- (8)鈴木,他,同上,実験報告,p37,同上
- (9)関,伊東,電気回路理論による油圧パルス制御のトランジェント解析,山梨講演会論文 p241,2002/10/12
- (10)伊東,関,油圧理論に於ける新理論,実験,同上,p243
- (11)伊東,パルス制御を用いた新方式トランスミッション,日本フルードパワーシステム学会論文集,2003 年 5 月号,p27
- (12)伊東,油圧制御における新理論構築,油圧技術,2003 年 5 月号,p49
- (13)伊東,油圧のスイッチングコントロール,同上,7 月号,p55
- (14)SEKI,ITOH, The experimental evaluation of adaptive use energy storage EDLC by HEV and LRV, STECH'03, p358, August 19 to 22, Tokyo, (15)
- (15)ITOH,SEKI, The experimental simulation of trolley-less LRV on a test track by EDLC and by flywheel, STECH'03, p543
- (16)伊東,関,操舵台車とエネルギー蓄積を備えた LRV, 第 11 回交通・物流部門大会,講演論文集,p247,2002 年 12 月 11 日,川崎
- (17)伊東,関,セルエネルギー調節装置,公開特許公報,(特開 2001-136660),2001 年 5 月 18 日
- (18)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, Rail and Tech 出版,No.89,p2~p12