

SPACE JAPAN INTERVIEW

昭和の宇宙に咲くCS「さくら」の開発から学んだこと

— 3.11地震・津波被災鉄道の「ソーラートンネル」による電化復興と衛星通信 —

磯 彰夫

Space Japan Review誌：前回、平常時の地上通信不感地域や非常災害時の地上通信被災地域バックアップのために、自立電源装備の衛星通信利用高速鉄道早期地震・津波検知システムの普及促進整備加速と地震災害High Hazard 及びVery High Hazard 地域である東アジア太平洋や南北アメリカの太平洋沿岸、中央アジア、中近東及び地中海沿岸地域等における石油コンビナート、人工透析病院等への拡大応用に関する普及促進施策の必要性について述べていただきました。今回は最初に東日本大震災時の鉄道運行に関してお話を伺いたいと思います。よろしくお願いします。

磯氏：3.11地震発生時、トンネル中で緊急停車した東北新幹線車内の模様を図1に示します(http://blog.goo.ne.jp/utchie_hachi/e/955613a5df65e8a49cea7b17ee3788c9mを参考に作成)。安全停車後の車内やトンネル内は非常灯が点灯し、その後、車内アナウンスの指示により、バスによる乗客の振替輸送がおこなわれたことが伝えられています(<http://www.youtube.com/watch?v=CcMd3T-fhCI>, <http://www.youtube.com/watch?v=APD2Smc8LWU>参照)。

また、仙石線下りの「石巻」行きの快速電車(4両編成)が3.11地震に被災した際の乗客の模様を図2に示します(<http://www.iza.ne.jp/news/newsarticle/event/disaster/505027/>を参考に作成)。「津波は避けられたものの無線も携帯もつながらず救助も求められない。夜になると吹雪になった。乗客がお土産用に持っていた、かりんとうやまんじゅうを食べ、真っ暗な車内で、寒さと恐怖に耐えた。一夜明け、全員が救助された」ことが伝えられています。



図1 トンネル中で緊急停車した東北新幹線車内の模様

図2 列車無線も携帯もつながらず救助も求められない

仙台方面の「あおば通」行き普通電車(4両編成)は午後2時46分、野蒜駅を出発した。直後に激しい揺れに襲われ、運転室に緊急停止を告げる無線が入った。停車したのは駅から約700メートル進んだところだった。JR東日本には、災害時に緊急停止した場合、乗務員は最寄りの指定避難所などに乗客を誘導する内規がある。

指定避難所は、電車が停止した場所から北東約300メートルにある野蒜小学校の体育館。車掌らは内規通りに乗客約40人を誘導。ところが、直後に体育館を津波が襲い、数人が亡くなった。電車も津波で流され、脱線していた。

下りの「石巻」行きの快速電車(4両編成)も野蒜駅を発車直後、突き上げられるような衝撃が襲った。電車は小高い丘で停止。車掌らが乗客約50人を3両目に集め、避難誘導しようとしたが、野蒜地区に住む男性乗客の1人が制止した。「ここは高台だから車内にいた方が安全だ」

皆、その言葉に従った。しばらくして轟音(ごうおん)とともに津波が襲来。あっという間に家や車のみこんだ。家の屋根につかまりながら流される70代の男性を車掌らが救出。津波は線路の直前で止まった。

- 2011. 3. 11(金) 私は仙台に出張でした。帰りの新幹線に乗り、仙台を出て約15分後、携帯の異様な着信音。次々と他の人の携帯にも同じ着信音が。。。
- デッキに出て私は着信メールを確認、
- 緊急地震速報のメールを目にしたとたん！！新幹線は止まりました。真っ暗になり、トンネルの中でした。
- 福島から郡山間・新幹線が走るトンネル前も後ろも真っ暗・・・そのまま、出られずに車中泊でした。翌日、11時ころにバスで大宮に向かうとのこと。
- 新幹線とお別れです。守ってくれてありがとう。車中には仙台福島方面にターンする人が残りました。
- やっと外に出られる。光が見えてきました。
- こんな経験はそうあるものではないのでしょうか。しかし、東北地方では、大変なことになっていることを後に知らされます。被災地のみなさん。頑張ってください。JRの職員の方々も懸命に動いてくれました。ありがとうございました。新幹線に乗っていた方々、本当にお疲れ様でした。笑顔を作り、イライラせずに過ごせたことをありがたく思っています。無力な自分を思い知らされました。

冠水しなかったのは、電車が止まっていた丘の上だけ。乗客の東松島市のパート、渋谷節子さん(61)は「少し前に進んでいても後ろでも、津波に巻き込まれていた」と振り返る。

津波は避けられたものの無線も携帯もつながらず救助も求められない。夜になると吹雪になった。乗客が持っていたお土産のかりんとうやまんじゅうを食べ、真っ暗な車内で、寒さと恐怖に耐えた。一夜明け、全員が救助された。渋谷さんは近くの小野市民センターの避難所に収容された。ここでも携帯電話はつながらず、家族と連絡がつかなかった。会社員の夫、洋次郎さん(65)と長女、百恵さん(25)は周囲の避難所を訪ね歩き、震災4日目になってようやく再会を果たした。

その瞬間を見守った小野市民センターの大友晋也所長(67)は2つの電車の明暗をこう語った。「上り電車で犠牲者が出たのは残念だが、乗務員は内規に従っており責められない。一方で、下り電車はマニュアルにとらわれない臨機応変な対応をとった。結局、それが生死を分けたのかもしれない」

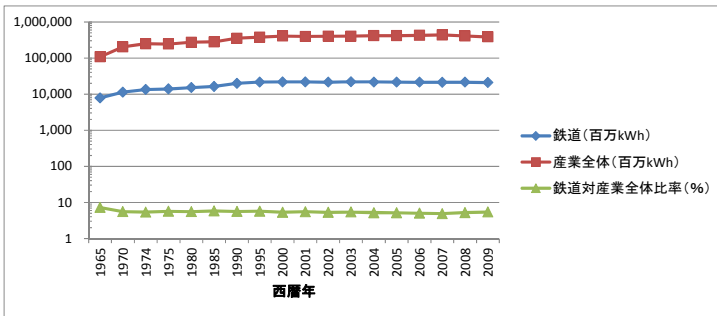


図3 鉄道及び産業全体使用電力量の推移

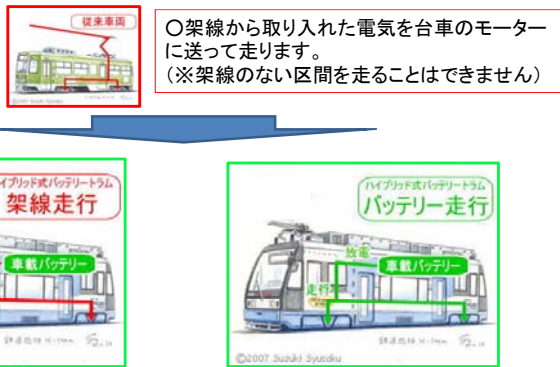


図4 ハイブリッド式バッテリー tram

【ハイブリッド式バッテリー tram】

○架線のある区間では、架線から取り入れた電気を台車のモーターに送って走りながら、同時に車載バッテリーにも充電します。

○架線のない区間では、充電したバッテリーから台車のモーターに電気を送って走ります。

○主な長所

1. 景観の向上、2. 路線新設時の建設費抑制／既存路線の保守費抑制、3. 路線新設時の既存構造物への影響小、4. 高所作業・道路作業への影響小、5. 架線障害の防止設費を抑制

日本全体の鉄道及び産業全体使用電力量推移を図3に示します。2009年における鉄道使用電力量は20,931百万kWh/年で、産業界全体使用電力量389,951百万kWh/年の5.4%を占めています。2000年～2009年(10年間)における鉄道の年平均使用電力量は21,508百万kWh/年です。

鉄道年平均使用電力量費用は、電力量料金14円/kWh とすれば (<http://www.enecho.meti.go.jp/denkihp/shiryu/ryokin.pdf#search=http://www.enecho.meti.go.jp/denkihp/shiryu/ryokin.pdf>参照)、301,112百万円(=14円/kWh × 21,508百万kWh/年)と試算されます。換言すれば、鉄道事業への年間平均電力供給市場は約3千億円/年と試算されます。また、2000年～2009年(10年間)における産業全体の年平均電力供給市場は約5.7兆円/年(=14円/kWh × 409,930百万kWh/年)と試算されます。

トンネル内で緊急停車後の新幹線車内及びトンネル内非常灯は2次電池(バッテリー)の電力供給によるものと思われまます(<http://www.youtube.com/watch?v=CcMd3T-fhCI>参照)。平成19年11月から同20年3月にかけて、札幌市において、電源電圧600V及び電池容量120Ah、使用電力量72kWh(=600V×120Ah)のリチウムイオンバッテリー駆動式・架線レス低床路面電車の走行実験が行われました。ハイブリッド式バッテリー tram を図4に示します(http://www.h2.dion.ne.jp/~syuchan/slrt/slrt_opinion_2007-01.html参照)。走行実験の結果、1. 信頼性、2. 車両製造コスト、3. サービス機器(冷暖房空調装置等)の設置、4. 従来車両との互換性の課題が指摘され、引き続き、事業化課題解決に必要な研究開発実用化が進められています。

リチウムイオンバッテリー要素生産技術面から見た事業化課題解決に関してはどのようにお考えですか。

磯氏: リチウムイオンバッテリーの電池容量及び生産単価と生産数量との関係を図5に示します (http://www.meti.go.jp/statistics/tyo/seidou/result/ichiran/03_kikai.html#menu2を参考に作成)。電池容量Y(Ah/個)と生産数量X(百万個)との関係は次式の回帰直線で近似できます。

$$\text{電池容量 } Y(\text{Ah/個}) = 7 \times 10^{-5}(\text{Ah/個}) \times X(\text{百万個}) + 1.01$$

電池容量Y(Ah/個)と生産数量X(百万個)との相関係数Rは $R = \sqrt{0.95} = 0.97$ で強い相関を示します。

係数 7×10^{-5} (Ah/個)は生産工程における①生産計画・体制管理技術(http://sma.jaxa.jp/JMR_JERG/data/JAXA-JMR-006_N3.pdf MIL-STD-483A, MILITARY STANDARD: CONFIGURATION MANAGEMENT PRACTICES FOR SYSTEMS, EQUIPMENT, MUNITIONS, AND COMPUTER PROGRAMS (04 JUN 1985) [S/S BY MIL-STD-973]., this standard establishes requirements for configuration management. http://www.everyspec.com/MIL-STD/MIL-STD-0300-0499/MIL-STD-483A_4800/ http://esamultimedia.esa.int/docs/industry/SME/Configuration/Section_1-CM.pdf

②品質管理技術(http://sma.jaxa.jp/JMR_JERG/data/JAXA-JMR-005A_N2.pdf#search=品質管理プログラム計画書, NHB 5300.4(1B) Quality Program Provisions for Aeronautical and Space Systems Contractors等参照)及び③信頼性管理技術(http://sma.jaxa.jp/JMR_JERG/data/JAXA-JMR-004B_N2.pdf, NHB 5300.4(1A-1) Reliability Program for Aeronautical and Space System Contractors等参照)における習熟度向上が寄与しています。

また、定数項1.01 (Ah/個)は、電極材料、電解質、電池セル構造等に関する性能対価格比生産技術向上が寄与しています。①生産計画・体制管理技術、②品質管理技術、③信頼性管理技術及び④電池セル性能対価格比生産技術向上の相乗効果が、生産数量32(百万個)時の電池容量1.07(Ah/個)から生産数量1,095百万個時の1.75(Ah/個)($=1.6 \times 1.07 \text{Ah/個}$)に電池容量性能向上もたらしたものと考えられます。

標準規格品多量生産による品質レベル向上の試算例を図6に示します((堀水俊直, “半導体製品における信頼性・品質確保について”, 平成22年度 宇宙航空品質保証シンポジウム, 宇宙航空研究開発機構, pp39-61, H22年12月1日, <http://sma.jaxa.jp/AQAS/h22/program.html>等を参考に作成)。

標準規格品月産10万個の場合、不良品数が1個の不良率は10ppm, 不良率1ppm以下達成に必要な不良0(良品)生産期間は10ヶ月以上が必要となります。そして、不良率10ppm品質要求を満たすには、歩留まりとStatistical process Controlの向上や不良率1ppmの品質要求の達成には故障物理と教育, 品質維持技術の向上が必須であることが指摘されています。

リチウムイオンバッテリーの平成23年度の生産市場は約2,200億円です(http://www.meti.go.jp/statistics/tyo/seidou/result/ichiran/03_kikai.html#menu2を参照)。生産単価(円/個)と生産数量(百万個)との関係は次式の回帰べき乗線で近似できます。

$$Y(\text{円/個}) = 6,070 \times X(\text{百万個})^{-0.334}$$

生産単価(円/個)と生産数量(百万個)との相関係数Rは $R = \sqrt{0.90} = 0.94$ で生産単価(円/個)と生産数量(百万個)とは強い相関を示します。生産数量32(百万個)時の生産単価1,200(円/個)から生産数量1,095百万個時の200(円/個)($=1200 \text{円}$ の6分の1)に量産効果による生産単価の低減が行われています。さらに、33.7kWhがガソリン1ガロン($=3.8 \text{リットル}$)燃費相当と言われている(<http://www.prnewswire.com/news-releases/epa-rates-the-all-electric-zero-emission-nissan-leaf-best-in-class-for-fuel-efficiency-environment-109957514.html>)、世界において、地域が偏在する石油資源依存から自立するために、電気自動車の量産商品化が進められています。例えば、電池容量($=24 \text{kWh/台}$)搭載の電気自動

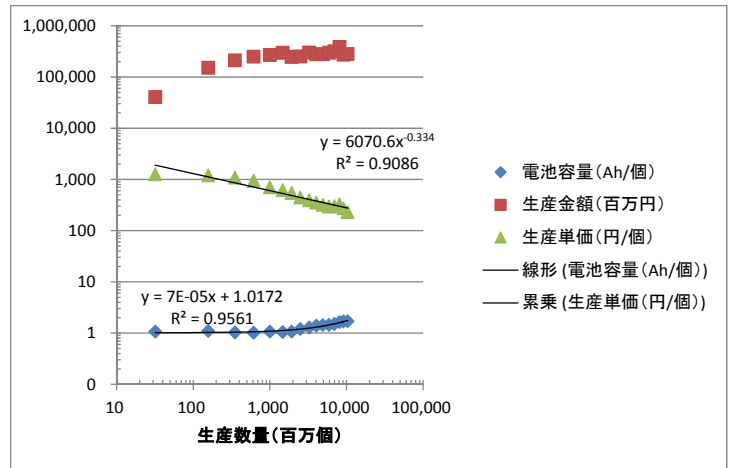


図5 リチウムイオンバッテリーの電池容量及び生産単価と生産数量との関係

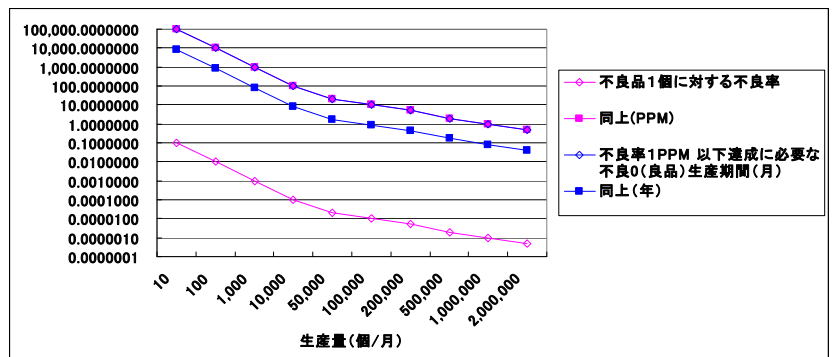


図6 標準規格品多量生産による品質レベル向上の試算例

- ・標準規格品月産10万個の場合、不良品数が1個の不良率は10ppm, 不良率1ppm以下達成に必要な不良0(良品)生産期間は10ヶ月以上
- ・不良率10ppm品質要求: 歩留まりとStatistical process Controlの向上
- ・不良率1ppmの品質要求の達成: 故障物理と教育, 品質維持技術の向上

車「リーフ」1車種で欧米において20万台/年及び日本において5万台/年の生産市場があると言われていま
す(<http://techon.nikkeibp.co.jp/article/HONSHI/20100107/179056/>参照)。

電気自動車搭載バッテリーは欧米で41万台/年及び日本において6.5万台の生産市場が予測されています
(<http://response.jp/article/2010/04/01/138602.html>参照)。ガソリン1リットル当たり28.8キロの走行を可能な
リチウムイオン電池搭載軽自動車「ワゴンR」年間生産市場は19.2万台/年(=1.6(万台/月)×12)であるこ
とが発表されています(http://headlines.yahoo.co.jp/hl?a=20120906-00000528-san-bus_all)。低床路面電車
等に加えて、高速列車及びhttp://dailynews.yahoo.co.jp/fc/economy/low_displacement_cars/?1346914099
参照)、一般住宅や平常時有効利用できる災害時避難施設(http://www.kahoku.co.jp/spe/spe_sys1062/20120801_02.htm、<http://www.kahoku.co.jp/news/2012/09/20120901t13041.htm>参照)等の太
陽光発電システム、ノートPC及び携帯電話機等に適用できる、国際標準リチウムイオンバッテリーの規格
開発とコスト低減・高信頼化を満たす量産化生産技術確立を加速する施策が期待されます。

ユーザーフレンドリーなニーズを満たす研究開発実用化に際しては、生産システム工学を効果的に駆使
し、進める必要があります。(http://www.product-lifecycle-management.com/download/MIL-STD-499B_Draft1993.pdf、<http://libsys.uah.edu/library/incose/Contents/Papers/93/93115.pdf>、NASA Systems En-
gineering Handbook (SP-6105) Systems Engineering for Space Vehicles Bryan Palaszewski with the Digital
Learning Network NASA Glenn Research Center NASA システムエンジニアリング・ハンドブック、<http://dtn-wisdom.jp/J-personal%20use/SP-6105%20NASA%20SE%20HBK-J.pdf>、<http://ci.nii.ac.jp/author?q=%E5%B1%B1%E5%BD%A2%E5%8F%B2%E9%83%8E&count=20&sortorder=1>参照)

2009年における鉄道使用電力量は20,931百万kWh/年で、産業界全体使用電力量389,951百万kWh/
年の5.4%を占めていることを説明いただきました。通信衛星の自立電源技術の波及効果例として、
海外における太陽光発電システムが鉄道に利用されている例があるとお聞きしましたが、その点は
いかがでしょうか。

磯氏：ベルギー北部アントワープとオランダ・アムステルダム間的高速鉄道用地利用太陽光発電システム
例を図7に示します。

2011年6月から、ベルギー北部アントワープとオランダ・アムステルダム間的高速鉄道の上に、長さ約
3.4km、幅14.7m、面積5万㎡の屋根に、1万6千枚、9列の太陽光発電パネルを設置した「ソーラートンネル」
(ベルギーソーラートンネル)は、年間
330万kWh/年(約950世帯分の年間使用
電力量3474kWh/世帯)の発電電力量を
高速列車の動力や照明、信号、駅の空
調などに使っているとされています。
ソーラートンネル区間外は通常の電源を
使います(<http://www.asahi.com/eco/TKY201107130233.html>、<http://www.engadget.com/2011/06/07/europes-first-solar-powered-train-tunnel-goes-live-on-belgian-h/>)。



ベルギー北部アントワープとオランダ・アムステルダム間的高速鉄道の上
に、長さ3.4km、幅14.7m、面積5万㎡の屋根に、9列、1万6千枚の太陽光
発電パネルを設置した「ソーラートンネル」は、年間330万kWh(約950世
帯分の年間電力量、3400kWh/世帯)の発電電力量を2011年6月から高
速列車の動力や照明、信号、駅の空調などに使っています。ソーラートン
ネル区間外は通常の電源を使います。



都農第1・第2太陽光発電所は、リニアモーターカーの実験線とし
て使われていた長さ3.9km、幅3.5m(面積1.3万㎡)の高架上に、
1列に12,962枚(第1:442枚、第2:12,520枚)の太陽光発電パ
ネルを設置し、発電規模は合計1,050kW(都農第1発電所:50kW/
都農第2発電所:1,000kW)、年間発電電力量は124万kWhです。



南海電気鉄道泉大津駅の太陽光発電システムは年間約
7.1万kWhの発電量が見込まれ、2011年1月からエレベ
ーターやエスカレーター、空調機、照明などの電力として利用
します。

(<http://www.asahi.com/eco/TKY201107130233.html>
<http://www.miyazaki-solarway.com/service/index.html#con1>
http://www.jiji.com/jc/v4?id=power_generation010006
<http://www.tetsudo.com/event/3557/>を参考に作成)

図7 鉄道用地利用太陽光発電システム

ベルギーソーラートンネルプロジェクト
を主導する、再生エネルギー会社
Enfinityによると「ソーラートンネルプロ
ジェクト費用は約£14 million(129.4円/
ポンド×14million=18.1億円)、また、ベ
ルギー政府の標準的なFeed-In Tariff
(FIT) (固定価格買い取り制度)により、
ソーラートンネルプロジェクトの販売受け取り価格は€350 per MWh (116円/ユーロ×350ユーロ=4万円/
MWh=40円/kWh)」であることが述べられています([http://www.theecologist.org/green_green_living/
out_and_about/932947/the_solar_tunnel_a_greener_future_for_our_railways.html](http://www.theecologist.org/green_green_living/out_and_about/932947/the_solar_tunnel_a_greener_future_for_our_railways.html))

参照)。ベルギーソーラートンネルプロジェクトにおける年間売電収入額は1.3億円/年(=330万kWh×40円/kWh)となり、総事業費(億円)対年間売電収入額(億円/年)比は14年(=18.1億円÷1.3億円/年)と試算されます。

日本において、各地でメガソーラー計画が進行中です。ベルギーソーラートンネルプロジェクトと日本の主なメガソーラー計画との違いを説明していただけますか。

磯氏：日本における主なメガソーラー計画例を図8に示します。

メガソーラーの年間発生電力量(万kWh/年)対面積(万㎡)比の回帰直線は $Y=70.4X-112.9$ で表されます。相関係数は0.99で、年間発生電力量と面積は強い相関があります。年間発生電力量 $Y=0$ の面積 $X=112.9\div70.4=1.6$ 万㎡は太陽電池パネル設置面積に依存しない送配電、蓄電放電や附属道路等の付帯設備面積で、メガソーラー建設と発電機能維持管理等に必要な最小限の付帯設備面積と考えられます。

売電単価が42円/kWhの場合(<http://www.enecho.meti.go.jp/saiene/kaitori/kakaku.html>参照)、年間売電収入(万円/年)対面積(万㎡)比の回帰直線は $Y=297X-486.9$ で表されます。相関係数は0.99で年間売電収入と面積は強い相関があります。年間収入 $Y=0$ の面積 $X=486.9\div297=1.6$ 万㎡は、メガソーラー売電収入を得るために必要最小限のメガソーラー付帯設備面積と考えられます。

メガソーラーの総事業費は初期投資が大半を占めると考えられ、総事業費(億円)対面積(万㎡)比の回帰直線は $Y=1.9X+0.78$ で表されます。相関係数は0.99で、総事業費と面積は強い相関を示します。面積 $X=0$ の総事業費0.78億円は、面積規模に依存しない、メガソーラー事業を行うために必要な運用管理等の各種費用と考えられます。

総事業費用(億円)対年間売電収入(万円/年)比は7年(=5.5億円÷8千万円/年)(<http://www.kahoku.co.jp/news/2012/12/20121228t12035.htm>参照)から14年(=11.9億円÷8.4千万円)(<http://techon.nikkeibp.co.jp/article/NEWS/20120806/232592/?ref=ML>参照)です。

換言すれば、メガソーラーの総事業費と売電累積額が等しくなる、初期設備投資の回収見込み年数は7年～14年となりますので、メガソーラーの設計寿命目標値は8年～15年(<http://www.nta.go.jp/shiraberu/zeiho-kaishaku/joho-zeikaishaku/hojin/7142/index.htm>参照)以上が要求されます。

ベルギーソーラートンネルプロジェクトは、年間発生電力量330万kWh/年、面積5万㎡、総事業費18.1億円及び総事業費対年間売電額比14年(=18.1億円÷1.3億円/年)であり、その規模は、宮城県登米市東和町米川地区メガソーラー(<http://www.kahoku.co.jp/news/2012/07/20120714t12018.htm>参照)の年間発生電力量900万kWh/年と比べて1対2.7(=330万kWh対900万kWh)、面積21万㎡と比べて1対4.2(=5万㎡対21万㎡)、総事業費28億円と比べて1対1.5(18.1億円対28億円)及び総事業費対年間売電額比7年と比べて2対1(=14年対7年)の規模に相当します。

太陽高度が高ければ、日射量が大きくなりますので、鉄道路線の太陽光高度は、太陽光発電システムの立地条件に大きな影響を及ぼすものと考えられます。アントワープ、オアムステルダム、日本最北端駅、及び3.11地震・津波で被災した東北地域の鉄道路線主要駅では太陽高度によってどのような影響がありますか。

磯氏：オアムステルダム、アントワープ、日本最北端駅及び3.11地震・津波で被災した東北地域の鉄道路線主要駅の太陽高度計算例を表1に示します(<http://www.pveducation.org/pvcdrom/properties-of-sunlight/sun-position-calculator>参照)。

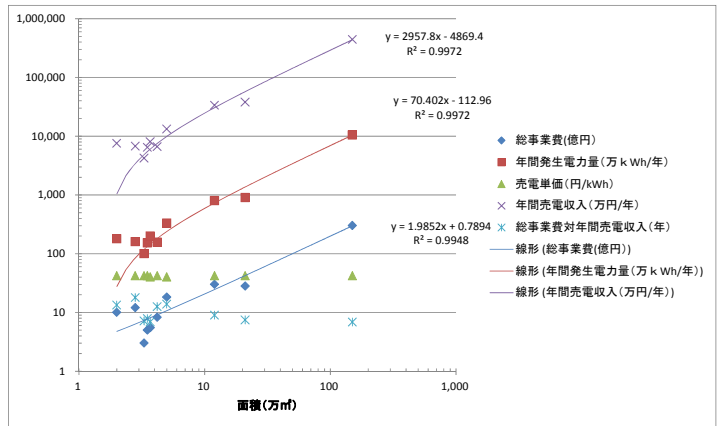


図8 主なメガソーラー計画例

ベルギーソーラートンネルは年間発生電力量330万kWh、面積5万㎡、総事業費18.1億円及び総事業費対年間売電収入比14年
宮城県登米市東和町米川地区メガソーラーの発生電力量900万kWhの2.7分の1、面積21万㎡の4.2分の1及び総事業費28億円の1.5分の1及び総事業費対年間売電収入比2倍に相当

表1 オアムステルダム、アントワープ、日本最北端駅及び3.11地震・津波で被災した東北地域の鉄道路線主要駅の太陽高度計算例欧州や日本の鉄道路線駅における太陽高度計算例

鉄道路線駅名	北緯(度)	東経(度)	夏至太陽高度(度)	冬至太陽高度(度)
アムステルダム	52.3	4.8	61.4	14.5
アントワープ	51.2	4.4	62.4	15.5
稚内(日本最北端駅)	45.4	141.6	68.4	21.5
八戸	40.5	141.9	73.4	25.5
久の浜	37.1	140.9	76.4	29.5
泉大津	34.4	135.2	79.4	32.5
都農町	31	131	82.4	35.5

日本最北端駅稚内は、アムステルダムにおける夏至太陽高度に比べて7度、冬至太陽高度に比べて7度、それぞれ高くなっており、ベルギーソーラートンネルに比べて、太陽高度立地条件は有利と考えられます。換言すれば、ベルギーソーラートンネル屋根面積5万㎡における年間発生電力量330万kWh/年の諸元例を日本の鉄道用地の年間発生電力量試算に適用し得られた結果は、最小限の試算値と考えられます。

ベルギーソーラートンネル諸元例を日本鉄道用地に適用した場合の年間電力発生量は、どのようになりますか。

磯氏:ベルギーソーラートンネル諸元例の年間電力発生量330万kWh/年は、2009年における日本の鉄道使用電力量20,931百万kWh/年の0.15%($=100 \times 3.3 \div 20,931$)に相当します。

ベルギーソーラートンネル諸元例の年間発生電力量は、屋根面積5万㎡当たり、330万kWh/年を適用して、日本の鉄道用地48,800万㎡(<http://www.stat.go.jp/data/nenkan/01.htm>参照)の65%にソーラートンネルを建設すれば、鉄道使用電力量20,935百万kWh/年($48800 \text{万} \times 0.65 \times 330 \text{万kWh/年} \div 5 \text{万} \text{㎡}$)が得られ、地産地消の鉄道使用電力システムの確立が期待されます。

宮崎県都農第1・第2太陽光発電所は、リニアモーターカーの実験線として使われていた長さ3.9km、幅3.5m(面積1.3万㎡)の高架上に12,962枚(第1:442枚+第2:12,520枚)、1列の太陽光発電パネルを設置し、発電容量は合計1,050kW(都農第1発電所:50kW/都農第2発電所:1,000kW)、年間発電電力量は124万kWh/年(<http://www.miyazaki-solarway.com/service/index.html>, http://www.jiji.com/jc/v4?id=power_generation010006参照)で、ベルギーソーラートンネル年間発電電力量330万kWh/年の37.5%($=100 \times 124 \div 330$)の規模です。

南海電気鉄道泉大津駅の太陽光発電システムは年間約7.1万kWh/年の発電電力量が見込まれ、2011年1月からエレベーターやエスカレーター、空調機、照明などの電力として利用されています(<http://www.tetsudo.com/event/3557/>参照)。この電力量は、ベルギーソーラートンネルの年間発電電力量330万kWh/年の2.1%($=100 \times 7.1 \div 330$)の規模です。

3.11地震・津波で被災した東北の鉄道例を図9に示します(<http://www.kahoku.co.jp/news/2011/09/20110911t71005.htm>を参考に作成)。3.11地震・津波で被災したJRの在来線八戸、山田、大船渡、気仙沼、石巻、仙石、常磐の7線総路線距離328.6kmや三陸鉄道(宮古市)路線距離107.6kmは内陸移転や高台移転ルートの検討が進められています。(<http://www.pveducation.org/pvc/drom/properties-of-sunlight/sun-position-calculator>参照)。

3.11地震・津波で被災した三陸沿岸の鉄道をリチウムイオンバッテリー駆動式・架線レス電車技術を適用電化して再興する場合に、必要なソーラートンネルの発電電力量はどの程度になるでしょうか。

札幌市における、リチウムイオンバッテリー駆動式・架線レス低床路面電車の走行実験成果とその後の研究開発実用化成果 (http://www.h2.dion.ne.jp/~syuchan/slrt/slrt_opinion_2007-01.html, <http://bunken.rtri.or.jp/PDF/cdroms1/0004/2009/0004004941.pdf>参照)を生かす、三陸沿岸の鉄道ソーラートンネルとバッテリートラムイメージ例を図10に示します。三陸沿岸の鉄道ソーラートンネルは、三陸沿岸観光資源の一つ



東北の鉄道は、東日本大震災の津波で駅舎やレールが流されるなど大きな被害を受けた沿岸部で不通が続いている。周辺住宅地の高台移転の可能性もあり、復旧の見通しが立たない区間も多い。JRの在来線は八戸、山田、大船渡、気仙沼、石巻、仙石、常磐の7線で計328.6キロが運休している。このうち、八戸線は来春に久慈—八戸間の全線が開通予定だ。

他の路線は全線復旧のめどが立っていない。JR東日本の清野智社長は、2011年4月の会見で「(在来線は)責任を持って復旧させる」と明言。運休区間には壊滅的な被害を受けた地域が含まれるため、JRは宅地の高台移転などの動きを見据えた上で本格復旧に乗り出す考えだ。具体的には、宮城県山元町が8月末、被災した常磐線を内陸に移転するルート案を公表しており、JRも既に技術的な検討に入っている。第三セクターの三陸鉄道(宮古市)は橋や駅など317カ所に被害が出たため、北リアス線の一部と南リアス線の全線が運休している。復旧費は110億円と見込まれ、国の支援策が固まれば年内にも工事に着手する。段階的に運行区間を広げ、2014年4月に全線(107.6キロ)の再開を目指す。

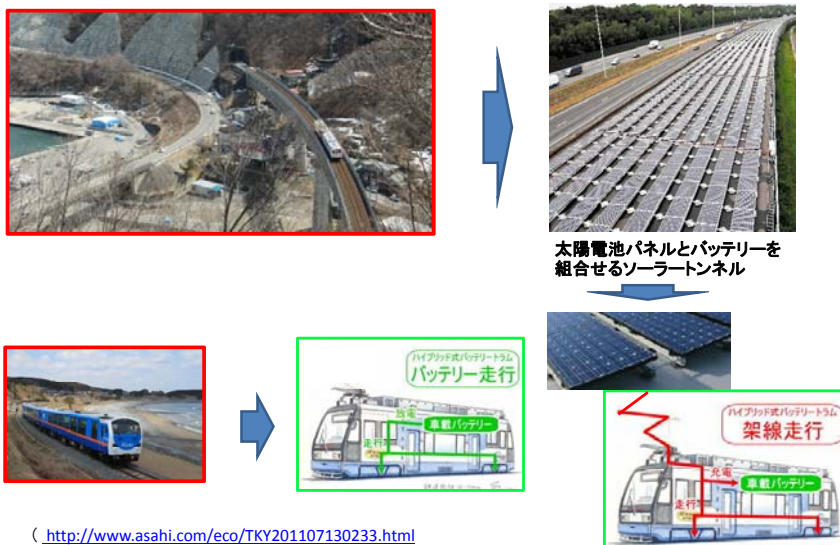
(<http://www.kahoku.co.jp/news/2011/09/20110911t71005.htm>を参考に作成)

図9 3.11地震・津波で被災した岩手・宮城・福島の鉄道例

である景観を生かす必要があります。トンネルから出た電車はバッテリー駆動走行することにより、乗客は架線・支柱等の影響を受けずに、三陸沿岸の四季折々の開けた景色を楽しむことが期待できます。被災したJRの在来線八戸、山田、大船渡、気仙沼、石巻、仙石、常磐の7線総路線距離328.6kmにおけるソーラートンネルの諸元を検討します。三陸沿岸の鉄道ソーラートンネルの屋根幅にベルギーソーラートンネル3列タイプ太陽光発電パネル諸元を適用すると、屋根幅4.9m(=14.7m÷3)が得られます。屋根幅4.9mはJR東日本209系電車の全幅2.95m(<http://ja.wikipedia.org/wiki/JR%E6%9D%B1%E6%97%A5%E6%9C%AC209%E7%B3%BB%E9%9B%BB%E8%BB%8A>参照)の1.6倍(=4.9m÷2.95m)及び狭軌幅1.0m(<http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%8B%AD%E8%BB%8C>参照)の4.9倍(=4.9m÷1.0m)です。

被災したJRの在来線八戸、山田、大船渡、気仙沼、石巻、仙石、常磐の7線総路線距離328.6kmの50%に、ベルギーソーラートンネル3列タイプ太陽光発電パネル諸元を適用すると、屋根幅4.9m、屋根長さ164km(=328km×0.5)ソーラートンネル屋根面積80.3万㎡(=4.9m×164,000m)から、発生電力量5,299万kWh/年(=80.3万㎡×330万kWh/年÷5万㎡)の試算結果が得られます。

電力量料金14円/kWhとすれば([http://www.enecho.meti.go.jp/denkihp/shiryo/ryokin.pdf](http://www.enecho.meti.go.jp/denkihp/shiryo/ryokin.pdf#search=http://www.enecho.meti.go.jp/denkihp/shiryo/ryokin.pdf)参照)、年間電力量料金換算額は7.4億円(74,186万円=



(<http://www.asahi.com/eco/TKY201107130233.html>
http://www.h2.dion.ne.jp/~syuchan/slrt/slrt_opinion_2007-01.html
<http://image.search.yahoo.co.jp/search?rkf=2&ei=UTF-8&p=%E4%B8%89%E9%99%B8%E9%89%84%E9%81%93+%E5%BE%A9%E6%97%A7#>を参考に作成)

図10 三陸沿岸の鉄道ソーラートンネルとバッテリートラムイメージ例

5, 299万 kWh×14円 /kWh)となり、鉄道線路使用料収入72.12億円 (<http://toushi.kankei.me/docs/text/S0008H5J> 参照)の10.3%(=100×7.4÷72.12)に相当します。

被災した三陸鉄道(宮古市)路線距離107.6kmを3.11地震・津波被災の復興の施策の一環として、最高速が電車の1/2強で、燃費は電車の2倍超といわれている気動車(<http://ja.wikipedia.org/wiki/%E6%B0%97%E5%8B%95%E8%BB%8A>参照)から電車化へ転換する場合の電力源として重要な役割が期待される、ソーラートンネルの検討例について説明していただけますか。

磯氏: 鉄道路線百km当りの使用電力量は、公表されている、2007年における鉄道年間使用電力量21,355百万kWh/年(平成22年電気事業便覧参照)及び鉄道電化率61.8%、電化区間15.2千km (<http://www.mlit.go.jp/statistics/pdf/23000000x023.pdf>参照)を用いて、140.4万kWh/百km(=21,355百万kWh/年÷152百km)です。三陸鉄道(宮古市)路線距離107.6kmの所要年間電力量は151.0万kWh(=1.076百km×140.4万kWh/百km)と試算されます。

所要年間電力量151.0万kWh/年は、長さ約3.4km、幅14.7m、9列の太陽光発電パネル設備のベルギーソーラートンネルプロジェクト、年間発生電力量330万kWh/年の2.2分の1(=330÷151)です。

三陸鉄道ソーラートンネル屋根幅をベルギーソーラートンネル屋根幅の3分の1とし、屋根幅4.9m(=14.7÷3)、3列(=9列÷3)のソーラートンネルにすれば、三陸鉄道ソーラートンネル長さは4.6{(3.4km÷2.2)×(9列÷3列)}kmになります。総事業費は8.2億円(=18.1÷2.2)の試算となります。

更に、長さ4.6kmの同じ規格ソーラートンネルを1基増設すれば、売電価格(<http://www.enecho.meti.go.jp/saiene/kaitori/kakaku.html>参照)に比例した売電収入が得られ、13年(8.2億円÷(42円/kWh×151万kWh/年))目に総事業費は売電累積収入が同じになり、14年目から売電累積収入は総事業費を上回ります。

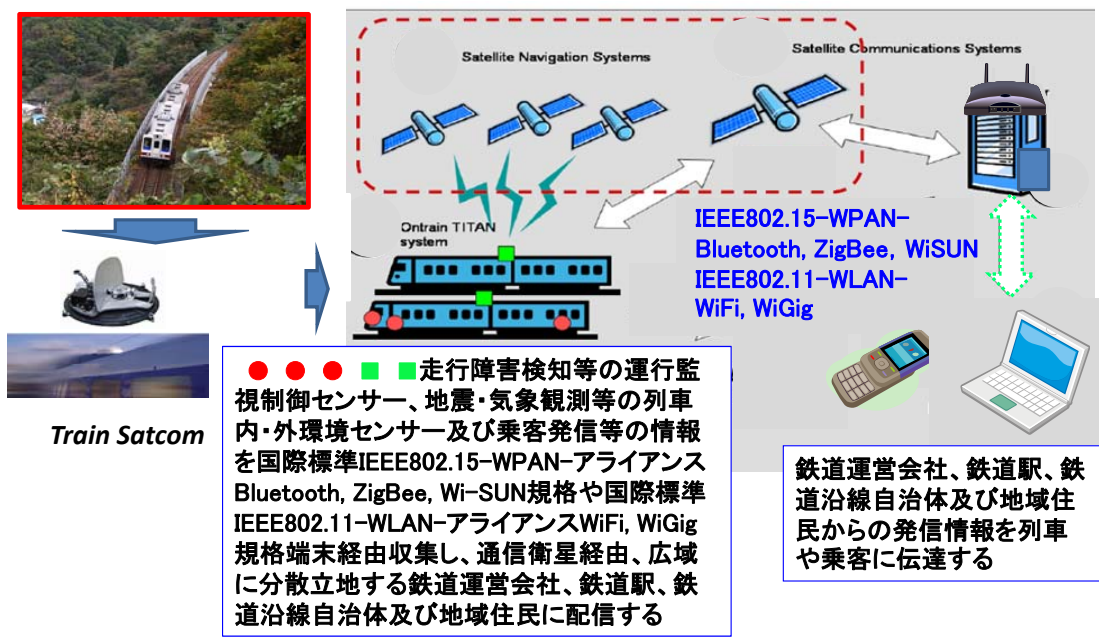
三陸鉄道ソーラートンネルの設計寿命を20年(<http://www.nta.go.jp/shiraberu/zeiho-kaishaku/joho-zeikaishaku/hojin/7142/index.htm> 及び<http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%A4%AA%E9%99%BD%E5%85%89%E7%99%BA%E9%9B%BB>参照)とすれば、14年目から7年間で4.4億円(=7年×0.63億円/年)の売電収入が期待できます。この売電収入は三陸鉄道関連事業営業収益1.1億円(<http://www.sanrikutetsudou.com/settlement>参照)の4倍(=4.4億円÷1.1億円)に相当します。

被災した三陸鉄道(宮古市)総延長距離107.6kmの鉄道用地の50%に、3列タイプ太陽光発電パネルのソーラートンネルを建設すれば、屋根幅4.9m(=14.7m÷3)、屋根長さ107.6km×0.5=53.8kmとなり、ソーラートンネル屋根面積は26.3万㎡(=4.9m×53,800m)で、宮城県登米市東和町米川地区メガソーラー面積21万㎡(<http://www.kahoku.co.jp/news/2012/07/20120714t12018.htm>参照)の1.2(=26.3÷21)倍に相当します。

被災した三陸鉄道(宮古市)には年間発生電力量は17,358万kWh(=26.3万㎡×330万kWh÷5万㎡)のメガソーラー資源が潜在し、鉄道用地に建設されるソーラートンネルは、列車及び駅施設への電力供給サービスに加えて、駅前・中施設を拠点する電気自動車、電動自転車、地上携帯電話機や平常時の地上通信不感地域における衛星電話機等への充電サービスステーション機能が期待できます。そして、ガソリンに代表される「燃料油」の需要減に伴い、減少続ける「街角ガソリンスタンド(給油所)」(<http://www.kahoku.co.jp/shasetsu/2013/01/20130113s01.htm>参照)から、駅前・中充電サービスステーションへの新たなパラダイムシフトと新産業創出が待望されます。

被災した三陸鉄道沿線周辺地域は地上携帯電話不感地域が多く(<http://servicearea.nttdocomo.co.jp/inet/GoRegcorpServlet?rgcd=02&cmcd=FOMA&scale=500000&lat=39.700807&lot=141.156203#>参照)、平常時における自立電源装備の衛星通信適用領域と考えられます。三陸沿岸列車衛星通信イメージ例を示していただけますか。

磯氏: 三陸沿岸列車衛星通信イメージを図11に示します(<http://iap.esa.int/sites/default/files/1.6.5%20-%20Dumville%20-%2020IRISS.pdf#search='Train%20Satcom'>, <http://www.orbit-cs.com/ku-band-train-satcom-antenna-system>を参考に作成)。走行障害検知等の運行監視制御センサー、地震・気象観測等の列車内・外環境センサー及び乗客発信等の情報を国際標準IEEE802.15-WPAN(<http://www.ieee802.org/15/>参照)-アライアンスBluetooth, ZigBee, WiSUN規格やIEEE802.11-WLAN(<http://ieee802.org/11/>参照)-アライアンスWiFi, WiGig規格の端末経由で収集し、通信衛星経由、広域に分散立地する鉄道運営会社、鉄道駅、鉄道沿線自治体及び地域住民に配信する一方、鉄道運営会社、鉄道駅、鉄道沿線自治体及び地域住民から



(<http://iap.esa.int/sites/default/files/1.6.5%20-%20Dumville%20-%20IRISS.pdf#search='Train%20Satcom'>
<http://www.orbit-cs.com/ku-band-train-satcom-antenna-system>
<http://techon.nikkeibp.co.jp/article/EVENT/20130108/259132/?ref=ML>を参考に作成)

図11 三陸沿岸列車衛星通信のイメージ例

の発信情報を列車や乗客に伝達します。国際標準IEEE802.15-WPAN 及びIEEE802.11-WLAN-アライアンスWiGig (<http://www.tensorcom.com/news.html>参照)規格端末は、ギガビットクラスの非圧縮映像信号処理伝送による超高速映像伝送やセンサーデータファイル転送が期待でき、早期地震検知システム用無線端末として早期導入施策が必要と考えます。被災したJRの在来線や三陸沿岸鉄道における3.11東日本震災復興・新興施策の一環として、リチウムイオンバッテリー駆動式・架線レス電車化と列車衛星通信システムの開発・導入施策の加速が待たれます。そして、地球上において資源地域が偏在している石油エネルギー依存の気動車 (<http://ja.wikipedia.org/wiki/%E6%B0%97%E5%8B%95%E8%BB%8A>参照)から電車への転換を図り、電化率100%鉄道システムの普及促進が望まれます。

さらに、開発・導入成果は、電化率の低いアジア、南北アメリカ及び欧州鉄道市場への展開が期待されます。

ありがとうございました。■

著者紹介

磯 彰夫

昭42東北大学大学院理学研究科修士課程了。同年電電公社電気通信研究所入社。昭48電電公社横須賀電気通信研究所。昭49宇宙開発事業団(NASDA)実用衛星設計グループ(出向)。昭53電電公社横須賀電気通信研究所。昭和62宇宙通信基礎技術研究所(SCR)出向。平成3NTT無線システム研究所。平4三菱電機鎌倉製作所入社。平14エム・シー・シー入社。平成19独立行政法人情報通信研究機構新世代ワイヤレス研究センターコピキタスマバイルグループ、現在株式会社アイソ・スペースネット・リサーチ代表取締役。工学博士。AIAA, IEEE, AFCEA, 電子情報通信学会, 各会員