

早期検知と脱線

中村 豊¹

¹株式会社システムアンドデータリサーチ
(〒186-0003 東京都国立市富士見台3-25-3)

E-mail: yutaka@sdr.co.jp

2004年新潟県中越地震では営業運転中の新幹線列車が初めて脱線したが、種々の事前対策が功を奏し、また幸運にも恵まれて災害とはならなかった。新幹線には地震対策のひとつとして、不測の事態が発生したときに災害の程度をできるだけ軽減させるための早期検知システムが設置されている。今回の地震でも、上越新幹線に設置されたコンパクトコレダスが、震央地域でP波検知後1秒で警報を発生し、震央域の全列車を緊急停止させた。脱線列車に対しては、警報から本格的な地震動が到来するまで3秒弱しかなかったが、被災したかも知れないところを130m近く走行せずに済み、対向列車突入の危険性も大幅に低減した。直下に発生した地震に対しても、コンパクトコレダスは想定どおり効果を発揮することが実証された。また、今回の脱線現象を分析した結果、主要な脱線は特定の高架橋ブロック間の著大な相対変位によって順次発生したと推定され、地震後、脱線車輜がレール上を胴体着陸状態で滑走して著大な摩擦熱が発生し、列車通過とともにレールの変形・破断が発生したと想定された。

Key Words : *Earthquake Early Warning, the 2004 Niigataken-Chuetsu Earthquake, Shinkansen Derailment, Toki #325, Compact UrEDAS, UrEDAS, FREQL, On-site Alert, Front Alert*

1. はじめに

早期検知システムはさまざまな地震対策のひとつであり、地震に遭遇したときに生じるかもしれない災害をできるだけ軽減することを目的に開発された。新幹線の場合、大きな地震動に襲われる前にできるだけ減速して被災箇所へ突入する危険を少なくするとともに、災害発生時の衝撃を緩和する効果を期待している。今回の地震で指摘された脱線列車と対向列車の衝突防止効果は、被災箇所への突入防止効果のひとつである。

早期検知システムは、設備の耐震強化など多くのハード面の対策を十分に施してもなお予測できない事態が発生する可能性があることを踏まえて、その際にも災害の程度をできるだけ軽減するための方策を追求して生まれたものである。したがって、早期検知システムが機能しても、その効力が発揮される事態が発生しないのが望ましい。

新潟県中越地震では早期検知システムの働きは脱線事故に関連して注目された。我々も、耐震安全性に関連して、1994年のノースリッジ地震(米国)や1995年の阪神大震災を契機に脱線現象について関心を持ち続けている。ここでは、早期検知システムの動作状況とともに、今回の脱線現象がどのようなものであったのか、を公開資料を中心に独自に入手した資料を交えて分析する。

2. 早期検知システムの現状

現在、新幹線で使われているP波検知システムは3種ある。コレダス(UrEDAS: Urgent Earthquake Detection and Alarm System, 早期地震動検知警報システム)とコンパクトコレダス(Compact UrEDAS)および気象庁と鉄道総研が共同開発したものの(以下気象庁システムと呼ぶ)である。

コレダスは、遠方の大地震対応として開発されたもので、震源地域に置かれ、P波検知後3秒程度で必要な警報を発信する(前線検知・警報)。東海道新幹線(1992年~)および山陽新幹線(1996年~)で正式に使われている。

コンパクトコレダスは、阪神大震災の状況をみて開発したもので、直下地震を含めた近傍地震を対象に、警報が必要な場所において、P波を検知し1秒程度で必要な警報を発信する(現場警報/オンサイト警報)。なお、いきなり大きな地震動に襲われた場合には瞬間的に警報を発信する機能も併せて持っている。盛岡以南の東北新幹線・上越新幹線・長野新幹線の沿線検知点(合計43地点)と海岸線検知点(太平洋側8地点、日本海側5地点)で使われている(1998年~)。なお、海岸線では警報処理時間を3秒に設定しているが、沿線と同じ1秒に変更するのはすぐにでも可能である。

以上のシステムは、実際に大きな地震動の中でも期待どおりの性能を発揮することが実際の地震で確認されている。和歌山県では、津波警報システムの

中核として、2000年からユレダスを串本に試験設置している。東京メトロでは、2000年からコンパクトユレダスのP波警報機能を正式稼働させている。そのほか、東京消防庁のハイパーレスキュー隊では、2005年からフレックル(FREQL: Fast Response Equipment against Quake Load, 地震動即時対応器)を地震直後の救難活動を余震から守るために装備している。フレックルは、ユレダスとコンパクトユレダスの機能を受け継ぎ、警報速度をそれぞれ1秒と1秒以下に迅速化したものである。センサー内蔵の本体は一辺12cmの立方体と小さいため、簡単に持ち運びできる。ハイパーレスキュー部隊のような早期検知システムの利用法が今後広まっていくことを期待したい。なお、カリフォルニア大学バークレー地震研究所やカリフォルニア工科大学地震研究所などとのユレダス共同観測結果によれば、通常使用範囲の半径200km内のみならず、10000kmを超える遠地大地震についても大まかな震源諸元が推定できる可能性が見出され、地震を感じない地域に対する津波警報システムとしても利用できるのではないかと期待している。

気象庁システムはユレダスと同様、遠方の大地震に対応するシステムとして半径200km以内に発生する地震に対して、P波検知後最短2秒で警報を出すことを目標に開発された。しかし、気象庁の試験観測結果によれば、2秒警報は不可能で、早くても4秒程度、時には7秒を越える。現行ユレダスよりも早い警報を目指したが実際にはかなり遅くなってしまった。しかし、気象庁の緊急地震速報用などに採用されている。

3. 2004年新潟県中越地震時のコンパクトユレダスの働き

(1) 地震発生時の状況整理

気象庁によると、本地震は、2004年10月23日17時56分0.3秒に発生し、その諸元(暫定値)は以下のとおりである。

震央：北緯37度17.3分，東経138度52.2分
深さ：13km
規模：M6.8

この地震は、新幹線の営業時間帯に発生して新幹線に被害をもたらした4番目の地震である。早期検知システム設備後では、2001年芸予地震(山陽新幹線)、2003年宮城県沖の地震(東北新幹線)に続いて3例目になる。

ただし、芸予地震は遠地地震対応のユレダスが対象とする地震ではなく、通常の沿線地震計がいち早く警報を発している。この地震では新幹線の高架橋が損傷した。この時も多くの列車が走行中に大きな地震動に遭遇しているが脱線していない。走行中の列車の乗客・乗員はほとんど地震に気づかなかったと

報告されている。例外は停車駅東広島に向かって減速中の「こだま642号」(上り)で、乗客は脱線したのではないかと思うほど大きく揺れたと証言している(文献1)。いずれの地点でも地震動の大きさは300Gal程度だったと推定される。この最大加速度は、JRの警報地震計の周波数特性：0.1Hz～5Hzによる水平合成加速度の最大値(5HzPGA)である。以下、特に断らない限り最大加速度とはこれを指す。

宮城県沖の地震では、深さ70kmの震源直上にあった海岸線のコンパクトユレダスが地震P波が地上に現れた瞬間に捕捉して危険と判断し、海岸線検知点としての設定通り3秒後に、警報を仙台-盛岡間に発信している。これは、新幹線沿線のコンパクトユレダスがP波を捕らえる前の警報である。その後、沿線のコンパクトユレダスのいくつかはP波検知後1秒で警報を出し、その後の500Galを越す主要動によって当該検知点の範囲内にある高架橋の柱が損傷した。幸いにも、地震が発生した時間に仙台-盛岡間を走行中の列車は、駅に停車中か、停止直前または発車直後であり警報によりすぐさま停止して、脱線した列車はなかった。

新潟県中越地震の震源域での強震観測によれば、地震動の大きさは最大1167Gal(K-NET小千谷)で、新幹線沿線の被害区間では、846Gal(新川口変電所)、434Gal(新長岡補助き電区分所)であった。

地震当日(2004年10月23日)は、朝方合計5mmの降雨があり、気温は12度から15度、風は1m/sから2m/s、天候は曇、日照時間は合計0.2時間であった。日没はおよそ17時、地震発生は17時56分であるから日没後約1時間のかかなり暗い状況だった。雲は夜になって無くなったと考えられ、少なくとも、脱線車両の乗客が地震後4時間経って長岡駅に向かって歩いたときは、月明かりで照明が不要な程であった。

(2) 新幹線の運行状況

早期検知システムが早期警報を出した区間(新川口変電所と新長岡補助き電区分所)が担当するエリア)にいた列車は次の4本である(図3参照)。北から、とき361号(下り、燕三条から東京方へ約12kmの地点の高架橋上で停車、乗客238人)、とき406号(上り、長岡駅に差し掛かって停車)、とき325号(下り、脱線して長岡駅まで6kmの地点に停車、乗客151人)、とき322号(上り、浦佐駅から東京寄り約3.4kmの地点で停車、乗客316人)である。なお、脱線した「とき325号(下り、200系10両K25編成)」には、運転士、車掌および客室販売員の3名が乗務し、乗客は151人であった。脱線付近の線路はほぼ南北に直線的に伸びている。したがって、その運行に大きな影響を与える地震動は東西方向成分となる。

(3) コンパクトユレダスの働き

200Gal(=cm/s²)以上を検知した震源域付近の新幹線沿線検知点を北から列挙すると、新押切SP(き電区分所、203Gal)、新長岡SSP(補助き電区分所、

434Gal), 新川口SS(変電所, 846Gal), 新六日町SP(き電区分所, 270Gal)となる。このうち, P波警報(P波検知後1秒)も発信したのは新川口SSと新長岡SSPの2カ所である。他は40Gal加速度警報だけを発信している。

表1 コンパクトユレダスの動作

検知点	上越新幹線沿線地震検知点(一部)				
	新六日町	新川口	滝谷T出口	新長岡	新押切
5HzPGA (Gal)	270	846		434	203.0
Rlmax	4.9	6.6		5.8	5.3
検知時間	17時56分	17時56分	17時56分	17時56分	17時56分
地震10Gal	8秒	3秒	秒	4秒	8秒
推定P波	4.4	2.6	3.0	3.5	7.2
推定P警報		3.6	3.6	4.5	
R12超過	6.4	2.8	2.8	4.1	9.2
10Gal超	6.6	3.3		4.7	10.1
40Gal超	9.4	4.2		6.0	11.2
Amax	11.4	7.7		9.5	15.7
Rlmax	13.4	7.8		10.6	19.2

* 5HzPGAはJR警報特性の水平合成最大加速度

* RIはリアルタイム震度、最大値は計測震度とほぼ一致

* P波検知時刻は気象庁震源を基に推定

脱線した「とき325号」が地震発生時にいたと思われる滝谷トンネル出口付近をはじめ, P波警報を発した沿線検知点でのP波到達時間などを0.1秒単位で推定して表1に示す。R12はリアルタイム震度2を表し, これは計測震度で2に相当する。*Galは5HzPGAでの加速度である。なお, コンパクトユレダスの警報ログには10Gal超過時刻の1秒未満を切り捨てたものが各検知点の発震時刻として記録される。

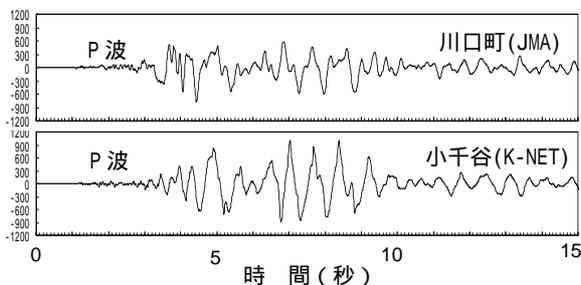


図1 震源地域の強震加速度波形例(単位:Gal)

図1に震源地域での強震記録(EW方向成分)を例示する。震源直上の川口町の記録(JMA川口)をみると, 東西方向が大きく揺れ始めるのはP波検知後2秒以上経過してからである。トンネル出口とほぼ同じ震央距離と推定される小千谷地点では, K-NET, 気象庁の記録とも, P波到来から東西方向の大きな揺れまでの時間は3.0秒程度であり, トンネル出口ではP波から警報まで約0.6秒と推定されるので, 警報から大きな揺れまでの時間は2.4秒程度あったと推定される。極めて短い時間であるが, 走行距離にすると約130mであり, 被災しているかも知れない130mの区間を走行しなくても済んだこととなる。図2に, 深さ13kmの震源から, 地震波動が拡がり, 検知点や脱線地点などに到達するさまを模式的に示す。

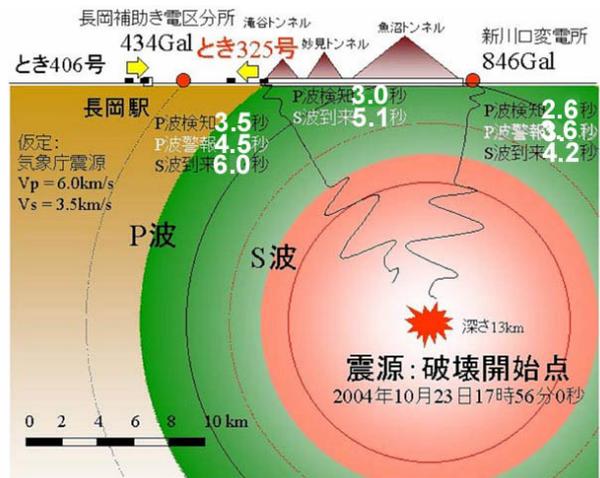
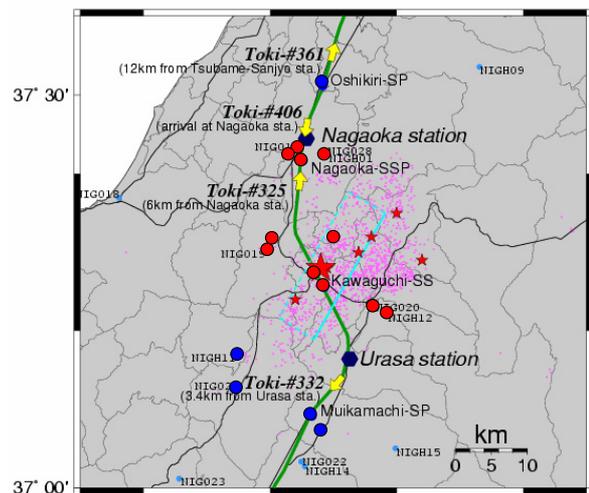


図2 地震波動伝播の模式図

川口町の記録も小千谷の記録も, 大きく揺れ始めてから一旦収束した大きくなるという特徴的な地震の様子を示している。脱線箇所とほぼ同じ震源距離の小千谷の記録でみると, 大きな揺れの始めから終わりまでの継続時間は5-6秒である。

なお, 地震後の報道では, 運転士による非常ブレーキ操作が強調されたが, 運転士はコンパクトユレダスの警報によって停電したのを見て, 非常ブレーキの操作を行っている。つまり, コンパクトユレダスが警報を発して周辺への給電を停止し走行中の列車に緊急ブレーキを作動させた。その後, その警報で運転士が地震を認識して非常ブレーキを操作したということである。

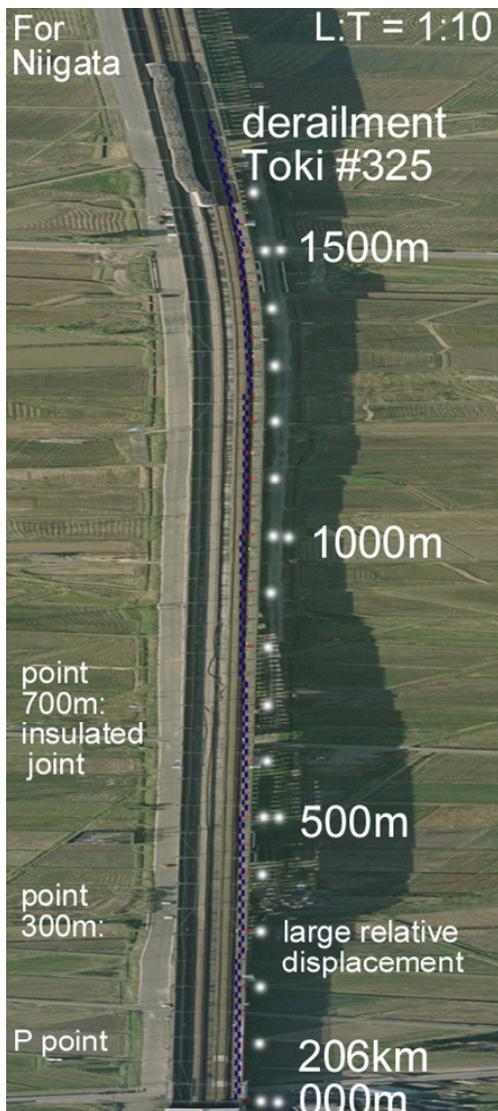


- コンパクトユレダスがあれば1秒でP波警報
- コンパクトユレダスはP波警報を出さない
- は主な震央,
- ピンクの点群は余震分布,
- 黄色い矢印は地震直後の新幹線列車位置と方向

図3 震央付近の状況(震央,余震分布,新幹線列車位置,強震観測点など)

図3には強震記録を用いて、上越新幹線の沿線コンパクトユレダスと同じ警報条件で動作状況をシミュレートした結果を示している。これによると、今回の中越地震の被害地域においては、いずれもP波検知後1秒で警報が発信されることがわかる。

なお、コンパクトユレダスと同等のP波警報レベルで、新川口SSや新長岡SSPでの記録波形に対して、最速警報システム「フレックル」の動作をシミュレーションした結果、それぞれP波検知後0.2秒、0.6秒での警報発信が確認された。現行のコンパクトユレダスよりもそれぞれ0.8秒、0.4秒の短縮が見込まれる。この時、トンネル出口ではP波到来前に警報を受けることになる。これは地震検知点を20km間隔から10km間隔に増やす効果と同等またはそれ以上の効果である。



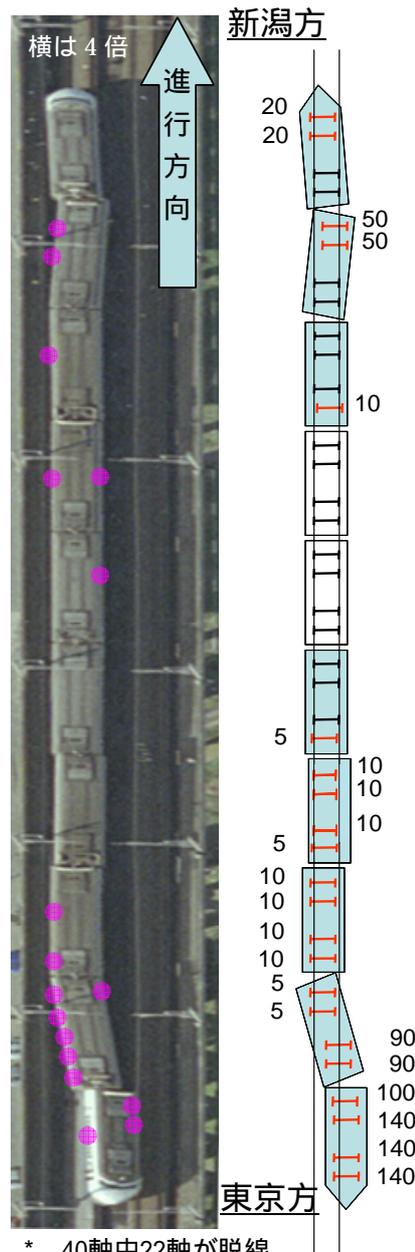
とき 325 号脱線やレール変状の状況などがわかる。次々に脱線したと考えられる 300m 地点付近での軌道スラブの色調変化も見てとれる。

図 4 脱線現場の航空写真

4. とき325号の脱線

(1) 報道された脱線状況

地震発生時、「とき 325 号」は滝谷トンネル付近にいた。滝谷トンネルはキロ程 205km700m（東京起点）までであるが 206km000m 付近までトンネル状の雪覆いで覆われている。本報告ではトンネル出口とはこの 206km000m を指す。また地点位置をここからの距離で示す。図 4 に脱線現場の航空写真を示す。写真の横方向（ほぼ東西方向）は 10 倍に強調しているが、レールの変状がみてとれる。



- * 40軸中22軸が脱線
 - * 1号車は排水溝に落下、車体は約30度傾斜
- 印は損傷した窓の位置

図5 とき325号脱線状況

新聞報道による事故調査委員会の発表によれば、脱線状況は以下のとおりである。

大宮起点 206km191m 付近の右側レール上から幅数 mm の細い傷が付き始め、約 16 m続いた後、レールの右側に落ちた痕跡が残っていた。何号車の車輪がこの傷をつけたかは不明である。最後尾停止位置から 750m 手前（206km830m 付近）のところで最後尾車両両が排水溝に落ちた。ここから最初の脱線箇所までは、640m 程度あり、最初の脱線箇所から停止した先頭車まで 1.6km 程度ある。

全 40 軸中 22 軸が脱線、最後尾車両は約 30 度傾斜した。脱線状況を図 5 に示す。

(2) 目撃証言に基づく地震発生状況と脱線状況

NHK 報道番組で放映された目撃者（当時高校三年生，男性）の証言（目撃位置は図 6 参照，トンネル出口から西北西に約 700m）によれば，突然の揺れを感じ，光を感じ，何事かと思っているとゴーという音がしたので振り返ると新幹線が走っていた．新幹線はトンネルを出た後，しばらくは普通に走り，いきなり火花を散らし始めた，滑るように停車位置まで走っていった．



図 6 目撃地点と新幹線の関係

これからわかることは以下のとおり．なお，その後，直接本人に取材した結果による補足を（ ）内に示す．

P 波を感じた，
直後に光を感じた（紫色の光，スパーク），
次にゴーという音を感じている（本人の感覚では から 2 秒くらい後），
振り向いて，トンネルを出つつある新幹線を確認したが，トンネルを出てしばらくは普通に走っていた，
いきなり火花を散らし始め（新幹線全体がトンネルから出て 50m-100m 走った後，先頭から火花に包まれ始め，やがて全体が火花に覆われた），火花の高さは新幹線の 2 倍くらいだった，滑るように走って止まった．

の証言は非常に興味深い．この証言は，脱線が大きな地震動で一気に生じたものではなく，ある地点を通過する際に，順次脱線していったことを物語っている．

また，からの証言は地震発生時の列車位置を特定するのに役立つ．図 8 に示す位置関係から目撃者が受けた P 波を「とき 325 号」もほとんど同時に受けたものと推測される．その列車がトンネルを出た時のゴーという音を，最初に地震に気づいた後，2 秒程（目撃者本人の感覚）経過して聞いている．トンネル出口付近から目撃位置まで 700m 程度あり，トンネルを出たゴーという音が目撃者に届くまでに

2 秒強を要する．つまり，地震発生時は，「とき 325 号」がトンネルから出始めた瞬間ということになる．振り向いたときには，2 秒分トンネルから出た状態で目撃されることになる．地震時の時間は長く感じられることが多いが，目撃者の感じた 2 秒という時間がもっと短かったとすれば，地震発生時の「とき 325 号」はトンネルからもう少し頭を出した状態となる．

別の目撃者（男性，目撃場所は未特定：線路近辺だと思われる）は，列車がトンネルから出てきた瞬間，火花が走ったところをみている．目撃された光が地震動の P 波によって「とき 325 号」のパンタグラフが架線から離線するときのスパークだとすると，K25 編成のパンタグラフは先頭から 3 両目 8 号車の後部（進行方向に対して，以下同じ）に位置するので，この時点でほぼトンネルから 75m 以上突き出ていたものと推測される．目撃少年の感じた光もこのスパークである可能性は高い．

今回の地震動は高周波数の上下動が P 波到来時から大きく卓越しており，地震直後に上下震動による離線が生じてスパークしても不思議ではない．もちろん，表 1 によれば，コンパクトコレダスにより P 波後 0.6 秒で停電したと考えられるので，スパークはこの前ということになる．トンネルから 75m 突き出た時点で地震の P 波を受けたとすると，スパーク時点ではパンタグラフはトンネルから出ている．これならば，暗くなった状況下でこのスパークが目撃される可能性は大きい．スパークの時点でトンネルを出たときの音は出口から約 470m ($=75/54.2 \times 340\text{m/s}$) の地点に達している．ここから目撃少年（トンネル出口から約 700m の位置）までの音の伝播時間は約 0.7 秒程度と推測される．つまり，少年は P 波の揺れを感じた後，1 秒くらい後にゴーという音を聞いたことになる．少年の感覚よりはやや短い，概ね整合する．

(3) 地震発生から火花を散らし始めるまで

航空写真によれば，トンネル出口から 100m 程のところ（先行列車がいる区間に次列車を進入させないための）P 点がある．P 点の 150m 前方（長岡寄りの 206km250m 付近）が閉塞区間の境界である．地震動が到来したときには「とき 325 号」はトンネルから 75m 程度頭を突きだした状態で閉塞区間境界のかなり手前だったと考えられるので，ATC による減速体勢には入っていなかったと考えられる．

震度 4 程度以上に相当する走行振動に曝されながら，大きく揺れ始める前に地震を感知するのは難しい．これまでも震度 5 を超える地域を走行していた列車運転士の多くが地震に気づいていない．警報システムが備えられている所以でもある．トンネル出口付近では，P 波到来後 0.6 秒程度でコンパクトコレダスの警報が届いていると考えられる．

トンネル出口付近は小千谷市とほぼ同じ震央距離であり波動の発現状況が類似していると考えれば，トンネル出口付近では，P 波に続いて約 2 秒後に S 波

が到着し、さらに約1秒経過してから本格的な揺れが始まったと考えられる。大きな揺れは5-6秒間継続し、途中1-2秒小さい部分があったと思われる。脱線地点周辺の地震動の大きさは、付近の高架橋がほとんど被災していないことから、小千谷市や川口町よりもかなり小さく、大きくても400Gal程度ではなかったかと思われる。

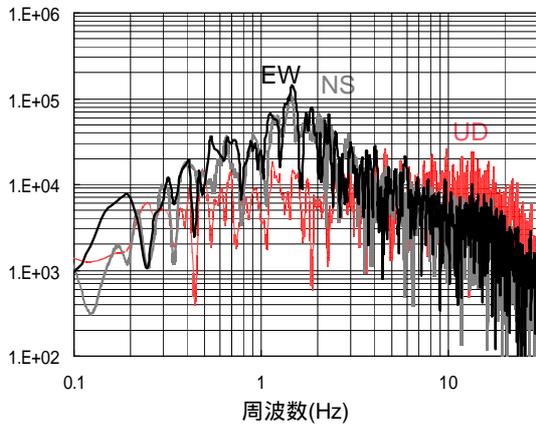


図7 K-NET 小千谷の加速度フーリエスペクトル

図7は小千谷の記録の周波数分析結果であるが、上下震動は概ね10Hz程度の高い周波数が卓越し、水平震動は、概ね0.7Hzから3Hz程度が卓越している。水平動のうち線路にほぼ直交する東西動成分は、1-2Hz程度が卓越し、新幹線列車の左右動の固有振動数に対応している。したがって、地震動により大きな左右動が励起され、「とき325号」は大きく左右にロッキング振動しながら走行したと推測される。

結局、「とき325号」はP波後S波まで2秒間、比較的周波数の高い上下動により細かく上下震動しながら、S波以後は、次第に大きく左右に揺れながら走行したものと推測される。P波初動部分の上下動ではパンタグラフの大離線が生じ、大きなスパークが発生した可能性がある。P波後、0.6秒程度で早期検知警報システムにより停電したと考えられるので、離線によるスパークはすぐに生じなくなったと思われる。大きく揺れだすまでの間は、空走時間のため、ほとんど減速していないと考えられ、この間の走行距離は、 $3 \times 54.2 = 160\text{m}$ と推測される。トンネル出口からは約240mとなり、ほぼ全車両がトンネルから出た状態で大きな震動を受け始めたことになる。先の目撃少年の話では、新幹線全体がトンネルから出た後、50m~100m走行して、火花を散らし始めたとのことである。したがって、火花を散らし始めたのは、出口から290m~340mということになり、大きく火花を散らすような脱線はこの辺りを通過するとき生じたものと推測される。

(4) 最初の脱線地点と主要な脱線地点付近の状況
一番東京よりの脱線痕跡(206km190m付近)は進行方向右側のレール踏面にあり、トンネル出口から

190mの距離にある。地震発生時には先頭車両は出口からほぼ75mの位置にあり、この脱線痕跡へは約2秒の距離にある。すなわちS波が到着した時点で、先頭車が最初の脱線地点に到達していたと考えられる。大きく揺れだすのはさらに1秒後であり、50mほど進んだところである。したがって、トンネルに一番近い脱線痕跡に関与している可能性のある車両は3両目以降となる。また、この脱線痕跡は一軸だけであり、大きく揺れ始めた震動で進行方向右側のレールに強く押しつけられた車軸のひとつ、おそらく3両目(8号車)後部台車の後部車軸が、たまたませり上がり、乗り上がり脱線したと考えられる。この時、先頭車は70m先の260m付近に達している。

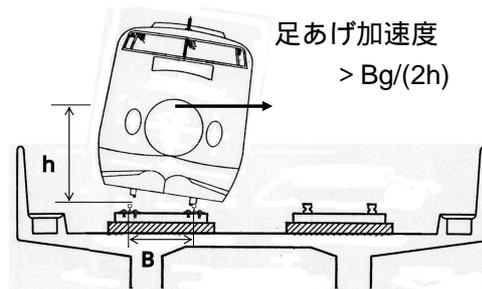
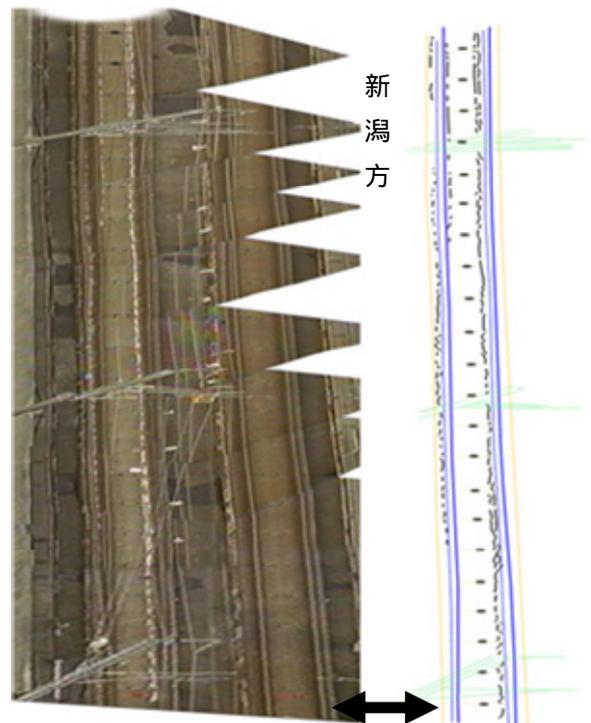


図8 足あげ加速度の見積



* 著大相対変位発生箇所(206km285m付近)
通過後の脱線状況=スラブ面の走行痕

左: 上が新潟方面、左側から撮影された報道映像を加工して作成、横方向を4倍に拡大
右: 走行痕(黒) レール(青) スラブ(黄色) および電架柱(緑)のトレース図

* 矢印は295m付近を示す
* 軌道中央の楕円はRCスラブブロックをとめる円筒形せん断キー=5m間隔

図9 大脱線開始点付近の状況

トンネル出口から 300m くらいの間は、一部耐震補強された、柱高さがほぼ揃った低い剛な高架橋が続いている。このため、すべての車輪が同じ位相で左右に揺れながら走行したと推測される。

左右動により車輪が浮く限界の水平加速度は、重心高さ 2.2m とレール幅 1.43m とから、概略 330Gal 程度と見積もられる（図 8 参照）。付近の地震動加速度はこれよりもやや大きいと考えられ、高架橋の増幅効果も考慮すると、大きな揺れの間は、左右に揺れると同時に車輪を浮かせながら走行したと考えられる。これは、脱線後のコンクリートスラブ上の走行痕跡（図 9 参照）とも整合する。

一方、トンネル出口から 300m 付近は崖状地形のため、高架橋の高さが急変している。このため、構造も一層式高架橋から 2 層式高架橋に変わる。つまり、地震動に対する高架橋の変形性能は、この地点で大きく変化しているものと推測される。高架橋の高さは概ね 5m 程度から 12m 程度へと急変しているが、設計震度が作用した時に 1cm 以下の変形に抑える規定に基づき、低い高架橋では柱幅 90cm の一層構造、高い高架橋では柱幅 110cm の二層構造となっている。この変形性能はほぼ固有振動数 2.23Hz（設計震度 0.2）～2.49Hz（設計震度 0.25）に対応する。大宮-熊谷間（上越新幹線）の高架橋（概ね高さ 9m）の実測によると、固有振動数は概ね 3.5Hz（文献 3）と規定よりも剛につくられている。

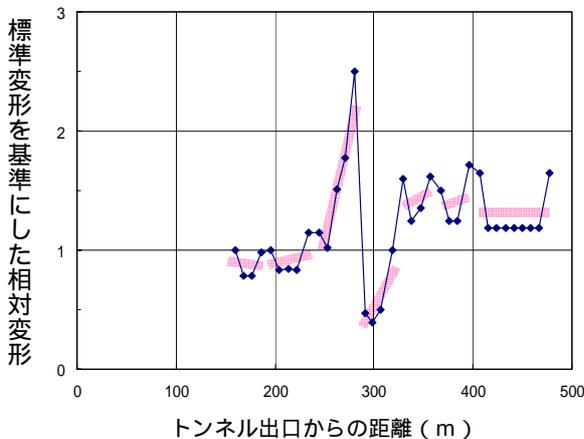


図 10 静的水平荷重に対する高架橋の変形形状

図 10 は、崖部分を中心に柱の高さや太さをもとにして、静的な加速度が作用したときの高架橋柱の変形分布を、崖上高架橋を基準にして概算したものである。

今回の地震動は 1Hz～2Hz 程度と、高架橋の固有振動数よりかなり低いので、高架橋の変形応答を静的に見積もっても大過ないとする。崖付近での柱の変形形状を図 10 に示されるように高架橋ブロック毎に平均し、滑らかに繋いだものと考え、崖の上に位置する一層式高架橋ブロックと崖を跨ぐ二層式高架橋ブロックの間には大きな相対変位が発生

することがわかる。つまり、一斉に左右の車輪を交互に上げながら進んできた列車の先頭車両が、崖地点を通過する時に、レール上の車輪がレールの大きな変位に追従できず脱線したのではなかろうか。脱線後も大きな地震動が継続する間は、左右に大きく揺れながらコンクリートスラブを傷つけたと考えられる。後続車両も同じように左右に揺れながら崖地点を通過したが、地震動の大きさの消長により、脱線したものと脱線しなかったものが生じたのであろう。間に比較的静かな部分がある地震動の様子と、前方と後方で脱線している状況は調和的である。さらに後半の地震動の方がより長いことは列車の後半でより多く脱線していることも調和的である。なお、片方の車輪を挙げた状態で、挙げた車輪の方向に投げ出されれば、ほとんど抵抗無く脱線し、レールには大きな脱線の痕跡は残らないものと想像される。

脱線後、レール踏面からコンクリートスラブ面まで約 20cm 落下する。3 号車（後ろから 3 両目）の乗客の中に、「何か下に引っ張られるような感じがして…」地震に気付いたと証言している人がいるが、この時の落下に対応しているかも知れない。

単純な落下を考えると、この間の車輪の落下に要する時間 t は、 $t = (2h/g)^{0.5} = 0.2$ 秒となる。ここに h は落下高さ、 g は重力加速度である。この間、列車は 10m 程度走行する。つまり、大きな変位が発生した地点はスラブ面の脱線痕跡箇所より約 10m 手前ということになる。最初に道床スラブに大きな傷がついている箇所は、206km295m 付近と思われるから、脱線を引き起こした大きな震動は 206km285m 付近で発生したことになる。これは図 10 の高架橋の変形図と整合する。



図 11 著大相対変位発生箇所 206km285m 付近（印）

大きな地震の揺れは、5-6 秒程度しか継続していない。195km/h で走行していた列車が一定の減速度で 1600m 走行して停止したとすれば、その減速度は約 3.3km/h/s (0.92m/s²) と見積もられる。したがって、この 5-6 秒間で 260-300m 程度走行する。大きく揺れ始めたのが 240m 付近と考えられるから、大きな地震動が収まったときには先頭車は概ね 500-540m 付近にあり、最後尾はちょうど大きな相対変位が発生する地点付近の手前が通過中と考えられる。既に大きな地震動は終わっていたかも知れず、最後尾車両（1号車）はこの時点では脱線していなかった可能性がある。

脱線車輪の走行などで破損したレール締結装置などが跳ね飛ばされ、窓ガラスを破損した。損傷状況（図 5 に付記）を見ると、進行方向左側に多い。これは、飛ばされたものが防音壁で跳ね返ったためと

考えられる。4号車と5号車の窓は損傷していないこと、全軸が脱線した3号車と4号車の後ろの2号車の窓ガラスの損傷がもっとも多いことなどから、脱線車両の1両～2両後ろの車両の窓ガラスが破損すると考えられる。1号車の窓ガラス損傷が少ないことから、2号車は一部しか脱線しなかった可能性がある。つまり、大きな地震動は2号車が285m付近を走行する時点でほぼ終了したと考えられる。300m付近の走行痕や停車位置での脱線状況を見ると、前部の台車が左側に脱線した後で大きな揺れは終了したと推定される。最後尾車両はこの時点では脱線していなかった可能性がある。以上の考察は、上述の地震終了時の車両位置関係とも矛盾しない。

(5) レールと車体の接触

脱線して車輪がスラブ面に落ちると、レール踏面と車体のボディマウント底面が接触する。その様子を図12に示す。



2号車（後から2両目）3号車寄り台車の状況、車輪がレールに密着していること、胴体がレールに接触していることなどが分かる。（NEWS23取材班提供VTRから）

図12 脱線状況の例

大きな地震動が継続している間の車体とレールの接触は、左右どちら側へ脱線したかによって異なる。すなわち、先頭車のように進行方向左側への脱線では、車体が右方向に揺れている時には右側のレールと車体底部右側が接触する。このとき、スラブ面への痕跡は右側レールの左側、すなわち軌条の内側につけられる。一方、車体が左方向に揺れている時には、スラブ面への痕跡は左側レールの左側（軌条の外側）につけられるが、左右のレールと車体の接触はないと考えられる。右側に脱線した場合には、これと逆の現象となる。すなわち、軌条内のスラブ面への痕跡がある方のレールと車体下部が接触しながら走行したと考えられる。

脱線状況を見ると、進行方向左側への脱線が比較的多く、大きな地震動の間、右側のレール上を車体が滑走した時間が長かったと推測される。左右の揺

れはほぼ半々と考えられるので、震動時間の半分の3秒程度がその滑走時間の上限と推定される。しかし、連続した滑走ではなく、摩擦による加熱量は相対的に少なかったものと推測される。しかし、地震動が収まった後は、脱線部分では車体がレール上に

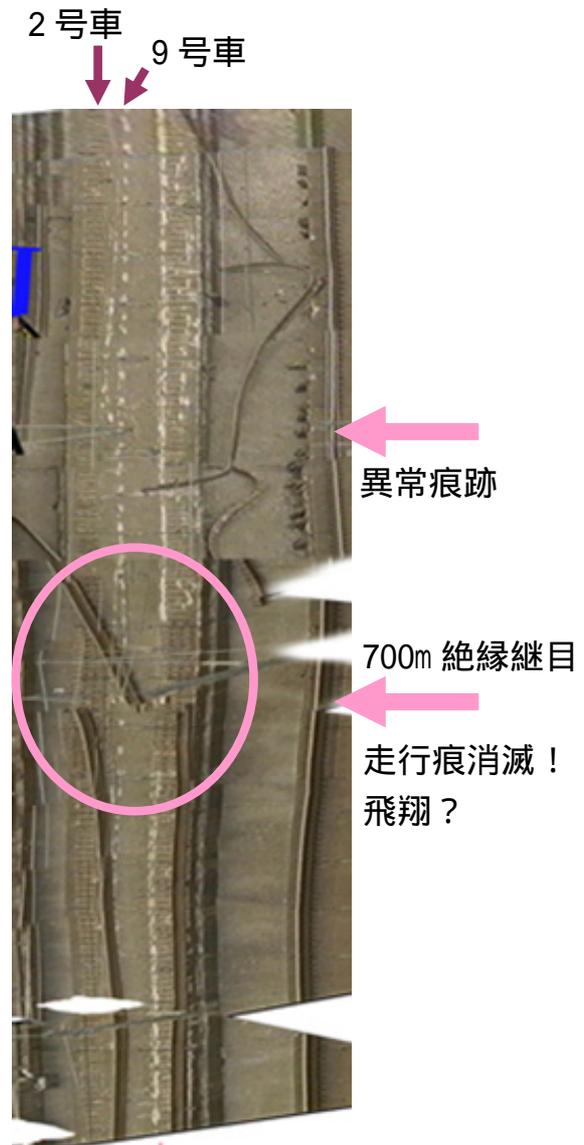
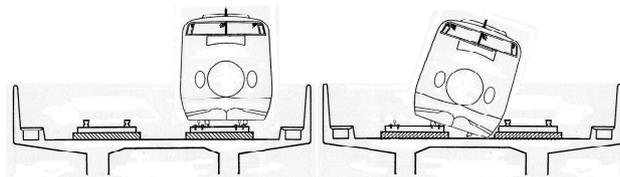


図13 700m地点付近の状況

胴体着陸した状態となり、連続的に接触する。つまり、脱線車両が通過する間、レール踏面は摩擦により加熱され続ける。このため、レールは上に凸の形状に孕みだそうとするが、車体重量と締結装置により抑えつけられる。列車通過後は車体重量による押さえ込みがなくなり、締結装置だけがレール変形に抵抗することになる。大きく脱線しなかった後部の車両では脱線後車輪がレールの締結装置を踏んで破壊しながら走行したと考えられるから、左右のレールの左側のレール締結装置は損傷していると考えられる。このため、列車通過後、レールの左方への孕みだしが始まったものと推測される。これが500m

から 600m のレールの状況であろう。700m 付近の絶縁継ぎ目付近は、レール伸縮に対して多少動きやすくなっていると考えられる。このため、継ぎ目部が盛り上がったものと推定される。付近のスラブ面（図 13 参照）をみると、9号車（先頭から2両目）の左側車輪によるものと思われる軌道中央左側の走行痕を残して走行痕が消えている。右側レールの左側にずっと続いていたスラブ面走行痕は約 15m に亘って突然消える。前後の走行痕の様子をみると、前の痕は次第に薄くなっているのに対して、15m 先では走行痕が突然、明瞭に始まっている。一方、左側のレールの左側の痕跡はあまり明瞭ではないが、右側と同時に痕跡が無くなり、右側の痕跡よりさらに 25m ほど先で再び始まっている。この痕跡は突然ではなく少しずつ濃くなっている。

これは次のように解釈できる。左右のレールともに浮き上がっているが、左側は車輪がかすかに浮く程度のところと浮き上がらないところが交互に現れた。これに対し、右側は、絶縁継ぎ目部分でかなり盛り上がった。ここを通過する脱線車両は車体の右側を浮かせて 15m ほど飛んだ後、各台車がほぼ同じ地点に着地して明瞭な痕跡を残した。



(a)先頭車

(b)最後尾車

図 14 地震後の脱線状況

2号車後部はここまで脱線しておらず、最後の1号車もレール上を走行しながら盛り上がり部分で飛び上がり、着地したあとのリバウンドで右側に大きく脱線したものと推測される。図 13に見られる変則的な走行痕（印で示した）は、その時に引きずり込まれて方向を変えながら走行した2号車の走行痕跡と思われる。つまり、最後尾車両はこの部分で大きく脱線し（排水溝に落ちかけたかも知れない）、その際、右側レールを巻き込んで引きちぎり、大きく変形させながら進んでいったものと推測される。なお、830m 付近からは上り側スラブの側面にも傷跡が見られることから、ここで完全に排水溝に落ち込んだとされている（図 14）。

(6) 脱線状況のまとめ

今回の脱線現象に関する考察をまとめると、脱線

は以下のように発生したと推定される。参考のため図15に脱線状況の模式図を示す。

先頭車が滝谷トンネル（206km地点）を出て、75mほど進んだところで、地震（P波）に遭遇し、スパークした。

P波から0.6秒後にコンパクトコレダス警報を受け停電、緊急ブレーキが作動し始めた。

P波から2秒後にS波が到来し、さらに1秒後大きな揺れが始まった（先頭240m付近）。その直後、8号車後部台車の後部車輪が190m付近で乗り上がり脱線した。

列車は、5-6秒継続する大きな揺れの中を、全車両が一斉に左右にロッキング震動しながら交互に片輪走行した。

高架橋ブロック間で大きな相対変位が発生する場所（285m付近）があり、ここを片輪走行するときに次々に脱線した。最初の大きな揺れが終わる頃に左車輪を挙げて右側に揺れている列車

の10号車前部台車が285m付近で左側に脱線し、そのまま30mほど走行して、今度は反対側に揺れはじめ、全列車は右側車輪を挙げた。その直後、9号車の後部台車が285m付近を通過して、右側に脱線した。その後揺れは一旦おさまり、80m走行した後、再び揺れ始めた。この揺れで、右側の車輪を挙げ始めた4号車が285m付近を通過する時に左側車輪が右側に脱輪した。続いて3号車の全台車および2号車の前部台車が285m付近を通過する時は左側に脱線した。この間、およそ1.5秒、この段階で大きな揺れはおさまり、最後尾車両の1号車は無事に285mを通過した可能性が高い。

大きな揺れが続いている間は、片輪走行し脱線車両のボディーマウント底面とレールの接触は左右交互に発生した。地震終了後は脱線した車体底面とレールが全面的に接触しながら滑走した。この摩擦熱によりレールが伸び、特に700mの絶縁継ぎ目付近が盛り上がった。

700m付近を通過した車両は飛び上がり、15m先に落下した。500m-600mでは列車通過後、左右のレールともに左側のレール締結装置の左側が脱線車両によって損壊して、大きく左側に孕みだした。

最後尾車両（1号車）は、700m付近を通過した時飛び上がり、着地後バウンドして2号車の後部台車を引きずりながら右側に大きく脱線した（700m付近）。この時同時に抱き込むようにレールを横倒ししながら進んだ。

さらに130mほど進んで、最後尾車両は完全に返送水路に落ち込み、停車位置まで滑走した。

以上のように、今回の脱線は微妙なタイミングで生じたと考えられる。警報が遅れ、列車がもう少し進んだ状態で大きな地震を受け始めて 285m 付近の大変形地点にさしかかったとすると、最初の大きな

揺れで先頭車両はより激しく脱線し、最後部車両も次の大きな揺れの最中に 285m 付近を通過して脱線した可能性が高い。つまり、より多くの車両が脱線した可能性が高く、レール上を脱線した車体が接触しながら滑走するため、摩擦の問題がより深刻になったと考えられる。すなわち、列車通過後にレールが変状するのではなく、通過中にレールを巻き込んで大惨事になった可能性もある。逆に、より早い警報などで早く制動をかけることができると、285m に差し掛かるのを遅くすることができ、先頭部分は脱線から免れ、後半部分もより少数の車両だけに脱線が限定されると期待される。レールの変状も抑えられるかも知れない。少なくとも今回の場合、より早い制動はより高い安全性をもたらすと考えられる。

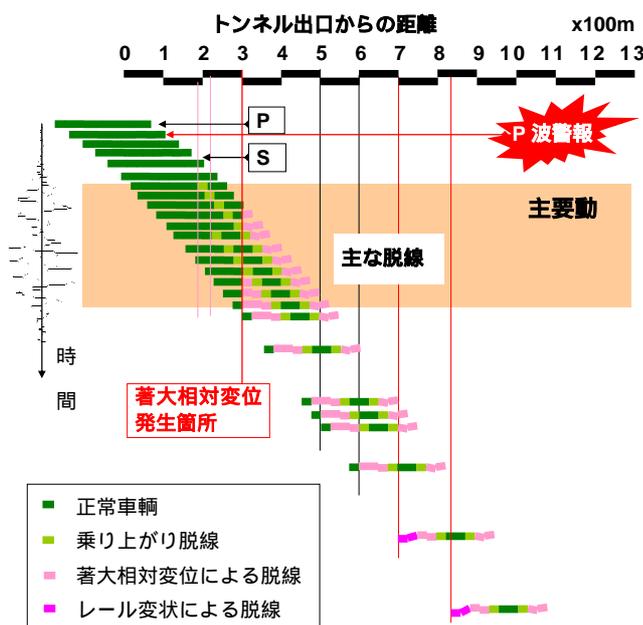


図 15 地震時脱線状況の模式図

5. 今後の対策について

ここでは前節で分析された脱線現象に基づいて、地震時の列車災害を防止する方策について検討する。

今回の脱線では、幸運にも列車の前方部分で致命的な走行障害が発生しなかった。今回の脱線事故の教訓のひとつは、脱線しても大きな走行障害を生じさせなければ、乗客の安全は確保されるというものである。結果的に後方から引っ張る形で滑走したのも、ドイツ新幹線 ICE のような惨劇に発展しなかった要因であろう。また、ボディーマウントタイプの車体では脱線すると、車体とレールが接触して滑走する可能性がある。考えてみると不思議でないかもしれないが、新鮮な知見である。滑走すれば、摩擦熱でレールに異常が生じる可能性が大きくなり、走行障害に発展する可能性があることもわかった。こ

うしたことから、定性的には以下の方策が考えられる。

- 脱線させない。
- 脱線しても正常に走行させる
- もし万一災害になっても最小限度に抑える。

この実現のため以下のような具体的方策が考えられる。

-1. 軌道側の脱線しやすい場所に脱線防止工（レールまたはガード）を敷設する。地震時は左右動が卓越し、車輪が交互に持ち上がる可能性が高い。このような状態でも効果が無くならないように配慮する。短い区間で大きな相対変位が生じる場所を選定し、集中的に敷設するだけでも、大脱線を防止する効果は大きいものと推察される。

-2. 車輪のフランジは現在 3cm であるが、これを可能なだけ伸ばすことで、脱線に対する耐性を高める。これによって、万一脱線しても、車体とレールが接触しないように期待され、摩擦熱の発生が抑えられる。

-1. 脱線しても車両がレールから大きく逸脱しないような装置を、軌道側ないしは車両側につける。車両側でいえば、脱線しても台車がレールをガイドとして抱き込むような構造とする。今回の脱線でも結果的にそのような事態となったことが報告されているが、これを意識的に行おうとするものである。

-2. 脱線した後、レールに過大な熱を加えないように工夫する。具体的には、ボディーマウント車体とレールの接触を防ぐため、車体下面位置を現在より上げる。または、車輪の径を大きくする、すなわち、フランジの長さを現在よりも大きくして、脱線時にも車体とレールが接触しないようにする。これは、脱線防止にも効果的だと考えられる。

-1. 現在より早く警報できるようにする。シミュレーションによれば、フレックルはコンパクトユレダスが 1 秒で発した警報を 0.2 秒程度に短縮できる。今より 0.8 秒早く、地震計間隔を 10km にすると同程度以上の効果が期待される。

-2. いち早く走行中の新幹線を減速させるため、緊急ブレーキの空走時間を短縮する。新幹線では、停電によって緊急ブレーキが作動する仕組みとなっているが、停電後、緊急ブレーキが効き始めるまでには数秒を要する。この空走時間をほとんど 0 にできれば、警報の迅速化や検知点の増設などよりも効果的である。しかも車両側で対策できるので現実的で、実現性の高い方策ではなからうか。

-3. 地震をより早く検知できるように検知点間隔を狭める。現在の新幹線は原則として 20km 間隔に地震計が設置されている。これを 10km 間隔にすると最大で 1 秒早く検知できる。しかし、設備が大掛かりになる割には効果が少なく、ここに現在より 1

秒以上警報が遅いシステムを置けば、現在よりも遅い警報しか実現できないことになってしまう。気象庁システムは警報まで早くても4秒以上かかるので新幹線のシステムとしては論外である。気象庁システムを用いた緊急地震速報も当然遅いので、新幹線で使う意味は全くない。

以上の方策は、可能性を示したにすぎない。より総合的な観点から検討していただければ幸いである。

6. おわりに

以上、新潟県中越地震におけるコンパクトユレダスの動作状況と脱線状況を、公開資料などを中心に分析した結果を報告し、得られた知見をもとに地震時の脱線対策を定性的にまとめた。しかし、分析は、解析的に検証された訳ではないので、思い過ごしや誤解が少なくないことを怖れる。間違いを指摘していただき、正確なものにしていただければ幸いである。いずれにせよ、地震時の脱線は避けがたい現象である。如何にうまくやり過ごすかが重要となる。本報告が少しでも貢献できればこれに過ぎる喜びはない。

謝辞：今回の脱線現象を自分なりに納得できるようになるまで、多くの資料を参照させていただいた。ほとんどが公開されたものであり、関係者のご尽力とご努力に感謝します。特に東京新聞の瀬口晴義記者には独自に入手された様々な情報を教えていただきました。深甚の謝意を表します。強震記録については、独立行政法人防災科学技術研究所によるK-NET, Kik-netの公開データ、気象庁仕様の計測震度計に記録され気象庁から公開されたデータならびにJR東日本の新幹線沿線で観測され土木学会を通じて公開されたデータを使用させていただいた。記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 増田泉子：芸予地震・・・その時、多くの乗客は気付かなかった、中国新聞特報2001、2001年5月1日朝刊。
- 2) 中村 豊：合理的な地震動強度指標値の検討 -DI値を中心にした地震動指標値間の関係 - 第27回地震工学研究発表会、2003.12.9～12。
- 3) 中村 豊、中嶋 繁：常時微動を用いた新幹線の高架橋の地震動特性の推定、第20回地震工学研究発表会講演概要集、pp.405-408,1989。

(2005.06.23 受付)

Earthquake Early Warning and Derailment of Shinkansen Train at the 2004 Niigataken-Chuetsu Earthquake

Yutaka NAKAMURA

It was the first time for Shinkansen trains on business to derail at the time of the 2004 Niigataken-Chuetsu Earthquake. Because various prior measures were effective and it was fortunately, the derailment caused no disaster. One of the countermeasures against earthquake disaster for Shinkansen, the early earthquake detection system has been installed to reduce the level of the disaster as possible. At the time of this earthquake, Compact UrEDAS for Joetsu Shinkansen make alarm one second after P wave detection at the epicentral area, and all trains around epicenter were urgent stopped. Although it was less than three seconds for the derailed train from the alarm to severe earthquake motion begins, the alarm decreased the possibility to run the possible damaged area more than 130m and to rush of the opposite train in the derailed area. Compact UrEDAS demonstrated that it is effective enough even for the earthquake just below as concerned. Moreover from the analysis of the derailment situation, main portion of derailment was caused by the large relative displacement between the specific viaducts. It was assumed that high frictional heat was caused by the derailed vehicle bodies slid on the rail after the earthquake as body landing, and the transformation and breaking the rail occurred just after the train running.