

新潟県中越地震の早期検知と脱線

中村 豊

1. はじめに

2004年新潟県中越地震では高速で営業運転中の新幹線列車が初めて脱線した。

新幹線構造物が地震で破壊されてしまえば、その上を走る新幹線の安全性を確保することなど不可能である。しかし、構造物が耐震的であっても、大きく揺れる中を高速走行すればなにが起きかわからない。つまり、新幹線のような、ものが動くことで機能を発揮するシステムの場合、施設の耐震化だけでは、地震被害や災害を防ぐことはできない。地震発生時の機能保全対策が不可欠となる。新幹線の場合、いち早く地震の発生を検知して、できるだけ減速することが地震時対策の基本であり、このためのシステムが地震早期検知警報システムなのである。

新潟県中越地震の場合、直下地震にもある程度対応できる「コンパクトユレダス」がいち早く警報を発して高速走行する新幹線を効果的に減速させた結果、脱線はしたものの大きな災害を防ぐことができた。地震時の対策としての早期検知警報システムの効果は一概に論じることはできないが、実際にその減災効果が確認された事例を示すことで、早期検知警報システムの役割を考えるきっかけとなれば幸いである。

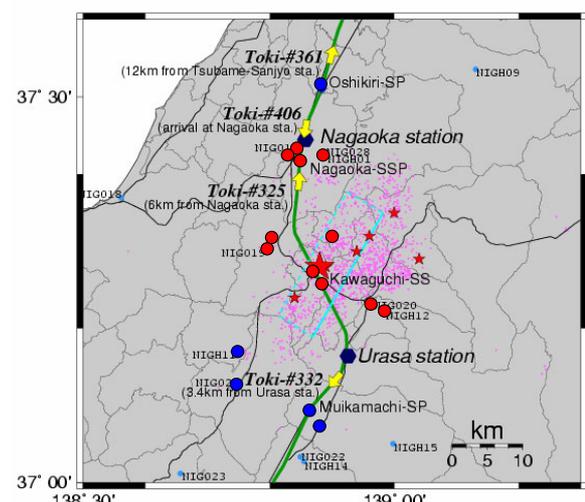
2. 2004年新潟県中越地震発生時の状況

本地震は、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史上4番目の地震である。気象庁によれば、2004年10月23日17時56分0.3秒に発生し、震央位置は、北緯 37度17.3分、東経 138度52.2分、深さは13kmで、地震規模はM6.8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ほどであった。

コンパクトユレダスがP波警報を出した区間は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で六日町き電区分所から押切き電区分所までの区間である。この区間内にいた列車は次の3本である(図-1参照)。北から、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



- 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 1 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)

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(270Gal)となる。このうち、P波警報(P波検知後1秒)を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。

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。RI2はリアルタイム震度¹⁾の2を表し、計測震度の2に相当する。加速度は5HzPGAの値(単位:Gal)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-2に震源域での強震記録(EW方向成分)を

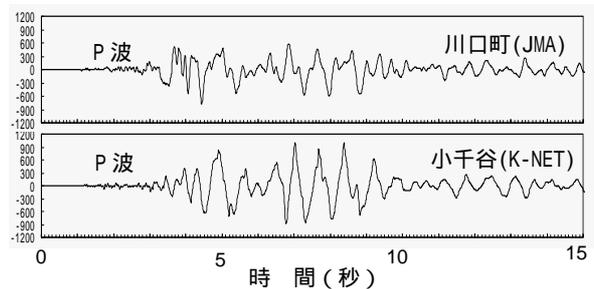


図 2 震源地域の強震加速度波形例(単位:Gal)

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)ほか				
	新六日町	新川口	脱線現場	新長岡	新押切
5HzPGA	270Gal	846Gal	(推定)	434Gal	203Gal
最大RI震度	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超過)	8秒	3秒	秒	4秒	8秒
P波到来時	5.0	2.9	3.3	3.5	5.9
P波警報時		3.9	3.9	4.5	
RI震度2超過時	6.9	3.1		4.1	8.0
10Gal超過時	7.1-8.1	3.4		4.7	8.5
40Gal警報時	9.8	4.2		5.9	9.9
S波到来時	10.7	5.9	6.4	6.7	15.9
5HzPGA時	12.1	7.7		9.4	13.4
最大RI震度時	13.1	8.1		9.5	17.8
	観測波形を用いたシミュレーション結果				

* 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

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2.5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-3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。

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動の様子を示している。脱線箇所とほぼ同じ震央距離の小千谷の記録でみると、大きな震動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。

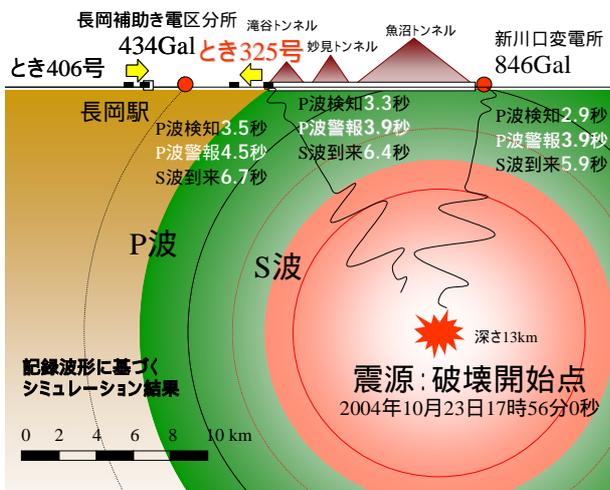


図 3 地震波動伝播の模式図

図-1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。これに対して、無被害地域ではP波警報が発信されず、コンパクトユレダスは的確な設定となっていることが確認された。

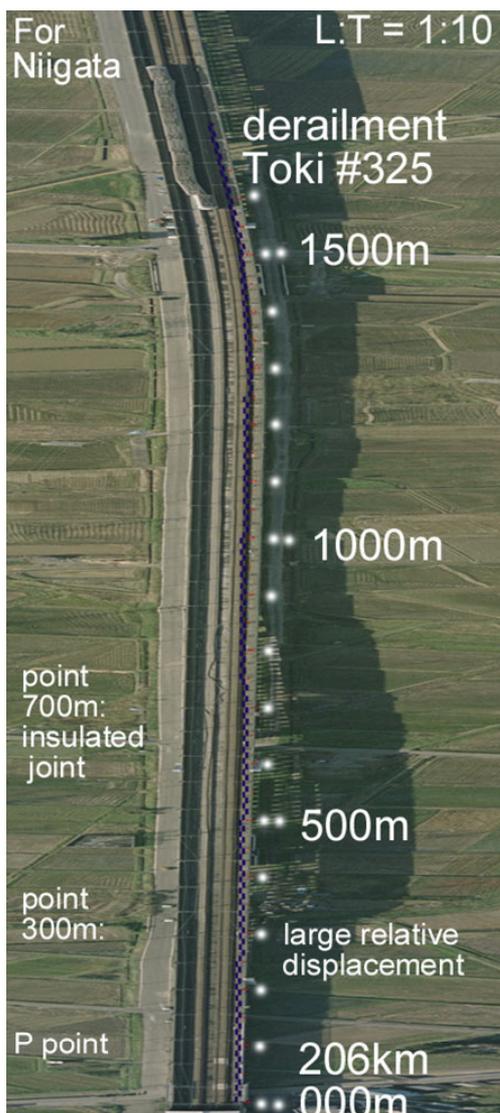
なお、コンパクトユレダスと同等のP波警報レベルで、新川口SSや新長岡SSPでの記録波形に対して、最速警報システム「フレックル」の動作をシミュレーションした結果、それぞれP波検知後0.2秒、0.6秒での警報発信が確認された。現行のコンパクトユレダスよりもそれぞれ0.8秒、0.4秒の短縮が見込まれる。この時、トンネル出口ではP波到来前に警報を受けることになる。これは地震検知点を20km間隔から10km間隔に増やす効果と同等またはそれ以上の効果である。

4. 報道されたとき325号の脱線状況

地震発生時、脱線した「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。ここ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)を10倍に強調した結果、レールの変状が明瞭にみとれるようになっている。

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 の細かい傷が付き始め、約 16m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。



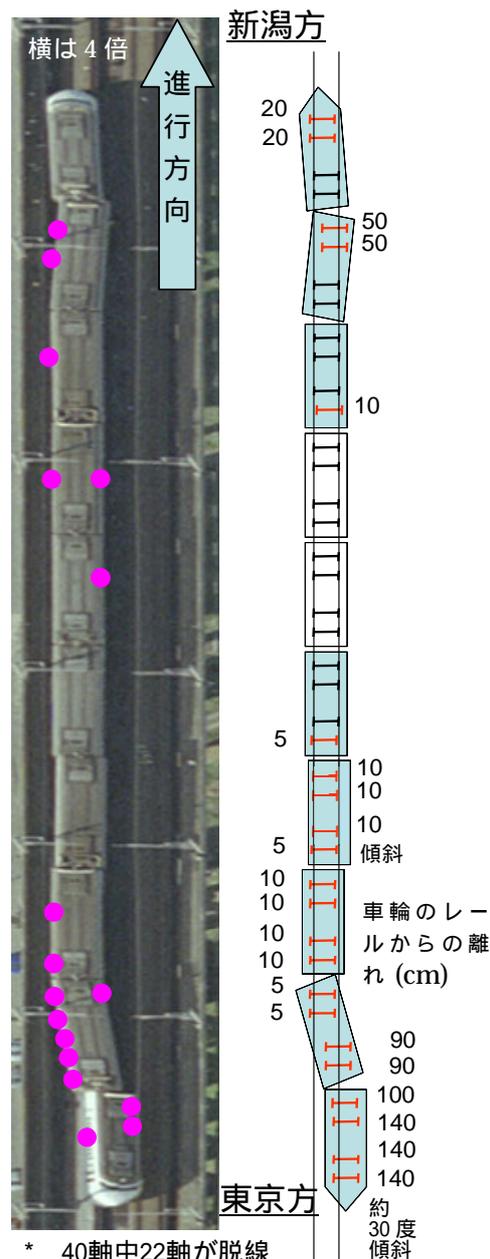
とき 325 号脱線やレール変状の状況などがわかる。次に脱線したと考えられる 300m 地点付近での軌道スラブの色調変化も見てとれる。

図 4 脱線現場の航空写真

脱線状況を図-5 に示す。

5. 目撃証言に基づく脱線状況

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



- * 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

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。

直接本人に取材した結果も併せて目撃証言をまとめると以下のようなになる。()内は直接取材によるもの。

P波を感じた、直後に光を感じた(紫色の光、スパーク)、



図6 目撃地点と新幹線の関係

次にゴーという音を聞いている(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-6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、コンパクトユレダスにより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突き出した時点で地震の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(=75/54.2×340m/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のが、概ね整合する。

6. 列車走行状況と地震動の関係

航空写真によれば、トンネル出口から100m程のところに(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ユ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観測点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するれば、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 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 ~ 15Hz 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、1Hz ~ 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

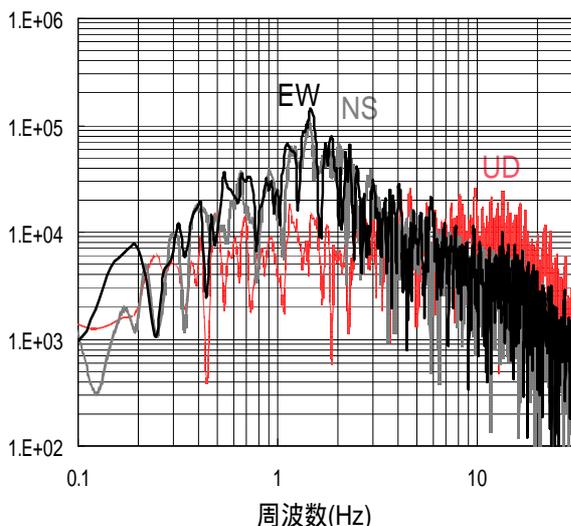


図7 K-NET 小千谷の加速度フーリエスペクトル

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。先目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に生じたものと推測される。

7. 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(206km191m付近から206m付近まで約15m)は進行方向右側のレール踏面にあり、トンネル出口から191m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、たまたませり上って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。

左側レール踏面には217m付近から10m程度の

間に脱線痕跡が認められる。これに対応するのは後ろから5両目(5号車)の後部台車の後部車軸で、左側レールに押しつけられて乗り上がり脱線したものと推測される。最初の脱線から100m程度(2秒程度)走行した時点であり、地震動の中休み部分で生じたものと考えられる。

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背の低い剛な高架橋が続いている。このため、すべての車輛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(図10参照)。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

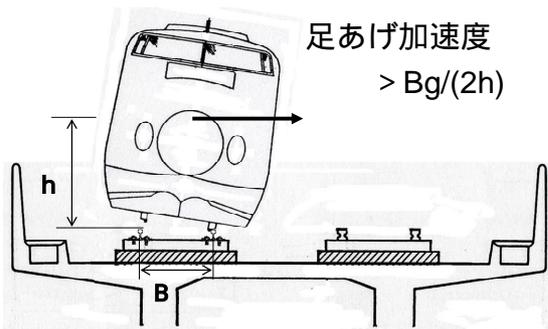
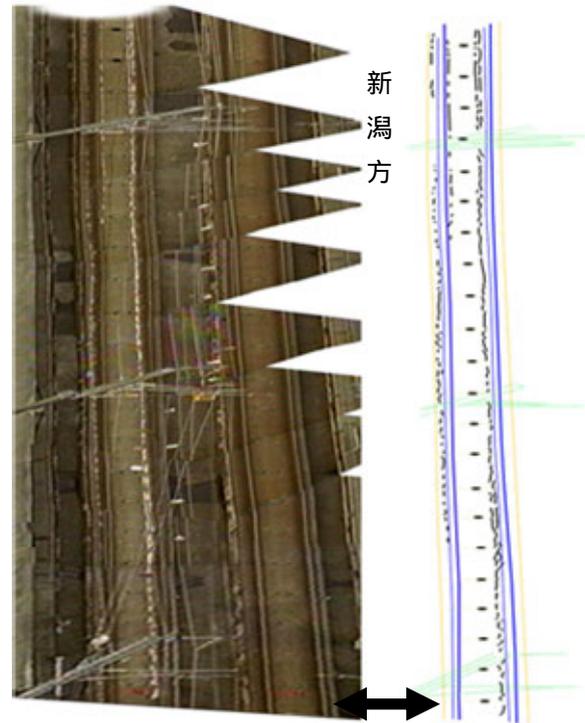


図8 足あげ加速度の見積

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3.5Hz³⁾と規定よりも剛につくられている。



* 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



図10 著大相対変位発生箇所206km285m付近(印)

図-11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差ないと考える。崖付近での柱の変形形状を図-11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。

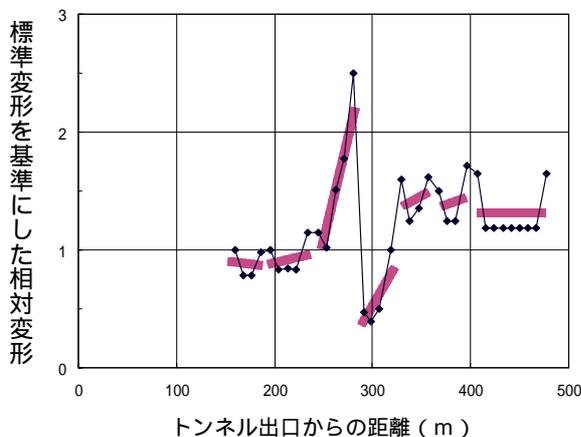


図 11 静的水平荷重に対する高架橋の変形形状

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地震動は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。

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か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。

8. 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。

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



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

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

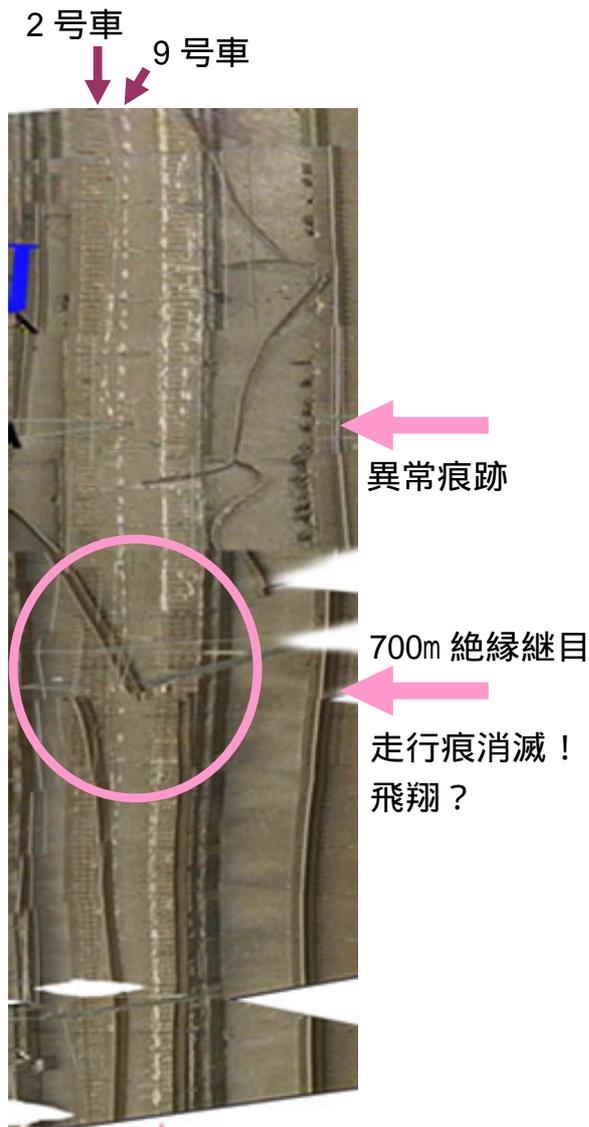


図13 700m地点付近の状況

ほぼ同じ地点に着地して明瞭な痕跡を残した。

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(排水溝に落ちかかったかも知れない)、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

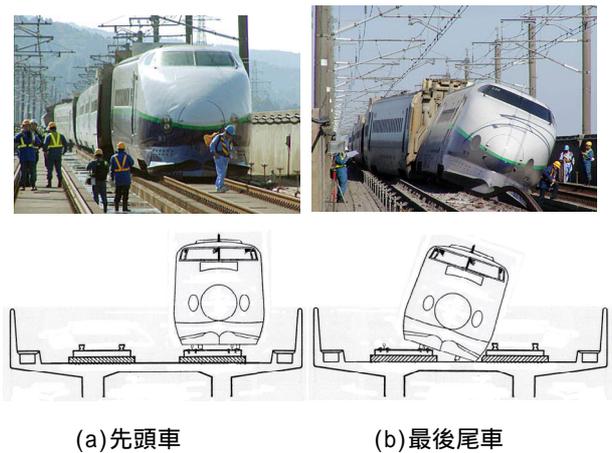


図14 地震後の脱線状況

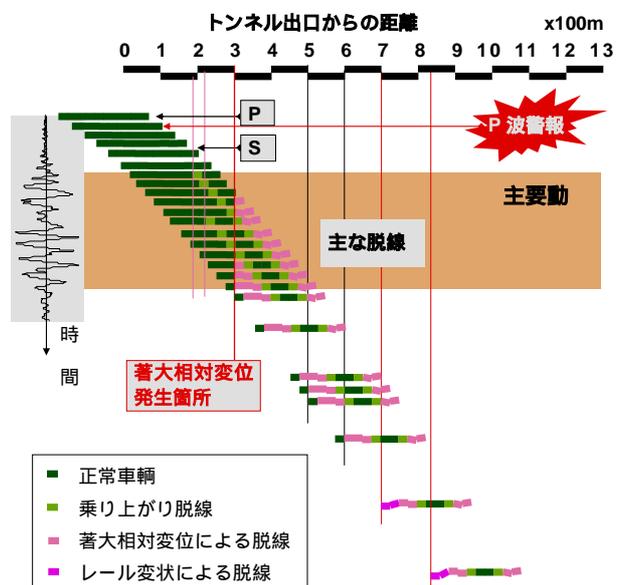


図15 地震時脱線状況の模式図

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)。

9. 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秒後にコンパクトユ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)。その後、8号車後部台車の後部車軸が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ったが、80m走行して再び揺れ始める前に、5号車の後部台車の後部車軸が217m付近で乗り上がり脱線した。再び揺れ始めて、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線した。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排水溝に落ち込み、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るとすると、最初の大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かもしれない。つまり、より多くの車両が脱線した可能性があり、その場合、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。脱線する車両が少なくなり、車体とレールの接触も限定されたものとなり、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ものと考えられる。

10. 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可能性として考えられる。この方策の中には既に実施されたか、実施されることになっているものもある。あくまでも部外者の考えで的を射ていないものもあるかと思う。ご教授いただければ幸いである。

-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なると期待され、摩擦熱の発生が抑えられる。

-1. 脱線しても車輪がレールから大きく逸脱しないような装置を、軌道側ないしは車輪側につける。車輪側でいえば、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 にするの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。しかも車輻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ろうか。

-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ので注意が必要である。

11. 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して分析した。また、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。

阪神大震災や新潟県中越地震の例をみると、M7クラスの地震でも震央域では脱線は避けがたい現象であると思われる。脱線しても転覆などに到らないよううまくやり過ごす方策を考えることが重要となる。そのためにも、今回の脱線についての詳しい調査分析が不可欠となる。事故調査委員会からは経過報告⁴⁾のみで最終報告はまだである。早急な公表を期待するとともに、本稿が議論の深まりに少しでも寄与できれば幸いである。

なお、2005年8月16日11時56分頃に発生した宮城県沖地震(M7.2)でも、コンパクトコレダスがいち早く警報を出して(当時話題になった気象庁の緊急地震速報発信よりも4秒ほど先行している⁵⁾)、仙台周辺を走行中の列車群を緊急停止させた。新幹線構造物に被害は無かったものの、運転再開までに長い時間を要した。これには架線の切断事故が発生したことも影響している。規模の大きな地震の場合長周期成分が卓越するため、架線の共振が発生したと思われる。共振により架線が大きく左右に振れてパンタグラフのすり板からはみ出た後、パンタグラフと衝突して切断に到ったものと推測される。こうした周期の長い架線の振動は時間をかけて成長すると考えられるので、警報とともにパンタグラフを下げる事ができれば、このような事態は避けられるのではなかろうか。

謝辞:多くの公開資料を参照させていただき、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考察させていただいた。資料を収集し、公開された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。また、長岡技術科学大学増井技官には現地調査におつき合いいただきとともに、目撃少年を探し出していただくなど、大変お世話になりました。(株)システムアンドデータリサーチの齋田淳主任研究員と佐藤勉副主任研究員には、資料整理や議論、現場調査などにおつき合いいただきました。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しています。記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 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。
- 2) 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。
- 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。
- 4) 航空・鉄道事故調査委員会:上越新幹線における列車脱線事故に係わる鉄道事故調査について(経過報告)、平成17年1月24日、<http://www.mlit.go.jp/araic/>
- 5) 検証:2005年8月16日11時16分頃の宮城県沖の地震に対する情報発信、2005年8月29日、<http://www.sdr.co.jp/050816miyagi/analysis.html>

中村 豊

[なかむら ゆたか]

現職 株式会社システムアンドデータリサーチ代表取締役、東京工業大学大学院総合理工学研究科人間環境システム専攻連携教授

工学博士

略歴 東京大学大学院土木工学専門博士課程修了、日本国有鉄道公社鉄道技術研究所、財団法人鉄道総合技術研究所コレダス推進部長を経て現職

研究分野 耐震工学、地震工学、リアルタイム地震防災

