大津波に遭遇した車両の挙動に関する一考察

0 [機] 永瀬和彦( 金沢工業大学)

# Trains Tossed by the Tsunami Attributed to the Massive Quake Shocked

# the Northeastern Section of Japan in 2011

# OKazuhiko Nagase (Kanazawa Institute of Technology)

Numerous trains operated on the narrow gauge lines in the Northeastern Section of Japan were tossed far away from the track by the huge tsunami attributed to the massive quake, which shocked the Pacific Ocean near the Japanese Northeast Coast in 2011. However, the behavior of these wrecked trains have not been made clear yet. The author investigated wrecked diesel railcars, which were attacked by the tsunami when the cars halted at a station according to the tsunami warning alarm called from the train dispatcher. As the results of the investigations, he found these railcars were floated by the tsunami and turned around the station for a while.

キーワード:鉄道,災害,津波,車両,脱線 Key Words: railways, disaster, tsunami, rolling-stock, derailment

## 1. はじめに

東日本大震災による津波で被災した鉄道車両の多くは, 軌道 から大きく逸脱した.しかし、これら被災車両が軌道から逸脱 する過程の挙動は明らかではない. 筆者は JR 山田線津軽石駅 で警報発令を受けて抑止中に、津波で被災したディーゼル動車 の挙動を調べた.その結果、当該車両は津波により相当の間、 駅構内を浮上しながら移動していた可能性があることがわかっ t.

## 2. JR 山田線津軽石駅付近の線形と周辺の被災状況

## 2.1 駅の線形と周辺の地形

JR山田線は津軽石駅付近の宮古方で、図1に示すように津軽 石川に沿って走る. 深い入江で形成された宮古湾に注ぐ同川の 河口には図2に示すように海面高さ8.5mの水門<sup>1)</sup>があり、水



(国土地理院地図を抜粋して一部に注記)

門海側は高さ10mの防潮堤で防護され、被災時に水門は閉鎖さ れていた. 同駅付近に標高 5.0m の水準点がある. 駅本屋から 水門までの距離は約 750m, 津軽石川までの直近距離は約 250m である.

#### 2. 2. 津軽石駅の線形

当駅中心は盛岡起点 110km120m(以下には地点は原則, 110km を略し、メートルのみ表示)に位置する. 駅は図3に 示すように対向式ホーム上下本線と,下り本線釜石方から分岐 した短小の預線との3線で構成され、上り線のホーム長は約 90m の直線で,構内は水平である.ホーム笠石に記載されたホ ーム高さは 920mm, 軌道中心とホーム緑端間距離は 1485mm である.

## 3. 駅及び周辺の被災状況

被災日当日,水門付近にある潮位計は破壊され,当時の潮位



図3 釜石方から見た構内(左から上り線,下り線,預線)





図4. 駅構内宮古方とその周辺の被災状況 (被災列車は左図の左側ホーム停車であった)

は不明である. 被災直後に行われた現地調査報告書<sup>2)</sup> によれ ば,水門上部に付着した漂着物から付近の津波高は10.41m と され,防潮堤上に流れが陸地方向に向いた漂着物が付着してい たことから,津波は水門と防潮堤を越流したとされる.水門を 越えた津波は津軽石川を遡行し,一部は防潮堤を越流し,駅及 び周辺に流れ込んだと推定される.

図4に駅宮古方構内及び周辺の被災状況を示す.図示のとおり、流失した道床は一部にとどまり、浸水被害を受けた沿線民家も、作業小屋などの簡易な家屋以外は大きくは損壊しておらず、電柱の倒壊もない.水門及び防潮堤が被害を逓減させたと 推定される.

駅本屋付近に残された2箇所の浸水跡が共にホーム面から1. 66m であったところから,駅中心付近はレール面 RL から2. 58m 程度冠水したと判断した.図3に示す通り,下りホームへの 通路と下り本線との間に設置されたフェンスの一部が海側に倒 壊しているので,引き波の速度も低くはなかったと想定され る.

## 3. 列車の被災状況

## 3. 1列車の被災に至るまでの状況

被災したキハ100形2両からなる宮古行第1647D列車は14時46分当駅上り本線から定時発予定で、図4左の左側ホームに停車中、大津波警報が発令されたため、乗客全員と車両の留置処置を施した乗務員とは、近隣の高台へ無事に避難した.当該列車の車両関係緒元を表1に示す.

表1 名	b災車両の主要緒元 <sup>3)</sup>
------	-------------------------

·空車質量 24.9t	·連結面間距離 16.5m
・車体長 16.0m	・車体外部巾 2803mm
・車体内面巾 2700mm	<ul> <li>・床面高さ1175mm</li> </ul>

#### 3. 2 車両の被災状況

当駅には列車停止位置目標は設置されていない.よって,列 車はホーム先端のキロ程 101m 付近に先頭を合わせて停車中 に,津波の襲来を受けたと推定した.津波によって列車は大き く退行し,被災後の在線位置は図5及び図6に示す状態となっ た.先頭は下り本線を越え,キロ程 195m 付近の預線上に移動 し,2両目後部は左の山側に逸脱し,図6に示す如く信号機器室 に貫通扉が接触して停止した.退行距離は約90m 程度である.

車両の外観上の損傷は、図7に例を示すように車両限界近く に設置された床下機器箱の擦過傷及びステップ等の曲損程度



図5 被災車両を上り本線ホームの宮古方から見る



図6 被災車両を釜石方の駅外海側から見る

で、これらは退行中にホームとの接触により生じたと見られ る. それ以外の大きな損傷は、軌道・車両共に見出せなかった. さらに、2 両目後部の貫通扉ガラスが信号機器室との接触によ り一部破損している. 車体にはホームとの接触痕は見られなか った. 先頭車前面に津波の最高水位を示すと見られる喫水線跡 が残り、その位置はレール面 RL から約 1.76m であった.

# 4. 考察

#### 4.1車両の浮力

2.2 で述べたように、駅中心付近の最大潮位はレール面 RL から 2.58m であり、一方、車両に残る喫水線はこれより低い. つまり、車両が一定の間、喫水線位置で浮上していたことにな る.しかし、冠水した車両が浮上する事態は、従前は全く想定 されてはおらず、車両の浮上に関わるメカニズムの研究も行わ れていない、そこで、これについての簡略な考察を試みる.

冠水による車両の総合浮力を Fo, 冠水によって車体に生ず る浮力をfi, 車両を構成する金属(キハ100形の場合, 主体は鋼) の冠水による浮力をfo, 非金属材料のそれをf3, 各種タンク及 び空気配管類等のそれをf4とし, それ以外の部品内部にある空 間などによる浮力は過少と見做して無視する. 津波潮流の比



図7 損傷が認められた床下機器箱とステップ



図8先頭前面に残る喫水線跡(矢印)

重を1.0とすれば、概ね以下の関係が成立する.

$$F_{0} = f_{1} + f_{2} + f_{3} + f_{4} \qquad (1)$$

$$= - c,$$

$$f_{1} = S\{h - (a + b)\}$$

$$f_{2} = \frac{k_{1}(m - p)}{c_{1}}$$

$$f_{3} = \frac{k_{2}p}{c_{2}}$$

$$f_{4} = V_{1} + V_{2} + (1 - 0.8e_{1})V_{3} + (1 - e_{2})V_{4} + (1 - e_{3})V_{5}$$

$$\cdots (2)$$

(2)

ただし、Sは車体外板内面の床面積, hはレール面 RL からの 潮位高さ, aは RL から車両床面までの高さ, bは車内の床面か らの浸水高さ, mは車両を構成する金属部材の質量, c<sub>1</sub>は前記部 材の平均比重, k<sub>1</sub>は同部材のうちの冠水した部分の質量の割合, pは車両を構成する非金属部材の質量, c<sub>2</sub>は前記部材の平均比 重, k<sub>2</sub>は同部材のうちの冠水した部分の質量の割合である.

各種タンク等による浮力 4を構成する式(2)の V<sub>1</sub>は空気ダ メ容積, V<sub>2</sub>は空気配管及びブレーキ・シリンダなどの容積, V<sub>3</sub> は燃料タンク容積, e<sub>1</sub> は容積で見た燃料タンクの燃料充填率, V<sub>4</sub>は水タンクの容積, e<sub>2</sub>は同タンクの水充填率, V<sub>5</sub>は汚物タン ク及び付属配管類などの容積, e<sub>3</sub>は同タンクの汚物及び初期投 入水を併せた充填率である.なお,燃料タンクに関わる V<sub>3</sub>が関 与する項で軽油の比重を 0.8 と見做し,汚物タンクに関わる V<sub>5</sub> が関与する項では汚物の平均比重は 1.0 と見做した.

#### 4. 2. 潮位と浮力との関係

浮力と潮位とのおおよその関係を図9に示す.潮位の上昇に 応じ、車両床下の冠水が始まり、これに応じて主として床下機 器類を主体とした式(1)の $f_2 \sim f_1$ による「部材の浮力」が発生 する.潮位が上昇して床面に達すると、車体空間が排除する海 水による浮力 $f_1$ が生じ、これが急激に増加する.一方、床上に は機器類は少なく、これら部材の冠水割合 $k_n$ ,  $k_2$ は、床面より 上に潮位が達した後は大きくは変わらないので、これによる浮 力も大きくは変らないと見做す.

潮位がさらに上昇し、車両が浮上を開始する時点の RL からの潮位(以下、「臨界潮位」という)は、車両の総合浮力 Fo が車 両質量 Wと等価となった時点である.よって、臨界潮位 hoは

 $h_0 = \frac{1}{S} \{ W \cdot (f_2 + f_3 + f_4) \} + (a+b) \qquad (3)$ 

で示される.

臨界潮位に達した以降は車内に浸水がない場合,車両は潮位 の上昇に比例して浮上するが,車両の喫水線は同じ位置を保 つ.引き波が発生し、潮位が低下すると、それまでとは逆の順 序を辿る.

車内への浸水がある場合,図中の破線で示す浸水の高さ位置 は潮位が床面に達した時点から始まる.引き波開始後も,浸水 は,高さが潮位又は喫水線と一致する時点までは継続して増加 する.浸水時の車両の浮上量は点線で示すように浸水がない場 合に比べくらべ,浸水高さとほほ等しい値だけ減少する.喫水 線は浸水により浮上量が減少し,車体が沈下したと等しい値だ け上昇する。そして、車体の浮上が止んだ(台車が着地した) 時点の潮位が最高値となり,以降は潮位の変化に応じて変化す る.

#### 4. 3. 浮力の算出

前記(3)の式のSを車体長さ16.00m,車体内面巾を2.80m と見做し,車両の金属材料質量 m は 23.00t,非金属材料の質 量 pを1.90t,空気タンクと配管類の容積 V<sub>1</sub>.V<sub>2</sub>の合計を0. 40m<sup>2</sup>,金属と非金属の冠水割合 k<sub>1</sub>.k<sub>2</sub>を共に0.80,金属の平均 比重 c<sub>1</sub>を7.80,燃料タンク容量を0.5 m<sup>2</sup>,水と汚物タンク等 のそれぞれの容量を0.10m<sup>2</sup>,空気タンクを除く各タンクの充 填率を0.50と見做し,非金属の平均比重 c<sub>2</sub>を1.5と仮定すれ ば,臨界潮位 h<sub>0</sub> は車内浸水がない(b=0)の場合には,(3)式 より h<sub>0</sub> は 1.66m となる.つまり,車内への浸水がなければ, 車両は低い潮位で容易に浮上する.

図 9 に記載した最高潮位の値から、浸水がない場合の車両の 浮上量は 0.90mとなる.車体に残された喫水線は 1.76m なの で、車内への浸水量は床面から 0.10m程度と推定され、車体は 気密性が高いことがわかる.

#### 4. 4. 被災時の車両の挙動

前記の結果から, 被災車両の挙動を推定して見る.

## (1) 車両の浮上と退行

津軽石川の水門付近で最大潮位が 10.41m に達した津波は, 高さ8.5mの水門と水門付近の防潮堤とを越流して河川に沿っ て遡行し,津軽石駅構内に流入した.流入した津波の流速は, 周辺家屋の損壊が大きくないところから比較的緩やかであった と見られ,構内の潮位の上昇も緩やかであったと推定される.

プラグドアを用いて気密性の高い2両編成ディーゼル動車は、潮位が臨界潮位1.66mとほぼ同じ時点で浮上を開始し、



図9 潮位と浮上力との関係

# S7-5-5

潮流によって退行を始めた.

図8に示す床下機器箱損傷の中心位置はレール面RLから約 0.44mある.損傷の原因となったと見られるホーム笠石の擦り 傷は、ホーム後寄りキロ程65m付近からある.当地点での傷中 心位置はRLから約0.75mで、それより宮古方ホームに明確な 擦り傷は認められなかった.キロ程89mのホーム後端付近の傷 中心位置は0.85mにあった.つまり、この付近では、図8に示 す床下機器付近がRLから約0.40m程度浮上していたことにな る.

車内に海水侵入がないと仮定した場合,車両が 0.40m 浮上 した時点の潮位は,臨界潮位にこれを加えた値,すなわち,2. 00m程度であったと想定される.車体には退行中にホームに接 触したと見られる擦過傷は全く残されていない.よって,ホー ム中程付近までの間は,車両は浮上したものの,台車は過上昇 防止ストッパなどによって車体から吊り下げられた状態とな り,車輪はレールへの載線状態を維持し,その後は,前述の如 く床下機器などがホームに接触したために,車体のホームへの 接触は免れたと推定した.

(2) 線路からの逸脱

車両はホーム外れまで退行すると,緩やかな山側に向かう潮 流に押し流されて線路から逸脱し,後部車両の貫通扉が図6に 示すように信号機器室屋根に接触した.後部車両の喫水線は確 認できなかったが,先頭車両の喫水線は図8に示すように貫通 扉窓ガラスより下にある.同一構造である後部車両も,喫水線 が同一であった可能性が高い.すると,扉窓ガラスは初めから 図6に示すように機器室屋根に接触して破損した可能性は少な い.当初は貫通扉が信号機器室に接触して僅かに変形し,扉の 隙間から海水が車内に侵入して後部台車が着地したと思われ る.その時点でも,それ以外の台車は依然,浮上を維持したと 推定した.

## (3) 引き波による車両の移動

引き波が起きた際,浮上を維持した先頭車両と後部車両の前 台車は,着地した台車を残したまま,浮上した車体とともに海 側に移動を開始した.先頭車は下り線を越える際,下り線の線 路脇に設置された構内通路(図5に示す)防護用の踏切警報機 をなぎ倒し,図10に示すように先頭車両の床下に捲き込んだ. これにより先頭車両前台車付近の車体が海側へ流動するのが阻 止され,他方,後部車両の後側台車は既に着地し,移動出来な



図 10 構内通路用踏切警報器(矢印)を床下に捲き込んだ先頭車

い状態にあった.前記二つの障害物などによって拘束されてい ない前部車両の後台車と後部車両の前側台車付近の車体は比較 的自由に移動して,図5及び図6に示す状態に至ったと判断し た.このような車両の移動を阻止する事態が起きなかったなら ば、車両はより遠方に移動した可能性が高い.

#### 5. 結論

東日本大震災の大津波によって JR 山田線津軽石駅停車中に 被災した2両編成ディーゼル動車からなる列車と同駅付近を調 査した結果,次のようなことがわかった.

- 駅構内の最大潮位はレール面上2.56mに達したにも関わらず、駅周辺の家屋の殆ど損壊していないことから類推すると、津軽石川河口付近に設置された水門及び防潮堤が有効に 機能して、現場付近の潮流は引き波をも含めて比較的穏やかであったと推定される。
- 2) 被災した列車は、当初は車輪がレールに載線状態を維持したまま浮上して緩やかに退行し、ホーム中程を過ぎた以降の地点で車両は完全に浮上状態となったと見られるが、床下機器箱などが笠石に軽く接触したため、車両が線路から大きく逸脱する事態は回避された。
- 3) その後,車両はホームを外れた時点で山側に大きく逸脱ながら退行して後部車両は信号機器室に緩やかな速度で接触し、前面貫通扉が変形して後部車内に海水が流入し、後部台車は着地したが、残りの台車は依然として浮上した状態を維持した。
- 4) その後に起きた引き波によって拘束を免れた車両の部位は 海側に流され,最終在線状態に至ったと推定した..
- 5)本列車が比較的気密性高い状態を保持できるプラグ扉であったこと及び車体に残る喫水線跡から類推した車内浸水量が 些少であったことを踏まえると、機密性の高い車体で構成された本車両は長時間にわたって浮上していたと推定される.
- 6) 津波に襲われた車両は低い潮位で容易に浮上する可能性が あることをふまえれば、機密性の高い車両は長時間にわたっ て近隣を浮遊する事態が起きる可能性は否定できない。

本研究の実施に際し,駅構内最高潮位の調査とホームの状況 調査は,筆者がJR東日本とJR西日本の関係者の方々の現地調 査に同行した際に,各位のご協力の下になされたものである. ご協力賜った関係各位に深謝の意を表します.

#### 参考文献

- 1) 富田隆史,中川康之,熊谷健太郎,山寄一雄; 釜石湾·宮古湾 調査報告(速報),釜石港第2次調査団報告書, pp. 7, 2011.
- 津軽石川三陸高潮対策事業の事後評価(報告)説明資料; 岩 手県県土整備部, pp. 1-2, 2009.
- 3) 佐藤芳彦, キハ 100・110 形登場; 鉄道ファン, Vol. 30, No. 4, pp. 55-58, 1990.