海底地震計データを利用した早期地震警報判断手法の検討

東海旅客鉄道㈱　正会員　○岡本　弘
東海旅客鉄道㈱　正会員　他谷　周一
ジェイアール東海コンサルタンツ㈱　正会員　丹羽　健友
三菱スペース・ソフトウェア㈱　下野　五月

1.　はじめに

鉄道では，地震発生を早期に検知し，早期に列車を減速・停止させることを目的として「早期地震警報システム」が整備されており，2011 年東北地方太平洋沖地震の際にも有効であったと報告されている[1]．東海道新幹線においても，東海道新幹線早期地震警報システム（TERRA-S）及び沿線地震計により構成される地震防災システムと，気象庁から配信される緊急地震速報とを組み合わせ，地震時の列車安全の確保が図られている(図-1)[2]．近年，海洋研究開発機構（JAMSTEC）による DONET や，防災科学研究所による K-NET(相模湾)及び S-net 等，公的機関による海底地震計の整備が進められており，既存の早期地震警報システムに加え，これらを有効に活用することで，海溝型地震に対して早期地震警報をさらに強化できると想定される．本稿では，公的機関により整備されている海底地震計のデータを用いた早期地震警報判断手法について検討した内容について述べる．

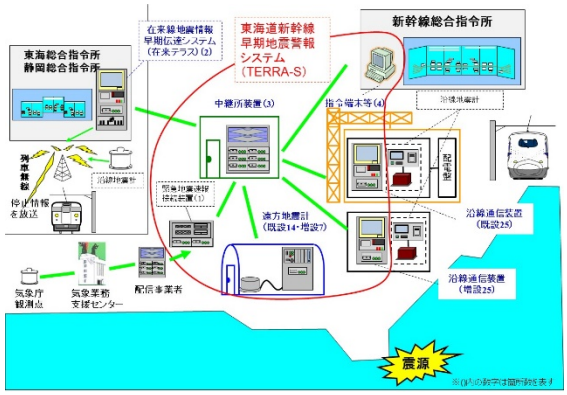

図-1　システム概要

2.　海底地震計データ利用による閾値超過型の早期地震警報判断手法

海底地震計データを活用して 1 秒でも早く警報出力する手段としては 2 つある．1 つは，海底地震計データからマグニチュード M や震央位置を推定し，その結果をもとに警報範囲を決定する「地震諸元推定型」の手法であり，もう 1 つは，海底地震計が観測した振幅が一定値を超えた場合に，地震計の直近を震源とする地震が発生したとみなし，所定の範囲に警報を出力する「閾値超過型」の手法であるが，今回は，シンプルな手法である閾値超過型の早期地震警報判断手法を検討することとした．

「閾値超過型」の検討項目は，観測する地震動指標，閾値，警報範囲である．まず，地震動指標については，上下動振幅に着目することとした．また，上下動加速度波形に対して功刀ら(2008)[5] が提案するフィルタ処理した加速度 A の最大値を算出し，それを震度への換算式（I=2log$A$+0.94）により求めた「上下動リアルタイム震度」（Ikp と呼ぶ）を地震動指標とした．上下動振幅に着目したのは，他谷ら(2013)[3]により，上下動最大加速度と計測震度 I の相関性が示され，警報出力に実用化されていることに加え，宮腰ら(2015)[4] が指摘する海底地震計の加速度センサー（ノード）の姿勢変化による影響を小さくできる利点を考えたからである．また，リアルタイム震度へ換算することにしたのは，海底地震計データをもとに陸上の計測震度の広がりを評価するためには，海底地震計での観測指標とも計測震度 I の親和性が重要となること，及び，警報判断指標として活用することから，地震中に逐次計算可能な指標であることも重要であると考えたからである．

次に，閾値及び警報範囲の決定方法について述べる．閾値超過型の早期地震警報判断手法では，ある海底地震計で閾値以上の振幅を観測した場合に，その海底地震計が設置されている海域であらかじめ想定した M の地震が発生したとみなすこととなる．そこで，閾値及び警報範囲は，Ikp の距離減衰モデルを作成し，これを用いて検討した．Ikp の距離減衰モデルは，(1)司・翠川(1999)[6]の基準基盤面での最大速度の距離減衰式，(2)佐藤ら(1989)[7]による気象庁 M からモーメントマグニチュード Mw への換算式，(3)翠川ら(1999)[8]による最大速度

キーワード　地震，海底地震計，鉄道，早期地震警報，上下動加速度
連絡先　〒100-0005 東京都千代田区丸の内一丁目 9 番 1 号　東海旅客鉄道㈱新幹線鉄道事業本部施設部　TEL:03-3286-5159

と *I* の換算式，(4)基準基盤面での計測震度(基盤震度：*Ib* と呼ぶ)と *Ikp* の関係式(**図-2**)を組み合わせることで作成した．**図-2** 中の式は 2000 年 1 月～2013 年 6 月に K-NET 相模湾，北海道釧路・十勝沖「海底地震総合観測システム」，DONET で記録された P 波初動部分が明瞭に記録されている地震 220 ケース，923 波形から作成した *Ib* と *Ikp* の関係である．海底地震計での警報閾値は，監視海域ごとに想定地震の M を設定すれば，このモデルを用いて，海底地震計での観測値を推計することで設定できる．また，警報範囲についても，このモデルを用いて想定地震時の陸域での各地の震度を推計することで設定できる．

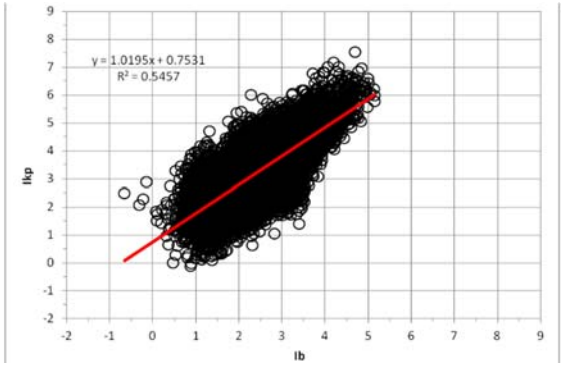

図-2　*Ib* と *Ikp* の関係

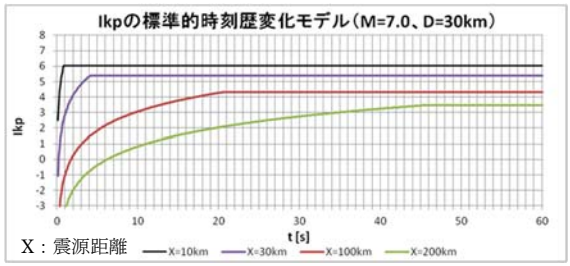

図-3　*Ikp(t)*の例

3.　海底地震警報システム導入効果の検討

海底地震計データを用いた閾値超過型の早期地震警報判断手法による警報システムの効果を検討する際，「地震発生から何秒程度で設定した閾値を超過するか」を知る必要がある．距離減衰式では *Ikp* の時間変化は分からないので，「*Ikp* 標準的時刻変化モデル *Ikp(t)*」を作成し，これを用いて警報タイミングのシミュレーションを行うこととした．*Ikp(t)*は，前述で *Ib* と *Ikp* の関係を検討した際に使用したものと同じ波形データを使用し，地震波到達からピーク到達までの区間を Jennings 型包絡線の減衰部を除いた二次関数で表し，ピーク値以降の区間を一定値で表した関数に観測波形の包絡線を近似させ，統計的に作成した．**図-3** に *Ikp(t)*の一例を示す．

また，作成した *Ikp(t)*を使用して各海域で *M*8 クラスの地震が発生した場合の警報タイミングシミュレーションを行った．想定震源海域は茨城沖，房総沖，相模沖，熊野灘の 4 海域とした．警報対象エリアは南関東・中京・近畿とした．海底地震計は**図-4** に示した位置に配置され，2 点以上の海底地震計で *Ikp* が 5.0 を超えた場合に警報が発信されると仮定した．結果を**表-1** に示す．震源域によって，また同じ震源域内でも震源位置によって大きさは異なるが，**表-1** のような余裕時間（警報出力～S 波到達時間）を生み出せる可能性があること等がわかった．

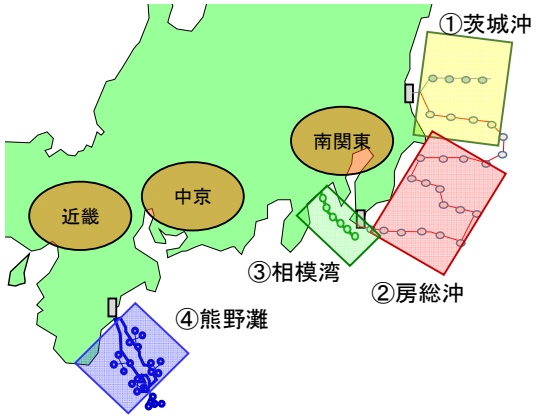

図-4　想定震源域と海底地震計の配置

表-1　警報シミュレーション結果

海域		茨城	房総	相模	熊野
余裕時間(秒)	平均	49	37	17	32
	最大	69	53	25	48

4.　まとめ

海底地震計データを用いた閾値超過型の早期地震警報判断手法として，上下動リアルタイム震度 *Ikp* による手法を提案した．これを茨城沖，房総沖，相模沖，熊野灘の 4 海域に適用した場合の早期地震警報タイミングのシミュレーションを行い，警報対象地域に S 波が到達する前に現状よりも余裕時間を生み出せる可能性があることを示した．

【謝辞】本稿では防災科研及び JAMSTEC の海底地震計データを使用させて頂いた．ここに記して感謝の意を表する．

【参考文献】1)JR 東日本(2011)：特集「東北地方太平洋沖地震と鉄道構造物」，SED37　2)他谷周一(2014)：東海道新幹線の地震防災システム，土木技術　3)他谷周一(2013)：東海道新幹線地震防災システム機能強化，JREA　4) 宮腰寛之ら(2015)：鉄道の早期地震警報への海底地震計情報活用に向けたデータ処理，RTRI REPORT　5) 功刀卓ら(2008)：震度のリアルタイム演算法，地震　6)司宏俊・翠川三郎(1999)：断層タイプ及び地盤条件を考慮した最大加速度・最大速度の距離減衰式，日本建築学会構造系論文報告集　7)佐藤良輔ら(1989)：日本の地震断層パラメータ・ハンドブック，鹿島出版　8)翠川三郎ら(1999)：計測震度と旧気象庁計測震度及び地震動強さの指標と関係，地域安全学会論文集