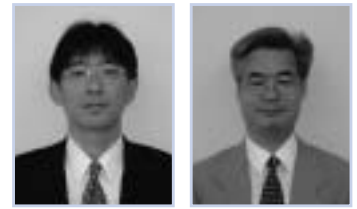


## 地震時運転規制方法の研究



鈴木 博人\* 島村 誠\*\*

従来、地震時の列車運転規制は地震計によって観測される最大加速度を判断指標として行われてきた。しかし、運転規制を行っても実際には列車運転に支障がないケースが大多数であり、現行の運転規制基準には改善の余地が認められる。そこで、地震の加害性をよりよく表現する最大加速度以外の地震動指標にもとづく列車運転規制基準を提案することを目的として、過去の地震動データや地震による鉄道構造物の被害記録にもとづいて、列車運転規制に用いる最適な地震動指標及び運転規制基準値について検討した。その結果、SI（スペクトル強度）を用いることにより最大加速度に比べて合理的な運転規制が可能となることを示すとともに、SIを用いた運転規制基準値を提案した。この基準案の導入により、適正な安全レベルを確保しつつ、運転規制発令回数を大幅に低減できることが見込まれる。

**キーワード：** 運転規制、地震動指標、スペクトル強度（SI）、最大加速度、計測震度

### 1 はじめに

世界有数の地震国である日本の鉄道にとって、地震時に列車の安全を確保することは大きな課題である。地震時に列車の安全を確保するための方法には、構造物の耐震性能を高めるハード対策と一定レベル以上の地震動が観測された場合には運転規制を行うソフト対策がある。

ソフト対策である地震時の運転規制は、最大加速度（ガル値）の観測値に基づいて行われてきた。加速度は、初期の地震計でもリアルタイムで簡単に計測できたため、地震動の大きさの指標として鉄道以外の多くの機関でも用いられてきた。

JR東日本管内の地震による運転規制は、1987年から2000年の14年間に171回発生している。これら171地震のうち、鉄道構造物に被害を及ぼした地震は、千葉県東方沖地震（1987）と三陸はるか沖地震（1994）の2回であり、それ以外の169地震では鉄道構造物に被害は発生していない。また、運転規制発令基準に満たない小地震での鉄道構造物被害は皆無である。このように、最大加速度による方法は運転規制を行っても実際には列車運転に支障がないケースが大多数であり、現行の運転規制基準には改善の余地が認められる。

地震動指標と地震被害の関係を分析した事例には、山崎ら（2001）<sup>1)</sup>や（財）日本ガス協会（1991）<sup>2)</sup>がある。前者は、高速道路の地震被害事例を対象とした分析から

スペクトル強度（SI）と計測震度は最大加速度よりも地震の被害との関連が高いと結論付けている。また、家屋や埋設管等の被害事例を対象とした後者の分析では、SIと最大速度は最大加速度、最大変位や計測震度よりも地震の被害との関連が高いとしている。このように、SIや計測震度は最大加速度よりも地震被害との関連性が高いといわれている。

一方、従来は地震動レベルをリアルタイムで測定できる地震計は地震動の振幅のみを評価する加速度や速度を計測するもののみであったが、最近では計測技術の進歩に伴って地震動の振幅だけでなく周波数特性も考慮されているSIや計測震度等もリアルタイムで計測できるようになった。

このようにSIや計測震度といった地震動指標を運転規制の基準に採用することで、地震時の列車運行の安全の向上と無害な地震に対する運転規制に起因する輸送障害の緩和に効果があると期待される。

そこで、本文ではこれらの技術進歩を踏まえ、適切な列車運転規制のための地震動指標とその運転規制基準値の決定方法について検討する。

### 2 地震時の列車運転規制の方法と現状

#### 2.1 地震時の運転規制方法

旧国鉄では、地震時の運転規制は1960年代までは駅長

や保線区長の体感震度で行なわれており、震度4で速度規制、震度5で運転中止としていた。その後、CTC化等による無人駅の増加等に伴って地震計（加速度計）が設置され、観測された最大加速度に基づいて運転規制が行われるようになった。地震計の導入にあたっては、運転中止の基準値は気象庁旧震度階の参考表（表1）の震度5の下限値に基づいて80gal以上が観測された場合とされた。なお、速度規制の基準値の40galは旧国鉄が独自に検討して定めたものである。

現在の在来線の運転規制の基準値は、地震計が導入された当初の基準値が用いられている（一般区間）が、耐震設計された区間（耐震区間）等のような耐震性能が高い構造物からなる区間等については基準値が高く設定されている。一般区間及び耐震区間の地震時の運転規制方法及び警備方法は、表2のとおりである。

表1：気象庁旧震度階の参考表（1949年制定）<sup>1)</sup>

震度	名称	記述	加速度 (gal)
0	無感	人体に感じないで地震計に記録される程度	0.8 未満
1	微震	静止している人々、特に地震に注意深い人だけに感ずる程度の地震	0.8～ 2.5
2	軽震	大勢の人に感ずる程度のもので、戸障子がわずかに動くのがわかるぐらいの地震	2.5～ 8.0
3	弱震	家屋が揺れ、戸障子がガタガタと鳴動し、電灯のような吊り下げ物は相当ゆれ、器内の水面の動くのがわかる程度の地震	8.0～ 25.0
4	中震	家屋の動揺が激しく、座りの悪い花びんなどは倒れ、器内の水はあふれ出る。また歩いている人にも感じられ、多くの人々は戸外に飛び出す程度の地震	25.0～ 80.0
5	強震	壁に割れ目が入り、墓石、石灯ろうが倒れたり、煙突、石垣などが破損する程度の地震	80.0～ 250.0
6	烈震	家屋の倒壊は、30%以下で、山崩れが起き、地割れを生じ、多くの人々は立っていることができない程度の地震	250.0 ～ 400.0
7	激震	家屋の倒壊が30%以上に及び山崩れ、地割れ、断層などを生ずる	400.0 以上

表2：地震時の運転規制及び警備方法

区間	震度	最大加速度(gal)	運転規制	警備
一般区間	3	25以上40未満	なし	なし
	4	40以上80未満	徐行35km/h	なし
	5	80以上	運転中止	地上巡回
耐震区間	3	25以上80未満	なし	なし
	4	80以上120未満	徐行35km/h	なし
	5	120以上	運転中止	地上巡回

### 3 運転規制に用いる地震動指標

運転規制に用いる新しい地震動指標として、SI及び計測震度を取り上げ、最大加速度を加えた3つの地震動指標を比較した。

#### 3.1 地震動指標

##### 3.1.1 最大加速度

最大加速度は、地表における地震動の加速度の最大値 (gal (cm / sec<sup>2</sup>)) による地震動指標である。

加速度は、同じ地震動であっても地震計のフィルター特性によって値が異なる。図1は、JR東日本の地震計と独立行政法人防災科学技術研究所の地震観測網であるK-net及びKiK-netのフィルター特性を示したものである<sup>3)</sup>。JR東日本とK-net等の地震計のフィルターを比較すると、K-netのフィルターは低周波数領域と高周波領域の感度が高く設定されており、JR東日本の地震計で計測された加速度はK-netの地震計で計測された加速度値の約0.6倍の値を示す。また、JR東日本で使用している地震計の加速度値は、気象庁旧震度階の参考表（表1）の加速度値の約1.8倍である。

なお、本論文ではK-net及びKiK-netの地震波形データを使用しているが、最大加速度はJR東日本の地震計のフィルターを使用した場合の値に変換して使用している。

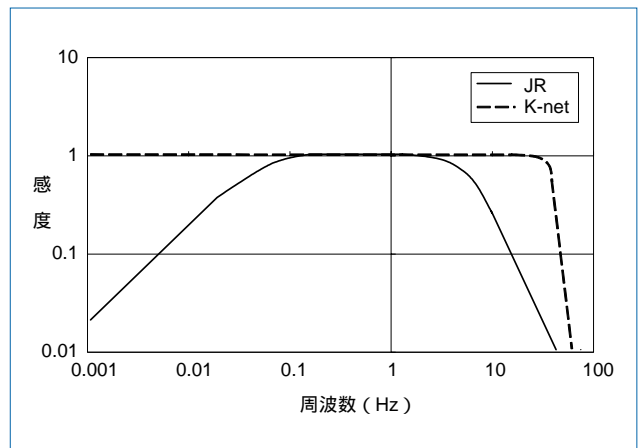


図1：地震計のフィルター

##### 3.1.2 SI

SI (スペクトル強度、Spectrum Intensity) は、地震による構造物の揺れの程度を表す地震動指標である。SIは、1961年にG.W.Housnerにより提案され、減衰定数  $h = 0.20$  に対する速度応答スペクトルの周期0.1秒から2.5秒の区間における平均値 (kine (cm / sec)) として定義される<sup>4)</sup>。

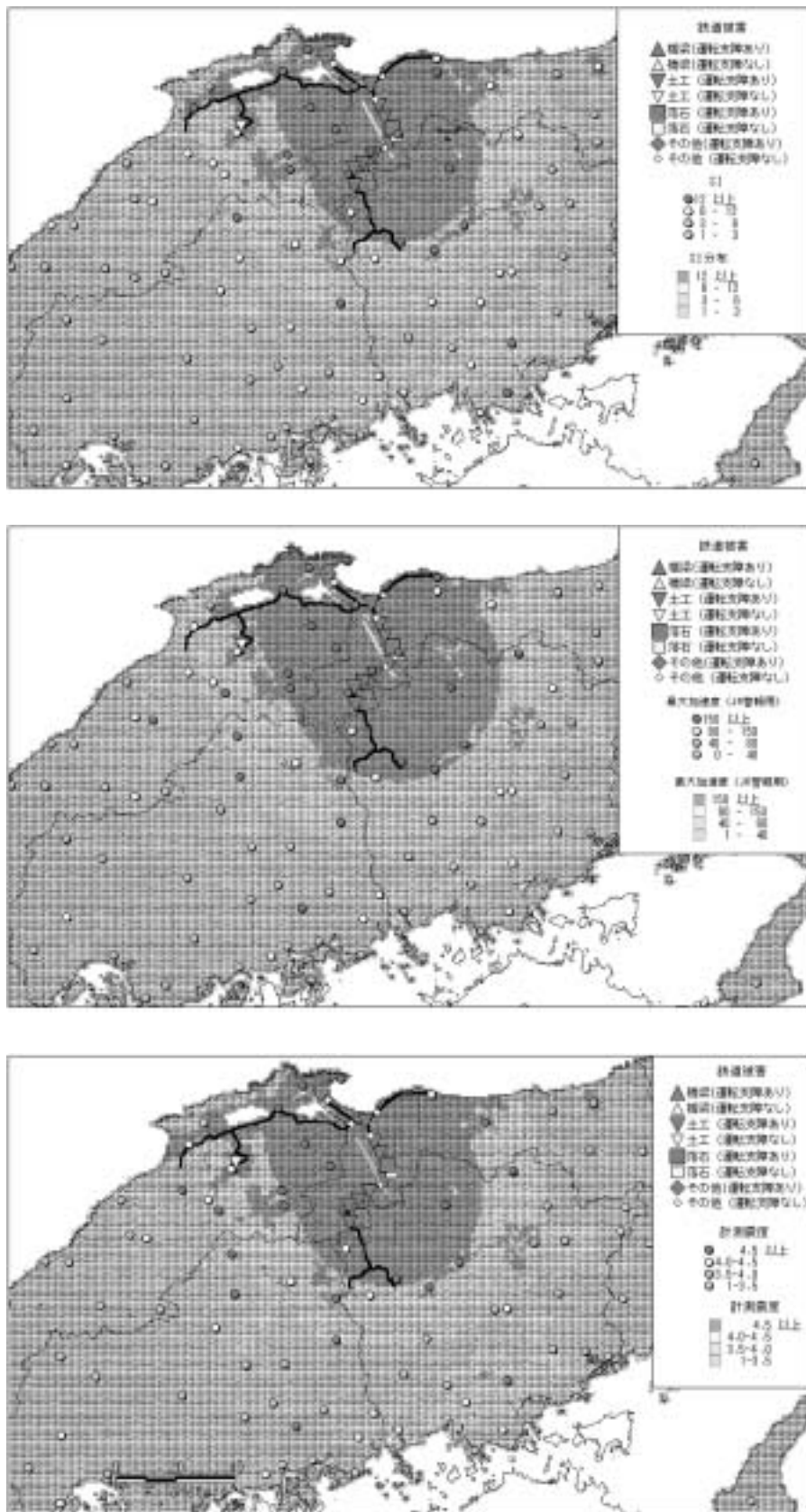


図2：鉄道被害箇所と地振動分布推定図（鳥取県西部地震 2000.10.6）  
（上：最大加速度、中：SI、下：計測震度）



$$SI = \frac{1}{2.4} \int_{0.1}^{2.5} Sv(t)dt \quad (h = 2.0)$$

SI : SI

Sv(t) : 周期tに対する最大速度応答

### 3.1.3 計測震度

震度は、ある場所での地震による揺れの強さの程度を表すために気象庁が定めた日本独自の地震動指標であり、従来は気象庁職員の体感や被害状況から判定していた。1990年からは、震度の判定をより客観的に行うためと震度情報のスピードアップを図るために、計測震度を直接計測できる震度計が導入されている。

計測震度は、地震動の加速度、周期及び継続時間等の要素を組合せて震度が測定できるように気象庁が開発した地震動指標で、地震動の加速度波形を用いて過去の地震による震度にできるだけ一致するように組み込まれた経験式によって算出される。

### 3.2 地震動指標と鉄道被害の関連性の分析

地震による鉄道構造物の被害データやJR東日本及びK-net等の地震計データを用いて、地震動指標と鉄道被害の関連性を分析した。

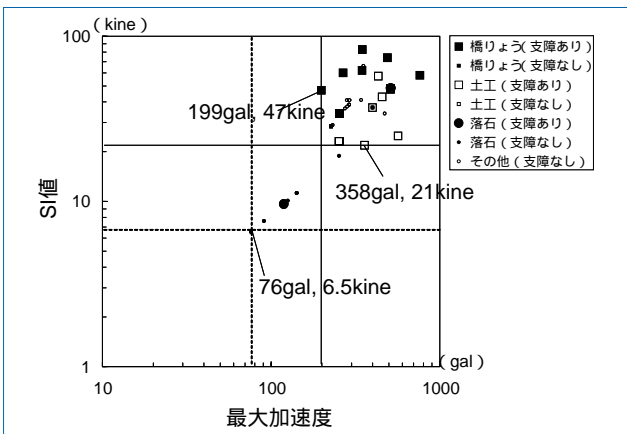


図3：地振動指標値と被害の関係（最大加速度，SI）

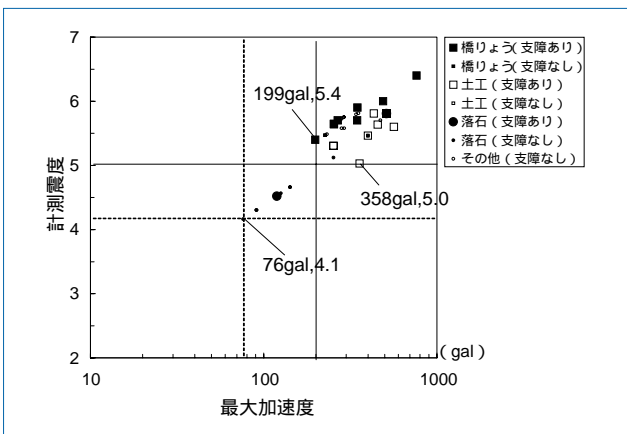


図4：地振動指標値と被害の関係（最大加速度，計測震度）

### 3.2.1 鉄道被害の地震動レベルの下限値

鉄道構造物に被害を発生させた地震動レベルの下限値は、三陸はるか沖地震（1994.12.28，M7.5）、兵庫県南部地震（1995.01.17，M7.3）、鳥取県西部地震（2000.10.06，M7.3）及び芸予地震（2001.03.24，M6.4）の被害データと地震動波形データを用いて行った。K-net及びKiK-netの地震観測網が整備された後に発生した鳥取県西部地震及び及び芸予地震については、山崎ら（2001）<sup>1)</sup>が提案している基盤面に換算した距離減衰式をトレンド成分として用いる空間補完法を用いて最大加速度、SI及び計測震度の面的分布を推定し、被害が発生した箇所のそれらの値を推定した。図2は、鳥取県西部地震の最大加速度、SI及び計測震度の面的分布を推定したものである。また、三陸はるか沖地震及び兵庫県南部地震については、地震動波形が残る箇所が少ないことから地震動の面的分布を求めることができなかったため、記録が残る観測箇所の地震動に対応する被害データのみを用いた。なお、表3は解析に用いた地震被害のデータ数である。

図3は、鳥取県西部地震及び芸予地震の被害箇所における最大加速度とSIをプロットしたものである。同様に、図4は最大加速度と計測震度のものである。なお、被害箇所は被害を受けた構造物を橋りょう（高架橋を含む）土工設備（盛土、切取り、自然斜面及び土留壁等）、落石、及びその他（ホームや電柱等）に区分し、被害の程度は列車の運転に支障ありと支障なしに区分して示した。これらの図において、全ての被害及び主要な構造物（橋りょう（高架橋を含む）及び土工設備（盛土、切取り、自然斜面及び土留壁等、ただし落石を除く）の被害に対する最大加速度、SI及び計測震度の下限値を求めると、表4のようになる。

表3：被害箇所のデータ数

地震	被害データ数					総計
	橋りょう	土工設備	落石	その他	合計	
鳥取県西部地震	10	30	7	9	56	137
芸予地震	23	7	11	25	66	
兵庫県南部地震	4	3	0	5	12	
三陸はるか沖地震	1	1	0	1	3	

注) 鳥取県西部地震及び芸予地震の被害データ数は鉄道被害の全箇所とした。兵庫県南部地震及び三陸はるか沖地震の被害データ数は記録の残る観測箇所毎の数とした（1つの観測箇所の周辺で複数の被害が発生していても被害データ数は1とした）。なお、記録の残る観測箇所数は兵庫県南部地震が5箇所、三陸はるか沖地震が1箇所である。

表4：地振動指標の下限値

	全ての被害を捕捉			主要な構造物の被害を捕捉		
	最大加速度 (gal)	SI (kine)	計測震度	最大加速度 (gal)	SI (kine)	計測震度
地震動レベル	76	6.5	4.1	199	21.8	5.0

表5：地震動レベルと超過データ数の関係

	全ての被害を捕捉			主要な構造物の被害を捕捉		
	最大加速度 (gal)	SI (kine)	計測震度	最大加速度 (gal)	SI (kine)	計測震度
地震動レベル	76	6.5	4.1	199	21.8	5.0
超過データ数	37	27	25	5	2	3

### 3.2.2 地震動レベルと超過データ数の関係

運転規制に用いる地震動指標は、なるべく少ない運転規制発令回数で被害地震を見逃しなく捕捉できる（警報を発する）ものが望ましい。図5は、1989年以降でJR東日本管内の地震計で観測された地震の299波形データ（被害が発生しなかった地震波形データは298波形、被害が発生したデータは1波形）から求めた最大加速度とSIの散布図上に、全ての被害を捕捉できる下限値及び主要な構造物被害を捕捉できる下限値を示したものである。また、図6は同様の関係を最大加速度と計測震度について示したものである。これらから、全ての被害を捕捉できる地震動の下限値及び主要な構造物の被害を捕捉できる地震動の下限値を超過するデータ数は、表5のようになる。なお、被害が発生した地震波形から得られる最大加速度、SI及び計測震度は、それぞれの全ての被害を捕

捉できる地震動の下限値及び主要な構造物の被害を捕捉できる地震動の下限値以上の値である。

以上から、全ての災害を捕捉できる下限値及び主要な構造物の被害を捕捉できる下限値を超過するデータ数は、SIと計測震度では大きな差がないのに対して、最大加速度ではこれよりも多いことがわかる。一般的な結論を導くにはデータ数が十分とはいえないが、今回の鉄道被害の分析結果は、SIや計測震度は最大加速度よりも地震被害との関連性が大きいという他機関における既往の研究結果と矛盾しない。

### 3.3 SIと計測震度の比較

以上より、SI及び計測震度は最大加速度と比べて地震被害の程度をよりよく表現するが、SIと計測震度との間には被害との関連性に大きな差はないと考えられる。そこで、警報のリアルタイム性、指標の不変性、コスト及び一般への認知度で両指標を比較した。

#### (1) 警報のリアルタイム性

SIの計算周期は地震計の機種によって異なるが、計算周期が最も短いものでは0.01秒間隔で計算されている。よって、SIは地震計の機種を選ぶことによって極めて短い時間間隔で警報を出力することが可能である。一方、計測震度は現在気象庁が定めている方法が10秒間隔で切り出された地震波形から計算するルールになっているので、警報の出力は10秒毎となる。従って、リアルタイム性が重要な運転規制にはSIの方が有利である。

#### (2) 指標の不変性

計測震度は、これまでに観測された地震動データに基づいて、地震動の加速度、周期及び継続時間等の要素を組合せて震度が測定できるように開発された指標であるため、今後の新たな地震動データを踏まえて、主要な係数が変更される可能性がある。従って、計測震度は主要な係数が変わることによって指標値の意味が変わる可能性があるとともに、地震動波形記録がないと指標値を再現できなくなる可能性がある。一方、SIは、定義式に経験データに依存するパラメータが含まれないのでこのような問題はない。

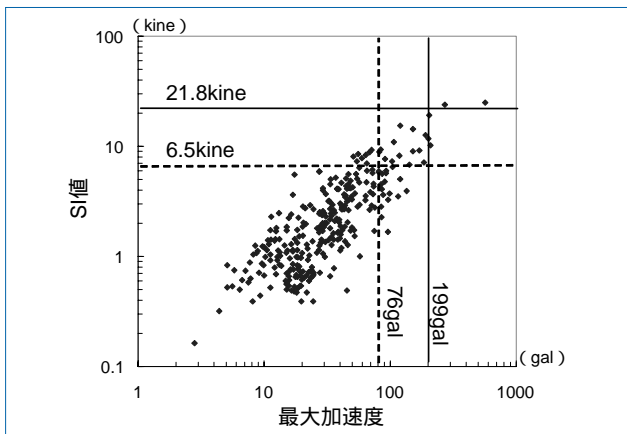


図5：最大加速度とSIの関係

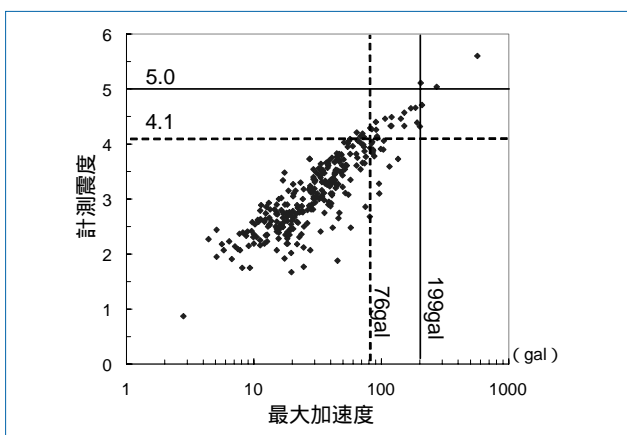


図6：最大加速度と計測震度の関係

### (3)計測機器のコスト

SIや計測震度が測定できるSI計や震度計の価格は機種によって異なるが、警報を0.01秒間隔で出力できるSI計と気象庁の検定に合格した一般的な震度計の価格を比較すると、SI計は震度計に比べて安価である。これは、SI計は比較的大きな地震動に対して確実に警報を発することを主目的とした機器であるのに対し、震度計は理学的な観測目的にも合致するように微小な地震動を捕らえることができる分解能の高い加速度センサーが用いられた機器であること等による。

### (4)認知度

計測震度は震度が従来から使用されてきたことから一般の認知度は高いのに対して、SIは一般に馴染みが薄く、数値から地震動の大きさを直感的に把握しにくいという難点がある。しかし、現行で最大加速度から震度に読み替えているのと同様に、SIから計測震度に読み替える方法を確立しておけば、SIの認知度が低いことは余り大きな問題にならないと考えられる。

## 3.4 運転規制に用いる新しい地震動指標の提案

運転規制に用いる地震動指標としては、地震被害との関連性から現行の最大加速度よりもSIや計測震度の方が有利である。地震被害との関連性においてはSIと計測震度には大きな差がないので、地震被害との関連性以外の面で比較すると、SIは計測震度に比べて一般への認知度の面では劣るが、警報のリアルタイム性、指標の不変性及びコストという面では優れている。以上から判断すると、運転規制に用いる地震動指標としては、現状ではSIが最も有利であると考えられる。

## 4 SIによる運転規制基準値の設定

次いで、前節で提案したSIを用いる場合の運転規制基準値の決定方法について、現行の規制基準値の設定経緯および既往鉄道被害の地震動下限値のふたつの根拠にもとづいて検討をおこなった。

### 4.1 現行運転中止基準値の設定経緯

地震計の導入以前の運転中止基準は、震度5で運転中止と定められ、震度は駅長または保線区長が判定していた。また、現行の最大加速度による一般区間の運転中止基準値は、地震計の導入にあたって気象庁旧震度階の参考表(表1)の震度5の下限値である80galに基づいて決められた経緯がある。こうした当初の設定根拠に立ち

返るならば、気象庁旧震度階の参考表の震度5の下限値に相当するSIを運転中止の基準値とする案を考えることができる。

SIと計測震度との関係は、JR東日本管内の地震計で観測された299波形のデータ、及びK-netが整備された後の被害地震である鳥取県西部地震及び芸予地震のK-netの245箇所の観測データを用い求めた(図7)。この図から両者の相関は高く、震度5の下限値に相当する計測震度4.5に相当するSIは、12kineとなる。

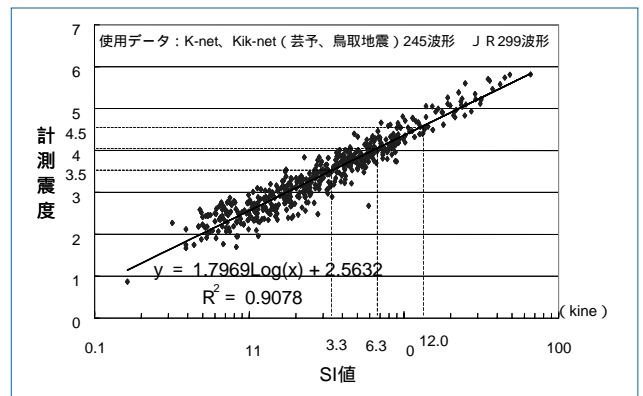


図7：計測震度とSIの関係  
(JRデータ及び芸予・鳥取西部地震データより)

### 4.2 被害地震の地震動下限値

3.2に述べた鉄道被害と地震動レベルの分析に基づいて、鉄道被害の下限値を運転中止基準値とする案も考えることができる。全ての鉄道被害に対するSIの下限値は6.5kine、主要な構造物に対する下限値は21.8kineである。そこで、これらの端数を処理した6kineあるいは20kineを運転中止の基準値とすることが考えられる。

### 4.3 運転中止基準値の提案

運転中止の基準値として考えられるSIの異なる3つの案について、表6で比較した。また、この表の中の運転中止基準値の超過データ数はJR東日本管内で観測された地震299波形のデータから求めたそれぞれの基準値案を超過するデータ数である(図8)。表6から、一般区間(落石の発生の恐れのない区間)の運転中止基準値としては案2の12kineを提案する。これは、主要線区における運転中止回数を低減できること、案1に対して主要な構造物の被害に対する安全余裕があること、及び現行の運転中止基準値が気象庁旧震度階の震度5の下限値に基づいて決められていたことによるものである。

また、山間区間(落石等の発生する恐れのある区間)の運転中止基準値としては6kineを提案する。これは、芸予地震で発生した落石を捕捉できること、及び図9よ

り現行の運転中止の基準値である最大加速度80galに相当する計測震度4.0の相当値であることによる。

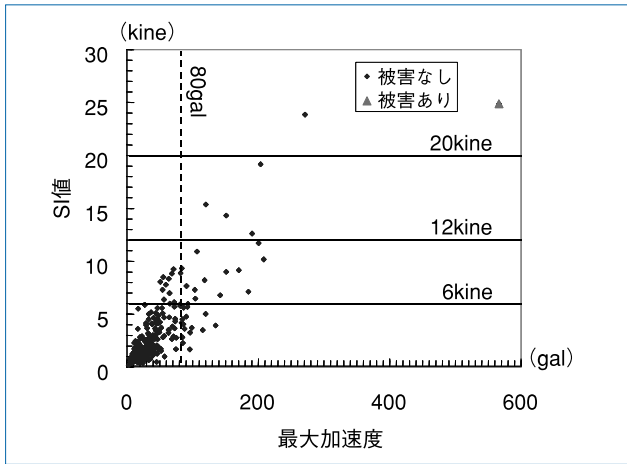


図8：SI値による運転中止基準値案と超過データ数 (N=299)

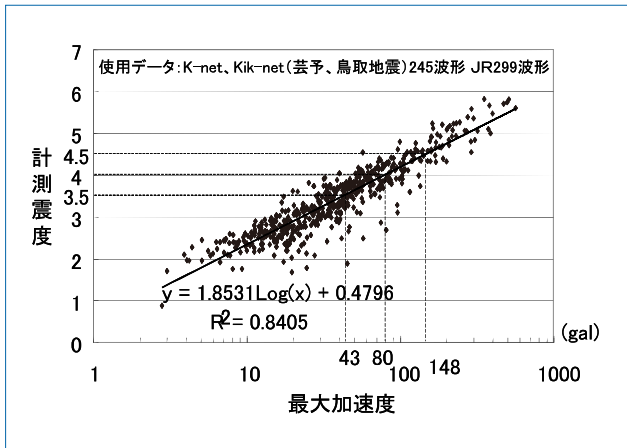


図9：計測震度と最大加速度の関係 (JRデータ及び芸予・鳥取西部地震データより)

#### 4.4 速度規制基準値の提案

現行の最大加速度による運転中止基準値は80gal、速度規制基準値は40galである。図9から、80gal及び40galに相当する計測震度は4.0及び3.5であり、両者の計測震度の差は0.5である。これから、SIによる速度規制基準値と運転中止基準値は計測震度にして0.5の差とし、図7から一般区間及び山間区間に対してそれぞれ6kine及び3kineを提案する。

#### 4.5 耐震設計区間の運転規制基準値の提案

耐震設計された区間のSIによる運転中止基準値は、一般区間の運転中止基準値の算出方法と同様に、計測震度を介して行う方法を提案する。運転中止基準値の算出方法は図10のとおりであり、SIによる運転中止基準値は気象庁旧震度階の参考表(表1)における最大加速度

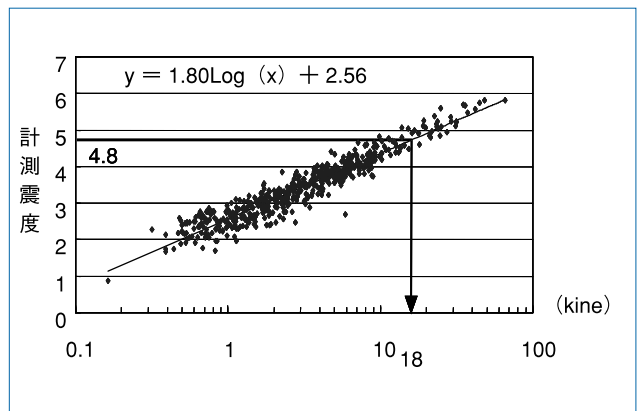


図10：耐震設計された区間の運転中止基準値の算出方法

表6：運転中止基準値の比較

		案1	案2	案3
運転中止基準値		20kine	12kine	6kine
設定根拠		構造物の被害の下限値である21kineの1の位の切り下げ	計測震度4.5相当値	全ての被害の下限値6.5kineの小数点以下切り下げ
運転中止基準値の超過データ数		2	6	30
長所		運転規制の発令頻度が減少する(37回→2回)。	運転中止の発令頻度が減少する(37回→6回)。また、主要な構造物に対して安全余裕がある。	全ての構造物に対して安全余裕がある。
短所		落石災害は20kine以下で発生した事例がある。また、主要な構造物に対して安全余裕が小さい。	落石は12kine以下で発生した事例がある。	運転中止の発令の低減効果が小さい(37回→30回)。
評価	一般区間	△	○	△
	山間区間	×	×	○

※超過頻度の算出は、JR東日本の299データによる。

※現行の運転中止の基準値である80galの超過回数は37回である。



120gal（計測震度4.8）に相当する18kineを提案する。また、速度規制基準値は計測震度4.3（＝計測震度4.8 - 0.5）に相当する9 kineを提案する。

#### 4.6 運転規制基準値と効果

表7にSIによる運転規制基準値をまとめた。また、運転規制に用いる地震動指標をSIに代えることによる効果をみるために、JR東日本の地震計で観測された299波形のデータを用いて、それぞれの運転規制値を超過したデータ数を求めた（表8）。これから、地震動指標をSIに代えることで、運転規制回数を総じて減じられることがわかる。

表7：SIによる運転規制基準値（案）

	一般区間	山間区間	耐震区間
運転中止(kine)	12	6	18
速度規制(kine)	6	3	9

表8：運転規制基準値の超過データ数

	現行の一般区間			現行の耐震区間	
	現行	SIによる場合		現行	SIによる場合
		一般区間	山間区間		
運転中止	37	6	30	14	3
速度規制	107	30	92	37	13

## 5 おわりに

本報告では、列車運転規制に用いる地震動指標として、現状で最適なものはSIであることを示すとともに、SIによる運転規制基準値の提案をおこなった。

なお、本報告の提案にもとづく新しい地震時列車運転規制基準は、2003年4月から導入される予定である。

最後に、本報告をまとめるにあたっては2001年8月から12月にかけて開催された「列車運転規制に用いる新しい地震動評価指標に関する技術検討会」（委員長：龍岡文夫 東京大学教授）より多くの助言を頂いたことに対して、この場を借りてお礼申し上げます。また、本検討で使用した鳥取県西部地震及び芸予地震の被害データは、JR西日本より提供頂いたことに対しても、この場を借りてお礼申し上げます。なお、本検討においては独立行政法人防災科学技術研究所によるk-net及びkik-netのデータを使用しました。

### 参考文献

- 1) 山崎文雄：高速道路の地震被害関数と通行規制基準，社会基盤システムの実時間制御技術3（文部省科学研究費特定領域研究，研究者代表：山崎文雄），(2001)，pp.37-50.
- 2) (財)日本ガス協会：地震時の緊急措置判断のための情報に関する研究報告書，(1991)
- 3) <http://www.bosai.go.jp>（防災科学研究所のホームページ）
- 4) 大崎順彦：新・地震動スペクトル解析入門，(1996)，鹿島出版会.