

マグニチュード推定式の改良による 早期地震警報の即時性向上

鉄道地震工学研究センター 地震解析研究室
主任研究員 野田 俊太

背景

- 2024年1月1日の能登半島地震(M7.6)や同年8月8日の日向灘の地震(M7.1)など、昨年も顕著な大地震が発生した。
- 大地震に対する安全性を向上させていくことが不可欠である。

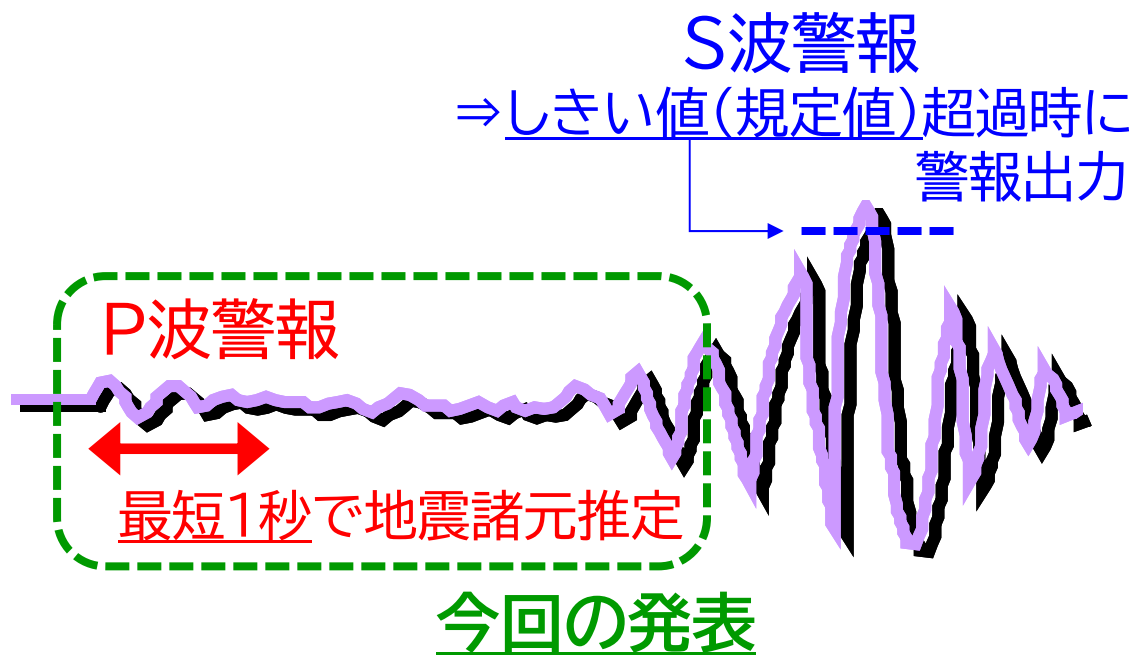
目的

- 新幹線早期地震警報システムの警報出力即時性を向上させ、走行列車の地震時安全性を向上させる。

- 早期地震警報の従来手法
- 従来のマグニチュード推定手法とその改良
- 改良係数によるM推定の効果と検証

早期地震警報の従来手法

- 地震時により早く列車を停止することが重要 ⇒ 早期地震警報



- 地震諸元とは
⇒ 地震の発生場所(震源または震央)
および規模(マグニチュードM)

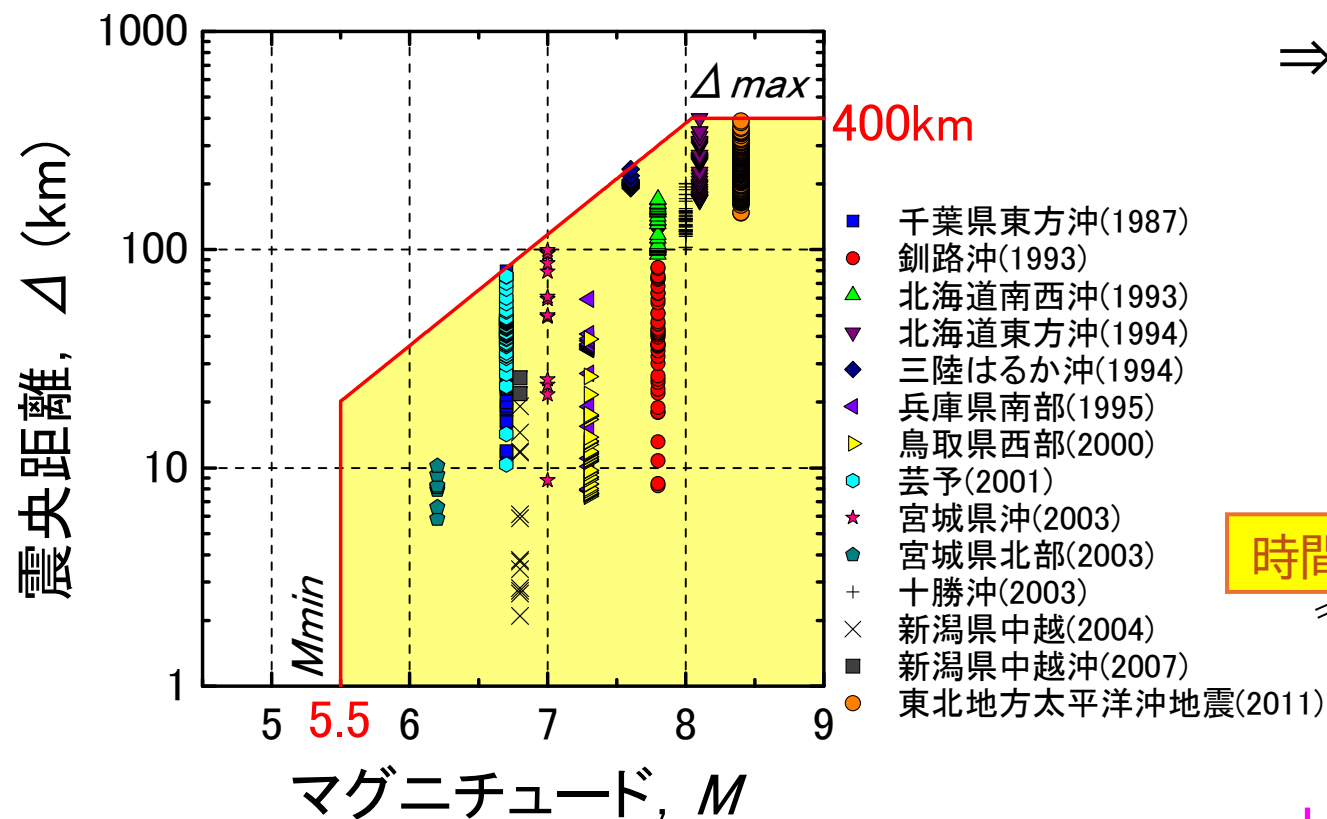
- 新幹線早期地震警報システムのP波警報
⇒ 複数手法の組み合わせで
地震諸元を推定

地震諸元	推定手法
震央距離	C-Δ法
震央方位	主成分分析法
マグニチュードM	距離減衰式法

早期地震警報の従来手法

- どの範囲に警報を出力するか？

⇒ M- Δ 法(中村・他, 2005)

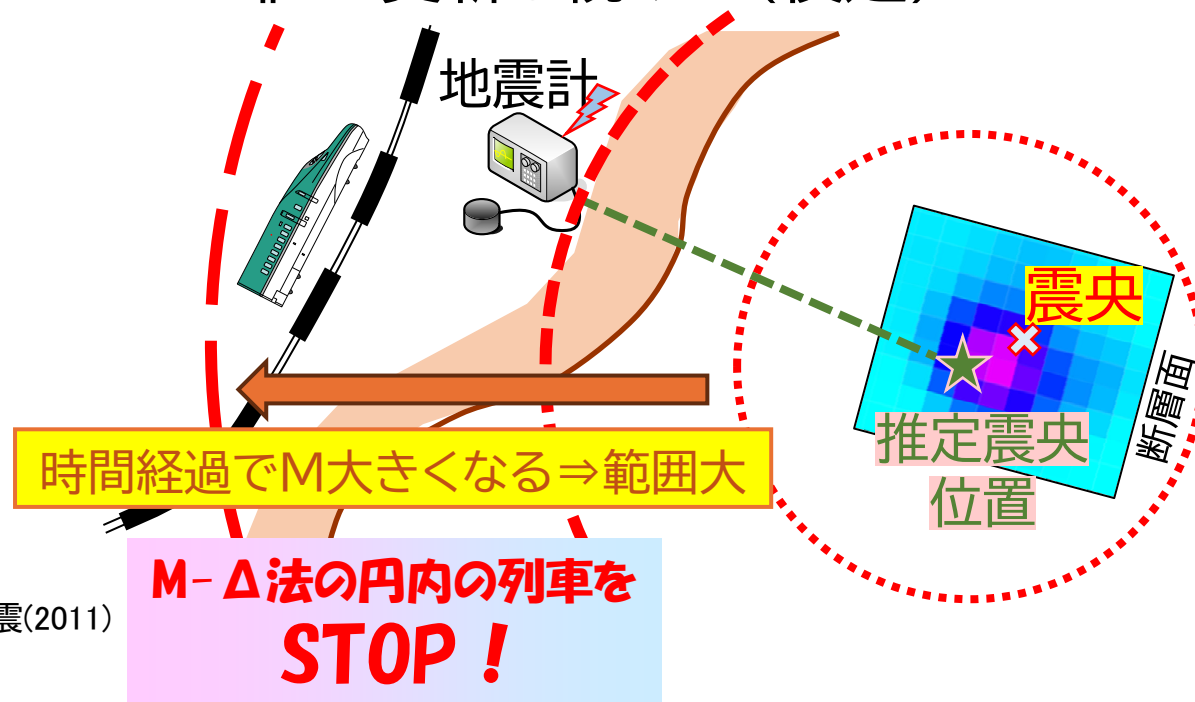


- M:大 ⇒ 警報出力範囲:広い

- Mの大きな地震は時間をかけて断層の破壊が進む

⇒破壊開始直後には最終的なMは不明

⇒Mの値を更新し続ける(後述)



- 大きなMの場合、それを早く推定することが重要

従来のマグニチュードMの推定手法

- 地震動の距離減衰式を利用 log: 常用対数

$$M = \underbrace{Pm_1}_{\text{係数}} \times \log D_{\max} + \underbrace{Pm_2}_{\text{係数}} \times \underbrace{\log \Delta}_{\text{震央距離}} + \underbrace{Pm_3}_{\text{係数}} + \underbrace{Pm_4}_{\text{係数}} \times \underbrace{\Delta}_{\text{震央距離}}$$

係数: 過去データから統計的に決定

⇒ 従来式では常に一定

震央距離 Δ : M推定前に決定(C- Δ 法)

- Δ を先に決定すると... ⇒ $\log D_{\max}$ とMは単純な比例関係

$$M = Pm_1 \times \log D_{\max} + Pm_3 + (\text{定数})$$

$D_{\max}$: 地震計で観測されている地動の変位の最大値

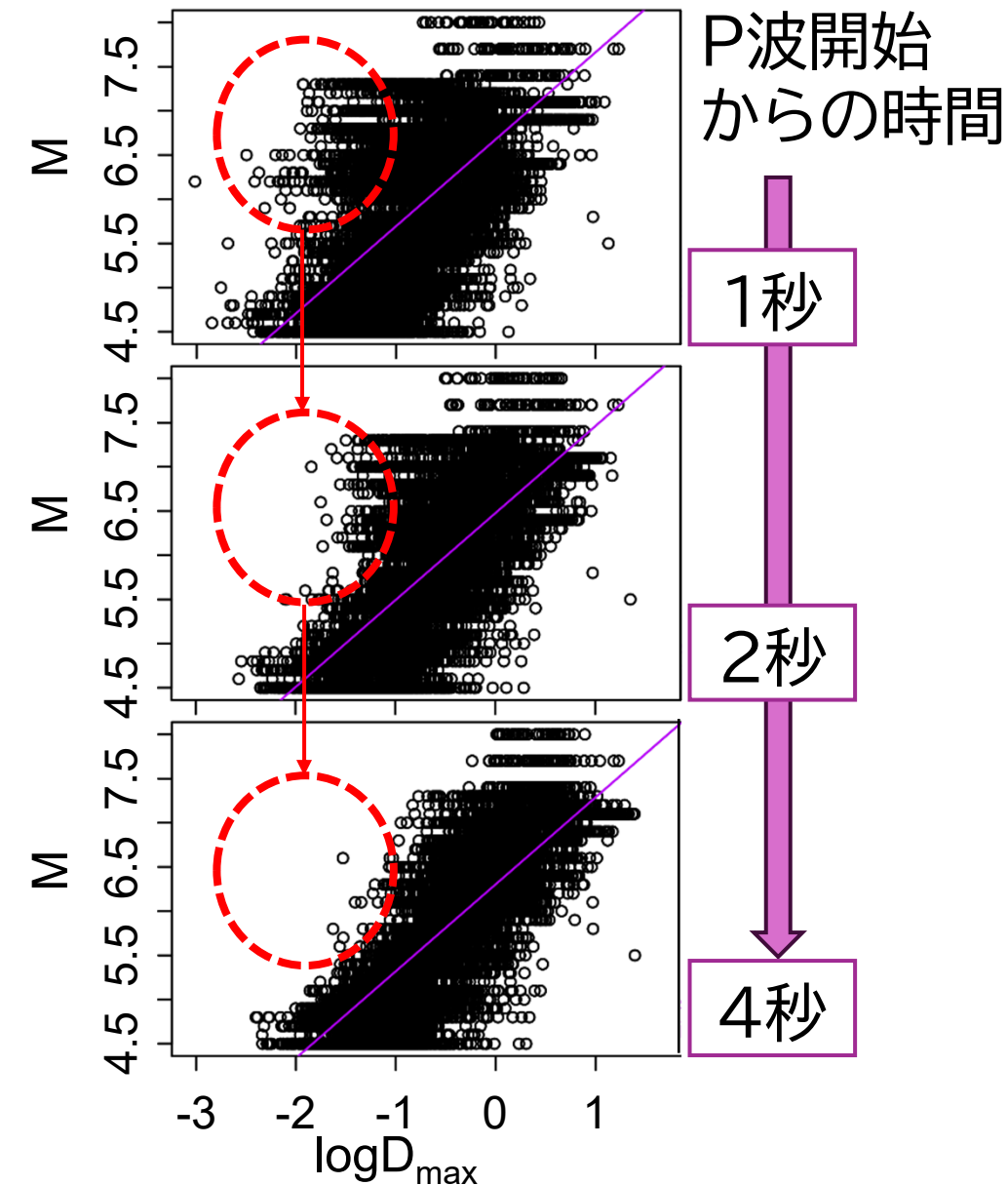
※断層の破壊が進行(Mが大) ⇔ $D_{\max}$ が大きくなる

$D_{\max}$ が最大にならないと、Mが最大にならない

⇒ 従来の地震学における技術的限界

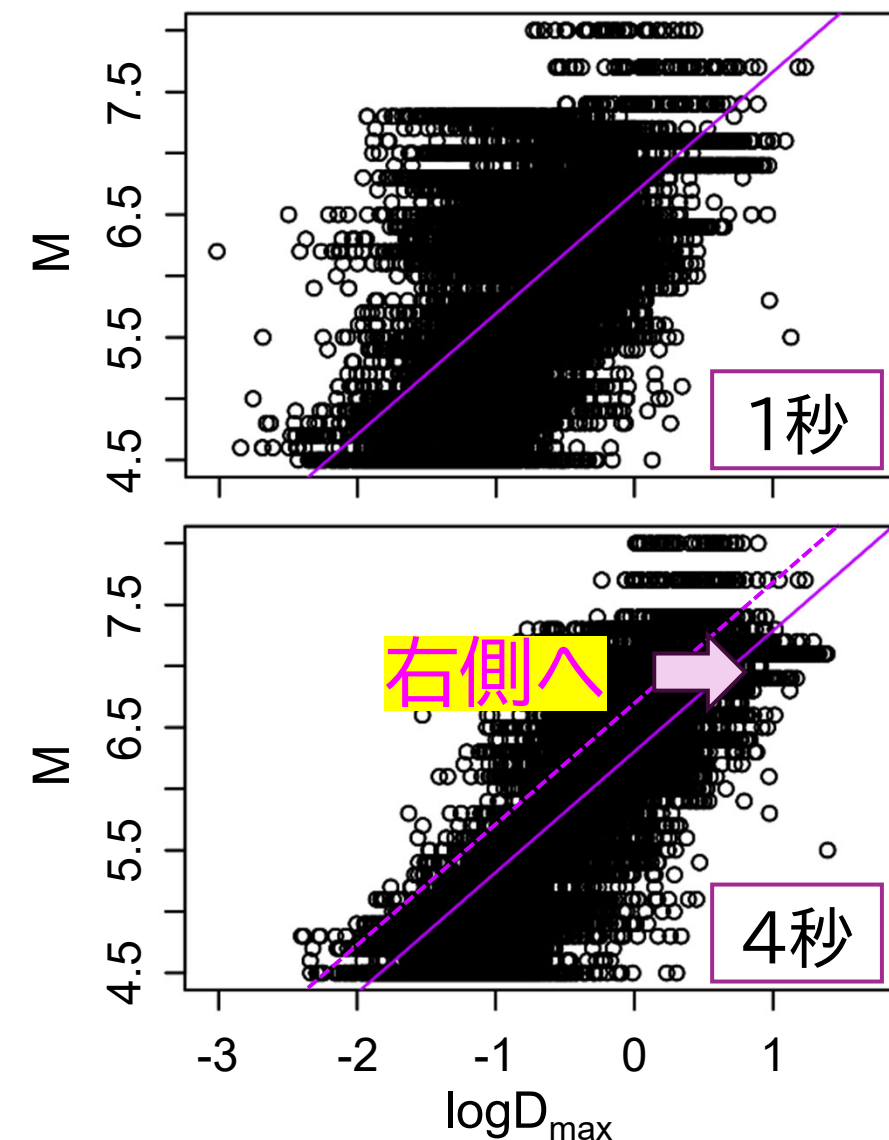
マグニチュードMと地動変位の最大値 $D_{\max}$ の関係

Railway Technical Research Institute



- P波開始から1秒時点:
 $\log D_{\max}$ とMのバラツキ大 しかし、
 $\log D_{\max}$ とMの比例関係は成立と
みなせる
- P波開始から時間が経つと…
 $\log D_{\max}$ とMの比例関係が成立したまま、
 $\log D_{\max}$ が大きくなる
⇒ P波開始からの時間によって、
比例関係式を変化させる(本研究)

マグニチュードMの推定式の改良

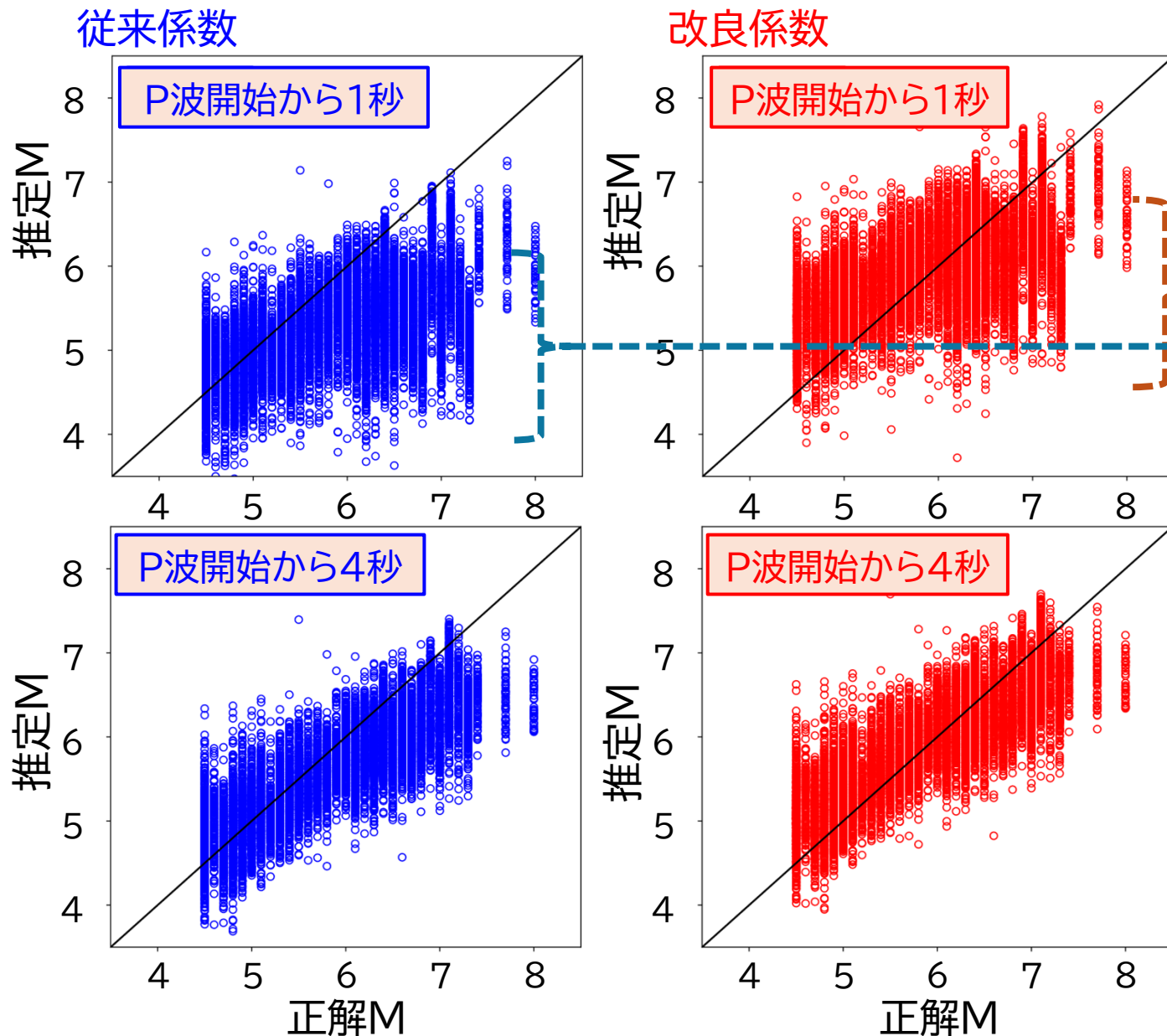


- $M = Pm_1 \times \log D_{\max} + Pm_3 + (\text{定数})$
 $\Rightarrow Pm_1$ を固定、 Pm_3 を時間変化させる
 ※比例関係式を $\log D_{\max}$ の増加に応じて右側にずらす

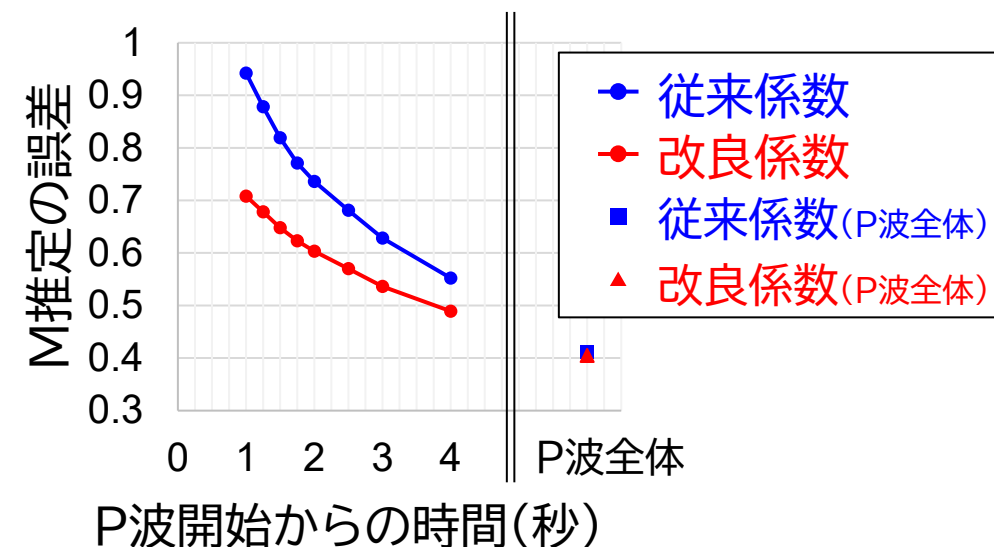
P波開始からの時間(秒)	従来Pm1	従来Pm3	改良Pm1	改良Pm3
1.0	0.968	6.002	0.984	6.679
2.0				6.475
3.0				6.377
4.0				6.304
それ以降				6.120

- ※比例関係式が右側にずれると、切片 Pm_3 は縦軸との交点のため、 Pm_3 の値は下がる
- ※ Pm_1 :固定、 Pm_3 :変化 $\Rightarrow$ 導入が容易

改良係数によるM推定



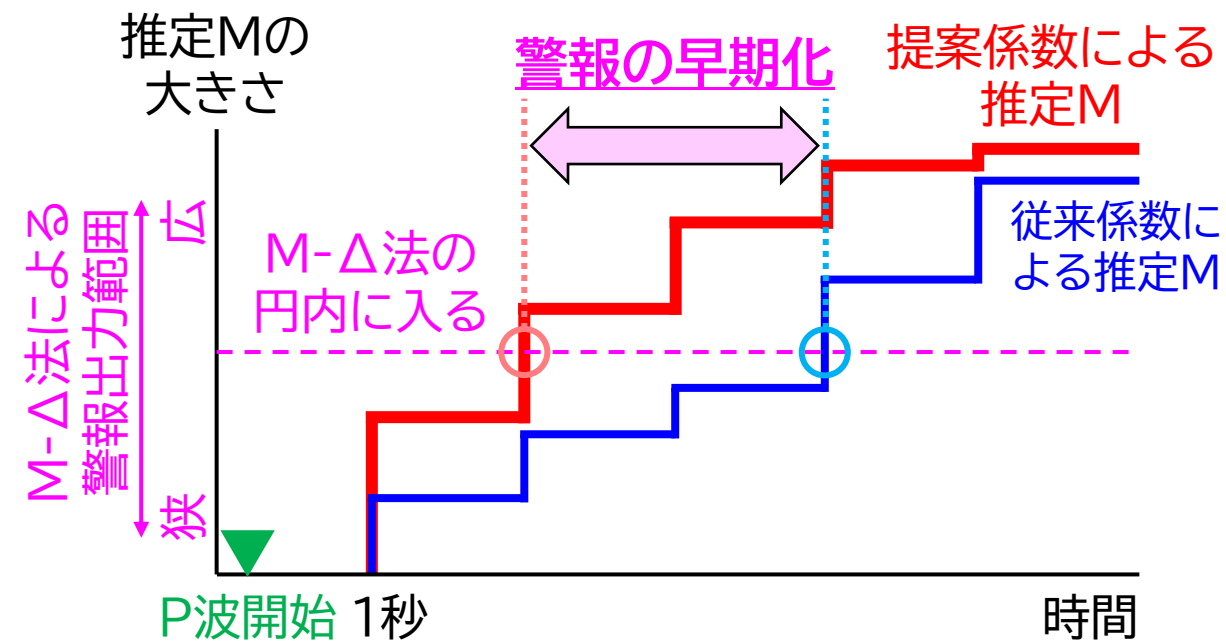
- P波開始から1秒時点:
従来係数⇒Mが過小評価
改良係数⇒過小評価が軽減



- 過小評価軽減のため、早い時点から改良係数の誤差低
⇒ より早く大きなMを推定可

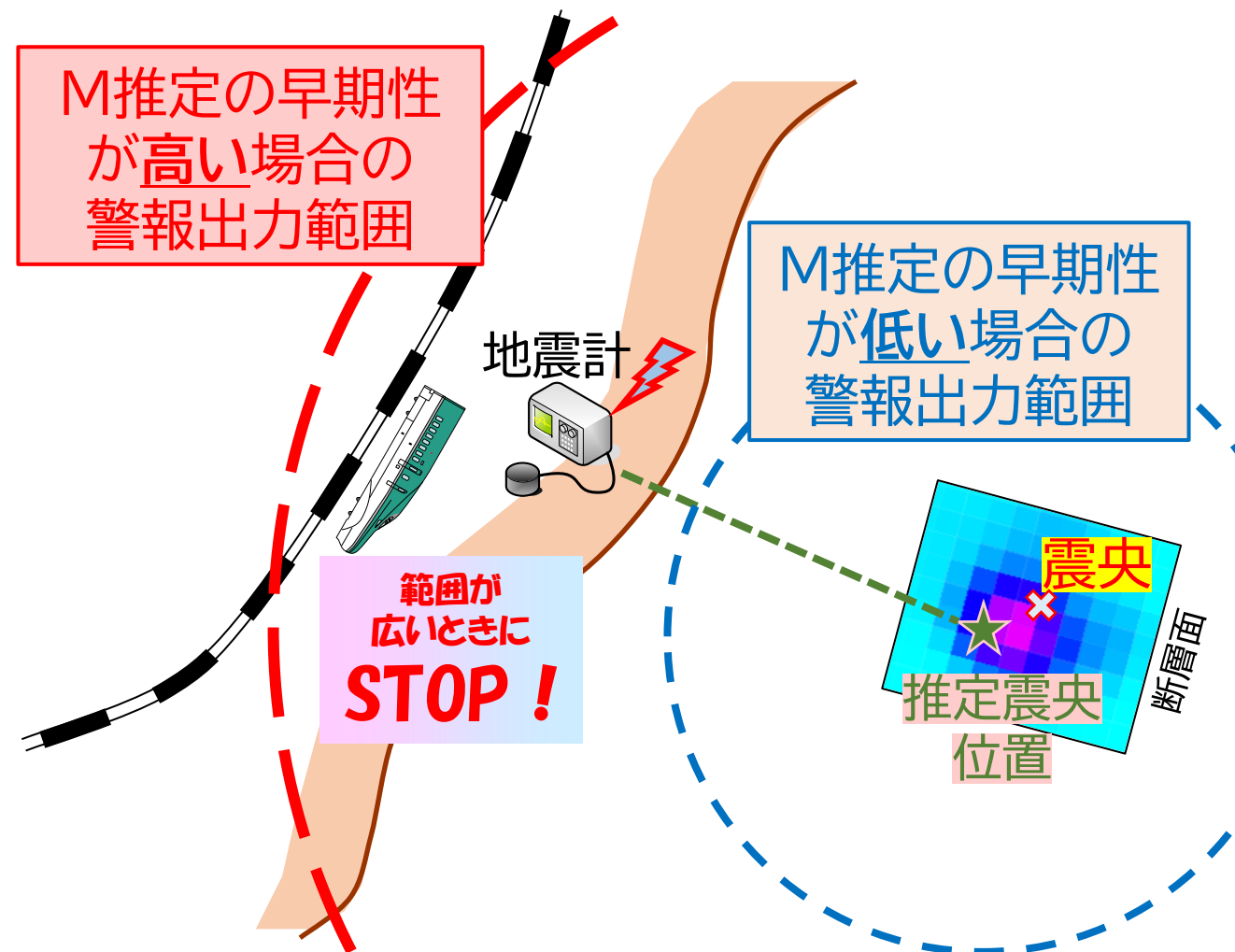
改良係数によるM推定の効果イメージ

Railway Technical Research Institute



- 改良係数によって、Mがより早いタイミングで大きくなる

⇒ M-Δ法による警報出力範囲がより早く広がる

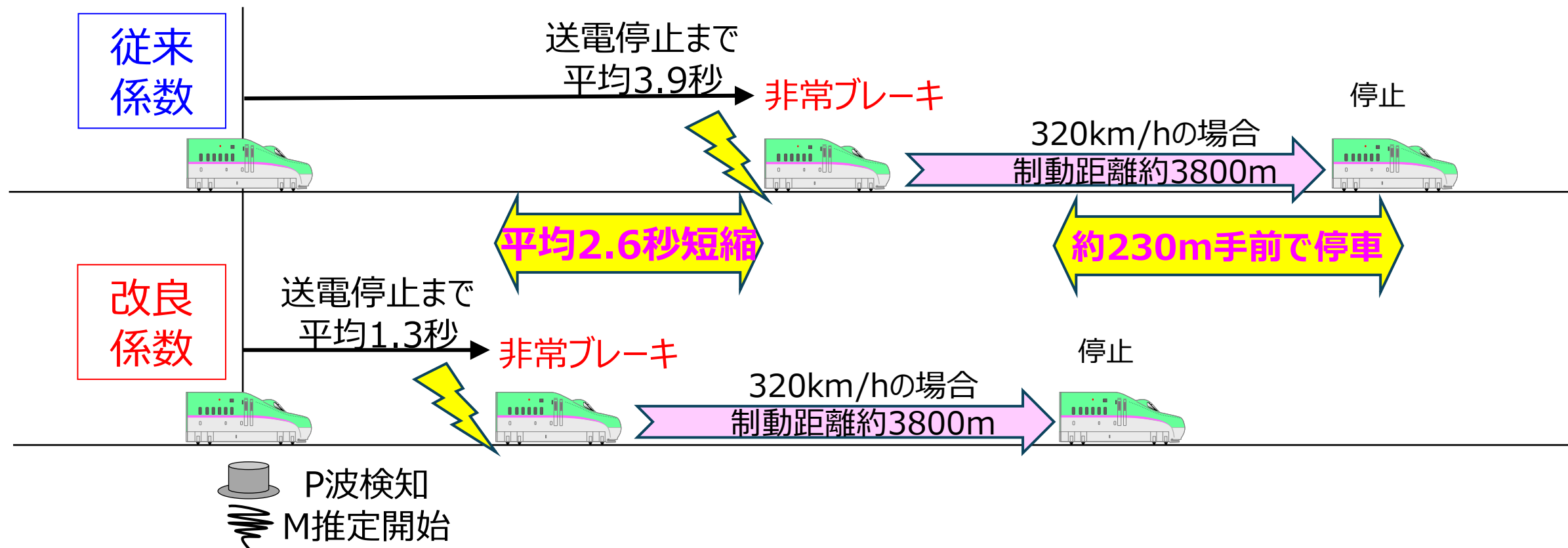


- 改良係数によって、より早いタイミングで列車停止可能

改良係数によるM推定の効果の検証

- JR東日本新幹線早期地震検知システムの動作ログを分析
対象期間: 2020年1月 ~ 2022年12月
- 分析方法: 従来係数と改良係数を使用した場合で、警報出力の最速タイミングがどのように変化するかを確認
- 最速で警報出力を行ったのがP波警報であった13地震:
従来係数 = 警報出力まで平均約3.9秒
改良係数 = 警報出力まで平均約1.3秒
⇒ 約2.6秒の短縮

改良係数によるM推定の効果の検証



- 約2.6秒の短縮により、停止までの距離が約230m短くなる。
- 一方で、警報出力の頻度が約1.2倍となる ⇒ “空振り”警報が増加する可能性

- 地震時により早く列車を停止するため、P波警報におけるマグニチュード推定式の改良を行った。
- 改良は、推定式の**係数を時間変化**させることに特徴がある。
- 改良係数の導入により、P波開始から早い時点における**マグニチュードの過小評価が軽減**される。これにより、より早いタイミングでの警報出力が可能となる。
- JR東日本新幹線早期地震検知システムの動作ログの分析により、改良係数の導入によって警報出力までの時間が**平均約2.6秒短縮**される。
- 本改良手法は、JR東日本、JR東海、JR西日本の各新幹線早期地震警報システムにて実用化済みである。

- 中島仁志, 櫛健典, 野田俊太, 岩田直泰:新幹線早期地震検知システムにおけるマグニチュード推定パラメータの変更, JREA, Vol.67, No.6, pp.47945-47948, 2024
- Noda, S., Iwata, N., Korenaga, M., “Improving the Rapidity of Magnitude Estimation for Earthquake Early Warning Systems for Railways,” Sensors, 24(22), 7361, <https://doi.org/10.3390/s24227361>, 2024