

3-2 本震直後の余震のリアルタイム確率予測

Real-time prediction of the probability of aftershocks after the main shock

東京大学生産技術研究所

統計数理研究所

Institute of Industrial Science, University of Tokyo

The Institute of Statistical Mathematics

大きな地震が起こった後、特に一日目には多くの強い余震が起こる確率が非常に高い。たとえば本震後数ヶ月の間に起こるマグニチュード 4 以上の余震の約半数が本震後一日目に起きている。ゆえに本震後できるだけ早く強い余震が発生する確率を予測できることが重要である。一方、本震のマグニチュードが同じでも一ヶ月の余震数が7~8倍違う¹⁾。そのため、 (b, c, p) 値の標準なパラメータのモデルを使ってでも余震のサイズを捉え予測するのは本震後1日以上待たねばならない²⁾。とくに本震の直後には、地震検出能力を超える極めて多くの余震が発生し、大量の余震が観測から漏れてしまうため、1日以内に予測を行うことが難しかった。

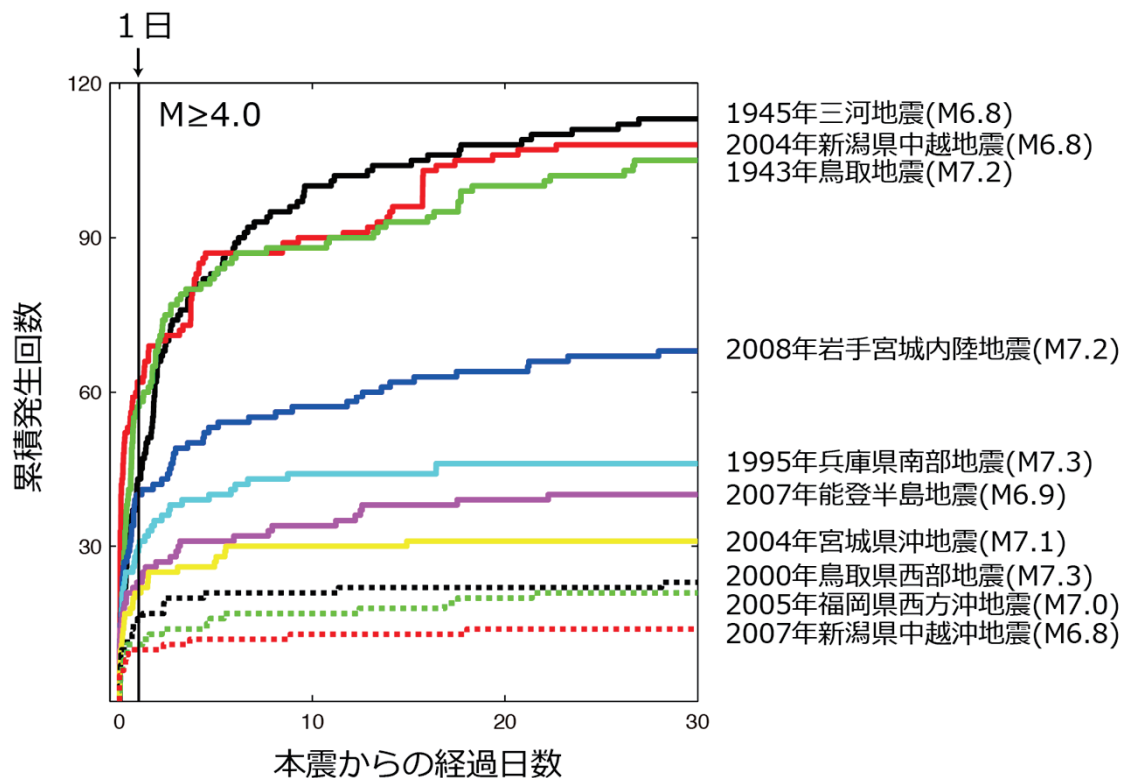
データの欠損は大森-宇津余震減衰則や Gutenberg-Richter 則の統計解析の結果に大きな影響を与えうするため、欠損の統計的な性質を解析に取り入れることが必要である。大きな地震の直後には、急激に検出率が下がり、大きな余震でも観測から抜け落ちてしまうことがある。このような欠損のある地震発生データから、実際にはどの程度の数の地震が起きていたかを捉える推定法をベイズ的方法に基づき開発した³⁾。そして今回、非定常なデータを状態空間法でリアルタイムに推定する手法を開発した⁴⁾。この方法を上記の余震の予測モデルと組み合わせることにより、本震後数時間のデータから、リアルタイムで余震の確率予測が行えるようになった。

2011 年の東北地方太平洋沖地震後の Global NEIC の余震データを用いて、本予測手法の有効性を確かめた。さらに 2013 年 2 月に群馬県日光地域で起こったマグニチュード 6.3 の地震発生直後の Hi-net 自動観測システムによって検出されたデータを使った予測と二日遅れの気象庁 PDE データを使った予測を比べて不確実なマグニチュードデータなどに対する本予測手法の頑健性を確かめた。

(近江崇宏, 尾形良彦, 平田祥人, 合原一幸)

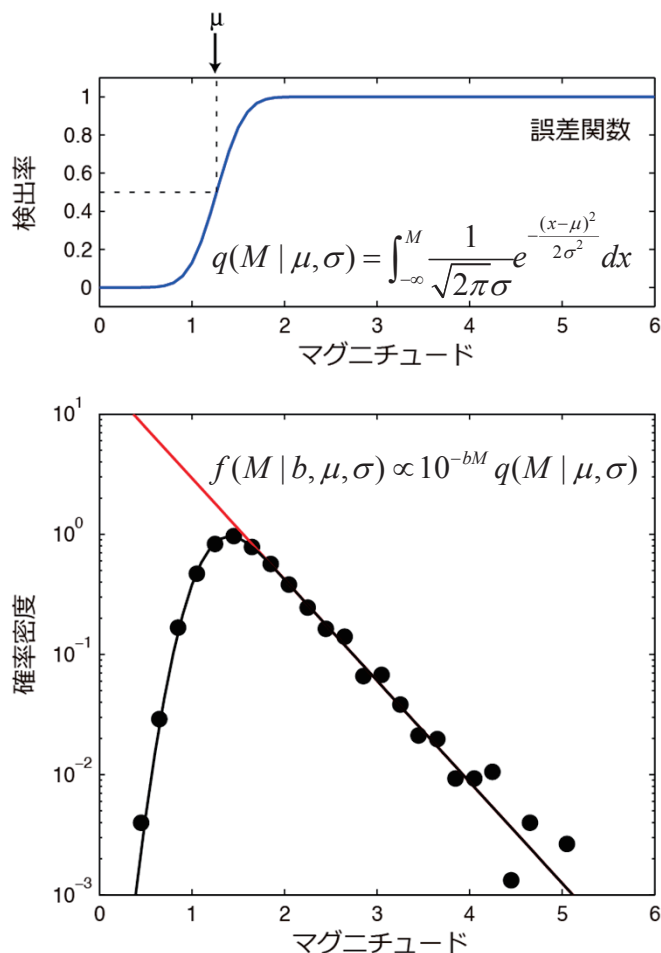
文献:

- 1) 気象庁・気象研究所 (2009) 連絡会報, 第 81 巻, pp. 101-131.
- 2) 地震調査委員会 (1998) <http://www.jishin.go.jp/main/yoshin2/yoshin2.htm>
- 3) 統計数理研究所 (2005) 連絡会報, 第 73 巻, pp. 666-669,
http://cais.gsi.go.jp/YOCHIREN/report/kaihou73/11_10.pdf.
- 4) Omi, T., Ogata, Y., Hirata, Y. and Aihara, K. (2013) *Scientific Reports* 3, doi:10.1038/srep02218.
<http://www.nature.com/srep/2013/130717/srep02218/full/srep02218.html>



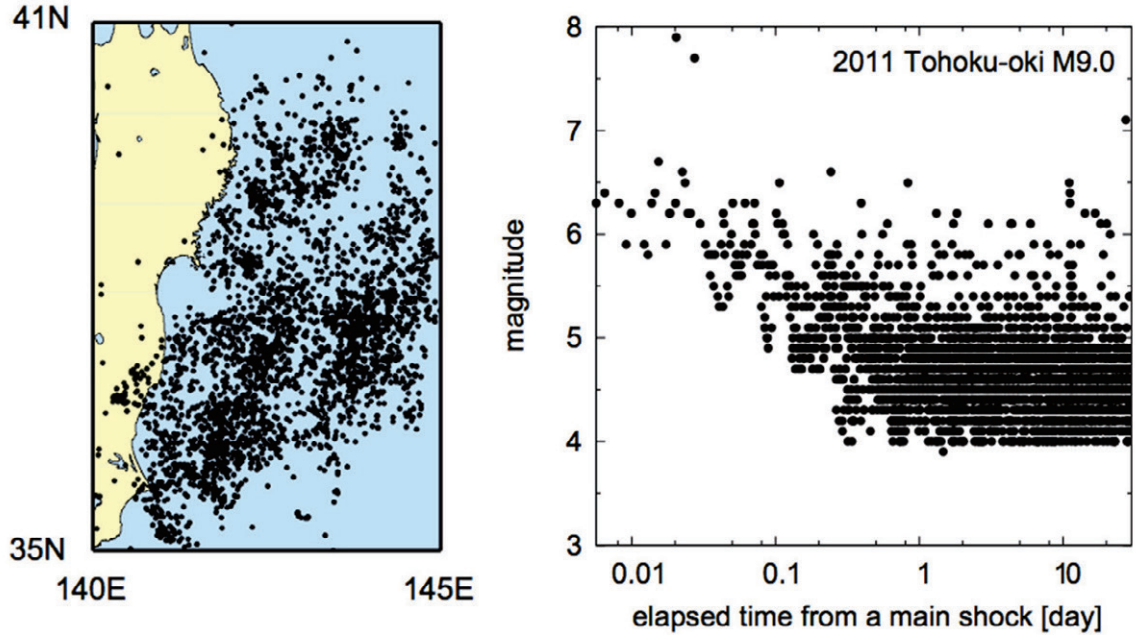
第1図. M4以上の余震累積数の比較

Figure 1. Comparison of numbers of aftershocks ($M \geq 4.0$) in inland or coastal areas in Japan.



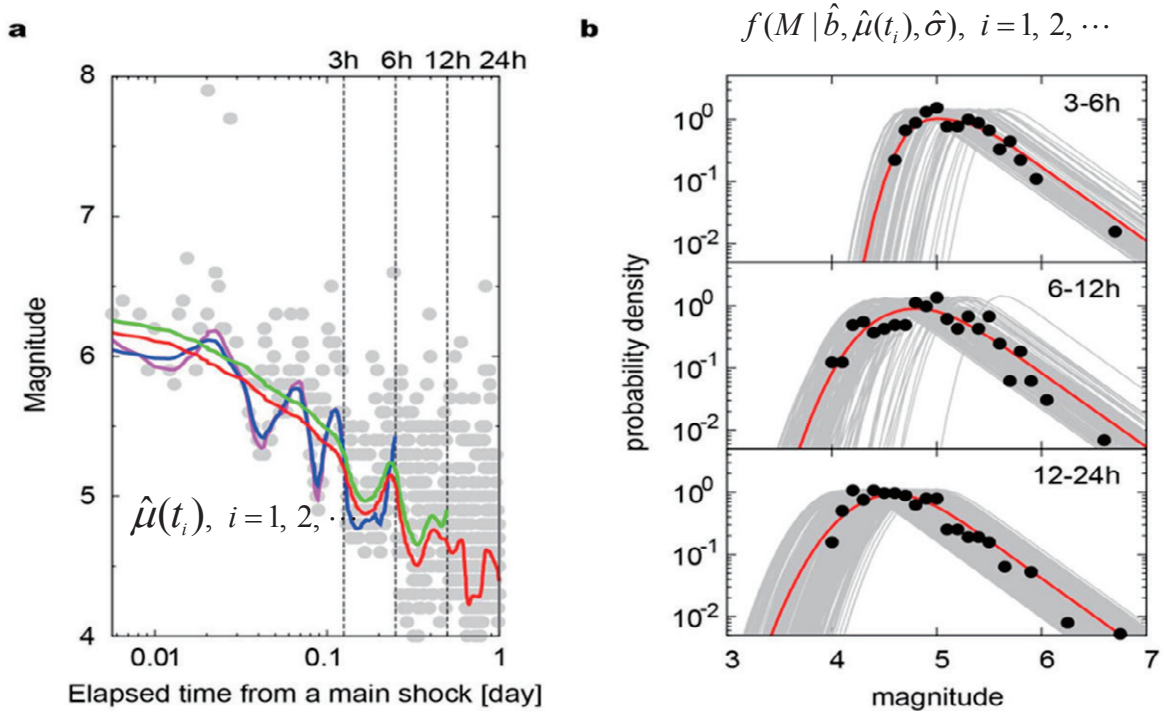
第2図. 検出率のマグニチュードへの依存性. 誤差関数(正規分布の累積関数)を仮定.

Figure 2. Statistical model of observed magnitude frequency distribution. (a) Detection rate function modeled as cumulative distribution function of normal distribution. The parameter μ represents the magnitude with a 50% detection rate. (b) Magnitude distribution (black solid line) of detected earthquakes, given as the product of the G-R formula (red straight line) and the detection rate function. Closed circles represent the empirical magnitude frequency distribution for aftershocks that occurred two weeks after the 1995 Kobe earthquake of M7.2.



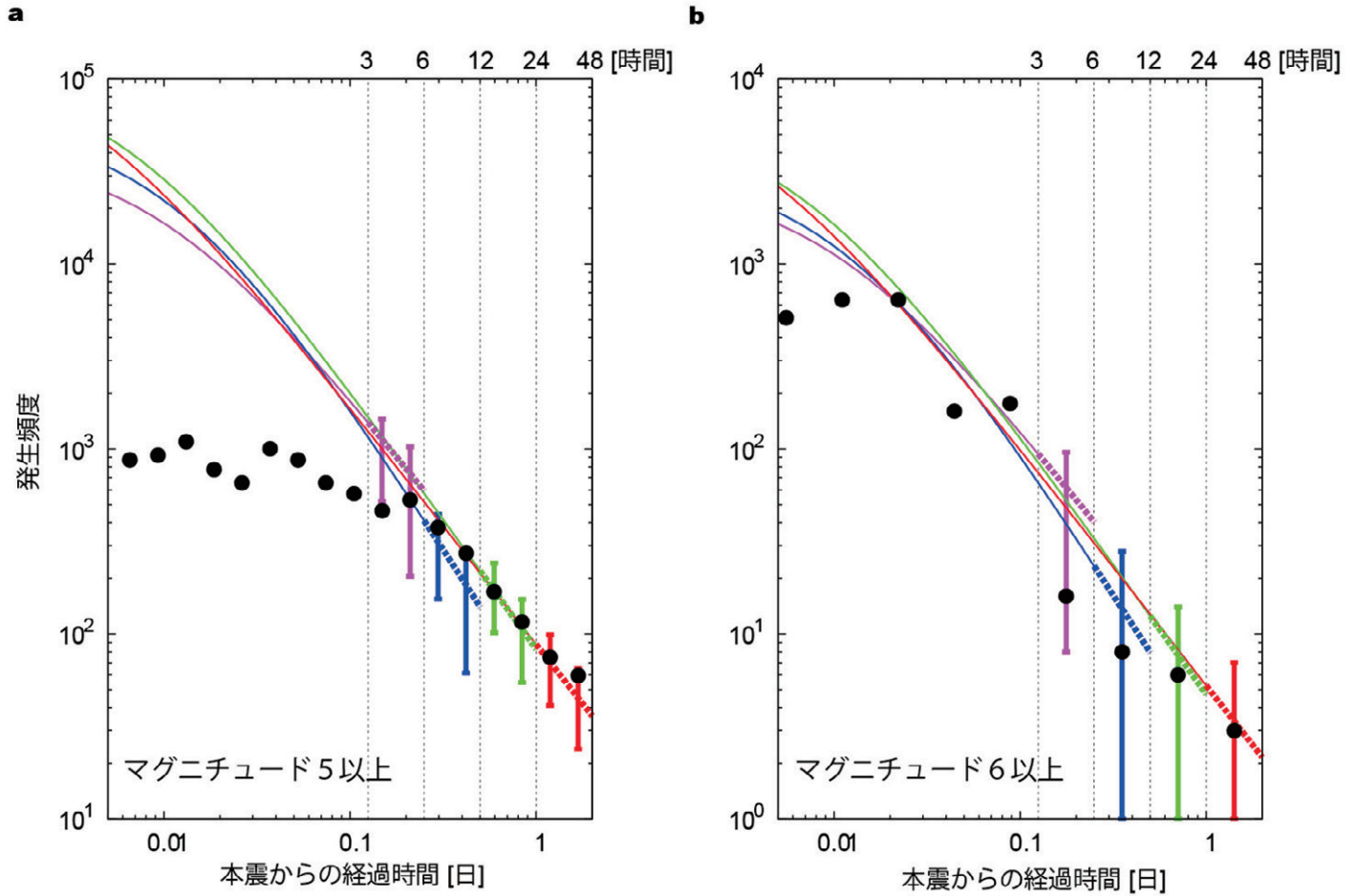
第3図. 2011年東北地方太平洋沖地震(M9.0)の余震データ(米国地質調査所NEIC/PDEのデータ). 余震の震央分布(上段左). 本震後経過時間とマグニチュード(左図. 横軸は本震後経過時間の対数).

Figure3. Observed aftershocks of the 2011 Tohoku-Oki earthquake of M9.0. (a) Epicenters and (b) time versus magnitude of earthquakes that occurred in Japan according to PDE/NEIC catalogue.



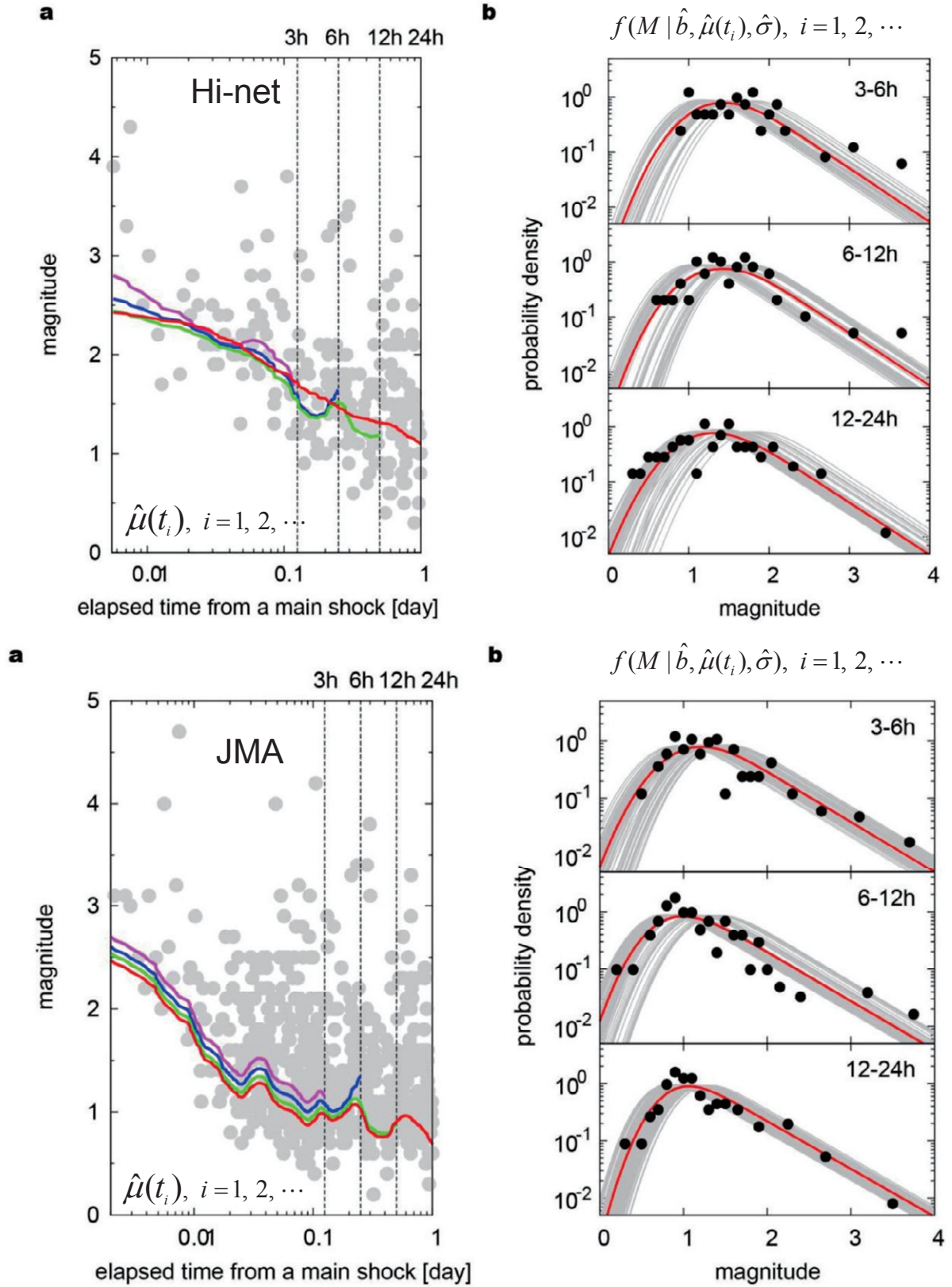
第4図. 左図は検出率が50%であるマグニチュード値の時間経過 $\mu(t)$. 余震データが検出される毎のリアルタイム推定関数. ここでは本震後3, 6, 12, 24時の各時点での推定関数(それぞれピンク, 青, 緑, 赤の曲線). 右図は各時点のマグニチュード頻度分布の予測(灰色)とその各時間区間での平均(赤線)と実際の余震の頻度.

Figure 4. Estimation of time-dependent detection rate. (a) Estimates of $\mu(t)$ for learning periods of 3 h, 6 h, 12 h, and 24 h after the main shock are represented by magenta, blue, green, and red curves, respectively. (b) Closed circles represent normalized magnitude histograms of observed aftershocks. Each grey curve represents the instantaneous magnitude distribution predicted at the time when each earthquake occurs, and red curves represent their average for each time window.



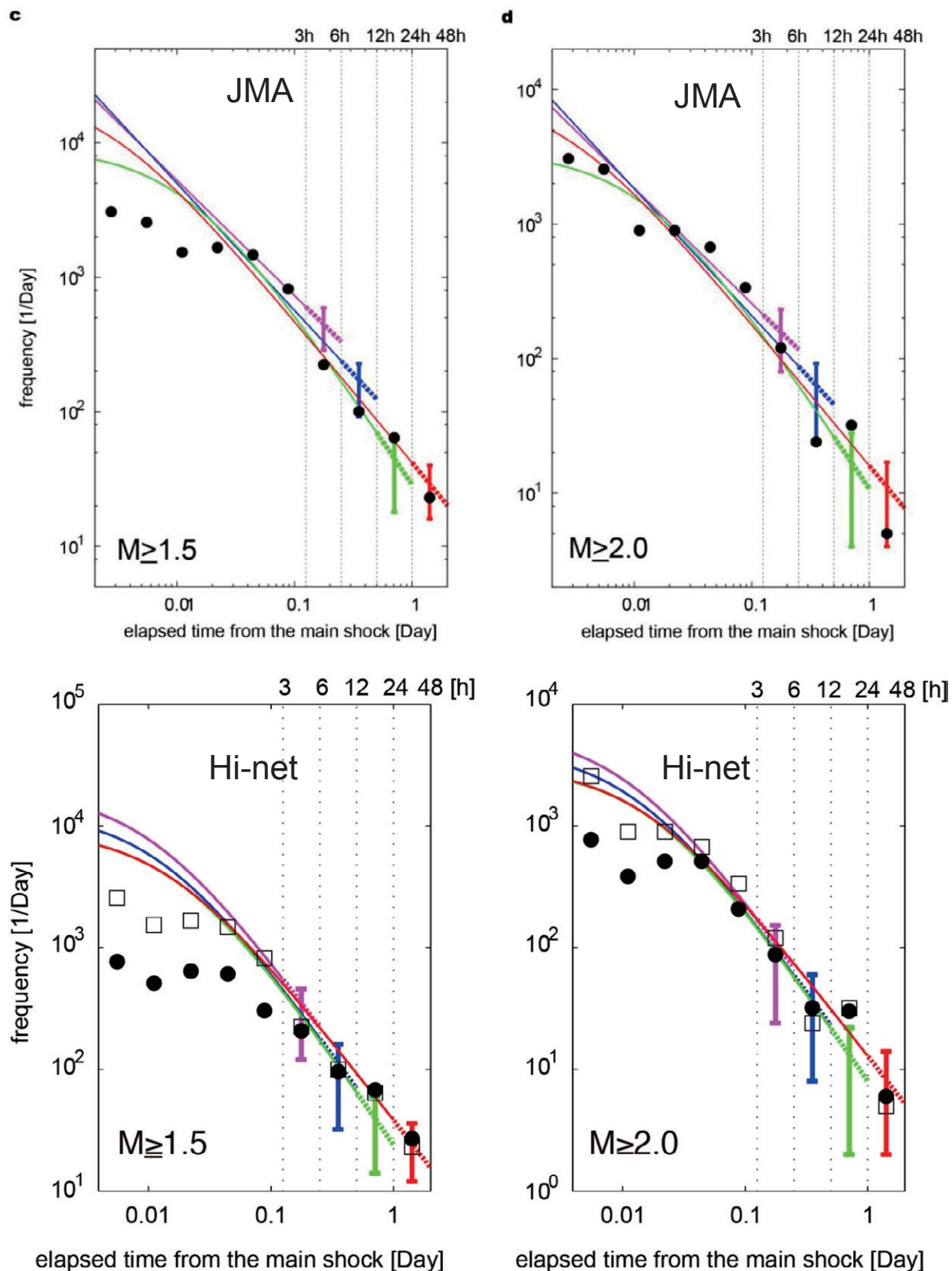
第5図. 余震発生率の予測と発生頻度の結果(左図はM5以上, 右図はM6以上). 本震後3, 6, 12, 24経過時までには得られたデータからそれぞれ実際に起きていた余震の発生率を推定し(それぞれピンク, 青, 緑, 赤の曲線), その後, 各々 6, 12, 24, 48経過時までの余震の予測発生率(対応する色の太い延長点線). 黒丸は実際の頻度率と誤差.

Figure 5. Forecast of underlying aftershocks and observed aftershocks. Closed circles represent empirical occurrence rates (# / day) of observed aftershocks with magnitude (a) $M \geq 5.0$ and (b) $M \geq 6.0$. Occurrence rates of underlying aftershocks with magnitude (a) $M \geq 5.0$ and (b) $M \geq 6.0$, estimated for a learning period (solid curve) and forecasted for the following period of the same duration (dashed curve). Learning periods are 3 (magenta), 6 (blue), 12 (green), and 24 (red) h after the main shock. Bars indicate 95% predictive intervals of empirical occurrence rates (see Supplementary Information).



第6図. 日光地域の地震 (M6.3) の本震発生後1日以内に起こった余震に対する予測とその結果(上図は Hi-net データ, 下図はJMA-PDEデータ). 第4図と同じ形式を同じ色でプロットした.

Figure 6. Estimation of the time-dependent detection rate for the JMA catalog. Notations are the same as in Fig. 4.



第7図. 日光地域の地震の本震発生後1日以内に起こった余震に対する予測とその結果(上図はJMA-PDEデータ, 下図はHi-net データ). 上下図ともM1.5以上(左側)およびM2.0以上(右側)の余震について第5図と同形式を同じ色でプロットした. 本震発生後1日以内に起こった. ●はそれぞれ実際に観測された余震頻度. 下図にはJMAの余震頻度(□)も重ねた.

Figure 7. Forecast of underlying aftershock activity for the JMA-PDE (top) and automatic Hi-net (bottom) catalog. Notations are the same as in Fig. 5. ● shows frequency of the detected aftershocks, and □ shows frequency rate (# of aftershocks / day) of observed by the JMA.