

気象庁の地震検知能力の時間空間的变化

太田健治*・藤原義寿*・前田憲二*

Spatiotemporal variation of minimum magnitude of completeness in The JMA catalog

Kenji OHTA, Yoshihisa FUJIHARA and Kenji MAEDA

(Received November 14, 2001; Accepted February 25, 2002)

ABSTRACT

The detection capability of JMA for seismicity has been changed according to the improvement of the observational network and/or the processing systems. We systematically investigate the spatiotemporal variation of minimum magnitude (M_c) of completely detected earthquakes in the JMA catalog 1/1/1926 through 9/30/2000. Our results show that, in particular, the deployment of 76-type seismometers in 1976 and the beginning of the processing of increased data provided by other institutions in 1997 significantly affected the change of M_c .

1. はじめに

過去の地震活動を調査する場合、地震カタログがどの程度の小さい地震まで完全に収録しているか、ということは重要な問題である。気象庁の地震の検知能力は地震観測網及び処理システムが改善されることにより大きく変化してきたことが知られている(例えば市川(1978), 石川(1987))。気象庁の地震検知能力の調査は過去にも行われており、例えば望月ら(1978)は、1965年~1974年の期間の気象庁59型地震計による震源決定能力を調査し、北海道の大部分と九州南部を除く内陸部に発生した深さ90km以浅の地震のうちM4以上は漏れなく決定されていることを報告している。また、横山(1984)は1979年~1983年の期間について調査し、気象庁の地震観測網は日本付近に発生した地震に対して、内陸部でM3以上、沿岸から200km以内の海域でM3.8以上のものはほぼ漏れなく震源決定されているとしている。

ここでは、1926年以降、高感度地震観測網(防災科学技術研究所が展開している微小地震観測網のこと:以下Hi-netと呼ぶ)が導入される前の2000年9月までの気象庁震源カタログについて、漏れなく地震を検知してい

るマグニチュードの下限(M_c : Magnitude completeness)が時間空間的にどのように変化してきたのかについて、系統的な調査を行なった。

2. データ

震源データは気象庁震源カタログを使用し、震源の深さが60km以浅のものについて調べた。深さが60km以浅の地震を対象にしたのは、それより深い地震はマグニチュードが決定されていない場合があるためである。気象庁の震源カタログにおける全国の平均的な M_c の変化の概要を見るために、1926年から2000年までの全ての地震について作成したM-T図をFig. 1に示す。なお、Fig. 1の作成にはSEIS-PC(石川・中村, 1997)を用いた。一方、気象庁の地震計や処理システムの更新による震源カタログの質の変遷は石川(2002)によりまとめられている。Table 1に石川(2002)によりまとめられたものに一部加筆した気象庁震源の変遷を示す。ここではTable 1及びFig. 1をもとに震源カタログの変遷を考慮し、マグニチュードの下限を解析する期間を次の7期間に分けた。

1) 1926年1月1日~1960年12月31日

震源カタログ開始から電子計算機による処理を開始するまでの期間。ただし、現在の震源カタログは、後年こ

* 仙台管区気象台

Sendai District Meteorological Observatory

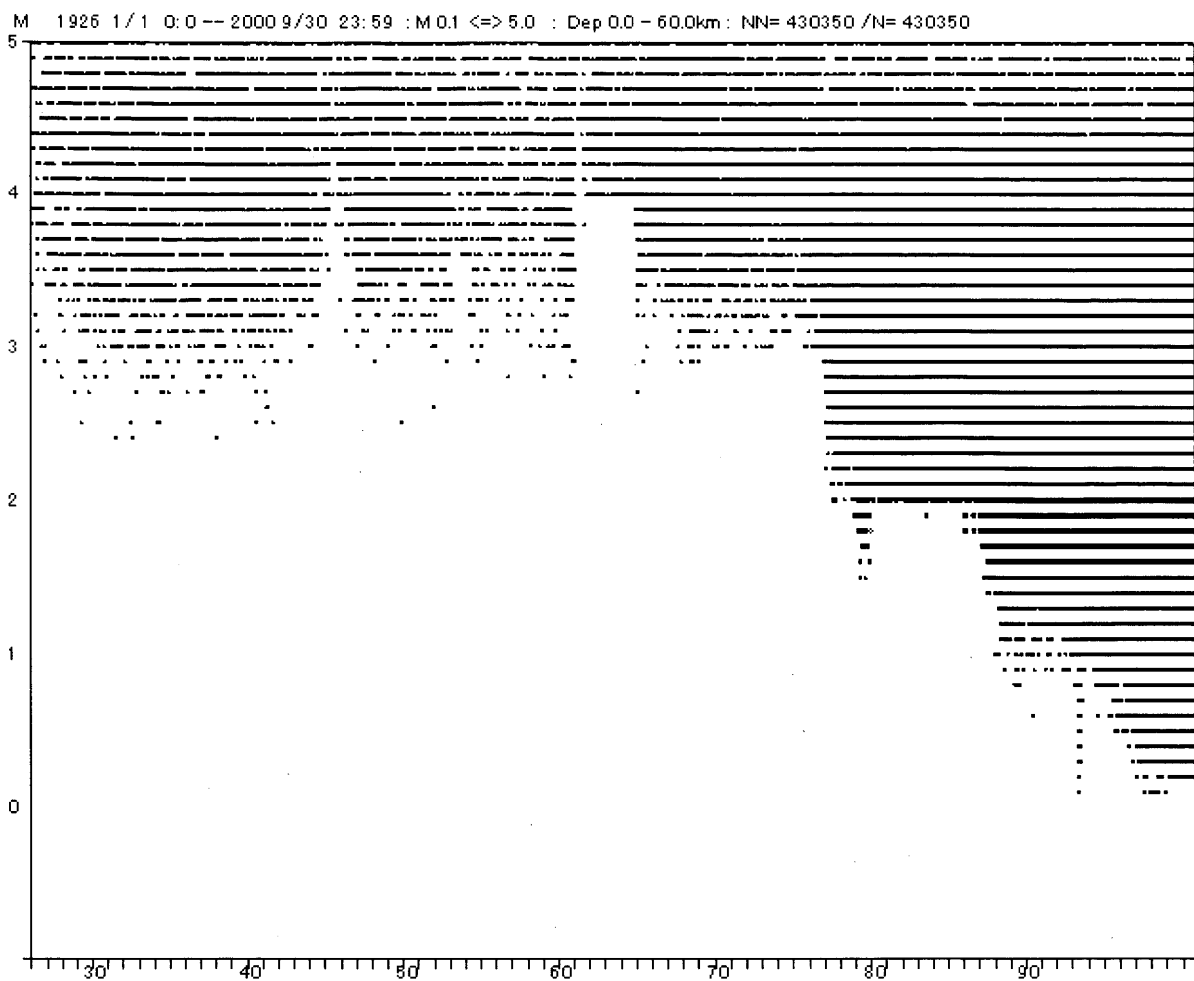


Fig. 1 Magnitude vs. time diagram for the JMA hypocenter catalog from 1926 to 9/30/2000.

気象庁の地震検知能力の時間空間的变化

Table 1. Change of the observational or processing system that affects the quality of the JMA hypocenter catalog. (Ref. Ishikawa (2002) with small addition)

年	処理・システム	走時表	震源時刻	緯度・経度	深さ	M	震源カタログ・ファイル	主な検知能力関係	
-1884							理科年表(2001年版)被害地震の表		
1885-1925							宇津カタログ		
1926-1950	全地震検測	市川・望月+LL(深さ600kmまで)	1分	1分	10km毎		坪井、勝又	別冊6号で併記された旧震源は65コラム目(80レコード形式では50コラム目)に「C」、「D」、「W」の文字	全地震検測
1951-1960	↓	↓	0.1秒	↓	↓	↓	↓	参考(1959:IBM704導入)	
1961	IBM704	和達・鷺坂ら	↓	↓	20km毎	↓	地震月報+別冊5号	電計作業開始	
1962-1964	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	
1965	電計	↓	↓	↓	↓	↓	↓	検測基準変更59型全振幅1mm以上	
1966	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	
1967	HITAC5020F	和達・鷺坂らに内挿	↓	↓	10km毎	↓	↓	67型地震計展開開始	
1968-1969	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	
1970	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	67型:盛岡・宮古・大船渡・秋田・山形・酒田(3月)	
1971	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	67型:青森・八戸・石巻・白河・小名浜(6/1)	
1972	電計	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	
1973	↓	市川・望月	↓	↓	↓	↓	↓	↓	
1974	↓	↓	↓	↓	↓	↓	地震月報	↓	
1975	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	67型:本荘(4/1)	
1976	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	76型地震計展開開始	
1977	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	
1978	↓	LL走時追加	↓	↓	↓	+EMT式(深さ60kmまで)	↓	76型:青森2,大船渡2,山形2(8/15)	
1979	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	
1980	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	
1981	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	
1982	地震伝送網+L/A東管南部1月東管北部7月L/A札幌・仙台3月	↓	↓	↓	↓	↓	↓	検測基準変更(2月)59型全振幅3mm以上61型全振幅6mm	
1983	L/A大阪10月	83A+LL(10月)	↓	0.1分	1km毎(LL除く)	EMT式の定数,76型だけ変更(10月)	↓	↓	
1984	L/A福岡8月	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	
1985	↓	↓	↓	↓	0.1km毎と1km毎	↓	↓	↓	
1986	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	宮古1000倍→3000倍(8/11)	
1987	EPOS東京9月	↓	↓	↓	↓	↓	↓	東京、他機関データ導入	
1988	L/A沖縄8月	↓	↓	↓	↓	↓	↓	88型地震計展開開始	
1989	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	
1990	ETOS仙台3月	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	
1991	ETOS札幌3月	↓	↓	↓	↓	↓	↓	八戸→八戸2(5/18)	
1992	ETOS福岡3月	↓	↓	↓	LL1km毎	↓	↓	盛岡→盛岡2(3/19)	
1993	ETOS大阪3月	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	
1994	ETOS沖縄3月 T-sys仙台9/21(一部4月) T-sys大阪10/14 T-sys福岡9/28 T-sys沖縄4月	↓	↓	↓	↓	↓	地震月報簡略化 地震年報CD開始	津波地震早期検知網(T-sys)10月 仙台:大船渡・山形・酒田・石巻・本荘・ 青森2,大船戸2,山形2を停止(11/1)	
1995	T-sys札幌1/10 EPOS2東京4月	↓	0.01秒	0.01分	0.01km	↓	震源フォーマット変更 80→96バイト(遊る) 観測点数記入	東京:津波地震早期検知網(4月) 仙台:3月トリガ-変更	
1996	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	札幌:1月稚内東北、10月平取を移設 沖縄:3/26玉城移設	
1997	10月全国一元化 12/11OBS室戸1、 室戸2接続	↓	↓	↓	↓	一元化以降EMT式を深さ90kmまで拡張、他機関振幅採用	10月札幌管区で低周波地震識別開始	札幌:12月上川を移設 沖縄:5/28-8/24波照間島、多良間島7フィルタ-使用、 検測再検討開始 12月トリガ-変更	
1998	11/5近畿-東海Hi-net接続	↓	↓	↓	↓	↓	↓	札幌:2月八雲、知内を移設 福岡:6/1串間本城休止	
1999	↓	深さ700kmまで	↓	↓	↓	↓	↓	札幌:3月、根室88→根室豊里、日高→十勝タム、10月北海道東方沖深さ30km固定 大阪:1/22南近畿Hi-net設定変更、2/11-3/2トリガ-変更、 10/30土居トリガ- 福岡:11/19熊本御船開始 沖縄:3月SIDEで1/100秒データ化、3/18与那国島久部良移設	
2000	8月釧路沖OBS接続 10月大阪・福岡Hi-net接続 11月大阪:大学17点追加	↓	↓	↓	↓	↓	↓	札幌:3月北見88→常呂、11月奥尻移設 大阪:2/29舞鶴2廃止 福岡:3/2串間奈留開始、3/28熊本御船廃止。 沖縄:6/23西表島、波照間島の88型更新。6/30粟国島、宮古島城辺、竹富町黒島を開始。	
2001	5.6月大阪:北近畿Hi-net 10月札幌・仙台Hi-net接続	10月:JMA2001モデル開始、三陸沖LL廃止	↓	↓	↓	5月変位M6秒フィルター導入	↓	5月:トリガ処理にフィルター波形導入 10月:M5以上は全国で検測	

の期間について電子計算機により再処理されたものであり、今回の解析にも再処理後のデータを用いた。

2) 1965 年 1 月 1 日 ~ 1975 年 12 月 31 日

1965 年から 76 型地震計設置以前の期間。なお 1961 年 ~ 1964 年は Fig. 1 から検知能力が著しく低下しており、またデータ数も少ないことから解析期間から外した。1961 年 ~ 1964 年の検知能力が低下しているのは電子計算機の処理能力の問題で小さな M が決定されなかったとされている。

3) 1977 年 1 月 1 日 ~ 1982 年 1 月 31 日

76 型地震計設置 (一部は期間中に設置) から地方中枢気象資料自動編集集中継装置 (以下 L/ADESS と呼ぶ) 整備以前の期間。なお、1976 年のデータは 76 型地震計が展開中であるため除いた。

4) 1982 年 2 月 1 日 ~ 1989 年 2 月 28 日

L/ADESS 整備開始から地震津波監視システム (以下 ETOS と呼ぶ) 整備以前の期間。

5) 1991 年 3 月 1 日 ~ 1994 年 8 月 31 日

仙台・札幌管区における ETOS 整備以降から津波地震早期検知網の展開以前の期間。なお、1989 年 3 月 ~ 1991 年 2 月の期間のデータは仙台・札幌 ETOS 整備中であり、また 88 型地震計が展開中のため除いた。

6) 1995 年 5 月 1 日 ~ 1997 年 9 月 30 日

津波地震早期検知網の展開以降から大学等関係機関の地震観測データの一元的処理 (以下 REDC と呼ぶ) 開始以前の期間。なお、1994 年 9 月 ~ 1995 年 4 月の期間のデータは津波地震早期検知網展開中のため除いた。

7) 1997 年 10 月 1 日 ~ 2000 年 9 月 30 日

REDC の開始以降から西日本 Hi-net のデータ処理開始直前の期間。

3. 解析方法

Mc を求める計算法は WIEMER and WYSS (2000) の方法を、プログラムは Zmap (WIEMER and ZUNIGA, 1994) を用いた。Zmap は WIEMER が数値解析言語 MATLAB を使って開発した地震活動の解析用プログラムであり、ソースコードは公開されている。Zmap は大地震前の地震活動静穏化や活発化といった地震活動度変化の調査、b 値の大きさ分布等の調査にも利用されている (例えば WIEMER and WYSS, 1994)。

WIEMER and WYSS (2000) の方法は、基本的にはマグニチュードの頻度分布がゲーテンベルグーリヒターの式

で表されることを利用し、マグニチュード別の地震回数積算曲線が直線からずれる点を基に求める方法である。Mc を求める方法の概念図を Fig. 2 に示す。

地域ごとの Mc を求めるため、全国を緯度経度ともに 0.5 度間隔の格子点を中心とし、それぞれの格子点から半径 50km 以内の領域に分けた。空間的な分解能を上げるためには格子点の間隔を狭くし、また隣り合う領域が重ならないように半径を小さくした方がよいが、一方で半径を小さくしすぎると領域内の地震数が少なくなり、Mc が求まらなくなる。格子間隔 0.5 度、半径 50km という値はこのことを考慮して試行錯誤により決定した。領域の分割方法の概念図を Fig. 3 に示す。また、各々の領域内の地震に対し、地震の数が 20 個以上の場合について Mc を決定することとした。20 個以上とした理由は、対象とする地震の数が少ないと適合度に問題が生じ、この下限の数が多いと Mc を求められる領域が減ってしまうため、この 2 点を考慮して決めた。

Mc 以上の地震について、マグニチュードの積算が直線からずれる程度を次式の R により表し、これを Mc の適合度と定義した。

$$R(a, b, Mc) = \left[1 - \frac{\sum_{i=Mc}^{M_{max}} |B_i - S_i|}{\sum_i B_i} \right] \times 100 (\%) \quad (1)$$

ここで、 B_i , S_i はそれぞれ Mc 以上の地震について、マグニチュードの i 番目の階級 M_i までの観測された積算地震数とゲーテンベルグーリヒターの式から予測される積算地震数を表す。また、係数 a , b は Mc 以上の地震データから求められたゲーテンベルグーリヒターの式の定数を、 M_{max} はマグニチュードの最大の階級を表す。Mc を変化させるにつれて適合度 R は変化するが、ここでは Mc を小さい方から次第に増加させ、適合度が 95% に達した時を Mc とした。もし、これで求められなければ適合度が 90% に達したものを Mc とした。さらに求められなかった場合は積算回数 - マグニチュード図の最大曲率から求めたものを Mc とした。

4. 結果及び考察

解析の結果、各期間ごとに求められた Mc の空間的变化を Fig. 4 に示す。また、Mc の時間変化を分かりやすくするため、すべての期間のカラースケールを同じ色に固定した図を Fig. 5 に示す。以下に各期間の Mc の特徴と若干の考察を述べる。

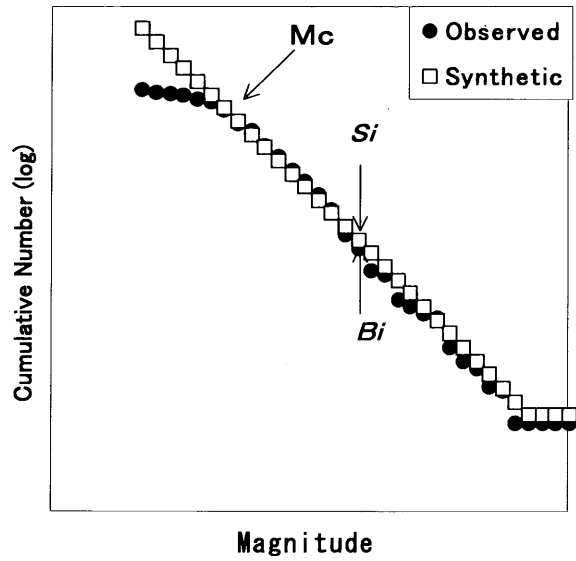


Fig. 2 Schematic diagram showing the method of obtaining M_c . B_i and S_i are the observed and predicted cumulative number of events in each magnitude bin.

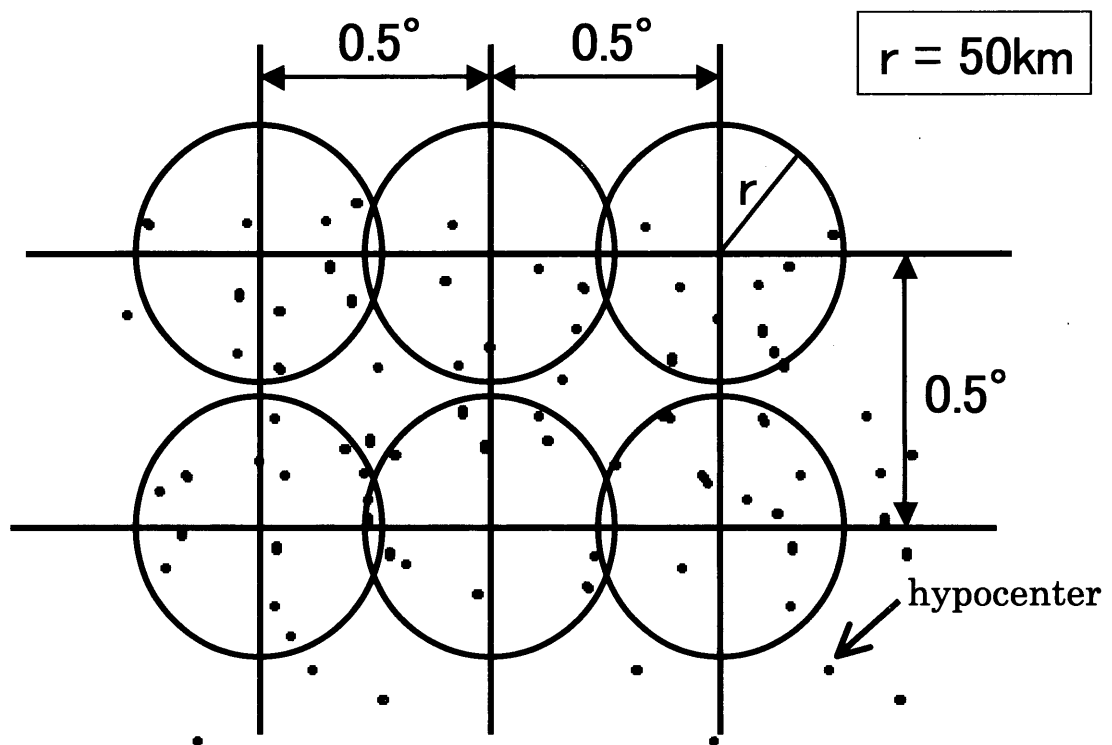


Fig. 3 Schematic figure showing how to define the circle area for calculating M_c . Each center of circle area is located at every 0.5 degrees in latitude and longitude. The radius for each circle is fixed at 50 km.

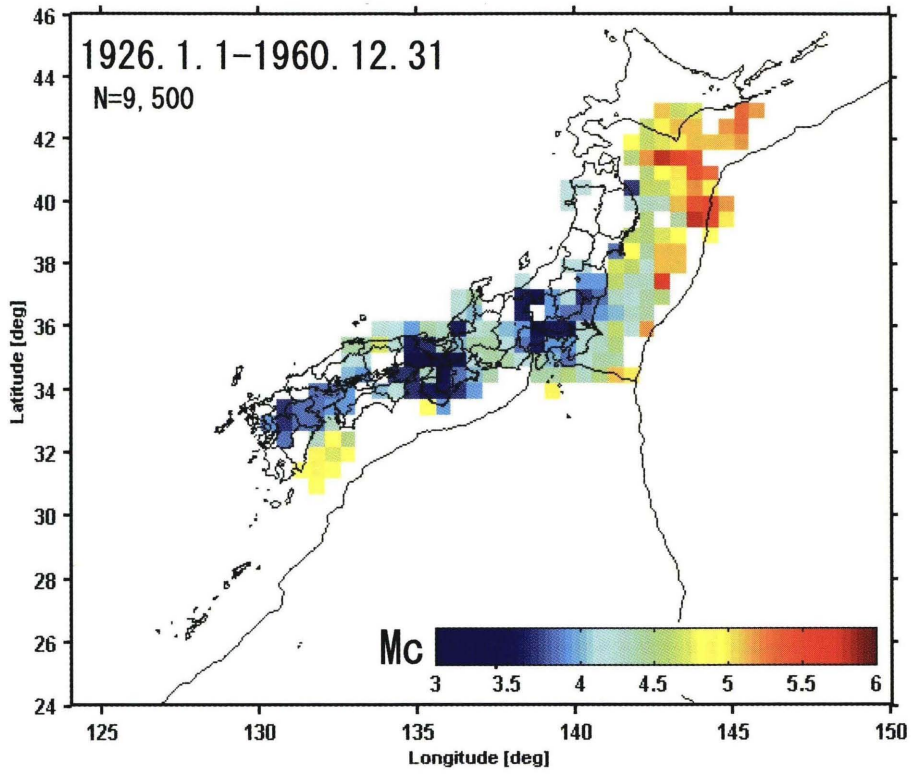


Fig. 4 Spatial variation of M_c obtained for seven different periods:
1) 1/1/1926 - 12/31/1960

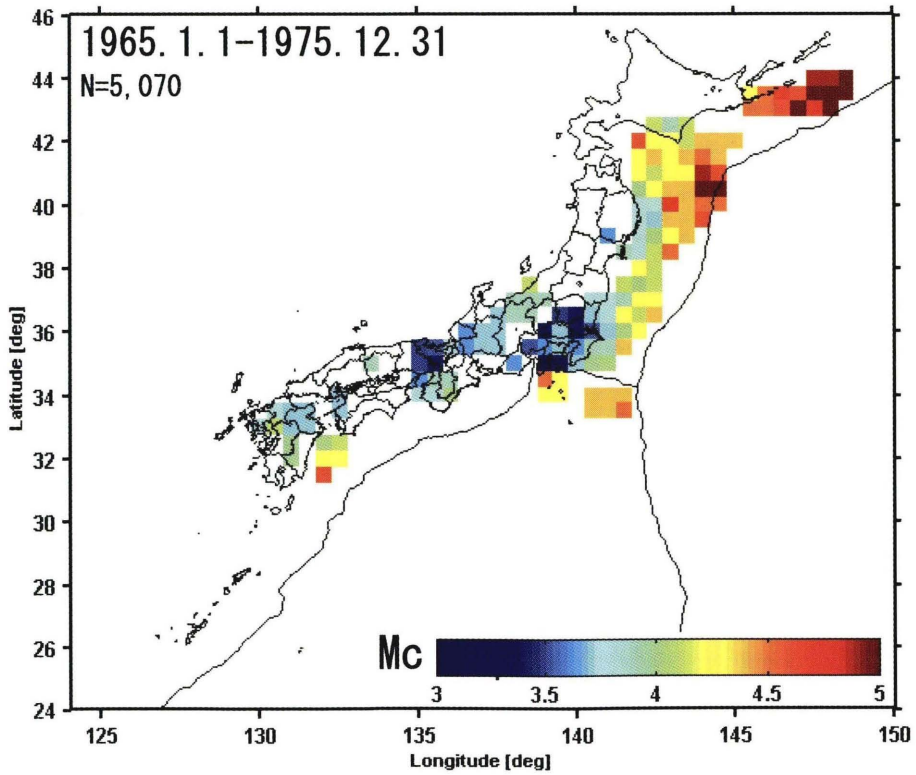


Fig. 4 2) 1/1/1965 - 12/31/1975

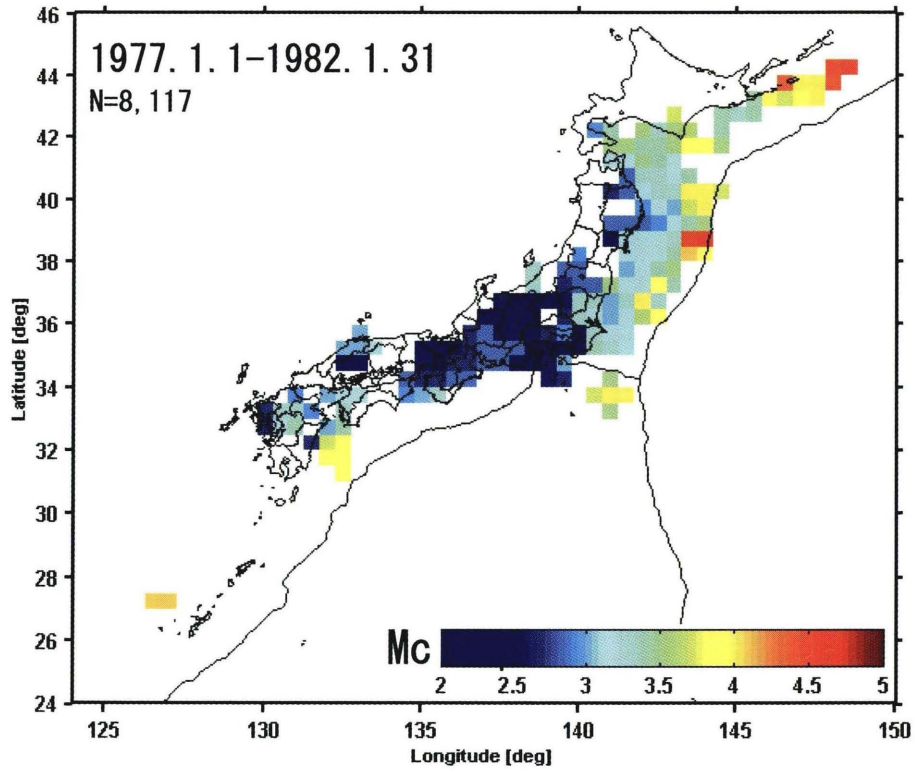


Fig. 4 3) 1/1/1977 - 1/31/1982

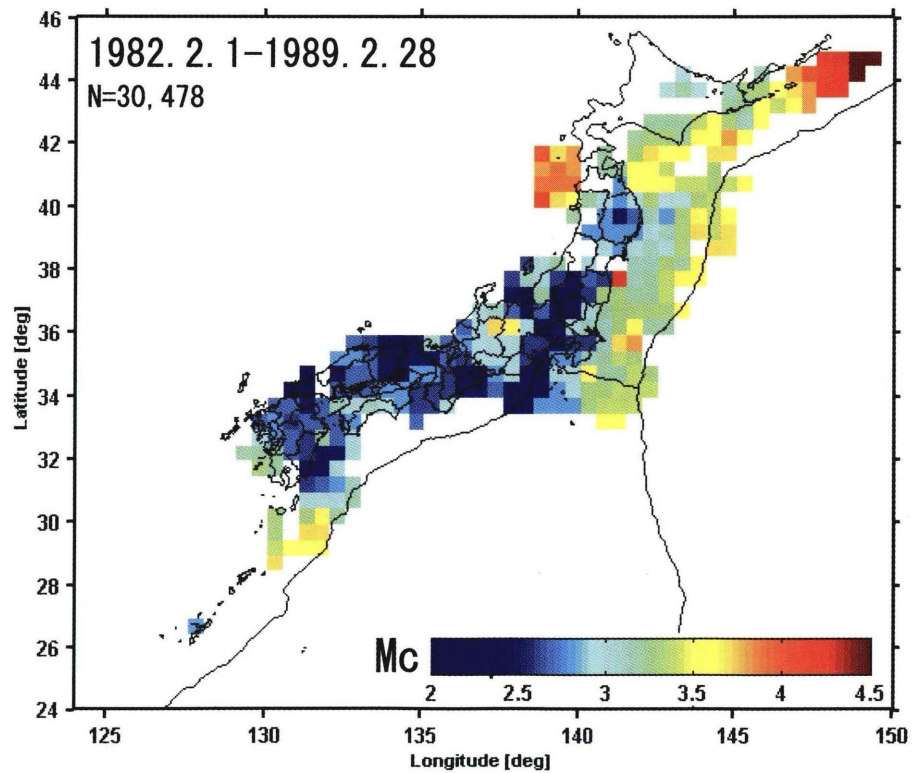


Fig. 4 4) 2/1/1982 - 2/28/1989

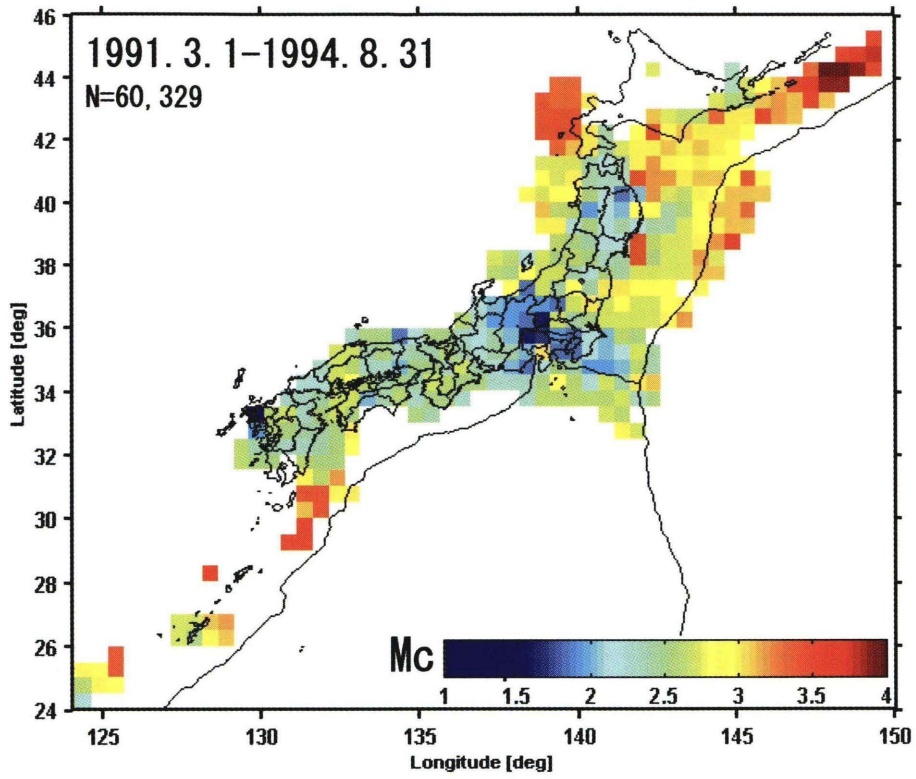


Fig. 4 5) 3/1/1991 - 8/31/1994

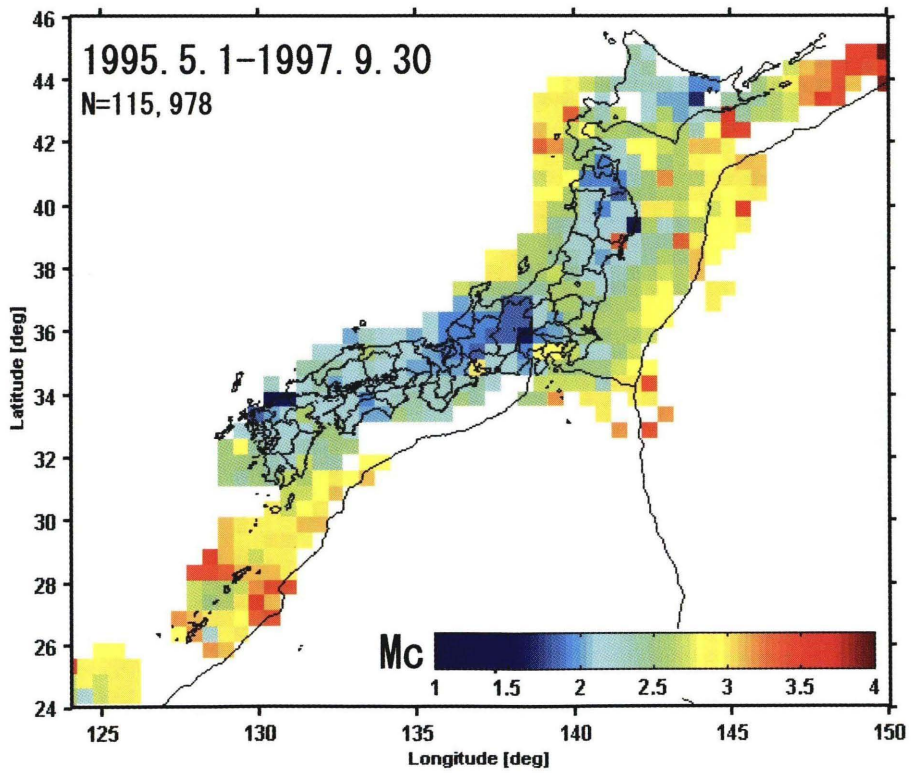


Fig. 4 6) 5/1/1995 - 9/30/1997

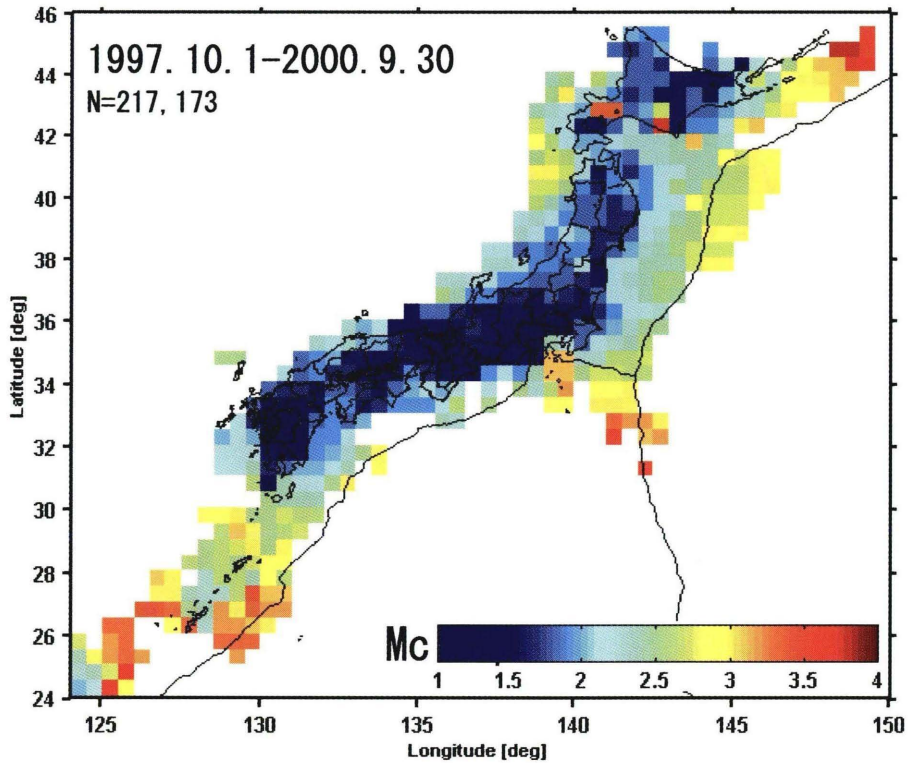


Fig. 4 7) 10/1/1997 - 9/30/2000.

期間1) (1926年1月1日～1960年12月31日)では、陸域については関東、近畿地方及び九州の一部でMが3.5～4.0程度の地震まで検知されており、東海、山陰地方の一部ではMが4.5前後まで検知されていることが分かる。北海道、東北、北陸及び九州南部は地震数が少ないためMcの求められていない領域が多い。海域では浦河沖～房総沖でMcは4.0～6.0程度であるが、南に向かうほど検知能力が向上してることが分かる。この傾向は北海道・東北地方及び九州南部で地震計が少なかったことによるものと思われる。

期間2) (1965年1月1日～1975年12月31日)では、解析した期間が期間1)より短いせいもあり地震数が約半分であるためMcが求められた領域は期間1)より少なく、特に陸域で少なくなっている。検知能力は陸域では期間1)とほぼ同じ程度である。海域では根室半島南東沖の領域で新たにMcが求められ、5.0程度となっている。この期間に対応する望月ら(1978)の調査結果と比較するとほぼ同様の結果となっており、Mcを求める手法の違いによる結果への影響は少ないことが分かる。

期間3) (1977年1月1日～1982年1月31日)では、陸域では関東～近畿地方にかけてMcが求められるようになり、Mcが2.0～3.0程度である。海域では沿岸部ほ

ど改善が見られ、期間2)より1程度Mcの改善がみられる。これらの検知能力の向上は1976年から始まった76型と呼ばれる地震計の全国的な展開によるものである。横山(1984)の結果と比較すると三陸沖の海溝軸近傍では本調査結果のほうが若干Mcが大きめに求まっているが、他の地域については大きな相異はない。

期間4) (1982年2月1日～1989年2月28日)では、陸域では特に中国、四国地方でMcが求まる領域が増えたとともに検知能力も向上している。海域ではいくつかの領域で新たにMcが求められるようになり、1983年日本海中部地震の余震域周辺が3.5～4.0程度に、九州の南東沖で2.8～3.7程度に求められている。この期間は様々な要因で検知能力が向上した(地震火山部(1991)も参照)。とりわけ1982年からL/ADESSが各管区に展開されたことにより処理能力は向上し、また、この期間の末期の1988年から88型地震計の展開が始まり、この影響でも検知能力が向上した。一方、1982年2月から検測基準を引き上げて59型地震計の全振幅が3mm以上、61型地震計が6mm以上の検測となったため検知能力の低下が懸念されたが、実際には76型地震計による高感度の地震観測処理には変更がなかったことと、前述のL/ADESSによる処理能力の向上により検知能力の低下の様子は見

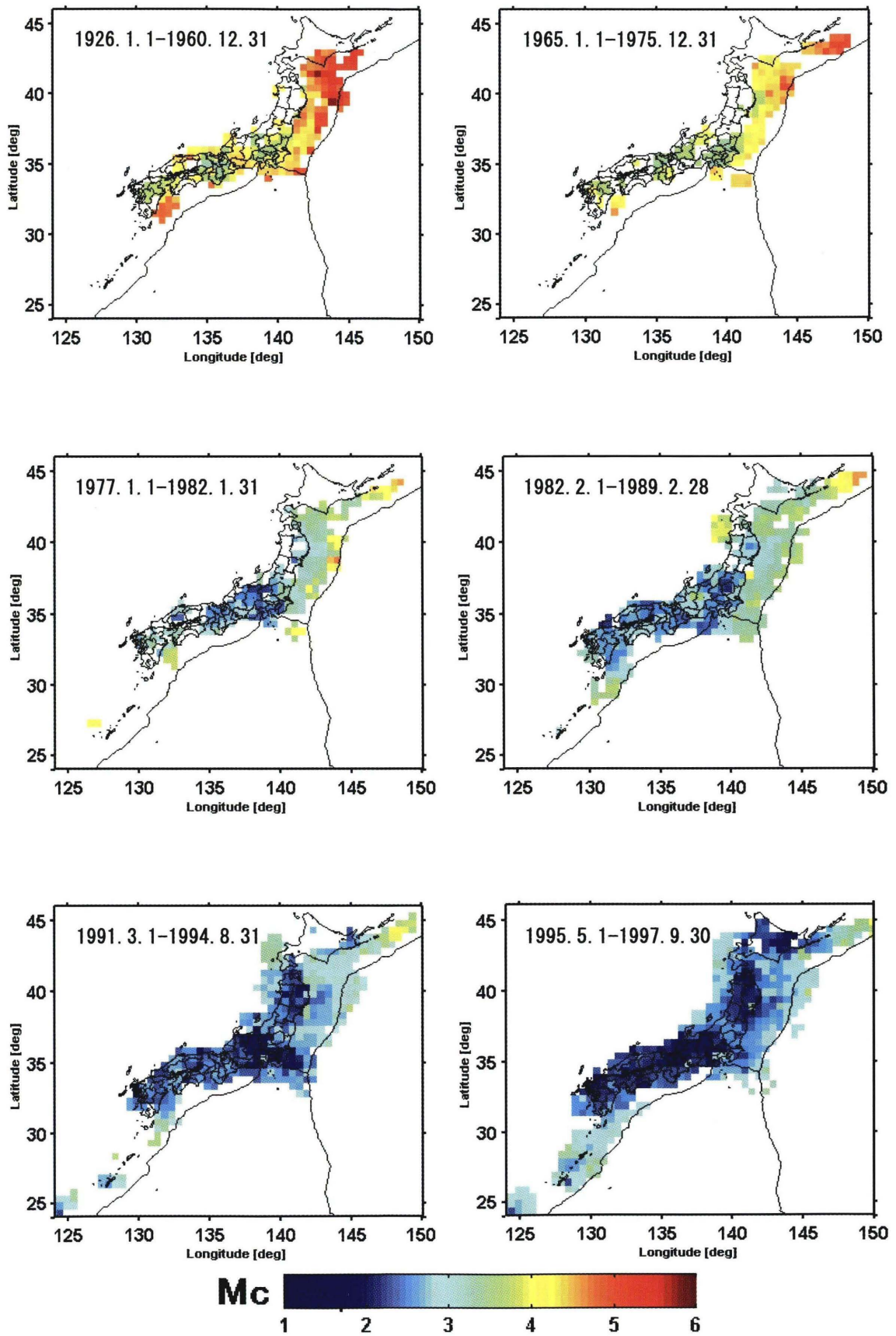


Fig. 5 Same figures as Fig. 4, but the color scale of M_c is fixed for every figure for convenience of understanding the time variation of M_c .

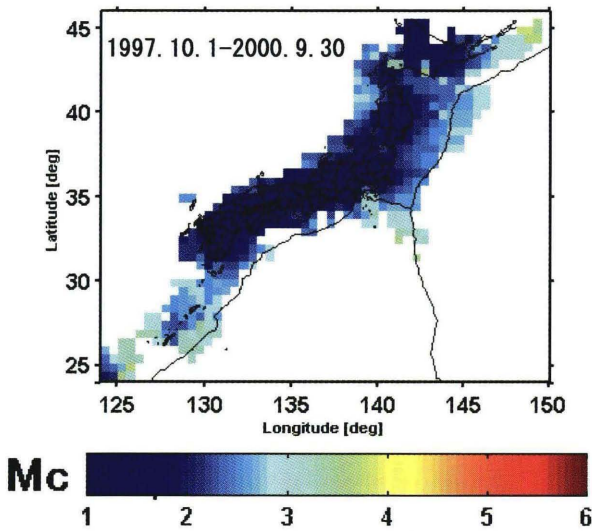


Fig. 5 (continued)

られない。

期間5) (1991年3月1日～1994年8月31日)では陸域については北海道と北陸、九州の一部以外はMcが求められ、全て3.0以下である。海域については北海道～九州の太平洋側で北海道東方沖を除きMcは2.0～3.5程度である。日本海側では1994年北海道南西沖地震の余震域周辺で3.5程度で、それ以外では2.0～3.0程度である。この期間は陸域、海域とも検知能力の大幅な改善は見られないが、Mcの求められた領域は期間4)よりも広がっている。検知能力に大幅な改善が見られないのはETOSの整備により処理効率や速度が向上したものの、新規の地震計の展開がそれほど多くなかったため検知能力にはさほど影響を与えなかったからと考えられる。

期間6) (1995年5月1日～1997年9月30日)では、陸域は北海道の一部でMcが計算されないものの、それ以外のMcが求められた領域では全般に2.0～3.0程度で、期間5)よりMcが2.0以下の領域が増えている。これは、津波地震早期検知網展開に伴う地震計の増設と、設置場所を気象台庁舎にこだわらず可能な限りノイズの少ない地点を選定した結果、検知能力が向上したものと思われる。海域では九州南方沖～沖縄付近の海域にかけて2.5～3.5程度に求められている。

期間7) (1997年10月1日～2000年9月30日)では、大学等関連機関からのデータ提供により全国的に大幅に検知能力が向上した。陸域についてのMcは北海道胆振地方周辺の3.5程度以外は日本全域で1.0～2.0程度であり、北海道、九州のMcがかなり改善されている。海域は北海道東方沖、伊豆諸島付近海域と沖縄付近海域の一部で3.5程度でそれ以外は2.0～3.0程度である。北海

道胆振地方と伊豆諸島のMcが大きいの、それぞれ2000年有珠山噴火と2000年三宅島噴火に伴う火山性地震の増加による処理能力の一時的低下の影響によるものである。

5. まとめ及び今後の課題

今回用いた手法により比較的容易にMcの時間的空間的变化の状況を定量的に、また系統的に評価することができた。その結果、地震観測網や処理システムの改善に伴い地震検知能力が大きく向上し、特に1976年からの76型地震計の運用、1997年10月からのREDCの処理開始は大きな効果を上げていることが分かった。本調査で得られた結果は過去に行われたMcの調査結果との整合性も良く、今回の手法が有効であることも分かった。

今後、気象庁マグニチュードの決定方法が見直されるとともに、過去に遡ってマグニチュードの再計算が行われることが計画されている。また、Hi-net導入に伴い地震検知能力がこれまでよりもさらに向上するであろう。これらの業務的な改善によりMcが大きく変わることが予想されることから、今後も引き続き調査を行っていく必要がある。

謝辞

本論をまとめるにあたり、匿名の査読者と気象研究所石川有三室長からは適切な助言をいただき、また、Stefan Wiemer博士からはプログラムを提供していただいた。ここに記して感謝いたします。

参考文献

- 石川有三 (1987) : 気象庁震源データの変遷とその問題点, 験震時報, **51**, 47-56.
- 石川有三 (2002) : 気象庁地震観測網と処理システムの変遷, 日本地震学会ニュースレター, **13**(5), 30-33.
- 石川有三・中村浩二, (1997) : SEIS-PC for Windows95, 地球惑星科学関連学会1997年合同大会予稿集, 78.
- 市川政治 (1978) : 気象庁新地震観測網の震源決定能力, 験震時報, **42**, 55-60.
- 地震火山部 (1991) : 最近の気象庁の地震観測網の震源決定能力—視覚的表現による—, 測候時報, **58**, 1-3.
- 望月英志, 小林悦夫, 岸尾政弘 (1978) : 1965～1974年の気象庁の震源検知能力, 験震時報, **42**, 23-30.
- 横山博文 (1984) : 最近の気象庁地震観測網の震源決定

能力 —1979 ~ 1983—, 驗震時報, **49**, 53-65.

WIEMER, S. and M. WYSS (1994): Seismic quiescence before the 1993 M=7.5 Landers and M=6.5 Big Bear (California) earthquakes, Bull. Seis. Soc. Amer., **84**, 900-916.

WIEMER, S and M. WYSS (2000): Minimum Magnitude of Completeness in Earthquake Catalogs: Examples from Alaska, the Western United States, and Japan, Bull. Seis. Soc. Amer., **90**, 859-869.

WIEMER, S. and R. ZUNIGA (1994): ZMAP—a software package to analysis seismicity(abstract), EOS, Trans., AGU, **75**, 456.