

긴급지진속보의 개요와 처리 방법에 대한 기술적 참고 자료

목차

1. 개요
2. 단독 관측점 처리
 - (1) 자동검측·주성분 분석법·B- Δ 법
 - (2) 노이즈 식별
 - (3) 레벨 법을 위한 한계치 초과 감지
 - (4) 실시간 진도 연산
3. 중추처리
 - (1) 진원과 M에 의한 진도 예측 기법
 - ① 진원 결정 방법
 - 가. IPF법
 - 나. 착미착법
 - 다. EPOS에 의한 자동처리 기법
 - ② 규모 계산 방법
 - ③ 진원·규모의 품질 관리 처리
 - ④ 예측진도 및 주요동 도달 예측 시각 산출 처리
 - 가. 입력 처리
 - 나. 예측 진도 산출 처리
 - 다. 강진동(주요동) 도달 예측 시각 산출 처리
 - (2) 진원 요소에 의하지 않는 진도 예측
 - ① 레벨 법
 - ② PLUM 법
 - 가. 수법의 원리와 가정
 - 나. 진도 예측
 - 다. PLUM법의 이벤트 작성·종료 처리
 - (3) 하이브리드 처리
4. 발표처리
 - (1) 발표 조건 등
 - (2) 전문

[참고문헌]

1. 개요

긴급지진속보는 지진 발생 후 진원 부근 관측점의 데이터를 바탕으로 가능한 한 빨리 진원이나 규모(M)를 추정하거나 강한 흔들림의 퍼짐을 포착해 각지의 진도나 도달 시각을 사용자에게 제공하는 정보다. 진원이나 규모, 예측 진도의 추정 정확도가 높아질 때마다 정보를 갱신해 발표한다. 그 결과, 진원과 관측점의 위치 관계에 따라서는 대상이 되는 지역에 S파(주요동) 등에 의해서 초래되는 강한 흔들림이 도달하기 전에, 경우에 따라서는 P파가 도달하기 전에 정보를 발신하는 것이 가능하다.

현재의 긴급지진속보로 이용하고 있는 진도 예측 수법은, 「진원과 규모에 의한 수법」과 「진원 요소에 의하지 않는 수법」으로 크게 나뉜다. 각각의 방법에는 장단점이 있지만, 서로 조합하여 사용함으로써 서로의 단점을 보완하고, 보다 정밀도 높은 진도 예측이 가능해질 것으로 기대한다.

우리가 지진 발생을 알려면, 진원에서 가장 가까운 관측점에 P파가 닿을 필요가 있다. 이 도달한 P파를 관측점에서 처리하는 것이 현재의 기술로서는 가장 빨리 대지진의 발생을 아는 방법이다. 각각의 관측점으로부터 진앙까지의 거리나 최대 진폭치 등을 산출하는 것을 「단독 관측점 처리」라고 부른다. 이 결과는 처리중추로 즉시 송출된다. 처리중추는 이런 단독 관측점 처리 결과가 집약되어 IPF(Integrated Particle Filter)법을 이용한 진원 결정이나 PLUM(Propagation Local Undamped Motion)법에 의해 이루어진다. 또 동시에 Hi-net의 파형 데이터를 이용한 착미착법이나 EPOS(지진 활동 등 종합감시시스템: Earthquake Phenomena Observation System)에 의한 자동 진원 처리가 작동되어, 각각의 진원의 동일판정이나 정밀도 평가, 하이브리드 처리를 거쳐 예측진도나 지진파의 도달 시간을 계산한다. 이 결과가 긴급지진속보의 발표 조건, 혹은 갱신 조건을 충족했을 경우에 긴급지진속보를 발신한다(그림 1).

본 자료에서는 긴급지진속보 처리의 기술적인 해설을 실시한다. 이론적 배경에 대해서는 참고 문헌 등을 참조할 것.

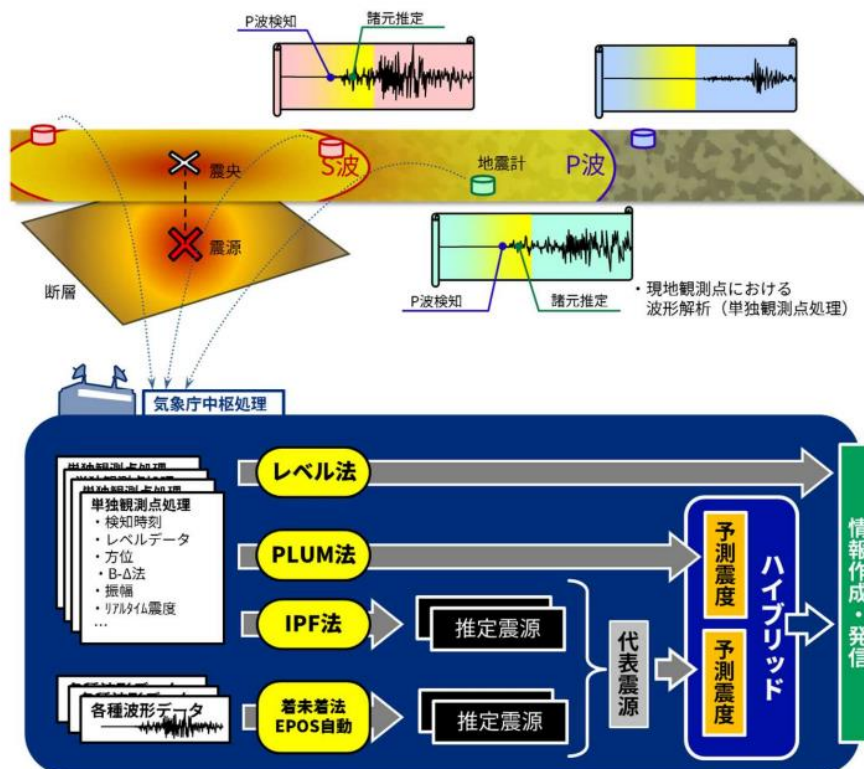


그림 1 : 긴급지진속보의 처리 흐름

2. 단독 관측점 처리

P파가 관측점에 도달해 기준 이상의 지동(地動)이 관측된 경우(이하 '트리거'라 칭함), 단독 관측점 처리를 개시한다(이 처리는 P파가 관측점에 도달한 경우 순차적으로 실행하고 지동이 통상 상태로 돌아올 때까지 초당 중추에 결과를 송신하지만, 진폭 모니터를 제외한 각 처리는 최초 1초에 실시한다(그림 2)). 또한, 진폭의 크기 등에 대해서는 이들 트리거의 유무에 관계없이 상시 감시하여 통지하는 기능이 있다.

단독 관측점 처리에는 주성분 분석법, B-Δ법(Odaka *et al.*[2003], 束田ほか[2004])라 불리는 처리가 있어, 진앙 방위, 진앙 거리 등을 추정한다. 또, 지진동의 세기의 지표로서 최대 진폭치나 실시간 진도를 순차적으로 산출한다. B-Δ법 등의 트리거에 수반하는 제원치(諸元値)에 대해서는 트리거 처리 후부터 트리거 종료 시까지 매초, 실시간 진도 등의 진폭치나 레벨 법에 이용하는 한계치 초과 데이터에 대해서는 순차적으로, 처리 중추에 송신한다.

단독 관측점 처리의 핵심을 이루는 주성분 분석법, B-Δ법, 노이즈 식별 처리, 레벨 법 등을 위한 한계치 초과 검지 및 실시간 진도 연산은 다음과 같다.

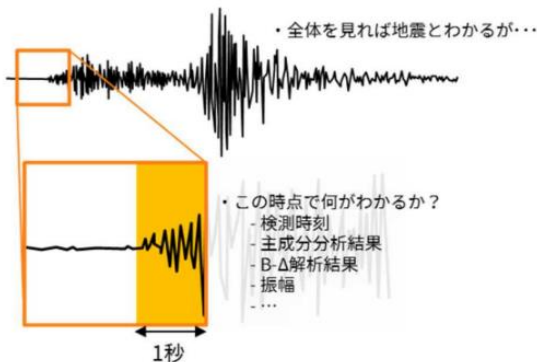


그림 2 : 1초만에 파형을 처리한다는 건?

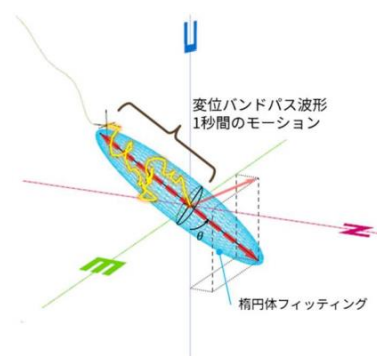


그림 3: P파 초동부(변위 파형) 1초간의 파티클 모션의 주축으로부터 지진파의 도래 방향을 구하다

(1) 자동검측·주성분 분석법·B-Δ법

지진파가 관측점에 도달하고 노이즈 레벨의 정수배의 진폭을 관측한 타이밍을 트리거로서 검지하여 처리를 개시한다. 먼저 트리거가 걸린 시점부터 거슬러 올라가 노이즈 레벨을 진폭이 넘은 시각을 읽어낸다. 이것을 P파의 검측 시각으로 한다. 이 시각부터 1초간의 변위 파형을 이용하여 지진파가 어느 방향에서 도래했는지를 주성분 분석에 의해 정한다(그림 3).

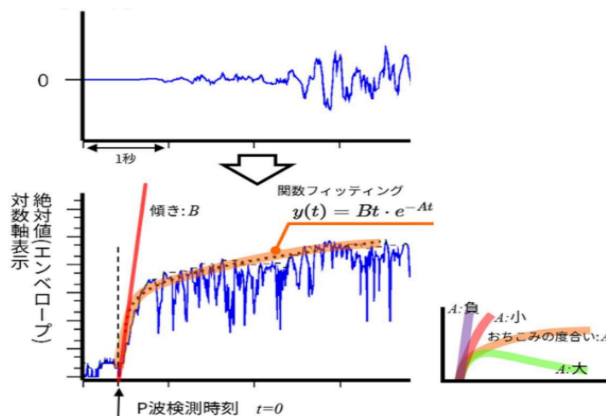


그림 4: P파 초동부(가속도 절대치 파형)로 함수 (1)식을 피팅하고 계수를 구함

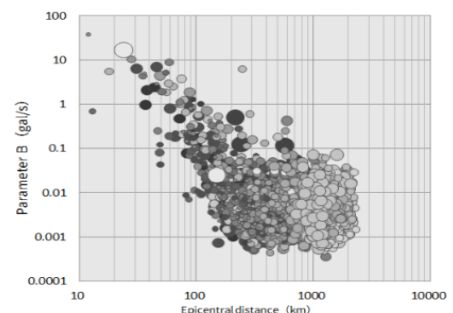


그림 5: 기울기를 나타내는 계수 B와 진앙거리 Δ의 관계

다음으로 1초간 가속도 파형의 절대치 파형을 작성하고 이것에,

$$y(t) = Bt \times e^{-At} \quad \dots(1)$$

를 피팅한다(그림 4). (1)식의 계수B는 이 절대치 파형의 증가율을 반영한 수치, 계수A는 진폭증가세의 지속시간을 나타낸 것이다. 즉, 계수B가 크면 클수록 가파르게 서고, 계수A가 작으면 작을수록 진폭의 증가가 오래 지속된다는 얘기다. 특히 계수B는 M(규모)에 의존하지 않고 진앙거리Δ와 상관관계가 있어, 계수B로부터 대략적인 진앙거리Δ를 구할 수 있다(그림 5).

(2)노이즈 식별

(1)의 처리에서는, 각종 노이즈 식별 처리와 병행하여 이루어진다. 이 노이즈 식별 처리에서는 이하의 ①~⑦의 처리를 실시하고 있다.

- ① 상하동과 수평동의 진폭 비: 자연지진의 P파 부분이라면, 상하동과 수평동의 진폭비는 일정한 범위 내에 수렴될 것으로 기대된다.
- ② 데이터의 편차도: 자연지진에 의한 파형에 대해 오프셋(offset) 어긋남 등에 의한 펄스성 노이즈 파형은 이동분산이 계속해서 큰 값이 되지는 않는다.
- ③ B-Δ법에서의 계수A: 파형이 일어난 후에 바로 가라앉아 버린 경우, B-Δ법에 있어서 계수A는 커진다. 이때 만일 그런 지진이 발생했더라도 규모는 크지 않을 것으로 예상한다.
- ④ B-Δ법에서의 계수B: 자연지진에 의해 생긴 진동이라면, B-Δ법에 있어서 계수B는 일정한 범위 내에 들 어갈 것으로 기대된다.
- ⑤ B-Δ법에 있어서 피팅 단차: B-Δ법에 있어서 피팅 단차가 너무 큰 경우는 상기 ③, ④의 품질 관리를 할 수 없기 때문에 배제한다.
- ⑥ 가속도 진폭 최대치: 일정 시간이 지나도 가속도 진폭의 최대치가 커지지 않았다면 큰 지진이 아니라고 판단된다.
- ⑦ 복수 센서의 트리거 상황: 복수의 센서가 병설 되어있는 경우, 양쪽 센서에서 트리거가 걸린 경우만 지진이라고 판단한다.

(3)레벨 법을 위한 한계치 초과 감지

관측점 직하 부근에서 지진이 발생했을 경우를 고려해, 어느 관측점에서 역치(閾値)이상의 진폭치가 검출되었을 경우에는, 레벨 법(3. (2). ① 참조)에 의해 정보를 발표한다. 단독 관측점 처리에 있어서는, 현재는 상하동 가속도 파형이 100gal을 넘었을 경우, 처리 중추에 역치 초과를 전달하는 레벨 데이터를 발신한다.

(4)실시간 진도 연산

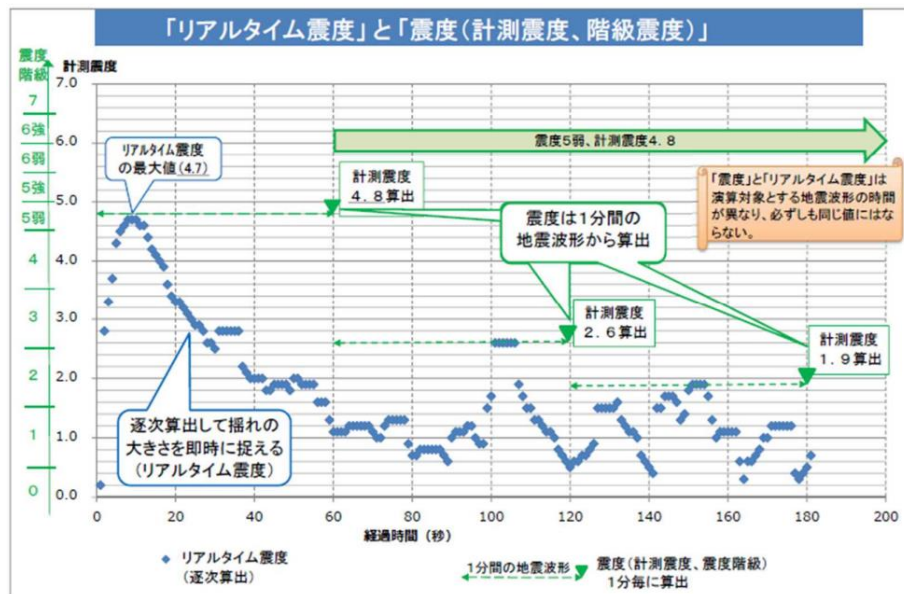
「실시간 진도」는 관측점에서 지진마다 단 하나의 값을 취하는 이른바 「진도」, 「계측 진도」와는 달리, 순차적인 흔들림의 크기를 나타내는 계측 진도 상당의 시계열 값이다(그림 6). 계측 진도 산출 방법(기상청 [1996])에서는, 일정시간 축적한 가속도 파형에 푸리에 변환을 이용하여 기상청 진도 산출에 이용하는 필터를 적용한다. 그러나, 주파수 영역의 필터이기 때문에 실시간으로 출력을 얻을 수 없다. 功刀[2008]에 의한 시간 영역의 점화식 필터를 이용하는 연산 방법에서는, 최대 가속도 등 기타 강진동 지표로부터 회귀식을 이용하여 산출하는 진도 상당치의 각종 추정 방법보다 계산 정밀도와 신속성을 높일 수 있다. 또한, 해석 구간을 이동하면서 행해지는 처리보다 계산량이 적어 순차성이 높다. 따라서, 근사적으로 설계된 시간영역의 점화식 필터를 대체하여 사용함으로써 실시간 진도를 산출한다.

또한 계측 진도의 산출에는 진도 필터를 적용한 지진파형의 3성분 파형을 벡터 합성한 후에 60초를 1지진으로 하여 벡터 합성의 값이 있는 진폭치 a 이상이 되는 시간의 합계가 0.3초가 되는 진폭치 a를 산출하고,

$$I = 2 \log_{10} a + 0.94$$

에 의해, 계측 진도를 산출한다. 실시간 진도를 산출함에 있어서도, 점화식 필터로부터 얻은 파형에 같은 처리를 실시함으로써 실시간 진도를 산출하지만, 진폭을 얻기 위한 시간폭이나 갱신 간격은 용도에 따라 변경되는 경우가 있다.

그림 6 : 실시간 진도와 진도(계측 진도·계급 진도) 산출 타이밍의 차이



3. 중추처리

처리 중추에서는 단독 관측점에 있어서 처리된 정보나 파형 데이터를 수신하고, 각종 진도 예측 처리를 행한다.

(1) 진원과 M(규모)에 의한 진도 예측 기법

지진파를 검출한 트리거 정보에 근거하여 진원이나 M(규모)을 자동으로 결정하고 진도 예측을 실시한다.

① 진원 결정 방법

가. IPF법

IPF(Integrated Particle Filter)법 (溜瀝 외[2004])은 B-Δ법이나 주성분 분석법의 결과를 고려한 테리터리 법·검측 시각에 근거한 그리드서치 법 등 종전의 방법(横田ほか[2002], 中村[2007])을 대체하는 새로운 기법이다. 종전의 방법에서는 B-Δ법이나 주시 잔차, 진폭의 값 등을 각각의 수법으로 처리하고 있었지만 IPF법에서는 이들을 통합하여 취급해 전체적으로 가장 데이터를 만족하는 진원을 몬테카를로법 중 하나인 파티클 필터에 의해 추정한다.

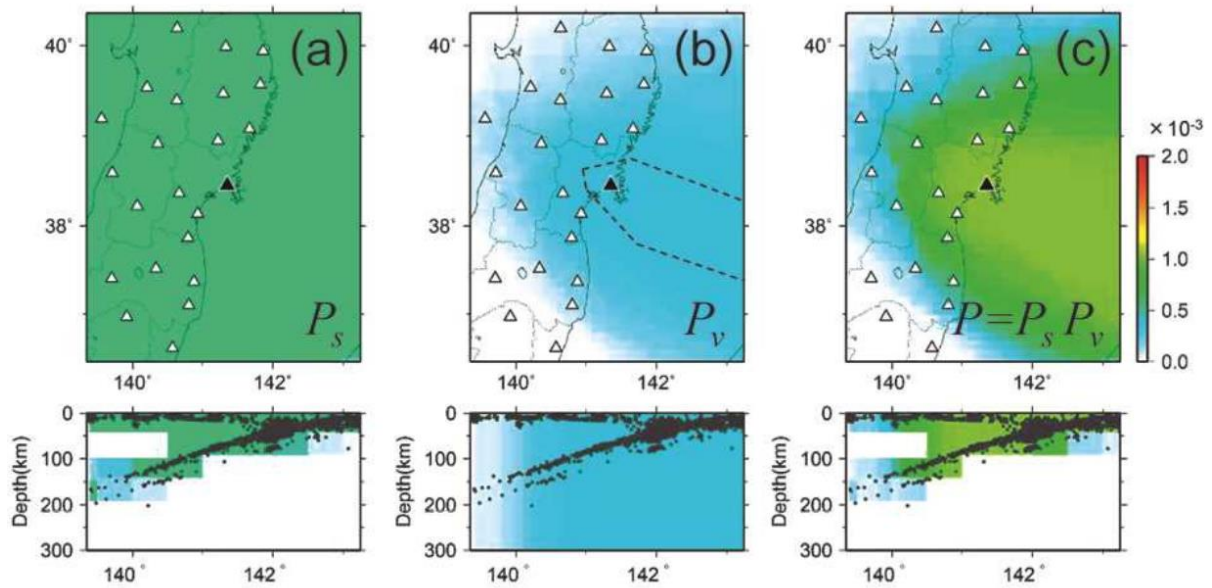


그림 7 : IPF법 처리에서의 사전 확률 부여 방법

초기 상태로서 IPF법은 지금까지 발생한 지진의 분포·회수에 근거하는 대략적인 사전 확률을 위도·경도·깊이 그리드로 가진다(그림 7(a)). 관측점으로부터 단독 관측점 데이터 처리 데이터(검측 시각, 진앙 거리, 방위각, 진폭치)를 수신하면, 우선 그 관측점을 포함한 수평 테리터리 및 그 주변에 확률 분포를 설정한다(그림 7(b), 테리터리에 대해서는 横田ほか[2002], 中村[2007]를 참조). 이것과 사전확률과의 곱에 의해 새로운 사전 확률 분포를 공간에 정의할 수 있다.

이 분포를 따르도록 가상 진원을 다수 랜덤으로 분포시켜, 각각의 가상 진원에 대해 단독 관측점 처리 데이터 각각에 대한 우도를 계산한다(파티클 필터, 그림 8). 이 우도가 가장 높은 이 입력시의 진원 후보로 한다. 우도의 함수 설계는 기본적으로는 어떤 진원 파라미터에 있어서 기대치와의 차이가 정규 분포로 근사할 수 있다는 가정 하에서 실시하고 있다.

다음 단계로, 새로운 데이터가 입력되었을 때, 혹은 다음 계산 타이밍을 맞이했을 때에는 전 단계에서의 다수 개의 가상 진원의 우도에서 그 무게 분포를 계산하고 무게 분포를 바탕으로 가상 진원을 복원 추출하여 다시 우도를 산출한다. 이때 추출한 가상 진원에 섭동을 줘 특정 가상 진원에서의 수렴을 막고 있다. 이 동작을 반복함으로써, 진원의 정밀도를 확률론적으로 높여간다.

또한, 이 무게 분포는 복수 지진의 식별에 이용할 수 있다. 새로운 관측 데이터의 입력이 있었을 때, 그 검측 시각 및 진폭 값에 대해 지금까지의 가상 진원과의 오차가 허용 범위보다 큰지에 의해 새로운 지진이 발생했는지 여부를 판정한다. 검측 시각만을 이용하던 종전의 방법의 식별보다 새롭게 진폭값을 이용함으로써 종합적인 복수 지진의 식별이 가능해졌다.

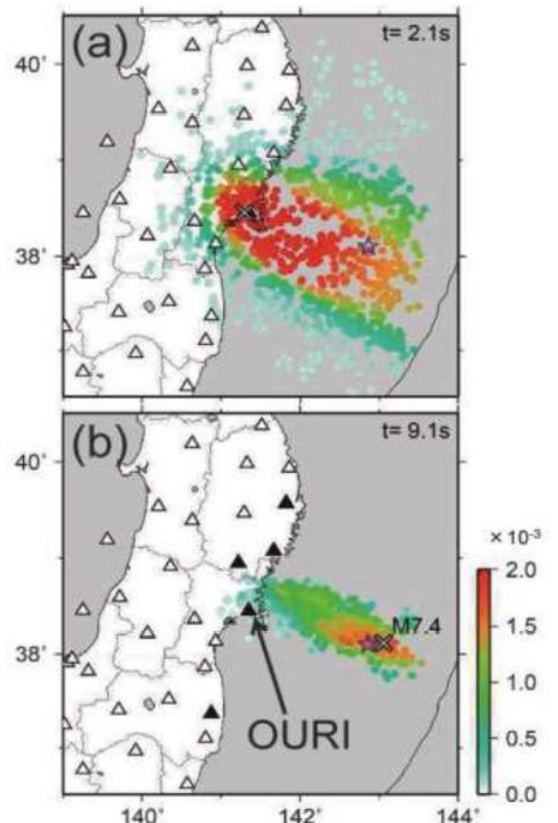


그림 8: IPF법 처리로 뿌려진 파티클과 그 우도(溜瀬ほか[2014]에서)

나. 착미착법

이 방법은 국립개발연구법인 방재과학기술연구소에서 개발된 그리드서치 법의 일종이다(Horiuchi *et al.* [2005], 그림 9). 긴급지진속보는 주로 기상청의 지진 관측망(다기능형 지진계) 데이터를 이용해 처리하고 있지만, 착미착법은 방재과학기술연구소의 Hi-net 관측망의 데이터를 이용해 처리하고 있다. 이들 관측망은 관측점의 밀도, 센서의 특성, 보수에 대한 사고방식이 다르지만, 서로의 특징을 살릴 수 있는 형태로 긴급지진속보의 고도화를 실시하고 있다.

진폭이 단기적으로 변화해 지진이 도달한 것으로 보이는 '착 상태'의 관측점과 아직 파형에 변화가 없고 지진파가 도달하지 않았다고 생각되는 '미착 상태'의 관측점에 대해 주변 2개 지점 이상이 '착 상태'가 되었을 때 진원결정처리가 개시된다. 각각의 관측점에서 파형의 변화가 있던 시각을 검출하여 주변의 그리드에 배치한 가상 진원군을 기초로 이론주시와의 차이가 작아지도록 그리드서치를 행한다. 그리드는 서서히 잔차가 작은 쪽으로 이동시키고, 또 간격을 좁히면서 서치를 반복해 충분히 수렴한 지점을 최종 추정 진원으로 간주한다.

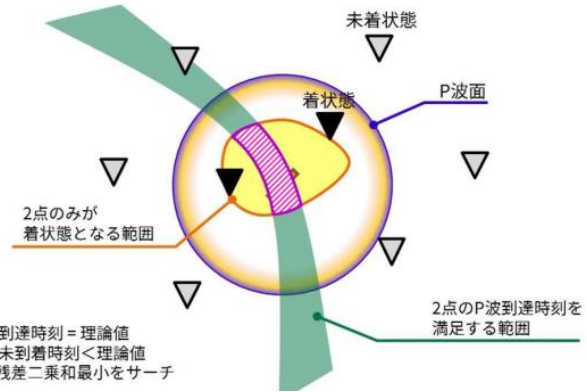


그림 9: 착미착법의 개념도 (그림은 2점 시)

다. EPOS를 통한 자동 처리 방법

기상청의 EPOS에 의한 처리에서는 관측점으로부터의 파형 데이터를 처리 중추에 모아 지진 검지 처리(트리거 판정)를 실시해 지진이라고 판단되면 P, S파의 도달 시각 및 최대 진폭의 자동 검출을 실시해 진원을 요구하고 있다. 이 처리는 파형 데이터를 처리 중추에 모으고, 또한 여러 관측점에서의 진폭 변화가 일어나지 않으면 처리가 개시되지 않기 때문에 결과가 나오는 시간이 긴급지진속보 처리보다 느리다. 하지만, 전술(前述)의 각 진원 결정 수법과 달리 S파 도달 시각도 결정에 이용하기 때문에, 정밀도로서는 전술의 각 처리보다 높다고 생각된다.

② 규모 계산 방법

전술한 처리에 의해 얻어진 진원과 각 관측점의 최대 진폭을 이용해 규모(M) 계산을 실시한다. 기상청의 일반적인 규모 계산으로는 지진파의 초동부뿐만 아니라 지진파 전체의 최대 진폭에 따라 규모를 구하기 때문에 즉각적인 규모의 계산은 불가능하다. 긴급지진속보 처리에서는 지진 검지 후의 빠른 단계로부터 규모의 추정을 가능하게 하기 위해, P파의 부분(P파 M)과 S파 도달 이후(전상(全相) M)의 2종류의 규모 계산식을 설정해, 각 관측점에 S파가 도달했다고 생각되는 시간에 대응해 계산식을 전환하고 있다.

이 때문에, 긴급지진속보 처리로 얻은 진원 위치의 차이나 최대 진폭의 나타나는 방법의 차이에 의해서, 규모가 일시적으로 증감할 가능성을 생각할 수 있다(그림 10). 이것을 방지하기 위해서,

■각 관측점에서는 P파를 검지한 후, 3초 후의 최대 진폭으로부터 P파 M을 구한다(이 이후, 초당 최대 진폭을 계산해 규모 계산을 실시한다).

■이론적인 S파가 도달해야 할 시간의 70%까지는 P파 M을 구한다. 그 이후는 전상 M식으로 전환한다. 단, 전상 M으로 전환하자마자 M이 작아지지 않도록, 잠시동안은 P파 기간의 최대 진폭을 이용한 P파 M을 유지한다(고정 M). 고정 M보다 전상 M이 커지면 전상 M으로 전환한다. 전상 M이 고정 M을 넘지 않는 경우에도 S파가 도달해야 하는 시간에서부터 고정 M에서 산출한 파괴계속시간 또는 P파 검지로부터 P파 부분에서의 최대 진폭이 발현될 때까지의 시간 중 하나를 경과한 경우 전상 M으로 전환한다.

라는 갱신 조건을 마련하고, 그 결과를 긴급지진속보의 규모로 하고 있다. P파 M과 전상 M은 각각 이하의 식으로 계산한다.

P파 M식(明田川ほか[2010]에서):

$$0.72M = \log_{10} A + 1.2 \log_{10} R + 5.0 \times 10^{-4} R - 5.0 \times 10^{-3} D + 0.46$$

전상 M식(清本ほか[2010]에서):

$$0.87M = \log_{10} A + 1.0 \log_{10} R + 1.9 \times 10^{-3} R - 5.0 \times 10^{-3} D + 0.98$$

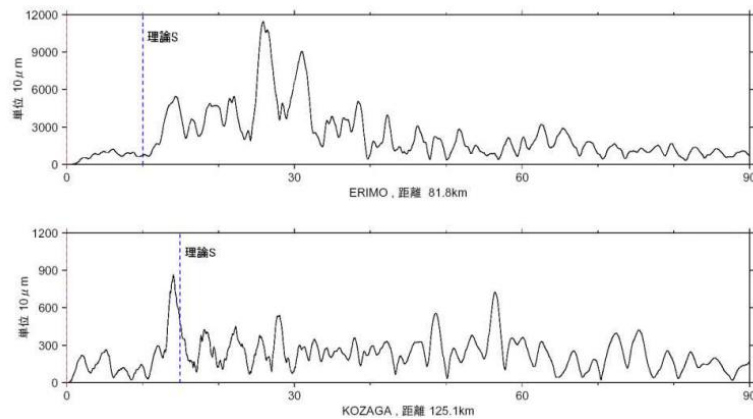


그림 10 : 3성분 합성 변위 규모의 추이와 이론 S파 도달 시각과의 비교

위 그림은 2003년 토카치 앞바다 지진 때의 에리모 관측점의 3성분 합성 변위 진폭이다. 푸른 점선 부가 이론 S파 도달 시각이며, 약 15초 후에 최대 진폭이 발현되고 있음을 알 수 있다. 그 때문에 이론 S파 도달 시각에서 규모 계산식을 전환해버리면 최대 진폭 발현까지는 규모를 작게 어렵하게 된다.

아래 그림은 2004년 9월 5일의 기이 반도 남동 앞바다 지진의 와카야마 고자가와 관측점의 3성분 합성 진폭이다. 위 그림과 달리 이론 주시보다 앞에 최대 진폭이 발현되었기 때문에 이론 S파 도달 시각 직전까지 P파 M을 구하면 규모를 과대평가하게 된다.

긴급지진속보에서는 이들 사례 등에서 계산식 전환으로 규모가 크게 변화하지 않게 하고 있다.

여기서 A는 최대 변위 진폭(10μm 단위), R은 진원 거리(km), D는 진원의 깊이(km)이다.

P파 M식이나 전상 M식에서는 규모를 합성 3성분 합성 변위 진폭으로 추정하고 있지만, 해저지진계(OBS)에 관해서는 설치 환경에 의한 지진파 증폭의 영향이나 지진 시의 자세각 변화 등에 의한 과대 진폭 혼입의 영향을 피하기 위해 육지의 관측점과 달리 상하동 변위 진폭을 이용해 규모 계산을 실시하는 것 외에, 복수 관측점의 진폭 데이터를 기다린 후 규모가 상위의 데이터는 이상치일 가능성을 고려해 제외한 후 규모 계산에 이용하고 있다.

상하동 변위 M식(林元ほか[2019]에서):

$$0.90M = \log_{10} A + 0.83 \log_{10} R + 1.7 \times 10^{-3} R - 2.6 \times 10^{-3} D + 1.68$$

③ 진원·규모 품질 관리 처리

예측 방법에 진원과 규모에 의하지 않는 방법인 「PLUM」법을 병용함으로써 진원을 결정할 수 없는 경우에도 간과 사례를 줄이고 있다. 게다가 진원과 규모의 품질 관리를 실시하는 것으로, 너무나도 부적절한 진원 결정이 이루어진 경우에는 진원 정보를 갱신하지 않고, 정보 발표에 이용하지 않는다는 「진원의 기각」 판단을 실시하는 것도 가능해졌다.

얕은 지진에서는 진앙 근방의 관측점만큼 큰 진폭을 기록하고 있을 것으로 예상된다. 새롭게 결정된 진원 및 규모에 대해서, 그 규모와 추정 진앙 부근의 관측점 수점의 진폭치를 이용한 근방 M을 비교해, 근방 M이 일정 이상 작다, 즉 결정된 진원 주변에서의 관측점에서 큰 진폭이 관측되고 있지 않다고 판단되었을 경우에는, 이 진원 및 규모를 「기각」하고, 대표 진원은 그때까지 결정된 것이므로 갱신을 실시하지 않는다(그림 11). 또한 심발 지진의 경우, 이 기각 판정 방법은 반드시 유효하지는 않기 때문에 진원이 일정 이상의 깊이로 결정된 경우에는 이 처리를 실시하지 않는 것으로 하고 있다.

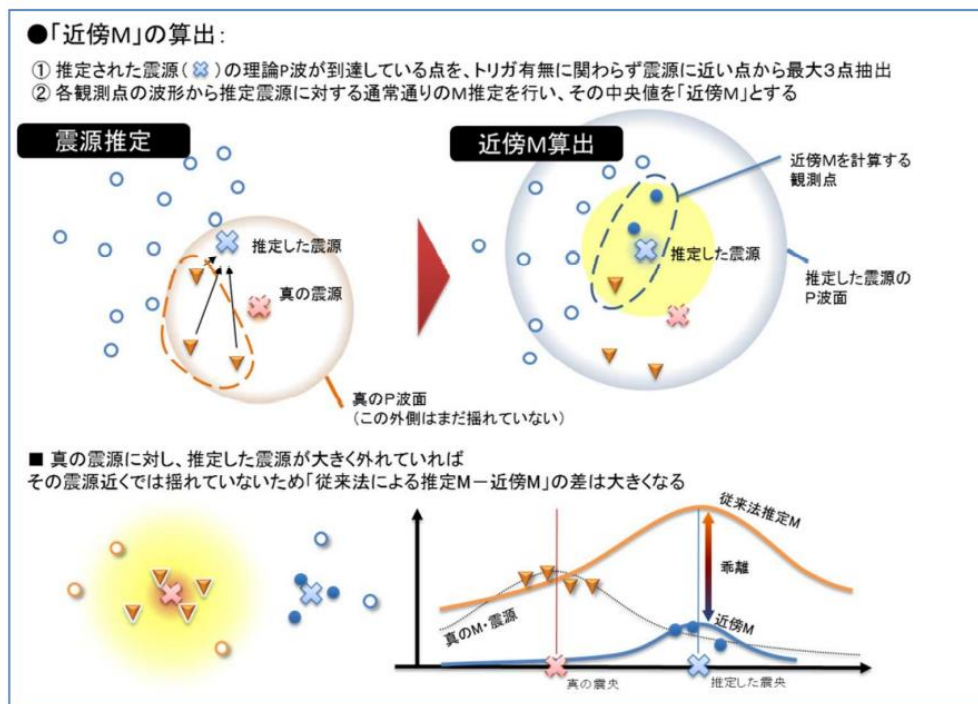


그림 11 : 근방 M의 추정 모식도

트리거 된 관측점(빨간 ▽)으로 추정된 진원(파란 ×)이, 실제 진원(빨간 ×)로부터 크게 벗어나 결정되었을 경우, 추정된 진원을 기초로 트리거 된 관측점의 진폭으로 규모를 평가하기 위해서 추정 규모를 과대평가하게 된다(왼쪽 위). 이때 트리거에 의하지 않고 추정된 진원 근방의 관측점 최대 3점(파란색 ▽) 진폭으로 규모를 평가(근방 M)했을 경우는 실제 진원으로부터의 흔들림이 미도달하기 때문에 규모가 작게 추정되게 된다(오른쪽 위). 이 진원에서의 추정 M과 근방 M의 괴리(하단)가 크고 추정한 M보다 근방 M의 값이 일정 이상 작은 경우에는 이 진원과 규모를 「기각」하여 대표 진원을 갱신하지 않는다.

또한, 비록 추정된 진원의 정확도가 양호하더라도, 지진계의 이상 등에 기기 노이즈에 의해 과대한 진폭치를 얻었을 경우에 규모를 과대 평가해 진도 예측이 과대해지는 경우가 있다. 이 때문에 A전문에서 얻은 변위 진폭치는 지진학적으로 계측할 수 없는 크기의 진폭이 관측된 경우에는 노이즈일 가능성이 높다고 판정해 규모 계산에 이용하지 않도록 했으며, 관측점 1점만으로 진원이 추정되고 있는 경우에는 추정 가능한 규모에 상한을 정하기로 했다.

④ 예측 진도 및 주요동 도달 예측 시각 산출 처리

긴급지진속보를 지진 방재 대책에 효율적으로 이용하기 위해서는 피해를 일으키는 강진동의 강한 정도 및 흔들림의 도달 시각을 실제 흔들림이 오기 전까지 예측하는 것이 매우 중요하다.

예측 진도 산출 처리는 전항까지의 방법에 따라 순차적으로 추정되는 진원 위치 및 규모 등을 기초로 대상이 되는 지점에서 예측되는 강진동의 강한 정도를 진도로 환산함과 동시에 강진동의 도달 예측 시각을 산출하는 것이다.

진도 예측에는 강진동 예측 방법을 활용한다. 강진동 예측 방법에는 회귀식 등의 통계적 기법에서 구한 지진동의 거리 감쇠식으로 대표되는 경험적 방법과, 지진파의 발생·전파의 물리적 모델 등을 활용해 고정밀도로 예측하는 이론적 방법이 있다. 본 처리에서는 간편하고 신속하게 계산할 수 있는 경험적 바탕을 채택했다(그림 12).

그 절차를 크게 나누면

- I. 진원 위치 및 규모 등으로부터 최대 속도의 거리감쇠식을 적용하여 대상 지점(전국 진도 관측점: 약 4000점)의 '기준 기반'에서의 추정 최대 진도를 구한다.
- II. 국토 수치 정보에 있는 지반 증폭도를 곱함으로써 대상이 되는 지점에서의 증폭 특성을 고려하여 지표에서의 추정 최대 속도를 산출한다.
- III. 지표에서의 추정 최대 속도를 계측 진도로 환산한다.

라고 하는 3단계가 있다. 거리감쇠식에는 진원까지의 최단거리를 입력하지만, 긴급지진속보의 발표 대상이 되는 규모가 큰 지진에 대해서는 진원은 더 이상 점이 아닌 공간적으로 넓어짐을 가진 진원역으로 취급할 필요가 있는 한편 긴급지진속보를 발표하는 타이밍에 정확한 단층 파라미터 등을 확정하는 것은 불가능하다(단층 주향을 특정할 수 없는 등)는 과제가 있다. 그 때문에 방재 대응상의 안전을 전망하고, 진원을 중심으로 규모에서 상사적(Similitude)에 의해 예측되는 단층 길이의 $\frac{1}{2}$ 을 반지름으로 한 구를 설정해, 대상이 되는 지점까지의 거리는 그 구면으로부터의 최단거리를 채택하고 있다(단, 정보 발표 내용에 따라 점 진원 상정의 단순한 진원 거리에서의 계산도 채용하고 있다).

또한, 본 단락에서 「공학적 기반」은 S파 속도 700m/s의 경질 지반, 「기준 지반」은 S파 속도 600m/s의 경질 지반을 나타낸다.

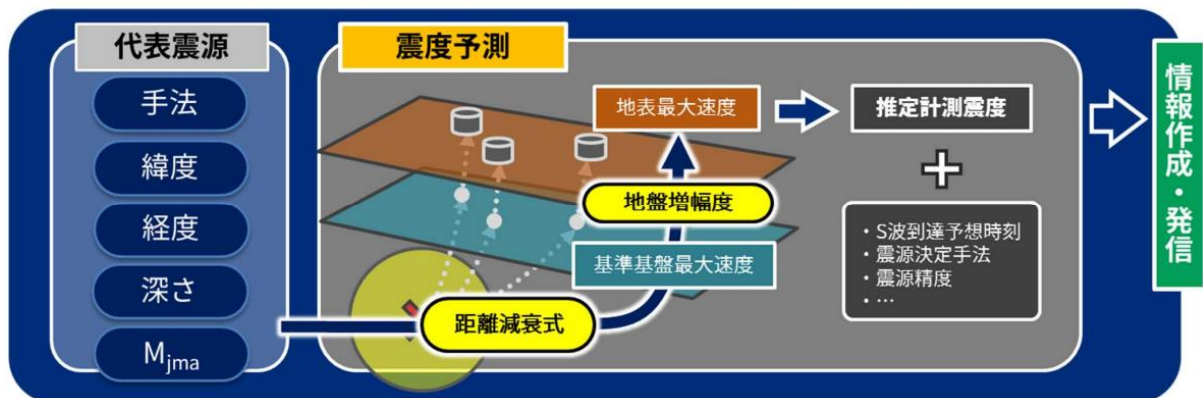


그림 12 : 예측 진도의 산출 흐름

가. 입력 처리

예측 진도를 산출하기 위한 입력 데이터는 기본적으로 진원(위도, 경도, 깊이) 및 규모다. 다만, 단독 관측점 처리의 레벨 법에 대해서는, 미리 설정하고 있는 역치를 넘었을 경우의 최대 진폭(최대 가속도 값)을 입력 데이터로 하는 경우도 있다. 예측 진도 산출, 강진동(주요동) 도달 예측 시각 산출의 입력 데이터는 다음과 같다.

[1] 예측 진도 산출을 위한 입력 데이터

진원(위도, 경도, 깊이), 규모, 지반 증폭도

[2] 강진동(주요동) 도달 예측 시각 산출을 위한 입력 데이터

진원(위도, 경도, 깊이), 지진 발생 시각

나. 예측 진도 산출 처리

■ 기상청 규모(M_{jma})에서 M_w 로의 변환

이후의 식 중에 M_w 는 모멘트 규모다. 앞 절의 규모 계산에서의 M은 기상청 규모(M_{jma})를 대상으로 한 관계식 이므로 M_{jma} 에서 M_w 로 변환할 필요가 있다.

M_w 로의 변환에 대해서는 각종 변환식이 제안되었는데, 본 처리에서는 이하의 식을 채용하고 있다.

$$M_w = M_{jma} - 0.171 \quad (\text{宇津[1982]、宇津[1977] 및 佐藤[1989]에서})$$

■ 최단 거리 계산

이하의 宇津[1997]의 식을 이용하여 규모로부터 상사칙에 의해 예측되는 단층의 길이를 산출하고, 그림 13과 같이 그 $\frac{1}{2}$ 을 반지름으로 하나의 구를 설정하고, 그 구면으로부터의 거리를 최단거리로 한다. 정보 발표 내용에 따라 점 진원 상정 시 단층 길이를 고려하지 않는다.

$$\log_{10} L = 0.5M - 1.85$$

L: 단층 길이, M: 규모 (宇津[1977]에서)

여기에서의 M은 처리상 M_w 로 간주하고 있다. 또한 최단거리에는 하한치를 두고 있어 현재는 진원으로부터의 거리가 3km 미만인 관측점에 대해서는 일률적으로 최단거리를 3km로 설정하기로 했다. 또한, 여기에서는 기반 심도에 대해서는 깊이 0km로서 계산하고 있다.

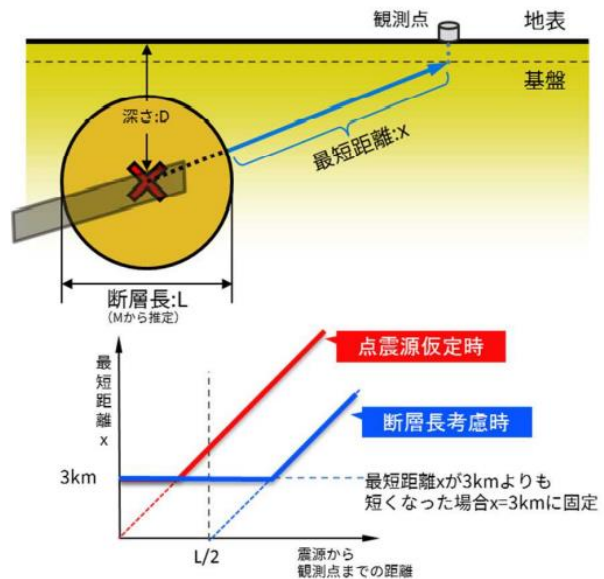


그림 13 : 최단 거리의 계산 방법

■ 대상 지점의 기준 기반상에서의 최대 속도 추정

지진동은 표층 지반의 차이 등에 의한 영향을 크게 받기 때문에 경질로 항상 똑같은 지반에서 평가하는 것이 합리적이다. 본 처리에서는 기준 기반상의 최대속도의 추정을 위하여 이하의 최대속도에 대한 司·翠川[1991]의 거리 감쇠식을 채용하고 있다.

$$\log_{10}(PGV_{600}) = 0.58M_w + 0.0038D - 1.29 - \log_{10}(x + 0.0028 \times 10^{0.50M_w}) - 0.002x$$

PGV_{600} : 기준 기반(S파 속도 600m/s)에서의 최대속도(cm/s)…수평동 2성분 중 큰 쪽의 값

M_w : 모멘트 규모 D: 진원의 깊이(km) x: 최단거리(km) (司·翠川[1991]에서)

여기서, 이 식은 기준 기반을 S파 속도 600m/s(지반증폭도 $ARV = 1.0$)의 경질 지반으로 하고 있다. 한편, 본 처리에서는 지진조사연구추진본부 지진조사위원회(문부과학성)의 방법에 준거해 내각부의 1km 메쉬 국토 수치 정보에 의한 공학적 기반으로부터의 증폭도를 이용해 최대속도를 보정하고 진도 추정을 실시하고 있다. 또, 대상이 되는 예측 지점이 기상청 관측망이며, 관측치를 충분히 얻을 수 있는 경우는 Iwakiri *et al.* [2011]에 근거해 산출된 관측점 보정 계수(진도 예측 보정 계수)를 이용해 최대속도의 보정·진도 추정을 실시한다. 여기서, 이러한 증폭도·보정 계수는 S파 속도가 700m/s의 공학적 기반에서의 최대속도로부터 산출되는 것이므로 기준 기반상의 값으로부터 변환이 필요하다. 기준 기반에서 공학적 기반까지의 최대속도의 증폭률은 아래 기록한 松岡·翠川 [1994]의 속도 증폭도 계산식에 의해 산정하고, 기준 기반의 최대속도에 그 증폭률을 곱한다. 실제로 계산할 경우 기준 기반의 최대속도에 $0.90(\cong (600/700)^{0.66})$ 배 함으로써 공학적 기반상의 추정 최대속도로 한다(그림 14). 0.90배의 산출 근거는 이하의 식에 의한다.

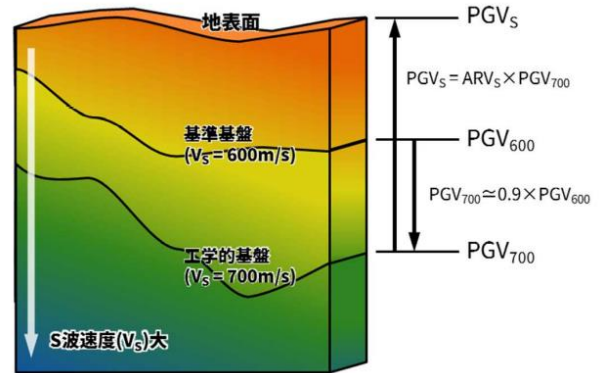


그림 14 : 최대속도의 공학적 기반 및 지표로의 변환

$$\log_{10}(ARV) = 1.83 - 0.66 \log_{10}(AVS) \pm 0.16 \quad (100 < AVS < 1500)$$

ARV : 지표에서 지하 30m까지의 속도 증폭도 AVS : 지표에서 지하 30m까지의 평균 S파 속도(m/s)

■ 지표면에서의 최대 속도 측정

공학적 기반상의 최대속도를 구한 후, 앞으로 다시 지표의 임의의 점에서의 최대속도를 구하기 위해 국토 수치 정보에 있는 각 대상이 되는 지점에서의 증폭도(속도 증폭도)를 곱한다(그림 14).

지표에서의 각 지점의 추정 최대진도를 S파 속도 700m/s의 공학적 기반으로부터 속도 증폭도를 700으로 하면,

$$PGV_s = ARV_{700} \times PGV_{700} \quad (\cong ARV_{700} \times 0.90 \times PGV_{600})$$

PGV_{600} : 공학적 기반상의 추정 최대 속도 PGV_{700} : 기준 기반 (경질 지반) 상의 추정 최대 속도

가 된다. 이 때, 대상 지점이 기상청 관측점이며, 진도 관측 데이터를 충분히 얻을 수 있는 경우에는, 이 ARV_{700} 으로 바꾸어 Iwakiri *et al.* [2011]에 근거해 산출한 관측점 보정 계수를 이용한다.

■ 대상이 되는 지점의 계측 진도 산출

전술의 식에서 계산된 지표에서의 추정 최대 속도에서 翠川ほか[1999]에 기초하여 다음 식을 이용하여 지표에서의 최대 진도를 예측한다. 또한 이 식은 진도 4 이상을 대상으로 한다는 점에 유의할 것.

$$I_{INSTR} = 2.68 + 1.72 \log_{10}(PGV_s) \pm 0.21 \quad (I_{INSTR} = 4 \sim 7)$$

I_{INSTR} : 최대 계측 진도, PGV_s : 지표에서의 추정 최대 속도(cm/s) (翠川ほか[1999]에서)

■ 진원의 깊이에 관한 제한

여기에서 이용하고 있는 司·翠川[1999]의 거리 감쇠식은 대체로 50km보다 얕은 지진을 대상으로 결정된 식이기 때문에 심발 지진에 적용하면 최대 속도치가 크게 계산된다. 이 때문에 현재는 운용상 진원의 깊이가 150km보다 깊을 경우에는 진도를 예측하지 않도록 대처하고 있다. 지금까지 150km보다 더 깊은 진원을 가진 지진에 의해 진도 5약이상을 관측한 예로는 2014년 5월 5일 이즈오 섬 근해의 지진(깊이 156km, 규모 6.0, 최대진도 5약)과 2015년 5월 30일 오가사와라 제도 서방바다 지진(깊이 681km, 규모 8.1, 최대진도 5강) 등이 있다.

다. 강진동(주요동) 도달 예측 시각 산출 처리

기상청에서 사용하는 속도 구조(JMA2001)를 바탕으로 깊이·진앙거리 별로 작성한 주시표를 사용하여 대상 지점 단위로 S파의 도달 예측 시각을 산출하여 주요동 도달시각으로 하고 있다.

(2) 진원 요소에 의하지 않는 진도 예측

지진동은 일반적으로 [1]진원의 파괴 과정(진원 특성), [2]진원에서 관측점까지의 전파 경로 특성, 그리고 [3] 관측점의 기반에서 지표까지의 지진파 증폭 특성(사이트 특성)의 3가지 특성에 의해 표현된다. 진원으로부터 지진파가 전파되어 가는 과정에서 어느 시점까지 얻은 관측기록으로부터 예측 대상 지점의 진도를 예측하는 것을 생각했을 때, “추정된 진원과 규모에 의한 진도 예측 방법”은 관측된 데이터를 일단 그 원인인 진원으로 거슬러 올라가 적은 파라미터(진원 위치, 규모, 관측점의 증폭 특성)로 표현한 다음 임의의 지점의 진도를 예측하는 방법이다. 진원 근방의 적은 관측 데이터로부터 진원을 계산함으로써 유예시간을 가지고 임의의 지점이 예측 가능해 지므로 긴급지진속보 기술에서 매우 강력하다. 한편, [1]진원 특성이나 [2]전파경로 특성에 대해서는 경험식에 근거해 평균화 되므로 이하와 같은 경우에는 진도 예측 오차가 큰 경우가 있다.

- 지진 초기의 극히 적은 데이터로 진원과 규모를 산출했을 때 등, 진원 요소가 큰 오차를 갖는 경우, 거기에서 더 진도 예측을 하기 때문에 진도 예측 오차가 클 수 있다.
- 넓은 진원역을 갖는 거대 지진이 발생한 경우나 지진파 복사에 이방성(異方性)이 있는 경우 등에는 강진역의 확대를 제대로 추정하지 못해 진도 예측이 크게 빗나가는 경우가 있다.
- 지진이 많이 발생하는 등 적절하게 검측치를 이용할 수 없는 경우에는 진원결정이 정상적으로 이루어지지 않아 정보를 발표할 수 없다.

이러한 과제를 해결하기 위해 “진원 요소에 의하지 않는 진도 예측 방법”을 병용한다. 흔들림에서 흔들림을 직접 예측하는 지진동 예측의 사고방식에서는 관측결과를 일단 진원으로 되돌리지 않고 주변에서 관측된 지진동 자체에서 직접 예측하고자 하는 관측점의 진도를 예측한다. 이 때, 관측 지점과 예측 지점이 충분히 근접해 있다면 [1]진원 특성이나 [2]전파경로 특성의 가정을 필요로 하지 않아, 진원 요소를 몰라도 정밀도 높은 지진동 예측이 가능해진다. 더욱이 이 방법에서는 상검측 등의 필요가 없기 때문에 관측점 환경에 대한 요건은 종래의 것과 비교해 낮고 노이즈 레벨이 비교적 높은 도시지역에 설치된 진도계 등의 활용이 가능해진다. 보다 조밀한 관측망을 구축할 수 있음에 따라, 진원 위치나 관측점 배치 등에 따라서는 진원과 규모에 의한 방법보다 빠른 단계에서 진동을 관측해, 보다 빠른 정보 발표가 가능해지는 경우가 있다. 한편, 일반적으로, 강한 흔들림을 예상하기 위해서는 강한 흔들림의 관측을 기다려야만 하므로, 진폭이 작은 P파 시점에서 강한 흔들림을 예측하는 진원과 규모에 의한 진도 예측 방법보다 유예 시간은 짧아진다.

① 레벨 법

진원에 의하지 않는 예측 수법의 하나로 레벨 법이 있다. 진원 결정에 이용하는 관측점으로부터 단독 관측점 처리에 의해 발신된 상하동 진폭이 100gal을 초과하는 데이터(2. (1))를 받으면, 중추에서는 신속성을 우선시하고, 진원 결정이나 주변의 진도 예측 등의 처리를 거치지 않고 「관측점 근방에서 진도 5약 이상의 흔들림」으로써 즉시 정보 발표를 실시한다. 그림 15와 같이 계측 진도 4.5이상(진도 5약 이상)의 경우 거의 100gal을 넘는다. 또한 관측된 진폭 수준에 대응하는 정보가 이미 이루어지고 있는 단계라면 레벨 법에 의한 새로운 정보 발표는 실시하지 않는다.

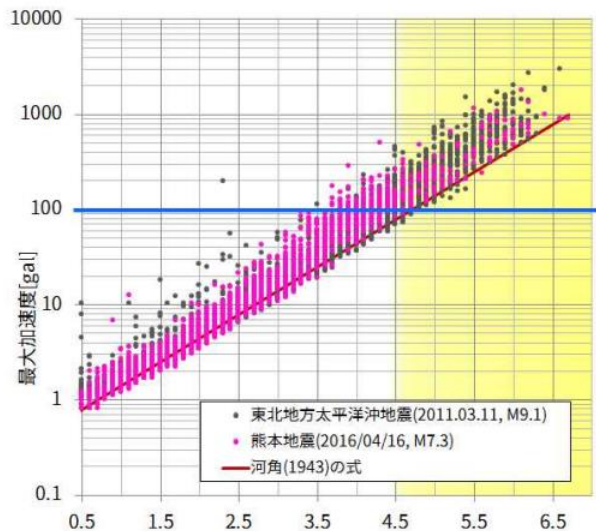


그림 15 : 진도계에서 관측된 최대 가속도 진폭과 계측 진도

② PLUM 법

PLUM(Propagation of Local Undamped Motion)법은 관측된 흔들림의 정보에서 진원 추정을 거치지 않고 직접 장래의 흔들림을 예측하는 Hoshiba[2013]의 실시간 지진동 예측 이론에 의거하여, 실시간 진도를 입력함으로써 구축된 간이적 진도 예측 방법(Kodera *et al.*[2018])이다.

가. 수법의 원리와 가정

통상, 지진파는 진원으로부터의 거리에 따라 감쇠하면서 전파된다. 즉, 예측 지점의 흔들림은 지진파의 도래 방향에 존재하는 관측점에서의 관측 결과를 얻을 수 있었다면, 그 지진파가 예측 지점을 향해 전파에 오는 것으로서, 흔들림으로부터 흔들림의 예측이 가능해진다. 이 때, 예측을 위해서는 지진파의 도래 방향과 감쇠 정도의 정보가 필요하지만, 충분히 짧은 거리에서는 지진파의 감쇠 현상을 무시할 수 있다고 간주함으로써, 감쇠를 고려하지 않는다. 또한, 근방의 관측점에서 관측된 흔들림의 최대치가 향후 예측 지점에 도래한다고 간주함으로써 도래 방향을 결정하지 않고 예측이 가능해진다. PLUM법은, “거리 R[km]이내에서 관측된 지진파가 공학 기반상에서 감쇠하지 않고 전파된다”고 가정하여 진도 예측을 하는 방법이다. 실시간으로 데이터를 취득할 수 있는 기상청 관측점(다기능형 지진계 + 지진계)의 데이터를 기초로, 예측 지점으로부터 반경 R 이내에서 얻은 실시간 진도를 모아 지반 증폭도를 고려한 후 최대치를 예측 대상 지점의 예측 진도로 한다. 이로 인해, 예측 지점 주변에서 관측된 강한 흔들림을 진도 예측에 반영하는 것이 가능해진다. PLUM법의 진도 예측에서는 예측 정밀도와 유예 시간에 있어서, 예측 관측점으로부터의 거리 R[km] 설정이 열쇠가 되지만, 관측점 밀도와 유예 시간의 확보로부터 최적이라고 생각되는 값으로써 R=30km로 설정하고 있다. 내륙의 얕은 지진 등에서는 진원 근방에서의 급준한 거리 감쇠를 고려하지 않음에 따른 과대평가나, 주변의 관측점이 없는 것으로 인한 과소평가가 발생하는 경우도 있지만, 진원이나 단층의 파괴의 진행에 의하지 않고 흔들림을 포착한 직후부터 신속하게 발표 가능한 PLUM법의 이점을 우선시하고 있다.

나. 진도 예측

PLUM법에 의한 진도 예측에서는, 경질 기반상으로 환산한 실시간 진도를 이용한다. 관측점에서 얻은 실시간 진도의 시간적인 최대치(Irobs)를 산출해, 翠川ほか[1999]의 최대 속도 진폭과 계측 진도의 환산식을 이용해 최대 속도 진폭 (PGVobs)으로 환산한다. 게다가, 그 지점의 지반 진폭도를 이용해 보정하고, S파 속도 600m/s의 경질 기반상에서의 최대 속도 진폭 (PGVobs600)을 얻는다. 경질 지반상에서의 최대 속도 진폭에 대해서 추가로 翠川ほか[1999]의 환산식을 적용함으로써 경질 지반상으로 환산한 실시간 진도 최대치(Irobs600)를 산출한다.

얻어진 경질 지반 환산의 실시간 진도 최대치에 대해, 비감쇠·전파방위 부정의 가정에 근거하여 예측 적용 반경(R) 이내의 데이터의 최대치를 예측 지점의 경질 지반에서의 예측 진도 (Ir600)으로 간주한다.

$$Ir600 = \max_i \{Irobs600_i\}$$

경질 지반에서의 예측 진도(Ir600)에 대해 진원과 규모에 의한 진도 예측 방법과 마찬가지로 지반 증폭도를 고려하여 지표면의 예측 진도(IrS)를 산출하여 PLUM법에 의한 지점 예측 진도로 한다(그림16).

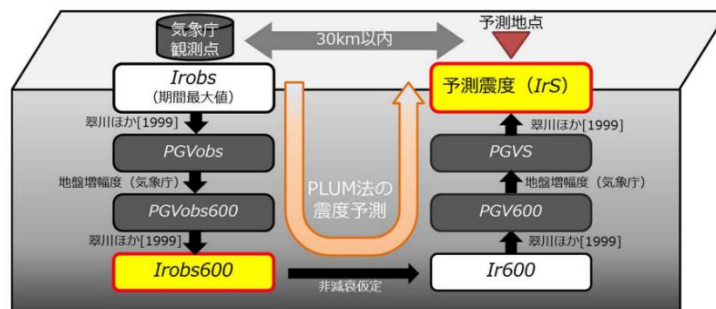


그림 16 : PLUM법에 의한 진도 산출 방법의 모식도

기상청 관측점에서 산출된 실시간 진도를 지반 증폭도를 고려하여 경질 기반에서의 실시간 진도를 요구한다. 이 때, 예측 지점으로부터 반경 Rkm 이내의 최대치를 예측 지점의 경질 지반에서의 실시간 진도로 간주하고 지반 증폭도를 고려하여 지표에서의 예측 진도를 산출한다.

다. PLUM법의 이벤트 작성 및 종료 처리

PLUM법에 의한 진도 예측은 주변 관측점에서 얻은 실시간 진도를 바탕으로 항상 그 시점의 진도 예측치를 산출하는 것이다. 그러나 긴급지진속보는 지진 이벤트 단위로 발표되는 정보이기 때문에, 예측 진도를 최대치로 홀드하거나 진원 요소로부터의 예측 최대 진도와 하이브리드 처리를 하기 위해, PLUM법에서도 지진 이벤트의 식별 처리가 필요하다.

그래서 PLUM법에서는, 관측점의 실시간 진도 값에 따라, 진도 트리거 온(on)·진도 트리거 오프(off) 판정을 실시한다. 관측점에서 [트리거 온 한계치] 이상의 실시간 진도가 관측되었을 경우에, 해당 관측점을 진도 트리거 온으로 판정하고, PLUM법의 예측에 이용한다. 진도 트리거 온 상태에서 실시간 진도가 [진도 트리거 오프] 상태를 일정 시간 밑돌았을 경우에, 해당 관측점을 진도 트리거 오프라고 판정한다. 새롭게 진도 트리거 온 관측점이 발생했을 경우에는, PLUM법의 신규 이벤트를 작성하고, 이미 공간적으로 근접한 PLUM법의 이벤트가 있으면, 진도 트리거 온 한 관측점을 기존 이벤트에 도입하는 처리를 실시한다. 이벤트에 소속된 데이터가 모두 진도 트리거 오프 상태가 된 경우, PLUM법 이벤트를 종료한다.

(보충) 유예 시간 예측

PLUM법에서는 예측 반경 $R[\text{km}]$ 의 데이터만으로 진도를 예측하기 때문에 유예 시간은 한정적이다(예를 들어 $R=30\text{km}$ 일 때 강진동이 3km/s 로 전파된다면 최대 10초). 또한 진도 예측에서 진원이나 지진파 전파 속도를 가정하지 않기 때문에 원리적으로 예측되는 흔들림까지의 유예 시간을 계산할 수 없다.

(3) 하이브리드 처리

■ 예측 진도의 하이브리드 처리

긴급지진속보의 진도 예측에서는 (1)진원과 규모에 의한 진도 예측 방법과 (2)진원 요소에 의하지 않는 진도 예측 방법의 각각의 예측 진도가 시간적·공간적으로 동일한 이벤트로 간주될 경우, 양자 중 예측 진도가 더 큰 쪽을 채용함으로써 양 방법을 통합한 진도 예측을 실시한다.

덧붙여, 하이브리드 처리와 함께 실장(実装)된 「진원의 기각」 로직에 대해서는, (1).③의 「진원·규모의 품질 처리 관리」에서 언급한 대로, 진원과 규모에 의한 진도 예측의 처리 속에서 실시되는 것이다.

■ PLUM법의 동일 이벤트 판정

PLUM법에 따른 이벤트가 새로 감지될 경우, 기존 이벤트가 존재하지 않는다면, 하이브리드 처리에서 새로운 이벤트로 인식해 발표한다. 진원과 규모에 의한 진도 예측 기법이나 하이브리드 처리에 의한 기존 이벤트가 존재했다면, PLUM법이 감지한 새로운 이벤트와 기존 이벤트를 동일 판정하고, 동일 판정된 경우에는 기존 이벤트에 도입된다. PLUM법과 진원과 규모에 의한 예측 기법의 동일 판정은, 각 기법에서 한계치 이상의 진도 예측이 이루어진 예보구에 중복이 있는 경우, 또는 PLUM법의 발표 대상 예보구 내에 진원과 규모에 의한 예측 기법의 추정 진원에 소속된 관측점이 존재하는 경우에 동일하게 간주하고 있다.

4. 발표 처리

발표하는 긴급지진속보에는 긴급지진속보(예보)와 긴급지진속보(경보), 2종류가 있다. 또 전문에 관해서도 「예보」와 「경보」, 각각의 발표 조건이나 발신하는 전문이 다르다. 이 장에서는 그러한 현상의 개략을 기술한다. 특히, 조건 등 기준에 대해서는 운용 상황에 비추어 변경되는 경우도 있기 때문에 주의. 전문에 관한 자세한 내용은 각종 전문 포맷 자료 등을 참조할 것.

(1) 발표 조건 등

이하에서는 「예보」와 「경보」의 발표 조건·갱신 조건 등에 대해 기술한다. 덧붙여, 「경보」 발표 시에는 같은 타 이밍에 「예보」도 발표한다.

■ 긴급지진속보(예보)

「예보」를 발표하는 기준은, 현재 이하와 같다.

발표 조건:

- I. 관측점에서 가속도 진폭이 100gal을 넘었을 때(레벨 법)
- II. 추정 규모가 3.5 이상이거나 예측 최대진도가 3 이상이 되었을 때

갱신 조건:

- I. 전 발표 때와 비교했을 때, 진원요소·규모·최대진도에 표1 중 하나의 조건을 충족하는 변화가 있었을 때
- II. 전 발표 때와 비교했을 때, 새롭게 진도 4 이상이 예상되는 예보구가 나타났을 때
- III. 전 발표 때와 비교했을 때, 예보구 별 예측 진도(진도 4 이상)가 ± 1 계급 이상 변화했을 때(발표했던 예보구가 발표 대상에서 제외(진도 4 미만) 되었을 때도 포함)
- IV. 경보 발표 또는 갱신 조건을 충족했을 때
- V. 진원·규모 해석 방법이 변화했을 때
- VI. 일정 시간이 경과했을 때(정시보)

종료 조건:

- I. 최초 지진파 검출로부터 규모에 따른 시간이 경과했을 때, 또한 한계치 이상의 실시간 진도가 일정 시간 이상 관측되지 않았을 때
- II. 일정 시간(600초) 이상 경과했을 때

표1 : 긴급지진속보(예보)의 갱신 조건

	위도·경도	깊이	규모	최대진도(계측진도)
내륙	± 0.2 도 이상	± 20 km 이상	+0.5 이상 혹은 -1.0 이상	+0.5 이상 혹은 -1.0 이상
해역	± 0.4 도 이상	± 40 km 이상		

■ 긴급지진속보(경보)

「경보」를 발표하는 기준은, 현재 이하와 같다.

발표 조건:

- I. 관측점 이상에서 해석 결과에 의해 예측 최대 진도가 5약 이상이 되었을 때

갱신 조건:

- I. 경보가 발표되지 않은 예보 구역에서 새롭게 예측 최대 진도가 5약 이상이 되었을 때

「경보」는 최대진도 4 이상이 예측되는 지역에 대해 발표한다. 다만, 진원 결정이나 PLUM법에 의한 진도 예측에 사용된 관측점 수가 1점인 동안에는 「경보」는 발표되지 않는다. 또 진원의 깊이가 150km보다 깊게 예측되

었을 경우에는 진원과 규모에 의한 방법만으로는 진도 예측을 하지 않기 때문에 「경보」는 발표하지 않지만, PLUM법에 의해 진도가 예측된 경우에는 경보 발표가 가능하다. 갱신 조건에 대해서는 지금까지 경보가 발표되지 않은 예보구(즉 「경보」 발표 시점에서는 예측 진도가 3 이하인 예보구)에 대해 새롭게 진도 5약 이상이 예측된 경우에 진도 4 이상이 예상되는 지역에 대해 「경보」의 속보(続報)를 발표한다.

■ 취소 보

지진 이외의 이유로 「예보」 또는 「경보」를 발표했다고 판단될 경우 이미 발표한 「예보」·「경보」를 취소하는 「취소 보」를 발표한다. 덧붙여, 「예보」에 대해서는, 정해진 시간 내에 2번째 관측점이 검지하지 못한 경우에는 자동적으로 「취소 보」를 발표한다. 다만, 도서부에서는 일정 이상의 흔들림이 계속되었다고 판단할 수 있는 경우에는 2번째의 검지가 없는 경우도 「취소 보」를 발표하지 않는다.

■ PLUM법 만으로 정보를 발표하는 경우의 진원 취급

PLUM법의 진도 예측만으로 「예보」 또는 「경보」를 발표한 경우에는 추정된 진원이 존재하지 않기 때문에 전문 중의 진원 요소에는 「가정 진원 요소」로서 이하의 진원 요소를 기재한다.

진원의 위도/경도 : PLUM법에서 최초로 진도 트리거 온 조건을 충족한 관측점의 위도 및 경도
진원의 깊이 : 10km(고정)
규모 : 1.0(고정)

* 진도 예측 및 주요동 도달 예측 시각 발표 단위에 대해서

각각, 계산은 전국 약 4000점의 지진 정보에 발표하고 있는 진도 관측점마다 계산하는데, 현재로서는 「예보」·「경보」는 대상이 되는 지점이 소속된 「지역」 단위로 발표하고 있다. 이 지역 안에는 복수의 진도 관측점이 있어 각각의 관측점에 대해 예측되는 진도와 주요동 도달 예측 시각을 계산하고, 진도에 대해서는 가장 크게 예측된 지점의 진도를, 주요동 도달 예측 시각은 가장 빠른 지점에서의 도달 예측 시각을 각각의 지역의 대표로 발표한다. 이로 인해, 예측 최대 진도와 주요동 도달 예측 시각은 동일한 장소에서 추정된 결과가 아닐 수 있다.

(2) 전문(電文)

진원 결정 방법, 진원 정밀도 및 시간 경과 등에 의해 예측 진도 산출용 입력 데이터의 정밀도를 평가하고, 각각의 진원 결정 방법별로 전문 종별 번호를 바꿈으로써 진도 예측치의 정밀도를 표현하고 있다.

진원 결정 방법(표2, 패턴 3)에서의 예측 진도의 상한과 하한에 대해서는 점 진원 상정에서의 예측치를 하한, 단층 길이(1/2) 고려에 의한 예측치를 상한으로 표현한다. 진원이 추정되지 않은 경우에 PLUM법만으로 전문을 발표할 때, 진원 요소에는 「가정 진원 요소」를 기술하는데, 이 때의 표현은 발표 패턴 2에 준거한다.

덧붙여, XML 전문에서는 전문 종별 번호와 같은 구분은 없지만, 코드 전문 등과 같은 진원 결정 방법(관측점 수)에 따라 규모나 예측진도의 표현이 바뀐다.

또한 출력인 전문 포맷 등의 상세 내용에 대해서는

·XML전문

기상청 방재정보 XML 포맷 기술 자료 http://xml.kishou.go.jp/tec_material.html

·코드 전문

전달자료에 대한 기술정보 <https://www.data.jma.go.jp/add/suishin/cgi-bin/jyouhou/jyouhou.cgi> 에서 「전문 해설 자료」로 검색
등을 참조.

	발표 패턴 1	발표 패턴 2	발표 패턴 3
진원 예측 기법	레벨 법	IPF법 (1~2점 처리, 가 정 진원 요소)	IPF법 (3점 이상 처리), 착미착법, EPOS에 의한 자동 처리 기법
코드 전문의 전문 종별 번호	35	36	37
디코딩 문장으로의 표현	최대 예측 진도 만	규모, 진도, 도달 예측 시 각	규모, 진도, 위도경도, 깊 이, 도달 예측 시각
규모	(없음)	M〇〇정도 이상	M〇〇정도
예측진도	진도 5약 정도 이상	진도 〇〇정도 이상	진도 〇〇에서 〇〇
도달 예측 시각	(없음)	〇〇시 〇〇분 〇〇초 경 이후	〇〇시 〇〇분 〇〇초 경 이후

【参考文献】

- 明田川保, 清本真司, 下山利浩, 森脇健, 横田崇: 緊急地震速報におけるP波マグニチュード推定方法の改善, 駿震時報, 73, 123-134, 2010. Iwakiri K., M. Hoshiba, K. Nakamura and N. Morikawa: Improvement in the accuracy of expected seismic intensities for earthquake early warning in Japan using empirically estimated site amplification factors, Earth Planets Space, 63, 57-69, 2011.
- 宇津徳治: 地震学, 共立出版, 1977.
- 宇津徳治: 各種マグニチュードの間の関係, 地震研究所彙報, 57, 465-497, 1982. Odaka T., K. Ashiya, S. Tsukada, S. Sato, K. Ohtake and D. Nozaka: A New Method of Quickly Estimating Epicentral Distance and Magnitude from a Single Seismic Record, Bull. Seism. Soc. Am., 93, 526-532, 2003.
- 功刀卓, 青井真, 中村洋光, 藤原広行, 森川信之: 震度のリアルタイム演算法, 地震2, 60, 243-252, 2008.
- 気象庁: 震度を知る (気象庁・監修), ぎょうせい, 238pp, 1996.
- 清本真司, 明田川保, 大竹和生, 新原俊樹, 下山利浩, 森脇健, 土井恵治, 横田崇: 緊急地震速報における技術的検討事項について, 駿震時報, 73, 135-150, 2010.
- 河角広: 震度と震度階 (続), 地震, 15, 5-12, 1943. Kodera Y., Y. Yamada, K. Hirano, K. Tamaribuchi, S. Adachi, N. Hayashimoto, M. Morimoto, M. Nakamura, and M. Hoshiba: The Propagation of Local Undamped Motion (PLUM) Method: A Simple and Robust Seismic Wavefield Estimation Approach for Earthquake Early Warning, Bull. Seism. Soc. Am., 108, 983-1003, 2018.
- 佐藤良輔, 岡田義光, 鈴木保典, 阿部勝征, 島崎邦彦: 日本の地震断層パラメーター・ハンドブック, 鹿島出版会, 390pp, 1989.
- 司宏俊, 翠川三郎: 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, [523] 63-70, 1999.
- 溜瀧功史, 山田真澄, Stephen Wu: 緊急地震速報のための同時多発地震を識別する震源推定手法, 地震2, 67, 41-55, 2014.
- 束田進也, 小高俊一, 芦谷公稔, 大竹和生, 野坂大輔: P波エンベロープ形状を用いた早期地震諸元推定法, 地震2, 56, 351-361, 2004.
- 中村浩二: 緊急地震速報について, 物理探査, 60, 367-374, 2007.
- 林元直樹, 中村武史, 干場充之: 海域地震観測網を含む様々な地震観測網に適用可能な緊急地震速報のための上下動マグニチュード推定手法, 駿震時報, 83:1, 2019.
- Hoshiba M.: Real-time prediction of ground motion by Kirchhoff - Fresnel boundary integral equation method: Extended front detection method for Earthquake Early Warning, J. Geophys. Res., 118, 1038-1050, 2013.
- Horiuchi S., H. Negishi, K. Abe, A. Kamimura, and Y. Fujinawa: An Automatic Processing System for Broadcasting Earthquake Alarms, Bull. Seism. Soc. Am., 95, 708-718, 2005.
- 松岡昌志, 翠川三郎: 国土数値情報とサイスミックマイクロゾーニング, 第22回地盤震動シンポジウム 資料集, 23-34, 1994.
- 翠川三郎, 藤本一雄・村松郁栄: 計測震度と旧気象庁震度および地震動強さの指標との関係, 地域安全学会論文集, 51-56, 1999.
- 横田崇, 上垣内修, 加藤孝志: 『ナウキャスト地震情報』の実用化に向けて, 地震ジャーナル, 34, 41-49, 2002.