

## 1979年 Imperial Valley 地震の調査および解析

赤 尾 嘉 彦  
(大崎研究室)

## § 1. はじめに

Imperial Valley 地震は、1979年10月15日に米国とメキシコの国境付近で発生した地震である。マグニチュードは  $M_L 6.6$  ( $M_s 6.8$ ) の中規模なもので被害も軽微であり、これといった特徴のある地震ではない。しかし、この地震は以下の2つの理由により、地震学者や耐震工学者から大きな注目を集めた。

第一の理由は、過去の地震活動などから地震の発生が長期的に予測され、断層周辺に高密度の強震観測網が敷かれていたため、50以上の強震記録が得られたからである。1回の地震で得られた強震記録の数としては、1971年 San Fernando 地震のとき(約200記録)を下回る。しかし、このときの記録の多くはビルなどの構造物の中で得られたもので、断層近傍の地盤上で得られた記録は1例しかなかった。一方、Imperial Valley 地震は地表に生じた断層線から10 km 以内だけでも14記録が得られた。観測点は断層を囲むように配置され、ほとんどが平坦な地盤上に設置されている。これらのデータは歴史上最も豊富かつ良質なものである。さらに、本震から1週間以内に震源やマグニチュードを同定可能な82個の余震が発生し、アメリカ側の強震観測点だけでも260以上の記録が得られた (Porcella et al., 1982)。これらのデータは、断層面上の複雑なメカニズム解明の研究などに絶好の機会を与えた (たとえば、強震記録を用いた解析だけでも Hartzell & Helmberger, 1982; Olson & Apsel, 1982; Archeluta, 1982, 1984; Hartzell & Heaton, 1983; Fujino et al., 1984; Spudich & Cranswick, 1984 などがある)。

もう一つの注目される理由は、重力加速度を越える大加速度(上下動)を観測したことによる。この地震以外にも、1971年 San Fernando 地震の Pacoima ダム、1978年 宮城県沖地震の東北大学校舎、1984年 Morgan Hill 地震の Coyte Lake ダムなどで重力加速度を越える大加速度が計器測定されている。しかし、これらの観

測地点は急峻な地形上や中層建物の最上階などであったため、観測記録は実際の入力地震動が大きく増幅されたものと解釈されてきた。今回の地震の大加速度記録は平坦な地盤上で得られたもので、これをそのまま入力地震動と考えるには耐震工学上極めて影響が大きい。

大崎研究室では、Imperial Valley 地震の大加速度の原因を究明するために1984年夏に常時微動測定などの現地調査を実施した。本報ではまず、この調査結果や文献資料を基に大加速度の原因究明を試みた。次に、震源域といわれる断層近傍の地震動の再現を試みた。この解析には、短周期地震動の推定に有効な方法と考えられる経験的グリーン関数法の一つを用いた。ところが、この方法では断層に非常に近い地点の地震動を過大評価することが分った。そこで、モーメント分布を考慮した新しい方法を提案し、断層近くの地震動まで再現することに成功した。

## § 2. 地震のメカニズム

## 2.1 Imperial 断層

Imperial Valley 地震は Imperial 断層上で発生した地震である。Imperial 断層は北米プレートと太平洋プレートのプレート境界上に位置する。この断層上では、図-1に示すようにジオサール・エリアからプレートが拡大するのに伴い横ずれが生じる。この種の断層をトランスフォーム断層と呼ぶ。北隣りにある巨大な San Andreas 断層なども同じタイプの断層である。Imperial 断層上の相対移動速度は、地震活動度から3 cm/年 (Brune, 1968)、地質年代と累積移動量から8 cm/年と推定されている (Levis, 1980)。このような地殻運動のため、Imperial 断層上では30~50年の間隔でマグニチュード6.5クラス以上の地震が繰返し発生している。

Imperial 断層上で発生した前回の地震は1940年 Imperial Valley 地震 ( $M_L 6.4$ ,  $M_s 7.1$ ) で、このとき断層

から6km離れたEl Centro市内で世界最初の300galを越す強震記録が得られた。この記録は通称エルセントロ地震波形と呼ばれ、長年にわたり耐震設計などで動的解析を行なう際の入力地震動として用いられてきた。

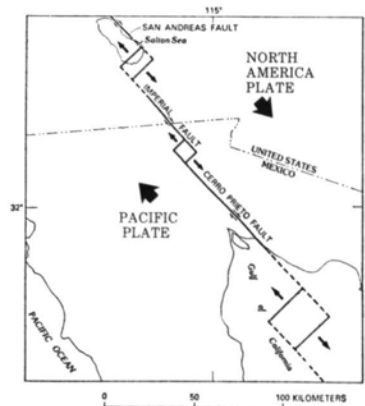
## 2.2 1979年 Imperial Valley 地震

強震観測網の初動記録の解析から、震源は国境の南3kmの深さ10kmのところと決定され(Chavez et al., 1982), 断層面の大きさは35km×10km, 走向はN37°W, 傾斜は鉛直か、やや東に傾いていると推定される。余震分布は、本震からの時間の経過とともに北側に移行し、全体としても北に集中している。

地表に生じた断層ずれの跡は、震源のあるメキシコ側では発見されず、アメリカ側に長さ30kmの断層ずれが生じた。すべり量は、本震から1日以内の調査で断層の南側に最大60cm近い右横ずれが確認され、北側では東下がりの縦ずれが卓越していた(Sieh, 1980)。一方、Imperial断層の約7km東にあるBrawley断層でも、長さ10kmにわたり最大15cmの西下がりの縦ずれが確認された。これらのずれは日が経つにつれ拡大している。

以上の事実から判断すると、南側の深い所で生じた破壊が北側の浅い所に向かって伝播し、主破壊はSan Andreas断層と整合する右横ずれで、Imperial断層の北側部分とBrawley断層の間に挟まれた三角地帯は、Imperial断層の南側部分の動きに引きずられるように特異な落ち込み運動を生じたと推定される。

地震の断層パラメータを表一1に示す。表中の地震モーメント(seismic moment)はAki(1966)によって提案された地震の大きさを表わす指標であり、物理的には断層面積と平均くい違い量と剛性率の積で表わされ、実際の計算は世界各地で観測された長周期地震波記録のフーリエ変換から求められる。Imperial Valley地震の場合は、Kanamori & Regan(1982)によって $6\sim7\times 10^{25}\text{dyne}\cdot\text{cm}$ と推定された。これに剛性率 $3\times 10^{11}\text{dyne}/\text{cm}^2$ を仮定すると、平均くい違い量は57~67cmとなる。



図一1 San Andreas 断層帯南部のプレート運動と断層の関係

|                              |                                                                                                                     |
|------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| origin time                  | Oct. 15, 1979, 23h16m54.29s (G.m.t.)                                                                                |
| hypocenter                   | lat 32°38.61'N long 115°18.53'W                                                                                     |
| magnitude<br>(cf. 5/18/1940) | M <sub>L</sub> 6.6 Ms6.8 Mo=7×10 <sup>25</sup> dyne·cm<br>(M <sub>L</sub> 6.4 Ms7.1 Mo=56×10 <sup>25</sup> dyne·cm) |
| fault plane                  | 35km×10km, depth 0km                                                                                                |
| strike direction             | N34°W (global), N36°W (trace average)                                                                               |
| dip angle                    | 90°E or 80°E                                                                                                        |
| slip vector                  | 67 cm rake 0°                                                                                                       |

表一1 本震の断層パラメータ

## § 3. 地震計の配置と観測記録

### 3.1 地震計の設置

Imperial断層周辺には各機関による強震観測網が設置されている。アメリカ側の強震計はUSGS, CDMG, その他の機関により管理されており、メキシコ側はUNAMとUCSDの共同、SAHOPにより管理されている。USGSとCDMGの地上設置の強震計は光学記録方式のSMA-1Tか、これと同タイプの特性を有する加速度計が主である(Porcella et al., 1979)。UNAM/UCSDの地震計はフォース・バランス型のデジタル加速度計DCA-310やDSA-1が主で、一部SMA-Iもある(Brune et al., 1982)。

図一2に、強震記録の得られた観測点の中で断層近くにあるものの位置を示す。1940年の記録が得られた地点はEl Centroアレー#9で、写真一1に示すような堅牢な建物内の1階床に置かれ、ここで観測された地震動には建物の影響が懸念される。しかし、これ以外の今回調査をした地点は、目視上地形や設置建物の影響は認められない。たとえば、写真一2は1.7G(G:重力加速

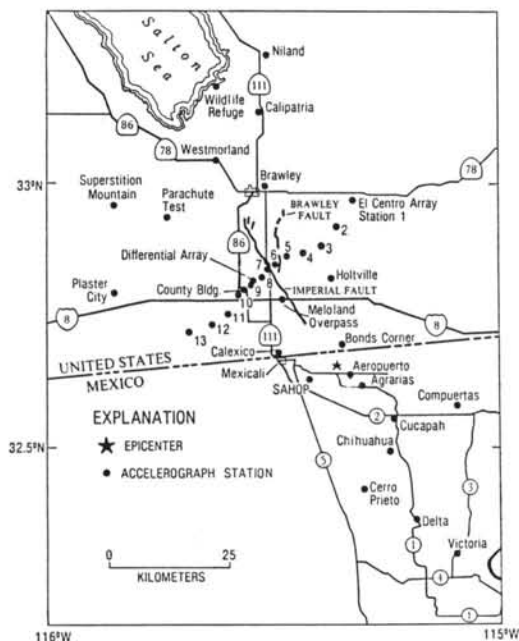


図-2 地表に生じた断層跡と強震記録の得られた観測点 (Porcella, 1984 による)



写真-1 El Centro アレー #9の地震計が設置されている変電所建物

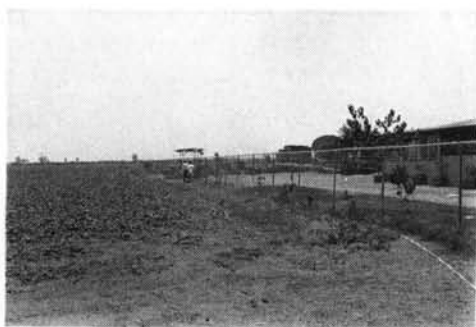


写真-2 El Centro アレー #6の周辺状況



写真-3 El Centro アレー #6のシェルター

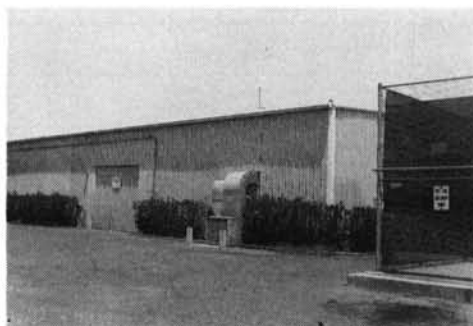


写真-4 El Centro アレー #7の倉庫

度)の大加速度を記録した El Centro アレー #6の周辺状況であるが、周囲はほぼ完全な平坦地で、地形の影響は考えられない。また、地震計は写真-3に示すプラスチック製のシェルターの中に納められ、コンクリート基礎の上にボルトで固定されており、シェルターや基礎台に異状は見られない。写真-4は、断層を挟んでアレー #6と対称な位置にある El Centro アレー #7のプレハブ倉庫である。#6で1.7Gの上下動を記録したのに、#7では0.65Gの上下動しか記録しなかった。地震計は1階床に設置され、建物はフレキシブルに見え、設置建物の影響は少ないと思われる。

### 3.2 観測記録

表-2に、断層近くの主な観測点における最大加速度などを示す。また、図-3に今回の観測に最も多く使われた SMA-1 と、日本の代表的な強震計である SMAC-B、SMAC-B<sub>2</sub>の周波数特性の比較を示す。SMA-1は周波数 20 Hz 付近までほぼフラットであり、計器補正をしなくても高周波数成分までの振幅を再現できるように設

| station                  | accomodation       | instrument      | trace distance | accelerogram      |                      |
|--------------------------|--------------------|-----------------|----------------|-------------------|----------------------|
|                          |                    |                 |                | direct.           | (G)                  |
| Westmorland Fire Station | instrument shelter | SMA-1           | 13km           | 180° up<br>090°   | 0.11<br>0.09<br>0.08 |
| Brawley** Airport        | instrument shelter | SMA-1           | 6km            | 315° up<br>225°   | 0.22<br>0.18<br>0.17 |
| Parachute Test Site      | 1-story building   | SMA-1           | 15km           | 315° up<br>225°   | 0.20<br>0.18<br>0.11 |
| Array No.1               | instrument shelter | SMA-1           | 22km           | 230° up<br>140°   | 0.15<br>0.10<br>0.15 |
| Array No.2**             | instrument shelter | SMA-1           | 16km           | 230° up<br>140°   | 0.43<br>0.17<br>0.33 |
| Array No.3**             | 1-story building   | SMA-1           | 13km           | 230° up<br>140°   | 0.22<br>0.15<br>0.27 |
| Array No.4**             | instrument shelter | SMA-1           | 7km            | 230° up<br>140°   | 0.38<br>0.32<br>0.61 |
| Array No.5**             | instrument shelter | SMA-1           | 4km            | 230° up<br>140°   | 0.40<br>0.71<br>0.56 |
| Array No.6***            | instrument shelter | SMA-1           | 1km            | 230° up<br>140°   | 0.45<br>1.74<br>0.72 |
| Array No.7**             | 1-story building   | SMA-1           | 1km            | 230° up<br>140°   | 0.53<br>0.65<br>0.36 |
| Array No.8**             | instrument shelter | SMA-1           | 4km            | 230° up<br>140°   | 0.50<br>0.55<br>0.64 |
| Differential*** Array    | 1-story building   | SMA-1 (DCA-300) | 5km            | 360° up<br>270°   | 0.51<br>0.93<br>0.37 |
| Array No.9*              | 2-story building   | SMA-1           | 6km            | 360° down<br>090° | 0.38<br>0.40<br>0.27 |

| station                     | accomodation       | instrument | trace distance | accelerogram       |                         |
|-----------------------------|--------------------|------------|----------------|--------------------|-------------------------|
|                             |                    |            |                | direct.            | (G)                     |
| Imperial** County Center    | instrument shelter | SMA-1      | 8km            | 092° up<br>002°    | 0.24<br>0.27<br>0.24    |
| Imperial C. Services Build. | 6-story building   | CRA-1      | 8km            | 092° up<br>002°    | 0.32<br>0.19<br>0.29    |
| Array No.10**               | 1-story building   | SMA-1      | 9km            | 050° up<br>320°    | 0.20<br>0.15<br>0.23    |
| Array No.11**               | 1-story building   | SMA-1      | 13km           | 230° up<br>140°    | 0.38<br>0.16<br>0.38    |
| Holtville** Post Office     | 1-story building   | SMA-1      | 8km            | 315° up<br>225°    | 0.22<br>0.31<br>0.26    |
| Meloland* overcrossing      | undergroun         | CRA-1      | 1km            | 360° up<br>270°    | 0.32<br>0.23<br>0.30    |
| Bonds Corner**              | 1-story building   | SMA-1      | 3km            | 230° up<br>140°    | 0.81<br>0.47<br>0.66    |
| Calexico** Fire Station     | 2-story building   | SMA-1      | 9km            | 315° up<br>225°    | 0.22<br>0.21<br>0.28    |
| Aeropuerto                  |                    | SMA-1      | 2km†           | 045° up<br>315°    | 0.316<br>0.179<br>0.240 |
| Agrarias                    |                    | DCA-310    | 4km†           | 183° down<br>0.93° | 0.280<br>—<br>0.227     |
| Mexicali (SAHOP)            |                    | SMA-1      | 13km†          | 000° up<br>090°    | 0.311<br>0.332<br>0.459 |
| Cucapah                     |                    | DSA-1      | 14km†          | 085° up<br>355°    | 0.310<br>0.115<br>—     |

\* 地震計の設置状況や周辺地形を調べた観測点  
 \*\* 現地調査と常時微動測定をおこなった地点  
 \*\*\* 現地調査、常時微動測定に加えて速度測定をおこなった地点  
 † 震央距離

表—2 断層近くの主な強震計とその記録

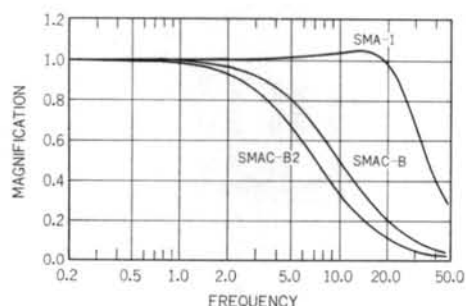
計されている。一方、SMAC は比較的低周波数成分を対象に設計されている。

## § 4. 地層構造の推定

### 4.1 Imperial Valley の地盤

Imperial Valley とは、カリフォルニア州南部からメキシコにかけて広がる東西の山脈に挟まれた沖積平野地帯を指す。ここは、カリフォルニア湾の延長上の Salton トラフの中心に位置し、San Andreas 断層帯の一部を形成する。この辺一帯はほぼ海面下で、最も低い所は Salton 湖の中で -84m ある。この付近で新しい地殻が形成されていると思われる。

この地域の地盤構造の調査は、1975年に Shannon & Wilson (1976) によりアレー #9 (1940 年の記録の取れた場所) で深さ 120m までのサンプリング室内試験と現位置 S 波検層が行なわれた。また、1979年に USGS による 40 回の発破試験により、深層地盤の P 波速度構造が調べられた (Fuis et al., 1981)。各強震観測点付近の表層地盤の調査は、1980年に USGS により 9 地点で 20 ~ 30m の深さまで電気コーン試験が、22 地点で深さ 75m



SMA-1: 固有周波数 25 Hz, 減衰  $\delta=0.6$   
 SMAC-B: 固有周波数 10 Hz, 減衰  $\delta=1.0$   
 SMAC-B2: 固有周波数 7.07 Hz, 減衰  $\delta=1.0$

図—3 日米の代表的強震計の理論特性の比較

(一部 30m, アレー #9 は 250m) まで、P, S 検層試験と各種のサンプリング試験が実施された (Porcella, 1984)。

これらの調査から、Imperial Valley の堆積層は北の Salton 湖付近で 3.7km, 南の国境付近で 4.8km, 東西の山に近い所ほど浅く、谷の中心を通る Imperial 断層帯に東側が西側よりやや厚いことが分かった。また、El Centro 周辺では沖積土 (湖水生粘土、堆積砂) が約 200m の層をなし、この層の S 波速度は 0.15 ~ 0.45 km/s,

| depth (km) | V <sub>p</sub> (m/s) | V <sub>s</sub> (m/s) | density (t/m <sup>3</sup> ) |
|------------|----------------------|----------------------|-----------------------------|
| 0.00-0.11  | 1700                 | 280                  | 2.0                         |
| 0.11-0.23  | 1700                 | 530                  | 2.0                         |
| 0.23-0.30  | 1800                 | 690                  | 2.0                         |
| 0.30-0.40  | 2400                 | 850                  | 2.1                         |
| 0.40-1.40  | 2400                 | 1200                 | 2.2                         |
| 1.40-2.30  | 3000                 | 1500                 | 2.3                         |
| 2.30-3.00  | 3600                 | 1800                 | 2.5                         |
| 3.00-5.25  | 4500                 | 2430                 | 2.7                         |
| 5.25-      | 5800                 | 3350                 | 2.8                         |

表—3 El Centro 市周辺の標準的な地層モデル

地下水面下のP波速度は1.4~1.7km/sと推定された。ただし、発破実験結果から1km以下の浅い地層の構造を読み取ることは難しく、250mから1kmまでの中間層の速度構造は不明である。

## 4.2 地盤のモデル化

入力地震動の解析を行なうには、震源から観測点までの地盤構造を決める必要がある。そこで地盤を水平成層と仮定し、El Centro 周辺の地盤をモデル化した。表—3はその結果で、240mより浅い地層は Porcella や Shannon & Wilson のアレー #9 の地点の試験結果を参考に決め、これより深い地層は Boore & Fletcher (1982) が推定した結果を参考に決めた。単位体積質量は深さ300mまでは2.0 t/m<sup>3</sup>とし、これより深い所は Olson & Apsell (1982) を参考に決めた。

各観測点の地層は、表—3に示した標準地層モデルの表層部分を、Porcella の結果と入れ替えてモデル化した。ただし、P, S 検層試験はボーリング坑と加振点が離れているため、一般に地表付近の速度を決めるのは難しい。今回の調査では常時微動測定の外に、大加速度を記録したアレー #6 と Differential Array (アレー #9 の近く) で地表に10m間隔で全長40mの水平アレーを設定し、屈折法によるS波とP波の速度測定を行なった。その結果、アレー #6 には表層に300 m/s のP波速度を有する層が認められたので、この地点の Porcella モデ

ルの速度構造を図—4のように変更した。

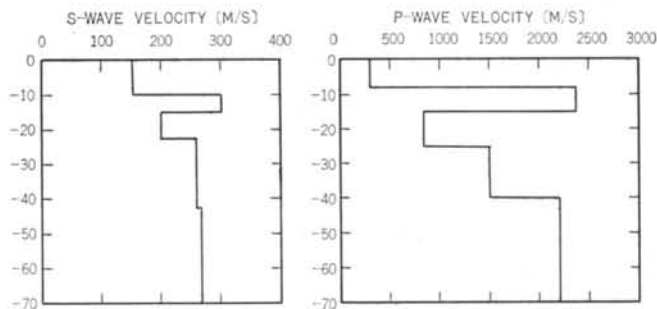
## § 5. 常時微動と地震動・地盤モデルとの比較

### 5.1 常時微動の測定方法

当初、強震観測点の表層地盤が不明であったため、常時微動測定を実施した。測定点は原則として断層線から15km以内のアメリカ側で、強震記録が得られた15地点とした。ただし、Meloland 立体交差路は立入許可が必要のため、アレー #9 は工学的な観点から、Imperial C. S. ビルは取り壊されて対象物がないなどの理由から測定を実施しなかった。測定は、写真—5, 6のように原則として強震計と同じ台の上に微動計を置き、水平・上下3成分を同時に最低20分間測った。データはサンプリング間隔51.2 Hz でデジタル化し、1024データ(20秒間)ごとにフーリエ変換し、20~35個のアンサンブル平均を取った。計測器は固有振動数5 Hz で超過減衰の電磁式速度計で、周波数特性は図—5のように周波数1~50 Hz の範囲でほぼフラットである。

### 5.2 常時微動測定結果

田中・吉沢(1975)は、常時微動(水平成分)の速度記録と地震動の加速度記録のフーリエ・スペクトル形状が良く似ていることを日本のデータを用いて示した。一方が速度のスペクトルで、他方が加速度のスペクトルであるので両者の次元は矛盾する。それにもかかわらず両者のスペクトル形状が相似なのは、地表で観測される地震動が基盤からの増幅の結果であるのに対し、常時微動は地表近くの地盤の自由振動と考えられ、実地震動より短周期成分が増幅されているので、長周期成分を強調した速度記録が大体一致したと推定される。ただし、Udwadia & Trifunac (1973) は同じ El Centro 周辺で



図—4 アレー #6 の速度構造モデル



写真一5 強震計 SMA-1 と微動計 (3成分)



写真一6 強震観測点での常時微動測定

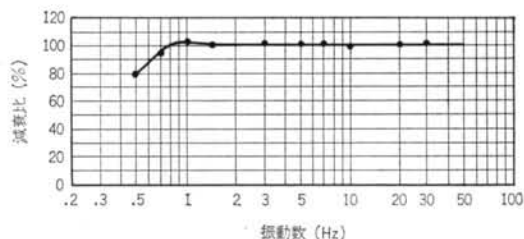
行なった常時微動測定から、地震動と常時微動の関連性に否定的な結論を下していた。

今回の測定は、比較的硬質地盤で地震動と常時微動にどのような関連があるかを調べることも目的の一つであった。その結果を表一4に示す。この表は、本震動、常時微動、地盤モデルの卓越周期を比較したもので、本震動は加速度フーリエ・スペクトル、常時微動は速度フーリエ・スペクトル、地盤モデルは深さ300mから上の伝達関数のそれぞれの卓越周期を、振幅の大きい方から1～3個選んだものである。

### 5.3 上下動の比較

卓越周期が2割以下の誤差範囲にあるものを同一の振動モードによる増幅効果とみなすと、常時微動と地盤モデルの整合性は非常によいが、地震動はいずれとも合わない。この最大の理由は、多くの本震動の記録にはP波の主要部分が欠けているためと思われる。その他に、上下動には300mよりも深い地層からの増幅効果や、日時変動する地下水位の影響があるためと考えられる。

ただし、大加速度を記録したアレー #6では、図一6のように三者の卓越周期やスペクトル形状はよく一致する。これから、本震動にはP波の主要動が含まれ、8Hz付近にあるピークは表層の増幅効果が大きく作用してい



図一5 常時微動計の周波数特性

| station               | dir. | main shock (Hz) | microtremor (Hz) | transfer f. (Hz) |
|-----------------------|------|-----------------|------------------|------------------|
| Array No.3            | 315° | 2.2             | 2.2 / 7.4        | 1.1 / 0.5 / 1.7  |
|                       | 225° | 1.6             | 2.2 / 1.8 / 7.4  |                  |
|                       | U-D  | 5.6             | 2.3              | 12.8 / 16.3      |
| Array No.6            | 230° | 0.4             | 2.4              | 1.0 / 2.3 / 0.4  |
|                       | 140° | 0.4             | 2.4              |                  |
|                       | U-D  | 8.5             | 7.8              | 7.9              |
| Array No.7            | 230° | 1.3 / 0.4       | 1.8              | 2.4 / 1.1 / 0.5  |
|                       | 140° | 0.9             | 2.2              |                  |
|                       | U-D  | —               | 19.57 / 10.6?    | >20              |
| Differential Array    | N-S  | 0.8 / 1.6       | 2.1 / 2.7        | 1.1 / 0.5        |
|                       | W-E  | 0.4 / —         | 2.6              |                  |
|                       | U-D  | 10.1            | 12.8 / 3.1       | 13.5             |
| Bonds Corner          | 230° | 1.6             | 1.4              | 2.6 / 1.9 / 1.2  |
|                       | 140° | 1.5             | <0.5             |                  |
|                       | U-D  | —               | 13.2?            | 13.5 / 16.2      |
| Calexico Fire Station | 315° | 1.8             | 3.2              | 1.2 / 0.5        |
|                       | 225° | 2.1 / 1.8       | 2.9 / 2.0 / 0.3  |                  |
|                       | U-D  | 8.8             | 12.5 / 3.2       | 8.8 / 11.4       |

表一4 地震動・常時微動・地盤モデルの卓越周期の比較

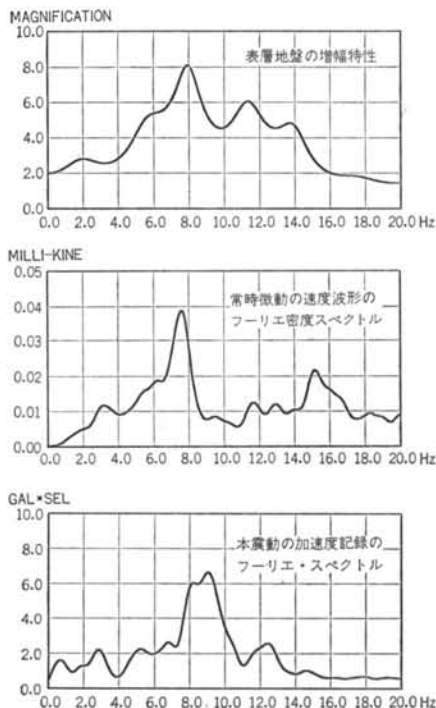
ること、修正したP波の速度構造が妥当であったことが推定できる。また、図一7は Imperial 断層から見て対称な位置にあるアレー #6と#7の上下動加速度波形である。別に求めた積分波形から、両波形は大体同一の時刻と考えられるが、#6の波形には周期0.1秒前後で1G以上の振動が数回繰返しているが、#7の波形には見られない。震源から、このような強力な波が一定時間間隔で、数波続けて伝播してきたとは到底考えられない。

以上の考察より、アレー #6の大加速度は地盤の増幅によって惹き起された疑いが非常に大きい。

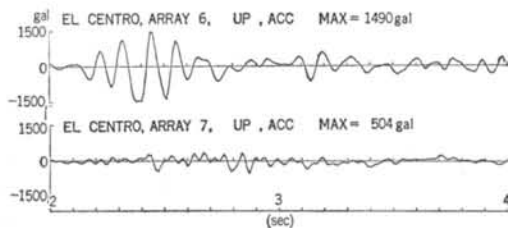
さらに、図一6の地盤モデルのスペクトルでは大加速度を生じた8～10Hzは、この周期範囲外よりもさらに2～3倍増幅されている。もし、この計算どおりの増幅が生じていたとすれば、同じP波が異なる特性の地盤に入射した場合は最大加速度がこれよりかなり小さくなったと思われる。ただし、地盤モデルのスペクトルのピークの高さは未知な地盤減衰量の与え方により大きく変動するもので、ここで与えた減衰量(5%)が妥当な値である保証はなく、基盤での入力地震動を見積ることは難しい。

### 5.4 水平動の比較





図—6 El Centro アレー #6 地点における上下動スペクトルの比較(本震動と常時微動は、単一のスペクトルにバンド幅 1 Hz の Parzen ウィンドを掛けた結果)



図—7 アレー #6 と #7 の上下動加速度波形(補正後)

地震動と常時微動のスペクトル形状には、田中らの調べた地盤のような相似性は見られない。両者の卓越周期が一致する割合は半分をやや下回るが、上下動のときよりもよく合っている。両スペクトル相互よりも、むしろ地盤モデルと両者との整合性が良い。つまり、300m からの地盤モデルは基盤からの増幅効果を含む地震動と、地表近くの振動である常時微動の中間の特性を持っていると推定できる。また、地盤モデルと常時微動の一致性は、水平動より上下動の方が幾分よい。

以上の観測結果を解釈すると、波速の大きい P 波の常時微動は深さ 300m ぐらいからの地盤の影響を受け、波速の小さい S 波の常時微動はこれより浅い地盤の影響を

受けると考えられる。

## § 6. 経験的グリーン関数法の適用

### 6.1 断層モデル理論

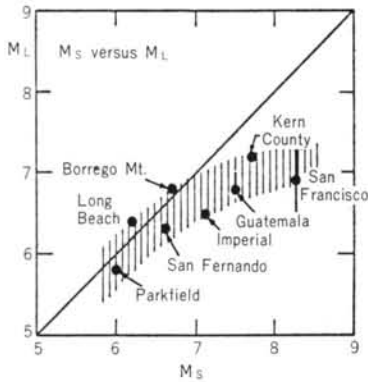
地震動の短周期成分を厳密に計算するには、複雑な断層面上のくい違い運動を正確に与え、断層震源から観測点に至るまでの地殻や地盤構造を忠実にモデル化し、さらに全体を数値モデルに置き替えて FEM など膨大な自由度の振動計算をするか、地殻・地盤モデルの点震源力に対する観測点での応答関数(グリーン関数)の式を作り、断層面上で変位を与えて数値積分する方法が考えられる。しかし、いずれの方法も現存の計算手段で短周期成分まで再現することは実現不可能である。また、短周期成分がどのような断層面上のメカニズムで発生しているのかすら解明されていない。

Hartzell (1978) は、このような煩雑な計算をする代わりに、本震とメカニズムや伝播経路や表層の増幅特性が似ている余震の観測波形をグリーン関数として用いるアイデアを示した。この方法は一般に経験的グリーン関数法と呼ばれ、地震動推定の有力な手段となっている。従来、この方法は余震などの中小地震を本震の地震モーメントと一致するように重ねることが原則と考えられてきた。しかし、周期 1 秒以下の短周期成分を合わせるためには、著者ら<sup>13)</sup>が提案する 2/3 乗則を適用した方がよいと考えられる。

### 6.2 余震記録

本震から 3 分後に発生した最大級の余震記録を用いて本震動を再現することを試みた。Johnston (1982) による初期推定によれば、発震時間は 23 時 19 分 29.98 秒 (GMT)、震源位置 ( $32^{\circ}45.94'N$ ,  $115^{\circ}26.45'W$ )、マグニチュード  $M_L 5.0$  である。震源深さは不明であるが、断層の平均深さ 5 km と仮定した。また、余震は断層面から 1.4 km 南西に位置するが、この余震は断層面上で発生したと思われる。断層面の位置は比較的正確であるので、断層面上に載るように震源位置を修正した。

余震のモーメント  $M_0$  は求められていないので、ローカル・マグニチュード  $M_L$  から経験式を用いて推定しなければならない。これには、 $M_L$  と  $M_0$  の直接の変換式を用いる方法と、 $M_L$  を一度表面波マグニチュード  $M_S$  に変換し、精度のよい  $M_S$  と  $M_0$  の関係式を用いる方法が考えられる。 $M_L$  と  $M_0$  の関係式は、Ohnaka (1978) が米国西部の中規模地震について提案した式が比較的信



図—8 表面波マグニチュード  $M_S$  とローカル・マグニチュード  $M_L$  の関係 (Kanamori, 1979 による)

頼度が高いように思われる。

$$\log \frac{M_0 D}{L} (\text{erg}) = (1.88 \pm 0.08) M_L + (9.07 \pm 1.49) \quad (2 < M_L < 6.8)$$

ただし、 $D$ は平均最終くい違い量、 $L$ は断層のスケール(長さ、幅)である。一般に地震は $10^{-4} \sim 10^{-5}$ のひずみエネルギーの解放であるから、 $\log(D/L) = -4.5$ を仮定すると、

$$\log M_0 = 1.88 M_L + 13.6$$

となる。これに  $M_L 5.0$  を代入するとモーメントは  $1.0 \times 10^{23} \text{ dyne} \cdot \text{cm}$  となる。

これとは別に、 $M_S$  を媒介としてモーメントを求める。  $M_L$  と  $M_S$  の関係には多くの式が提案されているが、図—8のように  $M_L 5.0$  程度ならば、 $M_L \approx M_S$  としても大差はないと考えられる。そこで下式から  $M_0 = 4.0 \times 10^{23} \text{ dyne} \cdot \text{cm}$  と推定した。

$$\log M_0 (\text{dyne} \cdot \text{cm}) = 1.5 M_S + 16.1$$

### 6.3 解析方法

余震のモーメントを  $1.0 \times 10^{23} \text{ dyne} \cdot \text{cm}$  とすると、本震とのモーメント比は700となる。また、 $4.0 \times 10^{23} \text{ dyne} \cdot \text{cm}$  とすると比は175となる。著者らの提案する原則に従って積ね合わせ数を求めると、それぞれ79と31となる。

ところで、余震の本震断層面上への配置方法には、断層面の相似形を重視して断層の長さと同方向に同数ずつ分布させる方法がある(村松・入倉, 1982; 田中ら, 1982)。しかし、相似形は比較的大きな地震について確認されたもので、そのばらつきもかなり大きく、M5クラスの地震だと断層面は応力分布に無理の少ない円形か正方形に近い形状をしていると考えられる。また、余震をグリーン関数とみなすのであるから、余震を断層面上のをできるだけ正方形に近い格子点に置くと、Hadley &

表—5. 観測記録と合成波形の最大加速度の比較。

| station               | trace distance (km) | synthetic acceleration (G) |          |        |
|-----------------------|---------------------|----------------------------|----------|--------|
|                       |                     | observed                   | uni-form | moment |
| Brawley Airport       | 6                   | 0.28                       | 0.26     | 0.22   |
| Array No.1            | 22                  | 0.21                       | 0.22     | 0.21   |
| Array No.2            | 16                  | 0.54                       | 0.35     | 0.43   |
| Array No.3            | 13                  | 0.35                       | 0.52     | 0.35   |
| Array No.4            | 7                   | 0.72                       | 0.97     | 0.59   |
| Array No.5            | 4                   | 0.69                       | 1.41     | 0.96   |
| Array No.6            | 1                   | 0.85                       | 2.32     | 1.02   |
| Array No.7            | 1                   | 0.64                       | 1.29     | 0.65   |
| Array No.8            | 4                   | 0.81                       | 0.88     | 0.64   |
| Differential Array    | 5                   | 0.63                       | 0.53     | 0.64   |
| Array No.9            | 6                   | 0.47                       | 0.77     | 0.62   |
| Array No.10           | 9                   | 0.30                       | 0.23     | 0.21   |
| Array No.11           | 13                  | 0.54                       | 0.52     | 0.46   |
| Holtville Post Office | 8                   | 0.34                       | 0.44     | 0.37   |
| Bonds Corner          | 3                   | 1.04                       | 0.75     | 0.54   |
| Calexico Fire Station | 9                   | 0.36                       | 0.33     | 0.24   |

表—5 本震動最大加速度の観測値と推定値の比較

Helmberger (1980) のようにランダムに配置させた方がよいであろう。さらに、モーメント分布が解明されているならば、Kanamori (1979) のようにモーメント分布に従って配置させた方がよい。

今回の解析は、余震を正方形に近い形に配置させた場合と、モーメント密度を考慮した配置の2通りについて行なった。モーメント密度は、剛性率 $\mu$ と最終くい違い量 $D$ の積で決まる。剛性率は、表—3に示したせん断波速度と単位体積質量から求まる。最終くい違い量の断層面上の分布は、Imperial Valley 地震について数種類提案されているが確定的な分布モデルはなく、剛性率ほど大きな変動がないので一様分布とした。立ち上がり時間は1秒前後と推定され、全体の破壊時間に対して微小なので無視した。破壊伝播速度は地殻のせん断波速度(3.3 km/s)の8割(2.7 km/s)とし、破壊様式は本震の震源から放射状に拡がると仮定した。

### 6.4 解析結果

積ね合わせ数79とした場合、ほとんどの観測点で合成結果が観測値を上回った。そこで、表—5には積ね合わせ数31(モーメント $4.0 \times 10^{23} \text{ dyne} \cdot \text{cm}$ )の例だけを示す。表中に示す加速度値は、水平2成分の最大加速度  $A_N$ ,



$A_E$  に対して以下の式より計算した値である。

$$A_H = \sqrt{A_N^2 + A_E^2}$$

余震を一樣に配置した場合は、断層に近い所で最大加速度を過大に見積り易いが、モーメント分布を考慮した場合にはそれがない。また、断層の南側に位置する Calexico や Bonds Corner では観測値がやや大きいが、Fujino et al. (1984) のように断層の南側で強い破壊が生じたとすれば、このことが説明できる。

## § 7. 結論

1979年 Imperial Valley 地震の記録は、断層から約1 kmの地点で上下動が1.7Gという大加速度を記録した。この大加速度の原因は、特殊な断層メカニズムによる可能性もあるが、多くは観測地点特有の地盤の増幅効果によるものと推定される。ただし、他の地点でも上下動で0.9G、水平動で0.8Gを記録しており、断層震源からかなり強い地震波が発生したものと推定される。日本でこのような大加速度記録が観測されていないのは、震源

域の記録が少ないことと地震計の特性によると考えられる。また、1Gに近い加速度を記録した地点付近には大きな建物の被害はなく、0.3Gを記録した地点でビルが復旧不可能な被害を受けており、最大加速度と被害の関係は不明な点が多い。

常時微動の測定と解析では、表層地盤の増幅特性との関連が認められた。しかし、常時微動と地震動の関連はそれほど良よくはなかった。

経験的グリーン関数法は、短周期地震動の推定に有効な方法であることが確かめられた。ただし、断層面から数km以内のところの推定にはモーメント分布を考慮した方法が必要である。

謝辞 本研究は、大崎研究室の田中貞二・渡辺孝英・佐藤俊明・福島美光・壇一男の各氏と共同で行なった研究の一部<sup>1)</sup>を発展させたものである。常時微動測定は Dr. Porcella (USGS), 三田彰 (UCSD 留学中), 渡辺弘之 (技術研究所) の各氏の協力を得て実施された。本文作成に当たっては、田中貞二氏に多くのご意見をいただいた。関係各位に深く感謝します。

## ＜参考文献＞

- 1) 大崎順彦他：“1979年 Imperial Valley 地震の調査および解析（その1～3）” 日本建築学会大会学術講演梗概集（1985）
- 2) U.S. Geological Survey：“The Imperial Valley, California, Earthquake of October 15, 1979” USGS Professional Paper, 1254 (1982)
- 3) Earthquake Engineering Research Institute：“Imperial County, California, Earthquake October 15, 1979” EERI Reconnaissance Report (1979)
- 4) J.N. Brune：“Seismic Moment, Seismicity and Rate of Slip Along Major Fault Zones” J. Geophys. Res., Vol. 73 (1968) pp. 777～784
- 5) A.G. Brady et al.：“The Imperial Valley Earthquake, October 15, 1979; Digitization and Processing of Accelerograph Records” USGS Open-File Report, 80-703 (1980)
- 6) Shannon & Wilson, Inc. & Agabian Associates：“Geotechnical and Strong Motion Earthquake Data from U.S. Accelerograph Stations, Vol. I” (1976)
- 7) R.L. Porcella：“Geotechnical Investigation at Strong-Motion Stations in the Imperial Valley, California” USGS Open-File Report, 84-562 (1984)
- 8) S. Hartzell & D.V. Helmberger：“Strong-Motion Modeling of the Imperial Valley Earthquake of 1979” Bull. Seism. Soc. Am., Vol. 72 (1982) pp. 571～596
- 9) A.H. Olson & R.J. Apse：“Finite Faults and Inverse Theory with Applications to the 1979 Imperial Valley Earthquake” Bull. Seism. Soc. Am., Vol. 72 (1982) pp. 1969～2001
- 10) 田中貞二・吉沢静代：“強震地動に含まれる地盤特性” 第4回日本地震工学シンポジウム講演集（1975）pp. 161～168
- 11) F.E. Udvardi & M.D. Trifunac：“Comparison of Earthquake and Microtremor Ground Motions in El Centro, California” Bull. Seism. Soc. Am., Vol. 63 (1973) pp. 1227～1253
- 12) S.H. Hartzell：“Earthquake Aftershocks as Green's Function” Geophys. Res. Letters, Vol. 5 (1978) pp. 1～4
- 13) 赤尾嘉彦・伯野元彦：“短周期地震推定のための経験的グリーン関数法の2/3乗則” 第18回地震工学研究発表会講演概要

- (1985)/Y. Fujino & Y. Akao : "2/3 Power Law in Empirical Green's Function Method for Synthesis of High Frequency Motion" Abstract of 23rd. IASPEI (1985)
- 14) M. Ohnaka : "Earthquake-Source Parameters Related to Magnitude" *Geophys. J.*, Vol.55 (1978) pp.45~66
  - 15) 村松郁栄・入倉孝次郎 : "大地震の強震動を予測する方法について" *自然災害科学* Vol.1 (1982) pp.29~43
  - 16) 田中貞二他 : "小地震記録の合成による強震加速度特性の推定" *地震研究所彙報* Vol.57 (1982) pp.561~579
  - 17) D.Hadley & D.V.Helmberger : "Simulation of Strong Ground Motions" *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol.70 (1980) pp.617~630
  - 18) H.Kanamori : "A Semi-Empirical Approach to Prediction of Long-Period Ground Motions from Great Earthquakes" *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol.69 (1979) pp.1645~1670
  - 19) Y. Fujino et al. : "Multiple Event Analysis of 1979 Imperial Valley Earthquake Using Distinct Phase in Near-Field Accelerograms" *Proc. of JSCE*, No.344 (1984) pp.127~136