

京都府・日吉ダム周辺の地震活動と湛水前後の活動の変化

伊藤 潔・片尾 浩・渡辺邦彦・米崎文雄*・佐藤信光*・大家充裕*

* 水資源開発公団・試験研究所

要 旨

ダムの湛水など環境変化に伴う地震活動の変化は、災害防止の面からもまた地震発生機構の解明からも興味深いことである。京都府船井郡日吉町に建設された日吉ダムでは、1997年3月に湛水が開始された。ダム湛水に伴う地震活動変化を検出するため、当該地域で地震観測を実施し、長期間の定常観測網のデータと併せて解析し、地震活動の変化を詳細に調査した。その結果、1995年兵庫県南部地震の後の、地殻が少しの刺激でも敏感に反映し、誘発地震を発生させようような時期にもかかわらず、ダム付近の湛水に伴う顕著な地震活動の変化は観測されなかった。

キーワード：ダム誘発地震，誘発地震，日吉ダム，殿田断層，地震活動

1. はじめに

ダムの湛水に伴い地震活動が活発化する現象が諸外国の大規模なダムで知られている(Simpson, 1976; 石川・尾池, 1982)。また、日本でもダムの水位と地震活動に関係があるとする報告がなされている(寺島, 1983; Hagiwara and Ohtake, 1972)。ダムの湛水など環境変化に伴う地震活動の変化は、災害防止の面からもまた地震発生機構の解明からも興味深いことである。

京都府船井郡日吉町に建設された日吉ダムでは、湛水が1997年3月に開始されたが、水資源開発公団(以下公団と記す)は、1996年9月から微小地震観測を実施している。一方、近畿北部では1960年代中頃から京都大学が微小地震観測を開始し、長期間の地震観測データが得られている。これらのデータを総合的に検討し、地震活動の変化を調査するため、京都大学防災研究所地震予知研究センターおよび水資源公団試験研究所は1999年度から3ヶ年にわたり共同研究、「微小地震観測及び解析に関する研究」を実施した。目的は、両者の観測結果を比較し、ダム湛水に伴う地震活動変化を調査することおよび周囲の地震環境を把握しておくことである。また、日吉ダム近傍には活断層である殿田断層が存在し、この断層と地震活動との関連についても併せて検討した。



Photo 1. A bird's-eye view of the Hiyoshi-dam.

本報告においてはこれらの研究の概要と主な結果を報告する。

2. 日吉ダムと地質・断層の概要

日吉ダムは、淀川の総合開発の一環として桂川に建設された多目的ダムで(Fig. 1)、高さ70.4m、堤頂長438m、貯水量6600万 m^3 の重力式コンクリートダ

ムである。ダムは①洪水調節、②流水の正常な機能の維持、③新規利水である。Photo 1はダムの上空からの写真である。

ダム周辺の地質は丹波帯に属する中生代である。ダムサイトの岩盤は古生代石炭紀から中生代ジュラ紀に生成されたと考えられるチャートとシャールスタインから構成され、岩質は堅硬である。このシャールスタインは河床部から右岸側に広く分布し、チャートは左岸側に分布している。

ダム周辺の主な活断層として、殿田断層、三峠断層 (Fig. 2) などがあり、ダムサイトからの距離はそれぞれ約 0.3 および 5km である。殿田断層は確実度 I とされ (活断層研究会, 1991), 最新活動時期は 2000 年前, 活動間隔 4000 年程度, 平均変位速度は 0.13~0.3m/千年と推定されている (植村・他, 2000)。この地域の大地震としては 1830 年文政京都地震 (M6.5) があり, 近年では 1968 年和知地震 (M5.6) がある。

3. 地震観測の概要とデータ

Fig. 2 には日吉ダム周辺の活断層および今回の調査に記録を使用した地震観測点を示す。公団が設置した地震観測点は Fig. 2 に示す 3 点 (▲) であり, 観測点座標を Table 1 に示す。公団の観測点では, 50-100m ボーリング孔に固有周期 1 秒の速度型地震

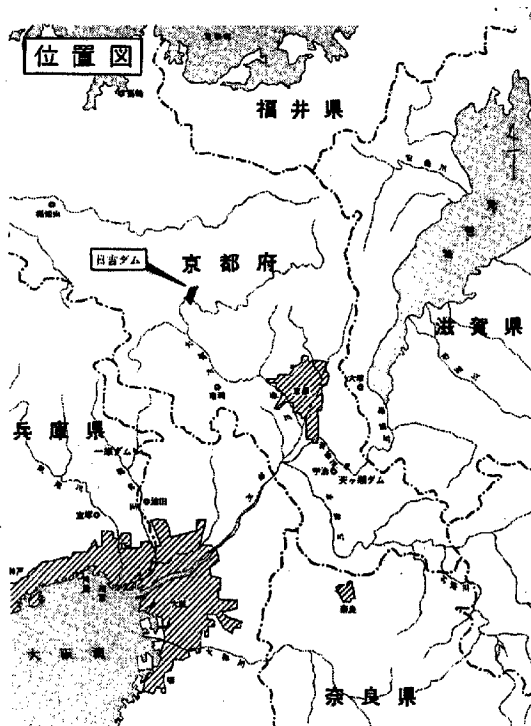


Fig. 1 Location of the Hiyoshi-dam.

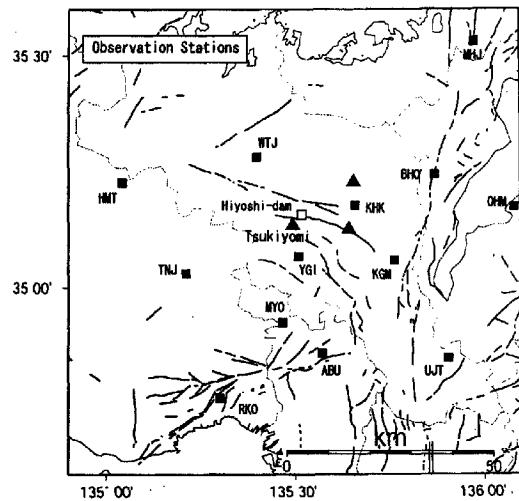


Fig. 2 Observation stations of earthquakes near the Hiyoshi-dam (open square). Solid triangles show the stations of the Water Resources Development Pub. Corp. and solid circles, the stations of Kyoto University. Lines show active faults.

計が設置され, その信号が地表で遅延トリガー記録されている。時刻は GPS 信号で補正された時計によっており, 波形記録の収録は 12 ビット/データである。観測点ごとに独立にトリガー記録された波形記録は電話回線等を通じて収録され, 3 点のデータによって, オフラインで地震同定, 記録の読みとり, 震源およびマグニチュード (M) の決定等の作業がなされている。地震波形は, 全国の大学の観測網で広く用いられている WIN フォーマットに変換され, WIN システムによって処理されている。

京都大学 (京大) の観測点は, 近畿中北部に分布している (Fig. 2)。大学の観測網は 1960 年代の中頃に設置され, 1975 年以降はテレメータによる集中記

Table 1 Station coordinates of the observation stations of the Water Resources Development Corporation and those of Kyoto University.

Station	Latitude	Longitude	elevation (m)
<i>(W.R.D.P.C.)</i>			
Hosono	35.1262	135.6457	327.65
Kamiyuge	35.2277	135.6585	268.35
Tukiyomi	35.1345	135.4972	70.10
<i>(Kyoto Univ.)</i>			
BHO	35.2447	135.8728	380.00
KHK	35.1774	135.6623	260.00
MYO	34.9254	135.4705	640.00
OHM	35.1738	136.0835	120.00
RKO	34.7639	135.3018	540.00
TNJ	35.0314	135.2136	310.00
WTJ	35.2824	135.4014	172.00
YGI	35.0681	135.5119	180.00
ABU	34.8600	135.5735	138.00
KGM	35.0593	135.7658	180.00
UJT	34.8489	135.9076	290.00
HMT	35.2265	135.0435	250.00

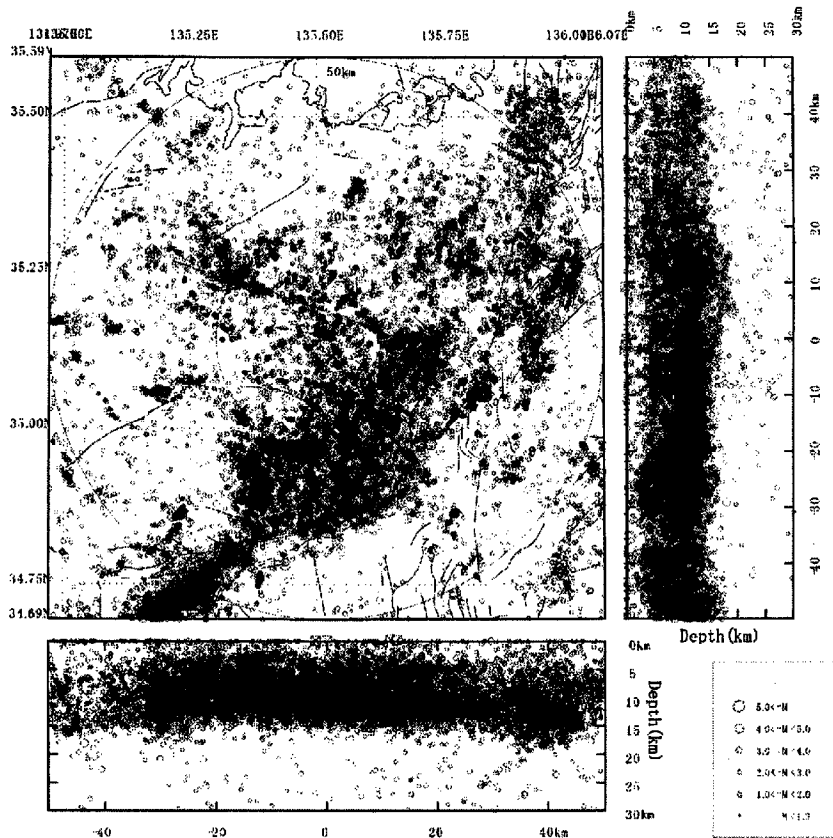


Fig.3 Epicenter distribution of earthquakes in the northern Kinki district and near the Hiyoshidam from 1992-2000. Solid lines show active faults.

録がなされている（前田・渡辺，1984；大見・他，1999）。高感度観測のための地震計は固有周期1秒であり，記録装置は最初アナログでその後デジタルへ変更されている。地震計は一部横穴の観測孔に設置されているが，残りはノイズがなるべく低い露岩を選んでその上に設置されている。専用回線で伝送された信号から，各観測点のノイズと信号比による地震検出を経て，2～3観測点のand/orを用いたトリガー方式によって，地震判別がなされている。記録はオンラインで自動解析された後，人的に修正処理がなされている。今回は修正解析されたデータを用いた。震源位置および震源時は，水平成層の地震波速度構造を用い，PおよびS波の理論走時と観測走時の標準偏差が最小になる点を求める方法で決めた。Mは最大振幅（渡辺，1971）を用いて決定した。なお，ダム建設時の採石発破の震源がダムの原石山に多数記録されていたが，これらは注意深く取り除いて解析した。

データについては，公団と京大の震源データを比較検討した結果，ダム近傍以外は大きな相違がない

のことがわかったので，長期間のデータは京大のものを用いて解析した。これにダム近傍の湛水前後のデータについて公団の結果を追加した。

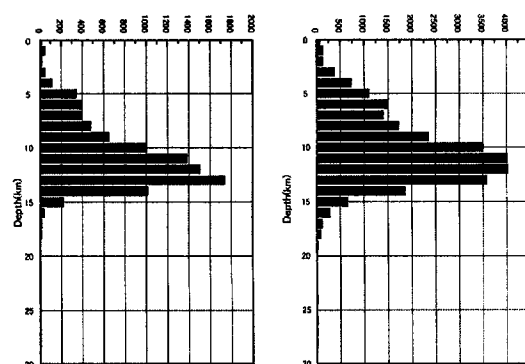


Fig.4 Depth-frequency distributions of earthquakes within 20km (left figure) and 50km (right figure) from the Hiyoshi-dam.

4. 日吉ダム周辺の地震活動

4.1 地震活動の概要

丹波山地は周囲に比べて地震活動が高い。Fig.3

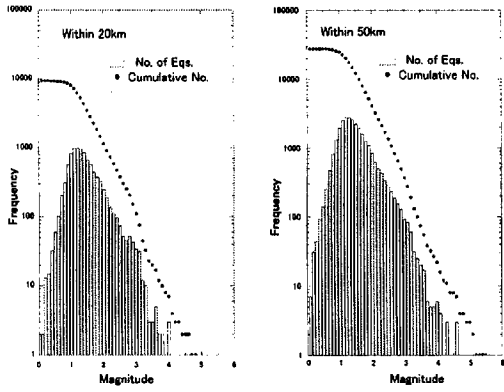


Fig.5 Magnitude-frequency and cumulative frequency distributions of earthquakes within 20km (left figure) and 50km (right figure) from the Hiyo-shi-dam.

に京大のデータによる 1976-2000 年の震央分布を示す。図には活断層 (活断層研究会, 1991) を重ねて示す。図中の円はダムサイトから半径 20 および 50km の範囲を示す。ダムサイト周辺の活断層は北西南東の走向を持ち、左横ずれ成分が卓越している。図にみられるように周囲に比べて日吉ダム周辺は活動度が高いが、一様に高いわけではない。

Fig. 3 には東西および南北に投影した地震の深さ分布を示す。また、Fig. 4 にはダムから半径 20 および 50km 以内の地震についての深さの頻度分布を示す。この地域の地震は 15km 以深では極端に少なく、

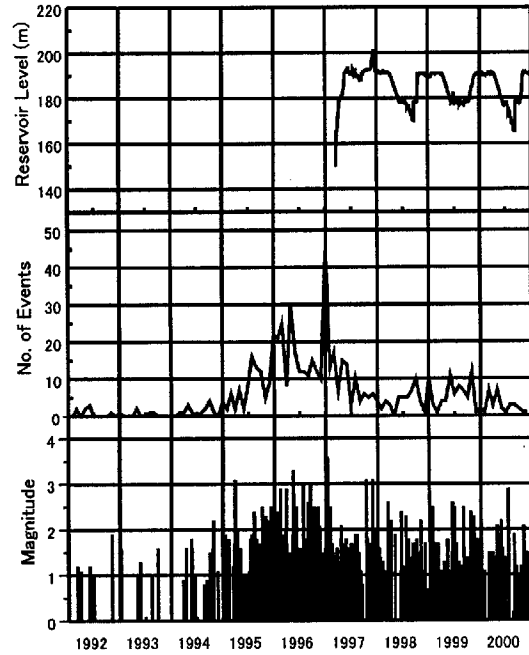


Fig.6 Reservoir level, monthly number and magnitude of earthquakes with in 4x4km from the Hiyo-shi-dam.

20km 以深ではほとんど発生しない。すなわち、上部地殻のみに地震が発生していることがわかる。地震発生数の最大値は深さ 12-13km である。また、下部地殻には地震の発生がなく、さらに、3km 以浅の地震は非常に少ないこともわかる。

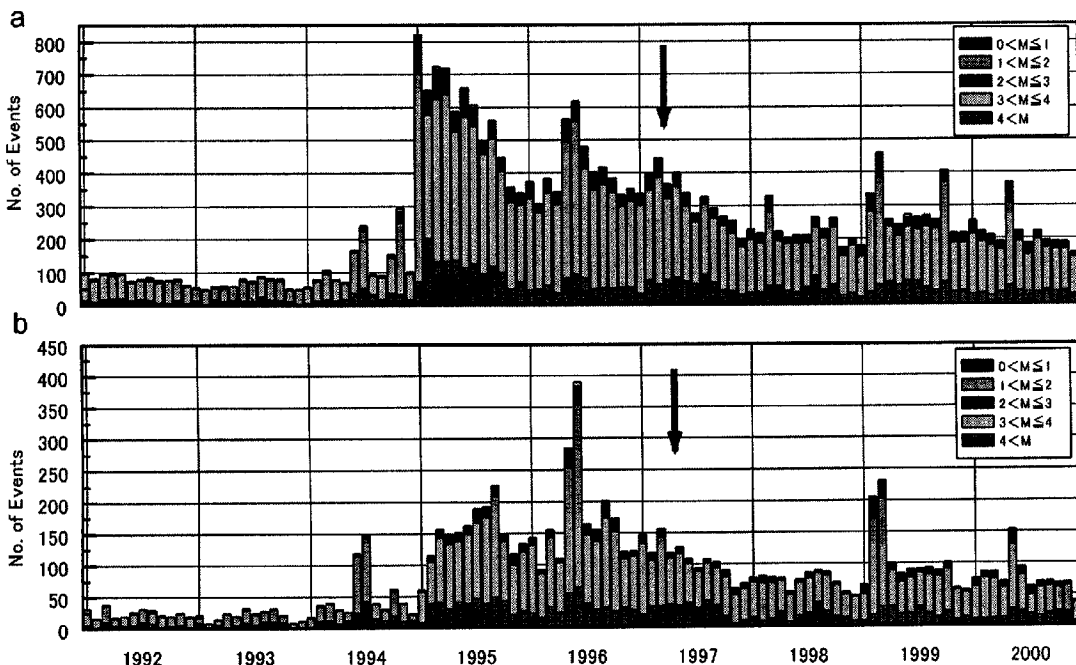


Fig.7 Monthly numbers of earthquakes within 20km (lower figure) and 50km (upper figure) from the Hiyo-shi-dam. Magnitude range is divided in each bar.

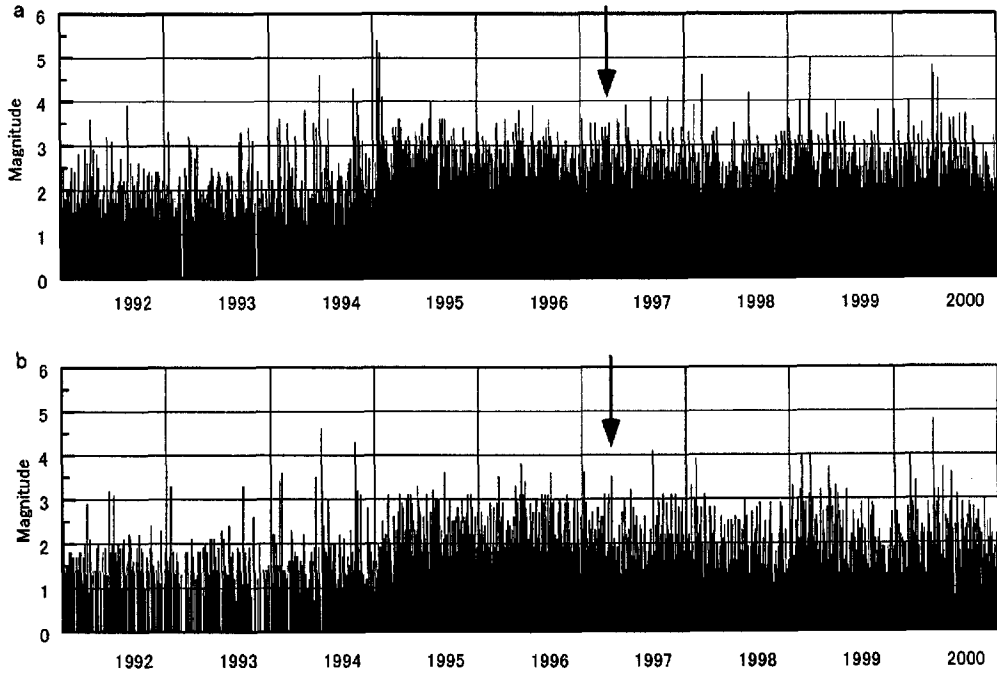


Fig.8 Magnitude of earthquakes within 20km (lower figure) and 50km (upper figure) from the Hiyoshi-dam. Dashed line in the epicenter map show the Tonoda fault. Dotted line in the space-time diagram shows the location of the dam-site.

Fig.5にはダムから20および50km以内の地震についてMの頻度および積算頻度分布である。これらによると、検知率が100%近い地震の最小値はM1程度であることがわかる。また、この期間の最大地震はダムから半径20km以内ではM4.5である。

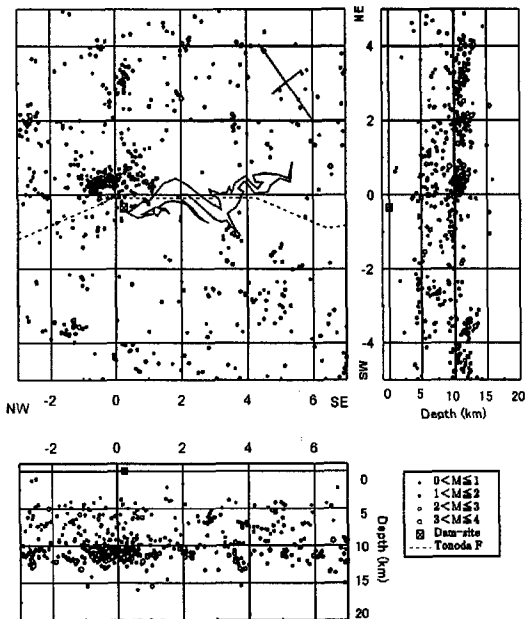


Fig.9 Hypocenter distribution of earthquakes near the reservoir of the Hiyoshi-dam. The epicenter distribution is rotated as the strike of the Tonoda fault (dotted line) becomes horizontal in the figure.

4.2 日吉ダムの湛水と地震活動の変化

Fig.6には湛水時のダムの水位とダムを中心とした10km四方の地震の月別頻度分布およびM-T図を示す。1995年から地震が急激に増加しているのがわかる。これは1995年兵庫県南部地震後に地震活動が活発化したためである(片尾・安藤, 1996)。これに伴ってM3.5程度のやや大きい地震が発生している。この活発化した地震活動は1997年ころまで続き、以降は徐々に小さくなってきているが、2001年でも依然として1995年以前よりも高い状態にある。ダムの湛水は1997年3月に開始されたが、このころから、地震活動は減少を見せ始めている。この地震活動の減少とダム湛水が関連しているかどうかを調べるには、さらに広域のデータを検討する必要がある。

地震活動の様子をさらに広域で見るために、ダムから半径20および50km以内の地震について、月別地震数および地震のM-T図をFig.7およびFig.8に示す。Fig.7では地震の検知率を考慮して、M別に地震数を示したが、Mにかかわらず同様な時間変化をしている。すなわち、全体の数の変化が地震数の変化を表している。これらの結果は全体的にはいずれもFig.6と同様な傾向を示している。50kmの範囲をとると1995年兵庫県南部地震の余震域が一部含まれるので、1995年からの地震の増加は当然であるが、20kmでも同じように地震が増加していること

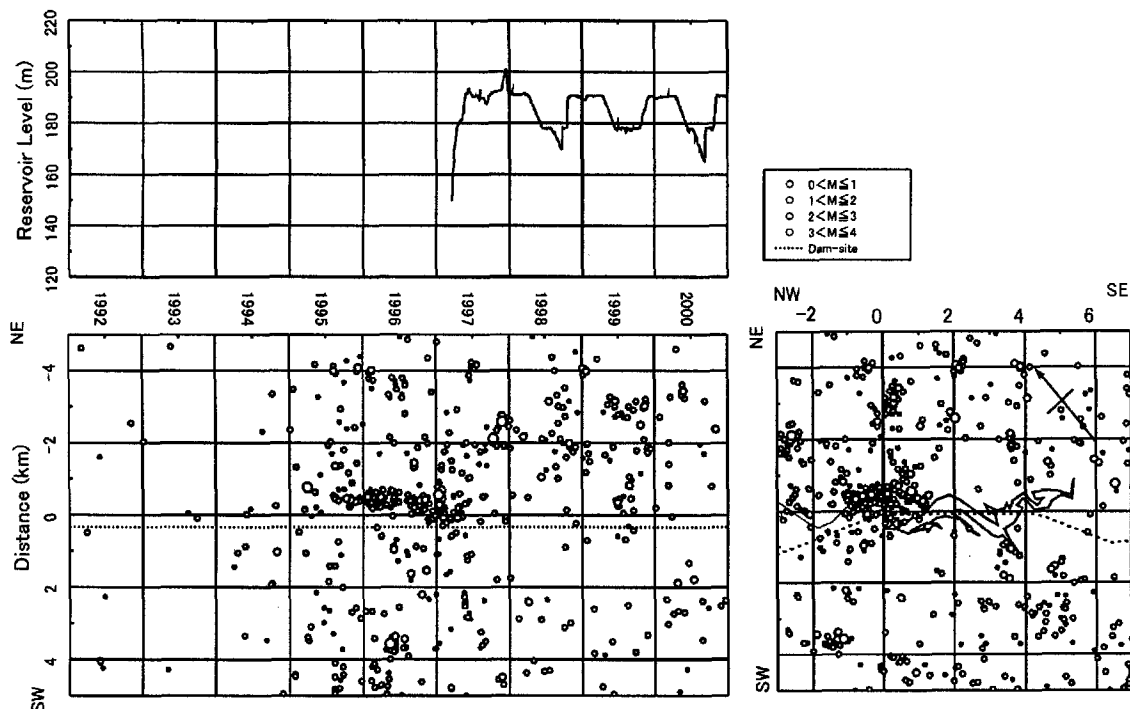


Fig.10 Space-time distribution of earthquakes near the reservoir. Space direction is taken across the strike of the Tonoda fault.

がわかる。したがって、1995年からの地震の増加は広範囲に起こったことがわかる。Figs. 7, 8にはダム湛水開始時を矢印で示した。また、Fig. 6で見られたように、ダムの湛水時頃からの地震活動の減少は、ダムの周囲だけでなく、広域で観測されていることがわかる。これらの結果はいずれも地震活動の変化とダムの湛水が対応していないことを示している。

Fig. 9にはダム周辺の震源分布を示す。平面図はダム付近の活断層である殿田断層の走向が水平になるように回転したものである。Fig. 9の地震の深さ

断面図は殿田断層に平行と直交方向の2方向のものである。また、Fig. 10には地震の時空間分布を示す。空間方向は殿田断層に垂直な方向にとってある。図からダムサイト付近の断層近傍にまとまった地震群が見られる。丹波山地の地震活動は、周囲に比べると定常的に活発であるが、前述のように1995年兵庫県南部地震後に特に活発化した。ダム近傍の地震群もそれらに属していることがわかる。詳細に見ると、この地震活動は1995年にダムサイトにおいて発生し、殿田断層に沿う方向の並びで継続し、約1年半

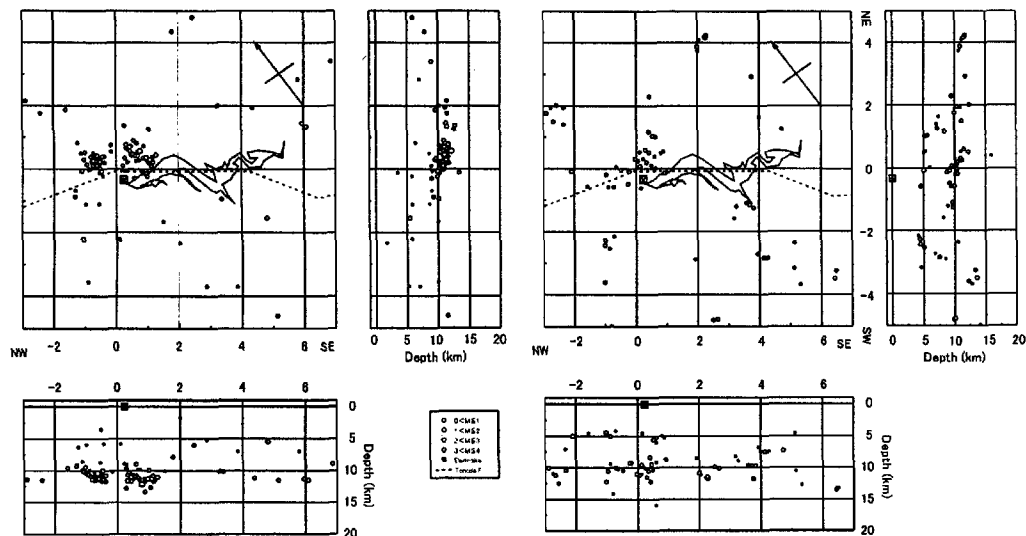


Fig.11a Hypocenter distributions during a half year before and after the filling action of the reservoir.

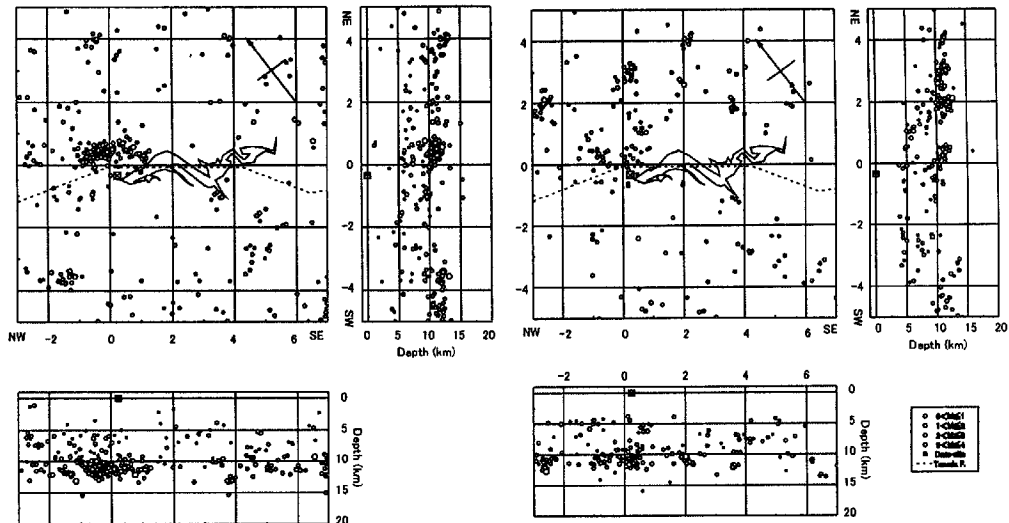


Fig.11b .Hypocenter distributions during 3 years before and after the filling action of the reservoir.

後には低活動になった。ちょうどこのころダムの湛水が開始され、ダム湖付近の地震活動は北側に拡散したように見える。その後のダム近傍での小規模な群発地震活動は、1995年中頃から1997年3月頃まで活動が続いた地域で1999年に再発生したものである。また、地震の深さについてもダム湛水の前後での変化は見られない。これらの図を見ると地震活動はダム湛水以後に不活化した様にも見えるが、前述のように広域における地震活動が同様な変化をしているので、特に関係はないと思われる。

Figs.11a, bには湛水開始時期を境にした前後半年および3年間の、地震活動の分布図を比較して示した。上述のように、湛水後の地震活動は湛水前に比較して低調である。平面的にはダム湖付近周辺で地震活動が低下しているように見える。これはダム周辺で1995年に活発化した地震活動が全般的に低下したためだと思われる。地震の深さについては特に変化は見られない。

ダムの湛水と地震活動について、震源が求められた地震について議論してきた。震源が求められない小さな地震の活動が変化したかはこれだけではわからない。Fig.12にはダムにもっとも近い月読観測点(Fig2)におけるS-P時間4秒以内の地震について、時間変化をダムの水位とともに示した。この結果、S-P時間1秒以下の地震は非常に少なく、ダムの湛水に伴っての変化も見られなかった。これらのことから、今回の観測ではダムの湛水と地震活動の関連は見出せなかった。

その後、ダムの水位には20m程度の振幅をもつ年周変化がある。Fig.6によるとこれらの水位変化と地震活動の関連も見られない。

5. 殿田断層と地震活動

ダム周辺には殿田断層があり(Fig.2)、1995年から始まる地震群はこの断層の近くで発生している。断層と地震活動の関連についても検討した。ダムの建設に際して、殿田断層ではトレンチ調査がなされている(植村・他、2000)。その結果によると、この断層は第四紀において、活発に活動を繰り返してきた活断層である。北東側隆起で左横ずれを伴う断層で、全長15km、垂直方向の変位速度は、0.1-0.2m/千年、水平方向の平均変位速度0.3-0.5m/千年とされている。トレンチ調査によると、最新活動は弥生前期~中期で、過去1.1万年間に3回活動したことがわかった。各イベントの年代は2310~1930年前、5500~7530年前、8020~10710年前と推定されている。

Fig.13は初動の押し引きによって、発震機構を求めたこの断層付近の地震の発震機構解である。Fig.13は下半球等積投影である。この地域の地震はほとんどが横ずれ型で、一つの節面が殿田断層の走

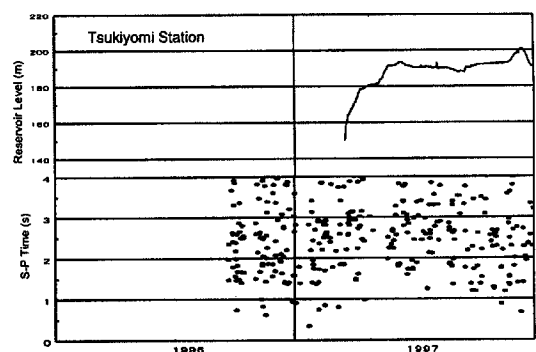


Fig.12 S-P time distribution at Tsukiyomi station, nearest station of the dam-site.

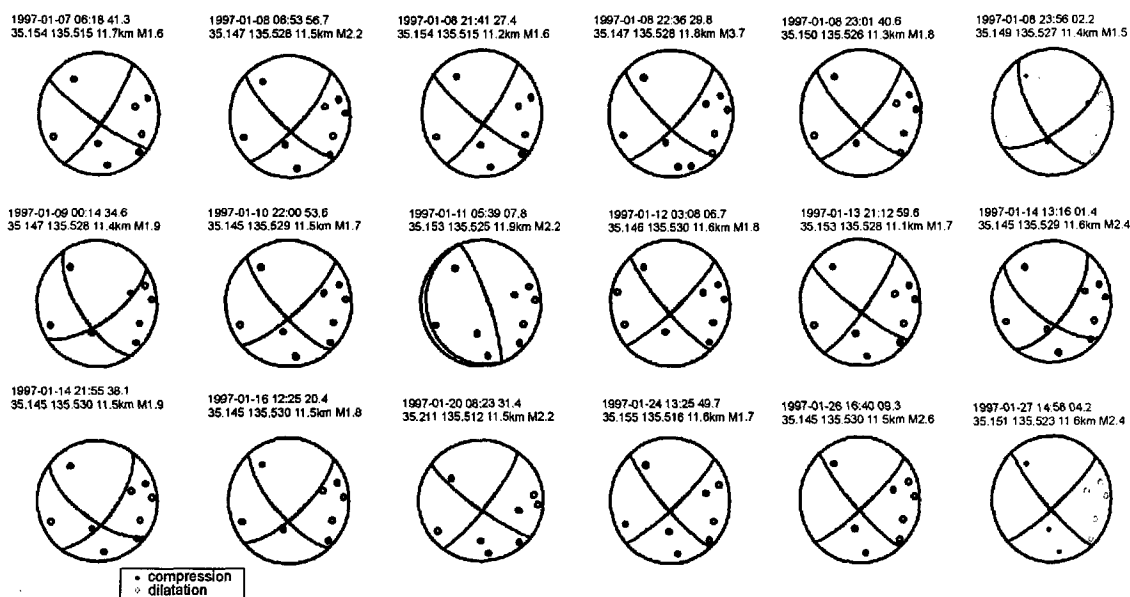


Fig.13 Focal mechanism of earthquakes near the Hiyoshi-dam by use of the lower hemisphere of equal-area projection.

向とほぼ一致する。これらの地震を含む Fig.9 に示すダム近くの地震群について、マスターイベント法で震源を再決定したが、地震の並びは殿田断層の走向に近い方向に延びている。したがって、殿田断層が地下 10km 程度までほぼ垂直に続いているとすれば、この地域の地下深い断層が、微小地震活動におよそ対応していると考えることができる。これらのことから、日吉ダム付近の地震は殿田断層の運動と調和的な応力場で発生していることが分かる。

トレンチ調査の結果を見ても、将来この断層が大地震を発生する可能性はある。したがって、ダムの湛水は直接地震活動には影響しなかったが、殿田断層での大地震の発生については、今後監視する必要がある。この断層が地震を起こした場合の被害想定なども必要であろう。

6. 議論

上記の議論は、主に京大のデータを用いた結果についてのものである。公団の3観測点のデータによる震源と京大のデータによる震源の比較も行った。公団のデータによるダム付近の震源は京大のものと大きな違いはなかった。ただし、3観測点であるため、1点の欠測があると震源が決まらない場合もあり、連続してダム湛水時の地震活動を調査するには、京大のデータが適していた。Mについては、地震の近くの公団の観測点だけで求める場合と京大の観測点を加えた場合では、公団の観測点だけで求めたMが小さくなる傾向にある。これは用いた地震の振幅

の距離依存性の勾配が、距離に無関係でないことを示している。小さなMの決定には、同じ式を用いること自体に問題がある。震源と観測点が短い場合は、用いる式の係数を再決定するなどの必要があることがわかった。

ダム湛水に伴う地震活動の変化は検出されなかった。ダムの初期湛水開始が1997年3月17日で、1995年1月17日の兵庫県南部地震の約2年後であった。この間丹波山地の地震活動は異常に活発化した。このような状態は地殻が応力変化などに敏感になっていると考えられ、少しの刺激が地震活動を誘発しやすいと考えられる。大地震の波動でさえも、火山地域など応力変化などに敏感な地域では地震を誘発するという研究がある(たとえば Brodsky, et al., 2000 など)。実際にはこのような状態でも、日吉ダムの周辺では誘発地震は発生しなかった。一方、ダムサイトに近い所では1995年から群発地震が発生したが、湛水開始前に活動は沈静化していた。この地震ために、ダムサイト付近では応力が解放してしまって、もう地震を起こす状態ではなかったという見方もできる。しかし、周囲の地震活動は依然高い状態であったので、湛水の影響があれば、ダムの直下ないし近傍のそれ以前に地震が発生しなかった地域で地震活動が活発化しても良いと思われる。また、湛水後はダムに近いところの地震活動はむしろ低下したと見ることができる。しかし、地震活動の低下は広域にわたっているので、ダムの湛水の影響だと考えるには無理がある。これらのことからダム湛水は地震活動には顕著な影響がなかったと思われる。

る。

ダムの湛水が地震を誘発する原因は、加重による応力増加と水がしみこむことによる間隙水圧の増加が考えられる。前者については、70m 程度の高さのダムでは、大きな影響はないと思われる。したがって、間隙水圧の増加が地震発生に影響する場合は多いと考えられる。しかし、水がこの地域の主な地震発生層である 3km 以上の深さにしみこむには、長時間を要する場合も多い。現時点で湛水開始から 5 年を経過しているが、影響が出るのはさらに長時間を要する可能性もある。今後引き続き調査を継続する必要がある。

ダムの建設によって、その地域の環境は当然変化する。ダムの貯水池の中には活断層である殿田断層も存在する。周囲の地震活動も活発である。これらのことから、今後の地震活動の調査は必要である。ダムの湛水など環境変化に伴う地震活動の変化は、災害防止の面からもまた地震発生機構の解明からも興味深いことである。

7. 結 論

京都府、日吉ダムの周辺の地震活動を調査し、ダムの湛水前後に得られた地震活動のデータを解析した結果、次のようなことが分かった。今後も殿田断層の地震活動の変化等に注意すべきであろう。

1995 年兵庫県南部地震の後の地震活動増加の時期もかわらず、日吉ダム周辺の微小地震活動の変化は観測されなかった。

その後のダムの水位と地震活動にも特別な相関は見られない。

長期間を見ると日吉ダム付近で 1995 年以降に活発化した群発地震は、1995 年兵庫県南部地震の後に活発化した丹波山地の地震活動の一部であった。これらの地震群は最大 M3.7 の地震を含んで長期間活動している。

上記の群発地震の発震機構は横ずれ型の地震が多く、また、その分布の長軸方向もおよそ殿田断層の走向方向に延びている。

謝 辞

本報告の調査には京都大学防災研究所地震予知研究センター（旧京都大学理学部阿武山地震観測所を含む）の観測網のデータを用いた。観測、データ

処理などに長年従事された各位に感謝します。

本調査は京都大学防災研究所地震予知研究センターおよび水資源開発公団試験研究所の共同研究の一部をまとめたものである。共同研究の推進に御尽力頂いた方々に感謝します。

参考文献

- 石川有三・尾池和夫 (1982): 中国のダム誘発地震について, 地震 2, 第 35 巻, pp.171-181.
- 片尾 浩・安藤雅孝(1996): 兵庫県南部地震前後の地殻活動, 科学, 第 66 巻, pp.78-85.
- 活断層研究会編 (1991): 新編日本の活断層, 東京大学出版会.
- 前田直樹・渡辺 晃 (1984): 微小地震の活動様式, - 近畿地方中北部の地震活動について, 地震 2, 第 37 巻, pp.579-598.
- 大見士朗・渡辺邦彦・平野憲雄・中川 渥・竹内文朗・片尾 浩・竹内晴子・浅田照行・小泉 誠・伊藤 潔・和田博夫・澁谷拓郎・中尾節郎・松村一男・許斐 直・近藤和男・渡辺 晃 (1999): 微小地震観測網 SATARN システムの現状と概要, 京都大学防災研究所年報, 42 号 B-1, pp.45-60.
- 寺島 敦 (1983): ダム貯水と地震活動 (1) - 日本の大ダムの場合 -, 地震 2, 第 36 巻, pp.373-382.
- 植村善博・岡田篤正・金田平太郎・川畑大作・竹村恵二・松浦旅人 (2000): 三峠活断層系, 殿田断層世木林地区のトレンチ調査と最近の活動履歴, 地学雑誌, 第 109 巻, pp.73-86.
- 渡辺 晃 (1971): 近地地震のマグニチュード, 地震 2, 第 24 巻, pp.189-200.
- Brodsky E. E., Karakostas, V. and Kanamori, H. (2000): A new observation of dynamically triggered regional seismicity; earthquakes in Greece following the August, 1999 Izmit, Turkey earthquake, Geophysical Res. Lett., Vol. 27; pp.2741-2744..
- Hagiwara, T. and Ohtake, M. (1972): Seismic activity associated with the filling of the reservoir behind the Kurobe Dam, Japan, 1963-1970, Tectonophysics, Vol.15, pp.241-254.
- Shimpson, D.W.(1976): Seismicity changes associated with reservoir loading, Engineering Geology, Vol.10, pp.123-150.

**Variations in Seismic Activity Before and After the Filling Action
in the Hiyoshi-dam in Kyoto Prefecture, northern Kinki district, Japan**

Kiyoshi ITO, Hiroshi KATAO, Kunihiko WATANABE, Fumio YONEZAKI*,
Nobuteru SATO* and Mitsuhiro OIE*

(* Water Resources Development Public Corporation, Research Institute)

Synopsis

Induced earthquakes accompanied with the filling action of the Hiyoshi-dam, in the Northern Kinki district, Japan are studied from the data of the small temporary seismological observation network near the dam-site and the routinely operated network. The filling action of the dam was executed on Mar. 17, 1997, about three years after the 1995 Hyogo-ken Nanbu earthquake of M 7.3, which is about 80km southwest from the dam-site. Seismic activity is activated by the big earthquake even in the dam-site. Therefore the area is thought to be sensitive to the changes in the stress or strain. However, the change in the seismicity is not found during and after the filling action of the dam, from the detailed analyses of the data.

Keywords: induced earthquake, Hiyoshi-dam, Tonoda fault, seismic activity