

ネパール地震の強震観測記録が公開されています。USGS によりカトマンズの Kanti Path 地点で観測されたものです。この強震記録を解析しましたので報告します。

この記録は、CESMD により公開されたものです。USGS および CESMD に感謝します。

1. 公開加速度波形の分析結果

(1) 積分による変位や速度

図 1 は二回積分して得られた変位波形を示したものです。青線波形が EW 方向、緑線波形が NS 方向、赤線波形が上下方向をそれぞれ示します。これによると、水平動は、周期 5 秒程度の振動が数波ほど継続した後、急激に小さな振幅になってからも 1 分以上振動が継続しています。各方向成分ごとの最終的な永久変位は、それぞれ概ね、南へ 157cm、東へ 21cm、上に 123cm、となっています。この値と GPS 計測された変位を比較したものが、図 2 です。東西方向の向きが逆になっているほかは、概ね妥当な計算結果となっていることがわかります。東西方向が異なっていることについては、後で考察します。

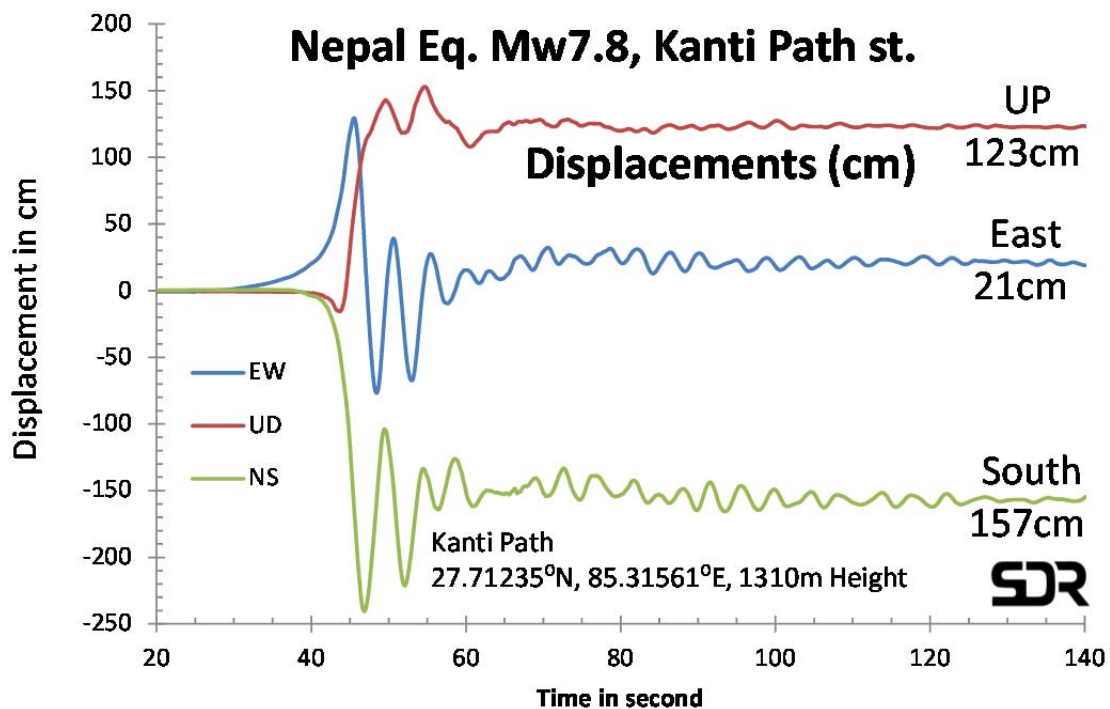


図 1 ネパール地震によるカトマンズの Kanti Path 地点の変位

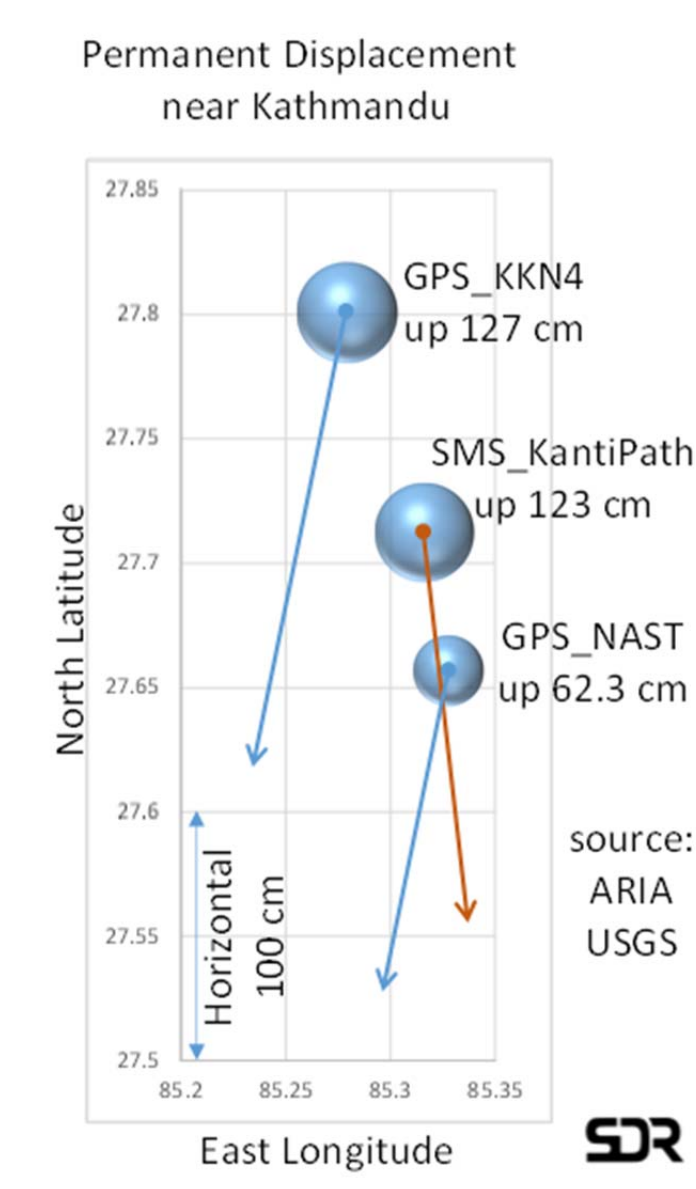


図2 ネパール地震によるカトマンズ付近の永久変位

図3は公開された加速度波形で、何の操作も加えられていないものです。水平成分は5秒程度の成分が卓越して150Galを超える程度の加速度を示していますが、震源域の加速度としては小さな加速度であることが注目されます。図4はこれを積分した速度波形であり、これによるとEW方向で107cm/sの大きな速度になっています。上下動成分加速度は比較的高い振動数成分が卓越して、200Gal近くに達していますが、積分した速度波形を見ると、長周期が卓越した波形になります。加速度波形を二回積分した変位波形を改めて成分ごとに表示したものが図5です。概ね30秒あたりで地震動が到来し始めていますが、東西方向についてはもっと前から振幅が大きくなり始めているのがわかります。

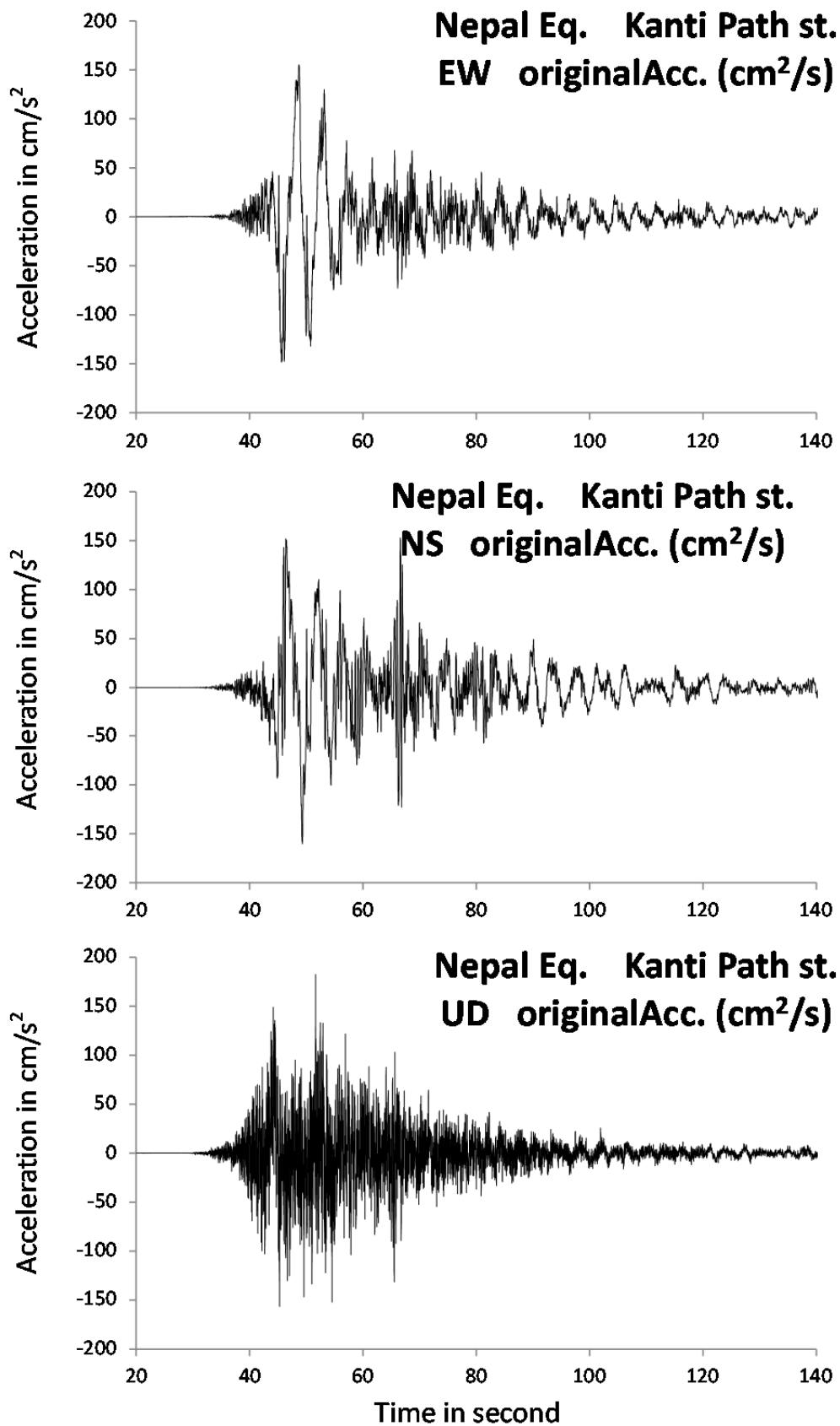


図3 ネパール地震によるカトマンズ付近の加速度波形

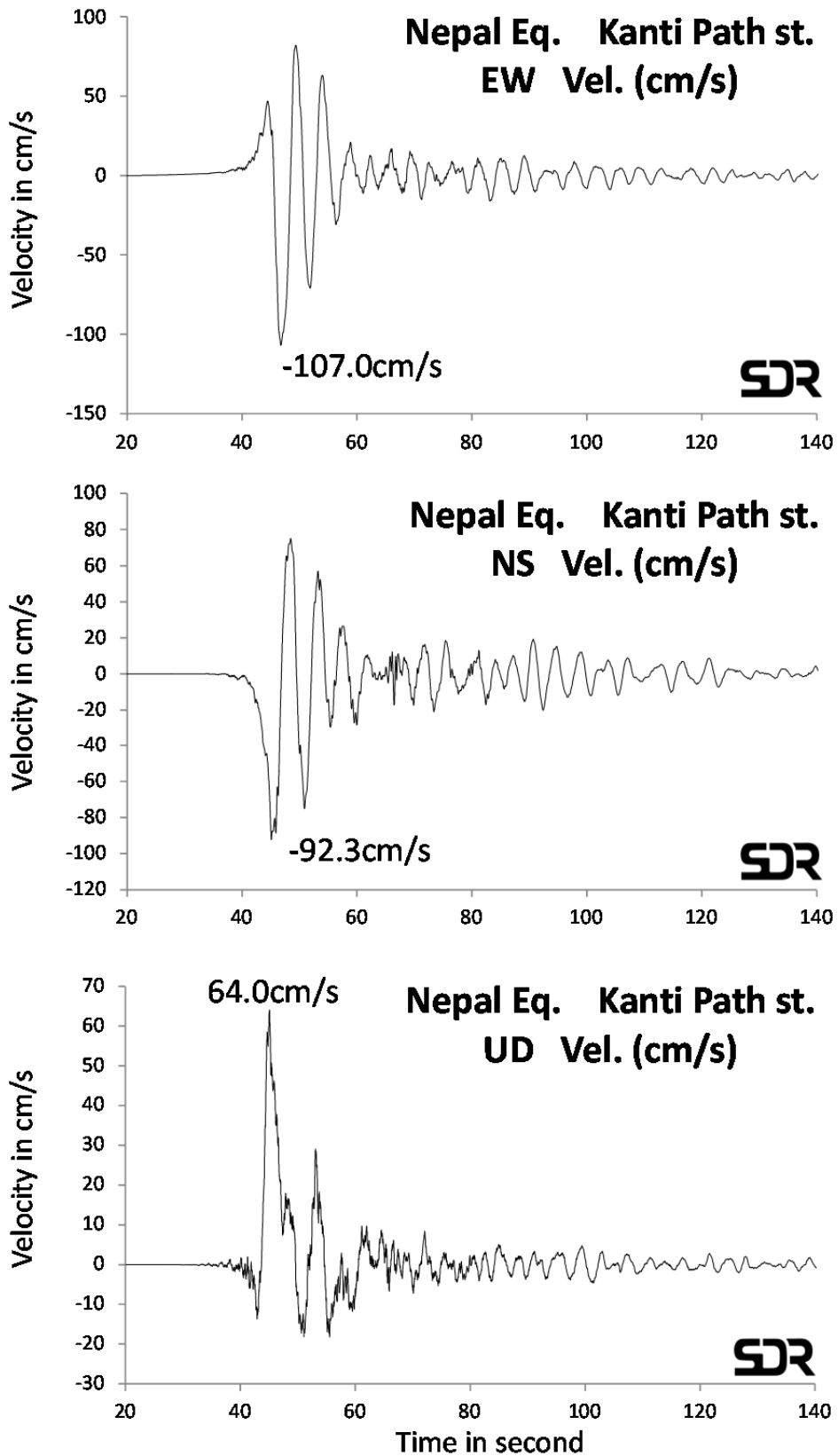


図4 ネパール地震によるカトマンズ付近の速度波形

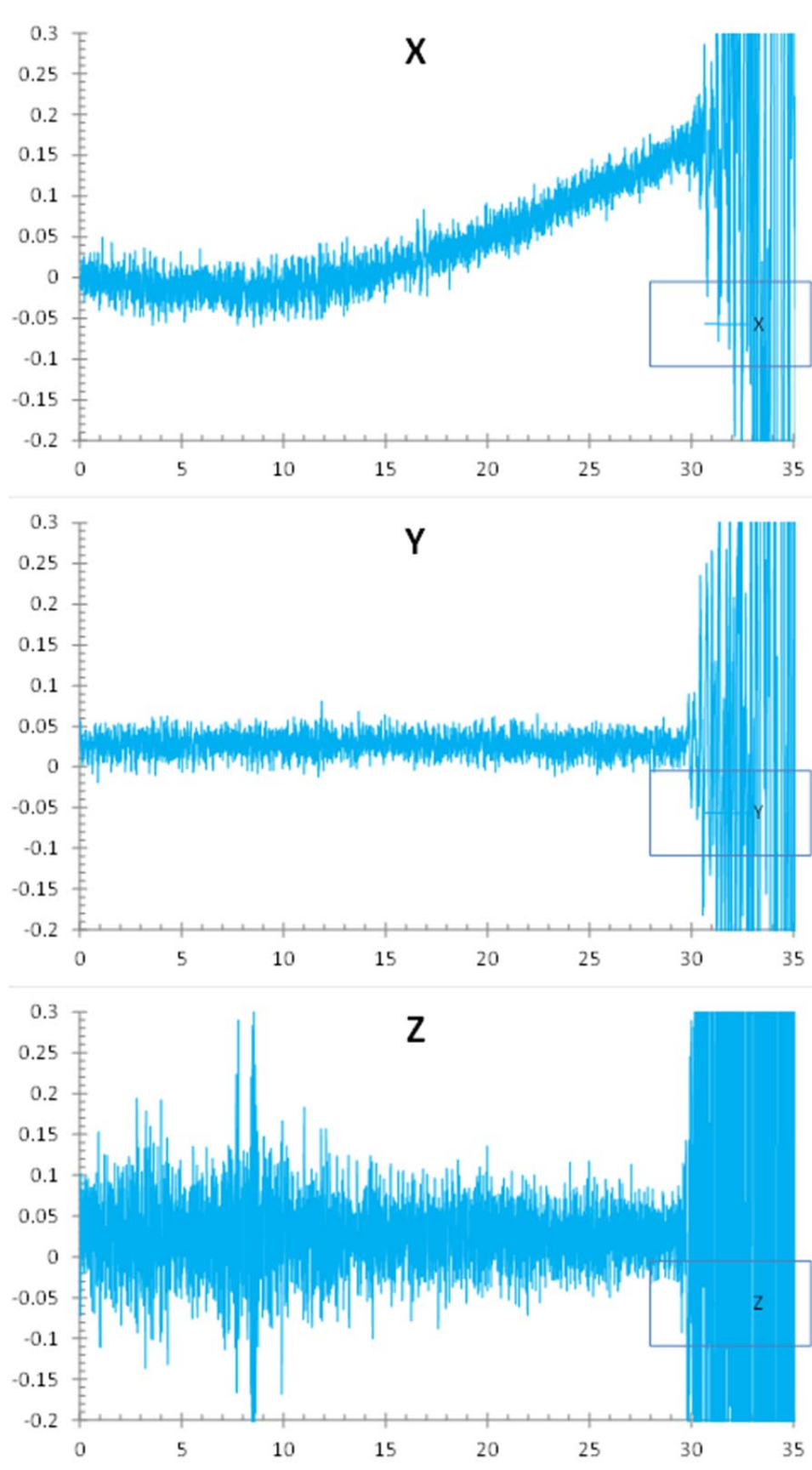


図 5 地震動到来前の加速度波形

そこで、地震動が到来する前の波形部分を拡大してみたものが、図 5 です。これをみると、NS 成分 (Y) や上下動成分 (Z) はなんらかのノイズ波形が認められるものの、中心線が大きく変動することはありません。これに対して、EW 方向 (X) では大きく変動していることがわかります。10 秒くらいまではやや西方に偏移していますが、それ以後は大きく（といっても 0.2Gal 程度ですが）東方に偏移しています。地震動到来以降の偏移の状況は、地震動にマスクされてよくわかりませんが、10 秒から 30 秒まで直線的に 0.2Gal 大きくなっているとすると、この間の変位は、 $0.2\text{Gal} \times 20 \text{ 秒} / 2 \times 20 \text{ 秒} / 3 = 13\text{cm}$ 程度、と見積もられます。地震動到来以後も 20 秒程度この傾向が続いていると仮定すると、その変位量は 30cm 程度にも達すると思われれます。つまり、EW 方向の積分により推定された永久変位、東側に 21cm、はこの地震動到来前の偏移に起因するものと推測されます。また、地震動到来前から変位し始めていることもこれによって説明できます。この地震前後の中心線の偏移の影響を正確にも積もることは困難なので、これ以上の考察は避けませんが、EW 成分の積分変位波形については、全体を西側に偏移して考える必要があるように思います。

(2) 変位軌跡

算定された変位から、水平面内の変位軌跡や上下軸と南北軸を含む平面内の変位軌跡、上下軸と東西軸を含む平面内の変位軌跡を描いたものが図 6 です。水平面内では時計回りに大きく回転しています。また、南側へは、上方向と連動するように変位しており、潜り込む断層の上にある地盤の動きを示しています。このように、Kanti Path 地点の変位軌跡は断層の動きを反映するとともに、軟弱な堆積層の応答を反映した特徴的な動きを示しているように見えます。

(3) 震度と 5HzPGA

図 7 には、リアルタイム震度の変動の様子を青色で描いています。リアルタイム震度は、地震動が単位質量の物体に及ぼす単位時間当たりの仕事量の対数で定義されています。つまり、地震動の物体への時々刻々のエネルギー供給能力を表現したものと考えることができます。実際の定義は、以下の示すように、多くの観測データに基づき、リアルタイム震度の最大値が計測震度とほぼ同じ値になるように、定数項を調節しています。同様に、多くの観測データに基づいて、リアルタイム震度と MMI 震度の関係式を得ています。

$$RI = \log | \mathbf{a} \cdot \mathbf{v} | + 2.4$$

$$MMI = RI * 11/7 + 0.5$$

ここで、 \mathbf{a} は加速度ベクトル（単位は cm/s^2 ）、 \mathbf{v} は速度ベクトル（単位は cm/s ）、 \cdot は内積を表します。|| は絶対値をとることを表します。

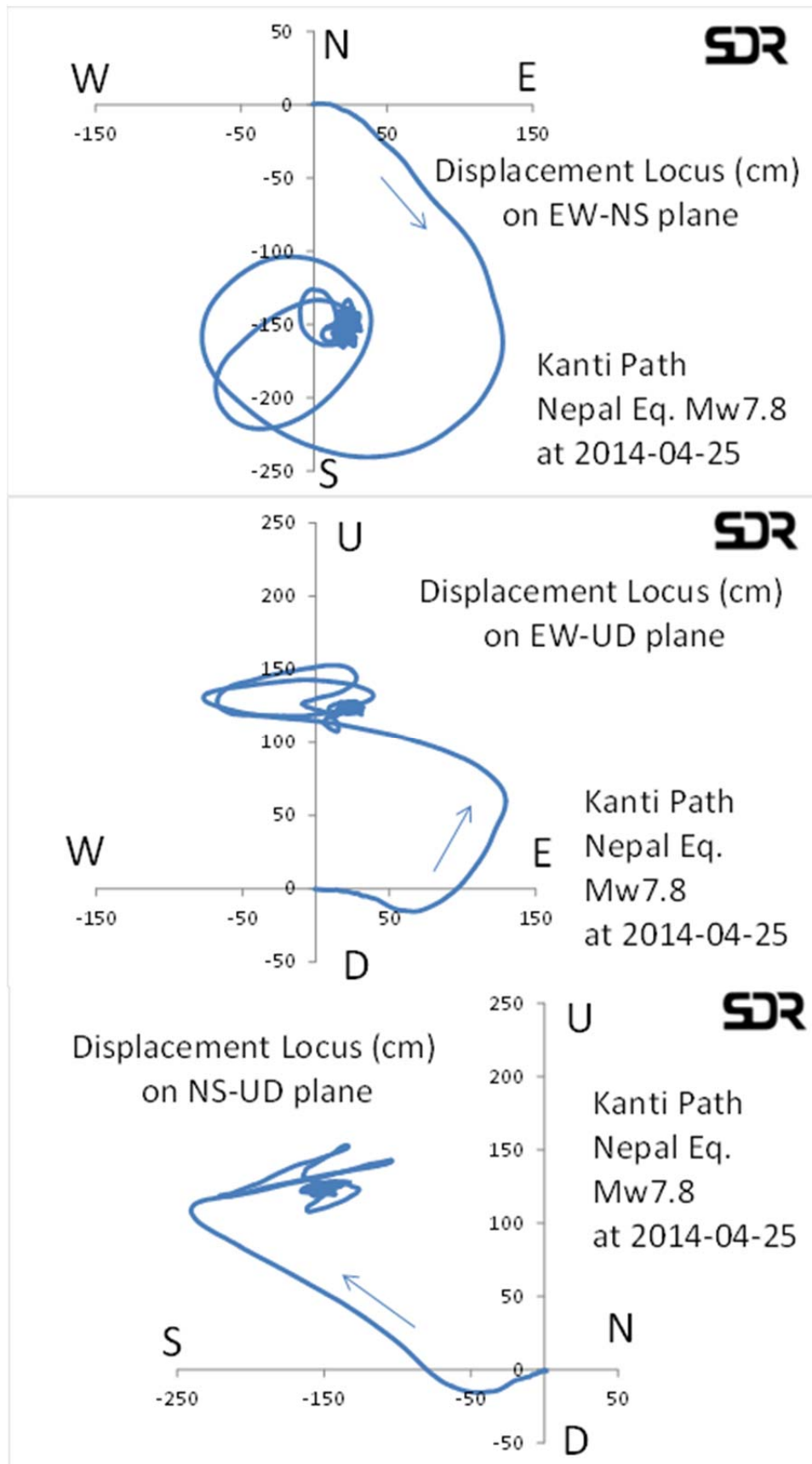


図6 地震動変位軌跡

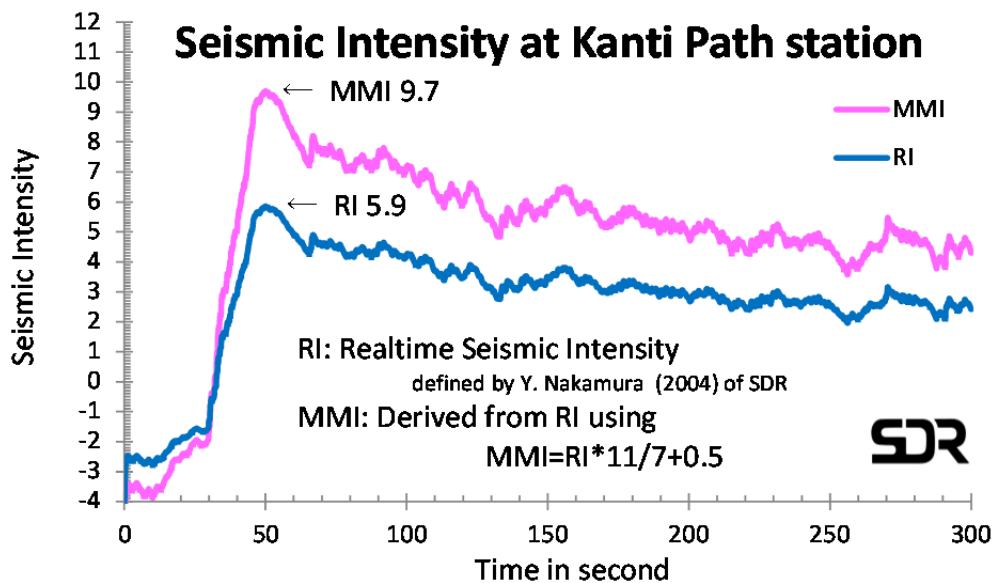


図7 Kanti Path 地点のリアルタイム震度と MMI

MMI と RI の関係式をもちいて、リアルタイム震度の変動を MMI 震度の変動に変換して、図 7 にピンクで示します。これによると、Kanti Path 地点の MMI 震度は 9.7（リアルタイム震度は 5.9、震度 6 弱）となります。リアルタイム震度は、高い振動数が卓越する場合には小さめに算定され、長周期成分が卓越する場合には大きめに算定されることがわかっています。つまり、被害が生じないような地震規模（マグニチュード）の小さい地震では、計測震度より小さめの値となり、被害が広範囲に及ぶマグニチュードの大きい地震では計測震度より大きめの値となります。周期 5 秒のいわゆる長周期地震動が卓越する場合には、リアルタイム震度は計測震度よりも概ね 0.8 程度大きくなることがわかっています。リアルタイム震度は、より被害と密接に結び付いた指標値である、と考えることができます。

加速度計測の周波数範囲を 5Hz 以下に制限して得られる水平合成加速度 5HzPGA は、被害判定指標としても有効な加速度指標値ですが、この時間変動を示したものが図 8 です。これによると、Kanti Path 地点の 5HzPGA は 158Gal となっています。この地点は、ずいぶん長く揺れ続け、地震から 5 分経過した時点でも、数 Gal、リアルタイム震度 2~3 程度の揺れが続いています。

図 9 は、各地の基盤における 5HzPGA の大きさを推定する式（図 9 中に示しています）にしたがって、M7.8 深さ 15km の地震による震央距離ごとの 5HzPGA を推定したものです。図には、Kanti Path 地点での 5HzPGA の観測値も青い点で示しています。観測値は、概ね基盤推定値の 2 倍程度となっています。しかし、破壊開始点からの波動伝播のみを考慮した推定式であり、破壊開始点から断層破壊が向かって来て、通り過ぎていく Kanti Path 地点の地震動を推定する式としては適当ではなく、もっと大きい基盤加速度であると考え

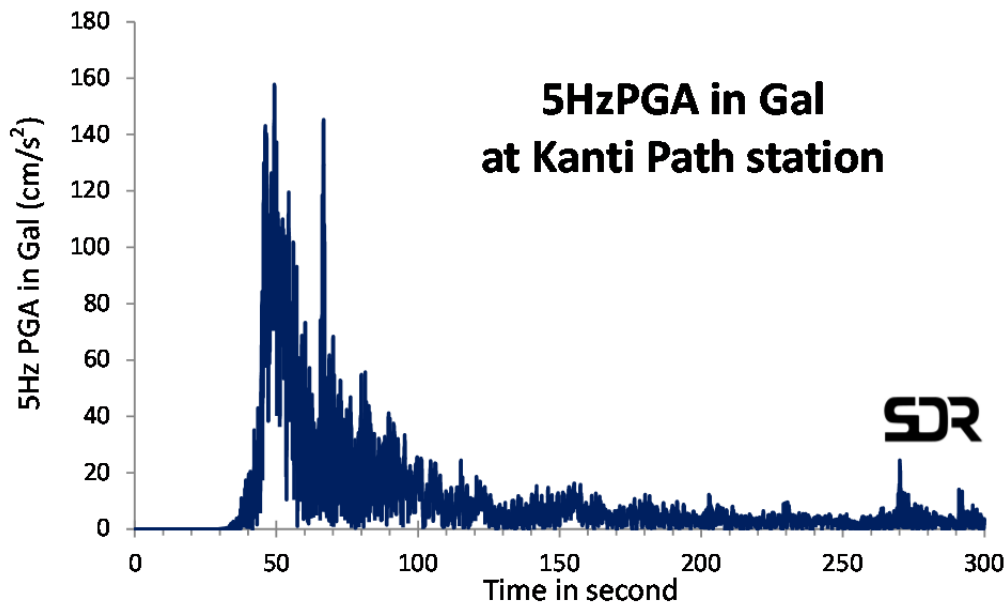


図 8 Kanti Path 地点の 5Hzpga (Gal)

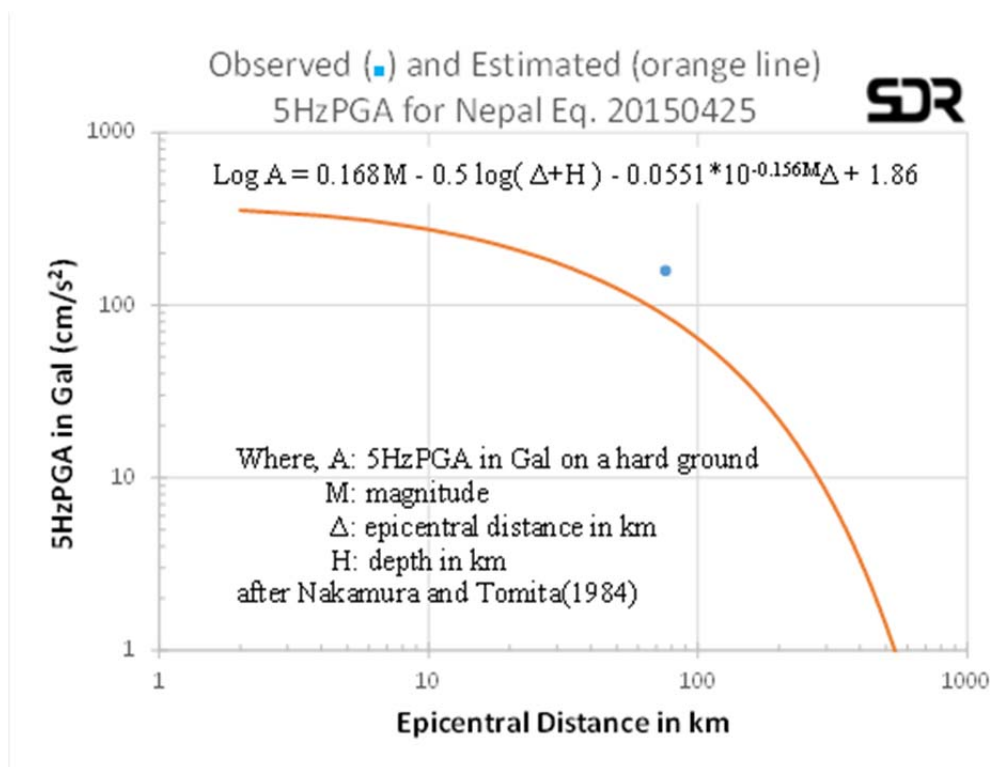


図 9 Kanti Path 地点の 5HzPGA(Gal)と推定基盤加速度 (5HzPGA)

のが妥当です。観測データは、断層直上にある軟弱な堆積層に覆われた地盤の地震時応答として、非常に興味深いものです。

図 10 は、これまでに得られたリアルタイム震度 RI と 5HzPGA の関係図上に、Kanti Path 地点の RI と 5HzPGA を赤い点でプロットしたものです。これによると、Kanti Path 地点

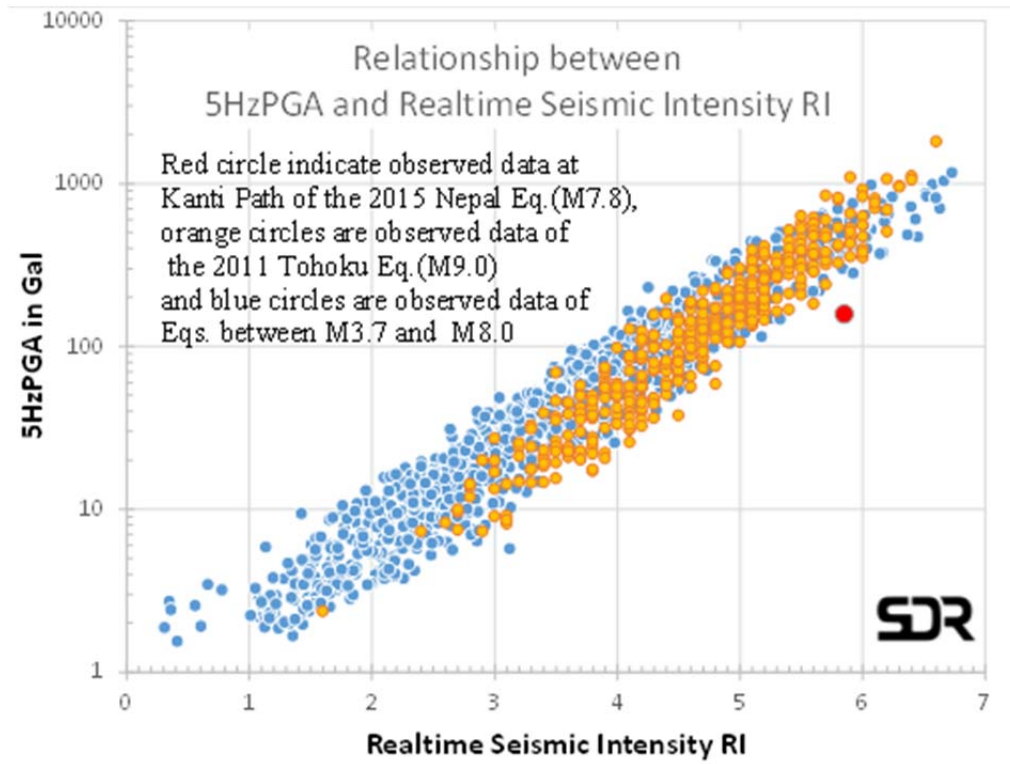


図 10 5HzPGA(Gal)とリアルタイム震度 RI の関係

はデータ群の下限に位置していることがわかります。つまり、震度に対してかなり加速度が小さく、震動の卓越周期が長いことを意味しています。既往のデータ存在域の限界に近い観測値であると考えられます。このように、5HzPGA と RI の関係図上の位置は、震動に含まれる周期情報を表しています。

マグニチュードが大きいほど、断層は大きく、すべり量も大きくなります。このことは、マグニチュードが大きいほど、地震動の卓越周期が長くなることを意味しています。つまり、5HzPGA と RI の値を用いて、当該地震のマグニチュードを推定できる可能性があります。多くのデータを用いて検討した結果、RI と 5HzPGA から大まかにマグニチュードを推定する式は次のようになります。

$$M = (RI - 1.5 * \log(5HzPGA)) * 2 + 4$$

これに RI=5.85、5HzPGA=157Gal を入力すると、M=9.1、となり、実際の Mw7.8 に対して、過大なマグニチュードが推定されます。これは、用いたデータが、異常に長い卓越周期の地点 Kanti Path のものであることによると思われるのですが、現在のところこれ以外のデータは公開されていません。通常の地盤や堅固な地盤などでの観測点のデータが存在し、公開されることがあれば、同様な検討を進めてみたいと考えています。

以上