受理日：２０１２年８月５日

掲載予定：　地震　第２輯、第６５巻２号

群発地震活動の震源移動と流体による亀裂伝播モデル

北海道大学大学院理学研究科附属地震火山研究観測センター※

勝俣　啓・佐々木 智彦

A fluid-filled crack propagation model to explain migration of earthquake swarm activities

Kei Katsumata and Tomohiko Sasaki

Institute of Seismology and Volcanology, Hokkaido University,

Sapporo 060-0810, Japan

※〒060-0810　札幌市北区北 10 条西８丁目

§1　はじめに

群発地震活動の発生原因としては，マグマや水の影響が有力視されている．例えば，高橋・他(1999)はマグマの貫入を指摘し，Morita et al. (2006)ではマグマの移動により震源が深い所から浅い所へ移動し，その後震源が同心円状に拡大していく様子を観測した．

本論文では，2004 年斜里岳群発地震活動で見られた震源移動のデータを流体による亀裂伝播モデルに当てはめて解析し，震源移動の特徴を説明できるかどうか議論する．

§2　データと解析

2004 年 4 月 27 日から北海道東部に位置する斜里岳付近を震源とする地震が観測され始めた．この群発地震は直近の定常地震観測点から 15 km 以上離れているので，震源域付近に臨時観測点を 9 か所設置した[一柳・他(2009)]．解析には，一柳・他(2009)により 4 月 27 日から 6 月 30 日までに決定された 1649 個の震源データを使用した(Fig.1)．震源決定精度は，水平方向が 1 km 以下，深さ方向が 5-10 km である．深さ方向の決定精度は悪いので，水平方向の震源

移動のみ議論し，深さ方向の移動は考慮しない.

震源移動が始まったエリアの中心付近の北緯 43.7267 度，東経 144.7324 度を原点として，震央距離を計算し，時間に対してプロットした(Fig.2). 震央は原点から東方向（Fig.2 縦軸の＋方向）と西方向（Fig.2 縦軸の－方向）の 2 方向に分かれて拡大し，群発地震が最初に始まった場所付近では地震が発生しなくなることが分かる．さらに，移動速度は最初の 4 日間が約 250 m/day と速く，その後は徐々に遅くなり 60 日間で約 2 km の移動が見られた.

流体による亀裂伝播モデルはSpence and Turcotte (1985)を使用した(Fig.3). このモデルは 2 次元亀裂モデルであり，亀裂は x 方向（東西方向）に伸張すると同時に y 方向（南北方向）に厚さを増していく．したがって，亀裂の成長も 2 次元である．流量一定の条件下で、亀裂先端の応力が一定となるように亀裂が 2 次元的に拡大し，亀裂の先端付近で群発地震が発生すると考える. 剛性率 μ，ポアソン比 ν の均一で不浸透性の弾性地盤に亀裂は形成される. 粘性 η の流体は原点(0,0)から一定速度 A で注入され，亀裂は+x（東向き）

と-x（西向き）方向に拡大する．亀裂の厚さは長さに比べて十分小さい，および亀裂先端における無次元化された応力拡大係数 γ は 1 より十分小さいと仮定すると，以下のような近似式が得られる [Spence and Turcotte (1985)]：

$$l = 0.7756A^{1/2}\left(\frac{\mu}{\eta(1-\nu)}\right)^{1/6} t^{2/3} \quad (1)$$

$$2h(0) = 1.2312A^{1/2}\left(\frac{\eta(1-\nu)}{\mu}\right)^{1/6} t^{1/3} \quad (2)$$

$$P(0) = 1.398\left(\frac{\mu}{1-\nu}\right)^{3/4} \eta^{1/4} A^{1/4} / l^{1/2} \quad (3)$$

ただし，+x 方向に長さ l，-x 方向にも長さ l，亀裂全体の長さは $2l$ である．Fig.3 には，亀裂の+x 方向，すなわち，東側のみ表示してある．以後，l を亀裂の半分長と定義する．$2h(0)$は時刻 t における x=0 での亀裂の厚さを表す．$P(0)$は亀裂全体の長さが $2l$ に達した時点における原点での内部圧力 $P(x=y=0)$を表す．

§3　結果

亀裂伝播モデルを斜里岳群発地震の震源移動に適用するために，時間軸(日数)を群発地震の地震発生数が増大した 2004 年 4 月 28 日 0

時 0 分 0 秒からの経過時間(秒)に変換し、両対数グラフとして再プロットした(Fig.4). 媒質の剛性率 μ = 30 GPa, ポアソン比 ν = 0.25, 水(80 度 C)の粘性率 η = 3×10^{-4} Pa·s を仮定してデータに直線を当てはめると，水の注入率は A = 10^{-7} ~ 10^{-6} m²/s が東方向と西方向共によくデータを説明できるようだ. (1)式から亀裂の半分長 l は時間 t の 2/3 乗に比例するが, 観測された震源移動の傾きも約 2/3 であることが分かる．ただし，10^5 秒（約 28 時間）以前の群発地震活動の初期段階では理論値から大きくはずれる．また，東向きの震源移動では 10^6 秒付近において注入率が小さい直線へとシフトしているように見えるが，その後も傾きは 2/3 を維持している．このように，10^5～10^6 秒においては, 東方向と西方向に広がる震源移動に対して等しい注入率でうまく説明できる. これは 1 か所の注入源から注入された水が東西両方向に拡大したことを示唆する．さらに，上記で得られた注入率の中間値 A = 5×10^{-7} m²/s を用いると，t = 11.6 日(10^6 秒)付近で亀裂の半分長が l = 約 1.2 km に達し，この時の亀裂の厚さは(2)式より，$2h(0)$ = 約 1 mm，内部圧力は(3)式より $P(0)$ = 約 500 Pa

となる．この $P(0)$の値は，亀裂外部に作用する静岩圧と亀裂を押し広げる水圧との差である．すなわち，間隙水圧の増分と考えられるので，せん断破壊強度を低下させるメカニズムとしても有効かも知れない．

§4　議論

(1)～(3)式は以下のような仮定を満たす場合の近似式であるから，仮定を満たしているか検討する．まず，注入される流体の流れは層流であると暗に仮定している．本研究で得られた亀裂の半分長 1　km，厚さ 1 mm の薄い亀裂の場合は，レイノルズ数が 10～100 程度となるので層流の仮定は妥当である．また，地殻浅部の火成岩や堆積岩の場合，応力拡大係数は 1 $MNm^{-3/2}$ 程度である [Spence and Turcotte (1985)]．この値に対応する無次元化応力拡大係数 γは 3.6 × 10^{-3} であるから，γが 1 より十分小さいという仮定も妥当であろう．

温度約 1100 度 C の安山岩質マグマの粘性率は η = 10^4 Pa·s 程度である [Murase and McBirney (1973)]．このマグマが注入されると

仮定して,震源移動に合うように注入率Aを推定すると,$A = 1.5\times10^{-4}$ ~ 6×10^{-4} m²/s となる.この場合，亀裂の厚さは(2)式より $2h(0) = 5.6$ ~ 11.1 m となる．亀裂の半分長 $l = 0.5$ km，亀裂の厚さ $2h(0) = 5$ m，深さ方向（Fig.3 の紙面に垂直な方向）の幅 0.5 km の鉛直亀裂が群発地震域の直下に存在し，亀裂の上端が 深さ 5 km だと仮定すると，群発地震域直上では，南北方向の地表変位が約 1 cm となる．亀裂上端の深さが 3 km の場合は，地表変位は約 3 cm となる．国土地理院の GPS 観測網からは今回の群発地震活動に伴う有意な地殻変動は観測されていないので,流体はマグマではなく水の可能性が高い.さらに，マグマの場合の注入率は $A = 10^{-4}$ m²/s 程度と非常に小さいので亀裂に注入されてから 100 秒程度で固結すると予想される [Spence and Turcotte (1985), Fig. 6]．したがって，観測されたような震源移動は起きないはずである．以上のように，Spence and Turcotte モデルが震源移動に適用できるならば，地殻変動データやマグマの固結条件と比較することにより,貫入した流体がマグマであるか水であるかの推定が可能になる.

西上・他(2002)によると，野島断層において 1.3×10^{-4} ~ 4.3×10^{-4} m^3/s の注入速度で 23 ~ 273 m^3 の注水実験を数回行ったところ，注水地点から距離 2.5 ~ 4.5 km，深さ 2 ~ 5 km のエリアにおいて微小地震の発生数が急増した．本研究で仮定したモデルは 2 次元であるが，z 軸（深さ）方向に 100 m の広がりを仮定すると，注入速度は約 10^{-4} m^3/s，時間 10^6 s の間には 100 m^3 オーダーの水が注入され，野島断層の注水実験とほぼ同規模になる．亀裂の z 軸（深さ）方向への広がりは不明であるが，100 m 程度の広がりがあれば，注水実験とは矛盾しないようだ.

§5　おわりに

北海道東部の斜里岳付近で発生した群発地震において検出された震源移動現象は, 水の貫入により亀裂が伸張しながら地震を引き起こすというシンプルなモデルで説明することができた. 今後は他の震源移動現象に対しても同様なモデルで説明可能かどうか調査したい.

謝　辞

北海道大学大学院理学研究院附属地震火山研究観測センターの一柳昌義氏には，斜里岳群発地震の観測データを提供して頂いた．田中良氏，2 名の査読者（亀伸樹氏と匿名の方）および編集担当委員の植平賢司氏から有益なコメントを頂いた．感謝の意を表します．

文　献

一柳昌義・高橋浩晃・山口照寛・高田真秀・岡山宗夫・笠原稔・岡崎紀俊，2009，高密度臨時地震観測による 2004 年斜里岳群発地震活動，北海道大学地球物理学研究報告, 72, 299-314.

Morita, Y., S. Nakao, and Y. Hayashi, 2006, A quantitative approach to the dike intrusion process inferred from a joint analysis of geodetic and seismological data for the 1998 earthquake swarm off the east coast of Izu Peninsula, central Japan, J. Geophys. Res., 111, B06208, doi:10.1029/2005JB 003860.

Murase, T. and A. R. McBirney, 1973, Properties of some common igneous rocks and their melts at high temperatures, Geol. Soc. Amer. Bull, 84, 3563-3592.

西上欽也・田所敬一・永井悟・水野高志・加納靖之・平松良浩, 2002, 注水に伴う誘発地震の発生特性, Journal of Geography, 111(2), 268-276.

Spence, D. A., and D. L. Turcotte, 1985, Magma – Driven Propagation of Cracks, J. Geophys. Res., 90, 575-580.

高橋浩晃・宮村淳一・郷家幸治, 1999, 北海道で発生した深部低周波地震, 北海道大学地球物理学研究報告, 62, 25-41.

Figure captions

Fig. 1. Earthquake swarms in the Shari-dake volcano area in the eastern Hokkaido, Japan. Black dots are 1649 earthquakes used in this study that were located by Ichiyanagi et al. (2009) from 27 April 2004 to 30 June 2004. A white plus indicates the origin of distance in Fig. 2 and Fig. 4.

Fig. 2. Migration of earthquake swarms in the Shari-dake volcano area in the eastern Hokkaido, Japan (Ichiyanagi et al., 2009). Epicentral distances are plotted as a function of the origin time in days. The epicentral distance is measured from the origin at (43.7267°N, 144.7324°E). The positive distance indicates that epicenters are located east of 144.7324°E, and the negative distance indicates that epicenters are located west of 144.7324°E. The days are counted from 28 April 2004.

Fig. 3. A fluid-filled crack propagation model [Spence and

Turcotte (1985)]. A fluid is injected along a line x=y=0. h(x,t) and l(t) are a half width and a half length of the crack, respectively.

Fig. 4. Epicentral distances are plotted as a function of time of earthquake occurrence. The positive and negative distances indicate earthquake migrations toward the east and the west viewed from the origin at (43.7267°N, 144.7324°E), respectively. The time is measured from 00h 00m 00s on 28 April 2004. The same data as those in Fig. 2 are used. Four lines are calculated from the model in Fig. 3 with assumption of four different injection rates A in m^2/s: 1×10^{-8} for line 1, 1×10^{-7} for line 2, 1×10^{-6} for line 3, and 1×10^{-5} for line 4.

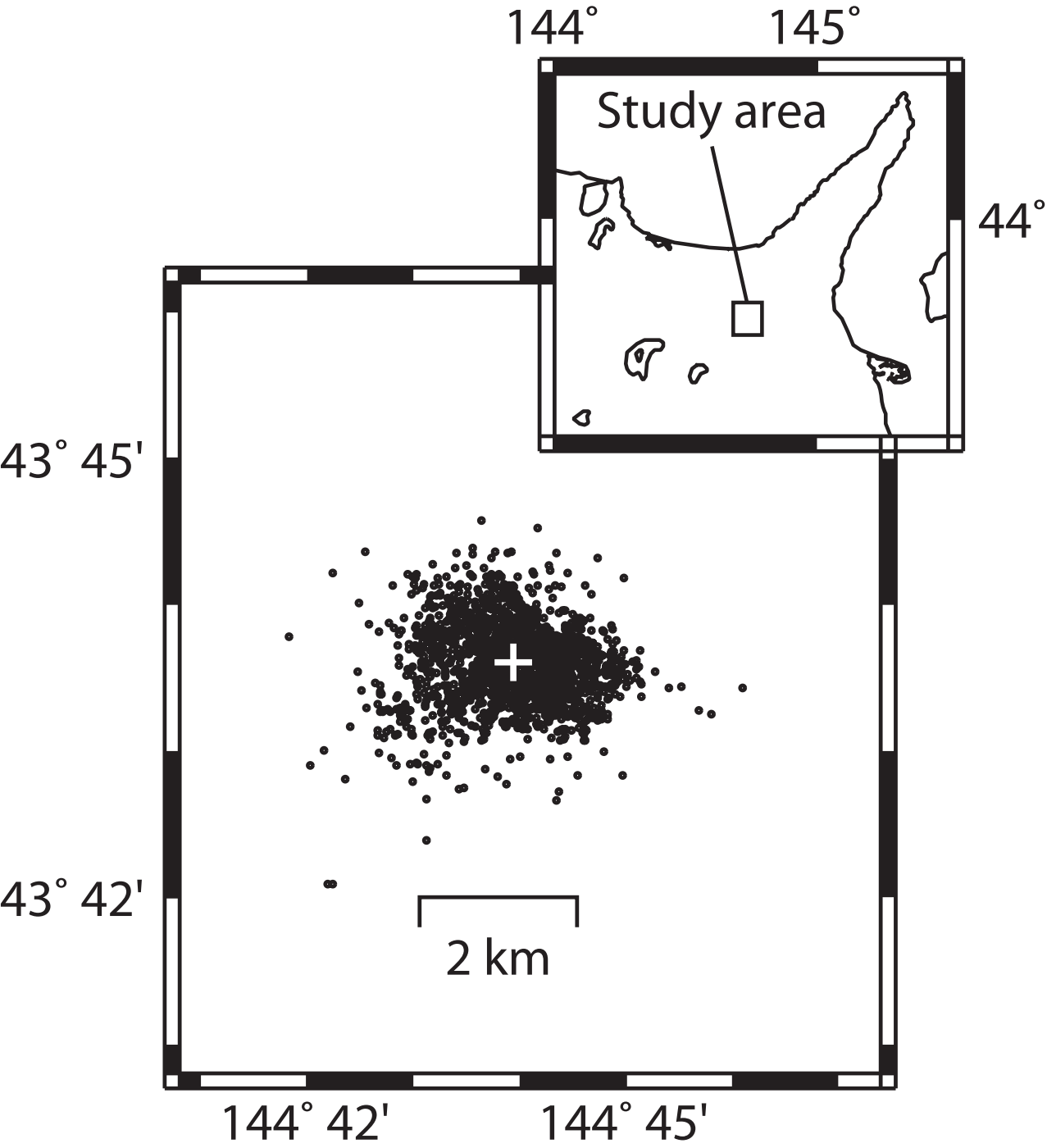

Figure 1. Katsumata and Sasaki

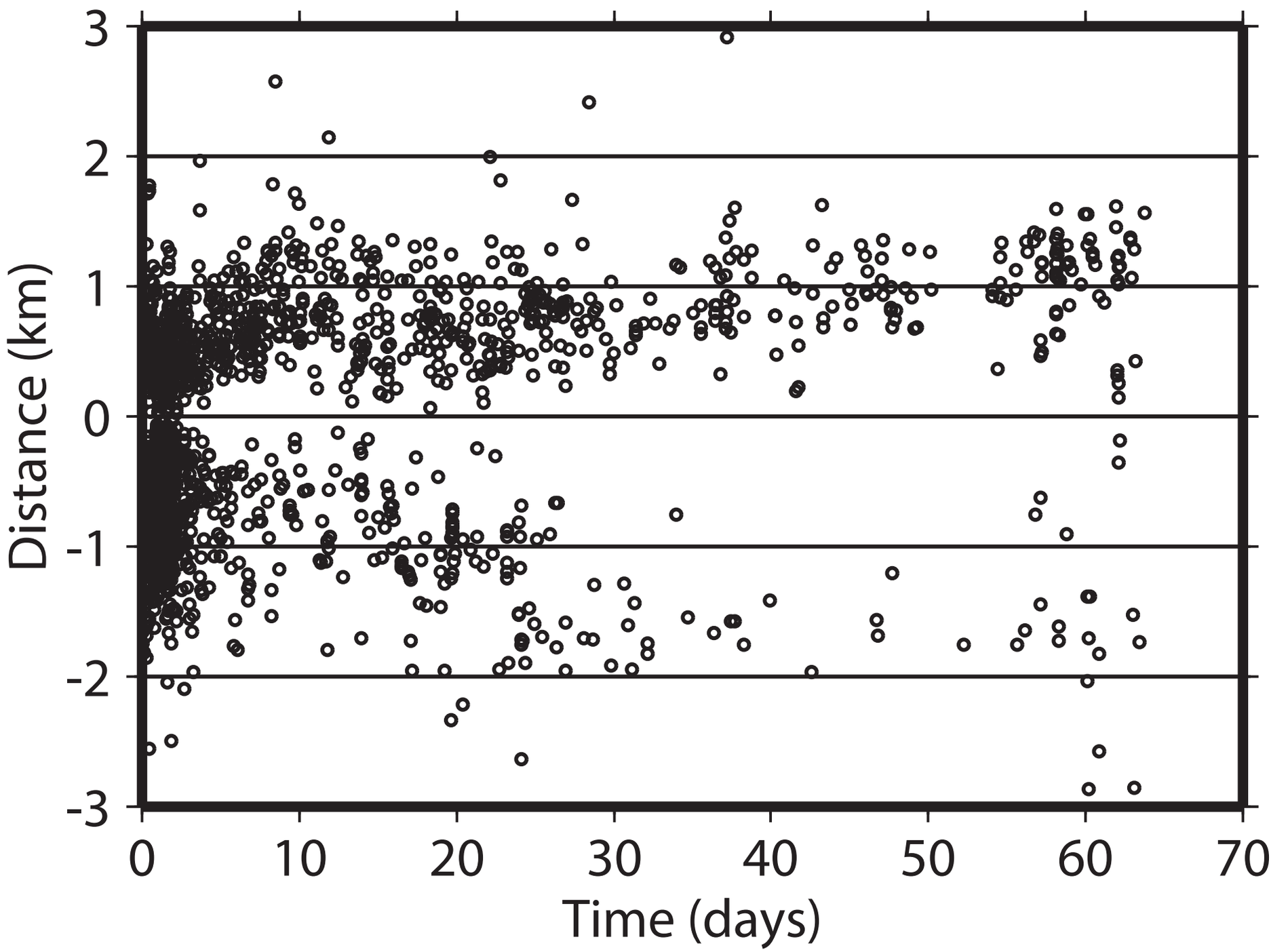

Figure 2. Katsumata and Sasaki

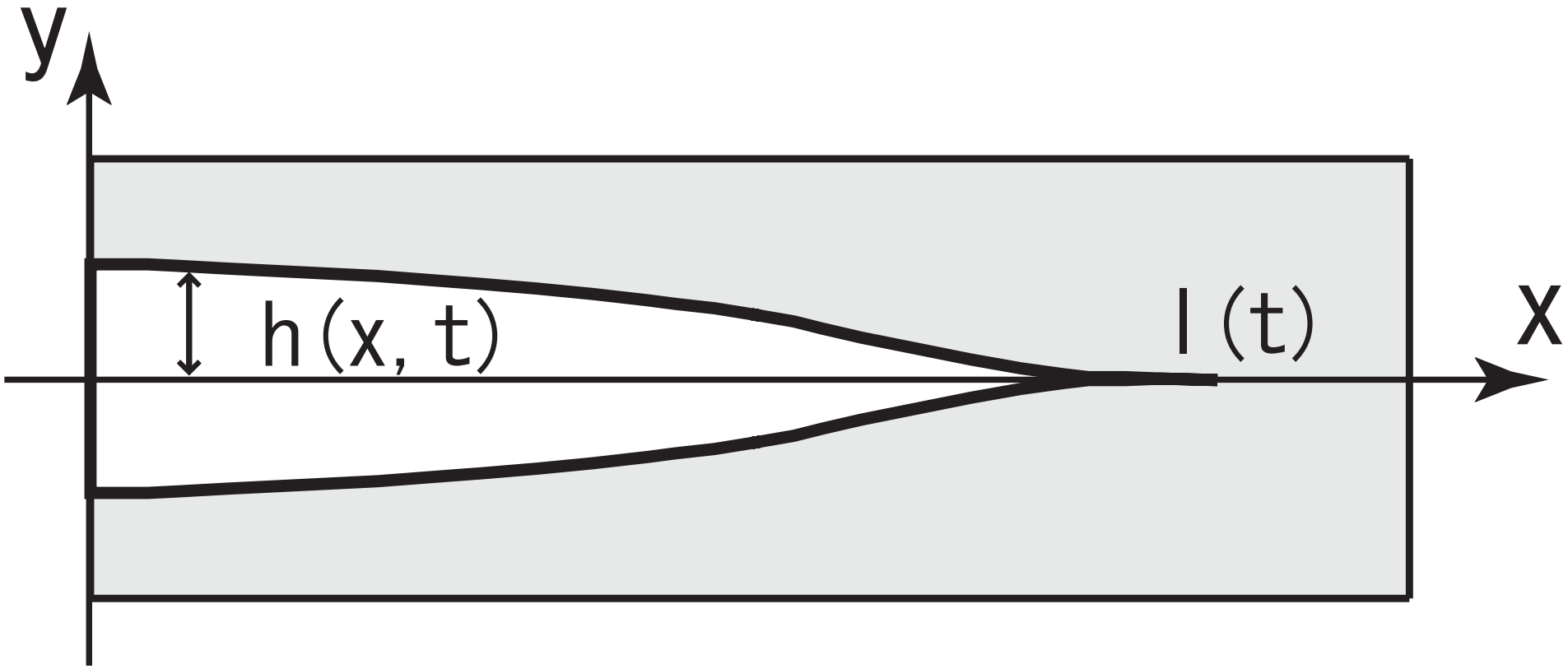

Figure 3. Katsumata and Sasaki

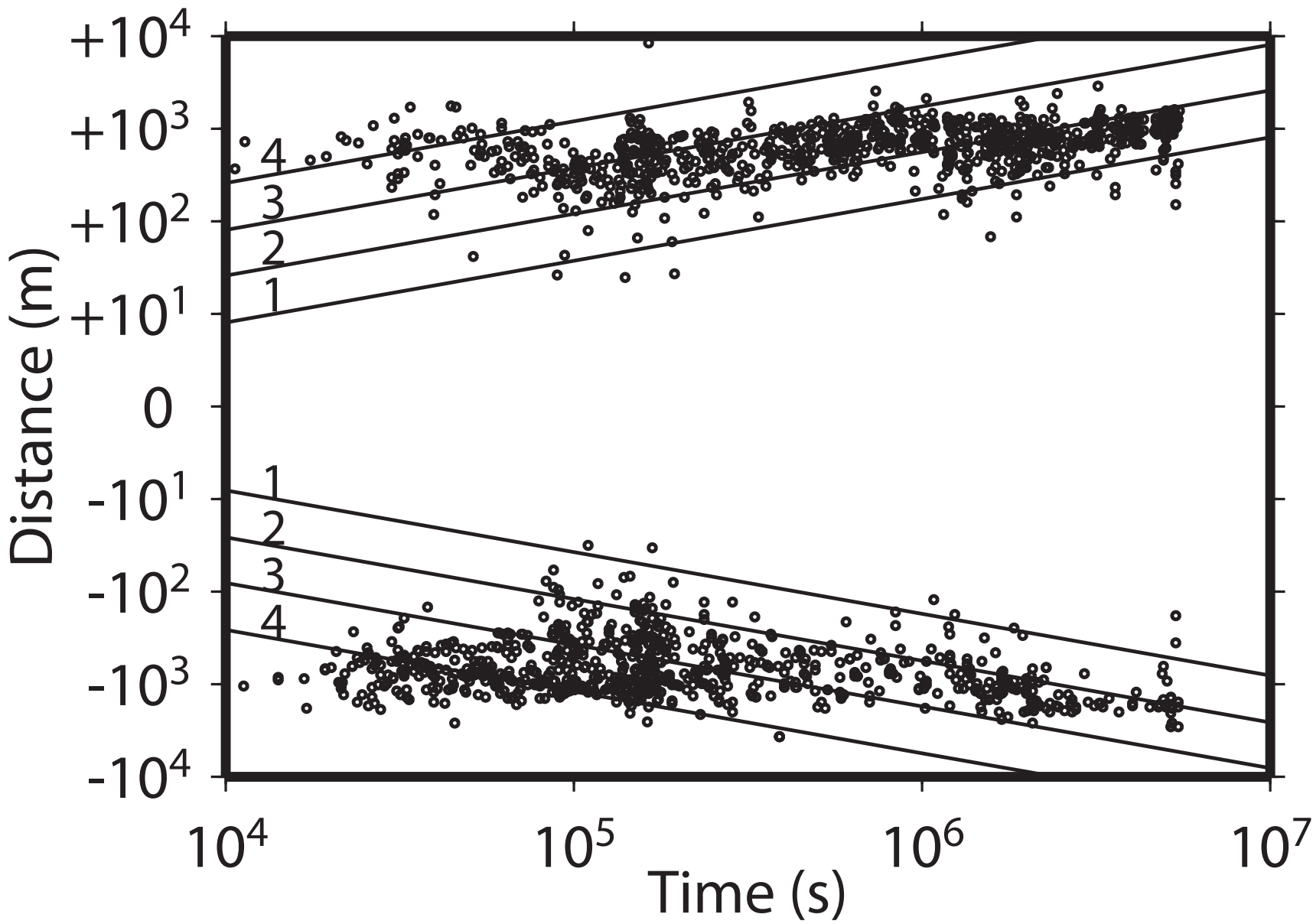

Figure 4. Katsumata and Sasaki