

# 2016年熊本 $M_w$ 7.1 地震前 GPS 形变特征分析\*

刘晓霞, 江在森, 冯蔚

(中国地震局地震预测研究所, 北京 100036)

**摘要:** 利用日本九州岛地区连续 GPS 观测数据, 分析了 2016 年熊本  $M_w$  7.1 地震前的区域地壳变形演化特征。GPS 速度场和应变率场显示, 熊本地震前右旋剪切应变积累区主要集中在断层上盘的九州中部块体 (CKY) 内, 断层下盘的南海弧前块体 (NFY) 和九州南部块体 (SKY) 表现为显著的绕块体中心的逆时针刚性旋转运动; 熊本地震发生在右旋剪切应变率高值区的边缘, 且发震断层附近区域 GPS 应变时序结果显示自 2014 年后右旋剪切应变呈逐渐增强趋势; 平行断层方向的 GPS 速度剖面结果显示发震断层上盘右旋剪切应变积累特征显著, 表现为越靠近断层处的滑动速率越小, 且断层西北侧站点速率随离开断层距离的增加呈非线性趋势变化。另外, GPS 剖面结果显示, 日奈久断层近场存在 1~2 mm/a 的相对滑动, 可能存在浅层蠕滑运动。

**关键词:** 熊本  $M_w$  7.1 地震; GPS 应变率; 震前变形; GPS 速度剖面

**中图分类号:** P315.725

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-0666(2017)03-0458-07

## 0 引言

2016 年 4 月 14 日, 日本九州岛熊本县发生了  $M_w$  6.2 地震, 震源深度约 11 km, 4 月 16 日熊本县再次发生  $M_w$  7.1 地震, 震源深度 12 km。日本气象厅已确定 4 月 16 日所发生的地震为主震, 而在 4 月 14 日发生的地震则为“前震”。这是继 2011 年 3 月 11 日东日本 9.0 级大地震后在日本境内发生的又一次 7 级以上地震。地震发生后, 日本多个研究机构的学者迅速对此次地震的震源机制、地表破裂方式和地表变形等进行了分析研究 (Shirahama *et al.*, 2016; Yagi *et al.*, 2016; Ozawa *et al.*, 2016; Asano, Iwata, 2016; Kubo *et al.*, 2016; Fujiwara *et al.*, 2016; Toda *et al.*, 2016), 确定了此次熊本地震的发震断层为日本南部九州地区的日奈久断层带和布田川断层带, 断层走向分别为 205° 和 235°, 日奈久断层带以右旋走滑为主, 而布田川断层带为右旋走滑兼少量正断成分。此次地震造成了布田川断层带东段和日奈久断层带北段近 34 km 的地表破裂, 最大右旋错动位于破裂带的中间地带, 量值达 220 cm, 大部分地表破裂是主震造成的 (Shirahama *et al.*, 2016)。由于阿苏山火山

群岩浆的作用, 地表破裂北东向传播至阿苏山火山群处终止 (Lin *et al.*, 2016)。熊本地震的发震断层是俯冲带近场的次级断裂, 且震中距阿苏山火山群仅数十千米, 这种独特的构造孕育背景下的孕震形变场特征的分析对认识此次地震孕育发生过程具有重要的意义。日本 GEO-NET 网以密集分布的连续 GPS 站而著称, 仅九州岛地区就分布近百个 GPS 连续站, 平均站间距约 18 km, 对熊本地震的震源区实现了全覆盖, 为研究此次熊本地震孕育相关的地壳应变积累过程提供了重要的基础资料。

日本九州岛在菲律宾海板块 4.5 cm/a 的北西向俯冲作用和欧亚板块的阻挡下表现出逆时针旋转的整体运动 (Ikeda *et al.*, 2009)。2011 年日本宫城 9.0 地震的发生造成欧亚板块和太平洋板块间长约 400 km 闭锁段解锁, 影响范围达上千千米, 持续时间达数年之久 (Baek *et al.*, 2012; Shestakov *et al.*, 2012; 王丽凤等, 2013; Shao *et al.*, 2016), 因此本文在分析此次熊本地震前的地壳变形避开了日本地震的震后余滑响应阶段和粘弹性松弛效应的早期阶段, 所采用的 GPS 观测数据时间段为 2012 年 10 月至 2016 年 3 月。

美国内华达州大地测量实验室的 Blewitt 等

\* 收稿日期: 2017-04-06.

**基金项目:** 国家自然科学基金国际 (地区) 合作与交流项目 (41461164004) 和中国地震局地震预测研究所基本科研业务专项 (2014IES010101) 联合资助.

(2009) 利用 GIPSY 软件对全球连续 GPS 资料进行了处理, 获取了全球连续 GPS 站的坐标时序结果 ([http://geodesy.unr.edu/gps\\_timeseries/](http://geodesy.unr.edu/gps_timeseries/))。本文基于其处理的 ITRF08 全球参考框架下 GPS 坐标时间序列资料计算了九州岛及周边地区 2012 年 10 月至 2016 年 3 月的扣除九州岛整体刚性运动的区域无旋转速度场, 并基于最小二乘配置球面应变计算方法获取了九州岛地区的主应变率场, 并结合震源区近场多站组合的应变参数时序动态特征, 分析了熊本  $M_w7.1$  地震前的区域地壳变形特征。基于扣除块体整体刚性运动的速度场结果, 针对两条发震断层 (布田川断层带和日奈久断层带) 进行 GPS 速度剖面分析, 探讨此次地震前两条发震断层的运动和变形特征。

# 1 熊本 $M_w7.1$ 地震前 GPS 速度场分析

ITRF 框架下 GPS 点的位移所描述的是 GPS 点在全球框架下的运动, 包含站点所在块体的刚性旋转运动, 块体内部变形和断层变形等信息, 孕震区和断层近场这种小尺度的区域变形信息往往被框架和块体的整体运动所覆盖, 因此如要识别孕震区和断层近场应变积累特征, 需要获取区域无旋转的速度场, 以削弱全球框架和块体整体运动的影响。考虑到 2011 年日本  $M_w9.0$  级地震的震后效应和 GPS 时间序列资料完整性, 本文计算了 2012 年 10 月至 2016 年 3 月九州岛地区位于 ITRF08 框架下的平均速度场, 并基于块体整体刚性旋转模型 (李延兴等, 2003) 计算了日本九州岛的块体旋转参数。结果显示九州岛块体旋转欧拉极位于 ( $47.9^\circ\text{W}$ ,  $30.4^\circ\text{N}$ ), 旋转角速度为  $1.15\text{ deg/Ma}$ , 基于该欧拉矢量获取了九州岛区域无旋转基准的速度场 (图 1), 在计算过程中对 GPS 时间序列中的奇异值和台阶进行了处理。

图 1 区域无旋转速度场结果显示, 以熊本地震的发震断层为界, 两侧地块表现出明显的差异运动, 九州中部地块 (CKY) 内的站点一致向 NE 方向运动, 越靠近熊本地震发震断层, 运动速率值越小, 表现出一定的应变积累特征。发震断层东侧的南海弧前块体 (NFY) 内的站点主要以北西向运动为主, 靠近断裂带的站点转向南西向运动, 且运动速率有所减小, 说明块体内部存在一定的

挤压应变积累; 九州南部块体 (SKY) 向南东方向运动, 前缘站点的速率快于靠近块体边界的站点, NFY 地块和 SKY 地块整体表现出逆时针旋转运动。CKY 地块与 NFY 地块存在明显的差异运动, 表现出显著的相对右旋走滑运动, 与此次地震的水平同震响应特征相符。

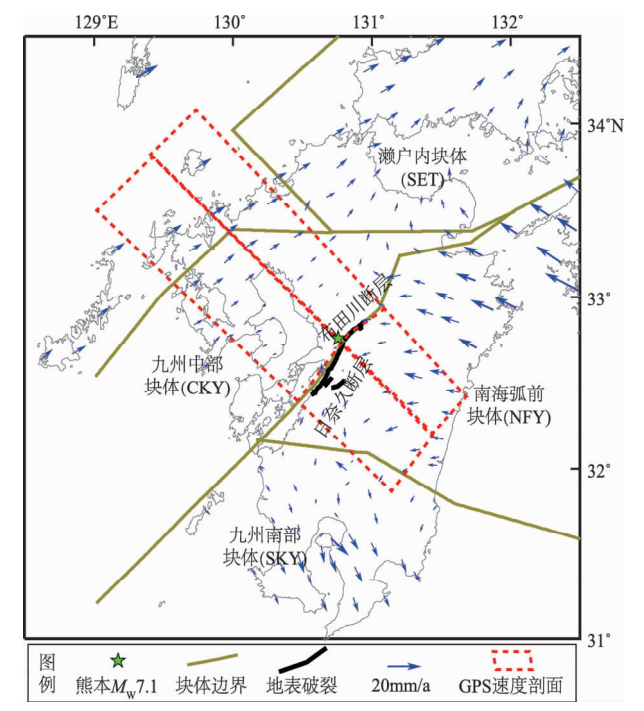


图 1 扣除九州岛整体刚性旋转的 GPS 速度场 (图中块体的划分参考 Nishimura 等, 2006, 2015)  
Fig. 1 Residual velocity in Kyushu after removing the whole rotating component (The blocks' boundary refers Nishimura *et al.*, 2006, 2015)

# 2 GPS 应变率场分析

本文所给出的基于站点时序资料获取的速度场, 能够较直观地反映熊本地震前九州岛地区与断层-块体构造关联的地壳运动特征, 识别出发震断层较为清晰的右旋剪切的地壳相对运动背景。为进一步识别震源区及周边地区的应变空间分布情况, 本文基于最小二乘配置球面应变计算方法 (Wu *et al.*, 2011), 进一步计算了九州岛地区的应变率场空间分布特征。第一剪应变定量表征  $N45^\circ\text{W}$  和  $N45^\circ\text{E}$  走向的剪切变形 (江在森等, 2003), Liu 等 (2015) 依据该参数研究了芦山地震前 NE 向的龙门山南段的应变积累状态。熊本地震两条

发震断层走向近 NE 向，第一剪应变参数可有效地反映该地区的剪切变形特征，而面应变参数可以反映某个地区的面膨胀和面收缩情况。因此，本文据图 1 中速度场资料计算了九州岛地区的 GPS

速度场经验协方差的高斯模型参数  $K$  为 0.008 507（江在森，刘经南，2010），基于该参数解算了该区应变率场，获取的主应变率、第一剪应变率和面应变率场结果（图 2）。

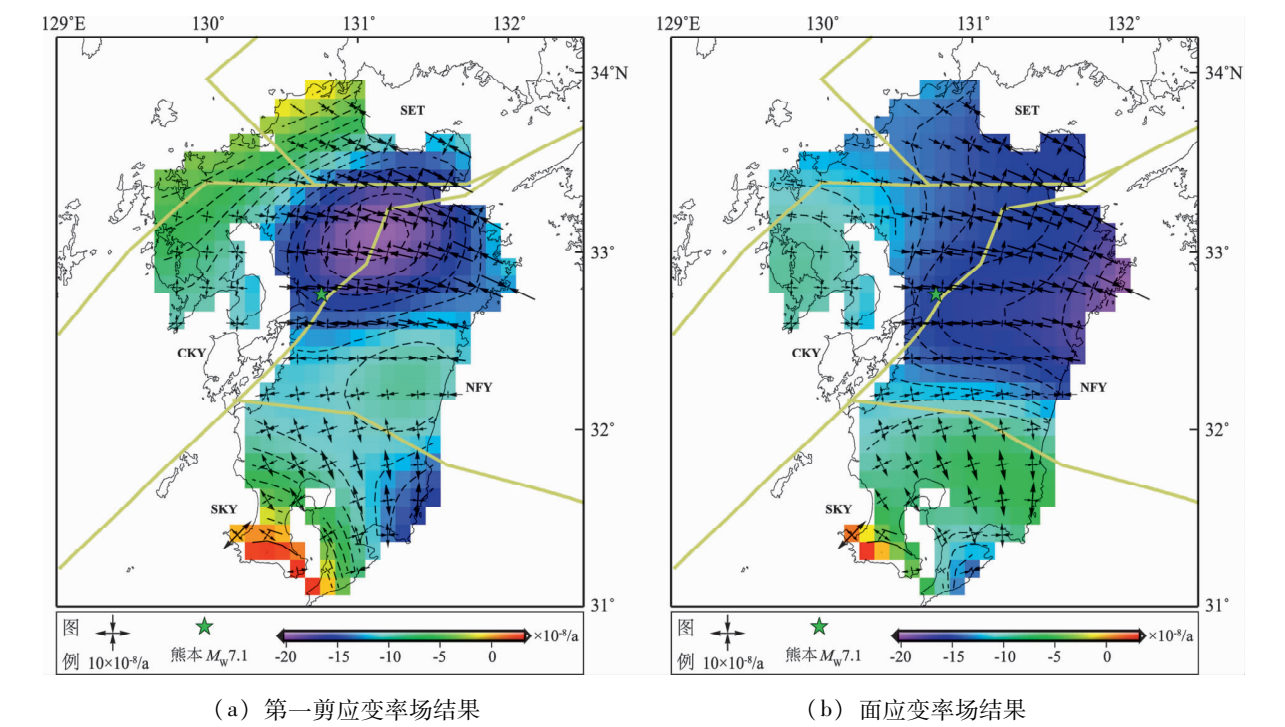


图 2 九州岛地区 GPS 主应变率分布

Fig. 2 The main strain rate field from GPS in Kyushu island area.

图 2 给出了九州岛地区的第一剪应变率和面应变率分布结果，其中第一剪应变率正值表征北东向左旋剪切变形，负值表征北东向右旋剪切变形。图 2 结果显示，九州岛地区主压应变率方向自北向南由 NW 向逐渐转为 SW 向，在熊本  $M_w 7.1$  震源区周边为近 EW 向的主压应变率占主导，主张应变率方向近南北向，且震源区北东侧区域为主压应变率高值区；SKY 地块内北西向的主张应变率占主导，与 NFY 和 CKY 的主应变状态差异显著。图 2a 结果显示，第一剪应变率负高值区沿 NFY 和 CKY 地块边界带的北东段分布，量值达  $-20 \times 10^{-8}/a$ ，由第一剪应变的物理意义可知该区为显著的右旋剪切变形，而此次熊本地震发生在第一剪应变率负高值区的边缘地带。图 2b 面应变率结果显示，发震断层西北侧为面收缩低值区，范围与第一剪应变负高值区一致，九州岛地区只有 SKY 块体表现出面膨胀特征。

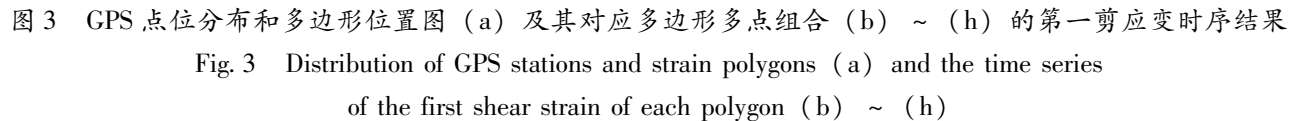
在数据精度较高的情况下，三角形应变计算

方法可以有效研究局部区域应变分配特征（Shen *et al*, 1996）。本文基于 GPS 站点坐标时序进一步计算了震源区附近多个多边形的应变参数，并利用小波方法对时序资料进行了趋势拟合，考虑到此次熊本地震为北东向断层右旋走滑型地震，图 3 仅给出了震源区附近几个多边形的第一剪应变时间序列结果。

图 3 结果显示，震源区北侧 4 个多边形的第一剪应变呈负值变化趋势，说明该区域表现为 NE 方向的右旋剪切变形，时序资料显示自 2014 年开始右旋剪切变形有明显增强趋势，且第一剪应变累积量由北向南逐渐递减。震源区北侧多边形 J700\_J465\_J701\_G070 第一剪应变累积量达  $-80 \times 10^{-8}$ ，自 2014 年 3 月第一剪应变线性趋势显著加快，年均速率由  $-13.3 \times 10^{-8}/a$  增加到  $-20 \times 10^{-8}/a$ ；紧邻震源区的多边形 J465\_J701\_G169 也表现出类似的加快变形趋势，第一剪应变率由  $-6 \times 10^{-8}/a$  增加到  $-18 \times 10^{-8}/a$ ；包含震中的三



示日本宫城 9.0 级地震的震后余滑影响在 1.5 a 左右结束,震后 1 a 粘弹性松弛的效应在九州岛地区仅为 2~5 mm,震后 10~50 a 的粘弹性松弛影响的大小为 2 mm。熊本地震震源区附近的三角形第一剪应变自 2014 年开始明显加速,至发震前的累积第一剪应变量达到 -40 nano,因此认为 GPS 反映的第一剪应变加速过程与日本宫城 9.0 级地震的影响无关,可能是熊本地震的震前预滑行为。



久断层的速度分量由远处的 9.5 mm/a 衰减至断层近场的 -2 mm/a, 从断层西北侧 CKY 块体内的站点滑动速率随距离衰减的趋势可以看出, 越远离断层, 站点速率变化越平缓, 说明 CKY 块体内部右旋剪切变形积累显著, 第一剪应变率结果也显示震源区西北侧为右旋剪切应变的高值区, 说明此次熊本地震前的右旋剪切应变积累主要发生在上盘区域, 且布田川断层带和日奈久断层带可能处于闭锁状态。2 条断层东南侧 NFY 块体内的站点运动主要表现出块体的整体运动, 应变积累特征不显著。垂直断层的速度剖面结果 (图 4b, d) 显示断层西北侧存在一定的挤压应变积累现象, 而东南侧块体内的站点应

变积累特性不显著,由图 1 也可以看出,断层东南侧块体整体主要呈逆时针旋转,布田川断层带和日

奈久断层带为旋转差异运动的边界带,因此主要表现为剪切变形的特征。

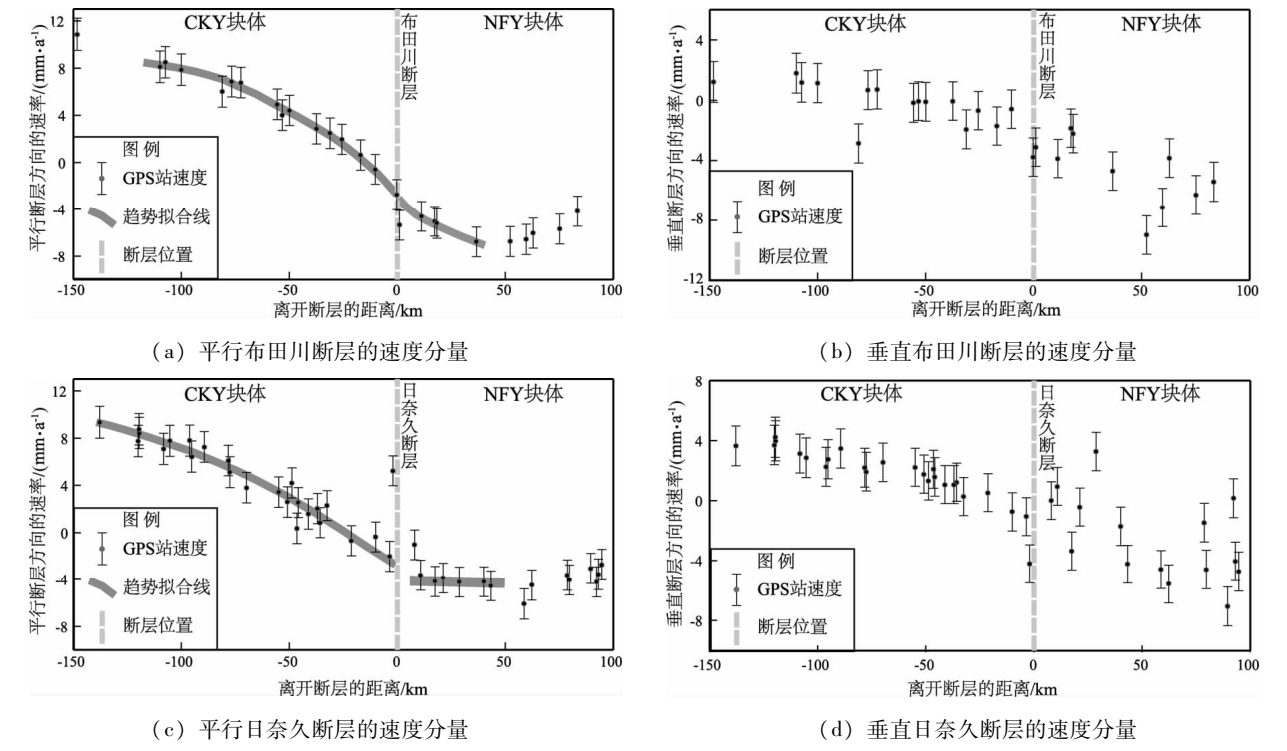


图 4 跨布田川断层和日奈久断层的 GPS 速度剖面

Fig. 4 GPS profiles across the Futagawa fault zone and the Hinagu fault zone

由平行日奈久断层的速度分量(图 4c)可以看出断层近场表现出明显的错动,这种断层处的明显错动与浅层蠕滑深部闭锁的走滑断层的剖面变形模式(Lyons *et al*, 2002; Smith - Konter *et al*, 2011)类似,且从震后 1 天的余震分布来看,日奈久断层处的余震主要分布在 5 km 以下的深度范围(Kubo *et al*, 2016; Yagi *et al*, 2016),这可能预示着日奈久断层在浅层岩石圈内为蠕滑运动,但深部地壳存在一定的闭锁。

4 结论和讨论

本文通过对熊本地震前的 GPS 资料的处理和分析,得到以下几点认识:

(1) 扣除九州地区整体运动的 GPS 速度场分布和剖面分析表明,熊本地震断层东南侧块体呈显著的逆时针刚体旋转运动,而断层西北侧呈现右旋剪切变形特征,显示断层上盘为主要的右旋剪切应变积累区。布田川断层和日奈久断层的右

旋滑动速率相当,近场均存在 1 ~ 2 mm/a 的滑动,略高于 Ikeda 等(2009)给出的 0.8 mm/a 的滑动速率。

(2) 基于最小二乘配置球面应变计算方法获取的主压应变率方向为 NWW 向,与该区主要的构造动力来源于菲律宾板块俯冲作用一致。熊本地震发生在第一剪应变负高值区的边缘,并且该区域处于面收缩低值区,与江在森等(2006)的研究得出的强震通常分布在地壳差异运动显著区,尤其是与区域主干断裂的构造活动背景相一致的剪应变率高值区边缘的认识相符,此次熊本地震正好发生在右旋剪切应变率高值区的边缘。

(3) 发震断层附近区域 GPS 站点组成图形单元的第一剪应变时序结果显示自 2014 年左右开始右旋剪切应变显著增强,不同图形单元剪应变增强的显著程度自北向南逐渐衰减,与应变率场给出的第一剪应变率负值极值区分布在震中西北侧具有一致性,这可能说明应变率高值区在熊本地震前区域构造应力场增强过程也相对容易发生地

壳变形。

(4) 值得关注的是平行断层的 GPS 速度剖面结果显示, 虽然断层西侧的右旋走滑速率是随着距离靠近断层逐渐衰减, 但到达断层处表现出明显的阶跃, 也就是日奈久断层两侧块体在断层近场存在  $1 \sim 2 \text{ mm/a}$  明显的错动。Ozawa 等 (2016) 对 InSAR 形变的研究指出与此次地震相关的断层段可能存在不同程度的浅层蠕滑。

(5) 熊本地震的地表破裂显示在布田川断层段是右旋剪切兼正断的应变释放 (Shirahama *et al.*, 2016), 但从垂直断层的 GPS 速度剖面结果 (图 4b) 来看, 断层上盘表现为地壳缩短的变形特征, 断层下盘近场 25 km 范围内的站点表现出弱拉张变形, 但不显著。Shinji 等 (2016) 在分析地表破裂滑动分配问题时考虑了布田川断层东侧 2 km 处的 Idenokuchi 断层的影响, 分析认为布田川断层为纯右旋走滑断层, Idenokuchi 断层为正断活动断层, 受 GPS 站点密度的影响, GPS 形变场无法区分两条断层的差异运动。

本文在研究和撰写过程中得到了邵志刚研究员的指导和建议, 本文所用的 GPS 资料为 Blewitt 教授解算结果, 数据下载地址由顾国华研究员提供。在此向提供指导建议和数据的学者表示诚挚的感谢。

## 参考文献:

江在森, 刘经南. 2010. 应用最小二乘配置建立地壳运动速度场与应变场的方法[J]. 地球物理学报, 53(5): 1109–1117.

江在森, 马宗晋, 张希, 等. 2003. GPS 初步结果揭示的中国大陆水平应变场与构造变形[J]. 地球物理学报, 46(3): 352–358.

江在森, 杨国华, 王敏, 等. 2006. 中国大陆地壳运动与强震关系研究[J]. 大地测量与地球动力学, 26(3): 1–9.

李延兴, 杨国华, 李智, 等. 2003. 中国大陆活动地块的运动与应变状态[J]. 中国科学: 地球科学, 33(增刊1): 65–81.

王丽凤, 刘杰, 赵金贵, 等. 2013. 2011 年日本 9.0 级地震的同震位错以及震后应力松弛过程对中国大陆的影响[J]. 地震, 33(4): 238–247.

ASANO K, IWATA T. 2016. Source rupture processes of the foreshock and mainshock in the 2016 Kumamoto earthquake sequence estimated from the kinematic waveform inversion of strong motion data[J]. Earth, Planets and Space, 68(1): 147.

BAEK J, SHIN Y H, NA S H, *et al.* 2012. Coseismic and postseismic crustal deformations of the Korean Peninsula caused by the 2011  $M_w 9.0$  Tohoku earthquake, Japan, from global positioning system data[J].

Terra Nova, 24(4): 295.

BLEWITT, C., KREEMER C., HAMMOND W. C. 2009. Geodetic observation of contemporary deformation in the northern Walker Lane: 1. Semipermanent GPS strategy[J]. Geological Society of America, 447: 1–15.

FUJIWARA S, YARAI H, KOBAYASHI T, *et al.* 2016. Small – displacement linear surface ruptures of the 2016 Kumamoto earthquake sequence detected by ALOS – 2 SAR interferometry[J]. Earth, Planets and Space, 68(1): 160.

IKEDA M, TODA S, KOBAYASHI S, *et al.* 2009. Tectonic model and fault segmentation of the Median Tectonic Line active fault system on Shikoku, Japan[J]. Tectonics, 28(5): 396–412.

KUBO H, SUZUKI W, AOI S, *et al.* 2016. Source rupture processes of the 2016 Kumamoto, Japan, earthquakes estimated from strong – motion waveforms[J]. Earth Planets & Space, 68(1): 161.

LIN A, SATSUKAWA T, WANG M, *et al.* 2016. Coseismic rupturing stopped by Aso volcano during the 2016  $M_w 7.1$  Kumamoto earthquake, Japan[J]. Science, 354(6314): 869–874.

LIU X X, WU Y Q, JIANG Z S, *et al.* 2015. Preseismic deformation in the seismogenic zone of the Lushan  $M_s 7.0$  earthquake detected by GPS observations[J]. Science China Earth Sciences, 58(9): 1592–1601.

LYONS S N, BOCK Y, SANDWELL D T. 2002. Creep along the Imperial Fault, southern California, from GPS measurements[J]. Journal of Geophysical Research, 107(B10): ETG 12–1–ETG 12–13.

NISHIMURA S, HASHIMOTO M. 2006. A model with rigid rotations and slip deficits for the GPS – derived velocity field in Southwest Japan[J]. Tectonophysics, 421(3–4): 187–207.

NISHIMURA T, TAKADA Y. 2015. The San – in shear zone in southwest Japan revealed by the GEONET data[C]. AGU Fall Meet. The Moscone Center, San Francisco.

OZAWA T, FUJITA E, UEDA H. 2016. Crustal deformation associated with the 2016 Kumamoto Earthquake and its effect on the magma system of Aso volcano[J]. Earth Planets & Space, 68(1): 186.

SHAO Z, ZHAN W, ZHANG L, *et al.* 2016. Analysis of the Far – Field Co – seismic and Post – seismic Responses Caused by the 2011  $M_w 9.0$  Tohoku – Oki Earthquake[J]. Pure and Applied Geophysics, 173(2): 411–424.

SHEN Z K, JACKSON D D, GE B X. 1996. Crustal deformation across and beyond the Los Angeles basin from geodetic measurements[J]. J Geophys Res, 101: 27957–27980.

SHESTAKOV N V, TAKAHASHI H, OHZONO M, *et al.* 2012. Analysis of the far – field crustal displacements caused by the 2011 Great Tohoku earthquake inferred from continuous GPS observations[J]. Tectonophysics, 5524–525(2): 76–86.

SHIRAHAMA Y, YOSHIMI M, AWATA Y, *et al.* 2016. Characteristics of the surface ruptures associated with the 2016 Kumamoto earthquake sequence, central Kyushu, Japan[J]. Earth, Planets and Space, 68(1): 191.

SMITH-KONTER B R, SANDWELL D T, SHEARER P. 2011. Locking

- depths estimated from geodesy and seismology along the san Andreas fault system; implications for seismic moment release[J]. Journal of Geophysical Research Solid Earth, 116(B6):100–114.
- TODA S, KANEDA H, OKADA S, *et al.* 2016. Slip – partitioned surface ruptures for the  $M_w 7.0$  16 April 2016 Kumamoto, Japan, earthquake [J]. Earth, Planets and Space, 68(1):188.
- WU Y, JIANG Z, YANG G, *et al.* 2011. Comparison of GPS strain rate computing methods and their reliability[J]. Geophysical Journal International, 185(2):703–717.
- YAGI Y, OKUWAKI R, ENESCU B, *et al.* 2016. Rupture process of the 2016 Kumamoto earthquake in relation to the thermal structure around Aso volcano[J]. Earth, Planets and Space, 68(1):1–6.

## Pre – seismic Deformation of the 2016 Kumamoto $M_w 7.1$ Earthquake Detected by GPS Observations

LIU Xiaoxia, JIANG Zaisen, FENG Wei

(*Institute of Earthquake Forecasting, China Earthquake Administration, Beijing 100036, China*)

### Abstract

We studied the characteristics of crustal deformation and variations of deformation in short terms before the 2016 Kumamoto  $M_w 7.1$  earthquake by using continuous GPS in Kyushu Island. The GPS velocity and strain rate field between Oct. 2012 and Mar. 2016 showed dextral shear movements between two sides of the causative fault and most strain accumulated by the west side block named CKY block. Otherwise, the velocity field in blocks NFY and SKY which are located in the east side of the causative fault showed typical counterclockwise rotation. The epicenter of the Kumamoto earthquake locates at the edge of the highest dextral shear strain area, and time – series of the first shear strain showed dextral strain was gradually increased from 2014. What's more, the GPS profiles across the Hinagu fault showed significant dextral shear strain accumulation with 1 ~ 2 mm/a relative slip rate in near – field, which may indicated creep movement of the Hinagu faults in upper crust area.

**Keywords:** the 2016 Kumamoto  $M_w 7.1$  earthquake; GPS strain rate; pre-seismic deformation; GPS velocity profiles