

## 中国全球地震台网建设预研

# 日本海洋实时监测系统 DONET 简介\*

申中寅<sup>※</sup>

(中国地震局地球物理研究所, 北京 100081)

**摘 要** 近年来,我国地震观测取得了长足进展,同时海底观测系统的建设也方兴未艾。而欧美及日本等发达国家在海底有线实时监测的成功先例,为我国相应工作的开展提供了良好的参考及借鉴。其中日本海底有线实时监测系统 DONET 始建于 2011 年,专注于海底地动—水压信号的高效采集,旨在监视日本南海海槽的地震和海啸事件。本文主要介绍 DONET 的硬件布局、搭建流程以及科研产出情况,并简要介绍我国国家海底科学观测网的基本信息。

**关键词** 海底观测网; DONET; 日本南海海槽; 国家海底科学观测网

**中图分类号:** P315 **文献标识码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.0253-4975.2018.07.007

## 引言

伴随海底通讯产业的发展,水下供电及数据传输技术日趋成熟,海底有线实时观测成为继潜水器和水下机器人之后新兴的海洋调查方法。其搭建方式大致可分为既有线路改造和新系统架设两种。前者主要基于 20 世纪 90 年代停用的太平洋海底通信线缆,如美国的 H2O(Hawaii-2 Observatory)和日本的 GeO-TOC(Geophysical and Oceanographical Trans-Ocean Cable)。后者则以加拿大 NEPTUNE 系统(North-East Pacific Time-Series Undersea Networked Experiments)为代表,包括美国、加拿大、欧盟所规划建设的一系列海底有线观测项目<sup>[1]</sup>。

NEPTUNE 以陆基台站为起点沿海底向外洋延伸通信供电线缆,后者藉由特定连接

装置搭载一系列固定观测仪器(搭载化学传感器及水样采集装置的自动升降浮标、流向流速计、声学多普勒流速剖面仪、声波层析成像仪和浮游生物相机)和海底接地型观测仪器(海底观测平台、地震仪和重力仪)。类似的有线式综合海洋环境监测系统还有沿岸 VENUS 系统(加拿大, Victoria Experimental Network Under the Sea)和 MARS 系统(美国, Monterey Accelerated Research System)。辅以自动潜水器定期探测, NEPTUNE 系统能实现海洋底层科学参数的连续采集,是海洋过程研究的必备基础<sup>[2]</sup>。

日本海洋研究开发机构(Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, JAMSTEC)自 2006 年起便开始着手高密度地震—海啸实时观测网的建设(Dense Oceanfloor Network system for Earthquakes and Tsunamis, DONET),以期监测日本南海海槽的高危地震—海啸活动(图 1)。其中日本东南海区段的 DONET1 于

\* 收稿日期: 2017-10-17; 采用日期: 2017-10-30。

※ 通信作者: 申中寅, e-mail: shen\_zhongyin@163.com。

基金项目: 地震行业科研专项: 中国全球地震台网建设预研(201508007)资助。

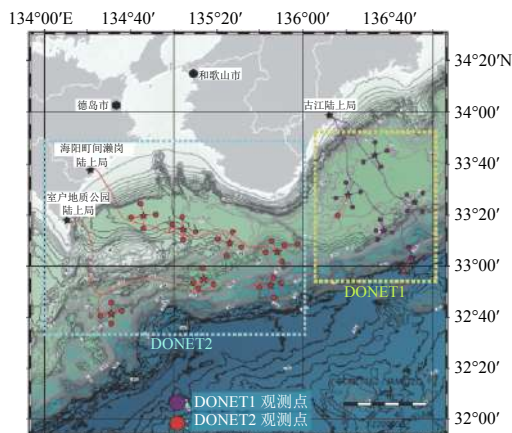


图1 DONET 分布示意图(原图引自 JAMSTEC)

2011 年竣工,而日本南海区段的 DONET2 则于 2016 年竣工。相对 NEPTUNE 系统, DONET 重点关注地震和地壳变动等地动信号的监测,为此日本海洋学会提议增设海洋化学—生物学观测群,以实现物理—化学—生物的综合观测<sup>[2]</sup>。

## 1 DONET 概况

截止 2017 年 3 月, DONET1/DONET2 拥有 22 个/29 个观测点,积累了超过 5 年/1 年的观测数据<sup>[3]</sup>。DONET 的台站平均间距为 15—20 km,覆盖了从近岸到海沟的广大区域<sup>[4]</sup>。经后续改造,个别 IODP(Integrated Ocean Drilling Program)的海底钻孔观测点也以有线方式接入 DONET 的实时数据流<sup>[5]</sup>。高密度观测为仪器的安装调试和运行维护带来了诸多不便。这就要求观测系统在具备风险抵御能力的同时,还应兼顾水下作业的便捷性和质量管理的可行性。事实上,日本早在 2002 年便已着手论证海底有线科学观测的可行性及技术方案,并于次年提出环绕日本列岛的 ARENA(Advanced Realtime Earth Monitoring Network in the Area)观测系统<sup>[6]</sup>。作为 ARENA 在南海海槽的局部实现, DONET 受惠于 ARENA 的人才和技术储备,同时也为后者的全面展开提供宝贵经验以及有益的社会反馈。

## 1.1 基本参数

DONET 由观测装置、科学节点(Scientific Nodes)、基干线缆系统组成。海底实时监测要求基干线缆稳定可靠,科学节点可供更换,观测仪器便于拓展。

海底通讯产业为 DONET 基干线缆提供了成熟的技术支撑和可靠的产品保障。基干线缆系统以基干线缆为骨架,由中继器(Repeater)、分路器(Branching Units)和终端单元(Termination Units)等控制元件组成。基干线缆兼具直流供电和光纤通信功能,由陆基终端向大洋延伸构成闭合环路以满足系统冗余要求。线缆光纤每隔 40—60 km 便设有中继器用于信号增益及监控。分路器受控于基干线缆的控制光纤,可调节科学节点负载。附有水声信标的终端单元为遥控无人潜水器(Remotely Operated Vehicle, ROV)提供科学节点的操作界面,是后者联系基干线缆的纽带。

科学节点藉由水下光电插拔连接器同基干线缆断连,其中共设有 8 组观测点光电连接器,每组可对应一个观测点。科学节点是基干线缆系统和末端观测群的连接中枢,兼具负载调配、数据控制、授时等功能。除个别情况, DONET 的科学节点普遍连有 4 个观测点,剩余连接接口可供系统拓展及冗余配置要求。

观测点安装有强震计、宽频带地震计、石英水压计、微差压计、水听器 and 温度计等观测装置群,能有效捕捉从地壳变动到海底振动的各频段地动信号和海啸波动。相对基干线缆,科学节点和观测点之间的延长线缆较为纤细,以便 ROV 作业的开展。

## 1.2 施工流程

DONET 施工可大致分为基干线缆铺设、科学节点放置和仪器安装 3 个步骤。为确保海底基干线缆良好的工作环境以及 ROV 水下作业的顺利进行, DONET 预先开展了线路勘察和海啸冲击模拟等准备措施。为避免浅海渔业和船只抛锚的影响,水深不足 1 000 m

的海底线缆均被掩埋。基干线缆铺设由专用船舶沿规划路线拖航完成。到达指定点位后,船只投放终端单元,后者借助水声信标引导 ROV 运载科学节点完成定位和连接工作。ROV 全程参与了科学观测仪器的安装以及延长线缆铺设作业,是 DONET 施工的重要环节。

鉴于海底水流的强烈扰动和 underwater 施工难度, DONET 的地震计采取浅坑覆盖掩埋的方法压制背景噪声<sup>[1]</sup>。工程人员通过 ROV 在指定地点钻孔一封套一清淤,随后在孔内及海底表面分别安装地震计和其他仪器(水压计和温度计)。随后用延长线缆连接观测仪器及对应科学节点,最后灌砂掩埋孔内的地震仪。受海底介质等实际工况条件限制, DONET1 的部分台基出露于海底,这些点位显著增强的背景噪声佐证了降噪作业是必要的<sup>[7]</sup>。

### 1.3 仪器工况

在众多观测仪器中,地震计对摆放方向有着明确的要求,后者直接影响了水平地动分量的准确测量。而水下地震计的定位安装只能藉由 ROV 及其摄像装置远程操控实现,潜在误差巨大。JAMSTEC 采用多种方法评估 DONET 海底地震计的定向情况<sup>[8]</sup>。其中包括:①陆基台站长周期波形互相关;②远震 P 波初动方向;③气枪震源的质点运动轨迹。研究表明海底地震计的定向偏差普遍在 10°左右,部分观测点甚至可达 50°。这些定量估计结果提供了数据后续校正处理的重要参数,也从侧面反映了水下作业的艰难。

另一方面,深水压力也会造成水压计的漂变,进而妨碍对地壳变动及海啸扰动的监测。为此 JAMSTEC 设计建造了专门的海底温压模拟设备,用于压力计的工况评估和漂变校正<sup>[9]</sup>。同时,参考水听计也被置于观测点旁以对比原水听计的观测结果<sup>[10]</sup>。针对 DONET 海底形变观测需要, JAMSTEC 与日本东北大学开展了 GPS/声学海底定位方法的联合研究,提高了海底定位的实时性和精度<sup>[11]</sup>。

### 1.4 DONET2

DONET1 于 2011 年竣工,其中的 5 个科学节点连接着 20 个观测点,随后又增设了 2 个观测点。DONET2 于 2016 年竣工,包括 7 个科学节点及其对应的 29 个观测点。由于观测规模和覆盖区域的扩大, DONET2 针对电力和信号负载的增加调整了系统的供电和数据传输模式<sup>[12]</sup>。为适应 DONET2 施工过程中更大的浮力变化范围, ROV 的浮力调控系统也得到升级改造。在 DONET1 建设过程中,由于部分台址地基过于致密,活塞取芯难以有效向下深入掘进,致使地震计未能按设计要求进行浅坑掩埋,严重影响了观测质量。DONET2 利用水压震动锤解决了这一难题,并成功应用于 4 个观测点位的台基施工。此外,为确保延长线铺设质量并减轻作业人员负担, DONET2 采用了全自动延长线铺设技术<sup>[13]</sup>。这些技术革新为未来的海底有线观测系统建设提供了有益的参考。

## 2 基于 DONET 开展的科学研究

作为毗邻人口稠密区的强震孕震带,日本南海海槽一直是科学研究的关注热点。DONET 通过专门的数据管理平台(JAMSTEC Ocean-bottom Seismology Database)将该区域的海底地动—水压信号实时传送至有关职能部门,并向科学研究团体提供数据的归档下载服务,为区域地震—海啸预警以及后续科学研究提供了可靠的数据保障。DONET 显著扩展了日本列岛地震台网的覆盖,有效提高了区域地震的观测和定位能力。根据区域微震监测的需要, JAMSTEC 改造升级了原有的地震数据处理系统<sup>[14]</sup>。与此同时,研究者通过分析海底低速沉积层对地震波振幅以及震级测定的影响,定量评估了 DONET 台站的震级偏差情况<sup>[15]</sup>。而数值模拟研究则揭示出海底水压变化与海啸波高的关联,提高了海啸预警的实效性和精确度<sup>[16]</sup>。结合仪器工况的校验,这些软件的投入最大限度的确保了 DONET

地震—海啸监测机能的良好运转,是硬件建设不可或缺的配套补充。

DONET 积累的详实地动—水压资料有力推动了区域精细结构和地震机制的科学探索。其中地震—水压数据被联合用于南海海槽增生楔的剪切波速反演<sup>[3]</sup>。基于 DONET 的地震精定位和震源机制结果,研究者揭示了南海海槽板块构造的次级结构及其运动规律<sup>[17]</sup>。而孕震区近场观测<sup>[18]</sup>和应力监测<sup>[19-21]</sup>则有助于对大型逆冲地震的前兆探索。慢滑事件引发的地壳形变会造成 DONET 水压观测的差异变化,后者同地震活动性的相互关联暗示了孕震机制的新线索<sup>[22]</sup>。

DONET 不仅是陆基台网在数量上的扩展,更为整个地震观测带来质的飞跃。DONET 成功记录到水下滑坡的地震信号<sup>[23]</sup>,还澄清了甚低频地震(Very Low Frequency Earthquake)与低频震颤(Low Frequency Tremor)的内在一致<sup>[24]</sup>。特别地,研究者从 DONET 地震记录中提取了“3·11”东日本特大地震触发的地方震序列<sup>[25]</sup>。上述研究仅凭现有陆地观测系统无从实现,印证了 DONET 对于在整个地震监测网的重要作用。

与此同时,JEMSTEC 还充分发掘了 DONET 水压观测在地震研究中的应用潜力。海底水压信号被用以约束海啸地震的震源破裂区及其垂向位移<sup>[26]</sup>。而海啸地震的海底水压扰动也揭示出地动信号同水压变化的关联<sup>[27]</sup>,暗示了地震—水压资料联合反演的原理基础。目前已开展了利用水压信号甄别上行—下行震相并压制海面反射波的方法研究并取得了一定成果<sup>[28]</sup>。

DONET 数据的科研产出囊括了从日常台网运行维护到常规观测整合,再到基本方法探索,直至热点科学问题的诸多领域,涉及数据流采集、整理、发掘的各个环节。受数据获取渠道限制,这些工作主要由 JAMSTEC 及其日本国内合作机构完成。随着国际合作的广泛开展,DONET 有望成为国际海底有线观测

系统的重要组成部分,发挥更加积极的作用。

### 3 中国的海底实时观测系统

以加拿大 NEPTUNE 为代表,当代海底有线实时观测系统已迈向了海洋物理—化学—生物跨学科综合观测的新时代。相比而言,日本的 DONET 则剑走偏锋,侧重于地震及海啸信号的监测。NEPTUNE 和 DONET 均布设于大洋板块俯冲带的强震高危地段,具有明确的科学及社会意义。相对日本的俯冲岛弧构造背景,我国沿海大陆架宽广,海啸危险不甚显著,而除过台湾海峡,整体强震活动也较为有限。我国的海底实时监测系统结合实际,针对最为迫切的社会和科学诉求,坚持“从易到难,由近及远,自浅至深”的原则,开展了一系列工作<sup>[29]</sup>。2017年5月,国家海底科学观测网正式立项。该项目为期5年,由同济大学和中国科学院声学研究所共建,将在东海和南海的海底分别建立海底有线科学观测网。相对 DONET,该观测系统更加侧重海洋物理—化学—生物的综合全方位观测,重点关注强烈的人类活动影响下的海陆相互作用、海洋环流与沉积搬运、海洋碳循环过程、海底深部过程等4个关键的前沿科学问题,开启了我国海洋研究的新篇章<sup>[30]</sup>。

我国海底观测系统的建设主要采取 NEPTUNE 模式,从而回避了 DONET 测项相对单一的不足,然而,DONET 仍有不少成功经验值得借鉴。纵观选址评估、装置架设的硬件建设以及运行维护、数据管理的软件支撑,DONET 的工作流程及理念是我们当下工作的良好范本。这既包括性能优异的科学观测装备,也需要先进的海底作业技术,更离不开可靠的制度和人事保障。而日本学者对 DONET 数据的全方位深度挖掘则是我国科技人员努力不懈的目标。从 DONET1 到 DONET2, DONET 的建设本身便是一个技术迭代升级的过程。日本工程人员针对实际遇到的问题及时调整方案并改进技术,力争兼



顾作业效率及操作者的体验,为我国的现场施工提供了有益参考。而另一方面,我国与日本国情差别显著,所面临的困难也不尽相同。例如,为避免渔业及航运影响,DONET的浅水线缆均掩埋海底。我国沿海大陆架宽广,浅水范围较大,操作可行的保护措施便成了必须面对的问题。而跨学科的数据流管理则对软件系统建设提出了更高的要求。这就要求我们实事求是,创造性地解决前进中的问题和障碍。

#### 4 结语

本文介绍了日本高密度地震—海啸实时观测网 DONET 的硬件布局及科研产出情况。

DONET 致力于海底地动和水压信号的监测,旨在监测日本南海海槽孕震带的地震及海啸活动。无论是设计施工还是数据质量控制,DONET 都能为我国海底监测系统的建设和维护提供宝贵经验。从地震—海啸监测能力的改善到区域精细结构的阐明,再到地震机理以及地动—水压联合反演的探索,以日本学者为主体的研究团队基于 DONET 数据开展了细致扎实的研究工作。我国的海底有线科学观测网以东海和南海为主要观测区域,于 2017 年正式立项,具有里程碑意义。另一方面,海洋观测,尤其是远洋领海观测,其意义往往不仅止于科学研究及社会福祉,更是海权的申明。这赋予了我国东海和南海海底系留科学观测更为深远的内涵。

#### 参考文献

- [1] 川口 勝義. 深海底リアルタイム観測ネットワークの構築[J]. 日本マリンエンジニアリング学会誌, 2009, 44: 58-63
- [2] 岡 英太郎, 磯辺 篤彦, 市川 香, et al. 海洋学の10年展望(1): 日本海洋学会将来構想委員会物理サブグループの議論から(海洋学の10年展望-「海の研究」特集号-) [J]. 海の研究, 2013, 22: 191-218
- [3] Tonegawa T, Araki E, Kimura T, et al. S-wave velocity structure in the Nankai accretionary prism derived from Rayleigh admittance[C]. EGU General Assembly Conference. EGU General Assembly Conference Abstracts, 2017: 19
- [4] Takaesu M, Horikawa H, Sueki K, et al. Development of an event search and download system for analyzing waveform data observed at seafloor seismic network, DONET[C]. AGU Fall Meeting. AGU Fall Meeting Abstracts, 2014
- [5] Kitada K, Araki E, Kimura T, et al. Long-term monitoring at C0002 seafloor borehole in Nankai Trough seismogenic zone[C]. Underwater Technology Symposium. IEEE, 2013, 20(3): 1-3
- [6] 廖又明. 解读日本 ARENA(新型实时海底监测电缆网络)计划[J]. 船舶, 2005(4): 20-25
- [7] Araki E, Yokobiki T, Kawaguchi K, et al. Background seismic noise level in DONET seafloor cabled observation network[C]. Underwater Technology Symposium. IEEE, 2013, 20(3): 1-4
- [8] Nakano M, Tonegawa T, Kaneda Y. Orientations of DONET seismometers estimated from seismic waveforms[J]. Jamstec Report of Research & Development, 2012, 15: 77-89
- [9] Matsumoto H, Araki E, Machida Y, et al. Utilization of temperature and pressure simulator for ocean-bottom and bore-hole observatories for quantitative crustal deformation[C]. AGU Fall Meeting. AGU Fall Meeting Abstracts, 2015
- [10] Nishida S, Kawaguchi K, Imaizumi T, et al. An evaluation of the performance of a hydrophone on sea floor[C]. Oceans. IEEE, 2014, 39(6): 1-4

- [ 11 ] Fujimoto H, Kido M, Osada Y. Improvement in the observation system for the GPS/A seafloor positioning[C]. AGU Fall Meeting. AGU Fall Meeting Abstracts, 2010, 50( 7 ): 565-568
- [ 12 ] Kawaguchi K, Araki E, Kogure Y, et al. Development of DONET2-off Kii channel observatory network[C]. Underwater Technology Symposium. IEEE, 2013, 20( 3 ): 1-5
- [ 13 ] Yokobiki T, Choi J K, Nishida S, et al. Construction of DONET2[C]. Techno-Ocean. IEEE, 2017: 435-438
- [ 14 ] To A, Becker J, Weber B, et al. Development of a SeisComp3 module for detecting micro earthquakes and its application to ocean bottom network data[J]. Jamstec Rep. Res. dev., 2014, 18: 1-15
- [ 15 ] Nakamura T, Nakano M, Hayashimoto N, et al. Anomalous large seismic amplifications in the seafloor area off the Kii peninsula[J]. Mar. Geophys. Res., 2014, 35(3): 255-270
- [ 16 ] Baba T, Takahashi N, Kaneda Y. A numerical study for relationship between coastal tsunami and bottom pressure fluctuation in the ocean generated from near-field earthquake[C]. Underwater Technology Symposium. IEEE, 2013, 20( 3 ): 1-3
- [ 17 ] Nakano M, Nakamura T, Kamiya S I, et al. Seismic activity beneath the Nankai trough revealed by DONET ocean-bottom observations[J]. Mar. Geophys. Res., 2014, 35(3): 271-284
- [ 18 ] Ariyoshi K, Nakata R, Matsuzawa T, et al. The detectability of shallow slow earthquakes by the Dense Oceanfloor Network system for Earthquakes and Tsunamis ( DONET ) in Tonankai district, Japan[J]. Mar. Geophys. Res., 2014, 35(3): 295-310
- [ 19 ] Kimura T, Mikada H, Araki E, et al. S-wave anisotropy estimated by seismic interferometry using ambient noise record in the Nankai Trough subduction zone, Japan[C]. AGU Fall Meeting. AGU Fall Meeting Abstracts, 2013
- [ 20 ] Kimura T, Mikada H, Araki E. Seismic velocity monitoring using ambient noise observed by DONET seismometers in the Nankai Trough, Japan[C]. The 20th International Symposium on Recent Advances in Exploration Geophysics ( RAEG 2016 ), 2016
- [ 21 ] Kimura T, Araki E, Mikada H, et al. Estimation of S-wave anisotropy in the Nankai Trough using active and passive seismic dataset observed by DONET[C]. The International Symposium on Recent Advances in Exploration Geophysics, 2015
- [ 22 ] Araki E, Kawaguchi K, Kaneda Y. Discriminating different type waves from pressure and ground motion observation in the seafloor by DONET cabled observation network[C]. American Geophysical Union, 2011
- [ 23 ] Nakamura T, Takenaka H, Okamoto T, et al. Seismic wavefields in the deep seafloor area from a submarine landslide source[J]. Pure Appl. Geophys., 2014, 171(7): 1153-1167
- [ 24 ] To A, Obana K, Sugioka H, et al. Small size very low frequency earthquakes in the Nankai accretionary prism, following the 2011 Tohoku-oki earthquake[J]. Phys. Earth Planet. In., 2015, 245: 40-51
- [ 25 ] Suzuki K, Nakano M, Takahashi N, et al. Synchronous changes in the seismicity rate and ocean-bottom hydrostatic pressures along the Nankai trough: A possible slow slip event detected by the Dense Oceanfloor Network system for Earthquakes and Tsunamis ( DONET ) [J]. Tectonophysics, 2016, 680: 90-98
- [ 26 ] Nakano M, Nakamura T, Kamiya S, et al. Intensive seismic activity around the Nankai trough revealed by DONET ocean-floor seismic observations[J]. Earth Planets Space, 2013, 65(1): 5-15
- [ 27 ] Matsumoto H, Nosov M A, Kaneda Y, et al. Ocean-bottom pressure and seismic signals at tsunamigenic earthquake[C]. Underwater Technology. IEEE, 2015: 1-5
- [ 28 ] Takahashi N, Kamiya S, Nakano M, et al. Direct observation of a plate boundary earthquake by a seafloor network in the Nankai Trough seismogenic zone ( DONET ): An example of the  $M=6.5$  earthquake on 1st April, 2016[C]. AGU Fall Meeting. AGU Fall Meeting Abstracts, 2016
- [ 29 ] 郑红霞, 张训华, 赵铁虎, 等. 海底监测技术之海底观测网络[J]. 海洋地质前沿, 2015, 31(5): 51-56
- [ 30 ] 央视新闻客户端. 我国将建国家海底科学观测网总投资超 20 亿元[J]. 科技传播, 2017, 9(11): 8

## A brief introduction to DONET in Japan

Shen Zhongyin

(Institute of Geophysics, China Earthquake Administration, Beijing 100081, China)

**Abstract** Significant progress has been made in the seismological observation in China recently, with a good start for the construction of ocean-floor observatories. The successes in the ocean-floor observing systems worldwide can serve China as good examples. Dense Ocean floor Network system for Earthquakes and Tsunamis (DONET) of Japan was built in 2011. This system focuses on observing the seafloor ground motion and hydraulic pressure signals efficiently, aiming at monitoring the earthquake and tsunami events in the Nankai Trough region. This paper provides a brief review into the hardware layout, construction procedures, and related scientific researches of the DONET, which can serve as good experiences for the Chinese counterparts. Lastly, we introduce details of the National Seafloor Observatory Network Project in China.

**Keywords** seafloor observation system; DONET; Nankai trough; national seafloor observatory network