

Sudden degeneration of eyes just before settlement in the larva of *Odontamblyopus lacepedii*, the endemic goby to Ariake Bay, Japan

Shotaro TOJIMA^{1)2)*}, Yuta YAGI³⁾, Izumi KINOSHITA⁴⁾, Shinji FUJITA, Yuichi HIROTA⁵⁾ and Hiroyuki HIRAGA

Abstract: The eel goby, *Odontamblyopus lacepedii*, with vestigial eyes, is endemic to Ariake Bay, Japan and is associated with shallow, muddy bottoms of estuaries. Larval distributions related to the metamorphosis of the species were examined around the upper estuary of the bay, which consists of a heavily turbid, vertically mixed, and strong tidal current. In the present study, we identified the larvae immediately after hatching. Their eyes were still enlarged with growth during the pelagic period but suddenly started to degenerate and became vestigial just before settlement during a 2-mm increment in body length. During this period, the larvae were vertically distributed from the surface and middle layer to the near-bottom and bottom layers with relatively high turbidity, and their pelvic fins rapidly developed; it is assumed that they changed their mode of life to be similar to that of adults. From these results, it is elucidated that the transition from a pelagic to a benthic lifestyle in this species synchronize with the eyes degenerate and buried under the skin, i.e., morphological and ecological changes occur in synchronization.

Keywords : *Odontamblyopus lacepedii*, Metamorphosis, Distribution, Ariake Bay

-
- 1) Usa Institute of Marine Biology, Kochi University, 194 Inoshiri, Usa, Tosa, Kochi 781-1164, Japan
 - 2) Consumer Affairs Agency, 3-1-1 Kasumigaseki, Chiyoda-ku, Tokyo 100-8958, Japan
 - 3) Demersal Fish Resources Division, Fisheries Stock Assessment Center, Fisheries Resources Institute, Japan Fisheries Research and Education Agency, 2-12-4 Fukuura, Kanazawa-ku, Yokohama 236-8648, Japan
 - 4) Aki Fishery Cooperatives, 3411-1 Nishihama, Aki, Kochi 784-0020, Japan
 - 5) Fisheries Resources Institute, Japan Fisheries Research and Education Agency, Yokohama, Kanagawa 236-8648, Japan

*Corresponding author: Shotaro Tojima
E-mail: S_tojima@outlook.jp

Introduction

The eel goby, *Odontamblyopus lacepedii* (Amblyopinae), is endemic to Ariake Bay, Japan (TAKITA, 2000). This species is classified in the family Oxudercidae (NELSON *et al.*, 2016). Also, *O. lacepedii* is found in western and southwestern Korea, China, Hong Kong, and Taiwan (MURDY and SHIBUKAWA, 2001). The species is unique within the Amblyopinae in having free and silk-like pectoral fin rays and in undergoing metamorphosis represented by eye degeneration during ontogenetic development (DOTSU, 1957).

Ariake Bay is characterized by having brackish, highly turbid water with strong tidal cur-

rents (INOUE, 1980). TANAKA (2007) speculated that as the Japan Archipelago separated from the Asian continent, only Ariake Bay retained such an environment, consequently supporting fishes, including *O. lacepedii*, as continental relicts.

Little is known about the early life history of the species, although there is some knowledge about its distribution (DOTSU, 1957; TAKITA, 1980; TAKITA *et al.*, 2003) and early development (DOTSU and TAKITA, 1967). Recently, AOYAMA *et al.*, (2007) and YAGI *et al.*, (2011) observed that *O. lacepedii* juveniles settled mainly around the upper estuary of the bay, indicating its importance as an essential nursery habitat. However, metamorphosing larvae have rarely been found, and information on the relationship between metamorphosis and the corresponding ecological changes in the species is very fragmented. The elucidation of eye degeneration in *O. lacepedii* reveals the importance of morphological and ecological changes during the early life history of the fish and the adaptation of the endemic fish to the unique environment of Ariake Bay.

In this study, we provide a detailed description of *O. lacepedii* larval development and describe its early migration in relation to its metamorphosis to better understand the early life history of the species.

Materials and methods

Odontamblyopus lacepedii larvae and juveniles were collected from the Rokkaku estuary (Stn.) located in the inner part of Ariake Bay (Fig. 1) On 20 July 2016, which was a spring tide. The pelagic larvae and juveniles were collected using oblique tows and a larval net with a mouth diameter of 1.3 m. The mesh aperture of the nets was 0.5 mm. To collect demersal larvae and juveniles, beam trawls (width, 1.5 m; height, 0.3 m; 2 mm mesh aperture) were used according to a meth-

od described by KUIPERS (1975) with modifications.

To examine the differences in the size and vertical distribution of species relative to the tidal phase, discrete-depth horizontal tows in the surface and middle layers were conducted with a larva net (1.3 m mouth-diameter, 0.5 mm mesh-aperture) and near-bottom layers were conducted with a specialized beam trawl (width, 1.5 m; height, 0.25 m; 2.0 mm mesh-aperture) and a beam trawl on the bottom from flood to ebb tides at Stn., located outside the river mouth. The specialized beam trawl was modified by KUIPERS (1975), and it was designed to keep the lower beam of the mouth 5 cm above the bottom to collect pelagic larvae distributed near the bottom (EBRAHIM *et al.*, 2006).

The towing distances (m) of the larval net were measured using a flowmeter (2030R, General Oceanics), and the towing depths (m) were measured using a depth recorder (DEFI-D10, JFE Advantech) attached to the nets. The towing distances (m) of the beam trawl and seine nets were monitored using a GPS (Colorado300, Garmin).

The number of individuals (n) was converted to density (N ; $n \times 1000 \text{ m}^{-3}$) using the following equation:

$$N_{LN} = (n \times 1000) / (A \times D), \quad (1)$$

where A is the area (m^2) of the larval net and D is the towing distance (m).

$$N_{BT} = (n \times 100) / (w \times D), \quad (2)$$

where w is the width (m) of the beam trawl and D is the towing distance (m) for the beam trawl.

All samples were fixed in 10% formalin, and fish larvae and juveniles were sorted and transferred to 80% ethanol. Subsequently, the *O. lacepedii* specimens were measured for size. The developmental stages of larvae and juveniles were assessed as described by KENDALL *et al.* (1984).

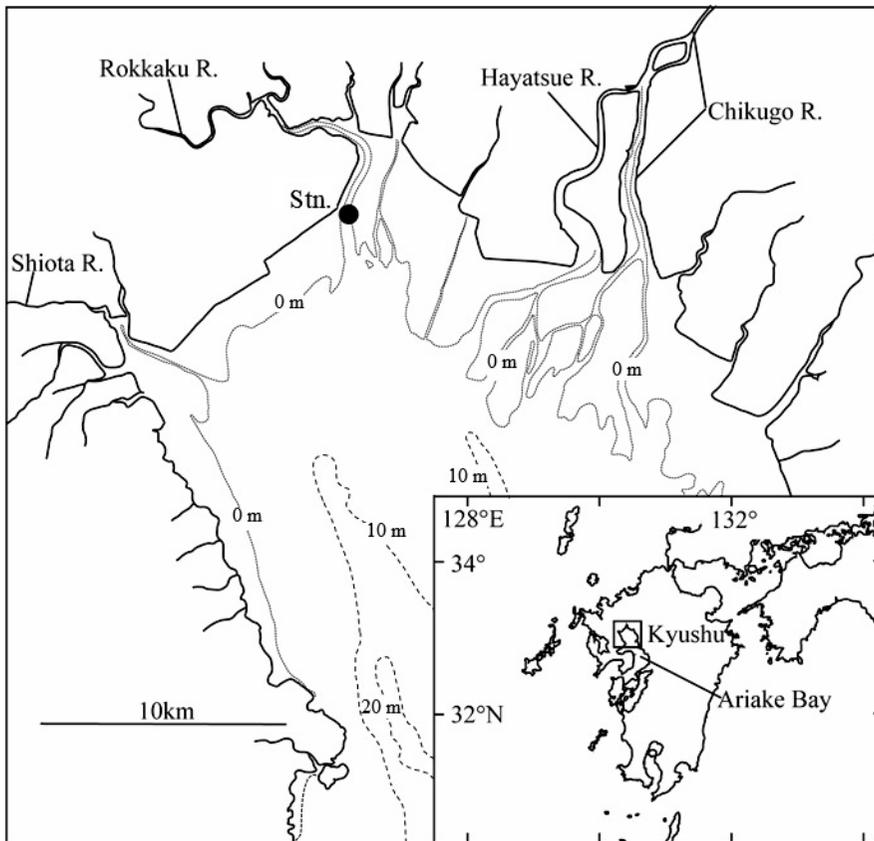


Fig. 1 Chart of Ariake Bay showing stations where fish larvae and juveniles were collected on 20 July 2016. Solid circle (Stn.) indicates the station for discrete-depth horizontal tows with a larva net, near-bottom net, and beam trawl.

The unlabeled lengths in the present study indicate body length (BL). To better understand the metamorphic phenomenon of the species, a maximum of 100 specimens collected using discrete-depth horizontal tows were randomly selected and their eye diameter and head length were measured.

Water temperature ($^{\circ}\text{C}$), salinity, and turbidity (NTU) were measured every hour at 0.5 m depth-intervals from the surface to the bottom using a Compact-CTD (ASTD102, JFE Advantech). The current was measured with an ADCP (WHS12000-I-UG12, RD Instruments) at 0.5 m depth-intervals from a depth of 1 m to the bot-

tom.

O. lacepedii larvae and juveniles (Fig. 2) were identified as species based on adult meristic characteristics (counts of dorsal and anal fin rays and vertebrae) and distribution of melanophores (DOTSU, 1957). The representative series of specimens used in this study were deposited at the Usa Institute of Marine Biology, Kochi University.

Results

Descriptions of larvae and juveniles (Fig. 2)

Morphology. The metamorphosis of the species started and completed at ca. 10.0 mm and

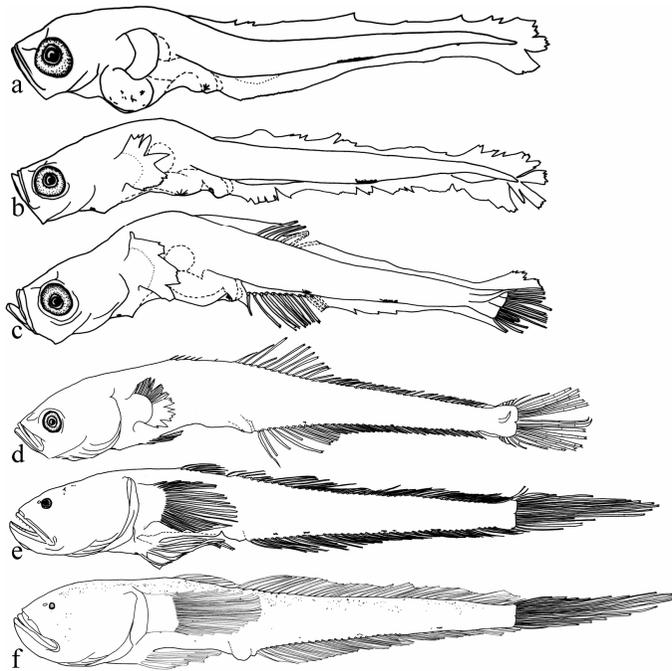


Fig. 2 Developmental stages of *Odontamblyopus lacepedii* larvae and juveniles. a, 2.9 mm BL yolk-sac larva (UKU-433000); b, 3.7 mm BL preflexion larva (UKU-433001); c, 4.3 mm BL flexion larva (UKU-433002); d, 9.8 mm BL postflexion larva (UKU-433003); e, 12.1 mm BL juvenile (UKU-433004); f, 15.3 mm BL juvenile (UKU433005).

12.0 mm, i. e., the eyes were enlarged with growth during the pelagic period (ca. 3.0–10.0 mm) and started to degenerate and become vestigial just before settlement with only 2 mm increase in body length (Fig. 3). During this period, the larvae were vertically distributed from the surface to the bottom (Fig. 3).

The caudal anlagen began to develop at approximately 4 mm with notochord flexion, and it was fully developed at approximately 10 mm. The caudal fin had longer principal rays in the lower lobe than in the upper lobe (Fig. 2f). Dorsal and anal anlagen appeared at approximately 4 mm, their incipient soft rays began to differentiate at approximately 4 mm in pre-metamorphic larvae, and all soft rays were present at ap-

proximately 10 mm in juveniles. Incipient rays in the pectoral fin and pelvic bud were present at ca. 10 mm in the pre-metamorphic stage (Fig. 2d), and they were fully completed at ca. 12 mm in the metamorphosing stage (Fig. 2e).

Pigmentation. The distribution of melanophores was sparse in the larvae during metamorphosis (Fig. 2a-e). Distinct melanophores were visible at the ventral margin of the tail in the smallest pre-metamorphic larvae (Fig. 2a), which were irregularly distributed in the later-stage larvae and juveniles (Fig. 2b-e). Ventral abdominal melanophores were found in the early pre-metamorphic larvae (Fig. 2a, b) but disappeared in metamorphosing larvae and juveniles (Fig. 2e, f). In juveniles approximately 15 mm in

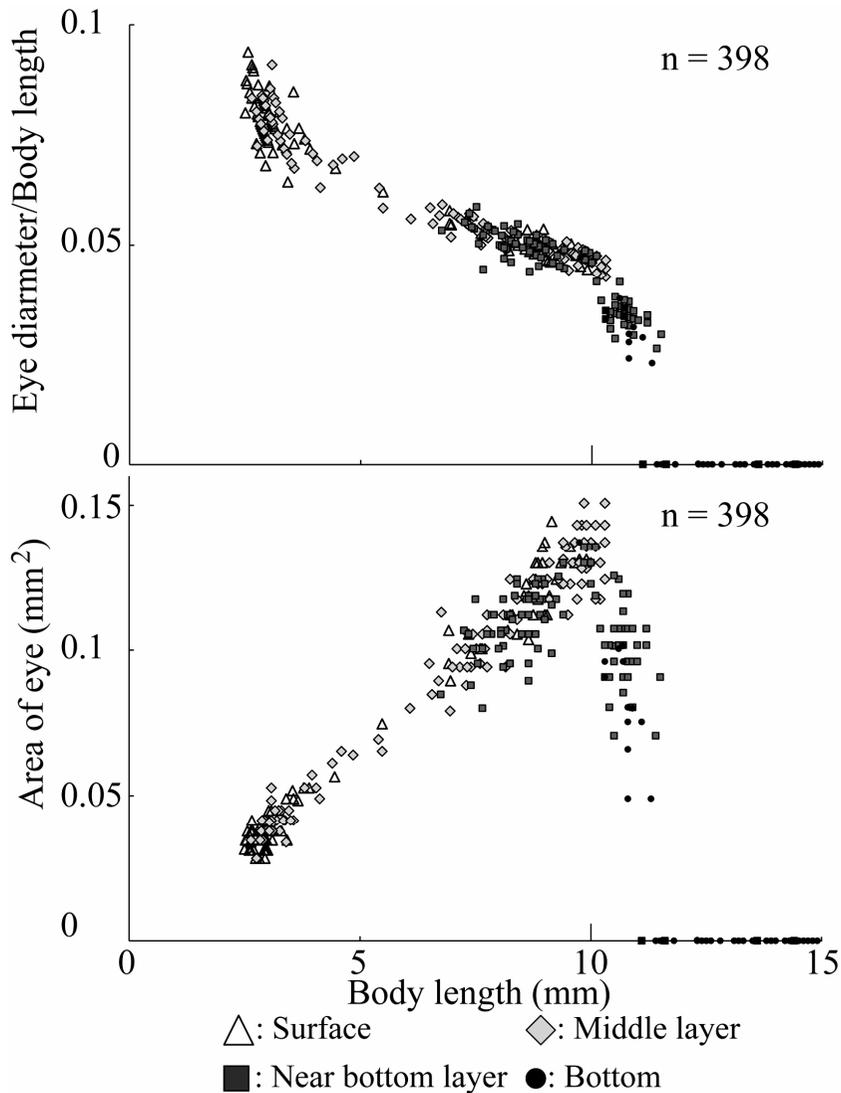


Fig. 3 The relationships among vertical distribution, eye diameter/body length (top), and area of eye in the standard length of *Odontamblyopus lacepedii* larvae and juveniles. Open triangle, gray diamond and square, and solid circle indicate specimens collected at the surface, middle and near-bottom layers, and bottom, respectively.

diameter, small melanophores were scattered dorsolaterally on the head and trunk (Fig. 2f).

Tidal changes in the distribution of larvae

Physical conditions (Fig. 4). Strong tidal cur-

rents, which reached a maximum velocity of ca. 1.5 kt, within the estuary drastically altered the vertical structure of the water column, and the current velocity was slightly higher in the surface layers than in the bottom layers during

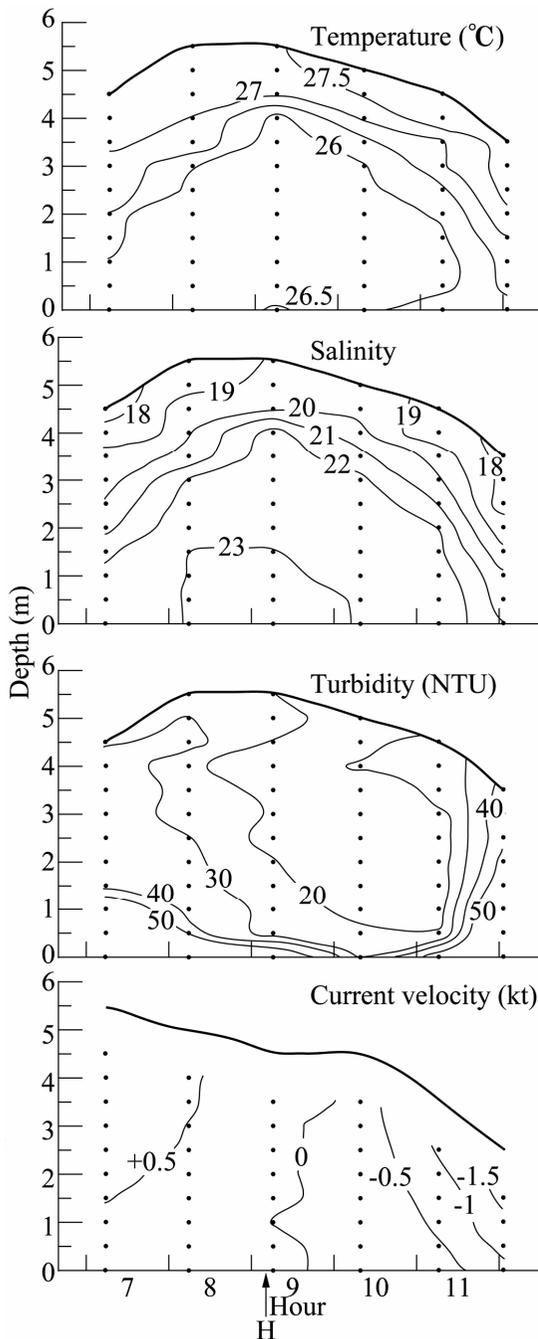


Fig. 4 Changes in the vertical profiles of water parameters at Stn. with tidal cycle. Flood and ebb velocities are denoted as + and -, respectively. *H* indicates the hour of high tide.

5). During the survey, the yolk sac, preflexion, and flexion larvae of *O. lacepedii* were distributed in the surface and middle layers, with a maximum density of $4136/1000\text{m}^3$ at low tide (12:00), but did not appear in near-bottom layers or on the bottom, except in near-bottom layer at 8AM. Juveniles ($< 10\text{ mm}$) were mainly distributed from the surface to near-bottom layers except in the surface layer at 10AM, after high tide. Juveniles ($> 10\text{ mm}$) were mainly distributed in the near-bottom and bottom layers during the survey.

Discussion

The morphological results for the larvae and juveniles obtained in the present study are consistent with those of DOTSU (1957), who used natural larvae. The yolk-sac larvae observed in this study were ca. 3.0 mm. In a study by DOTSU and TAKITA (1967), the larvae were 3.3 to 3.5 mm TL immediately after hatching; therefore, the larvae in the present study were determined immediately after hatching. No eggs of *O. lacepedii* have been found in the wild, but based on the distribution of yolk-sac larvae and juveniles, it is speculated that they hatch near the mouth of the river and then settle on the river bottom in the tidal areas (AOYAMA *et al.*, 2007). This suggestion is supported by the results of the present study, conducted near the river mouth, which *O. lacepedii* was observed from the yolk-sac larvae immediately after hatching to juveniles and settling on the bottom.

Their eyes were still enlarged with growth during the pelagic period but suddenly began degenerate and became vestigial just before settlement at a 2-mm increment in body length (Fig. 3). During this period, the larvae were vertically distributed from the surface and middle layers to the near-bottom and bottom layers, and their pelvic fins rapidly developed. These results

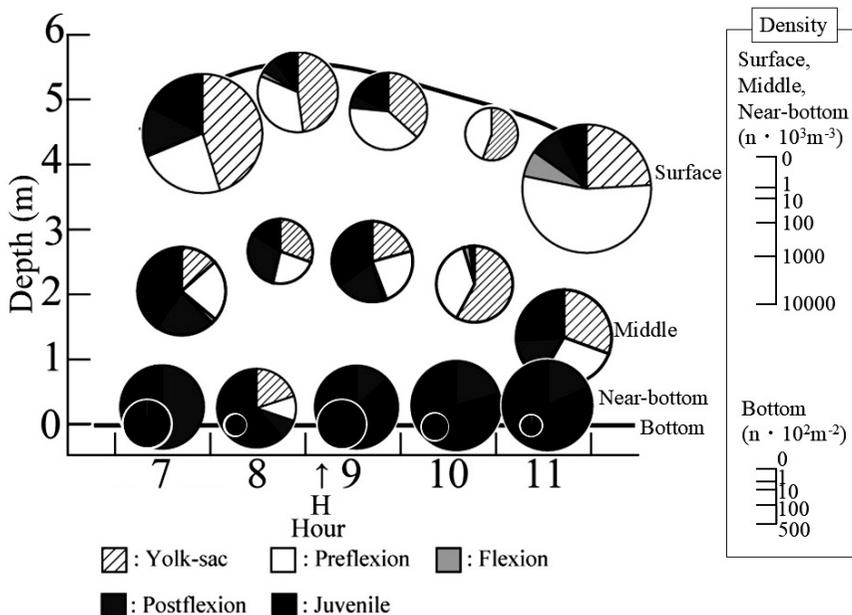


Fig. 5 Vertical profiles of *Odontamblyopus lacepedii* larvae and juveniles collected with a larva net, near the bottom net and beam trawl at Stn. with tidal cycle on 20 July 2016. The circles indicate Time and depth of collections. The diameter of each circle is drawn in proportion to the cube root of density ($n \cdot 10^3 \text{ m}^{-3}$) for the surface, middle, and near-bottom layer samples and the square root of density ($n \cdot 10^2 \text{ m}^{-2}$) for the bottom samples. *H* indicates the hour of high tide.

indicate that eye degeneration is synchronized with species settlement. The habitat has higher turbidity near the bottom than in the surface and middle layers, and it is suggested that the species changed its lifestyle to become more similar to adults.

However, the blind cave fish *Anoptichthys jordani* has a small eye during the first three days after hatching (ZILLES *et al.*, 1983). After approximately ten days, the eyeball was below the level of the surrounding epidermis. The orbital diameter diminished and did not allow a general view of the entire surface of the eyeball. Over the following weeks, the eyeball is gradually covered by epidermal tissue (ZILLES *et al.*, 1983). This difference is caused by the difference between the caves, where the environment

changes little generally or temporally, and the estuary in Ariake Bay, where the environment changes significantly temporally.

The changes in vertical distribution of *O. lacepedii* with its development will be compared with those of other fish species distributed in the Ariake Bay. The vertical distribution of two clupeoid fishes, *Ilisha elongata* and *Sardinella zunasi*, did not appear to change significantly with development (WANG *et al.*, 2021). The change in the vertical distribution associated with metamorphosis in *Cynoglossus lighti*, which undergoes remarkable morphological changes during its early life history (YAGI *et al.*, 2009), is not as synchronized as that in *O. lacepedii*. Unlike the three species mentioned above, the vertical distribution of *O. lacepedii* significantly changed

during metamorphosis. This difference may be because *O. lacepedii* has adapted to the unique environment of the Ariake Bay, with adults having a unique lifestyle of burrowing in the silty mud bottom.

On the other hand, when comparing the structural or functional changes with settlement of *Acanthogobius flavimanus*, belonging to Oxudercidae, with those of *O. lacepedii*, it was found that although the eyes of *A. flavimanus* did not degenerate, rapid changes in various characteristics, such as gaining broader upper-field view capability, occurred as the fish transitioned to a benthic lifestyle (Kanou *et al.*, 2004). These phenomena suggest that Oxudercidae is a group capable of rapid structural and functional changes in synchronization.

To date, little is known about the metamorphosis of *O. lacepedii* in the wild, in this study, based on a detailed spatiotemporal survey of the estuary area in the innermost part of Ariake Bay, morphological and ecological changes in *O. lacepedii* were synchronized. It is speculated that the rapid morphological change that occurred when *O. lacepedii* settled on the bottom is an example of potential of this species being realized in order to adapt to the large tidal ranges and high turbidity found in the Ariake Sea and part of the eastern coast of Eurasia. There is no knowledge regarding the morphology associated with ecological changes in the larvae and juveniles of this species in Asian continent, and so a comparison cannot be made, however, as this species is considered to be a continental relict species, the characteristics of this species in the Ariake Bay are thought to be common to the same species distributed on the Asian continent.

Acknowledgments

We are grateful to Y. KAWAMURA, Saga University, for their assistance with the study and

the two anonymous reviewers for their helpful comments. We thank H. KATAFUCHI and our laboratory staff for their support during the field research. This work was supported in part by a Grant-in-Aid for Scientific Research (19K12417).

References

- AOYOMA, D., I. KINOSHITA and S. FUJITA (2007): The function of the inner estuary as nursery grounds for fishes in Ariake Bay. *Aquabiol.* **29**, 16–25.
- DOTSU, Y. (1957): On the bionomics and life history of the eel-like goby, *Odontamblyopus rubicundus* (Hamilton). *Sci. Bull. Fac. Agric. Kyushu Univ.*, **16**, 101–110.
- DOTSU, Y. and T. TAKITA (1967): Induced spawning by hormone operation, egg development and larva of blind gobioid fish, *Odontamblyopus rubicundus*. *Bull. Fac. Fish. Nagasaki Univ.*, **23**, 135–144.
- EBRAHIM, A., I. KINOSHITA, M. SASHIDA, T. HASHIMOTO and J. NUNOBE (2006): Do the ayu (*Plecoglossus altivelis altivelis*) born in the river with an inlet or large estuary in its mouth perform a homing? *La mer.* **44**, 145–155.
- INOUE, N. (1980): Physical environment of Ariake Sound. *Mar. Sci. Month.*, **12**, 116–125.
- KANO, K., H. KOHNO and M. SANO (2004): Morphological and functional development of characters associated with settlement in the yellowfin goby, *Acanthogobius flavimanus*. *Ichthyol. Res.*, **51**, 213–221.
- KENDALL, A. W. JR., E. H. AHLSTROM and H. G. MOSER (1984): Early life history stages of fishes and their characters. *In* MOSER, H. G., W. J. RICHARDS, D. M. COHEN, M. P. FAHAY, A. W. KENDALL JR. and S. L. RICHARDSON (eds.) *Ontogeny and systematics of fishes*. *Am. Soc. Ichthyol. Herpetol.*, Spec. Publ. 1, Lawrence, p. 11–22.
- KUIPERS, B. (1975): On the efficiency of a two-metre beam trawl for juvenile plaice (*Pleuronectes platessa*). *Neth. J. Sea. Res.* **9**, 69–85.
- MURDY, E. O. and K. SHIBUKAWA (2001): A revision of the gobiid fish genus *Odontamblyopus* (Gobiidae: Amblyopinae). *Ichthyol. Res.* **48**, 31–43.

- NELSON, J. S., T. C. GRANDE and M. V. H. WILSON (2016): Fishes of the world, 5th ed. Wiley. Hoboken, xli + 707 pp.
- TAKITA, T. (1980): Fish in Ariake bay. Mar. sci. month. **124**, 105–115.
- TAKITA T., D. KOMURA, I. KAWAHARA, Y. MORI, N. NAKASHIMA and S. ITO (2003): Distribution of fishes in the innermost area of Ariake Sound. Bull. Saga Pref. Ariake Fish Res. Dev. Cent. **21**, 81–98.
- TAKITA, T. (2000): Fish. *In*: SATO, M. (ed.) Life in Ariake Bay: Biodiversity in tidal flats and estuaries. Kaiyu-Sha Tokyo, p. 213–252.
- TANAKA, M. (2007): Relict estuarine ecosystem isolated from the continental coastal waters. Aquabiol. **29**, 3–9.
- WANG, X., Y. YAGI, S. TOJIMA, I. KINOSHITA, S. FUJITA and Y. HIROTA (2021): Comparison of larval distribution in two clupeoid fishes (*Ilisha elongata* and *Sardinella zunasi*) in the inner estuaries of Ariake Sound, Shimabara Bay, Japan. Plankton Benthos Res. **16**, 292–300.
- YAGI, Y., I. KINOSHITA, S. FUJITA, D. AOYAMA and Y. KAWAMURA (2011): Importance of the upper estuary as a nursery ground for fishes in Ariake Bay, Japan. Environ. Biol. Fish. **91**, 337–352.
- YAGI, Y., I. KINOSHITA, S. FUJITA, H. UEDA and D. AOYAMA (2009): Comparison of the early life histories of two *Cynoglossus* species in the inner estuary of Ariake Bay, Japan. Ichthyol. Res. **56**, 363–371.
- ZILLES, K., B. TILLMANN and R. BENNEMANN (1983): The development of the eye in *Astyanax mexicanus* (Characidae, Pisces), its blind cave derivative, *Anoptichthys jordani* (Characidae, Pisces), and their crossbreds. A scanning and transmission electron microscopic study. Cell Tissue Res. **229**, 423–432.

Received: November 16, 2024

Accepted: March 17, 2025

津波により励起される東京湾の固有振動と その重ね合わせによる水位変動の増幅

小木曾愛¹⁾・北出裕二郎¹⁾*

Natural oscillations in Tokyo Bay excited by tsunami and amplification of sea surface fluctuation due to their superposition

Ai OGISO¹⁾ and Yujiro KITADE¹⁾*

Abstract: In this study, we investigated the natural oscillation in the complex topography of Tokyo Bay and the amplification mechanism due to their superposition through numerical experiments. First, an experiment was conducted in which waves were applied that simulated the tsunami caused by the Tohoku Pacific Coast Earthquake in March 2011, and the formation of natural oscillation in Tokyo Bay and its vibration form were investigated. Natural oscillations throughout the bay were excited with periods of 333 minutes, 111 minutes, and 73 minutes. Periods of 333 minutes and 111 minutes are vibrations of the entire Tokyo Bay with mainly along bay velocity components, which are the first and second modes of natural oscillation, respectively. It was found that the periods of 73 minutes is the third mode which have vibrations of the along bay velocity component from the bay mouth to offshore Kawasaki and the east-west velocity oscillation near the bay head. In actual measurements of tsunamis in Harumi, Tokyo Port, etc., it was observed that the amplitude gradually amplified from the first wave to the third wave, and then attenuated. The observed amplitude variation was explained by the "beat" that is due to the superposition of the local natural oscillation and the third mode of the entire bay. Next, we investigated the characteristics of the natural oscillations that form within Tokyo Bay in response to tsunamis of various periods that propagate from outside Tokyo Bay. As a result, it is indicated that the amplitude of each natural oscillation period included in the periodic component of the incident wave determines the amplitude of each natural oscillation period formed in the bay and finally determines the amplitude of the composed wave.

Keywords: Tsunami, Natural oscillation, Tokyo Bay, Tohoku Pacific Coast Earthquake

1) 東京海洋大学大学院海洋科学技術研究科
〒108-8477 東京都港区港南 4-5-7

*Corresponding author:
ykitade@kaiyodai.ac.jp

1. はじめに

津波は、地震による海底の地殻変動や海底火山の噴火、海岸部での大規模な地すべりなどによって引き起こされ、数分から数十分程度の周期を持つ。発生した津波は地形や水深の変化に伴い、屈

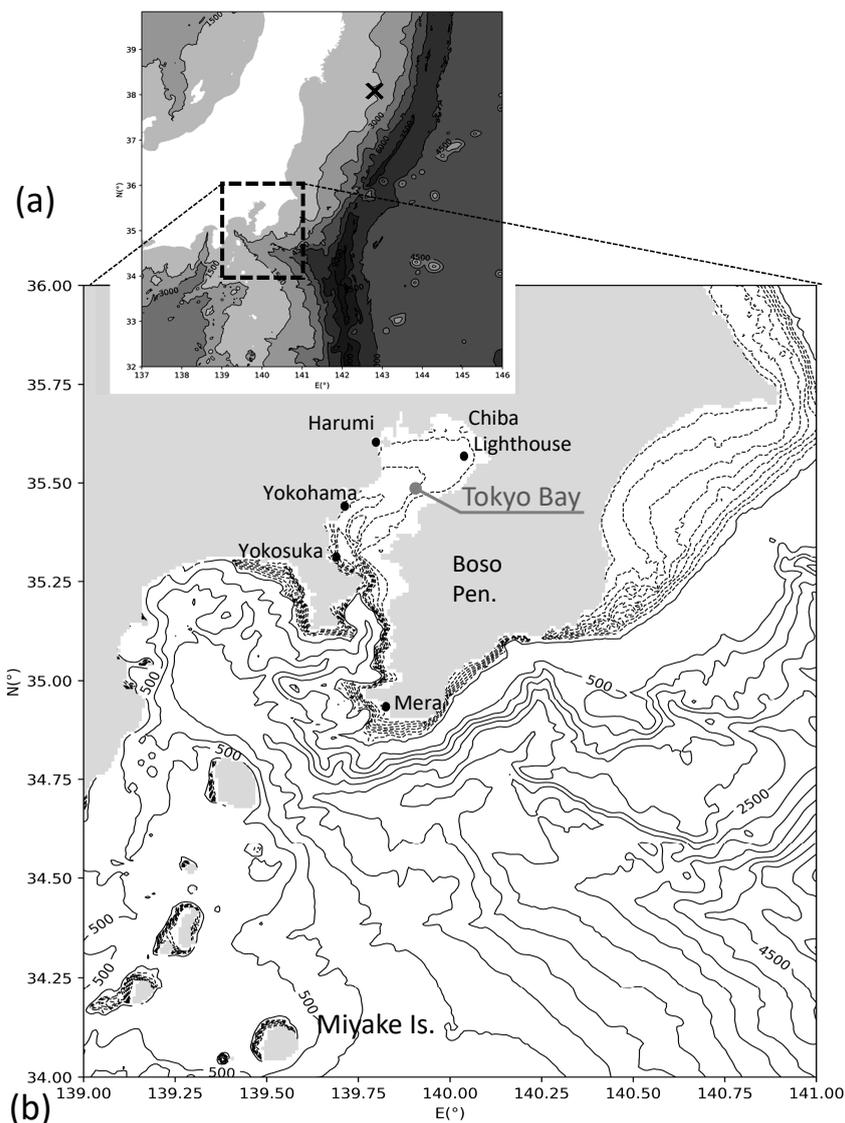


Fig. 1 (a) Bottom topography and the epicenter of the Tohoku Pacific Coast Earthquake. Dashed line indicates the study area. (b) Bottom topography in and around Tokyo Bay.

折や回折、反射や干渉を繰り返しながら伝播していく。遠浅な海岸では水深が浅くなるにつれて津波の波高が増大し、大きな被害をもたらす。東京湾 (Fig. 1) は湾口が狭く、湾曲していることから津波のエネルギーが入りにくく、湾奥には大きな津波は到達しにくいと考えられてきた。羽鳥 (2006) によれば、2011 年の東北地方太平洋沖地

震 (以下、東北沖地震と呼ぶ) 以前では、ほとんどの場合、東京湾奥における津波の波高は湾口と比べて著しく減衰していたと報告されている。しかし、佐々木ら (2012) によれば、東北沖地震による津波では、東京湾湾奥で 2m を超える浸水高や遡上高が計測され、元禄関東津波以来の最大級の津波である (Fig. 2)。

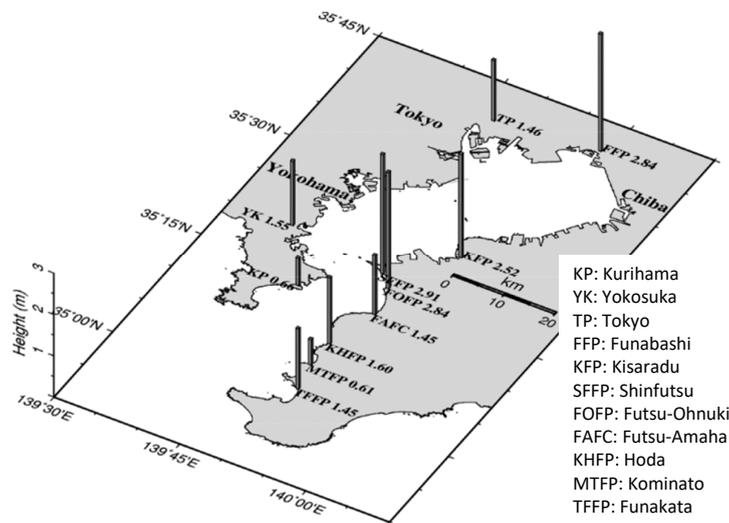


Fig. 2 Distribution of tsunami run-up height in Tokyo Bay due to of the Tohoku Pacific Coast Earthquake. From Sasaki et al. (2012) with partially changed.

この東北沖地震による津波は、東北地方から関東地方北部の太平洋側を中心に、北海道から沖縄の広い範囲で観測されている。布良、千葉灯標、晴海、横浜、横須賀における津波観測施設で得られた時間変化を見ると (Fig. 3), 東京湾湾口よりも外洋に面した布良では数十分以下の短い周期の振動が数時間続き、その後減衰している。東京港内の晴海、千葉灯標、横須賀及び横浜で観測された津波は、60分程度の周期の波が徐々に大きくなり数時間続いて弱くなるという「うなり」のような波形が見られているのが特徴的である。特に、晴海では7時間程度のうなりの周期があるように見受けられるが、その他の場所では振幅の大きい期間は異なっているなど、場所による違いがある点は興味深い。

津波と湾水の固有振動の共振は、津波の増幅だけでなく、津波振動の継続性にも関わる。日野ら (1964) は、東京湾では60~90分程度の固有振動周期が卓越することを示した。その後、相田 (1996) は東京湾内の固有振動の卓越周期について、東京湾内の細かい港湾の地形を考慮せずに48地点に区分し、各グリッド点の運動を表す運動方程式群を固有値問題として解くことにより、基本

振動の周期は300分で、節が1つのものは111分、2つのものは71分と65分であることを示し、70分程度の周期がよく観測されることを指摘した。大石ら (2018) は、南海トラフ巨大地震を想定した津波の数値シミュレーションによって、東京湾、相模湾、駿河湾の隣接する湾が連動する76分周期で津波に伴う振動が長期化する可能性があることを示した。彼らの研究では、東京湾内と湾外の振動との連成振動の重要性が述べられている。一方、水口ら (2013) は、東京湾奥部の港湾や運河を詳細に分解した高解像度化した2way ネスティングモデルを用い、港内における長波の増幅について検討している。しかし、湾奥の振動と増幅機構に特化した水口らの実験では、周期を一定とした強制振動を久里浜付近から与え続けている実験であるため、湾外から湾内に波及する過程が不明であり、湾内における自然な固有振動が抑制されている可能性も否めない。

以上のように多くの解析や数値実験から、特定の周期性を持たない津波が東京湾の湾口に到達し、湾内に波及して固有振動を形成するということは理解できる。しかし、湾口が狭く湾曲しているという特徴だけでなく、埋め立てなどが繰り返

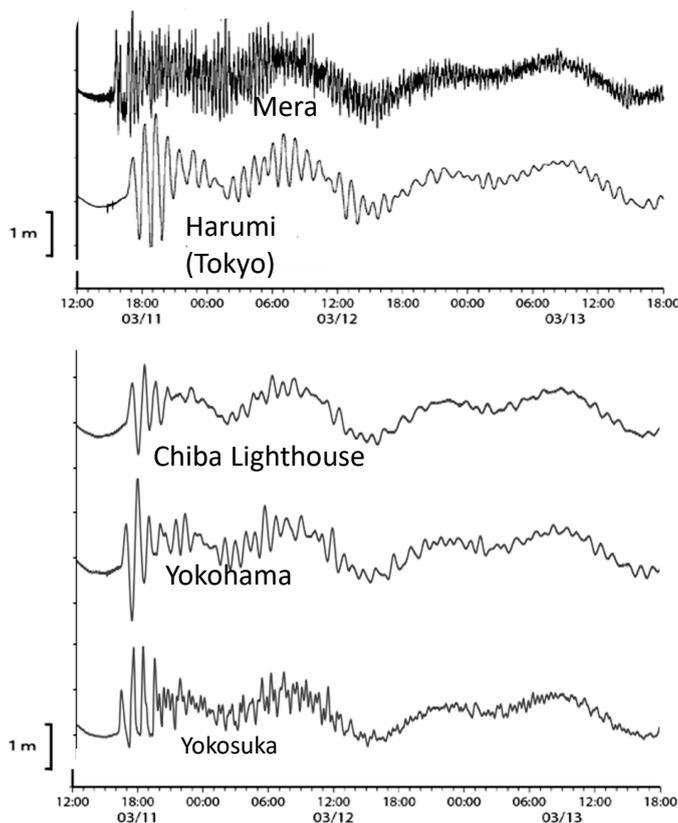


Fig. 3 Temporal variations in sea level fluctuations observed at Mera, Harumi, Chiba Lighthouse, Yokohama, and Yokosuka during the tsunami spread. The sea surface fluctuations at Fura and Harumi are taken from the Japan Meteorological Agency (2011), and the fluctuations at Chiba Lighthouse, Yokohama, and Yokosuka are plotted every 30 seconds observed by the Japan Coast Guard.

され、複雑な海岸線を持つ東京湾の地形において、固有振動がどこでどのように形成され、それらがどのように重なり合うのかという点を詳細に論じた研究はない。

そこで本研究では、近年の埋め立て地を含む東京湾の地形と相模湾沿岸の地形をモデル地形とし、外洋から強制振動を与える数値実験により、複雑な地形において形成される固有振動の特徴について検討するとともに、それらの重ね合わせが振動の増幅とどのように関係するかについて明らかにすることを目的とした。

2. モデル

2.1 基本方程式

実験には水平二次元の一層モデルを使用した。直交座標系で、東向きに x 軸、北向きに y 軸をとった。ナビエ・ストークスの運動方程式と連続の式を鉛直積分した浅水長波方程式 (1) から (3) を用いた。

$$\frac{\partial U}{\partial t} + u \frac{\partial U}{\partial x} + v \frac{\partial U}{\partial y} - fV = -g(H + \eta) \frac{\partial \eta}{\partial x} + A_h \left(\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} \right) - \frac{\tau_{bx}}{\rho_w} \quad (1)$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + u \frac{\partial V}{\partial x} + v \frac{\partial V}{\partial y} + fU = -g(H + \eta) \frac{\partial \eta}{\partial y} + A_h \left(\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} \right) - \frac{\tau_{by}}{\rho_w} \quad (2)$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} = -\frac{\partial U}{\partial x} - \frac{\partial V}{\partial y} \quad (3)$$

ここで、 t は時間、 U, V はそれぞれ x, y 軸方向の流速 u, v を鉛直積分したものである。 η は海面変位、 H は水深である。 g ($= 9.8 \text{ m/s}^2$) は重力加速度、 f ($= 1.0 \times 10^{-4} \text{ rad/s}$) はコリオリパラメータ、 A_h ($= 100 \text{ m}^2/\text{s}$) は水平渦動粘性係数、 ρ_w ($= 1025 \text{ kg/m}^3$) は海水の密度である。 τ_b は海底において働く接線応力を表す。海底における接線応力ベクトルは、堀川 (1973) より、流速ベクトル \mathbf{u} の大きさの二乗に比例するとして、 $\tau_b = \rho_w \gamma_b |\mathbf{u}|$ とした。ここで、 ρ_w は海水の密度、 γ_b ($= 0.0026$) は海底摩擦係数である。基本方程式系 (1) から (3) を、空間差分に Arakawa c グリッド、時間差分にリーブフロッグを用いて差分化した。計算を安定させるため、20 回に 1 回の割合でオイラー後方差分を用いて時間積分した。

2.2 モデル条件

モデル海域は、東京湾を中心に北緯 34 度から 36 度、東経 139 度から 141 度とした。各地点での水深は海洋情報研究センター刊行 JTOPO30v2 を採用し、水深が 2m より浅い場所は 2m とした。実際に近い水深の分布と陸岸地形を地形 A、固有振動の形成を確認するため、小さな入り江や港を取り除いた滑らかな海岸線を持つモデル地形を地形 B として実験を行った (Fig. 4 (a))。どちらの場合も、グリッドスケールは、 x 軸方向は 760m、 y 軸方向は 926 m とし、時間ステップは 0.5 秒とした。陸岸は波が完全反射し、non-slip となる条件、開境界は放射境界条件 (HIBIYA and KAJIURA, 1982) とした。

まず、初期状態を全域で静止とし、東北沖地震の際に生じた津波を模した波を与える再現実験を行った。モデル地形については地形 A を用いた。津波再現実験では、しばしば波源断層モデルで震

源から波を与えることが多いが、震源域を含んだモデル領域を考えない場合では、適切な境界条件を与えるのは難しい。また、房総半島沿岸の波形は、陸岸での反射や干渉により波が変形しているため、沿岸での水位変動をもとに境界条件を設定することも容易ではない。本実験では、東京湾の外へ波及してくる波を与えればよいことから、三宅島で地震時に観測された津波の波形をもとに、50 分周期の正弦波を一波だけ与えることとした (Fig. 4 (b))。ただし、本実験では、安定した結果が得られ、各ケースで比較しやすいように振幅を 10cm とした。実際の津波と比べて波高が 7 分の 1 であるが、津波による固有振動の形成とその重ね合わせに関する議論においては、一般性は失われまいだろう。この強制振動を東側境界から、位相差をつけて与えた。ここでは、北緯 36 度の地点から南に向かって、平均格子間隔を $\sqrt{2gh}$ (但し、 h は格子間の平均水深) で割った時間を、それぞれの格子における強制振動の時間差として与えることによって、北東方向から南西方向に向かって波が入射するようにした。なお、強制波の変位が再び 0m に戻った後は強制振動を与えず、放射境界条件によって波が領域外に抜けていくように境界条件を与えた。再現実験での数値積分は 3 日とした。この結果については、第 3 章で紹介する。

次に、東京湾外から波及する津波の波長に対する湾内水の応答を調べる実験を行った。この実験では、ガウス関数型の波を再現実験と同様にモデル海域の東側から与え、湾内に形成される固有振動の特徴について調べた。この実験結果については、湾外から波及する津波の周期に対する特性として、第 4 章で紹介する。

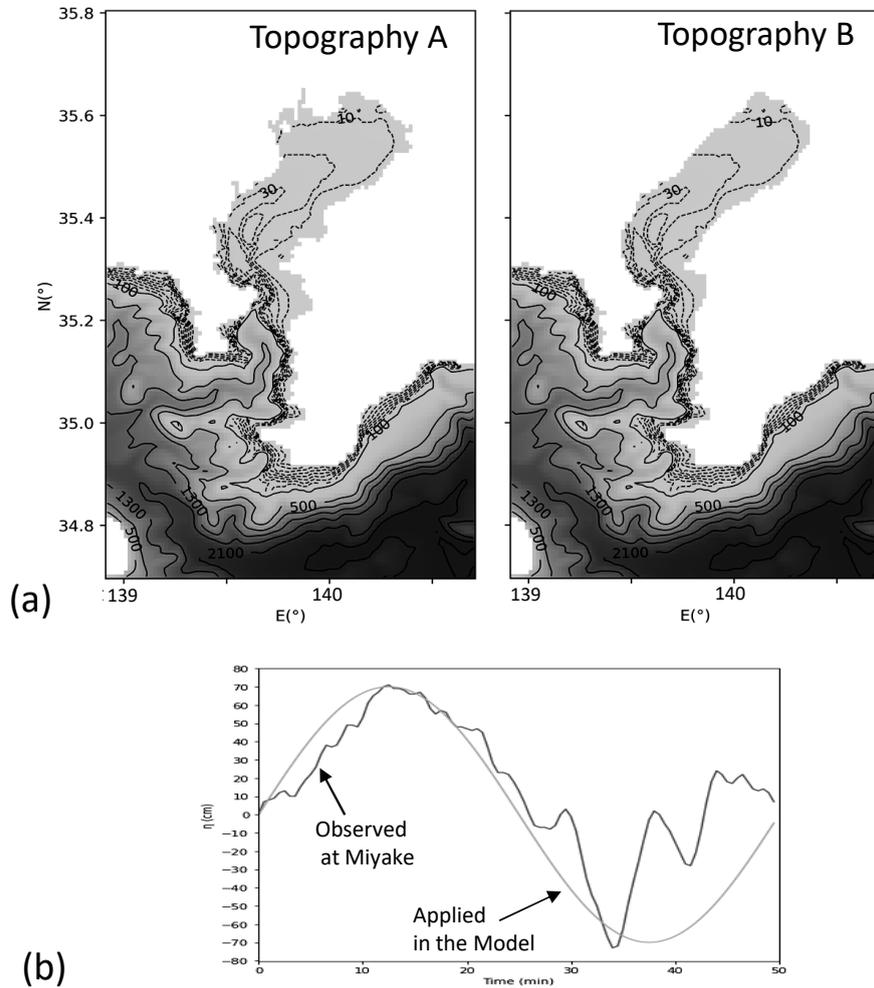


Fig. 4 (a) Topography of Tokyo Bay used in the numerical experiment. Topography A is the actual, and Topography B is the imaginal topography with the harbor removed and the shore smoothed. Numbers on the bottom contour lines are in meter. (b) Time series of sea level displacement observed at Miyake Island when the tsunami spread. Wave shape applied at the eastern boundary in a reproduction experiment (sin wave with a period of 50 minutes). However, in the experiment, the amplitude was set to 10 cm.

3. 津波による湾内振動の特徴

3.1 東京湾における津波の伝播過程

再現実験の結果から、モデル領域の北東方向から入射した波が、房総半島の先端付近で回折し、その一部が東京湾湾口へと入射する (Fig. 5 (a))。また、東京湾の湾口から入った波が湾奥まで伝播し、湾奥や東京港、木更津などで反射を繰り返して

ている様子が見られる (Fig. 5 (b))。

本研究の数値実験での東京湾における最大波高の分布 (Fig. 6 (a)) から、湾奥や東京港、木更津、富津付近で特に高い波高となることが分かる。この振幅の分布は、佐々木ら (2012) の現地調査 (Fig. 2) において、湾奥の船橋や木更津及び富津で、高い津波浸水高・遡上高が見られたことと概ね一致

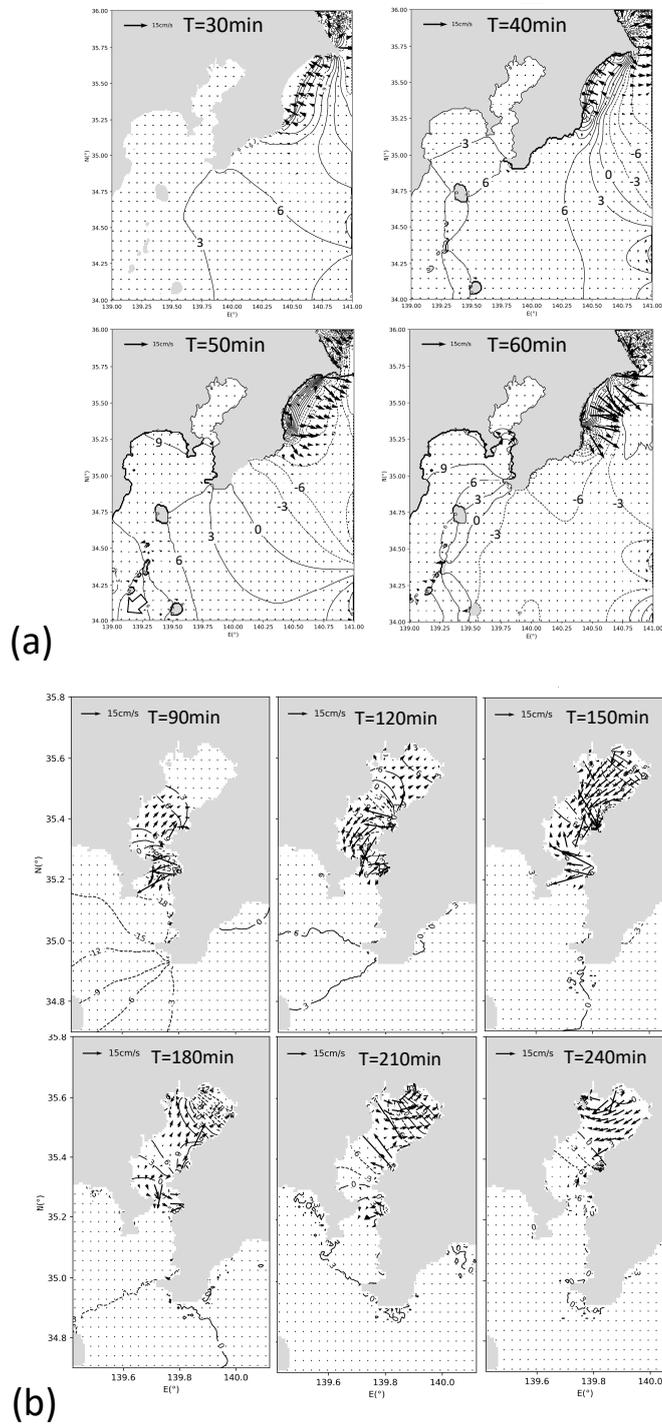


Fig. 5 Distribution of sea level displacement and current velocity vector of (a) whole calculation area and (b) in and around Tokyo Bay.

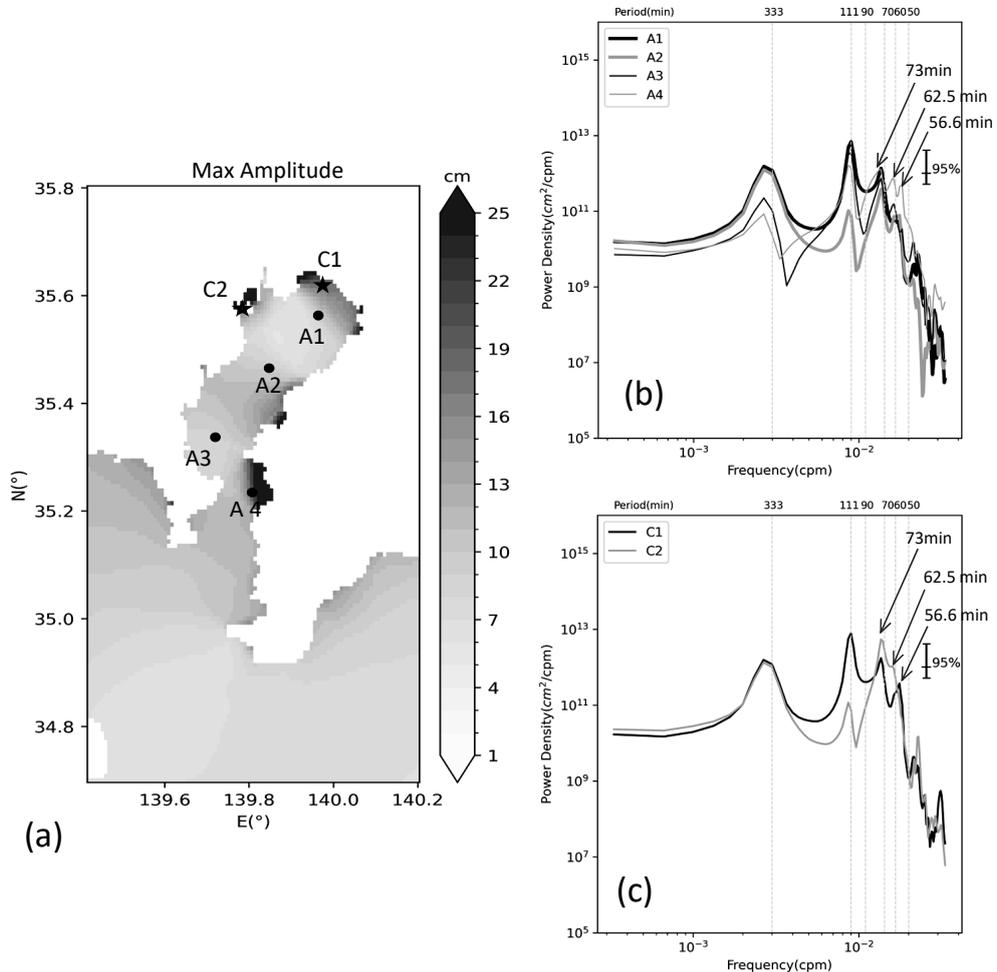


Fig. 6 (a) Distribution of maximum sea level displacement obtained by the model. (b) Power spectrum of sea level displacement from A1 to A4. (c) Power spectrum of sea level displacement at C1 and C2.

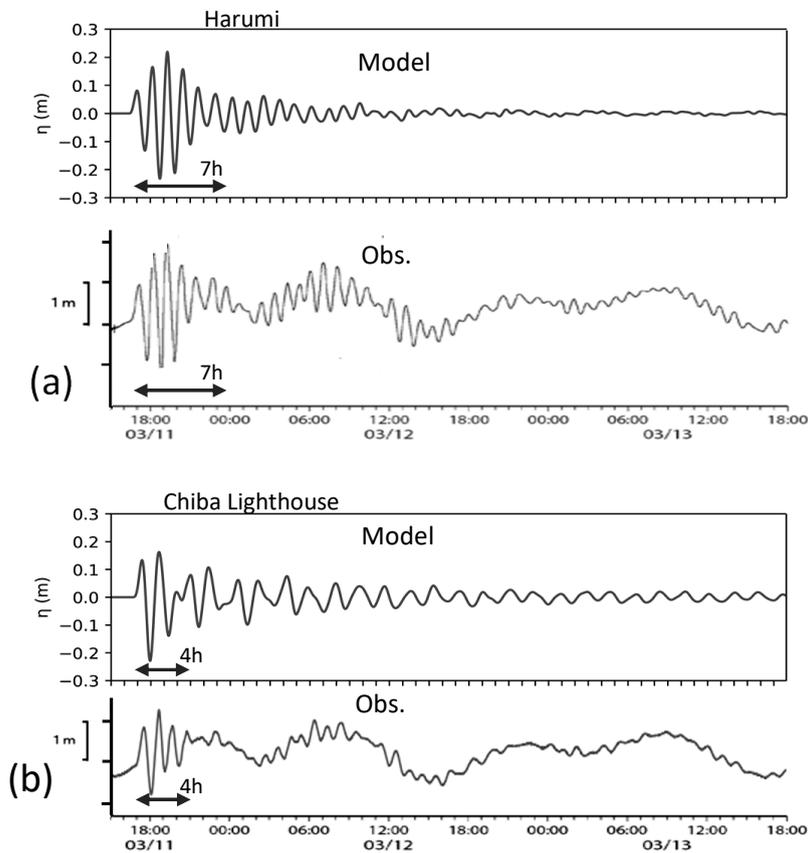
する。また、最大波高と第1波の到達時刻について、気象庁(2011)による観測値とモデルの結果を比較する(Table 1)。ここでは、それぞれ布良を基準とした相対的な最大波高と第1波の到達時刻が示されている。また、最大波高観測時刻については、観測値では布良から約70分後に千葉灯標、約120分後に東京晴海で最大波高が見られるなどの特徴があり、振幅がモデルで小さい地点もあるが、正弦波を入れたただけにもかかわらず津波時の特徴がおおむね再現されている。

3.2 湾内に形成される固有振動の周期

東京湾内でどのような周期が卓越するかを把握するため、計算開始から50時間後までの計算結果を用いて、直接フーリエ変換によりパワースペクトル密度を求めた。自由度10の三角型スペクトルウィンドウを施した。Fig. 7 (b) および (c) に、それぞれ湾軸に沿ったA1からA4と船橋沖C1および晴海沖C2におけるパワースペクトル密度を示す。50~80分の周期帯と111分や333分周期にピークが見られることが分かった。これは瀧川ら(2015)の結果や先述のこれまでの研究

Table 1. Comparison of observed and calculated values. Ratio of maximum displacement and first wave arrival time at each location relative to Mera.

Station	Ratio of Max displacement		First wave Arrival time (min.)	
	observed	model	observed	model
Chiba Lig.	0.54	0.81	70	97
Tokyo Harumi	0.87	0.92	76	78
Yokohama	0.90	0.59	46	49
Yokosuka	0.79	0.58	30	36

**Fig. 7** Temporal variations in sea level displacement obtained from experiments and observations. (a) Harumi, (b) Chiba Lighthouse. The observed sea surface fluctuation at each station shown in Fig. 3 are represented the same time axis as the model results.

で認められている固有振動の周期とほぼ一致する。しかしながら、これまでの研究では50~80分の周期帯にある複数のピークについて、どのよ

うにとらえるべきかという言及は少ない。

ここで、湾におけるメリアンの式を考えると、第 n モードの固有振動の周期 T_n は、

$$T_n = \frac{4l}{(2n-1)c} \quad (n=1,2,3,\dots)$$

となる（ただし、 l は湾の長さ、 c は長波の伝播速度である）。従って、単純に考えると、第2、第3モードの固有振動の周期は、基本モードに対して、それぞれ、3分の1、5分の1と短くなる。実験結果（Fig.6 (b) (c)）を見ると、最も周期の長い333分の次に111分にピークがあり、メリアンの式から概算される第2モードの周期とよく対応する。次のピークは73分に見られるが、同様に概算される第3モードの周期66分と比べると若干長い。しかし、これらの333分、111分、73分周期成分では、いずれの地点においても明瞭なスペクトルピークが認められることから、この3つの周期成分は東京湾全体におよぶ固有振動で、それぞれ基本モード、第2、第3モードであるとみてよいだろう。それに対して、50～70分の間にはいくつものピークがあり、その周期は場所により異なっており、いずれもメリアンの式から概算される第四モードの周期47.6分よりも長い。

観測された水位変動の記録とモデルの結果を比較する（Fig. 7）と、晴海では第1波から2波、3波と振幅が増加し、7時間程度で小さくなるなどの特徴がよく再現されている。千葉灯標では、第1波よりも2波目が大きくなりその後すぐに小さくなっている点で、観測結果と類似した特徴が再現されている。振動の周期は、両地点とも1時間より少し長い程度と見受けられるが、増幅する期間には違いがある。先のスペクトル解析の結果（Fig.6 (b), (c)）を振り返ると、ほぼ全域にみられる73分周期の第3モードと少し短い周期成分にいくつかのピークがみられた。ここで、異なる周期 T_1 と T_2 の波が重なり、うなりを起こした場合、そのうなりの周期 T は以下の関係となる。

$$\frac{1}{T} = \left| \frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right|$$

そこで、第3モードの73分周期とそれに近い周期の重ね合わせを考え、うなりの周期を計算してみる。晴海では、73分には明瞭なピークがみら

れ、その近くの周期成分に目立ったピークはないが、62.5分周期までのエネルギーレベルが高く、それより短い周期では急にレベルが低くなっている。そこで、 T_1 を73分と T_2 を62.5分として、そのうなりの周期 T を求めると約7.2時間となり、ちょうど増幅する期間（Fig. 7 (a)）と対応する。同様に、湾奥のC1では、56.6分周期にピークがあるので、これが第3モードの73分周期と合成した場合、そのうなりの周期は4.2時間となる。この4.2時間も湾奥東部の千葉灯標で観測された増幅する期間とほぼあう。以上のことから、晴海等内湾で、第2波目、3波目と増幅されたのは、東京湾全体で振動する第3モードの73分周期と各地域に特有の固有振動との重ね合わせによると説明できる。

3.3 固有振動の空間的構造

次に、スペクトル解析でピークの見られた333分、111分、73分、62.5分、56.6分周期の振動の空間的な構造を調べた。Fig. 8は海面水位の調和解析から求めた振幅と位相の分布である。333分周期は振幅が湾奥で大きく湾口で小さくなり、節が久里浜沖に一つ形成される基本モード。111分周期は振幅が湾奥と横浜から横須賀にかけて大きく川崎の北側（羽田沖）と湾口の久里浜より南で急に小さくなっており、節が二つの第2モードの構造であることが分かる。一方、73分周期では、振幅が湾奥の千葉から船橋と東京港、富津南付近で大きく、舞浜沖と横浜付近、湾口部三浦半島先端で振幅が小さくなっており、節が三つの第3モードの構造がみられる。62.5分周期は東京港東側で振幅が大きく港内での位相の変化が小さい構造、56.6分周期は船橋沖で振幅が大きくて木更津の北側とはほぼ逆位相で振動する構造となっている。

同様に、各周期成分の湾水振動を見るため、実験結果の流速を調和解析し流速楕円を作成した（Fig. 9）。333分周期、111分周期については、東京湾の湾軸方向に沿うような直線に近い流速楕円が見られた。それに対し、73分周期では、舞浜を囲むように東京港と船橋～千葉沖に向かう流速楕

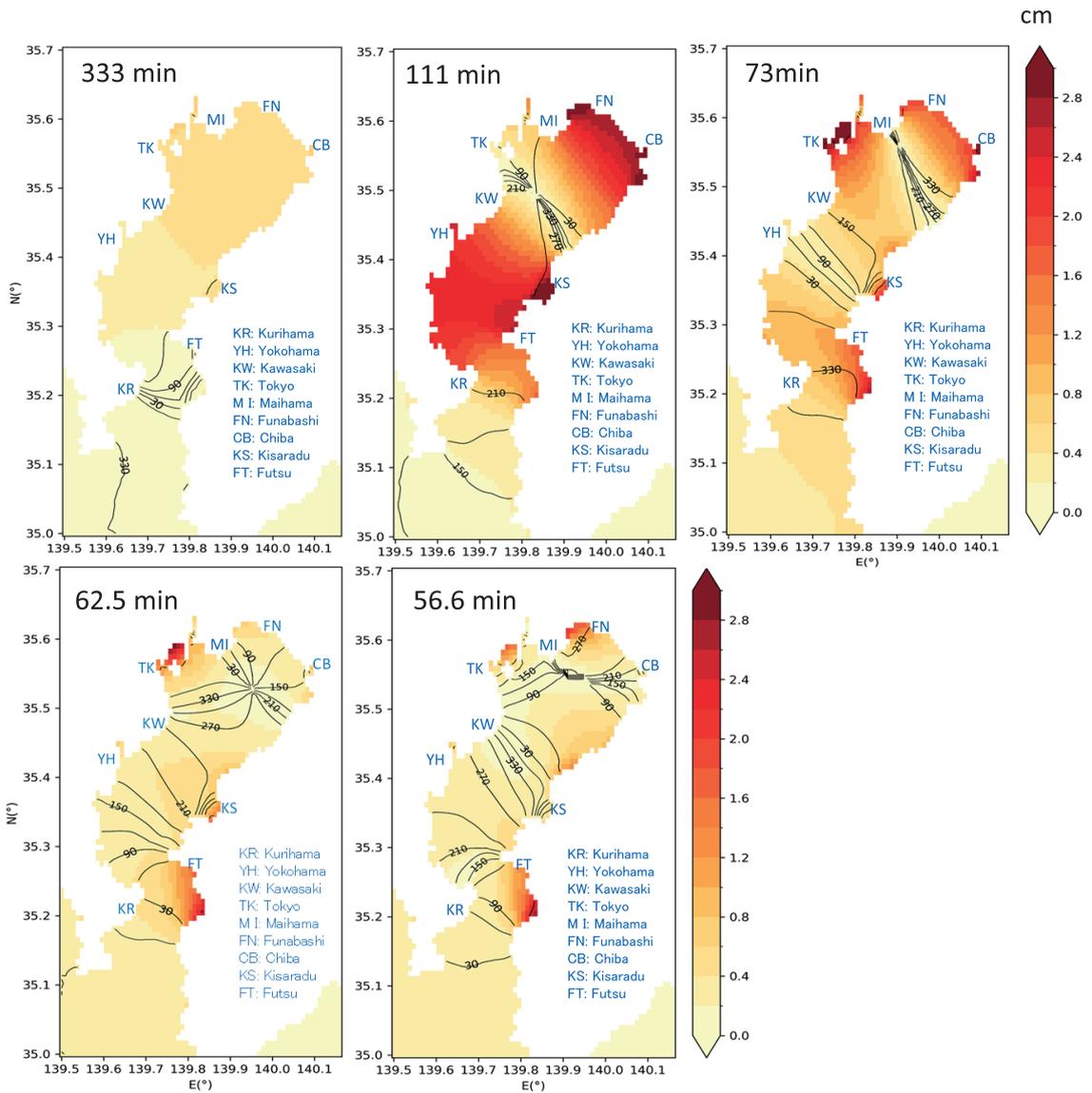


Fig. 8 Distribution of amplitude and isophase line of each periodic component. Color bars indicate amplitude of sea level displacement in cm. The unit of numerical values on the isophase line is degrees.

円が分布し、湾奥で東西方向の振動が形成されていることが分かった。111分と73分周期では、変位の振幅の小さいところで流速振幅が大きくなる湾全体にわたる振動である。それに対し、62.5分と56.6分では局所的に海面変位の振幅が大きい所の周辺で流速の振幅が大きくなっている傾向がみられる。62.5分周期は、東京港の出入り口付近

で大きく千葉沖では小さいが、56.6分周期では、東京港付近に比べて船橋沖より東で南北方向の大きな流速振動を示す。これらのことから、62.5分周期は東京港が主体の固有振動、56.6分周期は船橋沖から千葉沖が主体となる固有振動といえる。特に、第3モードの横浜沖のように、海面変位の振幅が小さく固有振動の節を示唆する場所にも

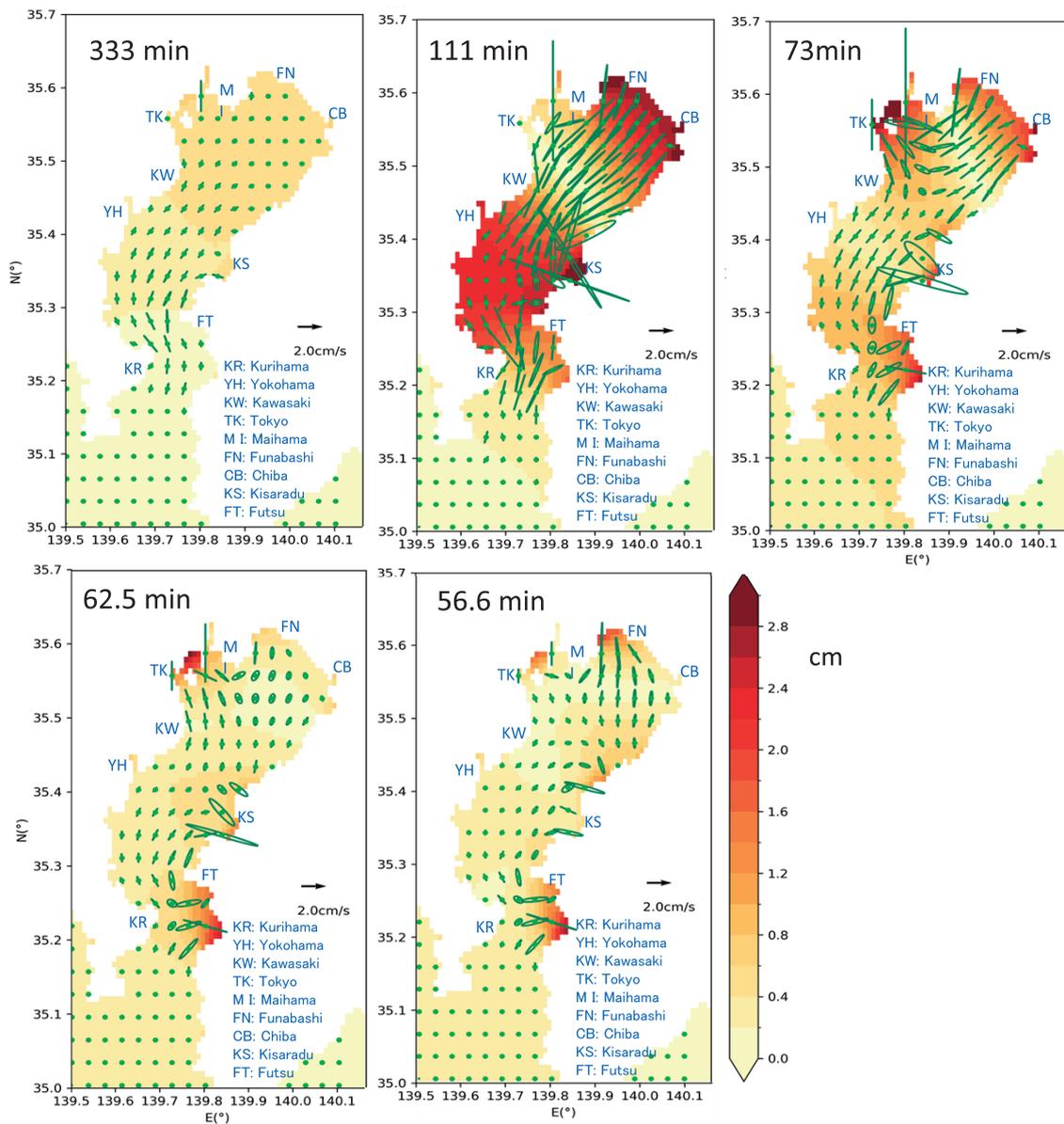


Fig. 9 Distribution of current velocity ellipse and amplitude of sea level displacement for each periodic component. Scale of ellipse is indicated by arrow.

かかわらず、等位相線が分かれており、位相が伝播している様子を示すことについては、5章で考察する。

4. 湾外から波及する津波の時間長に対して励起される固有振動の特性

4.1 実験条件の設定について

湾内の局所的な波の増幅において、幾つかの固有振動の重ね合わせが重要であることが示されたが、外洋から波及する波に対し、東京湾内では固

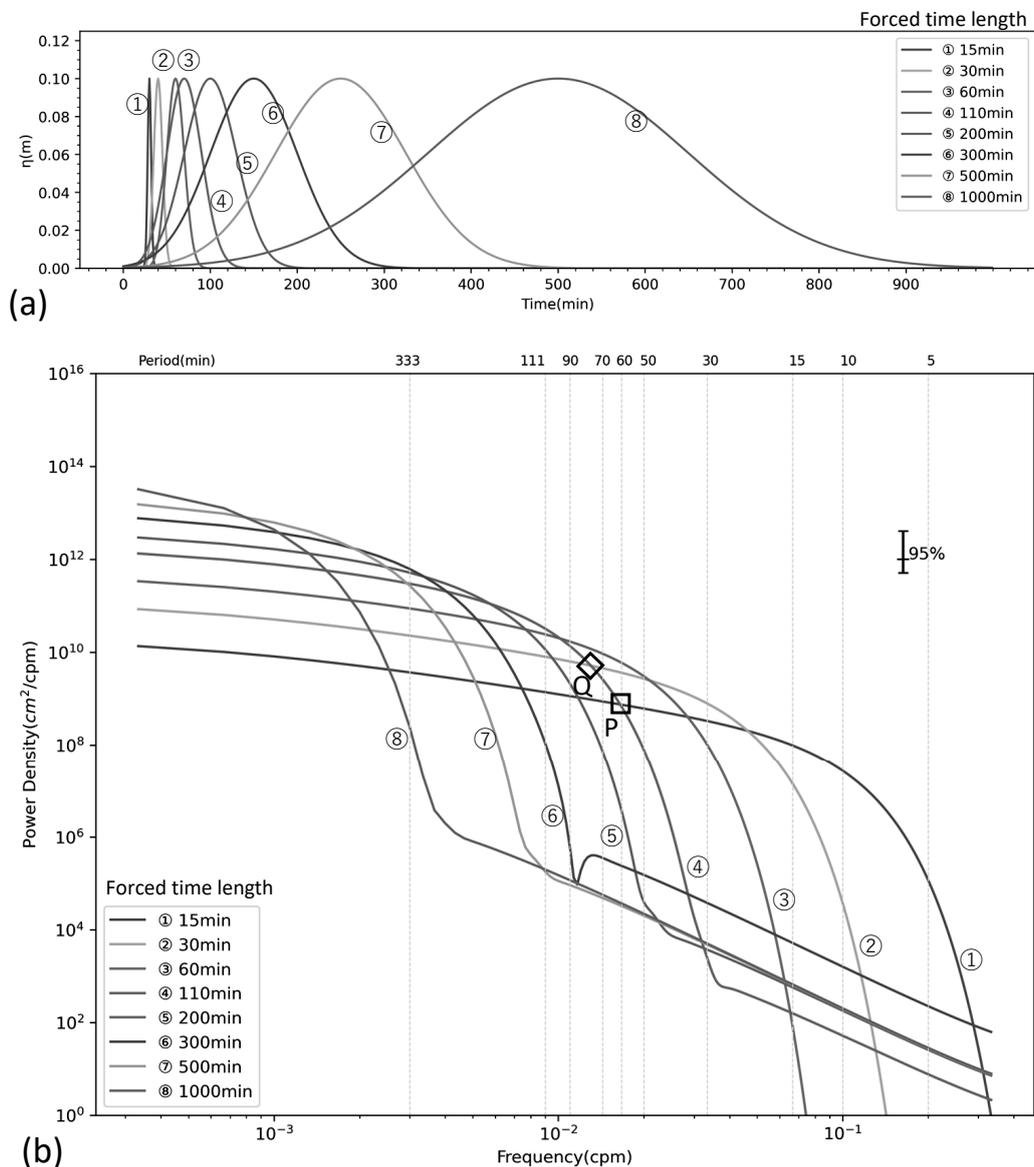


Fig. 10 (a) Temporal variation of Gaussian type wave of each forced time length given at the boundary. While experiments were performed totally 15 cases, changing the duration of the input wave from 15 min to 1000 min, only 8 cases are shown for clarity. (b) Frequency characteristics of the Gaussian wave given at the model boundary are indicated by power spectrum. Only 8 cases are shown for clarity.

有振動の周期変動のみが応答している点は興味深い。この章では、入射する津波の波形や波長に対して東京湾内に形成される固有振動の違いを調べるため、地形 A に対して、境界から与える波の波

形を Fig. 10 (a) に示したように時間長を変えたガウス関数とした。ここで与える波の最大変位は 10cm の正の変位で、ゼロでない変位の時間長さを時間長と呼び、時間長 15 分から 1000 分の 15 ケー

スの実験を行った。各波形が持つ周期特性は Fig. 10 (b) となる。時間長が数時間におよぶ津波は実際問題としてあまり例は無いが、波動の入射・伝播特性を示す意図で実験条件として入れている。なお、強制波の与え方については、前章の再現実験と同様に、北東方向から南西方向に波が入射するように東側から位相差をつけた。強制波の波形が再び波高 0m に戻った後は波が領域外に抜けていくようにした。

4.2 入射波に対して発生する固有振動の特徴

本研究で用いた実験条件では、湾内に形成される固有振動の周期は、いずれの条件においても先の再現実験と同様に、主に 333 分、111 分、73 分などが励起された。各周期の固有振動により形成される振幅の分布と等位相線の分布および流速楕円の分布は、それぞれ Fig.8 および Fig.9 とほぼ同様となった。また、東京湾内湾に入射する波の振幅は、①の時間長 15 分では小さいが、与える波の時間長が長くなるにつれて大きくなり、60 分を超えると布良と晴海での最大変位はほぼ同程度となり、110 分以上では晴海の最大振幅は布良の 1.4 倍程度となった。つまり、時間長が長くなると、内湾へ波及する波の振幅は調和定数表に見られる潮汐の振幅の比と同程度になる。一方、東京湾内に形成される固有振動では、その周期によって励起される振幅には大きな違いがみられた。Fig. 11 (a) は、与えるガウス波の時間長に対する各固有振動周期の振幅の変化を示す。入射波の時間長が固有振動に近いとき励起される固有振動の振幅が大きくなるが、長くなりすぎると固有振動が励起されなくなることを示す。これは入射波がガウス関数の場合、Fig.10 (b) に示したように、入射波に含まれる固有振動の周期成分が極端に小さくなることに対応している。

次に、3 章で示したように、局所的な固有振動と第 3 モードとのうなりによる振動の増幅があることから、62.5 分と 56.6 分の振幅を詳しく見ていく (Fig.11 (b))。波形①から④での実験結果で見ると、73 分周期の晴海と千葉沖の振幅の比はおおよそ 2 対 1 でほぼ一定の関係にある。一方、晴海で

の 73 分の振幅と 62.5 分の振幅の変化を見ると、73 分周期の振幅が大きくなると 62.5 分周期も大きくなる。ただし、その比 (73 分の振幅割る 62.5 分の振幅) は一定ではなく、①から④の実験では大きくなっている。

与えられる波のパワースペクトル (Fig.10 (b)) に□P で示したところは、波形①と④で波の持つ 60 分周期成分のエネルギーレベルがほぼ同じで、62.5 分周期成分では、わずかに④の方が大きく、この時に晴海に形成される固有振動周期 62.5 分の振幅は①より④の方が若干大きい (Fig.11 (b))。同様のことは、Fig.10 (b) に◇Q で示した 73 分周期成分の近くでの②と④がほぼ同レベルで 73 分周期成分ではわずかに④よりも②の方が大きい。このとき形成される固有振動 73 分周期の振幅は④よりも②の方が大きいことでも認められる。つまり、形成される固有振動周期の振幅は、固有振動の周期と同じ周期成分が入射波にどれだけ含まれているのかに依存している。再現実験の結果 (Fig.7 (a)) で見られたように、73 分周期と 62.5 分周期の波の重ね合わせで生じるうなりでは第 3 波目に波高が最も高くなることになるが、その振幅の増幅率は各波の振幅の組み合わせによる。即ち、入射する波の波形に含まれる周期特性により、各固有振動周期成分の増幅率が決まることを意味する。

5. 考察

5.1 モード構造と等位相線分布

本実験で得られた 333 分と 111 分周期については、港湾等の固有振動として一般的によく見られる湾軸方向に流速振動を持つ構造であることから、東京湾の固有振動の第 1, 2 モードであることは容易に判断できた。また、これらに続く周期の 73 分周期の振動は、湾奥に東西方向の振動が卓越するモード構造であったが、東京湾全体で見られたことから第 3 モードとして考えられた。この湾奥に東西方向の振動が形成されるのは、東京港の存在が大きいと考えられる。そこで、東京港を削除し、東京湾内湾の陸岸をスムーズにした仮想の地形 B を用いて、同様の条件を与えた実験を行

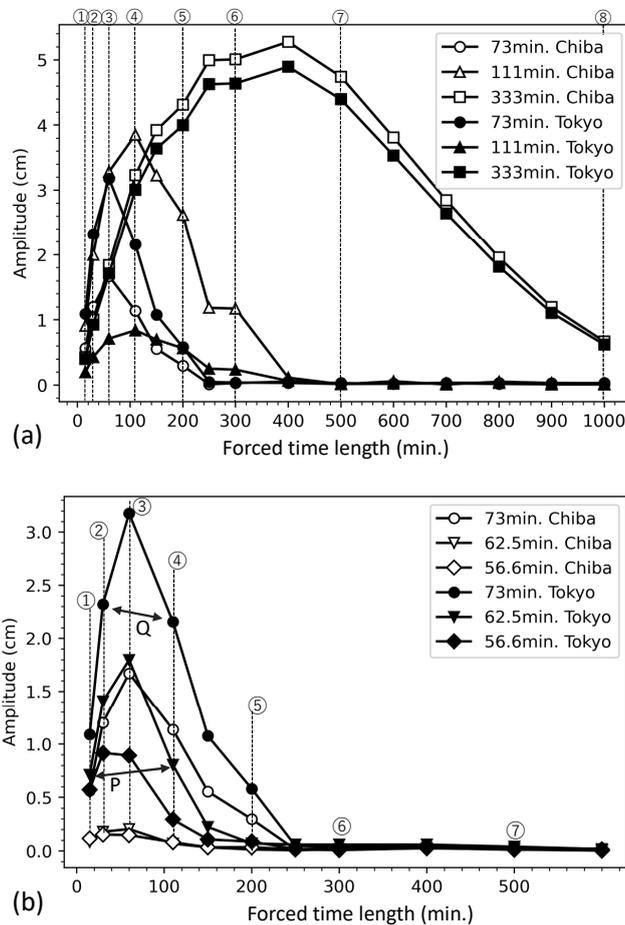


Fig. 11 The amplitude of surface displacement for each natural oscillation at off Chiba and Harumi (Tokyo) of all experiments. (a) 333, 111 and 73minutes periodic component, (b) 73, 62.5 and 56.5 minutes. Dashed line and number with circle indicate forced time length as shown in Fig. 10.

い、形成される振動系を調べた。Fig. 12 (a) に地形 A と B における 73 分周期の振幅と等位相線分布、および地形 B における 62.5 分周期の振幅と位相、および流速楕円の分布を示す。卓越する振動は地形 B では、Fig. 12 (b) 示したように 73 分周期ではなく、62.5 分となった。地形 B では東京港内に対応する地点が無いので、C1 のみを比較している。地形 B では、地形 A において見られた湾奥での東西方向の振動は発生せず湾軸に沿っ

た方向の振動が顕著である。また、地形 B では図中の I, II, III 付近に等位相線が密集し、位相が急に 180° 変化する定在波的構造を示し、3 か所に節が形成されていることが分かりやすい。

実際の地形、地形 A の実験では、等位相線が分散して分布していることが、モード構造を考える際に理解を難しくする。これは、3 章でも指摘したが、地形 A の 73 分周期では、横浜から川崎あたりに湾奥から 2 つ目となる振幅の小さい節域が

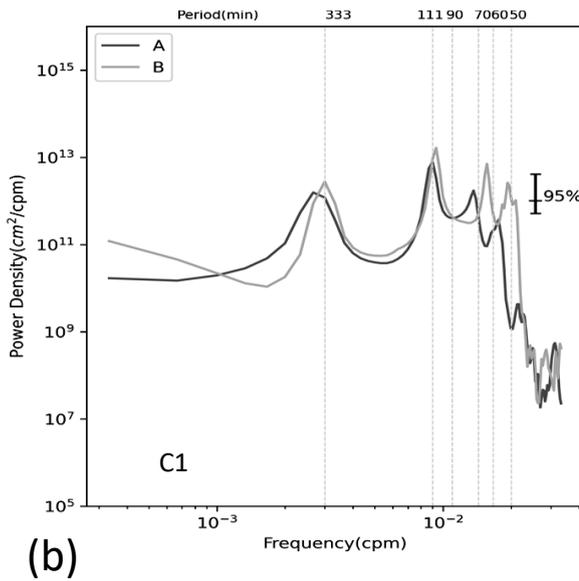
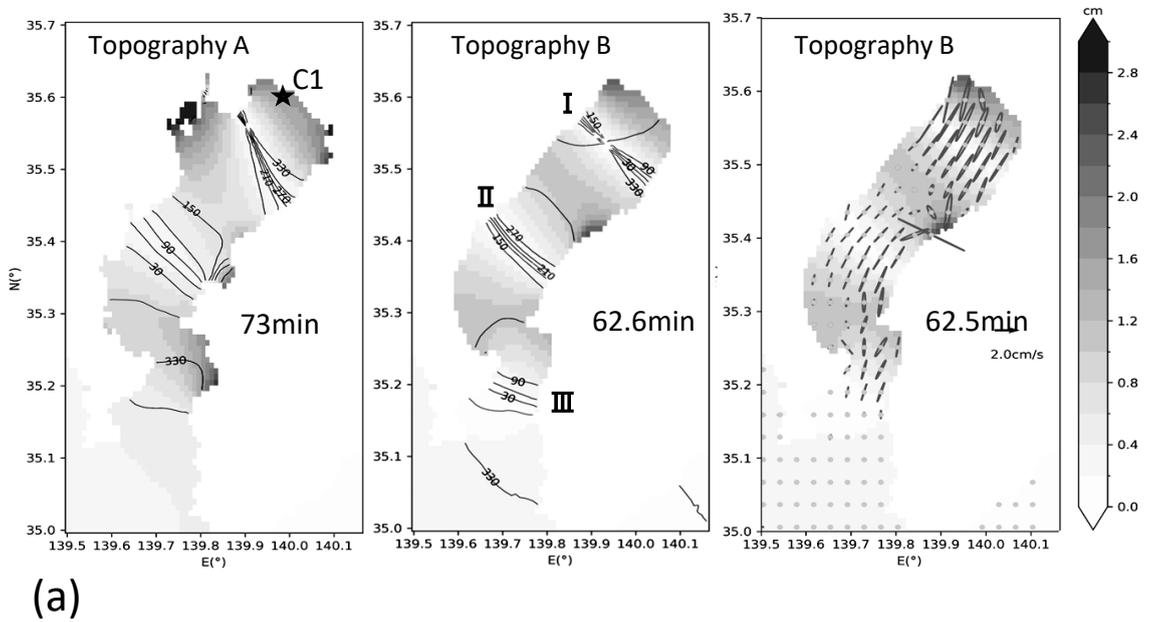


Fig. 12 (a) Distribution of amplitude and phase for the 73minute period component for Topography A (Left panel), and for the 73minute period (Middle Panel) and 62.5minute period (Right panel) for Topography B. (b) Power spectrum of sea level displacement at C1 for experiments with Topography A and B.

形成されるが、そこでの位相の変化は湾奥に位相が進む関係を示している。地形 B では、湾奥から 2 目となる節の部分は図中 II 付近で、そこを挟

んでほぼ逆位相であることが分かる。ただし、地形 B でも湾奥から 3 目目の節となる III 付近では位相の変化がみられる。一般に、入射波と反射の

Table 2. Variance (cm^2) obtained by integrating energy spectrum from 50 to 90 minutes periodic component at the monitoring point A1, A2, A3 and A4 along the bay axis.

	Topography A	Topography B
A1	2.5×10^9	6.2×10^9
A2	0.8×10^9	3.6×10^9
A3	1.7×10^9	5.0×10^9
A4	4.2×10^9	6.7×10^9

振幅が等しくないとき、位相が逆転するような明瞭な節ができない。その特徴は、地形 A での横浜付近から湾奥に向かうような位相変化に現れていると言えるだろう。

そこで、このような位相分布の違いをもたらしているエネルギーの減衰について調べる。地形 A と B のパワースペクトル (Fig. 12 (b)) では、周期 333 分と 111 分のピークでは、地形による違いは小さいが、50~80 分の周期帯のピークでは地形 A, B で異なる。地形 B の方がピークが鋭くエネルギーレベルも高い。卓越周期が異なることから直接同じ周期のエネルギーレベルを比較できない。そこで、第 3 モードのエネルギーレベルの違いを調べるため、地形 A と B のそれぞれの 50~90 分の周期帯におけるスペクトル密度を周波数で積分して比較した結果、地形 B の方が、地形 A よりもエネルギーが大きい傾向にあることがわかった (Table 2)。これは地形 A では、複雑な地形の海岸線や港湾が存在するため、流速振動の空間変化が大きく、水平粘性を通して波のエネルギーが減衰しやすいこと示唆している。また、局所的に強められる固有振動の流れに対し、海底摩擦が大きくなることも波のエネルギーを減少させる要因となる。

5.2 地形に対する固有振動周期の感受性について

本研究に用いた地形は、港湾の地形や河口域などを再現するには、必ずしも十分な解像度であるとは言いきれない。しかし、本研究の結果明らかとなった増幅機構は、固有振動の重ね合わせによ

る局所的な増幅であった。したがって、どのような固有振動の周期ができるのかが重要になる。この固有振動の周期を決めるのは、陸岸や海底地形で、これまでいくつもの先行研究があるが、本研究結果もそれらとほぼ同じ周期の固有振動が励起されることが示された。本研究では湾全体の固有振動モードと各港湾の固有振動との関係が重要であることを指摘しており、陸岸の地形の粗さやモデルで採用する水深に多少の変化があったとしても、その結論に大きな影響をもたらすことはないと考えられる。さらに、東京港晴海の増幅がよく再現されていることから、東京湾全体の第 3 モードの 73 分と東京港の 62.5 分の固有振動の重ね合わせであることは、本結論を支持するものと言える。

6. まとめと課題

本研究では、東京湾の複雑な地形における固有振動とその重ね合わせによる水位変動の増幅機構について数値実験により調べた。モデル領域は東京湾を中心とした関東近辺の海域とした。まず、2011 年 3 月の東北地方太平洋沖地震による津波を模した波を与えた実験を行い、東京湾内の固有振動の形成とその振動形態を調べた。湾内全体に及ぶ固有振動として、333 分、111 分、73 分周期が励起された。周期 333 分と 111 分では湾軸に沿った東京湾全体の振動で、それぞれ固有振動の第 1、第 2 モードであり、73 分周期は湾口から川崎沖までは湾軸に沿った流速振動だが湾奥で東西の流速振動となる第 3 モードであることが分かった。そのほかにも、場所により 62.5 分や 56.6 分に明瞭なピークが認められた。そこで、これらの周期成分について、その振動の空間的構造を調べた。62.5 分の周期変動は主に東京港での振動であり、56.6 分周期は船橋と木更津より東側に形成される南北方向の振動であることが分かった。東京港の晴海などでの地震による津波の際に観測された水位変動では、第 1 波から第 3 波まで徐々に増幅して減衰する振幅の変化が認められたが、この振幅変化と持続時間は東京港の固有振動 62.5 分と東京湾全体の第 3 モード 73 分周期の重ね合わせによ

る「うなり」であることが示された。また、複雑な海岸線においては水深が非常に浅くなっていることや、湾全体から見れば小規模な湾やくぼみであってもそこが腹となる共鳴振動を起こして大きな流速が生じる可能性がある。そのため水平粘性項や海底摩擦項によりエネルギーが減衰し、形成される固有振動の形状、特に位相分布に影響を与えると考えられた。エネルギーの減衰に関しては、より細かな地形を用いた実験も必要があるだろう。

次に、東京湾外から波及する様々な周期の津波に対し、東京湾内に形成される固有振動の特徴を調べた結果、伝播してくる波の周期成分に含まれる各固有振動周期成分の振幅の大きさにより、湾内に形成される各固有振動周期成分の振幅の大きさが決まることが分かった。さらに、励起される固有振動の組み合わせにより振動の時空間的な変化が生じると考えられた。このことから、今後の港湾の設計においては、あらかじめ想定される固有振動を調べ、固有振動の合成波により海面変動が極端に増大することが無いように注意する必要があるだろう。

謝辞

本研究を進めるにあたり、多くのご助言をいただきました東京海洋大学の日比谷紀之客員教授に深く感謝申し上げます。東北地方太平洋沖地震時の津波による海面変位の時系列図等は、気象庁、海上保安庁並びに国土地理院のホームページから得られました。本研究の一部は、科研費補助金「20K20134, 22H00172」により実施されました。

参考文献

- 相田勇 (1996) : 東京湾近傍の地震による津波の特性. 地震 第2輯, 第49巻, 217-226
- 羽鳥徳太郎 (2006) : 東京湾・浦賀水道沿岸の元禄関東 (1703), 安政東海 (1854) 津波とその他の津波の遡上状況. 歴史地震, 第21号, 37-45
- 日野幹夫, 日野和子 (1964) : 東京湾の侵入長波に対する振動応答特性. 海岸工学研究発表会論文集, Vol. 11, 98-107
- 堀川清 (1973) : 海岸工学 海洋工学への序説. 東京大学出版, 103-155
- 海上保安庁 : 日本海洋データセンター NEAR-GOOS 地域遅延モードデータベース (NEAR-GOOS RDMDDB) https://near-goos1.jodc.go.jp/index_j.html (最終アクセス日 2024/1/29)
- 気象庁 (2011) : 災害時地震・津波速報 平成23年 (2011年) 東北地方太平洋沖地震. https://www.jma.go.jp/jma/kishou/books/saigaiji/saigaiji_201101/saigaiji_201101.pdf (最終アクセス日 2024/2/10)
- 国土交通省 国土地理院ホームページ: 平成23年 (2011年) 東北地方太平洋沖地震に伴う地殻変動と震源断層モデル <https://www.gsi.go.jp/cais/topic110422-index.html> (最終アクセス日 2024/2/9)
- 大石祐介, 古村孝志, 今村文彦, 山下啓, 菅原大助 (2018) : 南海トラフ巨大地震による東京湾周辺での振動特性. 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol. 74, No.2, 205-210
- 佐々木淳, 伊藤一教, 鈴木崇之, R. U. A. WIYONO, 織田幸伸, 高山百合子, 羽角華奈子, 古田敦, 高木泰士 (2012) : 2011年東北津波の東京湾内での伝播特性と被害状況. 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol. 68, No.2, 261-265
- 瀧川朗, 室谷智子, M. HEIDARZADEH, Y. WU, 佐竹健治 (2015) : 東京湾内外の津波高さ分布・周期特性と東京湾・相模湾の固有振動. Japan Geoscience Union Meeting, HDS27-16.
- HIBIYA, T. and K. KAJIURA (1982) : Origin of the *Abiki* Phenomenon (a Kind of Seiche) in Nagasaki Bay. Journal of the Oceanographical Society of Japan, Vol. 38, pp. 172-182
- 水口大輔, 星野剛, 安田浩保, 山田正 (2013) : 東京湾奥部の港内における長波の波高増幅機構の解明. 土木学会論文集 A2 (応用力学), Vol. 69, No. 2 (応用力学論文集 Vol. 16), 583-592

Received: April 15, 2024

Accepted: April 14, 2025

海洋観測データの高精度化の取り組み

内田 裕¹⁾

Efforts to increase accuracy of ocean observation data

Hiroshi UCHIDA¹⁾

1. はじめに

筆者が第53回日仏海洋学会賞を受賞した2024年は、1872年から1876年にかけて行われた英国軍艦（海洋調査船）チャレンジャー号の世界一周航海による近代的な海洋学の幕開けから150周年にあたる（SUMMERBAYES AND THORPE 1996）。この150年間に海洋観測技術は大きく発展し、特に最近30年間に、海洋大循環に関する高精度な観測が精力的に実施されてきた。筆者は過去30年に渡り海洋循環に関わる海洋観測に携わってきた。現在の海洋は今しか観測できないことを念頭に、気候変動研究に耐えうる高品質な海洋観測データの公開を通して、海洋の長期変動に関する研究を行ってきた。本稿では、海洋観測、特に船舶による水温・塩分測定の世界観を概観するとともに、この30年間に実施してきた海洋観測データ、特に船舶による水温・塩分測定の高精度化の取り組みを振り返り、今後の課題を提起する。

2. 海水の温度・塩分測定の世界観

150年前のチャレンジャー号による大航海の目的は、海水や堆積物の物理・化学、海中と海底の生物分布などの研究により、イギリスの指導的地位を確保し続けることであった。しかし、真の目的は、海流の原因として当時論争となっていた風成説と対流説のうち対流説（高緯度表層の冷たい海水が沈降し、低緯度表層で浮かび上がってくるという考え）を実証することとされている（友田・高野 1983）。海面から1700 mまでの8層で、ストップコック採水器による海水サンプルの採取、ピエゾメータによる圧力（採水深度）測定、ハイドロメータによる比重測定、ミラー・カッセラ水銀温度計による水温測定、海水サンプルの塩分測定（蒸発乾固法）や化学成分分析などが、世界中の海洋で行われた（Fig. 1）。チャレンジャー号の結果から、海水の組成比は世界中どこでも変わらず、塩素量—塩分—密度の関係の妥当性を確認したことの意義は大きく、電気伝導度や屈折率などの化学・物理的手法によって塩分や密度の分布を求められることが証明された。チャレンジャー号による世界一周航海を皮切りに、ドイツやノルウェーによる大調査航海が次々と行われ、海洋調査の大航海時代が幕を開けた（友田・高野 1983）。

1) 国立研究開発法人海洋研究開発機構 地球環境部門海洋観測研究センター

〒237-0061 神奈川県横須賀市夏島町 2-15

1) Global Ocean Observation Research Center, Research Institute for Global Change, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, 2-15 Natsushimacho, Yokosuka, Kanagawa 237-0061, JAPAN

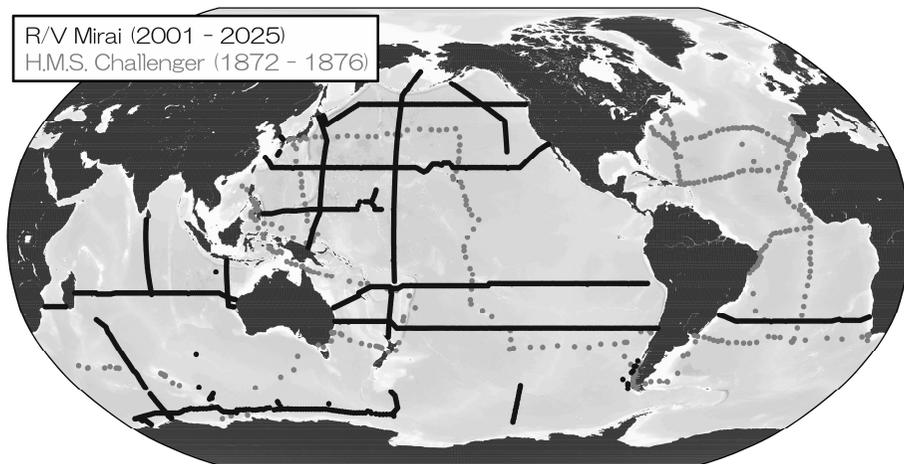


Fig. 1 英国チャレンジャー号による世界一周航海の測点（グレー）と、海洋地球研究船「みらい」による高精度船舶観測測点（黒）。

チャレンジャー号による海洋研究の幕開けと時を同じくして、計量標準分野も幕を開けた。度量衡の国際的な統一を目指して、1875年に国際度量衡局（BIPM）がフランスに設立され、当時17か国の代表によりメートル条約が締結された（日本は1885年にアジアで唯一条約に加盟）。1889年の第一回国際度量衡総会において、国際原器に基づく「メートル」と「キログラム」の定義が宣言され、各原器の一組づつと0.0001℃の桁まで校正値を付された二本の水銀温度計が、BIPMからメートル条約加盟国に配られた。これが国際的に初めての実用温度目盛（水の融解点0℃から水の沸点100℃まで）となった。

塩分については、塩素量の分析値と塩素量—塩分の関係式から推定されていたが、欧州の多くの国による海洋調査がさかんになるにつれ、塩分値の比較可能性を確保する必要性が生じた。そこで、1899年に国際海洋探査委員会（ICES）設立のための準備会議が開催され、クヌーセン（デンマークの海洋学者）により標準海水調達のための国際機関の提案がなされた。そして、1900年にクヌーセンが製造し塩素量の値が付された標準海水バッチ VI（80本）が世界初の塩分測定用国際標準海水としてドイツ・フィンランド・ノルウェー・ロシア・スウェーデン・デンマークに配布された。

その後、1906年のバッチ P1 から現在まで（最新のバッチは2024年の P169）、塩分測定用の唯一の国際標準海水（現在の IAPSO 標準海水）として世界各国に供給され続けている（JENKINS AND WILLIAMS 2025）（日本においては、1939年の第二次世界大戦開戦により欧州から標準海水の入手が困難になった。そこで、1942年から1980年代まで日本独自の標準海水を製造することで戦中・戦後の塩分測定の比較可能性を確保し続けた [UCHIDA 2025]）。

第二次世界大戦終結後は、およそ10年毎に国際的な大規模船舶観測プログラムが実施されてきた（1950年代の国際地球観測年 [IGY]、1960年代の国際インド洋調査 [IIOE]、1970年代の地球化学的大洋縦断研究 [GEOSECS]、1980年代の南大西洋ベンチレーション実験 [SAVE]）。この間、海洋観測機器の開発が大きく進展した。1930年代から開発が始まった電気伝導度塩分計は、現在世界標準として用いられている塩分計（カナダ Guildline 社 AUTOSAL 8400B）の原型が1970年代に開発され、1980年代に AUTOSAL 8400A が完成した。海洋の鉛直分布を測定可能な電気伝導度・水温・水深計（CTD）についても、1970年代には米国 Neil Brown 製 CTD MK IIIB が、1980年代には米国 Sea-Bird Electronics 製 CTD が開

発された (SHKVORETS 2025)。また、海水の状態方程式の作成に必要な海水密度の測定に用いられる卓上型振動式密度計が 1969 年に開発された (PICKER ET AL. 1974)。

電気伝導度計が普及するにつれ、塩素量から求めた塩分と電気伝導度から求めた塩分の差が無視できなくなった。そこで、1978 年に電気伝導度に基づく塩分 (実用塩分) が定義され、1980 年に実用塩分に基づく海水の状態方程式 (EOS-80) が国際的に合意された。また、標準海水バッチ P91 (1980 年) から認証値が電気伝導度比に変更された。これにより、採水試料に対する塩素量の測定値から求める鉛直方向に離散的な塩分データに代わり、CTD を用いた鉛直方向に連続的な水温・塩分データが利用できるようになった。

1980 年代に現在の水温・塩分測定機器の原型が利用可能になり、海水の国際状態方程式が整備されたことを背景に、1980 年代後半から 1990 年代にかけて、世界海洋循環実験計画 (WOCE) が実施された (SIEDLER ET AL. 2001)。全球的な海洋循環像と海洋循環による熱・物質輸送量を明らかにするために、世界中の海洋を岸から岸まで縦・横断する多数の測線を設け、世界中の観測研究機関が協力して海面から海底直上までの船舶 CTD 採水観測 (WHP) が行われた。WHP では、測定値の要求精度 (現在の拡張不確かさ) として圧力 3 dbar, 水温 2 mK, 塩分 0.002 g/kg が設定された。2000 年代になると、WHP の再観測が行われ (Fig. 1), 海洋循環や貯熱量などの時間変化の検出が試みられ、全球海洋各層観測調査プログラム (GO-SHIP) として国際的に大規模な船舶 CTD 採水観測が継続されている。GO-SHIP の CTD 観測においても、WHP と同じ要求精度が継承されている (HOOD 2010)。

3. CTD 観測データの高精度化

筆者は、1993 年から九州大学大学院で海洋研究を開始した。1992 年に人工衛星海面高度計 TOPEX/POSEIDON (T/P) の打ち上げが成功し、世界中で WOCE に関する観測が開始された時期であった。九州大学では、WOCE の一環として、

四国沖の T/P の軌道に沿った黒潮を横断する測線で、船舶による繰り返し水温・塩分断面観測、係留流速計時系列観測、係留倒立音響測深器時系列観測、人工衛星海面高度計観測などを組み合わせた黒潮流量を評価する観測 (ASUKA) を開始したところであった。国内の研究機関・大学・官庁などが ASUKA 測線上で実施した船舶観測データの品質管理を担当した (UCHIDA ET AL. 2008; UCHIDA AND IMAWAKI 2008)。各機関から提供されたデータを元に、水温—塩分 (T-S) 関係の比較から系統誤差の有無を評価し補正した。1990 年代当初は Neil Brown 製 CTD が主流であったが、米国 Sea-Bird Electronics (SBE) 製 CTD が普及し始めた頃であった。Neil Brown 製 CTD ではひずみゲージ式圧力センサーのヒステリシス補正や水温センサーと電気伝導度センサーの応答速度の違いの補正が必要であったが、SBE 製 CTD ではヒステリシスが小さい水晶振動式圧力センサーを採用し、ダクト内に配置された水温・電気伝導度センサーに水中ポンプを用いて一定流速の海水を導入することで精密な応答速度・測定タイミングの補正が可能で、SBE が提供する処理ソフトを用いた標準処理のみで、非常に高品質な (ノイズが少ない) データが得られた。ただし、黒潮の流量評価においては、水温や塩分の正確さはあまり重要ではなく、データ提供機関毎に品質管理のレベルは様々であった。

筆者は 2001 年に海洋科学技術センター (現在の海洋研究開発機構 [JAMSTEC]) に就職し、海洋地球研究船「みらい」を用いて、1990 年代に実施された大洋を縦横断する WHP 再観測に従事し、CTD 観測責任者を担当した (Fig. 1)。当時、WHP 再観測の先駆けとして、1999 年に北太平洋 47 度を横断する測線 P01 再観測が行われ、1985 年の WHP データとの比較から海盆全体に及ぶ大規模な底層昇温 (10 年当たり 2 mK 程度) が発見された (FUKASAWA ET AL. 2004)。このような海洋深層の僅かな変化を検出するために高精度な CTD データが必要とされた。「みらい」では、水温センサー (SBE 3) と電気伝導度センサーが 2 セット搭載された SBE 製 CTD を用いていた。

CTD 圧力センサーは、JAMSTEC において、圧力校正の一次標準器と同じ原理の重錘型圧力天秤を用いて毎年校正されていた。SBE 3 は、センサー製造元の SBE において、WHP 再観測の直前・直後に校正された。電気伝導度センサー補正用の採水試料に対する塩分測定には、最も精度が高い塩分計（カナダ Guildline 製 AUTOSAL 8400B）が用いられた（KAWANO ET AL. 2006a）。このように、高精度 CTD データを取得するための万全の体制が整えられていた。

「みらい」への初めての乗船航海は、2001 年に JAMSTEC が初めての本格的な高精度船舶観測として実施した WHP P17N 再観測であった。CTD データの品質管理の手始めに 2 台の SBE 3 の水温差を確認したところ、0.5 mK 程度の振幅を持つ差の振動に加え、観測前後のメーカー校正から見積もったセンサーの時間ドリフトでは説明できない、圧力に依存した 1 mK 程度の系統差が見られた（UCHIDA ET AL. 2015）。これらの水温データの不確かさは、深層の微小な変化（例えば 10 年当たり 2 mK の底層昇温）に比べて無視できない大きさだった。

圧力に依存した水温センサーの系統差については欧米の一部の機関ではすでに知られており、1997 年に SBE 製深海用基準温度計（SBE 35, Serial no. 3）を用いた SBE 3 の現場校正を検討した記事（WOCE ニュースレター）が報告されていた。そこで、急遽 2003 年の CTD 観測から SBE 35 を導入した（Fig. 2）。JAMSTEC が所有する 11 台の SBE 3 の圧力特性を評価したところ、6000 m あたり 0~2 mK 程度（最大で 5 mK）の圧力依存の存在が明らかになった（UCHIDA ET AL. 2007）。ただし、基準とする SBE 35 の圧力特性は不明だったため、実験室で SBE 3 の圧力特性を評価し、SBE 35 には圧力依存が無いことを間接的に確かめた（UCHIDA ET AL. 2015）。また、SBE 35 を産業技術総合研究所計量標準総合センター（NMIJ）が管理する温度の国家標準（ITS-90 の定点セル：水の三重点とガリウムの融解点）と比較することで、SBE による校正との整合性を確認した（UCHIDA ET AL. 2015）。論文執筆にあたり SBE

とトレーサビリティに関する議論の結果、2011 年に SBE の定点セルがアメリカ国立標準技術研究所（NIST）にトレーサブルなものに更新された（それ以前に使用していた水の三重点セルの 2011 年時点のバイアスは -0.13 mK 程度と評価された [UCHIDA ET AL. 2015 参照]）。

水温差の振動は CTD の水中での姿勢変化と相関があり、ダクト内の流速変化による、水温センサー・プローブ周りの摩擦熱の大きさの変化に起因するものと考えられた（UCHIDA ET AL. 2015）。そこで、2002 年に CTD 採水器フレームをアルミ製からステンレス製に変更し重量を増やし、フレームに回転抑止版を取り付けて採水器フレームの動揺軽減を図った。また、2015 年に、はなゆう製水中スリッピング・スィベルを CTD と水中ケーブルの間に導入した。メーカーと共同で信頼性向上のための改良を繰り返し、2017 年から安定運用が可能になり、CTD の姿勢変化が劇的に減少した（UCHIDA ET AL. 2018）。

以上により、「みらい」の高精度船舶 CTD 観測による深海（2000 m 以深）の水温測定の変動不確かさは 0.7 mK と見積もられた（UCHIDA ET AL. 2015）。これにより、「みらい」の 2 回の CTD 観測による 1 mK の水温差の検出が可能になり、全球的な海洋底層の大規模な昇温現象を明らかにした（KAWANO ET AL. 2006b, 2010; KOUKETSU ET AL. 2011）。

塩分については、通常、採水サンプルに対する分析値を用いて電気伝導度センサーを補正する。補正式・補正方法に関する工夫はあるものの、分析値の正確さが CTD 塩分データの品質を決定する。2010 年に海水の状態方程式が EOS-80 から国際海水熱力学方程式（TEOS-10）（IOC ET AL. 2010）に改訂されたことを機に、TEOS-10 の評価のために海水密度の直接測定に取り組むとともに（UCHIDA ET AL. 2011）、塩分分析も担当することになった。塩分の分析手法自体は確立されていたが、塩分計の校正に用いる IAPSO 標準海水（約 1 年毎に新しいバッチが製造される）のバッチ間オフセットの評価（KAWANO ET AL. 2006a）を引き継いだ（UCHIDA ET AL. 2025b）。実用塩分が導入

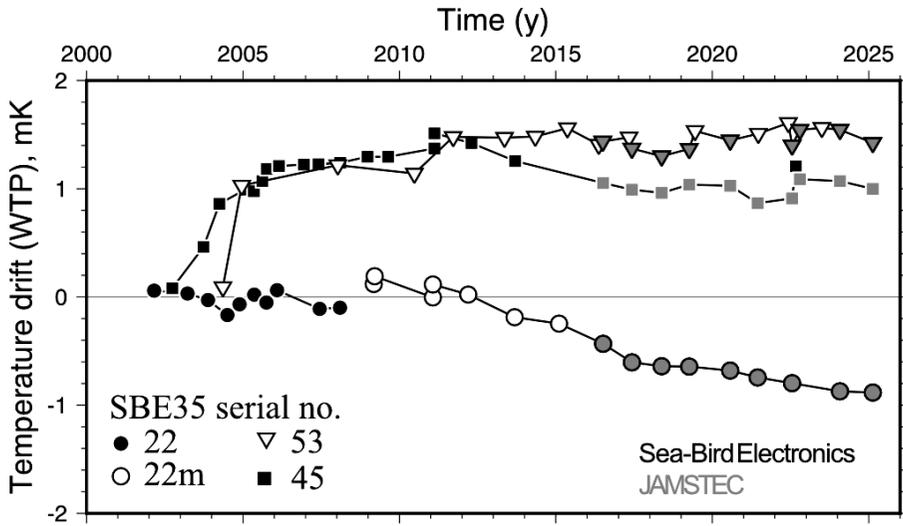


Fig. 2 海洋研究開発機構 (JAMSTEC) が所有する深海用基準温度計 (SBE 35) の校正履歴 (水の三重点セルで評価したセンサーの時間ドリフト)。Serial no. 22 は 2009 年にプローブを交換したため、交換後を 22m と表記。グレーは JAMSTEC が所有する水の三重点セルでの評価結果。Serial no. 45 は 2022 年に耐圧容器を交換したことにより約 0.2 mK のオフセットが生じた。

された 1980 年以降は、 ± 0.002 程度のバッチ間オフセットの存在が示唆され (Fig. 3)、北太平洋の時系列観測点で蓄積された船舶 CTD 塩分データにバッチ間オフセット補正を適用することで、北太平洋底層 (等温度面上) の低塩化 (10 年あたり -0.0006 g/kg) を初めて検出した (UCHIDA ET AL. 2020)。しかし、バッチ間の相対的なオフセットを繋ぎ合わせてオフセット・テーブルを拡張し続ける方法では、オフセット推定誤差が蓄積する懸念があった。

2010 年からの海水密度測定の取り組みの一環として、密度計の校正に必要な海水密度標準物質の開発を開始し、海水密度に関連した実用塩分、炭酸系成分 (アルカリ度、全炭酸)、および、栄養塩類 (ケイ酸塩、硝酸塩) が安定なマルチパラメータ標準海水 (MSSW) を完成させた (UCHIDA ET AL. 2025a)。合わせて、IAPSO 標準海水の海水密度に関連した海水特性値の安定性を評価した (UCHIDA ET AL. 2025c)。これらの結果から、IAPSO 標準海水の実用塩分が時間とともに増加

(1 年あたり 0.0001 g/kg) していることを発見し、塩分増加トレンドを考慮してバッチ P29 (1959 年) から P167 (2023 年) までの切れ目のないバッチオフセットを再評価した (Fig. 3) (UCHIDA ET AL. 2025d)。北太平洋時系列観測点の船舶 CTD 塩分データに再評価したバッチオフセット補正を適用すると、UCHIDA ET AL. (2020) で発見した北太平洋底層の低塩化は IAPSO 標準海水の塩分増加トレンドに起因した人工的なもので、実際には等温度面上で 10 年あたり 0.00029 g/kg の高塩化を明らかにした (UCHIDA ET AL. 2025d)。

この等温度面上の高塩化トレンドからの差の標準偏差を、「みらい」による海洋深層での塩分測定の不確かさとみなせば、その拡張不確かさは 0.00082 g/kg と見積もられ、「みらい」の 2 回の CTD 観測による 0.0012 g/kg の塩分差の検出が可能になった。

このように水温と塩分の精密な評価が可能になったことで、北太平洋底層の T-S 関係の時間変化の特徴が明らかになり、変化のメカニズム (深

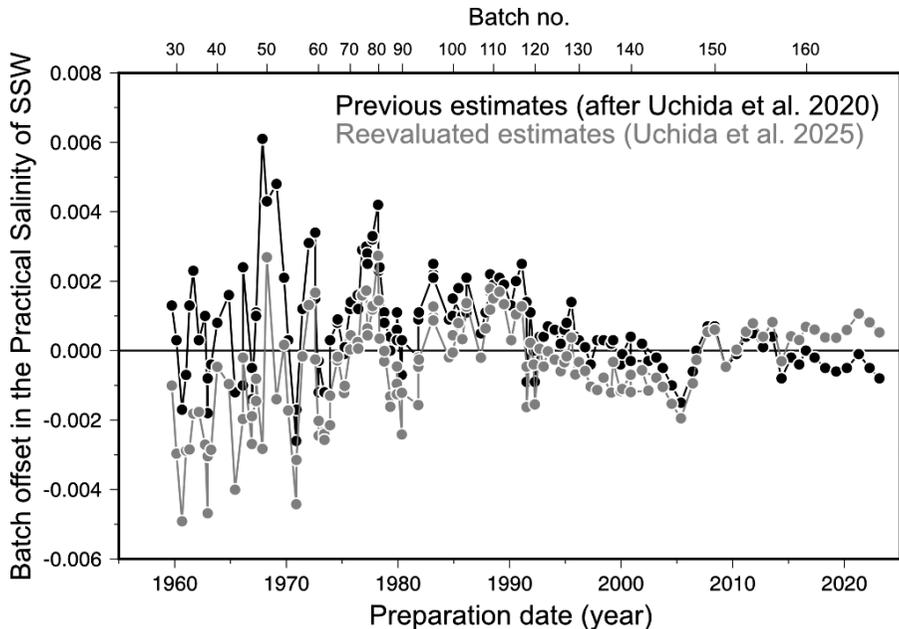


Fig. 3 IAPSO 標準海水の認証値（実用塩分）のバッチ間オフセット。黒丸は従来の評価値、グレーは IAPSO 標準海水の高塩化トレンド（1 年あたり 0.0001 g/kg）を考慮して再評価したもの。1980 年以前のバッチの認証値は塩素量で与えられるため、バッチ間オフセットのばらつきは、塩素量認証値の不確かさに加え、塩素量—塩分の関係式の不確かさに起因している。

層循環の弱化, MASUDA ET AL. 2010) の解明に迫れるようになった (UCHIDA ET AL. 2025d)。

密度については、TEOS-10 の発効を受け、TEOS-10 の検証と将来の改定に備えて海水密度の直接測定に取り組んだ。密度の測定に広く用いられている振動式密度計による海水密度測定には、密度計の非線形性に起因する誤差 (-0.01 kg/m^3 程度) があることを示唆した (UCHIDA ET AL. 2011)。この問題を解決するために標準海水の密度を密度の国家標準にトレーサブルに絶対測定が可能、海水測定に特化した液中秤量装置を開発した (KAYUKAWA AND UCHIDA 2021)。液中秤量装置を用いて MSSW の密度を認証し、MSSW を用いて振動式密度計を校正することで、海水サンプルの密度の高精度な測定が可能になる。ただし、振動式密度計の測定分解能は塩分計 (AUTOSAL 8400B) で求められる密度の分解能より一桁低い。そこで、塩分計と同等の測定分解

能で 10,000 m まで測定が可能、分光干渉法に基づく屈折率密度センサーを開発した (UCHIDA ET AL. 2019)。

これらの塩分・密度に関する取り組みを基に、TEOS-10 の維持・管理・改訂を担う海水特性に関する IAPSO/SCOR/IAPWS 合同委員会 (https://www.teos-10.org/about_JCS.htm) の委員として、TEOS-10 の高精度化にも取り組んでいる。

4. CTD 観測データのさらなる高精度化を目指して

2019 年に国際単位系 (SI) の定義が大きく改定された。SI の基本単位はすべてキログラム原器のような人工物から普遍的な定数 (例えば、キログラムはプランク定数、ケルビンはボルツマン定数) で定義されることになった。実際には、プランク定数はキログラム原器等に基づき決定され、NMIJ の測定値と科学技術データ委員会 (CO-

DATA)の特別調整値がほぼ一致していることから(藤井 2019),国内においては,定義改定による質量標準の不連続は生じない。また,新しい定義に従った熱力学温度を実現するための方法ではITS-90の定点温度値は厳密(不確かさは無い)とされ,定義改定がITS-90の温度値または実現の不確かさに影響を与えないとされている(CCT 2019)。したがって,質量と温度に関する従来のトレーサビリティ体系が直ちに影響を受けることは無いが,室温付近でITS-90は熱力学温度と約0.004 Kずれていることが明らかになるなど(FISCHER ET AL. 2011),計量標準分野の研究動向を注視する必要がある。

海水の温度測定においては,引き続き,ITS-90の定義定点(水の三重点とガリウムの融解点)に基づくトレーサビリティの確保が必要で,特に,海洋深層の微小な変化の検出には水の三重点の正確さが重要である。水の三重点ガラスセルからの不純物の溶出により,水の三重点温度は低下する(10年当たりの温度変化はホウケイ酸ガラス製セルで $-0.13 \sim -0.08$ mK,石英製セルで -0.02 mK)(UCHIDA ET AL. 2015 参照)。石英製セルを用いた直接または間接的な機関間比較(センサー製造元やNMIJとJAMSTECとの間の比較)を実施しているが,セルの長期間の使用においては国家標準に基づく定期的な校正や新替えを検討する必要がある。

水温センサーの圧力特性評価にも課題が残る。圧力特性の評価に広く利用されてるSBE 35は製造中止になり新規購入ができない。そのため,通常用いられるCTD水温センサー(SBE 3)の実験室での圧力特性評価装置を開発中である。今後,圧力特性評価サービスの実施,メーカーへの技術移転,あるいは,圧力特性を評価した水温センサーを用いた国際的なラウンドロビン試験(各機関が実施するCTD観測においてセカンダリー水温センサーとして使用することで,各機関が所有する水温センサーの圧力依存特性を評価する)が必要と考えられる。

水温センサーや電気伝導度センサーのヒステリシス(圧力や水温変化に対する動的応答)につい

ては,その存在については認知されているものの,センサー毎に個体差があることや,その精密な評価が難しいことなどから,現状ではほとんど考慮されていない。「みらい」CTD観測においては,極端に大きなヒステリシスを持つセンサーは使用しないようにしているが,測定精度が向上するにつれ無視できない問題となってきた。通常,センサー校正用の海水サンプル採取や深海用基準温度計(SBE 35)による測定は巻き上げ時(アップ・キャスト)に行われ,アップ・キャストで求めた現場校正結果を繰り出し時(ダウン・キャスト)の連続データに適用している。そのため,センサーのヒステリシスによりCTD連続データが系統誤差を持つ可能性がある。今後,センサーのヒステリシスの精密な評価・補正方法を確立する,あるいは,CTD連続データとしてアップ・キャストのデータの利用を検討する必要がある。

塩分については,測定分解能向上のための技術革新や絶対塩分を測定可能なセンサーの開発が必要である。例えば,北太平洋底層の水温と塩分の100 kmあたりの南北変化は,それぞれ,2 mKと0.0002 g/kgであるが,SBE製CTDの水温と塩分の測定分解能は,それぞれ,0.2 mKと0.0004 g/kgであり,水温・塩分の南北変化の大きさに対して塩分の測定分解能が一桁足りない(UCHIDA ET AL. 2019)。また,TEOS-10の塩分として絶対塩分が採用されたが,絶対塩分を海洋の現場で直接測定可能なセンサーが実用化されていないため,従来の電気伝導度センサーで求める実用塩分と絶対塩分との差(主にアルカリ度偏差とケイ酸塩に起因)である絶対塩分アノマリーを推定する経験式が用いられている(IOC ET AL. 2010)。この絶対塩分アノマリー推定式は主に外洋域深層の値を対象にしており,河川水の影響が大きい沿岸域や北極海の表層では誤差が大きい。そのため,屈折率の測定に基づく密度(絶対塩分)センサーの利用が期待されている。海水の屈折率測定の歴史は古く,チャレンジャー号が世界一周航海を行っていた1877年に最初の測定が行われた(LE MENN AND NAIR 2022)。その後現在にいたるまで複数の研究者が屈折率密度センサーの開発に挑戦

してきたが、電気伝導度センサーに匹敵するような実用化には至っていない。

筆者が開発した屈折率密度センサー (UCHIDA ET AL. 2019) は、最高精度の塩分計 (AUTOSAL 8400B) に匹敵する測定分解能を有するが、実用化のためには温度依存性や校正に関する問題を解決する必要がある。また、2005年のノーベル物理学賞受賞技術である光周波数コムなどの最新の光学技術を用いることで、従来よりも測定分解能が一桁高い、ブレイクスルーとなりうる屈折率密度センサーの実現に期待している。

謝辞

日仏海洋学会賞の受賞は、これまで九州大学・海洋研究開発機構・日仏海洋学会・海水特性に関する IAPSO/SCOR/IAPWS 合同委員会でお世話になりました先生をはじめとする皆様のご指導・ご協力のおかげです。特に、九州大学大学院において、筆者を海洋観測の世界に導き、現場および人工衛星による観測技術やデータ解析など、長きに渡りご指導いただくとともに、大学院時代に日仏海洋学会への入会を勧めていただきました今脇資郎先生に感謝いたします。また、大学院時代から高精度船舶観測の重要性を説かれ、海洋研究開発機構において、「みらい」による高精度な船舶 CTD 観測や係留観測に従事する機会を与えていただくとともに、CTD 観測責任者としての大役を支えていただきました深澤理郎先生に感謝いたします。さらに、観測データのトレーサビリティ確保の重要性を説かれ、マルチパラメータ標準海水の開発に導いていただきました故 青山道夫先生に感謝いたします。日本発の栄養塩標準物質を開発・普及させ、気候変動に関わる栄養塩の変化を明らかにしようとしていた矢先の 2022 年に急逝されました。青山先生から引き継いだ塩分データのトレーサビリティ確保については大きく発展させることができましたが、水温・塩分以外の観測項目についても、青山先生が目指した世界に近づけるよう観測データの高精度化に努力する所存です。最後に、長期航海の乗船中も家庭を守り、観測・研究に専念できるよう支えてくれた妻 亜

紀子に感謝を述べたいと思います。

References

- CCT (2019): *Mise-en-pratique* for the realization of the kelvin in the SI. <https://www.bipm.org/utls/en/pdf/si-mep/SI-App2-kelvin.pdf>
- 藤井賢一 (2019): プランク定数にもとづくキログラムの新しい定義. 日本原子力学会誌, 61, 16-20. https://doi.org/10.3327/jaesjb.61.10_716.
- FISCHER, J., M. DE PODESTA, K. D. HILL, M. MOLDOVER, L. PITRE, R. RUSBY, P. STEUR, O. TAMURA, R. WHITE AND L. WOLBER (2011): Present estimates of the differences between thermodynamic temperatures and the ITS-90. *Int. J. Thermophys.* 32, 12-25. <https://doi.org/10.1007/s10765-011-0922-1>.
- FUKASAWA, M., H. FREELAND, R. PERKIN, T. WATANABE, H. UCHIDA AND A. NISHINA (2004): Bottom water warming in the North Pacific Ocean. *Nature*, 427, 6977, 825-827. <https://doi.org/10.1038/nature02337>.
- HOOD, E. M. (2010): Introduction to the collection of expert reports and guidelines. The GO-SHIP Repeat Hydrography Manual: A Collection of Expert Reports and Guidelines, IOCCP Rep. No. 14, ICPO Publication Series No. 134, Ver. 1.
- IOC, SCOR AND IAPSO (2010): The international thermodynamic equation of seawater - 2010: Calculation and use of thermodynamic properties. Intergovernmental Oceanographic Commission, Manuals and Guides No. 56, United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization (English), 196 pp.
- JENKINS, A. AND R. WILLIAMS (2025): The history of Standard Seawater for salinity measurements. In: Aoyama M., Murata A., Cheong C., editors. Chemical Reference Materials for Oceanography. Springer Oceanography. Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-96-2520-8_18.
- KAWANO, T., M. AOYAMA, T. JOYCE, H. UCHIDA, Y. TAKATSUKI AND M. FUKASAWA (2006a): The latest batch-to-batch difference table of standard seawater and its application to the WOCE onetime sections. *J. Oceanogr.*, 62, 777-792, <https://doi.org/>

- g/10.1007/s10872-006-0097-8.
- KAWANO, T., T. DOI, H. UCHIDA, S. KOUKETSU, M. FUKASAWA, Y. KAWAI, AND K. KATSUMATA (2010): Heat content changes in the Pacific Ocean between the 1990s and 2000s. *Deep-Sea Res. II*, **57**, 1141–1151. <https://doi.org/10.1016/j.dsr2.2009.12.003>.
- KAWANO, T., M. FUKASAWA, S. KOUKETSU, H. UCHIDA, T. DOI, I. KANEKO, M. AOYAMA, AND W. SCHNEIDER (2006b): Bottom water warming along the pathway of lower circumpolar deep water in the Pacific Ocean. *Geophys. Res. Lett.*, <https://doi.org/10.1029/2006GL027933>.
- KAYUKAWA, Y. AND H. UCHIDA (2021): Absolute density measurements for standard seawater by hydrostatic weighing of silicon sinker. *Measurement: Sensors*, **18**, <https://doi.org/10.1016/j.measen.2021.100200>.
- KOUKETSU, S., T. DOI, T. KAWANO, S. MASUDA, N. SUGIURA, Y. SASAKI, T. TOYODA, H. IGARASHI, Y. KAWAI, K. KATSUMATA, H. UCHIDA, M. FUKASAWA, AND T. AWAJI (2011): Deep ocean heat content changes estimated from observation and reanalysis product and their influence on sea level change. *J. Geophys. Res.: Oceans*, **116**, C03012, <https://doi.org/10.1029/2010JC006464>.
- LE MENN, M. AND R. NAIR (2022): Review of acoustical and optical techniques to measure absolute salinity of seawater. *Frontiers in Marine Science*, <https://doi.org/10.3389/fmars.2022.1031824>.
- MASUDA, S., T. AWAJI, N. SUGIURA, J. P. MATTHEWS, T. TOYODA, Y. KAWAI, T. DOI, S. KOUKETSU, H. IGARASHI, K. KATSUMATA, H. UCHIDA, T. KAWANO AND M. FUKASAWA (2010): Simulated rapid warming of abyssal North Pacific waters. *Science*, <https://doi.org/10.1126/science.1188703>.
- PICKER, P., E. TREMBLAY AND C. JOLICOEUR (1974): A high-precision digital readout flow densimeter for liquids. *J. Solution Chem.*, **3**, 377–384, <https://doi.org/10.1007/BF00646478>.
- SHKVORETS, I. (2025): Salinometry. <https://salinometry.com> (access date: June 26, 2025)
- SIEDLER, G., J. CHURCH AND J. GOULD (eds.) (2001): *Ocean Circulation and Climate: Observing and Modeling the Global Ocean*. 715 pp., Academic Press, San Diego, USA.
- SUMMERHAYES, C. P. AND S. A. THORPE (1996): *Oceanography: an illustrated text*. 352 pp., John Wiley and Sons, New York, USA.
- 友田好文, 高野健三 (1983): 海洋. 地球科学講座, **4**, 261 pp. 共立出版 (株).
- UCHIDA, H. (2025): On Japanese Standard Seawater for salinity measurements used during and after World War II. In: Aoyama M., Murata A., Cheong C., editors. *Chemical Reference Materials for Oceanography*. Springer Oceanography. Springer, Singapore, https://doi.org/10.1007/978-981-96-2520-8_11.
- UCHIDA, H., S. IMAWAKI, H. ICHIKAWA AND THE ASUKA GROUP (2008): ASUKA Hydrographic Data Collection, *Reports of Research Institute for Applied Mechanics*, Kyusyu University, **135**, 21–31. <https://doi.org/10.15017/14180>.
- UCHIDA, H. AND S. IMAWAKI (2008): Estimation of the sea level trend south of Japan by combining satellite altimeter data with in situ hydrographic data. *J. Geophys. Res.*, **113**, C09035. <https://doi.org/10.1029/2008JC004796>.
- UCHIDA, H., T. KAWANO, M. AOYAMA AND A. MURATA (2011): Absolute salinity measurements of standard seawaters for conductivity and nutrients. *La mer*, **49**, 119–126.
- UCHIDA, H., T. KAWANO, T. NAKANO, M. WAKITA, T. TANAKA, AND S. TANIHARA (2020): An expanded batch-to-batch correction for IAPSO Standard Seawater. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, **37**, 1507–1520, <https://doi.org/10.1175/JTECH-D-19-0184.1>.
- UCHIDA, H., Y. KAYUKAWA AND Y. MAEDA (2019): Ultra high-resolution seawater density sensor based on a refractive index measurement using the spectroscopic interference method. *Sci. Rep.*, **9**, 15482, <https://doi.org/10.1038/s41598-019-52020-z>.
- UCHIDA, H., Y. MAEDA AND S. KAWAMATA (2018): Compact underwater slip ring swivel: Minimizing effect of CTD package rotation on data quality. *Sea Technology*, **59**, 11, 30–32.
- UCHIDA, H., T. NAKANO, J. TAMBA, J.V. WIDIATMO, K. YAMAZAWA, S. OZAWA AND T. KAWANO (2015):

Deep ocean temperature measurement with an uncertainty of 0.7 mK. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, **32**, 2199–2210. <https://doi.org/10.1175/JTECH-D-15-0013.1>.

UCHIDA, H., K. OHYAMA, S. OZAWA AND M. FUKASAWA (2007): In situ calibration of the SeaBird 9plus CTD thermometer. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, **24**, 1961–1967. <https://doi.org/10.1175/JTECH2093.1>.

UCHIDA, H., A. MURATA, M. WAKITA, H. MITSUDA, Y. NAGASAWA, T. TANAKA, Y. KAYUKAWA, K. TAKE-DA, K. ITO, T. YOSHIMURA, AND D. SASANO (2025a): Development of Multiparametric Standard Seawater (MSSW) for CO₂ parameters, dissolved oxygen, and density of seawater. In: Aoyama M., Murata A., Cheong C., editors. *Chemical Reference Materials for Oceanography*. Springer Oceanography. Springer, Singapore, https://doi.org/10.1007/978-981-96-2520-8_12.

UCHIDA, H., M. OE, AND M. WAKITA (2025b): History of batch-to-batch comparative studies of International Association for the Physical and Sciences of the Oceans standard seawater. In: Aoyama M., Murata A., Cheong C., editors. *Chemical Reference Materials for Oceanography*. Springer Oceanography. Springer, Singapore, https://doi.org/10.1007/978-981-96-2520-8_9.

UCHIDA, H., M. WAKITA, A. MAKABE, A. MURATA, AND A. PETROVIC (2025c): Changes of the composition of International Association for the Physical and Sciences of the Oceans standard seawater. In: Aoyama M., Murata A., Cheong C., editors. *Chemical Reference Materials for Oceanography*. Springer Oceanography. Springer, Singapore, https://doi.org/10.1007/978-981-96-2520-8_10.

UCHIDA, H., M. WAKITA, M. OE AND F. SANTIAGO-MANDUJANO (2025d): Possible increase in the Practical Salinity of IAPSO Standard Seawater. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, <https://doi.org/10.1175/JTECH-D-24-0049.1>.