



東京大学国際ミュオグラフィ連携研究機構
 東京大学生産技術研究所
 東京大学大学院新領域創成科学研究科
 東京大学大気海洋研究所
 九州大学
 シェフィールド大学
 ダラム大学
 英国科学技術施設会議ボルビー地下実験施設
 イタリア原子核物理学研究所
 サレルノ大学
 カターニャ大学
 ウィグナー物理学研究センター
 アタカマ大学
 オウル大学 Kerttu Saalasti 研究所

世界最高ミュオグラフィ観測精度を達成

1. 発表のポイント：

- ◆ 世界初海底ミュオグラフィセンサーアレイ（注1）の長期運用によって得られた79日間（6月1日～8月18日）のミュオグラフィデータと天文潮位データとを比較することにより、2時間の時間分解能で密度の時間変化にして3パーミル（千分の3）（約1日の時間分解能では、1.5パーミル（1万分の15））のミュオグラフィ観測精度としては、世界で最も高い精度を達成したことを確認した。
- ◆ ミュオグラフィ（注2）はこれまで火山、原発、ピラミッドなど陸域における透視に成果を上げてきたが、陸域での測定において1パーセントを切る密度の時間変化を捉えるこ

とは極めて困難であった。ミュオグラフィを海へ展開することで、今回、これをオーダーで改善した観測精度を達成した。

- ◆ 国内外の港湾部における地震や台風などによる津波、海底地形の時間変化などを陸域以上に精度良くイメージングできることが示された。
- ◆ 将来、ミュオグラフィセンサーアレイを実際の海底に実装することにより、東京湾底における海底下空間利用に係る評価への活用、海底火山や海洋地殻の内部構造探査、更には、二酸化炭素貯留隔離（CCS）モニタリングなどへの応用展開が期待される。

2. 発表概要：

東京大学国際ミュオグラフィ連携研究機構は、同大学生産技術研究所、大気海洋研究所、大学院新領域創成科学研究科、および九州大学、英国シェフィールド大学、英国ダラム大学、英国科学技術施設会議ボルビー地下実験施設、イタリア原子核物理学研究所、イタリアサレルノ大学、イタリアカタニーニャ大学、ハンガリーウィグナー物理学研究センター、チリアタカマ大学、フィンランドオウル大学 Kerttu Saalasti 研究所と共同で、世界初となる海底ミュオグラフィセンサーアレイ（HKMSDD : Hyper KiloMetric Submarine Deep Detector）の一部を東京湾アクアライン海底トンネル内部に設置し、この東京湾海底（Tokyo-Bay Seafloor）HKMSDD（TS-HKMSDD）を用いて、令和3年6月1日～8月18日までの79日間の長期観測を実施した。本ミュオグラフィ観測により得られたデータと天文潮位データとを比較することにより、2時間の時間分解能で密度の時間変化にして3パーミル（千分の3）（約1日の時間分解能では、1.5パーミル（1万分の15））の世界最高観測精度を達成したことを確認した。

ミュオグラフィは、宇宙に由来する高エネルギー素粒子ミュオン（注3）を用いて巨大物体を透視する技術である。これまで火山、原発、ピラミッドなどの透視に成果を上げているが、陸域での測定においては、1パーセントを切る密度の時間変化を追うことは極めて困難であった。ミュオグラフィを海へ展開することにより、これをオーダーレベルで改善した観測データを確認した。

この精度の達成により、国内外の港湾部における地震や台風などによる津波、また海底地形の時間変化を精度良くイメージングできることになる。今後、本技術の応用展開の可能性として、東京湾の堆積物構造や温室効果ガス（メタン）の実態把握など、海底下空間利用に係る評価への活用が期待される。更に、将来、HKMSDDを耐圧容器に入れ、より深い海底に適用することにより、海底火山や火山島を含む海洋地殻の内部構造や、海底下環境における二酸化炭素貯留隔離（CCS）等の環境モニタリング技術としての応用展開が期待される。

3. 発表内容：

<最高観測精度達成について>

ミュオンは銀河系における超新星爆発などの高エネルギーイベントによって加速される宇宙線と地球大気が反応してできる素粒子の一つである。このようなミュオンは主に、対流圏上層部において生成されるが、地表に到達するまでに局地的な気圧の変化に応じてその減衰量が変わる。陸上におけるミュオグラフィ観測では、気圧の時間変化の影響を受けるため、1パーセントを切る密度の時間変化を捉えることは極めて困難であった。

ミュオンは透過力が強く、東京湾の海水を通り抜けた後、更に海底の岩盤を貫通し、アクアライン内部に設置してあるセンサーに到達する。このミュオンの到達数を時間毎に計数することで、海水の厚み、即ち海水準の変動を測定することが可能である（図1～3）。逆に、海水準の変動を活用して、海底ミュオグラフィの観測精度を検証することも可能である。ミュオグラフィ測定の時間分解能、空間分解能、測定範囲は、トンネル内にインストールするセンサーモジュールの敷設範囲、敷設密度を上げることによって向上する。

一方、海底下においては、測定装置の上に位置する海水の「吸い上げ効果（IBE）（注4）」によってミュオンフラックスの時間変化の大部分を補償する。その結果、陸域での観測精度をオーダーで改善した2時間の時間分解能で3パーミル（千分の3）（約1日の時間分解能では、1.5パーミル（1万分の15））の観測精度を達成した。尚、前者の3パーミルは天文潮位を正解とした値からのずれの標準偏差、後者の1.5パーミルはLunar day（月の1日）単位では海水準が変動しないと仮定した時のゆらぎの標準偏差を示す。



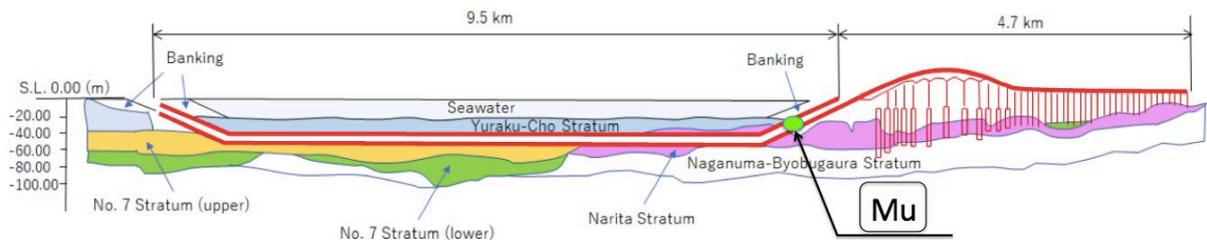


図 1 : 東京湾アクアラインの写真並びに今回設置した TS-HKMSDD の位置

© 2021 Hiroyuki Tanaka/Muographix

Mu と示された部分が TS-HKMSDD の一部が設置された場所を示す。

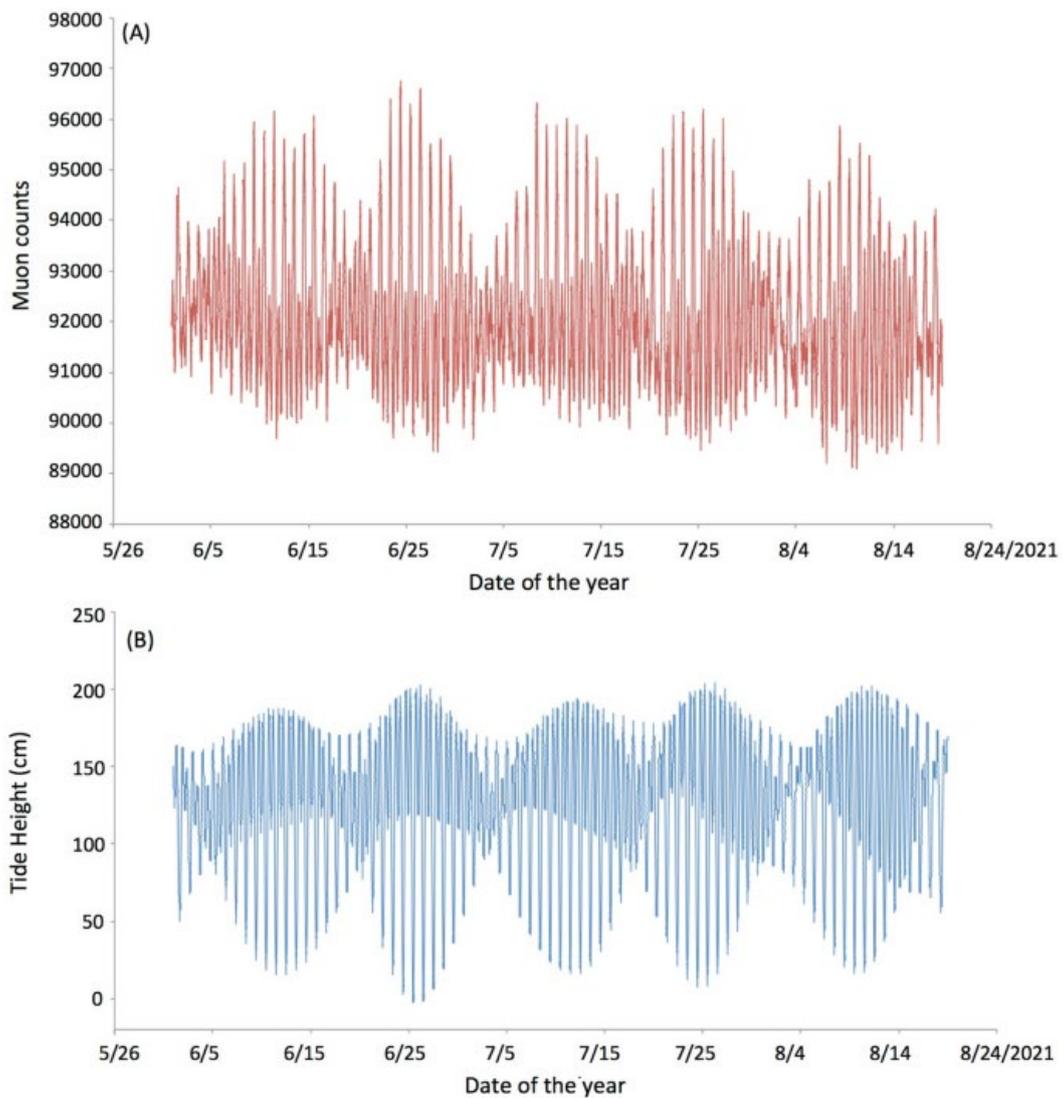


図 2 : TS-HKMSDD による測定結果

© 2021 Hiroyuki Tanaka/Muographix

赤線 (A) は TS-HKMSDD により測定されたミュオンカウント数、青線 (B) は天文潮位

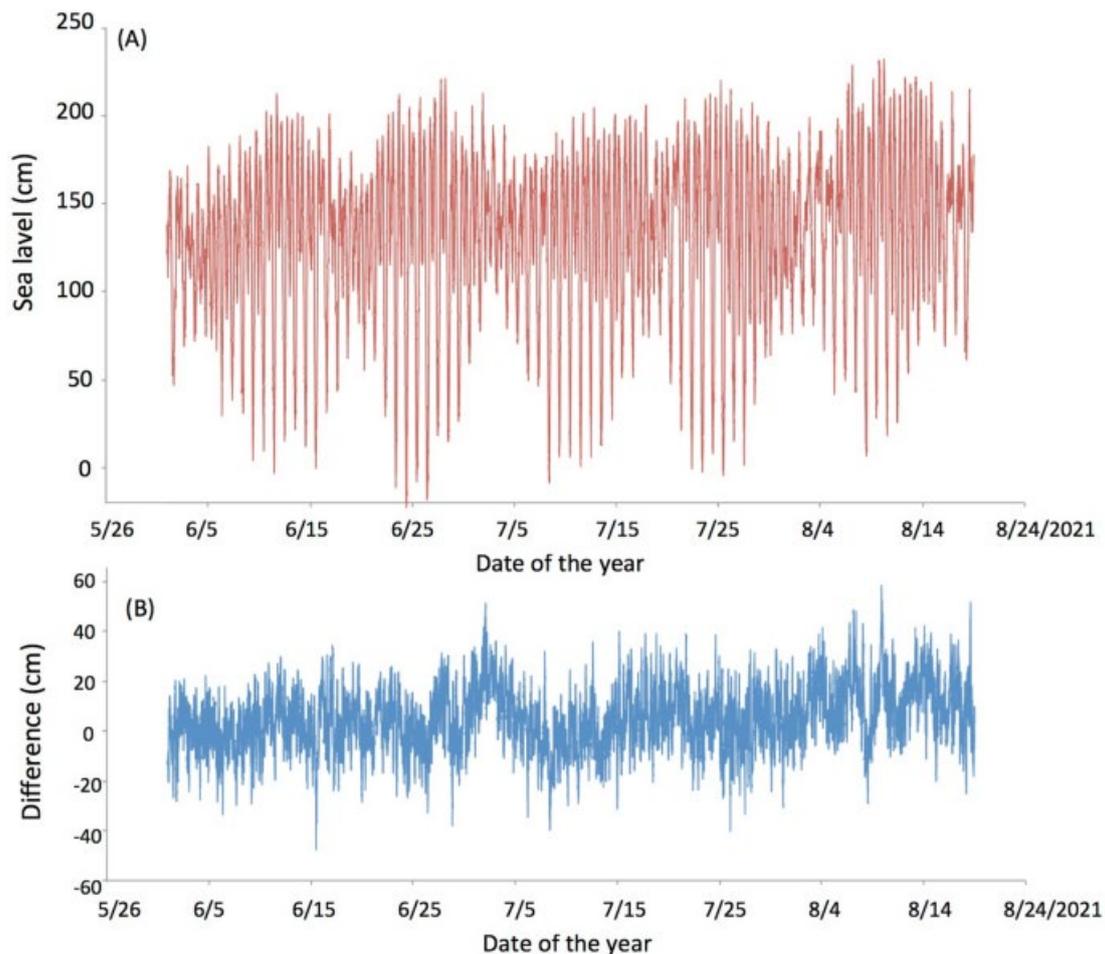


図3：TS-HKMSDDによる潮位の時間変動 (A) 及び天文潮位との差分 (B)
 © 2021 Hiroyuki Tanaka/Muographix

<今後の展望>

今後、HKMSDDをさまざまな海洋・海底下環境に活用することにより、国内外に散在する海底トンネルを活用した台風や、地震による津波、海底砂丘の移動による海底地形変化などの高精度イメージング測定などの応用展開が期待される。更に、海洋ダイナミクスによる海水密度変化などの測定や、東京湾海底における南関東ガス田（注5）に係る評価にも活用できるようになると考えられる。具体的には、ミュオグラフィ技術を用いて東京湾浅部堆積層におけるメタンの移動・集積メカニズムや浅部ガス溜りの空間分布と規模を科学的に解明することで、東京湾域における温室効果ガス排出リスクの把握や地下開発における安全性の担保等への貢献が期待される。

さらに、本研究基盤を活用して、岩盤中のガスや流体、火山活動等の環境モニタリングを、構造の密度分布の時間変化として可視化できるミュオグラフィ技術の開発を目指す。将来、HKMSDDを耐圧容器に入れ、海底トンネルから実際の深海底へと展開することにより、二酸化炭素貯留隔離（CCS）モニタリング（注6）や海底火山など、現場で連続的に海洋・海底下環境を監視・評価できる新しいイメージング技術としての応用展開が期待される。

4. 問い合わせ先：

東京大学国際ミュオグラフィ連携研究機構 機構長

教授 田中宏幸 (たなか ひろゆき)

〒113-0032 東京都文京区弥生 1 丁目 1-1

Email: ht@muographix.u-tokyo.ac.jp

ht@eri.u-tokyo.ac.jp

ht@virtual-muography-institute.org

※3 つのアドレスすべてにお送りください。

国際ミュオグラフィ連携研究機構ウェブサイト: <https://www.muographix.u-tokyo.ac.jp/>

5. 発表雑誌：

雑誌名：Scientific Reports

論文タイトル：First results of undersea muography with the Tokyo-Bay Seafloor Hyper-Kilometric Submarine Deep Detector.

著者：Hiroyuki K. M. Tanaka*, Masaatsu Aichi, Cristiano Bozza, Rosa Coniglione, Jon Gluyas, Naoto Hayashi, Marko Holma, Osamu Kamoshida, Yasuhiro Kato, Tadahiro Kin, Pasi Kuusiniemi, Giovanni Leone, Domenico Lo Presti, Jun Matsushima, Hideaki Miyamoto, Hirohisa Mori, Yukihiro Nomura, László Oláh, Sara Steigerwald, Kenji Shimazoe, Kenji Sumiya, Hiroyuki Takahashi, Lee F. Thompson, Yusuke Yokota, Sean Paling & Dezső Varga

DOI 番号： <https://doi.org/10.1038/s41598-021-98559-8>

アブストラクト URL： <https://www.nature.com/articles/s41598-021-98559-8>

6. 用語解説：

(注1) 海底ミュオグラフィセンサーアレイ (TS-HKMSDD)

素粒子ミュオン (注3) を検知できるミュオグラフィセンサーモジュールを一定の間隔に配置したもの。ミュオンが検知されるたび TS-HKMSDD の中央に位置するデータ収集センターに信号が集められ、記録される。今回、東京湾アクアライン海底トンネル内部の 100 m にわたり設置されたが、今後さらなる拡張や北海、英仏海峡、フィンランド湾など東京湾以外における設置が計画されている。

(注2) ミュオグラフィ

ミュオン (注3) の強い貫通力 (岩盤で 1 km 以上) を用いるレントゲン写真撮影法。医用のレントゲン写真では X 線を利用するが、これは X 線の透過力が人体程度であることを利用している。ミュオンの透過力が海洋の深さ程度のオーダーであることからミュオグラフィを利用して海のレントゲン写真を撮影可能である。

(注3) ミュオン

主に超新星などの銀河系の高エネルギーイベントによって光速まで加速される宇宙線と呼ばれる粒子が地球に到達すると、大気を構成する窒素や酸素の原子核と反応して高エネルギーの二次粒子生成する。その一つがミュオンと呼ばれる素粒子であり、貫通力が強い。

(注4) 吸い上げ効果 (IBE)

台風や低気圧の中心では気圧が周辺より低いため、中心付近の空気が海水を吸い上げるように作用する結果、海面が上昇する。逆に気圧の高い空気は海水を押し下げる。そのために、TS-HKMSDDにおいては、時事刻々と変化する気圧変動に起因するミュオンフラックスの時間変動がキャンセルされる。一方、大気と海水を構成する原子核における、 Z/A (Z は原子番号、 A は原子量)の違いから同じ表面密度でも海水の方が若干ミュオンを通しにくい。そのため、気圧変動によるミュオンフラックスの変化が海水準変動によるミュオンフラックスの変化によって完全にキャンセルされるわけではない。

(注5) 南関東ガス田

千葉県を中心として茨城・埼玉・東京・神奈川県下にまたがる微生物起源のメタンガスから成る水溶性天然ガス田。戦前より開発が開始され、東京都内でもガス井が掘削され天然ガスの生産が行われていた時期もあったが、現在は千葉県でのみ商業生産が行われている。しかし、東京湾下の調査はこれまで十分に行われてこなかったため、このエリアでのガスの賦存形態が未解明のままである。

(注6) 二酸化炭素貯留隔離 (CCS) モニタリング

現在、国際エネルギー機関 (IEA) によるエネルギー技術展望 (ETP2017) では、二酸化炭素排出削減による地球温暖化緩和策として、2060年時点での累積二酸化炭素排出量の16%を二酸化炭素貯留隔離 (CCS) が担うべきとしている。そのニーズに応えるために、 CO_2 の分離・回収・貯留に係る技術開発と同時に、圧入した CO_2 の貯留状況を定常的に監視・評価 (モニタリング) することが求められている。