

令和 5 年 5 月 31 日現在

機関番号：12601

研究種目：挑戦的研究（開拓）

研究期間：2020～2022

課題番号：20K20528

研究課題名（和文）海底トンネルを活用した海域へのミュオグラフィ探査可能域の拡張

研究課題名（英文）Extension of the explorable range of muography to ocean with underwater tunnel

研究代表者

田中 宏幸（Tanaka, Hiroyuki）

東京大学・地震研究所・教授

研究者番号：20503858

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 19,800,000円

研究成果の概要（和文）：ミュオグラフィはマグマ監視、ピラミッド内部調査などに大きな成果を上げてきたが、その観測ターゲットは全て陸上の物体に限られていた。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化する。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。本研究により、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（約1日の時間分解能では、1.5パーミル）の世界最高観測精度を達成した。海水準変動のリアルタイムモニタリングに成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

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に係る評価にも活用できるようになると考えられる。将来、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。

研究成果の概要（英文）：Muography has been applied to monitoring of magma and to searching for the internal structure of the pyramid. However its observational targets have been restricted to the objects located on land. Muons are mainly produced in the upper troposphere, but their attenuation varies according to changes in the local atmospheric pressure. Land-based muographic observations are affected by these atmospheric pressure changes, making it extremely difficult to capture density variations with a precision < 1 percent. With this study, the world's highest muographic precision was achieved: 3 permil in 2 hours (1.5 permil in one lunar day) in terms of temporal variations in density. We succeeded in real-time monitoring of temporal variations in sea level.

研究分野：ミュオグラフィ

キーワード：ミュオグラフィ 海域 海底トンネル

1. 研究開始当初の背景

80年前ミュオンが宇宙線の中に発見されて以来、その粒子が持つ強い透過性は世界中の研究者達を魅了してきた。過去半世紀以上様々な巨大物体の透視が試みられて来た。我が国主導で始まったミュオグラフィはマグマ監視、原発メルトダウン調査、ピラミッド内部調査などに大きな成果を上げてきたが、その観測ターゲットは全て陸上の物体に限られていた。

また、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化する。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。

2. 研究の目的

海底トンネルを長さ1kmの長大な海底下センサーとすることで、海底下における巨大物体透視技術「ミュオグラフィ」が将来新たにサイエンスターゲットを狙うための技術的課題の検証、解決を行い、海底トンネルを使用した海底ミュオグラフィの方法論を確立し、それを既存のミュオグラフィの技術体系を陸域から海域へと前進させる原動力とする。海底下でミュオグラフィが実施可能になれば、これまで難しかった海底岩盤の正確な絶対密度測定、海面昇降現象の面的なイメージング等が可能となり、将来的には地震発生場のより進んだ理解、海底資源のイメージング、津波をはじめとした海水面変動のリアルタイムイメージング等へとつなげることが可能となりミュオグラフィに新たな価値を付加できる。

3. 研究の方法

本挑戦的研究計画では海底トンネルを巨大なミュオグラフィ検出器（HKMSDD：Hyper-KiloMetric Submarine's Deep Detector；超km級海底検出器）として使用するための技術開発並びにその検証を行い、地表観測に限られてきたミュオグラフィ観測の技術体系を一変させる。具体的には、今回、長さ1kmのHKMSDDプロトタイプを整備して、以下の開発項目を実施することで海底ミュオグラフィの方法論を確立すると同時に検出器の長期運用における技術的課題の検証、解決を行う。①正確な海底岩盤密度分布決定方法の開発、②潮汐による周期的な海面昇降現象を活用した波高分布リアルタイムイメージング法の開発。いずれも既存の観測方法では得ることが困難な観測量である。本計画で整備するHKMSDDプロトタイプを用いて、これまでの地表ミュオグラフィの海域への直接的拡張ともいえる①海底岩盤の絶対密度分布測定に加えて、②海水の動きといった新たな対象も観測ターゲットに加え、これら2テーマを対象とした以下の測定原理を本計画で実証する。①海底岩盤の密度は地表の岩盤密度より正確に決まる事が理論的に予想されている。地表ミュオグラフィでは検出器の検出効率やミュオンのエネルギー分布の不確かさが密度決定の系統的誤差の要因となっていた。一方、HKMSDD上部には約20mの岩盤と約20mの海水が存在している。この内、海水準の日変動は川崎と木更津における潮位測定という形で正確に分かっている。すなわち、岩盤の上に存在する「厚み」と「密度」が分かっている海水をリファレンスとすることで、地表ミュオグラフィにおける問題を最小限に抑えることが可能となる。更に、地下深部のトンネル内部における低ノイズ空間は更なる精度向上をもたらすため、HKMSDDでは一般的な地表ミュオグラフィより正確な絶対密度を導出できることが期待される。②ミュオグラフィはミュオン経路に沿った物体の「厚み×密度」を測定するので、密度の時間変化が無ければ、ミュオグラフィ画像の時間変化は厚みの時間変化と等価である。満潮、干潮による海水準の日変動は1.0～1.5m程度である。地下岩盤密度や海水密度の日変動は無視することにより、潮汐による水位変化を利用して海水準変動のリアルタイムモニタリングの精度と時間分解能の検証を行う。



図1：TS-HKMSDD

4. 研究成果

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）を東京湾アクアライン海底トンネル内部に設置することで、東京湾海底（Tokyo-Bay Seafloor）HKMSDD（TS-HKMSDD）を構築した（図1）。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て、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。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世界最高観測精度を達成したことを確認した。図2にTS-HKMSDDによる測定結果を示す。また、図3にTS-HKMSDDによる潮位の時間変動（A）及び天文潮位との差分（B）を示す。

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世界最高観測精度を達成したことを確認した。図2にTS-HKMSDDによる測定結果を示す。また、図3にTS-HKMSDDによる潮位の時間変動（A）及び天文潮位との差分（B）を示す。

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。）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。図2にTS-HKMSDDによる測定結果を示す。また、図3にTS-HKMSDDによる潮位の時間変動（A）及び天文潮位との差分（B）を示す。

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

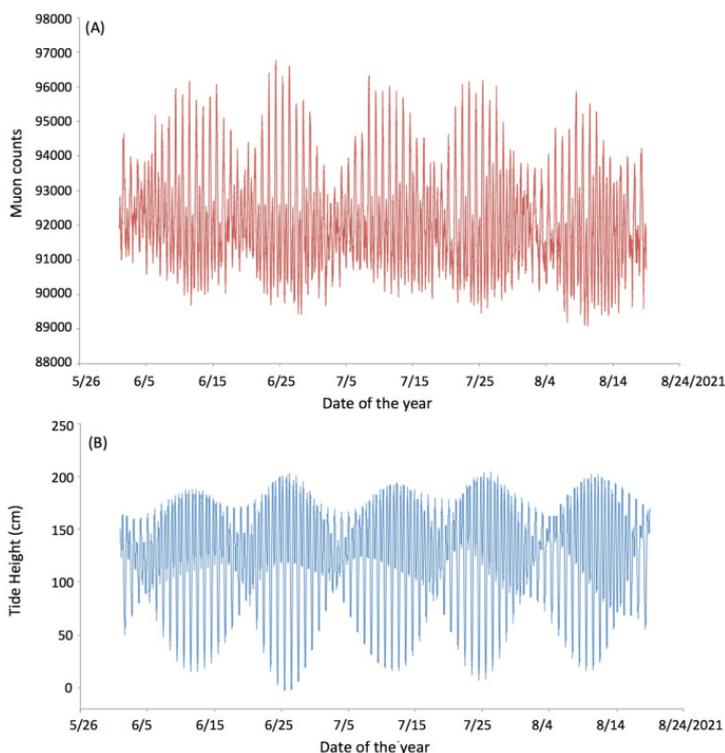


図1：TS-HKMSDDによる測定結果。赤線（A）はTS-HKMSDDにより測定されたミュオンカウント数、青線（B）は天文潮位

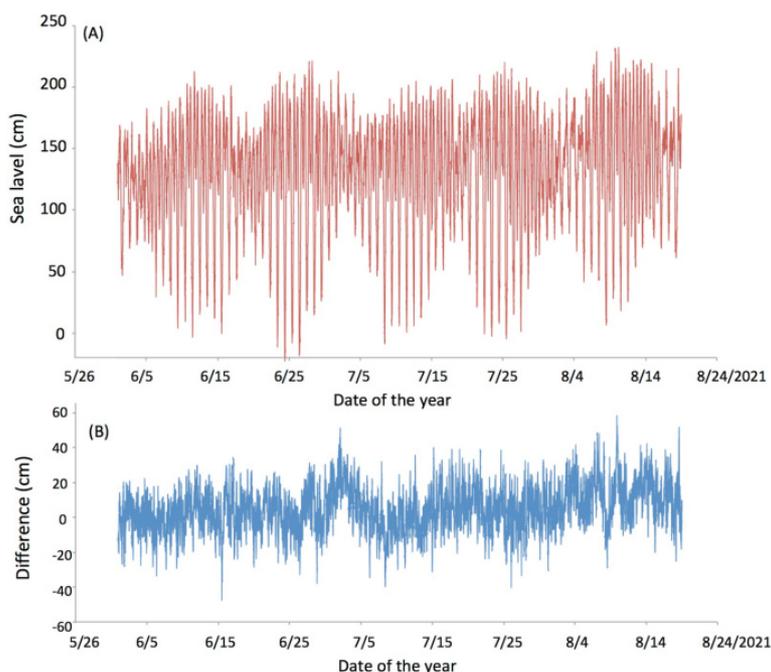


図2：TS-HKMSDDによる潮位の時間変動（A）及び天文潮位との差分（B）

変化を精度良くイメージングできることを確認した。結果として潮汐による水位変化を利用して海水準変動のリアルタイムモニタリングの精度と時間分解能の検証に成功した。更に TS-HKMSDD を用いて 2021 年台風 16 号通過に伴う、気象津波のミュオグラフィ観測に世界で初めて成功した。気象津波のメカニズムは完全には解明されていないが、従来研究により、津波の伝搬速度と大気擾乱に伴うパルスの移動速度が一致するときに大気エネルギーが効果的に海水に与えられ、振動を励起されることが示唆されている。同時期、台風 16 号通過に伴う気圧の低下が南西から北東に向けて移動していることが確認され、その平均速度は伊豆半島南端の石廊崎から横浜までは時速 40 km、横浜から水戸までは時速 60 km であることがわかった。一方、東京湾の深さが 15~20m であることを考慮すると、津波の伝搬速度を理論的に計算することが可能であり、その速度は時速 44~50 km である。すなわち、台風 16 号の通過に伴う気圧パルスの移動速度と津波の伝搬速度はほぼ等しかったことがわかる。従って、上述した従来研究による示唆から東京湾で気象津波が励起された可能性が高い。

図 4 には、TS-HKMSDD がとらえた振動を示す。周期約 3 時間の減衰振動であることが測定された。東京湾は浅く、深度がより大きな湖沼、例えばレマン湖などと比べて早く振動が減衰することが先行研究で報告されている。本研究で得られた振動の時系列変化を見てもレマン湖（緑線）と比べて東京湾（オレンジ線）の振動は、早く減衰することを確認した。

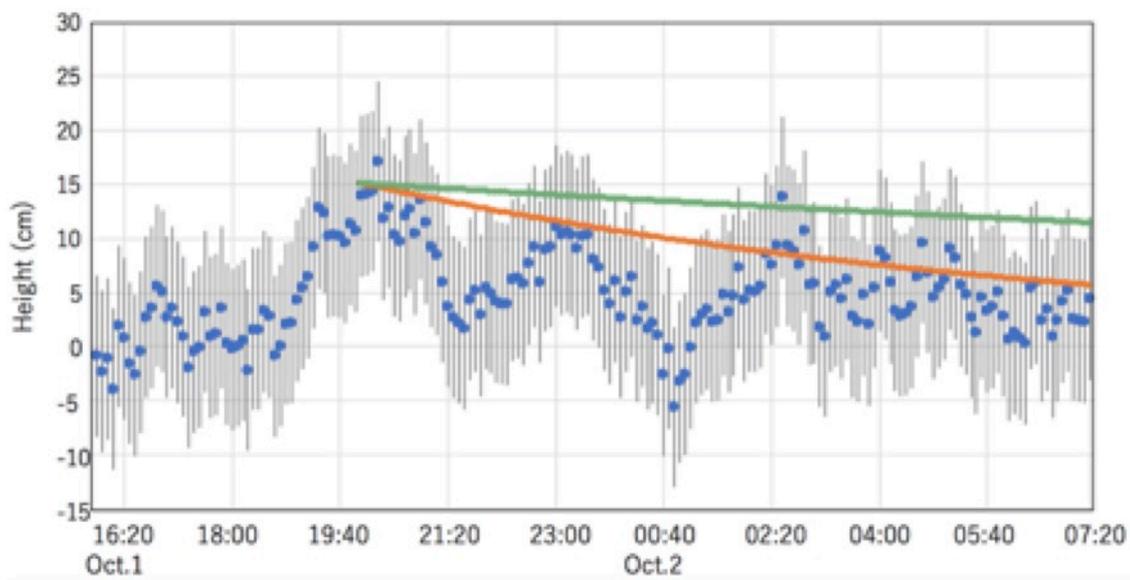


図 4：TS-HKMSDD がとらえた気象津波。オレンジ線、緑線はそれぞれ先行研究で得られている東京湾並びにレマン湖における減衰曲線を示している。

気象津波は、世界中どこでも起こりうる現象であり、これまでは地震や火山による津波のリスクが検討されてこなかった地域においてもリスクを増加させる要因となる。更に、地震火山活動が活発な地域においては、気象津波は地震や火山による津波に新たなリスクを追加するものとなる。これまでに、英国海峡やフィンランド湾でも気象津波は報告されており、今後英仏海峡トンネルやフィンランド湾トンネルにおける UK-HKMSDD や FI-HKMSDD の配備は、よりグローバルな気象津波の理解につながると期待される。

今後、HKMSDD をさまざまな海洋・海底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、HKMSDD は、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につながる。例えば、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) モニタリングや海底火山など、現場で連続的に海洋・海底環境を監視・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。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件/うち国際共著 2件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Tanaka, H.K.M., Aichi, M., Bozza, C. et al.	4. 巻 11
2. 論文標題 First results of undersea muography with the Tokyo-Bay Seafloor Hyper-Kilometric Submarine Deep Detector.	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1038/s41598-021-98559-8	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する

1. 著者名 Tanaka Hiroyuki K. M., Aichi Masaatsu, Balogh Szabolcs Jozsef et al.	4. 巻 12
2. 論文標題 Periodic sea-level oscillation in Tokyo Bay detected with the Tokyo-Bay seafloor hyper-kilometric submarine deep detector (TS-HKMSDD)	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1038/s41598-022-10078-2	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計0件

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 （ローマ字氏名） （研究者番号）	所属研究機関・部局・職 （機関番号）	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関			
英国	University of Sheffield	STFC	Durham University	
イタリア	INFN	University of Catania	University of Salerno	
フィンランド	University of Oulu			
ハンガリー	Wigner Research Center for Physics			

共同研究相手国	相手方研究機関			
チリ	Atacama University			