

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 17 日現在

機関番号：82706

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2014

課題番号：24760403

研究課題名(和文) 波浪海流結合モデルと合成開口レーダによる海洋流動場の定量的評価

研究課題名(英文) Analysis of ocean surface captured by satellite SAR using extended ocean wave model

研究代表者

田村 仁 (TAMURA, Hitoshi)

独立行政法人海洋研究開発機構・アプリケーションラボ・研究員

研究者番号：80419895

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：衛星搭載合成開口レーダ(SAR)は海洋の新しい物理現象を映し出す。SAR画像は海洋表面の粗度(さざ波)を捉えていることから、これら「さざ波」の物理過程を理解し、定量的に評価することは極めて重要となる。本研究ではさざ波エネルギーの推定方法の確立に成功するとともに、力学バランスが波数帯によって異なることを発見した。また新たなエネルギーソース項を数値海洋波浪モデルに導入する(Tamura et al. 2010, JGR-Oceans)ことで、これまでは再現不可能であった高波数領域におけるスペクトル形状の定量的評価に成功した。

研究成果の概要(英文)：Satellite Synthetic Aperture Radar (SAR) have provided useful insights into the ocean surface. Because SAR images reproduce roughness at the sea surface, it is crucial to understand the physics of short gravity waves. In this study, we investigated the spectral structure and source term balance of short gravity waves. The wave model reproduced the spectral form in the higher wavenumber domain using the nonlinear dissipation term. In the equilibrium range, nonlinear transfer played a major role in maintaining equilibrium conditions. On the other hand, in the saturation range, which starts at the upper limit of the equilibrium range, nonlinear transfer did not keep up with other source terms, and the dissipation term was in balance with wind input.

研究分野：海洋物理学

キーワード：短波重力波 合成開口レーダ 第三世代波浪モデル

1. 研究開始当初の背景

(1) 衛星搭載型合成開口レーダ(SAR)からは海洋波や内部波、海洋フロント、またサブメソスケール現象と呼ばれる空間スケール1-10km程度の新たな海洋乱流が確認されており、沿岸海洋学に新たなブレークスルをもたらし得る有力な観測手法となっている。SARはマイクロ波を海面に放射し、反射される後方散乱強度を用いて海洋表面を可視化しているため、波長数10cm程度までの高周波変動成分を観測していることとなる。この高周波変動成分が海面における流れの収束発散・シアや、また何らかの海面水温、海底地形、生物膜などの影響を受けることで空間密度に差異が生じ、その密度の高低でSAR画像に明暗が生じる。このためSAR画像には、海面の「流れ」以外にも様々な影響が反映されていることから、流動構造のみを定量的に評価することは極めて難しく、定性的な解釈・利用に留まっているのが現状である。

(2) SAR画像に反映される物理過程を解明する有力な手段として考えられるのが、海洋波モデルである。1940年代から開発が進められた海洋波モデルは、現在では第三世代波浪モデルまで発展し高精度な現業波浪予測を可能としている。第三世代モデルは成分波間の非線形相互作用を陽的に取り扱うことで、特定のスペクトル形状を前提とせずに波浪スペクトル(波長:約1m-500m)の時空間発展を推算するロバストなモデルとなっている。しかしながら、第三世代モデルで対象となるスペクトル帯にはSARが捕らえる高周波スペクトル領域は含まれていない。その理由としては、高周波領域のエネルギーのソースバランスに関する科学的知見が極めて不足していること、またエネルギーレベルが非常に小さいためにこれまで実用的な問題として取り扱われてこなかったことが挙げられる。そのためSAR画像に表れる流れを定量的に評価する有力な解析手法であるにも関わらず、当該研究分野に応用されるには至っていない。

2. 研究の目的

本研究では、SAR衛星画像に現れる何らかの「流れ」のシグナルを定量的に評価し、それに基づいて沿岸海洋における海洋変動現象の新たな科学的知見を得ることで、今後期待される超高解像度沿海モデル開発に寄与することを最終目標としている。その中で本研究課題においては、その基礎となる海面高周波変動成分の物理過程の解明を新しいアプローチによりチャレンジしようというものである。

3. 研究の方法

(1) 本研究では、現地観測による短波重力波(SG波)データ、および拡張第三世代波浪モデルに基づきSAR画像が反映する海表面

粗度に関する研究を行った。

(2) 現地観測データ解析:SAR画像に反映される短波重力波は吹送流やうねりに伴う軌道流速によるドップラー周波数シフトの影響を容易に受ける。そのため通常の定点観測で得られる周波数スペクトルから分散関係を仮定して推定される波数スペクトルの解釈には注意が必要となる。本研究ではマイアミ大学で開発されたASIS (air-sea interaction spar) buoyによって計測(一計測:20Hz、30分)された4点(20cm間隔)の水位変動に対し、Donelan et al (1996)によるWavelet Directional Method (WDM)を用いて波数スペクトルを直接推定した。使用したデータはFETCH (1998年、地中海リオン湾、852データ)およびDOGEE (2007年、北大西洋スペイン沖、352データ)の2つの現地観測プロジェクトの際に得られた海上風、および波数スペクトル(最大波数:10 rad/m)である。

(3) 拡張第三世代波浪モデル開発:また、これらの観測を対象に第三世代波浪モデルWW3 (Tolman and Chalikov 1996、以下TC96)を用いて波浪ハインドキャストを行った。波数領域は現地観測をカバーする最大60 rad/m (~4Hz)とし、ソースバランス(海上風外力、砕波散逸、成分波間相互作用)を検討するために通常用いられるスペクトルtailは使用せず、ソース項から直接スペクトル形状を計算した。海上風外力項および砕波散逸項にはWW3のデフォルトであるTC96、また非線形相互作用にはDIA法(Hasselmann et al 1985)を用いた。海上風速にはNCEP/CFSRの解析値データ(Saha et al 2010)を用いて波浪モデルを駆動した。海底地形、海岸線データにはETOP05 (Amante and Eakins 2009)を用いた。

4. 研究成果

(1) 図-1は本研究で用いた波数スペクトルに対して得られた観測期間中の海象条件の確率密度関数(pdf)を示している。FETCHが行われた地中海リオン湾は北西からの強風イベント(Mistral events)により最大風速が18m/sにまで達している(図-1a)。一方、観測海域がショートフェッチのため有義波高(図-1b)は最大で3m程度となっている。DOGEEでは、北西大西洋のロングフェッチのため風速に対し波浪の発達が顕著となっている。これらのことから、波齢の逆数(図-1d)を見ると、FETCHはyoung windsea (最大 $u_{10}/cp: 10$)を、一方、DOGEEはmature sea ($u_{10}/cp: 0.2-1$)を反映しており、一般的な外洋域における海象条件を広域にカバーした観測データセットとなっている。

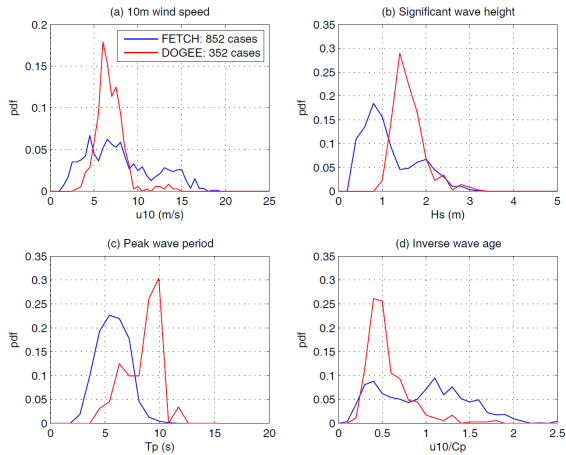


図-1 解析に用いたデータの海象条件 (pdf)
 (a) 10m 高度風速、(b) 有義波高、(c) ピーク周期、(d) 波齢逆数

(2) 図-2 はそれぞれの波数(k :0.2、0.5、1.0、2.0、5.0、10.0 rad/m)において、10m 海上風速に対する飽和スペクトル $B(k)$ の値を示している。ここで

$$B(k) = k^3 F(k) \quad (1)$$

$$F(k) = \int_{-\pi}^{+\pi} \Psi(k, \theta) k d\theta \quad (2)$$

$$\langle \eta(x)^2 \rangle = \int_{-\pi}^{+\pi} \int_0^{+\infty} \Psi(k, \theta) k dk d\theta \quad (3)$$

であり、 $F(k)$: elevation スペクトル、 $\Psi(k, \theta)$: 極座標表示での 2 次元波数スペクトル、 η : 水位である。観測結果で確認できるように、波数 1 (rad/m) 以下ではおおむね風速に比例するように $B(k)$ が増加していることがわかる。

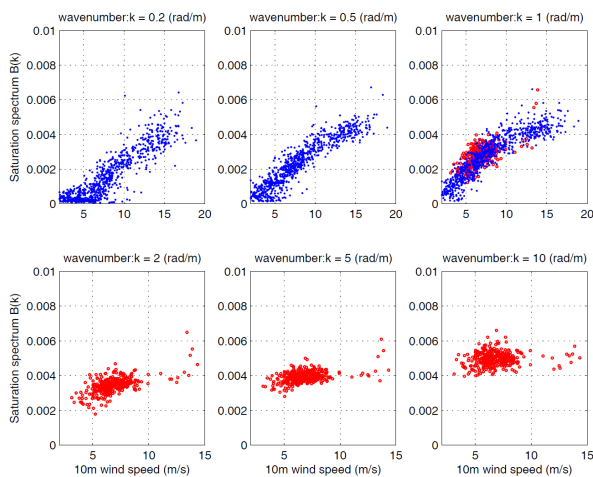


図-2 海上風速に対する飽和スペクトル値
 (青点 : FETCH, 赤点 DOGEE)

これは Toba (1974) が示した飽和スペクトル

$$B(k) \sim u_* g^{-1/2} k^{1/2} \quad (4)$$

(ここで g : 重力加速度、 u_* : 摩擦速度)

と整合している。一方、波数 2 (rad/m) 以上では、 $B(k)$ の値は風速に対して飽和しつつあり、波数 10 ではほぼ一定の値を取ることがわかる。このことは Phillips (1958) によって導入されたものの、その後 Phillips (1985) で否定された飽和スペクトル

$$B(k) \sim k^0 \quad (5)$$

が波数レンジによっては妥当であることを意味している。

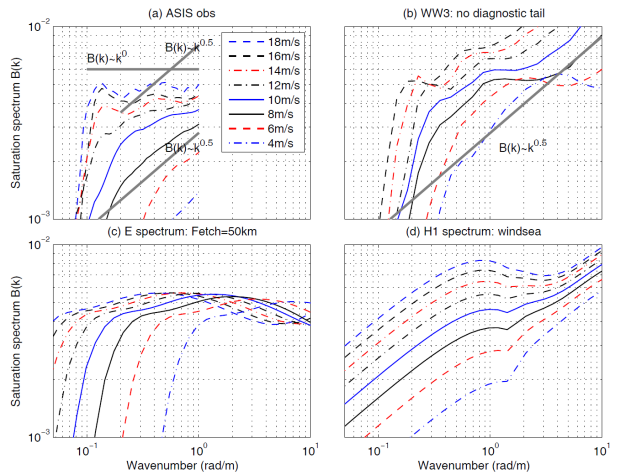


図-3 異なる海上風速に対する平均飽和スペクトル (波数レンジ: 0.05-1 rad/m)

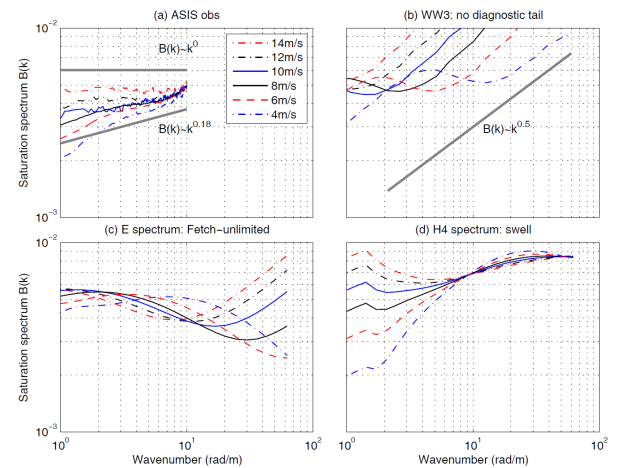


図-4 異なる海上風速に対する平均飽和スペクトル (波数レンジ: 1-10 rad/m)

図-3 (波数レンジ : 0.05-1 rad/m) および図-4 (波数レンジ : 1-10 rad/m) はそれぞれの風速レンジに対して平均した飽和スペクトル形状を示している。観測結果 (図-3a, 図-4a) では、ピーク領域(波数レンジ: 0.1-0.2 rad/m)におけるオーバーシュートとそれに続く Toba スペクトルおよび Phillips スペクトルが確認でき、Forristall (1981) によってはじめて示されたスペクトル形状の遷移を支持する結果となっている。また、SG 波領域 (1-10 rad/m) では Banner et al (1989) が示した波数に対する $B(k)$ の勾配 ($\sim k^{0.09 \pm 0.09}$) に収まっている

ることからも、観測データおよび解析手法 (WDM) の妥当性が確認できる。

(3) 観測された波数スペクトル形状 $F(k)$ は波数レンジに対して $k^{-2.5}$ から k^{-3} へのスペクトル遷移を示しており、既存の研究結果 (Forristall 1981, Hwang and Wang 2001, Resio et al 2004) と整合的である。このことは異なる波数領域で異なるソースバランスが成り立っていることを示唆している。一方、デフォルトの WW3 によって得られた波数スペクトル形状は観測結果と比較して大きく異なることが示された。この観測結果とモデル結果の違いは何に起因するものなのか。以下ではこのことを検討するために新たな砕波散逸項を導入する。Donelan (2001) は SG 波に対してバックグラウンドの流れとなる長波長帯の海洋波が砕波を促すとして (水理学的変調) 新たな非線形散逸モデルを提案している。ここで Donelan (2001) および Donelan et al (2012) による非線形散逸 S_{ds} は式(6)で表される。

$$S_{ds} = -A_2[(1 + A_3 mss(k))^2 B(k)]^{2.5} k^{-3} B(k) \quad (6)$$

A_2 、 A_3 はモデルパラメータ、 mss は Mean square slope で次式で表される。

$$mss(k) = \int_0^k F(l) l^2 dl \quad (7)$$

本研究でもこの水理学的変調に伴う砕波促進の概念を踏まえ、TC96 によって提案されている砕波散逸項の代わりに式(6)を用いることでソースバランスを検討した。

図-5 は、上記の非線形散逸モデルを用いて行った波浪ハインドキャスト結果から図-4 と同一の波数領域における飽和スペクトルを示している。波数帯 $k:1-2$ rad/m の低風速条件 ($u_{10}: 4-6$ m/s) では Banner et al (1989) が示した $B(k) \sim k^{0.18}$ 、一方、波数帯 $k:1-2$ rad/m の高風速 ($u_{10}: 10-14$ m/s) および波数帯 $k:10-20$ rad/m では $B(k) \sim k^0$ のスペクトル形状の再現に成功している。このことから砕波散逸項が SG 波領域でのソースバランスに極めて重要であることがわかる。安定したスペクトル形状を維持するため、発達中の波浪は下記の平衡条件を満たす必要がある。

$$S_{in} + S_{ds} + S_{nl} = 0 \quad (8)$$

改良モデルによって得られたハインドキャスト結果から、ソースバランスをプロットすると (図-6)、波数帯 $k:1-2$ rad/m では非線形相互作用項 S_{nl} と正味のエネルギー入力 $S_f = S_{in} + S_{ds}$ がバランスしていることがわかる。このことは Tamura et al (2010) で示されたように波浪スペクトルの平衡領域において S_{nl} は平衡条件(8)を満たすための調整機能となっていることがわかる。また、波数スペクトル形状 $F(k)$ は S_f が負の場合 ($u_{10}: 10-14$ m/s)

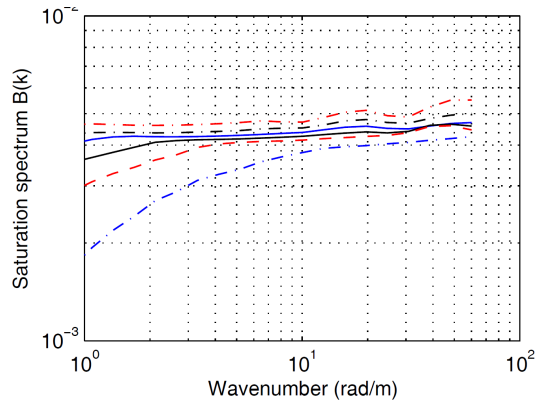


図-5 非線形散逸項による平均飽和スペクトル

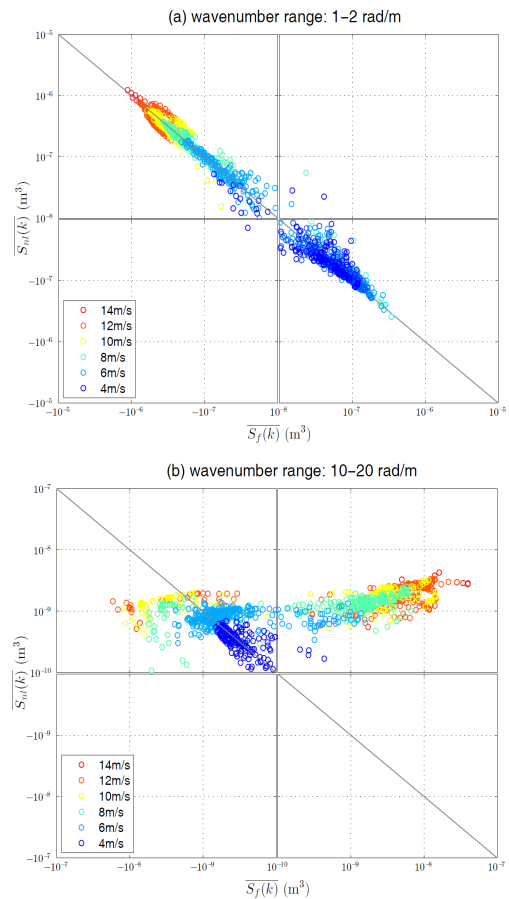


図-6 正味のエネルギー入力 S_f と非線形相互作用項 S_{nl} のバランス (a) 波数: 1-2 rad/m、(b) 波数: 10-20 rad/m

は k^{-3} に漸近し、またゼロに近いとき ($u_{10}: 4-6$ m/s) は $k^{-2.5}$ に漸近することがわかる。一方、波数帯 $k:10-20$ rad/m では S_{nl} は S_f とバランスせず、平衡条件(8)を満たすためには S_{in} と S_{ds} がバランスする必要がある。つまり、平衡領域および飽和領域において S_{nl} の役割が異なることがわかる。

本研究では短波重力波 (SG 波) 領域におけるスペクトル特性を調べるとともに、ソースバランス (海上風外力、砕波散逸、成分波間相互作用) を理解するため非線形散逸項を導

入して解析を行った。観測された波浪スペクトルから、これまでいくつかの研究で示されてきたスペクトル形状の遷移が確認され、また波数 10 rad/m 周辺では海上風に依存しない特徴的な収束点があることが確認された。第三世代波浪モデル WW3 は、ピーク領域におけるスペクトルの再現性は良いものの、SG 波を含む高波数領域では観測結果と比較してスペクトルエネルギーを過大評価する結果となった。一方、非線形散逸項を導入することでエネルギーレベルおよびスペクトル形状は大幅に改善された。ソースバランスの議論から、平衡領域においては成分波間相互作用項は、平衡条件を維持するための重要な役割を果たす。また正味のエネルギー入力が負の時は波数スペクトル形状 $F(k)$ は k^{-3} に漸近し、一方ゼロに近いときは $k^{-2.5}$ に漸近することが確認された。飽和領域では波数スペクトル形状 $F(k)$ は k^{-3} に漸近し、この領域では成分波間相互作用項は他のソース項と比較して小さく、平衡条件を維持するために海上風外力と碎波散逸がバランスする。

< 引用文献 >

- Amante, C. and B.W. Eakins (2009): ETOPO1 1 Arc-Minute Global Relief Model: Procedures, Data Sources and Analysis. NOAA Technical Memorandum NESDIS NGDC-24. National Geophysical Data Center, NOAA.
doi:10.7289/V5C8276M
- Banner, M. L., I. S. F. Jones, and J. C. Trinder (1989): Wavenumber spectra of shortgravity waves, *J. Fluid Mech.*, 198, 321–344.
- Donelan, M. A. (2001): A nonlinear dissipation function due to wave breaking, paper presented at Workshop on Ocean Wave Forecasting, Eur. Cent. for Med.-Range Weather Forecasts, Reading, U K, 2–4 July.
- Donelan, M. A., M. Curcic, S. S. Chen, and A. K. Magnusson (2012): Modeling waves and wind stress, *J. Geophys. Res.*, 117, C00J23, doi:10.1029/2011JC007787.
- Donelan, M. A., W. M. Drenan, and A. K. Magnussen (1996): Nonstationary analysis of the directional properties of propagating waves, *J. Phys. Oceanogr.*, 26, 1901–1914.
- Elfouhaily, T., B. Chapron, K. Katsaros, and D. Vandemark (1997): A unified directional spectrum for long and short wind driven waves, *J. Geophys. Res.*, 102, 15,781–15,796, doi:10.1029/97JC 00467.
- Forristall, G. Z. (1981): Measurements of a saturated range in ocean wave spectra, *J. Geophys. Res.*, 86, 8075–8084.
- Hasselmann, S., K. Hasselmann, J. H. Allender, and T. P. Barnett (1985): Computations and parameterizations of the nonlinear energy

transfer in a gravity-wave spectrum. Part II: Parameterizations of the nonlinear energy transfer for application in wave models, *J. Phys. Oceanogr.*, 15, 1378–1391.

- Hwang, P. A. (2008): Observations of swell influence on ocean surface roughness, *J. Geophys. Res.*, 113, C12024, doi:10.1029/2008JC005075.
- Hwang, P. A., and D. W. Wang (2001): Directional distributions and mean square slopes in the equilibrium and saturation ranges of the wave spectrum, *J. Phys. Oceanogr.*, 31, 1346–1360.
- Hwang, P. A., and W. J. Plant (2010): An analysis of the effects of swell and surface roughness spectra on microwave backscatter from the ocean, *J. Geophys. Res.*, 115, C04014, doi:10.1029/2009JC005558.
- Phillips, O. M. (1958): The equilibrium range in the spectrum of wind generated waves, *J. Fluid Mech.*, 4, 426–434.
- Resio, D. T., C. E. Long, and C. L. Vincent (2004), Equilibrium-range constant in wind-generated wave spectra, *J. Geophys. Res.*, 109, C01018, doi: 10.1029/2003JC 001788.
- Saha, S., Moorthi, S., Pan, H.-L. et al (2009), The NCEP climate forecast system reanalysis. *Bull. Amer. Meteorol. Soc.* 91, 1015–1057.
- Tamura, H., T. Waseda, and Y. Miyazawa (2010), Impact of nonlinear energy transfer on the wave field in Pacific hindcast experiments, *J. Geophys. Res.*, 115, C12036, doi:10.1029/2009JC006014.
- Toba, Y. (1973), Local balance in the air-sea boundary processes III. On the spectrum of wind waves, *J. Oceanogr. Soc. Japan*, 29, 209–220.
- Tolman, H. L., and D. V. Chalikov (1996), Source terms in a third-generation wind wave model, *J. Phys. Oceanogr.*, 26, 2497–2518.

5 . 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 3 件)

Tamura, H., W. M. Drennan, E. Sahlée and H. C. Graber (2014), Spectral form and source term balance of short gravity wind waves, *Journal of Geophysical Research –Oceans*, 119, 11, 7406–7419, DOI: 10.1002/2014JC009869, 査読有

田村仁・Will Drennan・Erick Sahlée・Hans Graber (2014): 短波重力波領域におけるスペクトル形状とソースバランス, 土木

学会論文集 B2(海岸工学), Vol. 70 ,No.2 ,
pp.111-115、査読有

田村仁・早稲田卓爾・宮澤泰正(2013):
風波スペクトルの平衡領域における非
線形相互作用の役割 ,土木学会論文集 B2
(海岸工学), Vol. 69 ,No.2 ,pp.121-125、
査読有

[学会発表] (計 5 件)

田村仁、短波重力波領域におけるスペク
トル形状とソースバランス、海岸工学講演
会、2014 年 11 月 14 日、ウイックあいち、
名古屋市、愛知県

田村仁、海洋波の高波数領域におけるス
ペクトル形状とソースバランス、日本海洋
学会、2014 年 9 月 14 日、長崎大学、長崎
市、長崎県

Hitoshi Tamura, Spectral form and source
term balance of short gravity wind waves,
WISE Meeting, 2014 年 6 月 12 日, Reading,
UK

Hitoshi Tamura, An analysis and modelling of
wavenumber spectra of short gravity waves,
Ocean Sciences Meeting, 2014 年 2 月 27 日,
Hawaii, USA

田村仁、風波スペクトル平衡領域におけ
る非線形相互作用の役割、海岸工学講演会、
2013 年 11 月 14 日、九州大学、福岡市、福
岡県

6 . 研究組織

(1) 研究代表者

田村 仁 (TAMURA, Hitoshi)
独立行政法人海洋研究開発機構・アプリケ
ーションラボ・研究員
研究者番号 : 80419895