

機関番号：82109

研究種目：基盤研究 (C)

研究期間：2008 ~ 2010

課題番号：20510173

研究課題名 (和文) 宇宙からの津波監視は可能か？—人工衛星観測による津波検出とその検知力評価

研究課題名 (英文) Can tsunami be monitored from the space? – Tsunami detectability of the satellite altimetry mission

研究代表者

林 豊 (HAYASHI YUTAKA)

気象研究所・地震火山研究部・主任研究官

研究者番号：40370332

研究成果の概要(和文):

研究課題名にある「宇宙からの津波監視は可能か？」に対する答は、海面高度計の測定精度評価等から、現衛星ミッション下で海面高度観測に基づくリアルタイム津波検知による方法では、No だと見える。しかし、他の宇宙測位技術も含めた津波検知の意味では、答は Yes になる。リアルタイムキネマティック GPS を用いたブイ方式の GPS 波浪計について、観測値をリアルタイムに津波予測に活用する実用的な方法があることも示した。

研究成果の概要(英文):

The answer to the research title, "Can tsunami be monitored from the space?", turned out to be "No", as far as the real-time tsunami detection by the undergoing satellite altimetry missions after the evaluations of accuracy of sea-level observation and others. However, other space positioning technology, Real-time Kinematic GPS, changes the answer to "Yes." In this study, a practical method for real-time tsunami forecasting using observation data by GPS buoys has been developed.

交付決定額

(金額単位:円)

	直接経費	間接経費	合計
2008 年度	1,900,000	0	1,900,000
2009 年度	800,000	0	800,000
2010 年度	700,000	0	700,000
総計	3,400,000	0	3,400,000

研究分野：複合新領域

科研費の分科・細目：社会・安全システム科学・自然災害科学

キーワード：津波, リモートセンシング, 巨大地震, 衛星海面高度計

## 1. 研究開始当初の背景

一般に津波は、外洋の深海部を伝播する間は線形近似がよく成立するが、浅海部では非線形性の高い挙動を示し、海岸の検潮所での水位観測値は非線形性効果の影響を強く受けている。検潮所の津波観測値から断層すべり量分布を求める線形逆解析手法 (Satake, 1995) が広く使われているが、もし、非線形の効果の影響が小さい外洋で S/N 比が高い津波観測値を得て、この方法に適用できれば、理想的な線形逆解析が可能となり、津波発生機構の解明に重要な貢

献が期待できる。

2004 年 12 月 26 日にインドネシアのスマトラ島沖で、マグニチュード (以下、M) が 9 を超える最近 40 年間で世界最大の規模の地震が発生した。回帰日数 10 日の準回帰軌道の人工衛星 Jason-1 が、地震から 2 時間後にベンガル湾上空を通過し、搭載されたマイクロ波海面高度計 (以下、海面高度計) によって、衛星直下を伝播中の津波が海面高度の変化として捉えられた (Gower, 2005)。海面高度計で明瞭な津波観測値が得られたのは、これが初めてである。海面

高度計を搭載した Jason-1 と TOPEX/Poseidon の前サイクル同一箇所つまり約 10 日前の(潮汐・気圧等の補正済み)観測値との差を津波の成分と仮定して、インド洋大津波の発生機構の解明に活用されてきた(例えば、Hirata et al., 2006)。

しかし、上述の方法で津波成分を仮定すると、海況変化に起因する非津波性の海面高度変化が大きなノイズとなり、解析結果も影響を受けることが避けられない。このため、半径約 150km 以内を前後各 30 日以内に通過した全ての衛星軌道で得られた海面高度観測データから、海面高度参照値を作り、低ノイズの津波成分を抽出する手法を開発してきた(Hayashi, 2008)。

海面高度計の観測成果をリアルタイム津波予測に活用することの可能性については、リモートセンシング関連学会ではシンポジウムで盛んに議論されていた。しかし、津波監視にとって海面高度計観測が全く役に立たないのか、工夫次第では役に立つのかについては、本研究開始前には明確ではなかった。

海面高度計の主な利用目的は地球重力場のマッピングと海洋物理学的変動のモニタリングであるが、海面高度計は他にも多様な時間スケールの海象を捉えている。そのため、いわば、想定外の利用ではあるものの、上述のように、海面高度計を津波の観測、津波発生機構の解明に活用し、さらに即時・準即時津波情報に活用できるか、その可能性を模索する必要があると指摘されていた。

## 2. 研究の目的

本研究は、以下の二点の研究を通じて、「宇宙からの津波監視は可能か?」という疑問に対する答えを導くことを目的とした。

- (1) 人工衛星による過去の海面高度観測データから、外洋を伝播する津波を探索し、それらを津波発生機構の検討に活用すること
- (2) 衛星海面高度観測による津波検知力を評価するとともに、将来の即時・準即時津波情報等への利活用の可能性を探ること

## 3. 研究の方法

### A. 当初計画していた方法

研究開始時点では、研究期間中に発生する事象等に応じて柔軟に修正することを予め想定しながらも、当初は、以下の方法で研究を進めることとしていた。

- (1) 過去の衛星海面高度観測データから非津波性変動成分を除去する処理をし、津波数値モデル計算結果と照合して、外洋での津波の抽出・同定を試みる。
- (2) 精度よく津波成分を同定できた事例について、地震断層すべり量分布等を逆解析し、津波発生機構を検討する。
- (3) 抽出した津波成分の性質と衛星の技術情報から、現在または将来の衛星海面高度観測ミッ

ションが検知しうる津波の規模の限界を評価するとともに、将来の巨大津波発生状況の早期把握、あるいはリアルタイム津波予測情報への利用可能性も検討する。

### B. 実際に実施した方法

実際に実施した研究の方法は、以下のとおり当初の計画から修正した。

- (1) 研究期間中に 2010 年 2 月にチリ中部沖で Mw8.8 の非常に規模の大きい地震が発生したことから、これに伴う津波の抽出も試みた。
- (2) 津波成分を同定できる事例が得られなかったため、この項目は実施できなかった。
- (3) 海面高度計以外の宇宙測位技術の一つとして、GPS プレイによる津波早期検知とその津波予測への適用可能性も、関連して検討した。これは、当初の計画には含めていなかったが、「宇宙からの津波監視は可能か?」という命題への答えを出す上で明らかに重要な検討事項であることが判明したため、追加した。

## 4. 研究成果

### (1) 海面高度計で検知される津波の高さの精度評価

海面高度計の観測値から潮位等を取り除いた海面高度偏差(SLA)には、多様な時間スケールの海象の影響が含まれる。SLA の値から津波成分を抽出するには、津波がなかった場合に得られたはずの SLA を推定して、その値を参照値として差分を取るようになる。

参照値の求め方の一つは、利用しうる全衛星から得られる SLA の値のうち、観測日時・場所が近いものから「津波がなかった場合の海面高度偏差」を推定して、参照値とする多衛星時空間内挿法とでも呼ぶべき方法(Hayashi, 2008)である。もう一つは、同一衛星同一軌道の前サイクル(Jason-1 では約 10 日前)での SLA の差分を取る方法(Gower, 2005)である(図 1)。

高精度で欠測の影響が少ない津波成分の抽出が可能となる前者に比べると、後者は、海況の時間変化の影響を適切に考慮していない。津波の事後解析に用いるには適切さを欠くとはいえ、リアルタイムに検知する目的で利用する際には、必要な方法である。

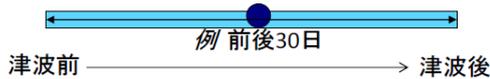
2004 年 12 月のインド洋大津波が発生した海域での非津波時の実測値から、両手法による精度などを Hayashi(2008)の結果を用いて比較した(図 2, 3)。

多衛星時空間内挿法では、平均誤差約 4cm の精度で津波成分が抽出されている。これは、外洋で約 10cm 以上の高さの津波なら、衛星海面高度計の観測値から検出できる可能性があることを示している。また、過去の観測データから抽出するには、津波がその程度以上の規模である必要があることを意味する。

### (2) 海面高度計観測値からの津波探索

#### a) 2007 年以前の観測値からの探索

多衛星時空間内挿法



前サイクルとの差分をとる方法

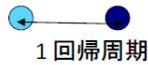


図 1. 各手法において「津波がなかった場合の海面高度」(参照値)を作成するのに必要とする観測期間のイメージ

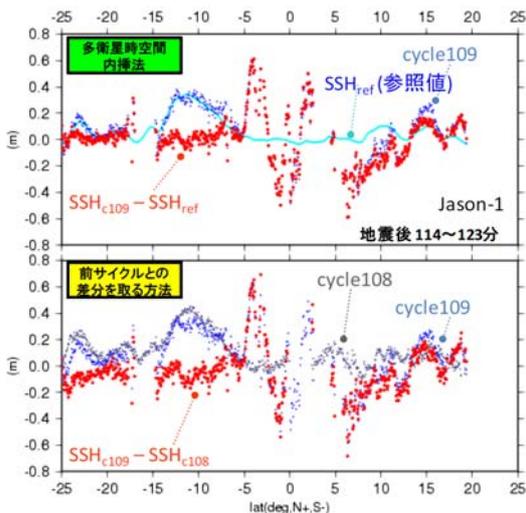


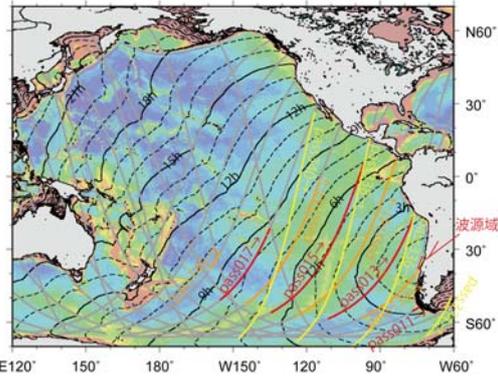
図 2. 2004 年インド洋大津波時の海面高度計観測値への両方法の適用例 (Hayashi, 2008 に加筆; 学会発表 8)  
(上) 多衛星時空間内挿法、(下) 前サイクルとの差分をとる方法

	前サイクルとの差分をとる方法	多衛星時空間内挿法
津波成分の抽出に成功した衛星軌道の数	2 (TOPEX/Poseidon, Jason-1)	5 (T/P, J1, ENVISAT, GFO x 2)
津波観測値を得ることができたサンプリング点数	J-1 356 T/P 88	J-1 412 T/P 285 他は略
津波観測値の推定誤差 (RMSE)	7~10 cm 以上	4-5cm
参照値を得るまでに要する期間 (津波後)	2~3 日後 [IGDR]*	5か月後 [IGDR] ~10 か月後 [GDR]

図 3. 2004 年インド洋大津波時の海面高度計観測値に適用して抽出される津波シグナルの性質の比較 (学会発表 8)

過去の海面高度計観測データに未発見の外洋津波観測記録が含まれているか否かを確認するため、以下の手順でスクリーニングし、探索対象の海面高度観測値を選んだ。

まず、海面高度計の観測値が整備されている 1992~2007 年に世界各地で発生した津波について、米国地質調査所等の世界の地震・津波カタログを用いて、外洋の津波の規模が大きかったと推定できる地震津波イベントを抽出した。津波到着後であり、かつ、地震発生から数時間以内に衛星が通過したと考えられる衛星軌道を選び出した。



○ 海面高度計を搭載した人工衛星の軌道 (地震発生から12時間以内)  
・ 津波到達後に通過(観測値が津波の影響を受けている範囲)  
Jason-1 cycle300 Jason-2 cycle061 ENVISAT cycle087  
・ 津波到達前に通過(観測値が津波の影響を受けていない範囲)  
○ 水深 (ETOPO1による) ○ 津波走時 (波源域はUSGSによる断面面上と仮定)  
3時間間隔 --- 1時間間隔

図 4. 計算による 2010 年 2 月チリ中部地震津波の走時、海面高度計を搭載した人工衛星の軌道 (学会発表 8)

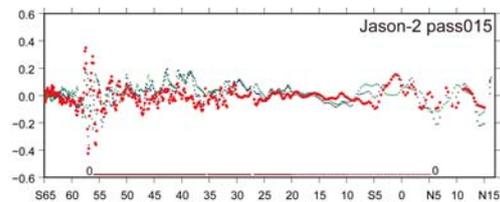


図 5. 2010 年 2 月チリ中部地震津波時の海面高度計観測データ (学会発表 8; 前サイクルとの差分をとる方法による)  
青 (津波時の SLA)、緑 (一回前約 10 日前のサイクルの SLA)、赤 (青と緑の差)。

次に、フランス国立宇宙研究センター (CNES) が解析した 7 日毎の海面高度偏差分布図データを収集して、海面高度計の観測値と比較をして、明らかに海洋性擾乱だと考えられるものを除き、かつ、表 3 の推定誤差に照らして十分に大きい残差を示す衛星軌道を探した。

しかし、この二段階のスクリーニングを通過する、良好な津波のシグナルを抽出できる可能性のある衛星軌道候補はなかった。

b) 研究期間中に発生した巨大地震に伴う津波の観測値からの探索

研究期間中、2010 年 2 月 27 日にチリ中部沖で発生した M8.8 (USGS による) の巨大地震 (以下、2010 年チリ地震) が発生した。世界中で十年に一度程度の巨大地震である。海面高度計を搭載した人工衛星 Jason-1, Jason-2, ENVISAT が、地震発生から 12 時間以内に、南東太平洋で津波が伝播している領域の上空を通過した (図 4)。海面高度計によるこれらの軌道直下の海面高度には、津波により生じた海面の高さの情報が最大で 10cm 程度で含まれていると考えられる (図 5)。

人工衛星 Jason-2 が地震の約 7 時間後に通過した pass015 で、衛星軌道と津波先頭波面が南米太平洋沖 N5~S5° 付近で交わり、海面高度計の観測値から前サイクルとの海面高度偏差の変化量の分布を求めると、最大 0.1m の二つの山を持つことが分かった。簡易な地震断層モデルと線形長波理論による津波伝播計算に矛盾しない結果であったが、回帰軌道の一サイクル間(約 10 日)の非地震性の海面変動と同規模の大きさ(図 3)であるため、これが津波による変化だとは同定できなかった。

なお、2011 年 3 月 11 日に東北地方太平洋沖で発生した M9.0(USGS による)の巨大地震による津波は、本研究期間終了直前であったために、研究対象に含められなかった。

### (3) 海面高度計の津波検知力評価

2010 年チリ地震のように稀な頻度の巨大地震においてさえ、明瞭な津波を海面高度観測データから抽出できなかったことは、現在の人工衛星の海面高度計ミッション下で、津波の発生機構の解明に有効な津波検知が可能になることを期待できないことを示している。津波検知力を高められるような衛星海面高度観測の仕様を検討することが、第一に解決すべき将来の課題となる。

本研究では、期間中に NASA, CNES による Jason-2 の海面高度計の運用が開始するため、海面高度科学チーム(OSTST)会合などを通じて、衛星の観測・データ処理・応用に関して予定されている技術情報と運用状況の情報を収集してきた。例えば、Jason-2 の観測値は 3 段階に処理され、特定利用者向けにプロダクツが提供される、あるいは公開されているが、このスペック情報等である(表 1)。

表 1. Jason-2 の海面高度プロダクツの種類

プロダクツ名	発行時期	高度計測精度	用途
OGDR (real-time)	3~6 時間後	11cm	現業目的の利用に限定
IGDR (near real-time)	1 ~ 1.5 日後	3.9cm	現業・研究目的で、利用者を非限定
GDR (delayed time)	60 日後	3.4cm	

収集した技術情報と、本研究での解析を通じて得た知見から、海面高度計での津波検知力を向上させるに、新たに満たすべき条件として、以下のものが挙げられる。

- ・観測頻度が現行の海面高度計ミッションよりかなり多くなければ、衛星が津波の伝播中の海上を通過することが、ほとんど起きない
- ・海上を飛行中の極軌道衛星が地上局へ観測データを通信する機能を、衛星が備えていなければ、リアルタイム津波検知はでき

ない

- ・絶対精度ではなく、相対精度で数 cm の精度の即時衛星軌道決定が必要である
- ・津波が高まる浅海域で海面高度を測定できれば、津波検知ができる機会が増える

しかし、これらはいずれも、将来の衛星で実現可能性を検討し、可能なものは実現を目指すべきという、大きな課題だと思われる。

### (4) 海面高度計以外の人工衛星技術を用いた津波検知可能性の検討

海面高度計以外の宇宙測位技術による津波観測手法であるリアルタイムキネマティック GPS 技術を活用したブイ式波浪計(写真 1)についても、津波検知力評価とリアルタイム予測情報への利用可能性を評価した。

海岸から 20km 以内沖合に展開されている GPS 波浪計は、海岸で津波が高くなる直前に海面上昇を観測できる場合がある(図 6)。GPS 波浪計と、離岸距離数 km に設置されている海象計での津波観測例を併用して、沖合から沿岸へ津波の高さが増幅する関係について、経験則を導いた(図 7)。



写真 1 GPS ブイ (GPS 波浪計) (港湾空港技術研究所 HP より)

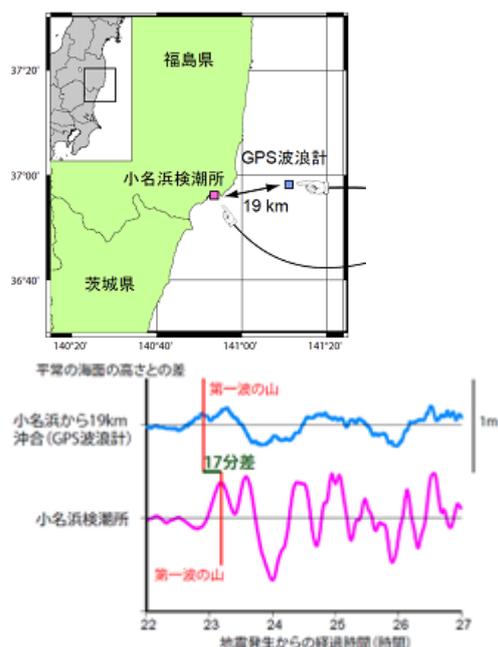


図 6. 2010 年チリ地震津波での GPS 波浪計と検潮所での観測波形の比較例  
潮汐成分・短周期成分は除去。

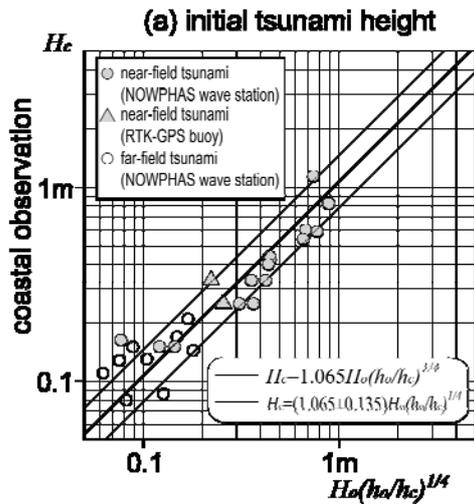


図 7. 波浪観測施設と検潮所での津波の高さの関係 (論文 1)

横軸は GPS 波浪計または海象計での津波の高さを観測点の水深で補正した値、縦軸は検潮所での津波の高さの観測値。

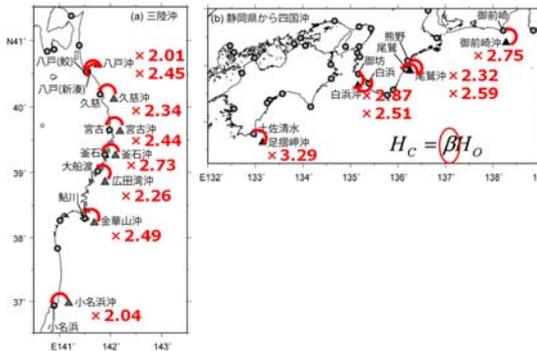


図 8. 経験式による GPS 波浪計から検潮所への津波第一波の高さの増幅率 (論文 2)。

経験式から求められる推定増幅率(図 8)を適用すれば、GPS 波浪計で津波第一波の山が到達する前に、対岸での津波の高さが一定以上になると推定でき、予報が過小評価であっても、実際に津波注意報を警報に切り替える等の判断に活用できることを示した(図 9)。

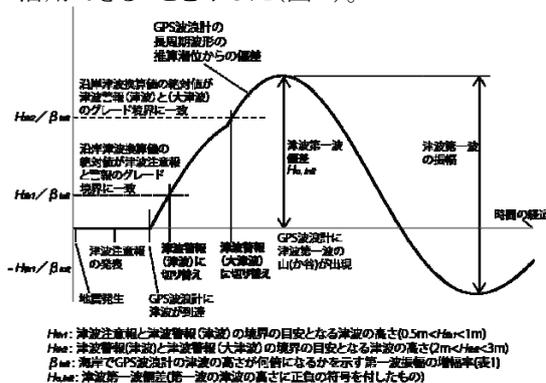


図 9. GPS 波浪計での津波から検潮所までの津波増幅率を活用した津波予測の切り替え方法 (論文 2)

ところで、2011 年 3 月 11 日の東北地方太平洋沖地震津波で、気象庁は釜石沖 GPS 波浪計での津波観測値から予報値の過小評価に気づき、手作業で岩手県沿岸の津波の予報を 6m に修正した。津波が釜石港の防潮堤を越える 7 分前であった。仮に、本研究の方法が実装されていれば、あと約 10 分早く、津波防波堤と防潮堤以上の高さの津波の到来を予報できたはずだと見積られる。

### (5) 結論

本研究で答えを探ることとした疑問は、「宇宙からの津波監視は可能か？」である。本研究を完了し、その疑問に対して、No でもあり Yes でもあると答えられる。

まず、人工衛星に搭載した海面高度計からのリアルタイムの津波検出を基にして、近い将来に津波監視を可能にできるかという意味では、答えは No である。今後計画される衛星ミッションで、数多くの重要な技術的課題を解決していく必要があるためである。

一方で、RTK-GPS の測位技術を用いた GPS 波浪計では、現行の観測網でも外洋での津波検出の可能性があり、しかも、観測値をリアルタイムに用いて津波予測に活用する実用的な方法があることも示せた。従って、「宇宙からの」を海面高度計以外の宇宙測位技術を含めてという文脈では、答えは Yes になる。

### (6) 今後の活動

将来の国内外における人工衛星の海面高度計ミッションが、津波検出の可能性を高めることができるものになるよう、本研究で得られた成果を踏まえて、適宜、関係機関・関係者が必要とする知見を提供していきたい。

本研究での GPS ブイの津波監視に係る研究成果は、気象研究所の重点研究「沖合・沿岸津波観測等による津波の高精度予測に関する研究」(2010~2014 年度)に引き継ぎ、研究を進展させていく。

### 引用文献

- Gower, J. (2005), *EOS Trans. AGU*, **86**, 37-38.
- Hayashi, Y. (2008), *J. Geophys. Res.*, **113**, C01001.
- Hirata, K., et al. (2006), *Earth, Planets Space*, **58**, 195-201.
- Satake, K. (1995), *Pure Appl. Geophys.*, **144**, 455-470.

### 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 2 件)

1. Yutaka HAYASHI, Empirical relationship of tsunami height between offshore and coastal stations. *Earth, Planets and Space*, 査読有, vol.62, 269-275, 2010.

2. 林 豊, GPS 波浪計の長周期は計算測地による沿岸津波換算値を活用した津波即時情報, 自然災害科学, 査読有, 29 巻, 381-391, 2010.

[学会発表] (計 11 件)

- (1) Yutaka HAYASHI, Extraction of the 2004 Indian Ocean tsunami signals from satellite altimetry data and tsunami detectability of the altimetry mission. The Asia Oceania Geosciences Society 5th Annual Meeting (AOGS2008), 2008. 6. 18, 釜山(大韓民国)
- (2) Kenji HIRATA, Jeffrey A. HANSON, Eric L. GEIST, Tetsuzo SENO, Wonn SOH, Toshiya FUJIWARA, Christian MULLER, Hideki MACHIYAMA, Eiichiro ARAKI, Kohsaku ARAI, Kazuki WATANABE, Leonardo SEEBER, Yusuf S. DJAJADIHARDIA, Safri BURHANUDDIN, Badrul M. KEMAL, Nugroho D. HANANTO, Hananto KURNIO, Yudi ANANTASENA, Kiyoshi SUYEHIRO, A new model for the unusual tsunami generation off northwest Sumatra during the 2004 Sumatra-Andaman earthquake. The Asia Oceania Geosciences Society 5th Annual Meeting (AOGS2008), June 20, 2008, 釜山(大韓民国)
- (3) Yutaka HAYASHI, Extraction of the 2004 Indian Ocean tsunami signals from satellite altimetry data and tsunami detectability of the altimetry mission. The 6th International Workshop on Remote Sensing for Disaster Management Applications, September 12, 2008, Pavia (Italy), 招待講演
- (4) Kenji HIRATA, Jeffrey A. HANSON, Eric L. GEIST, Tetsuzo SENO, Wonn SOH, Toshiya FUJIWARA, Christian MULLER, Hideki MACHIYAMA, Eiichiro ARAKI, Kohsaku ARAI, Kazuki WATANABE, Leonardo SEEBER, Yusuf S. DJAJADIHARDIA, Safri BURHANUDDIN, Badrul M. KEMAL, Nugroho D. HANANTO, Hananto KURNIO, Yudi ANANTASENA, Kiyoshi SUYEHIRO, The fifth model for the huge tsunami generation off northwest Sumatra during the 2004 Sumatra-Andaman earthquake. 2008 American Geophysical Union Fall Meeting, 2008.12.18, San Francisco (USA)
- (5) 林 豊, 平田賢治, 吉田康宏, 高山寛美, 長谷川洋平, 津波の予測精度向上に関する研究. 平成20年度気象研究所研究成果発表会, 2009.1.23, 気象研究所(つくば)
- (6) Kenji HIRATA, Hiromi TAKAYAMA, Hiroaki TSUSHIMA, Yutaka HAYASHI, Ryoichi IWASE, and Toshitaka BABA, Integration of Seafloor geodetic observation and offshore tsunami observation - toward researches on tsunami forecast. 第21回海洋工学シンポジウム, 2009.8.6, 日本大学理工学部駿河台キャンパス(東京都)
- (7) Yutaka HAYASHI, Norihisa USUI, Masafumi KAMACHI, and Shunichi KOSHIMURA, On real-time tsunami detectability of satellite altimetry: Case study with data during the Feb 2010 Chile earthquake tsunami. 3rd International Tsunami Field Symposium, 2010.4.10, 東北大学片平キャンパス(仙台市)
- (8) 林 豊・碓氷典久・蒲地政文・越村俊一, 宇宙からのリアルタイム津波検出は可能か?—衛星海面高度計による2010年2月チリ中部地震津波の観測値を用いた検討. 日本地球惑星科学連合2010年大会, 2010.5.23, 幕張メッセ国際会議場(千葉市)
- (9) 林 豊, 2010年2月チリ中部地震津波のGPS波浪計と検潮所での振幅比較, 日本地球惑星科学連合2010年大会, 2010.5.23, 幕張メッセ国際会議場(千葉市)
- (10) Yutaka HAYASHI, Norihisa USUI, Masafumi KAMACHI, and Shunichi KOSHIMURA, Detection of the 2010 Chile earthquake tsunami from satellite altimetry, The 8th International Workshop on Remote Sensing for Disaster Management, 2010.9.30, キャンパスイノベーションセンター東京(東京都)
- (11) 林 豊, 海岸—沖合津波高比の経験則を適用した新しい津波予報手順案の紹介. 海底地殻変動と津波に関するシンポジウム, 2011.1.19, 東京大学山上会館(東京都)

[その他]

ホームページ

[http://www.mri-jma.go.jp/Dep/sv/5\\_kakenhi/Hayashi/TDS.htm](http://www.mri-jma.go.jp/Dep/sv/5_kakenhi/Hayashi/TDS.htm)

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

林 豊 (HAYASHI YUTAKA)

気象庁 気象研究所・地震火山研究部・主任研究官

研究者番号:40370332

### (2) 研究分担者

平田 賢治 (HIRATA KENJI)

気象庁 気象研究所・地震火山研究部・主任研究官

研究者番号:20359128

蒲地 政文 (KAMACHI MASAFUMI)

気象庁 気象研究所・海洋研究部・部長

研究者番号:00354548

### (3) 連携研究者

岡田 正實 (OKADA MASAMI)

気象庁 気象研究所・地震火山研究部・客員研究員

研究者番号:20414518