

# 北極海における波浪予測

東京大学大学院新領域創成科学研究科

海洋技術環境学専攻, 早稻田卓爾

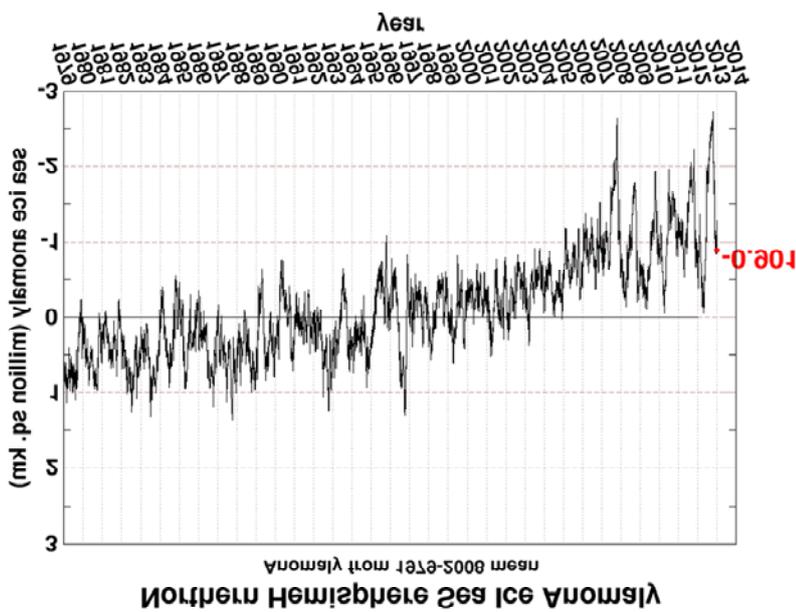
2015年11月6日 東京海洋大品川キャンパス  
GRENE北極気候変動研究事業  
第2回特別セミナー 北極海航路の持続的利用実現に向けて

## Outline

- 北極海夏季の波浪, 過去と現在, 未来
- 氷海の波浪の物理
- 波浪予報の現状と将来展望
- 平成28年度夏季波浪観測について

# 北極海夏季の波浪 過去と現在, 未来

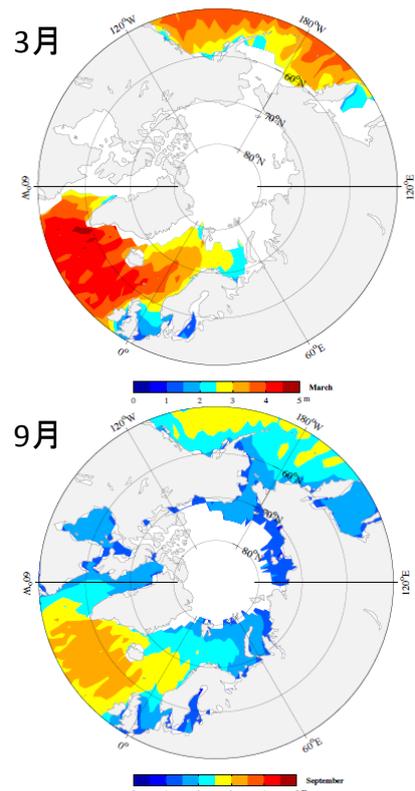
## 夏季海氷面積の減少 = 波浪場の増大



Walsh 2014

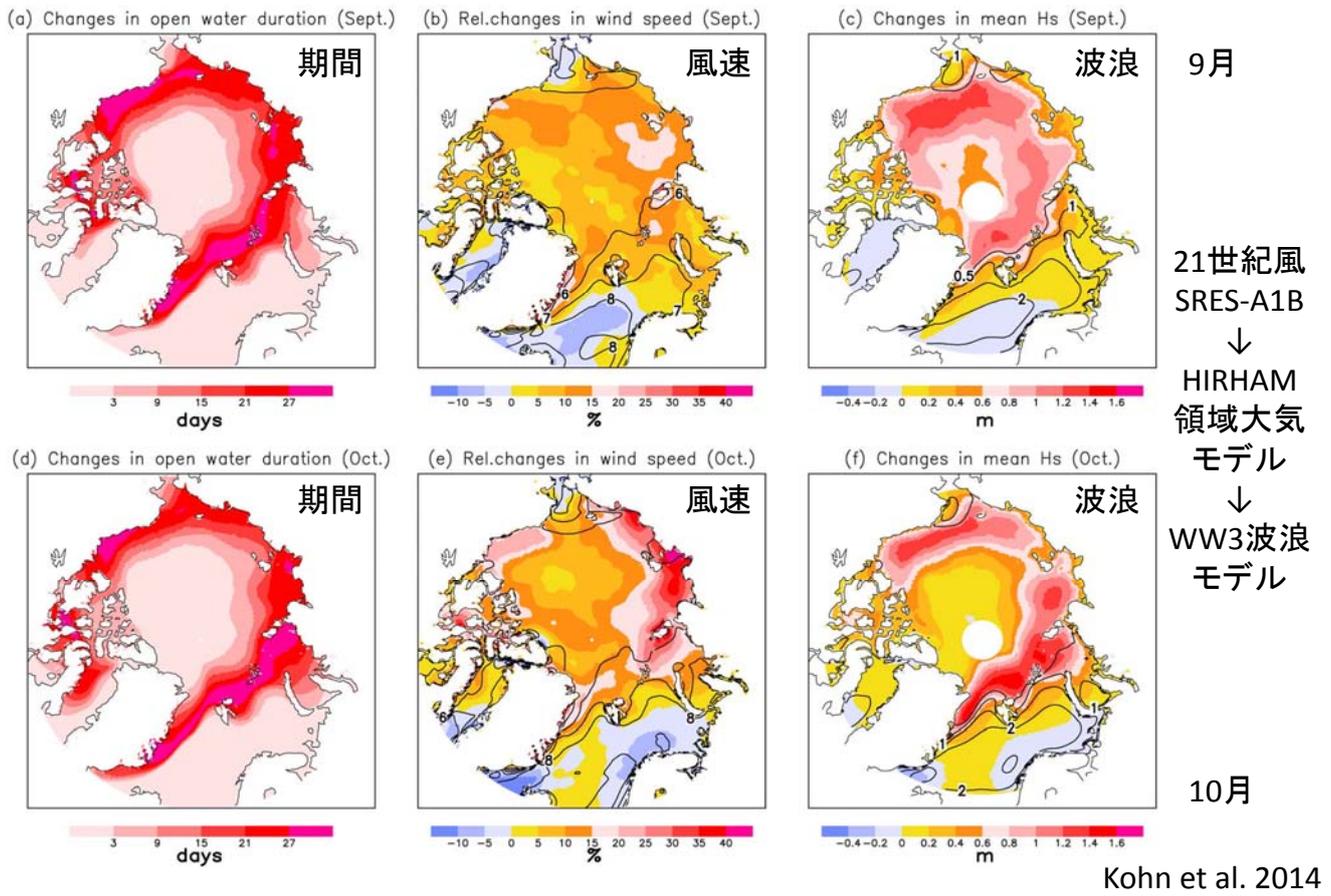
1000 km x 1000 km 程度の海域で  
新たに海洋波が生成されるようになった

2002-2012 平均波高

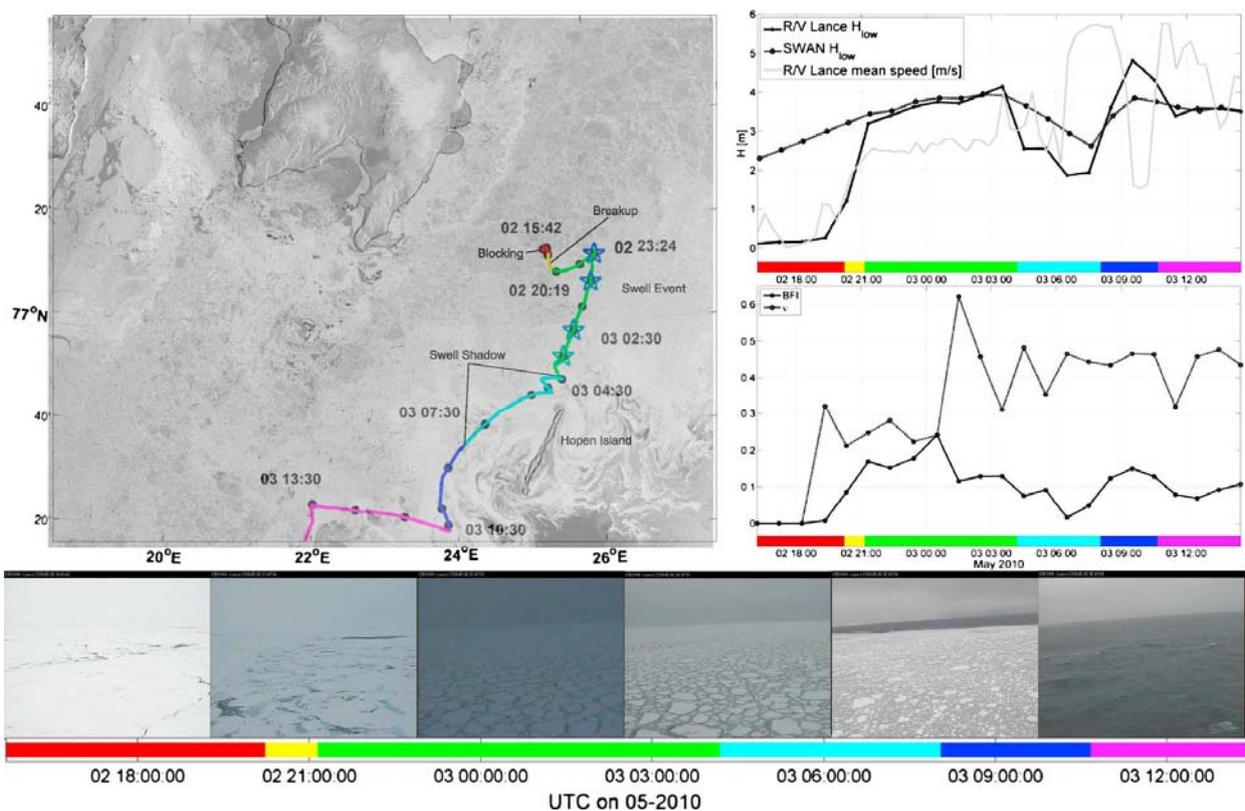


Babanin et al. 2014

# 温暖化シナリオ, 波高の増大 (2046-2065, 1980-1999)



## 現場観測された最大波高



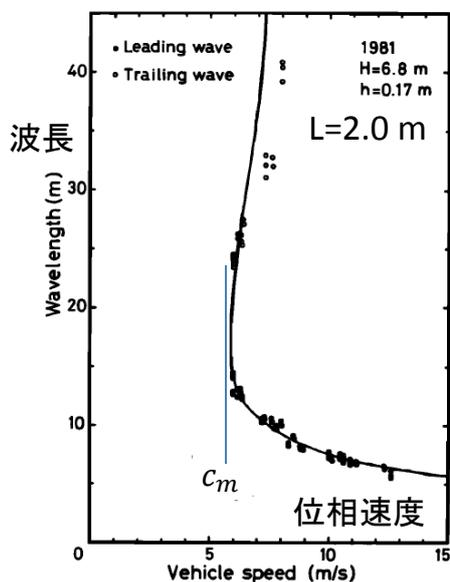
# 氷海の波浪の物理

## 連続体としての氷, 分散関係の変化

$$c^2 = \frac{g}{k} (1 + L^4 k^4) \tanh kH \quad \text{Wilson 1958}$$

$$L = \left[ \frac{D}{\rho_w g} \right]^{1/4} = \left[ \frac{Eh^3}{12\rho_w g(1 - \sigma^2)} \right]^{1/4} \quad \text{Action radius}$$

Guyenne et al. 2012



$$H = \frac{1}{2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\eta} |\nabla\Phi|^2 dy dx + \frac{1}{2} \int_{-\infty}^{\infty} \left[ g\eta^2 + \frac{D}{\rho} \left( \frac{\eta_{xx}^2}{(1 + \eta_x^2)^{5/2}} \right) \right] dx$$

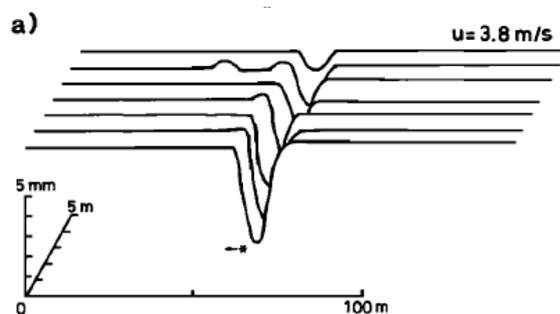
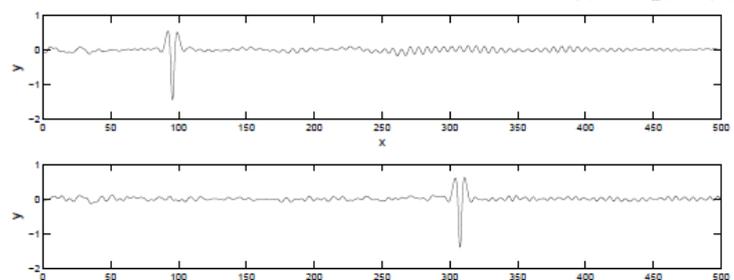
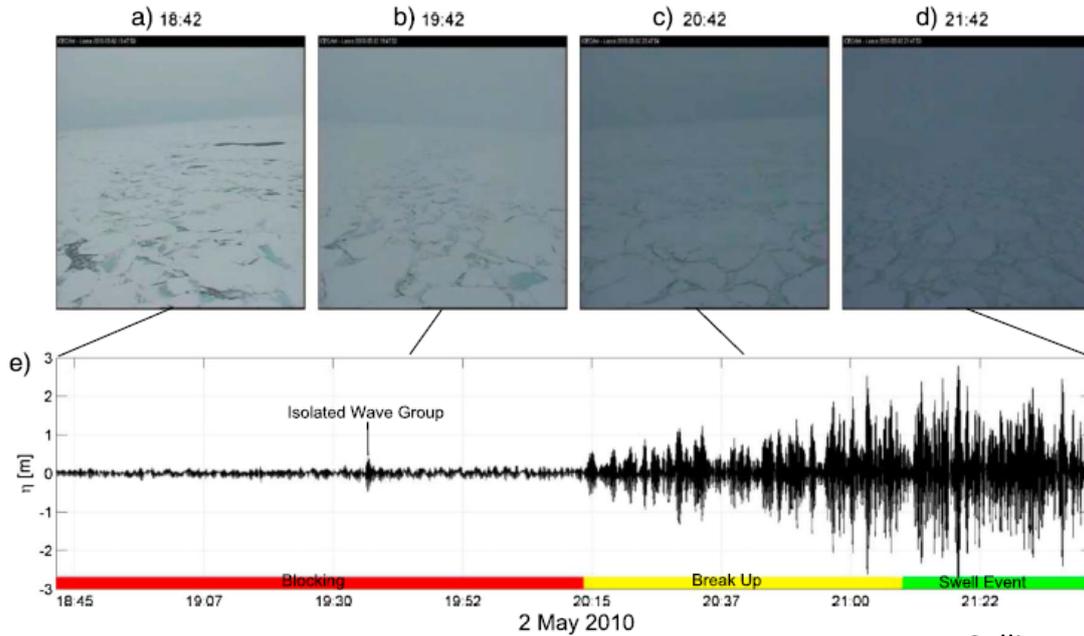


Fig. 5. Variation of wavelength  $\lambda$  with load speed. The distance between the deflectometer and the load's trace was 1 m. (Reproduced by permission from Takizawa [1985].)

Takizawa 1985

# 波群の観測例



Collins et al. 2015

屈曲重力波として伝わる波群が、  
氷板の破壊に寄与している可能性

# 水槽実験

$$\sigma^2 = \left( 1 + \frac{\rho_{ice}}{\rho_{water}} \frac{g^2 k^2 S_k S_\alpha - (N^4 + 16k^6 \alpha^2 v_e^4) S_k S_\alpha - 8k^2 \alpha v_e^2 N^2 (C_\alpha C_k - 1)}{gk(4k^3 \alpha v_e^2 S_k C_\alpha + N^2 S_\alpha C_k - gk S_k S_\alpha)} \right) gk \tanh kh \quad (7)$$

$$v_e = v + iG/\rho_{ice}\sigma, \quad \alpha^2 = k^2 - i\sigma/v_e$$

連続体として近似

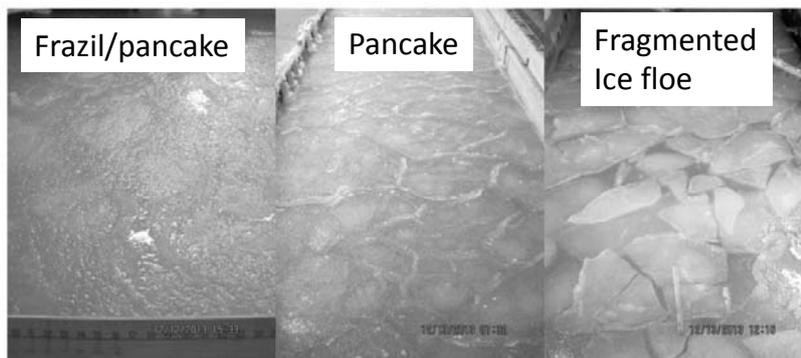


Fig. 3. (Left) Frazil/pancake ice mixture with a meter stick shown at the bottom of the photo. (Center) Pancake ice. (Right) Fragmented ice floe.

屈曲，粘性の効果を考慮した  
分散関係を経験的に決定

Zhao & Shen 2015

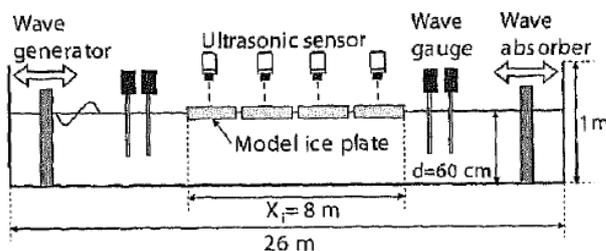
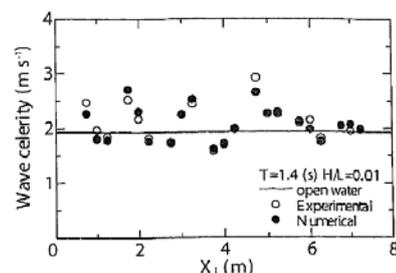


Fig. 3. The wave tank and experimental equipment.

Ogasawara & Sakai 2006

連結した合成樹脂素材の  
薄板を使った実験



連結された剛体と弾性体

# 波浪予報の現状と将来展望

## 第三世代波浪モデルの成熟

$$\underbrace{\frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{E}{\sigma} \right) + \nabla_H \cdot \left\{ (\mathbf{c}_g + \mathbf{U}) \frac{E}{\sigma} \right\}}_{\text{波浪の伝播}} = \frac{1}{\sigma} \left( \underbrace{S_{in}}_{\text{風による成長}} + \underbrace{S_{ds}}_{\text{エネルギー散逸}} + \underbrace{S_{nl}}_{\text{非線形相互作用}} \right)$$

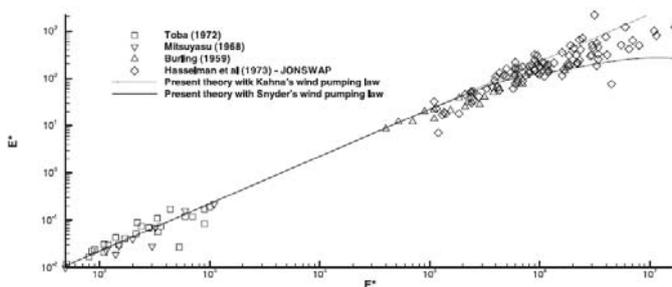


FIG. 5. Nondimensional total energy vs nondimensional fetch.

$$\frac{de}{dt} = \dot{e}_w - D_b$$

Fontaine 2013  
Tulin 1996

$$\frac{dc_g}{dt} = \gamma c_g \frac{D_b}{e}$$

フェッチ則を満たす

第一世代波浪予測モデル  
Snlが無い

第二世代波浪予測モデル  
Snlをパラメータ化

*Miami Wave Model*  
*Donelan et al. 2012*

第三世代波浪予測モデル  
Snlを近似的に数値計算

WAM-Model (WAMDI Group JPO1988)

Community Models:

WAM4

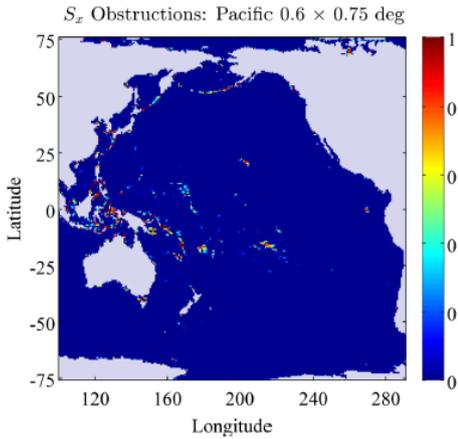
WaveWatchIII

SWAN

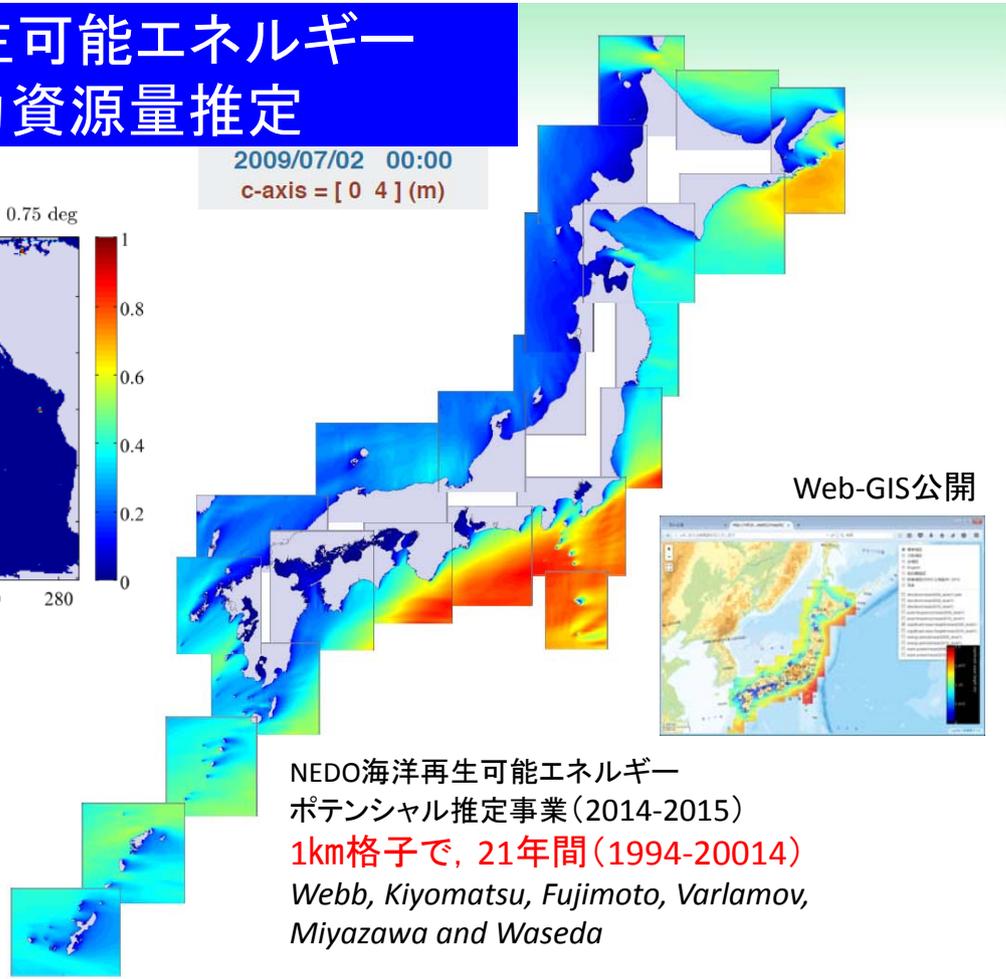
- NOPPプロジェクトによるパラメタリゼーションの高度化
- ONRプロジェクト (Rogers) - 氷海中波浪 (H. Shen)

# 海洋再生可能エネルギー 波力資源量推定

2009/07/02 00:00  
c-axis = [ 0 4 ] (m)



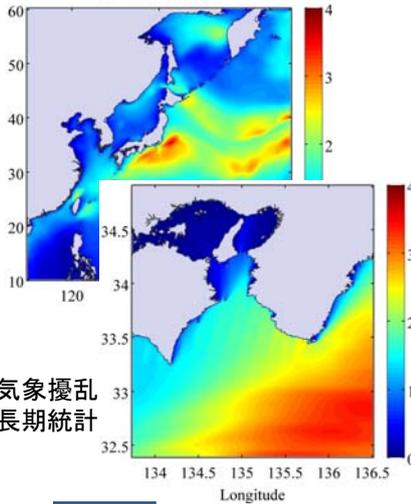
4重ネスティング  
NCEP-CFSR風  
未解像島影響考慮  
うねり減衰影響改善



NEDO海洋再生可能エネルギー  
ポテンシャル推定事業(2014-2015)  
**1km格子で, 21年間(1994-20014)**  
Webb, Kiyomatsu, Fujimoto, Varlamov,  
Miyazawa and Waseda

## スペクトルモデル(第三世代)

2009/07/02 00:00



気象擾乱  
長期統計

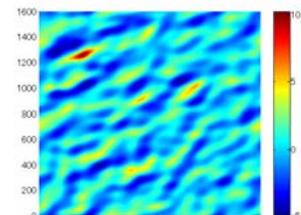
## スペクトル領域と時間領域を繋ぐ 次世代波浪モデルへ

$$S(k, \theta) = \langle \eta(\mathbf{r}, t) \eta(\mathbf{r} + \mathbf{R}, t + \tau) \rangle$$

整合性

海難事故解析システム  
科研A (2013-2015)

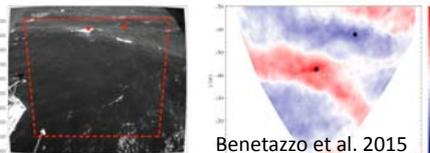
## 時空間領域モデル



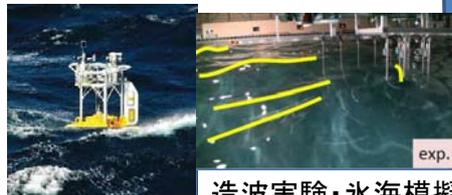
## 位相解像波浪モデル

短期統計、高次モーメント  
波群・波形・粒子速度、砕波率

## 観測・水槽実験



## ステレオカメラ



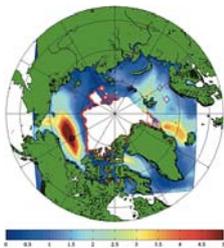
## 造波実験・水海模擬実験

## バイ観測



## 着水

応用



## 北極海波浪

統計値検証

短期統計検証

応用

海洋構造物・  
船舶への影響

# 北極海の波浪シミュレーションの課題

- 境界が時間と共に変わること
  - Wet/Dry, Adaptive mesh???
- 境界 (Ice Edge) での波浪の反射, 透過
- 屈曲・粘性による分散関係の変化
  - 氷の状態に依存, 季節性
- 氷と波浪の相互作用
  - 氷板の破壊への波浪影響
- 風応力, その変化
  - 風プロダクトの選定
  - 波浪による海面粗度変化による大気へのフィードバック

密接度?

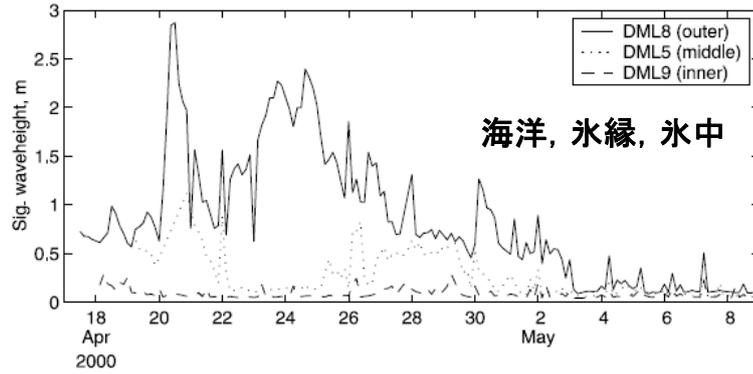
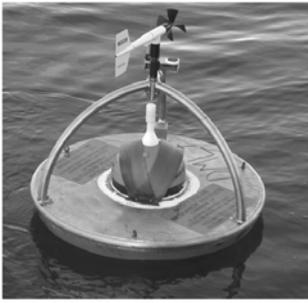
Ice Concentration ?

☆ 平成28年度に夏季波浪場の再解析を実施 - 観測検証

## 平成28年度夏季波浪観測について

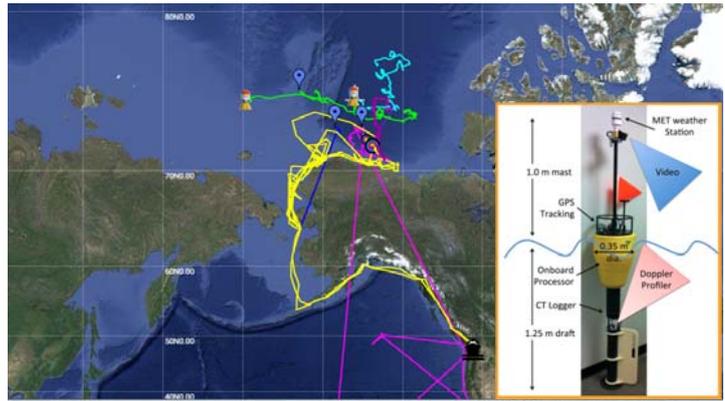
# 氷海中波浪観測事例

Pancake Ice Buoy, Doble & Wadhams 2006



Kohout et al. 2015

ONR: Marginal Ice Zone (MIZ) program



# 平成28年度での波浪観測計画



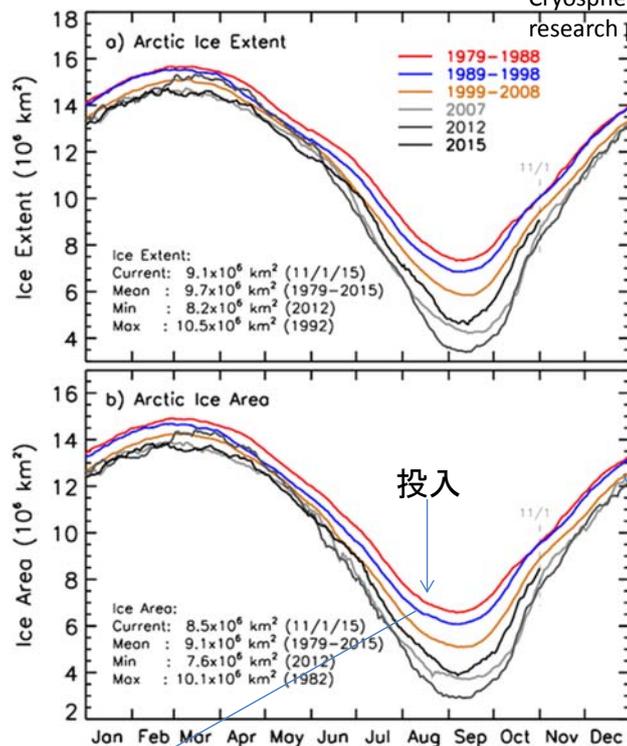
2016年8月-10月



波浪計  
水温計

B. Penrose, personal communication

Cryosphere scientific research portal



*The end*

## 参考文献リスト

1. Babanin, A. V., Zieger, S., & Ribal, A. (2014). 22 nd IAHR International Symposium on Ice.
2. Benetazzo, A., Barbariol, F., Bergamasco, F., Torsello, A., Carniel, S., & Sclavo, M. (2015). Observation of Extreme Sea Waves in a Space–Time Ensemble. *Journal of Physical Oceanography*, 45(9), 2261-2275.
3. Collins, C. O., Rogers, W. E., Marchenko, A., & Babanin, A. V. (2015). In situ measurements of an energetic wave event in the Arctic marginal ice zone. *Geophysical Research Letters*, 42(6), 1863-1870.
4. Cryosphere Scientific research portal, <http://neptune.gsfc.nasa.gov/csb/index.php?section=234>
5. Doble, M. J., & Wadhams, P. (2006). Dynamical contrasts between pancake and pack ice, investigated with a drifting buoy array. *Journal of Geophysical Research: Oceans (1978–2012)*, 111(C11).
6. Donelan, M. A., Curcic, M., Chen, S. S., & Magnusson, A. K. (2012). Modeling waves and wind stress. *Journal of Geophysical Research: Oceans (1978–2012)*, 117(C11).
7. Fontaine, E. (2013). A theoretical explanation of the fetch-and-duration-limited laws. *Journal of Physical Oceanography*, 43(2), 233-247.
8. Guyenne, P., & Parau, E. I. (2012). Computations of fully nonlinear hydroelastic solitary waves on deep water. *Journal of Fluid Mechanics*, 713, 307-329.
9. Khon, V. C., Mokhov, I. I., Pogarskiy, F. A., Babanin, A., Dethloff, K., Rinke, A., & Matthes, H. (2014). Wave heights in the 21st century Arctic Ocean simulated with a regional climate model. *Geophysical Research Letters*, 41(8), 2956-2961.
10. Kohout, A. L., Williams, M. J. M., Toyota, T., Lieser, J., & Hutchings, J. (2015). In situ observations of wave-induced sea ice breakup. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*.
11. Marginal Ice Zone Program, <http://www.apl.washington.edu/project/project.php?id=miz>
12. Ogasawara, T., & Sakai, S. (2006). Numerical analysis of the characteristics of waves propagating in arbitrary ice-covered sea. *Annals of Glaciology*, 44(1), 95-100.
13. Takizawa, T. (1985). Deflection of a floating sea ice sheet induced by a moving load. *Cold regions Science and Technology*, 11(2), 171-180.
14. Tulin, M. P. (1996). Breaking of ocean waves and downshifting. In *Waves and Nonlinear Processes in Hydrodynamics* (pp. 177-190). Springer Netherlands.
15. Walsh, J. E. (2014). Intensified warming of the Arctic: Causes and impacts on middle latitudes. *Global and Planetary Change*, 117, 52-63WAMDI Group (1988). The WAM model-a third generation ocean wave prediction model. *Journal of Physical Oceanography*, 18(12), 1775-1810
16. Zhao, X., & Shen, H. H. (2015). Wave propagation in frazil/pancake, pancake, and fragmented ice covers. *Cold Regions Science and Technology*, 113, 71-80.