

エクマン輸送に起因する新たな外洋型の高潮発生機構

A New Physical Mechanism of the Storm Surge Event Generated by the Onshore Ekman Transport in the Deep Open Sea

橋本孝治¹・吉野 純²・村上智一³・安田孝志⁴

Koji HASHIMOTO, Jun YOSHINO, Tomokazu MURAKAMI and Takashi YASUDA

The physical mechanism of October 2006 storm surge in the east coast of Hokkaido, Japan, is investigated in this study by using a coupled atmosphere-ocean-wave model. An approaching extratropical cyclone has generated abnormal high tide levels in Hanasaki Bay even though an along-shore wind has dominated. Its mechanism is considered to be different from the well-known type. A numerical simulation with the Coriolis force can predict a realistic high tide level of about 70cm, which is at least 20cm higher than that by a simulation without the Coriolis force. The results explain that the strong steady-state along-shore wind is able to cause a huge storm surge due to the Ekman transport, even in coastal areas facing the deep open sea.

1. はじめに

2006年10月上旬に発生した温帯低気圧は、日本列島太平洋沿岸に高潮をもたらした。北海道東部太平洋沿岸に位置する花咲検潮所(根室市)では、海岸線に平行な強風が卓越する中で最大潮位偏差86cmを観測した。一般的に、吹寄せによる水位上昇は、風のせん断力によって吹送流が発生し、その流れが堰き止められることによって生じると考えられている。しかし、今回の事例(以降、10月低気圧と呼ぶ)は海岸線に平行な風によって発生しており、従来の高潮メカニズムで説明することは難しい。海岸線に平行な風により水位上昇が生じるためには、エクマン輸送による岸向き水塊輸送が生じる以外には説明は困難であり、地球の自転効果が高潮発生の一因となっている可能性がある。海洋学的スケールでは、海岸線と平行な向きの季節風によってエクマン輸送が発生し、異常潮位を示すことはよく知られているが(宇野木, 1993)、台風や温帯低気圧などの移動性の気象擾乱による事例報告は殆どなく、しかも高潮被害にまでつながった報告は全く見受けられないことから、本事例の特異性・異常性が分かる。

橋本ら(2007)は、本事例に対して、エクマン輸送を考慮した海洋学的スケールでの潮位上昇を簡易な仮定のもとで理論的な説明を試みている。そして、海岸線に平行な風が長時間吹くことによってコリオリ力が卓越し、エクマン輸送に起因した岸方向への水塊輸送が生じたことが、今回の高潮発生の一因となったと説明している。しかし、上記の簡易的なモデルは、水深および外力を一

定とし、海岸線に平行な方向の運動は一樣として取り扱い、また、海底摩擦を無視した計算であることから、前提条件の多い理想的な機構の説明に終始している。

そこで本研究では、従来の高潮メカニズムで説明困難な10月低気圧によって花咲に発生した特異な高潮現象(高潮位偏差)を対象として、大気-海洋-波浪結合モデルによる高潮再現実験を実施し、コリオリ力の効果の有無によって如何なる違いが生じるかについて定量的な議論を行った。そして、エクマン輸送に起因する新たな外洋型の高潮発生機構の詳細を解き明かすことを目的とする。

2. 10月低気圧による高潮の状況

本研究の対象事例である10月低気圧は、2006年10月5日12時に四国南方で発生した。図-1は、10月低気圧の進路および強度を示す。この低気圧によって、10月6日から8日にかけて、太平洋沿岸の各地で最大潮位偏差80cm以上となる高潮位を観測した。北海道東部沿岸では7日未明から風が強まり、根室測候所では最大

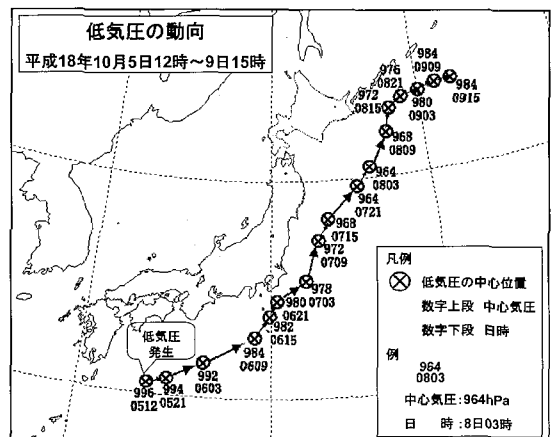


図-1 10月低気圧の進路と強度(気象庁より)。

- 1 正会員 修(工) (株)アルファ水工コンサルタンツ
- 2 正会員 博(理) 岐阜大学助教 大学院工学研究科 環境エネルギーシステム専攻
- 3 正会員 博(工) 豊橋技術科学大学産学官連携研究員 工学部建設工学系
- 4 フェロー 工博 岐阜大学教授 大学院工学研究科 環境エネルギーシステム専攻

瞬間風速 42.2 m/s を記録し極値を更新した。また、低気圧の水平スケールが非常に大きく、この地域の沿岸から外洋にかけての広域で 24 時間以上にわたり等圧線の込んだ低気圧の影響下となり、本州南岸などの他海域とは異なり、長時間海岸線と平行な方向からの強い風が卓越する状況となった (気象庁, 2006; 橋本ら, 2007)。

主な被害としては、高潮による海面上昇に伴い波が防波堤を容易に越流し、背後地が浸水したことに加え、漁船が岸壁に打ち上がるなどの被害があり、釧路・根室管内の水産被害額は 40 億円を上回り、この地域の高潮としては、これまでに類をみない規模の被害となった。

図-2 は、10 月低気圧時における花咲検潮所の潮位偏差と根室候候所の気圧低下量および風速・風向の時系列を示す。同図より 7 日 12 時から 8 日 6 時の変化について見ると、気圧低下量が直線的に増加し、これに対応して潮位偏差も直線的に時間に比例して増加していることが分かる。また、風速は 20 m/s 程度でほぼ一定で、風向も海岸線に平行な北東方向が卓越しており、当該海域では長時間継続的に一定な風が作用していたことが分かる。

これらより、橋本ら (2007) は、海岸線を右手とする海上風が 20 時間以上継続的に作用することで、コリオリ力が卓越し、定常的な岸方向への水塊輸送が発生し、潮位偏差の増大をもたらしたものと説明している。

このように、北海道東部沿岸で発生した 10 月低気圧の高潮は、海岸線に平行な風が長時間継続したことによるものであり、従来の閉鎖性湾内で発達する高潮発生機構とは異なる特異な現象と考えられる。

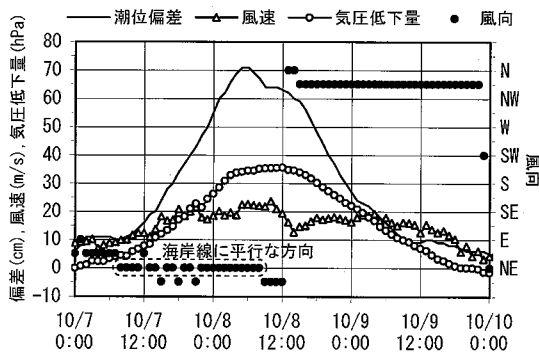


図-2 花咲の 10 月低気圧時の状況 (毎正時値)。

3. 数値実験の概要

本研究では、エクマン輸送による岸向きの水塊輸送が 10 月低気圧による高潮発生の一因と考えられることから、地球の自転効果に起因する水塊輸送による水位上昇量を定量化する目的で、「CASE1: 海洋モデル中のコリオリ力を考慮する計算」と、「CASE2: 海洋モデル中のコリオリ力を考慮しない計算」の 2 種類の高潮再現実験を行った。本検討に使用した数値モデルの概要と結合計算の設定について、以下に解説する。

(1) 数値モデルの概要

本研究では、高潮計算において精度面での有用性が実証されている大気-海洋-波浪結合モデルを使用する (村上ら, 2004; 吉野ら, 2005; 村上ら, 2006; 吉野ら, 2006; 村上ら, 2007)。このモデルは、より現実的な海水流動を計算するためにメソ気象モデル MM5 (Dudhia, 1993)、多重 σ 座標系海洋モデル CCM (村上ら, 2004) および波浪モデル SWAN (Booij ら, 1997) を結合させて大気、海洋、波浪場を 1 つの系として一体的に計算するものである。この結合モデルにおける相互作用の関係を図-3 に示す。

なお、計算期間は、10 月低気圧が北海道沿岸域に接近・通過した 2006 年 10 月 6 日 15 時~9 日 3 時とした。また、計算条件は表-1 に示すとおりである。

(2) 入力気象場としてのメソ気象モデル, MM5

海洋モデルや波浪モデルの入力気象場として使用した

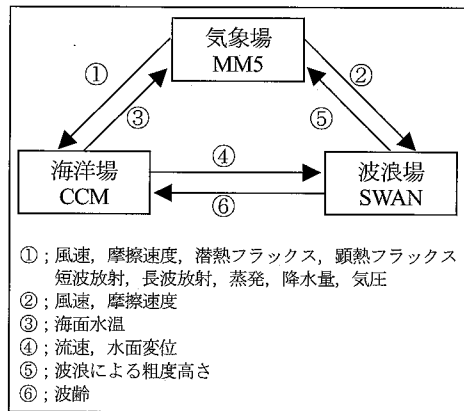


図-3 大気-海洋-波浪結合モデルの概要。

表-1 大気-海洋-波浪結合モデルの計算条件

気象モデル	計算領域	領域 I : 北緯 22°~51°, 東経 122°~168°, 90km 格子, タイムステップ 270 秒
MM5	タイムステップ	領域 II : 北緯 33°~48°, 東経 130°~156°, 30km 格子, タイムステップ 90 秒
	初期値・境界値	領域 III : 北緯 41°~45°, 東経 142°~150°, 10km 格子, タイムステップ 30 秒 (2-way ネスティング)
NCEP 全球客観解析データ		
海洋モデル	計算領域	領域 I : 北緯 37°~45°, 東経 140°~151°, 8km 格子, タイムステップ 12 秒
CCM	タイムステップ	領域 II : 北緯 42°~45°, 東経 142°~148°, 4km 格子, タイムステップ 6 秒 (1-way ネスティング)
波浪モデル	計算領域	北緯 42°~45°, 東経 142°~148°, 4km 格子, タイムステップ 300 秒
SWAN	タイムステップ	
結合モデル	交換時間間隔	10 分

気象モデルは、ペンシルバニア州立大学と米国大気科学
研究センターにより開発されたメソスケールの気象現象
を対象とした非静力学平衡・完全圧縮・非膨張系プリミ
ティブ方程式系モデル MM5 (fifth-generation meso-
scale model) である (Dudhia, 1993)。また、低気圧進
路と中心気圧を共に精度良く再現するため、4 次元デー
タ同化 (ナッジング法) を適用して計算を行った。ナジ
ング係数は、 2.5×10^{-5} とした。初期・境界・同化条
件には、NCEP 全球大気客観解析値 Final Analyses (1°
格子間隔; 6 時間間隔) を使用した。90 km, 30 km と
10 km 格子間隔の 3 段階双方向ネスティングによる計算
を行い、10 km 格子領域のみを高潮計算の入力値として
使用した。90 km および 30 km 格子領域は、本事例の
ように温帯低気圧の影響範囲が広く、かつ、海洋学的ス
ケールでの海水輸送計算が求められることから適用され
たものであり、これらの領域は 10 km 格子領域の側面
境界条件として重要となってくる。

(3) 高潮推算のための海洋モデル, CCM

高潮の計算は、村上ら (2004) により開発された海洋モ
デル CCM (Coastal ocean Current Model) を使用した。こ
の基礎方程式系は、コリオリ項を含む運動方程式、連続
方程式、温度・塩分に関する移流拡散方程式、状態方程
式、および、Mellor-Yamada Level 2.5 乱流モデルによ
って構成される。初期・境界条件としては、潮位偏差は 0
とし開境界とすることで、潮位偏差に着目した計算とし
た。また、多重 σ 座標系の採用により深海域から浅海域
まで連続的に計算可能であり、コリオリ力の作用による
岸方向への水塊輸送 (エクマン輸送) を鉛直方向の流速分
布をも含めて精度良く再現できる。CCM では、8 km と 4
km の単方向ネスティングによる計算を行った。また、結
合計算サイクルの中に、デルフト工科大学で開発された
第 3 世代波浪推算モデル SWAN (Booij ら, 1997) も、そ
の一部として組み込まれている。なお、SWAN での格子
間隔は 4 km とした。この計算手法に関する詳細につい
ては、吉野ら (2005) や村上ら (2006) を参照されたい。

4. 結果と考察

本章では、高潮推算においてコリオリ力を考慮した計
算 (CASE1) とコリオリ力を考慮しない計算
(CASE2) の計算結果を比較し、エクマン輸送に起因す
る高潮発生機構に関する考察を進めていく。

(1) 入力気象場の検証

はじめに、高潮推算精度に影響を及ぼす入力気象場
について議論する。

図-4 は、根室測候所における (a) 気圧、(b) 風速およ
び (c) 風向の観測値と計算値の時系列を示す。同図 (a) よ
り、観測値と計算値の気圧は概ね一致していることが分

かり、結合モデルは低気圧の接近に伴う気圧変化を再現
できているものと判断できる。また、同図 (b) と (c) よ
り、風速の計算値は観測値の風速変動の傾向を概ね再現
し、さらに計算値は、風向の観測値に見られる 7 日 9 時
から 8 日 9 時頃にかけての海岸線に対して平行となる北
東風の卓越を精度良く再現していることが確認できる。
ただし、8 日 6 時以降の計算値は、気圧でやや過大評価
傾向、風速でやや過小評価傾向となっているが、いずれ
も潮位偏差のピーク後であることから、本議論に与える
影響は極めて少ないものと判断できる。以上より、高潮
推算に用いられる入力気象場の再現性は高いと言える。

次に、10 月低気圧の気象場によって、海洋学的スケ
ールでのエクマン輸送に起因した海水流動が卓越する可
能性について検証する。図-5 は、花咲検潮所で最大潮位
偏差を観測した 10 月 8 日 4 時の気象場 (風ベクトルと等
圧線) の計算結果を示す。この図より、根室半島に平行な強

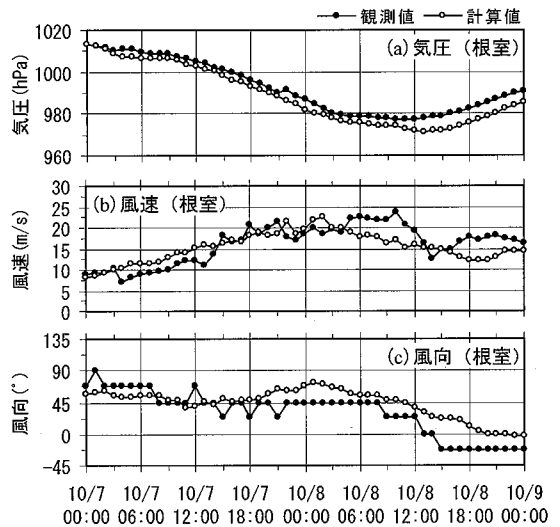


図-4 気象外力の観測値と計算値の時系列。

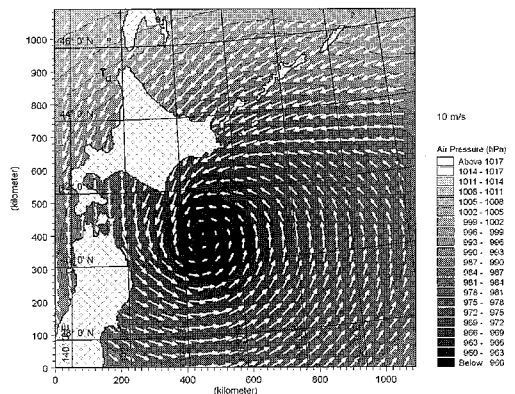


図-5 入力気象場の計算結果 (10 月 8 日 4 時)。

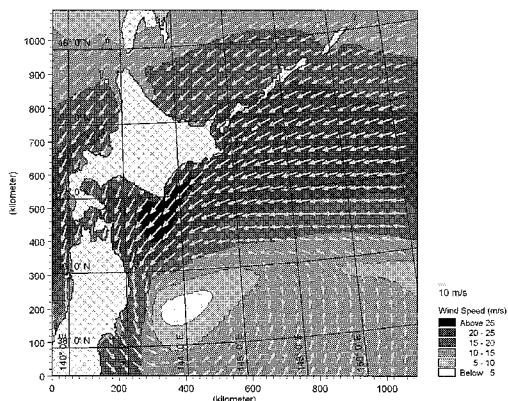


図-6 21時間平均風速 (10月7日8時から8日4時).

風が広域に卓越している状況が見てとれる。また、図-6は、高潮が発達しピークを記録する7日8時から8日4時の期間における21時間平均風速を示す。この図より、21時間平均風速としてみても、海岸線に平行な強風域が距離にして1000kmの範囲で発生しているのが分かる。北海道東部沿岸が位置する緯度でコリオリ力が卓越しうる時空間スケールとして、橋本ら(2007)は、ロスビーの変形半径が990km、慣性周期が17.5時間と算定しており、10月低気圧はこれら条件を満足する時空間スケールの気象外力場であることが確認できる。よって、10月低気圧時には定常な吹送流が形成され、コリオリ力が卓越しやすい状況であったものと推察される。

(2) 高潮推算の精度検証

次に、海洋モデルにおける「CASE1:コリオリ力を考慮する計算」と、「CASE2:コリオリ力を考慮しない計算」による潮位偏差の計算結果を比較し、考察する。

図-7は、花咲における潮位偏差の観測値と計算値の時系列を示す。CASE1の結果を見ると、高潮発生期間にわたって観測値と殆ど一致した時間発展を示した。一方、CASE2では、最大潮位偏差が50cm程度で過小評価となった。CASE1との潮位偏差の差は高潮発生期間で概ね20cmであり、CASE1とCASE2の差は、コリオリ力を考慮

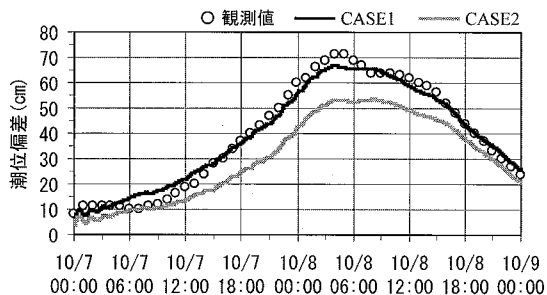


図-7 コリオリ力の有無による潮位偏差の比較.

していないことに起因していると言い換えられる。

図-8は、CASE1とCASE2の表層流速(10月8日4時)の比較を示したもので、両CASE共に水深の浅い岸のすぐ近くでは非常に強い吹送流が岸に平行に卓越していることがわかる。しかし、その沖に着目すると、CASE1では岸に向かう流れの発生が確認できる。一方、CASE2では風向と同じ向きの岸に平行な流れとなり、コリオリ力の有無によって外洋で流況場が大きく異なる結果が得られた。また、図-9は、CASE1とCASE2の潮位偏差(10月8日4時)の比較であり、コリオリ力を加味することによる潮位上昇量を示す。この図より、外洋に面する北海道東部沿岸全域にかけて、CASE2に比べCASE1で潮位偏差が高い状況が確認できる。

このように、コリオリ力の効果の有無は、高潮推算精度に大きな相違を生みだし、特に沖合における岸向きの水塊輸送を再現できるか否かが、高潮推算精度に大きな影響を与えたと考えられる。よって、10月低気圧の花咲における潮位の上昇は、海岸線に平行な風が沿岸から沖合にかけての広域スケールで定常的に吹くことで、地球の自転効果によるエクマン輸送が卓越し、その結果、岸向きの水塊輸送が生じたことにより発生したものと結論づけられた。

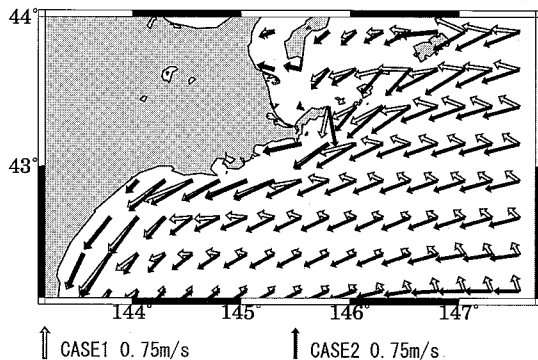


図-8 CASE1とCASE2の表層流速ベクトル (10月8日4時).

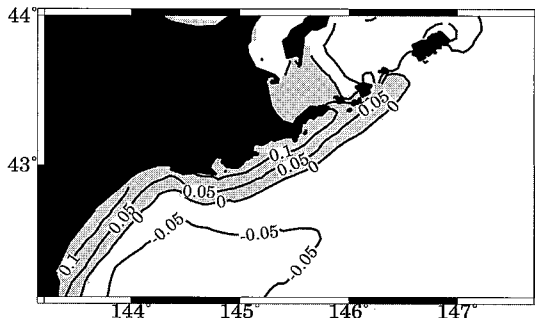


図-9 CASE1とCASE2の潮位偏差の比較 (10月8日4時). CASE1-CASE2の値 (m)であり、灰色の範囲は正值を示す

(3) 高潮発生機構の解明

ここでは、コリオリ力の効果を考慮したCASE1について、さらにその結果の詳細を検討することで、新たな外洋型の高潮発生機構に関する考察を進める。

まず、潮位偏差に及ぼす気圧と風の寄与について見る。図-10は、CASE1において気象外力を気圧のみにした計算結果と、風速のみにした計算結果における潮位偏差の時系列を示す。この図より、最大潮位偏差を観測した8日4時付近での各々の潮位偏差は、外力を気圧のみとしたケースで約30cm、外力を風速のみとしたケースで約60cmであることが分かり、潮位偏差に寄与する風速の影響が大きいことが確認できる。なお、風速のみのケースにおける潮位偏差60cmは、橋本ら(2007)による簡易的な理論モデルの結果とほぼ一致する。

次に、図-11は、根室半島沖合の北緯43°、東経146°に位置する計算点(水深 $h=1300$ m)における8日4時の流速の鉛直分布を示す。同図(a)は、CASE1における流速の鉛直分布であり、エクマン螺旋の存在が確認される。また、その表層流速は、海岸線の影響がない場合の理論式から求められるエクマン吹送流の表面流速(0.38m/s)とほぼ一致する(宇野木, 1993)。一方、同図(b)のCASE2の結果では、水深方向にほぼ様な風向と一致した流れが形成され、CASE1のような螺旋構造は確認できない。よって、CASE1では海岸線に平行な風の卓越によるエクマン輸送の発生が確認でき、この現象にともなって外洋から岸方向への水塊輸送が生じたことが、10月低気圧における花咲の高潮発生機構であると言える。

5. 結 語

本研究では、2006年10月低気圧によってもたらされた北海道東部沿岸の高潮を対象として、コリオリ力の効果の有無による高潮再現実験を行い、海岸線に平行な風によって発生する新たな外洋型の高潮発生機構について検討した。この結果、海洋モデルにおいてコリオリ力を無視したケース(CASE2)と比較して、コリオリ力を含んだケース(CASE1)では、極めて高い精度で潮位偏差を再現できることが確認されるとともに、CASE1では、エクマン輸送に起因する岸向きの吹送流やエクマン螺旋の形成が確認された。これより、海岸線に平行な風が長時間吹くことによって定常な吹送流が形成され、エクマン輸送に起因した岸方向への水塊輸送によって、今回の高潮が発生したことを明らかにした。また、コリオリ力の寄与は20cm程度であった。

このことは、本事例が一般的な高潮とは異なる現象であることを説明するとともに、新たな外洋型の高潮発生機構を裏付ける結果となり、今後の高潮防災における適切な設計外力の設定や高潮防災情報の発信等において、

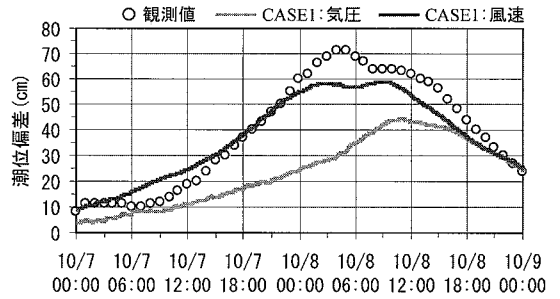


図-10 潮位偏差に及ぼす気圧と風速の寄与 (CASE1)。

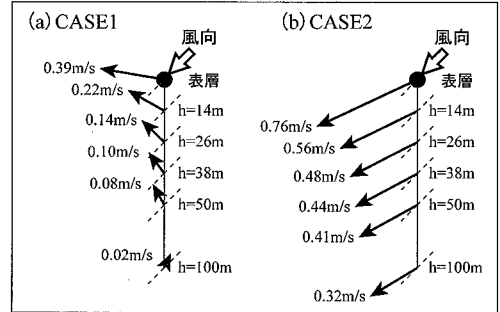


図-11 エクマン螺旋の形成。

本研究の見解は非常に重要である。

参 考 文 献

宇野木早苗(1993): 沿岸の海洋物理, 東海大学出版会, 672p.
 気象庁: 被災時自然現象報告書 2006 年第 3 号 (オンライン), http://www.jma.go.jp/jma/kishou/books/saigaiji/saigaiji_200603.pdf, 参照 2007-05-14.
 橋本孝治・吉野 純・安田孝志(2007): 海岸線に平行な強風によって発生した高潮に関する研究 (2006 年 10 月の温带低気圧による北海道東部沿岸の事例), 海洋開発論文集, 第 23 巻, (印刷中).
 村上智一・安田孝志・大澤輝夫(2004): 気象場と結合させた湾内海水流動計算のための多重座標モデルの開発, 海岸工学論文集, 第 51 巻, pp. 366-370.
 村上智一・川崎浩司・山口将人・水谷法美(2006): 気象場に支配される伊勢湾を対象とした大気-海洋-波浪結合モデルの精度検証, 海洋開発論文集, 第 22 巻, pp. 103-108.
 村上智一・橋本孝治・吉野 純・安田孝志(2007): 低気圧による北海道東部沿岸域の高潮の再現計算, 土木学会全国大会第 61 回年次学術講演会, (投稿中).
 吉野 純・村上智一・林 雅典・安田孝志(2005): 大気-海洋-波浪結合モデルを用いた台風 0416 号の強度予測実験, 月間海洋, 第 42 巻, pp. 194-202.
 吉野 純・村上智一・林 雅典・安田孝志(2006): 高潮計算精度に及ぼす入力台風気象場の再現性の影響, 海岸工学論文集, 第 53 巻, pp. 1276-1280.
 Booij, N., L. H. Holthuijsen, N. Doorn and A. T. M. M. Kieftenburg (1997): Diffraction in a spectral wave model, Proc. 3rd int. Symp. Ocean Wave Measurement and Analysis, WAVE'97, ASCE, pp. 243-255.
 Dudhia, J. (1993): A nonhydrostatic version of the Penn State-NCAR mesoscale model: Validation test and simulation of an Atlantic cyclone and cold front, Mon. Wea. Rev., Vol. 121, pp. 1493-1513.