



地盤変動を考慮した 北海道沿岸の海面水位の経年変化

港湾空港部港湾建設課

○恵平 寿輝

水口 陽介

日本データサービス(株)

羽原 大生

地球温暖化の影響により、北海道沿岸部の海面水位上昇が予想されている。今後、港湾・漁港の気候変動対策を検討する上で、港の利用や施設の安定性に影響する海面水位の変化を把握することは重要である。しかし、潮位観測点は地盤変動の影響を受けており、潮位データ分析には、その影響を考慮する必要がある。本報告では、国土地理院の電子基準点等のデータを活用した分析方法を整理し、北海道沿岸の海面水位の経年変化を把握するものである。

キーワード：潮位観測、海面上昇、気候変動、地盤変動

1. はじめに

近年、地球温暖化に伴う将来の気候変動の研究が進められており、2021年に公表された「気候変動に関する政府間パネル」第6次評価報告書¹⁾では、世界の平均海面水位は2100年までに2°C上昇シナリオ(SSP1-1.9)で0.28m~0.55m、4°C上昇シナリオ(SSP5-8.5)で0.63~1.01m程度、上昇することが予測されている。また、日本沿岸については、気象庁が海面水位の長期変化の傾向²⁾を分析しており、近年の海面水位の上昇率は、世界平均と同程度であることが示されている。

このような背景のもと、今後、北海道の港湾や漁港においても、気候変動による海面水位変動の影響を踏まえた整備計画や適応策の検討が求められるが、そのためには、海面水位の将来予測値を算定する必要がある。

一方、将来予測値の妥当性を検証するためには、潮位観測データが必要不可欠であるが、観測所は地震の影響等による地盤変動の影響を受けていることに留意する必要がある。すなわち、海面水位の経年変化を的確に把握するには、各観測所地点の経年的な標高データが必要となる。しかし、港湾・漁港の潮位観測においては、工事事業基準面の管理のため、港内BM等からの水準測量は定期的に行っているものの、国土地理院水準点との関係を把握するための測量は、費用や調査時間の関係から、経年変化を分析出来る頻度では実施されていない。

この課題に対し、野村ら³⁾は国土地理院の電子基準点のデータを用いて観測所の標高変化を把握する方法を提案している。ただし、この方法は観測所から概ね5km以内に電子基準点が無い場合、適用出来ないケースがある。

本報告では、電子基準点の地殻変動を考慮して測量を行う場合に用いるセミ・ダイナミック補正用の「地殻変動補正パラメータ」⁴⁾を活用し、電子基準点から5km以上離れた観測所の地殻変動量を分析する手法を提案するとともに、この新たな方法等により北海道沿岸の海面水位の経年変化を分析した。

2. 北海道の潮位観測地点と地盤変動補正の課題

(1) 北海道の潮位観測地点と潮位データ

北海道では、北海道開発局の他、気象庁及び国土地理院により、**図-1**に示す33地点の観測所において潮位観測が実施されている。本検討では、地盤変動量を把握するために必要な電子基準点の標高データが公表されている2009年以降の潮位データを用いて分析を行った。なお、北海道開発局以外の観測データは、海岸昇降検知センターの「潮位年報」⁵⁾を用いた。

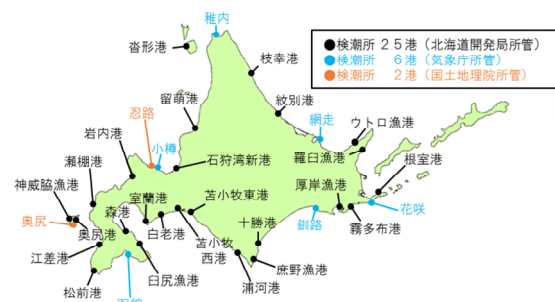


図-1 北海道の観測所位置図

(2) 地盤変動量の分析方法と課題

地盤変動の影響を含んだ潮位データを用いて、的確に海面変動量を分析するためには、潮位データから地盤変動量を控除する必要がある。北海道の検潮所では、気象庁が所管する網走、稚内、函館、釧路の4地点と国土地理院が所管する奥尻の計5地点に電子基準点が併設されており、検潮所の経年的な標高変化を直接把握することが出来る。しかし、その他の検潮所には電子基準点が設置されていないため、経年変化を把握することが出来ない。この課題に対し、既往の研究³⁾では、港の近傍に設置されている電子基準点の標高データを活用し、以下に示す3つの条件（以下、Case1～3）に該当する検潮所について、潮位データを補正する方法が整理されている。その条件を以下に示す。

Case1は、「検潮所に電子基準点が併設」されていることが条件で、前述の検潮所（5地点）が該当する。Case2は、「検潮所から概ね5km以内に電子基準点がある」ことが条件で、北海道では15の検潮所が該当する。検潮所と検潮所から5km程度以内に位置する電子基準点の地盤変動量に大きな開きはなく、その開差は海面上昇量に比べて小さいことが確認されている。一方、Case3は、「検潮所に近い2つの電子基準点の標高データ間の年変動量が、検潮所から近い電子基準点の標高で補正した年水位上昇量の20%以内である」ことが条件となる。しかし、5km以上離れた電子基準点と検潮所の地盤変動量との開差が小さいことを確認されている地点数が少ないほか、Case3の条件を満たすケースが少なく、多くが適用外となるという課題がある。

3. 地殻変動補正パラメータの活用

(1) 地殻変動補正パラメータについて

近年、電子基準点とGNSS測量機を用いた測量を行うことで、より正確な座標値を把握することが可能である。しかし、現実的には電子基準点も地殻変動の影響を受けており、座標値は変化していることになる。このため、国土地理院では、電子基準点のみを既知点に測量を行う場合の地殻変動によるひずみの影響を考慮する方法として、公共基準点等の座標値を補正するセミ・ダイナミック補正を導入している。このセミ・ダイナミック補正には、国土地理院が毎年更新・公表している「地殻変動補正パラメータ」が用いられる。このパラメータは、**図-2**に示すように、全国で約20km間隔に設置されている、およそ1200地点の電子基準点の連続観測データ等をもとに、空間内挿手法の1つであるクリギング法を用いて推定された約5km間隔の格子点上の地殻変動量として与えられる⁴⁾。

また、地殻変動補正パラメータは、国土地理院が提供

する補正支援ソフトウェアを用いることで、入力した任意の座標地点で推定されたパラメータ（地殻変動量）を取得することが出来る。但し、パラメータは、座標地点の標高データではなく、任意の基準年に対する地殻変動量となるため、本報告では、公表されている地殻変動補正パラメータの最も古い2009年を基準に、2021年までの1年毎のパラメータを入手し、検潮所の地盤変動量を分析した。なお、電子基準点の標高データには、現在、国土地理院から公表されている「電子基準点の日々の座標値（F5解）」⁶⁾を用いるが、F5解のデータが公表されていない2013年以前のデータは、気象庁による日本周辺の海面水位変化²⁾と同様に、旧解析値であるF3解を用いた。

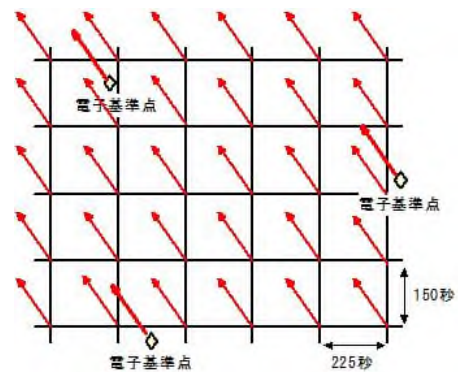


図-2 地殻変動補正パラメータのイメージ

(2) パラメータを用いた地盤変動量の検証

地殻変動補正パラメータから求めた地盤変動量の精度を検証するため、電子基準点が併設される前述のCase1に該当する検潮所（5地点）を対象に、検潮所併設の電子基準点及び検潮所から概ね5kmの距離に位置する電子基準点（Case2相当）、検潮所から5km以上離れた電子基準点（Case3相当）の観測値と地殻変動補正パラメータから求めた検潮所位置の地盤上昇量（以下、推定地盤変動量）を比較・検証した。

図-3に、Case1に該当する検潮所の中で、地殻変動量が多い函館検潮所の検証結果を示す。検潮所地点の電子基準点及びCase2に相当する検潮所から5.3km離れた電子基準点（函館）、Case3に相当する検潮所から17.6km離れた電子基準点（木古内）と函館検潮所の推定地盤変動量の経年変化を示したものである。

標高観測値に基づく、検潮所併設の電子基準点の地盤変動量+11.65mm/y、電子基準点（函館）+10.03mm/y、電子基準点（木古内）+10.64mm/yに対し、推定地盤変動量から求めた検潮所地点の年変動量は+9.41mm/yとなり、各観測値とは20%程度の差がある。

次に、地殻変動量が少ない稚内検潮所の検証結果を**図-4**に示す。検潮所併設の電子基準点観測値による地盤変動量+2.71mm/y、Case2に相当する検潮所から5.1km離れた電子基準点（稚内）の変動量+1.88mm/y、Case3に相当する検潮所から22.0km離れた電子基準点（稚内2）の

変動量+1.35mm/yに対し、推定地盤変動量は+2.08mm/yと、Case2相当やCase3相当よりも、検潮所地点の観測値に近い精度を有する結果となった。但し、検潮所の観測値と推定値には約23%の差がある。

以上の結果より、地殻変動補正パラメータより求めた推定地盤変動量を用いるためには、精度向上のための補正が必要であると考えられる。

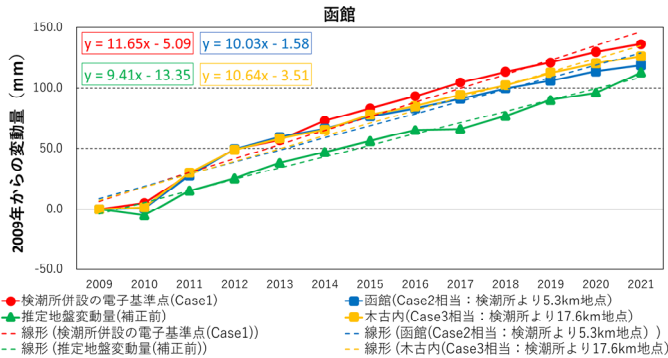


図-3 地盤変動量の経年変化（函館）

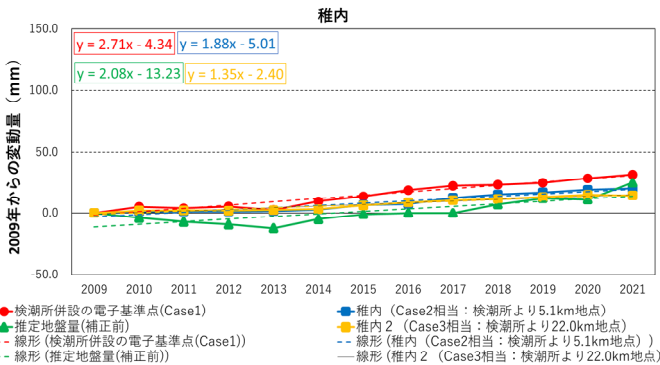


図-4 地盤変動量の経年変化（稚内）

(3) 推定地盤変動量の補正検討

電子基準点の観測値と地殻変動補正パラメータから求めた推定地盤変動量の数値には差があるため、推定地盤変動量の精度向上を目的に補正方法を検討した。今回、電子基準点が併設されている検潮所5地点に加え、統計データ数を確保するため、一定の精度が確認されているCase2に該当する5km以内に電子基準点を有する検潮所15地点を加えた計20地点を対象に、電子基準点の観測値と推定地盤変動量の回帰分析を行った。

図-5は、対象とした20地点の検潮所の電子基準点の観測（縦軸）と推定地盤変動量（横軸）の年変動量を示している。原点を通る1次回帰式の傾きは1.15であり、推定地盤変動量は観測値を過小評価する傾向にあった。一方、1次回帰式の当てはまりの良さを示す決定係数（ R^2 ）は0.92と高く、観測値と推定値の相関は良好であることから、推定値の精度向上のため、1次回帰式の傾き（回帰係数）により推定地盤変動量を補正することとする。なお、地域別の傾向を把握するため、地盤変動量が大きい函館や森、室蘭、十勝等の太平洋沿岸の7地点

とその他の13地点に分けて回帰分析を行ったが、図-6に示すように、1次回帰式の決定係数は0.96、0.85といずれも高く、傾きも1.17、1.12と全20地点で評価した場合と概ね同じであり、地域性の差は確認されなかった。このため、本報では、20地点の1次回帰式から求めた回帰係数により推定地盤変動量を補正する。

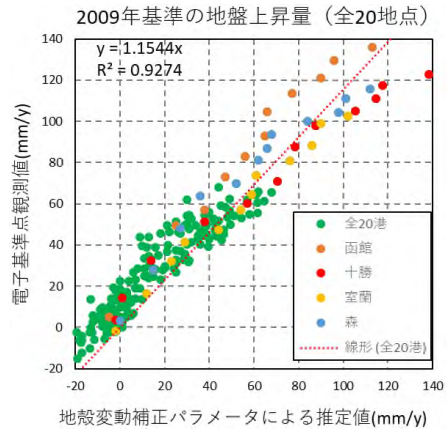


図-5 観測値と推定地盤変動量の相関図

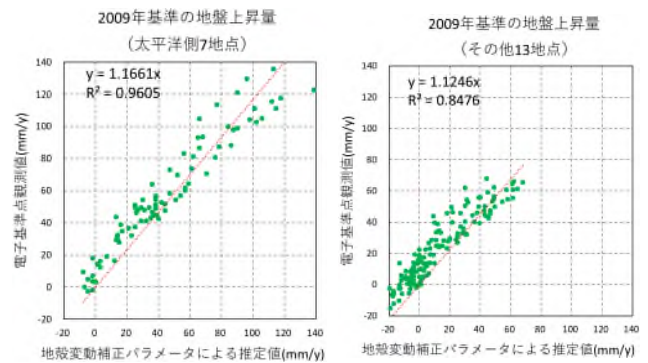


図-6 地域別の観測値と推定地盤変動量の相関図

前述で検証を行った、函館と稚内の検潮所を対象に、電子基準点の観測値と回帰係数により補正した推定地盤変動量の経年変化を図-7及び図-8に示す。回帰係数で補正した函館検潮所の推定地盤変動量は+9.41mm/yから+10.87mm/yに変化し、Case2に相当する電子基準点(函館)の+10.03mm/y及びCase3に相当する電子基準点(木古内)の+10.64mm/yよりも、検潮所地点の観測値+11.65mm/yに近い値となった。また、稚内検潮所の検証でも、検潮所地点の地盤変動量+2.71mm/yに対し、回帰係数により補正することで、推定地盤変動量が+2.08mm/yから+2.40mm/yと観測値に近づき、その差も22%から11%となり、精度が向上した。以上より、地殻変動補正パラメータから求めた推定地盤変動量を回帰係数により補正することで精度が向上し、既往のCase3と同程度以上の精度で地盤変動を評価することが出来ることを確認した。

本方法は、検潮所設置位置の地盤変動量をジャストポイントで推計するものであり、電子基準点の標高データ

を直接的に使用していない。このため、検潮所近傍の電子基準点の有無やその距離を問わず活用できるが、最寄りの電子基準点が5km以内に無い場合及び既往の Case3 を適用できない場合を対象とした新たな方法（新 Case3）として提案する。

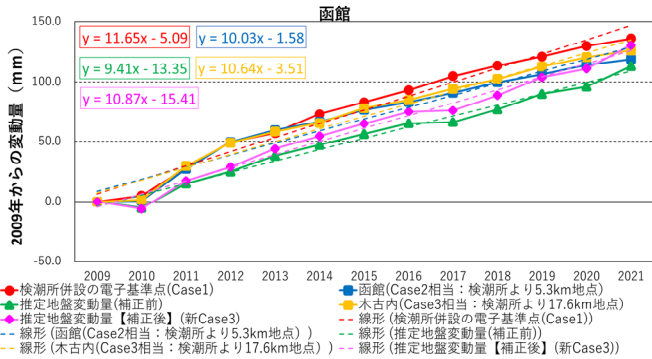


図-7 地盤変動量の経年変化（函館：補正後）

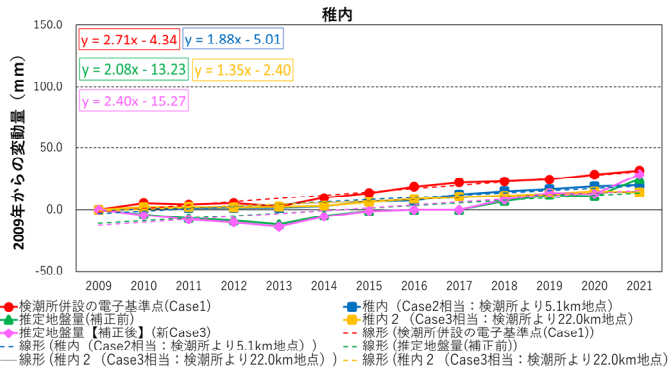


図-8 地盤変動量の経年変化（稚内：補正後）

4. 地盤変動量を考慮した海面水位の分析

(1) 北海道沿岸の海面水位の変動量

今回検討した、最寄りの電子基準点から5km以上離れている検潮所を対象に推定地盤変動量を用いる手法（新 Case3）を用いて、地盤変動を考慮した海面水位上昇量の分析例を示す。

図-9 は、既往の Case3 を適用できなかった松前港検潮所の推定地盤変動量と、地盤変動量の補正前後の海面水位の経年変化を示したものである。潮位観測データの変化量（青線）は-8.35mm/yと負の年変化を示すが、棒グラフで示す推定地盤変動量は+12.92mm/yの上昇傾向を示し、これを控除すると、海面水位の上昇量は+4.57mm/y（桃色線）と上昇傾向となった。なお、2011年以降の地盤変動は東日本大震災の影響と考えられる。

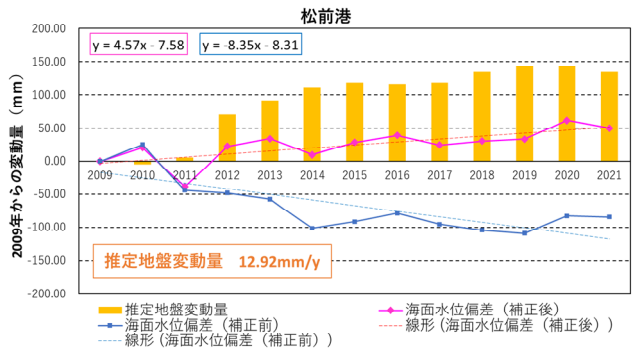


図-9 松前港検潮所の海面水位の経年変化

地盤上昇率 (mm/y) _2009-2021

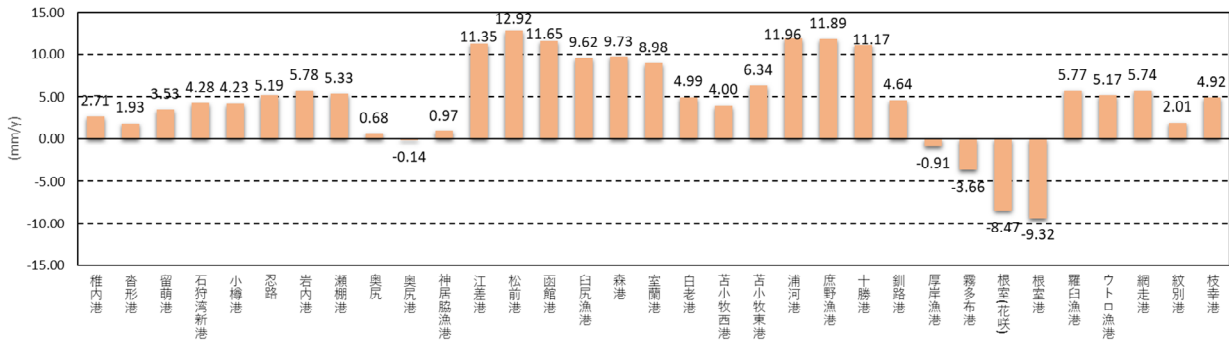


図-10 検潮所 (33地点) の地盤上昇量

海面水位上昇率 (mm/y) _2009-2021

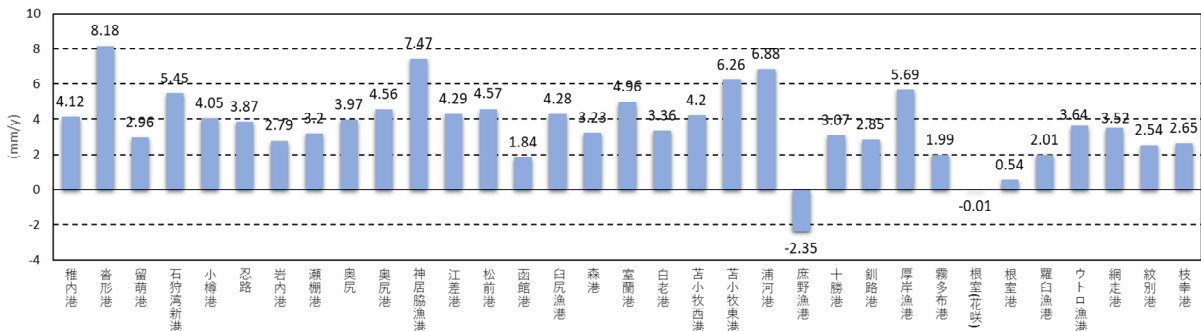


図-11 検潮所 (33地点) の水位上昇量

次に、**図-10** は、北海道全33地点の検潮所における年間の地盤上昇量、**図-11** は海面上昇量から地盤変動の影響を除去して求めた、年間の海面水位上昇量を示している。なお、地盤上昇量はCase1, 2または新Case3のいずれかで算定している。太平洋に面する十勝港や庶野漁港等の検潮所では、2003年の十勝沖地震以降、+11mm/y以上の地盤上昇が生じている。また、2011年の東日本大震災以降、東北地方から近い渡島檜山管内の検潮所（江差港、松前港、函館港等）では、年々地盤が上昇傾向にあることがわかる。今回の分析では、松前港検潮所の地盤上昇量が+12.92mm/yと道内で最も大きい上昇量となった。

一方、太平洋に面する道東地域の検潮所（根室港、霧多布港、厚岸漁港）では、千島海溝付近への太平洋プレート沈み込みが要因と考えられる地盤の沈下が顕著に表れており、根室港検潮所で道内最大となる-9.32mm/y、花咲検潮所-8.47mm/y、霧多布港検潮所-3.66mm/yの変化を示し、地盤が沈下傾向にある。地盤が沈下している地域では、気候変動に伴う海面水位の上昇量と地盤の沈下が相乗し、海面水位上昇の影響が特に大きくなるため、今後、注視が必要である。

(2) 地盤変動を考慮した海面水位上昇量の分析

表-1 は、北海道の検潮所33地点において、Case1, 2及び新Case3の3つの条件で補正した海面水位の上昇量と、回帰分析による海面水位上昇量のp値、95%信頼区間等を整理したものである。

表-1 に着色する、函館港や枝幸港、羅臼漁港、根室港、花咲、霧多布港、釧路港、十勝港、庶野漁港、苫小牧港（東港区）の10の検潮所において、回帰分析によるp値が0.05を上回る結果となり、海面水位上昇に関する統計的な有意性を確認できない結果となった。この要因については、胆振東部地震による長期の欠測等により統計処理を行うためのデータ数が不足していることや、潮位データのバラツキが要因と考えられる。そのため、これらの地点については、継続的に機器の保守管理を行い、潮位や地盤変動データを蓄積していくことが重要である。

次に、統計的な有意性を確認できなかった10港を除く23地点の海面水位上昇量に着目すると、北海道沿岸全体の平均海面水位上昇量は+4.43mm/y（95%信頼区間+2.461～6.324mm/y）となった。この結果は、気象庁が公表する「日本の気候変動2020」⁷⁾における近年の日本沿岸の海面水位上昇量+4.1mm/y（2006～2015年）と同程度であり、今回の分析結果は妥当であるものとする。

また、**表-2** は地盤変動量の補正条件別（Case1～新Case3）に該当する検潮所の海面水位上昇量やp値、相関係数、95%信頼区間を示したものである。観測値であるCase1・2と比較して新Case3のp値は小さく、相関係数も十分高いことから、新Case3の有効性を確認することが出来る。なお、新Case3で評価を行った、離島の杓形港や神威脇漁港検潮所の海面水位上昇について、統計的な

有意性は確認できるが、他地点と比べて上昇量が大きく、95%信頼区間の上限値も+10mm/yを超える結果となっている。電子基準点の数が少ない離島では、地殻変動補正パラメータを求める際に、本土の電子基準点の数値が含まれていることが要因の一つとして考えられる。このため、離島の地殻変動パラメータを蓄積し、離島毎に推定地盤変動量の補正係数（回帰係数）により補正する方法が考えられる。

表-1 検潮所の水位上昇量と回帰分析結果

海域	検潮所		分析条件	地盤 上昇率 (mm/y)	水位 上昇率 (mm/y)	水位 平均上昇量 (mm/y)	水位上昇量の回帰分析		
	No	検潮所名					p値	95%信頼区間	
日本海	1	函館	Case1	11.65	1.84	4.58	0.087	-0.316～-4.002	
	2	松前港	新Case3	12.92	4.57		0.005	1.663～7.468	
	3	江差港	新Case3	11.35	4.29		0.005	1.597～6.988	
	4	奥尻	Case1	0.68	3.97		0.023	0.667～7.271	
	5	奥尻港	Case2	-0.14	4.56		0.018	0.956～8.153	
	6	神居輪漁港	新Case3	0.97	7.47		0.002	3.396～11.533	
	7	瀬棚港	Case2	5.33	3.20		0.03	0.451～6.607	
	8	岩内港	Case2	5.78	2.79		0.038	0.190～5.384	
	9	忍路	Case2	5.19	3.87		0.001	1.890～5.843	
	10	小樽	Case2	4.23	4.05		0.001	1.992～6.098	
	11	石狩湾新港	Case2	4.28	5.45		0.0002	2.546～8.350	
	12	留萌港	新Case3	3.53	2.96		0.03	0.336～5.590	
	13	杓形港	新Case3	1.93	8.18		0.000003	6.137～10.219	
	14	稚内	Case1	2.71	4.12		0.002	1.865～6.368	
オホーツク海	15	枝幸港	新Case3	4.92	2.65	4.43	3.23	0.11	-0.729～6.026
	16	紋別港	新Case3	2.01	2.54			0.013	0.648～4.422
	17	網走	Case1	5.74	3.52			0.016	0.788～6.249
	18	ウトロ漁港	Case2	5.17	3.64			0.03	0.361～6.925
	19	羅臼漁港	Case2	5.77	2.01			0.08	-0.254～4.267
	20	根室港	新Case3	-9.32	0.54			0.77	-3.537～4.621
太平洋	21	花咲	新Case3	-8.47	-0.01	4.66	4.66	0.95	-3.295～-3.103
	22	霧多布	Case2	-3.66	1.99			0.27	-2.969～-9.485
	23	厚岸漁港	Case2	-0.91	5.69			0.0003	3.307～8.076
	24	釧路	Case1	4.64	2.85			0.11	-0.731～6.439
	25	十勝港	Case2	11.17	3.07			0.08	-0.435～6.568
	26	庶野漁港	新Case3	11.89	-2.35			0.39	-8.222～-3.532
	27	浦河港	新Case3	11.96	6.88			0.0009	3.691～10.059
	28	苫小牧東港	新Case3	6.34	6.26			0.052	-0.082～12.604
	29	苫小牧西港	Case2	4.00	4.20			0.002	1.831～6.561
	30	白老港	Case2	4.99	3.36			0.02	0.624～6.105
	31	室蘭港	Case2	8.98	4.96			0.004	1.952～7.507
	32	白尻漁港	新Case3	9.62	4.28			0.013	1.156～7.396
	33	森港	Case2	9.73	3.23			0.028	0.421～6.043

表-2 検潮所の水位上昇量と回帰分析結果

補正条件	水位上昇率 (mm/y)	回帰分析		
		p値	相関係数	95%信頼区間(mm/y)
Case1	3.87	0.0037	0.742	1.548 ～ 6.188
Case2	4.08	0.0009	0.805	2.043 ～ 5.952
新Case3	5.15	0.0001	0.878	3.347 ～ 7.149

(3) 海面水位上昇を踏まえた今後の対応について

本報告において観測値から推定した北海道沿岸の海面水位の平均上昇量は+4.43mm/yとなり、既往の研究⁹⁾により推定された、気温が2℃上昇した将来シナリオ（RCP2.6、IPCC第5次評価報告書）の海面水位上昇量の予測値+4.2mm/y（2100年時点の海面水位上昇量+39cm）とも概ね一致する結果となった。2050年の脱炭素社会の

実現に向けて、各分野においてカーボンニュートラル関連の施策が進み、将来の気温上昇を2℃に抑制した場合にも、現在と同程度の海面水位上昇は継続して発生することを意味する。特に、地盤沈下が進行する道東地域では、現状、海面水位上昇の統計的な有意性を確認出来ている検潮所が少ないが、海面水位の上昇量を北海道沿岸の平均値+4.43mm/yと考えた場合、根室港（根室地区）の地盤変動量は-9.32mm/yであるため、見かけ上+13.75mm/yのスピードで海面水位が上昇していることになる。小型船が利用する水深の浅い岸壁は、利用性から大水深の岸壁よりも低い天端高で整備されているが、例えば根室港では、水深3m以下の岸壁建設時の平均天端高と現在の満潮位の差が約30cm程度のため、海面水位上昇と地盤沈下が継続した場合、30年以内に施設が浸水することも考えられる。一方で、**図-12** に示す内閣府による日本海溝・千島海溝地震の発生に伴う地殻変動量の予測⁸⁾のように、現在、地盤が上昇傾向にある道東地域以外の太平洋沿岸においても、巨大地震に伴い地盤が沈下した場合、気候変動による海面水位上昇の影響が大きくなる。

現在、国土交通省港湾局では、「港湾における気候変動適応策の実装に向けた技術検討委員会」を設置し、港湾における気候変動適応策の実装に向けた具体的な対応方針について検討が進められている。今後、北海道の港湾・漁港において、気候変動に対する適応策を検討していく際には、地盤変動の影響を的確に捉えて検討することが重要である。

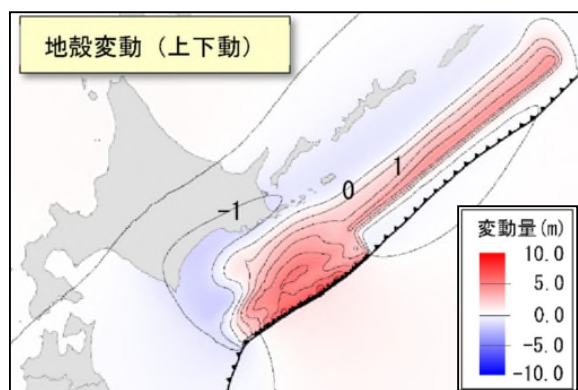


図-12 十勝・根室沖地震モデルによる地殻変動量（上下動） 出典：内閣府

5. おわりに

本報告では、電子基準点等を用いた地盤変動量と、その影響を考慮した潮位観測データを用いて、北海道沿岸の海面水位の経年変化について分析した。本報告の主要な結論を以下に示す。

- (1) 電子基準点に加えて、測量作業で行われるセミ・ダイナミック補正用の「地殻変動補正パラメータ」を用いることで、近傍に電子基準点が設置されていない地点を含め、道内の検潮所33地点の地盤変動量の傾向を把握することが出来た。
- (2) 電子基準点の観測値と地殻変動補正パラメータを用いて求めた推定地盤変動量の相関は高く、観測値と推定地盤変動量の回帰分析から求めた回帰係数により推定地盤変動量を補正することで、精度を向上することが出来る。
- (3) 地盤変動を考慮した海面水位の経年変化の分析の結果、p値が0.05を下回り統計的な有意性を確認できた23地点の検潮所の海面水位の平均上昇量は+4.43mm/y（95%信頼区間+2.461～6.324mm/y）となり、他機関の公表値と概ね同等の結果となった。

地殻変動の影響が大きい北海道の港湾・漁港において、今後、気候変動の適応策を検討するには、各地域の地盤変動量を適切に見積もり考慮することが重要である。そのため、今後も継続して地盤や海面水位をモニタリングし、その変動に注視していく必要がある。

本報告は、北海道の港湾・漁港の技術開発ビジョンに示される、将来の海象変化の予測技術の開発に資する取り組みの1つである。

参考文献

- 1) 気候変動に関する政府間パネル(IPCC)：第6次評価報告書 (AR6), 2021.8.
- 2) 気象庁：日本沿岸の海面水位の長期変化傾向(2022年2月15日発表)
- 3) 野村明弘・石川浩希・佐藤典之・早川哲也・岩崎慎介・大塚淳一・森信人・渡部靖憲：地盤変動を考慮した沿岸域の海面水位上昇量の分析方法, 土木学会論文集 B3(海洋開発), 2022
- 4) 国土地理院 HP：
<https://www.gsi.go.jp/sokuchikijun/sokuchikijun40046.html>
- 5) 海岸昇降検知センター：潮位年報
- 6) 国土地理院 HP：電子基準点データ提供サービス
- 7) 文部科学省, 気象庁：日本の気候変動 2020 大気と陸・海洋に関する観測・予測評価報告書, 2020年12月
- 8) 内閣府：十勝・根室沖地震モデルによる地殻変動量（上下動）,
https://www.bousai.go.jp/jishin/nihonkaiko_chishima/model/pdf/hokoku_zuhyo2.pdf