

防波堤背後盛土の有効性

—ブルーインフラ化の推進—

函館開発建設部 函館港湾事務所 ○大高 敬介

工藤 博文

北日本港湾コンサルタント株式会社 土井 善和

函館港若松地区において、クルーズ船受入のための泊地浚渫で発生した土砂をカルシア改質材で改良し（カルシア改質土）、西防波堤の老朽化対策として背後盛土を造成した。本論では、背後盛土により藻場創出機能を付加した自然調和型構造物として機能することが期待できることから、藻場の繁茂状況を調査すると共にブルーカーボン量の試算を行ったので報告するものである。

キーワード：カルシア改質土、浚渫土、ブルーインフラ、藻場

1. はじめに

港湾機能の維持・拡大のためには航路や泊地の浚渫が必要不可欠である。一方、環境保全等の観点から内陸部での浚渫土砂処分場の確保が困難になってきており、浚渫土砂の有効活用が課題となっている。

浚渫土砂の有効利用方策のひとつとして、カルシア改質材（原材料：転炉系製鋼スラグ）の混入による固化方法がある。本方策は、埋立工事での活用実績から配合方法や施工・品質管理を整理した「港湾・空港・海岸等におけるカルシア改質土利用技術マニュアル」が作成され、港湾整備で利用する際の指針となっている。

函館港若松地区泊地（水深 10m）の整備においては、土砂処分用地がなく新規造成が困難であったため、約 37 万 m^3 の浚渫土砂の受入場所の確保が課題であった。この課題を解決するため、「浚渫土砂の海洋投入及び有効利用に関する技術指針」（国土交通省港湾局 H25.7）の検討手順に基づき浚渫土砂の有効利用の検討を行い、浚渫土をカルシア改質材と混合したカルシア改質土として「西防波堤背後盛土」及び「窪地への埋め戻し」に有効利用を行った（図-1）。

この整備により西防波堤背後の水深が 3m になるため光量子量の増加や、土質改良に使用したカルシア改質材の原料である転炉系製鋼スラグから溶出する鉄イオンにより藻場創出機能を付加した自然調和型構造物としての機能が期待される（図-2）。

本報告は、海藻の生育因子である、水質・光量子量、OOTAKA Keisuke, KUDO Hirofumi, DOI Yoshikazu

付着生物及び藻場調査を行った上でブルーカーボン量の試算を行った。

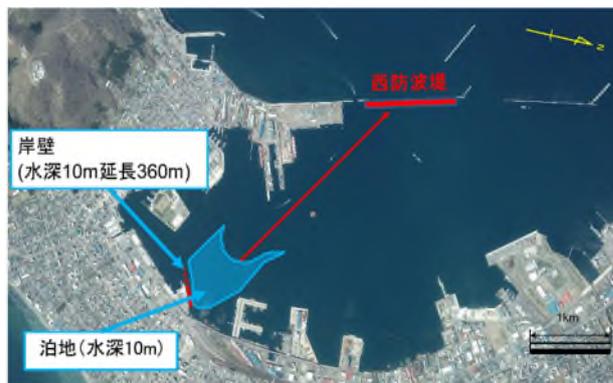


図-1 函館港内の位置関係

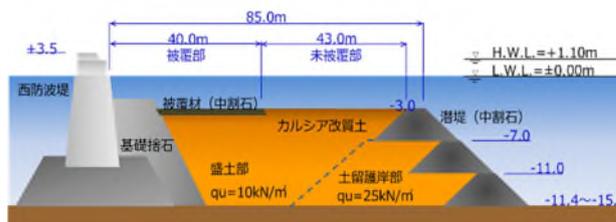


図-2 西防波堤背後盛土の断面

2. 調査の概要

水質・光量子量調査は、令和4年8月30日に実施した。当日の天候は曇り、波浪は静穏であり、透明度は、港外(St.4)で8.6m、港内(St.1~St.3)で約3.5mであった。また、付着生物及び藻場調査は、令和4年8月16日~8月19日に実施した。

調査箇所の断面は図-2、位置は図-3に示す。

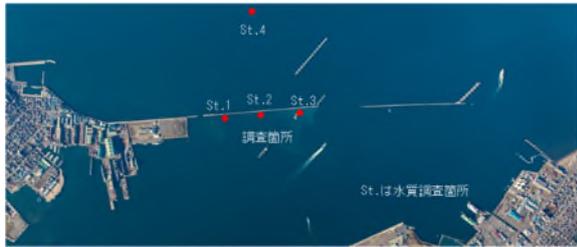


図-3 調査箇所位置図

(1) 水質・光量子量調査

調査項目のうち、pH、全窒素、SS、COD_{Mn}、大腸菌群数、大腸菌数、糞便性大腸菌(EC法)については、全て水産用水基準及び環境基準を満足しており、水質はD0を除き良好であった(表-1)。

一方、栄養塩類(アンモニウム態窒素、硝酸態窒素、亜硝酸態窒素、オルトリン酸態リン)については、海藻類の好適値を下回っており、磯焼け対策ガイドライン²⁾(以下:ガイドライン)における8月30日時点で海藻の成長に必要な栄養塩が不足していることが確認された。

表-1 水質試験結果

分析項目	試料名 単	試料名				基準等
		St.1	St.2	St.3	St.4	
pH(±25℃)	-	8.1	8.1	8.1	8.1	7.8~8.4 水産用水
全窒素	mg/L	0.25	0.23	0.25	0.19	0.3以下 水産用水
SS	mg/L	1	1	1	<1	2以下 水産用水
DO	mg/L	7.4	7.9	7.8	7.6	6以上 水産用水
COD(OH)	mg/L	0.5	<0.5	<0.5	<0.5	1以下 水産用水
大腸菌群数	MPN/100mL	33	7.8	33	46	1,000以下 水産用水
糞便性大腸菌群数	MPN/100mL	<1.8	<1.8	1.8 (大腸菌群数の5.5%)	7.8 (大腸菌群数の17.0%)	
大腸菌数	CFU/100mL	<1	<1	<1	1	300以下 環境基準
アンモニウム態窒素	μM	0.71	<0.71	0.71	0.71	緑藻17~63 褐藻4~15 紅藻5.3~5.5 磯焼けGL
硝酸態窒素	μM	<0.71	<0.71	<0.71	<0.71	
亜硝酸態窒素	μM	<0.36	<0.36	<0.36	<0.36	
オルトリン酸態リン	μM	<0.097	<0.097	<0.097	<0.097	緑藻6.5~19 褐藻0.25~0.75 磯焼けGL

光量子については、図-4に示すとおり、港外(St.4)と背後盛土上の減衰率が異なっており、背後盛土上の天端水深で海面の約20%の減衰率、同水深帯の港外で約40%の減衰率である。

函館の月別全天日射量の最小月は12月の5.2MJ・m⁻²・d⁻¹である(気象庁)。1J=4.57μmol(太陽光)なので、5.2MJ・m⁻²・d⁻¹=23.8mol・m⁻²・d⁻¹であるため20%に減衰してもOOTAKA Keisuke, KUDO Hirofumi, DOI Yoshikazu

4.76mol・m⁻²・dとなり、ガイドライン²⁾において海藻類に求められる0.5mol・m⁻²・d⁻¹程度に対して必要な光量が確保されている。

今回の調査結果から必要光量子量の限界水深は10m程度となるため、背後盛土上(水深3m)の光環境は海藻の生育に問題ないと考えられる。

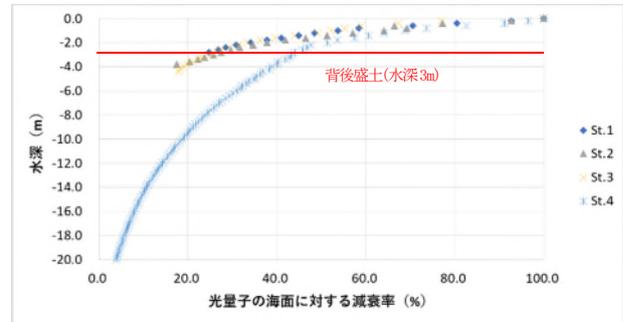


図-4 光量子減衰率

(2) 付着生物

調査箇所の基質は、天然石(F1)、浚渫土砂を50%配合したカルシア改良石(F2、F3)、鉄鋼スラグ水和固化体(F4)である(図-5)。

海藻類の出現種数と出現量は、表-2のとおりF1で4種(1,710g/m²)、F2で4種(468g/m²)、F3で2種(784g/m²)、F4で2種(522g/m²)である。主な着生種が緑藻類であることが一致し、被度の違いも無いことから、その差が基質による影響ではないと考えられる。

動物類の出現種数と出現量は、表-3のとおりF1で20種(1,168個体、87g/m²)、F2で36種(1,400個体、720g/m²)、F3で25種(2,000個体、92g/m²)、F4で18種(724個体、59g/m²)であった。

今回の調査では天然石(F1)とその他の石の大きな違いは認められなかった。一方、F2~F4はマコンブの遊走子の放出時期以降の令和4年3月に投入したことから、着生が確認されていないため、今後もデータの蓄積が必要と考えられる。

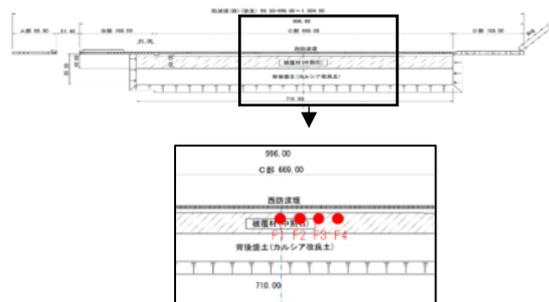


図-5 付着生物調査位置図

表-2 付着植物湿潤重量

綱	和名	F1	F2	F3	F4
緑藻	ヒトエグサ属	509.6	451.4	783.8	372.1
	アナアオサ	541.2	12.8		150.4
	ハネモ属		0.8		
褐藻	マコンブ	657.4			
紅藻	カバノリ		3.2		
	イトグサ属	1.9		0.6	
湿重量(g)計/m2		1,710.1	468.1	784.4	522.5
種類数計		4	4	2	2

表-3 付着動物湿潤重量

名称	F1		F2		F3		F4	
	個体数	湿重量	個体数	湿重量	個体数	湿重量	個体数	湿重量
普通海綿				0.02				
渦虫			8	0.04				
紐形	4	0.05			4	0.01		
腹足	696	14,220.60	812	13,604.37	1,604	24,416.98	520	6,236.78
二枚貝	0	0	16	629.24	4	0.08	0	0
多毛	12	0.14	136	2.44	8	0.02	20	0.54
軟甲	392	1.43	356	8.19	320	1.69	160	0.91
ヒトデ	0	0	8	0.89	8	1,120.00	4	0.27
ナマコ	0	0	4	0.01	4	7.92	0	0
ホヤ	64	70.73	60	65.16	48	55.87	20	50.47
個体・湿重量g/m2計	1,168	87.17	1,400	719.96	2,000	92.10	724	59.21

※一部の湿重量は0.5m枠での採取量をm2に換算

(3) 藻場調査

調査は、ライントランセクト法とし被度は方形枠(1m×1m)を設置して目視観測を行った。

L1~L3 は背後盛土の断面方向であり、図-6 のとおり防波堤側から基礎捨石部(0m)、背後盛土の被覆部(~40m)、未被覆部(~80m)、潜堤部(80m~)で形成されている。

0~20mの基礎捨石部、被覆部では、緑藻類のヒトエグサ、アナアオサの繁茂が見られ褐藻類のマコンブも点在して確認された。そのうち、基礎捨石部では無節サンゴモの被度が5~10%程度であった。

20~40mの被覆部では、緑藻類のアナアオサが着生しているが、被度は5%程度であった。その他の海藻類では、紅藻類のアカバ、ツノマタが確認された。40~80m 未被覆部では、海藻類の出現は見られなかった。80m以降の潜堤部では、緑藻類のヒトエグサ、アナアオサの繁茂が見られ、その他の海藻類では、緑藻類のハネモ、紅藻類のアカバ、ツノマタ、褐藻類のマコンブも確認された。また、海藻類の着生限界水深は8.0m~8.5mであった。

動物類は、0~40mの基礎捨石部、被覆部では、ホヤ類、アカザラガイ、イガイ類、マナマコが出現した。40~80mの未被覆部では、動物類の出現は見られなかった。80m以降の潜堤部では、イガイ、ホヤ類、アカザラガイが確認された。ウニ類の出現は、何れの測線においても見られなかった。L1 測線の調査結果は表-4 に示す。

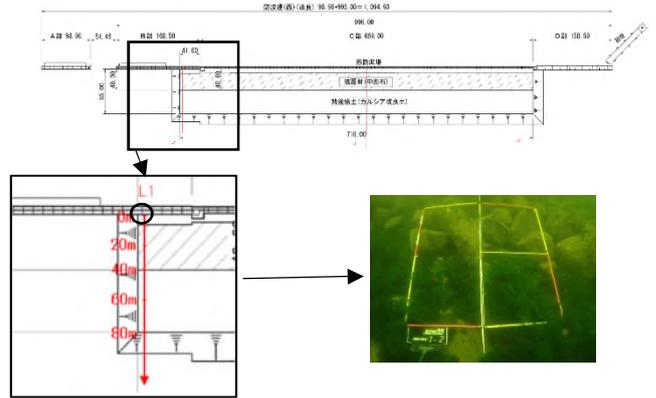


図-6 藻場調査位置図

表-4 藻場調査結果

測点		L1				
		0m	20m	40m	60m	80m
緑藻類	アナアオサ	25	50	+		20
	ハネモ					10
紅藻類	アカバ	10				+
	ツノマタ	40				10
動物	無節サンゴモ	10	+			
	イガイ類	10				
	ユウレイボヤ			+		

海藻類、ホヤは被度、動物類は個数、+は5%未満

対象区として、函館港周辺の天然藻場における調査を行った(図-7)。水深0~1mでは、緑藻類のスガモ、褐藻類のモク類、紅藻類のクロソゾ、ハネイギス、マクサ、ツノマタ、ハケサキノコギリヒバ等の多種の海藻類が見られた。水深1~2mでは、スガモの出現が少なくなり、褐藻類のモク類、アミジグサが多く見られた。水深2~3mでは、モク類のほか、ワカメの点在も確認された。水深3m以深では、岩盤が無節サンゴモのみとなっていた。

動物類は、水深2mまでは、小型巻貝及びイトマキヒトデが確認され、水深3m以深では、キタムラサキウニの出現が平均2個体/m²以上の密度で出現し、小型巻貝の出現が漸増した。調査結果は表-5 に示す。

これらの調査結果より、函館港周辺の天然藻場は、水深3m以浅で藻場が形成されたが、水深3m以深では、海藻類として無節サンゴモが優占し、植食動物のウニ、小型巻貝の出現も多く、磯焼けの様相を呈していた。



図-7 対象区藻場調査箇所

表-5 対象区藻場調査結果

測点	種名	L7				
		d=1.0m	d=2.0m	d=3.0m	d=4.0m	d=5.0m
緑藻類	スガモ	20				
褐藻類	モク類		30			
	アミジグサ		10			
紅藻類	クロソソ	10				
	アカバ		+			
	ハネイギス	10				
	マクサ	20				
	ツノマタ	10				
	無節サンゴモ	10	10	10	20	30
動物	キタムラサキウニ			1	4	6
	小型巻貝	2	5	47	34	42
	カサガイ類			2	2	
	イトマキヒトデ	1		1	4	

海藻類、ホヤは被度、動物類は個数、+は5%未満

3. ブルーカーボン量の試算

(1) 検討方法

藻場調査結果を踏まえ、ブルーカーボン量（炭素吸収量）を「Jブルークレジット®（試行）認証申請の手引き³⁾」（以下：手引き）に準じて試算した。

ブルーカーボン量は、対象生態系の分布面積に吸収係数（単位面積当たりのCO2吸収量）を掛けることで求められる。算定の方法は、図-8のとおり2つの方法があり、式1はすべての対象生態系に適用可能で、式2は海藻藻場生態系と海藻藻場生態系の場合に使用することが可能である。また、「対象生態系の分布面積」と「単位面積当たりの湿重量」は現地調査から計測することを基本とし、「単位面積当たりの吸収量」と「ブルーカーボン残存率」は文献値等を使用する。

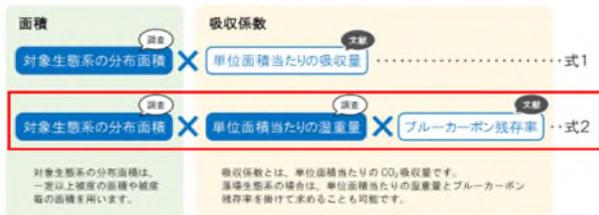


図-8 ブルーカーボン量の計算方法

函館港西防波堤背後盛土部は、主要海藻がアナアオサであることを踏まえて、図-9より式2を適用する。



図-9 算定式選定フロー

■藻場生態系を対象に算定する場合【式2】

ブルーカーボン量

= 対象生態系の面積 × 単位面積当たりの湿重量 × 藻場のCO2換算ブルーカーボン残存率

= 対象生態系の面積 × 単位面積当たりの湿重量 × (1-含水率) × P/B比 × 炭素含有率 × 44/12 × (残存率① + 残存率②) × 生態系全体への変換係数

※44/12 : CO2分子量の比で固定値 =CO2(44)/C(12)

(2) ブルーカーボン量の試算

a 分布面積

ブルーカーボン量は、アナアオサの繁茂が確認された背後盛土部のうち、西防波堤背後～中割石の被覆部までの40m区間を対象とする。したがって、分布面積は、710m × 40m=28,400m²=2.84haである。

b 単位面積当たりの湿重量

西防波堤背後の4地点で実施した付着生物調査結果を用い、その平均値とした。なお、湿重量は、アナアオサ及びヒトエグサの合計を対象とした。

付着生物調査4箇所の平均湿重量は、705.29g/m²=7.05t/haである。

c 含水率・P/B比・炭素含有率

手引きにおいては、各地での調査・研究文献の収集や実測により、設定するとされている。ここでは、ガイドラインの掲載値も参考にその他の文献・資料によって、アナアオサのデータを収集した。

「含水率」は、ガイドラインに掲載が無いため、他の文献を検索した。図-10にアナアオサの藻体面積(X, cm²)と湿、乾重量(Ywet・dry・g)との関係を示す。湿重量の係数が5.14、乾燥重量の係数が1.20であることから、含水率は1-1.20/5.14=0.77である。

「P/B比」「炭素含有率」は、ガイドラインにおいて、アナアオサの掲載は無いが、国立研究開発法人水産研究・教育機構のWebページに掲載されている資料である表-6において、「P/B比」を1.0、「炭素含有率」を29.5%とされている。

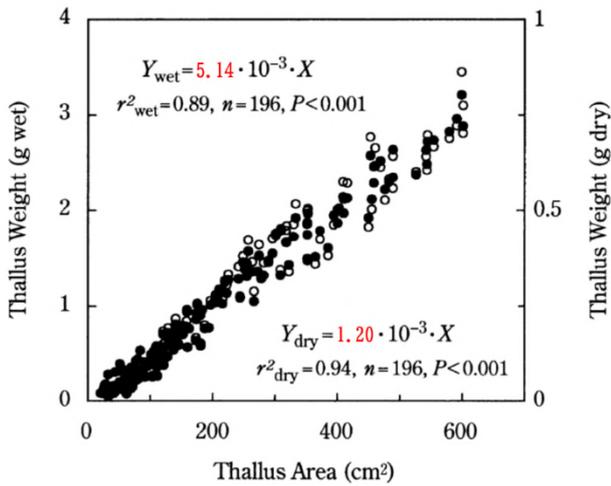


図-10 アナアオサの藻体面積(X, cm²)と湿, 乾重量(Ywet, dry, g)との関係⁵⁾

表-6 P/B比と炭素含有率⁶⁾

藻場タイプ	主な優占種	現存量 (kgD.W./m ²)	P/B 比	炭素含有率 (%)	面積 (ha)	推定生産量 (tonC)
アマモ場	スガモ	0.19	4	34.5	502	1316
ガラモ場	エソノネジモク	1.83	1.1	36.7	353	2608
コンブ場	マコンブ	2.53	3.5	30	1626	43195
アラメ場	アラメ	3.73	1	33.5	626	7822
ワカメ場	ワカメ	0.38	1	32.7	1993	2477
テングサ場	マクサ	0.46	1.1	39.4	102	203
アオサ・アオノリ場	アナアオサ	0.17	1	29.5	124	62
その他	タンバノリ	0.48	1	32.5	775	1209
合計	-	-	-	-	6101	58892

d ブルーカーボン残存率

手引きに掲載されている残存率を参照し、表-7に残存率①(1年間で生産される藻体に対する藻場内や藻場外に堆積する炭素の割合)、表-8に残存率②(1年間で海中に貯留される難分解性溶存有機炭素の割合)を示す。残存率①は、アナアオサが海藻であるため、海藻藻場=0.0472を用いる。残存率②は、アナアオサを対象とした掲載はないが、小型海藻であることを考慮し、過大評価とならないテングサ場=0.018を用いることとする。

表-7 残存率①

生態系	藻場タイプ	残存率①
海草藻場	-	0.162
海藻藻場	-	0.0472
養殖藻場	-	0.0472

表-8 残存率②

生態系	藻場タイプ	残存率②
海草藻場	アマモ場	0.0174
海藻藻場	ガラモ場	0.0408
	コンブ場	0.0312
	アラメ場(アラメ型)	0.0459
	アラメ場(カジメ型)	0.0459
	ワカメ場	0.0459
	テングサ場	0.018
養殖藻場	コンブ場	0.0312
	ワカメ場	0.0459

e 生態系全体への変換係数

手引きを参照し、表-9に生態系全体への変換係数を示す。アナアオサを対象とした掲載はないものの、残存率①と同様に海藻藻場の変換係数=1.50を用いることとする。

表-9 生態系全体への変換係数

生態系	藻場タイプ	生態系全体への変換係数
海草藻場	アマモ場	2.12
海藻藻場	ガラモ場	1.5
	コンブ場	1.5
	アラメ場(アラメ型)	1.5

(a)~(e)の各設定値により、西防波堤背後盛土部のブルーカーボン量(アナアオサ)は以下のとおり。

$$\begin{aligned}
 &= \text{対象生態系の面積} \times \text{単位面積当たりの湿重量} \times \\
 &(1 - \text{含水率}) \times \text{P/B比} \times \text{炭素含有率} \\
 &\quad \times 44/12 \times (\text{残存率①} + \text{残存率②}) \times \text{生態系全体} \\
 &\text{への変換係数} \\
 &= 2.84\text{ha} \times 7.05\text{t/ha} \times (1 - 0.77) \times 1.0 \times 0.295 \\
 &\quad \times 44/12 \times (0.0472 + 0.018) \times 1.50 \\
 &= 0.487 \text{ tCO}_2/\text{年}
 \end{aligned}$$

吸収係数は0.171tCO₂/ha/年(0.487/2.84)であった。

森林2.2tCO₂/ha/年の8%である。

4. 西防波堤におけるポテンシャル

西防波堤背後盛土部は、現状でアナアオサが主要種であり、一部にマコンブが点在している状況である。

しかし、今後は、近傍の北防波堤でマコンブの着生が多く確認されていることから、マコンブの着生量が増加することも考えられる。想定では、マコンブの湿重量等の現地調査結果が無いことから、図-8の式1を使用する。また、マコンブの単位面積当たりの吸収量は、「手引き」を参照して、表-10を用いて2ケースの試算を行う。

表-10 生態系全体への変換係数

式	生態系		単位面積あたり吸収量 (tCO2/ha/年)
式 1	海草藻場	アマモ場	4.9
	海藻藻場	ガラモ場	2.7
		コンブ場	10.3
		アラメ場	4.2
	マングローブ	アラメ場	68.5
	干潟		2.6

(1) ケース 1 (マコンブ 3 : アナアオサ 7)

マコンブ分のブルーカーボン量は、以下のとおり。
= 対象生態系の分布面積 × 単位面積当たりの吸収量

$$= 2.84\text{ha} \times 0.3 \times 10.3\text{tCO}_2/\text{ha}/\text{年}$$

$$= 8.755 \text{ tCO}_2/\text{年}$$

アナアオサの 7 割 (0.487×0.7=0.341) を加えると、西防波堤背後盛土部においてマコンブの着生量が増加した場合の想定ブルーカーボン量は、9.096 tCO2/年となった。なお、その吸収係数を森林と比較すると、以下のとおり、1.5 倍となる。

吸収係数は3.203tCO2/ha/年 (9.096/2.84) であった。

森林2.2tCO2/ha/年の1.5倍である。

(2) ケース 2 (マコンブ 5 : アナアオサ 5)

マコンブ分のブルーカーボン量は、以下のとおり。
= 対象生態系の分布面積 × 単位面積当たりの吸収量

$$= 2.84\text{ha} \times 0.5 \times 10.3\text{tCO}_2/\text{ha}/\text{年}$$

$$= 14.626 \text{ tCO}_2/\text{年}$$

アナアオサの 5 割 (0.487×0.5=0.244) を加えると、西防波堤背後盛土部においてマコンブの着生量が増加した場合の想定ブルーカーボン量は、14.870 tCO2/年となった。なお、その吸収係数を森林と比較すると、以下のとおり、2.4 倍となる。

吸収係数は5.236tCO2/ha/年 (14.870/2.84) であった。

森林2.2tCO2/ha/年の2.4倍である。

5. おわりに

西防波堤背後盛土被覆部への捨石投入は令和 4 年 7 月に完了し、捨石均しは令和 5 年 2 月頃に一部を残し概ね完了する見込みである。コンブ類の遊走子は 10 月頃から浮遊が始まるため、今年度についても着生によるコンブ藻場は未完成な状態になる。

今回の調査では、西防波堤背後盛土が未完成であり、施工による濁り等の影響があるにも関わらず、アナアオサが繁茂し少量ではあるがマコンブの生育が確認できた。

函館港より西側(日本海側)は栄養塩の少ない海域になるが、函館港内も栄養塩が少ないことが確認できた。また、周辺天然藻場においては、磯焼けが進んでいることが確認できたことから函館港周辺でもマコンブの育成環境は厳しいことがわかった。

西防波堤は水深の深い砂地にある人工物であるため、ウニが自力で到達する事が難しく、流入制御により食圧を下げることで岩礁地帯よりマコンブが繁茂する可能性がある。

この箇所で藻場形成をすることは遊走子を供給する核藻場となり周囲に好環境をもたらすことが期待できる。

ブルーカーボン量は、施設単体でも単位吸収量の多いコンブ場が 5 割になると 14.8tCO2/年と試算される。

これは被覆石の部分だけのため、カルシア改良土露出部分である残り半分が未評価となっている。

今年度工事が概ね完了することで、未評価箇所や周辺への遊走子供給などブルーカーボン量増加が期待されるため、継続して調査を実施することを考えている。

最後に、積雪寒冷地でカルシア改良土を大規模適用するのは全国初であったが、多くの関係者の多大な協力のもと令和 4 年で浚渫を完了することができた。このことに、感謝の意を表す。

参考文献

- 1) 一般財団法人 沿岸技術研究センター：港湾・空港・海岸等におけるカルシア改質土利用技術マニュアル
- 2) 水産庁：磯焼け対策ガイドライン(第3版)
- 3) 国土交通省認可法人 ジャパンブルーエコノミー技術研究組合：Jブルークレジット®(試行) 認証申請の手引きーブルーカーボンを活用した気候変動対策ー
- 4) 第63回北海道開発技術研究発表論文：佐々木実歩、櫻井博孝、山崎啓介：函館港若松地区泊地浚渫工事におけるカルシア改質土の施工について
- 5) 浅海養魚場における栽培アナアオサ, *Ulva peytusa* の生長と N, P 吸収速度 水産増殖 52(1), 2004
- 6) 三陸沿岸の藻場における炭素吸収量把握の試み 村岡大祐 <http://tnfri.fra.affrc.go.jp/tnf/news65/muraoka.htm>