



Title	背後小段部を有する防波堤構造物における藻場造成回復手法に関する研究
Author(s)	佐藤, 仁
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(工学)
Dissertation Number	甲第12025号
Issue Date	2015-09-25
DOI	https://doi.org/10.14943/doctoral.k12025
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/59940
Type	doctoral thesis
File Information	Jin_Satoh.pdf



背後小段部を有する防波堤構造物における

藻場造成回復手法に関する研究

Study on Verification of Recovery Technique of Seaweed Bed
in Breakwater Structure that has Rear Steps

平成 27 年 9 月

佐藤 仁

目 次

第 1 章 序論

1.1	研究背景	1
1.2	既往の研究	3
1.2.1	沿岸構造物の自然環境調和機能	3
1.2.2	北海道日本海沿岸における藻場造成・磯焼け対策	7
1.2.3	海藻量成長モデル	9
1.3	研究目的	13
1.4	本論文の構成	15
	参考文献	

第 2 章 海藻現存量の変動特性

2.1	対象海域	17
2.2	海藻の現存量と環境条件	19
2.3	海藻繁茂の経年変化	20
2.4	海藻現存量の年変動特性	20
2.4.1	対象領域	23
2.4.2	各環境条件の年変動特性	23
	(1)波浪年変動	23
	(2)水温年変動	25
	(3)海藻量変動	26
2.5	まとめ	28
	参考文献	

第 3 章 海藻現存量の推定法

3.1	概説	29
3.2	海藻現存量推定法の改良	30
3.2.1	平均間隔別の物理環境パラメータ変動	30
3.2.2	計算開始時期の改良	31
3.2.3	生態特性パラメータの設定	32

(1)光飽和度 a	32
(2)立ち上がり勾配 b	36
(3)葉状体部の光の透過率 m	39
(4)群落吸光係数 K	39
(5)葉面積指数 F	40
3.2.4 純生産量 P_n 算定式の改良	41
(1) P_n/P_g 改良	41
(2)水温による影響係数 β_1	42
(3)流速, 栄養塩による生産率 β_2 (Y)	43
3.2.5 先枯れ量 Bl	45
3.2.6 流出量 Pl	46
3.3 海藻現存量推定	49
3.3.1 物理環境パラメータ	49
3.3.2 成長量 P_g , 純生産量 P_n 算定	52
3.3.3 ウニ摂餌量 SL 算定	54
(1)流速による摂餌圧	54
(2)水温による摂餌圧	56
(3)振動流速	57
(4)計算間隔による摂餌圧の変動	60
(5)場所別・計算間隔別ウニ摂餌量 SL	62
3.3.4 先枯れ量 Bl , 流出量 Pl 算定	64
3.3.5 現存量 W 算定	65
3.3.6 現存量推定方法	65
3.3.7 計算間隔による現存量比較	67
3.3.8 計算開始時期による現存量比較	71
3.3.9 実測値との比較	74
3.3.10 各手法の現存量推定値と現地海藻量との比較	78
3.4 まとめ	81
参考文献	

第4章 沿岸施設の維持・管理手法

4.1 自然環境調和機能の維持・管理	83
4.2 自然環境調和機能診断の必要性	85
4.3 機能診断手法 (案)	86
4.4 機能評価	87

4.5	要因特定	88
4.6	対策・効果確認	89
4.7	機能診断の検証	90
4.8	簡易診断結果と施設の総合評価（改良前）	90
4.9	詳細診断結果（改良前）	91
4.10	簡易診断結果と施設の総合評価（改良後）	93
4.11	まとめ	95
	参考文献	

第5章 結論

5.1	海藻量年変動特性	97
5.2	海藻現存量推定法の構築	97
5.3	海藻現存量推定法の現地への適合性，評価手法	98
5.4	沿岸施設の維持・管理手法	98
5.5	今後の課題	98

謝辞

第1章 序論

1.1 研究背景

北海道の港湾・漁港は全国の海面漁業生産量の約 24.0% (H23 年)¹⁾を扱っており、国民への水産物供給の上で重要な役割を担っている。しかし、漁場の国際的な規制強化や水産資源状況の悪化、荒天や結氷等の厳しい環境条件が漁業活動への支障となっている状況にあり、将来にわたって安定的に水産物供給を図るには水産資源の増大と漁家経営の健全化が急務となっている。北海道周辺海域は世界的にも有数の好漁場として知られており、水産資源を維持するため増養殖事業を始め様々な取り組みがなされてきている。我が国の食糧供給基地を目指す北海道にとって水産資源の安定的な確保は重要な課題であり、港湾・漁港空間もその一翼を担う観点から、これまで経験的に知られていた沿岸構造物と水生生物との関わりを学術的裏付けによって体系化し、積極的に港湾・漁港整備に反映させていくことが期待されている。また、恵まれた自然環境を維持し経済活動と自然の共生を図る意味からも上述した法令・施策等の精神を具体化する取り組みが必要となっている。

港湾・漁港において整備される沿岸構造物は、水域の静穏の確保、背後地の安全確保などを図るため、防波、防砂、護岸等の機能を果たすことが求められる。これらの本来機能は、港湾・漁港を利用する船舶の安全な係留及び荷役作業、背後地の家屋や道路等の安全確保などを目的としている。港湾・漁港は物流拠点や水産業の基地としての本来の役割を担っているため、沿岸構造物には静穏な水面と所定の水深を有する航路と岸壁を確保するための防波・防砂機能が第一義的に求められている。また、離岸堤や防潮堤等は背後集落の防災機能や国土保全機能を有し、さらには国民の憩いやレクリエーションのための場を供給する機能も有する。さらに、港湾・漁港周辺海域は、水産有用種の生息場として貴重な領域であることが知られており、それらの機能を高めるとともに、静穏な港内においては中間育成・馴致によって放流種苗の初期減耗率の低下を図り、また、漁獲物の出荷調整や品質保持のため、港内泊地を活魚蓄養のための水面として高度に利用する必要がある。

一方、港湾・漁港周辺海域は、水産有用種の生息場・産卵場・幼稚仔の保護育成場として貴重な領域である²⁾ため、沿岸構造物にもそれらに寄与する機能が求められる。生物環境の視点から、必要な施設へ構造上の工夫等を施すことにより、浄化機能、藻場造成（藻場の基質となる人工的な岩礁や浅場等）、産卵礁・幼稚仔の保護育成等の機能を強化させることが可能である。

周辺海域における生物生産性の向上に寄与する港湾・漁港構造物の整備メニューとして、産卵礁と藻場の造成がある。近年の水産資源の減少の原因の一つに沿岸域の産卵場の喪失が挙げられ³⁾ており、産卵場は生物の再生産の基本となるものである。港湾・漁港構造物の存在する地点の環境条件が対象魚種の産卵場としての条件に適合すれば、構造物に産卵

礁としての機能を付加することによって資源回復の可能性が生まれる。藻場については、それ自体が水産有用種であること、ウニ、アワビ等の岩礁性生物の餌料であること、幼稚仔の保護育成、魚礁としての機能や前述の産卵場でもあること、等の理由により藻場の造成は生物生産性の向上に大きく寄与するものである。

このような観点から、静穏域の確保等を目的として整備された港湾・漁港施設等の沿岸構造物は、それ自体が魚礁および産卵礁の機能を有するとともに、その擬似岩礁効果により創出された藻場がさらにその機能の拡大に寄与していることが確認されている。我が国の食糧供給基地を目指す北海道にとって水産資源の安定的な確保は重要な課題である。港湾・漁港空間もその一翼を担う観点から、これまで経験的に知られていた沿岸構造物と水生生物との関わりを学術的裏付けによって体系化し、積極的に港湾・漁港整備に反映させていくことが期待されている。

しかしながら、この藻場が大規模に消失するいわゆる磯焼け状態が全国で発生し問題視されている。磯焼けは「浅海の岩礁・転石域において、海藻の群落（藻場）が季節的消長や多少の経年変化の範囲を超えて著しく衰退または消失して貧植生状態となる現象」⁴⁾と定義される。磯焼けの原因の一つとして藻場は海洋生物の産卵場、摂餌場あるいはそれ自体が基礎生産者としての役割を持つ等、様々な機能が複合的に作用しており、良好な海域環境を創造するための基盤となるものである⁵⁾。よって、この磯焼けの対策として、北海道内では15以上前から防波堤や護岸等への藻場造成機能を付加した自然環境調和型沿岸構造物が整備されてきた。しかしながら、基質の経年劣化や近年の水温上昇等により藻場造成効果の低下が懸念されている中で、長期的な調査事例が少ないことが現状である。

このような現状を踏まえ本研究は自然環境調和型沿岸構造物の機能保全対策に資することを目的に、過去に整備された施設の藻場造成効果の持続性を現地調査等により把握し、海藻の生育環境因子である水温と流動の面から藻場機能の評価を行い、機能低下の原因解明のための評価手法ならびに対策手法について検討するため実施した。

1.2 既往の研究

1.2.1 沿岸構造物の自然環境調和機能

「自然環境との調和」とは、港湾・漁港施設が存在する周辺海域の自然環境が持つポテンシャルを踏まえ、水生生物の生息・生育に望ましい環境を保全・再生・創出する取り組みを言う。また、「自然環境調和型沿岸構造物」は港湾・漁港の外郭施設、係留施設、水域施設など周辺海域の自然環境の保全・再生・創出に密接な関わりを持つと想定される沿岸構造物及びそれによって形成される空間で、土木技術によって水生生物の生息場として適した環境に改善又は環境を創出する機能を付加あるいは強化したものをいう。

静穏域の確保等を目的として整備された港湾・漁港施設等の沿岸構造物は、図 1-1 に示すようにそれ自体が魚礁および産卵礁の機能を有するとともに、その擬似岩盤効果により創出された藻場がさらにその機能の拡大に寄与していることが確認されている。近年、限られた沿岸域の水産資源を有効に利用するため、沿岸構造物が本来有する機能に加えて、これらの生物生息場としての機能を積極的に付加することが各地で求められている。防波堤・護岸等への藻場創出については、北海道開発局監修の下、平成 10 年度に「寒冷地における自然環境調和型沿岸構造物の設計マニュアル」⁶⁾が刊行され、北海道ではこれまでにおよそ 16 港（図 1-2）において整備が行なわれている。

北海道など寒冷地の海域特性や水生生物に関する調査研究は古くから行われているが、沿岸構造物と水生生物との関連に着目した調査研究の歴史は浅い。沿岸構造物の自然環境調和機能について、本格的に研究が始まったのは 1990 年代初頭からである。武内ら⁷⁾⁸⁾は北海道日本海南部の瀬棚港及び松前港の外郭施設において水産生物の生息分布調査を実施し、防波堤壁面にコンブ等の海藻が多く着生している状況を把握した。谷野ら⁹⁾は同じく瀬棚港において、構造物に着生する水産生物の群集特性を解明した。以上のように沿岸構造物が天然岩礁と同等の海藻着生機能を持ついわゆる擬似岩礁効果を有することが判明したことにより、各地で藻場造成機能付加型の自然環境調和型構造物の整備が推進されてきた。明田ら¹⁰⁾は北海道日高地方太平洋沿岸に位置する様似漁港において、当地域で初めて整備された自然環境調和型構造物の藻場造成機能について検討し、整備直後においてコンブ等大型海藻を主体とする良好な藻場が造成されたことを示した。また、同じく明田ら¹¹⁾は同箇所における藻場造成機能の経年変化についても検討し、海藻群落の遷移過程や天然岩礁との違いについて考察している。同じ太平洋沿岸の沿岸構造物の事例では、2001 年から開始された北海道東方太平洋沿岸の釧路港西港区の島防波堤に計画された環境共生型（自然環境調和型）防波堤の構造設計に関する検討がある¹²⁾¹³⁾¹⁴⁾。

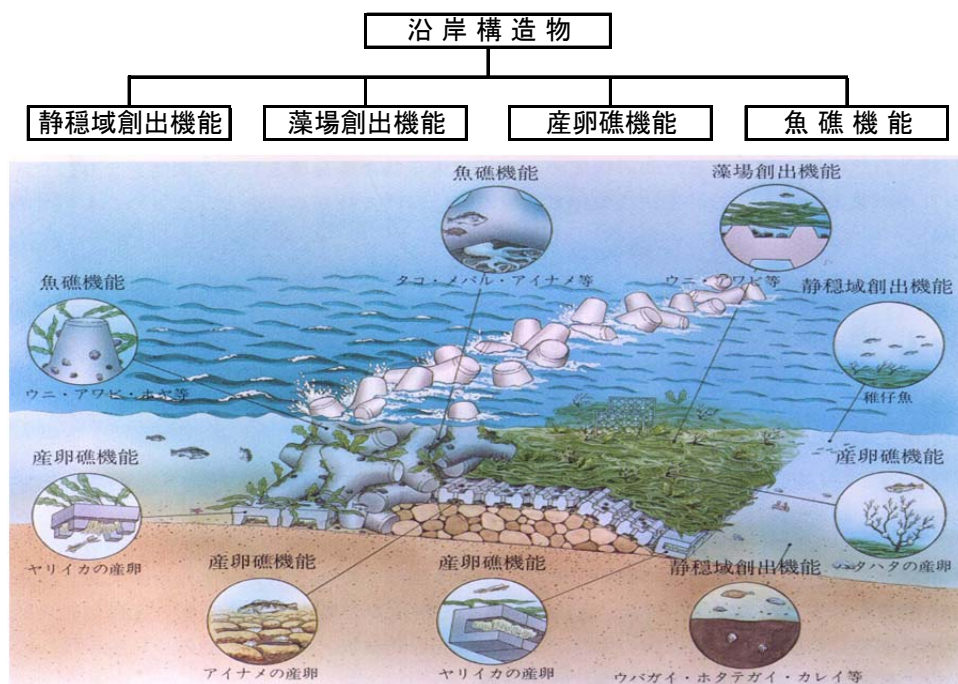


図 1-1 沿岸構造物の自然環境調和機能⁶⁾

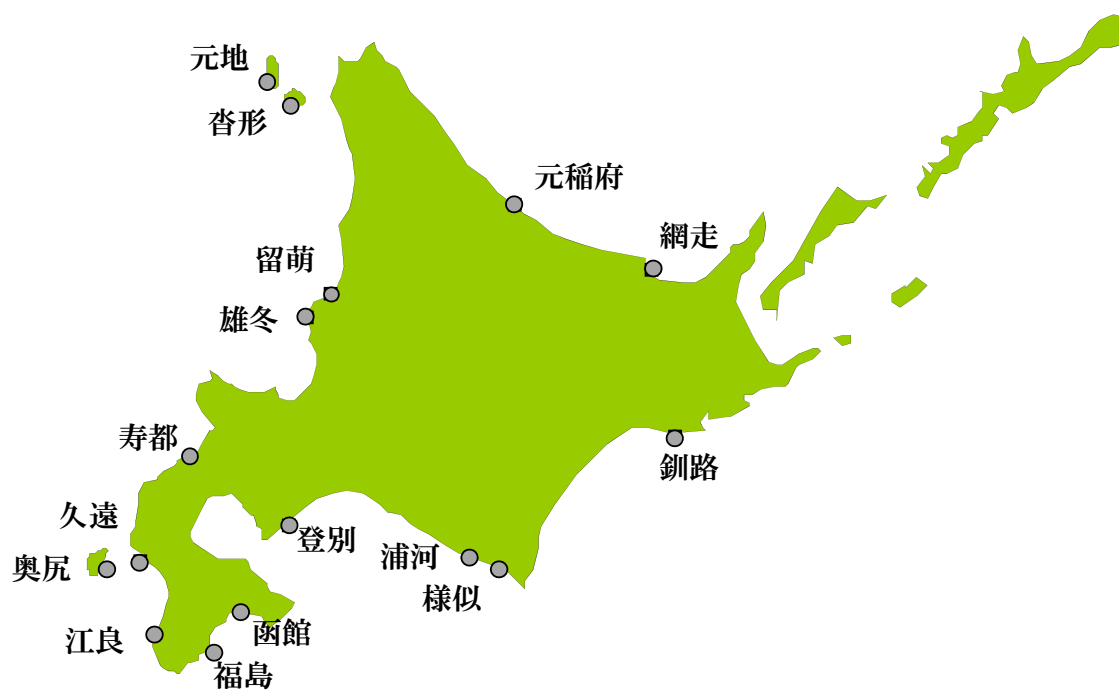


図 1-2 北海道における自然環境調和型構造物整備箇所⁶⁾

次に、港湾漁港における沿岸構造物と周辺海域の自然環境とは密接な関係があり、その自然環境の因子と水生生物も密接な関係がある。自然環境調和型構造物の検討にあたっては、その目的達成に大きな影響を及ぼすと想定される環境因子を抽出し、水生生物との関係について評価する必要がある。海域における自然現象として波浪、潮汐、流れ等があり、これらが沿岸構造物の存在によって変化し静穏域、海水交換、流れ場などの環境を生じさせる。これらの環境において水生生物との関係を考慮すべき環境因子には表 1-1 に示すとおり整理⁶⁾されている。

この内、波当たりと生息環境の関係から言えば、沿岸構造物の設置によってその背後には静穏域が確保され、周辺には回折波や反射波が生じて複雑な流れ場を形成する。波浪による擾乱は表層と低層の海水交換を促進し、水質の維持、栄養素等の輸送に寄与するが、海藻類のように定着する水生生物にとって強すぎる波当りは望ましくない。また、魚卵や稚仔魚は波浪による減耗が大きいことか、静穏度の高い海域はそれらの育成の場となることが示唆されている。前述の谷野ら⁹⁾は沿岸構造物および周辺の天然岩礁における海藻調査を実施し、海藻の分布を豊富度・多様度・均等度といった統計的解析から検討し、波当たりが異なる条件での藻場分布特性を示した。

流れの変化と生息環境の関係から見ると、構造物近傍では波浪や潮流によって渦流が生じ、海水の攪拌が行われて水質改善や海水交流が期待される。流れはまた、魚介類の栄養素となるプランクトン等を運び、海藻胞子の拡散にも影響を与える。一般的に、ガラモ場は比較的流れの穏やかな静穏な海域、アマモ場は種子植物であるため流れの停滞しやすい砂泥域や砂浜性岩礁域、コンブ場は比較的流れの強い場所に分布することがわかっている。

水質の変化と生息環境の関係から見ると、水質には水温、含有物（塩分、COD、SS等）、透明度などの要素があり、対象とする水生生物によってこれらの要素との関係が異なる。海藻類は栄養素としての窒素やリンなどの含有物のほかに、光合成を行うことから海中光量に関係する透明度が重要な要素となる。静穏域では太陽熱による水温上昇、雨水・河川水・地下水の流入による塩分濃度の低下が生じやすいので、これらの要素も水質を考えるうえで重要である。この内、北原ら¹⁵⁾¹⁶⁾は海藻成長と光合成との関連を検討し、水深帯により光り環境が変化する中での海藻成長特性を示した。

底質の変化と生息環境の関係から言うと、静穏域では海中の懸濁物の沈降や堆積が助長され水質や底質を変化させる。底質には基質、粒度、組成などの要素があり、波や流れなどの外力によるその変動状況も水生生物の生息に影響を与える。海藻類は安定した基質に付着して成長することから、変動の大きい砂質が主体を占める砂浜では繁茂しない傾向にある。しかしながら、釧路港の例のとおり砂浜域においても自然環境調和型構造物を配置することによって、新たな藻場を創出することが可能である。佐藤ら¹⁷⁾¹⁸⁾の報告によれば、釧路港の自然環境調和型構造物では砂浜域に形成された岩礁性の藻場創出効果の持続性が確認され十分に藻場創出機能を有していること、また、海藻着生は構造物の一部に限られる

が濁りのある砂浜海域においても海藻の成育に必要な環境が整っていることが判明している。

表 1-1 水生生物に関する環境因子⁶⁾

分 類	環 境 因 子 の 項 目
物理的環境因子	地形，深浅，底質（組成，表面形状，安定性），光（光量，光質）， 水温，降雨・地下水・河川
化学的環境因子	水質（pH，透明度，濁度，SS，COD），塩分，栄養塩類（窒 素，リン等必須代謝物質），汚染（有機質，無機質，生物質）
動力的環境因子	波浪（波高，波向），潮汐（干満），流況（海流，波浪流，潮汐流， 湧昇流），風況，漂砂
生物的環境因子	優越種，捕食関係，プランクトン

1.2.2 北海道日本海沿岸における藻場造成・磯焼け対策

前述のとおり、北海道内では15年以上前から防波堤や護岸等への藻場造成機能を付加した自然環境調和型沿岸構造物が整備されてきた。特に北海道日本海沿岸は海藻が着生する岩礁帯が多く分布していることから、藻場造成機能付加型の構造物が多く整備されてきた。藻場創出機能を付加あるいは強化するにあたって構造様式の観点から留意すべき点は、海藻類が付着する面の確保（規模と関連）と海藻類の生育に望ましい水深を踏まえた設置水深である。これらを考慮して、これまで幾つかの構造形式が考案され設計手法及び安定性の検討を経て実施に移されてきている。設計手法が確立されていること、施工によって構造物の安定性が実証されていることなどから、これまで施工実績のある構造形式の中から選定することを基本としている。

代表的な藻場造成機能付加型の沿岸構造物の例を図1-3に示す。この構造物は背後小段付傾斜堤と呼ばれるものである。ブロック積傾斜堤により来襲波を制御すると同時に、堤体背後に設置された小段上において光・流れ・着生基質といった海藻の生育に望ましい環境条件を創出するものである（図1-4）。

この背後小段上の藻場造成効果については、様似漁港と杓形港に整備された施設について検討した結果¹⁹⁾がある。それによると、海藻（コンブ）の現存量、品質などは良好で水産品としての価値を十分に有している。また、背後小段整備により大規模な藻場造成区域が創出されたことから、新たな水産資源の場の造成が図られたと述べている。同時に、課題としては様似漁港、杓形港ともウニの生息密度が小さく、摂餌圧の影響は小さい環境にあると思われる。よって、磯焼け海域の様なウニが高密度に分布する地帯での藻場造成効果の検討が必要であるとも述べている。

一方、磯焼けが顕著に現れている海域での背後小段上の藻場造成効果については様々な報告がある。伊東ら²⁰⁾は江良漁港の背後小段上におけるコンブ群落の消失とウニの摂餌行動について考察し、ウニの移動や摂餌行動が流速に起因していること、海域に生息するウニを除去して個体密度を減少させることにより、藻場の形成が促進されることを示した。また、町口ら²¹⁾は背後小段上の構造物としての付着基質や基質がつくり出す空隙が、波浪場におけるウニの行動に与える影響について示した。さらに、竹田ら²²⁾はウニ食害を定量的に評価する目的で、ウニの摂餌圧が藻場の存続に影響を与えない摂餌限界流速の発生頻度の限界値を現地観測結果から推定した。

最後に佐藤ら²³⁾は、北海道西部日本海沿岸においては磯焼けの持続要因であるいわゆる高密に分布するウニの食害が顕著であることから、高水温状態が継続されると藻場の回復が進展しないことを指摘した。また、この対策として既存背後小段天端の嵩上げを提案、現地実証試験によって藻場回復効果が発現することを示した。

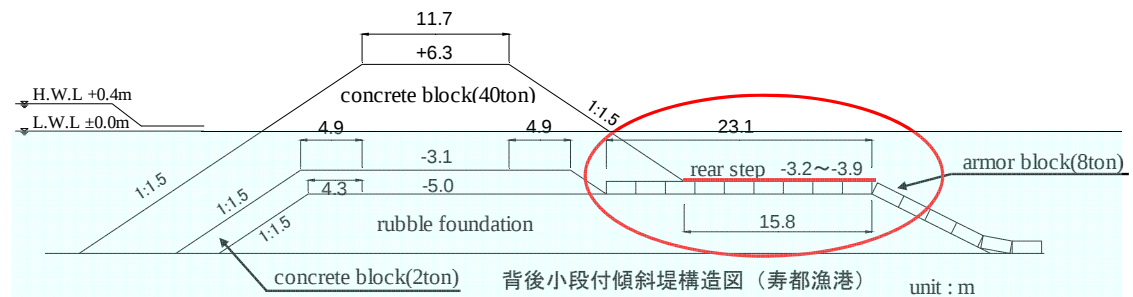
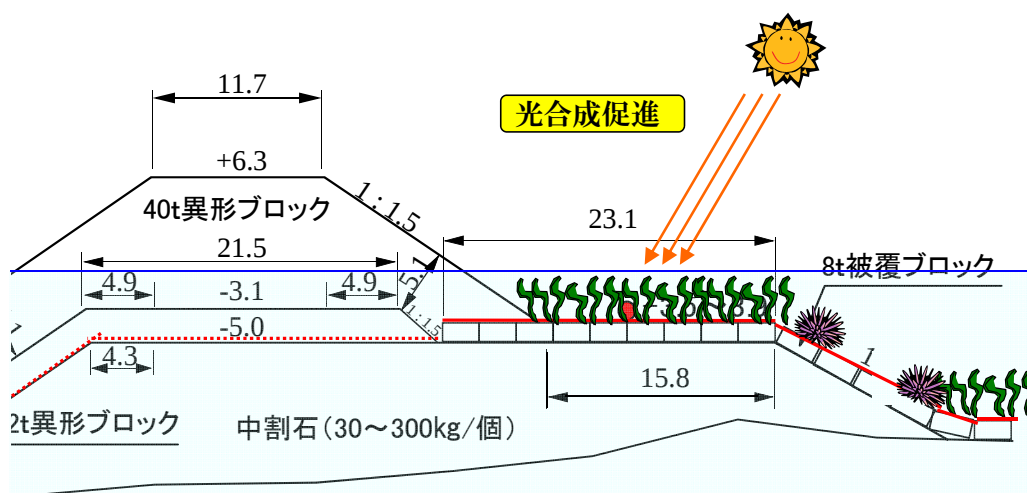


図 1-3 寿都漁港自然環境調和型構造物（背後小段付傾斜堤）



■ 天端水深を浅くすることで、

- ①流動が大きい
→ ウニの摂餌抑制 海藻保護
- ②浅場域の造成
→ 海藻の着生基質(コンクリートブロック等)の提供
- ③水中照度の減衰が小さい
→ 光合成促進(成長しやすい)

図 1-4 背後小段付傾斜堤の構造的特徴

1-2-3 海藻量成長モデル

現存量を予測する手法は桑原ら^{24) 25)}による海藻の生産量推定式によるモデルを用いた。本モデルは海藻群落の形成に影響を与える海域の環境因子及び食害動物の影響を同時に考慮し、コンブ類の現存量を定量的に求めるものである。対象とするコンブ類は北海道日本海沿岸においてほぼ周年にわたり優先種として成育し、コンブ漁業、ウニ・アワビ類の餌料海藻、生息場所として重要とされる1年生海藻ホソメコンブ(写真1-1)である。本モデルの活用方法としては、以下のような事例を想定している。

- ①漁港港湾構造物が周辺藻場に与える影響の事前評価およびその対策の検討
- ②構造物による藻場創出の可能性の事前評価
- ③水産協調機能を付加した構造物の設計
- ④構造物によるキタムラサキウニの摂餌圧評価
- ⑤河川排水や海洋工事で発生する濁水や浮泥が藻場に与える影響の予測評価
- ⑥海象変化によるホソメコンブ生産量予測



写真1-1 ホソメコンブ群落

Monsi・Saeki²⁶⁾が提唱した植物の光合成速度と光環境の関連性を基本として、さらに松山²⁷⁾は、現地調査および実験結果をもとにホソメコンブ群落の生産量を求める式 (1.1) を構築した.

$$Pg = \frac{2Db}{Ka} \ln \frac{1 + [1 + \{K/(1-m)\}a \cdot I_M]^{1/2}}{1 + [1 + \{K/(1-m)\}a \cdot I_M \exp(-KF)]^{1/2}} \quad (1.1)$$

ここで

Pg : 群落の日単位総光合成速度 (g wet wt./m²/day)

a : b/Pmax Pmax は光飽和値での光合成量 (無次元量)

b : 光合成-光曲線の立上り勾配 (無次元量)

m : 葉状体部の光の透過率 (無次元量)

K : 群落吸光係数 (無次元量)

群落中の光の吸光率を表すもの. 葉の傾きや配列様式などにより群落特有の値を持つ.

F : 葉面積指数 (m²/m²) 葉層全体 (付着器から先端部) の葉面積

I_m : 日南中時の光強度 (μ E/m²/s)

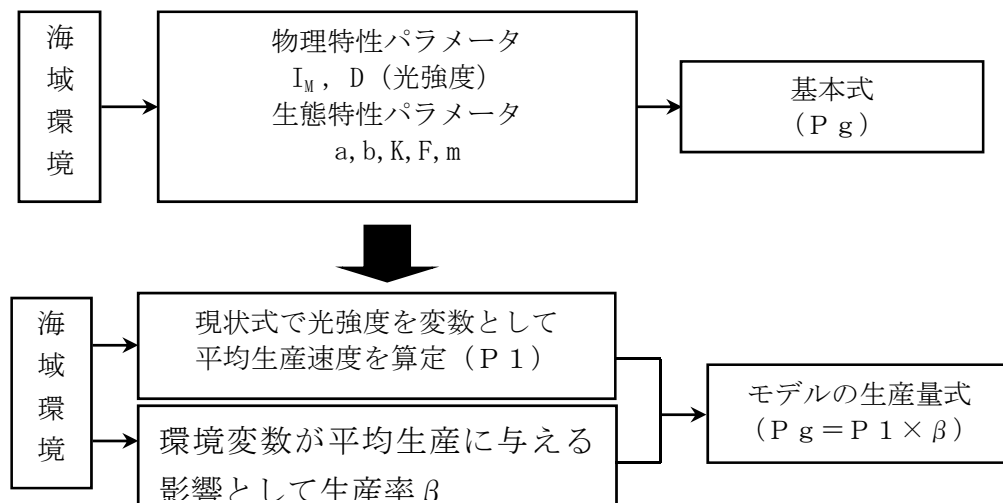
D : 日長 (hr)

(1) 式から群落の光合成系である葉状態呼吸量 (R_F) を差し引くと剰余生産量 (P_s) が求まり (P_s=Pg-R_F), さらに群落の非光合成系である茎状部と付着基部の呼吸量 (R_c) を差し引くと式 (1.2) に示すような純生産量 (P_n) が求められる. なお, 松山が現地実験を行なった時の P_n/Pg 比は年間を通じ 0.55 程度であることが判明している.

$$P_n = P_s - R_c = P_g - (R_F + R_c) \quad (1.2)$$

当モデルは海域環境からホソメコンブ現存量の求めるため, 環境要素のみをパラメータとする必要がある. そのため基本式のパラメータは環境要素で現す必要があるが, a, b, m, K, F は生態特性を表す係数である. このうち K (群落吸光係数) と F (葉面積指数) は群落の生産量で変化する係数であるため環境に依存する推定式を導入している.

一方, a, b, m は季節変化が大きいため, その変化は水温, 流況 (波浪), 栄養塩濃度等の環境変化に依存しているものと考えられる. そこで a, b, m を定数 (年平均値) とし光強度のみを変数として扱う一方, 環境変化による変動を変動率 β で現す手法を採用している. これら生産量式の構築概念を図 1-5 に, 生産量式に用いた変数とその扱いを表 1-2 に示す.



注) 生産量式で扱う変数は、相互に干渉せずに独立した変数でなければならない。

図 1-5 生産量式の構築概念

表 1-2 生産量式に用いた変数とその扱い

生産量式：陸上植物群落の総生産量式を1年生コンブのホソメコンブに適用					
平均生産速度（P 1）			生産率 β （ $= \beta_1 \times \beta_2$ ）		
変 数	使用データ	使用方法	変 数	使用データ	使用方法
①水 深	現地データ	生産量式へ 変数として 入力	水 温（ β_1 ）	現地データ	現地実験 により生 産率算定 式を構築
②日射量			流速と栄養塩 （ β_2 ）		
③日 長					
④懸濁物質					
⑤ a， b， m	年間平均値	算定式を構築			
⑥ K， F					

注) 黄色の箇所は、ホソメコンブのみ適用可能

実海域に現存する藻場の現存量は食害動物による摂餌や生態的な先枯れ、流体力による流出の影響を受けた結果を現している．そのため、現存量（W）を推定するためにはそれらを考慮し式（1.3）で求めることとする．

$$(\text{現存量 } W) = (\text{生産量 } P_n) - (\text{摂餌量}) - (\text{先枯れ量}) - (\text{流出量}) \quad (1.3)$$

Pg は光強度に依存する日単位総光合成量である．生産量 Pn への変換は式（1.4）式で示すとおり、現地で調査された Pn と Pg の比（Pn/Pg）と水温・栄養塩濃度・流速の影響を現す生産率 β を乗じて算定する方法とする．

$$(\text{生産量 } P_n) = (\text{総光合成量 } P_g) \times (\text{生産率 } \beta) \times (\text{Pn/Pg 比}) \quad (1.4)$$

また、キタムラサキウニを対象とした摂餌量を設定している．対象とするキタムラサキウニの年齢は平均的な3年目のもの個体を想定している．

先枯れ量および流失量については、式（1.5）、（1.6）に示す松山の調査結果をロジスティック曲線で近似した値を用いている．なお、式中の D は12月1日からの経過日数である．

$$(\text{先枯れ量 : kg/m}^2/\text{月}) = 1500 \exp(-0.0253D) / \{1 + 169 \exp(-0.0253D)\}^2 \quad (1.5)$$

$$(\text{流失量 : kg/m}^2/\text{月}) = 39840 \exp(-0.0303D) / \{1 + 2739 \exp(-0.0303D)\}^2 \quad (1.6)$$

以上により、海藻の成長、海藻の先枯れ・流出、ウニの摂餌を考慮した現存量が推定可能となる．計算フローを図1-6に示す．

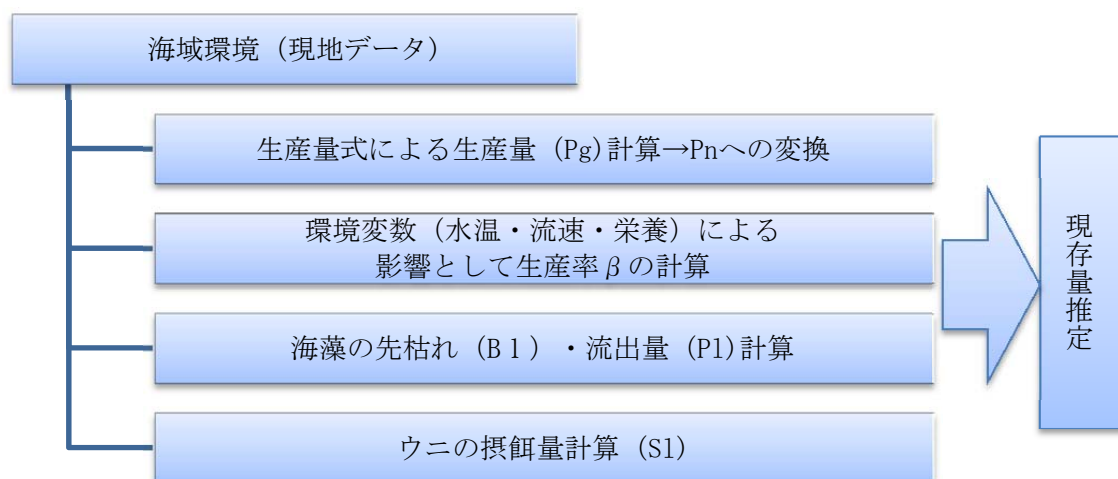


図1-6 現存量推定フロー

1.3 研究目的

北海道内では15年以上前から防波堤や護岸等への藻場造成機能を付加した自然環境調和型沿岸構造物が整備されてきた。しかしながら、基質の経年劣化や近年の水温上昇等により藻場造成効果の低下が懸念されている中で、長期的な調査事例が少ないことが現状である。

このような現状を踏まえ、本研究は自然環境調和型沿岸構造物の機能保全対策に資することを目的に、過去に整備された施設の藻場造成効果の持続性を現地調査等により把握し、海藻の生育環境因子である水温と流動の面から藻場機能の評価を行い、機能低下の原因解明のための評価手法ならびに対策手法について検討するため実施した。

(1) 海藻現存量の変動特性

これまで、自然環境調和型構造物の整備後に、藻場造成効果を把握するために現地調査等が実施されてきた。その現地調査は2～3年の実施が大半である。よって、藻場造成機能の評価する調査・検討が十分であるとは言えないと考えられる。なぜなら、施設整備後の藻場造成機能の長期的持続性が不明であり、もし何らかの原因で藻場が消失した場合の理由を特定することが困難になると考えられる。

また、これまでの藻場造成効果の調査・検討は、海藻成長期の一部や最終的な繁茂期しか実施されて来なかった。これは費用等によるモニタリング調査の制約および詳細な海域環境データの取得が困難であった理由と考えられる。これについても藻場造成機能の持続性の検討や機能消失の原因特定に踏み込めなかった理由と考えられる。よって、現状では藻場造成機能回復に資する既存施設の改良手法も未確定のままであり、この機能が失われた施設がそのまま現存されている状態にある。

そこで本研究では、まず自然環境調和型沿岸構造物の藻場造成効果の低下要因の一つである磯焼けの状況を現地調査により把握する。その検討には、新たに建設当時(約20年前)にさかのぼることとする。さらに、近年の観測データの充実により数年に及ぶ過去の海域データを収集整理し、海藻量と海域環境パラメータの年変動特性を解明するものである。

(2) 海藻の月別変化による現存量算定手法の開発

海藻の成長状況を把握するため、海藻現存量を推定(定量化)するモデルの確立を図るものである。本研究では、これまでの現存量算定手法を改良し前述の海藻量と海域環境パラメータの年変動特性を考慮した手法を確立するものである。具体的には海藻の成長時期の成長量を詳細に把握可能なモデルにする。また、海域環境の変動を詳細に分析しパラメータを設定することで、植食動物であるウニの摂餌量を十分考慮したモデルにする。さらに、現存量算定手法の現地への適合性を図るものである。これによりウニの食害を起因とする磯焼けの評価手法の確立が可能となるものである。

(3) 自然環境調和型構造物における藻場創出機能評価手法

これまで整備されてきた施設の藻場造成効果（藻場創出機能）が低下し，自然環境調和機能が十分に発現されない状況も見られるようになってきた．本来は，整備当初に期待した藻場創出機能が発現されているかどうかという海藻生育環境としての適性度を評価（機能診断）し，機能の維持に対する阻害要因を特定した上でその対策（機能回復）を施す，といった機能保全対策（ストックマネジメント）的アプローチが合理的である．しかしながら，コンクリートのひび割れや鋼材の腐食といった構造物の物理的・科学的な観点からの機能診断手法が数多く提示²⁸⁾されているにもかかわらず，生物的な面からの系統的評価手法が確立されておらず，機能保全が進んでいないのが実態である．

そこで，沿岸構造物の維持管理計画あるいは機能保全計画に自然環境調和型沿岸構造物の維持・管理手法を導入することを目的に，現状の機能把握・評価，阻害要因特定といった機能診断手法，並びに対策手法の検討やフォローアップに至る一連の評価体系について検討するものである．

1.4 本論文の構成

本研究は序論を含めて全5章で構成されており、内容は以下のとおりである。

第1章は序論であり、本研究の背景となる現状と本研究の目的を示し、既往の研究について取りまとめている。

第2章では、海藻現存量の変動特性を現地調査から検討し、既存の算定モデルの妥当性、課題について整理した。

第3章では、既存の算定モデルの精度向上のための改良手法について検討した。また、実際の現地データを用いて改良手法による海藻現存量の算定を行い、現地との整合性について検討した。さらに、自然環境調和型構造物の藻場回復手法の検討として、構造断面の改良による海藻現存量の推定を行い回復効果の検証を行った。

第4章では自然環境調和型構造物の維持管理手法の導入を目的に、環境共生機能(藻場創出機能)の機能保全を評価する手法を提案している。また、本診断方法について具体的に漁港を対象に実証診断を行い妥当性について検討している。

第5章では本論文で明らかになったことを要約し本研究の総括として取りまとめた。

参考文献

- 1) 北海道庁水産林務部：平成24年北海道水産現勢，pp.1-56，2012.
- 2) 水産庁：平成17年度水産の動向及び平成18年度水産施策，2006.
- 3) 日本水産資源保護協会：漁業影響評価指針，pp.1-35，2005.
- 4) 藤田大介：磯焼け 21世紀初頭の藻学の現況，日本藻類学会，pp.102-105，2002.
- 5) 向井 宏：藻場の生物群集(11)-沿岸環境と藻場-，海洋と生物 107，生物研究社，pp.470-475，1996.
- 6) (社)寒地港湾技術研究センター：寒冷地における自然環境調和型沿岸構造物の設計マニュアルー藻場・産卵機能編一，1998.
- 7) 武内智行，宮本義憲，増田 亨：防波堤周辺の水産生物生息分布状況調査ー瀬棚港を例としてー，海岸工学論文集，第37巻，pp.828-832，1990.
- 8) 武内智行，増田 亨：松前港における水産生物生息分布状況調査，海岸工学論文集，第38巻，pp.921-925，1991.
- 9) 谷野賢二，明田定満，佐藤 仁，大森康弘，富士 昭：防波堤の疑似岩礁効果について，海岸工学論文集，第40巻，pp.1151-1155，1993.
- 10) 明田定満，谷野賢二，小野寺利治：水産協調型断面への海藻着生効果について，平成7年度日本水産工学会学術講演会講演概要集，pp.211-214，1995.
- 11) 明田定満，谷野賢二，中内 勲，高橋義昭，小野寺利治：表面処理の相違によるコンクリート面への海藻着生状況について，海岸工学論文集，第43巻，pp.1246-1250，1996.

- 12) 北海道開発局港湾建設課, 水産課, 釧路開発建設部, 開発土木研究所: 浚渫土砂を活用した背後盛土付き防波堤の研究開発 (I), 第 44 回北海道開発局技術研究発表会, 2001.
- 13) 北海道開発局港湾建設課, 水産課, 釧路開発建設部, 開発土木研究所: 浚渫土砂を活用した背後盛土付き防波堤の研究開発 (II), 第 45 回北海道開発局技術研究発表会, 2002.
- 14) 北海道開発局港湾建設課, 水産課, 釧路開発建設部, 開発土木研究所: 浚渫土砂を活用した背後盛土付き防波堤の研究開発 (III), 第 46 回北海道開発局技術研究発表会, 2003.
- 15) 北原繁志, 根本任宏, 丸山修治: 釧路港島防波堤 (背後盛土付) 周辺における物理環境に関する研究, 第 50 回北海道開発局技術研究発表会, 2007.
- 16) 北原繁志, 根本任宏, 丸山修治: 釧路港島防波堤背後盛土の物理環境と海藻被度に関する研究, 第 51 回北海道開発局技術研究発表会, 2008.
- 17) 佐藤 仁, 牧野昌史, 丸山修治: 釧路港島防波堤背後盛土上における海藻群落形成と生物生息場機能向上に関する一考察, 第 52 回北海道開発局技術研究発表会, 2009.
- 18) 佐藤 仁, 福田光男, 丸山修治, 村井克詞: 防波堤に形成された背後盛土における藻場機能について, 海洋開発論文集, Vol. 25, pp. 165-170, 2009.
- 19) 北海道開発局港湾建設課, 水産課, 釧路開発建設部, 開発土木研究所: 環境共生型の港湾・漁港構造物の研究開発 (III), 第 39 回北海道開発局技術研究発表会, 1998.
- 20) 伊東公人, 明田定満, 谷野賢二: 傾斜堤背後小段の海藻場へのウニの進入状況について, 第 42 回北海道開発局技術研究発表会, 1999.
- 21) 町口裕二, 山下卓也, 伊東公人, 谷野賢二: 波浪環境下におけるエゾバフンウニ稚仔の棲み場の評価, 海岸工学論文集, 第 46 巻, pp. 1151-1155, 1999.
- 22) 竹田義則, 坪田幸雄, 永田晋一郎, 袖野宏樹: 自然環境調和型構造物における藻場の流速とウニの食害に関する研究, 第 46 巻, pp. 1221-1225, 1999.
- 23) 佐藤 仁, 福田光男, 丸山修治, 村井克詞: コンブ藻場の維持回復を目的とした地域協働型の磯焼け対策の事業化, 土木学会論文集 B3 (海洋開発) 特集号, 2013.
- 24) 桑原伸司, 佐々木秀朗, 北原繁志, 松山恵二, 清野克徳, 谷野賢二: 藻場生産力予測シミュレーションモデルの開発, 海岸工学論文集, 第 45 巻, pp. 1101-1105, 1998.
- 25) 桑原伸司, 松山恵二, 竹田義則, 北原繁志, 清野克徳, 金川 均, 谷野賢二: 藻場生産力予測シミュレーションモデルの開発 (第 2 報), 海岸工学論文集, 第 46 巻, pp. 1156-1160, 1999.
- 26) Monsi, M. and T. Saeki: Uber den lichtfaktor in den pftanzengesellschaften unt seine bedeutung fur die stoffproduktion. Jap, Jour, Bot., 14, 22 -52, 1953.
- 27) 松山恵二: ホソメコンブの光合成並びに光合成より見た忍路湾におけるホソメコンブの生産 (未発表), 1998.
- 28) 三上信雄, 藤田孝康, 保坂三美, 極檀邦夫, 重松宏和, 笠井哲郎: 沿岸構造物の効率的な維持管理のための簡易的な老朽化診断手法に関する研究, 海洋開発論文集, Vol. 26, pp. 165-170, 2010.

第2章 海藻現存量の変動特性

2.1 対象海域

対象海域は必要パラメータが最も多く調べられている海域の一つである北海道寿都町寿都漁港周辺海域(卓越海藻であるホソメコンブを対象)とした。この海域の西側には弁慶岬があり、主な波向きである西～北西向きの波が遮断され、波当たりが弱く磯焼けになりやすい海域である。また、寿都漁港周辺ではこれまでに海中林、ウニ密度管理区域等磯焼け対策として様々な調査が行われている。

調査対象とした北海道日本海側に位置する寿都漁港の平面図を図 2-1 に示す。背後小段付傾斜堤(図 2-2)として整備された防波堤(L=100m)は、寿都地先約 500m 沖の水深約 10m 付近に位置する。周辺は岩礁帯であり、この地帯の水産有用種であるホソメコンブ(*Laminaria religiosa* Miyabe)を始めとする大型藻類の分布域である。しかしながら、近年は天然藻場においてもコンブ類等の大型藻類が繁茂しない状況が続いている。この背後小段における海藻繁茂に関するこれまでの現地調査(海藻現存量把握)は、表 2-1 に示すとおり施設完成後から 2010 年(13 年経過)まで夏季の海藻繁茂期を中心に計 17 回実施されてきた。なお、2009 年と 2010 年は、ホソメコンブの幼芽時期である 2 月についても調査を実施している。この調査結果を用いて、施設完成から十数年経過した背後小段構造物の海藻繁茂状況(現存量等)の長期的な変遷を把握した。

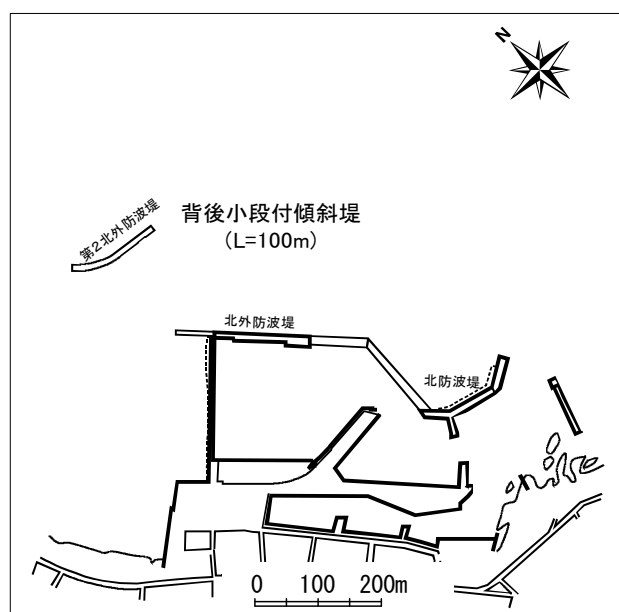


図 2-1 寿都漁港

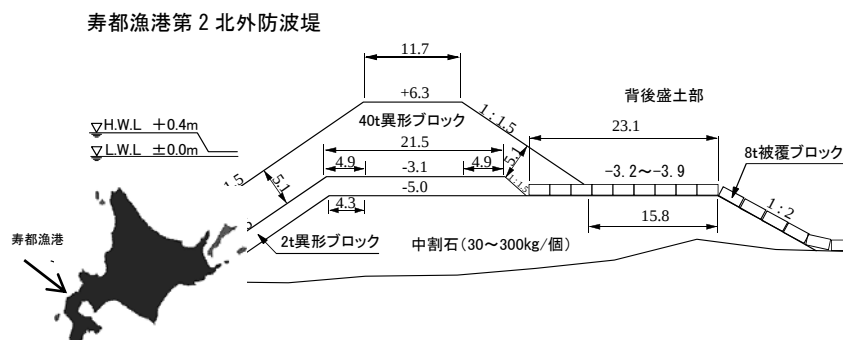


図 2-2 自然環境調和型沿岸構造物(背後小段付傾斜堤)

表2-1 海藻現存量の調査年

経過年	西 暦	調査月
0	1997	施設完成
1	1998	July
2	1999	July
3	2000	August
10	2007	July
11	2008	June
12	2009	February June
13	2010	February June
14	2011	February June
15	2012	February June
16	2013	Feb, Mar, Apr May, Jun
17	2014	Feb, Mar, Apr May, Jun

注) 1998~2000 年は丸山らによるモニタリング調査結果¹⁾を引用

2.2 海藻の現存量と環境条件

各調査年の海藻繁茂期におけるホソメコンブの現存量と生育環境因子として冬期（2月）の平均水温との関係を図 2-3 に示す。背後小段上は天然岩礁以上の藻場造成効果を有しているが、その年の冬期水温に強く依存しており年変動が大きい。

ホソメコンブの現存量は、冬期水温を用いた被食圧の関係式(2.1)で算定され、水温約 5℃を境界として低水温ほど現存量が大きいといえる。この理由として、背後小段上は当該海域の水産有用種でかつ植食動物でもあるキタムラサキウニ(*Strongylocentrotus nudus*)が高密度に生息していること、さらには、冬期の高水温により本来休眠状態であるはずのキタムラサキウニの摂餌が活発となることから、海藻の幼芽・生長期に悪影響を与えているものと推察される。

次に、図 2-4、写真 2-1 は 2007～2010 年における背後小段上と天然岩礁におけるホソメコンブの生育水深別の現存量（繁茂期）を示したものである。水深約 4m に位置する背後小段上の現存量は前述の冬期水温の場合と同様に年変動が大きく、現状の背後小段構造では藻場造成効果が継続して発現できない状況が明らかである。

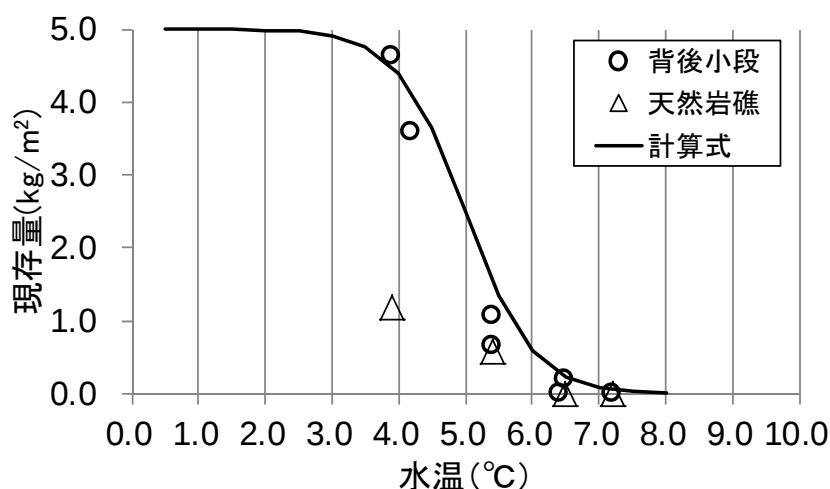


図 2-3 ホソメコンブの現存量と冬期水温（2月）

$$W = \frac{W_0}{1 + \alpha \times \exp(\beta(t - t_c))} \quad \dots\dots\dots (2.1)$$

W_0 : 最大現存量 (5 kg/m²)

t : 水温, $t_c=5$ °C, $\alpha=1$, $\beta=2$

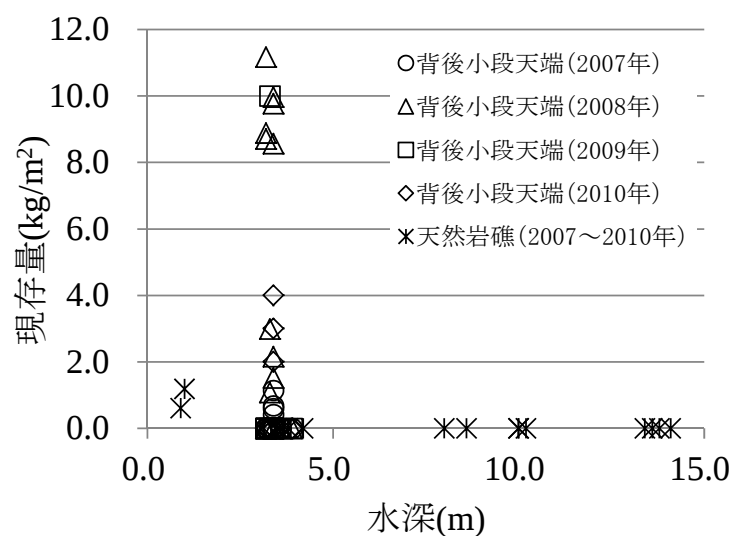


図 2-4 ホソメコンブの現存量と生育水深

2.3 海藻繁茂の経年変化

桑原ら²⁾³⁾による光強度・水温・流速・栄養塩等の環境因子を変数とした海藻の生産量推定式を用いた藻場造成予測モデルを用いて、背後小段上のホソメコンブの現存量を算定した。前述の表 2-1 に示したモニタリングによるホソメコンブの現存量データがある 5 カ年分について、当該年の海象条件や環境因子をパラメータとして計算を実施した。また、ウ

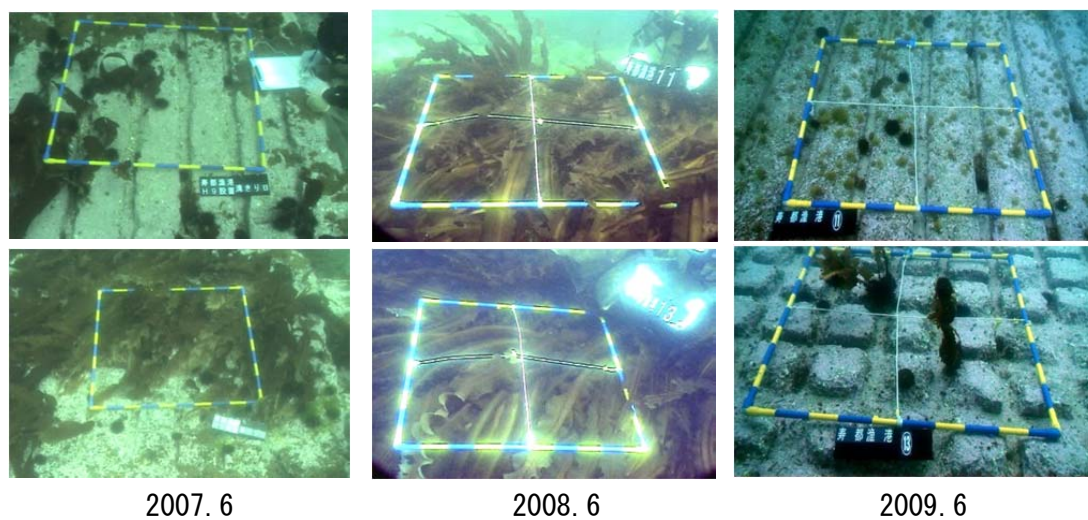


写真 2-1 海藻着生状況（寿都漁港 2007～2009 年）

ニの摂餌によるホソメコンブの減少量も考慮している。

計算結果の代表例として、2007 年の 2 月と 6 月のホソメコンブの生育分布を図 2-5 に示す。2 月は、まだホソメコンブは幼芽の時期であることから生産量は少ないが、徐々に生長し 6 月の繁茂期には、生産量が増大している状況が再現されている。

次に、計算結果とこれまで実施したモニタリング調査との比較を行った、図 2-6 は 1998 年～2000 年、2007 年～2009 年における背後小段上のホソメコンブ現存量の経年変化を示したものである。図中の棒グラフは、モニタリング調査によるデータを現存量 1 として示した。現存量 2 (□) は、前述の計算結果の値を示した。最後に、冬期の水温状況として 2 月の値を図示した。

背後小段上の藻場環境については、冬期の水温が約 5℃を上回ると背後小段上のホソメコンブの現存量は大幅に減少し、近年の冬期の高水温により本来休眠状態であるはずのキタムラサキウニの摂餌が活発となり、海藻の幼芽・生長期に悪影響を与えていることが判明⁴⁾している。図より、冬期水温と現存量との関係をみると、モデルによる計算値で示した現存量も冬期水温が低い程大きくなっていることが現れている。

また、モニタリングの結果とモデルの結果は傾向的には一致しているが、各々の現存量を比較すると、2008 年は合っているものの、2007 年と 2009 年は差が出る結果となった。

前述したように、冬期の水温の変動によりホソメコンブの現存量に差が現れる状況においては、海域の栄養塩は基準値を満たしているものの、高水温でキタムラサキウニの摂餌圧が非常に大きくなり、ホソメコンブの生長以前の幼芽期において、居所的にすべて食べ尽くされてしまう場合がある。この状況では、現行モデルは現存量を過大に算定しているものと推察される。

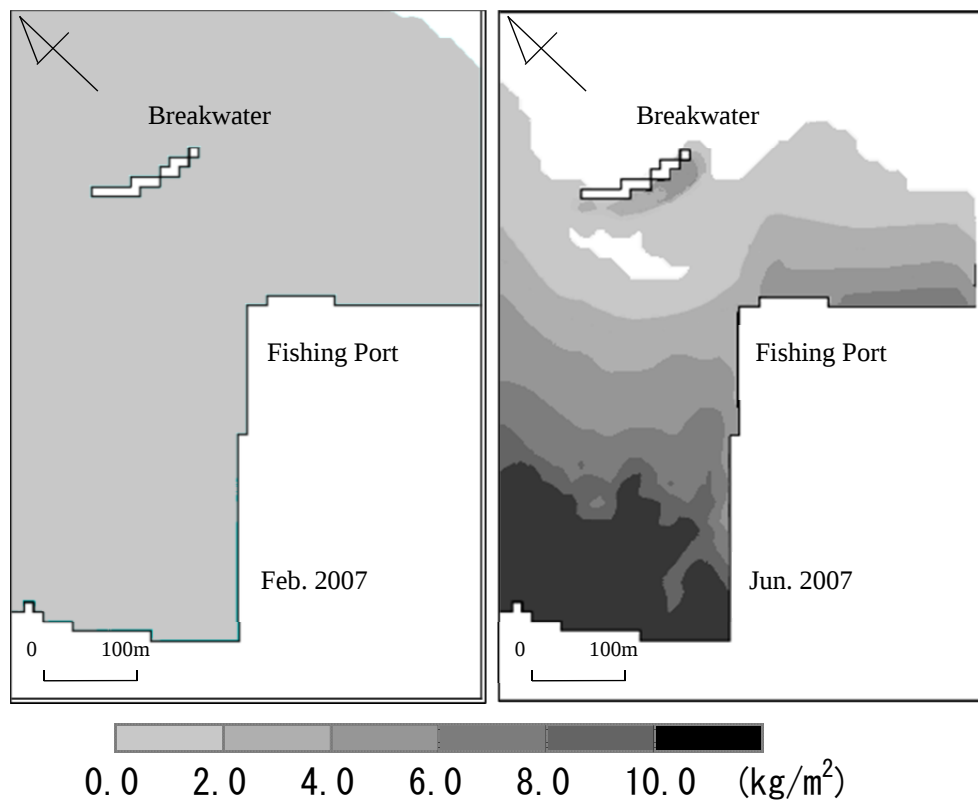


図 2-5 ホソメコンブの生育分布

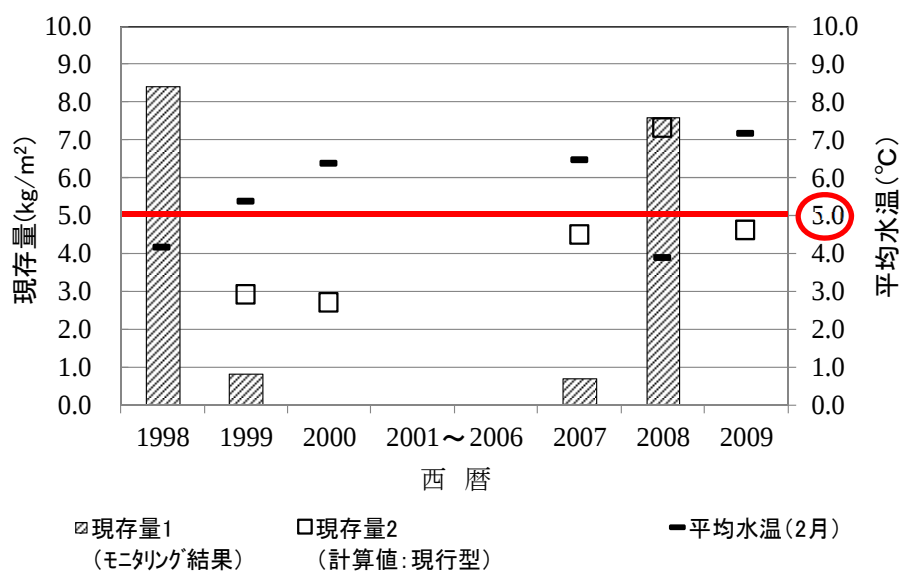


図 2-6 現地調査とモデルによるホソメコンブ現存量の比較

2.4 海藻現存量の年変動特性

2.4.1 対象区域

計算領域は図 2-7 に示すとおり小段沿い横方向 10m 毎に 10 地点とした(小段横方向長さ約 100m)。水深は全地点 4m である。また、小段上の堤端部は回折波の影響で波当たりが強く、中央部は波が遮断されるため波当たりが弱い。尚、後述する透過率は小段前後の測定波高の 0.25 とする。

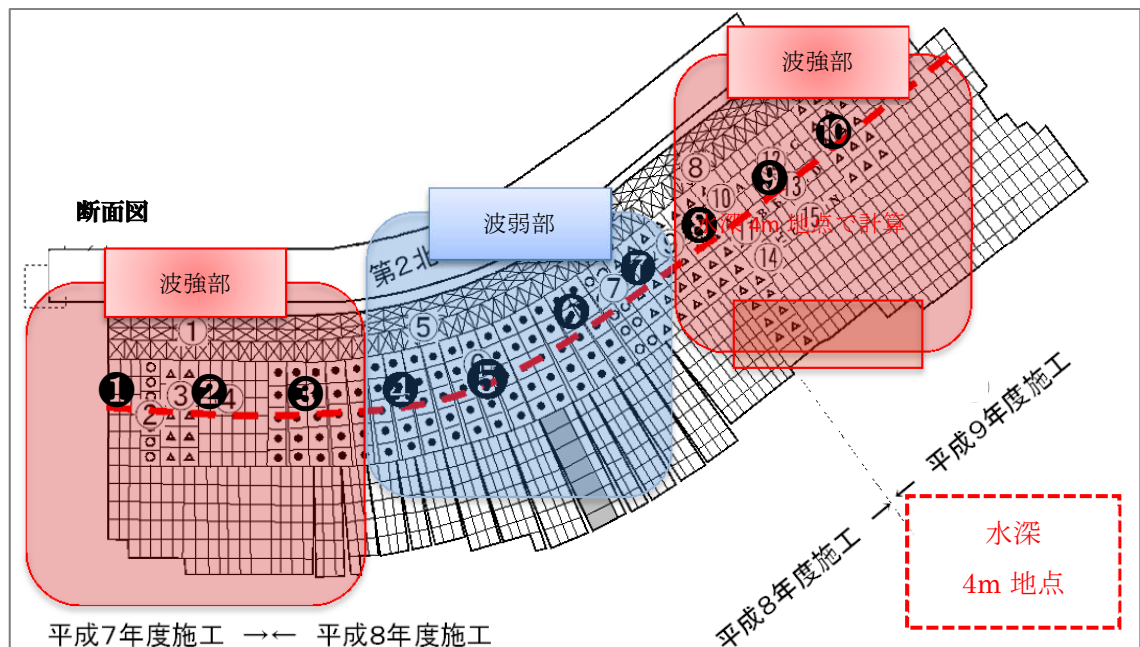


図 2-7 背後小段上の調査点

2.4.2 各環境条件の年変動特性

寿都漁港背後小段上の波浪を GPV 観測値、水温を現地観測値、海藻量を過去の調査データを基に 2007-2013 年 7 か年に渡る変動特性を求めた。

(1) 波浪年変動

波浪は GPV 測定値より 3 時間ごとの波浪を月平均値、10 日平均値としてそれぞれ求めた。対象領域に最も近い C 地点における観測値を用いた。以下に測定箇所(図 2-8)と、7 か年に渡る波浪変動(図 2-9)を示す。主に北～北西向きの波が主であることがわかる。2013 年がか

なり高波浪であったために海藻繁茂に好条件であったと考えられる。また、海藻が繁茂する年は通常だと1～2月の時点で傾向が確認される。しかしながら、2013年は1、2月は海藻着生が全く見られなかったが、3月末に遅れて海藻着生が確認されるという例年に無い特徴がみられた。これは3月に大幅な高波浪が来襲していることに起因すると考えられる。よって、海藻の着生状況は年毎の物理環境により変動すると考えられ、海藻の成長開始時期が影響しているものと考えられる。



図 2-8 GPV 測定箇所

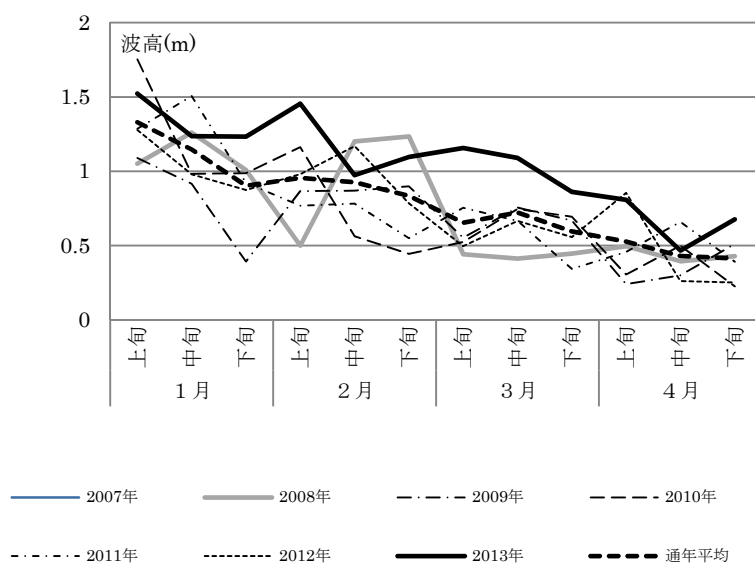


図 2-9 波浪年変動

(2) 水温年変動

現地観測値を基に，波浪と同様 2007-2013 年の 7 か年に渡り，月平均値・10 日平均値として求めた．以下に水温の年変動を図 2-10 に示す．7 か年通年平均値(黒点線)に対し，特に 2008 年は低水温，2009 年は高水温であることがわかる．

海藻成長には波浪，水温等の物理環境パラメータが大きく影響する．小段上海藻量の変動特性を示すが，その際に波浪・水温の年変動を海藻生長期に当たる 1-4 月に着目して次節で考察する．

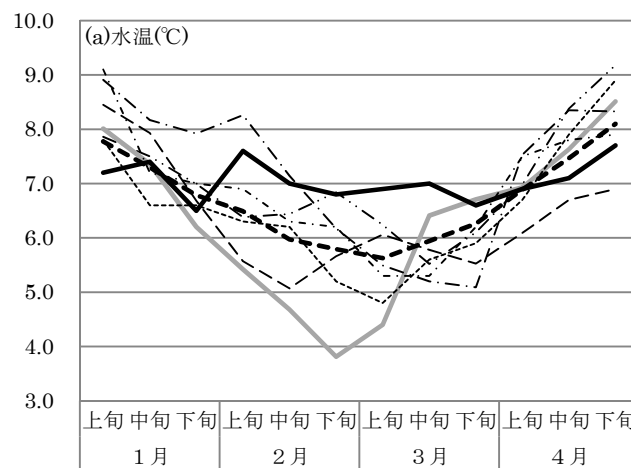


図 2-10 水温年変動

(3) 海藻量変動

小段上 10 地点の海藻量変動を過去の調査結果から同 7 か年にわたり求めた (図 2-11)。これまで海藻量調査は一年に 2 度、主に 2 月と 6 月に実施されてきた。結果は繁茂期 6 月の提端部(波強部)累計値と中央部(波弱部)累計値である。波当たりの強い提端部の方において海藻が高繁茂であることがわかる。中でも最も繁茂したのが 1998 年と 2008 年で、約 20kg の繁茂量である。以降、数年間無繁茂(磯焼け)状態が続いたが、昨年 2013 年に海藻繁茂が確認された。また、海藻が繁茂する年は、1~2 月に海藻繁茂が確認されるのが通常だが、2013 年は 3 月末に遅れて海藻繁茂が確認されるという異例の特徴がみられた。海域環境データがある 2007 年以降における海藻着生と海域環境を整理すると次のことが言える。

2007 年において水温は平年並みで波浪データは欠測で不明だが高波浪だったことが推定される。2008 年は海藻が大量に繁茂した。例年に比べ大幅な低水温状況にあり、2 月初期の高波浪も好影響となった。2009 年は海藻が全く無い状態。大幅な高水温がウニの摂餌活動を活発にして磯焼けになったものと推察される。2010 年、2011 年とも磯焼け状態が継続されている。2013 年は藻場が回復した。しかしながら従来の 2 月成長と異なり 3 月末から成長を開始している。水温は平年に比べて高いが、波浪が大幅に高いことから 3 月末に遅れて発現したという例年に無い特徴がみられた。これは海藻の成長開始時期が影響しているものと考えられる。

この海藻が遅れて出現し成長するという特性は従来の調査結果からは判断できない。そこで、本研究では月別による海藻成長特性を把握するため 2013 年の 3 月、4 月、5 月の期間に月毎の調査を実施した。その結果を図 2-12 に示す。

月別・場所別によって海藻繁茂状況を示す繁茂レベルは異なっている。特にコンブやワカメ等の大型海藻が 3 月から出現して 4 月、5 月に優先している状況にある。よって、既存の調査手法(発芽期、繁茂期のみ)では海藻成長特性を把握できないと考えられ、月別に調査することにより海藻の成長段階における特性も把握する必要があると考えられる。

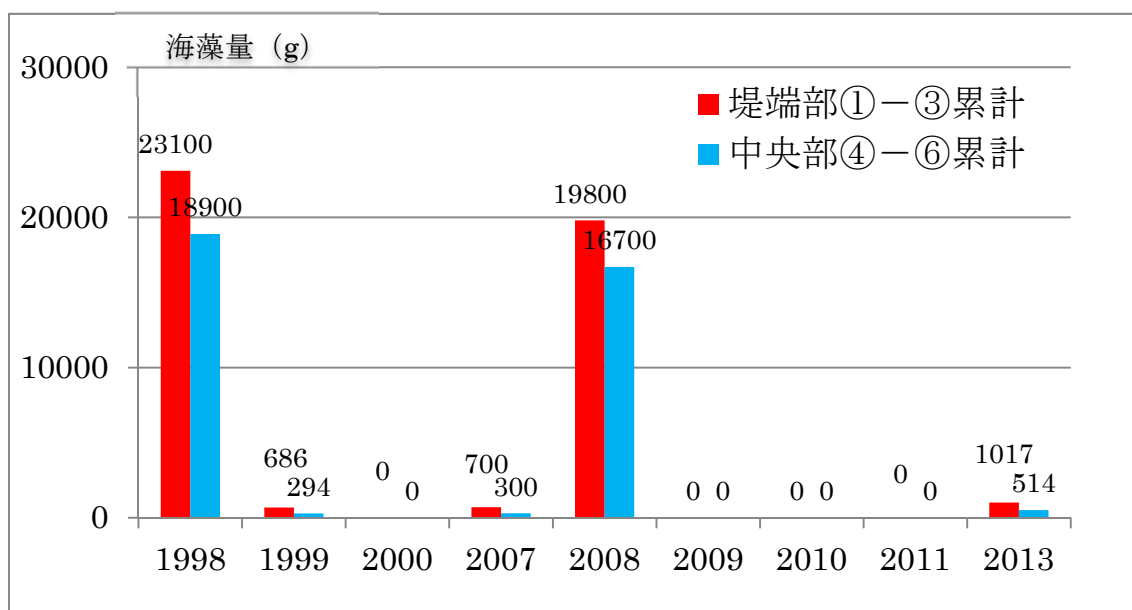


図 2-11 海藻量年変動

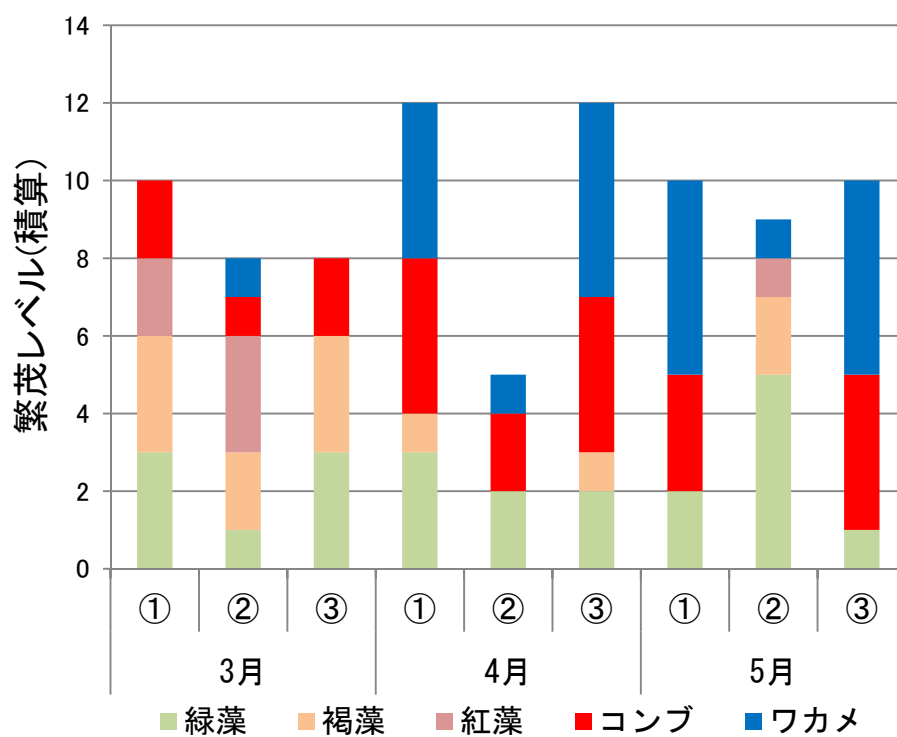


図 2-12 海藻現存量の月別変化 (2013 年)

2.5 まとめ

本研究において、自然環境調和型構造物の藻場造成機能に関して、建設当時（1998 年）からの海藻量の経年変化特性を明らかにした。また、2008 年からは、海藻成長に影響を与える水温・波高の物理環境条件と海藻成長との関連性について明らかにした。さらに、2013 年からは海藻生長量の月別変化について検討した。海藻量は年毎の物理環境に大きく依存し、特に低水温・高波浪が海藻繁茂に好条件である。また、海藻の成長特性（発芽時期）は年毎の物理環境により変化する。よって、海藻現存量を推定する際は海藻成長開始時期の検討が必要である。波浪・水温等のパラメータの平均間隔を変えると、短期間で大きく変動し、ウニの摂餌活動に大きく影響することが判明した。

参考文献

- 1) 丸山修治，坪田幸雄，竹田義則：ウニによる食害の低減を目的とした藻場機能付き防波堤の構造に関する一考察，第 43 回北海道開発局技術研究発表会，2000.
- 2) 桑原伸司，佐々木秀朗，北原繁志，松山恵二，清野克徳，谷野賢二：藻場生産力予測シミュレーションモデルの開発，海岸工学論文集，第 45 巻，pp. 1101-1105，1998.
- 3) 桑原伸司，松山恵二，竹田義則，北原繁志，清野克徳，金川 均，谷野賢二：藻場生産力予測シミュレーションモデルの開発(第 2 報)，海岸工学論文集，第 46 巻，pp. 1156-1160，1999.
- 4) 佐藤 仁，熊谷直哉，福田光男，吉田 徹，黄金崎清人：防波堤背後小段の藻場環境について，平成 21 年度日本水産工学会学術講演会講演概要集，pp. 211-214，2009.

第3章 海藻現存量の推定法

3.1 概説

山下ら¹⁾はウニの摂餌と海藻成長の月別特性を考慮し、ウニの摂餌量のみで簡易的に海藻繁茂の限界水深を推定する手法を提案した。しかしながら、さらに海藻量を定量的に予測するためには、水温・流速・栄養塩濃度・日射量など多項目のデータが必要なため、十分な検討が為されていない。

よって、上記の環境因子に関わるデータを有している寿都漁港周辺海域を対象として、現地モニタリングにより海藻量と物理環境の年変動特性を明らかにする。さらに、従来の海藻現存量推定法を改良し、近年の環境変動に対応した定量的な海藻現存量の推定を検討することとする。

推定に用いる藻場現存量モデルは海藻群落の形成に影響を与える海域の環境因子（光・波浪・流況・栄養塩等）および食害動物の影響を同時に考慮し、ホソメコンブの現存量を定量的に求めるものである。

前述の推定法の改良内容を表 3-1 に示す。まず、海藻成長開始日を従来の1月1日から1月1日開始、2月1日開始、3月1日開始に変化させて海藻成長の特性を把握し、最適な開始日を検討することとする。その際、海藻の光合成特性である係数 a （光飽和度）、係数 b （初期勾配）は、開始日の違いにより係数を再設定する必要がある。また、物理環境のパラメータについて、現行の計算は月平均で行っている。しかしながら、水温や波高の値は10日毎に数値は大きく変化するため、海藻現存量が実際と異なる可能性がある。よって、従来の月平均と10日平均で比較した改良法の検討を行った。推定法の改良手順を図 3-1 に示す。

表 3-1 海藻現存量推定法の改良内容

パラメータ	項目	改良内容
生態特性	a, b	改良式構築(成長開始日により変化)
	K, F, BL, PL	累計生産量($\sum P_g$)の関数に改良
物理環境	光, 波浪, 水温等	平均間隔を改良(月平均→10日平均)

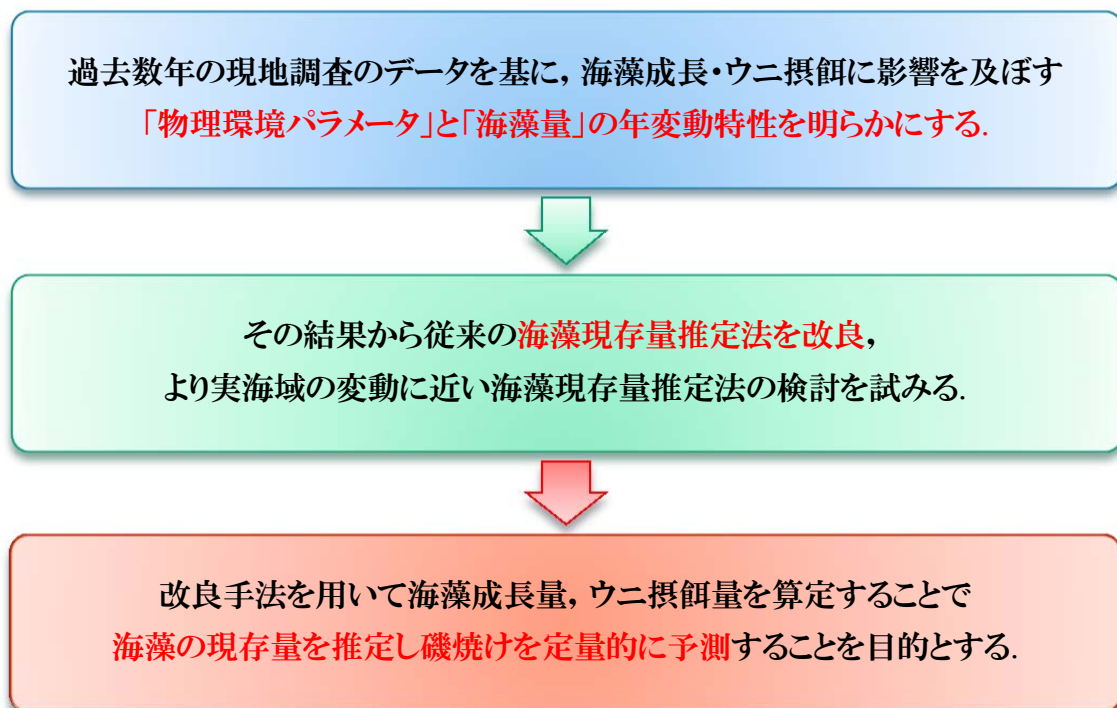


図 3-1 推定法の改良手順

3.2 海藻現存量推定法の改良

3.2.1 平均間隔別の物理環境パラメータ変動

海藻成長・ウニ摂餌量に影響を及ぼす物理環境パラメータ(波浪・水温・日射量等)は基本的には月平均値として使用される。しかし、序論でも述べたように実際の物理環境は時々刻々と変化し、それにより海藻成長、ウニ摂餌等も変化するものである。だが実際にそれらのパラメータで現地観測値として数時間毎に調査されている項目は少ないのが現状である。

本研究では、平均間隔を従来の月平均値から縮めることで、現地の物理環境変動に近づけ、より実海域の海藻変動に近い現存量推定法の検討を試みた。具体的には図 3-2 に示すとおり、従来の月平均計算を 10 日平均計算へと改良する試みを行う。

図より、従来型の月平均での整理では波高は冬季から春季に向かって徐々に小さくなるといった大まかな波高変化しか現れていない。しかしながら、10 日平均で整理すると低気

圧の通過等による高波浪や逆に静穏時の波高状況が表せるようになっている。この様に従来の月平均値を10日平均として平均間隔を縮めることで、パラメータは大きく変動することがわかる。また、磯焼けの主要因であるウニの摂餌は微量な流速の変動でも大きく影響することが知られており、10日平均とすることでより現地の摂餌活動及び海藻成長の変動に近づけることができるものと推察される。本研究ではこの月平均値、10日平均値のそれぞれを用いて計算することでその妥当性の検証も行うものとする。

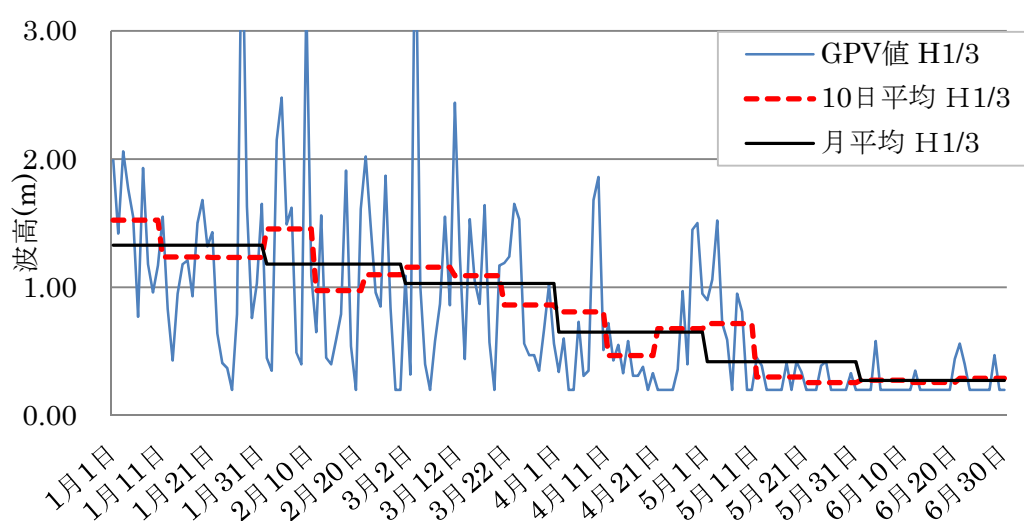


図 3-2 平均間隔による波高変動比較 (2013 年)

3.2.2 計算開始時期の改良

通常だと海藻が繁茂する年は1, 2月の時点で海藻着生が確認されるが、2013年のように海藻が3月末から確認されるというように、海藻の成長開始時期は年毎の物理環境により変動することが第2章で明らかとなっている。

そこで本研究では、図3-3に示すとおり、従来の1月1日から計算を1月, 2月, 3月1日からそれぞれ計算開始と改良した。実際には海藻成長にかかわるパラメータを開始時期によって変動させるものとする。

海藻成長量だけを見れば、当然ながら1月1日から成長開始した場合が先行して成長し、どのケースも徐々に成長量は増加していく。しかしながら、ウニの摂餌量や海藻の先枯れや流出の条件によってはマイナスの部分が多くなり、成長の途中段階で海藻が消失するいわゆる磯焼け状態になる状態が発生するものと推察される。

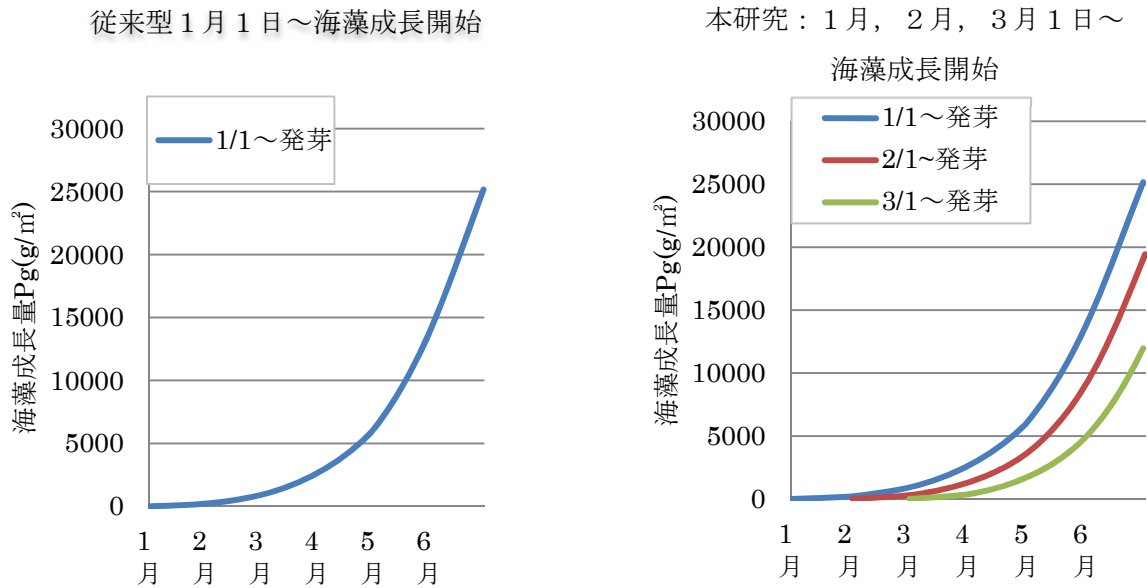


図 3-3 計算開始時期の変化

3. 2. 3 生態特性パラメータの設定

数値計算上において開始時期を変化させると前出の式(1.1)の生態特性のパラメータである a , b , m , K , F についても変化させる必要がある. 以下に各パラメータの改良内容を示す.

(1) 光飽和度 a

a は光飽和度である. 光飽和度海藻がある程度大きくなると飽和状態となり光合成速度の加速が止まる, その地点を飽和点という. 海藻が大きいほど飽和点は遅く訪れるため, a の値は大きくなる. a については既往の研究が極めて少なく, 従来は通年を通して一定値を用いるか, 月毎の実験を用いていたが, 本研究では表 3-2 に示す 6 月までの実験値¹⁾から式化を試みた.

[定義]

実験値より, 1 月 1 日から 2 月末日までを 0.018, 4 月中旬以降 6 月末日までは 0.044 と定義し, その間を直線近似により式 (3.1) を設定した. 式は $(x, y) = (59, 0.018), (105, 0.044)$ を通る直線で近似. x 軸は最大で 180 日 (1 月 1 日の場合) である.

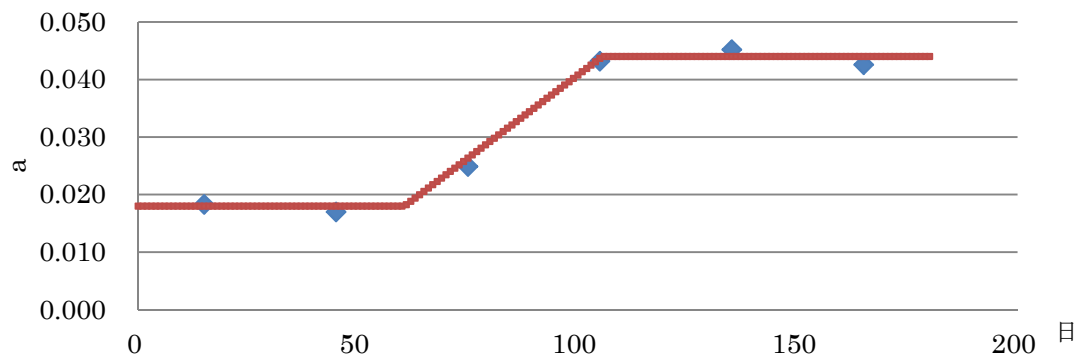
$$a = \frac{0.026}{\frac{45}{180}(180 - A)} x - 0.017 \quad (3.1)$$

$$a \leq 0.018: a = 0.018, a \geq 0.044: a = 0.044$$

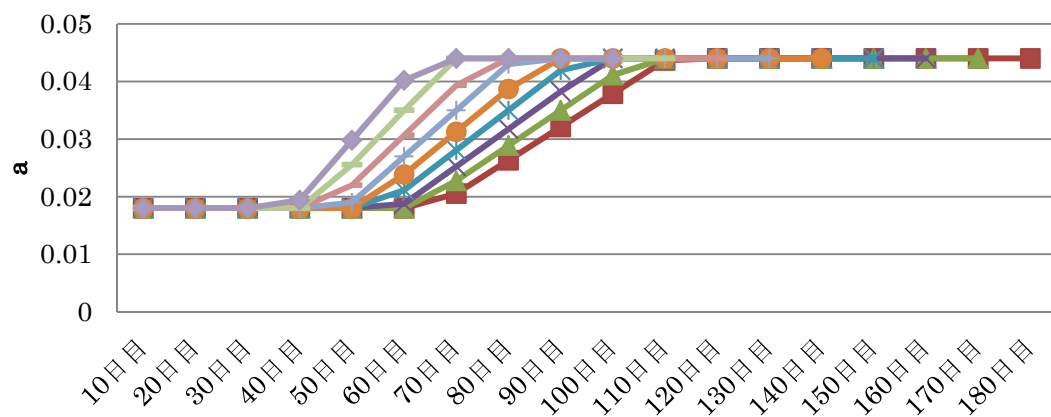
A : 計算開始日, x : 計算開始日からの経過日数

表 3-2 実験値

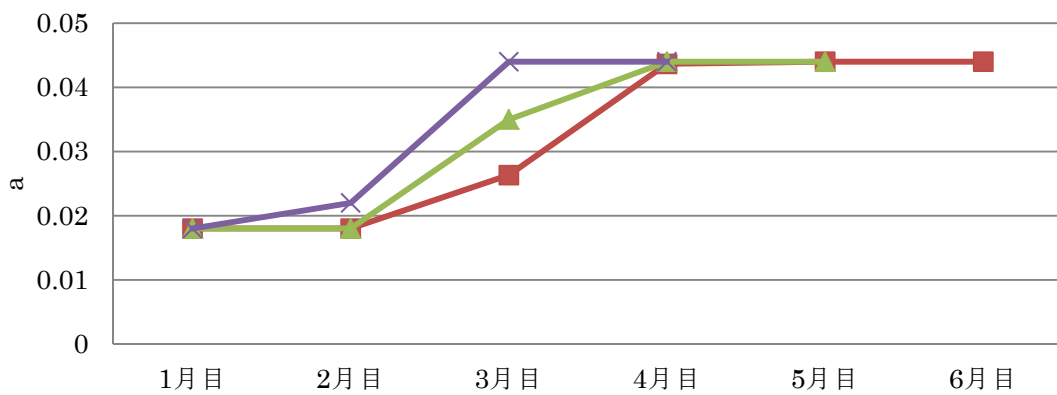
unit	1 月	2 月	3 月	4 月	5 月	6 月
a 実験値	0.018	0.017	0.025	0.043	0.045	0.043



a 実験値と定義値



a 10日計算時



a 月計算時

図 3-4 光飽和度 a の推移

図 3-4 に示すように計算開始時期を変えることでそれぞれ値が変わる。表 3-3, 3-4 に各計算開始時期における a 値の一覧表を示す。なお、開始時期は 1, 2, 3 月, 月毎, 10 日毎で 6 月末迄である。

表 3-3 a の値 (その 1)

月毎計算, 開始時期による a 一覧表				
	項目数	180	150	120
	開始時期	1/1~	2/1~	3/1~
	$x \setminus A$	0	30	60
1 月目	15	0.018	0.018	0.018
2 月目	45	0.018	0.018	0.022
3 月目	75	0.026	0.035	0.044
4 月目	105	0.044	0.044	0.044
5 月目	135	0.044	0.044	
6 月目	165	0.044		
*1 月目の計算の場合 15 日目の値をとるものとする				

表 3-4 a の値（その 2）

[各開始時期における a 一覧表]

10 日毎計算，開始時期による a 一覧表										
	項目数	180	170	160	150	140	130	120	110	100
	開始時期	1/1~	1/11~	1/21~	2/1~	2/11~	2/21~	3/1~	3/11~	3/21~
	x\A	0	10	20	30	40	50	60	70	80
10 日目	5	0.018	0.018	0.018	0.018	0.018	0.018	0.018	0.018	0.018
20 日目	15	0.018	0.018	0.018	0.018	0.018	0.018	0.018	0.018	0.018
30 日目	25	0.018	0.018	0.018	0.018	0.018	0.018	0.018	0.018	0.018
40 日目	35	0.018	0.018	0.018	0.018	0.018	0.018	0.018	0.018	0.019
50 日目	45	0.018	0.018	0.018	0.018	0.018	0.019	0.022	0.026	0.03
60 日目	55	0.018	0.018	0.019	0.021	0.024	0.027	0.031	0.035	0.04
70 日目	65	0.021	0.023	0.025	0.028	0.031	0.035	0.039	0.044	0.044
80 日目	75	0.026	0.029	0.032	0.035	0.039	0.043	0.044	0.044	0.044
90 日目	85	0.032	0.035	0.038	0.042	0.044	0.044	0.044	0.044	0.044
100 日目	95	0.038	0.041	0.044	0.044	0.044	0.044	0.044	0.044	0.044
110 日目	105	0.044	0.044	0.044	0.044	0.044	0.044	0.044	0.044	
120 日目	115	0.044	0.044	0.044	0.044	0.044	0.044	0.044		
130 日目	125	0.044	0.044	0.044	0.044	0.044	0.044			
140 日目	135	0.044	0.044	0.044	0.044	0.044				
150 日目	145	0.044	0.044	0.044	0.044					
160 日目	155	0.044	0.044	0.044						
170 日目	165	0.044	0.044							
180 日目	175	0.044								
*10 日目の計算の場合 5 日目の値をとるものとする										

(2) 立ち上がり勾配 b

b は光合成速度の初期勾配(立ち上がり勾配)である. a 同様に既往の研究が極めて少なく, 従来は通年を通して一定値を用いるか, 月毎の実験を用いていたが, 本研究では表 3-5 に示す 6 月までの実験値から式化を試みた.

[定義]

実験値より切片を 0.10, 4 月の中旬以降 6 月末日までは 0.34 で一定値として定義し式 (3.2) を設定する. 式は $(x, y) = (0, 0.10), (105, 0.34)$ を通る直線で近似した.

$$b = \frac{0.24}{\frac{105}{180}(180 - A)}x + 0.10 \quad (3.2)$$
$$b \geq 0.34: b = 0.34$$

A : 計算開始日, x : 計算開始日からの経過日数

表 3-5 実験値

unit	1 月	2 月	3 月	4 月	5 月	6 月
b 実験値	0.12	0.15	0.26	0.38	0.37	0.28

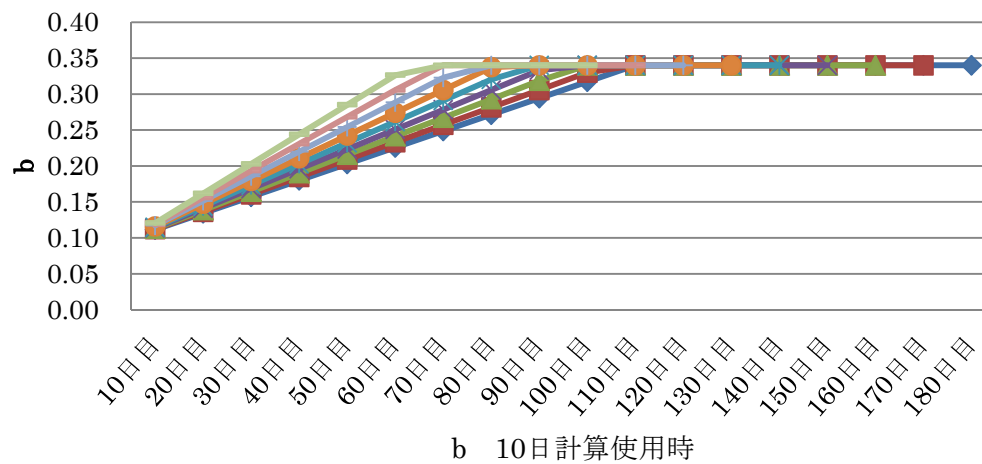
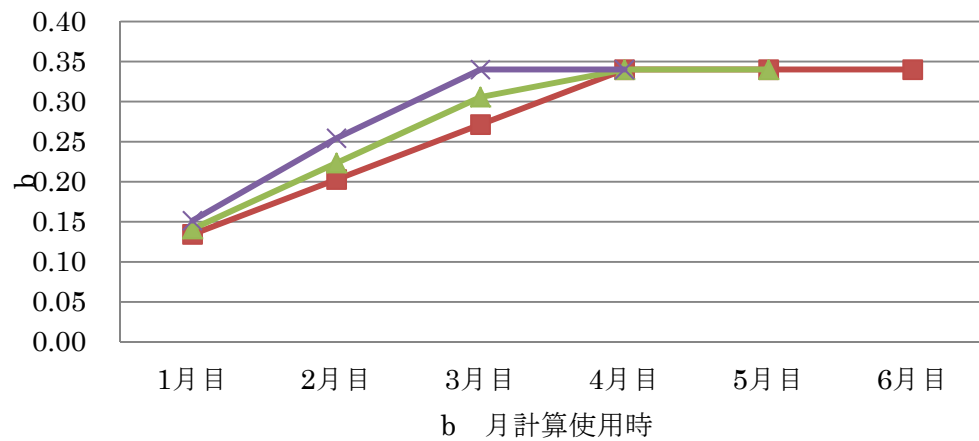
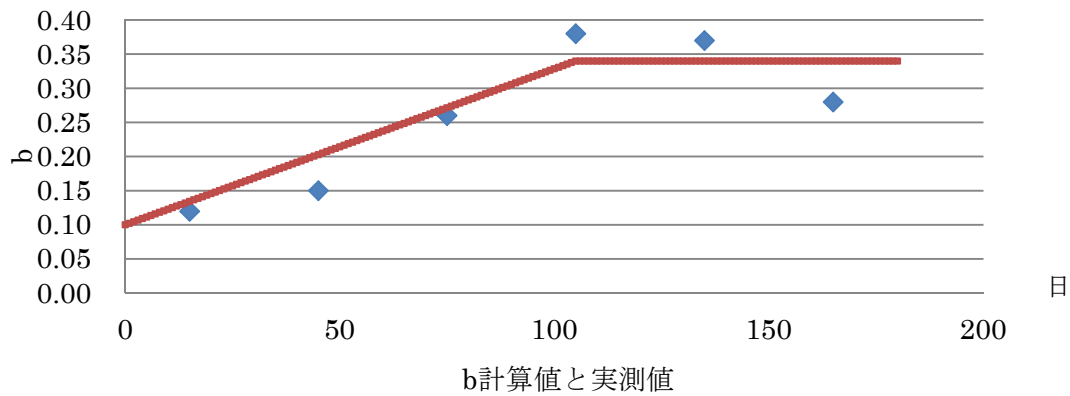


図 3-5 立ち上がり勾配 b の推移

b も a と同様に開始時期により値が変化する．表 3-6, 3-7 に各計算開始時期における b 値の一覧表を示す．

表 3-6 b の値（その 1）

月毎計算，開始時期による b 一覧				
	項目数	180	150	120
	開始時期	1/1~	2/1~	3/1~
	x \ A	0	30	60
1 月目	15	0.13	0.14	0.15
2 月目	45	0.20	0.22	0.25
3 月目	75	0.27	0.31	0.34
4 月目	105	0.34	0.34	0.34
5 月目	135	0.34	0.34	
6 月目	165	0.34		
*1 月目の計算の場合 15 日目の値をとるものとする				

表 3-7 b の値（その 2）

[各開始時期における b 一覧表]

10 日毎計算，開始時期による b 一覧										
	項目数	180	170	160	150	140	130	120	110	100
	開始時期	1/1~	1/11~	1/21~	2/1~	2/11~	2/21~	3/1~	3/11~	3/21~
	x \ A	0	10	20	30	40	50	60	70	80
10 日目	5	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.12	0.12	0.12	0.12
20 日目	15	0.13	0.14	0.14	0.14	0.14	0.15	0.15	0.16	0.16
30 日目	25	0.16	0.16	0.16	0.17	0.17	0.18	0.19	0.19	0.20
40 日目	35	0.18	0.18	0.19	0.20	0.20	0.21	0.22	0.23	0.24
50 日目	45	0.20	0.21	0.22	0.22	0.23	0.24	0.25	0.27	0.29
60 日目	55	0.23	0.23	0.24	0.25	0.26	0.27	0.29	0.31	0.33
70 日目	65	0.25	0.26	0.27	0.28	0.29	0.31	0.32	0.34	0.34
80 日目	75	0.27	0.28	0.29	0.31	0.32	0.34	0.34	0.34	0.34
90 日目	85	0.29	0.31	0.32	0.33	0.34	0.34	0.34	0.34	0.34
100 日目	95	0.32	0.33	0.34	0.34	0.34	0.34	0.34	0.34	0.34
110 日目	105	0.34	0.34	0.34	0.34	0.34	0.34	0.34	0.34	
120 日目	115	0.34	0.34	0.34	0.34	0.34	0.34	0.34		
130 日目	125	0.34	0.34	0.34	0.34	0.34	0.34			
140 日目	135	0.34	0.34	0.34	0.34	0.34				

150 日目	145	0.34	0.34	0.34	0.34					
目	155	0.34	0.34	0.34						
170 日目	165	0.34	0.34							
180 日目	175	0.34								
*10 日目の計算の場合 5 日目の値をとるものとする										

(3) 葉状体部の光の透過率 m

m は葉面の光の透過率を表す。m についても既往の研究が極めて少ない為、本研究では通年平均値として $m=0.19$ とした。

(4) 群落吸光係数 K

K は海藻群落の吸光係数である。全体としての群落の大きさに対する吸光率を表しており、成長初期においては吸光係数は高いが、海藻群落が大きくなると群落自体に阻害されることから 6 月以降はほぼ一定値となる。本研究では表 3-8 に示す 6 月末までの実験値を用いて多項式近似（図 3-6）により式 (3.3) を設定した。当月の K 値は前月までの累計成長量 ΣPg によって決定されるものとする。

$$K = -6.0 \times 10^{-11}(\Sigma Pg)^2 + 1.0 \times 10^{-5} \times (\Sigma Pg) + 0.42 \quad (3.3)$$

表 3-8 実験値

unit	12 月	1 月	2 月	3 月	4 月	5 月	6 月
K 実験値	0.75	0.50	0.40	0.30	0.70	0.69	0.66

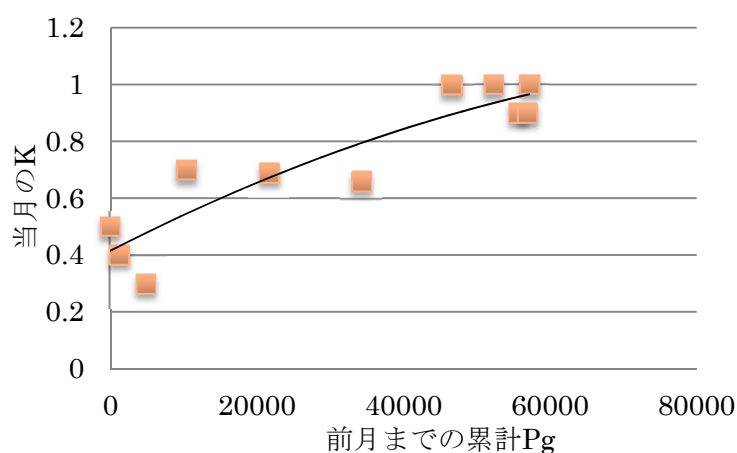


図 3-6 K 値の推移

(5) 葉面積指数 F

F は葉層全体の葉面積指数 (m^2/m^2) であり、海藻の葉の面積を表す。従来式では海藻発芽時点の F 値が過大評価され、Pg への影響が大きいと考えられたことから本研究では F の初期値(切片: $P_g=0$ 時)を 0.16 とし、表 3-9 に示す 6 月末までの実験値から多項式近似(図 3-7) により式(3.4)を設定した。K と同様に当月の F は前月までの累計生産量 ΣP_g によって決定される。

また、本計算では F の初期値を 0.16 としたが、F の値により Pg は大きく変化する。F の初期値の設定は成長量計算において非常に重要な事項である。

$$F = -3.0 \times 10^{-9}(\Sigma P_g)^2 + 4.0 \times 10^{-4} \times (\Sigma P_g) + 0.16 \quad (3.4)$$

表 3-9 実験値

unit	12 月	1 月	2 月	3 月	4 月	5 月	6 月
F 実験値	0.02	1.32	2.20	2.66	6.90	9.00	13.30

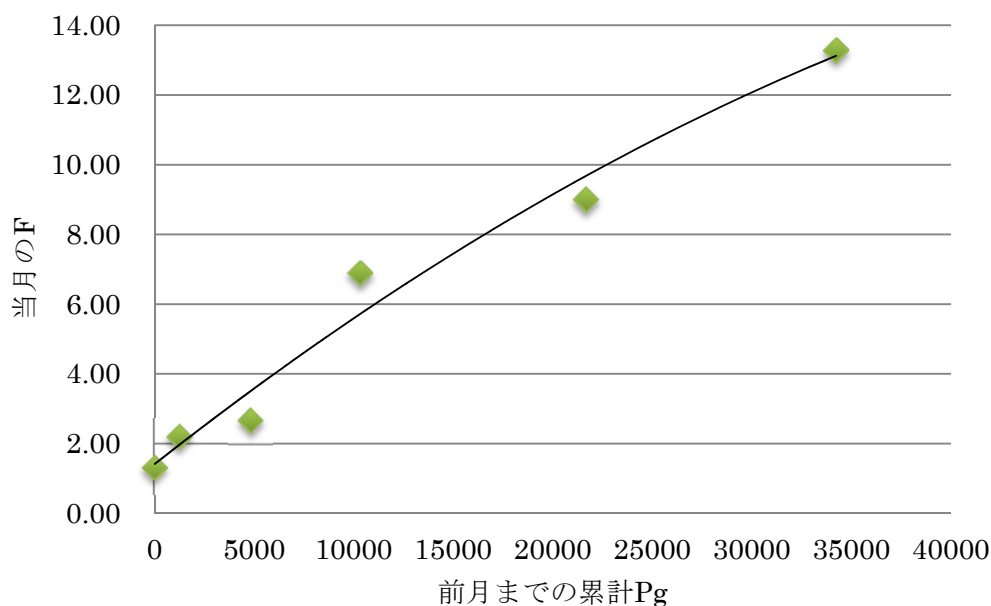


図 3-7 F 値の推移

以上のように、Pg 算定における海藻自体の生態特性パラメータである a, b, m, K, F の改良を行った。本計算では計算開始時期を変えるにあたって上記の改良式を用いるものとする。尚、本改良式は全て 1 月から 6 月末まで、6 月末最大繁茂を前提として改良式を決定しており、6 月以降の海藻の衰退傾向については考慮していない。よって、通年に及ぶ海藻成長量の計算の際には新たな改良式を提案する必要がある。

3.2.4 純生産量 Pn 算定式の改良

式 (3.5) に示す純生産量 Pn の算定方法について改良を行った。尚, Pg 改良と同様, 本研究では 1 月から 6 月末までの計算であり, 開始時期は変化しても最大繁茂期は 6 月末であるという前提の下で改良を行っている。また, 開始時期を変えるにあたって一月をすべて 30 日として定義した。

$$Pn = Pg \times Pn / Pg \times \beta_1 \times \beta_2 \quad (3.5)$$

ここに,

Pn/Pg : 呼吸等による消費量比

β_1 : 水温による成長量への影響係数

β_2 : 流速・栄養塩による成長量への影響係数

これに関し, Pn/Pg 比, β_2 については改良を行い, β_1 については既往の計算式を用いた。以下に改良内容とその計算式を示す。

(1) Pn/Pg 改良

Pn/Pg は純生産量/生産量であり, 生産量から呼吸等による消費量を差し引いた純生産量との比である。Pn/Pg 比についての既往の研究は極めて少なく, 従来は表 3-10 に示す松山による実験値の結果を月毎に使用して行われてきた。松山の実験結果によると, Pn/Pg 比は年間を通じ約 0.55 程度で, このことは約 45 パーセントが呼吸等により消費されていることを表す。本研究では 1 月から 6 月までを対象としているため, 表 3-11 及び図 3-8 に示す 1 月から 6 月までの平均値である Pn/Pg = 0.58 を一定値として与えることで簡易化した。

表 3-10 忍路湾での Pn/Pg 比の実験値 (松山²⁾)

月	12	1	2	3	4	5
Pn/Pg	0.616	0.495	0.534	0.693	0.656	0.61
月	6	7	8	9	10	11
Pn/Pg	0.509	0.389	0.349	0.161	-0.09	-0.549

表 3-11 Pn/Pg 比の実験値と改良値

unit	1 月	2 月	3 月	4 月	5 月	6 月
実験値	0.50	0.53	0.69	0.66	0.61	0.51
改良値	0.58					

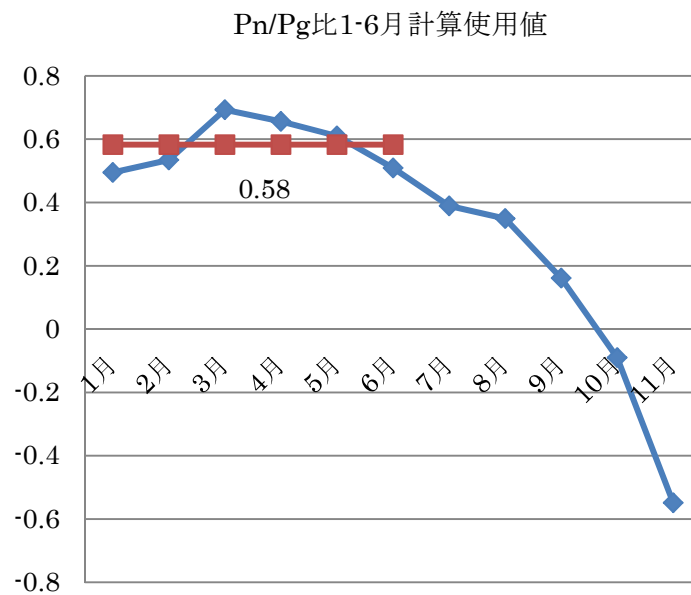


図 3-8 Pn/Pg 比

(2) 水温による影響係数 β_1

β_1 は水温による海藻成長率への影響係数である。 β_1 は水温の増加にともない増加し, 5, 6 月の平均水温である約 17 度(最適水温)前後をピークとし, 以降減少する。 β_1 は式(3.6)を用いる。この式による成長率 β_1 の変化を図 3-9 に示す。

$$\beta_1 = \frac{-0.0104T^3 + 0.1182T^2 + 4.4938T + 38.178}{100} \quad (3.6)$$

T : 水温(°C)

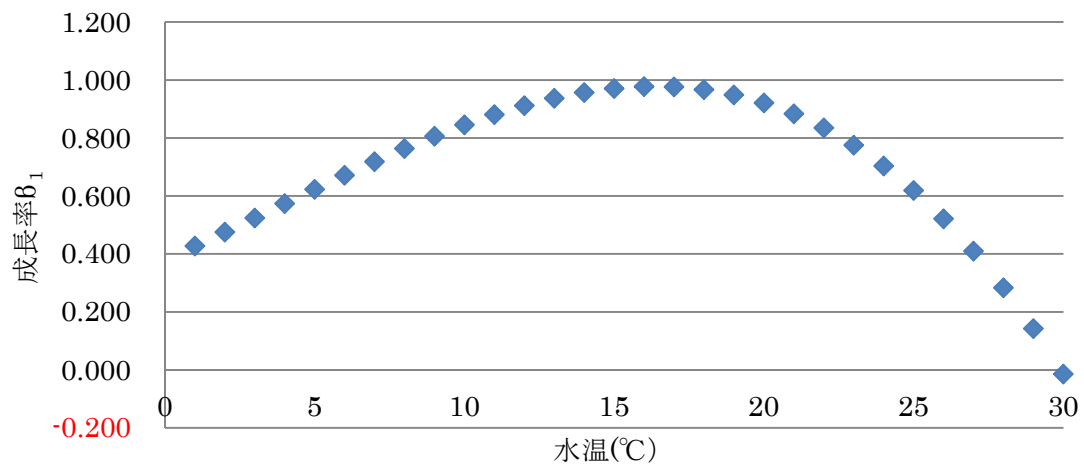


図 3-9 水温による成長率 β_1 の値

(3) 流速, 栄養塩による生産率 β_2

β_2 は流速, 栄養塩濃度(硝酸窒素濃度)を変数とする海藻成長率への影響係数である。図 3-10, 3-11 に示すとおり β_2 は振動流速が大きいほど, 栄養塩濃度が高いほど大きい。流速による影響は極めて小さく栄養塩濃度による影響が大きい。 β_2 算定には山下¹⁾らによる改良式(3.7)を用いる。

$$\beta_2 = 5 \times 10^{-5} \times U + (1.0 + 7.2 \times 10^{-3} \times N^2) \quad (3.7)$$

U: 振動流速(cm/s), N: 硝酸窒素濃度($\mu\text{g/l}$)

以上により純生産量 P_n 算定の改良を行った。

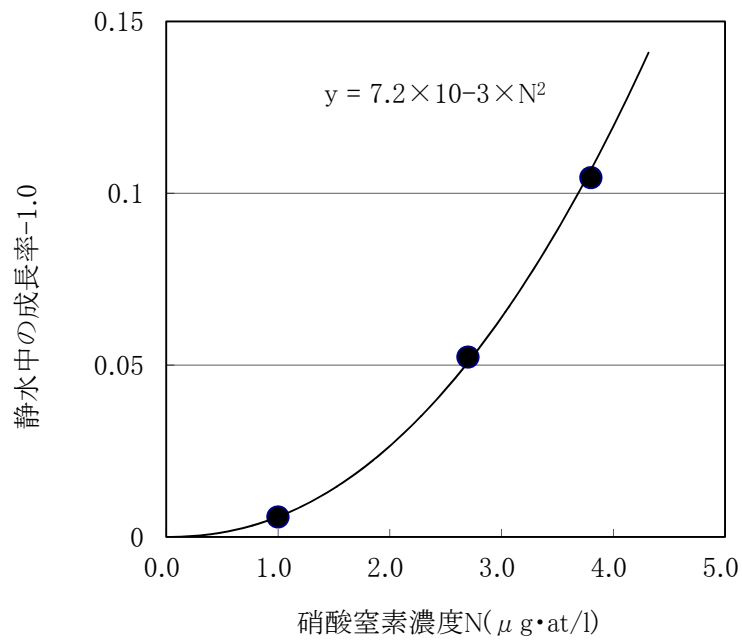


図 3-10 海藻成長率への影響係数

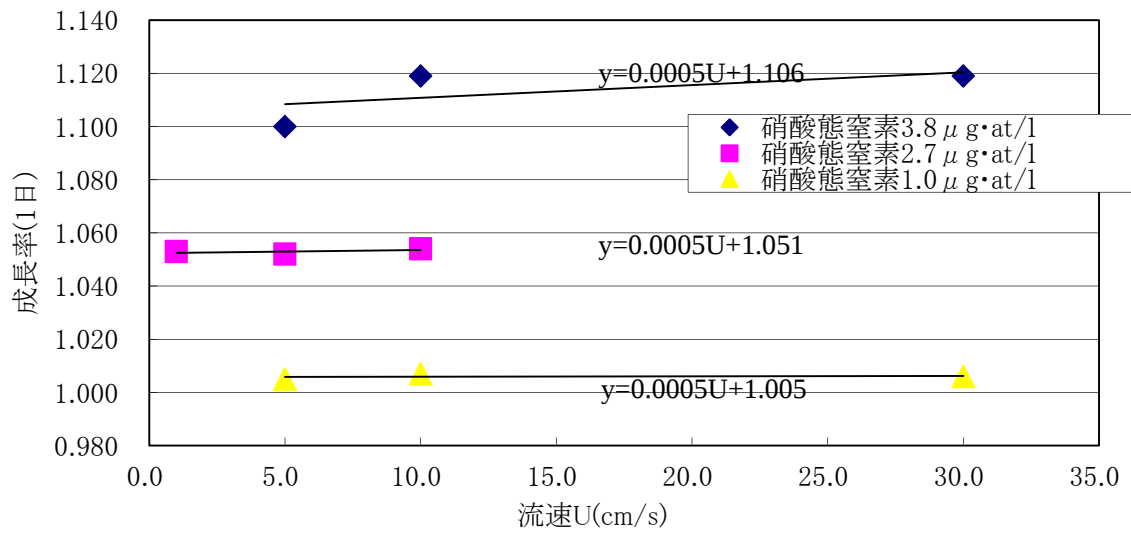


図 3-11 流速による補正

3.2.5 先枯れ量 Bl

B1 は海藻が枯れる際の損失量である．従来の B1 推定式は 12 月 1 日からの経過日数 D を変数として使用されてきたが，実際には先枯れ量は海藻量に影響すると考えられることから本研究では当日までの累計成長量 ΣPg の関数として改良を試みた．改良には表 3-12 に示す ΣPg の実験値と，B1 の従来式を D=中旬値として与え，12 月から 3 月迄，3 月から 6 月までをそれぞれ直線近似して式化した．以下に式 (3.8)，(3.9) を示し，計算結果を図 3-12 に示す．

$$0 \leq \Sigma Pg \leq 10338 (Bl \leq 21.2)$$

$$Bl \left(\frac{g}{m^2/day} \right) = 0.0021(\Sigma Pg) \quad (3.8)$$

$$10338 < \Sigma Pg (21.2 < Bl) \quad (3.9)$$

$$Bl \left(\frac{g}{m^2/day} \right) = 0.0015(\Sigma Pg) + 6.7882$$

ここに

ΣPg : 当日までの累計生産量

表 3-12 実験値

	備考	unit	12 月	1 月	2 月	3 月	4 月	5 月	6 月
pg	実験値		12	1211	3591	5524	11298	12592	12264
Σpg	実験値		12	1223	4814	10338	21636	34228	46492
D	中旬値	日	15	45	75	105	135	165	195
Bl	従来式	kg/月/m ²	0.08	0.16	0.32	0.64	1.15	1.78	2.20
BL	×1000/30	g/月/m ²	2.52	5.27	10.80	21.21	38.25	59.35	73.25

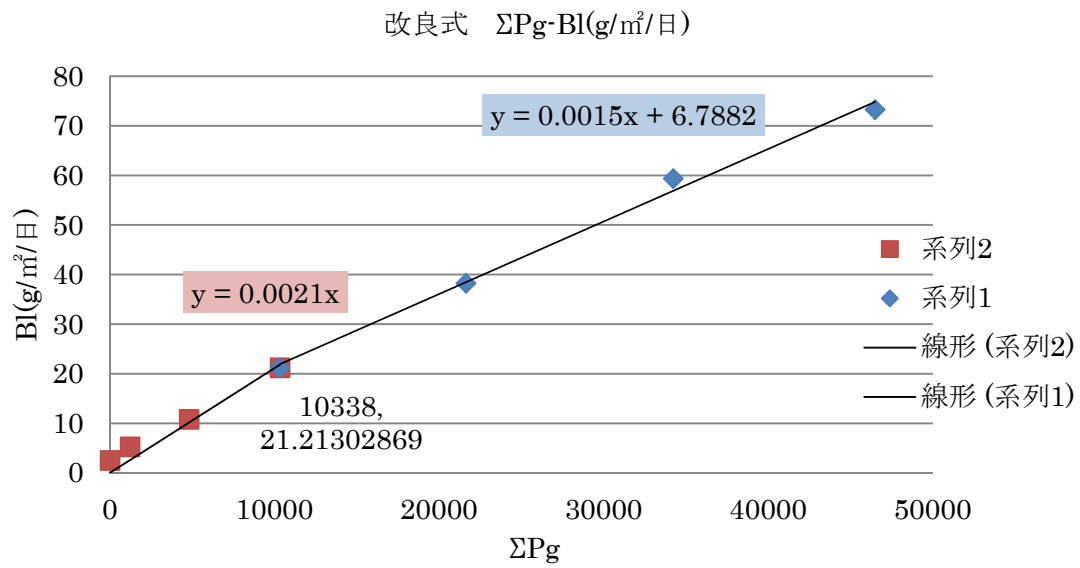


図 3-12 先枯れ量

本研究では 6 月末までを対象とするが，年間でみると先枯れ量は 6 月最大繁茂期にピークを迎える．先枯れ量 BI の年間推移を図 3-13 に示す．

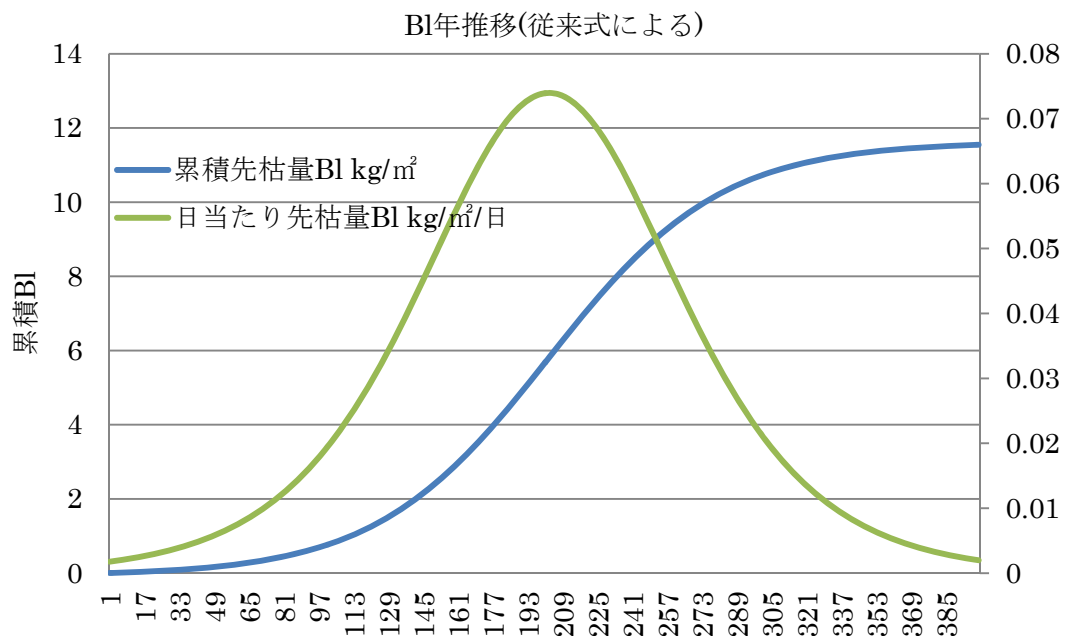


図 3-13 累積先枯れ量

3.2.6 流出量 Pl

Pl は海藻の流出(摩耗等による)の損失量である。Bl 同様，流出量は海藻量に影響すると考えられることから本研究では当日までの累計成長量 ΣPg の関数として改良を試みた。改良には表 3-13 に示す ΣPg の実験値と，Pl の従来式を D =中旬値として与え，12 月から 3 月迄を直線近似，3 月から 6 月まで多項式近似して式化した。以下に式 (3.10)，(3.11) を示し，計算結果を図 3-14 に示す。

$$0 \leq \Sigma Pg \leq 10338 (Pl \leq 4.19) \quad (3.10)$$

$$Pl \left(\frac{g}{m^2/day} \right) = 0.0004(\Sigma Pg)$$

$$10338 < \Sigma Pg (4.19 < Pl) \quad (3.11)$$

$$Pl \left(\frac{g}{m^2/day} \right) = 3.0 \times 10^{-8}(\Sigma Pg)^2 - 7 \times 10^{-4}(\Sigma Pg) + 8.1742$$

ここに， ΣPg ：当日までの累積生産量である。

表 3-13 実験値

	備考	unit	12 月	1 月	2 月	3 月	4 月	5 月	6 月
pg	実験値		12	1211	3591	5524	11298	12592	12264
Σpg	実験値	D=0 最少	12	1223	4814	10338	21636	34228	46492
D	中旬値		15	45	75	105	135	165	195
Pl	右式	kg/月/m ²	0.01	0.02	0.05	0.13	0.30	0.71	1.52
PL	×1000/30	g/月/m ²	0.28	0.69	1.71	4.19	10.13	23.63	50.64

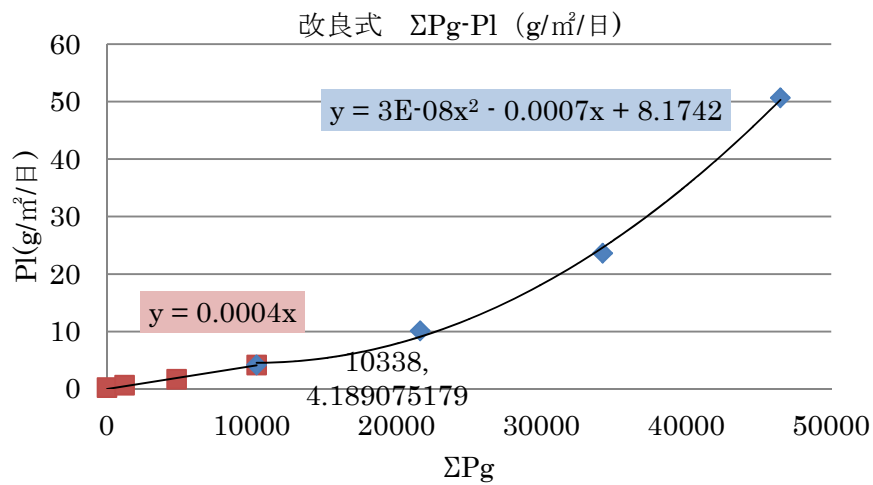


図 3-14 流出量

B1 同様、年間でみると流出量は 6 月最大繁茂期にピークを迎える。流出量 P_l の年間推移を図 3-15 に示す。

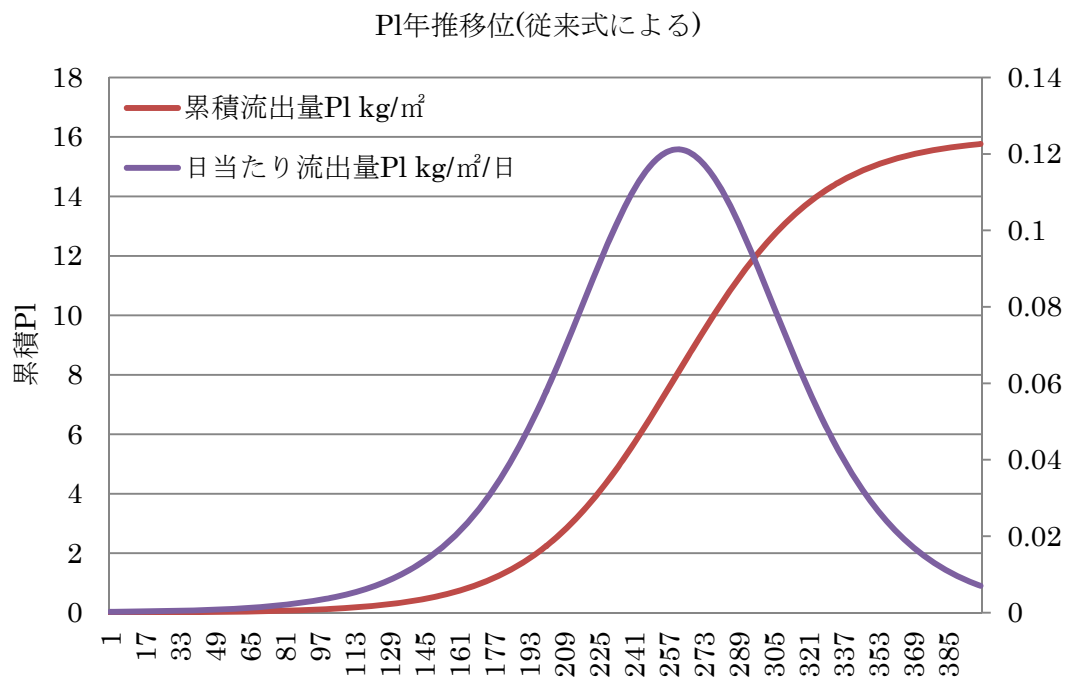


図 3-15 累積流出量

3.3 海藻現存量推定

本研究では月毎の海藻量データが最も多い年であり，特徴的な海藻変動特性の見られた2013年度を対象とし，現存量の計算を行った．計算開始時期・計算間隔を改良した各手法を用いた現存量推定を実施し，現地海藻量との比較を行う．現存量の推定は桑原らと同様の式 (3.12) で算定するものとする．

$$\text{現存量} = \text{純生産量 } P_n - \text{摂餌量 } SL - \text{先枯量 } BL - \text{流出量 } PL \quad (3.12)$$

3.3.1 物理環境パラメータ (2013 年)

現存量推定(海藻成長・ウニ摂餌量に影響)に使用するパラメータを一覧にしたものを表 3-14 に示す．また，月平均計算時・10 日平均計算時に使用する際のパラメータを月平均・10 日平均値でそれぞれ整理したものを表 3-15, 3-16 に示す．

表 3-14 使用パラメーター一覧

項目	記号	単位	使用データ	測定単位	10 日平均計算	月平均計算
波高	H1/3	m	GPV(C 点)測定値	3 時間	10 日平均値	月平均値
周期	T1/3	s	GPV(C 点)測定値	3 時間	10 日平均値	月平均値
水温	T	℃	現地観測値	10 日	10 日平均値	月平均値
日射量	Im	$\mu \text{ mol/m}^2/\text{s}$	現地観測値	10 日	10 日平均値	月平均値
日射時間	D	hr	気象庁	30 日	月平均値	月平均値
硝酸態窒素	N	$\mu \text{ g} \cdot \text{at/l}$	忍路湾(2008)	30 日	月平均値	月平均値

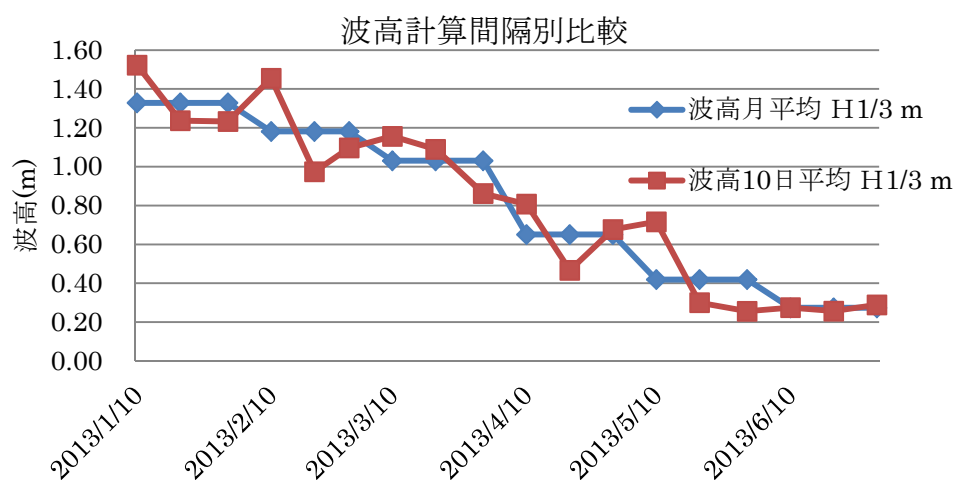
表 3-15 計算パラメータ月平均値

月毎計算	波浪条件 GPV C 点		現地観測値		気象庁	2008 忍路
	波高	周期	水温	日射量	日長	硝酸態窒素
	H1/3	T 1/3	T	Im	D	N
	m	sec	(°C)	(μ mol/m ² /s)	hr	μ g·at/l
2013/1 月	1.33	7.34	7.0	287	9	3.7
2013/2 月	1.18	6.85	7.1	423	11	3.5
2013/3 月	1.03	6.62	6.8	518	11	2.1
2014/4 月	0.65	5.58	7.2	628	12	4.8
2013/5 月	0.42	3.82	8.9	702	14	3.2
2013/6 月	0.27	2.81	13.7	990	14	0.8

表 3-16 計算パラメータ 10 日平均値

10 日毎計算	波浪条件 GPV C 点		現地観測値		気象庁	2008 忍路
	波高	周期	水温	日射量	日長	硝酸態窒素
	H1/3	T 1/3	T	Im	D	N
	m	sec	(°C)	(μ mol/m ² /s)	hr	μ g·at/l
2013/1/10	1.52	7.75	7.2	319	9	3.7
2013/1/20	1.24	7.03	7.4	269	9	3.7
2013/1/31	1.23	7.24	6.5	273	9	3.7
2013/2/10	1.46	7.54	7.6	324	11	3.5
2013/2/20	0.97	6.38	7	407	11	3.5
2013/2/28	1.10	6.57	6.8	537	11	3.5
2013/3/10	1.16	6.74	6.9	370	11	2.1
2013/3/20	1.09	7.00	7	500	11	2.1
2013/3/31	0.86	6.16	6.6	685	11	2.1
2013/4/10	0.81	5.95	6.9	676	12	4.8
2013/4/20	0.47	5.44	7.1	657	12	4.8
2013/4/30	0.68	5.36	7.7	551	12	4.8
2013/5/10	0.72	5.70	8.6	630	14	3.2
2013/5/20	0.30	2.99	7.9	639	14	3.2
2013/5/31	0.26	2.87	10.2	838	14	3.2
2013/6/10	0.27	2.60	12.3	1231	14	0.8
2013/6/20	0.26	2.76	13.5	833	14	0.8
2013/6/30	0.29	3.08	15.4	907	14	0.8

計算間隔を変えて使用する場合は上記の値をそれぞれ用いて計算を行う。平均間隔による各パラメータの変動を求めたものを図 3-16 から図 3-18 に示す。海藻成長量・ウニ摂餌量に影響を及ぼすパラメータの平均間隔を変えると値は大きく変動することがわかる。特に波高の変動はウニ摂餌量に、日射量変動は海藻成長量に大きく影響する。



日射量計算間隔別比較

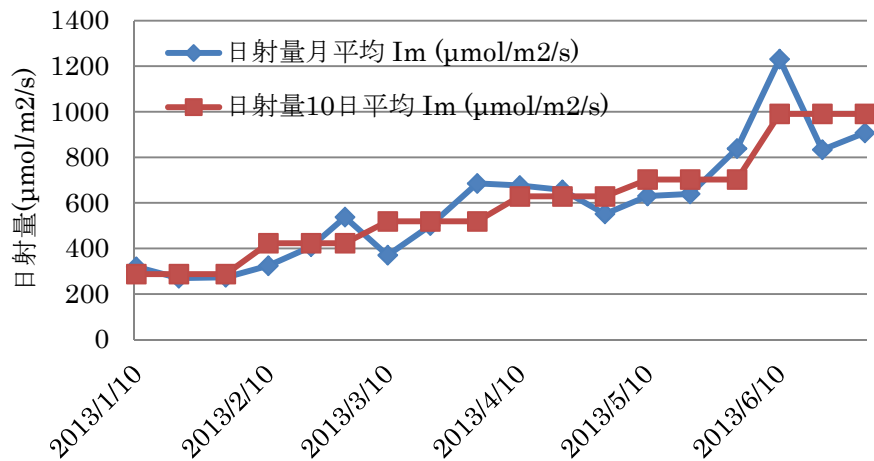


図 3-18 日射量の推移

3.3.2 成長量 P_g , 純生産量 P_n 算定

一日当たりの成長量 P_g を求め、各開始時期(1, 2, 3 月 1 日開始)、各計算間隔(月平均・10 日平均計算)により P_n を求めた。基本式は前述した式 (1.1) と同様である。

計算開始時期、計算間隔を変えた各手法での成長量 P_g , 純生産量 P_n を求めた結果を図 3-19 から図 3-21 に示す。なお、 P_g は一日当たりに計算が必要であるが、外力パラメータは 10 日平均計算なら 10 日間一定値、月平均計算であれば 30 日間一定値となる。

また、 P_n への変換の際に β_2 には振動流速の入力が必要であり、代表式に GPV 現地波高を代入した後に、微小振幅波理論による振動流速の算出が必要である。実際の計算では事前に振動流速の計算が必要であるが、本論文では振動流速の算出方法は後述する。

計算開始時期(発芽時期)をずらすことで成長量に大きな差が出ることがわかる。これは発芽時期を変えることにより、改良した生態特性パラメータ a, b, m, K, F が変動することによる。中でも特に影響の大きいのが F (葉面積指数)である。また、月別では日射量の大きい 5, 6 月に成長量が大きいことがわかる。

成長量 P_g に P_n/P_g 比(一定値 0.58)、水温の影響係数 β_1 , 振動流速・栄養塩による影響係数を掛け合わせて純生産量 P_n に変換した値を見ると、計算間隔を変えた場合には日当たり生産量に差が表れた。この差は日射量による影響が主であり、日射量の小さかった 10 日間などはやはり生産量が小さいことがわかる。また、1 月開始の場合の P_n が、6 月末で生長が衰退している結果になっている。これは a, b 等の生態パラメータが海藻群落がある程

度成長すると成長速度が一定値に近づくといった影響によるものであると考えられる。さらに、 P_g は場所による差はないが、 P_n は変換の際に β_2 で振動流速を入力し、振動流速は背後小段上横方向で異なるので、 P_n は場所による差が生じている。しかしながら β_2 式からも分かるように、海藻成長への流速の影響は大変微小であるため、場所による生産量 P_n の差はほとんど無いという結果になった。

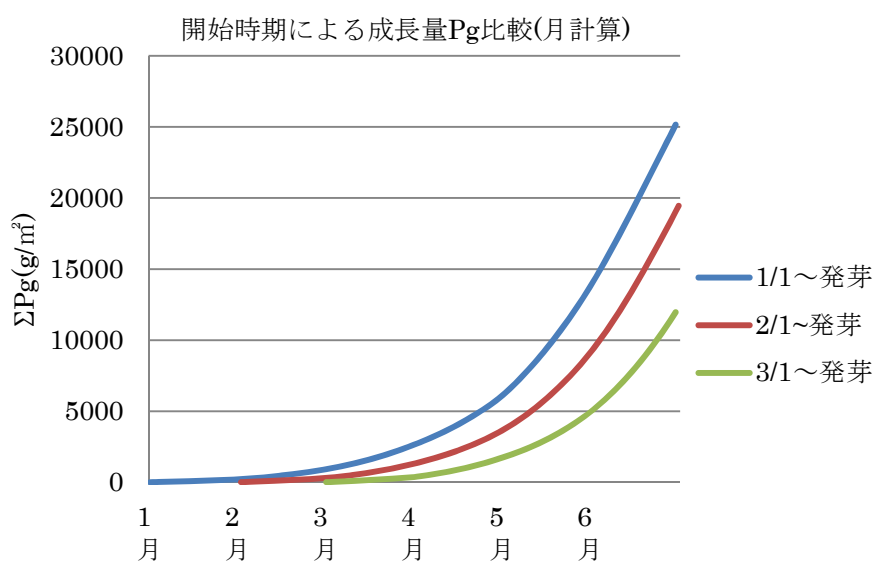


図 3-19 成長量 P_g の比較

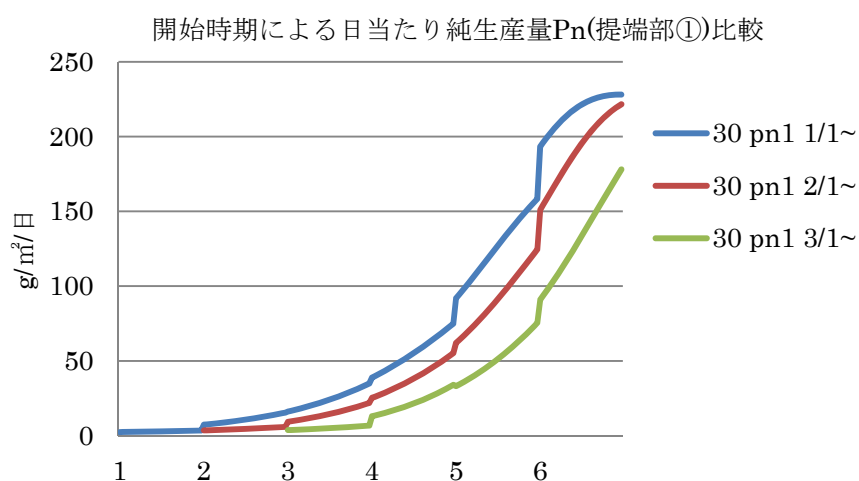


図 3-20 純生産量 P_n

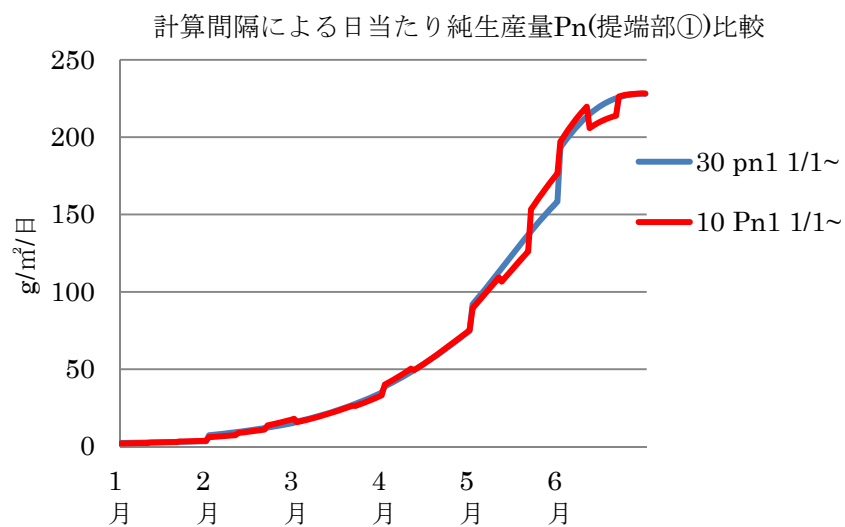


図 3-21 純生産量 Pn

3.3.3 ウニ摂餌量 SL 算定

海藻現存量に最も影響するのがウニの摂餌量である。ウニの摂餌量算定には川俣³⁾⁴⁾による以下の式(3.13)を用いるものとする。

$$\text{摂餌量 } SL(g/m^2) = F/F_s \times F_s \times N \quad (3.13)$$

ここに、

F/F_s :流速による摂餌圧

F_s :季節変化(水温)による摂餌圧

N :ウニ個体数(20 個/ m^2)

ここで、ウニの個体数 N は対象海域の平均個体数である 20 個/ m^2 とした。

(1) 流速による摂餌圧

流速による摂餌圧 F/F_s は以下の式 (3.14) であらわされる。

$$\frac{F}{F_s} = 1 - \exp \left[-\exp \left(-\frac{u_{max} - 27.1}{4.27} \right) \right] \quad (3.14)$$

ここに

F:ウニ 1 個体の日間摂餌量(g/day/個)

Fs:静水中におけるウニ 1 個体の日間摂餌量(g/day/個)

u_{max}:底面軌道流速振幅(cm/s)

図 3-22 に示すとおり, ウニの摂餌圧は振動流速によって大きく変化し, 振動流速が 20cm/s を超えると摂餌圧は減少し, 40cm/s を超えるとほぼ 0 となり摂餌不能となる.

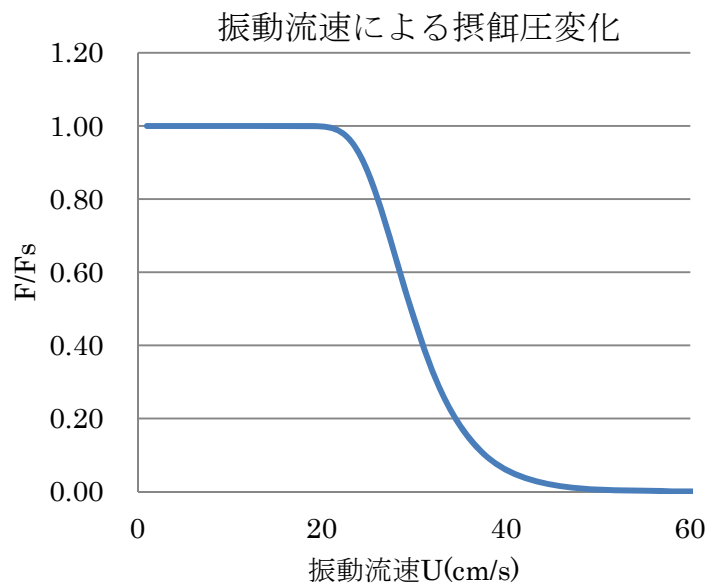


図 3-22 流速変化によるウニ摂餌圧

(2) 水温による摂餌圧

季節変化(水温)による摂餌圧の変化は以下の式 (3.15) で表される.

$$Fs = 0.333\theta(1 - \theta) \left[1 + 0.344 \sin \left(2\pi \frac{J - 48.5}{365} \right) \right] L^2 \quad (3.15)$$

ここに,

T:水温(°C)

$\theta : 0.653(T - 0.63)/27.36$

J:1 月 1 日からの経過日数

L:ウニの殻径(5 cm)

ここで、ウニの殻径は現地調査（図 3-24）による背後小段上のウニの平均殻径である 5 cmとしている。ウニの摂餌圧は水温の上昇に伴い増加し、産卵期に当たる 6 から 7 月にピークを迎え以降減少するという傾向があることがわかる。

また、町口⁵⁾は北海道産キタムラサキウニの天然種苗を 13 か月間にわたって飼育し、その成長および摂餌量と水温の関連について検討した。その結果、キタムラサキウニの摂餌量は水温の影響を大きく受け高水温期では活発に摂餌し成長するが低水温期では摂餌量・成長量ともに著しく低下する。月平均水温が 5℃以下となると摂餌量は大きく低下すると述べている。そこで、本研究においても水温が 5℃以下になる期間には F_s が 0 になりウニによる摂餌が無いものとして計算することとした。図 3-23 に F_s の月別変化の例を示す。

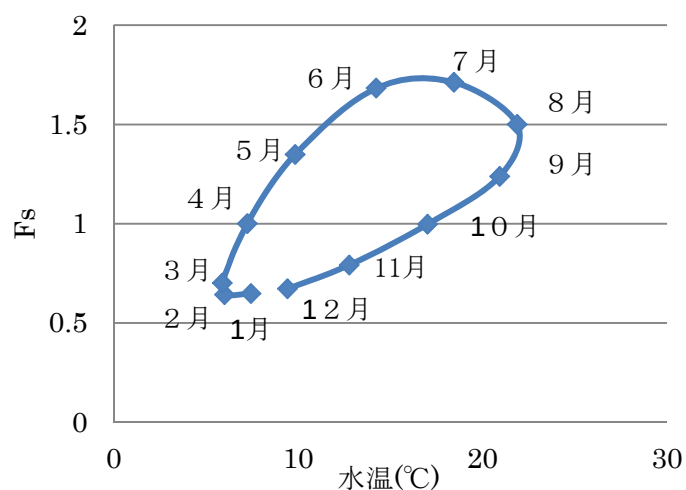


図 3-23 ウニ摂餌圧の月別変化

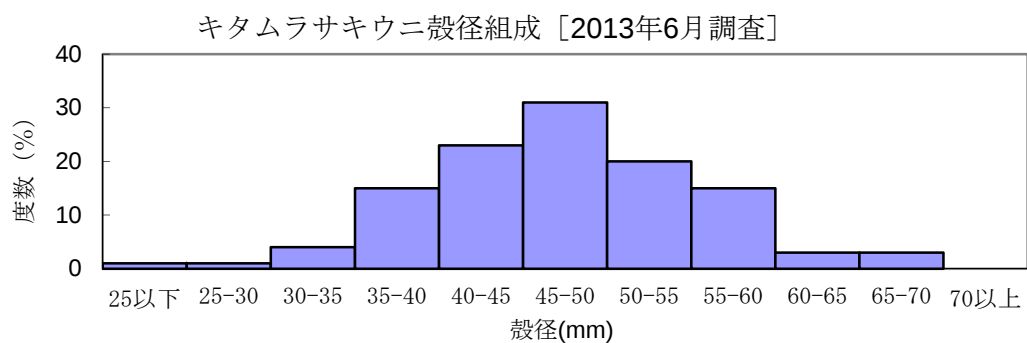


図 3-24 殻径組成（キタムラサキウニ）

(3) 振動流速

ウニの摂餌圧算定に当たって振動流速の算出をした。まず、GPV 波浪データの月平均値・10 日平均値を代表波式に代入して小段上 10 地点の波高を算出した。計算結果を図 3-25 に示す。中央部、特に⑤、⑥、⑦は波当たりが弱く、堤端部は高波高である。計算波高を基に振動流速への変換を行う。振動流速への変換には微小振幅波理論⁶⁾を用いた。算定式を式(3.15)に示す。

$$u = \frac{\pi H}{T} \times \frac{\cos 2\pi(h+z)/L}{\sin 2\pi h/L}$$
$$L = \frac{gT^2}{2\pi} \tanh \left(2\pi \frac{h}{L} \right) \quad (3.15)$$
$$z = -h$$

振動流速の算出結果を場所別に比較したものと、計算間隔により比較した結果を図 3-26, 3-27 に示す。中央部は波当たりが弱く振動流速も小さい。40 cm/s 以下ではウニは活動可能であることから、中央部では海藻発期にあたる 1-3 月時点で摂餌可能であることがわかる。また、計算間隔別にみると、例として 2 月中旬、4 月中旬などを見ると、10 日平均値による振動流速が月平均値を大きく下回る場合があり、摂餌活動が活発になることがわかる。

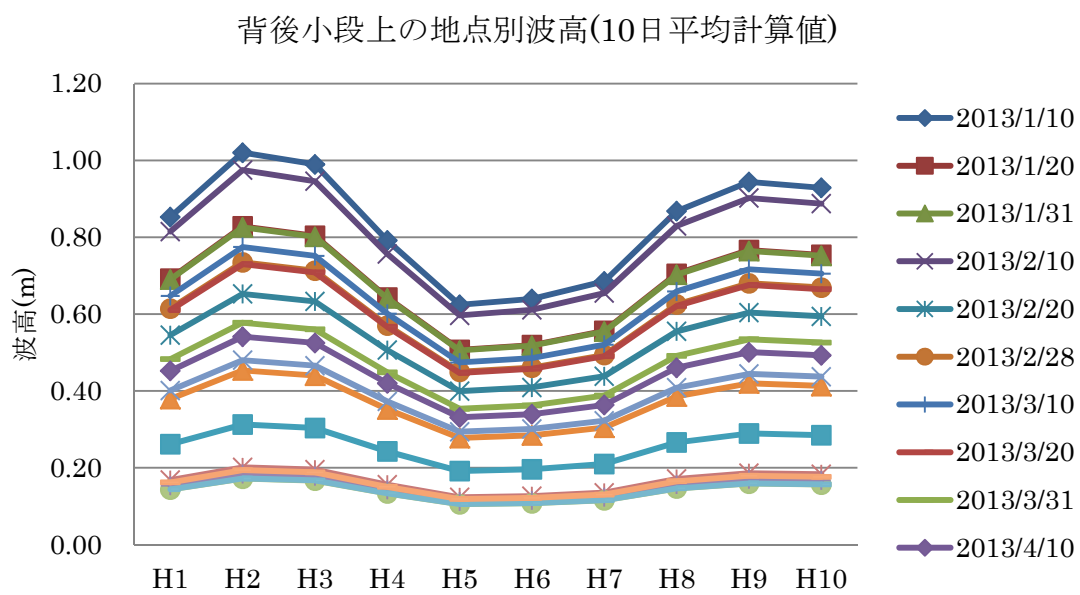
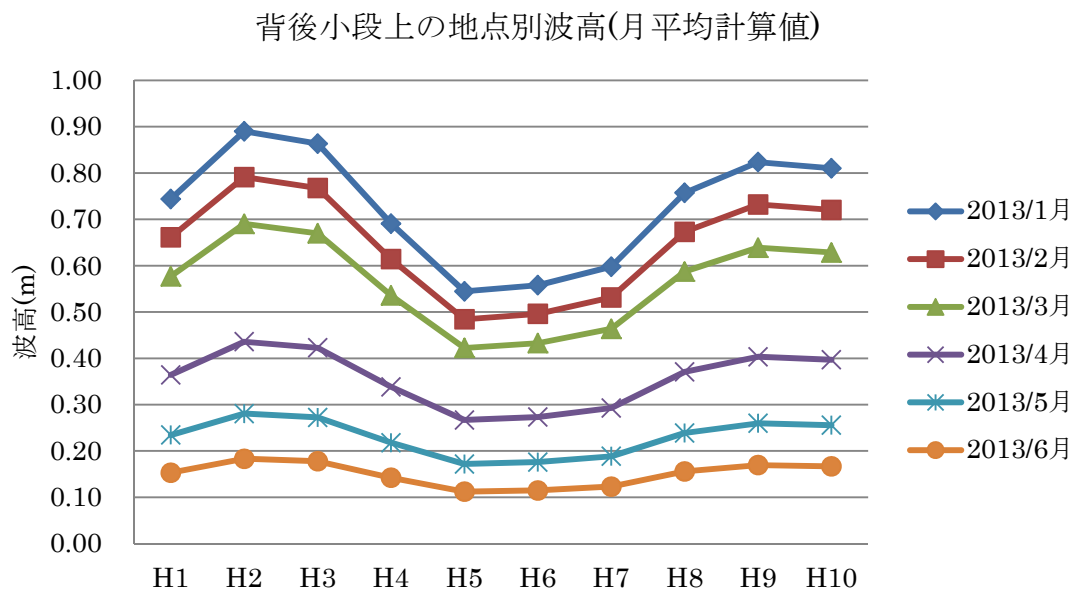


図 3-25 波高の推移

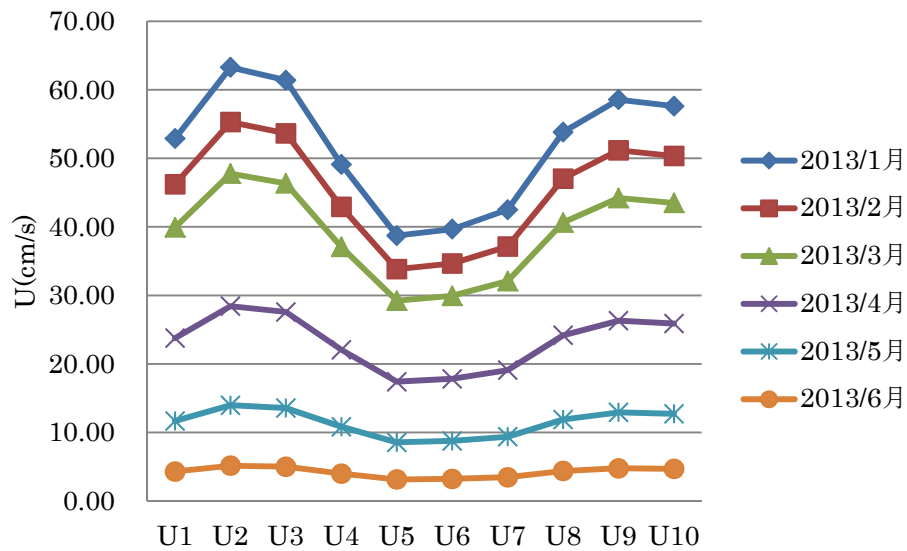


図 3-26 振動流速の月別変化

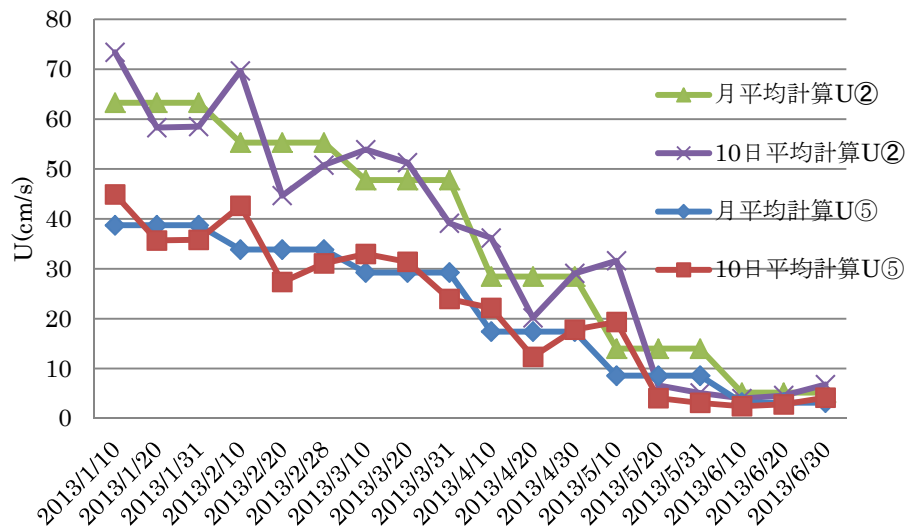


図 3-27 振動流速の比較（堤端部②および中央部⑤）

(4) 計算間隔による摂餌圧変動

月平均, 10 日平均による振動流速と水温による摂餌圧の変動を比較した結果を図 3-28, 3-29 に示す. 水温による摂餌圧 F_s の変動幅は流速による摂餌圧 F/F_s の変動と比較すると小さく, ウニの摂餌には流速の影響が大きいことがわかる. また, 計算間隔別に比較すると, 特に流速による摂餌圧 F/F_s の変動が大きく, 例えば 2 月中は月平均値では F/F_s は月を通して 0.2 で摂餌活動があまり活発でないとされるが, 10 日平均値で見ると, 波浪の小さかった 2 月中旬の 10 日間は月平均値の約 3 倍の 0.6 となっており, 摂餌活動が活発であったことがわかる. また, 特に海藻幼芽期当たる 1-3 月は海藻自体の成長量も微量であるために, 10 日間のウニの摂餌で食べ尽くされてしまうことが考えられ, 磯焼けへの影響が非常に大きく重要であると考えられる.

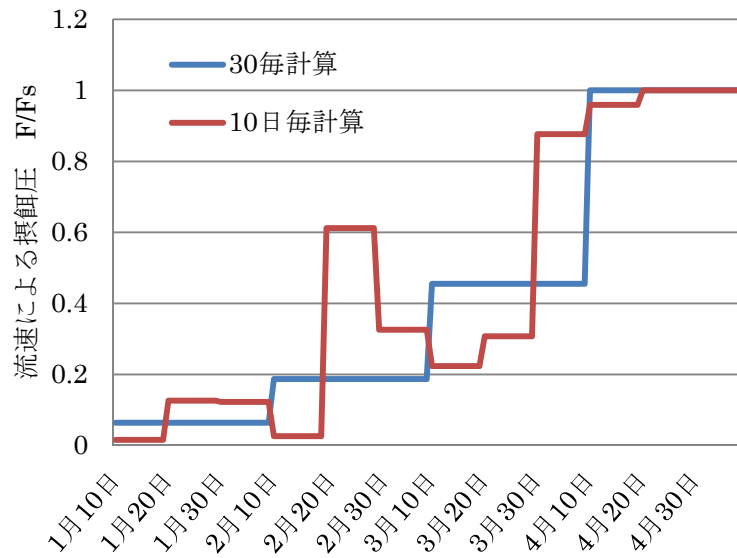


図 3-28 流速による摂餌圧の変化（波弱部⑤）

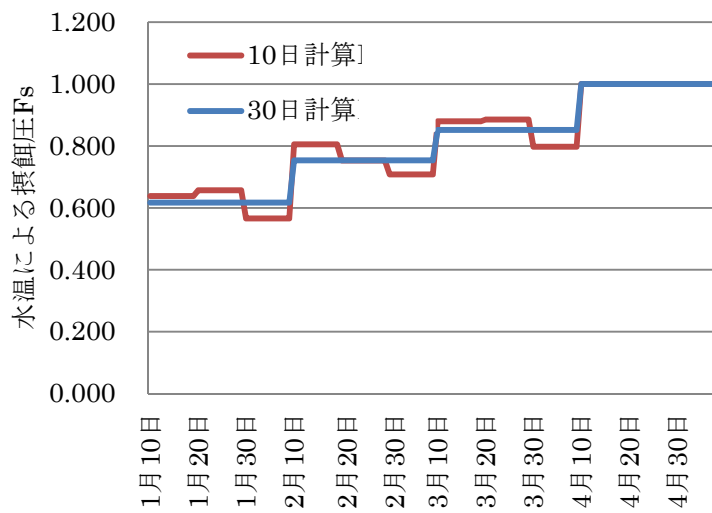


図 3-29 水温による摂餌圧の変化（波弱部⑤）

(5) 場所別・計算間隔別ウニ摂餌量 SL

流速による摂餌圧 F/F_s ，水温による摂餌圧 F_s よりウニの摂餌量 SL を求めた．前出の式 (3.13) を再掲する．

$$\text{摂餌量 } SL(g/m^2) = F/F_s \times F_s \times N \quad (3.13)$$

ここで本計算では N は前述のように 20 個体/ m^2 (対象海域での平均個体数) として求めた．小段上 10 地点の場所別の月当たりの摂餌量と，計算間隔による摂餌量の時系列比較を図 3-30, 3-31 に示す．

場所別にみると，波当たりの弱い中央部で摂餌が活発であるが，特に⑤，⑥，⑦では 1 月時点から摂餌が始まっていることがわかる．また，5 月及び 6 月は低波浪であり，摂餌圧が最大となることから SL も場所にかかわらず最大の値を示す結果となっている．また，計算間隔別に比較すると 2 月中旬, 4 月中旬は月平均値と 10 日平均値で大きく差が出ており，幼芽への摂餌の影響が重大であることがわかる．

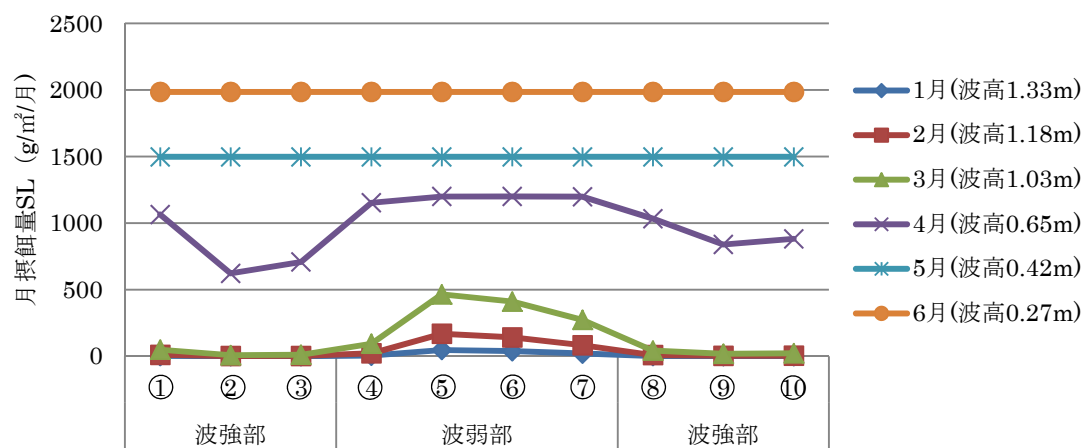


図 3-30 地点別摂餌量 SL

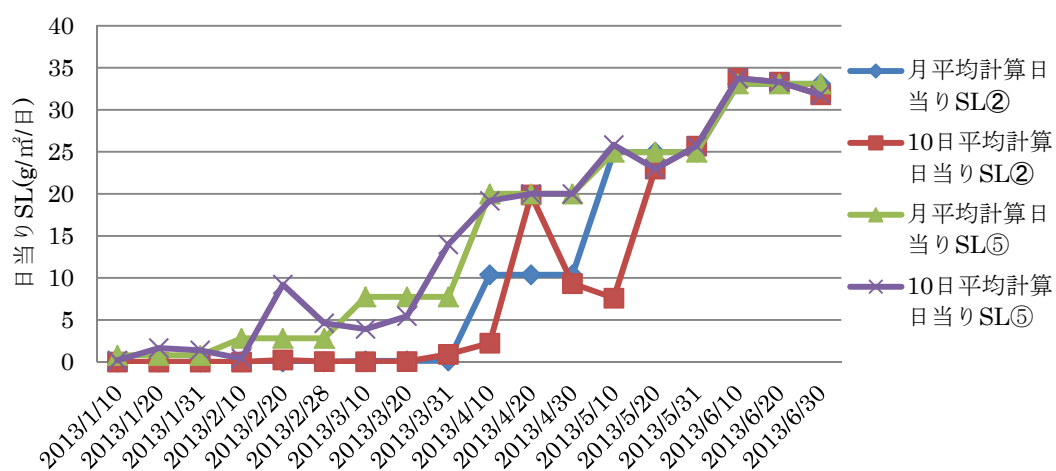


図 3-31 摂餌量の推移（堤端部②，中央部⑤）

3.3.4 先枯れ量 BI, 流出量 PI 算定

先枯れ量 BI, 流出量 PI は累計成長量 ΣPg との関数とした改良式を用いた. 日当たりの Pg から累計 Pg を求め, 日当たりの BI, PI を算出した. 計算結果を図 3-32 に示す.

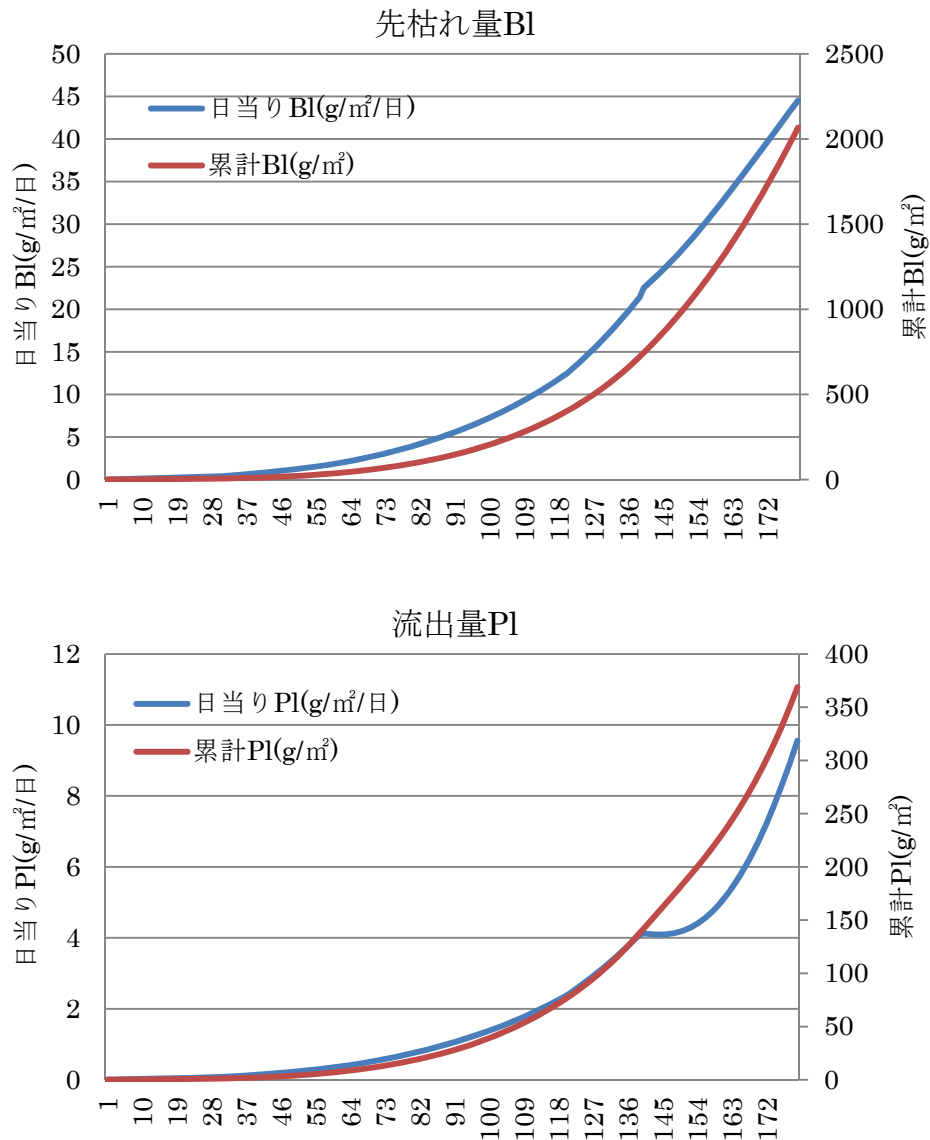


図 3-32 先枯れ量と流出量の計算結果

3.3.5 現存量 W 算定

以上で求めた純生産量 Pn, ウニ摂餌量 SL, 先枯れ量 B1, 流出量 P1 より海藻現存量 W の算定を行った. 前出の式 (3.12) を再掲する.

$$\text{現存量} = \text{純生産量 Pn} - \text{摂餌量 SL} - \text{先枯量 BL} - \text{流出量 PL} \quad (3.12)$$

計算開始時期を 1 月, 2 月, 3 月 1 日~, 計算間隔を月平均・10 日平均と変化させた 6 ケースの現存量推移を 6 月末まで行った. 現存量は月平均計算であれば 30 日毎, 10 日平均計算であれば 10 日毎にそれぞれ計算し, 各末日の残存量の積算値を最終的な現存量として推定するが, 積算値が途中で 0 及び負の値となる場合は海藻が食べ尽くされた事を示し, 以降は磯焼け (現存量 0) になるものとしている.

3.3.6 現存量推定方法

以下に例として提端部①での月平均計算の場合の現存量推定までの流れを示す.

<単位生産量・損失量の算出>

月単位, 10 日単位の単位生産量 Pn と, 単位損失量 (SL, P1, B1) をそれぞれ算出する. ここで損失量のうち最も割合が大きいのがウニの摂餌による損失量である. 次に各月単位及び 10 日単位ごとの生産量, 損失量を差し引きしたものを単位残存量として求める. 計算結果を図 3-33 に示す.

<単位残存量の算出>

単位生産量から損失量を差し引いた残存量を単位残存量とする. この時負の値を取るということは, その月(もしくはその 10 日間)の生産量に対して損失量が上回る事を示す. 以上の単位残存量を積算したものが現存量となるが, ここで例えば 3 月のウニ摂餌量が大きく, 3 月単位残存量が大きく負の値を示したとする. この 3 月の負の値が 1, 2 月の単位残存量の積算値の正の値よりも大きくなる場合, 成長過程の海藻が 3 月で消失したことになり, 以降の月は磯焼けであったとする. 計算結果を図 3-34 に示す.

<現存量(積算値)の算出>

単位残存量を積算したものが最終的な現存量である. 途中で 0 となった場合は以降磯焼けとする. 計算結果を図 3-35 に示す.

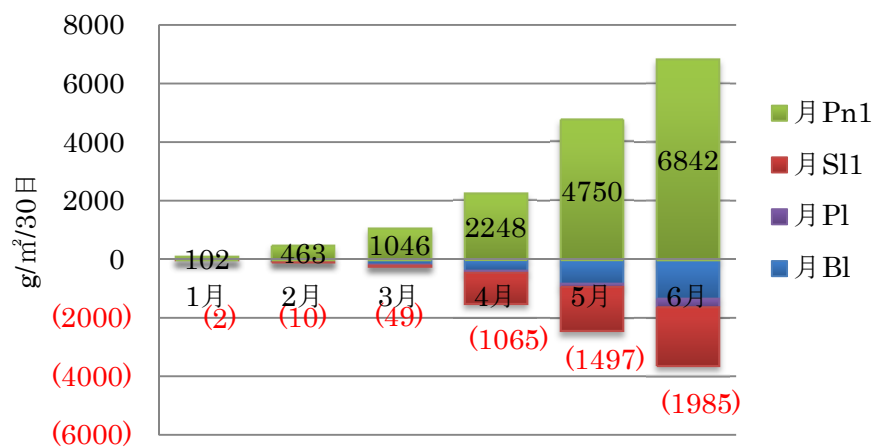


図 3-33 単位生産量と損失量

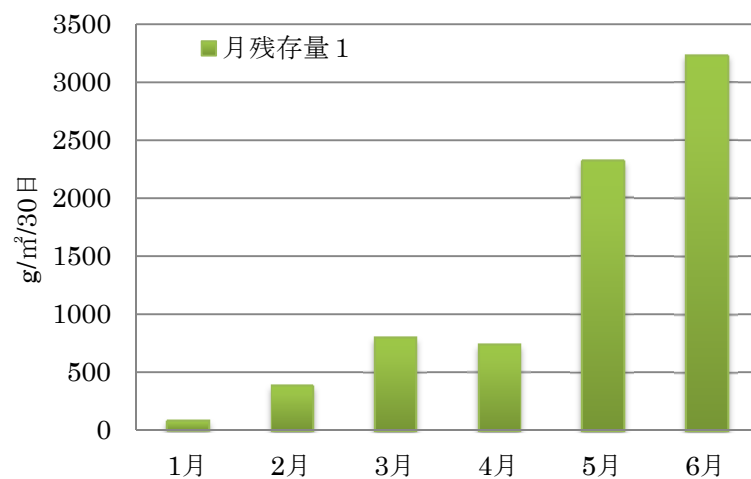


図 3-34 単位残存量

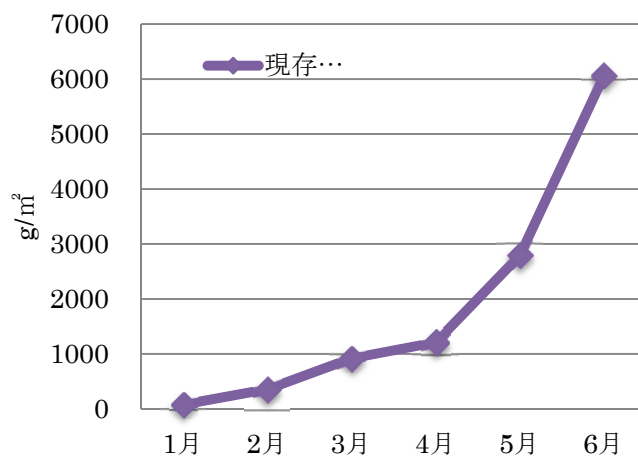


図 3-35 現存量算出結果

3.3.7 計算間隔による現存量比較

計算間隔による現存量の比較を波強部②と波弱部⑤について行った。まず、単位生産量・損失量を場所別に比較した結果と、計算間隔を月平均・10日平均とした場合の結果を比較したものを図 3-36(1)、3-36(2)に示す。なお、結果は海藻成長に当たる 1-4 月の計算結果を示している。

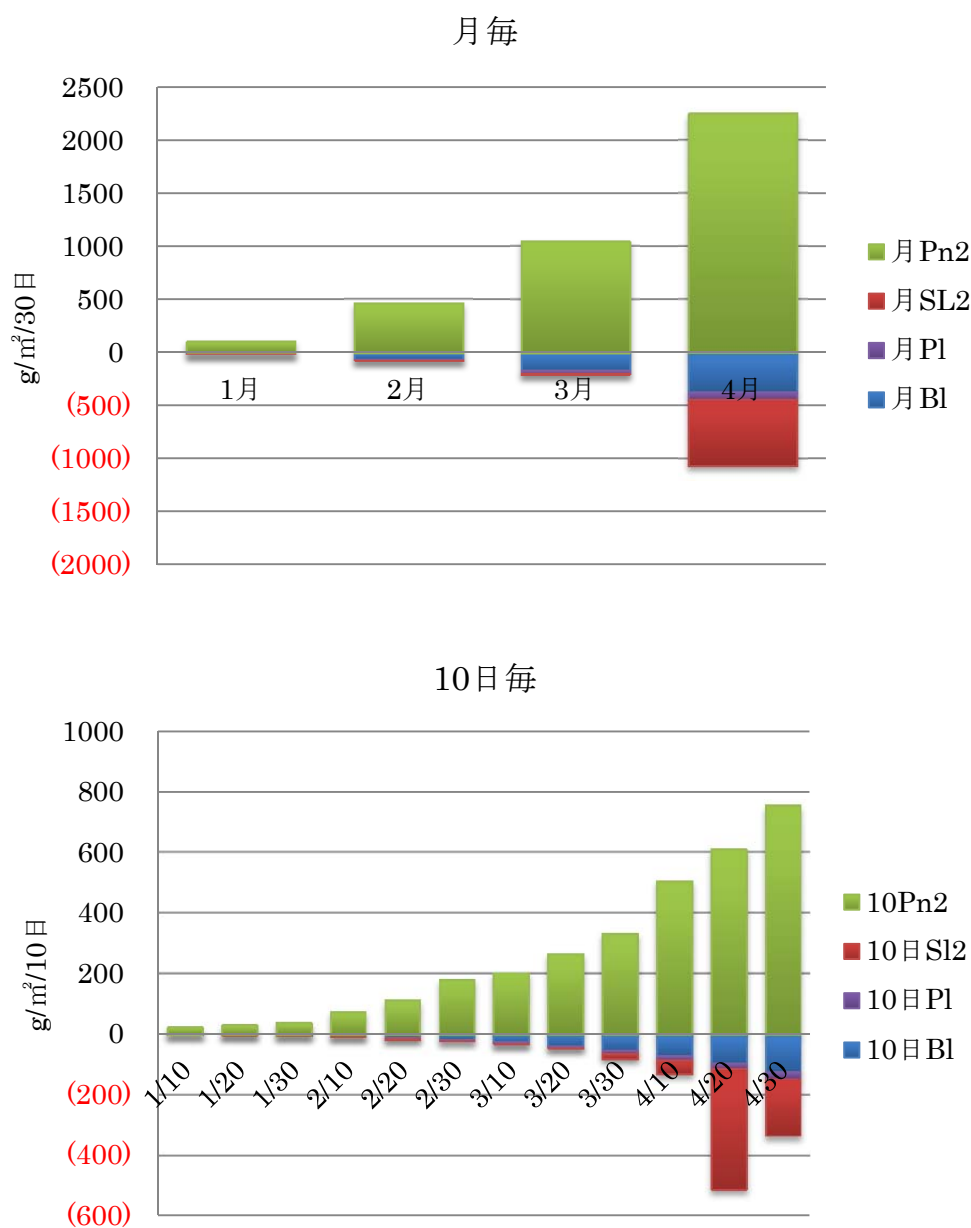
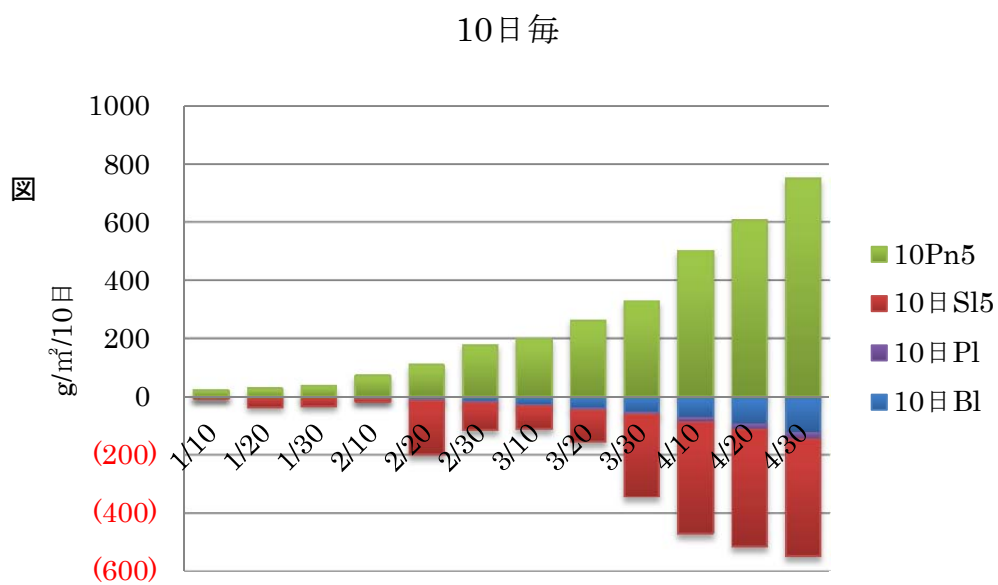
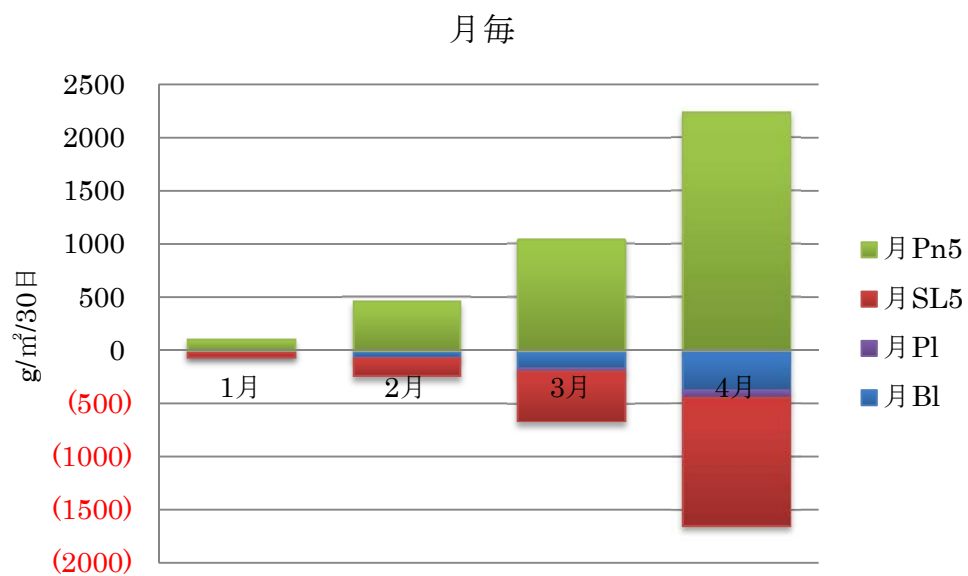


図 3-36(1) 生産量と損失量 (波強部②)

波強部②は波当たりが強く、ウニの摂餌による影響が少ない場所である。月平均値では常に生産量が損失量を上回るが、10日平均としてみると、4月中旬の低波浪であった10日間には損失量が生産量に近いほど大きな値になっていることがわかる。10日平均で見ると波の強い波強部②でもウニの摂餌が活発になるほど低波浪の10日間があったことがわかる。

一方、波弱部⑤は波当たりが弱くウニの摂餌による影響の大きい場所である。2月の月平均結果と10日平均結果を比較すると、月計算値では2月中は生産量が損失量より大きいとあるが、10日平均で見ると2月中旬は摂餌量が大きく、損失量が生産量を大きく上回っていることがわかる。

続いて、現存量積算値を各計算間隔で求めた結果を図3-37に示す。ウニ摂餌の影響の少ない波強部②では計算間隔を変えても現存量推移に大きな差はない。しかし、ウニの摂餌の影響の大きい波弱部⑤の結果を見ると、従来の月平均計算値では4月末まで海藻が繁茂し続けていることになるが、10日平均計算値で最も波浪の小さかった2月中旬の10日間のうちに海藻が食べ尽くされ、以降は磯焼けであるという結果となり明らかな差が出た。このように、海藻成長初期段階では海藻自体も小さい為、10日間のウニ摂餌により食べ尽くされることがあり、10日平均計算とすることでウニの摂餌による影響をより実現象に近づけて再現することができるものと考えられる。



3-36(2) 生産量と損失量 (波弱部⑤)

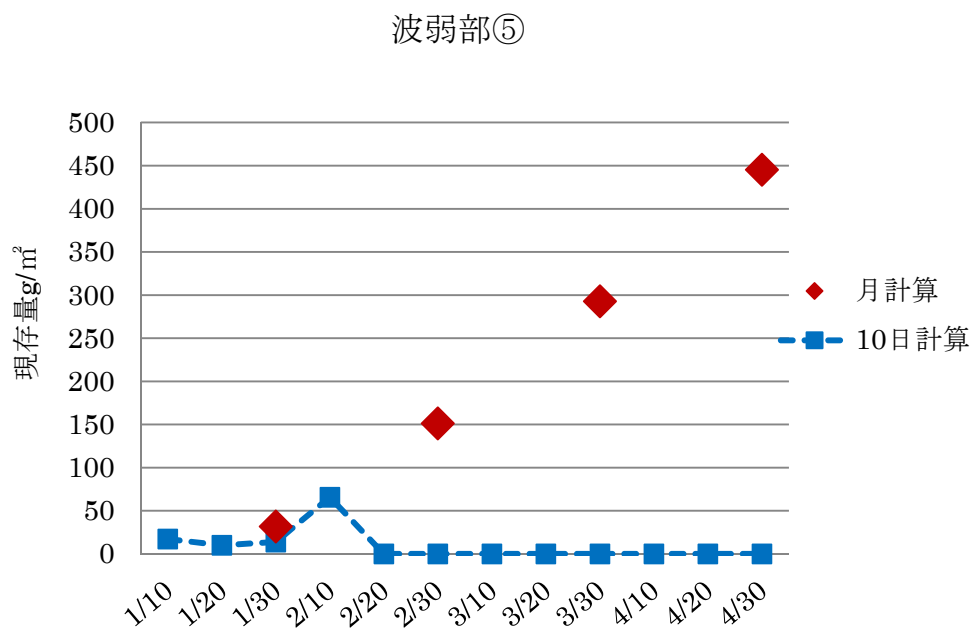
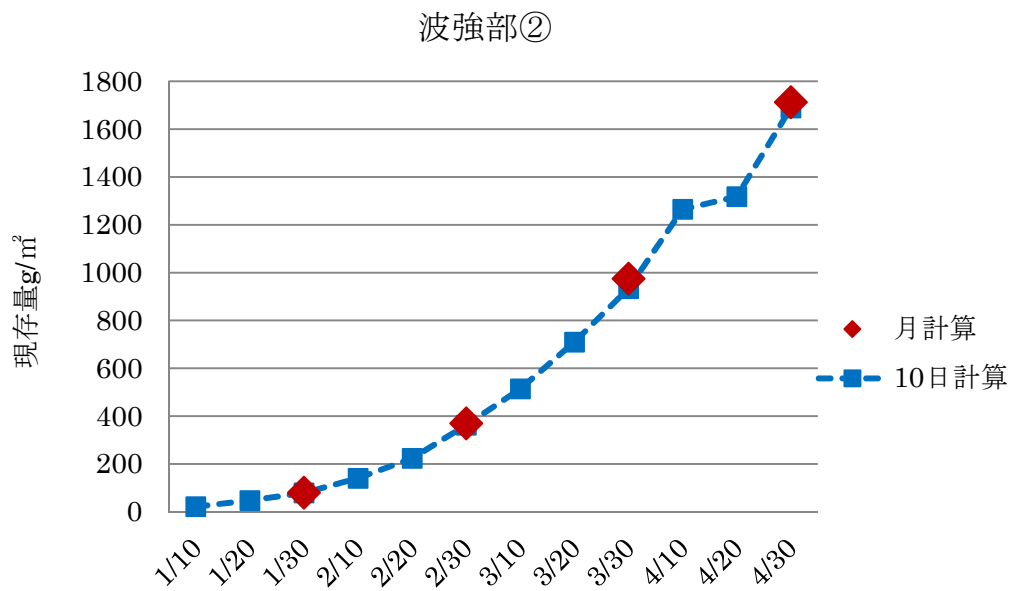


図 3-37 現存量積算値

3.3.8 計算開始時期による現存量比較

計算開始時期(発芽時期)を1月, 2月, 3月1日～として現存量を求めた. 波強部②において各開始時期における月平均計算の単位生産量と損失量を比較した結果と, 積算した現存量推移を求めたものを図 3-38 に示す. 開始時期を変えると海藻の成長量がそれぞれ変動する. 開始当月は海藻幼芽であるため生産量は微量である. 一方, 外力(物理環境パラメータ)である波浪の影響を受けるウニ摂餌圧 SL は開始時期によって変化せず, 月平均計算であれば月単位で規定され, 同値を取ることになる. よって3月1日から計算開始のような場合には, すでに3月時点でウニの活動が活発な波浪状況であれば, 生産量に対してウニ摂餌量が大きい為, 開始時期が遅すぎると生産量が損失量に追い付かないという場合があることがわかる.

次に, 各開始時期において現存量推移を求めた結果を図 3-39 に示す. 開始時期を変えることで現存量に大きな差が出るのがわかる. また, 3月1日のように開始時期が遅すぎるとウニ摂餌量に成長量速度が追い付かず, 定量的な現存量の推定ができない可能性があると考えられる. よって, 次節で計算値と現存量実測値との比較・検証を行うこととする.

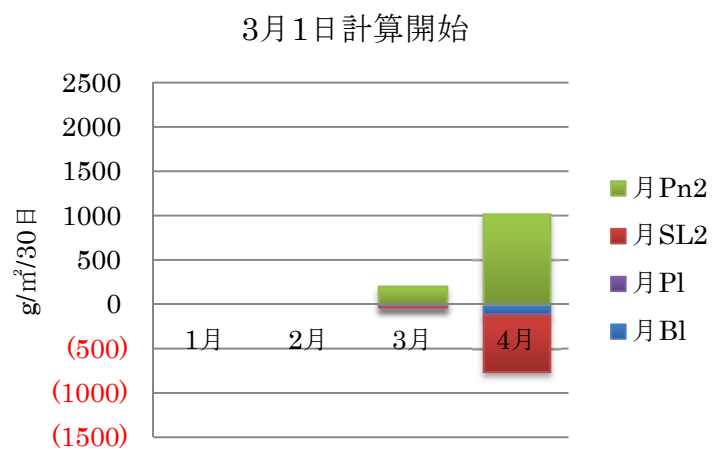
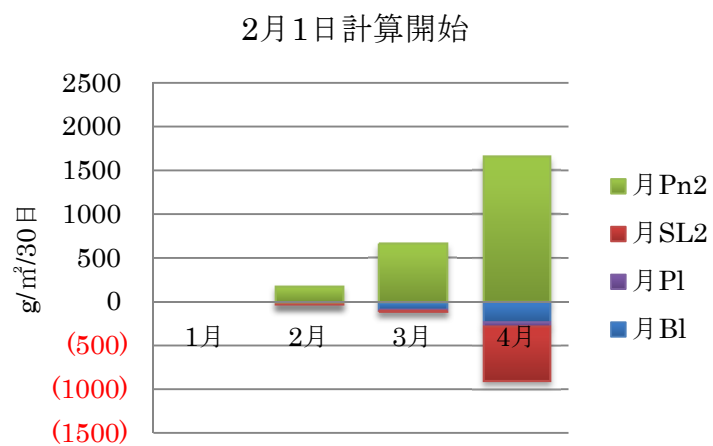
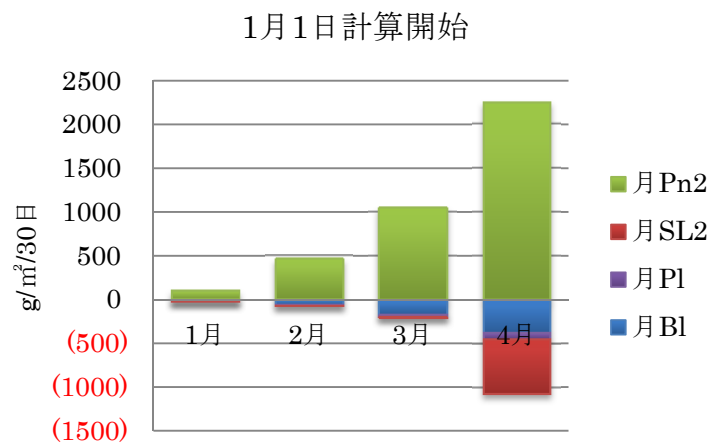


図 3-38 計算開始日の比較

波強部② 月平均計算

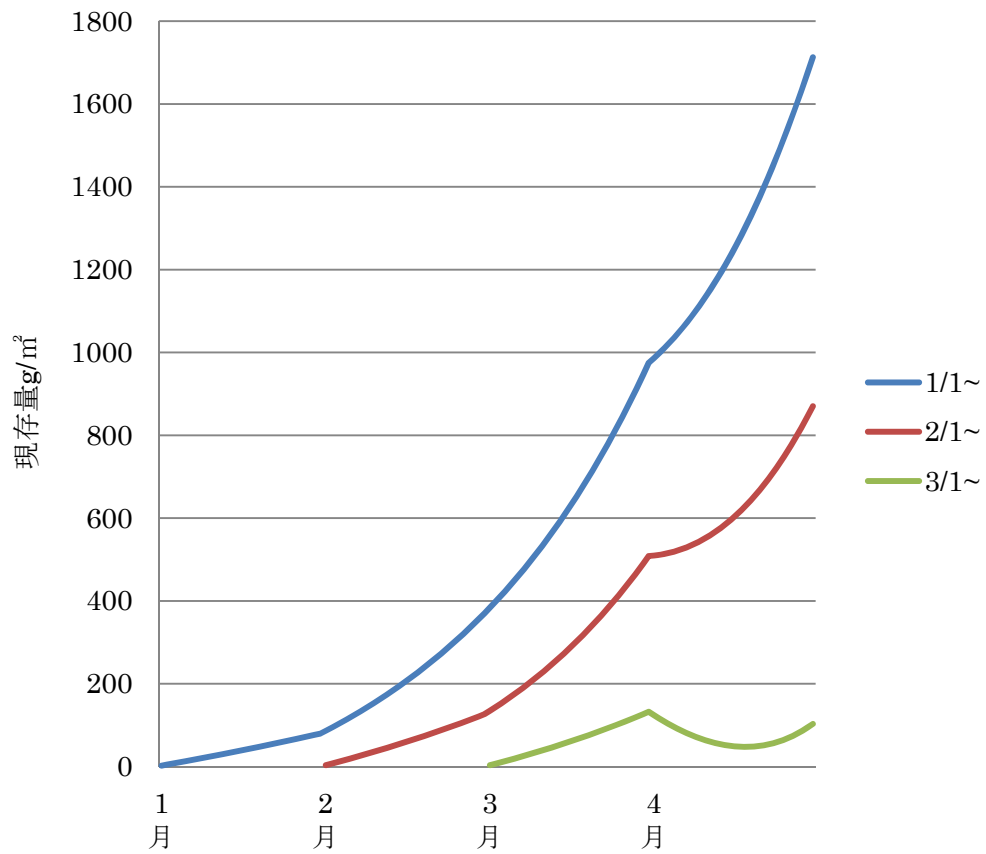


図 3-39 現存量の比較

3.3.9 数値計算の妥当性

計算開始時期・計算間隔を変えた各手法における 2013 年 6 月末まで現存量推定値と、同年の背後小段上の現地海藻量との比較を行い計算値の妥当性の検証を行った。現存量計算値と実測値の比較にあたっては、2013 年に背後小段上で実施された月毎の写真・動画撮影による調査結果を基に実測値海藻量のランク付け⁷⁾を行った。以下に調査概要とランク付けの方法を示す。

[調査概要・ランク付け方法]

- ・2013 年 3, 4, 5, 6 月の写真撮影, およびビデオ撮影実施
- ・測線 4(水深 4m 地点)における 10m 毎(写真 3-1)の画像を抽出
- ・ウニ摂餌対象外種であるフクロノリを除く海藻(図 3-40, 3-41, 写真 3-2)を画像から 0(無繁茂状態)～5(最大繁茂状態)の 6 段階でランク付(写真 3-3)を実施
- ・1 段階=約 500g/m²を目安

中央部はウニの摂餌対象外種であるフクロノリが多量に繁茂しており、実際には判断が難しい。写真と動画から 3, 4, 5, 6 月について最終的にランク付けした結果を表 3-17 に示す。



写真 3-1 調査箇所

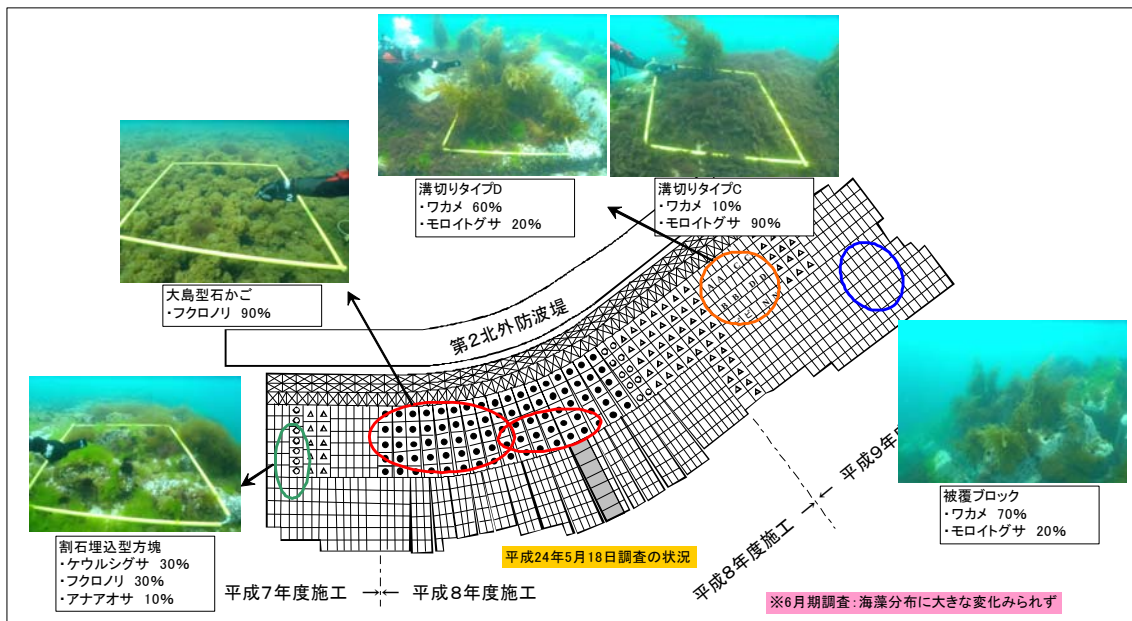


図 3-40 2013 年 6 月着生状況と優占種



写真 3-2 出現種

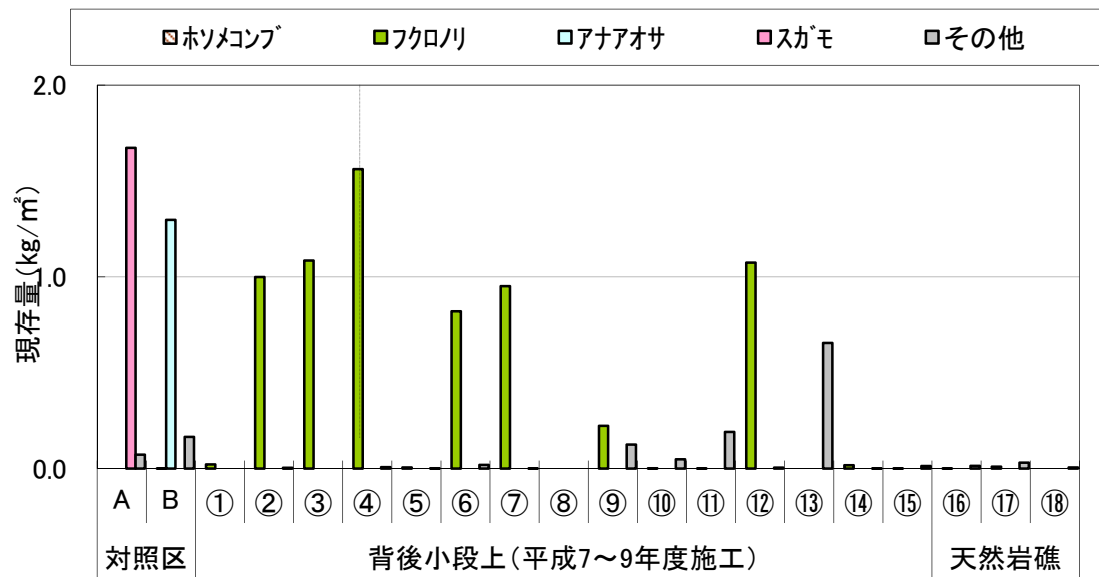
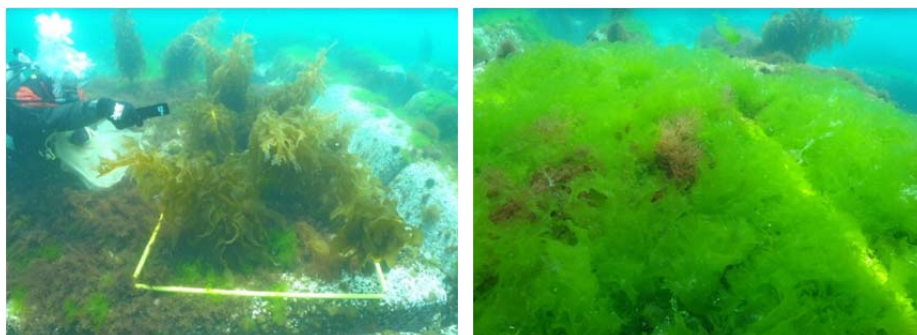


図 3-41 寿都漁港背後小段海藻重量構成



ランク 0 (無繁茂状態)



ランク 5 (最大繁茂状態)

写真 3-3 ランク付

表 3-17 地点別海藻繁茂量ランク付け

	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨	⑩
2013 年 ランク	0-10 m	10-20 m	20-30 m	30-40 m	40-50 m	50-60 m	60-70 m	70-80 m	80-90 m	90-100 m
3 月	1	2	1	0	0	0	0	0	1	0
4 月	1	1	1	1	0	0	0	1	1	1
5 月	0	3	1	1	0	0	0	2	4	5
6 月	0	2	0	1	0	0	0	0	4	4

3.3.10 各手法の現存量推定値と現地海藻量との比較

計算開始時期を1月, 2月, 3月1日~, 計算間隔を月平均, 10日平均とした6ケースの各手法による3, 4, 5, 6月末日の現存量算定値と現地海藻繁茂量をランク付けした結果との比較・検証を行った。結果を図3-42, 3-43に示す。なお, ランクは $1=500/\text{m}^2$ としている。

場所別にみると, 波当たりの小さい中央部はウニの摂餌の影響が大きく, 特に⑤, ⑥, ⑦では現地海藻は3月末の時点から6月末まで海藻着生がみられないという状況であるが, 従来の1月1日~月平均値とした場合の計算値では中央部も3月末の時点から繁茂していることとなり, 計算値が実測値を過大評価する結果となった。

計算開始時期別にみると, 1月1日から成長開始とした場合は, 提端部等の海藻繁茂量を比較しても, 計算値が実測値を大きく上回っており, 現存量を過大評価する結果となった。また, 3月1日から計算開始とした場合では, 提端部でもほぼ無繁茂であるという結果となり, 海藻量を過小評価する結果となった。開始時期としては, 本計算においては2月1日から計算開始とした場合の海藻現存量推定値が最も現地の海藻量変動に即した結果となった。

また, 計算間隔別にみると波当たりの強い海藻繁茂に好条件である提端部と, 波当たりが弱く海藻の繁茂しにくい中央部での場所別の差が明らかに表れていることがわかる。10日平均計算だとウニの摂餌の影響をより正確に再現できると考えられる。

以上の結果から, 本計算の2013年度における各月の現存量推定値は2月1日から計算開始とし, パラメータを10日平均値として与えた場合の計算値が実際の現地の海藻量変動に最も即した結果となった。

以上により, 海藻現存量の的確な算定が行えるようになったことから, 自然環境調和型構造物の藻場回復手法の検討として, 構造断面の改良による海藻現存量の推定を行った。その結果を図3-44に示す。計算は2014年のケースである。既設天端高(水深4m)では磯焼けの影響を強く受け計算値(現存量)と実測値(繁茂レベル)に乖離が現れている。しかしながら, 水深1mに嵩上げ改良した場合は, 海藻の成長が良く現れ計算値(現存量)と実測値(繁茂レベル)も一致していることがわかった。これにより, 嵩上げ改良の有効性が立証できたものと考えられる。

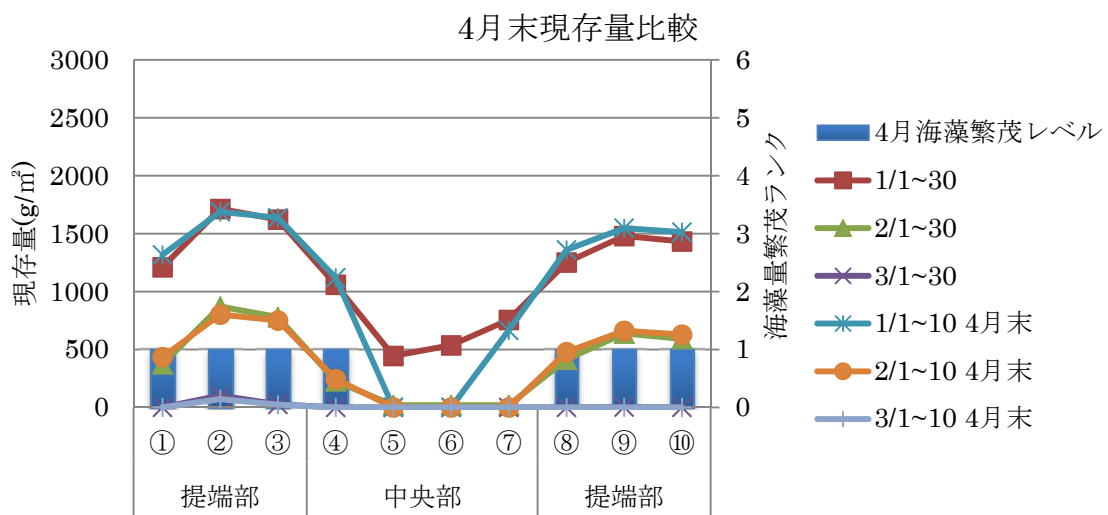
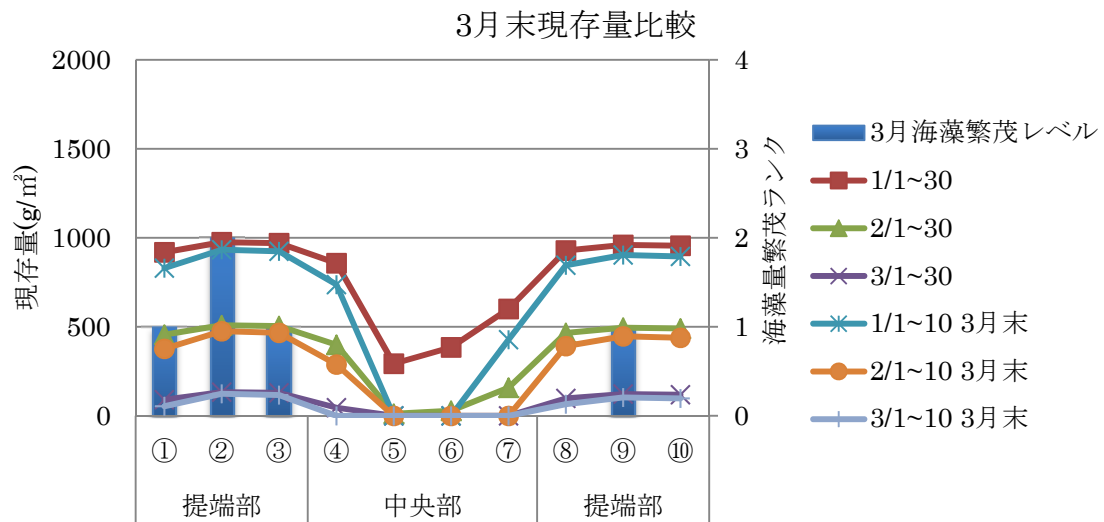


図 3-42 現存量比較 (その 1)

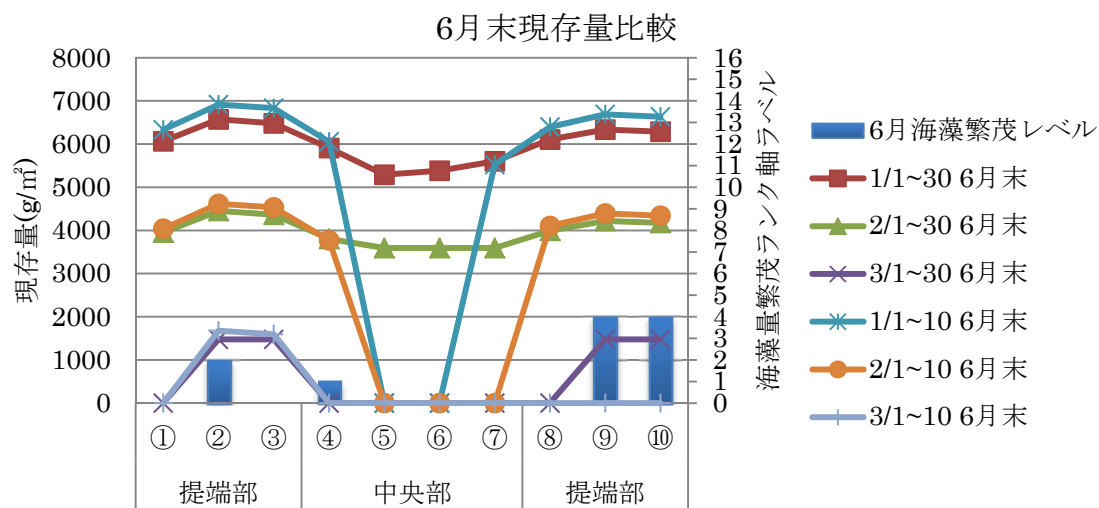
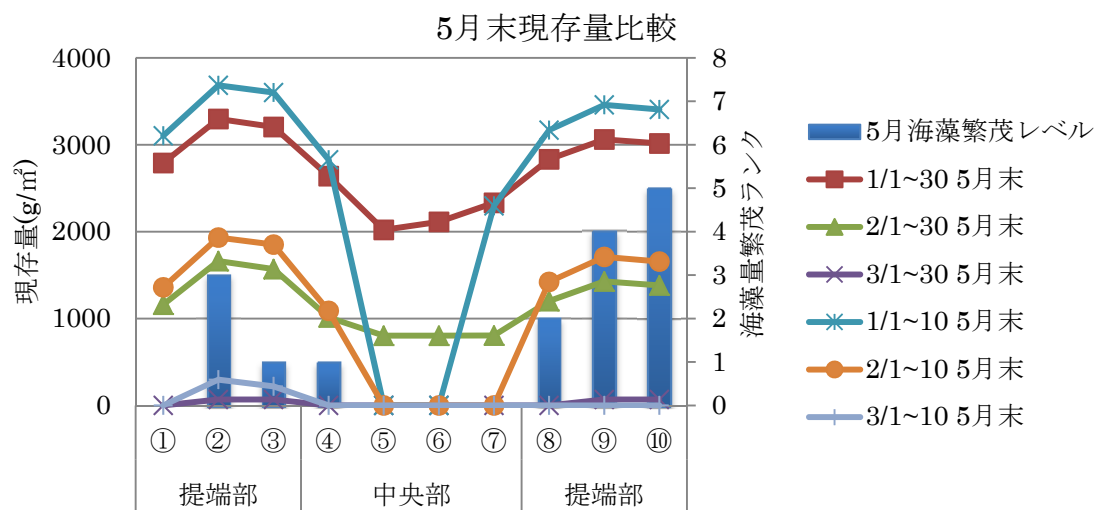


図 3-43 現存量比較（その2）

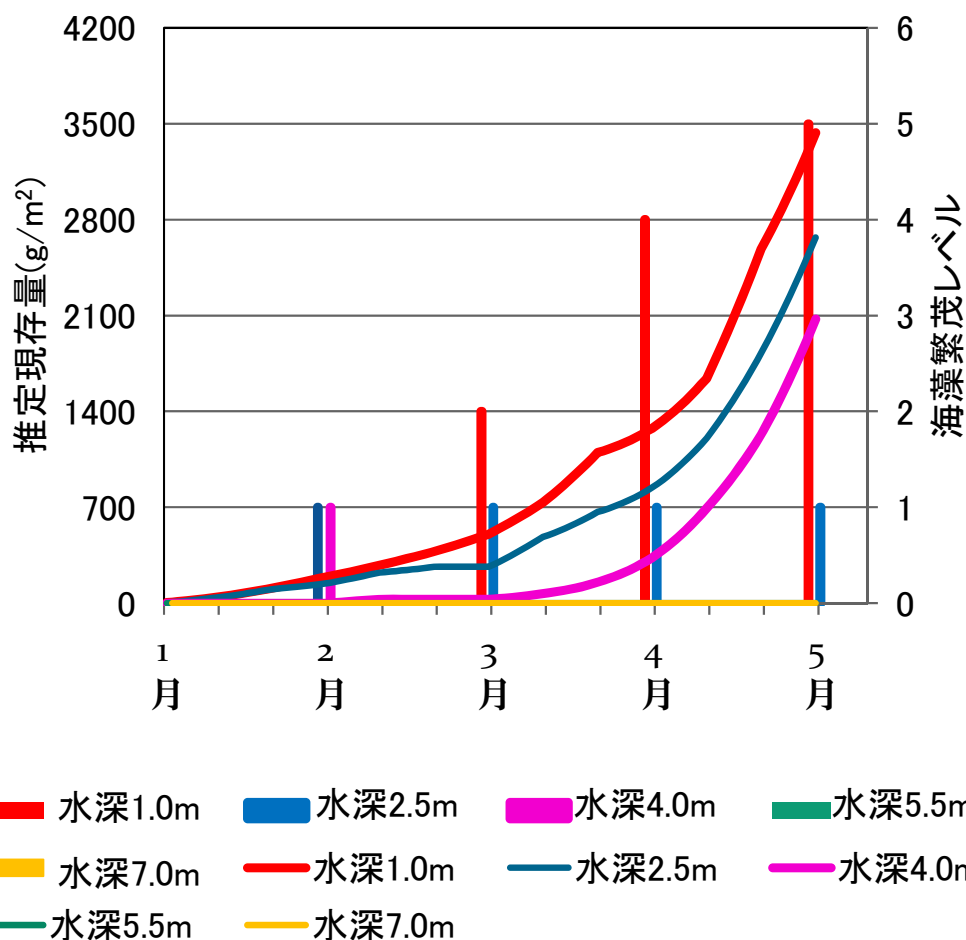


図 3-44 海藻現存量推定値（折れ線グラフ）と海藻繁茂レベル（棒グラフ）（2014 年）

3.4 まとめ

海藻の現存量の月別変化を推定するため計算モデルの改良を行った。その結果、海藻の成長開始時期を変えることで現存量に大きな差が出ることが判明した。また、計算パラメータを 10 日平均値にして現地の環境変動に近づけることでウニの摂餌による影響が明確に現れることがわかった。特に、海藻幼芽期のウニの摂餌量の変化によっては海藻現存量に大きな違いが出ることが判明した。現地の観測結果と月別変化量を比較することで、計算開始時期とパラメータの平均間隔が設定でき、対象海域での藻場造成機能を評価することが可能となる。以上のことから磯焼け要因や嵩上げ改良による藻場回復手法を検討する手法として本現存量推定法が有効であることが判明した。

参考文献

- 1) 山下俊彦, 佐藤 旬, 佐藤 仁: 寿都漁港背後小段上の海藻現存量の変動特性, 平成 25 年度土木学会北海道支部年次技術研究発表会, 2014.
- 2) 松山恵二: ホソメコンブの光合成並びに光合成より見た忍路湾におけるホソメコンブの生産(未発表), 1998.
- 3) Kawamata, S : Modeling the feeding rate of sea urchin *Strongylocentrotus nudus*(A.Agassiz) on kelp J.EXP. Mar. Biol. Ecol, 210, pp.107-127, 1997.
- 4) Kawamata, S. : Effect of wave-induced oscillatory flow on grazing by a subtidal sea urchin *Strongylocentrotus nudus*, J. Exp. Mar. Biol. Ecol., 224, pp.31-48, 1998.
- 5) 町口裕二: キタムラサキウニ *Strongylocentrotus nudus* 天然種苗の成長と摂餌について, 北海道区水産研究所研究報告, 57 号, pp. 81-86, 1993.
- 6) 堀川清司: 新編海岸工学, 東京大学出版, pp. 11-25, 1991.
- 7) 佐藤 仁, 佐藤 旬, 渡辺航希, 増田 亨, 松山恵二, 山下俊彦: 寿都漁港背後小段上の海藻現存量の変動特性と推定法, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), pp. 1101-1105, 2014.

第4章 沿岸施設の維持・管理手法

4.1 対象海域

自然環境調和機能の維持・管理計画を策定するに当たり、現状の把握から計画策定、実施、フォローアップまでに至る評価手法のフロー（案）を図 4-1 に示す。まず、事前調査においては、類似事例、既往の資料や文献、地元関係者からのヒヤリング、簡易モニタリングなどに基づき、現況把握や機能の阻害（低下）要因を整理する。詳細調査では表 4-1 に示す自然環境調和機能の確認のための評価要素を抽出し、機能の診断（再評価）を行う。

次に、阻害要因を排除・抑制または改変するための対策手法を検討し、費用対効果分析に基づき規模の設定を行い、維持管理計画を策定する。施工後は、継続的なモニタリング（効果調査等）を実施し、必要に応じて計画変更や改良工事を行うフォローアップを行う。なお、維持管理は、漁業者等地元関係者との協働の下で計画的に実施する必要がある。そのためには、初期段階から、検討過程や対策案等の様々な情報を産学官と共有する必要がある。この内、自然環境調和機能の再評価を行うための診断手法について検討した結果を次に述べる。

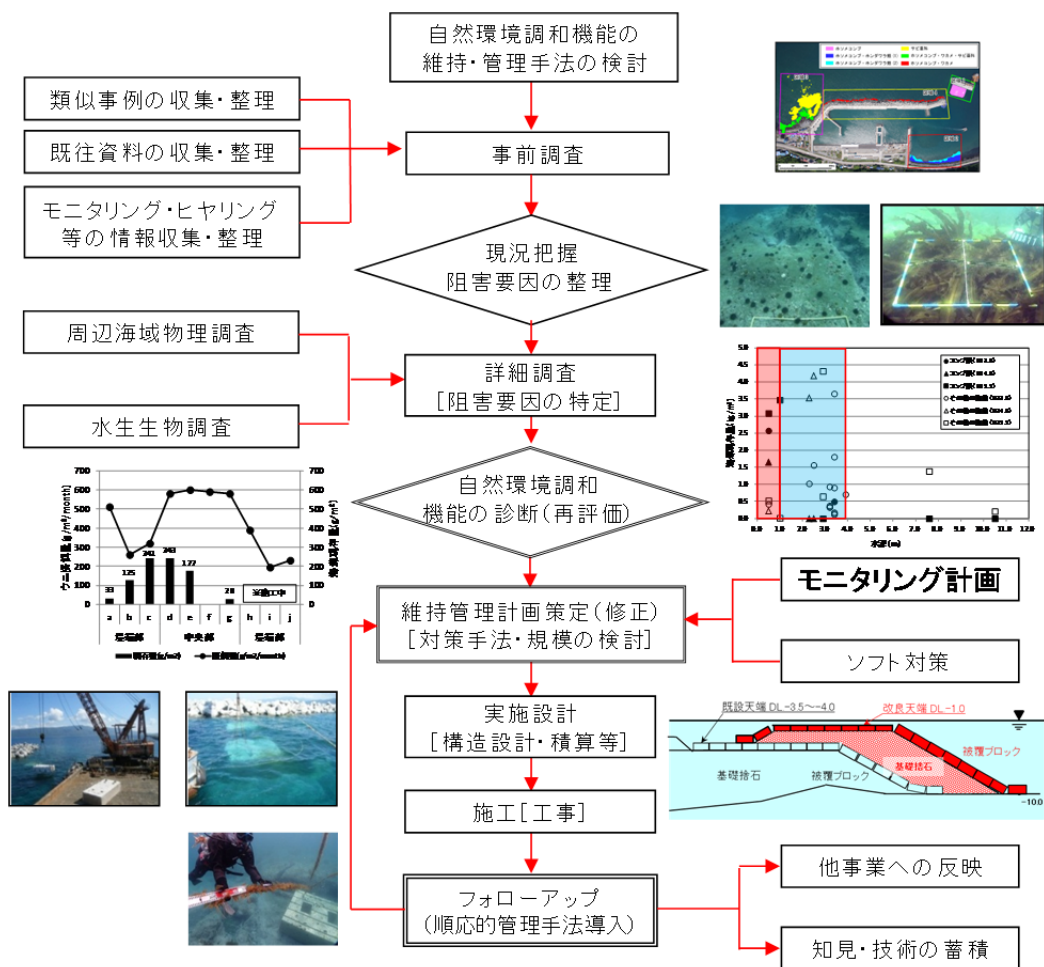


図 4-1 順応的管理による自然環境調和型沿岸構造物の評価フロー（案）

表 4-1 機能評価のための要素抽出一覧

項 目	要 素	備 考
藻場生息環境	現存量、栄養塩、光環境、濁度 etc	重複項目 有り
ウニ餌料環境	現存量、摂餌量 etc	
海域環境	流動・波浪、水深、水温、水質、底質 etc	

4.2 自然環境調和機能診断の必要性

前述のとおり，自然環境調和機能を有する寒冷地沿岸施設の藻場造成効果（藻場創出機能）が低下し，環境共生機能が十分に発現されない状況にあり，その原因として温暖化や栄養塩減少等の海藻の生育環境の変化，ウニ等植食性動物による食圧の増大などが挙げられることが判明した．しかしながら，個々の現地の施設においては，これらの原因が系統立てて究明されていないのが実態である．

沿岸施設の藻場造成効果が低下している場合，整備当初に期待した藻場創出機能が発現されているかどうかをまず把握することが必要である．そして，海藻生育環境としての適性を評価（機能診断）し機能の維持に対する阻害要因を特定する．その上で実際の対策（機能回復）を施す，といった機能保全対策（ストックマネジメント）的アプローチが合理的である．

これまで，例えば三上ら¹⁾による構造物の維持管理を実施する中でコンクリートのひび割れや鋼材の腐食といった構造物の物理的・科学的な観点からの機能診断手法は数多く提示されている．しかしながら，生物的な面からの系統的評価手法は未だ確立されておらず，自然環境調和型構造物の機能保全が進んでいないのが現状である．そこで，機能把握・評価，阻害要因特定といった機能診断手法，並びに対策手法の検討やフォローアップに至る一連の評価体系を確立し，最終的には沿岸構造物の維持管理計画あるいは機能保全計画に自然環境調和型沿岸構造物の維持・管理手法を導入することが重要である．

4.3 機能診断手法

自然環境調和機能の診断手法として、既往資料の収集整理（先行ガイドラインやマニュアル、各種学会での論文報告、道内での自然環境調和施設の整備例・モニタリング事例など）から、藻場創出機能に係る知見を整理するとともに、図 4-2 に示すとおり機能診断の全体スキームを整理した。本機能診断は①機能評価、②要因特定、③対策・効果確認の3つの項目から構成される。次に各項目について具体的な内容を述べる。

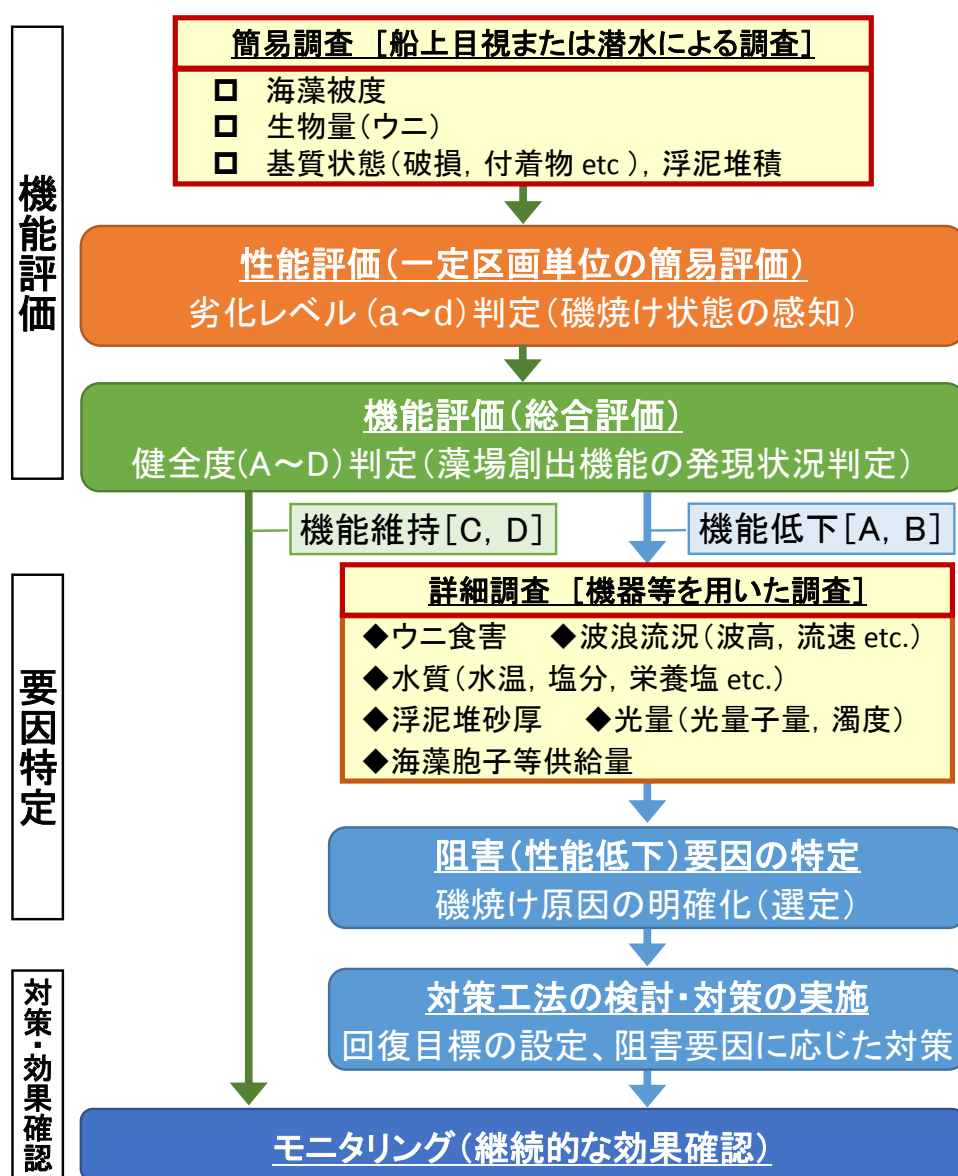


図 4-2 機能診断の全体スキーム

4.4 機能評価

機能評価は簡易調査、性能評価および機能評価（総合評価）の3つからなる。ここで簡易調査においては、例えば水中目視（潜水土）による海藻被度や食害生物による海藻の摂餌痕の有無を確認するなど、できる限り簡易に実施できる手法とし、なお、できるだけ指標の統一化を図る観点から、対象海域により分布する種が異なることもあり対象種の特定はしていない。

これらを実施した後、適切な評価基準により当該施設の自然環境調和型構造物としての機能評価を実施する。具体的には表 4-2 に示す藻場創出機能の評価指標（チェックリスト）を用いて、劣化レベルとして各項目で a（劣化あり）～d（劣化なし）の4段階評価を行い、最終的な総合判定に繋げる。

施設全体の総合評価は表 4-3 のとおりとし、海藻の繁茂状況および食害に対して重み付けした評価としている。この総合評価結果に対する対応としては、表 4-4 に示すような対応を考えており、Cは経過観察、AおよびBでは対策を講ずることを想定している。この総合判定において機能低下の評価となった場合には、施設機能に対する阻害要因を明らかにするとともに、必要に応じた対策工法の検討を行う必要がある。

表 4-2 藻場創出機能の評価指標（チェックリスト）

一次項目	劣化レベル	海藻の被度	ウニの分布密度
	a	5%未満	3個/㎡以上
	b	5～10%程度	2個/㎡～3個/㎡
	c	10～20%程度	1個/㎡～2個/㎡
	d	20%以上	1個/㎡未満
二次項目	劣化レベル	基質の状態	浮泥の堆積
	a	基質の破損または飛散が認められる	長期にわたって基質または葉面に浮泥が堆積している
	b	基質凹凸の摩耗または軽度の欠損等が認められる	基質または葉面の全面に堆砂が認められる
	c	固着性動物等による基質の優占が認められる	基質または葉面に対し部分的に堆砂が認められる
	d	異常なし	異常なし

表 4-3 総合評価

健全度	施設の状態	一次項目	二次項目
A	海藻被度が著しく低く、藻場創出機能が相当低下している状態	aが全数の2割以上	—
B	海藻被度が低く、藻場創出機能が低下している状態	a+bが全数の2割以上	—
		a+bが全数の2割未満	a+bが全数の2割以上
C	海藻被度が低い、藻場創出機能は保持されている状態 将来的に機能低下の可能性があり、継続観察が必要	a+bが全数の2割未満	a+bが全数の2割未満
D	機能の低下は認められず、十分な機能を保持している状態	すべてdである	—

表 4-4 評価結果に即した対応

評価結果	施設の状態	対応
A	自然調和型施設の機能が低下している状態	早急に改良の検討を行う
B	放置した場合に、施設の機能が低下する恐れがある状態	可能な限り対策を講じる
C	施設機能の低下は認められないが、継続して観察する必要がある状態	経過観察を行う
D	異常は認められず、十分な機能を保持している状態	地元利用者からの報告の収集、巡回時の状態確認

4.5 要因特定

阻害要因の特定には詳細なデータを取得する必要があるため、観測機器による現地調査や数値シミュレーション等を行う必要がある。具体的には表 4-5 に示すとおり阻害要因と思われる現象を特定するために、波高・流速計を用いた流況調査、光量子計・水温塩分計を用いた環境調査、採泥等底質調査、生物相調査などを実施する。また、疑われる機能阻害要因は複数存在することも考えられるので、簡易調査による現地の状況を十分把握した上で診断方法の抽出を図ることが重要である。

表 4-5 機能阻害要因と診断方法

疑われる 機能阻害 要因	原 因	診 断 方 法
ウニ類等による食害	摂餌行動や容易な環境にある	・ 波浪流況観測 ・ 数値解析 ・ 地形測量 ・ ウニフェンス設置等食害試験
孢子不足	着生できる孢子が少ない	・ 母藻ロープ設置による試験
基質競合 および不足	着底時期の異なる海藻、固着性動物の存在	・ 生物調査
浮泥堆積	懸濁物質の存在。払拭不可能である程に静穏である	・ セジメントトラップ ・ 数値解析
光量不足	海水の濁り。水深が深く光が届かない	・ 光量子量観測
栄養塩不足	生長に必要な栄養塩の不足	・ 水質分析
高水温	夏季ではコンブの枯死が進む 冬季ではウニの行動が活発になり 幼体コンブを捕食する	・ 水温観測
塩分低下	降水や河川出水等による淡水の拡散	・ 塩分観測
その他 水質異常	有害物質等の存在	・ 水質分析

4.6 対策・効果確認

阻害要因が特定された場合、回復目標の設定や阻害要因に応じた対策工法の検討を行い、対策を実施する。さらに、継続的なモニタリングにより効果の確認を行うことが重要である。仮に、十分な効果が発現されない場合は、対策および規模について再検討する必要がある。

4.7 機能診断の検証

本研究の対象である寿都漁港周辺の浅瀬はウニ・アワビの好漁場となっており、前述のとおり防波堤自体に藻場創出機能を付加することで背後水面等の高度利用を図った施設（図 4-3）がある。当該施設はスパン 2 においてウニの食害を抑制する物理的環境を創出することを目的に、背後小段の天端高を-3.6m から-1.0m まで嵩上げ改良が行われている（スパン 1 は工事中）。この改良前後の施設を対象として、本診断方法の妥当性の検証を行った。

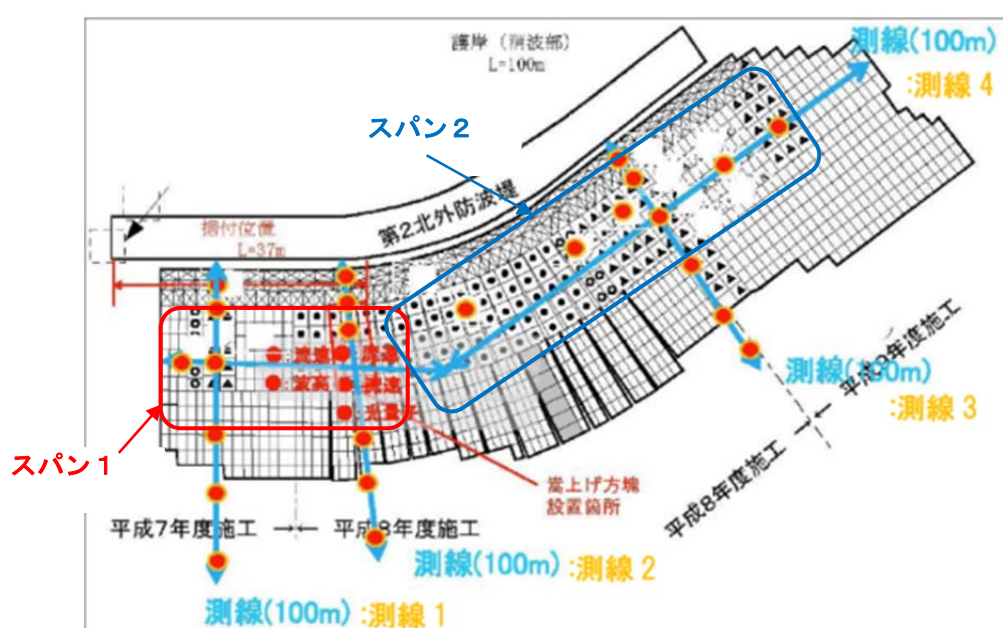


図 4-3 機能診断箇所

4.8 簡易診断結果と施設の総合評価（改良前）

改良前の調査結果を表 4-6 に示す。海藻の被度はアオサ目やフクロノリが大きく、ホソメコンブはスパン 1 の測点 4-2、スパン 2 の測点 4-5、4-7 のみに見られた。また、ウニは両スパンで出現していた。以上より簡易診断した結果を表 4-7 に示す。「海藻の被度」や「ウニの分布密度」によりスパン 1 は総合評価 B、スパン 2 は総合評価 A となった。

表 4-6 藻場調査結果（改良前）

測 線		測線4											単位
スパン		1				2							
測 点		4-1	4-2	4-3	4-4	4-5	4-6	4-7	4-8	4-9	4-10	4-11	
距 離		0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	m
網	種 名												
緑藻綱													
	アオサ目	10	20		+	5	+				+		%
褐藻綱													
	フクロノリ	5	+	10	10	10	20				+	+	%
	ワカメ												%
	ホソメコンブ		10			10		+					%
紅藻綱													
	イギス						25						%
	アカバ					+							%
	ダルス	10	25										%
	不明						10						
	モロイトグサ							10					%
動物	不明巻き貝類				2	3				3	2	5	
	クボガイ類		1	3			3	1	1				個/m ²
	ユキノカサガイ	6		2	3								個/m ²
	ヨメガカサ	2					2				3		個/m ²
	キタムラサキウニ	2		8	5	7	3		1	1	2	1	個/m ²
	エゾバフンウニ						1						個/m ²
	ヤドカリ類	2					2						個/m ²
	マナマコ									1			個/m ²
	マボヤ							1					個/m ²
	キヒトデ											1	個/m ²
	エゾアワビ		1								1	1	個/m ²

+:被度5%未満

表 4-7 簡易診断結果（改良前）

スパン		1				2						
測 点		4-1	4-2	4-3	4-4	4-5	4-6	4-7	4-8	4-9	4-10	4-11
1 次項目	海藻の被度	d	d	c	c	d	d	a	a	a	a	a
	ウニの分布密度	b	d	a	a	a	a	d	c	c	b	c
2 次項目	浮泥の堆積	d	d	d	d	d	d	d	d	d	d	d
	基質の状態	d	d	d	d	d	d	d	d	d	d	d
総合評価		B					A					

4.9 詳細診断結果（改良前）

上述のとおりスパン2は、簡易診断結果はAであり阻害要因を究明する必要がある。観測として流況、光量子量、栄養塩、水温・塩分等および波動場解析によるウニの摂餌行動の可否について評価した。

主要な現地観測結果と考察を以下に述べる。

(1) 観測期間 (H25. 2. 6~3. 5) において小段上 (水深-3. 6m) の流速は、ウニの摂餌を抑制する流速 (0. 25m/s 以上) の出現頻度はわずか 2. 2%であり、ウニの摂餌行動を制限できない環境であったと推察される。よって、流速を増加させウニの摂餌圧を低減させる構造形式とすることが重要である。

(2) 小段表層付近の光量子量は $200 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ を超えており、これまでコンブの強光阻害について報告されていないことから、光環境については十分に確保され、コンブ生育の阻害要因となっていない。

(3) 冬季 (H25. 2. 18) において、硝酸態窒素は窒素の閾値である $0. 014\text{mg}/\text{l}^{(2)}$ 以上となり、栄養塩に問題はないといえる。

(4) 同じく水温は $6. 6\sim 6. 8^{\circ}\text{C}$ と比較的高く、キタムラサキウニの活動活発化に影響を及ぼしている可能性がある。

次に、流動場の解析による対策工法の検討を行った。改良前の施設における現地観測結果ではウニの摂餌行動を制限できない環境にあった。このため非定常緩勾配不規則波動方程式により底面波動流速を算定し、ウニの摂餌行動を制限する流速 0. 25m/s、摂餌限界流速 0. 40m/s を目安とした評価を実施した。

嵩上げ前では 0. 40m/s 以上の流速が 40%以上出現するのは 1 月、12 月に限られ、0. 25m/s 以上の出現頻度を加えれば 1~3 月と 10~12 月 (秋季~冬季) において摂餌行動の抑制が可能である。一方、嵩上げ後は、天端水深が浅くなり 0. 40m/s 以上の出現頻度が 1~4 月と 9~12 月で 40%以上発生することが確認された (図 4-4)。つまり、嵩上げによりこの期間におけるウニの摂餌行動を抑制することができることがわかる。

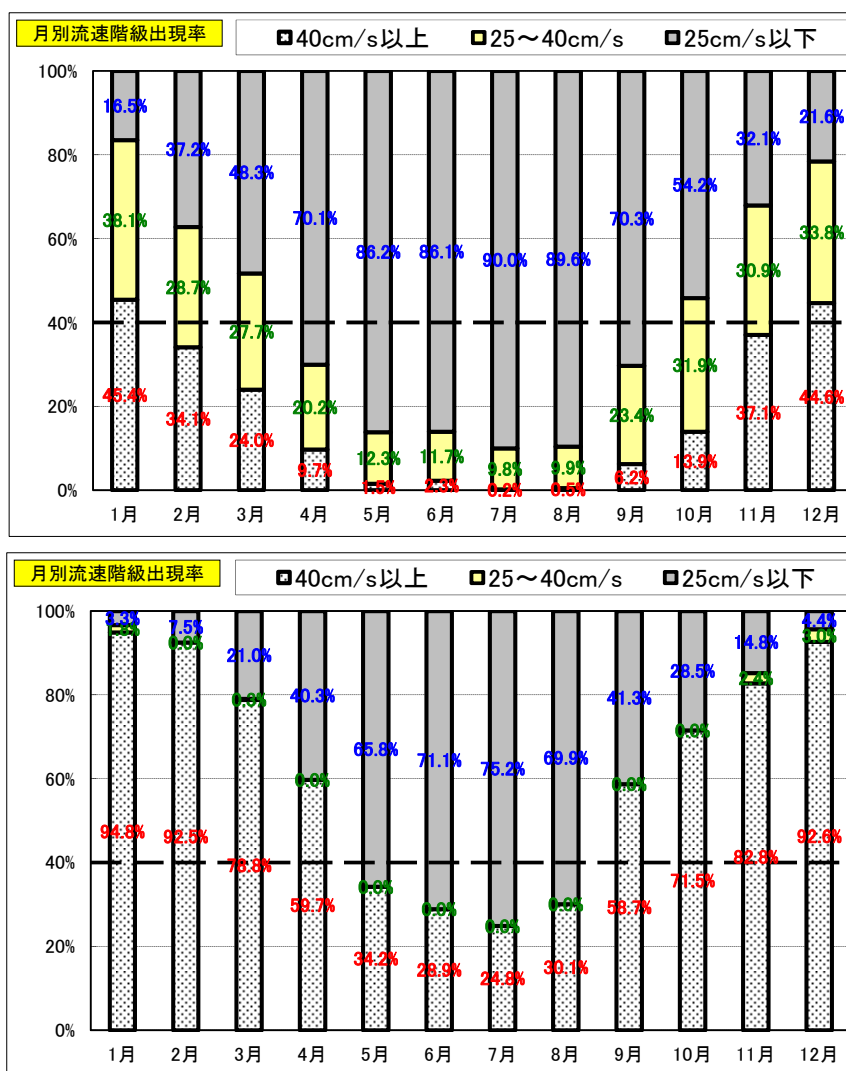


図 4-4 流速出現率（上：改良前 下：改良後）

4.10 簡易診断結果と施設の総合評価（改良後）

改良後（H26.2）の調査結果を表 4-8 に示す。ここでスパン 1 は未改良である。改良されたスパン 2 では海藻被度が大きく、ウニの出現数が減少（測線 4⑦で 1 個体/m²のみ）していた。そして簡易診断結果は表 4-9 のとおりとなり、未改良のスパン 1 は総合評価 A であるのに対し、改良したスパン 2 は総合評価 C となった。これは改良による自然環境調和機能の回復を適正に捉えたものであり、本診断手法の妥当性を示しているものと考えられる。

表 4-8 藻場調査結果（改良後）

側線			測線1			測線2			測線3			測線4			測線5			単位
スパン									2									
測点			① 小段 -4.0m	④ 小段 -4.0m	⑦ 小段 -4.0m	① 小段 -4.0m	④ 小段 -4.0m	⑦ 小段 -4.0m	① 小段 -1.0m	④ 小段 -1.0m	⑦ 小段 -1.0m	① 小段 -1.0m	④ 小段 -1.0m	⑦ 小段 -1.0m	① 小段 -1.0m	④ 小段 -1.0m	⑦ 小段 -1.0m	
植物	緑藻綱	アオサ							30	10	+			10	5		%	
		アナアオサ	10	20	20	+	+	+			20	20	+		10	10	30	%
	褐藻綱	セイヨウハバノリ							10					10		10	10	%
		フクロノリ							5	30	20	20	80	80	10	80	70	%
		カヤモノリ							+	10		10	+		20	10	5	%
		ケウルシグサ													30			%
		ホソメコンブ							10	+		+						%
		ワカメ								+		+	+	+				%
	紅藻綱	ノリ								70	10			10	5			%
		イギス									5							%
		アカバ											+					%
		ダルス	10	10	20													%
	ヌメハノリ								15			10			10		%	
動物	軟体動物	イガイ							1	2	1							個
		カキ類																個
		クボガイ類	20		25			25	2	2	2	2						個
		ユキノカサガイ		30														個
		ヨメガカサガイ								20								個
棘皮動物	キタムラサキウニ	5	3	2	7	8	9				5	6	7	4	1		個	
植物出現種類数		2	2	2	1	1	1	1	6	6	5	6	7	4	7	3	4	種
動物出現種類数		2	2	2	1	1	2	2	3	2	1	0	0	2	0	0	種	

* 1m²当りの被度、本数、個体数を表示する。また、「+」表示は被度5%未満を示す。

表 4-9 機能評価結果（改良後）

スパン		1						2								
測点		① 小段 -4.0m	④ 小段 -4.0m	⑦ 小段 -4.0m	① 小段 -4.0m	④ 小段 -4.0m	⑦ 小段 -4.0m	① 小段 -1.0m	④ 小段 -1.0m	⑦ 小段 -1.0m	① 小段 -1.0m	④ 小段 -1.0m	⑦ 小段 -1.0m	① 小段 -1.0m	④ 小段 -1.0m	⑦ 小段 -1.0m
1次項目	海藻の被度	d	d	d	a	a	a	d	d	d	d	d	d	d	d	d
	ウニの分布密度	a	a	b	a	a	a	d	d	d	d	d	d	c	d	d
2次項目	浮泥の堆積	d	d	d	d	d	d	d	d	d	d	d	d	d	d	d
	基質の状態	d	d	d	d	d	d	d	d	d	d	d	d	d	d	d
総合評価		A						C								

4.11 まとめ

自然環境調和型構造物の維持管理手法の導入を目的に、藻場創出機能の機能保全を評価する手法を提案した。本診断手法を用いて寿都漁港を対象に検討したところ、施設改良前は機能低下が生じていたものが、要因特定（詳細調査）と対策検討により改良された後には、機能が回復された診断結果となり、改良前後の藻場創出機能を適正に評価することができるなど、提案した診断手法の妥当性が得られたものと考えられる。

今後は当診断方法を多くの施設で実施、検証を進め、項目や劣化レベル指標の見直し等の改善を図ることで、より汎用性の高い診断方法となると考えられる。また、機能診断にあたって、特に「海藻被度」については調査時期によって被度が異なり評価に差異が生ずることが予想される。この点についても留意が必要であり、今後の課題とする。

参考文献

- 1) 三上信雄，藤田孝康，保坂三美，極檀邦夫，重松宏和，笠井哲郎：沿岸構造物の効率的な維持管理のための簡易的な老朽化診断手法に関する研究, 海洋開発論文集, Vol. 26, pp. 165-170, 2010.
- 2) 水田浩之，鳴海日出人，山本弘敏：ホソメコンブ配偶体の生長・成熟に及ぼす窒素・リンの影響，水産増殖 49(2)，pp. 175-170，2001.

第5章 結論

本研究では、自然環境調和型構造物の整備後に藻場造成機能を評価する調査・検討が十分なされていない状況において、藻場造成機能の長期的持続性が不明であり藻場が消失した場合の原因が不明のままで機能回復に資する既存施設の改良手法も未確定の状況を解決するための検討を行った。具体的には、

- ①自然環境調和型構造物の藻場造成効果の低下要因の一つである磯焼けの状況を把握する。
- ②数年に及ぶ過去の海域データを収集整理し、海藻量と海域環境との関連性を把握する。
- ③海藻の成長状況を把握するため、海藻現存量を推定(定量化)するモデルの確立を図る。
- ④海藻現存量推定モデルの現地への適合性を図る。
- ⑤既存施設（自然環境調和型構造物）の改良手法の確立を図る。

ことを目的に研究を実施した。以下に本研究の結論と今後の課題を示す。

5.1 海藻量年変動特性

自然環境調和型構造物の藻場造成機能に関して、建設当時（1998年）からの海藻量の経年変化を明らかにした。また、2008年からは海藻成長に影響を与える水温・波高の物理環境条件と海藻成長との関連性について明らかにした。さらに、2013年からは海藻成長量の月別変化について検討した。

- (1)海藻量は年毎の物理環境に大きく依存し特に低水温・高波浪が海藻繁茂に好条件である。
- (2)海藻の成長特性（発芽時期）は年毎の物理環境により変化する。
- (3)海藻現存量を推定する際は海藻成長開始時期の検討が必要である。
- (4)波浪・水温等のパラメータの平均間隔を変えると、短期間で大きく変動しウニの摂餌活動に大きく影響することが判明した。

5.2 海藻現存量推定法の構築

海藻の現存量の月別変化を推定するため数値計算モデルの改良を行った。

- (1)海藻の成長開始時期を変えることで現存量に大きな差が出ることが判明した。
- (2)計算パラメータを10日平均値にして現地の環境変動に近づけることでウニの摂餌による影響が明確に表れた。
- (3)特に、海藻幼芽期のウニの摂餌量の変化によっては海藻現存量に大きな違いが出ることが判明した。
- (4)現地の観測結果と月別変化量を比較することで計算開始時期とパラメータの平均間隔が設定でき、対象海域での藻場造成機能を評価することが可能となる。

5.3 海藻現存量推定法の現地への適合性、評価手法

- (1)現地の刈り取りによる海藻量の取得が不的確な場合において、写真等の画像データから海藻繁茂状況を分類し、現存量のランク付を行う手法を提案した。
- (2)上記の手法による 2013 年の現地データと海藻現存量推定結果を比較したところ、当年の 2 月 1 日から海藻成長開始とし、10 日平均計算とした計算条件が現地の海藻変動に最も則した結果となった。
- (3)嵩上げ改良による藻場回復効果が確認され、計算結果も現地を良く表していることが判明した。
- (4)磯焼け要因や嵩上げ改良による藻場回復手法を定量的に検討する手法として本現存量推定法が有効であることが判明した。

5.4 沿岸施設の維持・管理手法

自然環境調和型構造物の維持管理手法の導入を目的に、藻場創出機能の機能保全を評価する手法を提案した。本診断手法を用いて寿都漁港を対象に検討したところ、施設改良前は機能低下が生じていたものが、要因特定（詳細調査）と対策検討により改良された後には、機能が回復された診断結果となり、改良前後の藻場創出機能を適正に評価することができるなど、提案した診断手法の妥当性が得られたものと考えられる。

5.5 今後の課題

本研究では、海藻量と海域の物理環境パラメータを長期間にわたり比較することで、波浪・水温・海藻量の年変動特性を明らかにし、それらの特性を考慮して、より実海域の海域環境に沿った海藻現存量の推定法を確立した。しかし、研究の過程において、より定量的な現存量推定のためにさらに検討すべき事項が判明した。今後の課題として以下に示す。

- (1)過去に実施されてきた坪刈りによる調査方法では海藻自体を刈り取ることで、同個体の連続的な変動データを得ることは不可能である。そこで推奨されるのは、実際には測定箇所として決定した枠は固定し、手を加えずに月毎の画像・動画計測を行い、それとは別の測定箇所に近い箇所では坪刈りを行うなどして、ランク付けの際の指標(g/m^2 の目安として)とするのが望ましいと考えられる。
- (2)本研究での海藻成長式としては、対象種をホソメコンブとしている。しかし実際の調査結果では多様な海藻が繁茂している。成長式がホソメコンブを対象としていることなどから定量的に差異が発生することも考えられる。よって、もし現存量推定時においてホソメコンブ以外の海藻種による優占率(阻害率)のような項目が考慮されると、より正確な推定が

可能になると推察される。

(3)本研究では、6月に海藻が最大繁茂することを前提条件と海藻現存量の推定を試みた。しかしながら、現地調査結果を見ると、6月の海藻着生状況の写真では既に先枯れ等が始まっているのが確認でき、繁茂状況としては5月のものとさほど変わらないケースがある。もしくは5月の方が高繁茂になるケースも考えられる。このことから、海藻の衰退時期(最大繁茂時期)も年によって変動する可能性があると考えられる。海藻成長開始時期の変動に加えて、海藻衰退時期の変動も考慮した推定方法を検討する必要があると考えられる。

(4)本研究ではウニの個体数を1㎡当たり20個として定数として扱っている。しかし、実際にはウニ個体数はその時の流況によって大きく変動するものであると考えられる。また、ウニの深浅移動、基質による影響等も考えられるため、より定量的に摂餌量を求めるためには、流速の関数として個体数を決定、摂餌圧に重みをつけるなどの検討が必要と考えられる。

(5) 沿岸施設の維持・管理診断方法に関しては今後、多くの施設で実施、検証を進め、項目や劣化レベル指標の見直し等の改善を図ることで、より汎用性の高い診断方法となると考えられる。また、機能診断にあたって、特に「海藻被度」については調査時期によって被度が異なり評価に差異が生ずることが予想される。この点についても留意が必要と考えられる。

謝 辞

本論文の作成に際し、ご指導、ご助言、ご協力を賜った方々のお名前を記して、心からお礼を申し上げる次第です。

本研究に関して終始ご指導ご鞭撻を頂きました北海道大学大学院工学研究院 山下俊彦教授には心より感謝致します。また本論文の審査を通じて貴重なご意見とご指導をいただきました同大学院 清水康行教授，泉 典洋教授，渡部靖憲准教授に深く感謝致します。

学位取得の機会を与えてくださり，研究期間中に関してもご指導・ご助言・激励を賜りました国立研究開発法人水産総合研究センター水産工学研究所の山本潤博士，大村智宏博士に深く感謝申し上げます。

私が所属します国立研究開発法人土木研究所寒地土木研究所寒地水圏研究グループ水産土木チーム上席研究員 三上信雄博士を始めとするこれまで所属の研究員の皆様には，多大なご迷惑をおかけしたことを心からお詫びするとともに，暖かいご支援とご高配をいただきましたことに深く感謝申し上げます。

本研究を遂行する上で多大なご指導をいただくとともにご協力ご支援をいただいた松山 恵二博士，鳴海日出人博士，黄金崎清人氏，本松敬一郎博士，酒向章哲氏，岩倉祐二氏に深く感謝いたします。また，本論文をとりまとめるにあたり適切なご助言ご協力を賜りました同大学院研究室所属の皆様にも厚く感謝申し上げます。

最後に，本論文をまとめるまでに数多くの方々のご協力をいただきました。ご氏名を記すことが叶わなかった全ての皆様にも心より感謝申し上げます。

佐藤 仁