

漁村におけるCO₂排出削減・固定効果の 総合評価に関する研究

THE STUDY ON THE EVALUATION OF THE EFFECT OF CO₂ EMISSION
REDUCTION AND CO₂ FIXATION IN FISHING VILLAGES

浅川典敬¹・加賀屋誠一²・米田義昭³・古屋温美⁴・上杉智⁵・長野章⁶
Noritaka ASAKAWA, Seiichi KAGAYA, Yoshiaki MAITA, Atsumi FURUYA,
Satoshi UESUGI, and Akira NAGANO

- ¹正会員 財団法人 漁港漁場漁村技術研究所 (〒101-0047 東京都千代田区内神田1-14-10内神田ビル)
²正会員 工博 北海道大学大学院工学研究科 (〒060-8628 札幌市北区北13条西8丁目)
³正会員 北海道大学名誉教授 (〒060-8628 札幌市北区北13条西8丁目)
⁴正会員 工博 北海道大学大学院水産科学研究院 (〒041-8611 函館市港町3丁目1-1)
⁵国土交通省北海道開発局函館開発建設部 (〒040-8501 函館市大川町1番27号)
⁶正会員 工博 公立はこだて未来大学教授 情報アーキテクチャ学科 (〒041-8655 函館市亀田中野町116-2)

The CO₂ emission in fishing villages results mainly from the fossil fuel consumption during the fishing activities and disposition of waste products from processing. Through the use of the data of Hakodate City, Hokkaido as a study model, the study shows the quantification of the reduction effect of CO₂ emissions by improving the efficiency of fisheries, and of CO₂-fixation in the coastal area from the physical and biological aspects. The study includes a comprehensive WIO table-based discussion of the effects of CO₂-reduction/fixation in the fishing villages as well as the suggestions for the future development of fishery infrastructure.

Key words: fishing village, development of fishery infrastructure, CO₂ emission, CO₂ fixation, WIO, energy conservation, natural energy

1. はじめに

漁業は既存調査から、産業生産規模に比して温暖化要因の1つであるCO₂排出量の多い産業である。一方その根拠地である漁村はCO₂排出削減・固定効果の潜在力に富んだ場である。よって、水産基盤整備事業等を通じてCO₂排出削減に資する施策の実施が重要な課題となっている。本研究の目的は、水産基盤整備等が地球温暖化対策に貢献する意義を明らかにするため、漁村(旧南茅部町)でのCO₂排出量の削減及び海域における固定・吸収機能に資する可能性について、物理的・生物的側面から検証し、CO₂排出削減・固定効果の評価(漁村のCO₂固定・削減効果について、自然・人為的行為を総合的かつ定量的に把握)することである。評価にはライフサイクルを通じたCO₂排出量の評価を可能とする廃棄物産業連関表(以下WIO)にて分析を行い、併せてCO₂排出・固定にかかる原単位の作成を行った。調査フローを図-1に示す。

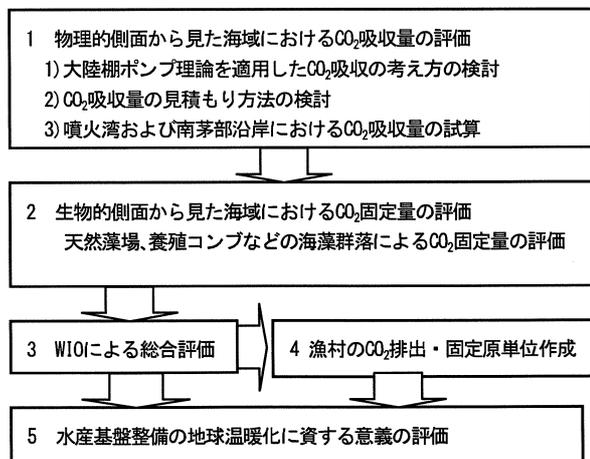


図-1 CO₂排出削減・固定効果の総合評価研究フロー

2. 旧南茅部町におけるCO₂固定量の試算

(1) 物理的側面から見た海域におけるCO₂吸収量の評価

中山ら¹⁾は東シナ海における5年間の観測結果と既往データから海洋の炭素収支を見積った結果、大気から海洋が35gC/m²/年を吸収し、大陸棚域から外洋中深層へ運ぶ機構（大陸棚ポンプ）が作用していることを見出した。これによれば、炭素吸収量は90gC/m²/年と報告されている。旧南茅部町沿岸域は噴火湾口南側に位置し同湾に連続した海域であることから、本研究では、湾内と同様な炭素吸収機構を有すると想定し、噴火湾全体の炭素吸収量から旧南茅部町沿岸域の炭素吸収量を試算した。図-2に噴火湾のCO₂移送のイメージを図-3に炭素吸収試算のフローを示す。

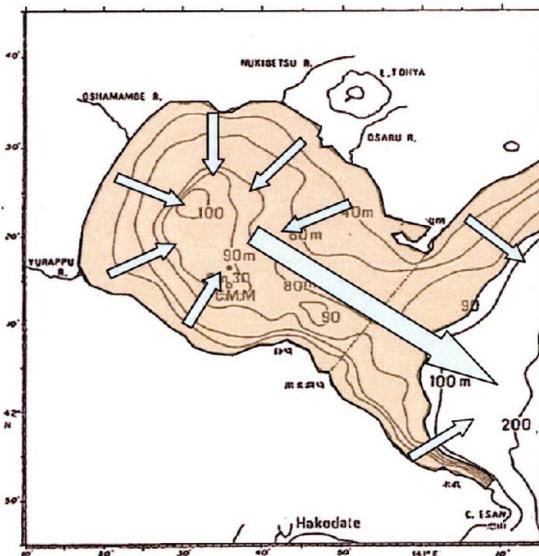


図-2 噴火湾のCO₂移送のイメージ

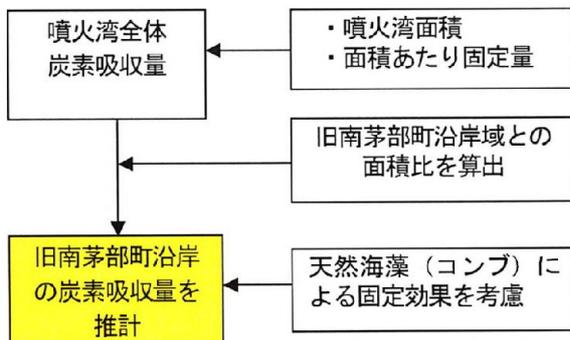


図-3 炭素吸収量の試算のフロー

旧南茅部町沿岸の漁場区域のラインは、図-4に示すように噴火湾の最深部の水深90mラインとほぼ一致しており、噴火湾と連続した海底地形であることから、当該漁場区域を対象海域として試算した。また、噴火湾の面積から湾全体の吸収量を算出し、旧南茅部町沿岸の漁場区域から求めた面積との比から炭素吸収量を試算した。

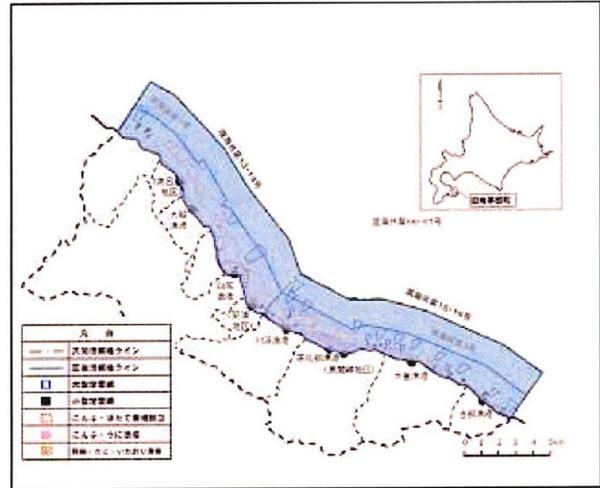


図-4 旧南茅部町沿岸の漁場区域

$$\text{① 噴火湾の年間炭素吸収量} = \text{噴火湾面積 (km}^2\text{)} \times \text{単位面積あたり吸収量 (gC/m}^2\text{/年)}$$

$$\text{② 旧南茅部町の炭素吸収量} = \text{噴火湾炭素吸収量} \times \text{旧南茅部町漁場面積} / \text{噴火湾面積}$$

ここで、噴火湾面積は2,485km²、噴火湾の炭素吸収量を90gC/m²/年(=90t-C/km²/年)とし、旧南茅部町漁場面積を138km²とする。上記①、②より旧南茅部町沿岸域の炭素吸収量は、次式となる。

$$(\text{CO}_2 \text{ 吸収量}) = 2,485(\text{km}^2) \times 90(\text{t-C/km}^2/\text{年}) \times 138(\text{km}^2) / 2,485(\text{km}^2)$$

$$= 12,420 \text{ t-C/年} = 45,540 \text{ t-CO}_2/\text{年}$$

ここで試算した大陸棚ポンプによる炭素吸収量には、海中の植物プランクトンや動物プランクトン、海藻や生物を由来とした溶存・懸濁態の炭素が含まれている。よって、ここでは、求めた炭素吸収量が過大評価とならないよう、後述する天然海藻（コンブ）の流れ藻による固定量を引いて、以下の通り再計算を行った。

旧南茅部町沿岸域の炭素吸収量

$$= 45,540 - \text{天然藻場のCO}_2\text{固定量}$$

$$= 45,540 - 10,253 = 35,287 \text{ t-CO}_2/\text{年}$$

(2) 生物的側面から見た海域におけるCO₂固定量の評価

生物的側面からのCO₂固定量の評価は、本研究においては沿岸における海藻（コンブ類）の炭素固定に注目し、評価を行った。海藻の炭素循環の機構は、図-5に示すとおり、①大気-海洋間のやりとり②生産者（植物プランクトン、海藻(草)類）による炭素の取り込み③呼吸や排出物・遺骸の分解による海中への回帰④摂餌による体内への炭素の取り込み⑤遺骸・生体が分解されず下方へと輸送されるもの（最終的に底層へ堆積）⑥流出海藻のうち分解されず深層循環へ移送さ

れるものとなっているが、海藻（コンブ類）の炭素固定については、上記のうち流出（流れ藻）による中深層循環への移送量を長期間固定される炭素量として試算した。なお、試算にあたっては当該海域の特性を踏まえ、天然藻場、人工藻場、養殖コンブの3タイプに分類して行った。

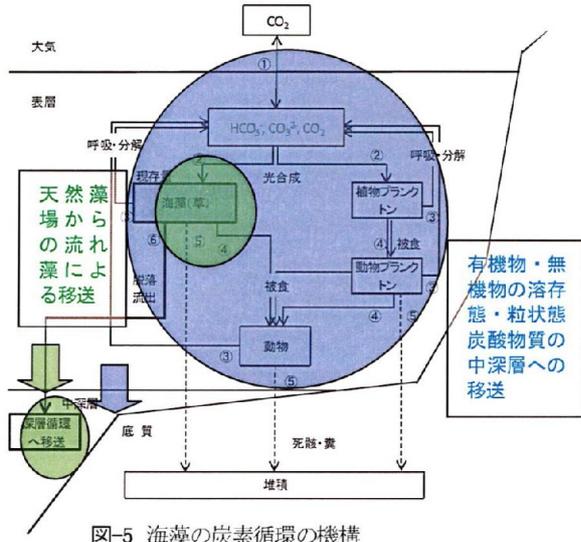


図-5 海藻の炭素循環の機構

a) 天然藻場の海藻による炭素固定の試算

天然コンブ場による炭素固定量の試算方法を図-6に示す。まず、対象海域の面積から藻場の現存量を推計し、海藻の炭素固定量を試算した。試算にあたっては、表-1に示す全国の天然コンブ場の調査結果を活用し、現存量とP/B比（年間純生産量と現存量の比）^{2),3)}及び炭素含有率から対象面積（315ha）分のCO₂固定量を算出し、平均値を求めてこれを対象海域のCO₂固定量とした。

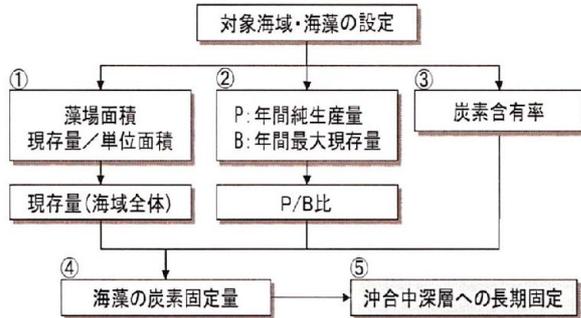


図-6 中深層への炭素固定の試算フロー

表-1 天然コンブ場の推計炭素固定量

藻場面積 (ha)	現存量 (kgDW/m ²)	海域全体の現存量 ^{※1} (tonDW)	P/B比	炭素含有率 (%)	炭素固定量 ^{※2} (tonC)	CO ₂ 固定量 ^{※3} (tonCO ₂)
315	3.7	11,639	2.3	30	8,031	29,447
	2.5	7,864	3.5	30	8,258	30,278
	2.1	6,606	3.5	30	6,936	25,433
平均					7,742	28,386

※1: 海域全体の現存量=藻場面積×現存量

※2: 炭素固定量=海域全体の現存量×P/B比×炭素含有率

※3: 二酸化炭素固定量=炭素固定量×CO₂:1モルの重量(44g)/C:1モルの重量(12g)

また、流出したコンブが中深層部へ移送される率については、米国のジャイアントケルプで年間純生産量 23kgDW/m²のうち約70%は枯死脱落により漂流物となり、最終的に（純生産量の）約35～50%が藻場外へ流出していることが報告⁴⁾されている。本研究では中央値の43%が移送されるものと仮定して長期のCO₂固定量を試算した。さらに、基礎生産を行う際の炭素取り込みの効率は、植物プランクトンのC/N比: αとコンブのC/N比: β

（表-2参照。ここでは、40を採用して試算）との関係において、(1-α/β)となることから、
 (天然藻場のCO₂固定量) = (現存量から推計した固定量) × (中層部移送率) × (1-α/β)
 = 28,386 (t-CO₂/年) × 0.43(%) × (1-6.6/40)
 = 10,253 t-CO₂/年 となる。

表-2 植物プランクトンとマコンブのC/N比

パラメータ	数値	出典
α	6.6	Redfield比 (C:N:P=106:16:1)
β	40	Mizuta et al. (1998) ⁵⁾ マコンブ先端部と基部の1～9月の概ねの平均値約40. 米田らの研究によれば約20 (1992) ⁶⁾

b) 人工藻場の海藻による炭素固定の試算

人工藻場の炭素固定効果については、渡島支庁管内における水産基盤整備事業等の実績を勘案し、5,000m²の造成面積を想定し、表-3の同管内における藻場造成結果を踏まえ、水深帯5mで着生量4.1kg/m²を試算に用いた。

表-3 渡島支庁における藻場造成試験結果

調査年	地区	水深(m)	着生量 (kg/1本)	試験礁	対象
H13	南茅部 尾札部	3.0	2.84	立軸礁 φ10mmロープ3本総り1.2m	1年目マコンブ
		5.0	0.68		
		9.0	0.01		
		15.0	0.00		
H14	南茅部 尾札部	3.0	0.00	立軸礁 φ10mmロープ3本総り1.2m	1年目マコンブ
		5.0	4.47		
		9.0	0.00		
		15.0	0.00		
調査年	地区	水深(m)	着生量 (kg/m ²)	試験礁	対象
H8	函館石崎	6.4	2.50	鋼製石詰礁 5m(L)×5m(B)×4m(H)	1年目マコンブ
		6.2	7.88		
		5.7	3.97		
		6.3	5.99		
		6.4	8.50		
H9	函館石崎	6.2	3.41	鋼製石詰礁 5m(L)×5m(B)×4.2m(H)	1年目マコンブ
		5.7	6.40		
		6.3	6.82		
		6.4	0.00		
		6.2	2.25		
H9	函館石崎	5.7	0.00	鋼製石詰礁 5m(L)×5m(B)×3.2m(H)	2年目マコンブ
		6.2	0.00		
		5.7	0.00		
		6.3	0.85		

これらの条件にて試算すると、

(人工藻場のCO₂固定量) = (造成による増殖量とP/B比からの推計固定量) × 0.43 × (1-α/β)
 = 77 × 0.43 × (1-6.6/40)

= 28 t-CO₂/年 となる.

(ここで、P/B比マコンブの3.5³⁾を適用)

c) 養殖コンブによる炭素固定の試算

旧南茅部町沿岸域のコンブ養殖においては、成長を促すための間引き作業が冬季に行われ、間引きされたコンブはそのまま海中へ放出されている。また、夏期の出荷時期にも加工・取り扱いや出荷時の規格などの理由から1.5m以上の部分を切断し海中へ放出している。放出されたコンブは天然藻場の流れ藻と同様に分解されず沖合中深層へ輸送されるものとしてCO₂固定に寄与すると考え、表-4に示した値を用いて養殖コンブの放出量を推計しCO₂固定効果を試算した。

表-4 養殖コンブ海中投棄による推計炭素固定量

養殖コンブ生産量 (t-DW) ^{※1}	海中投棄率 ^{※2}	コンブ放出量 (t-DW)	炭素含有率(%)	炭素固定量 (t-C)	CO ₂ 固定量 (t-CO ₂)
3,524	39	1,374	30	412	1,511

※1 南かやべ漁業協同組合の養殖コンブ生産実績 (平成17年度業務報告書)

※2 水産バイオマス資源化技術開発 (平成17年度報告書)

よって、以下のとおり固定量を試算する。

(養殖コンブ投棄によるCO₂固定量)

$$= \text{推計固定量} \times (1 - \alpha / \beta)$$

$$= 1,511 \times (1 - 6.6/40)$$

$$= 1,269 \text{ t-CO}_2/\text{年}$$

d) 海藻(コンブ)による炭素固定の収支

a)からc)の結果をまとめると表-5となる。海藻(コンブ)による年間のCO₂収支は11,538t-CO₂の固定となった。

表-5 海藻(コンブ)のCO₂収支(単位:t-CO₂)

	CO ₂ 固定量	CO ₂ 排出量	CO ₂ 収支 (+:排出, -:固定)
天然藻場	10,253	-	-10,253
人工藻場	28	12 ^{※1}	-16
養殖コンブ	1,269	-	-1,269
合計			-11,538

※1 人工藻場造成事業の建設工事に伴うCO₂発生量

3. WIOによる総合評価

(1)WIO適用の考え方

上述のCO₂固定効果について、旧南茅部町において、浅川らの作成⁷⁾した廃棄物産業連関表(WIO)を用いて評価を試みた。WIOは、産業連関表を用いて各産業から排出されるCO₂量を推計(ヒアリング調査と全国廃棄物産業連関表の按分)し作成した。この際、森林・海域のCO₂固定効果、人工藻場によるCO₂固定は新規部門として産業活動に取り入れることとした。また、既存の漁業・水産加工部門のCO₂排出削減量は、既存部門のCO₂排出量から今回算出の排出削減量を減じ、それによる経費の削減量も投入係数に反映した。また、シナリオ実現に要する費用(設備投資額)は耐用年数を考慮して1年間の費用を投入することとした。新規部門の投入、産出構造を表-6に示す。森林による固定の投入は森林の維持管理費をサービス部門に計上、産出はCO₂排出削減量を最終需要増分として最終需要(FLD)に計上した。大陸棚ポンプと天然藻場による固定は産出量を最終需要増分としてFLDに計上した。さらに、人工藻場は投入として年間事業費(維持管理費含む)をサービス部門に計上し、産出を最終需要増分としてFLDに計上し、年間漁獲金額をコンブ漁業部門への産出とした。

表-6 新規部門の動脈部門(投入、産出)、静脈部門、CO₂排出量

	動脈部門(百万円)		最終需要(FLD) (t-CO ₂)	CO ₂ 排出部門 (t-CO ₂)
	投入	産出		
森林固定	・森林維持管理費 維持管理原単位3,564円/ha ^{※1} × 3,531ha=12.6百万円	-	20,402	-20,402
大陸棚ポンプ	-	-	35,287	-35,287
天然藻場	-	-	10,253	-10,253
人工藻場	・1年当たり事業費(維持管理費含む) (耐用年数30年) ・人工藻場規模5,000m ² ・事業費 86.8百万円 ・維持管理(雑海藻駆除) 42百万円 ・1年あたり4.3百万円 ^{※2}	・単位漁獲量0.11kg/m ² ・漁獲金額5,000m ² × 0.11kg/m ² × 2,526円/kg = 1.4百万円 ^{※3} (コンブ漁業 部門へ産出)	16	-16
養殖コンブ	-	-	-	-1,269

※1 北海道の予算から計算 ※2 渡島支庁の事業例から計算 (5,000m²造成、耐用年数30年、2年毎の雑海藻駆除)

※3 推計天然コンブ場面積、南かやべ漁業協同組合実績より(漁獲1.084kg/ha、2,526円/kg)

また、養殖コンブによるCO₂固定量は、既存部門のCO₂排出量から減じた。

(2) 漁業、水産加工業部門のCO₂排出削減量の算出
次に、表-6で得られた投入・参入を産業連関表に

反映させて、表-7に示すCO₂削減シナリオについて、産業連関表の対応する部門において投入削減額を減じるとともにシナリオ実現に要する費用を加えて計算した。

表-7 CO₂排出削減量のWIOへの反映と評価

シナリオ	CO ₂ 削減量 (t-CO ₂ /年)	反映するWIO の産業部門	反映方法	重油換算量 (KL)	投入削減額 (百万円) ^{※1}	シナリオ実現 に要する費用 (百万円)
コンブ乾燥の効率化	679	コンブ漁業	昆布漁業部門のCO ₂ 排出量をから差し引く	251	17	0.3
イカ釣り漁業の省エネ	812	イカ釣り漁業	イカ釣り漁業部門のCO ₂ 排出量から差し引く	300	21	0.9
種苗センターの省エネ	22	サービス業	サービス業部門のCO ₂ 排出量から差し引く	8	0.6	0.5
漁協施設の新エネルギー導入	72	サービス業		149,028KWh ^{※2}	165	10.0
水産バイオマスの活用	45	リサイクル	リサイクル部門のCO ₂ 排出量から差し引く	72	5	8.0
旧南茅部町CO ₂ 排出削減量合計	1,630			631KL(重油) 149,028KWh(電力量)	220.7	17.7

※1 重油価格：全国平均69.3円/L（平成20年12月，小型ローリーでの納入価格，税込）（財）日本エネルギー経済研究所

※2 重油換算せず削減電力量で計算する 電気料金：1kWh=11.12円（税込）

表-8 旧南茅部町のCO₂排出量とCO₂削減量

(単位：t-CO₂/年)

CO ₂ 排出量	CO ₂ 排出削減量	収支
43,332	合計 68,857	-25,525
	内訳	
	森林 20,402	
	大陸棚ポンプ 35,287	
	天然藻場 10,253	
	人工藻場 16	
	養殖コンブ 1,269	
	CO ₂ 削減シナリオ ⁷⁾ 1,630	

(3) 旧南茅部町のCO₂の収支

森林、大陸棚ポンプによる固定吸収、天然藻場、人工藻場及び既産業部門におけるCO₂排出削減シナリオによるCO₂固定・吸収量の推計結果を表-8に示す。収支計算にあたっては、例えば森林の場合、その管理に必要となる排出を中間需要として考慮している。この結果、旧南茅部町のCO₂排出量43,332 t-CO₂/年、CO₂排出削減量は68,857 t-CO₂/年となることから、その年間の収支は、-25,525 t-CO₂/年となる。また、水産基盤整備（人工藻場）によるCO₂排出削減量は16 t-CO₂/年である。

(4) WIOによるCO₂削減の総合評価

最後に旧南茅部町周辺海域と森林、大陸棚ポンプによる固定・吸収、水産基盤整備、既産業部門にお

けるCO₂排出削減対策を反映したWIOを作成（表省略）した。CO₂削減効果の評価にあたっては、コンブ漁業の最終需要が10億円（現状の約25%増）となった場合に対象地域で考慮し得るCO₂削減固定効果及び対策を考慮した場合と考慮しない場合において両者の比較を行いその効果を評価した（表-9）。即ち、森林・海域、大陸棚ポンプによる固定吸収、人工藻場、既産業部門におけるCO₂排出削減シナリオによるCO₂固定・吸収量を考慮した場合のCO₂削減・固定効果は、旧南茅部町全体でCO₂の吸収側（値がマイナス）となり、考慮しない場合と比較してコンブ漁業10億円増あたり、前者CO₂排出増加量が4,812 t-CO₂/年であるのに対し後者のCO₂排出量増加量は4,354 t-CO₂/年となることから、458 t-CO₂/年の削減効果が発揮されたことが判明した。

表-9 CO₂排出固定対策の有無による効果の比較

	CO ₂ 排出削減対策なしの場合		CO ₂ 排出削減効果対策を考慮した場合	
	ア) 最終需要は現状のまま	イ) 最終需要が10億円増の場合	ウ) 最終需要は現状のまま	エ) 最終需要が10億円増の場合
コンブ漁業CO ₂ 排出量(t-CO ₂)	21,347	26,094	19,322	23,619
旧南茅部町全体CO ₂ 排出量(t-CO ₂)	a) 40,887	b) 45,699	c) -28,048	d) -23,694
アとイ、ウとエの差	4,812		4,354	

4. 漁村のCO₂排出・固定の原単位

本研究では、上述の結果を踏まえ旧南茅部町を対象に既存産業部門のほか森林・海域の自然環境、基盤整備によるCO₂排出・固定の原単位の作成を行った。ここでは、表-10に既存産業部門の原単位の計算結果の一部を示す。他地域において原単位を算出する場合、漁業及び関連産業部門におけるエネルギー消費調査を実施し、CO₂排出に関する基礎データを収集することが必要となる。

表-10 既存産業部門のCO₂排出量の原単位

部門	CO ₂ 排出量 (t-CO ₂)	指標 (生産額)	原単位
農林業	900	595	1.5
昆布漁業	20,667	4,525	4.6
定置網漁業	2,413	3,613	0.7
刺網漁業	3,415	1,846	1.8
イカ漁業	2,241	218	10.3
水産加工業	2,358	8,018	0.3
リサイクルセンター	9	17	0.5
サービス	525	29,637	0.02
飲食サービス	18	1,212	0.01
旅館宿泊	1,499	379	4.0

5. 主な結論と今後の課題

本研究では、旧南茅部町の沿岸域におけるCO₂の収支量について、従来試算手法に加え、藻の海底への移送率及び植物プランクトンのC/N比を導入して試算した。さらに、旧南茅部町の産業構造を調査し漁村のCO₂の固定・排出にかかる廃棄物産業関連表を作成し、削減対策の効果について一定の評価を行った。その際、当該海域のCO₂収支の試算結果を導入し、WIOに新たな産業部門を設定することにより、総合的な評価を実施した。また、併せて南茅部町におけるCO₂排出・固定の原単位の作成を行った。人工藻場及び養殖コンブの効果は他と

比較して小さいが、人為的に効果が発揮し得る分野であって検討の意義があると考えられる。この手法は既に人工藻場等の原単位を算出している海域において適用が可能であり、整備の効果を評価することが可能となる。また、今後実測による移送率の算出、現地データの集積による原単位の汎用化を図ること等を進めることにより、水産基盤整備事業の定量的なCO₂固定・削減効果の評価が可能となり、地球温暖化対策に向け政策的な事業の執行が図られるものと考えられる。

謝辞

本研究は、北海道開発局函館開発建設部の直轄調査結果等を取り纏めて報告したものであり、調査の遂行にあたってご支援頂いた関係各位に深く謝意を表す。

参考文献

- 1) Nakayama, N. Watanabe, S. Tsunogai, S. :Difference in O and CO gas transfer velocities in Funka Bay, Marine Chemistry, Vol.72, pp. 115-129, 2000.
- 2) 名畑進一, 酒井勇一: 2年目オニコンブの年間純生産量, 北水試研報, 49巻, pp.1-5, 1996.
- 3) 村岡大祐:三陸沿岸の藻場における炭素吸収量把握の試み, 東北水研ニュース, No.65, 2002.
- 4) Gerard, V.A.:Some aspects of material dynamics and energy flow in a kelp forest in Monterey Bay, California. Ph. D. Dissertation, University of California, Santa Cruz, 1976.
- 5) Mizuta, H. Hayasaki, J. and Yamamoto, H. : Relationship between Nitrogen Content and Sorus Formation in the Brown Alga *Laminaria japonica* Cultivated in the Southern Hokkaido, Japan, Fisheries Science, Vol.64, No.6, pp. 909-913, 1998.
- 6) Mizuta, H., Maita, Y. and Yanada, M. Nippon Suisan Gakkaishi 58(12),2345-2350,1992.
- 7) 浅川典敬, 長野章, 古屋温美, 上川浩幸, 中泉昌光: 漁村のCO₂排出量LCA分析と削減対策案の評価について, 産業連関 Vol. 15, No. 3, 2007. 10