土木学会論文集B2（海岸工学）
Vol. 70, No. 2, 2014, I_1286-I_1290

太平洋全域における海表面二酸化炭素フラックス変動および海洋酸性化の評価

Analysis of Ocean Acidification in the Pacific Ocean Based on the Data-driven Evaluation of the Air-sea Carbon Dioxide Flux

内山雄介[1]・松山真由子[2]・上平雄基[3]

Yusuke UCHIYAMA, Mayuko MATSUYAMA and Yuki KAMIDAIRA

The ocean absorbs about 1/3 of the anthropogenic CO_2 released to the atmosphere. As more CO_2 accumulates in the ocean, the oceanic pH decreases, leading to ocean acidification. In order to better understand the carbon cycle in the ocean and associated long-term pH variation, we estimate CO_2 exchange flux at the sea surface in the Pacific Ocean with the empirical method proposed by Sugimoto *et al*. (2012) exploiting the publically available oceanic dataset. The oceanic CO_2, the air-sea CO_2 flux, and pH are successfully evaluated for the Pacific Ocean from 1985 through 2008. The pH and CO_2 absorption relation is then argued along with climatological influences during the ENSO events.

1. はじめに

産業革命以降，世界各地で農業から工業への移行が進み，森林伐採や化石燃料の消費が増大してきた．近年，このような人間活動の拡大による二酸化炭素（以下，CO_2）濃度の増加や地球温暖化等に伴い，海水のアルカリ性が弱まる「海洋酸性化」が大きな問題となっている．海洋酸性化は世界的に広範囲にわたって進行しており，植物プランクトン，動物プランクトン，サンゴ，貝類や甲殻類など，さまざまな海洋生物の成長や繁殖に影響が及び，海洋生態系に大きな変化を及ぼす恐れがある．また，海洋は大気に放出された人為起源のCO_2 の約3分の1を吸収し，蓄積することで温暖化の進行を抑制していることが知られている．しかしながら，海表面におけるpHの低下と水温上昇の進行に伴い，海洋のCO_2吸収能力低下が危惧されており，温暖化が加速する可能性が予見される（例えば，IPCC, 2007）．したがって，海洋-大気間でのCO_2の吸収・放出量（CO_2フラックス）の時空間変動を評価し，海洋酸性化の状況を正確に把握する必要がある．

海洋中のCO_2濃度分布の観測は国際協力により精力的に実施され，気候値的な空間分布のデータベース化も進んでいるが，例えば南太平洋のように観測が疎らでデータの蓄積が不十分な海域も多い．そのため，海洋におけるCO_2濃度分布の全体像の把握には至っておらず，様々

表-1　海洋中CO_2濃度推定に使用したデータセットの一覧

物理量	データセット	空間解像度
pCO_2s，xCO_2s	SOCAT	1°×1°
xCO_2a	気象庁全球解析データ	2.5°×2.5°
SST	MGDSST	0.25°×0.25°
SSS	SODA	0.5°×0.5°
Chl-a	MODIS-Aqua SeaWiFs	4km 9km
SLP	JRA25	1.25°×1.25°
10 m wind speed	JRA55	1.25°×1.25°

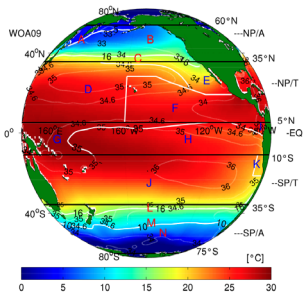

図-1　World Ocean AtlasのSST,SSSを用いた海域分割.

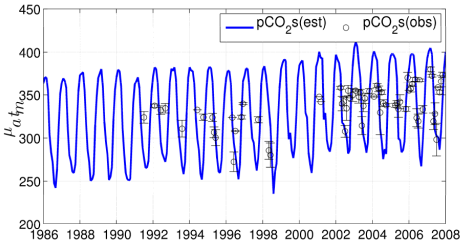

図-2　pCO_2sの推定精度の一例．北太平洋亜寒帯域におけるpCO_2sの推定値(青線)とSOCAT(観測値，黒丸）の比較．バーは標準偏差を表している．

1　正会員　博(工)　神戸大学准教授 大学院工学研究科市民工学専攻
2　正会員　学(工)　神戸大学工学部市民工学科(現神戸市建設局道路部計画課計画係)
3　学生会員　学(工)　神戸大学大学院工学研究科市民工学専攻

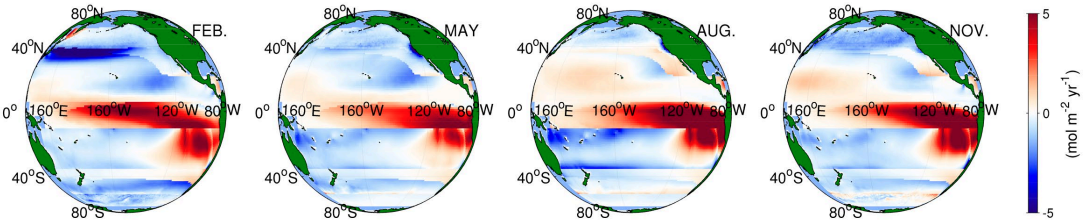

図-3　太平洋海表面におけるCO_2フラックス F_{CO2}推定値の月平均値の空間分布．正値(赤)は海洋からのCO_2放出を表す．

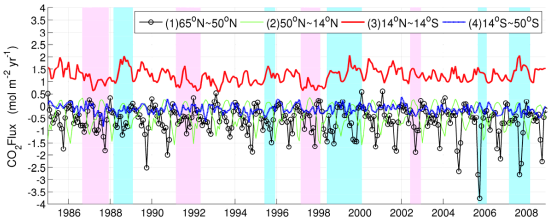

図-4　経度平均した F_{CO2}の月平均値の24年間の経年変動．背景のピンクおよびシアンの帯はそれぞれEl Niño，La Niñaの期間を表している．

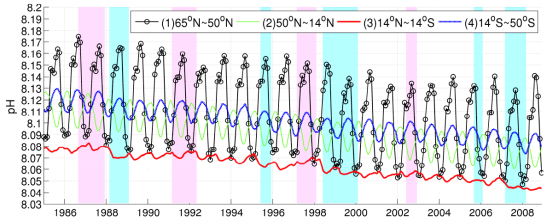

図-5　経度平均したpHの月平均値の24年間の経年変動．

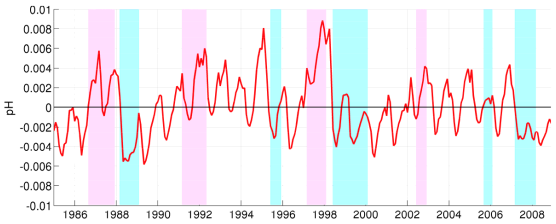

図-6　赤道域における，24年間の長期的減少傾向をトレンドとして除去したpHの経年変動．

な時間スケールでの気象・海象・気候変動に対する応答などについては未解明な部分が非常に多い．同様にpHについても，観測船を用いた採水と分析によって徐々にデータが蓄積されつつあるが，長期間の広域的な海洋酸性化の進行状況を解析するためには，何らかのデータ補間を行ってpH分布を推定する必要がある．これに対して杉本ら（2010，2012）は，海面水温（SST），海面塩分（SSS）および表層Chl.a分布を用いて北太平洋，南太平洋の広域におけるCO_2分圧の面的分布を長期間にわたって評価するための経験的な手法を提案した．また，Leeら（2006）は全球におけるSST，SSSから全アルカリ度を求める経験的手法を提案した．しかしながら，いずれも各研究者がアクセス可能なデータセットを用いて検定がなされているが，一般に入手可能なデータセットに対する精度検証は十分になされていない．そこで本研究では，海面CO_2濃度データベースSOCATを始めとするpublic domainのデータ（**表-1**）に対してCO_2フラックス，全アルカリ，pHについての既存の評価手法を適用し，その推定精度を確認する．さらに，CO_2フラックスと海洋酸性化の最近24年間にわたる中期変動傾向について解析し，季節変動や気候変動との関連を把握することを主たる目的とする．

2. 海洋表層CO_2分圧・CO_2フラックスの分布と変動

(1) 杉本ら（2012）による推定方法

本研究では，杉本ら（2012）によって提案された海洋-大気間のCO_2フラックス評価方法を1985年～2008年の24年間における海洋データセット（**表-1**）に適用する．各データセットの出典については松山（2014）を参照されたい．本方法では，疎らなCO_2濃度の観測値データベース（SOCAT：Surface Ocean CO_2 Atlas, version 2）に対して，重回帰分析による推定式およびSST，SSS，クロロフィル濃度などの海洋表層データを用いて詳細なCO_2濃度の空間分布を経験的に求める．CO_2分圧の季節変動特性は海域ごとに異なるので，まず，対象海域（太平洋ほぼ全域）を緯度別に5つの領域に分割し，World Ocean Atlas 2009によるSST，SSS気候値の空間分布を用いて各領域をさらに細分化し，**図-1**に示す合計14の小領域に分けて評価を行う．本研究では，CO_2フラックスF_{CO2}は，推定された海表面CO_2分圧（pCO_2s），大気下層におけるCO_2分圧（pCO_2a），海上10 m風速等の関数であるガス交換速度k，溶解度Lにより$F_{CO2} = c\ k\ L\ (pCO_2s - pCO_2a)$で評価する（$c$は正の定数）．ただし，$k$と$L$は気象庁／電中研によるJRA-55海上風再解析値，JRA-25海面気圧再解析値などを用いて評価する．海水中のpHはpCO_2sと全アルカリ度を用いて求めるLewis・Wallace（1998）の方法を用い，計算に必要な平衡定数はLuekerら（2000）の値を

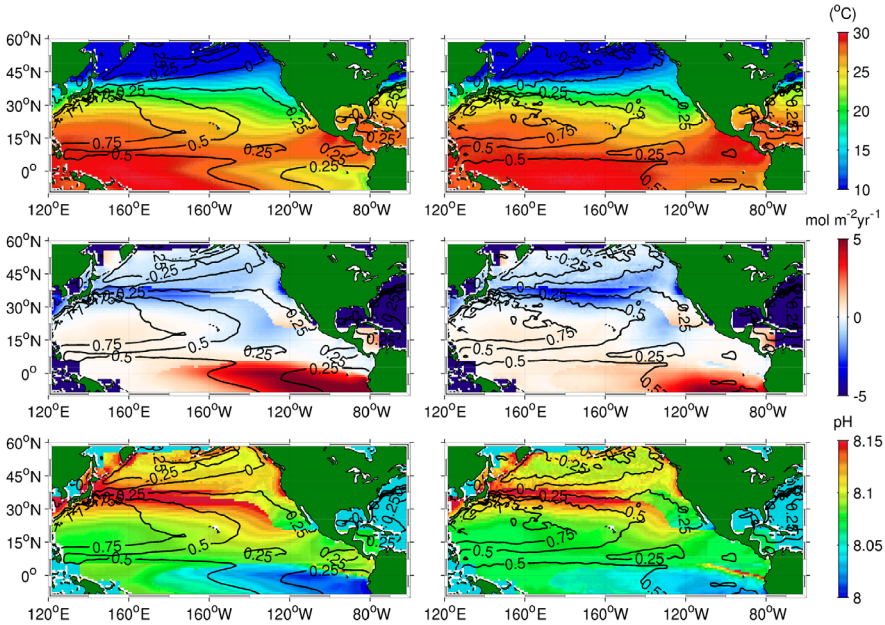

図-7 （左）平年（1985年1月～1997年2月）と，（右）エルニーニョ現象発生期間（1997年3月～1998年2月）における各物理量の期間平均値の比較．上から，SST，海面CO_2フラックス（海洋からの放出が正），pH分布である．図中のコンターは全て海面高度（SSH．単位はm）を表す．

用いる．pCO_2sおよびF_{CO2}の推定方法のさらなる詳細に関しては，杉本ら（2012）を参照されたい．

(2) 太平洋におけるpCO_2s，F_{CO2}分布

図-2は，太平洋亜寒帯域における海表面CO_2分圧pCO_2sの観測値との比較を示しており，両者は概ね一致している．pCO_2sは季節変動が大きく，年間で250～370 μatm程度の範囲の変動を24年間にわたって繰り返しながら，経年的に徐々に増加していることが分かる．図-3は太平洋全域におけるF_{CO2}推定値の月平均空間分布を季節ごとに示している．北太平洋亜寒帯域では一年を通じてF_{CO2}は負，すなわちCO_2の吸収域となっているが，春～夏季には植物プランクトンの光合成などの生物活動の活発化によってpCO_2sが低下し（図-2），CO_2吸収量は減少している（図-3）．反対に，冬季にはpCO_2sは増大し，CO_2吸収量は最大値を取る．また，赤道域や南米ペルー沿岸では，赤道湧昇や沿岸湧昇によって炭素の豊富な深層水が海表面に輸送されるため，いずれの季節においても正のF_{CO2}，すなわち強いCO_2放出が確認される．さらに，北太平洋亜熱帯域と亜寒帯域の境界付近の中緯度帯（日本列島の東側海面）では，冬季（2月）に極めて強いCO_2吸収が生じるなど，海域ごとのF_{CO2}の季節変動には明確な差異が見られる．

3. エルニーニョ・ラニーニャの影響

経度方向に空間平均したF_{CO2}，pHの月平均値の24年間の経年変動をそれぞれ図-4，図-5に示す．いずれの海域（緯度帯）においても，24年間にわたってpHの長期的な減少傾向，すなわち海洋酸性化の進行が確認される．また，海域ごとに季節変動パターンに有意な差異があることが分かる．赤道域ではF_{CO2}，pHともに明確な季節変動が見られず，ENSO，すなわちエルニーニョ（図中のピンク帯の期間），ラニーニャ（シアン帯の期間）との関連性が高い中期変動が確認される．例えば，赤道域におけるF_{CO2}は常に正，つまり常時CO_2放出傾向にあるが，エルニーニョ時に低下，ラニーニャ時に上昇することが確認される．そこで，赤道域の海洋表層pHについて，24年間の長期的減少傾向を線形トレンドとして除去し，中期変動シグナルを取り出して調べたところ（図-6），エルニーニョ時に上昇，ラニーニャ時に低下する傾向がより明瞭に捉えられた．同様の操作を行ったF_{CO2}についてもpHと同様に中期的な気候変動の影響を受けて中期変動していることが確認された．

20世紀最大のエルニーニョ現象が生じた1997年3月～1998年2月の１年間と，それ以前の1985年～1997年2月の期間（平年と呼称する）に対して時間平均された各物理量を比較した（図-7）．平年は，赤道域の南米ペルー沖において，貿易風による沿岸湧昇によって冷たい深層水が表層へ流れ込み，西向きエクマン輸送によって赤道域東部から中部にかけてSSTが低く，したがって海面高度SSHが低い領域が広がっている．本海域では，湧昇に伴

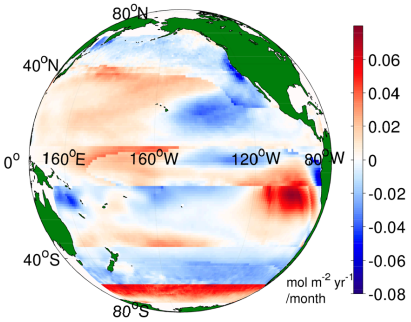

図-8　24年間のF_{CO2}トレンドの空間分布.

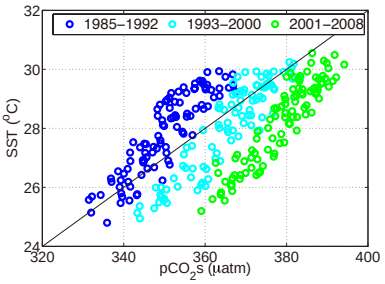

図-10　北太平洋亜熱帯域におけるpCO_2sとSSTの相関.

う低水温水塊が卓越するため，海洋はCO_2 を吸収しやすく，しかも底層からの炭素供給によってpCO_2sが高くなり，結果として大気とのCO_2分圧差が増大してF_{CO2}放出量が大きくなっている．海洋中CO_2分圧pCO_2sの増加によって水素イオン濃度が増加し，pHは低下して海洋酸性化が著しく進展する．一方，エルニーニョ時には貿易風の弱化によってペルー沖の沿岸湧昇が弱まり，アジア側の赤道域西部からの暖水の勢力が強まるため，南米側の赤道域東部における舌状に西進した低SST域が縮退する．その結果，ペルー沖のSSTおよびSSHは平常時より上昇し，F_{CO2}吸収量が減少してpCO_2sが低下し，pHが上昇するため，酸性化が抑制される，という構造になっていることが理解される．

4. 24年間における海洋酸性化の長期的変動傾向

太平洋全域における24年間の長期変動傾向を，線形トレンド（最小二乗fitting直線の傾き）の空間分布として評価する．北太平洋の亜寒帯域から中緯度域にかけての海域に着目すると，F_{CO2}トレンド分布から（**図-8**），西部海域ではフラックス増大，東部海域では減少傾向にあり，SSTトレンド分布（**図-9**）からは西部海域では昇温，東部海域では低温化傾向にあることが分かる．北太平洋亜熱帯域におけるpCO_2sとSSTには明確な正の相関があり（**図-10**），昇温海域である西部ではpCO_2s増大に伴う大気へのCO_2放出が，反対に低温化海域である東部では海洋

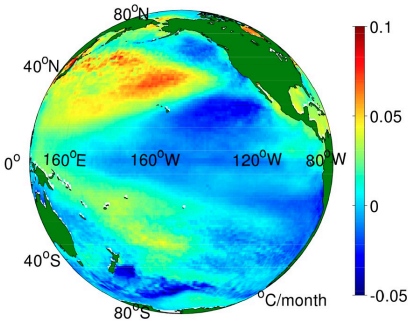

図-9　24年間のSSTトレンドの空間分布.

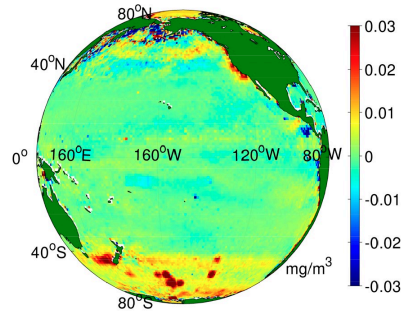

図-11　24年間のChl.aトレンドの空間分布.

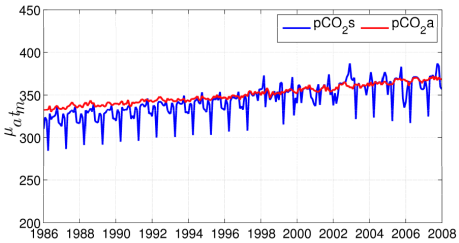

図-12　南太平洋亜寒帯域高緯度域（南極海域）におけるpCO_2sとpCO_2aの経年変動の比較.

へのCO_2吸収が進展しつつあることが示されている．また，太平洋最大のCO_2放出源である南米ペルー沖沿岸湧昇域を中心とした低緯度海域と，CO_2吸収源である南北亜寒帯域では，それぞれ放出量，吸収量が経年的に増加している様子が見て取れる．この機構を考察するためにChl.aのトレンドを求めた（**図-11**）．Chl.aは南北亜寒帯域で顕著な増加傾向にあり，これらの海域では春・夏季における植物プランクトンのブルームに伴う活発な光合成によって海洋表層でのCO_2消費が促進され，海洋へのCO_2吸収量が増大すると考えられる．低緯度域では，沿岸湧昇・赤道湧昇による深層水からの炭素供給の増加に伴ってCO_2放出量が上昇するものと解釈される．一方，南極海域ではChl.aが増加トレンドにあるにも関わらず，F_{CO2}トレンドが正（放出）になっている．この原因を理

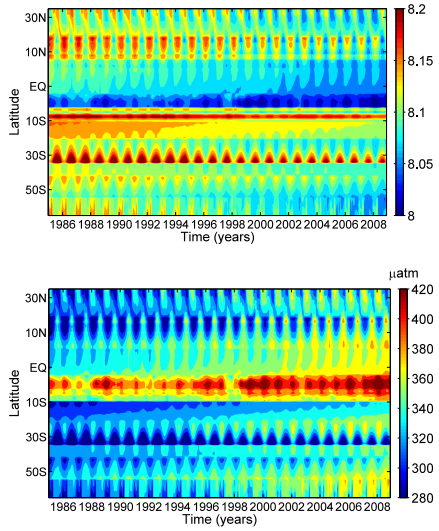

図-13 （上）pH，（下）pCO_2sの24年間の緯度別経年変動．

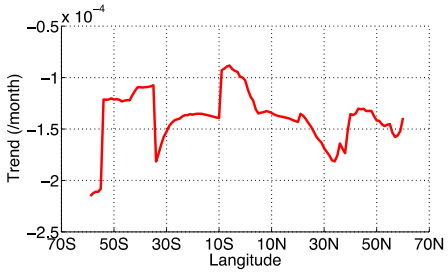

図-14 経度平均されたpHトレンドの緯度方向分布．

解するために，南極海域におけるpCO_2sとpCO_2aの経年変動を比較すると（図-12），1990年代後半以前と以降とではpCO_2sとpCO_2aの平均的な大小関係が逆転しており，1990年代後半以降は$pCO_2s > pCO_2a$となることにより，F_{CO2}が放出トレンドに転じたことが分かる．したがって，南極海域では1990年代後半からCO_2吸収能力の低下が顕著となり，海洋酸性化の限界に達しようとしていることが示唆される．

pHおよびpCO_2sの24年間の緯度別経年変動を図-13に示す．全ての緯度で24年間を通じてpCO_2sの増加と，それに対応したpHの低下傾向が確認される．赤道域で発達するpCO_2sの高濃度域は北太平洋亜熱帯域にまで徐々に拡大している様子が見られる．経度平均したpHトレンドからも（図-14），全緯度帯で負のトレンドが見られ，しかも高緯度域ほどpHの減少速度が大きく，酸性化の進行が速いことが示されている．

5. おわりに

本研究では杉本ら（2012）によって開発された海洋-大気間のCO_2フラックス推定方法を用い，一般に公開され比較的容易に入手可能なSST，SSS，クロロフィルa濃度などの海洋格子点データに対してそれを適用し，海洋表層におけるCO_2分圧の時空間構造を推定した．その結果、観測値に対して良好に一致する結果が得られ，一般的な海洋データセットを用いた場合でも十分な精度でCO_2濃度推定が行えることがわかった．ただし，データが極めて疎らな南半球については，回帰直線の推定精度に問題があり，今後より再現性を高めるためには，データの増加と回帰直線の再検討，あるいは新たな推定手法の開発が必要であるものと思われる．

CO_2フラックスF_{CO2}には海域ごとにかなり異なる特徴が見られた．南北亜寒帯域は吸収源，赤道域は放出源となること，24年間のF_{CO2}およびpHに明確な季節変動が現れることが確認された．同時に，赤道域ではENSOと関連して数年サイクルでのpHの低下と上昇，F_{CO2}の増加と減少が生じ，pCO_2sやCO_2フラックス分布がENSOに代表される中期的な気候変動の影響も強く受けていることが確認された．また，太平洋全域においてpCO_2sの増加傾向とpHの低下傾向が見られ，海洋酸性化が太平洋全域で進行していること，特に赤道域はpCO_2sが高く海洋酸性化が進行しており，南北亜熱帯海域でもpHに低下域が拡大していることなどが確認された．また，本解析により，南極海域においてCO_2吸収能力が長期的に低下する傾向にある可能性が強く示唆された．

謝辞：本研究に使用したデータの一部は気象研究コンソーシアムを通じて提供されたものである．

参 考 文 献

杉本裕之，平石直孝（2010）：太平洋における大気?海洋間の二酸化炭素フラックス推定手法の開発，測候時報，第77巻，特別号，S159-187.

杉本裕之，平石直孝，太石井雅男，緑川 貴（2012）：太平洋における大気－海洋間二酸化炭素フラックス推定手法，気象研究所技術報告第66号.

松山真由子（2014）：海表面二酸化炭素フラックスの評価に基づく海洋酸性化に関する基礎的研究，卒業論文，神戸大学工学部市民工学科.

IPCC (2007): AR4 SYR Synthesis Report Summary for Policymakers.

Lee, K., L.T. Tong, F.J. Millero, C.L. Sabine, A.G. Dickson, C. Goyet, G.-H. Park, R. Wanninkhof, R.A. Feely and R.M. Key (2006): Global relationships of total alkalinity with salinity and temperature in surface waters of the world' s oceans, Geophys. Res. Lett., Vol. 33, L19605, doi: 10.1029/2006GL027207.

Lewis, E. and D. W. R. Wallace (1998): Program developed for CO2 system calculations. ORNL/CDIAC-105. Carbon Dioxide Information Analysis Center, Oak Ridge National Laboratory, U.S. Department of Energy, Oak Ridge, Tennessee.

Lueker, T. J., Dickson, A. G. and Keeling, C. D. (2000): Ocean pCO2 calculated from dissolved inorganic carbon, alkalinity, and equations for K1 and K2: validation based on laboratory measurements of CO2 in gas and seawater at equilibrium. Mar. Chem., Vol. 70, pp105-119.