

地球環境変動に伴う海洋音波伝搬減衰の長期変化*

◎後藤慎平[†] (JAMSTEC/筑波大学), 土屋利雄 (JAMSTEC/東京海洋大学),
日吉善久 (JAMSTEC), 水谷孝一 (筑波大学)

1. はじめに

海水中を伝搬する音波の吸収損失 α (以下 α) は、海水中の水温や塩分などの物理量だけではなく、海水の化学的緩和作用による pH (水素イオン指数) 変化の影響を受けることが知られている¹⁾. 従来、 α の計算における pH の値は、過去の観測値や実験値 (pH8~8.1) が経験的に用いられてきた. しかし、近年の地球温暖化により海水温が上昇や、大気中の CO₂ 濃度が上昇することにより海水中に CO₂ が溶解込み、海水の pH 値低下が進行してきた. このような海洋環境変動により、 α の低下によってもたらされる海中雑音の増加が懸念されている^{2),3)}. そこで、我々は日本近海における 1984 年から 30 年間の pH の実測値と「気候変動に関する政府間パネル (IPCC)」の報告値を基に、今世紀末における pH から α の変化をシミュレーションした. さらに、 α は 1kHz 以上の高周波領域においては、水温の影響が大きくなる性質のため、海洋環境変動に伴う水温変化の影響を加味し、100Hz~10kHz の周波数範囲における雑音レベルを予測した.

2. 海洋酸性化と海水温上昇

大気中に放出された CO₂ の多くは海洋によって吸収され、その貯蓄量は大気の数十倍とも言われている. 海水の pH 値は、現在、概ね 8.1 (弱アルカリ) である. CO₂ は海水に溶解すると、炭酸水素イオン (HCO₃⁻) を放出する弱酸として振る舞う. これにより pH が低下し、海洋が徐々に酸性化してくる. IPCC 第三次報告書では、Fig.1 のように今世紀末までに海洋の pH 値は 0.3 ほど低下 (酸性化) するとされている.

一方、pH 値低下は、音波の吸収損失 α に影響を与えることが知られている. pH の低下により音波の吸収損失が小さくなることで、海中の雑音が増えることになり、海中音波を利用する探査装置や海棲哺乳類への影響が懸念されている.

海中音波伝搬では、構造的な緩和の他に科学的な緩和の影響が無視できない. これは海水中のホウ酸、硫酸マグネシウム、炭酸マグネシウムによる科学的緩和作用により吸収される現象である. pH、水温、塩分、水深をパラメータとする

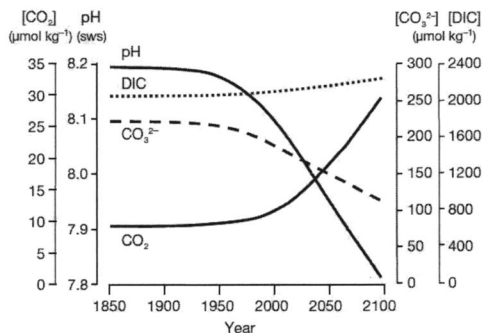


Fig.1 Atmospheric carbon dioxide concentration and the relationship of pH and bicarbonate ions in sea water⁴⁾

α との関係式は、様々な研究者から提案されている^{5),6),7),8)}. 各式によって各々係数は異なるが、本論では、適応範囲が広く、かつ良く使用されている Francois & Garrison の式を用いた. この式の有効範囲は、周波数 10 Hz~500 kHz において、 $-2 < T < 22$ [°C], $30 < S < 35$ [‰], $0 < D < 3.5$ [km] である. α は水温や塩分の影響を受けることから、pH 値だけでなく硫酸マグネシウムの上昇によっても値が減少する. つまり、海洋温暖化による水温上昇や塩分の低下についても十分に考慮する必要がある.

そこで、北西太平洋における高緯度海域から低緯度海域における水温と塩分と pH の実測値を用いて、 α の変化による伝搬損失について比較検討した.

3. 予測計算手法

今回の予測計算には気象庁より公開されている観測データを使用した⁹⁾. これは、Fig.2 に示すように、1984 年から 2014 年までの 30 年間の pH 変化が調査されている. このデータは、東経 137° 線上を北緯 30°, 20°, 10° (以下、30°N, 20°N, 10°N) 広範囲に渡って観測したデータである. 今回はこの最小自乗法による平均値から、1984 年の pH 値は、30°N = 8.173, 20°N = 8.143, 10°N = 8.106, 2014 年では 30°N = 8.122, 20°N = 8.095, 10°N = 8.063 として、2100 年における pH 値を試算した. 同庁の報告では、Fig.2 中に示すように、過去 30 年間における 10 年当たりの pH 変化は 30°N

* Long-term changes in the ocean sound wave propagation attenuation by the global environmental change,

Gotoh Shinpei (JAMSTEC/University of Tsukuba), Toshio Tsuchiya (JAMSTEC/Tokyo University of Marine Science and Technology), Yoshihisa Hiyoshi (JAMSTEC), Koichi Mizutani (University of Tsukuba)

† gotohs@jamstec.go.jp

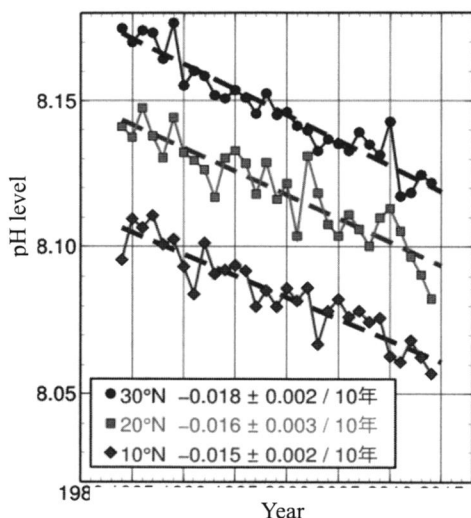


Fig.2 Changes of pH level in 1984 to 2014 (気象庁発表資料⁹⁾より)

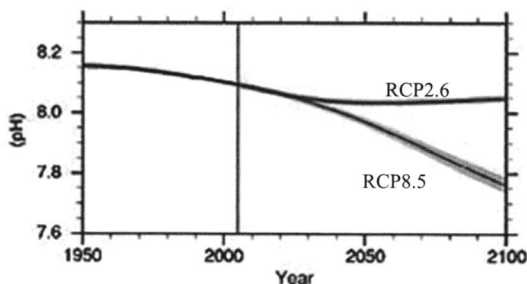


Fig.3 Global ocean surface pH by RCP 2.6 and RCP 8.5¹⁰⁾

で約-0.018, 20°N で約-0.016, 10°N で-0.015であった. 今後も持続的に CO₂の増加が見込まれる事から, pHにおいても直線的に増加すると仮定し計算した. これは, Fig.3 に示す通り, IPCC が報告した pH の長期的な将来予測に基づく気候変動予測シナリオ¹⁰⁾ (RCP) において, 最も酸性化が進んだ場合の RCP8.5 では pH 約 7.8, 抑制された場合の RCP2.6 では pH 約 8.05 であり, これらの平均値が 7.925 であることに鑑みても, 試算結果は妥当と考える.

さらに, α の計算には各深度における水温と塩分データが必要となる. そこで, pH 観測点とほぼ同海域において, 気象庁が毎年観測している季節ごとのデータを利用した. しかし, 1980年代はデータが極めて少ないことから, JAMSTEC により公開されている「四次元変分法海洋環境再現データセット」を利用した¹¹⁾. このデータセットには 1956年

2009年までの全球全層における海洋環境が再現されている. さらに, 2009年以降については, 各観測点に近いアルゴフロートのデータを利用した. これらのデータを Table.1 に示す. この表における水温と塩分データは, 観測時の海面近傍における季節的要素を排除するため, それぞれ冬と夏の観測値から平均値を計算したものである¹²⁾.

Table.1 Water temperature, salinity and pH level at each latitude from 1984 to 2014

		30°N	20°N	10°N
水温 (°C)	1984	7.297	7.765	7.586
	2014	8.578	8.136	7.647
	2014-1984	1.281	0.371	0.061
塩分 (psu)	1984	34.780	34.799	34.741
	2014	34.515	34.519	34.520
	2014-1984	-0.265	-0.28	-0.221
pH	1984	8.173	8.143	8.106
	2014	8.122	8.095	8.063
	2014-1984	-0.051	-0.048	-0.043

また, 今世紀末における水温と塩分の予測データについては, 気象庁が 2013年に発表した北太平洋における同年までの過去 100年間の平均海面水温¹³⁾を用いた. Francois & Garrison の式においては, 硫酸マグネシウムと真水の寄与が含まれるため, 海水温変化の影響を受けることが知られている. そのため, 温暖化による水温変動の予測については, 気象庁から報告されている日本近海での最大水温上昇 (+1.08°C) の値を基にした. この値が 2100年まで直線的に上昇し続けると想定し, 今世紀末の平均水温を試算したところ, IPCC が報告した予測水温 (+1.1°C) とほぼ同等の値が得られた. また, 塩分については, Table.1 において減少傾向が見られ, IPCC の報告書においても, 温暖化により極域の氷河等が解けだすことで海洋の塩分濃度が僅かに低下する可能性が報告されている. これらの結果を Table.2 に示す. 今回は, これらの観測データより, 各緯度における 1984年から 2014年の 1年当たりの塩分変化量を求め, 2014年の観測値を基に 2100年の予測値を試算して用い

Table.2 Predicted value of water temperature, salinity and pH in A.D.2100

	30°N	20°N	10°N
水温(°C)	9.5068	9.0648	8.5758
塩分(psu)	33.755	33.996	33.886
pH(RCP2.6)	8.05	8.05	8.05
pH(RCP8.5)	7.8	7.8	7.8

た.

4. 吸収損失と伝搬損失

取得した観測データを用いて、吸収損失低下による影響についてシミュレーションを行った。シミュレーションする周波数は、0.1kHz～50kHzで、各周波数において2014年と2100年における吸収損失 α の差を計算した。この周波数帯域の中には、水産業や海洋調査、海棲哺乳類のコミュニケーションなどで広く用いられる周波数が殆ど含まれている^{14), 15), 16)}。

ここでの音源は、沿岸土木工事や洋上発電施設^{17), 18)}などを想定し水深10mとした。これにより、Table.1の2014年の観測値と、Table.2の2100年の推定値を基に、各緯度における今世紀末の吸収損失変化量 $\Delta\alpha$ を試算した。その結果をTable.3に示す。

この結果をみると、周波数50kHzで吸収損失差 $\Delta\alpha$ が最大となっている。この α の減少は、10kHzより高い周波数領域では、pHだけではなく地球温暖化に伴う海水温上昇による影響¹⁹⁾が大きいためである。この表において、30°Nでの $\Delta\alpha$ の値が最大であり20°N、10°Nの差は比較的小さい。

また、このシミュレーション結果を基に沿岸付近で雑音を発生させたと仮定して、各周波数で推定される最大伝搬距離²⁰⁾での2100年における雑音レベルの増加率を求めた。ここでの伝搬計算は、音源を洋上発電施設などの大規模なものを浅海に設置したと想定し円筒拡散とした。

この表において、海中探査機の位置測位²¹⁾やマルチナロービーム音響測深機などの代表

的な音響機器(ソナー)に用いられる10kHz近辺の周波数では、RCP2.6での雑音レベルは約1.24倍であり、RCP8.5では最大で約1.44倍になるという結果が得られた。これは、将来ソナーを設計する際に必要なパラメータの変更を考慮しなければならなくなることを示唆している²²⁾。また、魚群探知機器^{21), 22)}やサイドスキャンソナーなどに用いられる50kHzでは、RCP8.5において、雑音レベルが約1.28倍になるという結果が得られた。このような高周波数域における α は、海洋酸性化よりも地球温暖化による海水温上昇の影響が大きい。しかし、鯨類のコミュニケーションに用いられるとされる100Hz付近²³⁾の周波数域では、酸性化の影響が大きくRCP2.6の場合、雑音レベルの増加は約1.02～1.06倍であり、最も海洋酸性化が進んだRCP8.5では、約1.17～1.21倍となる結果が得られた。このことから、日本近海にも多く棲息するヒゲクジラ類は、エコーロケーションに数Hz～数kHzを利用するとされることから、サウンドチャンネルを利用した数百～数千kmにおよぶ長距離コミュニケーションでは、海洋酸性化によりノイズレベルの増加し、生殖行動等に影響を与える可能性も考えられる。また、高周波域の周波数では海洋哺乳動物の捕食行動²⁴⁾に与える影響も考慮されなければならない。更に、海上を航走する大型船舶のスクリー音が発生する低周波域での騒音²⁵⁾などのレベルも増加することから、潜水艦などの水中航走体の探知距離に影響を及ぼす可能性が示唆される。従って、洋上発電施設をはじめとする長期設

Table.3 Comparison of the noise level in 2014 and 2100

Frequency[Hz] (Distance[km])	Latitude	$\Delta\alpha$ [dB/km]		Rate of increase of the noise level (when 2014 are set to 1)	
		RCP2.6	RCP8.5	RPC2.6	RCP8.5
100 (3000km)	30°N	0.00018	0.00056	1.06414	1.21339
	20°N	0.00012	0.00051	1.04231	1.19261
	10°N	0.00006	0.00045	1.02093	1.16815
1k (100km)	30°N	0.00851	0.029	1.10293	1.39637
	20°N	0.00541	0.02593	1.06426	1.34787
	10°N	0.00197	0.02253	1.02293	1.29613
10k (30km)	30°N	0.06254	0.10629	1.24110	1.44356
	20°N	0.05048	0.09375	1.19047	1.38237
	10°N	0.04709	0.08959	1.17661	1.36265
50k (5km)	30°N	0.39443	0.42678	1.25489	1.27848
	20°N	0.25978	0.31414	1.16130	1.19822
	10°N	0.27798	0.32093	1.17353	1.20291

置型の洋上設備は、防音・防振対策を強化し、海中で行われる土木工事においては、より一層の静音化を実現することが望まれる^{26), 27)}。また、海上を航走する大型船舶が発生する音波についても検討する必要がある。

5. まとめ

海水が大気中の二酸化炭素を吸収することにより生じる海洋酸性化 (pH の低下) が、吸収損失 α に与える影響について調べた。その結果、 α はここ 30 年間で少しずつ減少し、この減少率は高緯度ほど大きいことが分かった。さらに、気象庁が報告した pH 値を基に海洋酸性化が進行した場合の α を試算し、100Hz, 1kHz, 10kHz の各周波数で伝搬損失をシミュレーションした。その結果、今世紀末では1984年に比べ、 α は最大で約 0.45dB~2.06 dB の低下が起こることが分かった。このことから、今後、海洋酸性化や気温上昇などの地球環境変動が進むことで、海棲生物のエコーロケーションや潜水艦探知などのソーナー探知に影響を与える可能性も示唆された。

参考文献

- 1) Solomon, S, et al. (eds), "Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change", Cambridge Univ. Press, New York, U.S, (2007).
- 2) Tatiana Ilyina, et al., "Future ocean increasingly transparent to low-frequency sound owing to carbon dioxide emissions", Nature Geoscience 3, 18-22, (2010).
- 3) Richard A. Lovett, "Noisier Oceans May Be "Disaster" For Marine Animals", National Geographic News, (2008).
- 4) Wolf-Gladrow, D., et al, "Direct effects of CO2 concentration on growth and isotopic composition of marine plankton.", Tellus, 51B, 461-476, (1999).
- 5) Schulkin M & Marsh H.W., JASA Vol.34, 864-86, (1962).
- 6) Francois R. E., Garrison G. R., JASA 72(3), 896-907, (1982).
- 7) Francois R. E., Garrison G. R., JASA, 72(6), 1879-1890, (1982).
- 8) Ainslie M. A., McColm J. G., JASA, 103(3), 1671-1672, (1998).
- 9) http://www.data.jma.go.jp/kaiyou/shindan/a_3/pHtrend/pH-trend.html (2014/07).
- 10) Contribution of Working Groups I to the fifth Assessment Report (AR5) of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), (2013).
- 11) <http://www.jamstec.go.jp/cruisedata/mirai/j/index.html> (2014/11).
- 12) 福岡管区气象台, "九州・山口県の気候変動監視レポート 2013", pp.93, (2014).
- 13) 気象庁, "海洋の健康診断表 総合診断表 第2版", 41-51, (2013.12).
- 14) 赤松友成, "クジラ類への人工海中音の影響", 生命の科学 遺伝, 58 巻 2 号, (2004).
- 15) 防衛弘済会, "The MARCH", マーチ出版, vol.42, 19-30, (1988).
- 16) 直井純他, "海洋音響環境と鯨の生態 (水中音響)", 電子情報通信学会技術報告, US, 超音波, 超音波 103(277), 1-6, (2003).
- 17) J. Carstensen, et al., "Impacts of offshore wind farm construction on harbour porpoises: acoustic monitoring of echolocation activity using porpoise detectors (T-PODs)", MARINE ECOLOGY PROGRESS SERIES, Vol. 321, 295-308, (2006).
- 18) 林健太郎他, "風車翼の低騒音設計技術", 三菱重工技報 Vol.49 No.1, 82-85, (2012).
- 19) 海洋音響学会編, "海洋音響の基礎と応用", 成山堂書店, 72-75, (2004).
- 20) Lurton Xavier, "An Introduction to Underwater Acoustics: Principles and Applications, second edition", Springer Praxis Publishing, London, UK, 14-15, 249, (2010).
- 21) Michael V. Jakuba, et al., "Long-baseline acoustic navigation for under-ice autonomous underwater vehicle operations", Journal of Field Robotics, Vol.25, Issue 11-12, 861-879, (2008).
- 22) Lurton Xavier, "An Introduction to Underwater Acoustics: Principles and Applications, second edition", Springer Praxis Publishing, London, UK, 115-117, (2010).
- 23) Waller G, et al., "ealif eA: Complete Guide to the Marine Environment.", Pica Press, Mountfiel, (1996).
- 24) W. J. Richardson, et al., "Marine Mammals and Noise", Academic Press, pp.164,(1995).
- 25) H.M.Fizpatrick, M.Strasberg, "Hydrodynamic Sources of Sound", 1st Symp.ONR, Washington D.C., pp.241, (1956).
- 26) 風間健太郎, "洋上風力発電が海洋生態系におよぼす影響", 保全生態学研究 17(1), 107-122, (2012).
- 27) Jennifer C. Wilson, et al., "Coastal and Offshore Wind Energy Generation: Is It Environmentally Benign?", Energies 2010, 3, 1383-1422, (2010).