

43. カスピ海の海面上昇と海岸侵食

Sea-Level Rise and Beach Erosion in Caspian Sea

浅野敏之* アバス・イエガネ・バクティアリ**

Toshiyuki Asano*, Abbas Yeganeh Bakhatiry**

Abstract : Caspian Sea is the largest landlocked water reservoir in the world with an area of 378,000km², its surface lies on 28m below the global sea-level. A key feature of Caspian Sea is that its sea-level has progressively risen by more than 2.5 meters since 1977, and it undergoes a cyclic fluctuation afterwards. The cause and effect of the sea-level rise and its impact on the surrounding coastal topography and environment are worth examining, because the outcome can be applied to studies on future global sea level rise and its impact.

This study introduces the present status of the sea-level rise and the existing research work to investigate the cause of Caspian sea-level rise. Furthermore, this study discusses the Caspian sea-level fluctuation effects on shoreline changes.

Keywords : sea-level rise, beach erosion, impact on shoreline change

1. はじめに

カスピ海は面積 378,000km² を持つ世界最大の内海であり、アゼルバイジャン・トルクメニスタン・カザフスタン・ロシア・イランの国境に接している。カスピ海の潮位変動はほぼ無視でき、global ocean に比較して塩分濃度は約 1/3、平均水面は-26m低い。

カスピ海は石油と天然ガスの宝庫であり、その埋蔵量はペルシャ湾に次いで第2位である。また多様な動植物の生息地であり、湿地帯保全条約で有名なラムサールはイラン沿岸の都市である。有名なチョウザメは世界の 90%を占める。

次節で詳述するが、カスピ海はこの 17 年間に約 2.5 mの海面上昇を記録している。このため周辺各国は深刻な海岸侵食に直面している。カスピ海の海面上昇とそれに伴う海岸地形変化についての現在までの関係各国の文献・研究成果をレビューしておくことは、地球温暖化に伴う全球的海面上昇がもたらす海岸地形応答を理解する上で重要であると考ええる。本論文では、カスピ海の海面上昇の現状、海面上昇を引き起こした原因、海面上昇に伴う海岸地形変化について論述する。

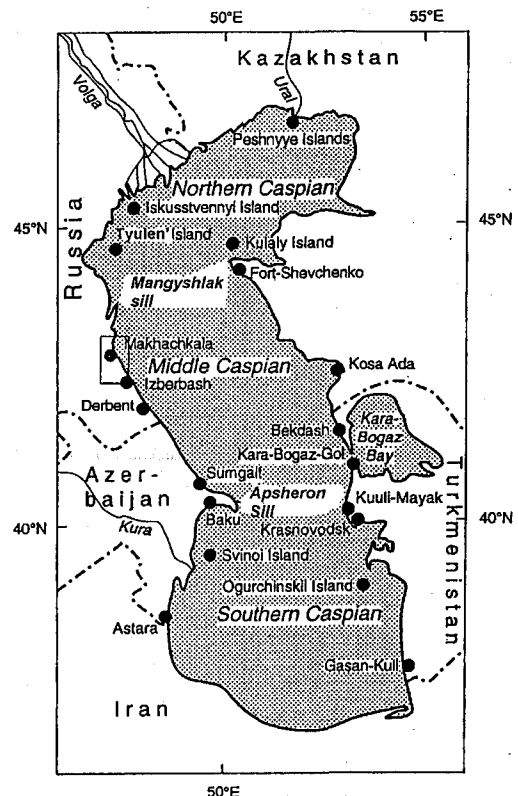


図-1 カスピ海(Kroonenberg et al.,2000)

* 鹿児島大学 工学部 海洋土木工学科

** イラン理工科大学 土木工学科

* Dept. Ocean Civil Engrg., Kagoshima Univ.

* Dept. Civil Engrg., Iran Univ. Science & Technology

2. カスピ海の海面上昇

カスピ海（図-1）は約 500 万年前に地殻変動、気候変動によって黒海と分離したとされる。その海底地形は図-2 に示すように中央部に海嶺を持つ特異な形状をしており、水深によって大きく3つの部分に分けられる。北部は陸上部の平野と繋がる水深数メートルのきわめて浅い水域であり、中央部は最大水深が 788m に達する。南部は Apsheron sill によって中央部と分かれるが最大水深は 1025m と 3 領域の中ではもっとも深い。東岸中央にある Kara-Bogaz Gol 湾と呼ばれる大きな円形潟の水深は浅く、海面変動に対しても影響を与えている。

図-3 に示すように、カスピ海の水面は様々な時間スケールを持って大きな変動を繰り返してきた。20 世紀になって低下傾向が続き、1978 年には global sea-level に比べて -29m という最低値を示したが、それから急激に海面が上昇し、1995 年では -26.5m となって 17 年前に比べて約 2.5m 上昇した。なお、最近では上昇は沈静化し、むしろ下降傾向にある。

こうした急激な海面上昇により、各地で浸水や海岸侵食

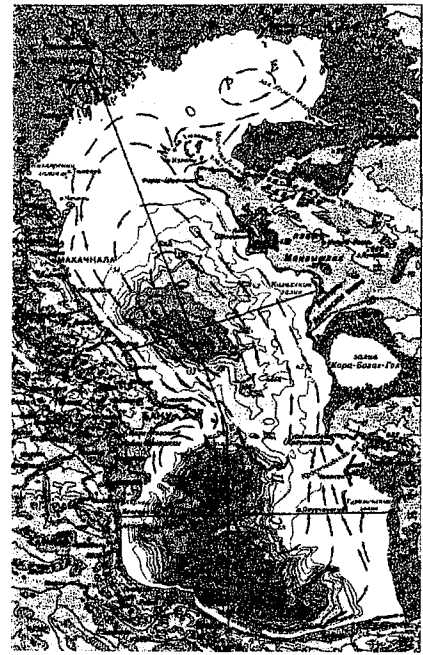


図-2 カスピ海の水深図

の被害が多発している。沿岸各国は海面上昇の原因を研究調査しており、多くの報告が出されているが未解明の部分も多い。大別して海面上昇の原因は、

- (1) 海底の地殻的な変化 (Tectonic factors)
- (2) 流入河川、特に河川流入量の 80% に相当するボルガ川の流域の水文・流出機構の変化 (Hydro-Meteorological factors)
- (3) 黒海との運河開通などの人為的要因 (Anthropogenic factors)

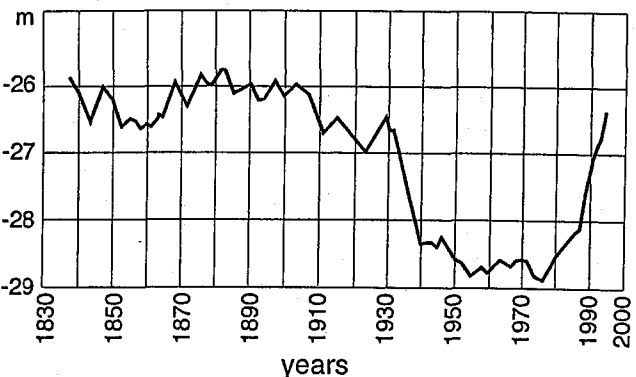


図-3 海水準の変動

が挙げられている。これまでの文献を整理してみると(2)の説が有力である。

Panin(1999)は、カスピ海への流入量の 79%は河川からの流入（大部分は Volga 河;65%）で、20%は直接降水、残りは地下水であるとしている。損失の 97%は蒸発であり、残る 3%は東岸トルクメニスタン国内にある Kara-Bogaz Gol 湾（図-1 参照）への流入である。彼は海水面の変動

表-1 カスピ海への流入・流出量の収支(Kurbanov,1993)

Period	Receiving part		Discharge part		Difference of the receiving and discharge parts
(years)	River runoff (km ³)	Precipitation (km ³)	Evaporation from water surface (km ³)	Run-off to the Kara-bogaz-gol (km ³)	(km ³)
1900-29	330	70	389	16	-5
1930-41	269	73	395	13	-66
1942-69	285	74	356	8	-5
1970-77	240	88	375	6	-53
1978-91	307	86	343	0	50
1991-93				16	

はこうした流入と蒸発の不均衡が主因であるが、温暖化も比肩できる大きさで影響を与えていると述べている。表-1は、Kurbanov(1993)によるカスピ海への流入・流出の収支を示した表で、上述の Panin による評価と同様の結果が表から読み取れる。

なお、Volga 河は global sea に流入しない唯一の大河川であるが、きわめて緩勾配（河口デルタ部分では水平 200km に対して 10m の標高差）であることも特徴である。流域のほとんども低平地である。

3. 海面上昇による汀線変化

3.1 汀線変化に関する観測結果

カスピ海の海面上昇に対応する海浜の応答は、地形勾配によって大枠の特徴が支配される。Ignatov et al.(1993), Kaplin and Selivanov(1995)らの研究では、初期地形勾配が 0.03 以下の緩勾配では単純な冠水に対応する海岸線後退をし、初期地形勾配が 0.03~0.3 では沿岸砂州と lagoon の形成を伴うとともに、沿岸砂州の存在によって海水準の上昇に比例的な海岸線の後退が妨げられ、波と bar-lagoon 地形との応答で海岸線位置が決まるとされる。さらに勾配 0.3~0.8 では沿岸砂州が汀線付近に形成され、さらに勾配がきつくなると海崖の侵食の形態をとることが示されている。

海面上昇に伴う海岸線の変化については、モスクワ州立大学のグループが詳細な測定を行っているので、以下ではその研究成果について紹介する(Kroonenberg et al., 2000)。観測場所は図-1の四角枠で示したカスピ海中央部西岸の Dagestan 海岸である。原論文には衛星写真ならびに航空写真が掲載されており、dune（砂丘あるいは砂堆）、scarp（浜崖）、lagoon（潟）、barrier（沖洲）の特徴地形が判別できる。現地の海底勾配は約 1/50、多段バーが水深 2.0m、1.4m、0.6m の所にあり、海面上昇とともにその形を失うことなく汀線方向に移動している。現地の風候・波候については、年 1 度あるいは 2 年に 1 度のストームにおける最大風速が 20m/s、最大波高で 4-5 m とされ、特に観測サイトでは遮蔽効果が効くため、波高が 1.5m 以上となることは稀であると論文中に記されており、特に波浪条件が厳しいところではないようである。

図-3 の海水準変動からわかるように、1930 年代になって海水準は低下し始め、1977 年までに 15m/year の割合で海岸線の前進が見られる。この時の海岸地形変化の模式図を図-4 上図に示す。海岸線は一定割合で前進したのではなく 1929, 1941, 1956, 1963 年に小段の変動を持っていたことが図に示されている。これらは暴浪のイベントで形成されたバーであろうと述べている。

1977 年以降は海水準の上昇期に入るが、上昇期では高さ 0.6~1.0m の barrier の形成が行われ、海岸陸上部とは lagoon で隔てられる(図-4 下図)。barrier の頂上部は砂礫や貝殻などの粒径の粗い材料で構成されるため、波によって流送されにくい。そのため、現地の barrier-lagoon システムは tidal-inlet を持つことなくほぼ全域に広がっている。

図-5 は海面上昇期における barrier と lagoon の特性量の変化を示したものである。図-5 の上段より以下のことが読み取れる。海面上昇の初期 1977~1981 では、汀線は 25m/year の急激な後退を示しているが、1982 以降では海水準が上昇しても汀線はほとんど後退しない。しかし下段の lagoon の特性量は 1988 年以降から大きく変化する。lagoon の幅はそれまで 50m 程度であったものが、最大 250m にもなり、lagoon の水深は 1.5m にも達している。一方で barrier の高さや幅は減少する。

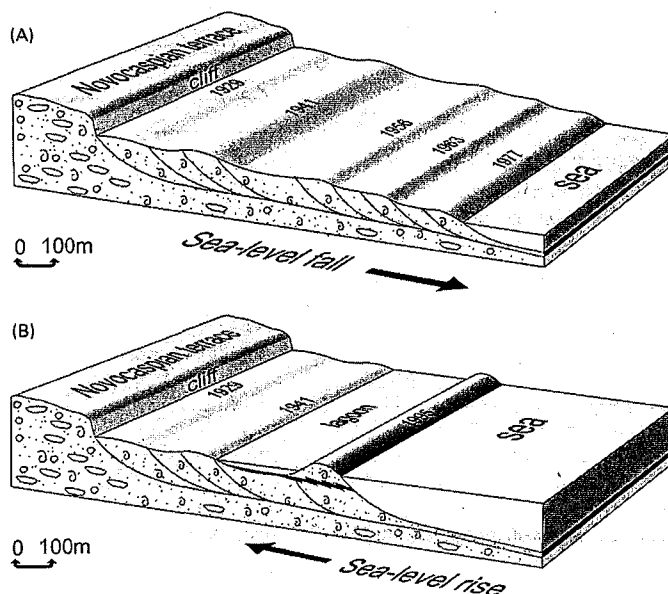


図-4 海面上昇期と海面下降期の海岸地形形成 (Kroonenberg et al., 2000)

海岸線は1978～1995年の期間に18m/yearの割合で後退したことになるが、その後退は一定割合で進行したのではないことが図-5の海岸線の後退(Coastal retreat)の結果からわかる。この期間に海水準は34cm/yearで上昇しているから、現地の海底勾配を1/50で考えると18m/yearの汀線後退は単純な浸水モデルの予測値と同じレベルの小さな割合であることがわかる。この理由は現地の波浪が比較的小さく、またbarrierの底質材料が粗いため、海水準上昇によって容易に地形変化が起こらず、barrierを岸側に移動させる駆動力が十分でないことが考えられる。海水準変動に対するbarrier-lagoonシステムの応答は特異であり、両者の関係は単純には説明できない。

3.2 汀線変化モデルによる比較検討

Kaplin-Selivanov(1995)は、カスピ海各地の海岸における海水準変化と汀線変化の関係をBruun則による計算結果と比較しながら検討した。彼らはカスピ海における最近の海面上昇期における海岸地形の変化を、次の4つのパターンに分類した。まず第1は北部における泥質低平地の海岸線後退であり、第2は沿岸砂州・砂嘴・テラスなどの地形を伴う堆積傾向の海浜、第3は西岸に広く存在する浸食型の海岸で、図-4.5に示した西岸のDagestan海岸も浸食型に分類される。第4はボルガ川河口に広がるデルタ海岸である。彼らの観測結果の一例として、図-6に東岸のKara-Bogz-Gol湾入り口から南に15km下がったところに位置する海岸の地形変化を示す。この海岸は第2番目の堆積傾向海岸の範疇に入るもので、barrier-lagoonシステムが見られる海岸である。海底勾配は0.006～0.008と緩やかである。表-2に、汀線後退量の観測値とBruun則による計算値、さらにbarrier-lagoonシステムの後退量を予測するDean-Maurmeyer(1983)のモデルによる計算値を示している。表-2から、観測値は計算値より総じて小さいが、Dean-Maurmeyerの計算値の方がBruun則の計算値より良く一致することがわかる。なお通常、Bruun則よりDean-Maurmeyerなど後に提案された予測式の方が大きめの汀線後退量となることが知られているが(SCOR Working Group, 1991)、この表の結果

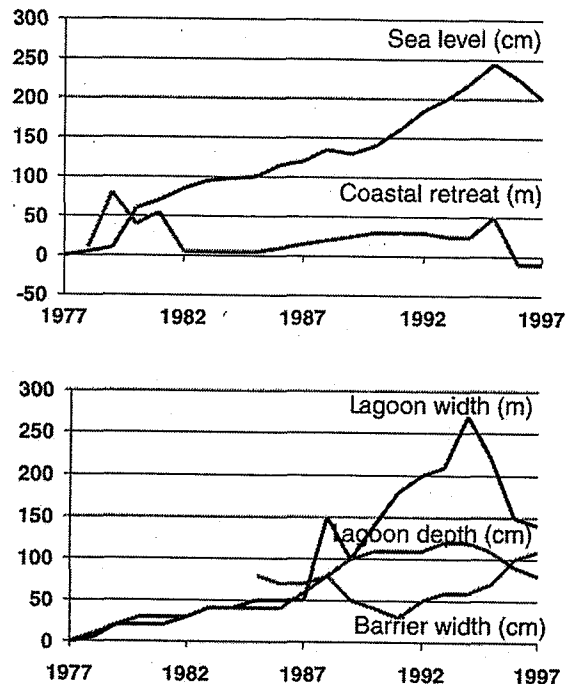


図-5 海面上昇期における barrier-lagoon システムの特性量の応答 (Kroonenberg et al., 2000)

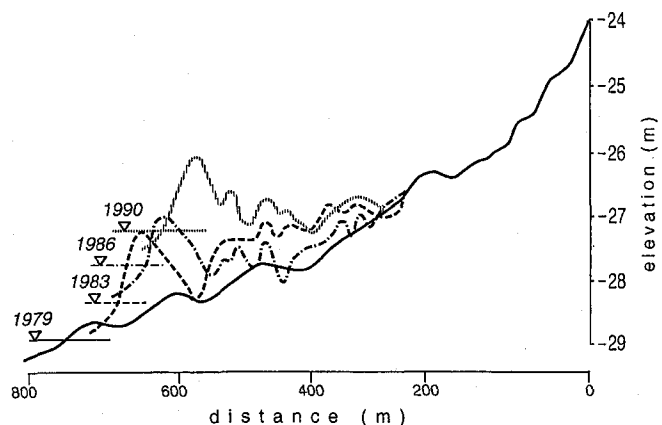


図-6 カスピ海における海岸断面変化の測定結果の一例 (Kaplin-Selivanov, 1995)

表-2 海岸線後退量に関する観測値と、Bruun 則・Dean-Maurmeyer 式による計算値との比較

Year	Shoreline retreat (m)		
	Field data	Bruun Rule	Dean-Maurmeyer
1979-1983	70-80	90-110	60-75
1983-1986	40-50	115-140	75-90
1986-1990	25-30	105-125	70-85

では Bruun 則の方が大きな予測値となっている。

さらに Kaplin-Selvanov(1995)は、カスピ海南西部アゼルバイジャンの Lenkoran 付近の海岸、カスピ海北東部のカザフスタン Atyrau 付近の海岸の地形変化の観測結果を示し、汀線後退量について同様の考察を行っている。前者については Bruun 則による計算値は観測値より 3～6 倍も大きな値となり、後者については海浜勾配が緩いため飛砂の影響が大きく、海面上昇に対して汀線は後退せずむしろ前進する結果となっている。

彼らは結論として、Bruun 則をふくめすべての断面変化モデルは観測結果を説明しないとし、沿岸漂砂の影響や飛砂の存在、波による dune 上の底質移動を考慮すべきと述べている。

4. まとめ

本論文ではカスピ海の海面変動の原因とそれに伴う海岸地形変化についての沿岸各国の研究成果を紹介した。本稿で述べたようにカスピ海は海嶺によって 3 つの部分に区分され、北部はきわめて浅く、それ以外の 2 領域は最大水深が 1000m に達する。海岸特徴地形も、崖や barrier, lagoon, bar, marsh など多様であり、広大なカスピ海について海面上昇と海岸線変化の関係を一律の簡単な形で議論することはできないと考える。

こうしたこともあって本研究では、この地で得られた成果・知見を、全球的な海面上昇と海岸地形変化の関係の解明に応用する段階には遙かに到達しなかった。また、Bruun 則は海面上昇に対して平衡となる海岸地形があることを前提としており、カスピ海で起こった海面上昇速度は平衡海浜の形成を保証するほどのゆっくりした速度であったか、についても今後議論すべきであろう。現地データの入手も困難であったため十分な考察結果を得られなかったのは残念であるが、わが国ではあまり知られていない地域での問題に興味を持つきっかけになれば幸いである。

最後に本研究は鹿児島大学の国際的共同研究・研究者交流事業として教育研究活性化経費の補助を受けたことを記し、謝意を表する。

参考文献

- Bruun, P. : Sea-level rise as a cause of shore erosion, J. of Waterways and Harbour Division, ASCE, No.1, pp.116-130, 1962.
- Dean, R. G. and Maurmeyer, E. M. : Models for beach profile response, Handbook of Coastal Processes and Erosion, Edited by P. D. Komar, CRC Press, pp.151-166, 1983.
- Golubtsov, V. and Lee, V. : Modeling of monthly sea levels on water balance equation for 1925-1998, Caspian Environment Program, Caspian Center for Water Level Fluctuations, pp.122, 2000.
- Ignatov, Y. I., Kaplin, P.A., Lukyanova, S. A. and Solovieva, G.D. : Evolution of the Caspian sea coasts under conditions of sea-level rise; model for coastal change under increasing greenhouse effect, J. of Coastal Research, No.9 (1), pp.104-111, 1993.
- Kaplin, P. A. and Silivanov, A. O. : Recent coastal evolution of the Caspian sea as a natural model for coastal responses to the possible acceleration of global sea-level rise, J. of Marine Geology, No. 124, pp.161-175, 1994.
- Kaplin, P. A. : Caspian sea as a natural model for coastal responses to the global sea-level rise, J. of Marine Geology, No. 144, pp.168-185, 1995.
- Kroonenberg, S. B., Rusakov, G.V. and Svitoch, A.A. : The wandering of the Volga delta; A response to rapid Caspian sea-level change, Sedimentary Geology, No.107, pp.189-209, 1997.
- Kroonenberg, S. B., Badyukova, E.N., Storms, J.E., Ignatov, E. I. and Kasimov, N.S. : A full sea-level cycle in 65 years: barrier dynamics along Caspian shores, J. of Sedimentary Geology, No. 134, pp.257-274, 2000.
- Kurbanov, P.K. : Vulnerability assessment case study and degree of the anthropogenic

- influence on the hydrological and hydro-chemical region of the Caspian sea and its coast, Caspian Environment Program, Caspian Center for Water Level Fluctuations, pp.103, 1993.
- Kurbanov, P.K.: Vulnerability assessment case study and degree of the anthropogenic influence on the hydrological and hydrochemical regime of the Caspian Sea and its coast, IPCC Eastern Hemisphere Workshop on Vulnerability Assessment to Sea-Level Rise and Coastal Zone Management, Tsukuba, Japan, pp.197-200, 1993.
- Leatherman, S.P. : Sea-level rise and erosion, Eos Transactions, American Geophysical Union, 2000.
- Leatherman, S. P. and Burkett, V. : Sea-level rise and coastal disasters : Lessons from the east coast and New Orleans, Natural Hazards Observer, No. 26(4), pp.11, 2002.
- Mansimov, M. and Aliyev, A.: Caspian sea-level rise, Azerbaijan International Autumn Report, p.45, 1994.
- Panin, G. N.: The weather systems related to the Caspian basin precipitation and evaporation from the Caspian sea, Caspian Environment Program, Caspian Center for Water Level Fluctuations, p.123, 1999.
- Pilkey, Orrin H. : Sea-level rise shown to drive coastal erosion ; discussions and reply in Eos Transactions, American Geophysical Union, Vol. 81, pp.436-439, 2000.
- SCOR Working Group 89: The response of beaches to sea-level changes: A review of predictive models, Journal Coastal Research, Vol.7, No.3, pp.895-921, 1991.
- World Meteorological Organization : Integrated Program on Hydro-Meteorology and Monitoring of Environment in the Caspian Sea Region, ISBN-92-63-00873-6, 1997.