

第4回「大気—海洋相互作用研究会」の報告

第4回の大気—海洋相互作用研究会が、気象学会秋季大会前日の10月6日(火)の午後、北海道大学低温科学研究所において、「高緯度での空と海と氷の相互作用」というテーマ(コンピーナー:北大低温研 竹内)で開催された。今回は開催場所が札幌ということもあって、雪氷関係の研究者の方々に講演していた。普段あまりその内容の詳細を知る機会の少ない極域における研究の現状を詳細に知ることができ、非常に有益であった。当日は雪氷関係者を含め30名以上の方が参加され、熱心に討論していただき、非常に盛会であった。

以下に、コンピーナーの主旨説明と、4件の講演(当初予定していた、篠原吉雄氏(函館海洋气象台)の講演は、演者のご都合で中止)の要旨を報告する。

研究会事務局 藤谷徳之助・中沢 哲夫

1. 主旨説明

竹内謙介(北大低温研)

大気—海洋相互作用研究会も4回目となりました。今回は北海道で行われる機会を利用し、氷、特に海水が大気—海洋相互作用に及ぼす影響について取り上げる事にしました。

大気と海洋は対流に関してちょうど逆の関係になります。つまり、大気は下から暖められると対流が起き、高高度まで影響が及びますし、海洋では逆に対流は海面で冷やされる事によって起き、深層に影響が及び、地球規模の循環を駆動します。その意味で大気—海洋相互作用にとっては高緯度域は熱帯とともにキーエリアであると言えます。

その中で、海水は2つの大きな役割をしています。一つは海洋から大気への熱の輸送を遮断する役割、もう一つは、海水の生成が低温・高塩分の深層水を生み、海洋の鉛直循環を強める役割です。

大気と海洋の研究者の交流はようやく近年、熱帯を中心に盛んになりつつある段階で、寒冷域に関しては

これからという状態ですが、今回の研究会がお互いの刺激となって、この分野の研究の盛り上がるきっかけの一助になる事を期待して企画した次第です。

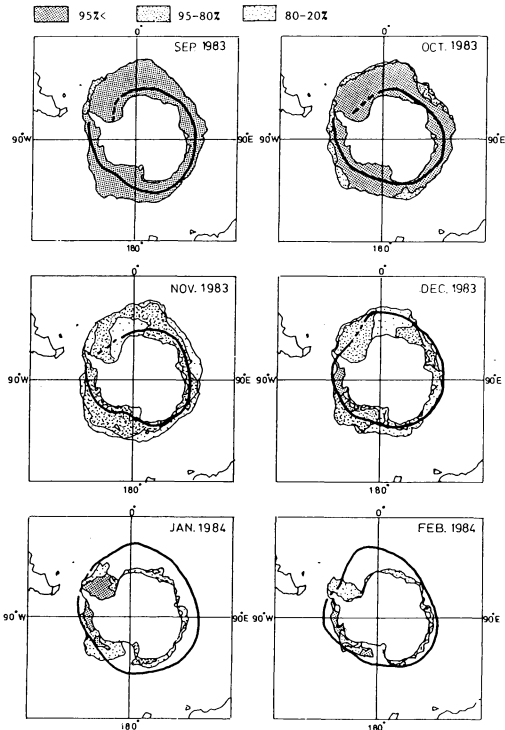
2. 南極域における大気—海氷相互作用

榎本浩之(北見工大)

南極圏では、冬期に海水が南極大陸とほぼ同じ面積にまで拡大する。また年々変動も大きく、気候変動のearly indicatorとも考えられている。この海水変動の原因及び大気に与える影響を考える。南極圏の海水域の上空には、環南極低圧帯(Circumpolar Trough:以下CPTと略す。)が位置しており海水分布と密接な関連がある。CPTの半年振動(Semiannual Oscillation:SAO)と海水分布の1年サイクルのフェイズのずれが、海水の振舞いを説明するうえで重要である。海水の運動の特殊性も考慮しなければならない。低気圧内では、地表の大気は収束するが、海洋の表層水は発散する。その間の海水は、内部抵抗の大きさにより発散も収束もおこし得る。海水密接度が、この内部抵抗に影響する。

海水縁とCPTとの相対的な位置(緯度)は季節的に入れ替わり、海水域における卓越風向も季節的に変化する。春から夏にかけて、南極圏では上空の極渦がつぶれる時期に対応して急激な気圧上昇が起きる。この時期の大気循環の変化が、拡大した海水面積の維持、低密接度域の発達、海水面積の急な縮小にとって重要である(第1図)。

海水面積の減少に先だって、密接度の減少のみがまぎらず生じる。さらに春から夏にかけて海水は融解の開始、西風から東風への風系の変化により、急激にその面積を縮小させる。融解が始まっている時期であるのに、大陸沿岸から数百kmゾーンでは、かえって海水の密接度が増加する。これは、海水の移流による極域への収束と考えられる。このため、海水域周縁部では海水の急速な消散がおり、大陸沿岸部では密集化がおこ

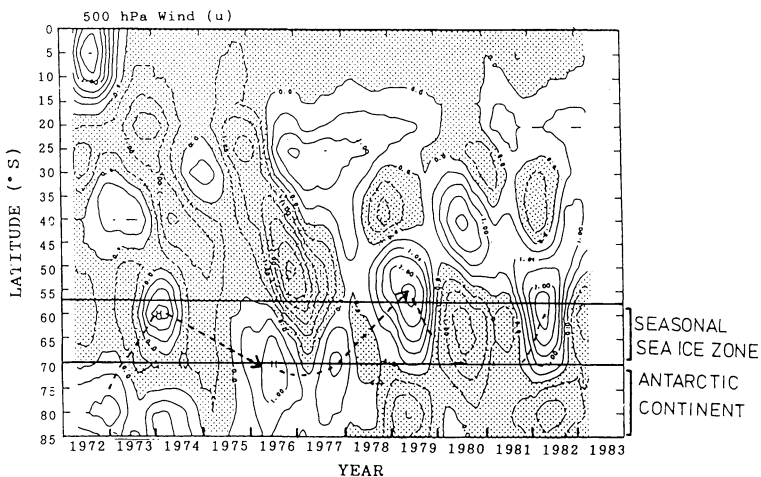


第1図 海水縁と環南極低圧帯 (CPT, 実線) との相対的な位置は季節的に入れ替わり、海水域の卓越風向も季節的に変化する。CPT より低緯度側で西風、高緯度側で東風となっている。海水縁と CPT の、相対的位置の逆転する時期に、海水面積の急激な減少が観測される。

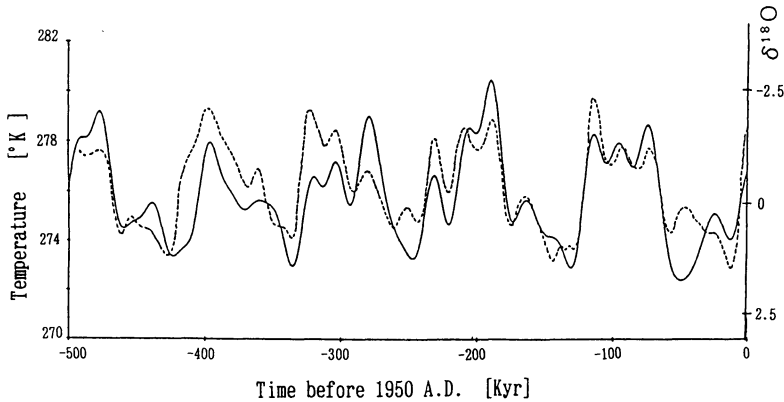
る。

CPT が活発な年には、CPT は高緯度に位置する。春に CPT が大陸付近に留まることにより海水域の発散 (開水面の拡大) が促進される。また海水縁における東風から西風への平均風系の変化の時期が遅れるため、急な縮小のおきる時期も遅れる。これは1ヶ月近くも変動幅がある。海水域の上空の気圧配置と海水の発散、収束が相互作用を起こしているという解析例もあり、大規模な開水面は CPT にも影響することが考えられる。大規模な Open Water ウェッジポリニアが海水域内に出現したときには、その位置は CPT に対応していた。またスポット的に昇温域が現れ、雲量、大陸での積雪も増えた。ポリニアが、熱と水蒸気の供給源としてこの地域の低気圧活動を活発にしたのかもしれない。

海水面積の経年活動の大気による原因を考えた。海水最大拡大期の気温をみると、海水が拡大した年に水縁付近では気温の低下が起きている。気温の変化が上層 (500hPa) まで見られることから、広域の大気変動が海水に影響していると考えられる。海水拡大と気温との関係で最も大きな相関が出たのは、大陸内部の気温上昇であった。これには、高気圧域の下降流による断熱圧縮も考えられるが、風のデータからは、東南極で南向きの成分が強く、内陸への暖気の移流が予想される。また、2~3のセクターで北向きの風の成分が強く、海水拡大に効果的な寒気の吹き出しのパターン



第2図 500 hPa 面における西風成分の長期 (10ヶ月以上) 変動。強化のアノマリーが、海水域の北限かまたは南限 (南極大陸沿岸) の両位置に現れる。海水面積は、この強風域の南北シフトに対応して拡大、縮小する。



第3図 過去50万年にわたる当モデルによる気温変動(実線)と Hays *et al.* (1976) の酸素同位体比による古水温変動(破線)の比較
(当モデルのパラメタ: $\alpha = 29$ (mly⁻¹d), $\beta = 75$ (m/K),
 $\zeta = -2.11 \times 10^4$ (m), $s = 0.0009$, $C_L^*/C_T^* = 8.26$)

と言えるかも知れない。

海水分布の拡大の年々の変動は、南極周辺の500hPa面での西風強化のアノマリー帯の南北動と同期しておきている。また、西風の強くなるゾーンは、海水域の北限かまたは南限(南極大陸沿岸)の両位置で振動しており、海水域上空の気圧変化が傾圧域の南北動に重要である(第2図)。

CPTの風の場合は、南極大陸を取り囲む湧昇域(南極発散線)の維持にとっても重要であり、多分野の共同研究が望まれる。極域の海水データは十分ではなく基本的な季節変化についても未知の部分が多い。極域の海洋-海氷-大気の相互作用の研究は始まったばかりである。

3. 大陸氷床の変動と氷期の10万年サイクル

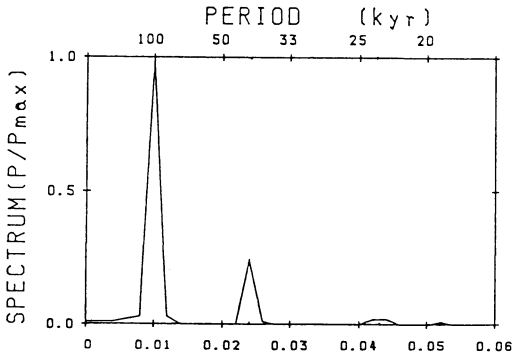
井上良紀(北大工)

周知のように、地質学上の第四紀とよばれる時代には、氷期と間氷期がほぼ10万年のサイクルで交互にくり返されてきた。しかし、なぜこのような氷期と間氷期が起こるのかに関しては、確固たる理論づけはなされていない。ここでは、この興味ある問題に対する一つの理論的アプローチについて述べてみたい。

氷期起源論のなかで、近年最も脚光を浴びているのは、ユーゴスラビアの地球物理学者 Milanković (1930)によって唱えられた、いわゆる“ミランコヴィツ

チ説”である。つまり、地球の地軸の傾きの変化(周期41,000年)、歳差運動(21,000年)と楕円軌道(周期93,000年)に基づく太陽と地球の間の複雑な幾何学的な配置の変化により、北半球高緯度地帯で夏期に受ける日射量に変化し、氷期と間氷期が生じるという理論である。最近、Haysなど(1976)は、インド洋の深海底の泥土のコアを詳細に調べ、過去およそ50万年にわたる古水温と $\delta^{18}\text{O}$ の時系列から、そのパワースペクトルを求めた。驚くべきことには、スペクトル図の二つのピークは、日射量変化から計算したスペクトルに現われる周期41,000年と、23,000年と19,000年のピークに、それぞれ非常によく一致していることが判明した。しかしながら、Haysなどのスペクトルは、日射量変化のスペクトルでは無視できるほどに小さいピークしかもたなかった10万年周期に相当する所に、最大のピークをもつ。このことは、氷河期の10万年の周期をもつ主要な変動が、日射量変動以外の何か他の未知のメカニズムによって(あるいは、が介在して)励起されていることを意味する。

まぎれもなく、氷期とは大陸氷床(10^6km^2 よりも大きく、大陸を蔽う氷)の規模が拡大した時期に当り、間氷期とは縮退したりなくなった時期に相当する。そこで、氷床の大きさの時間的な変化を記述するモデル方程式が、Weertman(1964, 1967)によって提出された: 2次元氷床は、常に放物線の形をしていて準平衡の状態にあるとする。このとき、雪線(平衡線ともいう)よりも高い所にある氷床表面では、積雪により氷河水が生成される割合の方が多く、他方低い所では氷



第4図 当モデルによる気温変動(第3図)のスペクトル

河水が消耗する割合の方が多い。Weertman は、日射量の変化に比例して雪線が上下に移動すると仮定して、氷の質量収支を表わす力学的な方程式を導いた。しかし、このモデルでは、スペクトルの10万年周期の所に、大きなピークを与えることはできそうにもない。

地球と大気からなる系のエネルギー収支を記述する気候モデルが、Budyko (1969) と Sellers (1969) によってつくられた。Hällen, Crafoord と Ghil (1980) は、これに上述した氷床の変動を支配する Weertman モデルを結合した一つの簡単な気候モデルを考えた。この力学系のもつ特色は、一定の入力(日射量)に対して、いわゆる自励振動を行うことができるということにある: まず、初め海洋の温度が高く、海水はほとんどない状態にあるとしよう。このとき海洋からの水分の蒸発が盛んで、したがって陸地の降雪量も大きい。これは氷床を成長させ、それに応じてアルベド(日射の反射率)が増大し、温度が低下する。このことは降雪量の降下をもたらす。こんどは氷床の大きさが減少するようになる。ついには、アルベドがさがり、温度が上昇し、最初に述べた状態に戻り、現象は周期性をもつ。つまり、氷期の10万年サイクルは、地球外の“周期的に変動する”要因によって決まるのではなく、その主要因は地球そのものに内蔵されていることを示した。

井上(1990)は、Hällenなどの気候モデルで、雪線の方程式にミランコヴィッチの日射量に比例する強制項を付加して、数値シミュレーションすることによって、その非線形応答を調べた。その結果、適当にパラメタ値を選択すれば、Haysなどの古水温の曲線にかなり近い気温変動の曲線を得ることができ、かつその

スペクトルも10万年周期の所に最大のピークをもつことが判明した(第3, 4図参照)。

4. 北極海の海洋・大気研究 —日本の現状と展望—

小野延雄(極地研北極圏環境研究センター)

近年、北極海の気候・海洋環境を国際協力によって調査研究しようとする機運が高まっている。人間活動に起因する地球規模変化は北極域に最も早く顕著に現れるだろうと推測され、その兆候把握が国際的な緊要課題となっていることや、北極海に存在していた米ソの緊張が緩和したことなどがその背景にある。

今回の研究会では、北極海の気候・海洋研究の国際動向と、我が国の北極海域研究の現状とを概観する話題提供を行った。国際動向には、汎地球的な国際協同研究計画の極域分担研究、種々の国際組織委員会が主導する北極研究、多国間や2国間の北極共同研究、それぞれの国や一つの研究機関が実施する北極調査研究などがあり、思い付くままに数えても十指を越えるので、主要なものだけを選んで簡単に紹介することにした。

高緯度海域の気候・海水・海洋に関する国際協同研究計画は、WCRPの「海水と気候」作業委員会(WGSI: Working Group on Sea Ice and Climate)で討議され、気候変化の高感度検知器としての海水域の長期モニタリングを確立することが目標となった。両極の海水域の面積や密度の情報は、衛星搭載のマイクロ波放射計によって極夜の季節を含めて得られるようになり、1973年からの季節変化や年々変動が明らかになっている。しかし、衛星リモートセンシングによって海水の厚さを知る方法はまだ確立していないので、WGSIは、海底に繫留して立ち上げた上向きソナーを主要海水域に配備して、その上を漂流する海水の厚さを計測する観測計画を立案し、現在その計測結果が出始めている。また、WCRPの90年代後半の推進課題の一つとして、北極気候システム研究(ACSYS: Arctic Climate System Study)を提唱し、全球気候モデルに海水域を組込む研究を推進することになった。WGSIの第3, 4, 5回会議の報告書は、WCRPレポートのNo.18, 41, 65として、また、ACSYSの科学的意義は、同レポートのNo.72として配布されている。

北極海洋科学会議 (AOSB : Arctic Ocean Sciences Board) は、北極海の海洋科学研究を推進する目的で、1984年に発足した。現在、AOSBが企画し推進している観測計画は、グリーンランド海域研究計画 (GSP : Greenland Sea Project) と、国際北極ポリニア研究計画 (IAPP : International Arctic Polynya Program) であり、共に、1993年に複数の砕氷船や観測船を結集する集中観測を実施する。その計画の最終調整を兼ねて、北極ポリニア国際ワークショップが1993年1月にシアトルで開催される。

一方、海洋分野に限らず広く北極科学研究を国際的に推進することを目的として、1990年に国際北極科学委員会 (IASC : International Arctic Science Committee) が設立された。現在、北極圏8ヶ国 (ノルウェー、スウェーデン、フィンランド、ロシア、アメリカ、カナダ、デンマーク/グリーンランド、アイスランド) と非北極圏6ヶ国 (ドイツ、フランス、イギリス、オランダ、ポーランド、日本) が加盟しており、さらにスイスとイタリアが加盟を希望している。IASCは、その最初の活動として「北極における地球規模変化」作業委員会 (WG Global Change in the Arctic) を設けて、北極に顕著に見られる地球規模変化の問題点の整理を行うワークショップを1992年4月にレイキャビクで開催した。1993年には、北極海洋研究のワークショップ (WS Arctic Ocean Studies) をロシアで開催する予定である。

そのほか、多国間研究計画としては、北極圏国が政府レベルで協議している AMAP (Arctic Monitoring & Assessment Programme), EC 主導の ECOPS (European Committee on Ocean & Polar Sciences), 衛星利用の PIPOR (Programme for International Polar Ocean Research), 海底試料採取を目指す NAD (Nansen Arctic Drilling) 計画などがあり、また、一国独自の計画としては、アメリカが北極研究 ARCSS (Arctic System Science) を企画し、その中に OAI (Ocean-Atmosphere-Ice Interaction) を副課題として位置付けている。これらの研究計画の多くは、その主要課題に、地球温暖化、オゾンホール、酸性雨、海洋汚染など、地球規模変化から地域環境問題までを採り上げている。

わが国の北極域研究は、文部省の北極圏地球環境共同研究経費や科学研究費国際学術研究、科学技術庁の振興調整費などで実施されている。

北極圏地球環境共同研究経費では、「北極圏の気候変

動に関する大気環境の研究」、「北極海ポリニア域での生物生産とエネルギー移動の研究」が平成2～6年度の5ヶ年計画、「北極海の海水および海洋環境とそれらの変動に関する研究」が平成4～6年度の3ヶ年計画で進められており、北極域に関する科学研究費国際学術研究は、北海道大学、東京大学、国立極地研究所などの研究者によって現在数課題が実施中である。

科学技術庁の振興調整費では「北極域の水圏における水、熱および物質の輸送過程の観測研究」(平成2～6年度)が実施中であり、また、海洋科学技術センターが独自のプロジェクトとして「北太平洋・北極域総合観測研究」を進めている。

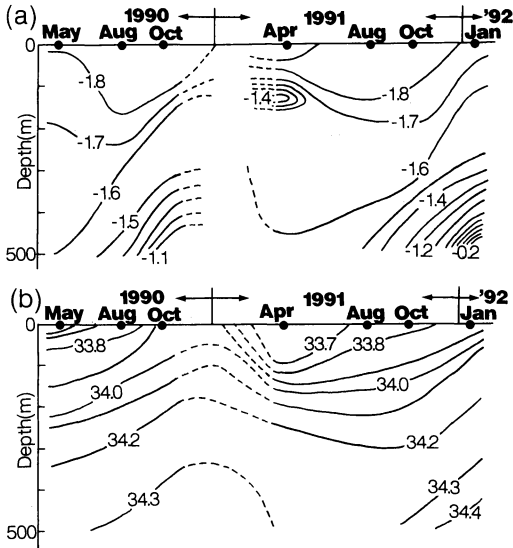
国立極地研究所北極圏環境研究センターでは、ノルウェー極地研究所との共同研究のもとに、高緯度不凍海域に近いスバルバル諸島での観測を開始した。また、入手した人工衛星データや海洋観測資料を解析して、北極海の海水・海洋の年々変動に海域間シーズンや ENSO サイクル現象が認められることを見出している。

5. 南極海水域における現場海洋・海水・気象観測

大島慶一郎 (北大低温研)

気象データにしても海洋データにしても、地球上で最も現場データが乏しいのが南極海水域である。ことに海水に覆われる冬季はほとんど現場データがない。一般に知られているこの海域の海洋場の描象はほとんどすべて夏の観測に基づいて作られたものである。大気場にしても、大陸には各国の基地によるデータがあるが、船舶も通らない海水域は全くの空白地帯である。FGGEの際に北極海域に数多く設置された気象・海象アルゴスプイも南極海域では極めて疎にしか設置されなかった。北極海域に比べ南極海域が文明圏から遠いことそして広大であることがこの海域の研究を北極より10年以上遅らせている。世にある様々な全球のデータセットや気候値も、こと南極海水域に関しては怪しげな外挿のもとに作られているものが多い (特に冬季のデータについては)。

このような背景のもと、1986年に WWSP (Winter Weddell Sea Project) が実施され、初めて本格的な冬季の南極海水域での観測が行われた。これはドイツの砕氷船ポーラーシュテルンを南極ウェッデル海の海水



第5図 昭和基地沖西方40 kmの地点(水深510 m)での水温(a)、塩分(b)の鉛直分布の季節変化

野内に越冬させて、集中的に海洋・海水・気象データを取得しようというもので、11カ国137人の研究関係者が乗船した(日本は不参加)。この観測によって冬季の海水域に関していくつかのことが明らかになった。例えば、海水の厚さは予想していたよりずっと薄いということ、そしてそれは高温高塩の周極深層水が海洋上層に取り込まれて多量の熱が運ばれるためであることなどである。その後このプロジェクトは WWGP (Winter Weddell Gyre Project, 1989年)などに引き継がれている。

そのような状況の中で日本においても、南極海水域において初めて本格的な海洋・海水・気象観測が、ACR (南極気候研究)のもと、第31, 32次南極越冬隊(1990-1992)を中心として行われた。前述したように南極海水域では冬季の観測がほとんどなく、特に海洋場の季節変動に関してはほとんどわかっていない。昭和基地は東オングル島という島の上であり、周辺の定着水の流出がなければ通年の海洋・海水観測が可能で

ある。そこで、南極沿岸域での季節変動を探るべく、通年の海洋・海水データを取得することを第一の目的とした。幸い31, 32次では基地周辺の海水流出はなく、2年間にわたって通年のデータを取得できた。観測項目としては、CTD・採水・係留による海洋観測を中心として、海水観測、海水上微気象観測、アルゴスプイ観測、航空機による AXBT・衛星トゥルース観測などである。

観測成果の一例を挙げる。第5図は、昭和基地より40 km あまり沖に出た大陸棚斜面上の地点での2年間にわたる、海水の温度・塩分の変化である。南極の秋(4, 5月)に表層低塩分水の蓄積が最も顕著になり、夏に上層の低温・低塩分水層の厚さが最小になる、という顕著な季節変化が見られる。この季節変化の様子は年による違いはほとんどない。他の観測から、このような特徴はこの地点でのローカルなものではなく、この辺りの沿岸域一般の特徴であることも示唆された。このような季節変化の原因として今のところ以下のように考えている。4, 5月は南極低圧帯が南極沿岸にぐっと近づき沿岸域での低気圧活動が活発になり東風が強くなる。この東風によるエクマン輸送により表層低塩水は沿岸域でパイルアップされ厚くなる。逆に12, 1月は低圧帯が北上し沿岸域での東風が弱まり、パイルアップ効果が小さくなって表層の低塩水層が薄くなる、というものである。さらに、このような大気場の季節変化に伴う海洋場の変化は、南極沿岸流の強弱にも現れることが、漂流プイの観測などで示唆された。今まで海洋場に関しては夏の観測に基づいて議論されてきたが、今後、季節変動成分が大きいということを十分認識して議論する必要がある。

グローバルな大気や海洋の循環や気候変動を理解する場合にも、南極海域でのデータの空白を埋めることは不可欠であろう。広大な南極海域を観測するには大規模な国際共同観測の形をとる必要があり、近い将来その時がくるはずである。来るべき時に備え日本もそのためのポテンシャルをさらに高めていく必要がある。