

# アムール川の流量変動とそのメカニズム

立花義裕（東海大学総合教育センター）

## 1. はじめに

オホーツク海は、沿岸結氷域を除けば、北半球最南端の結氷海域である。また、その年々の変動が非常に大きい。古くからオホーツク海の海氷生成の主因は、アムール川からの淡水流入であると長い間言われてきた。それは、淡水流入によるオホーツク海の高成層状態が海洋の鉛直熱輸送を制御し、海氷の生成を容易にさせているという考えである。

一般に海氷は大気海洋気候系に対して、動的に作用しているといわれ、その変動を理解することが10年スケールの気候変動を理解する上で重要であることは論を待たない。オホーツク海の海氷に限っても、その変動が周辺大気及び大気大循環に影響を及ぼすことが大気大循環の数値実験 (Honda et al, 1996 and Honda et al 1999) から示唆されている。海氷が海洋から大気への熱フラックスを遮断することが、大気にとっての熱源分布を大きく改変させ、それが大規模な大気大循環に影響を及ぼすということである。海氷の存在が大気への熱フラックスへの影響を理解するために、我々は1998年から、2000年までの3年間、冬季オホーツク海海氷上でのラジオゾンデ観測を行い、大気海氷間の熱フラックスの評価を行っている (Iwamoto et al, 2001, Inoue et al, 2003)。その結果、海氷密接度の増大に伴い海面熱フラックスが著しく減少することが確かめられつつある。

一方、オホーツク海の海氷の年々変動に対しては、大気大循環の変動が主な原因であるといわれ、多くの研究がある (例えば、Cavalieri and Parkinson, 1987, Parkinson, 1990, Fung and Wallace, 1994 や Tachibana et al, 1996)。10年スケールでの海氷の

変動に関しては、Tachibana et al (1997) に、アリューシャン低気圧の長期変動との関係から、1990年代以降の海氷量の激減状態について説明している。1970年代の平均的な海氷量時期、1980年代の多氷時期、1990年代以降の少氷時期が存在していることを示した。オホーツク海の海氷は、アリューシャン低気圧を代表される周辺大気の状態 (詳細な研究例は Yamazaki, 2000 参照) で説明され、海氷の10年変動は、周辺大気場の10年変動によって、従属的に説明されるというのが常識的な解釈であろう。しかしながら、古くからオホーツク海の海氷生成の主因は、アムール川からの淡水流入であると長い間言われてきた (例えば Akagawa, 1977)。そこで我々は、アムール川の淡水流入の年々から10年スケールの変動がオホーツク海の海氷変動にどのような関係があるかについて、検証を行った。なお、本小稿は共同研究者小木氏との共同研究に基づいて解説を行う (Ogi et al, 2000、立花 2001)。

## 2. アムール川流量データ

10年スケールの変動に関するデータ解析的研究は、多くの場合、公開されているデータを用いた研究形態をとることが多い。昨今はwebで手軽にデータの入手が可能となりつつあり、ますますその傾向が強まってきている。しかしながらアムール川の流量データに関しては、このような安易なデータの取得は困難である。大気や海洋の観測を自ら行い観測結果を解析するタイプの研究と同様に、データ取得のプロセスそのものも研究プロセスの一部であると見なすことができると考えられるので、データ取得プロセスを以下に手

短に述べる。

世界の主要河川のデータは一般に GRDC (Global Runoff Data Center) によって各国の協力の下、非営利な科学的な利用に限って公開されている。アムール川のデータの一部もここに公開されている。しかしながら、公開されているデータの最終年が1984年までであり、衛星に基づいた海氷観測データと重複する年数がきわめて少ない。また、公開されている観測点が、アムール川中流域のハバロフスクと、コムソモレスクナアムーレ(図2)のみであり、オホーツク海の淡水収支にもっとも重要な下流域観測点のデータは国際的には公開されていない。そこで、我々はロシアハバロフスクにある極東気象水文局を訪問し、ハバロフスク気象局が発行する冊子(Leningrad Hydrometeorology, 1986--年報のようなもの—但しロシア語)にまとめられているデータ集によって、下流域のバガロツカ観測点のデータを1999年分まで得ることができた。ただし、この書物は国外には出回っていないであろうとのことであった。コピー機などが無いので、そのデータを気象局職員に手作業で模写してもらい、データを取得することができた。流量データは毎年の月平均値が掲載されている。

次に観測方法について述べる。観測は決められた観測測線の川を横断する方向の鉛直断面の流速を計測し、面積分する事によって観測日の流量を求める。観測日に観測船が測線を横断し、川幅を約10等分したそれぞれの10地点を観測点とし、それぞれの観測点の水深に対して鉛直方向に約5等分した深さ毎の流速を測定する。川幅が約2kmであるので、横断方向に200m毎のデータ(グリッド数にすると約50点)があることになり、観測時の流量のみつもりはかなり正確であろう。このような観測を月平均4回程度行っていた(脚注:文体を過去形にしてあるのは、ソビエト時代の観測態勢である。現在は予算難から月1回の観測もままならないそうである)。観測頻度は一定の間隔ではなく水位が急変するようなイベントが起こると観測頻度を上げ、水位がほぼ

一定の場合は観測頻度を落とすという操作を行い、集中豪雨などの短時間の流量変化に対しても柔軟な観測を行っていた。これら離散的な流量データを時間及び空間内挿し(流量観測点相互の値に齟齬が出ないように内挿)、月平均流量データを計算している。従って我々が解析に用いた月平均流量データはかなり正確な値であると見なすことができる。また、冬季河川表面結氷期は、ハンドドリルで河川上に穴をあけて、氷下の流速を上記と同様の手法で測定している。

図2がアムール川の流量の年変化である。1971年から、1993年までの年変動をすべて重ねてある。冬季にほとんど流量がゼロに近いことは、河川が結氷期であることに対応する。流量のピークは、大雑把に2つあり、1つは、春の雪解けシーズン。もう1つは晩夏から秋である。これは、この時期の降水と上流の氷河や積雪の融解が主な原因であろうと考えられる。従って、年平均の流量データには、前年の降雪をもたらす大気場の情報や、上流域の夏期の気温情報が含まれている可能性がある。

### 3. 海氷の年々変動とのアムール川流量との負の相関関係

上記データを用いて、海氷の年々変動時系列とバガロツカ観測点におけるアムール川流量時系列とを比較した。なお、海氷のグリッドデータは、気象庁海上気象課作成の海氷データや、SSM/Iデータなどが公開されており、海水量の年々変動を把握するのは容易である。特に気象庁データは、1972年からの集積があり、10年スケールの変動を議論するに耐えうるほどに達してきた。本報で用いたデータは、気象庁データである。図3がオホーツク海の最大海氷面積とアムール川年平均流量の時系列である。ただし両者ともに3年移動平均を施してある。なお、淡水流入が起こるのは主に夏半年であり、その影響を受ける海氷はそれに続く冬である可能性が大きいので、横軸は、海氷データを一年ずらして表示してある。この図から、河川流量変動と海氷変動には負の相関関係



が読みとれる。つまり、流量が多い場合、それに引き続く冬の海水は少ないことを示している。相関係数は 0.84 で自由度をデータ年数の  $1/3$  とした場合、99% 有意なレベルである。この負の相関は、以前から言われ続けてきたアムール川の淡水流入がオホーツク海の海水に大きく影響しているという説を覆す驚くべき結果となった。この結果の解釈は現在検討中であるが、アムール川からの顕熱移流の影響の可能性がある。夏季シベリア大陸は非常に高温となり、そこを蛇行しながらゆっくりと流れる河川の水温は地温に限りなく近いことが考えられる。オホーツク海北部の海面水温は夏でも  $10$  度程度であり、夏季大陸の気温が  $20$  度を超えることを考えると、その温度差は  $10$  度に達する。この温度差による河川水の顕熱移流の効果が、流量の多い年により多く効き、海面温度の上昇をもたらす結氷時期を遅らせる可能性がある。この解釈の妥当性を評価するためには、今後熱収支解析などの研究を行う必要があろう。また、アムール川の水温データの取得にも努めなければならない。

図4は、アムール川の流量と最大海水面積のラグ相関図である。ラグ0年で負相関最大となり、ラグがプラスマイナス5年で逆相関最大となる。従って、アムール川の流量と、オホーツク海の海水は共に10年スケールで逆位相で変動しているとの解釈も可能である。つまり、両者の共通の変動は、直接の因果関係から説明される事象ではなく、第3の現象が10年スケールで変動し、その影響がアムール川と海水の双方に及んでいるという解釈である。海水は冬季の現象であり、アムール川は夏季に流量が最大となることより、冬季および夏季に共通のアジア～太平洋に亘る10年スケールの変動が内在している可能性が高い。最近我々は、冬季の大気大循環と下記の大気大循環の関連性についての研究をまとめた。(Ogi et al. 2003)。その結果は、アムール川の流量を制御する夏季大気場と海水を制御する冬季大気場の関連性を示唆するものである。この様な大気場の継続性による間接的影響についても理解を深

めなければならない。

#### 4. 今後の展望

これまで、多くの研究によって、河川や氷河の融解水などの淡水フラックスが、海水の生成や高緯度の熱塩循環に対して重要である（たとえば Aagaard, 1989）と言われてきたが、オホーツク海では、淡水流入が海水に及ぼす影響は負相関であった。同様な河川流量と海水量の負相関の関係は北極海へ注ぐロシア河川と北極の海水にも存在しているとの報告もあり（叶木, 1994）、河川の熱フラックスと淡水フラックス、双方の見積もりを再考する必要性が感じられる。熱や塩分両者の拡散の程度が異なっているので、短期的には温度移流効果が効き、長期的には塩分効果が重要となりそうである。いずれにしても、河川水の海洋への熱塩双方のフラックスが重要であり、高緯度域の気候変動の監視、予測などを行うためには、現在 ACSYS で行われている大河川の流量のモニタリングばかりではなく、河川水温のモニタリングも行う必要性が感じられる。また、現在アムール川の流量観測態勢が危機的状態になっていることを観測所訪問時に聞かされた。これは、ロシア政府からの末端観測所への観測資金の提供が激減しており、観測船の運行維持経費すら賄えない状態である。10年スケールの気候変動や極域の水循環変動について理解を深めるために、これまで長期にわたって行われてきた河川流量観測の中断がないように働きかける必要がある。観測維持のために最隣国の我が国が何らかの形での援助の必要性を痛切に感じる。

## 参考文献

- Aagaard K. and E.C. Carmack, 1989: The role of sea ice and other fresh water in the Arctic circulation. *J. Geophys. Res.*, 94, 14485-14498.
- Akagawa, M., 1977: Relation between flow of the Amur River and sea ice in the Okhotsk Sea. *Journal of the Japanese Society of Snow and Ice*, 39, 1-6.
- Cavalieri, D. J and C. L. Parkinson, 1987: On the relationship between atmospheric circulation and the fluctuations in the sea ice extents of the Bering and Okhotsk Seas. *J. Geophys. Res.*, 92, 7141-7162
- Fung XZ and J. M. Wallace, 1994: Arctic sea ice variability on a timescale of weeks and its relation to atmospheric forcing. *J. Climate*, 7, 1897-1914
- Honda, M., K. Yamazaki, Y. Tachibana, and K. Takeuchi, 1996: Influence of Okhotsk sea-ice extent on atmospheric circulation. *Geophys. Res. Lett.*, 23, 3595-3598.
- Honda, M., K. Yamazaki, H. Nakamura, and K. Takeuchi, 1999: Dynamic and thermodynamic characteristics of atmospheric response to anomalous sea-ice extent in the Sea of Okhotsk. *J. Climate*, 12, 3347-3358
- Iwamoto, K., K. Domon, M. Honda, Y. Tachibana, and K. Takeuchi, 2001, Estimation of surface heat flux on rawinsonde observation in the southwestern part of the Sea of Okhotsk under ice-covered condition (*J. Met. Soc. Japan*, 79-2, 101-108)
- 叶木, 1994, 北極海における海氷の動向と河川流量との相互作用、筑波大学自然学類卒業論文, 65pp
- Leningrad Hydrometeorology, 1986: Basic hydrologic characteristics. Far Eastern area. 412pp (in Russian).
- Ogi, M., Y. Tachibana, F. Nishio and M. A. Danchenkov, 2001, Does the fresh water supply from the Amur River flowing into the Sea of Okhotsk affect sea ice formation?(*J. Met. Soc. Japan*, 79-1, 123-129)
- Ogi, M., Y. Tachibana and K. Yamazaki., Impact of the wintertime North Atlantic Oscillation (NAO) on the summertime atmospheric circulation, *Geophys. Res. Lett.*, 30(13), 1704, doi:10.1029/2003GL017280, 2003.
- Parkinson, C. L., 1990: The impact of the Siberian high and Aleutian low on the sea-ice cover of the Sea of Okhotsk. *Ann. Glaciol.*, 14, 226-229
- Tachibana, Y., M. Honda, and K. Takeuchi, 1996: The abrupt decrease of the sea ice over the southern part of the Sea of Okhotsk in 1989 and its relation to the recent weakening of the Aleutian low. *J. Meteor. Soc. Japan*, 74,1-6 579-584.
- 立花, 2001, オホーツク海の海氷, アムール川淡水流入と10年変動, 月刊海洋総集編大規模大気海洋相互作用—数十年スケール変動の実体と機構—, 162 - 166pp
- Yamazaki, K., 2000: Interaction between the wintertime atmospheric circulation and the variation in the sea ice extent of the Sea of Okhotsk. *Seppyo*, 62, 345-354 (text in Japanese, abstract and figures in English).



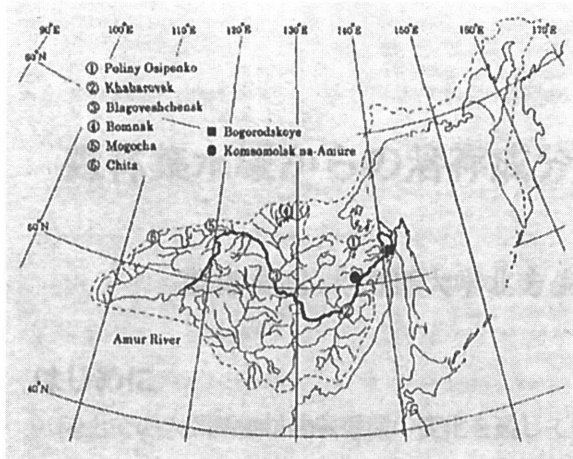


図1 オホーツク海及び、アムール川、及び流量観測点。アムール川を取り囲む点線は、オホーツク海への分水嶺を示す。■印で示された点がバカロッカ観測所である。

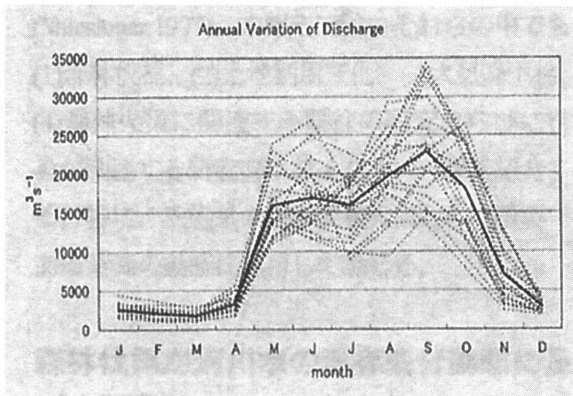


図2 アムール川の流量の年変化。  
1972年～1993年の全てを重ねている。

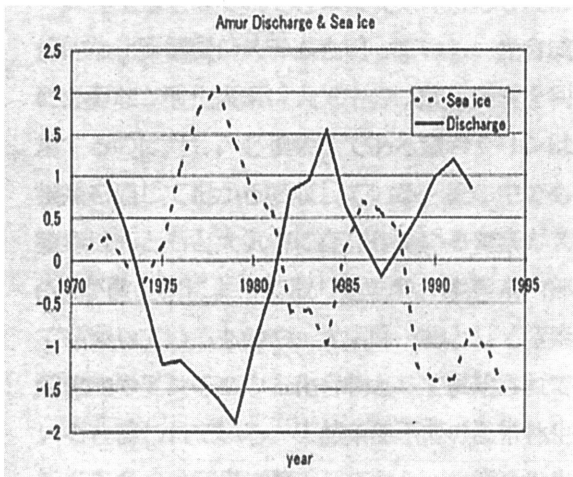


図3 アムール川の流量とオホーツク海の最大海氷面積の年々変動。但しデータは3年移動平均してある。また、流量データは実際の年に対して一年遅行させてある。これは、アムール川の流量が夏季最大となるために、それに引き続く冬の海氷との比較が容易にするため。データは標準偏差で無次元化してある。なお、平均流量、平均最大海氷面積は、 $330 \text{ km}^3/\text{yr}$ ,  $1.2 \times 10^6 \text{ km}^2$ で、標準偏差はそれぞれ  $53 \text{ km}^3/\text{yr}$ ,  $1.1 \times 10^5 \text{ km}^2$  である。

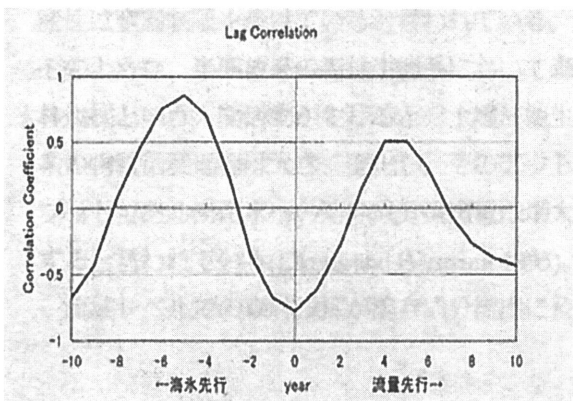


図4 最大海氷面積とアムール川とのラグ相関