

(19年度特別共同研究)

環オホーツク地域における気候変動・環境変動のモデリングと 予測可能性の研究

研究代表者： 三寺史夫 (低温科学研究所 環オホーツク観測研究センター)

研究分担者：

西岡純	(北海道大学・低温科学研究所)
中村知裕	(北海道大学・低温科学研究所)
戸田求	(北海道大学・低温科学研究所)
山口一	(東京大学・工学研究科)
中村尚	(東京大学・理学研究科)
小守信正	(JAMSTEC・地球シミュレータセンター)
本田明治	(JAMSTEC・地球環境フロンティア研究センター)
高谷幸太郎	(JAMSTEC・地球環境フロンティア研究センター)
吉田聡	(JAMSTEC・地球シミュレータセンター)
田口文明	(JAMSTEC・地球シミュレータセンター)
永沢亨	(水産総合研究センター・北海道区水産研究所)
東屋知範	(水産総合研究センター・北海道区水産研究所)
小埜恒夫	(水産総合研究センター・北海道区水産研究所)
津旨大輔	(電力中央研究所)
芳村毅	(電力中央研究所)
坪野考樹	(電力中央研究所)
仲敷憲和	(電力中央研究所)
吉田義勝	(電力中央研究所)
三角和弘	(電力中央研究所)
横沢正幸	(農業環境技術研究所・大気環境研究領域)
原口昭	(北九州公立大学・環境生命工学科)

1. はじめに

オホーツク海は、地球上で最も低緯度で結氷する海として知られている。近年、地球温暖化にともないシベリア高気圧の弱화가顕著になってきており、オホーツク海においてはそれが海氷面積の減少として鋭敏に現れつつある。ユーラシア大陸の雪氷やオホーツク海の海氷の消長は、大気と海洋・地表間の熱交換やアルベドの劇的な変化を通して環オホーツク地域さらには地球規模の気候変動・環境変動にまで影響を及ぼすことが知られており、さらに、物質循環や生態系にも大きな影響を及ぼす可能性がある。しかしながら、温暖化のような長期気候変動がもたらす環オホーツク地域への影響の定量的な評価・予測を実現

するには、未解明の問題が多く残っている。

このような特徴を持つ環オホーツク地域の気候変動・環境変動予測を実現するためには以下の研究課題の解明が必要であり、本特別共同研究を進めているところである。

- 環オホーツク地域の領域気候モデル構築に向けた大気－海洋・海氷－陸域結合プロセスの研究
- 気候変動、環境変動に関わる、物理過程、化学過程、生物過程のパラメタリゼーションの研究
- 環オホーツク地域における海洋・海氷の短期変動現象（数日から季節スケール）および長期変動現象（数年から数十年スケール）のモデリングと予測可能性の研究

具体的には、現在環オホーツク観測研究センターにおいて作成されつつある環オホーツク圏領域気候モデルを中心に、学際的な研究者が会して知見を共有するとともに、さらなる共同研究を誘発することによって、上記の研究課題を解明しようとするものである。ここでは、環オホーツク圏領域気候モデルの今年度の取り組みと、2008年2月21日、22日に行われたワークショップについて述べ、成果報告とする。

2. 環オホーツク圏領域モデル

共同研究の中心となる環オホーツク圏領域気候モデルについて述べる。基盤は大気－海洋－海氷－陸面結合モデルである。結合モデルの大気・陸面コンポーネントには国際太平洋研究センター(IPRC)の領域気候モデルを、海洋・海氷コンポーネントには東京大学気候システム研究センター(CCSR)で開発されたiced COCO3.4を用いた。IPRC領域気候モデルは、東太平洋赤道から亜熱帯に掛けて雲の再現が優れた結果を出しているモデルで、雲微物理、放射、積雲パラメタリゼーション、E-ε乱流クロージャーなどが組み込まれ、陸面モデル(BATS)と結合されている。Iced COCO3.4は、熱塩循環を含めた海洋大循環を再現するために構築されたモデルで、トレーサの移流には保存性の良いスキーム(UTOPIAやQUICKEST)が用いられている。海氷は、力学的には弾・粘塑性体で、熱力学的には熱の蓄積を無視するモデルである。また積雪とその熱・水フラックスへの効果も考慮されている。

以上の結合モデルに、海洋生態系モデル、鉄化学モデル、風送塵モデルを順次組み込んで行き、さらに潮汐混合モデルや河川流路網モデルの組込も計画している。

モデル領域は図1に示したように、大気はオホーツク海を中心としシベリア高気圧・アリューシャン低気圧の大部分が含まれるよう設定し、海洋は北太平洋亜寒帯・亜熱帯循環を含む海域とする予定である。ただしこの予備的実験では、テストとして大気モデルの境界が海洋に悪影響を及ぼさないように、大気モデルの境界を北太平洋の東端まで含むよう広げている。水平分解能は結合時の計算時間を考慮し、共に $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ とした。

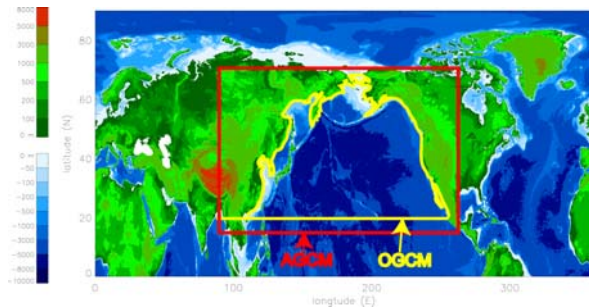


図1 環オホーツク圏モデルの領域

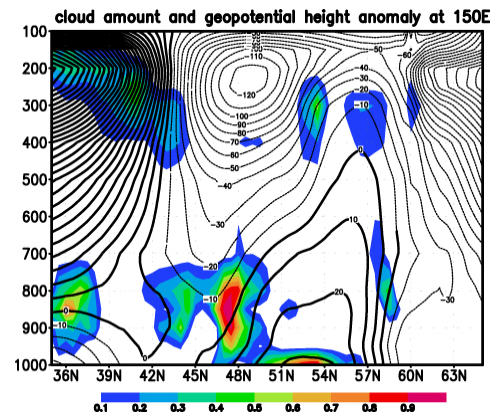


図2 夏季のイベント。東経 150 度断面におけるジオポテンシャル高度偏差と雲量。

時間積分の手順に関して、最初に、大気データとして気候値を与え、海洋コンポーネントを40年間スピナップする。その後、1950年前後からの各年の大気再解析データを与え、海洋コンポーネントのスピナップを続ける。最後に、解析する期間の少し前から大気・海洋コンポーネントを結合して計算する。初期・境界条件として、海洋はWorld Ocean Atlas 2001(米国海洋データセンター)を、大気は欧州中期予報センターの再解析データを用いている。ただし、最初はテストおよびチューニングのため、海洋コンポーネントを20年間スピナップしたところで結合して計算している。

夏季のイベントとして、オホーツク海の下層雲(または霧)とオホーツク海高気圧を非常によく再現していることが分かった。図2において、53Nあたりを中心にジオポテンシャル高度偏差は帽子を伏せたような形をしている。これがオホーツク海高気圧である。また、その下層に雲量の高い領域が見え、下層雲(あるいは霧)が再現されていることがわかる。一方、冬季においては低気圧の通過に伴う海上への寒気の吹き出しを表現していた(図は示さない)。西高東低の気圧配置となり、これに伴い寒気が大陸からオホーツク海および日本海北部に吹き出す様子が示された。また本州や北海道の山岳に当たることによって降水(雪または雨)をもたらしており、0.5度格子程度でも局地的な様子がある程度表現することができた。

3. 海洋海氷モデル — オホーツク海熱塩循環の再現 —

環オホーツク領域気候モデルのコンポーネントのひとつである、海洋海氷モデルを切り出してオホーツク海の熱塩循環を検討した。海氷が生成されるときには、氷にとって不純物である塩分が排出されるため、低温(結氷温度)で高塩分の重い水が形成される。オホーツク海では、シベリアからの寒気により、北西陸棚域のポリニヤで大量の海氷が形成され、したがって、低温高塩分水も大量に作られている。これが高密度陸棚水と呼ばれるもので、陸棚域から流れ出し、東樺太海流の中層に合流し、最終的に北太平洋中層(200m-800m)に流れ出して北太平洋中層水と呼ばれる海水の起源水となる。この高密度陸棚水はまた二酸化炭素や酸素などを大気物質を吸収し輸送するにも大切なほか、鉄のような海底堆積物をも大量に運んでいることが分かってきた。したがって、高

密度陸棚水は物質輸送の主要な経路である。

一方、オホーツク海の出口には千島列島があるが、そこでは非常に強い潮汐混合が起こっていることが知られている。これが、高塩分の中層水を表層へ運ぶ効果を持っており、海氷の融解で低塩化している表層水に塩分を補っている。これがオホーツク海の表層循環に乗ることによって北方へ移流され、北西陸棚域に達する。そこでは冬季にシベリアからの寒気で効率的に海氷が形成され高密度陸棚水が作られている。このように、北西陸棚域の高密度水→オホーツク海中層水→潮汐混合→北方への表層循環、が一連の流れとなって、3次元的な循環を形成していると考えられてきた。しかしながら、そのような循環を再現した研究はなかった。

図3はシミュレーション結果のひとつで、 $26.8 \sigma_{\theta}$ という等密度面(200m深前後)に沿った水温である。(c)がコントロール実験であり、(a)、(b)、(d)、(e)は風を0、0.5、1.5、2倍にしたものである。また、(f)に観測データに基づいた解析結果を示している。(c)のコントロール実験は、全体的に水温がやや高いもののおおむね観測の結果を再現している。たとえば北西陸棚域には結氷温度に近い非常に冷たい水が存在する。これが海氷形成に伴う高密度水である。それがサハリン島東岸に沿って流れ出し、南部の千島海盆に達している。一方、比較的高温の海水が千島列島付近から北の大陸棚に向かい流れている。このため、水温の水平分布は東西にコントラストができる。

面白いのは、風が変化することによって水温が変化することである。これは風が強くなることによって表層北向きの塩分輸送が大きくなり、海氷生成域の塩分強化をもたらしたためである。これが、陸棚水をさらに高塩分化し、中層まで冷たい海水を大量に流し込むことになる。このため、風の強化が中層の水温低下となって現れたのである。このように、オホーツク海の熱塩循環は風と強く結合していることが明らかとなった。

このほか、潮汐混合や大気温度を変化させたり、アムール川を取り除いた実験を行った。特に気温を上下させた実験では、海氷の伸縮に大きな変化が生じた。このため、暖かい時には高密度陸棚水の形成量が落ち込み、中層水温の効率的な上昇に寄与したことがわかった。シミュレーションでは気温が 3°C 上昇したときに中層水温がオホーツク全体の平均で 0.6°C していた。これは、オホーツク海中層のデータ解析により明らかとなった、ここ50年の水温上昇傾向と同程度であった(Nakanowatri et al., 2007)。

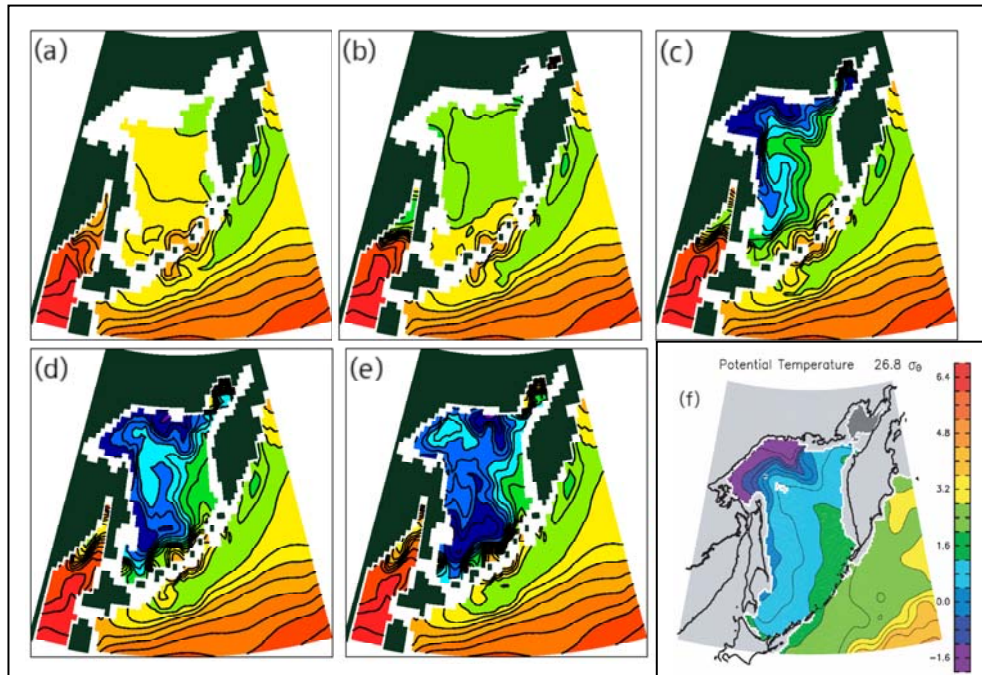


図3 風の強さを変化させることによって生じる中層水温の変化。(c)がコントロール実験。(a)、(b)、(d)、(e)は、コントロール実験に比べて風を0、0.5、1.5、2倍にしたものである。また、(f)に観測データ(Itoh et al., 2003)の解析結果を示す。

4. 氷盤の衝突を考慮した海氷モデルの開発

海氷の力学的変動の計算には、連続体モデルの一つである粘塑性体モデルが多く用いられる。前節で述べた海洋海氷モデルでも粘塑性体モデルを採用している。これは、歪速度の小さい時は粘性体の如く、歪速度の大きい時は塑性体の如く振る舞うという海氷野の特性に基づくものである。粘性体は応力が歪速度に比例し、塑性体は応力が歪速度に依存しない。

一方、氷盤同士の衝突が支配的になった場合、応力は歪速度の2乗に比例することが知られている。オホーツク海のように海氷の変化が激しい海域では、特に氷盤が密集しなくなる氷縁近くで、この氷盤衝突による運動量伝達が重要になってくる。そこで、オホーツク海の高精度モデリングおよび高解像度計算に繋げるため、氷盤衝突を考慮した海氷モデルを開発する。

本研究では、氷盤衝突を考慮した2つの海氷力学モデルを開発したが、ここでは特に2つ目のモデルについて記述する。それは、1つ目の、氷板衝突を直接考慮したモデル式を基礎にしたこれまでの研究により、氷盤衝突レオロジーとして、応力が歪速度の2乗に比例することを確認し、従来実績のある粘塑性体海氷モデルをベースにして、それに氷盤衝突のレオロジーを導入するための手法を考え、導入したものである。氷盤衝突のレオロジー式形状として、1つ目のモデル開発時に導出した氷盤群衝突相互作用の理論式の特徴を再評価し

て、連続体モデルとの結合に適した表現を考案した。この理論式については、離散要素シミュレーションの計算結果との比較によってその妥当性が検証されていて、それによる内部応力は歪速度について非線形の関数となっている。完成した新しいレオロジーモデルは、海氷密接時には粘塑性体として振る舞い、海氷が密接で無くなって離散性が強まったときに衝突氷盤群として振舞うように設計されている。

開発したモデルを用いてオホーツク海の一海氷期の計算を行い、氷盤衝突物理の影響について調べた。そのために、氷盤衝突応力の大きさを決めるパラメータを変えた計算を行い、その結果を比較した。その比較の結果、氷盤衝突物理の影響は北海道沿岸からクリル海盆付近に広く分布する、低密接度の海氷域に顕著に見られることを見出した。この低密接度域とそれに隣接する高密接度域において氷盤衝突パラメータ変化の影響が現れ、氷盤衝突応力を比較的大きく取ったときには、低密接度域における密接度が増え、代わりに高密接度域における密接度が減るというように、低密接度域から高密接度域への密接度勾配が緩やかになる傾向が見られた。これは、従来のレオロジーモデルでは塑性時の応力に比べて無視できるほど小さいとしてきた氷盤衝突応力を重視することで、低密接度の海氷が高密接度の海氷に容易に取り込まれにくくなったことを意味する。また、計算では、高密接度海氷の氷舌 (ice tongue) ともいえるような特徴的な形状が、氷盤衝突の影響度合いを強めたときには拡散して生じなくなるという顕著な違いも見られた。パッシブなマイクロ波センサによる衛星リモートセンシングの氷密接度分布を整理して、計算結果と比較した。それによると、従来の粘塑性体モデルでは低密接度域の面積を過小評価してしまうのに対して、氷盤衝突物理を考慮すると低密接度域の面積が増え、観測に近づくという結果が得られた。実際に氷盤衝突強度としてどの程度の値を用いればよいかは今後の検討課題であるが、本研究の成果により、氷盤衝突という従来あまり考慮されてこなかった物理を含めることで、氷縁や低密接度海氷域を中心とする海域での計算精度向上を図れる可能性が示された。これは、海氷域をとおした海洋—大気間の熱の交換を考える上で重要な影響を及ぼす可能性がある。

5. 陸域物質循環モデル

環オホーツク圏領域モデルでは、陸域生態系が有機物や栄養塩を生産し、河川がこれらの有機物質を海洋へ運搬することで海洋の物質生産が維持される過程を含む。近年のオホーツク海を対象とした研究では、陸域起源の鉄が沿岸域から外洋に至る広範な空間スケールの生物生産維持にも貢献する重要な供給源であることが明らかとなった。従来から、森林は河川流域や海洋環境保全・維持の観点から重要な役割を果たす、いわば魚付林としての認識がなされてきたが、一方で森林が海洋生産へ及ぼす影響の定量的評価法の確立は未だ無く、陸と海をつなぐ物質循環研究の視点からその客観的な評価法の確立が求められている。現在、海洋の植物プランクトン増殖の制限要因である鉄に着目し、陸域起源の鉄輸送・生成過程を加味した大気—植生動態モデルの開発を進める段階にある。鉄の生成メカニ

ズムや供給源の特定の解明を行う数値モデル研究を進め、将来的には上記の大気—海洋モデルと結合し、大気—陸域—海洋間相互作用を取り扱う物質循環モデルの構築を目指している(図4)。

陸域生態系における溶存鉄の生成過程

陸域の河川流域から沿岸域へ輸送される全鉄のおよそ 8 割程度は、植物プランクトンが

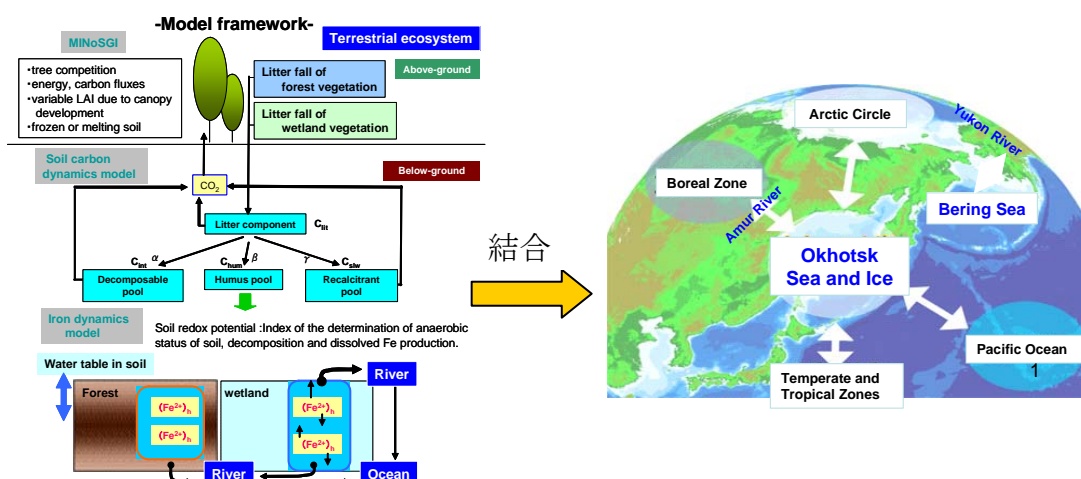


図4 陸域物質循環モデルの構成

直接に利用不能な粒状態の鉄であるといわれている。残り 2 割程度の溶存鉄は主に鉄イオンや有機酸鉄(腐植酸鉄)からなるが、腐植酸鉄は河川上流域の森林や湿地土壌内の腐植物質である水溶性腐植酸と土壌鉱物層中の鉄が錯体を形成することで生成されたもので、植物プランクトンが効率的に摂取できる形態である。腐植物質や溶存鉄の生成メカニズムは森林・湿地ごとで異なり、また森林でも針葉樹と広葉樹の別で大きな違いがある。さらに鉄の形態は酸化還元電位と関連して変化する。したがって、各土地利用形態の水・炭素循環と連動して腐植酸鉄の生成過程のモデル化を行う必要がある。

大気—植生動態モデルと鉄生成・輸送のモデル化

亜寒帯陸域の水・炭素循環、腐植酸鉄の生成及び輸送過程のモデル化にむけて、大気—植生動態モデル(MINoSGI)を用いる。MINoSGIは陸域植生の光・水・養分資源をめぐる種内競争を陽に表す植生動態サブモデルと、群落内物理環境を記述する多層微気象サブモデルが結合した陸域モデルである。従来の研究では、冷温帯の森林プロットの森林動態を良好に再現することに成功した。さらにはMINoSGIに土壌炭素動態モデルを結合させた。これによって、植生間や樹木個体間の競争による植生動態で生じたリターが土壌に供給され、土壌水分や土壌温度などの環境要因の関数で分解されるプロセスを記述できるようになった。

亜寒帯陸域には、森林とともに湿地が広く点在している。湿地は常に一定の水位が維持され、気温が低いことと併せて分解速度の遅い嫌氣的環境にある。このため、土壌中に腐植

酸が多く蓄積し、溶存鉄が生成されやすくなるので、面積としては少ないものの河口域で測定される流域全体の溶存鉄量に対する湿地起源の溶存鉄量は非常に多いことになる。一方で、森林は降水イベントが起こると溶存鉄が生成されやすい環境となる。特に、亜寒帯高緯度に広がる凍土域では、春先における凍土の融解が森林からの溶存鉄の生成や輸送に大きな影響を及ぼすであろう。したがって、北半球高緯度域の河川流域における溶存鉄生成・輸送メカニズムの理解と将来予測のためには、陸域植生の違いに伴う炭素循環と凍土の凍結・融解に伴う降水(洪水)イベントに関連した水循環の変動の理解が不可欠である。

現在、この陸域モデルは亜寒帯の森林域へ適用され、プロットスケールでのモデルパフォーマンスが検証されているところである。この検証の後に、異なる凍土形態と土地利用形態を有する二つの亜寒帯陸域、すなわち①アムール河（季節凍土帯であり、上流部に針広混交林と落葉広葉樹林、下流部に湿地帯が広がる流域）と②ユーコン河＋クソックウィン河岸域（不連続永久凍土地帯、上流部に広大な常緑針葉樹と湿原、下流部に湖沼群が優先する流域）を対象とした研究を行う。

5. ワークショップ

特別共同研究への参加者間での情報交換や新たな共同研究を触発するためのワークショップを2008年2月21日、22日の2日間にわたり開催した。プログラムは添付の通りである。聴衆を含めて50名以上の参加があり、熱のこもった議論が続く、盛り上がったワークショップとなった。

1日目は環オホーツク圏の気候変動に注目した話題提供、2日目は海氷モデルや物質循環・生態系モデルに関するプレゼンテーションが行われた。

成果として特筆すべきことは、オホーツク海からカムチャツカ半島の東方にかけて、海洋－海氷－大気－陸域が密接に関連しあった気候モードともいえるべき現象が見えてきたことである。したがって、この共同研究の具体的な目標の一つとして、まずこのような現象のメカニズムの解明が重要である、という認識で一致した。また、これが温暖化にともなう大気変動と相俟って、いかに海氷の変動をもたらすのか、それが高密度陸棚水を通して陸域から海洋への物質循環にいかなる影響をもたらされていくのか、共同研究の中で注目していこうという結論を得ることができた。

19年度 環オホーツク地域における気候変動・環境変動のモデリングと予測可能性に関するワークショップ プログラム

日時：2008年2月21日 13:00 - 22日 15:00

場所：北海道大学低温科学研究所2F 講義室

1日目 (2月21日)

13:00-13:10 三寺 史夫 趣旨説明

13:10-13:40 中村 尚 (東大理)

ブロッキングに伴う地表寒冷高気圧の発達

13:40-14:10 高谷 康太郎 (JAMSTEC 地球フロンティア)

真冬の北極振動的な循環の前兆として観測される惑星波活動の変化

14:10-14:30 吉田 聡 (JAMSTEC 地球シミュレータセンター)

再解析データに見られる低気圧とオホーツク海海氷の関係

14:30-14:50 本田 明治 (JAMSTEC 地球フロンティア)

海水域変動が大気循環場に及ぼす影響

14:50-15:10 小守 信正 (JAMSTEC 地球シミュレータセンター)

CFESによる高解像度大気海洋結合シミュレーション ～環オホーツク地域を中心に～

<15:10-15:40 休憩>

15:40-16:00 田口 文明 (JAMSTEC 地球シミュレータセンター)

黒潮続流域の海面水温前線に対する海面熱フラックスと下層大気の応答:2003-04 冬季における領域大気モデル実験

16:00-16:20 松田 淳二 (低温研)

オホーツク海の熱塩循環

16:20-16:50 中野渡 拓也 (低温研)

渦解像海洋大循環モデルで再現される北太平洋亜寒帯中層の50年スケール変動

16:50-17:20 立花 義裕 (JAMSTEC 地球観測センター)

オホーツク海における大気海洋双方向作用研究例 --霧/下層雲研究, オホーツク海の淡水収支研究--

17:20-18:00 議論:環オホーツク圏の気候変動研究の進め方

2日目 (2月22日)

9:00-9:20 藤崎 歩美 (東大工)

オホーツク海における海氷-海洋結合計算:大気データの違いと海氷の考慮がシミュレーション結果に及ぼす影響について

9:20-9:40 佐川 玄輝 (東大工)

オホーツク海における非静力海洋・海氷結合計算

9:40-10:10 本井 達夫 (気象研)

稚内と紋別の水位差による宗谷海峡通過流量の復元と予測

<10:10-10:40 休憩>

10:40-11:00 西岡 純 (低温研)

西部北太平洋亜寒帯域における微量栄養物質(鉄分)の供給過程

11:00-11:20 小埜 恒夫 (北水研)

北太平洋亜寒帯域の成層化と一次生産の変化

11:20-11:40 中村 知裕 (低温研)

冬季親潮域における表層鉄分布と水塊構造の同時観測

11:40-12:00 東屋 知範 (北水研)

サケに装着したアーカイバルタグデータについて

<12:00-13:20 昼食>

13:20-13:40 笹井 義一 (JAMSTEC 地球フロンティア)

北太平洋亜寒帯域における物質循環シミュレーション

13:40-14:00 三角 和弘 (電中研)

数値実験による北太平洋亜寒帯域の鉄の供給源の考察

14:00-14:20 戸田 求 (低温研)

亜寒帯陸域起源の鉄生成・輸送化に関する陸面モデル研究方針

14:20-15:00 議論:モデル研究の今後の進め方