

GEWEX へ向けて—我が国の取り組みの現状—*

GEWEX 作業委員会 (日本学会会議・WCRP 専門委員会)**

WCRP (気候変動国際協同研究計画) の大型副計画として、1995年頃から 21 世紀にかけて GEWEX (全地球エネルギー・水循環実験観測計画) を実施することが予定されています。現在、国際的にも、GEWEX に関連して様々な計画の検討が進められ、また、そのための準備研究が行なわれています。国内では、日本学会会議の気象学研究連絡委員会・WCRP 専門委員会 (委員長: 松野太郎・東京大学理学部教授) のなかに GEWEX 作業委員会 (世話人: 武田喬男・名古屋大学水圏科学研究所教授) がつくられ、GEWEX の National Programme が検討されています。

GEWEX 作業委員会で検討されてきた、GEWEX National Programme の大枠は付録に示す通りですが、これらについて関連研究者の研究計画、意見を聞き整理したうえで、近いうちに国内シンポジウムなども開催し、GEWEX National Programme をまとめる予定です。このような作業のステップとして作業委員会では、「GEWEX 関連資料」を各研究者に送り、下記のアンケート調査を行ないました。

1. GEWEX に関連して計画している研究課題
 課題名, 研究計画, 研究組織, 研究スケジュール
2. GEWEX に関連して提案する 協同観測計画など協同研究プロジェクト
 ミシシッピ-河流域 GCIP への参加 (観測, データ解析, モデリングなど)
 アジア GCIP の提案
 その他の field experiment
3. GEWEX に関連して地球観測人工衛星への要望

* On the National Programme of GEWEX.

** 武田喬男 (世話人), 加藤内蔵進 (幹事), いずれも名古屋大学水圏科学研究所。

J・EOS 搭載機器
 データ管理システム
 その他

4. GEWEX に密接に関連するプロジェクトの情報
 例 HAPEX
5. その他の御意見, コメント

アンケート調査は一応 5 月 15 日で締切りでしたが、これらのことについて御意見などをお寄せ頂ければ、今後の作業に参考にさせて頂きたいと考えておりますので、宜しくお願い致します。

なお、「GEWEX 関連資料」は名古屋大学水圏科学研究所の武田喬男 (世話人) もしくは加藤内蔵進 (幹事) に請求下されば、若干の残部がありますので郵送致します。

(付録) (「GEWEX 関連資料」からそのままの形で抜粋した)

GEWEX national programme の大枠

GEWEX の目標は次の通りである:

- 1) 地球上の水とエネルギーの循環とそれらの変動の解明
- 2) 地球上の水循環の大気, 海洋へのインパクトのモデル化
- 3) 地球規模, 地域規模の水循環, 水資源の変動, 地球環境の変化に対するそれらの応答の予測
- 4) 地球観測システム, データ管理・同化システムの開発, 促進

これらの目標を達成するためには、これまで比較的小ざりにされてきた陸面の水の循環を十分取り入れた高分解能モデルを作ることも要請される。しかし、水循環を合理的にモデル化することはそれほど簡単ではない。

植生の存在をも含めた陸面の水循環の知識は全く不十分であり、大気や海洋の水循環が不十分とはいえ、それなりの物理学的な基礎をもつのに比べて、そのダイナミクスは十分に理解されていない。大気中の水循環についても理解できていない問題は数多い。大気中の水は、地表面や海面から蒸発した水蒸気がいったん雲となり、その内部で降水が形成される。降水の物理学や力学は比較的長い歴史をもちながら、地球温暖化に伴って大気中の水循環がどの方向にシフトするののかという設問にはほとんど答えることができない。

GEWEX の研究は、① 観測、およびデータ解析などにより、地球上の水・エネルギー循環を構成する各過程を理解し、水・エネルギー循環とその変動の実態を明らかにする一方、各過程をモデル化する研究、② モデル化された水循環過程をいれた大気・海洋・陸面結合モデルにより、水循環、水資源の変動を予測する研究、③ 人工衛星による地球観測システムの発達を促進しながら、人工衛星データなどを用いた解析により気候の変化を調べる研究、から成る。①を中心とした研究計画は、どちらかという狭義の GEWEX のサブプログラムとして位置づけられ、②、③などの研究は WCRP の総まとめ的な研究であり、広義の GEWEX と考えることができる。

GEWEX のスケジュールは今のところ、1992~1998 年を build up phase とし、1998 年以降を global observing phase と考えている。build up phase では、さまざまな pilot study により各過程が調べられ、モデル化が進められるが、中心となるプロジェクトは GCIP (GEWEX Continental-scale International Programme) である。1998 年頃から地球観測人工衛星により地球上の水とエネルギーの循環の観測が具体的に始められる前に、既存の人工衛星、地上観測などにより、そのようなグローバルな観測を emulate することも GCIP の大きな目的である。GCIP の目標は、水循環のさまざまな状況が存在する地域を選び、特別観測により、

- 1) large-scale 水循環モデルの verification と構築
- 2) 人工衛星地球観測の validation

を行うことである。従って、process studies のための観測も、そのいくつかは GCIP の一部として位置づけていくことも可能である。現在のところ、ミシシッピ河流域 GCIP が build-up phase の国際協同観測計画として検討されている。アジア地域の GCIP を、日本の national programme のなかで検討することも必要である

う。

これらの状況をふまえて、GEWEX 作業委員会で検討した national programme の大枠は、以下の通りである。これらのうちのあるものは、今後、協同観測計画などの協同研究計画として組み立てられて行くであろうし、あるものは各自が独自に研究をしていくものであろう。これらのものを総合した形で、日本全体の GEWEX の研究が発展していくものと考えられる。

I. 地球上の水・エネルギー循環に関する諸過程の研究

A. 大陸スケール大気陸面相互作用

(continental-scale water and energy cycle processes)

この課題における主要課題はアジアモンスーンの変動に関わる大気・陸面相互作用の研究であろう。この研究で重要な陸面過程には、大陸スケールで想定される種々の地表面での積雪、凍土、土壌水分量とその相互の関係が、季節変動と年々変動の中でどのように変化しているかという問題が含まれる。これらの過程がメソスケールの大気現象(雲・降水系など)とどのように相互作用し、さらに、シノプティック、プラネタリー・スケールの大気現象にどのように影響しているかという問題が、相互作用における重要な課題である。これらの課題を、水循環という立場から見るとモンスーンに伴う水循環・輸送過程が最も重要となる。モンスーンは湿潤過程ぬきでは説明できないからである。この水循環・輸送過程にもメソ、地域、大陸スケールのシステムとその相互作用という視点が重要となる。

また大陸スケールの水循環の研究では、大陸をいくつかの特徴的な地域に区分し、各地域の水循環過程、およびそれらの地域間のコネクションの過程を理解しながら、総合的に大陸スケールの水循環とその変動を理解する視点も必要になる。

研究課題例

- ・アジア・モンスーンの変動と陸面過程の変化
- ・地域スケール水・エネルギー循環過程

(大陸スケールのシステムのサブシステムとして)

地域スケールのシステムの例

チベット高原、カザフ・ウラル高原、中国乾燥域、華中・華南域、インド・インドネシア半

島域, アマゾン域, ミシシッピ流域

- 地域スケールシステムの水・エネルギー循環の変動とシステム間のコネクション
- 大陸内部への水の輸送過程(水の安定同位体の利用も含む)
- 特定流域の大気陸面相互作用
- 大気陸面結合モデル
- 局域の水資源の変化の予測
- その他

B. 広域陸面過程

(land-surface water and energy cycle processes)

空間スケールが10~100 kmの地域を対象に, 水, およびエネルギーの大気地表面間の交換素過程を解明し, そのパラメタリゼーションを行う。地表面は植生, および土壌を含む厚みを持った層であると認識する。鉛直方向の範囲は, 上方は大気境界層上限まで, 下方は地温年変化の消失する恒温層までとするが, 特に, ゼロフラックス面以浅の土壌水分の挙動と蒸発散との関係にも注目する。10 kmスケールでは, 低地, 台地, 丘陵, 山地等の単一地形地域を対象とし, 各地域内における裸地, 積雪, 凍土等の地目の違いによる蒸発散, 浸透, 流出過程, 熱収支の差異を明らかにする。また, 同一地形地域内における異なる地目間の水とエネルギーの交換過程の相互作用についても明らかにする。蒸発散, 流出の水文過程については, いわゆるバケツモデル, あるいはタンクモデルにかわるモデルを, できるだけ, 衛星等で観測可能な表層土壌水分や植生情報をパラメータとして構築する。100 kmスケールでは, 10 kmスケールで得られた成果に基づいて, 多地目, 多地形地域を含む複雑な多種多様地の陸面水循環過程のモデリングを行い, それを地域スケール(1000 kmオーダー)の水循環とリンクさせる方法論について研究を行う。

なお観測対象地域として, 日本国内はルーチンデータも豊富で素過程の研究に適しているが, “A. 大陸スケール大気陸面相互作用”の観測計画の中に, いくつか対象地域を設定して観測を行うことも必要であろう。

研究課題例

- 各種地目の蒸発散過程
 - 裸地面, 植生地, 森林, 積雪面, 凍土帯, 複雑多種多様地(地形効果含む)

- 土壌水分の変化と植生
- 流出・水文過程
- 陸面水循環過程のパラメタリゼーション
 - 各地目の“バケツモデル”, “タンクモデル”の改良
- 複雑多種多様地の陸面水循環過程のモデリング
- その他
 - スケールアップの方法論

C. 雲スケール水・エネルギー循環過程

(cloud-scale water and energy cycle processes)

大気中の水循環過程において, 雲は多様な形態をとりながら, 周辺大気から水を集めては, 空間的に集中して降雨, 降雪として水を落とす。個々の雲は, 1 kmスケール, あるいは10 kmスケールで存在する一方, しばしば100 kmスケール, あるいはそれ以上の群として存在する。そのような雲の存在状態が, 大気中の水とエネルギーの循環過程をコントロールするのみでなく, 大気・地表面の水とエネルギー交換過程にも影響を及ぼす。それらの結果がまた地域スケール, 大陸スケールの大気循環にフィードバックしていく。このように雲の効果を理解し, それを気候モデルに導入するためには, 10~100 kmのマルチスケールで雲の集団構造化のダイナミクス, およびそれらに伴う水循環過程を研究することが必要である。近年, 熱帯の雲群については, メソスケールの雲群を中心に, 集団構造化のダイナミクスの研究が推進されているが, GEWEXでは, 亜熱帯, 中・高緯度の雲群についても研究が進められることが望ましい。なお, 1996年以降, TRMMにより熱帯, 亜熱帯の降雨が人工衛星により観測されようとしているが, 本研究でもTRMMの利用を十分に考慮すべきであろう。

研究課題例

1) 雲・放射過程

- 雲群の放射特性
- 下層雲群のダイナミクス
 - (分布, 形成・維持過程)
- 上層雲群のダイナミクス
 - (分布, 形成・維持過程)
- 雲群の放射効果のパラメタリゼーション
- その他

2) メソスケール降水過程

- ・メソスケール降水システムの構造とダイナミックス
(凝結熱放出の3次元分布含む)
- ・メソスケール降水システムの活動度の変動
- ・地域による特性の違い
(熱帯, 亜熱帯湿潤域, 大陸乾燥域など)
- ・メソスケール降水現象のパラメタリゼーション
- ・その他

- バック機構
- ・風の応力の変動と表層循環系のスピニング・スピンドウン
- ・海の運ぶ熱量の評価
- ・SST 分布と大気大循環の関係
- ・淡水授受の変動に対する海洋循環の応答
- ・その他

*** GCIP (GEWEX Continental-scale International Programme)**

上記の諸過程の解明には、当然基礎的な研究が必要であるが、特別協同観測による研究も必要となる。一方、大陸スケール大気陸面相互作用、広域陸面過程、雲スケール水・エネルギー循環過程、大洋スケール大気海洋陸域相互作用はそれぞれ独立な過程ではなく、密接に関連し合っている。これらを総合して、大陸スケール、あるいは地域スケールの水・エネルギーの循環の基礎理解をすすめながら、後述の地球観測システムを利用した気候解析、大気大循環モデルなどの気候モデルの発展とあいまって、地球上の水・エネルギーの循環の解明と変動の予測へと研究はすすめられていくのであろう。従って、特別協同観測も、それぞれが別々に行われるのではなく、有機的に行われることが望ましい。たとえば、大陸スケール、地域スケールの観測網の中に、広域陸面過程、雲スケール水・エネルギー循環過程などの特別協同観測のあるものは包含されることが望ましい。おそらく、GCIPはそのような形態をとることが予想される。

現在、GCIPとしてミシシッピ河流域を対象としたものが、国際協同観測計画として検討されている。わが国の national programme においても、この GCIP に人工衛星観測、モデリング、データ解析、特別観測などを通じて参加する計画があり得る。一方、日本の GEWEX programme が、世界の GEWEX programme の中で、地域的にどこを分担するのかということも考慮すべきである。アジア大陸・西太平洋域は、アジア・モンスーンを中心として興味深い水循環が起っており、また、湿潤地帯、乾燥地帯、凍土帯、その他、陸面状態のレンジが広い。このような観点にたつて、日本、中国、ソ連、その他の国々との協同観測計画として“アジア GCIP”を検討することは、日本の GEWEX national programme の大きな検討事項であると言える。

D. 大洋スケール大気海洋陸域相互作用

(ocean-basin scale water and energy cycle processes)

海洋は熱を受取り、移流と拡散により海洋内で再分配し、そして大気に供給する。また、蒸発により淡水が海洋から大気へ輸送され、降水により淡水が海洋へ供給される。また、陸域の降水により河川等を通して海洋へ淡水が供給される。大気はこの海洋からの熱の供給により運動が生じる。また、海から大気への水蒸気補給は、様々な輸送過程を経て陸域へ運ばれたり、大気運動を変化させることで陸域の水循環へフィードバックする。一方、大気の運動は海洋に運動量を与え、表層循環系を駆動し、熱や淡水の授受の海域的差で熱塩循環系が駆動される。

このように大気と海洋とは、海面における熱・淡水・運動量の授受を通して相互に作用を及ぼしている。この大気海洋相互作用の実態を、海盆スケールの規模において把握し、その相互作用の仕組みを理解することが気候変動のメカニズムの解明にとって重要である。

本研究では、大洋スケールにおける熱・淡水・運動量のフラックス、および陸域・海洋間の水蒸気や陸水の輸送量の分布とその変動の実態の定量的把握を基礎とし、大規模な大気海洋陸域相互作用を解明することが目標である。特に、中・高緯度における海面フラックスの変動に伴う、大気大循環や海洋大循環の応答と、陸域水循環の変化を通じた海域へのフィードバック、海洋表層における水塊形成の変動などの解明を目指すものである。

研究課題例

- ・種々の海面フラックスの評価
- ・SST 変動とフラックス変動の関係
- ・海面フラックスと海洋表層における水塊形成
- ・海洋・陸域間の水蒸気と陸水の輸送過程とフィード

II. 地球観測システムと気候の解析

(earth observing system and global change analysis)

GEWEX における中心課題である水およびエネルギーの全地球的循環は、とりもなおさず全地球的気候変動の熱的および力学的背景である。「水惑星」とも呼ばれる我々の地球環境は、海洋や陸水・土壌水分並びに雲水としての液相の水、雪氷や海氷並びに氷晶雲粒としての固相の水、そして大気中の水蒸気としての気相の水の存在によって大きく支配されている。この三相の相変化を伴う気圏・水圏・地圏における水の移動は、それに伴う顕熱・潜熱の作用、大気・海洋とのエネルギー交換、並びにその存在自身による放射特性によって、短時間の気象変動から長期の気候変動に至る大気の変動をもたらしているのみならず、生態系への影響、さらには地形への影響をももたらす重要な現象である。我が国における GEWEX 研究計画にあっても、このような認識のもとに、海洋上の風および水蒸気の3次元分布、全地球規模の雲および降水の気候と変動、全球海洋モニタリング、全地球規模の陸面状態と植生のモニタリング等の全球的な解析を推進する必要がある。

また GEWEX は気候変動の監視・研究・予測のための新しい人工衛星による地球(大気・海洋・地表面)観測システムを作る第一歩であり、将来の定常的な衛星観測網のプロトタイプをなすものである。地球大気の観測については、現在5個の静止気象衛星と数個の軌道衛星により観測が行なわれている。1990年代の後半には TOGA, WOCE に向けて新しい海洋観測衛星も打ち上げられ、海洋の観測も現在の気象観測と同じように行なわれることになろう。しかし、これらの衛星やその搭載センサーだけでは、「気候変動」の監視・予測に必要な水・エネルギー循環に関する諸要素を観測するには未だ不十分である。我が国においても、米国やヨーロッパ諸国による衛星を含む地球観測衛星ネットワークの構築に協力すると共に、地球規模で水蒸気の観測、風の直接観測、降水量の観測、土壌水分の観測等を行なうため新しいセンサーを開発し、衛星観測を行なう必要がある。

特に1990年代後半においては TRMM (熱帯降雨観測衛星)、日米欧の共同の POP (極軌道観測プラットフォーム) 等の衛星による観測が GEWEX の大きな柱となるものと予想される。これらの衛星における搭載センサーとしては、可視・赤外放射計、マイクロ波放射計、高度計、散乱計、合成開口レーダ、降雨レーダ、レーザー

ーダ等が計画されている。これらのセンサーにより雲分布、雲頂高度、水蒸気量・降雨の3次元分布、3次元風ベクトル、地・海表面温度、海面高度、海上風ベクトル、海面状態、土壌水分、地形、等に関するデータを得ることが期待されている。しかしながら、これらの観測はすべてリモートセンシング手法によっており、衛星による測定量から求めたい物理量を抽出する手法(アルゴリズム)の開発が精度のよいデータ取得にとって重要な役割を果たしている。TRMM および POP の主要推進国である我が国においては、これらの計画によって得られるデータの利用を推進すると共に、必要なアルゴリズムの開発や、アルゴリズムの検証のためのグラントルース実験を推進する必要がある。

研究課題例

- ・ 降水の変動と気候学
- ・ 全球海洋モニタリング
 - 海面フラックス、降水の海面へのインパクト
- ・ 全球陸面状態、植生モニタリング
- ・ 熱帯海洋の変動と降雨
- ・ GCM によるデータ同化システム
- ・ 熱帯、亜熱帯の降水量の評価 (TRMM)
- ・ 海上の風の3次元分布の観測 (LAWS)
- ・ 海上の水蒸気3次元分布の観測
- ・ 広域土壌分布の評価
- ・ 広域蒸発散の評価
- ・ その他

III. 大気大循環モデルと水循環

(Atmospheric General Circulation Model and Water Cycle)

3次元大気大循環モデルは地球の気候システムを定量的に理解するための実験手段であり、また短期・中期・長期数値予報の手段である。

現在の大気大循環モデルは大気大循環の基本的な特徴を再現できるが、大循環を駆動する熱源に関する降水量および水循環はその実態の全球分布がいまなお確立しておらず、この点での大気大循環モデルの検証が十分なされていない。これはモデルに組み込まれている積雲対流モデル、大気境界層モデル、地表面モデル、放射モデルなどの妥当性が十分検討されていないことを示す。降水量や水循環に関する新たな観測データにより大気大循環モデルの検証および改良を行う必要がある。

モデルの改良の中心は上に挙げたような個々の物理過程のモデル（パラメタ化）の改良である。このためには、例えば個々の積雲対流や雲クラスターを記述するモデルの開発も必要となる。（気候）モデルとしての性能を高めるためには放射と相互作用する雲モデルの開発、地下水モデルの開発も必要である。

改良された大気大循環モデルを用いて大気・海洋大循環結合モデルを開発・改良することが気候変動・変化を理解し、予測するために重要である。

数値予報モデルの水平分解能は90年代半ばに全球モデルで50 km、領域モデルで10 km が達成され、メソβ擾乱が予報の対象となろう。短期予報については、降水・気温などの天気要素を、予報モデルにより直接かつ量的にアメダススケール（約20 km）で予報することが課題となる。数値予報の他の重要な課題は1～3カ月の力学的長期予報の精度向上である。これらの課題を達成するには、(1) 予報モデルの物理過程パラメタ化の改良あるいは新たな導入、(2) 従来利用されなかった観測データ（降水量など）、今後入手が期待される地域観測データ、の4次元同化を積極的に推進する必要がある。全球4次元データ同化システムから得られるデータは、より正確な大気大循環、大気中の熱源分布、全球的な水・エネルギー

ギー循環の実態と機構を明らかにすると共に、モデルの検証のためのデータとなる。

放射、水文過程などの個々のプロセスについては項目I. で取り扱われている。

研究課題例

- ・大気大循環モデルの改良・検証
 - 水循環、熱源分布、降水分布、雲分布などの比較検討、モデルの物理過程の改良
- ・大気・海洋大循環結合モデルの開発・改良
- ・数値予報モデルの改良・検証
- ・全球客観解析の高度化
 - 衛星による降水量データの水蒸気解析・非断熱初期値化への利用、衛星による海上風データの海上風・海面気圧解析への取り込み、放射強度データの解析への直接利用、衛星データからの土壌水分・積雪深の推定
- ・高分解能4次元データ同化システムによる全球水・エネルギー循環などの解析・検証
- ・水循環の変動の様相
 - 乾燥化、砂漠化、湿潤化（豪雨頻発）
- ・その他

日本気象学会および関連学会行事予定

行 事 名	開 催 年 月 日	主 催 団 体 等	場 所	備 考
日本気象学会 1991年度春季大会	1992年5月26日 ～28日	日本気象学会	工業技術院つくば 研究センター（つくば）	
Quardrennial Ozone Symposium	1992年6月4日 ～13日	IAMAP/IOC	アメリカ Virginia 大学	Vol. 38, No. 4
第11回雲と降水に関する 国際会議	1992年8月17日 ～21日	IAMAP/ICCP	カナダモントリオール McGill 大学	Vol. 38, No. 4
第13回ニュークリエーシ ョンと大気エアロゾルに 関する国際会議	1992年8月24日 ～28日	IAMAP, CNA, ICCP	アメリカユタ州ユタ大学	Vol. 38, No. 1
International Symposium on GLOBAL CHANGE (IGBP)	1992年3月27日 ～29日	IGBP科学委員会, IGBP 国内委員会, 早稲田大学	早稲田大学	Vol. 38, No. 9