

データ同化を用いた波浪推算開境界条件の推定法

小林 智 尚*・足 立 忠 行**・藤 園 康 弘**・安 田 孝 志***

1. はじめに

近年, WAM モデル (Komen et al.; 1994) をはじめとする第三世代波浪推算モデルが国内外で開発・利用され (例えば, 宇都宮・大西・鈴木, 1999), 現地波浪の高精度推算が可能となっている (橋本ら, 1999a)。

この波浪推算モデルを適用する際には対象領域に開境界が含まれることが多い。この開境界では波浪条件を設定する必要があるが, その設定条件が対象領域内の推算波浪場の特性を左右することがある。このような問題に対し, 十分広い計算領域を設定して境界条件の影響を避けるという手段もあるが, うねりなどは伝播距離が大きく, 要求される計算領域が広大で膨大な計算量の要因となり, 実用面で問題となる。したがって不確実性を有する境界条件をどのように扱い妥当な推算結果を得るかが実務面において重要な課題となる。そこで本研究ではデータ同化手法を用い, 現地波浪観測データから開境界上での波浪条件の推定を試みた。

データ同化とは数値解析モデルに現地での観測結果を適用して解析結果を修正する手法である。これにより数値誤差やモデルに含まれる不確実性に伴う解析誤差が修正され, より高精度の数値解析結果を得ることができる。この手法は現在主に気象の分野で研究・活用されており, 数値気象予報の精度向上に貢献している。また波浪推算でも Lionello, Günther and Janssen (1992) が人工衛星データを用いてデータ同化を行い, 太平洋全域の波浪推算精度の向上を試みている。

本研究ではこのデータ同化手法を用いて波浪推算の際に解析対象領域に含まれる開境界上での波浪の方向スペクトルの推定を行った。これによって任意の地点の波浪推算を行う際にはその推算精度を向上できるとともに, 計算領域を小さく設定することができ, 効率的な計算が可能となる。

2. Adjoint 法によるデータ同化

(1) Adjoint 法について

Adjoint 法は変分法を用いたデータ同化手法である。この手法の最大の特徴は時間軸を溯って過去の解析結果も修正・最適化できる点である。一般に波浪観測は海岸近傍の地点で行われる。この地点は波浪の伝播を考えた場合, 波浪にとっては時間軸上ほぼ終端に位置する。このため波浪推算の精度を向上するためにはデータ同化手法によって過去に溯り, 観測点に到達する前の波浪, あるいは開境界において進入してくる波浪の条件を修正する必要がある。そのため波浪推算モデルに対しては時間を溯ってデータ同化できる手法が必要である。この点で Adjoint 法は適していると判断し, 本研究で採用することとした。

(2) 本研究での Adjoint 法適用について

本研究では波浪推算対象領域内にある波浪観測データを用い, データ同化により推算対象領域開境界上の地点における波浪条件を算定することとする。実際にはこの開境界上の地点の波浪条件を求めるべき未知の目的変数とし, まずこの変数に初期値として任意の条件を設定する。そして観測データのある地点での推算結果が観測値をより良く表現することを拘束条件に, Adjoint 法を用いてこの目的変数を修正する。そして開境界上の地点での最適な波浪条件を求めることとする。これより波浪観測データがある地点およびその周辺では実際の波浪をよく再現した推算結果を得ることができる。

(3) 波浪推算での Adjoint 法の定式化

Adjoint 法の数学的表現は Komen et al. (1994) や気象庁予報部 (1990) などに詳細に記述されている。ここでは実際に波浪推算モデルを Adjoint 法に適用した場合について述べる。本研究では波浪推算モデルとして WAM Cycle 4 モデル (Günther et al., 1992) を用いた。このモデルの基礎方程式は

$$\frac{DF}{Dt} \equiv \frac{\partial F}{\partial t} + \dot{x} \frac{\partial F}{\partial x} + k \frac{\partial F}{\partial k} = S_{in} + S_{nl} + S_{ds} \quad \cdots (1)$$

である。ここで F は空間座標 x , 時間座標 t , 波数ベクトル k を独立変数とする波浪のエネルギースペクトルで

* 正会員 工博 岐阜大学助教授 大学院工学研究科環境エネルギーシステム専攻

** 岐阜大学大学院 工学研究科環境エネルギーシステム専攻

*** 正会員 工博 岐阜大学教授 大学院工学研究科環境エネルギーシステム専攻

ある。また S_{in} , S_{nl} , S_{ds} はそれぞれ風から波へのエネルギー輸送項, 波浪成分波間の非線形相互作用によるエネルギー輸送項, 砕波などによるエネルギー消散項である。本研究ではこの方程式から Adjoint 法の方程式を導く。

まず数値モデルによる解析結果と観測結果との差を表す距離関数 H を定義する。ここでは観測から得られる波浪の方向スペクトル F_{obs} と波浪推算モデルによって得られる方向スペクトル F とを用いて距離関数 H を

$$H = \sum (F - F_{obs})^2 \dots\dots\dots (2)$$

とした。つぎに Adjoint 法に従い Adjoint 方程式を導く。式 (1), 式 (2) の基礎方程式, 距離関数より Adjoint 方程式は以下になる。

$$-\frac{\partial \delta F}{\partial t} + \dot{x} \cdot \frac{\partial \delta F}{\partial x} + \dot{k} \cdot \frac{\partial \delta F}{\partial k} \\ = \int \frac{\partial}{\partial F} (S_{in} + S_{nl} + S_{ds}) dF + 2 \sum (F - F_{obs}) \dots\dots (3)$$

ここで δF は目的変数の修正ベクトルの向きである。

Adjoint 法では式 (2) で定義された距離関数 H が最小となるように目的変数である開境界上の地点での方向スペクトルを逐次修正する。修正する際には式 (3) を時間軸を遡って計算し, 得られた修正ベクトルにしたがって開境界上での目的変数の値を修正する。

WAM モデルでは時間発展計算を行う際, 計算時間ステップごとにエネルギーの増分に上限を設け, 高周波数領域のスペクトルにも f^{-5} 則を仮定している (橋本ら, 1999b)。これによって WAM モデルでは波浪推算の計算安定性を得ている。時間軸を遡るデータ同化計算において式 (3) にしたがった計算を行った結果, 特に高周波数領域で計算が不安定になった。そのため Adjoint 方程式による計算でも WAM モデルと同様にエネルギー増分の上限の設置などにより計算の安定性を確保した。

3. Adjoint 法の波浪推算への適用

(1) 計算条件

本研究では計算対象領域を現地波浪観測データが得られる徳光海岸を中心に東経 $134^{\circ} \sim 138^{\circ}$, 北緯 $35^{\circ} \sim 39^{\circ}$ の約 $400 \text{ km} \times 400 \text{ km}$ とした (図-1)。図より対象領域の東西北の各方向の境界が開境界となる。したがってここではこの開境界上の波浪条件を推定することになる。解析対象期間は 1996 年 1 月 1 日から 10 日までの 10 日間とした。波浪推算に必要な海上風データには ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts) から提供されている解析値を用いた。一方, データ同化に必要な現地波浪観測データには建設省金沢工事事務所が徳光海岸で得たデータを用いた。

この観測結果は有義波高と有義波周期しかなく, 距離関数 H や Adjoint 方程式で必要な徳光海岸での方向ス

ペクトル F_{obs} は得られていない。そこで本研究では, 各計算時間ステップの F_{obs} は同一時間, 同一地点に WAM モデルの波浪推算によって得られる方向スペクトル F と相似形であると仮定し, このスペクトル F を観測された有義波周期, 有義波高にしたがって周波数方向およびスペクトル強度方向に伸長させて F_{obs} を求めた。

本研究のようにデータ同化を用いて波浪推算モデルのデータの向上を行うならば, 本来であれば, 波浪推算対象領域内の任意の点においてデータ同化を適用して推算精度を向上させた後, データ同化に用いなかった点において得られた推算結果と観測結果とを比較・検討すべきであろう。しかし今回はデータ同化手法そのものの特性などを把握することを目的とするため, ここではあえてデータ同化に用いた観測点においてデータ同化を適用した推算結果と観測値とを比較・検討することとした。

(2) データ同化適用観測点での波浪特性

Adjoint 法を用いて得られた徳光での推算値を図-2 に示す。ここではデータ同化に用いた徳光での結果を示している。図中には観測結果やデータ同化を適用した場合の推算結果とともに, このデータ同化の逐次計算の初期状態でもある, 対象領域の開境界上の点における方向スペクトルをすべてゼロとした場合の推算結果も示している。この図のように, データ同化を用いた手法を波浪推算に導入することにより, 観測値に対して精度の高い推算結果が得られている。また対象領域の開境界上で方向スペクトルをすべてゼロとした場合には観測値に比べて推算値が明らかに小さい。これは対象領域が小さいために吹送距離が不十分で波浪が十分発達できなかったためである。これに対して, データ同化手法を適用して開境界上での方向スペクトルを適切に見積もることにより, 比較対象点の徳光に影響を及ぼすであろう推算対象領域外の情報がデータ同化によって推定され, 開境界上の点での方向スペクトルとして与えられている。そして

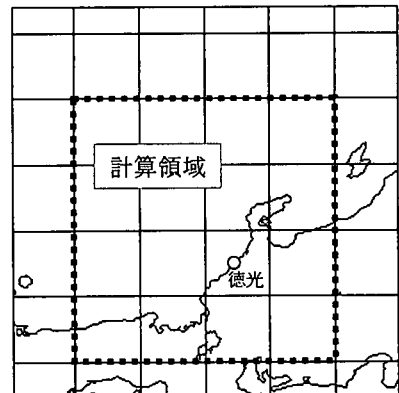


図-1 解析対象領域

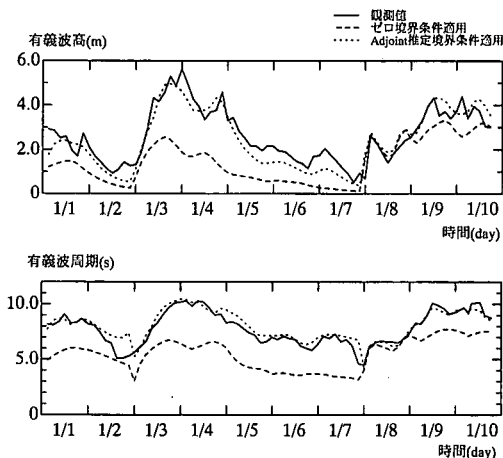


図-2 Adjoint法を適用した波浪推算結果(徳光海岸)

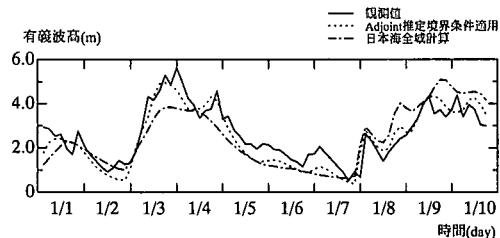


図-3 Adjoint法による推算結果と日本海全体を対象とした推算結果(有義波高, 徳光海岸)

これによって観測値がほぼ再現されている。

また1月9日0時から1月10日24時にかけて観測値は短い周期で激しく変動している。しかしデータ同化手法を用いた場合でも推算結果はこれを精度良く再現しているとは言いがたい。これはデータ同化手法により時間軸を溯って開境界上の点での方向スペクトルを算定する際、観測データのある地点で短い周期で変動する情報が与えられても、その情報が開境界に向かって逆伝播する際に細かい情報が時空間上に拡散してしまい、この情報が十分には伝わらないためである。前芝(2000)は熱拡散方程式を対象にAdjoint法を用いた初期状態推定を試みているが、基礎方程式に起因する同様のAdjoint法の性質を指摘している。

さらに図-2では1月6日0時から1月8日0時までの低波浪時で特に有義波高の推算精度が低い。この原因を検討するために日本海全体を対象に波浪推算を行った結果を図-3に示す。この図から、日本海全体を波浪推算対象とした場合でも、現在議論している期間においては特に有義波高が過小評価されていることが分かる。このようにデータ同化手法を用いた場合でも日本海全体を対象とした場合でも推算波浪が観測値に比べて過小となるのは海上風データの精度が不十分で実際の海上風に比

べて小さい値となっているからだと考えられる。このためデータ同化を用いた推算では、たとえ大きな波浪を開境界上で設定しても、海上風が小さいために対象領域内を伝播する間に波浪は減衰し、比較対象地点に到達するときには実際の観測値に満たなくなっているためである。ただしデータ同化手法によって十分には再現できない場合はこのような海上風が極端に小さいときに限られるようである。この静穏時を除いて、図-3では日本海全体を対象にした波浪推算結果と比較してデータ同化による波浪推算結果は観測値を良く再現している。これより本研究で用いたデータ同化手法では海上風の精度も含めて開境界上での波浪特性を推定し、高精度の推算が可能となることが分かる。

つぎに徳光海岸における波浪推算結果を方向スペクトルと比較する。ただし観測ではこの方向スペクトルが得られていないために、ここではデータ同化手法により得られた方向スペクトルを日本海全域を対象としてWAMモデルによる推算方向スペクトルと比較する。

図-4に徳光海岸における推算方向スペクトルの一例を示す。この図(b),(c)に示す通り、データ同化を用いた手法では日本海全体を対象とした波浪推算で得られた方向スペクトルも再現している。ただし図-3に見ら

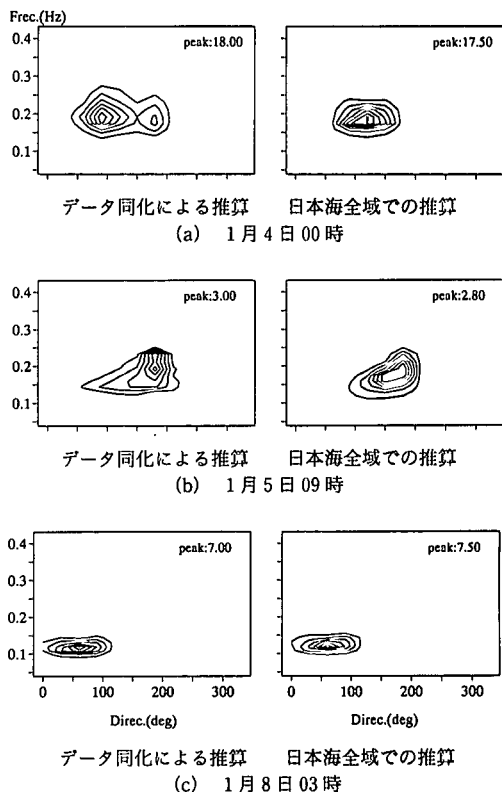


図-4 推算された方向スペクトル(徳光海岸)

れるように日本海全体を対象にした WAM による波浪推算結果とデータ同化手法に用いた観測値に差があるため、この図でも絶対値については日本海全体を対象とした推算結果のスペクトルのほうが小さくなっている。

この推算結果の比較では特に図-4(c)のような静穏時においてデータ同化を用いた推算結果が日本海全体を対象とした推算結果で得られた方向スペクトルをより忠実に再現していた。これは静穏時には、うねり成分を除いて、長距離を伝播する成分波が少なく、データ同化手法によって設定する開境界条件が比較対象地点の方向スペクトルに及ぼす影響が小さいためと考えられる。図-4(b)でもデータ同化を用いた推算結果と日本海全体を対象とした推算結果の両者のスペクトルはほぼ合っているが、データ同化を用いた推算結果のスペクトルのほうがやや広がっている。これはデータ同化に用いる方向スペクトルを各計算ステップごとに得られたスペクトルと相似形であると仮定し処理したため、データ同化で時間軸上の計算を繰り返し行うごとにスペクトルが広がってしまったためと考えられる。

また、図-4(a)のようにデータ同化によって得られた方向スペクトルにピークが二つ存在し、有義波高などの観測値は再現しているものの、方向スペクトルが異なる場合もわずかに見られた。このようにスペクトル形が大きく異なったのは図-4(b)と同様に観測でスペクトル形が規定されていないために、データ同化の繰り返し計算の段階で、スペクトル形が変形したためと考えられる。

これらスペクトルに関する問題は、観測においてスペクトルが得られていれば解決される問題である。

(3) 開境界上での波浪特性

ここでは、データ同化によって推定された開境界上の点における波浪の特性について検討する。

図-4と同時刻における対象領域開境界上の数地点での代表波の特性を、日本海全体を対象に行った波浪推算結果とともに図-5に示す。図中、それぞれの地点における有義波高、主波向、有義波周期をそれぞれベクトルの大きさ、ベクトルの向き、数値で示している。これらの図より明かなように、日本海全体を対象として行った波浪推算結果とは大きく異なり、データ同化によって推算された開境界上の波浪は、データ同化に用いた観測データのある徳光海岸に向いていることが分かる。またデータ同化によって算定された開境界上の波浪は有義波周期が長く、有義波高が小さい。このうち、得られた開境界上の波浪の主波向が徳光海岸に向かっていているのは、徳光海岸でのみ観測値を用いたデータ同化を行ったため、Adjoint 方程式による波浪の逆伝播の計算を行った際、波浪修正情報が徳光海岸からしかなかったためである。したがって開境界上の点では、徳光海岸に向かう波

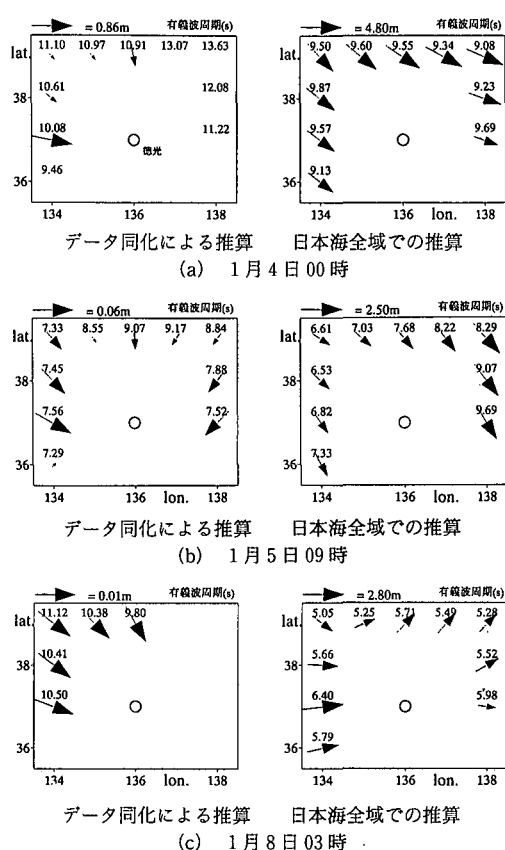


図-5 開境界上での代表波浪特性(有義波高、主波向、有義波周期をそれぞれベクトルの大きさ、向き、数値で示す。)

浪以外の波浪成分については境界条件を決定するための情報がないために、規定されていない。

また開境界上の点での波浪成分のうち、比較対象点まで到達するものは伝播距離の比較的高い低周波の成分である。したがってそれ以外の比較的高周波の波浪成分は開境界上の点では規定する必要がないため、Adjoint 方程式による波浪の逆伝播計算でこれらの情報が徐々に欠落してしまう。また一方、これら比較的高周波成分の波浪は対象領域内を波が伝播する時に生成されるのであえて開境界上で与える必要もない。このような理由から、開境界上の点においてデータ同化によって推算される波浪成分は伝播距離の短い高周波成分が欠落した状態となり、有義波周期が長く、有義波高も小さくなってしまふ。

これら対象領域の開境界でデータ同化によって推定された波浪の特性についてはその方向スペクトルを見ることによりさらに明らかになる。図-6に1月5日09時における開境界上の数点での方向スペクトルを、日本海全体で行った推算結果とともに示す。これらの図からも、開境界上の各点においてデータ同化によって推定された

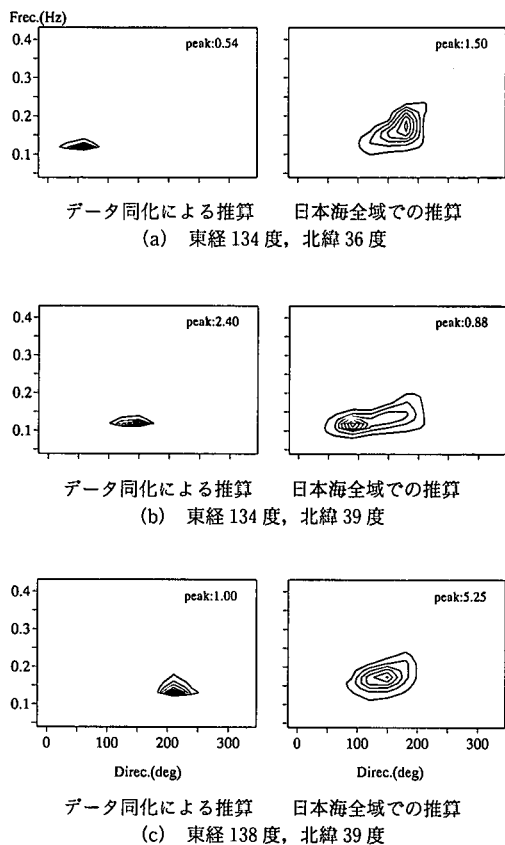


図-6 開境界上での方向スペクトル (1月5日09時)

方向スペクトルは実際の方向スペクトルと異なり、低周波でしかもデータ同化を行った現地データの存在する徳光海岸に向かう成分のみで構成されていることが分かる。ここでデータ同化に用いる観測データが存在する地点を複数点にしても、ほとんどの観測データが海岸線に沿った地点でしか得られない波浪観測の現状から考えると、開境界上で実波浪と同じ特性の波浪をデータ同化により推定することは困難であろう。同様に、対象領域全体で実波浪と同じ特性の波浪を推定することも難しい。

以上のように、Adjoint法によるデータ同化では計算対象領域全域で観測結果を再現しうる手法ではなく、データ同化に用いた観測結果の存在する点とその近傍においてのみ、波浪場を高精度に補正する手法である。ただしこの手法では単に開境界条件を求めるだけではなく、海上風に含まれる誤差など、推算に関わる諸原因を含めて、その誤差を開境界上の点での波浪特性として表し、比較対象点においてより高精度に現地観測結果を再現することができる。

4. おわりに

本研究では波浪推算モデル WAM にデータ同化手法

として Adjoint 法を適用し、開境界を含む波浪推算小領域を対象に、その開境界上での波浪条件の推定を行った。その結果この Adjoint 法を用いることにより、データ同化に用いた現地観測データの存在する地点においては代表波浪だけでなく、方向スペクトルについても現地観測値をほぼ再現することができた。またデータ同化によって推定された開境界上の点における波浪の方向スペクトルは、データ同化に用いた現地観測データの存在する地点に向かう成分でしかも比較的低周波の波浪成分のみが再現されている、など、データ同化の特性についても明らかにできた。これよりデータ同化手法を用いて波浪推算領域の開境界での波浪条件を算定すれば、データ同化に用いた観測値のある地点およびその周辺の方向スペクトルを含めてその観測値を高精度に再現しうる波浪推算が可能となることが明らかとなった。

今後このデータ同化手法の実用的な適用法として、複数地点での現地観測結果を用いて開境界上の波浪特性を算定し、その結果得られる波浪推算結果をデータ同化を行った観測点以外の地点において観測結果と比較し、その推算の可能性と精度について議論する必要がある。

謝辞: 岐阜大学工学部玉川一郎助教授には Adjoint 法について様々な有益な助言を頂きました。ここに感謝の意を表します。また解析には ECMWF より提供された海上風データを用いました。

参 考 文 献

- 宇都宮好博・大西健二・鈴木 靖 (1999): 第三世代波浪推算モデルの浅海域への適用, 海岸工学論文集, 第 46 巻, pp. 266-270.
- 橋本典明・川口浩二・真期俊行・永井紀彦 (1999a): 方向スペクトル観測値に基づく第三世代波浪推算法 (WAM) の推定精度に関する検討, 海岸工学論文集, 第 46 巻, pp. 276-280.
- 橋本典明・川口浩二・真期俊行・永井紀彦 (1999b): 第三世代波浪推算法 (WAM) の推算精度に関する検討, 港湾技術研究所報告, 第 38 巻, 第 4 号, 47 p.
- 前芝健弘 (2000): 一次元の熱伝導方程式におけるアジョイント法によるデータ同化, 岐阜大学工学部土木工学科卒業論文, 50 p.
- 気象庁予報部 (1990): 気象データと客観解析, 数値予報課報告・別冊第 36 号.
- Lionello, P., H.Günther, and P. A. E. M. Janssen (1992): Assimilation of altimeter data in a global third generation wave model, Jour. Geophys. Res. C97, pp. 14453-14474.
- Komen, G. J., L. Cavaleri, M. Donelan, K. Hasselmann, S. Hasselmann, and P. A. E. M. Janssen (1994): Dynamic and Modelling of Ocean Waves, Cambridge Univ. Press, 532 p.
- Günther, H. et al. (1992): The Wamodell Cycle 4 (revised version), Deutsches Klima Rechen Zentrum, Technical Report No. 4, 101 p.