

21. 降水による水面への $\text{NO}_3^- \cdot \text{NH}_4^+$ 供給が三河湾生態系に及ぼす影響推定

Evaluation of the Impacts of Wet Deposition of NO_3^- and NH_4^+ on Ecological System in Mikawa Bay, Japan

北田敏廣^{*}、星野直樹^{*}、Anggara Kasih^{**}、佐野方昂^{***}

Toshihiro KITADA^{*}, Naoki HOSHINO^{*}, Anggara Kasih^{**}, Masataka SANO^{***}

ABSTRACT ; Effects of wet deposition of ammonia-N and nitrate-N on algal blooming in Mikawa Bay, Japan, where N is known as limiting factor for eutrophication, were numerically investigated by using a modified CE-QUAL-W2 model, a fluid-dynamic/ecological model. Three years simulations from April, 1998 to March, 2001 were performed for the cases with and without the wet deposition of N compounds. Results show the amount of N loading through precipitation is about 10 % of that from rivers, yet chlorophyll-a concentration in near-sea-surface water can be drastically increased by adding this wet deposition, and the calculated concentrations come close to observation. The nature of N loading by wet deposition, which provides the nutrient to photosynthesis active area, will explain this phenomenon.

KEYWORDS ; Eutrophication, Mikawa Bay, Total N Loading, Wet Deposition, Acidic Species

キーワード : 富栄養化、三河湾、窒素負荷、湿性沈着、酸性物質

1. はじめに

三河湾は閉鎖性の強い内湾であり、周囲の陸域からのN-負荷量は、1950年代後半から1990年代にかけて増加を続けていった。近年、栄養塩の流入量に総量規制がかかり陸域からの流入は減少傾向にあるが、赤潮の発生等結果として生じる環境汚染にははっきりとした減少傾向は見えない。これには、長年の間に底部に堆積した栄養塩類の巻き上げ溶出も深くかかわっていると考えられる。Anggara¹⁾, Anggara & Kitada^{2, 3)} は、流動・生態系モデルによって底泥からの溶出制御と陸域からの流入制御との相対的な有効性を検討し、底泥からのN-負荷量の溶出制御がもっとも効果的としている。ところで、降水中には NO_3^- 、 NH_4^+ などのイオンが主要物質の一つとして含まれており、降水起源のN分の海面への直接的寄与が、三河湾では無視できない規模になると指摘されている⁴⁾。

本研究は、三河湾の富栄養化、およびそれに伴う藻類増殖に対して、大気から降水を通じて直接導入される窒素関連物質がどのように影響し得るかを流動/生態系モデル(CE-QUAL-W2⁵⁾)を用いて推定したものである。

2. 流動-生態系モデル

2. 1. モデルの概要

本研究では、米陸軍技術開発センターで原型が開発された流動-生態系モデル(CE-QUAL-W2)を基礎モデルとして用いた。ただし、原モデルは大気からの降水に伴う窒素負荷を含んでいないので、これらをモデルに加えた(図1参照)。当該モデルは、運動量、熱、塩分輸送の偏微分方程式系に加えて、溶存酸素(DO)、栄養塩類、その他の有機物、植物プランクトン等の輸送・反応式を含む。さらに、大気-海面間の運動量、熱、

^{*}豊橋技術科学大学エコロジー工学系 Department of Ecological Engineering, Toyohashi University of Technology, Toyohashi, 441-8580 Japan; ^{**}Yokkaichi University; ^{***}Aichi Environmental Research Center, Aichi Prefecture Office.

物質の交換, 同じく海水-底面間の運動量, 物質交換等が乱流過程を含めて定式化されている。また、これらの偏微分方程式は、流れの主軸に垂直な水平方向に積分することによって、主軸方向の距離および水面からの深さを独立変数とする空間二次元の式に定式化されている。主軸の方向については、後に示す計算領域の図2を参照されたい。

2. 2. 生態系モデル

本研究の生態系モデルの概略を図1に示す。モデルは、海水部(Water Column)と底部堆積部(Sediment)からなる。大気-海水間の物質移動では、酸素、二酸化炭素の海水への吸収(放散)のほかに、本研究では降水による硝酸性(NO₃)窒素およびアンモニア性(NH₄)窒素の供給を考慮している。以下、各媒体でのモデルの概要について述べる(詳細については、CE-QUAL-W2⁵⁾を参照)：

“Water Column”で考慮している従属変数(図中のコンパートメント)は、Chlorophyll-a、LDOM (Labile Dissolved Organic Matter; 易分解の溶解性有機物)、LPOM (Labile Particulate Organic Matter; 易分解の粒子状有機物)、RDOM (Refractory Dissolved Organic Matter; 難分解の溶解性有機物)、RPOM (Refractory Particulate Organic Matter; 難分解の粒子状有機物)、Phosphorus (リン酸)、Ammonium (アンモニウム-窒素)、Nitrate (硝酸性窒素)、Silica (珪素)、DO (Dissolved Oxygen; 溶存酸素)等である。ここに、藻類については、珪藻、緑藻、藍藻を区別せず一つにまとめ、さらに、Chlorophyll-a (クロロフィル a; 以下、Chl-a と略)を、藻類を表わす代表の変数としている。実際、県、国等の公共機関で日常的に取得されているデータは、ほとんどがこのChl-aであり、モデル計算値と実測との比較もChl-a量で行うため、これをモデル変数とするのが自然である。なお、平均的にChl-a濃度の約67倍が藻類濃度にほぼ相当と考えられている⁵⁾。図中、煩雑を避けるために矢印線を入れていないが、モデルではLDOM, RDOM, LPOM, RPOMが分解するときPhosphorus, Ammonium, Nitrateを放出する。

“Sediment”(図1)中のOrganic sediment(有機物)に輸送過程はなく、LPOM, RPOMと藻類の沈降により増加し、分解によって減少するようにモデル化されている。また、Sedimentは、その上の海水が嫌気状態(DO<0.2 g m⁻³)に

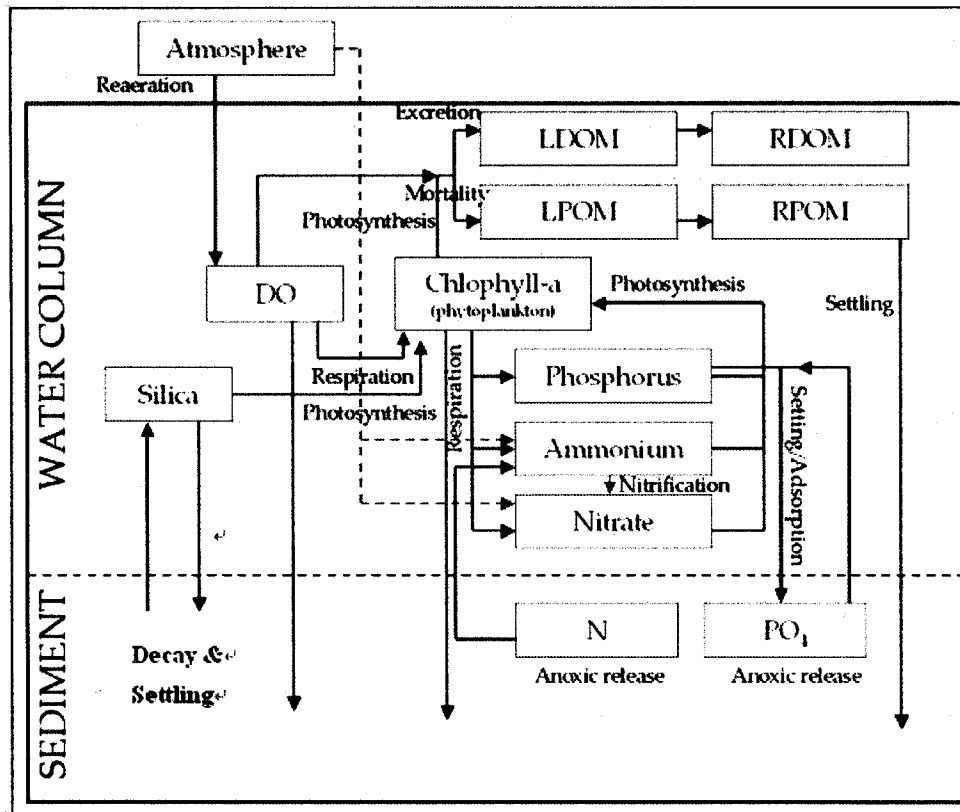


図1 CE-QUAL-W2の水質/生態系モジュール。図中、破線矢印が降水による海域への窒素負荷を示す。

あるとき、アンモニア、リンを放出する。

“Atmosphere”から海面に、既定の酸素、二酸化炭素の他に、特に、降水と共にアンモニア性窒素と硝酸性窒素が供給されることをモデルに含めた（図1の破線矢印）。

3. シミュレーション条件

3. 1. 計算領域および計算期間

1998年4月1日～2001年3月31日の3年間について、図2の領域を対象に計算を行った。流動/輸送方程式を、渥美湾を通る主軸（図2左パネル参照）に直角な水平方向に積分することにより、3次元流動の影響を除いて渥美湾を鉛直面内の2次的に取り扱った。したがって、近似的な取り扱いであるが、代わりに、3年間という長期間の連続的な計算が可能で、N、P等の排出削減の政策的な効果等が見やすいという特性がある。図2左パネルのA-5, A-7等は愛知県や国の機関が月1回のペースで行っている物理的、化学的、生物学的な調査の地点を表わす（平成10-12年度公共用水域等水質調査結果：資料編⁶⁾）。これらの地点で取得されたデータを初期分布、境界条件、シミュレーション結果の検証等に用いた。

図2右パネルは、二次元計算領域の格子点網を示す。格子長は、深さ方向に1.1 m、水平方向に850 mである。ただし、領域の境界にあたる部分（網掛け）は、外部との諸量の交換に使われる厚味を持たない格子である。

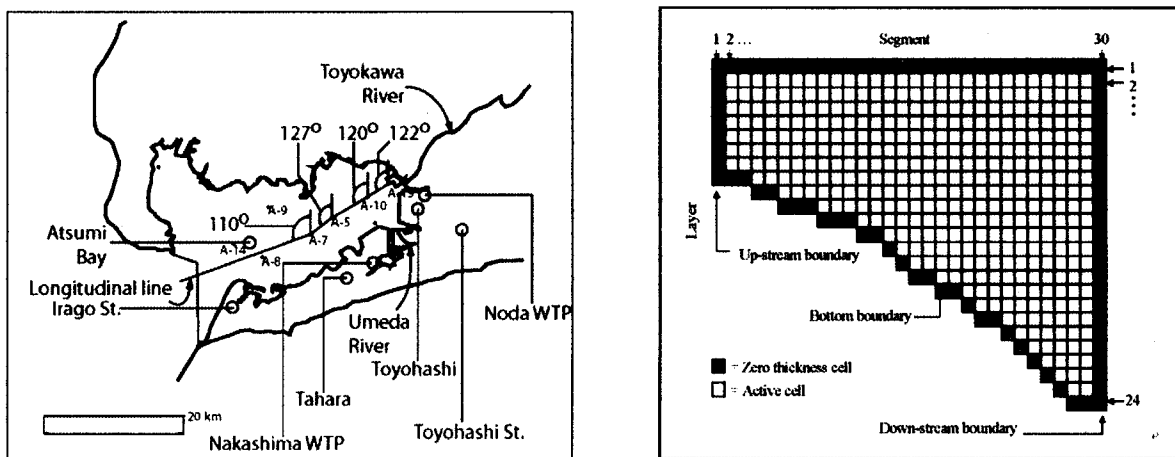


図2. 渥美湾計算領域。左：平面図（モデルシミュレーションの主軸方向を細実線で示す）、右：シミュレーション用の二次元格子点網（水平格子長：850 m、鉛直格子長：1.1 m）。

3. 2. 気象および潮汐の入力情報

水質、水量等について陸域からの負荷量および降水による負荷量（これらについては次項で述べる）を除いて、シミュレーションを実行する上で必要なデータの概略を述べる。気象データ：気温、風向、風速、露点温度、雲量の各格子点での時間値データを、豊橋および伊良湖のアメダスデータの重み付き平均（距離の二乗の逆数を重み）により求めた。湾の出口側の境界条件として必要な、潮汐により変動する海面水位は、日本海洋データセンターの潮位時間値⁷⁾（舞阪、鳥羽、名古屋の重み付き平均）を用いて推定した。また、湾口境界での水温、塩分の鉛直方向分布は、愛知県のデータ⁶⁾を用いて推定した。

3. 3. 陸域からの窒素負荷量

陸域から渥美湾への栄養塩負荷は河川および下水処理場処理水の直接放出によって生じる。渥美湾に流入する河川では、豊川の流量が際立って大きく、梅田川がそれに続く。本研究のモデルでは、河川流入水の流量、水温とともに、化学組成として $\text{PO}_4\text{-P}$ 、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 、 S_i 、 DO 、および COD の 6 項目が必要であるが、シミュレーションの全期間で存在しているのは全リン(T-P)、全窒素(T-N)、 S_i 、 DO 、 COD であって、 $\text{PO}_4\text{-P}$ 、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 、 $\text{NH}_4\text{-N}$ については隔月等のデータしか利用できない場合もあり、このときは、データのそろった最寄月の平均的 $\text{PO}_4\text{-P/T-P}$ 比、 $\text{NO}_3\text{-N/T-N}$ 比、 $\text{NH}_4\text{-N/T-N}$ 比を用いて必要な物質濃度を推定した。必要とされる日平均濃度は、月一度の観測値を時間的に内挿して得た。豊川の流量は国土交通省（当時、建設省）豊橋工事事務所取得のデータを用いた。河川からの負荷は、Segment 2 に豊川、音羽川、佐奈川を、Segment 5 に梅田川、朝倉川、柳生川、汐川を割り当てた。

渥美湾に直接放流する下水処理場の主なものは、野田処理場、中島処理場、豊川流域下水道等であるが、これらの処理場の月別実績値から各種の日量を推定した。例えば、先の研究^{1, 2, 3)}から、渥美湾の藻類増殖は窒素制限であることが分かっており、以上の陸域からの推定年間負荷量を窒素についてまとめたものが、表 1 である。なお、降水による窒素負荷（湿性沈着）については、次節 3. 4 で説明する。

表 1. 陸域から渥美湾への推計窒素負荷量：1998 年度－2000 年度. 単位: N-トン/年.

	1998*	1999*	2000*
河川	3871 [#]	2518	2185
WTPs ^{\$}	584	570	549
湿性沈着	318	220	263

* 1998 年度：1998 年 4 月 1 日－1999 年 3 月 31 日；# 単位：N-トン/年；\$ 下水処理場。

3. 4. 降水起源の N 負荷量推定

愛知県下で測定されている降水量および化学組成(降水量、化学組成ともに 1 降雨単位)のうち、豊橋と半田のデータを用いて各セグメントへの湿性沈着量を推定し、それに各セグメントの（主軸に直角な水平方向への）長さを乗じて、海面への NO_3^- 、 NH_4^+ の沈着量分布を推定した。図 3 に 1998 年度の渥美湾への沈着量の月別値を示す。 NH_4^+ および NO_3^- 起源の N がほぼ同量ある。先述のように、渥美湾への N 流入は河川や下水処理場処理水の湾への放流が主たるものであり、これらと比較するために、表 1 に 3 年分の推定値をまとめた。表 1 は、降水による直接負荷が下水処理場からの排出量の約半分程度になり得ることを示す。さらに、河川および下水処理場からの負荷が、ほぼ点源として作用するのに対して降水からの N は薄く広く海表面に供給されることになり、湾の生態系への影響も異なることが推測される。図 4 は、図 3 に加えて、河川および下水処理場からの月別の N 負荷量をプロットしたもの

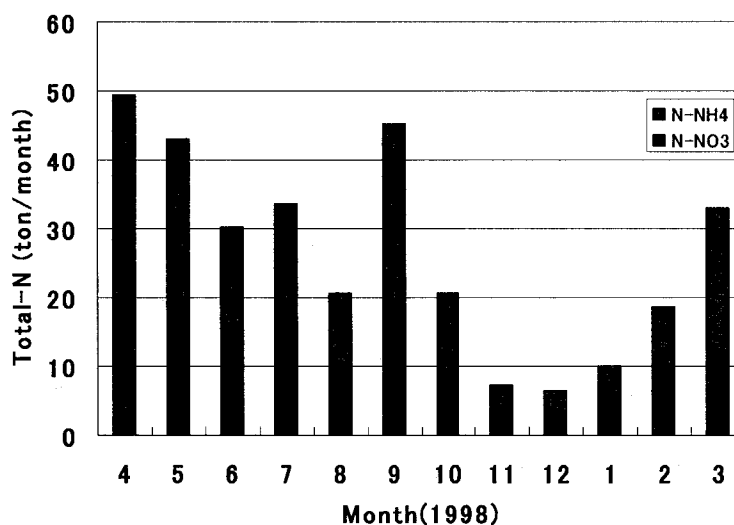


図 3 降水により直接渥美湾に供給される N 量の月変化。

である。河川からの負荷量が季節によって大きく変動するのに対して、下水処理場からの負荷量が年間ほぼ一定であること、したがって、冬季（11月－3月）には、下水処理場の寄与率が総量の30%以上になることを示唆する。

4. 結果および考察

降水によるN負荷を考慮(WET_DEP)、考慮せず(BASE)の2ケースの計算を行い、その効果を推定した。図5a, bに渥美湾奥のSegment 5(湾奥から約3.5 km)の表層(深さ50 cm)でのT-N($=\text{NO}_3^--\text{N} + \text{NH}_4^+-\text{N}$)およびChl-aの3年分(1998年4月－2001年3月)の変化を示す。図5aより、いずれの計算値も観測値(T-N)にほぼ追従している。降水によるN負荷を考慮したケースのほうが高い

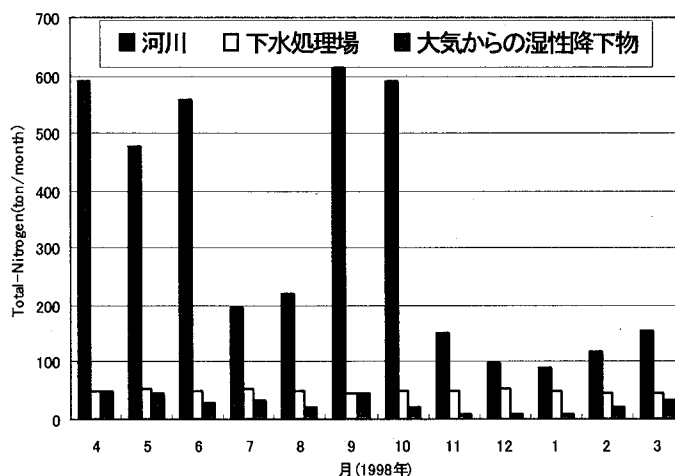


図4 渥美湾に流入する全窒素(T-N)量の月変化(1998年度)

濃度を示す。表1や図4に見られる降水によるN負荷への寄与は、高々10%あるいはそれ以下であるが、表層への負荷であることが実線と点線の大きな差をもたらすことを意味する。Chl-a(図5右パネル)の場合は、このことがより明かである。降水によるN負荷を考慮したケースは観測値(○)よりも過大なChl-a濃度を示すことが多いが、Baseケースよりは、はるかに良い適合性を示す。観測値は、1ヶ月に1回測定されたもので、これと比較することによって降水によるN負荷の直接寄与を考慮することの重要性を断定することは早計かも知れないが、計算結果は少なくとも、(1)降水によるN分導入がChl-a濃度の時間変動に大きく寄与し得る、(2)表1、図4に見られるN負荷の数値の比較から想像される以上に、Chl-aに対する影響が大きく、表層での広範囲にわたる散布の影響を示す、(3)1999年～2001年では、降水からのN供給を考慮したほうがより観測値に近い、等の結論が得られる。

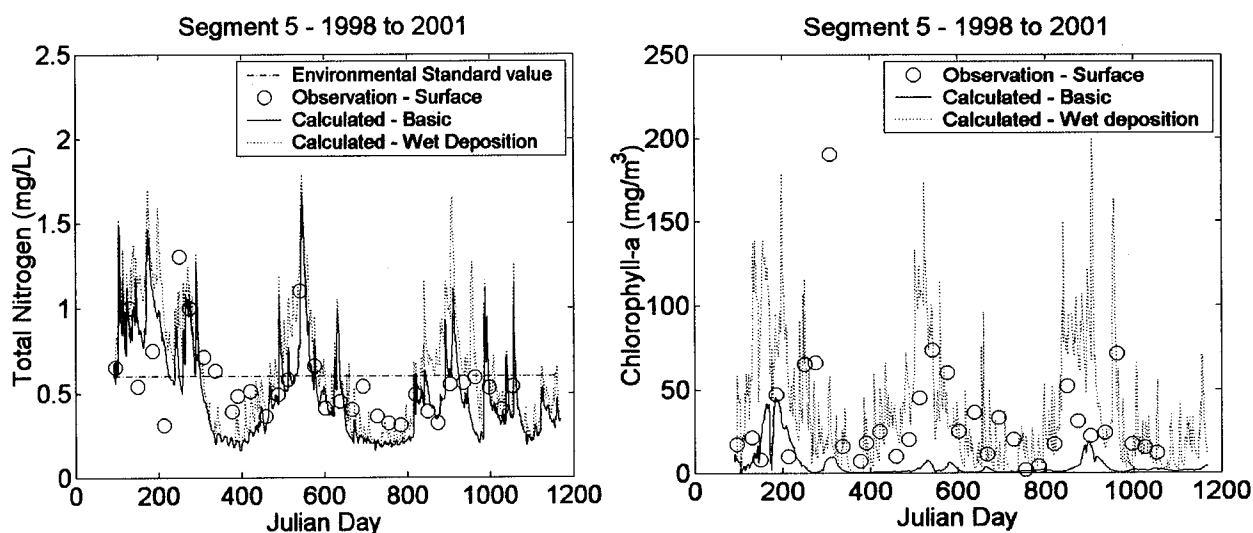


図5 3年間(1998年4月－2001年3月)の観測および計算値の比較: Segment 5(図2参照)の表層; Julian Day 91が1998年4月1日に対応、あとは通しの日数になっている。左パネル: 全窒素(T-N)、右パネル: クロロフィルa(Chl-a)。○: 観測値、実線: Base Case(大気からのN供給なし)、点線: WET_DEP Case(Base CaseのN供給に加えて大気からのN供給あり)

5. 結論

三河湾（その東半分を占める渥美湾）の藻類増殖は、N 濃度が律速であることが知られているが、陸域からのこれら N, P 流入規制にもかかわらず赤潮発生頻度等に目立った減少はない。このことには、底泥からの溶出等の寄与も考えられるわけであるが、本研究は、特に、大気から降水を通じて生じる N 負荷がどの程度この問題に影響し得るかを、流動/生態系モデルのシミュレーションによって調べたものである。その結果、以下のことが得られた。

- (1) 渥美湾への降水経由の直接の N 負荷は、河川からの負荷量の 1 割程度、下水処理場からの負荷の 5 割程度である。
- (2) 表層の T-N 濃度は、降水からの負荷項を加えることにより 1 割以上増加する。夏季は、観測値に比べて過大側の濃度になることが多い。
- (3) 表層のクロロフィル a 濃度は、降水起源の N の考慮により大きく増加し、観測値の変化に近くなる。N 負荷量が河川起源のその 1 割増しでは計れないクロロフィル a 濃度の増加であり、光合成に有利な表層に広く負荷されるという降水起源 N 負荷の特徴が現れていると推測される。
- (4) 降水中の N としてはアンモニア性窒素が硝酸性窒素と同量かもしくはそれ以上有るのが特徴である。
- (5) 今後、海面への沈着量の推定の精度を上げる工夫および降水起源の N 負荷量を変化させることによる感度解析等を行い、渥美湾や三河湾の持続可能な N 負荷量レベルを調べる必要がある。

参考文献

- 1) Anggara Kasih, G.A. (2004) Modeling Study on Eutrophication and Alga Blooming in Mikawa Bay, Japan, 博士学位論文, 豊橋技術科学大学, 171 p.
- 2) G.A. Anggara Kasih, G.A. and T. Kitada (2004) Hydrological Processes, **18**, 3037-3059.
- 3) Anggara Kasih, and T. Kitada (2004) Environ. Eng. Research, **41**, 613-624
- 4) Kitada, T. and G.A. Anggara Kasih (2006) EMECS7, Caen, France, May 9-12.
- 5) Cole, T.M. and Buchak, E.M. (1995) CE-QUAL-W2, Ver.. 2, User Manual; Cole, T.M. and Wells. S.A. (2003) CE-QUAL-W2, Ver. 3.2.
- 6) 愛知県 (1999, 2000, 2001) 平成 10、11、12 年度公共用水域等水質調査結果 (資料編).
- 7) 日本海洋データセンター (2002) http://www.jodc.go.jp/online_data/tide.