

2. 渡良瀬貯水池における水質変化特性

渡良瀬貯水池の水質は、流入河川の栄養塩濃度が高いため（表2-1）、窒素、リン共に高濃度を示し、このため、藻類量の指標であるクロロフィル-a濃度も非常に高いものとなっている（表2-2）。本貯水池は周辺河川である渡良瀬川および谷田川から流入を受けるが、表2-1に見られるように、両河川とも特に窒素濃度が高い。リン濃度については、両河川とも高い濃度ではあるが、渡良瀬川の方が谷田川の3分の1程度のレベルである。このため、両河川水のN/P比は大きく異なる。また、谷田川については、貯水池の機場の直上流ですでにクロロフィル-a濃度が河川としてはかなり高いレベルにあり、貯水池に藻類そのものを大量に供給していると考えられる。

表2-1 渡良瀬貯水池周辺河川の年平均水質の遷移

| | | 1992 | 1993 | 1994 | 1995 | 1996 | 1997 | 1998 | 1999 | 平均 |
|------|-----------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 渡良瀬川 | クロロフィル-a($\mu\text{g/l}$) | 14 | 13 | 14 | 12 | 16 | 10 | | | 13 |
| | T-N(mg/l) | 3.08 | 3.00 | 3.04 | 3.06 | 2.87 | 3.72 | 3.22 | 2.94 | 3.12 |
| | T-P(mg/l) | 0.115 | 0.132 | 0.138 | 0.127 | 0.131 | 0.127 | 0.152 | 0.120 | 0.130 |
| | N/P | 26.9 | 22.8 | 22.1 | 24.1 | 21.8 | 29.3 | 21.2 | 24.4 | 23.9 |
| 谷田川 | クロロフィル-a($\mu\text{g/l}$) | 35 | 41 | 46 | 79 | 35 | 74 | | | 52 |
| | T-N(mg/l) | 4.72 | 5.03 | 4.88 | 5.24 | 3.95 | 5.00 | 4.76 | 4.16 | 4.72 |
| | T-P(mg/l) | 0.273 | 0.413 | 0.352 | 0.547 | 0.410 | 0.653 | 0.555 | 0.430 | 0.454 |
| | N/P | 17.3 | 12.2 | 13.9 | 9.6 | 9.6 | 7.7 | 8.6 | 9.7 | 10.4 |

表2-2 渡良瀬貯水池の年平均水質の遷移（単位：mg/l）

| | | 1992 | 1993 | 1994 | 1995 | 1996 | 1997 | 1998 | 1999 | 平均 |
|-----------------------------|--|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| クロロフィル-a($\mu\text{g/l}$) | | 56 | 80 | 86 | 111 | 102 | 92 | 52 | 79 | 82 |
| T-N(mg/l) | | 1.14 | 1.24 | 1.50 | 1.58 | 1.37 | 1.87 | 1.51 | 1.27 | 1.44 |
| T-P(mg/l) | | 0.073 | 0.095 | 0.065 | 0.103 | 0.112 | 0.137 | 0.072 | 0.085 | 0.093 |
| N/P | | 15.6 | 13.1 | 23.1 | 15.3 | 12.2 | 13.6 | 21.0 | 15.0 | 15.5 |

2.1 渡良瀬貯水池水質の年間変化

本節では、渡良瀬貯水池水質の変化特性の概要について知るために、既往の定期水質調査結果データベースを用いて（1）水温（2）濁度（3）pH（4）溶存酸素（5）リン（6）窒素（7）クロロフィル-aに関して年間変動特性について調べる。水温から溶存酸素の4項目については、平成8年度から定期調査において鉛直分布が測定されているので、この結果を用いて鉛直分布の変化について見ることにする。リン、窒素、クロロフィル-aについては、経時変化を図化することでその変動特性について見ることにする。

ここで用いるデータは、利根川上流工事事務所により測定されたもので、平成4年1月から平成11年12月までの8年間に南、北、谷中の3ブロックで採水した標本について水質分析した結果である。鉛直方向には、平成7年度までは貯水池表層のみ、平成8年度からは表層及び底層の2点で採水されている。測定頻度は、ほぼ1週間に1度の割合で行われている。

2. 1. 1 水温

水温は、貯水池における生物の活動を大きく左右すると共に、鉛直方向の水温変化は鉛直方向の密度差の原因となる。鉛直方向の水温差が大きい場合は、鉛直方向の混合が抑制され、表層と底層との間での水の交換が減少することから、鉛直方向の水質変化に大きな影響を与える。

鉛直方向の水温差が大きくなることを成層化と呼ぶが、図2-1-1に示すように渡良瀬貯水池においては、年間を通して強固な成層は形成されない。ただし、例年4月頃から緩やかな成層は認められ、6月中旬にかけての期間中持続する。平成10年（1998年）の様に3月初旬頃から水位が高かった年では、上記期間中の成層は、3月下旬から4月にかけて水位を上昇させた年に比べて、成層形成が始まる際に低温の水が貯水池に大量に存在するため、底層水温が低く保たれて、4月中旬から6月中旬にかけての水温成層は例年より強いものとなっている。

通常、夏期に成層は最も強く形成されるが、本貯水池においては、夏期に水位を低下させて、水深が約3mと浅くなるため、風による混合と夜間の表面冷却による混合により成層の形成が進行しないものと考えられる。

渡良瀬貯水池は、図1-4に示されるように3つのブロックに区画が分かれているが、図2-1-1に示すように3ブロックとも水温変化の様子は類似で、ブロック毎の差はほとんど見られない。

2. 1. 2 濁度

濁度は水中に入った光の散乱の度合いを表す指標で、水中懸濁物の量に高い相関を示すものである。例年満水位（水深約6.5m）付近では濁度の値は10～15程度で推移している（図2-1-2）。これに対して水位を低下させている時期には濁度が高くなる傾向がある。特に平成9年（1997年）の2月～4月にかけて水位を低下させたときには濁度が60を越えるに至っているほか、平成8年（1996年）8月、平成11年（1999年）7月にも濁度が上昇している。水位低下時には、底泥が風により巻き上げられることで濁度の上昇が起こったと考えられる。特に平成9年（1997年）の高濁度水は水位が1m近くにまで下げられており、底泥の巻き上げによる影響が特に大きかったことが分かる。

2. 1. 3 pH

貯水池水のpHは、7～9.5の範囲で変化している（図2-1-3）。pHに影響を与える要因として植物性プランクトンによる光合成が挙げられる。光合成が盛んになると水中の炭酸を摂取するため、pHが上昇する。表層においてpHの値が9を越える時期の植物性プランクトンの活動は活発であったことが示唆される。

2. 1. 4 溶存酸素

溶存酸素濃度の変化は、貯水池の水温構造に大きく影響を受ける。水中の酸素飽和濃度は水温の関数で表すことができるが、水温が上がるにつれて飽和濃度は下がる。このため、冬期は溶存酸素濃度が高く、夏期には下がる。

溶存酸素は水面からの曝気により供給され、また植物性プランクトンの光合成によっても増加する。酸素消費については、底泥における微生物による有機物の分解に伴うものが主なものと考えられる他、水生動物による消費も考えられる。

溶存酸素濃度の年間変化を図2-1-4に、また酸素飽和濃度が水温により変化することから、水温を考慮した酸素飽和度について図2-1-5に示す。年間水温変化から、本貯水池では強い成層が形成されないことが分かっているが、溶存酸素濃度の分布にもこの水温構造が大きく影響しており、貯水池がほぼ完全に混合している10月中旬から3月中旬までの期間は全貯水池的にほぼ飽和濃度で推移する。4月下旬から6月中旬にかけて弱いながらも水温成層が形成される時期には、底泥による酸素消費が水面からの曝気による酸素供給を上回り、底層付近に低酸素水塊が形成される。平成10年(1998年)の様に3月初旬から水位が高い年は、成層が比較的強く形成され底層への酸素の供給が抑制されるため、底層水温が低いにも関わらず、4月下旬から6月中旬にかけて底層における酸素の欠乏は大きくなっている(図2-1-5)。

6月中旬から9月下旬までの低水位の状況では、底層において、表層に比べて酸素濃度が低下する時期もあるが、溶存酸素濃度が3mg/lを切るような低酸素水塊の発達は見られない。夏期には水温の上昇により底泥の温度も上昇し、微生物活動の活発化による酸素消費は増加していると考えられるが、水深が浅くなるために水面からの酸素供給により低酸素水塊の発達が抑制されていると考えられる。

貯水池表層においては、植物性プランクトンの光合成が活発になると溶存酸素濃度が過飽和となる。本貯水池表層においても、4月から10月にかけて、過飽和になる時期が多く見受けられる(図2-1-5)。

2.1.5 リン

リン濃度については、全リン(T-P)およびオリトリン酸態リン($\text{PO}_4\text{-P}$)について測定されている。T-Pについては年間を通して通常0.05~0.2(mg/l)のレベルで変動している(図2-1-6)。平成9年(1997年)の1月下旬から4月上旬にかけてと平成11年(1999年)の3月の2回にT-Pが非常に高くなることがあったが、これらの現象が発生した際には貯水位が非常に低下しており(1997年は1m、1999年は2m程度)、水位が非常に低くなったために底泥が巻き上げられて、これほど高い値を示した特異な現象と考えられる。

リン濃度については、河川からの流入により上昇する場合と貯水位を下げたときに上昇する場合の2通りの上昇過程が存在すると見受けられる。このことについては、2.3節において後述する。

平成8年(1996年)4月より、表層に加えて底層においてもリン濃度の計測が行われているが、表層と底層の間での濃度差はT-P、 $\text{PO}_4\text{-P}$ 共にあまり見られず、ほぼ同程度の濃度である(図2-1-6)。(図ではT-P、 $\text{PO}_4\text{-P}$ 共1997年の1月下旬から4月上旬にかけて表層と底層の差が大きいように見えるが、これは、この期間中の $\text{PO}_4\text{-P}$ 観測が無かったが、図ではこの間のプロットを結んでいるため、差があるように見えるためである。19

99年3月に底層で T-P, PO₄-P 共に表層に比べて非常に高い値を示しているのは、このとき水位が非常に下がり、底泥の巻き上げにより底層濃度が極めて高くなったためである。）

また年ごとに見た場合、T-P 濃度については特に大きな変化傾向は見受けられないが PO₄-P 濃度については、平成4年（1992年）から平成7年（1995年）の変化に比べて、平成8年（1996年）以降に高濃度を示すことが多くなっている。PO₄-P は植物性プランクトンが速やかに利用することが可能な形態であることから、平成8年（1996年）以降に高濃度を示すことが多くなったことについては、平成2年の運用以来リンが底泥に蓄積されて夏期のリンの溶出量が増加している可能性もあり、注目すべき現象である。

2. 1. 6 窒素

窒素濃度については、全窒素 (T-N)、アンモニア態窒素 (NH₄-N)、亜硝酸態窒素 (NO₂-N)、硝酸態窒素 (NO₃-N) に関して測定が行われている。T-N については年間を通して通常 1.0～3.0(mg/l)のレベルで変動している（図2-1-7）。図には T-N と共に無機態要素の濃度についても同時に示している。緑の線が NO₂-N 濃度で、青の線と緑の線との差分が NO₃-N 濃度で、赤の線と青の線との差分が NH₄-N で、赤の線は無機態窒素の合計を示している。

窒素濃度の変動に関してはかなり明確な特性が見られる。すなわち、河川からの流入により T-N が無機態窒素の上昇を伴って上昇し、その後植物性プランクトンによる摂取による無機態窒素の減少、植物性プランクトンの捕食、死滅などにより懸濁態の沈降として起こると考えられる T-N の減少が繰り返されている。無機態窒素の構成はそのほとんどが NO₃-N で占められており、NH₄-N と NO₂-N 濃度は低いレベルにある。

窒素濃度についてもリン同様、水位低下時に濃度上昇あるいは濃度低下の停止が見られる。この際の特徴的なのは、無機態窒素のうちアンモニア態窒素 (NH₄-N) の割合が高く、窒素濃度の上昇が底泥からのアンモニア態窒素 (NH₄-N) の溶出による影響を受けたものであることが示される。

窒素についても、表層と底層との間の濃度差はほとんどなく、鉛直方向の成層は見られない。

2. 1. 7 クロロフィル- a

クロロフィル- a 濃度は、高い N, P 濃度を反映して高水準で推移している。値は年間を通して 50～200(μg/l)程度である。図2-1-8に示されるように、クロロフィル- a 濃度の上昇は河川水の流入に伴う場合（緑印）と、水位が低下したときの栄養塩濃度の上昇に伴う場合（赤印）に分けられる。

河川水流入に伴うピークは、河川水により供給された栄養塩を植物性プランクトンが利用し増殖することで起こり、その後1ヶ月程度で流入前のレベルにまで減少するケースが多い。これは、植物性プランクトンが無機態の栄養塩を利用しつくした後、死滅や捕食により沈降する量が底泥から回帰する栄養塩を用いて増殖する植物性プランクトン量の増加を上回るために、ピーク形成後は減少に移行するものと考えられる。

夏期制限水位への移行のための水位低下に伴うクロロフィル- a のピークは8月に見ら

れることが多い。夏期制限水位時のクロロフィルー a のピークは底泥からの栄養塩回帰量に規定されていると考えられるため、8月までは栄養塩回帰量が多いが、9月以降は減少し（特にリン）、このような結果となっていると思われる。

2. 1. 8 考察

定期水質調査結果の検討から、渡良瀬貯水池の水質変化についての概略が示された。本貯水池の大きな特徴は、水深の浅さに起因する混合型の貯水池であり、水温成層は4月から6月中旬にかけての満水位の時期に緩いものが形成されるだけである。

通常の貯水池では成層が強く形成される夏期に、水位が低下することで混合が進むという本貯水池の水温構造により、富栄養化が進んでいるにも関わらず、夏期の底層における溶存酸素の欠乏が顕著に見られない。

一般的には夏期の底層における貧酸素水塊の発達が生じた底泥からの栄養塩の溶出を促進するとされているが、本貯水池においては、平成8年（1996年）から平成11年（1999年）の間で最も底層での溶存酸素が低下した平成10年（1998年）の5月においては、窒素、リン共に濃度上昇は見られなかった（図2-1-4、2-1-6、2-1-7）。むしろ底泥からの栄養塩回帰による貯水池水の栄養塩濃度上昇は夏期の水位低下時に顕著に見られ、底層の溶存酸素が欠乏していなくても水位低下時に底泥からの栄養塩回帰が活発に起こっていると考えられる。この水位低下時の底泥からの栄養塩回帰に伴い、クロロフィルー a 濃度の上昇がおこることが多い（図2-1-8）ことから、本貯水池の植物性プランクトン増殖への底泥の寄与は、底層の溶存酸素濃度低下時にはなく水位低下時に大きいことが分かる。

クロロフィルー a 濃度の顕著な上昇により示される植物性プランクトンの大量増殖（ブルーム）は、河川水の流入があった後と水位低下時に起こることが示された。ただし、水位低下時については、水位が極端に浅くなると様相が異なる。例えば、平成9年（1997年）3月には水位が低下した。このとき、クロロフィルー a は水位低下に伴い一旦 200 $\mu\text{g/l}$ 程度のピークを示した後、水位はさらに極端に低下し（水深 1m 程度）底泥が激しく巻き上げられ、このため全リン濃度は 0.3mg/l に達したが、クロロフィルー a 濃度は約 50 $\mu\text{g/l}$ にまで低下した（図2-1-6、2-1-8）。この例が示すように、水深が 1m 程度と極端に浅くなると、底泥の巻き上げによる栄養塩濃度の上昇（特にリン）が起こるものの、濁度の値も上昇していることから（図2-1-2）、光制限となり、植物性プランクトンの増殖は抑制されるものと考えられる。

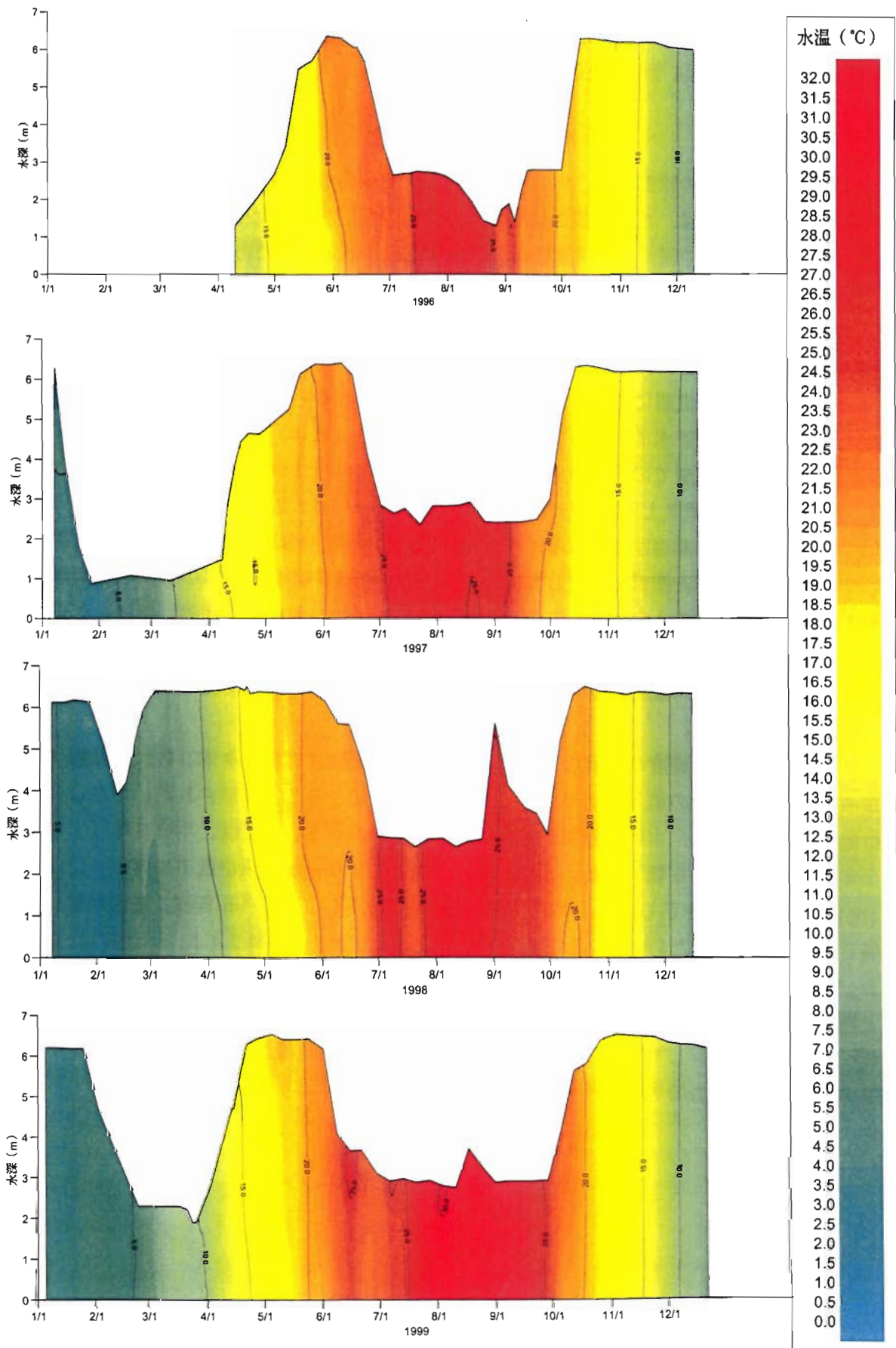


図 2 - 1 - 1 (1) 南ブロック水温鉛直分布 ('96~'99)

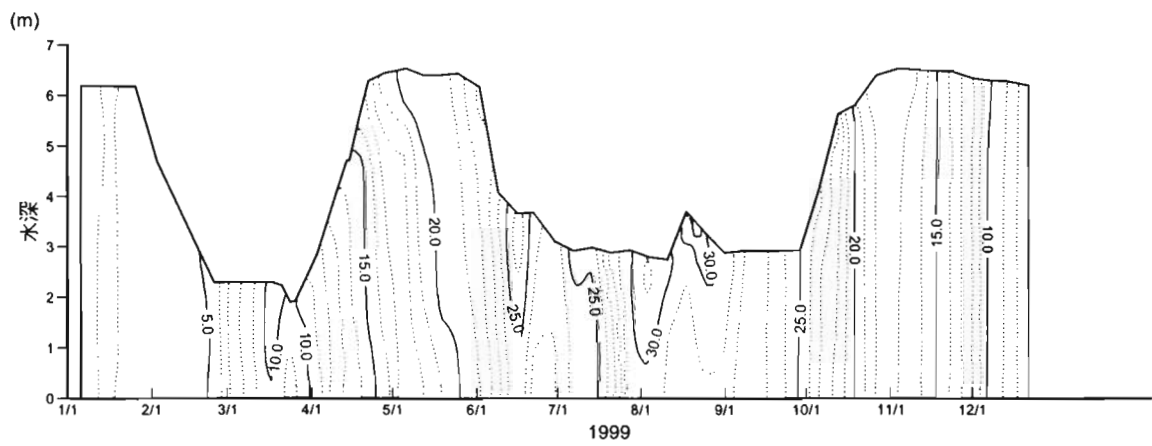
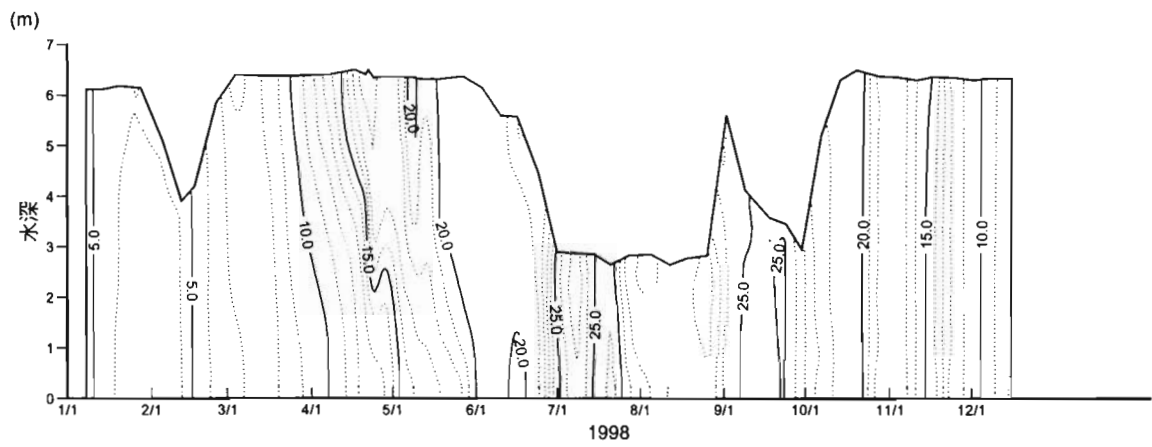
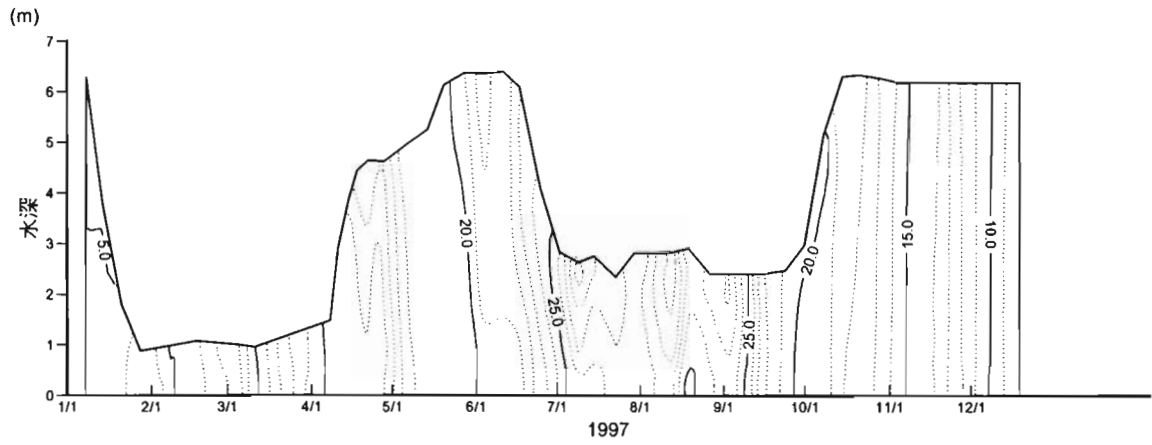
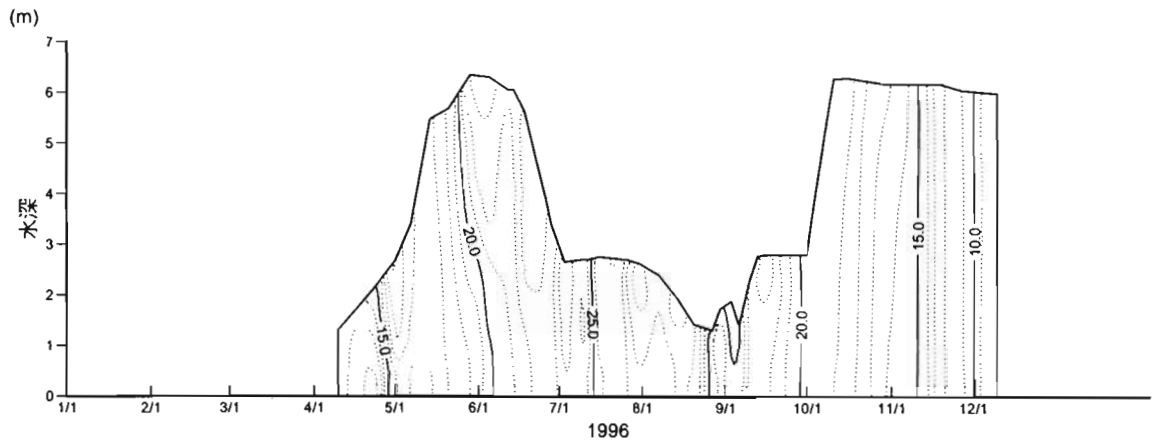


図 2 - 1 - 1 (2) 北ブロック水温鉛直分布 ('96~'99)

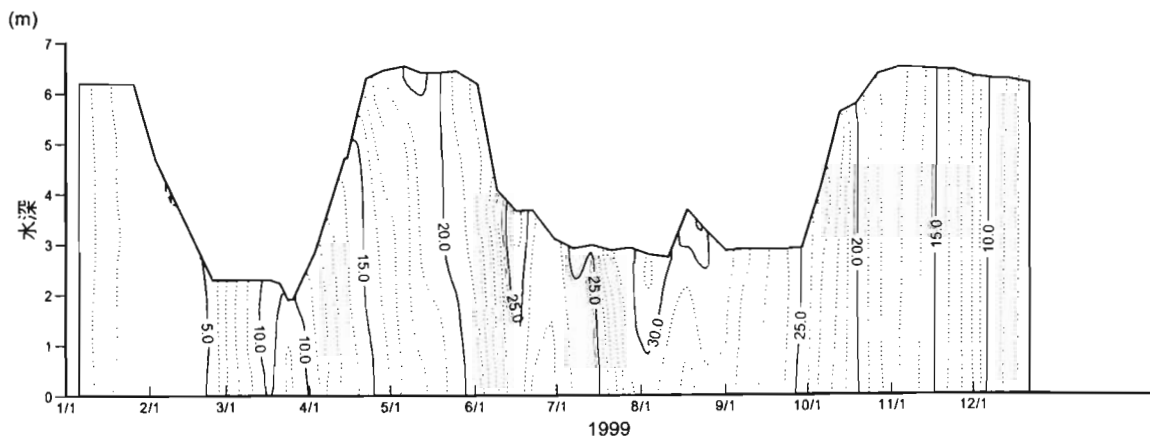
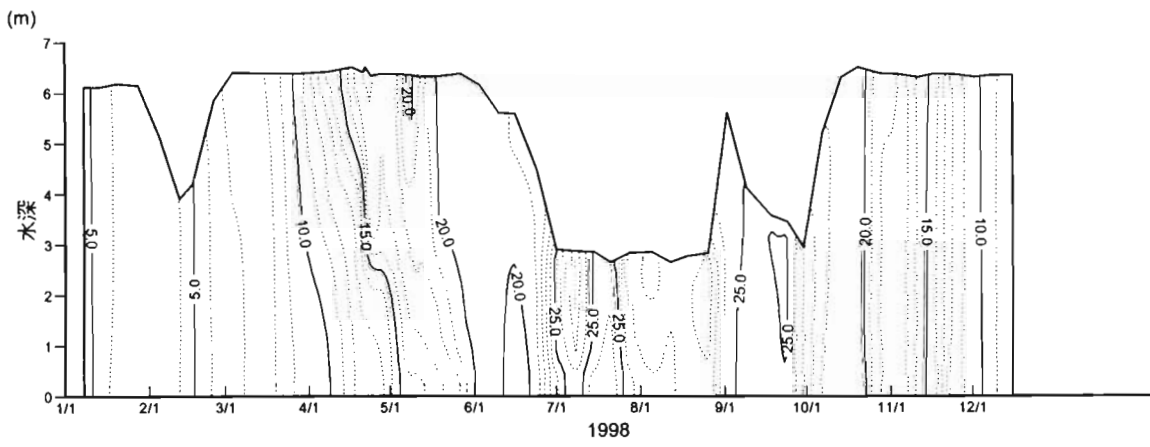
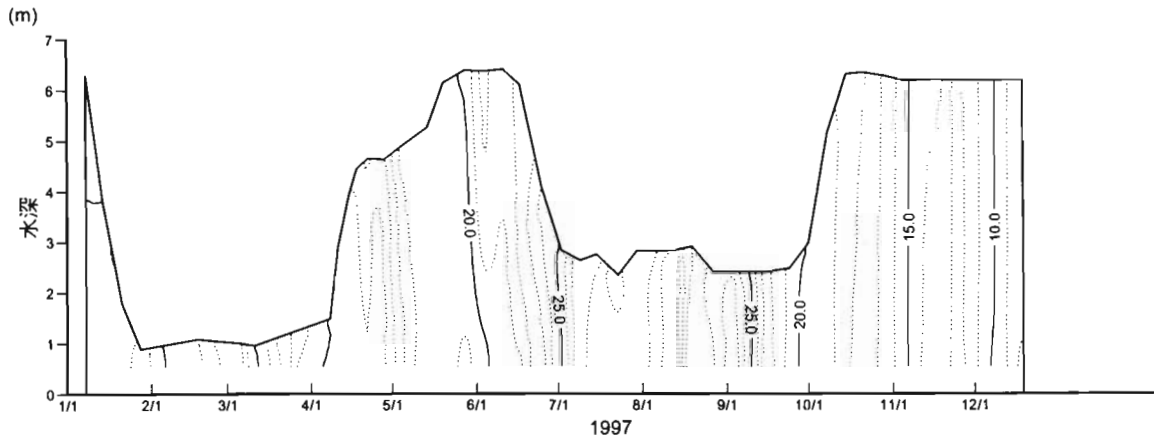
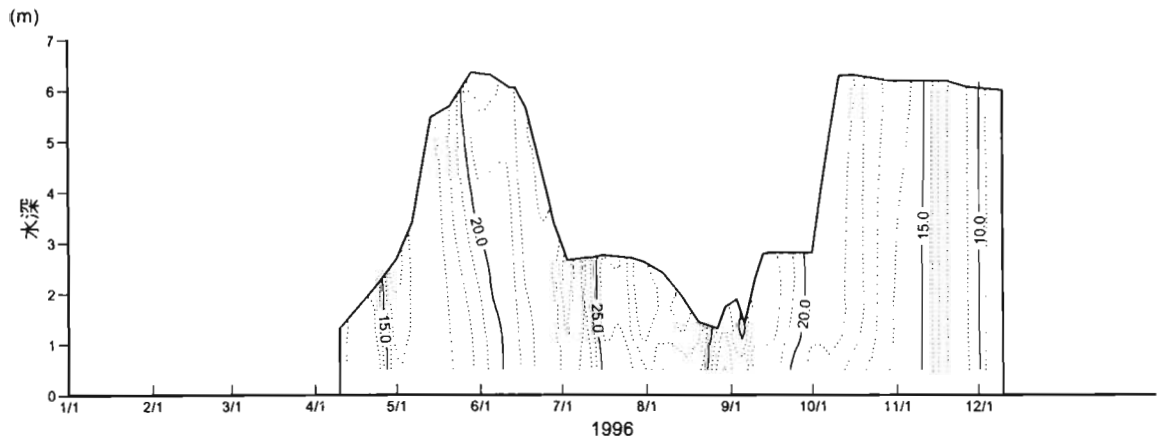


図 2 - 1 - 1 (3) 谷中ブロック水温鉛直分布 ('96~'99)

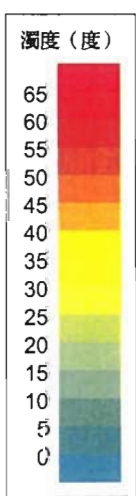
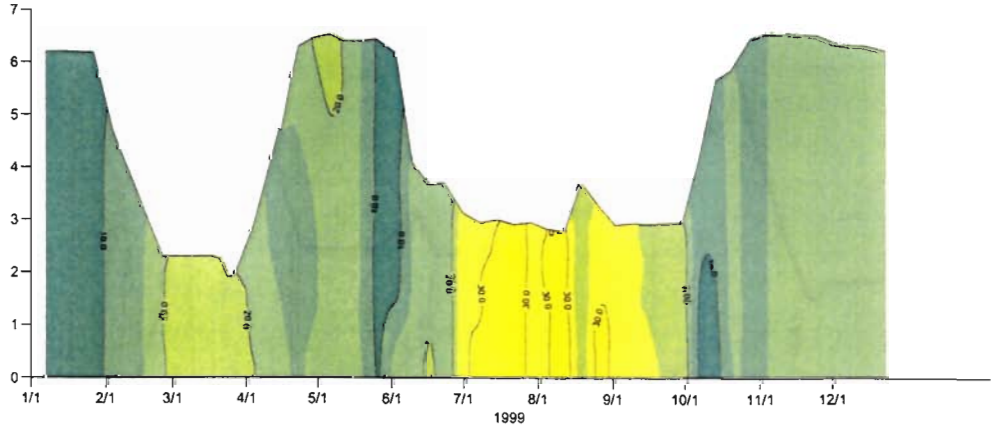
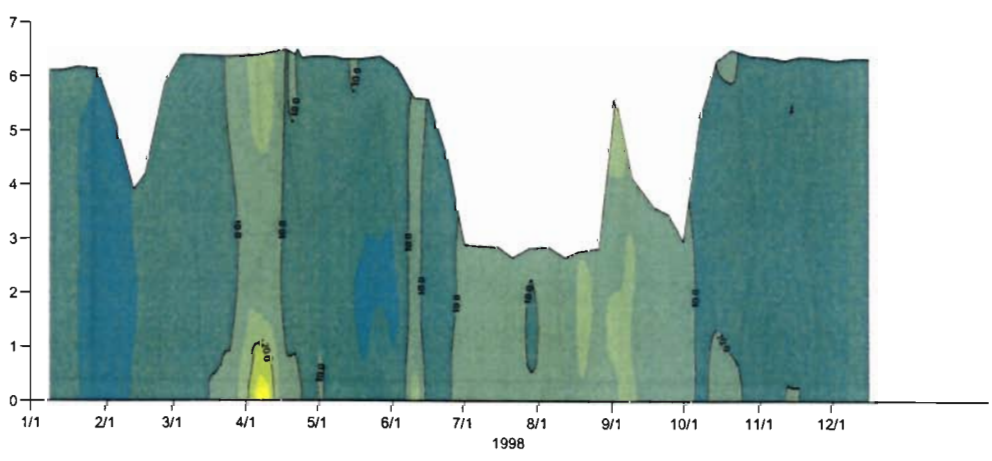
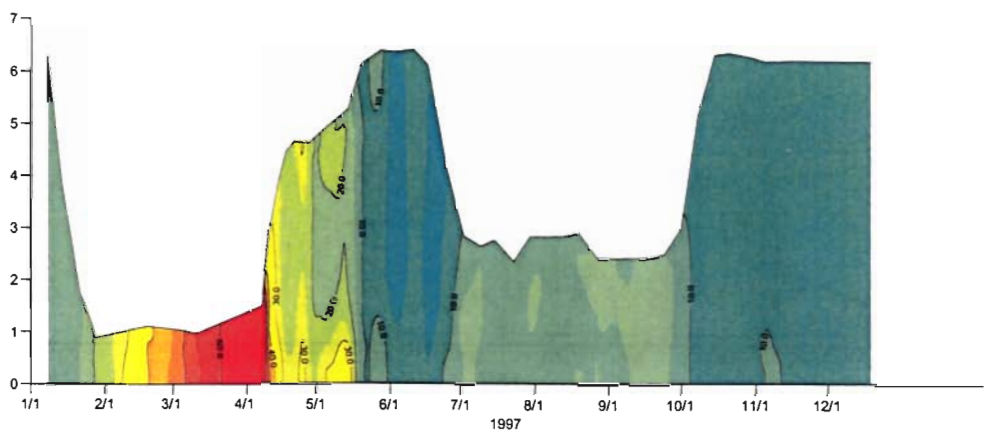
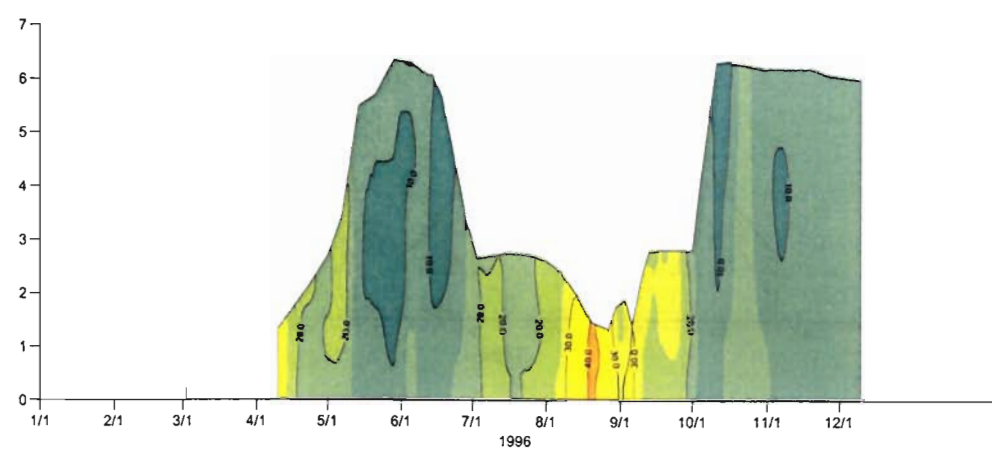


図 2 - 1 - 2 (1) 南ブロック濁度鉛直分布 ('96~'99)

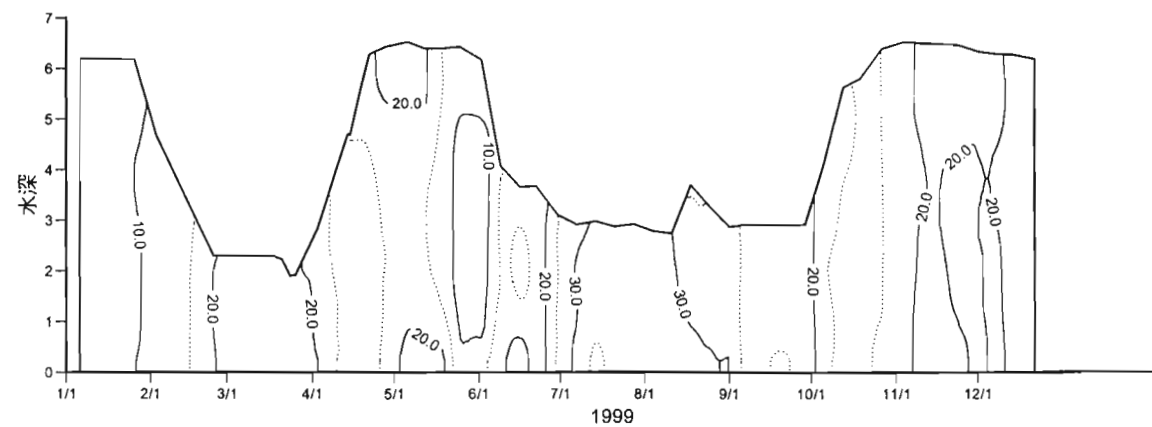
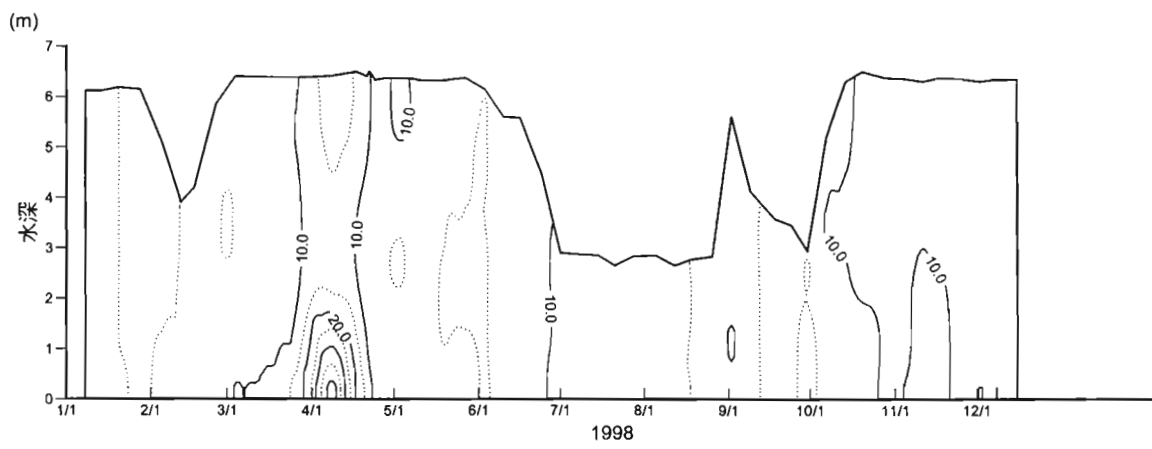
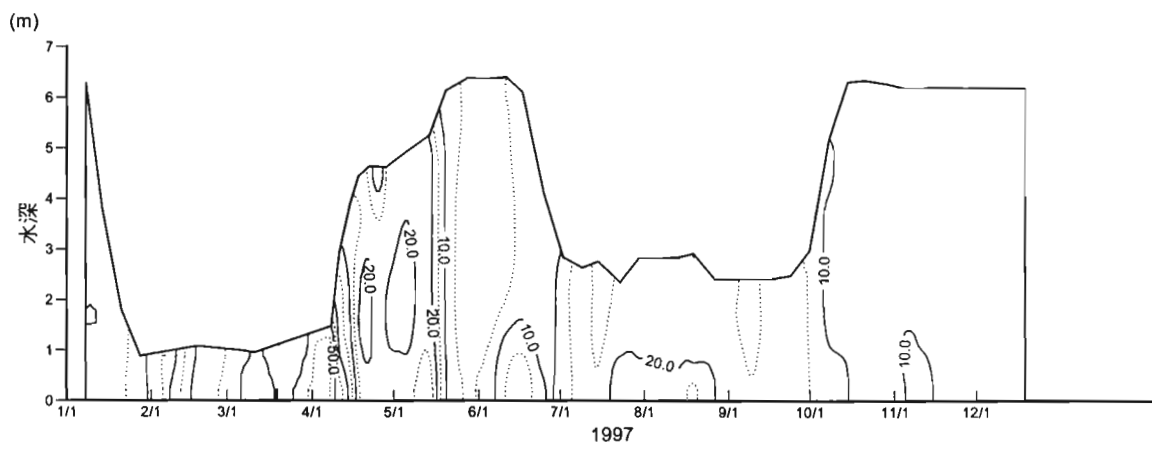
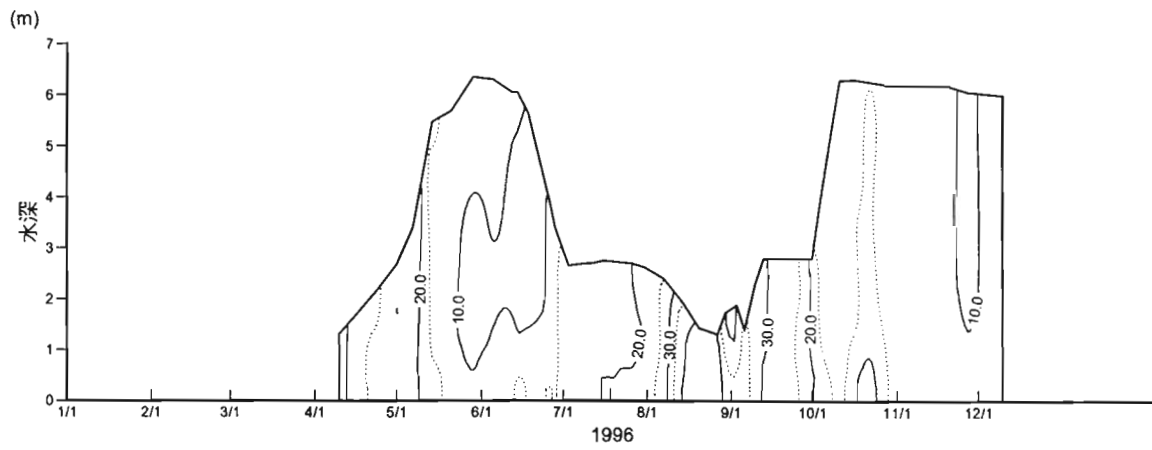


図 2 - 1 - 2 (2) 北ブロック濁度鉛直分布 ('96~'99)

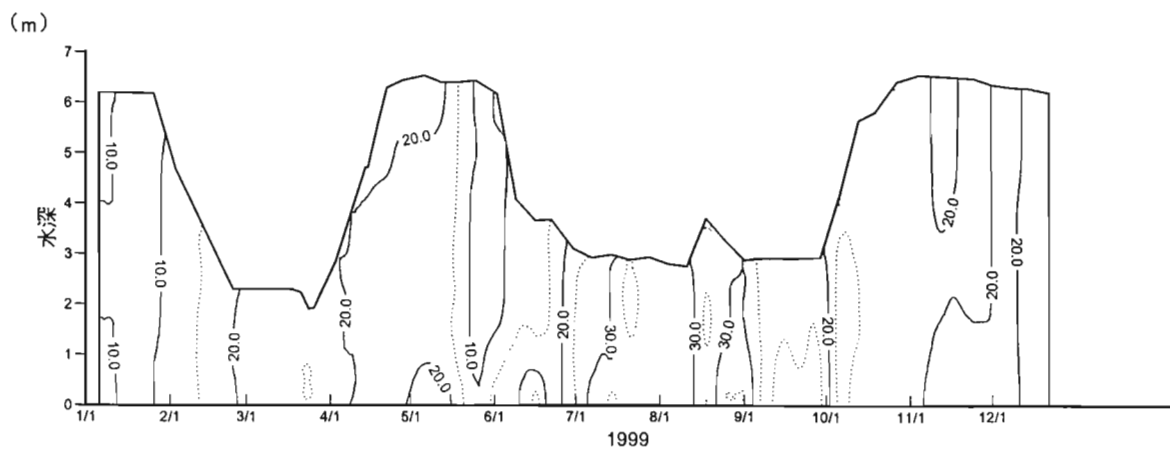
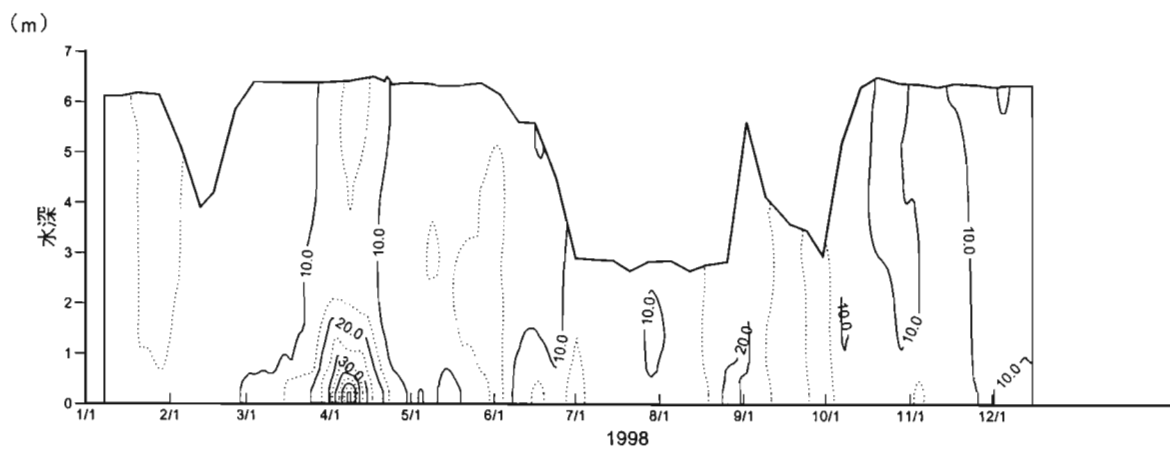
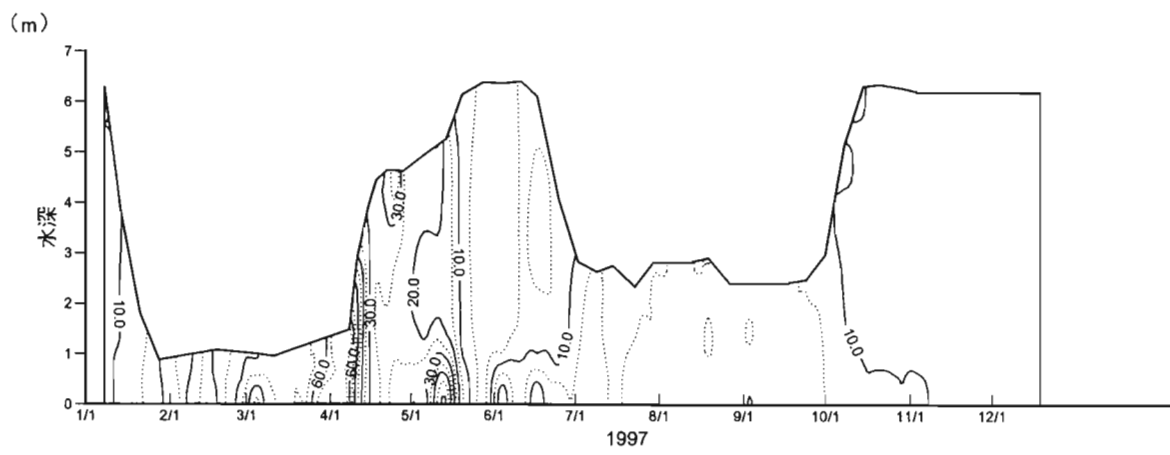
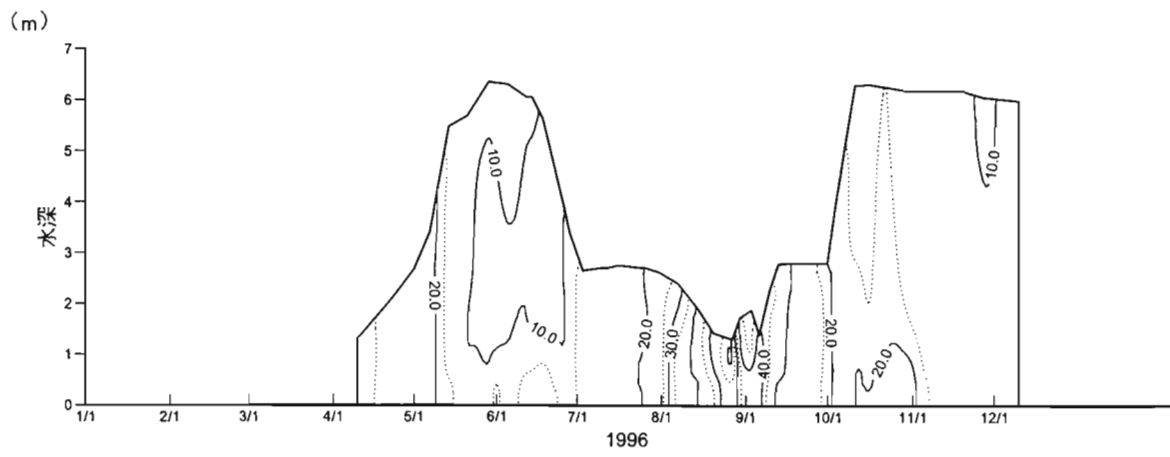


図 2 - 1 - 2 (3) 谷中ブロック濁度鉛直分布 ('96~'99)

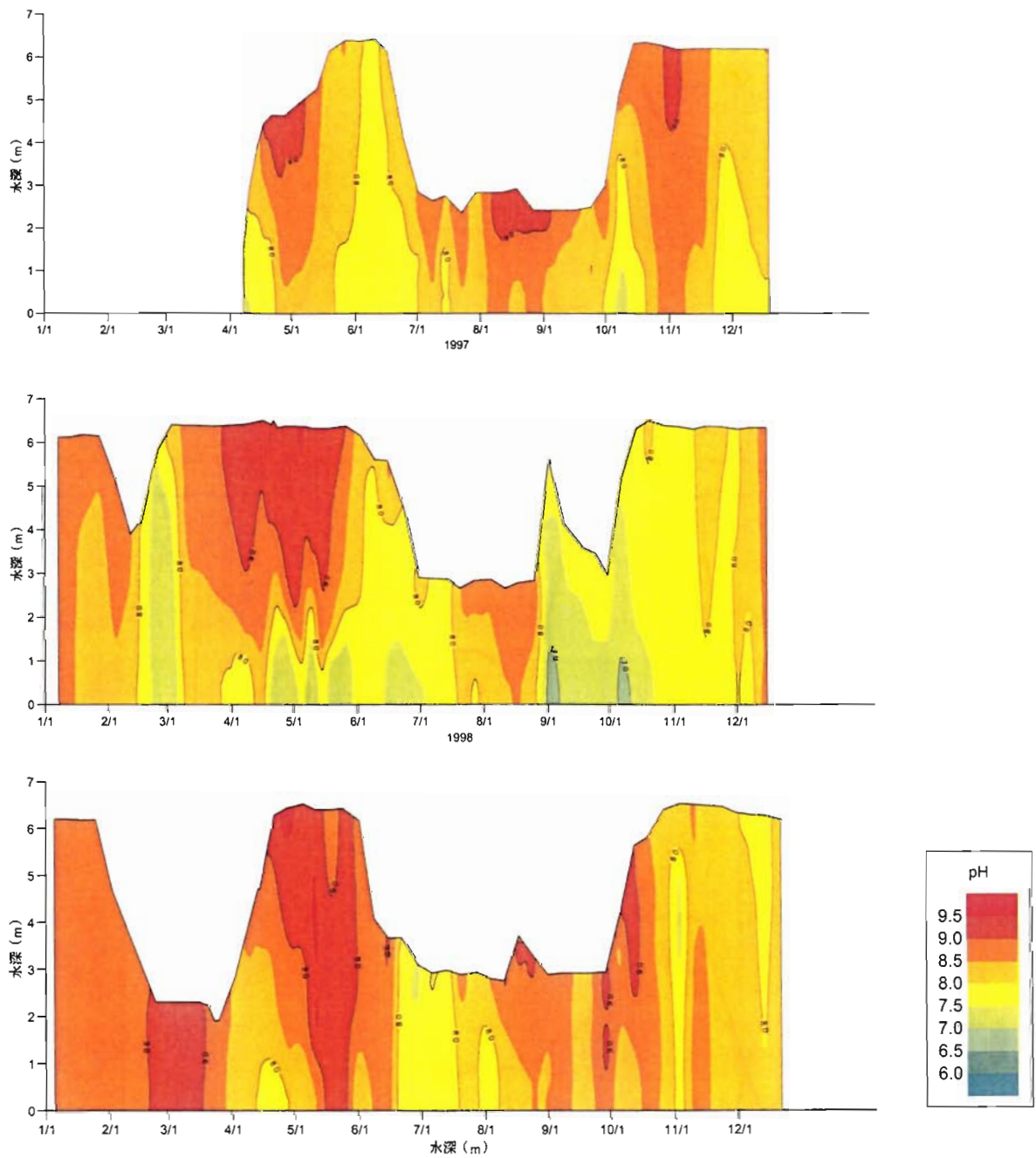


図 2 - 1 - 3 (1) 南ブロックpH鉛直分布 ('97~'99)

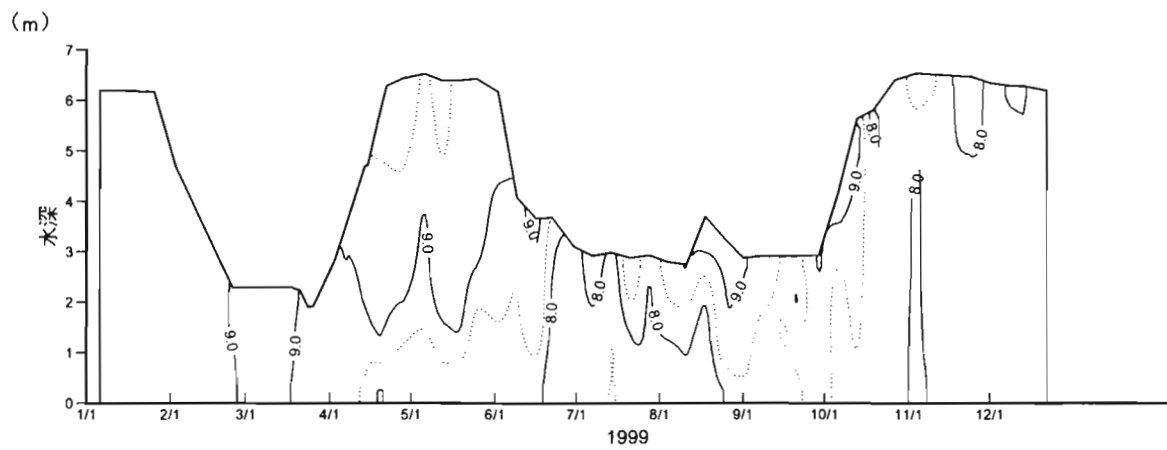
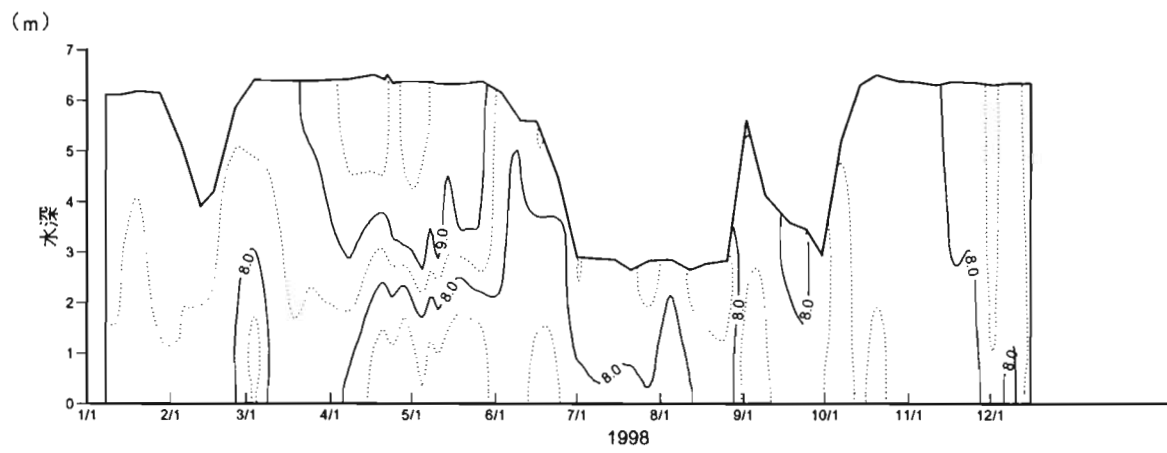
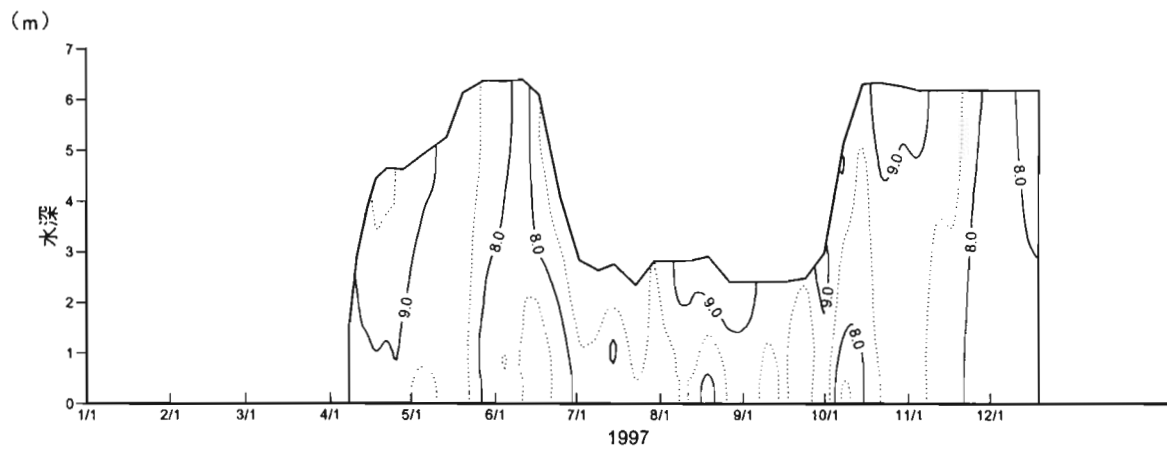


図 2 - 1 - 3 (2) 北ブロックpH鉛直分布 ('96~'99)

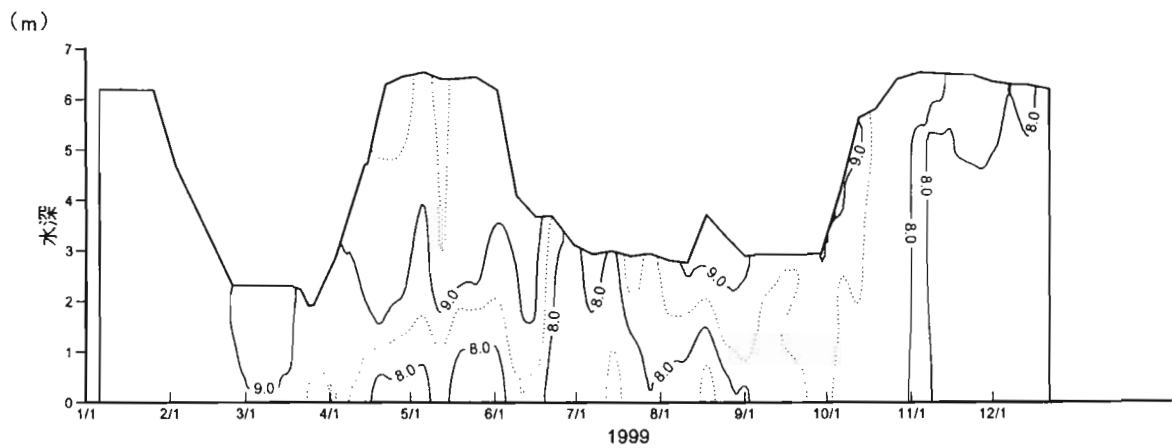
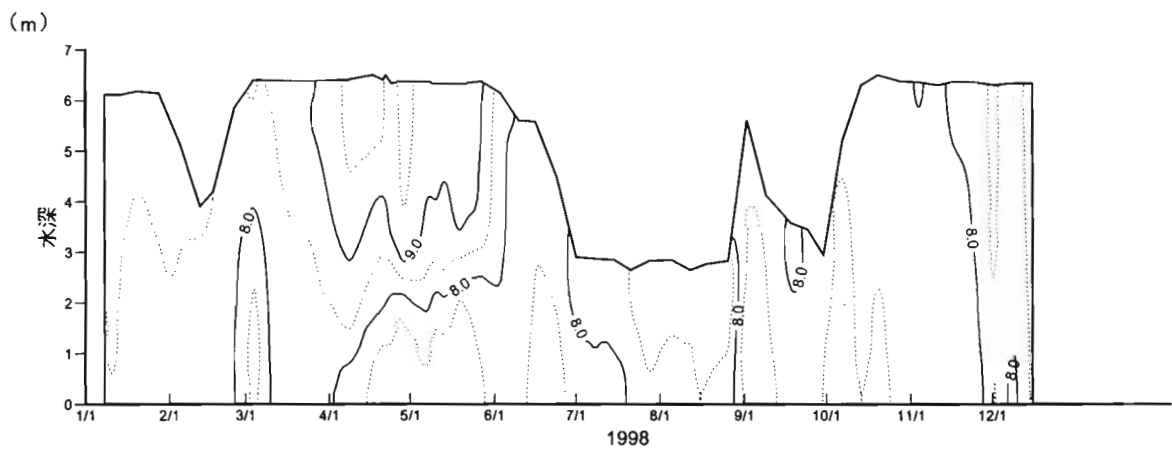
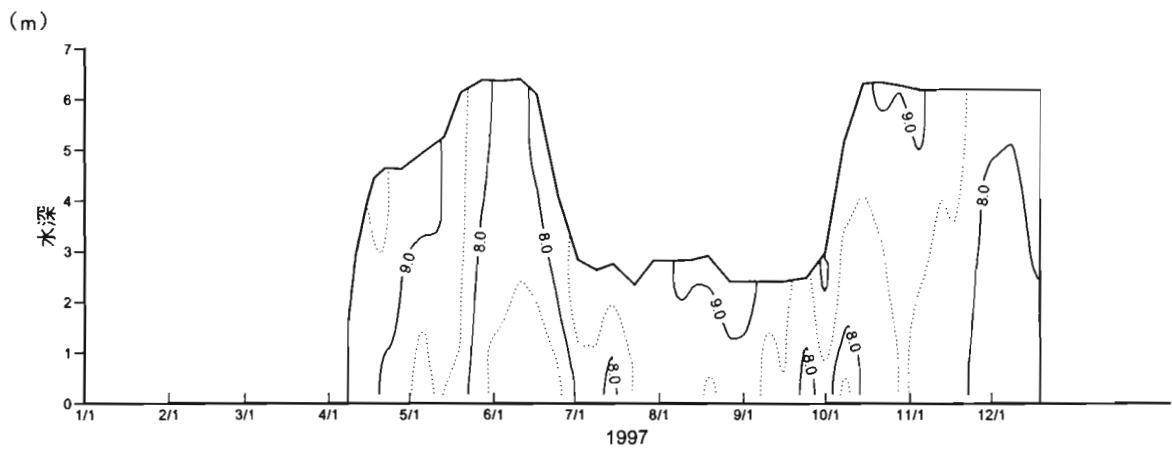


図 2 - 1 - 3 (3) 谷中ブロックpH鉛直分布 ('97~'99)

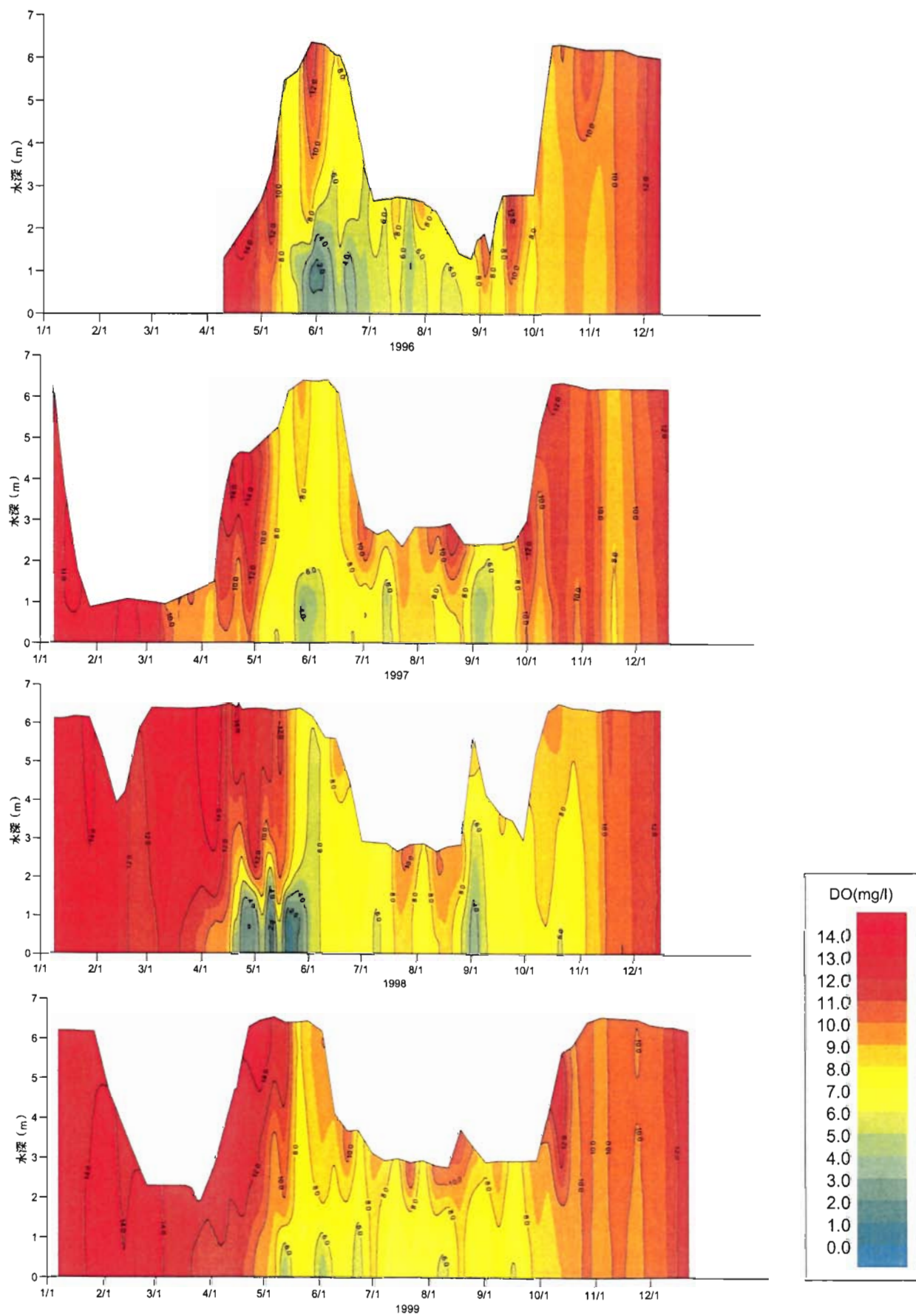


図 2 - 1 - 4 (1) 南ブロックDO鉛直分布 ('96~'99)

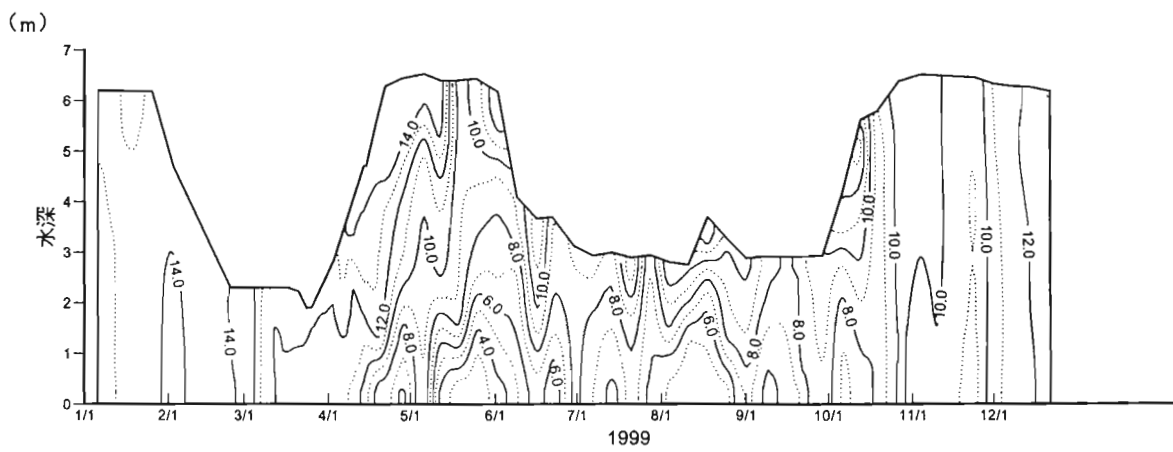
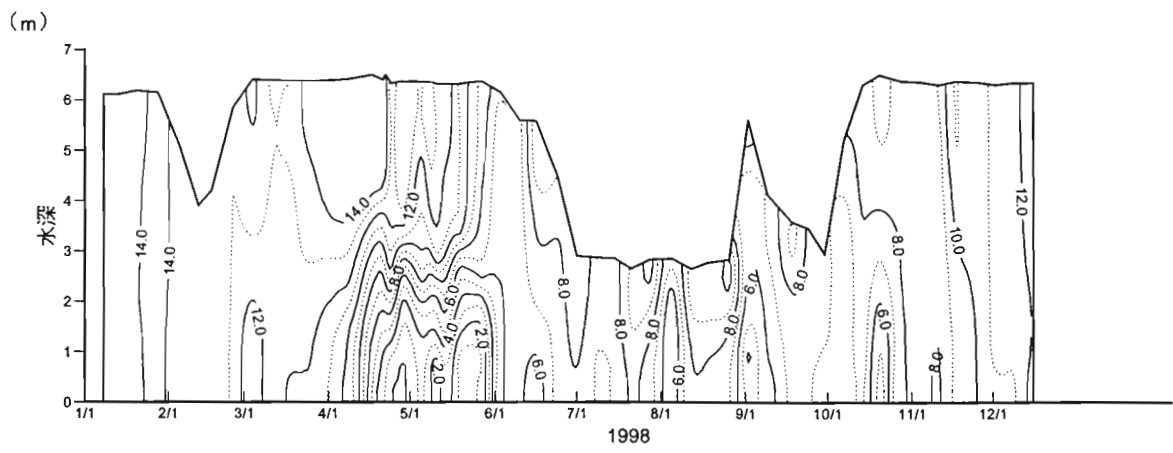
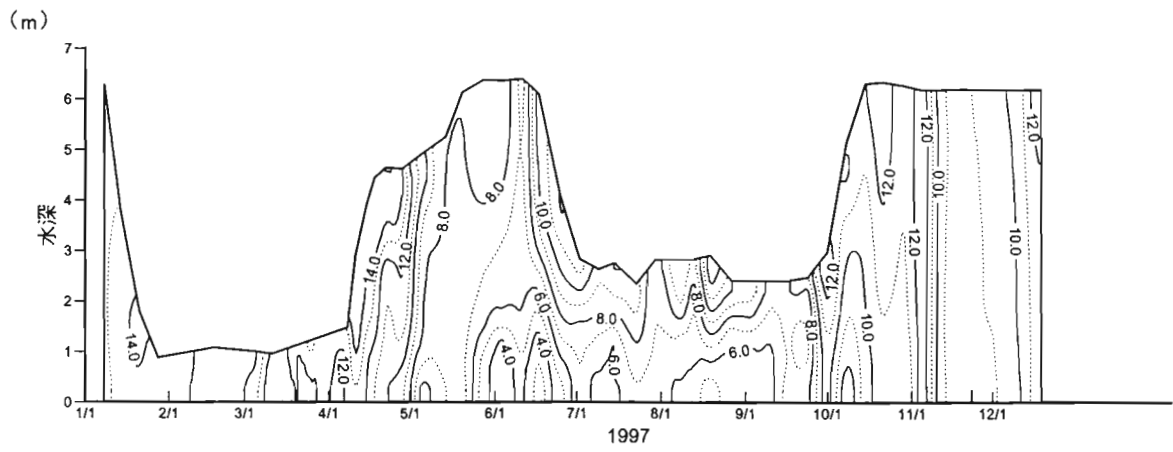
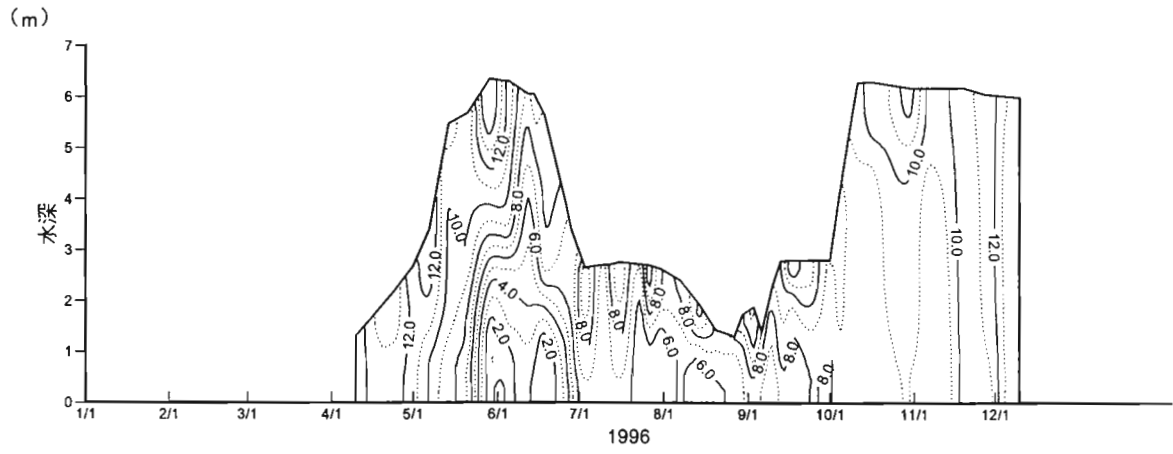


図 2 - 1 - 4 (2) 北ブロックDO鉛直分布 ('96~'99)

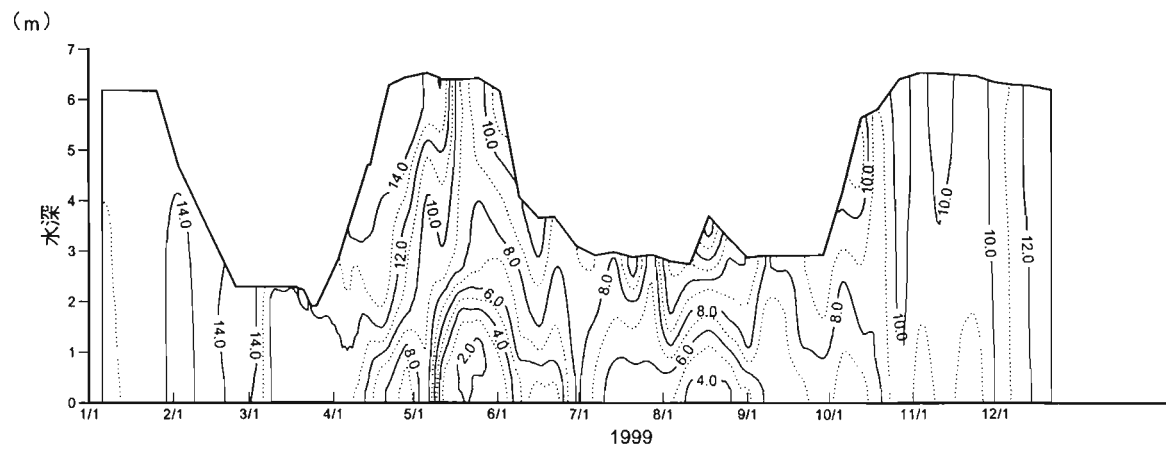
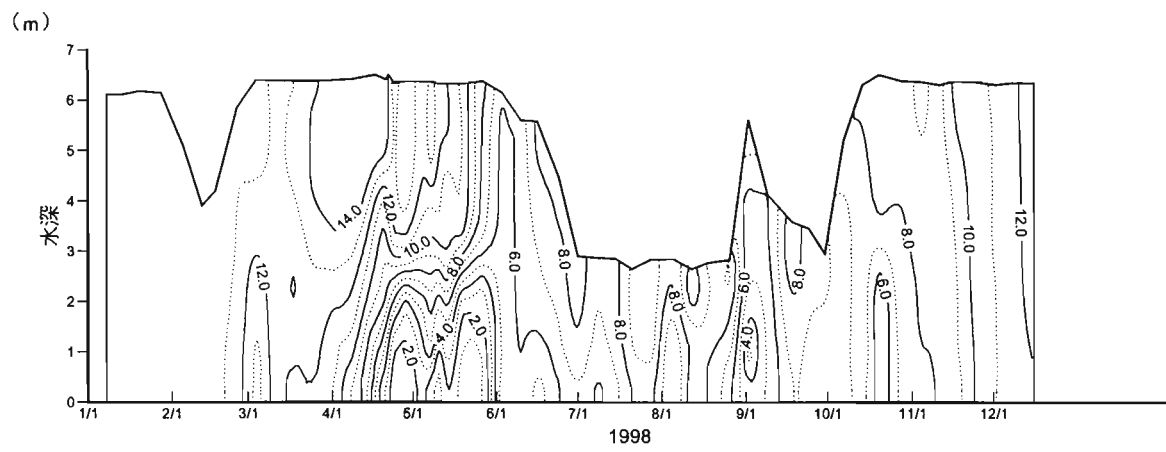
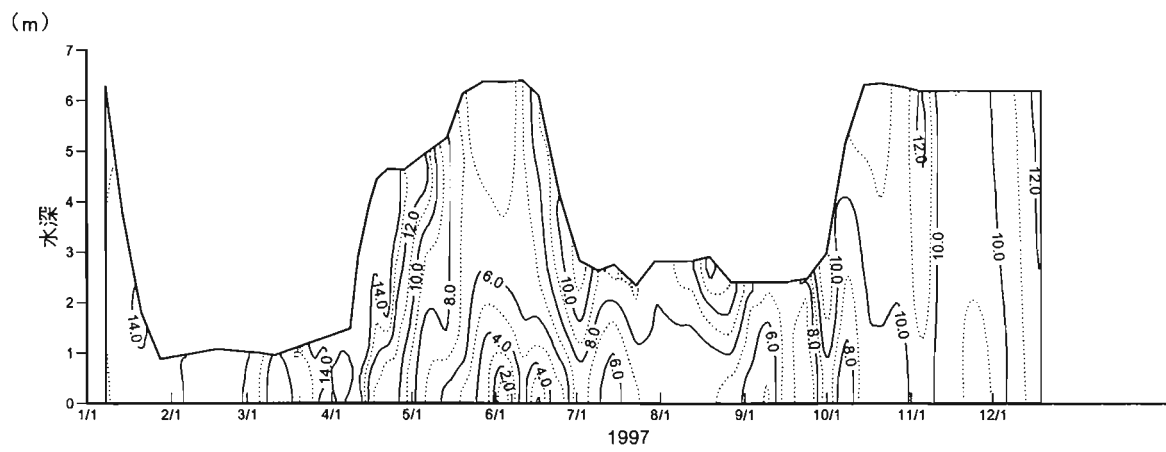
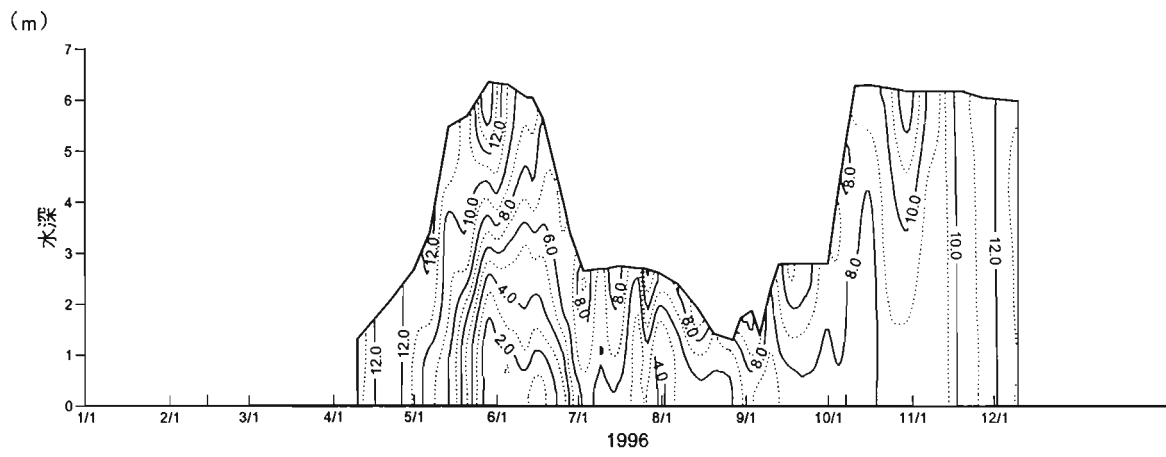


図 2 - 1 - 4 (3) 谷中ブロックDO鉛直分布 ('96~'99)

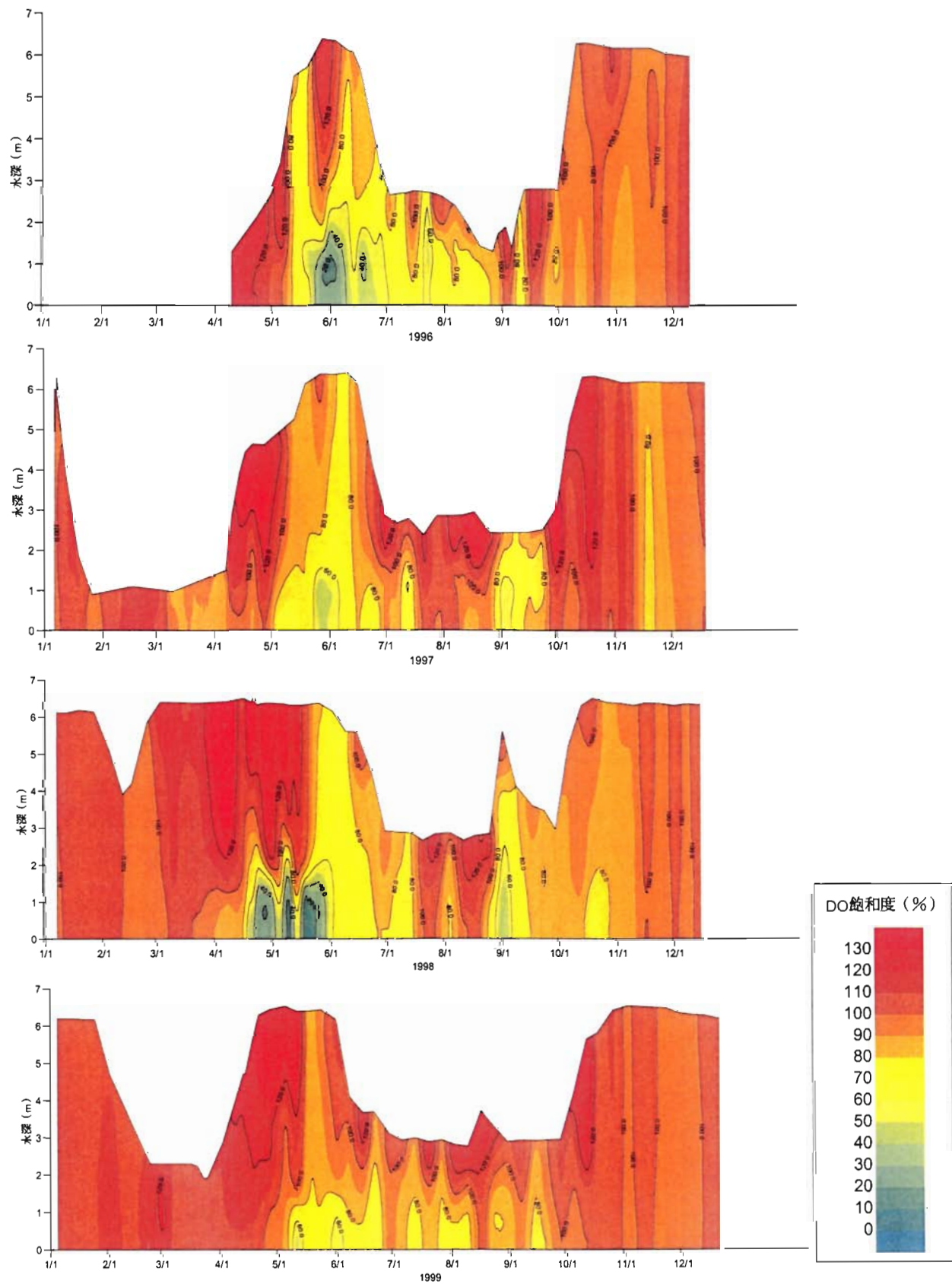


図 2 - 1 - 5 (1) 南ブロックDO飽和度鉛直分布 ('96~'99)

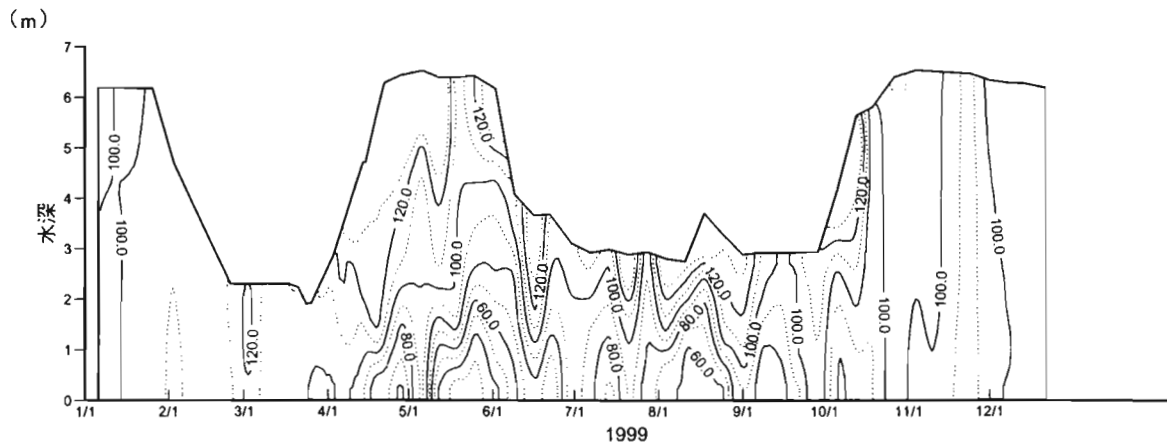
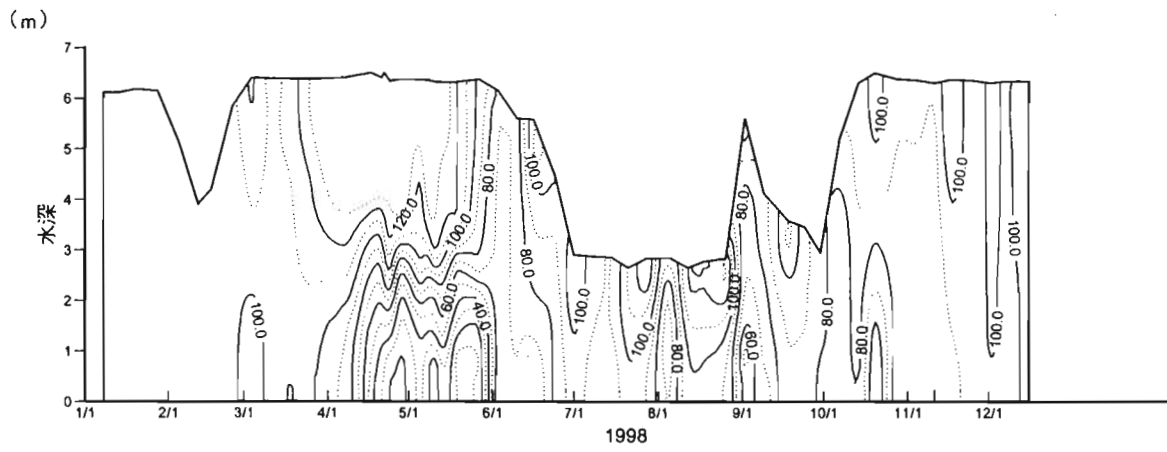
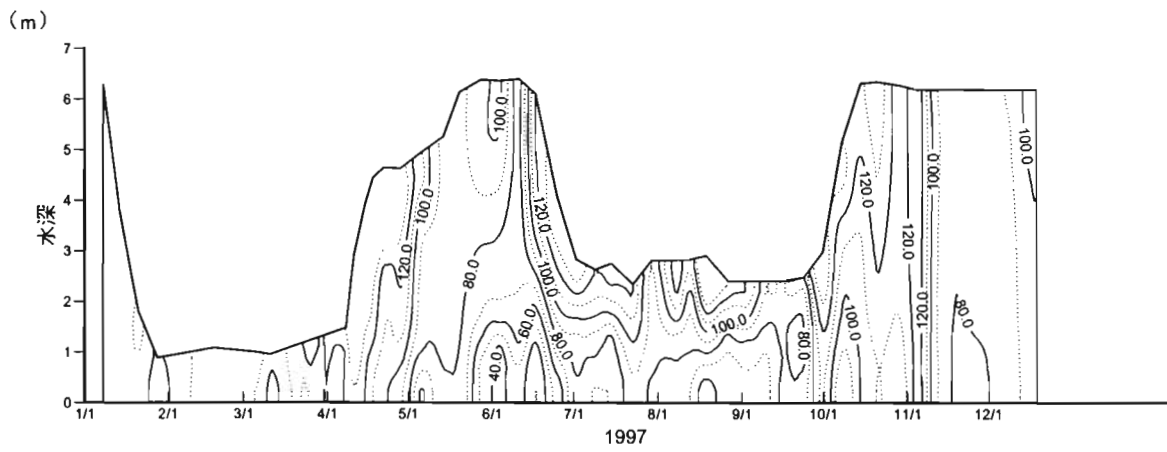
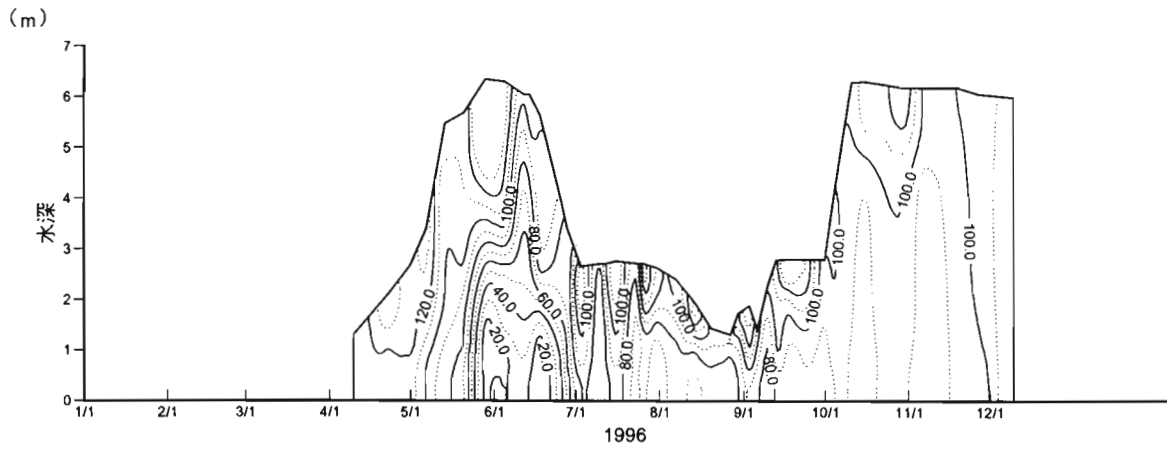


図 2 - 1 - 5 (2) 北ブロックDO飽和度鉛直分布 ('96~'99)

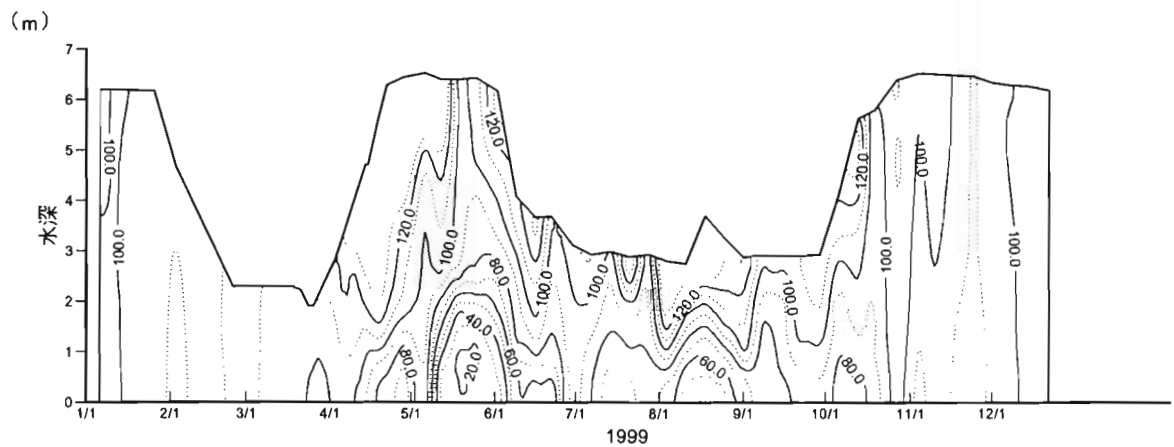
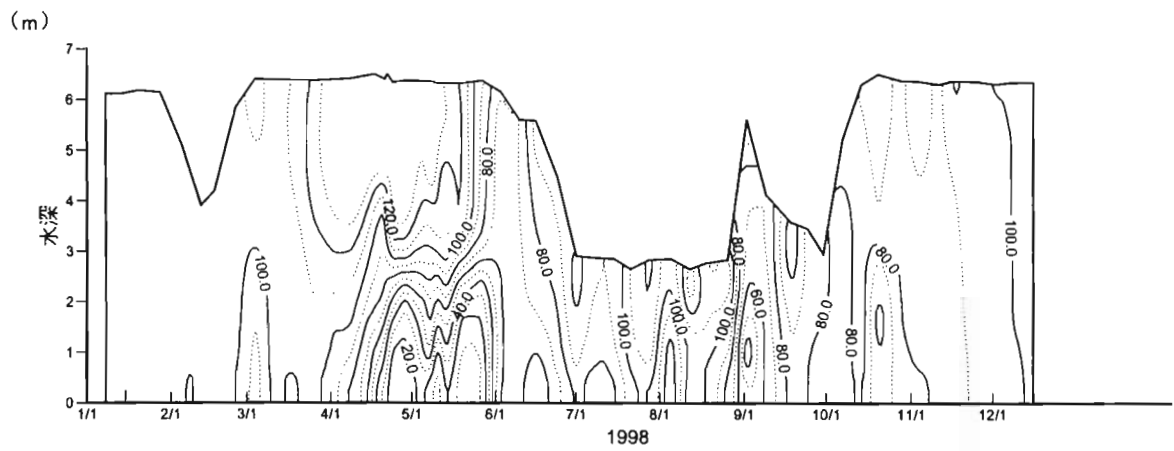
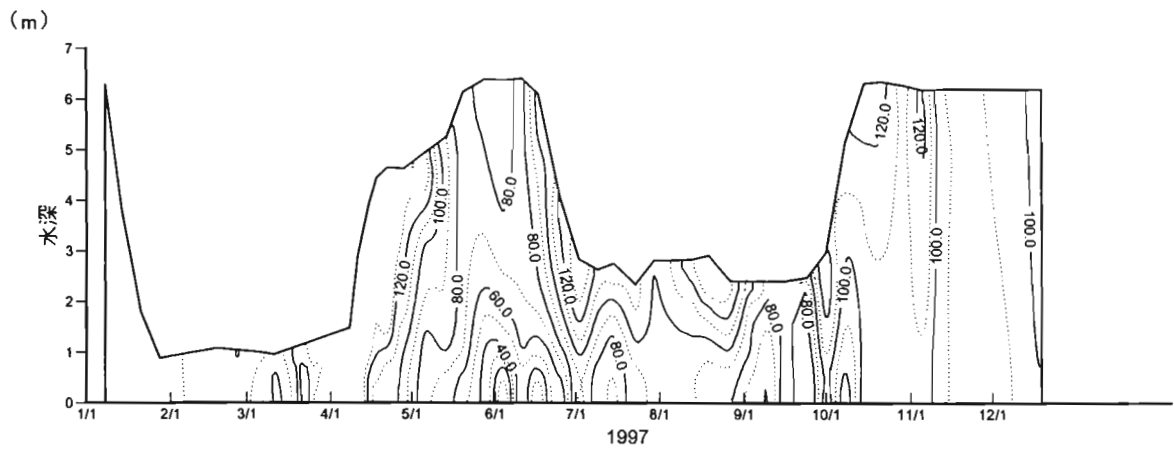
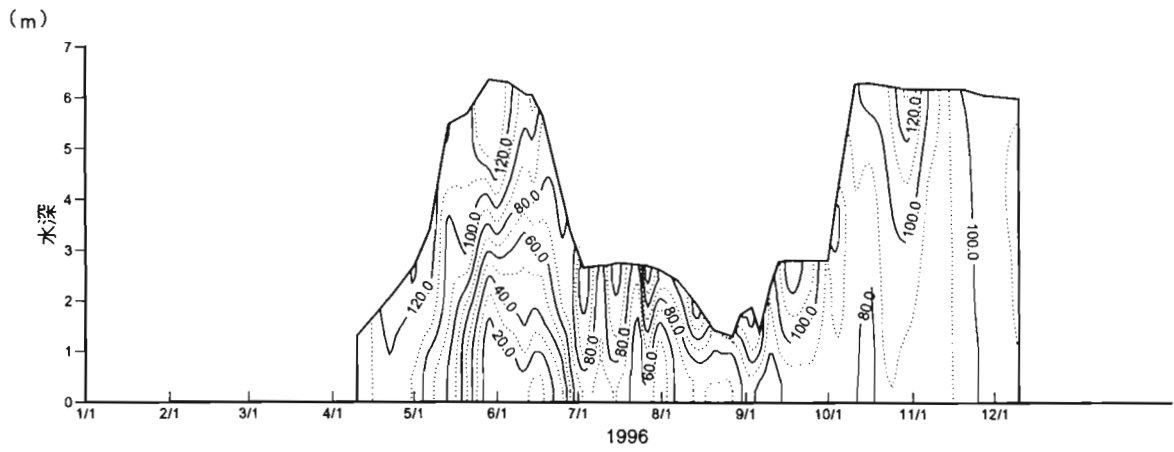


図 2 - 1 - 5 (3) 谷中ブロックDO飽和度鉛直分布 ('96~'99)

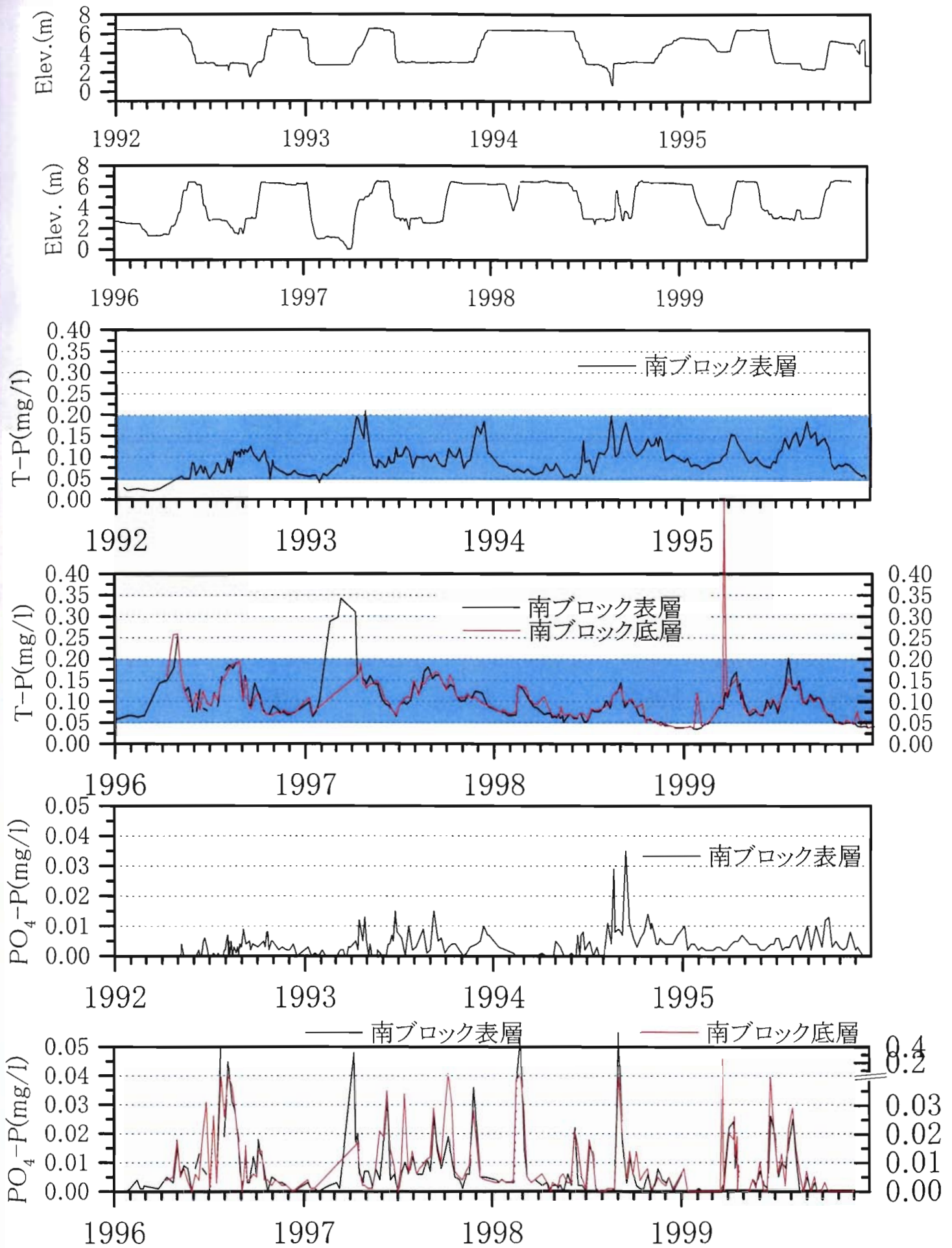


図 2-1-6 南ブロックにおける水位、T-P及びPO₄-Pの年間変動特性

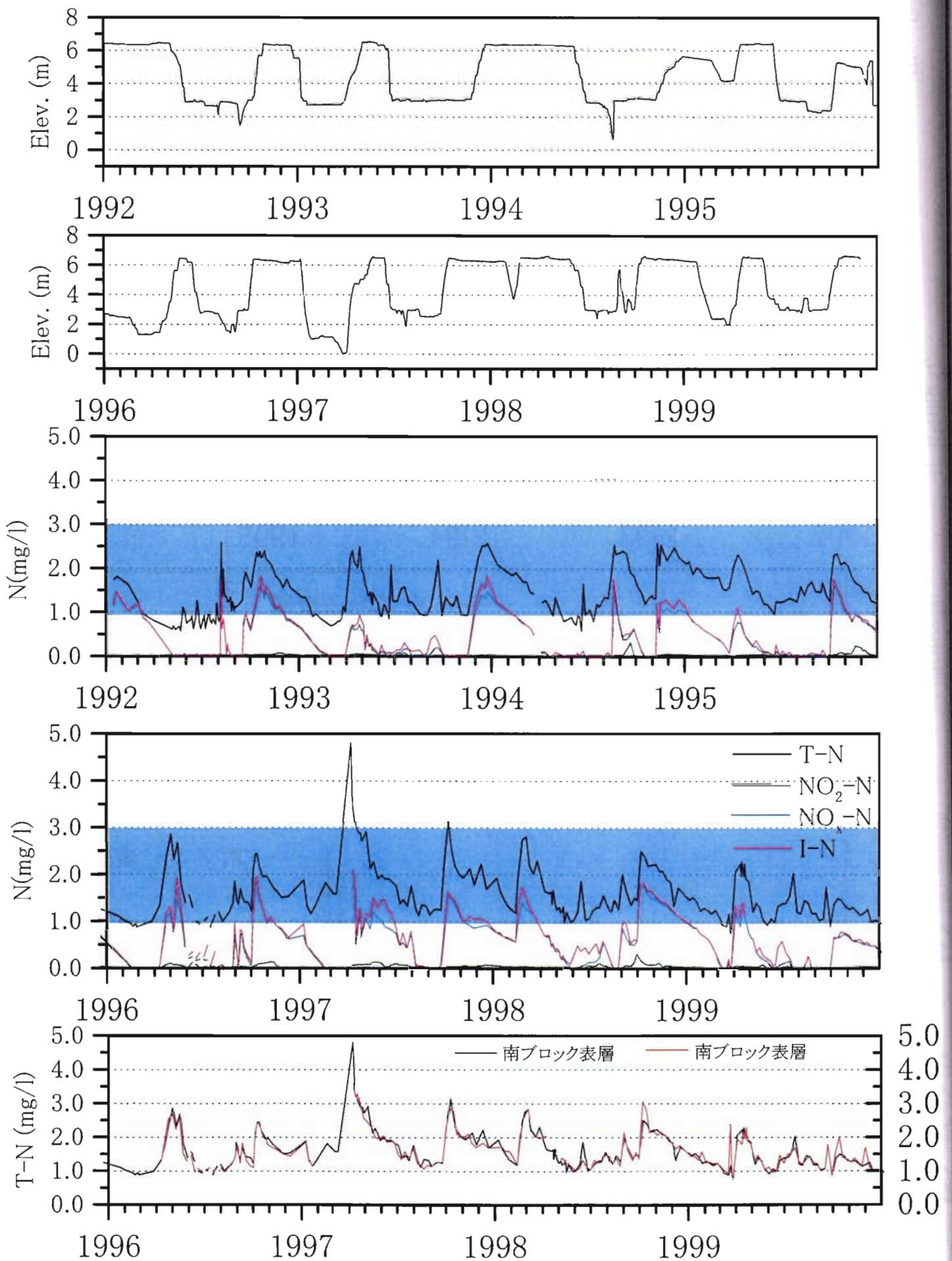


図 2-1-7 南ブロックにおける水位、T-N及び無機窒素の年間変動特性

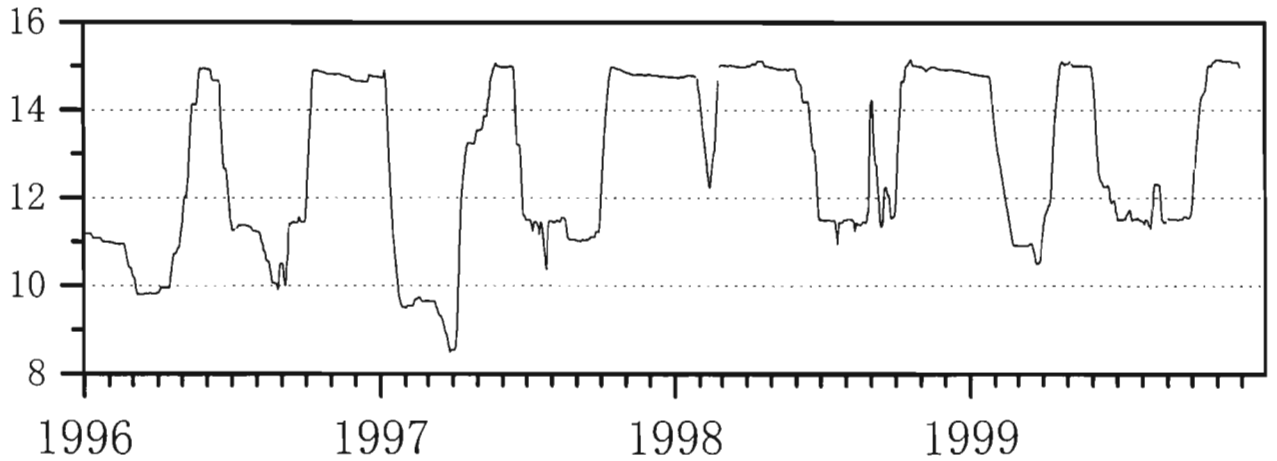
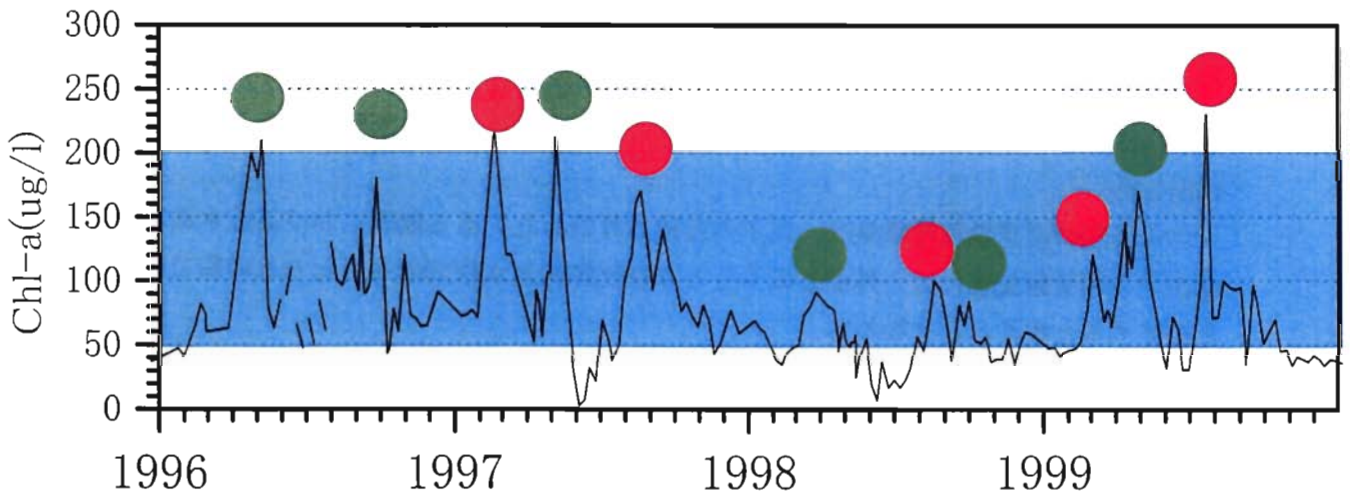
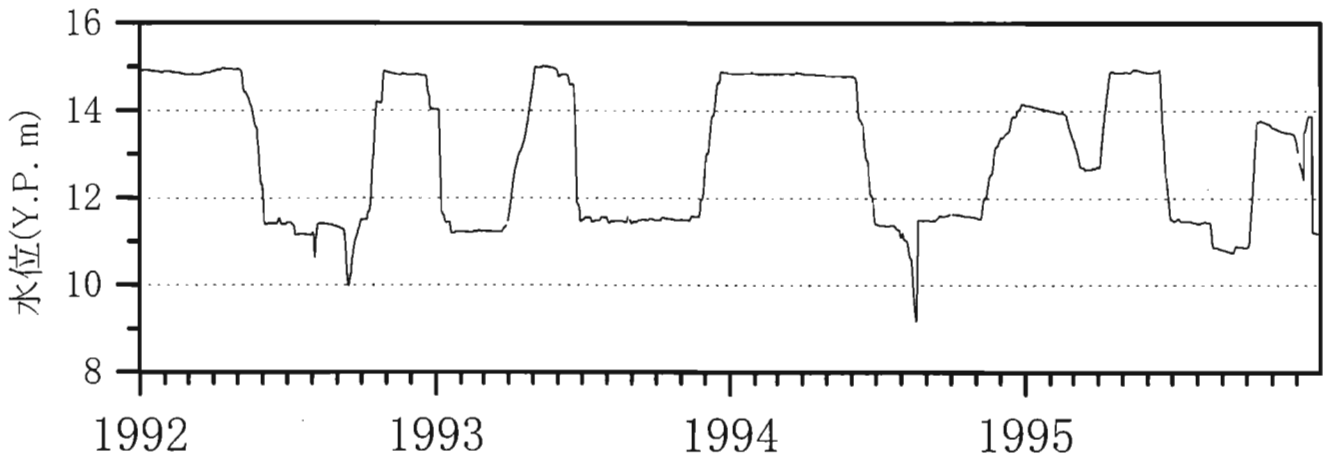
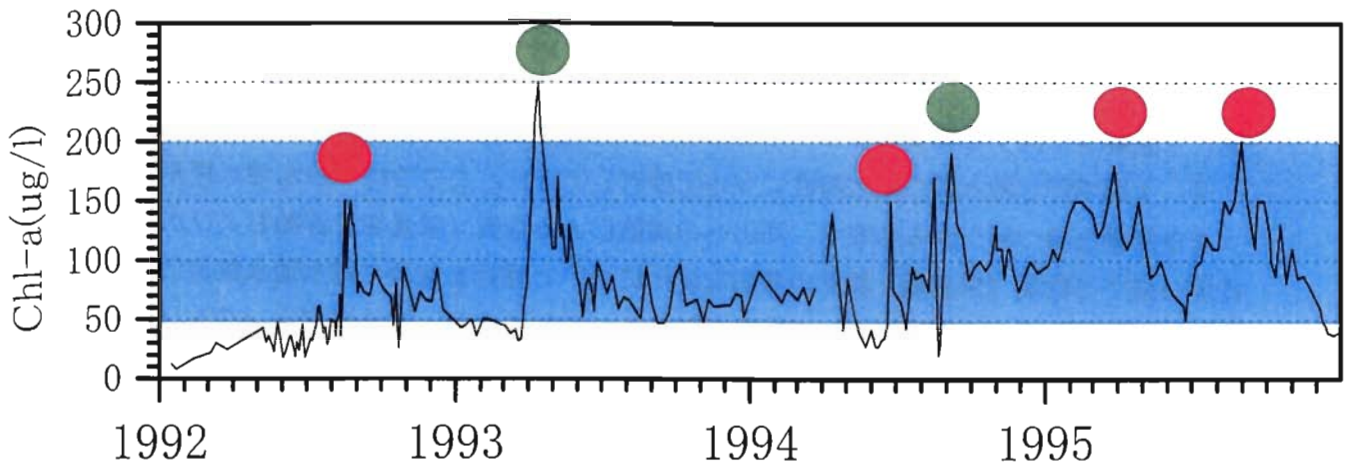


図 2-1-8 クロロフィル-a濃度と水位変化との比較

2. 2 栄養塩に関する物質収支

2. 1節で貯水池水質の変化特性について検討してきた。ここでは、貯水池水質変化に大きな影響を持つ河川からの取水、河川への補給による物質（栄養塩）移動および水柱と底泥の間での物質（栄養塩）移動の量的な変化について解析を進めて貯水池水質変化に与える上記物質移動の重要性について検討を加える。これにより、植物性プランクトン量を規定すると考えられる水中に存在する栄養塩濃度を決定する年間を通しての種々のフラックス量が明らかになり、貯水池水質変化に対する河川から（河川へ）の栄養塩負荷、底泥から（への）の栄養塩負荷が時期毎にどれほどの重要性を持つかということが明らかになる。

方法としては、定期水質調査結果及び貯水池管理日報を用いて、年間を通しての栄養塩の外部（河川）とのやりとり及び水柱と底泥間のやりとりとして求められる物質移動量を計算する。ここで解析対象とする諸量は、以下の通りである。

- ①貯水池内水量
- ②水門を通して貯水池に流入する全窒素および全リンの累積負荷量
- ③貯水池水柱に存在する全窒素・全リンの総量
- ④全窒素および全リンの推定累積沈降量

ここで、②の累積負荷量とは取水時に貯水池に流入する物質（平成4～8年は取水水量と下宮橋水質観測値の積、平成9年は取水水量と機場地点水質観測値の積として算出）を正とし、補給時に貯水池から放流される物質（補給水量と南ブロック水質観測値の積として算出）を負とした量の累計値で、各年の初期値を0として計算した。また、③の貯水池水柱に存在する総量は、各時点での貯水池内水量と南ブロック水質観測値との積として算出した。

さらに④の推定累積沈降量は、以下の方法で算出した。ある期間における貯水池水柱に存在する物質総量変化は、外部とのやりとり及び底泥と水柱間のやりとりとの和で表すことができる。すなわち、

$$S_2 = S_1 + S_{in} - S_{out} - S_f \quad (2.2.1)$$

ここで、 S_2 :ある期間の終了時点での水柱内総量、 S_1 :ある期間の開始時点での水柱内総量、 S_{in} :外部（河川）からの流入量、 S_{out} :外部（河川）への放流量、 S_f :底泥への移動量（沈降を正、回帰を負と考える）

大気とのやりとり、降雨による負荷はここでは考えていないため、式2.2.1で物質収支を求めることができる。また、この式を変形することである期間中の正味の沈降量を求めることができる（式2.2.2）。ここで、底泥とのやりとりについては、底泥への沈降を正、底泥からの回帰を負と考えているので、底泥からの回帰が沈降を上回る場合は負の沈降量として求めることができる。

$$S_f = S_1 - S_2 + S_{in} - S_{out} \quad (2.2.2)$$

このある期間内の正味の沈降量の累計を求めたものが推定累積沈降量になっている。以

下に、平成4年から9年の6年間のデータに関して全リン(T-P)、全窒素(T-N)について算定した結果を示す。

2. 2. 1 リン

図2-2-1に平成4年(1992年)から9年(1997年)に関して貯水量、T-Pの総量、累積負荷量、推定累積沈降量の経時変化を示す。全リン量は貯水池内の水量に強く関連しているが、0.8~3.8t程度が水柱内に存在していることがわかる。

平成5年(1993年)の4月から7月にかけての変化を見るとわかりやすいが、T-Pの負荷量特性について見るために、同程度の流入および放流量がある場合を比較すると(4月から5月にかけての流入と、6月中旬から下旬の放流量は、約15,000,000m³とほぼ同程度である)、貯水池に流入する負荷量が貯水池から放流される量に比べて遙かに多いことが分かる(貯水池へのT-P負荷は10t以上と推定されるのに対して、放流量は2t程度に過ぎない)。負荷量と貯水池水柱内の全量を比較すると、この4月から5月までの間に約2.5tの上昇しか見られないため、負荷量の推定値である10tのうちの7~8割程度は、比較的速やかに沈降していると考えられる。放流の際には、流入した負荷量の相当量がすでに沈降した後の貯水池水を放流していることから、同程度の水量を放流したとしても、放流されるT-P量は、流入したT-P負荷量に比べると少ないものとなっていることが分かる。

T-P濃度変化の特徴として、水位低下時の濃度上昇が挙げられる。平成4年(1992年)から9年(1997年)のうち平成5年(1993年)以外は7月から9月にかけて、特に外部からの負荷量が無くても濃度の上昇が見られる。わかりやすい例として平成7年(1995年)の7月から8月初旬にかけてはT-P濃度が約0.11mg/lから0.16mg/lと上昇しているが、この期間中外部からの負荷は無く、外部との出入りは無視できる。この間、年累積沈降量は、約6tから5.5tと減少しており(全量は1.4tから2t程度に上昇)、約0.5tのT-Pが底泥から水柱へ回帰したことが示される。この期間の水量は12,200,000m³であることから、水量で除すと約0.04mg/lの上昇に相当し、観測されたT-P濃度の上昇に必要な回帰量が約0.5tであったことが示されている。平成7年(1995年)の夏期制限水位への水位低下以前で直近の流入は当年の4月に行われている。このとき流入したT-P負荷量は7t以上であり、年当初から累積した沈降量も濃度上昇が始まる6月中旬の段階で約7tとなっており、このうちの1割弱に当たる量が回帰するだけで、水量が減少しているためにT-P濃度の上昇は顕著なものになっていることがわかる(夏期制限水位時のT-P濃度の上昇は、水量が12,200,000m³であることから、底泥からのT-Pの正味の回帰が1.22tあれば0.1mg/lの濃度上昇につながる。)

2. 2. 2 窒素

図2-2-2に平成4年(1992年)から9年(1997年)に関して貯水量、T-Nの総量、累積負荷量、推定累積沈降量の経時変化を示す。全窒素量は貯水池内の水量に強く関連しているが、10~60t程度が水柱内に存在していることがわかる。

リン同様に 1993 年の 4 月から 7 月にかけての変化を見ると、4 月から 5 月にかけての流入時には、流入負荷量が約 110t あり、この期間中に水柱に存在する全 T-N 量は約 30t 増加していることから、差分の約 80t が底泥に沈降したと推定される。他の水位上昇時と比較しても、流入負荷量のうち約 4 割から 7 割程度は、リン同様に比較的速やかに沈降していると考えられる。

リンについては、水位低下時に底泥からの回帰に伴う濃度上昇が顕著に見られたが、窒素については、リンほど水位低下に伴う底泥からの回帰が明確に認められない。

2. 2. 3 考察

河川から流入した負荷量のうちリンについては、7～8 割程度、窒素については 4～7 割程度が比較的速やかに沈降することが示された。これは、リンと窒素の形態の違いに起因すると考えられる。すなわち、リンについては、河川の懸濁態（浮遊砂）に吸着するなどして、懸濁態で存在するものの比率が高く沈降速度が速いためと考えられる。窒素については、平均的に見て流入河川水の全窒素のうち 7 割以上が溶存態の無機態で存在しているため、リンに比べて速やかに沈降する割合が低くなっていると考えられる。

夏期の底泥からの回帰に関しては、リンについては、ほぼ毎年夏期制限水位時には回帰が起り、T-P 濃度の明確な上昇が見られる。窒素については同様の減少が見られる年もあるが、リンに比べると明確な上昇は見られない。しかし、夏期の水位低下後、T-N 濃度減少の速度が低下あるいは、濃度が少し上昇し、この際にはアンモニア態窒素濃度の上昇が見られることから（後述）、窒素についても回帰が起っていると考えられる。

図 2-2-1、2-2-2 から本貯水池には毎年リン及び窒素が正味の量として沈降していることがわかる。流入河川水質、貯水池水質の変化から推定される沈降水量（沈降による貯水池水柱からの減少量として算出）を年ごとにまとめると表 2-2-1 の様になる。沈降したリン及び窒素の比については、変動を伴うものの貯水池懸濁物の N/P 比である約 14 に近いものと考えられる。沈降したもののうちリンについては、気化することは無いと考えられるので、累積沈降水量が底泥の増加として底泥に堆積していると考えられる。底泥の N/P 比は約 1.5～2.5 で年間を通してほぼ一定である（表 2-2-2）。このことは、最終的に堆積する窒素の量は多くてもリンの 2.5 倍程度に過ぎないことを示している。

表 2-2-1 水質変化から推定される貯水池への累積沈降水量（堆積量とは異なる）
単位:t

| | P 累積沈降水量 | N 累積沈降水量 | N/P 比 |
|--------|----------|----------|-------|
| 1992 年 | 3.7 | 85.1 | 23 |
| 1993 年 | 16.5 | 135.8 | 8.2 |
| 1994 年 | 4.6 | 76.5 | 16.6 |
| 1995 年 | 8.8 | 101.9 | 11.6 |
| 1996 年 | 16.8 | 164.3 | 9.8 |
| 1997 年 | 12.6 | 122.7 | 9.7 |

表 2-2-2 底泥観測結果および底泥中の全窒素と全リン比

| 観測年月 | 南ブロック | | | | 北ブロック | | | | 谷中ブロック | | | |
|------|-------------|-------------|----------|---------|-------------|-------------|----------|---------|-------------|-------------|----------|---------|
| | TN mg/kg | TP mg/kg | TN TP | 年 平均 | TN mg/kg | TP mg/kg | TN TP | 年 平均 | TN mg/kg | TP mg/kg | TN TP | 年 平均 |
| H4.3 | 1360 | 886 | 1.53 | 1.58 | 1060 | 586 | 1.81 | 1.97 | 1590 | 608 | 2.62 | 2.28 |
| H4.8 | 1330 | 820 | 1.62 | | 1580 | 740 | 2.14 | | 1140 | 589 | 1.94 | |
| H5.3 | 2070 | 964 | 2.15 | 1.65 | 1770 | 701 | 2.52 | 2.71 | 541 | 388 | 1.39 | 1.53 |
| H5.8 | 1290 | 1110 | 1.16 | | 3050 | 1050 | 2.90 | | 857 | 517 | 1.66 | |
| H6.3 | 1650 | 1380 | 1.20 | 1.31 | 1890 | 1120 | 1.69 | 1.53 | 894 | 439 | 2.04 | 2.16 |
| H6.8 | 1280 | 899 | 1.42 | | 1330 | 972 | 1.37 | | 1280 | 559 | 2.29 | |
| H7.2 | 1540 | 937 | 1.64 | 1.38 | 1050 | 580 | 1.81 | 1.76 | 1230 | 494 | 2.49 | 2.01 |
| H7.8 | 903 | 811 | 1.11 | | 1480 | 863 | 1.71 | | 613 | 402 | 1.52 | |
| H8.2 | 2170 | 1390 | 1.56 | 1.64 | 696 | 506 | 1.38 | 1.48 | 953 | 467 | 2.04 | 1.77 |
| H8.9 | 1370 | 797 | 1.72 | | 786 | 494 | 1.59 | | 1050 | 701 | 1.50 | |
| H9.9 | 1350 | 989 | 1.37 | 1.37 | 2230 | 865 | 2.58 | 2.58 | 1610 | 623 | 2.58 | 2.58 |

これに対して、窒素の沈降水量は表 2-2-1 に示されるようにリンに対して 8.2~23 倍の量が推定されている。この窒素の沈降と堆積との間の差分は、底泥における脱窒による消失で、窒素ガスとして大気へ放出されたと考えられる。

沈降する懸濁物の平均的な N/P 比は約 14 であるが、堆積している底泥の N/P 比は約 1.5~2.5 であり、なおかつリンの気化による減少が考えられないことを考えると、沈降した窒素の 80% 以上が脱窒により、気散したと考えられる。この値は、種々の湖沼において脱窒により失われる窒素の割合を整理した結果、0~62% の全窒素負荷が脱窒で失われるという評価 (Seitzinger, 1988) と比べてもかなり高い値である。渡良瀬貯水池の底泥表層は、特に水位低下時に直上水との混合が盛んに起こっていると考えられるが、このときに直上水の硝酸が底泥に供給されるか底泥間隙水中のアンモニアが硝化され、さらに混合後に再度沈降して底泥が嫌氣的になった状態で脱窒が起こるといった機構が予想される。

表 2-2-1 に見られる累積沈降水量の年変動は、主に流入水量の違いにより生起している。沈降水量が多い年は、流入水量が多く、このため流入負荷量が大きくなり、その分沈降水量も多くなっている。

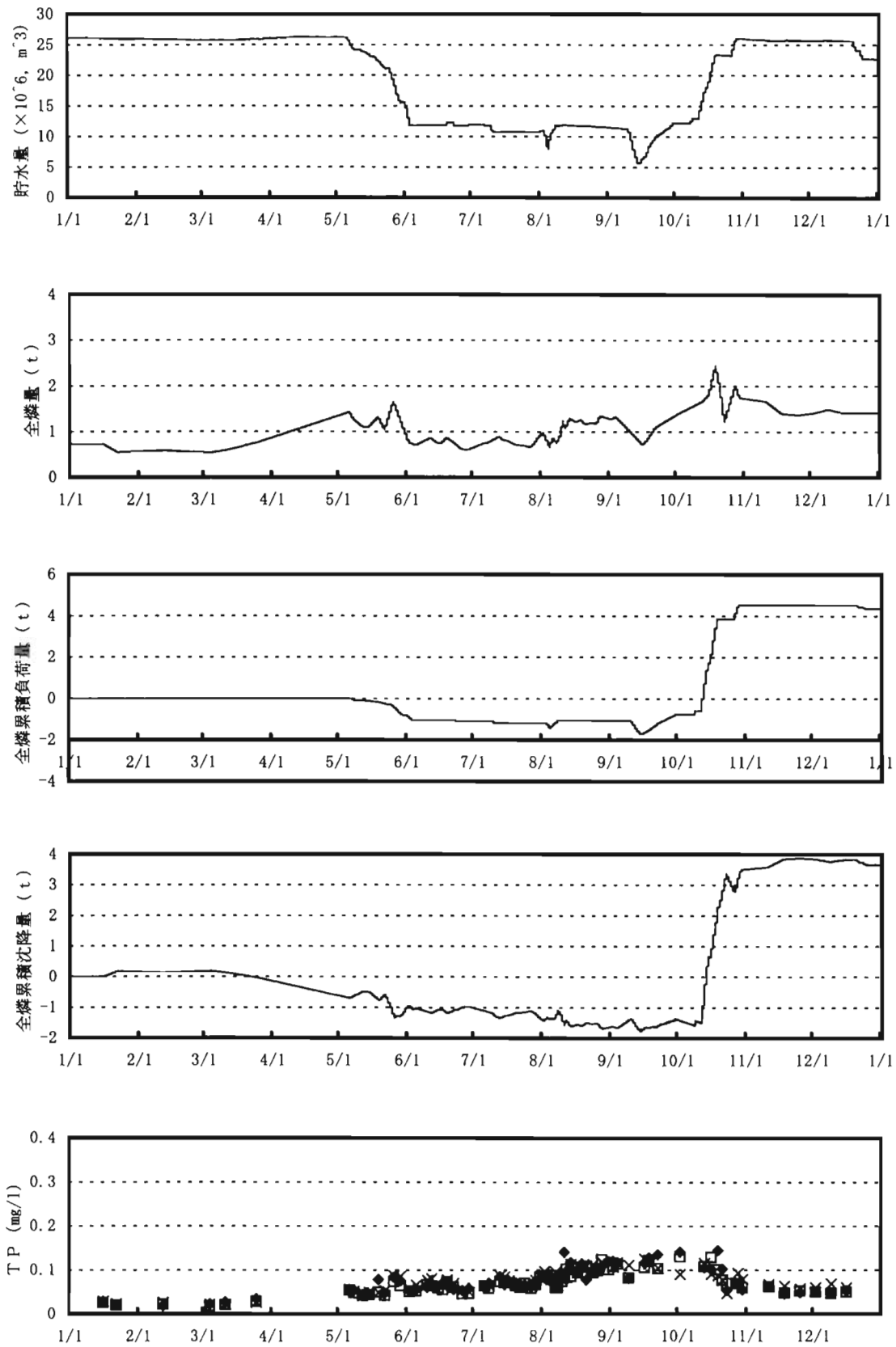


図 2-2-1(1) 水量及びT-P収支の経時変化 (平成4年、1992年)

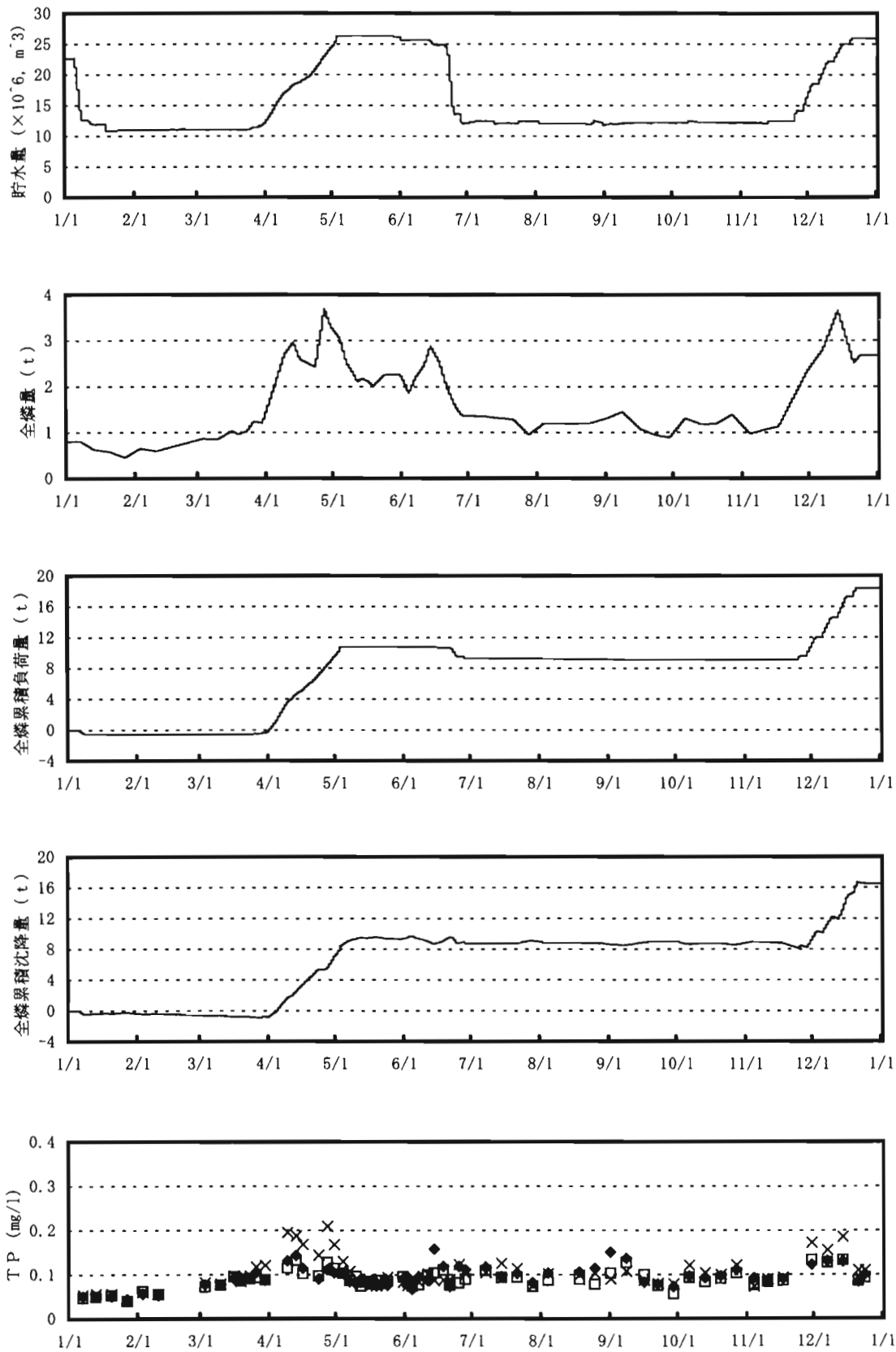


図 2-2-1(2) 水量及びT-Pの収支の経時変化 (平成5年、1993年)

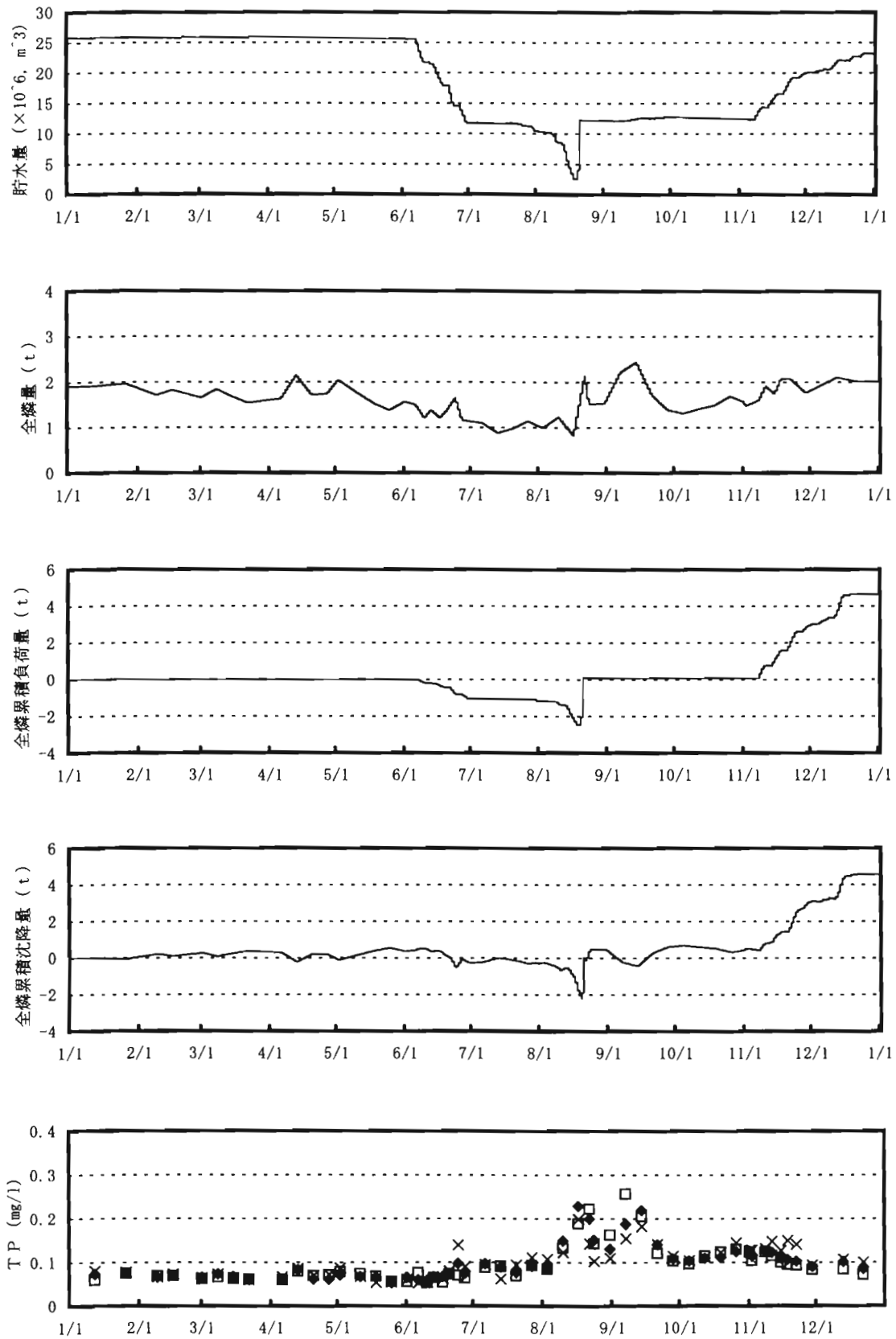


図 2-2-1(3) 水量及びT-Pの収支の経時変化 (平成6年、1994年)

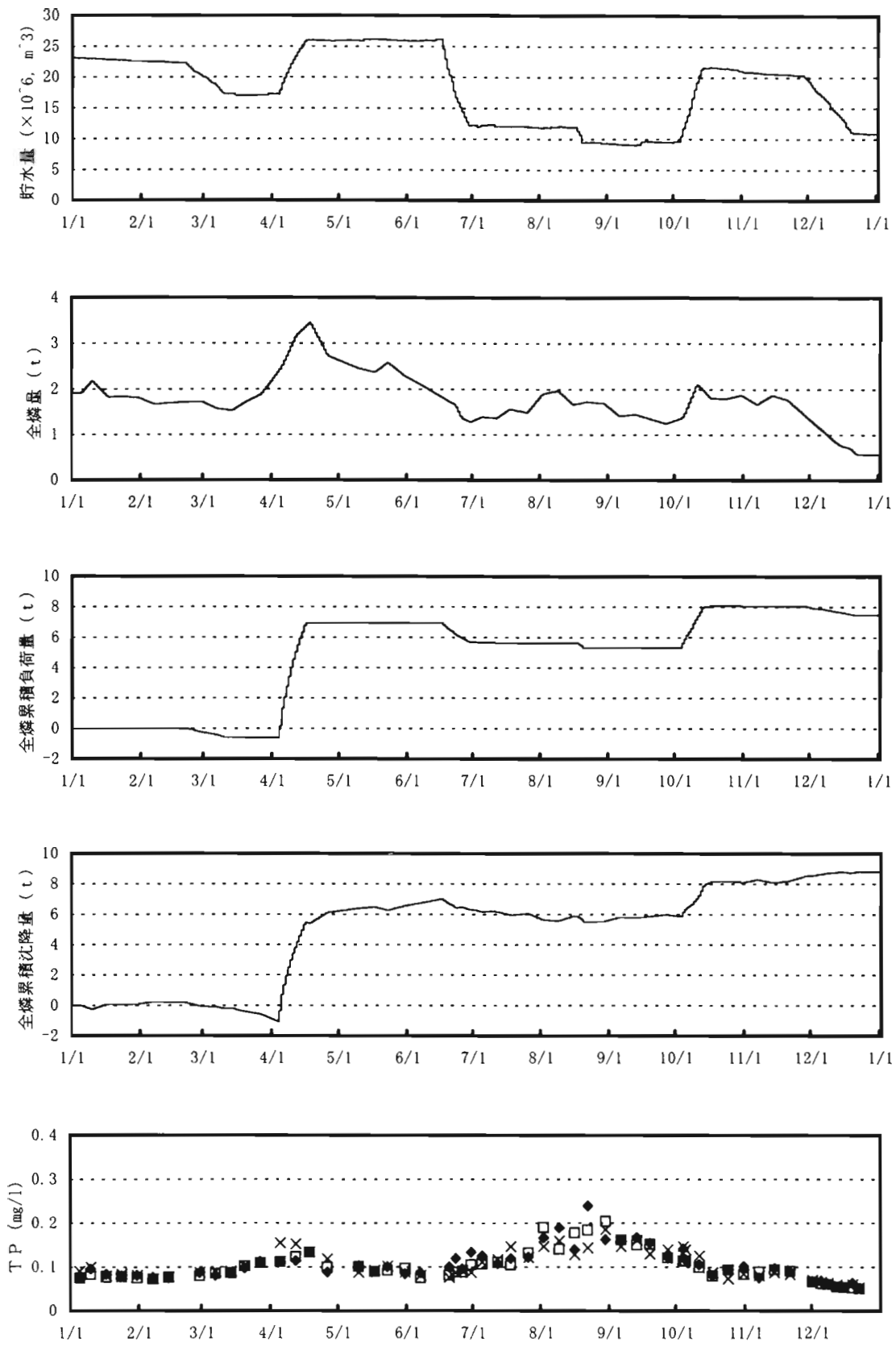


図 2-2-1(4) 水量及びT-Pの収支の経時変化 (平成7年、1995年)

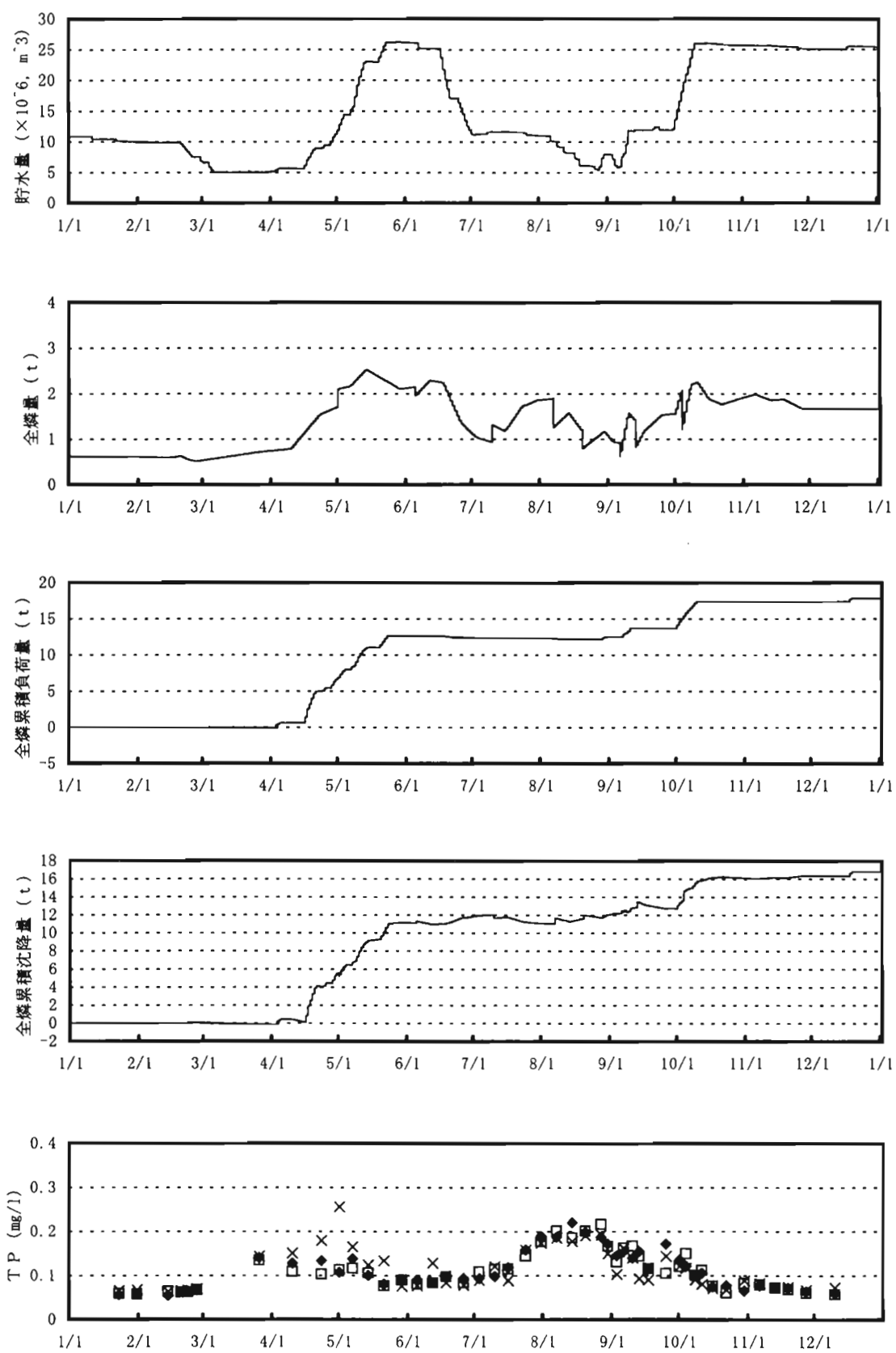


図 2-2-1(5) 水量及びT-Pの収支の経時変化 (平成8年、1996年)

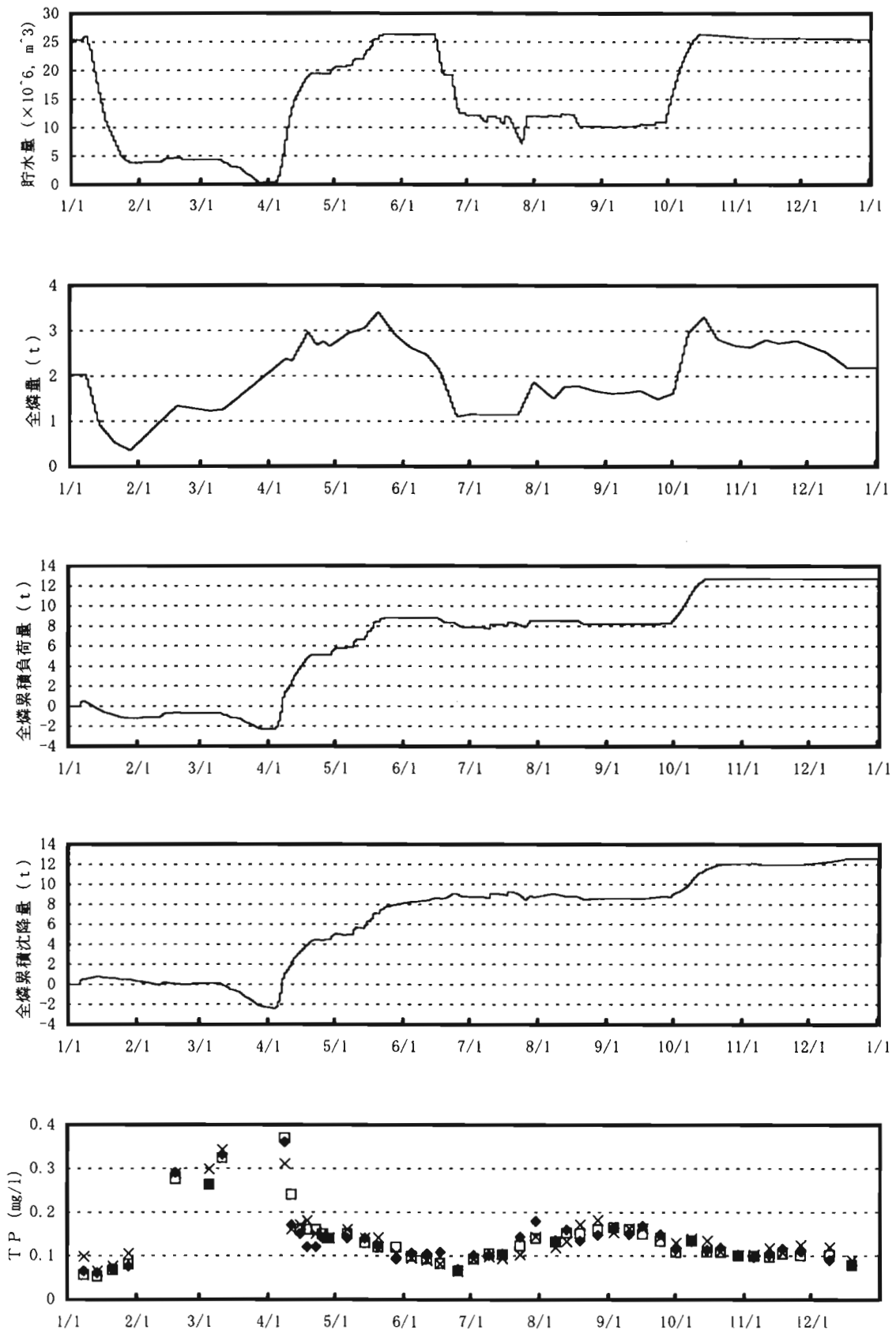


図 2-2-1(6) 水量及びT-Pの収支の経時変化 (平成9年、1997年)

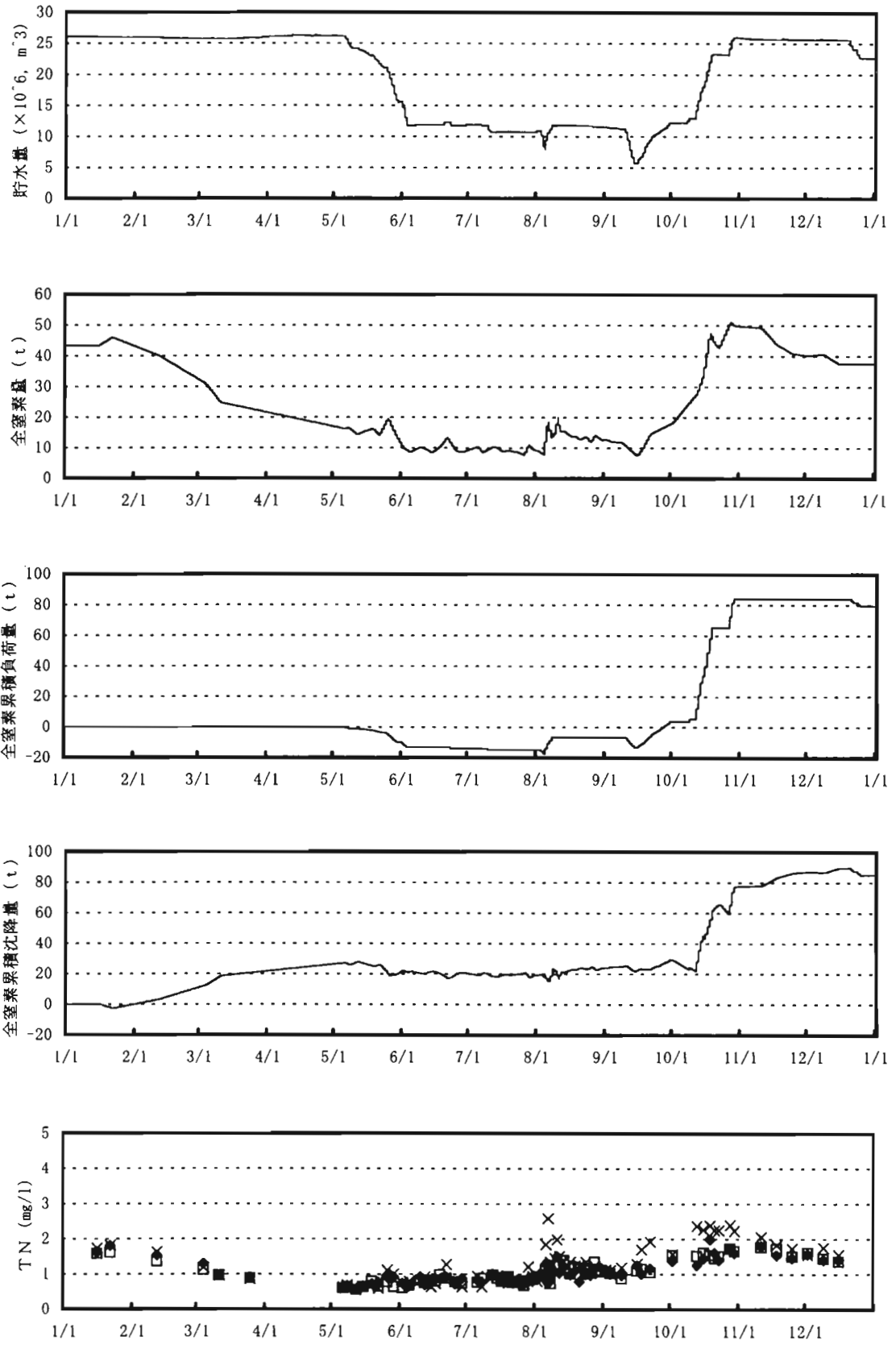


図 2-2-2(1) 水量及びT-N収支の経時変化 (平成4年、1992年)

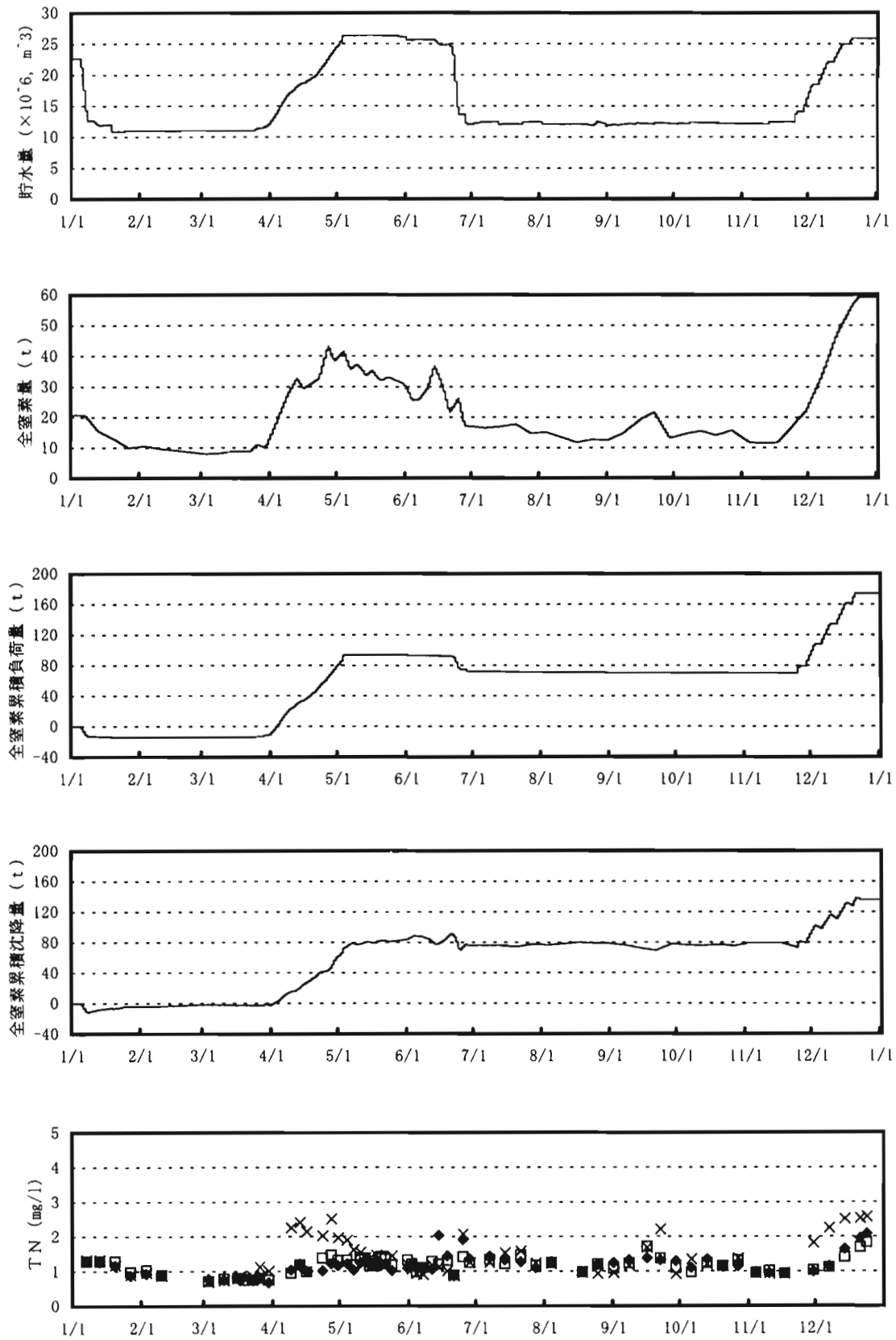


図 2-2-2(2) 水量及びT-Nの収支の経時変化 (平成5年、1993年)

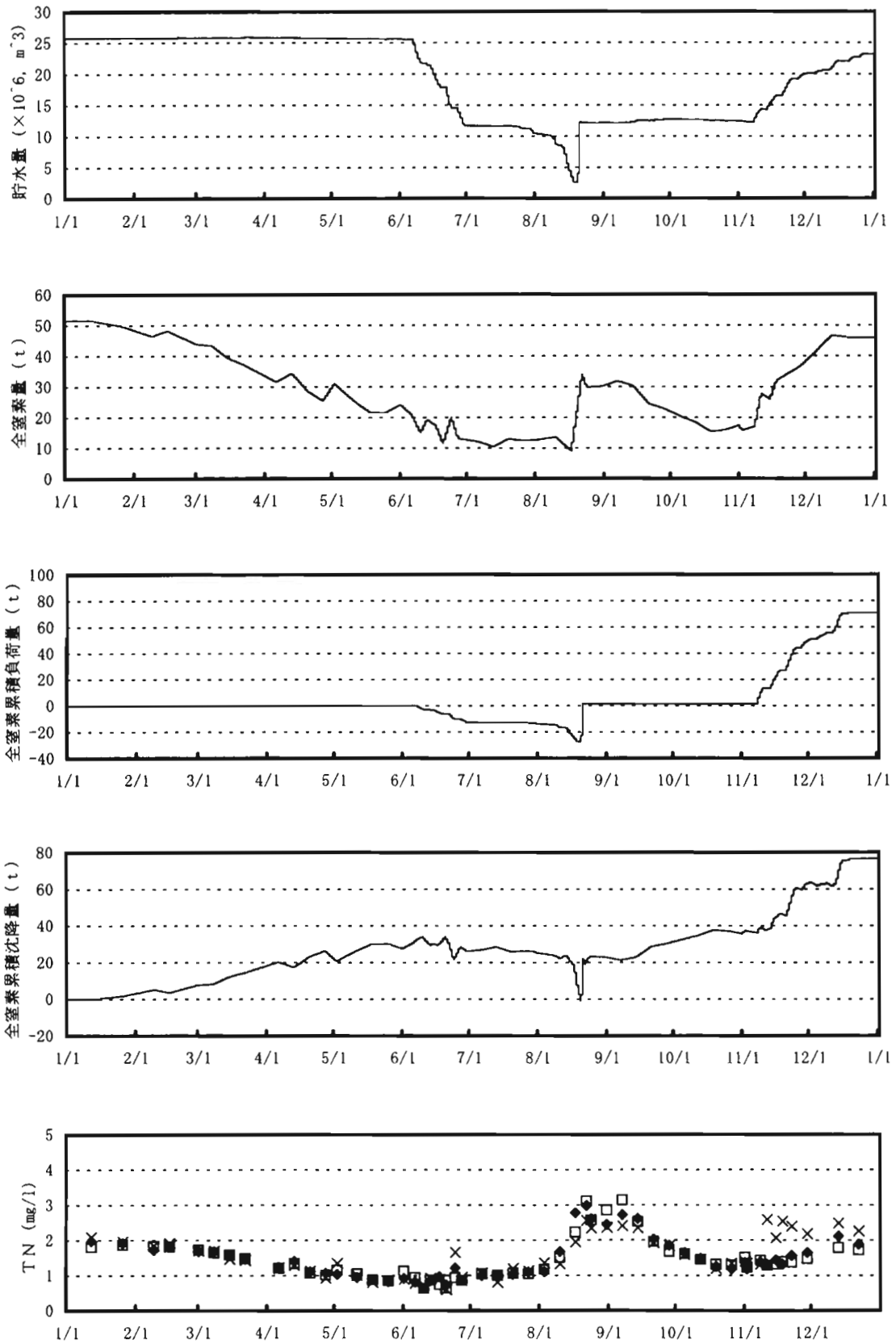


図 2-2-2(3) 水量及びT-Nの収支の経時変化 (平成6年、1994年)

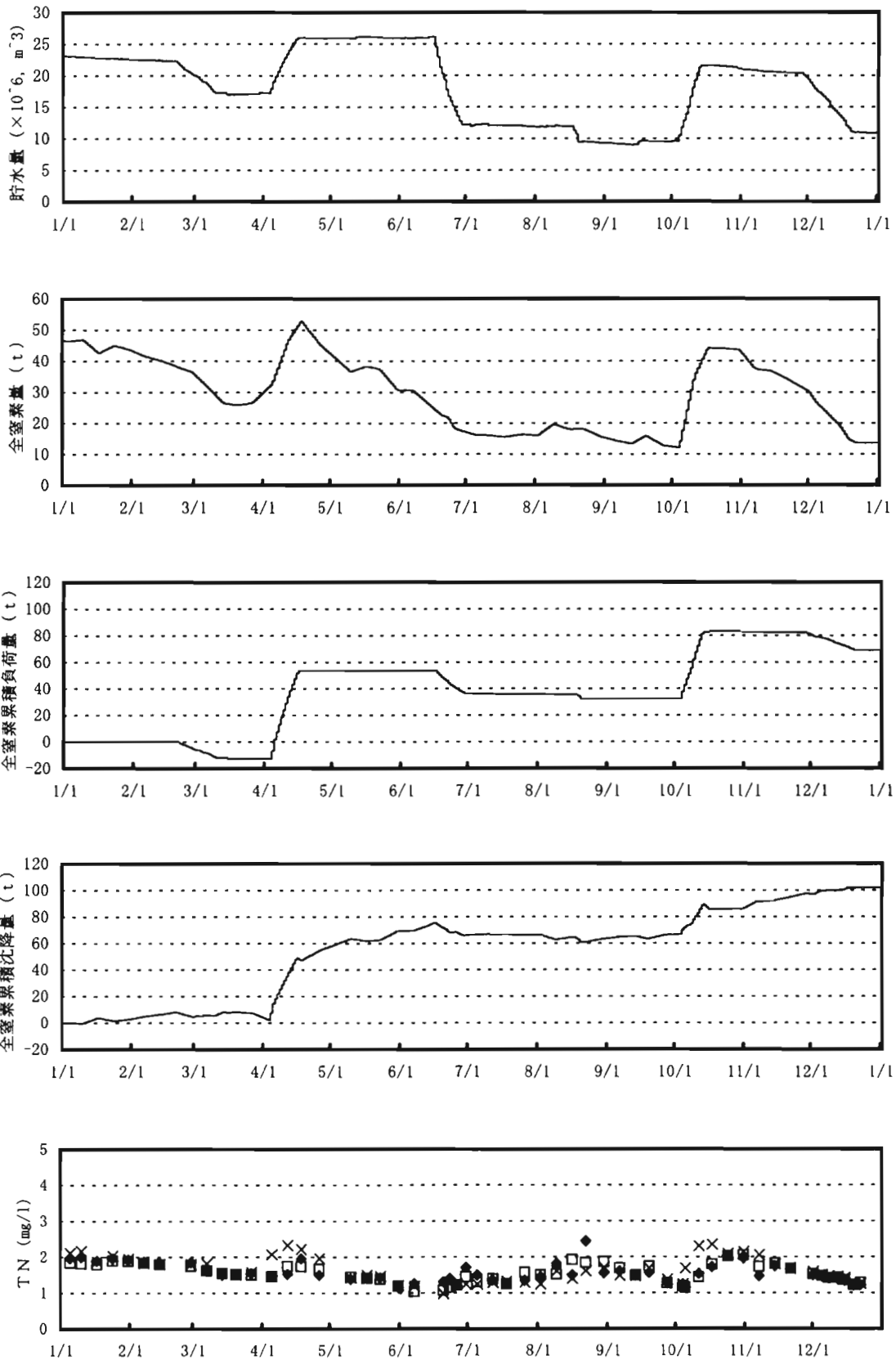


図 2-2-2(4) 水量及びT-Nの収支の経時変化 (平成7年、1995年)

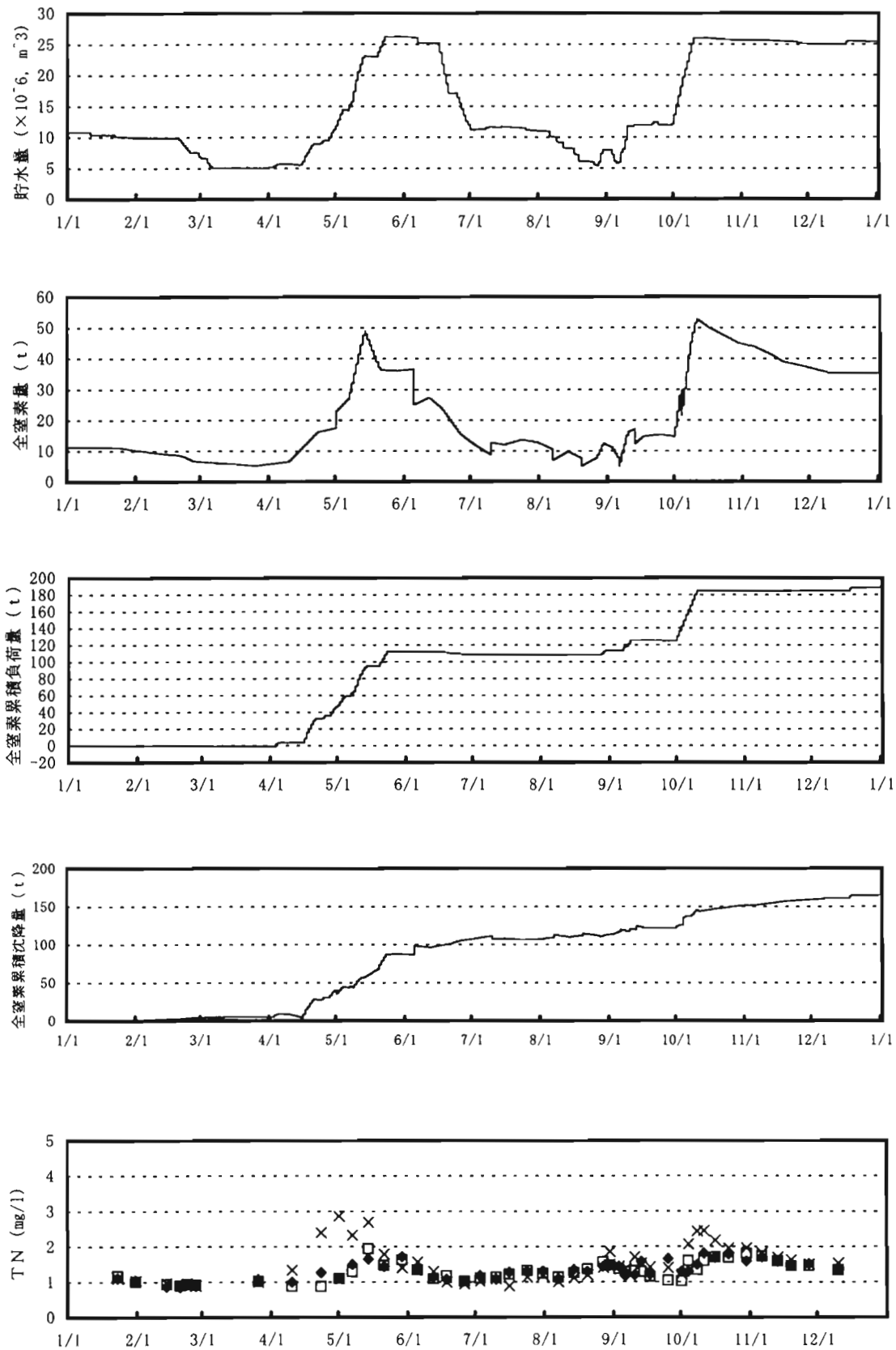


図 2-2-2(5) 水質及びT-Nの収支の経時変化 (平成8年、1996年)

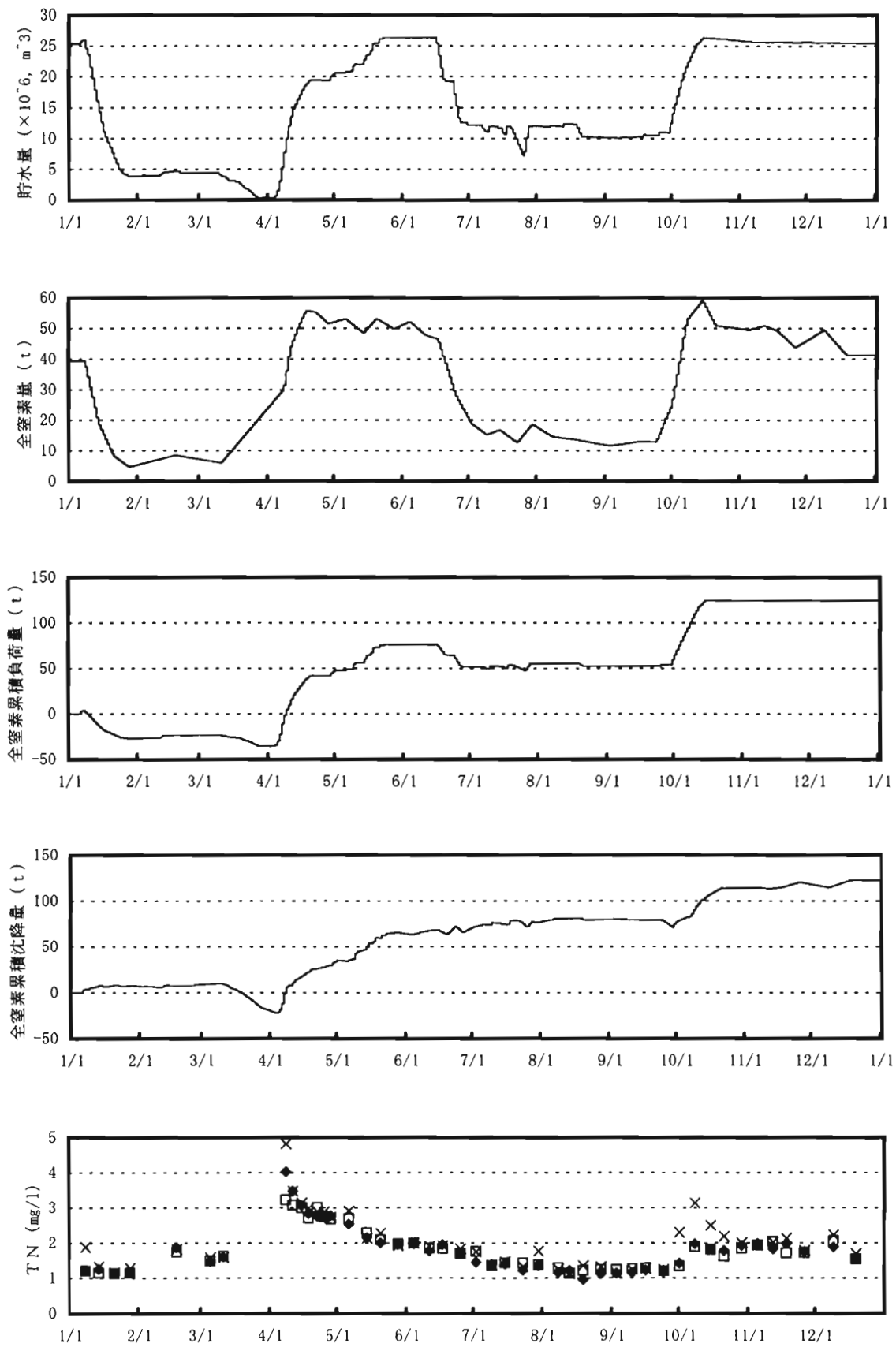


図 2-2-2(6) 水量及びT-Nの収支の経時変化 (平成9年、1997年)

2. 3 貯水池運用と水質変化

2. 3. 1 貯水池運用に伴う水柱と底泥間の物質移動

ここでは、貯水池運用に伴う物質移動について詳細に検討する。対象とした項目は全窒素および全リンである。

検討期間は、表2-3-1および図2-3-1に示す平成4年～9年の低水位時、高水位時、水位下降時、水位上昇時の各水位状況で設定した。なお、期間を選定するにあたり、低水位時、高水位時は出来る限り水門を通しての流入出の無い期間とした。また、季節的な特徴を検討することも考慮した。

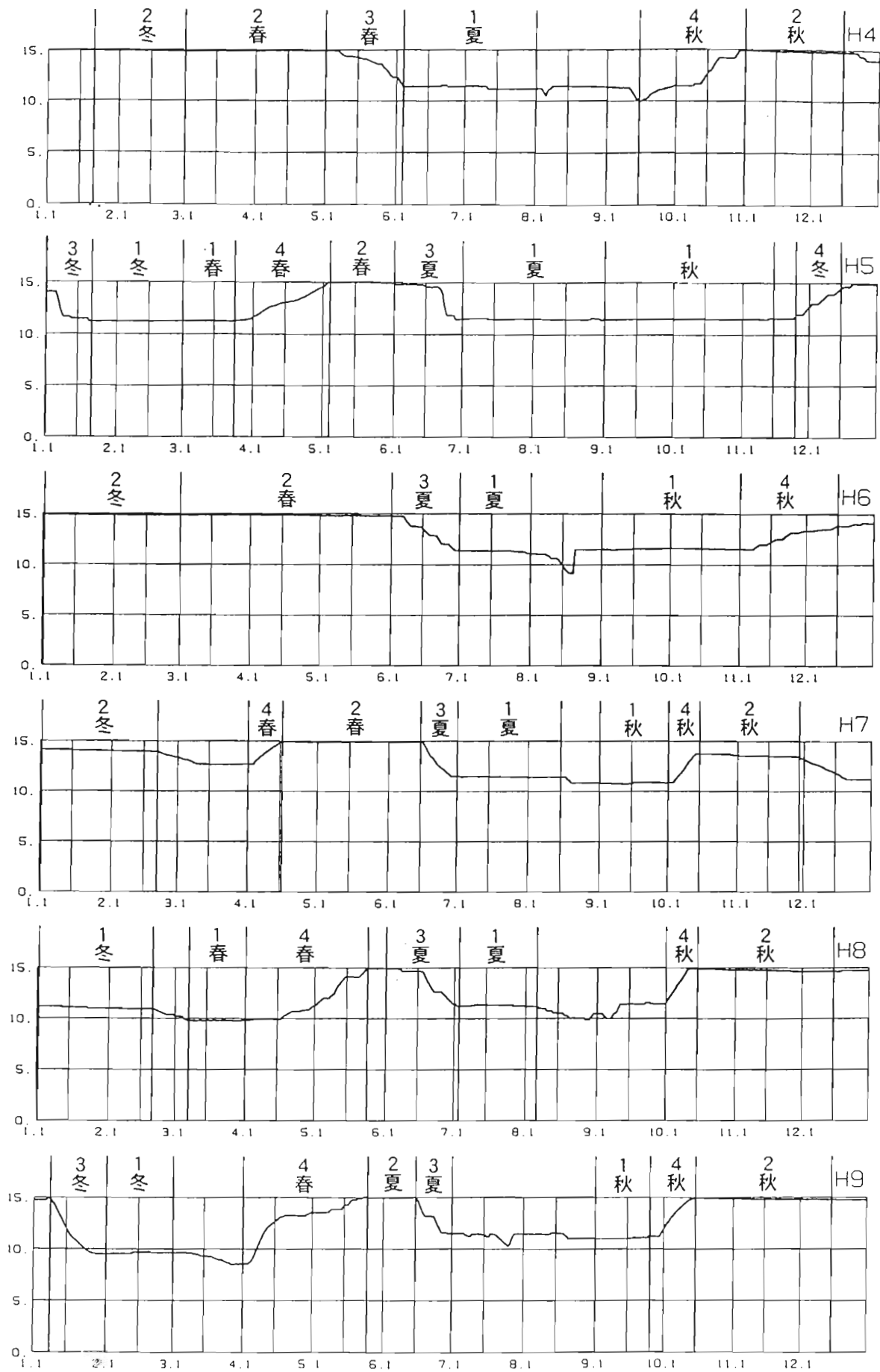
期間別物質変動量と収支概念図を巻末資料中の巻末表2-3-1および巻末図2-3-1に示す。以下、この巻末資料を基に物質収支特性について述べる。

表2-3-1 収支計算期間

| | 1. 低水位時 | 2. 高水位時 | 3. 水位下降時 | 4. 水位上昇時 |
|--------|---|--|---|--|
| 春 期 | H5.3/1-3/23(23日) H8.3/7-3/31(25日) | H4.3/1-4/30(61日) H5.5/5-5/31(27日) H6.3/1-5/31(92日) H7.4/17-6/15(60日) | H4.5/1-6/3(34日) | H5.3/24-5/4(42日) H7.4/1-4/16(16日) H8.4/1-5/23(53日) H9.4/1-5/24(54日) |
| 夏 期 | H4.6/4-7/31(58日) H5.7/1-8/31(62日) H6.7/1-7/31(31日) H7.7/1-8/15(46日) H8.7/3-8/5(34日) | H9.5/25-6/15(22日) | H5.6/1-6/30(30日) H6.6/1-6/30(30日) H7.6/16-6/30(15日) H8.6/1-7/2(32日) H9.6/16-6/30(15日) | |
| 秋 期 | H5.9/1-11/15(76日) H6.9/1-10/31(61日) H7.9/1-9/30(30日) H9.9/1-9/24(24日) | H4.11/1-12/15(45日) H7.10/16-11/28 (44日) H8.10/16-12/15 H9.10/16-12/15 (H8,H9ともに61日) | | H4.9/16-10/31(46日) H6.11/1-12/15(45日) H7.10/1-10/15(15日) H8.10/1-10/15(15日) H9.9/25-10/15(21日) |
| 冬 期 | H5.1/21-2/28(39日) H8.1/1-2/19(50日) H9.2/1-2/28(28日) | H4.1/21-2/29(40日) H6.1/1-2/28(59日) H7.1/1-2/20(51日) | H5.1/1-1/20(20日) H9.1/8-1/31(24日) | H5.11/25-12/15 (21日) |

なお、四季は気温の変化を考慮して次の様に区分した。

春期：3～5月、夏期：6～8月、秋期：9～11月、冬期：12月～翌年2月



図中の数字…1:低水位時, 2:高水位時, 3:水位下降時, 4:水位上昇時

図 2-3-1 物質収支検討期間

(1) 低水位時の物質収支特性

(窒素)

低水位時の貯水池水中の全窒素量の変化傾向は、大きく2期間に分類される。春期から夏期にかけては主に増加傾向を示し、秋期から冬期にかけては減少傾向を示す。春期から夏期の増加傾向を示した年の増加量は、1日当たり約0.03~0.04tである(巻末図2-3-1(1))。これは底泥からの溶出や巻き上げによるものと思われる。一方、春、夏期に反対の減少傾向が見られた年を見ると、夏期の平成5、8年では検討期間の直前に河川水の流入が見られる。水質および物質量の変動特性で述べたように、河川水の流入により貯水池内の全窒素量が大きく増加し、底泥への沈降により時間をかけて減少し濃度が安定していく。各年とも、計算期間の約1ヶ月前まで水位上昇が起こっていたため、貯水池内の窒素濃度が低下しきっていない事が影響していたと思われる。

次に秋期から冬期を見ると(巻末図2-3-1(2))、平成9年の秋期では夏期と同様に1日当たり約0.08tの増加を示すが、その他の年では約0.01~0.21tの減少傾向を示す。その中でも、特に平成6年は0.21tの減少と大きな値となる。これには、設定期間直前に高濃度な河川水が流入しているため、その影響が表れていると考えられる。その他の減少傾向を示す平成5、7年では、前掲の水質濃度時系列に見られるように、期間開始時に濃度上昇しており、その後水位が上昇する直前まで緩やかに濃度低下している。

冬期は各年ともに減少傾向を示し、その量は1日当たり約0.04~0.06tとなる。この要因としては、物質量の時系列変化図に見られる様に、直前の水位上昇が3ヶ月以上も前に終了しているにも係わらず全窒素濃度がまだ十分低下していない事が影響していると考えられる。

(リン)

低水位時において全リンの貯水池水中存在量は、秋期を除いて増加傾向を示す(巻末図2-3-1(3)、(4))。増加量は、平成8年夏期が最大で1日当たり約0.03tであり、最小は平成6年夏期の0.0003tである。このような物質量の増加は、底泥からの溶出や巻き上げ等によるものと思われ、この事が秋期以外の低水位時の特徴と推察される。秋期は、全窒素同様に期間開始時と終了時の気象条件等が影響していると考えられる。開始時は、気象条件や水温の影響を受けて底泥からの溶出や巻き上げ等が貯水池水質に影響し、終了時はその影響が弱まり、リン濃度が低下していく状態にあると推察される。

(2) 高水位時の物質収支特性

(窒素)

高水位時は全期間で減少傾向を示し(巻末図2-3-1(5)、(6))、減少量は1日当たり0.13~0.45tである。その中でも春期の平成5、7年の減少量が特に多く、それぞれ1日当たり約0.37tおよび0.45tとなる。同じく春期の平成4、6年の減少量は約半分の0.22~0.25tとなる。それぞれの設定期間で見られた違いを、物質量の経時変化で見ると、前者

期間は開始時に全窒素に占める無機態窒素比率が 20%以下であったのに対し、後者期間は約 40%であった。この事より、平成 5、7 年は貯水池内で生産が活発になっており、窒素の減少（沈降と思われる）が急速に起きている事が推察される。その他の季節では、生産が不活性になる冬期（平成 4 年は特異年）で減少量は小さくなり、1 日当たり約 0.13~0.16 t となる。また、夏期から秋期は 1 日当たり概ね 0.20 t~0.25 t で減少する傾向にある。これらの結果は、水位上昇に伴って流入した大量の窒素が、基礎生産を介して沈降し、貯水池内で安定して物質循環出来る濃度まで、その量（濃度）を減少させていることを示していると思われる。

（リン）

全リンは、平成 4 年春期を除き全ての期間で減少傾向を示す（巻末図 2-3-1（7）、（8））。減少量は、全窒素でも見られた様に生産が活発化する平成 5、7 年の春期および夏期で大きくなり、1 日当たり約 0.03~0.04 t となる。生産が不活性となる冬期の減少量は小さくなり、1 日当たり約 0.004~0.005 t となる。これら各期間の中間に位置する秋期の減少量は、平成 8 年を除き 1 日当たり約 0.01~0.02 t となる。冬期以外で減少量が 0.01 t 未満の年（平成 6 年春期、平成 8 年秋期）は、水質の時系列変化が期間後半に安定（横這い状態）している。

（3） 水位下降時の物質収支特性

（窒素）

水位下降時は水門からの流出の影響等により、貯水池水中の物質量は減少する。しかし、減少量は流出量とは一致せず、各季節、各年で差分がプラス（+）傾向およびマイナス（-）傾向で生じており、季節間の関係は不明確である（巻末図 2-3-1（9））。この差分で（+）傾向とは、貯水池内の減少量が水門を通しての流出量よりも少ない状態であり、（-）傾向はその逆の傾向を示している。（+）傾向を示す期間は、濃度時系列変化図から、計算開始時に既に安定状態にあり、水位が下降するに従って底泥からの溶出や巻き上げ等の影響を受け、差分が（+）傾向になったものと考えられる。しかし、1 日当たり差分は 0.05 t~0.59 t と低水位時の値よりも大幅に大きくなっている。原因の一つは、補給（放流）時の流れにより、底泥が巻き上げられて、水中に回帰したことが考えられる。

これに対して（-）傾向を示す期間は、直前の水位上昇により流入してきた窒素が未だ安定していない状態であった事が影響していると考えられる。

（リン）

全リンも全窒素と同様の傾向を示し、各季節、各年で差分が（+）傾向および（-）傾向を示す（巻末図 2-3-1（10））。この差分が生じた要因も全窒素同様と思われる。直前の流入水の影響がある期間は、水門を通しての流出する量以上に貯水池内の物質

量が減少し、安定している期間ではその反対の傾向を示すと考えられる。

(4) 水位上昇時の物質収支特性

(窒素)

貯水池内に比べ高濃度な河川水が流入する水位上昇時は、貯水池内物質量が大幅に増加する。しかし、その増加量は流入量とは一致せず、各年で差が生じている。差分量は全ての年で(－)傾向であり、流入した物質が水中から減少している状態である(巻末図2-3-1(11))。1日当たり差分量を見ると0.85t～2.77tで減少しており、この値は他の水位状況期間で減少が見られた時の値に比べ非常に大きな値である。従って、水位上昇時は底泥への沈降等による物質の水中からの減少が多状態と言える。

(リン)

全リンも全窒素と同様の傾向を示し(巻末図2-3-1(12))、全ての年で流入物質の水中からの減少(1日当たり0.09t～0.40t)が見られる。特に、リンは窒素の様な脱窒素作用によるガス化といった現象は考えられないため、この減少量は主に沈降し底泥に蓄積されるものと思われる。計測差が無いと仮定すると、水位上昇時のリンは1日当たり約0.1t以上底泥へ沈降・堆積していることになる。

2.3.2 まとめと考察

水質変化特性および物質質量変化特性、物質収支特性の検討結果より、渡良瀬貯水池における水質特性を以下の様にまとめる事が出来る。

【濃度変化】

渡良瀬貯水池の窒素は、水位上昇時に高濃度となるなど水位変化に応じた変化を示す。しかし、リンでは、窒素ほどの顕著な変化は見られず、反対に水位上昇時に低濃度化する年も観測されている。これは、水門を通して流入する河川水の濃度に起因しており、河川水の窒素は貯水池内に比べて常時高濃度であるが、リンに関しては低濃度を示す時期が存在しているためである。この様に、各物質で河川水影響の受け方が異なり、渡良瀬貯水池では窒素とリンが異なった変動を示す事が確認された。

次にクロロフィルa濃度では観測年によりピーク時は異なるが、春期から夏期の水温上昇する季節で高濃度を示す傾向にある。特に春期にピークが確認される特徴として、その年の初めは低水位であり、その状態から水位上昇した時に栄養塩が供給されるために植物プランクトンの増殖が活発化する傾向にあることが挙げられる。また、クロロフィルaの濃度レベルで見ると、各ブロックともに概ね同程度であるが、谷中ブロックが僅かに高い傾向を示す。このことから谷中ブロックの流通が、他ブロックに比べて悪い事が推察される。

【水位帯別物質質量変化】

図2-3-2、3に示す様に、各物質とも水位状況に伴う特徴が以下の様に見られた。なお、変化量の検討は各期間の平均値で実施した。

①水位上昇時

水位上昇時は河川から大量に物質が流入するが、その流入量と貯水池内の増加量は一致せず、全窒素、全リンともに底泥への沈降により水中からの減少が見られた。減少量は、全窒素が1日当たり約1.65t、全リンが1日当たり約0.20tであった。

②高水位時

高水位時は、河川から大量に物質が流入し、高濃度となった貯水池内の水質環境が、安定的な水質環境へと移行するため、全期間で物質量の減少が確認された。全窒素、全リンの減少量ともに、季節特徴が現れており、生産が活発化する春期で大きく、不活性になる冬期で小さくなった。また、秋期は春期と冬期の中間レベルとなった。

③水位下降時

水位下降時は全窒素、全リンともに減少期と増加期の2期に分割される。減少は、直前の高水位の期間が短く、流入した河川水の影響が残り安定的な水質環境に達していない期間で見られた。反対に増加は、直前の高水位時に水質環境が安定状態に達しており、水位が低下するに従い底泥の巻き上げや溶出等の影響によるものと考えられた。

④低水位時

低水位時は全窒素、全リンともに減少期と増加期の2期に分割される。そのうち減少期は各物質による違いが見られた。全窒素、全リンともに各年の秋期で物質量の減少が見られた。この要因として、気温低下など気象条件等の外的要因が影響し、底泥からの回帰量が期間初期に比べ後期で少なくなっていることが考えられる。

また、全窒素では秋期以外でも減少期が見られた。この要因として、直前の高水位から低水位に至る迄の期間が短く、流入した高濃度河川水の影響が考えられる。増加期は、底泥からの溶出や巻き上げが影響し、全窒素で1日当たり約0.04t、全リンで1日当たり約0.01tの物質量の増加が見られた。

以上より、検討された貯水池内の物質収支概念図を図2-3-4に示す。

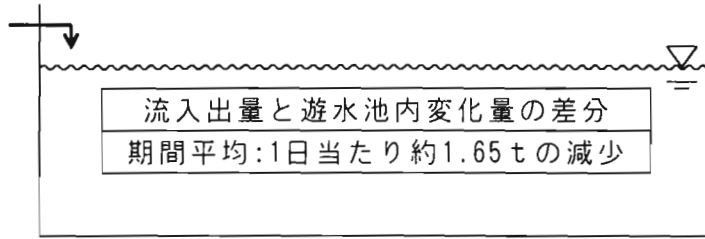
【考察】

これ迄の物質収支の検討結果のうち、水門を通しての流入出が殆ど無い低・高水位時での物質増減量の窒素／リン比を見ると、低水位時（増加時）が約4:1、高水位時（減少時）が約15:1~40:1と大きく異なり。窒素とリンとでは貯水池内における挙動が異なっていることが分かる。定期水質調査結果より、底泥中の窒素／リン比は約1.5~2.5と水中での値に比べてかなり低い事が明らかにされており、低水位時の溶出や巻き上げによる回帰が起こる際（すなわち水中の物質増量増加時）の窒素／リン比が、約4:1と低くなっている原因と考えられる。

貯水池内は図2-3-5の物質挙動フローと図2-3-6の概念図の様な物質の挙動を示す。河川より大量に流入した物質は貯水池内で有機化し、デトライタスとして沈降し、比較的有機物の少ない底泥の上に浮泥状に堆積する。この堆積した浮泥層で有機物は分解され、これに伴って酸素も消費される事から、浮泥層底面付近では還元環境になる。この場合、嫌気性の脱窒素細菌により、還元環境下で脱窒素作用が起こり窒素が気化することで、底泥中の窒素／リン比に近づくものと思われる。

以上より、渡良瀬貯水池は大量の窒素を水中から気化させる作用を持ち（沈降した窒素の約80%以上）、ある意味では河川水の浄化に寄与している。しかし、堆積残留した窒素やリンにより底泥中の窒素、リン濃度が経年的に増加し、夏期の回帰量が増加する可能性が懸念される。

①水位上昇時

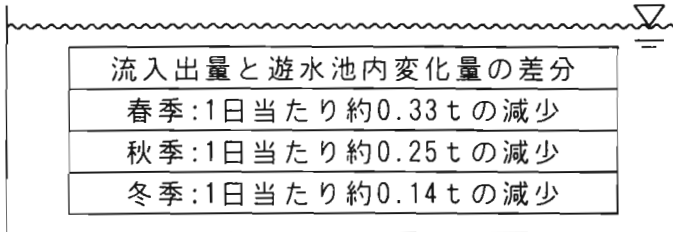


窒素量の変化

減少期

- ・ 季節的な特徴等無く、全期間概ね同レベル。

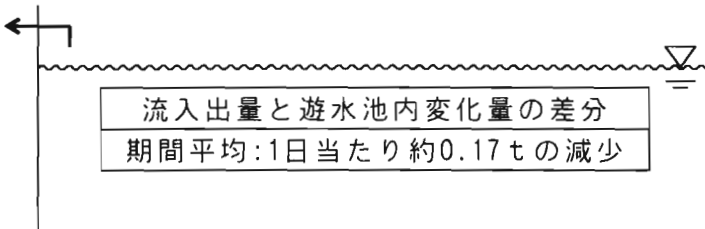
②高水位時



減少期

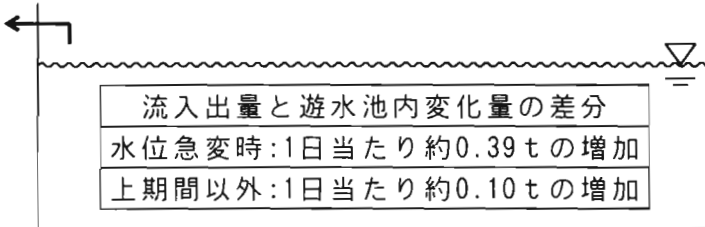
- 春季(活性期) → 大
- 秋季(準活性期) → 中
- 冬季(不活性期) → 小

③水位下降時



減少期

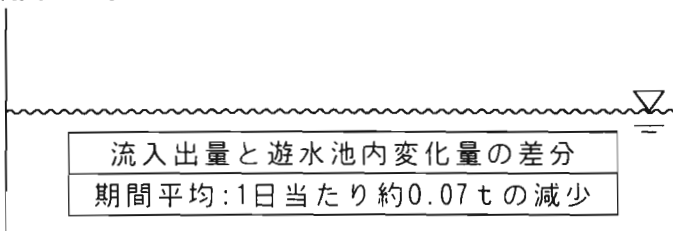
- ・ 直前の河川水流入の影響が残る時期 (H8夏季, H9夏季・冬季)



増加期

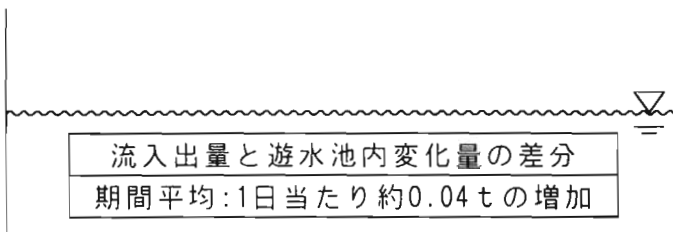
- ・ 水位変化が急激な時期 (H5夏季・冬季, H7夏季)
- ・ 上期間以外 (H4春季, H6夏季)

④低水位時



減少期

- ・ 直前の河川水流入の影響が残る時期 (H5夏季, H8夏季・冬季)
- ・ 各年の秋季

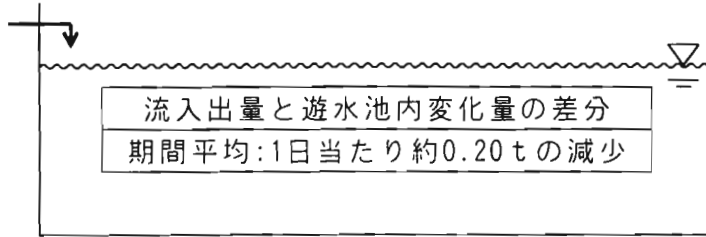


増加期

- ・ 直前の河川水流入の影響が無い時期 (H4夏季, H5春季, H6, 7夏季)

図 2-3-2 全窒素の流入出量と遊水池内変化量の差分量の状況(期間平均値)

①水位上昇時

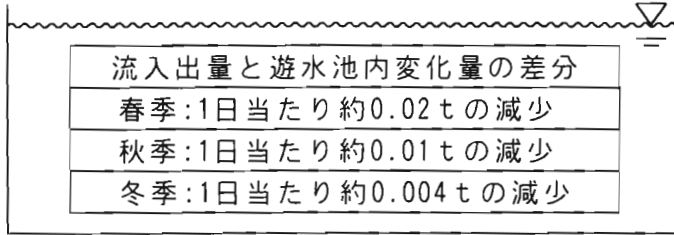


燐量の変化

減少期

- ・ 季節的な特徴等無く、全期間概ね同レベル。

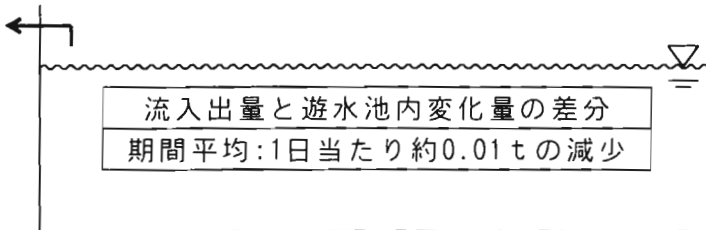
②高水位時



減少期

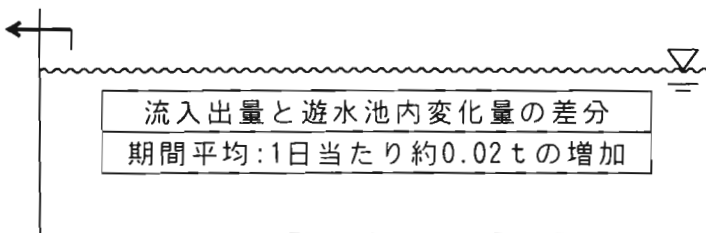
- 春季(活性期) → 大
- 秋季(準活性期) → 中
- 冬季(不活性期) → 小

③水位下降時



減少期

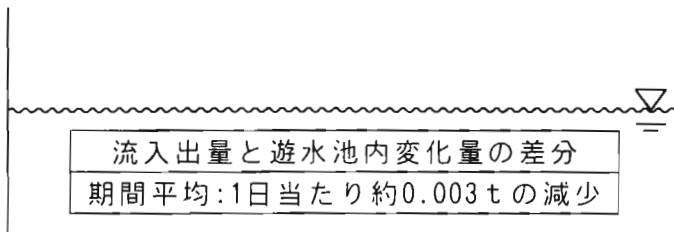
- ・ 直前の河川水流入の影響が残る時期 (H8夏季, H9夏季・冬季)



増加期

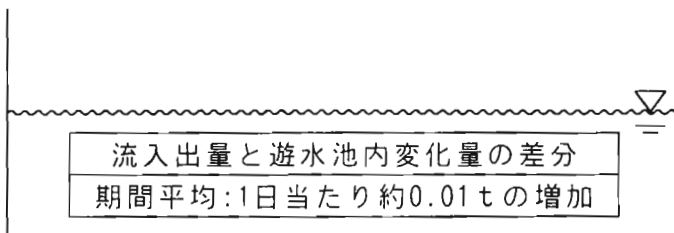
- ・ 上記期間以外

④低水位時



減少期

- ・ 各年の秋季



増加期

- ・ 秋季以外全期間

図 2-3-3 全燐の流入出量と遊水池内変化量の差分量の状況(期間平均値)

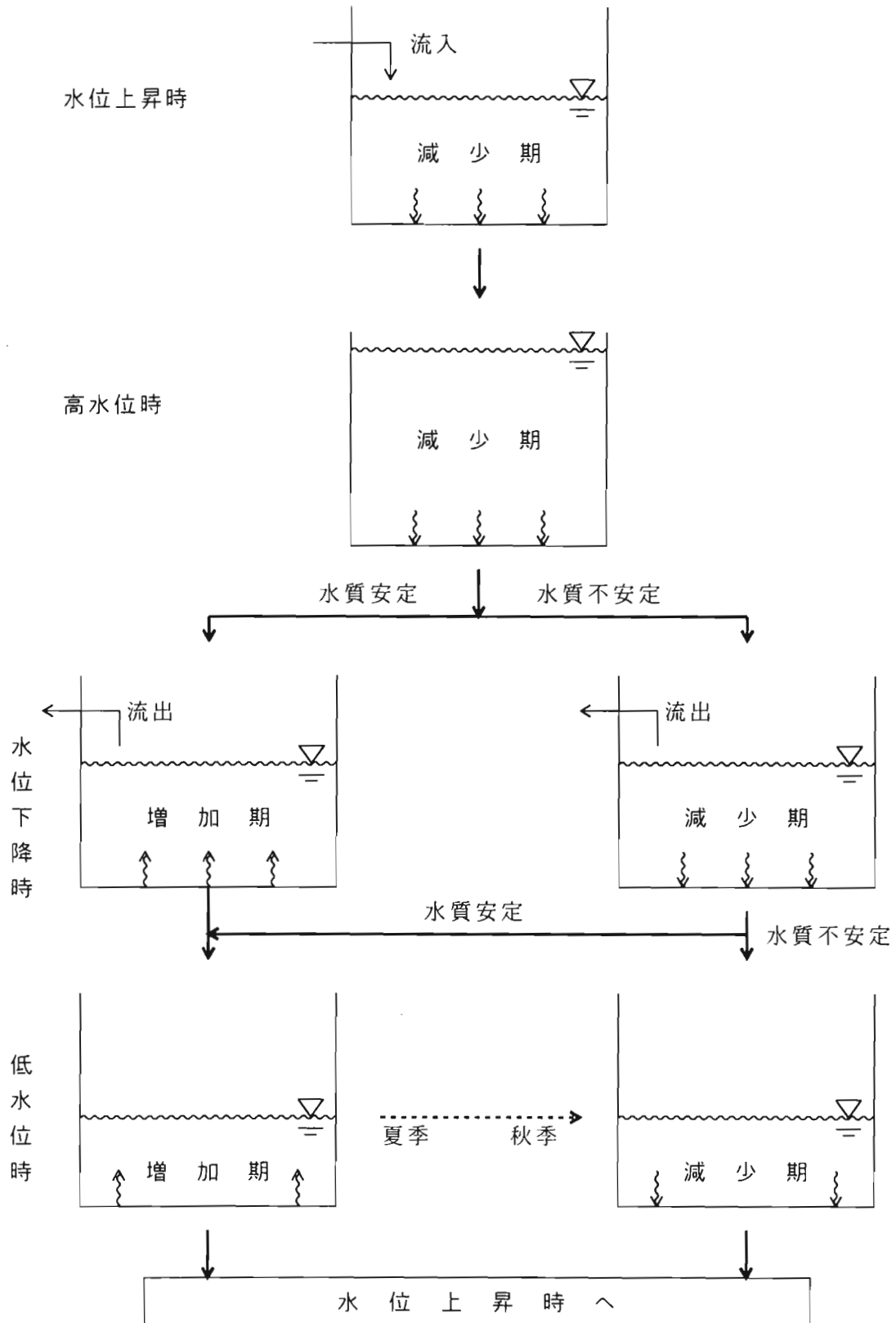


図 2-3-4 全窒素，全磷の物質収支概念図

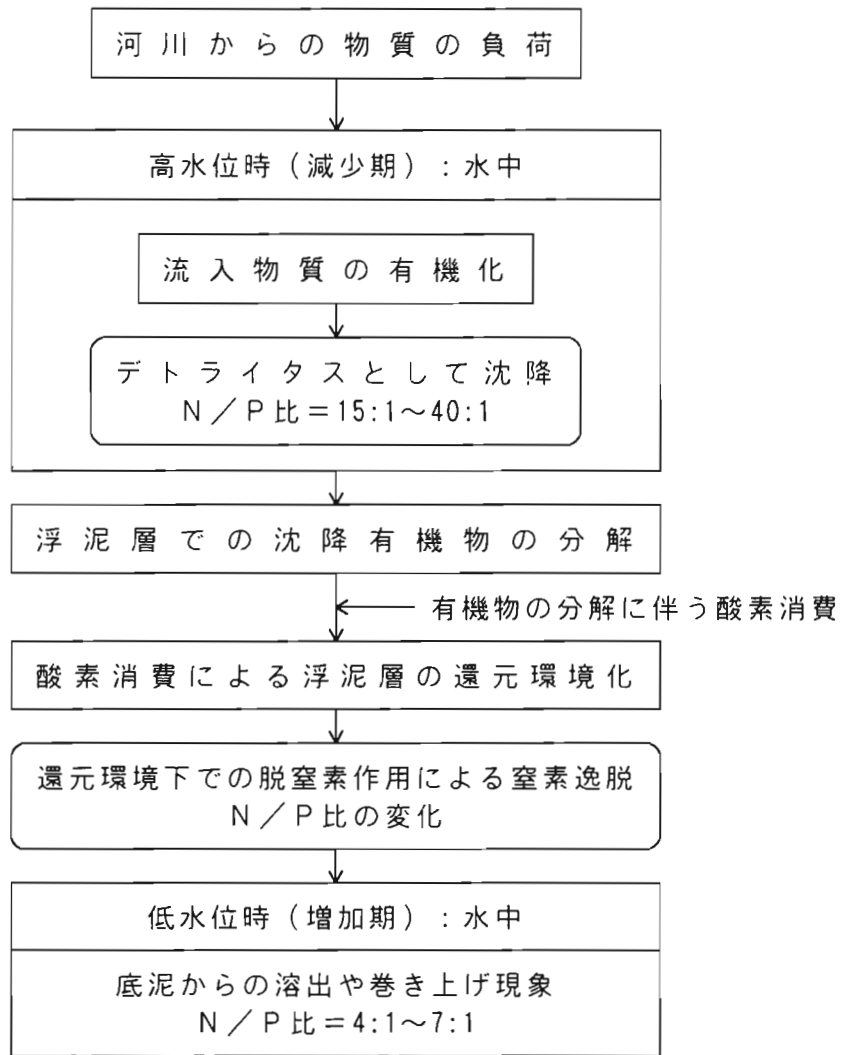


図 2-3-5 物質挙動フロー図

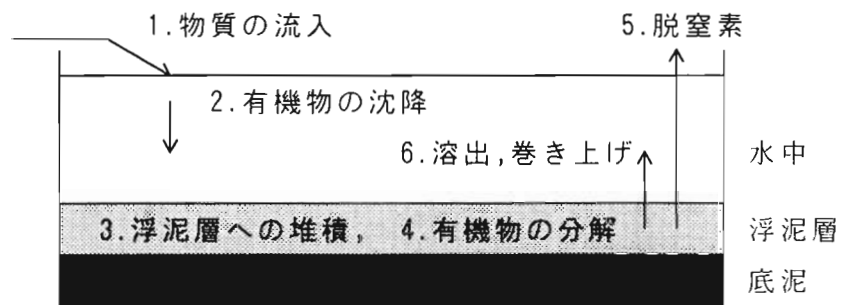


図 2-3-6 遊水池内の挙動メカニズム概念図