

1.2 琵琶湖深層部DOの冬季の回復の支配要因

1.2.1 循環期における気象・水文要因の長期的変遷

琵琶湖深層部のDO 支配要因の検討に先立ち、DO の変動に影響を及ぼすと考えられる要因の長期的動向について整理する。

(1) 気温の長期的動向

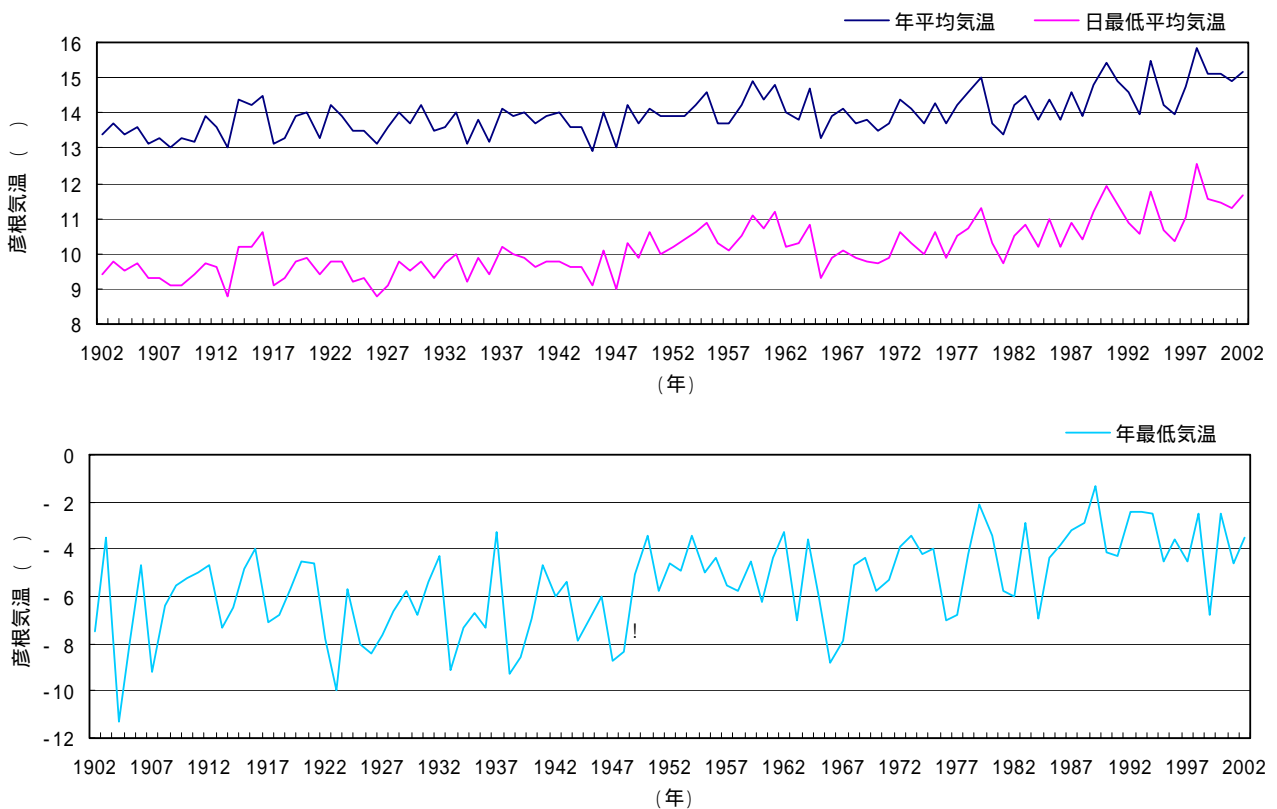
琵琶湖深層部のDO 回復については、循環期の冬期にどれだけ気温が低下し大循環が深部まで及ぶかが重要となる。この点から、彦根地点の過去百年間（1902～2002年）の気温の長期的動向を図1.2.1に整理した。

年平均気温や日最低平均気温は、この約100年間で2℃程度上昇しており、近年の温暖化傾向は彦根地点でもうかがえる結果となっている。

また、年最低気温について過去100年間の状況を振り返ると、前半と後半各50年間で傾向が異なり、前半50年間は年最低気温が低く-8.0℃を下回る年が度々あり、かなり寒い冬であったことがうかがえる。

一方、後半50年間（1952年以降）では、最低気温が-8.0℃を下回るのは1回のみであり、近年では年最低気温も-4.0～-2.0℃と高くなっている。

以上のことから、気温の長期的動向から見ると50年以前においては現在よりも冬はかなり寒く、琵琶湖の水温も相当低下し大循環も深部まで及んでいたものと推察される。



データ出典) 滋賀の気象、彦根地方気象台および同地点観測結果

図 1.2.1 彦根地点気温の長期的動

(2) 琵琶湖湖水の流動について

琵琶湖深層部におけるDOの消費については、湖水の滞留も影響を及ぼすと考えられ、琵琶湖における流況に関わる諸量の長期的動向を図1.2.2に整理した。

これらの図をもとに湖水の滞留状況の長期的動向をみると、逆算流入量で見ると 1965 年（昭和 40 年）以降、流入量が減少する傾向がうかがわれ、その結果、見かけの滞留時間は長くなる傾向となっている。

なお、この湖水の滞留時間が長くなる時期は、北湖深層部の DO が低下するとされる時期と概ね同時期となっているが、両者にとどのような関係にあるかについては、今後、詳細な検討が必要である。

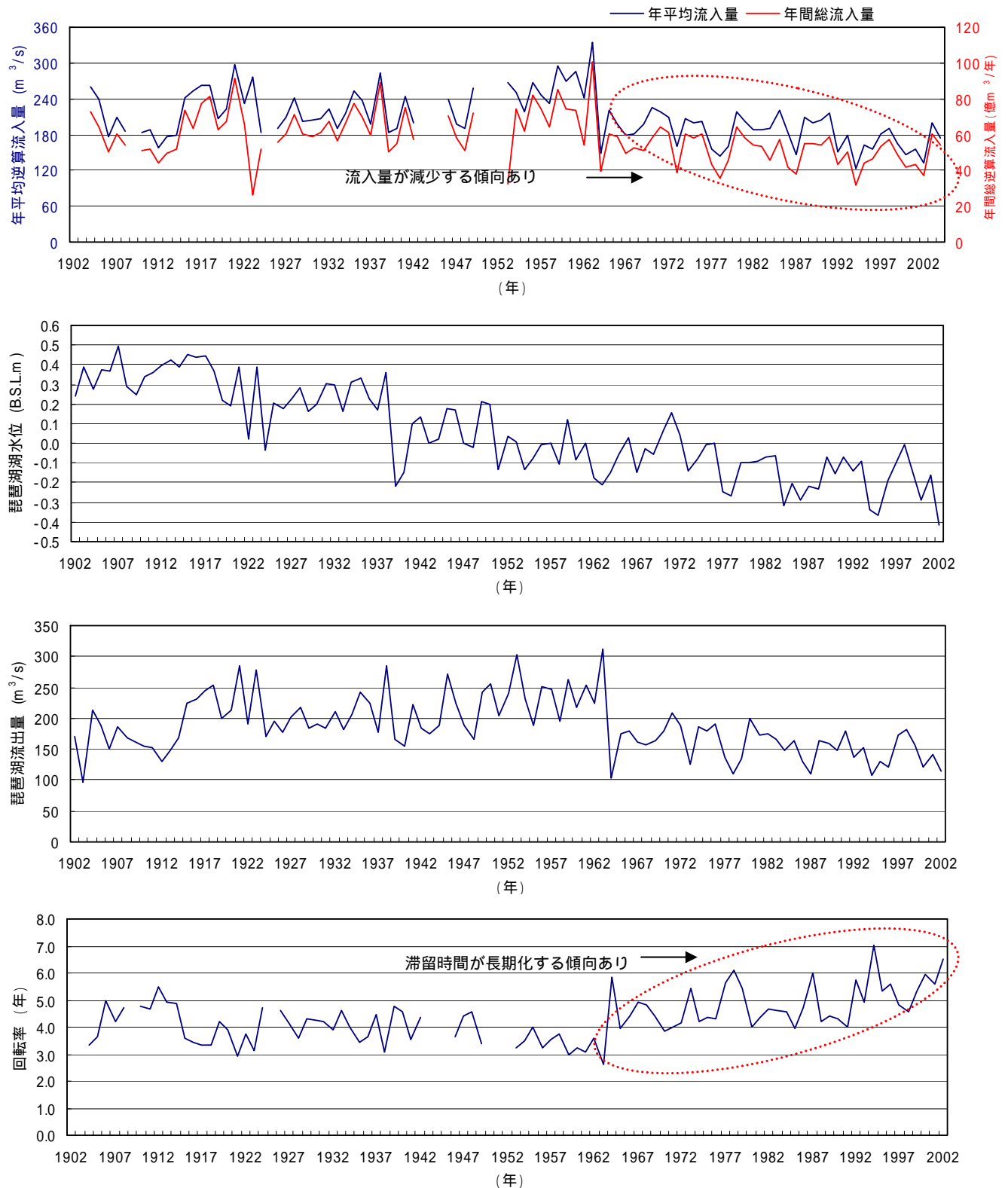


図 1.2.2 琵琶湖の流況に関わる諸量の長期的動向

1.2.2 深層部水温、DO の長期的変遷

(1) 北湖深層部水温の経年的動向

琵琶湖北湖の深層部の水温については、今津沖の調査結果によると、近年では全体的に高く変動も小さくなっており地球温暖化の影響ではないかとの指摘がある。

これらの指摘を確認するため、国土交通省、水資源機構および滋賀県により実施されている定期水質調査結果を用いて水深方向の観測がなされている今津沖中央および安曇川沖中央地点の最深部水温の長期的動向を整理した。その結果を図 1.2.3 に示した。

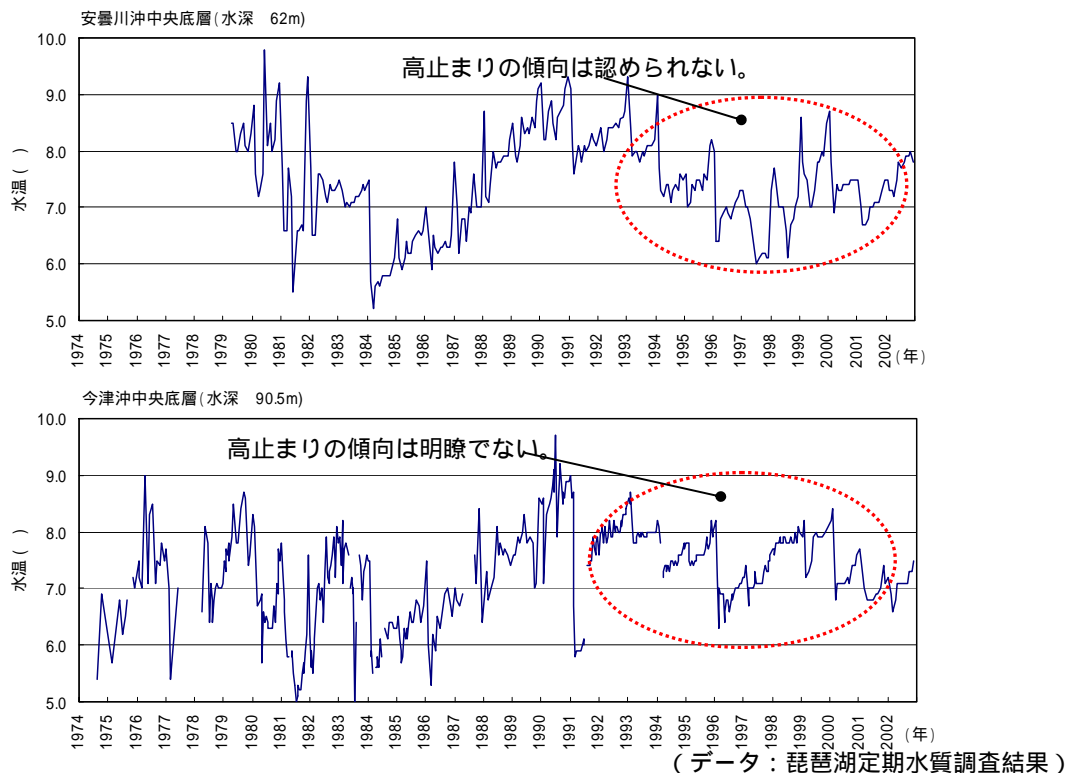


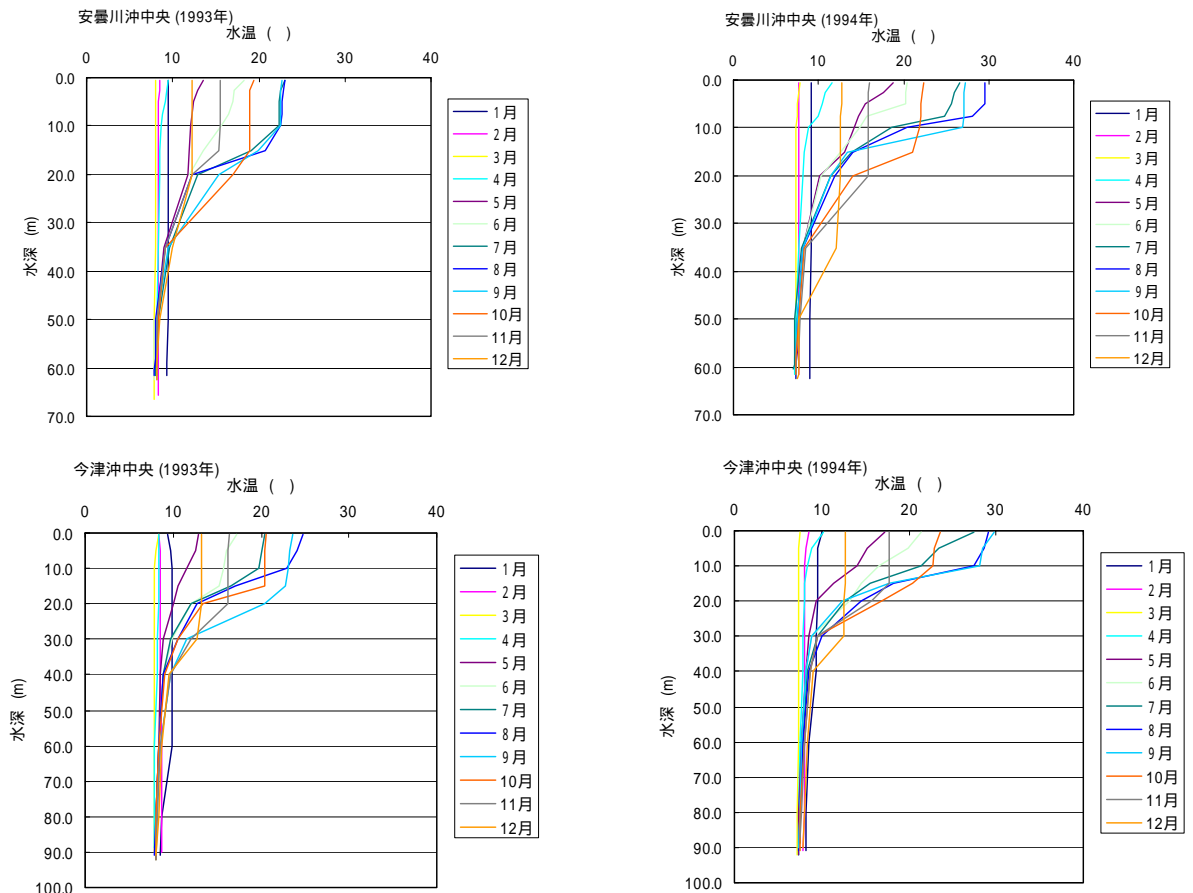
図 1.2.3 琵琶湖各地点最深部水温の長期的動向

これらの結果によると、安曇川沖中央の最深部（水深約 62m）の調査結果による限り、深層部水温の高温化は認められない結果となっている。また、遠藤らが検討した今津沖中央地点最深部の水温についても、高温化の傾向は明瞭でない。

さらに、各地点最深部のみならず温度成層の影響を受けにくいと考えられる水深 40m 以深の各水深別の水温の経時変化を図 1.2.5 および 1.2.6 に示した。なお、参考として図 1.2.4 に、冷夏・長雨であった平成 5 年(1993)と猛暑・渇水であった平成 6 年(1994)における今津沖中央、安曇川沖中央地点の水温鉛直分布の経時変化を示した。

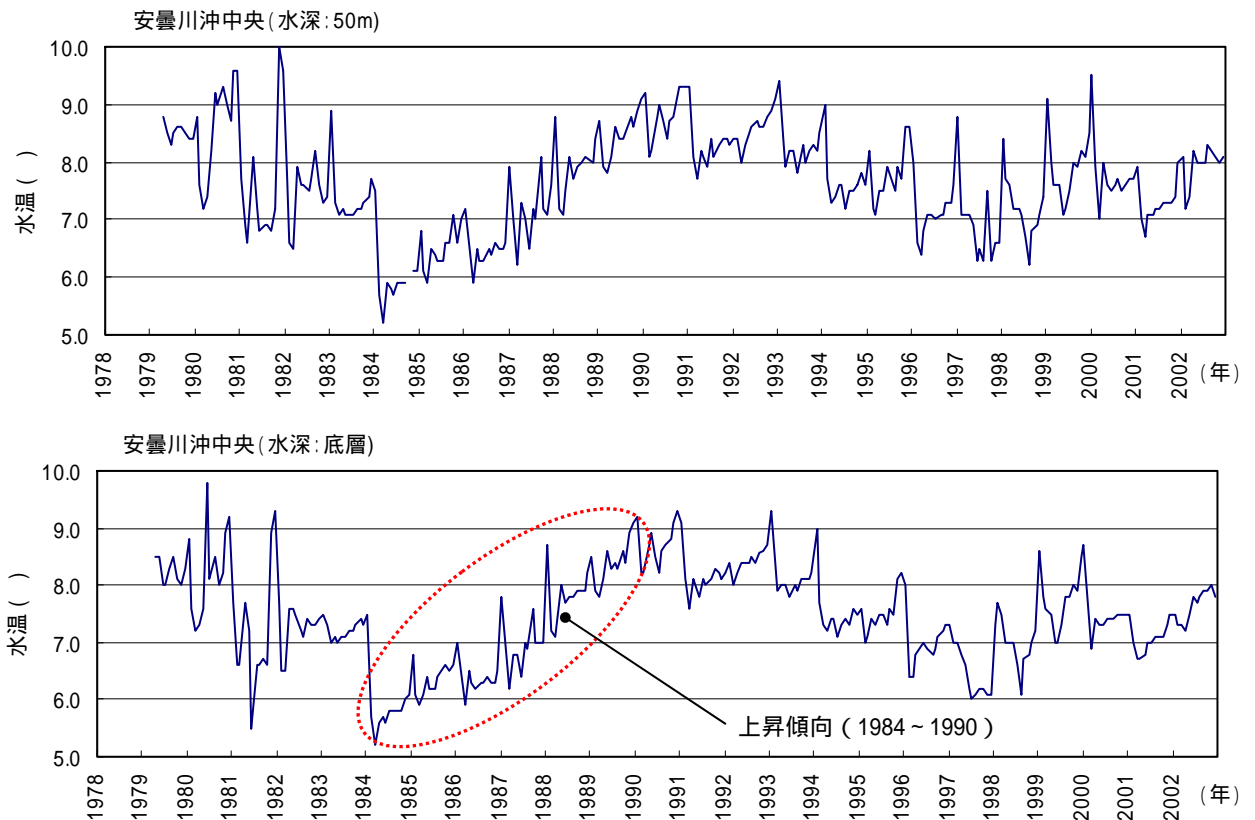
安曇川沖中央地点の観測結果を見ると、水深 50m の地点では、最深部（水深約 62m）の場合と比較すると全体としては、水温レベル、変動パターンも最深部と概ね同様であるが、1996 年以降やや変動が大きくなっている。

つぎに、図 1.2.6 に示した今津沖中央地点の水深別の観測結果結果によると、遠藤らが検討に用いている水深 75m と同様の観測は行われていないが、水深 60m および 80m の結果を比較すると水深 60m の方が全体として水温がやや高めであるが、変動パターンは概ね同様である。これらの観測結果によっても、1990 年代以降の深層水の高温化は明瞭でない。ただし、水温の変動については、過去に比べて変動が小さくなる傾向はうかがえる。



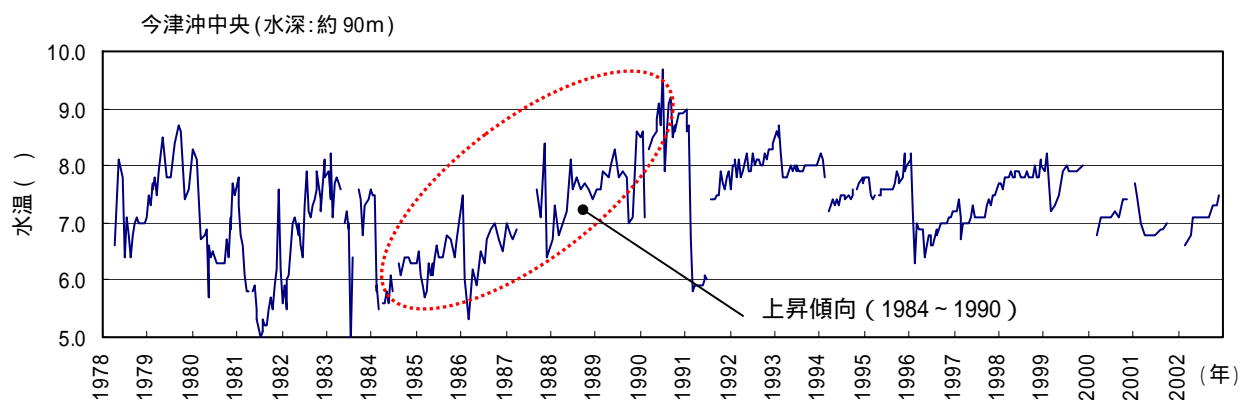
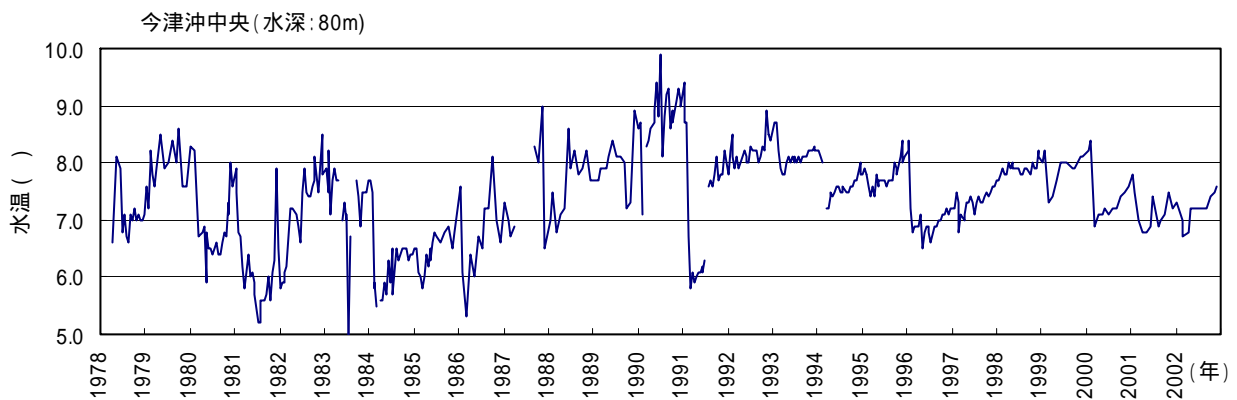
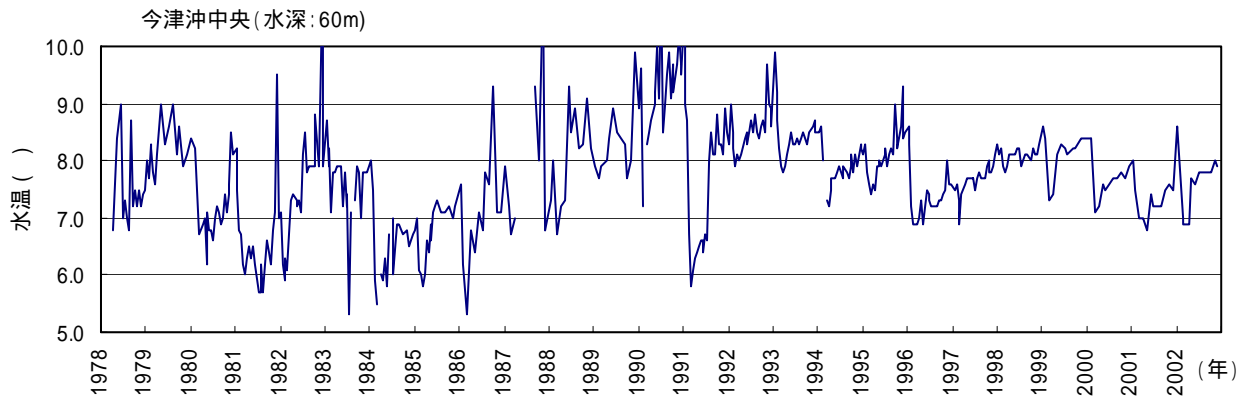
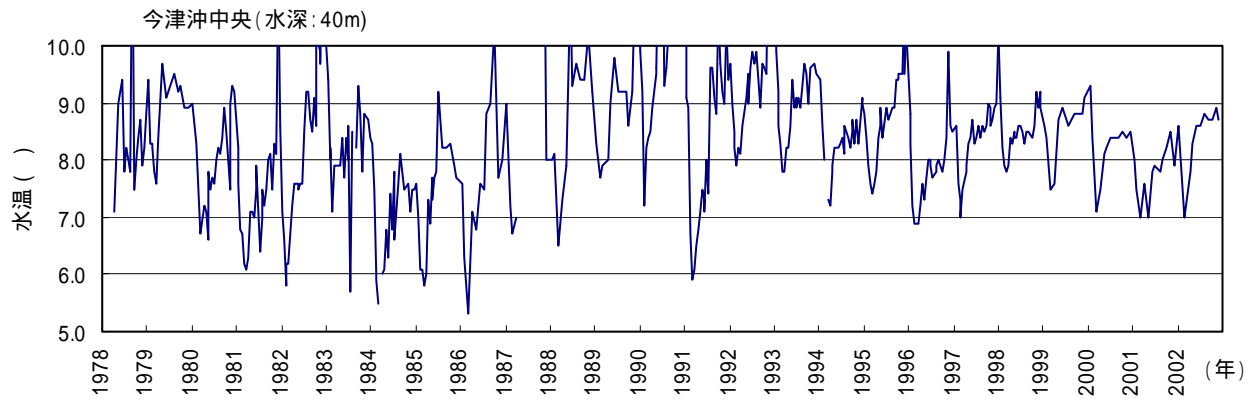
(データ：琵琶湖定期水質調査結果)

図 1.2.4 冷夏・長雨年 (1993) および猛暑・渇水年 (1994) における各地点の水温鉛直分布



(データ：琵琶湖定期水質調査結果)

図 1.2.5 北湖安曇川中央地点における水深別水温の長期的動向



(データ:琵琶湖定期水質調査結果)

図 1.2.6 北湖今津沖中央地点における水深別水温の長期的動向

なお、1985年～1991年頃の期間における深層部水温の上昇については、今津沖中央および安曇川沖中央の観測でも確認できるものとなっている。

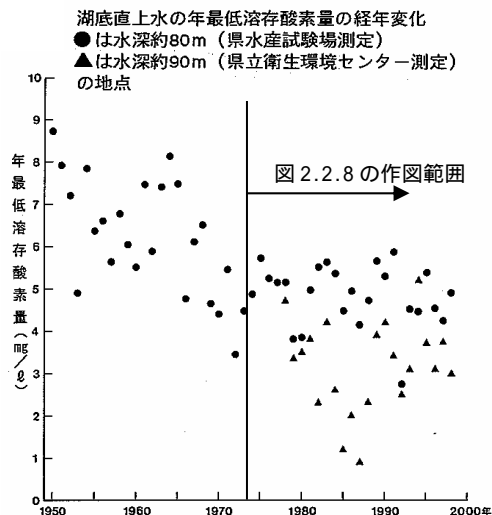
深層部の水温については、各年における気象条件、躍層形成状況、成層崩壊期における気象条件等に影響を受けるものと思われるが、1985年～1991年頃の水温上昇原因を検討することは、今後の北湖深層部の水温やDO濃度の動向を把握する上でも重要な課題と考えられる。

(2) 北湖深層部DO濃度の経年的動向

北湖深層部の溶存酸素(DO)については、1.1節において述べたように年間最低DO濃度が長期的に低下していることが指摘されている。この深層部のDO低下現象について、水温と同様に今津沖中央および安曇川沖中央地点の調査結果にもとづき、各年のDO最低値を経年的に整理すると図1.2.8のとおりである。

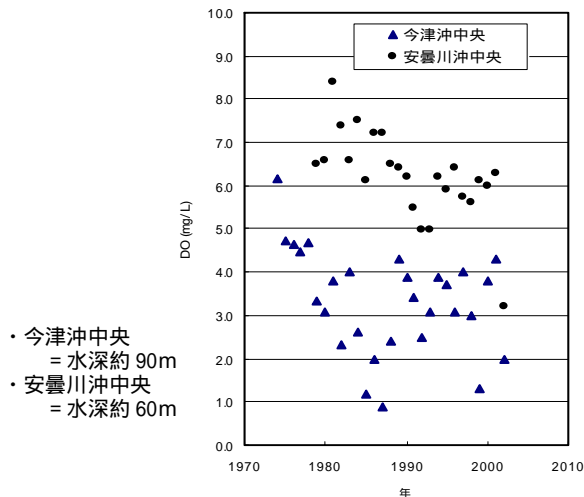
対象としたデータの期間は約30年間と図1.2.7の場合よりも短い。安曇川沖中央地点については、全体としては1980年代に比べてそれ以降で年最低DO濃度がやや低くなっているが、近年では6.0mg/L前後で比較的安定した状況となっている。

一方、今津沖中央地点の結果を見ると、定期水質調査結果によると年最低DO濃度が経年的に減少する傾向はうかがえないものとなっている。



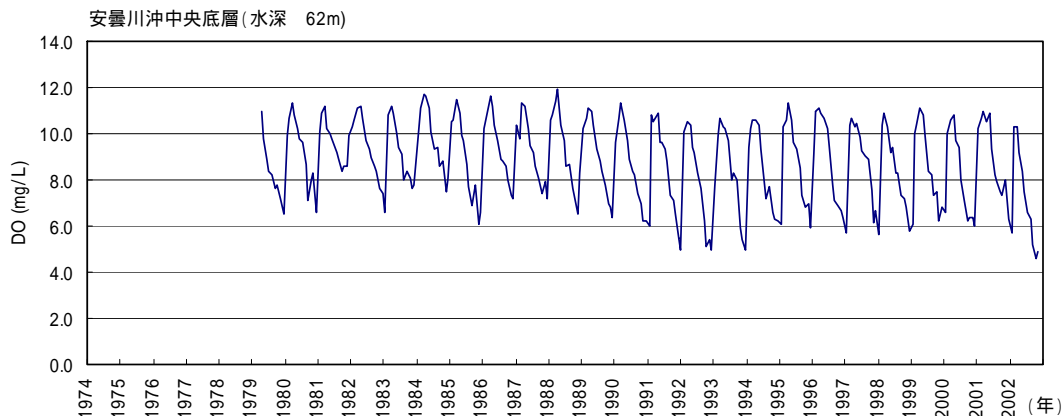
(出典：滋賀県琵琶湖研究所「オウミア No.66」)

図1.2.7 北湖(今津沖中央)地点の深層部におけるDO濃度の変化



(データ：琵琶湖定期水質調査結果)

図1.2.8 各地点底層における年最低DO濃度の経年変化



(データ：琵琶湖定期水質調査結果)

図1.2.9 各地点底層におけるDO濃度の経時変化(その1)

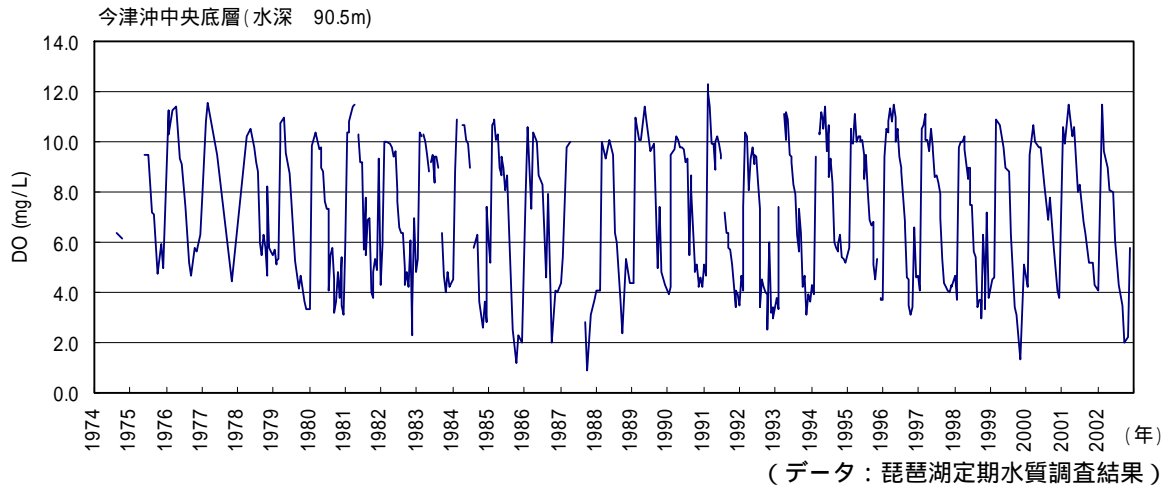


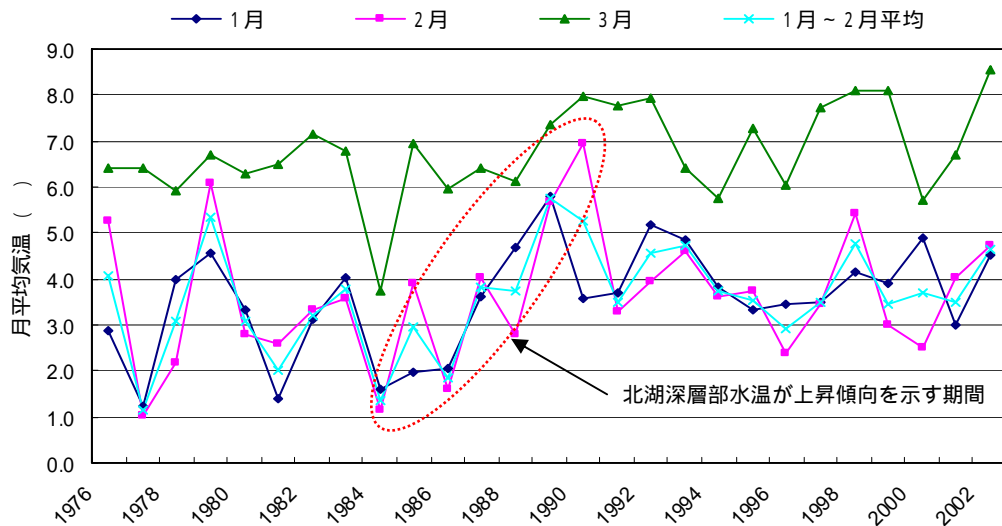
図 1.2.10 各地点底層におけるDO濃度の経時変化

(3) 気温と深層部水温のマクロ的關係

琵琶湖深層部の水温については、今津沖中央および安曇川沖中央地点ともに、1984年（昭和59年）に一度水温が低下し、その後、1990年（平成2年）まで上昇する傾向となっている。また、1991年には再び水温が低下している。この状況を再度確認するため両地点の水温鉛直分布の経時変化を図1.2.14～1.2.17に示した。同図にはあわせて彦根地点の気温を示したが、底層の水温が低下している年では、循環期に全層にわたり水温が低下し、同時期の気温も他の年に比べて低くなる傾向が認められる。

このことから、完全循環となる1～2月における気温（彦根）の月平均気温を整理すると図1.2.11に示すとおりであり、1984年および1991年における完全循環期の気温の低下状況、1984～1990年の上昇状況が酷似するものとなっている。

これらの関係を、相関図の形で整理すると図1.2.12～1.2.13に示すとおりであり、循環期における気温が高いほど底層水温が高くなる関係が比較的明瞭に現れるものとなっている。



(データ：彦根気象台)

図 1.2.11 琵琶湖完全循環期（1～2月）における月別の月平均気温の推移（彦根地点）

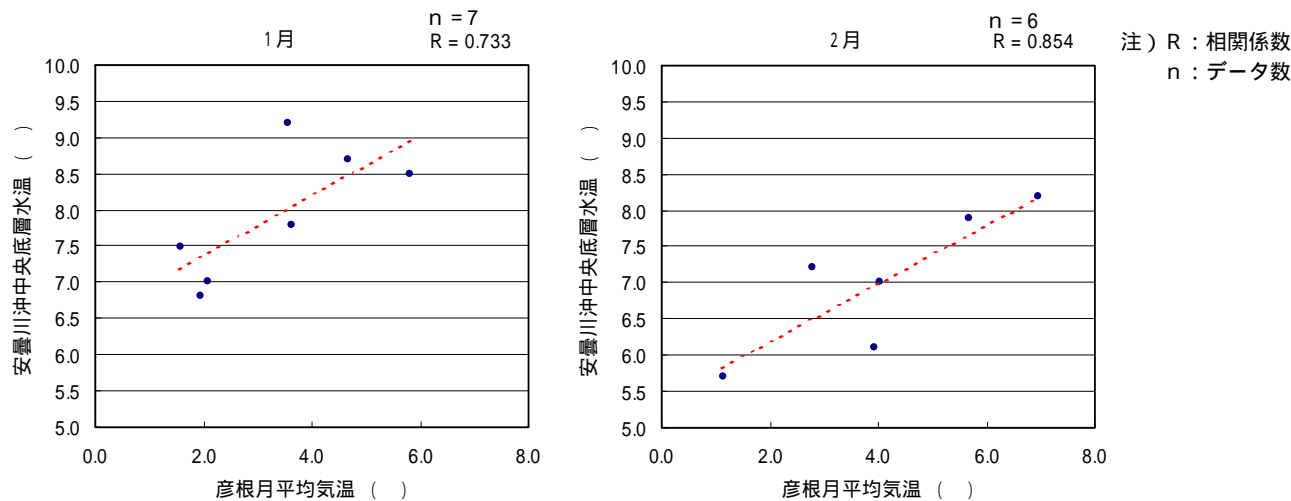


図 1.2.12 琵琶湖完全循環期（1～2月）における月平均気温と各地点底層水温の関係（その1）

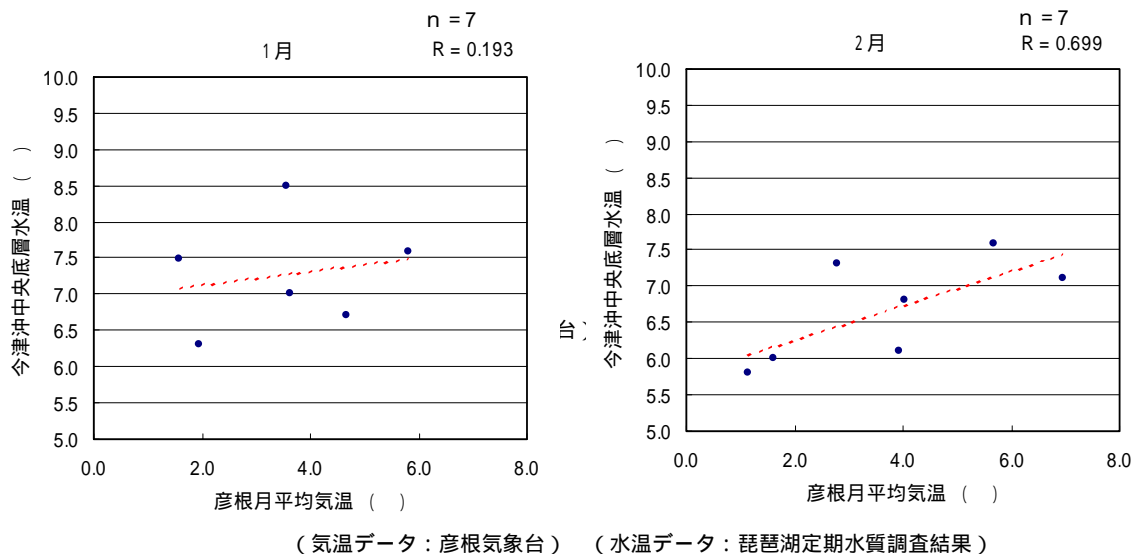


図 1.2.13 琵琶湖完全循環期（1～2月）における月平均気温と各地点底層水温の関係（その2）

以上までの検討成果を踏まえ、北湖深層部水温の変動要因について整理すると、つぎのとおりである。

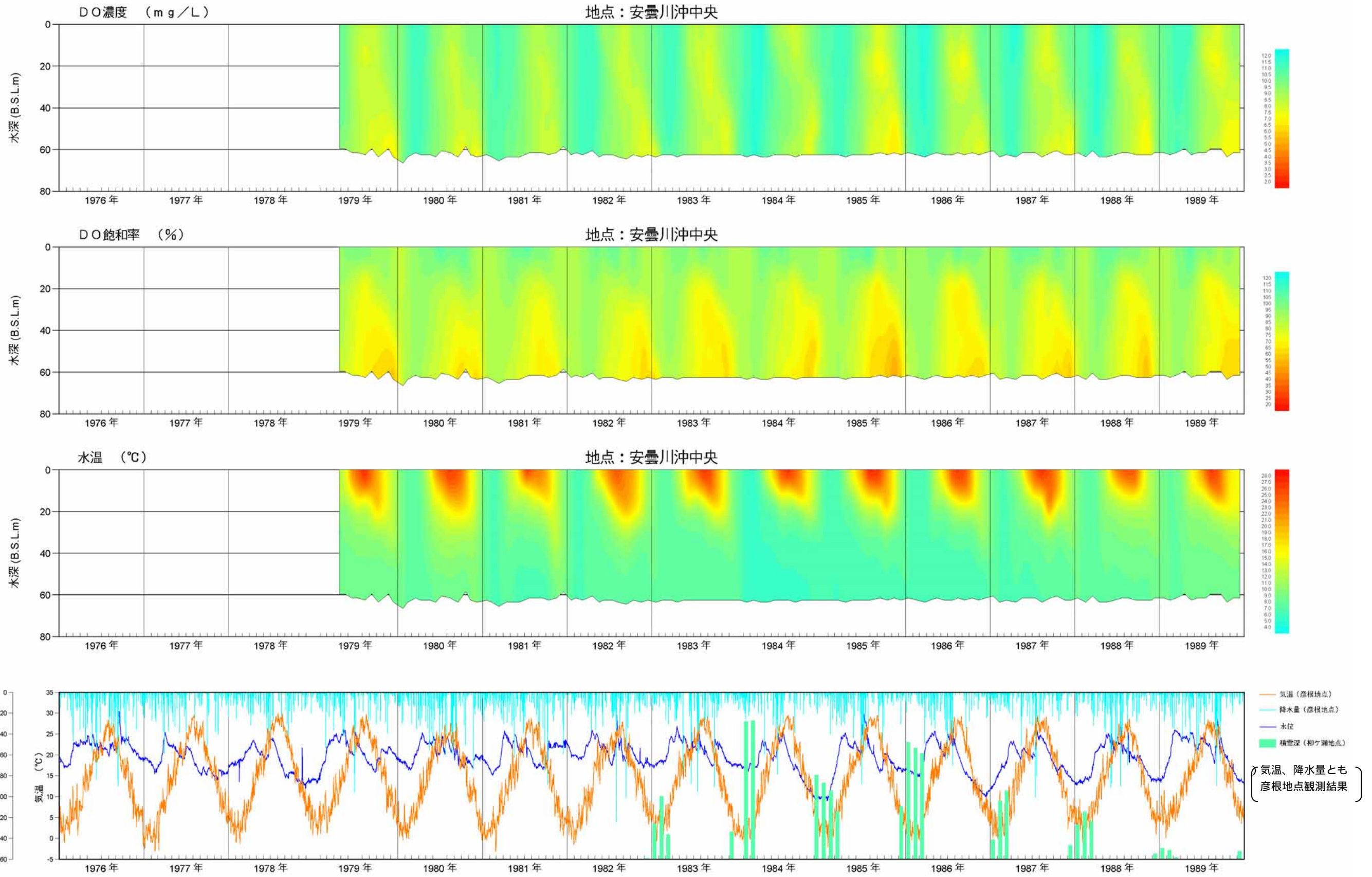
北湖深層部水温の変動要因に関するまとめ

北湖深層部の水温は、完全循環期の気象状況に大きな影響を受け、循環期の気温が低い場合は、循環が深層部まで及ぶとともに、水温も低下する。

反対に、暖冬により循環期の気温が高い場合は、深層部の水温も高くなり、これらの状況が経年的に継続する場合は、深層部に熱が蓄積され深層部の水温は上昇する。

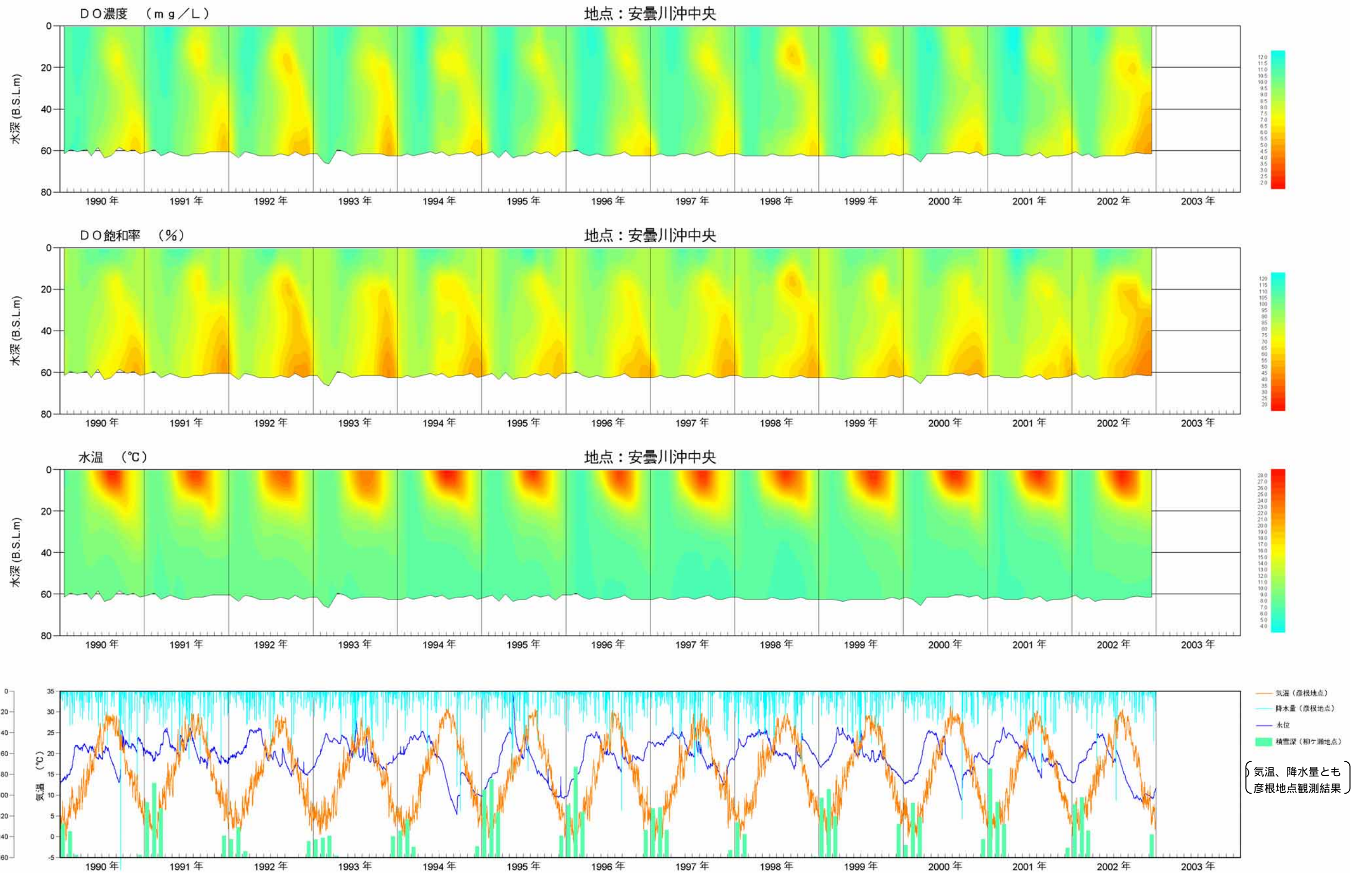
暖冬が経年的に連続し、その後循環期に比較的寒い状況になった場合でも、深層部の水温が比較的高いために循環は深部まで及び、水温も低下するといった変動を示すものと考えられる。（1991年の状況）

以上のことから、深層部の水温は主として1～2月の完全循環期における気温の影響を受けて変動しているものと判断される。近年では地球温暖化の影響により気温が上昇していることが指摘されており、深層部の水温も気温上昇の影響を受ける可能性があるが、定期調査結果による限り現時点では経年的に深層部水温が上昇する傾向はうかがえない。しかしながら、今後ともデータを蓄積し、深層部水温の動向を監視していくことが重要である。



(気象データ：彦根气象台)
(水質データ：琵琶湖定期水質調査結果)

図 1.2.14 安曇川沖中央地点における水温、DO等の鉛直分布の経時変化(その1)



(気象データ：彦根気象台)
 (水質データ：琵琶湖定期水質調査結果)

図 1.2.15 安曇川沖中央地点における水温、DO 等の鉛直分布の経時変化 (その 2)

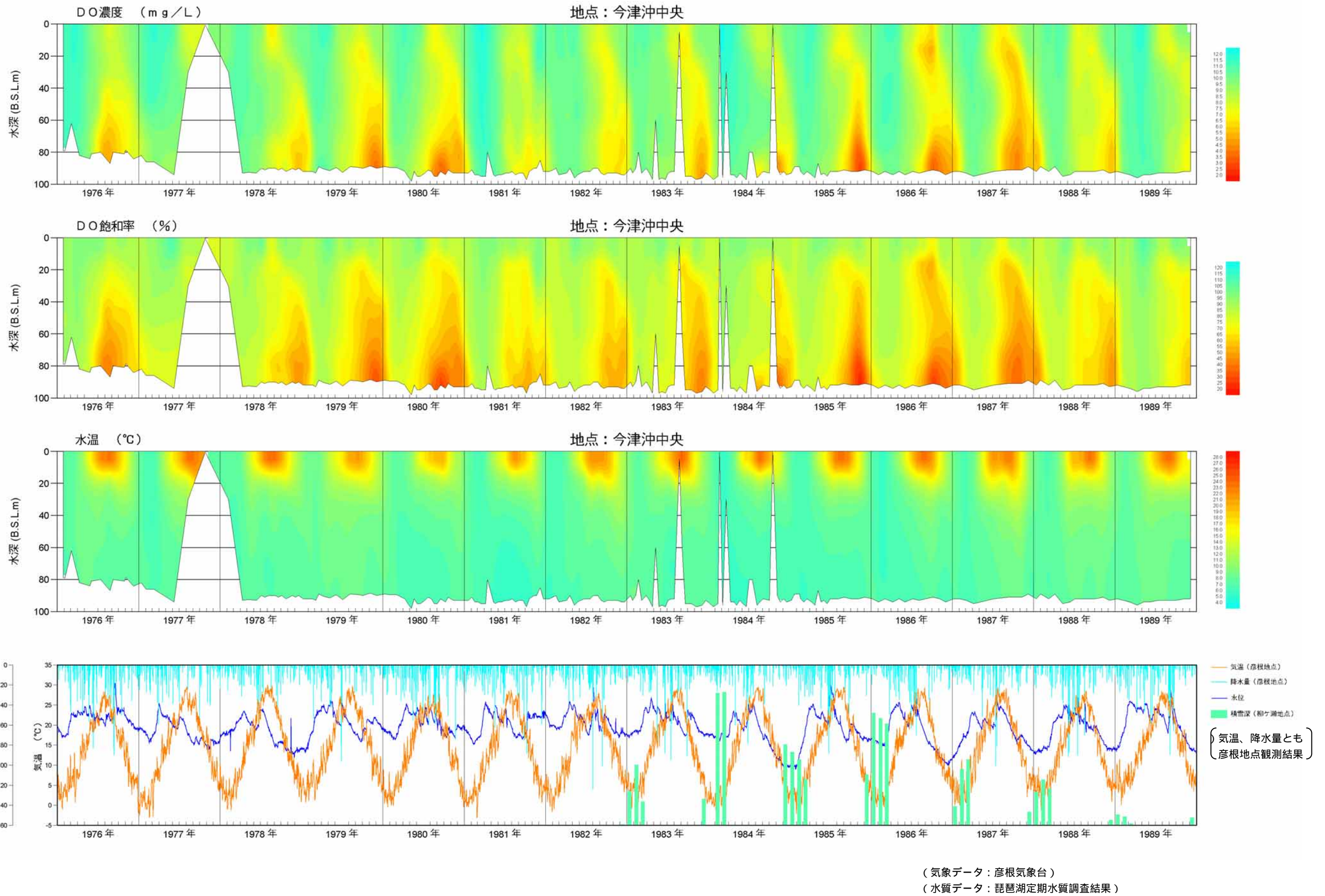
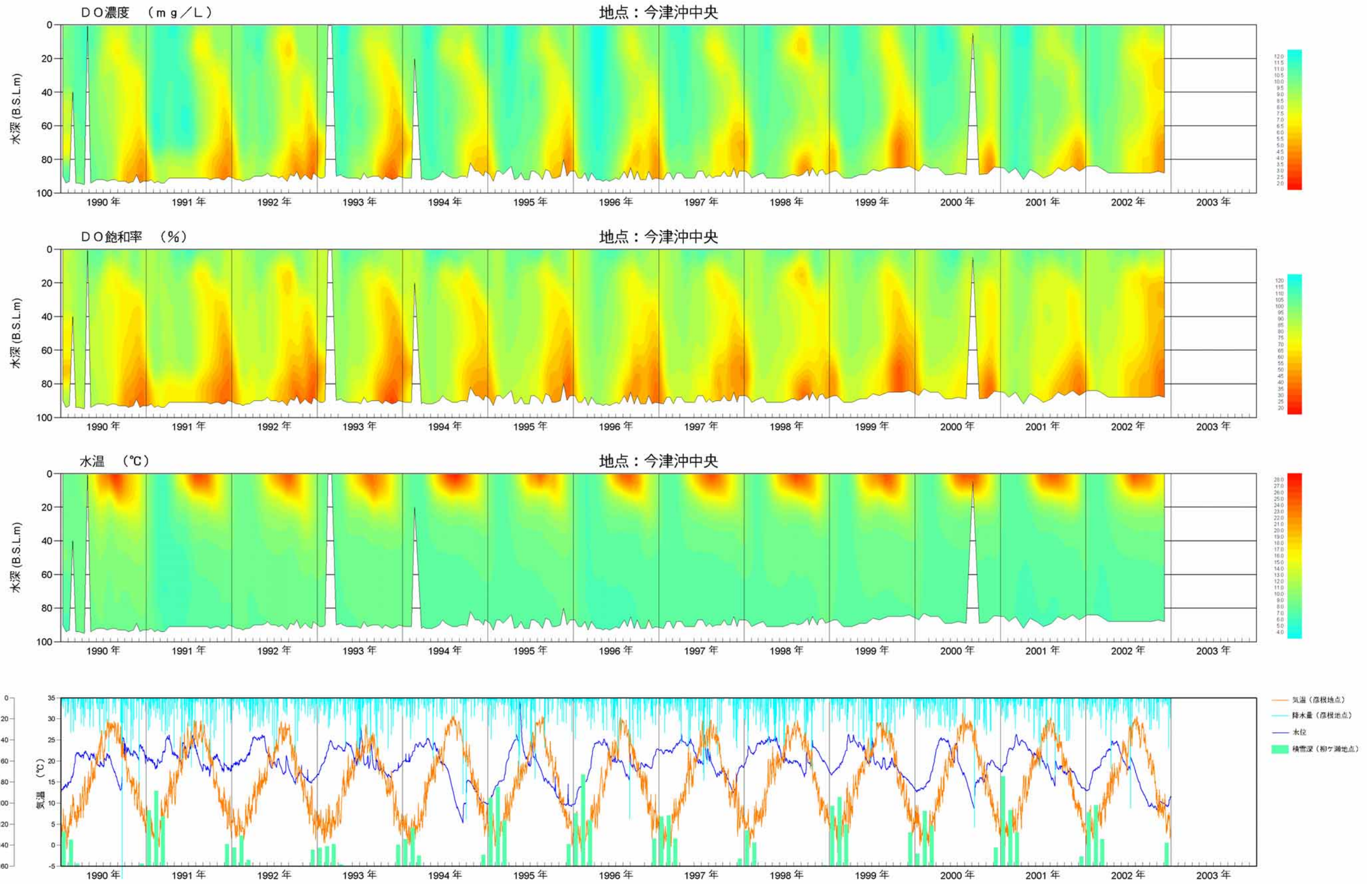


図 1.2.16 今津沖中央地点における水温、DO 等の鉛直分布の経時変化 (その 1)

(気象データ: 彦根気象台)
(水質データ: 琵琶湖定期水質調査結果)



(気象データ：彦根気象台)
 (水質データ：琵琶湖定期水質調査結果)

図 1.2.17 今津沖中央地点における水温、DO 等の鉛直分布の経時変化 (その 2)

(4) 琵琶湖冷却期におけるDO回復時の状況とその要因の検討

深層部DOの経時変化

琵琶湖深層部のDO濃度の経時変化を図1.2.9および1.2.10に示したが、このうち今津沖中央地点の底層DOの経時変化を年別にかつ融雪出水量別に示すと図1.2.18のとおりである。これらの資料より、底層DO濃度の経時変化の特徴を簡単に整理すると、つぎのとおりである。

- 1) 深層部のDO濃度は季節変化が卓越しており、概ね2~7月に高く、8~1月に低くなる変動パターンを示す。
- 2) 濃度が最も低くなる時期は年によって異なり、10月~翌年の2月とかなり幅がある。また、最も濃度が低下した場合は1.0mg/L程度とかなり低くなっている。
- 3) 一方、各年ともに概ね1~2月において冬期の湖水の循環により深層部のDO濃度も回復している。回復時のDO濃度レベルは年によって異なり、10~12mg/Lの範囲にある。

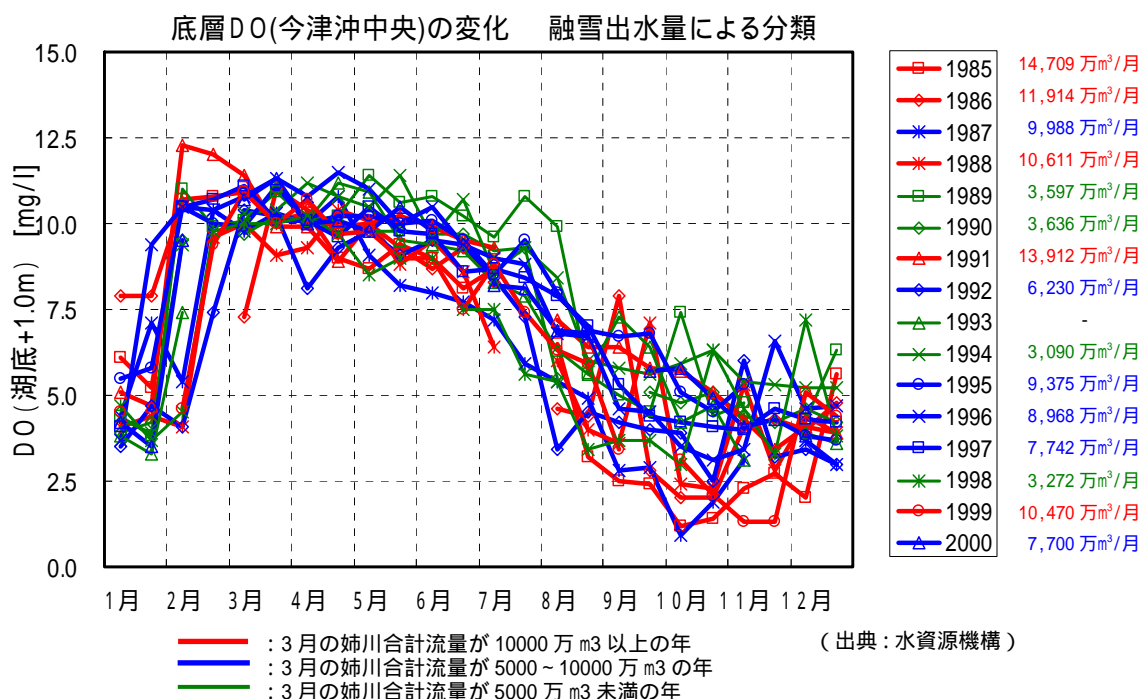


図 1.2.18 琵琶湖深層部DOの経時変化 (融雪出水量の分類による)

深層部DO濃度と水温、気温との関係

深層部のDO濃度は、上述したように冬期の湖水の循環によって回復する。また、水温が低いほど循環が深部に及ぶとともにDO濃度も高いレベルに回復することを述べたが、これらの関係を現地データで検討すると、図1.2.19および1.2.20のとおりである。

- 1) まず、底層DO濃度と水温の関係については図1.2.19に示すとおりであり、今津沖中央および安曇川沖中央地点ともに、水温が低いと底層のDO濃度が高くなる関係が認められる。
- 2) 気温との関係については、当日の気温が直ちに底層の水温に影響を及ぼすことはなく、深部まで循環が及ぶまでの冷却条件が重要である。ここでは、底層DO濃度と気温の大まかな関係を把握するため水質調査日を含む前30日間平均気温との関係を検討した。その結果、安曇川沖中央地点では、深層部DO濃度と気温との間に明瞭な関係が認められ、気温が低いほど深層部のDO濃度が高くなる関係が認められる。

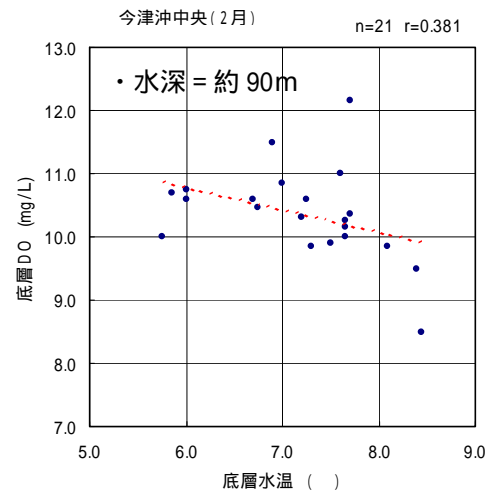
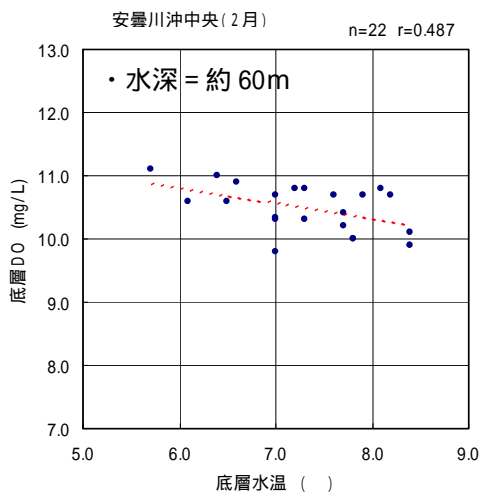
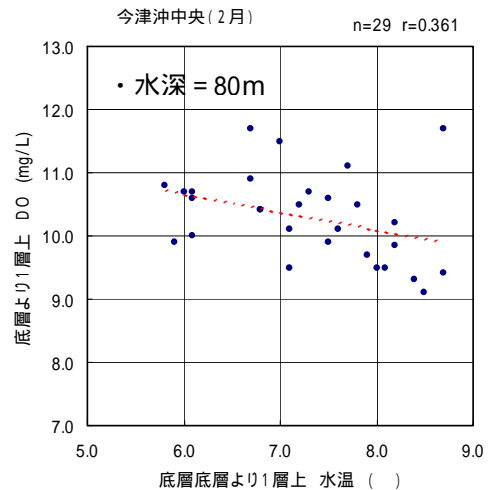
3)一方、今津沖中央地点においても、気温と底層 DO との間に同様の関係が認められるが、**図 1.2.20** に示すように、2つのグループに分類される。

4)図中の上部に位置するグループは、前述した深層水温が経時的に高くなっている 1984～1991年の期間のものが3点あり、今ひとつは2002年の結果である。

5)同期間においては、暖冬が続き水温が高いことから、少し寒い冬であっても循環が深部にまで及ぶことからこのような関係が存在するものと推察される。

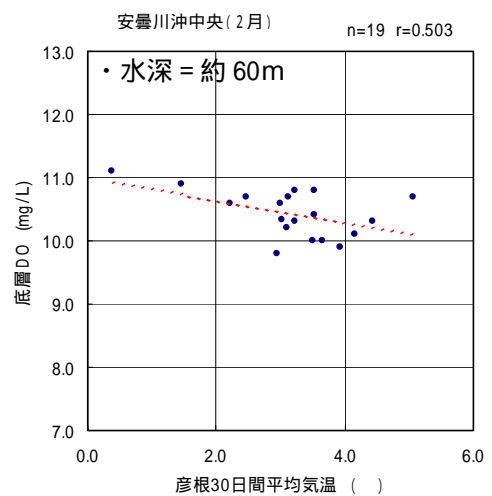
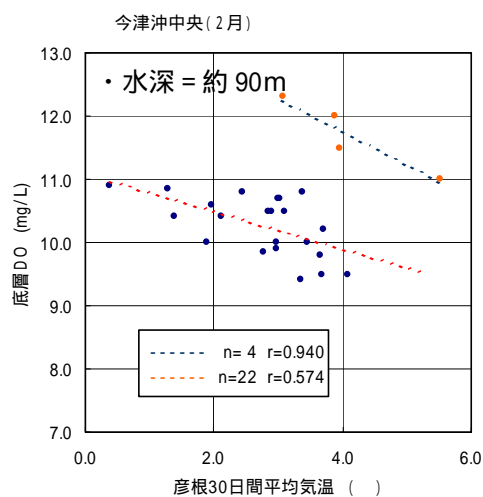
以上のように、実測値からも深層部の DO 濃度は、循環期の水温や、気温に支配されていることをおおよそ示すことができる。

n : データ数、r : 相関係数を示す。



(データ出典: 琵琶湖定期水質調査結果のうち 1977～2002年の調査結果による)

図 1.2.19 琵琶湖深層部における水温とDO濃度の関係



(データ出典 水温: 琵琶湖定期水質調査結果 1977～2002年、気温: 彦根気象台)

図 1.2.20 琵琶湖深層部における水温と気温の関係

(5) 過去と現代における琵琶湖DOを取り巻く環境変化のとりまとめ

琵琶湖の溶存酸素(DO)について、深層部のDO濃度が高かったとされる1960年代(過去)と低下を指摘されている1990年代(現代)を対象に、大胆な仮定をもとにDOを取り巻く要因のマクロ的な変化を検討した。その結果を図1.2.22に示した。

この結果をもとに、後述する循環期におけるDO回復メカニズム検討に先立ち、過去と現代において琵琶湖のDOを取り巻く環境が大きくどのように変化したかを整理すると、つぎのとおりである。

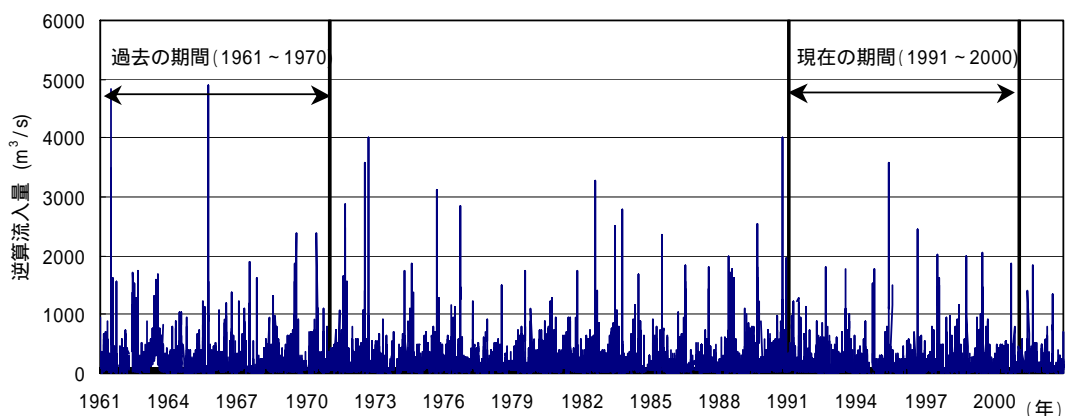
供給としての流入水量については、前述したように近年流入量が少なくなる傾向にあり、今回の試算によると、90年代流入水量は60年代の約75%となっている。

その結果として、河川由来のDO流入量も減少し、年間約1.7万t程度少なくなっている。これは、姉川由来のDO量の8倍強となっている。(姉川由来DO量を約4,300t/年として)

また、図1.2.22に示すように出水回数や規模も縮小する傾向にあり、出水によって湖内DOを消費する汚濁物も大量に流入するが、出水の規模・頻度の減少により、年間に換算して約6千t弱のDO流入量が少なくなっている。

琵琶湖深層部のDO回復の要となる循環期の気温の状況については、90年代は、60年代に比べて平均1℃気温が上昇している。この結果をもとに循環期における水温(60年代6月：寒い年の実績値を勘案、90年代7月)を仮定し、現存量を比較すると約7千t程度現代のほうが少なくなる結果となった。

また、DO消費にかかわる事項として、過去に比べ現代の滞留時間が長くなっていることや成層形成期における水温が過去に比べ現代のほうがやや高くなり、成層形成期間が長くなる可能性があること、これらに伴うDO消費量が多くなる可能性が指摘される。

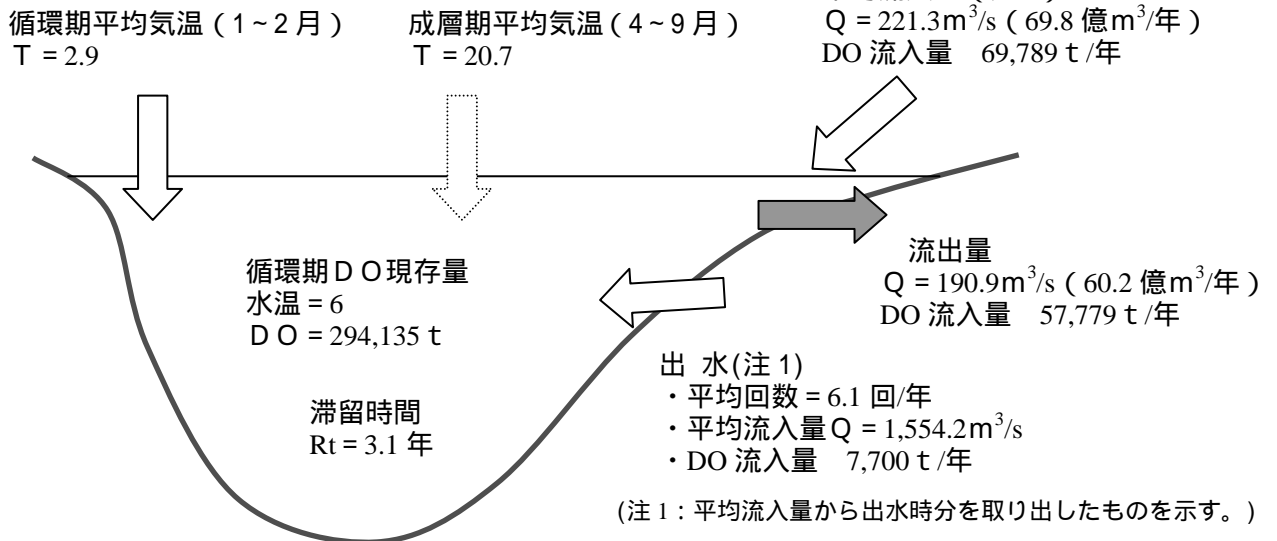


(データ：琵琶湖河川事務所データより算出)

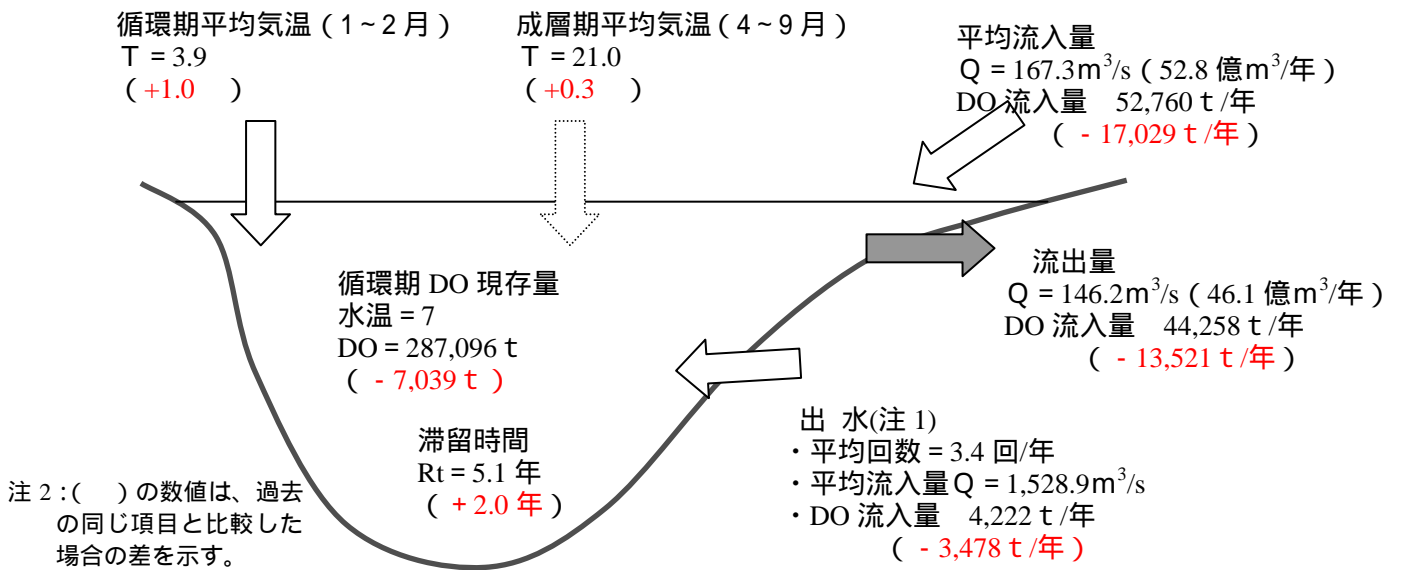
図1.2.21 琵琶湖逆算流入量の推移

以上のように、現代は過去に比べると琵琶湖への DO 供給量や消費量から、マクロ的には DO が低下しやすい環境にあると言える。

過去の状態(1961 ~ 1970 年の 10 ヶ年平均)



現代の状態(1991 ~ 2000 年の 10 ヶ年平均)



計算上の仮定
 流入量：逆算流入量を採用
 流入 DO 濃度：過去でデータがないため、過去、現在ともに 22 流入河川の DO 濃度の 1991 ~ 2000 年の単純平均値を採用 (10mg/L)
 出水回数：逆算流入量より 1,000m³/s を超えるものを対象 (図 1.2.21 参照) とし、1 年あたりの平均回数を算出、水量も同様に、対象出水時の流入量を単純平均した値を採用
 出水時 DO 濃度：出水時の水温を平均 20 と仮定し、同温度における DO 飽和濃度 (9.4mg/L) を採用
 流出量および流出 DO 濃度：流出量は実績値を採用。DO 濃度は過去のデータがないため両期間ともに、1991 ~ 2000 年の唐橋流心の実測平均値を採用
 滞留時間：前出のものと同様に、琵琶湖の湖容積を逆算流入量で割った値、その期間平均値を採用
 循環期水温：過去の実績から設定
 循環期 DO 現存量：水温から飽和 DO 濃度を算出し、実測値における平均飽和率 (85%) を乗じて濃度を算出。この濃度に琵琶湖の湖容積を乗じて現存量を算出

図 1.2.22 過去と近年における DO 供給・消費等に関わる指標のマクロ比較

琵琶湖深層部DOの冬季の回復の支配要因

【調査結果（近30年程度の気象・琵琶湖水質観測データによる）】

深層部の水温（今津沖中央、安曇川沖中央）の経年変化傾向は、気温（彦根）の変化傾向と良好な類似を示す。循環期（1～2月）における気温が高いと底層水温が十分低下しないという関係がみられる。一般に琵琶湖のDO濃度が底層まで回復するのは2月であり、2月の底層DO濃度は、循環期の深層水温が低いほど、またその冬の気温が低いほど高くなる関係がみられる。

【調査結果から推察されること】

深層部のDOが高いレベルに回復するためには、循環期の琵琶湖水温がいかに低下するか、すなわちいかに寒い冬であるかが重要である。

（DO回復の度合いは、回復時期（全層循環の開始・終了時期）の長さおよび水温に依存するため、冬季気温の影響は大であると考えられる。）