平成 29 年度　修士論文

宮城県釜房貯水池における曝気循環が フォルミディ.ウム消長に及ぼす影響の評価

指導教員　　中村 恭志　准教授
木内 豪　教授

東京工業大学　大学院環境社会理工学院　融合理工学系地球環境共創コース

修士課程　16M51512

押元 啓介

目次

第1章　序論……1
1.1　はじめに……1
1.2　対象フィールド……2
1.3　既往研究……3
1.4　研究の目的と構成……4
第 1 章図表集……6

第2章　現地観測結果に基づく曝気プルームモデルの物理パラメータの調整……9
2.1　既往の曝気循環モデルの概要……9
2.1.1　曝気循環装置による流動過程……9
2.1.2　ダブルプルームモデルの基礎方程式……10
2.1.3　ダブルプルームモデルの計算手順……11
2.2　過去の現地観測結果に基づく物理パラメータの調整……14
2.3　長期連続モニタリング結果による物理パラメータの検証……17
第 2 章図表集……19

第3章　フォルミディウムの成長速度に関する回帰式の作成と有用性の検証…… ……26
3.1　フォルミディウムの成長速度に関する回帰式の概要……26
3.1.1　釜房貯水池の流域特性・曝気稼動状況……26
3.1.2　フォルミディウムの成長速度における回帰式作成の概要……27
3.2　フォルミディウムの成長速度の算出……29
3.3　日射、水温、栄養塩データの整理……29
3.3.1　日射……29
3.3.2　水温……30
3.3.3　栄養塩……31
3.4　風速データの整理……32
3.4.1　ウェダバーン数の概要……32
3.4.2　ウェダバーン数の算出……32
3.5　曝気による輸送量データの整理……34
3.5.1　成長速度と曝気による下降流量における関係性の考察……34
3.5.2　一定水深を通過する下向き鉛直輸送量……35
3.5.3　透明度の一定倍水深を通過する下向き鉛直輸送量……36
3.5.4　曝気循環装置(下降プルーム)としての指標の選定……38

3.6　重回帰分析による回帰式の作成と有用性の検証……38
3.6.1　重回帰分析の概要と準備関係性の考察……38
3.6.2　重回帰分析……39
3.6.3　回帰式作成における説明変数の選定……40
3.6.2　作成した回帰式の有用性の検討……41
第 3 章図表集……44

第4章　　曝気循環の運用方法がフォルミディウム消長に及ぼす影響……109
4.1　3 次元貯水池流動モデル……109
4.1.1　基礎方程式……109
4.1.2　Soroban 格子法と計算格子の配置……111
4.1.3　ダブルプルームモデルの組み込み……112
4.2　曝気循環を通常稼動した際の再現計算……113
4.2.1　計算期間と計算条件……113
4.2.2　計算結果と観測結果の比較……114
4.3　曝気循環を仮想条件下で稼働した際の再現計算……115
4.3.1　計算条件……115
4.3.2　計算結果・比較……115
4.4　各条件下でのフォルミディウムの成長速度推算と影響評価……117
第 4 章図表集……119

第5章　　結論……145

謝辞……146

第 1 章　序論

1.1　はじめに

日本は過去より洪水・渇水の問題が絶えず，その対策としてダムが建設された経緯がある．今日においてダムの用途は拡大し，水を安定して供給するという当初の目的に加えて，水力発電や工業用水，観光地としての役割も果たしておりダムの存在は私たちの生活に欠かせない重要な社会基盤となっている．しかし高度経済成長期に多く建設されたダムは高齢化が進んでいる．その一方で，ダムの新たな建設は適地の減少や社会情勢の変化などにより非常に難しい状況である．したがって既存の貯水池が社会に対して担っている役割を今後も維持していくためには能動的な管理を実践し，有効に活用していくことが求められる．ここにおける能動的管理とは，湖沼・ダムを管理する段階で，湖内の流動状況や物質の輸送過程，季節的な状況変化などのデータを蓄積しておき，予めその特徴などを把握した状態で，問題が発生する前に対策を打つという管理方法である．そのような管理方法が確立し実行されれば起こりうる問題を事前に防ぐことが可能になる．

貯水池は海などとは対照的に閉鎖性を有し，大きな流動が生じないために上流より流入してきた有機物・栄養塩などが蓄積しやすく急峻な成層が発生するケースも多く見受けられる．その結果引き起こされる水環境上の問題としてアオコなど藻類の異常増殖による富栄養化があげられる．同現象は景観障害のみならず，フォルミディウムなどの藻類が生産する 2-メチルイソボネオール(2-MIB)による異臭発生，それに伴う上水の異臭味障害，藻類増殖による湖水の水質悪化，それによる利水障害などが懸念される．これらフォルミディウムなどの藻類は光合成によって増殖する．彼らには自泳能力がないが貯水池内に水温成層が形成されている状況下では鉛直輸送が鈍くなり彼らを上層にとどめやすくしてしまい，異常増殖さらには水質悪化を招く危険性が高まる．貯水池内における水質の安定的な維持は，その水を使う私たちの生活にとっても重要な管理項目である．

近年では水質悪化を未然に防ぐ能動的な管理の一つとして，曝気循環装置(以下，曝気装置)を用いて湖内の流動を人為的に変化させる試みがなされている．曝気装置は深い水深から気泡を放出し，その浮力を利用して湖内に循環を発生させる装置である．曝気装置は湖内に鉛直方向の循環流，広域的な循環流を発生させ，水温成層を破壊し，表層水温の低下，フォルミディウムなど藻類を光合成不可能な層まで輸送する働きが期待されている．同装置は本研究の対象地である宮城県釜房貯水池の他にも大分県松原ダム，愛媛県鹿野川ダム，広島県土師ダム，岡山県旭川ダム，広島県椋梨ダムなどでも導入されており水温成層の破壊や藻類の増殖抑制など定性的な有用性が確認されている．

その一方で曝気装置の稼働・維持管理には莫大なコストがかかり，効率的な運用が求められている．しかし，曝気装置による藻類低減の定量的効果に対する知見は不足している状態にあり，時事刻々と変動する貯水池の状態を見ながらの具体的な曝気装置の運用効率化というところまでには至っていない．

1.2　対象フィールド

本研究の対象地である釜房貯水池は釜房ダムを建設した際に形成された人造湖である．釜房ダムは 1940 年に洪水調節，農業・工業用水の確保のため建設計画が上がった．第二次世界大戦の影響で建設は一時中断したが，戦後における台風の洪水被害が多発したために建設を再開し 1970 年 12 月に(当時で)総事業費 87 億 2 千万円を投じて完成した[1)]．釜房ダムは重力式コンクリートダムで堤高 45.5m, 堤頂長 177m, 堤長幅 7.5m, 堤体積は約 100,000 ㎥である．ダムの総貯水量は 45,300,000 ㎥，湛水面積は 3,900,000 ㎡，常時満水位 E.L.149.8m，夏季制限水位 E.L.133.0m である[2)]．湖心部は約 E.L.120m で水深が 25m 程度になる一方, E.L.132m～E.L.143m である水深 10m 前後の浅瀬が広がるなど 3 次元的に非常に急峻な地形を有している(図 1.3-1)．釜房貯水池は仙台市の西方約 25 ㎞，宮城県柴田郡川崎町の名取川の支流である碁石川に位置するダム湖である．釜房貯水池には上流より前川，北川，太郎川の 3 河川が流入している．

ダムの用途としては単なる治水，利水に留まらず灌漑，工業用水，発電，上水としての供給を行う多目的ダムである[3)]．

釜房貯水池は竣工時の 1971 年よりフォルミディウム(藍藻類)の異常増殖と共に異臭味の発生が確認されてきた．その一対策として仙台市水道局は活性炭を投じ，異臭味であるカビ臭の発生防止に努めた．しかし活性炭のみでは限界があり 1984 年に水質保全のためのパイロット実験を開始，また曝気循環装置(間欠式揚水筒)を 4 基設置，その 2 年後に間欠式揚水筒をもう一台設置，更に 1989 年には大型の間欠式揚水筒を設置して異臭味は一時的に収まった．ところが，1996 年より，再び異臭味が発生し原因究明を行った結果，その原因物質が，フォルミディウムの生成する 2-MIB という化学物質であることが分かった．そして 2004 年に既設の間欠式揚水筒の曝気循環装置を夏季強循環施設に改良し，新たに多段式壇気曝気施設を設置した．したがって現在では多段式散気曝気施設(常用散気式曝気)4 基(図 4.3-2)，夏季強循環施設 6 基(図 4.3-3)を設置している．しかし依然として近年は低水準ではあるがカビ臭が断続的に発生している．

また釜房貯水池は曝気装置の稼働・維持管理の膨大なコストにも悩まされている．夏季強循環曝気の稼働には 1 か月フルで稼動させた場合に電気代のみで 50 万円かかるとされる．また，常用の散気曝気に関しては空気を送る管の取り換えに 1 億円かかるとされ，曝気の効率的運用が迅速な課題となっている．そこで釜房貯水池では今年度より試験的に，水位が低下する, つまり貯水量が大幅に低下する 8 月～9 月にかけて曝気装置の稼働台数を減らした運用を試みている[4)]. 少ない稼働台数でも要求される循環流が発生しフォルミディウムの発生を食い止めることが可能か検証に乗り出している．

1.3　既往研究

上述したように貯水池の水質の維持・管理と同時に曝気装置のコスト削減に向けた効率的運用は非常に重要な課題である．以下に，曝気装置導入による成層破壊，水質保全効果および流動そのもの，また今後の曝気装置の効率的運用に向けた可能性を論じている調査・報告を一例ではあるが紹介する．

後藤ら(2006)[5](2008)[6]は植物プランクトンの一種である藍藻類の発生状況と曝気装置の関係を考察するために，曝気装置の規模や基数などが異なる複数の同規模の貯水池において藍藻類の発生量と成層強度を比較した．その結果，曝気装置を稼働させることで成層強度を低下させ藍藻類の増殖の抑制に効果があることを定性的に確かめている．

松梨(1988)ら [7]によっては曝気装置の水質的検討として曝気装置を考慮した水質予測モデルの提案がされている．彼らは同一水系，同一水質条件下で曝気装置を導入している貯水池としていない貯水池において，水質と流動を測定し曝気装置による混合効果を確認すると共に同装置を考慮した水質予測モデルを開発した．しかし，現地観測を行った範囲は曝気筒から約 10m と狭い範囲での観測に留まっている．

曝気装置の局所的な流動に関しては現地観測などで確認した事例が多く存在する．

丹波ら(1993) [8]，古里(2015) [9]は曝気装置の導入されている貯水池において同装置近傍における現地観測を実施した結果，第 1 循環流・第 2 循環流の存在を示し，プルームの空間構造を捉えている．

また曝気装置近傍での流動モデルもいくつか開発されているがその報告事例は多くない．岩佐ら(1984) [10]は円筒座標系に基づく 3 次元流動計算を気泡群と連立して水温成層下での内外部プルーム，プルーム近傍の流動構造を計算しているが，計算負荷が大きく時間もかかり，10m 程度の範囲のみしか計算可能ではなかった．

Asaeda＆Imberger(1993) [11]は様々な成層条件下で室内実験を行い，曝気装置が作り出すプルームの流動構造を把握すると共に曝気モデルであるダブルプルームモデルを提案した．

曝気装置は自身の近傍のみならず湖内全体に流動を引き起こし，その特性を表現するべく 3 次元の貯水池流動モデルも開発されている．

梅田ら(2004) [12]は土師ダムにおいて ADCP を用いた時間的･空間的な現地観測結果から，曝気装置により生じる流動が貯水池内全体に影響を及ぼしていることを報告している．

中村ら(2013)[13]によって 3 次元の貯水池流動モデルである TITech-WARM(Tokyo Institute of Technology – Water Reservoir Model)が開発され，本研究の対象である釜房貯水池においても適用されている．しかし同モデルは Asaeda らのダブルプルームモデルを組み込んでおり実貯水池に適用する際には物理パラメータの調整が求められている．

関根ら(2003)[14]は水温分布より算出した成層強度に着目しダブルプルームモデルにより吐出口水深，空気量，曝気装置の稼働台数，配置などを最適化する可能性を論じている．

1.4　研究の目的と構成

本研究では釜房貯水池を対象とし，カビ臭発生の原因藻類とされるフォルミディウムの成長をいくつかの環境要因を用いて回帰式を作成し表現すると共に，曝気装置の影響の把握，稼働条件による違いを評価することを目指した．その際，曝気装置近傍のプルーム過程の把握にはダブルプルームモデルを用い，過去の現地観測結果より同モデル内の物理パラメータを調整してから計算を行った．曝気装置の稼働条件の違いによる湖内の再現計算においては TITech-WARM を用い，時間的に変動する水温分布，プルーム過程，他の環境要因を入力条件としてフォルミディウムの成長速度を作成した回帰式より計算し，曝気装置の稼働条件別に評価した．

以下に本論文の構成を示す．

第 2 章では本研究において曝気装置近傍でのプルーム過程の計算に用いたダブルプルームモデルについて述べ，2015 年 8 月に行われた過去の現地観測結果を基に同モデル内の物理パラメータの調整を行う．また調整後のパラメータの有用性について湖内 ADCP の長期連続モニタリング結果と比較しその有用性を検討した．

第 3 章ではフォルミディウムの成長速度についての回帰式を作成し，その有用性を検討する．説明変数の一つとした曝気装置が引き起こす下降流量の計算については物理パラメータ調整後(第 2 章)のダブルプルームモデルを用いた．

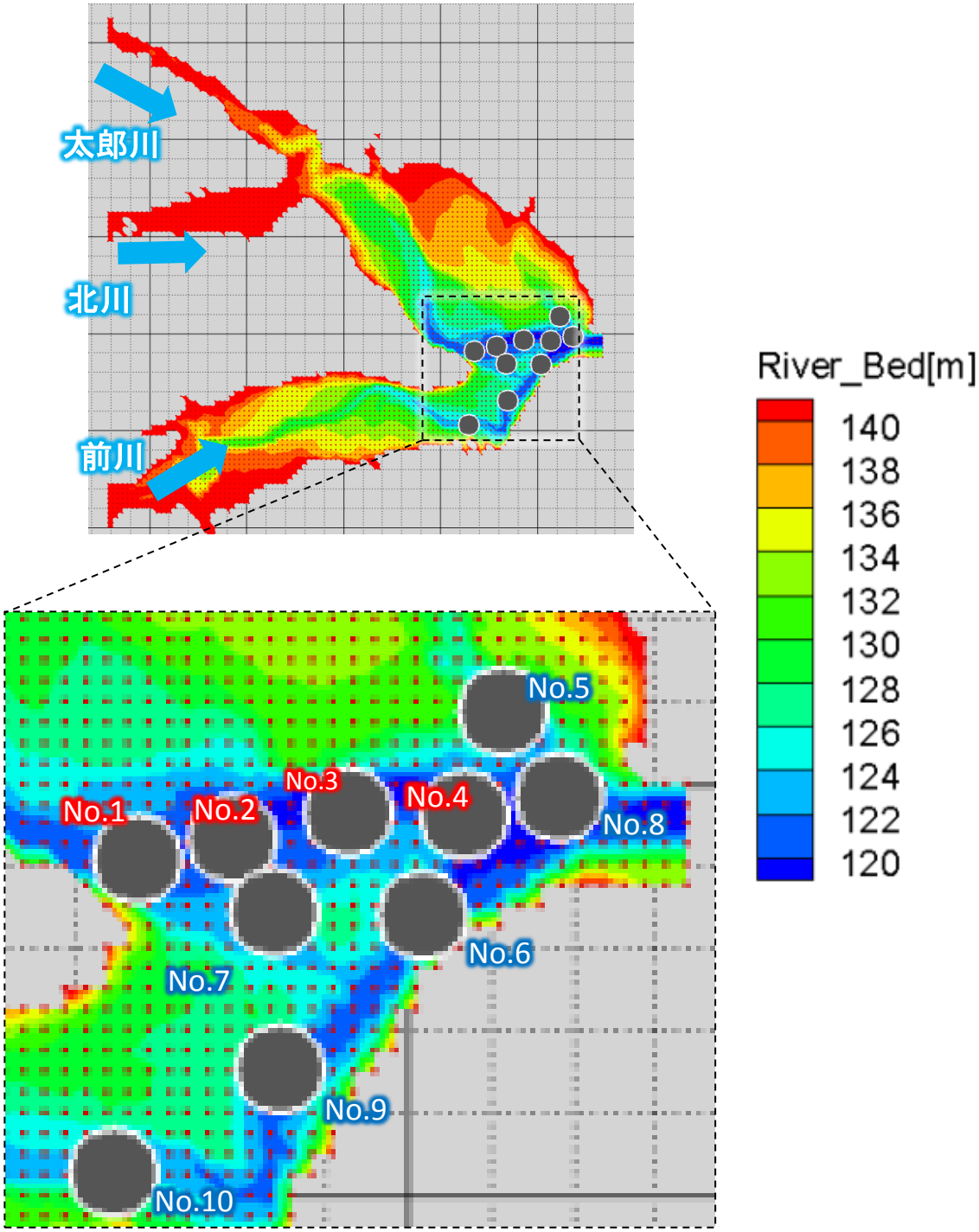
第 4 章では曝気装置の稼働条件が異なる 3 ケースにおいて TITech-WARM を用いて数値流動計算を行い，各条件下における湖内の流動特性について確認した．またその上で，計算結果から曝気装置の作り出す下向き流量，水温を第 4 章で作成した回帰式内で変化させることでフォルミディウムの成長速度にどのような影響が出るのか計算し，比較・検討を行った．

第 5 章では本研究より得られた主な知見と今後の課題について述べる．

〈参考文献〉

1) http://www.thr.mlit.go.jp/kamafusa/dam/history01/，国土交通省東北地方整備局釜房ダム管理所，アクセス日：2018/02/04
2) http://www.thr.mlit.go.jp/kamafusa/dam/gaiyo02/，国土交通省東北地方整備局釜房ダム管理所，アクセス日：2018/02/04
3) http://www.thr.mlit.go.jp/kamafusa/dam/jigyo01/，国土交通省東北地方整備局釜房ダム管理所，アクセス日：2018/02/04
4) 国土交通省　東北地方整備局　釜房ダム管理所：平成 29 年度調査検討データ集，第 2 回　釜房ダム水質保全対策報告会　参考資料-1，平成 30 年 1 月 30 日
5) 後藤浩一，古里栄一，浅枝隆: 藍藻類の増殖抑制効果に対する曝気循環対策の施設規模の影響，水工学論文集，Vol. 52 (2008) P 1297-1302
6) 後藤浩一，酒井健寿，岩崎健次: 曝気循環装置による藍藻類増殖抑制対策に関する研究(I)―成層強度と藍藻類の現存量との関係―，土木学会年次学術講演会講演概要集(CD－ROM)，第 61 巻 ROMBUNNO.2-195，2006 年 9 月 1 日
7) 松梨史郎，宮永洋一: 曝気を考慮した水質予測モデルの実貯水池への適用，水理講演会論文集，Vol. 32 (1988) P 251-256
8) 丹羽薫，大西実，山下芳浩: 貯水池流動制御による水質保全対策，水工学論文，Vol. 37 (1993) P 271-276
9) 古里栄一，久能誠，丹波薫，梅田信:貯水池気泡循環対策による広域水平密度流～低プルーム数における実用式～，土木学会論文集 G(環境)，Vol.71,2015.
10) 岩佐義朗，松尾直規，尾沢卓思，南部茂義: エアレーションにより生ずる流れの数値解析，京都大学防災研究所第 27 号 B-2
11) Asaeda, T. and Imberger, J.: Structure of bubble plumes in linearly stratified environments J.Fluid Mech., Vol.249, pp.35-57, 1993.
12) 梅田信，和泉恵之: 曝気循環施設が設置された貯水池の流動解析，ダム水源地環境技術研究所所報 2004 年度, 3-12, 2004
13) 中村恭志，戸田真仁，渡部一人，石川忠晴: 3 次元貯水池数値流動モデル "TITech-WARM"の開発と釜房貯水池への適用, 水工学論文集, 第 57 巻, 2013 年, 2 月
14) 関根秀明，吉田延雄，梅田信，浅枝隆：曝気式循環施設の理論とその効果に関する考え方，ダム工学 13(1)，5-18，2003

第1章　図表集



No.1~4 : 常用散気式曝気施設
No.5~10 : 夏季強循環曝気

図1.3-1 釜房貯水池の地形と曝気装置位置

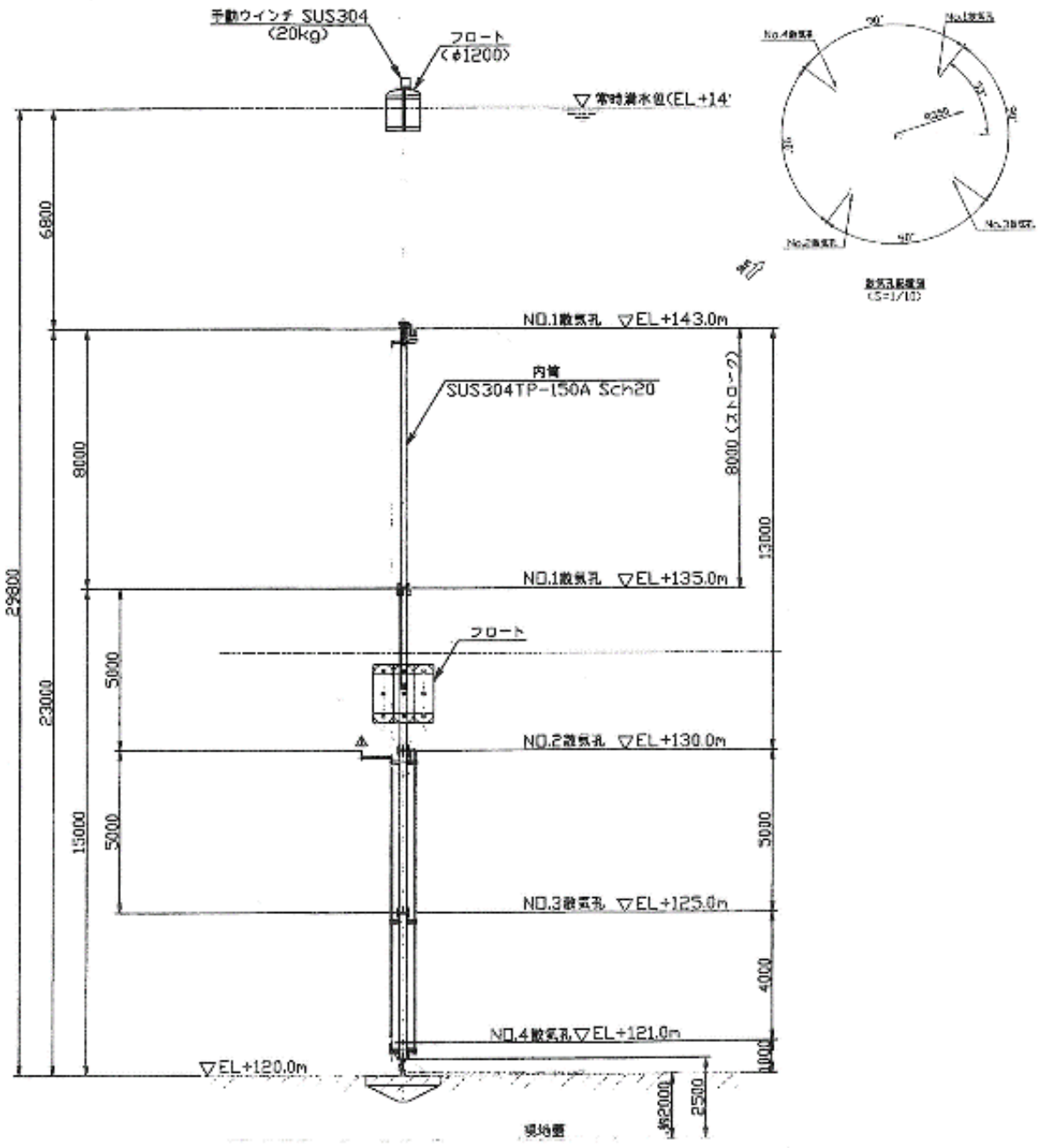


図1.3-2 常用散気式曝気施設の概要

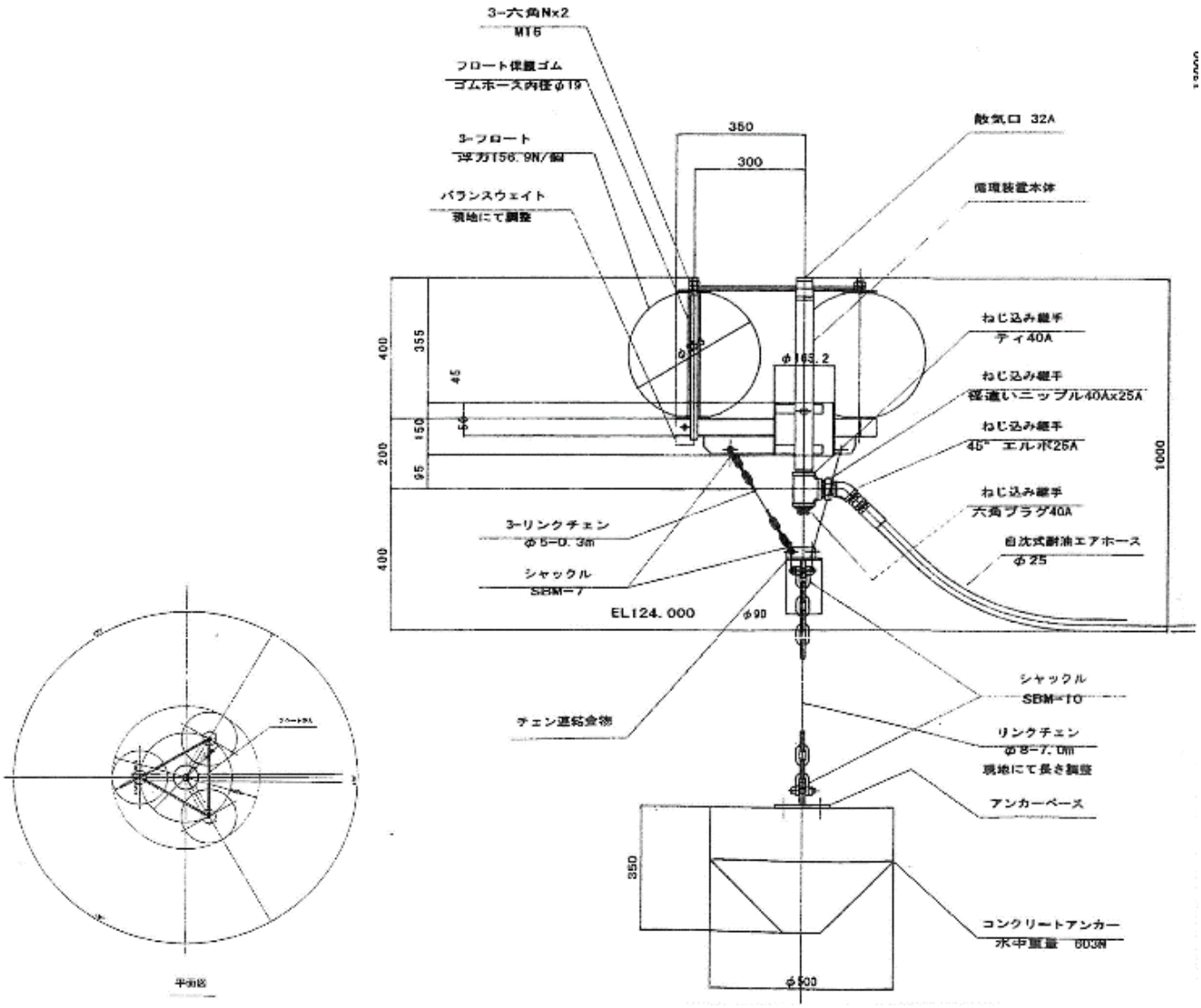


図1.3-2 夏季強循環曝気の概要

第 2 章　現地観測結果に基づく曝気プルームモデルの物理パラメータの調整

2.1　既往の曝気循環モデルの概要

2.1.1 曝気循環装置による流動過程

釜房貯水池の中心域には，計 10 基の曝気循環装置(以下，「曝気」と称す)が設置されていることを第 1 章において述べた．同貯水池は季節的に水温成層を形成する貯水池である．そのような貯水池における曝気のモデル化として，本研究では Asaeda＆Imberger（1993）[1)] のダブルプルームモデルを用いた．なお本モデルは散気管などを用いて上方へ微小な気泡群を連続的に放出する「散気曝気方式」を対象として考えている．**図 2.1-1** はダブルプルームモデルにおける散気曝気の概念図を示している．**図 2.1-1** に示すように曝気の吐出口から放出された気泡群は上昇し，気泡コアを形成する．気泡コアは周辺水を連行しながら鉛直上向き方向に上昇する内部プルーム(Inner Plume)を形成する．内部プルームは周辺水を連行して，自身は希釈されながら上昇し，浮力と連行により運動量を全て失った高さで静止する．その後，負の浮力が働き内部プルームのひとまわり外側を下降する外部プルーム(Outer Plume)を形成する．外部プルームは周辺水と同じ密度になる水深まで下降し，周辺に向かって放射方向に水平貫入(Intrusion)する．気泡コアの上昇速度は数十[㎝/ s]程度であることから，上述したプルーム過程は貯水池内部の流動の時間スケールに比べると非常に小さい．そこで，以下の同モデルでは周辺水の密度構造などがプルームの時間スケール内では変化しないとし，定常状態におけるプルームの解析を行う．

鉛直方向に座標軸である z 軸を与える．更に内部プルーム，外部プルームは共に鉛直軸対象であるとし，それぞれのプルームの円筒の半径を a(z),b(z)とおく．周辺水は鉛直方向に密度$\rho_a(z)$で成層しているとする．そして，内部プルーム，外部プルームの物理量として各水深における鉛直方向への流速 u(z), v(z), プルーム半径 a(z),b(z), および相対浮力 g’(z), g”(z) に対する方程式をモデル化する．上昇する水塊の上向きの運動量は全て内部プルームに含まれるとし，下降する運動量は外部プルームに含まれると考える．上述したように曝気の吐出口より放出された気泡群は周辺水を連行しながら上昇し内部プルームを形成する．外部プルームが存在しない水深では周辺水は静止しているとし，内部プルームの上昇速度 u(z) に比例する量βu(z)を周辺水から取り込むとする．更に上昇を続け，周辺に下降する外部プルームが存在する推進になった時，内部プルームは外部プルームとの間において連行による水塊のやり取りを行うようになる．実験結果から内部プルーム内の乱流生成が外部プルームとの速度差により励起されることが報告されている．一方で，外部プルーム内の乱流生成は静止しているとみなしている周辺水と外部プルームの下降速度 v(z)との速度差によって生ずるとされる．そこで，ダブルプルームモデル内の内部・外部プルーム間の連行過程においては，外部から内部への連行は内部・外部プルーム間の速度差 u(z)-v(z)に比例する量β(u(z)-v(z))が取り込まれ，内部から外部へは外部プルームの外部プルームの速度 v(z)に比例するγv(z)を連行量とすると考える．周辺水から連行により，内部プルームの相対浮力・

運動量は徐々に減少していく．そして運動量が 0 になる水深で内部プルームは気泡群から剥がれ，下降プルームとして反転して下降していく．下降が始まる水深において，外部プルームの相対浮力は底層で連行された水を含んでいるので周辺水より密度が大きく重く(水温が低いため)，負の浮力を有している．負の浮力により下降する外部プルームは内部プルームから連行すると共に，自身より軽い周辺水を連行係数αで連行する．ここに，αはその結果，相対浮力は連行が進むにつれ減少し，外部プルームの相対浮力が 0 となり周辺水との密度が同じになった水深で水平方向に貫入(intrusion)する．ここに，αは外部プルームの周辺水からの連行係数，βは内部プルームの周辺水からの連行係数，γは外部プルームの内部プルームからの連行係数をそれぞれ表している．3つの連行係数の概念図を図2.1-2に示す．

2.1.2　ダブルプルームモデルの基礎方程式

上述した曝気による輸送の仮定を基に，内部・外部プルームについて，体積フラックス，運動量フラックス，浮力フラックスの保存式を示すと以下のようになる．

内部プルーム

$$\frac{d(a^2u)}{\mathrm{dz}} = 2a * \beta(u-v) - 2\,a * \gamma v \qquad (2.1.2-1)$$

$$\frac{d(a^2u^2)}{\mathrm{dz}} = \mathrm{a}^2 g' + 2a * \beta\mathrm{v}(u-v) + 2a * \gamma uv \qquad (2.1.2-2)$$

$$\frac{d(a^2ug')}{\mathrm{dz}} = \mathrm{a}^2 u\frac{g}{\bar{\rho}}\cdot\frac{d\rho_a}{dz} - 2a * \beta(u-v)g'' + 2a * \gamma v\tilde{g} + \frac{d(a^2guF)}{dz} \qquad (2.1.2-3)$$

外部プルーム

$$\frac{d\left((b^2-a^2)v\right)}{\mathrm{dz}} = -2a * \beta(u-v) - 2a * \gamma v - 2b * \alpha v \qquad (2.1.2-4)$$

$$\frac{d\left((b^2-a^2)v^2\right)}{\mathrm{dz}} = -(b^2-a^2)g'' - 2a * \beta\mathrm{v}(u-v) - 2a * \gamma uv \qquad (2.1.2-5)$$

$$\frac{d\left((b^2-a^2)\,vg''\right)}{\mathrm{dz}} = -(b^2-a^2)v\frac{g}{\bar{\rho}}\cdot\frac{d\rho_a}{dz} - 2a * \beta(u-v)g'' + 2a * \gamma v\tilde{g} \qquad (2.1.2-6)$$

ここでzは曝気の吐出口からの鉛直方向の高さ[m]，u(z),v(z)はそれぞれ，内部プルーム，外部プルームの平均上昇・下降速度[m/s]，g’(z),g”(z)はそれぞれ内部プルーム，外部プルームの周辺水に対する浮力[$\mathrm{m/s^2}$]である．α,β,γはそれぞれ，外部プルームの周辺水からの連行係数，内部プルームの周辺水からの連行係数外部プルームの内部プルームからの連行係

数を表している．

また，内部プルーム，外部プルームの周辺水に対する浮力は以下の式で定義される．

$$g' = g(\rho_a - \rho_i)\,\bar{\rho} \qquad (2.1.2-7)$$

$$g'' = g(\rho_0 - \rho_a)\bar{\rho} \qquad (2.1.2-8)$$

ここで，ρ_a ρ_i ρ_0はそれぞれ，周辺水，内部プルーム，外部プルームの密度[kg/㎥]である．$\bar{\rho}$は基準密度[kg/㎥]曝気上方の密度分布の鉛直平均を用いる．また$\tilde{g}$は g’ のうち，水に起因する割合であり，F を内部プルーム断面中の気体含有率，Q_Hを水深 H における気体流量としたとき，以下の式により算出される．

$$\tilde{g} = g' - gF = g' - g\frac{Q_H}{\pi(a\lambda)^2(u+u_z)} \qquad (2.1.2-9)$$

ここで，λは内部プルームと中央の気泡プルームの半径の比であり，u_sはスリップ速度[m/s]である．連行係数など各パラメータの標準値は Asaeda&Imberger らにより以下の値が示されている．

$$\alpha = 0.083, \beta = 0.042, \gamma = 0.083, us = 0.3, \lambda = 0.7 \qquad (2.1.2-10)$$

2.1.3 ダブルプルームモデルの計算手順

上に示したダブルプルームモデルの基礎方程式より，内部プルーム外部プルームの半径，流速，浮力を求めることになる．実際に計算で上記の方程式を解くには，それぞれの変数をまず無次元化して扱う．

$$A = \frac{a}{2\alpha H} \quad , \quad B = \frac{b}{2\alpha H} \quad , \quad U = \frac{u}{u_s M_H^{-\frac{1}{3}}} \quad , \quad V = \frac{v}{u_s M_H^{-\frac{1}{3}}} ,$$

$$G' = \frac{g'H}{u_s^2 M_H^{\frac{2}{3}}} \quad , \quad G'' = \frac{g''H}{u_s^2 M_H^{\frac{2}{3}}} \quad , \quad S^2 = B^2 - A^2 \quad , \quad Z = \frac{z}{H}$$

$$B = \frac{\beta}{\alpha} \quad , \quad \Gamma = \frac{\gamma}{\alpha} \quad , \quad \tilde{G} = G' - \frac{1}{(1-xH_R)\left(U + M_H^{-\frac{1}{3}}\right)\tilde{G}^2}$$

$$\mathrm{C_H} = (4\pi)^{\frac{2}{3}}(\alpha)^{\frac{4}{3}}(P_N)^{\frac{2}{3}} \qquad (2.1.3-1)$$

$$\mathrm{H}_R = \frac{H}{H_A + H} \qquad (2.1.3-2)$$

$$\mathrm{P_N} = \frac{N^3 H^4}{Q_B g} \qquad (2.1.3-3)$$

$$\mathrm{M_H} = \frac{Q_B g}{4\pi\alpha^3 H u_s^3} \qquad (2.1.3-4)$$

ここで，H_Aは大気圧の水頭[m]， P_N及びM_Hはそれぞれ成層強度，気泡放出量と曝気形態の関係を表す無次元パラメータである．N，H，Q_Bはそれぞれ，浮力振動数，全水深[m]，放出空気量[㎥/s]である．以上の各変数を用いて式(2.1.2-1)～式(2.1.2-6)を書きかえると以下の式(2.1.3-5) ~式(2.1.3-10)のようになる．

内部プルーム

$$\frac{d(A^2U)}{\mathrm{dZ}} = BA(U-V) + \Gamma\mathrm{AV} \qquad (2.1.3-5)$$

$$\frac{d(A^2U^2)}{\mathrm{dZ}} = \mathrm{A}^2G' + BAV(U-V) - \Gamma\mathrm{AUV} \qquad (2.1.3-6)$$

$$\frac{d(A^2UG')}{\mathrm{dZ}} = A^2UC_H - BA(U-V)G'' + \Gamma\mathrm{AV}\tilde{G} + \frac{d}{dZ}\left\{\frac{A^2U}{\widetilde{A^2}(1-xH_R)\left(U + M_H^{-\frac{1}{3}}\right)}\right\} \qquad (2.1.3-7)$$

外部プルーム

$$\frac{d(S^2V)}{\mathrm{dZ}} = -BA(U-V) - \Gamma\mathrm{AUV} - BV \qquad (2.1.3-8)$$

$$\frac{d(S^2V^2)}{\mathrm{dZ}} = -\mathrm{S}^2G'' - BAV(U-V) - \Gamma\mathrm{AUV} \qquad (2.1.3-9)$$

$$\frac{d(S^2VG'')}{\mathrm{dZ}} = \mathrm{S}^2\mathrm{VC_H} - \mathrm{BA}(u-v)G'' + \Gamma\mathrm{AV}\tilde{G} \qquad (2.1.3-10)$$

書きかえられた以上の式(2.1.3-5)~式(2.1.3-10)を連立して，4 次精度のルンゲ・クッタ法で各方程式を積分して解く．まず，内部プルームの初期条件$\mathrm{A, AU, A}^2UG$は Asaeda & Imberger と同様に以下の級数解を用いた初期条件を与える．

$$\mathrm{A} = \mathrm{Z}\left\{0.6 + 0.001719M_H^{-\frac{1}{3}}Z^{\frac{1}{3}} - 0.002527M_H^{-\frac{2}{3}}Z^{\frac{2}{3}} + Z(-0.04609 + 0.000031M_H^{-1}) + \cdots\right\} \tag{2.1.3-11}$$

$$\mathrm{U} = \mathrm{Z}^{-\frac{1}{3}}\left\{1.609 + 0.3195M_H^{-\frac{1}{3}}Z^{\frac{1}{3}} - 0.06693M_H^{-\frac{2}{3}}Z^{\frac{2}{3}} + Z(-0.4536 + 0.0105M_H^{-1}) + \cdots\right\} \tag{2.1.3-12}$$

$$\mathrm{A}^2\mathrm{UG}' = -C_H A^2 UZ + \frac{A^2 U}{\widetilde{A^2}(1 - xH_R)\left(U + M_H^{-\frac{1}{3}}\right)} \tag{2.1.3-13}$$

なお，Z は曝気の吐出口からの無次元距離であるが，モデル内においてはプルームモデルで使用する鉛直格子幅と同じとした．まず，式(2.1.3-11)~式(2.1.3-11)を最下部の初期条件として，内部プルームの上昇速度 U(z)が 0 になる高さまで上向きに積分を行う．次に，この高さにおいて，内部プルームは下降に転じるとして，外部プルームの計算を行う．外部プルームの初期条件は，内部プルームと体積流量は保存されるので以下の条件式を用いる．

$$S^2 V = A^2 U \tag{2.1.3-14}$$

内部プルームが水面まで到達した場合，水面付近で水平に広がったのち，下降しプルーム(外部プルーム)を形成する．その結果，水面下で下降に転じた場合に比べて水面で下降を始めた場合には，水面付近で多くの水を連行し，外部プルームの体積を増加させるとされる．そこで，Asaeda & Imberger らに従い，水面で下降し始める場合にのみ以下の体積フラックスを加えて計算することとした．

$$\mathrm{Q_e} = \frac{\mathrm{C_e} Q_0^{\frac{3}{4}}}{gN^{-\frac{5}{4}}} \tag{2.1.3-15}$$

ここで$\mathrm{Q_e}$は水面での連行量, $\mathrm{Q_0}$は大気圧下での空気放出量, $\mathrm{C_e}$は 1 程度の任意定数である．また，外部プルームの運動量フラックスの初期条件は，下降を始めた直後にはほぼ，連行が見られないことから，式(2.1.3-9)の右辺の第 2 項，3 項を 0 として，外部プルームの計算を開始する高さ Z から外部プルームが発生する高さ$\bar{Z}$まで式(2.1.3-9)を積分して次頁の条件式を与える．

$$S^2V = S^2G''(\tilde{Z} - Z) \qquad (2.1.3-16)$$

最後に下降する外部プルームの相対浮力の初期条件は，内部プルームの相対浮力から気泡による浮力を差し引いたもので与えられると考え，浮力フラックスの初期条件として式(2.1.3-8)と式(2.1.3-10)を辺々引いた以下の条件により与えられる．

$$S^2V = S^2G''(\tilde{Z} - Z) \qquad (2.1.3-17)$$

$$S^2VG'' = A^2UG' - \frac{UA^2}{(1 - ZH_R)\left(U + M_H^{-\frac{1}{3}}\right)\widetilde{A^2}} \qquad (2.1.3-18)$$

この初期条件を基に外部プルームを鉛直下向きに積分していき,外部プルームの浮力G''が 0 になる高さまで計算を行っていく．以上の手順に従い，式(2.1.3-5)~式(2.1.3-10)の積分を繰り返し行い，各変量が収束するまで反復計算が行われる．また気泡は水面に到達して大気中に放出されるまでなくなることはないので，外部プルームが発生する高さから新たに周辺水を連行して鉛直上向きに内部プルームを形成し上昇していく．その際，1 段目の外部プルームが発生した高さを新たな気泡放出水深とみなして，再び式(2.1.3-5)~式(2.1.3-10)に初期値として与え，同 6 式から上部の領域についてプルーム過程の計算が行われる．

2.2　過去の現地観測結果に基づく物理パラメータの調整

Asaeda & Imberger(1993)はダブルプルームモデルを開発する際に，塩水による室内実験(水槽水深 50[cm]程度，気泡吐出量$10^{-6}[\mathrm{m^3/s}]$，成層強度$N^2 = 0.1[1/s^2]$)のデータと丸山貯水池(水深 20[m]，気泡吐出量$6000[\mathrm{m^3/s}]$，成層強度$N^2 = 10^{-3}[1/s^2]$)のデータを用いた．ダブルプルームモデル内のパラメータα, γは非成層下での軸対象密度噴流のおおよその平均値である 0.083 を使用している[2)3)]．βは Asaeda & Imberger らによる室内実験と丸山貯水池でのデータに合うように彼らが試行錯誤的に 0.042 と決めたものである．また表面での連行量Q_eを考える際，定数C_eを用いて以下の式(2.2-1)のように表される．

$$Q_e = C_e\left\{\frac{(Q_0 g)^3}{N^5}\right\}^{\frac{1}{4}} \qquad (2.2-1)$$

ここにQ_eは水面での空気量$[m^3/s]$,N は浮力周波数$[s^{-1}]$,g は重力加速度$[m/s^2]$である．Asaeda & Imberger は密度成層と気泡浮力の比の無次元数を表すプルーム数P_Nがおおよそ10^2～10^4の範囲のみでしか実験を行っていない．図 2.2-1 は Asaeda & Imberger らの実験より得られたC_e(水面による連行増加係数)とP_N(無次元プルーム数)の関係図である(Asaeda& Imberger(1993)より引用)．ただし，x 軸がP_N，y 軸がC_eを表す．図 2.2-1 からプルーム数であ

るP_Nが10^2～10^4の範囲ではC_eが 0.1 程度と安定している様子が見て取れる. その結果からダブルプルームモデル内ではC_eの値を 0.1 と決定している．しかし，古里らが提唱するように現在日本の貯水池で稼働している曝気のプルーム数P_Nは 10 以下である [4]．釜房貯水池におけるP_Nを以下の式(2.2-2)を用いて算出してみる．

$$P_N = \frac{N^3 H^4}{g Q_B} \qquad (2.2-2)$$

$P_N = N^3H^4/\,gQ_B = (10^{-2})^3 20^4/\,10/0.06 = 0.266$となり，10 以下であることが確かめられる(ただし，代表的成層強度$N^2 = 10^{-4}[1/s^2]$，水深 H=20[m]，気泡吐出量$Q_B = 0.06[m^3/s](3600L/min)$)．また図 2.2-2 は古里ら(2015)がまとめたP_NとC_eの関係である．同図内の右側の領域は Asaeda & Imberger の実験結果の領域で，左側は古里ら(2015)が追加した調査結果である．この領域に釜房貯水池も含まれることになる．したがってダブルプルームモデル内で標準値とされている物理パラメータ$\alpha, \beta, \gamma, C_e$を実際の貯水池にそのまま適用するには疑問が残る．そこで本研究では過去に行われた釜房貯水池での現地観測の結果を元に上記のパラメータを釜房貯水池の状況に合うように調整することにした．

今回，物理パラメータの同定を行うにあたって，2015 年 8 月 27 日～28 日の現地観測のデータを用いた [5]. 同観測により曝気周辺において曝気のプルームのおおよその形状を把握することができたとされる．それは大きく以下に示す 2 点である．

(1) 外部プルームつまり下降が始まる点は曝気中心から半径約 30m 前後

(2) 外部プルームは水深 6～8m あたりで下降が終わり放射方向に貫入する

まず(1)については，主に ADCP(Acoustic Doppler Current Profiler: 調音波多層流向流速計)による移動観測により曝気直上から半径約 30m の地点に下降流を確認している. また曝気直上より半径 30m 以内の観測点においては目立った濁度の上昇は確認されなかった一方で，半径 30[m]以上の観測点においては水深 6～8[m]で濁度の上昇を確認している．これは後述するが貫入により低層の濁質が輸送されたためと考えられ外部プルームの半径を推測する 1 つの要因になりうる．更に貯水池広域を定点撮影していた画像を解析した結果からも外部プルームの半径は約 30m 前後という結果が得られている. 次に(2)については(1)と同様の ADCP の移動観測で外部プルームの下降が水深約 6~8[m]で終わっている様子が確認されている．また水平方向に関しては外部プルームの下降が収まる水深より曝気から離れる方向に帯状の流速が確認された. その水深は約 5～8[m]であったことからプルーム輸送過程の中の貫入にあたるのではないかとされている. また前述したように曝気から 30[m]以上離れた観測点の水深 6～8[m]において濁度の上昇が見られたこともプルームの貫入水深を推定できる一つの要因になりうる．

図 2.2-3 は現地観測で行われた観測の一部の結果で，ADCP の移動観測の側線と点 C における流速の鉛直分布の結果を示している(中村(2015)より引用) [5]. (a)は ADCP の移動観測の側線の一部を示している．(a)内の点 C における曝気から離れる方向の水平流速の鉛直分

布を示したものが(b)である．(b)より水深約 5～8m において曝気から離れる向きに流速が確認された．(b)中の斜線部において流速の最大値である水深 6.7[m]を貫入水深，また同部分を積分した際の流量 23.3[m^3/s]を貫入流量とし，これらの条件に合うようにダブルプルームモデル内の物理パラメータ$\alpha, \beta, \gamma, C_e$を同定することにする．図 2.2-4 はパラメータ同定に用いた鉛直水温分布である．(a)は測点を示し，赤く囲った測点の鉛直水位温分布である(b)のデータを用いた．その際，以下の 2 点に留意して観測点を選択した．

1. 貫入水深，貫入流量を求めた流速分布と同じ 8/28 午前に観測されていること
2. 曝気に近くも，半径 30[m](外部プルームの下降)より外側にあること

今回ダブルプルームモデル内で調整する物理パラメータは数が多いため，それぞれのパラメータが計算結果(主に貫入水深，貫入流量)にどのような影響を及ぼすのか感度分析を行った．4 つあるパラメータのうち 1 つを変化させ，残りの 3 つは固定して分析を行った．それをパラメータの数分，4 パターンについて調べた．ダブルプルームモデルの計算では，当日の曝気の気泡吐出量が約 6 割に抑えられていたことも考慮に入れて計算を行った．図 2.2-5 は感度分析の結果を示している．(a), (b)双方ともにおいて，横軸はそれぞれのパラメータを変化させた時の標準値との比である．縦軸はそれぞれ，貫入水深，貫入流量である．各パラメータは 0.1 倍，0.5 倍，1.5 倍，2 倍，3 倍と変化させた．(a)に着目するとα, γを変化せても計算される貫入水深はほぼ変化しないことが確認される．その一方で，β, C_eの値の変化は貫入水深を大きく変化させる．βは内部プルームが周辺水を連行するときの係数であり，βが大きい，つまり底層の低温の水塊を多く輸送している場合は外部プルームとして下降する際，その浮力が周囲と同じになる水深はより深くなるために貫入水深も深くなると考えられる．また逆にC_eはプルームが下降を始める高さで周囲から水を引き込むときに関わる係数であり，底層より高温の水界を多く引き込む，つまりC_eが大きいときは相対浮力が早い段階で 0 になるために貫入水深が浅くなると考えられる．次に(b)貫入流量について考察する．貫入流量についても貫入水深の場合と同様にα, γは特段大きな影響を与えないことが確認できる．一方，やはりC_e，βはその変化によって比較的大きな影響を与えることが見て取れる．貫入水深の場合と比べて今度は両者とも値が大きくなればなるほど貫入流量も比例して増加しているように見える．これは各段階で引き込む水の量が増えれば増えるほど貫入流量が増加するためだと予測できる．貫入流量に関していえば，C_eが最も影響の度合いとしては大きい．以上の感度分析の結果より，本研究ではβ, C_eの値を系統的に変化させ，釜房貯水池の状況(貫入水深＝6.7[m]，貫入流量＝23.3[m^3/s])に合う値を決定する．図 2.2-6 はβ, C_eを系統的に変化させた場合の(α, γは標準値(0.083)を使用している)貫入水深と貫入流量の結果を示している．(a),(b) の中の黒い破線は観測の結果得られた値を表している．これらの条件を満足するようなパラメータは$\beta = 0.16,\ C_e = 0.25$の時であると読み取ることができた．梅田(2005)ではやはりダブルプルームモデル内の物理パラメータの同定を行い，$\beta = 0.135, C_e = 0.05$とすることでより良い再現性が得られると論じており[6]，本研究で得られた値も先行研究から大きく離れた値ではないことが考えられる．

2.3　長期連続モニタリング結果による物理パラメータの検証

ここでは，2.2 において調整した物理パラメータの有用性について検証する．具体的には，まず調整した物理パラメータをダブルプルームモデルの計算に適用し，貫入水深を求める．次に釜房貯水池の曝気付近に固定設置されている ADCP の速度分布と比較しその水深位置の変動の一致性を 2 パターン(標準値のパラメータを使用時，調整したパラメータ使用時)において比較する．

釜房貯水池では現在，ADCP を固定設置しており 10 分間隔で長期連続的に流速の鉛直分布を記録している．この ADCP は以前，浅瀬の領域に設置されていたが 2013 年の 8 月に現在の位置に移動された．図 2.3-1 は固定 ADCP の位置，曝気の並びから見た際の断面のイメージ図，2013 年 8～10 月のモニタリング結果である．ただし(c)内での流速は若岡ら(1997)によるノイズの除去を行っている[7]．(a)より固定 ADCP は曝気から遠くない場所に位置しており，曝気からの貫入があれば(b)で示した断面図のように固定 ADCP が観測しているはずである．(c)は 2013 年の 8～10 月における北西方向の流速鉛直分布のコンター図である．図内の赤い領域は(a)内での北西方向の流速を，逆に青い領域は(a)内の南東方向の流速を示している．(c)内における北西向き，つまり赤い領域は水深 5～10[m]に位置しており曝気によるプルームの貫入と考えることができる．そこで，今回調整したダブルプルームモデル内の物理パラメータと標準値のパラメータを用いて連続的に貫入水深を計算しコンター図の赤い領域との位置関係を確認した．入力データとしては図 2.3-1 の(a)内のダムサイトでの長期連続的な鉛直水温分布のデータを使用した(ダムサイトでは水温や濁度，pH などの鉛直分布をほぼ 2 時間おきに観測している)．図 2.3-2 は固定 ADCP の流速分布のモニタリング結果と計算した貫入水深(調整前後の 2 パターン)を組み合わせたものである．黒の点線が標準値のパラメータを用いて計算した貫入水深，緑の実線が本研究で調整したパラメータを用いた結果である．全体的に調整前よりも，調整後の方が貫入水深は深くなっている傾向を確認できる．これはC_eの値を 2.5 倍にしたことが大きな要因であると考えられる．調整前の標準値を用いたケースは水面付近での値が大きく深い貫入水深をうまくとらえ切れていない．一方で調整後のパラメータを用いた貫入水深は比較的 ADCP モニタリング結果の北西方向への流速を追っているように見て取れる．また 2015 年 8 月に行われた観測の期間に限らず他の期間についても再現性を確認できた．以上より，本研究においてダブルプルームモデルを適用する際はこの章で調整したパラメータを用いる．

〈参考文献〉

1) Asaeda, T. and Imberger, J.: Structure of bubble plumes in linearly stratified environments J.Fluid Mech., Vol.249, pp.35-57, 1993.
2) A. Matulka, P. López, J. M. Redondo, A. Tarquis: On the entrainment coefficient in a forced plume: quantitative effects of source parameters, Nonlin. Processes Geophys., 21, 269-278, 2014
3) 楊宏選, 陸旻皎, 熊倉俊郎, 早川典生: 拡散領域で加熱される密度噴流の連行特性, 水工学論文集, 第 54 巻, 2010 年 2 月
4) 古里栄一, 久能誠, 丹波薫, 梅田信:貯水池気泡循環対策による広域水平密度流～低プルーム数における実用式～, 土木学会論文集 G(環境), Vol.71,2015.
5) 中村友洋: 釜房貯水池における曝気循環装置の現地観測と数値モデル化,修士論文, 2017 年
6) 梅田信, 和泉恵之: 曝気循環施設が設置された貯水池の流動解析, ダム水源地環境技術研究所所報 2004 年度, 3-12, 2005
7) 若岡圭子, 横山勝英, 石川忠晴: 湖沼・貯水池における ADCP 観測の問題点と誤差補正に関する研究, 水工学論文集, Vol. 41 (1997) P 1041-1047

第2章　図表集

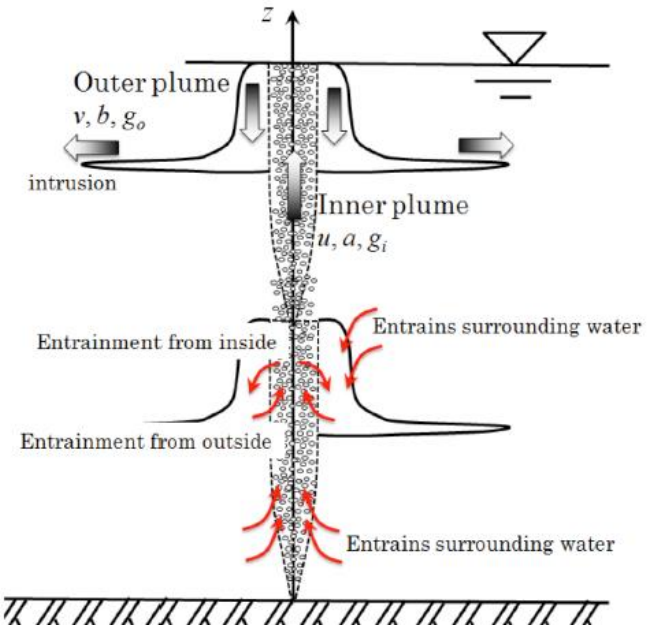


図2.1-1　散気曝気装置の概念図
（TITeh-WARM User Manual より引用）

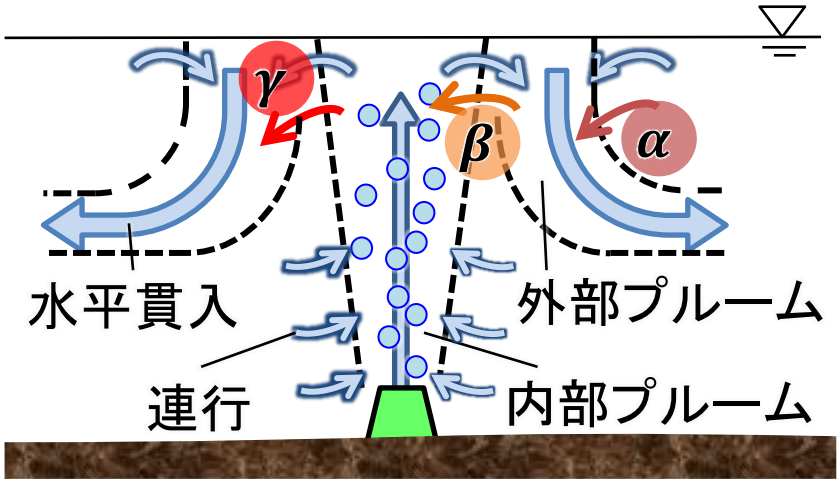


図2.1-2　内部・外部プルーム、周辺水間の連行係数

$$C_e = Q_e/((Q_0 g)^3/N^5)^{\frac{1}{4}}$$

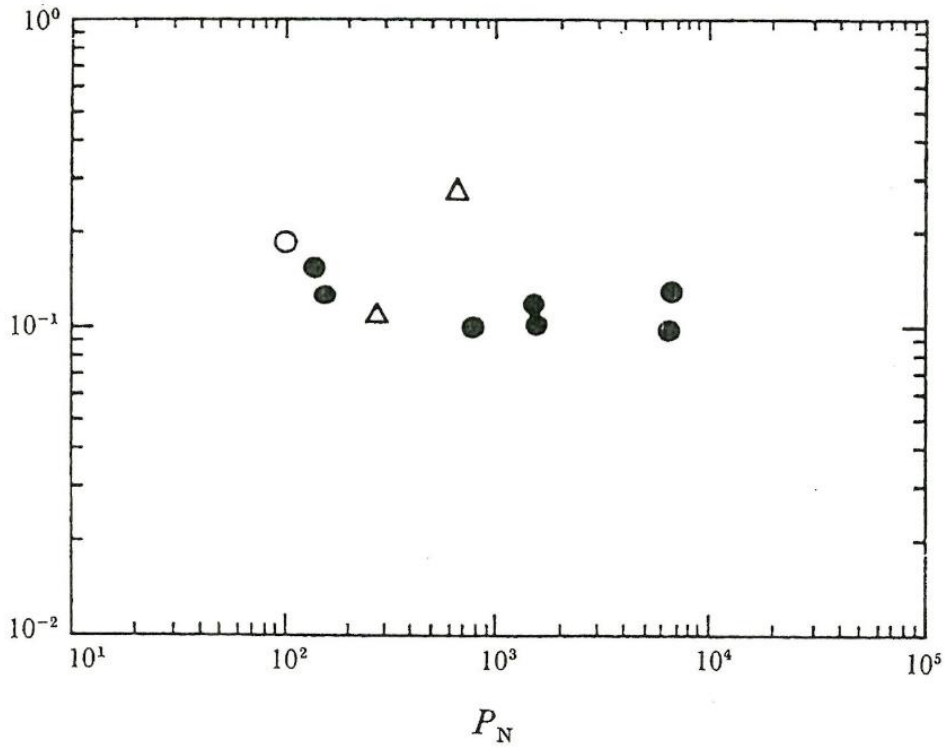


図2.2-1 水面連行増加係数Ceとプルーム数PNの関係
（Asaeda & Imberger(1993)より引用）

$$C_e = Q_u/q \; Q_{ure}/q$$

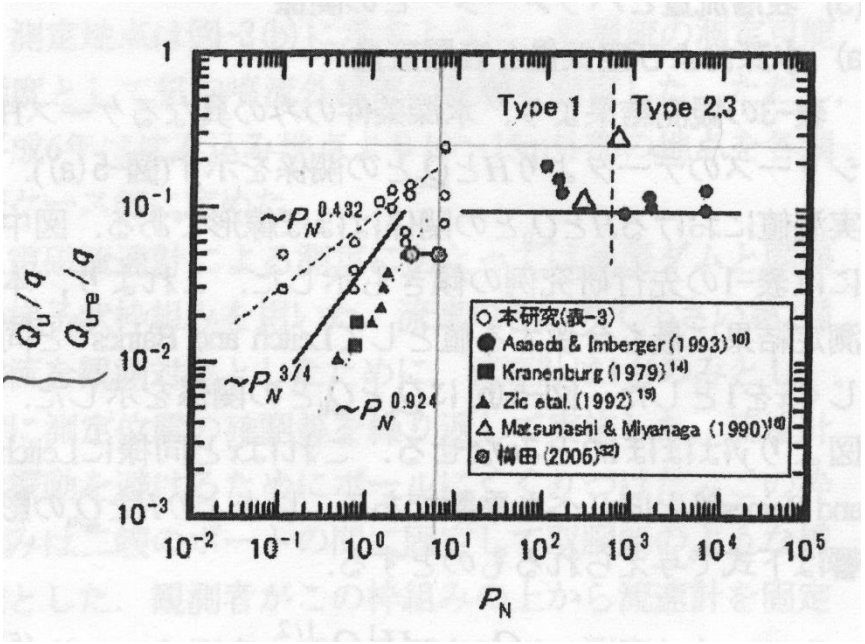


図2.2-2 水面連行増加係数Ceとプルーム数PNの関係
（古里(2015)より引用）

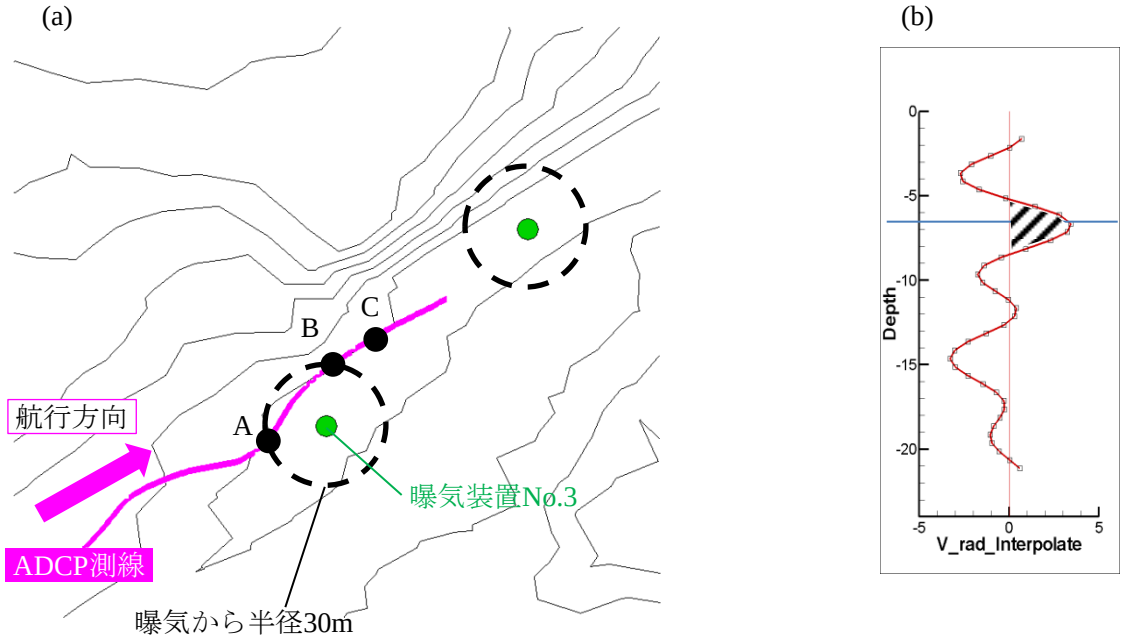


図2.2-3　ADCP移動観測の測線及び点Cにおける放射方向流速鉛直分布
（中村(2015)より引用）
（a）ADCPによる移動観測の側線　　(b)点Cにおける放射方向流速の鉛直分布

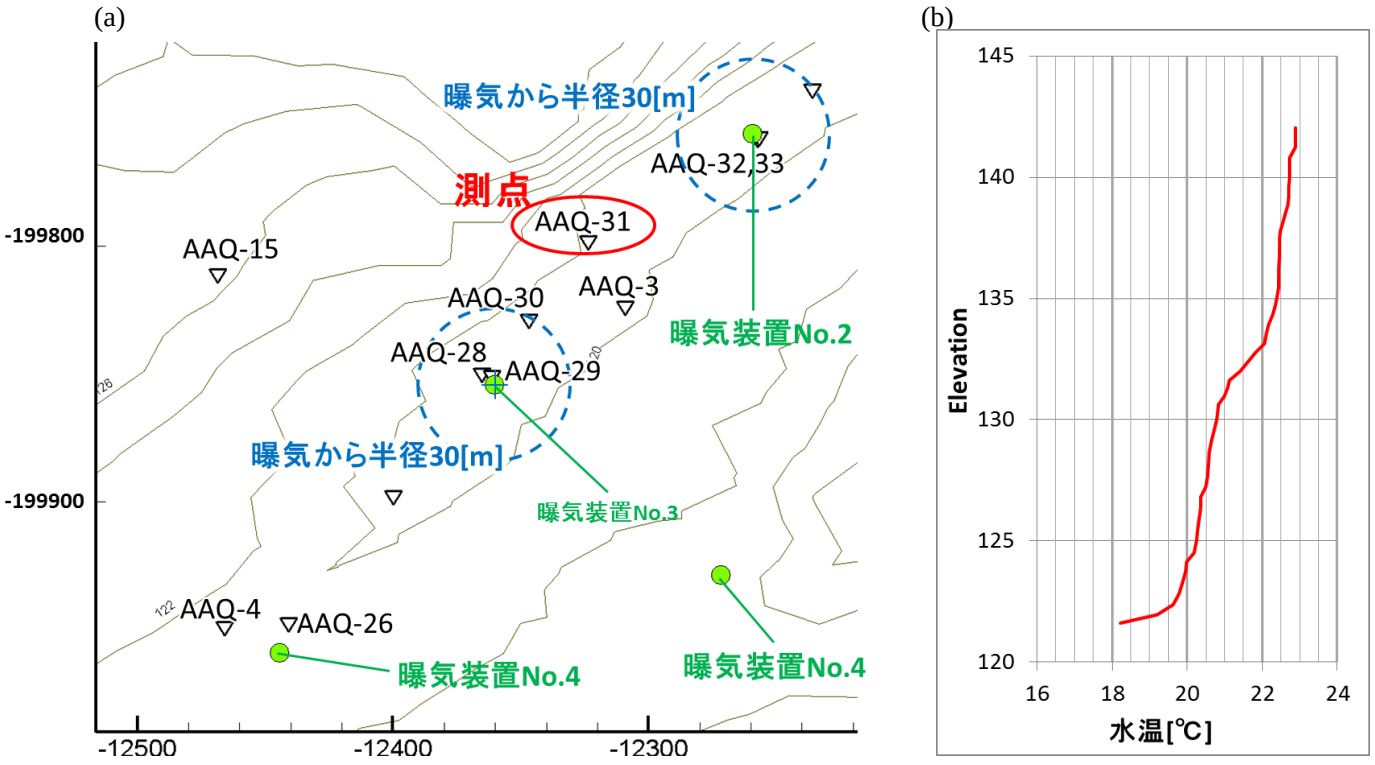
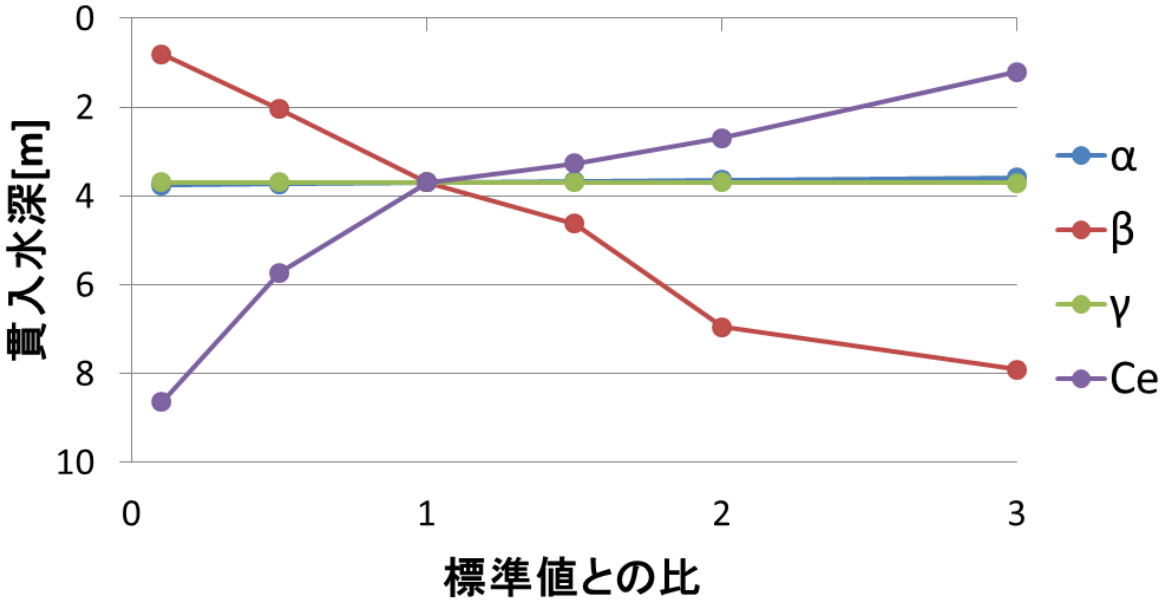


図2.2-4　パラメータ調整に使用した鉛直水温分布及び測点
（a）測点　　(b)鉛直水温分布

(a)



(b)

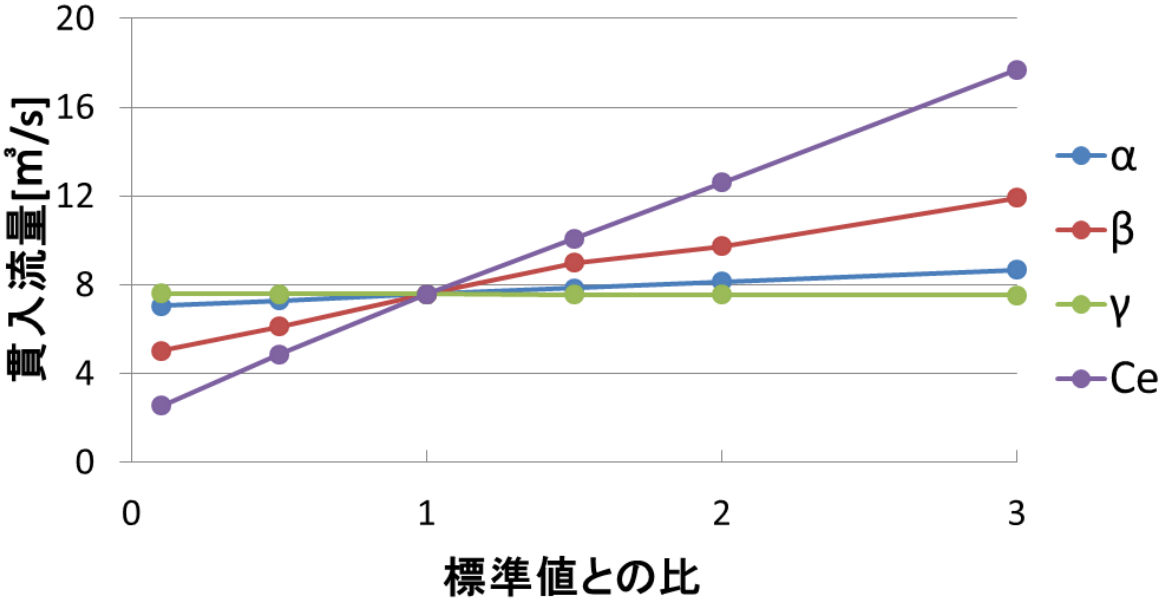


図2.2-5　各パラメータの感度分析
(a)　貫入水深　　(b)貫入流量

(a)

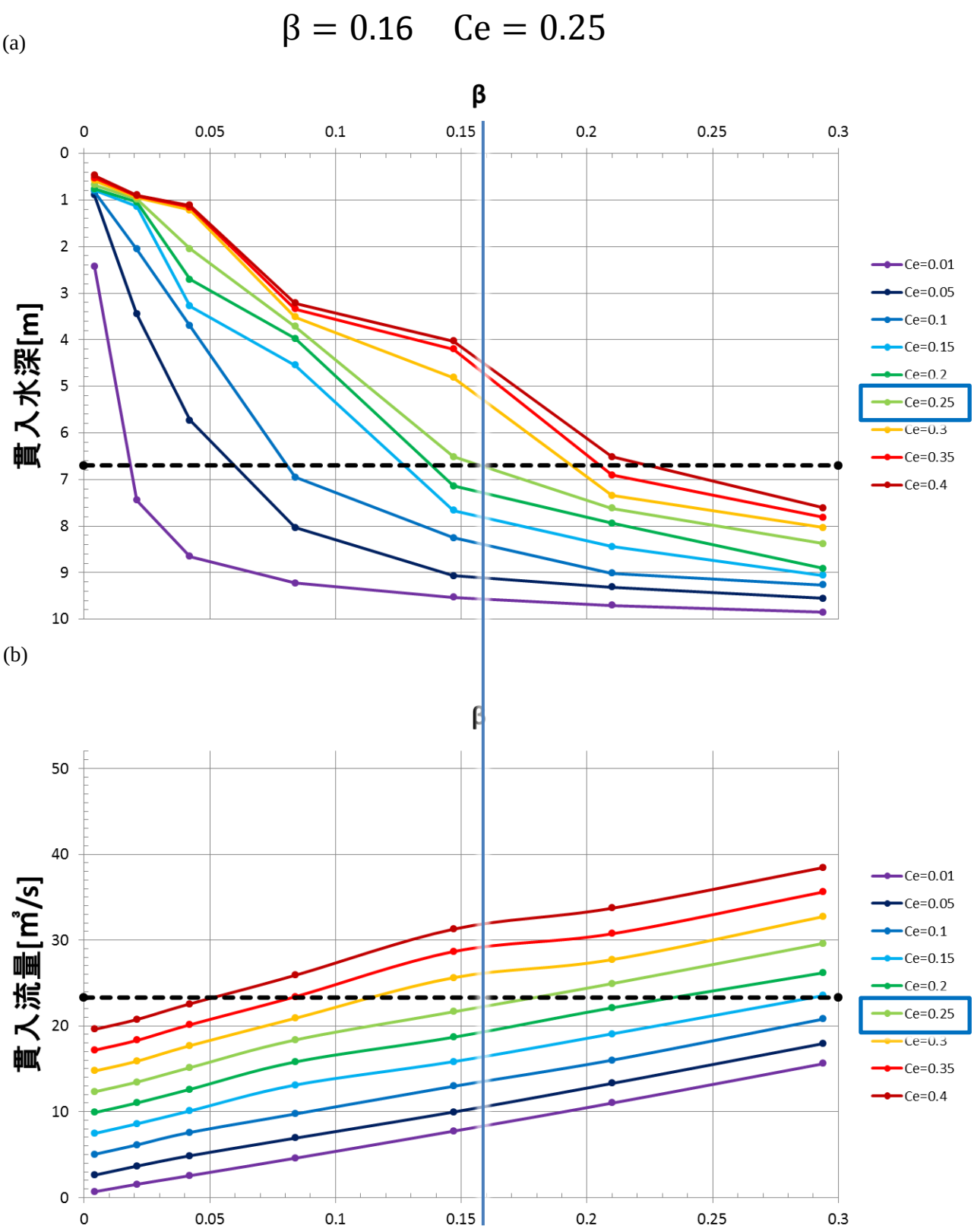


図2.2-6　β, C_eを系統的に変化させた場合の貫入水深・流量
(a)　貫入水深　　(b)貫入流量

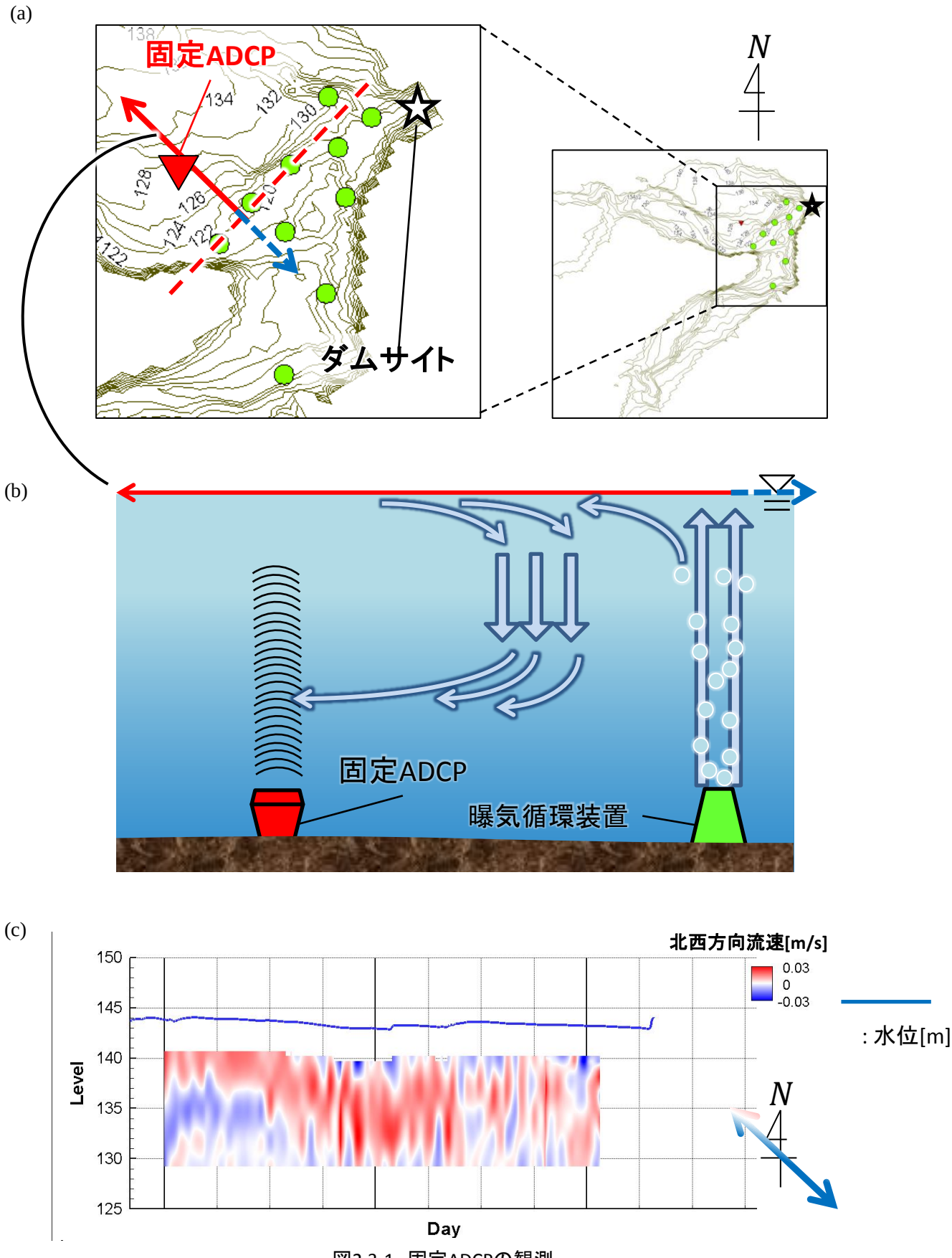
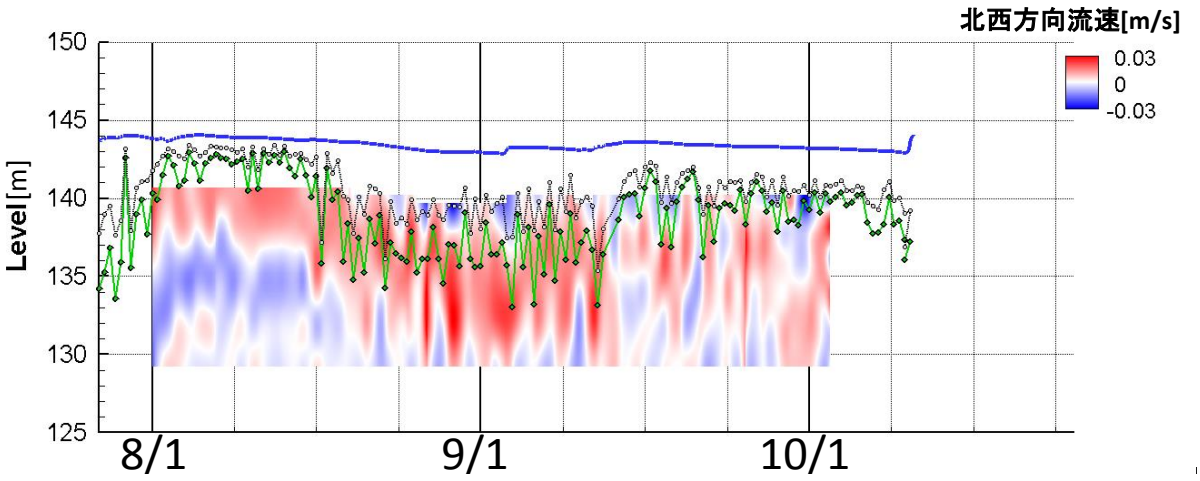
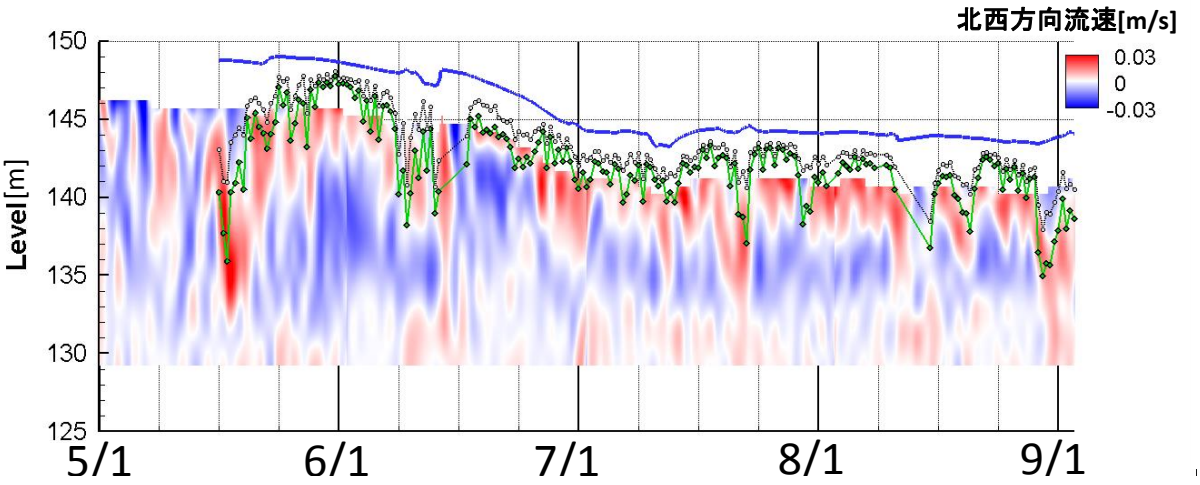


図2.3-1　固定ADCPの観測
（a）固定ADCPの位置　（b)曝気の並びと直行する断面のイメージ図
（b）（c)固定ADCPモニタリング結果(2013年8月～10月）

(a) 2013年8月～10月



(b) 2014年5月～8月



：　水位[m]　　：　本研究で調整したパラメータを用いて計算した貫入水深

：　標準値とされる　パラメータを用いて計算した貫入水深

図2.3-2　固定ADCPの流速分布と計算貫入水深の比較
（a）2013年8月～10月　　(b)2014年5月～8月

第 3 章　フォルミディウムの成長速度に関する回帰式の作成と有用性の検証

3.1　フォルミディウムの成長速度に関する回帰式の概要

3.1.1 釜房貯水池の流域特性・曝気稼動状況

ここでは，本研究の研究対象である釜房貯水池の流域特性と曝気の稼動状況について整理する．図 3.1-1 から図 3.1-22 は 2004 年～2014 年の 11 年間に及ぶ

・フォルミディウムの発生状況(＋曝気の稼動状況)　---(ア)
・2MIB 濃度(フォルミディウムの生産化学物質)　---(ア)
・鉛直水温分布(ダムサイト)　---(イ)
・表面水温(ダムサイト)　---(イ)
・日平均気温　---(ウ)
・河川からの流入量，ダムからの放流量　---(ウ)　　貯水位　---(イ)
・日単位での日射量の積算値　---(ウ)
・日単位の雨量の積算値　---(ウ)
・日平均風速　---(ウ)
・全リン，全窒　---(エ)

をそれぞれ順に表している．(ただし，(ア)~(エ)はデータの入手元を表している)

上記の(ア)については仙台市水道局の水質検査課が釜房貯水池において約 1～2 週間に 1 回の頻度で行っている調査結果を参考にした．フォルミディウムの単位である「[糸状体/mL]」であるが，フォルミディウムの観測はある一定量の少ない水を採取し，その中に糸状のフォルミディウムがどれだけ入っているかを指標としている．仙台市水道局によれば 100μm 長を一単位としている．図中のフォルミディウム，2MIB はダムの表層水での値を読み取りプロットしたものである．

(イ)については釜房ダムのダムサイトで計測された値を参考にしている．ダムサイトではほぼ 2 時間おきに水温や濁度，pH などの鉛直分布を標高と共に計測している．

(ウ)は，釜房ダム管理所が独自に 1 日 1 回の頻度で行っている観測結果を参考にした．

(エ)については水文・水質データベース(http://www1.river.go.jp/)内における釜房ダムのダムサイトでの観測結果を参考にし，全リン，全窒素ともに表層の値をプロットした．この観測は 1 か月に 1 回の観測頻度であった．

第 1 章でも述べたように釜房ダムでは断続的にカビ臭が発生している．その原因とされる化学物質が 2MIB である．その 2MIB を生産する藍藻類であるフォルミディウムは釜房貯水池で度々発生している．全体的な傾向としては，春先の 5 月ごろと夏終盤～秋口にかけての発生が多いように見て取れる．春先は上流の 3 河川から融雪の影響で流入が多くなり，それに合わせてフォルミディウムの数が増えると考えられる．一方，夏終盤~秋口にかけては貯水池内での水温成層が強く形成される時期でもありフォルミディウムが増殖しや

すい環境になっているのではないかと考えられる．

貯水池は春先に河川から融雪の影響で流入が増え，多いときで 50[㎥/s]程度である．流入が増えることで 3～4 月は水位が 145～150[EL. m]に及ぶ．釜房貯水池での水位のピークはちょうどこのころである．また流入水は水温が低いため湖底に入り込み，5～6 月にかけては日射量が増加して表層が温められ湖内に水温成層が形成され始める．夏季には日射，気温の上昇のピークが訪れ表層には強い日成層が頻繁に発生する．夏季には 9 月ごろに来る台風に備え貯水池内の水の体積を低下させる，つまり水位を下げる．この時水位は 140[EL. m]前後まで下げられる．この時期と時を同じくして湖内の水温成層は崩れ始め 9 月の下旬ごろには鉛直水温は一様な分布に変化する．

曝気の稼働条件は貯水池の対応したい状況に応じて 3 つのモードに分かれている．細かくは水質条件によって異なるが，平常時モード，カビ臭対応モードは常用曝気 4 台を稼働させる．またカビ臭発生時モードは常用曝気 4 台に加え夏季曝気 6 台の計 10 台を稼働させる．基本的に通常稼動期間は毎年 4/1～10/31 としながらも状況に応じて稼働させるか否かを柔軟に決めている．図 3.1-1 から図 3.1-22 を見ても分かるように年によってその稼動期間，稼働条件は異なっていることが分かる．

風については，1 月~5 月に大きくその値は日平均風速で 4～8[m/s]ほどである．夏季は比較的安定している様子が確認され，9～10 月頃からは春ほどではないが，また風速が強くなり始める．

栄養塩(全リン，全窒素)は全体的に秋口に増える傾向が多く確認される．この 1 つの要因としてはダムの出水がある．出水により湖底の濁質が巻き上げられ，その中に含まれる栄養塩が多く観測されている可能性がある．

3.1.2 フォルミディウムの成長速度における回帰式作成の概要

カビ臭の原因物質を生産するフォルミディウムは藍藻類で植物プランクトンの一種である．植物プランクトンは水よりも密度が大きくそのままでは沈んでしまうために浮遊できるように進化をしてきた(その 1 つの例に鞭毛などがある)．彼ら自身に自泳能力はないため成長に適した環境下では増殖ができ，一方で成長に適さない環境下では繁殖することがほぼできない．そのため，釜房貯水池では曝気を稼働させることで湖内に流動を発生させ，外部プルームのような下降する流れにより植物プランクトンを生息できない水深(環境)に輸送し死滅させることを一つの目的としている．しかし第 1 章でも述べたように，その曝気の輸送による植物プランクトン低減の効果は定性的には示されている一方で，他の環境要因(例：水温，日射など)と比較した時の定量的な成長に対する影響評価というところまでは至っていない．

よって本研究ではいくつかの環境因子を選択し，フォルミディウムの成長速度に関する回帰式を作成する．参考にしたデータ期間は 2004～2014 年の 11 年間に及ぶ「301 ケース」

である.

その上で，最終的には曝気の効果が他の環境因子に対してどの程度影響を及ぼしているのかを定量的に考察する(第 4 章).

また重要な課題として曝気の稼働に多額のコストがかかることも懸念されている．そもそも常用の散気曝気，夏季用の散気曝気を設置するだけで合計約 2.1 億円もかかっている．更に曝気の出力は小さい夏季曝気でさえ 7.5[kw]，大きい常用曝気となると 22[kw]で，私たちが日常で使う家電製品の 10～100 倍のスケールの電力を消費する．またその上，短い期間だけ稼働させるわけではなく，数か月という単位で稼働させ続けるために多額のコストがかかることは言うまでもない．そこで，フォルミディウムの成長を抑制することが大きな目的としつつも，曝気の稼働をどの程度抑えられるかということも急務なのである．その抑える具合を定量的に把握するための手立てとしてフォルミディウムの成長速度に関する回帰式を適用できないかと考えた.

フォルミディウムの成長速度の回帰式を作成するにあたり，本研究では以下の 5 つの環境因子を用いた.

(1)日射
(2)表面水温
(3)栄養塩
(4)風
(5)曝気による輸送

一般的に植物プランクトンの発生には様々な環境要因が絡んでくる．上記のほかにも，DO(酸素濃度)，炭素，生育領域の広さ・永続性，などがあげられる．その中でも植物プランクトンが成長するために絶対的に必要になるのが，光合成をするための「日射」・適度な「水温」・体の構成に要る「栄養塩」である．この 3 つの環境因子は外すことはできない．付加的な要素として磯部(2015)は風応力に対する成層の安定性(ウェダバーン数)がフォルミディウムの増殖に影響を与える可能性があることを示唆しており，冬季においては曝気の鉛直輸送(後述)と比べても無視できないとしている [1)]．また古里ら(2003)はウェダバーン数が植物プランクトンの生育を左右する一つの指標になりうることを示唆している．[2)] さらに曝気による輸送の効果に関しては後藤(2006)ら [3)]や，後藤(2008)ら [4)]によって曝気の稼働量がより大きい貯水池では植物プランクトンの発生がより抑制されるということが定性的に示唆されている.

以上より上にあげた 5 つの因子の影響が非常に強く作用してくること，データの有無などを考慮したうえで，本研究ではこれらのデータを説明変数としてフォルミディウムの成長速度に関する回帰式を作成する．次節からはフォルミディウムの成長速度の算出，5 つの環境因子のデータ整理方法などについて述べていく.

3.2　フォルミディウムの成長速度の算出

フォルミディウムは前述したように植物プランクトンの一種であり，その増殖の仕方は図 3.2-1 のように分裂によるものであると考えられるため，その増殖スピードは指数関数的であると言える．よって本研究では，観測値の対数を取って成長速度を計算することにした．計算式は以下の式(3.2-1)である．

$$k_n = \frac{\{(\log_{10} N_{n+1}) - (\log_{10} N_n)\}}{T_n} \ [1/\mathrm{day}] \qquad (3.2-1)$$

ここで，k_nは n 回目の観測と(n＋1)回目の観測間でのフォルミディウムの成長速度，T_nは n 回目の観測と(n＋1)回目の観測間での期間[day]，N_nは n 回目の観測におけるフォルミディウムの個体数[糸状体/mL]である．したがって，成長速度が分かっている状態で，次の観測のフォルミディウムの個体数を考えれば式(3.2-1)を式変形して以下の式(3.2-2)を得る．

$$N_{n+1} = N_n \times 10^{k_n \cdot T_n} \qquad (3.2-2)$$

式(3.2-2)より，n 回目の観測での個体数を初期値とし，その値に対して成長速度が大きいほど，(n+1)回目の観測までの期間が長いほど(n+1)回目の観測での個体数が指数関数的に増えることを表現している．本研究では 2004 年～2014 年の 11 年間分の成長速度 k を図 3.1-1～図 3.1-22 内に示したフォルミディウムの個体数[糸状体/mL]のデータから算出した．

2004 年～2014 年の 11 年分のフォルミディウムの成長速度(以後：k と称す)の時系列変化を図 3.2-2~図 3.2-4 に示す．縦軸はフォルミディウムの成長速度 k，横軸はそれぞれの観測期間の中央値(観測と観測のちょうど真ん中の日時)を取っている．図より成長速度 k は -0.2～0.2 の間を基本的に推移していることが読み取れる．観測の間の期間が 10 日だとすると k=0.1 で式(3.2-2)よりフォルミディウムの個体数は 10 倍に，k=0.2 で 100 倍になる．そのような期間はフォルミディウムが急激に上昇する期間であると言え，カビ臭の発生の大きな要因となりかねない．

3.3　日射，水温，栄養塩データの整理

3.3.1 日射

日射(光)は植物プランクトンが光合成をする上で欠かせない要素である．

一般的に光が透過する量は水深に伴って指数関数的に減衰するとされる．その光が 1%になる水深では経験的に「呼吸による酸素の消費」と「光合成による酸素の生産」がほぼ釣り合うとされ，この水深のことを補償水深という[5)]．

経験的にこの補償水深は透明度[m]の約 2～2.5 倍とされている．この補償水深が深い状態というのはつまり日射が強い状態の時である．日射が強い時は，この補償水深も一層深くなり，植物プランクトンが生息できる範囲も広がる．そして繁殖が進行する．もちろん光合成が加速されることも繁殖を促進する大きな原因である．

ただし一般的に日射が強すぎると強光阻害が起こり，かえって光合成能力の低下が引き起こされるが，図からはその効果を読み取ることはできない．

今回，日射量のデータとしては図 3.1-1～図 3.1-22 内に示した日日射量(積算値)のデータ(2004～2014)を用いることにした．

次に日日射量と k の関係を考える．図 3.3-1 に成長速度 k と日日射量ϕの比較方法についての模式図を示す．観測日時t_nとt_{n+1}の観測結果から成長速度k_nを算出する．日射に関しては，時間 t が($t_n \leq t < t_{n+1}$)を満たす期間内での日日射量の値の平均値ϕ_nを算出する．全ての期間においてk_n, ϕ_nを算出し，その上で両者の関係をプロットしたのが図 3.3-2 に示す散布図である．図 3.2-6 より，日射量が 20[MJ]を超えるようになるとほとんどフォルミディウムは減少しないことが見て取れる．一方，日射量が約 15[MJ]より下ると k が-0.1 より小さくなるケースが多くなり，フォルミディウムが急激に減少する可能性があることが確認できる．しかし同じように日射が高くない状況下においてもフォルミディウムの成長が見られる期間も存在する．したがって一概にフォルミディウムの成長は日射量だけに依存しないことが分かる．

3.3.2 水温

水温は比熱が大きくその温度は変わりにくい．したがって水中で生きる変温生物にとって水は生きやすい環境と言える．その反面，水温の小さな変化が水中の生物の生死を決め得ることは多い[5]．

したがって今回は水温がフォルミディウムの成長に与える影響というものを説明変数の一つとして選択した．今回，回帰式の作成にあたり水温のデータとして用いるのは図 3.1-1～図 3.1-22 内に示したダムサイトにおける表面水温(2004～2014)のデータである．

水温に関しても 3.1.1 の日射の時と同様に，k(成長速度)と WT(水温)の関係を散布図としてプロットした．図 3.3-3 はその結果を示したものである．

図 3.3-3 より表面水温が低い状態，約 15[℃]以下では，ほとんどのケースで成長速度 k は-0.1～0.1 の間であることが読み取れる．一方で水温が 20℃を超えてくるようになると k は-0.3~0.3 ほどの振れ幅を持ってくる．これは水温の高い夏場などに，フォルミディウムが成長してしまったケースと，曝気の稼働によりフォルミディウムが減少したケース，両方を含んだ結果を示している可能性がある．

(ただし，2006 年 8/25 10:00 ~ 8/28 8:00 は水温鉛直分布データ(ダムサイト)に異常が見られたのでその期間は除いた．詳しくは図 3.1-5 を参照)

3.3.3 栄養塩

栄養塩も先の日射，水温と並んで生物の生育に欠かせない要素である．

栄養塩は生物の体の構成に必要な化学元素であり，水に溶存していて食物連鎖によって生物は摂取する．生物の体を構成する主な要素としては C,N,P である．またこれらは，よく成長しているプランクトン，周辺水において C：N：P の比が 106：16：1 になるレッドフィールド比が知られているためよく焦点を当てられる．

今回は中でも栄養塩として，P(リン)と N(窒素)について考える．生物の生育に関してはどちらが乏しいかということが必要な情報になってくる．したがって図 3.1-1 から図 3.1-22 に示した全リンと全窒素の時系列データより釜房貯水池がリン制限，窒素制限のどちらなのかを考察した．

図 3.3-4 は釜房貯水池における 2004 年から 2014 年にかけての全窒素，全リン(いずれもダムサイト上層)の濃度比を表している．同図内の中央を隔てる赤い実線はレッドフィールド比で，このラインより右下側のエリアがリン制限，左上が窒素制限だと考えることができる．同図より釜房貯水池のダムサイト上層においてはリン制限であると判断できる．

したがって本研究において，フォルミディウムの成長速度の回帰式を作成する際，栄養塩としてはリンを説明変数とすることにした．

しかし，上述したようにフォルミディウムの観測スパンは 1～2 週間なのに対し，全リンの観測スパンは 1 か月に 1 回と非常に少ない．そこで，今回はフォルミディウムの観測日時に合わせて全リンのデータを線形補間することにした．図 3.3-5 にその模式図を示す．

この操作を行ったうえで日射・水温の時と同様に k(成長速度)と TP(全リン)の関係を散布図としてプロットした．図 3.3-6 はその結果を示したものである．

同図から，全リンと成長速度の間には目に見える形では相関関係は確認することはできない．一般的にはリンが多ければ生息できる個体数は増えるはずであるが同図ではリンがある程度大きくても k(成長速度)が-0.1 を下回るケースがいくつか見受けられる．可能性としては，釜房貯水池でのリン濃度が通常状態でも低く，あまりフォルミディウムの成長に影響を及ぼしていないということである．図 3.3-4 に示したレッドフィールド比と全リン，全窒素の関係を見ても分かるようにリンが常に足りていない．したがって元々リンが足りていないのが釜房での通常状態の可能性も考えられる．他の環境要因の影響が大きい可能性も十分にありうる．

3.4　風速データの整理

3.4.1 ウェダバーン数の概要「

この項ではフォルミディウムに対する風の影響というものを考える．一般的に風の強さを表す指標としては風速[m/s]が広く用いられる．しかしこれは風の強さを表す絶対的な指標である．水温成層の強度はその水温鉛直分布によって季節的・時間的に異なってくる．ウェダバーン数は風に対する湖沼の成層強度の強さを表す指標である．鉛直の輸送や下層水の湧昇特性を表すことを目的としている．

3.4.2 ウェダバーン数の算出

ウェダバーン数は以下の式(3.4-1)で表される．

$$\mathrm{W} = \frac{\mathrm{g}'H}{U_*^2} \cdot \frac{H}{L} \qquad (3.4-1)$$

ここに，g'は相対浮力[$\mathrm{m/s^2}$]，H は有光層厚[m]，U_*^2は風応力の摩擦速度，L は吹送距離である．概念的には「(成層がその状態を維持しようとする強度)/(風が混合しようとする強さ)」である．一般的にこの値が 1 以下の場合(風の効果が上回った状態では)，下層水の湧昇が生じる可能性があり，1 より大きい場合(風の効果が下回っている状態では)，成層は安定しているとされる．また相対浮力に含まれる z(標高)を有光層厚としてウェダバーン数を表すと以下の式(3.4-2)のようになる．

$$\mathrm{W} = \frac{\mathrm{N}^2H^2}{\frac{\rho_a}{\rho_z}C_D U^2} \cdot \frac{H}{L} \qquad (3.4-2)$$

ここで N は浮力周波数[1/s]，ρ_aは水表面での空気の密度，ρ_zは標高 z での水の密度，U は 10m 風速である．また浮力周波数の 2 乗である成層強度N^2は以下の式(3.4-3)で算出される．

$$\mathrm{N}^2 = -\frac{\mathrm{g}}{\rho}\frac{\partial \rho}{\partial \mathrm{z}} = -\frac{\mathrm{g}}{\rho_\mathrm{H}}\frac{\rho_s - \rho_H}{H} \qquad (3.4-3)$$

ここに，ρ_sは水表面での水の密度，ρ_Hは水深 H(有効層厚)での水の密度を表す．
$\mathrm{C_D}$については後述する．なお，風応力の摩擦速度は以下の式(3.4-4)，(3.4-5)で定義される．

$$U_*^2 = \sqrt{\tau_0/\rho} \qquad (3.4-4)$$

$$\tau_0 = \rho_a C_D U^2 \qquad (3.4-5)$$

また，式(3.4-5)中のC_Dは抗力係数，τ_0は風によって水表面に作用する摩擦応力である．抗力係数C_Dについては式(3.4-6)に示す近藤らによるバルク式を用いた[6]．

$$10^3 \times C_D = \begin{cases} 1.08 \times U^{-0.15} & (2.2 < U \leq 5.0)[m/s] \\ 0.771 + 0.0858 \times U & (2.2 < U \leq 5.0)[m/s] \\ 0.867 + 0.066 \times U & (5.0 < U \leq 8.0)[m/s] \\ 1.2 + 0.025 \times U & (2.2 < U \leq 5.0)[m/s] \\ 0.073 \times U & (2.2 < U \leq 5.0)[m/s] \end{cases} \quad (3.4-6)$$

今回，ウェダバーン数の算出において，H は 4m とした．というのも経験的にこの有光層厚は透明度の 2～2.5 倍とされ，釜房貯水池における透明度がおおよそ 2.0[m]であることに起因する(透明度については 3.5-2 において詳細を述べる)．吹送距離 L はダムサイトから本川筋と前川筋の上流部までの約 1.0[km]を用いた．風速 U の値は図 3.1-1～図 3.1-22 に示した 2004 年～2014 年の 11 年間に及ぶ風速の値を用いた．また水の密度は水温との対応表[7](水圏の環境：有田正光　108 ページ(Inter. Critical Tables))を参考にした．そのためダムサイトでの鉛直データが欠損している期間においては，ウェダバーン数を算出できなかった．ウェダバーン数の値が負になる時，つまり水表面での密度が 4m 水深より大きい場合(式(3.4-3)を参照)は，4m 水深の水温に±0.01[℃]の差を設けることでウェダバーンの値が常に正の値を取るように補正を行った(水温のデータは少数第一位まで)．算出した 11 年間分のウェダバーン数の推移を図 3.4-1～図 3.4-3 に示す．

同図群より，例年 4 月～10 月あたりで W が 1 を超えるケースが多くある．これは水温成層が強く湖内での成層が安定状態であると考えることができる．一方それ以外の期間は W が 1 以下のケースがほとんどである．これは逆に風による混合の影響が大きいとみることができる．図 3.1-1 から図 3.1-22 内の風速の時系列を見ても秋～春にかけては夏季と比較しても風速が強いことが確認できる．

W(ウェダバーン数)についても日射，水温，栄養塩などと同様の方法で k(成長速度)と W(ウェダバーン数)の関係を散布図としてプロットした．図 3.4-4 はその結果である．

同図より，W が 1 以上の時，k が 0.1 を超えるケースが多くなる傾向が確認できる．しかし，W が 1～10 の範囲においては k が極端に小さいケースも存在し一概に明確な正の相関があると言い切ることはできない．

3.5　曝気による輸送量データの整理

3.5.1 成長速度と曝気による下降流量における関係性の考察

この項では曝気が作り出す下降プルームがフォルミディウムの生育にどのような影響を与えるか考察する．ここでは曝気による水温の変化がフォルミディウムに与える影響ではなく，上層のフォルミディウムを下層に直接輸送することで死滅させる物理的効果を念頭に置いている．図 3.5-1 は下降プルームがフォルミディウムを無光層に運び，死滅させる様子の概念図を示している．同図中の h はフォルミディウムが生息していると仮定している水深，V_hは水深 h よりも上層の体積である．N_nは n 回目の観測におけるフォルミディウムの個体数，C_nは n 回目の観測が行われた際のフォルミディウムの濃度を表している．今，水深 h における下降プルームの流量が$q_{(h)}$の時，観測日時t_nからt_{n+1}の期間Δt_nにおいて下層に運ばれる流量は$q_{(h)} \cdot \Delta t_n$となる．ここで観測日時t_{n+1}でのフォルミディウムの個体数は以下の式(3.5-1)のように表せる．

$$C_{n+1} \cdot V_h = C_n \cdot V_h - q_{(h)} \Delta t_n \cdot C_n \qquad (3.5-1)$$

ここで濃度の変化が左辺に来るように式変形をすると以下の式(3.5-2)のようになる．

$$\frac{C_{n+1} - C_n}{\Delta t_n} = -\frac{q_{(h)}}{V_h} \cdot C_n \qquad (3.5-2)$$

両辺を積分して以下の式(3.5-3)を得る．

$$(\log C_{n+1}) - (\log C_n) = A - \alpha \cdot \int_{t_n}^{t_{n+1}} q_{(h)}\, dt \qquad (3.5-3)$$

ただしここで A，αは定数である．この式(3.5-3)の両辺を観測日時の期間Δt_nで除することで左辺は期間t_nにおけるフォルミディウムの成長速度k_nとなり以下の式(3.5-4)のようになる．

$$k_n = A' - \alpha \times \frac{1}{\Delta t_n} \cdot \int_{t_n}^{t_{n+1}} q_{(h)}\, dt \qquad (3.5-4)$$

式(3.5-4)中の「 $\int_{t_n}^{t_{n+1}} q_{(h)}\, dt$ 」は期間Δt_nにおいて下降プルーが水深 h で下向きに輸送する水の流量の合計になる．それをΔt_nで除するということはその期間における下降プルームの流量の平均値に他ならない．それを今Q_hとおけば，成長速度 k とQ_hの間には比例関係があると言える．そこで本章では，「フォルミディウムの成長速度 k」と「下降プルームの(水深

h における)下向き流量の平均値」との関係を探ることにした．その際，$q_{(h)}$の指標として次頁の 4 つの指標を検討することにした．

(1)一定水深 z[m]における下向き流量　：　$Q_z[m^3/s]$
(2)一定水深 z[m]以浅の体積V_zに対するQ_z　：　R_z　$(= Q_Z/V_z)$
(3)透明度[m]の x 倍の水深における下向き流量　：　$T_x[m^3/s]$
(4)透明度[m]の x 倍の水深以浅の体積にV_xに対するT_x　：　RT_x　$(= T_x/V_x)$

詳細の考察は，(1)(2)については 3.5.2 において，(3)(4)については 3.5.3 において述べる．

3.5.2 一定水深を通過する下向き鉛直輸送量

ここでは曝気によるフォルミディウム低減効果を表す指標として(1)，(2)について考察する．上述したようにこの 2 つの指標はある一定水深での下降プルームの流量というものを基本的に考えている．(1)の指標は流量そのものを示している．一方，貯水池というものは時々刻々とその水位を変えている．釜房貯水池の地形は急峻な勾配を有しているため水位が変化すれば，(それに伴って同じ水深でも)その水深以浅の水の体積は変わってくる．そこで単に流量だけに着目するのではなく，上層からどれだけの割合で水を下層に輸送するのかということを考慮に入れた指標が(2)である．

曝気周囲のプルーム計算には Asaeda＆Imberger（1993）[8]のダブルプルームモデルを用いた. その際, 第二章で過去の現地観測の結果より調整した物理パラメータを使用した. (1)(2)のそれぞれの指標の算出においては以下の 3 点に留意して計算を行った．

1. 曝気によるプルームの貫入水深が考えている一定水深 z[m]より浅い場合は z[m]での下降プルームの下向き流量は“0”とし平均計算を行うこと
2. 曝気が稼働していない期間においては，下降プルームの下向き流量は“0”として平均計算を行うこと
3. ダムサイトでの鉛直水温分布データに欠損がある場合はダブルプルームモデルの計算ができないので，その期間にあるはずの下降プルームの下向き流量は平均計算に含まないこと

また，一定水深 z[m]についてであるが，z＝1，2，…，10 の 10 パターンについて(1) Q_z，(2) R_zをそれぞれ算出した．その上で期間(フォルミディウムの観測日時)ごとにその平均を計算し，フォルミディウムの成長速度と比較した．その際のそれぞれのパターンにおける k(成長速度)との単相関係数をまとめたものが表 3.5-1，図 3.5-2 である．図 3.5-2 は表 3.5-1 の結果を図化したものであり，横軸は何 m の水深での下向き流量を考えているかという z[m]である．縦軸は k(成長速度)との単相関係数を表している．

同図より相関係数は全て負の値を取っていることが分かり，曝気による下降プルームが

多かれ少なかれフォルミディウムの減少に寄与している可能性があると言える．更にQ_z，R_zに関わらず水深 z の変化に対応する k との相関係数の関係性は似た傾向をたどっている様子が確認できる．また k との相関性の強さとしてはかすかではあるが，水深 z が 4～5m 付近で極大になる様子が確認できる．前述したように釜房貯水池における補償水深は約 4m であるとされ，その水深とほぼ一致する．この結果より補償水深とされる 4m 付近を通過する流量と k(成長速度)との相関が強いということが分かった．

3.5.3 透明度の一定倍水深を通過する下向き鉛直輸送量

次に(3)，(4)について考察する．上述したようにこの 2 つの指標は透明度の一定倍水深を通過する下向き鉛直輸送量を考えている．3.5.2 ではその閾値として一定水深を考えた．しかし，フォルミディウムにとっての有光層は日によって変化する可能性が大いにある．それは上層の濁度の違いなどによって同じ日射の強さであっても光の届く水深が異なるため，日射自体の強さが日によって変化するため，などである．よって本項ではその閾値となる水深を一定水深 z[m]ではなく，透明度[m]の何倍かという観点から考える．

ダブルプルームモデルの計算の入力データはダムサイトの鉛直水温分布でほぼ 2 時間おきにデータがあるため曝気周辺のプルーム状況も 2 時間おきに把握ができる．一方で，閾値として考えたい透明度のデータは(水文水質データベース(http://www1.river.go.jp/)由来のもので)1 か月に 1 回の頻度であった．したがって閾値として考えたい透明度のデータが少なかったため，濁度(ダムサイトで 2 時間おき)と透明度(水文水質データベース，1 か月おき)の関係式を作り，2 時間おきの透明度のデータを作成することを試みた．

釜房貯水池における透明度の平均値(2004～2014 年)は約 2m であったので，今回は濁度の鉛直分布データから水深 2m 間での平均の濁度を求め，それと透明度を比較した．図 3.5-3 はその比較結果を散布図にしたものである．同図より，水深 2m 間での平均濁度と透明度の間には負の相関が見られる．それはもちろん，濁度が高くなれば水が濁り透明性が失われ，濁度が低ければ水の透明性が増すからである．本研究では，この水深 2m 間での平均濁度と透明度の間に反比例の関係があると仮定した．図 3.5-4 は横軸に(1/透明度)[1/m]を取ったものである．この(1/透明度)と水深 2m 間での平均濁度の間に比例の関係があると仮定している今，その相関係数は同図に示すように 0.7884 となった．その関係性は以下の式(3.5-5)のようになった．

$$(\text{濁度}) = 11.969 \times \frac{1}{(\text{透明度})} - 2.0269 \qquad (3.5-5)$$

上式を透明度について式変形することで以下の式(3.5-6)を得る．

$$(\text{透明度}) = \frac{11.969}{(\text{濁度}) + 2.0269} \qquad (3.5-6)$$

以上より本研究ではダムサイトにおける 2 時間おきの濁度の鉛直分布データから水深 2m 間での平均濁度を求めその上で，式(3.5-6)を用いて 2 時間おきの透明度の推算値を算出した．

その 2 時間おきの透明度のデータを用いて，(3) T_x[m^3/s](透明度[m]の x 倍の水深における下向き流量)，(4) RT_x(透明度[m]の x 倍の水深以浅の体積にV_xに対するT_x)をダブルプルームモデルで計算した．その際，以下の 3 点に留意して計算を行った．

1. 曝気によるプルームの貫入水深が透明度[m]x 倍の水深以浅の場合はその閾値の水深での下降プルームの下向き流量は“0”とし平均計算を行うこと
2. 曝気が稼働していない期間においては，下降プルームの下向き流量は“0”として平均計算を行うこと
3. ダムサイトでの鉛直水温分布データに欠損がある場合はダブルプルームモデルの計算ができないので，その期間にあるはずの下降プルームの下向き流量は平均計算に含まないこと

また，透明度の何倍の水深かを表す x については x＝0.5，1.0，1.5，2.0，2.5，3.0，3.5，4.0 の 8 パターンについて(3) T_x，(4) RT_xを算出した．その上で期間フォルミディウムの観測日時)ごとにその平均を計算し，フォルミディウムの成長速度と比較した．その際のそれぞれのパターンにおける k(成長速度)との単相関係数をまとめたものが表 3.5-2, 図 3.5-5 である．図 3.5-5 は表 3.5-2 の結果を図化したものであり横軸は x[倍]を表している．縦軸は k(成長速度)との単相関係数を表している．

同図より先の 3.5.2 項と同様に相関係数は全て負の値を取っており，この項で考えた計 16 のどの指標においてもフォルミディウムの減少に寄与している可能性が考えられる．またT_x， RT_xともに k(フォルミディウムの成長速度)との相関係数は似たような挙動を示している．ただ，全体的に指標T_xの方がRT_xに比べて k との相関関係が強いことが読み取れる．これは上層の体積に対して下層に輸送する流量の割合に着目するよりも，流量自体に着目した方が優れていることを示唆している．

透明度に対しての倍率 x[倍]でいえばT_xの場合は x=2.0[倍]において，RT_xにおいては，x=2.5[倍]において k との関係性が最も強いことが読み取れる．これは補償水深が透明度の約 2～2.5[倍]であることに起因すると考えられる．透明度の約 2～2.5 倍である補償水深がフォルミディウムの生死に大きく影響しているとすればこの結果はその前提から大きく外れるものではない．

3.5.4 曝気循環装置(下降プルーム)としての指標の選定

フォルミディウムの成長を抑制させる働きがあると考えられる下降プルーム(曝気が作り出す)の指標として，上では(1)Q_z[m^3/s]，(2)R_z，(3)T_x[m^3/s]，(4)RT_xの 4 つを提案した．更にその中でも水深 z[m]については 10 パターン，x[倍](透明度に対する倍率)では 8 パターン，の計 36 パターンについて k(フォルミディウムの成長速度)との関係性を，図表を交えて考察した．以上の 36 パターンの中で k(フォルミディウムの成長速度)との相関係数が最も高かったのは，Q_{5m}で「-0.1883807」であった．したがって本研究において，k についての回帰式を作成する際に(曝気による)下降プルームの説明変数としては，Q_{5m}を採用することにする．Q_{5m}と k(成長速度)との関係を散布図として図 3.5-6 に示す．

同図より，Q_{5m}[m^3/s]が 120 を超えるとフォルミディウムは成長(増殖)しないという傾向が読み取れる．それ以下の値においては，フォルミディウムは成長も減少もしている．しかしフォルミディウムの成長速度が大きいとき($k > 0.1$)はQ_{5m}[m^3/s]が 20 以下の時に多いように読み取れる．また全体的に見ても k は負の領域にプロットが分散しており，曝気の稼働により一定のフォルミディウム低減の効果がある可能性も考えられる．

3.6　重回帰分析による回帰式の作成と有用性の検証

3.6.1 重回帰分析の概要と準備

重回帰分析は原因と結果の因果関係を考えるための分析で，一つの目的変数に対して複数の説明変数が考えられる状況を想定している．

本研究ではフォルミディウムの成長を表現するために 5 つの説明変数である「日射量」，「表面水温」，「全リン」，「ウェダバーン数」，「Q_{5m}」)を設定した．k(成長速度)と 5 つの説明変数(日射量，表面水温，全リン，ウェダバーン数，Q_{5m})の関係については，それぞれ図 3.3-2，図 3.3-3，図 3.3-6，図 3.4-4，図 3.5-6 に示した通りである．日射，全リンに関してはフォルミディウムの観測期間と同じ 353 ケースについて比較ができているが，ダムサイトでの鉛直データを用いる表面水温，ウェダバーン数，Q_{5m}に関しては，データの欠損がある期間が存在する影響で 301 ケースとなっている．したがって，ケース数が少ない 301 ケースに合わせてデータをそろえ，重回帰分析を実施した．

なお本研究における重回帰分析は統計分析フリーソフトである「R 言語」を用いて行った．

図 3.6-1-1~図 3.6-1-11 は重回帰分析を行うにあたって R 言語にインプットしたデータを時系列表示したものである．

重回帰分析の結果より一般的に t 値の絶対値が 1.4 以上で説明変数として影響の度合いが大きいと言われている(切片は除く)．回帰式を作成する場合，重回帰分析では影響の度合いが低い説明変数を不採用としていき回帰式の精度を上げていく操作を行う．その際，P 値が大きい順に説明変数を一つずつ不採用としていき，もう一度重回帰分析にかける．そして

再度解析結果を見てP値が最も大きい説明変数を不採用とする.この作業を繰り返し行う.そしてt値の絶対値が全て1.4以上になった時点で解析を終了する(有意水準5%のt検定).

調整済み決定係数は一般的に0.4以上で精度的に問題ないとされる.

3.6.2 重回帰分析

本項では，kに対して回帰式を作成することを試みる．その際，以下の

・日射，水温，TPは植物プランクトンの生育にどれも欠かせない要素であること

・ 風，曝気の影響は付加的要因であり低減を促進すると予測できること

を考慮して，以下の式(3.6-1)のような形で回帰式のモデルを仮定した.

$$k = (\text{日射の影響}) \times (\text{水温の影響}) \times (\text{全リンの影響}) + (\text{風の影響}) + (\text{曝気の影響}) \quad \cdots(3.6\text{-}1)$$

また，フォルミディウムが生育するに際し日射，水温，全リンに関してはその値が大きければ(または多ければ)より生育しやすいということでなく適度な条件というものがある．したがって，本研究では，以下の式(3.6-2)～式(3.6-4)のように日射，水温，全リンの影響に関しては3次式を仮定することにした.

$$(\text{日射の影響}) = A_3 \cdot \varphi^3 + A_2 \cdot \varphi^2 + A_1 \cdot \varphi + A_0 \qquad (3.6-2)$$

$$(\text{水温の影響}) = B_3 \cdot WT^3 + B_2 \cdot WT^2 + B_1 \cdot WT + B_0 \qquad (3.6-3)$$

$$(\text{全リンの影響}) = C_3 \cdot TP^3 + C_2 \cdot TP^2 + C_1 \cdot TP + C_0 \qquad (3.6-4)$$

ここでφは日射，WTは表面水温，TPは全リンのデータ列を表している.

曝気による下降プルームの影響については付加的な要因であるので以下の式(3.6-5), のように設定した.

$$(\text{曝気の影響}) = E \cdot Q_{5m} \qquad (3.6-5)$$

また，風の影響についてであるが，W(ウェダバーン数)は，成層の不安定 or 安定を評価する質的な変数として扱うため，以下のようなダミー変数を用い，(風の影響)は以下の式(3.6-6)のように設定した.

$$W = 1 \quad (W \leq 1: \text{成層が不安定})$$

$$W = 0 \quad (W > 1: \text{成層が安定})$$

$$(\text{風の影響}) = D \cdot W \qquad (3.6-6)$$

目的変数である k(成長速度)に関しては，増減の大きいイベントでの精度を優先して表現したいため，

$$k \to 0 \quad (|\Delta N| = |N_{n+1} - N_n| \leq 40) \qquad (3.6-7)$$

上式(3.6-7)に示すような変換を行った．図 3.6-2 は 2004 年~2014 年におけるフォルミディウムの頻度分布を示している．(a)よりフォルミディウムの変化が 100 以上となるのは非常に少ないケースということが確認できる．(a)においてフォルミディウムの変化量が 100 以下の範囲を抜き出したのが(b)である．(b)よりフォルミディウムの変化量が 40 以上になったケースはそれぞれ 5 回に満たない．したがってフォルミディウムの変化量が 40 以下のケースにおいてはフォルミディウムの安定的な変化と考えることにした．図 3.6-3 は 2004~2014 年においてフォルミディウムの変化量が 40 以下の期間に網掛けを施したものである．図 3.6-3 に示すようにオレンジ色の網掛けがある$|\Delta N| \leq 40$の期間は比較的，フォルミディウムの変化が安定している様子が確認できる．

3.6.3 回帰式作成における説明変数の選定

重回帰分析を行うにあたり，仮定した回帰式内の日射，水温，栄養塩の 3 次式の積の部分は展開し，そこで生成される 63(＝4^3-1)の説明変数を新たに設定して，ウェダバーン数，曝気を加えた計 65 の説明変数の選定を行った．

～説明変数の内訳～

- $\varphi^a \cdot WT^b \cdot TP^c \ (a,b,c = 0\ or\ 1\ or\ 2\ or\ 3)$ (a=b=c=0 は除く) ：説明変数×63
- W ：説明変数×1
- Q_{5m} ：説明変数×1
-

R 言語を用い，重回帰分析を行った結果，P 値の大きい順に 22 の説明変数を削り，全ての t 値の絶対値が 1.4 以上になった．その際削った係数の順序を示したリストを表 3.6-1 に示す．また説明変数を 22 削ったうえで重回帰分析を行った時のそれぞれの係数，t 値，P 値，調整済み決定係数を表 3.6-2 に示す．

表 3.6-1 中の赤字は選定により削った係数であり，右の数字は削った順番を表している．同表中の「(例)　solar3_TP3_WT2」 は説明変数「$\varphi^3 \cdot TP^3 \cdot WT^2$」を表している．同表において，W は 1 番に削る説明変数となった．これはフォルミディウムの成長に対しては，日射・水温・全リン・曝気に比べ W の影響が小さいという可能性があるためである．

表 3.6-2 より，残った説明変数に対して重回帰分析を行った結果，t 値の絶対値は全て 1.4 以上になっていることが分かる．調整済み決定係数は 0.3243 となった．

3.6.4 作成した回帰式の有用性の検討

本項では，上で作成した回帰式の有用性を検討していく．

まず，回帰式で求めた k(成長速度)と N(フォルミディウム数)を観測値と比較する．N を計算する際の概念図を図 3.6-4 に示す．回帰式により推算された k(以後：k_{reg}と称す)を用いて，前回の観測で得られたフォルミディウム数を基にN_{Est}を計算した．一期間で N を推算したら，初期条件はリセットしてまた前回のフォルミディウムの観測値を基にk_{reg}を用いてN_{Est}を推算するという操作を繰り返し行った．図 3.6-4 中の$\Delta N(Obs.)$はある期間におけるフォルミディウム数の観測値の変化量，$\Delta N(Est.)$は前のN_{Obs}(フォルミディウムの観測値)に対して推算したN_{Est}がどれだけ変化したかという量である．

観測値と回帰式による推算値の比較結果(k と N)(2004 年～2014 年)を図 3.6-5~図 3.6-15 として示す．ただし観測値において，$|\Delta N(Obs.)| \leq 40$の期間は k→0 としてプロットしている．同図群中の赤い網掛けは$\Delta N(Obs.) > 40$，青い網掛けは$\Delta N(Obs.) < -40$の時を表している．それ以外の期間は$|\Delta N(Obs.)| \leq 40$の期間である．このそれぞれの期間における$\Delta N(Est.)$の内訳を考えたものが表 3.6-3 である．図中の黒い太線で囲った領域は，回帰式の精度が観測と完全に合致するときに 100%になる部分である．同領域を見てみると$\Delta N(Obs.) > 40$の時，つまり観測でフォルミディウムが 40 より大きい変化をするケースは 27.1%と再現性が低く回帰式は観測結果をよく表現できていない．したがって，今回作成した回帰式はフォルミディウムの成長速度を低い方に見積もり，安全な結果(フォルミディウムが増えない)を表現しやすいと言える．よってこの回帰式を用いて k(成長速度)を計算した時，k(成長速度)が大きな値を示すときはより危険な状態(フォルミディウムが増える)を表している可能性が高いということができる．

今回作成した回帰式では，「日射・水温・全リン」の 3 つの環境要素に加え，曝気の影響も考慮されている．そこで，貯水池に曝気がない仮想状態でフォルミディウムの成長の特性を「日射・水温・全リン」が適切に表現しているか考察する．以下の(ⅰ)～(ⅳ)の手順で確かめた．

(ⅰ)まず観測結果より，日射量と水温の散布図を描いた．その結果が図 3.6-16 である．

(ⅱ)次に水温，日射量をそれぞれ以下の 3 つの領域に分ける．

- 「水温(or 日射量) < (平均－標準偏差) 」
- 「(平均－標準偏差) < 水温(or 日射量) < (平均＋標準偏差) 」
- 「(平均＋標準偏差) < 水温(or 日射量)」

図中の 4 本の点線はその境目を表している．

(ⅲ)次に水温，日射に関して 3 つの領域で，それぞれにおける中央値を考える．それをプロットしたのが同図中の＋マークである．この計 9 点を 9 つの領域の代表値として扱う．つまり，図 3.6-17 の簡略図に示すように水温，日射量の値をそれぞれ 3 段階(低，中，高)で分けた時にできる 9 つの領域(a)~(i)における水温と日射量の

代表値を決めた.

(ⅳ)作成した回帰式においてQ_{5m}＝0とし，領域(a)~(i)それぞれにおいて，回帰式内のTPをxとして関数を描いた．その結果が図 3.6-18 である.

灰色の網掛けがない部分は，領域(a)~(i)における TP の最小値と最大値である．図より表面水温が低いとき(左側)は成長速度が 0 付近であまり変化をしないことが読み取れる．ところが，水温が中程度かつ日射も中程度となると TP が増加した時 k も増加している．ただ，日射が高いとき，成長速度は高くない．同図より，日射は中程度，水温は中程度以上で k(成長速度)は高くなると読み取ることができ，概ねフォルミディウムの生育条件を表現していると言える.

同様の方法で「TP と WT」,「日射と TP」の散布図(図 3.6-19，図 3.6-20)を描き，9 つの領域における k(成長速度)と日射の関係，水温の関係をそれぞれ描いたものを図 3.6-21，図 3.6-22 として示す.

図 3.6-21 より水温が低いとき(下の段)，成長速度は 0 付近でフォルミディウムはほぼ成長しないという結果になった．一方で水温が高い時についても成長速度は 0 付近でこれはフォルミディウムの生育条件とはそぐわないような結果になった．TP に関しても低いとき，高いときは，成長速度はほぼ 0 以下である．ただし，TP も水温も中程度の時は，日射が高くなれば成長速度は高くなることがグラフから確認された．図 3.6-18 で日射が高いとしたときの値は図 3.6-16 より約 18[MJ]であった．図 3.6-21 の中央のグラフにおいて日射が 18[MJ]の時はやはり成長速度は 0 付近である．20[MJ]を日射が超えてくるようになるとフォルミディウムの成長が活発になるという可能性も考えられる.

図 3.6-22 について考察する．同図より，日射が低いときは，成長速度はほぼ 0 以下でフォルミディウムは成長しない．一方で，日射・全リンが中程度の時は高水温になれば成長速度は正の値として大きくなっていく様子が確認できる．日射が高いとき(約 18[MJ])の時は成長速度はやはり 0 近傍である.

以上より，日射・水温・全リンの 3 つの環境条件のうち 2 つが中程度の時，残りの 1 つが高くなればなるほど成長速度は大きくなっていく様子が確認できた．これはフォルミディウムの成長過程を適切に表している可能性が高い．また図 3.6-18，図 3.6-21，図 3.6-22 内の四隅のグラフに比べ中央のグラフはデータ数も多く信憑性も比較的高いと言える.

次は回帰式で求めた k(成長速度)のうち，曝気による影響と日射・水温・全リン(曝気以外)の影響の内訳を，定量的に以下の手順(ⅰ)～(ⅲ)に沿って考察する.

(ⅰ) k_{Est}のうち曝気による効果k_{Est-ae}を以下の式(3.6-8)より算出する.

$$k_{Est-ae} = E \cdot Q_{5m} \qquad (3.6-8)$$

ここで，E は重回帰分析により求められた説明変数Q_{5m}の係数を表す.

(ⅱ) k_{Est}のうち，曝気以外の環境要因(日射，水温，全リン)による効果k_{Est-en}を以下の

式(3.6-9)より算出する．

$$k_{Est-en} = k_{Est} - E \cdot Q_{5m} \qquad (3.6-9)$$

(ⅲ)2004~2014 年において両者を時系列で描く．

以上の結果を図 3.6-23 に示す．重回帰分析の結果，説明変数Q_{5m} の係数は負の値となりフォルミディウムの成長を抑制する働きがあることが分かった．しかし図 3.6-23 を見てみると曝気の影響k_{Est-ae}は日射・水温・全リンの影響k_{Est-en}に比べて小さいことが見て取れる．説明変数Q_{5m}の係数の値は，「-0.0001612789」でQ_{5m}は大きくても高々160[㎥/s]程度であるから曝気の効果は最大でも

$$160\times(-0.0001612789)=-0.025804624$$

となる．ただこの値は小さいにしても決して無視できるわけではない．k_{Est-en}の値が 0 付近の時は成長速度をマイナス，つまりフォルミディウムを低減させる働きは少なくともあると言うことができる．

〈参考文献〉

1) 古里栄一，浅枝隆，須藤隆一: アンテナ色素の吸光特性に基づく藍藻類の光学的および水理学的発生条件に関する現地データを用いた考察　アンテナ色素・浮力周波数仮説，水環境学会誌 Vol. 26 (2003) No. 5 P 285-293
2) 磯部将吾: 釜房貯水池におけるカビ臭発生機構の湖内流動からの検討,修士論文, 2015 年
3) 後藤浩一，酒井健寿，岩崎健次: 曝気循環装置による藍藻類増殖抑制対策に関する研究(I)―成層強度と藍藻類の現存量との関係―, 土木学会年次学術講演会講演概要集(CD－ROM)，第 61 巻 ROMBUNNO.2-195，2006 年 9 月 1 日
4) 後藤浩一，古里栄一，浅枝隆: 藍藻類の増殖抑制効果に対する曝気循環対策の施設規模の影響，水工学論文集，Vol. 52 (2008) P 1297-1302
5) Christer Bronmrak & Lars-anders Hansson 著，占部城太郎　監訳(2007)，湖と池の生物学　(15P, 16P, 29P)，共立出版
6) 近藤純正(1994)，水環境の気象学(170P)，朝倉書店
7) 有田正光 編著，池田裕一 中井正則 中村由行 道奥康治 村上和男 著(1998)，水圏の環境(108P)，東京電機大学出版局
8) Asaeda, T. and Imberger, J.: Structure of bubble plumes in linearly stratified environments J.Fluid Mech., Vol.249, pp.35-57, 1993.

第3章　図表集

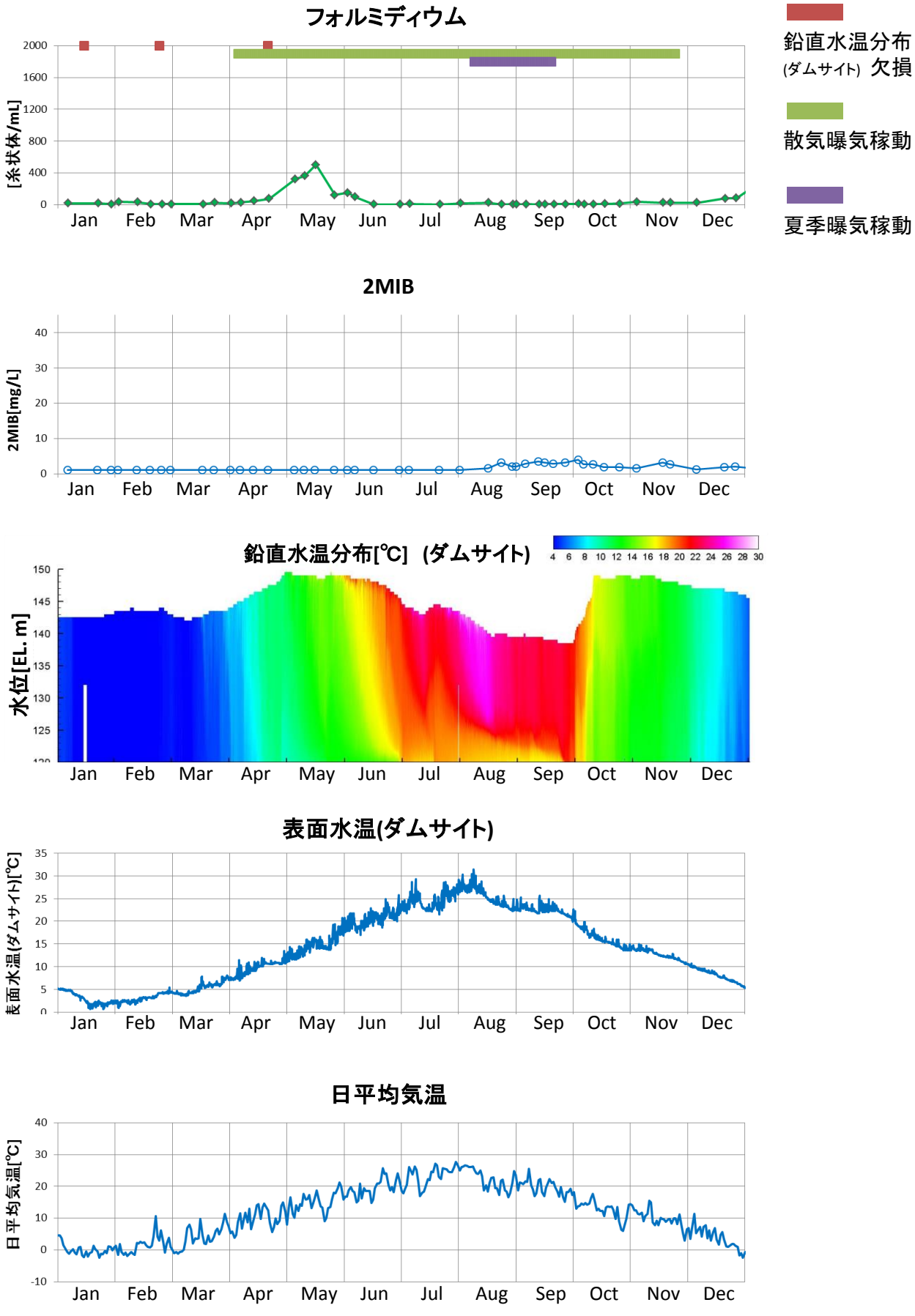


図3.1-1　釜房貯水池における　フォルミディウム・2MIB・鉛直水温分布・表面水温・日平均気温　(2004年)

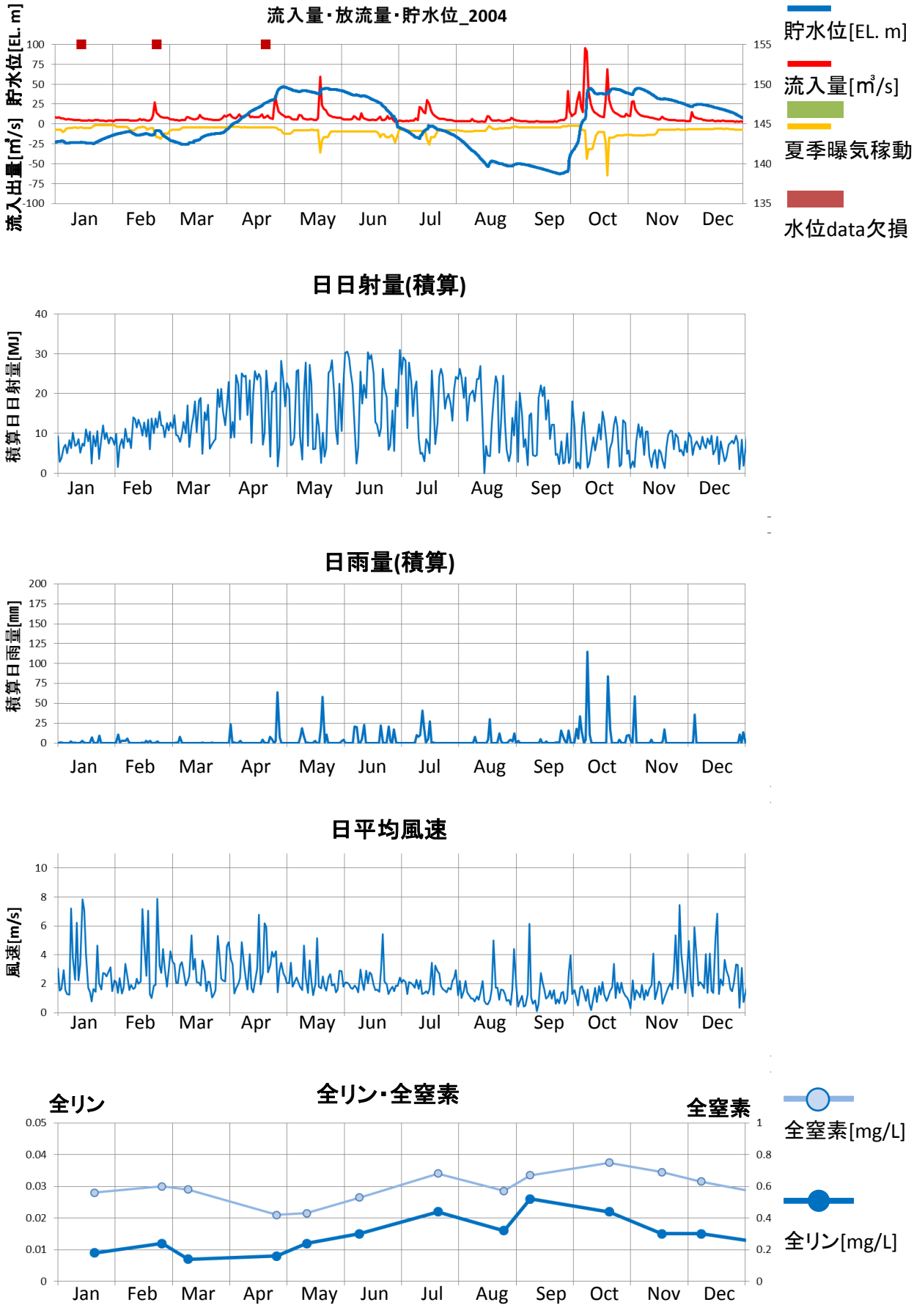


図3.1-2　釜房貯水池における　流入出量・貯水位・日日射量・日雨量・日平均風速・全リン・全窒素　(2004年)

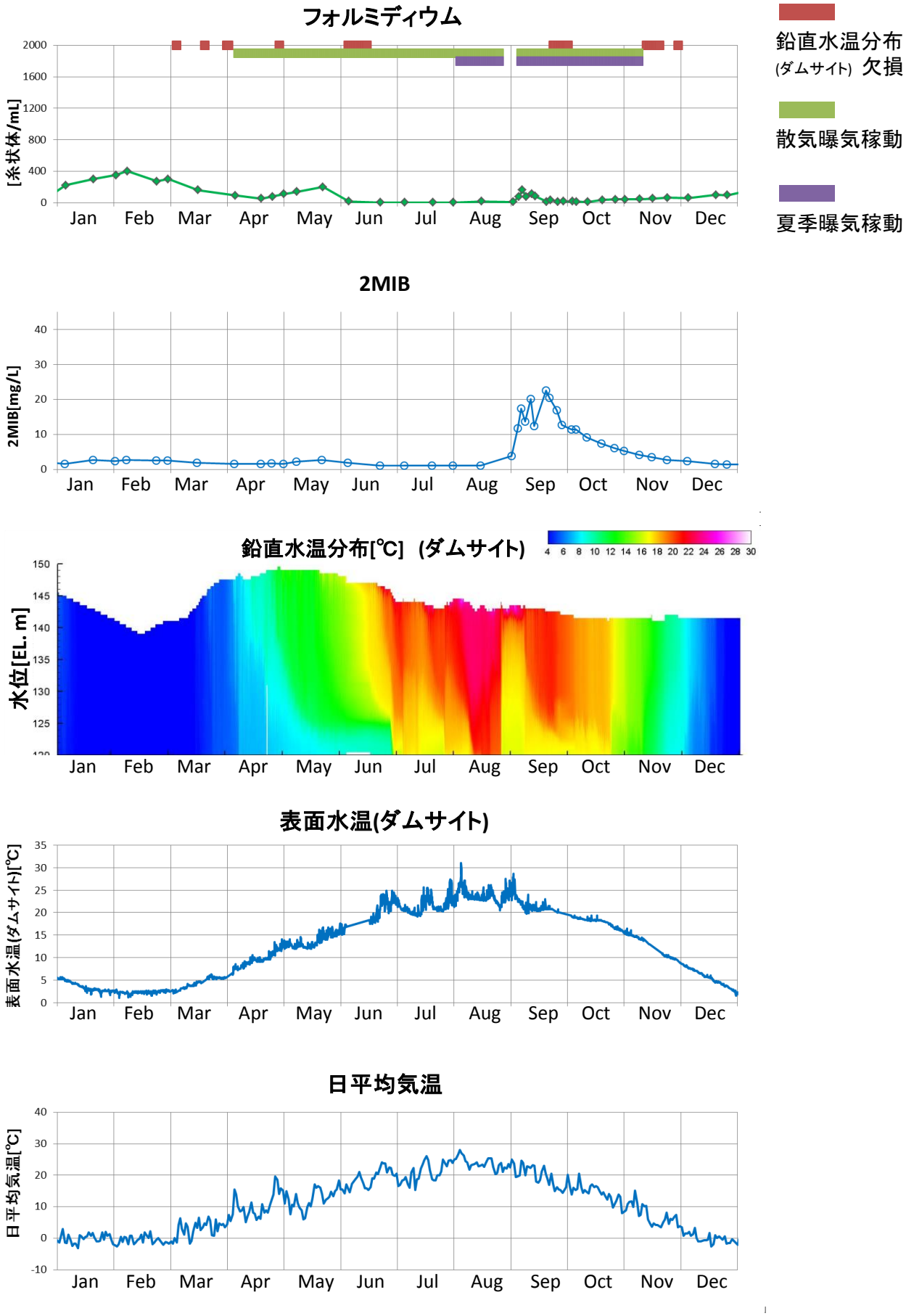


図3.1-3　釜房貯水池における　フォルミディウム・2MIB・鉛直水温分布・表面水温・日平均気温　(2005年)

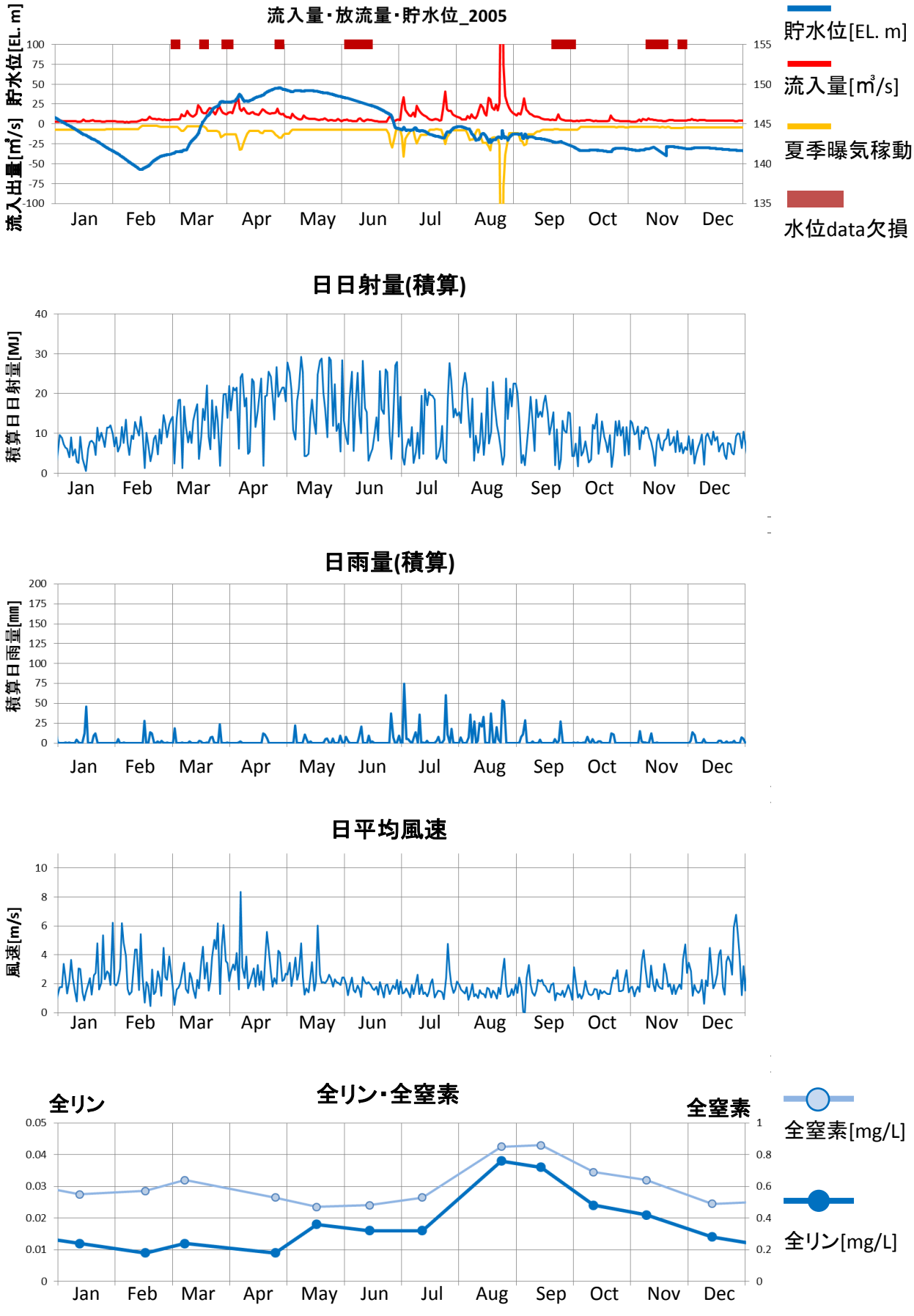


図3.1-4　釜房貯水池における　流入出量・貯水位・日日射量・日雨量・日平均風速・全リン・全窒素　(2005年)

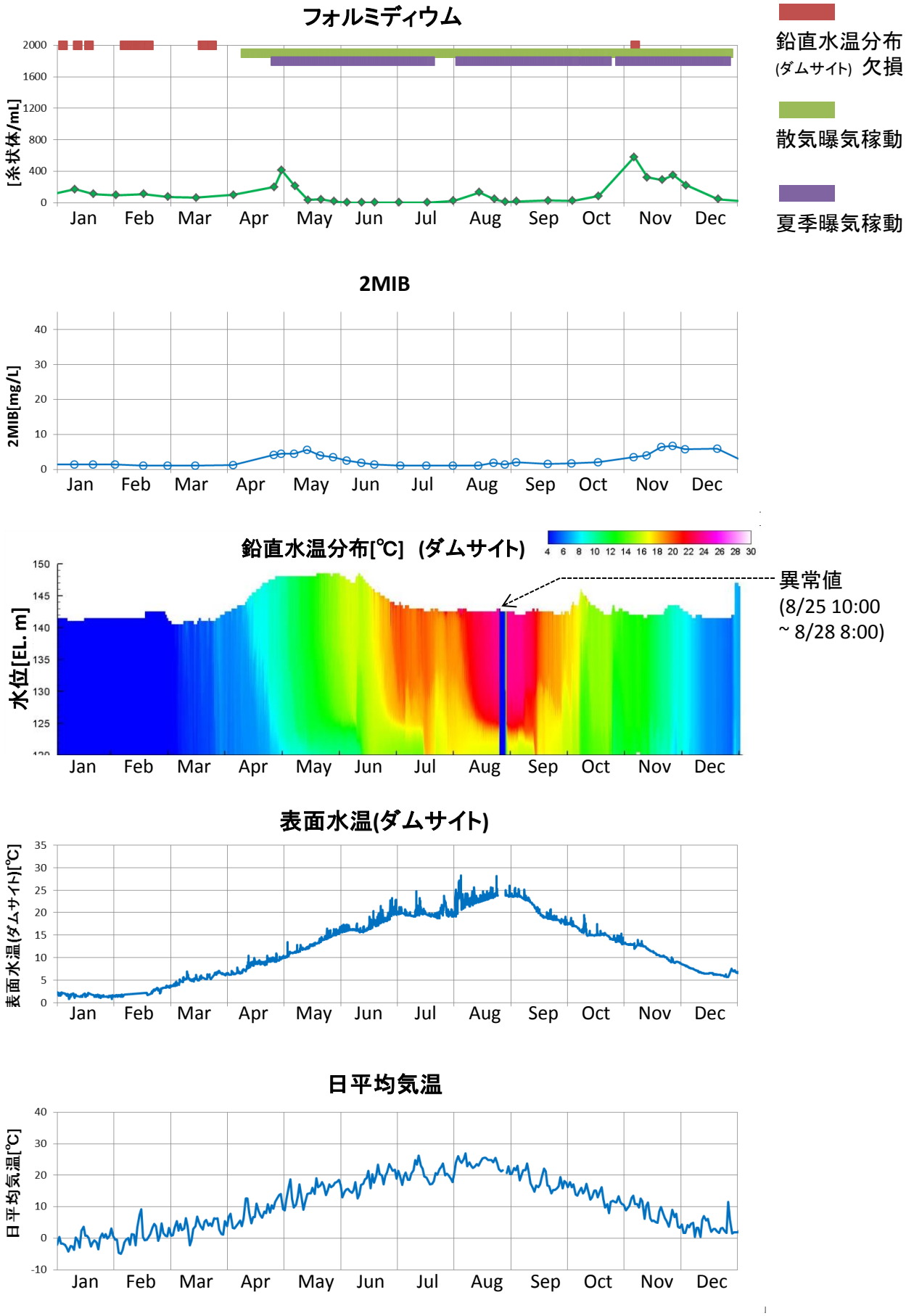


図3.1-5 釜房貯水池における フォルミディウム・2MIB・鉛直水温分布・表面水温・日平均気温 (2006年)

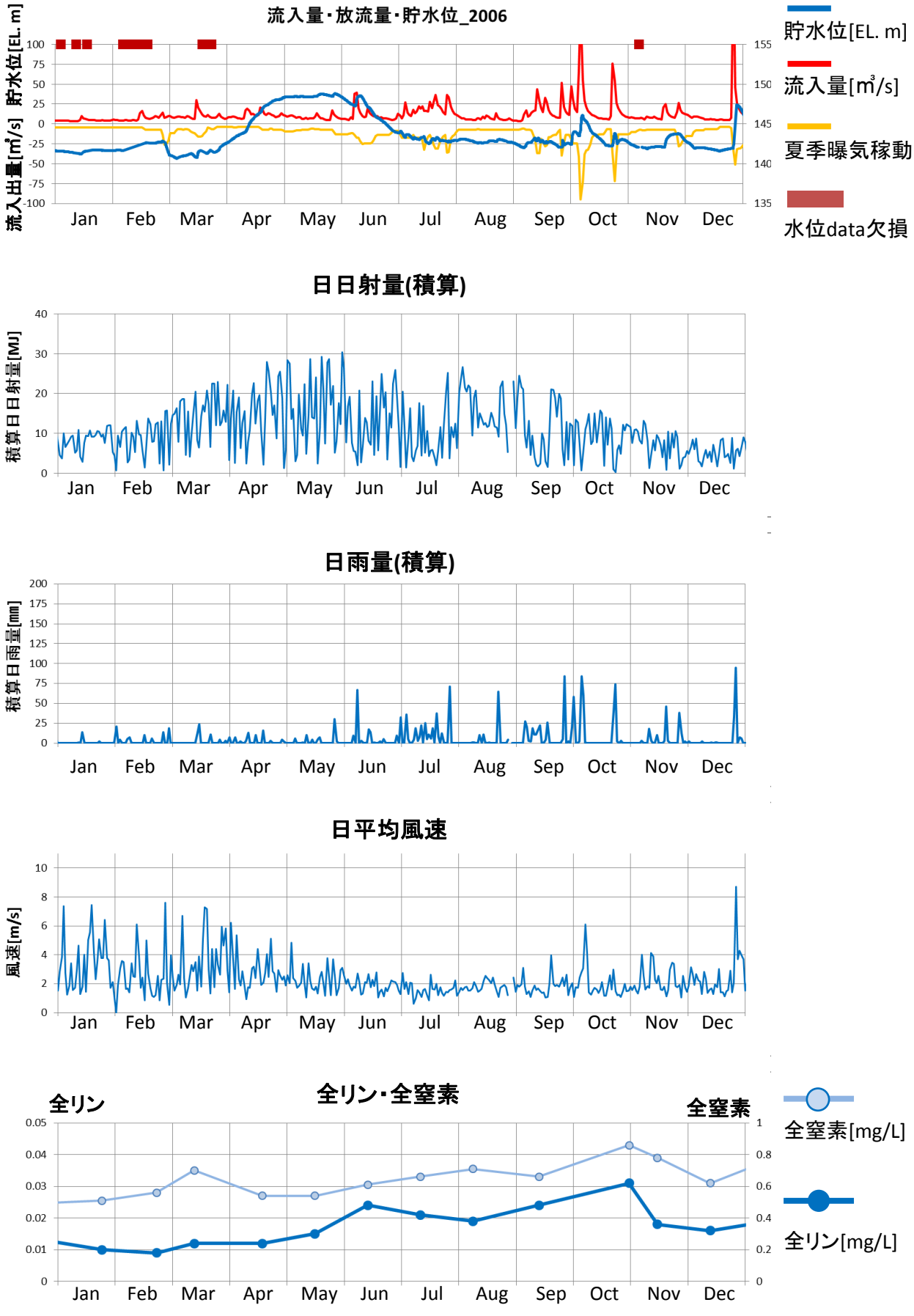


図3.1-6　釜房貯水池における　流入出量・貯水位・日日射量・日雨量・日平均風速・全リン・全窒素　(2006年)

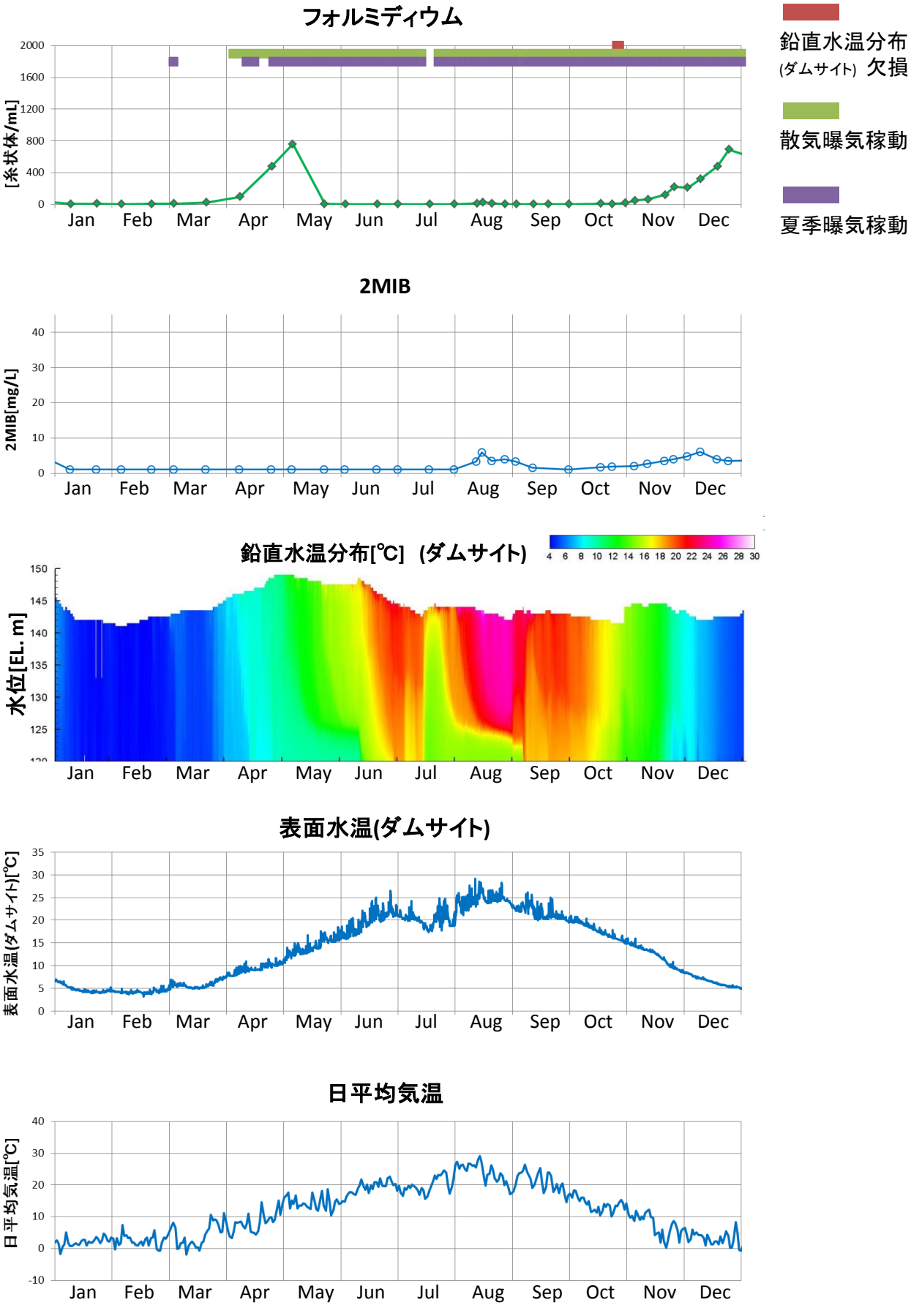


図3.1-7　釜房貯水池における　フォルミディウム・2MIB・鉛直水温分布・表面水温・日平均気温　(2007年)

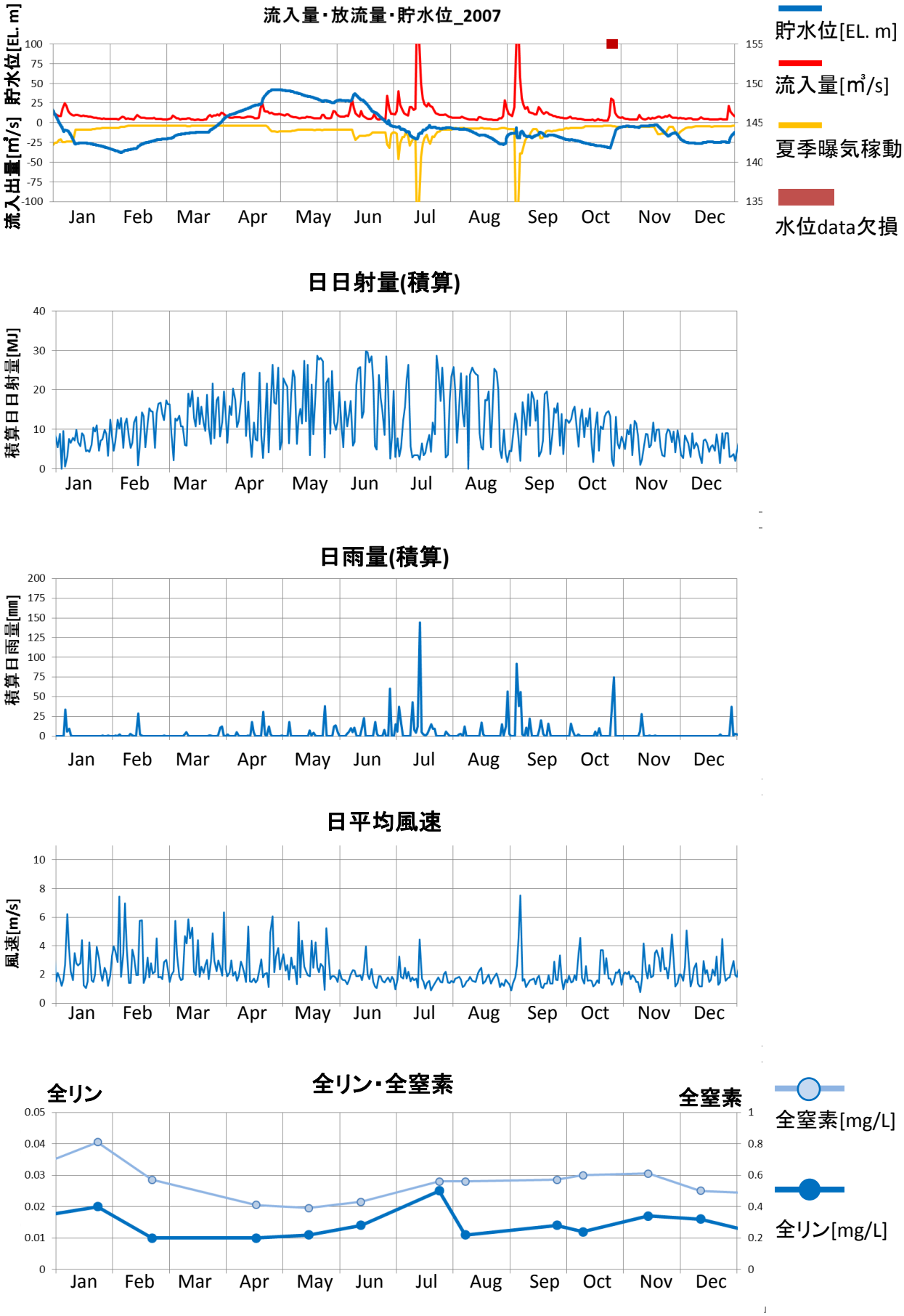


図3.1-8　釜房貯水池における　流入出量・貯水位・日日射量・日雨量・日平均風速・全リン・全窒素　(2007年)

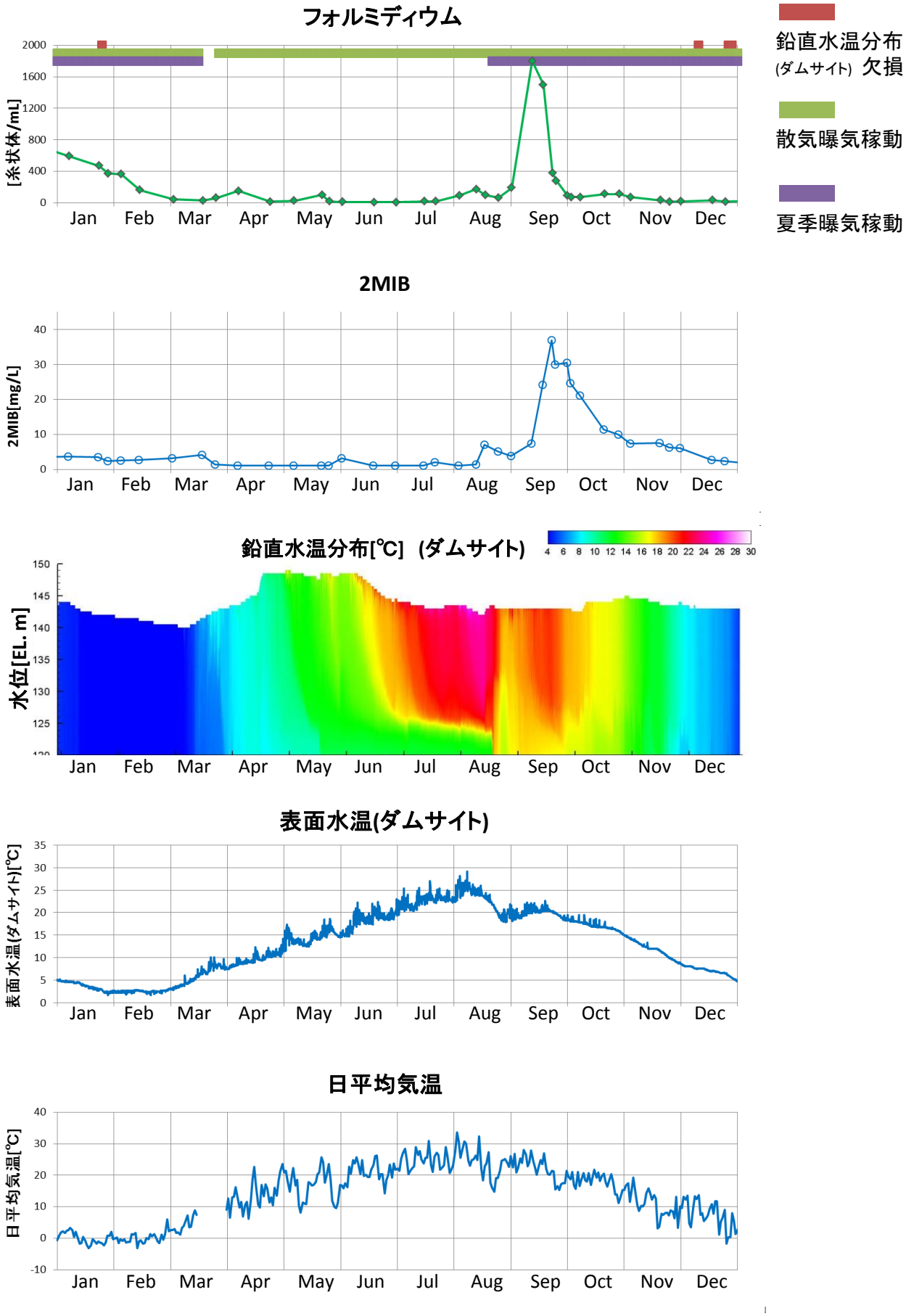


図3.1-9　釜房貯水池における　フォルミディウム・2MIB・鉛直水温分布・表面水温・日平均気温　(2008年)

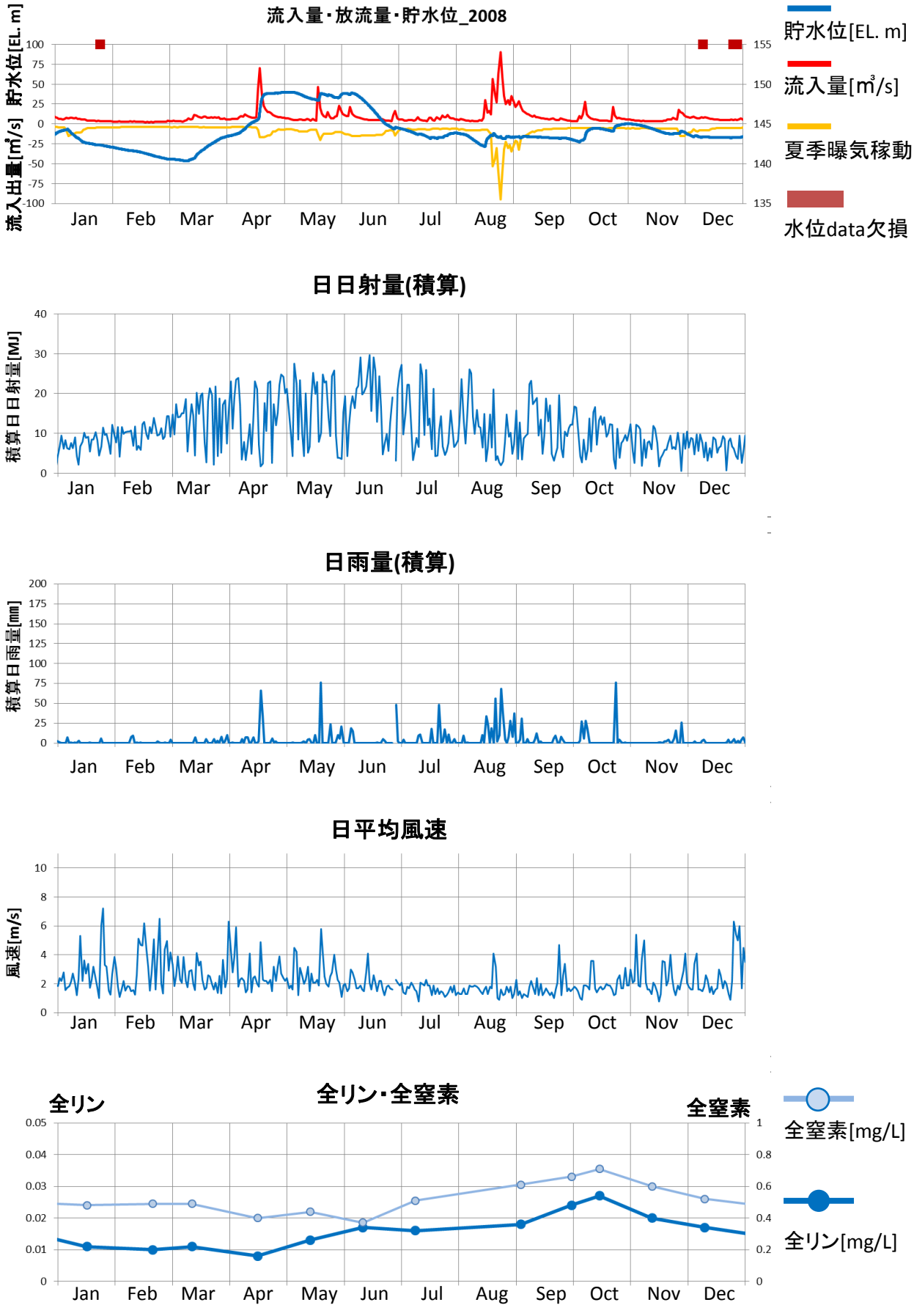


図3.1-10　釜房貯水池における　流入出量・貯水位・日日射量・日雨量・日平均風速・全リン・全窒素　(2008年)

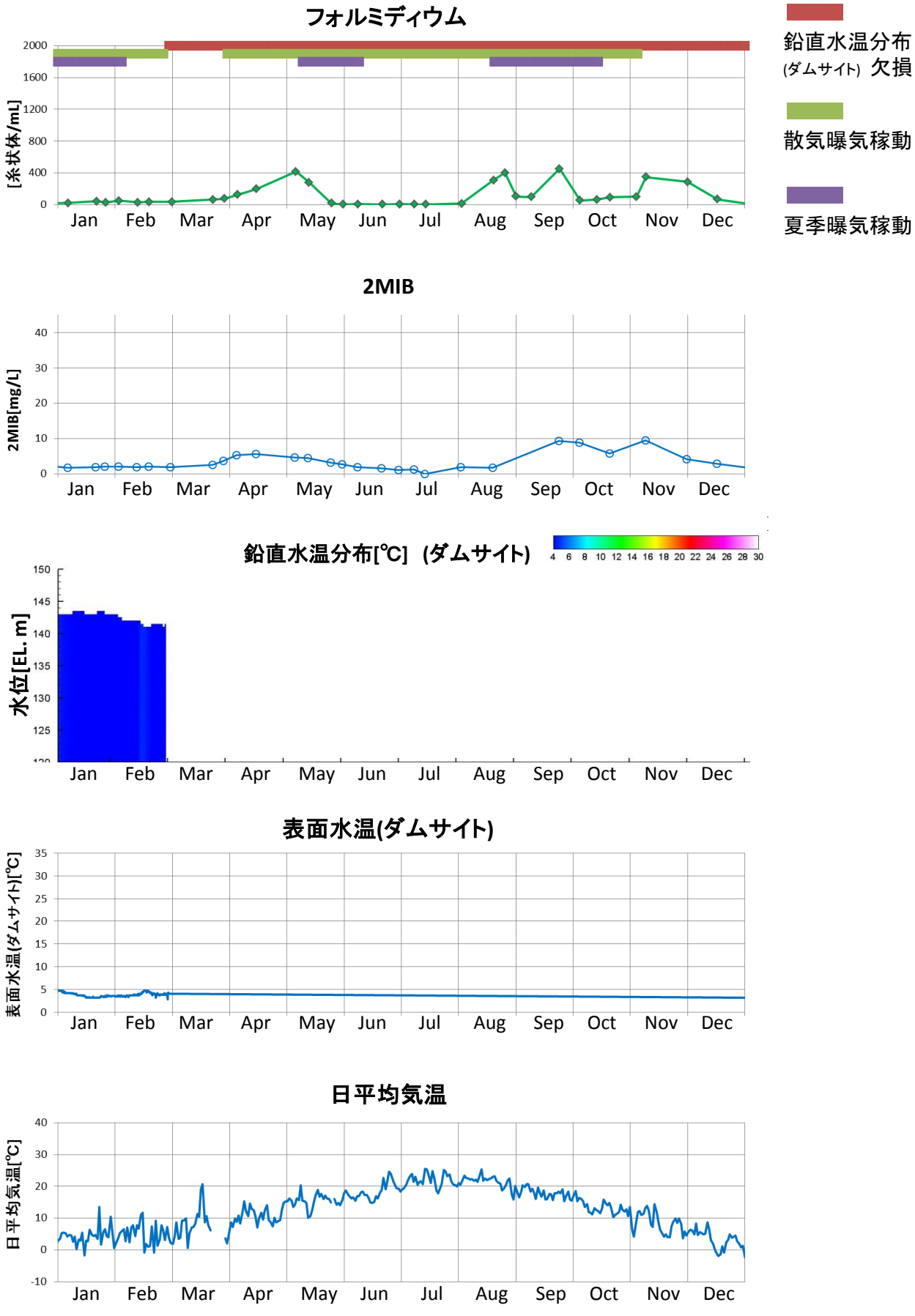


図3.1-11 釜房貯水池における フォルミディウム・2MIB・鉛直水温分布・表面水温・日平均気温 (2009年)

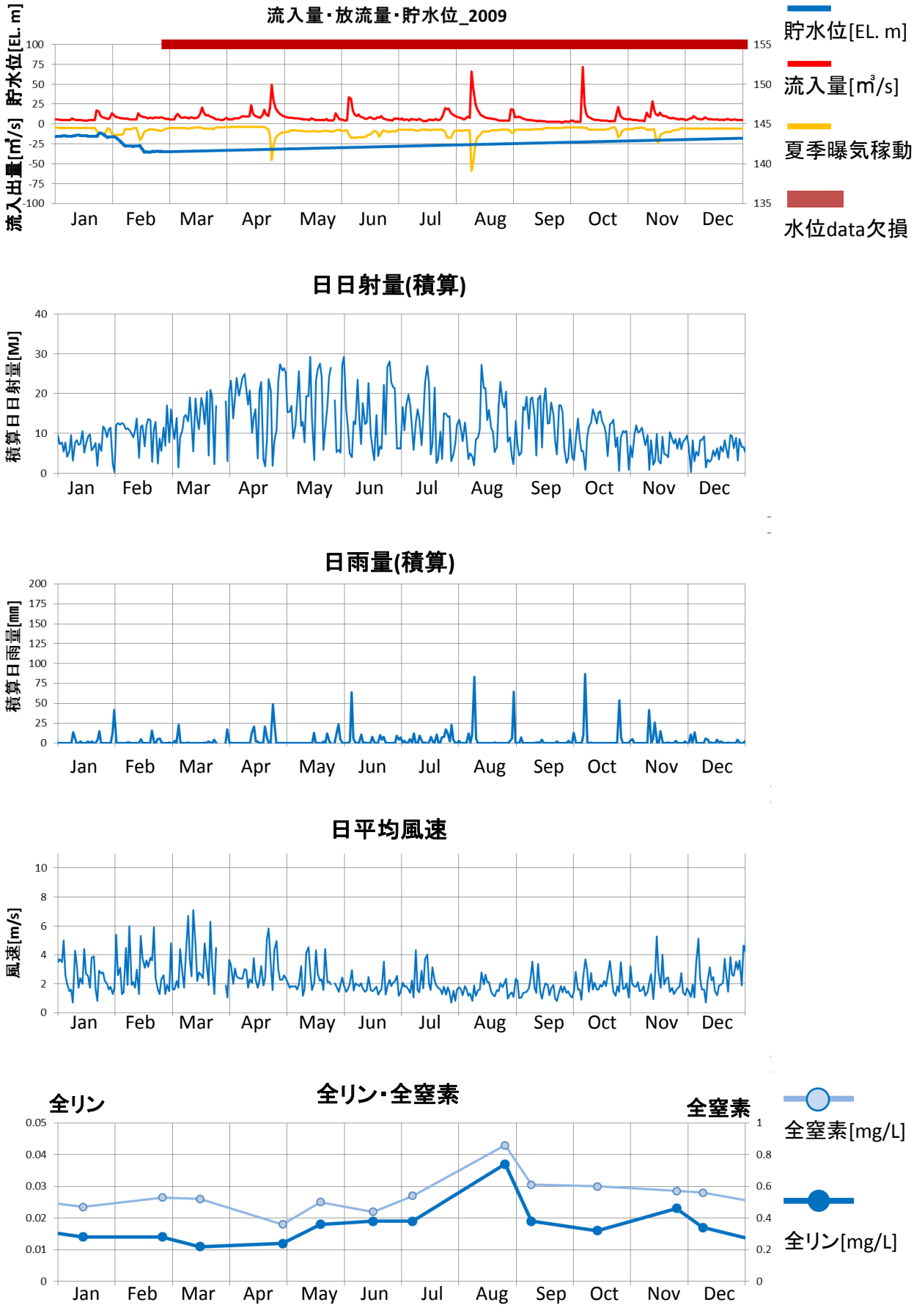


図3.1-12　釜房貯水池における　流入出量・貯水位・日日射量・日雨量・日平均風速・全リン・全窒素　(2009年)

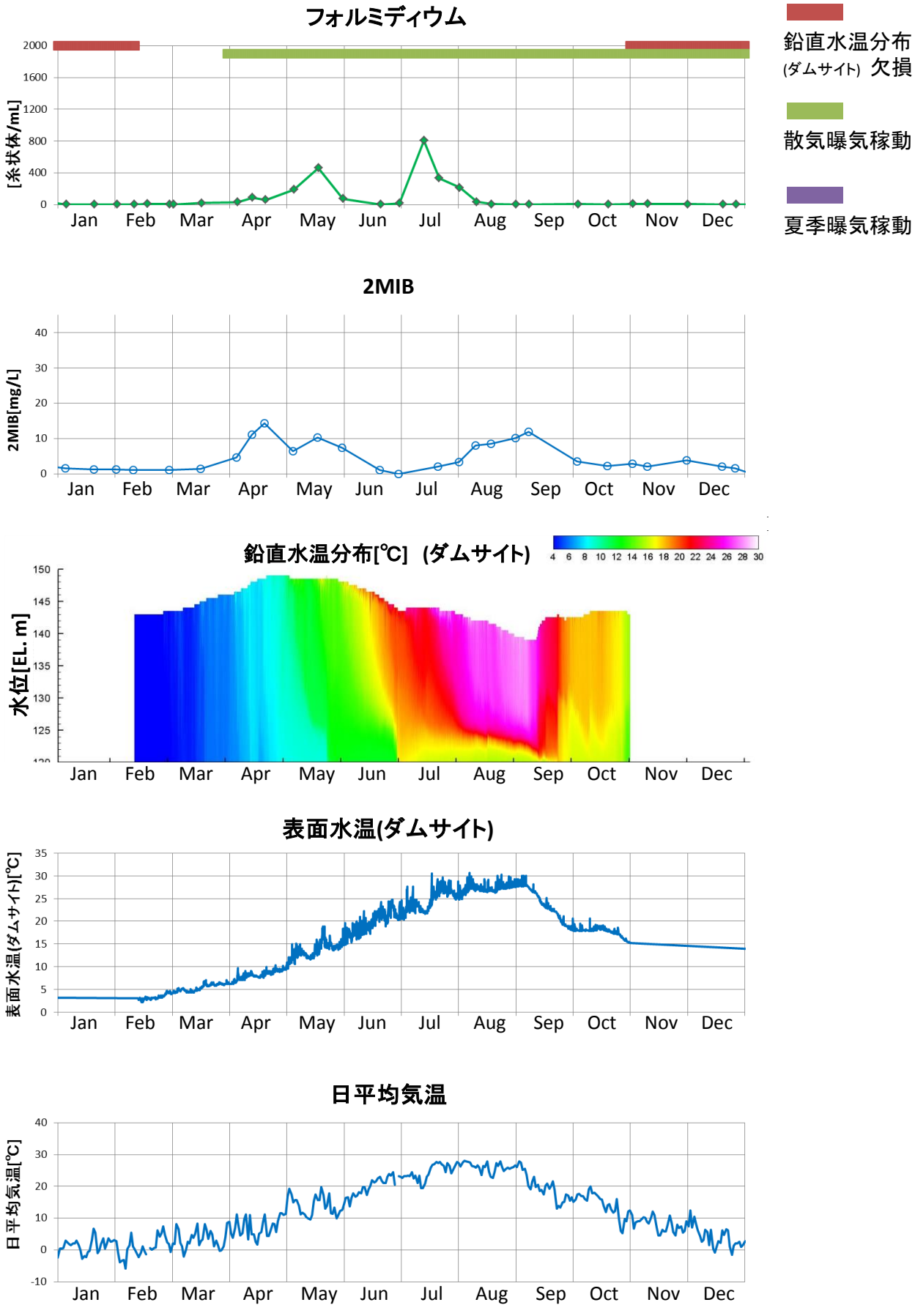


図3.1-13 釜房貯水池における フォルミディウム・2MIB・鉛直水温分布・表面水温・日平均気温 (2010年)

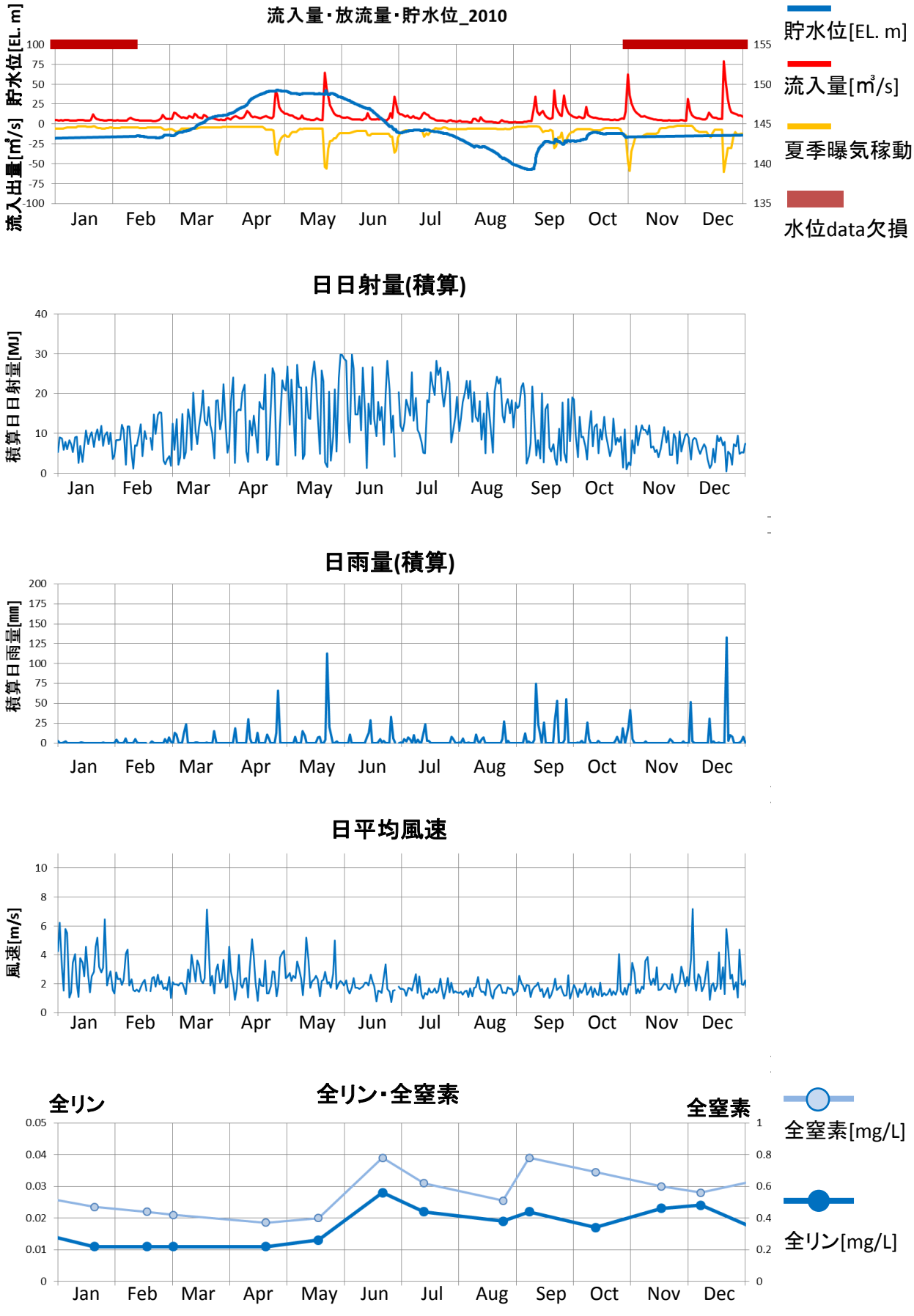


図3.1-14　釜房貯水池における　流入出量・貯水位・日日射量・日雨量・日平均風速・全リン・全窒素　(2010年)

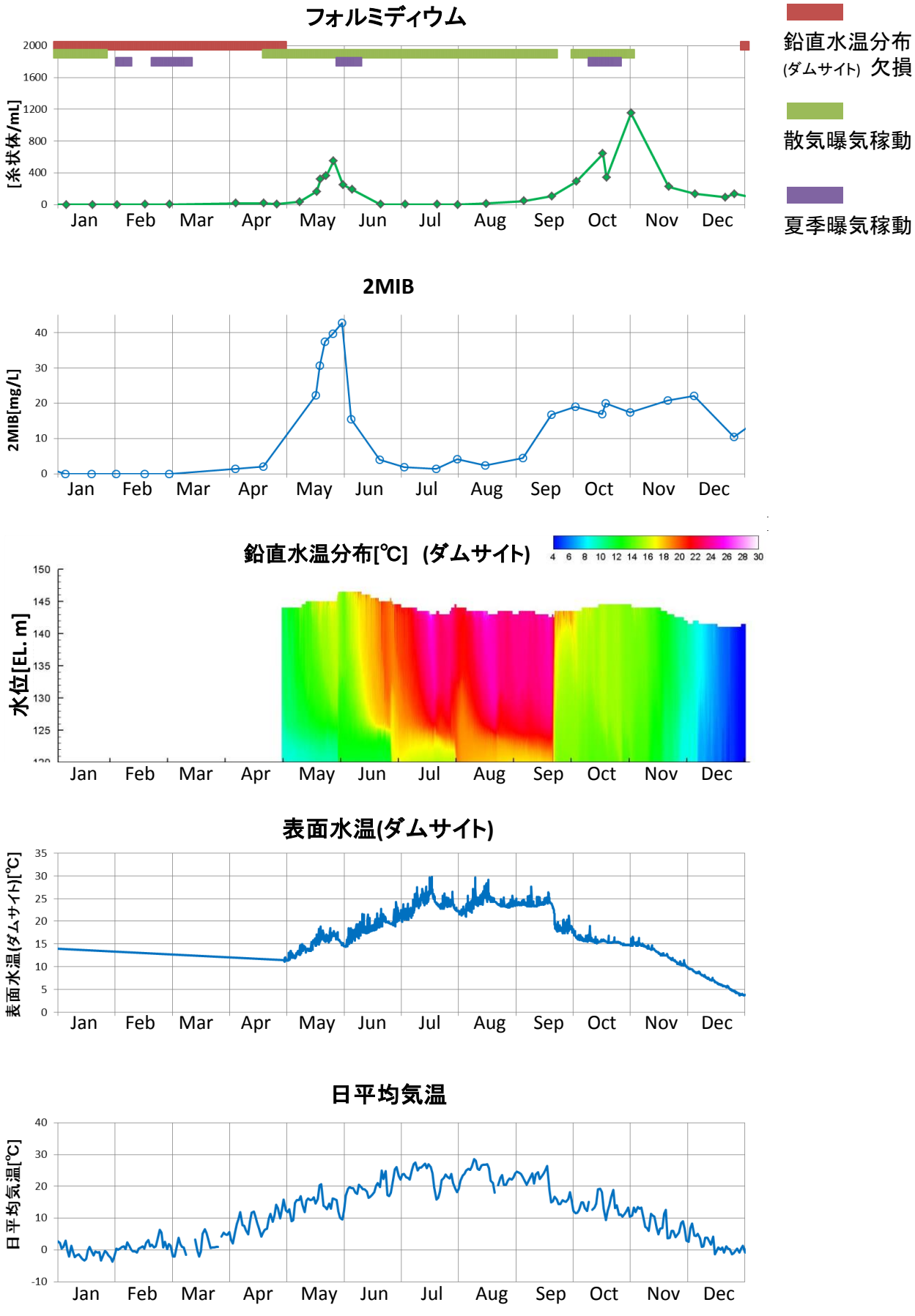


図3.1-15 釜房貯水池における フォルミディウム・2MIB・鉛直水温分布・表面水温・日平均気温 (2011年)

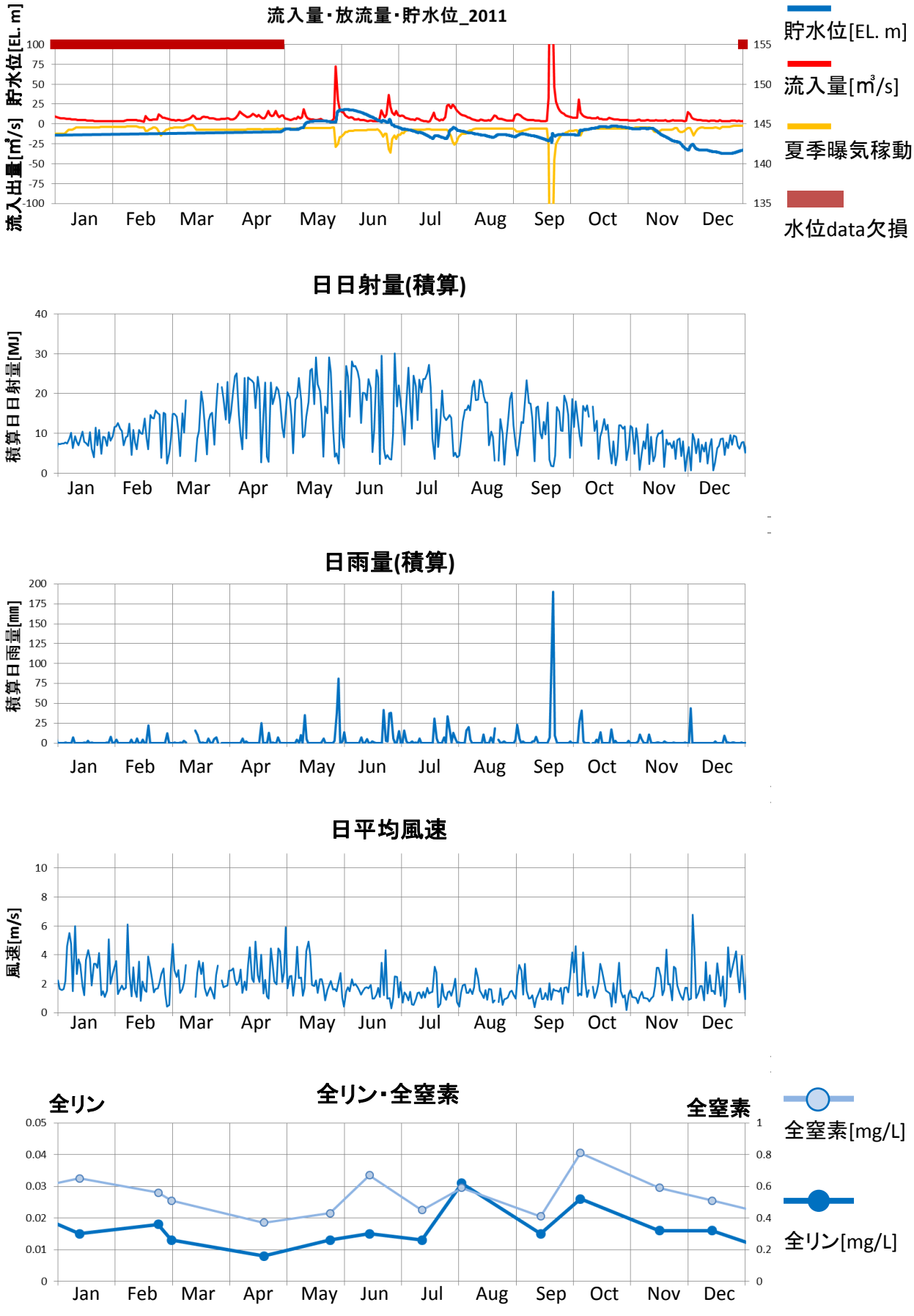


図3.1-16　釜房貯水池における　流入出量・貯水位・日日射量・日雨量・日平均風速・全リン・全窒素　(2011年)

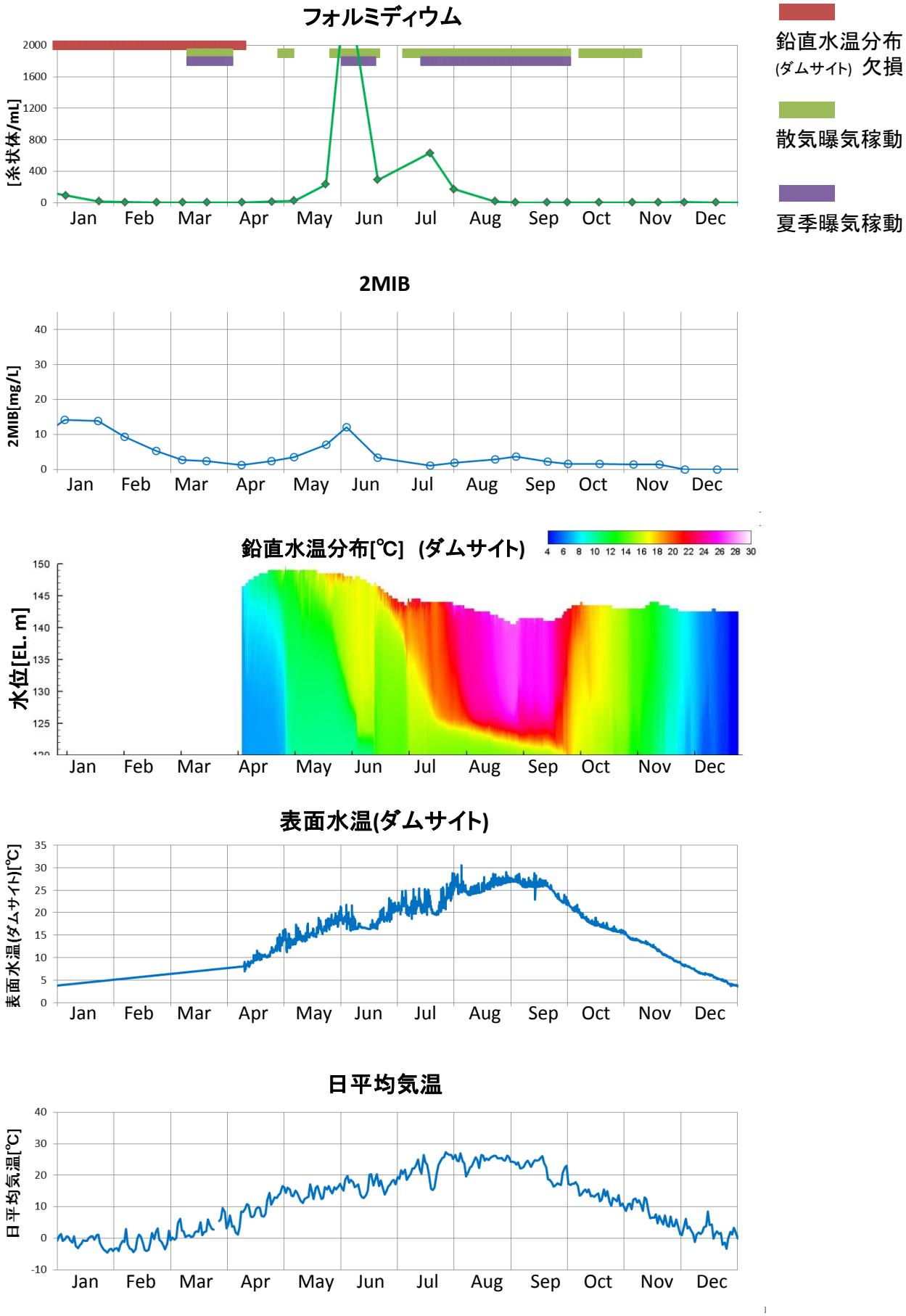


図3.1-17 釜房貯水池における フォルミディウム・2MIB・鉛直水温分布・表面水温・日平均気温 (2012年)

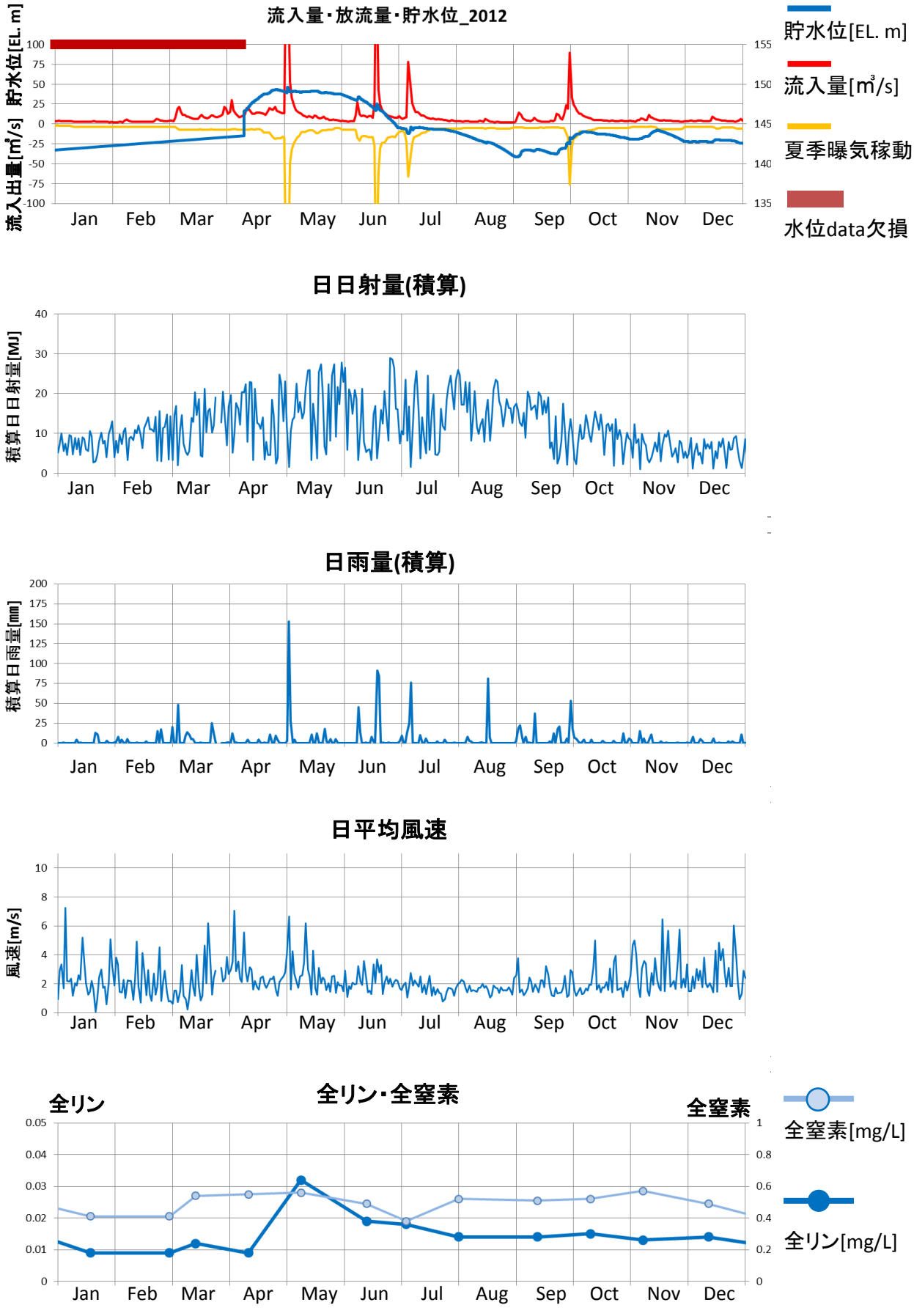


図3.1-18　釜房貯水池における　流入出量・貯水位・日日射量・日雨量・日平均風速・全リン・全窒素　(2012年)

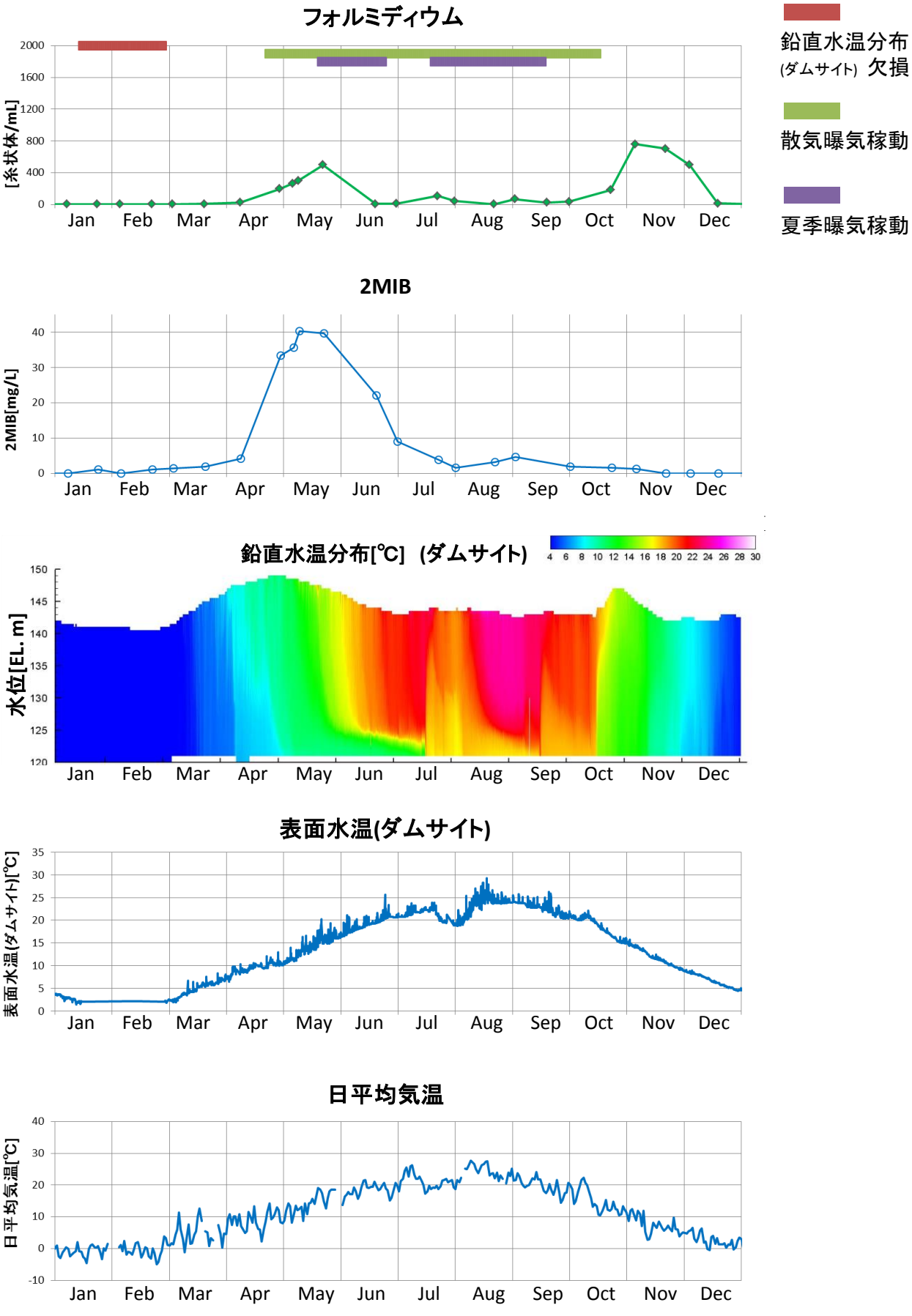


図3.1-19 釜房貯水池における フォルミディウム・2MIB・鉛直水温分布・表面水温・日平均気温 (2013年)

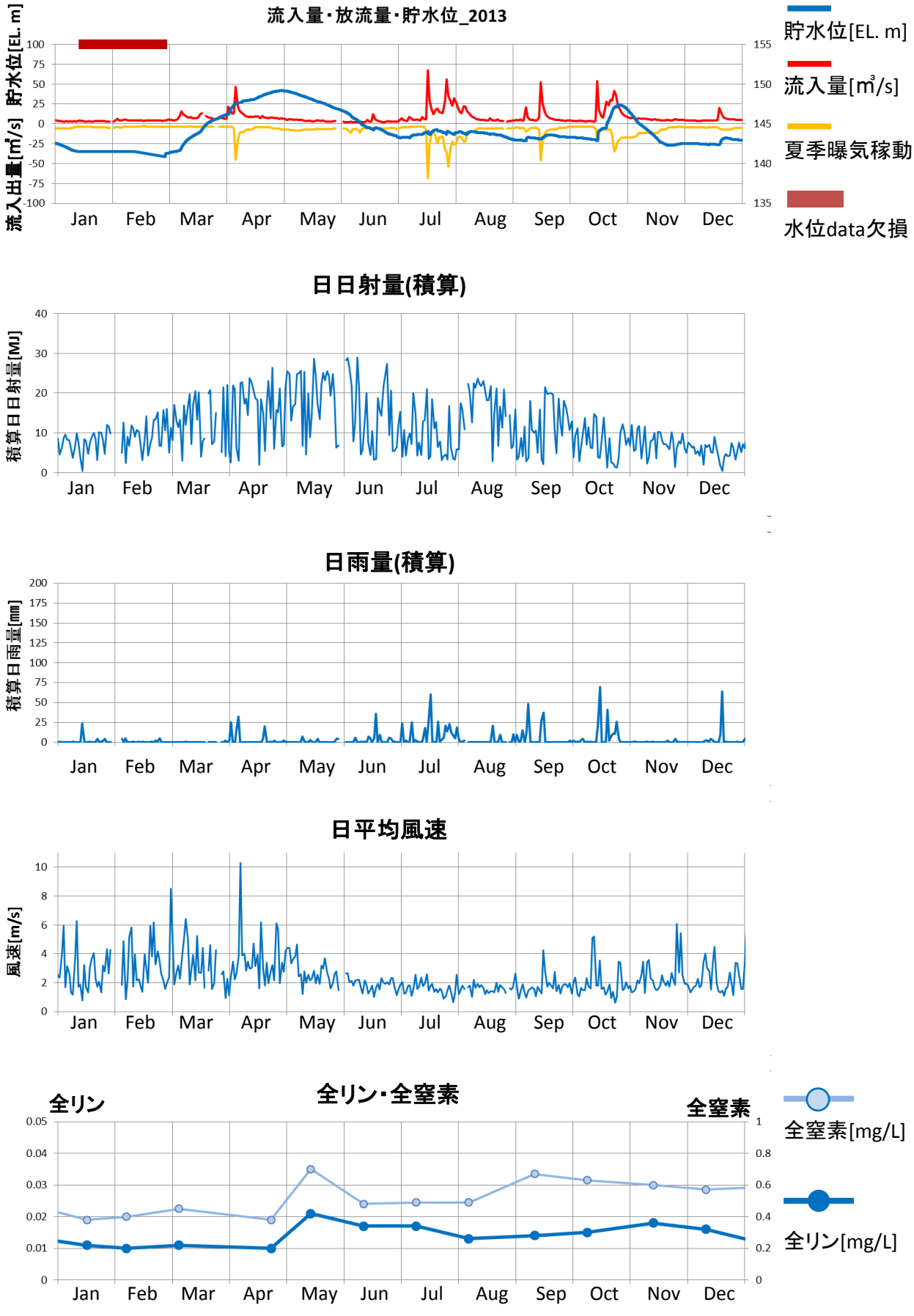


図3.1-20　釜房貯水池における　流入出量・貯水位・日日射量・日雨量・日平均風速・全リン・全窒素　(2013年)

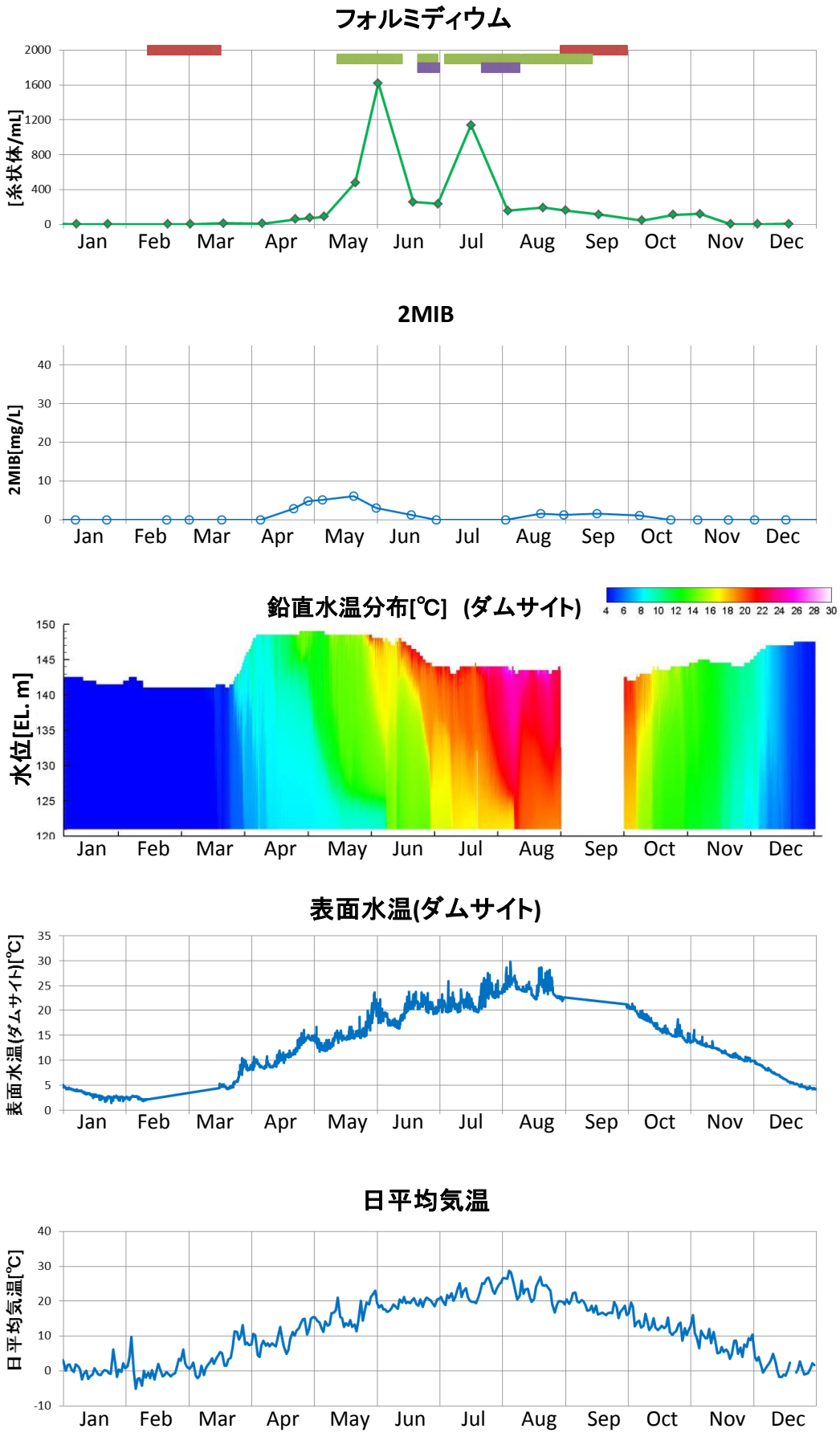


図3.1-21 釜房貯水池における フォルミディウム・2MIB・鉛直水温分布・表面水温・日平均気温 (2014年)

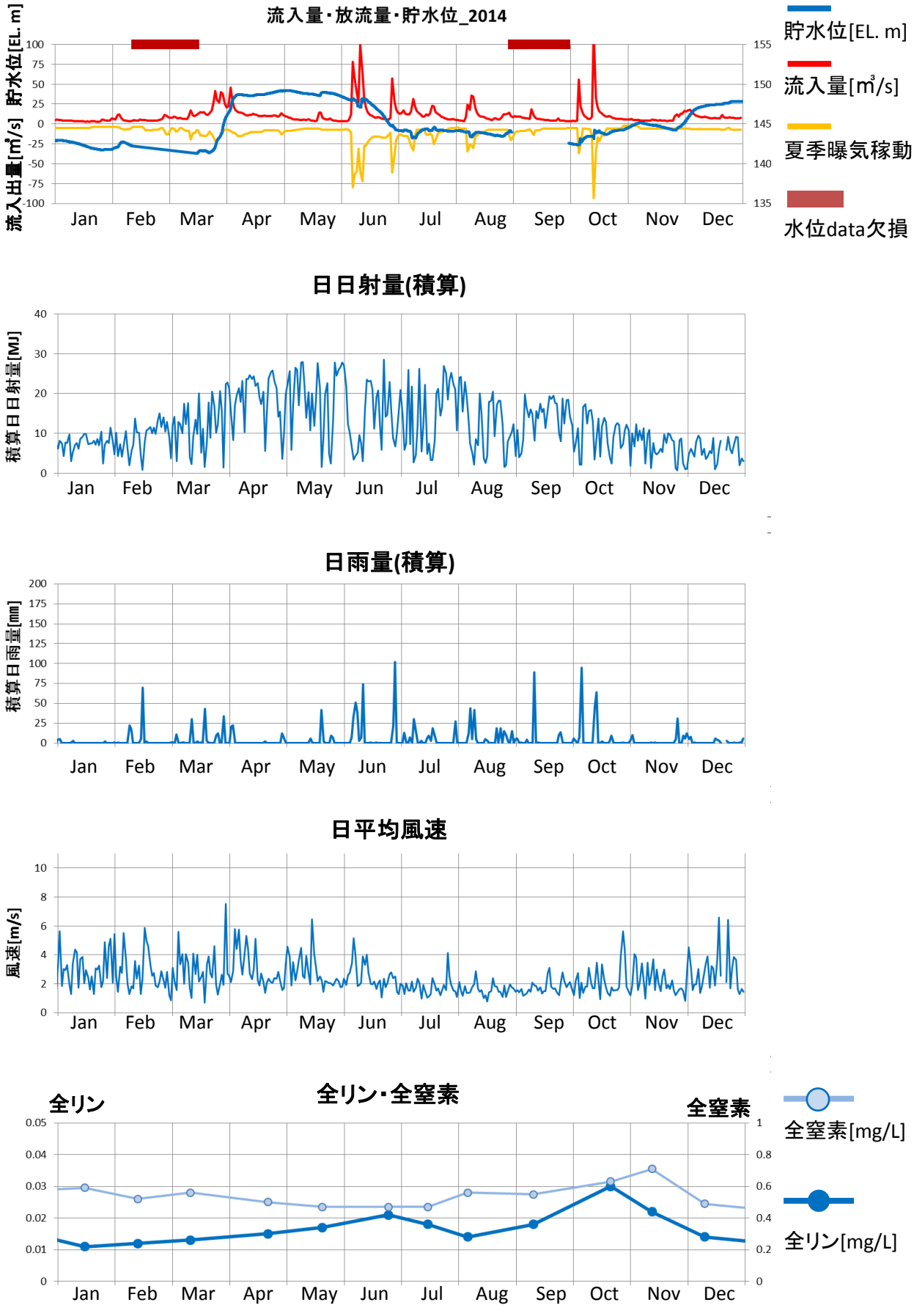


図3.1-22　釜房貯水池における　流入出量・貯水位・日日射量・日雨量・日平均風速・全リン・全窒素　(2014年)

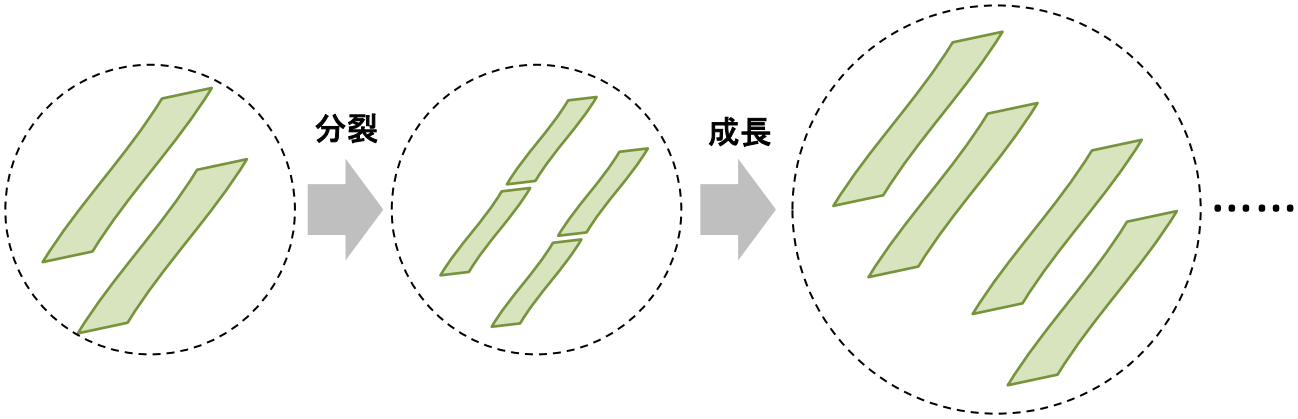
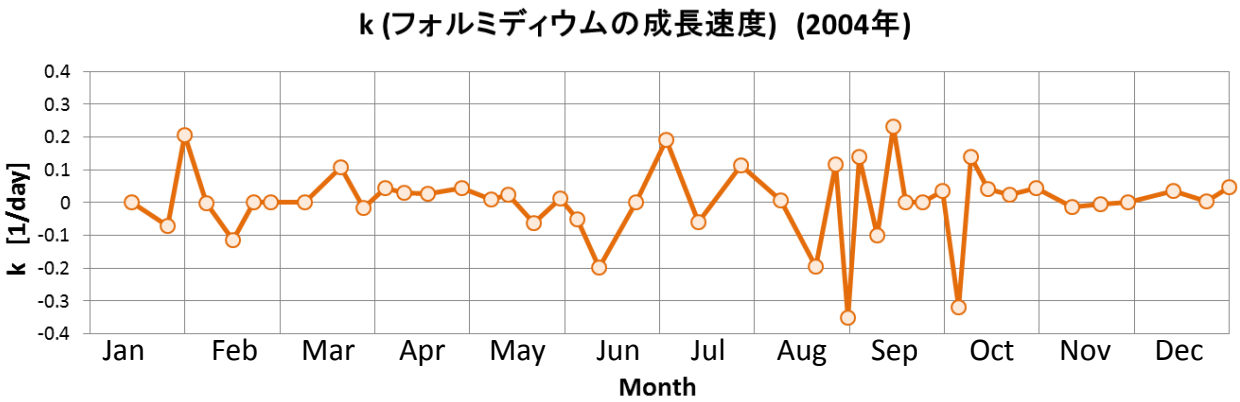
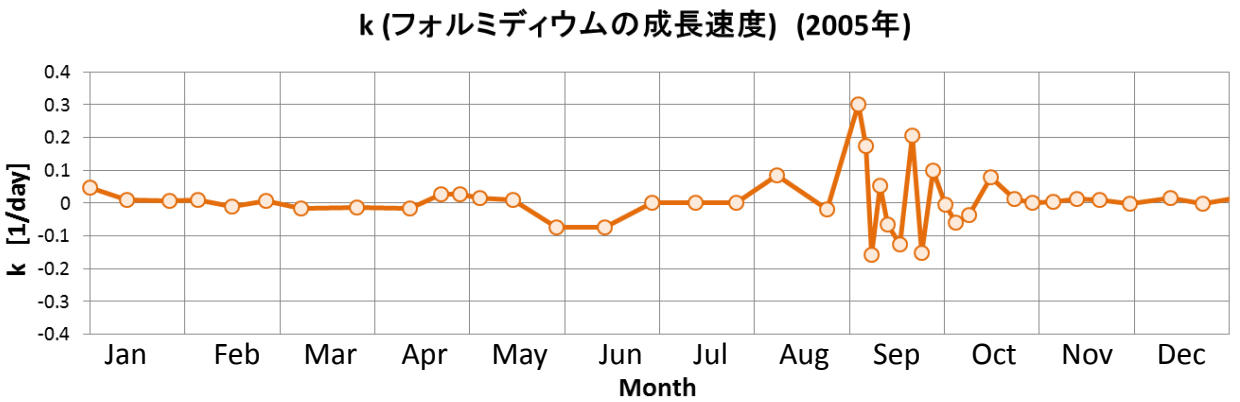


図3.2-1　フォルミディウムの分裂増殖のイメージ図





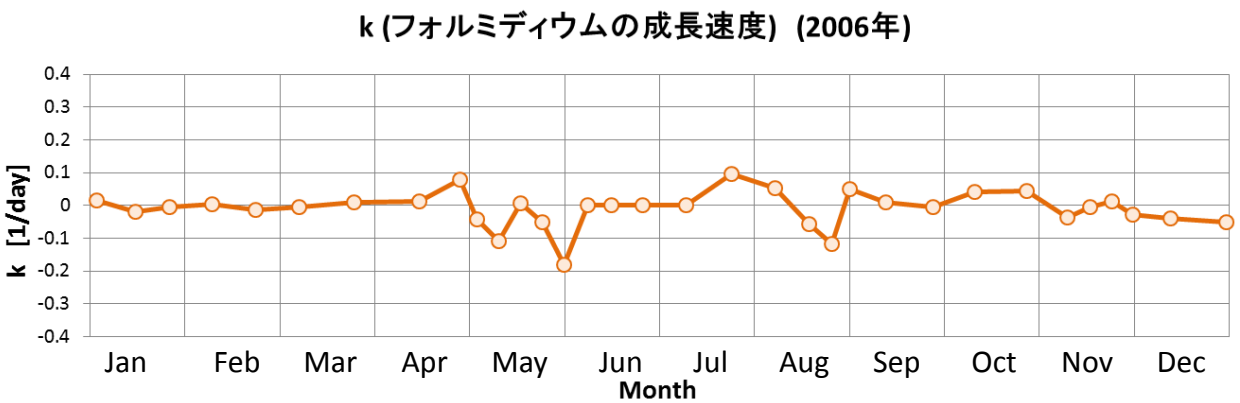
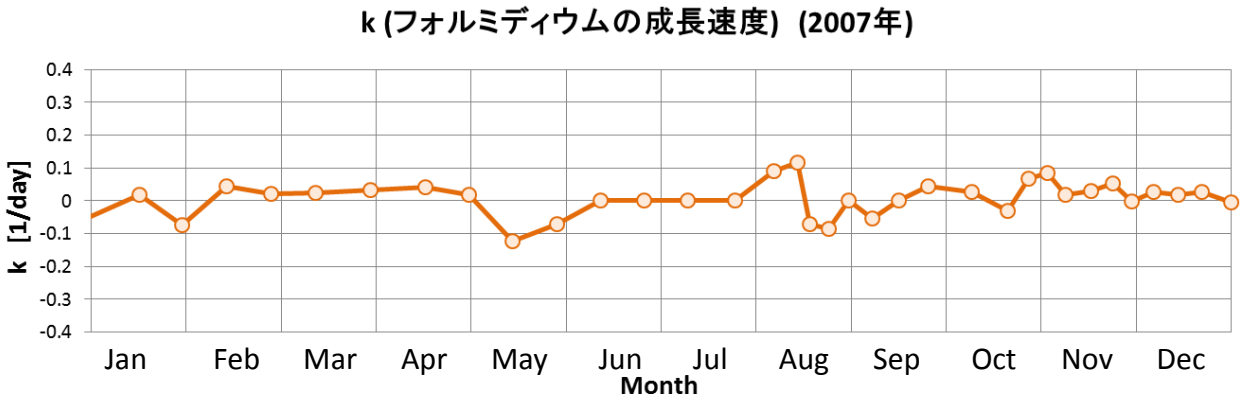
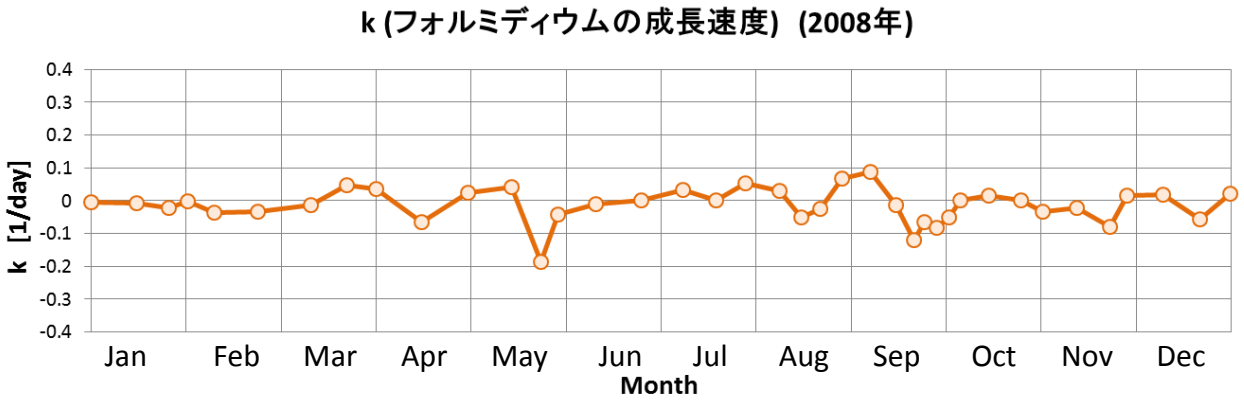
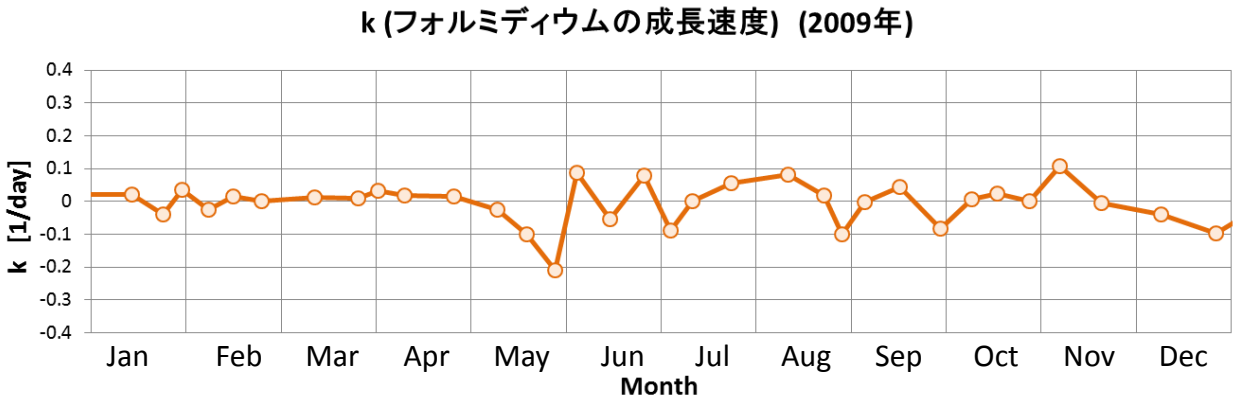


図3.2-2　算出したk(成長速度)（2004年~2006年)







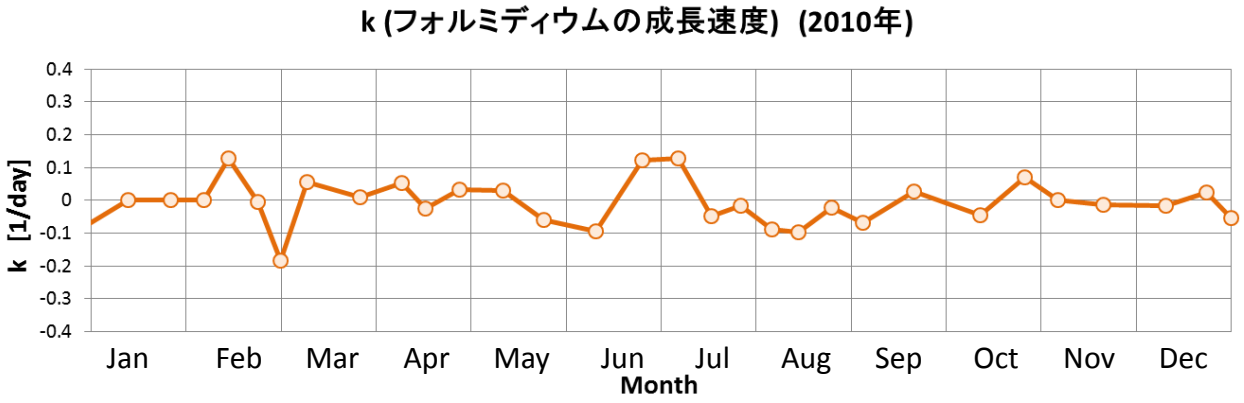
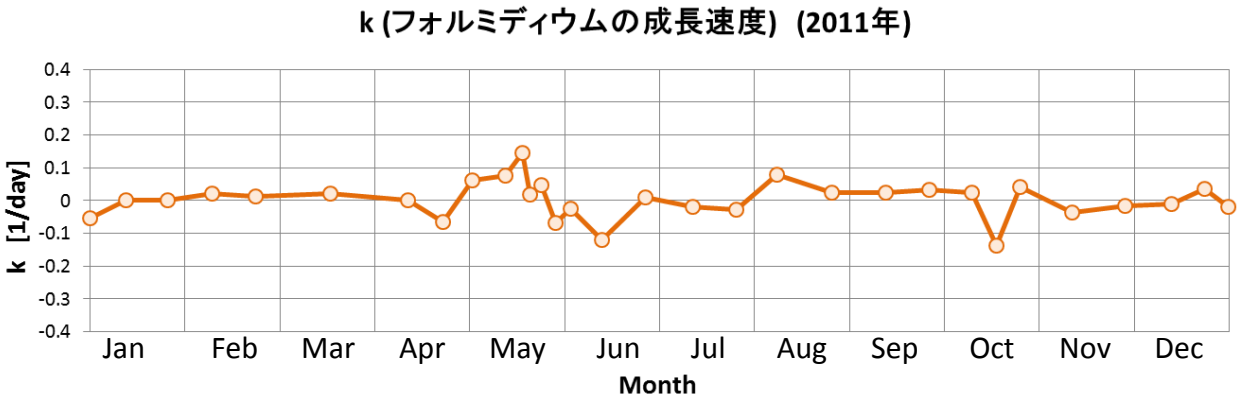
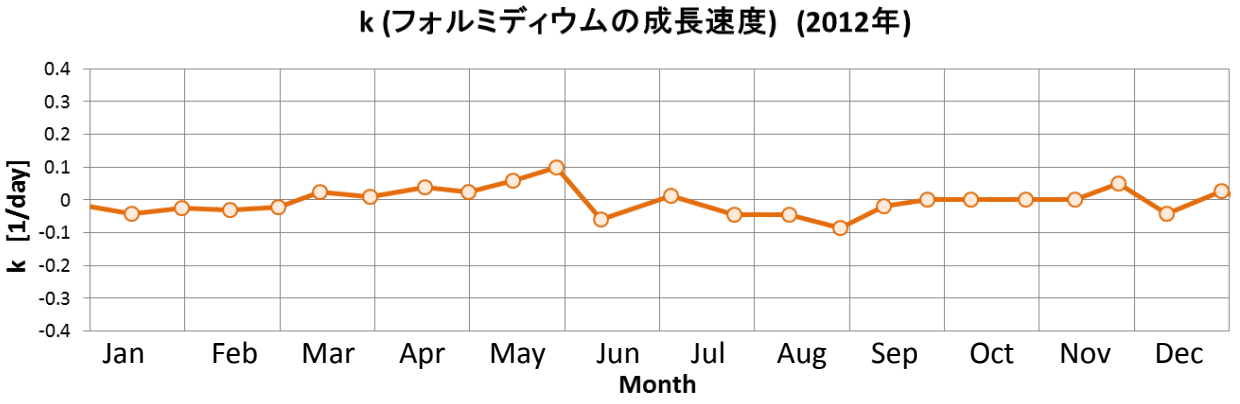
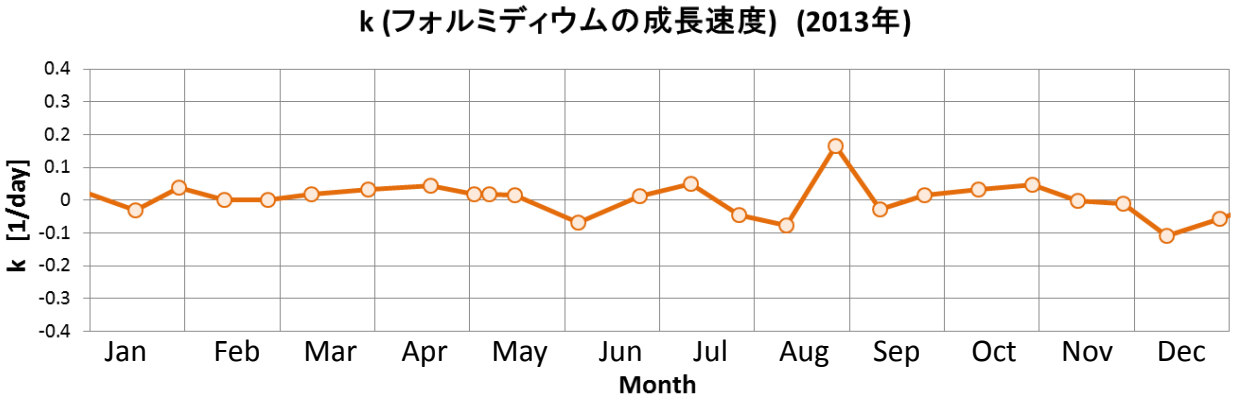


図3.2-3 算出したk(成長速度) (2007年~20010年)







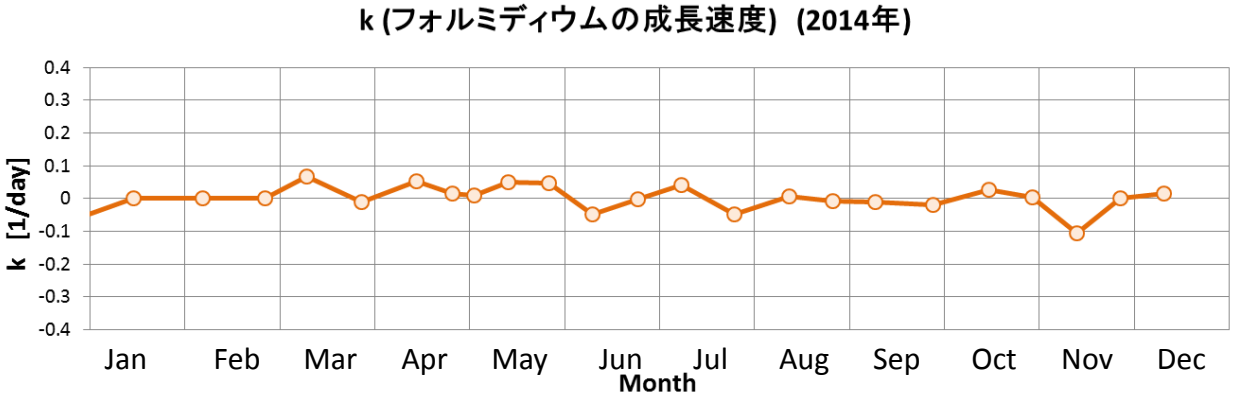


図3.2-4 算出したk(成長速度) (2011年~2014年)

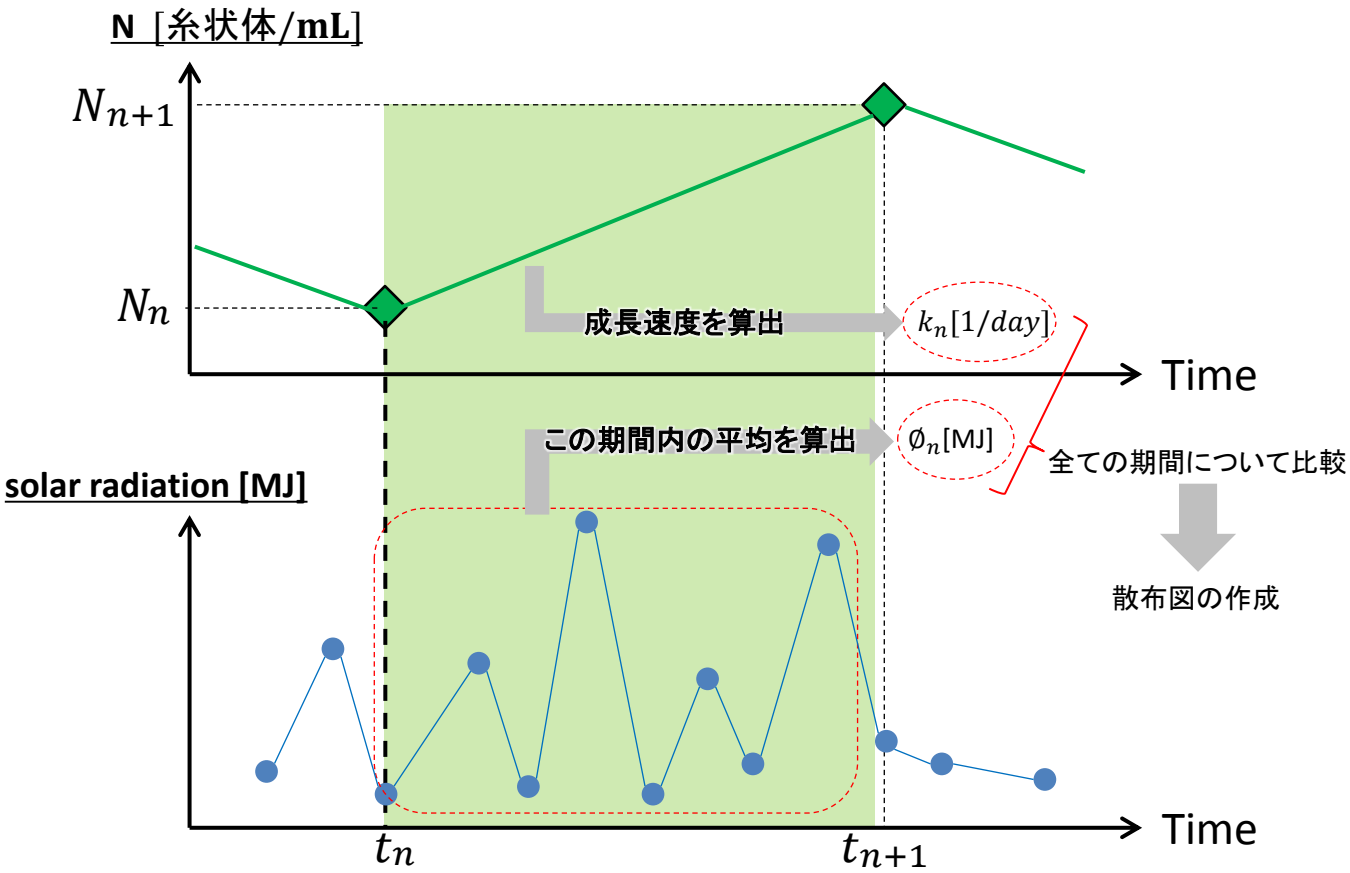


図3.3-1 k_nと$\emptyset_n$の算出・比較方法の模式図

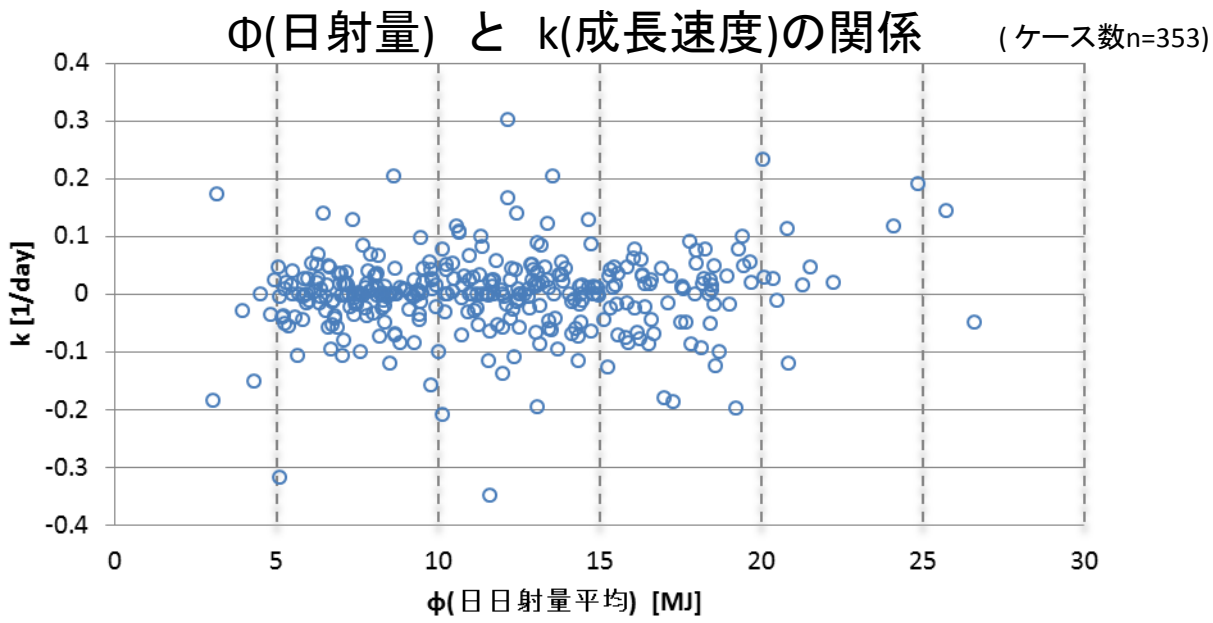


図3.3-2 Φ(日射量)とk(成長速度)の関係

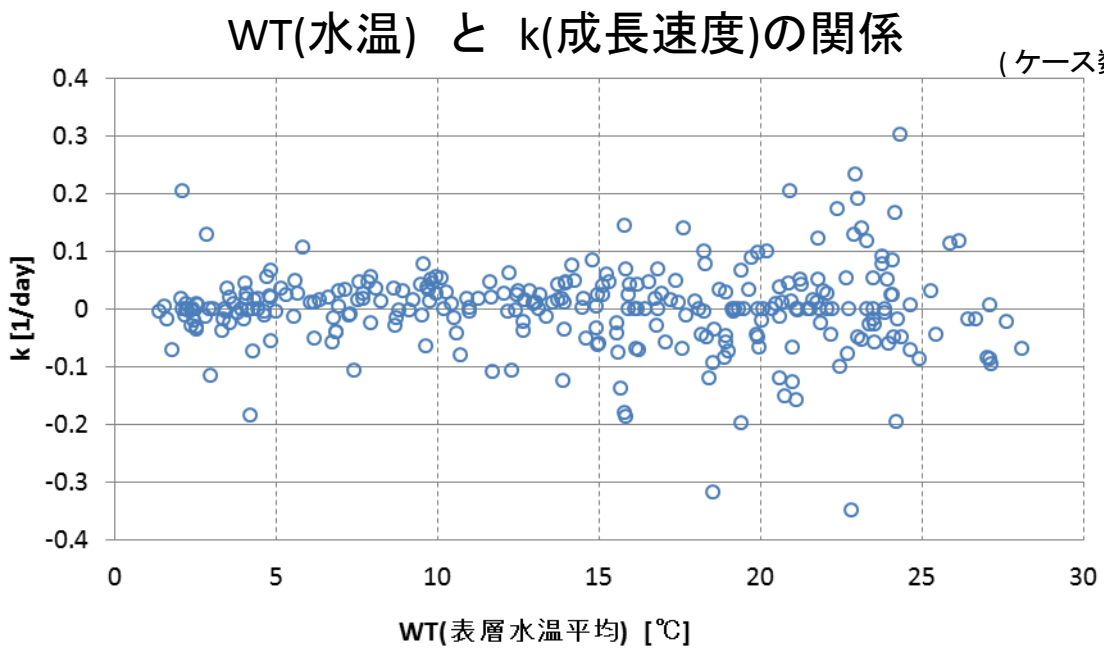


図3.3-3 WT(表面水温)とk(成長速度)の関係

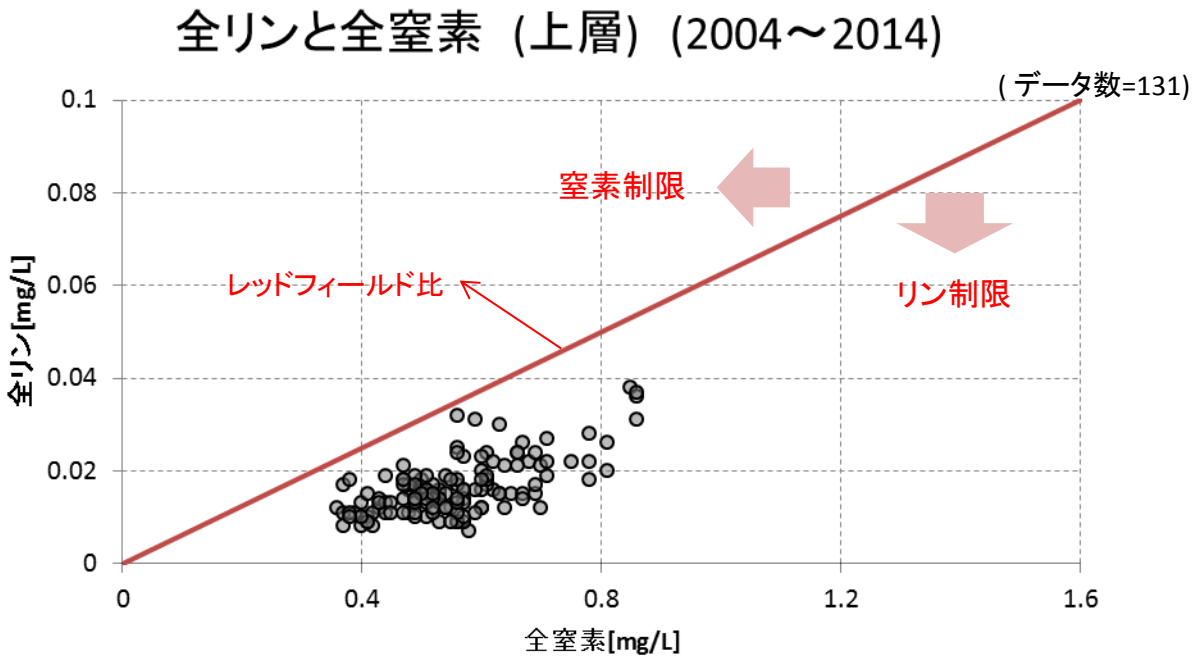


図3.3-4 全窒素と全リン、レッドフィールド比の関係性

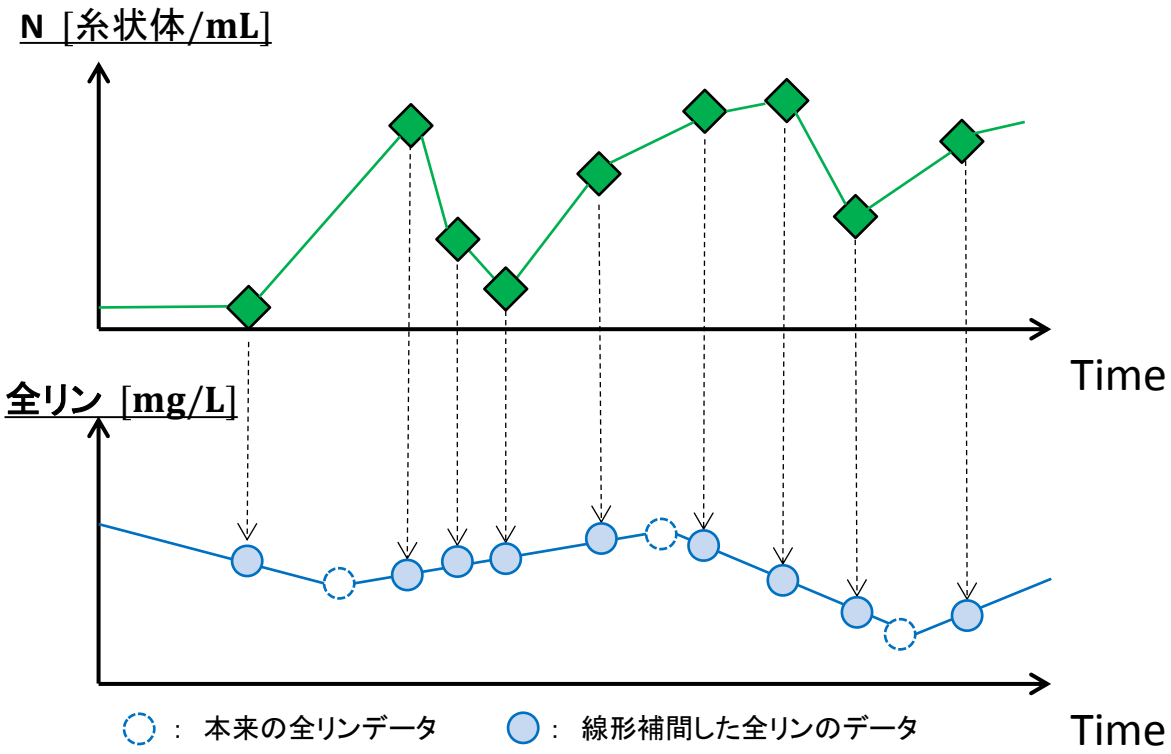


図3.3-5 フォルミディウムの観測日時に合わせた全リンデータの線形補間 (模式図)

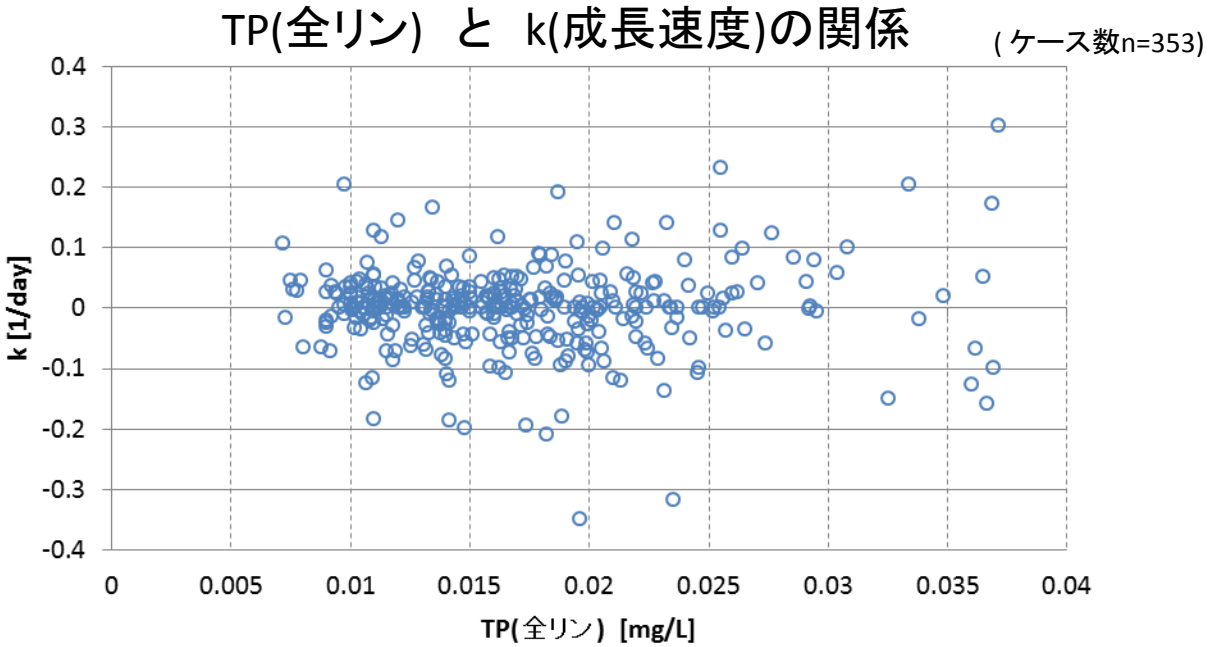


図3.3-6 TP(全リン)とk(成長速度)の関係

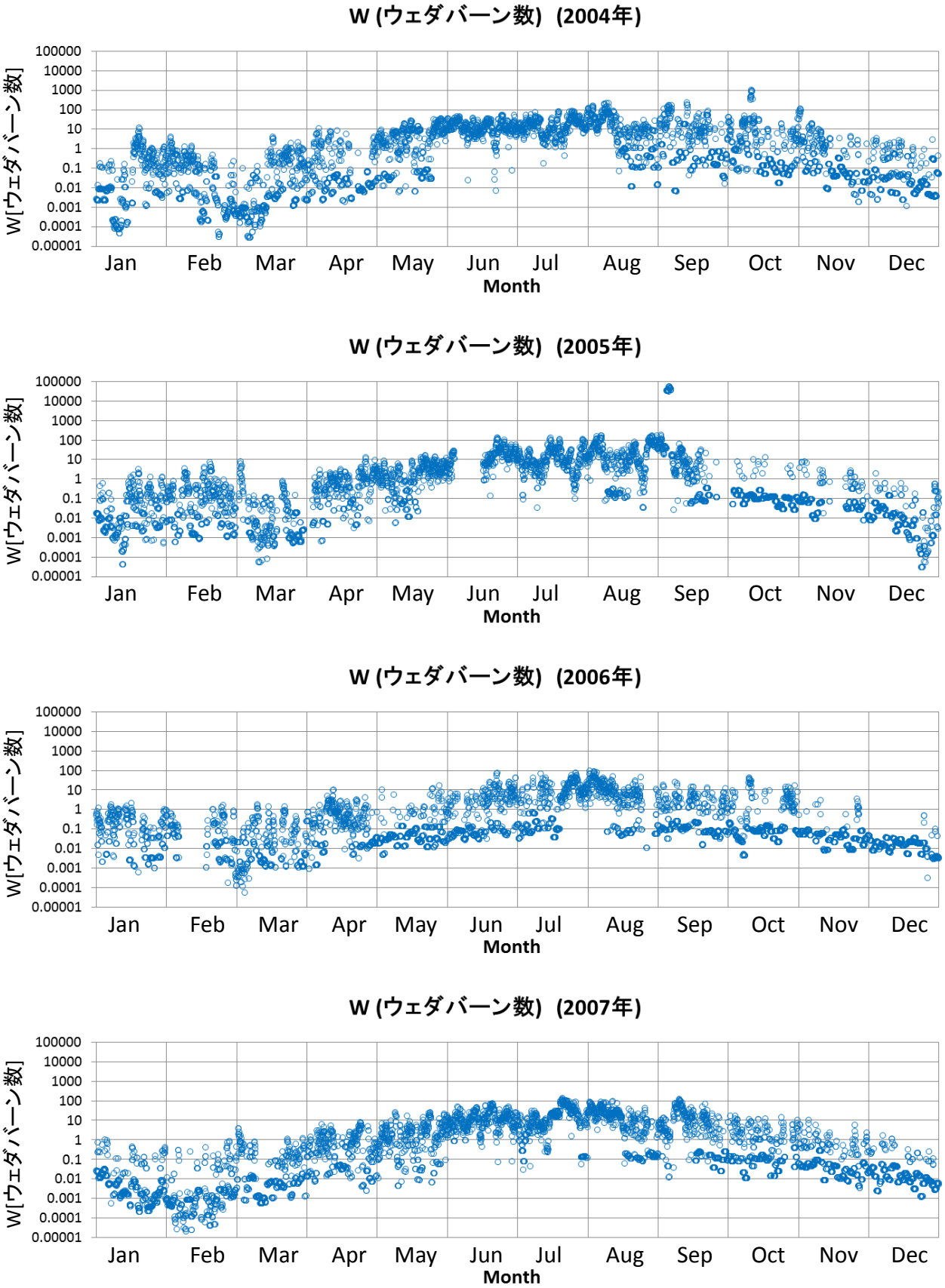


図3.4-1 算出したW(ウェダバーン) (2004年~2007年)

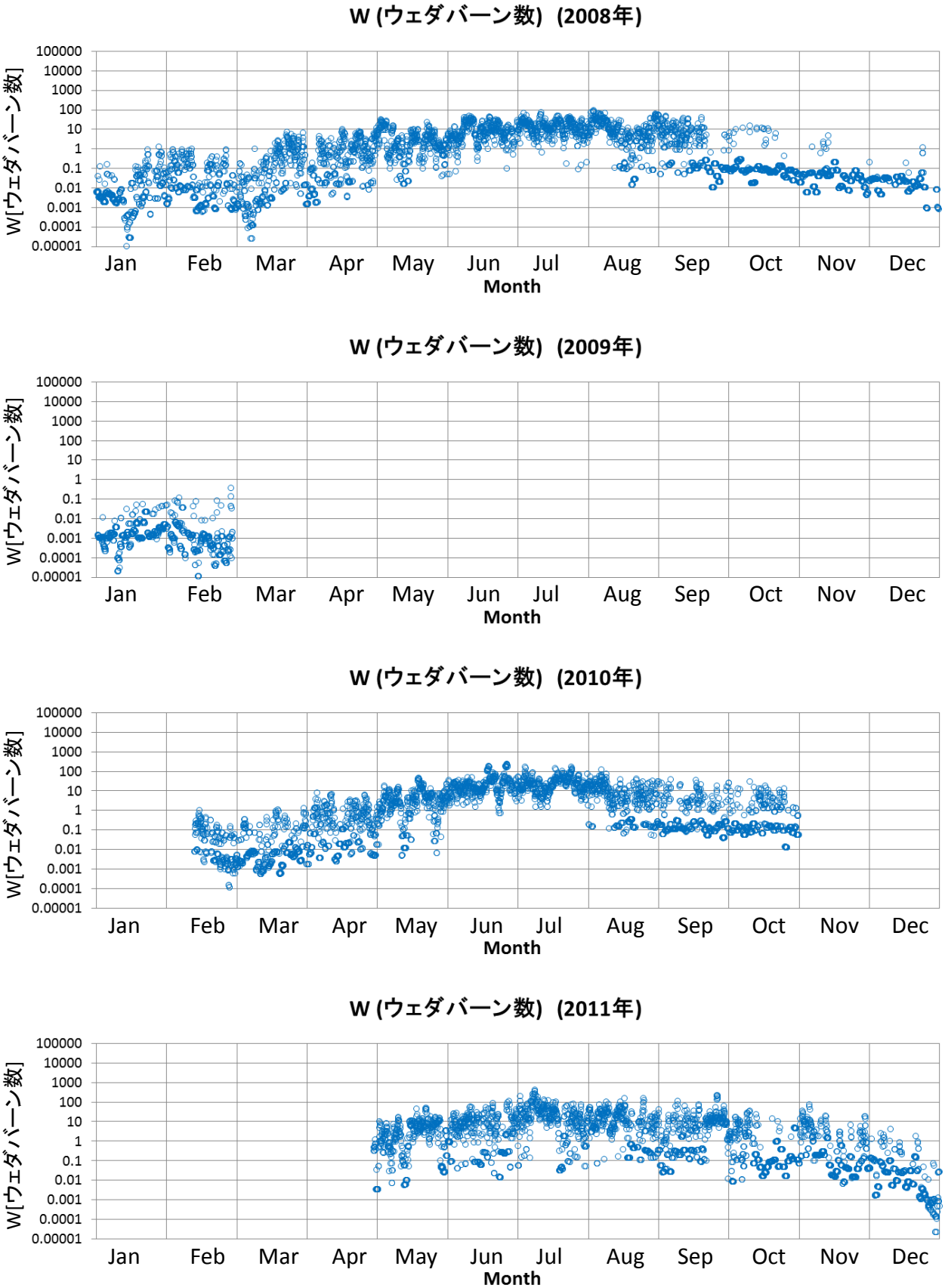
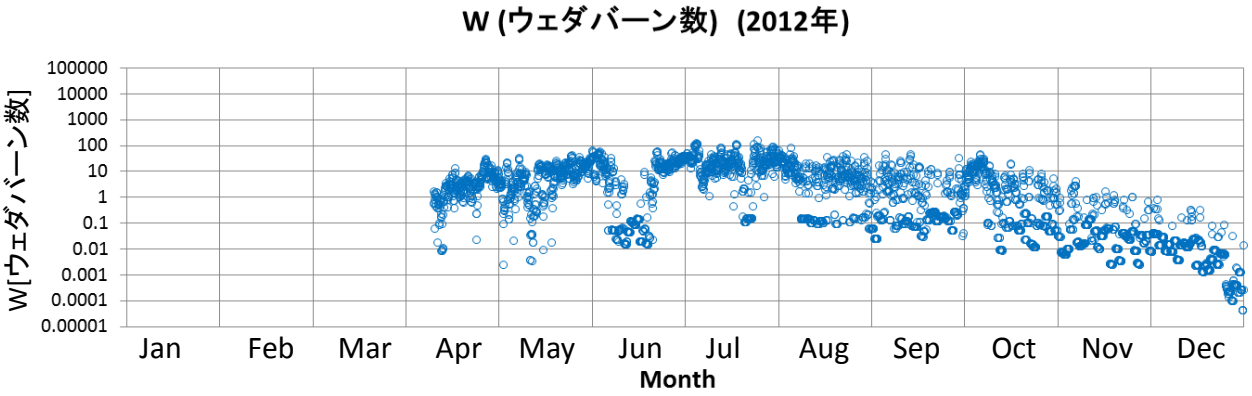
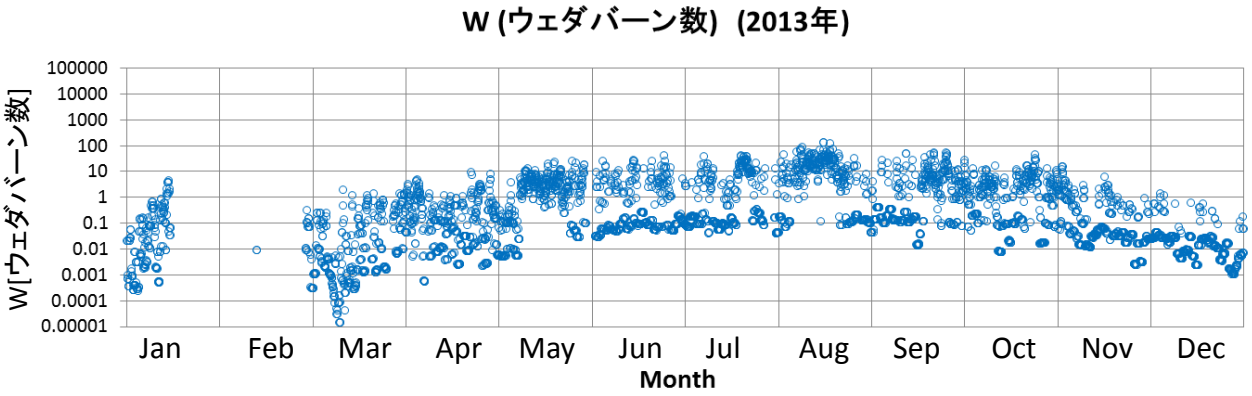


図3.4-2 算出したW(ウェダバーン) (2008年~2011年)





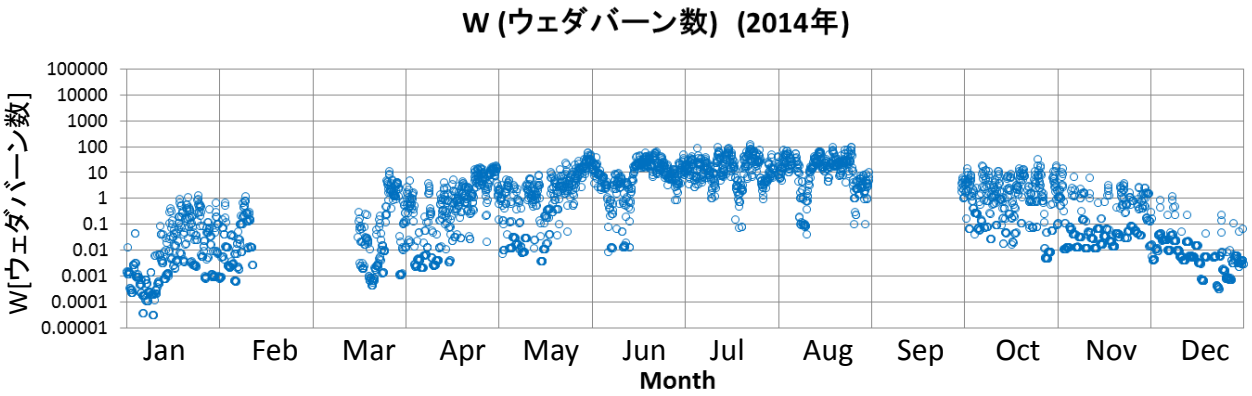


図3.4-3 算出したW(ウェダバーン) (2012年~2014年)

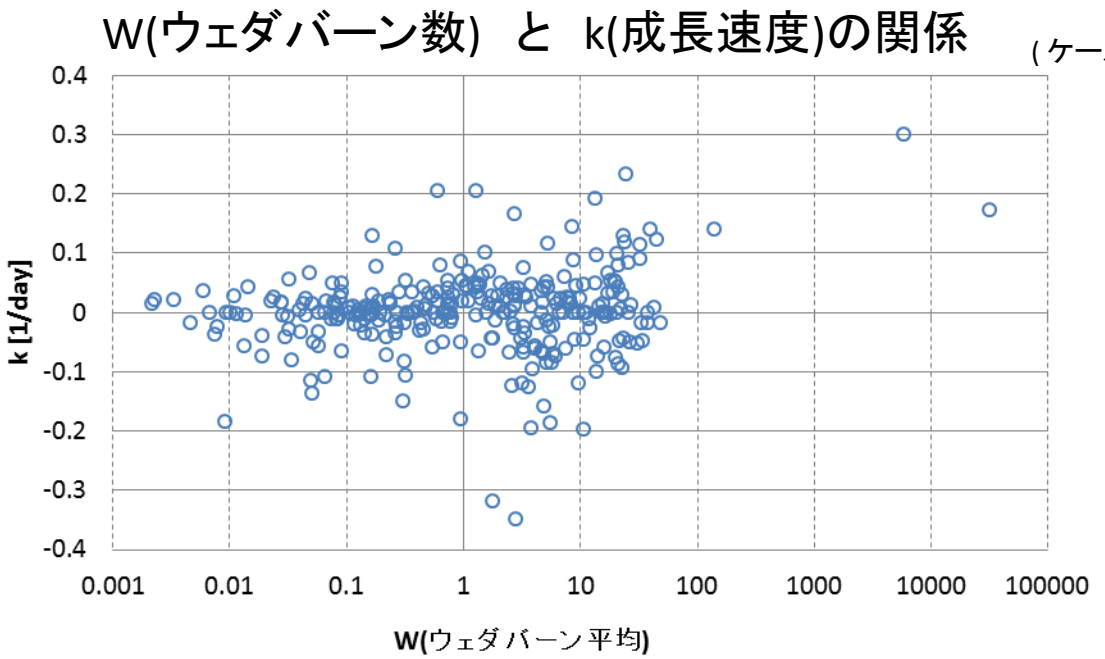


図3.4-4 W(ウェダバーン)とk(成長速度)の関係

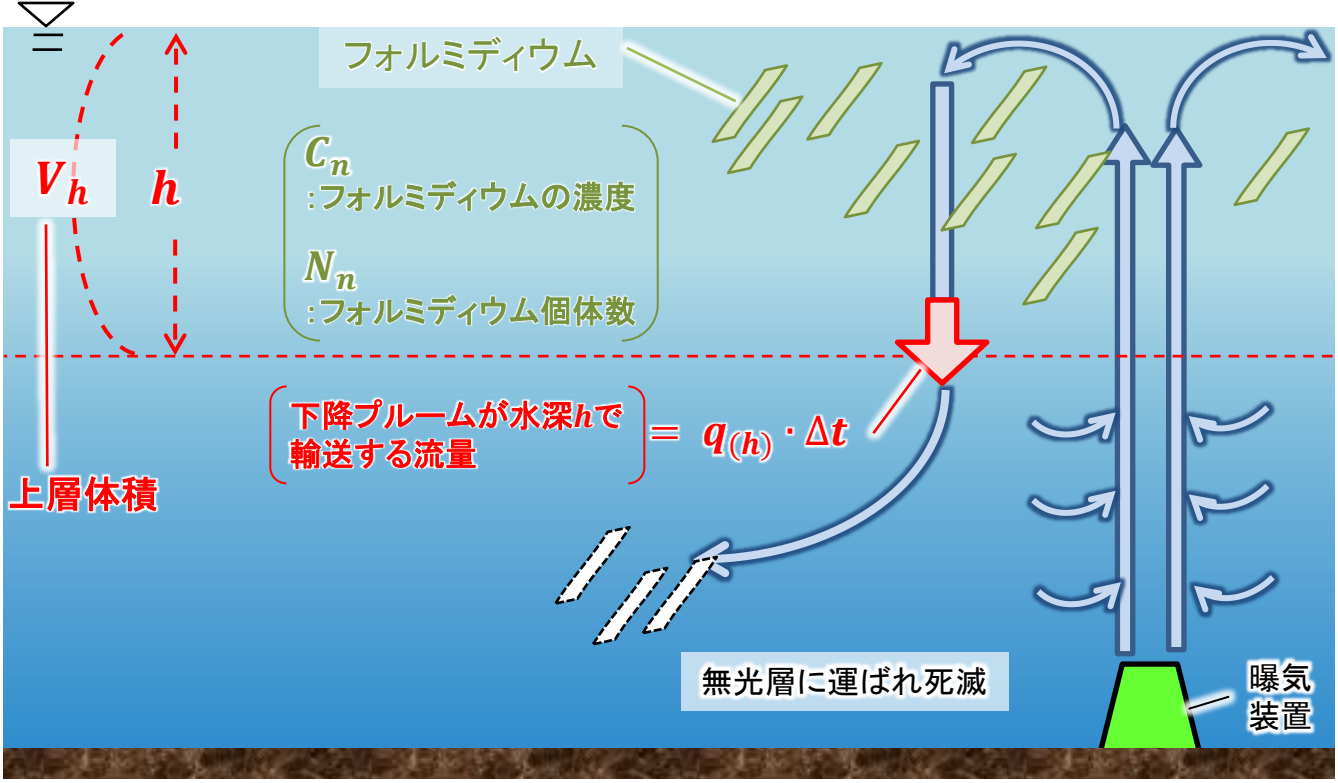


図3.5-1　曝気の下降プルームによるフォルミディウムの下層への引き込み　(概念図)

表3.5-1　k(成長速度)とQ_z、R_zの相関係数比較

Qz[㎥/s]	Q1m	Q2m	Q3m	Q4m	Q5m	Q6m	Q7m	Q8m	Q9m	Q10m
kとの相関係数	−0.1395977	−0.1700622	−0.1794588	−0.1793663	−0.1833807	−0.1777101	−0.1816379	−0.1797179	−0.1764402	−0.1729953
Rz	**R1m**	**R2m**	**R3m**	**R4m**	**R5m**	**R6m**	**R7m**	**R8m**	**R9m**	**R10m**
kとの相関係数	−0.1290546	−0.1639583	−0.1738854	−0.1830936	−0.1828392	−0.1795104	−0.1832486	−0.1767924	−0.1705371	−0.1634151

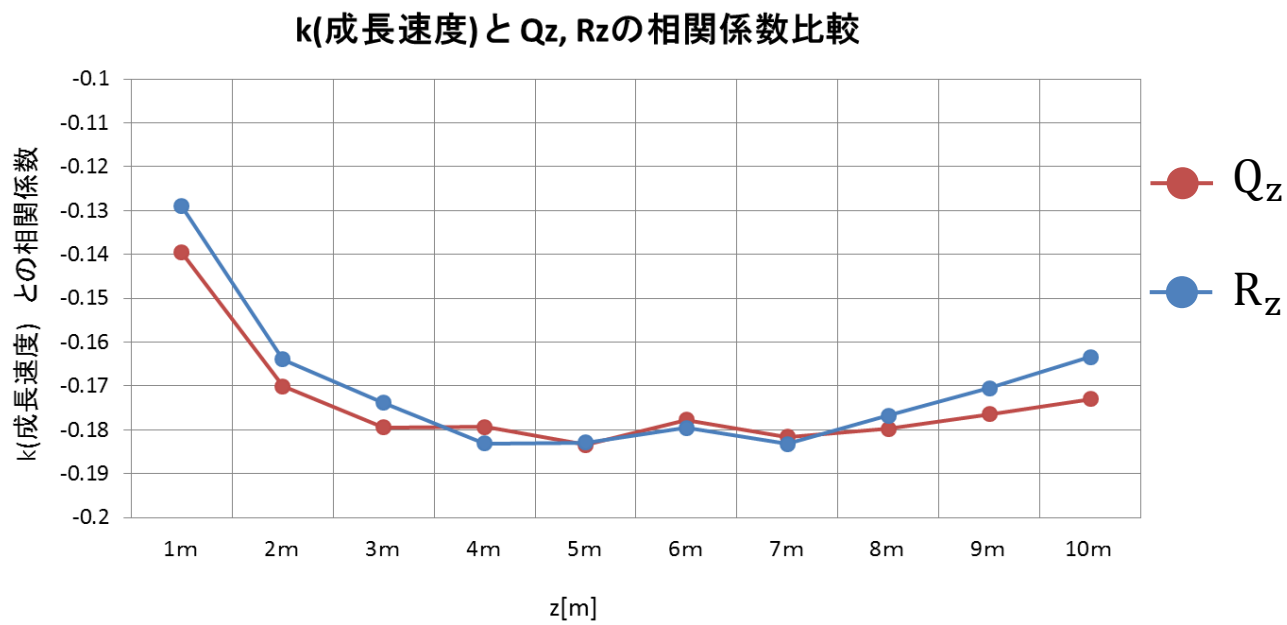


図3.5-2　k(成長速度)とQ_z、R_zの相関係数比較

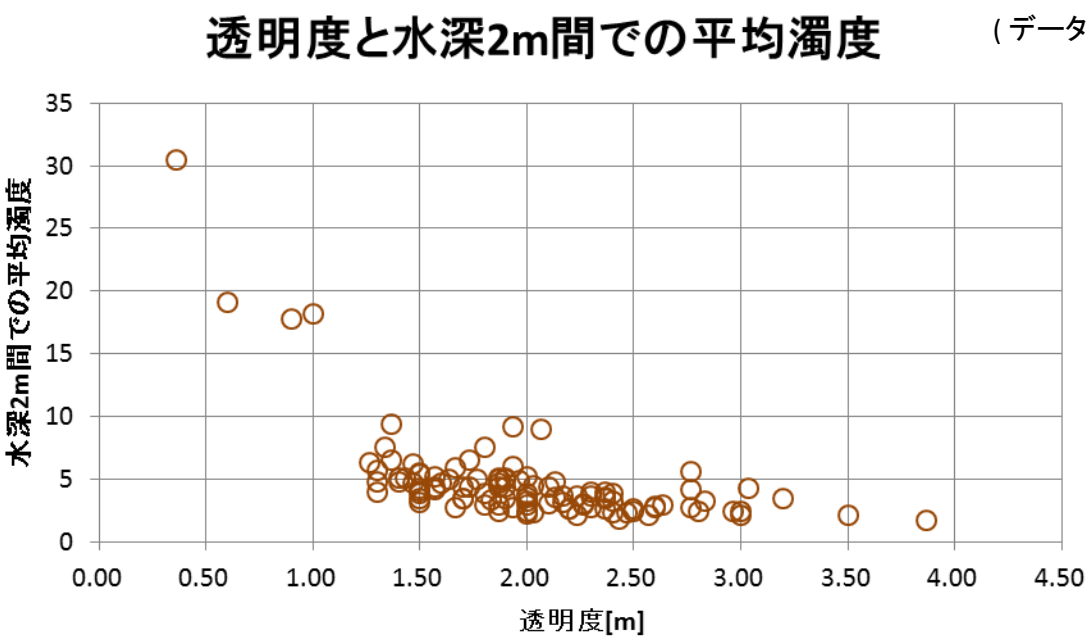


図3.5-3　透明度[m]と水深2m間での平均濁度

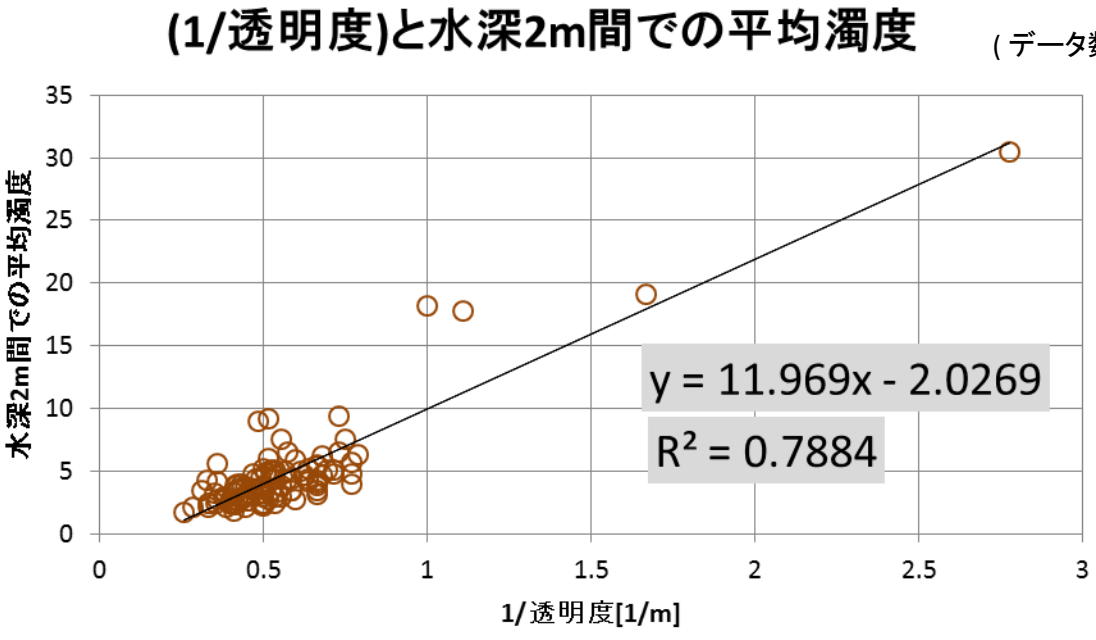


図3.5-4　1/透明度[1/m]と水深2m間での平均濁度

表3.5-2　k(成長速度)とT_x、RT_xの相関係数比較

Tx[㎥/s]	T0.5	T1.0	T1.5	T2.0	T2.5	T3.0	T3.5	T4.0
kとの相関係数	−0.1476149	−0.1635639	−0.1720346	−0.1744277	−0.1721752	−0.1694503	−0.14158	−0.1371974

RTx	RT0.5	RT1.0	RT1.5	RT2.0	RT2.5	RT3.0	RT3.5	RT4.0
kとの相関係数	−0.1359034	−0.1517117	−0.1625917	−0.1661526	−0.1672943	−0.1641685	−0.1416982	−0.1492022

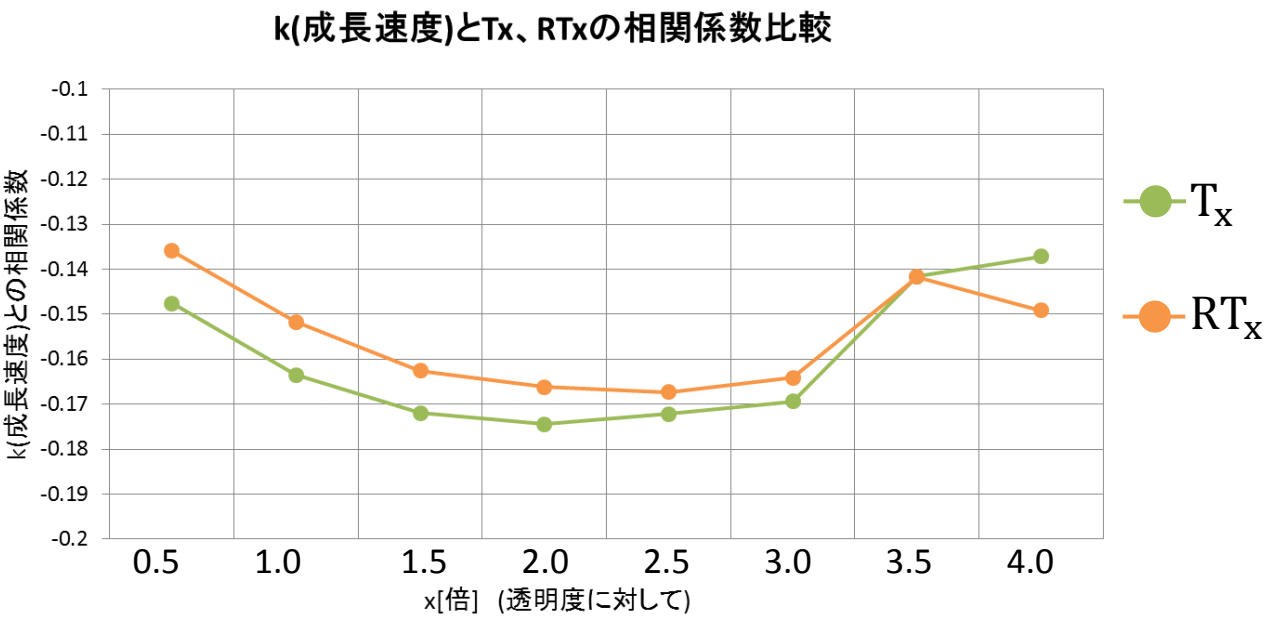


図3.5-5　k(成長速度)とT_x、RT_xの相関係数比較

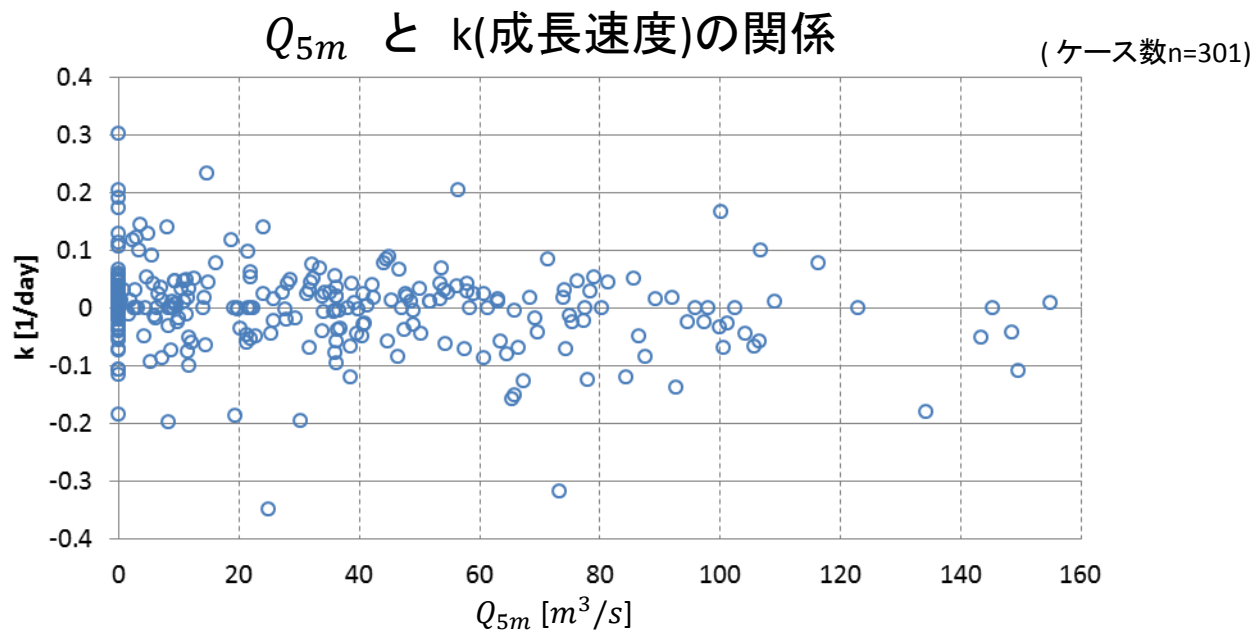
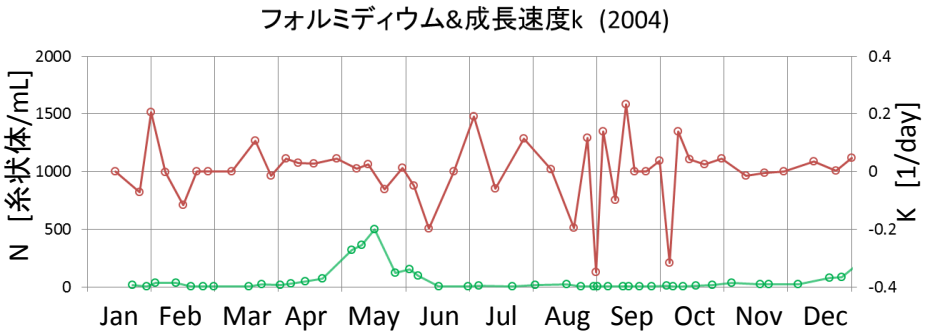
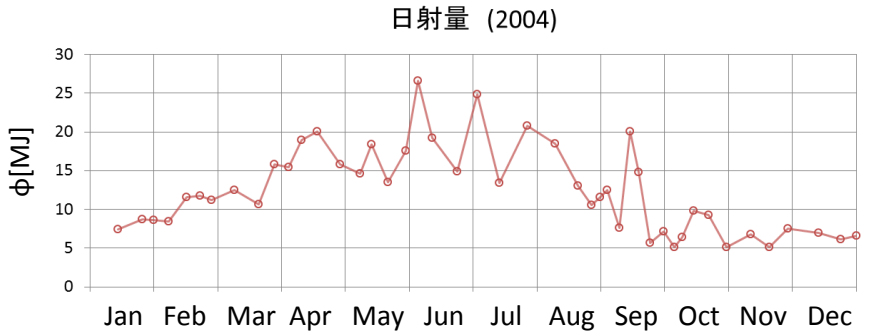
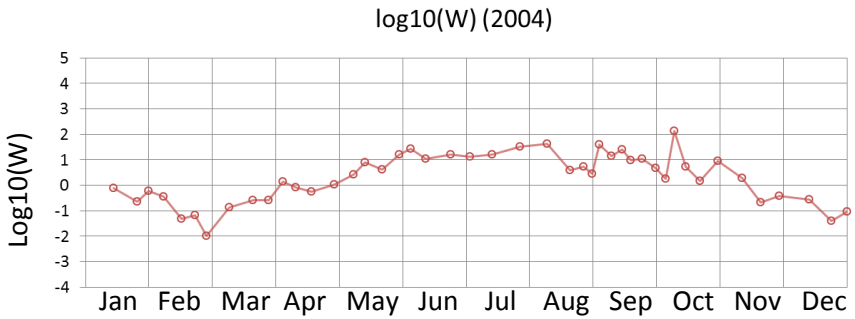
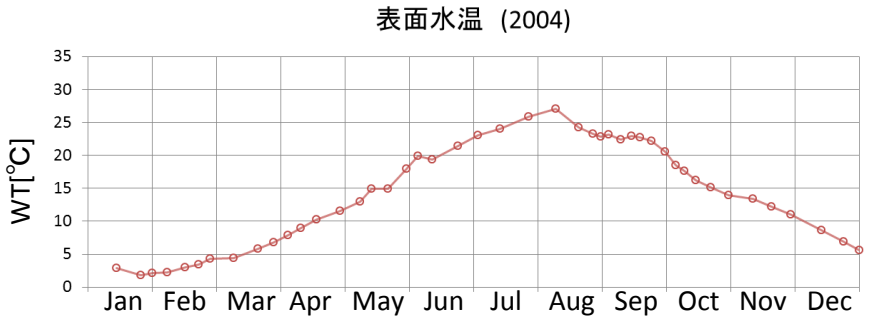


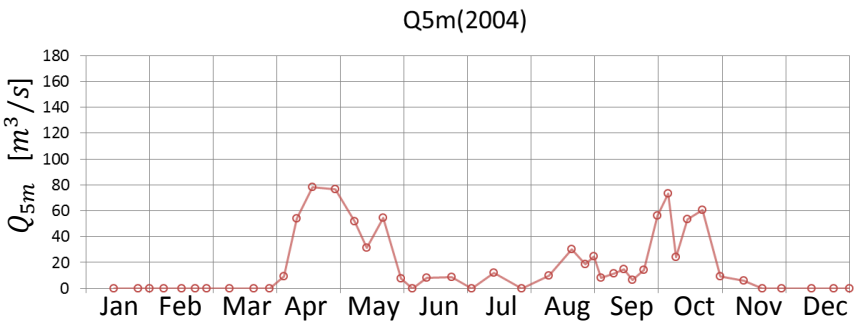
図3.5-6　Q_{5m}とk(成長速度)の関係











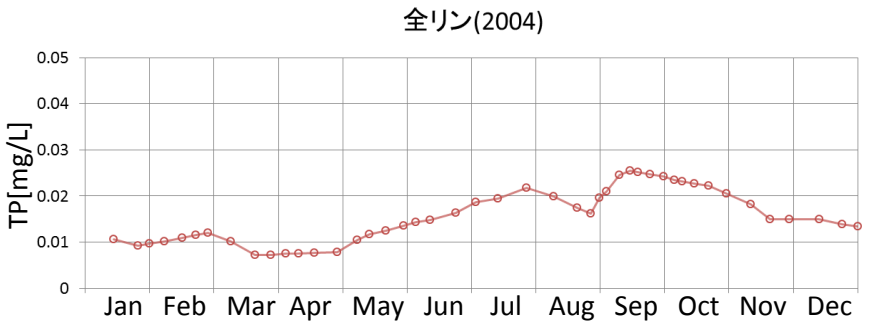
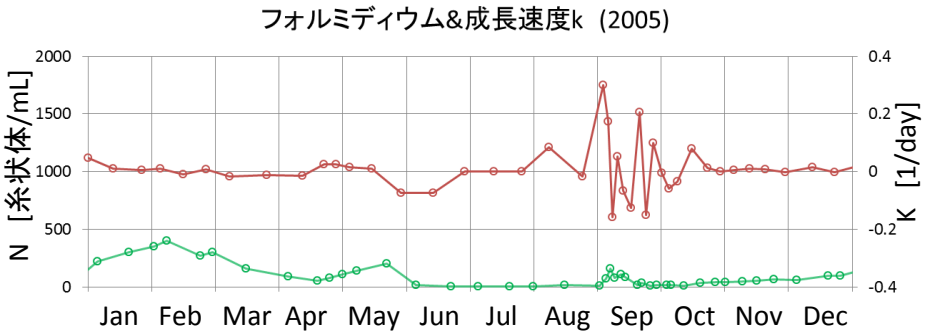
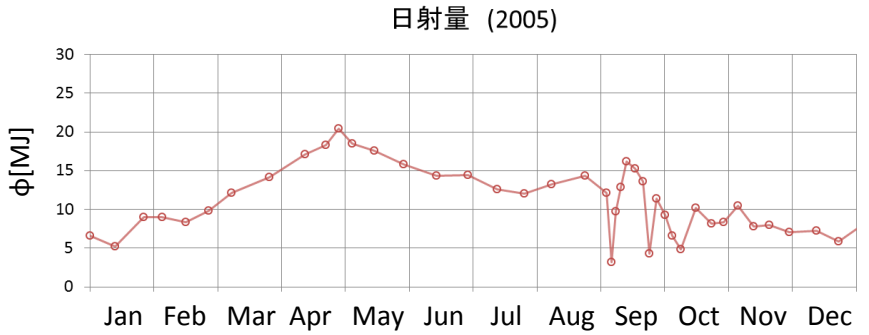
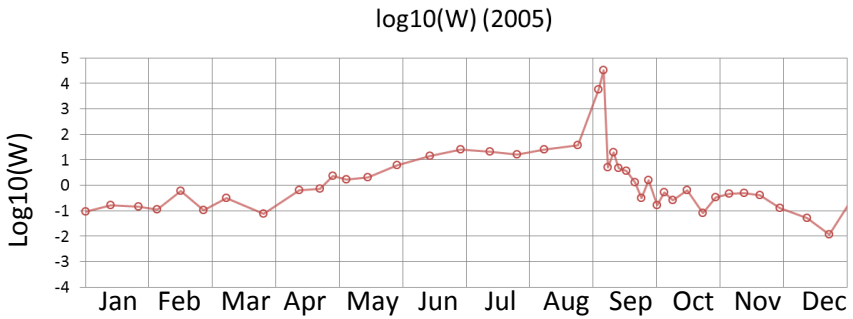
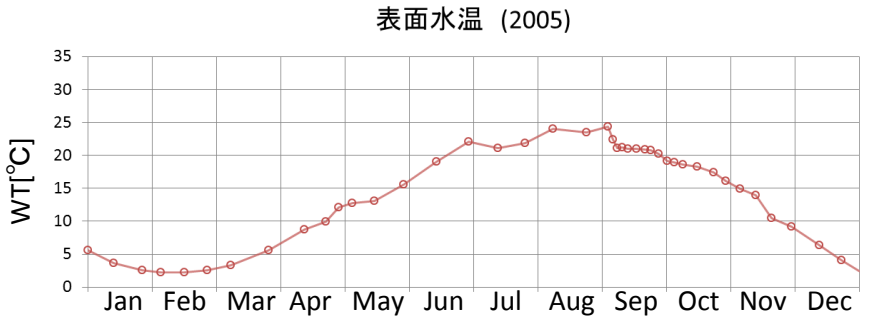


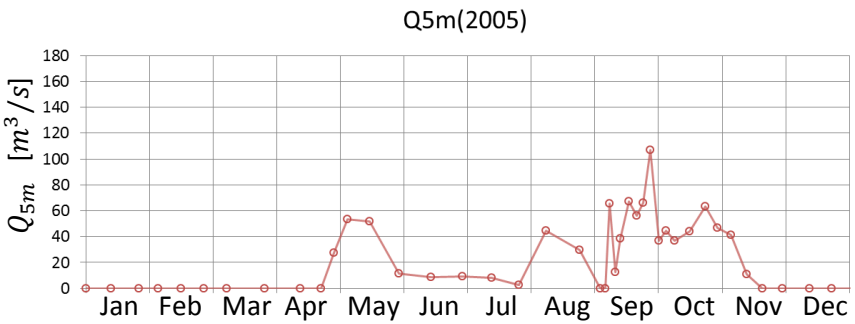
図3.6-1-1　重回帰分析でのインプットデータ（2004年）











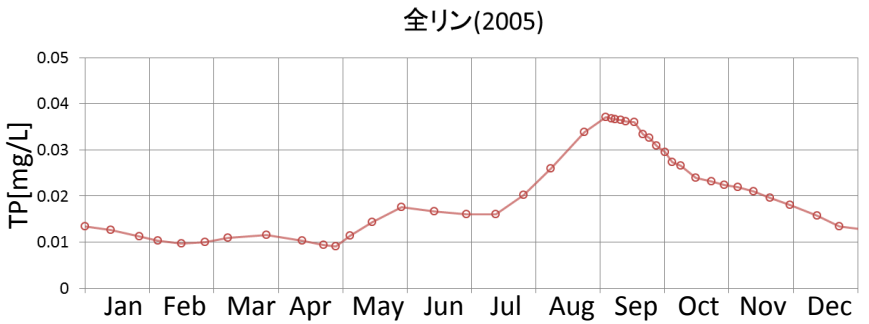
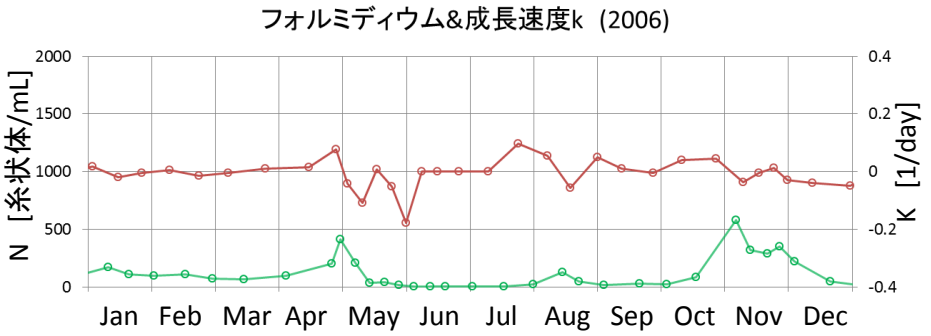
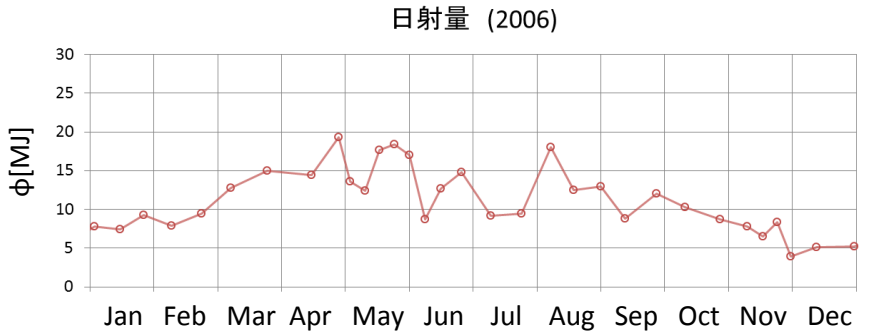
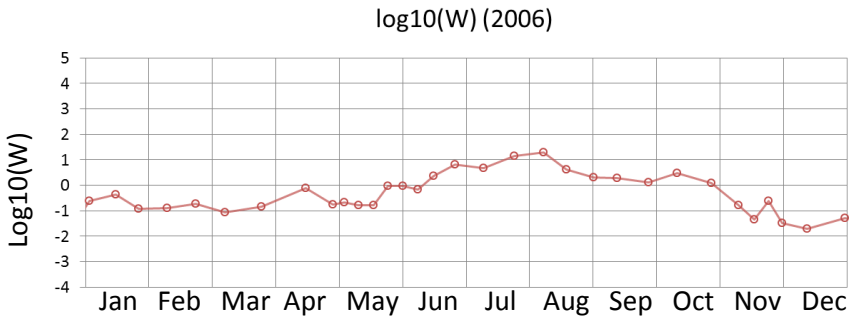
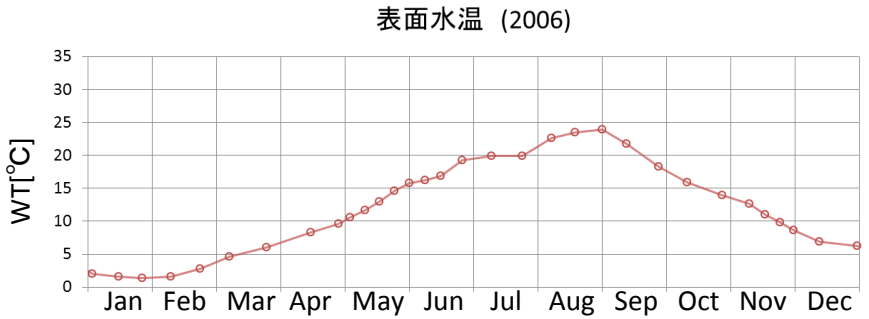


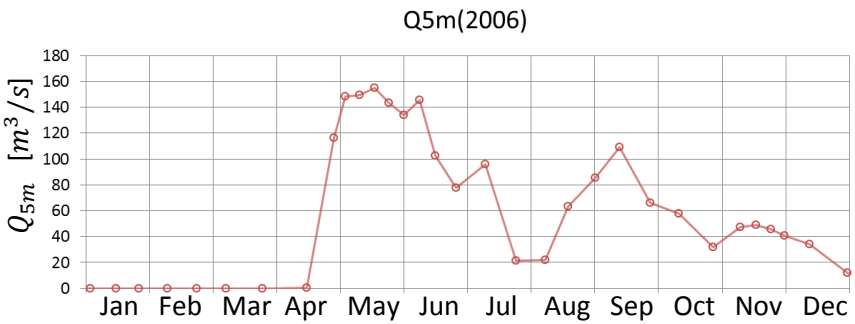
図3.6-1-2　重回帰分析でのインプットデータ（2005年）











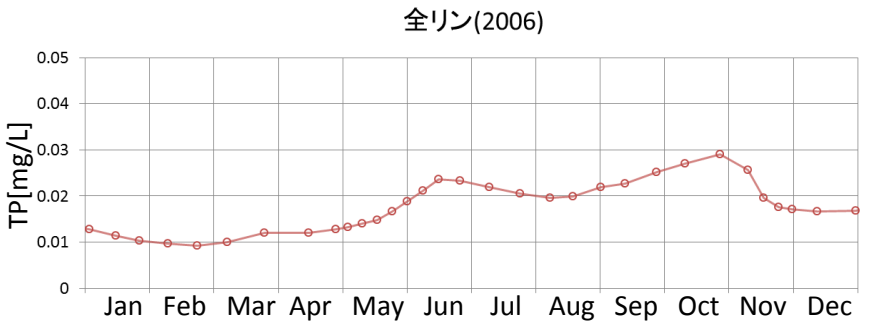
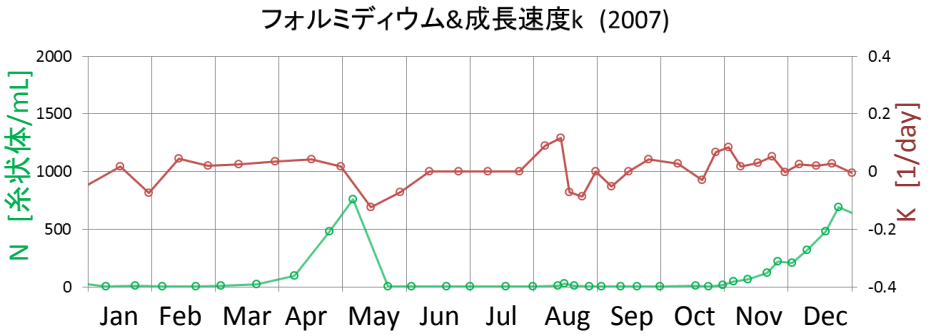
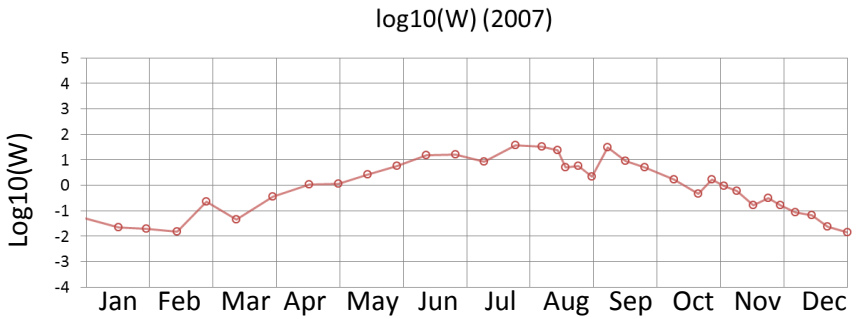


図3.6-1-3　重回帰分析でのインプットデータ（2006年）









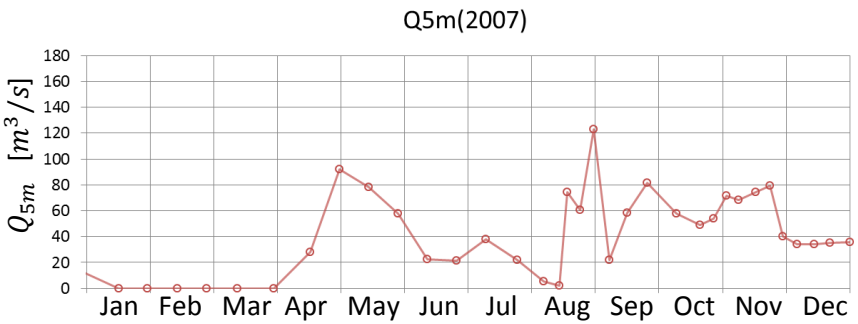
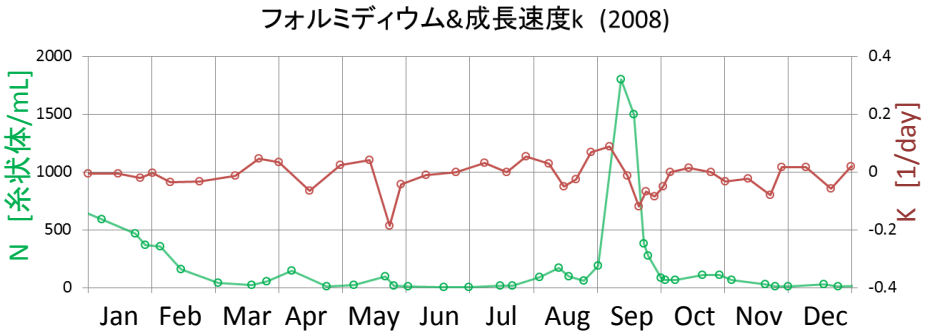
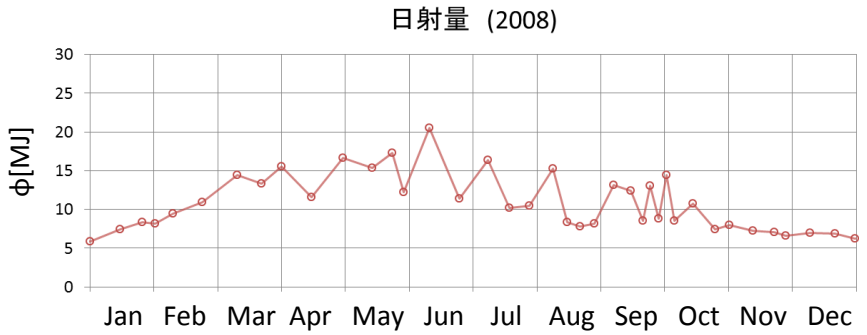
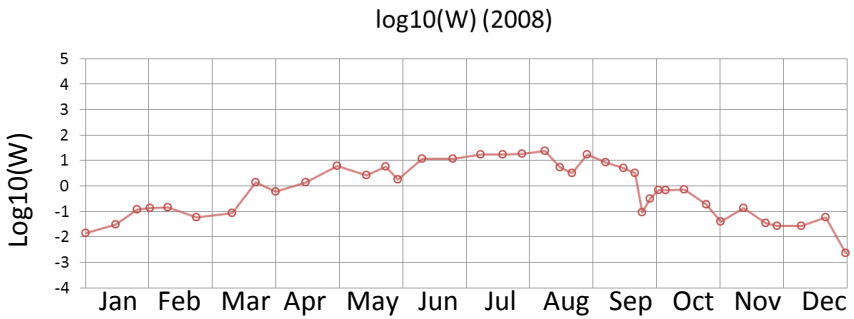




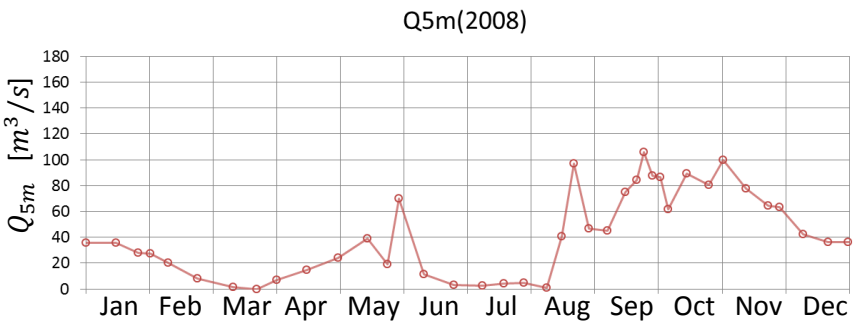
図3.6-1-4　重回帰分析でのインプットデータ（2007年）











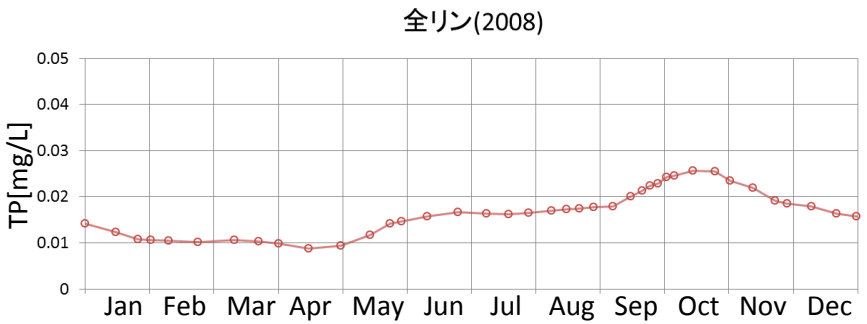
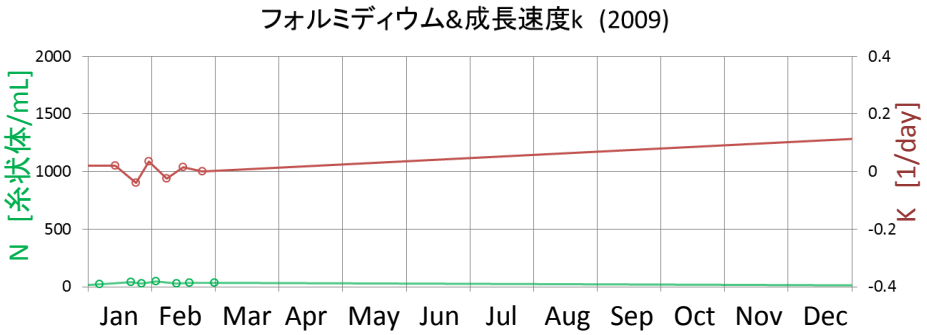
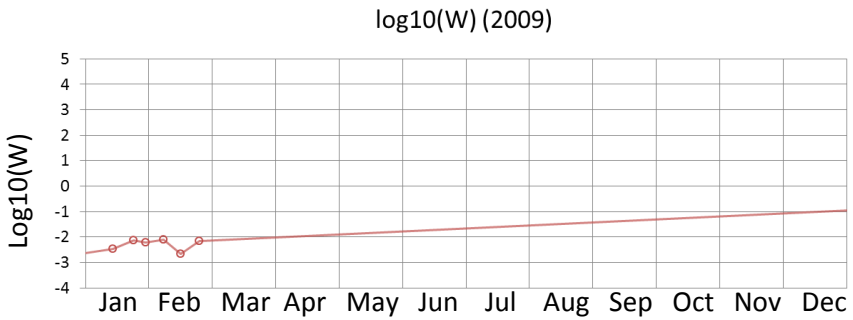


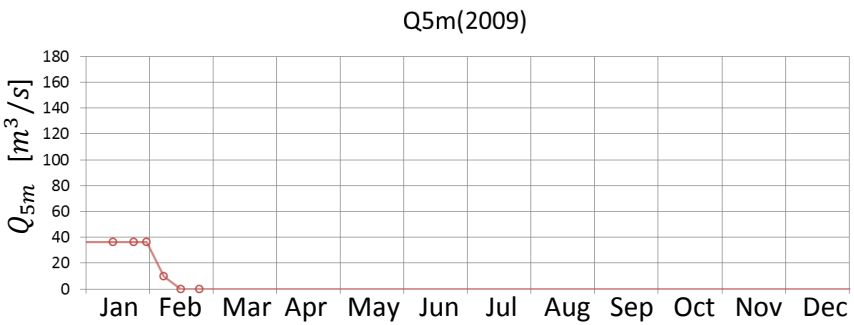
図3.6-1-5　重回帰分析でのインプットデータ（2008年）











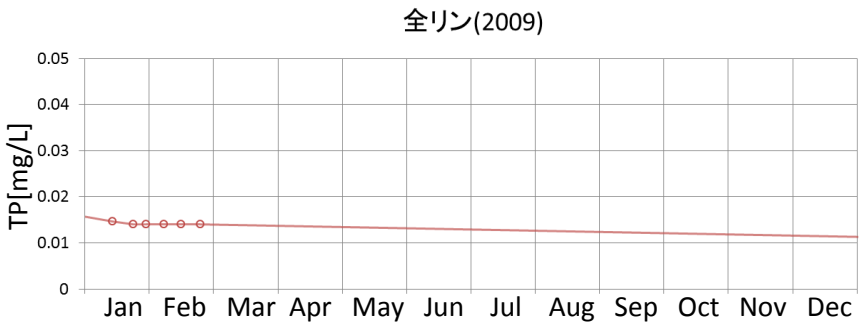
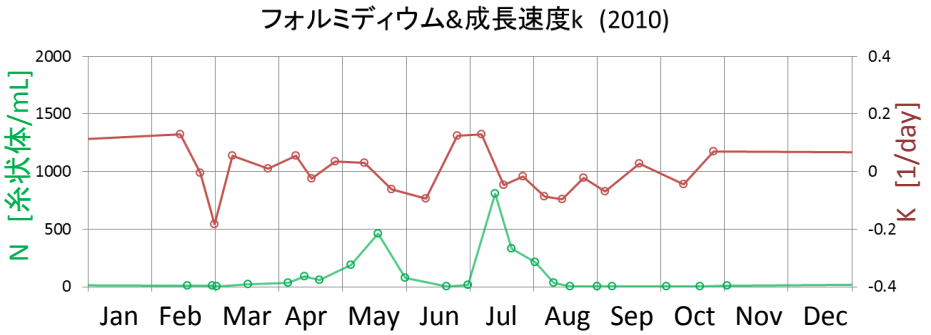
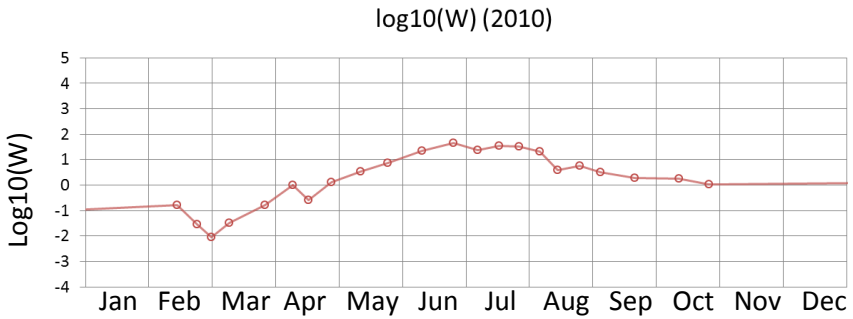
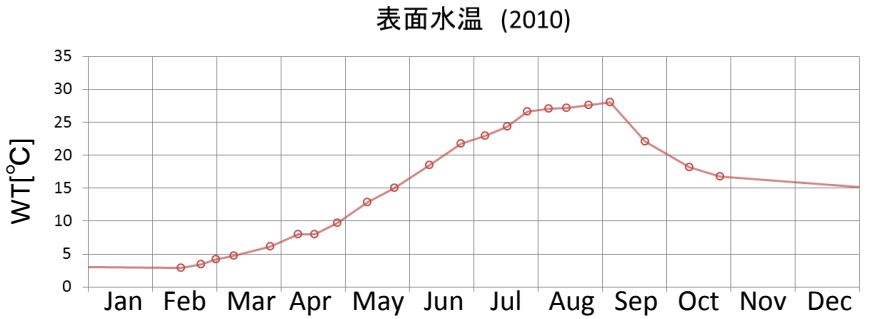


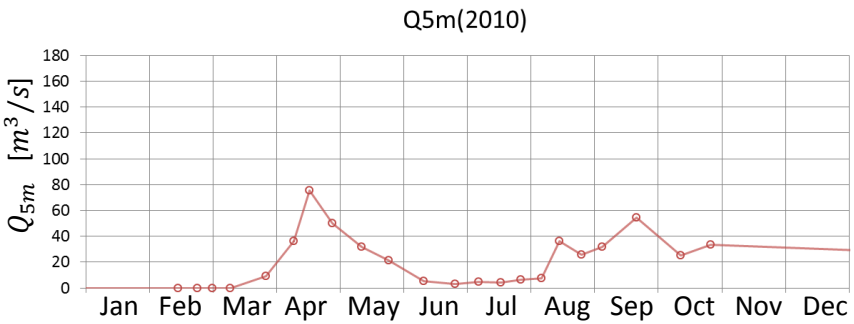
図3.6-1-6　重回帰分析でのインプットデータ（2009年)











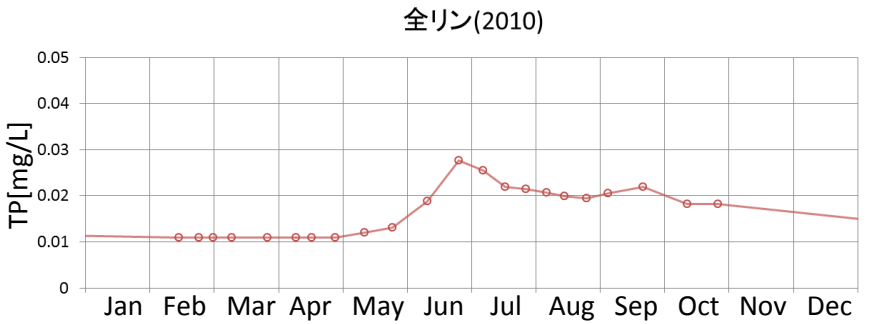
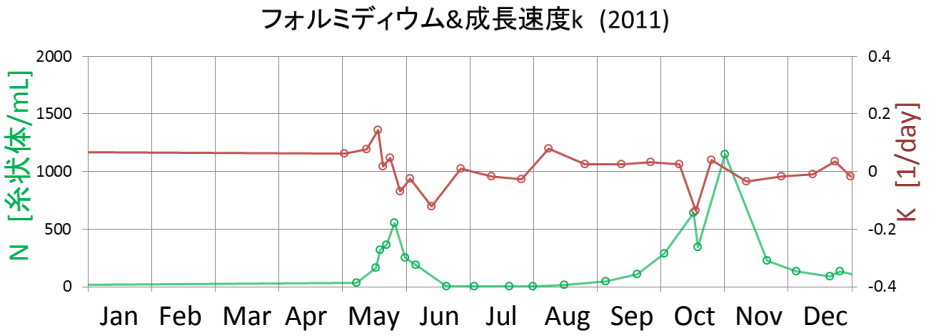
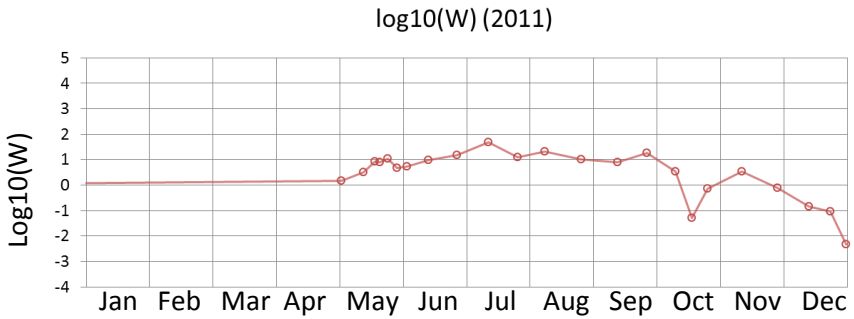
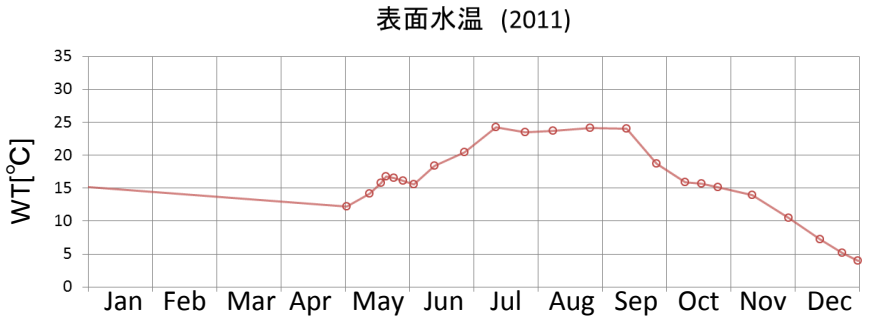


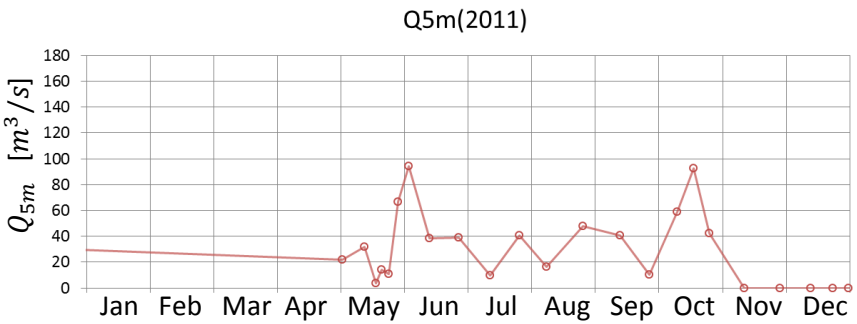
図3.6-1-7　重回帰分析でのインプットデータ（2010年）











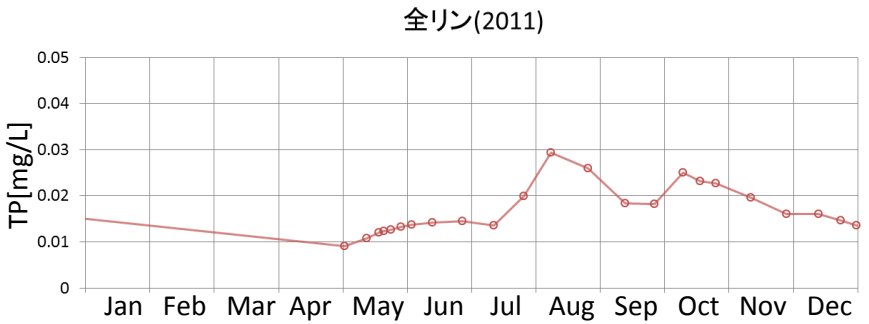
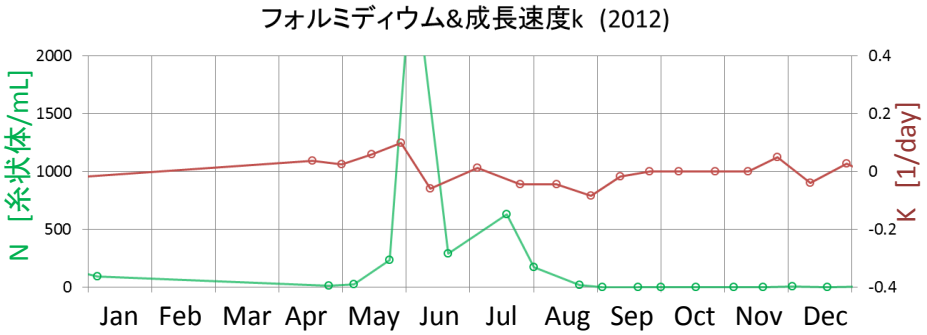
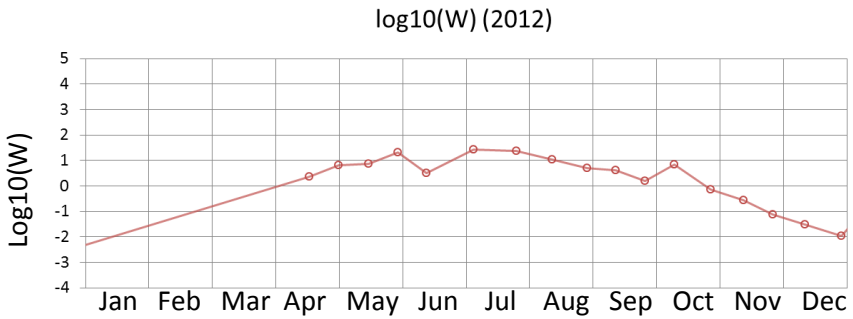


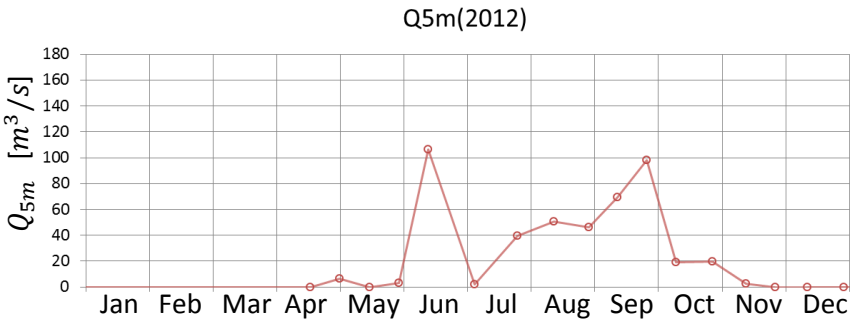
図3.6-1-8　重回帰分析でのインプットデータ（2011年）











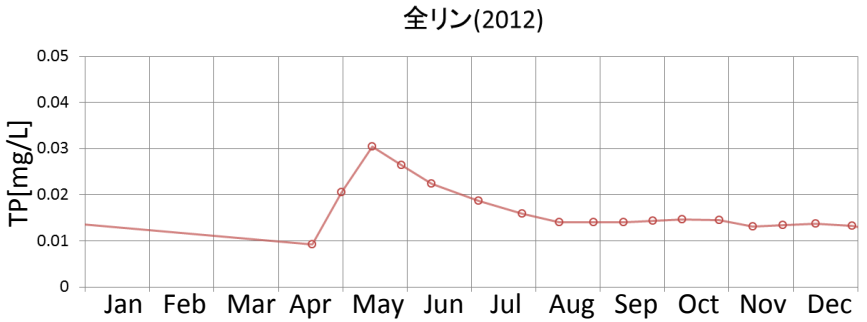
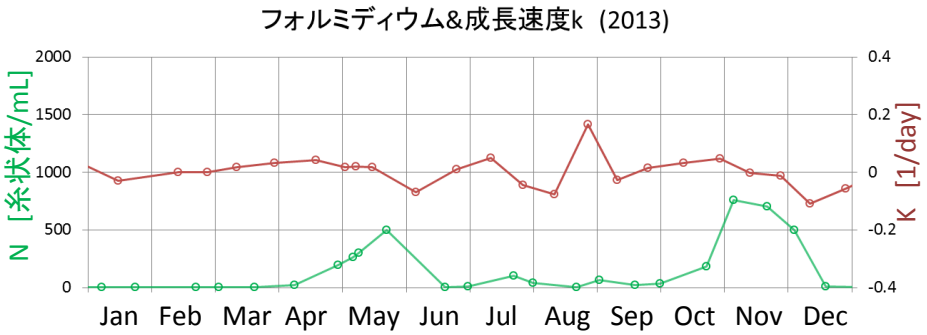
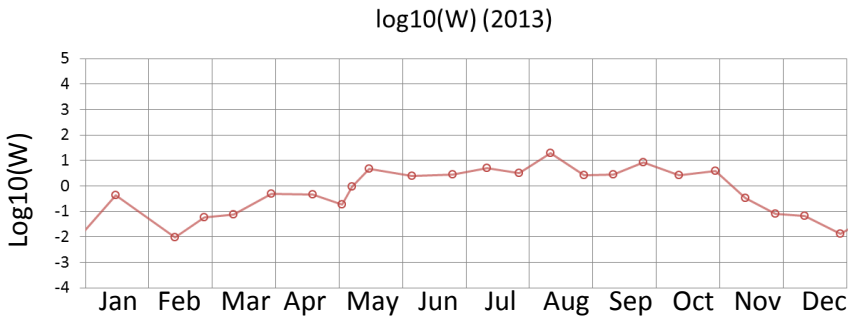
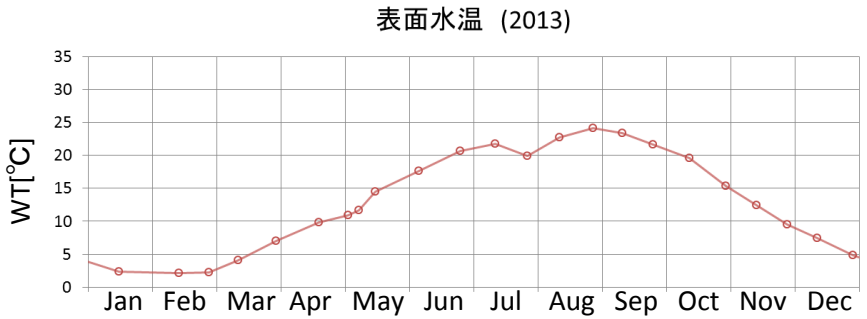


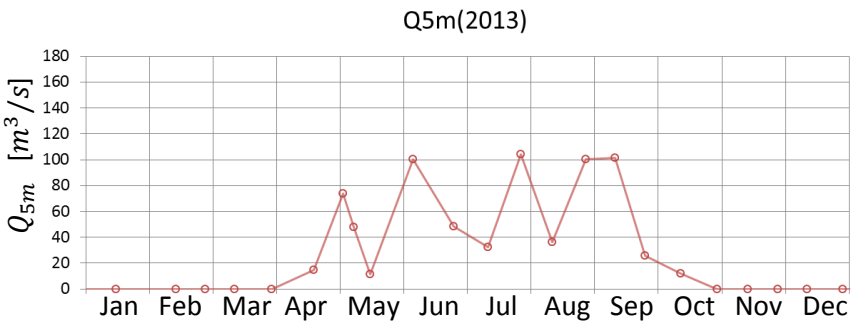
図3.6-1-9　重回帰分析でのインプットデータ（2012年)











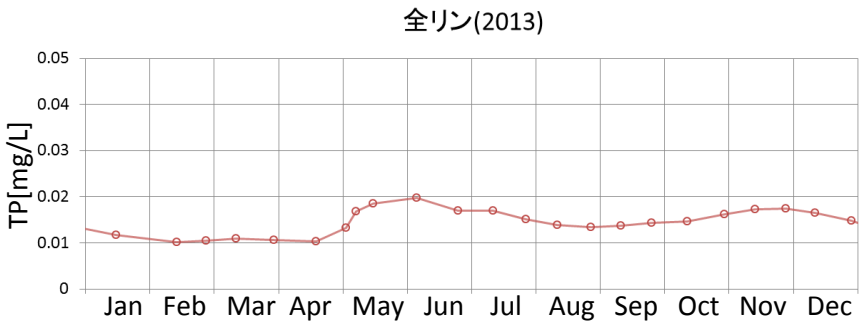
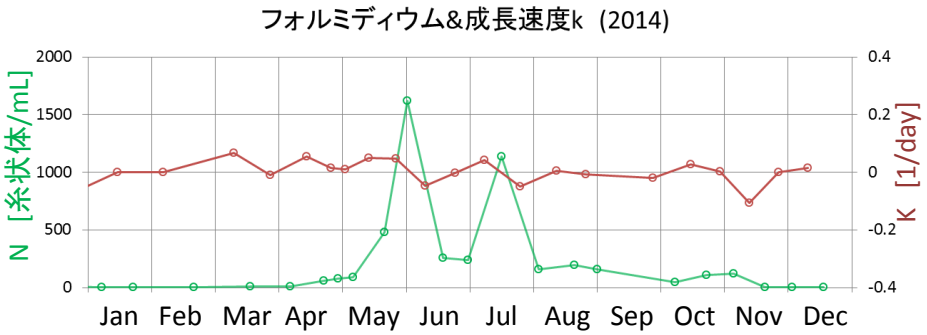
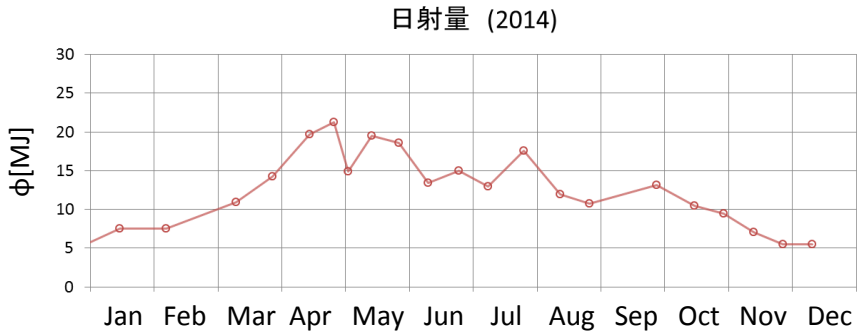
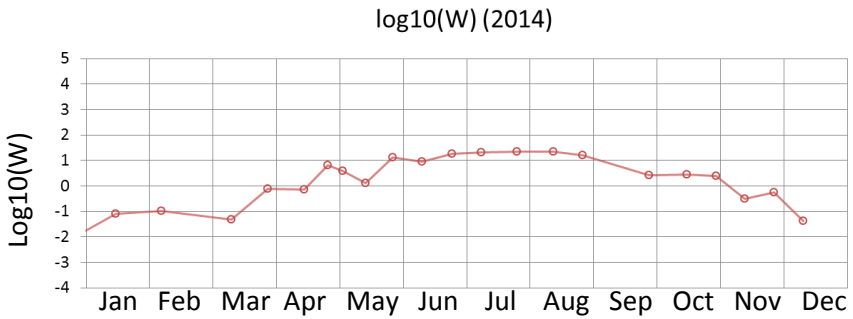
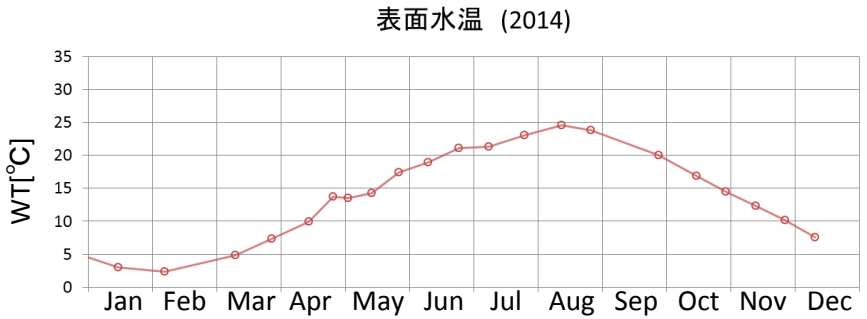


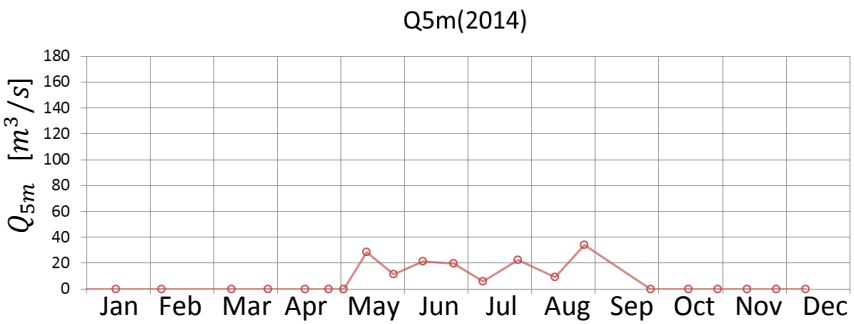
図3.6-1-10　重回帰分析でのインプットデータ（2013年）











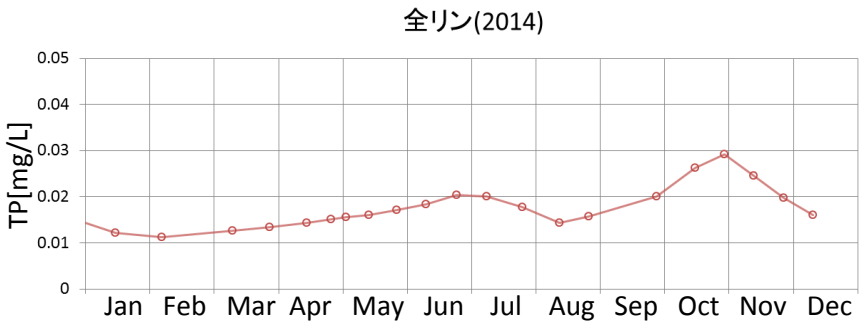
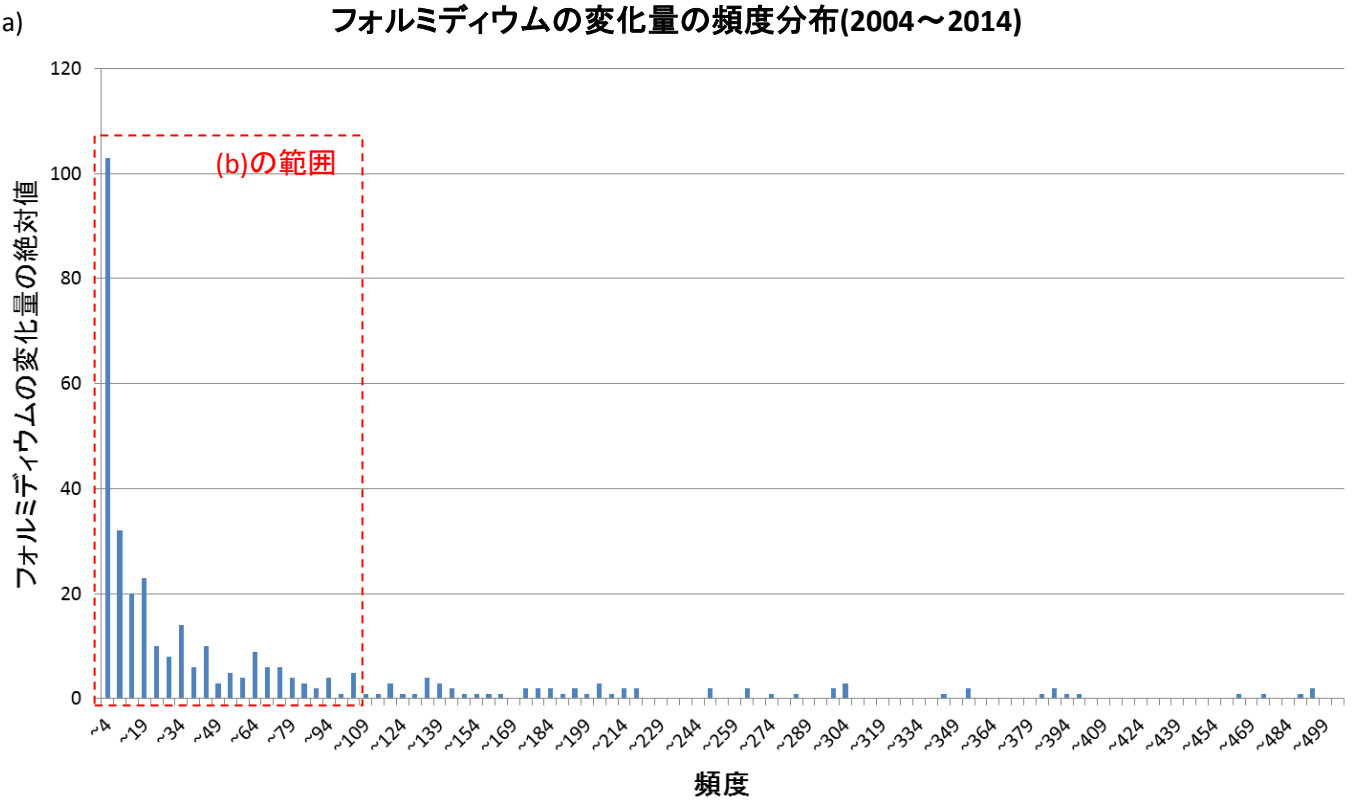


図3.6-1-11　重回帰分析でのインプットデータ（2014年）

(a)



(b)

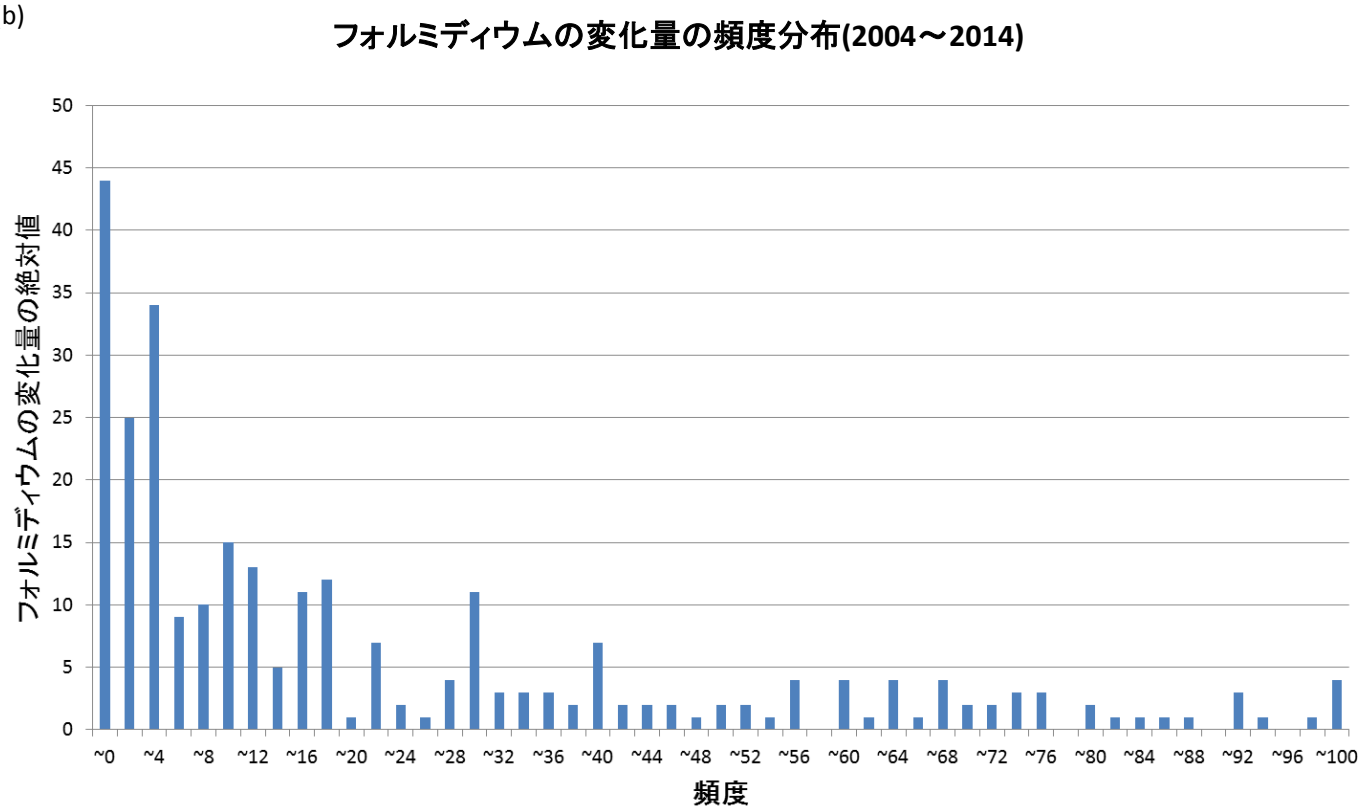


図3.6-2　2004年~2014年におけるフォルミディウムの頻度分布
(a)横軸は全変化量を含む　(b)横軸は変化量が100までを表す

(a)

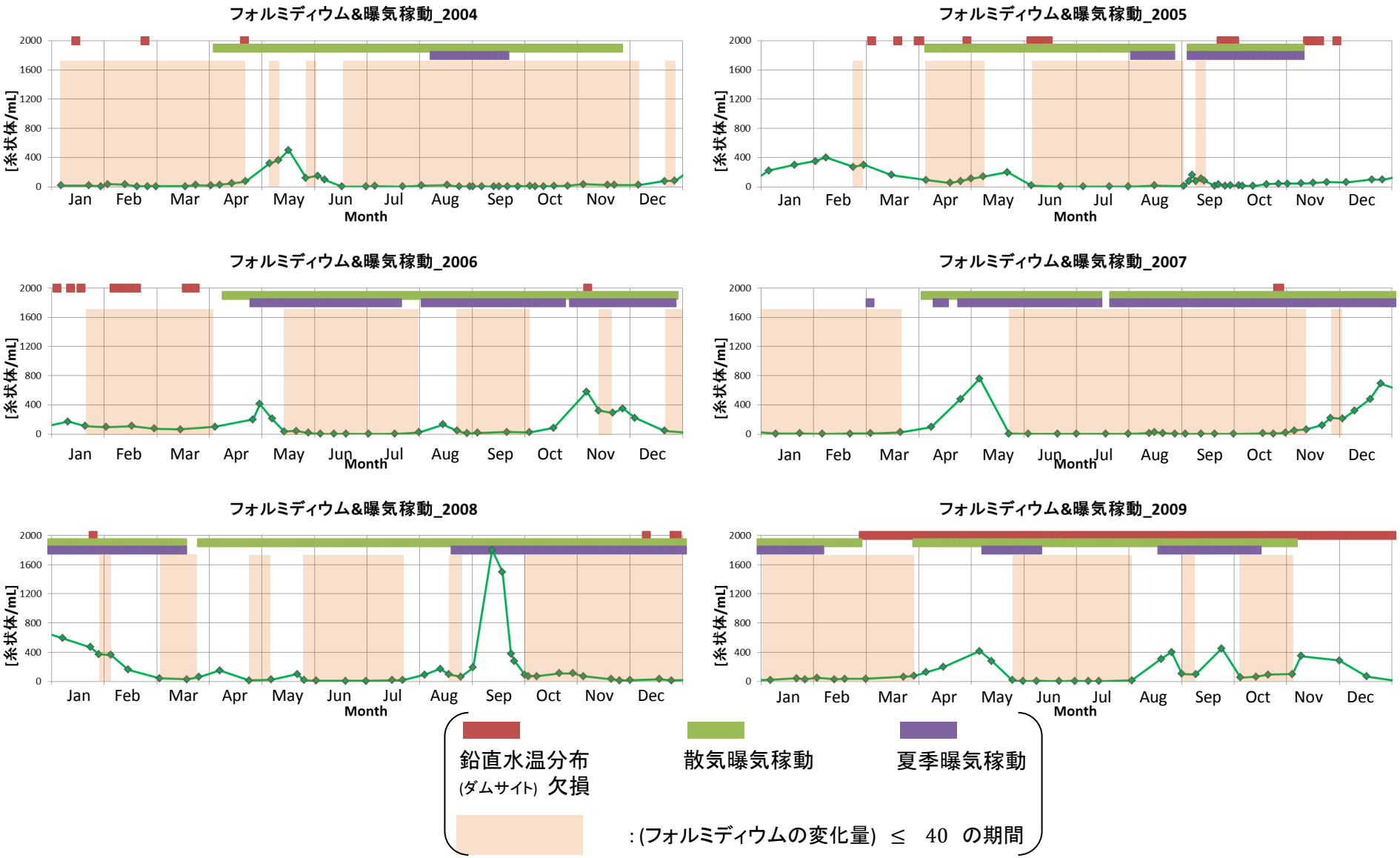


図3.6-3 (フォルミディウムの変化量) ≤ 40 の期間 (a)(2004～2009)

(b)

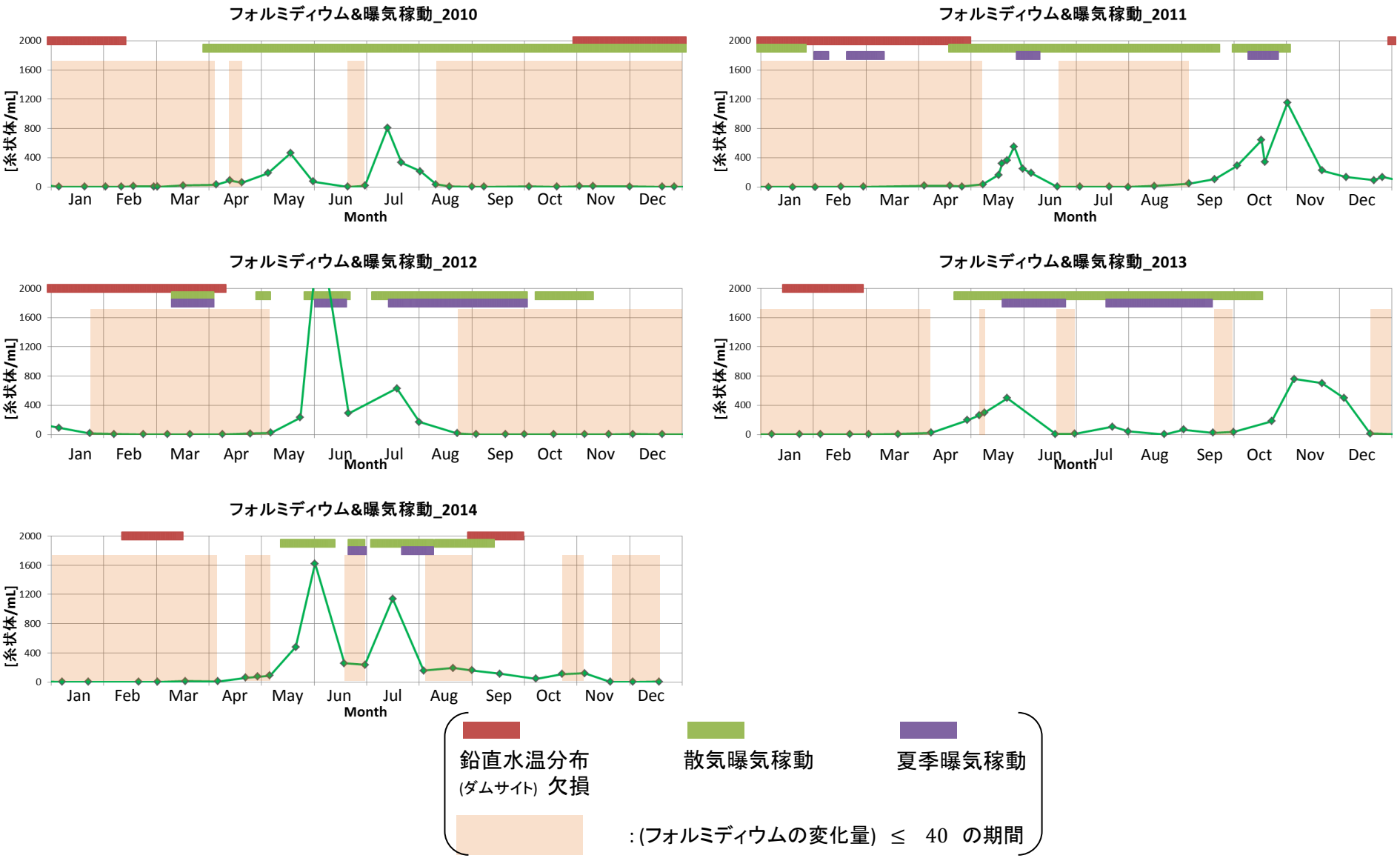


図3.6-3 (フォルミディウムの変化量) ≤ 40 の期間 (b)(2004～2009)

表3.6-1　説明変数を削った順

solar3_TP3_WT3	2	solar3_TP3_WT2		solar3_TP3_WT1		solar3_TP3_WT0	
solar3_TP2_WT3	3	solar3_TP2_WT2	4	solar3_TP2_WT1	15	solar3_TP2_WT0	16
solar3_TP1_WT3		solar3_TP1_WT2		solar3_TP1_WT1	8	solar3_TP1_WT0	10
solar3_TP0_WT3		solar3_TP0_WT2		solar3_TP0_WT1	13	solar3_TP0_WT0	9
solar2_TP3_WT3		solar2_TP3_WT2		solar2_TP3_WT1		solar2_TP3_WT0	22
solar2_TP2_WT3		solar2_TP2_WT2		solar2_TP2_WT1	21	solar2_TP2_WT0	20
solar2_TP1_WT3		solar2_TP1_WT2		solar2_TP1_WT1	19	solar2_TP1_WT0	
solar2_TP0_WT3		solar2_TP0_WT2		solar2_TP0_WT1	18	solar2_TP0_WT0	17
solar1_TP3_WT3		solar1_TP3_WT2		solar1_TP3_WT1		solar1_TP3_WT0	
solar1_TP2_WT3		solar1_TP2_WT2		solar1_TP2_WT1		solar1_TP2_WT0	
solar1_TP1_WT3		solar1_TP1_WT2		solar1_TP1_WT1		solar1_TP1_WT0	
solar1_TP0_WT3		solar1_TP0_WT2		solar1_TP0_WT1		solar1_TP0_WT0	
solar0_TP3_WT3		solar0_TP3_WT2		solar0_TP3_WT1		solar0_TP3_WT0	12
solar0_TP2_WT3		solar0_TP2_WT2		solar0_TP2_WT1	5	solar0_TP2_WT0	11
solar0_TP1_WT3		solar0_TP1_WT2		solar0_TP1_WT1	6	solar0_TP1_WT0	7
solar0_TP0_WT3		solar0_TP0_WT2		solar0_TP0_WT1	14		
W(ウェダバーン数)	1			Q5m			

表3.6-2 残った説明変数と重回帰分析の結果

説明変数	係数	t値	P値
(切片)	0.2224	3.09	0.002221
solar3_TP3_WT2	−0.8353	−4.562	0.00000787
solar3_TP3_WT1	18.79	4.384	0.000017
solar3_TP3_WT0	−49.17	−2.598	0.009923
solar3_TP1_WT3	0.00003738	3.867	0.00014
solar3_TP1_WT2	−0.0007576	−3.412	0.000748
solar3_TP0_WT3	−4.362E−07	−3.76	0.00021
solar3_TP0_WT2	0.000009109	3.434	0.000694
solar2_TP3_WT3	−1.569	−2.81	0.005334
solar2_TP3_WT2	57.89	3.537	0.00048
solar2_TP3_WT1	−575.3	−4.054	0.0000669
solar2_TP2_WT3	0.0977	3.088	0.002239
solar2_TP2_WT2	−1.776	−2.57	0.010731
solar2_TP1_WT3	−0.00346	−4.121	0.0000509
solar2_TP1_WT2	0.06579	3.549	0.00046
solar2_TP1_WT0	0.2813	3.623	0.00035
solar2_TP0_WT3	0.00003053	4.197	0.0000373
solar2_TP0_WT2	−0.0006108	−3.748	0.00022
solar1_TP3_WT3	57.96	4.041	0.0000704
solar1_TP3_WT2	−2033	−4.554	0.00000813
solar1_TP3_WT1	22020	3.705	0.000259
solar1_TP3_WT0	−67550	−2.019	0.044562
solar1_TP2_WT3	−3.419	−4.011	0.0000793
solar1_TP2_WT2	90.03	4.098	0.000056
solar1_TP2_WT1	−664	−2.661	0.008277
solar1_TP2_WT0	3062	2.174	0.030645
solar1_TP1_WT3	0.08565	4.366	0.0000184
solar1_TP1_WT2	−2.007	−4.329	0.0000215
solar1_TP1_WT1	9.333	2.578	0.010509
solar1_TP1_WT0	−44.24	−2.271	0.023984
solar1_TP0_WT3	−0.0006455	−4.326	0.0000218
solar1_TP0_WT2	0.01449	4.214	0.0000348
solar1_TP0_WT1	−0.04221	−2.413	0.016514
solar1_TP0_WT0	0.1577	1.789	0.074734
solar0_TP3_WT3	−228.3	−2.455	0.014764
solar0_TP3_WT2	5674	2.504	0.012889
solar0_TP3_WT1	−30080	−3.882	0.000132
solar0_TP2_WT3	15.64	2.692	0.007567
solar0_TP2_WT2	−288.3	−2.238	0.026104
solar0_TP1_WT3	−0.4221	−3.25	0.00131
solar0_TP1_WT2	8.034	2.8	0.005498
solar0_TP0_WT3	0.003268	3.479	0.000591
solar0_TP0_WT2	−0.06441	−3.076	0.002322
Q_5m	−0.0001613	−2.075	0.038986
調整済み決定係数		0.3243	

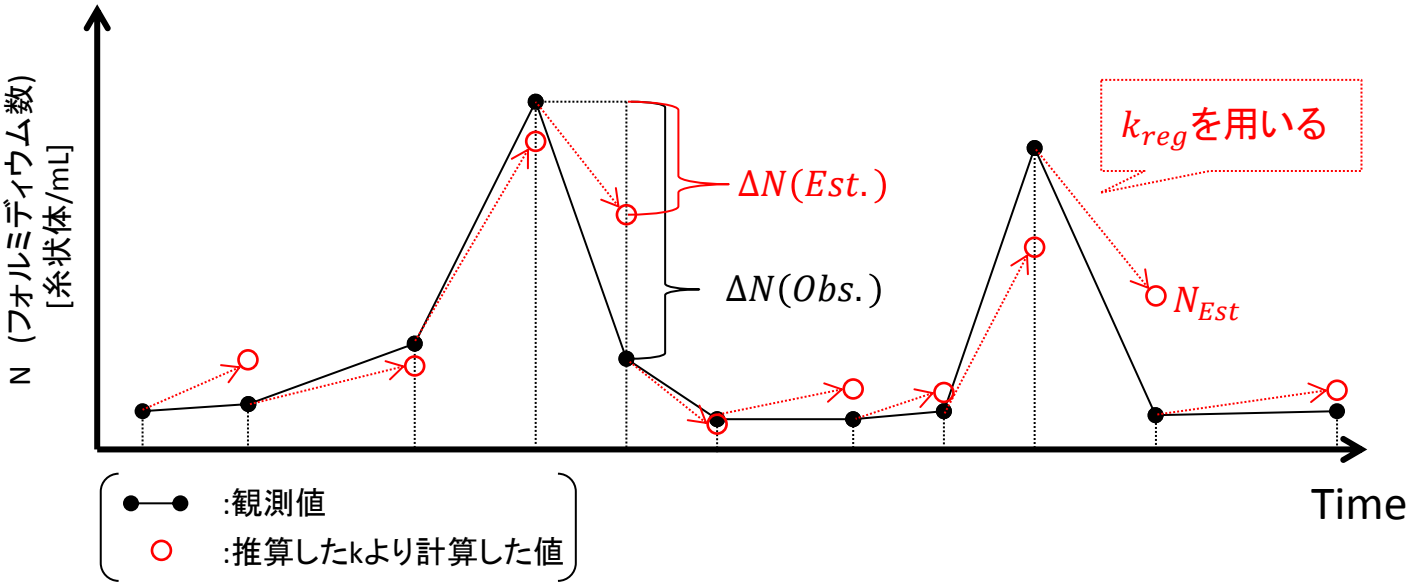


図3.6-4　kの推算値からN (フォルミディウム数)を計算する際の概念図

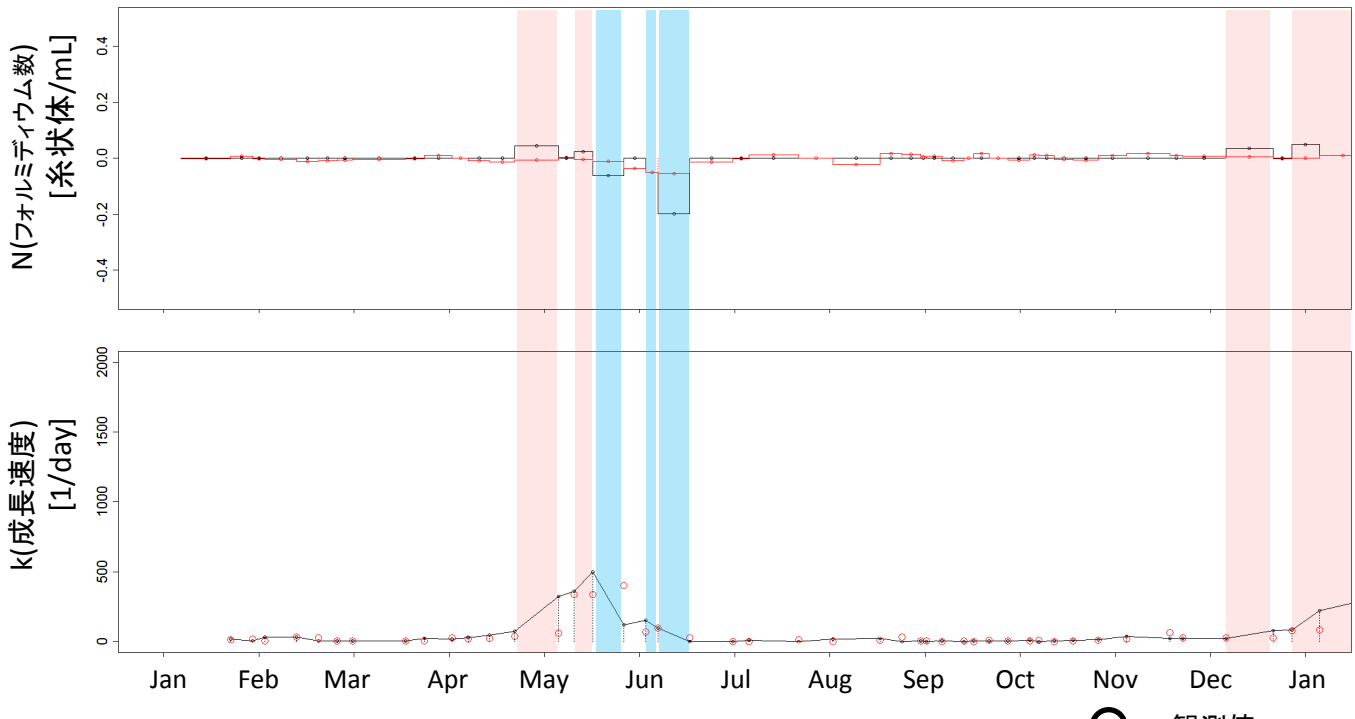


図3.6-5　回帰式での推算値と観測値の比較　2004年
k(成長速度)とN(フォルミディウム数)について

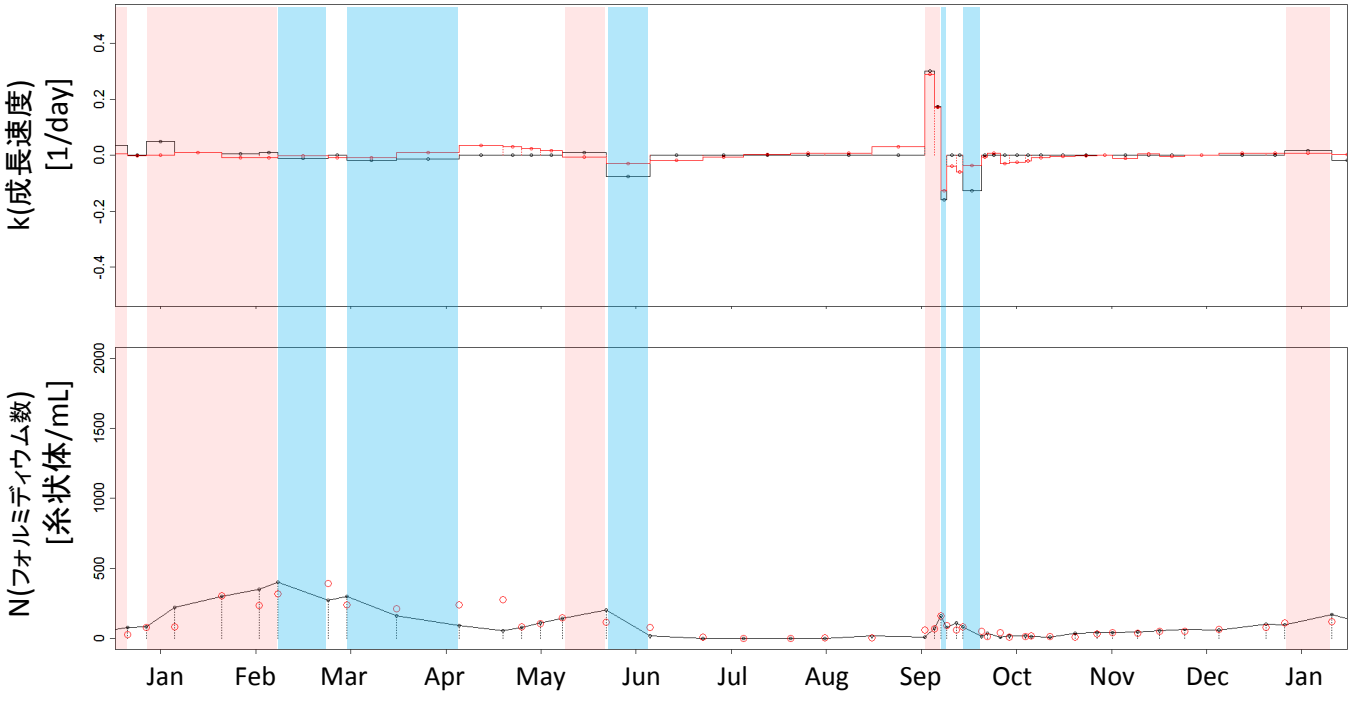


図3.6-6　回帰式での推算値と観測値の比較　2005年
k(成長速度)とN(フォルミディウム数)について

:観測値

:回帰式による推算値

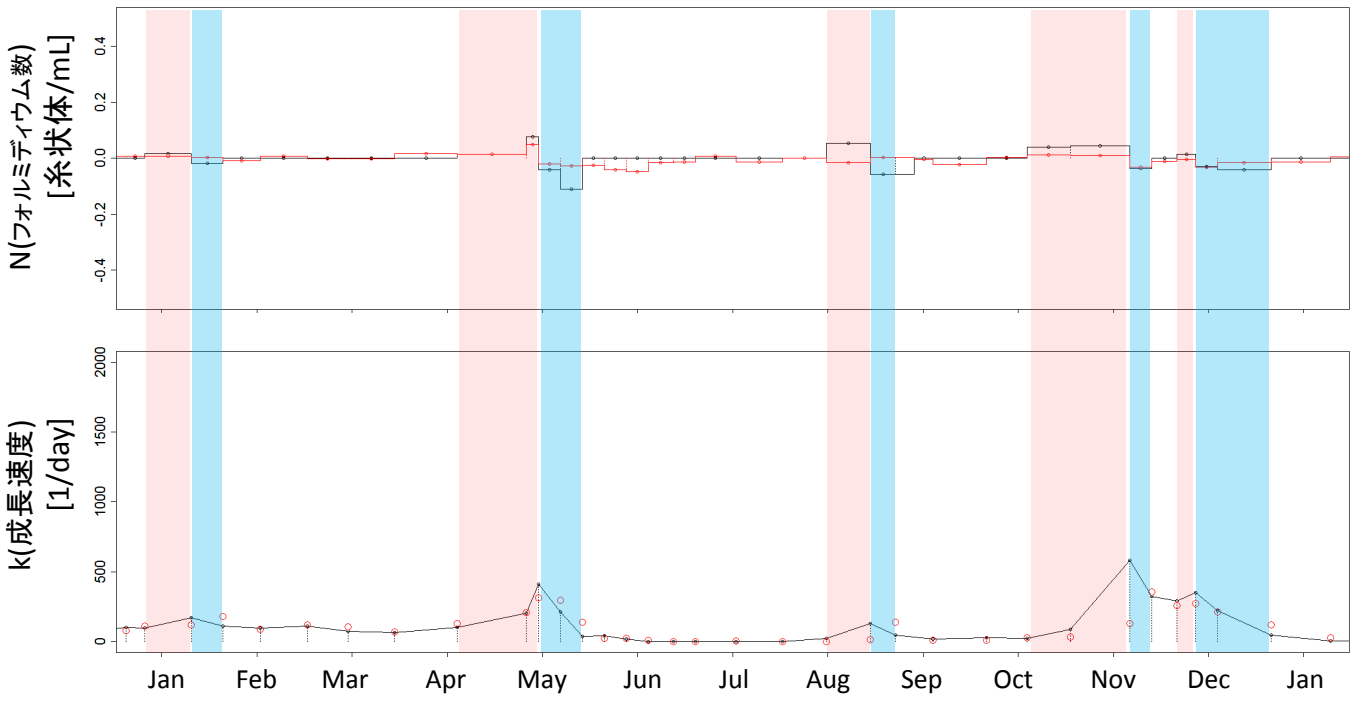


図3.6-7　回帰式での推算値と観測値の比較　2006年
k(成長速度)とN(フォルミディウム数)について

:観測値

:回帰式による推算値

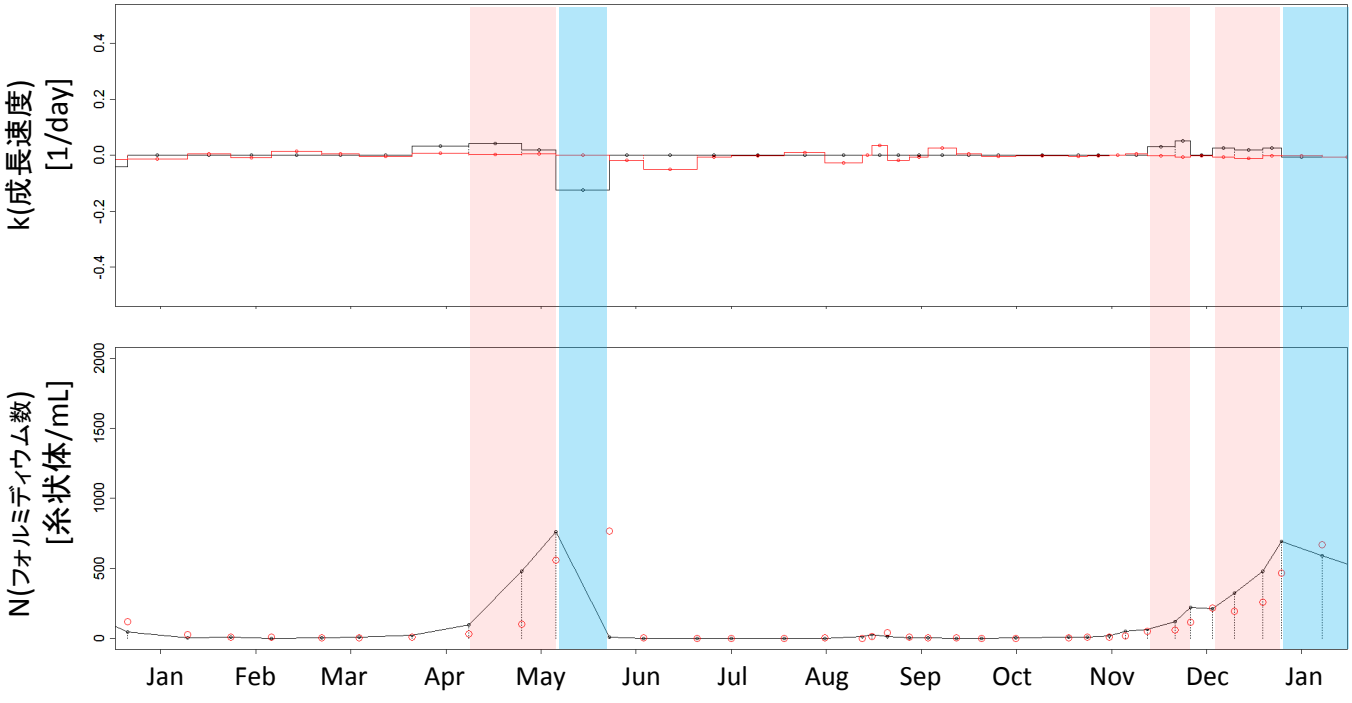


図3.6-8　回帰式での推算値と観測値の比較　2007年
k(成長速度)とN(フォルミディウム数)について

:観測値

:回帰式による推算値

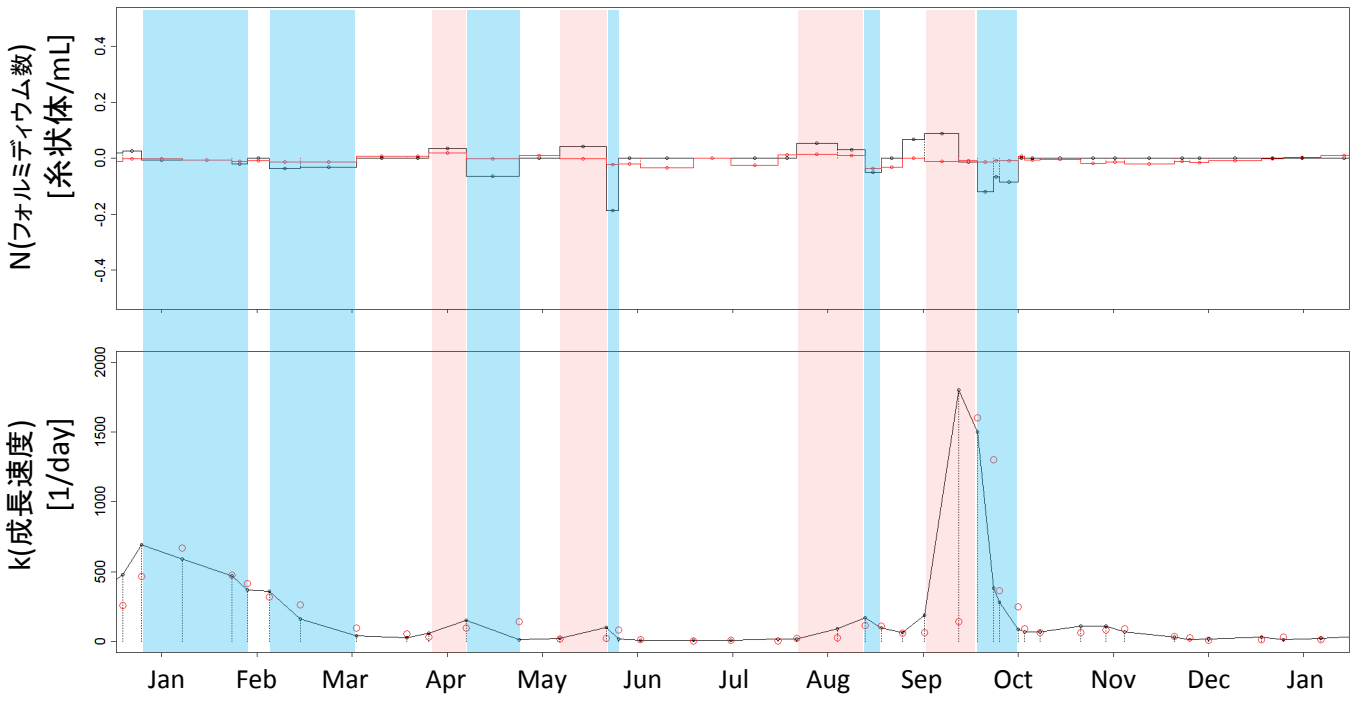


図3.6-9　回帰式での推算値と観測値の比較　2008年
k(成長速度)とN(フォルミディウム数)について

:観測値

:回帰式による推算値

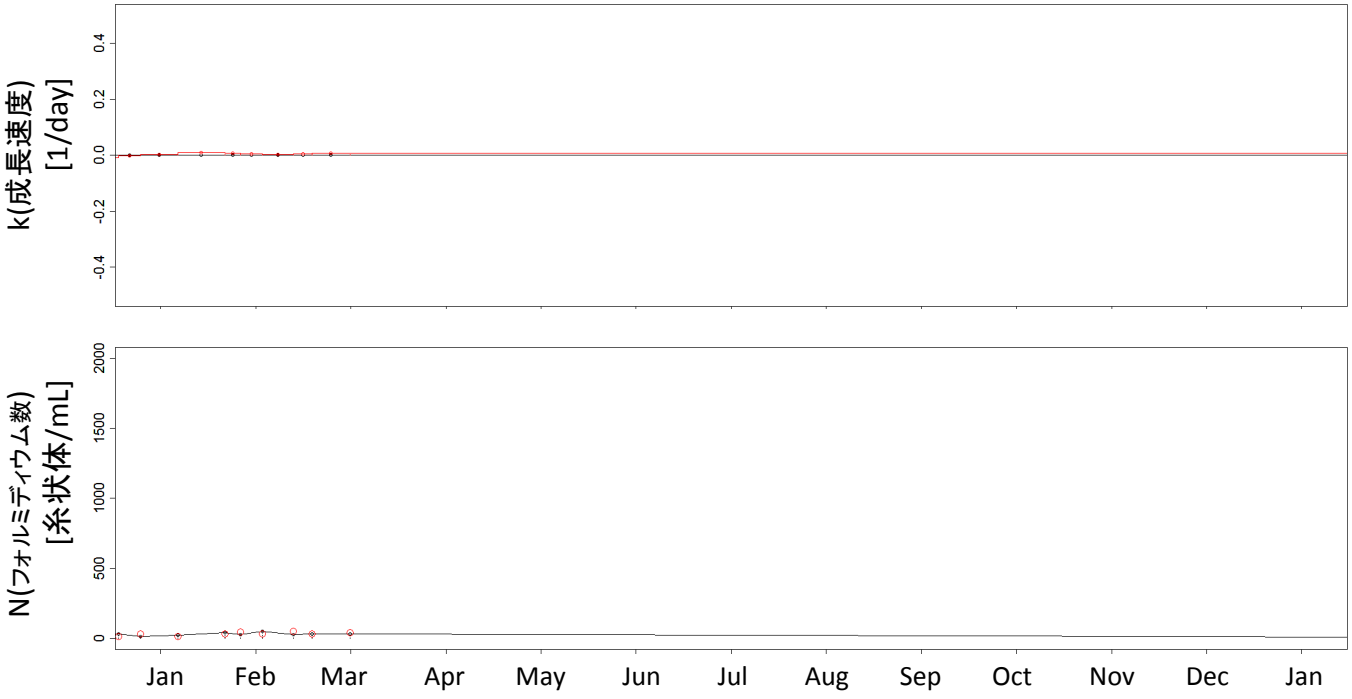


図3.6-10　回帰式での推算値と観測値の比較　2009年
k(成長速度)とN(フォルミディウム数)について

:観測値

:回帰式による推算値

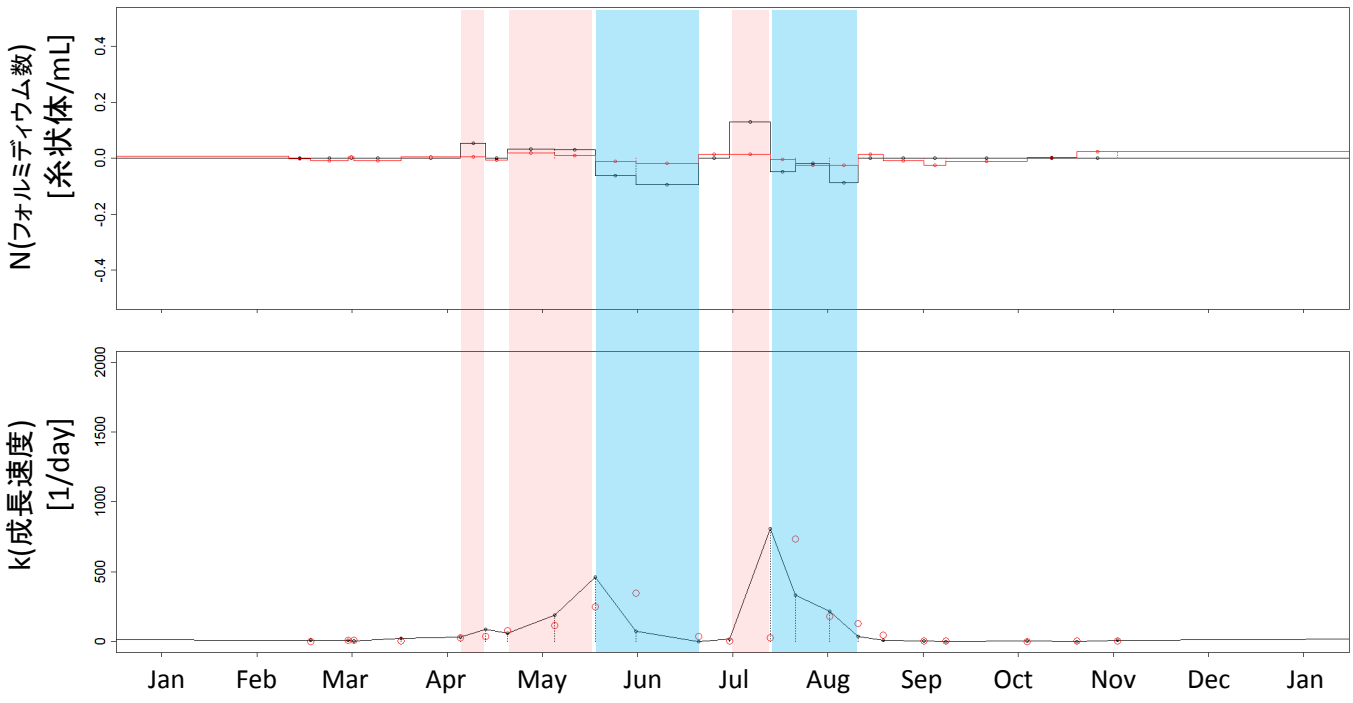


図3.6-11　回帰式での推算値と観測値の比較　2010年
k(成長速度)とN(フォルミディウム数)について

:観測値

:回帰式による推算値

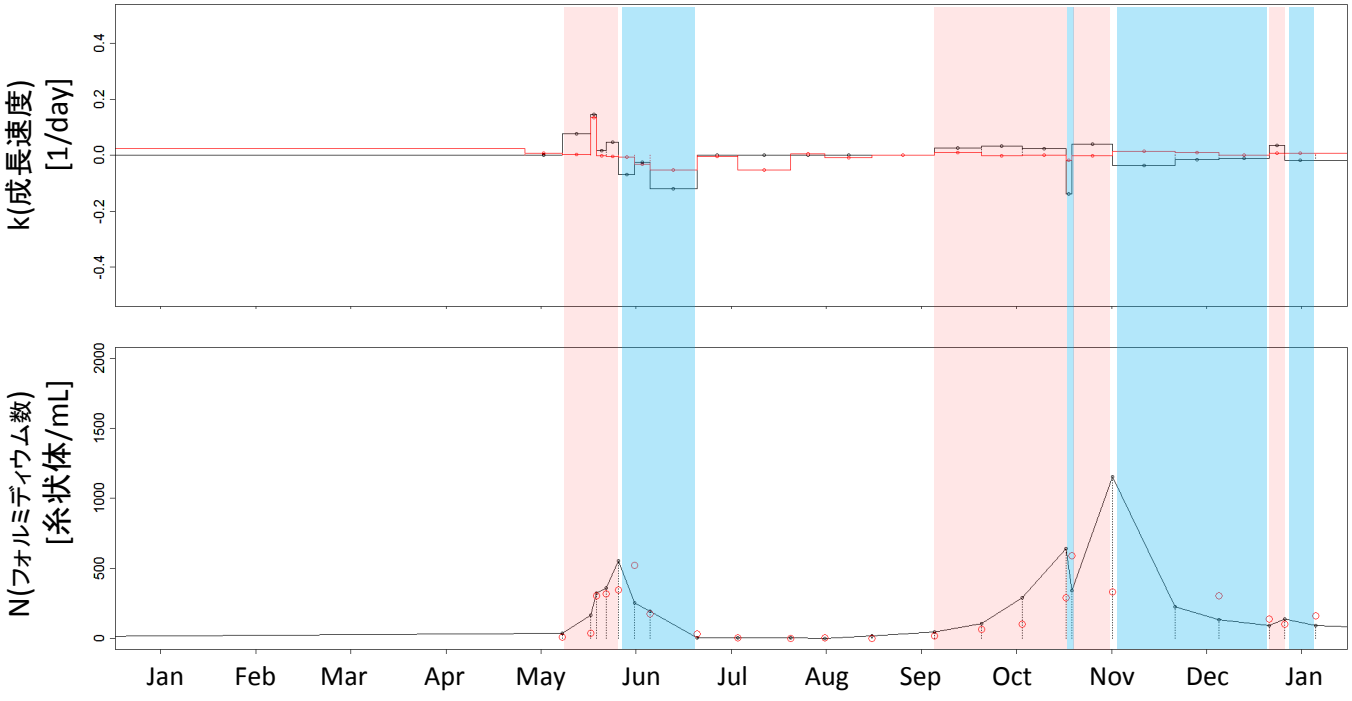


図3.6-12　回帰式での推算値と観測値の比較　2011年
k(成長速度)とN(フォルミディウム数)について

:観測値

:回帰式による推算値

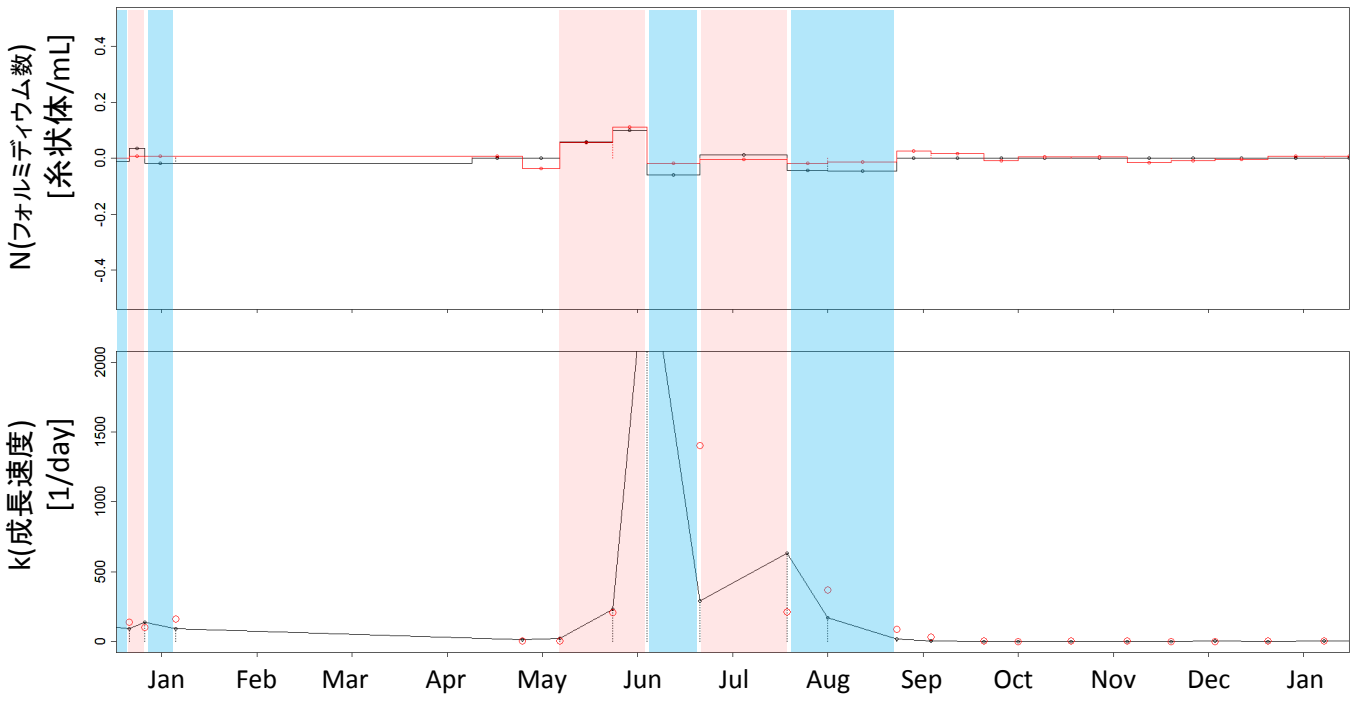


図3.6-13　回帰式での推算値と観測値の比較　2012年
k(成長速度)とN(フォルミディウム数)について

:観測値

:回帰式による推算値

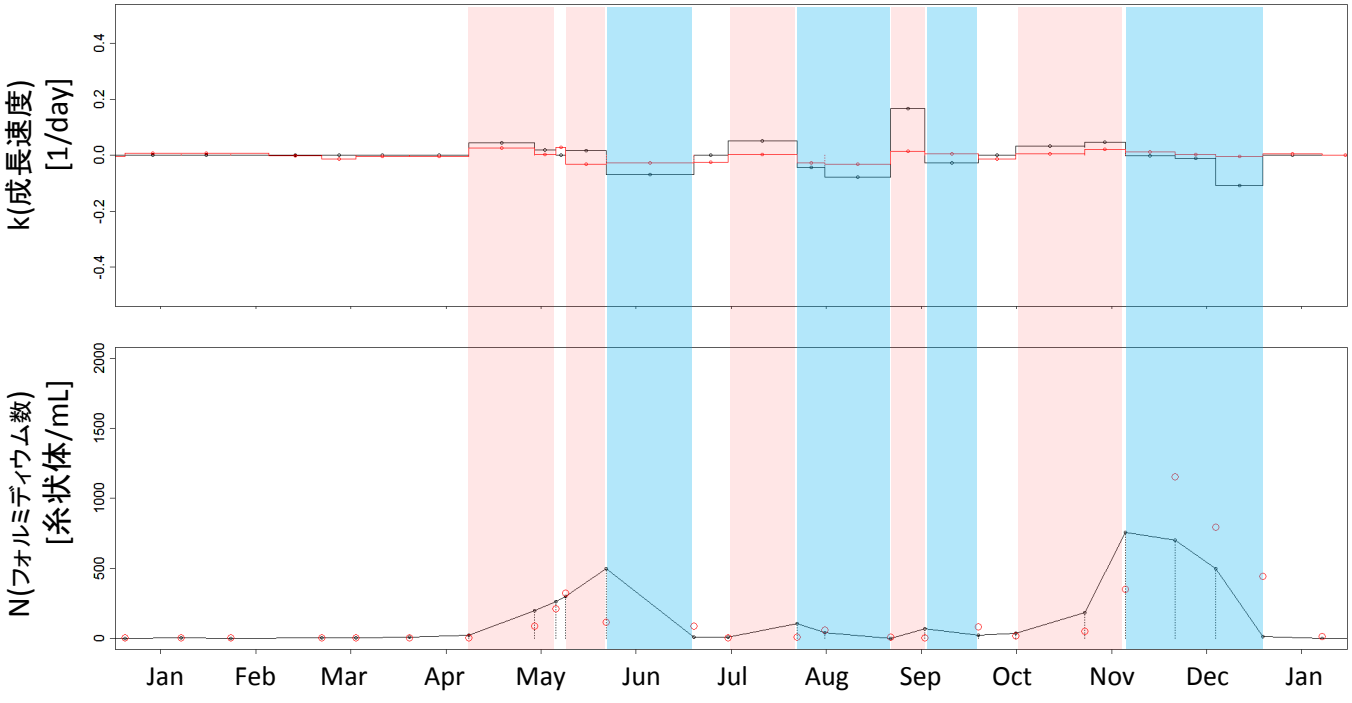


図3.6-14　回帰式での推算値と観測値の比較　2013年
k(成長速度)とN(フォルミディウム数)について

:観測値

:回帰式による推算値

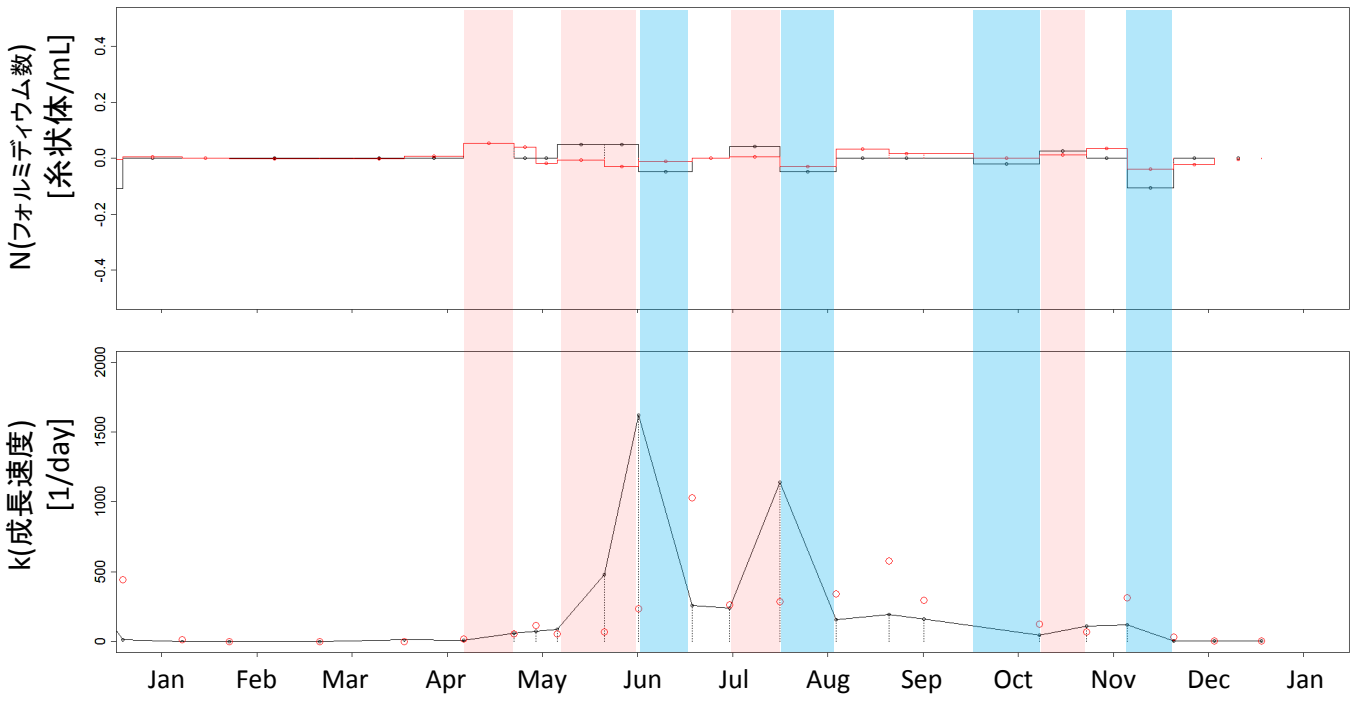


図3.6-15　回帰式での推算値と観測値の比較　2014年
k(成長速度)とN(フォルミディウム数)について

:観測値

:回帰式による推算値

表3.6-3　ΔN(Obs)の3条件下におけるΔN(Est)の内訳

	$\Delta N(Obs.) > 40$	$\lvert\Delta N(Obs.)\rvert \leq 40$	$\Delta N(Obs.) < -40$	301
$\Delta N(Est.) > 40$	27.1% (= 16/59)	4.3% (= 8/186)	28.6% (= 16/56)	40 case
$\lvert\Delta N(Est.)\rvert \leq 40$	62.7% (= 37/59)	94.1% (= 175/186)	9.0% (= 5/59)	217 case
$\Delta N(Est.) > 40$	10.2% (= 6/59)	1.6% (= 3/59)	62.5% (= 35/59)	44 case

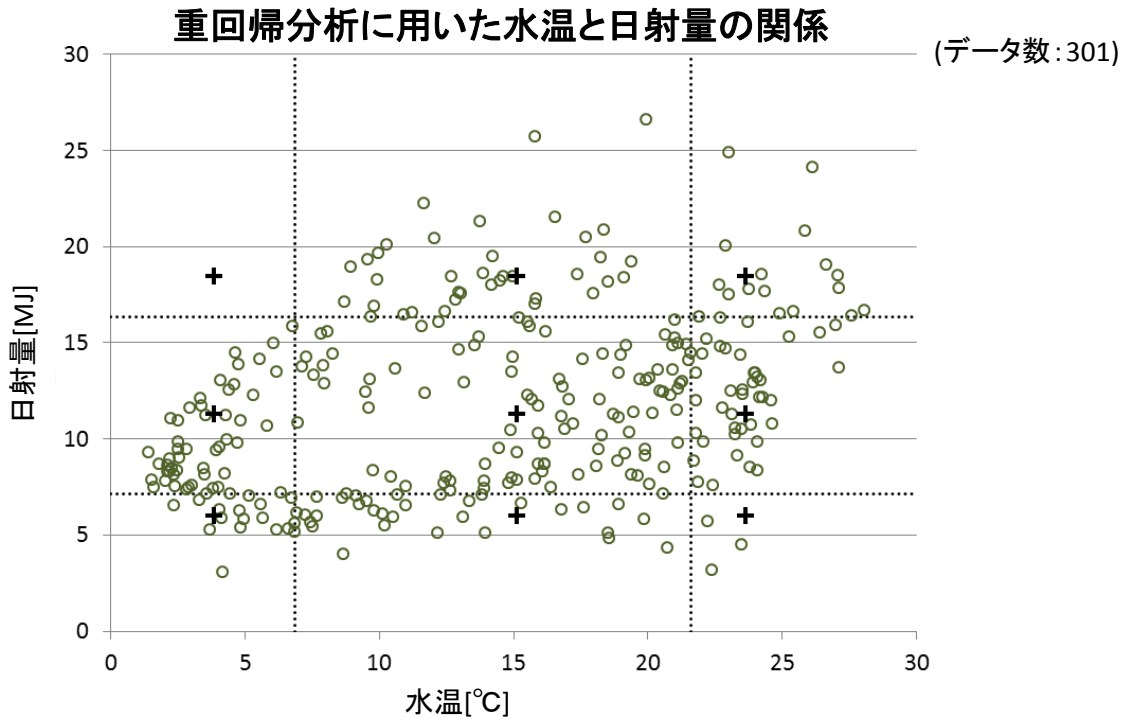


図3.6-16　重回帰分析に用いた水温と日射量のデータ比較

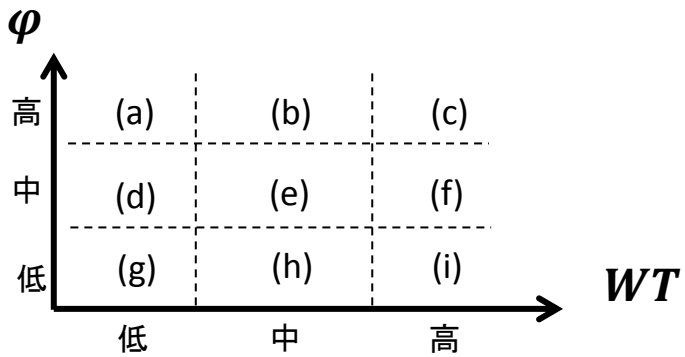


図3.6-17　水温・日射の大中小別　9種類の状態簡略図

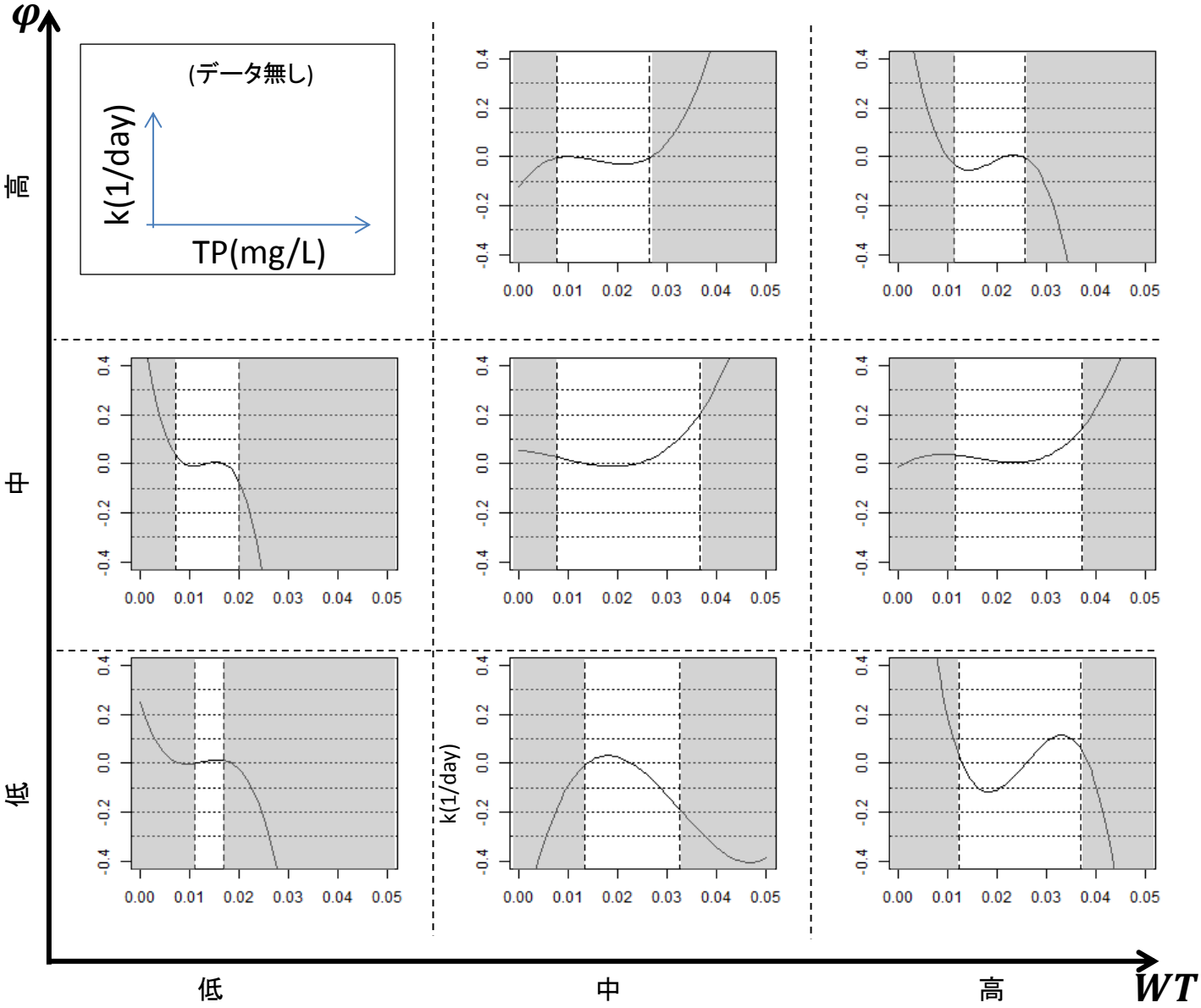


図3.6-18　回帰式におけるTPとk(成長速度)の関係

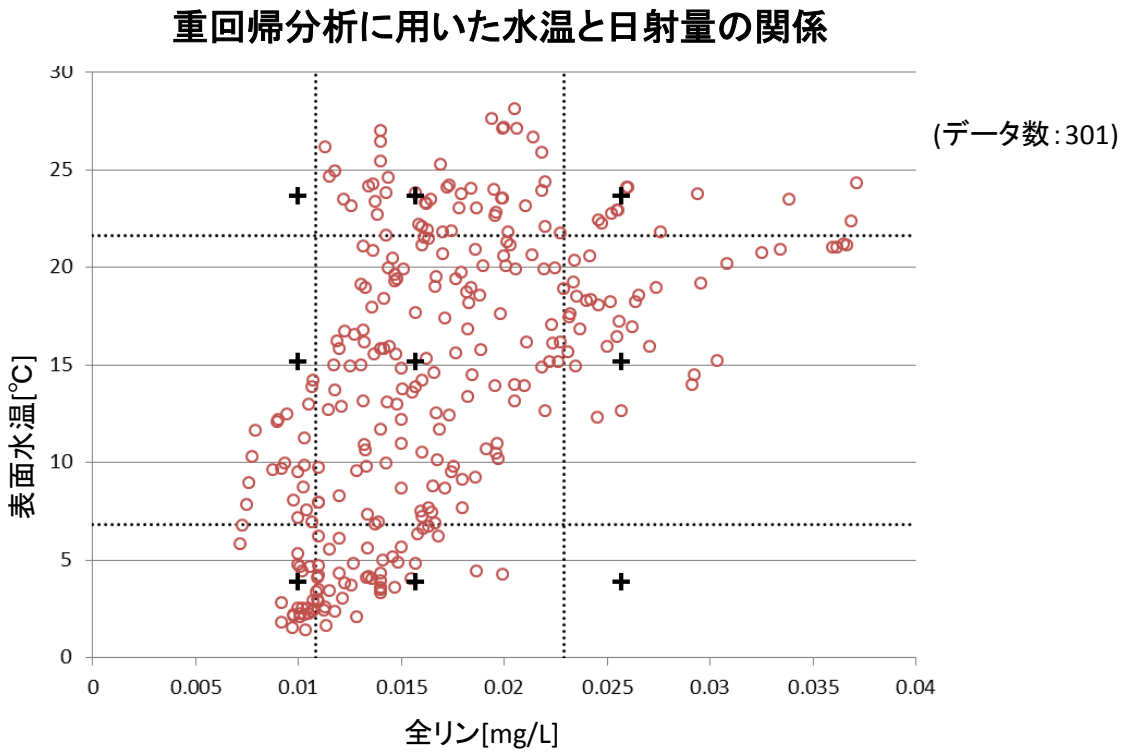


図3.6-19　重回帰分析に用いた全リンと表面水温のデータ比較

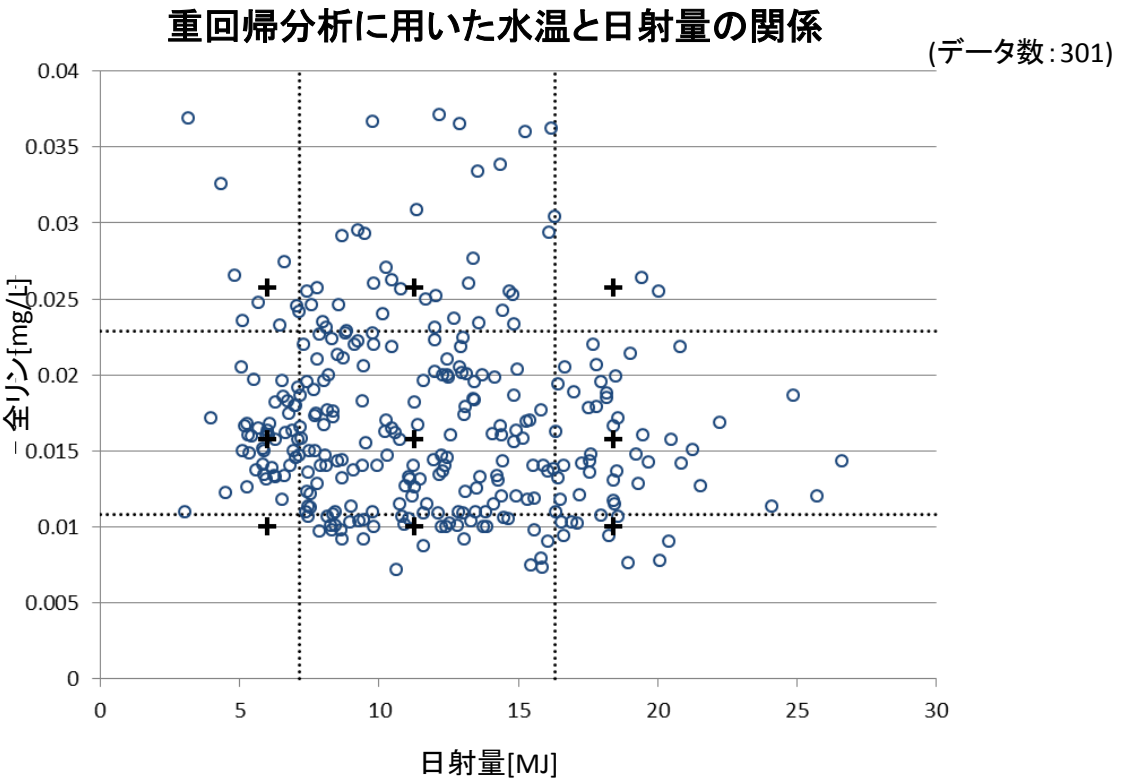


図3.6-20　重回帰分析に用いた水温と日射量のデータ比較

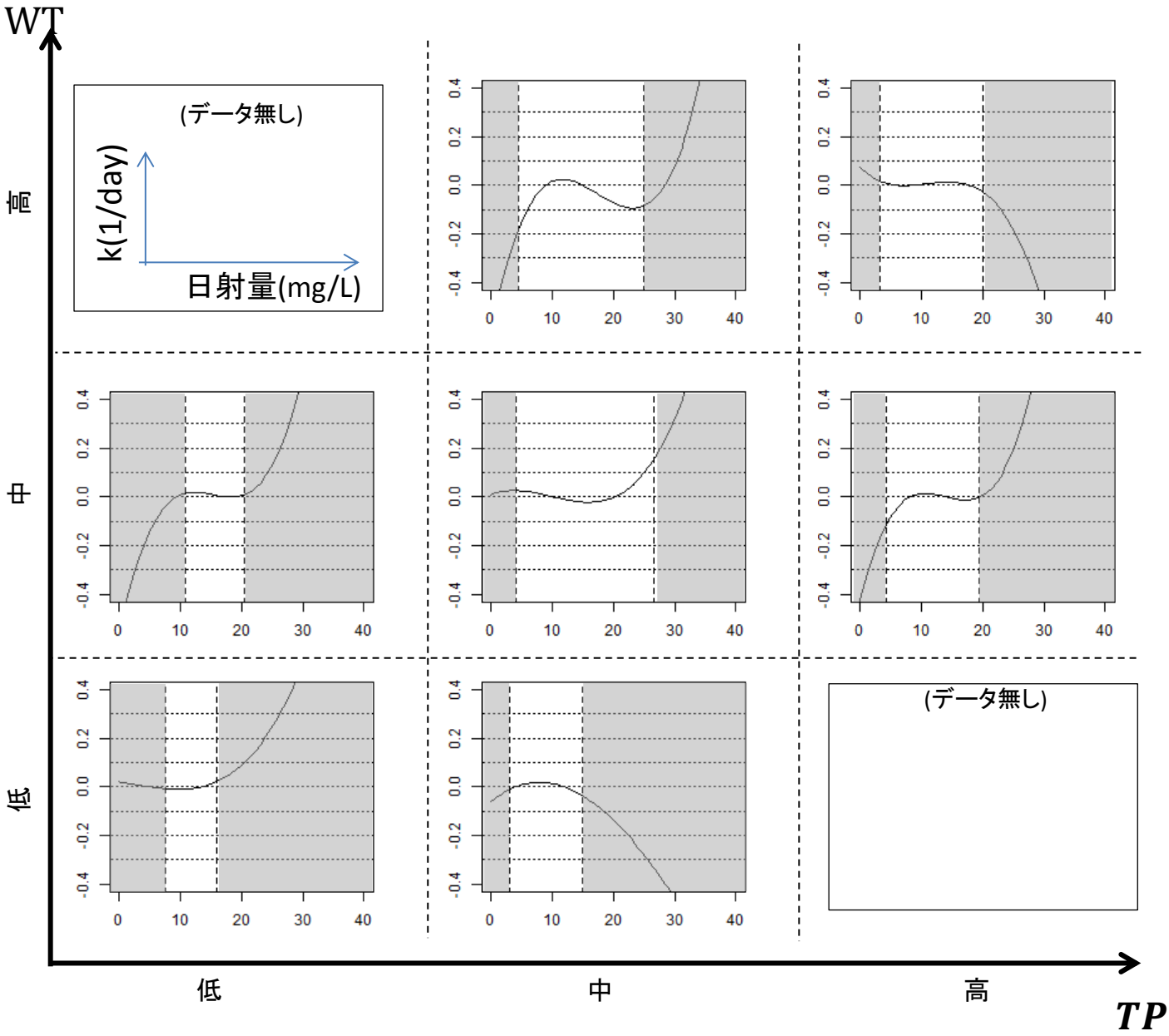


図3.6-21　回帰式における日射量とk(成長速度)の関係

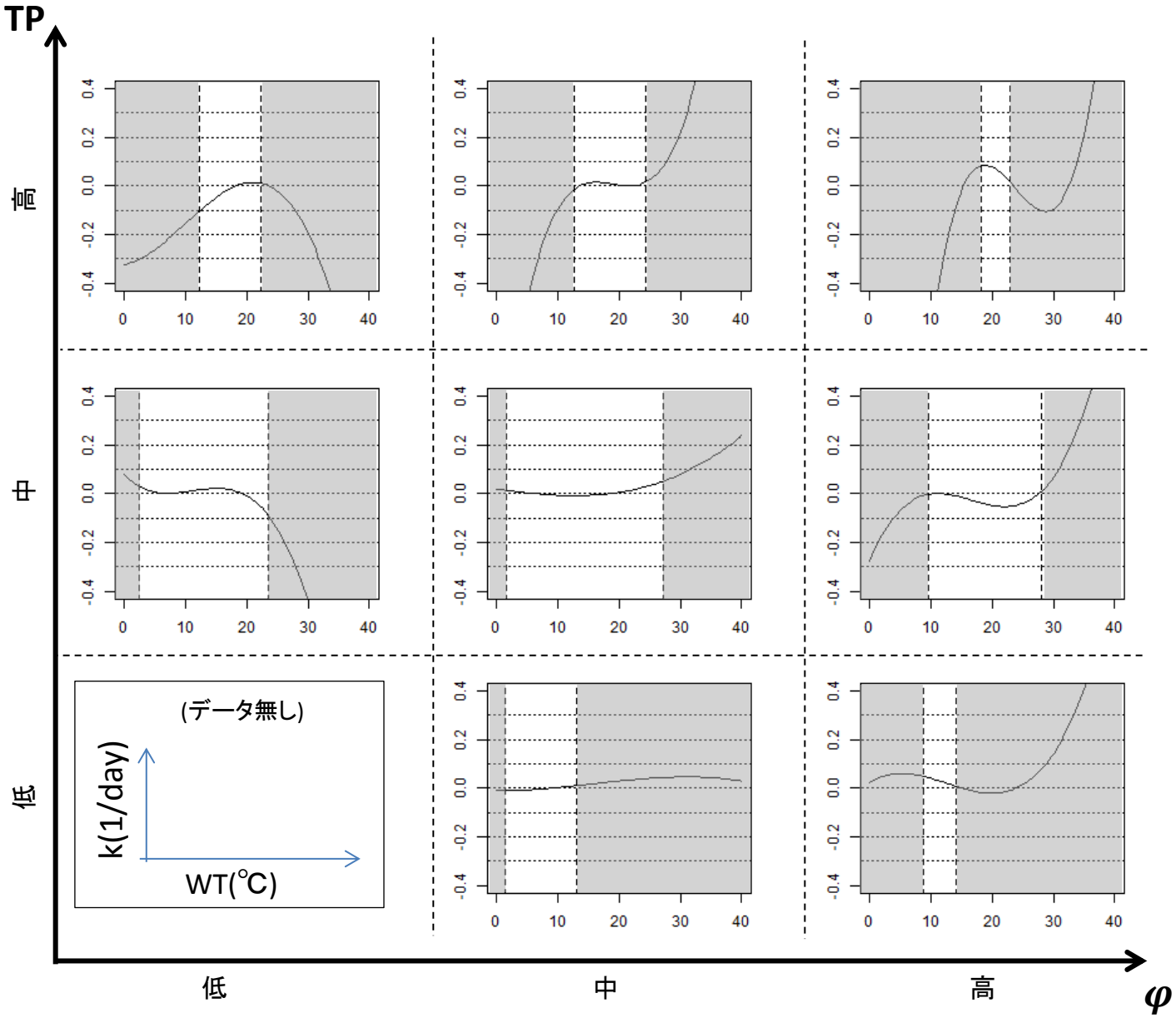


図3.6-22　回帰式における表面水温とk(成長速度)の関係

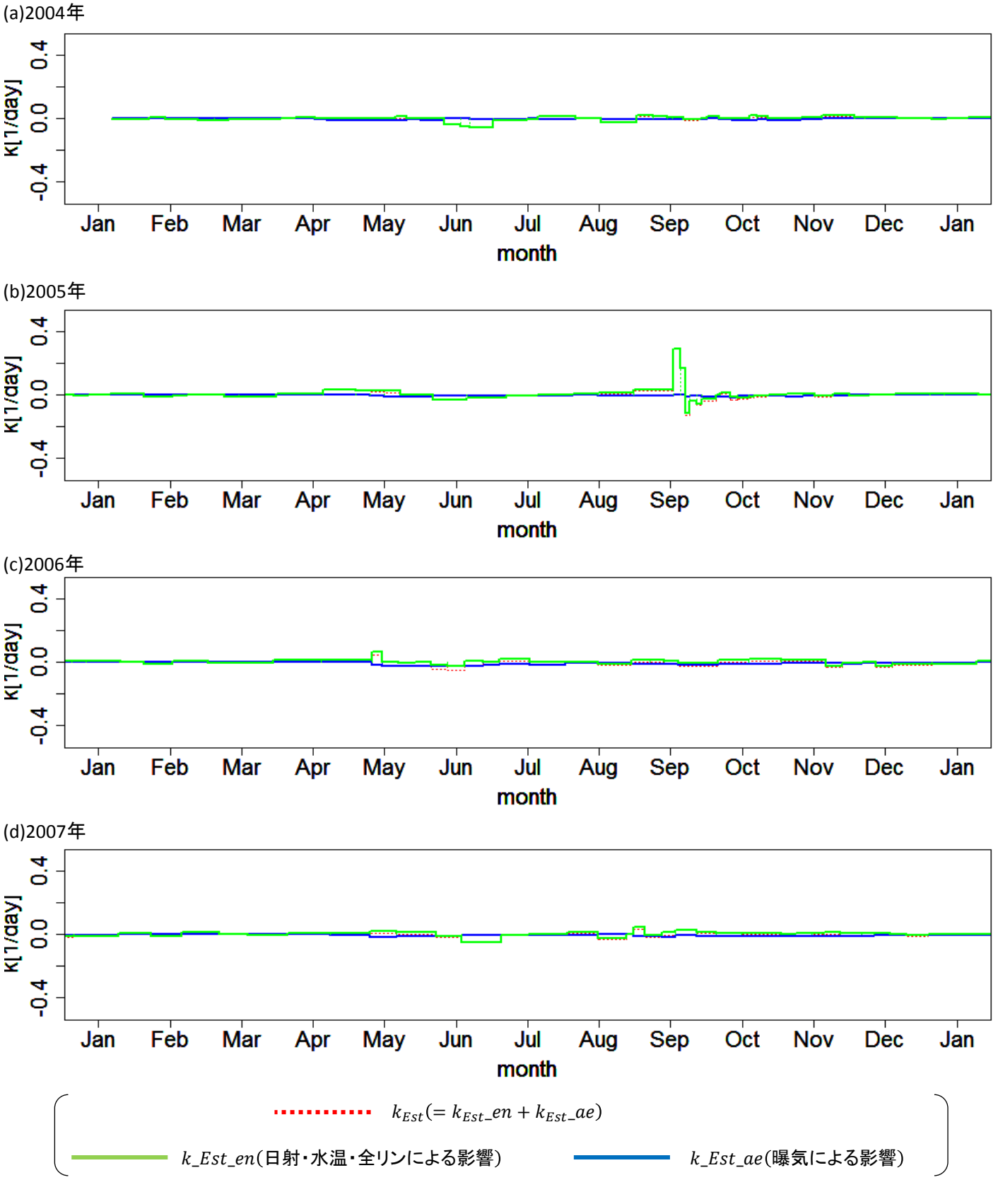
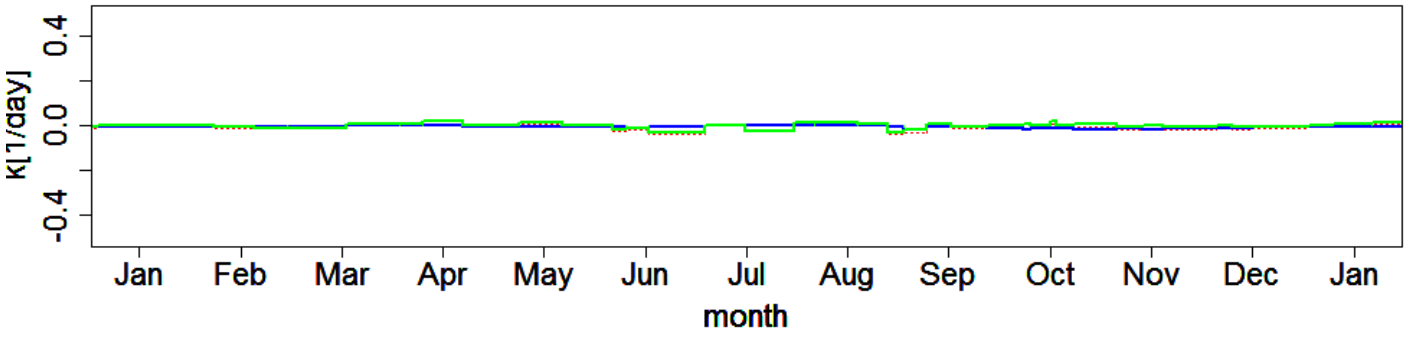
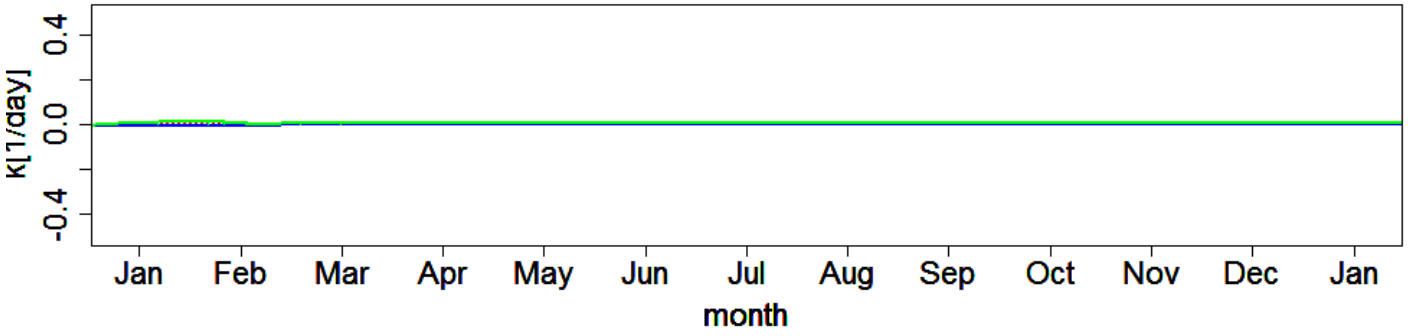


図3.6-23　推算したk(成長速度)の内訳(曝気とそれ以外)

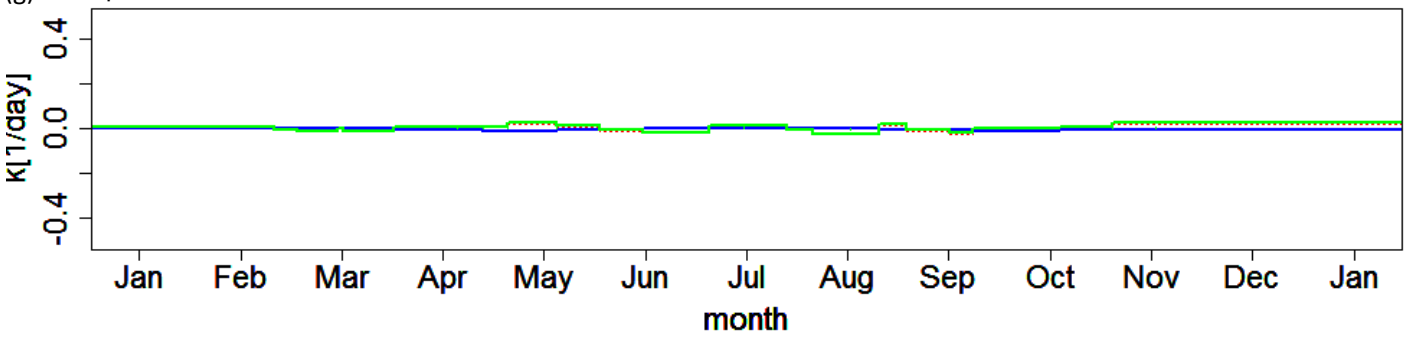
(e)2008年



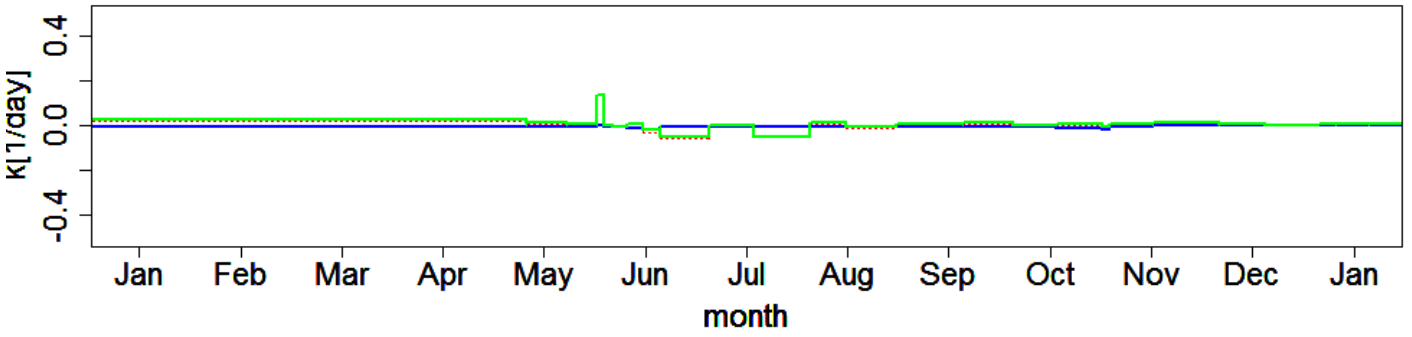
(f)2009年



(g)2010年



(h)2011年



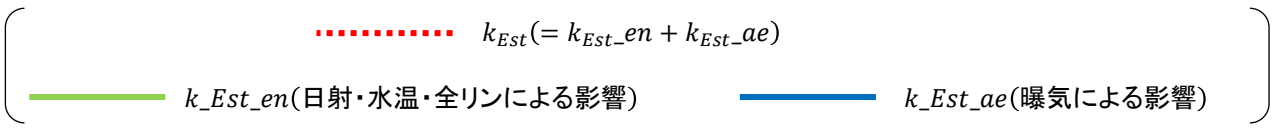
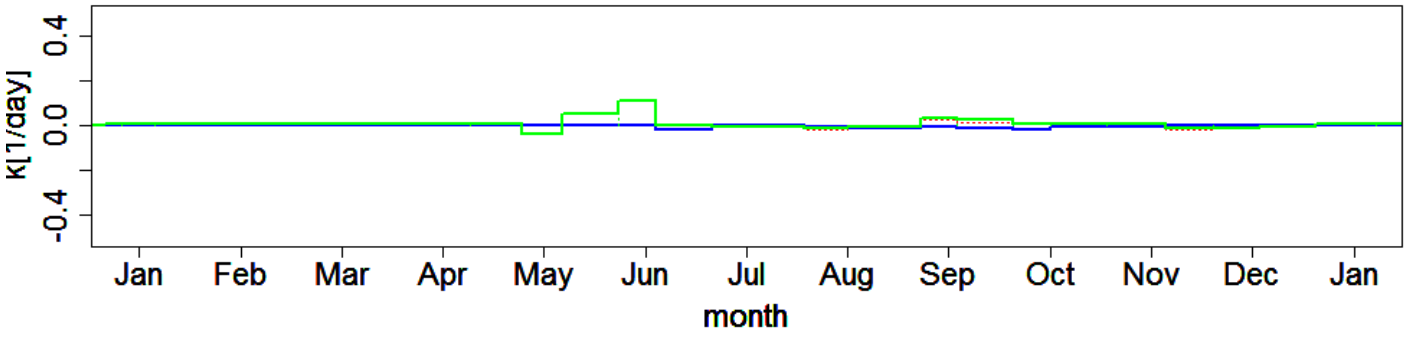
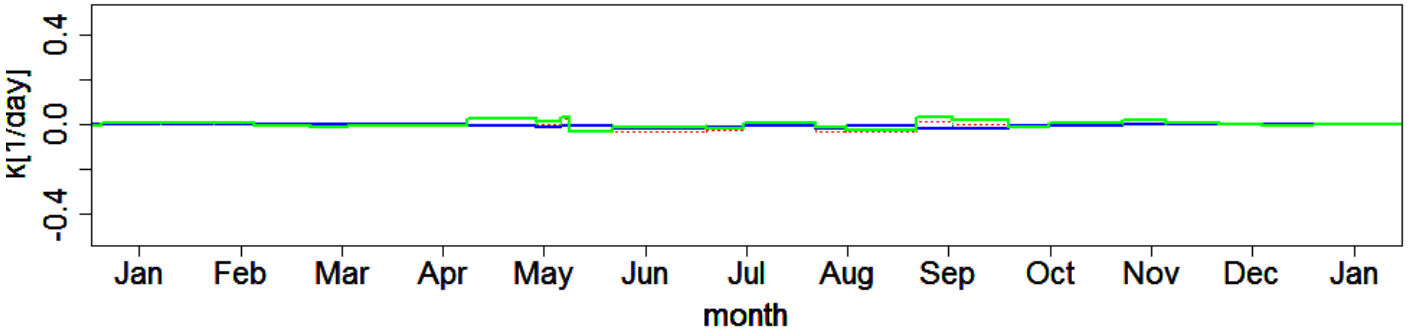


図3.6-23　推算したk(成長速度)の内訳(曝気とそれ以外)

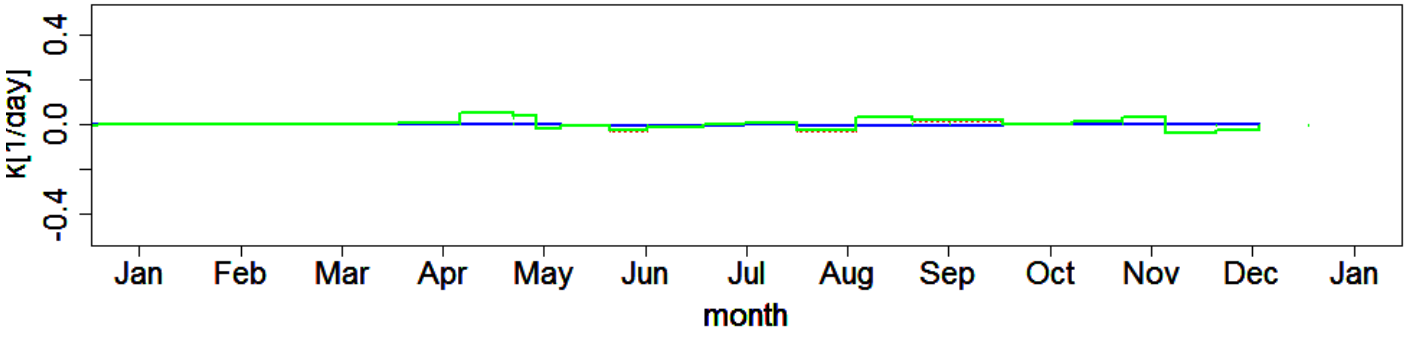
(i)2012年



(j)2013年



(k)2014年



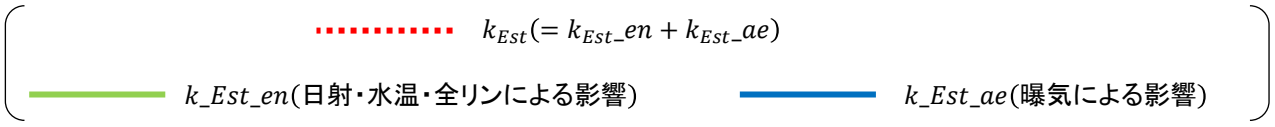


図3.6-23　推算したk(成長速度)の内訳(曝気とそれ以外)

第 4 章　曝気循環の運用方法がフォルミディウム消長に及ぼす影響

第 2 章では過去の現地観測結果よりダブルプルームモデル [1]内の物理パラメータを釜房貯水池の状況を表現できるように調整した.

第 3 章では，カビ臭の原因藻類とされるフォルミディウムの成長速度に関して，日射量・表面水温・全リン・ウェダバーン数・曝気による下降プルームによるフラックスを説明変数として重回帰分析を行い非線形の回帰式を作成した.

第 4 章(本章)では，調整済みの物理パラメータを用いたダブルプルームモデルを組み込んだ 3 次元貯水池流動モデルを用いて異なる曝気循環の稼働条件下での再現計算を行う．その結果を第 3 章で作成した回帰式に代入しフォルミディウムの成長速度がどのように変化するか評価する.

4.1　3 次元貯水池流動モデル

4.1.1 基礎方程式

本研究における 3 次元貯水池流動計算は“TITech-WARM” [2]を使用する．同モデルは水温成層や汽水湖などにおける 3 次元密度流を解析可能な非静水圧･自由水面モデルである．鉛直方向の格子解像度を自由に動的に調整可能な Soroban 格子法を高精度移流数値解析法である CIP 法と組み合わせた CIP-Soroban 法を基礎にしている.以下に TITech-WARM 内で用いる基礎方程式を示す.

X 方向の運動方程式

$$\frac{\mathrm{Du}}{\mathrm{Dt}} = -\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial x} - \frac{2}{3}\frac{\partial k}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x}\left(v_{lic_M}\frac{\partial u}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(v_{lic_M}\frac{\partial u}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(v_{eff}\frac{\partial u}{\partial z}\right) + \frac{uv}{R} + f_{cov} + \frac{\tau_x}{\rho} \tag{4.1-1}$$

Y 方向の運動方程式

$$\frac{\mathrm{Dv}}{\mathrm{Dt}} = -\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial y} - \frac{2}{3}\frac{\partial k}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x}\left(v_{lic_M}\frac{\partial v}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(v_{lic_M}\frac{\partial v}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(v_{eff}\frac{\partial v}{\partial z}\right) + \frac{v^2}{R} + f_{cov} + \frac{\tau_x}{\rho} \tag{4.1-2}$$

Z 方向の運動方程式

$$\frac{\mathrm{Dw}}{\mathrm{Dt}} = -\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial z} - \frac{2}{3}\frac{\partial k}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x}\left(v_{lic_M}\frac{\partial w}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(v_{lic_M}\frac{\partial w}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(v_{eff}\frac{\partial w}{\partial z}\right) + \frac{\tau_x}{\rho} - g \tag{4.1-3}$$

連続式

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \tag{4.1-4}$$

スカラー量の輸送方程式

$$\frac{D\phi_{sp}}{Dt} = w_{setlment}\ \frac{\partial \phi_{sp}}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{v_{lic}}{\sigma_{\phi_{sp}}}\frac{\partial \phi_{sp}}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\frac{v_{lic}}{\sigma_{\phi_{sp}}}\frac{\partial \phi_{sp}}{\partial y}\right) + + \frac{\partial}{\partial z}\left(\frac{v_{eff}}{\sigma_{\phi_{sp}}}\frac{\partial \phi_{sp}}{\partial z}\right) + S_{\phi_{sp}} \tag{4.1-5}$$

乱流エネルギーk の輸送方程式

$$\frac{\mathrm{Dk}}{\mathrm{Dt}} = \mathrm{P_k} - \ \varepsilon + G_k + \frac{\partial \phi_{sp}}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{v_{lic}}{\sigma_k}\frac{\partial k}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\frac{v_{lic}}{\sigma_k}\frac{\partial k}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(\frac{v_{eff}}{\sigma_k}\frac{\partial k}{\partial z}\right) \tag{4.1-6}$$

乱流散逸率εの輸送方程式

$$\frac{\mathrm{Dk}}{\mathrm{Dt}} = (c_1 P_k - C_2\varepsilon)\frac{\varepsilon}{k} + C_1(1 - C_3)\frac{\varepsilon}{k}G_k + \ + \frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{v_{lic}}{\sigma_\varepsilon}\frac{\partial k}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\frac{v_{lic}}{\sigma_\varepsilon}\frac{\partial k}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(\frac{v_{eff}}{\sigma_\varepsilon}\frac{\partial k}{\partial z}\right) \tag{4.1-7}$$

以上の 7 つの式(4.1-1)～式(4.1-7)が本モデルの基礎方程式である．以上の式は主流方向 x，横断方向 y，鉛直方向 z から成る計算空間(x, y, z)において定義されており，式(4.1-1)，式(4.1-2)には主流方向の曲率 1/R を用いて実空間における遠心力の効果を考慮している．各変数の定義は以下の通りである．

t ： 時刻[sec]
x ： 計算空間座標(主流方向)[m]
y ： 計算空間座標(横断方向) [m]
z ： 計算空何座標(鉛直方向) [m]
$\mathrm{u}(t,x,y,z)$ ： 流速(x 方向，主流方向) [m/s]
$\mathrm{v}(t,x,y,z)$ ： 流速(y 方向，横断方向) [m/s]
$\mathrm{w}(t,x,y,z)$ ： 流速(z 方向，鉛直方向) [m/s]
$\mathrm{p}(t,x,y,z)$ ： 圧力[Pa]
$\rho(t,x,y,z)$ ： 密度[kg/㎥]
$\mathrm{k}(t,x,y,z)$ ： 乱流エネルギー[J/kg]
$\mathrm{v_{lic}}_M(x,y)$ ： 水平方向渦粘性係数[㎡/sec]
$v_{eff}(t,x,y,z)$ ： 鉛直方向有効拡散係数[㎡/sec]
$\mathrm{R}(x)$ ： 曲率半径[m]
$\mathrm{f_{co}}$ ： コリオリパラメータ($\mathrm{f_{co}} = 2 \times 7.27 \times 10^{-5}\sin(\textit{緯度})$
g ： 重力加速度[$\mathrm{m/sec^2}$]
$\tau_\mathrm{x}(t,x,y,z), \tau_y\,(t,x,y,z), \tau_\mathrm{z}\,(t,x,y,z)$ ： 水面・川床面状・側岸面上での各方向応力
$\phi_{sp}(t,x,y,z)$ ： スカラー量
$\sigma_{\phi_{sp}}(t,x,y,z)$ ： 定数(スカラー量)

$S_{\phi_{sp}}(t,x,y,z)$　：　生成項(スカラー量)

$w_{setlment}$　：　沈降速度[m/s]

$\varepsilon(t,x,y,z)$　：　乱流エネルギー散逸率[J/kg/s]

σ_k　：　標準 k-εモデルの乱流エネルギー定数

σ_ε　：　標準 k-εモデルの散逸率定数

P_k　：　乱流エネルギー生成項[J/kg/s]

G_k　：　密度成層による乱流抑制項[J/kg/s]

$C_1,\ C_2,\ C_3$　：　標準 k-εモデル定数

スカラー量として与えられるものは水温や塩分がメインであるが，SS や DO なども同様の方法で与えられるモデルとなっている．本研究においては，水温のみをスカラー量として与えた．この時の生成項は$S_{\phi_{sp}}$日射などによる熱収支項である．

また，乱流のエネルギー方程式において生成項P_k，密度成層G_kによる乱流抑制項は以下の式(4.1-8)~式(4.1-10)で計算する．

$$P_k = v_{turb}\left\{\left(\frac{\partial u}{\partial z}\right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial z}\right)^2\right\} \qquad (4.1-8)$$

$$G_k = \frac{g}{\rho}\frac{v_{eff}}{\sigma_t}\min\left(\frac{\partial \rho}{\partial z}, 0\right) \qquad (4.1-9)$$

$$v_{lic} = 0.01 \cdot D^{\frac{4}{3}} \qquad (4.1-10)$$

4.1.2　Soroban 格子法と計算格子の配置

Soroban 格子法は矢部ら(2004)[3]によって開発されたものである．同方法はそろばんのように格子軸とその上の格子軸で構成をされる．格子軸は平行に，格子点は各格子軸上に配置される．そして，格子点は格子軸上を軸方向に，格子軸は格子平面内を自由に移動できる．格子点，格子軸の移動方向を 1 方向に限定することで格子点の移動や補間が容易に行える．また，必要に応じて格子点を自由に配置できるために，自由表面や河床面といった境界条件が必要な領域に直接，格子点を配置できるため境界条件を容易に与えることができる．更に，物理量の変化が激しく，高い空間解像度が必要な領域には格子点を集中させることができる．本研究で用いる TITech-WARM には上に述べた Soroban 格子法が採用されている．

TITech-WARM を用いた 3 次元計算においては図 4.1-1 のように河川の澪筋に沿って x 軸, x 座標を取る. y 軸は x 座標に直行するようにとり, その原点が澪筋に来るようにする．そうすることで，実空間における y 軸は澪筋と常に直交する平面になりその座標は澪筋か

らの距離に相当することになる．また z 軸は鉛直方向に取る．この x,y,z の計算空間内における計算格子は複数の格子平面上の格子軸，その格子軸上の複数の格子点から成り，格子平面を x 軸に直交する y 軸方向に複数平行に取り，そして格子平面上においては z 軸方向の平行な複数の格子軸が設定される．そして図 4.1-2 に示すように各格子点上に流速や塩分などの各種物理量を計算するための計算格子が配置される．物理量の空間変動に応じて格子点を集中させる方法は以下の式(4.1-11)に示すモニタ関数を用いて自動的に調整が行われる．

$$\mathrm{M} = \sqrt{1 + \alpha \left|\frac{\partial f}{\partial z}\right|} \qquad (4.1-11)$$

ここでαは格子の集中度合いを調整する定数である．このモニタ関数は，図 4.1-2 に示すように等面積のいくつかの区間に分割し，その境界面に新たな格子点を配置する．この結果格子点は自動的に物理量$\mathrm{f}(x,y,z)$の鉛直分布の空間分布が激しい(急峻な)理領域に集中的に配置される．

4.1.3　ダブルプルームモデルの組み込み

一般的に曝気により生成されるプルーム半径は数十メートル程度で，流動解析における空間スケールはそれよりも大きい．したがって計算格子の水平間隔より曝気のプルーム半径は小さくなる．そこで図 4.1-3 に示すように曝気によるプルームを計算の格子間に存在する鉛直小領域とみなし，ダブルプルームモデルの計算結果から鉛直方向の体積フラックスの鉛直分布を以下の式(4.1-12)のように計算する．

$$\mathrm{Q_{total}}(z) = \pi a^2 u - \pi(b^2 - a^2)v \qquad (4.1-12)$$

式(4.1-12)を z に関して微分した$\frac{\mathrm{dQ_{total}}}{dz}$はプルームの体積増加量であり，鉛直単位幅あたりの周辺水からの連行量を与える．そこで図 4.1-3 に示すように曝気を含む格子セル内では下層的な吸い込み(連行)と湧き出し(貫入)が水深ごとに生じていると仮定して計算を行うことしている．以下はその手順である．

1. 曝気を格子軸間に持つ格子セルを決定する．
2. 曝気の吐出口から水面までの等間隔格子を設定し，周辺の Soroban 格子点上の流動計算結果から密度$\rho_a(z)$を補間により求める．
3. 密度$\rho_a(z)$を入力値としてダブルプルームモデルで計算を行う．そして計算結

果から得られた$\mathrm{Q_{total}}(z)$から曝気装置の吸い込み量と湧き出し量$\frac{\mathrm{dQ_{total}}}{dz}$を算出

4. 距離を重みとして流動計算で用いる隣接計算格子上へ吸い込み量, 湧き出し量である$\frac{\mathrm{dQ_{total}}}{dz}$を分配し，連続条件式を以下の式(4.1-13)，式(4.1-14)に示すように修正して曝気による吸い込みと湧き出しの影響を考慮して流速場と圧力場の計算を行う．

$$\frac{\partial u}{\partial x}+\frac{\partial v}{\partial y}+\frac{\partial w}{\partial z}=-\frac{B}{A+B}\frac{\mathrm{dQ_{total}}}{dz} \qquad (4.1-13)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x}+\frac{\partial v}{\partial y}+\frac{\partial w}{\partial z}=-\frac{A}{A+B}\frac{\mathrm{dQ_{total}}}{dz} \qquad (4.1-13)$$

ここで式(4.1-13)は格子軸$(\mathrm{x_i}, y_{ij})$の格子点，式(4.1-14)は格子軸$(\mathrm{x_l}, y_{lm})$上の格子点における式を表している．

5. 次の計算ステップにおいて，移流などを計算後，再び 1.から計算を繰り返す．

4.2 曝気循環を通常稼動した際の再現計算

4.2.1 計算期間と計算条件

ここでは，流動計算を行う期間・条件について述べていく．

まず図 4.2-1 は釜房貯水池の(計算)地形を表している．同図より釜房貯水池の湖心部は深いところだと 20m 以上の水深を有していることが分かる．水深が深い領域は主に河川の澪筋に沿ったところがメインでそれ以外の領域の河床はなだらかな地形である．つまり湖心部にかけて釜房貯水池は急峻な地形を有している．

図 4.2-2 は釜房貯水池における貯水位と累加貯水量の関係を表している．春先など貯水位が高いときは 145~150[EL. m]まで上昇しその累加貯水量は3×10^7～$4\times10^7[m^3]$である．一方で秋口など水位が低下する期間においては，その水位は 140~143[EL. m]まで低下し，累加貯水量は 1.5×10^7～$2\times10^7[m^3]$となる．したがって貯水位が最も低下する夏～秋にかけての貯水量は，貯水位が高いときの貯水量に比べ約半分程度になる．貯水量が半分になれば稼働させるべき曝気の数を減らし効率的な曝気の運用というものが可能になるかもしれない．そこで本研究では，水位が低下している 8 月に計算期間を設定することにした．2004 年～2014 年の 8 月において，以下の条件を基に計算期間(年)を選択した．

・水位が(渇水ではなく)平年並みに低下している
・曝気 10 基全てが 1 か月中常に稼動している(再現しやすくするため)

以上の観点から 2007 年の 8 月に計算期間を設定することにした．図 4.2-3 に 2007 年の釜房貯水池における，フォルミディウム数，水理条件，気象条件，環境条件の時系列グラフを再掲する．日雨量のグラフより同年 7 月には大きな降雨があり，一度できた水温成層は 7 月に解消した．気温も 7 月は 20 度以下と平年を下回る気温だった．しかし 8 月には雨も減り天気が回復したこともあり，水温成層は再度形成された．表面水温，気温も 8 月には平年並みに回復した．

次に計算条件について述べる．図 4.2-3 は流動計算で用いた計算格子の配置を示している．その格子間隔は X 方向，Y 方向に 25[m]とし，鉛直方向は最小で 1[cm]とした．ただし水平方向の X,Y 方向に関しては実際の南北方向から共に 0.5422789[rad]傾けている．

図 4.2-4 に流動計算で用いる境界条件(3 河川，ダムサイト)，図 4.2-5 に初期条件として用いた水温の鉛直分布，図 4.2-6 に気象条件(風速，気温，雲量，湿度，日射量)を示す．

湖内の水温は 2007 年 8/1 の 0:05 に観測された鉛直水温分布(図 4.2-5)を湖内全体に一様に与え流速は 0 とした．また TITech-WARM に組み込んだダブルプルームモデル内の物理パラメータは第 2 章で調整を行った際の値($\alpha = \gamma = 0.083, \beta = 0.16, C_e$=0.25)を用いた．曝気装置は観測と同じ条件を再現するために常用，夏季循環共に計 10 基を 1 か月間フルで稼働させた．この曝気装置の稼働条件を「case0」とする．

4.2.2 計算結果と観測結果の比較

図 4.2-7 に釜房貯水池に設置されている曝気位置を示す．曝気装置は湖心部に集中的に設置されている．主に澪筋に沿った水深の深い位置にある．No.1~4 は常用曝気装置で空気吐出量は 3700[L/min]である．一方 No.5~10 は夏季強循環の曝気装置である．No.6 だけ空気吐出量が 3600[L/min]で常用曝気に唯一近く，それ以外の 5 基は 870[L/min]である．

図 4.2-8 は case0 での計算結果で，曝気装置それぞれの貫入水深，貫入流量を示している(貫入水深については常用と夏季強循環とで分けた)．(a)より貫入流量は常用，夏季強循環共にほぼ安定している様子が確認された．常用，および No.6 の貫入流量はおおよそ 30～40[㎥/s]を，No.6 以外の夏季強循環は 15～20[㎥/s]の中で変動している．月の前半は日中の気温が高く水表面と下層の水温差が大きい．しかし夜になると気温が下がり水表面と下層の水温差は小さくなる．その水温差の変動が大きいために貫入流量も合わせて小刻みな変動をしていると考えられる．逆に月の後半は気温が下がり表面と下層での水温差の変動も小さくなったので貫入流量も安定している．同様に貫入水深も月の前半では変動が大きいことが読み取れる．全体的に貫入水深は空気吐出量の少ない夏季強循環の曝気装置の方が深い．これは空気吐出量が少ないために表層における引き込み(密度の小さい水塊)が少なく負の浮力がより働くためと考えられる．

図 4.2-9 はダムサイトにおける水温の鉛直分布を観測，case0(計算結果)について比較したものである．1 日～10 日頃にかけては case0 に比べて観測の方が表面水温がやや高い．一

方で月の中旬～下旬にかけては概ね良好に再現できている．水温成層があると予測できる水深はどちらも 125[EL. m]あたりとほぼ一致している．図 4.2-10 はダムサイトにおける表面水温を観測と case0 において比較したものである．月の前半においては日中における表面水温の再現性は高いと言えるが，夜間の表面水温は 1 度前後差が出てしまう結果となった．月の後半においては日中，夜間共に，うまく再現できている．

4.3　曝気循環を仮想条件下で稼働した際の再現計算

4.3.1 計算条件

Case0(実際と同じ曝気稼動条件)では，曝気装置 10 基すべてを稼働させて数値流動計算を行った．次は，境界条件，初期条件(流速＝0，水温鉛直分布)は case0 と変えずに，曝気装置の稼働条件のみを変化させて 2 パターン(case1,case2) の流動計算を行った．Case1 は曝気装置 10 基全てを 1 か月間停止させるケース，case2 は 10 基ある曝気装置のうち，常用の曝気装置 4 基のみを 1 か月間稼働させるケースである．

4.3.2　計算結果・比較

図 4.3-1 は case0 と case2 の流動計算結果における貫入流量の比較をしたものである．Case0 は全曝気を稼働，case2 は常用曝気のみを稼働と，曝気の稼働条件は異なるが，両者とも常用曝気の貫入流量は非常によく似た変動をしている．したがって，全曝気装置において合算した合計の貫入流量こそ差はあるものの 1 台ごとに見た時の貫入流量は曝気の稼働条件にあまり左右されないということが考えられる．また，貫入水深について(図 4.3-2)もどちらかが非常に高い，低いといったような状況は見受けられない．貫入水深・流量は曝気の吐出量，吐出水深，周囲の水温鉛直分布の状況に主に左右される．今，case0，case2 の常用曝気において空気吐出量，吐出水深は変えてないので両者の水温鉛直分布の変化が似ていると考えることができる．

図 4.3-3 は case0，case1，case2 でのダムサイトにおける水温鉛直分布の比較である．Case0 と case2 は曝気稼動台数が 10 基，4 基と異なるが全体的な水温鉛直分布の変化は似ているように見える．月の前半に着目すると case2 に比べて case0 の方が早い段階で水温鉛直分布が一様になろうとしている様子が見られる．case0 に比べて case2 は多少時間がかかるものの，20 日を過ぎたあたりからの水温鉛直分布は case0 に非常に近いものになっている．一方 case1 は曝気を全停止している状況で，月の始めに形成された水深 5m 前後の水温成層が 1 か月を通して残っている．また曝気を稼働させている case0，case2 と比較して水面での水温が非常に上昇している．曝気装置は底層から水温の低い水塊を連行して上昇させる．その効果が全くない case1 においては表面水温が下がらなかったと考えられる．

図 4.3-4 はダムサイトにおける水温鉛直分布を 5 日おきに(それぞれ 14:00)抜き出したものである．case0 と case2 に関しては水深 10[m]あたりまでは非常によく似た水温鉛直分布を示している．水深が深いところではやや差はあるものの 1℃前後である．一方赤線で示した case1 は水深 5[m]前後に強い水温成層が残り続けている様子が先のコンター図と同様に確認できる．

図 4.3-5 はダムサイトにおける観測，case0，case1，case2 における表面水温の推移を示している．同表より case0，case2 に比べて case1 は 2[℃]程度高い水温で推移していることが読み取れる，20 日を過ぎたあたりからは天候が崩れてきたことも影響してか case0，case2 に近い値で推移している．以上より曝気装置の稼働によって水温成層の解消，表面水温の低下が期待されることが確認された．

図 4.3-6~図 4.3-8 は 8/5，8/15，8/25 の 14：00 における水平流動図を 3 ケースごとに示したものである．赤い領域は右向き流速，青い領域は左向き流速を表している．また緑の実線は上から本川筋，前川筋を，黄色いプロットは曝気装置の位置を表している．その結果としてそれぞれの時間に対して水深 3[m], 7[m], 11[m], 15[m]での流速の様子を描いた．Case0，case2 において見てみると水深 3[m]及び水深 7[m]においては，曝気装置から放射方向への流速を確認できる．これは曝気装置によるプルームが貫入している様子を捉えていると考えることができる．また case0 に対して曝気装置の稼働台数が 6 基少ない case2 であるが，どの時間・層においても case0 と非常によく似た水平流動が発生していることが確認できる．一方 case1 は各層においてコンターの色が一色であることが非常に多く，水平方向に関していえば case0，case2 と違い一様な流れが発生していると言える．主な発生理由としては風の影響が考えられる．また case0，case2 は水深が深い 11m，15m においても流動が確認できるが，case1 ではコンターの白い領域が広くほぼ流れが発生していない様子が確認できる．上層においては風の影響などで流動があるが曝気装置の稼働がないことで湖心の深い部分では流動が発生しないと考えることができ，逆に曝気装置を稼働させることで貫入する水深だけでなく，それより深い水深においても流動を引き起こすことができると考えることができる．

図 4.3-9 は本川筋，前川筋における 3 ケースごとの流速・水温の鉛直分布を示している．左側が上流,右側がダムサイトを示している(本川筋, 前川筋は図 4.3-6 を参照). case0, case2 においては水深 5[m]前後で 4m ほどの厚さの上流に向かう帯状の流速を確認でき，これは曝気装置によるプルームが貫入していると考えられる．また河川からの低水温の流入が曝気装置の引き起こす湖内全体の循環流により湖心の方まで到達している様子も見受けられる．また case2 においては前川筋上の夏季循環の曝気装置は稼動していないが，case0 における前川筋の流速分布，水温分布と似たような傾向を示した．したがって，曝気装置の稼働が少ない case2 ではあるが常用の 4 基の稼働で 10 基稼働させた case0 に非常に近い流動を引き起こしていることが考えられる．一方 case1 はおそらく風の影響によって表面には流動が発生しているが，湖心の深い領域ではほぼ流動が発生していない．したがって曝気

装置の稼働によって表層のみならず湖心の深い部分まで，循環を発生させることができ，これによって水温成層の解消も促進させられると考えられる．

4.4　各条件下でのフォルミディウムの成長速度推算と影響評価

最後に，今回流動計算を行った 3 ケースにおいて，第 3 章で作成した回帰式にそれぞれの状況を代入し，フォルミディウムの成長速度を計算・比較した．3 ケースとも日射量，栄養塩に関しては同じデータを用い，曝気の稼働状況により変化した表面水温・水深 5m における下向き流量(Q_{5m})を変化せて k(フォルミディウムの成長速度)を算出した．

2007 年 8 月におけるフォルミディウムの観測は 8/1，8/13，8/16，8/21，8/28 の 5 回行われ，その間のそれぞれの期間を term1，term2，term3，term4 とした．同 4 期間に対して 3 ケースごとの表面水温の平均，Q_{5m}の平均を表したのが図 4.4-1，図 4.4-2 である．Case0，case2 は 4 期間ともほぼ表面水温に差はない．しかし case1 は term1~term3 にかけて 2 度程度の差を確認できる．term4 においては csae1 だけが 0.5℃程度高い．Q_{5m}だが，case1 は曝気装置を稼働させていないので 0，case0 におけるQ_{5m}は case2 の約 2 倍で 80～100[㎥/s]を推移している．

図 4.4-3 は term1~4 において第 3 章で作成した回帰式を用いて 3 ケースごとに成長速度を算出した結果である．同図より case0，case2 においては算出された成長速度に大きな変化はなかった．一方 case1 は case0，case2 と比べて全体的に成長速度が上昇する結果となった．Term2 において，期間は長くないが曝気装置を全停止させることで成長速度は大幅に上昇し 0.1 程度となった．これは 3 日間においてフォルミディウムの量が約 2 倍に増える値であり，より危険性が増していると言える．また term3，4 においても成長速度が上昇しており，曝気装置を稼働させないことでフォルミディウムの成長を促してしまうという結果が得られた．また第 3 章で考察したように本研究で作られた回帰式はフォルミディウムの成長を低く見積もる傾向が出ていたため，case1 で成長速度の明らかな上昇が確認された term2～4 においてはフォルミディウム発生の危険性が推算した値よりも高くなる可能性があり，本来はより危険な状態と言える．

図 4.4-4 は推算された k(成長速度)のうち，曝気装置の稼働による低減分とそれ以外(日射，水温，栄養塩)による分で分けた内訳を 3 ケースごと 4 期間において示したものである．今回，成長速度を算出する際，3 ケースにおいては表面水温と，Q_{5m}の値しか変えていないので，推算された k(成長速度)のうち曝気以外の影響というのは水温の変化のみに起因する．上述したように case0 と case2 では曝気装置の稼働に起因するQ_{5m}は約 2 倍の開きがあった．しかし算出された成長速度には大きな差はなかった．同図を見ると推算された k(成長速度)のうち曝気以外の環境因子(日射，水温，栄養塩)による分の値の変化も少ないことが確認できる．また term2 における成長速度が case0(2)から case1 に対してマイナスからプラスに転じた原因は 主に水温の上昇であったことが同図より読み取れる．したがって以上よりフ

ォルミディウムの成長・減少において曝気装置の直接的な物理的影響は同装置が間接的に変化させた水温の変化によるものより非常に小さいことが確認できた.

〈参考文献〉

1) Asaeda, T. and Imberger, J.: Structure of bubble plumes in linearly stratified environments J.Fluid Mech., Vol.249, pp.35-57, 1993.
2) 中村恭志, 戸田真仁, 渡部一人, 石川忠晴:3 次元貯水池流動モデル“TITech-WARM”の開発と釜房貯水池への適用，水工学論文集，第 57 巻，pp.I_755-I_780,2013
3) T,Yabe, H.Mizoe, K.Takizawa, H.Moriki, H.N. Im, Y.Ogata. Higher-Order Schemes with CIP Method and Adaptive Soroban Grid towards Mesh-Free Shene , J. Comput.Pyhs.. Vol. 194,pp57-77,2004

第4章　図表集

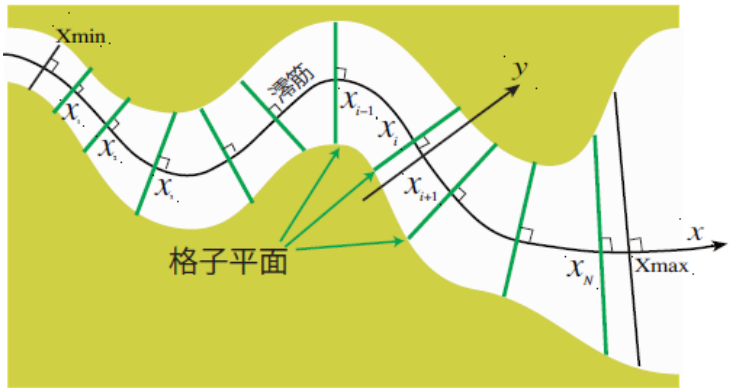


図4.1-1　TITech-WARMにおけるx軸、y軸の設定方法(模式図)
(TITechーWARM　User　Manual　より引用)

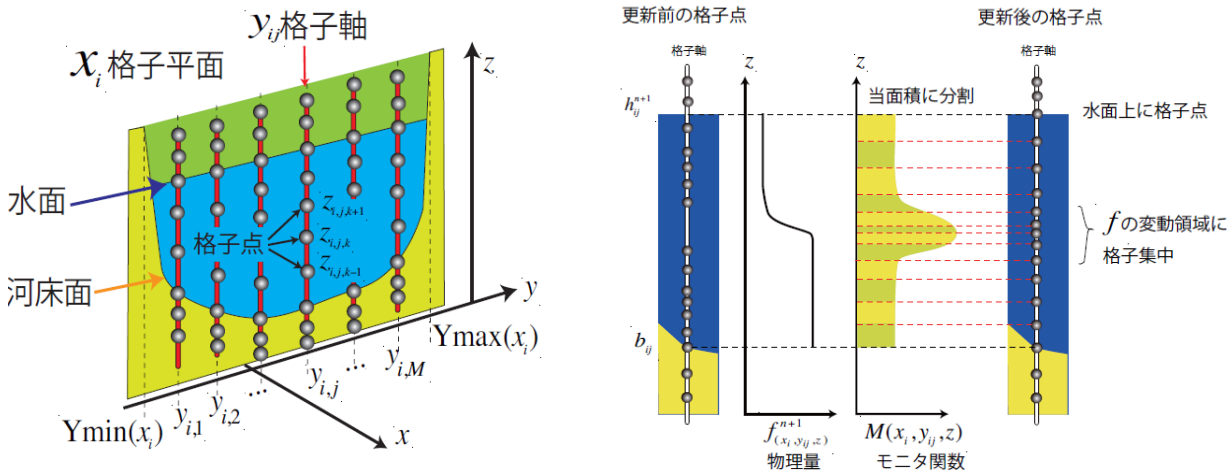


図4.1-2　TITech-WARMにおけるSoroban格子の配置とその方法
(TITechーWARM　User　Manual　より引用)

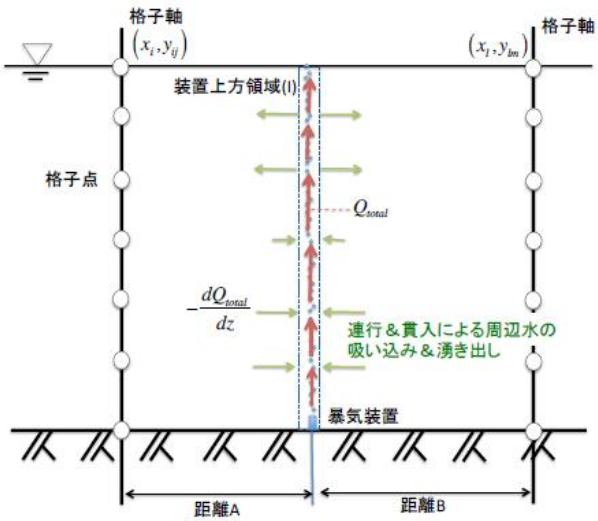


図4.1-3　TITech-WARMにおける曝気プルームの組み込み
(TITechーWARM　User　Manual　より引用)

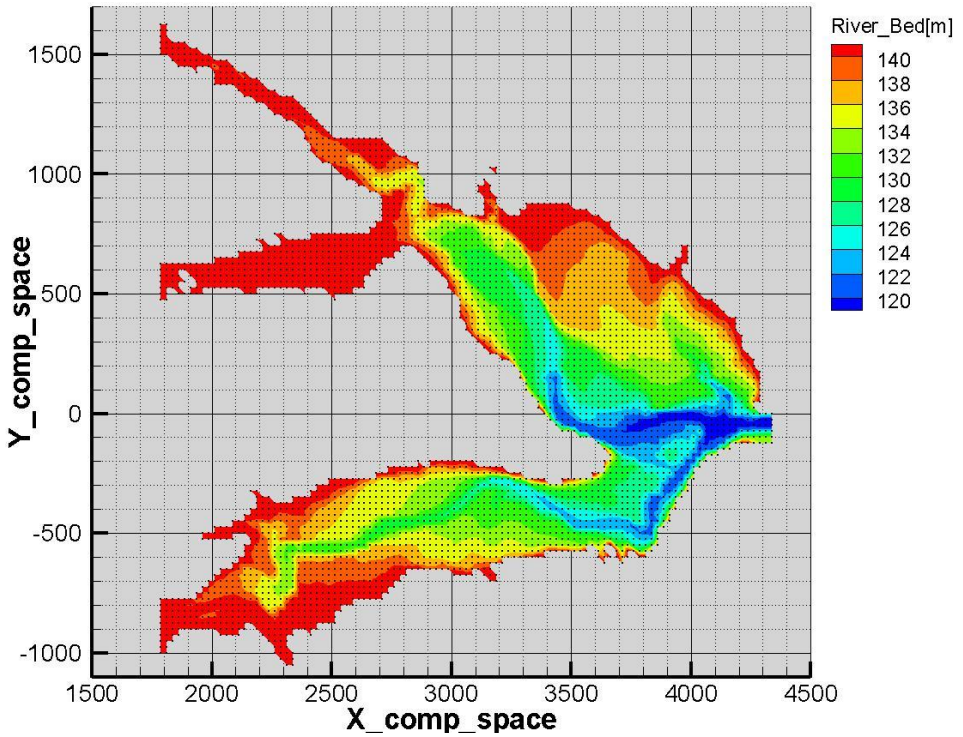


図4.2-1　計算地形

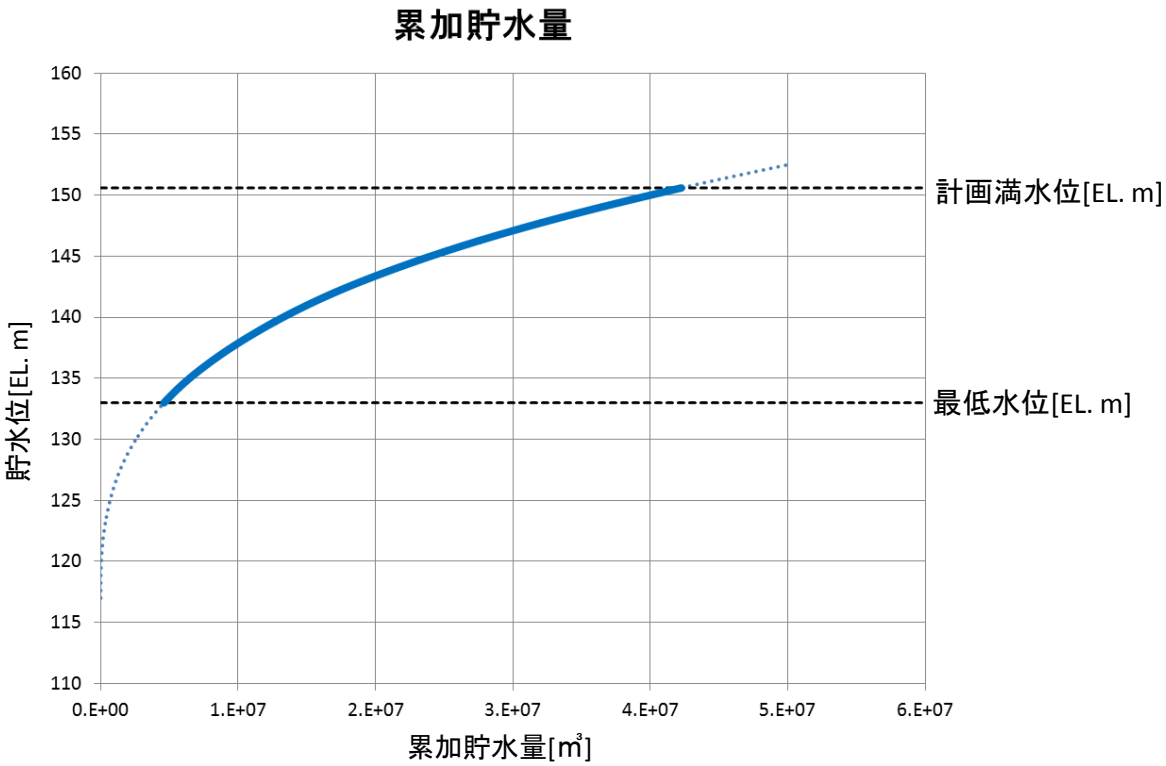


図4.2-2　貯水位と累加貯水量の関係

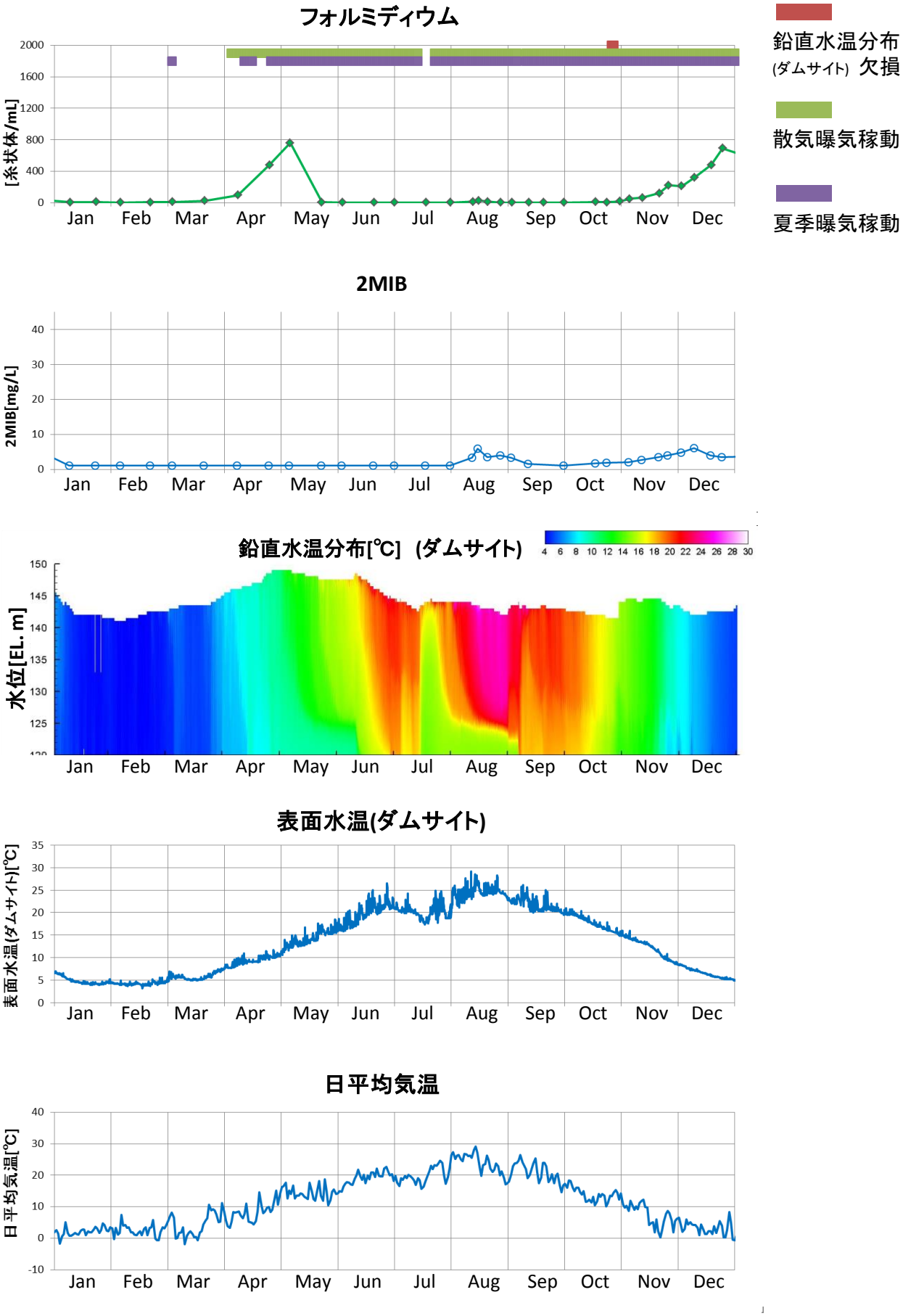


図4.2-3 釜房貯水池における フォルミディウム・2MIB・鉛直水温分布・表面水温・日平均気温 (2007年)

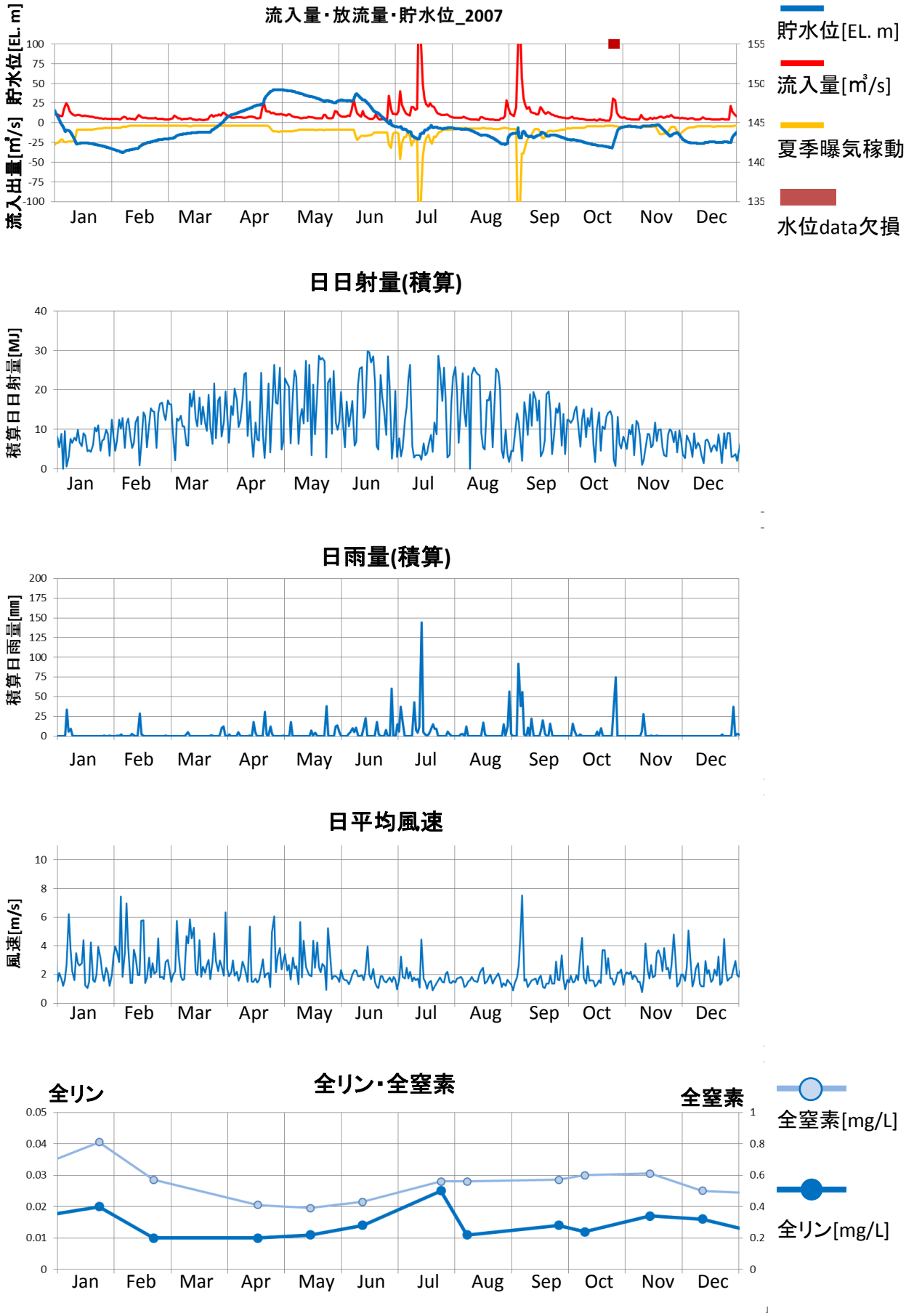


図4.2-3 釜房貯水池における 流入出量・貯水位・日日射量・日雨量・日平均風速・全リン・全窒素 (2007年)

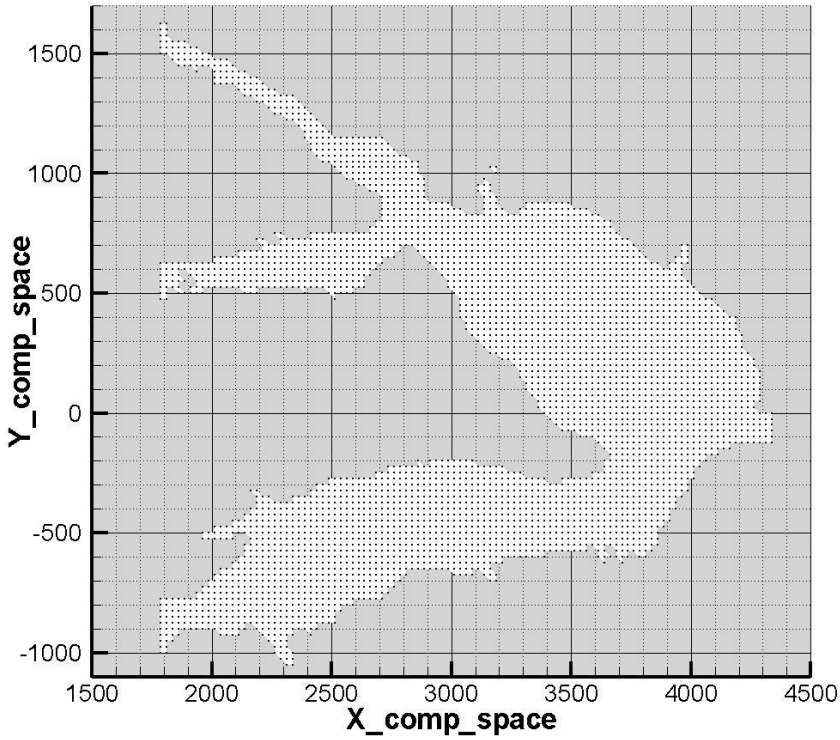


図4.2-3　計算格子の配置

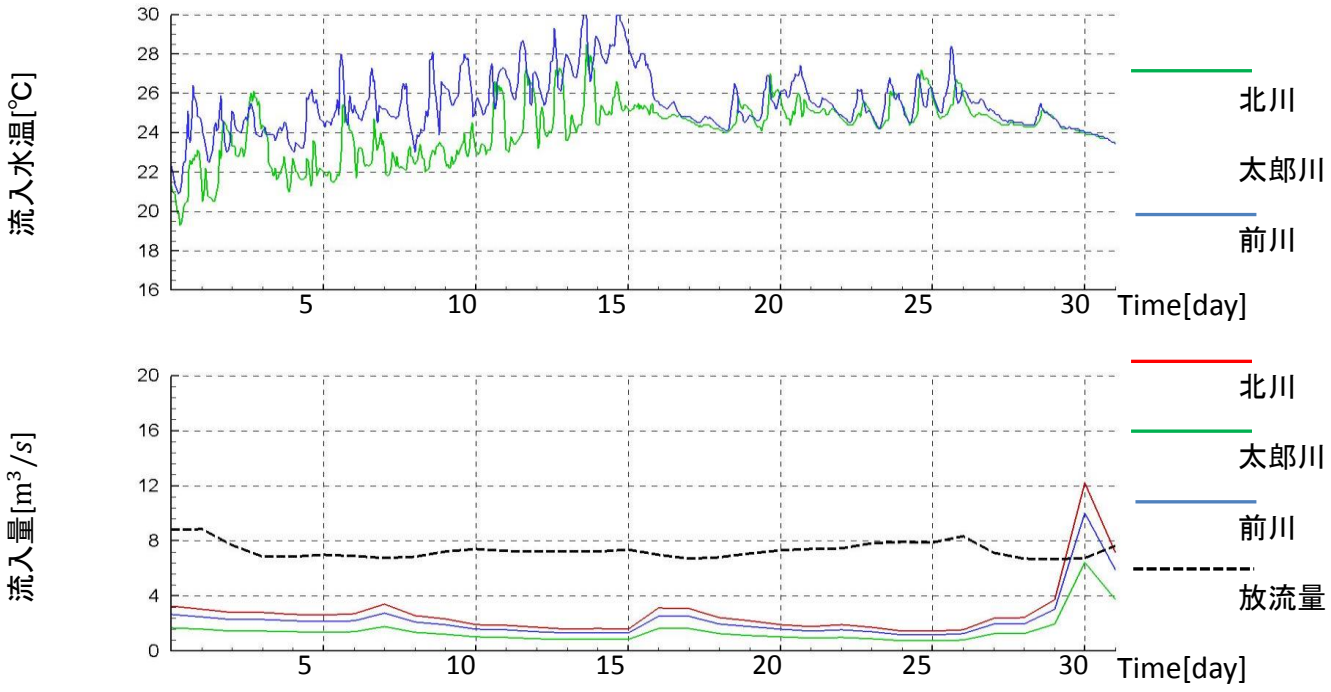


図4.2-4　境界条件　(3河川、ダムゲート)

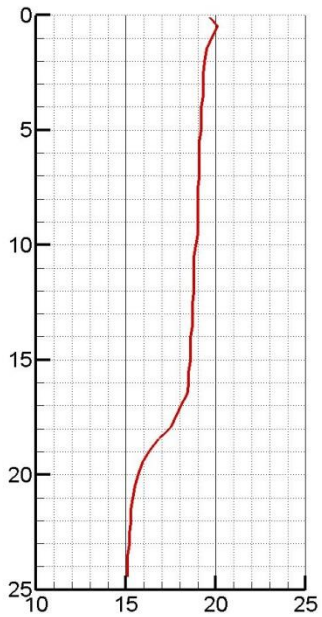


図4.2-5 初期条件　(水温鉛直分布)

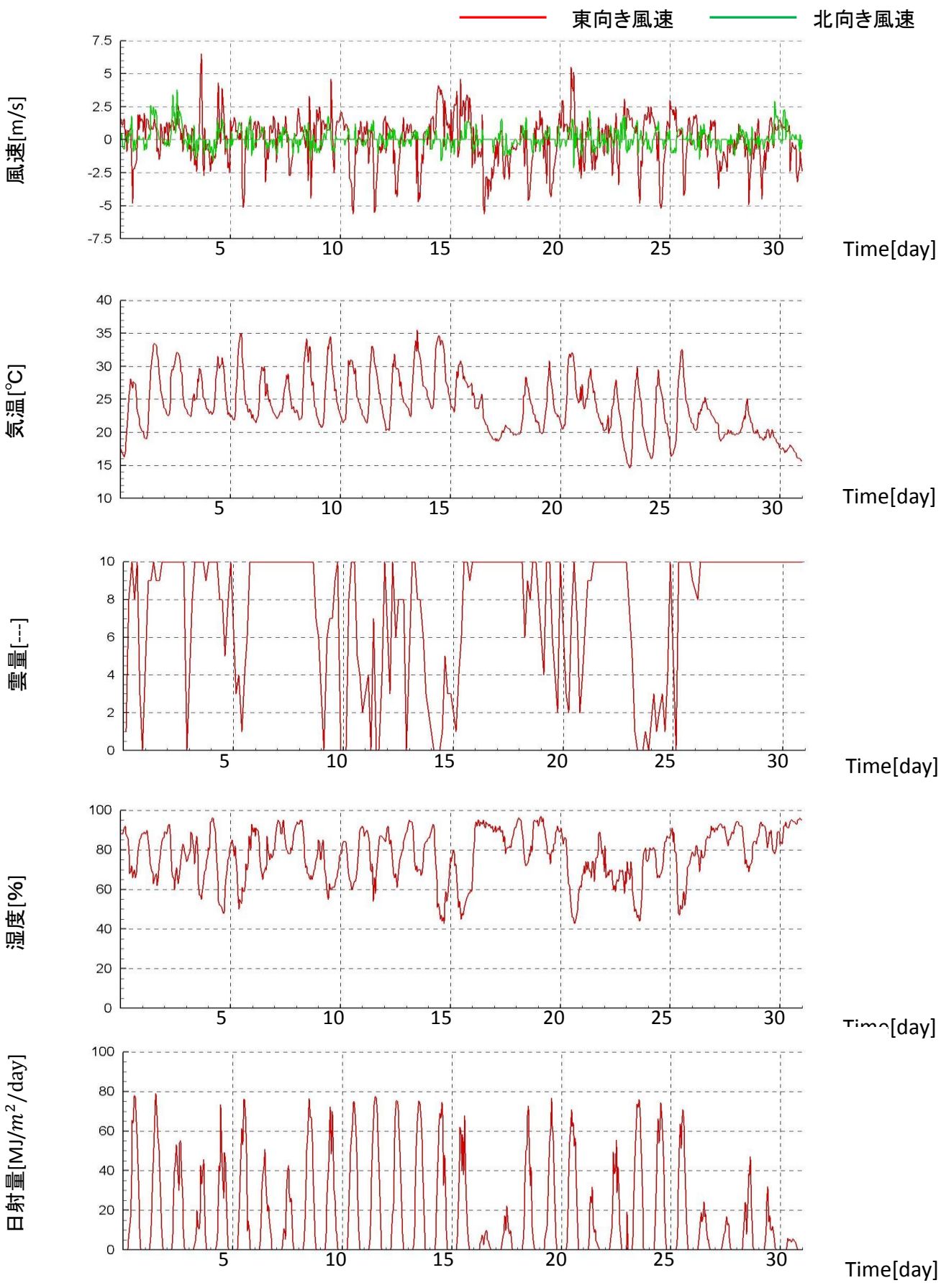
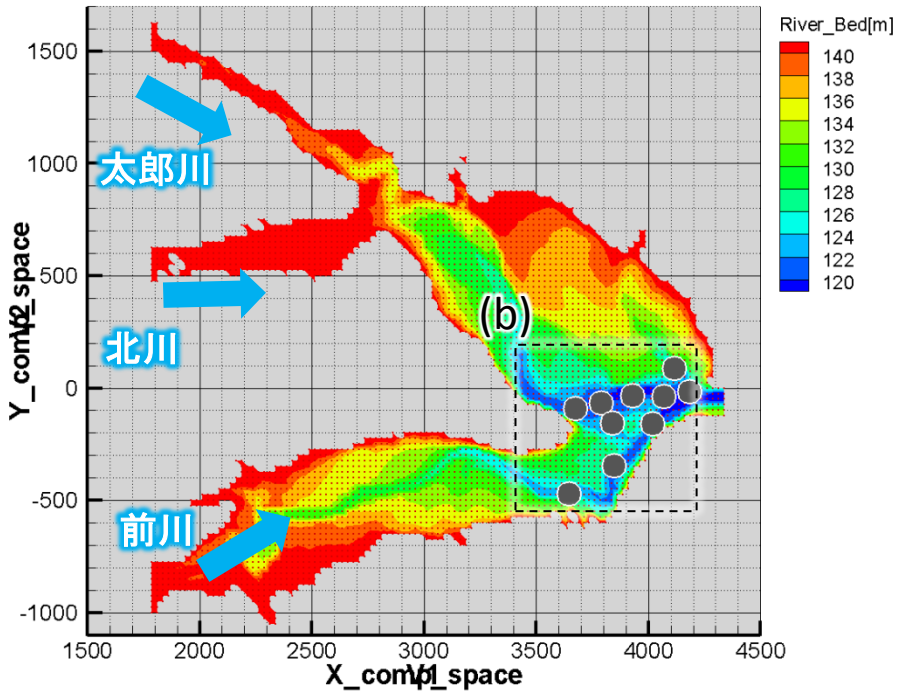


図4.2-6　流動計算における気象条件

(a)



(b)

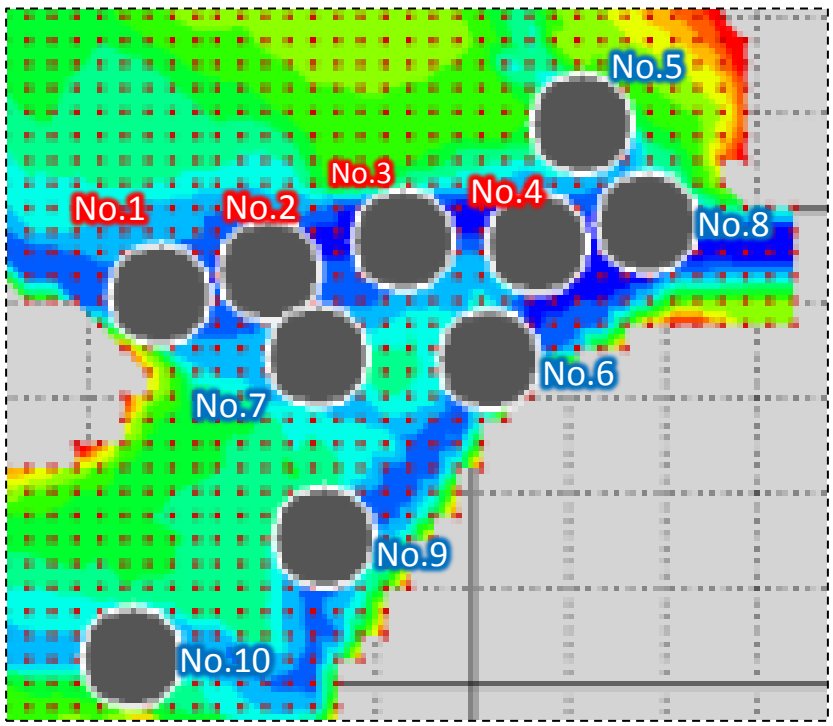
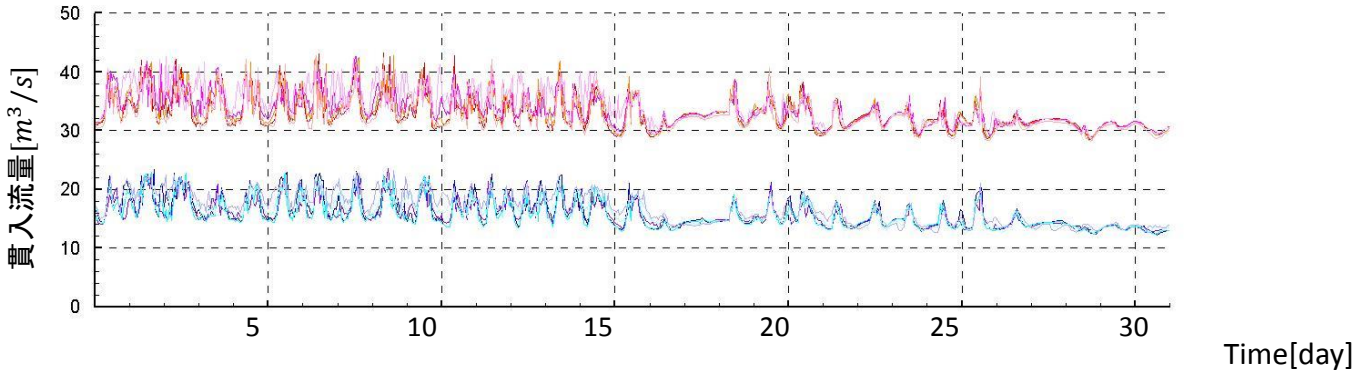
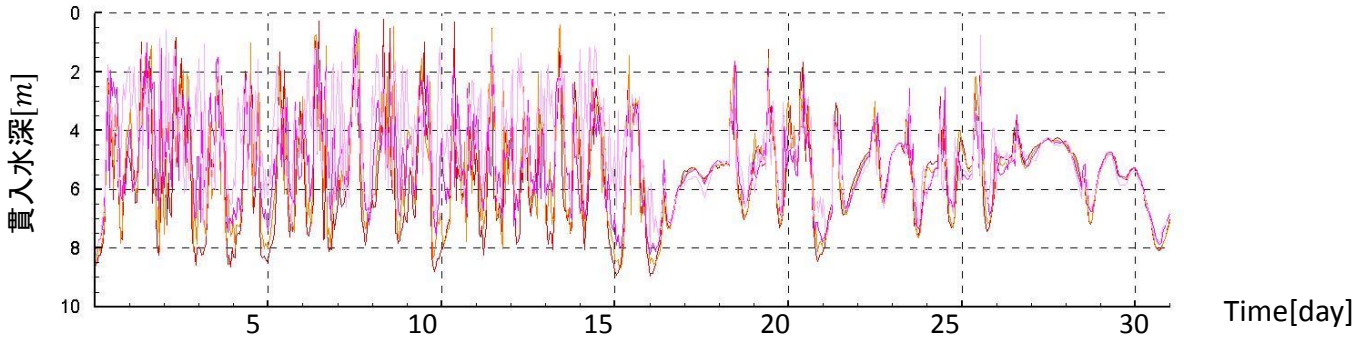


図4.2-7　釜房貯水池における曝気位置　(a)全体　(b)湖心域拡大

(a) 貫入流量



(b-1) 貫入水深(常用曝気4台)



(b-2) 貫入水深(夏季強曝気6 台)

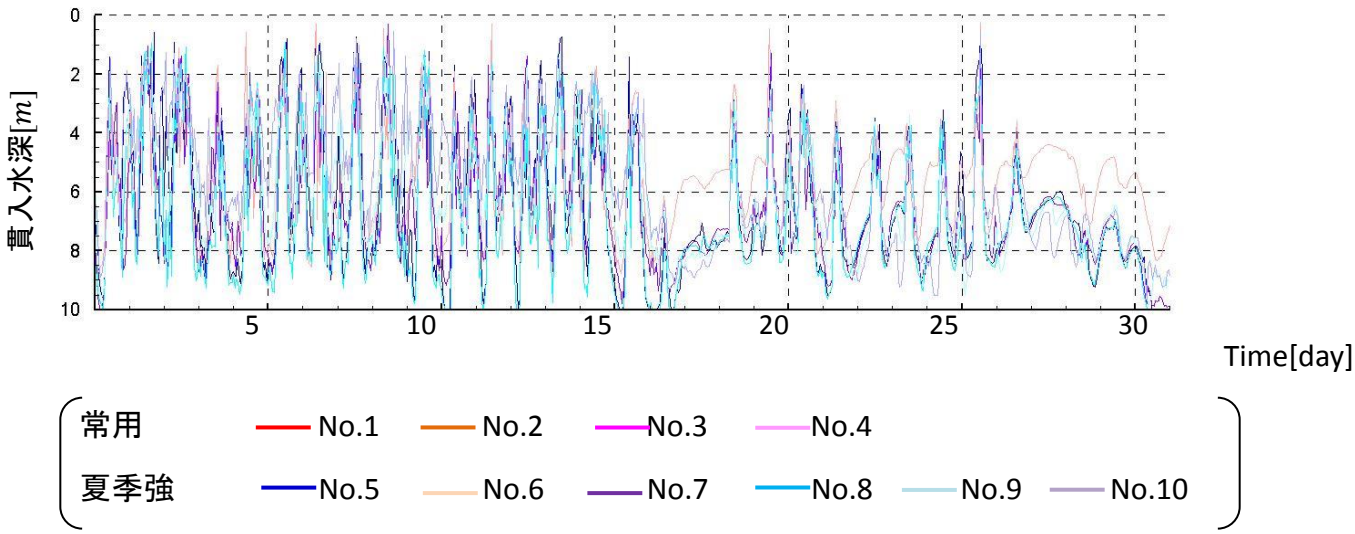


図4.2-8 貫入水深・貫入流量の計算結果

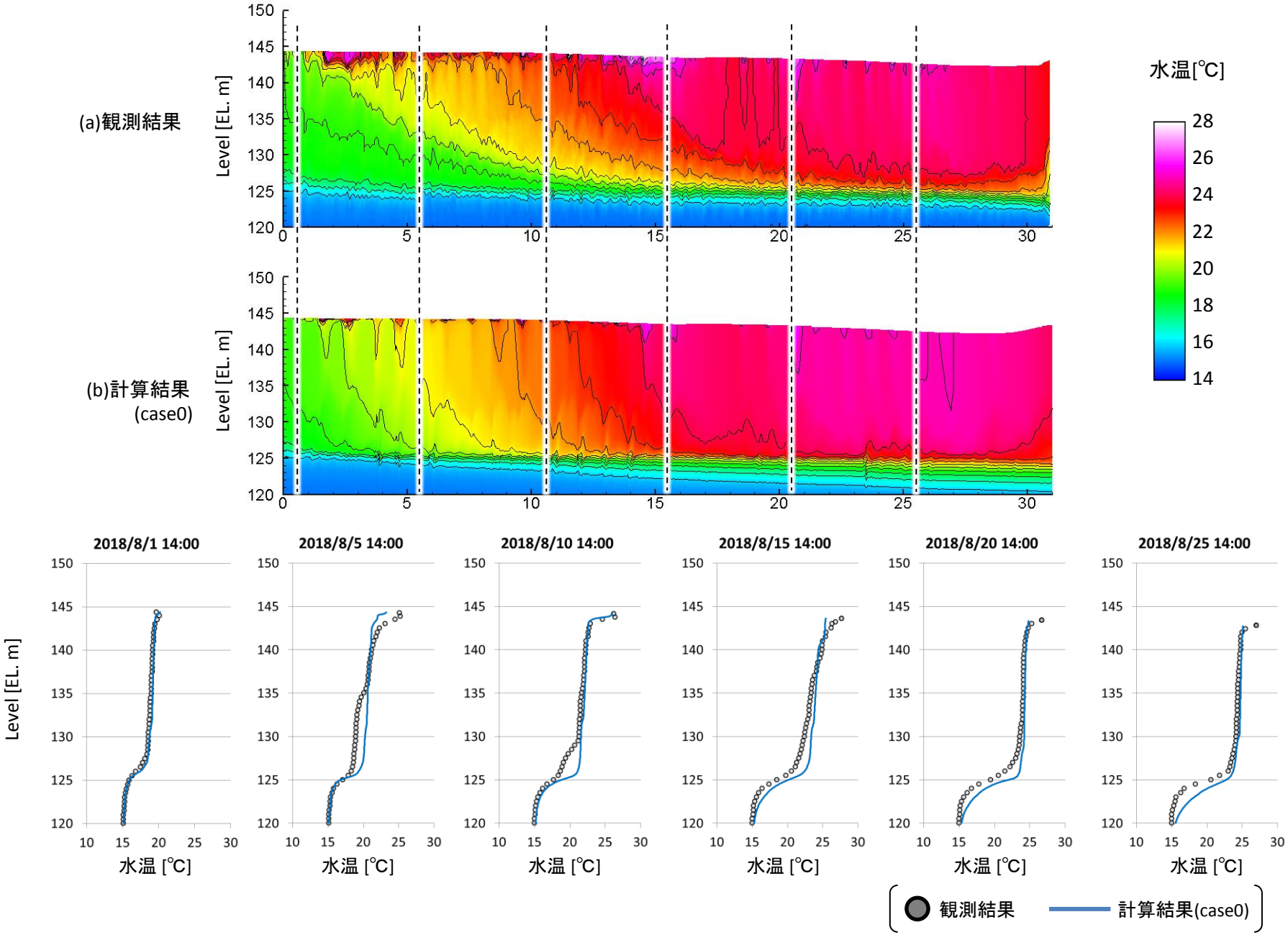


図4.2-9　ダムサイトにおける水温鉛直分布の比較

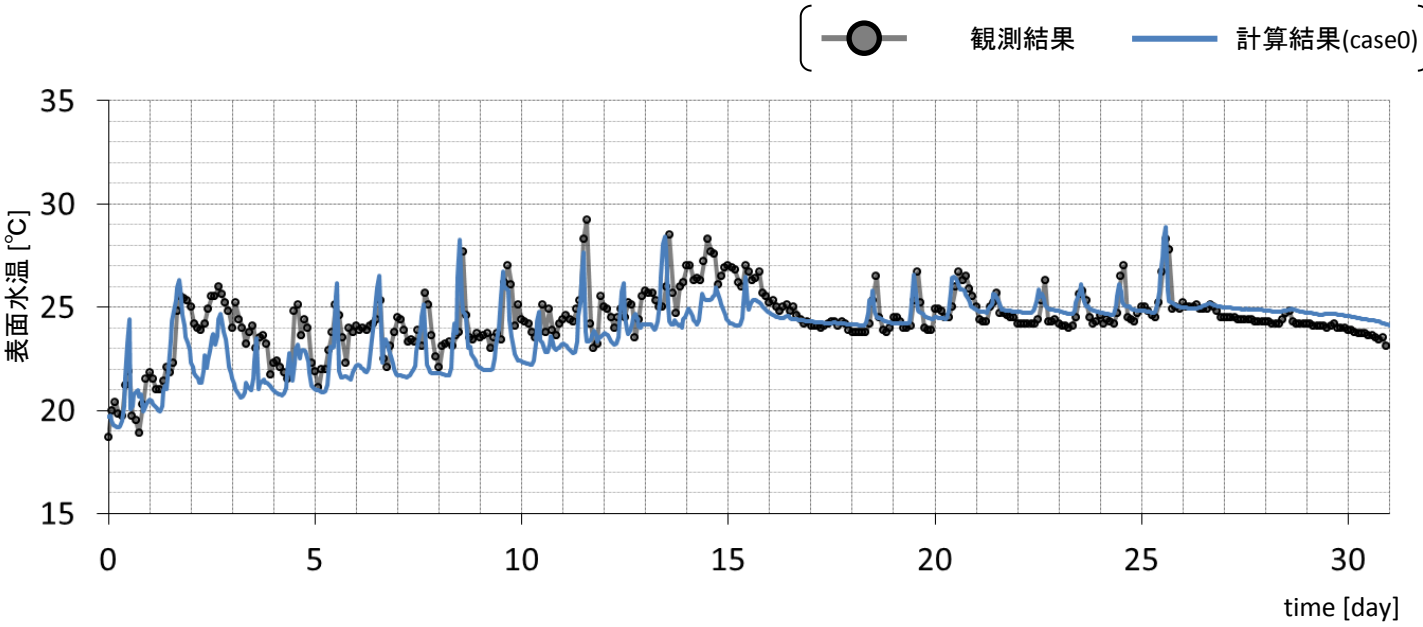
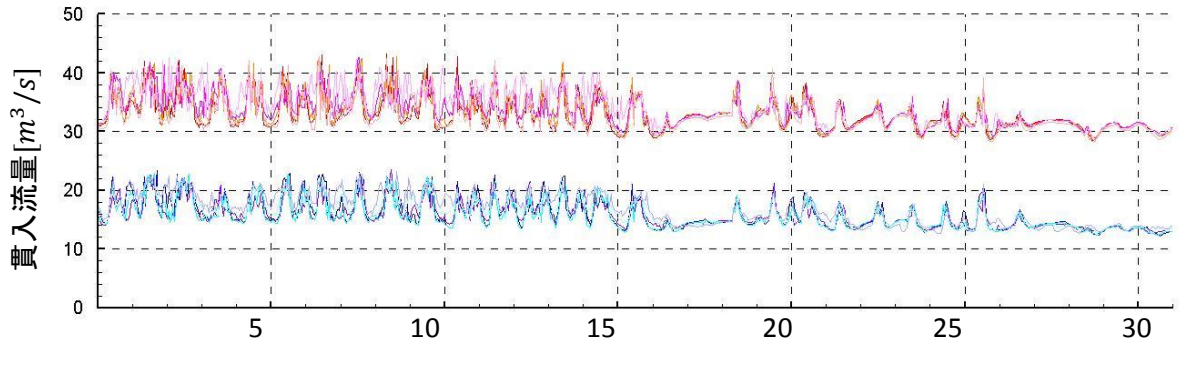


図4.2-10　ダムサイトにおける表面水温の比較

(a)　case0　　(全曝気稼動)



(b)　case2 (常用4基のみ稼動)

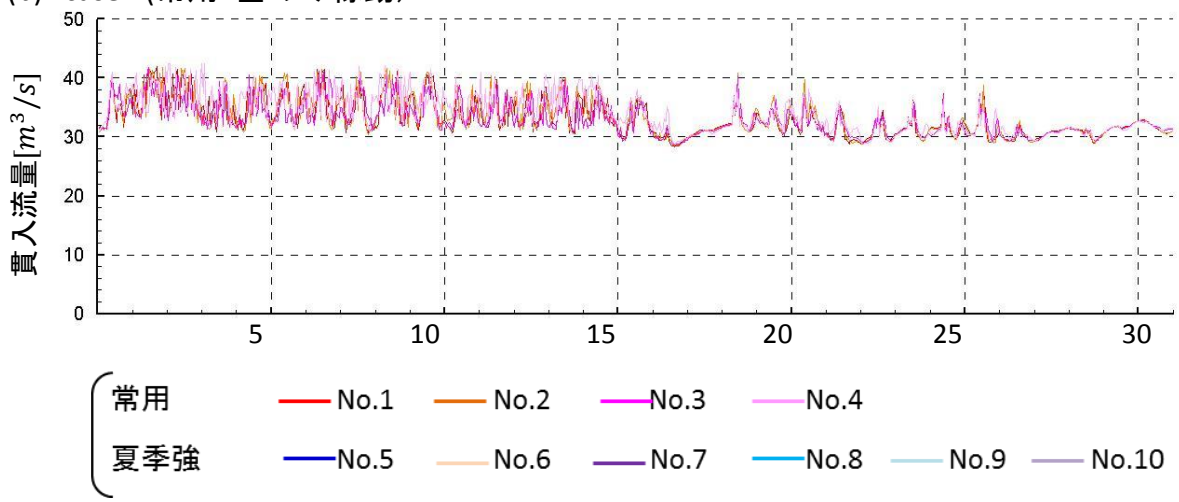
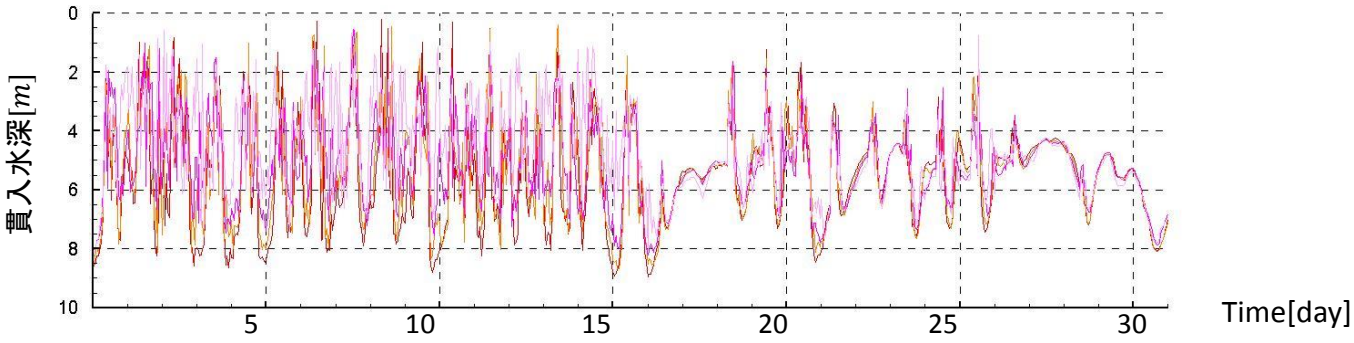
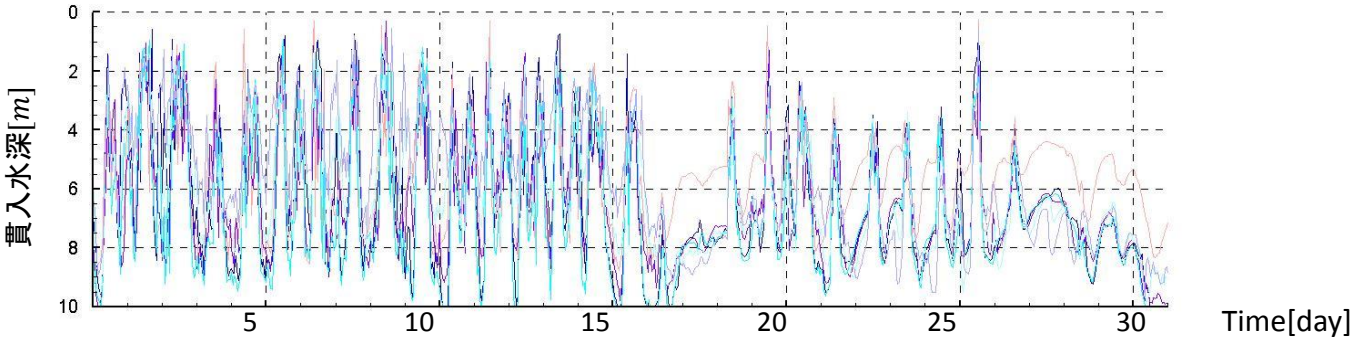


図4.3-1　貫入流量の計算結果比較(case0 & case2)

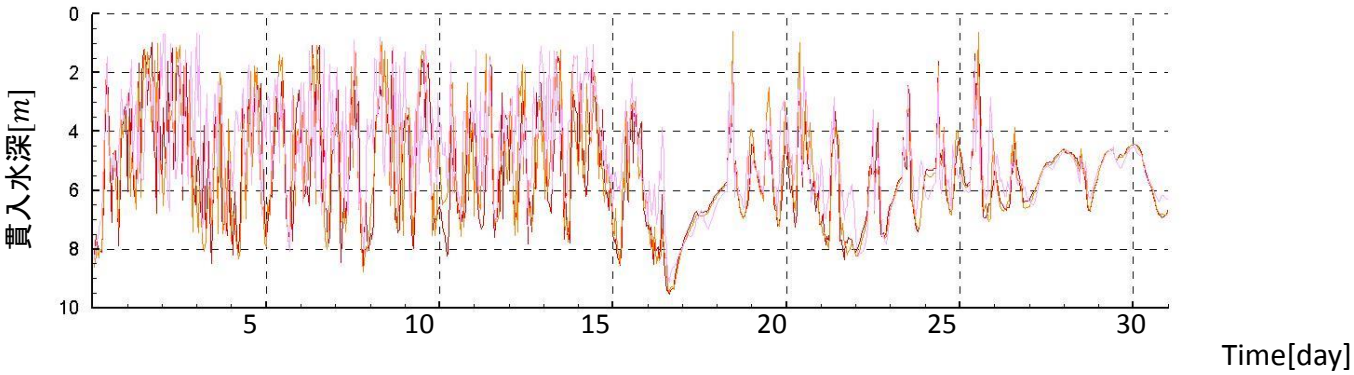
(a-1) case0 (常用曝気4台)



(a-2) case0(夏季強曝気6台)



(b) case2(常用曝気4台)



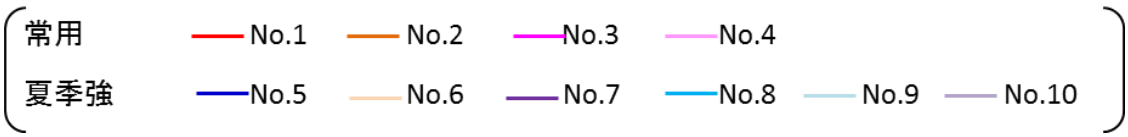


図4.3-2 貫入水深の計算結果比較(case0 & case2)

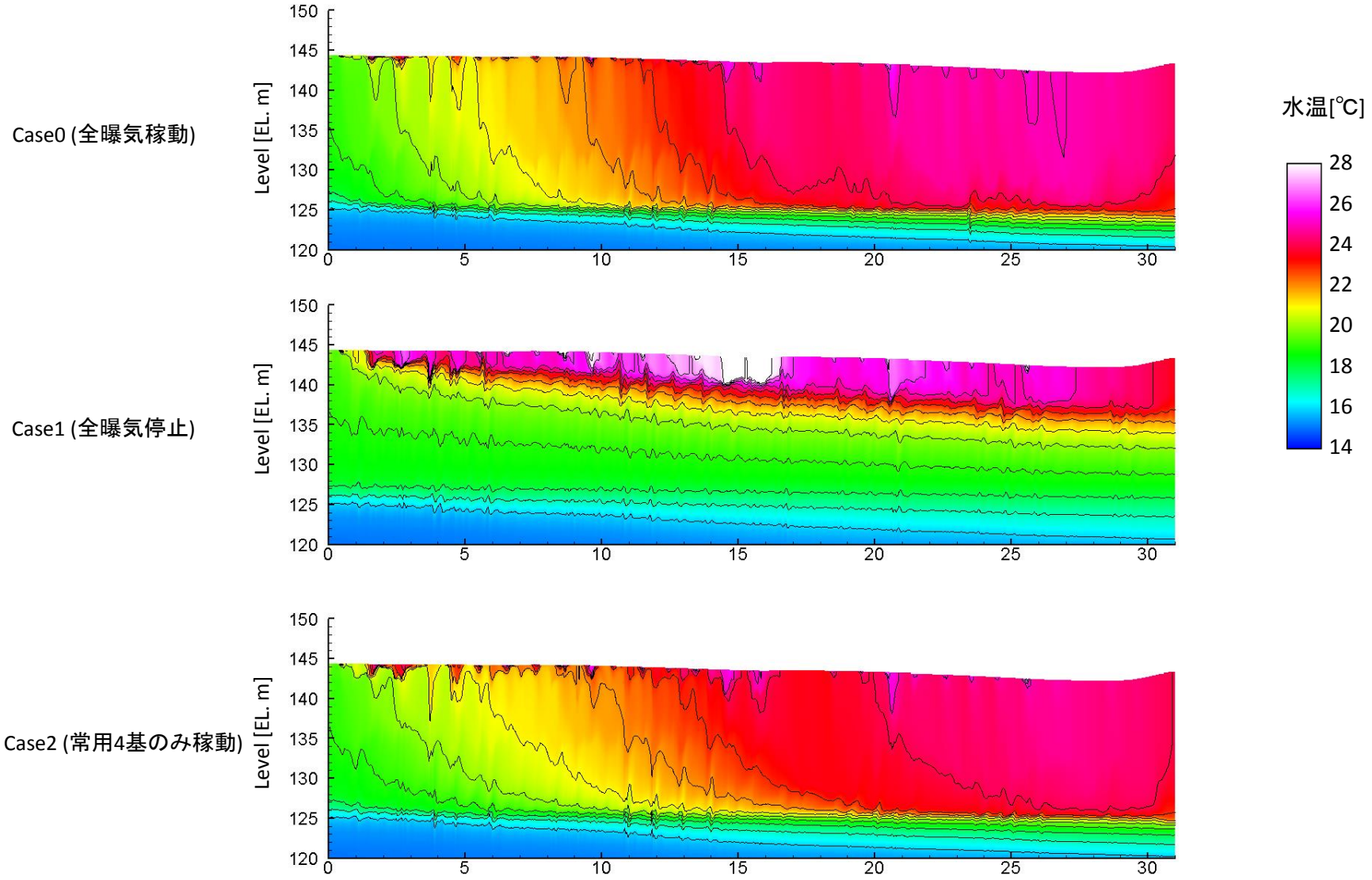


図4.3-3　ダムサイトにおける水温鉛直分布の比較(case0,case1,case2)

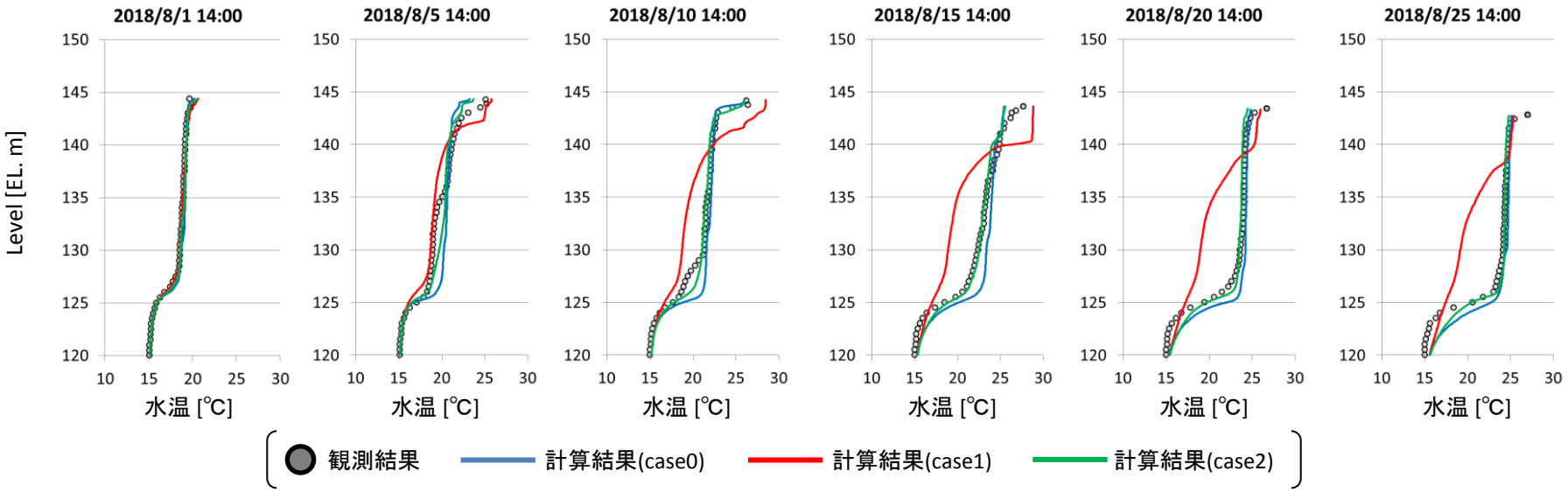


図4.3-4　5日おきの水温鉛直分布の比較(観測、case0,case1,case2)

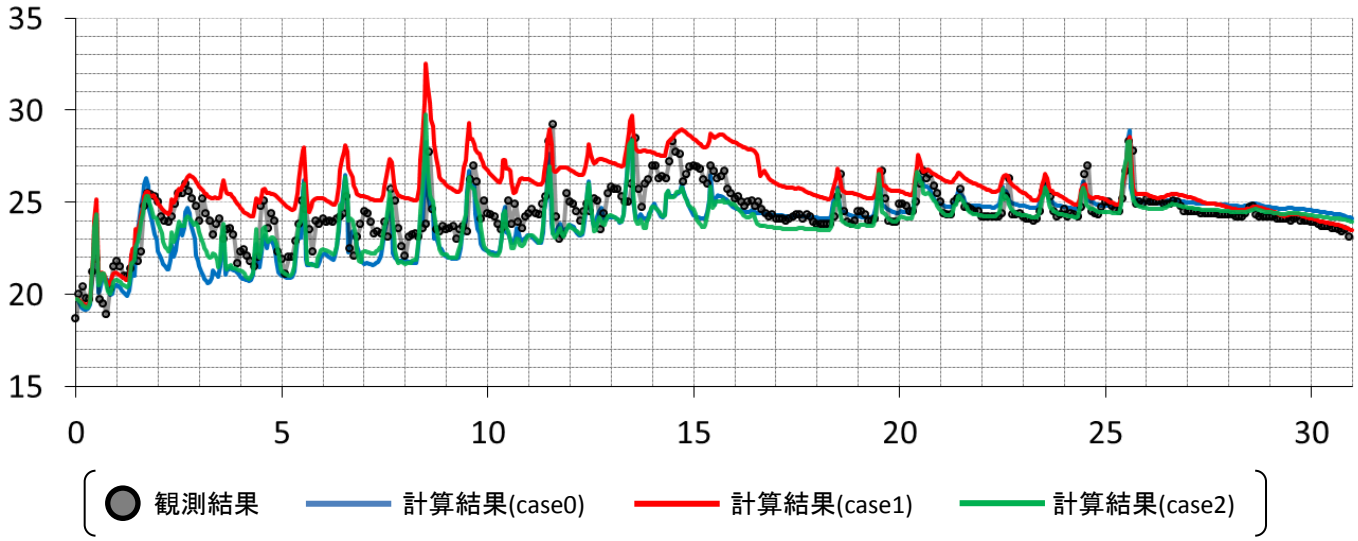


図4.3-5　表面水温の比較(観測、case0,case1,case2)

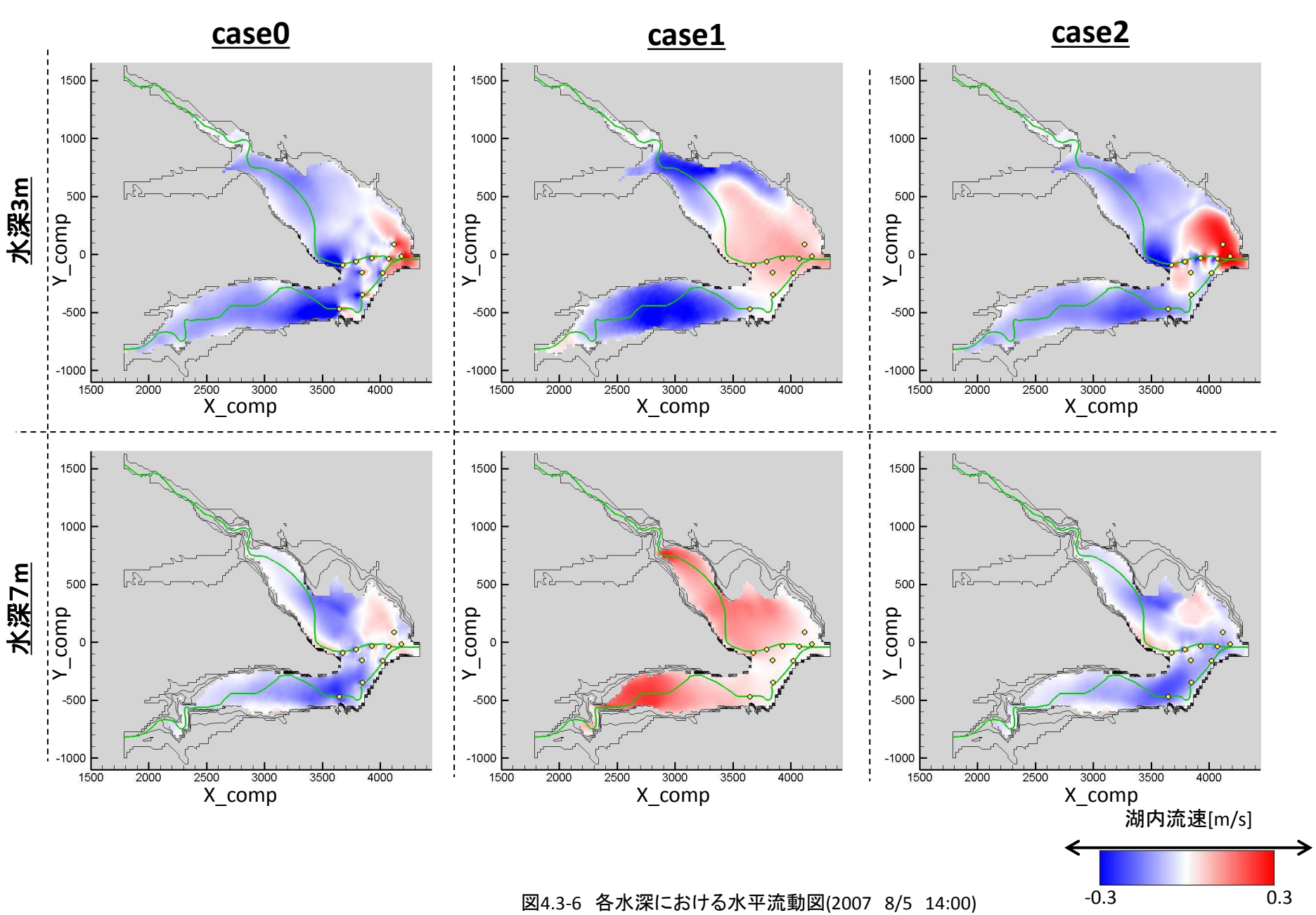


図4.3-6　各水深における水平流動図(2007　8/5　14:00)

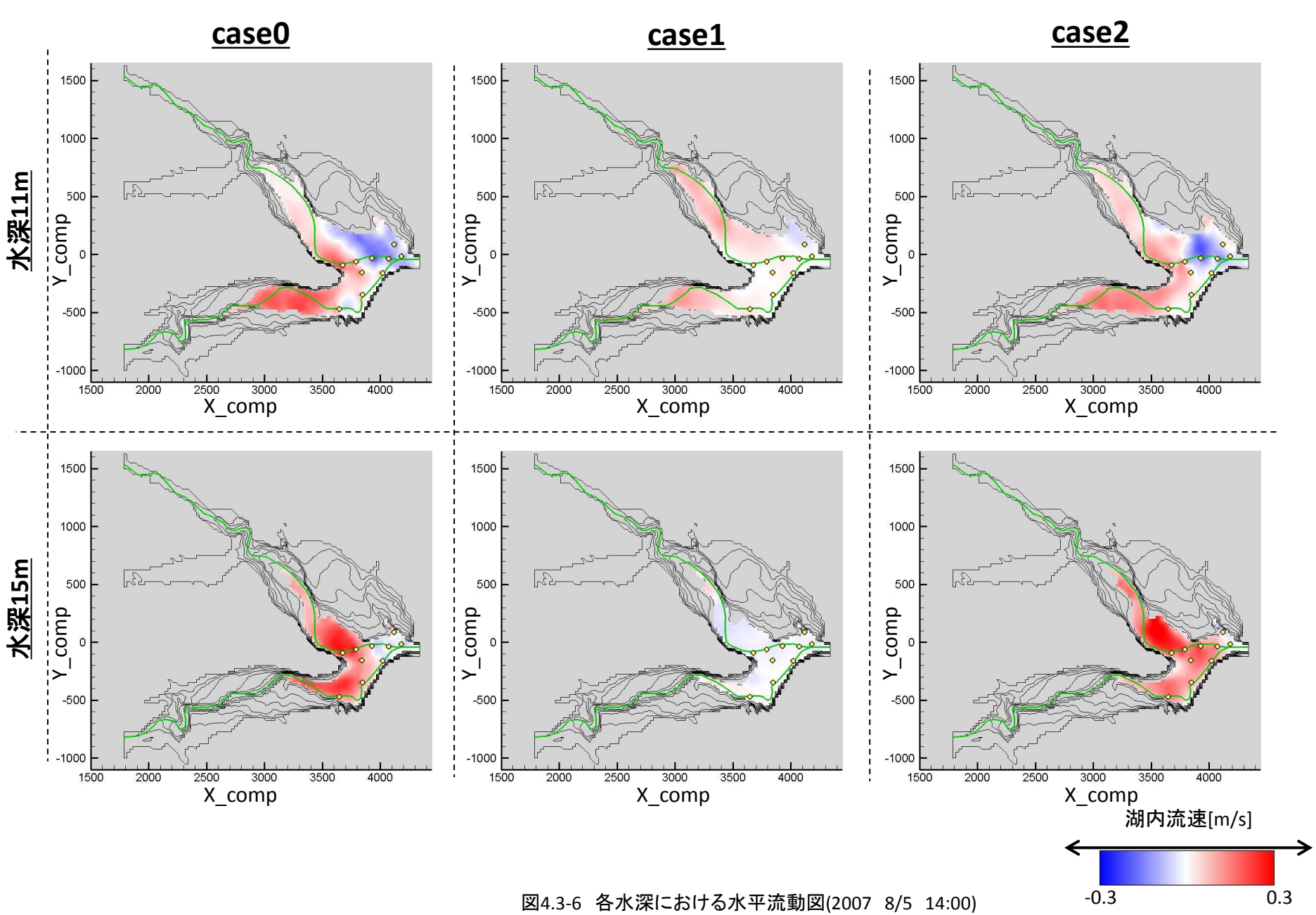


図4.3-6　各水深における水平流動図(2007　8/5　14:00)

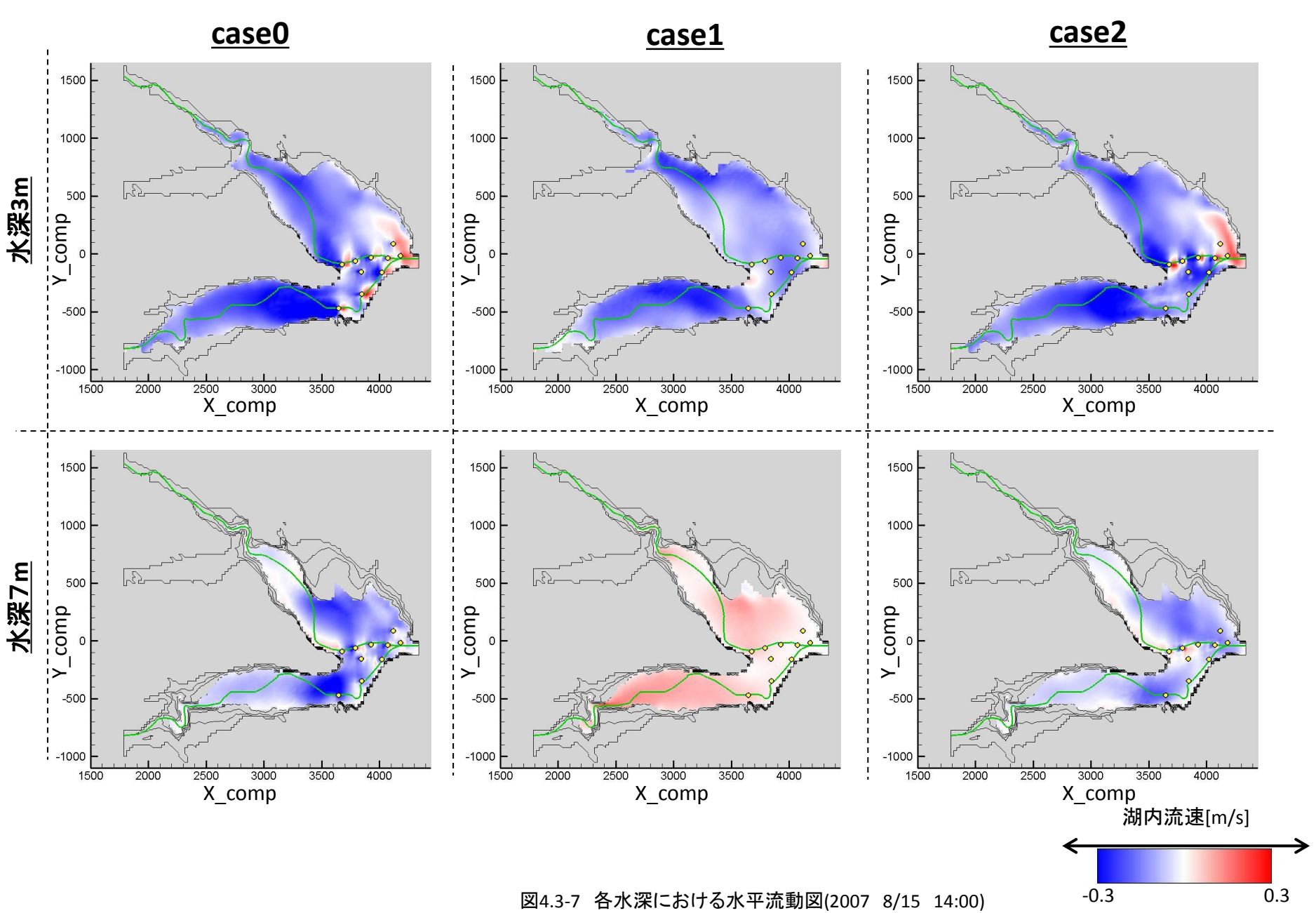


図4.3-7　各水深における水平流動図(2007　8/15　14:00)

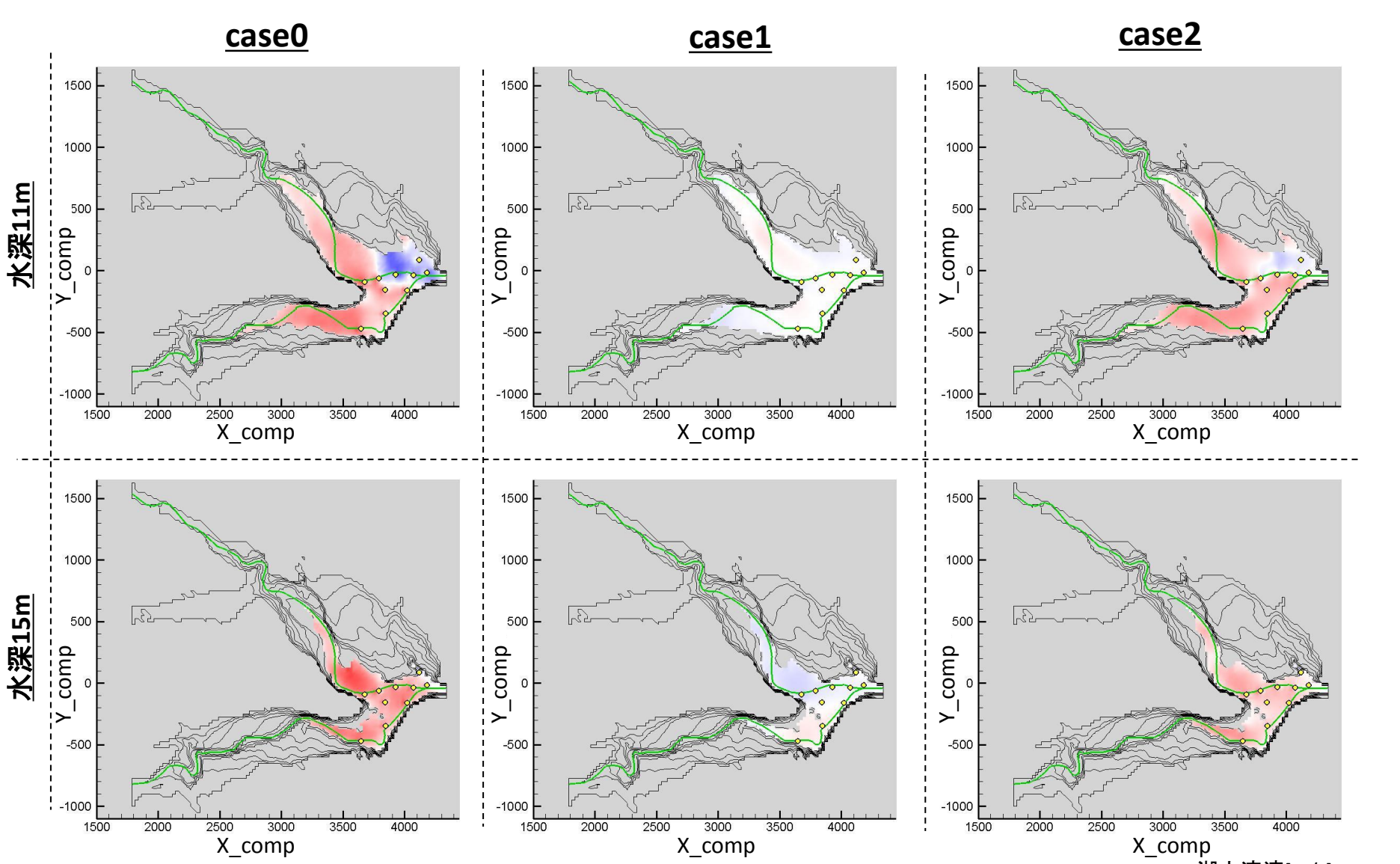


図4.3-7　各水深における水平流動図(2007　8/15　14:00)

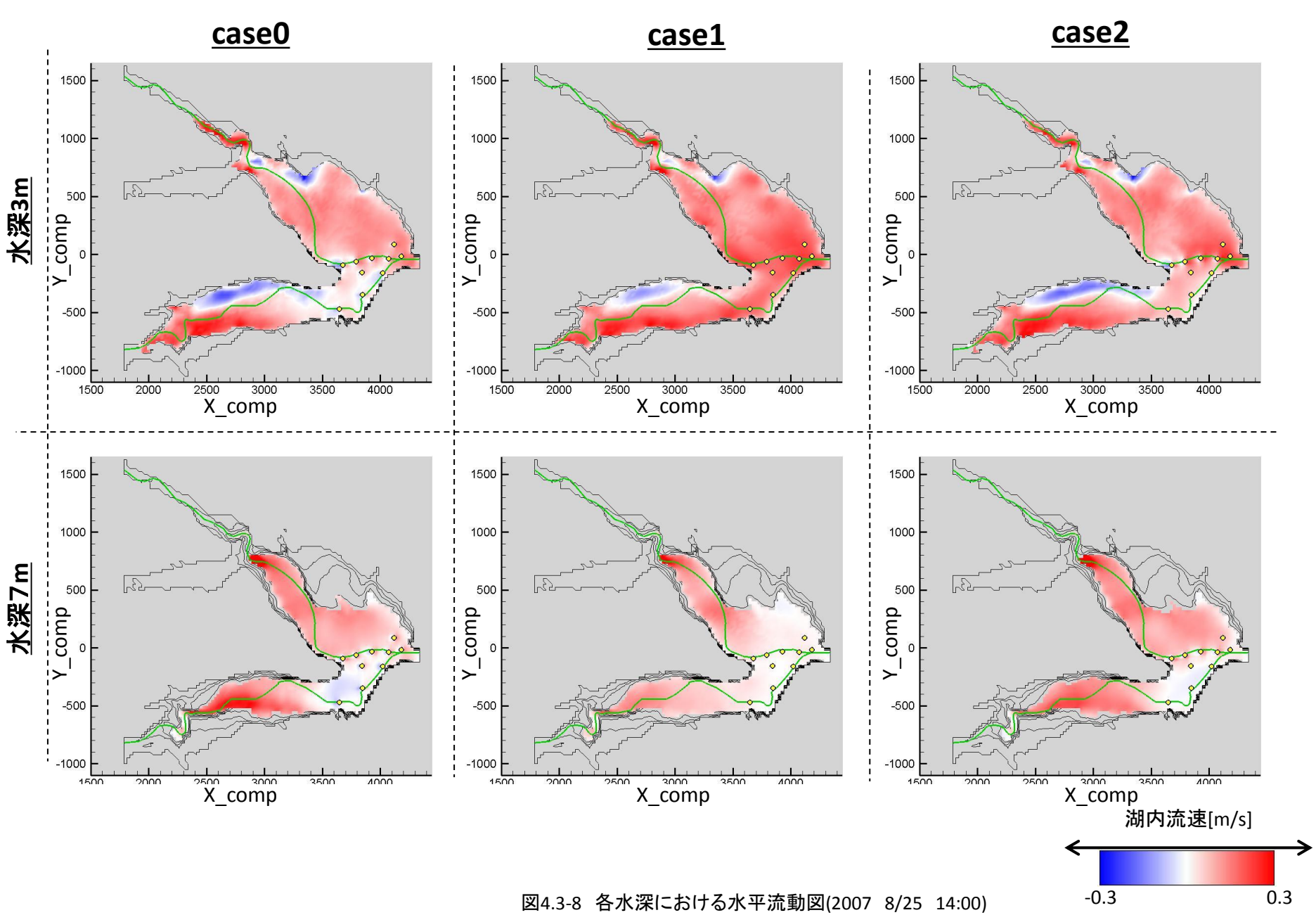


図4.3-8　各水深における水平流動図(2007　8/25　14:00)

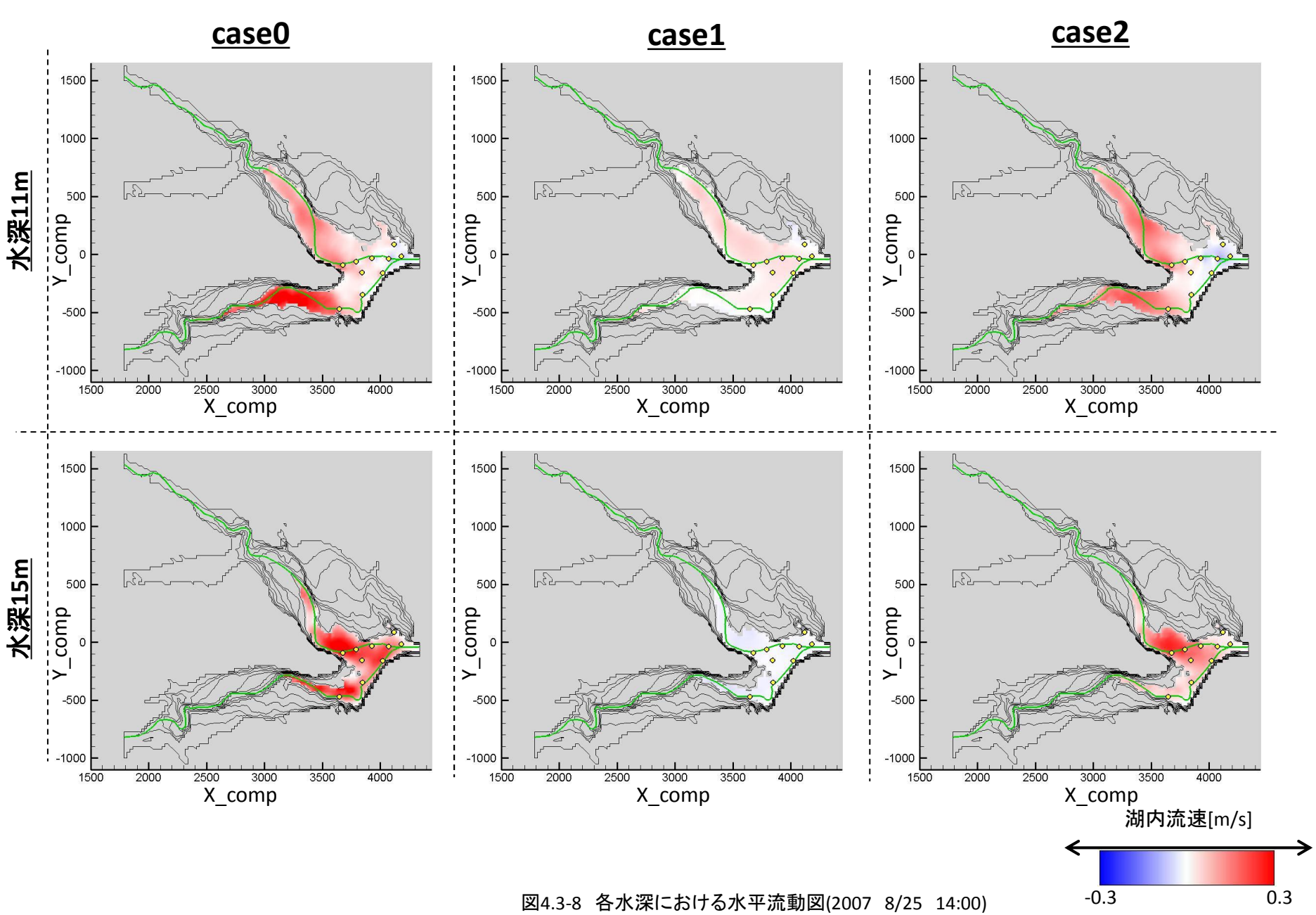


図4.3-8　各水深における水平流動図(2007　8/25　14:00)

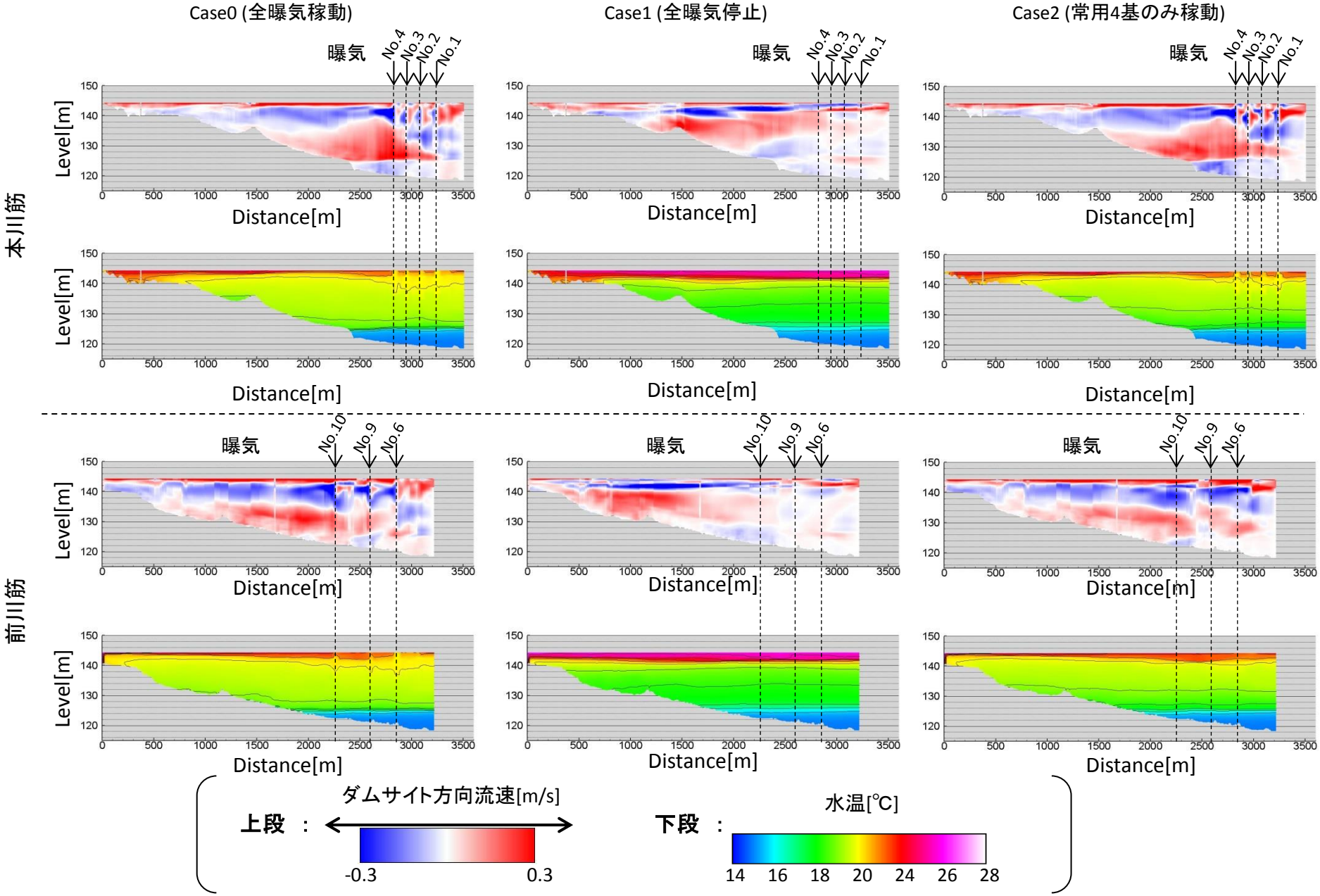


図4.3-9 本川筋、前筋における流速・水温の縦断分布図(2007 8/5 14:00)

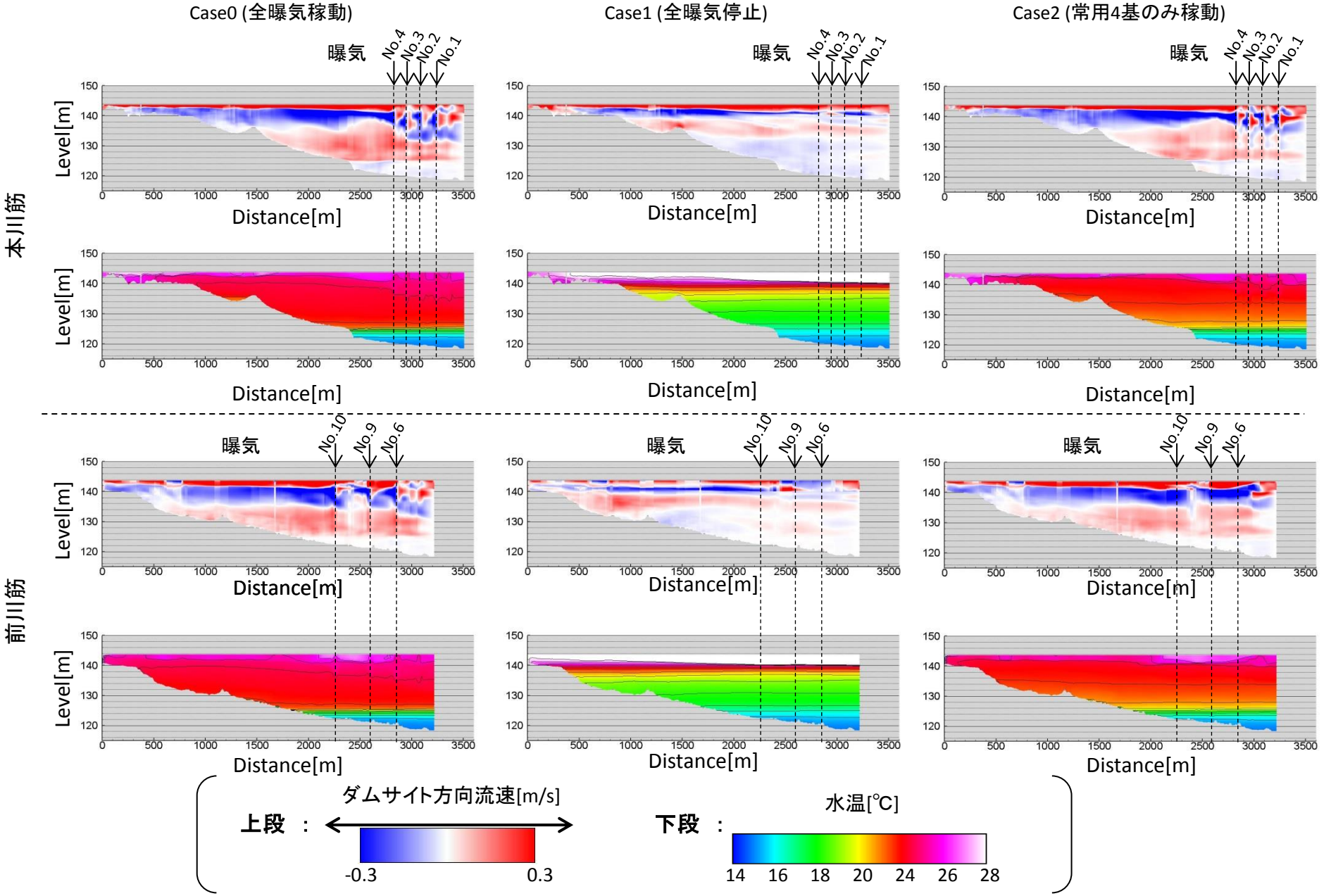


図4.3-9 本川筋、前筋における流速・水温の縦断分布図(2007 8/15 14:00)

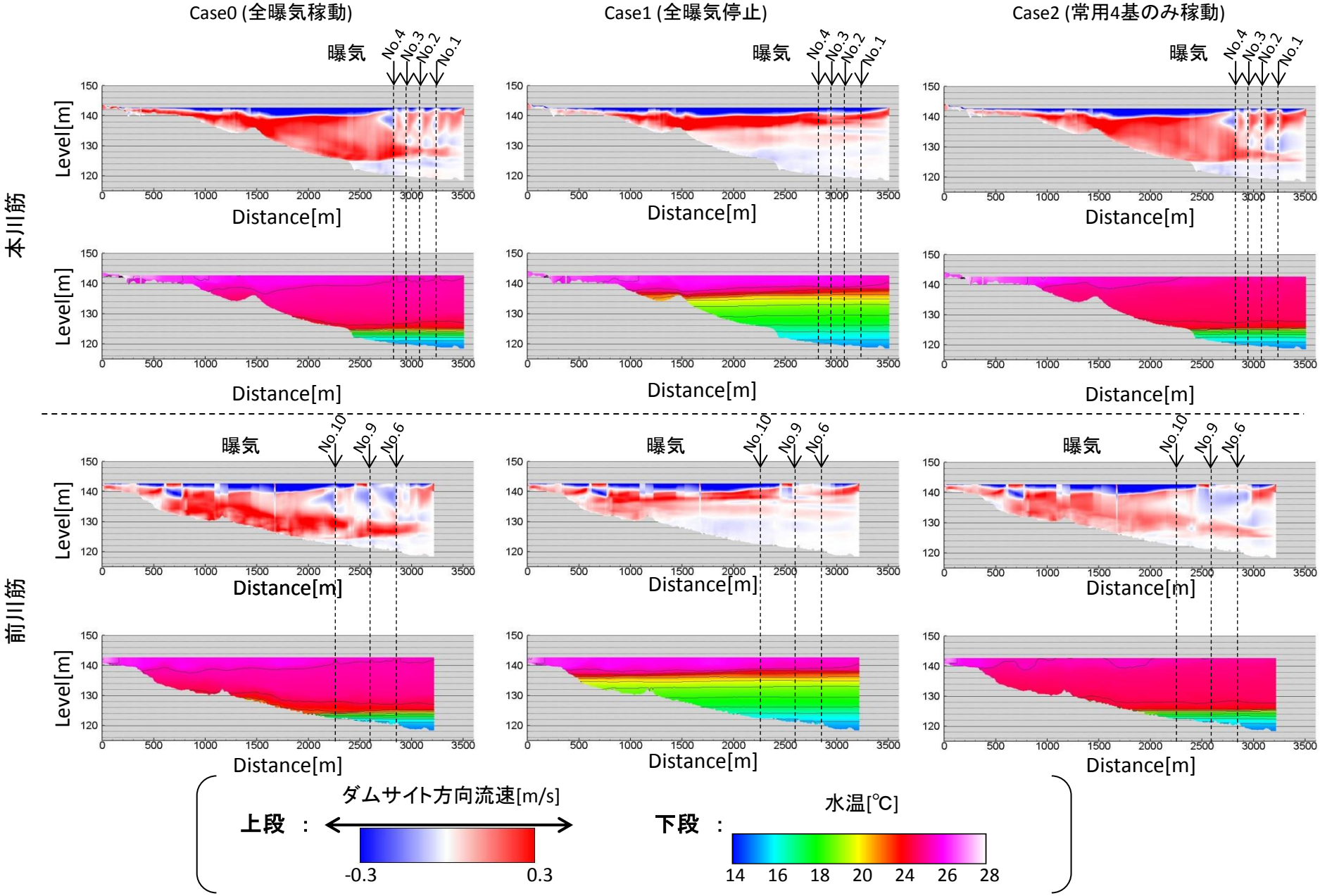


図4.3-9 本川筋、前筋における流速・水温の縦断分布図(2007 8/25 14:00)

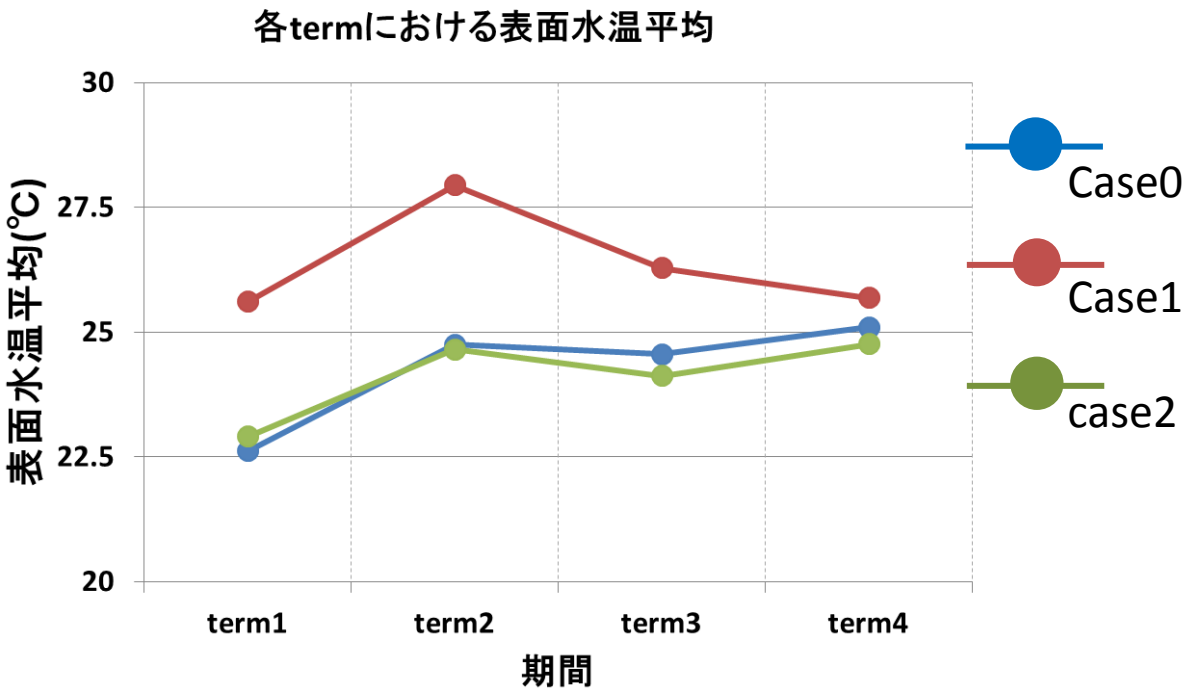


図4.4-1　2007年8月における各期間の表面水温平均

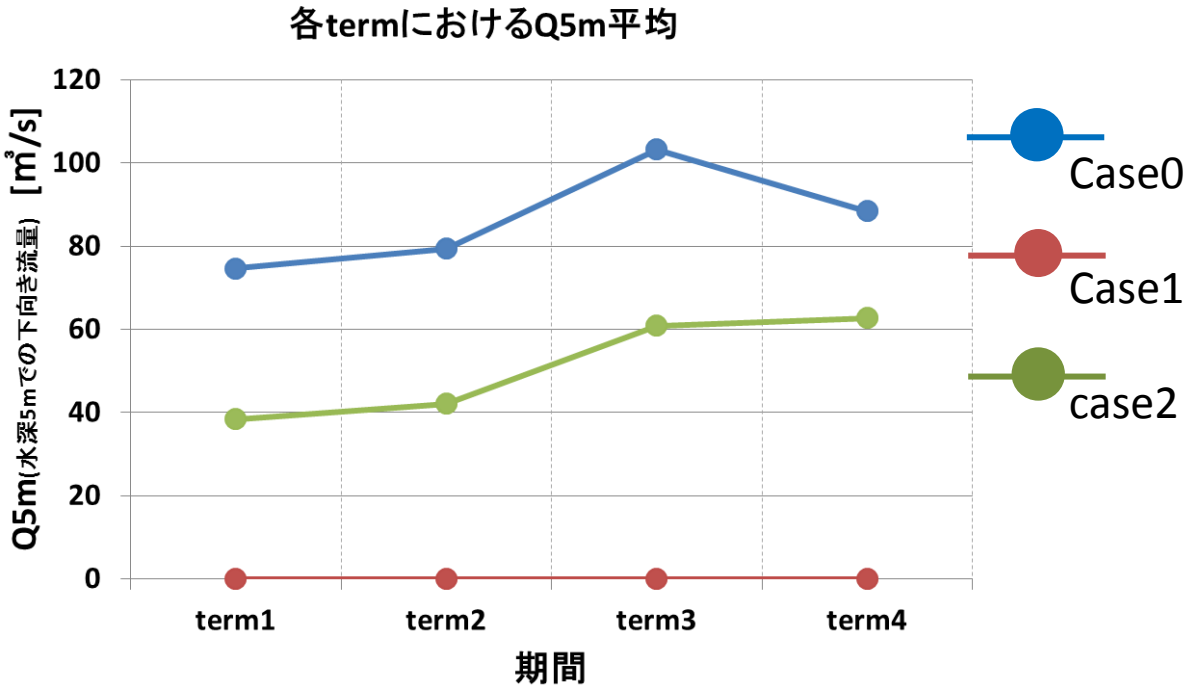


図4.4-2　2007年8月における各期間のQ_{5m}平均

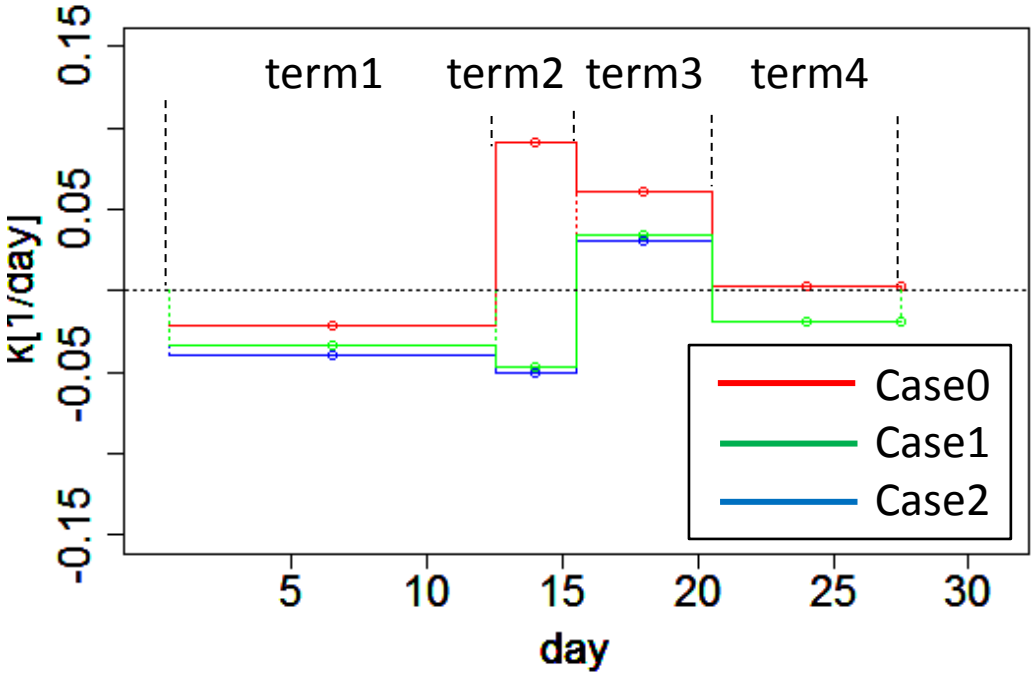
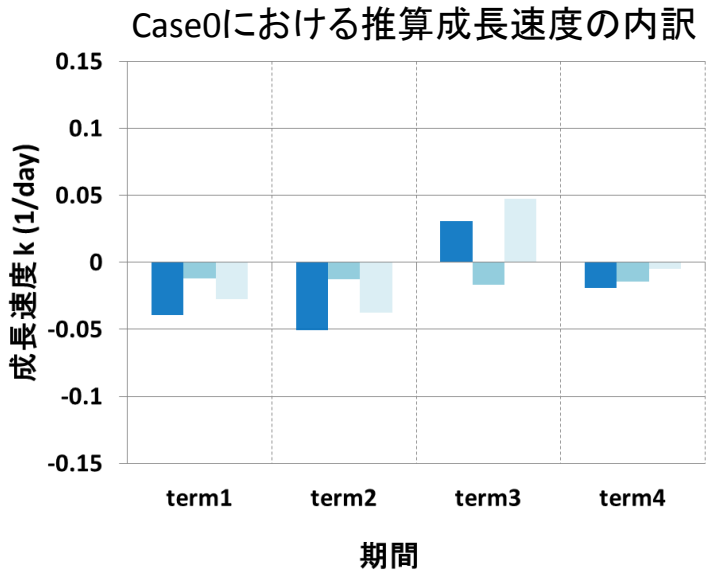
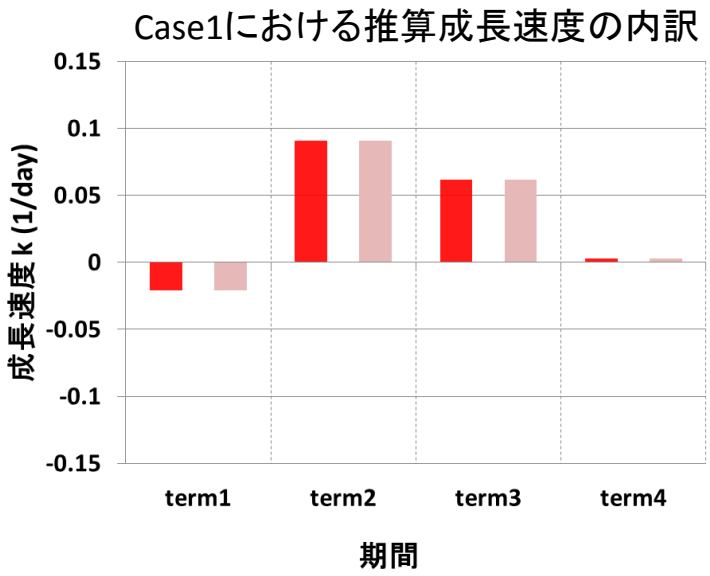
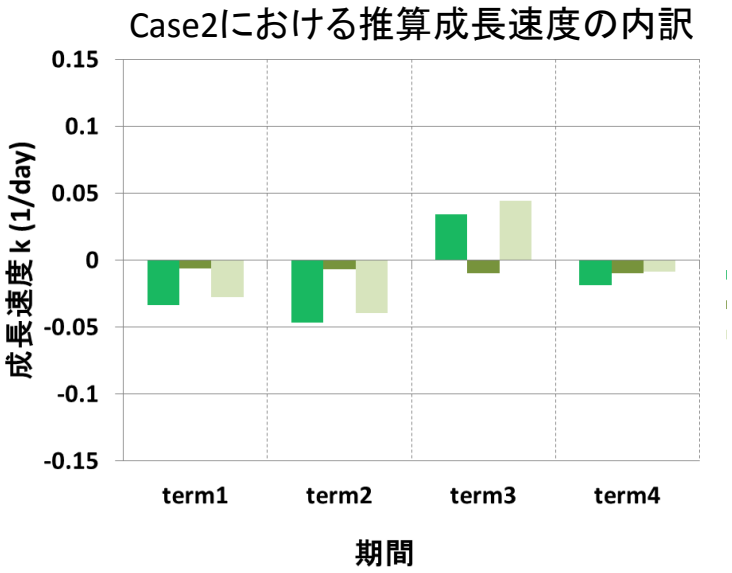


図4.4-3　2007年8月における各期間のQ_{5m}平均







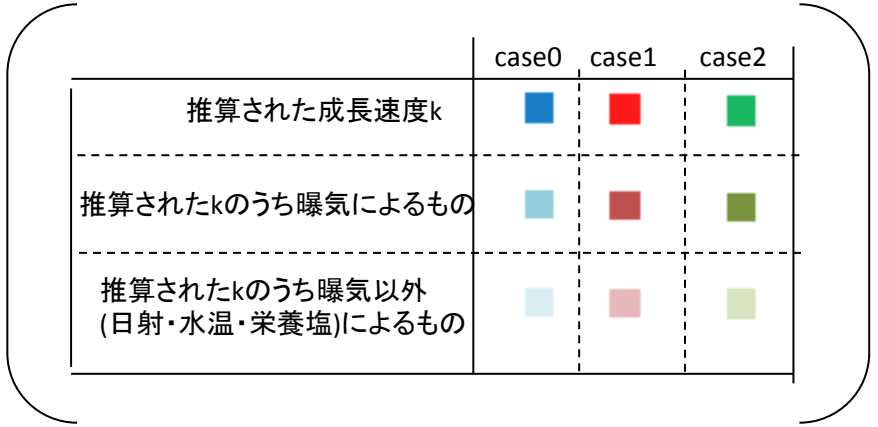


図4.4-4　3ケースごとの4期間における推算k(成長速度)の内訳

第 5 章　結論

本研究では，2015 年 8 月に行われた現地観測結果を基に，ダブルプルームモデル内の物理パラメータの調整を行った．その上で曝気装置近傍での下降プルームの鉛直フラックスを計算し，それと日射，水温，栄養塩，風の影響を鑑みてフォルミディウムの成長速度に関する回帰式を重回帰分析より作成した．更に曝気装置の異なる稼働条件下において TITech-WAARM を用いて流動計算を行い，各条件下におけるフォルミディウムの成長速度を作成した回帰式より計算・比較検討した．これより得た主な知見を以下に示す．

1)　ダブルプルームモデル内の物理パラメータ$\alpha, \beta, \gamma, C_e$に対して感度解析を行った結果，貫入水深・貫入流量はβ, C_eに大きく依存していることが確認された．また観測より推定された曝気装置が作り出すプルームの貫入水深：6.7[m]，貫入流量 23.3[㎥/s]に合うようにβ, C_eを系統的に変化させた結果，$\beta = 0.16, C_e = 0.25$と推定された．この値は先行研究と比較しても離れた値ではなく，また固定 ADCP の長期モニタリング結果における貫入とみられる水深と比較した結果，調整後の物理パラメータを使用して計算した貫入水深は一致性が高く観測以外の期間においてもその適用性が確認された．

2)　調整済みの物理パラメータを用いたダブルプルームモデルより，2004 年～2014 年において曝気装置が作り出すプルームのフラックス鉛直分布を計算した．その結果，フォルミディウムの成長速度に対しては水深 5m における下向き流量が最も相関性が高いことが確認された．その値と日射，ダムサイトにおける表面水温，全リン，ウェダバーン数を用いて回帰式を作成した結果調整済み決定係数は 0.3243 となった．

3)　作成した回帰式はフォルミディウムの安定，減少については概ね再現されたが，上昇については約 27%とうまく再現できなかった．作成した回帰式はフォルミディウムの成長速度を低く見積もる傾向があることが確認された．

4)　調整した物理パラメータを使用して曝気の稼働条件別に 2007 年 8 月において 1 か月間再現計算を行った．その結果，曝気装置の稼働台数が少ない 4 基の場合でも 10 基稼働させた時のような流動構造を形成することが確認された．一方，曝気装置を全停止させたケースでは湖内に循環流が発生せず，他の 2 ケースに比べ水温成層が解消しなく表面水温も 2[℃]前後高い値を推移したことが確認された．

5)異なる曝気装置の稼動条件下で，作成した回帰式を用いて各条件におけるフォルミディウムの成長速度を算出した．その結果，曝気装置を 4 基，10 基稼働させた時でその値はほぼ変わらなかった．一方で曝気装置を全停止したケースでは他の 2 ケースと比較して成長速度が大幅に上昇する期間が見受けられた．またその内訳としては曝気装置の物理的影響よりも間接的な水温上昇の影響が大きいことが確認された．

今後の課題としては，回帰式作成時に重みをつけるなどの回帰式の精度の改善，他の環境因子(河川からの流入，放流)の検討，また複雑な曝気装置稼動条件下におけるより効率的な運用の模索などが必要であると考えられる．

謝辞

本研究を進めるにあたって，指導教官の中村恭志先生には熱く丁寧なご指導を賜りました．一つのことを実証するにしても複数の観点からのアプローチを考えること，結果から何をどう読み取り，次に何をするべきか考察すること，などその多くを日々の研究生活から学ばせて頂きました．特に，相関を取る時や回帰分析を行う時などは相関係数や決定係数の数字だけを見て判断するのではなく，傾向を掴み，精度の改善につながる方法を見出すことの大切さをご指導くださいました．また研究の打ち合わせや合同ゼミなどでは分かりやすく説明することの重要性を何度も説いて頂きました．私は研究に限らず就職活動においてもなかなか結果を出せずにいましたが，先生はこまめに状況を気かけてくださり，精神面でも度々支えて頂きました．指導教官でありながら一番身近な社会人として見習うべきその多くを感じ取ることができました．学部を含めた 3 年間における研究，また研究生活は先生によるご指導なしでは形にすることはできませんでした．ここに深く感謝申し上げます．大変ありがとうございました．

木内先生には直接研究におけるご指導を頂く機会は多くありませんでしたが，合同ゼミの発表などで研究や発表方法に関するアドバイスを頂き非常に参考になりました．ゼミなどでは鋭い質問をしてくださり，疑問に感じていなかったことに気付かされることが多く，研究に対して深く向き合うことができました．ありがとうございました．

同期の古田島くんには研究におけるデータ整理方法など複雑なプログラミングの相談をすることも多く非常に助けられました．自身の研究もありながらない時間を割いて夜遅くまで共に試行錯誤してくれたことに感謝しています．また研究に限らず，就職活動や日々の生活において一人しかいない同期としてとても心強く，心の支えになりました．D2 の安嶋さんは研究室での夜遅い時や現地観測などでご一緒する機会も多く，何気ない会話や体調への配慮など先輩として非常に尊敬できる存在でした．M1 の荒木くん・竹村くん・永島くん・山本くんは何気なく，そして明るく研究の進捗具合や体調を気遣ってくれ，古田島くん同様，研究室に通いたいと思える理由を作ってくれる大事な存在でした．B4 の荒井くん，岩崎くん，前田くん，イザーズくん，三浦くんは研究に対して真剣に集中して向き合う姿勢を年齢に関係なく気づかせてくれました．研究の終盤では共に夜遅くまで作業をすることも多く励まし合い，また研究への姿勢という面では何度も気持ちを引き締めさせてくれる存在でした．

研究生活において応援して下さった先輩方，励まし合った友人や後輩の方々，そして何より，健康面でも精神面でも経済面でも支えてくれた父，母，姉には最大の感謝を申し上げます．

以上簡単ではありますが，本研究並びに研究生活，修士課程に対し，ご協力して頂いたすべての皆様に深く感謝し，謝辞にかえさせて頂きます．

平成 30 年　2 月

押元 啓介