

Holt-Winters 法を用いた湖沼における水質の長期的トレンドと季節性の評価 Assessment of long term trend and seasonality of water quality in lakes using Holt-Winters's method

○中桐貴生* 人見晃司** 堀野治彦* 櫻井伸治*

○Takao NAKAGIRI*, Koji HITOMI**, Haruhiko HORINO*, Shinji SAKURAI*

1.はじめに 日本では、かつて湖沼の水質悪化が全国的に深刻となり、これを受け湖沼水質保全特別措置法が制定(1984年)されて以降、主要な湖沼(指定湖沼)を対象に様々な改善対策が講じられてきた。湖沼の水質は、指標項目の多くで季節的に大きな変動が生じ、また不規則な気象的あるいは人為的要因の影響も受ける。このため対策の効果を検査すべく、数ヶ月レベルの時間間隔での変化トレンドが長期的にどのように推移してきたかについて決定論定に捉えることは容易ではない。本研究では、平滑化手法の1つである Holt-Winters 法(以下 HW 法)の湖沼における各種水質変動への適用可能性を検討し、同時に水質の時系列変化における季節性とトレンドの抽出およびそれらの評価を試みた。

2.研究方法 HW 法は、季節性のある商品の需要予測など、主に経済学で用いられる時系列分析法の1つで、季節性とトレンドを考慮した指数平滑化モデルである。HW 法には加算型と乗算型があり、今回採用した乗算型の場合、ある期 t における推定値 F_t は、1 ステップ前における観測値 x_{t-1} から季節性を取り除いた基準値 L_{t-1} 、トレンド T_{t-1} 、および 1 周期前の季節性 S_{t-p} を用いて次式で表される。

$$F_t = (L_{t-1} + T_{t-1})S_{t-p} \dots (1) \quad L_t = \alpha \frac{x_t}{S_{t-p}} + (1 - \alpha)(L_{t-1} + T_{t-1}) \dots (2)$$

$$T_t = \beta(L_t - L_{t-1}) + (1 - \beta)T_{t-1} \dots (3) \quad S_t = \gamma \frac{x_t}{L_t} + (1 - \gamma)S_{t-p} \dots (4)$$

ここで、 p は 1 周期内での期数、 α 、 β 、 γ は平滑化定数である。本研究では、国土交通省水文学水質データベースから入手した琵琶湖、霞ヶ浦、中海、宍道湖の 4 湖沼計 16 地点 (Table 1) における 1997 年 1 月 ~ 2016 年 12 月の TN、TP、TOC、COD、Chl.a の月例観測データを用いて解析した。1 年を 1 周期として 1-3 月、4-6 月、7-9 月、10-12 月の 4 期 ($p = 4$) に分けて該当月の平均値をその期の観測値とした。最初の 2 周期 (8 期) 分のデータを用いて次式により初期値を設定し、2 周期目 (1998 年) 以降の観測値と HW 法による推定値の平均絶対パーセント誤差 (MAPE) が最小になるように平滑化定数を最適同定した。

$$L_p = \frac{1}{p} \sum_{t=1}^p x_t \dots (5) \quad T_p = \frac{1}{p} \left(\frac{1}{p} \sum_{t=1+p}^{2p} x_t - \frac{1}{p} \sum_{t=1}^p x_t \right) \dots (6) \quad S_k = \frac{x_k}{L_p} \dots (7) \quad k = (1, 2, \dots, p)$$

3.結果と考察 (1)再現性 各地点における水質項目ごとの HW 法による推定誤差 (MAPE) を Table 1 に示す。水質項目別にみると、COD の推定誤差がデータの得られた 14 地点の全てで最も小さく、Fig.1a に示す琵琶湖北湖の早崎港沖のように、季節的変動も的確に再現された地点もみられた。一方、

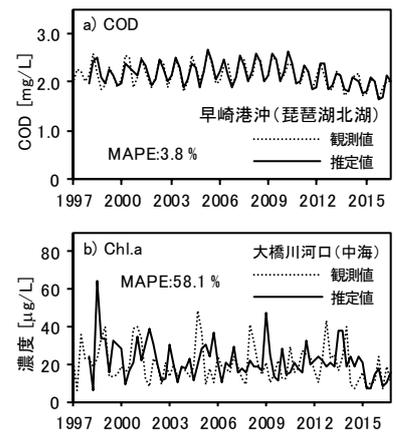


Fig.1 Reproduction accuracy

Table 1 Reproduction accuracy by Holt-Winter's method (Evaluated by MAPE:%)

	琵琶湖(北湖)				琵琶湖(南湖)			霞ヶ浦			中海			宍道湖		
	外ヶ浜沖中央	外ヶ浜沖	早崎港沖	北小松沖中央	柳ヶ崎沖	雄琴沖中央	粟津沖中央	湖心	高崎沖	掛馬沖	中海湖心	安来港地先	大橋川河口地先	S1	S3	S6
TN	7.5	7.4	7.1	8.1	12.2	11.4	12.5	16.0	18.7	17.3	15.1	15.8	16.2	15.4	14.8	14.0
TP	17.2	16.3	18.2	17.1	20.9	19.6	17.2	15.0	14.9	13.2	23.1	29.5	23.4	29.1	28.0	30.3
TOC	8.5	7.2	6.5	8.3	7.5	7.6	9.5	15.3	19.5	16.2	72.4	63.8	21.1	18.9	19.3	20.8
COD	4.0	4.2	3.8	4.6	5.5	4.9	5.5	7.3	11.0	8.7	9.2	-	-	9.5	9.2	9.5
Chl.a	48.6	46.9	48.6	48.1	41.1	32.6	31.7	34.4	28.0	30.6	41.9	46.2	58.1	37.2	26.7	30.6

* 大阪府立大学大学院生命環境科学研究科 Grad. School of Life and Environmental Sciences, Osaka Pref. Univ.

** 日本工営株式会社 NIPPON KOEI CO., LTD.

キーワード: Holt-Winters 法, 湖沼水質, 長期的トレンド

Chl.a の推定誤差はどの地点でも総じて大きく、Fig.1b に例示するように、COD に比べると不規則な変動をうまく再現できなかったことがその原因と思われた。当初、Chl.a でも水温など季節的要因による植物プランクトンの増減に呼応した周期性が存在すると予想したが、規則的な季節変動は抽出されなかった。このことから、植物プランクトンの動態には、天候による日射量の変動や食物連鎖、人為的化学成分の流入などの影響が季節性やトレンドに比べ無視できない程大きいと推察される。その他の項目については、20 % 以下の MAPE 値がほとんどだった。なお、中海の 2 地点(湖心、安来港地先)において、TOC の MAPE が他地点に比べて顕著に大きくなっているが、月例データにおける極端に大きな値の突発的な存在によるもので、代表値としての妥当性について再検討する余地がある。

(2)トレンドと季節性の評価 総じて再現性が良好だった COD に着目し、データが得られた 14 地点について、トレンド T_t と季節性 S_t を抽出した。 T_t については、琵琶湖北湖・南湖および中海の計 8 地点では Fig.2a に例示するように当初は僅かながら正值(すなわち汚濁進行)だったものが漸減し、2010 年頃に負値(すなわち浄化傾向)に転じ、以後も負値を維持していた。一方、霞ヶ浦および宍道湖の計 6 地点では Fig.2b に例示するように当初は比較的大きな負値であったものが漸増しながらも、近年でも先の 8 地点と同程度に負値を維持する結果となった。これらの結果は、かつては汚濁が依然進行中の湖沼と、既に改善傾向にある湖沼があったが、近年では、どの地点もトレンド的には安定し、共通して改善傾向にあると解釈される。

また、 S_t については、霞ヶ浦を除く 11 地点では、Fig.3a に示す琵琶湖北湖の例で見られるように、見た目上ではほぼ一定の振幅のまま推移し、一方、霞ヶ浦の 3 地点では、Fig.3b のように、同一周期内での極小値は経年的にほぼ一定であるのに対し、極大値は増加傾向にあり、結果的に振幅が大きくなる傾向が見受けられた。ただし、これらの要因について明確な考察までには至らなかった。

(3)将来予測 2017 年 3 月に発表された第 7 期琵琶湖に係る湖沼水質保全計画では、2020 年に琵琶湖の南湖で TN の年平均値が 0.24 mg/L を下回ることが目標とされているものの、現時点では未だ多くの地点で達成されていない。そこで、南湖で目標を達成できていない栗津沖中央と柳ヶ崎沖を対象に、上の解析で得られた最終年の 2016 年における季節性ならびにトレンドがその後も維持されると仮定して将来予測を行い、今後の見通しについて検討した。その結果、栗津沖中央(Fig.7)では、2022 年に目標を達成し、また環境基準の 0.20 mg/L を下回るのは 2026 年と予測され、一方、柳ヶ崎沖では、目標を達成するのは 2026 年で、環境基準を下回るのは 2038 年となった。この予測結果に従えば、両地点、特に柳ヶ崎沖では今後何らかの浄化対策の強化が必要ということになる。

4.おわりに COD, TOC, TN, TP といった季節的周期性が比較的明確な水質指標項目であれば、モデル定数が 3 つ程度の HW 法でも、日本の湖沼における水質のトレンドや季節性の長期的変動を妥当に抽出することが可能と思われた。水域の水質保全に関する長期的政策課題の策定や具体的数値目標の設定などについて検討する場合に、本手法はある程度有用と思われる。

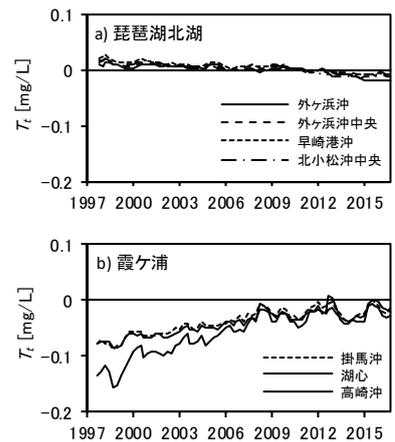


Fig.2 Trend T_t of COD

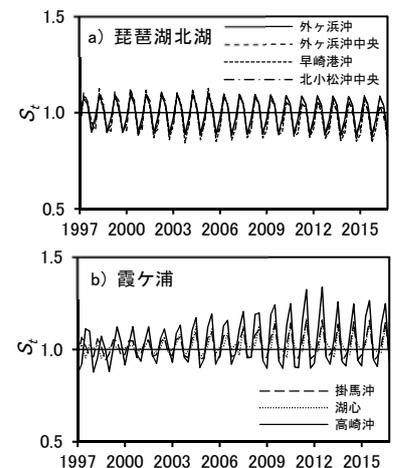


Fig.3 Seasonality S_t of COD

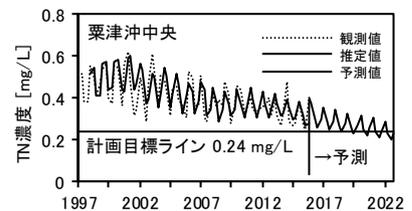


Fig.4 Forecast of TN by the HW