

広島県立総合技術研究所

保健環境センター研究報告

第 33 号

2025 年 12 月

目 次

資 料

広島県における新型コロナウイルス検査に影響を与える N 遺伝子変異の検出状況 伊藤 彩乃, 池田 周平, 平塚 貴大, 増田 加奈子, 末井 真菜, 鈴藤 和, 島津 幸枝, 高尾 信一, 中島 安基江, 重本 直樹……………	1
感染症発生動向調査におけるエコーウイルス 11 型の検出事例 鈴藤 和, 大関 雅暉, 池田 周平, 高尾 信一, 末井 真菜, 伊藤 彩乃, 谷澤 由枝, 島津 幸枝, 中島 安基江, 重本 直樹……………	8
菓子類等大麻含有食品からの THC 抽出精製法の確立 菅田 和子, 伊達 英代……………	16
カンナビノイド 11 成分の分析法の確立及び大麻含有食品中のカンナビノイド類の検出 菅田 和子, 伊達 英代……………	22
食品中のニコチン酸及びニコチン酸アミドの分析法の検証 河野 敏己, 井原 紗弥香……………	28
広島湾沿岸域における BOD ₃ の長期変動解析—Chl-a を用いた推定手法による評価— 濱脇 亮次, 後田 俊直 ……………	35
広島湾の都市部と島嶼部の干潟における生物生息環境, 底生生物相及び 物質循環機能の比較 後田 俊直, 濱脇 亮次, 小田 新一郎……………	49
他誌掲載論文 (2024 年 10 月~2025 年 9 月) ……………	59

資料

広島県における新型コロナウイルス検査に影響を与える N遺伝子変異の検出状況

伊藤 彩乃, 池田 周平*, 平塚 貴大, 増田 加奈子**, 末井 真菜,
鈴藤 和, 島津 幸枝, 高尾 信一***, 中島 安基江, 重本 直樹

Detection status of SARS-CoV-2 nucleocapsid gene mutations impeding PCR detection in Hiroshima Prefecture, Japan

ITO Ayano, IKEDA Syuhei*, HIRATSUKA Takahiro, MASUDA Kanako**,
SUEI Mana, SUZUTO Madoka, SHIMAZU Yukie, TAKAO Shinichi***,
NAKASHIMA Akie and SHIGEMOTO Naoki

(Received: October 3, 2025)

新型コロナウイルスの一部の検査診断試薬において、偽陰性等の影響を及ぼすことが報告されているN遺伝子のC29200T変異の実情を明らかにするため、広島県で解析した全ゲノム配列及び公知のデータを用いて広島県内、国内、世界での検出状況を調査した。調査の結果、流行当初から2025年8月までに、当変異を持つウイルスが広島県内では23株（0.46%）、国内では2,188株（0.32%）、世界では333,542株（0.20%）検出されていたことが明らかとなった。当変異は変異株・亜系統及び流行地域によらず保有されていたことから、病原体の遺伝子検査を行う際には、変異による検出率低下の可能性を踏まえ、検査精度を担保する方法の選択を視野に入れておく必要があると考えられた。また、新型コロナウイルスの全ゲノム解析による監視体制の継続は、検査に影響を与える変異を持つウイルスの検知及び注意喚起に重要な役割を果たしていることが示された。

Key words : 新型コロナウイルス, C29200T, NGS, GISAID, covSPECTRUM

結 言

新型コロナウイルス感染症（COVID-19）を引き起こす病原体である新型コロナウイルス（SARS-CoV-2）は、コロナウイルス科ベータコロナウイルス属の約30,000塩基からなる1本鎖・プラス鎖RNAゲノムをもつエンベロープウイルスである。2019年に中国湖北省武漢市で報告され[1,2]、2020年3月にはパンデミック状態となり、以後、世界中で流行の波を繰り返している[3]。ヒトからヒトへの伝播は咳や飛沫を介して起こり、肺炎、呼吸器症状、高熱、下痢、味覚障害等、様々な症状が見られ、重症例や死亡例も確認されている[4,5]。2023年5月4日に世界保健機構（WHO）は、国際的に懸念される緊急事態（PHEIC）の終了を宣言したが、引き続きリスクの高い健康課題であり、長期的な対応が必要であるとしている[6]。SARS-CoV-2のヌ

クレオカプシドタンパク質をコードする遺伝子であるN遺伝子は、SARS-CoV-2特有かつ配列保存性の高い領域であるため、検査のターゲットとされることが多い[7]。近年、N遺伝子のプローブ領域にC29200T変異を有するウイルスが、一部の検査診断試薬でのSARS-CoV-2リアルタイムRT-PCR検査で、偽陰性となる場合があることが明らかとなった（図1）[8-11]。このことは、COVID-19患者の見落とし、患者への医療の提供が行われない、適切な感染予防措置が講じられない等の事象が発生する可能性を示唆している。このように、病原体の遺伝子検査では検査対象遺伝子の配列が変異することにより、結果として偽陰性となることは一般的に知られているが、実際にどの程度の割合でそのような現象が生じるかについての詳細な報告はない。今回、既報[8-11]のあるC29200T変異について、当県で解析した新型コロナウイルスの全ゲノム配列及び公知のデータベースに登録された配列データを用いて、

* 広島県西部厚生環境事務所・保健所広島支所：Hiroshima prefectural Western Office of Health, Welfare and Environment, Hiroshima Branch

** 広島県健康福祉局食品生活衛生課：Hiroshima prefectural Health and Welfare Affairs Bureau, Food and Public Sanitation Division

*** 広島県西部畜産事務所：Hiroshima prefectural Western Office of Livestock Industry

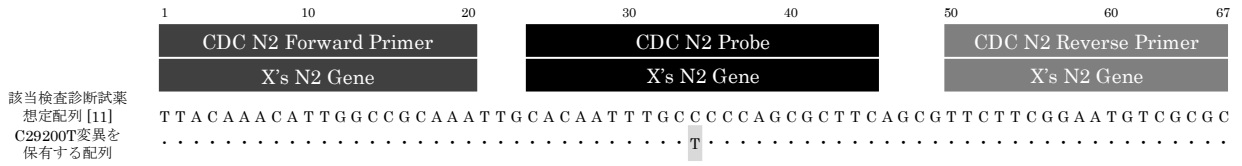


図1 CDCプライマー・プローブ及び該当検査診断試薬が使用していると想定されるN2領域の配列

表1 広島県内で検出されたC29200T変異を保有するSARS-CoV-2

	検体採取年月	GISAID ID	Nextstrain clade
1	2021/9	EPI_ISL_5763933	21J(Delta, AY.29)
2	2022/5	EPI_ISL_14113680	21L(Omicron, BA.2)
3	2022/6	EPI_ISL_14125788	21L(Omicron, BA.2)
4	2022/8	EPI_ISL_14876084	22B(Omicron, BA.5)
5	2022/8	EPI_ISL_15280286	22B(Omicron, BA.5)
6	2022/11	EPI_ISL_15908094	22B(Omicron, BA.5)
7	2022/11	EPI_ISL_16194348	22B(Omicron, BA.5)
8	2022/11	EPI_ISL_16194350	22B(Omicron, BA.5)
9	2022/12	EPI_ISL_16280065	22B(Omicron, BA.5)
10	2022/12	EPI_ISL_16280066	22B(Omicron, BA.5)
11	2022/11	EPI_ISL_16280067	22B(Omicron, BA.5)
12	2022/12	EPI_ISL_16280068	22B(Omicron, BA.5)
13	2022/12	EPI_ISL_16390111	22B(Omicron, BA.5)
14	2022/12	EPI_ISL_16390112	22B(Omicron, BA.5)
15	2022/12	EPI_ISL_16390124	22B(Omicron, BA.5)
16	2022/12	EPI_ISL_16390125	22B(Omicron, BA.5)
17	2022/12	EPI_ISL_16390130	22B(Omicron, BA.5)
18	2022/12	EPI_ISL_16560073	22B(Omicron, BA.5)
19	2024/2	EPI_ISL_19046757	23H(Omicron, HK.3)
20	2024/2	EPI_ISL_19046777	23I(Omicron, JN.15)
21	2024/11	EPI_ISL_19621405	24E(Omicron, KP.3.1.1)
22	2024/12	EPI_ISL_19621406	24E(Omicron, KP.3.1.1)
23	2025/1	EPI_ISL_19694885	24E(Omicron, KP.3.1.1)

当県, 国内, 世界での検出状況を調査したので報告する.

方 法

1 全ゲノム配列データ

感染症の予防及び感染症の患者に対する医療に関する法律に基づき, 積極的疫学調査及び感染症発生动向調査事業において2025年8月までに当センターで検出したSARS-CoV-2について, 次世代シーケンス解析(以下, NGS解析)を行い, 得られた全ゲノム配列4,977株を用いた. NGS解析にあたっては, 2024年3月31日までは国立感染症研究所によるSARS-CoV-2ゲノム解析システムであるCOG-JP (COVID-19 Genomic Surveillance Network in Japan)を, 2024年4月1日以降はPathoGenS (Pathogen Genomic data collection System)を使用した. なお, 上記システムより得られた配列情報は, GISAID (Global Initiative on Sharing Avian Influenza Data) [14]に登録し, 各配列に固有のIDの付与を受けた.

2 変異解析

県内株の解析データについては, GISAID登録後, サーチ機能により変異株・亜系統及びC29200T変異を集計した. Clade及び変異箇所は, Nextclade[15]を用いて解析し, 判定した. また, 国内及び世界のデータ集計は, GISAID登録データをもとにした解析ツールであるcovSPECTRUM[16]を使用した. 期間, 地域, 変異株・亜系統及びC29200T変異を設定の上, フィルター機能を用いて抽出した.

SARS-CoV-2検査陽性者数の集計は, 国立健康危機管理研究機構感染症情報提供サイト感染症発生动向調査週報一覧[17]及びWHO COVID-19 dashboard data[18]からダウンロードしたデータを使用した.

結 果

1 広島県内, 国内及び世界のC29200T変異検出状況

当センターの解析により全ゲノム配列が得られたSARS-CoV-2 4,977株のうち, 0.46%にあたる23株からC29200T変異が検出された(表1).

次いで, 国内の検出状況をGISAID及びcovSPECTRUMより取得したところ, 登録されたSARS-CoV-2 692,159株のうち0.32%にあたる2,188

株から, C29200T変異が検出された(2025年9月15日時点).

広島県と国内の登録株でのC29200T変異保有状況を調査したところ, 県内では, 2021年9月1日から2025年1月7日までの検出株が当該変異を保有しており, 特に, 2022年11月から12月(6.88%(13/189株))の登録株に多く見られた(図2). 国内では, 2020年のSARS-CoV-2パンデミック初期から当該変異を保有する株が検出されており, 特に, 2022年5月から6月(1.43%(594/41,397株)), 2022年11月から2023年1月(0.50%(504/111,166株))に保有株数の増加が認められた.

一方, 世界では, GISAIDに登録された17,007,512株のうち0.20%にあたる333,542株がC29200T変異を保有していた(2025年9月15日時点). 世界での当該変異保有状況について, covSPECTRUMにより, 地域を北アメリカ地域, ヨーロッパ地域, アジア地域に設定し調査した(図3). 当該変異を保有する株は, いずれの地域でもパンデミック当初から現在まで継続的に検出されていた.

各地域のC29200T変異保有株を調査したところ, 北アメリカ地域では, 2020年12月から2021年5月(0.27%(1,958/726,127株)), 2021年7月から12月(0.19%(3,593/1,890,288株)), 2022年4月から5月(0.19%(750/396,100株)), 2022年7月から10月(0.34%(2,190/640,984株))に比較的多く認められた. ヨーロッパ地域では北アメリカ地域と同様に2021年1月から5月(0.22%(2,127/961,700株)), 2021年7月から12月(0.24%(5,987/2,489,718株))に多く認められた. 2022年2月から3月(0.13%(1,552/1,208,911株))と10月(0.32%(476/150,666株))はヨーロッパ地域で多く認められた. アジア地域では, 2022年5月から2022年12月(0.39%(2,100/540,981株))に多く認められた. いずれの地域でも, 当該変異を保有する株の割合は1%未満であった.

2 C29200T変異と変異株・亜系統

各地域(広島県, 日本, 北アメリカ地域, ヨーロッパ地域, アジア地域)における変異株及び亜系統毎のC29200T変異の保有率(2025年9月17日時点)を表2に示す. 広島県内で検出された変異株及び亜系統の当該変異保有率は, Omicron BA.5系統が4.09%と最も多く, 次いでOmicron KP.3系統が2.80%, その他は0.5%以下であった. なお, 国内で検出された変異株及び亜系統の当該変異保有率は, 0.00-0.91%であった. 一方, 北アメリカ地域, ヨーロッパ地域, アジア地域では, 0.03-

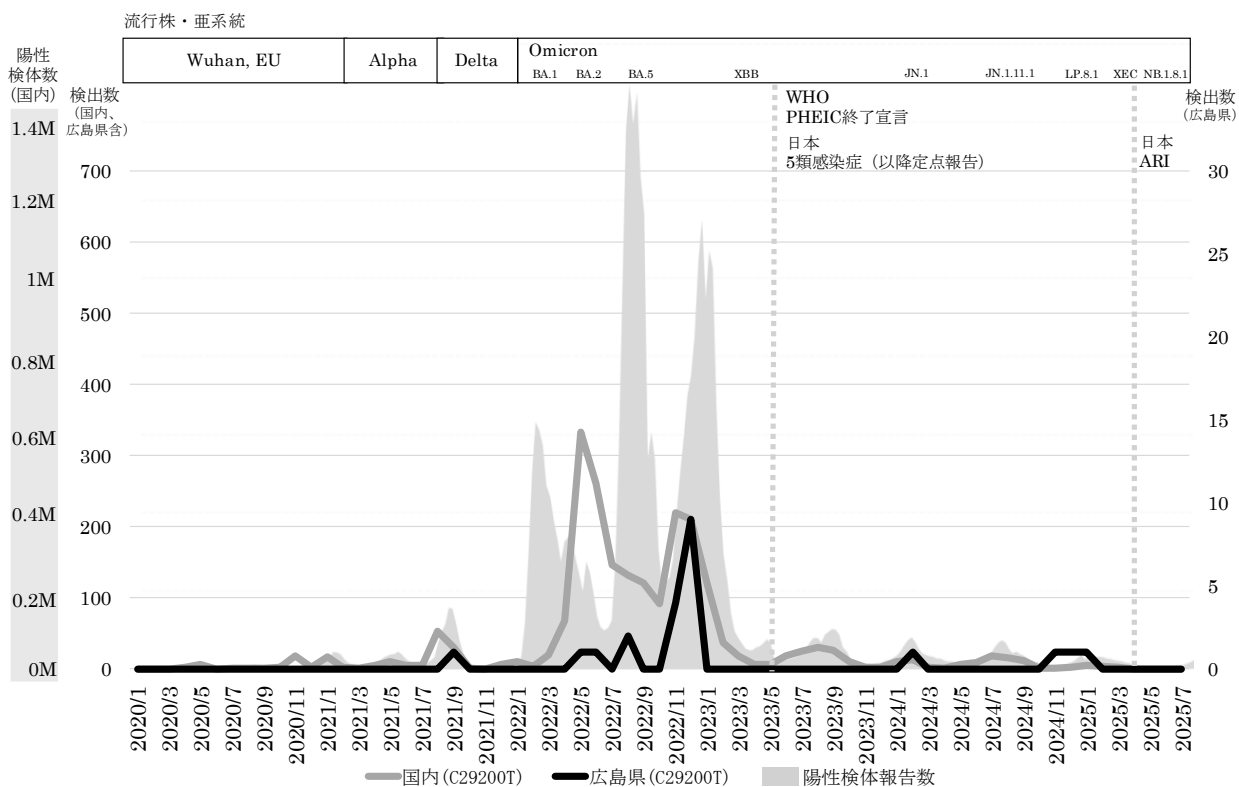


図2 C29200T変異を保有するSARS-CoV-2の月別検出状況と陽性検体報告数 (広島県, 国内)

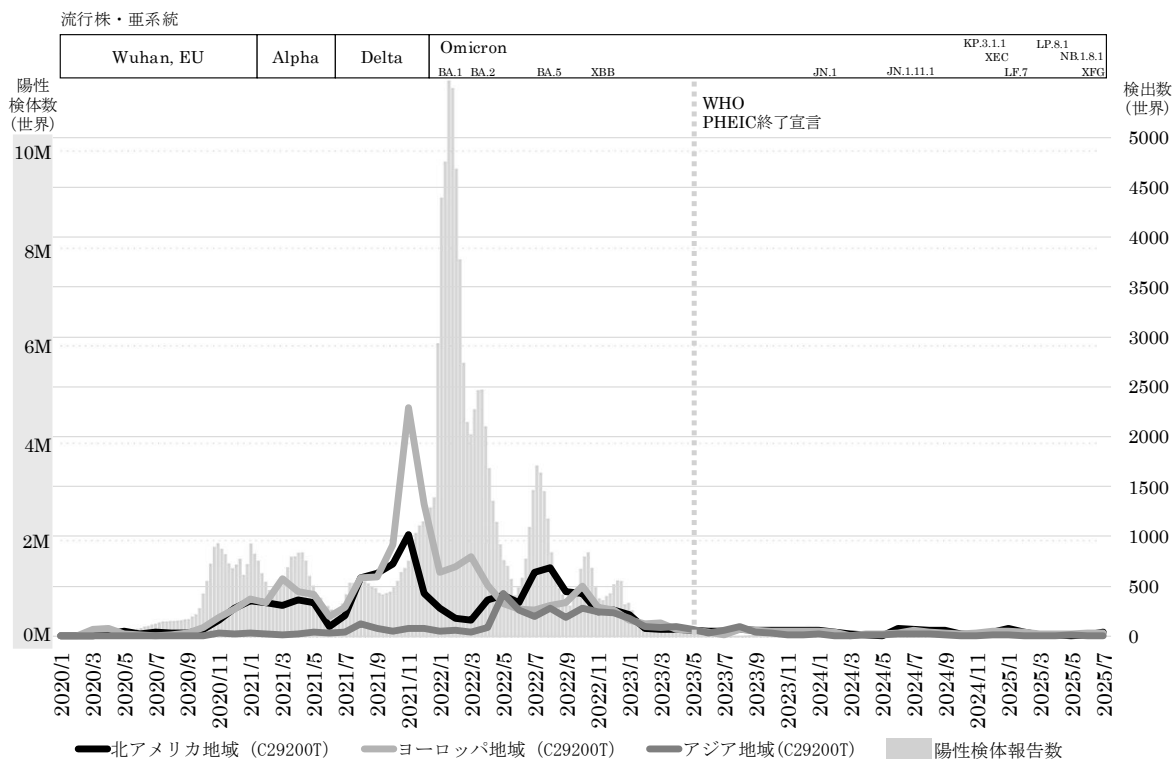


図3 C29200T変異を保有するSARS-CoV-2の月別検出状況と陽性検体報告数 (北アメリカ地域, ヨーロッパ地域, アジア地域)

表2 C29200T変異を保有するSARS-CoV-2の変異株・亜系統の検出状況
(広島県, 国内, 北アメリカ地域, ヨーロッパ地域, アジア地域)

広島県	%	日本	%		
All time	0.46 (23/4,977)	All time	0.32 (2,188/692,159)		
Alpha	0.00 (0/1,057)	Alpha	0.04 (23/52,053)		
Delta	0.14 (1/738)	Delta	0.09 (92/97,004)		
21K (Omicron, BA.1)	0.00 (0/672)	21K (Omicron, BA.1)	0.03 (23/82,565)		
21L (Omicron, BA.2)	0.45 (3/669)	21L (Omicron, BA.2)	0.91 (724/79,494)		
22B (Omicron, BA.5)	4.09 (15/367)	22B (Omicron, BA.5)	0.47 (1,007/215,794)		
Omicron, XBB*	0.33 (1/302)	Omicron, XBB*	0.27 (137/50,276)		
24A (Omicron, JN.1)	0.00 (0/110)	24A (Omicron, JN.1)	0.00 (0/2,405)		
Omicron, KP.3*	2.80 (3/107)	Omicron, KP.3*	0.46 (65/14,265)		
24F (Omicron, XEC)	0.00 (0/54)	24F (Omicron, XEC)	0.16 (5/3,167)		
24H (Omicron, LF.7)	-(0/0)	24H (Omicron, LF.7)	0.00 (0/57)		
25A (Omicron, LP.8.1)	0.00 (0/11)	25A (Omicron, LP.8.1)	0.24 (1/419)		
25B (Omicron, NB.1.8.1)	0.00 (0/50)	25B (Omicron, NB.1.8.1)	0.37 (3/814)		
25C (Omicron, XFG)	-(0/0)	25C (Omicron, XFG)	0.00 (0/54)		
					XBB* (Nextclade) KP.3* (Nextclade) % (C29200T/All samples)
北アメリカ地域	%	ヨーロッパ地域	%	アジア地域	%
All time	0.20 (12,157/6,217,216)	All time	0.20 (15,786/8,090,821)	All time	0.22 (3,970/1,776,172)
Alpha	0.17 (511/295,336)	Alpha	0.21 (1,698/824,927)	Alpha	0.08 (67/79,342)
Delta	0.21 (3,461/1,624,952)	Delta	0.25 (6,003/2,362,472)	Delta	0.15 (439/284,445)
21K(Omicron, BA.1)	0.05 (546/1,037,812)	21K(Omicron, BA.1)	0.06 (710/1,240,129)	21K(Omicron, BA.1)	0.03 (50/154,191)
21L(Omicron, BA.2)	0.25 (817/327,287)	21L(Omicron, BA.2)	0.17 (2,247/1,343,466)	21L(Omicron, BA.2)	0.33 (911/275,631)
22B(Omicron, BA.5)	0.35 (2,382/678,216)	22B(Omicron, BA.5)	0.23 (1,859/823,203)	22B(Omicron, BA.5)	0.40 (1,559/384,950)
Omicron, XBB*	0.14 (656/480,071)	Omicron, XBB*	0.17 (529/317,054)	Omicron, XBB*	0.17 (362/210,220)
24A(Omicron, JN.1)	0.14 (205/147,186)	24A(Omicron, JN.1)	0.18 (154/83,833)	24A(Omicron, JN.1)	0.09 (40/46,183)
Omicron, KP.3*	0.18 (172/97,845)	Omicron, KP.3*	0.18 (109/60,407)	Omicron, KP.3*	0.37 (73/19,541)
24F(Omicron, XEC)	0.36 (105/29,142)	24F(Omicron, XEC)	0.90 (170/18,933)	24F(Omicron, XEC)	0.13 (7/5,271)
24H(Omicron, LF.7)	0.22 (9/4,099)	24H(Omicron, LF.7)	0.71 (35/4,933)	24H(Omicron, LF.7)	0.60 (11/1,840)
25A(Omicron, LP.8.1)	0.14 (27/19,665)	25A(Omicron, LP.8.1)	0.14 (9/6,508)	25A(Omicron, LP.8.1)	0.18 (3/1,622)
25B(Omicron, NB.1.8.1)	0.03 (1/2,890)	25B(Omicron, NB.1.8.1)	0.06 (2/3,088)	25B(Omicron, NB.1.8.1)	0.17 (15/8,771)
25C(Omicron, XFG)	0.50 (42/8,435)	25C(Omicron, XFG)	0.42 (40/9,561)	25C(Omicron, XFG)	0.34 (7/2,031)

0.90%であり、地域毎にみても変異株及び亜系統間で当該変異の保有に大きな差は認められなかった。

考 察

SARS-CoV-2の流行当初から現在までのC29200T変異保有率は、広島県内で0.46%、国内で0.32%、世界(北アメリカ地域, ヨーロッパ地域, アジア地域)では0.20-0.22%であり、当該変異を保有する株は、流行の主流ではなかったと考えられた。

広島県と国内では、陽性検体数の増減の波とC29200T変異の保有率の上昇に連動が見られず、各ピークには差が見られた(図2)。なお、今回使用した陽性検体報告数は報告日で、データベースに登録された当該変異を保有する株は検体採取日で集計されているため直接比較することは難しいが、それらを考慮した上でも、連動があるとはいえなかった。

北アメリカ地域, ヨーロッパ地域では、2021年1月から2022年7月の、特にDeltaの流行期に当該変異保有株の増加が見られた(図3)が、国内では大きな増加が

見られなかった(図2)。国内では、Deltaの流行期に緊急事態宣言やまん延防止等重点措置等の流行対策がとられたため、結果として国内に流入するDeltaの多様性が抑制され、当該変異を保有するウイルスの流行も抑制された可能性が考えられた。

以上のことから、C29200T変異保有株は、SARS-CoV-2の流行初期から現在まで、確認される時期及び変異を保有する変異株・亜系統に偏りが認められず、かつ世界中で検出されていることから、変異はウイルスの進化に伴うものではなく、偶発的な点変異であることが推測された。また、当該変異の保有率は全体的に低く、流行への寄与は極めて低いものと考えられた。

既報[8-11]にあるように、検査診断試薬の多くは専用の検出システムが用いられており、検出系の詳細やデータ解析プログラムが非公開とされていることがある。また、検査結果が定性で示されるシステムでは、今回の検討のように、ウイルスの変異により結果が偽陰性と判定された事例の検証が困難である。特に、今回の変異部位の偽陰性については、プローブ領域の変異により、PCRの検出シグナルが陽性判定閾値には達し

なかったため、サンプルが陰性と判定された可能性が想定される。このような偽陰性判定は、複数の遺伝子領域をターゲットとすることで防止できると考えられる。

なお、2023年5月以降の解析については、PHEICの終了宣言によるGISAI[14]へのデータ登録数の減少を考慮する必要がある。また、世界のデータは、登録国及び登録数に偏りがあることに留意する必要がある。

結 語

SARS-CoV-2の遺伝子検査に影響を与えるN遺伝子のC29200T変異を持つウイルスが、全体に占める割合は限定的であるものの、広島県内、国内及び全世界で検出されていたことが明らかとなった。当該変異は、変異株・亜系統によらず出現しており、病原体の遺伝子検査に偽陰性をもたらす事例があることから、臨床診断に際しては、このような可能性を踏まえた上で検査結果を判断する必要があると考えられる。このことから、特に新しい病原体の流行対策においては、二つ以上の遺伝子領域を標的とした検査を行うこと、検査結果に疑義が生じた場合は別の方法で検査を実施すること等、検査精度を担保する方法の選択を視野に入れておく必要がある。また、SARS-CoV-2のNGSによる世界規模での監視の継続は、検査に影響を与える変異を持つウイルスの検知及び注意喚起等に重要な役割を果たしている。

謝 辞

使用した登録データ及び解析システムについて、国立感染症研究所、医療機関、行政機関、GISAI、Nextclade、Nextstrain、covSPECTRUM、ご協力いただいた全ての皆様に感謝いたします。

また、本解析はPathoGenS (Pathogen Genomic data collection System) を使用しています。PathoGenSは厚生労働省行政推進事業補助金 新興・再興感染症及び予防接種政策推進研究事業 (JPMH21HA2003, JPMH24HA2005) の助成を受け運用されています。

文 献

[1] Zhou P, Yang X L, et al. A pneumonia outbreak associated with a new coronavirus of probable bat

origin. *Nature*. 2020, 579(7798), 270-273.

[2] Zhu N, Zhang D, et al. A Novel Coronavirus from Patients with Pneumonia in China, 2019. *N Engl J Med*. 2020, 382(8), 727-733.

[3] World Health Organization. "WHO Coronavirus (COVID-19) Dashboard, Latest reported counts of COVID-19 cases and deaths". modified 2020-03-22. <https://data.who.int/dashboards/covid19/summary?n=c>, cited 2025-09-15.

[4] 国立健康危機管理研究機構. "新型コロナウイルス感染症". 国立健康危機管理研究機構感染症情報提供サイト. 2021-09-30. <https://id-info.jihgs.go.jp/infectious-diseases/covid-19/index.html>, 参照 2025-09-15.

[5] 厚生労働省. "新型コロナウイルス感染症 (COVID-19) 診療の手引き 第10.1版". 2024-04-23. <https://www.mhlw.go.jp/content/001248424.pdf>, 参照 2025-09-15.

[6] World Health Organization. "WHO policy brief: COVID-19 surveillance". modified 2024-12-10. <https://www.who.int/publications/m/item/who-policy-brief-covid-19-surveillance>, cited 2025-09-15.

[7] Shirato K, Naganori N, et al. Development of Genetic Diagnostic Methods for Novel Coronavirus 2019 (nCoV-2019) in Japan. *Jpn J Infect Dis*. 2020, 73(4), 304-307.

[8] Mori H, Yoshida H, et al. Stealth Omicron: a novel SARS-CoV-2 variant that is insensitive to RT-qPCR using the N1 and N2 primer-probes. *Cureus*. 2023, 15(3), e36373.

[9] Isabel S, Abdulnoor M, et al. Emergence of a mutation in the nucleocapsid gene of SARS-CoV-2 interferes with PCR detection in Canada. *Sci Rep*. 2022, 12(1), 10867.

[10] Ziegler K, Steininger P, et al. SARS-CoV-2 samples may escape detection because of a single point mutation in the N gene. *Euro Surveill*. 2020, 25(39), 2001650.

[11] Miller S, Lee T, et al. Single-Point Mutations in the N Gene of SARS-CoV-2 Adversely Impact Detection by a Commercial Dual Target Diagnostic Assay. *Microbiol Spectr*. 2021, 9(3), e01494-21.

- [12] 国立健康危機管理研究機構. “病原体検出マニュアル「感染研・地衛研専用」SARS-CoV-2 遺伝子検出・ウイルス分離マニュアル Ver.1.1”. 国立健康危機管理研究機構感染症情報提供サイト. 2021-02-08. https://id-info.jihs.go.jp/manuals/pathogen-detection/SARS-CoV-2_gene_detect_and_isolation_manual_Ver1_1.pdf, 参照 2025-9-15.
- [13] 国立健康危機管理研究機構. “新型コロナウイルスゲノム解読プロトコル (Qiagen社 QiaSEQ FX編) v1.4”. 国立健康危機管理研究機構感染症情報提供サイト. 2022-01-27. https://id-info.jihs.go.jp/manuals/pathogen-detection/SARS-CoV2_genome_analysis_manual_QIASEQFX_ver_1_4_220127.pdf, 参照 2025-09-15.
- [14] Elbe S, Buckland-Merrett G. Data, disease and diplomacy: GISAID's innovative contribution to global health. *Glob Chall*. 2017, 1(1), 33-46.
- [15] Aksamentov I, Roemer C, et al. Nextclade: clade assignment, mutation calling and quality control for viral genomes. *J Open Source Softw*. 2021, 6(67), 3773.
- [16] Chen C, Nadeau S, et al. CoV-Spectrum: analysis of globally shared SARS-CoV-2 data to identify and characterize new variants. *Bioinformatics*. 2022, 38(6), 1735–1737.
- [17] 国立健康危機管理研究機構. “感染症発生動向調査週報一覧”. 国立健康危機管理研究機構感染症情報提供サイト. <https://id-info.jihs.go.jp/surveillance/idwr/idwr/index.html>, 参照 2025-09-15.
- [18] World Health Organization. “WHO COVID-19 dashboard, Weekly COVID-19 cases and deaths by date reported to WHO”. <https://data.who.int/dashboards/covid19/data?n=c>, cited 2025-09-15.

資料

感染症発生動向調査におけるエコーウイルス 11 型の検出事例

鈴藤 和, 大関 雅暉*, 池田 周平**, 高尾 信一***, 末井 真菜, 伊藤 彩乃, 谷澤 由枝,
島津 幸枝, 中島 安基江, 重本 直樹

Detection and molecular analysis of Human echovirus 11 in Hiroshima Prefecture and Retrospective investigation of genotypes of Enterovirus detected in Hiroshima Prefecture (2020-2025)

SUZUTO Madoka, OZEKI Masaki*, IKEDA Syuhei**, TAKAO Shinichi***, SUEI Mana,
ITO Ayano, TANIZAWA Yukie, SHIMAZU Yukie, NAKASHIMA Akie
and SHIGEMOTO Naoki

(Received: October 17, 2025)

広島県の感染症発生動向調査において、2025年5月から6月にかけて、A市で無菌性髄膜炎を呈した乳児（症例1）及び咽頭炎を呈した乳児（症例2及び症例3）からエコーウイルス11型（E11）が検出された。エンテロウイルス（EV）遺伝子のVP1領域の塩基配列に基づく系統樹解析を実施したところ、2023年に欧州で乳児の重症例が多数報告されているE11 new lineage 1と同じ系統に属しており、2018年に広島県内で検出されたE11とは異なるlineageとなった。さらに、2020年1月から2025年7月までに広島県内の小児から検出されたEVのうち、型別可能であった185件について、患者の病態とウイルス型について遡り調査を実施したところ、県内では季節に関わらず年間を通じて複数のウイルス型のEVが流行しており、様々な病態の患者が発生していることが判明し、特に乳児及び新生児については、E11だけでなくEV-A71やコクサッキーA群及びコクサッキーB群による重症化に注意が必要であると考えられた。

Key words : エコーウイルス11型, エンテロウイルス, 遺伝子型別検査, 感染症発生動向調査事業

結 言

エコーウイルス11型(E11)はエンテロウイルス(EV)属の一種であり、エンテロウイルス(EV)とはピコornaウイルス科に属するRNAウイルスの総称で、コクサッキーウイルスA群(CV-A)、コクサッキーウイルスB群(CV-B)、エコーウイルスなどが含まれる[1]。EV感染症は手足口病をはじめとして幅広い病態を示す疾患であり、多くは自然軽快するが、一方で、髄膜炎や敗血症、心筋炎などを引き起こす場合があり、特に新生児や乳児では注意を要する[1]。2022年7月から2024年3月までに、フランスにおいてE11に関連する急性肝不全を伴う重症新生児敗血症の報告が増加した[2]。また、他の欧州諸国(クロアチア, イタリア, スペイン, スウェーデン, イギリス)でも新生児のE11

感染例が報告され[3,4]、世界保健機関(WHO)および厚生労働省検疫所(FORTH)から注意喚起がされていた[5]。国内では2024年にE11によるウイルス性肝炎や急性脳炎の重症例が報告され[6-8]、2025年2月に厚生労働省からE11感染症の実態把握についての事務連絡[9]が発出され、生後3か月以下の乳児の重症例について、医療機関による届出や相談及び積極的疫学調査の実施要請がされている。

今回、広島県の感染症発生動向調査において、2025年5月から6月にかけて、A市で無菌性髄膜炎を呈した乳児と咽頭炎を呈した乳児からE11が検出されたことから、その系統について解析するとともに、EV全体の動向を調査する目的で、2020年から2025年までに検出されたEVについて患者の病態とウイルス型を調査し、いくつかの知見が得られたことから、これらについても合わせて報告する。

*広島県感染症・疾病管理センター：Hiroshima Prefectural Health and Welfare Affairs Bureau, Health Crisis Management Division, Hiroshima Prefectural Centers for Disease Control and Prevention

**広島県西部厚生環境事務所・保健所広島支所：Hiroshima Prefectural Western-side Office of Health, Welfare and Environment Hiroshima Branch, Public Sanitation and Environment Division

***広島県西部畜産事務所：Hiroshima prefectural Western Office of Livestock Industry

材料と方法

1 感染症発生動向調査におけるエコーウイルス11型 (E11) の検出

(1) 2025年E11陽性症例の概要

症例1は、1カ月齢の女児。発熱、咳、上気道炎、下気道炎、髄膜炎を呈し、2025年5月11日にA市の医療機関を受診し入院した。睡眠時の浅い呼吸があり、血液検査において、AST 214U/L, ALT 142U/L, LDH 511U/Lと肝機能障害を示唆する数値を示した。医療機関におけるLAMP検査において百日咳菌が陽性であった。症例2は、7カ月齢の男児。2025年5月5日から咳を呈しており、2025年5月8日にA市の医療機関を受診し、急性呼吸器感染症 (ARI) サーベイランスの対象として検体採取された。患者の発熱は無く、同居家族には呼吸器症状は認めなかった。症例3は、1歳3カ月齢の女児。2025年6月3日に発熱、湿性の咳、鼻汁を呈し、同日にA市の医療機関を受診し、ARIサーベイランスの対象として検体採取された。患者はA市の保育施設に通っており、施設では同様の症状を認める呼吸器感染症が流行していた。同居家族に呼吸器症状は認めなかった。

(2) 病原ウイルスの遺伝子検査

症例1は、髄液、咽頭拭い液、便を試料にそれぞれ核酸抽出を行い、EV、ライノウイルス、ヒトパレコウイルス、ヒトヘルペスウイルス6型及び7型、パルボウイルスB19、単純ヘルペスウイルス1型及び2型のリアルタイムRT-PCR検査を実施した。EVについては5'UTR領域をターゲットとし、表1のプライマー及びプローブ (Hypercool Probe) を用い、ライノウイルスと同時に検出を可能としたデュプレックスリアルタイムRT-PCRを実施した。症例2及び症例3はARIサーベイランスで採材された咽頭拭い液を試料に核酸抽出を行い、インフルエンザA型及びB型、新型コロナウイルス、RSウイルス、ヒトアデノウイルス、ライノ/エンテロウイルス、パラインフルエンザウイルス (1, 2, 3, 4型)、ヒトメタニューモウイルス及び季節性コロナウイルス

のリアルタイムRT-PCR検査を、JIHS感染症研究所が示した急性呼吸器感染症サーベイランス遺伝子検査マニュアル第1版に従い実施した。

(3) E11の遺伝子解析

(2)でEV陽性となった検体について、病原体検出マニュアル[10]に準じたPCR法によるEV遺伝子のVP1及びVP4-VP2領域の検出、VP1領域の塩基配列に基づく系統樹解析を実施した。(2)でのEV陽性検体のRNAをテンプレートに、表2のプライマーを使用し、表3のPCR反応試薬及び反応条件によりNested-PCRを行った。VP4-VP2領域は、増幅産物がシングルバンドの場合はQIAquick PCR Purification Kit (キアゲン) を、複数バンドの場合は目的のバンドの切り出しを行い、QIAquick Gel Extraction Kit (キアゲン) を使用してPCR産物の精製を行った。その後、BigDye Terminator v3.1 Cycle Sequencing Kit (Applied Biosystems) にてシーケンス反応を行い、Applied Biosystems 3500 Genetic Analyzer (Applied Biosystems) にて塩基配列を解読、得られた塩基配列データについて、NCBIサイトでのBLASTによる相同性検索[11]や、遺伝子解析ソフトMEGA X [12]により2022年から2023年に欧州で流行したE11の配列情報を用いて近隣結合法による系統樹解析を行った。

(4) E11陽性症例の遡り調査

2014年から2025年までに、広島県の感染症発生動向調査においてE11が検出された症例について調査し、発生状況をまとめた。

2 県内のエンテロウイルス陽性症例の遡り調査 (2020年-2025年)

感染症発生動向調査事業において、2020年から2025年6月までに広島県内の小児科医療機関から搬入された臨床検体のうち、当センターの検査において遺伝子検査及びウイルス分離検査によりEVが検出され、EVの遺伝子型別が可能であった185検体について、患者の病態とウイルス型を調査した。

表1 症例1のリアルタイムRT-PCR検査に用いたプライマー及びプローブ

対象ウイルス	プライマー・プローブ名	Sequence(5' to 3')	参考文献
EV,ライノウイルス	Primer	Enterο-NTR-F	GCC CCT GAA TGY GGM TA
		Enterο-NTR-R	GAA ACA CGG WCA CCC AAA G
	Probe	Enterο-NTR-HypProbe	LC Yellow555-YGY RGC <u>GGA ACC GAC</u> TA-BHQ1
		Rino2-NTR-HypProbe	FAM-YGG GAY GGR <u>ACC RAC</u> TA-BHQ1

下線部を2-amino-dA及び5-Methyl-dCで修飾

表2 エンテロウイルス (EV) のPCRに用いたプライマー

増幅領域		プライマー名	Sequence(5' to 3')	参考文献
VP1領域	1stPCR	Primer SO224	GCI ATG YTI GGI ACI CAY RT	14
		SO222	CIC CIG GIG GIA YRW ACA T	
	NestedPCR	Primer AN89	CNT GGG AGG GCG ATC GCA A	
		AN88	TAC TGG ACC ACC TGG NGG NAY RWA CA	
VP4-VP2領域	1stPCR	Primer EVP2	CCT CCG GCC CCT GAA TGC GGC TAA T	15
		EVP4	CTA CTT TGG GTG TCC GTG TT	16
	semi-NestedPCR	Primer OL-68	GGT AAY TTC CAC CAC CAN CC	17

表3 エンテロウイルス (EV) の遺伝子型別検査に用いた試薬と反応条件

増幅領域		試薬及び反応条件
VP1領域	RT	PrimeScript RT reagent Kit (タカラバイオ) 94°C/15min→85°C/5sec→4°C/5min
	1st PCR	Ex Taq (タカラバイオ) 94°C/3min→(95°C/30sec・42°C/30sec・72°C/45sec) × 40→72°C/5min
	2nd PCR	Ex Taq (タカラバイオ) 94°C/60sec→(95°C/30sec・60°C/30sec・72°C/30sec) × 40→72°C/5min
VP4-VP2領域	RT,1st PCR	Access RT-PCR System (Promega) 48°C/45sec→94°C/2min→(94°C/10sec・52°C/10sec・65°C/1min) × 45→65°C/5min
	semi-NestedPCR	GoTaq Colorless Master Mix (Promega) 94°C/2min→(94°C/40sec・55°C/40sec・72°C/1min) × 45→72°C/5min

結 果

1 感染症発生動向調査におけるエコーウイルス11型 (E11) の検出

(1) 2025年E11陽性症例の遺伝子検査結果

リアルタイムRT-PCR検査において、症例1の髄液、咽頭拭い液、便及び症例2の咽頭拭い液からEV遺伝子が検出された。その他のウイルスは全て陰性であった。症例3の咽頭拭い液からはEV遺伝子及びヒトアデノウイルス (HAdV) 遺伝子が検出された。HAdVについては、遺伝子型検査を実施した結果、HAdV2であった。

(2) E11の遺伝子解析

症例1の髄液、咽頭拭い液、便、症例2及び症例3の咽頭拭い液を材料にVP4-VP2領域のPCRを実施し、症例1、症例2及び症例3の咽頭拭い液は1stPCR産物でEV遺伝子が確認され、症例1の髄液及び便は2ndPCR産物でEV遺伝子が確認された。また、症例1、症例2及び症例3の咽頭拭い液を材料にVP1領域のPCRを実施したところ、いずれも1stPCR産物でEV遺伝子が確認された。VP4-VP2領域及びVP1領域の各PCRで検出されたEV遺伝子の塩基配列を解読し

たところ、BLASTによる相同性検索により、VP4-VP2領域及びVP1領域の塩基配列はE11と一致した。なお、症例1及び症例2から検出されたEVのVP1領域の塩基配列は100%一致した。国内及び欧州の既報[6-8]を参考に、症例1、症例2及び症例3から検出されたE11のVP1領域の塩基配列と、2022年から2023年までに欧州で流行したE11の塩基配列の系統樹解析を行ったところ、欧州で流行したE11と同様にE11 new lineage 1に属することが確認された (図1)。また、2018年に検出されたE11の塩基配列も同時に解析したところ、new lineage 1とは別のlineageとなった。

(2) E11陽性症例の遡り調査 (2014年-2025年)

2014年から2025年までに、広島県内で15人のE11陽性症例が確認された (表4)。居住地は7市町、年齢は1カ月齢から8歳、診断名は無菌性髄膜炎、急性呼吸器感染症 (ARI)、上気道炎、風疹疑い及びけいれん重積であった。これら15症例の年齢と臨床症状を精査したところ、厚生労働省が注意喚起しているE11感染症の暫定症例定義[9]に合致する症例は2025年の症例1のみであった。

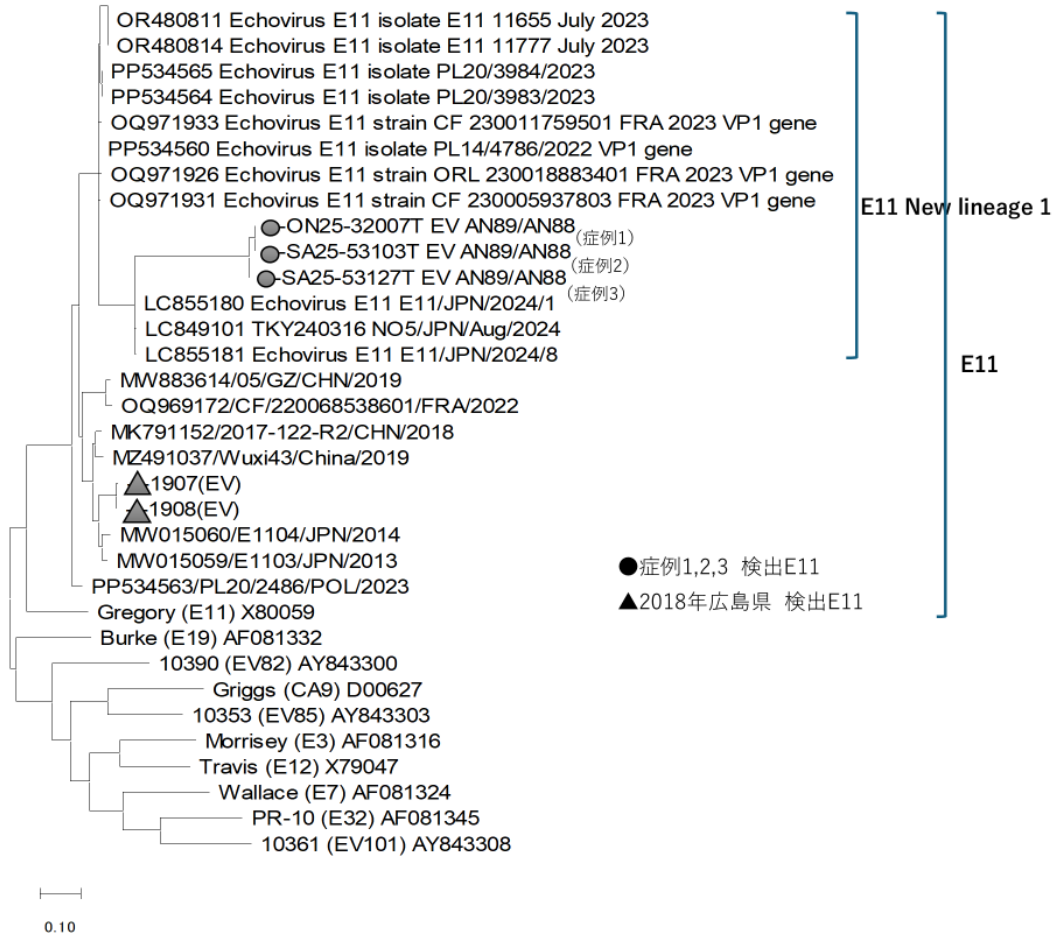


図1 2025年に県内で検出されたエコーウイルス11型の系統樹解析
(エンテロウイルス (EV) VP1領域 約300bp)

表4 広島県内でエコーウイルス11型 (E11) が検出された症例 (2014-2025)

検体採取日	居住地	年齢	診断名	臨床症状				暫定症例定義に合致 (生後3か月以下の重症例)	その他の 検出ウイルス	図1 (系統樹) に記載
				無菌性髄膜炎	上気道炎	肝機能障害	その他 (特記事項)			
2025/6/3(症例3)	A市	1y3m	急性呼吸器感染症(ARD)		○				Ad2	○
2025/5/15(症例1)	A市	1m	無菌性髄膜炎	○	○	○	百日咳	○		○
2025/5/8(症例2)	A市	7m	急性呼吸器感染症(ARD)		○					○
2018/12/4	D市	2y6m	感染性胃腸炎							○
2018/12/3	D市	2y5m	感染性胃腸炎							○
2018/11/28	F市	2y10m	感染性胃腸炎						SaV	○
2018/6/26	A町	5y2m	無菌性髄膜炎	○						
2017/7/17	E市	8y	夏かぜ		○		発疹			
2015/7/31	B市	4y	無菌性髄膜炎	○						
2014/12/9	B市	0y	無菌性髄膜炎	○						
2014/12/9	B市	0y	無菌性髄膜炎	○						
2014/12/9	B市	0y	無菌性髄膜炎	○						
2014/11/21	C市	4y	風疹疑い				発疹			
2014/10/29	D市	1y3m	上気道炎		○				RSV	
2014/2/5	B市	2y	けいれん重積							

Ad2: アデノウイルス2型, SaV: サボウイルス, RSV: ヒトRSウイルス

2 県内のエンテロウイルス陽性症例の遡り調査 (2020年-2025年)

(1) 疾病名別集計結果

2020年から2025年までに感染症発生動向調査でEVが検出された疾病名別患者数を図2に示した。また、疾病名別の全体に占める割合を図3に示した。疾病名では、手足口病が77人(41.6%)と最も多く、5月から11月までに患者が多く認められる傾向があった。次いで上気道炎が34人(18.4%)、ヘルパンギーナが21人(11.4%)、原因不明の発疹症が20人(10.8%)であった。無菌性髄膜炎は16人(8.6%)で、発生時期は5月が2人、7月が7人、8月が5人、9月が1人、10月が1人と5月から10月に発生しており、EV流行期とされる時期に患者が認められる傾向があった。その他には、下気道炎が6人(3.2%)、感染性胃腸炎が6人(3.2%)、発熱のみが3人(1.6%)、脳症が2人(1.1%)であった。なお、無菌性髄膜炎、急性脳症及び不明熱の合併症として、肝機能障害が3人(1.6%)に認められた。

(2) ウイルス型別集計結果

2020年から2025年までに感染症発生動向調査で検出されたEVのウイルス型別患者数を図4に示した。2020年8月から12月及び2024年5月から11月はコクサッキーウイルス(CV) A16型(CV-A16)が、2021年11月から2022年3月及び同年6月から12月、2023年5月から11月及び2024年5月から10月はCV-A6が多く検出され、それぞれの期間では手足口病及びヘルパンギーナが流行しており、それらの患者からの検出例が多かった。2022年8月から2023年7月はCV-A2がヘルパンギーナや気道炎患者から、2023年はCV-B5が気道炎や無菌性髄膜炎の患者から多く検出された。無菌性髄膜炎及び脳症の患者からは、CV-B3、B5が複数人から検出され、さらにエンテロウイルスA71(EV-A71)、CV-A2、CV-A16、CV-B4の検出が認められた。これらの症例の中には、同時期に手足口病や咽頭炎等で流行していたウイルス型に起因する例が散見された。なお、E11は2025年5月から6月にかけて3人から検出されたが、2020年から2025年4月までの検出例は無かった。

考 察

2025年5月から6月にかけて広島県内でも、欧州諸国

で乳児の重症例が報告されていたE11 new lineage 1に属するウイルスが無菌性髄膜炎及び咽頭炎の患者から検出された。これらは、2018年に広島県内で検出されたE11とは異なるlineageに属していた。それぞれの感染経路については、症例2は不明であったが、症例1の患者については同居家族である小児から百日咳菌に感染しており、百日咳菌だけでなくその他の病原体にも感染する可能性のある状態にあったと推測された。症例3は保育施設内で感染した可能性が考えられた。神戸市において2024年8月から11月までに複数の医療機関で発生したE11感染症については、地理的近接性が認められず、感染経路はそれぞれ別々であったと考えられていた[7]が、今回報告した3症例は短期間に同じ市内で確認されており、地理的近接性が認められたことから、E11の地域的な流行があった可能性が考えられた。よって、E11を含むEV感染症の予防には、流行時に周囲の人から乳幼児への感染予防対策が非常に重要であると考えられた。

今回、症例1では百日咳菌が検出されており、E11だけでなく百日咳菌の呼吸器症状への影響が考えられたが、一方で、髄液、咽頭拭い液および便からE11が検出されたことから、中枢神経症状および肝酵素上昇についてはE11の感染が関与した可能性が高いと考えられた。E11症例の臨床経過については、2024年に東京都で肝不全、多臓器不全を発症した3例のE11感染新生児は、全て死亡している[6]が、今回の症例1については経過が良好であり退院していた。東京都の症例は2024年8月または11月の発生であり、症例1とは発症時期が異なっていた。また、年齢も7日齢から8日齢と極めて若齢であったが、症例1は1カ月齢と生後しばらく経過していたことが回復に寄与した可能性が考えられた。しかし、神戸市の事例では、東京都と月齢及び発症時期は類似しているが、全例において肝逸脱酵素の上昇を認めず、中枢神経感染症であったにもかかわらず数日で後遺症なく退院できている[7]。新生児の重篤なエコーウイルス感染症の罹患数と症状、死亡率の調査において、肝炎の死亡率が中枢神経感染より高い傾向が報告されているが[18]、症例1は肝逸脱酵素の上昇を認めているが経過が良好であったことから、E11の臨床スペクトラムは幅広いことが示唆された。

2020年から2025年までの遡り調査では、広島県内では季節に関わらず通年に渡って複数のウイルス型のEVが流行しており、様々な病態を引き起こしていることが明らかとなった。EVの検出数は、2020年23人、

2021年19人, 2022年26人, 2023年60人, 2024年52人, 2025年6月までに5人と推移した。2020年から2022年までの検出数が少ない理由は, 新型コロナウイルス感染症の流行対策として, 感染予防対策が積極的に行われた影響と考えられた。2023年にEVの検出数が増加した理由は, 新型コロナウイルスの流行が3年目となり, これまでの規制が緩和され人流が活発化すると共に, 徐々に感染予防対策に緩みが生じたことが影響したためと推測された。検出時期については, 夏季の小児の急性熱性疾患にはEVの流行が関与することが多いと言われている[1]が, 今回の調査でも小児の間で通年に渡って流行していることが認められた。

全国から病原体検出情報システムへ報告されたE11のうち, 2024年(12月28日時点での集計)は46例が登録されていた。これは, 2018年, 2019年に次いで多く, 2024年11月28日までに集計された44例のうち重篤と判断された診断名は, 髄膜炎9例, 脳炎・脳症2例, 肝炎2例, ショック1例であった[19]。今回, 広島県で実施した調査において, 無菌性髄膜炎, 脳症及び肝機能障害を認めた患者の年齢を調査したところ, 患者は全て乳幼児であり, 無菌性髄膜炎については, 年齢は1カ月齢未満が4人, 1カ月齢が5人, 2カ月齢が2人と, 計11人であり, その他は, 4カ月齢が1人, 3歳が1人, 0歳とされていた患者が1人であった。肝機能障害については, 無菌性髄膜炎及び急性脳症を併発した患者がいずれも1カ月齢, 不明熱を併発した患者が1歳1カ月齢であった。また, 脳症については, 2022年8月の1例は上気道炎と無菌性髄膜炎及び脳症を併発した症例であり, 2024年9月の1例は急性脳症と肝機能障害を併発した症例であった。県内で確認された小児のEV関連の無菌性髄膜炎患者の多くは, E11感染症について注意喚起されていた暫定症例定義に合致する月齢である0カ月齢から3カ月齢までであったことから, 新生児期及び乳児のEV感染症対策の重要性が再認識される結果となった。さらに, 無菌性髄膜炎患者からは, 複数のウイルス型のEVが検出されており, E11だけでなく, EV-A71やCV-A及びCV-Bによる重症化についても注視していく必要があると考えられた。

結 語

2022年から欧州諸国で乳児の重症例が多数報告されているE11 new lineage 1が, 広島県内でも, 無菌性髄膜炎及び咽頭炎の小児患者から検出された。検出さ

れたウイルスは, 2018年に県内で検出されたE11とは異なっていた。現在, E11のnew lineage 1は, 日本を含む世界各国で報告されており, その流行が懸念されている。また, 小児期のE11感染症は十分解明されていない点が多いことから, 引き続きE11の流行状況の把握に努めるとともに, 広島県内で流行する様々なEVについても, 重症化する患者の発生を予防するために, 流行状況を把握し, 流行期には手洗い等の感染防止対策の励行等の注意喚起を積極的に行っていくことが重要である。

謝 辞

本調査研究を行うにあたり, 広島県感染症発生動向調査事業において検体採取を担当された医療機関の諸先生方, 保健所および関係各位に御礼申し上げます。

文 献

- [1] 細矢光亮. “エンテロウイルス”. 日本小児感染症学会編. 日常診療に役立つ小児感染症マニュアル 2012.東京医学社, 2012, 471-81.
- [2] Grapin M, Mirand A, et al. Severe and fatal neonatal infections linked to a new variant of echovirus 11, France, July 2022 to April 2023. *Euro Surveill.* 2023, 28(22), 2300253. doi:10.2807/1560-7917.ES.2023.28.22.2300253.
- [3] Piralla A, Borghesi A, et al. Fulminant echovirus 11 hepatitis in male non-identical twins in northern Italy, April 2023. *Euro Surveill.* 2023, 28(24), 2300289. doi:10.2807/1560-7917.ES.2023.28.24.2300289.
- [4] World Health Organization (WHO). Enterovirus-echovirus 11 infection- the European region. <https://www.who.int/emergencies/disease-outbreak-news/item/2023-DON474>, cited 2024-12-26
- [5] 厚生労働省検疫所FORTH.エンテロウイルス・エコーウイルス11型感染症—ヨーロッパ地域, *Disease outbreak news.* 2023-07-07. https://www.forth.go.jp/topics/2023/202300707_00001.html, 参照 2024-11-07.
- [6] Ikuse T, Matsui T, et al. Neonatal acute liver failure cases with echovirus 11 infections, Japan, August to November 2024. *Euro Surveill.*

2025,30(1),2400822. doi:10.2807/1560-7917.ES.2025.30.1.2400822.

[7] 久保萌加 松原康策 他. 2024年に神戸市内の2つの医療機関で経験したエコーウイルス11による新生児期, 乳児期早期感染症例.IASR病原微生物検出情報月報. 2025, 46, 38-41.

[8] 萩美貴 押部智宏 他. 兵庫県におけるエコーウイルス11型の検出・分離状況, 2013~2024年.IASR病原微生物検出情報月報. 2025, 46, 110-112.

[9] 厚生労働省健康・生活衛生局感染症対策部感染症対策課. “エコーウイルス11型 (E-11) 感染症の実態把握について (協力依頼)”, 2025-02-06, <https://h-crisis.niph.go.jp/wp-content/uploads/2025/02/001400326.pdf>, 参照 2025-09-18.

[10] 国立健康危機管理研究機構感染症情報提供サイト. “手足口病 病原体検査マニュアル, 令和5年6月 Ver.2”. 2023-07-04. <https://id-info.jihs.go.jp/manuals/pathogen-detection/HFMDis20230704.pdf>, 参照 2025-09-24.

[11] National Library of Medicine. “BLAST: Basic local alignment search tool”, <https://blast.ncbi.nlm.nih.gov/Blast.cgi>, cited 2025-09-24.

[12] Kumar S, Stecher G, et al. MEGA X: Molecular Evolutionary Genetics Analysis across Computing Platforms. Mol Biol Evol. 2018, 35(6), 1547-1549.

[13] McLeish NJ, Witteveldt J, et al. Development and assay of RNA transcripts of enterovirus species A to D, rhinovirus species A to C, and human parechovirus: assessment of assay sensitivity and specificity of real-time screening and typing methods. J Clin Microbiol. 2012, 50: 2910-2917.

[14] Nix WA, Oberste MS, et al. Sensitive seminested PCR amplification of VP1 sequences for direct identification of all enterovirus serotypes from original clinical specimens. J Clin Microbiol. 2006, 44, 2698-2704.

[15] Rotbart HA. Enzymatic RNA amplification of the enteroviruses. J Clin Microbiol. 1990, 28, 438-442.

[16] Ishiko H, Shimada Y, et al. Molecular diagnosis of human enteroviruses by phylogenybased classification by use of the VP4 sequence. J Infect Dis. 2002, 185, 744-754.

[17] Olive DM, Al-Mufti S, et al. Detection and differentiation of picornaviruses in clinical samples following genomic amplification. J Gen Virol. 1990, 71, 2141-2147.

[18] Modelin JF. Perinatal echovirus infection: insights from a literature review of 61 cases of serious infection and 16 outbreaks in nurseries. Rev Infect Dis. 1986, 8(6), 918-926.

[19] 国立健康危機管理研究機構感染症情報提供サイト. “病原微生物検出情報システムに登録されたエンテロウイルス属及びエコーウイルス11の記述疫学, 2018-2024年 (2024年11月28日現在)”. <https://www.niid.go.jp/niid/ja/entero/680-idsc/13033-info-241211.html>, 参照 2025-09-18.

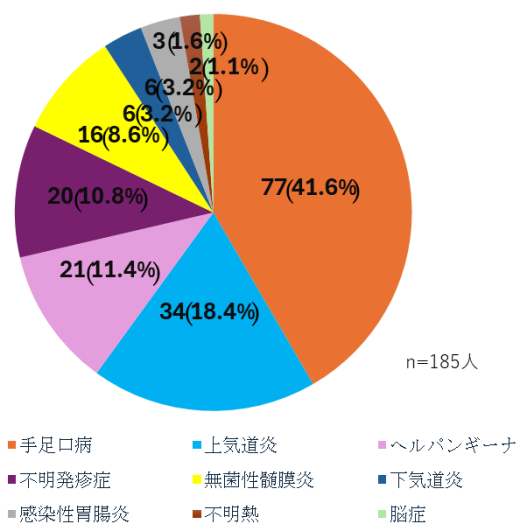


図3 広島県におけるエンテロウイルス (EV) 陽性症例の疾病名別割合 (2020年~2025年) (円グラフ内の数字 左側 (人数) ; 右側 (割合))

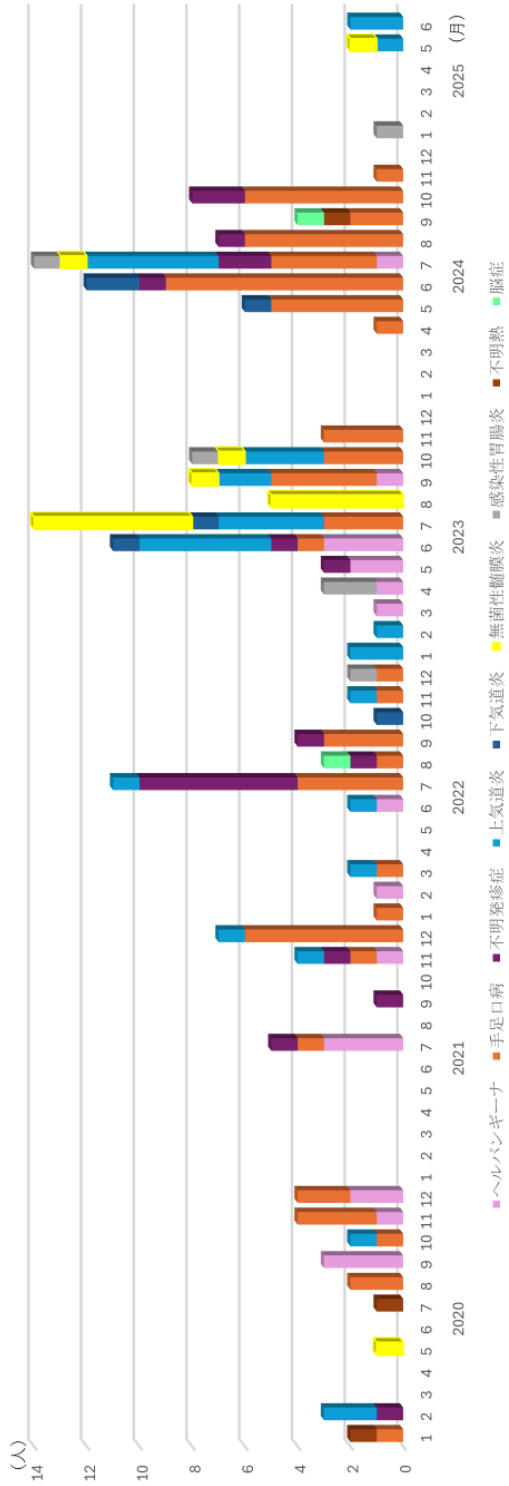


図2 広島県における疾病名別のエンテロウイルス (EV) 陽性患者数 (2020年～2025年)

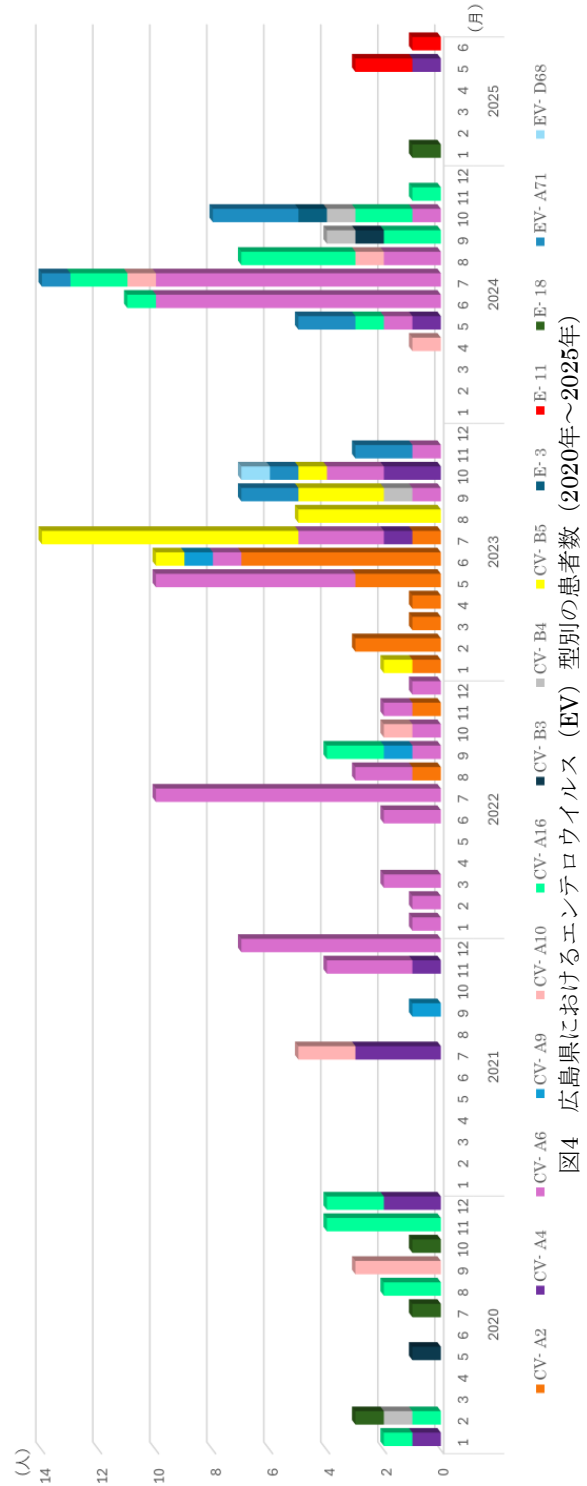


図4 広島県におけるエンテロウイルス (EV) 型別の患者数 (2020年～2025年)

資料

菓子類等大麻含有食品からのTHC抽出精製法の確立

菅田 和子, 伊達 英代

Establishment of Extraction Methods for THC from Cannabis Edible Products, including Confectionery Products

SUGETA Wako and DATE Hideyo

(Received: September 18, 2025)

複雑なマトリックスを有する菓子類等大麻含有食品からTetrahydrocannabinol (THC) を抽出・精製する方法として、油脂分を多く含む食品にはヘキサン及びアセトニトリルを用いた液液抽出法を、糖分を多く含む食品にはC18固相抽出カラムを用いた抽出精製法をそれぞれ確立した。さらに、大麻含有疑い食品中のTHCについて、高速液体クロマトグラフ-トリプル四重極質量分析計 (LC-MS/MS) 及び高速液体クロマトグラフ-飛行時間型質量分析計 (LC-QTOF/MS) による定性分析、ガスクロマトグラフ-水素炎イオン化検出器 (GC/FID) 及び高速液体クロマトグラフ (HPLC) による定量分析を実施した。

Key words : 大麻含有食品, THC, HPLC, GC/FID, LC-MS/MS, LC-QTOF/MS

結 言

令和6年版犯罪白書[1]によると、大麻取締法違反による検挙人員は、平成26年から8年連続で増加し、平成29年から令和3年までは昭和46年以降における最多を記録し続けた。また、令和5年も検挙人員は6,703人で過去最多であった。近年の大麻使用者の増加には、違法栽培による入手機会の拡大や、海外における嗜好用大麻の合法化などを背景とした大麻使用に対する意識の変化など、複数の要因が関与していると考えられる[2]。また、大麻の摂取形態も多様化しており、従来の乾燥大麻による喫煙に加え、THCを高濃度に含有する大麻リキッドの電子パイプによる喫煙や、クッキーやチョコレート、キャンディ等の経口摂取が可能な菓子類等大麻含有食品の流通も増加傾向にある。こうした状況の中で、THCが含有された大麻含有食品であることを認識せずに喫食し、健康被害を引き起こした事例が報告されている。大麻摂取の自覚がなく、意図せず健康被害が生じた場合には、食中毒扱いとして地方衛生研究所に検体が搬入される可能性がある。

THCの抽出に関しては、大麻草及び大麻リキッドにおいては、エタノール等の有機溶媒を用いることで比

較的容易に実施可能である。しかし、食品は脂肪やたんぱく質、色素等様々な成分からなる複雑なマトリクスで構成されているため、THCの抽出は容易ではない。加えて、これらの夾雑成分がTHCと共に抽出されることにより、THCの正確な定性・定量も困難となる。さらに、食品毎に夾雑成分の組成が大きく異なることも抽出法の確立を困難としている一因と考えられる。

そこで、本研究では菓子類等大麻含有食品中のTHCの分析を行うために、効果的なTHCの抽出精製方法について検討を行った。

さらに、確立した抽出精製法を用いて、大麻含有疑い食品中のTHCについて、LC-MS/MS及びLC-QTOF/MSを用いた定性分析、GC/FID及びHPLCを用いた定量分析を行ったので、それらの結果について報告する。

方 法

1 試料

厚生労働省近畿厚生局麻薬取締部経由で厚生労働省に研究用大麻の交付申請を行い、大麻含有疑い食品計3製品(製品No.1-3)を入手し、試料とした(表1)。製品No.1はチョコレート、製品No.2はクッキー、製品

No.3はキャンディであった。

表1 大麻含有疑い食品概要

製品No.	1	2	3
形態	チョコレート	クッキー	キャンディ
			
成分表示	SEMISWEET CHOCOLATE (SUGAR, UNSWEETENED CHOCOLATE, COCOA BUTTER, POTASSIUM CARBONATE, SUNFLOWER, LECITHIN, VANILLA), CANNABIS EXTRACT, NATURAL FLAVORS	記載なし	CBD
THC含有量	180 mg/個	記載なし	記載なし

2 試薬

(1) 標準品

Cannabinol (CBN) (1.0 mg/mL) は、Cerilliant社製認証標準物質 (CRM) を使用した。

(2) 乾燥大麻

厚生労働省中国四国厚生局麻薬取締部経由で厚生労働省に研究用大麻の交付申請を行い、入手した。

(3) その他試薬

HPLCの移動相には、関東化学株式会社製HPLC用アセトニトリル、蒸留水及びリン酸を、LC-MS/MS及びLC-QTOF/MSの移動相には、関東化学株式会社製LC-MS用アセトニトリル及び蒸留水、富士フィルム和光純薬株式会社製LC-MS用ギ酸を使用した。

抽出溶媒には、関東化学株式会社製HPLC用メタノール、アセトニトリル及び蒸留水、富士フィルム和光純薬株式会社製特級ヘキサン及び酢酸エチルを使用した。

乾燥大麻抽出液の内部標準物質には、シグマアルドリッチ製トリベンジルアミンを使用した。

(4) 器材

C18固相抽出カラムには、アジレント・テクノロジー株式会社製Bond Elut C18 (500 mg) を使用した。

ろ過にはADVANTEC社製0.20 µm 孔径ディスクポザブルメンブレンフィルターユニット及び島津ジーエルシー社製0.45 µm孔径シリンジフィルターを使用した。

3 装置及び条件

(1) GC/FIDによる確認

装置は、アジレント・テクノロジー株式会社製6890GCを用い、分析条件を表2に示した。

表2 GC/FID分析条件

GC/FID system	Agilent 6890GC
Column	DB-5MS 30 m×0.25 mm×0.25 mm
Carrier	He 1.2 mL/min, constant flow
Injector	Split / Splitless, 250 °C
Split ratio	20 : 1
Injection volume	1 µL
Oven	200 °C (2 min) - 10 °C/min - 240 °C (15 min)
Detector	FID 300 °C, H ₂ 32 mL/min, Air 200 mL/min He 24 mL/min

(2) HPLCによる確認

装置は、アジレント・テクノロジー株式会社製HP1200を用い、分析条件を表3に示した。

表3 HPLC分析条件

HPLC system	Agilent HP1200
Column	YMC Triart C18 150 mm×2.0 mm, 5 µm
Column temperature	35 °C
Injection volume	10 µL
Flow rate	0.5 mL/min
Mobile phase A	Water containing 0.1% phosphoric acid
Mobile phase B	Acetonitrile containing 0.1% phosphoric acid
Gradient	A (21 %) → 30 min → A (5%)
Wavelength	210 nm

(3) LC-MS/MSによる確認

装置は、アジレント・テクノロジー株式会社製1290 Infinity II (LC) 及び6740 Triple Quad LC/MS (MS/MS) を用い、分析条件を表4に示した。

(4) LC-QTOF/MSによる確認

装置は、アジレント・テクノロジー株式会社製1260 Infinity (LC) 及び6540 UHD (QTOF/MS) を用い、分析条件を表5に示した。

表4 LC-MS/MS分析条件

LC system	Agilent 1290 Infinity II		
Column	COSMOSIL COSMOCORE 2.6C18, 2.1×50 mm		
Temperature	40 °C		
Injection volume	2 µL		
Flow rate	0.4 mL/min		
Mobile phase A	Water containing 0.1 % formic acid		
Mobile phase B	Acetonitrile containing 0.1 % formic acid		
Gradient	A (50 %) → 6 min → A (5 %) 4 min		
MS/MS system	Agilent 6740 Triple Quad LC/MS		
MS conditions			
Ionization mode	ESI	Gas temperature	300 °C
Gas flow	10 L/min	Nebulizer gas	50 psi
Capillary voltage	4000 V	Fragmentor voltage	130 V
Scan mass range	<i>m/z</i> 50-1000		
MRM conditions			
Precursor ion	<i>m/z</i> 315.2318		
Product ion	<i>m/z</i> 193.1 (CE 25 eV), <i>m/z</i> 123 (CE 37 eV)		
Product Ion Scan conditions			
Collision energy	10, 20, 40 eV		

表5 LC-QTOF/MS分析条件

LC system	Agilent 1260 Infinity		
Column	COSMOSIL COSMOCORE 2.6C18, 2.1×50 mm		
Temperature	40 °C		
Injection volume	5 µL		
Flow rate	0.4 mL/min		
Mobile phase A	Water containing 0.1 % formic acid		
Mobile phase B	Acetonitrile containing 0.1 % formic acid		
Gradient	A (50 %) → 6 min → A (5 %) 4 min		
QTOF/MS system	Agilent 6540 UHD		
MS conditions			
Ionization mode	ESI	Gas temperature	350 °C
Gas flow	10 L/min	Nebulizer gas	50 psi
Capillary voltage	3500 V	Fragmentor	120 V
Scan mass range	<i>m/z</i> 50-1000	Reference mass	<i>m/z</i> 121.050873 <i>m/z</i> 922.009798
Targeted MS/MS conditions			
Collision energy	10, 20, 40 eV		
Precursor ion	<i>m/z</i> 315.2318 (THC)		

4 標準溶液の調製

(1) CBN標準溶液

CBN標準溶液は、国連薬物犯罪事務所の方法(GC/FID法) [3]に基づき、3.3 - 53.3 µg/mLの範囲で調製した。

(2) 添加回収試験用乾燥大麻抽出液、定量用及び確認用THC標準溶液

THC標準溶液の入手が困難であったため、GC/FID法を用いてTHC濃度を定量した乾燥大麻抽出液を、添

加回収試験用乾燥大麻抽出液、定量用及び確認用THC標準溶液として使用した。

乾燥大麻抽出液の調製方法を以下に示した。乾燥大麻約1.5 gを秤量し、内部標準物質として0.5 mg/mLトリベンジルアミンを含有するエタノール溶液20 mLを正確に加えた。これを15分間超音波処理後、メンブレンフィルターでろ過した。得られたろ液500 µLを採取し、THCカルボン酸体を脱炭酸させてTHCに変換するため、150 °Cで加熱して乾固させた。得られた残渣にエタノール1.5 mLを加えて溶解したものを乾燥大麻抽出液とした。

CBNの標準溶液を用いて乾燥大麻抽出液中のTHCの濃度を定量後、適宜エタノールで希釈し、0.86-8.6 µg/mLの範囲の定量用THC標準溶液及び100 ng/mLの確認用標準溶液を調製した。

5 試料溶液の調製

(1) チョコレート及びクッキーからの抽出

チョコレートは粉碎しやすくするため凍結後に、クッキーは常温のままそれぞれ粉碎し、試料とした。得られた各試料約1 gを遠沈管に秤量し、アセトニトリル飽和ヘキサン10 mLを加えて15分間振とう後、遠心分離した。上層のヘキサン層を分取し、残渣に再度アセトニトリル飽和ヘキサン10 mLを加え、同様の操作を行い、全ヘキサン層を合わせた。これに、ヘキサン飽和アセトニトリル20 mLを加えて15分間振とう抽出を行い、アセトニトリル層を分取した。同様の抽出操作をさらに2回繰り返し、得られた全アセトニトリル層を合わせた。これにアセトニトリル飽和ヘキサン10 mLを加えて振とう後、アセトニトリル層を分取した。アセトニトリルを減圧留去し、10 mLに定容したものを試料溶液とした。

(2) キャンディからの抽出

キャンディを粉碎後、約1 g秤量し、水10 mLで溶解した。この液を、あらかじめメタノール10 mL及び水10 mLでコンディショニングしたC18固相抽出カラムに全量負荷した。続いて、水20 mLで洗浄を行い、酢酸エチル10 mLで溶出した。得られた溶出液を減圧留去し、アセトニトリルで10 mLに定容したものを試料溶液とした。

6 THC添加回収試験

THCの添加回収試験には、市販のブラックチョコレート、ミルクチョコレート、ホワイトチョコレート、クッキー及びキャンディの計5試料を用いた。各試料

に対し、乾燥大麻抽出液をTHCの添加濃度が100 µg/gとなるように添加した後、「方法 5 試料溶液の調整」に記載した抽出操作を実施し、添加回収試験用試料溶液を作製した (n = 3)。

分析はGC/FID分析条件 (表2) 及びHPLC分析条件 (表3) の2法を用いた。

結果及び考察

1 抽出精製方法の検討結果

(1) チョコレート及びクッキー

油脂分を多く含むと考えられるチョコレート及びクッキー等の試料については、既報[4]をもとに、ヘキサン-アセトニトリルによる液液分配による抽出法を採用した。食品に含まれる油脂成分は抽出効率に大きく影響するため、非極性溶媒であるヘキサンと極性溶媒であるアセトニトリルの液液分配を行うことで、油脂分はヘキサン層に移行し、夾雑物の影響を抑えることができた。また、チョコレートに関しては、事前に凍結してから粉碎を行うことで、摩擦熱による試料の凝集を防ぐことができた。

(2) キャンディ

糖類を多く含むと考えられるキャンディについては、C18固相抽出カラムを用いてTHCを吸着させ、水で糖を洗い流した後、溶媒によりTHCを溶出させた。溶出溶媒として、酢酸エチル、メタノール、アセトニトリル及びエタノールの4種類を比較検討した結果、酢酸エチルを除く3溶媒では回収率が約80%にとどまったが、酢酸エチルによる溶出では約93%と最も高い回収率が得られたため、酢酸エチルで溶出する抽出法を採用した。

THCは、C18固相抽出カラムと疎水性相互作用により強く保持されるため、メタノール、アセトニトリル及びエタノール等の高極性溶媒では十分に溶出されない一方、中程度の極性を有しつつ疎水性も兼ね備えている酢酸エチルは、THCとの親和性が相対的に高くなり、溶出率の向上に寄与したと考えられる。

2 THCの添加回収試験結果

市販のブラックチョコレート、ミルクチョコレート、ホワイトチョコレート、クッキー及びキャンディにおけるTHCの回収率を表6に示した。GC/FIDでは88%以上、HPLCでは86%以上と、いずれの方法に

おいても良好な結果が得られた[5]。これらの結果から、チョコレート及びクッキーに対しては、ヘキサン-アセトニトリルによる液液抽出を3回実施する方法、キャンディに対してはC18固相抽出カラムを用いて酢酸エチルで抽出する方法により、油脂分や糖分などの夾雑物を除去し、THCを効率的に抽出できた。これにより、様々な形状の食品における抽出精製法を確立できた。

表6 5種類の食品におけるTHC添加回収試験結果 (n=3)

試料	ブラック チョコレート	ミルク チョコレート	ホワイト チョコレート	クッキー	キャンディ
GC/FID	96 %	88 %	93 %	88 %	93 %
HPLC	92 %	87 %	90 %	86 %	92 %

3 大麻含有疑い食品中におけるTHCの分析

(1) LC-MS/MS及びLC-QTOF/MSによるTHCの確認

大麻含有疑い食品を「方法 5 試料溶液の調製」に記載した方法で抽出した試料溶液について、LC-MS/MS及びLC-QTOF/MSを用いて試料中のTHCを確認した。LC-MS/MS MRMモードのTICにおける保持時間は確認用THC標準溶液と製品No.1 (チョコレート) 及び製品No.2 (クッキー) で一致した (図1- (A))。またProduct Ion Scanモードにおける各CEのプロダクトイオンスペクトルも概ね一致する結果が得られた (図1- (B), (C), (D))。さらに、LC-QTOF/MS MSモードのEIC (m/z 315.23186) においても、確認用THC標準溶液とチョコレート及びクッキーの保持時間が一致した (図2- (A))。加えて、Targeted MS/MSモードでの各CEにおけるプロダクトイオンスペクトルも概ね一致した (図2- (B), (C), (D))。以上の結果より、製品No.1及び製品No.2にはTHCが含有されていることが確認された。

なお、製品No.3 (キャンディ) についても、LC-MS/MS及びLC-QTOF/MSにより定性分析を実施したが、THCは検出されなかった。当該製品は、大麻の表記及びシンボルマークが付されていたことから、税関において任意放棄された物品であった。税関の通関手続きにおいては、任意放棄された物品であっても必ずしも鑑定が行われるわけではなく、本製品も鑑定を経ずに大麻製品として取り扱われた可能性が高いと考えられる。

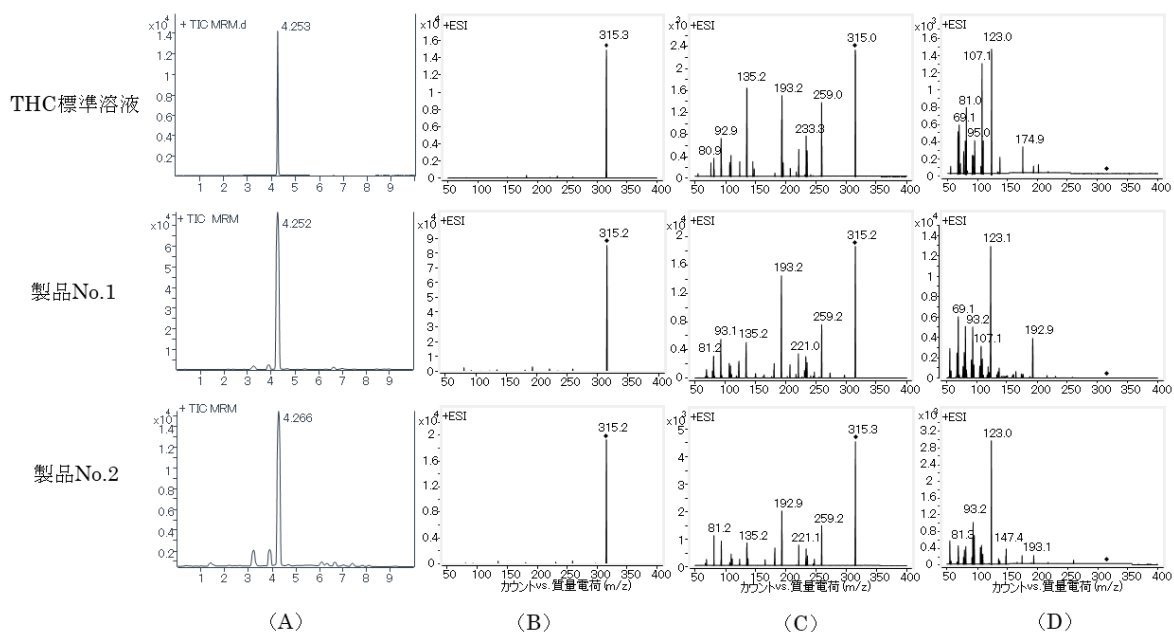


図1 THCのプロトン付加イオン ($[M+H]^+$) m/z 315.2におけるLC-MS/MS MRMモードによるTIC (A) , Product Ion Scanモードによるプロダクトイオンスペクトル CE10 eV(B), 20 eV(C), 40 eV(D)

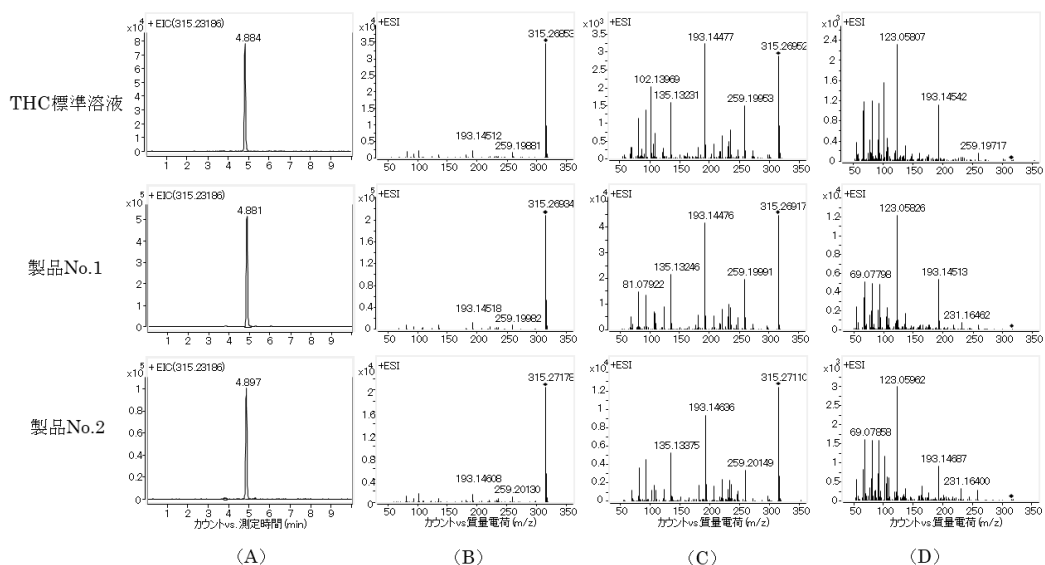


図2 THCのプロトン付加イオン ($[M+H]^+$) m/z 315.23186におけるLC-QTOF/MS MSモードによるTIC (A) , Targeted MS/MSモードによるプロダクトイオンスペクトル CE10 eV(B), 20 eV(C), 40 eV(D)

(2) 大麻含有疑い食品中のTHCの定量

大麻含有疑い食品をGC/FID及びHPLCで定量分析し、全量喫食した場合の推定摂取量を算出した結果を表7に示した。GC/FIDの分析ではチョコレートは149.5 mg、クッキーは16.0 mg、HPLCの分析ではチョコレートは154.0 mg、クッキーは17.4 mgの定量値が得られた。カナダ政府は2018年に嗜好用大麻の所持

及び使用を合法化した。大麻製品に関する規制措置として、経口摂取用の大麻抽出物については1回分当たりTHC含有量を10 mg以下、1包装当たりを1000 mg以下と定めている[6]。クッキーについては、1枚を分割して摂取するとは考えにくい。1回分として評価した場合、カナダの規制値を上回っていることとなる。一方、チョコレートについては1包装のため、規制

値を下回っていた。加えて、チョコレートは板状で36等分の溝が刻まれているため、1片を1回分とみなした場合のTHC量は約4 mgと推定され、1回分の規制値を下回る結果であった。ただし、大麻含有食品であることの認識がない場合、3片以上の摂取により規制値を上回る可能性がある。THCの作用発現は摂取方法によって異なり、喫煙では3分以内に心拍数の増加、10分以内に多幸感などの作用が現れるのに対し、経口摂取では通常30分から1時間程度かけて緩やかに作用が始まり、より長時間持続すると報告されている[7]。したがって、大麻含有食品中のTHC量が低い場合であっても、効果を感じないまま複数回摂取する可能性があり、本研究で対象とした大麻含有疑似食品においても、過量摂取による健康被害が生じるリスクは十分に考えられた。

表7 大麻含有疑似食品中のTHC定量結果及び推定摂取量

試料	全量 g	THC含有量 mg/g (推定全量摂取量 mg)	
		GC/FID	HPLC
チョコレート	45.7 (1包装)	3.27 (149.5)	3.36 (154.0)
クッキー	14.3 (1枚)	1.12 (16.0)	1.22 (17.4)

結 語

本研究では、菓子類等大麻含有食品からのTHC抽出精製法について検討し、チョコレートやクッキーについては、ヘキサン及びアセトニトリルによる液液抽出法、キャンディについてはC18固相抽出カラムと酢酸エチルを用いる方法を適用することで、夾雑物の影響を抑えつつ高回収率での抽出が可能であった。

また、LC-MS/MS及びLC-QTOF/MSによる定性分析、GC/FID及びHPLCによる定量分析により、大麻含有食品中にTHCを確認し、いずれもカナダの制度[6]で定められた限度値を超える濃度で含有していることが明らかとなった。これらの結果は、大麻含有食品による経口摂取のリスク、特に意図しない過量摂取による健康被害の可能性を示唆するものであった。

ただし、本研究で構築した抽出精製操作は、複数回の分配など操作工程が多く、使用する溶媒量も多いため、迅速性や簡便性の観点からは課題が残る。したがって、今後は操作の簡略化や溶媒使用量の削減といったさらなる手法の改良についても検討する必要がある。

謝 辞

乾燥大麻及び大麻含有食品の入手に大変ご尽力くださいました厚生労働省九州厚生局沖縄麻薬取締支所 富岡 康博鑑定官に深く感謝申し上げます。

文 献

- [1] 法務総合研究所. “各種犯罪の動向と各種犯罪者の処遇 薬物犯罪”. 令和6年版 犯罪白書—女性犯罪者の事態と処遇—. 2025, 第4編/第2章/第1節/2.
- [2] 嶋根卓也. 薬物乱用・依存状況の実態把握と薬物依存症者の社会復帰に向けた支援に関する研究. 令和元年度厚生労働行政推進調査事業費補助金 総括・分担研究報告書. 2019, 3-5.
- [3] United Nations Office on Drugs and Crime. ”Recommended methods for the identification and analysis of cannabis and cannabis products (Revised and updated)”. ST/NAR/40/REV.1, https://www.unodc.org/documents/scientific/Recommended_methods_for_the_Identification_and_Analysis_of_Cannabis_and_Cannabis_products.pdf, cited 2025-9-2
- [4] 菅田和子, 伊達英代, 他. CBD関連製品の分析法の検討及び買い上げ検査の結果. 広島県立総合技術研究所保健環境センター研究報告. 2020, 28, 13-23.
- [5] 厚生労働省健康・生活衛生局食品基準審査課長, 厚生労働省健康・生活衛生局食品監視安全課長. 「食品中の食品添加物分析法の妥当性確認ガイドライン」の作成及び「第2版 食品中の食品添加物分析法」の改正について 別添1 食品中の食品添加物分析法の妥当性確認ガイドライン. 健生食基発0308第1号, 健生食監発0308第1号. 令和6年3月8日.
- [6] Government of Canada. “Reduce your risk: Choose legal cannabis”. modified 2023-02-06 <https://www.canada.ca/en/health-canada/services/drugs-medication/cannabis/personal-use/reduce-risk-choose-legal.html#a4>, cited 2025-09-05.
- [7] 三島健一. 大麻成分の中樞効果：有用性と危険性. 薬学雑誌. 2020, 140, 193-204.

資料

カンナビノイド11成分の分析法の確立 及び大麻含有食品中のカンナビノイド類の検出

菅田 和子, 伊達 英代

Examination of an Analytical Method for 11 Cannabinoids and Identification of Cannabinoids in Cannabis Edible Products

SUGETA Wako and DATE Hideyo

(Received: September 18, 2025)

規制成分 Δ^9 -Tetrahydrocannabinol (THC) 及び Δ^8 -THCを含むカンナビノイド11成分について、高速液体クロマトグラフ-飛行時間型質量分析計 (LC-QTOF/MS) を用いた一斉分析法により、同一分子式を有する成分を良好に分離可能な方法を確立した。また、確立した分析法を用いて、大麻含有食品を分析した結果、麻薬である Δ^9 -THCを検出するとともに、その他複数のカンナビノイドも検出された。

Key words : 大麻含有食品, カンナビノイド類, LC-QTOF/MS, THC

結 言

近年、大麻の摂取形態は多様化しており、乾燥大麻による喫煙に加え、THCを高濃度に含有するリキッドを用いた電子タバコや、経口摂取可能な大麻含有食品等様々な製品が流通している。これらの製品のうち、特に大麻含有食品においては、大麻草由来の原料が使用されている場合があり、THCのみならず、Cannabidiol (CBD) や Cannabinol (CBN) などの複数のカンナビノイド成分が含有されている可能性がある。しかしながら、大麻草に含有されているカンナビノイド類は互いに類似した化学構造を有しており、 Δ^9 -THC、 Δ^8 -THC、CBD 及び Cannabichromene (CBC) の分子式は $C_{21}H_{30}O_2$ 、Tetrahydrocannabivarin (THCV) 及び Cannabidivarin (CBDV) は $C_{19}H_{26}O_2$ 、Tetrahydrocannabinolic acid (THCA) 及び Cannabidiolic acid (CBDA) は $C_{22}H_{30}O_4$ と、それぞれ同一の分子式を有する。これら同一の分子式を有するカンナビノイド成分の検出には、液体クロマトグラフィーによる分離が不可欠である。特に、 Δ^9 -THC 及び Δ^8 -THC は麻薬、THCA はみなし麻薬に該当し、いずれも麻薬及び向精神薬取締法による規制対象成分で

あることから、これら3成分と他の非規制成分を分離可能な分析法の確立は、製品中の規制成分の有無を判断する上で極めて重要である。しかし、既報[1]で実施した定性分析法では成分間の識別が困難なものもあった。

そこで本研究では、規制対象である Δ^9 -THCや Δ^8 -THCに加え、CBD、CBN、Cannabigerol (CBG) などを含む計11成分のカンナビノイドを対象とし、微量成分の分析に優れるLC-QTOF/MSを用いた分析法を検討した。また、既報[1]の抽出法を用い、実際に押収された大麻含有食品6製品について、カンナビノイド類の定性分析を実施したので、その結果についても報告する。

方 法

1 試料

大麻含有食品について、厚生労働省近畿厚生局麻薬取締部経由で厚生労働省に交付申請を行い、計6製品 (製品No.1-6) を入手し、試料とした (表1)。各製品の形態は、製品No.1-3がチョコレート、製品No.4がクッキー (加熱済み)、製品No.5がクッキー生地 (未加熱)、製品No.6がプロテインバーであった。

表1 大麻含有食品の概要

製品No.	1	2	3	4	5	6
形態	チョコレート	チョコレート	チョコレート	クッキー	クッキー生地	プロテインバー
						

2 試薬

(1) 標準品

Δ^9 -THC及び Δ^8 -THC (各100 $\mu\text{g/mL}$) は、広島大学大学院医系科学研究科から譲受した。

CBD, CBC, CBN, CBG, THCv, CBDV, THCA, CBDA及びCannabigerolic acid (CBGA) (各1.0 mg/mL) は、Cerilliant社製認証標準物質 (CRM) を使用した。

分析対象としたカンナビノイド11成分の概要を表2に示した。

表2 カンナビノイド11成分の概要

Compound name	Abbreviation	Formula	Monoisotopic mass	Polarity
Δ^9 -Tetrahydrocannabinol	Δ^9 -THC	$\text{C}_{21}\text{H}_{30}\text{O}_2$	314.224579	+
Δ^8 -Tetrahydrocannabinol	Δ^8 -THC	$\text{C}_{21}\text{H}_{30}\text{O}_2$	314.224579	+
Cannabidiol	CBD	$\text{C}_{21}\text{H}_{30}\text{O}_2$	314.224579	+
Cannabichromene	CBC	$\text{C}_{21}\text{H}_{30}\text{O}_2$	314.224579	+
Cannabinol	CBN	$\text{C}_{21}\text{H}_{26}\text{O}_2$	310.193268	+
Cannabigerol	CBG	$\text{C}_{21}\text{H}_{32}\text{O}_2$	316.240234	+
Tetrahydrocannabivarin	THCV	$\text{C}_{19}\text{H}_{26}\text{O}_2$	286.193268	+
Cannabidivarin	CBDV	$\text{C}_{19}\text{H}_{26}\text{O}_2$	286.193268	+
Tetrahydrocannabinolic acid	THCA	$\text{C}_{22}\text{H}_{30}\text{O}_4$	358.214417	-
Cannabidiolic acid	CBDA	$\text{C}_{22}\text{H}_{30}\text{O}_4$	358.214417	-
Cannabigerolic acid	CBGA	$\text{C}_{22}\text{H}_{32}\text{O}_4$	360.230072	-

(2) その他試薬

LC-QTOF/MSの移動相には、関東化学株式会社製LC-MS用アセトニトリル及び蒸留水、富士フィルム和光純薬株式会社製LC-MS用ギ酸及びシグマアルドリッチ製LC-MS用ギ酸アンモニウムを使用した。

抽出溶媒には、関東化学株式会社製HPLC用メタノール、アセトニトリル及び蒸留水、富士フィルム和光純薬株式会社製特級ヘキサン及び酢酸エチルを使用した。

(3) 器材

C18固相抽出カラムには、アジレント・テクノロジー株式会社製Bond Elut C18 (500 mg) を使用した。

ろ過にはADVANTEC社製0.20 μm 孔径ディスクポザブルメンブレンフィルターユニットを使用した。

3 装置及び条件

装置は、アジレント・テクノロジー株式会社製1260 Infinity (LC) 及び6540 UHD (QTOF/MS) を用い、分析条件を表3に示した。

表3 LC-QTOF/MS分析条件

LC system	Agilent 1260 Infinity			
Column	InertSustaine Swift C18 (2.1 \times 100 mm, 3 μm , GL Sciences Inc.)			
Column temperature	40 $^{\circ}\text{C}$			
Injection volume	5 μL			
Flow rate	0.4 mL/min			
Mobile phase A	10 mM Ammonium formate in Water (pH4.1)			
Mobile phase B	Acetonitrile			
Isocratic	A (45 %) 22 min			
QTOF/MS system	Agilent 6540 UHD			
MS conditions				
Ion source	ESI	Gas temperature	350 $^{\circ}\text{C}$	
Gas flow	10 L/min	Nebulizer (N_2)	50 psi	
Capillary voltage	3500 V	Fragmentor voltage	120 V	
Scan range	m/z 50-1000			
Reference mass	m/z 121.050873, 922.009798			
Targeted MS/MS conditions				
Collision energy	10, 20, 40 eV			
	m/z	m/z 315.2319 (Δ^9 -THC, Δ^8 -THC, CBD, CBC), m/z 311.2006 (CBN)		
Precursor ion	m/z	317.2476 (CBG), m/z 287.2006 (THCV, CBDV)		
	m/z	357.2071 (THCA, CBDA), m/z 359.2228 (CBGA)		

4 標準溶液の調製

(1) カンナビノイド類標準溶液

カンナビノイド11成分のうち、 Δ^8 -THC及びCBCについては各1 $\mu\text{g/mL}$ 、その他9成分については各0.1 $\mu\text{g/mL}$ となるようメタノールで調製し、これを標準原液とした。この標準原液をメタノールで希釈し、各成分の検出限界値 (LOD) 及び定量下限値 (LOQ) 確認用として、50 ng/mLの標準溶液を調製した。

検量線用標準溶液は、CBC及びCBGについては0.7 - 2 $\mu\text{g/mL}$ 、その他の9成分については0.1 - 1 $\mu\text{g/mL}$ の濃度範囲となるように調製した。

5 試料溶液の調製

(1) チョコレート及びクッキーからの抽出

チョコレートは粉砕しやすくするため凍結後に、クッキーは常温のままそれぞれ粉砕し、試料とした。得られた各試料約1 gを遠沈管に秤量し、アセトニトリル飽和ヘキサン10 mLを加えて15分間振とう後、遠心分離した。上層のヘキサン層を分取し、残渣に再度アセトニトリル飽和ヘキサン10 mLを加え、同様の操作を繰り返した。全ヘキサン層を合わせ、ヘキサン飽和アセトニトリル20 mLを加えて15分間振とう抽出を行い、アセトニトリル層を分取した。同様の抽出操作をさらに2回繰り返し、得られた全アセトニトリル層を合わせた。これにアセトニトリル飽和ヘキサン10 mLを加えて振とう後、アセトニトリル層を分取した。アセトニトリルを減圧留去し、10 mLに定容したものを試料溶液とした。

(2) キャンディからの抽出

キャンディを粉碎後、約1g秤量し、水10 mLで溶解した液を、あらかじめメタノール10 mL及び水10 mLでコンディショニングしたC18固相抽出カラムに全量負荷した。続いて、水20 mLで洗浄を行い、酢酸エチル10 mLで溶出した。得られた溶出液を減圧留去し、アセトニトリルで10 mLに定容したものを試料溶液とした。

6 カンナビノイド類の添加回収試験

カンナビノイド類の添加回収試験には、市販のチョコレート、クッキー及びキャンディの計3試料を用いた。各試料に対し、CBC及びCBGについては10 µg/gとなるように、その他カンナビノイド9成分については5 µg/gとなるように添加した後、「5 試料溶液の調整」に従い、添加回収試験用試料溶液を作製した (n = 3)。

結果及び考察

1 カンナビノイド類のLC-QTOF/MSによる確認

表2に示すとおり、カンナビノイド11成分のうち、THCA, CBDA及びCBGAの3成分はネガティブ (-) モードで、それ以外の8成分はポジティブ (+) モードでイオン化された。また、ネガティブ (-) モードでイオン化される3成分 (THCA, CBDA及びCBGA) においては、カルボン酸基を有するためpHの影響を受けやすく [2], 保持時間の再現性が低下することが確認された。分析の頑健性を向上させるため、移動相のpHは4.1に固定し、同一分子式を有する成分を分離する条件を検討したところ、表3に示したHPLC条件で、MSモードにおいても良好なクロマトグラムが得られた (図1-(A))。さらに、Targeted MS/MSモードを用いて、各成分に対しコリジョンエネルギーを10, 20, 40 eVに

設定し、QTOF/MSスペクトルを取得した (図1-(B), (C), (D))。各成分の検出限界値 (LOD) 及び定量下限値 (LOQ) を算出した (表4)。LODはS/N比が3.3, LOQはS/N比が10に相当する濃度とした [3]。

表4 カンナビノイド11成分のLOD及びLOQの結果

	Δ ⁹ -THCA	Δ ⁸ -THC	CBD	CBC	CBN	CBG	THCV	CBDV	THCA	CBDA	CBGA
LOD	9.7	12.2	3.0	29.5	6.2	23.9	3.3	3.9	2.1	11.3	0.9
LOQ	29.2	36.9	9.2	89.3	18.9	72.5	10.0	11.9	6.4	34.1	2.5

2 カンナビノイド類の添加回収試験

市販チョコレート、クッキー及びキャンディを用いて添加回収試験を実施した結果、各成分の回収率はチョコレートにおけるΔ⁹-THCの結果を除き、概ね70から120%の範囲内であった (表5)。このことから、既報 [1] の抽出法及び本研究で確立したLC-QTOF/MS分析法は、THC以外のカンナビノイド成分においても十分に抽出可能かつ分析可能であることが示された。なお、食品マトリックスの違いによる影響も一部認められたが、再現性は良好であり、実試料に対しても同様の抽出法によって分析が可能であると考えられる。

一方、チョコレートにおけるΔ⁹-THCの回収率は、既報では良好な回収率が得られていたが、本研究ではその回収率が低下していた。この原因として、添加濃度の違いが挙げられる。既報のΔ⁹-THC添加濃度は100 µg/gであったが、本研究では、大麻草中に少量しか含まれないカンナビノイドも分析可能であること、各種カンナビノイド類のピーク分離を確保することを目的としていたため、添加濃度を5 µg/gとした。それにより、少量のΔ⁹-THCに対し、大量のマトリックスが共存する状態となり、スプレー時に生じる帯電液滴中のΔ⁹-THCのイオン化を妨害するイオンサプレッションが強く働いた可能性がある [4]。

表5 菓子類等食品中からの添加回収試験結果

	Calibration Curve (µg/mL)	Concentration 5 µg/g									Concentration 10 µg/g	
		Δ ⁹ -THC	Δ ⁸ -THC	CBD	CBN	THCV	CBDV	THCA	CBDA	CBGA	CBG	CBC
		0.1-1 (r=0.999)	0.1-1 (r=0.999)	0.1-1 (r=0.998)	0.1-1 (r=0.998)	0.1-1 (r=0.999)	0.1-1 (r=0.999)	0.1-1 (r=0.999)	0.1-1 (r=0.999)	0.1-1 (r=0.999)	0.7-2 (r=0.999)	0.7-2 (r=0.999)
Chocolate	Average (%)	48.4	75.2	77.5	70.3	77.1	71.4	123.9	104.6	75.1	93.4	98.6
	CV (%)	2.9	0.8	0.5	1.1	1.1	1.6	3.0	6.9	6.1	0.3	1.1
Cookie	Average (%)	70.9	71.3	71.9	70.6	68.8	63.4	167.9	104.7	81.7	102.0	85.1
	CV (%)	0.5	1.6	4.1	1.4	3.9	1.8	3.3	1.7	2.8	1.7	1.2
Candy	Average (%)	74.8	71.1	68.7	68.9	67.9	67.2	97.2	134.1	111.5	100.3	83.6
	CV (%)	5.5	5.4	3.7	3.2	4.1	3.3	4.0	3.1	3.0	3.1	2.6

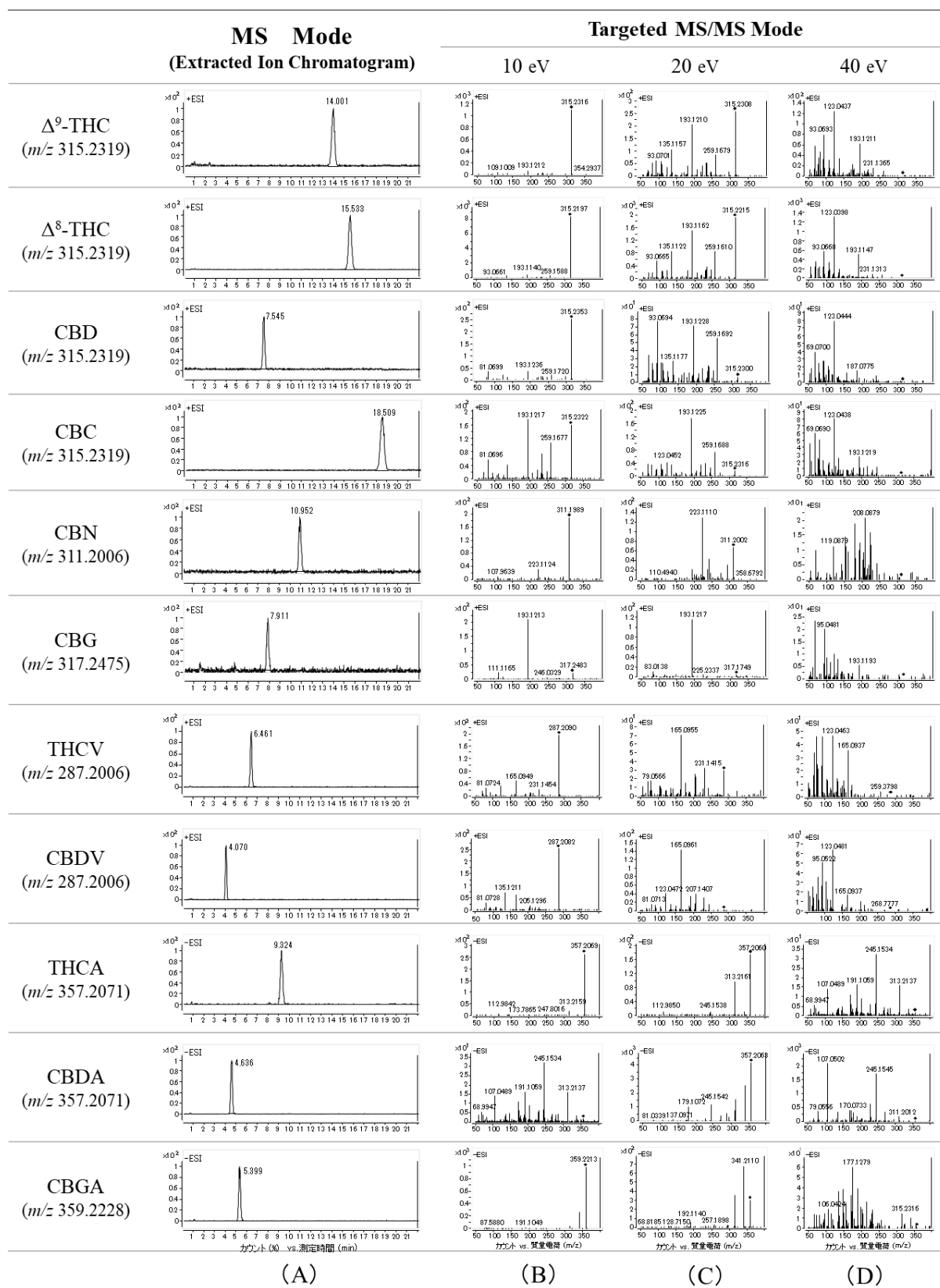


図1 各カンナビノイドのプロトン付加分子 ($[M+H]^+$) 又は脱プロトン化分子 ($[M-H]^-$) をモニターイオンとした LC-QTOF/MS MS モードによる TIC (A), Targeted MS/MS によるプロダクトイオンスペクトル CE 10 eV (B), 20 eV (C), 40 eV (D)

今後の研究では、 Δ^9 -THCの回収率低下の原因を明確にするため、低濃度におけるTHCの分配挙動の確認を行うとともに、食品マトリックスによる影響を補正するため、安定同位体を用いた内部標準法による補正を導入することなども検討していく必要がある。

3 大麻含有食品中のカンナビノイド類の確認

大麻含有食品6製品 (No.1-No.6) について、「方法5 試料溶液の調製」及びLC-QTOF/MS分析法を用いて、カンナビノイド11成分の定性分析を実施した。その結果を表6に示す。表6から明らかなように、No.1-No.5の5製品から規制成分である Δ^9 -THCが検出された。また、これらの製品からは Δ^9 -THC以外の複数のカンナビノイド成分が検出された。この結果は、これらの製品には大麻由来の抽出物がそのまま食品に使用されている、もしくは意図的に混合物として配合されている可能性を示唆している。一方、製品No.6のプロテインバーについては非規制成分であるCBDAのみが検出された。CBDAは加熱によって脱炭酸され、CBDへと変換される[5]。CBDには抗炎症作用や抗不安作用等が報告されている[6]ことから、本製品はそうした効能・効果を意図したものと考えられる。なお、CBDAは酸性条件下で加熱されることにより、規制成分であるTHCに変化することが報告されている[7,8]。そのため製品の形状や使用方法によっては注意が必要である。

表6 大麻含有食品中のカンナビノイド定性結果

製品No.	1	2	3	4	5	6
形態	チョコレート	チョコレート	チョコレート	クッキー	クッキー生地	プロテインバー
	Δ^9 -THC	Δ^9 -THC	Δ^9 -THC	Δ^9 -THC	Δ^9 -THC	CBDA
	CBD	THCV	CBD	CBN	CBD	
検出成分	CBN	CBN	CBN	CBG	CBN	
	CBG		CBG	THCV	CBG	
	THCV		THCV		THCV	
					CBGA	

結 語

本研究では、大麻含有食品に含有される可能性のあるカンナビノイド11成分について、LC-QTOF/MSを用いた定性用の一斉分析法を検討し、麻薬に該当する規制成分及び非規制成分の識別を可能とする手法を確立した。また、確立した手法を用いて実際に押収された大麻含有食品6製品の分析を行い、5製品から規制成分である Δ^9 -THCを含む複数のカンナビノイドが検出された。本法は、同一分子式を有する成分間において

も十分な分離性能を示し、食品という複雑なマトリックスにおいても安定した再現性及び回収率を確認できたことから、法規制における検査において有用であると考えられる。

謝 辞

本研究を行うにあたり、 Δ^9 -THC、 Δ^8 -THCの標準品及び分析用カラムをご提供くださいました広島大学大学院医系科学研究科 奈女良昭教授に深く感謝申し上げます。また、カンナビノイド11成分の分離条件に関して貴重なご助言を賜りましたことに、心より御礼申し上げます。

また、大麻含有食品の入手に大変ご尽力くださいました厚生労働省九州厚生局沖縄麻薬取締支所 福岡康博鑑定官にも深く感謝申し上げます。

文 献

- [1]菅田和子, 伊達英代. 菓子類等大麻含有食品からのTHC抽出法の確立. 広島県立総合技術研究所保健環境センター研究報告. 2025, 33, 16-21.
- [2] John W. Dolan. Back to Basics. The Role of pH in Retention and Selectivity. LCGC North America. 2017, 35, 22-28.
- [3]上本道久. “分析の信頼性を支えるもの”. 検出限界と定量下限の考え方. ぶんせき. 日本分析化学会. 2010, 5, 216-221.
- [4]公益社団法人日本薬学会物理系薬学支部会. “マトリクス効果によるイオン化抑制”. 薬学用語解説. 2023-12-21. <https://www.pharm.or.jp/words/word00695.html>, 参照 2025-09-02
- [5]Cinzia Citti, Barbara Pacchetti, et al. Analysis of cannabinoids in commercial hemp seed oil and decarboxylation kinetics studies of cannabidiolic acid(CBDA). Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis. 2018, 149, 532-540.
- [6]渡辺正仁, 早崎華, 他. カンナビジオールの治療効果とその作用機序. 保健医療学雑誌. 2018, 9(2), 112-126.
- [7] Zsuzsanna Czegeny, Greta Nagy, et al. CBD, a precursor of THC in e-cigarettes. Scientific Reports. 2021, 8951

- [8] John Merrick, Braian Lane, et al. Identification of Psychoactive Degradants of Cannabidiol in Simulated Gastric and Physiological Fluid, Cannabis and Cannabinoid Research, 2016, 1(1), 102-112.

資料

食品中のニコチン酸及びニコチン酸アミドの分析法の検証

河野 敏己, 井原 紗弥香

Validation of Analytical Methods for Nicotinic Acid and Nicotinamide in Foods

KAWANO Toshiki, IHARA Sayaka

(Received: October 2, 2025)

ニコチン酸 (NA) 及びニコチン酸アミド (NAA) の分析法は第2版食品中の食品添加物分析法で定められており、現在、固相抽出を用いたHPLCおよびLC-MS/MSによる分析法の改正が検討されている。この検討法は、食肉製品を対象とした検証がすでに行われているが、食肉製品以外の食品を対象とした検証は十分に行われていない。今回、食肉製品以外の食品を対象に、検討法の適用可否について検討を行った。

食肉製品以外の食品におけるNA及びNAAの妥当性確認試験の結果、真度、併行精度及び室内精度はすべて妥当性確認ガイドラインの目標値を満たしており、今回検証した検討法は、食肉製品以外の食品の分析においても適用可能であると考えられた。

Key words : ニコチン酸(NA), ニコチン酸アミド(NAA), 食品添加物, 妥当性確認, HPLC

結 言

食品添加物は、保存料、甘味料、着色料、香料など、食品の製造過程または食品の加工・保存の目的で使用されている。食品添加物は、食品安全委員会による評価を受け、人の健康を損なうおそれのない場合に限って、成分規格や使用基準を定めたうえで、厚生労働省により使用を認められている。食品中の食品添加物の分析は、使用基準の妥当性を検証するうえで重要である。各試験機関で活用するため、厚生労働省より「第2版食品中の食品添加物分析法」が通知されているが、科学的知見に基づき、分析法を適宜見直しする必要がある。また、食品添加物の新規指定や使用基準改正に伴い、新たな分析法設定のための検証・検討が必要で、「第3版食品中の食品添加物分析法」の発行に向けた分析法案の検討が、国立医薬品食品衛生研究所を中心に進められている[1]。

食品添加物の一種であるNA及びNAAは、生体内で糖質や脂質、たんぱく質などの代謝に関与しており、栄養強化剤として利用されている。一方で、過剰添加により食中毒を起こした事例があり、使用基準が定

められている。これまでにNA及びNAAの分析法について検討が行われ[2]、各試験機関等により食肉製品を対象とした検証が行われている。今回、食肉製品以外の食品を対象とした分析法の検討及び検証を行った。

方 法

1 試料

試料は、クリーミングパウダー、清涼飲料水2品(清涼飲料水①, 清涼飲料水②)とした。

2 試薬及び試液

(1) 標準品

NA標準品, NAA標準品:富士フィルム和光純薬株式会社製を用いた。

(2) 試薬

メタリン酸, 酢酸, 25%アンモニア水:富士フィルム和光純薬株式会社製の特級を用いた。

酢酸アンモニウム:シグマアルドリッチジャパン合同会社製のLC-MS用を用いた。

アセトニトリル:関東化学株式会社製の高速度液体ク

ロマトグラフィー用及びLC-MS用を用いた。

メタノール:関東化学株式会社製の高速液体クロマトグラフィー用を用いた。

逆相・陽イオン交換ミックスモードポリマーカートリッジカラム:ウォーターズ社製の容量6cc充填剤150mgのカラムを用いた。

ガラス繊維プレフィルター内蔵メンブランフィルター:グローバルライフサイエンステクノロジーズジャパン株式会社製を用いた。

(3) 試液

4%メタリン酸:メタリン酸20 gに水を加えて溶かし、500 mLとした。

2%メタリン酸:メタリン酸20 gに水を加えて溶かし、1000 mLとした。

2%酢酸:酢酸2 mLに水を加えて100 mLとした。

酢酸・メタノール溶液:酢酸2 mLにメタノールを加えて100 mLとした。

アンモニア・メタノール溶液:25%アンモニア水20 mLにメタノールを加えて100 mLとした。

3 装置および分析条件

分析装置及び分析条件を表1に示した。

4 標準溶液の調製

NA及びNAAをそれぞれ0.100 g正確に量り取り、水を加えて溶かし、それぞれ正確に100 mLとし、標準原液とした(濃度1,000 µg/mL)。各標準原液2.5 mLを正確に量り取り、水を加えて正確に100 mLとし、希釈標準原液とした(濃度25 µg/mL)。希釈標準原液1, 2, 5, 10 mLをそれぞれ正確に量り取り、水を加えて正確に25 mLとし、検量線用標準溶液とした(濃度1, 2, 5, 10及び25 µg/mL)。

別にNA 0.100 g及びNAA 0.500 gを正確に量り取り、水を加えて溶かして正確に100 mLとし、添加回収試験用混合標準原液とした(NA濃度1,000 µg/mL及びNAA濃度5,000 µg/mL)。これを水で10倍に希釈し、添加回収試験用混合標準溶液とした(NA濃度100 µg/mL及びNAA濃度500 µg/mL)。

5 検量線

検量線用標準溶液10 µLをHPLCに注入して、得られたピーク面積を用いて検量線を作成した。

6 定量

試験溶液10 µLをHPLCに注入し、検量線から絶対検量線法によりNA及びNAAの含有量を算出した。

表1 装置及び分析条件

装置(HPLC)	Agilent 1260 Infinity II
カラム	Scherzo SM-C18 (Imtakt製) (粒子径3 µm, 3 mm×150 mm)
流速	0.2 mL/min
注入量	10 µL
カラム温度	40 °C
移動相	0.1%酢酸含有0.02 mol/L酢酸アンモニウム溶液:アセトニトリル混液 (97:3)
検出波長	261nm
装置(LC-MS/MS)	Agilent 1290 Infinity II, Agilent G6470A
カラム	Scherzo SM-C18 (Imtakt製) (粒子径3 µm, 3 mm×150 mm)
流速	0.3 mL/min
注入量	1 µL
カラム温度	40 °C
移動相	0.1%酢酸含有0.02 mol/L酢酸アンモニウム溶液:アセトニトリル混液 (97:3)
イオン化モード	ESI (+)
ドライガス	N ₂ , 250 °C, 10 L/min
キャピラリー電圧	3500 V
フラグメンター電圧	160 V

7 添加試料及び試験溶液の調製

試料10.0 gに添加回収試験用混合標準溶液 (NA 100 mg/L, NAA 500 mg/L) 1 mLを添加しよく混合した後, 30分間放置し, 図1に示した手順により試験溶液を調製した.

8 定量限界の算出

S/N比10程度の濃度の標準溶液を6回繰り返し測定した. 日本産業規格高速液体クロマトグラフィー通則[3]に基づき, 測定値の標準偏差に4.03を掛けた値を検出限界とし, 検出限界に5を掛けた値を定量限界とした.

9 妥当性確認の方法

クリーミングパウダー, 清涼飲料水①, 清涼飲料水②の3種類の試料について, 妥当性確認ガイドライン[4]に従い, 食品衛生検査指針[5]に示される定量限界相当の濃度として, NA 2 µg/mL, NAA 10 µg/mLとなるように添加用標準溶液を添加し, 分析者1名が2併行5日間分析を行った.

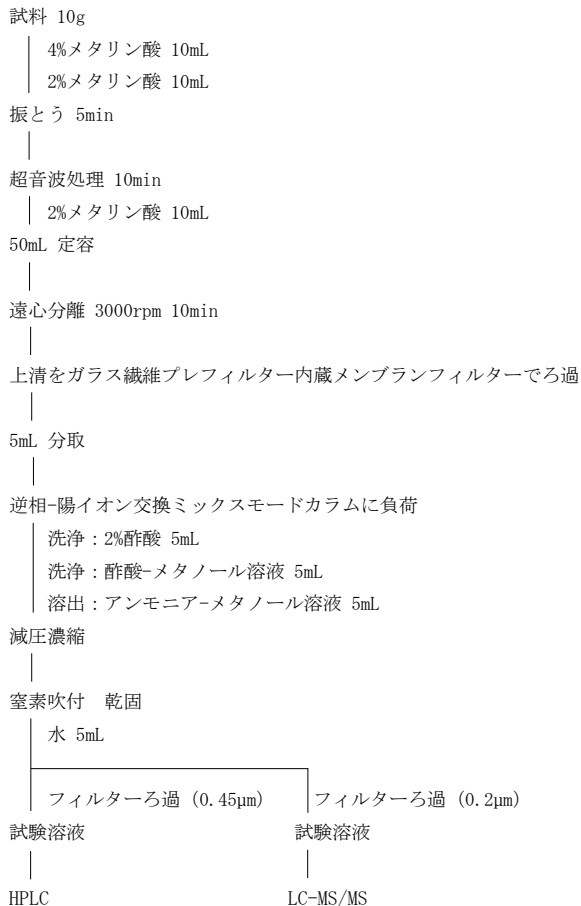


図1 試験溶液の調製法

10 LC-MS/MSによる確認

標準溶液 (10 µg/mL), クリーミングパウダー, 清涼飲料水①及び清涼飲料水②の3種類の試料の添加回収試験溶液を注入して, プロダクトイオンスキャン (m/z 50~150, コリジョンエネルギー値: 5 V及び25 V) を行い, プロダクトイオンスペクトルを比較した.

結果及び考察

1 検量線

クロマトグラム (図2) のNA及びNAAのピーク面積値 (表2) を用いて, 絶対検量線法により検量線を作成した. 1~25 mg/Lの濃度範囲で, 検量線の相関係数は, 1.000の良好な直線性を示した.

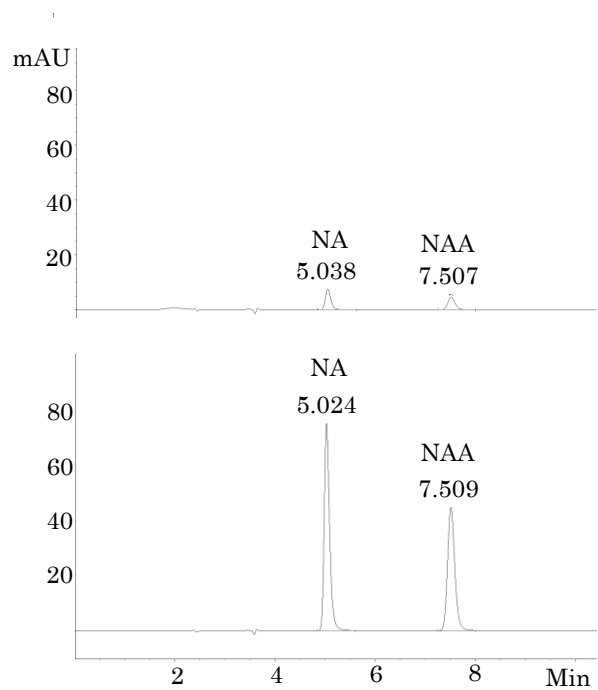


図2 検量線用標準溶液のクロマトグラム (上: 1 µg/mL, 下: 10 µg/mL)

表2 標準溶液の濃度及びピーク面積

濃度 (µg/mL)	NA	NAA
25	1409	1126
10	567	453
5	282	225
2	113	90
1	57	45

2 定量限界の算出

今回の検討において算出した定量限界は、NAは0.000110 g/kg、NAAは0.000142 g/kgであり、食品衛生検査指針[5]で示されるHPLCによる定量限界、NA 0.01 g/kg、NAA 0.05 g/kgを満たした。

3 妥当性確認試験

各ブランク試料及び標準溶液から得られたクロマトグラムを図3に示した。このクロマトグラムを基に、NA及びNAAのピーク出現位置の妨害ピークを確認した。清涼飲料①について、NAAのピーク出現位置に小さなピークが認められたが、定量限界相当濃度の1/10を大幅に下回っていることを確認した。これにより、各試料の選択性に問題がないことが確認された。

真値及び精度を一元配置分散分析による解析を行った結果を表3に示した。いずれの試料においても妥当性確認ガイドライン[4]の目標値である真度70～120%、併行精度<10%及び室内精度<15%を満たした。なお、ブランク試料において検出されたNA及びNAAについて、各添加試料における定量値は、ブランク試料の定量値を差し引いて求めた。

以上の結果から、NA及びNAAの今回検討した方法における妥当性が確認され、食肉以外の食品についても本法が適用可能であると考えられた。

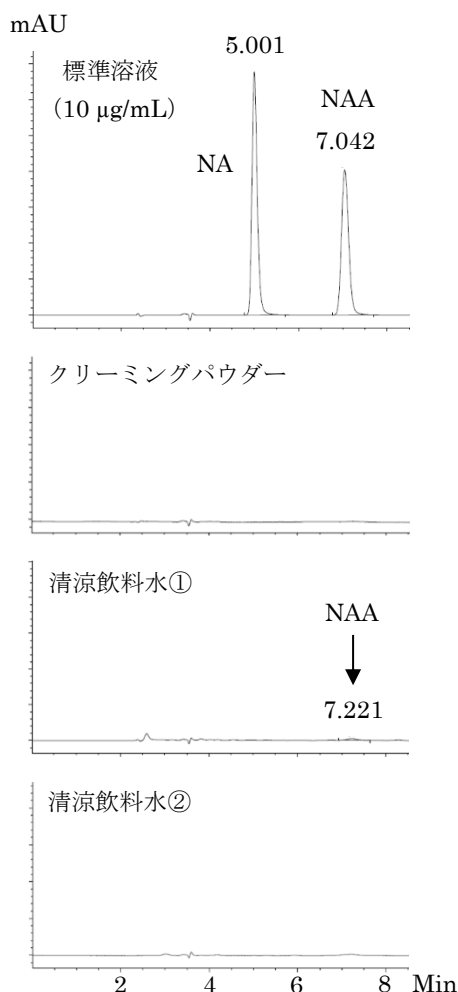


図3 標準溶液及び試料溶液のクロマトグラム

表3 妥当性評価結果

化合物名	クリーミングパウダー			清涼飲料水①			清涼飲料水②		
	真度 (%)	併行精度 (RSD%)	室内精度 (RSD%)	真度 (%)	併行精度 (RSD%)	室内精度 (RSD%)	真度 (%)	併行精度 (RSD%)	室内精度 (RSD%)
NA	110.5	1.2	1.8	99.6	1.6	1.6	96.7	2.0	2.3
NAA	109.7	1.3	1.7	97.5	1.6	1.8	98.3	2.1	2.3

4 LC-MS/MSによる確認

標準溶液 (10 µg/mL) 及び各添加回収試験溶液のNA及びNAAのピークの保持時間は一致した。さらに、標準溶液 (10 µg/mL) 及び各添加回収試験溶液について、NA及びNAAの[M+H]⁺に該当する各イオン、m/z 124.0及びm/z 123.0をプリカーサーイオンとし、

コリジョンエネルギー5 V及び25 Vでプロダクトイオンスキャンを行ったところ、図4～7に示したプロダクトイオンスペクトルが得られ、試料溶液及び標準溶液のスペクトルは一致した。よって、LC-MS/MSによる定性が可能であることを確認した。

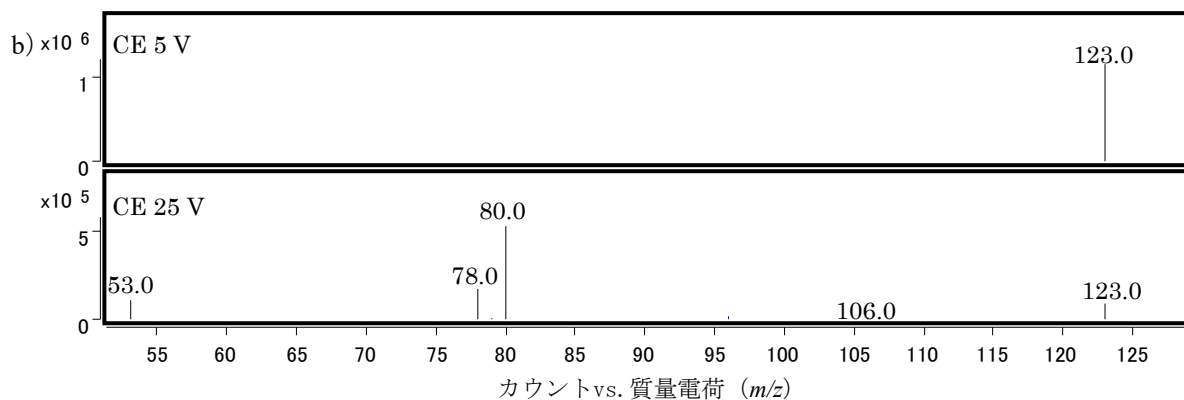
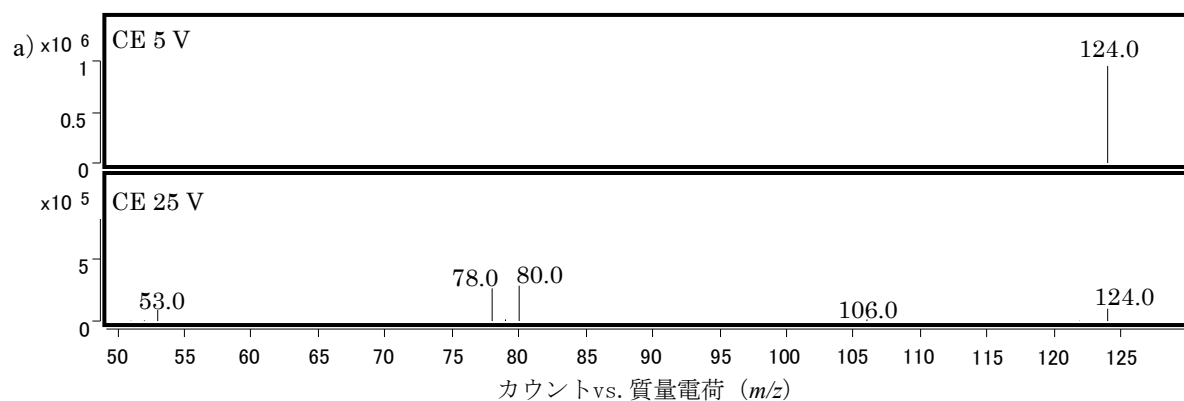


図4 標準溶液 (10 $\mu\text{g/mL}$) のプロダクトイオンスペクトル a) NA, b) NAA

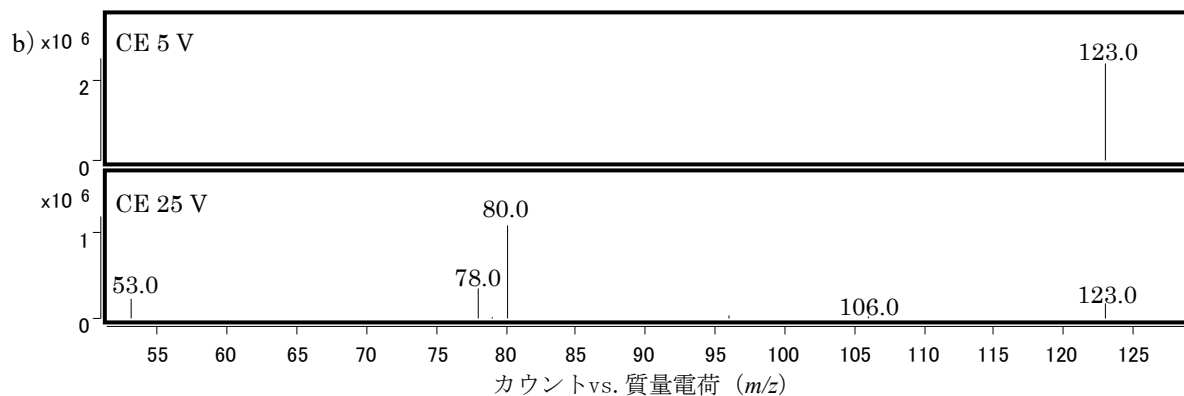
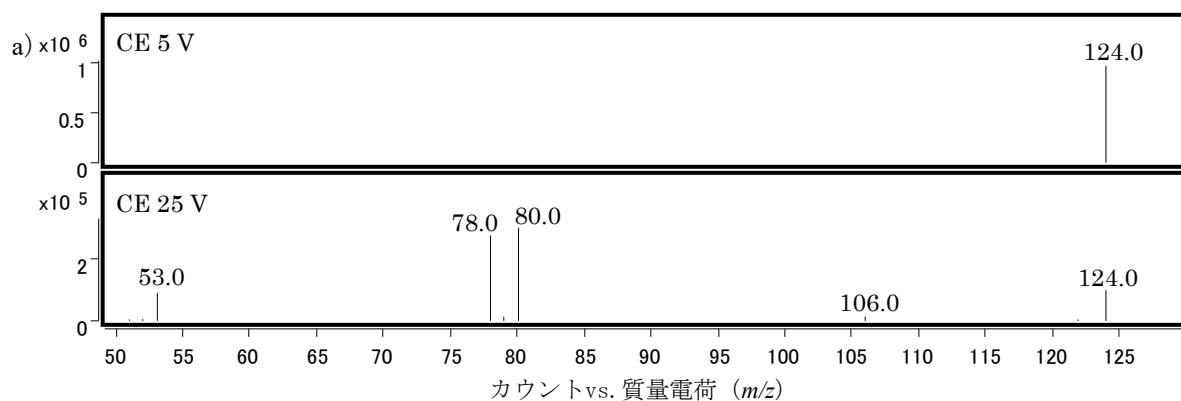


図5 添加試料 (クリーニングパウダー) のプロダクトイオンスペクトル a) NA, b) NAA

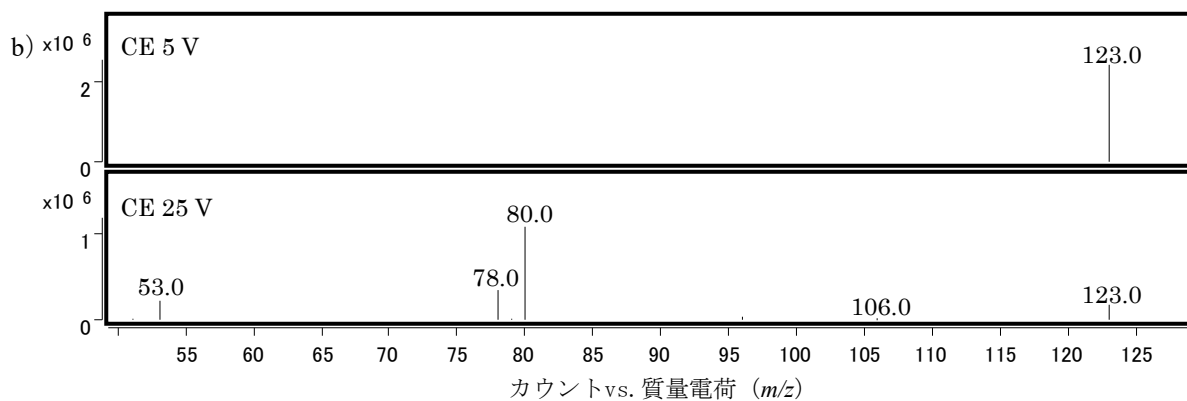
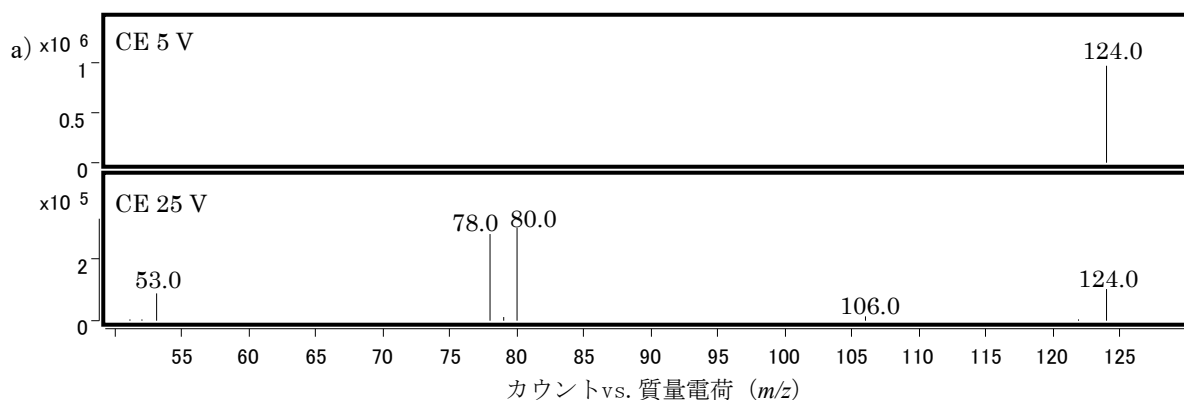


図6 添加試料 (清涼飲料水①) のプロダクトイオンスペクトル a) NA, b) NAA

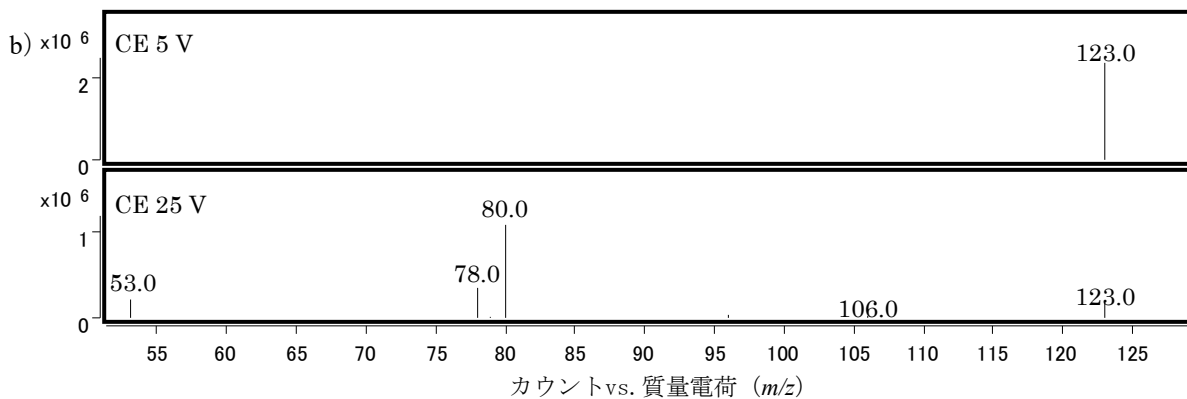
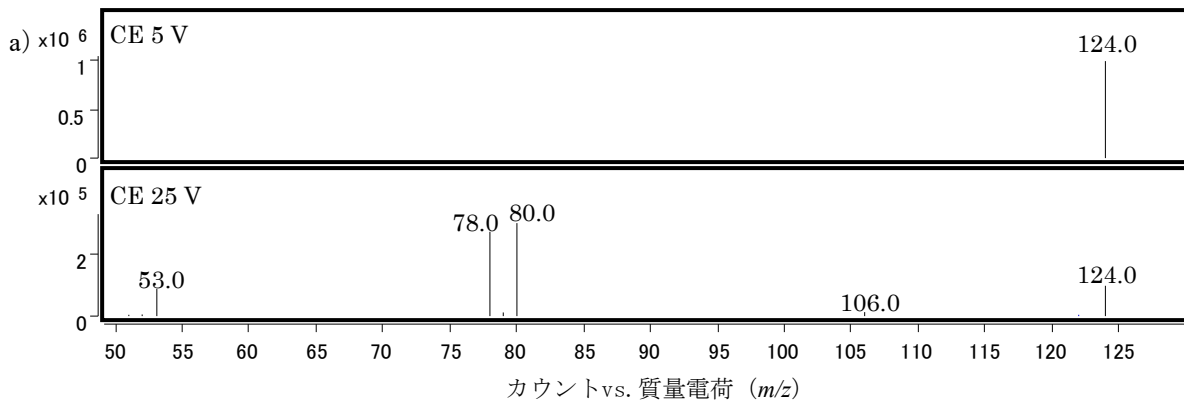


図7 添加試料 (清涼飲料水②) のプロダクトイオンスペクトル a) NA, b) NAA

結 語 文 献

今回、食肉製品を対象としたNA及びNAAの分析法が食肉製品以外の食品(クリーミングパウダー及び清涼飲料水2品)に対して、適用可能か妥当性試験を実施し、検証した。

定量限界相当の濃度となるようNA及びNAAを添加した試料を分析者1名が2併行5日間分析し、得られた結果から推定された真度, 併行精度及び室内精度は, いずれも妥当性確認ガイドライン[4]のそれぞれの目標値を満たしていることを確認した。さらに, いずれの添加試料も液体クロマトグラフィー質量分析により, 定性が可能であることを確認した。以上の結果から, 食肉製品以外の食品中のNA及びNAAの分析法の妥当性が確認された。

本研究は, 厚生労働省食品等試験検査費食品中の食品添加物分析法の検討事業(令和6年度)により実施した。

- [1] 多田敦子, 堀江正一, 他. 食品中の食品添加物分析法に向けた検討. 第55回全国衛生化学技術協議会年会講演集. 2018, 78-79.
- [2] 比企麻子, 山嶋裕季子, 他. 固相抽出を用いたHPLCおよびLC-MS/MSによる食肉中のニコチン酸およびニコチン酸アミド分析法の改良. 食衛誌. 2016, 57(4), 96-100.
- [3] 一般社団法人 日本分析機器工業会. JIS K 0124:2011 高速液体クロマトグラフィー通則. 一般財団法人 日本規格協会, 2011
- [4] 厚生労働省健康・生活衛生局食品基準審査課長, 厚生労働省健康・生活衛生局食品監視安全課長, 「食品中の食品添加物分析法の妥当性確認ガイドライン」の作成及び「第2版 食品中の食品添加物分析法」の改正について 別添1 食品中の食品添加物分析法の妥当性確認ガイドライン. 健生食基発0308第1号, 健生食監発0308第1号. 令和6年3月8日.
- [5] 厚生労働省監修. “87 ニコチン酸及びニコチン酸アミド”. 食品衛生検査指針, 食品添加物編2003. 日本食品衛生協会2003, 437-443.

資料

広島湾沿岸域におけるBOD₃の長期変動解析 —Chl-aを用いた推定手法による評価—

濱脇 亮次, 後田 俊直

Long-term variation of BOD₃ in the coastal area of Hiroshima Bay —evaluation using a chlorophyll-a-based estimation method—

HAMAWAKI Ryoji, USHIRODA Toshinao

(Received: October 22, 2025)

広島湾では毎年夏季を中心に沿岸域の底層で貧酸素水塊が形成され、生態系に深刻な影響を及ぼしている。本研究では、広島湾における有機物分解能および酸素消費特性を把握するため、1981～2023年の広域総合水質調査データを用い、クロロフィルa (Chl-a) から推定した生物化学的酸素要求量 (BOD₃) の長期変動を解析した。その結果、表層・底層ともにBOD₃の長期的な増減傾向は認められず、Mann-Kendall検定により有意な傾向は検出されなかった。このことから、過去約40年間に於いて広島湾のBOD₃はほぼ横ばいで推移し、有機物分解能やそれに関連する栄養塩負荷等は大きく変化していない可能性が示唆された。BOD₃は貧酸素水塊発生の予測や物質循環特性を把握するうえで有効な指標であり、今後も環境変動の早期把握に活用できると考えられる。

Key words : BOD, 貧酸素水塊, 広島湾, 酸素消費, Chl-a

結 言

瀬戸内海は日本最大の閉鎖性内湾であり、外洋との水交換が制限されることに加え、水深が浅く、河川分布が広範であるため、水質が人為的影響を受けやすい特徴を有している。高度経済成長期には瀬戸内海全体の水質汚染が深刻化し、「瀬死の海」と呼ばれるほど水質が悪化した。しかし、瀬戸内海環境保全特別措置法に基づく総量削減制度による富栄養化対策が進められた結果、窒素・リン濃度の低下や水質改善が認められ、赤潮の発生件数も80件/年程度で推移しており、ピーク時であった1980年代に比べると大幅に減少している [1,2]。しかし近年では、海域の基礎生産の低下に伴うノリの色落ちなど、いわゆる「貧栄養化」に伴う新たな問題も指摘されている [3,4]。

広島湾を含む瀬戸内海各地では、夏季を中心に底層の溶存酸素 (DO) が著しく低下する現象が継続的に観測されており、その範囲は湾全体に及ぶこともある [5,6]。底層DOの低下は水生生物の生息環境を悪化させるだけでなく、有害な硫化水素の発生を引き起こし、

底層生物群集や水産資源に深刻な影響を与えることが知られている [7,8]。さらに、底層DOの低下は底泥からの栄養塩溶出を促進し、再び富栄養化を引き起こす可能性も指摘されている [7]。このため、瀬戸内海の健全な海域環境を維持するためには、栄養塩管理のみならず、貧酸素水塊の発生要因となる有機物分解に伴う酸素消費ポテンシャルの把握が不可欠である。これまで酸素消費ポテンシャルに関する研究は多数行われてきたが、多くは水塊中の酸素消費要因の解明や貧酸素水塊のモデル化に重点が置かれ、化学的酸素要求量 (COD) 等の水質項目と酸素消費ポテンシャルとの直接的な関係を評価した研究は少ない。また、過去から現在に至るまでの酸素消費ポテンシャルに関する報告はほとんどない。

有機物分解に起因する酸素消費ポテンシャルを表す代表的な指標である生物化学的酸素要求量 (BOD) は、底層DOの変動機構を理解する上で重要であり、特にBOD₃は海水中の有機物性状とDO消費要因の関連を示す有用な指標として知られている [11]。しかし、BOD₃の観測データに関する報告は近年のものに限られ、過去のデータは不足している。このような状況に

において、既存のCODやTOCの長期データを活用してBOD₃を推定することができれば、過去から現在に至るまでの酸素消費ポテンシャルの長期変動を簡便に評価できる。瀬戸内海では、広域総合水質調査や公共用水域常時監視調査等の水質調査が継続的に行われており、これらの既存データを活用し、CODから酸素消費ポテンシャルを推定する既報の手法 [14] を応用すれば、過去から現在にかけてのBOD₃の長期変動を簡便かつ一貫した指標として評価することが可能となる。

本研究では、広島湾においてBOD₃を実測し、有機物関連項目であるCODおよびTOCとの関係を解析することで、酸素消費ポテンシャルの推定手法を確立し、広島湾における酸素消費ポテンシャルの長期変動とその変動要因を明らかにすることを目的とした。

方 法

広島湾は、瀬戸内海西部に位置する平均水深約30mの半閉鎖性内湾である。湾奥は広島市をはじめとする都市域に接しており、主要河川である太田川から栄養塩や有機物が供給されることが湾内水質に大きく影響する [15]。また、湾内は入り組んだ海岸線と複数の小規模港湾が存在し、水流の複雑な循環が生じることから、底層水の滞留や貧酸素水塊の形成が起りやすい。このため、夏季には湾奥部を中心に底層の溶存酸素(DO)が低下し、貧酸素水塊が形成される [5,6]。栄養塩濃度は河川から供給される有機物や底泥からの溶

出に影響を受け、窒素やリンは夏季に底層で増加する [7,16]。本研究では、広島湾内の5地点(図1)において、表層水および底層水の採水を行った。採水は2020年度から2024年度までの5年間にわたり、年4回(春季(5月)、夏季(8月)、秋季(11月)、冬季(2月))実施した(表1)。観測点は湾奥から湾口にかけて太田川の影響等を考慮して選定した。これらの地点は、いずれも広島県の公共用水域常時監視地点である(St.1:広島湾9, St.2:広島湾29, St.3:広島湾12, St.4:広島湾14, St.5:広島湾西部21)。

採水にはパンドーン採水器を用い、基本項目(水温、塩分、pH、DO)、有機物関連項目(BOD、COD、有機態炭素(TOC))、栄養塩関連項目(全窒素(TN)、全リン(TP)、アンモニア態窒素(NH₄-N)、硝酸態窒素(NO₃-N)、亜硝酸態窒素(NO₂-N)、リン酸態リン(PO₄-P))を測定した。本研究は、主に有機物関連項目に着目するが、環境条件の補足やその変動要因を解明するために水温等の基本項目や窒素、リン等の栄養塩関連項目等も併せて調査した。採取試料は海洋観測ガイドライン [17]、流れ分析法による水質試験方法(JIS K 0170)、広島県公共用水域水質測定計画 [18] に準じて分析した。BOD₃は既報 [11,19] に示された方法に従い、採水当日と試験開始3日後にDOを測定し、その差からBOD₃を算出した。CODおよびTOC用試料は4℃で冷蔵保存し、24時間以内に分析を行った。溶存性COD(D-COD)、溶存性TOC(DOC)および溶存性栄養塩の測定は、450℃で1.5時間熱処理したガラス繊維ろ紙(Whatman GF/C、孔径1.2μm)を用いてろ過した試料を分析に用いた。分析にはすべて富士フイルム和光純薬(株)製の試薬を使用した。また、直接測定しない形態の炭素、窒素及びリンの測定は次の方法により算出した。粒子状有機態炭素(POC)はTOCからDOCを差し引いた値とした。粒子状有機態窒素(P_{TN})は全窒素から溶存性全窒素(D_{TN})を差し引いた値とした。溶存性有機態窒素(DON)はD_{TN}から溶存性無機態窒素(DIN=NH₄-N+NO₃-N+NO₂-N)を差し引いた値とした。粒子状有機態リン(POP)はTPから溶存性全リン(D_{TP})を差し引いた値とした。本研究における定量下限値は公共水域水質測定計画 [18] に準じた。なお、この計画におけるBODの定量下限値は0.5mg/Lであるが、海域のBOD₃はこの値を下回ることがあるため、ばつ気した飽和超純水のDOを繰り返し測定し、その標準偏差から定量下限値を求めた。

また、既報 [14] では、BODとCODにはBOD = a ·

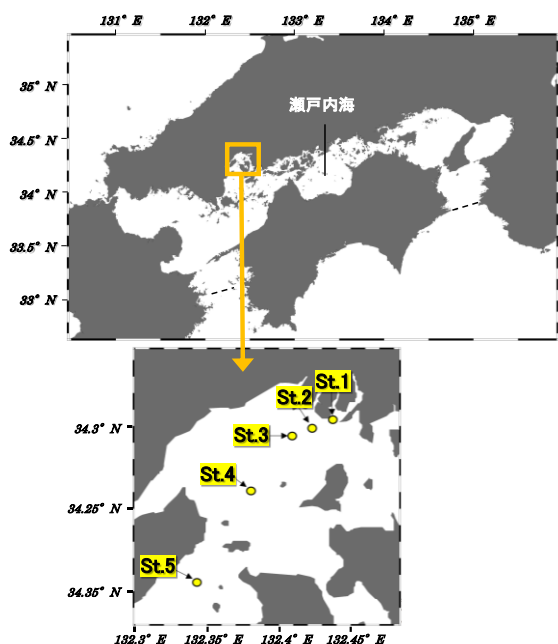


図1 広島湾における調査地点

表1 広島湾調査地点情報と調査時期

○:水質調査実施

地点	緯度	経度	層	調査年月																					
				R2				R3				R4				R5				R6					
				春季	夏季	秋季	冬季	春季	夏季	秋季	冬季	春季	夏季	秋季	冬季	春季	夏季	秋季	冬季	春季	夏季	秋季	冬季		
5月	8月	11月	2月	5月	8月	11月	2月	5月	8月	11月	2月	5月	8月	11月	2月	5月	8月	11月	2月						
St.1(広島湾9)	34° 21' 12"	132° 26' 14"	上層														○	○	○	○	○	○	○	○	
			下層																○	○	○	○	○	○	○
St.2(広島湾29)	34° 20' 54"	132° 25' 21"	上層														○	○	○	○	○	○	○	○	
			下層																○	○	○	○	○	○	○
St.3(広島湾12)	34° 20' 56"	132° 24' 33"	上層	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
			下層	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
St.4(広島湾14)	34° 18' 36"	132° 22' 45"	上層	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
			下層	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
St.5(広島湾西部21)	34° 15' 21"	132° 20' 33"	上層	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
			下層	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○

(COD)^b の関係式が採用されている。このことから、本研究においてもこの関係式を用い、最小二乗法によりaおよびbを算出した。また、本研究では、既報に示されたCOD以外にもBODと関連性が高いと考えられるTOCおよびChl-aを用いてBOD₃推定式の構築を試みた。

構築したBOD₃の推定式を用い、広島湾における過去の公的水質データを活用してBOD₃の長期変動を追跡した。広島湾では、広域総合水質調査や公共用水域常時監視調査等により、長期的かつ豊富な水質データが蓄積されている。本研究では、表層および底層 (B-1 m) の水質データが充実している広域総合水質調査の水質データを用い、広島湾沿岸部における過去から現在までのBOD₃の長期変動を評価するとともにその変化の要因を考察した。

結果および考察

1 広島湾の水質測定結果

2020年から2024年にかけて、広島湾内の定点において表層および底層の水質を測定した結果を表2および表3 (本調査により得られた各地点の水質データは別表1~別表4を参照) に示す。水温は明瞭な季節変動を示し、冬季には約10°Cまで低下し、夏季には表層で25~29°Cに達した。底層は表層よりもやや低く推移し、夏季には水温差が顕著となって強い成層が形成された。pHは年間を通じて7.8~8.3の範囲で安定しており、大きな変動は認められなかった。塩分は表層で21~32psuであり、底層は表層より高い値を示した。特に夏季には河川流入の影響により表層の塩分が低下する傾向が確認された。

DOは表層で8.0~11.0mg/L前後であったが、底層では夏季に顕著な低下が認められた。特に2023年8月

にはSt.4の底層DOが2.2mg/Lまで低下した。これは夏季の強い成層により表層から底層への酸素供給が制限され、貧酸素水塊が形成されたものと考えられる。これは、既報[6]でも示されている現象が現在も、広島湾では起こっている可能性が示唆される。Chl-aは0.4~55.7 μg/Lの範囲にあり、春から夏にかけて沿岸部表層で高濃度を示し、沖合では低い値を示した。底層では春季から秋季は概ね1~3 μg/L以下で推移したことに対し、冬季には3 μg/Lを超える地点が多く、表層より高濃度となる場合も見られた。この現象は周防灘や有明海奥部でも報告されており[22,23]、成層の崩壊に伴う鉛直混合の活発化や、季節的な水柱構造の変化、さらにプランクトンの沈降過程などが複合的に作用した結果と考えられる。

CODは0.9~9.0 mg/Lの範囲にあり、とくに一次生産が活発となる春~夏季に高濃度となった。空間分布としては沿岸表層で高く、沖合・底層にかけて低下する傾向が認められた。また、CODとChl-aの間には有意な正の相関 ($r=0.78, p<0.001$) が認められ、CODは広島湾における基礎生産の変動を反映する有効な指標の一つと考えられる。TOCは1.2~4.6 mg/Lの範囲にあり、CODと類似した季節変動を示した。春~秋季に表層で高く、冬季には低下した。また、空間的にもChl-aやCODと同様に、沿岸表層で高く、沖合・底層にかけて低下する傾向が認められた。CODとTOCには有意な正の相関 ($r=0.88, p<0.001$) が、またTOCとChl-aにも有意な正の相関 ($r=0.75, p<0.001$) が認められた。これらの結果から、春~夏季にかけてのCODおよびTOCの上昇は植物プランクトンの増殖を反映していると考えられる。一方、底層でCODやTOCが表層よりも低い値を示したのは、沈降粒子の分解が進行する一方で、水柱中に残存する有機物が少なかったためと推察される。また、Chl-aの相関が

表2(a) 広島湾における水質調査結果 (基本項目)

地点	月	層	水温(°C)			pH			塩分(psu)			DO(mg/L)		
			平均値	最大値	最小値	平均値	最大値	最小値	平均値	最大値	最小値	平均値	最大値	最小値
St.1	5	上	19.0	19.8	18.1	8.2	8.2	8.2	18.5	21.4	15.6	9.3	9.5	9.1
		下	16.0	17.0	14.9	8.1	8.1	8.1	32.5	32.8	32.2	7.4	7.5	7.2
	8	上	29.4	29.9	28.9	8.4	8.6	8.3	18.3	20.4	16.2	9.7	9.9	9.5
		下	23.1	24.2	22.0	7.9	7.9	7.8	31.4	31.4	31.4	3.8	4.1	3.5
	11	上	20.5	21.1	19.9	8.0	8.0	8.0	24.4	27.8	21.1	7.7	7.9	7.5
		下	22.1	22.5	21.7	8.0	8.0	8.0	32.3	32.4	32.2	6.0	6.2	5.7
2	上	9.0	9.4	8.5	8.0	8.1	7.9	20.7	30.1	11.2	10.5	10.8	10.2	
	下	11.0	11.8	10.1	8.1	8.1	8.1	32.8	33.2	32.4	9.7	10.5	8.9	
St.2	5	上	18.5	19.2	17.7	8.3	8.3	8.2	28.3	29.0	27.6	9.9	9.9	9.8
		下	15.4	16.0	14.8	8.1	8.1	8.1	32.7	32.9	32.6	7.2	7.2	7.1
	8	上	28.9	29.9	27.8	8.4	8.5	8.3	19.7	26.2	13.2	9.3	9.7	8.9
		下	22.8	23.6	22.0	7.9	8.0	7.8	31.7	31.8	31.6	4.4	4.9	3.9
	11	上	21.8	22.1	21.5	8.1	8.1	8.1	30.7	31.5	30.0	7.6	7.9	7.3
		下	21.9	22.6	21.1	8.0	8.0	8.0	32.4	32.4	32.3	5.4	6.0	4.8
2	上	8.9	9.1	8.7	8.1	8.1	8.1	24.6	31.4	17.9	10.6	10.9	10.3	
	下	11.0	11.8	10.2	8.1	8.1	8.1	33.0	33.4	32.7	8.8	9.1	8.6	
St.3	5	上	18.8	19.5	17.5	8.3	8.5	8.2	27.1	30.7	17.6	10.5	12.8	9.7
		下	15.5	16.5	14.8	8.0	8.2	8.0	32.8	32.8	32.6	6.9	8.3	5.6
	8	上	29.3	30.8	28.2	8.5	8.9	8.2	22.8	28.3	18.5	9.7	11.1	8.6
		下	22.3	23.7	21.2	7.9	7.9	7.8	31.9	32.3	31.6	3.8	4.3	3.2
	11	上	20.5	21.8	19.1	8.0	8.1	8.0	31.3	32.0	30.5	7.0	7.2	6.8
		下	21.0	22.8	19.8	8.0	8.0	8.0	32.2	32.6	31.7	6.1	7.0	4.6
2	上	10.2	10.9	9.5	8.1	8.2	8.1	30.9	31.9	28.8	9.8	11.1	9.0	
	下	10.8	11.8	9.9	8.1	8.1	8.1	32.8	33.4	32.5	9.0	10.2	8.2	
St.4	5	上	18.3	19.4	17.0	8.3	8.4	8.2	29.9	31.6	28.2	9.7	9.9	9.4
		下	15.3	16.0	14.6	8.1	8.2	8.0	33.0	33.1	32.9	7.5	8.0	6.9
	8	上	28.8	30.3	27.9	8.4	8.8	8.2	25.4	30.4	17.4	8.9	11.4	6.9
		下	22.1	23.4	21.5	7.8	7.9	7.7	32.1	32.6	31.6	3.8	4.8	2.2
	11	上	20.6	21.6	19.5	8.1	8.1	8.0	31.5	32.2	29.7	7.5	8.0	7.0
		下	21.1	22.5	20.1	8.1	8.1	8.0	32.3	32.6	32.1	7.0	7.4	6.2
2	上	9.8	10.7	9.2	8.1	8.2	8.1	30.9	32.6	28.9	9.8	10.6	9.2	
	下	10.8	11.8	10.0	8.1	8.1	8.1	33.1	33.7	32.9	9.0	9.3	8.6	
St.5	5	上	18.0	18.7	17.7	8.2	8.3	8.2	31.0	32.0	30.3	9.2	9.7	8.9
		下	15.3	16.0	14.3	8.1	8.1	8.1	33.0	33.2	32.9	7.8	8.1	7.3
	8	上	28.0	29.6	26.8	8.3	8.4	8.2	27.7	30.2	23.9	8.1	8.6	7.7
		下	22.2	23.4	21.2	7.9	8.0	7.9	32.3	32.8	31.8	5.2	5.8	4.3
	11	上	20.7	21.6	19.5	8.1	8.1	8.1	31.9	32.7	30.8	7.4	7.8	7.1
		下	20.9	22.3	19.6	8.1	8.1	8.1	32.6	32.9	32.1	7.3	8.0	6.5
2	上	10.4	10.8	9.7	8.1	8.1	8.1	32.6	32.8	32.1	9.5	9.8	9.2	
	下	10.8	11.6	10.0	8.1	8.1	8.1	33.1	33.5	32.8	9.0	9.4	8.6	

表2(b) 広島湾における水質調査結果 (Chl-a及び有機物関連項目)

地点	月	層	Chl-a(μg/L)			TOC(mg/L)			COD(mg/L)			BOD(mg/L)		
			平均値	最大値	最小値	平均値	最大値	最小値	平均値	最大値	最小値	平均値	最大値	最小値
St.1	5	上	9.2	12.8	5.7	2.4	2.7	2.0	2.6	2.9	2.4	1.8	2.4	1.2
		下	2.6	3.1	2.0	1.6	1.6	1.6	1.6	1.6	1.6	0.7	0.7	0.7
	8	上	20.0	22.9	17.1	3.2	3.3	3.2	4.7	4.9	4.6	2.0	2.0	2.0
		下	1.1	1.6	0.7	1.5	1.5	1.4	2.2	2.6	1.8	0.4	0.4	0.3
	11	上	3.0	4.7	1.3	1.7	1.8	1.7	2.8	3.2	2.3	1.2	1.7	0.6
		下	1.8	2.2	1.3	1.4	1.5	1.3	2.2	3.0	1.4	0.5	0.5	0.4
2	上	6.2	10.3	2.1	1.5	1.6	1.4	2.3	2.3	2.2	0.7	1.0	0.4	
	下	6.8	7.0	6.5	1.4	1.5	1.3	1.7	1.9	1.4	0.7	0.9	0.4	
St.2	5	上	6.4	7.5	5.4	2.3	2.4	2.2	3.0	3.2	2.7	1.5	1.7	1.4
		下	2.3	2.5	2.1	1.6	1.6	1.6	1.4	1.5	1.3	0.6	0.9	0.4
	8	上	13.3	13.9	12.7	2.7	3.0	2.4	3.6	3.7	3.5	1.6	2.0	1.2
		下	1.3	1.6	0.9	1.4	1.5	1.4	2.1	2.2	2.0	0.3	0.4	0.2
	11	上	6.7	10.7	2.7	1.8	1.9	1.8	2.9	3.0	2.8	1.3	1.9	0.7
		下	1.4	1.8	1.0	1.4	1.6	1.3	2.2	2.7	1.6	0.4	0.5	0.3
2	上	4.5	6.3	2.7	1.5	1.5	1.4	2.0	2.2	1.8	0.8	1.0	0.5	
	下	4.3	6.2	2.5	1.3	1.3	1.3	1.6	1.8	1.3	0.5	0.7	0.3	
St.3	5	上	20.6	55.7	3.4	2.9	4.6	2.0	4.6	9.0	2.5	2.7	7.0	0.7
		下	1.7	2.6	0.8	1.5	1.6	1.3	2.1	2.9	1.6	0.5	0.9	0.3
	8	上	11.1	13.8	5.8	3.2	3.7	2.7	4.5	6.1	3.6	1.6	2.4	1.0
		下	1.2	1.9	0.7	1.5	1.6	1.5	2.1	2.5	1.7	0.3	0.4	0.3
	11	上	3.3	5.1	1.5	1.5	1.7	1.3	2.3	3.2	1.6	0.6	1.4	0.2
		下	2.3	5.5	1.1	1.5	1.6	1.4	2.3	3.4	1.7	0.4	0.4	0.4
2	上	4.2	7.5	1.0	1.6	1.7	1.3	1.9	2.3	1.3	0.6	0.8	0.4	
	下	3.9	5.9	2.5	1.4	1.5	1.3	1.9	2.1	1.3	0.5	0.8	0.3	
St.4	5	上	4.6	8.1	1.6	2.1	2.3	1.9	3.0	3.4	2.2	1.2	1.6	0.8
		下	1.8	2.8	1.5	1.4	1.6	1.3	1.8	2.6	1.0	0.4	0.7	0.2
	8	上	5.9	11.7	1.7	2.7	3.4	2.3	3.9	5.1	2.8	1.2	1.7	1.0
		下	0.9	1.6	0.4	1.5	1.7	1.3	2.1	2.6	1.5	0.3	0.5	0.2
	11	上	5.3	9.3	2.3	1.6	1.8	1.3	2.4	3.1	1.7	0.7	1.1	0.4
		下	2.8	6.8	1.1	1.4	1.6	1.2	2.2	2.9	1.5	0.4	0.4	0.3
2	上	3.2	5.2	1.3	1.4	1.4	1.3	2.0	2.3	1.5	0.5	0.9	0.3	
	下	3.1	6.4	1.2	1.3	1.4	1.3	1.5	1.9	0.9	0.4	0.9	0.3	
St.5	5	上	3.0	6.0	1.2	2.2	2.5	1.7	2.9	3.3	2.1	1.1	1.5	0.7
		下	1.2	1.4	0.8	1.4	1.6	1.4	1.7	2.2	0.9	0.4	0.7	0.3
	8	上	2.8	5.0	1.2	2.5	3.0	2.0	3.4	4.5	2.3	1.2	1.9	0.5
		下	1.1	2.5	0.4	1.5	1.6	1.4	2.1	2.8	1.5	0.5	0.6	0.3
	11	上	4.2	7.8	2.7	1.6	2.0	1.3	2.4	3.2	2.1	0.5	1.0	0.3
		下	3.5	8.3	1.1	1.5	1.7	1.3	2.3	3.1	1.3	0.4	0.7	0.2
2	上	3.3	4.6	2.1	1.5	1.9	1.2	2.0	2.5	1.6	0.5	0.8	0.3	
	下	3.1	5.3	1.5	1.3	1.4	1.2	1.7	2.0	1.4	0.4	0.6	0.3	

表3(a) 広島湾における水質調査結果 (栄養塩関連項目)

地点	月	層	TN(mg/L)			TP(mg/L)			NH ₄ (mg/L)		
			平均値	最大値	最小値	平均値	最大値	最小値	平均値	最大値	最小値
定量子限値			0.05			0.003			0.01		
St.1	5	上	0.46	0.43	0.43	0.037	0.040	0.035	<0.01	<0.01	<0.01
		下	0.16	0.21	0.16	0.028	0.029	0.026	0.01	0.02	<0.01
	8	上	0.56	0.62	0.50	0.052	0.056	0.049	<0.01	0.01	<0.01
		下	0.18	0.22	0.13	0.037	0.052	0.022	0.02	0.04	<0.01
	11	上	0.37	0.49	0.25	0.038	0.046	0.030	0.07	0.12	0.03
		下	0.23	0.25	0.21	0.035	0.036	0.035	0.02	0.03	<0.01
	2	上	0.57	0.57	0.57	0.041	0.051	0.030	0.09	0.09	0.09
		下	0.16	0.18	0.13	0.026	0.028	0.025	0.01	0.01	<0.01
St.2	5	上	0.34	0.43	0.24	0.030	0.035	0.025	<0.01	<0.01	<0.01
		下	0.18	0.21	0.15	0.026	0.027	0.026	0.01	0.02	0.01
	8	上	0.40	0.41	0.39	0.037	0.041	0.032	<0.01	<0.01	<0.01
		下	0.17	0.21	0.12	0.031	0.039	0.023	<0.01	<0.01	<0.01
	11	上	0.31	0.47	0.16	0.039	0.045	0.032	0.07	0.14	<0.01
		下	0.24	0.26	0.22	0.037	0.039	0.035	0.02	0.03	0.01
	2	上	0.33	0.42	0.24	0.030	0.032	0.027	0.03	0.03	0.03
		下	0.16	0.18	0.14	0.028	0.031	0.025	0.02	0.02	0.02
St.3	5	上	0.57	0.75	0.25	0.043	0.070	0.022	0.02	0.07	<0.01
		下	0.18	0.19	0.16	0.025	0.029	0.021	0.02	0.05	<0.01
	8	上	0.37	0.52	0.25	0.031	0.045	0.021	<0.01	<0.01	<0.01
		下	0.22	0.31	0.16	0.040	0.057	0.027	0.03	0.06	<0.01
	11	上	0.30	0.42	0.19	0.036	0.046	0.031	0.06	0.12	<0.01
		下	0.21	0.23	0.19	0.035	0.041	0.030	0.04	0.07	0.02
	2	上	0.27	0.38	0.22	0.028	0.040	0.021	0.06	0.17	0.03
		下	0.16	0.17	0.14	0.025	0.030	0.021	0.02	0.03	<0.01
St.4	5	上	0.22	0.79	0.17	0.020	0.032	0.012	<0.01	<0.01	<0.01
		下	0.15	0.21	0.14	0.021	0.026	0.014	0.01	0.03	<0.01
	8	上	0.27	0.37	0.21	0.023	0.031	0.015	<0.01	0.01	<0.01
		下	0.24	0.30	0.17	0.044	0.061	0.035	0.02	0.06	<0.01
	11	上	0.23	0.32	0.16	0.030	0.033	0.027	0.03	0.05	<0.01
		下	0.20	0.25	0.16	0.029	0.033	0.026	0.03	0.07	<0.01
	2	上	0.22	0.25	0.17	0.023	0.026	0.016	0.03	0.06	0.02
		下	0.15	0.18	0.12	0.022	0.026	0.018	<0.01	0.01	<0.01
St.5	5	上	0.19	0.25	0.14	0.017	0.025	0.014	<0.01	<0.01	<0.01
		下	0.17	0.17	0.15	0.021	0.026	0.015	0.01	0.02	<0.01
	8	上	0.23	0.28	0.17	0.020	0.027	0.013	<0.01	0.03	<0.01
		下	0.20	0.23	0.15	0.034	0.040	0.029	0.02	0.03	<0.01
	11	上	0.17	0.22	0.13	0.026	0.027	0.025	0.02	<0.01	<0.01
		下	0.18	0.25	0.15	0.027	0.031	0.023	0.02	0.03	<0.01
	2	上	0.16	0.19	0.12	0.020	0.022	0.016	0.02	0.02	0.01
		下	0.15	0.17	0.13	0.021	0.023	0.018	0.01	0.02	<0.01

表3(b) 広島湾における水質調査結果 (栄養塩関連項目)

地点	月	層	NO ₂ (mg/L)			NO ₃ (mg/L)			PO ₄ (mg/L)		
			平均値	最大値	最小値	平均値	最大値	最小値	平均値	最大値	最小値
定量子限値			0.005			0.005			0.005		
St.1	5	上	<0.005	<0.005	<0.005	0.140	0.226	0.054	0.003	0.005	<0.003
		下	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	0.012	0.015	0.010
	8	上	0.007	0.010	0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.003	<0.003	<0.003
		下	0.010	0.016	<0.005	0.012	0.022	<0.005	0.024	0.037	0.011
	11	上	0.039	0.040	0.039	0.059	0.094	0.023	0.021	0.021	0.020
		下	0.051	0.067	0.035	0.035	0.045	0.025	0.025	0.025	0.024
	2	上	0.019	0.026	0.013	0.379	0.416	0.343	0.028	0.045	0.011
		下	0.006	0.008	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	0.013	0.016	0.010
St.2	5	上	<0.005	<0.005	<0.005	0.011	0.018	<0.005	<0.003	<0.003	<0.003
		下	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	0.012	0.015	0.010
	8	上	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.003	<0.003	<0.003
		下	0.015	0.024	0.006	0.024	0.041	0.007	0.021	0.027	0.015
	11	上	0.040	0.048	0.033	0.067	0.072	0.062	0.022	0.023	0.021
		下	0.059	0.079	0.039	0.037	0.052	0.022	0.029	0.031	0.027
	2	上	0.008	0.009	0.008	0.173	0.264	0.081	0.014	0.019	0.009
		下	0.007	0.009	<0.005	0.022	0.036	0.007	0.016	0.019	0.013
St.3	5	上	<0.005	0.013	<0.005	0.045	0.199	<0.005	<0.003	0.006	<0.003
		下	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	0.007	<0.005	0.013	0.017	0.006
	8	上	<0.005	0.007	<0.005	<0.005	0.012	<0.005	<0.003	<0.003	<0.003
		下	0.014	0.025	0.006	0.043	0.106	0.014	0.029	0.043	0.018
	11	上	0.024	0.031	0.018	0.047	0.093	0.019	0.023	0.036	0.017
		下	0.038	0.109	0.011	0.022	0.046	0.009	0.024	0.038	0.017
	2	上	0.009	0.011	0.007	0.061	0.103	0.033	0.016	0.020	0.007
		下	0.006	0.009	<0.005	0.018	0.031	<0.005	0.014	0.017	0.007
St.4	5	上	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.003	<0.003	<0.003
		下	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	0.008	<0.005	0.012	0.017	0.009
	8	上	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	0.006	<0.005	<0.003	<0.003	<0.003
		下	0.015	0.029	<0.005	0.061	0.093	0.039	0.033	0.049	0.024
	11	上	0.020	0.051	<0.005	0.033	0.096	<0.005	0.016	0.021	0.009
		下	0.022	0.040	0.010	0.019	0.048	<0.005	0.020	0.025	0.012
	2	上	0.012	0.023	<0.005	0.056	0.071	0.014	0.012	0.019	<0.003
		下	0.006	0.010	<0.005	0.014	0.027	<0.005	0.011	0.015	0.007
St.5	5	上	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.003	<0.003	<0.003
		下	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	0.006	<0.005	0.011	0.014	0.010
	8	上	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.003	<0.003	<0.003
		下	0.014	0.026	0.005	0.039	0.069	0.023	0.024	0.030	0.020
	11	上	0.017	0.034	0.006	0.019	0.057	<0.005	0.014	0.016	0.009
		下	0.015	0.033	<0.005	0.013	0.043	<0.005	0.015	0.024	0.009
	2	上	0.005	0.009	<0.005	0.017	0.031	<0.005	0.009	0.014	0.003
		下	0.012	0.024	<0.005	0.008	0.014	<0.005	0.012	0.015	0.007

CODのそれより低いのは、TOCに過マンガン酸カリウムでは酸化されない難分解性有機物が含まれるためと考えられる。

BOD₃は0.2~7.0 mg/Lの範囲にあり、春~秋季にかけて高く、挙動はChl-a、COD、TOCと季節的・空間的に類似していた。BOD₃と有機物関連項目との関係性については次節にて記述する。

TNは0.12~0.79 mg/Lの範囲にあり、春~夏季には濃度が上昇し、沿岸表層で高値を示す傾向があった。一方、TPは0.012~0.070mg/Lの範囲にあり、TNやCOD・TOCと同調しない季節変動・空間分布であった。これには、海水や底泥中でのリンの吸着・溶出・再生といった物理・化学的特性が大きく影響していると考えられる[23, 24]。また、海域における栄養塩バランスの評価には、レッドフィールド比(N:P(モル比)=16)という指標が広く使われ、N:P比が16を超える場合にはリン制限、それ以下なら窒素制限と呼ばれる[25]。そこで、本研究で対象とした期間における広島湾のN:P比を算出したところ、表層で11~80(平均23)、底層で9~23(平均14)を示した。これらの結果から、表層ではリン制限、底層では窒素制限であると考えられる。この結果は過去にも類似した結果が報告されており[26]、広島湾における栄養塩環境は大きく変化していないものと考えられる。また、広島湾におけるN:P比は陸域あるいは底質からの栄養塩負荷が大きく寄与することが報告されており[27]、広島湾の栄養塩環境を把握するためには今後も継続的

なモニタリングが必要であると考えられる。

2 BOD₃と水質項目の相関解析

底層における貧酸素水塊の発生は、水生生物の生息環境を著しく悪化させる主要因である。特に、水温躍層が形成される夏季には、酸素供給が遮断され、底層のDO濃度が急速に低下する[5]。本研究では、海域におけるDO消費の主要因と考えられる有機物分解過程に着目し、BOD₃と有機物関連項目および栄養塩項目との関係を解析した。

解析結果を図2に示す。BOD₃はChl-aとの間に最も高い正の相関が認められ、次いでCOD、TOC、TN、TPの順に相関が高かった。この結果は、BOD₃が主として植物プランクトン由来の有機物の分解過程に依存していることを示しており、Chl-aとの高い相関は、一次生産に伴って生成される有機物が酸素消費の主要因となっていることが示唆される。一方、CODやTOCとも有意な相関が認められたことから、BOD₃は水中の有機物量と密接に関連する指標であると考えられる。このようなBOD₃と有機物関連項目との高い相関は、既往研究においても報告されており、鹿児島湾においても、BOD₃はChl-aやCODと密接に関連し、植物プランクトンの増殖と分解が酸素消費の主要因であることが示されている[29, 30]。本研究の結果もこれと一致しており、広島湾においても有機物分解が酸素消費を支配する主要因であることを裏付けているといえる。TNやTPとの関係は有機物に関連する指標よりも相関が弱かったが、これは栄養塩がBOD₃

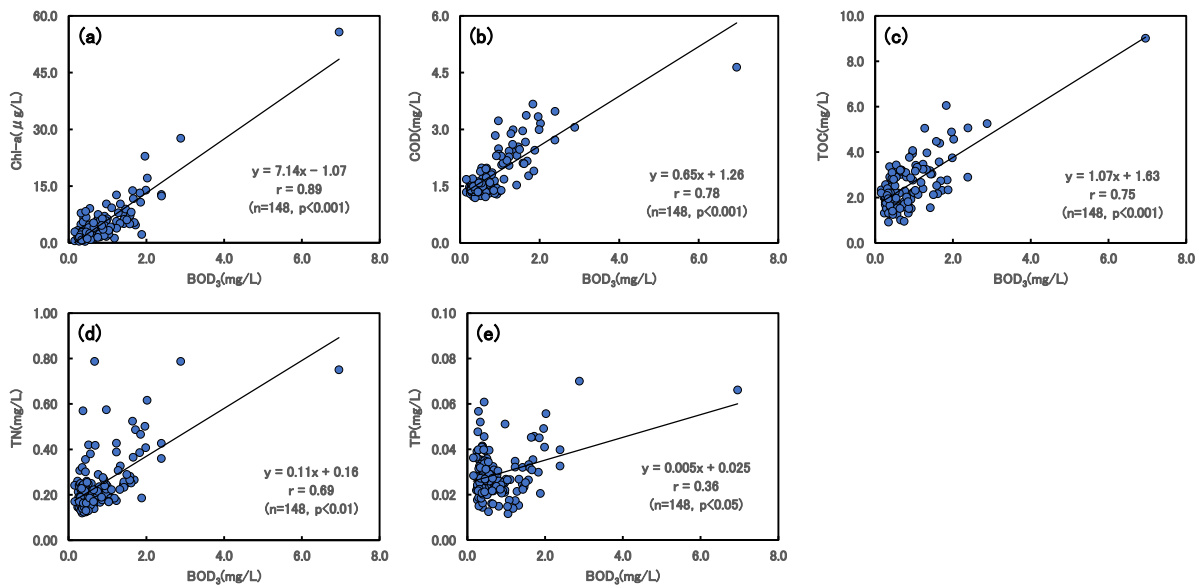


図2 広島湾におけるBOD₃と水質項目(有機物関連項目及び栄養塩関連項目)の関係
(a)Chl-a, (b)COD, (c)TOC, (d)TN, (e)TP

に直接的に反映されるのではなく、植物プランクトンの増殖を介して間接的に影響を及ぼすためと考えられる。以上の結果から、BOD₃を推定する上では、特にChl-a、COD、TOCが有効な水質項目であると考えられる。

3 BOD₃推定式の検討

BOD₃と各水質項目との相関解析の結果、BOD₃は主として植物プランクトン由来の有機物およびそれに関連する水質項目と高い関係性を示した。BOD₃は水中における短期的な酸素消費ポテンシャルを表す指標であり、海域における貧酸素水塊の発生機構の解明やその予測に資する可能性がある[31]。しかし、海域におけるBOD₃の観測事例は極めて少なく、過去に遡った酸素消費ポテンシャルの経年変動を直接的に把握することは困難である。このため、長期的に観測されている水質項目のうち、BOD₃と高い相関を示す指標を用いて推定式を構築できれば、広島湾におけるBOD₃の長期変動を定量的に評価することが可能であると考えられる。これまで海水中における酸素消費要因の解明については多くの研究が行われてきた[9, 10]が、水質データのみから酸素消費速度を直接算出できる報告例はほとんどない。しかし、既報[14]では、酸素消費速度が回帰式($y = a \times x^b$, a: 定数, x: 変数, b: 定数)で示されており、この方法を用いれば水質データから便宜的に酸素消費速度を算出できる。本研究では、既報[14]に示された関係式を応用し、BOD₃と相関性の高かったChl-a、TOC、CODを説明変数として回帰分析を行い、BOD₃推定式の構築を試みた。

解析の結果を表4および図3に示す。各水質項目を説明変数としたBOD₃推定式における傾きを表す係数aは0.28~0.31であった。これは、いずれの指標を用いても単位濃度あたりの基準的なBOD₃寄与量がほぼ共通していることを示しており、酸素消費に寄与する有機物の質が反映されていると考えられる[30,

32, 33]。ただし、aの値は季節や海域によって変動する可能性があるため、この点には注意が必要である。

一方、それぞれの推定式で得られたbは0.67~1.53の範囲にあり、変数によって差が見られた。Chl-aを説明変数とした場合のbは0.67であり、1未満であることから、植物プランクトン由来の有機物が短期的な酸素消費(BOD₃)に寄与する可能性が考えられる。また、CODを変数とした場合、bは1.10となり、BOD₃

表4 有機物関連項目を変数としたBOD₃の回帰式

	変数	BOD ₃ 推定式	a	b
推定式1	Chl-a	$BOD_3 = 0.31 \times (Chl-a)^{0.67}$	0.31	0.67
推定式2	COD	$BOD_3 = 0.28 \times (COD)^{1.10}$	0.28	1.10
推定式3	TOC	$BOD_3 = 0.31 \times (TOC)^{1.53}$	0.31	1.53

とCODの関係がほぼ線形であることを示した。さらに、TOCを用いた場合、bは1.53と最も高く、TOCが高い場合には生物利用可能な有機物の供給量が増加する可能性が示唆される。

実測値と推定式の適合度を示す決定係数(R²)は、Chl-aが0.72 ($p < 0.001$)で最も高く、次いでTOCが0.69 ($p < 0.001$)、CODが0.57 ($p < 0.001$)であった。これらの結果から、BOD₃の推定において最も有効な変数はChl-aであると考えられる。Chl-aは植物プランクトン由来の易分解性有機物を反映しており、短期的な酸素消費ポテンシャルの推定に適していると考えられる。TOCは難分解性有機物も含むものの、広島湾では動植物プランクトンやバクテリア等の生物由来有機物が主体と考えられるため、R²が高い値を示したと考えられる。一方、CODは無機還元物質や難分解性有機物の影響を受けやすい[30]等の理由から、3つの変数の中では最もR²が低かったと考えられる。以上の結果から、BOD₃の推定に用いる変数としては、Chl-aが最も適当であり、TOCおよびCODは補助的な指標として利用することが妥当であると考えられる。

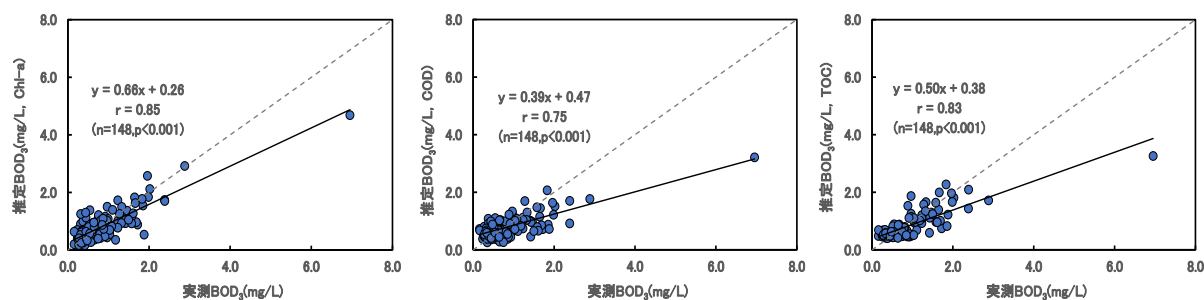


図3 実測BOD₃と推定BOD₃の比較
(a)Chl-a, (b)COD, (c)TOC

4 広島湾におけるBOD₃の長期変動

広島湾では例年、沿岸域の底層において貧酸素水塊の形成が確認されており、貧酸素水塊の発生は底層に生息する海洋生物に深刻な影響を与えることが報告されている[34]。そのため、海域においてBOD₃を測定することは、貧酸素水塊の発生を予測するうえで重要な指標の一つとされている[31]。これまで広島湾において、BOD₃の長期変動を評価した事例は報告されていない。そこで本研究では、前節にて構築したBOD₃推定式を用いて、広島湾沿岸域におけるBOD₃の長期変動を解析した。解析には1981年から

2023年までの期間に実施された広域総合水質調査で得られたChl-aデータを用い、広島湾沿岸域（地点番号396および411）における表層および底層のBOD₃を推定した。その結果を図4に示す。推定BOD₃の長期変動をMann-Kendall検定により評価した結果、いずれの層においても有意な増加・減少傾向は確認されなかった。このことから、過去43年間に於いて広島湾のBOD₃は長期的にはほぼ横ばいで推移しており、広島湾の有機物分解に伴う酸素消費構造が大きく変化していない可能性が示唆された。したがって、今後も広島湾沿岸域においては貧酸素水塊が継続して発生する

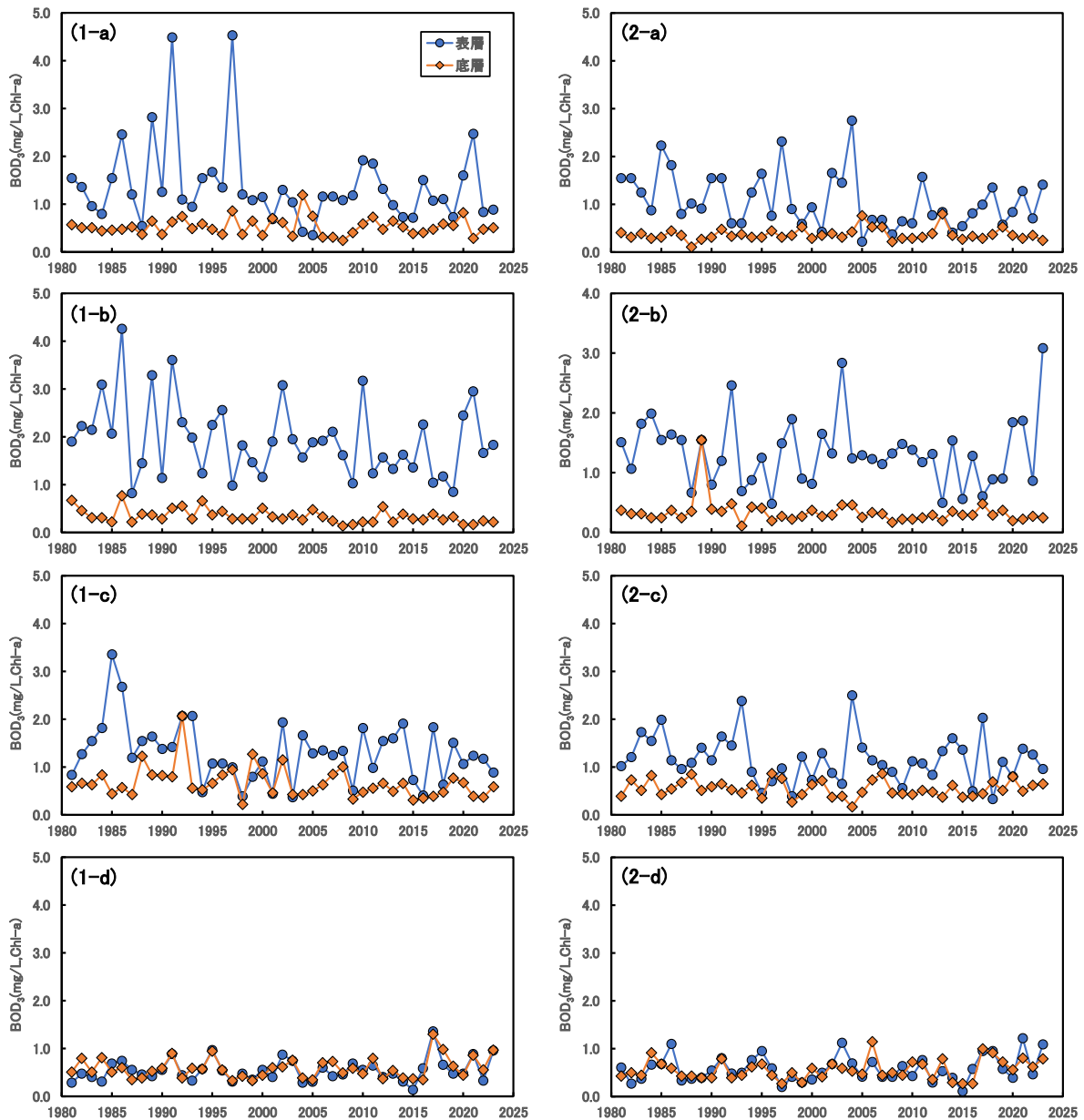


図4 広島湾表層及び底層におけるBOD₃の長期変動
 (1:396*, 2:411*, a: 春季, b: 夏季, c: 秋季, d: 冬季)
 ※広域総合水質調査（環境省）における調査地点通し番号

可能性が高いと考えられる。

一方、日本の閉鎖性水域においては、近年の貧栄養化により有機物の分解能が低下していることが報告されている[35]。BOD₃は、水中の酸素消費速度を評価するだけでなく、有機物分解能を評価する指標としても用いられることから、本研究で得られた広島湾のBOD₃の長期的横ばい傾向は、過去数十年間において広島湾の有機物分解能が大きく変化していないことを示している。このことは、広島湾における有機物や栄養塩が長期的に安定して供給されている可能性を示唆している。

以上のことから、Chl-aを指標としてBOD₃を推定することは、水塊中の酸素消費量を簡便に把握できることから、今後の貧酸素水塊発生の予測や海域における物質循環を評価する指標として有効であると考えられる。また、貧酸素水塊の発生を抑制するためには、有機物負荷の削減や底層水の循環改善等、湾内の酸素環境を改善するための継続的な対策を講じることが重要である。

結 語

本研究では、広島湾におけるBOD₃の長期的変動傾向を明らかにし、貧酸素水塊形成との関連性を検討することを目的とした。1981～2023年の推定BOD₃を解析した結果、表層・底層ともに長期的な増減傾向は認められず、有機物分解能は概ね大きく変化していないことが明らかとなった。これは、広島湾における酸素消費ポテンシャルは大きく変化していないことを示唆しており、他の閉鎖性水域で報告されている貧栄養化による分解能低下[35]とは異なる傾向を示した。

BOD₃は海域の酸素消費ポテンシャルを把握する有効な指標であり、今後は貧酸素水塊発生の予測モデルや物質循環評価への活用が期待される。ただし、広島湾のBOD₃は大きな変動を示さず、沿岸生態系の酸素消費特性は安定的に維持されていることから、有機物負荷の削減や底層水の循環改善等、湾内の酸素環境を改善するための継続的な対策を講じることが重要であると考えられる。

謝 辞

本研究は、地方公共団体環境研究機関等と国立環境研究所との共同研究（Ⅱ型）「沿岸海域における新水

質基準としての底層溶存酸素（貧酸素水塊）と気候変動の及ぼす影響評価に関する研究」によって、実施したものである。関係者には謝意を表する。

文 献

- [1] 多田邦尚, 藤原宗弘, 他. 瀬戸内海の水質環境とノリ養殖. 分析化学. 2010, 59, 945-955.
- [2] 山本民次. 瀬戸内海の水底質環境と生態系修復技術. 環境と安全. 2014, 5, 199-203.
- [3] 藤原建紀. 瀬戸内海のパラ栄養化. 水環境学会誌. 2011, 34, 34-38.
- [4] T Yamamoto. The Seto Inland Sea-eutrophic or oligotrophic?, Mar.Pol.Bul.. 2003, 47, 37-42.
- [5] 山本裕規, 山本民次, 他. 浮遊系-底生系カップリング・モデルによる広島湾北部海域の貧酸素水塊形成に関する動態解析. 水環境学会誌. 2011, 34(2), 19-28.
- [6] 伊達悦二, 清木徹. 広島湾の貧酸素水塊の分布とその形成機構. 広島県保健環境センター研究報告. 2006, 14, 1-11.
- [7] 小倉紀雄, 高田秀重. 東京湾-100の環境変遷. 安全工学. 1995, 34(5), 325-331.
- [8] 長尾正之, 橋本英資, 他. 広島湾における海底酸素消費量の連続測定. 土木学会論文集. 2000, 663(Ⅱ-53), 109-117.
- [9] 小林志保, 藤原建紀, 他. 沿岸海域の貧酸素化を引き起こす有機物の起源推定: 炭素安定同位体比を用いたアプローチ. 水環境学会誌. 2018, 41(1), 1-10.
- [10] 藤井智康, 藤原建紀, 他. 沿岸海域における窪地の貧酸素水塊の消滅過程. 土木学会論文集B2 (海岸工学). 2015, 71(2), I_1285-I_1290.
- [11] 牧秀明. 環境部局による海域の調査研究の在り方について. 全国環境研会誌. 2016, 41(1), 9-11.
- [12] 大久保慧, 西嶋渉, 他. 瀬戸内海における底質からの溶出量の推定及び近年の変遷. 土木学会論文集G (環境). 2022, 78(7), III_381-III_389.
- [13] 矢吹芳教, 小野純子, 他. 日本近海の太平洋外洋水のCODの長期変動と瀬戸内海のCODに及ぼす影響. 水環境学会誌. 2017, 40(5), 189-197.
- [14] 井上裕雄, 原田政隆. 浅海養殖場における有機物の堆積・分解過程について. 昭和52年度農林水産業特別試験研究費補助金による研究報告書. 1978,

- 21-43.
- [15] 山本民次, 石田愛実, 他. 太田川河川水中のリンおよび窒素濃度の長期変動-植物プランクトン種の変化を引き起こす主要因として-. 水産海洋研究. 2002, 66(2), 102-109.
- [16] 山本民次, 松田治, 他. 広島湾底泥化の無機態窒素溶出フラックスの見積り. 生物生産学研究: 広島大学生物生産学部紀要. 1995, 34(2), 185-190.
- [17] 日本海洋学会. “海洋観測ガイドライン (和文第5版, 2023年6月公開)”. <https://kaiyo-gakkai.jp/jos/guide>. 2025.10.01.
- [18] 広島県. 令和7年度公共用水域等の水質測定計画. 令和7年3月.
- [19] 小田新一郎, 濱脇亮次, 他. 広島湾における栄養塩類及びCOD関連項目の季節変動について. 広島県立総合技術研究所保健環境センター研究報告. 2020, 28, 45-52.
- [20] 福島武彦, 天野耕二, 他. 湖沼水質の簡易な予測モデル. 水質汚濁研究. 1986, 9(12), 775-785.
- [21] 早川和秀, 岡本高弘, 他. 低濃度有機汚濁水域における有機物指標の特性把握: 琵琶湖におけるCOD(Mn), BOD, TOCの比較から. 水環境学会誌. 2018, 41(6), 193-203.
- [22] 山口聖, 松原賢, 他. 有明海湾奥西部の鹿島川感潮域における高い栄養塩・高クロロフィル水塊と沿岸の冬季珪藻ブルームとの関係. 沿岸海洋研究. 2017, 54(2), 193-201.
- [23] 井伊博行, 平田健正, 他. 茶畑周辺の池水中のpH変化と窒素, リン, 硫黄, アルミニウムの挙動について. 土木学会論文集. 1998, 594(VII-7), 57-63.
- [24] 小林節子, 西村肇. 底質からのリン溶出におけるFe(II)とリン酸イオンの挙動. 水質汚濁研究. 1988, 11(12), 755-764.
- [25] Redfield A. C., The biological control of chemical factors in the environment, *Am. Sci.*, 1958, 46, 205-221.
- [26] 山本民次, 橋本俊也, 他. 瀬戸内海における植物プランクトン態N:P比とその変動要因. 水産海洋研究. 1999, 63(3), 6-13.
- [27] 山本民次, 橋本俊也, 他. 1991~2000年の広島湾海中における新生物元素の時空間的変動, 特に植物プランクトン態C: N: P比のレッドフィールド比からの乖離. 沿岸海洋研究. 2002, 39(2), 163-169.
- [28] 内野宏治, 猪股あるか, 他. 有明海奥部における酸素消費対する水柱中の有機炭素分解の寄与. 水環境学会誌. 2019, 42(5), 195-200.
- [29] 有西聡美, 伊口航平, 他. 鹿児島湾における海域版BOD測定による易分解性有機物について, 鹿児島県環境保健センター所報. 2024, 25, 51-56.
- [30] 牧秀明, 金谷弦, 他. 沿岸海域の水温変動評価と底層溶存酸素 (DO), 有機物指標に係る地方環境研究機関との共同研究. 地球環境. 2023, 205-213.
- [31] 竹本修明, 久下芳生, 他. 海水のBOD測定. 水質汚濁研究. 1981, 4(2), 80-90.
- [32] 一瀬諭, 琵琶湖における難分解性有機物生成に及ぼす植物プランクトンの影響. 八郎湖流域管理研究. 2014, 1-6.
- [33] 仲川直子, 金澤良昭, 他. 珪藻類を対象とした植物プランクトン由来の難分解性溶存有機物に関する特性評価. 兵庫県環境研究センター紀要. 2010, 2, 1-7.
- [34] 松田治, 山本民次, 他. 広島湾の貧酸素と硫化水素がガザミ幼生の初期発達段階に及ぼす影響. 生物生産学研究: 広島大学生物生産学部紀要. 1993, 32(2), 61-70.
- [35] 藤原建紀, 鈴木元治. 閉鎖性海域のCOD上昇. 水環境学会誌. 2024, 47(1), 37-46.

別表1(a) 広島湾における水質調査結果 (St.1及びSt.2)

地点	年	月	層	水温 (°C)	pH	塩分	DO (mg/L)	Chl-a (µg/L)	TOC (mg/L)	DOC (mg/L)	COD (mg/L)	D-COD (mg/L)	BOD (mg/L)	D-BOD (mg/L)	
定量下限値				—	—	—	0.5	0.5	0.2	0.2	0.5	0.5	0.05	0.05	
St.1	2023	5月	上	19.8	8.2	21.4	9.5	12.8	2.7	1.5	2.9	1.9	2.38	0.41	
			下	17.0	8.1	32.2	7.2	2.0	1.6	1.3	1.6	1.3	0.66	0.19	
	8月	上	28.9	8.3	20.4	9.5	17.1	3.2	1.7	4.6	2.8	2.02	0.23		
		下	24.2	7.8	31.4	3.5	0.7	1.5	1.4	2.6	2.2	0.33	0.13		
	11月	上	21.1	8.0	27.8	7.5	4.7	1.8	1.4	2.3	1.8	1.72	0.27		
		下	21.7	8.0	32.4	6.2	2.2	1.3	1.1	1.4	1.1	0.45	0.16		
	2月	上	9.4	7.9	11.2	10.8	2.1	1.6	1.2	2.3	2.0	0.37	0.20		
		下	11.8	8.1	33.2	8.9	6.5	1.5	1.1	1.4	1.0	0.39	0.16		
	2024	5月	上	18.1	8.2	15.6	9.1	5.7	2.0	1.5	2.4	1.6	1.23	0.29	
			下	14.9	8.1	32.8	7.5	3.1	1.6	1.4	1.6	1.2	0.72	0.28	
	8月	上	29.9	8.6	16.2	9.9	22.9	3.3	1.7	4.9	2.7	1.96	0.19		
		下	22.0	7.9	31.4	4.1	1.6	1.4	1.2	1.8	1.4	0.40	0.24		
	11月	上	19.9	8.0	21.1	7.9	1.3	1.7	1.4	3.2	2.9	0.59	0.27		
		下	22.5	8.0	32.2	5.7	1.3	1.5	1.2	3.0	2.5	0.51	0.35		
	2月	上	8.5	8.1	30.1	10.2	10.3	1.4	1.2	2.2	0.9	0.97	0.49		
		下	10.1	8.1	32.4	10.5	7.0	1.3	1.2	1.9	1.5	0.92	0.38		
	St.2	2023	5月	上	19.2	8.2	29.0	9.9	7.5	2.4	1.7	3.2	1.9	1.41	0.37
				下	16.0	8.1	32.6	7.1	2.1	1.6	1.3	1.5	1.2	0.40	0.13
8月		上	27.8	8.3	26.2	9.7	13.9	3.0	1.8	3.7	2.4	1.99	0.18		
		下	23.6	7.8	31.6	3.9	0.9	1.4	1.3	2.0	1.8	0.25	0.08		
11月		上	21.5	8.1	31.5	7.9	10.7	1.9	1.4	2.8	2.0	1.85	0.16		
		下	21.1	8.0	32.3	6.0	1.8	1.3	1.2	1.6	1.3	0.32	0.14		
2月		上	8.7	8.1	17.9	10.9	2.7	1.5	1.2	1.8	1.6	0.52	0.18		
		下	11.8	8.1	33.4	8.6	2.5	1.3	1.1	1.3	1.2	0.34	0.11		
2024		5月	上	17.7	8.3	27.6	9.8	5.4	2.2	1.4	2.7	1.9	1.69	0.26	
			下	14.8	8.1	32.9	7.2	2.5	1.6	1.3	1.3	1.0	0.85	0.20	
8月		上	29.9	8.5	13.2	8.9	12.7	2.4	1.5	3.5	2.6	1.23	0.23		
		下	22.0	8.0	31.8	4.9	1.6	1.5	1.2	2.2	2.1	0.45	0.25		
11月		上	22.1	8.1	30.0	7.3	2.7	1.8	1.5	3.0	2.6	0.67	0.29		
		下	22.6	8.0	32.4	4.8	1.0	1.6	1.5	2.7	2.4	0.47	0.19		
2月		上	9.1	8.1	31.4	10.3	6.3	1.4	1.1	2.2	1.8	1.00	0.44		
		下	10.2	8.1	32.7	9.1	6.2	1.3	1.1	1.8	1.2	0.75	0.44		

別表1(b) 広島湾における水質調査結果 (St.1及びSt.2)

地点	年	月	層	TN (mg/L)	DTN (mg/L)	TP (mg/L)	DTP (mg/L)	NH ₄ (mg/L)	NO ₂ (mg/L)	NO ₃ (mg/L)	PO ₄ (mg/L)	
定量下限値				0.05	0.05	0.003	0.003	0.01	0.005	0.005	0.003	
St.1	2023	5月	上	0.43	0.23	0.040	0.011	<0.01	<0.005	0.054	<0.003	
			下	0.16	0.13	0.029	0.020	0.02	<0.005	<0.005	0.015	
	8月	上	0.62	0.29	0.056	0.011	0.01	0.010	<0.005	<0.003		
		下	0.22	0.19	0.052	0.043	0.04	0.016	0.022	0.037		
	11月	上	0.49	0.39	0.046	0.032	0.12	0.039	0.094	0.021		
		下	0.21	0.18	0.035	0.030	0.03	0.035	0.025	0.024		
	2月	上	0.57	0.53	0.030	0.016	0.09	0.026	0.416	0.011		
		下	0.13	0.09	0.028	0.017	<0.01	<0.005	<0.005	0.010		
	2024	5月	上	0.43	0.34	0.035	0.014	<0.01	<0.005	0.226	0.005	
			下	0.21	0.17	0.026	0.018	<0.01	<0.005	<0.005	0.010	
	8月	上	0.50	0.18	0.049	0.008	<0.01	0.005	<0.005	<0.003		
		下	0.13	0.10	0.022	0.017	<0.01	<0.005	<0.005	0.011		
	11月	上	0.25	0.25	0.030	0.023	0.03	0.040	0.023	0.020		
		下	0.25	0.19	0.036	0.028	<0.01	0.067	0.045	0.025		
	2月	上	0.57	0.54	0.051	0.040	0.09	0.013	0.343	0.045		
		下	0.18	0.14	0.025	0.018	0.01	0.008	<0.005	0.016		
	St.2	2023	5月	上	0.24	0.12	0.025	0.009	<0.01	<0.005	<0.005	<0.003
				下	0.15	0.11	0.027	0.020	0.02	<0.005	<0.005	0.015
8月		上	0.41	0.16	0.041	0.012	<0.01	<0.005	<0.005	<0.003		
		下	0.21	0.16	0.039	0.035	<0.01	0.024	0.041	0.027		
11月		上	0.47	0.34	0.045	0.032	0.14	0.033	0.062	0.023		
		下	0.22	0.18	0.035	0.031	0.03	0.039	0.022	0.027		
2月		上	0.42	0.38	0.032	0.016	0.03	0.009	0.264	0.009		
		下	0.14	0.12	0.031	0.019	0.02	<0.005	0.007	0.013		
2024		5月	上	0.27	0.17	0.035	0.011	<0.01	<0.005	0.018	<0.003	
			下	0.19	0.14	0.026	0.019	0.01	<0.005	<0.005	0.010	
8月		上	0.39	0.20	0.032	0.005	<0.01	<0.005	<0.005	<0.003		
		下	0.12	0.10	0.023	0.027	<0.01	0.006	0.007	0.015		
11月		上	0.16	0.17	0.032	0.025	<0.01	0.048	0.072	0.021		
		下	0.26	0.27	0.039	0.034	0.01	0.079	0.052	0.031		
2月		上	0.24	0.21	0.027	0.020	0.03	0.008	0.081	0.019		
		下	0.18	0.16	0.025	0.020	0.02	0.009	0.036	0.019		

別表2(a) 広島湾における水質調査結果 (St.3)

地点	年	月	層	水温 (°C)	pH	塩分	DO (mg/L)	Chl-a (μg/L)	TOC (mg/L)	DOC (mg/L)	COD (mg/L)	D-COD (mg/L)	BOD (mg/L)	D-BOD (mg/L)
定量下限値				—	—	—	0.5	0.5	0.2	0.2	0.5	0.5	0.05	0.05
St.3	2020	5月	上	19.5	8.5	29.4	12.8	55.7	4.6	2.5	9.0	4.1	6.95	1.56
			下	15.5	8.0	32.7	6.2	1.5	1.3	1.1	2.9	1.5	0.54	0.12
	8月	上	29.0	8.9	20.9	11.1	13.2	3.7	1.6	6.1	3.4	1.83	0.31	
		下	21.2	7.8	31.6	3.2	0.7	1.5	1.2	2.5	2.1	0.29	0.20	
	11月	上	19.1	8.0	30.5	6.9	1.5	1.4	1.0	2.2	1.9	0.43	0.10	
		下	20.0	8.0	32.2	5.6	1.5	1.4	1.3	2.1	1.8	0.37	0.17	
	2月	上	10.9	8.1	31.1	9.8	2.5	1.3	1.1	2.3	1.9	0.47	0.46	
		下	11.0	8.1	32.5	8.6	3.3	1.4	1.1	2.1	2.1	0.32	0.20	
	2021	5月	上	19.1	8.4	17.6	10.3	27.6	3.1	2.0	5.3	2.8	2.88	0.58
			下	15.7	8.0	32.8	5.6	0.8	1.5	1.3	2.0	1.7	0.29	0.06
	8月	上	30.8	8.4	25.2	8.6	12.4	3.5	2.0	5.1	3.8	2.39	0.28	
		下	22.1	7.9	32.2	4.3	0.8	1.6	1.3	2.2	1.9	0.38	0.23	
	11月	上	19.8	8.0	31.5	7.0	4.9	1.3	1.1	2.4	2.1	0.31	0.16	
		下	19.8	8.0	31.7	7.0	5.5	1.5	1.2	2.5	2.4	0.37	0.18	
	2月	上	10.0	8.2	31.1	11.1	6.7	1.7	1.3	2.3	1.8	0.76	0.13	
		下	9.9	8.1	32.7	10.2	4.7	1.5	1.2	1.9	1.6	0.53	0.13	
	2022	5月	上	18.5	8.2	30.7	9.7	3.4	2.0	1.5	3.1	2.6	0.67	0.22
			下	14.8	8.0	32.8	7.8	1.7	1.4	1.1	2.2	2.1	0.26	0.07
	8月	上	28.4	8.4	28.3	9.4	5.8	3.2	1.9	3.9	2.8	0.96	0.14	
		下	22.8	7.8	32.3	3.9	1.7	1.5	1.4	1.7	1.5	0.27	0.15	
	11月	上	20.0	8.0	31.8	6.8	3.3	1.6	1.4	2.0	1.7	0.23	0.06	
		下	20.8	8.0	32.3	6.4	1.8	1.5	1.2	1.7	1.6	0.44	0.11	
	2月	上	10.5	8.1	31.9	9.0	1.0	1.5	1.4	2.1	2.1	0.44	0.22	
		下	11.0	8.1	32.9	8.2	2.5	1.4	1.2	2.0	1.9	0.29	0.18	
	2023	5月	上	19.2	8.3	29.5	9.8	8.9	2.5	1.6	3.0	1.9	1.46	0.24
			下	16.5	8.1	32.6	6.7	1.7	1.6	1.3	1.6	1.4	0.57	0.16
	8月	上	28.2	8.2	18.5	10.0	13.8	2.7	1.7	3.6	2.5	1.65	0.12	
		下	23.7	7.8	31.6	3.6	0.9	1.6	1.3	2.3	2.1	0.39	0.10	
	11月	上	21.6	8.0	32.0	7.2	5.1	1.5	1.3	1.6	1.3	1.42	0.16	
		下	21.7	8.0	32.6	6.7	1.6	1.4	1.2	1.7	1.4	0.35	0.11	
	2月	上	10.1	8.1	28.8	9.5	3.2	1.7	1.3	1.3	1.2	0.56	0.26	
		下	11.8	8.1	33.4	8.8	3.2	1.3	1.1	1.3	1.1	0.40	0.21	
	2024	5月	上	17.5	8.3	28.2	9.7	7.2	2.1	1.5	2.5	1.8	1.58	0.20
			下	15.2	8.2	32.8	8.3	2.6	1.6	1.3	1.6	1.3	0.89	0.88
	8月	上	30.3	8.5	21.0	9.4	10.3	3.0	1.8	4.0	2.9	1.33	0.18	
		下	21.5	7.9	31.9	3.9	1.9	1.5	1.3	2.0	1.6	0.40	0.26	
	11月	上	21.8	8.1	30.7	7.1	1.6	1.7	1.5	3.2	2.9	0.69	0.38	
		下	22.8	8.0	32.4	4.6	1.1	1.6	1.5	3.4	3.0	0.37	<0.05	
	2月	上	9.5	8.1	31.8	9.8	7.5	1.5	1.1	1.7	0.9	0.76	0.44	
		下	10.2	8.1	32.6	9.2	5.9	1.4	1.1	2.0	1.4	0.81	0.44	

別表2(b) 広島湾における水質調査結果 (St.3)

地点	年	月	層	TN (mg/L)	DTN (mg/L)	TP (mg/L)	DTP (mg/L)	NH ₄ (mg/L)	NO ₂ (mg/L)	NO ₃ (mg/L)	PO ₄ (mg/L)
定量下限値				0.05	0.05	0.003	0.003	0.01	0.005	0.005	0.003
St.3	2020	5月	上	0.75	0.17	0.066	0.009	<0.01	<0.005	<0.005	0.003
			下	0.17	0.12	0.024	0.016	0.02	<0.005	0.007	0.016
	8月	上	0.39	0.14	0.030	0.006	<0.01	0.006	0.012	<0.003	
		下	0.31	0.26	0.057	0.049	0.06	0.008	0.106	0.043	
	11月	上	0.36	0.32	0.046	0.040	0.12	0.019	0.093	0.036	
		下	0.22	0.19	0.035	0.032	0.03	0.011	0.009	0.017	
	2月	上	0.22	0.19	0.021	0.017	0.04	0.007	0.050	0.014	
		下	0.16	0.12	0.021	0.017	0.02	0.006	0.020	0.013	
	2021	5月	上	0.79	0.44	0.070	0.020	0.07	0.013	0.199	0.006
			下	0.19	0.14	0.029	0.024	0.05	<0.005	<0.005	0.017
	8月	上	0.36	0.16	0.033	0.012	<0.01	<0.005	<0.005	<0.003	
		下	0.16	0.13	0.027	0.023	<0.01	0.015	0.023	0.018	
	11月	上	0.19	0.16	0.035	0.029	0.04	0.021	0.019	0.021	
		下	0.19	0.16	0.035	0.027	0.04	0.020	0.017	0.020	
	2月	上	0.29	0.22	0.029	0.007	0.05	0.007	0.033	0.007	
		下	0.14	0.11	0.023	0.012	<0.01	<0.005	<0.005	0.007	
	2022	5月	上	0.79	0.44	0.022	0.008	<0.01	<0.005	<0.005	<0.003
			下	0.19	0.14	0.024	0.017	<0.01	<0.005	<0.005	0.011
	8月	上	0.25	0.12	0.021	0.006	<0.01	<0.005	<0.005	<0.003	
		下	0.24	0.20	0.036	0.030	0.02	0.025	0.043	0.024	
	11月	上	0.26	0.22	0.037	0.031	0.08	0.018	0.048	0.024	
		下	0.23	0.20	0.035	0.030	0.07	0.017	0.022	0.024	
	2月	上	0.22	0.21	0.026	0.023	0.03	0.009	0.058	0.020	
		下	0.17	0.14	0.026	0.018	0.02	0.009	0.031	0.017	
	2023	5月	上	0.25	0.11	0.023	0.006	<0.01	<0.005	<0.005	<0.003
			下	0.16	0.13	0.026	0.023	0.02	<0.005	0.006	0.016
	8月	上	0.52	0.25	0.045	0.010	<0.01	0.007	<0.005	<0.003	
		下	0.20	0.17	0.042	0.037	0.02	0.019	0.030	0.031	
	11月	上	0.26	0.19	0.032	0.025	0.05	0.028	0.034	0.019	
		下	0.20	0.16	0.030	0.027	0.02	0.032	0.019	0.021	
	2月	上	0.38	0.37	0.040	0.029	0.17	0.011	0.103	0.020	
		下	0.16	0.12	0.030	0.023	0.03	0.006	0.008	0.015	
	2024	5月	上	0.28	0.20	0.033	0.010	<0.01	<0.005	0.022	<0.003
			下	0.21	0.16	0.021	0.013	<0.01	<0.005	<0.005	0.006
	8月	上	0.33	0.13	0.027	0.006	<0.01	<0.005	<0.005	<0.003	
		下	0.17	0.14	0.041	0.037	0.03	0.006	0.014	0.029	
	11月	上	0.42	0.43	0.031	0.025	<0.01	0.031	0.040	0.017	
		下	0.20	0.19	0.041	0.040	0.03	0.109	0.046	0.038	
	2月	上	0.22	0.21	0.026	0.023	0.03	0.009	0.058	0.020	
		下	0.17	0.14	0.026	0.018	0.02	0.009	0.031	0.017	

別表3(a) 広島湾における水質調査結果 (St.4)

地点	年	月	層	水温 (°C)	pH	塩分	DO (mg/L)	Chl-a (μg/L)	TOC (mg/L)	DOC (mg/L)	COD (mg/L)	D-COD (mg/L)	BOD (mg/L)	D-BOD (mg/L)
定量下限値				—	—	—	0.5	0.5	0.2	0.2	0.5	0.5	0.05	0.05
St.4	2020	5月	上	18.6	8.3	30.9	9.6	3.4	2.1	1.5	3.4	1.5	1.05	0.16
			下	15.3	8.1	33.0	7.8	2.8	1.3	1.1	2.6	1.5	0.39	0.09
	8月	上	28.2	8.8	17.4	11.4	7.9	2.9	1.7	5.1	3.1	1.28	0.22	
		下	21.9	7.9	31.8	4.8	0.5	1.3	1.1	2.3	2.0	0.22	0.21	
	11月	上	19.5	8.1	31.7	7.6	2.6	1.3	1.2	2.2	1.8	0.58	0.15	
		下	20.2	8.1	32.1	7.1	2.0	1.2	1.2	2.1	1.7	0.33	0.12	
	2月	上	10.7	8.1	30.7	9.8	3.0	1.3	1.1	2.2	1.8	0.36	0.26	
		下	11.2	8.1	32.9	8.8	2.4	1.3	1.1	1.9	1.8	0.26	0.18	
	2021	5月	上	18.5	8.4	28.5	9.8	6.2	2.3	1.7	3.0	2.4	1.43	0.24
			下	15.8	8.0	33.1	6.9	1.5	1.5	1.2	1.3	1.2	0.24	0.16
	8月	上	30.3	8.2	30.4	6.9	1.7	2.5	1.9	4.1	2.9	0.97	0.14	
		下	21.5	7.8	32.6	3.3	<0.5	1.7	1.3	2.6	1.7	0.27	0.20	
	11月	上	19.9	8.1	31.8	8.0	9.1	1.6	1.2	2.9	2.3	0.54	0.20	
		下	20.1	8.1	32.1	7.4	6.8	1.5	1.2	2.6	1.6	0.45	0.16	
	2月	上	9.5	8.2	31.3	10.6	5.2	1.4	1.1	2.2	1.5	0.63	0.09	
		下	10.0	8.1	33.1	9.3	2.5	1.3	1.2	1.7	1.5	0.29	0.07	
	2022	5月	上	18.0	8.2	31.6	9.7	1.6	1.9	1.4	2.9	2.4	0.81	0.11
			下	14.6	8.0	33.0	8.0	1.5	1.4	1.2	2.0	2.1	0.27	0.10
	8月	上	28.0	8.3	29.2	8.1	5.1	2.6	1.9	3.2	2.1	1.32	0.22	
		下	22.2	7.8	32.5	4.1	1.0	1.5	1.3	1.5	1.5	0.28	0.16	
	11月	上	20.3	8.0	32.2	7.0	3.1	1.6	1.3	1.7	1.5	0.35	0.09	
		下	21.0	8.0	32.3	7.0	2.7	1.6	1.4	1.8	1.7	0.31	0.19	
	2月	上	10.0	8.1	30.9	9.2	1.3	1.4	1.3	2.3	2.1	0.35	0.20	
		下	10.9	8.1	33.0	8.6	1.2	1.4	1.2	1.7	1.7	0.26	0.06	
	2023	5月	上	19.4	8.2	30.2	9.4	3.8	2.3	1.5	3.2	2.1	1.23	0.17
			下	16.0	8.1	32.9	6.9	1.6	1.6	1.4	1.8	1.5	0.45	0.17
	8月	上	27.9	8.3	28.5	8.9	3.3	2.3	1.8	2.8	2.5	0.97	0.09	
		下	23.4	7.7	31.6	2.2	1.0	1.5	1.3	2.1	1.9	0.44	0.19	
	11月	上	21.6	8.1	32.2	7.9	9.3	1.7	1.3	2.1	1.5	1.10	0.13	
		下	21.8	8.0	32.6	7.4	1.5	1.4	1.2	1.5	1.0	0.29	<0.05	
	2月	上	9.2	8.1	28.9	9.7	2.1	1.3	1.2	1.8	1.3	0.46	0.21	
		下	11.8	8.1	33.7	8.8	2.8	1.3	1.1	0.9	0.9	0.35	0.22	
	2024	5月	上	17.0	8.3	28.2	9.9	8.1	2.1	1.5	2.2	1.4	1.61	0.22
			下	14.7	8.2	33.1	7.7	1.6	1.3	1.3	1.0	1.0	0.66	0.16
	8月	上	29.6	8.6	21.6	9.0	11.7	3.4	1.9	4.4	2.8	1.66	0.29	
		下	21.5	7.9	32.0	4.6	1.6	1.4	1.4	1.9	1.7	0.50	0.22	
	11月	上	21.6	8.1	29.7	7.2	2.3	1.8	1.5	3.1	3.1	0.79	0.34	
		下	22.5	8.1	32.5	6.2	1.1	1.4	1.4	2.9	2.8	0.38	0.29	
	2月	上	9.4	8.2	32.6	9.9	4.5	1.4	1.1	1.5	1.0	0.93	0.52	
		下	10.3	8.1	32.9	9.2	6.4	1.3	1.1	1.5	1.2	0.87	0.44	

別表3(b) 広島湾における水質調査結果 (St.4)

地点	年	月	層	TN (mg/L)	DTN (mg/L)	TP (mg/L)	DTP (mg/L)	NH ₄ (mg/L)	NO ₂ (mg/L)	NO ₃ (mg/L)	PO ₄ (mg/L)
定量下限値				0.05	0.05	0.003	0.003	0.01	0.005	0.005	0.003
St.4	2020	5月	上	0.19	0.11	0.012	<0.003	<0.01	<0.005	<0.005	<0.003
			下	0.14	0.11	0.014	0.010	<0.01	<0.005	<0.005	0.010
	8月	上	0.31	0.11	0.021	0.006	<0.01	<0.005	0.006	<0.003	
		下	0.24	0.19	0.036	0.031	<0.01	0.005	0.093	0.026	
	11月	上	0.21	0.18	0.029	0.023	0.05	0.015	0.032	0.019	
		下	0.16	0.13	0.026	0.021	0.07	0.015	0.019	0.025	
	2月	上	0.25	0.20	0.026	0.019	0.06	0.009	0.061	0.017	
		下	0.16	0.12	0.018	0.015	0.01	0.006	0.014	0.012	
	2021	5月	上	0.23	0.13	0.022	0.010	<0.01	<0.005	<0.005	<0.003
			下	0.15	0.11	0.022	0.018	0.02	<0.005	<0.005	0.012
	8月	上	0.21	0.18	0.025	0.010	<0.01	<0.005	<0.005	<0.003	
		下	0.24	0.19	0.048	0.040	0.01	0.029	0.050	0.036	
	11月	上	0.16	0.11	0.029	0.018	<0.01	<0.005	<0.005	0.011	
		下	0.16	0.11	0.026	0.018	<0.01	0.010	<0.005	0.012	
	2月	上	0.17	0.13	0.016	0.013	0.02	<0.005	0.014	<0.003	
		下	0.14	0.17	0.019	0.012	0.01	<0.005	<0.005	0.007	
	2022	5月	上	0.23	0.13	0.015	0.007	<0.01	<0.005	<0.005	<0.003
			下	0.15	0.11	0.022	0.018	0.02	<0.005	<0.005	0.012
	8月	上	0.22	0.12	0.015	0.006	0.01	<0.005	<0.005	<0.003	
		下	0.23	0.17	0.040	0.033	0.02	0.008	0.071	0.031	
	11月	上	0.32	0.18	0.033	0.028	0.04	0.014	0.023	0.021	
		下	0.25	0.20	0.033	0.026	0.02	0.013	0.010	0.018	
	2月	上	0.24	0.21	0.025	0.022	0.02	0.023	0.066	0.019	
		下	0.18	0.12	0.024	0.017	<0.01	0.010	0.027	0.015	
	2023	5月	上	0.17	0.11	0.017	0.005	<0.01	<0.005	<0.005	<0.003
			下	0.16	0.13	0.026	0.023	0.03	<0.005	0.008	0.017
	8月	上	0.22	0.13	0.022	0.011	<0.01	<0.005	<0.005	<0.003	
		下	0.30	0.27	0.061	0.055	0.06	0.029	0.055	0.049	
	11月	上	0.22	0.14	0.027	0.018	0.02	0.016	0.016	0.009	
		下	0.19	0.16	0.031	0.026	0.03	0.030	0.016	0.022	
	2月	上	0.19	0.18	0.021	0.016	0.02	<0.005	0.071	0.007	
		下	0.12	0.09	0.026	0.018	0.01	<0.005	<0.005	0.009	
	2024	5月	上	0.25	0.16	0.032	0.010	<0.01	<0.005	<0.005	<0.003
			下	0.17	0.16	0.022	0.016	<0.01	<0.005	<0.005	0.009
	8月	上	0.37	0.15	0.031	0.007	<0.01	<0.005	<0.005	<0.003	
		下	0.17	0.14	0.035	0.030	<0.01	<0.005	0.039	0.024	
	11月	上	0.24	0.22	0.030	0.023	0.01	0.051	0.096	0.019	
		下	0.25	0.22	0.031	0.026	<0.01	0.040	0.048	0.022	
	2月	上	0.24	0.21	0.025	0.022	0.02	0.023	0.066	0.019	
		下	0.18	0.12	0.024	0.017	<0.01	0.010	0.027	0.015	

別表4(a) 広島湾における水質調査結果 (St.5)

地点	年	月	層	水温	pH	塩分	DO	Chl-a	TOC	DOC	COD	D-COD	BOD	D-BOD
				(°C)			(mg/L)	(μg/L)	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)
				—	—	—	0.5	0.5	0.2	0.2	0.5	0.5	0.05	0.05
St.5	2020	5月	上	17.7	8.2	32.0	8.9	1.2	1.7	1.2	3.2	2.0	0.66	0.10
			下	15.7	8.1	33.0	8.1	1.3	1.4	1.2	2.2	1.5	0.30	0.17
	8月	上	27.2	8.4	23.9	8.2	1.2	2.0	1.5	3.4	2.7	0.54	0.10	
		下	21.9	8.0	32.0	5.5	1.1	1.4	1.3	2.8	2.4	0.43	0.08	
	11月	上	19.5	8.1	31.9	7.6	3.2	1.3	1.1	2.1	1.9	0.41	0.21	
		下	19.9	8.1	32.5	7.4	3.6	1.5	1.2	2.0	1.8	0.45	0.18	
	2月	上	10.7	8.1	32.1	9.4	3.1	1.2	1.1	2.2	1.9	0.52	0.32	
		下	11.0	8.1	33.1	8.8	3.1	1.2	1.0	2.0	1.7	0.38	0.18	
	2021	5月	上	17.9	8.2	30.5	9.0	4.2	2.1	1.6	3.3	2.3	1.08	0.33
			下	15.5	8.1	33.2	7.6	1.0	1.5	1.1	1.3	1.3	0.34	0.17
	8月	上	28.6	8.3	29.8	7.7	5.0	3.0	2.2	4.5	3.1	1.57	0.22	
		下	21.5	7.9	32.6	4.3	<0.5	1.6	1.3	2.5	2.1	0.42	0.18	
	11月	上	20.0	8.1	31.9	7.8	7.8	1.7	1.2	2.4	2.1	0.32	0.16	
		下	19.6	8.1	32.1	8.0	8.3	1.5	1.1	3.1	1.9	0.44	0.22	
	2月	上	10.0	8.1	32.6	9.8	2.8	1.4	1.2	1.6	1.4	0.39	0.15	
		下	10.0	8.1	33.1	9.2	2.7	1.4	1.2	2.0	1.9	0.35	0.12	
	2022	5月	上	17.9	8.2	31.5	9.7	1.2	2.2	1.5	2.7	2.7	1.18	0.17
			下	14.3	8.1	33.1	8.1	1.3	1.4	1.3	2.2	2.0	0.40	0.08
	8月	上	26.8	8.2	30.2	7.8	2.2	2.5	1.7	2.3	2.1	1.88	0.13	
		下	23.0	7.9	32.8	5.8	0.8	1.5	1.3	1.5	1.0	0.57	0.23	
	11月	上	20.7	8.1	32.7	7.2	2.7	1.5	1.2	2.2	1.4	0.34	0.12	
		下	21.0	8.1	32.8	7.5	2.9	1.7	1.4	2.2	1.7	0.16	0.06	
	2月	上	10.8	8.1	32.7	9.2	2.1	1.5	1.4	2.1	1.7	0.31	0.19	
		下	10.9	8.1	33.2	8.6	1.5	1.4	1.3	1.8	1.7	0.28	0.27	
	2023	5月	上	18.7	8.3	30.6	9.1	2.3	2.3	1.5	3.2	1.9	1.03	0.07
			下	16.0	8.1	32.9	7.3	0.8	1.4	1.2	1.6	1.4	0.38	0.22
	8月	上	27.8	8.3	28.9	8.6	1.9	2.3	1.8	2.9	2.4	0.91	0.11	
		下	23.4	7.9	31.8	4.7	0.7	1.5	1.3	1.9	1.8	0.34	0.14	
	11月	上	21.6	8.1	32.4	7.1	3.3	1.4	1.4	2.3	1.4	1.03	0.10	
		下	21.9	8.1	32.9	7.0	1.5	1.3	1.3	1.3	1.1	0.46	0.09	
	2月	上	10.8	8.1	32.6	9.6	4.0	1.9	1.4	2.5	1.2	0.51	0.37	
		下	11.6	8.1	33.5	9.4	2.9	1.3	1.2	1.4	0.9	0.45	0.17	
	2024	5月	上	18.0	8.3	30.3	9.3	6.0	2.5	1.7	2.1	1.4	1.50	0.33
			下	14.8	8.1	33.0	7.9	1.4	1.6	1.3	0.9	0.8	0.75	0.25
	8月	上	29.6	8.4	25.5	8.3	3.6	2.8	2.0	3.8	2.8	0.88	0.29	
		下	21.2	8.0	32.3	5.7	2.5	1.6	1.3	2.0	1.7	0.54	0.29	
	11月	上	21.6	8.1	30.8	7.4	4.1	2.0	1.6	3.2	2.8	0.65	0.39	
		下	22.3	8.1	32.6	6.5	1.1	1.6	1.3	2.8	2.8	0.68	0.67	
	2月	上	9.7	8.1	32.8	9.6	4.6	1.4	1.1	1.8	0.8	0.85	0.54	
		下	10.4	8.1	32.8	9.0	5.3	1.2	1.0	1.5	1.2	0.64	0.49	

別表4(b) 広島湾における水質調査結果 (St.5)

地点	年	月	層	TN	DTN	TP	DTP	NH ₄	NO ₂	NO ₃	PO ₄
				(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)
				0.05	0.05	0.003	0.003	0.01	0.005	0.005	0.003
St.5	2020	5月	上	0.14	0.10	0.016	0.004	<0.01	<0.005	<0.005	<0.003
			下	0.16	0.11	0.015	0.013	0.01	<0.005	0.006	0.010
	8月	上	0.17	0.15	0.013	0.006	<0.01	<0.005	<0.005	<0.003	
		下	0.22	0.18	0.034	0.027	0.01	0.005	0.069	0.022	
	11月	上	0.16	0.13	0.025	0.020	0.05	0.011	0.015	0.015	
		下	0.16	0.12	0.023	0.018	0.03	0.008	0.008	0.012	
	2月	上	0.16	0.11	0.020	0.014	0.02	0.006	0.023	0.011	
		下	0.15	0.11	0.023	0.014	0.02	0.006	0.014	0.013	
	2021	5月	上	0.19	0.11	0.018	0.009	<0.01	<0.005	<0.005	<0.003
			下	0.15	0.12	0.026	0.017	0.02	<0.005	<0.005	0.010
	8月	上	0.26	0.14	0.027	0.011	<0.01	<0.005	<0.005	<0.003	
		下	0.22	0.18	0.040	0.033	0.03	0.026	0.029	0.030	
	11月	上	0.13	0.10	0.025	0.015	<0.01	0.006	<0.005	0.009	
		下	0.15	0.10	0.027	0.016	<0.01	<0.005	<0.005	0.009	
	2月	上	0.12	0.09	0.016	0.011	0.02	<0.005	<0.005	0.003	
		下	0.14	0.09	0.018	0.016	0.02	<0.005	<0.005	0.007	
	2022	5月	上	0.19	0.11	0.014	0.007	<0.01	<0.005	<0.005	<0.003
			下	0.15	0.12	0.020	0.016	0.01	<0.005	<0.005	0.010
	8月	上	0.19	0.18	0.021	0.007	0.03	<0.005	<0.005	<0.003	
		下	0.15	0.12	0.029	0.023	0.03	0.010	0.023	0.020	
	11月	上	0.17	0.12	0.027	0.024	<0.01	0.012	0.008	0.015	
		下	0.17	0.13	0.028	0.023	<0.01	0.012	0.008	0.015	
	2月	上	0.19	0.15	0.022	0.019	0.01	0.009	0.031	0.014	
		下	0.17	0.15	0.022	0.018	<0.01	0.024	0.012	0.015	
	2023	5月	上	0.17	0.10	0.015	0.004	<0.01	<0.005	<0.005	<0.003
			下	0.16	0.13	0.021	0.019	0.02	<0.005	0.006	0.014
	8月	上	0.27	0.14	0.022	0.014	<0.01	<0.005	<0.005	<0.003	
		下	0.23	0.18	0.032	0.029	<0.01	0.021	0.045	0.023	
	11月	上	0.17	0.13	0.027	0.020	0.03	0.021	0.013	0.015	
		下	0.16	0.13	0.027	0.022	0.02	0.018	0.006	0.016	
	2月	上	0.13	0.10	0.020	0.017	0.02	<0.005	<0.005	0.004	
		下	0.13	0.11	0.021	0.013	0.02	<0.005	<0.005	0.009	
	2024	5月	上	0.29	0.17	0.025	0.010	<0.01	<0.005	<0.005	<0.003
			下	0.22	0.15	0.024	0.019	<0.01	<0.005	<0.005	0.010
	8月	上	0.28	0.18	0.021	0.011	<0.01	<0.005	<0.005	<0.003	
		下	0.19	0.15	0.034	0.031	0.01	0.008	0.030	0.024	
	11月	上	0.22	0.19	0.027	0.021	<0.01	0.034	0.057	0.016	
		下	0.25	0.25	0.031	0.024	<0.01	0.033	0.043	0.024	
	2月	上	0.19	0.15	0.022	0.019	0.01	0.009	0.031	0.014	
		下	0.17	0.15	0.022	0.018	<0.01	0.024	0.012	0.015	

資料

広島湾の都市部と島嶼部の干潟における 生物生息環境, 底生生物相及び物質循環機能の比較

後田 俊直, 濱脇 亮次, 小田 新一郎*

Comparison of Marine Environment for Various Organisms, Macrobenthic Fauna and Material Circulation in Tidal Flats between urban and island area in Hiroshima Bay

USHIRODA Toshinao, HAMAWAKI Ryoji and ODA Shinichiro*

(Received: October 23, 2025)

広島湾内の都市部及び島嶼部に位置する干潟において現状把握を目的として、水質・底質・底生生物及び物質循環機能（有機物分解とそれに伴う栄養塩類の回帰）について調査を行い、地域性を比較した。直上水及び底質の有機物、栄養塩類、植物色素量は、島嶼部より都市部で高く、また、流入河川のある干潟で高くなる傾向がみられた。底生生物の生物相、個体数、現存量等は、都市部、島嶼部といった地域性には因らず、直上水や底質中の餌料（有機物量、植物色素量）の他、土壌粒子の均一性、地形、塩分、海草藻場（コアマモ）の存在等が関与していることが推察された。有機物分解活性の指標となる酸素消費速度（SOD）は、島嶼部より都市部の地点で高く、春季及び夏季に高くなる傾向がみられ、底泥の有機物含有量、底生生物の生物相や現存量の違い、泥温上昇に伴う生物の活性化を反映しているものと推察された。栄養塩の溶出は、SODと同様に、島嶼部より都市部で高い傾向がみられた。窒素はアンモニア態窒素（ $\text{NH}_4\text{-N}$ ）として溶出し、SODとの相関が高く、干潟生物の代謝活動により $\text{NH}_4\text{-N}$ が水中に回帰されているものと推察された。一方、リンはSODとの相関は低く、底泥への吸着が関与していることが推察された。特に島嶼部では、無機態リンが底泥に吸収されており、栄養塩類の回帰速度の違いが干潟の一次生産に影響している可能性が示唆された。

Key words : 広島湾, ベントス, 物質循環, 栄養塩溶出

結 言

干潟は、豊かな生物生産性を有し、様々な種類の底生動物が生息する生物多様性に富む生態系である。干潟に生息する底生動物やバクテリアにより、海水中や底泥中の有機物は摂取、分解され、最終的には二酸化炭素と無機態窒素・リンまで無機化される。沿岸域生態系を支えていると同時に海域の水質浄化や物質循環機能を担う重要な役割を果たしている[1]。また、高い一次生産性を背景に多くの海洋生物を育てており、同時に酸素が豊富に存在することで分解作用が卓越し、沿岸域の物質循環を促進している[2]。しかし、干潟はかつて全国の沿岸域に広く分布していたが、埋め立て等により消失が進んだほか、近年では、海水温の上昇に伴う南方系魚類ナルトビエイなどの食害生物の来遊、

高水温の継続、貧酸素水塊の発生、陸上からの砂の供給の減少や円滑な物質循環の滞り等により、干潟機能の低下が指摘されている[3]。

一方、2015年の瀬戸内海環境保全特別措置法改正において、生物の多様性及び生産性が確保されている「豊かな海」とするという考え方が明確にされるとともに、藻場・干潟その他の沿岸域の良好な環境の保全、再生及び創出等の措置を講ずることが追加された。また、「豊かな海」の実現へ向けて、「人の活動が自然に対し適切に作用することを通じて行うべき」として、規制による自然環境の保全にとどまらず、人が適度に手をかける「里海」の考え方が取り入れられた[4]。施策についても、これまでの大きな海域単位から湾・灘など地域の実情や季節ごとの課題に対してきめ細やかな対応が求められるようになった。これを受け、広島県においても「瀬戸内海の環境の保全に関する広島県計

*広島県西部保健所 : Hiroshima Prefectural Western Center for Public Health

画」[5]を変更し、県の基本理念を『美しく恵み豊かな瀬戸内海の実現』とするとともに、新たに湾灘協議会（西部、中部、東部の3海域）を設置し、漁業者・NPO・行政等の関係者が、『美しく恵み豊かな瀬戸内海の実現』に向けて具体的な取り組みを検討・実施することになった。このような取り組みや施策を効果的に行うには科学的な知見が必要であり、干潟の現状についての情報が求められている。県内の干潟の分布には、地勢・環境的な特性により湾・灘等の海域間で大きな違いがみられ[6]、同一湾内でも陸域負荷や地形といった環境特性の違いから干潟の特徴は異なっていると考えられる。

本報では、広島湾内の都市部及び島嶼部に位置する干潟において調査を行い、水質・底質・底生生物及び物質循環機能（有機物分解とそれに伴う栄養塩類の回帰）について現状を把握するとともに地域性を比較したので、その結果を報告する。

方 法

1 調査地点

調査地点とその概要をそれぞれ図1及び表1に示す。広島湾は、湾奥に流量の豊富な一級河川の太田川が流入し、その河口部には政令指定都市の広島市がある。このため、特に北部海域は、陸域からの負荷流入の影響を受けやすく、閉鎖性が高い海域である。都市部の



図1 調査地点

干潟は、広島湾北部海域にある2干潟（A, B）を選定した。一方、島嶼部の干潟は、広島湾南部海域に位置し、都市部の流入負荷の影響が少ない地点である能美島の2干潟（C, D）を選定した。なお、A及びCの干潟には河川による流入負荷がある。

調査は、各地点2017年5月（春季）、7～8月（夏季）、10月（秋季）及び2月（冬季）の大潮の干潮時に計4回実施し、水質、底質、底生生物及び物質循環機能（有機物分解、栄養塩類の無機化）についての調査を行った。なお、水質調査は各地点1定点、他の調査は、2定点（n=2）で行った。

2 調査方法

(1) 水質調査

干潟の直上水（底泥表面から約30cm直上）を採水した。試料は実験室に持ち帰り、表2に示す項目について海洋観測ガイドライン[7]及び工場排水試験法（JIS K0102 及び JIS K0170）等に準じて測定した。

(2) 底質調査

干出した干潟の潮間帯の表層（約5cm層）を採取し、均等に混合して試料とした。また、植物色素量測定用の試料は表層1cm層を採取した。泥温及び酸化還元電位（ORP）は現地で干潟表面から5cm深の位置で測定した。なお、ORPは、標準水素電極を基準とした電位（Eh）に換算したものを測定値とした。採取した試料は実験室に持ち帰り、表3に示す項目について底質調

表1 調査地点

	地名	面積* (ha)	流入河川
広島湾奥	A. 御手洗川河口	26	御手洗川（2級河川）
	B. 地御前	18	なし
島嶼部	C. 島戸瀬戸	3.9	島戸川
	D. 岡大王	7	なし

*環境省：平成27～29年度 瀬戸内海における藻場・干潟分布状況調査

表2 水質調査方法及び分析方法

測定項目	測定方法
塩分	海洋観測ガイドライン（電気伝導度法）
pH	JIS K0102 12.1
有機体炭素（TOC及びDOC）	JIS K0102 22.1
全窒素（TN）	JIS K0170-3（流れ分析法）
亜硝酸態窒素（NO ₂ -N）	JIS K0170-2（流れ分析法）
硝酸態窒素（NO ₃ -N）	JIS K0170-2（流れ分析法）
アンモニア態窒素（NH ₄ -N）	JIS K0170-1（流れ分析法）
全リン（TP）	JIS K0170-4（流れ分析法）
リン酸態リン（PO ₄ -P）	JIS K0170-4（流れ分析法）
クロロフィルa（Chl-a） 及びフェオフィチン（Pheo）	Lorenzen法（アセトン抽出法）[8]

表3 底質調査方法及び分析方法

測定項目	測定方法
酸化還元電位 (Eh)	底質調査方法
強熱減量 (IL)	底質調査方法
硫化物 (AVS)	検知管法 (ヘドロテックS)
全有機炭素 (TOC)	底質調査方法
全窒素 (TN)	底質調査方法
全リン (TP)	灰化・塩酸抽出法[11], JIS K0170-4 (流れ分析法)
クロロフィルa (Chl-a) 及びフェオフィチン (Pheo)	Lorenzen法 (アセトン抽出法)[8]
粒度分布	脱塩・有機物分解処理[12], JIS A 1204 (ふるい分析及び沈降分析)

査方法[9]等に準じて測定した。また、粒度組成の特徴を表す数値として、粒度分布の測定から得られた累積曲線から淘汰係数[10]を算出した。

(3) 底生生物調査

底生生物 (マクロベントス) の試料採取は、底質試料を採取した場所で杵取り法により行った。干潟に25cm×25cmの方形杵 (コドラート) を差し込み、杵内の砂泥を深さ約15cm採取した。これを目合い1mmの篩でふるった後、篩上の残留物を保冷して実験室に持ち帰った。試料はソーティング後、種の同定、個体数及び湿重量 (殻込み) の測定を行った。

(4) 酸素消費速度

有機物の好氣的環境下における分解は、底生動物の呼吸や底質による酸素消費として捉えることができ、計測が簡単で信頼性も高いことから[13]、有機物分解活性の指標として酸素消費速度 (SOD: Sediment Oxygen Demand) を測定した。底泥試料は、円筒アクリル容器 (内径105mm, 高さ180mm) に表層土壌を半分程度コア採取し、底蓋をして実験室に持ち帰った。なお、コア内に採取された底生生物は取り除かず、採取時の状態で試験を行った。SODの測定は、底質調査方法[9]に準じ、柱状コアによる室内実験法により行った。コア内の上層水には調査地点の干潟直上水を用いた。上層水は、空気曝気し酸素濃度を高めた後、上層水表面が空気に接しないよう上蓋をして恒温室内に静置し、経時的にDOを測定した。別途、干潟直上水を容量102mLのDO瓶に封入してDO消費を測定し、これを差し引きすることで底泥のみのDO消費とした。DOの測定にはDOメーター (HACH社製 HQ30d) を用いた。コア内上層水のDOは、濃度が3mg/L以上では直線的に減少したため、この1次回帰式を求め、1日当たり、底泥面積当たりのSOD (g/m²/日) を算出した。なお、試験温度は、春季及び秋季は20°C、夏季は25°C、

冬季は10°Cとし、暗条件で行った。また、上層水は静置状態とし、測定時には底泥が巻き上がらない程度に攪拌を行った。

(5) 栄養塩溶出速度 (無機化速度)

栄養塩溶出速度は、窒素及びリンについて底泥コアをインキュベートする室内実験法により測定した。SOD試験と同様にコア内の上層水には干潟直上水を用い、上層水を常時空気曝気した状態で行った。経時的に上層水30mLを採取し、ディスポーザブルメンブレンフィルター (孔径0.45µm) でろ過し、分析に供した。この際、上層水を採取量だけ補充して試験を継続した。採取した試験水は、無機態窒素 (NH₄-N, NO₃-N) 及びNO₂-N) 及び無機態リン (PO₄-P) をオートアナライザーにより測定した。これらの濃度の変化量から1次回帰式を求め、1日当たり、底泥面積当たりとして溶出速度 (mg /m²/日) を算出した。

結果及び考察

1 水質

各地点の水質の年平均値 (最小値～最大値) を表4に示す。有機物 (TOC, DOC), 栄養塩類 (TN, DIN, TP, PO₄-P) 及び植物色素量 (Chl-a, Pheo) は、島嶼部 (C, D) と比べて都市部 (A, B) で高い傾向がみられた。都市域からの流入負荷の影響によるものと考えられた。また、塩分は、河川の流入のあるA及びCでは低値となっていることから河川の影響を受けており、有機物及び栄養塩類は、都市部ではBよりもAが、島嶼部ではDよりもCが高くなっているものと考えられた。

2 底質

各地点における干潟土壌の粒度分布及び淘汰係数を

それぞれ図2及び図3に示す。いずれの干潟も砂分（粒径0.075～2mm）が8割以上を占め、泥分率（0.075mm以下の粒子、シルト・粘土分）は0.8～5.3%と低く、砂質系の干潟であった。淘汰係数とは粒度の分布範囲の広さを表すもので、値が小さいほど粒径が均質化していることを示す。淘汰係数は、A～Cの干潟が1.3～1.7に対してDの干潟は、0.8と低く、砂分が98%以上となっており、4つの干潟の中では最も粒径が均質化した干潟であった。

次に、各地点におけるEh及びAVSの季節変化をそれぞれ図4及び図5に示す。なお、図中のエラーバーは各地点2定点の最大値と最小値を示す。Ehは、夏季に低下する傾向がみられるが、全ての干潟でマイナスとなることはなく好気的な環境であった。AVSは、Bの干潟で高い傾向がみられたが、最大でも0.081mgS/gであり、水産用水基準の0.2mgS/gを超えることはなかった。

有機物の指標であるIL及びTOC、栄養塩類（TN及びTP）の年平均値を図6に示す。なお、これらの項目は顕著な季節変動が認められなかったため、年平均値を示した。図中のエラーバーは年間の最大値と最小値を示す。これらの項目は、いずれも都市部のA、Bで高い傾向がみられ、特にAの干潟が最も高くなった。都市部では陸域負荷の影響が強いことやそれを利用して増殖する植物プランクトン量が多いため、堆積物が多くなることが要因と考えられた。また、Aは、流入河

川からの負荷が大きいものと推察された。

底生生物の餌の指標となる植物色素量について、各地点の季節変化を図7に示す。植物色素量は、A：13.6～18.1 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ 、B：7.9～17.8 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ 、C：3.8～7.2 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ 、D：0.9～4.8 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ であり、共通した季節変動の傾向は認められなかったが、年間を通じて明らかに都市部の干潟で高い傾向にあった。都市部の方が海水中の栄養塩類が高いため一次生産が盛んであることが分かる。次に植物色素量に占めるChl-aの割合の季節変化を図8に示す。Pheoは、Chl-aの分解生成物であり、生物の捕食過程で生成する。このため、Pheoの割合が高い、つまりChl-aの割合が低いということは、干潟上でChl-aが生物によって摂取、分解されていることを示している[14]。植物色素量に占めるChl-aの割合は、A：0.29～0.48、B：0.18～0.41、C：0.49～0.59、D：0.53～1.0であり、都市部の干潟で低くなっており、島嶼部に比べて生物による摂取、分解が盛んに行われていることが示唆された。また、季節的には、A、B及びDの干潟では、泥温が高く干潟生物の活性が高くなる夏季に低く、活性の低下する冬季に高くなる傾向がみられた。Cの干潟では、このような傾向はみられなかったが、これは後述するように表層堆積物食者である腹足類の現存量が冬季に高くなることが要因として考えられた。

表4 各地点の水質の年平均値 (最小値～最大値)

	pH	塩分 (psu)	TOC (mg/l)	DOC (mg/l)	TN (mg/l)	DIN* (mg/l)	TP (mg/l)	PO4-P (mg/l)	Chl-a ($\mu\text{g}/\text{l}$)	Pheo ($\mu\text{g}/\text{l}$)
A. 御手洗川河口	8.40 (8.22~8.77)	23.9 (21.0~27.2)	2.2 (1.6~2.8)	1.4 (1.1~1.9)	0.47 (0.33~0.68)	0.26 (0.11~0.53)	0.096 (0.057~0.16)	0.029 (0.012~0.036)	4.8 (1.2~7.0)	9.3 (4.9~14.3)
B. 地御前	8.40 (8.24~8.54)	29.6 (27.6~31.2)	1.9 (1.5~2.1)	1.4 (1.3~1.6)	0.40 (0.31~0.56)	0.17 (0.046~0.28)	0.076 (0.059~0.093)	0.029 (0.013~0.041)	3.5 (2.1~5.8)	8.7 (3.7~13.0)
C. 島戸瀬戸	8.13 (7.86~8.32)	28.5 (19.8~33.7)	1.5 (1.1~1.9)	1.2 (0.8~1.7)	0.26 (0.15~0.43)	0.11 (0.027~0.34)	0.045 (0.020~0.074)	0.023 (0.009~0.044)	1.0 (0.4~1.8)	1.4 (0.4~2.5)
D. 岡大王	8.21 (8.15~8.29)	32.6 (32.1~33.4)	1.3 (0.9~1.5)	1.0 (0.8~1.2)	0.22 (0.15~0.35)	0.051 (0.035~0.83)	0.038 (0.022~0.054)	0.012 (0.008~0.015)	2.7 (1.7~5.8)	2.5 (1.4~3.5)

*DIN=NO₂-N+NO₃-N+NH₄-N (溶存性無機態窒素)

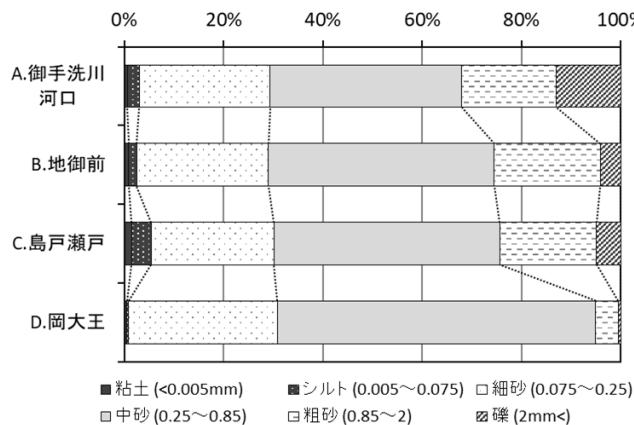


図2 各地点の土壌の粒度分布

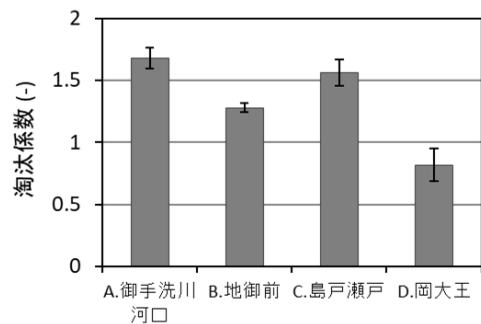


図3 各地点の土壌の淘汰係数

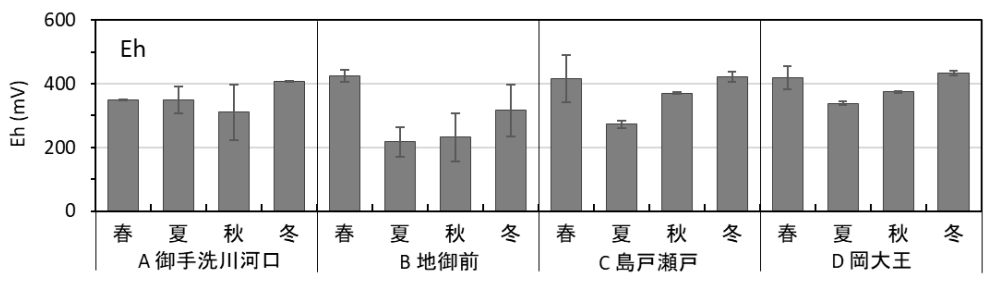


図4 各地点におけるEhの季節変化

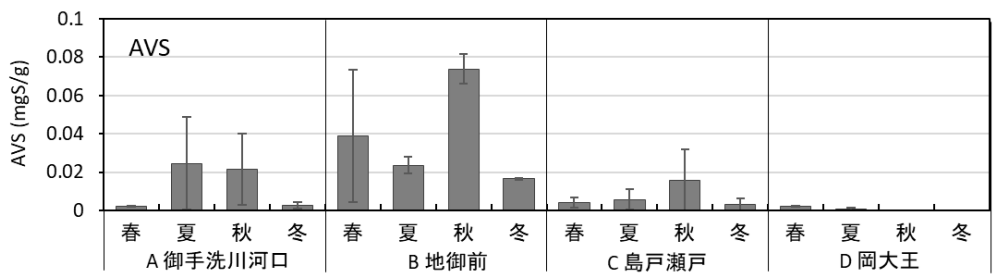


図5 各地点におけるAVSの季節変化

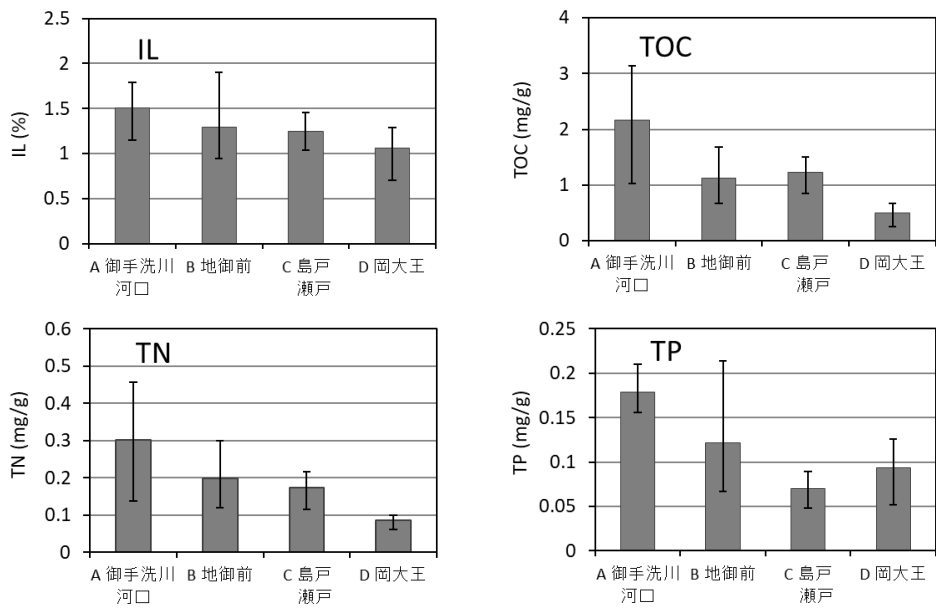


図6 各地点のIL, TOC, TN及びTPの年平均値

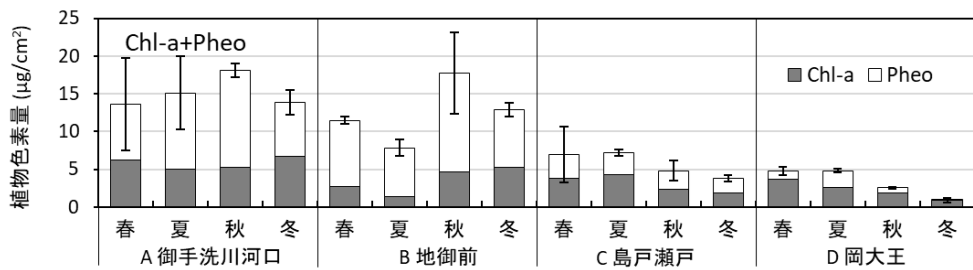


図7 各地点における植物色素量の季節変化

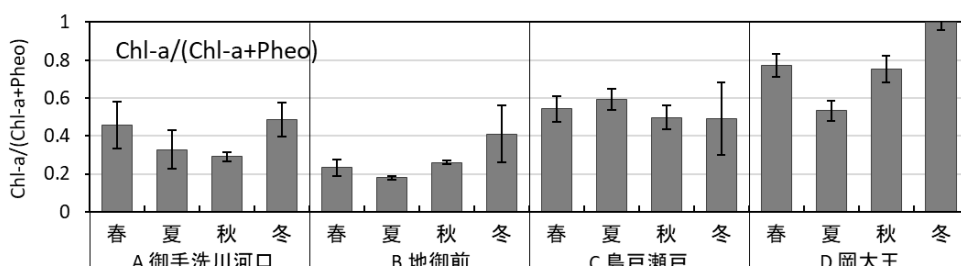


図8 各地点における植物色素量に占めるクロロフィルaの割合の季節変化

3 底生生物 (マクロベントス)

各地点の底生生物の出現種類数, 個体数, 現存量の年平均値と優占種を表5に示す. また, 底生生物の分類群別の組成比及び各地点における底生生物の現存量をそれぞれ図9及び図10に示す. なお, 個体数及び現存量は, 方形枠2回分 (0.125m²) の結果を1m²当たりへ換算している.

各干潟についてみていくと, まずAの干潟では, 出現種類数18.0種, 個体数2,680個体/m², 現存量417g/m²であった. 優占種は年間を通して環形動物のコケゴカイであり, 総個体数の48~68%を占めた. 分類群別の個体数での組成比は, 環形動物が64%であり, 続いて軟体動物 (二枚貝) が18%であった. 現存量では, 1個体当たりの湿重量が大きい二枚貝が約8割を占め, その大半はアサリであった. 現存量は, 秋に二枚貝の顕著な増加がみられたが, これはマテガイの加入によるものであった.

次にBの干潟は, 出現種類数23.3種, 個体数3,920個体/m², 現存量1,127g/m²であり, 出現種類数, 個体数, 現存量とも今回調査した4干潟の中で最も多かった. 主にアサリとコケゴカイが優占していた. Aの干潟と共通種が多く, 底生生物相が似通っていたが, 特に二枚貝が多いのが特徴であった. 分類群別の個体数での組成比は, 環形動物が56%, 二枚貝が41%であり, 現存量では二枚貝が約9割を占めた. 現存量は, 春季が最も多く, これはアサリによるものである. この干潟では, アサリは殻長25mmを超える成貝が認められ, 現存量を押し上げていた. 潮干狩りによりアサリが採捕されており, 夏季~冬季にかけて二枚貝 (アサリ) の現存量の減少はこの影響が大きいものと考えられた. 秋季にはAの干潟と同様にマテガイの加入がみられた.

次にCの干潟は, 出現種類数21.8種, 個体数2,156個体/m², 現存量807g/m²であった. 分類群別の組成比では, 軟体動物 (腹足類) 及び節足動物の割合が高いことが特徴的であった. 軟体動物 (腹足類) 及び節足動物の主な生物種は, 表在性のウミナ属, アラムシロ, ヤドカリ類であった. Cの干潟は, コアマモの群集がみられる. コアマモのような藻場はもともと波が穏や

かで安定した海底に成立するが, 葉の伸長がさらに波を緩和し, 底質を安定化する役割を果たしている[15]. このため, コアマモの存在により表在性のウミナ属, アラムシロ, ヤドカリ類などが定着しやすいものと考えられる. 現存量は, 春季が最も多く, これはアサリによるものである. アサリは, 夏季には激減したが, この干潟では採捕はないため魚類等による捕食などの環境的な要因であると考えられた.

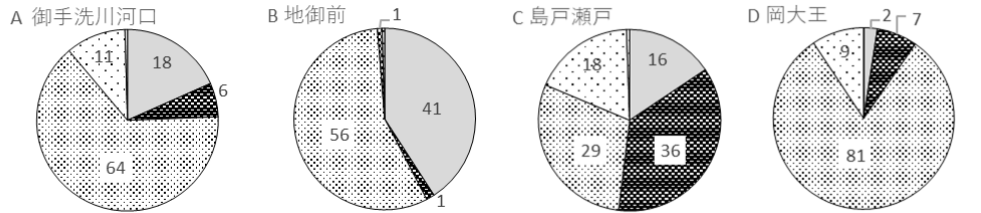
次にDの干潟は, 出現種類数14.3種, 個体数578個体/m², 現存量26g/m²であり, 出現種類数, 個体数, 湿重量とも今回調査した4干潟の中で最も少なかった. 特に現存量は, 最も多いBの干潟が1127g/m²であるのに対して, Dは26g/m²と約40倍の差があった. 一般に水域の富栄養度が低ければ生息する生物の現存量は少なく, 富栄養度が増加すれば, 一次生産者の増加も含め, 餌となる有機物が増えることで生物量も増加するといわれている[16]. 実際, Dの干潟は, 底質中の有機物量, 植物色素量は最も少なく, 餌料が少ないことが底生生物の現存量に影響しているものと推察された. 地形的には, Dの干潟は, 直線的な形状の前浜干潟であり, 対岸との距離も大きく離れている開放的な干潟である. このような干潟では, シルトクレイ等の微粒子は巻き上げられ流出し, 底質中の有機物が少なく摂食の機会が減ることだけでなく, 波あたりが強いことで地表面に留まるのが困難であり, 生息に不利な環境であるともいわれている[17]. また, Dの干潟ではアサリは存在しなかったが, 淘汰係数が1.0以上であれば数値が大きい (土壌粒子が不揃いである) ほど, アサリの現存量は多くなるという報告もある[10]. Dの干潟は, 淘汰係数0.8であり, 粒径が均質化した干潟である. 餌料だけでなくこのような物理的な要因も影響しているものと考えられた. AとBの干潟については, Aの干潟の方が, 直上水及び底質中の有機物量, 植物色素量が高く餌料環境は良いと考えられるが, 出現種類数, 個体数, 現存量はBの干潟の方が高くなっていた. Aの干潟は河口域にあり塩分等の環境変動が激しいのに対して, Bの干潟は生息環境が安定していることが要因と考えられた.

表5 各地点における底生生物の出現種類数, 個体数の年平均値と優占種

	A. 御手洗川河口	B. 地御前	C. 島戸瀬戸	D. 岡大王
出現種類数	18.0 (12~25)	23.3 (11~31)	21.8 (17~26)	14.3 (7~18)
個体数(個体/m ²)	2680 (2220~2944)	3920 (1608~6448)	2156 (1680~3048)	578 (288~1096)
現存量(g/m ²)	417 (201~715)	1127 (655~1744)	807 (462~1283)	26 (6~61)
優占種 (上位3種)	春 コケゴカイ (68%) ウミニナ属 (10%) アサリ (7%)	コケゴカイ (48%) アサリ (34%) ヒメシラトリ (6%)	コケゴカイ (26%) アサリ (20%) ウミニナ属 (14%)	コケゴカイ (24%) チロリ属の一種 (4%) ニッポンオフェリア (3%)
	夏 コケゴカイ (55%) ムロミスナウミナナフシ (18%) オチバガイ (7%)	コケゴカイ (38%) アサリ (30%) ヒガタチロリ (14%)	ウミニナ属 (49%) チロリ属の一種 (15%) アサリ (7%)	アラムシロ (10%) アナジャコ (8%) マテガイ (4%)
	秋 コケゴカイ (48%) マテガイ (21%) ムロミスナウミナナフシ (10%)	アサリ (23%) コケゴカイ (22%) マテガイ (15%)	ヤドカリ類 (49%) ウミニナ属 (18%) イトゴカイ科 (6%)	ヒモムシの一種 (19%) イトゴカイ科 (18%) アナジャコ (12%)
	冬 コケゴカイ (66%) アサリ (4%) アラムシロ (4%)	コケゴカイ (28%) アサリ (14%) ドロオニスビオ (13%)	ウミニナ属 (65%) イトゴカイ科 (13%) アラムシロ (4%)	ホソイトゴカイ (74%) ミナミシロガネゴカイ (4%) ナガホコムシ (4%)

出現種数, 個体数及び現存量のカッコ内は, (最小値~最大値)を示す。優占種のカッコ内は, 占有率を示す。
1個体当たり10gを超える個体は湿重量の解析から除外した。
ヤドカリは, ヤドカリ科とホンヤドカリ科を分類していないため「ヤドカリ類」と表記した。

<個体数>



<現存量>

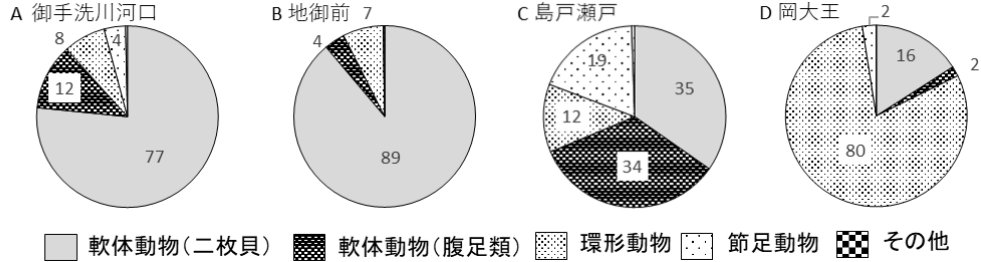


図9 底生生物の分類群別の組成比 (年平均) 上段: 個体数による組成比, 下段: 現存量による組成比

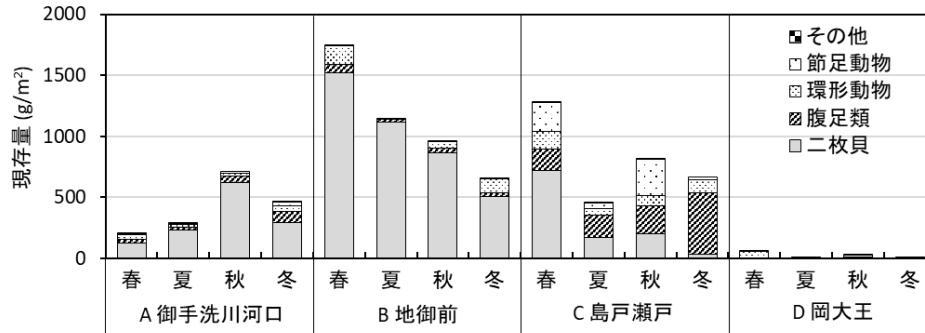


図10 各地点における底生生物の現存量

4 有機物の分解 (酸素消費速度)

各地点におけるSODを図11に示す。なお、SODの測定は、各地点2ヶ所で行ったため、グラフはその平均値を表しており、エラーバーは最大値と最小値を示す。各干潟のSODは、A: 0.13~1.9g/m²/日、B: 0.30~2.8g/m²/日、C: 0.11~0.49g/m²/日、D: 0.05~0.31g/m²/日であった。A、C及びDの干潟では、SODは夏季に高く、冬季に低くなる傾向がみられた。これは水温が高くなると、干潟堆積物中の底生生物等の呼吸活性が高くなることによるものと推察された。Bの干潟では、SODは春季に最も高くなったが、これは後述するように底生生物、特に二枚貝(アサリ)の現存量が大きいことが要因と考えられた。また、地域的には島嶼部より都市部の方が高くなっていた。干潟のSODは、干潟生物による代謝活動によるものであるが、底生生物の現存量とSODに相関は認められなかった。例えば、AとCを比べるとCの方が底生生物の現存量は大きいにもかかわらず、SODはかなり低くなっていた。今回の調査で採取した底生生物は、1mmの篩上に残るマクロベントスであるが、干潟の有機物分解には、マクロベントスだけではなく1mmの篩を通過するメイオベントスやバクテリアも関与している。有機物分解への寄与率は干潟によって異なり[18,19]、堆積物中の有機物含有量が高い干潟は、メイオベントスやバクテリアの寄与率の方が大きくなるといった報告もある[1]。このため、有機物含有量の高い都市部の干潟では、メイオベントスやバクテリアによる寄与が大きく、その結果SODが高くなっていることが推察された。また、底生生物相の違いによる要因も考えられる。底生生物の中では、とりわけ過食者である二枚貝は、分解・代謝速度が大きいことが報告されている[18-20]。都市部の干潟、特にBの干潟では二枚貝(アサリ)の現存量が大きいこともSODが高い要因の一つと考えられた。さらに、A及びBの干潟では、埋在性の二枚貝や下層堆積物食者の環形動物が優占している。このような埋在性の底生生物は、摂餌や移動することにより、底質の攪乱(バイオターベーション)を行う。巣穴内の灌水作用により酸素が導入されることで好気性微生物の活性を高めることや、深いところに埋没してしまっている有機物を表面近くに引っ張り出すといった効果がある[12,21]。このような生物攪乱の効果もA及びBの干潟のSODを高める要因の一つになっていると推察された。

5 栄養塩類の回帰 (栄養塩溶出速度)

各地点におけるNH₄-N fluxを図12に示す。窒素については、コア内上層水のNO₂-N及びNO₃-Nの濃度変化

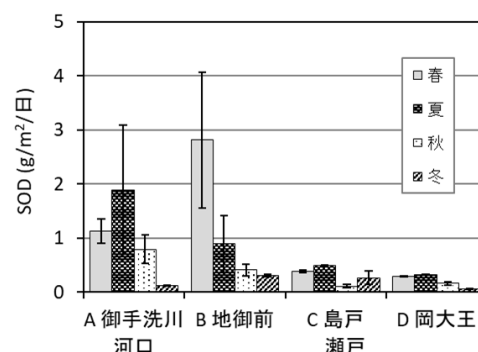


図11 各地点におけるSOD

はほとんどなく、増加が認められたのは、NH₄-Nだけであった。このため窒素の溶出速度は、NH₄-Nの溶出速度として表した。各干潟のNH₄-N fluxは、A: 3.2~364mg/m²/日、B: 20~399mg/m²/日、C: -7.9~116mg/m²/日、D: -3.3~3.9mg/m²/日であり、SODと同様に島嶼部より都市部の地点で高くなっていた。また、季節的には春季及び夏季に高くなる傾向がみられ、島嶼部ではマイナス値(無機態窒素の吸収)もみられた。窒素の溶出には、温度と生物活動に起因した有機物の分解、無機化に伴うNH₄-Nの生成が溶出速度を最も左右するといわれている[22]。ここでSODとNH₄-N fluxの相関を図13に示す。SODとNH₄-N fluxは高い相関(r=0.85, p<0.01)が認められ、バクテリア等による干潟堆積物中有機物の分解やベントスの排泄に伴いNH₄-Nが水中に回帰されていることが示唆された。このため有機物分解活性が高い(SODが大きい)都市部で、季節的には泥温の高くなる春季及び夏季にNH₄-N fluxは高くなるものと推察された。

次に各地点におけるPO₄-P fluxを図14に示す。各干潟のPO₄-P fluxは、A: 0~9.5mg/m²/日、B: 0.5~8.0mg/m²/日、C: -0.4~1.1mg/m²/日、D: -0.7~-0.02mg/m²/日であり、SOD、NH₄-N fluxと同様に島嶼部より都市部の地点で高くなっていた。季節的には、夏季に高くなった。特に島嶼部の干潟ではマイナス値が多く、Cの干潟では秋季と冬季、Dの干潟では通年マイナス値であった。ここでSODとPO₄-P fluxの相関を図15に示す。SODとPO₄-P fluxの関係には、窒素の場合のような高い相関は認められず(r=0.56)、生物の代謝以外の要因が寄与していることが考えられた。リンは、嫌気条件下ではリン酸塩となって海水中に遊離し、好気条件下では海水中のリン酸塩は水酸化鉄に吸着してリン酸鉄となって底泥に蓄積することが知られている[23]。このため、好気的環境下にある干潟底質からのリンの溶出には、生物の代謝に起因するPO₄-Pの生成と底泥表層へのリンの吸着が関与していると考えられる。都市部、特に水温が高い夏季には、生物代

謝が活発になり、吸着よりも $\text{PO}_4\text{-P}$ の生成が卓越することで $\text{PO}_4\text{-P}$ fluxが高くなるものと推察された。逆に代謝活性の低い島嶼部では吸着が卓越し、無機態リンが底泥に吸収されているものと推察された。

干潟生態系においては、底生生物や微生物が有機物の生産や分解・無機化を行い、干潟の物質循環において大きな役割を果たしている。有機物の分解活性が高いことは、干潟の浄化機能が高いことを表し、その過程で有機態の栄養塩類を植物プランクトンなどの一次生産者が利用できる無機態栄養塩類に再生（回帰）することは、干潟域の生物生産性を高めることになる。干潟直上水や底質の植物色素量は、島嶼部より都市部で高くなっていたが（表4, 図7）、都市部では陸域等からの栄養塩類の負荷が大きいだけでなく、底泥からの回帰が速いこともこの要因となっていることが考えられた。

今回の試験は、室内でのコアインキュベーション法により行ったが、実際の干潟では、潮汐による冠水・干出があり、常に温度や水位の変化にさらされており、干潟生物による有機物の分解活性もこのような環境変化に伴い大きく変動する[24]。今回の結果は、冠水時の有機物の分解・無機化過程といった物質循環の一過程を評価したものであるが、栄養状態の異なる都市部と島嶼部の干潟において、顕著な地域差が認められた。

ことは干潟の保全、再生といった取り組みを行う上で注目すべき結果であった。今回の結果は、都市部と島嶼部各2地点での調査によるものであり、県内各地でのデータを蓄積し、地域性について検証していく必要がある。

結 語

広島湾内の都市部及び島嶼部に位置する干潟において調査を行い、水質・底質・底生生物及び物質循環機能（有機物分解とそれに伴う栄養塩類の回帰）について現状を把握するとともに地域性を比較した。得られた知見は以下のとおりである。

1) 直上水及び底質の有機物、栄養塩類、植物色素量は、島嶼部より都市部で高く、また、流入河川のある干潟で高くなる傾向がみられた。植物色素量に占めるChl-aの割合は都市部の干潟で低く、島嶼部と比べて干潟生物による摂取、分解が活発であることが示唆された。

2) 底生生物の優占種、個体数、現存量等は、都市部、島嶼部といった地域性には因らず、直上水や底質中の餌料（有機物量、植物色素量）の他、土壌粒子の均一性、地形、直上水の塩分、海藻藻場（コアモモ）の存在等が関与していることが示唆された。

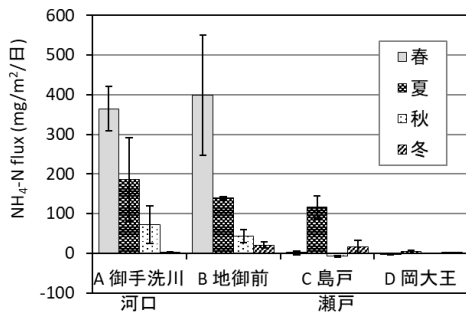


図12 各地点におけるNH₄-N flux

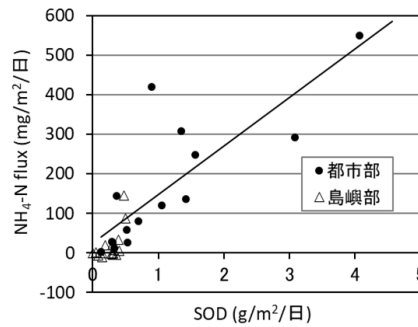


図13 SODとNH₄-N fluxの相関

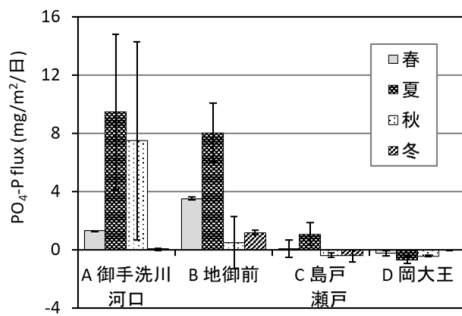


図14 各地点におけるPO₄-P flux

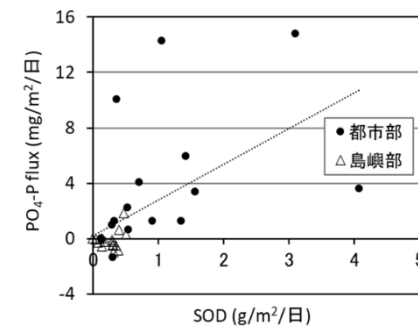


図15 SODとPO₄-P fluxの相関

3) SODは、島嶼部より都市部の地点で高く、春季及び夏季に高くなる傾向がみられた。各干潟における有機物含有量、底生生物の生物相や現存量の違い、泥温上昇に伴う生物の活性化を反映しているものと考えられた。

4) 窒素は、 $\text{NH}_4\text{-N}$ の形態で溶出し、 $\text{NH}_4\text{-N flux}$ は、都市部で高く、季節的には春季及び夏季に高くなった。SODとの相関が高く、干潟生物の代謝活動により $\text{NH}_4\text{-N}$ が水中に回帰されているものと推察された。

5) リンは、 $\text{PO}_4\text{-P}$ として溶出し、 $\text{PO}_4\text{-P flux}$ は、都市部で高く、季節的には夏季に高くなった。特に島嶼部ではマイナス値を示す場合が多く、無機態リンは底泥に吸収されていた。都市部と島嶼部において、栄養塩類回帰の速さの違いが干潟の一次生産に影響している可能性が示唆された。

謝 辞

本研究の実施にあたり、国環研と地環研とのII型共同研究「干潟・浅場や藻場が里海里湖流域圏において担う生態系機能と注目生物種との関係」（平成27～29年度）のメンバーには有益な情報・意見をいただいた。ここに謝意を表す。

文 献

[1] 国分秀樹. 英虞湾干潟域の生物生息機能・物質循環機能の定量的評価と生態系再生手法に関する研究. 三重県水産研究所研究報告. 2009, 18, 1-91.

[2] 一見和彦. 沿岸域における干潟の機能的役割. 瀬戸内海. 2019, 78, 11-13.

[3] 水産庁. 藻場・干潟ビジョン. 令和5年12月改訂.

[4] 特定非営利活動法人里海づくり研究会. “助成活動実績報告書「沿岸海域における物質循環促進技術の開発～小型動物群集における主要種の物質循環機能の定量化～」”. 公益財団法人おかやま環境ネットワーク. https://okayama.coop/kankyounet/net-activefiles/16_houkoku/16_3.pdf, 参照 2025-10-20.

[5] 広島県. 瀬戸内海の環境の保全に関する広島県計画. 平成28年10月.

[6] 清木徹, 伊達悦二, 他. 県内干潟の特性と水質浄化能について. 広島県保健環境センター研究報告. 2001, 9, 13-25.

[7] 日本海洋学会. “海洋観測ガイドライン (和文第5版, 2023年6月公開)”. <https://kaiyo-gakkai.jp/>

jos/guide, 参照 2025.10-20.

[8] 西條八束. クロロフィルの測定法. 陸水学雑誌. 1975, 36(3), 103-109.

[9] 環境省水・大気環境局. 底質調査方法. 平成24年8月.

[10] 水産庁, (社)マリノフォーラム21. 砂質系干潟の健全度評価手法マニュアル. 平成19年3月.

[11] 日本海洋学会編. 沿岸環境調査マニュアル[底質・生物編]. 初版, 恒星社厚生閣. 1986.

[12] 水産庁. 干潟の生産力改善のためのガイドライン. 2008年2月.

[13] 佐々木淳, 前田周作. 酸素消費速度に着目した干潟・浅瀬の環境評価. 海岸工学論文集. 2006, 53, 1046-1050.

[14] 青山裕晃, 鈴木輝明. 干潟の水質浄化機能の定量的評価. 愛知水試研報告. 1996, 3, 17-28.

[15] 金子健司, 豊原哲彦. 浅海域の群集構造と機能-砂浜潮間帯と藻場との比較を通して-. 日本海洋生物研究所年報. 2001, 109-116.

[16] 一見和彦, 住元宏栄, 他. 人手と干潟の生物環境-干潟底生生物の現存量と種多様性に与える人間活動の影響-. 沿岸海洋研究. 2011, 48(2), 15-22.

[17] 奥迫優, 岡浩平. 瀬戸内海の島嶼部におけるベントスの機能群組成と地形的開放度を含む干潟環境の関係性. 日本ベントス学会誌. 2023, 78, 1-12.

[18] 清木徹, 平岡喜代典, 他. 広島湾における干潟の水質浄化能に関する研究-有機物の分解特性について-. 水環境学会誌. 1998, 21(7), 421-428.

[19] 李正奎, 西嶋渉, 他. 自然および人工干潟の有機物浄化能の定量化と広島湾の浄化に果たす役割. 水環境学会誌. 1998, 21(3), 149-156.

[20] 一見和彦, 東菌圭吾, 他. 干潟域における一次生産と無機化過程; 高松市新川河口干潟域の調査研究から. 沿岸海洋研究. 2018, 55(2), 79-86.

[21] 向井宏. “群集の構造と動態”. 海洋ベントスの生態学. 日本ベントス学会編. 東海大学出版会, 2003, 115-243.

[22] 河合章. 水域底泥からのアンモニア態窒素などの溶出. 沿岸海洋研究ノート. 1981, 18(2), 106-111.

[23] 山本民次. “瀬戸内海底泥からのリン・窒素の溶出”. 瀬戸内海の海底環境. 柳哲雄編著. 恒星社厚生閣, 2008, 61-75.

[24] 佐々木晶子. 河口干潟における好氣的有機物分解量: 温度・潮汐の影響を考慮した推定. 瀬戸内海. 2008, 52, 48-51.

他誌掲載論文 (2024年10月~2025年9月)

(1) 広島県内で分離された劇症型溶血性レンサ球菌感染症の起因菌の解析

(平塚貴大, 伊藤彩乃, 末井真菜, 東久保唯, 石井圭子^{*1}, 秋田裕子, 増田加奈子^{*2}, 重本直樹, 広島県獣医学会雑誌 39, 101-104, 2025)

当センターでは、劇症型溶血性レンサ球菌感染症の原因として分離された *Streptococcus* 属菌について解析を行った。2015年~2024年の6月までに、STSSの原因菌として当センターに搬入された菌株、19株について解析を行った。菌の型別として、Lancefield血清型別を実施し、A群であればT血清型別及びemm遺伝子型別を併せて実施した。また、emm遺伝子型別の結果、emm1であったものについて、次世代シーケンサーを使用し、国際的に拡大しているM1UK系統であるか確認を行った。Lancefield血清型別の結果、A群が9株、B群が3株、G群が6株、型別不能が1株であった。A群の9株のT血清型別の結果、T1が6株、TB3264が1株、型別不能が2株であった。また、emm遺伝子型別の結果、emm1が5株、emm12が2株、emm49が1株、emm89が1株であった。届出数の増加が顕著な2024年に分離された菌株は、A群が半数以上を占めたが、T血清型及びemm遺伝子型は多様な型を示し、特定の型による流行ではないことが示唆された。M1UK系統は今回の解析においては検出されなかったが、引き続き注視していく必要がある。

^{*1} 広島県健康福祉局感染症・疾病管理センター、^{*2} 広島県西部家畜保健衛生所

(2) Feline leukaemia virus subgrouping using a viral interference assay

(Dimas Arya Abdillah^{*1 *2}, Takahiro Hiratsuka, Fumiko

Matsuyama^{*3}, Yuki Hattori^{*4}, Takehisa Soma^{*5}, Tetsuya Shimoda^{*6}, Takashi Kato^{*7}, Hideo Sakai^{*8}, Masaharu Hisasue^{*9}, Ariko Miyake^{*1 *2}, Kazuo Nishigaki^{*10 *11} Arch Virol, 170, 210, 2025)

Feline leukaemia virus subgroup A (FeLV-A) is transmitted among cats, and FeLV subgroups are frequently generated de novo. We investigated the frequency of detection of subgroups using interference assays in 50 cases. FeLV-A infection alone was detected in 38% of the cases, whereas coinfection with both FeLV-A and FeLV-B was observed in 62% of the cases. No cases of FeLV-B infection alone were observed. Cases of coinfection with FeLV-A and FeLV-B showed a higher prevalence than cases of FeLV-A infection alone. The FeLV containing an X region was discovered in two new cases. This study may help to elucidate the mechanism underlying FeLV-B-associated diseases.

^{*1}Laboratory of Molecular Immunology and Infectious Disease, Joint Graduate School of Veterinary Medicine, Yamaguchi University, ^{*2}Research Institute for Cell Design Medical Science, Yamaguchi University, ^{*3}Yatsushiro Pet Clinic, ^{*4}Tokyo Feline Medical Center, ^{*5}Veterinary Diagnostic Laboratory, MLT Co., Ltd, ^{*6}Sanyo Animal Medical Center, ^{*7}Kato Veterinary Hospital, ^{*8}Isahaya Pet Clinic, ^{*9}Laboratory of Small Animal Internal Medicine, Veterinary Medicine, Azabu University, ^{*10}Laboratory of Molecular Immunology and Infectious Disease, Joint Graduate School of Veterinary Medicine, Yamaguchi University, ^{*11}Research Institute for Cell Design Medical Science, Yamaguchi University

広島県立総合技術研究所保健環境センター研究報告

第 33 号

2025 年 12 月 発行

広島県立総合技術研究所保健環境センター

〒734-0007 広島市南区皆実町一丁目 6-29

TEL (082) 255-7131

FAX (082) 252-8642

**BULLETIN
OF
THE HIROSHIMA PREFECTURAL TECHNOLOGY
RESEARCH INSTITUTE, PUBLIC HEALTH AND
ENVIRONMENT CENTER
No.33
December 2025**

Contents

Reports

Detection status of SARS-CoV-2 nucleocapsid gene mutations impeding PCR detection in Hiroshima Prefecture, Japan ITO Ayano, IKEDA Syuhei, HIRATSUKA Takahiro, MASUDA Kanako, SUEI Mana, SUZUTO Madoka, SHIMAZU Yukie, TAKAO Shinichi, NAKASHIMA Akie and SHIGEMOTO Naoki.....	1
Detection and molecular analysis of Human echovirus 11 in Hiroshima Prefecture and Retrospective investigation of genotypes of Enterovirus detected in Hiroshima Prefecture (2020-2025) SUZUTO Madoka, OZEKI Masaki, IKEDA Syuhei, TAKAO Shinichi, SUEI Mana, ITO Ayano, TANIZAWA Yukie, SHIMAZU Yukie, NAKASHIMA Akie and SHIGEMOTO Naoki.....	8
Establishment of Extraction Methods for THC from Cannabis Edible Products, including Confectionery Products SUGETA Wako and DATE Hideyo.....	16
Examination of an Analytical Method for 11 Cannabinoids and Identification of Cannabinoids in Cannabis Edible Products SUGETA Wako and DATE Hideyo.....	22
Validation of Analytical Methods for Nicotinic Acid and Nicotinamide in Foods KAWANO Toshiki, IHARA Sayaka.....	28
Long-term variation of BOD ₅ in the coastal area of Hiroshima Bay —evaluation using a chlorophyll-a-based estimation method— HAMAWAKI Ryoji, USHIRODA Toshinao.....	35
Comparison of Marine Environment for Various Organisms, Macrobenthic Fauna and Material Circulation in Tidal Flats between urban and island area in Hiroshima Bay USHIRODA Toshinao, HAMAWAKI Ryoji and ODA Shinichiro.....	49
Papers Published in Other Journals (Oct. 2024 to Sep. 2025)	59