

青森県環境保健センター年報

Annual Report
of
Aomori Prefectural Public Health and Environment Center

No.29 2018

青森県環境保健センター

はじめに

青森県環境保健センターは、公衆衛生、公害等に関する試験検査、指導及び研究並びに情報の提供を総合的に推進するために、平成2年に設置された地方衛生研究所と地方環境研究所の機能を併せ持った研究機関です。

今年度の大きな話題として、昨年3月から麻しん（はしか）が、昨年7月から風しんが大都市を中心に流行したことがあります。これを受け、当所への麻しん、風しんの検査依頼が増加しました。幸いなことに、本県では今回の流行に係る患者の発生は、これまでのところ確認されておりませんが、近年、本県を訪れる外国人観光客が大幅に増加しており、さらに、今年開催されるラグビーワールドカップや2020年東京オリンピック・パラリンピック開催を控える中、輸入感染症の発生が危惧されることから、一層の検査体制の整備が求められると考えられます。

また、当所では、対EU輸出ホタテガイ生産海域モニタリングの一環として、貝毒検査及び微生物検査について国際規格「ISO/IEC17025」に基づく試験所認定を平成15年3月に取得し検査を実施しており、この度、4回目の更新認定を受け、試験所認定を維持することができました。今後ともこれに限らず、すべての試験検査において、技術と信頼性を高い水準で維持してまいります。

ここに、当所の業務概要と、職員が通常業務として試験検査を行っている中で見つけた課題をテーマとして取り組んだ研究報告を「青森県環境保健センター年報（No29 2018）」に取りまとめました。御高覧の上、皆様の率直な御意見をいただければ幸いに存じます。

平成31年3月

青森県環境保健センター

所長 工藤 隆治

目 次

I 環境保健センターの概要

1 沿 革	1
2 組織、所掌事務及び職員の状況	2
3 ISO/IEC17025 に基づく試験所認定	4

II 業務の概要（平成 29 年度実績）

1 総務室	5
2 微生物部	6
3 理化学部	11
4 公害部	16
5 研修等業務（所内研修会）	19
6 年間動向	21
1) 講師等派遣	21
2) 委員会、協議会等の委員	21
3) 平成 29 年度青森県環境生活部出先機関等職員研究発表会「あすをひらく」	22
4) 会議・学会・研修会等出席状況	23

III 研究報告

1 報 文

十二湖青池の呈色機構に関する研究（第四報）：青色呈色のシミュレーション 花石 竜治 大坂 直人 知北 和久	26
最尤法による非負寄与を与えるケミカルマスバランス法 花石 竜治	53
青森県内における有害大気汚染物質モニタリング —優先取組物質のトレンドと季節変動を中心に— 対馬 典子 内海 宣俊	59

2 ノート

青森県におけるヒトパラインフルエンザウイルスの分子疫学（2011～2017） 筒井 理華 菩提寺 誉子 福田 理	78
青森県における微小粒子状物質（PM _{2.5} ）成分測定結果（平成 29 年度） 工藤 香織 大坂 直人	83
浮遊粒子状物質の走査型電子顕微鏡による観察及びエネルギー分散型 X 線分析 野澤 直史 対馬 典子 北畠 茂	89

IV 他誌投稿・学会等発表抄録	92
-----------------	----

Table of contents

I Reports

Coloration mechanism of Aoike Pond in Lake Juniko (fourth report): Simulation of blue coloration

Ryuji Hanaishi, Naoto Osaka, Kazuhisa Augustine Chikita 26

A chemical mass balance method giving nonnegative source contribution by the maximum likelihood method

Ryuji Hanaishi 53

Monitoring of hazardous air pollutants in Aomori Prefecture

- With emphasis on the trend and seasonal variation of priority substances considering measures-

Noriko Tsushima, Nobutoshi Utsumi 59

II Notes

Molecular epidemiology of human parainfluenza virus in Aomori Prefecture (2011–2017)

Rika Tsutsui, Motoko Bodaiji, Osamu Fukuda 78

Results of component measurements on microfine particulate matter (PM_{2.5}) in Aomori Prefecture (2017)

Kaori Kudo, Naoto Osaka 83

Observation of suspended particulate matter by scanning electron microscope and its analysis by energy dispersive X-ray spectroscopy

Naofumi Nozawa, Noriko Tsushima, Shigeru Kitabatake 89

I 環境保健センターの概要

1 沿革

(1) 設置の目的

青森県環境保健センターは、県民のニーズに的確に対応するため、平成2年に衛生研究所、公害センター及び公害調査事務所を統合し、公衆衛生、公害等に関する試験検査、指導及び研究並びに情報の提供を総合的に推進するために設置された。

(2) 沿革

【環境保健センター】

年 月 日	概 要
平成2年4月1日	青森県環境保健センター、青森県環境保健センター八戸公害事務所、青森県環境保健センター六ヶ所放射線監視局設置
平成12年4月1日	センター内に環境管理部新設、弘前市・八戸市・むつ市に環境管理事務所新設(八戸公害事務所廃止)
平成13年4月1日	センター内に青森県感染症情報センター設置
平成15年4月1日	組織改正により、環境管理部が青森環境管理事務所に、放射能部及び六ヶ所放射線監視局が青森県原子力センターに移行
平成19年4月1日	組織改正により、青森・弘前・八戸・むつ環境管理事務所が地域県民局に移行

【旧衛生研究所】

年 月 日	概 要
昭和24年6月1日	庶務係、細菌検査係、化学試験係、病理臨床試験係、食品検査係の5係制で発足
昭和29年7月1日	血液銀行係を加え6係制となる
昭和31年1月25日	青森県衛生研究所弘前出張所を設置する
昭和32年6月1日	青森県血液銀行設置に伴い衛生研究所弘前出張所及び血液銀行係を廃止する
昭和33年5月1日	処務規程の全面改正により、庶務係、試験検査係となる
昭和34年3月3日	試験検査係を細菌病理臨床試験係、化学食品検査係に改め3係制となる
昭和39年4月1日	庶務室、微生物科、理化学科の1室2科となる
昭和43年3月25日	青森県保健衛生センター合同庁舎完成し移転
昭和44年4月1日	公害科が新設され1室3科となる
昭和48年4月1日	室及び科制を課制に改める
昭和49年4月1日	公害調査事務所設置に伴い公害課は廃止される

【旧公害センター】

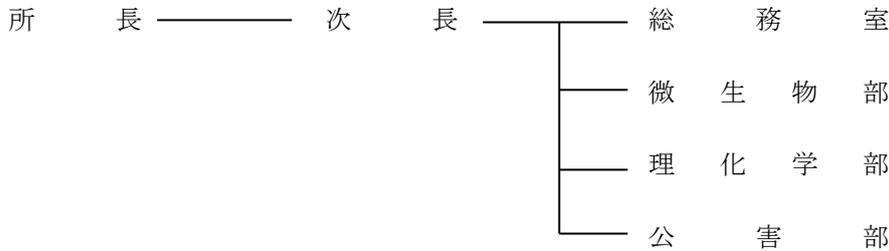
年 月 日	概 要
昭和46年4月1日	青森県公害センター開設

【旧公害調査事務所】

年 月 日	概 要
昭和49年 4月 1日	青森公害調査事務所開設 庶務課及び調査規制課の2課制が設けられ、調査規制課に大気係及び水質係が置かれる
昭和55年 4月 1日	組織改正により調査規制課が廃止され、大気課及び水質課が設けられ3課制となる
昭和56年 4月 1日	青森県公害調査事務所に名称変更となる
昭和57年10月 1日	旧血液センターの庁舎を全面改修し、公害調査事務所の検査及び管理部門を移設した

2 組織、所掌事務及び職員の状況

(1) 組織



(2) 所掌事務

- ① 公害の防止その他の環境の保全（放射性物質に係るものを除く。）上必要な調査及び試験研究に関すること。
- ② 保健衛生上必要な試験研究に関すること。
- ③ 保健衛生に係る技術指導に関すること。

(3) 分掌事務

総務室

- ① 所の予算及び決算に関すること。
- ② 庁舎、公有財産及び備品等の管理並びにその他の庶務に関すること。
- ③ 所内各部の所管に属しない事務に関すること。

微生物部

- ① 病原微生物等の試験検査及び調査研究に関すること。
- ② 微生物学的健康危機に関すること。
- ③ 微生物学的試験及び検査の技術指導に関すること。
- ④ 感染症等に係る情報の収集、解析及び提供に関すること。
- ⑤ その他必要な試験検査及び調査研究に関すること。

理化学部

- ① 食品中の残留農薬、動物用医薬品、その他の化学物質等の試験検査及び調査研究に関すること。
- ② 毒劇物、医薬品、家庭用品等の試験検査及び調査研究に関すること。
- ③ 温泉、飲料水等の試験検査及び調査研究に関すること。
- ④ 理化学的試験の技術指導に関すること。
- ⑤ 毒劇物及び医薬品等の化学物質による健康危機に関すること。

⑥ その他必要な試験検査及び調査研究に関すること。

公害部

- ① 大気汚染、水質汚濁、土壌汚染、騒音、振動及び悪臭の防止に係る試験検査並びに調査研究に関すること。
- ② 微小粒子状物質（PM_{2.5}）及び有害化学物質等の試験検査並びに調査研究に関すること。
- ③ 廃棄物の処理に係る試験検査及び調査研究に関すること。
- ④ その他必要な試験検査及び調査研究に関すること。

(4) 職員の状況

(平成30年4月1日現在)

区分	課長級	副参事級	総括主幹級	主幹級	主査級	主技事師	専門員	技師	技能主事師	非常勤事務員	非常勤労務員	非常勤技術員	専任当直員(非常勤)	計
所長	1													1
次長		1												1
総務室			1	1	1				1	1			2	7
微生物部				2	1	4					3			10
理化学部			1	1	2	1	2		1		3			11
公害部				4	1	1					1			7
計	1	1	2	8	5	6	2	2	2	1	7	2		37

3 ISO/IEC17025 に基づく試験所認定

対 EU 輸出ホタテガイ生産海域のモニタリング検査に係るサンプリング、ホタテガイの麻痺性、下痢性及び記憶喪失性貝毒検査、ホタテガイのサルモネラ属菌及び大腸菌検査について、平成 15 年 3 月に試験所認定を取得した。

平成 26 年度からは、下痢性貝毒検査については登録検査機関が行うことになり、認定範囲から外れ、平成 27 年 3 月に第 3 回 ISO/IEC17025 試験所認定更新が承認された。

機関の名称	青森県環境保健センター
認定番号	RTL01290
初回認定日	2003年3月26日
認定範囲	<p>M27 食品試験</p> <p>M27. A1 食品・飼料・肥料</p> <p>M27. A1. 11 自然毒</p> <p>M27. A1. 11. 1 動物性自然毒</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ サンプリング ・ ホタテガイの麻痺性貝毒検査 ・ ホタテガイの記憶喪失性貝毒検査 <p>M27. A1. 14 微生物</p> <p>M27. A1. 14. 1 衛生指標菌</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ サンプリング <p>M27. A1. 14. 1. B15. 1</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ ホタテガイの大腸菌検査 <p>M27. A1. 14. 1. B15. 2</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ ホタテガイのサルモネラ属菌検査

Ⅱ 業務の概要(平成 29 年度実績)

1 総務室

1.1 職場見学者の受入れ

平成 24 年度から、試験・検査、研究等に興味を抱き、将来の職業選択の一助となることを目的として中学生などの見学の受入れを行っている。

生徒等には、当センターの概要の説明並びに各試験室等の見学及び検査体験を実施している。

区 分	H24 年度	H25 年度	H26 年度	H27 年度	H28 年度	H29 年度
見学者 (人)	6	7	13	—	4	3

1.2 センター内ベンチャー制度

環境保全上及び保健衛生上の試験研究に対する職員の意欲及び研究能力の一層の向上を図るため、職員が自ら研究を企画し、実施することを支援することを目的に、平成 28 年度からセンター内ベンチャー制度を実施している。

平成 28～29 年度は、次の研究を実施した。

研 究 名	研究期間
十二湖青池の呈色機構に関する研究	平成 28 年度～29 年度

2 微生物部

2.1 調査研究

(1) 感染症流行予測調査事業

厚生労働省感染症流行予測調査事業の一環として、環境水からのウイルス分離によるポリオ感染源調査及びブタにおける HI 抗体調査による日本脳炎感染源調査を実施している。

ア ポリオ感染源調査

平成 29 年度は 7 月から 12 月にかけて、青森市内下水処理施設から採水した下水処理前水 36 検体を対象にウイルス分離を実施した結果、アデノウイルス 2 型 1 株が分離された。

イ 日本脳炎感染源調査

平成 29 年度は 7 月から 9 月にかけて、十和田食肉衛生検査所及び田舎館食肉衛生検査所で採血したブタの血液 140 検体を対象に HI 抗体調査を実施した結果、10 倍以上の抗体価を保有している日本脳炎陽性ブタは認められなかった。

(2) 感染症発生動向調査事業（ウイルス等・細菌等）

平成 11 年度から感染症法に基づき、県内の細菌・ウイルス・リケッチア・クラミジア等の病原体を把握するために感染症発生動向調査の一環として病原体検査を実施しており、平成 29 年度においては次のとおり行った。

ア ウイルス・リケッチア・クラミジア

県内（青森市及び八戸市を除く。）の医療機関が採取した材料 190 検体（糞便（直腸ぬぐい液・腸内容物）21 検体、咽頭ぬぐい液（鼻腔ぬぐい液・鼻汁）129 検体、髄液 11 検体、血液・血清 18 検体、尿 8 検体、その他 3 検体）からウイルス分離及び遺伝子検出を実施した結果は、次のとおりであった。

ウイルス等の検出状況

疾患等	検出されたウイルス等	検出株数
インフルエンザ	インフルエンザウイルス AH1pdm09	14
	インフルエンザウイルス AH3 亜型	34
	インフルエンザウイルス B 亜型（山形系統）	31
	インフルエンザウイルス B 亜型（ビクトリア系統）	2
	ヒトヘルペスウイルス 6 型	1
呼吸器関連 （インフルエンザを除く）	RS ウイルス	6
	アデノウイルス 2 型	3
	インフルエンザウイルス B（山形系統）	3
	コクサッキーウイルス A 4 型	1
	コクサッキーウイルス A 6 型	1
	ノロウイルス GII 型	1
	ヒトパラインフルエンザウイルス 1 型	6
	ヒトパラインフルエンザウイルス 3 型	1
	ヒトメタニューモウイルス	1
ヒトライノウイルス	9	
麻しん関連	コクサッキーウイルス A 6 型	1
	ヒトヘルペスウイルス 6 型	2
感染性胃腸炎関連	アデノウイルス 2 型	1
	単純ヘルペスウイルス	1
	ノロウイルス GII 型	3

疾患等	検出されたウイルス等	検出株数
手足口病関連	単純ヘルペスウイルス	1
	ヒトヘルペスウイルス 6 型	2
	ヒトヘルペスウイルス 7 型	1
	ヒトライノウイルス	4
ヘルパンギーナ関連	コクサッキーウイルスA10型	1
	ヒトライノウイルス	1
無菌性髄膜炎関連	アデノウイルス 3 型	1
	エコーウイルス 3 型	1
	エコーウイルス 6 型	1
	コクサッキーウイルスA 6 型	1
	水痘帯状疱疹ウイルス	1
	ヒトパレコウイルス 3 型	2
	ヒトヘルペスウイルス 6 型	1
	ヒトライノウイルス	1
その他	A型肝炎ウイルス	2
	E型肝炎ウイルス	1
	RSウイルス	1
	アデノウイルス 2 型	2
	コクサッキーウイルスA 6 型	3
	コクサッキーウイルスA16型	1
	肺炎クラミジア	1
	ヒトパレコウイルス 3 型	2
	ヒトヘルペスウイルス 6 型	1
	ヒトヘルペスウイルス 7 型	2
	ヒトライノウイルス	6

イ 細菌等

県内の医療機関で、ライム病疑い患者から採取された血清 1 検体の遺伝子検査を実施した結果、ライム病ボレリア陰性であった。また、カルバペネム耐性腸内細菌科細菌感染症患者から採取された検体由来の菌株計 12 株の性状確認及び遺伝子検査を実施した結果、カルバペネマーゼを産生する菌株は認められなかった。

(3) 結核菌の遺伝子解析

平成 24 年度から、県の結核対策の一つとして、VNTR 法による結核菌の遺伝子型別解析を行っている。平成 29 年度は 22 株について遺伝子解析を行った。

(4) 青森県病原微生物検出情報

平成 11 年度から 3 病原体（サルモネラ属菌、腸炎ビブリオ、カンピロバクター属菌）の発生状況の把握を目的として県内の細菌検査施設を有する医療機関及び臨床検査センター10 施設から菌株及び検出情報の収集を実施している。平成 26 年 7 月から医療機関 1 施設を加え計 11 施設となった。また、情報収集対象とする病原体を 6 菌種（サルモネラ属菌、カンピロバクター属菌、ビブリオ属菌、エルシニア、メチシリン耐性黄色ブドウ球菌、基質拡張型β-ラクタマーゼ産生菌）とした。

ア 平成 29 年度は、提供を受けた検出情報及び気温等の環境情報を解析し、環境保健センターのホームページに週報として 53 回掲載した。

イ 収集した病原性菌株について血清型・薬剤感受性試験及び PFGE 遺伝子解析を実施し、その結果を関係機関に提供している。

(5) 厚生労働科学研究事業

平成 29 年度に研究事業として厚生労働科学研究班等に参加した事業は、以下のとおりである。

- ア 厚生労働科学研究費補助金(新興・再興感染症及び予防接種政策推進研究事業)「食品由来感染症の病原体情報の解析及び共有化システムの構築に関する研究」分担研究「食品由来感染症の病原体情報の解析及び共有化システムの構築に関する研究」
- イ 厚生労働科学研究費補助金(食品の安全確保推進研究事業)「ウイルスを原因とする食品媒介性疾患の制御に関する研究」
- ウ 厚生労働科学研究費補助金(食品の安全確保推進研究事業)「食品由来薬剤耐性菌の発生動向及び衛生対策に関する研究」分担研究「全国地方衛生研究所において分離される人、食品由来薬剤耐性菌の情報収集体制の構築」
- エ 日本医療研究開発機構(AMED)委託研究開発費 感染症実用化研究事業 新興・再興感染症に対する革新的医薬品等開発推進研究事業「迅速・網羅的病原体ゲノム解析法の開発及び感染症危機管理体制の構築に資する研究」

(6) 菌株の収集事業

県内で発生した食中毒事例等及び感染症事例から分離されたサルモネラ属菌、ビブリオ属菌、腸管出血性大腸菌(O157等)、カンピロバクター属菌について、生化学的性状試験、血清学的試験等を行い県並びに青森市及び八戸市保健所及び関係機関に対して情報提供を行っている。

(7) 感染症発生動向調査事業に係る青森県感染症発生情報

平成13年度から感染症患者の把握と予防啓発を目的に実施している。

平成29年度は、県内の感染症患者情報及び病原体検出情報を収集・分析し、その結果を週報として52回(インフルエンザ情報を適時掲載)、月報として12回、環境保健センターのホームページに掲載した。また、平成28年(1月~12月)の感染症発生動向調査事業報告書を作成し、ホームページに掲載するとともに関係機関に配付した。

2.2 試験検査

(1) ウイルス性食中毒等関連検査

ウイルス性食中毒及び感染症の続発防止並びに衛生指導を行うことを目的として県保健所及び保健衛生課からの依頼により実施している。

平成29年度は、ウイルス性食中毒(疑いを含む)及び感染症集団胃腸炎事例が14事例あり、糞便121検体、吐物2検体、食品1検体、ふき取り66検体、計190検体についてRT-PCR法、リアルタイムPCR法及びダイレクトシーケンス法により原因ウイルスの検索及び遺伝子解析を行った。

その結果、糞便121検体中ノロウイルス Genogroup I (GI型)が1検体、ノロウイルス Genogroup II (GII型)が11検体、サポウイルス GII型が1検体から検出された。吐物、食品及びふき取りからは食中毒起因ウイルスは検出されなかった。

(2) 細菌等による食中毒等関連検査

細菌等による食中毒及び感染症の続発防止並びに衛生指導を行うことを目的として県保健所及び保健衛生課からの依頼により実施している。

平成29年度は、浴槽水が原因と疑われる感染症事例が1事例あり、浴槽水1検体及びふき取り1検体の計2検体についてレジオネラ属菌の検出を行った。

その結果、いずれの検体からもレジオネラ属菌が検出された。

(3) 対EU輸出ホタテガイ生産海域モニタリング調査

保健衛生課からの依頼により実施している。平成29年度は、平成30年1月から3月にかけて、6定点(平内2定点、野辺地2定点、むつ、川内)で採取したホタテガイ合計32検体についてサルモネラ属菌及び大腸菌の検査を行った。その結果、全てEU向けホタテガイに関する衛生基準を満たしていた。

2.3 青森市及び八戸市に対する技術協力

青森市及び八戸市に対し、病原体等の試験研究等業務に対する県の技術的協力に関する協定に基づき、技術協力を行った。

(1) 食中毒等関連検査(ウイルス等・細菌等)

ア ウイルス等

平成 29 年度は、八戸市でウイルス性食中毒（疑いを含む。）・感染症集団胃腸炎事例が 2 事例あり、糞便 10 検体、ふき取り 5 検体、計 15 検体について RT-PCR 法及びリアルタイム PCR 法により原因ウイルスの検索を行った。

イ 細菌等

平成 29 年度は、事例がなかった。

(2) 感染症発生動向調査事業（ウイルス等・細菌等）

ア ウイルス・リケッチア・クラミジア

青森市内の医療機関が採取した材料は、61 検体（糞便（直腸ぬぐい液・腸内容物）11 検体、咽頭ぬぐい液（鼻腔ぬぐい液・鼻汁）23 検体、髄液 21 検体、血液・血清 4 検体、尿 2 検体）であった。

八戸市内の医療機関が採取した材料は、75 検体（糞便（直腸ぬぐい液・腸内容物）11 検体、咽頭ぬぐい液（鼻腔ぬぐい液・鼻汁）55 検体、髄液 5 検体、血液・血清 2 検体、胃液 1 検体、気管吸引液 1 検体）であった。

イ 細菌等

青森市内の医療機関が採取した材料は、5 検体（菌株 5 検体）であった。

八戸市内の医療機関が採取した材料は、6 検体（菌株 6 検体）であった。

2.4 精度管理

(1) ウイルス等

平成 29 年度は、厚生労働省健康局結核感染症課が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実施しているインフルエンザウイルスに関する外部精度管理に参加し、検査技能は適正であると判定された。

(2) 細菌等

平成 29 年度は、一般財団法人食品薬品安全センター秦野研究所が実施しているサルモネラ属菌及び大腸菌に関する食品衛生外部精度管理及び公益財団法人結核予防会結核研究所で実施している結核菌遺伝子型別外部精度評価に参加し、検査技能は適正であると判定された。

2.5 教育・指導

(1) 対 E U 輸出ホタテガイ生産海域のモニタリングに係るサンプリング者育成研修

保健衛生課からの依頼により、対 E U 輸出ホタテガイ生産海域のモニタリングに係るサンプリング者育成を目的に研修を実施しており、平成 29 年度はサンプリング者に指名された者に対して、ホタテガイの無菌的採取法について、講義と実演を行った。

(2) 病原体等の包装・運搬に係る研修

保健衛生課からの依頼により、包装・運搬責任者育成を目的に研修を実施しており、ゆうパックにより臨床検体等を送付する際の遵守事項について講義と実演を行っている。

(3) 衛生検査所に対する外部精度管理

医療業務課からの依頼により、衛生検査所における精度管理の質的向上を図ることを目的に立入検査を実施し、指導監督及び助言を行っている。

2.6 健康危機管理

高病原性鳥インフルエンザが、ヒトに感染することによる新型インフルエンザ出現に警戒し、検査技術の導入及び検査体制の整備を行っている。

試験検査総括表（平成 29 年度）

分類	部門	件数	検査 項目数	検査 総数
(1) ウイルス (行政検査)	①感染症発生動向調査（ウイルス等）			
	・インフルエンザウイルス	95	6	570
	・呼吸器関連ウイルス（インフルエンザウイルスを除く。）	51	15	765
	・麻疹関連ウイルス	10	5	50
	・感染性胃腸炎関連ウイルス	8	7	56
	・手足口病関連ウイルス	8	10	80
	・ヘルパンギーナ関連ウイルス	7	10	70
	・無菌性髄膜炎関連ウイルス	42	6	252
	・その他のウイルス	105	13	1,365
	②ポリオ感染源調査	36	1	36
	③日本脳炎感染源調査	140	1	140
	④ウイルス性食中毒等関連検査	205	5	1,025
	小 計	707		4,409
(2) 細菌等 (行政検査)	①感染症発生動向調査（細菌等）			
	・ライム病ボレリア	1	1	1
	・カルバペネム耐性腸内細菌科細菌	12	3	36
	②結核菌の遺伝子解析	22	1	22
	③対EU輸出ホタテガイモニタリング検査	32	2	64
	④細菌等による食中毒等関連検査			
	・レジオネラ属菌	2	1	2
⑤病原性菌株の収集	72	1	72	
⑥病原微生物検出情報（菌株）	57	1	57	
	小 計	198		254
合 計		905		4,663

3 理化学部

3.1 試験検査

(1) 有害物質等検査

ア 県産農産物の残留農薬検査

平成 18 年 5 月から、食品中に残留する農薬等へのポジティブリスト制度（農薬等が残留する食品の販売等を規制する制度）が施行され、農薬残留基準が定められていないものには一律基準（0.01ppm）が適用されることとなったことから、精密分析機器である GC/MS 及び LC/MS/MS を用いて分析を実施している。

平成 29 年度は次の 10 種 56 検体 1 検体当たり約 250 項目について検査を実施した。トマト 7 検体（179 項目）、もも 3 検体（162 項目）、メロン 3 検体（160 項目）、とうもろこし 6 検体（115 項目）、人参 7 検体（159 項目）、大根 5 検体（154 項目）、玄米 6 検体（108 項目）、りんご 8 検体（156 項目）、長いも 6 検体（117 項目）、ごぼう 5 検体（137 項目）。（（ ）内の項目数は試験法の妥当性が確認された項目数）

その結果、トマト、もも、メロン、大根、玄米、りんご、長いも及びごぼうからは下の表に示す農薬が検出されたが、いずれも基準値未満であった。

とうもろこし及び人参については、全ての項目について定量下限未満であった。

検出農薬

作物名	検出農薬名（検出検体数）
トマト	アゾキシストロビン(1)、ジエトフェンカルブ(1)、イミダクロプリド(1)
もも	アセタミプリド(2)、クレソキシムメチル(2)、クロチアニジン(2)
メロン	アセフェート(1)、チアクロプリド(2)、メタミドホス(1)、クロチアニジン(1)
大根	ホスチアゼート(2)、クロルピリホス(1)
玄米	トリシクラゾール(1)、フェリムゾン(1)、クロチアニジン(1)
りんご	シペルメトリン(4)、アセタミプリド(4)、トリフロキシストロビン(5)、フェニトロチオン(2)、シハロトリン(1)、シフルトリン(1)、チアクロプリド(1)
長いも	アセフェート(1)、イミダクロプリド(1)、メタミドホス(1)
ごぼう	プロチオホス(1)

イ 輸入農産物の残留農薬検査

平成 29 年度は県内に流通している輸入農産物の残留農薬検査を、次の 5 種 20 検体 1 検体当たり約 250 項目について実施した。パプリカ 4 検体（152 項目）、キウイ 6 検体（180 項目）、バナナ 5 検体（153 項目）、レモン 1 検体（111 項目）及びオレンジ 4 検体（89 項目）。

その結果、バナナ、レモン及びオレンジからは下の表に示す農薬が検出されたが、いずれも基準値未満であった。

検出農薬

作物名	検出農薬名（検出検体数）
バナナ	クロルピリホス（3）
レモン	イマザリル(1)、シペルメトリン(1)、チアベンダゾール(1)、ピリメタニル(1)、マラチオン(1)
オレンジ	イマザリル（4）、チアベンダゾール（4）、クロルピリホス（1）

ウ ホタテガイの有機スズ化合物検査

漁網防汚剤として使用されていた有機スズ化合物について継続的に調査している。平成 29 年度はホタテガイ 5 検体 (3 項目) について実施した結果、全ての項目 (ジブチルスズ化合物、トリブチルスズ化合物、トリフェニルスズ化合物) で定量下限未満であった。

エ 魚介類中の PCB、水銀及びクロルデン類検査

県産魚介類の安全性を確保するため、暫定的規制値の定められている PCB、水銀及びシロアリ駆除剤であるクロルデン類 (6 項目) について、継続的に調査している。平成 29 年度は県産魚介類 3 種 5 検体 (アジ、マコガレイ (2)、ブリ (2)) について実施した結果、水銀については全ての検体から検出 (0.025~0.109ppm) されたが、いずれも暫定的規制値 (0.4ppm) 以下であった。PCB、クロルデン類については、全て定量下限未満であった。

オ 流通貝の貝毒検査

下痢性及び麻痺性貝毒による食中毒を未然に防止するため、流通貝について貝毒検査を継続的に実施している。平成 28 年度より下痢性貝毒については LC/MS/MS を用いた機器分析による検査となった。平成 29 年度はホタテガイ 12 検体 (下痢性 7 検体、麻痺性 5 検体) について実施した結果、全て定量下限未満であった。

カ りんごジュースのカビ毒検査

県産りんごジュースの安全性を確保するため、平成 17 年度から、カビ毒 (パツリン) の検査を実施している。平成 29 年度は 10 検体について実施した結果、全て定量下限未満であった。

キ アレルギー物質検査

平成 29 年度は 40 検体 (菓子 25 検体、穀類加工品 9 検体、そうざい 6 検体) の特定原材料 5 品目 (小麦・そば・落花生・卵・乳) について、それぞれ 2 種類の検査試薬で検査を実施した。その結果、そばで穀類加工品 1 検体が基準値を超えた。

ク 清涼飲料水検査

土産品として売られている清涼飲料水の安全性を確保するため、鉛等の検査を実施している。平成 29 年度は 7 検体について鉛、ヒ素を検査した結果、鉛、ヒ素は全て基準値未満であった。

ケ 遺伝子組換え体検査

平成 29 年度は大豆穀粒 5 検体について遺伝子組換え体の混入率の検査を実施した結果、遺伝子組換え体 (RoundupReady Soybean) の混入率は全て定量下限 (0.1%) 未満であった。

(2) 畜水産食品の残留有害物質モニタリング検査

畜水産食品の安全性を図るため、合成抗菌剤、抗生物質及び寄生虫駆除剤についての動物用医薬品検査を実施している。平成 29 年度は県内で取去された鶏卵 13 検体 (32 品目)、牛乳 7 検体 (40 品目) について検査を実施した結果、全て定量下限未満であった。

(3) 対 EU 輸出ホタテガイ生産海域のモニタリング検査

「対 EU 輸出水産食品の取扱いについて」 (平成 21 年厚生労働省・農林水産省・水産庁通知) 及び同通知の別紙「対 EU 輸出水産食品の取扱要領」に基づき生産海域の監視を目的に、貝毒及び環境汚染物質について、陸奥湾産ホタテガイのモニタリング検査を実施している。

貝毒については、EU 向けホタテガイの採捕期間中に毎週実施しており、平成 29 年度は 1 月~3 月に 6 定点 (平内 2 定点、野辺地 2 定点、むつ、川内) から採捕したホタテガイ 43 検体について、2 項目 (麻痺性及び記憶喪失性貝毒) の検査を実施した結果、全て EU 向けホタテガイに係る基準を満たしていた。

環境汚染物質については、12 検体 (6 定点・年 2 回 (6 月、11 月)) について、23 項目 (PCB、塩素系農薬、クロルデン類、ベンゾ[a]ピレン、総水銀、カドミウム、ヒ素、鉛、クロム、ニッケル、銅、亜鉛、銀) の検査を実施した結果、総水銀、カドミウム、亜鉛及びヒ素は全ての検体から、ベンゾ[a]ピレンは 2 検体から検出されたが、いずれも EU 向けホタテガイに係る基準を満たしていた。

(4) 家庭用品の試買検査

昭和 55 年度から、「有害物質を含有する家庭用品の規制に関する法律」に基づく家庭用品の試買検査を実施している。平成 29 年度は、家庭用洗剤 10 検体について容器試験、塩酸消費量等 (合計 4 項目)

の検査を、繊維製品 10 検体についてはホルムアルデヒドの検査を実施した結果、全て規格に適合していた。

(5) 医薬品の収去検査

不良医薬品の製造及び流通を防止するため、医薬品等一斉監視指導において収去した医薬品の検査を実施している。平成 29 年度は 6 検体についてアセトアミノフェンの定量試験を実施した結果、全て規格に適合していた。

(6) その他の行政検査

食中毒疑い（スイセン誤食）に係る検査

平成 29 年 4 月に県南地方において、自宅周辺の畑から採取したニラ様植物を調理したものを喫食後、嘔吐しスイセン誤食による食中毒が疑われた。確認のため、調理品残品 1 検体、調理に使用しなかった食材 1 検体、採取同一場所で保健所が採取した植物全体 1 検体及び採取痕が確認された植物 1 検体の計 4 検体についてスイセンの毒成分の検査を実施した。その結果、全ての検体から毒成分であるガラントミン、ガラントミノンが検出された。スイセンの代表的な毒性成分のリコリンは、採取痕が確認された植物のみに検出された。

小川原湖への米軍戦闘機燃料タンク投棄に係るシジミ等の検査

平成 30 年 3 月、小川原湖への米軍 F-16 戦闘機による燃料タンク投棄に伴うシジミ等への影響分析として、投棄前後の検体中の石油類の含有検査（定性）を実施した。投棄前のシジミ（貝付き及び可食部）、ワカサギ、シラウオ各 1 検体、投棄後のシジミ（貝付き及び可食部）各 6 検体、ワカサギ 3 検体、シラウオ 6 検体の計 25 検体について実施した。その結果、いずれの検体においても石油類は検出されなかった。

3.2 精度管理調査

(1) 食品薬品安全センター秦野研究所による外部精度管理調査

平成 11 年度から一般財団法人食品薬品安全センター秦野研究所による食品衛生外部精度管理調査に参加している。

平成 29 年度は重金属（玄米のカドミウム）、残留農薬（にんじんペーストのチオベンカルブ、マラチオン、クロルピリホス）、残留動物用医薬品（豚肉（もも）ペーストのスルファジミジン）、麻痺性貝毒（ホタテガイペースト）、アレルギー物質（卵）（ベビーフード、かぼちゃペースト、各 1 検体）の 5 検体について実施した。いずれも結果は良好であった。

(2) 水道水質検査の外部精度管理調査

水道水質検査における分析精度及びデータの正確さを確保し、分析結果の信頼性を高めることを目的として保健衛生課の依頼により平成 11 年度から実施している。

平成 29 年度は、水質検査に従事する県内 3 施設を対象に、カドミウム及びその化合物並びに銅及びその化合物について外部精度管理調査を実施した。各施設のデータを Xbar-R 管理図により解析した結果、全施設で全項目について管理限界内であった。Zスコアによる評価も全て良好であった。

(3) 医薬品の外部精度管理調査

各都道府県において医薬品等の試験検査を受託する衛生検査所等の試験検査機関を対象として、医薬品、医療機器等の品質、有効性及び安全性を確保することを目的に実施されている国立医薬品食品衛生研究所薬品部第三室による外部精度管理調査に平成 27 年度から参加している。

平成 29 年度はイプリフラボン定量法（HPLC 法）及び純度試験（HPLC 法）について実施した。

なお、平成 28 年度に参加したイプリフラボン錠の定量法（HPLC 法）及び確認試験（紫外可視吸光スペクトル測定法）の評価は良好であった。

(4) 対 EU 輸出ホタテガイ等二枚貝におけるマリンバイオトキシン検査機関検証

平成 27 年度から対 EU 輸出水産食品の取扱要領の規程に基づいた、対 EU 輸出水産食品におけるマリンバイオトキシン検査機関の検証が、国立医薬品食品衛生研究所食品衛生管理部第二室により開始され、記憶喪失性貝毒の実試料測定調査及び麻痺性貝毒の評価が行われている。

平成 29 年度は記憶喪失性貝毒については、2 試料の実試料調査が行われ評価は良好であった。

なお、麻痺性貝毒検査については、前出(1)食品薬品安全センター秦野研究所による外部精度管理調査において、評価は良好であった。

3.3 試験所認定に係る維持管理事業

当所は平成 15 年 3 月に ISO/IEC17025 に基づく試験所認定を取得し、認定の維持管理のため日本適合性認定協会（JAB）が実施する定期サーベイランス及び4年ごとの試験所認定登録更新審査を受けている。

平成 29 年 10 月 12 日に第 9 回システムサーベイランス現地審査を受け、基準に適合していることが認められた。〔認定範囲：食品試験分野（麻痺性貝毒、記憶喪失性貝毒、大腸菌、サルモネラ属菌）〕

業務実績総括表（平成 29 年度）

分類	部 門	事 業	検体数	項目数 /1 検体	総項目 数※2
試験 検査	(1)有害物質検査	①県産農産物の残留農薬検査 ※	56	108～179	8,075
		②輸入農産物の残留農薬検査 ※	20	89～180	2,920
		③ホタテガイの有機スズ化合物検査	5	3	15
		④魚介類のPCB、水銀、クロルデン類検査	5	8	40
		⑤流通貝の貝毒検査	12	1	12
		⑥りんごジュースのカビ毒検査	10	1	10
		⑦アレルギー物質検査	40	2	80
		⑧清涼飲料水検査	7	2	14
		⑨遺伝子組換え体検査	5	1	5
		小 計	160		11,171
	(2)畜水産食品の残留有害物質モニタリング検査	①動物用医薬品検査（鶏卵）	13	32	416
		②動物用医薬品検査（牛乳）	7	40	280
		小 計	20		696
	(3)対EU輸出ホタテガイ生産海域のモニタリング検査	①貝毒検査	43	2	86
		②環境汚染物質検査	12	23	276
		小 計	55		362
	(4)家庭用品の試買検査	①家庭用洗剤の検査	10	4	40
		②繊維製品の検査	10	1	10
		小 計	20		50
	(5)医薬品の収去検査		6	1	6
(6)その他の行政検査	①食中毒疑い（スイセン誤食）に係る検査	4	3	12	
	②F-16燃料タンク投棄に係るシジミ等の検査	25	1	25	
合 計			290		12,322
精度 管理	(1)外部精度管理調査（食品薬品安全センター）		5	1～3	9
	(2)水道水質検査の外部精度管理調査		3	2	6
	(3)医薬品の外部精度管理		2	1	2
	(4)対EU輸出ホタテガイ等二枚貝におけるマリンバイオトキシン検査機関 検証		2	1	2
	合 計			12	
総 計			302		12,341

※ 1 検体当たり約 250 項目について検査を実施したが、各農産物について試験法の妥当性が確認された項目についてのみ項目数に計上した。

※2 検体数×項目数の総和

4 公害部

4.1 大気関係

(1) 環境大気監視

弘前市2地点、黒石市1地点、五所川原市1地点、十和田市1地点、三沢市1地点、むつ市1地点、六ヶ所村1地点及び鱒ヶ沢町1地点の計9地点で大気中の二酸化硫黄(SO₂)、窒素酸化物(NO_x)、一酸化炭素(CO)、光化学オキシダント(O_x)、浮遊粒子状物質(SPM)、微小粒子状物質(PM_{2.5})、炭化水素(HC)について常時監視を実施した。これらのうち、環境基準が定められている6測定項目についての環境基準の達成状況は、下表のとおりであった。

測定項目	二酸化硫黄(SO ₂)				二酸化窒素(NO ₂)			一酸化炭素(CO)					
	有効測定	短期的評価		長期的評価		有効測定	適	否	有効測定	短期的評価		長期的評価	
		適	否	適	否					適	否		
測定局数	1	1	0	1	0	8	8	0	1	1	0	1	0

測定項目	光化学オキシダント(O _x)		浮遊粒子状物質(SPM)				微小粒子状物質(PM _{2.5})					
	適	否	有効測定	短期的評価		長期的評価		有効測定	短期基準に関する評価		長期基準に関する評価	
				適	否	適	否		適	否	適	否
測定局数	0	4	7	5	2	7	0	2	2	0	2	0

(2) 稲わら焼却による大気汚染状況調査

五所川原市1地点において、稲わら焼却時のベンゾ[a]ピレン、アルデヒド類及び粉じんについて調査を実施した。

(3) 酸性雨実態調査

降水成分の地域特性を明らかにし、今後の酸性雨対策に資することを目的として、青森市・鱒ヶ沢町各1地点において降水量、水素イオン濃度(pH)、電気伝導度(EC)及びイオン成分8項目の測定を実施した。

(4) 有害大気汚染物質モニタリング調査

有害大気汚染物質による大気汚染の状況を把握するため、弘前市1地点において、ベンゼン等優先取組物質21物質について毎月1回の調査を実施した結果、環境基準が設定されているジクロロメタン等4物質及び指針値が設定されているアクリロニトリル等9物質については、いずれも基準値及び指針値を下回っていた。

(5) 微小粒子状物質(PM_{2.5})成分測定調査

県内における微小粒子状物質(PM_{2.5})の成分組成の割合や発生源の寄与割合などを把握するため、弘前市1地点において、質量濃度、イオン成分8項目、無機元素成分29項目、炭素成分3項目について4季節各季2週間の調査を実施した。

(6) アスベスト調査

弘前市1地点において一般環境大気中のアスベスト濃度の測定を実施した。また、建築物解体現場等周辺地域10地点においてアスベスト濃度の測定を実施した結果、全ての地点で敷地境界規制基準内であった。なお、試料採取は各環境管理部が実施した。

4.2 水質関係

(1) 公用水域・地下水の水質測定及びクロスチェック

公用水域及び地下水の水質測定については外部分析機関に委託していることから、分析に関する精度を確保するため、外部分析機関とクロスチェックを実施した。

(2) 水浴場水質調査

県内 19 水浴場における水質調査（化学的酸素要求量(COD)、ふん便性大腸菌群数等）を外部分析機関に委託して実施していることから、分析の精度を確保するため試料分割法によるクロスチェックを 2 検体について実施した。

(3) 十和田湖水質保全事業

十和田湖の水質保全に資するため、秋田県と共同で十和田湖の湖心における水質調査を実施した。
また、十和田湖に流入する 2 河川の水質調査を実施した。

(4) 排水基準監視クロスチェック

特定事業場排水の水質測定を外部分析機関に委託していることから、分析に関する精度を確保するため外部分析機関とクロスチェックを実施した。

4.3 騒音、振動関係

(1) 航空機騒音調査

八戸飛行場及び三沢飛行場周辺地域の航空機騒音の環境基準達成状況を把握するため、三沢市、十和田市、六戸町、五戸町及び六ヶ所村の各 1 地点並びに東北町の 2 地点で騒音調査を実施した結果、東北町 1 地点で環境基準値を超過したが、その他の地点は環境基準を達成した。

また、三沢市の 1 地点で日米共同訓練の実施に係る航空機騒音実態調査を実施した。

(2) 新幹線騒音調査

新幹線騒音の環境基準達成状況を把握するため、南部町及び七戸町の各 1 地点で調査を実施した結果、いずれも環境基準を達成した。

4.4 その他

(1) 精度管理

環境省が実施する統一精度管理調査に参加し、模擬排水試料 1 検体（対象項目：化学的酸素要求量(COD)、生物化学的酸素要求量(BOD)）について分析した。Zスコアによる評価は、全ての項目について満足できる結果であった。

また、全国環境研協議会酸性雨広域大気汚染調査研究部会が実施する酸性雨分析精度管理調査に参加し、模擬水質試料 2 検体（対象項目：水素イオン濃度(pH)、電気伝導度(EC)、硫酸イオン(SO₄²⁻)、硝酸イオン(NO₃⁻)、塩化物イオン(Cl⁻)、ナトリウムイオン(Na⁺)、カリウムイオン(K⁺)、カルシウムイオン(Ca²⁺)、マグネシウムイオン(Mg²⁺)、アンモニウムイオン(NH₄⁺)）について分析した。

(2) 行政依頼検査等

関係課から緊急の依頼を受けた水質事故・魚類へい死等に係る分析を実施した。

業務実績総括表（平成 29 年度）

分類	事業	業務	地点・検体数	項目数
大気	環境監視・調査	環境大気常時監視	9	36
		稲わら焼却による大気汚染調査	3	12
		酸性雨実態調査	78	858
		有害大気汚染物質モニタリング調査（委託）	(12)	(156)
		有害大気汚染物質モニタリング調査	12	96
		微小粒子状物質（PM _{2.5} ）成分測定調査（委託）	(56)	(168)
		微小粒子状物質（PM _{2.5} ）成分測定調査	56	2,128
		アスベスト調査	15	60
水質	水質保全	公共用水域、地下水等クロスチェック分析	16	18
		十和田湖水質保全事業調査	19	284
		排水基準監視クロスチェック分析	2	2
騒音	騒音防止対策	航空機騒音環境基準達成状況調査	7	98
		日米共同訓練の実施に係る航空機騒音実態調査	1	6
		新幹線騒音調査	2	24
その他	精度管理	統一精度管理調査	1	2
		酸性雨分析精度管理調査	2	60
	行政依頼検査等	魚類へい死・水質事故等	7	115
		高病原性鳥インフルエンザ発生事案に係る水質分析	5	20

5 研修等業務（所内研修会）

研修名	研修内容	実施日	対象者	受講者数	開催部名
ISO 所内研修	ISO/IEC17025関係の知識・技術の習得	2017/4/24	環境保健センター職員	10	微生物部
ISO 信頼性確保部門研修	ISO/IEC17025関係の知識・技術の習得	2017/4/24	ISO 信頼性確保部門担当者	6	微生物部
対 EU 輸出ホタテガイ生産海域のモニタリングに係るサンプリング及び ISO/IEC17025に係る対 EU 輸出ホタテガイサンプリングマンに対する研修	ISO/IEC17025関係の知識・技術の習得	2017/5/12	検体採取員	16	微生物部
ISO 信頼性確保部門研修	ISO/IEC17025関係の知識・技術の習得	2017/6/2	ISO 信頼性確保部門担当者	6	微生物部
微生物部セミナー	微生物関係の知見の習熟及び発表方法の習熟	2017/7/19	環境保健センター職員	16	微生物部
ISO 動物管理区分内部研修（動物飼育管理）	実験動物の飼育・飼養管理に必要な知識等の習得	2017/4/17	ISO 実験動物試験新担当者	1	理化学部
ISO 理化学検査区分内部研修（不確かさ・トレーサビリティ）	理化学検査の分析精度、トレーサビリティ及び不確かさ等の知識の習得	2017/4/18	ISO 業務担当者、理化学検査担当者	14	理化学部
ISO 新人検査部門業務研修会・ISO/IEC17025に係る内部研修	ISO/IEC17025の概要、試験所認定等の知識の習得	2017/4/24	ISO 業務担当者	17	理化学部
温度計・湿度計検証の内部研修（データロガー検証）	検査に係る温度計及び湿度計の検証方法を習得する	2017/4/28	新規貝毒検査・微生物検査担当者（ISO 関連）	10	理化学部
検体受付新担当者研修	検体受付の流れ、器具・機材の取扱、検体授受書の書き方等の習得	2017/5/15	受付新担当者（ISO/GLP）	3	理化学部
ECD 研修会	放射線業務従事者教育・訓練	2017/5/15	GC 担当、ECD 操作担当者	8	理化学部
ISO 検体採取担当者の内部研修（ISO 関連）	ISO/IEC17025の概要、検体採取員認証に必要な知識・技術の習得	2017/5/25	ホタテ採取員	12	理化学部
ISO 理化学検査区分の内部研修（精度管理等）	理化学検査の分析精度、バリデーション等の知識の習得	2017/6/26	ISO 業務担当者、理化学検査担当者	16	理化学部
H29 ガラス体積計検証の内部研修・実技試験	貝毒検査で使用するガラス体積計の検証方法を習得・検証する	2017/6/30 ～7/6	新規貝毒検査担当者（ISO 関連）	5	理化学部

研修名	研修内容	実施日	対象者	受講者数	開催部名
貝毒検査に係るマウスアッセイ研修	外部講師（国衛研大城先生）を招いて、マウス試験に関する知識及び手技の習得	2017/9/28	新貝毒検査担当者（ISO 関連）、検査担当者	5	理化学部
検体受付担当者の研修（ISO 関連）	受付担当者が年間計画、受付業務の流れ、器具・機材の取扱、検体採取資材等授受確認書の書き方及び注意事項について確認する	2017/12/14 ～12/15	受付担当者（ISO 関連）	9	理化学部
分銅検証の内部研修	ワーキング分銅の検証方法を習得する	2017/12/26	理化学・微生物検査担当者	3	理化学部
H29 LC/MS/MS 操作研修（waters）	LC/MS/MS の原理、装置の構造、基本操作の習得	2018/1/22	LCMS 操作担当者	4	理化学部
公害部セミナー	環境分野の知見及び技術の習得	2017/7/20	環境保健センター職員	30	公害部
公害部セミナー	環境分野の知見及び技術の習得	2017/12/8	環境保健センター職員	30	公害部
H29年度 あすをひらく	環境、公衆衛生、原子力関係の知見の習得	2018/1/26	環境生活部、健康福祉部、危機管理局、各地域県民局職員	60	公害部

6 年間動向

(1) 講師等派遣

研修等の名称	内容 (対象者)	実施日	講師派遣部 (職員氏名)
対EU輸出ホタテガイ生産海域のモニタリングに係るサンプリングに関する研修及びISO/IEC17025に係る対EU輸出ホタテガイサンプリングマンに対する研修会	ISO/IEC17025関係の知識・技術の習得 (検体採取員)	平成29年5月12日	微生物部 (筒井 理華)
出前トーク 「腸管出血性大腸菌って何？」	微生物に関する知識・技術の習得 (卸勤務薬剤師会関係職員)	平成29年6月15日	微生物部 (高橋 洋平)
出前トーク 「みんなでノロウイルスを予防しよう～」	微生物に関する知識・技術の習得 (社会福祉施設関係職員)	平成29年6月20日	微生物部 (筒井 理華)
出前トーク 「腸管出血性大腸菌って何？」	微生物に関する知識・技術の習得 (社会福祉施設関係職員)	平成29年6月20日	微生物部 (高橋 洋平)
平成29年度病原体等の包装・運搬講習会	微生物に関する知識・技術の習得 (保健所・検査機関関係職員)	平成29年7月12日	微生物部 (筒井 理華)

(2) 委員会、協議会等の委員

委嘱団体等の名称	委員の名称	任 期	委員派遣部 (職員氏名)
全国衛生化学技術協議会	理事	平成27年度～平成29年度	所 長 (工藤 真哉)
	常任幹事	平成27年度～平成29年度	理化学部 (佐藤 裕久)
青森県 (医療薬務課)	新型インフルエンザ等対策青森県有識者会議委員	平成29年9月14日 ～平成31年9月13日	微生物部 (筒井 理華)
青森県 (医療薬務課)	青森県精度管理専門委員	平成29年1月19日 ～平成32年1月28日	微生物部 (筒井 理華)
青森市	青森市精度管理専門委員	平成28年4月1日 ～平成30年3月31日	理化学部 (佐藤 裕久)
八戸市	八戸市衛生検査所精度管理専門委員	平成29年7月1日 ～平成31年3月31日	理化学部 (佐藤 裕久)

(3) 平成29年度青森県環境生活部出先機関等職員研究発表会「あすをひらく」

開催日時：平成30年1月26日（金） 13：30～16：45

開催場所：青森県環境保健センター2階大会議室

発表者		演題名
所属	氏名	
微生物部	高橋 洋平	青森県内で検出された腸内細菌科細菌の解析 (2017年に搬入されたサルモネラ属菌)
微生物部	菩提寺 誉子	青森県内で検出された呼吸器感染症起因ウイルスの遺伝子解析 (2012年4月～2017年12月に検出したRSウイルス)
理化学部	山本 明美	スイセンによる食中毒について
理化学部	花石 竜治	十二湖青池の呈色機構に関する研究（第二報）
公害部	前田 寿哉	航空機騒音の測定条件に関する考察
公害部	大坂 直人	根岸小学校局における大気汚染常時監視・PM _{2.5} 成分測定項目間の濃度相関について
下北地域県民局 環境管理部	嘉山 定伸	産業廃棄物事務の適正化に向けた取り組みについて3 ～環境管理部における人材育成～
原子力センター	阿部 真之	蛍光ガラス線量計の感度低下について
原子力センター	工藤 翔	過去の測定値を上回った放射能測定値の原因調査事例
原子力センター 青森市駐在	神 俊雄	大気中トリチウムの化学形別濃度調査

※ 所属に微生物部、理化学部、公害部と記載されている発表者は、青森県環境保健センター職員

(4) 会議・学会・研修会等出席状況

ア 会議・検討会等出席

名 称	開催地	開催月日	出席者	出席者数
「新興・再興感染症に対する革新的医薬品等開発推進研究事業_国内ならびにグローバルサーベイランスのためのRSウイルス感染症に関する検査システムの開発研究」	東京都	2017/5/22～23	微生物部員	1
平成29年度地域保健総合推進事業 地方衛生研究所地域レファレンスセンター連絡会議	宮城県	2017/9/28～29	微生物部員	2
平成29年度地域保健総合推進事業全国疫学情報ネットワーク構築会議	東京都	2017/11/24	微生物部員	1
平成29年度第2回結核予防業務検討会	青森市	2018/1/19	微生物部員	2
平成29年度「ウイルスを原因とする食品媒介性疾患の制御に関する研究」班会議	神奈川県	2018/1/25～26	微生物部員	2
ISO/IEC 17025:2017 改正説明会	京都府	2018/2/12～13	微生物部員	1
「迅速・網羅的病原体ゲノム解析法の開発及び感染症危機管理体制の構築に資する研究」	東京都	2018/2/15	微生物部員	1
H29 地衛研全国協議会北海道・東北・新潟支部衛生化学研究部会総会	福島県	2017/10/12～13	理化学部員	2
H29 東北ブロック水産業関係研究開発推進会議資源環境部会員毒研究分科会	宮城県	2017/11/20	理化学部員	1
平成29年度岩手県GMP調査、PMDAによる査察への同行	岩手県	2018/2/15	理化学部員	1
平成29年度第2回GMP調査当局会議	東京都	2018/3/7～8	理化学部員	1
国立環境研究所打合せ	茨城県	2017/4/10	公害部員	1
平成29年度全国環境研協議会 北海道・東北支部総会	宮城県	2017/6/29	所 長	1
平成29年度十和田湖環境保全会議	十和田市	2017/11/2	公害部員	2
第46回全国環境研協議会総会	東京都	2018/2/21	所 長	1
平成29年度地方公共団体環境試験研究機関等所長会議	東京都	2018/2/22	所 長	1
平成29年度全国環境研協議会北海道・東北支部 酸性雨広域大気汚染調査研究専門部会	新潟県	2018/2/22	公害部員	1
平成29年度十和田湖資源対策会議	青森市	2018/3/1	公害部員	2
平成29年度十和田湖水質・生態系会議	青森市	2018/3/2	公害部員	3
平成29年度環境測定分析統一精度管理ブロック会議	青森市	2018/3/6	次 長 公害部員	6

イ 学会・研究会等出席

名 称	開催地	開催月日	出席者	出席者数
第 27 回感染症シンポジウム「薬剤耐性菌の現状と対策」	東京都	2017/5/22～23	微生物部員	1
第 59 回日本臨床ウイルス学会	長崎県	2017/5/27～28	微生物部員	1
平成 29 年度結核菌 VNTR 技術研究会	東京都	2017/7/25～26	微生物部員	1
東北食中毒研究会	宮城県	2017/10/19	微生物部員	1
第 29 回ウイルス性下痢症研究会学術集会	大阪府	2017/10/23	微生物部員	1
第 66 回日本感染症学会東日本地方学術集会・第 63 回日本化学療法学会東日本支部総会 合同学会	東京都	2017/10/31～11/2	微生物部員	1
ワンヘルスに関する連携シンポジウム	東京都	2017/11/27～28	微生物部員	1
第 31 回公衆衛生情報研究協議会総会・研究会	埼玉県	2018/1/25～26	微生物部員	1
H29 年度日本食品衛生学会総会・特別シンポジウム	東京都	2017/6/9	理化学部員	1
日本法中毒学会第 36 年会	東京都	2017/7/6～7	理化学部員	1
第 40 回農薬残留分析研究会	東京都	2017/8/31～9/1	理化学部員	1
JASIS2017 コンファレンスセミナー	千葉県	2017/9/6～8	理化学部員	1
(公社) 日本食品衛生学会第 1 回分析セミナー	千葉県	2017/9/7	理化学部員	1
第 113 回日本食品衛生学会学術講演会	東京都	2017/11/9～10	理化学部員	1
第 54 回全国衛生化学技術協議会年会	奈良県	2017/11/21～22	理化学部員	2
第 58 回大気環境学会年会	兵庫県	2017/9/6～8	公害部員	1
第 43 回全国環境研協議会北海道・東北支部研究連絡会議	山形県	2017/10/5～6	公害部員	2
第 44 回環境保全・公害防止研究発表会	長崎県	2017/11/13～14	公害部員	1
第 33 回全国環境研究所交流シンポジウム	茨城県	2018/2/15～16	公害部員	1
平成 29 年度地方独立行政法人青森県産業技術センター「工業部門研究成果発表会」	弘前市	2018/3/9	公害部員	1
第 52 回日本水環境学会年会及び併設研究集会	北海道	2018/3/15～17	公害部員	1

ウ 研修会・講習会等出席

名 称	開催地	開催月日	出席者	出席者数
平成 29 年度病原体等の包装・運搬講習会	東京都	2017/5/19	微生物部員	1
ISO/IEC 17025 ラボラトリーのための内部監査員養成セミナー	神奈川県	2017/5/22～23	微生物部員	1
H29 年度蚊類調査に係る技術研修会	東京都	2017/5/29～30	微生物部員	1
平成 29 年度バイオセーフティ技術講習会 基礎コース	千葉県	2017/6/26～28	微生物部員	1
衛生微生物技術協議会第 38 回研修会	東京都	2017/6/27～28	微生物部員	2
平成 29 年度抗酸菌検査個別研修	東京都	2017/7/25～26	微生物部員	1
院内感染に関連する薬剤耐性菌の検査に関する研修	東京都	2017/9/26～28	微生物部員	1
平成 29 年度短期研修細菌研修	東京都	2017/11/6～24	微生物部員	1
平成 29 年度地方衛生研究所全国協議会北海道・東北・新潟支部公衆衛生情報研究会総会・研修会	岩手県	2017/11/9～10	微生物部員	1
レジオネラ症対策に係る研修	青森市	2017/12/18	微生物部員	2
NESID に係る研修会	東京都	2018/2/5	微生物部員	1
平成 29 年度希少感染症診断技術研修会	東京都	2018/2/27～28	微生物部員	2
腸管出血性大腸菌 MLVA 技術研修会	東京都	2018/3/23	微生物部員	1
平成 29 年度食品衛生検査施設信頼性確保部門責任者等研修会	東京都	2017/5/26	理化学部員	1
第 3 種放射線取扱主任者講習	東京都	2017/7/13～14	理化学部員	1
平成 29 年度特定機器分析研修Ⅱ (LC/MS/MS)	埼玉県	2017/7/24～28	理化学部員	1
平成 29 年度貝毒分析研修会	神奈川県	2017/10/3～10	理化学部員	1
平成 29 年度指定薬物分析研修会	東京都	2017/10/13	理化学部員	1
平成 29 年度地衛研全国協議会衛生理化学分野研修会	東京都	2018/1/26	理化学部員	1
放射線障害の防止に関する法令改正の説明会 (原子力規制庁)	宮城県	2018/2/23	理化学部員	1
平成 29 年度機器分析研修	埼玉県	2017/5/18～6/2	公害部員	1
大気環境学会関東支部講演会	東京都	2017/6/2	公害部員	1
光化学オキシダント自動計測器の校正に係る研修	山形県	2017/6/16	公害部員	1
Dionex IC 技術説明会 (2017)	宮城県	2017/6/29	公害部員	1
音環境セミナー	東京都	2017/7/12～13	公害部員	1
平成 29 年度環境モニタリング技術研修 (水質コース)	埼玉県	2017/8/29～31	公害部員	1
水銀大気排出規制に係る水銀測定法等に関する説明会	東京都	2018/2/7	公害部員	1
平成 29 年度全環研北海道・東北支部事業 IoT の環境計測への適用セミナー	新潟県	2018/2/23	公害部員	1
平成 29 年度環境測定分析統一精度管理調査 結果説明会	東京都	2018/2/28	公害部員	1

III 研究報告

1 報 文

十二湖青池の呈色機構に関する研究 (第四報) : 青色呈色のシミュレーション

花石竜治 大坂直人¹ 知北和久²

十二湖青池の青色呈色のシミュレーションの方法およびその結果について報告する。水以外に呈色要因がなく、湖内における散乱光と湖底からの乱反射光が存在すると仮定して計算したところ、散乱光の寄与は乱反射光のそれに比べて無視でき、シミュレーションは、直達および散乱日射条件で、湖面の青色呈色を色調・明暗の不均一性とともによく再現した。さらに、湖面の定点での年間の暦日・時刻に関して呈色を示す「青池カラーチャート」を提案し、観測方位や最大水深の仮定の違いが青色呈色に与える影響を検討した。最後に、直達日射条件で湖面輝度は午前中に極大となることを示した。

Key words: Simulation, Aoike Pond, Coloration, Absorption of light, Aoike color chart

1. 緒言

湖沼の呈色は、多くの陸水学者の関心を引く問題である。それに関与する因子として、湖内での光吸収および光散乱が挙げられ、Kirk¹⁾は、前者の構成要素を水そのものの光吸収、溶存態黄色物質、植物プランクトンおよび非生物粒状物質として分類した。また、Jerlov²⁾およびKirk¹⁾は水質の吸収スペクトルによりその光学的分類を行った。

水域の呈色の計算方法について、Jerlov²⁾はその教科書でスペクトルからのC.I.E.標準表色系の等色関数の方法による色調計算法を総括した。また、Kirk¹⁾はモンテ・カルロ法を挙げ、水中における光の挙動の考察の原理を述べている。

陸水において、水質の光吸収のうち水によるものだけを考えればよいという例は希ではあるが存在し、その美しい青色ゆえにアメリカ合衆国の国立公園にもなっているCrater湖が一例と指摘されている^{1), 3), 4)}。Smithらは、Crater湖における実測の上向き放射強度スペクトルから、等色関数の方法でCrater湖の青色色調を算出し、色度図上にプロットした⁴⁾。

さて、本論文で研究対象とする、青森県深浦町の世界自然遺産白神山地山麓に位置する十二湖青池(あおいけ、図1参照)は、「万年筆の青インクを水に落としたよう」と形容される青色を呈し、津軽国定公園にあって青森県西海岸の観光地の一

つとなっており、その青色の原因は未解明とされてきた⁵⁾。

国内の青色呈色を示す湖沼については高貝⁶⁾により総括されており、その例として、原因が鉱物粒子のアロフェンによる福島県の「五色沼」、火山性鉱物粒子のケイ酸アルミニウムの光散乱で青く見えると推定される北海道美瑛町の「青い池」が挙げられ、青森県深浦町の青池については透明度が極めて高いと指摘されている。

青池は最大水深8.8mかつ透明度が全透⁷⁾と報告されている。また水理的には湧水が湖水の供給源であり、その流量は、無風時に湖面上にさざ波が観察され、また、伏流して湧出する鶏頭場ノ池(けとばのいけ)の湖面を波立たせる程度であって、越口ノ池(こいくちのいけ)湖群の水源である⁸⁾とされる。

吉村⁹⁾は、青池の水温は夏季でも全層で約10℃で、溶存酸素は不飽和であると報告した。また、既往の水質調査¹⁰⁾⁻¹²⁾の中で、工藤らは¹¹⁾水質の特徴として、栄養塩類に関しては中栄養湖に分類されるが、クロロフィル-a濃度が極めて低いことを報告している。これらのことを上記の水理的現象と考え合わせれば、青池は湖水の滞留時間が短く、植物プランクトンが増殖できない条件となっていると推定される。また高松らは、青池の呈色機構について、水による光吸収を基調としレ

1 青森県原子力センター

2 北海道大学大学院 理学研究院 地球惑星科学部門・地球惑星ダイナミクス分野

イリー散乱が関与している¹³⁾とした。

筆者らが2016年度に水質調査を行った¹⁴⁾ところ、着色に寄与する金属類元素および無機陰イオンは検出されなかった。さらに2017年度には、可視光吸収スペクトル測定^{15), 16)}を行い、青池における可視領域の光吸収は水によるものに限るという結論に達した。

本論文で著者らは、青池は水による光吸収が際立つ例と考え、散乱光とともに湖底からの反射光

も呈色要因としての可能性があるかと推定した。Kirk¹⁾は、水底が浅い場合に上向き放射照度に水底からの反射の寄与があることを指摘している。

本研究は、青池について上述の因子を含めて呈色機構をシミュレーションにより解明することを目的とした。その結果、呈色のシミュレーション方法を確立し、それを適用して検討したので報告する。

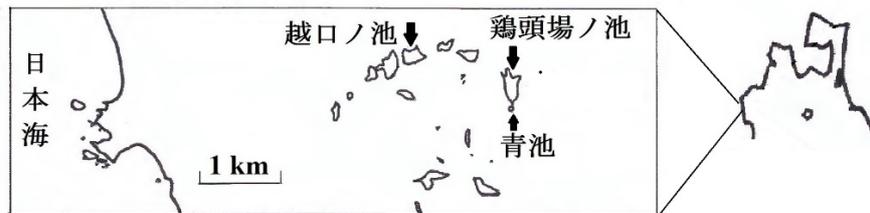


図1 青池の位置図

2. シミュレーションの理論構築の前提:「木漏れ日」観測から

2018年度の調査で、青池の湖面上にある木の枝から木漏れ日が青池に入射する画像を撮影できた。図2に2018年7月24日15:52に撮影した木漏れ日の画像を示す。



(a) 原図



(b) 原図からコントラストを増加し描画
図2 青池における「木漏れ日」の画像

図2のとおり、湖内で光の通過跡が認められ、これは、太陽光が湖内に入射して湖内で散乱光を

発していることを示した。その最後の場所が青白く光っており、これは湖底に十分な強さの光が届いたからであり、湖底における光反射の証拠であった。

筆者らは、これまで、青池湖水は懸濁物質(SS)が極めて低濃度であるという調査結果¹⁴⁾から、懸濁微粒子等による散乱光は無視できると考え、青池の青色呈色原因は水による光吸収によるもので、湖底からの反射によるという仮説を提唱¹⁴⁾し、かつそれを支持する分光学的測定結果を得ていた¹⁶⁾。

そして、2018年度は「木漏れ日」において湖底からの反射光を観測した。このことは従来仮説を支持する観測結果であった。しかし同時に、湖内光路に沿って散乱光も観測されたことから、湖内における光散乱の寄与も可能性として考慮する必要が生じた。

湖底における反射と湖内における光散乱は、青池における光挙動を考える上で主要なものであり、反射光だけを考慮した従来仮説を再検討する段階に至った。

3. シミュレーション理論

3.1 青池の呈色に関する条件

呈色のシミュレーションを行うにあたり、青池が一般的な池や湖沼と異なる点を挙げる。

1) 懸濁物や着色性の溶質が希薄であるということ。

- 2) 湖底の岩石が灰白色を呈する十二湖凝灰岩（新生代新第三紀中新世^{17)・19)}からなると推定され、湖底で光が反射される条件。
- 3) 湖盆形態が吉村ら⁸⁾の報告にある「漏斗型」をしているということ。

なお、青池は山の中の急峻な崖に囲まれた池であり、周囲に複数の観測点を設けることは困難である。物理現象のモデルには一般性が求められるが、本論文に記述した限られた観測条件を再現するパラメータを求められることを確認して、モデル化が達成されると判断する。

3.2 シミュレーションにおけるモデルおよび仮定

シミュレーションの考え方は次のとおりである。

- ① 青池の湖盆形態を回転放物面と近似する。
- ② 光の減衰は、湖内透過中の水の吸光係数²⁰⁾により波長依存の光吸収による減衰を受ける。また、波長に依存しない光散乱を受け、それにより光路進行方向での光強度が減衰を受ける。なお、湖面での入射時および射出時にフレネルの反射透過係数^{21)・23)}で波長によらず減衰するものとする。
- ③ 滑らかと仮定した湖底における反射光ベクトルは、内積を用いた反射光ベクトルの算出法により、また、湖面での屈折は、長谷川の光線屈折式²⁴⁾による。
- ④ 湖底における乱反射光を次のように仮定する。乱反射光の方向ベクトルは、滑らかと仮定した湖底における反射光ベクトルから派生するとし、乱反射光ベクトルの強度は、その反射光ベクトルへの正射影と仮定する。入射光をスペクトルに構造を持った直達日射光あるいは散乱日射光とし、湖内を透過し、白色的（波長によらず一定）と仮定された分光反射率を有する湖底で乱反射され、湖内を透過し、1回だけ反射した光が湖面から射出し観測点に届くと仮定する。観測点から見た湖底からの反射光は、湖底の各点からの寄与の面積素片の大きさにより重み付けした和とする。この面積素片に対応し、乱反射によって湖面上への面積素片の射影を得て観測点から見た立体角を計算する。
- ⑤ 湖内における光散乱は次のように仮定する。散乱が1回だけ起こると仮定する。湖底の面積素片の湖面への射影を大きさとして持つ点

を湖内の光散乱点として、離散的な散乱点を設定する。湖内の各散乱点からの寄与の和を、対応する湖底点における面積素片の大きさを射影した値で重み付けした和とする。この面積素片に対応し、観測点から見た立体角を計算する。

- ⑥ 直達日射のスペクトル強度は、北海道長沼町における NEDO（新エネルギー・産業技術総合開発機構）の観測結果²⁵⁾を集計した結果を用いる。
- ⑦ 散乱日射のスペクトル強度は、同じくこの北海道長沼町における測定結果²⁵⁾を集計した結果を用いる。この場合の全天からの放射の太陽高度・方位角依存性も、同じくこの集計結果を用いる。
- ⑧ 直達日射でも散乱日射でも、観測点に届く光の経路の中で、湖面上で射出する点を中心に、水平方向の二次元正規分布の強度分布を与えるものとする。

3.3 直達日射の場合の光強度の算出理論

3.3.1 計算の前提

高度 θ 、方位角 ϕ （北→東→南→西→北の向きに設定する。）の太陽光が入射する湖面上の点を $T_2(x_2, y_2, 0)$ とし、この光が回転放物面の湖底上の点 $T_1(x_1, y_1, z_1)$ で反射されるとする。

反射が乱反射として起きることを考慮するため、湖底の面積素片 ΔS において、滑らかな湖底を仮定して得た反射光ベクトルから派生する方向ベクトルが湖底での乱反射光の方向を与えるとする。

この乱反射光ベクトルの光線が湖面上の点 $T_3(x_3, y_3, 0)$ で射出されて、観測点 $H(-(r+w)\sin\eta, -(r+w)\cos\eta, h)$ に届くとする。ここで、 r は湖面の円の半径を、 w は湖岸から観測点までの水平方向の距離を、 η は展望台の方角で真西から真北方向への方位角を、 h は湖面から観測点までの高さをそれぞれ表す。

また、散乱光については、湖内の点 $T_4(x_n, y_n, z_n)$ から発せられ、立体角の強度因子を乗せられて湖面から射出し、観測点に届くものとする。散乱は水中の微粒子による光散乱によるものと考えており、季節などにより変動する因子と考える。散乱の効果により、湖水を通過する光の強度が白色的に（光の波長によらず）減衰し、また一部が転換し散乱光として放射されると考え、散乱の強さに対する散乱による全立体角への散乱強度の割合である転換因子を想定する。

上記のモデルにより、湖底での乱反射については図 3(a) に示したフローで、散乱については図 3(b) で示したフローで計算を行った。図 4 に乱反

射の光路の概念図を、また図 5 には仮定した回転放物面モデルを示した。

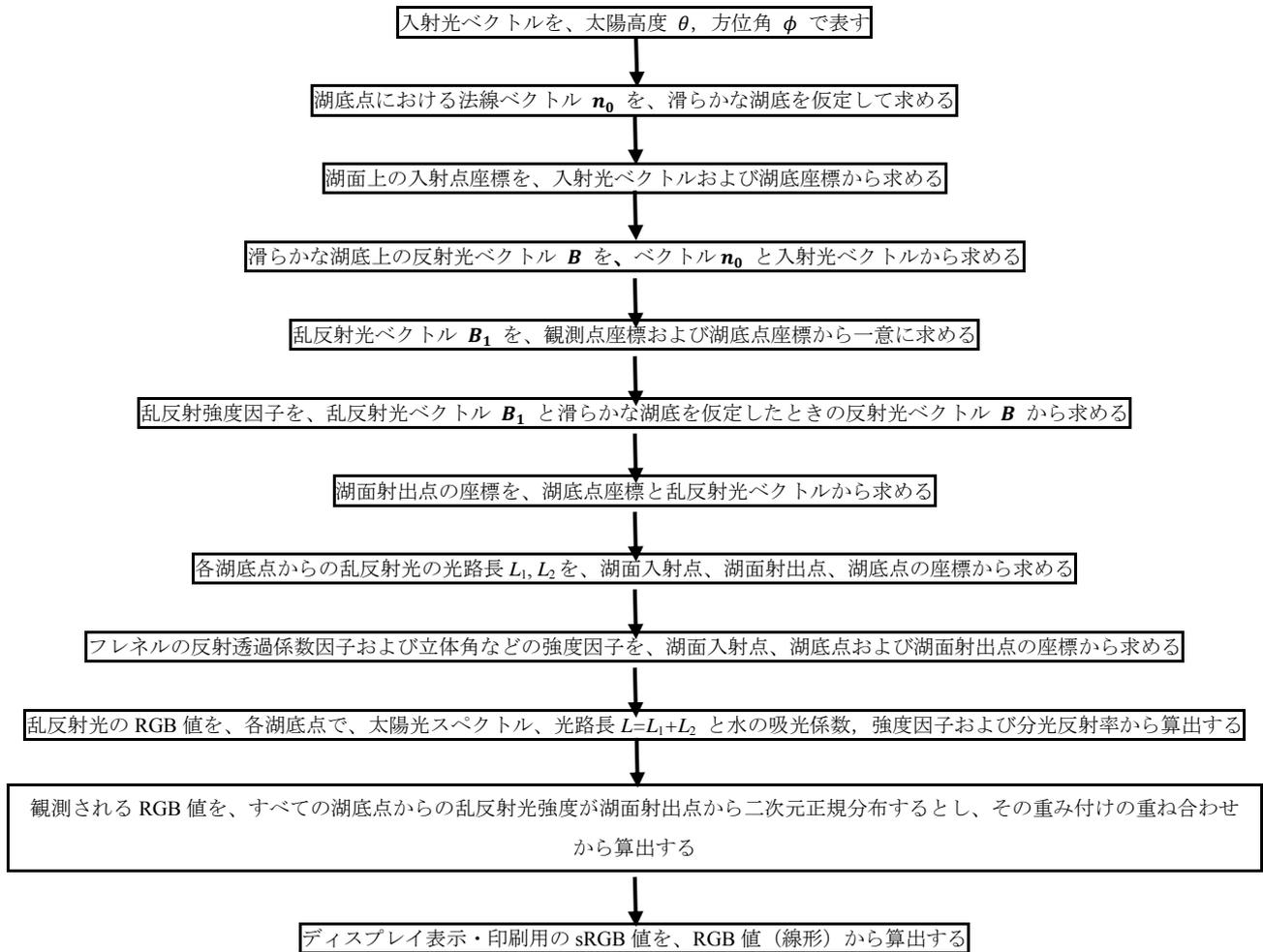


図 3(a) 青色呈色のシミュレーションのフロー。湖底での乱反射の場合

3.3.2 湖底における乱反射モデル

(1) 湖底における反射

図 5 の回転放物面の表面の表式は次式で表せる：

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{a^2} - (z + d) = 0$$

$$a = \frac{r}{\sqrt{d}}$$

点 $T_1(x_1, y_1, z_1)$ で回転放物面の表面に接する平面（接平面）の法線ベクトルは、半楕円球の内側を向くので、偏微分を用いて

$$\mathbf{n}' = (-2x_1, -2y_1, a^2)$$

これを規格化したベクトルを \mathbf{n}_0 とする。

(2) 光線屈折式による屈折の扱い²⁴⁾

「光線屈折式」（スネルの屈折の法則の三次元拡張版）をベクトルで表示した長谷川の式²⁴⁾を用いる。

太陽光が湖面に入射する方向の単位ベクトルを \mathbf{A}' とすると、 θ 、 ϕ を用いて次のように表せる。ここで前者は太陽高度の角度、後者は方位角であり、北 (0) → 東 → 南 (π) → 西 → 北の向きに取る。

$$\mathbf{A}' = (\cos\theta\cos\phi, -\cos\theta\sin\phi, -\sin\theta)$$

\mathbf{A}' の成分として長谷川の式により、湖面から水中（大気→水）へ入射した方向の単位ベクトル \mathbf{A}''

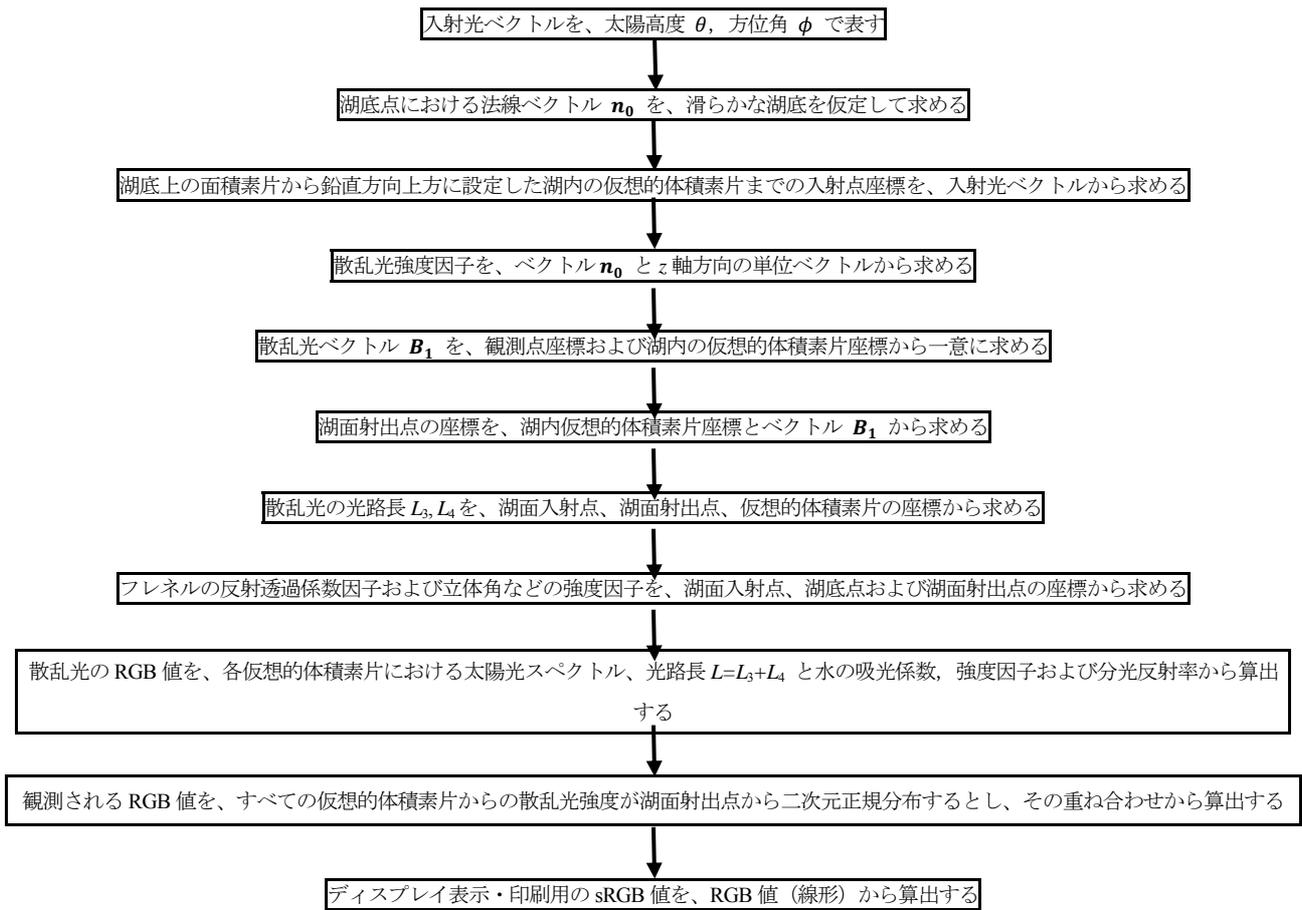


図 3 (b) 青色呈色のシミュレーションのフロー。湖内における散乱光の場合

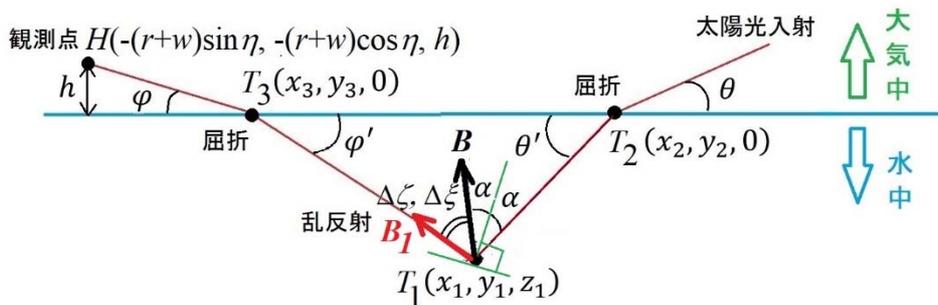


図 4 青池における乱反射光の光路の概念図

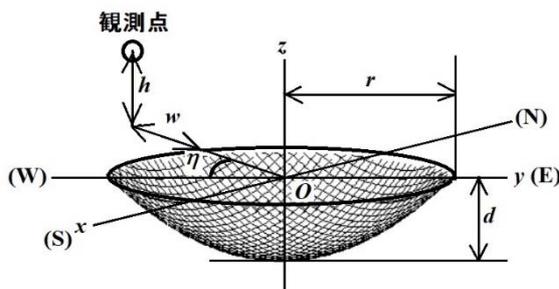


図 5 仮定した回転放物面モデル

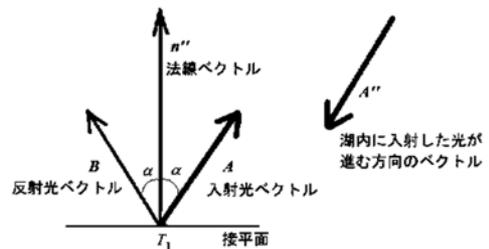


図 6 湖底での反射に関するベクトル図

を得る。ここで n_{12} は、空気に対する水の相対屈折率である。

$$\mathbf{A}'' = \left(\frac{\cos\theta\cos\phi}{n_{12}}, -\frac{\cos\theta\sin\phi}{n_{12}}, -\sqrt{1 - \frac{1}{n_{12}^2}\cos^2\theta} \right)$$

$$:= (X, Y, Z)$$

…(1)

次いで、 T_2 の座標に関する次の等式を得る。

$$x_2 = x_1 - \frac{z_1}{Z}X$$

$$y_2 = y_1 - \frac{z_1}{Z}Y$$

(3) 湖底での反射の扱い

図 6 に示したように、ベクトル \mathbf{A}'' の逆ベクトル (以下「入射光ベクトル」という。) を \mathbf{A} とし、湖底上の点 $T_1(x_1, y_1, z_1)$ で反射した光が進む方向の単位ベクトル (以下「反射光ベクトル」という。) を \mathbf{B} とすると、入射光ベクトル \mathbf{A} は式 (1) により、

$$\mathbf{A} = -\mathbf{A}''$$

$$= \left(-\frac{\cos\theta\cos\phi}{n_{12}}, \frac{\cos\theta\sin\phi}{n_{12}}, \sqrt{1 - \frac{1}{n_{12}^2}\cos^2\theta} \right)$$

ベクトル \mathbf{A} と \mathbf{n}_0 のなす角を α とすると、ベクトルの内積を用いて、

$$\cos\alpha = \mathbf{A} \cdot \mathbf{n}_0$$

反射の法則により、 \mathbf{n}_0 を用いて \mathbf{n}'' を次式で表せる。

$$\mathbf{n}'' = (2\cos\alpha)\mathbf{n}_0$$

また、

$$\mathbf{n}'' = \mathbf{A} + \mathbf{B}$$

から次式が成り立つ。

$$\mathbf{B} = \mathbf{n}'' - \mathbf{A} = 2(\mathbf{A} \cdot \mathbf{n}_0)\mathbf{n}_0 - \mathbf{A}$$

(4) 粗度を持つ湖底での乱反射の考慮

乱反射光強度は乱反射光ベクトル \mathbf{B}_1 を決定し、この成分と、滑らかな湖面を仮定した反射光ベクトル \mathbf{B} の成分から、正射影による強度を求めることができる。

湖底点 $T_1(x_1, y_1, z_1)$ と湖面上の射出点 $T_3(x_3, y_3, 0)$ とから、乱反射光ベクトル $\mathbf{B}_1 = (b_{1x}, b_{1y}, b_{1z})$ との間に以下の等式が成り立つ。

$$\frac{x_3 - x_1}{b_{1x}} = \frac{y_3 - y_1}{b_{1y}} = \frac{-z_1}{b_{1z}}$$

…(2)

また、観測点 $T_4(x_4, y_4, z_4)$ とすると、

$$x_4 = -(r + w)\sin\eta$$

$$y_4 = -(r + w)\cos\eta$$

$$z_4 = h$$

であり、射出後の方向ベクトルから、

$$\frac{x_4 - x_3}{n_{12}b_{1x}} = \frac{y_4 - y_3}{n_{12}b_{1y}} = \frac{z_4}{n_{12}\sqrt{\frac{1}{n_{12}^2} - 1 + b_{1z}^2}}$$

…(3)

が成り立つ。式 (2)、式 (3) およびベクトル \mathbf{B}_1 の規格化条件から、

$$X = \sqrt{\frac{1}{n_{12}^2} - 1 + b_{1z}^2}$$

とすると、解くべき代数方程式は

$$\left[\left(X^2 - \frac{1}{n_{12}^2} \right) \left\{ X^2 (z_1^2 + z_4^2) + \left(1 - \frac{1}{n_{12}^2} \right) z_4^2 \right\} + X^2 \left(-\frac{1}{n_{12}^2} + X^2 + 1 \right) \{ (x_1 - x_4)^2 + (y_1 - y_4)^2 \} \right]^2 - 4X^2 \left(X^2 - \frac{1}{n_{12}^2} \right)^2 \left(-\frac{1}{n_{12}^2} + X^2 + 1 \right) z_1^2 z_4^2 = 0 \quad \dots(4)$$

方程式 (4) は、 X^2 についての四次方程式となる。その方程式の係数は、複雑すぎるのでここでは記述を略すが、数式処理ソフトにより計算コード内に記述し、数値的に求め、四次方程式を DKA 法により数値的に解く。解は正の実解で、これから $0 < b_{1z} \leq 1$ なる b_{1z} を得る。これと式 (2) および式 (3) から b_{1x}, b_{1y} を得て、乱反射光ベクトルを求める。

(5) 湖面からの射出における扱い (水→大気)

前項の扱いにより、湖面上の光射出点 $T_3(x_3, y_3, 0)$ に関する次の等式を得る。

$$x_3 = x_1 - \frac{z_1}{b_{1z}} b_{1x}$$

$$y_3 = y_1 - \frac{z_1}{b_{1z}} b_{1y}$$

(6) 光路長の計算

以下、光路長について、湖内への進入後から反射までの線分 T_1T_2 を L_1 、反射後から湖面での射出までの線分 T_1T_3 を L_2 とすると、 L_1, L_2 を次式で表せる。

$$L_1 = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + z_1^2} = \frac{z_1}{Z}$$

$$L_2 = \sqrt{(x_3 - x_1)^2 + (y_3 - y_1)^2 + z_1^2} = -\frac{z_1}{b_{1z}}$$

(7) フレネルの反射透過係数の考慮

光の湖面への入射、湖面からの射出においては、すべて屈折するのではなく、光の角度に依存した因子で湖面で反射することによって、入射・射出光の光強度を減じる。この効果をフレネルの反射透過係数^{21)・23)}により考慮する。

(8) 光路の制限因子

寄与する光路に次なる 3 条件を課して制限を設ける。

- ① 湖底での反射で、観測点から見て逆方向の反射がないこと。

この条件は、 \mathbf{A} を入射光ベクトル、 \mathbf{B}_1 を乱反射光ベクトルとし、これらのなす角を γ とすると、条件が $\gamma < \pi/2$ であることから、

$$\cos\gamma = \mathbf{A} \cdot \mathbf{B}_1 \geq 0$$

となる。

- ② 滑らかな湖底を仮定したときの法線ベクトルと乱反射光ベクトルのなす角が $\pi/2$ 以下であること。

この条件は、法線ベクトルを \mathbf{n}_0 、なす角を κ とすると、

$$\cos\kappa = \mathbf{n}_0 \cdot \mathbf{B}_1 \geq 0$$

となる。

- ③ 崖による光路制限

青池周囲は急峻な崖に覆われており、低高度の太陽光入射が制限される状況にある。

よって、数値計算上の仮定として、高さ $\xi = 10 \text{ m}$ 、傾斜角 $\delta = 60^\circ$ の崖が湖岸を囲むとした。

以下、二つの場合分けを行い、崖の効果を計算に組み入れる。

- (ア) 崖の角度 δ が太陽高度 θ よりも大きい場合

図 7 に様相を示す。

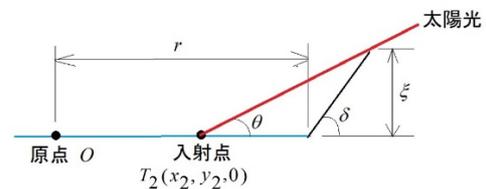


図 7 崖の角度が太陽高度よりも大きい場合の概念図

入射点と湖岸との距離は $r = \sqrt{x_2^2 + y_2^2}$ であり、湖岸と崖の最上方の動径方向の距離が $\xi/\tan\delta$ であるから、条件として次を満たす必要がある。

$$\frac{\xi}{r - \sqrt{x_2^2 + y_2^2} + \frac{\xi}{\tan\delta}} < \tan\theta$$

(イ) 崖の角度 δ が太陽高度 θ よりも小さい場合

図8に様相を示す。この場合には、 δ より大きい全ての θ について、無条件に入射することになる。

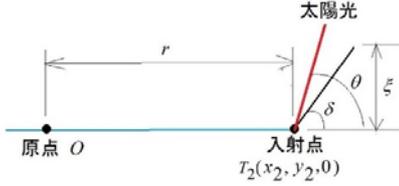


図8 崖の角度が太陽高度よりも小さい場合の概念図

(9) 観測点における光強度についての因子

図9に、湖底における反射光が観測されるまでの軌跡を示した。ここで、 ΔS は湖底における面積素片、 $\Delta S'$ はその水平面内への射影である。

ベクトルは \mathbf{n}_0 が面積素片 ΔS の法線ベクトル、 \mathbf{B}_1 が乱反射光ベクトル、 \mathbf{B}_2 がその湖面射出後の方向ベクトル、 \mathbf{k} が z 軸方向の単位ベクトルである。

また角度は、 θ が \mathbf{n}_0 と \mathbf{B}_1 のなす角、 θ' が \mathbf{k} と \mathbf{n}_0 のなす角、 ϕ が \mathbf{B}_2 と \mathbf{k} のなす角、 θ''' が \mathbf{n}_0 と入射光ベクトル \mathbf{A} のなす角である。これらの角度は、これら単位ベクトルの成分を用いた内積表示から求めることができる。

$$\begin{aligned} \mathbf{B}_1 &= (b_{1x}, b_{1y}, b_{1z}) \\ \mathbf{B}_2 &= \left(n_{12}b_{1x}, n_{12}b_{1y}, n_{12}\sqrt{\frac{1}{n_{12}^2} - 1 + b_{1z}^2} \right) \end{aligned} \quad \dots(5)$$

角度とベクトルの関係は、以下に示すとおりである (図9参照)。

$$\begin{aligned} \cos\theta &= \mathbf{n}_0 \cdot \mathbf{B}_1 \\ \cos\theta' &= \mathbf{B}_1 \cdot \mathbf{k} \\ \cos\phi &= \mathbf{B}_2 \cdot \mathbf{k} \\ \cos\theta''' &= \mathbf{n}_0 \cdot \mathbf{A} \end{aligned} \quad \dots(6)$$

湖面での入射および射出に関して、フレネルの反射透過係数をそれぞれ $D(\theta, \theta')$ 、 $D(\varphi', \varphi)$ (無次元) (図4参照) と仮定し、光線の強度因子を求める。

また、波長 λ_i における分光反射率 $\rho(\lambda_i)$ ($0 \leq \rho(\lambda_i) \leq 1$, 無次元) が白色的で、

$$\rho = \rho(\lambda_i)$$

であると仮定する。

湖底の面積素片に入射する太陽光は平行光線であるから、湖面上の射出点において湖底での面積素片を水平面に投影した $\Delta S'$ までは、平行光線の挙動となる。

湖面射出以後について幾何光学の考察を行う。文献²⁶⁾により、光束がなす立体角およびフレネルの反射透過係数、面積素片の補正による因子 ΔQ_R を考慮する。

$$\Delta Q_R = \frac{\Delta S \cdot \cos\theta \cdot \cos\phi \cdot \cos\theta'''}{R^2 \cos\theta'} D(\theta, \theta') D(\varphi', \varphi) \rho \quad \dots(7)$$

ここで、 R は、湖面上の面積素片の投影 $\Delta S'$ から観測点までの距離であり、

$$R = \sqrt{(x_4 - x_3)^2 + (y_4 - y_3)^2 + z_4^2}$$

また、式(7)においては、両辺の次元は [立体角]¹となる。

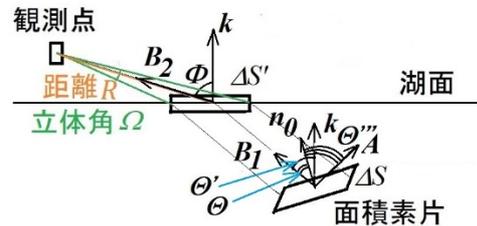


図9 湖底における乱反射を考える場合の面積素片

(10) 乱反射強度の考慮

項3.3.2(3)で考察した滑らかな湖底を仮定して得た反射光ベクトルを $\mathbf{B} = (B_x, B_y, B_z)$ とする。また、乱反射光 $\mathbf{B}_1 = (b_{1x}, b_{1y}, b_{1z})$ とする。強度因子は、乱反射光ベクトルの反射光ベクトルへの正射影と考える。これはベクトルの内積の式から求める

ことができる。求める強度因子 T は無次元で、

$$T = \mathbf{B} \cdot \mathbf{B}_1 = B_x b_{1x} + B_y b_{1y} + B_z b_{1z}$$

となり、乗算因子となる。

(11) 面積素片の媒介変数表示

回転放物面の湖底点 $T_1(x_1, y_1, z_1)$ の直交座標を媒介変数表示すると、

$$\begin{aligned} x_1 &= r t \cos \psi \\ y_1 &= r t \sin \psi \\ z_1 &= d(t^2 - 1) \end{aligned}$$

ここで、 $0 \leq \psi < 2\pi$ 、 $0 \leq t \leq 1$ である。湖底の面積素片 ΔS は、ヤコビアンおよび二重積分の面積分への変換を求めると

$$\Delta S = \sqrt{r^2 + 4d^2 t^2} r t \Delta \psi \Delta t \quad \dots(8)$$

となる。

3.3.3 水中での光散乱モデル

(1) 散乱点設定のための仮想的な湖底の面積素片

図 10 に、散乱点を考える場合の概念図を示した。

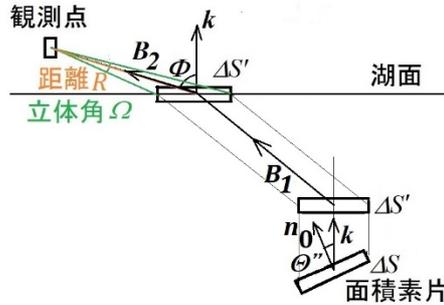


図 10 湖内における光散乱を考える場合の面積素片

仮想的な湖底の面積素片 ΔS から鉛直方向上方に水平面へ射影した面積素片 $\Delta S'$ を考えると

$$\begin{aligned} \Delta S' &= \Delta S \cdot \cos \theta'' \\ \cos \theta'' &= \mathbf{n}_0 \cdot \mathbf{k} \end{aligned}$$

であり、ベクトルの意味は式 (6) と同じである。

湖内における面積素片の直交座標を $T_4(x_n, y_n, z_n)$ とすると、対応する湖底の座標

(x_1, y_1, z_1) から、湖底での面積素片の式を得る。ここで、

$$\begin{aligned} x_n &= x_1 \\ y_n &= y_1 \end{aligned}$$

である。

湖内での光散乱の場合には、湖底からの乱反射の場合に比べて、面積素片に乗ぜられる因子が変わる。フレネルの反射透過係数を $D(\theta, \theta')$ 、 $D(\varphi', \varphi)$ と仮定し、光線の強度を求める。湖底の面積素片に入射する太陽光は平行光線であるから、湖面上の射出点において湖底での面積素片を水平面に投影した $\Delta S'$ までは、平行光線の挙動となる。

湖面射出以後について幾何光学の考察を行う。文献²⁶⁾により、強度因子 ΔQ_S を考慮する。

$$\Delta Q_S = \frac{\Delta S \cdot \cos \theta'' \cdot \cos \phi}{R^2} D(\theta, \theta') D(\varphi', \varphi)$$

他の記号の意味は、式 (7) と同じである。 $\Delta S' = \Delta x \Delta y$ であり、鉛直方向の座標区間 Δz から、湖内水中における体積素片は $\Delta V = \Delta x \Delta y \Delta z$ であり、体積素片に対応した面積素片の補正による因子は $\Delta Q'_S = \Delta Q_S \Delta z$ となる。よって

$$\Delta Q'_S = \frac{\Delta S \cdot \cos \theta'' \cdot \cos \phi}{R^2} D(\theta, \theta') D(\varphi', \varphi) \Delta z \quad \dots(9)$$

上式で、 $\Delta Q'_S$ の次元は [立体角]²[長さ] である。

(2) 散乱による湖内における光量の指数関数的減衰と転換因子による散乱光強度

湖水中の微粒子による白色的光散乱の効果で、光路長に対して指数関数的に光強度が減衰すると仮定する。今、湖面入射点から散乱点までの光路長を L_3 、散乱点から湖面射出点までの光路長を L_4 とする。

光路長について、湖内への進入後から散乱点までの線分 $T_1 T_4$ を L_3 、散乱点から湖面での射出までの線分 $T_4 T_3$ を L_4 とすると、 L_3, L_4 は次式で表せる。

$$L_3 = \sqrt{(x_2 - x_n)^2 + (y_2 - y_n)^2 + z_n^2}$$

$$L_4 = \sqrt{(x_3 - x_n)^2 + (y_3 - y_n)^2 + z_n^2}$$

散乱による減衰の因子 S は、光の波長 λ_i において、この光路長を透過する水の光吸収の効果（吸光係数 $A(\lambda_i)$ ）も含み、

$$S \propto \exp\{-(L_3 + L_4)k\} \exp\{-(L_3 + L_4)A(\lambda_i)\}$$

ここで、パラメータ k は散乱強度因子である。散乱光が散乱による減衰の因子から転換因子 U （無次元、 $0 \leq U \leq 1$ ）により、放射されると仮定する。散乱光は全立体角に放射されるが、放射源と考えている体積素片 $\Delta V = \Delta x \Delta y \Delta z$ から、湖面上に射影された面積素片への放射強度は、減衰の因子に乘ずる転換因子 U により決まると考える。以上から散乱光強度因子は次式で与えられる。

$$S = U \cdot \exp\{-(L_3 + L_4)k\} \exp\{-(L_3 + L_4)A(\lambda_i)\}$$

上記 S は無次元である。

3.3.4 光強度の算出

(1) 湖底における乱反射による光強度の算出

光路長 $L = L_1 + L_2$ は太陽高度と方位角、湖底点

$$P_R(\lambda_i, \theta_j, \phi_k, x_1, y_1, z_1) = \beta K_m f(\lambda_i) T \Delta Q_R \cdot \exp\{-(L_1 + L_2)k\} \exp\{-(L_1 + L_2)A(\lambda_i)\} \quad \dots(10)$$

$$P_S''(\lambda_i, \theta_j, \phi_k, x_1, y_1, z_1) = \beta K_m f(\lambda_i) \Delta Q_S' U \cdot \exp\{-(L_3 + L_4)k\} \exp\{-(L_3 + L_4)A(\lambda_i)\} \quad \dots(11)$$

(3) 両方の寄与の考慮

式 (10) のうち $T, \Delta z$ は設定値から導き出せるが、湖底反射率 ρ および散乱での変換係数 U はパラメータの走査で決定することになる。また、式 (7) および式 (9) のうち、前者は次元が [立体角]⁻¹ であるが、後者は次元が [立体角]⁻¹[長さ] になっている。よって、式 (9) に次元が [長さ]⁻¹ の定数 $M = 1 \text{ m}^{-1}$ を乗じ、二式の次元を一致させる。これにより、式 (9) から次を得る。

$$\Delta Q_S' M = \frac{\Delta S \cdot \cos \theta'' \cdot \cos \Phi}{R^2} D(\theta, \theta') D(\varphi', \varphi) \Delta z M$$

$$\begin{aligned} P_R(\lambda_i, \theta_j, \phi_k, x_1, y_1, z_1) &= \beta K_m f(\lambda_i) T \frac{\Delta S \cdot \cos \theta \cdot \cos \Phi \cdot \cos \theta'''}{R^2 \cos \theta'} D(\theta_j, \theta_j') D(\varphi_{jk}', \varphi_{jk}) \cdot \rho \cdot \exp\{-(L_1 + L_2)k\} \exp\{-(L_1 + L_2)A(\lambda_i)\} \\ &:= \beta P_R'(\lambda_i, \theta_j, \phi_k, x_1, y_1, z_1) \end{aligned} \quad \dots(13)$$

の座標 $T_1(x_1, y_1, z_1)$ に依存する。

式(10)のとおり、観測点に到達する光強度 $P_R(\lambda_i, \theta_j, \phi_k, x_1, y_1, z_1)$ は、離散的に取った波長 λ_i 、太陽高度 θ_j 、方位角 ϕ_k 、水の吸光係数 $A(\lambda_i)$ (次元: [長さ]⁻¹) と光路長 L 、直達日射時の光強度 $f(\lambda_i)$ (次元: [仕事率][面積]⁻¹[波長]⁻¹)、フレネルの反射透過係数および観測時の立体角の効果、面積素片の補正を考慮した ΔQ_R (次元: [立体角]⁻¹) の因子を含み、表される。パラメータ $K_m = 683 \text{ lm/W}$ (次元: [光束][仕事率]⁻¹) は放射量から測光量への変換係数である。全体的な乗算因子は β (次元: [輝度]⁻¹) である。

(2) 湖内における光散乱による光強度の算出

式 (11) のとおり観測点に到達する光強度 $P_S''(\lambda_i, \theta_j, \phi_k, x_1, y_1, z_1)$ (次元: [波長]⁻¹[長さ]) は、湖底における乱反射を考えたときと同様に、光路長 $L = L_3 + L_4$ 、散乱光強度因子 S (無次元) および面積素片の補正を考慮した $\Delta Q_S'$ (次元: [立体角]⁻¹[長さ]) の因子を含み、表される。全体的な乗算因子は β (次元: [輝度]⁻¹) である。

さて、式 (10) および (11) において、共通の乗算因子 β があることから、

$$Reffac = \frac{\rho}{U} \quad \dots(12)$$

で定義される因子 (無次元) を定義し、以下の式で光強度式 (10) および式 (11) を書き直す。

$$\begin{aligned}
& P_S(\lambda_i, \theta_j, \phi_k, x_1, y_1, z_1) \\
&= \beta K_m f(\lambda_i) \frac{\Delta S \cdot \cos\theta'' \cdot \cos\phi}{R^2} D(\theta_j, \theta_j') D(\varphi'_{jk}, \varphi_{jk}) \Delta z M \cdot \frac{\rho}{Reffac} \cdot \exp\{-(L_3 + L_4)k\} \exp\{-(L_3 + L_4)A(\lambda_i)\} \\
&:= \beta P'_S(\lambda_i, \theta_j, \phi_k, x_1, y_1, z_1)
\end{aligned} \tag{14}$$

ここで、 $P'_R(\lambda_i, \theta_j, \phi_k, x_1, y_1, z_1)$ および $P'_S(\lambda_i, \theta_j, \phi_k, x_1, y_1, z_1)$ は次元が [輝度][波長]⁻¹ である。

以上により、湖底における乱反射および湖内における光散乱の効果の双方を考慮した観測される光強度の式として次式（次元：[波長]⁻¹）を得る。

$$\begin{aligned}
& P(\lambda_i, \theta_j, \phi_k, x_1, y_1, z_1) \\
&= P_R(\lambda_i, \theta_j, \phi_k, x_1, y_1, z_1) + P_S(\lambda_i, \theta_j, \phi_k, x_1, y_1, z_1) \\
&= \beta P'_R(\lambda_i, \theta_j, \phi_k, x_1, y_1, z_1) \\
&\quad + \beta P'_S(\lambda_i, \theta_j, \phi_k, x_1, y_1, z_1)
\end{aligned} \tag{15}$$

$$\begin{aligned}
& P(\lambda_i, \theta_j, \phi_k, x_1, y_1, z_1) \\
&= P_R(\lambda_i, \theta_j, \phi_k, x_1, y_1, z_1) \\
&= \beta K_m f(\lambda_i) T \frac{\Delta S \cdot \cos\theta \cdot \cos\phi \cdot \cos\theta'''}{R^2 \cos\theta'} D(\theta_j, \theta_j') D(\varphi'_{jk}, \varphi_{jk}) \cdot \rho \cdot \exp\{-(L_1 + L_2)k\} \exp\{-(L_1 + L_2)A(\lambda_i)\}
\end{aligned} \tag{17}$$

となる。

なお、前段で、次元が [長さ]⁻¹ のパラメータ M を定義し使用した。式 (13) および (14) を比較し、また、式 (16) から明らかなように、これは $Reffac$ と随伴する因子であり、パラメータ決定のときに、 $Reffac/M$ （次元：[長さ]）として決められ、 $M = 1 \text{ m}^{-1}$ から $Reffac$ を逆算していることに相当する。

3.3.5 太陽日照度の呈色計算への取り込み

直達日射の場合の太陽光放射量の考慮は、太陽光放射量 $f(\lambda_i)$ （次元：[仕事率][面積]⁻¹[波長]⁻¹）、等色関数 $\bar{y}(\lambda_i)$ （無次元）および測光量への変換係数 $K_m = 683 \text{ lm/W}$ から照度計算値 $E_{0,fine}$ （次元：[光束][面積]⁻¹）を式 (18) により求め、これと照度設定値 E （次元：[光束][面積]⁻¹）から得た β （次元：[輝度]⁻¹）が光強度を表す式 (13)、(14)、(17) に含まれる。

式 (15) で、湖内における光散乱の寄与が、湖底における乱反射に比べて無視できる場合、すなわち

$$\frac{\cos\theta \cdot \cos\theta'''}{\cos\theta'} \cdot T \gg \Delta z M \frac{\cos\theta''}{Reffac} \tag{16}$$

のとき第二項が無視でき、

$$\begin{aligned}
E_{0,fine} &= \sum_{\lambda_i} K_m f(\lambda_i) \bar{y}(\lambda_i) \Delta \lambda \\
\beta &= \beta_0 \frac{E}{E_{0,fine}}
\end{aligned} \tag{18}$$

上記で β_0 （次元：[輝度]⁻¹）は、スケーリングファクターを含む因子となる。これは画像解析で決定する。

3.3.6 湖面上の色調・濃淡の分布の考慮

次に、湖内透過光強度 $P(\lambda_i, \theta_j, \phi_k, x_1, y_1, z_1)$ と等色関数 $\bar{x}(\lambda_i)$ 、 $\bar{y}(\lambda_i)$ 、 $\bar{z}(\lambda_i)$ （無次元）との積の波長についての積分を、文献²⁷⁾掲載の等色関数値で離散的に行い、三刺激値 XYZ （無次元）を求め

$$\begin{aligned}
& X(\theta_j, \phi_k, x_1, y_1, z_1) \\
&= \sum_{\lambda_i} \bar{x}(\lambda_i) P_R(\lambda_i, \theta_j, \phi_k, x_1, y_1, z_1) \Delta \lambda
\end{aligned}$$

Y、Z についても同様である。

このようにして求めた三刺激値 XYZ から、線形変換²⁸⁾によって RGB 値 $R(\theta_j, \phi_k, x_1, y_1, z_1)$ 、 $G(\theta_j, \phi_k, x_1, y_1, z_1)$ 、 $B(\theta_j, \phi_k, x_1, y_1, z_1)$ (無次元) を算出する。

さて、光路長を求める際には、観測点に到達する光の湖面上における射出点の離散的座標 T_3 も取り扱う。ここで、 T_3 の x および y 座標が湖底点座標の関数であり、さらにこれらが媒介変数 ψ 、 t の関数であることを明示し、 $x_3(\theta_j, \phi_k, \psi_1, t_1)$ 、

$$R(\theta_j, \phi_k, x, y) = \sum_{\psi_1} \sum_{t_1} R(\theta_j, \phi_k, \psi_1, t_1) \frac{1}{2\pi\sigma^2} \exp \left[-\frac{\{x - x_3(\theta_j, \phi_k, \psi_1, t_1)\}^2 + \{y - y_3(\theta_j, \phi_k, \psi_1, t_1)\}^2}{2\sigma^2} \right]$$

緑、青についても同様である。

ここまでで求めた RGB 値は次元が [長さ]² である。実際の青池画像を解析して得たパラメータにより、上記の RGB 値を求める。また実際は、青池湖面上に 1 m × 1 m の単位面積区間のメッシュを切るのので、湖面上の平均輝度は、上記 $R(\theta_j, \phi_k, x, y)$ などを β_0 (次元: [輝度]⁻¹) で除算して、次元を [輝度][長さ]²=[輝度][面積]⁻¹ とし、湖面上の単位面積区間で和を取り求める (次元: [輝度]) ことができる。

最後にこの (線形) RGB 値から、JIS の規定にしたがって、sRGB 値に変換し、色の表示を行う。

3.4 散乱日射²⁹⁾⁻³³⁾ の場合の光強度の算出理論

基本的には、太陽高度および方位角で定まる光路長、散乱日射強度、およびそれらから定まる色調と

$y_3(\theta_j, \phi_k, \psi_1, t_1)$ と記述する。また RGB 値もこれらの媒介変数で表記し、 $R(\theta_j, \phi_k, \psi_1, t_1)$ 、 $G(\theta_j, \phi_k, \psi_1, t_1)$ 、 $B(\theta_j, \phi_k, \psi_1, t_1)$ とする。このとき、湖面上の座標 (x, y) において、 T_3 を中心として光が標準偏差 σ で二次元正規分布をし、考える光路の湖面における光強度が重ね合わせで寄与すると仮定する。例えば、赤色光強度 $R(\theta_j, \phi_k, x, y)$ (次元: [長さ]²) は次のように表す。

色の明暗を表す RGB 値を、離散的に取った θ_j 、 ϕ_k に関して和を取り表す。

散乱日射の場合の光強度 $c(\lambda_i)$ (次元: [仕事率][面積]⁻¹[波長]⁻¹) と、散乱光強度因子 $cint(\theta_j, \phi_k)$ (無次元) を

$$cint(\theta_j, \phi_k) = \sin\theta_j(a\phi_k^2 + b\phi_k + c) \quad \dots(19)$$

と仮定する。ここで a, b, c はパラメータであり、方位角 ϕ_k は、北 (0) → 東 → 南 (π) → 西の、天頂から見て時計回りの角度である。また、湖底における乱反射および湖内における光散乱の寄与を考慮し、観測点に到達する光強度 (次元: [波長]⁻¹) を、式 (13)、(14) にならひ、 $c(\lambda_i)$ を散乱日射の場合の太陽光強度として、次式のとおり表す。

$$\begin{aligned} P_{cloudy}(\lambda_i, \theta_j, \phi_k, x_1, y_1, z_1) &= P_{R,cloudy}(\lambda_i, \theta_j, \phi_k, x_1, y_1, z_1) + P_{S,cloudy}(\lambda_i, \theta_j, \phi_k, x_1, y_1, z_1) \\ &= \beta K_m c(\lambda_i) cint(\theta_j, \phi_k) T \frac{\Delta S \cdot \cos\theta \cdot \cos\Phi \cdot \cos\theta'''}{R^2 \cos\theta'} D(\theta_j, \theta_j') D(\varphi'_{jk}, \varphi_{jk}) \cdot \rho \\ &\quad \cdot \exp\{-(L_1 + L_2)k\} \exp\{-(L_1 + L_2)A(\lambda_i)\} \\ &\quad + \beta K_m c(\lambda_i) cint(\theta_j, \phi_k) \frac{\Delta S \cdot \cos\theta'' \cdot \cos\Phi}{R^2} D(\theta_j, \theta_j') D(\varphi'_{jk}, \varphi_{jk}) \Delta z M \frac{\rho}{Reffac} \\ &\quad \cdot \exp\{-(L_3 + L_4)k\} \exp\{-(L_3 + L_4)A(\lambda_i)\} \end{aligned} \quad \dots(20)$$

式 (20) を等色関数との積をとり波長についての積分により三刺激値 XYZ を得て、線形変換で RGB 表色系に移行し、 θ_j, ϕ_k の組み合わせで、湖面上の点 (x, y) における、次元が [長さ]² の RGB 値 $R'(\theta_j, \phi_k, x, y)$ 、 $G'(\theta_j, \phi_k, x, y)$ 、 $B'(\theta_j, \phi_k, x, y)$

を求める。

ここで、式 (20) で、湖内における光散乱の寄与が、湖底における乱反射に比べて無視できる場合、第二項が無視でき、

$$\begin{aligned}
& P_{cloudy}(\lambda_i, \theta_j, \phi_k, x_1, y_1, z_1) \\
& = P_{R,cloudy}(\lambda_i, \theta_j, \phi_k, x_1, y_1, z_1) \\
& = \beta K_m c(\lambda_i) \text{cint}(\theta_j, \phi_k) T \frac{\Delta S \cdot \cos\theta \cdot \cos\phi \cdot \cos\theta'''}{R^2 \cos\theta'} D(\theta_j, \theta_j') D(\phi_{jk}', \phi_{jk}) \cdot \rho \\
& \quad \cdot \exp\{-(L_1 + L_2)k\} \exp\{-(L_1 + L_2)A(\lambda_i)\}
\end{aligned} \tag{21}$$

となる。

これを全天で考慮するために、次式のとおり和を取り、散乱日射による次元が [長さ]² の RGB 値である $R''(x, y)$ 、 $G''(x, y)$ 、 $B''(x, y)$ を求める。

$$R''(x, y) = \frac{1}{n_\theta n_\phi} \sum_{\theta_j} \sum_{\phi_k} R'(\theta_j, \phi_k, x, y)$$

緑と青も同様である。ここで n_θ は太陽高度の角度の刻み数、 n_ϕ は太陽方位角の角度の刻み数である。直達日射の場合と同様に、最後に sRGB 値を求める。

散乱日射の場合の太陽光放射量の考慮は、太陽光放射量 $c(\lambda_i)$ 、等色関数 $\bar{y}(\lambda_i)$ および測光量への変換係数 $K_m = 683 \text{ lm/W}$ から照度計算値 $E_{0,cloudy}$ (次元: [光束][面積]⁻¹) を式 (22) により求め、これと照度設定値 E から得た β が光強度を表す式 (20)、(21) に含まれる。

$$\begin{aligned}
E_{0,cloudy} & = \sum_{\lambda_i} K_m c(\lambda_i) \bar{y}(\lambda_i) \Delta\lambda \\
\beta & = \beta_0 \frac{E}{E_{0,cloudy}}
\end{aligned} \tag{22}$$

ここまでで求めた RGB 値は次元が [長さ]² である。実際の青池画像を解析して得たパラメータにより、上記の RGB 値を求める。また実際は、青池湖面上に $1 \text{ m} \times 1 \text{ m}$ の単位面積区間のメッシュを切るので、湖面上の平均輝度は、上記 $R''(x, y)$ などを β_0 (次元: [輝度]⁻¹) で除算して、次元を [輝度][長さ]²=[輝度][面積]⁻¹ とし、湖面上の単位面積区間で和を取り求める (次元: [輝度]) ことができる。

最後にこの (線形) RGB 値から、JIS の規定にしたがって、sRGB 値に変換し、色の表示を行う。

4. 計算方法

4.1 「木漏れ日」解析

「木漏れ日」の画像の解析方法の概略を以下に示す。なお、解析に供すべき画素の RGB 値はこれら 3 種の色値があるが、B 値だけを解析した。G 値を省いたのは、バックグラウンドで G 値が大きく、真度の偏りが解析に影響を与えることが想定されたからである。

- ① デジタルカメラ画像から、木漏れ日の湖面上射出点の座標を計算する。
- ② (木漏れ日射出点座標) 観測位置の方位角 (真西からの偏角) からの逆回転により、湖面上射出点の座標を絶対座標系 (南: +x 軸, 東: +y 軸) で表す。
- ③ 日時から太陽光の高度・方位角を計算する。
- ④ (入射方向ベクトル) ③により、青池湖内に入射する木漏れ日の方向ベクトルを求める。
- ⑤ デジタルカメラ画像から、湖底からの光射出点の湖面上の座標を計算する。
- ⑥ (反射光射出点座標) ②と同様に、⑤を絶対座標系で表す。
- ⑦ 観測位置と⑥から、乱反射後の湖面から射出後の光の方向ベクトルを求める。
- ⑧ (反射光方向ベクトル) ⑦から湖面射出前の光 (乱反射光) の方向ベクトルを求める。
- ⑨ (湖底点座標) ⑥で求めた木漏れ日の反射光の湖面上の射出点座標と⑧で求めた方向ベクトルから、回転放物面上の湖底点座標の二次方程式を解き、湖底点座標を決定する。
- ⑩ (散乱光放射点座標) ここでは、入射後光線の直線と射出前光線の直線の交点である散乱光放射点座標を求める。光入射点の座標を⑨の湖底点座標と④の入射光の方向ベクトルから求め、光入射点の座標と入射光方向ベクトルの媒介変数表示と、光射出点の座標②と散乱光の方向ベクトルの媒介変数表示から、通過点座標 (湖面射出点) を同時に満たす座標を求める。未知変数である、方向ベクトルに乗ぜられる媒介変数 (二つ) で、3 本の overdetermined な連立一次方程式を、行列の特異値分解により最小

二乗解として求める。この解(媒介変数)から、二直線の交点である散乱光放射点の座標を決定する。

- ⑩ ⑩の散乱光放射点と反射光方向ベクトルから、木漏れ日入射点を決定する。
- ⑪ (光路長および散乱強度の計算) ⑩木漏れ日入射点座標、⑩散乱光放射点座標および②木漏れ日射出点座標から、木漏れ日を与える光の光路長を決定する。

上記の方法により、光散乱強度因子(項 3.3.3 における k) を決定できる。

4.2 青池画像の呈色分布解析と呈色の再現

青池の観測地点において、デジタルカメラ(Panasonic 社 DMC-LZ5)により湖面の画像を撮影した。その設定のうち、絞り、露出時間、ISO 感度が重要と考えられた。

本研究では、まず、直達日射時の撮影で得た画像を、上記3点の感度自動調整値から補正して標準化³³⁾し、比較可能な情報にした。次いで、湖面最奥部と展望台の定点の画像における位置から、位置を決定し、その周囲の色情報から、湖面における座標を計算し(<付録>参照)、その RGB 値を表計算ソフト用ファイルの情報として記述した。共通因子 β_0 、 σ 、 k および q と U の比 $Reffac$ を独立変数として、GB 値を従属変数とする最適化を行い、これら独立変数の値を決定した。

また、湖内光散乱が湖底における乱反射に比べてその寄与が無視できる場合、 β_0 、 σ 、 k を独立変数として、GB 値を従属変数とする最適化を行い、これら独立変数の値を決定した。

4.3 直達日射と散乱日射

4.3.1 直達および散乱日射の太陽光強度スペクトル

NEDO²⁵⁾による北海道長沼町における10分間毎の太陽光の測定結果を集計して、直達および散乱日射²⁹⁾⁻³²⁾のスペクトル強度および太陽高度・方位角依存性を得た。

$$\text{輝度} \propto \frac{1}{\beta_0} \{0.2126 \cdot R(\theta_j, \phi_k, x, y) + 0.7152 \cdot G(\theta_j, \phi_k, x, y) + 0.0722 \cdot B(\theta_j, \phi_k, x, y)\}$$

…(23)

4.3.4 シミュレーションに用いた日射強度の測定

青池湖岸は切り立った崖に囲まれ、日射の測定が

直達日射については花石ら¹⁶⁾によった。

散乱日射は、1年の中の各月で最も散乱比が高かったデータを用い、前述の直達日射のスペクトル評価法と同様に、12か月のスペクトルを求めた。

直達および散乱日射について、各月の光強度を、太陽高度を θ として、 $\sin\theta$ で除した強度について、550 nm における光強度で規格化し算術平均を取り、その後、因子を乗じて、シミュレーションに用いたスペクトル強度とした。

4.3.2 散乱日射の呈色計算への取り込み

NEDOによる北海道長沼町における2012年の1ヶ月毎の10分間毎(31日ならば4146個のデータ)の気象データとしての水平面日射強度および直達日射強度から、直達日射強度がゼロの場合の水平面日射強度(散乱日射強度)を日時とともに1年分抽出し(9716個のデータ)、集計した。

データの集計では、まず、散乱日射強度を $\sin\theta$ で除し、商 x を得て、それらから算術平均値 μ と標準偏差 s を求め、 $x < \mu - 2s$ あるいは $x > \mu + 2s$ のデータを棄却し、残ったデータから再度、算術平均値 μ と標準偏差 s を求め、 $x < \mu - 2s$ あるいは $x > \mu + 2s$ のデータを棄却してデータとした。その上で、 $x' = x/\mu$ の相対値について、二次多項式による最小二乗法を行い、式(19)の二次式の係数 a, b, c を得た。

4.3.3 散乱日射の場合の湖面の呈色計算

直達日射の計算では、湖底点からの乱反射光および湖内に想定した散乱点からの散乱光が湖面に分布し、重ね合わせで呈色を表現できたが、散乱日射の場合は、さらにそれらの重ね合わせで呈色を表現する必要がある。

RGB 表色系での呈色を考えると、湖面の同じ面積区間(水平面区間)に輝度の異なる光強度が存在した場合、輝度の高い方の光をその区間の呈色とする計算を行った。この場合の輝度とは、RGB 表色系から XYZ 表色系に移行した際の Y 値に比例し、次式で表される²⁸⁾。

不可能であったので、上空の見通しの良い物産館(青池より約 0.5 km 北)で直近に測定した値を用

いた。光度計は Zhangzhou WeiHua Electronic 社 LX-1010B を用いた。

4.4 「青池カラーチャート」の描画

以上の知見により、縦軸に月日、横軸に時刻を配し、それらの座標である日時における青池の呈色をプロットした「青池カラーチャート」を描画した。日時からの太陽高度・方位角の算出は上述のとおり赤坂の式³⁴⁾で行った。なお、青池カラーチャートは、見かけの湖面中央であるパースの円の楕円の中央に近い点 $(x, y) = (0, -3.85 \text{ m})$ (展望台からの眺望として回転済みの平面座標値)での値をプロットした。

5. 結果

5.1 直達日射と散乱日射の場合の太陽光強度スペクトル

散乱日射の光強度スペクトルを算出するために、1年の中の各月で最も散乱比が高かったデータで1本のスペクトルを抽出し、太陽高度を θ としたときの $\sin\theta$ での除算の補正を行い、スペクトルを得て、図11に示した。表1に散乱日射として採用した日時等のデータを示した。

散乱日射の光強度スペクトルは、強度の変動幅が大きかったが、スペクトル形状は類似しており、550 nm での光強度を基準に、比率を求めた結果を散乱

日射のスペクトル $c(\theta, \lambda)/\sin\theta$ として図12に示した。図12には花石ら¹⁶⁾による直達日射の光強度比スペクトル集計値を併記している。

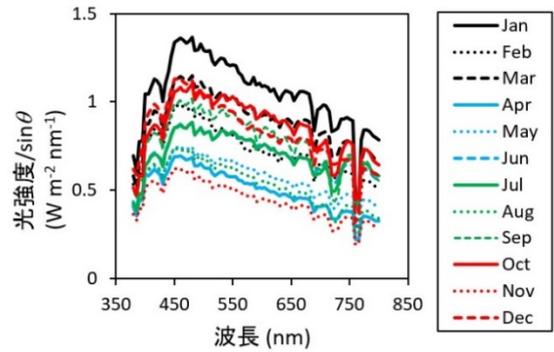


図11 散乱日射の各月の代表例の光強度スペクトル

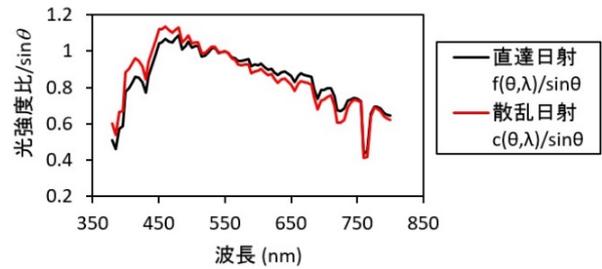


図12 比で表した直達および散乱日射の光強度スペクトル

表1 散乱日射のスペクトル推定に供した各月の代表例のデータ

月	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月
DATE	1/10	2/10	3/27	4/27	5/19	6/25	7/23	8/27	9/11	10/3	11/12	12/24
TIME	13:30	15:00	8:00	14:30	11:30	10:00	11:00	11:20	12:20	11:20	11:30	10:30
全天日射強度 (W m ²)	260	156	184	242	383	465	470	279	403	423	150	243
太陽高度(度)	20.1	17.4	26.9	41.7	66.7	62.2	65.7	57	50.1	43.2	29.3	22

5.2 散乱日射の太陽光高度および方位角依存性

図13に太陽高度の正弦と散乱日射強度との関係を集計した結果を示した。

図14にデータの頻度分布の三次元表示を示した。また、データ x' を二次式で集計した結果を図15に示した。

上記の集計から式(19)の μ の曲線の係数として、

$$a = -2.67 \times 10^{-5} (\text{度})^{-2}$$

$$b = 9.69 \times 10^{-3} (\text{度})^{-1}$$

$$c = 2.50 \times 10^{-1}$$

を得た。

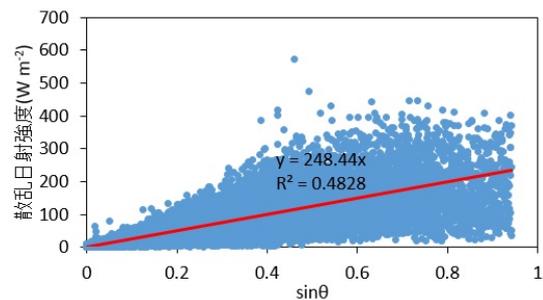


図13 太陽高度の正弦と散乱日射強度

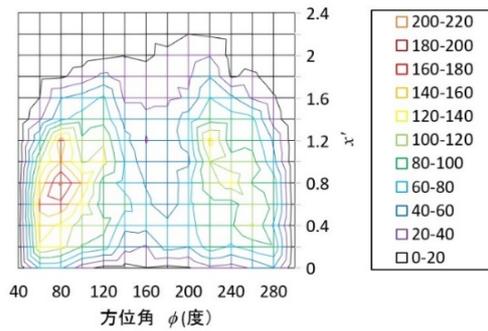


図 14 散乱日射強度を $\sin\theta$ で除した強度の相対値の頻度の、太陽方位角に対するプロット

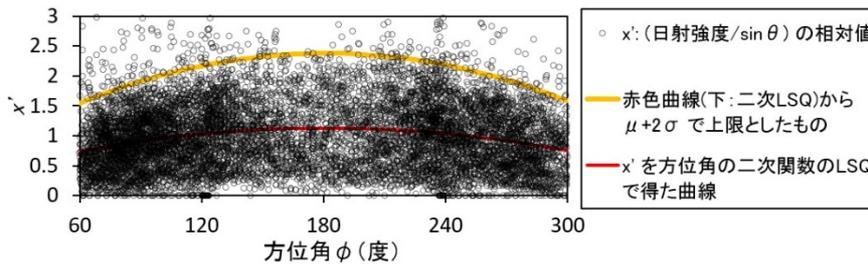


図 15 散乱日射強度を $\sin\theta$ で除した強度の相対値の、太陽方位角に関する二次式での回帰曲線

5.3 「木漏れ日」解析

図 16 に、2018 年 7 月 24 日 15:52 の観測結果と解析により決定したパラメータを用いて計算した「理論値」を示す。パラメータは表 2 に示した。

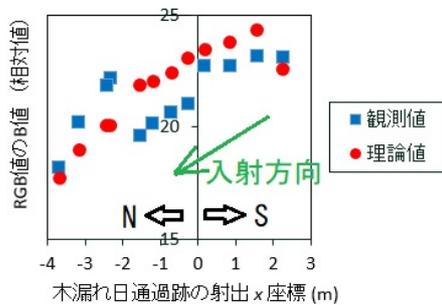


図 16 「木漏れ日」解析結果

表 2 「木漏れ日」解析により得たパラメータ

k	m^{-1}	0.0660
q <td>無次元</td> <td>0.250</td>	無次元	0.250
U <td>無次元</td> <td>0.280</td>	無次元	0.280

5.4 青池画像の呈色分布解析と呈色の再現

この解析では、まず湖面上に木の葉などが少なく、かつ晴れて日射が強い状況であった 2017 年 5 月 2 日 10:07 および 11:35 の画像を用いた。

図 17 に解析に供した画素を画像上に黄色で示した。表 3 に解析で得られたパラメータを示した。図 18 には RGB 観測値（線形 RGB 値に変換後）とその計算値の GB についての散布図を示した。

図 19 に、11:35 における基準化した青池画像とそのパラメータによるシミュレーション結果を示した。シミュレーションパラメータの決定はそれらを走査しながら画像のシミュレーションを行うことによった。計算条件を表 3(a)、(b) に記した。

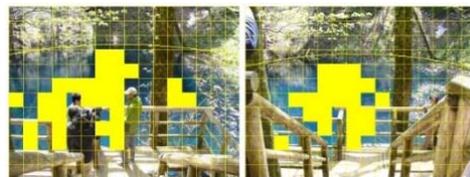


図 17 解析に供した青池画像の画素。左：10:07、右：11:35。黄色で塗りつぶした部分を使用。

5.5 5 月 2 日の朝から夕方までの青池展望台からの眺望の経時変化のシミュレーション結果

以下、シミュレーションのパラメータは表 3(a)、(c) を用いた。図 20 に 5 月 2 日の直達日射条件での毎時正時の青池の展望台からの眺望のシミュレーション結果を示した。

5.6 一般的な青池画像のシミュレーション結果

図 21 に、5 月 2 日、5 月 26 日、7 月 24 日、7 月 25 日および 9 月 2 日の測定条件での青池の展望台からの眺望のシミュレーション結果を示した。

9 月 2 日だけは、その時期に湖面上に木の葉が多

くなり光量が減るので、その日の青池画像から決定したパラメータ（表 3(a)、(d)）を用いた。

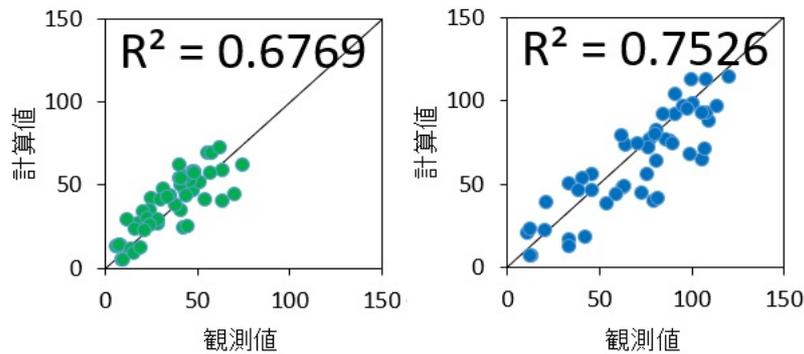


図 18 画素の色値の観測値と再現値（計算値）の比較。左：緑、右：青。

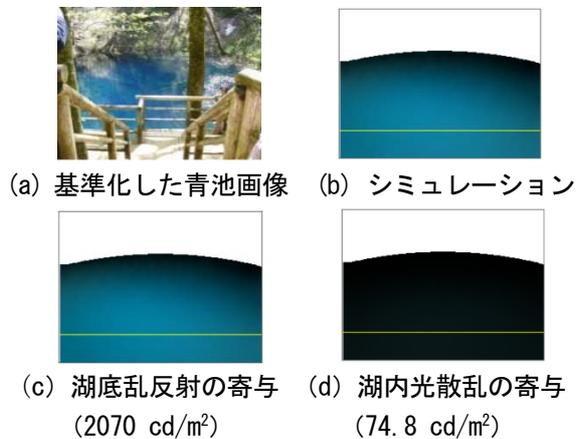


図 19 5 月 2 日 11:35 における基準化した青池画像とシミュレーション結果

5.7 「青池カラーチャート」の算出

図 22(a)～(e) に直達日射条件で最大水深 8.8m の、5 月 2 日の青池画像をもとに決定したパラメータ（表 3(a)、(c)）を用いて描画した青池カラーチャートを示した。図 22(f)、(g) は最大水深を変えて計算した。また、図 22(h) は同条件で、湖面上方に木の葉が多く、湖面への日射が弱い条件であった 9 月 2 日の青池画像をもとに決定したパラメータ（表 3(a)、(d)）を用いて描画した青池カラーチャートを示した。図 22(i)～(k) は散乱日射の場合のパラメータ（表 3(a)、(c)）を用いて描画した青池カラーチャートを示した。

5.8 湖面輝度の暦日・時刻依存性のシミュレーション

図 23 に、直達日射条件下の展望台からの眺望での湖面輝度の二次元グラフを示した。縦軸に暦日、横軸に時刻を配した。なお、湖面輝度は、式 (23) の

右辺を、湖面の面積区間で和を取り、次元を [輝度] に取って算出した。

6. 考察

6.1 「木漏れ日」画像の解析

図 16 に示したように、解析結果としての RGB の B 値再現が達成され、パラメータを決定できた。これらのうち、散乱強度因子 k は、後段の計算でも、他のパラメータと同時に走査し決定したが、同じ桁で算定された。この因子は、湖水中のわずかな懸濁物質の濃度に関係すると考えられたが、青池において調査した範囲で同じ規模であったと推定できた。

6.2 青池画像の呈色分布解析と呈色の再現

図 18 から、最適化に用いた GB 値について、決定係数は 0.65 以上であり、計算による最適化が良好になされたと判断した。

5 月 2 日 11:35 の青池画像のシミュレーション結果を示した図 19 から、青池の呈色については、湖内光散乱の寄与は無視でき、湖底における乱反射だけが寄与していると判断した。このことは、筆者らが提唱¹⁴⁾し、支持する測定結果を得た¹⁶⁾仮説が正しいことを示すと考えられた。

なお、表 2 および表 3 のパラメータの中で、式 (12) で定義された $Reffac$ が、表 2 で計算される値と表 3 に示されている値とで大きく異なった。

表 3(b) は、「木漏れ日」条件ではなく、青池に日射が全面的に入射した場合の画像を再現するパラメータで、図 19 のとおり、結果として湖内光散乱の寄与は無視できるほど小さいという解析結果であった。この状況の原因は、仮に湖内散乱光が存在しても、湖底乱反射光のほうが強く、画像撮影とい

う観測にかかわらず、 $Reffac > 600$ という解析結果に反映されたからと考えられた。

6.3 5月2日の青池呈色のシミュレーションと湖面輝度

図 20 から、午前中に輝度のピークがあり、12 時以降にそれが減少に転じることがシミュレーション結果として示された。これは図 23 の湖面輝度のチャートでも明らかになった。

6.4 一般的な青池画像のシミュレーション

図 21 から、直達日射（晴れ）および散乱日射（曇り）条件で、感度補正³³⁾後の青池画像をシミュレーション結果は定性的にはあるが、良好に説明した。

6.5 青池カラーチャート

「青池カラーチャート」は、暦日と時刻によって呈色が示されるという特色がある。よって、陸水としての青池の、水辺の景観を示すグラフという重要性があると考えられる。

図 22(a)~(e) に示したとおり、直達日射の場合の青池カラーチャートは、観測方位により違いが認められた。差異が明瞭なのは、青色が明るい時間帯が午前か午後かの違いであった。四方位からの展望を展望台（北北西、 $\eta = 60.5^\circ$ ）からの展望と比較した結果、展望台は、午前に明るく午後に暗く見える位置に存在することが分かった。

図 22(f), (g) のとおり、最大水深を現実の 8.8 m から 5 m へ浅くすると青色呈色が午前に明るくなり、また水深が 15 m へ深くなると青色呈色が濃くなり、さらに暗い日時が多いという結果であった。

以上から、天然の条件である最大水深 $d = 8.8$ m ということが、青池が明る過ぎず暗過ぎずの青色を呈する上で主要因であることが示された。

図 22(i)~(k) には散乱日射条件の結果を表した。この場合の青池カラーチャートは、概ね正午の縦線に関して対称であり、特に日射の照度が高い場合には鮮明な青色を与えた。

6.6 湖面輝度の暦日・時刻依存性のシミュレーション

図 23 に示した湖面輝度の二次元グラフでは、夏

至の前後の 4 月から 8 月の午前中が明るい色を示すことが分かった。夏至の頃が鞍部になっているが、その程度は小さく、4 月から 8 月を同じ程度に指し示すといえた。

7. 結語

青池に、水以外に着色要因が存在しないと仮定し、その可視領域の吸光係数および湖盆形態を模した回転放物面の湖底での乱反射モデルおよび湖内での散乱モデルを用いた呈色計算方法を確立した。

シミュレーションにおいて、青池画像を再現するパラメータを選択する過程で、湖内の散乱光の寄与は、湖底における乱反射の寄与に比べて無視できることを見出した。このことは、既報⁷⁾の青池の透明度・最大水深に符合すると考えられた。

この方法により直達および散乱日射条件における湖面画像をシミュレーションしたところ、湖面上で不均一な色調・明暗を伴い、青色呈色が再現された。

また暦日と時刻に関して青池の呈色が分かる二次元グラフ「青池カラーチャート」を描画した。これにより、直達日射条件では、仮定した観測方位により呈色が変わり、最大水深が現実よりも浅い場合と深い場合とで呈色が異なる結果が得られた。散乱日射条件では、「青池カラーチャート」は直達日射の場合と異なるが、鮮明な青色を与えた。

さらに湖面輝度の二次元プロットにより、直達日射条件における湖面の明るさが午前中に極大を取ることが示された。

本研究により、著者らが提唱¹⁴⁾し、支持する結果を得ていた¹⁶⁾、青池が青い理由は、水が赤色光吸収をする性質が際立つからという仮説は、今回のシミュレーションの成功により実証されたと考えられた。

結論として、青池の青色呈色の本質は水による光吸収であり、それが際立つ条件として、青池が以下の三点を特徴としているからと考える：

- 1) 水系の源泉地であり、その湖水は懸濁物や着色性の溶質が希薄であること。
- 2) 湖底が灰白色の「十二湖凝灰岩」であると考えられ、光を効率的に反射すると考えられること。
- 3) 最大水深が、青色として明る過ぎず暗過ぎずの色調・明暗を与える深さであること。

表3 シミュレーションで得たパラメータ

(a) 共通パラメータ

r (青池を模した回転放物面の半径)	m	15.6
w (湖岸から観測点までの水平方向距離)	m	0.4
d (青池の最大水深)	m	8.8
h (観測点の高さ)	m	7.2
ξ (崖の高さ)	m	10
δ (崖の傾斜角)	度	60
散乱日射の場合の全天考慮の角度増分	度	40
$\Delta\lambda$ (波長積分の増分)	nm	5

(b) 式 (13)、(14) のパラメータ

β_0	(cd/m^2) ⁻¹	1.83×10^{-2}
σ	m	3.62
k	m ⁻¹	0.0251
q	無次元	0.25
$Reffac(= q/U)$	無次元	>600
$\Delta\psi$ (湖底点走査の角度増分)	度	40
Δt (湖底点走査の助変数増分)	無次元	0.2
Δz (散乱点走査の鉛直方向増分)	m	0.5

(c) 式 (16)、(20) のパラメータ

β_0	(cd/m^2) ⁻¹	2.09×10^{-2}
σ	m	3.62
k	m ⁻¹	0.0316
q	無次元	0.25
$\Delta\psi$ (湖底点走査の角度増分)	度	40
Δt (湖底点走査の助変数増分)	無次元	0.2

(d) 9月2日の青池画像を再現する式 (16)、(20) のパラメータ

β_0	(cd/m^2) ⁻¹	2.15×10^{-2}
σ	m	5.88
k	m ⁻¹	0.143
q	無次元	0.25
$\Delta\psi$ (湖底点走査の角度増分)	度	40
Δt (湖底点走査の助変数増分)	無次元	0.2

図20 5月2日における各時刻（毎正時）の青池画像の変化のシミュレーション結果（数値は湖面輝度）

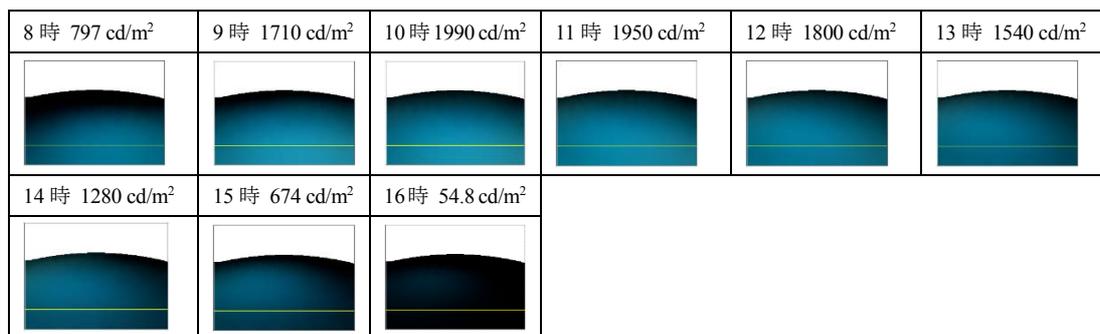
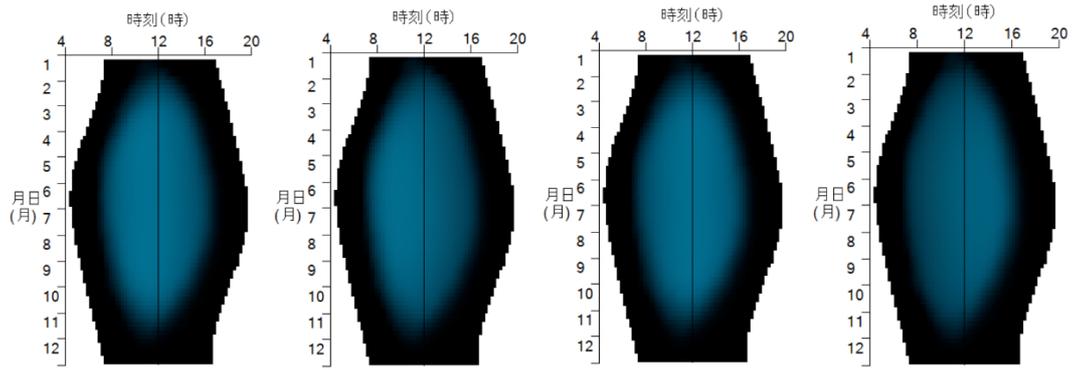
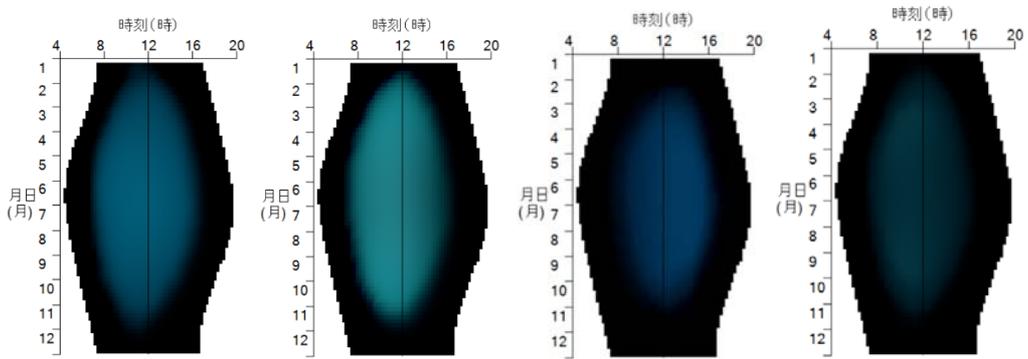


図 21 青池画像、感度補正後画像およびそのシミュレーション結果と条件

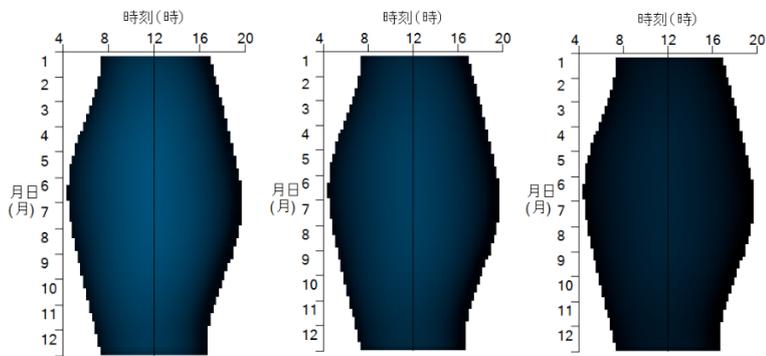
日時	原画像	感度補正後	シミュレーション	露出時間 ISO 感度	天候	日射強度 (lx)	湖面輝度 (cd/m ²)
2017/05/02 10:07				1/80 s ISO80	晴れ	推定 100000	2000
2017/05/02 11:35				1/100 s ISO100	晴れ	推定 100000	1880
2018/05/26 12:06				1/30 s ISO100	晴れ	推定 100000	1700
2018/07/24 12:24				1/25 s ISO100	曇り	34500	1020
2018/07/24 13:57				1/8 s ISO100	曇り	28500	843
2018/07/24 14:56				1/8 s ISO100	曇り	22400	662
2018/07/25 9:15				1/8 s ISO100	曇り	17200	509
2018/07/25 10:54				1/13 s ISO100	曇り	23100	683
2018/09/02 10:58				1/10 s ISO100	晴れ	124000	494
2018/09/02 13:22				1/30 s ISO100	晴れ	111000	294



(a) 展望台方位から (b) 西から (c) 北から (d) 東から



(e) 南から (f) $d=5\text{ m}$ (g) $d=15\text{ m}$ (h) 光が弱いとき



(i) 散乱日射 50000 lx (j) 30000 lx (k) 10000 lx

図 22 青池カラーチャート

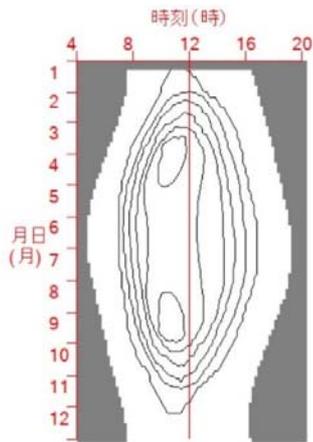


図 23 直達日射時の湖面の輝度の暦日・時刻依存性
(等高線間隔は 400 cd/m^2 に相当)

文 献

- 1) Kirk, J. T. O.: *Light and Photosynthesis in Aquatic Ecosystems*, 3rd ed., Cambridge University Press, UK, 2010.
- 2) Jerlov, N. G.: *Marine Optics*. Elsevier, Netherlands, 1976.
- 3) Smith, R. C. et al.: Optical Properties of Clear Natural Water. *J. Opt. Soc. Amer.*, **57**, 589-595, 1967
- 4) Smith, R. C. et al.: Optical Properties and Color of Lake Tahoe and Crater Lake. *J. Limnology and Oceanography*, **18**, 189-199, 1973.
- 5) 青森県西津軽郡深浦町役場観光ウェブサイト
<http://www.town.fukaura.lg.jp/lake12hp/firstP.html> (2018年12月現在アクセス可能)
- 6) 塘 忠頭 編, 高貝慶隆: 裏磐梯五色沼湖沼群の青色色彩とナノコロイド粒子との関わり. 裏磐梯・猪苗代地域の環境学, 福島民報社, 福島, 2016.
- 7) 三上 一, 他: 青森県の湖沼 (I). 青森県環境保健センター研究報告, **3**, 50-59, 1992.
- 8) 吉村信吉, 他: 津軽十二湖の湖盆形態 (上) 津軽十二湖研究(1). 地理学評論, **10**, 968-989, 1934.
- 9) 吉村信吉: 津軽十二湖の水温、透明度(2) 津軽十二湖研究(2). 地理学評論, **11**, 437-454, 1935.
- 10) 松谷善三, 他: 津軽十二湖越口ノ池湖群湖水の溶存化学成分. 日本水産学会誌, **11**, 5-15, 1942.
- 11) 工藤精一, 他: 津軽十二湖の水質の現状. 青森県公害調査事務所所報, **8**, 78-83, 1986.
- 12) 對馬康夫, 他: 津軽十二湖湖沼群の水質化学特性, *Jpn. J. Limnol.*, **56**, 9-18, 1995.
- 13) 高松信樹, 他: 津軽十二湖青池の呈色機構に関する一考察. 日本陸水学会 要旨集, **73**, 284-284, 2008.
- 14) 花石竜治, 他: 十二湖青池の呈色機構に関する研究 (第一報). 青森県環境保健センター年報, **27**, 36-52, 2016.
- 15) 花石竜治, 他: 十二湖青池の呈色機構に関する研究 (第二報): 試作した吸収スペクトル測定装置のハードおよびソフトウェア. 青森県環境保健センター年報, **28**, 51-55, 2017.
- 16) 花石竜治, 他: 十二湖青池の呈色機構に関する研究 (第三報): 光測定結果の解析について. 青森県環境保健センター年報, **28**, 56-62, 2017.
- 17) 酒井軍治郎, 他: 十二湖周辺の利水調査報告書. 青森県企画部, 青森, 1962.
- 18) 青森県史編さん自然部会編: 青森県史自然編 地学. 青森県, 青森, 2001.
- 19) 青森県地学教育研究会編著: 青森の自然をたずねて 新訂版 日曜の地学-2. 築地書館, 東京, 2003.
- 20) Pope, R. M. et al.: Absorption spectrum (380-700 nm) of pure water. II. Integrating cavity measurements. *Applied Optics*, **36**, 8710-8723, 1997.
- 21) 谷田貝豊彦: 光学. 朝倉書店, 東京, 2017.
- 22) 鶴田匡夫: 応用光学 I 応用物理工学選書 1. 培風館, 東京, 1990.
- 23) 山口一郎: 応用光学 応用物理学シリーズ, 応用物理学会編. オーム社, 東京, 1998.
- 24) 長谷川能三: ベクトル表記による光の反射・屈折の法則. 大阪市立科学館研究報告, **26**, 31-34, 2016.
- 25) NEDO 新エネルギー・産業技術総合開発機構: 日射に関するデータベース, 2015.
<http://www.nedo.go.jp/library/nissharyou.html> (2018年12月時点)
- 26) 大田 登: 色彩工学 第2版. 東京電機大学出版局, 東京, 2001.
- 27) JIS Z8701:1999 色の表示方法—XYZ 表色系及び $X_{10}Y_{10}Z_{10}$ 表色系.
- 28) JIS X9204:2000 高精細カラーデジタル標準画像 (XYZ/SCID).
- 29) 榎根 勇: 水文学 自然地理学講座 3. 大明堂, 東京, 1980.
- 30) 近藤純正: 水環境の気象学—地表面の水収支・熱収支—. 朝倉書店, 東京, 1994.
- 31) 田中丸治哉, 他: 地域環境水文学 シリーズ地域環境工学. 朝倉書店, 東京, 2016.
- 32) 久米 篤, 他監訳: 生物環境物理学の基礎 第2版 (原著: Gaylon, S. C. et al.: “An Introduction to Environmental Biophysics”, 2nd ed., 1997), 森北出版, 東京, 2003.
- 33) 上谷芳昭: ビデオ測色法とその応用. *J. Illum. Engng. Inst. Jpn.*, **88**, 479-483, 2001.
- 34) 赤坂 裕, 木村健一 編: 気象データとその利用 建築環境学 1. 丸善, 東京, 1992.

<付録> 青池のデジタルカメラ画像からの湖面各点の座標の取得およびその逆

花石竜治

透視図では、円を斜め上から見ると楕円に見え、その楕円を得るための幾何学はすでに構築されている（パースの円問題）。

ここでは、デジタルカメラ画像に写っている青池画像から対応する湖面上の平面座標を得る方法を開発したので報告する。

まず、青池の観測点（高さ h 、青池湖岸からの動径方向の距離 w ）から青池を展望し、その画像を撮影することを考える。このとき、湖岸の最遠点および展望台の先端が写ることになる。画像上のピクセルに対応して、これらがそれぞれ、 ZZ_2 、 ZZ_1 のピクセル位置と仮定する。

これから行うことは、上記の二つのピクセル位置の情報を用いて、湖面上の画像上のピクセル位置からその湖面上の平面座標値を求めることである。以下、 r は青池湖面の半径、 h' は展望台の高さである。

画像上の位置 ZZ_1, ZZ_2 について、これらの透視された後の座標を z_1', z_2' とする。また透視の写像前の段階の座標を y_1', y_2' とする。すなわち、透視前後の座標関係で、 (y, z) 平面上の点 $Z_1'(y_1', z_1')$ と点 $Z_2'(y_2', z_2')$ を考える。

次に点 Z_1' と点 Z_2' を通る直線 $Z_1'Z_2'$ に直交し、点 $Q(q, 0)$ を通る直線を考える。観測点 $H(-r+w, h)$ と点 Q を通る直線 HQ は

$$z = -\frac{h}{r+w+q}(y-q)$$

で表される。この式で表される直線の傾きの逆数に -1 を乗じた数が、直線 $Z_1'Z_2'$ の傾き $slope1$ であり

$$slope1 = \frac{r+w+q}{h}$$

とおく。

さて、点 Z_1' と点 Z_2' については、それぞれ、

観測点 H とを通る直線（それぞれ、直線 HZ_1' および直線 HZ_2' とする。）の方程式を決定できる。

直線 HZ_1' は、展望台の高さ h' とから幾何学で導かれる座標 $(X, 0)$ について、

$$X = \frac{w}{h-h'}h - (r+w)$$

が成り立ち、直線の表式は

$$z = -\frac{h}{X+r+w}(y-X) \quad \dots(A1)$$

同様に、直線 HZ_2' は、最奥部の座標 $(r, 0)$ から

$$z = -\frac{h}{2r+w}(y-r) \quad \dots(A2)$$

点 $Q(q, 0)$ を通り、傾きが $-1/slope1$ である直線上の点を $M(y_m, z_m)$ とする。

直線 HZ_1' および直線 HZ_2' と、点 $M(y_m, z_m)$ を通り傾きが $slope1$ である直線との交点を、それぞれ点 $Z_1(y_1, z_1)$ 、 $Z_2(y_2, z_2)$ として、これらの座標の表式を求める。ここで、

$$slope1 = \frac{z_2 - z_1}{y_2 - y_1} \quad \dots(A3)$$

である。

傾きが $slope1$ で、点 $M(y_m, z_m)$ を通る直線は

$$z = slope1 \cdot (y - y_m) + z_m$$

傾きの顕わな表式を代入して

$$z = \frac{r+w+q}{h}(y-y_m) + z_m \quad \dots(A4)$$

Z_1 、 Z_2 の座標はそれぞれ式 (A1), (A2) を満たし (A4) も同時に満たすから、点 Z_1 の z 座標について

$$-\frac{h}{X+r+w}(y_1-X) = \frac{r+w+q}{h}(y_1-y_m) + z_m$$

上式を y_1 について解くと

$$y_1 = \frac{-z_m + y_m \frac{r+w+q}{h} + \frac{Xh}{X+r+w}}{\frac{h}{X+r+w} + \frac{r+w+q}{h}}$$

見通しをよくするため、次の変換を行う。

$$Z = \frac{r+w+q}{h}$$

$$E = \frac{Xh}{X+r+w}$$

$$F = \frac{h}{X+r+w}$$

$$G = -(r+w)$$

これらにより、

$$y_1 = \frac{-z_m + y_m Z + E}{F + Z} \quad \dots(A5)$$

よって、

$$\begin{aligned} z_1 &= -F \left(\frac{-z_m + y_m Z + E}{F + Z} - X \right) \\ &= -F \frac{-z_m + y_m Z + E}{F + Z} + E \end{aligned} \quad \dots(A6)$$

同様にして

$$-\frac{h}{2r+w}(y_2-r) = \frac{r+w+q}{h}(y_2-y_m) + z_m$$

を y_2 について解くと

$$y_2 = \frac{-z_m + y_m \frac{r+w+q}{h} + \frac{rh}{2r+w}}{\frac{h}{2r+w} + \frac{r+w+q}{h}}$$

これに

$$C = \frac{rh}{2r+w}$$

$$D = \frac{h}{2r+w}$$

を用いると

$$y_2 = \frac{-z_m + y_m Z + C}{D + Z} \quad \dots(A7)$$

よって

$$z_2 = -D \frac{-z_m + y_m Z + C}{D + Z} + C \quad \dots(A8)$$

さて、点 M は直線 HQ 上の点であり、式 (A4) に座標値を代入し、 y_m について解くと

$$\begin{aligned} y_m &= \frac{r+w+q}{h} z_m + q \\ &= \frac{z_m}{Z} + q \end{aligned}$$

よって式 (A5)、(A6)、(A7)、(A8) は

$$\begin{aligned} y_1 &= \frac{qZ + E}{F + Z} \\ y_2 &= \frac{qZ + C}{D + Z} \\ z_1 &= -F \frac{qZ + E}{F + Z} + E \\ z_2 &= -D \frac{qZ + C}{D + Z} + C \end{aligned}$$

さらに $q = Zh + G$ と置き換えて

$$y1 = \frac{Z(Zh + G) + E}{F + Z} \quad \dots(A11)$$

$$y2 = \frac{Z(Zh + G) + C}{D + Z}$$

$$z1 = -F \frac{Z(Zh + G) + E}{F + Z} + E$$

$$z2 = -D \frac{Z(Zh + G) + C}{D + Z} + C$$

…(A9)

次に、z 座標 z1, z2 から画像のピクセル座標系への線形変換を考える。式 (A9) から

z1 に関して：

$$\left(-F \frac{Z(Zh + G) + E}{F + Z} + E \right) A + B = ZZ1$$

z2 に関して：

$$\left(-D \frac{Z(Zh + G) + C}{D + Z} + C \right) A + B = ZZ2 \quad \dots(A10)$$

ここで、H を画像の縦座標の高さピクセル数として

$$B = \frac{H}{2}$$

である。

式 (A10) を A について解き、等しいとおくと

$$\frac{ZZ1 - B}{-F \frac{Z(Zh + G) + E}{F + Z} + E} = \frac{ZZ2 - B}{-D \frac{Z(Zh + G) + C}{D + Z} + C}$$

$$\begin{aligned} & \frac{(ZZ1 - B)(F + Z)}{-F\{Z(Zh + G) + E\} + E(F + Z)} \\ & = \frac{(ZZ2 - B)(D + Z)}{-D\{Z(Zh + G) + C\} + C(D + Z)} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & (ZZ1 - B)(F + Z)[-D\{Z(Zh + G) + C\} \\ & \quad + C(D + Z)] \\ & \quad - (ZZ2 - B)(D \\ & \quad + Z)[-F\{Z(Zh + G) + E\} \\ & \quad + E(F + Z)] = 0 \end{aligned}$$

これは Z について二次方程式となる。

2 次係数：F · ZZ2 · h - D · ZZ1 · h - BFh + BDh

1 次係数：

$$\begin{aligned} & DF \cdot ZZ2 \cdot h - DF \cdot ZZ1h + FG \cdot ZZ2 - E \cdot ZZ2 \\ & \quad - DG \cdot ZZ1 + C \cdot ZZ1 - BFG \\ & \quad + BDG + BE - BC \end{aligned}$$

0 次係数：DFG · ZZ2 - DE · ZZ2 - DFG · ZZ1 + CF · ZZ1 - BCF + BDE

二次方程式 (A11) から解の公式により数値的に Z を求め、式 (A12) を用いて、画像へ写像するパラメータ A を算出する：

$$A = \frac{ZZ2 - B}{-D \frac{Z(Zh + G) + C}{D + Z} + C}$$

…(A12)

さらに、式 (A9) により y1, y2, z1, z2 を求めて、式 (A3) から slope1 を求める。

画像上のピクセル座標が与えられた場合に、これから円内の座標を返す関数について考察する。

いま画像上のピクセル座標 (X0, Y0) が与えられた場合、次なる zq が画像への写像前にこれまで検討してきた z1, z2 と同じ次元の変数を与える：

$$zq = \frac{Y_0 - B}{A}$$

…(A13)

この座標値 zq に対応する、傾き slope1 の直線上で与える y 座標 yq は次を満たす。

$$zq = slope1(yq - y1) + z1 \quad \dots(A14)$$

よって

$$yq = \frac{zq - z1}{slope1} + y1$$

この点 (yq, zq) と観測点 H(-(r + w), h) = (G, h) を通る直線が z = 0 となる y 座標 q が

求める y 座標である。その直線は

$$z - h = \frac{h - z_q}{G - y_q}(y - G)$$

と表される。上式に $y = q, z = 0$ を代入して整理すると

$$-h = \frac{h - z_q}{G - y_q}(q - G)$$

よって

$$q = -h \frac{G - y_q}{h - z_q} + G$$

これが求める円内の y 座標である。

x 座標については、画像上の座標 X_0 から、次なる写像前の x_q を計算し、画像への写像が等 y 面への射影によることから、 y 座標に依存した変換となり、平面内の比例関係から、求める x 座標 p は、画像の幅の二分の一を X_{mid} とすると、

$$x_q = \frac{X_0 - X_{mid}}{A}$$

$$p = x_q \frac{q + r + w}{y_q + r + w}$$

となる。

次に、「画像上ピクセル座標から、円内座標への変換」の逆を行えば、円内座標から画像上座標へ

の変換が可能である。

まず、二次方程式 (A11) を解き、また、式 (A12) から A を求める。次に数値的に y_1, y_2, z_1, z_2 を求め、これらにより式 (A3) から $slope1$ を求める。

y 座標 q から式 (A15) により y_q を求め、以後、式 (A14)、(A16) を用いて z_q, Y_0 と計算していく。

$$y_q = \frac{(q - G)(h - z_1 + slope1 \cdot y_1) + hG}{h + (q - G) \cdot slope1} \quad \dots(A15)$$

$$Y_0 = Az_q + B \quad \dots(A16)$$

x 座標についても、同時に使用する q および y 座標についての計算で y_q を求め、

$$x_q = p + \frac{(y_q - q)p}{q + r + w}$$

から、係数 A を用いて画像上の座標を算出する。

$$X_0 = Ax_q + X_{mid}$$

以上により、青池のデジタルカメラ画像から湖面上における座標の取得およびその逆を得るための数式を整備した。

Coloration mechanism of Aoike Pond in Lake Juniko (fourth report): Simulation of blue coloration

Ryuji Hanaishi, Naoto Osaka, Kazuhisa Augustine Chikita

The authors report methods of simulation of blue coloration of Aoike Pond in Lake Juniko and the results. Calculating based on an assumption that scattering light in the pond and irregularly reflected light from the bottom of the pond were present without coloring factors other than water, the contribution of scattered light could be ignored compared to that of irregularly reflected light, and the simulations were carried out under the direct and scattering solar radiation conditions, thus the blue coloration of the lake surface was successfully reproduced together with color tone, light and dark inhomogeneity on the pond surface. In addition, we proposed "Aoike color chart" showing coloration with respect to the annual calendar date and time at the fixed point of the pond surface, and examined the influence of the difference of the observation orientation and maximum water depth assumed on blue coloration. Finally, the authors showed that the lake surface luminance would reach its maximum in the morning under direct solar radiation conditions.

Key words: Simulation, Aoike Pond, Coloration, Absorption of light, Aoike color chart

1 Aomori Prefectural Nuclear Power Safety Center

2 Laboratory of Physical Hydrology, Department of Earth and Planetary Sciences, Graduate School of Science, Hokkaido University

最尤法による非負寄与を与えるケミカルマスバランス法

花石竜治

環境汚染における発生源寄与解析手法であるリセプターモデルのケミカルマスバランス (CMB) 法に、計算手法として最尤法を適用した例を取り上げる。最尤法は尤度関数を最大とする確率変数を求める方法である。最尤法の解法のうち、非負拘束を制約条件とした場合の非線形最適化解法の一つが「主双対内点法」である。本論文では、主双対内点法により CMB を解く機能を表計算ソフトのマクロとして作成した計算手法について紹介する。

Key words: Chemical mass balance, Primal-dual interior-point method, Non-linear optimization

1. 緒言

ケミカルマスバランス法 (CMB) は、リセプターモデルにおいて、発生源から環境の測定点へ、元素や難分解性化合物の化学種がその組成を保持しながら到達すると考え、発生源からの寄与の線形和 (重ね合わせ) によって環境測定点における化学種の濃度が決まるとし、これにより環境問題における発生源寄与を求める方法である。

CMB 計算を重ね合わせの逆と解釈すれば、最小二乗法が計算手法として選択されることは、想像に難くない。この手法のうち、発生源側の測定誤差および環境側の測定誤差の両方を考慮できる有効分散最小二乗法 (EV)¹⁾ は多用され、現在も米国環境保護局 (EPA) の公認解析手法²⁾ となっている。

今般のコンピュータ技術の進展により、より高度な計算を手軽に行うことができる時代となって、我が国の柏木らが新しい CMB 法を開発した。それらには、関数関係解析を利用した最尤法^{3,4)} とともに、CMB 計算の中で最も計算量の多い「ベイズ統計」による方法^{5,6)} も含まれる。これらの計算手法の開発は、従来法の最小二乗法が物理的に解釈不可能な負の寄与を与える可能性があること⁷⁾ が動機となっているようである。

筆者らが 2016 年度に公表した非負拘束有効分散最小二乗法⁸⁾ は、負の発生源寄与を与えない方法ではあるが、そのアルゴリズムは、EV の選択肢である「負の寄与の発生源除去」法とほぼ一致する解を与える。

本論文では、柏木らが提案した「最尤法」

(Maximum Likelihood Method) による CMB 計算手法を、近年の数値計算環境の改善で取り組みやすくなった最適化数学の知見を取り入れて改良し、従来法と同様に表計算ソフト上で完結するソフトウェアとしたので紹介する。

2. 理論

2.1 CMB 計算への最尤法の適用

CMB 計算の前提を次のとおりとする。

- ① 発生源からの寄与が線形和 (重ね合わせ) である
- ② 環境の化学種濃度の偶然誤差が正規分布をなす

ここで、化学種 i について、環境濃度が y_i 、発生源 j でのその化学種濃度が x_{ij} 、発生源寄与が g_j 、真の発生源濃度が ζ_{ij} であるとする。

いま環境濃度の偶然誤差の分散が実験的に求められており、誤差分散 $\sigma_{y_i}^2$ で正規分布をなすと仮定すれば、発生源プロファイルの不確かさを考慮しない場合 ($\zeta_{ij} = x_{ij}$)、尤度 $L(\mathbf{g})$ は

$$L(\mathbf{g}) \propto \prod_i \exp \left[-\frac{(y_i - \sum_j \zeta_{ij} g_j)^2}{2\sigma_{y_i}^2} \right] \quad \dots(1)$$

と表せる³⁾。この尤度を最大化する確率変数 g_j の真値を求めることが最尤法である。

2.2 最尤法と非線形最適化⁹⁾

尤度 $L(\mathbf{g})$ の最大化は、それらの対数尤度の最大化と等価であり、式 (2) で表す関数 $f(\mathbf{g})$ の最小化に帰着される。

$$f(\mathbf{g}) = \sum_i \frac{(y_i - \sum_j \zeta_{ij} g_j)^2}{2\sigma_{y_i}^2} \quad \dots(2)$$

さらに、不等号制約条件として、式 (3) で表すとおおり、寄与 g_j がすべて非負と仮定する。

$$\forall g_j \geq 0 \quad \dots(3)$$

この問題は、式 (2) が非線形であり、また不等式 (3) による制約条件が存在するので、「不等号制約条件がある場合の非線形最適化」に帰着される¹⁰⁾。

2.3 主双対内点法による解

「不等号制約条件がある場合の非線形最適化」の解法の一つである「主双対内点法」の適用に必要な数式を導出する。

ヘッセ行列の要素 $\nabla_{gg}^2 f(\mathbf{g})_{km}$ 、勾配ベクトルの要素 $\nabla_g f(\mathbf{g})_k$ は次式に示すとおおりとなる。

$$\nabla_{gg}^2 f(\mathbf{g})_{km} = \frac{\partial^2 f(\mathbf{g})}{\partial g_k \partial g_m} = \sum_i \frac{\zeta_{ik} \zeta_{im}}{\sigma_{y_i}^2}$$

$$\nabla_g f(\mathbf{g})_k = \frac{\partial f(\mathbf{g})}{\partial g_k} = - \sum_i \frac{(y_i - \sum_j \zeta_{ij} g_j) \zeta_{ik}}{\sigma_{y_i}^2}$$

行列・ベクトルの方程式は以下のとおおりである。ここで、 nso は発生源の数である。

$$\mathbf{B}_{l,g} = \begin{bmatrix} \frac{\partial^2 f(\mathbf{g})}{\partial g_1^2} & \dots & \frac{\partial^2 f(\mathbf{g})}{\partial g_1 \partial g_{nso}} \\ \vdots & \frac{\partial^2 f(\mathbf{g})}{\partial g_k \partial g_m} & \vdots \\ \frac{\partial^2 f(\mathbf{g})}{\partial g_{nso} \partial g_1} & \dots & \frac{\partial^2 f(\mathbf{g})}{\partial g_{nso}^2} \end{bmatrix}$$

$$\boldsymbol{\mu}_g^l = \text{diag}(\mu_{g,1}^l, \mu_{g,2}^l, \dots, \mu_{g,nso}^l)$$

$$= \begin{bmatrix} \mu_{g,1}^l & 0 & 0 \\ 0 & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & \mu_{g,nso}^l \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{G}^l = \text{diag}(g_1^l, g_2^l, \dots, g_{nso}^l)$$

$$= \begin{bmatrix} g_1^l & 0 & 0 \\ 0 & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & g_{nso}^l \end{bmatrix}$$

解くべき連立方程式は式 (4) である¹⁰⁾⁻¹²⁾。

$$\begin{bmatrix} \mathbf{B}_{l,g} & -\mathbf{I} \\ \boldsymbol{\mu}_g^l & \mathbf{G}^l \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \mathbf{G}^l \\ \Delta \boldsymbol{\mu}_g^l \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\nabla_g f(\mathbf{g}) \\ \mathbf{W}\mathbf{1} - \mathbf{G}^l \boldsymbol{\mu}_g^l \end{bmatrix} \quad \dots(4)$$

ここで、 Δ を増分の記号として、

$$\Delta \mathbf{G}^l = [\Delta g_1^l, \Delta g_2^l, \dots, \Delta g_n^l]^T$$

$$\Delta \boldsymbol{\mu}_g^l = [\Delta \mu_{g,1}^l, \Delta \mu_{g,2}^l, \dots, \Delta \mu_{g,n}^l]^T$$

$$\mathbf{W} = \sum_j g_j^l \boldsymbol{\mu}_{g,j}^l$$

$$\mathbf{1} = [1, 1, \dots, 1]^T$$

$$\mathbf{G}^l \boldsymbol{\mu}_g^l = [g_1^l \mu_{g,1}^l, g_2^l \mu_{g,2}^l, \dots, g_{nso}^l \mu_{g,nso}^l]^T$$

また、上付きの T は転置を表し、 \mathbf{I} は単位行列である。上記により、解の増分 ($\Delta \mathbf{G}^l$) および計算過程のパラメータの増分 ($\Delta \boldsymbol{\mu}_g^l$) を求める。(4) 式の左辺の行列は正則であることが証明されている¹⁰⁾。

3. 計算方法

3.1 主双対内点法における連立一次方程式計算

方程式 (4) は、部分的ピボットを行うガウス消去法で解いた。

3.2 繰り返し計算法

方程式 (4) の解であるパラメータの増分を求め、既報¹³⁾の方法により、繰り返し計算を行って、

g_j^l 、 $\mu_{g,j}^l$ を更新した。

3.3 計算の初期値および収束条件

前項の繰り返し計算における発生源寄与の初期値は、 i 番目の環境濃度を y_i 、発生源プロフィールでの i, j 番目の要素を $\zeta_{ij} (> 0)$ としたとき、 j 番目の発生源寄与の初期値 g_j^l を次式で取った。

$$g_j^l = \min\left(\frac{y_i}{\zeta_{ij}}\right)$$

収束条件は、

$$DE = 10^{-2} \cdot \max(g_j^l)$$

として、繰り返しの10回毎について

$$\left| \sum_{k=l}^{l+10} \max(|\Delta g_j^{k+10}|) - \sum_{k=l}^{l+10} \max(|\Delta g_j^k|) \right| < DE$$

となることとした。

3.4 用いたCMBモデルと比較のための計算手法

米国EPAのCMBダウンロードサイト²⁾で公表されている発生源プロフィールと環境データを使用した(pack2, 1978年1月24日、微小粒子)。表1にテストデータを示した。

また、花石らが既報⁸⁾で解析例を報告した、東京湾底質のダイオキシン類をPCPなどの農薬不純

物由来と仮定する解析を今回の最尤法でも試行した。データセットは既報⁸⁾にあるのでここでは略す。

非負拘束法を含む有効分散最小二乗法(EV)の計算は、筆者が頒布しているCMBマクロ^{12),13)}により行った。方法は、(1)EV全発生源選択、(2)EV負の寄与を与える発生源除去法、(3)非負拘束EVおよび(4)最尤法を試みた。

4. 結果

4.1 大気中微小粒子(米国EPAテストデータ)の解析結果

表2に寄与率を示し、図1に寄与率の円グラフを描画した。なお、「(a)EV全発生源」では表2の寄与率が図1の数値と異なっているが、これは負の寄与を描画できないため、非負の寄与だけで描画しているためであり、間違いではない。

4.2 底質のダイオキシン類の解析結果

表3に寄与率を示し、図2に寄与率の円グラフを描画した。「(a)EV全発生源」については前項と同様である。

表1 テストデータとして用いた発生源プロフィールおよび環境濃度(米国EPAテストデータ)

成分	発生源 (mg/kg)																環境濃度(μg/m ³)	
	MARINE		UDUST		AUTPB		RDOIL		KRAFT		ALPRO		STEEL		FERMN		実測値	標準偏差
NA	400000	40000	12500	3400	0	500	35000	17000	127000	7100	41000	17000	12600	4800	31000	3000	0.19	0.01
MG	48000	9000	13000	2700	0	5000	0	30000	6300	5300	28000	18000	65000	7100	0	40000	0	0.08
AL	0	0	88400	27100	11000	5000	5300	2400	2500	140	270000	80000	6500	1600	6400	1300	0.19	0.01
SI	0	0	223000	11000	8200	3000	9600	4800	1500	140	3400	3400	50000	2100	9900	3000	0.39	0.02
CL	400000	100000	0	100	30000	10000	0	1000	18000	4200	13300	8400	18500	7800	4200	1600	0.79	0.03
K	14000	2000	10300	600	720	290	2800	1000	15000	1400	2200	600	9200	700	105000	39000	0.19	0.01
CA	14000	2000	24400	4000	12500	5000	15800	6400	0	5000	3300	300	62000	5700	13000	1400	0.11	0.01
TI	0	0	8400	1200	0	1000	1100	380	60	20	400	300	2000	200	460	70	0.011	0.001
V	0	0	230	50	0	50	34400	7500	10	10	640	360	600	100	240	190	0.028	0.001
CR	0	0	450	170	0	100	470	150	2800	800	0	100	21000	14000	420	30	0.004	0.001
MN	0	0	1230	170	0	160	460	130	300	40	110	80	87000	9000	173000	9900	0.027	0.001
FE	0	0	60000	6000	21000	8000	29700	6100	12000	1100	4500	2900	320000	30000	21000	14000	0.227	0.008
NI	0	0	90	30	180	80	53600	12100	1300	140	1900	850	7000	700	0	50	0.043	0.002
CU	0	0	300	120	730	300	750	250	210	130	440	70	2800	300	360	40	0.033	0.002
ZN	0	0	1100	370	3500	1300	4000	1800	690	210	150	110	12000	1200	5800	2500	0.106	0.004
BR	2000	500	200	60	50000	17000	130	210	1300	600	370	540	0	1000	1600	2200	0.419	0.012
PB	0	0	3700	1500	200000	30000	1100	640	130	110	120	100	7600	700	450	160	0.94	0.02
OC	0	0	118000	43000	500000	100000	70000	62000	17000	2100	39000	39000	0	0	90000	9000	15.3	1.6
EC	0	0	18500	9100	38000	14000	31000	25000	2200	2300	23000	10000	0	0	15000	1500	1.8	0.4
SO4	100000	40000	4200	3100	13000	4000	481000	119000	400000	21000	44000	39000	25000	13000	42000	4000	6.9	0.3
NO3	0	0	0	100	9100	3000	6500	4400	0	3000	4100	1800	0	14000	57000	28000	2.9	0.2
TSP																	43	

表2 CMB計算で得られた寄与率(米国EPAテストデータ)

発生源	MARINE	UDUST	AUTPB	RDOIL	KRAFT	ALPRO	STEEL	FERMN
EV全発生源	-11.82	4.02	58.99	2.54	49.12	-1.53	-3.48	2.15
EV負の寄与発生源除去		4.42	77.98	6.32	10.59			0.69
非負拘束 EV	0.00	4.38	77.98	6.34	10.61	0.00	0.00	0.69
最尤法	5.61	17.57	65.14	9.61	0.25	0.00	0.13	1.69

表3 CMB計算で得られた寄与率(東京湾底質のダイオキシン類)

発生源	PCP1967	PCP1970	PCP1971	PCPUK	CNP1978	CNP1983	CNP1986	CNP1987	CNP1989	NIP1967	TPN1973	TPN1993
EV全発生源	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	-0.71	0.98	1.27	-13.22	111.66
EV負の寄与発生源除去	0.00		0.14	0.08	0.00				20.47	38.85		40.45
非負拘束 EV	0.00	0.00	0.14	0.08	0.00	0.00	0.00	0.00	20.51	38.86	0.00	40.41
最尤法	0.00	0.00	0.06	0.05	0.00	0.00	0.06	1.59	7.21	24.63	1.68	64.70

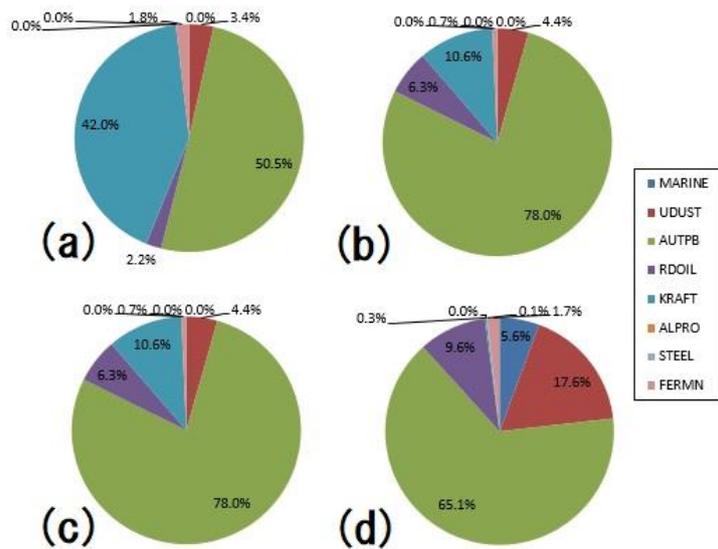


図1 米国 EPA テストデータについての CMB 計算により得られた発生源寄与率。(a) EV 全発生源選択、(b) EV 負の発生源寄与除去、(c) 非負拘束 EV 法、および (d) 最尤法。

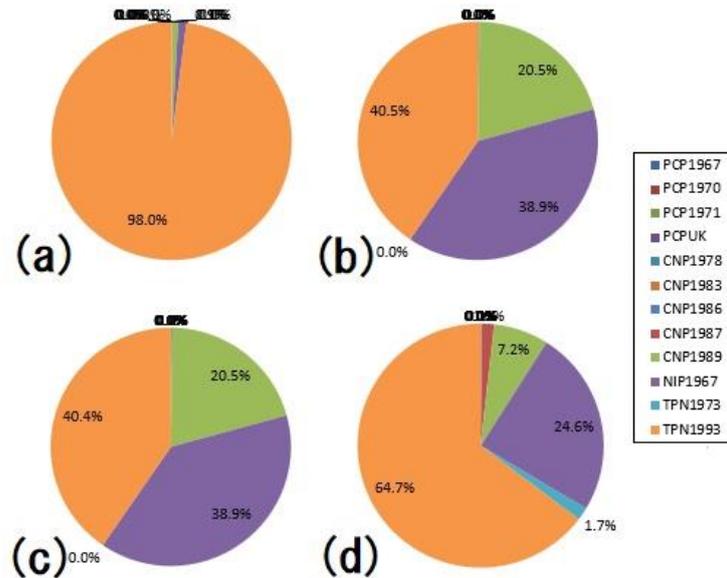


図2 東京湾底質 DXN 類についての CMB 計算により得られた発生源寄与率。(a) EV 全発生源選択、(b) EV 負の発生源寄与除去、(c) 非負拘束 EV 法、および (d) 最尤法。

5. 考察

5.1 多重共線性がある場合の有効分散最小二乗法 (EV) と最尤法での寄与の与え方について

今回用いたデータセット (米国 EPA テストデータおよび東京湾底質 DXN 類) では、全発生源を用いた有効分散最小二乗法 (EV) の結果で、負の寄与が現れており、その回避が必要であった。

これら 2 種類のデータで、「全発生源 EV」で負の寄与を与えた発生源の寄与が、「EV 負の寄与の発生源除去」および「非負拘束 EV」でゼロになっている。これはこれらの計算アルゴリズムが同じように負の寄与の発生源を除去するからと考えら

れる。

一方、最尤法は、米国 EPA テストデータにおいて、「全発生源 EV」で負の寄与を与えた発生源について、この方法の収束解として正の発生源寄与を与えた。この結果は、前述の二つの方法と際立って違う点であった。最尤法は「非線形最適化」を解く方法に置換されるが、その最適解は、単純な発生源選択 (全か、あるいは部分的に取捨選択するかどうか) がなされる場合に比べて、より真値に近い結果を与えると考えられた。

5.2 多重共線性により解として対をなす発生源

表2で、米国EPAテストデータについてのEV計算結果を最尤法計算結果と比較すると、KRAFTという発生源寄与が、前者で高く算出されたことが分かった。このKRAFTの寄与率は、負の発生源除去および非負拘束有効分散最小二乗法では、全発生源選択の場合よりも低く算出された。すなわち、KRAFTは多重共線性の影響を比較的強く受ける発生源の可能性があると考えられた。

一方、発生源MARINEは、「全発生源EV」で負の寄与率を与え、方法(b)および(c)で寄与がゼロ、(d)最尤法で正の寄与を与えた。最尤法で発生源KRAFTの寄与率がそれ以外の方法による結果と比べて、著しく低下していることを考え合わせれば、発生源KRAFTとMARINEは多重共線性があり、最小二乗法を行う線形代数の計算上、対をなして挙動すると考えられた。

6. 結語

最尤法によるCMB計算について、非線形最適化の一法である主双対内点法により数式を展開し、その解法を表計算ソフトのマクロに組み込み、表計算ソフトで計算が完結するようにした。これは、データの取扱いの上で取り組みやすい解析環境を与えたと考える。

データセットの一例を取り上げ、最尤法による発生源寄与の算出結果を従来法の有効分散最小二乗法によるものと比較した。

今回取り上げたデータセットはあくまでも一例に過ぎず、今後、この方法による発生源寄与推定結果を積み重ねることで、方法の長所および短所が明らかになると考える。

謝 辞

イサラ研究所 齊藤勝美氏には、本プログラムコードの開発に当たり、試用していただいた。ここに記して感謝申し上げます。

文 献

1) Watson, J. G. et al.: The effective variance weighting

for least squares calculations applied to the mass balance receptor model. *Atom. Environ.*, **18**, 1347-1355, 1984.

2) https://www3.epa.gov/scram001/receptor_cmb.htm
(2018年10月現在アクセス可能)

3) 柏木宜久, 他: 関数関係解析による Chemical Mass Balance. *応用統計学*, **31**, 59-74, 2002.

4) 鈴木貴博, 他: 関数関係解析によるケミカルマスバランス法を用いたダイオキシン類の発生源寄与率推定法に関する検討. *環境化学*, **16**, 437-448, 2006.

5) Kashiwagi, N.: Chemical mass balance when an unknown source exists. *Environmetrics*, **15**, 777-796, 2004.

6) 柏木宜久, 他: 環境汚染に対する未確認発生源の寄与率の推定. *統計数理*, **54**, 123-146, 2006.

7) 橋本俊次, 他: ケミカルマスバランス法による環境汚染物質に対する発生源寄与率の推定. *ぶんせき*, 144-151, 2014.

8) 花石竜治, 他: 非負寄与を与える発生源探索によるケミカルマスバランス法. *青森県環境保健センター研究報告*, **27**, 70-73, 2016.

9) 東京大学教養学部統計学教室 編: 基礎統計学 III 自然科学の統計学. 東京大学出版会, 東京, 1992.

10) 山下信夫: 応用最適化シリーズ 非線形計画法. 朝倉書店, 東京, 2015.

11) 寒野美博, 他, 東京大学工学教程編纂委員会編: 基礎系数学 最適化と変分法. 丸善出版, 東京, 2016.

12) Boyd, S. et al.: *Convex Optimization*. Cambridge, UK, 2004.

13) <https://github.com/convexbrain/Totsu/blob/master/solver/src/PrimalDualIPM.cpp>

(2018年10月現在、アクセス可能)

14) <http://rhanaiishi.world.coocan.jp/>

(2018年10月現在、アクセス可能)

15) 早狩 進, 他: 環境データ解析用表計算マクロの紹介と解析例 (II) —CMB 法解析マクロ—. *大気環境学会誌*, **36**, 39-45, 2001

A chemical mass balance method giving nonnegative source contribution by the maximum likelihood method

Ryuji Hanaishi

The author takes up an example where the maximum likelihood method is applied to the chemical mass balance (CMB) method of the receptor model which is a source apportionment analysis method for environmental pollution. The maximum likelihood method is a method of finding random variables that maximize the likelihood function. Of the calculation methods of the maximum likelihood method, the "primal-dual interior-point method" is one of nonlinear optimization solutions subjected to nonnegative constraints. In this paper, the author introduces the calculation method which solves the CMB by a macro of the spreadsheet software using the primal-dual interior-point method.

Key words: Chemical mass balance, Primal-dual interior-point method, Non-linear optimization

青森県内における有害大気汚染物質モニタリング —優先取組物質のトレンドと季節変動を中心に—

対馬典子 内海宣俊

青森県では平成 9 年 10 月から有害大気汚染物質モニタリング調査を開始し、現在は優先取組物質 21 項目について県内 5 地点月 1 回の調査を実施している（環境省、県、青森市、八戸市の 4 実施主体）。平成 9、11 年度にベンゼンが沿道属性の地点で環境基準値を超過したが、それ以降、環境基準及び指針値が設定されている物質について基準値を超過した物質はなかった。各物質濃度の推移は、概ね減少もしくは横ばい傾向であったが、1,2-ジクロロエタンはやや増加傾向が見られた。また、平成 19 年度以前の八戸地域のヒ素濃度は全国的に見て高めに推移していたが、平成 20 年度には全国平均値とほぼ同レベルまで低減され、以降概ね横ばいで推移している。

Key words : heavy metal, yellow sand, hazardous air pollutants monitoring, volatile organic compounds

1. はじめに

平成 8 年 5 月に大気汚染防止法が改正され、低濃度ではあるが長期曝露によって人の健康を損なうおそれのある有害大気汚染物質の対策が制度化された。平成 22 年 10 月の中央環境審議会答申（第九次答申）においては、「有害大気汚染物質に該当する可能性がある物質」として 248 物質、その中でも有害性の程度や大気環境の状況等に鑑み健康リスクがある程度高いと考えられる 23 物質が「優先取組物質」としてリストアップされている。本県では、同法に基づき平成 9 年 10 月から青森市 2 地点（堤小学校局、青森県庁局）及び八戸市 2 地点（八戸小学校局、根岸小学校局）においてモニタリング調査を開始し、途中、地点変更を経て、平成 29 年 1 月から弘前市立第一中学校局を加えた 5 地点においてモニタリング調査を実施している。

これまで本県では重金属類を中心とした調査結果について報告している¹⁻¹⁰⁾。

今回、県内 5 地点における優先取組物質のトレンド、季節変動及び物質相互の相関を中心に基礎的なとりまとめを行ったので報告する。

また、黄砂の影響が疑われたベリリウム及びその化合物の高濃度事例についても併せて報告する。

2. 調査方法

2.1 方法

「大気汚染防止法第 22 条の規定に基づく大気の汚染の状況の常時監視に関する事務の処理基準」（平成 13 年 5 月制定、28 年 9 月最終改正）及び「有害大気汚染物質測定方法マニュアル」（平成 23 年 3 月、26 年 3 月改訂）に準拠し実施した。

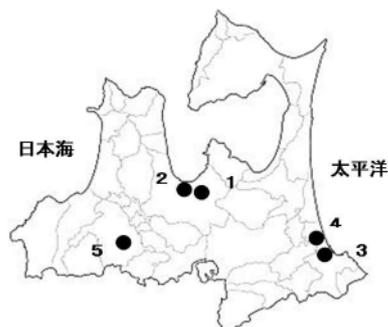


図 1 県内モニタリング調査地点

表 1 調査地点の概要

St.	地点	所在地	調査区分	用途地域
1	堤小学校局	青森市	一般環境	住宅
2	青森県庁局	青森市	沿道	商業
3	八戸小学校局	八戸市	一般環境	住宅
4	根岸小学校局	八戸市	一般環境・固定発生源周辺	住宅
5	弘前第一中学校局	弘前市	一般環境	住宅

表 2 有害大気汚染物質モニタリング調査実施主体 (○：青森県)

年度	一般環境			発生源周辺	沿道		備考
	堤小学校局 (青森市)	八戸小学校局 (八戸市)	第一中学校局 (弘前市)	根岸小学校局 (八戸市)	青森県庁局 (青森市)	橋本小学校局 (青森市)	
平成9	○	○		○	○		平成9年10月から3物質(ベンゼン、トクロロエチレン、トクロロエチレン)の調査開始
平成10	○	○		○	○		ベンゼン等揮発性有機化合物9物質追加
平成11	○	○		○	○		アルデヒド類、重金属類、ベンゾ[a]ピレン追加
平成12	○	○		○	○		
平成13	○	○		○	○		酸化エチレン追加
平成14	○	○		○	○		
平成15	○	○		○	○		
平成16	○	○		○	○		
平成17	○	○		環境省	○		
平成18	○、青森市	○		環境省	○、青森市		平成18年10月から青森市実施
平成19	青森市	○		環境省	青森市		
平成20	青森市	○		環境省	青森市		
平成21	青森市	○		環境省	青森市		
平成22	青森市	○		環境省	青森市		
平成23	青森市	○		環境省	青森市		八戸小学校局、根岸小学校局において塩化メチル、トルエン追加
平成24	青森市	○		環境省	青森市		堤小学校局において塩化メチル、トルエン、青森県庁局においてトルエン追加
平成25	青森市	○		環境省	青森市		
平成26	青森市	○		環境省	青森市		
平成27	青森市	○		環境省		青森市	平成28年1月に青森県庁局を橋本小学校局に地点変更
平成28	青森市	○、八戸市		環境省		青森市	平成29年1月から八戸市実施
平成29	青森市	八戸市	○	環境省		青森市	平成29年4月から弘前市立第一中学校局で実施(青森県)
平成30	青森市	八戸市	○	環境省		青森市	

2. 2 地点

調査地点を図1、表1及び表2に示す。

- ・堤小学校局(青森市、以下、「堤小局」)
- ・青森県庁局(青森市、以下、「県庁局」)
- ・八戸小学校局(八戸市、以下、「八小局」)、
- ・根岸小学校局(八戸市、以下、「根岸小局」)
- ・第一中学校局(弘前市、以下、「一中局」)

なお、青森市実施の県庁局(沿道)は、平成28年1月から橋本小学校(青森市、以下、「橋本小局」)に地点変更しているが、一連の地点として県庁局としてのトレンドに含めた。

根岸小局は、アクリロニトリル、クロロホルム、クロム及びその化合物、マンガン及びその化合物、ヒ素及びその化合物については固定発生源の属性であり、その他は一般環境として区分されている(平成28年度調査分)。

2. 3 調査対象物質

調査対象物質を表3に示す。

第九次答申においてリストアップされた23の優先取組物質のうち、県ではダイオキシン類についてはダイオキシン類対策特別措置法に基づき別途モニタリングを実施しており、「六価クロム化合物」及び「クロム及び三価クロム化合物」の形態別については現時点では測定が困難であるため、当面、クロム及びその化合物の全量(クロム換算値)を測定することとしており、最終的に21物質を対象として実施している。

一般環境の調査地点は全21物質を実施しており、沿道の属性地点である県庁局、橋本小局は、ベンゼン、1,3-ブタジエン、トルエン、アセトアルデヒド、ホルムアルデヒド及びベンゾ[a]ピレンの6物質を実施している。

2. 4 考察・解析データ

2. 4. 1 経年変化

経年変化(図2)は、本県において酸化エチレンのモニタリングを追加した平成13年度から平成28年度までの年平均値を対象とした。また、平成29年度よりモニタリング開始した一中局の29年度年平均値も参考までグラフ上にプロットした。

なお、塩化メチル及びトルエンについては調査に追加された平成23年度以降を対象とした。

2. 4. 2 季節変動

八小局、堤小局、県庁局については平成20～28年度における月間値(n=1)の平均値、根岸小局については平成20～27年度における月間値(n=1)の平均値、一中局については平成29年度における月間値(n=1)について折れ線グラフ化した。

塩化メチル、トルエンについては追加年度からのデータを使用した。

2. 4. 3 変動係数・単相関解析・多変量解析

季節変動の考察同様、塩化メチル、トルエンが調査に追加された年度からとし、堤小局についてはn=60(平成24～28年度)、八小局についてはn=72(平成23～28年度)、根岸小局についてはn=60(平成23～27年度)、一中局についてはn=12(平成29年度)のサンプルを用いた。

表3 調査対象 21 物質と基準値・指針値等

物質名		IRAC (国際がん研究機関) の発がん性評価 (※)	評価値等		設定年月
アクリロニトリル	VOCs	2B	2 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	指針値	平成 15 年 7 月
塩化ビニルモノマー	VOCs	1	10 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	指針値	平成 15 年 7 月
塩化メチル (クロロメタン)	VOCs	3	—		
クロロホルム	VOCs	2B	18 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	指針値	平成 18 年 11 月
1,2-ジクロロエタン	VOCs	2B	1.6 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	指針値	平成 18 年 11 月
ジクロロメタン (塩化メチレン)	VOCs	2A	150 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	環境基準値	平成 13 年 4 月
テトラクロロエチレン	VOCs	2A	200 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	環境基準値	平成 9 年 2 月
トリクロロエチレン	VOCs	1	(200) 130 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	環境基準値	(平成 9 年 2 月) 平成 30 年 11 月 改定
トルエン	VOCs	3	—		
1,3-ブタジエン	VOCs	2A	2.5 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	指針値	平成 18 年 11 月
ベンゼン	VOCs	1	3 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	環境基準値	平成 9 年 2 月
アセトアルデヒド	VOCs	2B	—		
ホルムアルデヒド	VOCs	1	—		
酸化エチレン	VOCs	1	—		
ベンゾ[a]ピレン	PAH	2A	—		
ニッケル化合物	重金属類	1	25 (ng/m^3)	指針値	平成 15 年 7 月
クロム及びその化合物	重金属類	—	—		
マンガン及びその化合物	重金属類	—	140 (ng/m^3)	指針値	平成 26 年 4 月
ヒ素及びその化合物	重金属類	1	6 (ng/m^3)	指針値	平成 22 年 10 月
ベリリウム及びその化合物	重金属類	1	—		
水銀及びその化合物	重金属類	3	40 (ng/m^3)	指針値	平成 15 年 7 月

(※) 「IRAC の発がん性評価」

グループ 1：ヒトに対する発がん性がある。

グループ 2A：ヒトに対しておそらく発がん性がある。

グループ 2B：ヒトに対して発がん性がある可能性がある。

グループ 3：ヒトに対する発がん性について分類できない。

グループ 4：ヒトに対する発がん性がない。

3. 結果及び考察

3. 1 PRTR 届出データに基づく大気への排出量

県内における PRTR 届出データに基づく大気への排出量（公表されている過去5年間である平成24～28年度分）（優先取組物質に限る）を表4に示した。なお、ニッケルの大気への排出量を把握するため、政令番号308（ニッケル）と309（ニッケル化合物）を集計した。また、ベンゾ[a]ピレンについては届出対象外物質である。

本県における平成28年度の優先取組物質に関する排出量上位3物質は、トルエン、クロロホルム、ベンゼンであった。

3. 2 経年変化

調査結果（年平均値）の推移を図2に示した。年平均値は各年度12回の測定結果を算術平均して算出した。年平均値の算出にあたっては、検出下限値未満の場合は検出下限値の1/2の値を用い、検出下限値以上で定量下限値未満の場合は測定値を用いた。

3. 2. 1 揮発性有機化合物（VOCs）

アクリロニトリル、塩化ビニルモノマー、ジクロロメタン、テトラクロロエチレン及びトリクロロエチレンについては全国平均よりも低い濃度レベルで推移していた。全国平均は減少傾向であったが、県内地点についてはほぼ横ばいで推移していた。

ベンゼンは、沿道属性の地点である県庁局において、平成9年度と11年度において環境基準値を超過したが、それ以後は環境基準を達成し、一般環境全国平均と沿道全国平均のほぼ間のレベルを推移していた（図3）。

大気中ベンゼンの主要な発生源はガソリン中に含まれているベンゼンが自動車の排気ガスとして大気中に放出されるものであるが、大気中ベンゼン濃度が低下した理由は大気汚染防止の観点からガソリン中のベンゼン含有率の上限値（規制値）が平成12年1月から強化されたことが要因と言われている。

酸化エチレン、アセトアルデヒド及びホルムアルデヒドについてはいずれも全国平均よりも低いレベルで、年度により多少のばらつきはありながら漸減傾向から横ばいで推移していた。

塩化メチル、クロロホルム及び1,3-ブタジエンについては全国平均とほぼ同レベルで横ばいで推

移し、トルエンについては全国平均より低いレベルでほぼ横ばいで推移していた。

沿道属性の地点である県庁局では、ベンゼン、1,3-ブタジエン、アセトアルデヒドなど自動車排気ガス関連の濃度が他の地点と比較し高めであった。

1,2-ジクロロエタンについては全国平均よりも低いレベルであるが、全国平均と同様にやや増加傾向にあった。

3. 2. 2 ベンゾ[a]ピレン

ベンゾ[a]ピレンは木材の燃焼、剪定くずや農業廃棄物などのバイオマスの不完全な燃焼、自動車や航空機の排気ガスなどで発生することが知られている。本県においても全国平均とほぼ同程度のレベルで推移していた。

平成13～25年の期間における国内の一般環境、固定発生源周辺、沿道モニタリングの全地点で測定されたベンゾ[a]ピレン濃度は、一般環境 $2.2 \times 10^{-5} \sim 7.6 \text{ ng/m}^3$ 、固定発生源 $7.0 \times 10^{-6} \sim 22 \text{ ng/m}^3$ 、沿道 $2.7 \times 10^{-5} \sim 7.1 \text{ ng/m}^3$ の範囲で変動していたと報告されている¹¹⁾。平成13～28年度における堤小局のベンゾ[a]ピレン濃度については年平均値 $0.046 \sim 0.29 \text{ ng/m}^3$ 、平成13～28年度における県庁局の濃度については年平均値 $0.047 \sim 0.40 \text{ ng/m}^3$ 、平成13～28年度における八小局の濃度については年平均値 $0.11 \sim 0.78 \text{ ng/m}^3$ 、平成17～28年度における根岸小局の濃度については年平均値 $0.052 \sim 0.31 \text{ ng/m}^3$ の範囲で変動していた。なお、石塚ら¹²⁾によると、昭和53年に実施した根岸小学校（1月、5月、8月、11月）の大気中ベンゾ[a]ピレン濃度の年平均値は 1.1 ng/m^3 であると報告されており、平成28年度の根岸小局の年平均値は 0.052 ng/m^3 であることから、濃度レベルは当時と比較し20分の1程度に減少していた。

3. 2. 3 重金属類

ニッケル化合物（以下、「ニッケル」）、クロム及びその化合物（以下、「クロム」）、マンガン及びその化合物（以下、「マンガン」）については、八小局及び根岸小局が概して全国平均よりも高めのレベルで推移しており、堤小局については低めで推移していた。

平成19年以前における八戸地域のヒ素濃度は全国的に見て高く推移していたが、その中でも平成18年度に八小局では年平均値で 5.4 ng/m^3 、根岸小局では年平均値で 70 ng/m^3 と高い濃度を示した。特に根岸小局のヒ素濃度の年平均値が高く

なった理由は、5月分が220 ng/m³、8月分が540 ng/m³と高い値であったことにあるが、ヒ素を含有する鉱石を原料としている事業所から大気中に排出された排ガス中にヒ素が含まれていたこと、また、調査日当日の気象条件（逆転層の形成）が主な原因と推定された。なお、ヒ素濃度の調査方法（ハイボリウムエアサンプラー法）は、一月に1回、24時間大気を吸引することにより、大気中のヒ素を採取し、分析を行い、その月の測定値とし、年間12回の測定値の平均値をもって評価するため、調査日の気象条件等の影響を受けやすく、また、突発的であっても高濃度が観測されると年平均値が大きく上昇するという特性がある。県ではこの測定方法の他に、平成18年7月から年間を通した連続測定（ローボリウムエアサンプラー法）も実施しており、この結果によると、根岸小局における平成18年7月3日から平成19年7月2日までの1年間の平均値は5.0 ng/m³であり、常態的にヒ素の濃度が70 ng/m³程度になっているということではなく、ヒトへの健康影響の面では問題のないレベルであった。

当時、ヒ素については指針値が設定されておらず、モニタリング結果の評価及び事業者による排出抑制対策に当たっての指標がない状況であったことから、平成19年から21年にかけて、本県から指針値の設定を環境省に対して要望したところ、平成22年10月に指針値6 ng/m³が設定された。

この発生源と推定された事業者と行政が連携し、排出抑制対策を実施した結果、平成20年度には八戸地域のヒ素濃度は全国平均値と同レベルまで低減され、以降、ほぼ横ばいで推移している¹³⁾。

堤小局については全国平均と同程度あるいは低めで横ばいで推移しており、一中局についても同程度の濃度レベルである。

水銀及びその化合物（以下、「水銀」）については、いずれの地点も全国同様概ね横ばいで推移しており、指針値（年平均値40ng/m³以下）を大幅に下回っていた。

ベリリウム及びその化合物（以下、「ベリリウム」）については全国平均と同レベルであり、ほぼ横ばいで推移していた。

表4 青森県内における年度別届出排出量（大気への排出量）（平成24～28年度分）

政令番号	物質名	用途等	青森県における届出排出量(kg/年)大気への排出				
			平成24年度	平成25年度	平成26年度	平成27年度	平成28年度
9	アクリロニトリル	合成繊維原料、ゴム原料、塗料等	820	750	800	840	980
94	塩化ビニルモノマー (クロロエチレン)	ポリ塩化ビニル(塩化ビニル樹脂)などの合成樹脂原料。樹脂をつくる過程で残ったごくわずかのクロロエチレンは除去されるため、通常私たちが日常生活で直接クロロエチレンにふれることはないと考えられている。	0	0	0	0	0
128	塩化メチル (クロロメタン)	ゴム原料等	0	0	0	36	0
127	クロロホルム	フロン原料、医薬品、水道副生成物等	12,000	11,000	12,000	12,000	12,000
157	1,2-ジクロロエタン	合成繊維原料等	0	0	0	0	0
186	ジクロロメタン (塩化メチレン)	噴霧剤、冷媒等	5,300	810	650	0	0
262	テトラクロロエチレン	フロン原料等	0	0	0	0	0
281	トリクロロエチレン	フロン原料等	0	0	0	0	0
300	トルエン	自動車排ガス等	100,000	97,000	120,000	130,000	120,000
351	1,3-ブタジエン	ゴム原料、自動車排ガス等	0	0	0	0	0
400	ベンゼン	自動車排ガス等	6,400	6,100	7,200	5,800	5,600
12	アセトアルデヒド	香料、防カビ剤、自動車排ガス等	0	0	0	0	0
411	ホルムアルデヒド	殺菌剤、接着剤、自動車排ガス等	0	170	180	150	150
56	酸化エチレン	主に他の化学物質の原料として使われている。また、滅菌剤などにも使われる。	0.3	3.4	3.7	3.8	4.3
-	ベンゾ[a]ピレン	自動車排ガス等、化学工業、煙草等					
308	ニッケル	金属表面処理剤、合金等	16	9.1	12	25	26
309	ニッケル化合物	触媒、メッキ剤、電池、工場排ガス等	540	560	420	410	170
87	クロム及び三価クロム化合物	顔料、工場排ガス等	240	240	220	270	140
412	マンガン及びその化合物	触媒、電池、特殊鋼、工場排ガス等	530	360	460	580	620
332	砒素及びその無機化合物	殺虫・殺菌剤、半導体原料、顔料、染料原料、工場排ガス等	8.5	6.3	15	24	22
394	ベリリウム及びその化合物	電子材料、工場排ガス等	0	0	0	0	0
237	水銀及びその化合物	触媒、顔料、電池、蛍光灯、工場排ガス等	0.4	1.5	4.0	4.1	1.4

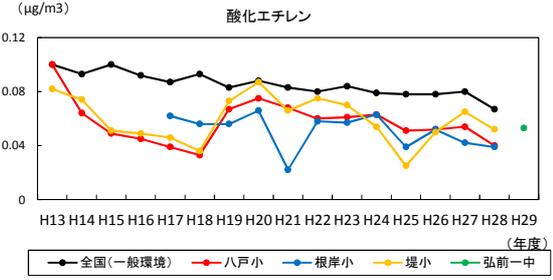
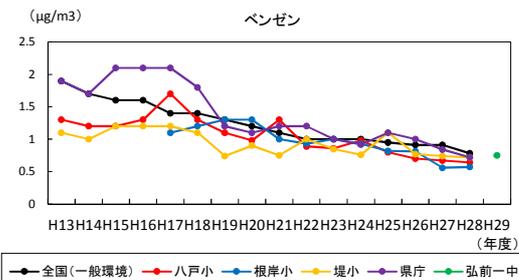
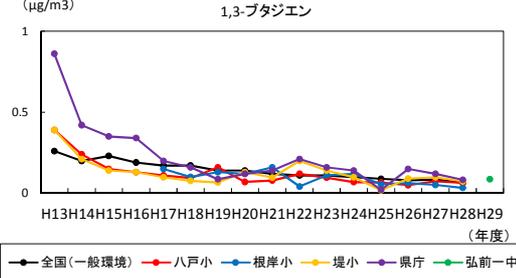
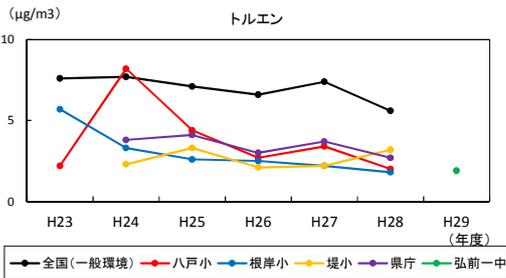
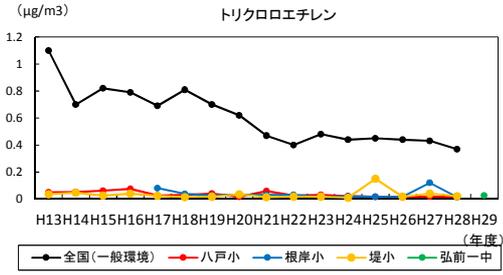
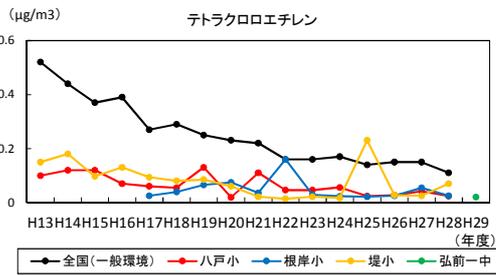
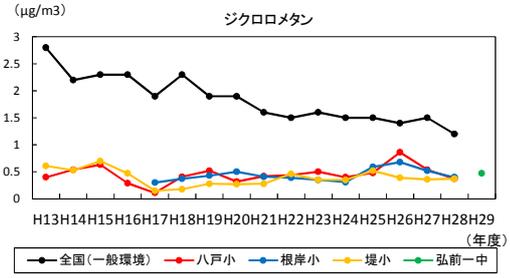
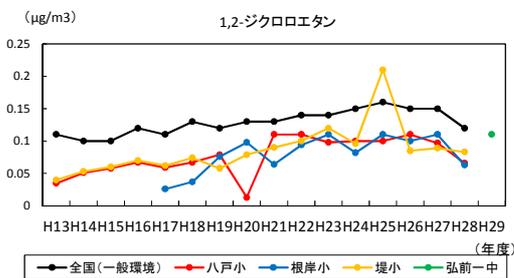
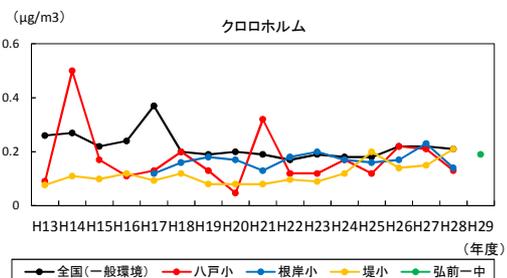
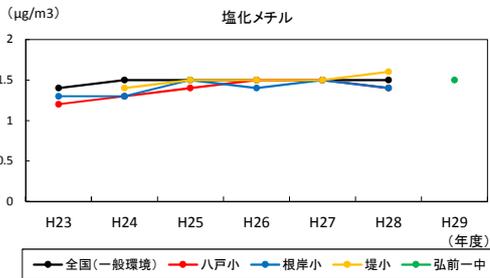
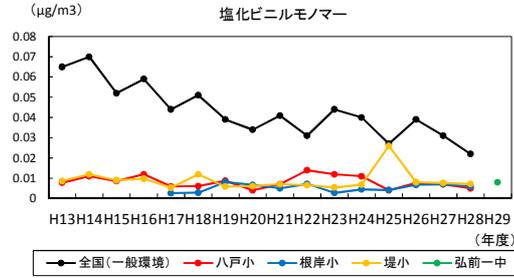
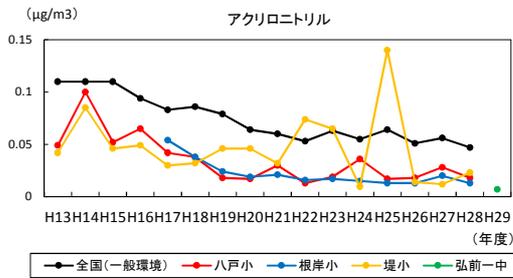


図2 (1) 有害大気汚染物質モニタリング調査における経年変化

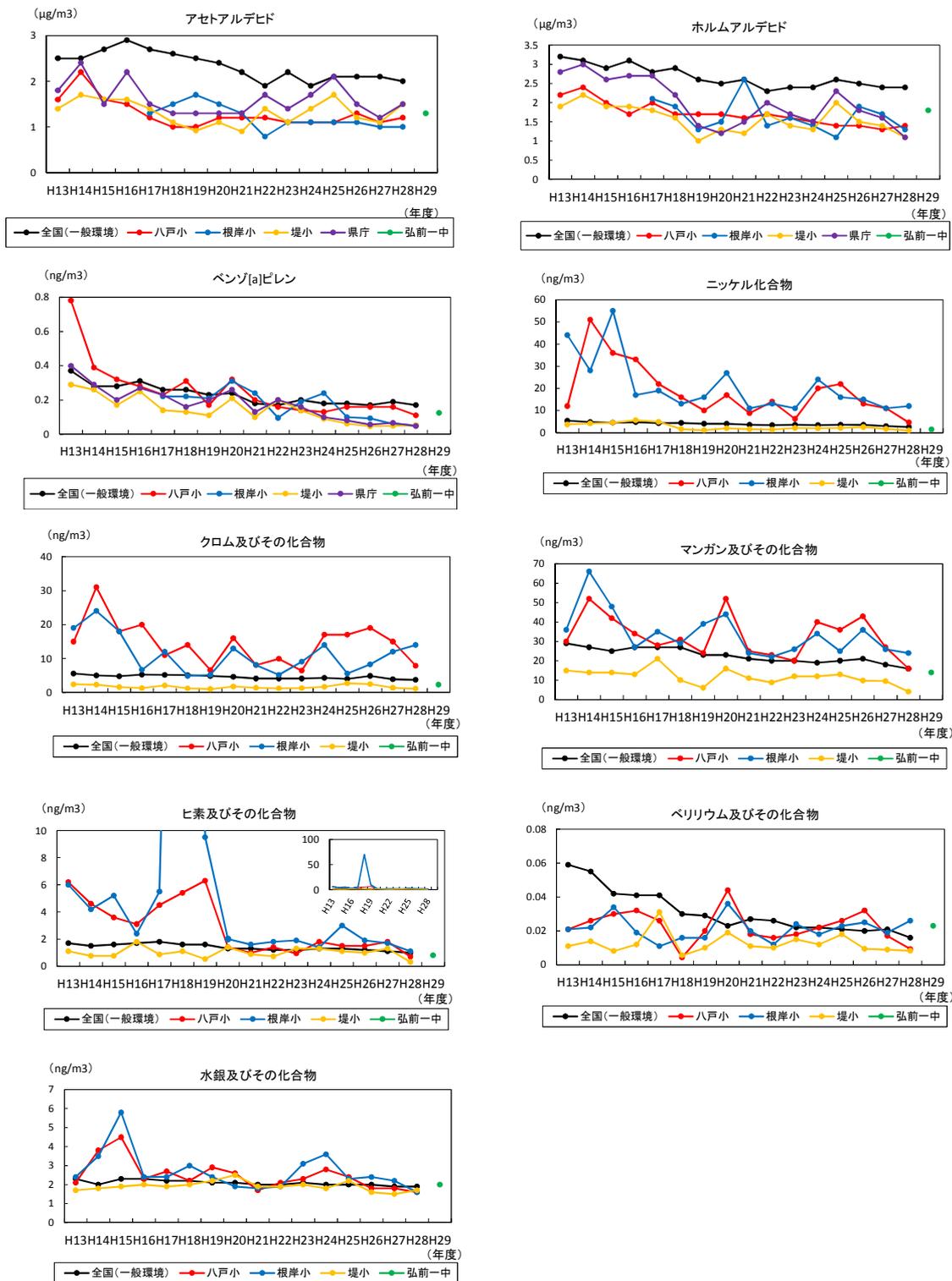


図2 (2) 有害大気汚染物質モニタリング調査における経年変化

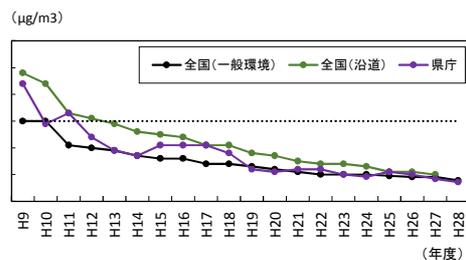


図3 ベンゼンの年平均値経年変化

3. 3 季節変動

全 21 物質について、地点ごとの月別平均値の推移を図 7 に示す。

3. 3. 1 揮発性有機化合物（VOCs）

全体的に季節変動は明瞭でないものが多かったが、その中で、比較的明瞭と考えられたのは、1,3-ブタジエン、ベンゼンで、夏から秋にかけて低濃度で、冬から春にかけて高くなっており、また、ホルムアルデヒドについては初夏から初秋にかけてやや高くなっていった。

3. 3. 2 ベンゾ[a]ピレン

いずれの地点も夏から秋にかけて低く、冬から春にかけて高くなっている。

全国的にベンゾ[a]ピレン濃度は秋～冬季にかけて高濃度、夏季に低濃度になる季節変動をしつつ、経年的に減少する傾向が認められているが¹⁴⁾、本県においても同様の傾向であった。このことは、秋～冬季は気温が低く暖房等の化石燃料の燃焼が多くなり、また、冬季に大気が安定し、拡散しにくくなるためベンゾ[a]ピレン濃度が上昇し、逆に春～夏季の気温の高い時期は化石燃料の燃焼が少ないことや紫外線などによる光化学反応で分解されてベンゾ[a]ピレン濃度が減少するためと考えられる。

3. 3. 3 重金属類

ニッケル、クロム、マンガン、ヒ素、水銀については、八戸地域（八小局、根岸小局）において春から夏にかけて高くなっていったが、堤小局、一中局においては明瞭な季節変動は見られなかった。

また、ベリリウムについては大半のデータが定量下限値未満であった。なお、一中局における平成 29 年 5 月のベリリウム、マンガンの突出した値については次の 3. 3. 4 に記述する。

3. 3. 4 黄砂の影響が疑われる高濃度事象

通常捕集される粉じんは灰色である（①）。

平成 29 年 5 月の一中局におけるモニタリングにおいてやや茶褐色がかった粉じん（②）が捕集された（図 4）。マンガン及びその化合物濃度は 110 ng/m^3 で 4 月（ 5.6 ng/m^3 ）の約 20 倍であった（図 6）。また、ベリリウム及びその化合物については発生源は存在せず濃度は一中局においては通常定量下限値未満あるいはその近傍レベルであるのに対し 0.19 ng/m^3 であった（図 5）。5/7～8 にかけ本県において黄砂が観測されたが、モニタリ

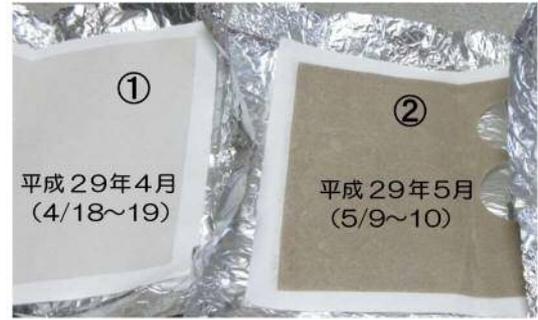


図 4 ハイポリウム石英繊維ろ紙に捕集された粉じん

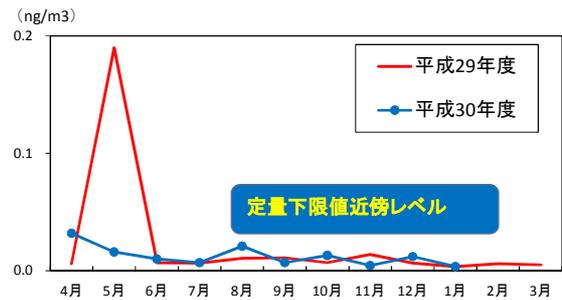


図 5 ベリリウム月間値推移

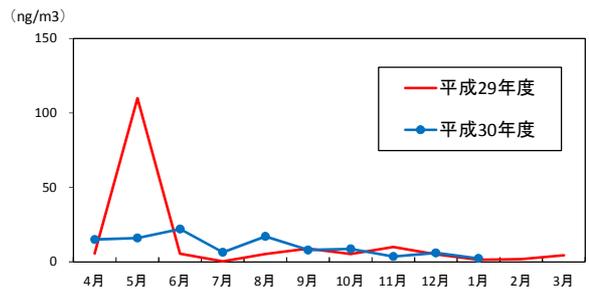


図 6 マンガン月間値推移

ング初日（5/9）の昼から夕方にかけての風速 4 m/s 程度（1 時間値）の N 系の風による黄砂の巻き上げの影響の可能性が示唆されたことから、原因究明の一助とするため石英繊維ろ紙上に捕集された粒子について、走査型電子顕微鏡（SEM）¹⁵⁻¹⁶⁾ による表面観察を行った。平成 29 年 4 月採取分（4/18～19）（①）、そして前日まで観測された黄砂の影響が推測されるろ紙として平成 29 年 5 月採取分（5/9～10）（②）について観察した。①については細かいものから多少粗い粒子が繊維に付着しており、②については①と比較し粗大な粒子が多数繊維に付着していた（図 10）。

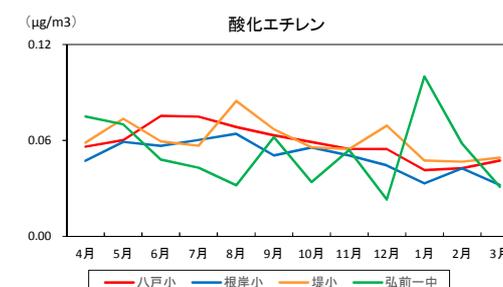
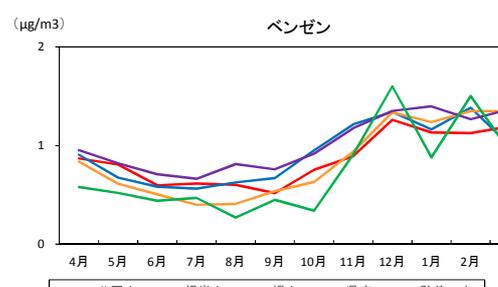
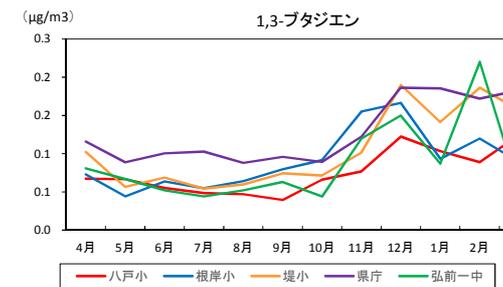
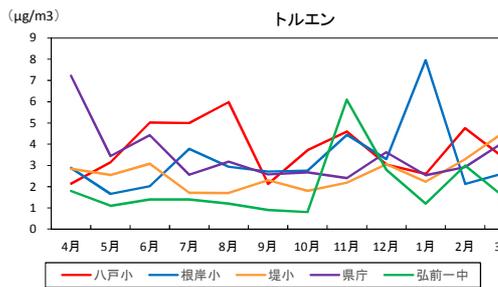
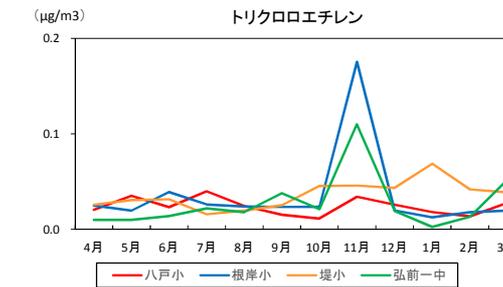
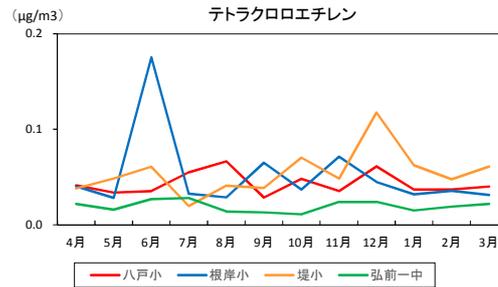
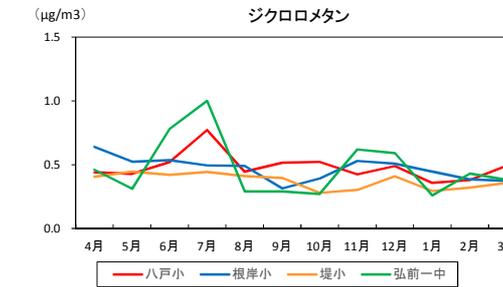
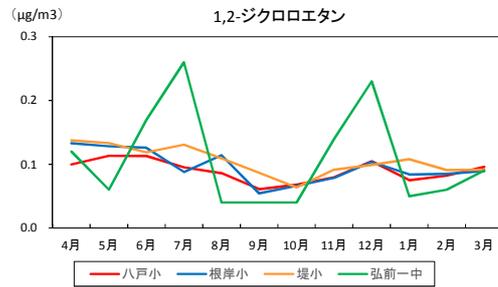
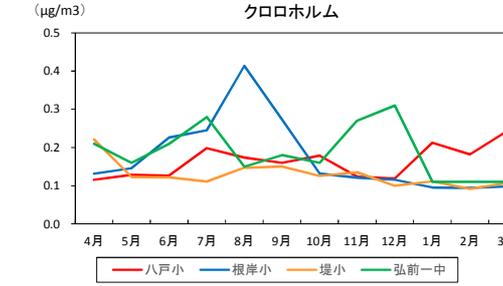
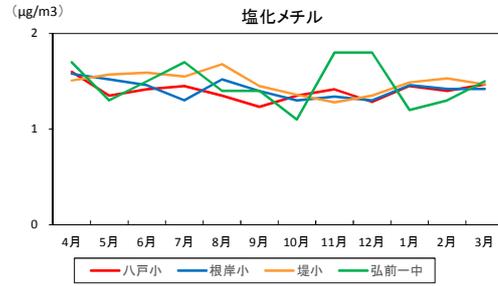
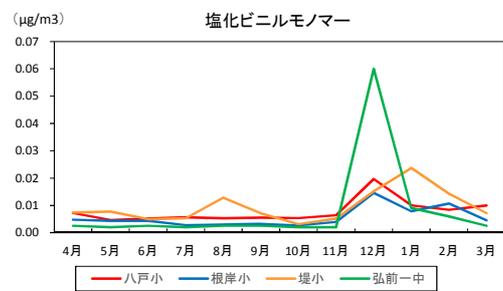
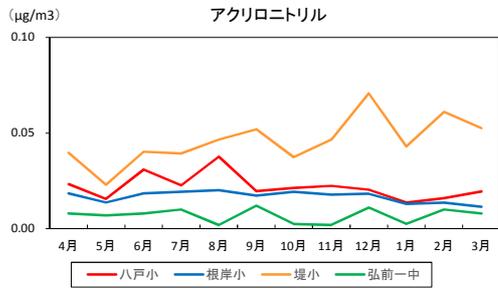


図7(1) 有害大気汚染物質モニタリング調査における月別平均値の推移

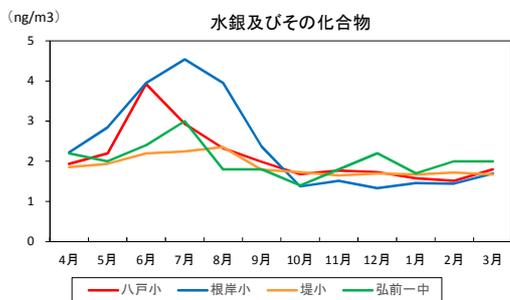
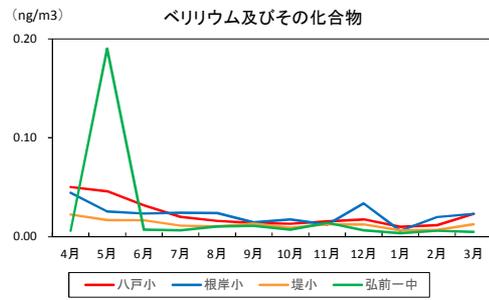
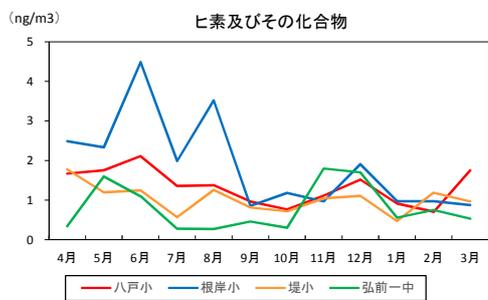
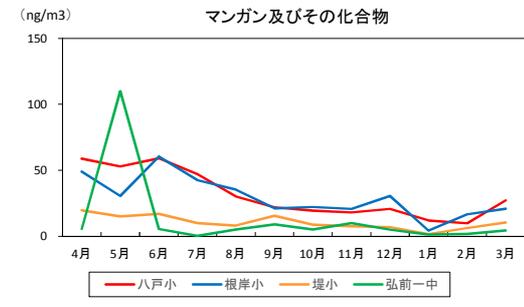
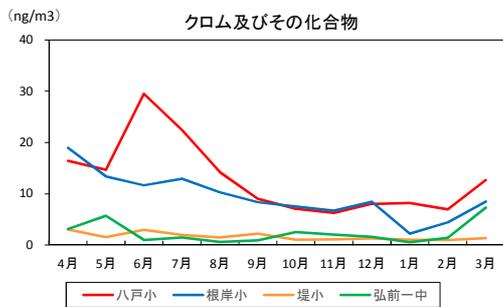
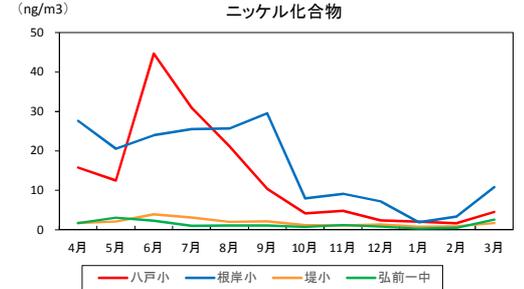
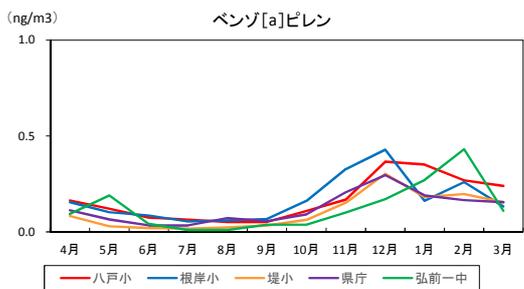
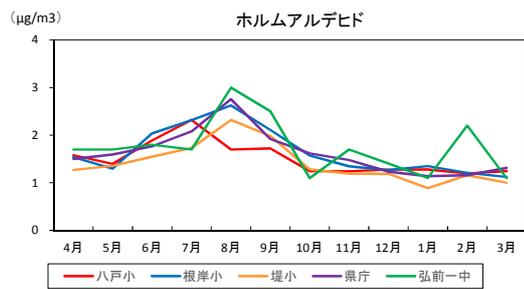
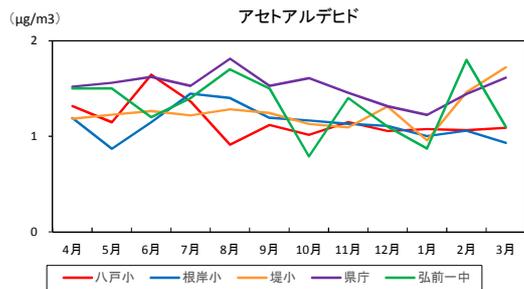


図7 (2) 有害大気汚染物質モニタリング調査における月別平均値の推移

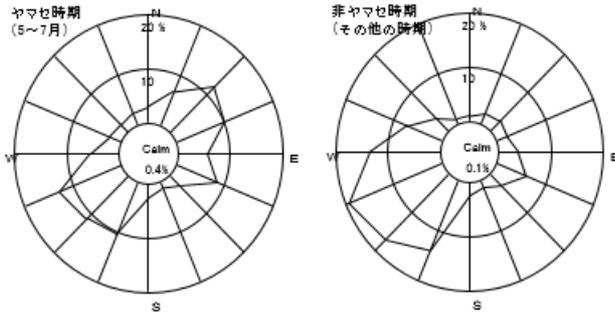


図8 八戸地域における平成29年度の風配図
出典：気象庁電子閲覧室データ
(八戸特別地域気象観測所)

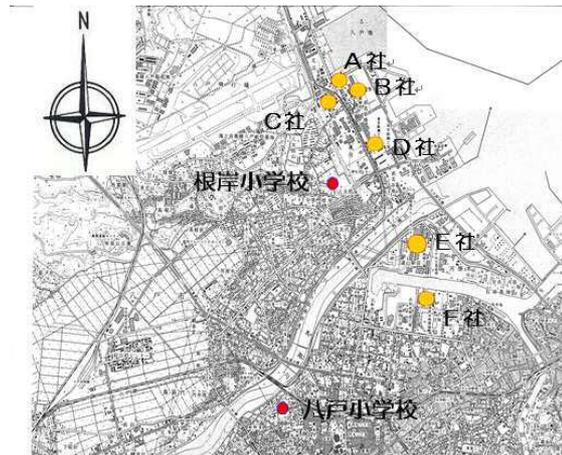


図9 八戸の臨海工業地帯における
重金属排出主要事業場

エネルギー分散型X線分析装置(EDX)による元素分析については、0.1%レベルの含有量でないと検出されないことから、今回、ベリリウムは確認できなかった。

なお、平成17年4月の有害大気汚染物質モニタリングにおいても石英繊維ろ紙上に黄土色の粉じんが捕集され、黄砂によるベリリウムの高濃度事例が報告されており¹⁴⁾、それによると、青森市及び八戸市で従来の測定値を1桁程度上回る濃度のベリリウムが観測されていた。

3.4 八戸地域の気候と臨海工業地帯

青森県は、三方海に囲まれ、東側の下北半島と西側の津軽半島が陸奥湾を取り囲み、奥羽山脈が県内を二分する複雑な地形で、同じ県内でも日本海側と太平洋側とでは気候が大きく異なる。

冬には湿った空気が山脈にぶつかり日本海側に雪を降らせる一方、夏は太平洋側で「ヤマセ」とよばれる冷湿な北東風の影響を受けるといわれている。

八戸地域は県の南東部に位置し、太平洋側に位置する北日本有数の臨海工業地域である(図9)。一例として、平成29年度における八戸市の風向について、ヤマセ時期(5~7月)と非ヤマセ時期(その他の期間)の風配図を図8に示す。ヤマセ時期は北東系の頻度は高く、その他の時期は低かった。

3.3.3で述べているように八戸地域においては、ヤマセ時に臨海工業地帯方向からの影響と考えられる春から夏にかけての重金属類の濃度の増加が見られ、八小局、根岸小局については気象条件等により臨海工業地帯等の影響を受けるものと推察された。

なお、本県では平成18年7月から平成28年12月まで八戸地域における詳細な濃度情報を得るために、ローボリウムエアサンプラー法を用いた年間を通じた濃度調査を実施したが、一部のデータについて主成分分析を行ったところ、ヤマセの吹く春夏には総合的に重金属類の濃度が高い傾向にあり、更に根岸小局ではB社から、八小局ではE、F社(図9)からの影響を主に受けていることが推察されている⁷⁾。

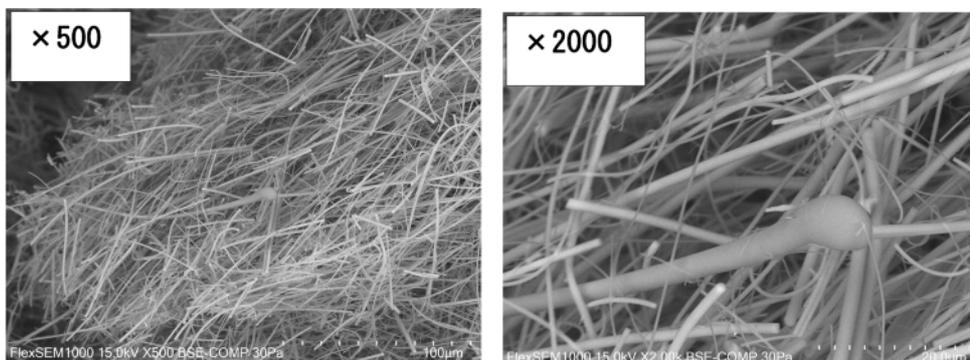
3.5 統計手法を用いた地点及び項目の特徴に関する考察

3.5.1 変動係数CV(%)

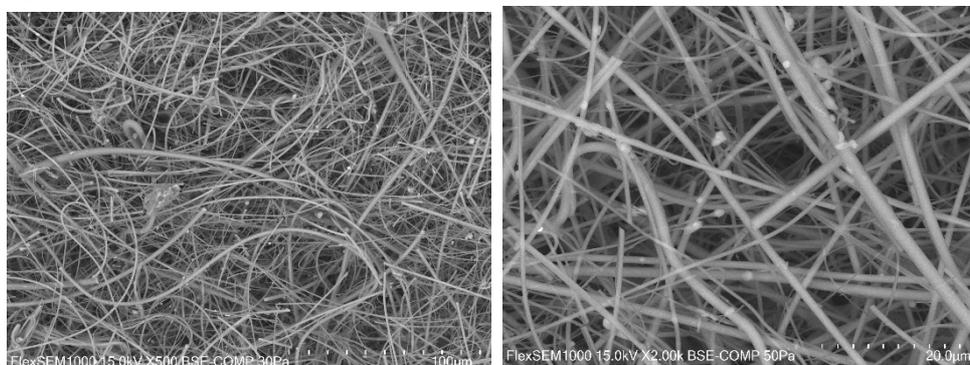
地点別の物質毎の濃度変動について比較するため、堤小局についてはn=60(平成24~28年度)、八小局についてはn=72(平成23~28年度)、根岸小局についてはn=60(平成23~27年度)、一中局についてはn=12(平成29年度)のサンプルを用い、地点別の各物質の変動係数を求め、折れ線グラフ化した(図11)。なお、本来折れ線グラフは時系列でのデータの推移を表す目的で作成されるものではあるが、物質間の比較や物質毎の地点の違いによるばらつきを視覚的に見やすく表現する目的で今回用いた。

21物質中、大半のデータが定量下限値未満あるいはその近傍であったアクリロニトリル、塩化ビニルモノマー、テトラクロロエチレン、トリクロロエチレン及びベリリウムの5物質については除外した。

操作ブランク石英繊維ろ紙



①平成29年4月18日～19日（定期モニタリング）



②平成29年5月9日～10日（定期モニタリング）

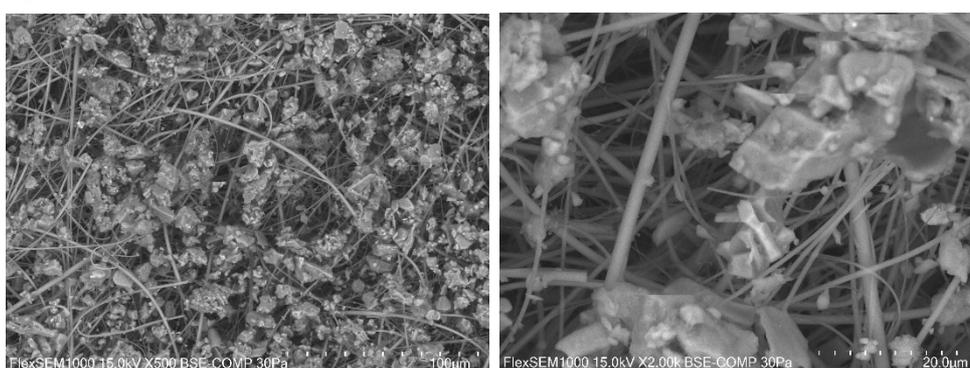


図 10 走査型電子顕微鏡による表面観察像
(装置名：日立ハイテクノロジーズ製 FlexSEM1000)

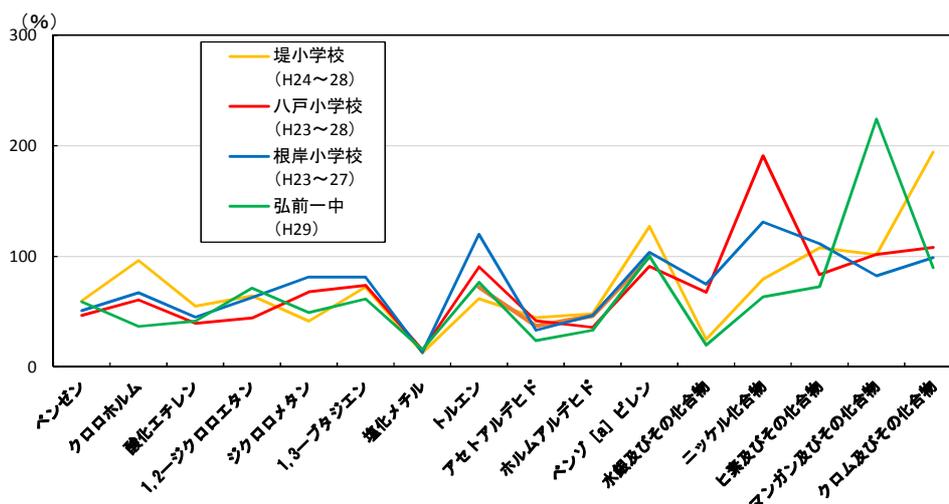


図 11 地点別物質毎の変動係数

また、一中局のマンガンについては 12 個のサンプルのうち平成 29 年 5 月における高濃度事例による特異的なバラツキと考えられ（「3. 3. 4 黄砂の影響が疑われる高濃度事象」参照）、堤小局のクロムについては濃度レベルが低いため、その結果濃度変動も大きな傾向となるものと考えられた。

ベンゼン、酸化エチレン、1,2-ジクロロエタン、1,3-ブタジエン、塩化メチル、アセトアルデヒド、ホルムアルデヒドについては 4 地点とも濃度変動は同程度であり、その中でも塩化メチルはほぼ一致していた。

水銀、ニッケルについては八小局、根岸小局が堤小局、一中局を上回っており、既にふれているように八戸地域においてはヤマセ時に臨海工業地帯の発生源の影響と考えられる濃度の増加が濃度変動に反映しているものと考えられた。

3. 5. 2 調査項目間の相関（単相関解析）

地点ごとの特性を把握するため、各項目間の相関行列を表 8 に示した。

なお、優先取組物質 21 物質中、大半のデータが定量下限値未満あるいはその近傍であったアクリロニトリル、塩化ビニルモノマー、テトラクロロエチレン、トリクロロエチレン及びベリリウムの 5 物質については除外し、4 地点ともに 16 物質間について、変動係数と同じサンプル数で単相関解析を行った。相関係数 0.7 以上のものを二重枠で示した。

八小局、根岸局、一中局についてはベンゼン、1,3-ブタジエン、ベンゾ [a] ピレン間それぞれにおいて有意水準 1% で正の相関を示した。なお、堤小局においてはベンゼンと 1,3-ブタジエン間において有意な正の相関は見られなかったが、ベンゼンとベンゾ [a] ピレンそして 1,3-ブタジエンとベンゾ [a] ピレン間において有意水準 1% で正の相関を示した。

ベンゼン、1,3-ブタジエン、ベンゾ [a] ピレンなどは自動車排ガス関連物質であり、各地点で比較的高い相関性を示している。

アセトアルデヒドとホルムアルデヒドについても各地点で有意水準 1% で正の相関を示した。

堤小局、八小局、根岸小局についてのニッケル、クロム、マンガン間それぞれにおいても有意水準 1% で正の相関を示し、特に八小局においては 0.761~0.887 と強い相関を示した。なお、既報⁷⁾において、八小局ではニッケル、クロム、マンガンの発生源の影響を主に受けていることが主成分分析により示唆されている。

3. 5. 3 主成分分析 (PCA)

3. 5. 3. 1 4 地点における主成分分析

主成分分析とは、互いに相関のある多種類の特性値を少数個の総合的な特性値に集約する方法として用いられている手法である。

今回、県内4地点(堤小局、八小局、根岸小局、一中局)の有害大気汚染物質濃度データの集団全体についての特性の把握を目的として204サンプル(変動係数算出と同じサンプル数の合計)を用いて主成分分析を適用した。その結果を表5～7及び図12に示す。

用いた項目(物質)としては、単相関解析に供した16物質のうち、近年におけるPRTR届出データに基づく大気への排出量の排出上位物質であるトルエン、クロロホルム、ベンゼン及び自動車排ガス関連物質である1,3-ブタジエン、ベンゾ[a]ピレンを除外した11物質(酸化エチレン、1,2-ジクロロエタン、ジクロロメタン、塩化メチル、アセトアルデヒド、ホルムアルデヒド、水銀及びその化合物、ニッケル化合物、ヒ素及びその化合物、マンガン及びその化合物、クロム及びその化合物)とした。

第1主成分(Z1)の寄与率は36%、第2主成分(Z2)の寄与率は18%で、Z2までの累積寄与率は53%であった。Z1についてはすべての変量の主成分負荷量が正の符号をもつことから総合的な影響の程度を示す指標(総合的影響指標)と推察された。Z2については、濃度変動の地点による差が比較的小さく、同程度の濃度レベル(年平均値)で推移している7物質の主成分負荷量が正符号であり、八小局、根岸小局が堤小局を上回って推移している重金属類4物質の主成分負荷量が負の符号であることから、バックグラウンドあるいは工業活動といった由来に関連する指標(由来指標)と推察された。

3. 5. 3. 2 地点による考察

主成分分析を行った結果について、全スコア(204)を地点ごとに色分けし、プロットした(図13)。

Z1スコアについては、八戸地域である八小局、根岸小局が広い分布範囲を示していた。

表5 固有値及び寄与率

成分	主成分 1	主成分 2	主成分 3
固有値	3.907	1.961	1.131
寄与率(%)	35.52	17.83	10.28
累積寄与率	35.52	53.35	63.63

表6 固有ベクトル

成分	主成分 1	主成分 2	主成分 3
酸化エチレン	0.248	0.052	-0.455
1,2-ジクロロエタン	0.178	0.482	0.195
ジクロロメタン	0.164	0.394	0.262
塩化メチル	0.076	0.464	0.418
アセトアルデヒド	0.252	0.322	-0.433
ホルムアルデヒド	0.288	0.254	-0.466
水銀及びその化合物	0.361	-0.227	0.018
ニッケル化合物	0.392	-0.296	0.161
ヒ素及びその化合物	0.307	0.045	0.168
マンガン及びその化合物	0.429	-0.174	0.102
クロム及びその化合物	0.406	-0.232	0.203

表7 主成分負荷量

成分	主成分 1	主成分 2	主成分 3
酸化エチレン	0.491	0.073	-0.484
1,2-ジクロロエタン	0.351	0.676	0.207
ジクロロメタン	0.324	0.552	0.279
塩化メチル	0.15	0.649	0.444
アセトアルデヒド	0.499	0.451	-0.461
ホルムアルデヒド	0.569	0.356	-0.496
水銀及びその化合物	0.713	-0.318	0.019
ニッケル化合物	0.774	-0.415	0.171
ヒ素及びその化合物	0.608	0.063	0.179
マンガン及びその化合物	0.848	-0.244	0.109
クロム及びその化合物	0.803	-0.325	0.216

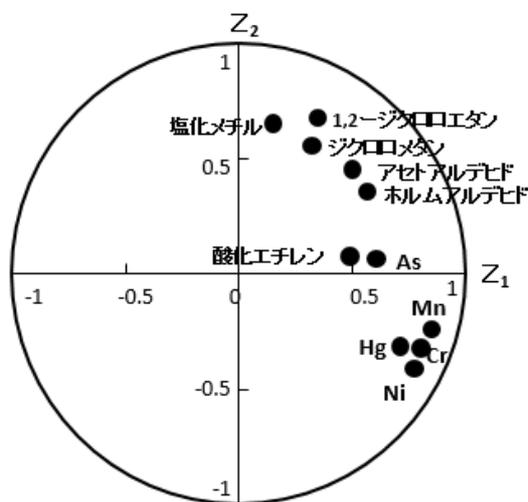


図12 Z₁とZ₂の負荷量散布図

Z2スコアについては、青森市、弘前市は正領域に(右肩あがりのかたまった分布)、八戸地域ではZ1スコアが正領域においては負領域に位置していた。これらのことは、青森市、弘前市は気象条件により大きな影響は受けず、八戸地域においては気象条件により重金属類の影響を受けることを示唆している。

3.5.3.3 気象条件による考察

主風向で差が見られるかを確認するため、主成分分析を行った結果について、全スコア (204) から八戸地域である八戸小及び根岸小に関するスコア (132) を抽出し、モニタリング時の主風向により色分けした (図 14)。

なお、区分については、『ヤマセ (NNE, NE, ENE, E)』、『非ヤマセ (NNE~E 以外)』の 2 つに分類した。

その結果、八戸地域においては、非ヤマセ時には Z1 に関してはある範囲内におさまっているが、ヤマセ時には Z1 にばらつきが見られ、更に、Z1 の高めのサンプルにおいて Z2 も総じてばらつく傾向が見られ、臨海工業地帯からの影響と推察された。

3.5.4 クラスタ分析

2 つ以上のデータがあるとき、これらをいくつかのグループに分類し、集団の特徴を簡潔に説明する方法をクラスタ分析という。

今回、地点間の類似性をみる目的で、地点の平均値データを用いてサンプルクラスタの分類を行った。なお、地点毎の平均値は変動係数の算出と同じサンプルを用いた。また、優先取組物質 21 物質を用いた。距離の測定には $(1 - |\text{相関係数}|)$ を、距離の定義としてはワード法を用いてクラスタ分析を行い、樹形図を作成した (図 15)。

クラスタとしては、堤小局、一中局からなるクラスタと、八小局、根岸小局からなるクラスタの大きく 2 つに分類され、年間を通し、堤小局と一中局は類似した大気質、そして同一市内である八小局と根岸小局は類似した大気質であるとの結果が示された。

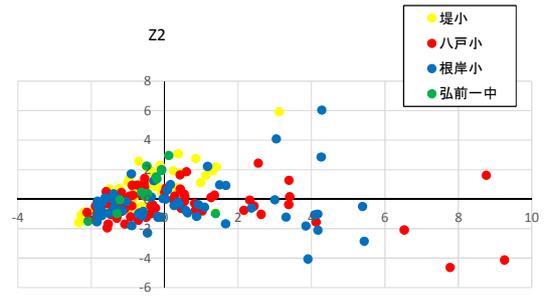


図 13 主成分スコアの地点による考察

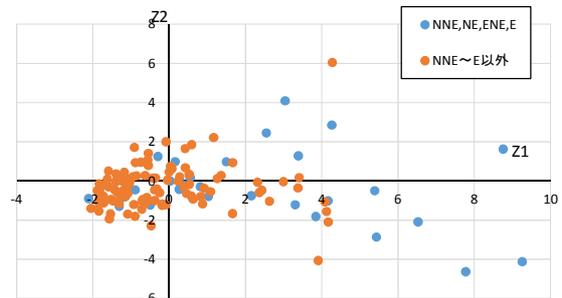


図 14 八戸地域における主成分スコアの主風向による考察

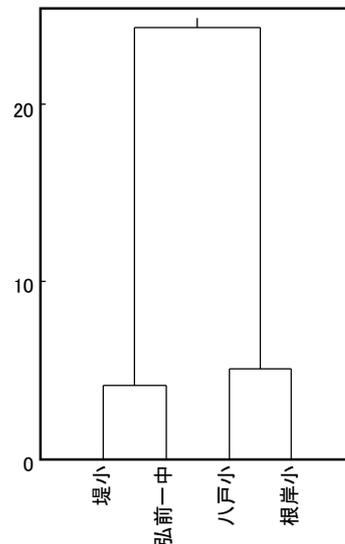


図 15 地点間に関するクラスタ分析

表8 項目間の相関

* : 5%有意 (>0.254)
** : 1%有意 (>0.330)

堤小局(H24~28)	ベンゼン	クロロホルム	酸化エチレン	1,2-ジクロロエタン	ジクロロメタン	1,3-ブタジエン	塩化メチル	トルエン	アセトアルデヒド	ホルムアルデヒド	ベンゾ[a]ピレン	水銀及びその化合物	ニッケル化合物	ヒ素及びその化合物	マンガン及びその化合物	クロム及びその化合物
ベンゼン	1															
クロロホルム	0.101	1														
酸化エチレン	-0.061	0.084	1													
1,2-ジクロロエタン	0.330*	0.357**	-0.156	1												
ジクロロメタン	0.233	0.279*	0.153	0.745**	1											
1,3-ブタジエン	0.231	-0.153	0.257*	-0.360**	-0.322*	1										
塩化メチル	-0.014	0.385**	0.062	0.383**	0.474**	-0.019	1									
トルエン	0.649**	0.077	-0.030	0.201	0.315*	0.200	0.201	1								
アセトアルデヒド	0.312*	0.151	0.044	0.310*	0.324*	0.150	0.345**	0.551**	1							
ホルムアルデヒド	-0.231	0.129	-0.025	0.421**	0.315*	-0.119	0.383**	-0.048	0.397**	1						
ベンゾ[a]ピレン	0.358**	-0.129	0.125	-0.047	-0.251	0.333**	-0.248	0.067	0.131	-0.110	1					
水銀及びその化合物	-0.092	0.218	-0.270*	0.583**	0.418**	-0.314*	0.442**	0.067	0.269*	0.460**	-0.204	1				
ニッケル化合物	-0.237	-0.010	-0.037	0.195	0.223	-0.062	0.171	-0.089	0.174	0.368**	-0.245	0.357**	1			
ヒ素及びその化合物	0.196	0.047	0.338**	0.325*	0.234	0.101	0.134	-0.015	0.191	0.305*	0.139	0.174	0.282*	1		
マンガン及びその化合物	-0.019	0.004	0.021	0.259*	0.123	0.051	0.079	0.046	0.266*	0.405**	-0.066	0.201	0.542**	0.550**	1	
クロム及びその化合物	-0.141	-0.079	-0.196	0.263**	0.150**	-0.064	0.121**	-0.078	0.095	0.287**	-0.156	0.279**	0.657**	0.168*	0.658**	1

* : 5%有意 (>0.232)
** : 1%有意 (>0.302)

八小局(H23~28)	ベンゼン	クロロホルム	酸化エチレン	1,2-ジクロロエタン	ジクロロメタン	1,3-ブタジエン	塩化メチル	トルエン	アセトアルデヒド	ホルムアルデヒド	ベンゾ[a]ピレン	水銀及びその化合物	ニッケル化合物	ヒ素及びその化合物	マンガン及びその化合物	クロム及びその化合物
ベンゼン	1															
クロロホルム	-0.070	1														
酸化エチレン	0.144	0.173	1													
1,2-ジクロロエタン	0.156	0.108	0.382**	1												
ジクロロメタン	-0.054	0.561**	0.198	0.152	1											
1,3-ブタジエン	0.728**	-0.040	0.115	-0.072	0.013	1										
塩化メチル	0.048	0.266*	-0.120	0.232*	0.252*	0.049	1									
トルエン	0.233*	0.136	0.269*	0.174	0.023	0.079	-0.064	1								
アセトアルデヒド	0.285*	0.093	0.539**	0.243*	0.264*	0.360**	0.118	0.172	1							
ホルムアルデヒド	0.063	0.100	0.684**	0.190	0.261*	0.177	-0.071	0.222	0.737**	1						
ベンゾ[a]ピレン	0.758**	-0.051	0.006	-0.060	0.036	0.751**	0.124	0.116	0.226	0.003	1					
水銀及びその化合物	0.011	0.046	0.475**	0.207	0.005	0.012	-0.118	0.382**	0.362**	0.387**	-0.135	1				
ニッケル化合物	-0.064	0.147	0.507**	0.289*	0.130	-0.050	0.062	0.470**	0.456**	0.455**	-0.134	0.869**	1			
ヒ素及びその化合物	0.239*	0.356**	0.437**	0.418**	0.206	0.105	0.151	0.200	0.413**	0.309**	0.154	0.476**	0.463**	1		
マンガン及びその化合物	-0.021	0.102	0.530**	0.314**	0.141	-0.062	0.093	0.338**	0.519**	0.493**	-0.086	0.606**	0.761**	0.473**	1	
クロム及びその化合物	-0.028	0.199	0.497**	0.383**	0.207	-0.034	0.159	0.429**	0.514**	0.451**	-0.045	0.637**	0.887**	0.487**	0.867**	1

* : 5%有意 (>0.254)
** : 1%有意 (>0.302)

根岸小局(H23~27)	ベンゼン	クロロホルム	酸化エチレン	1,2-ジクロロエタン	ジクロロメタン	1,3-ブタジエン	塩化メチル	トルエン	アセトアルデヒド	ホルムアルデヒド	ベンゾ[a]ピレン	水銀及びその化合物	ニッケル化合物	ヒ素及びその化合物	マンガン及びその化合物	クロム及びその化合物
ベンゼン	1															
クロロホルム	-0.333**	1														
酸化エチレン	0.187	0.387**	1													
1,2-ジクロロエタン	0.031	0.340**	0.493**	1												
ジクロロメタン	-0.013	0.110	0.190	0.475**	1											
1,3-ブタジエン	0.800**	-0.213	0.159	-0.133	-0.190	1										
塩化メチル	-0.147	0.257*	-0.030	0.524**	0.445**	-0.331**	1									
トルエン	0.284*	-0.071	-0.039	-0.067	-0.040	0.262*	-0.233	1								
アセトアルデヒド	0.108	0.486**	0.604**	0.421**	0.273*	0.151	0.120	0.049	1							
ホルムアルデヒド	-0.227	0.693**	0.526**	0.351**	0.239	-0.097	0.048	0.018	0.771**	1						
ベンゾ[a]ピレン	0.762**	-0.322*	0.175	0.002	-0.092	0.820**	-0.334**	0.281*	0.175	-0.127	1					
水銀及びその化合物	-0.288*	0.376**	0.260*	-0.107	-0.082	-0.154	-0.074	-0.032	0.307*	0.343**	-0.167	1				
ニッケル化合物	-0.164	0.150	0.094	-0.093	-0.117	-0.047	-0.004	-0.028	0.202	0.173	-0.078	0.440**	1			
ヒ素及びその化合物	-0.179	0.213	0.162	0.297*	0.159	-0.238	0.195	0.020	0.333**	0.192	-0.085	0.464**	0.147	1		
マンガン及びその化合物	-0.217	0.237	0.356**	0.219	0.201	-0.157	0.137	-0.043	0.500**	0.426**	-0.003	0.661**	0.527**	0.585**	1	
クロム及びその化合物	-0.064	0.175	0.227	0.093	-0.056	-0.018	0.085	0.059	0.343**	0.289*	0.063	0.452**	0.763**	0.246	0.671**	1

* : 5%有意 (>0.576)
** : 1%有意 (>0.708)

一中局(H29)	ベンゼン	クロロホルム	酸化エチレン	1,2-ジクロロエタン	ジクロロメタン	1,3-ブタジエン	塩化メチル	トルエン	アセトアルデヒド	ホルムアルデヒド	ベンゾ[a]ピレン	水銀及びその化合物	ニッケル化合物	ヒ素及びその化合物	マンガン及びその化合物	クロム及びその化合物
ベンゼン	1															
クロロホルム	0.107	1														
酸化エチレン	-0.074	-0.338	1													
1,2-ジクロロエタン	0.243	0.842**	-0.345	1												
ジクロロメタン	0.061	0.719**	-0.270	0.915**	1											
1,3-ブタジエン	0.870**	0.025	0.077	0.046	-0.007	1										
塩化メチル	0.275	0.814**	-0.283	0.790**	0.675*	0.141	1									
トルエン	0.516	0.429	-0.063	0.287	0.292	0.586*	0.572	1								
アセトアルデヒド	0.006	-0.012	0.043	-0.079	0.075	0.334	0.210	0.208	1							
ホルムアルデヒド	-0.255	-0.043	-0.087	-0.225	-0.070	0.075	0.023	-0.019	0.823**	1						
ベンゾ[a]ピレン	0.741**	-0.400	0.413	-0.231	-0.257	0.821**	-0.266	0.242	0.154	-0.143	1					
水銀及びその化合物	0.034	0.529	-0.141	0.824**	0.867**	-0.061	0.593*	-0.027	0.250	0.033	-0.163	1				
ニッケル化合物	-0.292	-0.085	-0.052	0.010	0.037	-0.408	0.098	-0.175	0.102	-0.085	-0.229	0.204	1			
ヒ素及びその化合物	0.464	0.445	-0.047	0.305	0.189	0.405	0.387	0.627*	0.006	-0.166	0.256	0.012	0.273	1		
マンガン及びその化合物	-0.176	-0.106	0.236	-0.214	-0.238	-0.123	-0.211	-0.140	0.188	-0.004	0.127	-0.058	0.642*	0.458	1	
クロム及びその化合物	0.027	-0.252	-0.130	-0.112	-0.192	-0.200	-0.006	-0.089	-0.106	-0.430	0.024	-0.024	0.749**	0.135	0.502	1

4. まとめ

有害大気汚染物質モニタリング調査についてとりまとめた結果、以下の知見が得られた。

- ・環境基準値等が定められている項目のうち、これまでに基準値等を超過したのは、平成9年と11年のベンゼンのみで、現在ではすべての地点で基準値あるいは指針値以下である。
- ・各物質濃度の経年変化は概ね減少もしくは横ばい傾向であったが、1,2-ジクロロエタンはやや増加傾向にあった。
- ・平成19年度以前の八戸地域のヒ素濃度は全国的に見て高めに推移していたが、平成20年度には全国平均値とほぼ同じレベルまで低減され、以降概ね横ばいで推移している。
- ・1,3-ブタジエン、ベンゼン、ホルムアルデヒド、ベンゾ[a]ピレンに比較的明瞭な季節変動が見られた。
- ・ニッケル、クロム、マンガン、ヒ素、水銀について、八戸地域において春から夏にかけて堤小局や一中局と比較し、やや高めの値を示した。
- ・項目間の相関では、ベンゼンと1,3-ブタジエン等に有意な相関が見られた。
- ・11項目、204サンプルについて主成分分析を行った結果、第1主成分(Z1)は総合的な影響の程度を示す指標、第2主成分(Z2)はバックグラウンドあるいは工業活動といった由来に関連する指標と推察された。八戸地域ではヤマセの吹く時期に概して総合的な影響や重金属類の影響の度合いが高かった。
- ・4地点間のサンプルクラスター分析により、堤小局、一中局からなるクラスター、八小局、根岸小局からなるクラスターの2つに分類された。
- ・平成29年5月の一中局におけるモニタリング時に、ベリリウムやマンガンが通常時と比較し高い値が観測されたが、粉じんについて走査型電子顕微鏡(SEM)による表面観察を行ったところ、通常時とは異なる粗大な粒子が多数繊維に付着していた。前々日～前日に黄砂が観測されたことから、黄砂の巻き上げの影響が示唆された。

5. おわりに

県内における有害大気汚染物質モニタリング調査については、平成9年10月から調査開始し、途中、平成18年10月の青森市、そして平成29年1月の八戸市の中核市移行等に伴い、現在4つの実施主体に分かれ5地点で実施されている。蓄積されたデータを全県的に監視・解析・評価するため、今後も市と情報共有・連携しながらモニタリング体制を構築していくことが必要と考える。

また、人員、予算、設備の限られた中において、他機関からの技術支援等も受けながら種々の事例の原因究明に当たっていくことも必要と考える。

謝 辞

本調査の取りまとめに当たり、データ提供いただきました青森市並びに八戸市に、また、走査型電子顕微鏡(SEM)による表面観察及びエネルギー分散型X線分析装置(EDX)による元素分析の実施について御協力いただいた地方独立行政法人青森県産業技術センター八戸工業研究所 技術支援部 高柳和弘研究管理員に深く感謝いたします。

引用文献

- 1)花石竜治, 他: 八戸市内における有害大気汚染物質(重金属類)の発生源の推定. 青森県環境保健センター研究報告,12,31-41,2001.
- 2)花石竜治, 他: 青森県における有害大気汚染物質モニタリングの分析方法の確立ー重金属類ー. 青森県環境保健センター研究報告,12,60-67,2001.
- 3)宮野裕文, 他: 線形回帰を用いた危険風向に対する大気中のニッケル・ヒ素濃度の推定. 青森県環境保健センター研究報告,14,37-50,2003.
- 4)宮野裕文, 他: 八戸市内における大気中のヒ素・ニッケル濃度の推定計算ー拡散計算値と実測値の適合性の検討ー. 青森県環境保健センター研究報告,14,51-61,2003.
- 5)花石竜治, 他: 八戸市内の金属関係工場周辺地域での浮遊粉じんの粒径分布ーアンダーセンエアーサンプラーによる測定結果ー. 青森県環境保健センター研究報告,14,81-83,2003.
- 6)花石竜治, 他: 八戸地域における有害大気汚染物質としてのニッケルの形態別分析結果. 青森県環境保健センター研究報告,21,42-45,2010.

- 7) 対馬典子, 他: 八戸地域における環境大気中の重金属成分モニタリングーローボリウムエアサンプラー法による濃度調査ー. 青森県環境保健センター研究報告, **22**, 11-22, 2011.
- 8) 花石竜治, 他: 八戸地域における有害大気汚染物質の発生源推定についてー多元素分析に焦点を当ててー. 青森県環境保健センター研究報告, **22**, 23-27, 2011.
- 9) 安田徳彦, 他: 八戸地域における環境大気中ニッケル化合物のモニタリングについて. 青森県環境保健センター研究報告, **25**, 52-55, 2014.
- 10) 対馬典子, 他: 八戸地域における環境大気中インジウム濃度ーローボリウムエアサンプラー法による濃度調査よりー. 青森県環境保健センター年報, **28**, 63-73, 2017.
- 11) 猪股弥生, 他: 2000～2013年の日本における大気中ベンゾ[a]ピレン濃度の経年変動ートレンド解析ー. 大気環境学会誌, **51(2)**, 111-122, 2016.
- 12) 石塚伸一, 他: 八戸市における大気中のベンゾ[a]ピレン. 青森県公害センター, **4**, 28-35, 1979.
- 13) 工藤香織: 有害大気汚染物質排出抑制対策の取組みについて. 第56回全国大気汚染防止連絡協議会, 平成22年11月2日(愛媛県松山市)
- 14) 花石竜治, 他: 黄砂飛来時における有害大気汚染物質の高濃度事例. 青森県環境保健センター研究報告, **16**, 31-34, 2006.
- 15) 加藤寛子, 他: 大気中微小粒子状物質のSEM-EDSによる解析. 広島市衛研年報 **35**, 132-134(2016).
- 16) 中島寛則: 大気中粒子の電子顕微鏡による観察事例. 第44回環境保全・公害防止研究発表会(2017.11).

Monitoring of hazardous air pollutants in Aomori Prefecture

- With emphasis on the trend and seasonal variation of priority substances considering measures -

Noriko Tsushima, Nobutoshi Utsumi

In Aomori Prefecture, a hazardous air pollutant monitoring was started in October 1997 and, now, 21 priority substances considering measures are investigated once a month at 5 sites in the prefecture (4 key organizations; Ministry of Environment, Aomori Prefecture, Aomori-shi and Hachinohe-shi). While benzene exceeded the environmental standard at the points in the roadside areas in 1997 and 1999, none of the substances with established environmental standards and guidance values has exceeded the standards thereafter. The concentration changes in the respective substances have mostly shown a decreasing or leveling-off trend, but 1,2-dichloroethane showed a slightly increasing trend. In addition, the concentration of arsenic in Hachinohe area, which had remained at a slightly higher level in comparison with the national level before 2007, was reduced to almost the same level as the national mean in 2008 and is going sideways since then.

Key words : heavy metal, yellow sand , hazardous air pollutants monitoring ,
volatile organic compounds

2 ノ ー ト

青森県におけるヒトパラインフルエンザウイルスの分子疫学(2011~2017)

筒井理華 菩提寺誉子 福田理

青森県内におけるヒトパラインフルエンザウイルス (HPIV) の発生動向および臨床症状との関連を明らかにすることを目的として、2011 年 4 月から 2018 年 3 月までに県内の医療機関を受診し呼吸器症状を呈する小児患者 1269 名の検体の遺伝子検査を行った。その結果、45 名の検体から HPIV が検出され、HPIV の *haemagglutinin-neuraminidase* 遺伝子領域の塩基配列の解析では、HPIV1 型が 15 検体、HPIV3 型が 27 検体、HPIV4 型が 3 検体検出された。HPIV1 型および HPIV3 型と呼吸器症状の関連では、HPIV1 型では上気道炎が、HPIV3 型では下気道炎が多いように見られた。

Key Words : Human Parainfluenzavirus, Molecular epidemiology

1. はじめに

ヒトパラインフルエンザウイルス (Human Parainfluenzavirus : 以下、HPIV) は、パラミクソウイルス科に属するマイナス一本鎖 RNA ウイルスである。パラミクソウイルス科には、レスピロウイルス属である HPIV1 型および HPIV 3 型、ルブラウイルス属である HPIV2 型および HPIV4 型がある。HPIV は小児を中心とした急性呼吸器感染症を引き起こす原因ウイルスの一つであり、クループや上気道炎、気管支炎の原因としても知られている^{1,2)}。多くの小児は生後 2 歳までに HPIV 3 型に感染し、5 歳頃までには大半が HPIV 1 型、HPIV 2 型、HPIV 4 型に感染する。

今回、遺伝子群別と臨床症状との関連を明らかにすることを目的として、本県で 2011 年 4 月から 2018 年 3 月までに呼吸器症状を呈する小児患者の検体から検出された HPIV の分子疫学解析を行ったので報告する。

2. 材料と方法

2.1 検査材料

2011 年 4 月から 2018 年 3 月までに呼吸器症状

を呈し、病原体定点医療機関に外来受診あるいは入院した小児患者から採取された咽頭ぬぐい液または鼻汁 1660 検体中インフルエンザと診断された検体 391 検体を除く 1269 検体を用いた。

2.2 検査方法

1) ウイルス RNA の抽出・HPIV 遺伝子の検出

QIAamp Viral RNA Mini Kit により RNA 抽出後、表 1 のプライマー^{3,4,5)}および QIAGEN OneStep RT-PCR Kit を使用し、HPIV の *haemagglutinin-neuraminidase* (HN) 遺伝子領域のマルチプレックス RT-PCR 法により増幅した。アニーリング温度は 55°C とした。PCR 反応後、電気泳動を行い、陽性バンドが検出された検体の増幅産物をダイレクトシーケンス法により同定した。

2) 遺伝子解析

遺伝子群別は、ダイレクトシーケンス法で HPIV の HN 遺伝子領域の塩基配列を決定することにより行った (HPIV1 型 223nt、HPIV3 型 131nt、HPIV4 型 411nt)。系統解析は塩基配列解析ソフトウェアの Molecular Evolutionary Genetics Analysis (MEGA)⁶⁾ を使用し、ML 法 (Maximum

表 1. マルチプレックス RT-PCR 法に用いたプライマー

HPIV	プライマー名	配列 (5'→3')	増幅産物 (nt)
HPIV1	PI51+	CCGGTAATTTCTCATACTATG	317
	PI51-	CCTTGGAGCGGAGTTGTAAAG	
HPIV2	PIP2+	AACAATCTGCTGCAGCATTT	507
	PIP2-	ATGTCAGACAATGGGCAAAT	
HPIV3	para3.1	CTCGAGGTTGTCAGGATATAG	189
	para3.2	CTTTGGGAGTTGAACACAGTT	
HPIV4	PIP4+	CTGAACGGTTGCATTCAGGT	451
	PIP4-	TTGCATCAAGAATGAGTCCT	

Likelihood : 最尤法) により行った。遺伝子群の参照配列は、HPIV1 型では Beck ら⁷⁾、HPIV 3 型では Mizuta ら⁸⁾の報告を参考にした。

また、ダイレクトシーケンス法により得られた塩基配列の相同性解析を行った。

3. 結果

3.1 遺伝子検出

HPIV の HN 遺伝子領域を増幅した結果を表 2 に示す。HPIV は 1269 検体中 45 検体 (3.6%) から検出された。そのうち HPIV1 型が 15 検体 (33.3%)、HPIV3 型が 27 検体 (60.0%)、HPIV4 型が 3 検体 (6.7%) であった。また、HPIV の単独感染は 45 検体中 32 検体であり、その内訳は HPIV1 型単独感染が 12 検体、HPIV3 型単独感染が 18 検体、HPIV4 型単独感染が 2 検体であった。これら以外の 13 検体は、全て HPIV と他の呼吸器系ウイルスとの 2 種類の混合感染であり、その内訳は、HPIV1 型ではヒトライノウイルス (HRV) が 2 検体、ヒトメタニューモウイルス (hMPV) が 1 検体、HPIV3 型では HRV が 6 検体、hRS ウイルス (hRSV)、ヒトボカウイルス (HBoV) およびコクサッキーウイルス (CV) B5 型が各 1 検体、HPIV4 型では HRV が 1 検体であった。

3.2 症状別検出状況

HPIV の検出状況を呼吸器症状の症状別に示す (表 3、図 1)。上気道炎 16 検体は、HPIV1 型単独感染が 9 検体 (56.3%)、HPIV1 型と HRV の混合感染が 1 検体 (6.2%)、HPIV 3 型単独感染が 4 検体 (25.0%)、HPIV3 型と HRV の混合感染が 2 検体 (12.5%) であった。下気道炎 21

検体は、HPIV1 型単独感染が 2 検体 (9.5%)、HPIV1 型と HRV および HPIV1 型と hMPV の混合感染が各 1 検体 (各 4.8%)、HPIV 3 型単独感染が 8 検体 (38.0%)、HPIV3 型と HRV が 3 検体 (14.2%)、HPIV3 型と hRSV、HPIV3 型と HBoV および HPIV3 型と CVB5 の混合感染が各 1 検体 (各 4.8%)、HPIV4 型単独感染が 2 検体 (9.5%)、HPIV4 型と HRV の混合感染が 1 検体 (4.8%) であった。その他の呼吸器症状 8 検体は、HPIV1 型単独感染が 1 検体、HPIV3 型単独感染が 6 検体、HPIV3 型と HRV の混合感染が 1 検体であった。なお、その他の呼吸器症状は、診断名または臨床症状に上気道炎や下気道炎等詳細な内容が記載されていなかった検体を示す。

3.3 ML 法による系統解析

HPIV1 型 15 検体、HPIV3 型 27 検体と同定された 42 検体のうち、遺伝子解析に用いる塩基数 (HPIV1 型 223nt、HPIV3 型 131nt) より短い検体を除いた 26 検体 (HPIV1 型 12 検体、HPIV3 型 14 検体) について、MEGA 法による分子系統解析を行った結果を図 2 および図 3 に示す。HPIV 遺伝子を ML 法により系統解析した結果、HPIV1 型は 12 検体全て同一クラスターのクラスター I に分類された。HPIV3 型は 14 検体全て同一クラスターのクラスター I に分類された。

3.4 相同性解析

HPIV1 型の塩基配列の相同性は 94.9~100%、HPIV3 型の相同性は 95.2~100% であった。

4. 考察

4.1 症状別検出状況

遺伝子群別で症状を比較すると、HPIV1型では15検体中上気道炎が10検体(66.7%)、下気道炎が4検体(26.7%)で上気道炎が多かった。HPIV3型では27検体中上気道炎が6検体(22.2%)、下気道炎が14検体(51.9%)で下気道炎が多かった。なお、HPIV4型では、下気道炎のみ検出された。

今回の調査においては、症例数が少ないことから遺伝子群と臨床症状との関連は明らかにするまでには至らなかった。

4.2 ML法による系統解析

HPIV1型12検体およびHPIV3型14検体のHN遺伝子領域を解析した結果、HPIV1型は山形県やアメリカで検出された株と類似する株であり(図2)、HPIV3型はアメリカで検出された株と類似する株であった(図3)。

4.3 相同性解析

HPIV1型およびHPIV3型の塩基配列の相同性がそれぞれ94%以上であることから、2011年4月から2018年3月までに青森県内で検出されたHPIV1型およびHPIV3型はそれぞれ同様の遺伝子群であることが示唆された。

5. まとめ

青森県内で2011年4月から2018年3月までに検出したHPIV45検体は、HPIV1型が15検体、HPIV3型が27検体、HPIV4型が3検体であった。

HPIV1型およびHPIV3型の遺伝子解析を行った結果、HPIV1型およびHPIV3型はそれぞれ同一クラスターに分類され、県内のHPIVはそれぞれ同様の遺伝子群であったことが示唆された。

表2. HPIVが検出された小児における呼吸器系ウイルス検出状況

検出されたウイルス	検体数	%
HPIV1	15	33.3%
HPIV3	27	60.0%
HPIV4	3	6.7%
内訳		
HPIV1	12	15
HPIV1/HRV	2	
HPIV1/hMPV	1	
HPIV3	18	27
HPIV3/HRV	6	
HPIV3/hRSV	1	
HPIV3/HBoV	1	
HPIV3/CVB5	1	
HPIV4	2	3
HPIV4/HRV	1	
合計(検体数)	45	100.0%

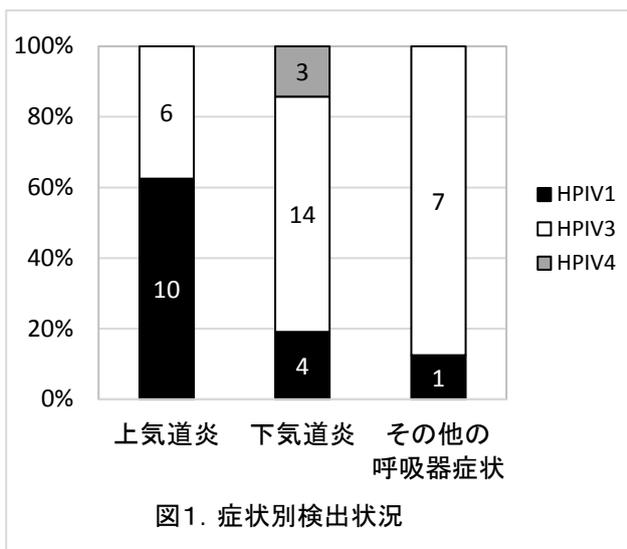
表3. 呼吸器症状の症状別HPIV検出状況

検出されたウイルス	呼吸器症状		
	上気道炎	下気道炎	その他の呼吸器症状
HPIV1	9	2	1
HPIV1/HRV	1	1	
HPIV1/hMPV			1
HPIV3	4	8	6
HPIV3/HRV	2	3	1
HPIV3/hRSV		1	
HPIV3/HBoV		1	
HPIV3/CVB5		1	
HPIV4		2	
HPIV4/HRV		1	
合計(検体数)	16	21	8

表2および3の略語

HPIV : human Parainfluenzavirus HRV : human Rhinovirus
HMPV : human Metapneumovirus hRSV : human RSvirus
CVB : coxsackievirus B HBoV : human Bocavirus

・HPIV1/HRV : HPIV1型とHRVの2種類の混合感染を示す。



HPIV1 型および HPIV3 型と呼吸器症状の関連では、HPIV1 型では上気道炎が、HPIV3 型では下気道炎が多いように見られたが、臨床症状と遺伝子群との関連を明らかにするためには、今後も継続してサーベイランスデータおよび遺伝学的データを蓄積する必要があると考えられた。

文 献

1)Karron R. A. et al. : Parainfluenza viruses. In *Fields Virology, 5th Edition*. 1497-1526, 2006
 2)Henrickson K. J. : Parainfluenza viruses. *Clin Microbiol Rev*. **16(2)**, 242-264, 2003.

3)Echevarria J. E. et al. : Simultaneous detection and identification of human parainfluenza viruses 1, 2, and 3 from clinical samples by multiplex PCR. *J. Clin. Microbiol.*, **36(5)**, 1388-1391, 1998
 4)Karron R. A. et al. : Rapid detection of parainfluenza virus type 3 RNA in respiratory specimens: use of reverse transcription-PCR-enzyme immunoassay. *J. Clin. Microbiol.*, **32(2)**, 484-488, 1994
 5)Aguilar J. C. et al. : Detection and identification of human parainfluenza viruses 1, 2, 3, and 4 in clinical samples of pediatric patients by multiplex reverse transcription-PCR. *J. Clin. Microbiol.*, **38(7)**, 1191-1195, 2000
 6)Kumar S. et al. : MEGA7: Molecular Evolutionary Genetics Analysis Version 7.0 for Bigger Datasets. *Molecular Biology and Evolution*, **33(7)**: 1870-1874, 2016
 7)Beck E. T. et al. : Genome sequencing and phylogenetic analysis of 39 human parainfluenza virus type 1 strains isolated from 1997-2010. *PLoS One*. **7(9)**, e46048, 2009
 8)Mizuta K. et al. : Molecular evolution of the haemagglutinin-neuraminidase gene in human parainfluenza virus type 3 isolates from children with acute respiratory illness in Yamagata prefecture, Japan. *J Med Microbiol*. **63(4)**, 570-577, 2014

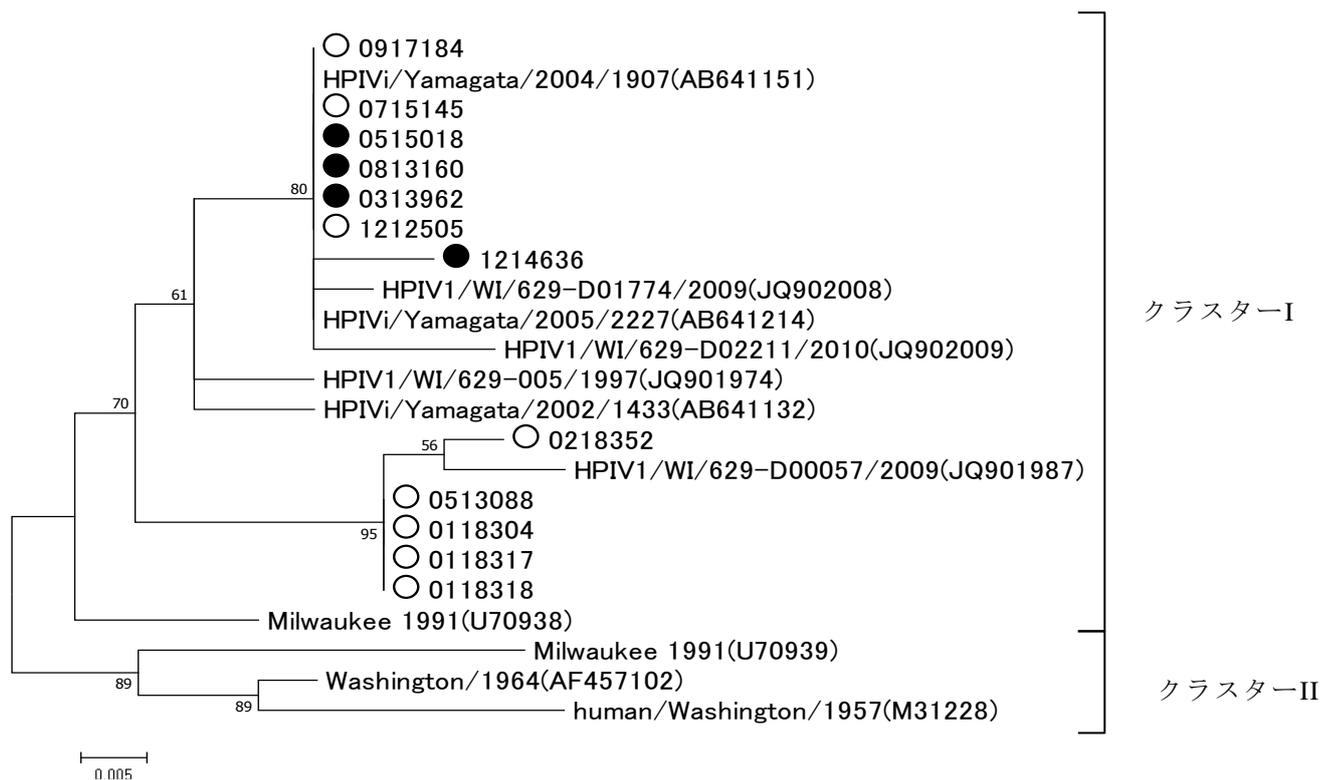


図 2. HPIV1 型分子系統解析結果 (ML 法 : *HN* 遺伝子 (223nt))
 ○ : 上気道炎、● : 下気道炎

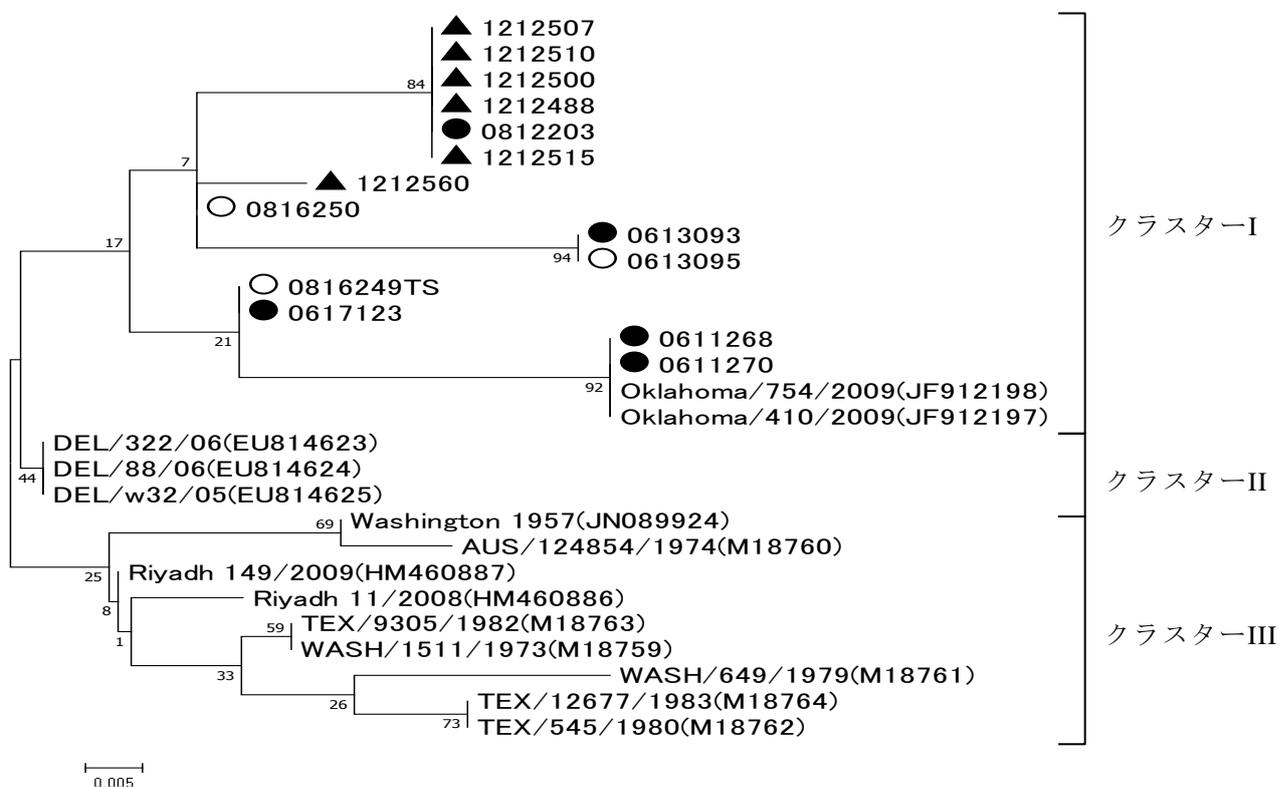


図 3. HPIV3 型分子系統解析結果 (ML 法 : *HN* 遺伝子 (131nt))
 ○ : 上気道炎、● : 下気道炎、▲ : その他の呼吸器症状

青森県における微小粒子状物質 (PM_{2.5}) 成分測定結果 (平成 29 年度)

工藤香織 大坂直人¹

青森県における PM_{2.5} の質量濃度や成分組成の割合、季節変動等を把握するため、平成 29 年度に県内の自動車排出ガス測定局 1 地点において PM_{2.5} の成分測定を実施した結果、質量濃度の年平均値は 10.6 μg/m³ であり、平成 28 年度の全国平均値 (道路沿道: 12.0 μg/m³)¹⁾ よりもやや低い結果であった。成分組成の主要な項目は有機炭素 (OC)、硫酸イオン (SO₄²⁻) であり、次いでアンモニウムイオン (NH₄⁺)、元素状炭素 (EC) の順で、これら 4 項目の通年における合計値は質量濃度全体の約 62% を占めていた。また、OC 及び EC 濃度は秋季において最も高く、SO₄²⁻ 及び NH₄⁺ 濃度は春季において最も高くなっていた。

Key words : PM_{2.5}, component analysis

1. はじめに

青森県では、大気汚染防止法第 22 条の規定に基づく大気汚染の状況の常時監視に関する事務の処理基準及び PM_{2.5} の成分分析ガイドラインに基づき、県内における PM_{2.5} の質量濃度や成分組成の割合、季節変動等を把握するため、平成 26 年度から県内 1 地点において PM_{2.5} の成分測定を実施している。平成 28 年度秋季までは、県南東部に位置する八戸市内の一般環境大気測定局で実施し、既報²⁾ において平成 26 年度及び平成 27 年度の測定結果を報告したところである。

八戸市の中核市移行 (平成 29 年 1 月) に伴い、平成 29 年度からは、県南西部に位置する弘前市内の自動車排出ガス測定局に調査地点を変更し実施しており、今回、平成 29 年度の測定結果を取りまとめたので報告する。

2. 調査概要

2.1 調査地点及び調査期間

調査は、図 1 に示す弘前市内の文京小学校自動車排出ガス測定局 (以下「文京小学校局」という。) において表 1 に示す春夏秋冬の 4 季節、各季 2 週間連続で実施した。同局は、県道桔梗野富田線の道路端から 2.7 m、県道石川土手町線の道路端から 11 m の位置にあり、自動車類交通量は、平成 27 年度全国道路・街路交通情勢調査によると桔梗野富田線で

1 原子力センター

8,985 台/日、石川土手町線で 13,542 台/日である。

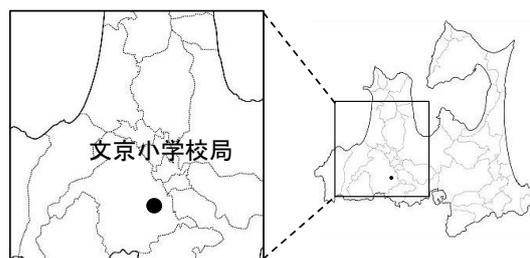


図 1 調査地点

表 1 調査期間

春季	平成 29 年	5 月 10 日～ 5 月 23 日 (14 日間)
夏季	平成 29 年	7 月 20 日～ 8 月 2 日 (14 日間)
秋季	平成 29 年	10 月 19 日～ 11 月 1 日 (14 日間)
冬季	平成 30 年	1 月 18 日～ 1 月 31 日 (14 日間)

2.2 試料採取方法

試料採取は、ムラタ計測器サービス (株) 製スリットジェットエアサンプラ (MCAS-SJ-A1) を使用し、30 L/min で 24 時間 (0 時～24 時) 採取した。

当該機器は 1 台に独立した 2 経路が備わっており、イオン成分及び炭素成分測定用石英繊維フィルタ (PALL 製 2500QAT-UP φ47 mm) と無機元素成分測定用 PTFE フィルタ (PALL 製 Teflo φ47 mm) を各経路にセットし、同時に採取を行った。

採取後のフィルタは、サンプラ内で最長 6 日間保管した後回収し、分析まで冷凍保存した。

2.3 分析方法

(1) 質量濃度

PTFE フィルタを用いて標準測定法により質量濃度を求めた(夏季を除く)。フィルタの秤量にはウルトラマイクロ天秤(メトラー・トレード(株)製 XP2U)を使用した。なお、夏季については、フィルタの秤量条件(温度 $21.5 \pm 1.5^\circ\text{C}$ 、相対湿度 $35 \pm 5\%$ 、24 時間以上コンディショニング)が整わなかったことから、同局に設置している自動測定機(東京ダイレック(株)製 SHARP monitor 5030)の値を用いた。

(2) イオン成分

イオン成分 8 項目 (Cl^- 、 NO_3^- 、 SO_4^{2-} 、 Na^+ 、 NH_4^+ 、 K^+ 、 Mg^{2+} 、 Ca^{2+}) は、石英繊維フィルタの 1/2 を超純水 20 mL で 20 分間超音波抽出し、イオンクロマトグラフ(Thermo Scientific DIONEX 製 ICS-1600)で測定した。

(3) 無機元素成分

無機元素成分 29 項目 (Na、Al、K、Ca、Sc、Ti、V、Cr、Mn、Fe、Co、Ni、Cu、Zn、As、Se、Rb、Mo、Sb、Cs、Ba、La、Ce、Sm、Hf、W、Ta、Th、Pb) は、PTFE フィルタをマイクロウェーブを用いて酸分解(硝酸 5 mL、ふっ化水素酸 2 mL、過酸化水素 1 mL)し、ICP-MS(Agilent 製 7500cx)で測定した。

(4) 炭素成分

炭素成分 2 項目(有機炭素、元素状炭素)は、石英繊維フィルタを用い、測定はサーマルオプティカル・リフレクタンス法とし、外部委託により行った。

2.4 解析方法

解析には、成分濃度が「質量濃度 > (イオン成分 + 炭素成分)」の関係を満たしている測定値のみを用いた。また、成分濃度については、主要な項目である有機炭素(OC)、元素状炭素(EC)、塩化物イオン(Cl^-)、硝酸イオン(NO_3^-)、硫酸イオン(SO_4^{2-})、アンモニウムイオン(NH_4^+)、無機陽イオン(Na^+ 、 K^+ 、 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} の合計)及びその他(質量濃度と主要項目の濃度合計との差。無機元素成分を含む。)に区分し集計した。検出下限値未満の測定値は 0 として扱い、欠測項目については集計から除外した。

3. 結果と考察

3.1 質量濃度

(1) 質量濃度測定結果

平成 29 年度の文京小学校局における質量濃度測定結果を表 2 に示した。

質量濃度範囲は $3.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ から $27.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ であり、

調査期間中に短期基準(1 日平均値が $35 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 以下)を超過した日はみられなかった。

通年における平均値は $10.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ であり、直近の平成 28 年度全国平均値(道路沿道 32 地点の年平均: $12.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$)¹⁾と比べ 1 割程度低い結果であった。

また、季節別の平均値をみると、春季及び秋季において高く、それぞれ $12.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 、 $12.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ であった。一方、冬季における平均値が最も低く $7.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ であった。

表 2 質量濃度測定結果 (単位: $\mu\text{g}/\text{m}^3$)

区分	時期	平均(最小~最大)	データ数
H29 文京	春季	12.6 (3.5~27.5)	14
	夏季*	10.2 (4.2~16.4)	10
	秋季	12.5 (3.6~22.8)	14
	冬季	7.0 (4.4~13.2)	14
	通年	10.6 (3.5~27.5)	52
H28 全国	通年	12.0 (道路沿道 32 地点の年平均)	

*自動測定機による値。「質量濃度 > (イオン成分 + 炭素成分)」の関係を満たしていない 4 データを集計から除外。

(2) $\text{PM}_{2.5}$ 自動測定機による質量濃度との比較

自動測定機による質量濃度と標準測定法による秤量値との関係を図 2 に示した(夏季を除く)。

両者は強い相関($r=0.97$)を示しているが、回帰直線の傾きから、標準測定法による秤量値の方が自動測定機よりも 1 割程度高い傾向がみられた。

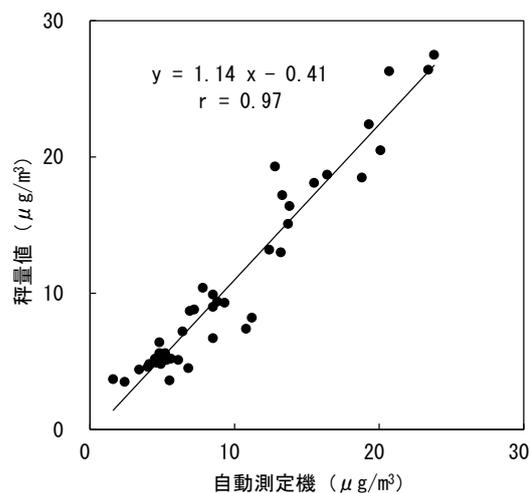


図 2 質量濃度(夏季を除く)

3.2 成分濃度

(1) 日別成分濃度

平成 29 年度の文京小学校局における日別成分濃度を図 3~6 に示した。

質量濃度が短期基準(1 日平均値が $35 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 以下)

の5割 ($17.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$) を超えた日に着目すると、春季は5月20日、21日、22日、23日の4日、夏季は0日、秋季は10月24日、25日、27日、29日、31日の5日、冬季は0日であった。その他の項目を除き、春季の4日はいずれも SO_4^{2-} 濃度が最も高

く、 $4.1 \sim 11 \mu\text{g}/\text{m}^3$ で質量濃度の約21~40%を占め(図3)、秋季の5日はいずれもOC濃度が最も高く、 $6.4 \sim 7.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ で質量濃度の約35~38%を占めていた(図5)。

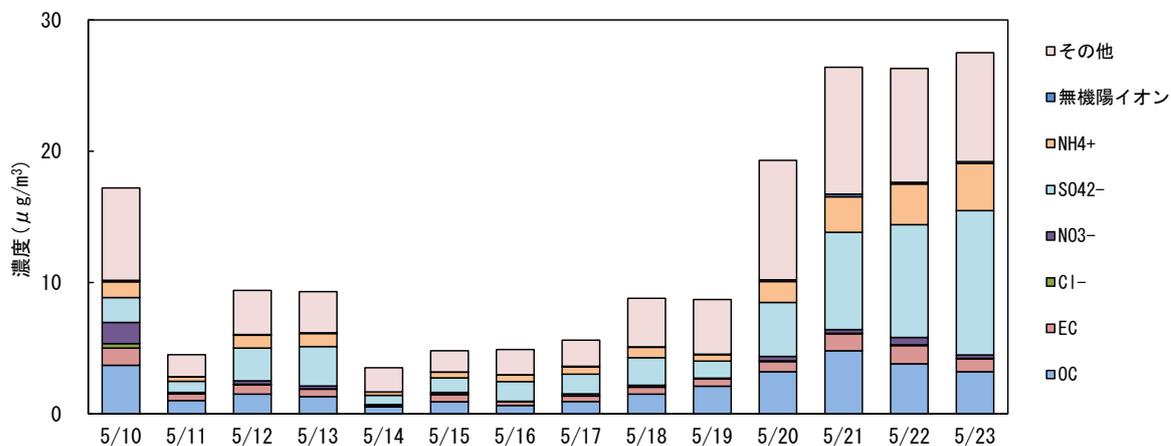


図3 日別成分濃度 (春季)

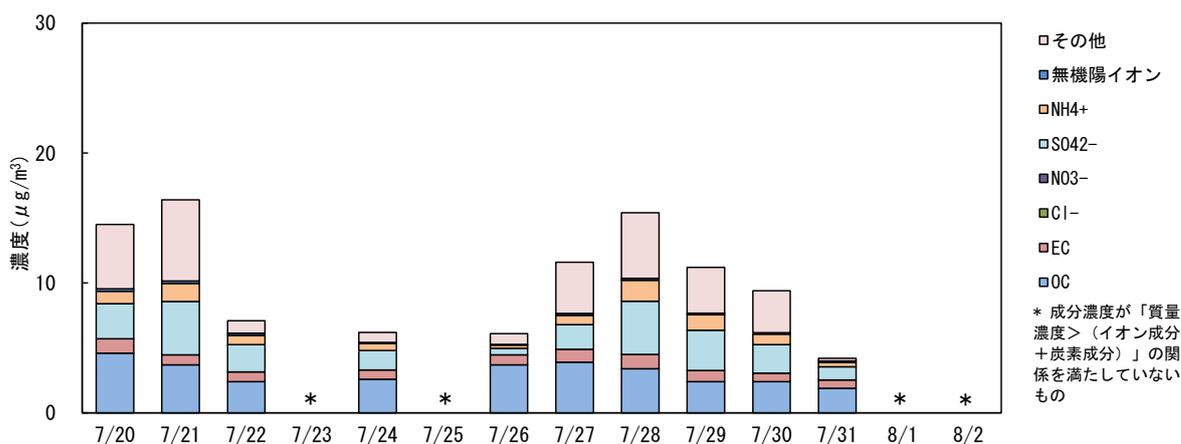


図4 日別成分濃度 (夏季)

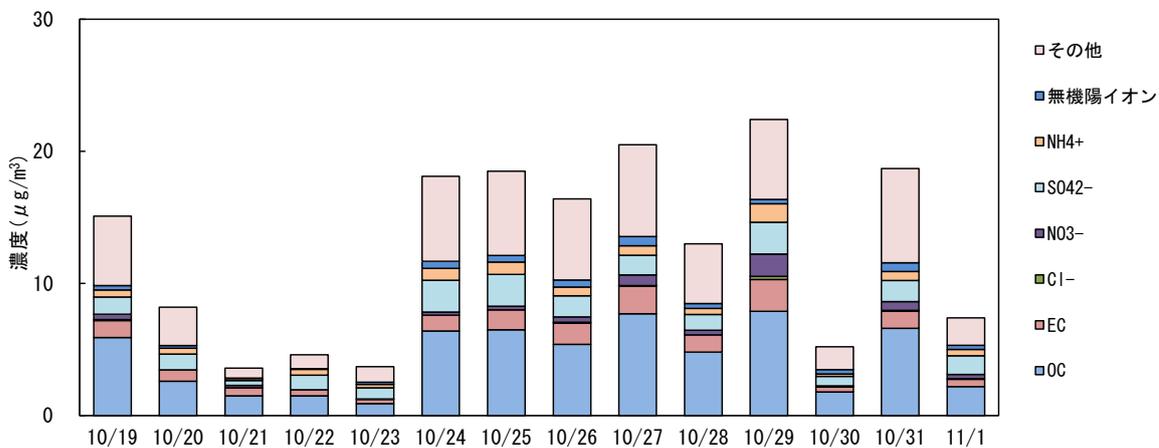


図5 日別成分濃度 (秋季)

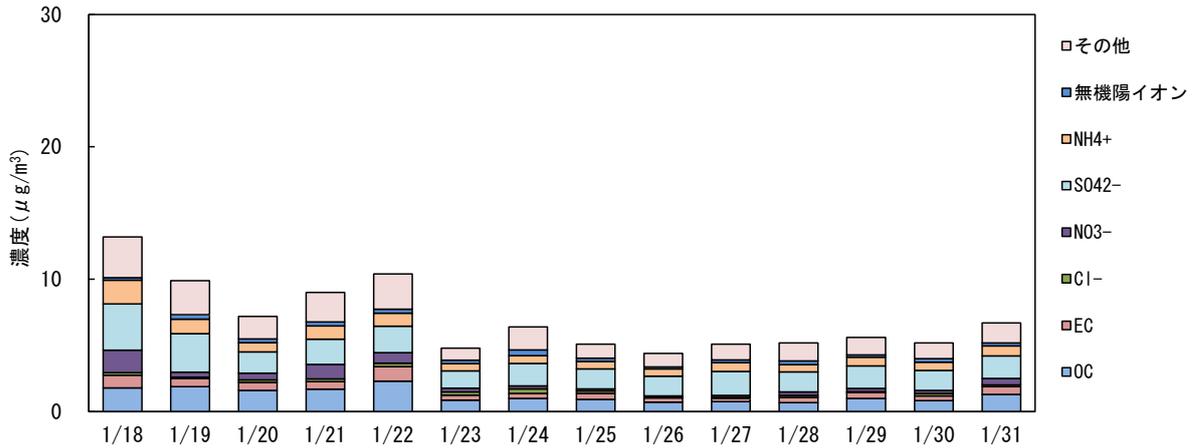


図 6 日別成分濃度 (冬季)

(2) 季節別成分濃度

平成 29 年度の文京小学校局における季節別成分濃度を図 7 に示した。

その他の項目を除き、OC、SO₄²⁻ が主要な成分であり、次いで NH₄⁺、EC の順で、これら 4 項目の通年における合計値は質量濃度全体の約 62% を占めていた。

また、OC 及び EC 濃度は、秋季において最も高く、冬季に最も低くなっており、一方、SO₄²⁻ 及び NH₄⁺ 濃度は春季において最も高く、秋季に最も低くなっていた。

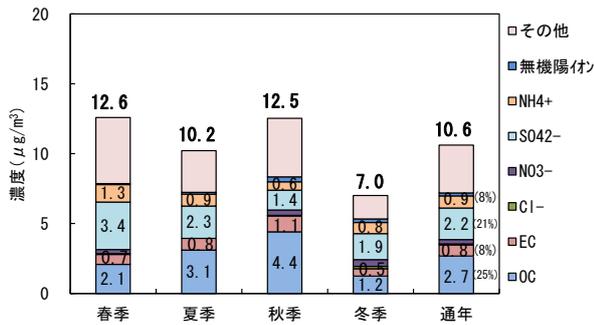


図 7 季節別成分濃度

(3) イオンバランス

Na⁺濃度が欠測となった春季データを除き、夏季、秋季及び冬季における陽イオン当量濃度合計と陰イオン当量濃度合計の関係を図 8 に示した。

両者は強い相関 (r=0.99) を示しているが、白抜きでプロットした 6 つのデータ (夏季: 1 データ、秋季: 5 データ) については、陽イオンに対する陰イオンの当量濃度合計の比が 0.67~0.79 となり、0.8~1.2 の許容範囲³⁾を低い方に外れた。

夏季及び秋季データについては、陰イオンの Cl⁻ 及び NO₃⁻ に検出下限値未満となったデータが多くみられ、特に NO₃⁻ については検出下限値が大きく、その結果、陰イオンの当量濃度合計値が低く見積もられ、許容範囲を低い方に外れた一因になったと考える。

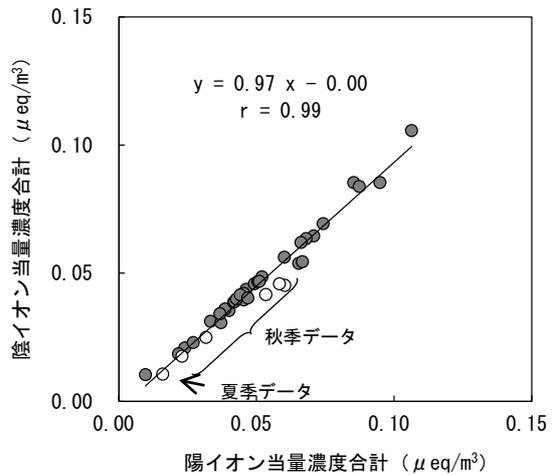


図 8 陽イオンと陰イオンの関係 (春季を除く)

(4) 質量濃度と主要成分濃度の相関

質量濃度と主要成分濃度の相関係数を表 3 に、項目間の相関図を図 9~13 に示した。

質量濃度は、質量全体に占める割合の高い OC、EC、SO₄²⁻ 及び NH₄⁺ の 4 項目の濃度と強い相関 (r>0.7) がみられた (表 3、図 9、図 10)。

また、秋季において最も高い値となった OC 濃度は EC 濃度と強い相関 (r=0.92) がみられ (表 3、図 11)、春季において最も高い値となった SO₄²⁻ 濃度は NH₄⁺ 濃度と強い相関 (r=0.98) がみられた (表

3、図 12)。

無機陽イオンの K⁺濃度は、表 3 及び図 13 に示すとおり OC 及び EC 濃度と強い相関(それぞれ r=0.85、r=0.75) がみられ、K⁺、OC 及び EC はバイオマス燃焼の指標成分であること、また大気汚染常時監視測定結果において、10 月 18~29 日の間、文京小学校局を含む複数の測定局において、PM_{2.5} 濃度に稲わら焼却の影響と考えられる上昇傾向がみられていたことから、秋季に OC 濃度が高くなった要因の 1 つに、稲わら焼却の影響があったものと推察される。

表 3 質量濃度と主要成分濃度の相関係数

質量濃度	OC	EC	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	NH ₄ ⁺	無機陽イオン (Kのみ)
質量濃度	1						
OC	0.78	1					
EC	0.81	0.92	1				
Cl ⁻	-0.09	-0.03	0.10	1			
NO ₃ ⁻	0.42	0.41	0.58	0.56	1		
SO ₄ ²⁻	0.75	0.22	0.30	-0.20	0.09	1	
NH ₄ ⁺	0.80	0.28	0.40	-0.08	0.29	0.98	1
無機陽イオン (Kのみ)	0.60	0.85	0.75	-0.07	0.27	0.05	-0.12

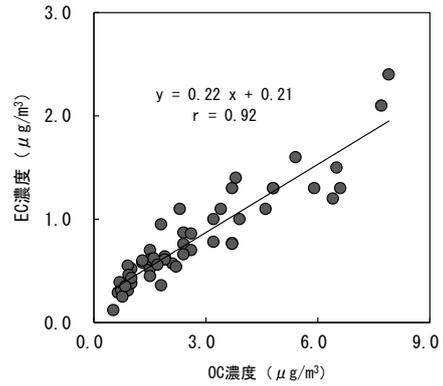


図 11 OC 濃度と EC 濃度の相関図

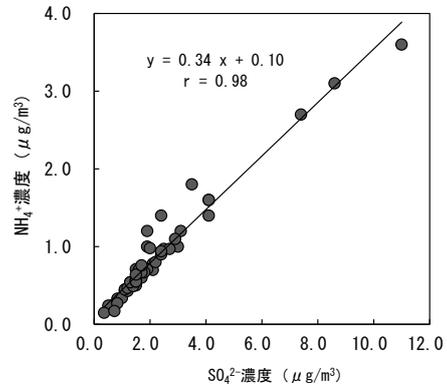


図 12 SO₄²⁻濃度と NH₄⁺濃度の相関図

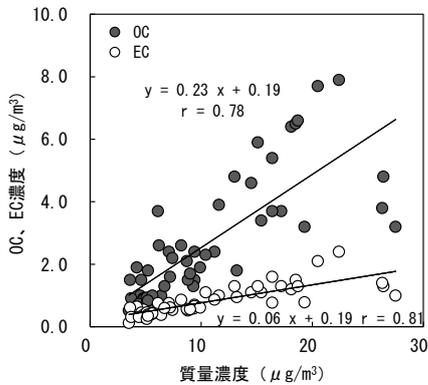


図 9 質量濃度と OC、EC 濃度の相関図

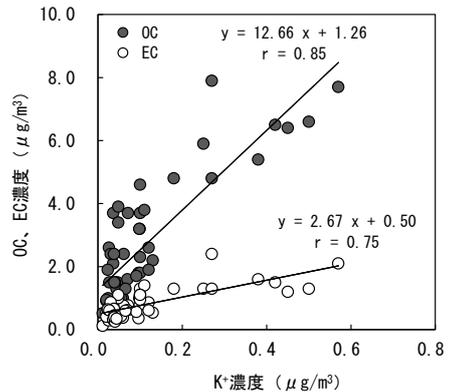


図 13 K⁺濃度と OC、EC 濃度の相関図

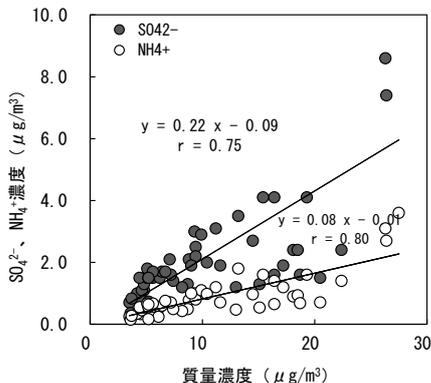


図 10 質量濃度と SO₄²⁻、NH₄⁺濃度の相関図

(5) 全国の成分測定結果との比較

平成 29 年度の文京小学校局における季節別及び通年の成分割合と平成 28 年度の全国の道路沿道 32 地点における通年の成分割合¹⁾(平成 28 年度全国平均値)を 図 14 に示した。

文京小学校局における通年の成分割合は、全国平均値と比べ、その他の濃度の割合が高く、NO₃⁻及び NH₄⁺濃度の割合がやや低くなっていたが、これら

以外の項目の割合については、概ね同程度であった。

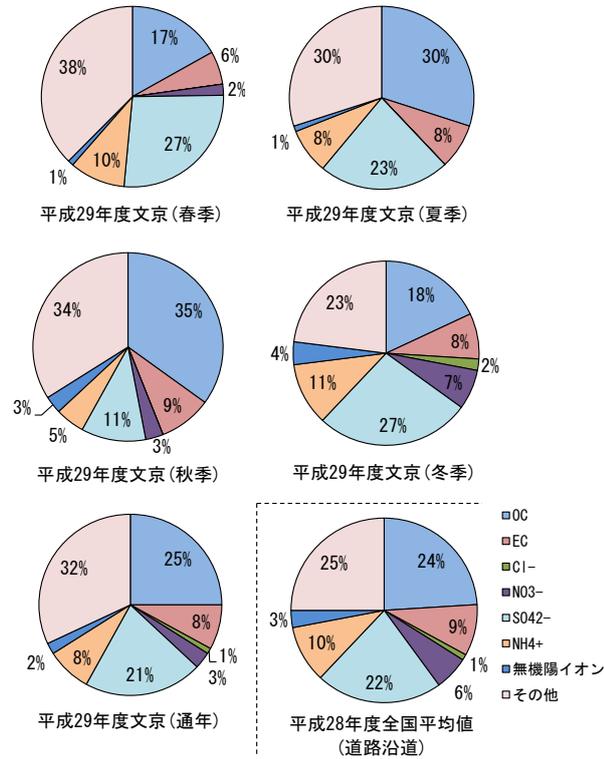


図 14 成分割合

4. まとめ

平成 29 年度の文京小学校局における PM_{2.5}成分測定結果は、以下のとおりであった。

1) 質量濃度範囲は 3.5 μg/m³ から 27.5 μg/m³ で、通年における平均値は 10.6 μg/m³ であり、平成 28 年度の全国平均値 (道路沿道 : 12.0 μg/m³) と比べ 1 割程度低い結果であった。

また、質量濃度の季節別平均値は、春季及び秋季において高く、それぞれ 12.6 μg/m³、12.5 μg/m³ であり、冬季において最も低く 7.0 μg/m³ であった。

2) 自動測定機による質量濃度と標準測定法による秤量値の間には強い相関 (r=0.97) がみられたものの、標準測定法による秤量値の方が自動測定機より

も 1 割程度高い傾向がみられた。

3) その他の項目を除き、OC、SO₄²⁻ が主要な成分であり、次いで NH₄⁺、EC の順で、これら 4 項目の通年における合計値は質量濃度全体の約 62% を占めていた。

また、OC 及び EC 濃度は秋季において最も高く、冬季に最も低くなっており、SO₄²⁻ 及び NH₄⁺ 濃度は春季において最も高く、秋季に最も低くなっていった。

4) 陽イオン当量濃度合計と陰イオン当量濃度合計には強い相関 (r=0.99) がみられたが、陽イオンに対する陰イオンの当量濃度合計の比が 0.8~1.2 の許容範囲を低い方に外れた 6 データについては、NO₃⁻の検出下限値が影響したものと考えられた。

5) 質量濃度は、OC、EC、SO₄²⁻及び NH₄⁺の 4 項目の濃度と強い相関 (r>0.7) がみられ、OC 濃度は EC 濃度 (r=0.92) と、SO₄²⁻濃度は NH₄⁺濃度 (r=0.98) と強い相関がみられた。

また、バイオマス燃焼の指標成分である K⁺濃度と OC 及び EC 濃度には強い相関 (それぞれ r=0.85、r=0.75) がみられており、大気汚染常時監視測定結果からも、秋季に OC 濃度が高くなった要因の 1 つに稲わら焼却の影響があったものと推察された。

6) 平成 29 年度の文京小学校局における通年の成分割合は、平成 28 年度の全国平均値 (道路沿道 32 地点) と比べ、その他の濃度の割合が高く、NO₃⁻及び NH₄⁺濃度の割合がやや低くなっていたが、これら以外の項目の割合については、概ね同程度であった。

文 献

- 1) 環境省：平成 28 年度大気汚染の状況
- 2) 工藤香織ほか：青森県における微小粒子状物質 (PM_{2.5}) 成分測定結果. 青森県環境保健センター年報,27,78-83,2016
- 3) 環境省：大気中微小粒子状物質 (PM_{2.5}) 測定方法暫定マニュアル (改定版)

浮遊粒子状物質の走査型電子顕微鏡による観察及びエネルギー分散型 X 線分析

野澤直史 対馬典子 北島茂

大気常時監視において浮遊粒子状物質が環境基準値を超過したガラス繊維ろ紙テープ上において、大気中の粒子を捕集したスポットが目視できなかったことから、ガラス繊維ろ紙を SEM 観察及び EDX 分析した結果、Na、Cl を含む粒子が多数観察された。

Key words : air pollutants continuous monitoring , SPM, SEM, EDX

1. はじめに

青森県では、大気汚染防止法に基づき、県内に一般環境大気測定局 15 局（県測定 8 局、青森市測定 3 局、八戸市測定 4 局）、自動車排出ガス測定局 4 局（県測定 1 局、青森市測定 2 局、八戸市測定 1 局）の合計 19 局を設置し、各測定局で測定されたデータをテレメータシステムで収集して常時監視している。

平成 30 年 10 月に一般環境大気測定局である弘前市立第一中学校（以下、「第一中学校局」という。）において、浮遊粒子状物質（SPM）が環境基準値を超過した事例があり、原因究明の一助とするため、SPM ガラス繊維ろ紙の走査型電子顕微鏡（SEM）による観察及びエネルギー分散型 X 線分析装置（EDX）による分析を行った結果を報告する。

2. SEM 観察及び EDX 分析方法

2.1 装置

日立ハイテクノロジーズ製卓上型電子顕微鏡 FlexSEM1000（エネルギー分散型 X 線分析装置 付属）

地方独立行政法人青森県産業技術センター
八戸工業研究所 装置

2.2 観察及び分析方法

測定用試料は、ガラス繊維ろ紙テープをハサミで約 5mm 角に切り、装置の測定用ステージにカーボンテープで接着し試料とした。

SEM 観察及び EDX 分析は、ガラス繊維ろ紙に通電性が無いため低真空モードにより行った。

3. 結果

3.1 SPM 常時監視データ

第一中学校局の測定局地点を図 1 に示す。

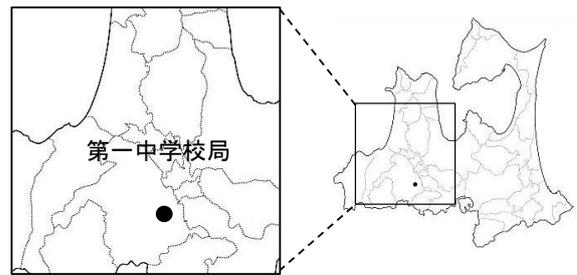


図 1 測定局地点

第一中学校局及び比較のため第一中学校局の南約 2.5km に位置する自動車排出ガス測定局弘前市立文京小学校局（以下、文京小学校局という。）における H30 年 10 月 1 日から平成 30 年 10 月 15 日までの SPM 1 時間値の経時変化を図 2 に示す。

第一中学校局では、H30.10.6 18 時に SPM 1 時間値が $254 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 、H30.10.7 18 時に $442 \mu\text{g}/\text{m}^3$ と短期環境基準値（1 時間値 $200 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 以下）を大きく超過した。

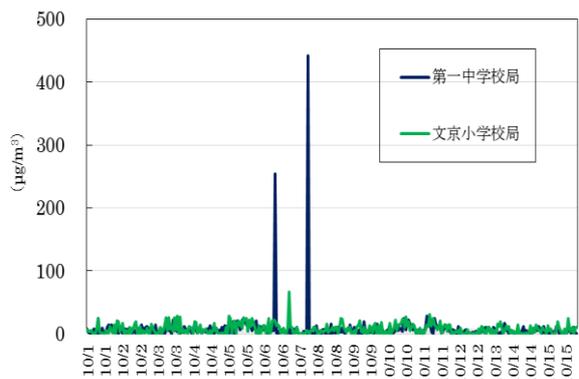


図 2 SPM 1 時間値の経時変化（H30 年 10 月）

文京小学校局では、H30.10.6 18 時に SPM 1 時間値が $21 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 、H30.10.7 18 時に $4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ と低かった。

第一中学校局における H30.10.6 18 時及び H30.10.7 18 時のガラス繊維ろ紙デープを図 3 に示す。

H30.10.6 18 時の SPM ガラス繊維ろ紙テープでは、大気を捕集したスポットが確認できたが、H30.10.7 18 時の SPM ガラス繊維ろ紙テープでは、大気を捕集したスポットは確認できなかった。

このため、SPM が正常に測定が行われているかを確認するため、H30.10.7 18 時の SPM ガラス繊維ろ紙について SEM 観察及び EDX 分析を行った。

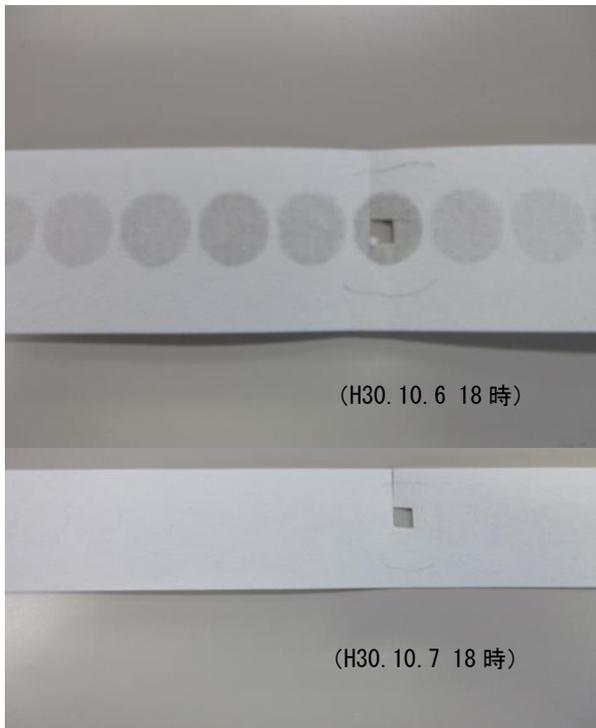


図 3 SPM ガラス繊維ろ紙テープ

3.2 SEM 観察

第一中学校局の SPM ガラス繊維ろ紙(ブランク)の SEM による 2000 倍の観察画像を図 4 に示す。

SPM ガラス繊維ろ紙 (H30.10.7 18 時) の SEM による 2000 倍の観察画像を図 5 に示す。

図 4 では、ガラス繊維ろ紙上に $1\sim 2 \mu\text{m}$ 程度の粒子が多数捕集されていることが確認された。

3.3 EDX 分析

SPM ガラス繊維ろ紙 (H30.10.7 18 時) の EDX 分析による特性 X 線スペクトルでは、ガラス繊維及び土壌成分である Si、O が検出された他、Na、Cl が検出された。

EDX 分析による元素マッピングを図 6 に示す。

元素マッピングでは、ガラス繊維上の粒子において Na、Cl が確認された。

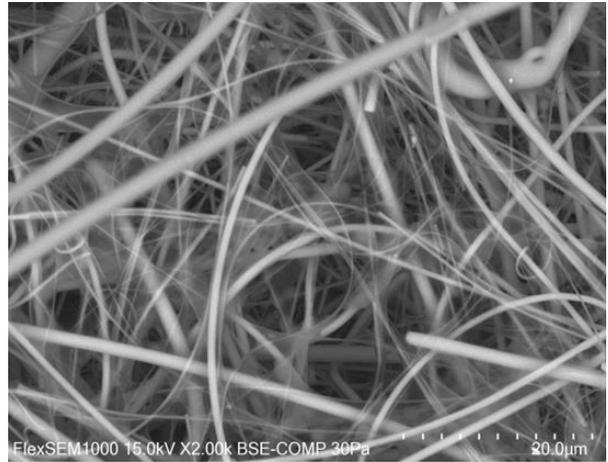


図 4 SPM ガラス繊維ろ紙の SEM 観察画像 (ブランク 2000 倍)



図 5 SPM ガラス繊維ろ紙の SEM 観察画像 (第一中学校局、H30.10.7 18 時 2000 倍)

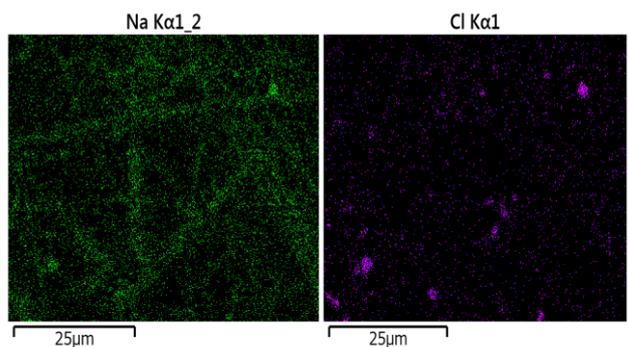


図 6 SPM ガラス繊維ろ紙の元素マッピング (Na、Cl) (第一中学校局 H30.10.7 18 時)

4. 考察

第一中学校局の H30.10.7 18 時の SPM において、NaCl を含む粒子により SPM が一時的に環境基準値を超過したものと推測された。

第一中学校局 H30.10.6 18 時及び H30.10.7 18 時における SPM 濃度は高濃度であったが、第一中学校局に最も近い文京小学校局では SPM 濃度は低かったことから、第一中学校付近に局所的な発生源があったものと推測された。なお、NaCl を含む粒子の発生源は特定できなかった。

5. まとめ

・SEM 観察及び EDX 分析により、大気常時監視における SPM ガラス繊維ろ紙上の環境大気中の粒子及び粒子に含まれる元素を確認することができた。

・SEM 観察及び EDX 分析は、環境大気に係る調査の高濃度事例等の原因究明に有効であると考えられる。

謝 辞

走査型電子顕微鏡 (SEM) による表面観察及びエネルギー分散型 X 線分析装置 (EDX) による元素分析の実施について御協力いただいた地方独立行政法人青森県産業技術センター八戸工業研究所技術支援部 高柳和弘研究管理員に深く感謝いたします。

IV 他誌投稿・学会等発表抄録

他誌投稿抄録

青森県、群馬県および熊本県を中心に検出されたRSウイルスに関する分子疫学解析

筒井理華 清田直子¹ 小林美保² 竹田 誠³
木村博一⁴ : Infectious Agents Surveillance
Report (IASR) Vol. 39 p. 215-217 (2018)

RSウイルス(RSV)は、乳幼児や高齢者に気管支炎や細気管支炎あるいは肺炎を引き起こす。RSVは、*G*遺伝子の塩基配列を基盤とした分子系統解析により、2つのサブグループ(RSV-AとRSV-B)に分類される。今回、国内外で検出されたRSVに関し、*G*遺伝子解析を基にした分子疫学解析を行った結果、若干の知見を得た。2009年9月～2010年4月に国内(青森県、群馬県および熊本県)の医療機関において、上気道炎や下気道炎など呼吸器症状を呈する患者から採取した鼻咽頭ぬぐい液709検体のうち、RSVが検出された50検体を材料とし、*G*遺伝子C-末端超可変領域の塩基配列を解析した。さらに近隣接合法(NJ法)による系統解析を行うとともに、pairwise distances(p-distance)解析、positive selection解析を行った。NJ法によるRSV遺伝子を系統解析した結果、RSV-Aは34株すべてがGA2型、RSV-Bは16株すべてがBA型に分類された。p-distance解析の結果、RSV-AおよびRSV-Bは有意差がみられなかった。Positive selection解析の結果、RSV-Aは6つ、RSV-Bは1つが正の選択部位として推定された。

1 熊本県保健環境科学研究所

2 群馬県衛生環境研究所

3 国立感染症研究所ウイルス第三部

4 群馬パース大学大学院保健科学研究科

編 集 者

工藤隆治 稲宮寿文 石岡和敏
小田桐和枝 佐藤裕久 野澤直史
竹内千晴 武差愛美 花石竜治 工藤香織

青森県環境保健センター年報

平成 30 年度
平成 31 年 3 月発行

編 集 青森県環境保健センター

発 行 〒030-8566 青森市東造道 1-1-1

電 話(017)736-5411 FAX(017)736-5419

メールアドレス KANKYOSENTA@pref.aomori.lg.jp

ホームページ <http://www.pref.aomori.lg.jp/soshiki/kankyo/kankyosenta/center-home.html>
