

ISSN 1884-0981

環境・消防技術開発センター機関誌

第6巻●第1号

2017年3月1日発行



環境と消防



Fire and Environmental Safety

北九州市立大学 環境技術研究所
環境・消防技術開発センター

巻 頭 挨拶

北九州市立大学環境技術研究所
環境・消防技術開発センター長

加藤 尊 秋

北九州市立大学 環境技術研究所 環境・消防技術開発センター機関誌「環境と消防」は、今回で第6巻第1号となりました。本誌は、当センターに参画する研究者、また、連携して研究を進める行政や民間企業の方々の多彩な研究成果をわかりやすく説明する広報誌として重要な役割を果たしています。今回の号では、災害の被害軽減のために重要な役割を果たす構造設計について、当センターの城戸准教授による説明を載せています。また、株式会社ルミカ、および、株式会社アンテックにご協力いただき、ケミカルライトを用いた防災用品、および、紫外線による火災検知についてご紹介いただきました。さらに、近年、化学物質の評価において重要性を増しつつある生物・生態系に対する毒性評価について、消火剤に焦点を当て、当センター参画者であり、国際光合成産業化研究センター長でもある河野教授に解説をしていただきました。「環境と消防」では、ひきつづき、新たな研究分野の紹介や、これまでに開発した技術の展開状況の報告をしていきたいと思っております。本号の作成を含め、研究・活動資金をご提供いただいた北九州市立大学環境技術研究所に深く感謝申し上げます。

目 次

消防・防災研究の最前線

建物と防災：地震と構造設計と建物の安全性

北九州市立大学国際環境工学部 城戸 将江 …… 2

緊急・保安用品としてのケミカルライト：機能と展開

株式会社ルミカ 小林 正隆 …… 6

紫外線による火災検知

株式会社アンテック 末石 建二 …… 9

解説

生態系を構成する生物への影響に配慮した消火剤の開発

北九州市立大学国際環境工学部 河野 智謙 …… 13

活動報告

環境・消防技術開発センター活動報告

…… 24



建物と防災：地震と構造設計と建物の安全性

北九州市立大学国際環境工学部 准教授

城戸 将江

Masae Kido

1. はじめに

日本は世界でも有数の地震国であり、1995年の兵庫県南部地震、2011年の東北地方太平洋沖地震、2016年の熊本地震など、大規模な被害をもたらす巨大地震がたびたび発生している。兵庫県南部地震は都市部で発生した直下型地震で、建物の倒壊・崩壊により建物の下敷きとなり亡くなられた方が多かった。1階や中間階がつぶれてしまう層崩壊と呼ばれる現象が多数みられた[1](写真1)。東北地方太平洋沖地震は、海溝型地震で、地震の規模をあらわすマグニチュードは日本観測史上最大で、海溝型地震の特徴である津波により多くの方が亡くなられた。2016年に発生した熊本地震では、震度7が2回観測され、こちらも現在の気象庁震度階級が制定されて以降初めてのことで、4月14日の前震ではなんとか持ちこたえた建物が、4月16日の本震で倒壊するという現象も見られた。また、木造住宅に多くの被害が見られた。この地震でも1層崩壊が見られ(写真2)、地表面に地割れが発生した箇所もあった(写真3)。日本でこのような大規模な地震が発生するのは、日本が、4枚のプレート(太平洋プレート、フィリピン海プレート、ユーラシアプレート、北米プレート)の境界に位置しているからである。よって、地震の発生は避けることができず、地震に対する備えが大事である。



写真1 層崩壊(神戸市庁舎)

2. 日本の耐震設計

2.1. 地震被害と建築基準法

日本には建築基準法があり、建物の安全性を確保するための設計法が示されている。表1に、日本で発生した大規模な地震と耐震設計基準の変遷を示す。1950年に建築基準法が制定され、その後数回改定が行われている。ご存じの方も多いかと思うが、地震被害を極力小さくす

連絡先

〒808-0135 福岡県北九州市若松区ひびきの1-1

北九州市立大学国際環境工学部建築デザイン学科

E-mail kido-m@kitakyu-u.ac.jp



写真2 1層崩壊(熊本地震)



写真3 地割れとその向こうに見えるブルーシートがかけられた屋根(熊本地震)

るといふ観点からもこの改定は重要な事項であるため、ここで説明をする。1971年の改定は、1968年の十勝沖地震で見られた鉄筋コンクリート構造建物の柱のせん断破壊(脆性的な破壊で層崩壊などにつながる可能性がある)を防止するための改定である。また、1981年の改定では初めて大地震に対する設計が定められたもので、「新耐震設計法」と呼ばれている。よって、1981年は日本の建物の耐震設計においては重要な年である。1981年より前に建てられた建物については、大地震に対する検討がなされていないわけであるから、十分な耐震性能を有していない場合もある。新耐震となってから30数年が経っているが、建築物の寿命を考えると新耐震以前の建物は存在している。兵庫県南部地震では、新耐震以前の建物の被害が比較的多く、1995年に耐震改修促進法が制定されている。新耐震以前の建築物については耐震診

表1 地震と耐震設計基準の変遷

発生年	地震名	マグニチュード	耐震設計基準の変遷
1707	宝永地震	8.4	1920市街地建築物法施行 1924市街地建築物法改正
1854	安政東海地震	8.4	
1854	安政南海道地震	8.4	
1891	濃尾地震	8	
1896	三陸地震	6.8	
1923	関東大震災	7.9	
1944	東南海地震	7.9	
1946	南海地震	8	
1948	福井地震	7.1	
1962	宮城県北部地震	6.5	
1964	新潟地震	7.5	1971 建築基準法改正
1968	十勝沖地震	7.9	
1975	大分県中部地震	6.4	
1978	伊豆大島近海の地震	7	
1978	宮城県沖地震	7.4	
1995	兵庫県南部地震	7.3	1981建築基準法改正 1995耐震改修促進法 2000 建築基準法改正
2001	芸予地震	6.7	2007 建築基準法改正
2004	新潟県中越地震	6.8	
2005	福岡西方沖地震	7	
2006	能登半島地震	6.9	
2007	新潟県中越沖地震	6.8	
2008	岩手・宮城内陸地震	7.2	
2011	東北地方太平洋沖地震	9	
2016	熊本地震	7.3	

断を行い、仮に耐震性に問題があれば耐震補強が行われてきている。ただし、すべての建物に義務化されたものではない。

2.2. 耐震設計

さて、1981年に新耐震設計法が示されたが、このときより日本の耐震設計は中小地震に対する一次設計、大地震(だいたい震度6強程度)に対する二次設計の二つにより設計される(ただし、後述する60mを超える超高層建築は別)。二次設計は、大地震時においては、多少の損傷は許容するが、建物を倒壊させず人命を保護するという考えである。

3. 建物と安全性について

熊本地震では多くの建物が被害にあった。5月、6月に日本建築学会九州支部で実施された益城町悉皆調査ならびに学校建築被災度判定に参加し、被害状況を実際に見てきた。益城町では木造住宅の被害が多くみられ、倒壊・崩壊したものも多く見られた。学校建築では主として体育館の調査をいくつか担当させていただいたが、避難所として使用されている場所もあれば、使用していない、

あるいは使用できない場所もあった。

建築物は地震発生時には人命を守れなければならない。しかし、新耐震より前の建物では十分な耐震性を有していないかもしれない、もし耐震性に問題がある場合は倒壊・崩壊してしまうかもしれない。また、耐震設計の二次設計では損傷を許容しているし、継続して建物を使用できるかどうかは建築基準法では保証されていない。自分の家が倒壊したり、倒壊はまぬがれたものの傾いたりしてそのまま住み続けることができない場合、避難するという選択をせざるを得ない。避難先として考えられるのは公共建築であり、実際に体育館や学校の教室が避難場所として使用されている。しかし、それもまた建物である。熊本地震では車中で避難するという被災者の方もおられた。

大きな余震が発生すると建物の損傷が進行することもある。地震が発生し被災したあとも、人命を守ることのできる建築物が必要である。また、防災上重要な役割を担う建物として、消防署、警察署、病院、学校などが挙げられるが、耐震化はもちろんのこと被災後の継続使用が可能であればより防災上有効である。また、防災上重要な建物のみでなく、事務所ビル等に入居している企業の事業継続性の確保も重要で、建築物の耐震性と極力損傷を少なくするという設計が必要だと考えられる。

4. 長周期地震動と関連する研究

地震はどこでも起こりうるが、現在懸念されているのが南海トラフ沖を震源域とした大地震である。南海トラフ沖ではこれまでに周期的に大規模な地震が発生している。表1の太字で記した東海地震、南海地震からもそのことが分かる。おおむね90年程度の間隔となっており、次の地震に備えておく必要があることがわかる。

現在、この地震発生によって励起される長周期地震動による、超高層建築物のような固有周期の長い建物への影響が懸念されている。例えば、2011年の東北地方太平洋沖地震では遠く離れた東京や大阪の超高層建築物が長時間ゆっくりと、長い場合10分以上も揺れ続けるという事象が観察された。地震と言え、がたがたと揺れることを想像するかもしれないが、超高層建築物ではゆっくりと長時間揺れる。建築構造物は柱や梁などの構造部材から構成されているが、このような地震を受けた場合の柱や梁の構造性能について平成22年度より研究がすすめられ[2]、設計法についても提案されつつある。

ところで、コンクリート充填鋼管(CFT)は鋼管にコンクリートを充填したもので、構造性能に優れ超高層建築物の柱によく使用されている。このCFT柱が長時間繰り返し変形する場合の構造性能については、これまでに実験的研究が行われてきているが[3]~[7]、長周期地震動に対する設計法は確立されていない。このような背景から、現在、日本鋼構造協会の「長周期地震動に対する柱部

材の保有性能に関する調査研究小委員会(委員長：森田耕次、千葉大学名誉教授)の一員として、建築デザイン学科の津田恵吾教授とともに、CFT柱の構造実験を実施している。その結果の一部[8]、[9]を紹介する。

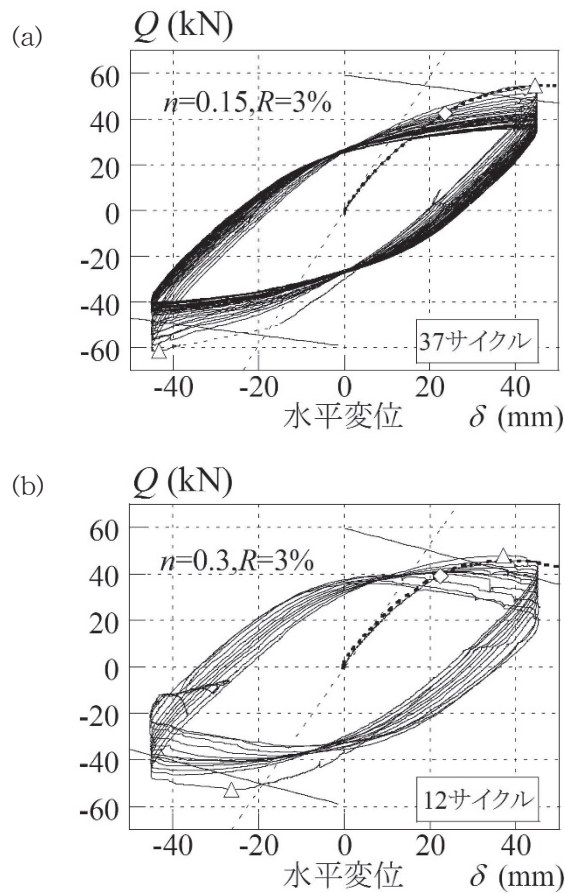


図1 水平力-水平変位関係

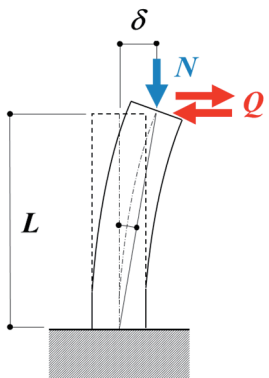


図2 荷重条件と変位

図1は柱の実験結果である。(a)は軸力比 n が0.15、(b)は軸力比が0.3の場合の結果で、縦軸は図2の水平力 Q で横軸は変形 δ をあらわしている。地震が発生すると、建物は水平方向に揺れるが、柱もそれに伴い変形する。その状態を部材のみを取り出して実験したものである。柱は常に上部の建物の重量を支えており、基本的には圧縮されている。これを

軸力と呼んでおり、軸力比とは、試験体に作用させる軸力 N と終局耐力(柱が最大限発揮できる耐力)の比である。軸力比は建物によって異なっているため、実験変数として選択している。

それぞれ同じ柱が同じ振幅(柱上部のたわみ δ 、図2

参照)で繰り返し荷重を受けた場合、軸力比が異なると、水平力-変形関係は異なっていることが分かる。次第に水平力が低下しており、このことは繰り返しの力を同一振幅で繰り返し受けることで、次第にこの柱が抵抗できる力が小さくなっていることをあらわしている。図3に変位反転点(図1の $\delta=45\text{mm}$ のところ)の水平力とサイクル数の関係を示している。縦軸は1サイクル目の水平力に対する i サイクル目の水平力の比である。図によれば、軸力比 $n=0.15$ の場合は、水平力の低下の仕方は緩やかであるが、軸力比 $n=0.3$ の場合は、5サイクル目くらいまでは $n=0.15$ と同じような傾向を示しているものの、その後は急激に水平力が低下していることがわかる。

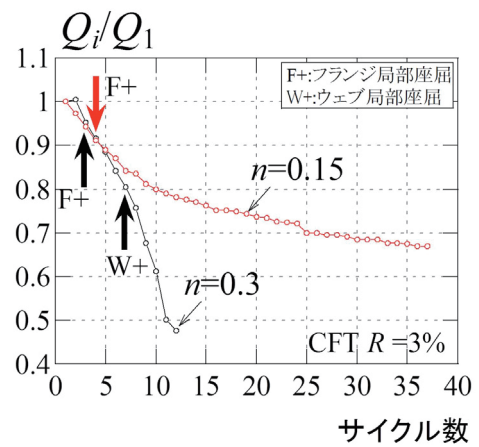


図3 変位反転点の無次元化水平力-荷重サイクル数関係



写真4 $n=0.15$ 実験後の柱脚の様子

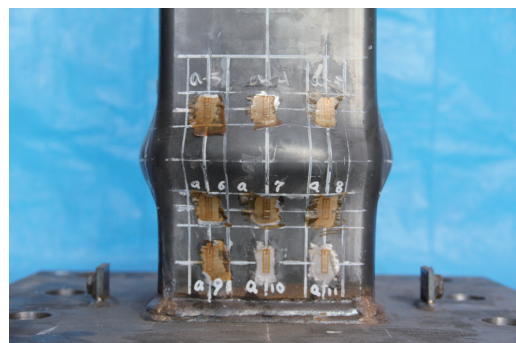


写真5 $n=0.3$ 実験後の柱脚の様子

写真4および5にそれぞれ $n=0.15$ 、 0.3 のときの試験体の柱脚部分の写真を示す。 $n=0.3$ の場合は大きく膨らんでいる箇所があり(これを局部座屈と呼ぶ)、柱の損傷が大きいことが分かる。このような繰り返し水平力を受ける場合の構造性能に影響を与えるパラメータは軸力比だけでなく、振幅、柱を構成する材料強度、材長、断面寸法、などがあるため、数多くの実験資料を蓄積し、さらに荷重低下のメカニズムを明らかにすることが必須である。

特に、今年2017年4月より、関東地域、静岡地域、中京地域及び大阪地域の対象地域内において、超高層建築物等を新築する際には、長時間の繰り返しの累積変形の影響を考慮して安全性の検証を行うこととなり、評価方法の構築が喫緊の課題となっている。現在も、実験を続けており今後は長周期地震動を考慮できるCFT柱の設計法を構築したいと考えている。超高層建築は利用者も多く、都心部に建てられており、企業の事業活動も行われており、被害を極力小さくすることが重要である。福岡は、東京などと比較すると、超高層建築物も少なく南海トラフ沿いの巨大地震の影響は大きくないと考えられるが、本研究は超高層建築物の安全性を確保する、防災に役立つと考えている。

5. 最後に

地震と耐震設計の関係、建物の安全性について、今後発生すると考えられている南海トラフ沿いの巨大地震に関連する研究について記した。地震は避けることのできない自然災害で、防災を考える時、地震時に人命を守る、地震後にも安全性を確保することは当然のこと、重要な拠点となりうる施設の継続使用が可能となるようにし、事業所などについても事業の継続性が確保されることが望ましい。また、まったく触れていなかったが、建築物が地震を受けても倒壊せず、多少の損傷があったとしても修復して使用することができれば、資源を守ることにつながり、環境問題にも貢献できると考えている。災害後も長く使用できる建物が設計されるよう、今後も設計法について研究をつづけていくつもりである。

(引用文献)

- [1] 日本建築学会, 土木学会編(1995) 1995年阪神・淡路大震災スライド集.
- [2] 長谷川隆, 福元敏之, 時野谷浩良, 寺田岳彦, 成原弘之, 金子洋文, 小鹿紀英(2014) 長周期地震動に対する鉄骨造超高層建築物の安全性検証方法の検討, その1, 日本建築学会大会学術講演梗概集(関東), 1013-1014.
- [3] 成原弘之, 安田聡, 佐藤英佑, 宇佐美徹, 鈴木康正, 長谷川隆(2014) 長周期地震動に対する鉄骨造超高層建築物の安全性検証方法の検討, その27, 日本建築学会大会学術講演梗概集(近畿), 1251-1252.
- [4] 佐藤英佑, 成原弘之, 安田聡, 宇佐美徹, 長谷川隆(2014) 長周期地震動に対する鉄骨造超高層建築物の安全性検証方法の検討, その28, 日本建築学会大会学術講演梗概集(近畿), 1253-1254.
- [5] 宇佐美徹, 山崎賢二, 牛渡ふみ, 成原弘之, 鈴木康正, 長谷川隆(2014) 長周期地震動に対する鉄骨造超高層建築物の安全性検証方法の検討, その29, 日本建築学会大会学術講演梗概集(近畿), 1255-1256.
- [6] 牛渡ふみ, 宇佐美徹, 山崎賢二, 成原弘之, 長谷川隆(2014) 長周期地震動に対する鉄骨造超高層建築物の安全性検証方法の検討, その30, 日本建築学会大会学術講演梗概集(近畿), 1257-1258.
- [7] 山崎賢二, 宇佐美徹, 牛渡ふみ, 成原弘之, 長谷川隆(2014) 長周期地震動に対する鉄骨造超高層建築物の安全性検証方法の検討, その31, 日本建築学会大会学術講演梗概集(近畿), 1259-1260.
- [8] カク オツキン, 吉田キカ, 城戸将江, 津田恵吾(2016) 一定振幅繰り返し荷重を受ける角形CFT長柱の疲労特性に関する研究 その1 実験計画ならびに概要, 日本建築学会九州支部研究報告, 第55号, 569-572.
- [9] 吉田キカ, カク オツキン, 城戸将江, 津田恵吾(2016) 一定振幅繰り返し荷重を受ける角形CFT長柱の疲労特性に関する研究 その2 実験結果, 日本建築学会九州支部研究報告, 第55号, 573-576.

緊急・保安用品としてのケミカルライト：機能と展開

株式会社ルミカ 研究室 主任研究員

小林 正隆
Masataka Kobayashi

1. ケミカルライトの略歴

電気や火を使わない光るアイテムとして、化学発光を応用したケミカルライトはイベントや夜釣り、そして今回の主題である緊急・保安用品として広く使用されている。



図1 様々なケミカルライトの例

古代からホタルやオワンクラゲなどの発光生物は、体内の化学反応を利用して光を生み出してきた。同じようにケミカルライトも“ケミカル”と謳う通り化学反応によって光を生み出している。特に1963年に米国のベル電話研究所のE. A. Chandrossによって報告された過シュウ酸エステルを使用した化学発光システムによって今日のケミカルライトの礎が成された。1965年には棒状のチューブを折り曲げ内部の液体を混合することで発光を開始させる機構が米国で特許化されている。これによって、持ち運びが可能で任意の時に発光できるケミカルライトが誕生した。(ケミカルライトという語は、語意からすると化学発光を応用したもの全てが含まれる。しかし、本文に於いては特別な断り書きが無い場合は、狭義の棒状の化学発光体製品の意味でケミカルライトという語を使用する。)因みに、発明国である米国ではケミカルライトについては、Glow-StickやLight-Stickという名称が一般的である。また、Cyalumeという商標も同じ製品類を指す語として広く使用されている。日本では、本来とはやや異なる発音でサイリウムという名称で呼ばれることがある。また、ペンライトという言葉で総括的に呼ばれることも多い。

株式会社ルミカは、前身の日本化学発光株式会社の設立(1978年の創業準備期間を含め)以来、夜釣り用の浮きマーカーである「ケミホタル」の発売を皮切りに、主力商品としてルミカライト初め、様々なケミカルライト関連商品の製造販売を行ってきた。その後、コンサートやイベント向けのグッズ、釣り具関連商品以外にも登山やダイビング、そして今回のテーマである緊急・保安用品として使用されるまでに製品としての安定性と使用上の安全性を高めてきた。

連絡先

〒811-3136 福岡県古賀市糸ヶ浦65
株式会社ルミカ Tel 092-942-3211
E-mail kobayashi@lumica.co.jp
http://www.lumica.co.jp/

2. 緊急・保安用品としてのケミカルライト

緊急・保安の場面でケミカルライトが使用される際に要求される特性を明らかにしたい。その為、一般的によく知られた棒状のケミカルライトの基本的な構造を示す。

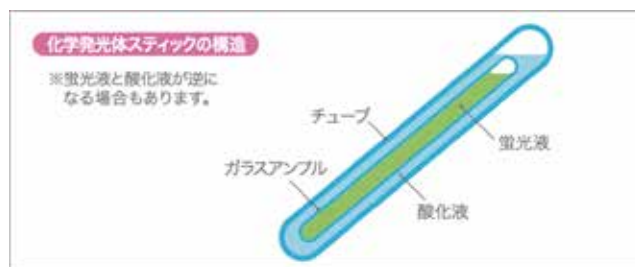


図2 ケミカルライトの基本構造

外側はプラスチック製のチューブで内部にガラスアンブルに封入されている蛍光液、その周りに酸化液と2種類の液体が分かれて入っている。そして、そのチューブを折り曲げると中のガラスアンブルが割れて2つの液が混ざり、化学反応を起こし、光を出し始める仕組みになっている。

さて、上述の特徴的構造を有するケミカルライトであるが、これを実際に緊急・保安用品(防災グッズ、エマージェンシーツール)として使用するにあたり、求められている特性あるいは有効性を以下の様に考えている。

① 保管性の良いこと

災害などの非常事態は何時発生するか分からない以上、常備品としての防災グッズは十分長期間の保管に耐えられなければならない。市販の防災リュックに含まれる水や非常食は5年間の保管が可能であることを表示するものが多いので、ケミカルライトも5年間の保管が可能であることが要求される。また、メンテナンスフリーであることが望ましい。



図3 使用例、折って発光するまで

乾電池を使った照明具の場合、一旦使用した乾電池をそのまま器具に入れておくと液漏れを生じ、点灯しないばかりか器具の破損につながることもある。

しかし、ケミカルライトの場合は使用を中止して再度使用するということは、そもそもできない設計であり、保管期間ごとの更新を別にすればメンテナンスは不要となる。

② 耐衝撃性のあること

保管性に付随する内容であるが、ケミカルライトはガラスの破割によって発光が開始すると化学反応が終わるまで発光を途中で止めることができないという不可逆的性質を持っている。実際に使用するときには既に発光の終わった後ということでは実用にならない。

その為、少々の衝撃では発光を開始しない耐衝撃性を有する必要がある。しかし、余りに強固なハウジングにしてしまうと人間の手で折り曲げて発光を開始させることが出来ない。適度な強靭性を設計に織り込む必要がある。

③ 耐水性のあること

保管中や使用時に水に濡れる状況が生じることは十分

想定できる。また、夜露に曝される場面も想定される。更に、川や海などに転落した場合やダイビングなど水中での目印としての使用にも対応できることが望まれる。株式会社ルミカの当該商品であるルミカライトは、深度500mの環境でも破損せずに発光を継続することが出来るように設計されている。

④ 十分な光量と発光の持続時間のあること

被災者にとって、自らの周囲を照らす目的と居場所を救援者に見つけてもらう目的の両方に於いて発光する器具は有効である。その為には十分な光量が必要となる。反射板などは自らは発光しないのでこの目的には不向きである。ルミカライトの場合、10~12時間程度発光を継続する黄色や緑の発光色のレギュラータイプでは1km以上の視認性を示し、手元の文書や地図を読むのに十分な光量を有する。一度発光を開始すれば一晩放置状態で確実に発光し続ける特性は簡便性の意味でも好適である。

⑤ 火花や発熱による二次災害を引き起こさないこと

災害や事故の場面では、可燃性ガスやガソリンなどの燃料漏れを伴うことが多い。その場合、火炎を伴う蠟燭のみならず露出した電気接点も引火の要因となり、二次災害の原因となり得る。しかし、何らかの照明や発光性のマーカーが必要となる場面が多いのも事実である。ケミカルライトの場合、原理的に火炎や電気を使用しないので、火災などの二次災害につながる熱や火花が生じない。

⑥ 携行性の良いこと

手に持ちやすいことやリュック、鞆、ベルトなどに装着しやすい形状で軽いことは被災者の体格や体力の面からも重要と考えられる。ルミカライトのレギュラータイプの場合、単2乾電池の約二分の一の重量で、やや大きめのペンの形状であり、長時間手で持っても疲れず、更に末端のフックでつりさげることが出来る。また、携行性の良い形状、重量であることは、保管場所をそれほど選ばなくてよいという利点にも繋がる。更に、自動車のグローブボックスに収まる大きさであり、夜間にダッシュボードなどにおいて目印とすることも可能である。

3. ルミカライトの安全性と信頼性の向上：

アーク・シリーズの開発

ケミカルライトが緊急・保安用途に好適であることは前述の通りであるが、製品の安全性や信頼性の面で幾つかの改良の余地があった。大別すると下記の2点に集約される。

① 使用開始時の折り曲げ過ぎによる破損とその解決

ケミカルライトは棒状のプラスチックのチューブを

折り曲げることにより内部のガラス管が破割し、2液が混合することで発光を開始する。この際、プラスチックチューブ内のガラス管が破割できれば十分なのであるが、力を入れ過ぎてしまう結果、プラスチックチューブがせん断される程度にまで折り曲げてしまうことがあった。せん断が生じると内容液が漏れ出てしまうことになる。内容液そのものは、毒性の低いものではあるが、有機系の溶媒に数%の過酸化水素を含んでいる為、皮膚への付着や目に入るなどすると軽い炎症や痛みを生じることがある。

この問題について株式会社ルミカでは、プラスチックチューブの素材を見直すと共にチューブの設計そのものに変更を加えることで解決した。アークという名称のシリーズがそれに該当する。これは、内部のガラス管が破割するのに必要な角度までしか容易には曲がらないという特徴である。これにより、折り曲げ過ぎに起因する液漏れ事故は事実上一掃された。このような改良を施すことにより、緊急時においても躊躇なくケミカルライトを発光させることが可能となった。

更に、この改良による副産物として、プラスチックチューブの耐熱性を向上することができた。実際、アーク・シリーズは、80℃の環境下でも液漏れを生じない。また、従来ケミカルライトのチューブの断面は円形かそれに近い多角形であり、斜面では転がり出して安定しないという問題も指摘されていたが、プラスチックチューブの改良を行う際にこの点も含めて検討し、転がり難い形状とすることができた。

② 内容液の航空輸送への適合理化

ケミカルライトに使用される液体は、有機系の溶媒を主体としている。有機系の溶媒は、その物性により安全に関わる様々な法律が適用されている。特に液体が引火性液体に区分されると、輸送上様々な制約を受けることになる。輸送上の制約により搬入できない地域や搬送の遅滞が生じることは緊急・保安用品としては致命的である。

実際、アーク・シリーズを投入するまでは空港の担当者から手荷物や預け荷物としての搭載に関する問い合わせが繰り返し生じていた。また、宅配業者から空輸を拒絶された時期もあった。株式会社ルミカでは、内容液を抜本的に見直し、引火性液体に関する区分に該当しない組成を生み出すことでこれに対応した。また、航空会社と直接交渉を行い航空機搭載可のロゴマークを商品パッケージに貼りつける認可を得ることが出来た。事実上、国内輸送に関する障壁は無くなり緊急発送も可能となり緊急・保安用品としての活用がよりスムーズとなった。



図4 アークシリーズの写真



図5 航空機搭載可のロゴ

最後に、東日本大震災後、岩手県陸前高田市を訪れ、震災に遭われた方の話を聞く機会があった。その方の自宅は高台にあり津波の被害は免れたが、夜になり停電で真っ暗になった際に自宅にあった懐中電灯を使おうと思ったがしばらく使っていなかったため電池が切れており点灯しなかった。しかし、娘さんがコンサートで使うためにたまたま買っていたルミカライトがあることを思いだし夜間の照明代わりに使って本当に助かったという話を聞くことができた。また、東京で計画停電の際の活用についても同様の報告を受けることが出来た。

最近数年の日本では毎年のように大災害が発生している。多くは地震と水災害であり大規模な停電を含むものである。電力が復旧するまでの数日間の夜をどのように過ごすかは切実な問題である。残念ながら、緊急・保安用品としてのケミカルライトの認知度は十分とは言えない。アイドルコンサートに付随する特殊なアイテムという認識が残っているのも事実である。震災直後の夜を過ごす際にケミカルライトを使用された方は、コンサート用に買い溜めをしておられる方であったという例も多かった。今後の大きな課題は、緊急用品また保安用品としての認知度を上げることだと考えている。

紫外線による火災検知

株式会社アンテック 代表取締役

末石 建二
Kenji Sueishi

1. はじめに

1991年、屋号アンテックとして産声を上げてから今年で25年を終えます。アンテックは当初、陶芸用の電子機器を開発・販売しており炎を発見して消火することではなく、むしろ燃やす事に専念した企業でした。私共を育ててくれました地元備前焼はいまだに薪を燃料とした焼成方法が大半を占めていますが、時代の流れや自然環境保護の問題もあって焼成過程の一部である乾燥まではその燃料にガスや灯油が使われるようになり、人手から次第にはありますが自動化が進んで来ています。そうした時代の流れに対応すべく、当社では薪の効率の良い焼成方法の探求から炎を見守ると言う安全装置の開発を経て、現在では炎のセンシングに特化したメーカーへと形を変えています。そしてそのセンシングの基礎なる紫外線応用技術を進化させ、『炎』から『紫外線』に特化したメーカーへ移行するまでをご紹介させていただきますが、その中で私共の紫外線検出方式の炎センサーに少しでも興味を持っていただければと思います。

2. 陶芸から学ぶ

備前焼は焼き締めて仕上げる焼成方法です。釉薬を使用する磁器ですとその焼成時間は1昼夜、長くても2昼夜程度ですが、備前焼は約2週間もの焼成を行うのです。

この行程を少しでも楽に・・・と言う思いで開発しました商品は、予め設定された窯内温度に導く様に、現在使用している薪(燃料)のカロリー計算をしながら『今入れて下さい』と言う薪の投入タイミングと今の温度を保つために必要な薪の量を『何本を入れて下さい』と指示をしてくれるものです。私共ではそれを窯焚き支援装置と呼んでいます。

私共では炎を管理・監視するする数々の支援装置を開発して来ました。その中の一つがこれから話を進めます紫外線検出方式の炎センサーです。

3. 赤外線方式

屋外で炎を検出する為には炎から放出される光の波長を捉えるしかありません。

その波長は赤外線領域あるいは紫外線領域になり、それぞれのセンサーにてセンシングを行います。赤外線の利用は炎のみならず多くの機器に使用されていますので御存知の方もいらっしゃると思いますが、赤外線はとても身近なもので色々な物質から放出されています。更には言えば温度を持つ物質からは殆ど赤外線が放出されると考えた方が良くらいで人や動物、蛍光灯や太陽光などからも赤外線は放出されているためにセンサーから見

連絡先

〒701-4254 岡山県瀬戸内市邑久町豆田116-3
株式会社アンテック Tel 0869-22-2155
E-mail info@antec-japan.net
http://www.wantec-japan.net/

た場合、ある一定のものを特定するには邪魔なものが多すぎます。

赤外線はテレビのリモコンなど通信にも使用されていますが、センサーとしては人感センサーが有名です。しかし、センサーとして使用しているからと言って人間が持つ特有の赤外線を判断している訳ではありません。赤外線センサーはセンサーが監視出来る範囲から放出される赤外線の強弱を濃淡の点で表すことで1枚の絵として捉えています。そしてその絵を記憶し常に新しい絵と比較し、違いがあることを判断していると考えると理解しやすいでしょう。

人間が居ない状態でその監視下にある赤外線分布の絵を記憶しておきます。その監視下に人間が入って来ると絵の状態が書き変わる。つまりそこで何かが起きたと言う判断をします。それが人間を判断する物として利用される物を人感センサーと呼んでいます。実際には絵が変わるものであれば動物でも炎でも同じ結果になります。

先程、絵が書き変わるということをお話しましたが、最初から人間が居ればそれに反応する事はありませんし、人間が静止してしまうと人感センサーと言えど人間は居ないと判断してしまいますのでこのことからもお解りいただけるものと思います。

つまり、赤外線では1つの波長を捉えただけでは何が起こったのかを判断する事は出来ないと言う事です。この赤外線を使用して炎を特定する場合には異なる波長を2波、若しくは3波を同時に検出しそれぞれの波長による赤外線強度を測定、この割合を比較する事で何から放出された赤外線であるのかを特定します。その中には勿論、炎も含まれているのですがあまり識別精度を上げますと逆に、紙が燃えた炎は検出出来ても、油が燃えた炎は検出出来ないと言う事になりかねませんので使用にあたっては注意が必要です。

4. 紫外線検出方式

炎を検出するもう一つの方法は私共も採用しています紫外線検出方式です。

光と言うものは人間が解りやすいように波長の長い方から電波→赤外線→可視光線→紫外線→X線と分類され

ていますが、これはあくまでも一連のものですから可視光線領域から紫外線領域に入ったからと言って何かが急に変わる事ではありません。更に紫外線は可視光線に近い方からUV-A、UV-B、UV-Cに分類されていますが、赤外線・可視光線・紫外線を通じ唯一UV-C¹⁾のみの特徴があります。それは太陽光に含まれていないと言う事です。赤外線・可視光線・UV-A・UV-Bは地表に届きますが、UV-Cはオゾン層に吸収されますので理論上では地表には到達しません。また、紫外線を発生させる為には数千度の温度が必要となる事から自然界においてUV-Cの紫外線を発生させるものは炎しかありません。

この帯域に焦点を当てたセンサーを作れば炎だけを確実に捉える事ができる。これを応用したセンサーが紫外線検出方式の炎センサーと呼ばれているものです。

紫外線検出方式は赤外線検出方式に比べ、センサーからみた邪魔なものが少ない分、高感度²⁾に出来る事が特徴ですが、普及しない(知られていない)には訳があります。

5. 普及しなかった紫外線検出方式

紫外線による炎の有無の判断は決して新しい技術ではありません。私共も既に23年も前から使用して居るのです。では何故普及しなかったのか？

(1) 誤報を出す

それは太陽光による誤報にあります。先程、UV-Cを利用した紫外線検出方式による炎センサーの利点として、UV-Cはオゾン層に吸収されて地表には到達しないと言うことを説明させていただきましたが、これは理論上の話であって100%ではありません。そこは自然界のことですから決して多くはありませんがオゾン層をくぐり抜けて地表に到達する場合があります。この紫外線に敏感に反応して誤報を出す事があるのです。また、現在殆どの商品に使用されています紫外線検出素子であるUV管は放電管に似た性格を持っており、素子そのものが紫外線を放出することがあり、他の紫外線検出方式の炎センサーに影響を与え、結果として誤報となる場合もあります。

(2) 法的な問題

普及しなかったことにはもう一つ、大きな問題がありました。それは消防法にこの紫外線を検出するセンサーの規定が無かった事です。これにより結果論としては消防設備(火災報知器)への組み込みが出来ないことや、何かにつけて何らかのお墨付きが好きな国民ですから言う意味でも非常に困難な営業活動を余儀なくされたものです。

このような背景から紫外線検出方式の炎センサーは普及

しませんでした。私どもは平成15年頃からセキュリティ業界向けのセンサーを開発・販売を試みましたが、実際に営業活動をしてみますと、紫外線センサーは『使い物にならない』、『ダメセンサー』と言うレッテルが既に貼られていました。このような業界内の常識とも言える認知を覆すだけの力は私共には無かったのです。

6. 認識を変える

そうした中、とある工場の火元責任者の方から今の当社の方向性を決定する言葉を聞く事になります。それはこんな言葉でした。

『私どもの工場では勿論、火災報知機は取付ています。それは法律で決まっているからですが、それで工場を守れるとは思っていません。あの高い天井が60度、70度になって火災報知機が働いたとしてもその時下は火の海。火災を起こした時に、地域住民に対して私どもは法律に基づいて・・・と言う言い訳にはなるかもしれないが、しかし資産となる設備を失ってしまう。自社の資産を守る為に法律は関係ない！』

と言う事でした。確かに言われる通りです。行き詰まっていた取り組みに一つのヒントがそこにありました。

7. 方向性の転換

この言葉を機に紫外線検出方式の炎センサーへの考え方が変わる事になります。

最大の変更点は認識でした。『紫外線を検出する方式の炎センサー』から『あくまでも紫外線検出用のセンサー。但し、炎も検出する事ができます』と言うような消防法の枠ではなく単純に電子部品(電子機器)の販売をしていると言う意識改革です。当時、この商品は工場関係に多く販売されていましたが、この商品が幾ら多く販売されても(取り付けられても)このセンサーが本来の能力を発揮できる確率は極めて少ない。

つまりそれだけ火災発生頻度は少ないと言う事であり、性能重視と言うよりもむしろこの商品をご採用いただいた事への付加価値や差別化を重視した営業活動を主体とした事も大きな転換でした。こうした用途のセンサーは一般的に屋内の天井に取り付けられる商品ですから、工事事業者やセキュリティ関係の業界を重視していたのですが、単純にこのセンサーが持つ能力・性能がご採用いただく企業様が製造する商品の付加価値を高めたり、差別化に利用できるものとして活用される業界、または企業向けに商品開発を進める事に移行していきます。

更に、差別化や付加価値を少しでも長く維持いただくために国内では1業種1社、国外では1国1社に限定する事でご契約いただく企業様を守ると言う試みも始めました。

8. 全く新しい市場へ

最初に取り組んだのはお仏壇業界でした。お仏壇はロウソクやお線香の炎が火元となって火災を引き起こすと言う事が問題となっていました。

しかし、お仏壇に炎センサーを取り入れるには問題があります。それはロウソクの炎です。お線香のような燻りは温度が数百度しかなく紫外線は発生しませんから問題はないのですが、ロウソクは直接炎が出ます。センサーはこの炎に反応してしまい通常の炎センサーでは役に立たないのです。

そこで開発したのがお仏壇用特殊フィルター (SKH060) ですが、これはお仏壇の中のみと言う限定ではあるのですが、ロウソクの炎では反応しないよう、またそれが何かに燃え移った時に即時にセンサーが反応すると言うものでした。

この技術により、提携先のお仏壇販売会社様は自社が販売するお仏壇に『安心と安全』と言う付加価値を持たせる事に成功。価格競争下にある業界の中で独自性を出して利益の確保に成功しています。

更に、林業向けの重機用(重機用火災センサー: SKH086)では振動や衝撃に強く、110℃までの高温に耐えうる商品、高速道路のSA・PAではトイレで多発していた悪戯を防止するために個々のトイレが監視可能な検出角度調整機能を備えた商品(悪戯防止用火災センサー: SKH087)などその業界に合わせた商品作りを積極的進め、今では20種類を超える商品アイテムを保有するに至っています。

9. 次世代センサーへの取り組み

もう何年になるか忘れてしまいましたが、アメリカで911のテロ事件が発生してからの事です。

『軍事的な物に関しては自国内で開発するが、テロ対策に関してはそうも言っている場合ではない』と、アメ

リカ政府は同盟国に対して色々な技術開発の依頼をしました。

日本へはナノテクノロジーとセンサー技術であったと聞いていますが、その中で『毒ガスにレーザー光を照射すると紫外線が返ってくる』と言う事で、現在の国立研究法人・物質材料研究機構(以下、NIMS)の小出康夫先生(現在:理事)が開発していましたダイヤモンド半導体紫外線センサーが注目され、素子はNIMS、駆動回路を当社が受け持ち共同で基礎研究を始める事になります。ただし、この時の基礎研究では『ダイヤモンドで炎を検出する事』を目標に置いたものであり、その成果は平成18年3月14日、NIMSのプレスリリースにて世界で初めてダイヤモンドにより炎の検出に成功した事を発表しました。(ダイヤモンド半導体紫外線センサー: ZBZ065)

ダイヤモンドは装飾品として使用されますので他の鉱物に比べ一般的によく知られた鉱物ですが、熱伝導が良い、硬いなどの性質を活かして切断、研磨など工業用品としてもよく使われてる素材(鉱物)です。しかし、私共の電気・電子業界から見たこの素材の特徴は550℃の高温に耐えうる事に加え、高エネルギーによる劣化が無いと言う点です。

窓際に置かれた物が長年の歳月により色が変わり、もしくは色抜けをしたと言う経験は皆さんにもあると思います。それは太陽光に含まれる紫外線により色素が破壊されて起こるものです。

波長の短い紫外線はエネルギー量が強く、多くの物質は劣化してしまおうのですがダイヤモンドは劣化しないのです。そしてダイヤモンドより硬い鉱物は無くこれによる半導体の生成は追いつかれる技術であっても抜かれる技術ではないと言う事です。これが私共がダイヤモンドに取り組む最大の理由です。

これまでにご紹介させていただきました紫外線センサーはその素子にUV管と言う、昔の真空管みたいなも



(a) SKH047
標準型炎センサー



(b) SKH086
重機用火災センサー



(c) SKH087
悪戯防止用火災センサー



(d) ZBZ065
ダイヤモンド半導体
紫外線センサー

図1 紫外線センサー

のです。駆動する為には400V近い電圧を加える必要があり、得られる信号は紫外線が有るか、無いかと言うON/OFF的な信号です。

しかし、ダイヤモンドを素材とした紫外線センサーは半導体³⁾です。紫外線の強度に比例した出力信号、つまりアナログ量として取り出す事が可能ですから、火災検知で言えば事務所などの広い1ルームでも3台のセンサーを配置するのみで火災が発生している位置を特定できたりもします。この他にはオゾン層の簡易計測や、宇宙空間では紫外線発電が可能であり将来的にも用途の広い素子であると言う事が言えます。

10. 炎と紫外線

先でも触れましたが、紫外線は自然環境下においては太陽光と炎のみにしか含まれません。この分離さえ出来れば高感度な炎センサーとなる事がお解りいただけましたものと思います。私共は最初に陶芸業界から炎に接して来ました。それは物を作り出す(生み出す)と言う事での応用でした。しかし今は、火災と言う災害から物を守る事に取り組んでいます。

生産性もなく、また、めったに起こる事のない火災を監視するものに世間の関心はとても低いものです。しかし、火災は一度発生すると全てのものを焼き尽くします。その中には思い出や生命も含まれます。

私共が持つ技術でそれを守れるとしたら、私共は全力でそのお手伝いをさせていただきたいと考えています。

(注)

- 1) UV-C: 波長が10~400nm、即ち可視光線より短く軟X線より長い不可視光線の電磁波を紫外線と言ひ、その中でも波長が280nm未満の物をUV-Cと言ひます。強い殺菌効果を有してゐます。
- 2) 高感度: 当社のセンサーではライターの2cm程度の炎でも5m~10m離れて、1mの火柱であれば70m離れた位置から最短0.5秒で検出可能です。(標準型炎センサー: SKH047)
- 3) 半導体: 電気を通すものを導体と言ひ、逆に通さないものを絶縁体と呼びます。文字からすると少し電気を通すものと思われがちですが、こうした現象は単純に導体が抵抗を持ったに過ぎません。通常は絶縁体なのに外部的に何等かのアクションが起こった時に電気を流す(導体)ような物質の事を半導体と呼びます。本書で記載してゐますダイヤモンド半導体紫外線センサーは、紫外線を受ける事で電気を通す物体になると言ひます。

生態系を構成する生物への影響に配慮した消火剤の開発

北九州市立大学国際環境工学部 教授
国際光合成産業化研究センター長

河野 智 謙
Tomonori Kawano

1. はじめに

近年、我々が使用する様々な化学物質が人間の健康のみならず、様々な影響を生物や生態系にあたえることが明らかになり、それら化学物質のリスク評価が重要視されている。北九州市においては、緊密な産学官の連携によって多様な消防資機材の開発が行われているが、特に、石けん成分を主成分とした環境配慮型泡消火剤の開発は、国内外の事例と比較して、先駆的な環境問題への取り組みであるといえる[1-3]。

消火戦術における環境への配慮とは、あえて単純化すると、生態系への配慮とほぼ同義であり、生態系に対する配慮とは、生態系を構成する様々な生物への配慮と捉えなおすことができる。この生態系を構成する植物や微生物に対する影響を正しく評価することによって、はじめて既存の消火剤や新規に開発される消火剤の環境負荷について議論することが可能になる。本小文では、生物に対する影響評価をどのように行うべきか、またその結果どのような知見が得られたのかについて、用語の説明とともに、事例を交えた解説を行いたい。

2. 化学物質の影響：短期的視点と長期的視点

生物や生態系への化学物質の影響を短期的視点と長期的視点から考えたい。短期的な視点においては、直接的な環境破壊や生物に対する急性毒性(acute toxicity)を考慮する必要がある。また長期的な視点から見ると急性毒性の評価では見過ごされがちな慢性的な毒性(chronic toxicity)や環境への残留性の指標の一つである生分解性を考慮する必要がある。慢性毒性の指標の一つとして生物の増殖率への影響を評価した場合、投与群(処理区)と対照群(区)との間に有意な影響が認められない濃度を無影響濃度(NOEC, Non Observed Effect Concentration)や無影響量(NOEL, Non Observed Effect Level)として表すことができる。

一般に化学物質が示す様々な生物に対する慢性毒性は、急性毒性よりも低い濃度で確認できることが多い。これは、急性慢性毒性比(ACR, Acute Chronic Ratio)として後述する EC_{50} 値をNOEC値で除した $EC_{50}/NOEC$ 比を求める方法などによって明らかにすることができる[4]。例えば、環境省がミジンコを対象に実施した化学物質群の毒性評価では、ACRが1を上回る(慢性毒性の方が急性毒性よりも低濃度で観察される)ケースは、ACR:1~10の範囲の物質が全体の約43%、ACR:11~50の範囲の物質が約27%、ACR:51~100および101~500の範囲の物質群がそれぞれ約6.5%であり、わずかではあるが、ACRが1,000前後に達する化学物質も存在す

連絡先

〒808-0135 福岡県北九州市若松区ひびきの1-1
北九州市立大学国際環境工学部環境生命工学科
E-mail kawanotom@kitakyu-u.ac.jp

る[4]。

中長期的な視野で考えた場合、対象となる生物の個体数の変化は、増殖と死滅の速度の差として得ることができる。本来、化学物質が存在しない場合でも、生物の個体数は様々な季節変動、環境要因の変化、個体群の状態、他の生物との相互作用により常に変動している。これに、特定の化学物質(モデル実験では金属イオン群を使用)により誘導される急性毒性による死滅個体の増加と慢性毒性による増殖率の低下など、化学物質により誘導される諸変化を計算に反映させることで、実際の個体数変化をシミュレーションするための数学的なモデルの開発も行われており[5]、今後、モデル実験で得たパラメータを組み込むことで、実際の生態系に消火剤を散布した時の生物個体数の変化予測への利用が期待できる。

化学物質が示す毒性と関連付けることが困難であるが、重要な指標として生分解性の有無を上げることができる。環境に配慮した泡消火剤の開発においても、生分解性の評価のために活性汚泥における微生物依存的な分解反応速度の解析(酸素消費速度および CO_2 発生速度の解析)を評価法として採用し、市販されている既存の合成界面活性剤系の泡消火剤、新規開発品およびそれらの構成成分の生分解性を比較しながら、より優れた生分解性を有する成分を選抜することで、生分解性を向上させた泡消火剤の開発が進められている[6]。

3. 毒性と生態毒性

生物に対して化学物質が引き起こす現象のうち生存を脅かす致死レベルの毒性を指標とした毒性評価の指標として、 LD_{50} や LC_{50} など指標は一般にもよく知られている。 LD_{50} は、体重あたりどの程度の量の化学物質が対象とした生物の半数の個体を死滅させるかを指標とした指標であり、mg(物質)/kg(体重)のような単位で表される。Lはlethal(致死)の頭文字から、Dはdoseの頭文字で、薬であれば服用量を、食物であれば摂取量を意味し、下付け数字の50は50%の死亡率を表す(致死率50%なので生存率50%と捉えてもよい)。同様に、 LC_{50} は、生物あるいは特定の細胞が存在する水環境や溶液中にどのくらいの濃度の化学物質が存在すれば対象とした生物あるいは細胞の半数が死滅するかを表す指標であり、mg(物質)/L(体積)のような単位で表される。一般的に、急性毒

性を示す化学物質の場合、致死率は時間とともに増大し、一定の時間が経過すると致死率がそれ以上変化しにくくなる。従って、LD₅₀やLC₅₀の数値が得られたのが、薬剤と生物が接触して以降、数時間なのか、半日後(12h)なのか、1日後なのか(24h)、あるいはもっと長期間、例えば2日後(48h)、3日後(72h)、4日後(96h)なのかを厳密に区別する必要がある。

水生微生物の遊走性への影響など致死以外の現象を指標とした急性毒性の場合、EC₅₀(Half maximal effective concentration)として毒性を評価することも多い。EC₂₀(20%影響濃度)のように、EC_xの下付け数字(x)は、50以外にも0から100の間で設定することができる。すでに述べたLD₅₀やLC₅₀も、このEC_x式の毒性濃度評価の特殊ケースであるといえる。

毒性評価にあたり、半数致死率も半数生存率も見ている現象は同じであるが、生物がどの程度まで化学物質のストレスに耐えて生存しているのかについて特に着目した表記法として半数生存限界濃度(median tolerance limits)を意味するTLmと表記される数値も魚類をはじめとする多くの水生生物に対する様々な薬剤の影響の指標として利用されている。ここでも化学物質の影響をどの時点で評価したのかを厳密に区別する必要がある、48 hr TLmやTLm-48のように、時間情報を併記することになっている。

生態系を構成する生物に対する毒性を問題とする場合、「生態毒性(eco-toxicity)」という用語が用いられる。一般的な毒性ではなく、環境中に生息する生物に対する影響を評価する場合、対象生物の生育環境を再現する場合としない場合で得られる値が大きく異なることがある。林野火災など、広域にわたり、薬剤が散布されるケースを考えると、生物がどのような環境にいた場合にどのような影響があるのかを複合的に評価する必要があり、モデル実験で得られたLC₅₀やTLm-48からは実際の生物の影響を推計できないケースがある。生態系を構成する生物への影響に配慮した消火剤の開発においては、消火剤およびその成分の生体毒性をより正確に把握するために、生態系における生物の生育環境条件を反映したアッセイ系の構築を重視している[7,8]。

4. 水田生態系を構成する生物を利用した生態毒性評価モデル

一般建物火災用の消火剤の環境への影響を評価する場合、住宅地に隣接する適度に管理された半自然生態系(里山、里地、河川水系)に生息する生物への影響を重視した。日本の農耕地の大部分を占める水田は、日本の伝統文化に基づき、長期間にわたり継続して維持管理がなされてきた湿地性の半自然生態系である[9]。水田は、農地整備の程度に応じて在来の多年生草本から帰化植物までの比率が変化する半自然の草地[10]とも湿地[11]ともみなせる二次的自然環境である。近年は、休耕田も多く、水生

植物や湿生植物の保全の場としての耕作放棄水田の意義が注目されている[12]。

上述の北九州市で行われた産学連携による「環境に配慮した泡消火剤」の研究開発の初期において、北九州市立大学の参画グループが採用したモデル水生生物は、主として(1)淡水環境に生育する原生生物であるミドリゾウリムシ(学名*Paramecium bursaria*)と(2)淡水から汽水までの幅広い環境に生息できる魚類のモデルとして選択したヒメダカ(学名*Oryzias latipes*)である。また、(3)湿地で生育する高等植物を代表してイネ(学名*Oryza sativa* L.)を利用した。イネは英語でrice plantであり、人為的に水田生態系に導入される主要な植物種である。一方、ヒメダカは、観賞用に品種改良がなされ一般に流通するようになった日本産メダカのモデル生物である。メダカ科(Adrianichthyidae)は英語でricefishesであり、共に典型的な水田湿地生態系の構成モデル生物の一つであるといえる。日本産のメダカは、従来1種のメダカとして扱われていたが、2012年にキタノメダカが別種(学名*Oryzias sakaizumii*)とされたため[13]、その他の従来のメダカが学名*Oryzias latipes*を引き継ぎ、和名をミナミメダカと改められた。メダカ(現在のミナミメダカ)は、シーボルトのコレクションンによってはじめて西洋に紹介され学名が与えられている[14]。なお、メダカとイネの学名を併記すると、お互いに属名が類似していることがわかる。*Oryzias*は、イネを表す*Oryza*から派生している。また、*latipes*は、幅が広い意を持つ*latus*と足(尻ビレ)の意の*pes*からなる。従って*Oryzias latipes*という学名は、「イネの近くに生息しヒレが広い」という意を表している。学名からもイネとメダカのつながりがよくわかる。

ゾウリムシ属をはじめとする繊毛中の多くは、古くから培養法として、稲わらやイネ科の穀物粒の煮沸液にフードバクテリアを摂取した培地中で培養する手法が確立されていることから明らかなように、水田の稲わらの分解を担うバクテリア群を餌として捕食する性質があり、水田生態系の構成モデル生物の一つであるといえる。

ミドリゾウリムシは、温帯地域の河川や湖沼の自然環境および水田、農業用水系、防火用水などの里山の概念に含めることのできる人為的に構築された、生活環境に密接した水環境に幅広く生息する繊毛中(単細胞生物)である[15]。興味深いことに、特徴的な緑藻との共進化を遂げてきたミドリゾウリムシの細胞内には、クロレラ(*Chlorella*)に近縁の数百もの微小な緑藻細胞が共生しているため[16,17]、緑藻に代表される水生光合成生物に対する影響と一般的な繊毛中に代表される遊走性原生生物への影響の両方を評価することができる指標生物である[18]。また、ミドリゾウリムシおよびその近縁種(*P. caudatum*および*P. trichium*)は、顕微鏡下での細胞死の観察(判別)が容易なことから、様々な化学物質の急性毒性評価(LC₅₀の決定)に用いられている[18-21]。共生緑藻

の光合成に由来する炭水化物は、ミドリゾウリムシ宿主細胞側で、エネルギー源として利用できるため、光条件下での長期間の維持・培養が容易であることも、実験モデル生物としてのメリットであるといえる[17,20,22]。

消火剤開発の過程でバイオアッセイに利用したゾウリムシ類は、環境調査のフィールドであった遠賀川水系[23]から採取したものであり、生息していた地点(遠賀川中流域)から採取した生育水(河川水)でのバイオアッセイ[8]や遠賀川を水源とする水道水を成分分析後に利用したバイオアッセイ[24]、国内外の様々な水環境から採取してきた環境試料水や世界各地の成分が公開されているミネラルウォーターを用いたバイオアッセイ[25]など、ミネラル組成が生育環境を反映するように設定した、あるいは調整した水条件を毒性評価試験に採用している。

筆者らのグループでは、これらのモデル生物を用いて、実験室内での個々の生物(イネ[26,27]、ヒメダカ[28,29]、ゾウリムシ[30]、ミドリゾウリムシ[24,25,31,32])を用いた生体毒性評価試験(一般に水田の水源がそうであるように河川水に由来する淡水モデルでのバイオアッセイ)および水田環境を再現したビオトープでの生体毒性評価手法を確立し[7,33]、市販および開発中の泡消火剤および消火剤成分(特に界面活性成分)の毒性評価を行った。ここでは、2種類の原生生物を用いた泡消火剤の生態毒性評価の代表的なデータを紹介する(図1)。

次のセクションで詳述するように、水生生物の毒性評価においては、環境中の水の条件の再現に十分注意を払う必要がある[24,25,28-31,33]。通常の実験室での実験のように、イオン交換水や蒸留水を基礎とした低ミネラル条件で毒性評価試験を行った場合と環境水を再現した条件での評価試験(致死試験)を行った場合では、得られる数値(LC₅₀値、TLm値)が大きく異なる。合成界面活性剤系の泡消火剤(複数の市販薬剤)や単独で与えた複数の合成界面活性剤成分の場合、淡水や汽水を再現したモデル水中のミネラル成分が指標生物に対する毒性を高める傾向があり、逆に石けん系泡消火剤や石けん成分(脂肪酸塩)を添加した場合、環境水中のミネラル成分(特にCa²⁺、Mg²⁺等のカチオン)が水生生物に対する毒性を劇的に減じる傾向が確認された。

興味深いことに、生物分類上大きく離れた生物グループに属するミドリゾウリムシ(原生生物界)とヒメダカ(動物界)に対して各種消火剤や界面活性剤成分が示す生態毒性の大小の傾向が、非常に類似していた。そこで、二つの実験系を新規の消火剤開発のステージに合わせて使い分けをすることを考案した。一つのデータポイントのために、ヒメダカを利用した魚毒性試験では、5個体を飼育する1Lビーカーを用いて、48時間から96時間の観察が必要であり、単一の試薬に対するTLm値を決定するためだけに数百のヒメダカ個体と数十Lの水試料とそ

れに添加する大量の試薬が必要になる(特に高濃度試験区での使用量が大きい)。一方、ミドリゾウリムシを用いた致死試験では、約100個体を懸濁した1mLの試料を用いて12時間(LC₅₀値)の試験を行うだけで、一つのデータポイントが得られる。

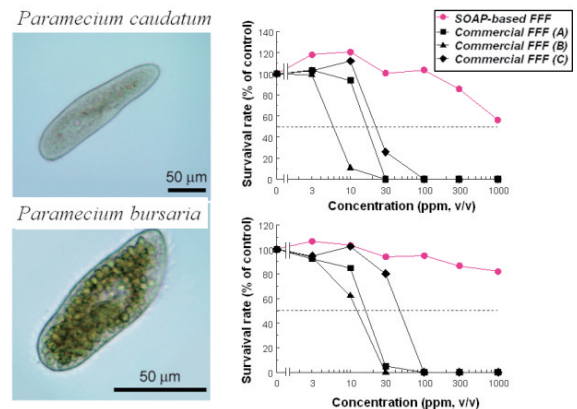


図1 淡水環境中の繊毛虫を用いた泡消火剤の生態毒性試験の例。(上)ゾウリムシ(*P. caudatum*)に対する生態毒性試験。(下)ミドリゾウリムシに対する生態毒性試験。石けん系泡消火剤試作品(6505+)と市販の合成界面活性剤系泡消火剤(A: フォスチェックFWD881C、B: メガフォームAGF、C: フォレックスパンS)の毒性(致死効果、12時間)を比較。北九州市水道水条件下での試験。高濃度領域において、石けん系泡消火剤の毒性が低いことがわかる。2005年3月「環境に配慮した泡消火剤の研究報告書」より抜粋。

多くの候補物質を対象とした予備的なスクリーニング試験を行うには、省スペースと時間短縮が可能な水生微生物試験の方が明らかに現実的な選択肢である。ヒメダカを用いた魚毒性試験は、予備試験で選抜した限られた種類の候補成分および各候補成分を混合した試作品に対してのみ実施した。また、実際の生態系を対象とした毒性試験は行うべきではないので、開発品の実証試験では、様々なモデル生物を定着させた淡水生態系、湿地生態系、草地生態系などを再現したコンパクト・ビオトープを設計し、野外での長期間の影響評価を行った[7]。

ビオトープ試験では、開発段階で利用したモデル生物(イネ、ヒメダカ、ミドリゾウリムシ)だけでなく、複数の原生生物、甲殻類、貝類、水生昆虫、水生植物、陸生植物など多くの生物種に対する影響を確認している。ここでは、淡水環境を再現したコンパクト・ビオトープでの消火剤散布実験の様子(図2上)、野外静置期間中のビオトープへの昆虫の飛来と繁殖の様子(図2中)、自然定着した優占動物種の例(図2下)、および実験終了時に各処理区での生存生物の回収結果(図3)を示す。

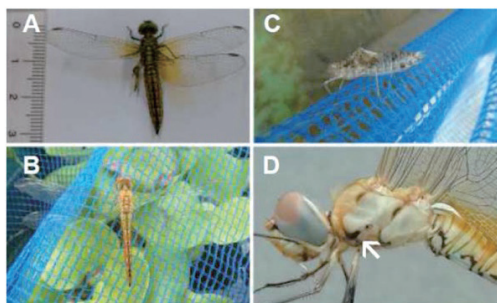
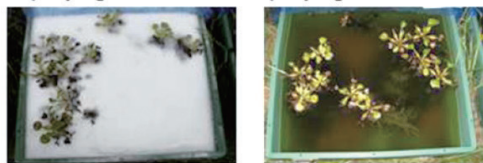
ビオトープ表面は目の粗いネットで被覆し、ネットの一部は水面に触れるようにし、系外の昆虫の産卵を促す

Fire-fighting foams sprayed.

- (1) Before spraying. (2) Fire-fighting foams sprayed.



- (3) Just after spraying. (4) One day after spraying.



Physella acuta Nymph of dragonfly



図2 コンパクトビオトープにおける消火剤の生態毒性試験の様子。(上段)石けん系消火剤散布。(中段)系外から飛来し定着した昆虫の例(アキアカネ: *Sympetrum darwinianum*)。(下段)底質の優占生物種。サカマキガイとトンボ幼生。実験経過: 2010年5月に系を野外に設置し生物を導入, 2010年9月消火剤散布, 2010年4月, 生存生物の回収。写真は、文献[7]より抜粋。

が、内部からの成長個体の脱出は防いだことから、ビオトープをカバーするネット内部でヤゴの抜け殻および羽化したトンボ成虫を複数個体観察した。石けん系消火剤処理区で観察されたトンボは、形態からアキアカネ (*Sympetrum darwinianum*) と同定できた(図2中)。このことは、石けん系の消火剤を散布後、ビオトープ内の環境が野外の昆虫の繁殖を阻害しないレベルにまで回復したことを示している。一方、合成界面活性剤(Phos-check)処理区では、昆虫の定着が確認できなかった。また、野鳥などの動物や風雨などの媒介あるいは初期に導入されたホテイアオイなどの植物根系に付着するなどの経路で系内に導入されたと考えられる、複数の水生生物の定着

も確認された。

対照区と石けん系消火剤区の底質で最も多くの個体が観察されたのはサカマキガイ (*Physella acuta*) とトンボの幼虫(ヤゴ)であった。多くのヤゴは種が未同定であるが、系内で成長し捕捉された成虫(図2中段)がアキアカネと同定されたことから、同種である可能性が高い。一方、合成界面活性剤(Phos-check)処理区では、サカマキガイや昆虫の定着が確認できなかった。

合成界面活性剤(Phos-check)処理区では、目視での生物の観察ができないまま、薬剤散布(2009年9月)から7か月が経過した時点(2010年4月)で、生存生物の全個体調査を行ったところ、水中と底質から一個体も目視できるサイズの生物が確認できなかった(図3上)。対照区と石けん系消火剤処理区では、共に多くの定着生物個体が確認できたが、優占動物種であったサカマキガイ(図3中)およびヤゴ(図3下)の体長には処理区間で差が認められた。

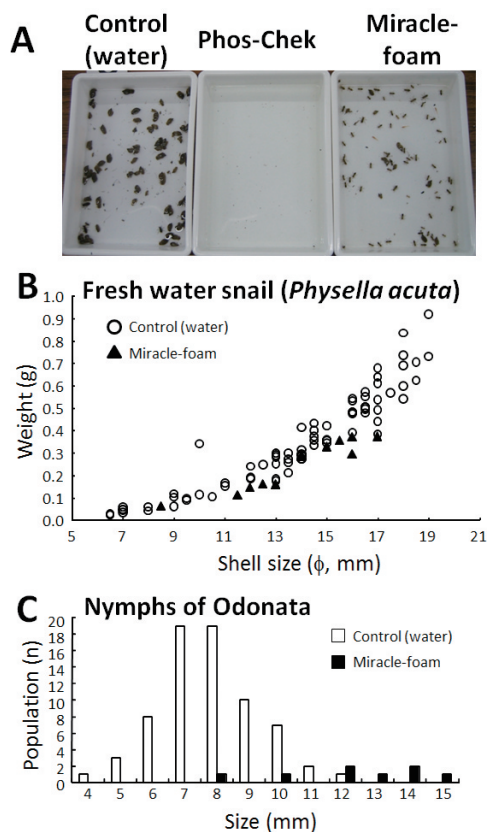


図3 淡水生態系を再現したビオトープでの長期野外毒性評価の例。淡水と川砂からなる系に生物を定着させ、水、合成系消火剤(Phos-Check)または石けん系消火剤(Miracle-foam)を散布、7か月後に全個体調査を行った。(A)底質(面積0.64㎡、砂層厚: 5cm)中に生息する目視可能個体全てを回収。処理区別のサカマキガイ個体の体長分布(B)とトンボ幼虫の体長分布(C)の比較。文献[7]より抜粋。

フィールドでの生態毒性評価トピックの一つに、航空消火における生物への影響評価も上げておきたい。林野

火災の消火を想定したヘリコプターからの泡消火剤の散布条件を再現した環境影響評価の一環として物理的刺激、大量の泡の降下を特徴とする消火薬剤散布スポットに、あらかじめ調整した指標生物を配置し、その後の致死効果の観察するなど、複数の生物種を対象とした生態毒性評価を実施している(図4)。

このように開発ステージに応じて、目的に合致したアッセイ系を選択することで、効率的な開発を行うことが可能になった。より簡便で早い周期での反復実験が可能なバイオアッセイを繰り返すことで、高い生態毒性を示す化学物質をスクリーニングで候補成分から除外し、環境に配慮した泡消火剤開発に利用可能な成分を効率的に選抜し、開発サイクルを短縮することができた。



図4 林野火災用泡消火剤の生態毒性評価実験の様子。

5. 広範囲の水環境での生態毒性評価手法

我々が魚毒性評価に用いたヒメダカは、小サイズだけでなく生体毒性評価の材料として大きな利点がある。ヒメダカを含めたミナミメダカ(旧メダカ)が、メダカ属 *Oryzias* に属する種であることはすでに述べた。研究材料としての利点の一つは、ミナミメダカがゼブラフィッシュと並んで最も一般的な淡水に生息する真骨魚類の実験モデルとして世界の多くの研究室で実験に用いられているためデータを多くの研究者と共有できることである[34]。もう一つの重要な利点は、メダカ属が示す幅広い環境適応性である。メダカ属には、新たに加わったキタノメダカを加えて、15種類以上が知られ、それら種間の系統関係が明らかになっている[35]。興味深いことに、メダカ属を構成する個々の種は、それぞれ特徴的な地生態学的生息分布パターンを示すことが知られ[36,37]、あ

る種はインドネシア諸島の特定の淡水湖のみに生息することが知られるが、その他の多くの種は、東アジアの広域の淡水、汽水、あるいは海水を好み、広範囲の水域に分布している[38-40]。

このようにメダカ属の種が浸透圧が大きく異なる幅広い水環境に分布している事実は、高浸透圧ショックや低浸透圧ショックに対して魚類がどのように応答するのかについての大変興味深い生物モデルを提供しているといえる[41]。属内の種の異なる塩濃度環境への分布のみならず、ミナミメダカ (*O. latipes*) 単独でも生活環の中で淡水と汽水の間を移動し、急激な浸透圧の変化を経験するが、多くの場合、それに適応できることが知られている[35]。東京大学のイノウエとタケイ[34,41]によって、実験室でもミナミメダカの実験系統の個体が淡水から汽水への移行後も浸透圧変化に適応し生存できることが観察されているが、海水への適応は観察されていない(淡水から海水への移行後数分で全個体が死滅との記述あり)。

我々の実験系では、淡水中で飼育したヒメダカを数時間かけて、人工海水塩を添加し、段階的に塩濃度を増した汽水(5%→10%→15%→25%→50%の海水濃度)に適応させる馴化プロセスを経ることで、最終的には海水相当の塩濃度の水環境へ適応できること。このような馴化へ経たヒメダカは、海水中(極度な高浸透圧条件)でも、あるいは超純水中(極度な低浸透圧条件)でも数日間にわたって外見上の異常もなく生存が可能であることを観察している[42]。

このように生活環の殆どの期間を淡水環境で過ごすミナミメダカが汽水から海水までの環境に一過的に適応できる事実は、水系が異なる河川に特定の系統のミナミメダカが分布域を拡大している事実(つまり河川氾濫等により一時的に海水域に達した個体が、隣接する別の河川に進入することによる生育分布域の拡大)を説明できる[34]。ヒメダカが示す幅広い浸透圧条件への適応能力を利用することで、同一種の指標生物を利用して、異なる水環境(貧ミネラル水、淡水、汽水、海水)の影響下における化学物質の生態毒性の変化を調べることが可能になる[28,29]。

表1 水条件の違いによる石けん成分(オレイン酸カリウム)のヒメダカにおける生態毒性(LC₅₀)の変化。

水条件	LC ₅₀ (ppm)	
	24 h (純水との比)	48 h (純水との比)
純水	7.5 (-)	7.5 (-)
水道水 (河川由来)	162.5 (21.7)	150 (20)
汽水 (25%海水)	970 (129.3)	925 (123.3)

参考文献[29]から抜粋。

同一種の指標生物を用いないで、それぞれの水条件で生息可能な複数の指標生物を実験に用いた場合、水条件により、化学物質の毒性が増大する、あるいは軽減するという現象が観察された場合に、それが水条件の影響であるのか、生物種の違いによるのかの判断が付きかねるとい問題が生じる。ヒメダカの浸透圧馴化プロトコル[42]を開発したことで、同一生物種を用いた広範囲の水環境での生態毒性評価が可能になったことの意義は大きいといえる。

表2 異なる水条件でのヒメダカに対する泡消火剤の生態毒性(LC₅₀)の比較。

水条件	消火剤	LC ₅₀ (ppm)		
		12 h	24 h	48 h
純水	合成 A	150	137	85
	合成 B	2	2	2
	合成 C	200	185	65
	合成 D	185	185	185
	石けん系	65	55	55
水道水 (河川由来)	合成 A	25	25	25
	合成 B	20	20	18.5
	合成 C	65	65	65
	合成 D	200	200	200
	石けん系	400	200	200
汽水 (25%海水)	合成 A	15	7.5	7.5
	合成 B	65	55	20
	合成 C	65	20	20
	合成 D	185	133	73
	石けん系	4000	1330	650

参考文献[29]から抜粋。

異なる水条件での代表的な生態毒性評価実験の例を表1(石けん成分)および表2(消火薬剤)に示す[29]。ここでは、超純水、消火活動に利用される水道水(遠賀川水源)および人工海水塩で調整した25%海水濃度相当の汽水モデル水と比較に用いた。石けん系消火剤の界面活性成分として利用される脂肪酸塩(オレイン酸K)がヒメダカ個体の生存率に与える影響を比較したところ、純水条件で最も毒性が高く、河川水と同等の硬度の水道水条件において毒性が純水との比較で約20倍緩和され、汽水条件においては、純水との比較で120倍以上の毒性緩和が観察された(表1)。このような硬度と毒性緩和との関係は、石けん系泡消火剤(試作品)を用いた場合にも観察された(表2)。しかし、市販の合成系消火剤(全て海外製)の毒性評価においては、硬度上昇が毒性緩和につながることはなかった(表2)。

6. 河川の流域によって変化する生態毒性

水のミネラル含有量を反映した硬度の差が、石けん系消火剤の生態毒性を大きく変化させるという知見から、同一河川に消火薬剤が混入した場合でも、河川の流域に

よって水の硬度が異なるため、生態毒性も変化する可能性が示唆された。

すでに議論したようにヒメダカは、適切な馴化プロセスを経た場合、幅広い水条件に適応できるため、異なる水条件における魚毒性試験を網羅的に実施することが可能なモデル生物である。そこで、近隣の遠賀川の源流域、上流域、中流域、下流域、河口汽水域および河口海水域から採取した水をヒメダカの生育水として用い、それらの水条件での石けん系騒消火剤の生態毒性評価を行った(図5)。

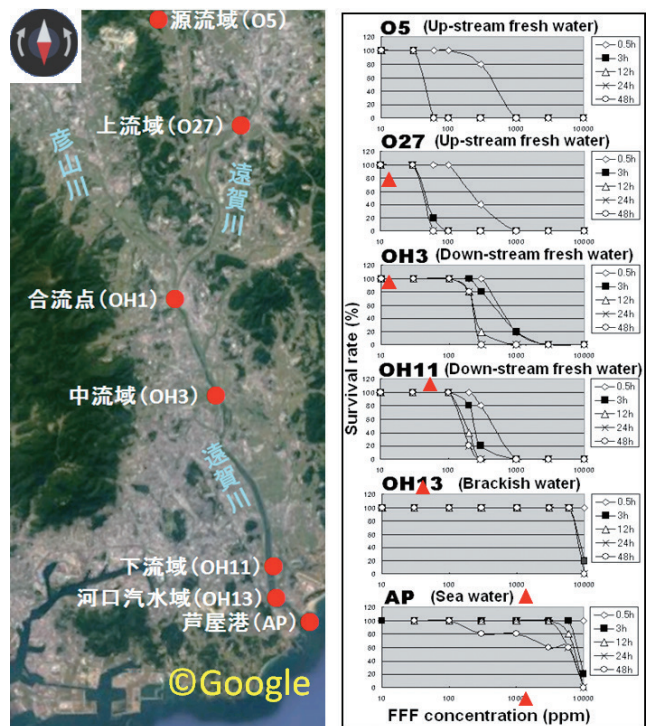


図5 遠賀川水系から採取した河川水および海水および異なる水条件への馴化を施したヒメダカを利用した石けん系泡消火剤の生態毒性評価。(左)遠賀川水系における水試料採取地点。(右)各地点から採取した水にヒメダカ個体を適応させた後、様々な濃度の消火剤を添加し、0.5、3、12、24、48時間後に観察された生存率をグラフで示した。文献[28]を改変。

7. 環境水のミネラル組成と石けん系消火剤の生態毒性

異なる河川域の水の硬度の違いによる毒性の変化は、原生生物ミドリゾウリムシを利用した石けん成分であるオレイン酸Naの毒性評価試験においても確認できた(図6、○記号)。一方、合成系の界面活性剤を主成分とする市販の食器洗浄剤は、どの河川のどの流域においても、ほぼ同じレベルの毒性を示した。石けん系消火薬剤が河川に流入した場合、水流に従い、中流、下流、河口への到達することで、毒性が失われてゆく特徴を持つことを示唆している。

文献[28]では、遠賀川水系から採取した水の硬度と石

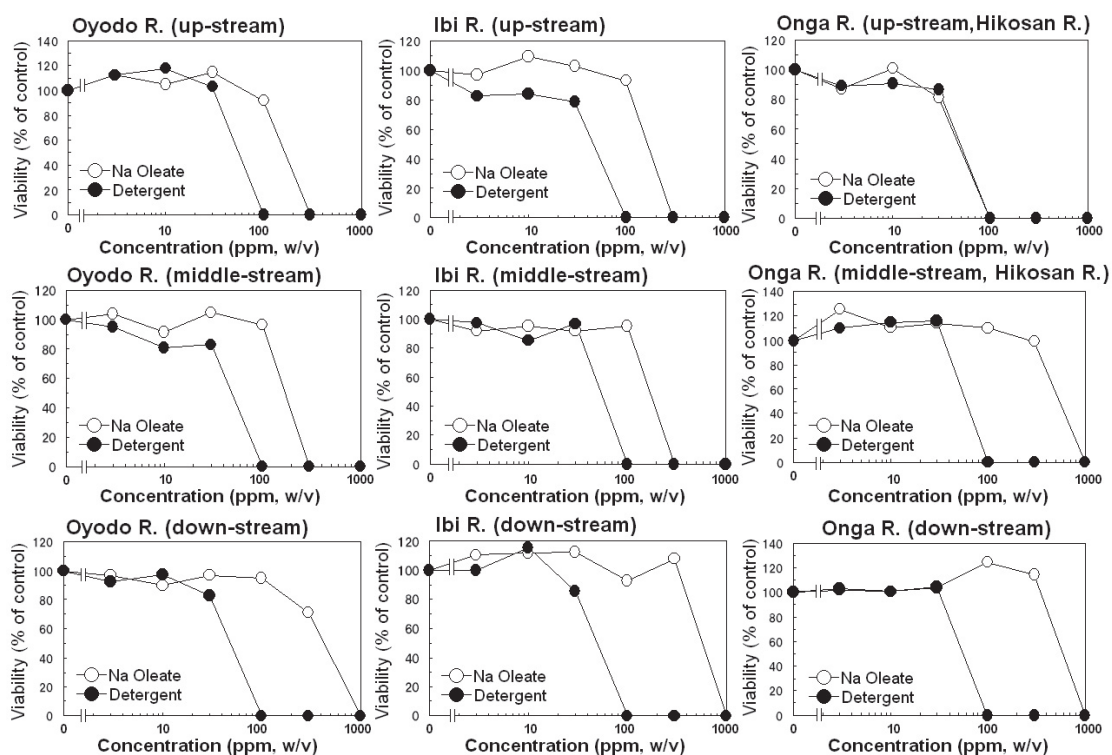


図6 河川の流域の違いが原生生物ミドリゾウリムシの界面活性剤への感受性に与える効果。大淀川(宮崎県、左)、揖斐川(岐阜県、中央)、遠賀川(福岡県、右)の上流域(上段)、中流域(中段)、下流域(下段)から採取した水をオレイン酸Na(O)および市販の合成系食器洗浄剤(●)の生態毒性評価(12時間、LC₅₀値)に用いた。文献[24]より抜粋。

けん系泡消火剤の魚毒性との関係を、また文献[24]においては、国内および東アジアの河川から採取した水の硬度との関係をまとめている。水の硬度の上昇とヒメダカにおける石けん系泡消火剤の魚毒性の低下(LC₅₀値の増大)との間に強い相関が確認できた(図7)。一方、魚毒性試験よりもコンパクトで短時間の実験が可能ミドリゾウリムシでは、国内外の河川および湖沼から多数の環境水試料を取り寄せ、より詳細な分析が可能となった。硬度とLC₅₀値との間の正の相関はミドリゾウリムシと石けん成分の組み合わせでも確認でき[24]、さらに様々なイオンの含有量と石けん成分のLC₅₀値との関係を調べることで、硬度上昇に貢献する2種類のカチオン(Ca²⁺とMg²⁺)が最も石けん成分の毒性緩和に貢献することが明らかになった。

二つのカチオンを比較した場合、Ca²⁺の方がより効果的に石けん成分(オレイン酸Na)の毒性緩和に貢献することが分かった。図8に環境水中のCa²⁺濃度とオレイン酸NaのLC₅₀値との直線的相関を表したグラフを示す。一方、合成系界面活性剤を主成分とする食器洗浄剤の毒性とCa²⁺濃度との間には、相関が認められない。

以上のデータは、環境水中のカチオン、特にCa²⁺が石けん成分の生態毒性緩和に貢献していることを強く支持する。河川の異なる流域における石けん成分の生態毒性の大小もCa²⁺濃度の高低に起因するものであるならば、

下流域の水が示した石けん成分の生態毒性を緩和する働きも、水に含まれるCa²⁺除去することで、失われるはずである。これを検証するため、河川水にCa²⁺キレート試薬(グリコールエーテルジアミン四酢酸、EGTA)を添加し、溶存するCa²⁺を除去し、オレイン酸Naに対するミドリゾウリムシの生態毒性評価を行った(図9)。低ミネラルの水条件である河川の上流域の水では、EGTA添加によるLC₅₀値の変化はほとんど認められなかったが、硬度が高くなる下流域では、EGTA添加によりオレイン酸Naの毒性が高めに観測された。図9には、遠賀川水系の水での実験のみ示しているが、そのほかの複数の水系の水でも実験を行い、同様の傾向の結果を得ている[24]。

実験室でのモデル環境水と8種類の石けん成分(4種類の脂肪酸と2種類の塩の組み合わせ)を用いたミドリゾウリムシ[31]とゾウリムシ[30]の致死試験でもCa²⁺とMg²⁺の添加や除去により、石けん成分の毒性が大きく変化することを確認した。これらの知見は、脂肪酸塩のアルカリ金属イオン(K⁺, Na⁺)と環境水中のアルカリ土類金属イオン(Ca²⁺, Mg²⁺)が置換され、不溶性金属石けんが形成され、界面活性が消失することが、毒性緩和のメカニズムであろう。すなわち、高い生分解性に優れた石けんの成分の特徴に加えて、分解される以前に水生生物に与える影響も低減される性質も、環境負荷を低減させる環境性能の一つであると考えられる。

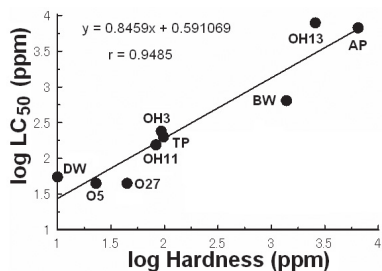


図7 ヒメダカにおける石けん系泡消火剤の魚毒性と水の硬度の関係。文献[28]を改変。

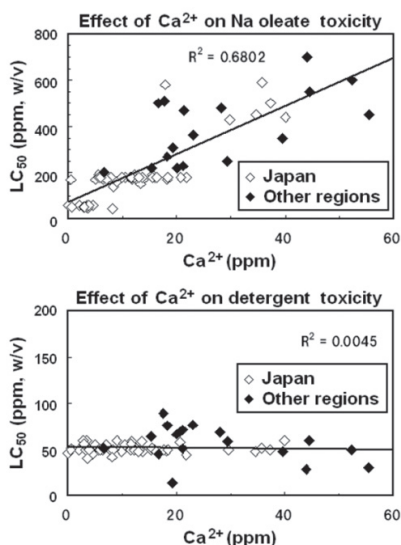


図8 ミドリゾウリムシの界面活性剤感受性と水のカチオン組成との関係。オレイン酸Na(上)と合成系食器洗浄剤(下)の毒性とCa²⁺濃度との関係。文献[24]より抜粋。

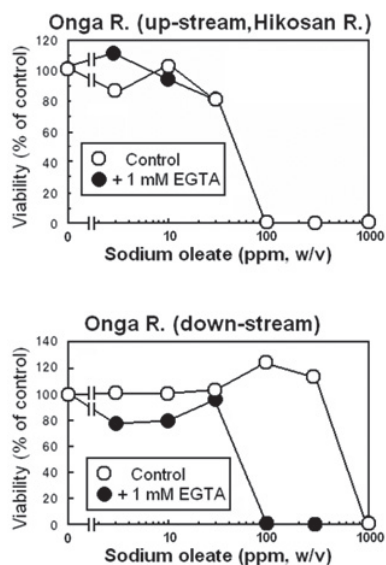


図9 河川水中で評価したミドリゾウリムシのオレイン酸Na生態毒性に対するCa²⁺キレート試薬EGTAの効果。遠賀川上流域(上)と下流域(下)から採取した水を用い、EGTAの有無がオレイン酸Naの致死効果に及ぼす影響を評価した。文献[24]より遠賀川水系のデータのみ抜粋。

8. 今後の取り組み：

(1)低濃度域での影響評価、(2)燃焼ガスのバイオアッセイ

急性毒性と慢性毒性の違いは冒頭に述べたが、ここでは、急性毒性と同じ短いタイムスパンの応答の中で、致死効果の観察以外の手法で生物応答を評価する試みについても簡単に触れておきたい。

DNAマイクロアレイ法による消火剤添加直後からの遺伝子発現の変化の解析をヒメダカを用いて行った。石けん系の消火剤の処理では致死効果以下の濃度での顕著な遺伝子発現の変化は確認できていない。

水質モニタリングに水槽中の魚群の応答を利用するユニチカ株式会社との共同研究実験では、様々な有毒物質に対する応答データベースを取得する中で、消火剤に対する応答反応のデータも得た。ヒメダカが、消火剤の濃度上昇を感知し、誘導される驚動反応を電気生理学的な手法で検知したところ、石けん系消火剤よりも合成系消火剤の方が激しい反応を示した。

実験装置の模式図を図10に、また未発表データの一部を図11に示す。このシステムは、水源に化学物質が混入したことを検出するために開発されたものであるが、生物の応答を利用している以上、毒性を示さない(inertな)化学物質の検出は困難である。結果として、合成系の消火剤は、20ppmに到達するまでに、すでに数ppmが混合された時点で前日のノイズ履歴を上回る電気生理的な応答を示している。

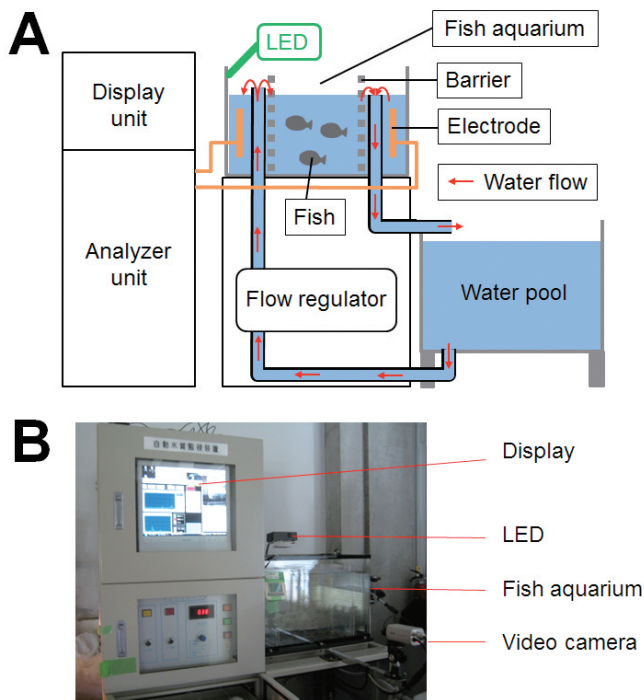
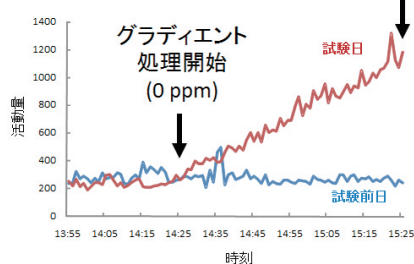


図10 水質モニタリングシステムを応用したヒメダカの化学物質応答検出装置。

A フォスチェック(合成系) 最終濃度 (20 ppm)



B ミラクルフォーム(石けん系)

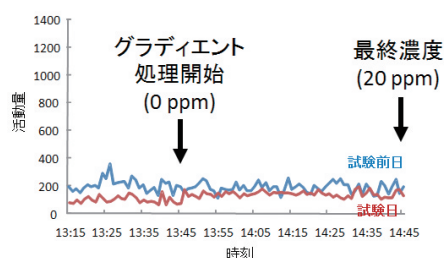


図11 水質モニタリングシステムを応用したヒメダカの低濃度消火剤への応答検出。

一方、石けん系消火剤ミラクルフォームを混合した場合、最終濃度の20ppmに到達するまでに全く応答を検出できなかった。低濃度の石けん系消火剤の水源への混入は、このシステムでは検出できないことになるが、低濃度の石けん系成分の安全性を示唆するデータであるともいえる。以上、ヒメダカを用いた二つの応答検出の試みは、現在投稿論文を準備中である。

ミドリゾウリムシは電気刺激や光に反応して遊走運動をすることが知られ[43,44]、この誘導遊走運動をマイクロチップ上で可視化する取り組み[45,46]や細胞運動にともなう光学ラベル粒子のキャピラリー内輸送を指標に遊走運動能を評価する試みも行われている[47,48]。

この遊走運動は、低濃度の化学物質の影響を受けやすく、走電性遊走を様々な金属イオンの高感度検出に利用する試みが報告されている[49]。走電性遊走運動の阻害による金属イオンの検出感度は、10~30 μ Mの範囲であり、低濃度泡消火剤の影響を同様の手法で評価することが計画されている。

ここまで消火剤の直接的な生態毒性にのみに焦点を当ててきたが、林野火災や木造建物火災を想定した場合、木材の燃焼ガスと消火剤の複合効果を新たな環境影響評価の対象として取り上げたい。植物遺体である木材の燃焼は、リグニン等に由来するフェノール物質群や燃焼に由来する有毒性の無機ガスを多く含む。そこで植物遺体の燃焼ガスおよび気化した消火剤の影響の対象として、①林野火災の場合に考慮すべき、延焼していない周囲の植物への影響、②消火作業従事者への影響が考えら

れる。植物遺体の燃焼ガスが生きた植物細胞に及ぼす影響評価の実験モデルはすでにタバコ(シガレット)の煙がタバコ培養細胞に与える影響を解析する実験系として報告されている[50,51]。特定された燃焼ガス中の致死誘導成分は、一酸化窒素(NO)であった。一方、ヒトを対象とした燃焼ガスの影響評価は、ヒト肺由来細胞の培養系にタバコの燃焼ガスを通気する方法で解析した[51]。

この二つの培養細胞のモデルを利用して、東京理科大学の火災科学研究センターの設備を利用し、消火剤添加木片からの燃焼ガスを二つの培養細胞系に通気し、生死判別を行った。ヒト肺由来細胞への効果は、未発表であるため詳細には触れない。植物細胞に石けん系消火剤を添加した木材からの燃焼ガスを与えた場合、毒性増加は認められなかったが、合成系界面活性剤は、木材からの燃焼ガスの毒性を大幅に高めることが示された[52]。今後、合成系界面活性剤が燃焼ガスの植物細胞毒性をどのようなメカニズムで増大するのかについて、詳細な解析が待たれる。

謝辞

ここに紹介した一連の研究は、北九州市立大学、環境・消防技術開発センターを開設した上江洲一也教授の複数の研究プロジェクト(総務省、JST他)に参画させていただいた中で行った研究です。研究参画のご縁をいただいた上江洲教授、元北九州市消防局長・山家氏をはじめとする北九州市消防局の皆様、シャボン玉石けん糊の森田社長、高橋専務をはじめとする石けんエキスパートの皆様、その他関係各位に感謝の意を表します。また実際に研究員として、また博士研究、修士論文研究、卒業論文研究のテーマとして、本研究のいろいろな場面に携わり、良い仕事を残してくれた歴代の研究室の皆さんにもお礼を述べます。

(引用文献)

- [1] 北九州市消防局警防部警防課(2005)「環境に配慮した一般火災用消火剤の研究開発について」月刊消防27(9):18-25.
- [2] Mizuki, H. *et al.* (2007) Novel environmental friendly soap-based fire-fighting agent. *J. Environ. Engin. Manag.* 17: 403-408.
- [3] Kawano, T. *et al.* (2015) Special Issue on Fire and Disaster Prevention Technologies. *J. disaster Res.* 10: 583.
- [4] Fukuhara, A. *et al.* (2016) Acute to chronic estimation of *Daphnia magna* toxicity within the QSAAR framework. *SAR QSAR Environ. Res.* 27: 833-850.
- [5] Takaichi, H. and Kawano, T. (2016) Expanded and practical use of logistic equations in eco-toxicity evaluation: cases of lethal metal toxicity curves in green paramecia with minimal-sized experiments. *J. Adv. Comput. Intellig. Intellig. Informat.* 20: 681-690.
- [6] Mizuki, H. *et al.* (2010) Microbial degradation of a soap-based fire-fighting agent in activated sludge. *J. Environ. Engin. Manag.* 20: 109-113.

- [7] Kawano, T. *et al.* (2014) Eco-toxicological evaluation of fire-fighting foams in small-sized aquatic and semi-aquatic biotopes. *Adv. Mater. Res.* 875-877: 699-707.
- [8] Goto, K. *et al.* (2015) Learning from the eco-toxicology of fire-fighting foams in aquatic organisms: Altered eco-toxicity of sodium alkyl sulfonates in green paramecia and medaka fish maintained in different waters. *J. Disaster Res.* 10: 604-612.
- [9] Usio, N., Miyashita, T. (2014) Social-Ecological Restoration in Paddy-Dominated Landscapes. Springer.
- [10] 大窪久美子(2002)「日本の半自然草地における生物多様性研究の現状」日本草地学会誌 48: 268-276.
- [11] 日鷹一雅(1998)「水田における生物多様性保全と環境修復型農法」日本生態学会誌48:167-178.
- [12] 関岡裕明, 他(2011)「水生植物および湿生植物の保全を目的とした耕作放棄水田の植生管理」ランドスケープ研究63: 491-494.
- [13] Asai, T. *et al.* (2011) *Oryzias sakaizumii*, a new ricefish from northern Japan (Teleostei: Adrianichthyidae). *Ichthyol. Explor. Freshwaters* 22: 289-299.
- [14] Temminck, C.J. and Schlegel, H. (1846) Pisces. In: P.F. von Siebold (ed.) *Fauna Japonica, sive descriptio animalium quae in itinere per Japoniam suscepto annis 1823-30 collegit, notis observationibus et adumbrationibus illustravit P.F. de Siebold*. Leiden, parts 10-14:173-269.
- [15] Kawano, T. (2007) Uses of medaka fish, protozoa, algae and semi-aquatic plants for assessing the ecological impacts of aquatic pollutants: A case for rice paddy field micro-environment exposed to fire-fighting agents. *Proc. Japan-Taiwan Joint Int. Symp. Environ. Sci. Technol. (Kitakyushu, Japan)*. pp. 57-60.
- [16] Kawano, T. *et al.* (2004) Green paramecia as an evolutionary winner of the oxidative symbiosis: A hypothesis and supportive data. *Z. Naturforsch.* 59c: 538-542.
- [17] Kadono, T. *et al.* (2004) Flow cytometric studies of the host regulated cell cycle in algae symbiotic with green paramecium. *Protoplasma* 223: 133-141.
- [18] Takahashi, T. *et al.* (2005) A new approach for the assessment of acrylamide toxicity using a green paramecium. *Toxicol. In Vitro* 19: 99-105.
- [19] Miyoshi, N. *et al.* (2003) Use of *Paramecium* species in bioassays for environmental risk management: determination of IC₅₀ values for water pollutants. *J. Health Sci.* 49: 429-435.
- [20] Tanaka, M. *et al.* (2002) Complete elimination of endosymbiotic algae from *Paramecium bursaria* and its confirmation by diagnostic PCR. *Acta Protozool.* 41: 255-261.
- [21] Goto, K. *et al.* (2011) Model toxicity assay for amino acid derivatives using green paramecia: Comparison of natural amino acids and *N*-acetylated non-protein amino acids. *Curr. Topics Peptide Protein Res.* 12: 29-34.
- [22] Kadono, T. *et al.* (2004) Effect of symbiotic algae on the growth kinetics in dark-grown *Paramecium bursaria*. *Endocytobios. Cell Res.* 15: 63-70.
- [23] Nishihama, S. *et al.* (2008) Seasonal changes in the microbial population of the water column and sediments of the Ongagawa river, northern Kyushu, Japan. *Limnology* 9: 35-45.
- [24] Goto, K. *et al.* (2007) Eco-toxicity of a soap component (sodium oleate) and a synthetic detergent cocktail using green paramecia assayed in natural water samples from East Asia. *J. Environ. Engin. Manag.* 17: 377-383.
- [25] Goto, K. *et al.* (2008) Use of natural mineral waters as the sources of diversified natural waters worldwide for testing the eco-toxicity of detergents using green paramecia. *ITE-IBA Lett.* 1: 184-188.
- [26] Kawano, T. *et al.* (2006) Possible ecological risk assessment of commercial fire-fighting foams using germinating rice (*Oryza sativa* L.) seeds. *ITE Lett.* 7: 379-382.
- [27] Kawano, T. *et al.* (2007) Development of soap-based fire-fighting agents less toxic to germinating rice (*Oryza sativa* L.) seeds. *ITE Lett.* 8: 596-600.
- [28] Lin, C. *et al.* (2006) Assessing the eco-toxicity of novel soap-based fire-fighting foam using medaka fish (*Oryzias latipes*, Red-orange variety) adopted to river and sea water conditions. *ITE Lett.* 7: 499-503.
- [29] Kawano, T. *et al.* (2007) Ecological risk assessment of fire-fighting chemicals using medaka fish (*Oryzias latipes*) in different water conditions. *ITE Lett.* 8: 306-311.
- [30] Kadono, T. *et al.* (2006) Confirming the altered toxicities of fatty acid salts in *Paramecium caudatum* cultured in different waters. *ITE Lett.* 7: 606-609.
- [31] Kadono, T. *et al.* (2006) Altered toxicities of fatty acid salts in green paramecia cultured in different waters. *Z. Naturforsch.* 61c: 541-547.
- [32] Kadono, T. and Kawano, T. (2007) Natural historical views on the controlled cell growth and oxidative stress responses in symbiotic associations between ciliated protozoa and green algae in green paramecia (*Paramecium bursaria*). *ITE Lett.* 8: 439-445.
- [33] Ikemizu, A. and Kawano, T. (2016) Toxicities of novel fire-fighting form formulae assayed in different water conditions from fresh to brackish waters. *2nd Int. Conf. Sci. Engin. Environ.*
- [34] Inoue, K., and Takei, Y. (2003) Asian medaka fishes offer new models for studying mechanisms of seawater adaptation, *Comp. Biochem. Physiol. B. Biochem. Mol. Biol.*, 136: 635-645.
- [35] Takehana, Y. *et al.* (2005) Molecular phylogeny of the medaka fishes genus *Oryzias* (Beloniformes: Adrianichthyidae) based on nuclear and mitochondrial DNA sequences, *Mol. Phylogen. Evol.* 36: 417-428.
- [36] Naruse, K. (1996) Classification and phylogeny of fishes of the genus *Oryzias* and its relatives. *Fish Biol. J. Medaka* 8: 1-8.
- [37] Roberts, T.-R. (1998) Systematic observations on tropical Asian medakas or ricefishes of the genus *Oryzias* with descriptions of four new species, *Ichthyol. Res.* 45: 347-354.
- [38] Naruse, K. *et al.* (1993) Description and phylogeny of rice fish and their relatives belonging to the suborder Adrianichthyoidei in Sulawesi, Indonesia, *Fish Biol. J. Medaka* 8: 1-8.
- [39] Shinomiya, A. *et al.* (2004) Field survey of sex-reversals in the medaka, *Oryzias latipes*: genotypic sexing of wild populations. *Zool. Sci.* 21: 613-619.
- [40] Tzeng, C.-S. *et al.* (2006) The phylogeography and population demographics of selected freshwater fishes in Taiwan. *Zool. Stud.* 45: 285-297.
- [41] Inoue, K. and Takei, Y. (2002) Diverse adaptability in *Oryzias* species to high environmental salinity. *Zool. Sci.* 19: 727-734.

- [42] Yokawa, K. *et al.* (2009) Effects of water salinity on the cold-induced suspended animation and irreversible damages in *Oryzias latipes*: Experimental eco-physiology predicting the seasonal changes in limnological fish distribution. *J. Environ. Engin. Manag.* 19: 195-200.
- [43] Aonuma, M. *et al.* (2007) Inhibition of anodic galvanotaxis in green paramecia by T-type calcium channel inhibitors. *Z. Naturforsch.* 62c: 93-102.
- [44] Otsuka, K. and Kawano, T. (2014) Platform for two-dimensional cellular automata models implemented by living cells of electrically controlled green paramecia designed for transport of micro-particles. *J. Adv. Comput. Intellig. Intellig. Informat.* 18: 3-8.
- [45] Otsuka, K. *et al.* (2015) On-chip platform for biological cellular automata models using swimming paramecium cells. *ICIC Exp. Lett. Part B: Appl.* 6: 299-304.
- [46] Otsuka, K. *et al.* (2014) Single cell traffic of swimming green paramecia on microchips with micro-flow channels fabricated by micro-casting. *Adv. Mater. Res.* 875-877: 2224-2228.
- [47] Furukawa, S. *et al.* (2009) Micro-particle transporting system using galvanotactically stimulated apo-symbiotic cells of *Paramecium bursaria*. *Z. Naturforsch.* 64c: 421-433.
- [48] Furukawa, S. and Kawano, T. (2012) Enhanced microsphere transport in capillary by conditioned cells of green paramecia used as living micromachines controlled by electric stimuli. *Sens. Mater.* 24: 375-386.
- [49] Kawano, T. (2014) Use of swimming cells of green paramecia for detection of toxic rare earth ions at lethal and sub-lethal concentration. *Adv. Mater. Res.* 875-877: 2229-2237.
- [50] Yukihiro, M. *et al.* (2011) Lethal impacts of cigarette smoke in cultured tobacco cells. *Tobacco Induced Disease* 9: 8 (doi:10.1186/1617-9625-9-8)
- [51] Noriyasu, A., *et al.* (2013) Menthol-enhanced cytotoxicity of cigarette smoke demonstrated in two bioassay models. *Tobacco Induced Disease* 11: 18 (doi:10.1186/1617-9625-11-18)
- [52] Noriyasu, A. *et al.* (2014) A novel wild-land fire-fighting foam for minimizing the phytotoxicity of wood burning-derived smoke tested in living plant cells. *Adv. Mater. Res.* 875-877: 725-733.

1. シンポジウム実施報告

(1) 災害に対する社会の強みと弱みを測る

2016年2月19日に北九州学術研究都市学術情報センターの遠隔講義室にて開催した。北九州学術研究都市の情報共有イベントであるひびきのサロンと共同開催となった。技術系の話題が多かったこれまでのシンポジウムとは趣を変え、社会科学、特に、産業連関分析を用いた経済学的な災害研究を中心に据えた。まず、当センターの奥山恭英教授より、「災害の経済的影響：概要と傾向」と題し、経済学的な災害研究で必要なる基礎概念、たとえばハザードとしての自然現象と被害の区別、インフラストラクチャーなどの社会的なストックに対する影響と生産水準の低下など、フローに対する影響の区別についての説明がなされ、さらに、阪神大震災等に関する研究結果の紹介がなされた。次に、フィリピン、デ・ラサール大学のKrista D. Yu准教授より、「Living in the “Disaster-REALM” : A web-based tool for estimating the economic impact of natural disasters」と題し、産業連関分析の基礎を含め、同分析を災害に対する社会や産業の脆弱性評価に使う方法が紹介された。Yu准教授らの分析手法は、Disaster-REALM webサイトを通じて広く利用可能とのことであった。最後に、「北九州における先進的な危機管理研究」と題し、北九州市立大学を中心とする消防・防災研究について、加藤が紹介を行った。

なお、このシンポジウムに先立ち、災害に関する情報活用の実践研究会を実施した。研究会では、当センターから中武繁寿教授が「広域災害を視覚化するクラスター型センサーネットワーク」と題して発表した。フィリピン側からは、上述のYu氏より「Inoperability input-output model: A Japan-Philippines case study」と題して災害に対する社会の脆弱性を測るための産業連関モデルの詳細説明があり、また、デ・ラサール大学のMichael Angelo B. Promentilla教授からは、「Inoperability Input-Output Modelling Approach for Assessment of Climate Change-Induced Disaster Risk to Interdependent Sectors」と題して、意思決定手法の一つであるAHPの応用に関する発表がなされた。

シンポジウムの終了後には、北九州産業学術推進機構(FAIS)のご支援により、産学連携センター 1階において交流会が開かれ、大いに盛り上がった。(肩書きは、いずれも講演当時)

(2) 光合成と森林火災の管理による地球規模でのCO₂濃度への影響

このシンポジウムは、北九州市立大学国際光合成産業化研究センターとの共催により、北九州市立大学国際環境工学部にて2016年3月30日に行われた。まず、当センターの上江洲一也教授、また、当センター研究者である

第143回産学連携サロン「ひびきのサロン」

災害に対する社会の強みと弱みを測る

Measuring Strength and Weakness of the Society in Disaster Responses

サプライチェーンの複雑化により、ある場所で起こった災害が思わぬ場所に社会的、経済的な影響を与える可能性が高まっている。このような複雑な連関関係を数理モデルで表し、災害が社会と経済に与える影響を包括的に捉える試みを災害大国である日本とフィリピンの研究者が紹介する。

2016年2月19日 (Fri.) 時間 (Time) 15:30 - 17:30 **参加無料**

場所 (Place) 北九州学術研究都市 学術情報センター 遠隔講義室 1
Tele-Lecture Room 1, Media Center, Kitakyushu Science and Research Park

発表 1
災害の経済的影響：概要と傾向
Economic Impacts of Disasters: Overview
北九州市立大学 教授 奥山 恭英 氏
Yasuhide Okuyama, Professor
The University of Kitakyushu

発表 2
災害 REALM プロジェクト：自然災害の経済への影響を測る web ツールづくり
Living In the "Disaster-REALM" : A Web-based Tool for Estimating the Economic Impact of Natural Disasters
デ・ラ・サール大学 (フィリピン) 准教授 クリスタ・ダニエル・ユー 氏
Krista Danielle S. Yu, Associate Professor
De La Salle University (Philippines)

発表 3
北九州における先進的な危機管理研究
Innovative Disaster Management Research In Kitakyushu
北九州市立大学 准教授 加藤 尊秋 氏
Takaaki Kato, Associate Professor
The University of Kitakyushu

交流会 17:45 ~
会費：1,000円 (ひびきの会員は無料)
会場：産学連携センター 展示ルーム

ひびきのへのアクセス

【車の場合】 ※駐車無料
北九州都市高速道路黒崎出入口
鹿児島本線「折尾駅」下車
(黒崎・折尾出口下車折尾方面へ)

【公共交通機関の場合】
鹿児島本線「折尾駅」下車
北九州バス
学術研究都市
北九州都市高速道路黒崎出入口から
所要時間 20分
※所要時間 15分

※運次選択あり
Interpreted between Japanese and English

シンポジウムのチラシ



Krista D. Yu氏による講演の様子

とともに、国際光合成産業化研究センター長でもある河野智謙教授から「環境・消防技術開発センター・国際光合成産業化研究センターにおける現在の取組と今後の展望」と題して活動紹介がなされた。つづいて、フィンランド・ヘルシンキ大学のHeinonsalo Eero Jussi氏より、「Long-term Effects of Fire on Carbon and Nitrogen Pools and Fluxes, part B: The linkage between plant photosynthesis and soil organic matter decomposition: a mycorrhizal perspective」と題して森林火災と温室効果ガス発生・蓄積量に関する最

新の研究紹介がなされた。最後に、European Chemicals AgencyのOuti Priha氏からは、「Biofilm and quorum sensing research at VTT」と題してバイオフィーム形成の特徴と検知手法に関する発表がなされた。(肩書きは、いずれも講演当時)

2. SAFETEC2016(第2回 西日本防災・防犯危機管理展)出展

環境・消防技術開発センターでは、2016年11月10日から11日にかけて小倉駅北側の西日本国際展示場で行われたSAFETEC2016に独自のブースを出展した。ブースでは、当センターの井上浩一教授による超高輝度小型LED投光器の紹介、および、上江洲一也教授による泥炭火災対策の紹介を行った。さらに、当センターと連携して活動している(株)インフォグラムと(株)ルミカにご参加いただき、図上訓練支援システムと災害対策用ケミカルライトについてご紹介いただいた。

また、この企画に合わせ、上江洲一也教授が「泥炭火災の早期探知と消火技術」と題して展示会内セミナーを行

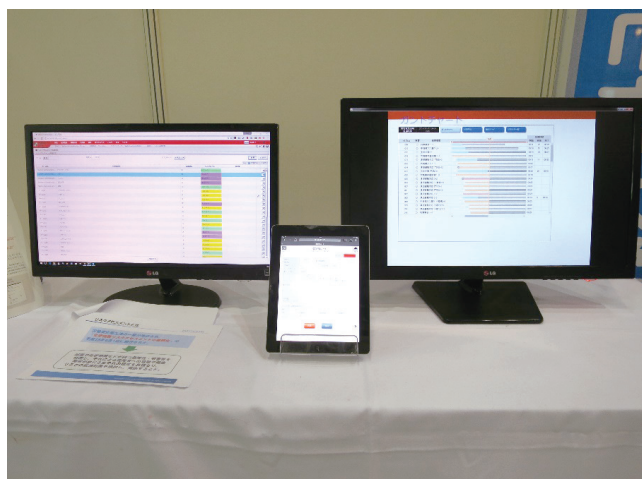
い、炎を出さずに、緩やかに、そして長期間くすぶり続ける“燻焼”である「泥炭火災」を、安価かつ効果的に消火するための早期検知システムと消火戦術の開発構想を紹介した。

3. 2016年度報道紹介

- ①「CROSS i」,「Today's V.I.P. ～熊本地震に関する事や北九州の災害リスクと必要な心構え」、2016年5月22日、クロスFM(南博)
- ②「災害への備え 非常食 いかに配るかも課題」、2016年6月22日、西日本新聞北九州面(南博)
- ③「災害への備え 避難所 運営主体は官から民へ」、2016年7月3日、西日本新聞北九州面(南博)
- ④「防災行事参加1割強 北九州市民 全国より30ポイント低く」、2016年8月29日、西日本新聞北九州面(南博)
- ⑤「平成28年度大都市消防防災研究機関連絡会における泡消火剤デモンストレーション」、2016年10月28日、ニュースブリッジ北九州、NHK北九州放送局(加藤 尊秋、上江洲 一也)



当センターブースの様子
(左側に超高輝度LED投光器、右側にケミカルライト)



図上訓練支援システムのデモ展示

2016年度 北九州市立大学 環境技術研究所 環境・消防技術開発センター 参画者

センター長	北九州市立大学 国際環境工学部環境生命工学科 加藤 尊秋
参画者(あいうえお順)	同 国際環境工学部エネルギー循環化学科 秋葉 勇
	同 国際環境工学部機械システム工学科 井上 浩一
	同 国際環境工学部環境生命工学科 上江洲 一也
	同 グローバル人材育成推進室 奥山 恭英
	同 国際環境工学部環境生命工学科 河野 智謙
	同 国際環境工学部建築デザイン学科 城戸 將江
	同 国際環境工学部建築デザイン学科 デワンカー バート
	同 国際環境工学部情報メディア工学科 中武 繁寿
	同 国際環境工学部環境生命工学科 原口 昭
	同 地域戦略研究所 南 博
	同 国際環境工学部エネルギー循環化学科 安井 英斉



北九州市立大学 環境技術研究所
環境・消防技術開発センター
(事務局 加藤研究室)

〒808-0135 北九州市若松区ひびきの 1 - 1

TEL 093-695-3237

FAX 093-695-3337

<http://www.env.kitakyu-u.ac.jp/ja/shoubou/>

機関誌「環境と消防」の内容は、上記ホームページでも
ご覧いただけます。

北九州市立大学事務局管理課

TEL 093-695-3311

FAX 093-695-3368