

ISSN 2434-2815

No.11

JISE REPORT

国際生態学センター 調査研究レポート

2024年6月

公益財団法人 地球環境戦略研究機関 国際生態学センター

落葉樹環境保全林の樹種別生長過程 その2 林 寿則・尾崎 光彦	1
オオバボダイジュ果実散布体の形状計測 矢ヶ崎 朋樹・小木曾 晴信・松本 淳	5
都市域に堆積する落ち葉の燃焼性状その1ー含水率と脱水時間についてー 林 寿則	7
IGES 国際生態学センター シニアフェロー6年半の研究業績 原田 洋	11
特 集 IGES 国際生態学センター 市民環境フォーラムの記録 「地球温暖化に対する研究と実践的取り組みについて」	13
生態学的視点から見た温暖化の現状と課題 目黒 伸一	14
グリーン水素エネルギーシステムと燃料電池の役割 石原 顕光・目黒 伸一	17
脱炭素化推進に向けた小型・分散型アンモニア製造装置開発についての紹介 依田 宏	23
水素基本戦略とリスクアセスメント 三宅 淳巳	27
総合討論	34

落葉樹環境保全林の樹種別生長過程 その2

林 寿則 (IGES 国際生態学センター)・尾崎光彦 (IGES 国際生態学センター)

1 はじめに

前号 (JISE REPORT No.10) では、落葉樹環境保全林の樹種別樹高生長過程について報告した (林・尾崎, 2023)。本報では、日本各地に植樹された落葉樹環境保全林の高木層を形成する主要樹種の樹種別の幹径 (根元径または胸高直径) の肥大生長について、既存資料及び現地調査に基づいて比較解析する。

2 調査方法

日本各地に造成された環境保全林の中で、既に公表されている生長調査データおよび2019年度に静岡県熱海市、長野県上田市において実施された生長調査から、植栽後の経過年数と根元径/胸高直径の測定値を用いた (藤原, 1997; 林・鈴木・矢ヶ崎, 2013; 林, 2019; 林・村上・武藤, 2018; 林ほか, 2017; 本多・島田, 1997; 林・尾崎, 2020)。

本報では、落葉樹環境保全林の樹種別生長過程その1 (林・尾崎, 2023) において取り上げた落葉広葉樹高木7種 (イロハモミジ、ケヤキ、クヌギ、コナラ、ブナ、ミズナラ、ヤマザクラ (一部、オオヤマザクラを含む)) を対象としてデータを整理・比較した。

解析に用いたデータの調査地数 (林分数)、個体数および主な生育地は表1の通りである。図示されたデータ (図1~7, 表2) について、特に長い年数を経過した植樹地においては、植樹されたポット苗を起源とする個体と植樹地内外からの種子散布等により新たに侵入した個体が混在していると考えられるが、その識別は困難であることから、本報ではこれらを区分せずに計上した。なお、図1~7の●は根元径、●は胸高直径の計測

値を示す。

表1. 調査林分数、データ個体数、生育地

樹種	林分数	個体数	主な生育地
イロハモミジ	13	57	青森県柏村、塩那道路、岩手県大槌町など
クヌギ	15	69	塩那道路、富士市、上田市
ケヤキ	19	91	青森県柏村、御所野市、塩那道路、箱根町など
ブナ	17	192	青森県柏村、御所野市、塩那道路、箱根町
コナラ	29	251	青森県柏村、御所野市、塩那道路、富士市など
ミズナラ	27	121	釧路市、御所野市、塩那道路、箱根町など
ヤマザクラ	19	116	御所野市、富士市、上田市、熱海市など



写真1. 調査時の林齢31年生のクヌギとコナラが優占する落葉樹環境保全林の林内 (長野県上田市)

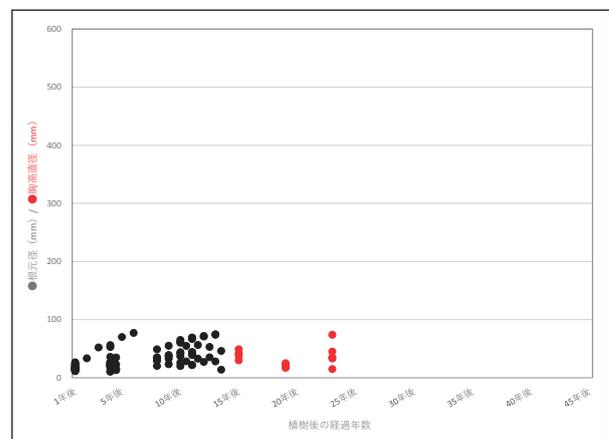


図1. イロハモミジの肥大生長過程

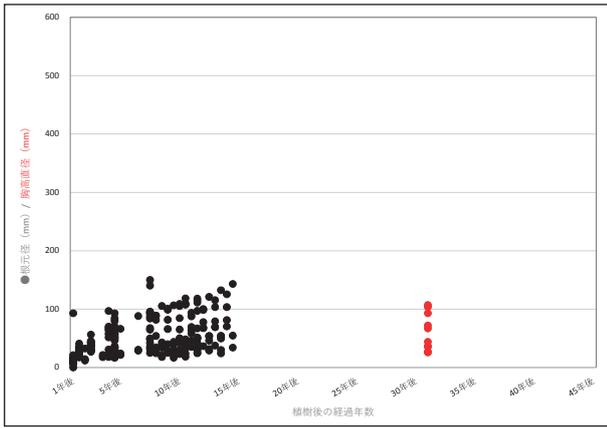


図2. ケヤキの肥大生長過程

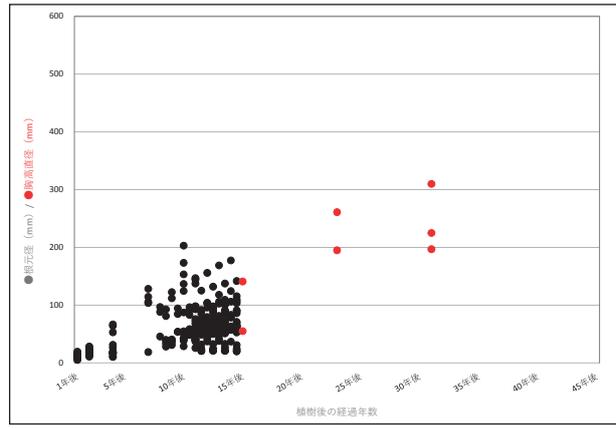


図3. クヌギの肥大生長過程

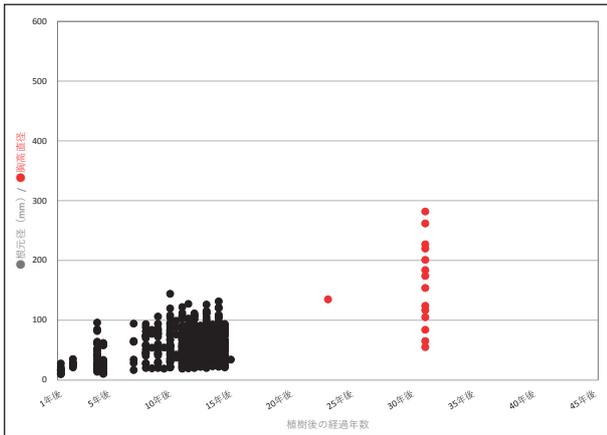


図4. コナラの肥大生長過程

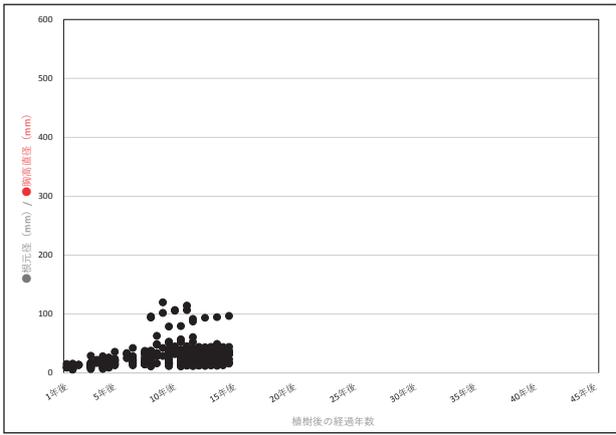


図5. ブナの肥大生長過程

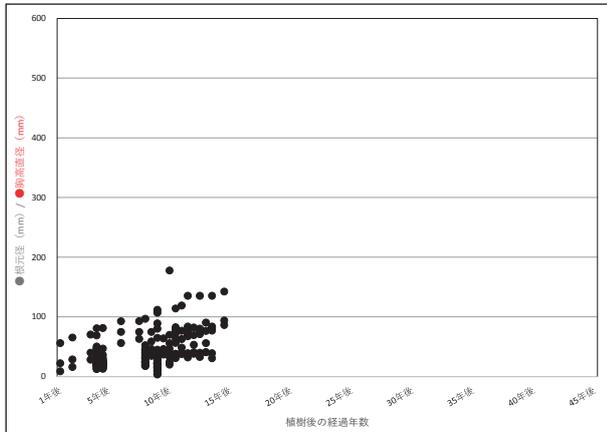


図6. ミズナラの肥大生長過程

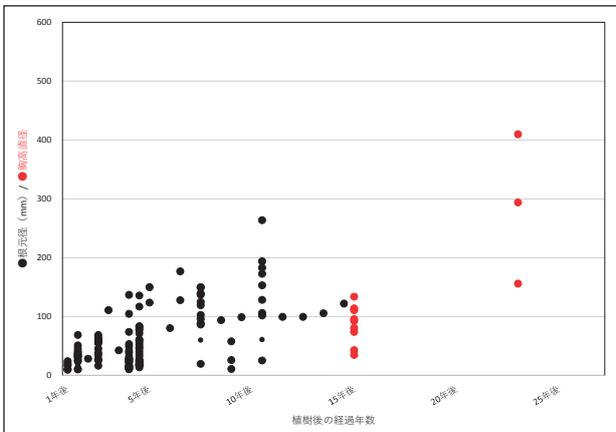


図7. ヤマザクラの肥大生長過程

3 結果

イロハモミジは13林分、57個体、植樹から23年生までの個体を対象として図示された(図1)。肥大生長の過程は、植樹後5年で根元径は概ね10～70mmの範囲にある。植樹から6年後に根元径77.1mm、また、植樹から23年後の胸高直径74.0mmに肥大生長した個体もあるが、5年生以降の幹径の肥大量は他種に比べて小さい。

ケヤキは19林分、91個体、植樹後31年を経

過した個体までを対象とした(図2)。肥大生長の過程は、植樹後5年で根元径約18～97mm、10年生で21～100mm前後、15年生で約24～140mm、31年生の胸高直径で約26～100mm程度に肥大している。植樹から5年後までに最も肥大した個体は根元径97.0mm、10年生までで150.0mm、15年生で143.2mmとなったほか、31年生では胸高直径104.0mmの個体がある。

クヌギは15林分、69個体、植樹後31年までの個体を対象とした(図3)。植樹後5年で根元径約10～60mm、10年生で約28～200mm、15年

生では約 20 ～ 170mm 程度となっている。また、25 年生の胸高直径は 195 ～ 260mm 程度、31 年生の胸高直径では約 200 ～ 300mm 程度となっている。植樹から 5 年後までの最も肥大した個体は根元径 64.3mm、10 年生までで 203.1mm、25 年生の胸高直径では 261.0mm、31 年生の胸高直径では 310.0mm となっている。

コナラは 29 林分 251 個体、植樹から 31 年を経過した個体が対象となった（図 4）。根元径の肥大生長は、植樹後 5 年目までで約 14 ～ 90mm、10 ～ 15 年生で約 20 ～ 140mm となり、31 年生の胸高直径では概ね 55 ～ 280mm 程度となっている。植樹から 5 年後までの最も肥大した個体は根元径 96.0mm、15 年生までで 144.3mm、31 年生の胸高直径で 282.0mm となっている。

ブナは 17 林分、192 個体、植樹から 14 年までの個体を対象とした（図 5）。植樹後 5 年で根元径は約 13 ～ 35mm の範囲にあり、その後は 10 ～ 14 年生になっても 100mm 前後に肥大した一部を除き、多くの個体は 20 ～ 50mm 程度の範囲にしか肥大生長していない。植樹から 5 年後までに最も肥大した個体は根元径 36.0mm、14 年生まででは 120.0mm となっている。

ミズナラは 27 林分、121 個体、植樹から 14 年までの個体が対象となった（図 6）。その肥大生長は、植樹後 5 年で根元径約 14 ～ 80mm、10 ～ 15 年で 30 ～ 140mm 程度に肥大生長している。植樹から 5 年後までに最も肥大した個体は根元径 81.2mm、15 年生まででは 177.8mm となった。

ヤマザクラ 19 林分、116 個体、植樹後 23 年までの個体を対象とした（図 7）。植樹後 5 年で根元径約 20 ～ 130mm、15 年生までで生長の良い個体では、根元径 200mm 程度に肥大している。その後、15 年生の胸高直径では約 35 ～ 130mm 程度、

23 年生の胸高直径では概ね 150 ～ 400mm 程度となっている。植樹から 5 年後までの最も肥大した個体は根元径 150.1mm、15 年生までで 264.0mm、23 年生の胸高直径では 410.0mm となっている。

4 | 考察

環境保全林（常緑樹、落葉樹含む）の幹径の肥大生長については、調査区内に生育する全ての生存個体（低木種を含む）の平均値を算出して時系列で解析した報告があり（林, 2019）、植樹後 5 年で平均根元径は 30 ～ 40mm、10 年で 60 ～ 70mm 程度に肥大していれば、比較的良好な生長であると評価している。本報では落葉性高木樹種のみを対象に平均値ではなく各個体の値をプロットしているため分布範囲は大きくばらつくが、各樹種の上限付近の値は、平均値では示されない潜在的な肥大生長能力を示している。

樹種別に見ると、クヌギ、コナラ、ヤマザクラの肥大生長が、その他の樹種に比べて充実しており、中でも、ヤマザクラは植樹から 5 年で根元径 100mm を超える個体が複数認められるなど、幹径の肥大生長が特に速い樹種に位置付けられる（表 2）。ヤマザクラのポット苗は樹高の伸長生長も早いことが報告されており（林・尾崎, 2023）、樹高・幹径ともに初期生長の優れた樹種に位置付けられる。ケヤキとミズナラは植栽から 5 ～ 15 年目まではクヌギなどと同程度の肥大生長が認められるが、ケヤキでは、それ以降は右肩上がりでの肥大生長を続ける個体は多くない。ミズナラに関してはデータが不足しており、15 年以降の肥大生長に関しては未評価である。

イロハモミジとブナは幹径の肥大生長が遅い樹種と評価された。特にブナは植樹から 15 年経過

表 2. 幹径（根元径、胸高直径）の肥大生長の推移

植樹後の年数 樹種	5 年まで	15 年まで	25 年まで	31 年まで
イロハモミジ	10.3～70.1	13.8～77.1	<u>15.0～74.0</u>	
ケヤキ	18.0～97.0	24.2～143.2		<u>26.0～104.0</u>
クヌギ	10.5～64.3	20.0～203.1	<u>195.0～261.0</u>	<u>197.0～310.0</u>
コナラ	14.0～96.0	21.0～144.3	<u>135.0</u>	<u>55.0～282.0</u>
ブナ	13.2～36.0	18.0～120.0		
ミズナラ	14.2～81.2	30.7～177.8		
ヤマザクラ	19.4～137.1	<u>35.0～134.0</u>	<u>156.0～410</u>	

しても多くの個体の根元径は50mm以下に留まっており、樹高の伸長生長が遅い点と合わせて（林・尾崎, 2023）の、最も生長速度の緩やかな樹種に位置付けられる。

次に、自然度の高い森林に生育する個体との比較を目的として、『日本の重要な植物群落 東北版（青森県・岩手県・宮城県・秋田県・山形県・福島県）』（環境庁編, 1980a）及び『日本の重要な植物群落 甲信越版（新潟県・山梨県・長野県）』（環境庁編, 1980b）に記録されている落葉広葉樹林の高木第1～2層を構成する樹種の胸高直径と本件データとの幹径を比較した。

まず、イロハモミジでは、植樹から25年を経過した環境保全林の胸高直径の最大値は74.0mmとなっており（表2）、環境省編（1980a; 1980b）の高木第1層を構成する個体（ヤマモミジを含む）の値（100～200mm）には大きく及ばない。イロハモミジは照葉樹林域の環境保全林再生事業でも導入されているが、混植されたシイやカシ類の林冠の覆われているケースも観察され、林縁など日照条件に恵まれた環境でなければ、その生長は停滞することもあると考えられる。

次にケヤキについては自然度の高い森林の個体は胸高直径250～1,000mm、さらにクヌギでは100mm、コナラ10～40mm、ブナ300～800mm、ミズナラ200～500mm、ヤマザクラ100～250mmといった範囲が多く記載されている（環境庁編, 1980a; 1980b）。これらの中でケヤキ、ブナは他の樹種に比べて顕著に幹径が肥大する能力を持っていることがわかるが、植樹から30年程度のケヤキは104mm、15年生のブナでは120mm程度となっており（表2）、ポット苗の肥大生長は自然性の個体に大きく及ばない。一方、環境保全林（31年生）のクヌギ（310mm）やコナラ（282mm）、23年生のヤマザクラ（410mm）の中には、『日本の重要な植物群落（1980a; 1980b）』の幹径の値を上回っている個体も複数存在している（二次林に生育する個体も含まれると推察されるが）。なお、クヌギやコナラ、ヤマザクラは、樹高伸長生長に関しても植樹から20～25年生以降になると、自然度の高い落葉樹林と同等程度の樹高に伸長する個体が複数認められており、他の樹種に比べて自然度の高い森林群落の値との差異は小さいと報告されている（林・尾崎, 2023）。

以上のことから、落葉樹環境保全林の幹径の肥大生長に関しては、ブナ、ケヤキ、イロハモミジ、ミズナラは緩やかに肥大し自然性の個体との差異

が大きく、ヤマザクラ、クヌギ、コナラは植樹から25～30年程で自然性の個体に近似した個体の出現が期待できると評価された。

なお、いずれの樹種についても、植樹から15年以上経過した個体のデータは十分でなく、現段階では初期生長段階の評価に留まる。

謝 辞

2019年度に実施された環境保全林の生長調査は、市村清新技術財団植物研究助成により実施されました。生長調査では、市村清新技術財団熱海植物研究園、旭化成ホームズ(株)、日置電機(株)、横浜ゴム(株)の関係者各位にご理解ご協力を賜りました。御礼申し上げます。

引用文献

- 藤原一繪. 1997. 日本列島の環境保全林形成による緑化・回復に関する植生生態学的研究. 平成6年度～平成8年度 科学研究費補助金（基礎研究（B）（2））研究成果報告書：1-266. 横浜国立大学環境科学研究センター植生学研究室.
- 林 寿則・鈴木伸一・矢ヶ崎朋樹. 2013. 箱根ポーラ美術館に植栽された広葉樹15種の11年間の生長動態. 生態環境研究, 20（1）:25-35.
- 林 寿則・桜井光雄・金澤 厚・旭 誠司. 2017. 太平洋側北限付近に植栽されたタブノキポット苗の初期生長動態. 生態環境研究, 24（1）:9-15.
- 林 寿則・村上雄秀・武藤一己. 2018. あさひ・いのちの森の生長動態. 生態環境研究, 25（1）:25-35.
- 林 寿則. 2019. 環境保全林の生長過程について. JISE REPORT, (2):18-20.
- 林 寿則・尾崎光彦. 2020. 環境保全林の成長と防火機能に関する実験研究. 自然環境復元研究, 11（1）:51-66.
- 林 寿則・尾崎光彦. 2023. 落葉樹環境保全林の樹種別生長過程 その1. JISE REPORT, (10):6-9.
- 本多嘉明・島田直明. 1997. 環境保全林生長データベース. 平成6年度～平成8年度 科学研究費補助金（基盤研究（B）（2））研究成果報告書：299-361. 横浜国立大学環境科学研究センター植生学研究室.
- 環境庁編. 1980a. 日本の重要な植物群落 東北版（青森県・岩手県・宮城県・秋田県・山形県・福島県）. 大蔵省印刷局.
- 環境庁編. 1980b. 日本の重要な植物群落 甲信越版（新潟県・山梨県・長野県）. 大蔵省印刷局.

オオバボダイジュ果実散布体の形状計測

矢ヶ崎 朋樹 (IGES 国際生態学センター / IGES 本部 生物多様性と森林領域)

小木曾 晴信 (福井工業高等専門学校)

松本 淳 (越前町立福井総合植物園)

1 はじめに

オオバボダイジュ *Tilia maximowicziana* Shiras. は、北海道および本州北部（東北・関東北部・北陸）に分布するアオイ科シナノキ属の落葉広葉樹で、花序に葉状の苞が発達する（北村・村田、1971）。果実が成熟するころになると、果実と苞葉は合着したまま果実散布体（写真1）を形成し、ときにプロペラのような回転を伴って落下することから、風散布型種子（植物の繁殖生態）の教材としてしばしば注目される（矢ヶ崎・鈴木、2018）。

風散布型種子は生物模倣教育の格好の教材の一つでもあり、回転落下したり滑空したりする種子の姿を観察することで、飛行体の滑空・回転メカニズムに関するヒントやアイデアを得ることができる（矢ヶ崎、2023a）。とくに、それらの形をまねた模型制作（生物模倣学習プログラム）は、工作体験を通して学習効果を高めるねらいがある（矢ヶ崎、2023a、2023b）。すべての果実散布体が回転体であるとは限らないため、学習時には回転体と非回転体の形状の違いをよく観察する必要がある。

本報は、シナノキ属果実散布体を用いた生物模倣学習プログラム（模型制作）の指導に資する知見を得ることを目的として、オオバボダイジュの果実散布体に着目し、回転体か非回転体かを決定づける特徴が「苞葉と花（果）序軸とでつくられる角度」に表れるのかを検証する。



写真1. オオバボダイジュの果実散布体。

2 材料と方法

2023年8月に、越前町立福井総合植物園（福井県丹生郡越前町朝日17-3-1）に自生するオオバボダイジュより果実散布体を計30個採取した。これらを室内に持ち帰り、風のない空間で2mの高さから苞の基部を持って落下試験を行った。この落下試験では、果実散布体を5回自由落下させ、5回すべて回転したものを「回転体」、それ以外を「非回転体」とした。形状の計測にあたっては、福井県工業技術センター保有の3Dスキャナ型3次元測定器（キーエンス社製 VL-300）を用いて果実散布体の立体画像データを取得した後、CADソフトウェア（Autodesk社製 AutoCAD）を用いて、果実散布体の苞葉と果序軸とでつくられる角度（ $\angle A \sim \angle F$ ）（図1）を計測した。

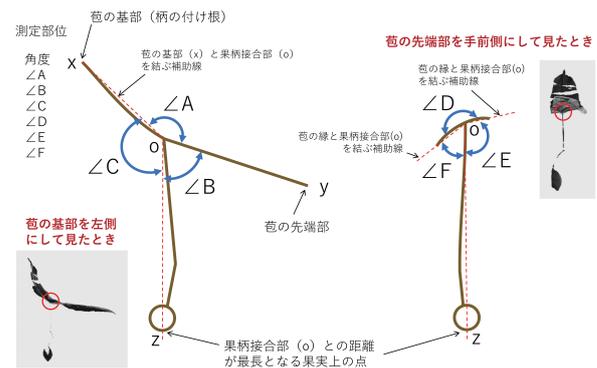


図1. 果実散布体の断面形状と計測位置。

3 結果

落下試験を行った結果、採取した果実散布体（ $n=30$ ）は、回転体が12個、非回転体が18個であった。回転体・非回転体ごとの $\angle A \sim \angle F$ の角度を表1に示す。この結果、すべての角度に関して、回転体と非回転体との間で有意差はなかった。

表 1. 形状計測位置∠A～Fに係る計測結果. 上段の値は平均、括弧内は標準偏差を示す.

	∠A	∠B	∠C	∠D	∠E	∠F
回転体 (n=12)	146.3 (14.0)	55.6 (12.0)	158.3 (11.0)	146.5 (34.1)	111.2 (31.0)	102.4 (32.2)
非回転体 (n=18)	140.1 (15.7)	64.0 (17.4)	155.9 (7.3)	143.6 (22.4)	104.3 (24.1)	112.1 (21.5)
	n. s.	n. s.	n. s.	n. s.	n. s.	n. s.

形状計測位置∠A～Cおよび∠D～Fの計測結果を三角図にそれぞれ展開したものが図2である。

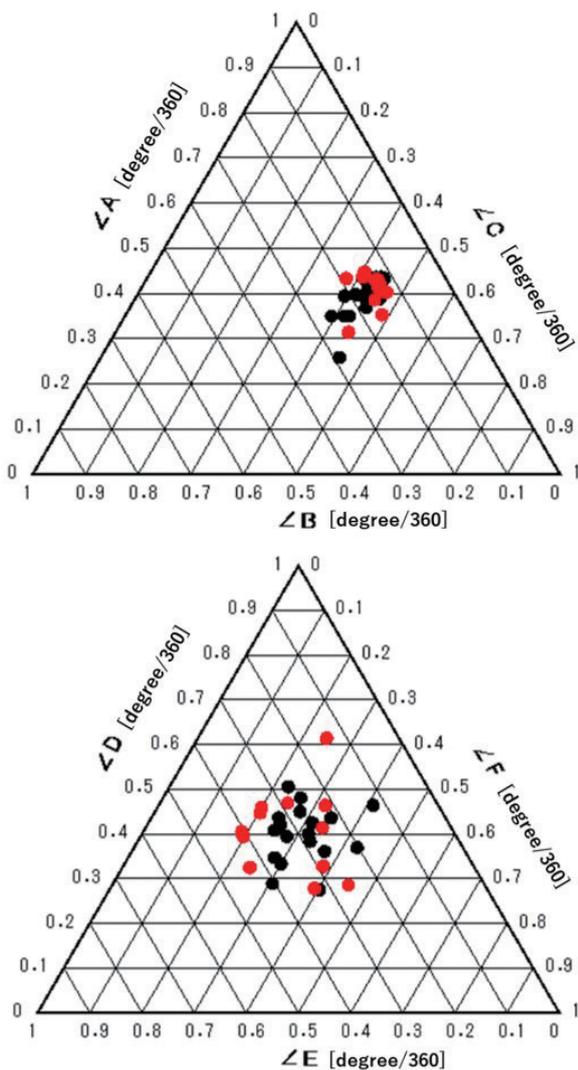


図 2. 形状計測位置∠A～C (上) および∠D～F (下) の計測結果. (赤: 回転体 黒: 非回転体)

4 | 考察

今回対象としたオオバボダイジュ果実散布体の計測位置(∠A～F)は「苞葉と花(果)序軸とでつくられる角度」に相当するが、回転体と非回転体との間では有意差がないことがわかった。これは、オオバボダイジュ果実散布体の回転特性が、単なる苞葉と果序軸との角度のみで決定づけられるものではなく、苞葉(面)のねじれやゆがみ、果序軸の長さや果実散布体の重心の違いなどを含む、様々な形状要素に基づくものであることを示唆している。三角図において∠D～Fの角度分布が∠A～Cのそれよりも分散する傾向が見られているのは、苞の先端部を手前側にしてみた時の断面形状に左右不相称となる多様な形状タイプが存在するためと考えられる。∠A～Cは比較的値にばらつきが少ないことから、苞の基部を左側にして見たときの果実散布体の形状は比較的安定していることが示唆される。

今回の計測では、オオバボダイジュ果実散布体が回転落下するための決定的な形状要素を特定することができなかった。その模型制作(生物模倣学習プログラム)において、回転体の完成まで上手く導くためには、別の形状要素にも着目する必要があるようだ。その探究については今後の課題としたい。

引用文献

- 北村四郎・村田源(1971)原色日本植物図鑑・木本編Ⅰ. 保育社.
- 矢ヶ崎朋樹・鈴木邦雄(2018)科学教室におけるシナノキ科樹木果実散布体の模型制作—教材化の有効性に関する一考察. JISE REPORT 1: 7-10.
- 矢ヶ崎朋樹(2023a)野外における「生物模倣工作教室」実施レポート(その1). JISE Newsletter 93:4.
- 矢ヶ崎朋樹(2023b)野外における「生物模倣工作教室」実施レポート(その2). JISE Newsletter 94:7.

都市域に堆積する落ち葉の燃焼性状その1

—含水率と脱水時間について—

林 寿則 (IGES 国際生態学センター)

1 | はじめに

降水量が減少し空気が乾燥した日が続く1月から5月にかけては、林野火災の発生件数が大幅に増加する。近年、その発生件数と焼失面積は減少傾向にあるものの2017年から2021年の5年間の林野火災出火件数は約1,300件/年に上っている(林野庁, 2023)。林野火災の原因としては、たき火や火入れ、レジャー目的で増加する入山者の火の不始末等、人為的な行為に起因するものが多くを占めている(総務省消防庁, 2022)。また、秋期から春期にかけての林野では下草の多くが枯れ、さらに落ち葉や枯枝の堆積によって地表可燃物が多量に蓄積されていることも火災の発生・延焼拡大の原因となっている。都市部の公園や街路空間でも冬期から春期にかけては緑化用樹木として植栽されている落葉性高木樹種から大量の落ち葉が発生し、植え込み内や居住地・駐車場周辺、風のたまりやすいスペース等に堆積している状況を観察することがある(写真1)。

これまでの林野火災に関する研究では、火災危険度は林床可燃物の種類、堆積量、含水率等に依存していること(山下, 1992)や堆積するリターの下層になるほど含水率が高いこと(消防庁消防研究所, 1988)、直射日光にさらされるコナラ林のリター含水率は10%以下に減少する日もあるが、常時日陰にあるスギ植林地のリターでは10%以下になることは殆どないこと(津田, 1987)、林内可燃物の中でも木本類の落葉に比べてススキやエノコログサなどの枯れた草本類が燃え易いこと(山下, 1987)、里山林の林床の落ち葉の含水率は23~54%程度であること(なお、1週間ほど乾燥させると20%以下に低下する)(齊藤・岩河・中村, 2003)などが報告されており、いずれも可燃物の含水率を重要なパラメーターとして位置付



写真1. 公園・学校・街路空間等に堆積する落ち葉

けている。一方、都市域の落葉落枝も人為的な行為や地震火災などの自然災害に起因する火災の延焼や発生源となる可能性は否定できないが、林野火災の研究に比べて都市域の公園や街路空間、学校等に堆積している落ち葉の含水率に関する研究は少ない。そこで、本報では、樹木の防火機能に関する研究の一部として、一般的に都市域の街路樹や公園・広場・学校に植栽されている樹木を対象に公園や街路空間に堆積している落ち葉の含水率と脱水時間(落葉を加熱した際に、単位重量当たりの全ての水分が失われるまでの時間)を計測・比較した。

2 | 調査方法

2023年11月14日から16日にかけて、横浜市西区及び保土ヶ谷区内の公園・学校・街路空間等の地表に既に落下堆積している12種の落ち葉を各樹種10枚ずつ採集した。採集後の落葉は0.2g ± 0.02gに切り取り(加熱乾燥式水分計に付属している電子天秤で計測)、加熱乾燥式水分計(A&D社製MX-50)により105℃加熱で落ち葉の含水率を計測した。合わせて、0.2gあたりの落ち葉に含

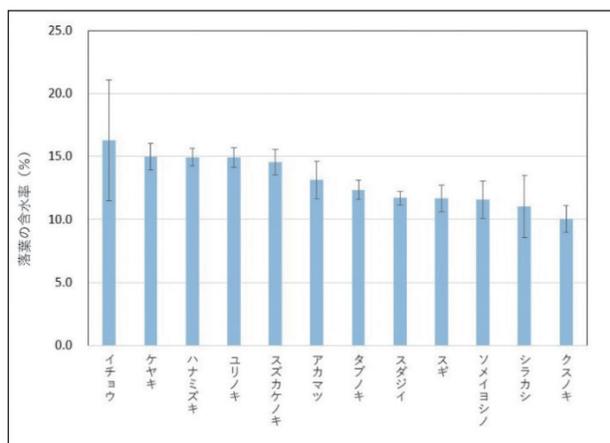


図 1. 落葉の含水率（エラーバーは標準偏差）

まれる水分が全て失われるまでの計測時間（以下、脱水時間という）を記録した。各樹種 10 枚の落ち葉の含水率と脱水時間の平均値を算出して比較した。対象としたのは、アカマツ、スギ、イチョウ、ソメイヨシノ、ハナミズキ、ケヤキ、スズカケノキ、ユリノキ、クスノキ、スダジイ、タブノキ、シラカシ、以上 12 種の落ち葉である。

3 | 結果

各樹種の落ち葉 10 枚の含水率の平均値は、イチョウ 16.3%（最小値 11.3%～最大値 24.0%）、ケヤキ 15.0%（13.9～16.3%）、ハナミズキ 14.9%（14.2～16.3%）、ユリノキ 14.9%（14.2～16.4%）、スズカケノキ 14.5%（13.1～16.0%）、アカマツ 13.1%（11.3～15.7%）、タブノキ 12.3%（11.4～13.5%）、スダジイ 11.7%（11.0～12.7%）、スギ 11.7%（10.5～13.1%）、ソメイヨシノ 11.5%（10.0～14.3%）、シラカシ 11.0%（8.6～14.1%）、クスノキ 10.0%（8.2～11.1%）となり、含水率が最も高いイチョウと最下位のクスノキとの差は平均値で 6.3%となった。落ち葉 1 検体の含水率が高かったのは、イチョウ 24.0%、同 19.6%、ユリノキ 16.4%、ハナミズキ 16.3%、ケヤキ 16.3%などの落葉広葉樹で、含水率の低かった下位は、クスノキ 8.2%、シラカシ 8.6%、同 9.2%、クスノキ 9.6%などの常緑広葉樹と、ソメイヨシノ 9.9%であった。なお、標準偏差の値が大きかった種はイチョウ 4.8、シラカシ 2.5 などとなっている（図 1）。

加熱環境下における単位重量当たりの脱水時間は、平均 333 秒かかるアカマツが最も長く、検体ごとの値のバラつき（標準偏差）も小さかった。次いでイチョウの平均脱水時間が 276 秒、ソメイヨシノが 202 秒、タブノキ 197 秒、ハナミズキ

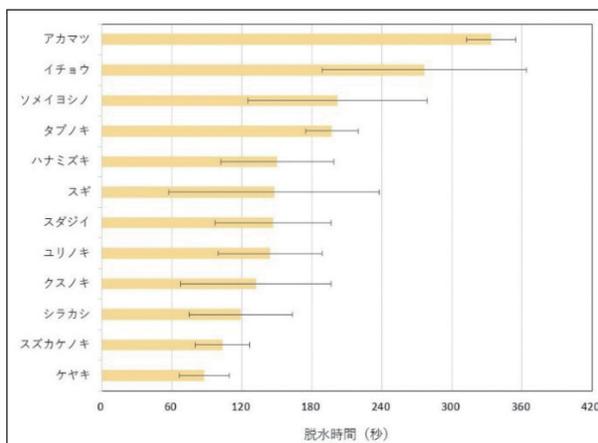


図 2. 落葉の脱水時間（エラーバーは標準偏差）

150 秒などとなっている。一方、平均脱水時間が最も短い樹種はケヤキ 88 秒、次いでスズカケノキが 103 秒、シラカシ 119 秒、クスノキ 132 秒などとなり、アカマツやイチョウに比べて 1/3 程度の時間で単位重量当たりの水分が失われる結果となった（図 2）。

4 | 考察

落ち葉に含まれる含水率は、クスノキとシラカシが下位の 2 種となり、ソメイヨシノを挟んでスギやスダジイ、タブノキ、アカマツといった常緑樹種が下位を占めた（図 1）。落葉樹（イチョウ、ケヤキ、ハナミズキ、ユリノキ、スズカケノキ）の落ち葉の含水率が高い傾向にあったのは、脱落して間もない落葉の中に、含水率の高い検体が含まれていた影響と考えられた。一方、一般に 4 月～9 月に大量の葉を落とすと報告されている（長尾・原田, 1995）クスノキやシラカシ、タブノキなどの常緑樹種では、地上に落下してからの時間が長く、著しく乾燥の進んだ落ち葉が複数含まれていたことによると推察された。

なお、環境保全林の林床に堆積する常緑広葉樹 4 種（スダジイ、タブノキ、シラカシ、クスノキ）の落ち葉含水率の季節変動について調査した林・原田（2019）によれば、本件調査と同時期（11 月）の上記 4 種の落ち葉の平均含水率は、クスノキ 13.5%、シラカシ 23.4%、タブノキ 12.8%、スダジイ 15.3%でシラカシ以外は今回の平均値とほぼ同様の値となっていた。シラカシの値が他種に比べて高かったのは落下直後の含水率の低下していない落ち葉の混在によるものと考えられた。いずれにしても、落下間もない落ち葉を除くと、都市域に堆積している多くの落ち葉の含水率は、①

樹種に関わらず20%以下に低下しているものが多くを占めていること、②さらに時間が経過すると含水率は10%を下回り、より着火発炎しやすい落ち葉が増加するようになること、以上2点が明らかになった。なお、今回の計測値の範囲は8.2～24.0%であるが、林野火災に関連した森林内の地表堆積物の含水率を調査した研究によれば、谷筋の森林では尾根部に比べて風が弱く十分な日照が得られないことから、特に下層の堆積物は乾燥し難く、含水率は常時高い傾向が認められること（消防庁消防研究所, 1988）、アカマツ林内の地表堆積物の含水率は約18.9～49.5%、コナラ林では約20.5～37.2%程度であること（松本・新島, 1993）、日あたりの良いコナラ林の表層の落ち葉は10%以下低下する場合があること（津田, 1987）、里山に堆積している落ち葉の含水率は約23～54%にある（斉藤・岩河・中村, 2003）等の報告があり、都市域の落ち葉の含水率はこれらの値よりは低く、谷部スギ植林地内に堆積する表層リターの値（10～20%程度）や直射日光に晒されるコナラ林内リターの値（10%以下～20%程度）（津田, 1987）と同程度に位置付けられた。なお、堆積物の乾燥速度は森林の構成種、階層構造、地被物の堆積密度、地形、日射、風速、気温、湿度等に依存するとの指摘がある（消防庁消防研究所, 1988。）

脱水時間については、含水率よりも樹種ごとの傾向が明瞭となった（図2）。特にアカマツの落ち葉は、加熱時に水分が消失するまでの時間が他種に比べて顕著に長かった。しかし、同じ硬質な葉を持つスギの脱水時間は平均的な順位であった。全体的には、比較的厚い葉を持つイチヨウやソメイヨシノ、タブノキの脱水時間が長く、葉の薄いケヤキやシラカシ、スズカケノキでは脱水時間が短い傾向が認められた。生葉の厚さと脱水時間との関係について計測した林（2021）によれば、葉が厚い樹葉ほど脱水時間も長くなっていると報告しており、落ち葉においても同様の傾向があるように見えた。なお、生葉では加熱時の脱水時間が長いスギが（林, 2021）、落ち葉になるとその特徴が認められなくなる原因については明らかではない。

森林の階層構造や林床に届く日射量と林内堆積物の含水率に関して玉井（2009）は、開空度が高い落葉樹林の堆積物の方が常緑・落葉混交林に比べて含水比が20%以下になった日数が多く、これは林床面に到達する日射量が多く蒸発量が多いた

めと指摘している。津田（1987）も落ち葉の含水率は林冠の疎である落葉性コナラ林の方が常緑性のマツ林やスギ林に比べて乾燥が早く含水率も低下すると報告している。

都市域の公園や街路などの立地環境は、林野に比べて保水性に優れた土壌も少なく、ほぼ舗装され風通しも良い。また、一般に植栽配置は単層構造で見通しの確保された明るい空間となっている。さらに、年間を通して林床には十分な日射が到達する場所が多いことから、都市空間に堆積する落ち葉は、含水率の低下が進みやすく乾燥速度も促進されやすい。一方で都市景観・美観維持等の観点から定期的な管理が行われ、林野に比べて火種となる落葉落枝の積極的な除去が行われやすい環境である点は、林野に堆積する落ち葉との大きな違いである。

なお、葉の含水率と火災の危険性については、含水率が20%以下に低下すると発火の危険性が高まるという報告がある（山下, 2006；石田・斉藤, 2001ほか）。本件落ち葉の含水率測定に引き続いて、都市域に堆積する落ち葉の火熱に対する反応（火炎近傍ならびに輻射熱に対する発炎性、燃え易さ・燃え難さ）について実験を行ったので次号にて報告する。

引用文献

- 林 寿則・原田 洋. 2019. 環境保全林の林床に堆積した落葉は火災の延焼を助長する危険性はないか. JISE REPORT,(3) : 15-18.
- 林 寿則. 2021. 樹葉の防火機能に関する基礎実験－葉の厚さ・樹葉含水率・脱水時間の関係－. JISE REPORT,(6) : 14-16.
- 石田真奈美・斉藤庸平. 2001. 樹葉の接炎耐火性能に関する研究. 日本造園学会関西支部大会研究発表要旨集, 53-54.
- 松本久二・新島溪子. 1993. アカマツ林及びコナラ林における落葉落枝の分解と大型土壤動物の季節変動. 森林総研研報, 364 : 51-68.
- 長尾忠泰・原田 洋. 1995. 都市における環境保全林のリターフォールについて. 生態環境研究, 2(1) : 19-24.
- 林野庁. 2023. 「日本では山火事はどの位発生しているの？」(https://www.rinya.maff.go.jp/j/hogo/yamakaji/con_1.htm) [2024年4月30日参照]
- 斉藤庸平・岩河信文・中村克己. 2003. 里山と防火. ランドスケープ研究 66(3) : 195-198.

- 総務省消防庁. 2022 令和 3 年版消防白書. 115pp.
消防庁消防研究所. 1988. 林野火災の飛火延焼
に関する研究. 消防研究所研究資料第 21 号.
148pp.
- 玉井幸治. 2009. 林床可燃物含水比の予測. 水利
科学 (308) : 29-51.
- 津田 智. 1987. 燃料としてのリターの乾燥と湿
度の関係, 日産科学振興財団助成「林野火災の
拡大機構とその跡地における生態機能の回復過
程に関する研究」研究報告集, 林野火災の生態:
83-90.
- 山下邦博. 1987. 林内可燃物の火災危険について.
日本火災学会論文集, 37(1) : 21-32.
- 山下邦博. 1992. 林野火災の発生・拡大メカニズム.
消防科学と情報, 29 : 8-12.
- 山下邦博. 2006. 大規模火災の危険性. Re.(150) :
43-50.

IGES 国際生態学センター シニアフェロー6年半の研究業績

原田 洋 (元 IGES 国際生態学センター)

2016年12月に非常勤のシニアフェローとして IGES-JISE の一員となつてから2023年6月に退任するまでの6年半の間に発表できた研究業績の一覧を以下にまとめている。その多くは、JISE のメンバーとの共同研究あるいは協力をいただいたものであり、ここに記して感謝を申し上げる。

1 原著論文

- ①先崎 優・原田 洋. 2016. 横浜市中区三溪園におけるダンゴムシ4種の生態分布. 生態環境研究, 23:1-8.
- ②矢ヶ崎朋樹・原田 洋. 2017. 武蔵野台地における防風樹林の発達史—歴史資料を用いた津田塾大学・小平校地の分析事例. 自然環境復元研究, 9:17-26.

2 著書

- ①原田 洋・栗城源一・大久保慎二・先崎 優. 2017. 土の中の生きものからみた横浜の自然. 158pp. 海青社.
- ②原田 洋・鈴木伸一・林 寿則・目黒伸一・吉野知明. 2018. 環境を守る森をしらべる. 158pp. 海青社.
- ③原田 洋・井上 智. 2022. 環境を守る森を評価する. 171pp. 海青社.

3 総説・研究報告 JISE REPORT に掲載

- ①原田 洋・林 寿則. 2018. 「日本植生誌」から読めること. (1):11-14.
- ②原田 洋・林 寿則. 2018. 現存植生図の凡例から読めること. (1):15-16.
- ③原田 洋・矢ヶ崎朋樹. 2018. 常緑植物の評価種による環境保全林の自然性評価. (1):17-

18.

- ④原田 洋・尾崎光彦・鈴木邦雄. 2019. 冷温帯落葉広葉樹環境保全林の自然性評価手法の開発. (2):6-9.
- ⑤原田 洋・林 寿則. 2019. 神奈川県における潜在自然植生3群集の種組成についての考察. (2):10-13.
- ⑥原田 洋・矢ヶ崎朋樹. 2019. 仮想的飽和環境保全林を到達目標とした場合の環境保全林の成熟度評価. (2):14-17.
- ⑦原田 洋・尾崎光彦. 2019. 「日本植生誌」から読めること その2. (2):21-23.
- ⑧原田 洋・林 寿則. 2019. 「環境保全林の種組成の回復を阻害しているのは林床に厚く堆積した未分解の落葉ではないか」という仮説. (2):24-26.
- ⑨原田 洋・矢ヶ崎朋樹. 2019. 特定の評価種による落葉広葉樹環境保全林の自然性の評価. (3):1-4.
- ⑩矢ヶ崎朋樹・小木曾晴信・原田 洋. 2019. 常緑広葉樹人工林を対象とした自然性評価の試み. (3):5-7.
- ⑪尾崎光彦・原田 洋. 2019. 「日本植生誌」から読めること その3. (3):8-11.
- ⑫尾崎光彦・原田 洋. 2019. 「日本植生誌」から読めること その4. (3):12-14.
- ⑬林 寿則・原田 洋. 2019. 環境保全林の林床に堆積した落葉は火災の延焼を助長する危険性はないか. (3):15-18.
- ⑭原田 洋・矢ヶ崎朋樹. 2020. 関東地方の主要森林における群落構成種内の常緑植物の占める種数割合についての一考察. (4):1-3.
- ⑮原田 洋・林 寿則. 2020. 「日本植生誌」から読めること その5. (4):4-5.
- ⑯原田 洋・林 寿則. 2020. 環境保全林の敷きワラの分解と雑草の繁茂についての考察.

(4) : 12-15.

- ⑰林 寿則・原田 洋. 2020. 環境保全林の林床に堆積する落葉を除去した場合の植物種の侵入について. (4) : 16-18.
- ⑱尾崎光彦・原田 洋. 2020. 「日本植生誌」から読めること その6. (5) : 1-3.
- ⑲原田 洋・矢ヶ崎朋樹. 2020. 南関東地方に残存する自然林3群集における構成種内のつる性植物についての考察. (5) : 13-14.
- ⑳原田 洋・林 寿則. 2020. 環境保全林の種多様性解析のための試案. (5) : 15-17.
- ㉑原田 洋・鈴木邦雄. 2021. 照葉樹環境保全林の研究小史. (6) : 1-6.
- ㉒原田 洋・尾崎光彦. 2021. 関東地方暖温帯域に残存する自然林3群集におけるシダ植物についての考察. (6) : 7-9.
- ㉓原田 洋・尾崎光彦. 2021. 関東地方暖温帯域に残存する自然林3群集を構成する高木および低木についての考察. (7) : 14-16.
- ㉔原田 洋・尾崎光彦. 2021. 関東地方暖温帯域に残存する自然林3群集を構成する種組成についての考察. (7) : 17-18.
- ㉕原田 洋・林 寿則. 2022. 自然林を「近自然林」と「真自然林」とに区分する試み. (8) : 1-2.
- ㉖原田 洋・尾崎光彦. 2022. 関東地方暖温帯域の二次林群集におけるシダ植物の種組成についての考察. (8) : 14-16.
- ㉗原田 洋・尾崎光彦. 2022. 関東地方暖温帯域の落葉広葉樹二次林における高木層・亜高木層を構成する高木樹種の特性について. (9) : 1-3.
- ㉘原田 洋・林 寿則・尾崎光彦. 2023. 関東地方暖温帯落葉広葉樹二次林の自然性評価の試み. (10) : 1-2.

4 総説・解説 JISE Newsletter に掲載

- ①原田 洋. 2017. 環境保全林の自然性評価手法の開発 その1. (76) : 4-5.
- ②原田 洋. 2017. 環境保全林の自然性評価手法

の開発 その2. (77) : 4-5.

- ③原田 洋. 2018. 環境保全林の自然性評価手法の開発 その3. (78) : 4-5.
- ④原田 洋. 2018. 潜在自然植生図の凡例から読めること. (79) : 4-5.
- ⑤原田 洋. 2018. 横浜北部地域の公園の白い花の咲く樹木. (80) : 4-6.
- ⑥鈴木邦雄・原田 洋. 2019. 環境保全林からふるさとの森まで (1). (81) : 1-3.
- ⑦原田 洋. 2019. 名は体を表したり表さなかったり. (81) : 7-8.
- ⑧原田 洋. 2019. 植物と魚の間にみられる同名異種. (82) : 7-8.
- ⑨原田 洋. 2019. 似た者同士. (83) : 4-5.
- ⑩鈴木邦雄・原田 洋. 2020. 環境保全林からふるさとの森まで (2). (84) : 1-4.
- ⑪原田 洋. 2020. 柏とカシワは非なるもの. (84) : 5-6.
- ⑫原田 洋. 2020. 赤色は花に少なく、果実が多い. (85) : 4-5.
- ⑬原田 洋. 2020. 立春を過ぎても葉や果実が落下しない落葉広葉樹のこと. (86) : 8-9.
- ⑭原田 洋. 2020. 北アルプス穂高岳周遊. (86) : 10.
- ⑮原田 洋. 2021. 北アルプス三俣蓮華岳とその周辺を歩く. (87) : 8.
- ⑯原田 洋. 2021. 変わらない植生と変化する植生. (88) : 5-6.
- ⑰原田 洋. 2021. 尾瀬の思い出. (88) : 7.
- ⑱原田 洋. 2022. 北アルプス剣岳周遊. (90) : 6.
- ⑲原田 洋. 2022. 思い出の鎌倉. (91) : 7.
- ⑳原田 洋. 2022. シラビソ・オオシラビソ林の林床には白い花が咲く多年草が多い. (92) : 4-5.
- ㉑原田 洋. 2022. 乗鞍岳山麓五色ヶ原の思い出. (92) : 6.
- ㉒原田 洋. 2023. 東北地方のオオシラビソ林の林床にも白い花の多年草植物の種類が多い. (94) : 6.

特集 IGES 国際生態学センター 市民環境フォーラムの記録

Feature The IGES-JISE Environmental Forum at June 21, 2023

IGES 国際生態学センター市民環境フォーラム (2023年6月21日 オンライン開催)

「地球温暖化に対する研究と実践的取り組みについて」

13:30-13:35 開会挨拶 IGES 国際生態学センター センター長 鈴木邦雄

〈講演〉

13:35-13:55 生態学的視点から見た温暖化の現状と課題

IGES 国際生態学センター主幹研究員 目黒伸一

13:55-14:35 グリーン水素エネルギーシステムと燃料電池の役割と開発状況
(工学的視点から見た温暖化軽減技術と対策1)

横浜国立大学特任教員(教授)石原顕光氏・IGES-JISE 目黒伸一

14:35-15:15 脱炭素化推進に向けた小型・分散型アンモニア製造装置開発について
の紹介(工学的視点から見た温暖化軽減技術と対策2)

つばめ BHB 株式会社 依田 宏氏

15:15-15:55 水素保安戦略とリスクアセスメント

(工学的視点から見た温暖化軽減技術と対策3)

横浜国立大学教授 三宅淳巳氏

15:55-16:10 休憩

16:10-16:25 総合討論および質疑応答

:目黒伸一、石原顕光、依田 宏、三宅淳巳

16:25 閉会

生態学的視点から見た温暖化の現状と課題

目黒 伸一 地球環境戦略研究機関 国際生態学センター

1 はじめに

二酸化炭素をはじめとした地球温暖化に寄与すると考えられる温室効果ガスは産業革命以後急速にその排出量が増加している。現在もその増加傾向は継続しており、陸上生態系や海洋で吸収しきれない温室効果ガスが空中に溜まることによって、温暖化がますます加速しているのが現状である（図1）。

そこで科学技術によってその排出量を低減する、あるいはある空間に吸収させるといったことで解決しようと様々な分野で試みられている。

ところで生態学的視点からこの温暖化現象をどう考えるかといった議論はあまり多くないようにみえる。

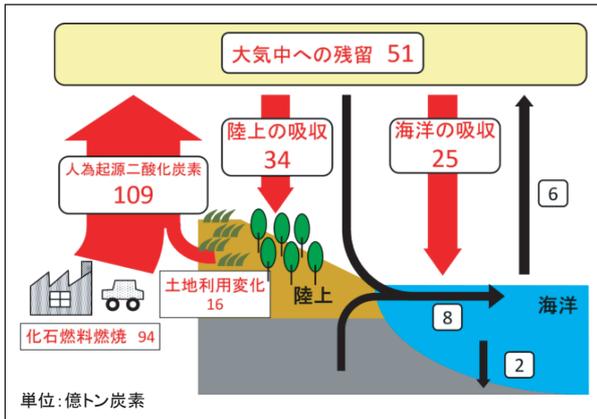


図1. 人為起源の炭素収支模式図 (2010年代)

https://www.data.jma.go.jp/kaiyou/db/mar_env/knowledge/global_co2_flux/carbon_cycle.html

2 生物由来の温室効果ガス

温室効果ガスの由来の大半を占める発生源は石油、石炭や天然ガスなど化石燃料を燃焼させた結果として生じているが、その大元である化石燃料は動植物遺体が数億年単位の時間をかけて生成されてきたものであり、生物由来ということができ

る。その化石燃料が永い地球の歴史の一瞬で分解されて、急激な温室効果ガスの排出により温度上昇しているわけだが、現在において空気中の二酸化炭素ガスを吸収する生物はその量的配分を考慮すれば、ほぼ植物だけと言って過言ではない。したがって、生態ピラミッドから明らかなように、現代の生態系の基盤である植生を構成する樹木や草本が温室効果ガスを吸収すべき役割の一端を担うべきなのは言うまでもない。

ただし、実際、樹木や植生の発達を待つには数十年単位の時間が必要となってくる。そのため、木を植えることによって二酸化炭素を多く固定するようになるには年月を要する。喫緊の二酸化炭素を吸収しなければならない要請に応えられるようにするには、大規模かつ相当に綿密な植栽計画なしには成しえないことは紛れもない事実である。

3 生態学から見た温暖化対策の問題点

しかし一方で、現状の電力を賄うために再生エネルギー事業を拡大して、例えば太陽光パネルの施設を現地の植生を壊してまで設置する、あるいは陸上や海上に風力発電装置を建設してそこを生育地にする動植物のハビタットに影響を与えるなどの行為には違和感を禁じ得ないのも生態学を研究している者には明らかである。

日本を含めた世界のほとんどの地域で植生は劣化しており、自然植生は極めて少ない現状にあり、さらにそこにあった植生を少なくとも原状回復するには多くの場合多大なる時間がかかり、それまでの間に劣化した植生はその生物学的質だけでなく、環境保全機能も劣化させてしてしまう。たとえば太陽光パネルを設置するには土壌を削り、平坦な地形に整地する必要がある。この際の土壌は残土などと称して捨てられてしまうが、この土壌を作り出すには動植物遺体と母岩の風化が必要であり、1cmで数十年から百年といった年月が

掛かっている。

また、自然は合目的に創り出された産物ではないことも忘れてはならない。自然はより成熟した生態系を形成する方向へと基本的には不可逆的に遷移している。その結果として、最も安定した生態系へ向かっているのである。その行き着いた先には多少の自然災害ではビクともしないシステムが永く存在することになる。結果としてより複合的でより高い環境保全機能を有する系が出来上がるわけである。

4 | 保守的な生態系

温暖化に伴って生態系が蒙る影響・被害についての議論や研究は続いている。植生における温度変化の影響を最も受けそうな植生タイプの一つとして亜高山帯など森林限界付近の植生、特に草本植生が挙げられる。このような立地における元来生育していなかった外来種や高木種の侵入はもともあった草本植生には甚大な影響を与えることは想像に難くない。また、高層湿原なども周辺植生の片や高温化による水分蒸散が増大することによる水供給の変化やそれに起因する水位変化などにより同様に影響を受けることは必至と思われる。しかし、多くの植生を直ちに劣化するような恐れは少ないであろう。自然植生には環境に対しての幅があり、許容力と表現してもいい。その植生帯と他の植生タイプとの境界付近は環境総和としての閾値にあたり、そこでは温暖化による何らかの応答は十分に考えられる。例えば、常緑樹林帯上部であるモミ林へより多くの下方からの常緑植物が生育地を抜け、モミ自身もより上方のブナ帯下部へ少し侵入するような現象は見られるようになるかもしれない。しかし、そのような事態が起こったとしても、系としての植生を構成する群落内の種組成自体が大きく変化することはない。

実際、自然環境下においても温度変化は長い地



写真 1. 横浜国立大学環境保全林。
(2023.5.18 目黒伸一撮影)

球の歴史の中で繰り返し起きてきたし、植物の移動も絶えず水平方向、垂直方向で行われてきた。ただし、ここで強調しておきたいのは、このような変化は自然変化の中で起きてきたことであり、人間というただ一種の活動によって引き起こされたことはないという事実である。人間はその因果関係を認識しているからこそ、その自分自身が地球資源を利用したことによる地球温暖化と他の生物を含めた環境変化に対して責任を持たねばならない。

5 | 環境保全機能としての植生

地球温暖化に伴って、我々の生活への影響が多くの場面で想定される。農作物の不作、水資源の枯渇など直接的な市民生活への影響が考えられるし、すでにその兆候は見られている。いっぽう、台風の大規模化・強大化などによる大雨やゲリラ豪雨のような短時間での集中豪雨とその頻発化による洪水、土砂崩れなどによる自然災害の甚大化も安全・安心な生活環境を維持には多大な影響を与え、人命を危機に晒すことさえある。

ところで植生学的に厳密な意味での自然植生は、人間活動によりこの地球上には既にほとんど存在していない。植生は一般にその自然性が高いほど、保温、保湿、地盤保持、水質浄化、防火、防音、防音などの環境保全機能が高い。また、その機能は多面的であり、二酸化炭素の吸収もその一つとして挙げられる。

したがって、生物材料である植生を用いることで上記自然災害を未然に防ぎ、同時に二酸化炭素を吸収するために自然植生に近い植生を復元することが、温暖化対策への生態学的アプローチとなるといえよう。

人間活動がもしないとした時に判定される自然植生である、潜在自然植生を植生調査から判別す



写真 2. マレーシアで形成された環境保全林。
(2022.11.07 目黒伸一撮影)

ることで、その立地に適した樹種群を抽出し、その苗木を植えて植生復元した方法は宮脇方式と呼ばれる植栽である。すでに国内外でこの宮脇方式による植林は行われている。日本国内で3400万本、海外で500万本の苗木による森づくりが行われている。日本の中では暖温帯、冷温帯、亜熱帯さらには亜高山帯や酸性土壌の立地でも成功裏に森林を形成している。また、海外では赤道直下の熱帯などでも森林形成を可能としている。基本的には植生調査による潜在自然植生を明らかにして、その土地・立地に合った樹種群を植栽する方法はどこでも共通している（写真1, 2）。

植栽された樹木の成長挙動を追跡調査することで様々な生態学知見とともに環境保全に関するデータも蓄積される。そのうちのひとつとして、森林全体の生長量が算出され、その総体としての物質生産量が明らかにされ、結果として樹上に貯えられた二酸化炭素量も提示される（図2）。

形成された森林は時間とともに土壌を含む森林植生の質が上がっていく。植栽後、少なくとも数十年～百年は地上での樹木成長の総和は上昇し続けるため、吸収された二酸化炭素量は増加し、他の環境保全機能も基本的には強化されていく。

陸前高田の松林をはじめ、津波で多くの森林が破壊されたのをご存じの方は多いと思われる。ところが津波で残った森林もあった。写真3は東日本大震災時に宮城県内に形成された宮脇方式による環境保全林である。筆者の研究ではその立地に生育する樹木群の中で基本的に広葉樹の方が針葉



写真3. イオン多賀城店環境保全林。
(2011.3.18 高野義武氏撮影)

樹よりも力学的強度が高い傾向にある（Meguro et al. 2016）。実際写真でわかるように植栽された樹木は倒れないばかりか、流されてきた多くの車などを止めてさえいた。このように自然の揺り動かしに対して自然性が高い生態系はより強い保全・復元力を有している。

6 | 終わりに

地球温暖化による自然災害の甚大化は人々の命を脅かすまでになってきている。そのため、一刻も早い対策を講じることが急務なのはもはや国・地域を問わず共通の認識と捉えられている。エネルギー消費の効率化や二酸化炭素の排出減少は喫緊の課題であり、化学的、物理的手段による対応は非常に重要なのは間違いない。

いっぽう、排出されている二酸化炭素の起源が生物由来であることや近年みられる政情不安によって化石燃料による火力発電増大や輸送エネルギーロスなど人間社会における自然への負荷変動は制御予測が難しいのが実情である。広い視野から生態系を含めた自然環境の緩衝機能を顧みて、時間の経過とともに着実に生育する環境を保全していく森林復元・創造を温暖化対策戦略のひとつとして積極的に推進されることを望みたい。

引用文献

- Meguro, S. 2023. Miyawaki method: Notes on the Miyawaki Method for reforestation approach. The Malaysian Forester 86:153-173.
- Meguro, S., Suzuki, S. & Hayashi, H. 2016. Dynamic characteristic of the tree under the snowiness environment II. Eco-habitat. 23:83-92.

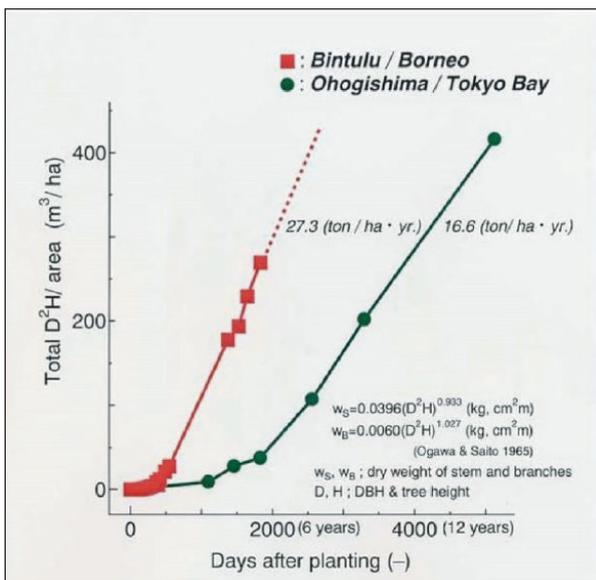


図2. 日本と熱帯における宮脇方式によって形成された環境保全林の成長。(Meguro 2023) を改変

グリーン水素エネルギーシステムと 燃料電池の役割

石原 顕光 (横浜国立大学)・目黒 伸一 (IGES 国際生態学センター)

1 | はじめに

21世紀もはや四半世紀を過ぎようとしているが、人類はますます困難な状況に置かれている。最近では地域紛争や経済危機の克服に焦点が当てられている感があるが、他の問題を忘れることは許されない。経済成長 (Economy Growth) とエネルギー安全保障 (Energy Security) と環境保全 (Environmental Protection) は、3つのEと呼ばれ、互いに密接な関係にある。特に経済成長には、それに見合った資源・エネルギーの消費が必要であり、そのエネルギーの消費によって環境悪化が引き起こされる。この3つのEはトリレンマ問題とも呼ばれ、現在のところ、根本的な解決策は見出されていない。この問題を根本的に解決する方策として、水素エネルギー社会が究極のクリーンエネルギーシステムとして提唱されているが、特に、再生可能エネルギーを基盤とする水素はグリーン水素と呼ばれている。

水素エネルギー社会の実現のためには、まだまだ解決しなければならない技術課題が数多くある。本稿では、人類文明とエネルギーシステムの関わりを考え、人類文明史のなかで水素エネルギー社会位置付け、またアントロピーの立場から原理的にとらえることを試みた。さらに、グリーン水素エネルギーシステムの中核をなすと考えられる燃料電池の開発状況を概説した。

1 | 人類文明とエネルギーシステム

人類はおよそ50万年前に火の使用を始めたといわれている。これは物質の持つ化学エネルギーの熱エネルギーへの転化であった。化学エネルギーから熱エネルギーへの変換が生活に役立つことを見出したのである。熱は低品質のエネルギー

であるが故に、変換は自発的に進行し、小規模ながら熱エネルギーを容易に利用することができた。この時代は長く続いた。

18世紀後半にようやく、熱機関を用いて、継続的に熱エネルギーを力学的エネルギーに変換できるようになった。その後、ファラデーが電磁誘導の法則を発見し、力学的エネルギーがさらに電気エネルギーに変換可能となった。その成果にもとづき、初めは石炭、後には石油の持つ化学エネルギーを継続的に大量に熱エネルギーに、さらに電気エネルギーまで変換し、莫大なエネルギーに支えられた文明を構築してきた。これは人類の輝かしい成果といってよいであろう。また近年のエレクトロニクスの発達は目を見張るものがあり、人類の生活はますます便利で豊かになっている。エネルギー消費者である我々は、使いやすい電気エネルギーを利用することが多いので、現代文明は電気エネルギーに支えられていると思っている人も多い。しかし、人類文明を支える根幹は、かつては石炭の、現在は石油や核燃料の持つ化学エネルギーや核エネルギーから熱エネルギーへの変換であり、その状況はなんら変化していない。

20世紀末から、人類を取り巻く状況が変わってきた。1972年のローマ・クラブの報告¹⁾にみられるように、地球は有限であることが自覚され、資源量に限りがあることが明確に意識されるようになってきた。特に近年、二酸化炭素排出に伴う地球温暖化議論の高まりや化石燃料の枯渇・自動車の排気ガスによる大気汚染の問題が注目されている。このような時代背景のもとに、文明を支えるエネルギーシステムは、さらに高いエネルギー変換効率を持つことが求められている。燃料の持つ化学エネルギーをいったん熱エネルギーに変換してしまう現在のエネルギーシステムは、カルノー効率の制限を受け、必然的にトータルのエネルギー変換効率の低下

を招く。つまり、現在のエネルギーシステムでは、燃料の持つ低エントロピー性はその全てを使いきることなく、消費されているのである。用いる量が同じであれば、燃料をどのように利用しようと、最終的な生成物と熱量は変わらない。しかし、そのエネルギー変換の経路には自由度がある。ここで自由度とは潜在的に実現可能な選択の幅という意味である。エネルギー変換効率が低いことは、自由度の喪失を意味する。つまり、熱エネルギーに変換してしまうことにより、自由度は大幅に低減するのである。文明の進歩とは、文明のなかの可能性の展開ではないかといわれる²⁾。これは、文明の進歩とは潜在可能性の発現であると言い換えることができるであろう。潜在可能性の発現のためには、より大きな自由度の獲得が必要である。文明の進歩が歴史の必然であるとするれば、潜在可能性の発現は歴史の必然である。すなわち熱エネルギーを経由しない、自由度の大きなエネルギーシステムの構築は文明の必然といえるのではないだろうか。

熱エネルギーを経由せずに、化学エネルギーと電気エネルギーを直接、相互変換することは電気化学システムの得意とするところである³⁾。燃料電池や水電解は、化学反応に伴うギブズエネルギー変化と電気エネルギーを、原理的には100%相互変換しうる。しかし、例えば現状の燃料電池の効率はずしも高くない。原理的に可能である変換を、現実起こしえないのは、人類の科学技術が未熟であることに他ならない。この課題を、人類の叡智を持って解決できなければ、人類に現在の繁栄を持続する能力がないということであろう。我々は今、叡智を結集させ、燃料電池のみならず様々なエネルギー変換システムの効率向上のために、基礎科学に立脚した研究を進めて、新しい“エネルギー科学”を確立すべきターニングポイントに立っているとイえるのではないだろうか。特に、再生可能エネルギーを基盤とする水素エネルギーは、“グリーン水素”と呼ばれているが、その“エネルギー科学”の推進が今こそ必要である。

また人類文明の未来を考えると、1次エネルギー源の確保という問題がある。化石燃料はいずれ枯渇する。再生可能エネルギーを1次エネルギーとするエネルギーシステムの構築に向けた努力は、化石燃料をまだ利用できる現在だからこそ行っておく必要がある。

2 | 持続可能な活動と物質循環

資源や環境の問題を考える場合に、エントロピーの視点が重要であることは、古くから指摘されている⁴⁾。エントロピーの観点からは、人類社会を含めた理想の定常的な地球環境のあり方として、物質は循環し、活動によって生成したエントロピーは全て熱の形で宇宙空間に放出することが示される^{4,5)}。この様子を模式的に図1に示した。

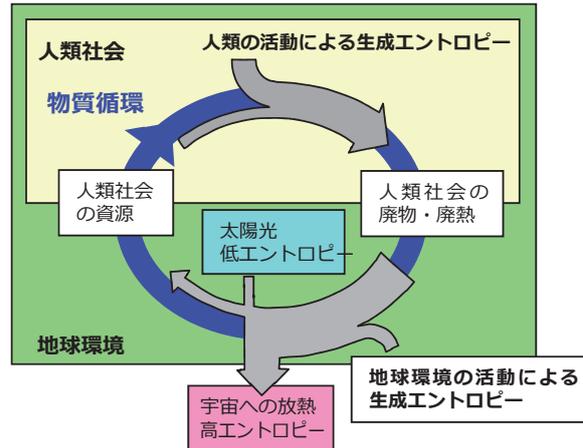


図1 物質循環にもとづいた、人類社会を含めた地球環境のエントロピーの流れ。

3 | 物質循環を満したエネルギーシステム

人類のエネルギーシステムもまた、物質循環に依拠していることが望ましい。ここではまず、人類の消費するエネルギーの量について検討しておく。太陽から地球表面に到達するエネルギーは 1.24×10^{14} kW であり、これを100とすると2000年の人類のエネルギー消費量はわずか0.02にすぎない。従って量で考える限り、人類の利用するエネルギーは、現在や数年前からの太陽に基づく再生可能エネルギーで十分賄えるはずである。しかし、再生可能エネルギーは低密度であり、季節・時間による変動が大きい。

人類は、可能であれば現在の生活様式・文明システムをより豊かなものにしたいと考えている。すでに述べたように、現代文明は石油等の化石燃料に代表される莫大なエネルギーの使用を前提として構築されている。化石燃料は過去数億年の太陽エネルギーの凝縮であり、質量・体積エネルギー密度ともに非常に高い。人類は、化石エネルギーを局所的に消費する場所、すなわち高エネルギー

消費地である都市群をつくっている。現代文明はエネルギーを局所的に高密度で利用するシステムである。そのため、低密度で変動の大きな再生可能エネルギーは、そのままでは現代文明を維持するには非常に使いにくい。現在のシステムを大きく変更することなく文明を維持するためには、低密度の再生可能エネルギーを現代文明に利用しやすい形態に変換し、高エネルギー消費地へ集積する必要がある。そのためには再生可能エネルギーを1次エネルギーとして、エネルギーキャリアである2次エネルギーに変換することが必要となる。そのような2次エネルギーには次のような特性が求められる⁶⁾。

- ① 様々な1次エネルギーから容易に産出できる。
- ② 各種形態のエネルギーへの変換効率が高い。
- ③ 消費者に取り扱い易い。
- ④ 用途に応じて大量貯蔵から少量貯蔵まで可能である。
- ⑤ 短距離輸送から長距離輸送まで容易である。
- ⑥ 使用に際して、環境に有害物質を排出しない。

「電気」は2次エネルギーの主力の一つである。電気は、様々な1次エネルギーから容易に産出できる、各種形態のエネルギーへの変換効率が高い、消費者に取り扱い易いなどの優れた特性を持つ。しかし、大量貯蔵や長距離輸送が困難であるという欠点がある。それらの欠点を補完し、電気の相補的な役割を担う2次エネルギーとして「物質(=燃料)」が必要である。

再生可能エネルギーから2次エネルギーである燃料を製造する場合、エネルギーを取り出した後に発生する廃物の物質質量と製造する燃料の物質質量はトータルでバランスする。したがって理論上は、燃料を構成する元素の循環は満たされることになる。太陽光エネルギーは人類がエネルギー源として使用しなくても地表に降り注ぎ、高エントロピーの熱となり宇宙空間に輻射される(図2(a))。人類が再生可能エネルギーを利用することは、太陽光の低エントロピー性を利用して、人類にとって低エントロピーである燃料を生産するということである。言い換えると太陽光の低エントロピーを物質に転化することである。人類はその燃料(低エントロピー物質)を輸送・移動させ、適切な条件を設定することにより、エネルギーを放出する

自発的な変化を起こさせ、高エントロピー状態の廃物と廃熱を放出させる。そして、その高エントロピー状態の廃物と廃熱のうち、熱は宇宙空間に放出し、廃物は再生可能エネルギーを利用して再び燃料に変換する(図2(b))。その変換に伴って生成するエントロピーも熱の形態で宇宙空間に放出する。このプロセスが完結すれば、物質は循環し、人類のエネルギー消費に伴って生成するエントロピーはすべて熱として宇宙空間に廃棄することができる。

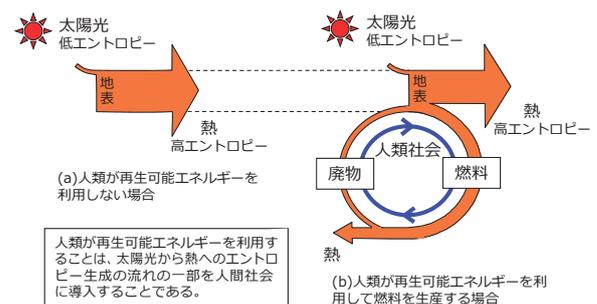


図2 太陽光から熱への変換に伴う全エントロピーの流れの模式図。

具体的な燃料として「水素」は有力な候補である。水素は2次エネルギーとして次のような特性を持つ⁷⁾。

- ① 水素は気体・液体・金属水素化物(固体)として用途に応じた形態で貯蔵できる。また電気は移動に送電線が必要であるが、水素は貯蔵して輸送することが可能である。したがって、電気は短距離の輸送に、水素は長距離あるいは送電線のない場所への輸送に適している。

水素吸蔵合金では、水素が結晶格子間に原子状に侵入して金属水素化物を生成し、常温・常圧の水素は1/1000以下の体積に圧縮される。大規模貯蔵には気体、輸送機関による輸送には液体、交通機関用および小規模貯蔵用には金属水素化物を利用することができる。

- ② 水素は他の燃料と比較して単位重量当たりのエネルギーが大きい。

水素分子の陽子数・電子数はヘリウム原子と等しいが、中性子を持たないため、分子量はヘリウムの原子量の1/2であり、あらゆる物質の中で最小となる。このことが、水素の物性値に大きく影響し、燃料として優位になる。特に、実用上重要である単位質量当りになると、水素は燃焼熱(- ΔH°)、電気として取り出しうるエネルギー

($-\Delta G^\circ$) がそれぞれ 143 kJ g^{-1} 、 118 kJ g^{-1} となり、メタン ($-\Delta H^\circ: 56 \text{ kJ g}^{-1}$ 、 $-\Delta G^\circ: 51 \text{ kJ g}^{-1}$) やメタノール ($-\Delta H^\circ: 23 \text{ kJ g}^{-1}$ 、 $-\Delta G^\circ: 22 \text{ kJ g}^{-1}$) と比較しても、飛び抜けて大きな値となる。2次エネルギーとしての大量の輸送、貯蔵を考えたとき、水素の単位質量当り大きなエネルギー密度は利点となる。

③ 電気化学システムを用いて、 H_2O に対する H_2 と O_2 の化学エネルギーと電気エネルギーを比較的容易に直接相互に変換できる。

すでに述べたように、化学エネルギーをいったん熱エネルギーに変換することは、自由度の大幅な低減を招く。電気化学システムを用いれば、化学エネルギーと電気エネルギーを直接相互変換することができる。 H_2O に対する H_2 と O_2 の化学エネルギーは、燃料電池や水電解システムを用いることにより、熱を経由することなく電気エネルギーに直接変換できる。大気圧、 25°C で水素と酸素の持つ化学エネルギーは、燃料電池を用いて理論起電力 1.23 V として電気エネルギーに変換でき、逆に、電気エネルギーを水素と酸素の化学エネルギーに変えるための水の理論分解電圧は 1.23 V となる。実は、どのような燃料を用いても、理論的には、燃料の化学エネルギーを直接、電気エネルギーに変えることはできる。しかし、実際には反応を有限の速度で行わせるための余分なエネルギーが必要であり、これが燃料によって大きく異なる。また、燃料が化合物の場合、酸化反応の生成物として完全な酸化状態ではない化合物が生成する場合や、逆に完全な酸化物を電解しても実際には燃料が全く生成できない場合もある。例えば、酸性電解質中で水素は電気化学的に活性であり、その反応速度は非常に速く、その酸化反応および水電解による生成反応の余分に必要なエネルギーは比較的小さい。また酸化生成物は水だけである。それに対して、燃料となりうるメタノールやジメチルエーテルは電極触媒を被毒するため酸化反応に必要な余分なエネルギーが大きく、またホルムアルデヒドやギ酸など様々な生成物を生じる。逆にそれらの完全な酸化物である CO_2 と H_2O の電解によりメタノールやジメチルエーテルを生成するのは非常に困難である。

④ 水素の燃焼生成物である水は生物に無害であり、環境汚染物質を排出しない。

水は人体の約 65% 、生物によっては 99% を占める物質である。無害であるというよりも、むしろ水の循環作用なしに生物は生存できない。

これらの特性を考慮すると、水素が燃料として優れていることがわかる。図3に、水の電気分解により得られた水素を燃料として、物質循環を満たすエネルギーシステムの模式図を示した。このエネルギーシステムでは、再生可能エネルギーを1次エネルギーとして、水素と電気が互いにその欠点を補完しあいながら2次エネルギーとして人類文明を支えていくことになる。

水素の化学エネルギーと電気エネルギーを直接相互変換できるデバイスが、電気化学システムである。そして、グリーン水素エネルギーシステムにおいては、電気化学システムである水電解と燃料電池が、その中核をなすと考えられる。この様子を図4に模式的に示した。次節では、各種存在する燃料電池の一つである、固体高分子形燃料電池の開発状況について述べたいと思う。

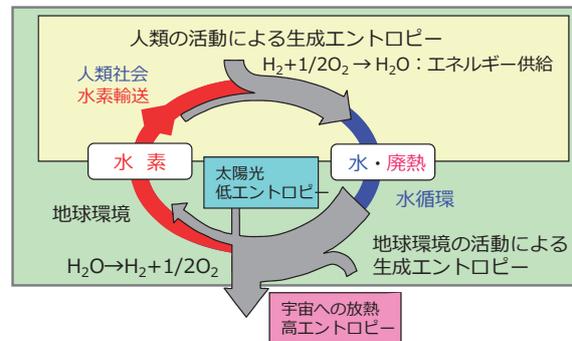


図3 水の電気分解により得られた水素を燃料として、物質循環を満たすエネルギーシステムの模式図

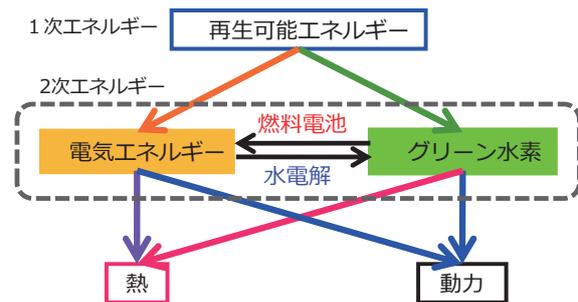


図4 再生可能エネルギーをベースとし、電気エネルギーとグリーン水素（水素の化学エネルギー）を2次エネルギーとしたエネルギーシステムの模式図。

4 固体高分子形燃料電池の開発状況

固体高分子形燃料電池 (PEFC; Polymer Electrolyte Fuel Cell) は、すでに家庭用コジェネレーションシステムや燃料電池車として実用化さ

れている。また今後さらに様々な分野でクリーンな電源としての利用が期待される。燃料電池システムの模式図を図5 (a) に、PEFCの基本構造を図5 (b) に示す。電池は燃料である水素を供給する燃料極と大気から空気を取り込んで、その中の酸素を反応させる空気極からなっている。

PEFCは燃焼熱基準で計算すると、25℃、大気雰囲気中で83%という高い理論エネルギー変換効率を持つ。しかし現状では、燃料電池の空気極で進行する酸素還元反応(ORR; Oxygen Reduction Reaction)の速度が遅く、この反応を進ませるために必要な余分なエネルギーとして、起電力が0.3V程度低くなってしま(約25%の電圧ロス)。そのため、発電システムとしての性能を十分に発揮しているとは言えない。燃料である水素の酸化反応は速度が速く速やかに進行するが、それを酸化させるための酸素の還元反応が電池の性能を制限してしまう。

筆者らは、2035年以降のPEFCの本格普及には、エネルギー変換効率の飛躍的向上が必要であると考えている。そのためには、ORRの反応速度を劇的に増加させることが必須である。酸性電解質中でのORR触媒として、安定性も含めると、現状では白金系触媒が最も高機能である。現在、合金化・コアシェル化・有機物修飾による表面水分

子吸着阻害・セラミック担体との相互作用など、白金系触媒の高活性化のために多くの試みがなされている。現行のPEFCシステムの高性能化は着実に進んでいるが、余分に必要なエネルギーがゼロになり、理論通りに高効率を達成できるような高活性な触媒合成の道筋は見えていないように思われる。われわれは、我が国が得意とするセラミックス技術に基づいた、白金に変わる高機能電極触媒の開発に取り組んでいる⁸⁾。革新的な触媒開発が必要だと考えている。

5 | おわりに

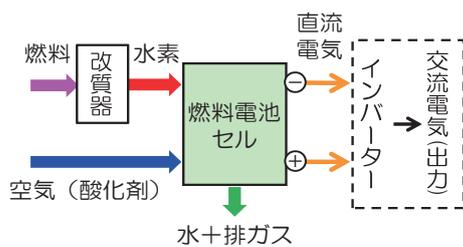
人類が再生可能エネルギーのみから水素を製造できるようになると、本来の地球環境に備わっていた水循環に、新たに人類活動による増加分が加わることになる。しかし、全エントロピーの量としては新たな環境負荷は生じさせていない。このことは本来地球環境に備わっているエントロピー生成の流れを利用して、人類が水循環という能動的活動を増加させることを意味する。すでに文明の進歩とは、文明の中の可能性の展開ではないかといわれることを述べたが、地球環境においても同様である。地球環境の展開とは、地球環境の持つ可能性の発現なのである。

水素エネルギーに対する期待は大きい。一方、現状では、関連するほぼ全ての分野において、技術課題を抱えているのも事実である。しかも、人類は現在なお、地球環境における物質循環の破壊者ですらある。しかし、熱エネルギーを介さない高効率エネルギー変換システムの確立、さらには地球環境の水循環をより豊かにするグリーン水素エネルギー社会の構築こそ、人類が積極的に働きかけることによってはじめて可能となる地球環境の持つ可能性の発現である。この可能性の発現は、人類文明による地球環境の展開の本質的な歩みととらえるべきではないだろうか。

参考文献

- 1) ドネラ H. メドウズら：成長の限界—ローマ・クラブ人類の危機レポート、ダイヤモンド社(1972)。
- 2) 情報の文明学：梅棹忠夫、中公文庫(1999)。
- 3) 石原顕光：トコトンやさしい電気化学の本 新版、日刊工業新聞社(2023)。
- 4) 槌田敦：資源物理学入門、日本放送出版協会(1982)。

(a) 燃料電池システム



(b) PEFCの基本構造

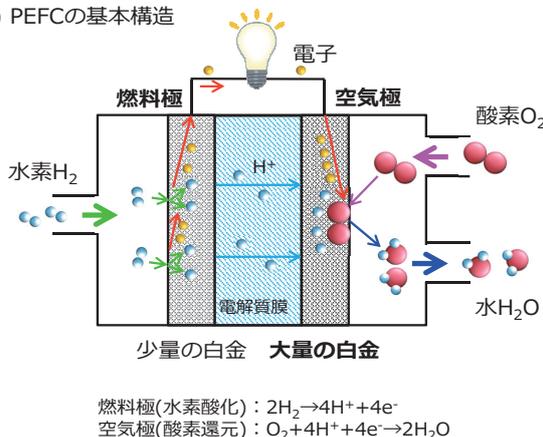


図5 (a) 燃料電池システムの模式図、(b) PEFCの基本構造。

- 5) 石原顕光：トコトンやさしいエントロピーの本 第2版、日刊工業新聞社（2020）。
- 6) 石原顕光：トコトンやさしい再生可能エネルギーの本、日刊工業新聞社（2012）。
- 7) 水素エネルギー協会編：水素エネルギーの事典、朝倉書店（2019）。
- 8) A. Ishihara, S. Tominaka, S. Mitsushima, H. Imai, O. Sugino and K. Ota, “Challenge of advanced low temperature fuel cells based on high degree of freedom of group 4 and 5 metal oxides”, *Curr. Opin. Electrochem.* 21, 234-241 (2020)。

脱炭素化推進に向けた小型・分散型アンモニア製造装置開発についての紹介

依田 宏 (つばめBHB株式会社)

1 はじめに

アンモニアは、化学工業において尿素などの窒素肥料を製造するための基幹化学品として極めて大量に生産されており、増加し続ける人類の食糧需要を支えるなど大きな役割を担ってきた。最近では、アンモニアの易液化性・可燃性・炭素原子を含まない一方水素3原子を含む物質である等の特性から、輸送・貯蔵可能な水素キャリアとしての利用、火力発電における化石資源との混焼・専焼燃料などによる低・脱炭素化に向けた燃料としての利用など、環境・エネルギー両面からも注目をされている。

また、近年供給が増大している再生可能エネルギー（太陽光、風力など）を基に生成された水素を原料として生産されるアンモニア（グリーンア

ンモニア）は、化石資源から生成していた従来型アンモニアと比較して脱炭素化を大きく推進するものとして期待がかかっている。

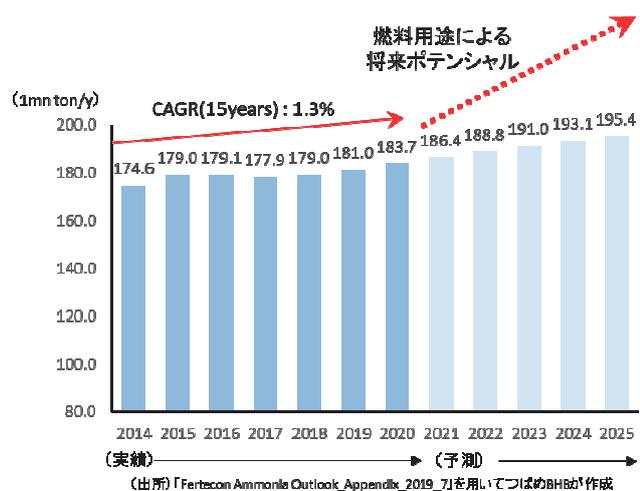
本稿では、従来製法（*1）に比べてより低温・低圧条件下でのアンモニア合成を可能とする新触媒を用い新たに開発された小型現地生産型アンモニア製造について解説し、分散型生産による効率的な生産・消費、および再生可能エネルギーとの組み合わせによる脱炭素化推進について紹介する。

（*1）従来の代表的なアンモニア製法はハーバー・ボッシュ法（以下、HB法）である。100年以上の実績を持ち、空気中の窒素と主に化石資源から得られる水素を高温・高圧条件下で反応させるアンモニアを合成する。運転条件が厳しいことより大規模・

アンモニアの様々な用途



世界のアンモニア生産量推移(予測含む)



- ✓ 肥料需要の増加を中心として需要が増加し、1%以上の成長率で生産量が増加
- ✓ 2020年時点で世界の生産量は約180百万トン
- ✓ CO₂フリー燃料や水素キャリアとしての着目が高まっており、将来的に爆発的に需要が増加する可能性がある

図1 アンモニアの用途と世界の生産規模

一極集中型での生産が中心となっている。

2 アンモニアについて

アンモニアは、化学工業において窒素含有化成品として特に尿素をはじめ窒素肥料を製造するための窒素源として重要な化成品である。また、メラミン樹脂やナイロンなどの合成繊維原料や、排ガス脱硝還元剤にも使用されるなど、現在の世界のアンモニア生産・消費量は年間約2億トンとされている。

最近ではカーボンニュートラルの実現に向け、二酸化炭素を発生しない燃料として火力発電における化石資源との混燃・専燃燃料や水素キャリアといった環境・エネルギー関連の工業利用にも注目が集まっている(図1)。今後のアンモニア需要は、人口増加と共に肥料産業や工業向けに増加することに加え、燃料向けに大きく需要が伸びると言われており、2050年には現在の約2倍の需要が見込まれている。

3 新アンモニア合成触媒の開発・実証

アンモニア合成反応は理論的には低温・高圧条件が有利であるが、従来より用いられている鉄系アンモニア合成触媒は触媒活性・反応効率を向上させるために高い反応温度を必要とする。

これに対し、2012年に東京工業大学の細野研究室で新たに開発されたエレクトライド触媒は、低温・低圧条件下で効率的にアンモニア合成を促進することが特徴となっている^{1)~3)}。

エレクトライド触媒の実用化については、アンモニア合成プラントへの適用実証のために、2019年12月にパイロットプラントを操業開始し、今日まで引き続き触媒活性確認、耐久性能確認、運転条件の最適化、運転方法の確立を進めている(図



図2 年産20トンの実証試験設備概要

2)。同時に、触媒性能向上・長寿命化などエレクトライド触媒の最適設計にも大きく貢献し、これら実運転からのノウハウを基に既に第一世代触媒の開発は終了し、実プラントに適用するための商業化が進められている。

4 アンモニア生産・消費サイクルにおける脱炭素化

エレクトライド触媒による温和な条件での効率的なアンモニア合成はアンモニア製造プラントの省エネルギー化を可能にし、HB法ではスケールメリットの優位性を失うために実現が困難であったアンモニア製造プラントの小型化が実現可能となる。プラントの小型化は、化石資源を要因とするアンモニア製造プラントの建設地制約を解消し建設地を分散させ、消費地でのオンサイトアンモニア生産を可能にする。

	HB法	Tsubame BHB
ターゲット	特定地域での大量生産	小規模分散型 オンデマンド生産
1基あたり 年間生産能力	20~120万トン	0.1~10万トン (目標値)
建設費	800M~3 B\$	1M~80M\$ (目標値)
動作条件	10~30 MPa 400~500℃	3~5MPa 300~400℃ (目標値)

図3 HB法とオンサイトアンモニア生産システムのビジネスモデル比較

図3にHB法と弊社の目指すビジネスモデルの比較を示す。HB法は大規模一極集中型のアンモニア生産システムであるが、弊社は小規模分散型のオンサイトアンモニア生産システムにより、アンモニアの輸送と貯蔵に掛かるコスト・エネルギー消費を低減させ、現状で高い物流コストを支払っている地域の消費者に安価なアンモニアを提供すると同時に脱炭素化を推進できる(図4)。

さらに、脱炭素社会を目指す近年の世界的潮流を受けて、二酸化炭素を排出せずに製造されるアンモニア、すなわち、グリーンアンモニアが望まれている。グリーンアンモニアを製造するには、製造時に大量の二酸化炭素を排出する化石資源由来の原料水素から脱却する必要があり、再生

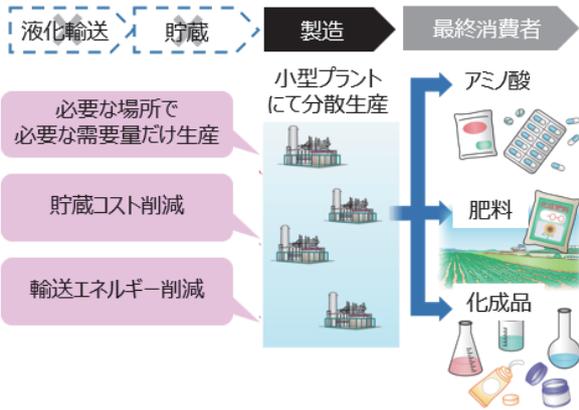


図4 オンサイトアンモニア生産システムにおけるサプライチェーン

可能エネルギー由来の電力を用いた水の電気分解によって製造される水素の使用が有望視されている。再生可能エネルギーを利用した発電は、規模が比較的小さいことやコストの地域差が大きいことが課題である。弊社では再生可能エネルギーを利用した小規模分散型のオンサイトアンモニア生産システムの初期検討として、再生可能エネルギーの生産に適した地域を調査している。例えば、ラオス国は水力発電が非常に盛んで国内需要を大きく上回る余剰電力を輸出しているが、農業で使用される化学肥料を輸入に頼っている。このケースでは、豊富な余剰水力発電を利用したオンサイ

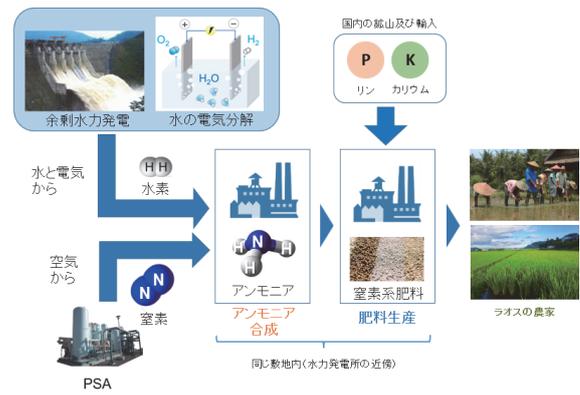
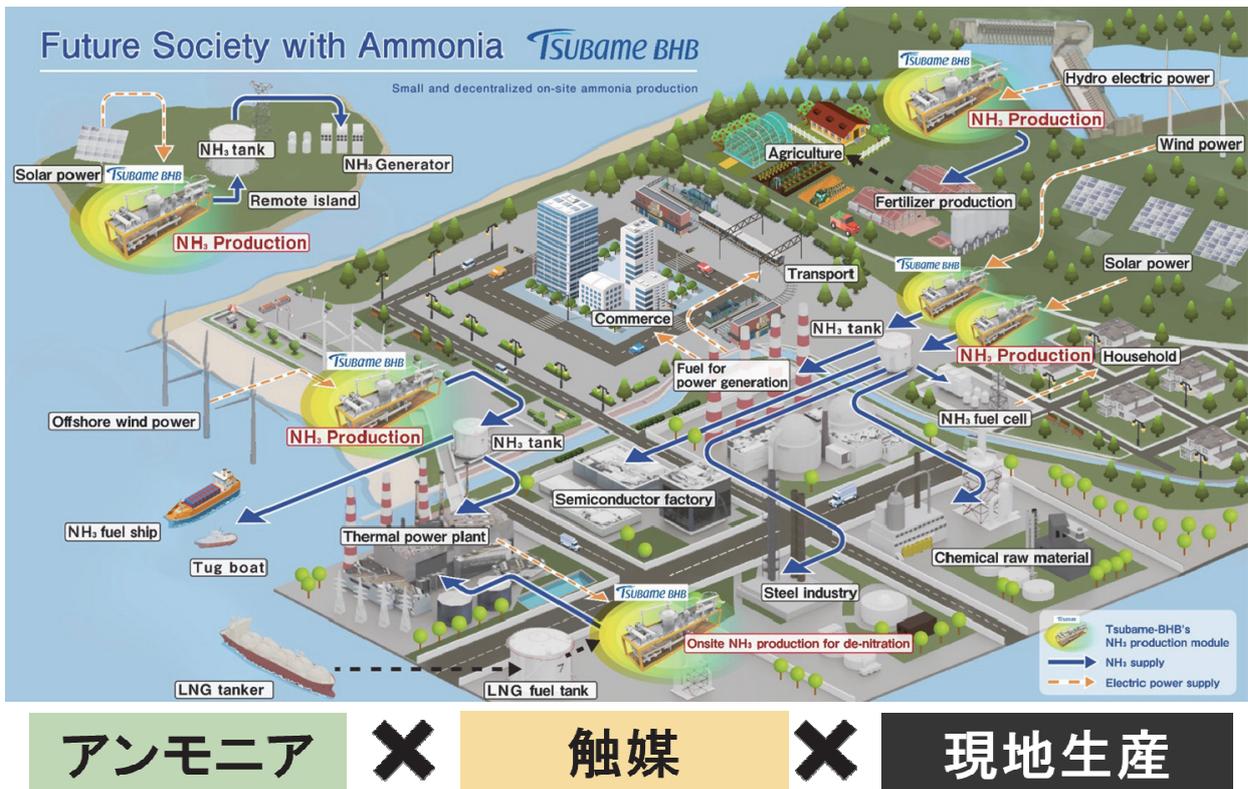


図5 再生可能エネルギーを活用したオンサイトアンモニア生産システム

トアンモニア生産システムおよび窒素肥料生産システムを構築できれば、グリーンアンモニアを原料とし、輸送・貯蔵にかかるコスト・二酸化炭素排出を削減した窒素肥料を現地の消費者に提供できる可能性がある（図5）。

弊社は洗練された従来の優れたHB法と競合するのではなく、それぞれの強みを生かした最適なシステムを提供することにより、エネルギー効率向上・脱炭素化を推進すると共に、地域社会の発展にも貢献していきたいと考えている。

以上述べた内容をモデル案として纏めたものを図6に示した。



アンモニア × 触媒 × 現地生産

図6 アンモニアを利用した持続可能な社会のモデル案

5 | おわりに

パイロットプラントでの運転実証試験では、成形したエレクトライド触媒の優れた活性、安定性、ハンドリングの容易さを確認することができた。

その成果を基に商業プラントの提案を複数進めており、既に国内向けでは商業プラントの受注がなされ実用化の段階に入ってきている。引き続き第二、第三の受注に向け具体的に案件の話を進めており、今後更なる装置最適設計・エネルギー効率向上・脱炭素化と併せアンモニアを必要としている国・地域への展開を推進している。

既に述べたグリーンアンモニアのラオス国への展開についても、現地側とのプロジェクト化についての交渉も進めており、実現化を視野に入れ取り組んでいく考えである。

地球温暖化対策として国際的に脱炭素化が声高に叫ばれている昨今、弊社としてもその一助となるばかりではなく、日本発の技術として国内・海外共に広く展開することにより地球環境保護・脱炭素化に向けた貢献ができることを切に願っている。

引用文献

- 1) Kitano, M., Inoue, Y., Yamazaki, Y., Hayashi, F., Kanbara, S., Matsuishi, S., Yokoyama, T., Kim, S.-W., Hara, M., Hosono, H., *Nat. Chem.*, 4, (11), 934 (2012) .
- 2) Kitano, M., Kanbara, S., Inoue, Y., Kuganathan, N., Sushko, P. V., Yokoyama, T., Hara, M., Hosono, H., *Nat. Commun.*, 6, 6731 (2015) .
- 3) 北野政明, 細野秀雄, 原亨和, ペトロテック, 39, (2), 127 (2016) .

水素基本戦略とリスクアセスメント

三宅 淳巳 (横浜国立大学)

1 はじめに

「世界の CO2 収支 (Global Carbon Budget)」によれば、2023 年の全世界の CO2 排出量は前年比 1.1% 増加し、368 億トンと史上最高記録を更新している。また、日本の 2021 年度の温室効果ガス排出量は 11.7 億トン (CO2 換算) で、2013 年度と比べて 16.9% 減ってはいるものの、前年度からは 2.0% の増加となっている。図 1 に 2019 年度における我が国の CO2 排出量と産業部門からのエネルギー起源 CO2 排出量を示すが、鉄鋼業、化学工業、機械製造業の 3 業種で全体の排出量の 63% を占めており、各業種での取り組みが進められている。

地球規模課題である脱炭素、カーボンニュートラル社会の実現に向け、その有力な施策として水素等による技術システムの導入、普及が進んでおり、2023 年 6 月に閣議決定された改定水素基本戦

略^[3]、2024 年 2 月に同じく閣議決定され 3 月に国会審議入りした水素社会推進法^[4] など、官民一体となった水素等の普及拡大が急速に進められている。ここでは、低炭素水素を製造・利用する企業の事業計画を政府が認定し、企業の設備投資に必要な資金などを補助することとしており、政府は 2050 年までに CO2 の排出量を実質ゼロにする目標を掲げるが、化石燃料を使う鉄鋼や発電などの分野は脱炭素が難しいとされる。低炭素水素を普及させることで、こうした分野での脱炭素の推進を狙うとともに、CO2 を回収して地下に貯留する事業のための環境を整備する CCS 事業法案も審議を開始した。政府が CO2 の貯留を担う事業者を選ぶ制度を設け、2030 年までに国内で民間事業者が CO2 の貯留事業を始められる環境を整えたと定めている。

水素基本戦略は水素産業戦略と水素保安戦略により構成されるが、革新的技術の導入、普及には安全・安心を大前提として進める必要があり、水

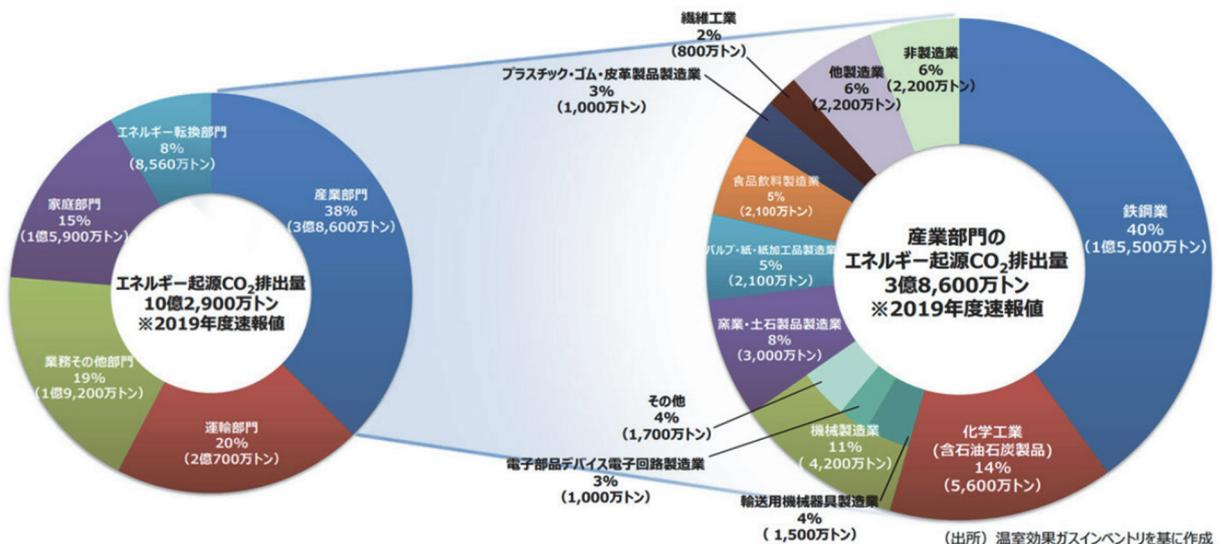


図 1 2019 年度における日本の産業部門からのエネルギー起源 CO2 排出量の業種別内訳^[1, 2]

素関連システムの社会実装を進めるためには、各システムのリスク低減を図ったうえで各ステークホルダーが残存するリスクと共生するという考え方を導入し適用することが有効な解決策となり得る。

筆者らはリスク共生概念に基づき、社会における多様なリスクに適切に対処して先端科学技術の社会実装を支援することを目的として社会総合リスクの概念を創出し、工学的な視点からのシステム内部のリスク評価にとどまらず、関係主体、開発段階、社会の価値観等を考慮したリスクアセスメント手法を提案してきた^[5]。本稿では、これまでの我が国の水素を主としたエネルギー戦略の経緯を概観し、内閣府戦略的イノベーション創造プログラム「エネルギーキャリア」において筆者らが実施した水素ステーションの安全性評価を中心に、リスク共生学の適用事例について紹介する。

2 我が国におけるエネルギー技術開発の変遷

我が国のエネルギー研究開発は、新エネルギー技術開発を目的としたサンシャイン計画（1974年～1992年）、省エネルギー技術開発を目的としたムーンライト計画（1978年～1992年）、そ

の後のニューサンシャイン計画（1993年～2002年）などにより国策として進められてきた。さらに、科学技術基本計画やエネルギー基本計画の中で、水素を日常の生活や産業活動で利活用する社会である“水素社会”の実現に向けた取組を加速することが定められ、2014年に水素社会実現に向けた水素・燃料電池戦略ロードマップの策定がなされた。この戦略ロードマップにおいて、水素社会の実現に向けて、これまで取り組んできた定置用燃料電池の普及の拡大及び燃料電池自動車市場の整備に加え、水素発電の本格導入といった水素需要の拡大や、その需要に対応するための水素サプライチェーンの構築の一体的な取り組みの必要性が示されている。さらに、2017年には世界で初めての府省横断での取組をまとめた世界で初めての水素戦略である「水素基本戦略」が閣議決定され、水素社会のシナリオが示された^[6]。また、2020年の菅首相（当時）による2050年カーボンニュートラル宣言、その後、2021年10月に閣議決定がされた「第6次エネルギー基本計画」では、水素社会実現に向けた取組を抜本的に強化する方向性が示されており^[7]、水素利用の普及・推進は政策的に重要な位置付けにある。2023年6月には、今般の社会情勢の変化を踏まえ「水素基

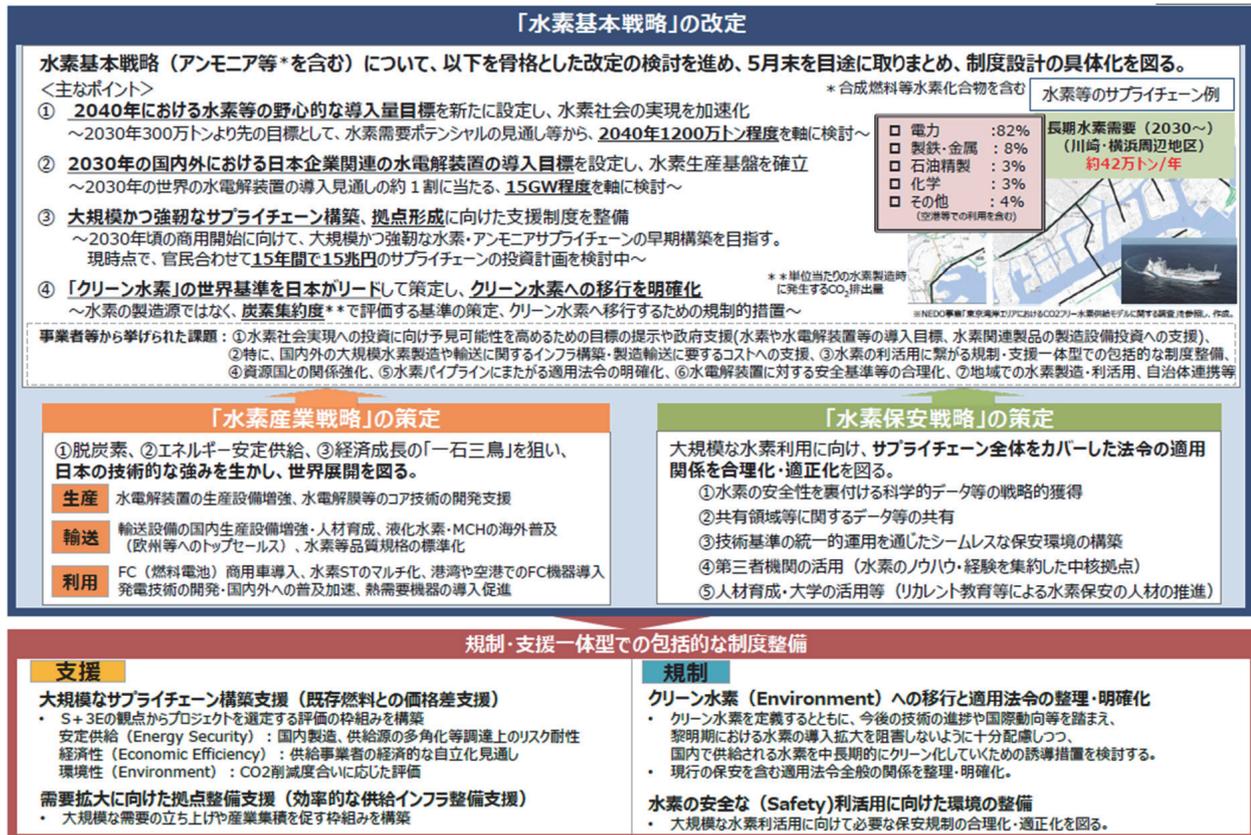


図2 改定水素基本戦略の概要^[8]

本戦略」の改定が行われ、より具体的な目標値が掲げられるとともに、官民一体となった水素社会の実現に向けた取組がますます加速している状況である^[3]。

3 | 水素ステーションの社会実装プロセス

燃料電池自動車の実用化に際しては、燃料電池自動車に安全かつ効率的に水素を充填し、燃料電池を適切かつ効率的に作動させる必要があり、さらに、その社会実装に際しては、燃料電池自動車が従来の燃料による自動車と同等以上の性能を有し、消費者の選択肢の一つとなる必要がある。ここでは燃料電池自動車およびそこに水素を充填する水素ステーションの性能向上という技術的課題とともに、高圧ガス保安法や消防法など、システムを取り巻く法規制の合理化や見直し、さらには消費者の心理や行動の変容を促すための社会受容性獲得など、社会的な課題が存在している(図3)。

筆者らは内閣府の戦略的イノベーション創造プログラム(SIP)「エネルギーキャリア」(2014～2018年度)において、社会総合リスクアセスメントを水素エネルギーキャリアに適用し、水素ステーションの安全性評価を実施してその有効性について検証した^[9,10]。水素エネルギーキャリアとは、「気体のままでは貯蔵や長距離の輸送の効率に課題のある水素を、液体や水素化合物にする

ことで効率的に貯蔵・運搬する方法」^[11]であり、液化水素、有機ハイドライド及びアンモニアを活用したCO2フリー水素バリューチェーン構築を目指して開発された技術である。エネルギーキャリアの安全性評価研究では、水素ステーションの社会実装を実現するために、水素ステーション及び水素輸送の社会総合リスクを特定し、その安全性を検討するための考え方を整理することにより、必要かつ合理的な対策や規制の検討を支援することを目的とした。特に、研究開始当初、水素ステーションは未だ導入段階であり、その将来展望において、水素ステーションの整備・運用費及び機器コストを下げることにより、2025年に320箇所、2030年に900箇所の設置を目指していた^[12]。そのため、水素ステーションや水素輸送などの水素サプライチェーンが大規模に普及する前に関連技術の計画・導入・普及段階の各リスクを洗い出し、対策や規制を事前に整理することが本プロジェクトの目的であった。なお、個別の詳細なリスク評価結果については、文献を参照されたい^[13,14]。

4 | 水素ステーションのリスクアセスメント

水素ステーションの社会実装には、施設や設備を安全かつ効率的に運用するための技術課題とともに、高圧ガス保安法、消防法、建築基準法等の

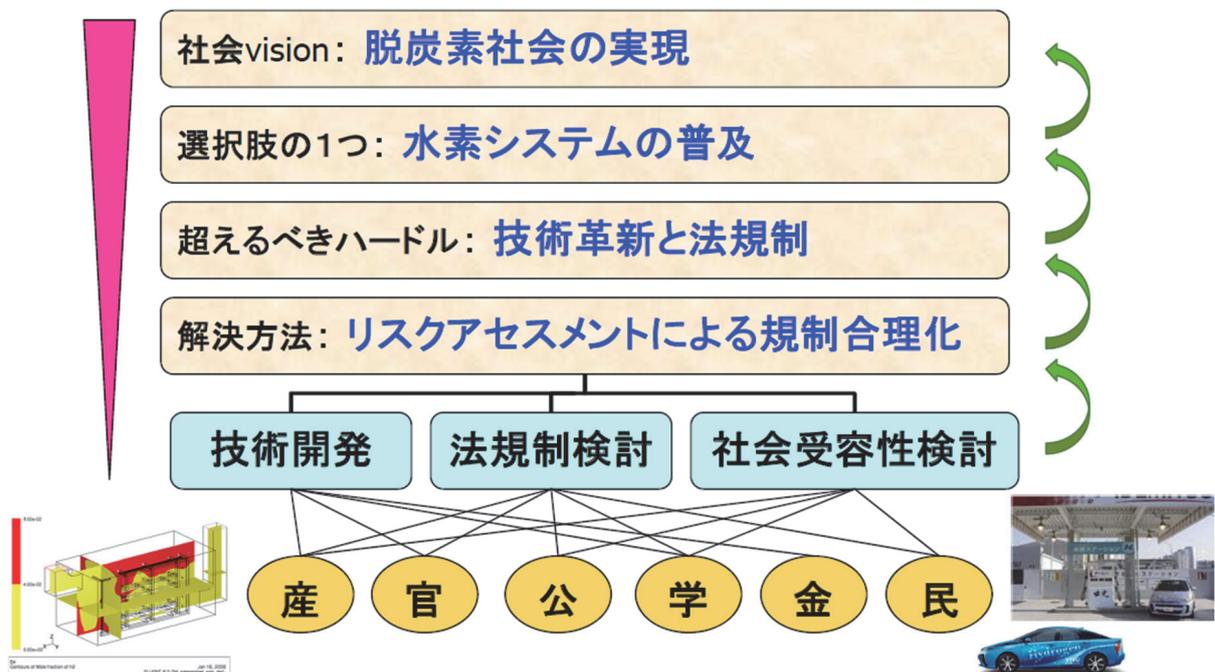


図3 水素ステーションの社会実装の考え方

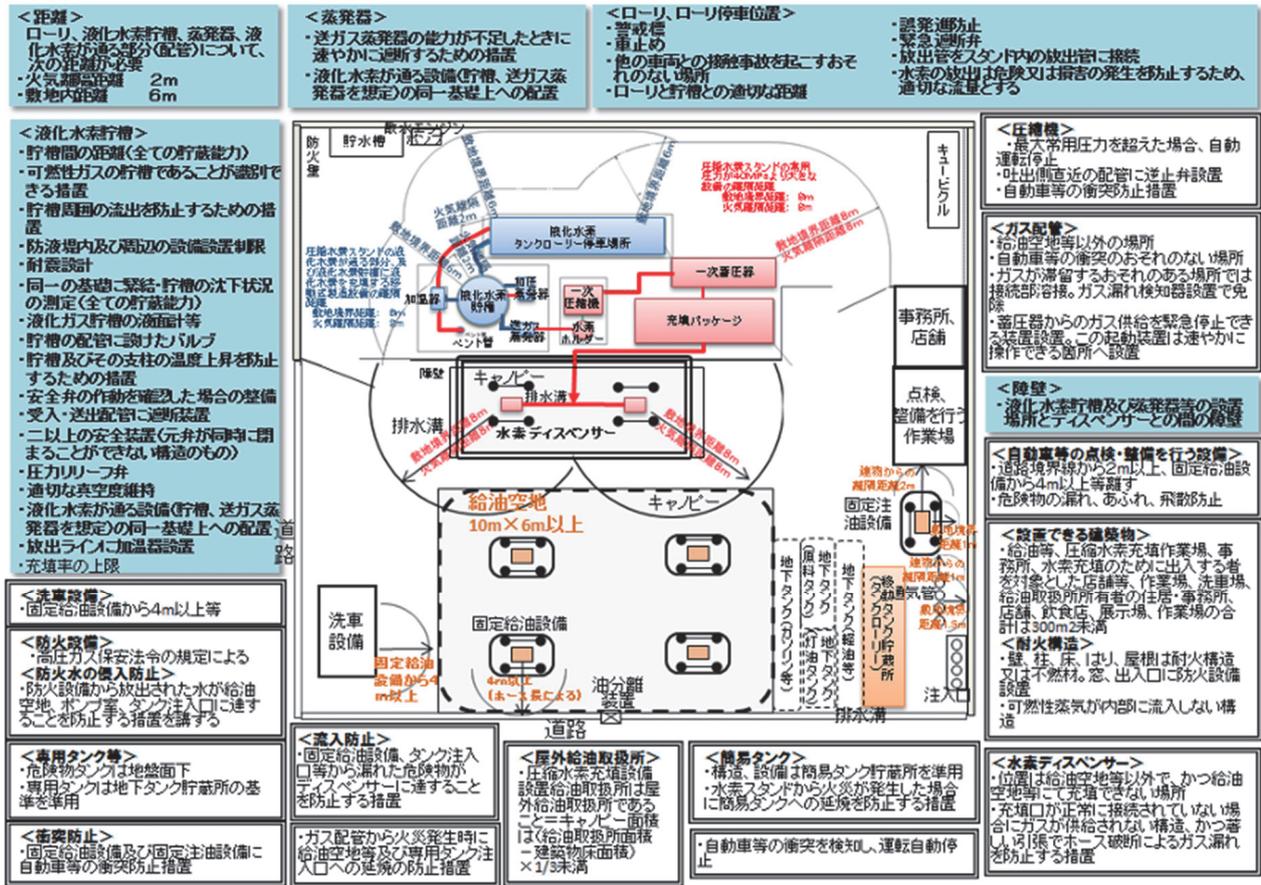


図4 リスクアセスメントに基づく液化水素貯蔵型圧縮水素スタンド併設給油取扱所のレイアウト例^[16]

保安規制をクリアする必要があるが、これら法規制定時には高圧水素を市街地で使用することは想定されていないため、まずステーションのモデルを構築し、モデルに基づいてシナリオ抽出を行い、抽出したシナリオについてひとつずつ、その発生頻度と影響度を算出しリスクの推定を行った。リスクアセスメントの結果、すでにその存在が社会的に認められているガソリンスタンドと同等以上の安全性が担保できた場合には、必要な安全要件を具備することを条件に水素ステーションの設置を認めることができるよう法規制や技術基準の策定を行い、社会実装を導くことができた^[15]。

また、ユーザーの利便性を高めるため、ガソリンスタンドと同一敷地内に水素ステーションを併設する水素スタンド併設給油取扱所についても検討を行い、図4に示す設備的要件と運用上の規定を整えることにより設置を許可することとなった^[16]。

5 有機ハイドライド型水素ステーションのリスクアセスメント

水素エネルギーキャリアとしては高圧水素、液化水素がすでに実用化されているが、より効率的

かつ安価に取り扱うための方法として期待されている技術システムに有機ハイドライドシステムがある。有機ハイドライドは石油燃料と同様に常温での液体輸送、貯蔵が可能であり、水素ステーションにおける水素供給設備の原料としての利用が検討されている。有機ハイドライドの一種であるメチルシクロヘキサン (MCH) は適切な条件で反応させることによりトルエンと水素を生成し、逆にトルエンは水素と適切な条件で反応させることによりMCHを生成する。この性質を利用し、タンクローリーなどでMCHを受入れてオンサイトでMCHから水素を生成させ、水素を燃料電池自動車に供給するとともに、トルエンをタンクローリーなどで払い出す施設がMCH水素ステーションである。払い出されたトルエンは、水素化されてMCHとしてリサイクルされる^[11]。図5にMCH/トルエン系による水素生成反応を、図6に有機ハイドライド型水素ステーションの全体スキームを、図7にMCHを用いた有機ハイドライド型水素ステーションのフィジカルリスクアセスメント結果を示す。リスクの評価では、発生頻度を4レベル、影響度を5レベルで分類し、安全対策実施前後でリスクの比較を行った。

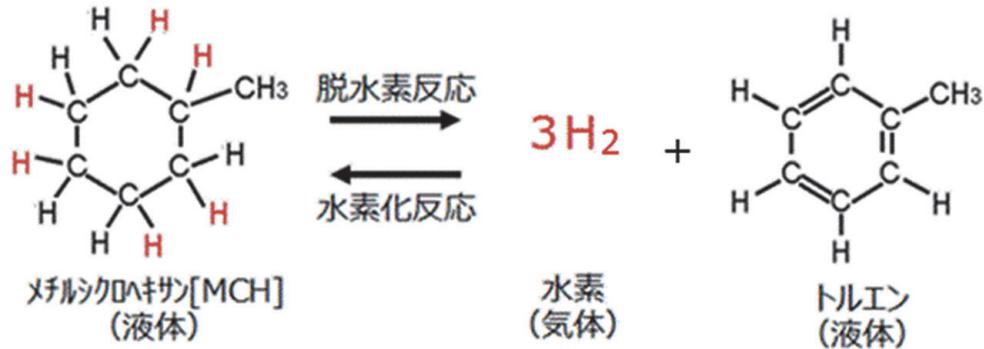


図5 メチルシクロヘキサン/トルエン系による水素生成反応^[17]

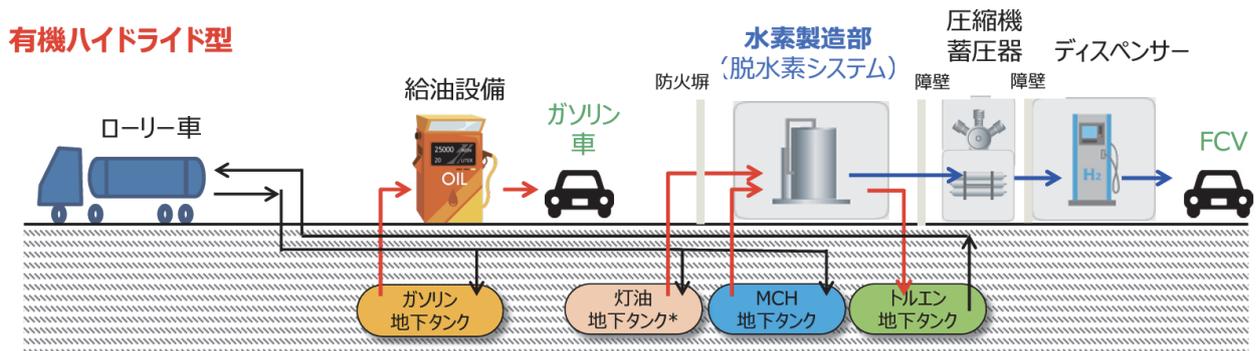


図6 有機ハイドライド型水素ステーション全体スキーム (給油取扱所併設型)^[11]

安全対策前		発生頻度			
		1	2	3	4
影響度	5	1	92	191	114
	4	2	31	73	45
	3	0	16	31	30
	2	0	0	0	0
	1	0	0	7	15

➔

安全対策後		発生頻度			
		1	2	3	4
影響度	5	0	0	0	0
	4	71	107	102	21
	3	92	108	61	1
	2	24	19	6	6
	1	8	9	3	10

図7 有機ハイドライド型水素ステーションのリスク評価例 (発生頻度及び影響度の段階は、数字が大きいほどリスクは大きくなる。)^[13]

図7のマトリクス中の数字は該当するリスクレベルのシナリオ数を示している。分析では、まずガイドワードに基づくリスクの洗い出し手法であるHAZID (Hazard Identification) studyを用いて重大影響シナリオの抽出を行った。本手法は、ガイドワードに外部ハザードを組み込むことで、ステーション内でのリスクだけでなく、自然災害等ステーション外のリスクの洗い出しも可能な定性的評価法である。また、可能な安全対策の実施前後でのリスクレベルを比較する

ことで、現行の安全対策の有効性を検証することが可能である。抽出された648件のシナリオについて、発生頻度と影響度のマトリクスで整理した結果、現行法で十分にリスク低減がなされていることが確認された^[10,13]。また、安全対策実施後のマトリクスにおいてリスクが最大と見積もられた発生頻度がレベル4 (十分に起こりえる)かつ影響度がレベル4 (重大な災害)となっている21件はいずれも自然災害由来のシナリオである。抽出された重大影響シナリオについては

より詳細な分析が行われる。特に、大規模災害時のリスクについては、災害防止対策にとどまらず、災害後の復旧までを含めたアセスメントが必要となるため、社会的損失も含めた詳細な分析を行うことが望ましい。

6 リスク共生概念と社会総合リスクガイドライン

リスク共生学とは、この世界に潜在する多様なリスクから社会や組織目的に応じて受け入れるリスクを我々が選択するために必要な学問体系である^[18]。AIやゲノム編集などの新規技術は社会を大きく変化させるポテンシャルを有している一方で、そのような技術は現行の法制度や倫理観に必ずしもそぐわない問題を既に社会に投げかけており、定められた制度の中でその解決方法を模索するだけでなく、人（社会）・制度・技術の要素を共变的かつ総合的に分析・評価・マネジメントする枠組みが必要となる。しかし、社会ニーズの適切な反映と共に、安全に係る規制の合理化、適正化や、新たなシステム導入により発生する多様なリスクへの事前の対応が不可欠であるが、十分な事前対応が実施されているとは言い難く、さらに社会におけるリスクの調整・最適化も複雑かつ困難である。社会に潜在するリスクは独立ではなく互いに連関しているため、各個別リスクへの最適な対応の集合が社会に潜在するリスク全体への対処としては必ずしも最適な対応とは言えなくなるため、より俯瞰的かつ大局的な視座に基づいたリスク選択に関する学問としてリスク共生学の成立に至っている。

水素ステーションは市中に建設され、一般ドライバーが水素の充填に利用する一方、施設周辺には一般市民が存在することから、コンビナートや工業団地等とは異なる前提でリスクを検討する必要がある。そこにリスク共生概念を導入する必然性がある。そこでは、技術的安全要件を満たすだけでなく、地域社会と共生するために地域住民や自治体とのコミュニケーションを含めた受容性の獲得が必要であり、フィジカルリスク分析の他、環境、経済、社会制度等に関するリスク分析結果を統合した総合的な評価が必要となる。導入から普及段階にある水素ステーションではリスクを絶対評価することは困難であり、そのような場合には既に社会に受容されている既存のシステムとの比較によって評価することが有効である。以上の検討に基づき、水素ステーションの社会総合リス

クを検討するためのガイドラインを作成し公表した^[9]。

7 おわりに

本稿では、これまでの我が国の水素を主としたエネルギー戦略の経緯を概観し、社会実装を目的としてリスク共生概念に基づいて筆者らが実施した水素ステーションのリスクアセスメントについて概説した。

今後、水素システムに限らず、多くの分野において科学技術システムの開発、導入、実装が予想されることから、研究開発から普及までの各段階において、社会総合リスクの観点から定性的または定量的なリスクアセスメントを実施し、評価の前提条件や限界を明示した上で適切なリスク対応およびリスクコミュニケーションを含むマネジメントを実施することにより、透明性の高い意思決定プロセスに基づいて社会実装を進めることが期待される。

引用文献

- [1] 環境省 <https://www.env.go.jp/content/900445401.pdf> (2024年3月1日閲覧)
- [2] 経済産業省, 温室効果ガス排出の現状等, https://www.meti.go.jp/shingikai/sankoshin/sangyo_gijutsu/chikyu_kankyo/ondanka_wg/pdf/003_03_00.pdf (2024年3月1日閲覧)
- [3] 再生可能エネルギー・水素等関係閣僚会議, 「水素基本戦略」令和5年6月6日, https://www.cas.go.jp/jp/seisaku/saisei_energy/pdf/hydrogen_basic_strategy_kaitei.pdf (2024年3月1日閲覧)
- [4] 資源エネルギー庁「脱炭素成長型経済構造への円滑な移行のための低炭素水素等の供給及び利用の促進に関する法律案」2024年2月13日, <https://www.meti.go.jp/press/2023/02/20240213002/20240213002.html> (2024年3月1日閲覧)
- [5] 横浜国立大学リスク共生社会創造センター, 「先端科学技術の社会総合リスクアセスメントガイドライン」, 2017.
- [6] 再生可能エネルギー・水素等関係閣僚会議, 「水素基本戦略」平成29年12月26日, https://www.cas.go.jp/jp/seisaku/saisei_energy/pdf/hydrogen_basic_strategy.pdf (2024年3月1日閲覧)

- [7] 第6次エネルギー基本計画, <https://www.meti.go.jp/press/2021/10/20211022005/20211022005-1.pdf> (2024年3月1日閲覧)
- [8] https://www.cas.go.jp/jp/seisaku/saisei_energy/kaigi_dai3/shiryoku2.pdf (2024年3月1日閲覧)
- [9] 横浜国立大学, 「水素ステーションの社会総合リスクアセスメント書」, 2019. <https://www.jst.go.jp/sip/dl/k04/end/team10-2.pdf> (2024年3月1日閲覧)
- [10] 科学技術振興機構, 戦略的イノベーション創造プログラム「エネルギーキャリア」終了報告書, 2019. <https://www.jst.go.jp/sip/dl/k04/end/team10-0.pdf> (2024年3月1日閲覧)
- [11] 石油エネルギー技術センター, 有機ハイドライドを用いた水素スタンドの技術基準 JPEC-S 0010(2020), 2020年3月30日制定 https://www.pecj.or.jp/japanese/committee/pdf/jpec-s_0010.pdf (2024年3月1日閲覧)
- [12] 水素・燃料電池戦略協議会, 水素・燃料電池戦略ロードマップ～水素社会実現に向けた産学官のアクションプラン～, 平成31年3月12日
- [13] J. Nakayama, J. Sakamoto, N. Kasai, T. Shibutani, A. Miyake, Preliminary hazard identification for qualitative risk assessment on a hybrid gasoline-hydrogen fueling station with an on-site hydrogen production system using organic chemical hydride, *International Journal Hydrogen Energy*, Vol.41, pp.7518-7525, 2016.
- [14] 産業技術総合研究所, 「水素ステーションとその周辺のリスク評価書」(2019年1月28日), 2019. <https://www.jst.go.jp/sip/dl/k04/end/team10-3.pdf> (2024年3月1日閲覧)
- [15] 経済産業省, https://www.meti.go.jp/shingikai/energy_environment/suiso_nenryodenchifukyu/pdf/006_02_00.pdf (2024年3月1日閲覧)
- [16] 消防庁, 「液化水素スタンドを給油取扱所に併設する場合の安全性に関する検討報告書」 https://www.fdma.go.jp/singi_kento/kento/items/kento143_14_houkokusyo.pdf (2024年3月1日閲覧)
- [17] 石油エネルギー技術センター, 有機ハイドライド水素スタンドの概要(技術基準案等の作成に向けた取り組み状況について), 2017年7月21日 https://www.fdma.go.jp/singi_kento/kento/items/kento223_07_shiryoku1-4-1.pdf (2024年3月1日閲覧)
- [18] 横浜国立大学先端科学高等研究院リスク共生社会創造センター, 「リスク共生学」, 丸善出版, 2019.

総合討論

目黒：IGES-JISE 市民環境フォーラム「地球温暖化に対する研究と実践的取り組みについて」での、ご講演ありがとうございました。視聴参加者からの質問で、日本は地震国であり、地熱発電の利用の可能性について教えてください、とありました。先程、石原さんのご講演のエネルギーやエントロピーの話と関連ありそうなので、できればお願いします。

石原：ご指摘のとおり、日本は火山国であり、地熱発電は有効だと思います。例えば、別府温泉を持っている大分県は再生可能エネルギーの自給率は全国一位、供給率は全国二位ですね。非常に地熱発電は有効な方法だと思いますが、実際には、国立公園の中にあつたり、熱を使うことで温泉が枯渇するという話があつたり、技術だけでなく、政治的・経済的な問題もあります。それでも、地熱発電は有効な手段だと思いますので、使ってゆくべきだと思います。

目黒：ご講演中に少し話されていましたが、熱自身を取り出して使うってということではどういうやり方があるのでしょうか？なかなか利用しにくい形なのかなとは思いますが。

石原：温度の高いところにある熱っていうのはあまりないですからね。例えば、太陽光発電は直接太陽の光を電気に変えています、それとは別に、太陽の表面温度はおよそ 6000 度なので、上手に集光できれば、かなり高い温度の熱が得られます。その熱を利用する太陽熱発電があります。スペイン南部のセビリヤには、集光型太陽熱発電所が建設されています。また身近なところでは、昔ながらのお湯を温めて使うこともできます。太陽熱発電のように非常に高温の熱が得られれば、それを利用して、そのエネルギーを物質に変換して運んで都市で使うような試みも行われています。ただ熱に変えてしまうと、基本的に温度の高いところから低いに移動しようとするので、太陽光はそのまま光のエネ

ルギーとして使うのがいいのかなという気はします。

目黒：ありがとうございます。依田さんへの質問です。アンモニアの新しく開発された装置が従来よりもかなりコンパクトに製作・設置出来るようになったってということですね。実際の使用場所の国や地域で製作するのか、あるいは日本から運ぶような形になるのでしょうか。

依田：基本的には使用場所は従来の大型アンモニア製造装置の設置が難しい、あまり工業的に発展してないところが多いです。装置は極力モジュール化・コンパクトなサイズとして（幅 3m 程度、40 フィートコンテナ長さ 12m 以内など）、輸送条件も勘案しつつ基本的には現地工事は極力減らすようにしています。モジュール型装置製作は、正直なところ日本ではなかなか価格競争で難しく、例えば中国、ベトナムなどが中心になるかなと思っています。

目黒：その装置小型化するにあたって、具体的にご苦労されたことはございますか。

依田：そうですね。ハーバーボッシュ法とか従来法に比べて低温低圧でアンモニア合成できるので小型化に向いている設計となりますが、可燃性ガス（水素など）・毒性ガス（アンモニア）を扱うので、それらに対応した上で極力コンパクトに収めることと製作のしやすさに苦慮いたしました。加えて高圧ガス保安法などの法規対応も考慮しながらコンパクトな装置にして行くと言うところが難しいところでした。

参加者：実際にこれから大量に脱炭素燃料といわれる水素並びにアンモニアといったものをどう社会実装していくのか。社会の受容性なくして多分事業化できないと思いますし、どのようなステップを踏んでいくのかをこれからよく考えなきゃいけないと感じました。

高圧ガス保安法、それからガス事業法、電気事業法といった、いわゆる事業法で同じ設備を扱うのですけれども、事業が違うことによって法体系が異なる。これを水素に統一した形の法律体系に今後変えていこうとするのか、それとも従来の枠組みを残しつつ、技術基準というものを統一して行くという方向に行くのか？そういった議論というのは、あったかどうか。といった水素に関する保安戦略について教えて頂ければと思います。

三宅：はい、ご質問ありがとうございます。経済産業省の検討会の中では、そのような議論は非常に活発に行われました。社会の大きな要請としてカーボンニュートラルとか脱炭素の一つの大きな選択肢として、水素やアンモニアの活用があると思います。その水素に関してはいろいろな法律の網がかかっている。しかしながら水素という切り口で見て、例えば水素事業法というような法律を新たに作ることに議論がありましたが、それに関しては検討会の中で結論は出ていません。ただし、そういったことも踏まえて、その検討の俎上には載せていこうということです。ですから、当面は現行の法律の中で考えていくのですが、先を見通して新しい法律を作るかどうかということの検討も議論の一つのトピックスになります。例えば、韓国ではすでに水素法という法律が数年前にできています。これは、水素に関する事案をすべて取り扱うというのではなく、すでにある法体系ではカバーできない部分については、その水素法で取り扱うという枠組みになっています。ほかの諸外国も含めた国際整合というのも必要ですので、こういった形で法を合理化、適正化していくかというのはこれからの議論になると思います。

ですから回答としては、議論はなされているが、現時点では結論が出てないので、当面は現行の法体系の中で考えていく。新たな法律については、スピード感を持ってやっていくということちょっと玉虫色の表現で書かれているということになります。

【水素社会推進法及びCCS事業法は、2024年5月17日に開催された第213回通常国会の参議院本会議において可決・成立し、5月24日に公布されました】

参加者：ありがとうございます。実際2030年は

すぐ来ますので、非常にその動向自体に高い関心がございます。

目黒：三宅さん、実装する時の社会受容性の話は研究とか工学とはちょっと違う領域になると思うのですが、実際どういう形で精査されるものなのでしょうか。

三宅：はい。一般論として、実装に当っては社会受容性の獲得が必要なわけですが、まずは技術的課題と法的課題をクリアするというのが大前提です。それでも、一般市民の方々とか不安感を持たれる方へ、きちんと技術の説明ですとか、あるいは連絡体制や万一避難が必要な場合のシナリオを描いて示していく。つまり、密室で決定された話ではなくて、議論のプロセスを透明化して、その情報提供を必ず行うことだと思います。

社会実装においては、技術開発や運用の検討過程において、モニタリングをしながら早い段階から常にステークホルダーとの議論をして、それを技術開発に取り組んでいくということが求められています。情報提供、議論の透明性、それからエビデンスに基づいて客観的な結論を導く。そういうスキームをまず示しておいて、議論の進め方に対してみんなが合意できるようにする。そして、一つの技術或いは一つのトピックスに関するリスクだけを考えるのではなくて、いろいろな技術が複層しており、多様なステークホルダーのことを考慮して、複眼的に見て折り合う着地点を見出すことが、これから求められるリスクマネジメントの在り方になってくると思います。ゼロリスクではないということ、メリットとデメリットがどんな技術にもあるのだということをきちんと議論の俎上に載せるということですね。そして、同じ土俵に上がって議論をする時に、共通言語としてのリスクという概念を皆さんがご理解いただいた上で、議論を進めて最終的に合意形成に至るようにする、こういうプロセスが重要だと思います。

もう一つは大きな意味で、その社会的な利益ですね。脱炭素は非常に大きな社会的な命題となっており、地球規模の課題です。これを実現するための必要な技術要件をはめ込んだ議論が必要だと思います。ただし、そのためのリソースの投入が必要になることを忘れてはならない。ここでいうリソースとは単にお金だけでは

なくて、ヒューマンリソース、情報、あるいは時間も含まれる。そのようなリソースをどこに投入するかというのが、大きな社会の意思決定に影響してくる大事なファクターだと考えています。

目黒：ありがとうございます。かなり様々な事を想定するする必要があり、透明性やステークホルダー、考え得るシチュエーションを考慮したうえで関係者が納得していただくように精査していくことが一番大事なのですね。

三宅：そうですね。共感を得るということが重要ですね。

目黒：どうもありがとうございます。予定時刻を過ぎてしまっていますので、本日のフォーラムはこれで終わりたいと思います。皆さんお忙しいところお集まりいただきまして、貴重なお時間を頂き感謝いたします。また、質問や提案等ありましたら私のところへ送ってくださればよろしいかと思います。本日はどうもありがとうございました。

三宅・石原・依田：ありがとうございました。失礼します。

(文責：目黒・尾崎)

JISE REPORT No.11

2024年6月21日印刷
2024年6月28日発行

発行：公益財団法人地球環境戦略研究機関国際生態学センター：IGES-JISE
<https://jise.jp/jp/> ; E-mail: jise@iges.or.jp
〒240-0115 神奈川県三浦郡葉山町上山口 2108-11

印刷：株式会社彩流工房
〒231-0862 神奈川県横浜市中区山手町 24-11 徳永山手ビル 201 号
TEL : 045-222-7611 FAX : 045-222-7612

