

デンマークの自然エネルギーの到達点と 新型コロナウイルス感染症の発生変動に関する一考察

鷺見紋子¹、大友詔雄²

¹ 札幌医科大学 医療人育成センター 教養教育研究部門 物理学

² 株式会社 NERC (自然エネルギー研究センター)

Study on the Development Situation of Natural Energy and the Temporal Variations of COVID-19 Reported Cases in Denmark

Ayako Sumi¹, Norio Ohtomo²

¹ Division of Physics, Department of Liberal Arts and Sciences, Center for Medical Education, Sapporo Medical University,

² Natural Energy Research Center, Co., Ltd.

北海道と人口および耕地面積が同規模の国であるデンマークは福祉国家として知られるだけでなく、現在は自然エネルギーの大国でもある。筆者らのデンマークとの関わりを踏まえて、自然エネルギーの到達水準を紹介し、デンマークの新型コロナウイルス感染症(COVID-19)の発生数データから見えた興味深い結果を紹介する。デンマークの麻疹流行は非線形力学系の特性を持ち、その特性とコミュニティの人口サイズとの間に特有の関係がある。デンマークのCOVID-19の発生数も同じ特性を持つことから、人口規模が大きくなると、“自己組織化”構造を生成する時間的・空間的な人々の行動が重要な要素になると考えられる。

Denmark is a country with population size and agricultural land area similar to those of Hokkaido (Japan). It is known as a welfare state and is among those countries with high use of natural energy. On the basis of our relations with Denmark, the development situation of natural energy is described briefly, and an interesting result relating to the number of reported cases in the outbreak of Danish COVID-19 is discussed. The measles outbreak in Denmark had the special characteristic of a nonlinear dynamic system related to population size. As reported cases of COVID-19 in Denmark also have the same characteristic, it is considered an important factor that the spatiotemporal pattern of activity of the population generates a self-organizing structure.

Key words: Denmark, natural energy, COVID-19, dissipative structure, self-organization

1. 1995年頃のデンマークの到達点

福祉国家として有名なデンマークは、医療費無料、出産費無料、教育費無料、充実した高齢者サービスなど、社会福祉がとても充実している。このデンマークは北海道と良く似ている点が多く(人口規模や耕地面積は北海道とほぼ同じ)、筆者の一人(大友)は、北海道の自然エネルギーを推進するに当たって、デンマーク

がモデルになるのではないかと考えた。そこで1995年に、コペンハーゲンの高齢者施設の視察と、当時の自然エネルギーの研究開発の先進地であったフォルケセンターを訪問した。そして1998年に、もう一人の筆者(鷺見)が、ポストドクターフェローとして、デンマーク・オーデンセ大学オールセン研究室に留学した。先ずその時の感想から記述したい。

(1) コペンハーゲンの高齢者施設

コペンハーゲンの高齢者施設では、今でも鮮明に記憶していることがある。施設を訪れた時、副所長(女性)の説明では、「現在は1人1室が基準の広さとなっていますが、政策が変わり、これからは、1人2部屋が基準になります」。1人1部屋と言っても、浴室やトイレも広く(車椅子対応)、部屋の雰囲気もホテル並みであっただけに、これには驚いた。「何が問題で広くするのですか?」と尋ねたところ、「特に問題が有る訳では有りません。福祉は人がするものですから、部屋の広さや設備を良くすればよしとするものでは有りません」。この答えに再び驚くとともに感心した。

(2) フォルケセンター

フォルケセンター¹⁾では、デンマークの反原発の先頭に立っていたプレーベン・メゴード所長が、所内を隈なく案内してくれた。随所に創意・工夫に溢れた興味深い“もの”があった。例えば、直径20mほどのガラス張りの球体の中に、自己完結型の生態循環システムを人工的に作り上げて、自然界の生態系の循環とはどのようなものかを研究していた。今日世界的に最重要課題となっている「循環」の内容を具体的に追究したのである。所長曰く「何事も実際にやってみること。日本人は、能力が高く、教科書に書いてあることをしっかり覚えていて、余計なことはしない。デンマーク人は先ずやって失敗から学ぶことが多い」。

(3) デンマーク・オーデンセ大学オールセン研究室

“目から鱗が落ちる”話は沢山あったが、次の話題に移りたい。ポストドクターフェローとして留学したデンマーク・オーデンセ大学オールセン研究室のことである。

ラーズ・オールセン博士は、再帰性感染症の理論研究の第一人者で、感染症の発生変動は“カオス”(内在的自己組織化現象)であるとする論文を発表していた²⁾。今なお深遠な世界となっているテーマである。日本から来た若手研究者が、そうしたテーマを研究し学位を取得したということもあって、デンマークの国営テレビが1時間にわたって講演をTV放映した³⁾。その後の“感染症のカオス特性”に関する研究成果は、「時間感染症学」として成書にまとまった⁴⁾。

2. 再帰性感染症の“カオス”研究

(1) バタフライ効果

流行性感染症は、いくらかのゆらぎを伴って、非常

に規則的に発生すること(再規性)が広く観測され、近年流行のふるまいを決定論的カオスとして説明することが試みられている。しかし、これまでのカオスの研究方法では、流行の変動パターンの時間的構造を十分に解明することができていなかった。その理由を、数学者ロバート・メイ博士は、“感染症発生変動の時系列データの長さは、最も長いニューヨークのデータで、せいぜい40年(データ点数は月単位で500点)であり、信頼できる解析には短すぎる”と指摘した⁵⁾。確かに、感染症の発生データの長さは非常に短い。例えば、日本の感染症サーベイランスデータは、最長でおよそ10年間(週単位で500点)しかない。

しかしながら、“カオス変動”は、時々刻々その規則性を変え(バタフライ効果⁶⁾)、気象学者エドワード・ローレンツ博士が「正確な長期予測は困難である」と指摘している⁷⁾ように、長いデータは仮にあって使うことが出来ず、セグメントに分割した短いデータとして扱うことが必要である。このようなことで、短いデータ長の時系列の時間的変動構造を解明することを可能にする時系列解析の新しい方法が望まれていた。我々が構築した「MemCalcによる時系列データ解析方法」は、こうした短いデータ長も解析できる方法である⁸⁾。

我々は、感染症の数理モデルであるSEIR(susceptibles/exposed/infectives/recovered)モデル⁴⁾から生成された時系列の解析結果と実測データである感染症データ(麻疹、水痘、ムンプス、風疹)の解析結果を比較し、感染症流行のメカニズムを解明した^{4,8)}。完全に決定論的な方程式によって記述されるSEIRモデルから生成された時系列に観測される不規則変動は、その系に内在して発生するものであり、外部から雑音が付加されたために起こるものではない(このような不規則変動を“決定論的カオス”と呼ぶ)。このため、従来のノイズ(雑音)の捉え方に基づく時系列解析法ではカオス時系列を扱うことが本質的に妥当ではないことになる。

(2) カオス時系列のパワー・スペクトル密度が示す指数特性

カオス時系列であるレスラー、ローレンツそしてダフィング・モデルのような決定論的な非線形力学系から生成された時系列のパワー・スペクトル密度(PSD; power spectral density)⁹⁾が指数特性を持つことが明らかになっている。一方、麻疹、水痘、ムンプス、そして風疹の発生データのPSDも指数特性を持つという結果を得ている¹⁰⁾。この結果は、我々の論文や書で提示してきた理論的・実験的研究成果から考察すると、4つ

デンマークの自然エネルギーの到達点と新型コロナウイルス感染症の発生変動に関する一考察

の感染症の発生が決定論的な非線形力学系に基づいていることを示している。

(3) 指数スペクトルと人口サイズの関係

指数スペクトルは、人口サイズとの関係を見ると、興味深い結果を示す。図1は、イギリス、アメリカ、デンマークの麻疹流行の非線形力学系の特性とコミュニティの人口サイズとの間の関係を明らかにした結果である¹¹⁾。

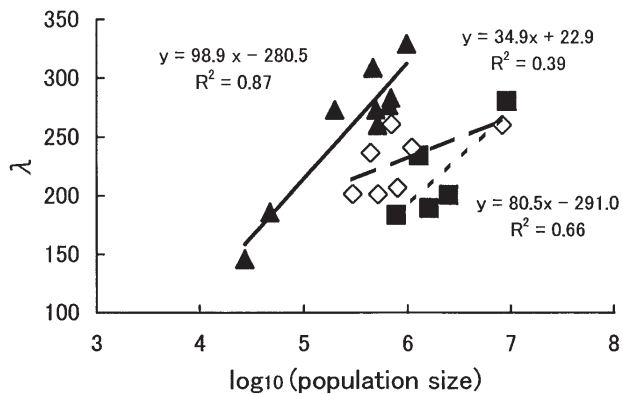


図1

パワー・スペクトル密度 (PSD; power spectral density) の傾き (λ) の人口密度に対するプロット：デンマーク (▲)、イギリス (◇)、アメリカ (■)。傾きの線形回帰直線を実線 (デンマーク)、破線 (イギリス)、点線 (アメリカ) で示す¹¹⁾。

一般に流行性感染症発生の力学系がカオス系に基づいている場合、発生数データの PSD は指数特性を示す。

以下、デンマークの解析結果で得られたこれらの特性を紹介する (表1)。デンマークのコミュニティの中で、コペンハーゲンとシェラン島データの PSD の傾き λ が最も大きい値を示す。PSD の低周波数領域のスペクトルパワー値の増加によるものであり、これはカオス現象に特有の周期倍分岐によって起きた支配的な離散ピークの出現によるものである。

フン島と4つのユトランド半島のコミュニティ、合計5つのコミュニティに関しては、傾き λ がコペンハーゲンとユトランド半島の場合よりも小さく、そしてボーンホルム島とファロエ島の場合よりも大きい。したがって、5つのコミュニティの傾き λ の比較的大きい値は、各 PSD の低周波数領域における小さいスペクトルパワーと、時系列データに混入する非決定論的なノイズが少ない (高周波数領域のスペクトルパワーが小さい) ことの結果である。そして、ボーンホルム島とファロエ島の傾き λ が最も小さいのは、前述の5つのコミュニティと比較して、多量の非決定論的ノイズが存在するためである。

結論として、デンマークの場合にみられた人口サイズの増加とともに傾き λ が増加する (図1)。ウイルスの繁殖の問題は、基本的にはその繁殖を保障する条件が満たされることが先決であるから、人間に蔓延するウイルスが人口サイズに依存することはこれまで指摘されてきた¹²⁾通りであるが、「人口→大⇒傾き→大」の理由が大切であり、それは次のように説明することが可能である；人口サイズの増加に従って、カオス的特性である周期倍分岐過程による長周期モードが PSD の低

表1

デンマークのコミュニティのデータ期間、人口サイズ、PSD の指数特性：傾き

(a) コミュニティ	(b) 期間	(c) 人口サイズ	(d) PSD の傾き
(1) コペンハーゲン	1920-1967	686,000	283.4
(2) シェラン島	1920-1967	979,000	329.4
(3) ユトランド半島東部	1920-1967	657,000	277.0
(4) フン島	1920-1967	511,000	260.4
(5) ユトランド半島西部	1920-1967	492,000	273.3
(6) ユトランド半島北部	1920-1967	460,000	308.9
(7) ユトランド半島南部	1920-1967	198,000	273.4
(8) ボーンホルム島	1920-1967	47,000	186.1
(9) ファロエ島	1912-1967	27,000	146.1

周波数領域の支配的なピークとなり、一方、時系列データに混入する非決定論的ノイズの減少により高周波成分が急速に減少するためである。このことの更に深い考察は後述する。

3. 今日のデンマークの到達水準

それから20数年経った2020年の現在、デンマークの自然エネルギーの到達水準はどうなっているのか？福祉国家と言われるデンマークの新型コロナウイルス感染症の発生状況はどうなっているのか？特に後者については、入手した発生数データを解析した結果に焦点を絞って紹介したい。

(1) 自然エネルギーの到達水準

自然エネルギーについては、風力発電と有機性廃棄物のメタン発酵の普及状況は相変わらず世界のトップを走っており、また地域熱供給では世界をリードしている。

風力発電

近現代の風力発電はデンマークに始まる。主として脱穀・製粉・製材などの動力として用いられた多翼型オランダ風車と違って、デンマークの風車は、現在の3枚羽根の発祥となっている。1800年代に既に風車で電気を起こし、その電気で水素を製造する発想はデンマークのポール・ラクールによる¹³⁾。因みに、風力発電の発電効率は、理論的には、羽根の枚数が少ないほど、羽根が大きいほど（羽根の先端の速度が早いほど）優れている。従って、現在の風車は、かつては想像できないほど大型化している。現在世界最大の風車は、オランダのロッテルダム港にそびえ立つ羽根の直径220mの、出力12MWの風車であり、これは16,000世帯の電力をまかなえる。

写真1は、高さ250mまでの風車を試験できる世界で唯一の施設があるデンマークの田舎町ウスタイル(Østerild)の写真である。デンマークの風力業界の実力を見ることができる場所として有名で、現在7基の試験用の大型風車が設置されている¹⁴⁾。

こうした風力発電の数は、人口比でみると世界一であり、電力自給率では優に100%を超えている¹⁴⁾。実は北海道の風力発電による発電ポテンシャルは、デンマークに匹敵する。かつて、先に紹介したフォルケセンターのメゴード所長は、デンマークに原発建設計画が浮上した時、「デンマークには原発の電気はいらない」として、反原発の先頭に立った。原発推進者達から、「原発1基の発電量は、何千基もの風力発電機が必要と

なる」と非難を受けたとき、彼は「かつてデンマークには、何万基もの風車があった」と言って、「デンマークに原発は作らない」という国会決議を引き出した。その翌年旧ソ連のチェルノブイリ原発災害が発生した。

バイオガス

生ごみや下水汚泥、家畜の排せつ物などの有機性廃棄物が、電気と熱を作り出す原料になることは良く知られた技術である。メタン菌が、有機物を餌として、バイオガスと呼ばれる可燃性ガス(CH₄60%、CO₂40%)を生成する。廃棄物が有用物(資源)になる典型的な事例である。デンマークのバイオガスの歴史は、風車と違った経過をたどっている。1990年代後半、初期のデンマークのバイオガスは大型施設として始まった。家畜の排せつ物や都市の生ごみなどを半径30km四方から運び、メタン発酵で発生した電気は送電線で全土に、熱は数km離れた都市に送った。

そして今は、小中規模のバイオガス施設がデンマークの全土に限なく分布している¹⁵⁾。この状況を北海道のバイオガス施設の普及状況と比べると、北海道の普



写真1 デンマーク・ウスタイル(Østerild)に設置されている風車の風景

デンマークの自然エネルギーの到達点と新型コロナウイルス感染症の発生変動に関する一考察

及状況は著しく少ない。この最大の原因は、電力会社が「送電線の容量が無い」としていることにある。

バイオガスに含まれるCO₂はカーボンニュートラルという考え方で、大気中のCO₂を増やすことにならないとされているが、気になる所である。実は、CO₂も有用な資源になる。植物の炭酸同化作用はその事実を体現しているが、このメカニズムを人類は未だ技術として実現できていない。しかし、CO₂を原料にする「サバティエ反応」¹⁶⁾というメカニズムは技術的に実現している。簡単に説明すると、風力発電や太陽光発電などの電力があれば、水の電気分解で生成する水素とCO₂を結合させることでメタンガスに転換させることが出来る。ドイツの有名な自動車メーカー・アウディが、E-gasと名付けて天然ガス自動車の燃料として使っている。こうしてCO₂が有用な資源になることが示された。

地域熱供給：第4世代地域熱供給

第4世代地域暖房(4GDH; The 4th Generation District Heating)システムは、スマート熱グリッドによって、持続可能なエネルギー・システムの適切な発展を支援する合理的な技術的且つ制度的概念として定義される。4GDHシステムは、低いグリッド損失をもつ低エネルギー建物の熱供給を提供する。そこでは、低温熱源の利用が、スマート・エネルギーシステムの運用に統合される。デンマークの地域熱供給は、当初110℃の供給温度(蒸気)で稼働すべく設計された。年々温度は下げられ、現在では約90℃の温度(高温水)で稼働している。技術の進歩によって、地域熱供給システムが必要とする水の温度はさらに低くなり、その結果エネルギー効率が向上し、産業活動の排熱の活用や熱を貯蔵する経済的根拠を生み出している¹⁷⁾。

新しい低温給湯器が住宅内に設置され、家庭用温水が消費者側には45℃で供給される。レジオネラ菌の発生が危惧されるが、温水の熱交換器と温水システムへの滞留量を少量に抑える、ドイツの規制DVGW W55に基づいた設計による制御で解決している。こうして、全体の地域熱供給システムの供給温度は55℃、利用者からの戻り温度は約30℃となる。

(2) 新型コロナウイルス感染症の蔓延

循環社会をまっしぐらに進んでいるデンマークでも、新型コロナウイルス感染症(COVID-19)の蔓延は例外ではない。そこで、デンマークの発生数の時系列データ¹⁸⁾に筆者らが展開してきた時系列解析法を適用して解析を行った。

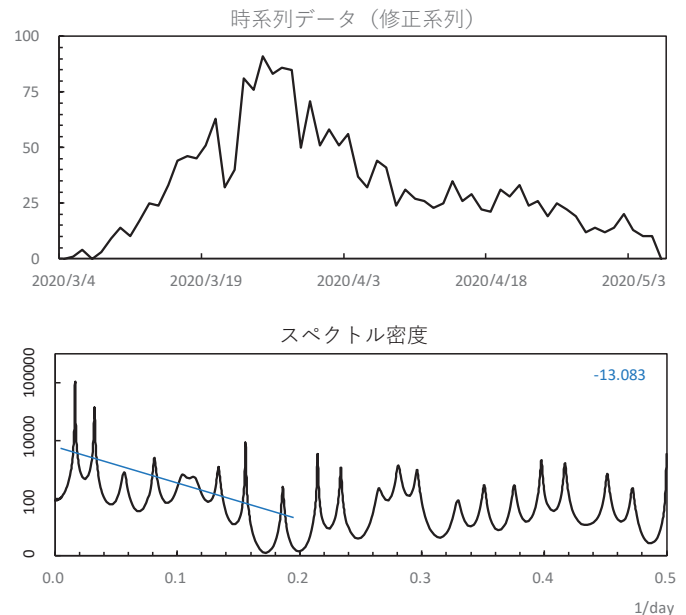


図2 デンマークにおける新型コロナウイルス感染症入院者数のスペクトル解析：(上) 原時系列データ、(下) そのPSD。

デンマークにおけるCOVID-19による入院者数時系列データのスペクトル解析

図2上は、2020年3月4日から5月6日の間のデンマークにおけるCOVID-19入院者数推移(日毎)を示す(データ点数64)。図2下に示すこのPSDの傾きは指数特性を示す。

前述したように、カオス特性を示す感染症の発生数データのPSDが指数特性を示し、かつコミュニティの人口規模が大きいほど指数特性の傾きが大きくなること(図1)、即ち、デンマークのコミュニティの中で最大の人口規模のコペンハーゲンデータのPSDの傾き入が最も大きい値を示し、人口規模の小さいボーンホルム島やファロ島の傾きが小さくなることを紹介した。

傾きがゼロになるのは、非決定論的ノイズ、すなわち偶発的に計数されるノイズ成分である白色雑音の場合であり、一般に非決定論的変動が混入する程、PSDの傾きは小さくなり、逆に決定論的変動=非線形効果が強まるほど傾きは大きくなる。

感染症発生変動について見れば、人口規模が小さい場合、非線形開放系の特性(PSDの指数型減衰)を有するものの、開放系としての相互作用効果が弱くなる(新たな保菌者に接触する機会が少ない)ためと考えられる。一方、人口規模が大きくなると、新たに保菌者に接触する機会が増加するだけでなく、局所的異常発生(クラスター)や接触効果を強める相互作用現象、即ち、感染症発生に関わる時間的・空間的構造の複雑化

が進み、そのことで更に感染率が高まると推測される。

一般に物理学的には、開放系では、絶えずエネルギー的補給がなされることで、閉鎖系の特徴である“平衡構造”や“緩和構造”(この2つは“自己集合”と呼ばれる)を作ることを超えて、“散逸構造”¹⁹⁾と呼ばれる特有の構造化が進む。再帰性の感染症発生数の変動現象の中で、人口規模が大きくなると、こうした“散逸構造”が進むのは興味深いことである。

この場合の“散逸構造”は、開放系としての人口集団の時間的・空間的行動パターンにおいて形成されるものである。即ち、集団の規模が大きくなるにつれ、外部からのエネルギー(人)の補給が大きくなり、ある条件では規則的変動やパターン形成などの“秩序(構造)”が作り出される(自己組織化²⁰⁾)ものの、その秩序も多様に変化しつつ次々に発生・消滅を繰り返す、といった複雑な構造(“複雑性”)を背景にしているものと推察される。イメージ的には、水の流れに作り出される渦(乱流)を想起されたい。

COVID-19を発症させる新型コロナウイルスを含めて、多くのウイルスの蔓延には、以上述べたような、人の行動パターンの自己組織化が背景にあると考えるのは少々考えすぎかもしれないが、ウイルスがこの特性に乗じて(上手く利用して)、次々と増殖を繰り返す術を身に着けているのかもしれない。とすれば、対策としては、人の行動パターンを改めることが重要なことになる。日本におけるCOVID-19防止対策として3密(3つの密:密閉、密集、密接)を控えるように勧められている。これは十分納得できる対策ではあるが、人口規模に依存した“人の行動パターンの自己組織化”が背景にあるとなれば、より根源的には、人々が系全体を俯瞰する能力を持たないのに関わらず、人々の自律的な振舞いの結果として“自己組織化”を作り出す。こうした時間的・空間的な人々の行動をもたらす都市構造や、エネルギー源として何を利用するかという社会のあり方までもが課題となると考えられる。

参考文献

- 1) フォルケセンター デンマークが誇る再生可能エネルギー(自然エネルギー)研究所。実験農場的たたずまいの敷地内では、風力発電、太陽光発電・太陽熱利用、バイオガスシステムの施策、そのあらゆる形態の自然エネルギーの研究が進められている。
- 2) Olsen LF, Schaffer WM. Chaos versus noisy periodicity: Alternative hypotheses for childhood epidemics. *Science* 1990; 249: 499-504.
- 3) Sumi A. Time Series Analysis and Prediction of Infectious Diseases. デンマーク国営放送、1998年12月8日15時~16時。
- 4) 小林宣道監修, 鷺見紋子, 大友詔雄: 時間感染症学。札幌, 北海道大学出版会, 2020.
- 5) May RM. In: Nina Hall editor. *The New Scientist Guide to Chaos*. London: IPC Magazines New Scientist; 1991. P. 82-95.
- 6) バタフライ効果(butterfly effect)は、力学系の状態にわずかな変化を与えると、そのわずかな変化が無かった場合とは、その後の系の状態が大きく異なってしまうという現象。カオス理論で扱うカオス運動の予測困難性、初期値鋭敏性を意味する標語的、寓意的な表現である。気象学者のエドワード・ローレンツによる、「蝶がはばたく程度の非常に小さな攪乱でも遠くの場所の気象に影響を与えるか?」という問い掛けと、もしそれが正しければ、観測誤差を無くすることができない限り、正確な長期予測は根本的に困難になる、という数値予報の研究から出てきた提言に由来する。(Wikipedia)
- 7) Lorenz EN. Deterministic Nonperiodic Flow. *J Atmos Sci*. 1963; 20: 130-141.
- 8-1) 常盤野和男, 大友詔雄, 田中幸雄: 最大エントロピー法による時系列解析 - MemCalcの理論と実際 -。札幌, 北海道大学図書刊行会, 2002.
- 8-2) 細田嵯一監修, 笠貫宏, 大友詔雄(編). 生体時系列データ解析の新展開。札幌: 北海道大学図書刊行会, 1996
- 8-3) 三宅浩次監修, 高橋延昭, 神山昭男, 大友詔雄(編): 生物リズムの構造 - MemCalcによる生物時系列データの解析 -。札幌, 富士書院, 1992.
- 9) PSD(パワー・スペクトル密度 Power spectral density)とは、時系列の周波数依存性を表す尺度で、二乗平均値の周波数領域における分布を意味する。
- 10) Sumi A, Ohtomo N, Tanaka Y, Koyama A, Saito K. Comprehensive Spectral Analysis of Time Series Data of Recurrent Epidemics. *Jpn J Appl Phys*. 1997; 36: 1303-18.
- 11) Sumi A, Olsen L F, Ohtomo N, Tanaka Y, Sawamura S. Spectral Study of Measles Epidemics: The Dependence of Spectral Gradient on the Population Size of Community. *Jpn J Appl Phys*. 2003; 42: 721-33.
- 12) MS Bartlett: *J. R. Statist. Soc. Ser. A* 120 (1959) 48.
- 13) ポール・ラ・クール: 風力発電機の写真と説明は、

デンマークの自然エネルギーの到達点と新型コロナウイルス感染症の発生変動に関する一考察

Wikipedia:「ポール・ラ・クール」を参照されたい。

- 14) デンマークの風力発電の到達点については、「前進する風力発電—風力発電がデンマークのエネルギー・システムにもたらす変革—」(State of Green, 2017年)を参照されたい。
- 15) バイオガスの普及状況は、「地域熱供給—都市部のエネルギー効率化—」(State of Green, 2016年)を参照されたい。
- 16) サバティエ反応(Sabatier reaction)は、水素と二酸化炭素を高温高压状態に置き、ニッケルを触媒としてメタンと水を生成する化学反応。さらに効果的な触媒として、酸化アルミニウム上にルテニウムを担持させた触媒も使える。フランスの化学者ポール・サバティエが発見した。(Wikipedia)
- 17) 第4世代地域暖房(4GDH)システムについては、前掲参考文献14)を参照されたい。
- 18) 安岡美佳. 新型コロナウイルス感染爆発は回避も、厳しい経済・社会情勢続く. 日本貿易振興機構. 2020. <2020.11.30. アクセス>
<https://www.jetro.go.jp/biz/areareports/2020/10ee81bfc3b5cd87.html>
- 19) 散逸構造(さんいつこうぞう、dissipative structure)とは、熱力学的に平衡でない状態にある開放系構造を指す。すなわち、エネルギーが散逸していく流れの中に自己組織化のもと発生する、定常的な構造である。イリヤ・プリゴジンが提唱し、ノーベル賞を受賞した。定常開放系、非平衡開放系とも言う。(Wikipedia)
- 20) 自己組織化(じこそしきか、self-organization)とは、物質や個体が、系全体を俯瞰する能力を持たないのに関わらず、個々の自律的な振る舞いの結果として、秩序を持つ大きな構造を作り出す現象のことである。(Wikipedia)