

風力発電システムの導入と運用にともなう環境負荷量のライフサイクル評価

Life cycle evaluation of environmental burden related to wind-power generating system

天野 耕二* 海老原 美里**

Koji Amano* Misato Ebihara**

ABSTRACT: Recently, innovation of wind-power generating system has increased all over the world. The major factor of greenhouse effect is carbon dioxide (CO₂) emissions caused by power generator plants. So, we focused on one of the renewable energy, wind-power. Generating system utilizing renewable energy should be generally better for the environment than power generator plants. However, even though the wind-power generating system must have environmental affection through the indirect energy consumption by construction materials, operations of plants and so on. To determine the environmental effects of wind-power generating system comparing with different output generated, we investigated energy consumption and CO₂ emission though their life stage of construction and operation. Using the general method of Life Cycle Assessment, we found that about 50% of the total environmental effects could be caused by the construction materials, and also found that environmental effects over kWh of 1500kW wind-power generating system are smaller than other systems. As for other results of this study, CO₂ pay back time of wind-power generating system was estimated to be less than 1.4 year, expected reduction of CO₂ emission was nearly 350g-CO₂/kWh, and wind velocity should be important to affect environmental performance of the wind-power generating system.

KEYWORD; Life cycle assessment, Wind-power generating system, Energy consumption, CO₂ emission

1 はじめに

風力発電システムに関する研究は、1980年代からヨーロッパにおいて盛んに行われてきた。技術開発については勿論、補助金制度の確立や電力会社による買電価格の設定等ソフト面における研究の発展も著しい。日本においても、火力や水力等、各種発電システムとの環境面からの比較を行った研究や、太陽光、太陽熱を利用した発電システムに関する研究が盛んである。しかし、風力発電システムについては、設備容量が100kWという小型風車をモデルに用いることが多い。現在、設置される風力発電システムは、1000kWを越すほどの大型風力発電システムが多いことから、100kW風車をモデルにした研究では、現状の風力発電システムによる影響を把握できているとは言えない。また、実際に風力発電システムを導入する際には、補助金の適用枠内であるか否か、売電収入等の経済性に重点がおかれ、定量的に環境負荷を考慮することは少ない。そこで、本研究では、ライフサイクルを通して環境負荷量を算出し、また設備容量の異なる風力発電システムの環境負荷量を比較することにより、発電サービスあたりの環境負荷がより小さい風力発電システムの導入を検討する。

2 研究対象と研究対象範囲

研究対象は、滋賀県草津市烏丸半島内「水生植物公園みずの森」に設置される 1500kW 風力発電システム、

* 立命館大学理工学部 Department of Environmental Engineering, Ritsumeikan Univ.

** 立命館大学大学院理工学研究科 Graduate School of Environmental Engineering, Ritsumeikan Univ.

および同地点へ設置した場合の 1000kW、800kW、250kW 風力発電システムである。評価方法は、風力発電システムのライフサイクルである素材製造段階、部品・組立段階、輸送段階、建設段階、運用段階(20年)を対象範囲として、積み上げ法によりインベントリ分析を行う。販売・購入、廃棄・リサイクル段階は評価対象外である。また、コンピュータや系統連係保護装置等の電気設備、配電線等は含めないこととした。環境負荷項目は、エネルギー消費量と二酸化炭素(以下、CO₂)排出量である。

3 インベントリ分析

インベントリ分析は、各風力発電システムのライフサイクルを素材製造段階、部品・製品組立段階、輸送段階、建設段階、運用段階に分け、各段階におけるエネルギー消費量とCO₂排出量を算出した。

素材製造段階では、電気・機械設備と建設資材に分類し、各装置別に求めた素材構成重量を素材別に足し合わせるにより算出した。なお、素材構成比¹が不明で計算に入れなかった素材は、全体の4.3(重量)%であった。部品・製品組立段階では、ブレード、増速装置、発電設備、ナセル装置及びタワーの各装置重量に、製造エネルギー消費原単位¹およびCO₂排出原単位¹を乗ずることにより算出した。輸送段階については、タワーはドイツで製造し海運輸送により日本へ輸入され、その他の装置は日本国内で製造し自動車輸送され、建設資材は現地調達することと仮定した。また、海運輸送では重油(C重油)、自動車輸送では軽油のCO₂排出原単位²)を用いている。建設段階は、建設に際して投入する燃料使用量および電力量(直接投入分)と工事用機械の損耗分に分類して求めるべきであるが、本研究では直接投入分をもって、建設段階におけるエネルギー消費量及びCO₂排出量とした。運用段階は、所内動力と修繕保守に分類し算出した。年間所内動力量については、風車制御に要する電力量を考慮するため、所内率10%³ととして発電端発電量から控除し、送電端発電量を算出した。修繕保守については、素材製造段階と製品・部品組立段階のエネルギー消費量及びCO₂排出量の合計値の2%³とした。

インベントリ分析の結果、風力発電システムの導入と運用にともなうエネルギー消費量の約47%、CO₂排出量の約52%を、素材製造段階が占めることが分かった(表1)。

表1：風力発電システムの導入と運用にともなう各システムあたりのエネルギー消費量とCO₂排出量

風力発電システム 設備容量	エネルギー消費量(Gcal/システム)								CO ₂ 排出量(トCO ₂ /システム)							
	1500kW		1000kW		800kW		250kW		1500kW		1000kW		800kW		250kW	
		%		%		%		%		%		%		%		%
素材製造段階	2131	46	1654	47	1648	47	515	50	661	51	515	52	513	52	160	54
部品・製品組立段階	816	18	557	16	550	16	145	14	147	11	101	10	100	10	27	9
輸送段階	373	8	262	7	260	7	48	5	111	9	78	8	77	8	14	5
建設段階	153	3.3	153	4	153	4	77	7	44	3	44	4	44	4	22	7
運用段階(20年間)	1179	25	885	25	879	25	245	24	323	25	247	25	245	25	75	25
ライフサイクルトータル	4652	100	3511	100	3491	100	1031	100	1287	100	985	100	980	100	298	100

4 考察

4.1 年間発電量の推定

風力発電システムによる発電電力量の推定は、風力発電システムの出力曲線と設置地点の風車タワー高さにおける風速出現率分布を用いて、式(1)⁴⁾により行う。

$$\text{年間発電電力量 (kWh)} = \sum (V_i \times f_i \times (365 \times 24h)) \dots \dots \dots (1)$$

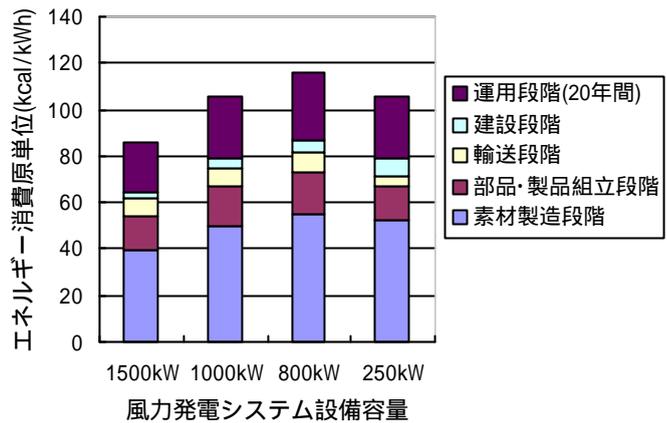
V_i : 風速階級*i*の発電出力 (kW)、 f_i : 風速階級*i*の出現率

風速出現率分布の観測データがない場合、平均風速より推定されるワイブル分布を用いて発電電力量を推定することが可能である。ワイブル分布においてk=2の場合をレイレ分布といい、自然界の風の分布をほぼ近似できる⁵⁾。本研究では、設計値である年平均風速6m/sとレイレ分布を用いて、各風力発電システムの年間発電量を推定した。

4.2 エネルギー消費原単位とエネルギーペイバックタイム

自然エネルギーによる発電システムにしても、プラントの建設や運転、保守において直接・間接に化石燃料を消費している。そこで、風力発電システムの稼働によって電力1kWhを供給する際に消費するエネルギー量(エネルギー消費原単位)を求めた(図1)。

その結果、1500kW風力発電システムのエネルギー消費原単位が最も小さくなった。また、ライフサイクルステージ別に見た場合、素材製造段階が最も大きい割合を占め、次に運用段階となっている。よって、素材量の削減や所内率の低減、設備利用率の向上等につながる技術開発により、エネルギー消費原単位は大幅に改善されると考えられる。



エネルギーペイバックタイムとは、「あるエネルギー生産システムのライフサイクルを通して投入されたエネルギーが、生産されるエネルギーによって回収されるまでの時間」と定義される³⁾。言い換えれば、風力発電システム稼働前におけるエネルギー消費(借金)を、風力エネルギーによる発電(運用段階におけるエネルギー消費を差し引いたもの)により返済するために必要な時間である。結果を、「発電システムのエネルギー分析(内山洋司、山本博巳)」³⁾において報告されている自然エネルギーを利用した各種発電システムのエネルギーペイバックとともに示す(図2)。

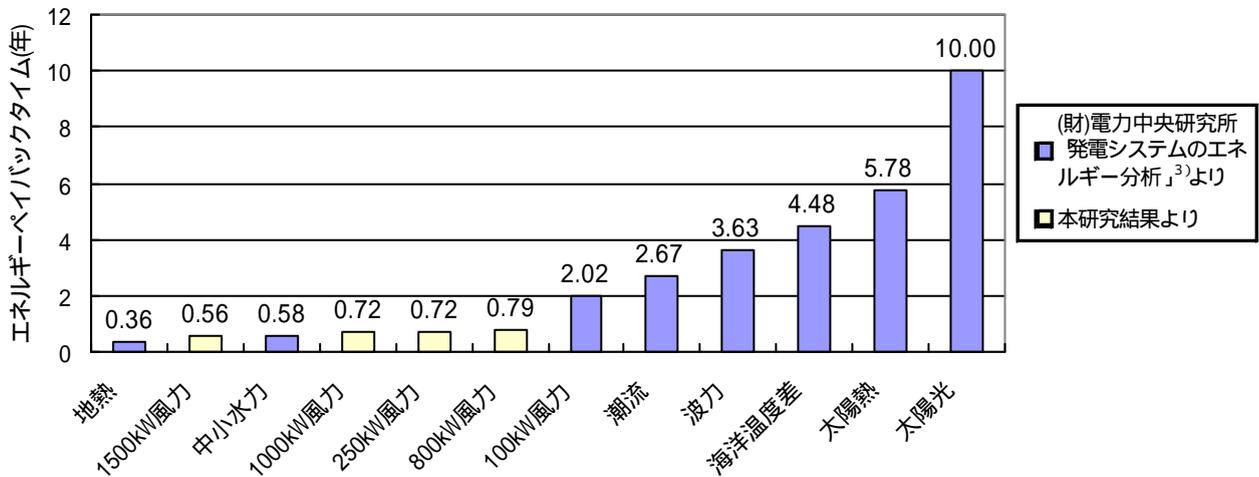


図2：自然エネルギーを利用した各種発電システムのエネルギーペイバックタイム

図2より、設備容量の異なる風力発電システムのエネルギーペイバックタイムを比較すると、大型化することにより短くなっている。100kW風力発電システムのエネルギーペイバックタイムが約2年必要であったことから、その要因はスケールメリットによる影響が挙げられるが、それだけでなく、素材の選定、発電効率の向上、所内率の低減など、技術開発が進んだ結果も影響していると考えられる。また、太陽エネルギーを利用した発電システムのエネルギーペイバックタイムは、5年から10年にも達するのに対し、地熱発電システム、中小水力発電システムは、自然エネルギーを利用した発電システムの中で、実用化段階にあると言われる。これらのエネルギーペイバックタイムと比べ、大型風力発電システムの値は大差ないことも分かった。

4.3 CO₂ 排出原単位とメタンガスによる影響

CO₂ 排出原単位は、全ライフサイクルにおける CO₂ 排出量を総発電量で割ることにより求めた(図3)。この結果、設備容量の異なる風力発電システムの発電サービスあたりの CO₂ 排出量を比較すると、1500kW 風力発電システムの CO₂ 排出原単位が最も小さい。よって、同じ電力量を得るとき、1500kW 風力発電システムにより発電したときが、二酸化炭素排出による環境負荷量が最も小さいことになる。

ところで、化石燃料の採掘時に地中にあったメタンガスが大気中へ排出される。メタンガスは CO₂ に比べ、温暖化影響が大きいため、少量

であっても無視できない。そこで、メタン漏れの温暖化影響を CO₂ 量に換算してみた⁷⁾⁸⁾。風力発電システムの温暖化影響を考えると、採掘時のメタン漏れによる影響を無視できず、その量は CO₂ 排出量に換算すると、CO₂ 排出原単位を約 4% 増加させることが分かった(図3)。以下、風力発電システムの導入と運用にともなう CO₂ 排出量は、メタン漏れによる温暖化影響を含めた値を用いている。

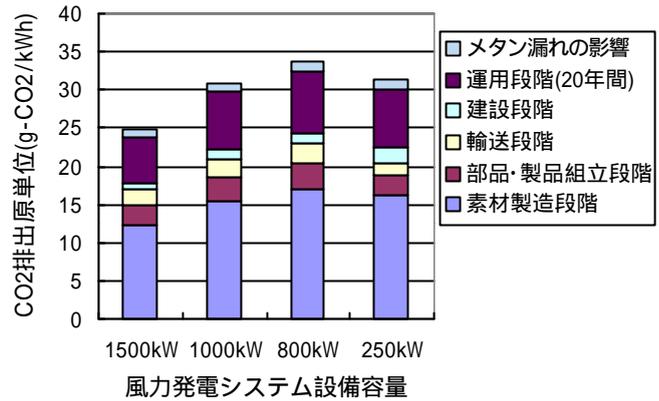


図3：発電サービスあたりの CO₂ 排出

4.4 CO₂ ペイバックタイムと CO₂ 削減効果

CO₂ ペイバックタイムは、風力発電システムの導入にともなう CO₂ 排出量が、既存の発電システムによる電力構成で、風力発電システムの稼働による発電量と同発電量を得るために排出される CO₂ 量の何年分に相当するかを示す。この CO₂ ペイバックタイム以上の稼働により、風力発電システムは、初めて環境負荷削減効果をもつことになる。ここで、既存発電システムによる電力は、既に建設された発電システムの稼働により得られることを、評価の前提条件としている。

本研究では、「太陽光発電システムの導入による CO₂ 排出削減効果(稲葉敦、近藤康彦ら)」⁶⁾ において提唱された CO₂ 回収年及び CO₂ 削減効果の計算方法を応用し、式(2)により風力発電システムの CO₂ ペイバックタイムを、式(3)により CO₂ 年間削減量を、式(4)により CO₂ ペイバックタイム以降の CO₂ 年間削減量を求めた(表2)。

$$CO_2 \text{ ペイバックタイム(年)} = \frac{A}{B \times C - D} \dots \dots \dots (2)$$

$$CO_2 \text{ 年間削減量(t-CO}_2\text{/年)} = \frac{B \times C \times 20 - (A + D \times 20)}{20} \dots \dots \dots (3)$$

$$CO_2 \text{ ペイバックタイム以降の } CO_2 \text{ 年間削減量(t-CO}_2\text{/年)} = B \times C - D \dots \dots \dots (4)$$

- A: 風力発電システムの運用段階以外の CO₂ 排出量(g CO₂)
- B: 既存発電システムの CO₂ 排出原単位(g CO₂/kWh)
- C: 風力発電システムによる年間発電量(kWh/年)
- D: 風力発電システムの運用段階の CO₂ 排出量(g CO₂/年)

表2：各風力発電システムの CO₂ ペイバックタイム、CO₂ 削減効果及び CO₂ 削減率

設備容量 (kW)	CO ₂ ペイバックタイム (年)	CO ₂ 年間削減量(t-CO ₂ /年)		CO ₂ 削減率 (g-CO ₂ / kWh)
			CO ₂ 回収年以降	
1500	0.99	959	1009	355
1000	1.24	578	616	349
800	1.36	522	560	346
250	1.26	172	184	348

風力発電システムの導入に伴うCO₂排出量は、既存の発電システムによる電力構成を基準とした場合、1～1.4年までに、回収されることが分かった。また、CO₂ペイバックタイムを考えない場合、例えば、1500kW風力発電システムでは、1年間に959t-CO₂のCO₂排出量を削減でき、CO₂ペイバックタイムを考えた場合は、0.99年まではCO₂削減効果はないが、それ以降は、年間1009t-CO₂のCO₂削減効果があると考えられる。さらに、CO₂総削減量を各風力発電システムの発電量で割ることにより、CO₂削減率を求めた。これにより、発電サービスあたりのCO₂削減効果が算出された。

4.5 年平均風速による違い

年平均風速は、年間発電量の算定に大きく影響するため、エネルギー消費原単位やCO₂排出原単位等、環境負荷量の評価を左右してしまう。本研究では、本来用いるべきタワー高さにおける実測値がないため、最も近くの観測所の数値である設計値を年平均風速として用いていた。そのため、年平均風速に対する信頼性が低下している。そこで、年平均風速が4～7m/sにおけるエネルギー消費原単位(図4)とCO₂排出原単位について検討を加えた。

注目すべき点は、1000kW、250kW風力発電システムにおけるエネルギー消費原単位の年平均風速に対する変化である。年平均風速6～7m/sでは、1000kW風力発電システムを導入した方が発電サービスあたりのエネルギー消費が小さいが、年平均風速4～5m/sでは、250kW風力発電システムによる場合の方が小さくなり、逆転する。このように、風力発電システムの導入と運用にともなう環境負荷量は、年間発電量を推定する際に用いる年平均風速値に大きく左右される。よって、風力発電システムを評価する場合には、年平均風速値を十分に検討して用いなければならない。

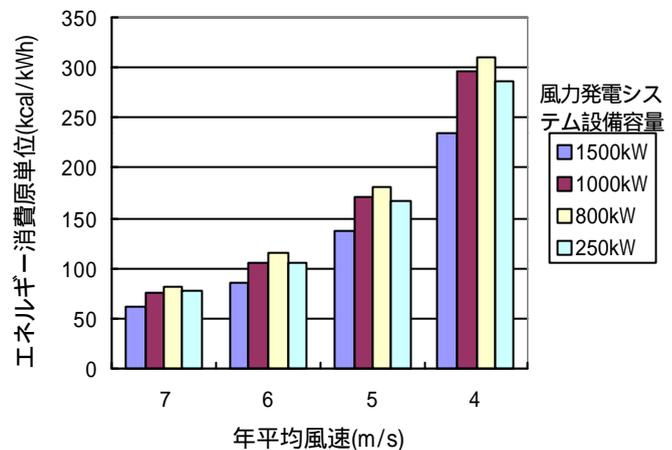


図4: 年平均風速の違いによるエネルギー消費原単位の変動

4.6 設備容量の異なる風力発電システムの組合せ

滋賀県草津市烏丸半島内「水生植物公園みずの森」に設置される1500kW風力発電システムによる推定年間発電量は、滋賀県の年間使用電力量(1999年)の0.03%を占める。また、草津市の年間使用電力量(1999年)に対しては、0.54%を占める。ここで、ある発電量を、風力発電システムによる電力で賄う場合を想定し、設備容量の異なる風力発電システムを、どのように組合せたときが最も環境負荷が小さくなるかを検討してみた。

草津市の年間使用電力量の1%及び10%を風力発電システムにより供給しようとする場合に、1500kW、1000kW、800kW、250kW風力発電システムをそれぞれ何基導入するか、考え得る全ての組合せについて環境負荷量を算出した。その結果、最も環境負荷が小さい組合せは、1%では1500kW風力発電システムを2

基(エネルギー消費量：9300Mcal/システム、CO₂排出量：2600t-CO₂/システム)、10%では1500kW 風力発電システムを 19 基(エネルギー消費量：88400Mcal/システム、CO₂排出量：24400t-CO₂/システム)となり、いずれの場合も 1500kW 風力発電システムのみを導入したときであった。今回は、草津市の年間使用電力量の 1% 及び 10%を供給するという条件だけであったが、その他風力発電システムを導入する際に前提条件となる様々な事柄を考慮し、環境面からの優位性を考えることは重要である。

5 まとめ

今回は、設備容量の異なる風力発電システムの環境負荷量を明らかにし、それらの環境面からの比較を行うことができた。本研究より得られた知見をまとめる。

- ・風力発電システムの導入と運用にともなう環境負荷量を低減するためには、素材製造段階を重点的に行うことが有効であると考えられる。
- ・1500kW、1000kW、800kW、250kW 風力発電システムを比較した場合、発電サービスあたりのエネルギー消費、CO₂排出および CO₂削減率は、1500kW 風力発電システムを導入した場合が最も環境へも負荷が小さい。
- ・採掘時のメタン漏れによる温暖化影響は、CO₂ 排出原単位を約 4 %増加させる。
- ・年平均風速は風力発電システムによる環境負荷量へ大きな影響を与える。4 ~ 7m/s において、1500kW 風力発電システムを導入したときが、発電サービスあたりの環境負荷量が最も小さい。

6 今後の課題

現段階では、風力発電システムの設備容量と環境影響との関係を導くまでには至っていない。1500kW、1000kW、800kW、250kW 風力発電システムの中で、発電サービスあたりの環境負荷が最も大きいのは250kWではなく、800kW 風力発電システムであった。そのため、発電サービスあたりの環境負荷は、スケールメリットにより改善されるとは一概には言えない。また、本研究では、廃棄・リサイクル段階を評価対象範囲に含めていない。しかし、ライフサイクルトータルで考えた場合、埋立て処分なのか、リサイクルされるのかで環境への負荷が変化するため、重要なポイントとなる。今後は、廃棄・リサイクル段階まで含めた全てのステージを考慮する必要がある。

参考文献

- 1) 科学技術庁資源調査会編；自然エネルギーと発電技術 - 水力・地熱・風力・波力・潮流・海洋温度差 ,p150-162 , 大成出版社 , 1983.9
- 2) 資源エネルギー庁；エネルギー 2 0 0 0 , p97-105 , 電力新報社 , 1999
- 3) 内山洋司、山本博巳；発電システムのエネルギー収支分析 , 電力中央研究所報告 Y90015 , 1995.3 , 財団法人電力中央研究所
- 4) 清水幸丸；自然エネルギー利用学 , p75-103 , パワー社 , 1993
- 5) 清水幸丸；風力発電技術 , p61-66 , パワー社 , 1990
- 6) 稲葉敦、近藤康彦、小林光雄、喜多浩之、高橋伸英、野田優、松本真太郎、森田英基、小宮山宏；太陽光発電システムの導入による CO₂ 排出削減効果 , エネルギー・資源 , 16 巻 5 号 , 1995
- 7) 内山洋司；発電システムのライフサイクル分析 , p23-24 , 電力中央研究所報告 Y94009 , 1995.3 , 財団法人電力中央研究所
- 8) 内山洋司、山本博巳；発電プラントの温暖化影響分析 , p31-34 , 電力中央研究所報告 Y91005 , 財団法人電力中央研究所