

# 太陽光発電と風力発電の分担比の最適化

The optimal supply mix of solar photovoltaics and wind power in Japan

槌屋治紀\*<sup>1</sup>

Haruki TSUCHIYA

## Abstract

This paper reports the optimal mix of electricity generation from solar photovoltaics and wind power corresponding to electricity demand in Japan. The optimal supply mix is analyzed to minimize the mismatch error of demand-supply equations using the monthly electricity demand in 1999-2013 and the electricity generation of solar and wind powers which are simulated by the Extended AMEDAS 2000 weather data. The results of correlation analysis show the average of the optimal supply ratio of solar/wind is around 3/2 for 1999-2013. However it is around 1/1 for the latest three years as the electricity demand in summer decreased.

キーワード：太陽光発電、風力発電、電力需要、最適分担比

Key Words: Photovoltaics, Wind Power, Optimal mix, Electricity demand

## 1. はじめに

国内にある再生可能エネルギーは、安全性、セキュリティ、エネルギー自立、二酸化炭素の排出ゼロ、地域でエネルギーの地産地消、町づくりと地域の自立に寄与という特徴を持つことから注目されている。再生可能エネルギーのうち水力、地熱、バイオマスなどは変動を小さくできるが、太陽光発電と風力発電は変動する電源であり、将来、日本において大量に導入するとき、電力需要に対してどのような分担比でその発電設備を設置するのが最適かという問題が生じる。すでに2008年の電力需要データを利用して、日本における再生可能エネルギーによる電力供給をコンピュータシミュレーションによって検討し、電力需要と再生可能エネルギーの発電量から1年間の「バックアップ電力+余剰電力+電力貯蔵損失」という評価関数を最小にする太陽光と風力の発電量の比を評価するところみを行っている。<sup>(1) (2)</sup> 本報告は1999~2013年度の15年間の月別電力需要データと、太陽光発電と風力発電の月別発電量の変動に注目して、需要と供給のミスマッチを最小化する評価関数を定義して太陽光と風力の最適分担比をもとめる分析を行ったものである。

## 2. 最適化問題の定式化

### 2.1 評価関数

1年間の電力需要の変化に対応する太陽光発電と風力発電の最適な分担を知るために、日本全国の月別の電力需要と太陽光発電と風力発電の月別の発電量との関係を検討する。このような分析の例としてヨーロッパの研究では、以下のようにマッチング方程式を定義している。<sup>(3)</sup>

$$L(t) = a * S(t) + (1-a) * W(t) + \delta(t) \quad (1)$$

$L(t)$  : 電力需要  $S(t)$  : 太陽光発電量

$W(t)$  : 風力発電量  $\delta(t)$  : 誤差

$a$  : 太陽光発電の分担比 (ー)  $t$  : 月

ここで太陽光発電の分担比を  $a$  とするとき、風力発電の分担比は  $1-a$  である。(1)式において、需要と供給の変動のミスマッチを示す誤差  $\delta(t)$  が評価関数であり、1年間の  $\delta(t)$  を最小にするように  $a$  を決定することが課題である。

### 2.2 変数

(1)式は変動部分の相互関係を評価するものであるため、各変数は月別電力量をその1年間の月間平均値で割って基準化した数値とし、変数の変動を示すものとした。単位は無次元である。

$$L(t) = \text{各月の電力需要} / \text{平均月間電力需要} \quad (2)$$

$$S(t) = \text{各月の太陽光発電量} / \text{平均月間太陽光発電量} \quad (3)$$

$$W(t) = \text{各月の風力発電量} / \text{平均月間風力発電量} \quad (4)$$

(1)を以下のように変形することができる。

$$L(t) - W(t) = a * (S(t) - W(t)) + \delta(t) \quad (5)$$

(5)式において、1年間の相関分析を行えば、実際の  $L(t) - W(t)$  と  $S(t) - W(t)$  のデータを用いて1年間の  $\delta(t)$  を最小にする  $a$  の値を求めることができる。<sup>(2)</sup>

## 3. 太陽光発電と風力発電の分担比の計算

### 3.1 気象データ

太陽光発電と風力発電の発電量を計算するために、日本の1時間ごとの気象データが必要である。本報告では、日本建築学会の拡張AMEDAS標準気象データ2000年版を使用してこの計算を行っている。<sup>(4)</sup> これは1981~2000年の20年間における代表的な気象を再現した1時間ごとの北海道から沖縄まで日本全国842地点のデータである。この気象データのうちから太陽輻射データと風速データを利用してシミュレーションを行っている。

### 3.2 太陽光と風力の発電量の計算

太陽光の発電量は、気象データの842の各地点について

\*1 株式会社システム技術研究所 所長  
(〒103-0004 東京都中央区東日本橋1-1-5)  
(原稿受付: 2014年12月15日)

計算した。1年間に最大の発電量になるように、ひとつのユニットとして10kWの太陽光パネルを南向き、傾斜角を「緯度-5」度に設定した。このパネルに降り注ぐ1時間ごとの水平面太陽輻射を直達光と散乱光に分割し、傾斜面の太陽輻射をもとめて1年間の発電量を計算した。<sup>(5)</sup> 太陽光発電が、日本の電力会社10地域のそれぞれの年間電力需要に比例した電力を各地点に供給するようにそのユニット数を配置した。計算結果は表1のようになり太陽光発電の設備利用率は全国平均で12.6%になった。ここで設備利用率とは、以下のように、定格出力で1年間(8760時間)発電した場合に対する年間発電量の比によって発電設備の利用率(%)を示すものである。

$$\text{設備利用率} = \frac{\text{年間発電量} \times 100}{\text{定格出力} \times 8760} \quad (6)$$

風力発電は、ひとつのユニットとして出力2MW、直径80m、ハブ高さ56mの風車を各地点に設置すると想定した。風車はカットイン風速3m/s、カットアウト風速25m/sとし、842地点の風速データを用いて、べき乗法則によりハブ高さの風速を計算し、効率40%で発電量をもとめた。<sup>(6)</sup> 風力発電量を842地点について計算したのち設備利用率18%以上の地点を選び出したところ90地点になった。風力のひとつのユニットの発電設備を単位として電力会社別の全国10地域に発電容量を配分してユニット数を決定した。このとき表1に示すように、風力発電の設備利用率は全国平均で26.3%になった。表1は、2050年ごろのエネルギー供給源として想定したもので、太陽光2億2700万kW、風力5400万kWの規模であり、試算として太陽光と風力の発電量の比が2:1になるように設定した。

表1 2050年ごろを想定した地域別の太陽光と風力の発電容量、発電量、設備利用率(気象データから計算)

地域	太陽光			風力		
	容量(MW)	発電量(GWh)	設備利用率(%)	容量(MW)	発電量(GWh)	設備利用率(%)
北海道	9,582	9,234	11.0	4,939	13,129	30.4
東北	23,807	22,996	11.0	11,930	26,259	25.1
関東	70,442	81,054	13.1	3,718	9,549	29.3
中部	31,383	36,435	13.3	5,481	13,129	27.4
北陸	8,293	8,062	11.1	2,885	4,774	18.9
関西	37,848	41,045	12.4	3,602	7,162	22.7
中国	15,853	17,239	12.4	10,646	20,291	21.8
四国	6,963	8,285	13.6	2,498	9,549	43.6
九州	21,034	24,231	13.2	7,320	17,904	27.9
沖縄	1,928	2,197	13.0	1,310	3,581	31.2
全国計	227,133	250,778	12.6	54,328	125,326	26.3

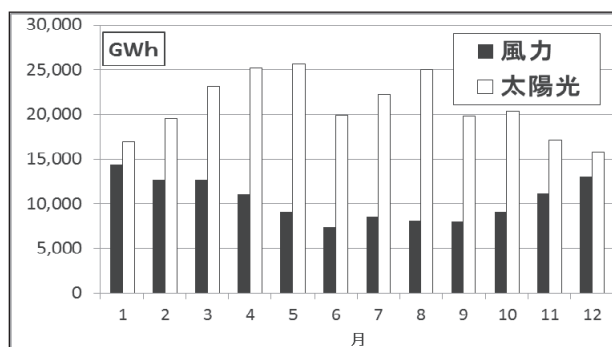


図1 気象データから計算した1年間の月別発電量

図1、図2には表1に示した全国合計の太陽光と風力の1年間の月別、時間別発電量を示している。ここでは各電力会社の送電網がひとつに統一されていると想定している。風力発電量は24時間を見るとほとんどの時刻で同様の発電が見られるが、月別をみると夏季に小さく冬季に大きいことがわかる。太陽光発電量は昼間の時刻に限られるが、月別を見ると4~5月と8月に大きく、6月は梅雨のため小さいが、夏季に大きく冬季には小さくなっている。1年間を通じてみると、太陽光と風力は補完的関係になっていることがわかる。

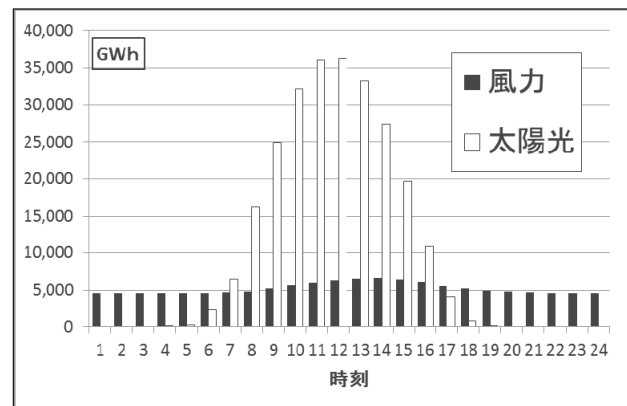


図2 気象データから計算した1年間の時刻別発電量

### 3.3 電力需要

電力需要データとして日本の10電力会社の1999年度~2013年度の期間の受発電実績データを使って以下の分析を行った。<sup>(7)</sup> これは自家発電を除いたものである。冬季の電力需要が12月から翌年にかけて連続的にとらえられるようにするため、対象とするデータを暦年ではなく、4月から翌年の3月までの年度データとしている。図3に示すように、電力需要は2007年度まで増加傾向にあったが、2008年度にはリーマンショックにより経済活動が収縮して急減した。また2011年度には3.11の福島第一原発事故のあと省エネルギーの高まりによって電力需要は減少している。

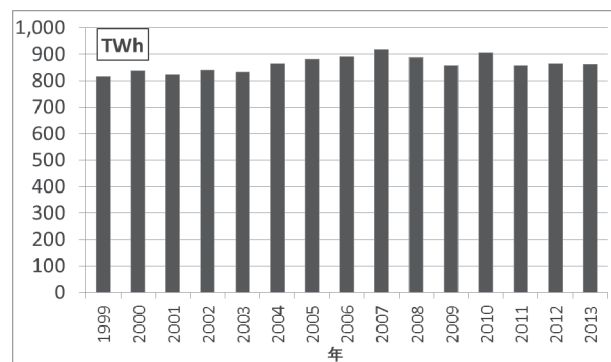


図3 電力需要の推移データ(1999~2013)

### 3.4 分担比の最適値

1999年~2013年度における電力需要を用いて、(5)式によって各年度について相関分析を行ったところ、表2

(1999-2006)、表 3 (2007-2013) のような結果を得ることができた。期間中の相関係数は 0.81~0.87 付近にあり、良好な相関があることがわかる。この期間の電力需要の平均値を用いた場合に  $\delta$  を最小にするのは、表 3 の右端下に示すように、 $a=0.5764$  であり、

$$L(t)-W(t)=0.5764 * (S(t)-W(t)) \quad (7)$$

の関係が求められた。このとき相関係数は 0.849 であり、図 4 と図 5 に示すような相関関係になっている。

表 2 マッチング方程式の各変数の値 (1999-2006)

	L(t)-W(t)	L(t)-W(t)	L(t)-W(t)	L(t)-W(t)	L(t)-W(t)	L(t)-W(t)	L(t)-W(t)	L(t)-W(t)	L(t)-W(t)
Month	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2006
4	-0.082	-0.093	-0.094	-0.139	-0.072	-0.085	-0.075	-0.064	
5	-0.001	-0.003	0.025	0.013	0.039	0.008	-0.006	0.027	
6	0.204	0.211	0.228	0.202	0.213	0.211	0.191	0.204	
7	0.187	0.225	0.257	0.192	0.178	0.259	0.201	0.199	
8	0.351	0.370	0.406	0.413	0.300	0.363	0.320	0.331	
9	0.345	0.339	0.264	0.283	0.302	0.286	0.297	0.299	
10	0.123	0.064	0.059	0.059	0.094	0.078	0.081	0.058	
11	-0.157	-0.144	-0.145	-0.117	-0.141	-0.167	-0.166	-0.131	
12	-0.289	-0.287	-0.276	-0.276	-0.289	-0.313	-0.259	-0.261	
1	-0.310	-0.301	-0.297	-0.258	-0.265	-0.304	-0.232	-0.281	
2	-0.192	-0.150	-0.171	-0.153	-0.160	-0.141	-0.143	-0.163	
3	-0.178	-0.232	-0.258	-0.218	-0.199	-0.195	-0.210	-0.217	
a =	0.617	0.613	0.635	0.578	0.573	0.629	0.539	0.577	
相関係数	0.846	0.830	0.849	0.817	0.860	0.862	0.826	0.855	

表 3 マッチング方程式の各変数の値 (2007-2013)

	S(t)-W(t)	L(t)-W(t)	L(t)-W(t)	L(t)-W(t)	L(t)-W(t)	L(t)-W(t)	L(t)-W(t)	L(t)-W(t)	L(t)-W(t)	L(t)-W(t)
Month	AMEDAS	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	Average	Average
4	0.164	-0.096	-0.069	-0.086	-0.059	-0.070	-0.066	-0.141	-0.082	
5	0.340	0.026	0.062	0.011	0.021	0.010	0.018	0.002	0.018	
6	0.241	0.203	0.230	0.186	0.181	0.185	0.175	0.211	0.202	
7	0.248	0.159	0.226	0.195	0.202	0.208	0.134	0.269	0.201	
8	0.419	0.322	0.401	0.311	0.348	0.278	0.300	0.343	0.344	
9	0.152	0.311	0.274	0.236	0.340	0.268	0.266	0.162	0.294	
10	0.090	0.087	0.096	0.067	0.060	0.051	0.030	0.046	0.072	
11	-0.255	-0.145	-0.135	-0.135	-0.169	-0.168	-0.183	-0.137	-0.150	
12	-0.489	-0.262	-0.291	-0.262	-0.295	-0.276	-0.254	-0.173	-0.278	
1	-0.556	-0.278	-0.313	-0.225	-0.254	-0.233	-0.171	-0.251	-0.266	
2	-0.252	-0.138	-0.203	-0.112	-0.122	-0.115	-0.095	-0.147	-0.147	
3	-0.102	-0.187	-0.278	-0.186	-0.254	-0.138	-0.155	-0.185	-0.208	
a =		0.558	0.666	0.511	0.588	0.519	0.472	0.504	0.576	
相関係数		0.844	0.870	0.845	0.831	0.856	0.828	0.807	0.849	

図 4 には平均電力需要、太陽光、風力の月別変化を示している。図 5 には、相関分析の散布図を示している。このとき、 $a$  は直線の傾きを表しており、太陽光と風力の最適分担比は、 $0.576:(1-0.576)=0.576:0.424$  であり、およそ 3:2 とするのが適当であることを示している。

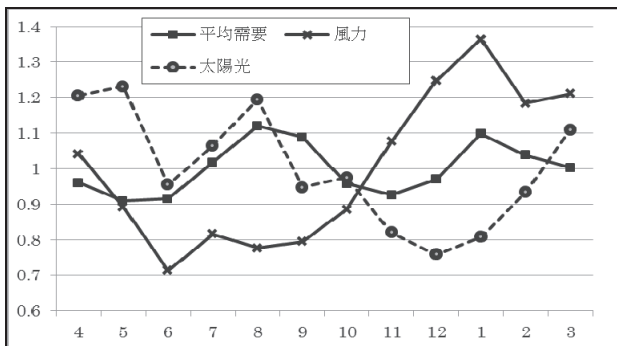


図 4 基準化した平均電力需要(1999-2013)と太陽光、風力の月別変化

表 2、表 3 に示すように 1999~2013 年度の期間の各年度

の太陽光の最適分担比  $a$  の値は、一定ではなく変動している。 $a$  の値は、図 6 に示すように年ごとに変動して最小値の 0.472(2012 年度)から最大値の 0.666(2008 年度)に分布している。この結果から太陽光：風力の最適分担比は、 $a$  の値が最小のときは、 $0.472:(1-0.472)=0.472:0.528$  でありおよそ 1:1 になり、最大のときには  $0.666:(1-0.666)=0.666:0.334$  となりおよそ 2:1 になる。

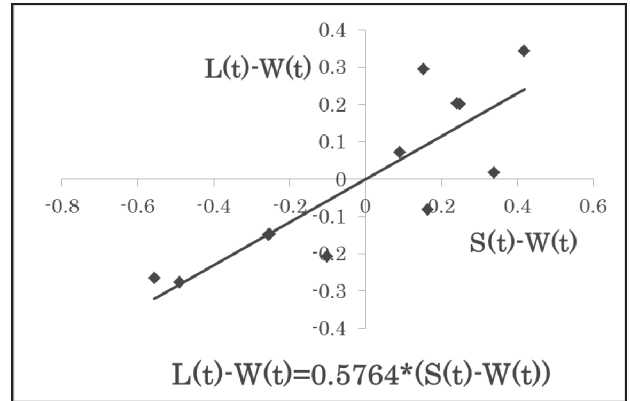


図 5 基準化した平均電力需要(1999-2013)と太陽光・風力の相関関係の散布図

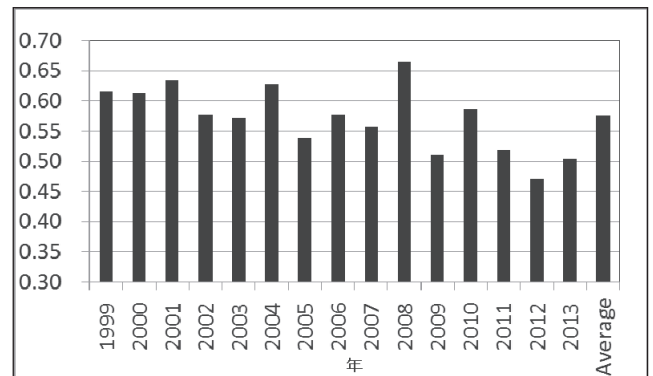


図 6 太陽光の最適分担比 a の値の変化

### 3. 5 電力需要の変化と最適分担比

太陽光の最適分担比  $a$  が年によって変化している理由を調べると、過去 15 年間の月別電力需要の季節的変化が原因であることが判明した。電力需要の月ごとの変動は図 7 のようになっている。図 7 は、夏季 (6 月~8 月) と冬季 (12 月~翌年 2 月) の電力需要が年間需要のうちに占めている割合を表わしている。この期間は 1 年の 12 ケ月のうちの 3 ケ月分であるので、年間のおよそ 1/4 (0.25) になるはずであるが、実際の平均値は 0.265 付近にある。図 7 をみると、夏季の電力需要は冬季にくらべて 1999~2008 年度には大きい、2011~2013 年度においては小さくなっている。

このような月別電力需要の変化が、太陽光の最適分担比  $a$  の値の変化に対応しているものと考えられる。図 6 において、2011~2013 年度については  $a$  の値が小さくなっており、図 7 において夏季需要が冬季需要より小さくなっており両者是对応関係にあることがわかる。最適分担比は夏季と冬季の電力需要に依存し、冬季需要が大きくなれば風力

の比重が増加し、夏季需要が大きくなれば太陽光の比重が増加した最適分担比になる。このように太陽光と風力の発電設備の最適な構成は、電力需要の季節的变化と密接な関係があることが明らかになった。

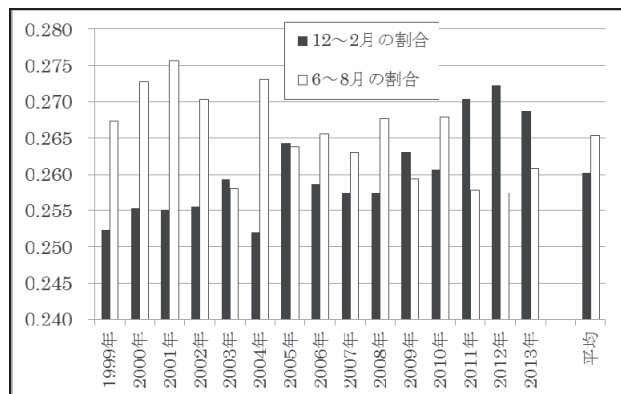


図7 電力需要の冬季(12-2月)と夏季(6-8月)の割合

過去15年間(1999~2013)の太陽光：風力の発電量(kWh)の最適分担比の平均値は3:2であった。しかし、2011~2013年度には、逆に夏季よりも冬季の電力需要が大きくなっており、その影響として、この期間の最適分担比は、風力の割合が増加して1:1の近くになっている。

太陽光と風力の設備利用率はおおよそ12%と26%であり、おおよそ1:2の関係にあることから、発電量の分担比の太陽光の部分を2倍にすれば発電容量の分担比になる。太陽光と風力の発電容量(kW)の分担比は、過去15年間の平均からはおおよそ3:1、最近3年間の傾向からはおおよそ2:1にするのが望ましいことになる。ただし、最近3年間の傾向が将来も続くかどうかは不明である。

#### 4. 2050年の電力供給シナリオ

##### 4.1 電力需要の予測

2050年には、人口および世帯数が25%減少し、産業活動はサービス化・情報化が進展して、資源効率の高い社会へ移行してゆくと、エネルギー需要は現状に比較して減少することが公式報告でも論じられている。ここでは、LED(発光ダイオード)や高性能ヒートポンプなど高効率電力利用技術の普及によって、電力需要は2008年の75%、おおよそ660TWhに減少すると推定した。<sup>(8)</sup>

##### 4.2 太陽光および風力発電の設定

2050年のひとつの電力供給構成シナリオを表4に示した。国内にある再生可能エネルギーとして水力発電27GW、地熱発電14GW、バイオマス発電8GWを想定した。太陽光と風力からの電力供給については、その発電量の分担比が3:2のときには、太陽光204GW、風力65GW、分担比を1:1にした場合は太陽光170GW、風力81GWになった。太陽光と風力の合計供給割合は、全電力需要の57%であり、水力・地熱・バイオマス発電によって供給の変動から生じる送電線の不安定をカバーするものとした。太陽光と風力の余剰と不足は、「揚水など」に示すように揚水発電24GWとバッテリー

により変動を吸収、あるいは天然ガスバックアップで調整することにより安定な電力供給を行うものと想定している。

表4 2050年の電力供給構成シナリオ

発電種類	設備利用率(%)	太陽光:風力=3:2		太陽光:風力=1:1	
		発電容量(GW)	発電量(TWh)	発電容量(GW)	発電量(TWh)
太陽光	12.6	204	226	170	188
風力	26.3	65	150	81	188
水力	45	27	111	27	111
地熱	70	14	87	14	87
バイオマス	70	8	49	8	49
揚水など	-	60	37	60	37
合計		378	660	360	660

#### 5. 結論

将来の電力需要に対して太陽光と風力が非常に大きな供給源となる場合に、太陽光と風力の1年間の発電量の最適分担比を求める試みを行った。まず日本全国における太陽光と風力の1時間ごとの発電量を、拡張AMEDAS気象データを用いて計算した。次に電力需要と太陽光と風力の関係をマッチング方程式によって定式化して、需要と供給の変動を最小にする評価関数によって1999~2013年度の電力需要との相関関係を分析し、太陽光発電と風力発電の発電量の分担比がおおよそ3:2~1:1にあることを示した。この分担比となる場合について、2050年の再生可能エネルギーによる電力供給構成シナリオを示した。

本研究の結果は、将来の電力需要の季節的变化が、太陽光と風力の発電設備の導入構成比に影響を与えることを示唆している。もとより将来の電力需要の季節的変動パターンは簡単に予測できないが、省エネルギー意識の向上、冷房機器のCOPの向上、温暖化による気温上昇の冷暖房需要に対する影響、ヒートポンプ暖房の普及などの各種要因があり、今後の電力需要の季節的变化に注目することが必要である。

#### 参考文献

- 1) 樋屋(2011)、日本における再生可能エネルギーによる電力供給法、日本太陽エネルギー学会誌、37(6):49-54
- 2) H. Tsuchiya, Electricity supply largely from solar and wind resources in Japan, *Renewable Energy*, 48(2012), 318-325
- 3) Heide D, von Bremen L, Greiner M, Hoffmann C, Speckmann M, Bofinger S, Seasonal optimal mix of wind and solar power in a future, highly renewable Europe, *Renewable Energy*, 2010:35:2483-24
- 4) 拡張アメダス標準気象データ1981-2000、建築学会
- 5) 太陽エネルギーハンドブック、日本太陽エネルギー学会、1985
- 6) 風力発電導入ハンドブック、NEDO、2009
- 7) 「電力需給の概要」、経済産業省
- 8) WWF ジャパン『脱炭素社会に向けたエネルギーシナリオ提案』 第1部~第4部、2012~2013