

太陽光発電—個人住宅の経験¹

農工大工 佐藤勝昭

はじめに

私どもが18年住み慣れた我が家を壊し、太陽光発電システムを備えた新しい住宅を建築する決断をしたのは1993年6月のことであった。我が家ではその前年から建て替えを検討していたのであるが、その年の4月にあった工業技術院/NEDOの太陽電池連絡会で、ミサワの研究所の石川進氏から「建材一体化により設置費用も含めた太陽電池のコストはすでに1000円/Wとなった」との報告があったこと、および、通産省関係者から「本年の3月に小規模な太陽光発電施設に対する“逆潮あり系統連携”のためのガイドラインが作られた」旨報告されたことがきっかけとなった。今、家を建てれば、少なくとも2025年くらいまでは住めるはずである。その頃になれば、太陽電池を設置しているのが当たり前になるであろう。もし、それほどのコスト増にならないのであれば、太陽電池の導入に踏み切る時期が来ているのではないか。このように考え、さっそく石川氏を訪ねて詳しく話を伺った。

太陽電池屋と建築屋の発想の違い

「さすが建築屋は発想が違うな」と感じたのは、石川氏と話したときのことである。我々太陽電池材料に関わるものは、「まず太陽電池ありき」となるが、彼の発想はそれとは根本的に違い、太陽電池は1つの建築部品にすぎないのである。彼は、「これからの家は、快適さだけでなく、徹底的な省エネルギー性と、環境への配慮を追求しなければならない。」と熱っぽく説くのである。いわく、「太陽光発電はその目標の一部にすぎない。まず、徹底的に高気密、強断熱の家を造る。これによって、空調に必要なエネルギーは通常の木造家屋の15%となり、大幅な省エネルギーが可能である。次に、二酸化炭素の排出を減らすために、都市ガスを導入

せずオール電化住宅とする。最もエネルギーを食う給湯については深夜電力を利用する。給湯器に供給する水は、予め太陽熱コレクターで熱交換器を通して加熱しておく。空調は高気密・強断熱であれば、1台のインバータエアコンだけでダクトを通して全室の暖房冷房が可能である。夏の冷房については、太陽光発電が有効に働くので、電気代を節約できる。」なんと、ここで初めて「太陽電池」の登場なのである。

屋根瓦の代わりに「太陽電池パネル」を葺く。屋根の上に別に架台をおいて太陽電池を乗せると、その設置費用は高いものになる。しかし、瓦の代わりに使えば、瓦代が不要である。設置費用は、瓦を葺く費用と同程度にする。このため、大工さんでも設置できるようにシンプルで大きさが手頃なモジュールが必要である。太陽電池の強化ガラスは、落下テストでスレート瓦より遥かに強いことが証明されている。建材一体化は大変メリットがあるのである。

太陽電池パネルの上を人が歩く

結局、石川氏の提案を全部受け入れて、省エネルギー住宅を建てることになった。外壁の厚みは120ミリ、断熱材を十分に使う。窓は2重ガラス、赤外線反射コーティング付き；これらによって熱損失率1.19 kcal/m²hという小さな値が実現できる。太陽電池は京セラ製多結晶シリコンモジュールNA641K86型で、モジュール数は35枚(7直列×5並列)、最高電圧205.1V、最適電流14.7A、太陽電池総出力3.014kWp(AM1.5、入射エネルギー密度100mW/cm²、素子温度25°Cにおける値)のもので、電池総面積は29.0m²である。インバータは日本電池製ラインバックLBS-5-SX(单相3線式、定格AC202V、容量5kVA、主回路方式：自励式、出力制御：電流制御方式、絶縁トランス：有)、効率は出力によるが50%出力時で92.6%で

¹ この文章は、Crystal Letters(応用物理学会結晶工学分科会機関誌) No. 4 (1996) 5-11. をベースに、最近のデータをいれて加筆したものである。

ある。費用は、当初の見積もり（省エネルギー、太陽光発電、および集中空調システムの導入を考慮しない場合）に比べて、800万円近く余分にかかってしまった。（1994年度から、通産省は太陽光発電の設備に対して最大50%の補助をするようになったが、我が家は、1年早かったため、この恩恵には浴さなかった。）西日を防ぐために、西の窓は最小限の数におさえた。省エネのために、出窓は使わないほうがよいというアドバイスもあったが、家は機能だけでなく形も大切だという家族のねばりで、北海道仕様の出窓を取り付けてもらう。

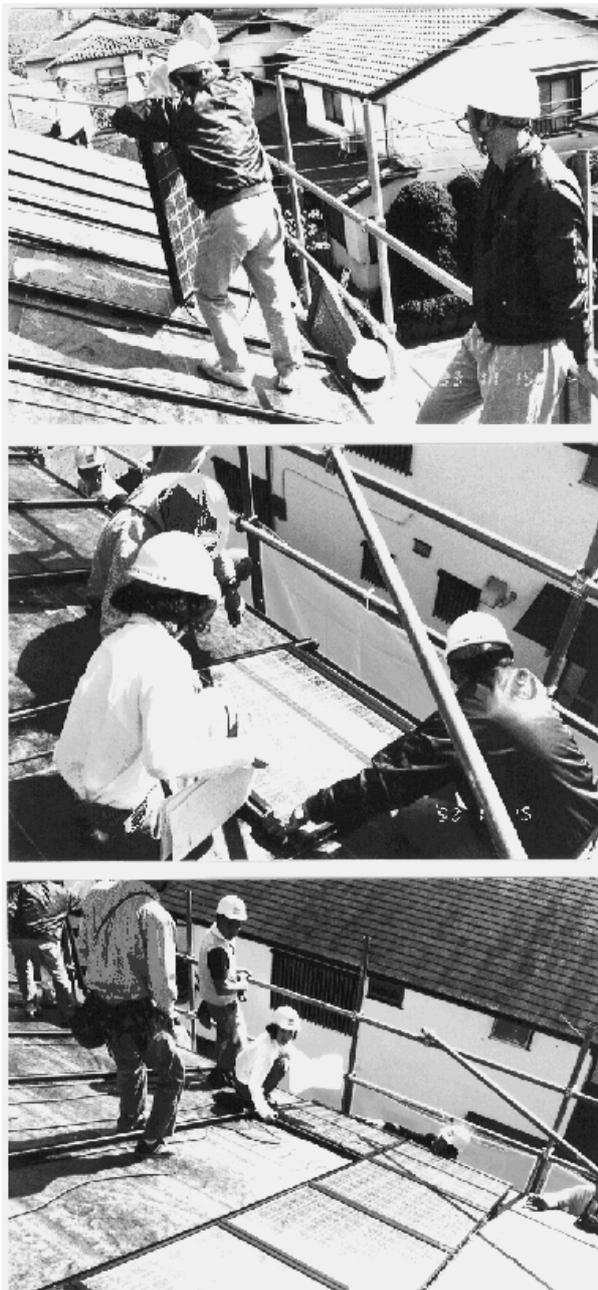


図1 太陽電池の取付工事

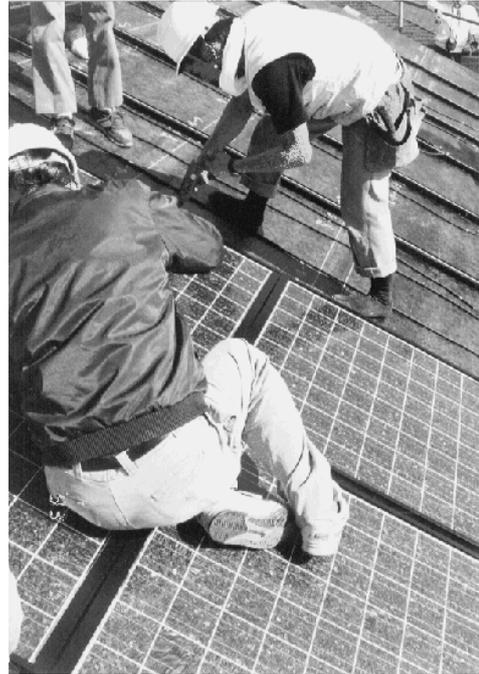


図2 太陽電池モジュールの上に乗ってのネジ止め作業

屋根の傾斜角は 26.5° 、これは4月中旬の南中時の太陽（高度 64.5° ）が垂直に降り注ぐ角度である。この屋根に太陽電池パネルを設置する。物見高い私は、ヘルメットをかぶって屋根に登らせてもらう。設置作業は大変興味深いものであった。（図1）防水シートの上にレールを置き、この上に、運び上げた35枚のパネル（1枚の大きさ $900\text{mm}\times 900\text{mm}$ ）を1枚ずつネジ止めする。パネルは、放熱を考え、数センチだけ浮かせて空気が通るようになっている。電気工事屋さんは、なんと、そのパネルのガラスの上ののっかってネジ止めしている。（図2）電子材料学の講義で、太陽電池の原理と構造の話はするが、

その上に乗って歩くなどということは教えていない。建材として用いると言うことは乗って歩いてもよいような丈夫なものを必要とすることを意味するのだと、そのときはじめて気がついた。配線は直並列にして200Vとしてインバータに供給する。大宅さんという小柄な女性の建築技師が、屋根の上を飛び回って、指示を出している。パネルの合計面積は南面屋根の約70%をカバーする。太陽電池パネルとほとんど外観が違わない太陽熱コレクター（不凍液の入った水を循環させて熱交換機を介して水道水を加

熱)も取り付けられた。棟があがってから大工さんも電気屋さんも大変であった。大工さんは、釘1本打つにも、それを伝って熱が逃げないように工夫している。電気屋さんは、配線の経路やコンセントのすきまから空気が漏れないようにしっかりとシールする。回路の数も多いので、大変な時間がかかった。

「佐藤勝昭太陽光発電所」の誕生

「系統連携、逆潮あり」のシステムは、東京電力と特別の契約を結ぶ。小さくても発電所。質のよい電力を系統に送り出さなくてはならないのである。筆者と東京電力の社長との間で、契約書を交わす。系統連携の協議資料は91ページに上っている(太陽電池モジュール、インバータの詳細を含む)。さらに、当時は電気工作物規程に従って、自家用電気工作物と見なされ、関東電気保安協会との保安契約も交わさなければならなかった。(その後、1995年12月1日に規程が変わり、一般用電気工作物として扱われるようになったので保安契約はなくなった。)我が家には受電用と売電用の2つのメータがある。時間帯別電力契約なので、受電についても、昼間(7:00-23:00)と夜間(23:00-7:00)の2つの表示がある。深夜電力は、昼間の約1/4という安い料金になっている。図3に電力系統図を示す。

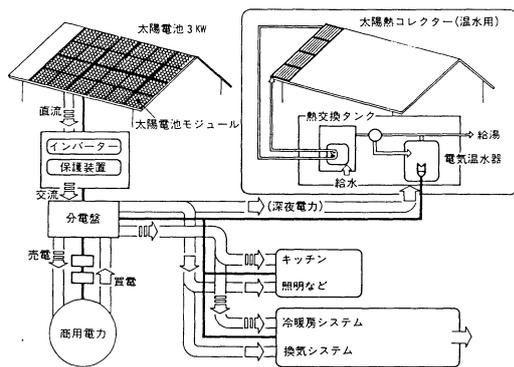


図3 電力系統図

さて、新居は翌年の1994年3月20日に完成。完成した我が家の外観を図4の航空写真(産経新聞社撮影)に示す。色が変わって見える右端の1列は太陽熱コレクターである。着工から実

に6ヶ月を要した。ミサワの研究所は入居前に数日をかけて、徹底的な測定を行っている。もちろん、東京電力川崎支店生田営業所にとっても初めての経験であるから、図5のように電柱に計器をぶら下げて測定をしていた。



図4 建材一体型太陽電池を屋根に搭載した自宅の航空写真(産経新聞社提供)

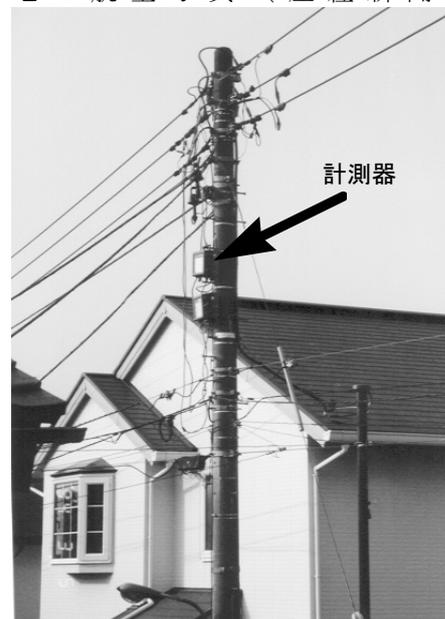


図5 東京電力が電柱につけた計測器

強断熱、高气密の家はさすがである。何も暖房を使わなくても冬場の室温は18°Cくらいある。23°Cなら十分に温かい。断熱性がよいので、たとえば室温を20°Cにセットしたときの天井と床の温度差は1°程度に過ぎない。これが快適さのもとになっている。冬場暖房しなくても、玄関

も廊下もトイレも温かい。家中の温度が均一なのは、熱交換機を通した強制換気によって、1時間に2回程度全体の空気が入れ替わることにもよっている。この点では、この家は基礎代謝のために常にエネルギーを必要としている。高断熱効果による省エネルギーの効果は、この基礎代謝のエネルギーを補って余りある。実際に使ってみると夏場の冷房効率も高く、コストがかからない。家中の部屋の冷房を入れていても、1台のエアコンで十分である。省エネのため、照明器具の白熱電灯はすべてボール型の蛍光灯に取り替えた。(これで、照明は1/3程度の消費電力となった。)契約上、受電位置(責任分岐点)における力率は85%ということなので、蛍光灯器具もインバータ式のものを使い、力率を低下させないようにした。

太陽電池の出力および、電力の授受については、PT(電力用変圧器)を通して直流低電圧に変換し、パソコン(NEC9801VM:本学の大森助教授のご自宅でお使いだったものを計測用にと頂いた)のA/D変換ボードに入力して、10分毎にデータをフロッピーディスクに蓄積している。データの収集は94年5月から現在まで続けている。年に数日、フロッピーが満杯だったり、停電などがあった後パソコンの復帰が遅れたりしてデータが欠落している部分もあるが、一応内挿によって補っている。

年間発電量 3411 kWh、年間販売電力量 1445kWh(3年間の平均)

これまでに測定したデータをもとに解析してみよう。典型的な5月の晴れの日と晴れたり曇ったりの日々の太陽光発電電力の日変化を図6(a)(b)に示す。同図には系統との電力の出入りも記されている。正は買電、負は売電である。晴天の際の日変化は、理論曲線とよく一致する。晴れたり曇ったりの日には、系統との電力の出入りが激しいことがわかる。太陽光発電は大変不安定な電源なのである。使ってみてはじめて知ったことであるが、晴れた日の最大発電電力は、南中時(11時40分頃)に2.2~2.4kWである。

「公称3kWの太陽電池モジュールなのに2.2kWしかでないのは不当表示だ」と怒るなかれ。公

称値はあくまで、標準太陽光(100 mW/cm²)が垂直に当たったとき、標準温度(25°C)でモジュールから取り出せる最大電力なのである。東京地方の太陽光は雨上がりのきれいな空気の時のをぞいで標準太陽光の強度に達していない。また、夏場の太陽電池の温度は50-70°Cくらいにまで上昇している。このときの変換効率は標準気温(25°C)の場合の90%位にまで低下している。²さらに、インバータ効率の問題もある。通常の運転状況でインバータ効率は約90%である。従って、たとえ、100mW/cm²の光量があったとしても、出力は公称値の80%位になってしまう。すなわち、3kWのモジュールでも2.4kWとなる。だから、測定された2.2~2.4kWというのは極めて正常な値なのである。これまでのピーク値の記録は2.8kWであるが、これは、午前中ぐずづついていて、昼頃急に雨が上がった瞬間に記録されている。これは、雨で太陽電池の温度が下がっていて、雨上がりの強い日差しを受けたことによる。ピークを記録した後20-30分で2.2kW程度にまで低下する。これは、温度上昇によるもので、0.6kWの減は40°Cの温度上昇に相当する。

1日の発電量は、夏の晴れた日で15~17kWh、冬の晴れた日で13~15kWhである。曇りの日は2~5kWh、雨の日でも1~2kWhは発電している。1ヶ月の発電量は平均284kWh、3年間の平均で見ると、発電の最大は8月で342kWh、ついで、1月の321kWhと5月の320kWhが並び、ついで、4月の305kWhである。最小は10月で231kWh、6月の251kWhであった。測定を開始した94年5月から97年3月の3年間の総発電量は9948kWhである。年平均では3411kWhということになる。

一方、系統に供給(つまり電力会社に販売)した電力は、3年間の平均で、毎月120kWhであるが、空調を使っているときとそうでないときで大きく異なる。売電の多い月は、5月で172kWh、ついで4月が166kWhであるが、最も少ないのは雨の多い6月で92kWh、ついで少ないのは空調

² 温度に対する補正係数 K_1 は、 $K_1=1-a(T_c-25^\circ\text{C})$ で与えられる。ここに、 a は結晶 Si では 0.004~0.005 である。従って、 $T_c=50^\circ\text{C}$ のとき、 $K_1=1-0.005\times 25=0.875$ となる。

を使う夏場で 93kWh となっている。1日あたりの売電量で見ると、秋の晴れた日に最大 9kWh 販売した記録がある。夏季空調稼働させているときでも 3kWh 程度販売しているのである。94

年 5 月から 97 年 3 月の約 3 年間の総販売電力量は 4216kWh であった。同期間の発電量と比較すると、発電量の約 42% を系統に供給したことがわかる。

96.5.25

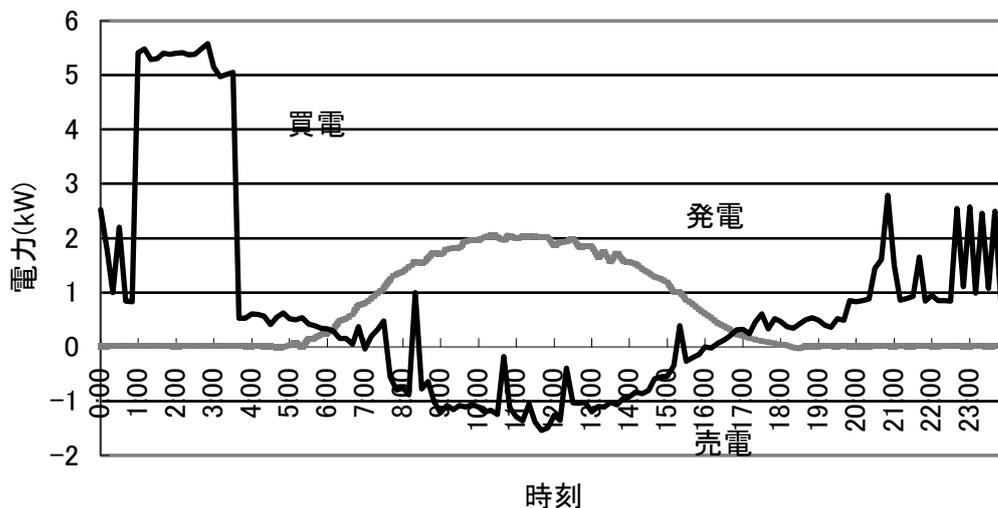


図 6(a) 晴れた日の発電電力、消費電力の日変化
(黒線は購入電力、正は買電、負は売電。グレーの線は太陽電池出力。)

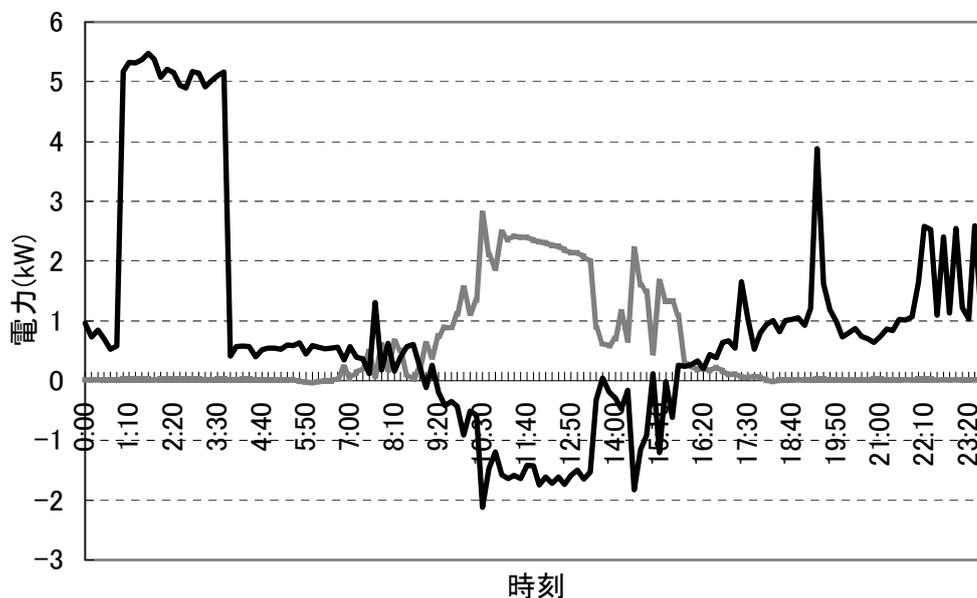


図 6(b) 晴れたり曇ったりの日の発電電力、消費電力の日変化 (黒線は購入電力、正は買電、負は売電。グレーの線は太陽電池出力。)

図 7 の棒グラフに、94 年 3 月から 97 年 3 月までの月別の電力使用量と、販売電力の変化を示す。購入した平均電力は、昼間が月 325kWh、夜間が月 646kWh である。こんなに使っても時間帯別契

約のため引き落とされる電気料金は比較的安く月 16717 円であった。一方、販売した電力に対して振り込まれた金額は、多い月で 6997 円、少ない月で 2521 円、平均で月 4032 円であった。

引き落としと振り込みとの差額は 12685 円。先に述べたように我が家はガスを引いていないので、これが光熱費のすべてである。参考のため

に、入居以来の全データを表 1 として掲げる。

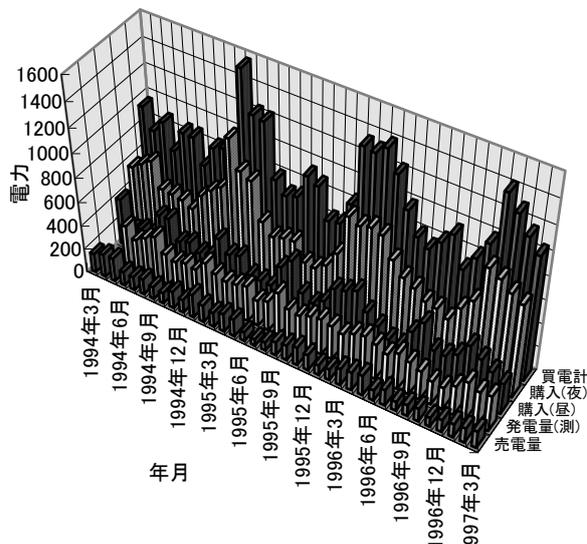


図7 1994.3-1997.3の発電、売電、買電のデータ

表 2 に新築前の 1992 年と建築後の 1995 年における光熱費の比較を示す。家を建て替える前の 1992 年には光熱費は、電気・ガスあわせて、平均月額 17960 円であったが、立て替えた後の電気だけの料金は、平均月額から、毎月 5275 円(年額 63300 円) 程度安くなっている。この程度ではもちろんモトはとれないが、省エネおよびクリーンエネルギー供給に協力していること、さらに、全室空調の快適さを考えれば確かに安あがりといえよう。

いので元栓を閉めたかどうかを気にしなくてよいし、

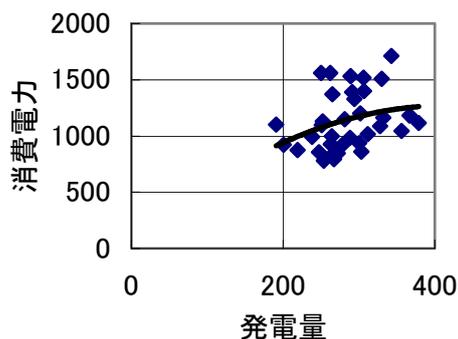


図 8(a) 発電量と消費電力の相関(通年)

ピーク電力需要削減効果はあるか

図 8 は、消費電力と太陽光発電量の相関を示すグラフである。実線は多項式近似したときの回帰曲線である。通年でみると、(a)図のようにデータにはばらつきが多く、回帰直線は傾きがやや緩やかであり、曲線からの誤差も大きい。夏場(6-9月)に限れば、ばらつきも少なく、回帰曲線は 1 次関数で比較的良好に近似することができ、消費電力と発電量には相関がある。従って、太陽光発電は夏場のピークカットには確かに貢献していると考えられる。

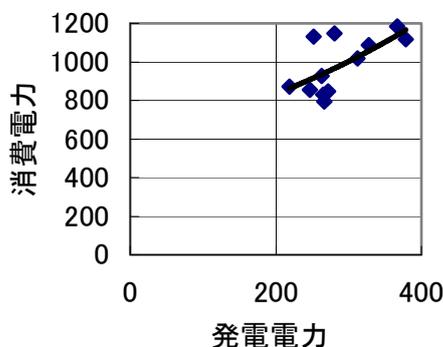


図 8(b) 発電量と消費電力の相関(夏場)

苦勞したガスなし台所

移り住んでしばらく慣れるまで苦勞したのが、オール電化台所である。はじめ、ガスを使わな

高温の気体がでないので台所が汚れないと喜んでいたのであるが、ガスに比べて火力が足りず、

野菜を炒めてもしゃきっとしない。使用している調理器は、200V、2kW のハロゲンヒータで赤外線吸収ガラスを加熱し、この熱を鍋に伝えて加熱する方式である。鍋の底がガラスにピツタ

リとくっついていないと熱が伝わらない。たいていの鍋は底が湾曲している。はじめはフラットでも、安物だと、だんだんと底が丸くなってしまう。

表1 太陽光発電、売電、買電、その他の電力データ

年・月	発電量 (測)	売電 量	買 電、 (昼)	買 電、 (夜)	買電 計	発電-売 電	消費量	余剰量	電気料 金	振込	差額
1994年3月		160	393	559	952			-792	18751	5683	13068
1994年4月		192	171	616	787			-595	11519	5442	6077
1994年5月	356	197	212	675	887	159	1046	-690	13301	5799	7502
1994年6月	272	116	215	476	691	156	847	-575	12042	3816	8226
1994年7月	328	112	402	468	870	216	1086	-758	18558	3977	14581
1994年8月	379	131	414	454	868	248	1116	-737	18882	4653	14229
1994年9月	265	103	252	417	669	162	831	-566	12936	3521	9415
1994年10月	238	91	281	563	844	147	991	-753	14958	3232	11726
1994年11月	264	141	232	645	877	123	1000	-736	13798	4677	9121
1994年12月	251	111	248	707	955	140	1095	-844	14786	3765	11021
1995年1月	343	197	430	1136	156	146	1712	-1369	24122	6997	17125
				6							
1995年2月	291	145	332	910	124	146	1388	-1097	19130	5140	13990
				2							
1995年3月	265	119	358	868	122	146	1372	-1107	19755	4227	15528
				6							
1995年4月	279	150	232	565	797	129	926	-647	13250	4901	8349
1995年5月	303	145	225	478	703	158	861	-558	12407	4700	7707
1995年6月	219	74	225	503	728	145	873	-654	12579	2497	10082
1995年7月	252	54	420	514	934	198	1132	-880	19457	1917	17540
1995年8月	367	70	514	373	887	297	1184	-817	21794	2521	19273
1995年9月	267	115	277	365	642	152	794	-527	13426	3991	9435
1995年10月	254	130	229	429	658	124	782	-528	12178	4312	7866
1995年11月	288	154	287	564	851	134	985	-697	15131	5279	9852
1995年12月	306	130	434	908	134	176	1518	-1212	22630	4617	18013
				2							
1996年1月	289	85	457	869	132	204	1530	-1241	22181	2854	19327
				6							
1996年2月	262	95	498	896	139	167	1561	-1299	23730	3189	20541
				4							
1996年3月	307	141	360	872	123	166	1398	-1091	18942	4733	14209
				2							
1996年4月	332	157	279	710	989	175	1164	-832	15188	5406	9782
1996年5月	300	174	208	602	810	126	936	-636	12121	4898	7223
1996年6月	263	88	197	555	752	175	927	-664	10845	2691	8154
1996年7月	312	137	358	484	842	175	1017	-705	16649	4640	12009
1996年8月	281	78	477	467	944	203	1147	-866	20045	2776	17269
1996年9月	247	95	286	416	702	152	854	-607	11833	3129	8704
1996年10月	201	109	283	549	832	92	924	-723	13092	3367	9725
1996年11月	191	77	334	655	989	114	1103	-912	16812	3091	13721
1996年12月	250	106	456	962	141	144	1562	-1312	23296	3599	19697

1997年1月	330	117	384	913	129	213	1510	-1180	20625	3984	16641
1997年2月	294	125	319	839	115	169	1327	-1033	17904	4208	13696
1997年3月	302	147	261	787	104	155	1203	-901			
合計	9948	4216	1137	22594	3397	5732	39702	-29754	568383	137104	431279
平均(毎月)	284	120	325	646	971	164	1134	-850	16717	4032	12685
年平均	3411	1445	3900	7747	1164	1965	13612	-10201	200606	48390	152216
	発電	売電	買電 (昼)	買電 (夜)	買電 合計	発電・売 電	消費 量	余剰量	引き落 とし	振り込 み	差額

最近は、電磁調理器用に開発されたそこに肉厚の鉄板を付けた平坦性の高い鍋が出回っており、熱効率が高くなったので、これを使うと火力の弱さはあまり気にはならなくなった。もちろん中華鍋が使えない。おかげで、我が家では脂っこい料理が減り煮物を中心とした和食が増えた。おかげで、健康的な食生活を送っている。しかし、もっと火力の強い調理器を研究する必要があると思う。

表2 新築前の家(1992年)と新築前(1995年)の光熱費の比較

月	1992年電気料金	1992年ガス料金	1995年電気料金
1	11022	17459	17125
2	7985	17904	13990
3	7443	15566	15528
4	7389	13228	8349
5	6122	11336	7707
6	4059	7995	10082
7	4550	8440	17540
8	6073	7995	19273
9	5189	7327	9435
10	4648	8440	11726
11	5110	9331	9121
12	10386	10556	11021
総和	79976	135577	150897
平均月額	6665	11298	12575

取材の協力

これまでに、いろんな取材があった。NHKが2回(教育テレビ学校放送社会科4年「ジャパン・アンド・ワールド」、総合テレビ「暮らしの経済」)、ハウジング雑誌(月刊ハウジング1994年9月、ニューハウス1994年12月)、中日新聞、共同通信(地方紙で全国的に紹介1995年1月20日頃)、週刊誌(週間宝石1994年9月)、婦人雑誌(ハイミセス1996年1月)、産経新聞(1996年6月25日)などなど。前日には、一応掃除をしておかねばならない。日曜の朝、10時くらいに始まって夕方5時くらいまでかかることもある。平日の取材だと、授業を済ませて、飛んで帰宅ということにもなる。カメラマンは手慣れたものである。絵になるように、部屋の中の造作をいろいろと変えて撮影している。カメラマンが閉口するのが、肝心の太陽電池がよく見えないことである。屋根の上に架台に載っていると思って撮影にきたのに、太陽電池は屋根瓦の代わりにべたっと屋根にへばりついていて斜め下から見るとサンルームの屋根位にしか見えないのである。見方を変えると、太陽電池が載っているかどうかちょっと目にはわからないような極めてふつうの家なのである。ヘリコプターをとばして撮影してくれた新聞もある。それから、取材の日に限って雨が降ったり曇ったりするものである。せっかく太陽電池が働いているのをパソコン画面で見せようと思っているのに出力がほとんど0で、以前のデータをモニタに出して見せたことも多い

おわりに

このように、我が家では、3年間に累計で約10MWhもの電力を発電し、日常生活に使いながら累計4.2MWhの余剰電力を系統に供給できた。昼間購入電力(7:00-23:00)は3年間の累計3.9MWhで比較的節電型であるといえる。

しかし、問題は、深夜電力(23:00-7:00)を3年間の累計で7.7MWhも使用していることで、安価であるとはいえエネルギーを多消費していることには変わりがない。もう少し節電型の給湯設備を工夫することが必要ではないかと感じている。太陽電池に関しては、今後一層の材料開発が進みもっと安価で、高効率なものになることが期待される。変換効率が倍になれば、同じ屋根の面積で倍の電力を発電できることになる。

太陽電池材料としては、当面結晶系のシリコンが先導していくと予想されるが、長期的に見ると結晶系を使っている限りエネルギー回収も遅く資源的にも問題がある。³ 薄膜系電池の発展が、資源的にも、エネルギー回収の短縮の点からも、コストの点からも望ましいと考えている。21世紀には、ほとんどの家庭に太陽電池が普及するであろう。そして、家庭で使用される電力量のかなりの部分が、太陽電池によって供給される日もそう遠くないと予想している。

³ 太陽電池のエネルギーペイバックタイムは、生産規模が10MW/年の時、多結晶Siなら8.2年、アモルファスSiならば3.9年である。(太陽光発電技術開発の今後の進め方について中間報告書 p24による。)