

AHPと感度分析を用いた 一戸建て住宅用太陽光パネルの順位付け

発表構成

1. 研究背景
2. 研究目的
3. 分析手法
4. 階層図作成
5. シミュレーション
6. アンケート予備調査
7. 今後の課題
 - 参考文献
 - Appendix

東京理科大学 工学部 経営工学科
山口研究室所属 石崎 裕一

住宅用太陽光電池の現状

東日本大震災の二次災害（放射線漏洩，計画停電）

✓ 原子力への不信感の高まり。

- 2011/9/11に約6万人が明治公園で反原発デモ。 [5]
 - 再生可能エネルギーの活用を望む。
 - 再生可能エネルギーの中でも太陽光電池に注目。

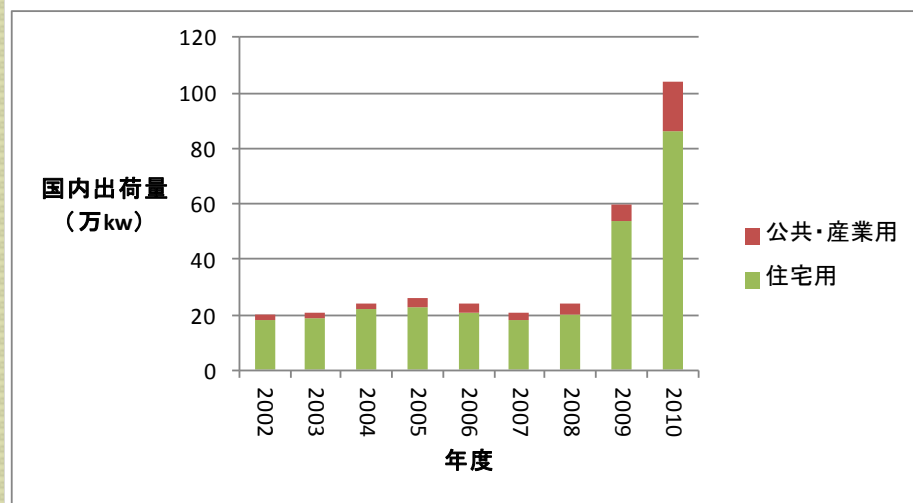


図1 太陽光電池の国内出荷用途別内訳[2]



- ✓ 住宅用の出荷量増加
- ✓ 余剰電力買取制度(2009年)を受けての急増加。

製造メーカー採択の現状

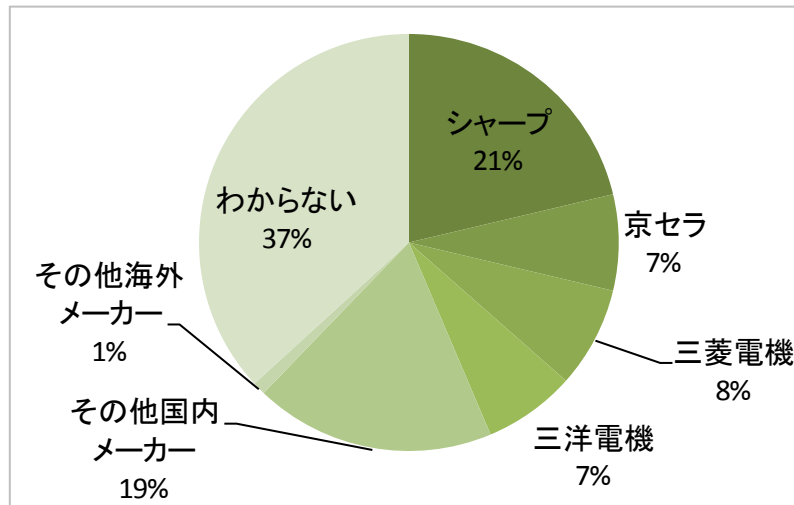


図2 導入したいメーカー先^[1]

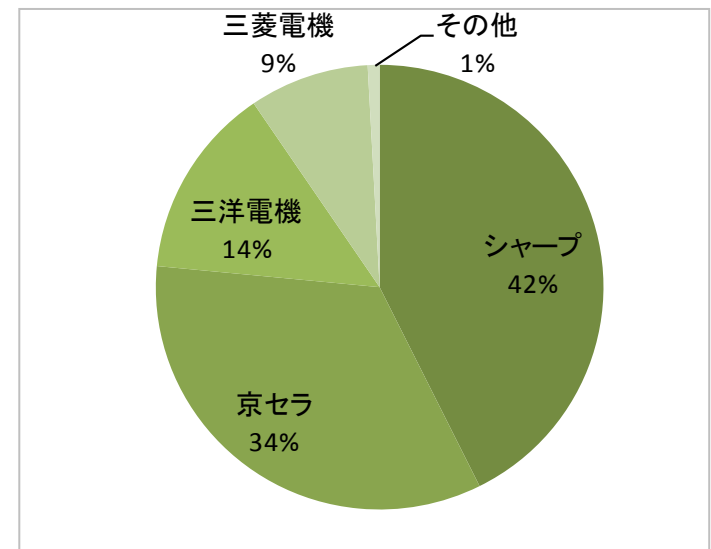


図3 メーカー別の採用率^[7]

✓ 導入したいメーカーが「その他国内，海外」や「わからない」の人が約6割を占める。



✓ 導入実績の現状は国内4社（シャープ，京セラ，三洋電気，三菱電機）が99%を占める。

研究目的

研究背景より

- 原子力エネルギーへの不信感が高まる。
- 太陽光発電の余剰電力買取制度の施行から，住宅用太陽光電池の出荷が増加。
- どの製造メーカーを採択したいかが不明確な消費者が多い。

メーカー採択に関わる項目を選定。

↓
一戸建て住宅用太陽光パネルの順位付けを行う。

✓ 製造メーカー採択の指標を，導入希望者に与える。

研究概要

- 太陽光電池導入にあたって
 - 複数の「評価項目」及び「選択肢」が存在.
 - 複雑な状況下にある採択問題を取り扱う.

～ Analytic Hierarchy Process ～

- 評価基準（価格や性能など）ごとに代替案（各メーカーのパネル）を一対比較する.
 - 各評価結果を統合し、最適な代替案を見つけるためのモデル.

評価方法：採用実績上位4社が公表するデータを用いる.
➤ 現実（データによる理論値）と心理（評価項目間の一対比較）の統合による重みの算出.

分析手法①

- AHP(Analytic Hierarchy Process)^{[3][4]}
 - 主観的判断とシステムアプローチをうまくミックスした問題解決型（提案型）手法の一つ。



図4 AHPの構造

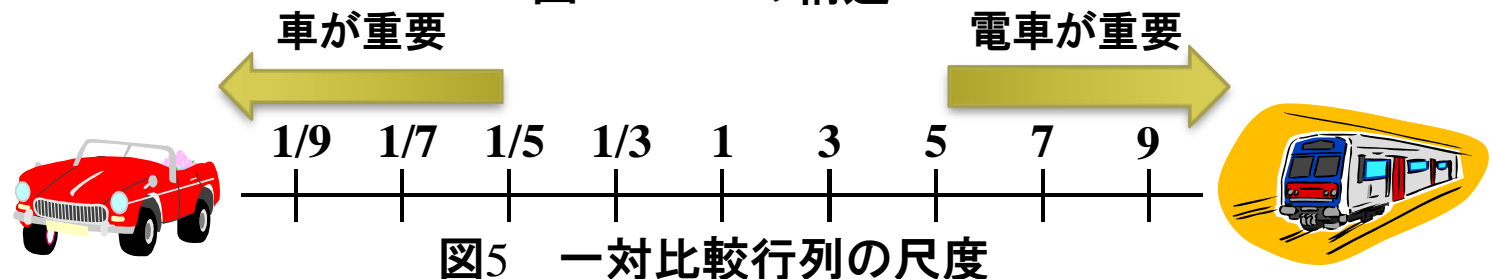


図5 一対比較行列の尺度

分析手法②

- A_1, A_2, \dots, A_n から一対比較行列 A を作成する。

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix} \quad (1) \quad \begin{aligned} a_{ii} &= 1 \\ a_{ij} &= 1/a_{ji} \end{aligned}$$

$$Aw = \lambda_{\max} w \quad (2) \quad \begin{aligned} \lambda_{\max} &: A \text{ の最大固有値} \\ w &: \text{主固有ベクトル} \end{aligned}$$

一対比較行列 A の最大固有値に対する固有ベクトルの要素の和を1に正規化したベクトルを重要度とする。

- 整合度指数(Consistency Index)

$$C.I. = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \quad (3)$$

一対比較が首尾一貫しているかどうかを判定する尺度。

$C.I. \leq 0.1(0.15)$ の場合, 整合性ありと判断される。

分析手法③

- 感度分析^[4]

- 意思決定者の回答パターンがデータ構造にどのように影響を与えるかを調べる手法。

＜例：営業利益の分析＞

$(\text{営業利益}) = (\text{単価}) \times (\text{売上数量}) - (\text{固定費} + \text{単位あたり変動費} \times \text{数量})$



単価，売上数量，固定費，単位あたり変動費，の4変数をそれぞれ起こりうる範囲で動かして，営業利益の数値がどう動くかを見る。

パネル間で差のない項目

1. 自然災害への耐久性

表1 各災害への対策例^[15]

災害例	災害対策
雷	過去30年間に太陽電池が直接落雷を受けたという事例は極めて稀.
地震	パネルの重さは和瓦に比べ1/4~1/5と軽く, 屋根への荷重は通常の建築物では問題ない.
風・台風	建設基準法に基づき風速60m/s(地上15m)の強風にも耐えうる設計が施されている.
雪	積雪によって発電量は減少するが, 壊れることはない.
雹(ひょう)	パネルのガラス面はJIS規格に適合した約3mm厚以上の強化ガラスを使用しており, 雹(ひょう)で割れることはない.

✓ 高い耐久性
✓ 差をつけ難い

2. メンテナンス費用, 回数

- 太陽光パネルに関してはメンテナンスフリーである.

3. 保証年数^{[11][12][13][14]}

- 4社とも保障年数を10年で提供している.

✓ 上記3項目以外を理論式により統合.

評価基準の設定

- 1w当たりの価格^[10]

$$1w当たりの価格 = \frac{\text{モジュールの価格}}{\text{モジュールの公称最大出力}} \quad (4)$$

- 変換効率^[8]

$$\text{変換効率} = \frac{\text{モジュールの公称最大出力}}{\text{モジュールの面積}} \times \frac{1}{1000} \quad (5)$$

- CO₂削減量^[14]

➤ 3kw太陽光発電システムの年間発電量の場合.

$$\{180(g - c / kWh) * 2 \times 3,000(Wh / \text{年})\} / 1000 = 540(kg - c / kWh) \quad (6)$$

- 初期投資回収期間^[17]

➤ 投資回収期間法を用いて算出.

$$(\text{導入費} + \text{工事費} - \text{補助金}) / (\text{1年間の売電額}) \quad (7)$$

階層図作成

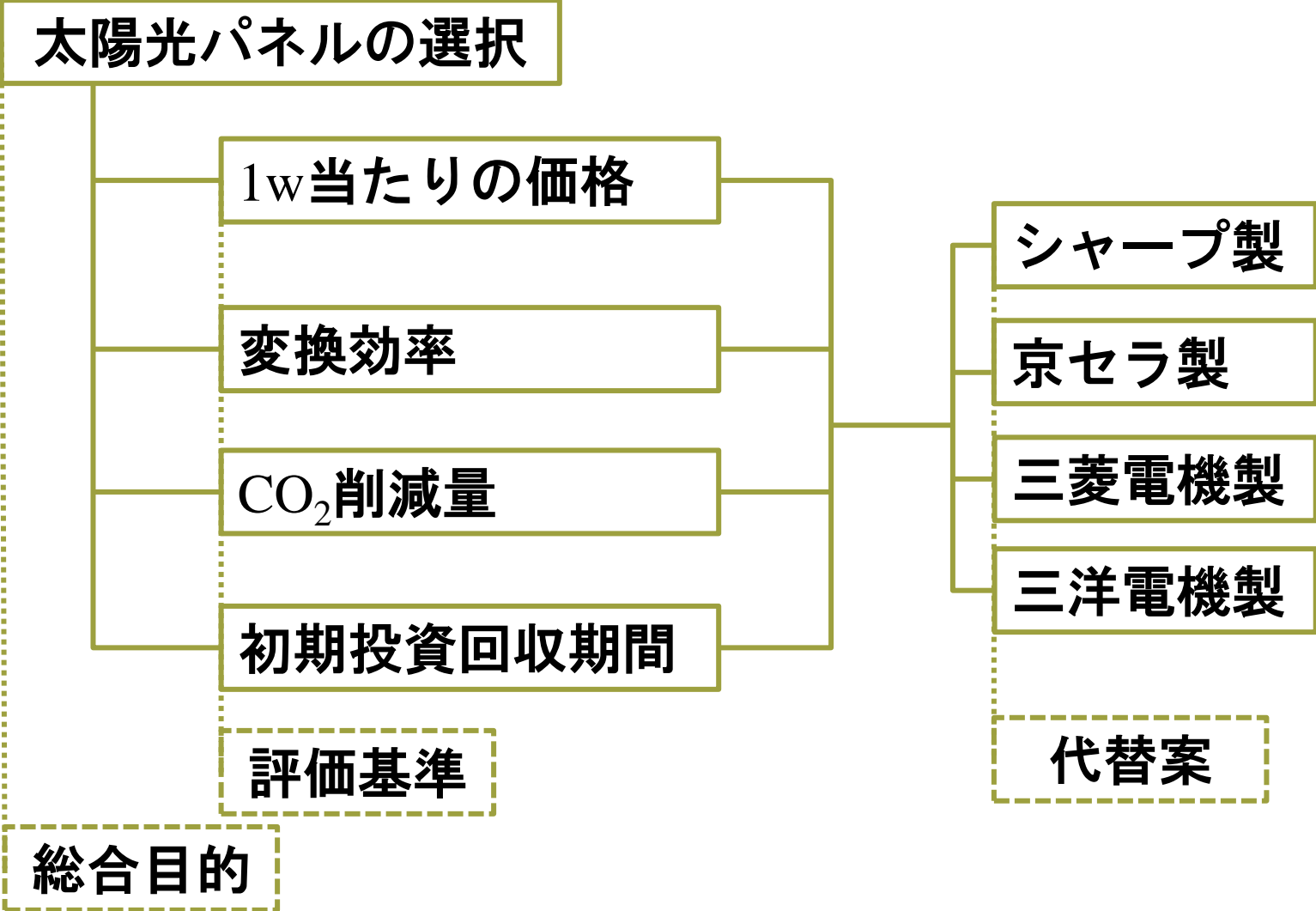


図6 AHPモデルの構造：太陽光パネルの選択

モデル屋根及び製品の設定

- 屋根の条件設定^[9]
 - 切妻屋根
 - 傾斜30度, 4m×8m (32m²)



図7 切妻屋根

- 対象製品抽出^{[11][12][13][14]}
 - 各メーカーの新商品をベースに選択.
 - 各パネルに適したパワーコンディショナー※ (パワコン) を, メーカーに問い合わせ設定.

※パネルが発電した直流電力を, 交流電力に変換する製品.

表2 分析対象商品 (パネルとパワコン)

	シャープ	京セラ	三洋電機	三菱電機
パネル	ND-170AA	KJ192P-3CRCA	HIT-N230SJ13/SJ16	PV-MX190HA-C
パワコン	JH-L1C3/L1C3P	PVN-404	SSI-TL40A5	PV-PN30G

各製品の基本情報及び仮定

表3 分析対象製品

	パネルの価格(¥)	パネルの公称 最大出力(w)	パネルの面積(m ²)	パワコンの価格(¥)
シャープ	79,380	170	1.15335	297,990
京セラ	100,800	192	1.354056	294,000
三洋電機	166,950	230	1.28296	309,750
三菱電機	119,700	190	1.421706	299,250

- (パネル枚数) = (屋根面積) / モジュール面積
- (システム容量) = { (最大出力) / 1,000 } × (パネル枚数)
- (年間発電量) = (システム容量) × 1,000
- (導入費) = (パネル費用) + (パワコン費用)
- (工事費) = (システム容量) × 100,000
- (補助金) = (システム容量) × 48,000
- (年間余剰電力) = (年間発電量) × (平均余剰率)
- (年間売電額) = (年間余剰電力) × 42

各代替案の評価行列

表4 シミュレーション結果

	1w当たりの価格(¥)	変換効率(%)	CO ₂ 削減量(kg-c/kWh)	回収期間(年)
シャープ	466.9411765	0.14739671	826.2	22
京セラ	525	0.14179620	794.88	24
三洋電機	725.8695652	0.17927293	993.6	32
三菱電機	630	0.13364226	752.4	29

- 各代替案の評価行列 X を算出。
 - 代替案は各評価基準で正負の優劣が異なるため、最小値が0，最大値が1となるように正規化。

$$x = \frac{k - \text{各基準の最小(大)値}}{\text{各基準の最大(小)値} - \text{各基準の最小(大)値}} \quad (8)$$

$$X = \begin{bmatrix} 1.00 & 0.30 & 0.31 & 1.00 \\ 0.78 & 0.18 & 0.18 & 0.80 \\ 0.00 & 1.00 & 1.00 & 0.00 \\ 0.37 & 0.00 & 0.00 & 0.30 \end{bmatrix} \quad (9)$$



アンケート概要（一部）

6. アンケート予備調査

	左の項目が絶対的に重要 (中間)	左の項目がかなり重要 (中間)	左の項目が重要 (中間)	左の項目が若干重要 (中間)	両方の項目が同じくらい重要 (中間)	右の項目が若干重要 (中間)	右の項目が重要 (中間)	右の項目がかなり重要 (中間)	右の項目が絶対的に重要 (中間)									
	9	8	7	6	5	4	3	2	1	1/2	1/3	1/4	1/5	1/6	1/7	1/8	1/9	
1w当たりの価格			○															変換効率
1w当たりの価格			○															CO ₂ 削減量
1w当たりの価格					○													初期投資回収期間
変換効率							○											CO ₂ 削減量
変換効率							○											初期投資回収期間
CO ₂ 削減量									○									初期投資回収期間

図8 評価基準間の重要度を計るアンケート例

✓ 図7のように、重要度の当てはまる箇所に丸付けを行ってもらい、一対比較行列 A を作成する。

A氏（50代所帯主）の場合

6. アンケート予備調査

① 一対比較行列 A の
整合性確認.

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 7 & 7 & 5 \\ 1/7 & 1 & 3 & 3 \\ 1/7 & 1/3 & 1 & 1 \\ 1/5 & 1/3 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$\lambda_{max} = 4.218365$$

$$C.I. = 0.07278833 \leq 0.1$$

整合性あり

② A の主固有ベクトルを正規化.

$$w = \begin{bmatrix} -0.31078306 \\ -0.17919817 \\ -0.06095211 \\ -0.67720317 \end{bmatrix} \quad (11)$$

正規化

$$W = \begin{bmatrix} \hat{e} & 0.25305254 & \hat{u} \\ \hat{e} & 0.14591063 & \hat{u} \\ \hat{e} & 0.04962975 & \hat{u} \\ \hat{e} & 0.55140708 & \hat{u} \end{bmatrix} \quad (12)$$

③ 評価行列 X と W
より代替案の重みを算出.

$$E = XW = \begin{bmatrix} \hat{e} & 0.8636180 & \hat{u} \\ \hat{e} & 0.6737039 & \hat{u} \\ \hat{e} & 0.1955404 & \hat{u} \\ \hat{e} & 0.2590516 & \hat{u} \end{bmatrix} \quad (13)$$

B氏（40代所帯主）の場合

6. アンケート予備調査

① 一対比較行列 A の整合性確認.

$$A = \begin{pmatrix} 1 & 1/5 & 7 & 1/3 \\ 5 & 1 & 7 & 1 \\ 1/7 & 1/7 & 1 & 1/7 \\ 3 & 1 & 7 & 1 \end{pmatrix} \quad (14)$$

$\lambda_{max} = 4.38903532$
 $C.I. = 0.1 \leq 0.1296784$
整合性なし（ ≤ 0.15 の場合には整合性あり）

② A の主固有ベクトルを正規化.

$$w = \begin{pmatrix} -0.23310679 \\ -0.66259619 \\ -0.06341743 \\ -0.55325909 \end{pmatrix} \quad (15)$$

正規化

$$W = \begin{pmatrix} 0.15413247 \\ 0.43811503 \\ 0.04193222 \\ 0.3658203 \end{pmatrix} \quad (16)$$

③ 評価行列 X と W より代替案の重みを算出.

$$E = XW = \begin{pmatrix} 0.6643862 \\ 0.4992881 \\ 0.4800473 \\ 0.1667751 \end{pmatrix} \quad (17)$$

感度分析

- 初期投資回収期間の重要度を減少させる
 - 売電価格増加を想定した場合と言える。

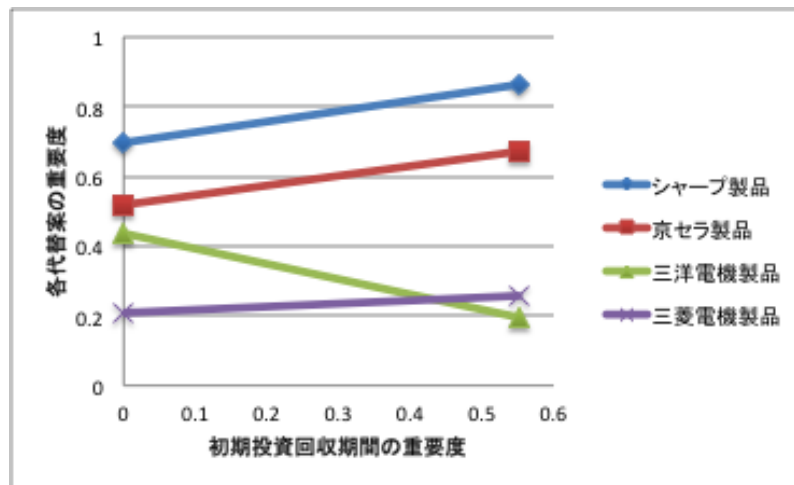


図9 A氏における感度分析

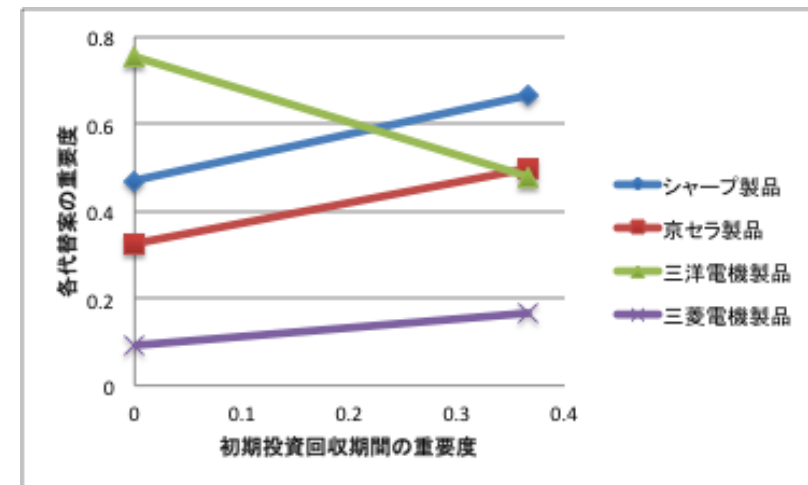


図10 B氏における感度分析

- ✓ A, B氏ともに重要度減少により代替案の順位が変動。
 - 三洋電機製品のみ重要度が増加する。
 - 売電価格増加が将来見込まれる場合，両氏の感性には三洋電機製品が最適と考えられる。

今後の課題

- 分析対象となる被験者を更に増やす。
 1. 整合性のある回答のみを採用。
 2. 採用した回答をいくつかのグループに分割する。
 - アンケート項目に「年収」や「年齢」などを追加し、グループごとの重要度を知ることができる。
 3. 売電価格変化による重要度変化の他にも感度分析を行い、様々な状況を予測することができる。
- 感度分析における数値設定の改善。
 - 重要度を0に変化させた際に、その他3つの重要度を同比率で変化させたが、これに関しては再度検討が必要と考えられる。

S-PLUSを利用した箇所

- 一対比較行列 A の固有値, 固有ベクトル算出.
 - 正規化, 整合指数算出及び行列の乗算も行った.

```
> x <- rbind(c(1., 0.3, 0.31, 1.), c(0.78, 0.18, 0.18, 0.8), c(0., 1., 1., 0.), c(0.37, 0., 0., 0.3))
> A <- rbind(c(1., 1./5., 7., 1./3.), c(5., 1., 7., 1.), c(1./7., 1./7., 1., 1./7.), c(3., 1., 7., 1.))
> eigen(A)
$values:
[1] 4.264002e+000+0.000000i -1.320008e-001-1.052748i -1.320008e-001+1.052748i 5.551115e-017+0.000000i
$vectors:
complex matrix: 4 rows, 4 columns.
      [,1]      [,2]      [,3]      [,4]
[1,] -0.23310679+0i -0.3920172+0.3614195i -0.3920172-0.3614195i -5.551115e-017+0i
[2,] -0.66259619+0i -0.3512290-1.2424298i -0.3512290+1.2424298i -5.555556e-001+0i
[3,] -0.06341743+0i 0.1166977+0.0562195i 0.1166977-0.0562195i -1.587302e-002+0i
      [,1]      [,2]      [,3]      [,4]
[4,] -0.5532591+0i 0.2328276-0.4244467i 0.2328276+0.4244467i 0.6666667+0i
> ci <- ((4.38903532) - 4.)/3.
> ci
[1] 0.1296784
> b <- eigen(A)$vectors
> w <- b[, 1.]
W <- rbind(w[1.]/sum(w), w[2.]/sum(w), w[3.]/sum(w), w[4.]/sum(w))
> E <- x %*% W
```

参考文献①

- [1]調査データを多数掲載する、調査資料、データバンクサイト
<http://reposen.jp/>（最終閲覧日2011/9/6）
- [2]JPEA 太陽光発電協会
<http://www.jpea.gr.jp/index.html>（最終閲覧日2011/9/6）
- [3]木下栄蔵：『AHPの理論と実際』日科技連 2000
- [4]大西真一，山ノ井高洋，今井英幸：AHPの感度分析結果を用いた代替案ウェイトの表現法，第21回ファジィシステムシンポジウム
- [5]さようなら原発1000万人アクション 脱原発で持続可能・平和な社会をめざす
<http://sayonara-nukes.org/>（最終閲覧日2011/9/28）
- [6]太陽電池の発電効率
http://www.sankometal.co.jp/prod/technology/pdf/03_06.pdf（最終閲覧日2011/9/28）
- [7]建設知識
http://www.xknowledge.co.jp/kenchi/kenchi_index（最終閲覧日2011/10/01）
- [8]太陽電池の変換効率
http://www.sankometal.co.jp/prod/technology/pdf/03_06.pdf（最終閲覧日2011/10/08）
- [9]Newtonムック～太陽光発電の全て～ ニュートンプレス2010/01/15
- [10]再生可能エネルギーの全量買取制度の導入に向けた検討について
<http://www.meti.go.jp/committee/materials2/downloadfiles/g100324a03j.pdf>（最終閲覧日2011/10/15）

参考文献②

- [11]住宅用太陽光発電 | 京セラ
<http://www.kyocera.co.jp/solar/> (最終閲覧日2010/9/6)
- [12]太陽光発電システム | シャープ
<http://www.sharp.co.jp/sunvista/> (最終閲覧日2010/9/6)
- [13]住宅用太陽光発電システム | 三菱電機
<http://www.mitsubishielectric.co.jp/service/taiyo/> (最終閲覧日2010/9/6)
- [14]住宅用太陽光発電システム | 三洋電機
<http://jp.sanyo.com/solar/> (最終閲覧日2010/9/6)
- [15]高部電気株式会社
<http://www.takabe-denki.co.jp/> (最終閲覧日2010/9/6)
- [16]再生可能エネルギーの全量買取制度の導入に向けた検討について
<http://www.meti.go.jp/committee/materials2/downloadfiles/g100324a03j.pdf> (最終閲覧日)
- [17]千住鎮雄, 伏見多美雄, 藤田精一, 山口俊和: 『経済性分析』 財団法人
日本規格協会(2008)

Appendix

パワーコンディショナーについて

- ・ 家庭用電力に変換する性能（変換効率）に注目。

表A 4社のパワーコンディショナーの比較^{[1][2][3][4]}

メーカー名	製品名	変換効率
シャープ	JH-G1C3/G1C3P	94.0%
	JH-G1C4/G1C4P	94.0%
三菱電機	PV-PN55G	96.5%
	PV-PN40G	97.5%
三洋電機	SSI-TL55A2	94.5%
	SSI-TL40A5	94.5%
京セラ	PVN-404	94.5%
	PVN-551B	94.5%

- ・ 変換効率は3.5%範囲以内に収まっている。
 - メーカー間で技術的な差が小さい。

パワーコンディションをメーカーの順位付に加えない。

● 太陽光電池の基礎用語

➤ 再生可能エネルギー

風力，水力，太陽光（熱），地熱，バイオマスを用いるエネルギーの総称である。環境負担が少なく，温暖化抑制が期待される。

➤ 再生可能エネルギー固定価格買い取り法

様々な個人や事業者が自然エネルギーで発電した電力を，電力会社に一定の価格で買い取ることを義務付けるもの。

➤ 変換効率

太陽光発電システムにおいて，太陽の光エネルギーを電気エネルギーに変換したときの変換割合のことを指す。変換効率が高いものほど，より効果的に電気を作ることができる。1cm²の太陽電池に対して光エネルギーが当たった場合の最大電力が変換効率となる。

「変換効率 = 出力電気エネルギー ÷ 太陽光エネルギー × 100」

➤ パワーコンディショナー

太陽電池の直流電力を交流電力に変換する専用のパワーコンディショナ。

● 太陽光電池の種類

➤ 単結晶シリコン電池

変換効率は高めだが、多くのシリコン結晶を使用するため製造コストが高くなるというデメリットがある。

価格面では多結晶シリコン型太陽電池よりも高いが、面積あたりの発電効率は多結晶シリコンよりも効率的なため、屋根が狭く多結晶シリコン太陽電池では十分なシステム量が確保できない場合などに最適である。

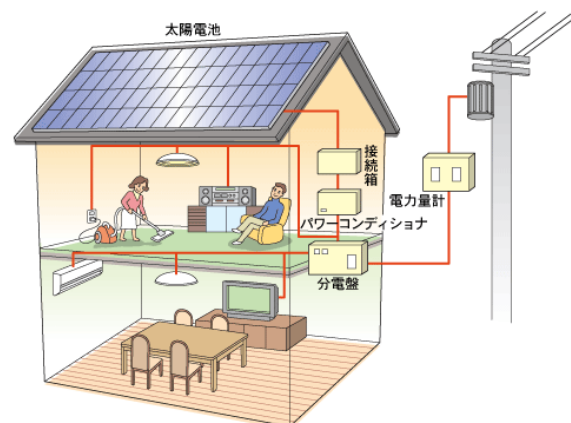
➤ 多結晶シリコン電池

結晶の粒が小さなシリコンを使った太陽電池である。単結晶シリコン太陽電池と比較して面積あたりの発電効率は落ちるが、その分価格が安いという特徴がある。

また、製造にかかるエネルギー量も少なくて済むため、近年製造量が増加している。

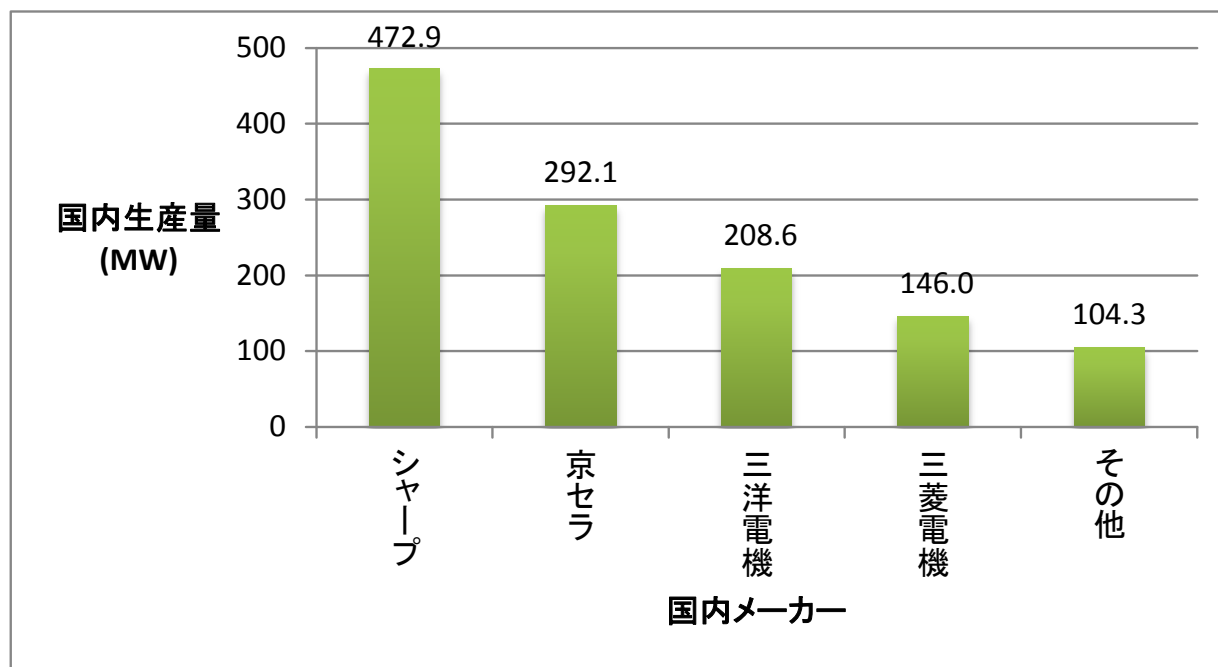
最も経済効率性に優れた太陽電池で、屋根の面積という制約を考えないのであれば最適。しかし、屋根が狭小な場合などには多結晶シリコン太陽電池では出力量が不足する場合も考えられる。

● 住宅用太陽光発電システムの様子



- 住宅用の太陽光発電システムは、太陽の光エネルギーを受けて太陽電池が発電した直流電力を、パワーコンディショナにより電力会社と同じ交流電力に変換し、家庭内のさまざまな家電製品に電気を供給する。
- 一般の系統連系方式の太陽光発電システムでは電力会社の配電線と繋がっているため、発電電力が消費電力を上回った場合は、電力会社へ逆に送電（逆潮流）して電気を買って取り返すことが可能。反対に、曇りや雨の日など発電した電力では足りない時や夜間などは、従来通り電力会社の電気を使う。

- 太陽光電池システムの国内生産量



図A 国産製造メーカーの生産量（国内）

- 石油電力のCO₂排出原単位と太陽光発電システムの製造時CO₂排出量の差.

$$200(g - c / kWh) - 20(g - c / kWh) = 180(g - c / kWh)$$

シミュレーション過程

- シミュレーションで得られたデータ

表B CO₂削減量算出に用いたデータ

	パネル枚数(枚)	システム容量(kw)
シャープ	27	4.59
京セラ	23	4.416
三洋電機	24	5.52
三菱電機	22	4.18

表C システム容量別の平均余剰電力の割合^[13]

システム容量	件数	平均余剰率
2.5kw未満	2048	46.7%
2.5kw以上～3.5kw未満	8616	55.1%
3.5kw以上～4.5kw未満	5653	54.9%
4.5kw以上～5.5kw未満	2493	54.5%
5.5kw以上～6.5kw未満	1190	55.9%

表D 年間余剰電力

	余剰電力(Wh/年)
シャープ	2501.55
京セラ	2424.384
三洋電機	3085.68
三菱電機	2294.82

表E 初期費用算出に用いたデータ

	導入費(¥)	工事費(¥)	補助金(¥)	売電額(¥)
シャープ	2,441,250	45,900	220,320	105,065
京セラ	2,612,400	44,160	211,968	101,824
三洋電機	4,316,550	55,200	264,960	129,599
三菱電機	2,932,650	41,800	200,640	96,382