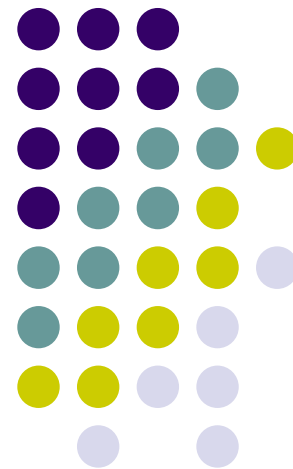


# リアル・オプション・アプローチによる 住宅用太陽光発電への蓄電池導入 評価

## 発表構成

- 1.研究背景
- 2.研究目的
- 3.分析手法(リアル・オプション)
- 4.適用対象
- 5.モデルの作成
- 6.評価の概要
- 7.分析・結果
- 8.まとめ・今後の課題
- 9.参考文献・Appendix

東京理科大学工学部  
経営工学科  
山口研究室  
杉原良和



# 太陽光発電への注目

## 1. 研究背景

### □ エネルギー、環境問題の深刻化.

- 化石燃料の枯渇.
- 地球温暖化問題.

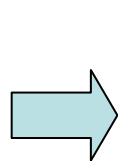
### □ 太陽光発電に注目が集まる. [4]

- エネルギーが無尽蔵に存在する.
- 二酸化炭素をほとんど排出しない.

### □ 住宅用太陽光発電に注目.

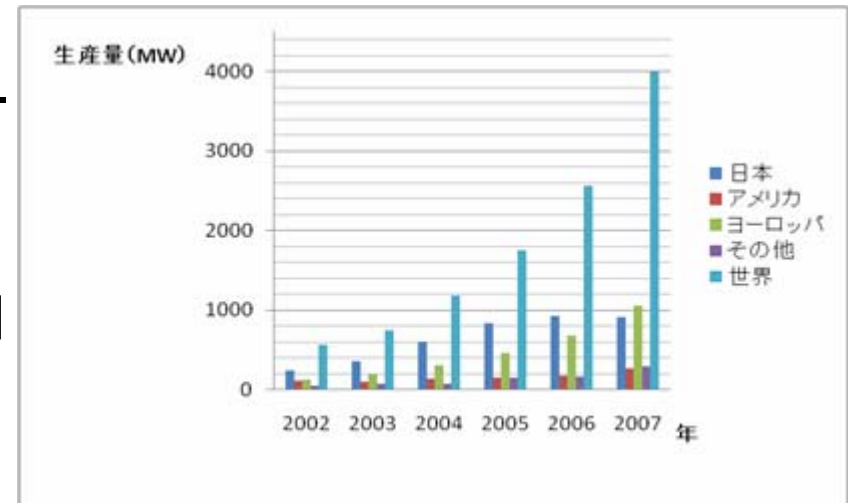
- 家庭での発電により電力削減に貢献.
- 二酸化炭素をほとんど排出しないことから家庭での環境意識が高まる.

太陽光発電  
の住宅導入

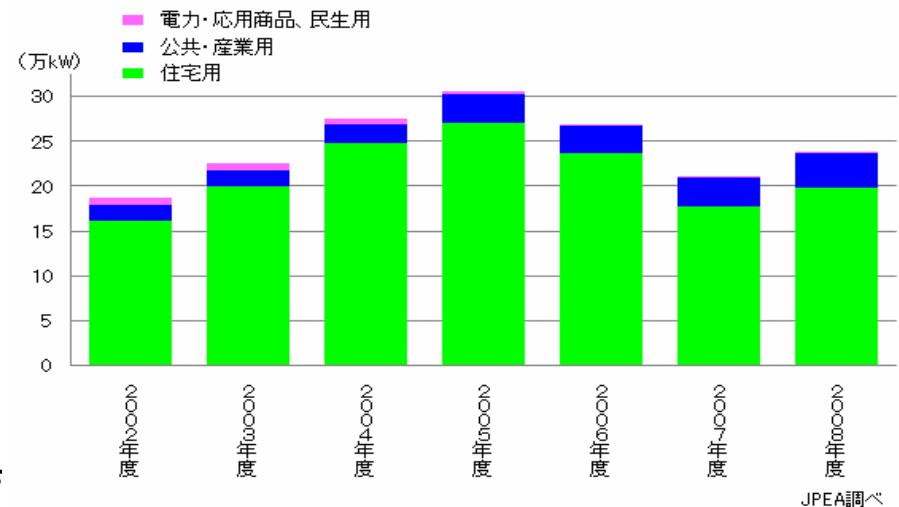


経済性

環境貢献に期待



図A: 世界の太陽光発電生産量 [14]



図B: 国内出荷用途別内訳 [5]

### ➤ 国・地方自治体の補助金制度. [8]

- 太陽光発電導入額の約1～2割を削減可能.

### ➤ 余剰電力買取制度の義務化.(2010年より)[4],[8]

- 家庭の余剰電力を市場電力価格の約2倍で取引し,向こう10年間にわたって施行.



経済性に期待

### ➤ 蓄電池の開発・研究 [6]

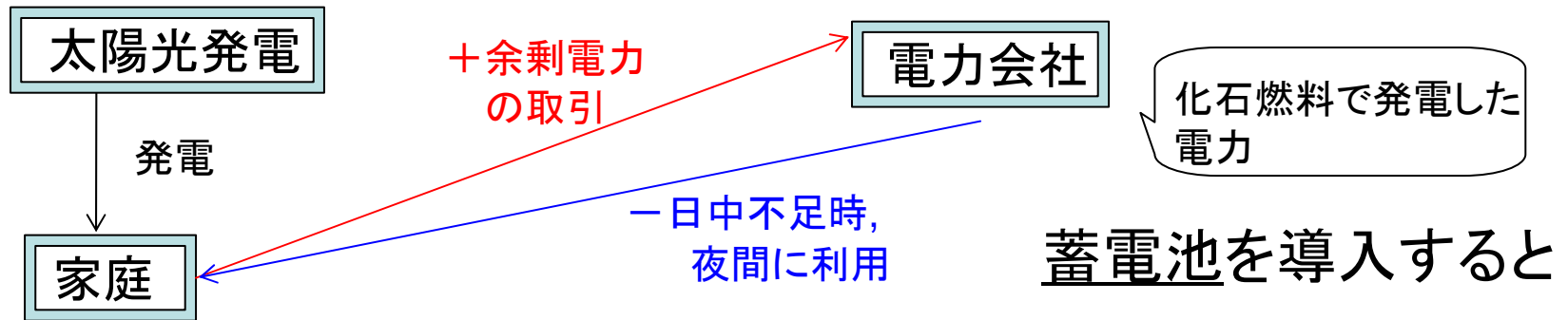
- 太陽光発電で発電した電力を蓄電して不足時に使用.
- 電力会社の電気を使用不可な災害時に蓄電池の利用.
- 二酸化炭素を排出しないエネルギーを利用し続けることが可能.



環境貢献  
に期待

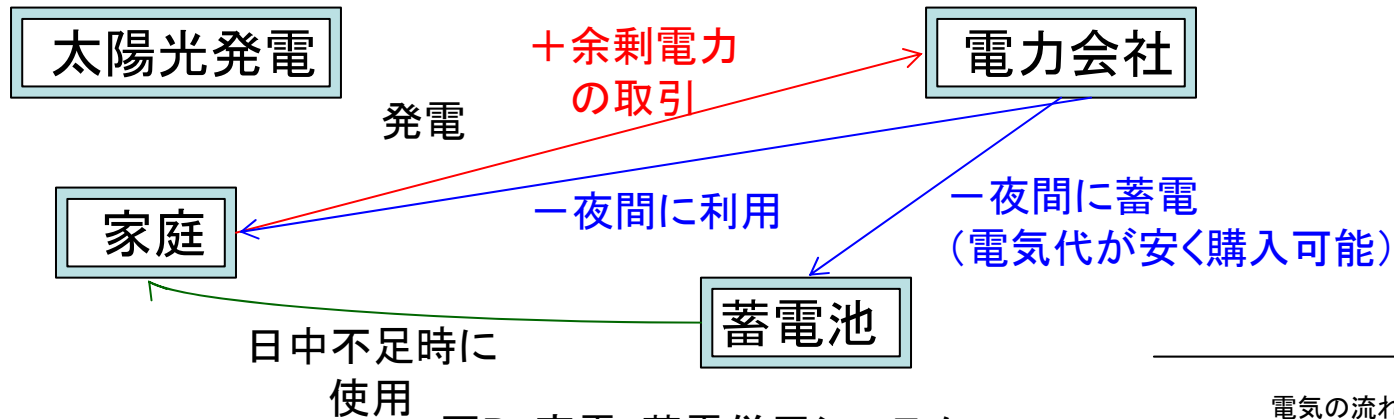
# 住宅用太陽光発電の主な発電方式① [11] 1.研究背景

## 1. 系統連携型太陽光発電システム(売電システム)



図C: 売電システム

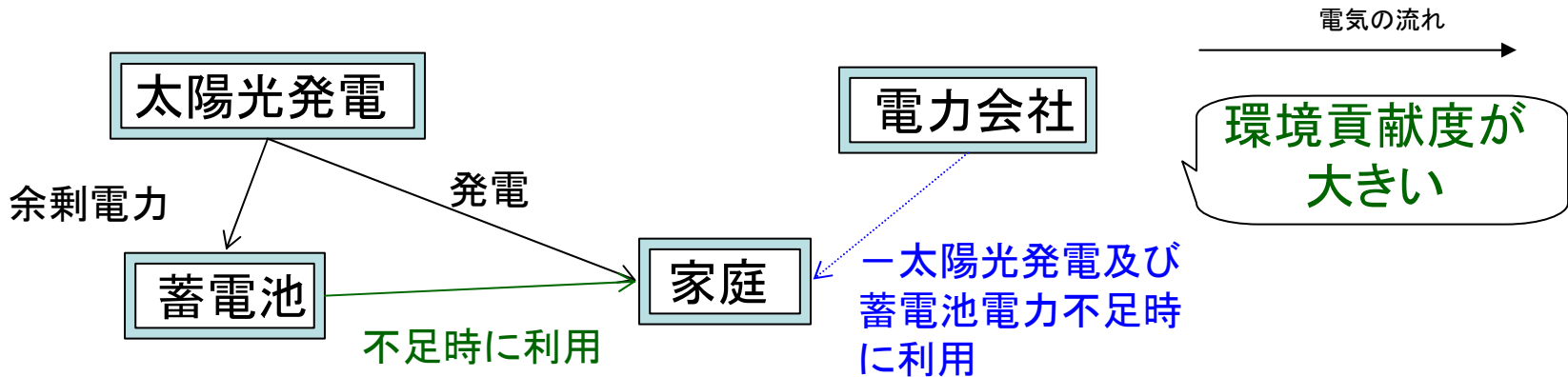
## 2. パワースーラーシステム(売電・蓄電併用システム)



図D: 売電・蓄電併用システム

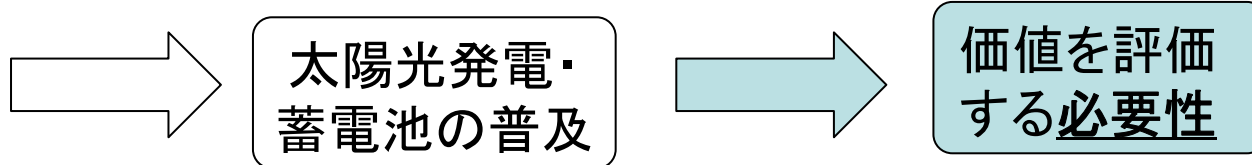
# 住宅用太陽光発電の主な発電方式② [11] 1.研究背景

-余剰電力買取制度の義務化がなくなった場合



図E: 独立型太陽光発電システム

- 蓄電池を導入することにより環境貢献が可能.
- 余剰電力買取制度の変化に対応.



- 蓄電池導入による家庭での経済性は不確実.
- 蓄電池の高価格, 技術発展, 社会制度が現在なし.

➡ 不確実性を考慮した評価手法の必要性.

# 研究目的

## 2.研究目的

- 研究目的

➤ 事業の不確実性の価値を考慮できるリアル・オプション・アプローチを用いて、住宅用太陽光発電における蓄電池の導入評価を行う。

- 住宅での太陽光発電及び蓄電池を普及させる立場に立ち、(図C, 図Dの) **価値・評価**を行う。

— 来年度から施行される売電システムにおいて蓄電池を導入することによる評価。

➤ 価値が得られる場合

— 普及を促し、二酸化炭素排出削減に貢献が期待。

■ 価値が得られない場合

— 評価が得られるための分析・提案(感度分析)

# リアル・オプション・アプローチ

## 3.分析手法

- リアル・オプションとは [1]
  - 予め決められた期間(行使期間)内に,予め決められたコスト(行使価格)で,何らかの行動を行う権利(義務ではない).
- リアルオプション・アプローチ (ROA) [3]
  - 不確実性の高い事業の価値を評価する際に,確率的・動的な視点から評価する.
- ROAに必要なパラメータ
  - 原資産の価格 -プロジェクトの投資・買収.
  - 行使価格 -オプションを行使する際の価格.
  - 行使期間 -プロジェクトの有効期間.
  - 原資産のボラティリティ -原資産の変動性.
  - リスクフリーレート -リスク極小な投資から得る利回り.

住宅用太陽光  
発電において  
モデル化

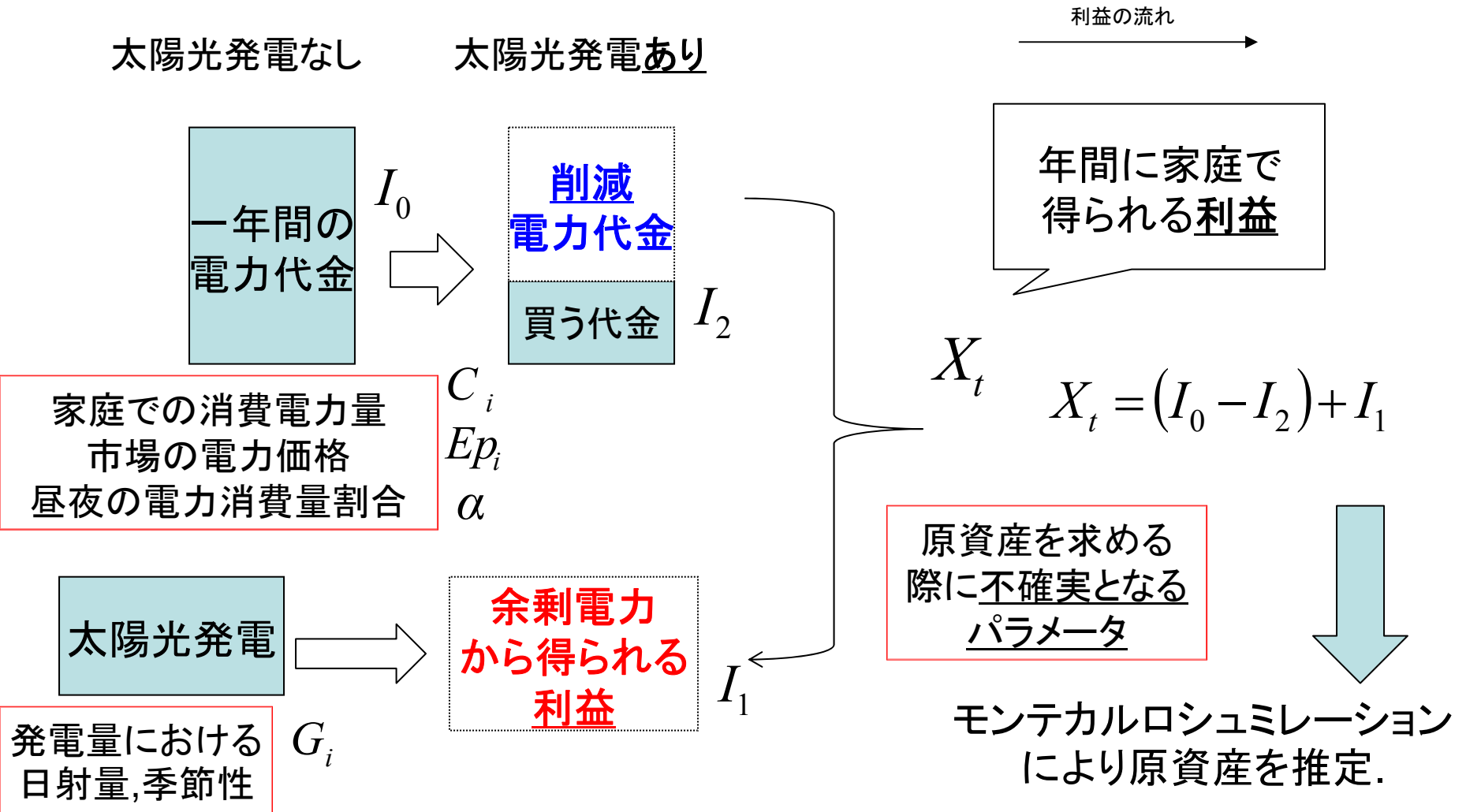
# 事業の適用対象

## 4.適用対象

- **対象**-日本の一世帯住宅(マンション, 工場は除く)
- **対象範囲**-日本全国47都道府県.
- **適用手段・目的**
  - ROAを用いて2011年以降の住宅用太陽光発電について蓄電池を導入することによる評価を行う.
- **評価及び価値**
  - 最適な蓄電池投入のタイミング.
  - 蓄電池導入のオプションを考慮した売電・蓄電併用システムの価値評価.
  - オプションを考慮しない住宅用太陽光発電の評価.



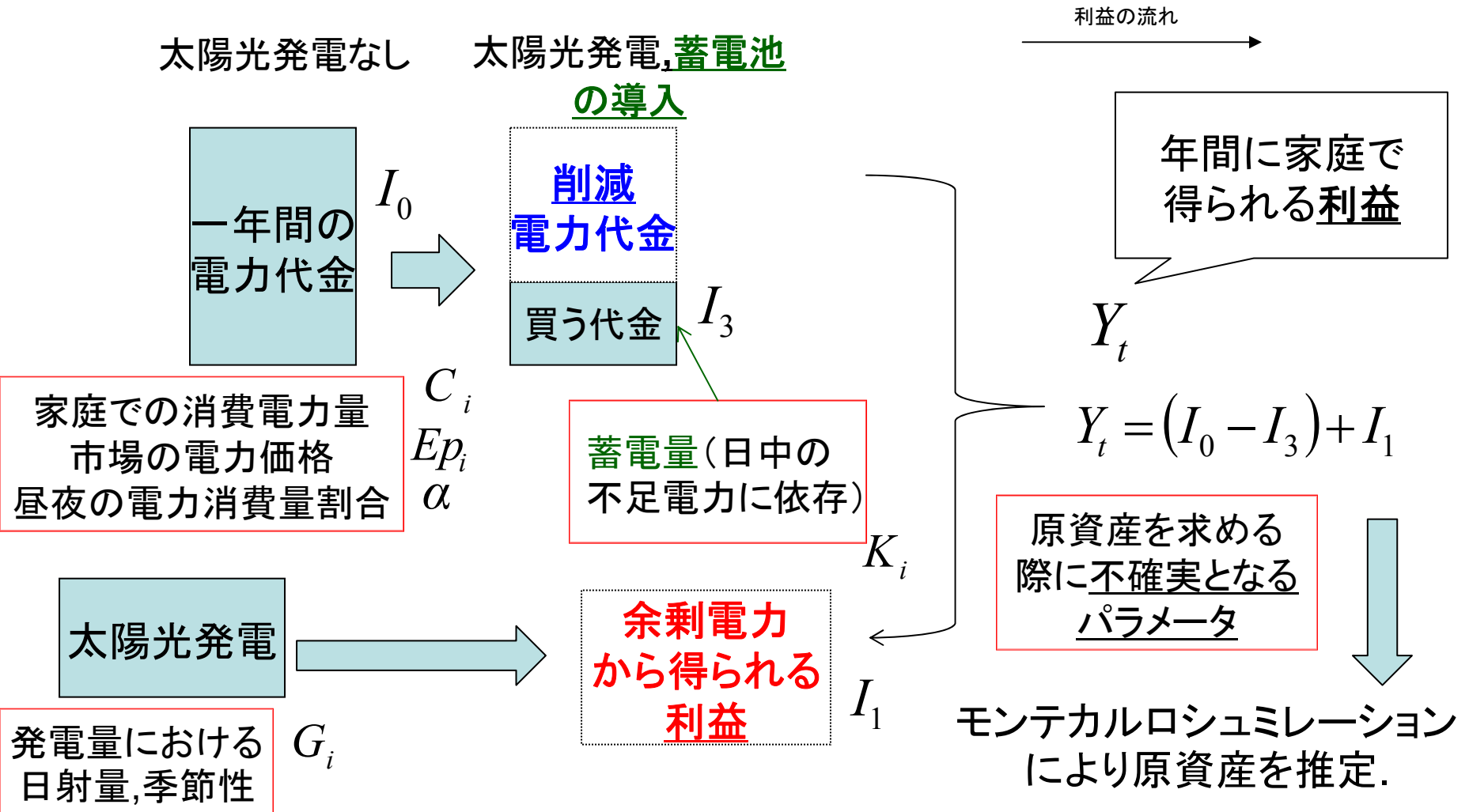
# 売電システム,モデル図(原資産の評価) 5.モデルの作成



図F: 売電システムの原資産導出のモデル図

# 売電・蓄電併用システム,モデル図

## 5.モデルの作成



図G: 売電・蓄電併用システムの原資産導出のモデル図

# モデルを構成するパラメータ①

## 5.モデルの作成

- 月別予測発電電力量(kwh) [4],[5],[7]
- $G_i = \text{日射量} * \text{太陽電池容量}(3.59\text{kW}) * \text{温度補正係数} * \text{パワーコンディショナー変換効率}(0.94) * \text{外的損失}(0.9465) * \text{その月の日数} \quad (1)$

- 年間負担電力代金

$$\sum_{i=1}^{12} C_i \times Ep_i = I_0 \cdots (2)$$

- 年間に売る余剰電力代金

$$\sum_{i=1}^{12} \max(G_i - \alpha C_i, 0) \times 2Ep_i = I_1 \cdots (3)$$

- 年間に買う電力代金(売電システム)

$$\sum_{i=1}^{12} \{ \max(\alpha C_i - G_i, 0) + (1 - \alpha) C_i \} \times Ep_i = I_2 \cdots (4)$$

$C_i$ :  $i$ 月にかかる平均消費電力量 ( $i = 1 \cdots 12$ )  
 $\alpha C_i$ :  $i$ 月にかかる日中消費電力量  
 $(1 - \alpha) C_i$ :  $i$ 月にかかる夜間消費電力量  
 $\alpha$ : 消費電力量の重み  
 $Ep_i$ :  $i$ 月の市場電力価格  
 $G_i$ :  $i$ 月に発電する電力発電量

# モデルを構成するパラメータ②

## 5.モデルの作成

- 年間に買う電力代金 [9] 夜型電気契約により, 日中は通常価格の1.3倍  
夜間は通常価格の0.4倍で計算

$$\sum_{i=1}^{12} \max (\alpha C_i - G_i - k_i, 0) \times 1.3 Ep_i + \{k_i + (1 - \alpha) C_i\} \times 0.4 Ep_i$$

$$= \sum_{i=1}^{12} \max [1.3(\alpha C_i - G_i) + 0.4(1 - \alpha) C_i - 0.9 k_i, 0.4(k_i + (1 - \alpha) C_i)] \times Ep_i$$

$$= I_3 \dots (5)$$

$k_i$ :  $i$ 月に蓄電した蓄電量

• 行使期間

$t = 10$ (年)

• 行使価格

$I_\beta(t)$ :  $t$ 年における蓄電システム投資額

- 蓄電池の価格は技術開発により, 価格減少が予想される。  
➤ 幾何ブラウン運動を用いて価格減少モデルとして用いる。 [12]

$$\begin{cases} \ln I_\beta(t) = \ln I_\beta(0) + vt + \sigma z(t) \dots (6a) \\ E[I_\beta(t)] = I_\beta(0) \times e^{\left(v + \frac{1}{2}\sigma^2\right)t} \dots (6b) \end{cases}$$

$v, \sigma$ : 定数  
 $z$ : 標準ウィーナー過程  
 $\ln I_\beta(t) \sim N(\ln I_\beta(0) - vt, \sigma \sqrt{t})$

# 評価までの流れ

## 6.モデルの解法(概要)

### □ モンテカルロシミュレーションの実行 [1]

- モデル図(図F,G)の不確定要因,モデル式を用いてシミュレーションを行う.

### □ ROAによる価値評価・感度分析.(S-PLUSを用いて分析)

- 二項格子モデルによる原資産の現在価値評価(スライド24~26ページ参照)
  - 原資産の変動性をツリー上で表現
  - リスク中立確率を用いて,現在価値を求める.
- スイッチング・オプションによる評価(スライド27ページ参照)
  - オプション保有者に対して,一定のコスト(行使価格)で二つの操業モード間で変更を行う権利を与える. [1]



- モデルでは売電・蓄電併用システムから売電システムに戻ることはできない

# シミュレーションに使用したパラメータ

## ● 消費電力量の重み $\alpha$

- 1,2,6,7,8,12月は0.1~0.4の一様分布とし,3,4,5,9,10,11月は0.3~0.6の一様分布と仮定.

-夏・冬は夜間の電力使用が多くなると予想されるので上記の値を仮定.

表1:15年間における市場電力価格データの統計量

## ● 市場電気価格 $Ep_i$ [15]

- 市場の過去15年のデータを利用.
- 最小値・最大値から一様分布を仮定.

## ● 月別予測発電電力量 (kwh) $G_i$ [7]

- 温度補正係数
- -損失率12月~2月を10%,3月~5月・9月~11月を15%,6月~8月を20%.

## ● 日射量

表2:日本全国の月別平均日射量データ[10]

平均	24.5792
標準誤差	0.309794
中央値 (メジアン)	24.8848
標準偏差	1.199825
分散	1.439581
範囲	3.4766
最小	22.28246
最大	25.75906
信頼区間 (95.0%)	0.664441

	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月
平均	4.115	4.4605	4.9325	5.379	5.5985	5.1611	5.3757	5.6688	4.7876	4.4359	3.7006	3.6377
標準偏差	23.042	19.638	17.787	19.074	15.72	13.439	16.383	21.017	20.146	17.283	14.956	18.437
最大値	5.05	5.68	5.72	5.09	5.5	5.5	6.42	5.99	5.72	4.98	4.39	4.67
最小値	1.22	1.95	2.94	3.7	4	3.61	3.68	3.45	2.73	2.56	1.28	0.97

# シミュレーションに使用したパラメータ②

- 蓄電池の容量<sup>[13]</sup>  $K_i$ 
  - 家庭での1日の平均使用電力12kw（月に約360 kw）
  - シミュレーションでは一ヶ月の累積容量（最大.360kw）の値を変えて評価する
- 蓄電池の価格（行使価格）<sup>[13]</sup>

表3: 式(7)を用いて算出した市場の蓄電池価格(容量12kw)

年	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
円	479614	459234	439720	421035	403144	386014	369611	353906	338867	324468	310681

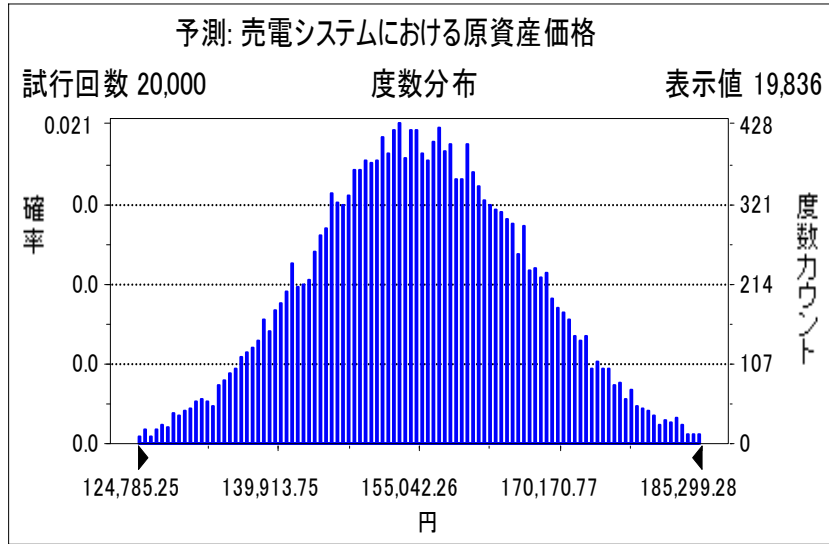
- 平均消費電力量  $C_i$

表4: 乱数発生で得られた平均消費電力量

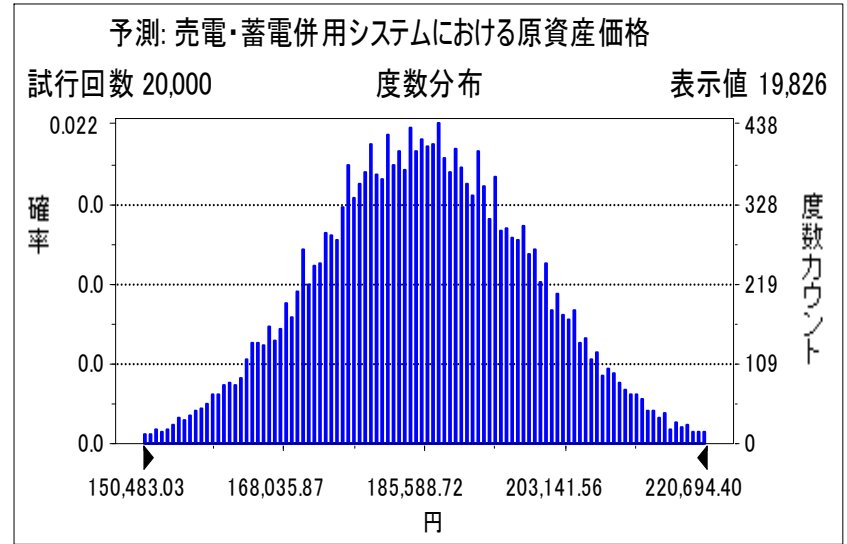
月	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月
平均	443.4616	375.2374	338.3847	364.9689	297.1569	250.05	310.3537	404.4734	385.9773	327.6749	279.43	349.8877
標準偏差	38.80662	15.8481	15.34733	14.78186	15.18404	24.29299	17.52819	21.94961	16.71315	16.7119	18.34707	13.74506

➤ 一般家庭の年間消費電力は3600~5000kw

# シミュレーションの実行(月の蓄電最大容量を6kwとした場合) 7.分析・結果



図H: 売電システムにおける原資産価格の変動



図I: 売電・蓄電併用システムにおける原資産価格の変動

表5: 原資産価格から得られる統計量

統計量	売電システム原資産価格	売電・蓄電併用システム原資産価格
試行回数	20000	20000
平均値	155042	185589
中央値	154882	185437
標準偏差	11637.32	13502.19
分散	135427100.68	182309070.91
リスクフリーレート	0.0144	0.0144
ボラティリティ	0.0751	0.0728
上昇係数	1.078	1.075
下降係数	0.928	0.930
リスク中立確率	0.577	0.581

リスクフリーレート  
=10年国債の利回り  
1.44%

(2004年9月現在)

シミュレーション統計量

式(7),(8)より計算

2010/7/23

S-PLUS提出資料

16



# S-PLUSによる分析結果①

## 7.分析・結果

\$gennzaibai:

numeric matrix: 11 rows, 11 columns.

	[,1]	[,2]	[,3]	[,4]	[,5]	[,6]	[,7]	[,8]	[,9]	[,10]	[,11]
[1,]	1705462	1679550	1637491	1576776	1494589	1387773	1252797	1085711	882102.6	637046.9	345052.3
[2,]	NA	1431218	1395378	1343640	1273604	1182582	1067563	925181.9	751678.2	542855.5	294034.2
[3,]	NA	NA	1189063	1144974	1085294	1007730	909717.4	788388	640537.9	462591	250559.4
[4,]	NA	NA	NA	975682.8	924826.5	858730.8	775210	671820	545830.4	394194	213512.6
[5,]	NA	NA	NA	NA	788085.2	731762.1	660590.4	572487.2	465126	335910	181943.5
[6,]	NA	NA	NA	NA	NA	623566.6	562918	487841.4	396354.2	286243.6	155042
[7,]	NA	NA	NA	NA	NA	NA	479687.1	415711	337750.8	243920.7	132118.1
[8,]	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	354245.6	287812.2	207855.5	112583.6
[9,]	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	245257.4	177122.8	95937.41
[10,]	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	150934.1	81752.47
[11,]	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	69664.86

2011年度太陽光発電予想投導入額

図J: 売電システムの現在価値

約166万(工事費なし)[13]-約9万円のプラス

\$gennzaitiku:

numeric matrix: 11 rows, 11 columns.

	[,1]	[,2]	[,3]	[,4]	[,5]	[,6]	[,7]	[,8]	[,9]	[,10]	[,11]
[1,]	2041479	1990457	1921303	1831657	1718908	1580180	1412297	1211760	974716.7	696927.7	373730.4
[2,]	NA	1730420	1670301	1592366	1494347	1373743	1227792	1053453	847378	605879.9	324905.6
[3,]	NA	NA	1452090	1384336	1299123	1194274	1067391	915828.3	736675	526726.7	282459.3
[4,]	NA	NA	NA	1203484	1129403	1038252	927945	796182.9	640434.5	457914.2	245558.3
[5,]	NA	NA	NA	NA	981856	902613.1	806716.6	692168.2	556767	398091.4	213478.2
[6,]	NA	NA	NA	NA	NA	784694.2	701325.8	601742.1	484030	346084.1	185589
[7,]	NA	NA	NA	NA	NA	NA	609703.3	523129.4	420795.5	300871	161343.3
[8,]	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	454786.9	365822	261564.7	140265.2
[9,]	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	318030.4	227393.4	121940.7
[10,]	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	197686.4	106010.1
[11,]	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	92160.77

-太陽光発電と合わせて約14万円のプラス

図K: 売電・蓄電併用システムの現在価値

2010/7/23

S-PLUS提出資料

# S-PLUSによる分析結果②

## 7.分析結果

\$ROA:  
numeric matrix: 11 rows, 11 columns.

	[,1]	[,2]	[,3]	[,4]	[,5]	[,6]	[,7]	[,8]	[,9]	[,10]	[,11]
[1,]	1801672	1760840	1701443	1621139	1517336	1387773	1252797	1085711	882102.6	637046.9	345052.3
[2,]	NA	1500803	1450441	1381848	1292775	1182582	1067563	925181.9	751678.2	542855.5	294034.2
[3,]	NA	NA	1232230	1173818	1097551	1007730	909717.4	788388	640537.9	462591	250559.4
[4,]	NA	NA	NA	992966.2	927831.3	858730.8	775210	671820	545830.4	394194	213512.6
[5,]	NA	NA	NA	NA	788085.2	731762.1	660590.4	572487.2	465126	335910	181943.5
[6,]	NA	NA	NA	NA	NA	623566.6	562918	487841.4	396354.2	286243.6	155042
[7,]	NA	NA	NA	NA	NA	NA	479687.1	415711	337750.8	243920.7	132118.1
[8,]	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	354245.6	287812.2	207855.5	112583.6
[9,]	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	245257.4	177122.8	95937.41
[10,]	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	150934.1	81752.47
[11,]	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	69664.86

図L:スイッチングオプション評価

赤:スイッチングオプション  
行使

- 図J,K,Lより
  - 経済性の評価が得られたが、設備費や導入工事費等の費用も含めれば10年での利益はほとんどないと予想される。
  - 新規に太陽光発電を購入する場合は蓄電池と合わせて購入する方が利益を得る可能性がある。
  - 住宅に蓄電池の導入する場合は、評価の年(2011年)から5年以内に行うべき。

# S-PLUSによる感度分析結果

7.分析・結果

## □ 蓄電池

- 価格が減少, 容量が大きくなるにつれスイッチングオプションの価値が拡大.
- 蓄電池の導入の最適時期は2011年から4年から8年後の間に収束.
- 1日の平均使用電力の7割以上の容量を持つ蓄電池の導入は価値を得ることができない.



補助金制度の検討, 技術革新,  
住宅に段階的に設置すべき

## □ 余剰電力買取制度の変化

- 余剰電力制度がなくなった場合
- 売電システムの価値が減少. 蓄電池の導入は評価から6年以内で行使される.
- 余剰電力制度が市場電力価格の2倍以上になる場合
- 売電システムの価値が増加. 増加につれオプションは行使されない.
- 売電・蓄電併用システムの価値も増加するため, 経済性の価値は増加する.



蓄電池の導入は制度に対応できる. 蓄電池の市場動向と合わせて余剰電力制度の取引価格が減少した後に,  
家庭に十分な容量の蓄電池を導入することも可能.

## まとめ・今後の課題

□ 住宅への太陽光発電及び蓄電池の導入は今後さらに価値が向上し、普及が拡大できる可能性がある。

-住宅普及拡大により、公共施設などへの普及も期待。

□ 感度分析より蓄電池導入の評価も得られることから、蓄電池の制度・政策や技術開発に力を注ぐべき。

### ■ 感度分析の評価の拡張

-設備費，工事費

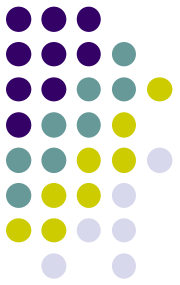
-太陽光発電自体の導入の最適化を評価

## S-PLUSの解析にあたって

- コマンドを作成することで、二項行使モデルを簡単に表現することができた.
- ✓ エクセルで作成した際はシート作成が困難でした.
  
- コマンドのパラメータを変化するだけで容易に感度分析が行えるため、時間の短縮と作業効率の向上に繋がった.

# 参考文献

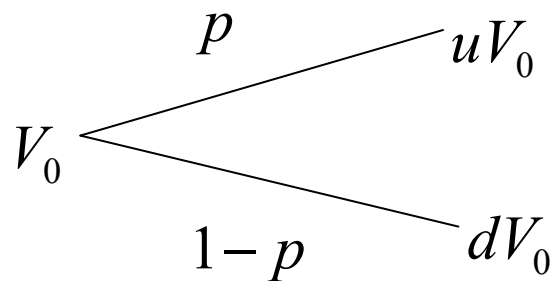
- [1]トム・コープランド,ウラジミール・アンティカロフ, 鈴木公明(訳):「リアル・オプション戦略フレキシビリティと経営意思決定」, 東洋経済社
- [2]山本大輔:「入門リアル・オプション」, 東洋経済社
- [3]今井潤一:「リアル・オプション」, 中央経済社
- [4]ニュートンプレス, “太陽光発電”, 2009. 9
- [5]JPEA太陽光発電協会 (<http://www.jpea.gr.jp/>),最終閲覧日2009/9/12
- [6]太陽光発電省エネドットコム (<http://www.shouene.com/index.html> ),最終閲覧日2009/9/12
- [7]京セラ太陽光発電の発電量予測 (<http://windom.phys.hirosakiu.ac.jp/gaiken/abst2005/gaikenB18.pd> ),最終閲覧日2009/9/11
- [8] 経済産業省・買取制度の義務化  
(<http://www.business-i.jp/news/sou-page/news/200908070099a.nwc>),最終閲覧日2009/9/10
- [9] 東京電力 (<http://www.tepco.co.jp/>),最終閲覧日2009/9/13
- [10] 独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 (<http://www.nedo.go.jp/library/index.html>),最終閲覧日2009/9/10
- [11] 株式会社ジーエス・ユアサ パワーサプライ  
(<http://home.gyps.gs-yuasa.com/products/sl/sikumi.html>),最終閲覧日2009/10/03
- [12]David G.Luenberger:「金融工学入門」, 日本経済新聞社
- [13]資源エネルギー庁 電力ガス事業部 ([www.meti.go.jp/committee/materials2/downloadfiles/g81128a05j.pdf](http://www.meti.go.jp/committee/materials2/downloadfiles/g81128a05j.pdf) ),最終閲覧日2009/10/17
- [14] 世界の太陽光発電生産量  
([http://www.spc.jst.go.jp/hottopics/0904reuseenergy/r0904\\_zhai.html](http://www.spc.jst.go.jp/hottopics/0904reuseenergy/r0904_zhai.html) ),最終閲覧日2009/10/18
- [15]市場電力価格の推移 (<http://www.enecho.meti.go.jp/topics/hakusho/2006EnergyHTML/excel/i2104017.xls>),最終閲覧日2009/10/15



# *Appendix*

# リアル・オプション評価①-二項格子モデル-

- 二項格子モデルを作成.
- 原資産の変動性をツリー上で表現.



$V_0$ : 原資産価格  
 $u$ : 上昇係数  
 $d$ : 下降係数  
 $p$ : リスク中立確率

図M: 一期間における原資産の変動性 [1]

- 上昇係数と下降係数について  
コックス,ロス,ルビンシュタインの変換式

$$\begin{cases} u = e^{\sigma \sqrt{T/n}} \\ d = 1/u \end{cases} \quad \begin{array}{l} T: \text{期間} \\ n: T \text{ を } n \text{ 期間に分類} \end{array} \quad \dots (7)$$



# リアル・オプション評価②-二項格子モデル-

- リスク中立確率のアプローチ

- 不確実性等価なキャッシュフローをリスクフリーレートで割り引く

$$p = \frac{(1 + r_f) - d}{u - d} \quad \dots (8) \quad r_f: \text{リスクフリーレート}$$

- 原資産のツリー上の各点における現在価値を求める.

- オプション価値の導出

- 2格子1期間のモデルによるオプションを考慮した現在価値

$$C_0 = \frac{pC_u + (1-p)C_d}{(1 + r_f)} \dots (9)$$

- 実際に期間において最終ノードからオプション価値を求め、ツリーをさかのぼることによって現在価値を導出する.

# リアル・オプション評価③-二項格子モデル-

- ツリー上の各状態における現在価値
  - ある状態における期待価値をリスク中立確率で求め,その状態におけるCFを加えた値に等しい.

$$PV_b = \frac{pPV_c + (1-p)PV_d}{(1+r_f)} + CF_{vb} \dots (10)$$

図N: ある状態における現在価値 [1]

$$\begin{cases} PV_{\alpha}: \text{状態}\alpha\text{における現在価値} \\ CF_{\alpha}: \text{状態}\alpha\text{で生まれるキャッシュフロー} \\ p: \text{リスク中立確率} \end{cases}$$

# リアル・オプション評価④

## - スイッチング・オプションによる評価 -

1.  $X_t$ について期末状態におけるオプション価値を求め,直前状態における現在価値を求める.

$$PV_{Xb}^f \quad \begin{array}{l} \nearrow c \\ \searrow d \end{array} \quad \begin{array}{l} S_{Xc} = \max(PV_{Xc}, PV_{Yc} - I_{\beta}(t)) \\ S_{Xd} = \max(PV_{Xd}, PV_{Yd} - I_{\beta}(t)) \end{array}$$

図0: 売電システムの期末状態における二項格子モデル[1]

2. 1.の  $PV_{Xb}^f$  と, 同じ状態における  $Y_t$  の現在価値  $PV_{Yb}$  を比較し, 売電・蓄電併用システムに移行するか判断する.

$$PV_{Xb}^F = \max (PV_{Xb}^f, PV_{Yb} - I_{\beta}(t)) \cdots (11)$$

3. 2. をツリーの先端(初期状態)まで繰り返し行い, オプションを含めた価値を求め, どの状態で移行するか観測する.