平成27年10月27日（火）
第4回原型炉開発総合戦略TF
資料3

エネルギー技術の社会的評価の例

1．社会評価を調べる統計手法の開発例

2.　核融合の社会経済分析例

岡野邦彦

１．社会評価を調べる統計手法の開発例

関連報告書は以下からダウンロードが可能。

（2008年） 研究時期が大震災前なのにもご注意ください。
・電力中央研究所　http://criepi.denken.or.jp/
・研究報告書　のページへ
・報告書番号で、L07012　を入力して検索
・報告書全文　をクリックしてダウンロード

さまざまなエネルギー分野からの専門家を集めた委員会を設置して検討を進めたもの。
（革新的エネルギー技術評価研究委員会）

背景となる問題意識

核融合のように資源が無尽蔵ならそのメリットは無限大？
→それは違いそうだが、定量評価ができない。

より安全な技術は、どれくらい効用が高い？
→効用を定量化できないか

エネルギー技術の評価軸を決め、特定のエネルギー技術によらないそれらの評価関数形状（効用曲線）を決めることはできないだろうか？

総合評価法としてマーケティング・リサーチ等の分野で使われている コンジョイント分析 を適用してみた。

コンジョイント分析の概念

- 一連の属性（価格，性能，外見等々に相当）から構成されるプロファイル・カードを用いる。
- 回答者に複数のプロファイルを示し、どの製品を選ぶかをたずねる。
- 大量の回答を統計処理して効用関数を求める。

具体例　パソコンの場合

属性
•CPU速度
•メモリー搭載量
•ハードディスク容量
•価格
•ブランド,デザイン等

プロファイル例
•Pentium4 3.0GHz
•512M
•10G
•98000円
•NEC製、スリムタイプ

データ　K	CPU	メモリ	デザイン	ブランド	価格
1	1.5GHz	256M	デザインA	ブランドA	17万円
2	2.0GHz	256M	デザインA	ブランドB	17万円
3	1.5GHz	256M	デザインB	ブランドA	17万円
4	2.0GHz	256M	デザインB	ブランドB	17万円
5	2.0GHz	768M	デザインA	ブランドA	25万円
6	2.5GHz	768M	デザインA	ブランドB	25万円
7	2.0GHz	768M	デザインB	ブランドA	25万円
8	2.5GHz	768M	デザインB	ブランドB	25万円
評価値	X_1	X_2	X_3	X_4	m

総合効用関数値　$U_k = a_1X_1 + a_2X_2 + a_3X_3 + a_4X_4 - a_m m + \varepsilon$

a_i, a_m は未知の係数、εは統計的意味のノイズ

アンケートで係数a_i, a_mを決定する。→付録1，2

プロファイル例（7つのプロファイルを表示した場合）

新エネルギー　A

資源量：10年
環境負荷：$20gCO_2/kWh$
経済性：5円/kWh
安定性：1ヵ月1日停電
運用性：千家屋分
安心感：0.01人/年死亡
開発期間：30年

新エネルギー　B

資源量：100年
環境負荷：$50gCO_2/kWh$
経済性：20円/kWh
安定性：1年1日停電
運用性：10万家屋分
安心感：0.001人/年死亡
開発期間：5年

新エネルギー　C

資源量：1000年
環境負荷：$1000gCO_2/kWh$
経済性：1円/kWh
安定性：半年1日停電
運用性：1億家屋分
安心感：0.1人/年死亡
開発期間：50年

新エネルギー　D

資源量：　・・・・
環境負荷：　・・・・
経済性：　・・・・
安定性：　・・・・
運用性：　・・・・
安心感：　・・・・
開発期間：　・・・・

・・・・・・

この質問内容は例で、水準などの聞き方は実際のアンケート時と異なります

このように属性が多すぎると判断不可能。
そこで・・・

部分属性を用いたペアワイズ評定型

全属性からランダムに選んだ3属性の2対質問を大量に聞く

設問の例

次のA・B　2つの発電技術のうち、あなたはどちらを選びますか？

（カッコに○印を記入してください。）

※示す以外の条件は、すべて同等であると仮定してお答えください。

発電技術　A

項目	特徴のケース
資源量	石油の100倍
日本全体の電気代	年間2兆4千億円増える（1人あたり2万円の負担増）
自然現象に対する強さ	影響を受けない

（　　）

発電技術　B

項目	特徴のケース
資源量	石油の10倍
日本全体の電気代	年間1兆4千億円減る（1人あたり1万円の負担減）
自然現象に対する強さ	不規則に発電できなくなる

（　　）

とりあげる【3項目】は
A、B 共通です。

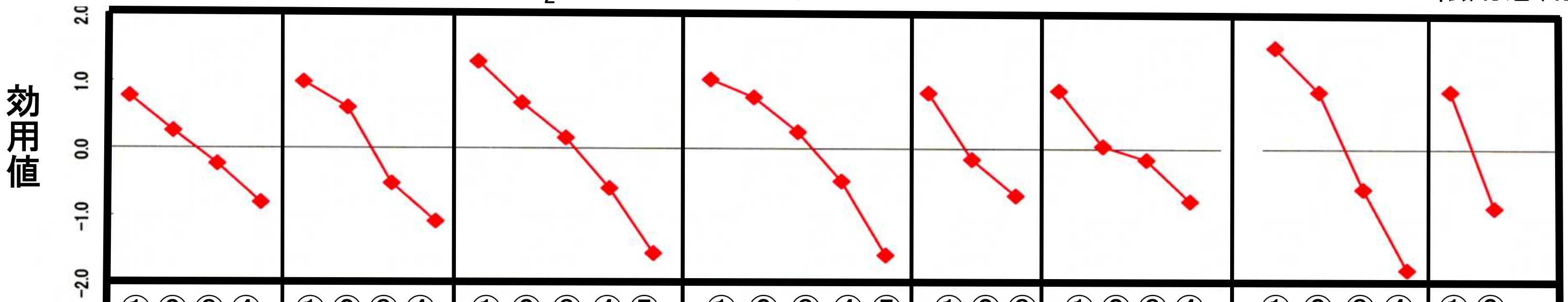
【特徴のケース】は、
A、B で異なる内容です。

対象は1300人。その属性の性別、年齢、地域などにも平準化を図っている。

エネルギー関係の専門家を除外したケースは、対象者を変えて2回実施し、結果が大幅に変わらないことを確認。

エネルギー関係の専門家だけに聞いたケースも行い、意識差の比較もおこなった。(差は明快に出る)

一般1300人調査による効用曲線

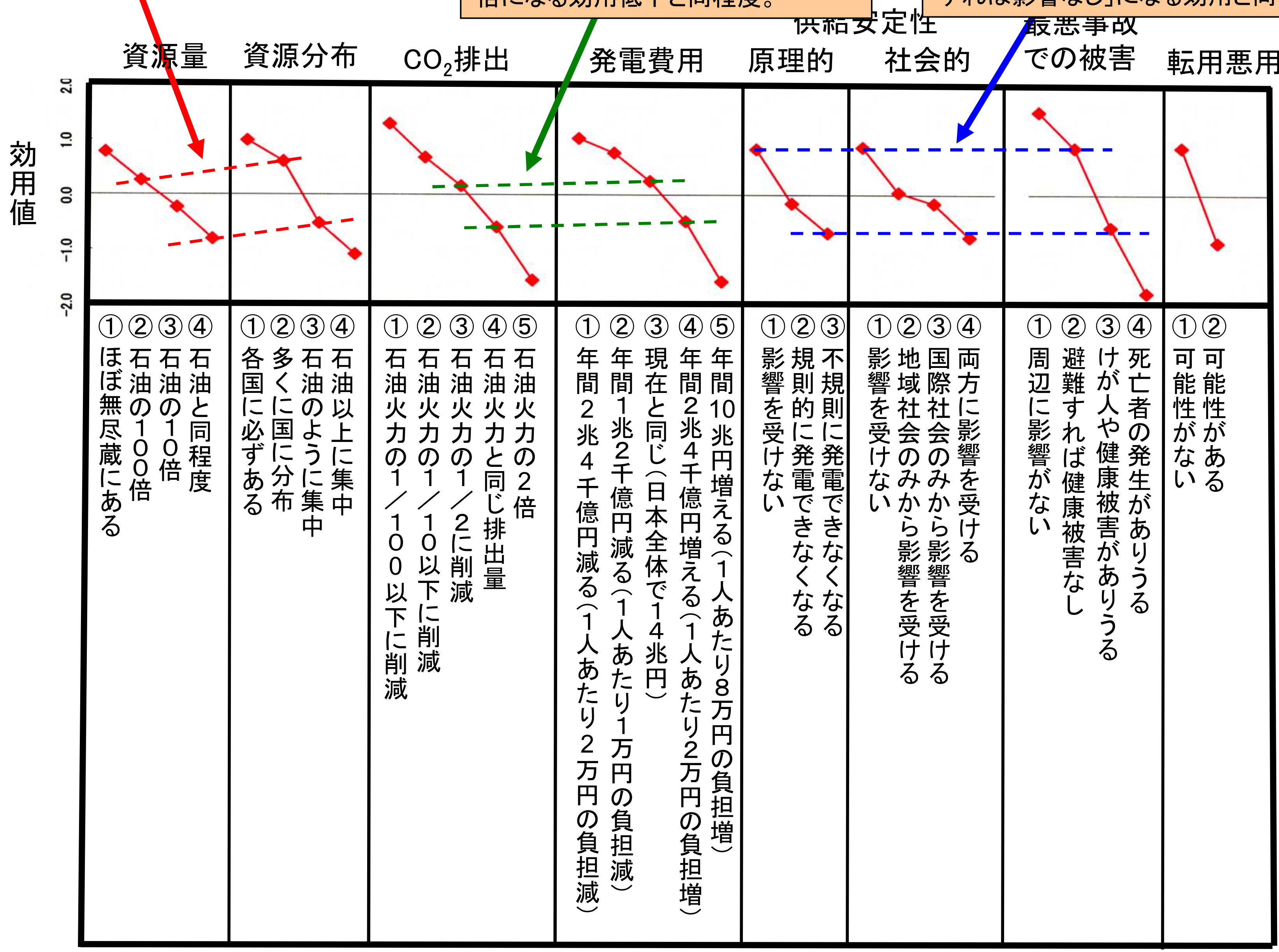


資源量	資源分布	CO_2排出	発電費用	供給安定性 原理的	供給安定性 社会的	最悪事故での被害	転用悪用
① ほぼ無尽蔵にある ② 石油の100倍 ③ 石油の10倍 ④ 石油と同程度	① 各国に必ずある ② 多くに国に分布 ③ 石油のように集中 ④ 石油以上に集中	① 石油火力の1／100以下に削減 ② 石油火力の1／10以下に削減 ③ 石油火力の1／2に削減 ④ 石油火力と同じ排出量 ⑤ 石油火力の2倍	① 年間2兆4千億円減る（1人あたり2万円の負担減） ② 年間1兆2千億円減る（1人あたり1万円の負担減） ③ 現在と同じ（日本全体で14兆円） ④ 年間2兆4千億円増える（1人あたり2万円の負担増） ⑤ 年間10兆円増える（1人あたり8万円の負担増）	① 影響を受けない ② 規則的に発電できなくなる ③ 不規則に発電できなくなる	① 影響を受けない ② 地域社会のみから影響を受ける ③ 国際社会のみから影響を受ける ④ 両方に影響を受ける	① 周辺に影響がない ② 避難すれば健康被害なし ③ けが人や健康被害がありうる ④ 死亡者の発生がありうる	① 可能性がない ② 可能性がある

資源量が100倍になる効果は、資源が多くの国に分布している効果と同程度。

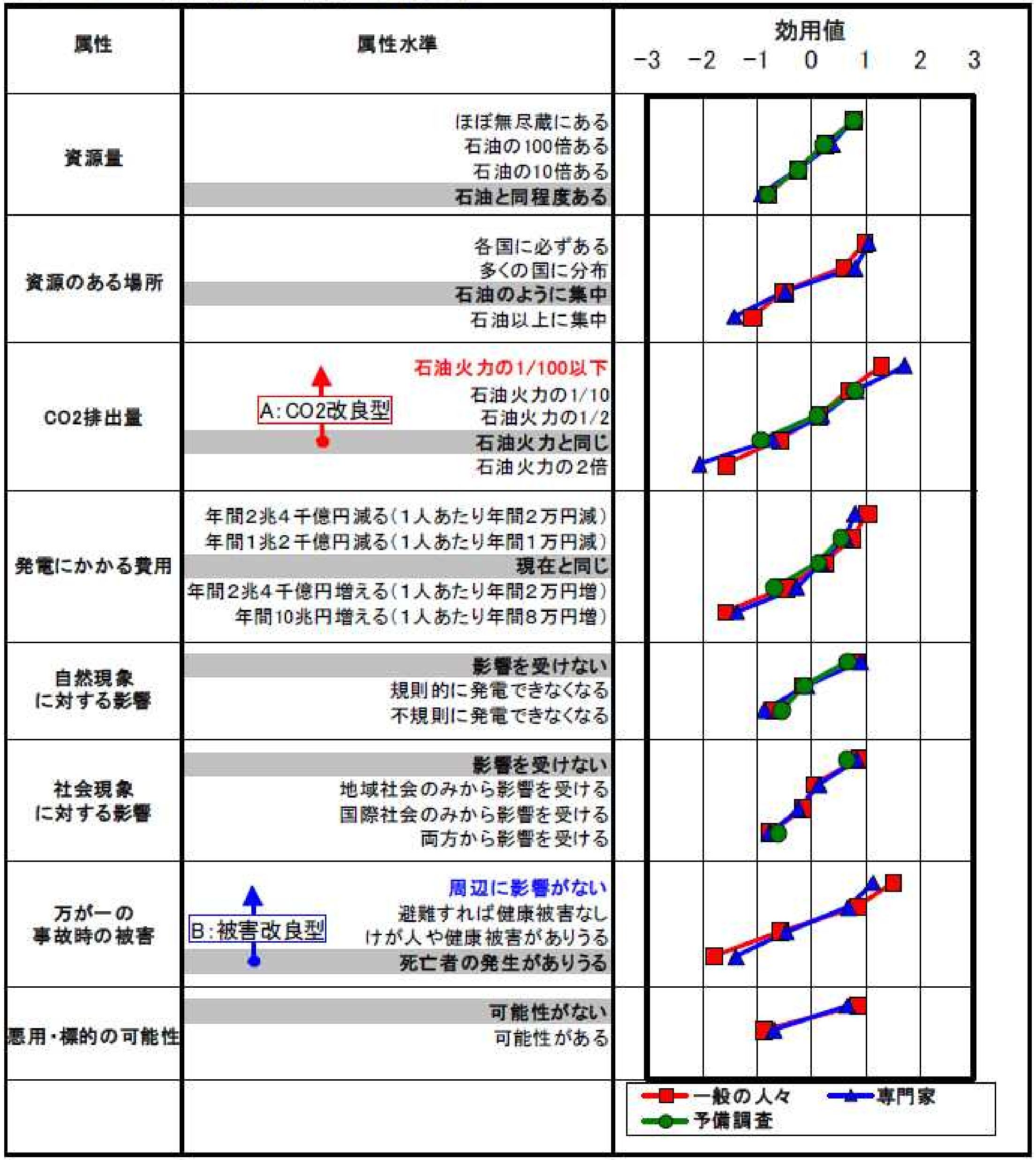
日本全国での総電気代が年間2兆4千億円（国民1人当たり2万円）上がることの効用低下は、CO2排出が2倍になる効用低下と同程度。

「自然現象の影響」「社会影響」を受けずに確実に発電できる効用は、「事故で健康被害がある」が「事故でも避難すれば影響なし」になる効用と同じ。

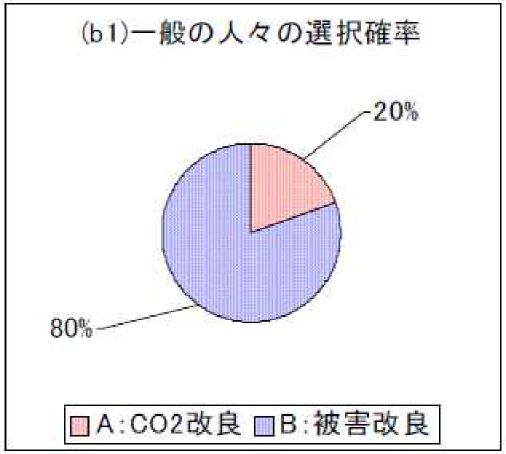


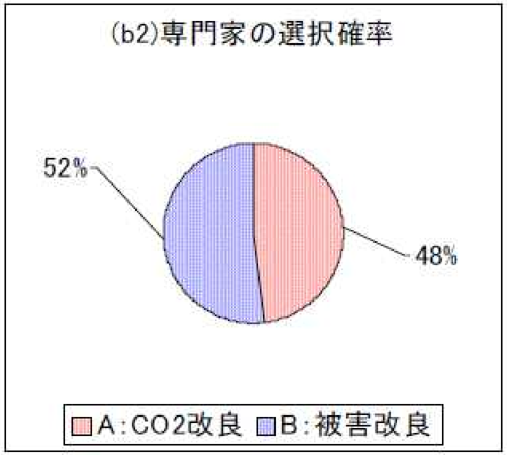
効用関数の回答者属性の差（専門家と非専門家）

(a) エネルギー技術に関する効用値



(b)効用値から求めた選択確率





技術評価手法としての可能性

●専門家の意識と一般の方の意識の差も調査可能で、なにを説明することで理解を得られるかの基準になる。

●事後感想によれば、自己の偏った見方を認識した人も多い。
講演会などよりも有効なコミュニケーションツールとして機能する可能性がある。
自分で気が付く、というのはもっとも効果的。

●個別技術に適用することで、特定技術への先入観なしに評価した場合の評価の行方がわかる。

一般調査で特定技術名を挙げた調査との乖離が大きいなら、その乖離を理由を調べて誤解を解いていく足がかりに利用可能ではないか。

●各エネルギー技術の利点を生かした導入や開発シナリオの提言が可能かもしれない。

2. 核融合の社会経済分析例

導入速度の視点

どのくらいの速度で投入可能か？

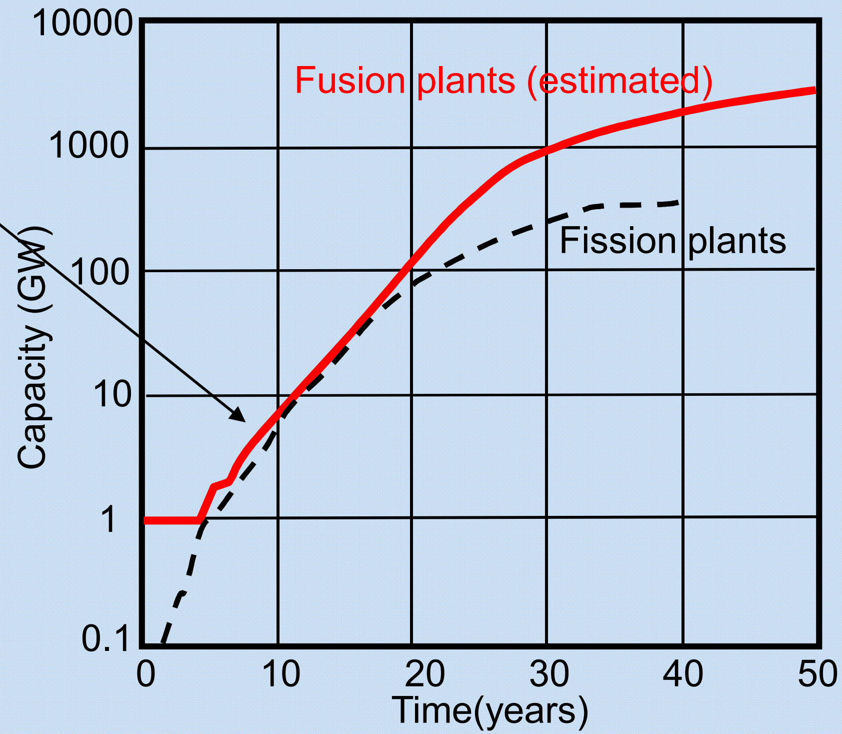
T制約ケース（初期はTBRが制約）

・初期装荷トリチウムの制約
TBR=1.08で核分裂の歴史と同程度の増設速度が可能（右図）

・建設工事容量の制約は
100GW/y　と仮定
＝軽水炉ピーク時の数倍

建設速度制約ケース
初期装荷トリチウムなし立上げも可能（NBI：100MW，3ヶ月で起動）。
この場合は，トリチウム倍増を待たずに次の炉を建造可能で，建設工事容量のみが制約。

1GW=100万kW～1台



Asaoka et.al, Fusion Technol. 39(2001)518
Tokimatsu et al., Fus. Science & Technol. 41(2002)831

コスト競合による参入コストの視点

CO_2放任（BAU：Business as Usual)ケースでは 2050年での核融合の参入可能コストは、50 mil/kWh （約6円/kwh)。 この実現はかなり困難と言え、核融合の導入は生じないだろう。おそらく、石炭が優位に立つ。

550ppm を守るケースでは、参入可能コストが50-110 mil/kWhとなり、核融合導入が起こり得る状況になる。

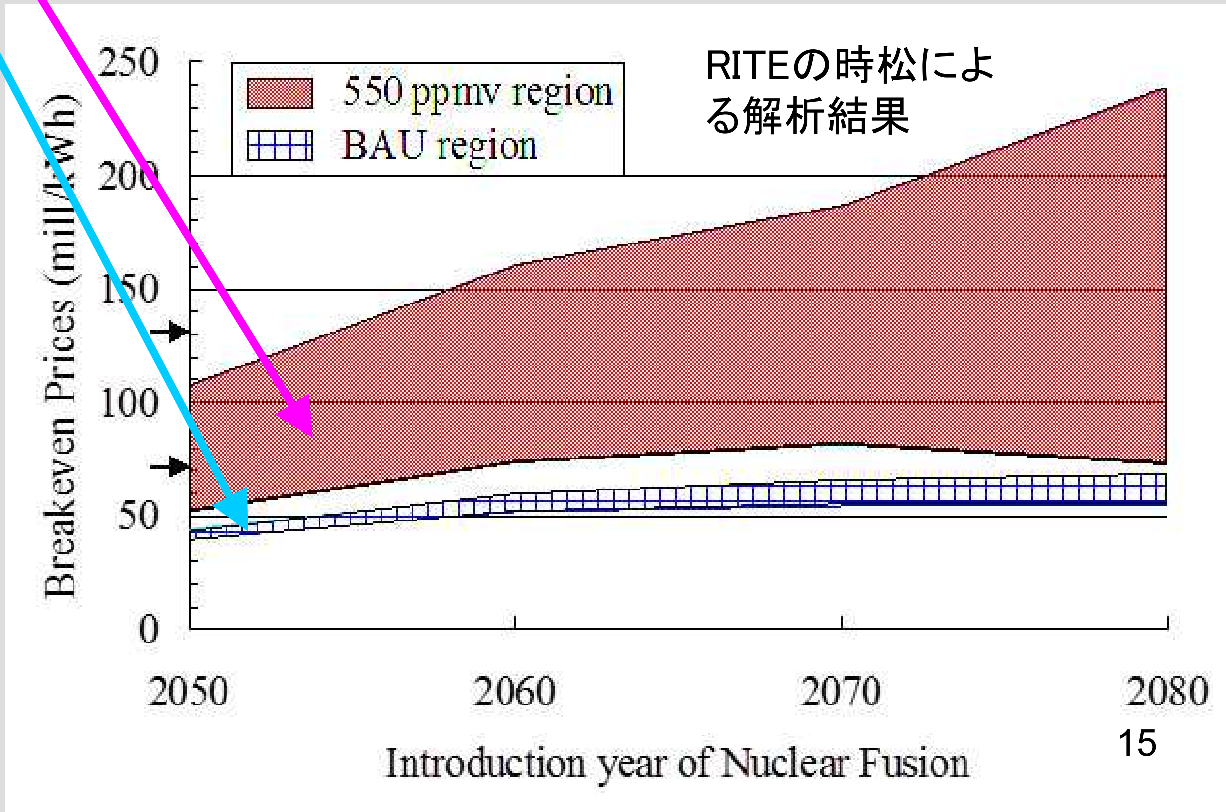
ARIES-RS (βN=5.0):
COE=64-86mil/kWh

R. Miller, Fus. Eng. Des. 49-50(2000)33

CREST (βN=5.5):
COE=7～12yen/kWh

K. Okano et al. Nucl. Fus., 40(2000)635.

現行電源の1.5倍以下の発電コストでないと如何なる場合も導入されない



2100年での寄与度の視点

2050年導入と2070年導入の効用の差は大きい。

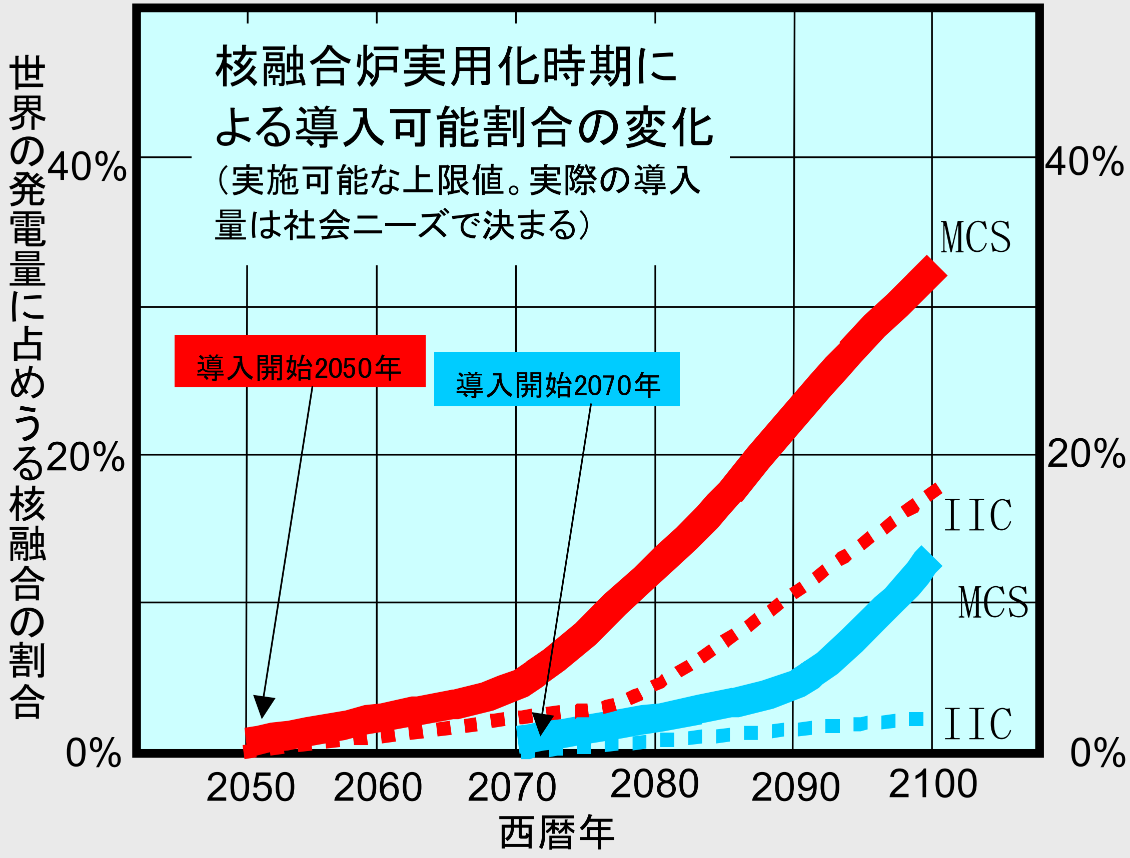
特にT制約ケース(図のIIC)では2070年導入では寄与は非常に小さくなる。

いくらなら市場に入るか？

2050-60年ころ市場投入可能なコスト限界点は**現行火力の約1.5倍 (COEn=1.5)**

(地球環境産業技術研究機構とエネルギー経済研が独立に解析し，ほぼ同じ数字を得ている)
(戦略検討分科会の記述とも一致)

建設台数と共にコストが低下することを考慮して，他電源と競合しながら導入される場合の導入可能量試算結果



時松，他，Fusion Science & Technology (2002)p.831をもとに作成

まとめ

社会的評価の過去の解析例を紹介しました。

1．社会評価を調べる統計手法の開発例

コンジョイント分析による効用曲線導出

2．核融合の社会経済分析例

様々な視点からの核融合導入時期とコスト要求

付録

付録-1

評価関数の決定方法は？

計量経済でよく使われるCVM的質問ではエネルギー技術の効用を定量化困難
（Contingent valuation method)

a) あなたは＊＊が実施されることにいくらの補助金があれば同意しますか？
b) あなたは＊＊が実施されるのを阻止できるならいくらまで払いますか？

専門家のご意見:
●世代を超える問題、現実に痛みを感じない問題をCVMで聞くのは無理
●相互に影響をもつ評価軸を独立に取り扱って評価関数は決められない
など

総合評価法として、マーケティング・リサーチ等の分野で使われているコンジョイント分析の適用なら可能ではないか。

効用値と効用曲線 -1

A、B、二つの候補が示されたとして、

技術Aの効用値： $U^A = [a_{1i}X_{1i} + a_{2i}X_{2i} + a_{3i}X_{3i} + a_{4i}X_{4i} + \text{-----}]^A$

X_{ki} 属性kに対するi番目のレベル値
a_{ki} i番目レベルに対する効用関数の係数値

ロジットモデル（詳細は付録1参照）
L番目の質問でカードAのほうを選ぶ確率は
$P^{AL}=[1-\exp(U_{BL}-U_{AL})]^{-1}$

ある人の選択: A A B A B ------------ (全部で 30 回答)

この事象が発生する確率: $P^{A1}P^{A2}P^{B3}P^{A4}P^{B5}$-------------------

全回答者

尤度関数 $L = \prod_{N} \left[\prod_{A\text{を選択}} P^A \cdot \prod_{B\text{を選択}} P^B \right]$

N: 回答者の数

効用値と効用曲線 - 2

技術Aの効用値：　$U^A = [a_{1i}X_{1i} + a_{2i}X_{2i} + a_{3i}X_{3i} + a_{4i}X_{4i} + \text{-----}]^A$

尤度関数 $L = \Pi\,[\Pi\, P^A \cdot \Pi\, P^B]$

アンケートにより $(U^A, X_{1i}, X_{2i}, X_{3i}, X_{4i}, \text{----})$, $(U^B, X_{1i}, X_{2i}, X_{3i}, X_{4i}, \text{----})$ と回答者の実際の選択結果のセットを得る。

効用関数係数 a_{ki} のセットは、尤度関数 L を最大化する係数であろうと考える。

効用関数は $\{a_{ki}X_{ki}\}$ のセットで与えられる折線グラフで表される。

付録-2

ロジットモデルとは？

離散選択問題の予測、解析用のモデル

例１：お昼にカレー、うどん、牛丼のどれを食べるか

例２：大阪に行くのに、新幹線、飛行機、車のどれを使うか

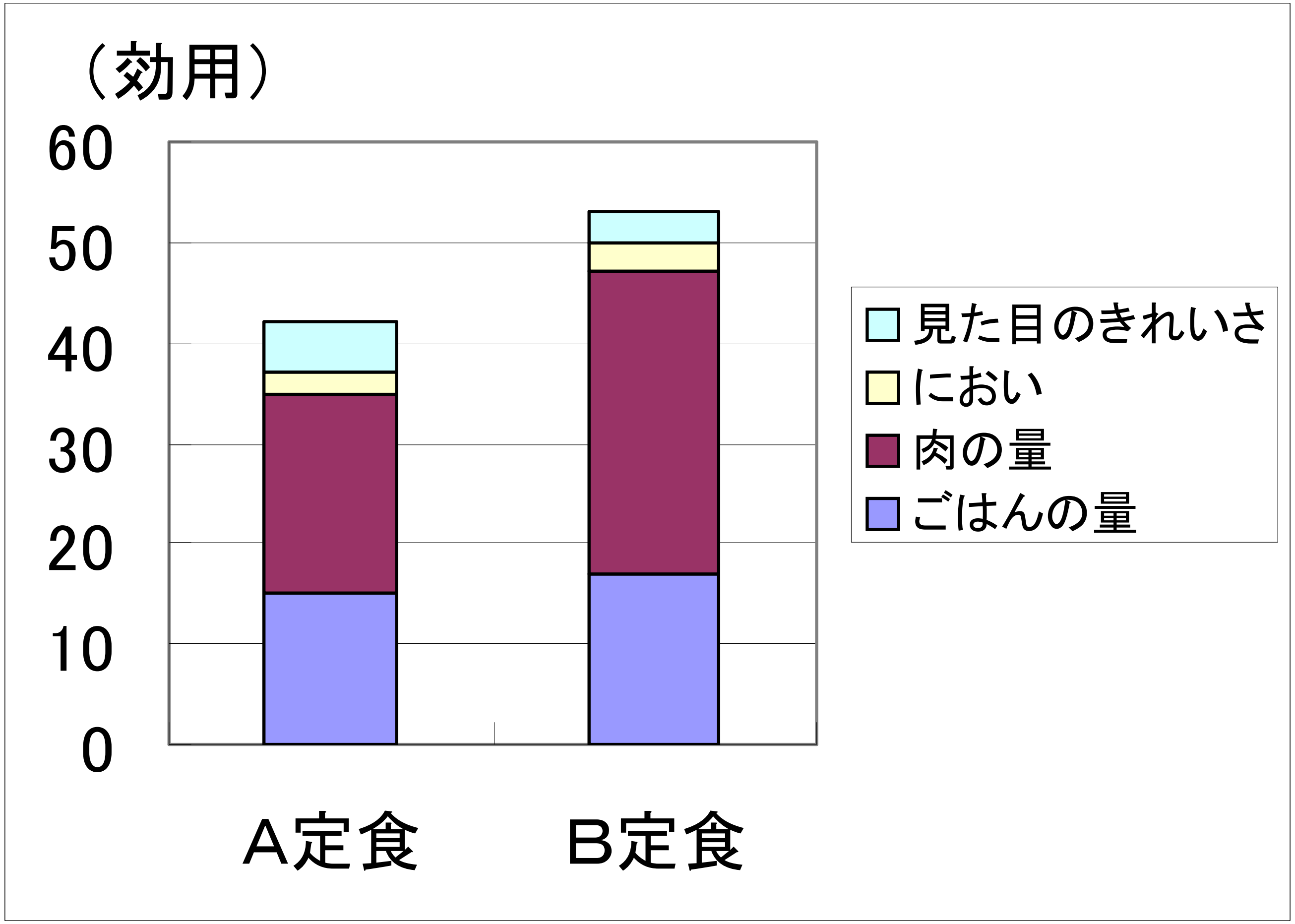
参考：連続型の問題

例１：今日一日でどれだけ電気を使うか

例２：運動のために何分走るか

選択行動のモデル化

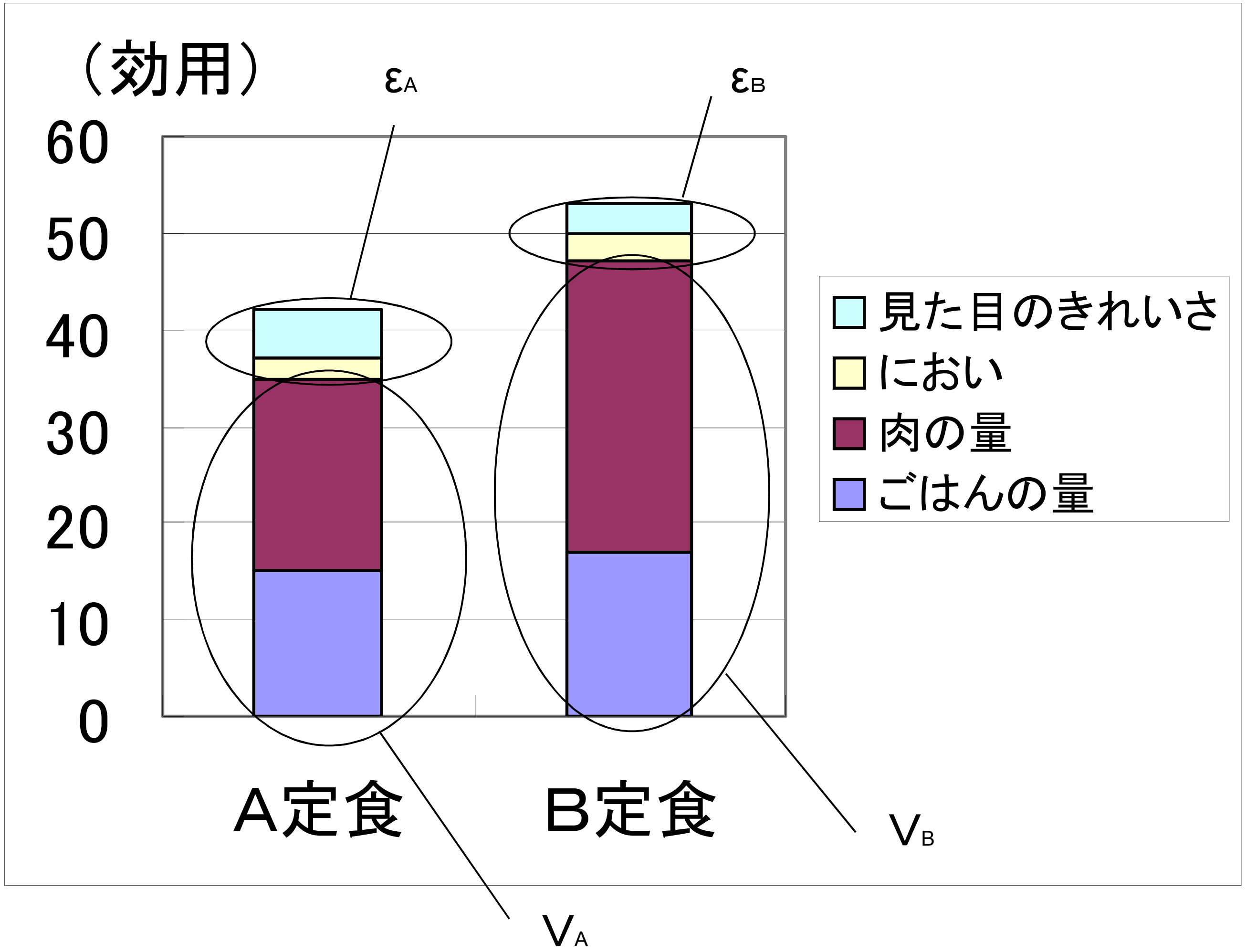
・選択行動の主体は、効用の一番大きな選択肢を選ぶ
・全体の効用は、要素の和として表現できる
・効用の数値は、間隔尺度で表現されている



調査者が計測できない要素の考慮

・全体の効用Uを計測できる部分V(確定項)と計測できない部分ε(誤差項・変動する項)に区分する

・たとえば、「におい」や「見た目のきれいさ」は、計測できないので誤差項とする



確定項Vの表現

- 線形関数で表現
- 多くは、主効果のみを考慮

定食A： $V_A = \beta_{ごはんの量} \times X_{ごはんの量A} + \beta_{肉の量} \times X_{肉の量A}$

定食B： $V_B = \beta_{ごはんの量} \times X_{ごはんの量B} + \beta_{肉の量} \times X_{肉の量B}$

- ベクトル表記すると

$V_j = \beta' X_j$

β'：パラメータベクトル、 X_j：定食jの属性水準ベクトル

- パラメータβ'は、回答者個人によらず同じと仮定

→個人の行動は予測できないが集団としての平均的行動なら予測できる（のではないか）。

- 人がA定食に感じている効用は、測定できない部分も含めて

$U_A = V_A + \varepsilon_A$

ランダム効用モデル

・多くの人に定食を選ばせたら選択比率はどうなるか？

・ある無作為に選んだ個人が定食Aを選ぶ確率はいくらか？

定食Aの選択確率は、

$$
\begin{aligned}
P(A) &= P\left(U_A \geq U_B\right) = P(V_A + \varepsilon_A \geq V_B + \varepsilon_B) \\
&= P(V_A - V_B \geq \varepsilon_B - \varepsilon_A) \\
&= P\left(\beta'(X_A - X_B) \geq \varepsilon_B - \varepsilon_A\right)
\end{aligned}
$$

ランダム効用モデルの特徴

定食Aの選択確率：

$$P(A) = P\left(\beta'(X_A - X_B) \geq \varepsilon_B - \varepsilon_A\right)$$

・定食Aと定食Bで水準が等しい属性は、選択行動に影響しない。

→梅干しがあるかないかでは、ごはん500gの価値は変わらない

・誤差項εは、個人でも一定でない。選択ごとに毎回異なるかもしれないとして、いろいろな分布形が想定できる

・誤差項が独立に同一のガンベル分布にしたがう場合がロジットモデル

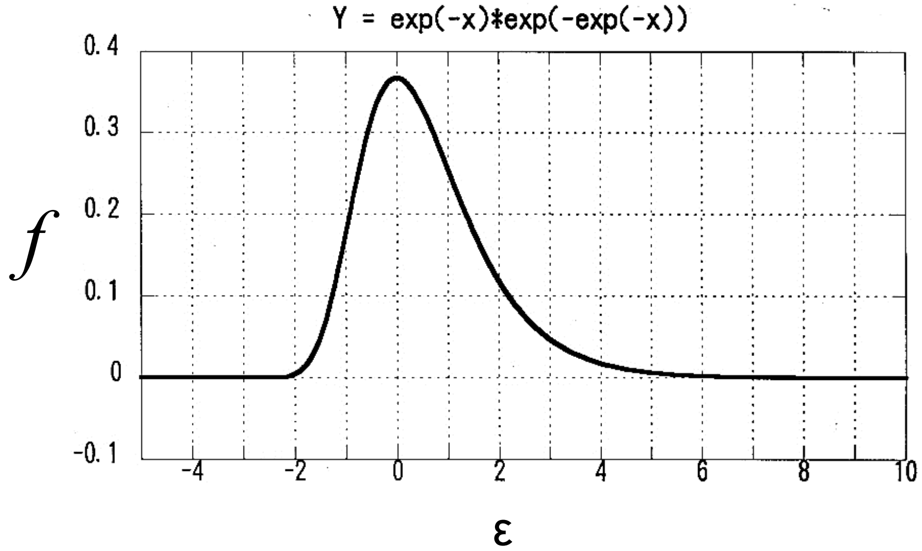
ガンベル分布と正規分布

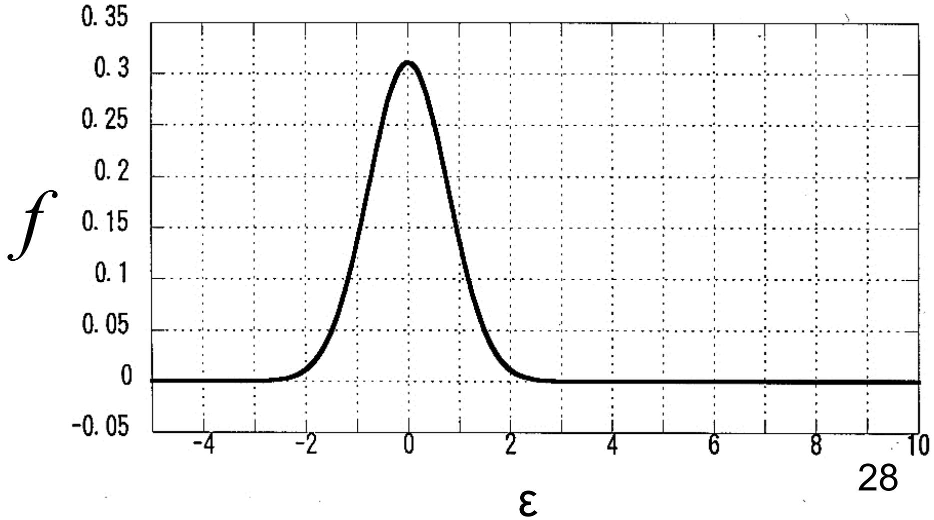
ガンベル分布

$$f(\varepsilon) = e^{-\varepsilon} \cdot e^{-e^{-\varepsilon}}$$

分散が $\sigma^2 = \pi^2/6$ の正規分布

$$f(\varepsilon) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} e^{-(x^2/2\sigma^2)}$$





ガンベル分布の数学的特性

$$f(\varepsilon) = e^{-\varepsilon} \cdot e^{-e^{-\varepsilon}} \qquad (1)$$

$$\varepsilon_0 \to \infty : \quad F = 1$$

$$F(\varepsilon_0) = \int_{-\infty}^{\varepsilon_0} f(\varepsilon) d\varepsilon \ = e^{-e^{-\varepsilon_0}} \qquad (2)$$

f の確率分布をするεが、ε0 以下である確率がF

あとで計算に都合がよい。

ランダム効用モデルの特徴

定食Aの選択確率:

$$P(A) = P\left(\beta'(X_A - X_B) \geq \varepsilon_B - \varepsilon_A\right)$$

・定食Aと定食Bで水準が等しい属性は、選択行動に影響しない

・誤差項εは、個人でも一定でない。選択ごとに毎回異なるかもしれないとして、いろいろな分布形が想定できる

・誤差項が独立に同一のガンベル分布にしたがう場合がロジットモデル

f の関数形の仮定

どの候補（いまは定食A,B）においても、*f(ε)*は同じガンベル分布だとする。これは、じつは相当に大きな仮定である。（ロジットモデルの基本仮定）

n さんが候補 j を選ぶのは以下の場合：

$$V_j + \varepsilon_j > V_i + \varepsilon_i \qquad (i \neq j) \qquad (3)$$

すなわち

$$\varepsilon_j > \varepsilon_i + V_i - V_j \qquad (4)$$

ここで、ε_i は知っていることにして、(3)のようなε_jが現れる確率、すなわち候補 j が選ばれる確率 P_jを(2)を使って計算すると

$$P_j = \prod_{j \neq i} F(\varepsilon_i + V_i - V_j) \quad = \quad \prod_{j \neq i} e^{-e^{-(\varepsilon_i + V_i - V_j)}}$$

$$P_j = \prod_{j \neq i} F(\varepsilon_i + V_i - V_j) \quad = \quad \prod_{j \neq i} e^{-e^{-(\varepsilon_i + V_i - V_j)}}$$

実はεiはわからないので、確率分布f（ε）の重みをかけて期待値を求める。

$$f(\varepsilon) = e^{-\varepsilon} \cdot e^{-e^{-\varepsilon}} \qquad (1)$$

$$P_j = \int_{-\infty}^{\infty} \left(\prod_{j \neq i} e^{-e^{-(\varepsilon_i + V_i - V_j)}} \right) e^{-\varepsilon_i} e^{-e^{-\varepsilon_i}} d\varepsilon_i$$

$$= e^{V_i} \Big/ \sum e^{V_j} \qquad (5)$$

$$\int_{-\infty}^{\infty}\left(\prod_{j\neq i} e^{-e^{-(x+V_i-V_j)}}\right)e^{-x}e^{-e^{-x}}dx$$

$$=\int_{-\infty}^{\infty}\left(\prod_{j} e^{-e^{-(x+V_i-V_j)}}\right)e^{-x}dx$$

$$=\int_{-\infty}^{\infty}\left(e^{-\sum_j e^{-(x+V_i-V_j)}}\right)e^{-x}dx$$

$$=\int_{-\infty}^{\infty}\left(e^{-e^{-x}\sum_j e^{-(V_i-V_j)}}\right)e^{-x}dx$$

$$[t=e^{-x},\quad dt=-e^{-x}]$$

$$=-\int_{\infty}^{0} e^{-t\,\Sigma_j e^{-(V_i-V_j)}}dt$$

$$=\int_{0}^{\infty} e^{-t\,\Sigma_j e^{-(V_i-V_j)}}dt$$

$$=\left[\frac{e^{-t\,\Sigma_j e^{-(V_i-V_j)}}}{-\sum_j e^{-(V_i-V_j)}}\right]_0^{\infty}$$

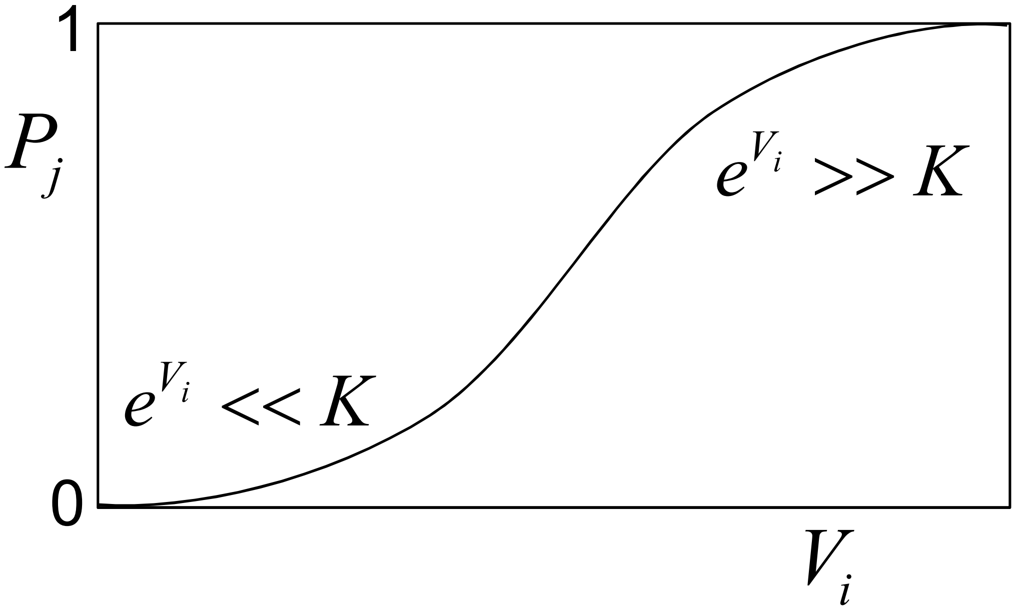
$$=\frac{1}{\sum_j e^{-(V_i-V_j)}}$$

$$=\frac{e^{V_i}}{\sum_j e^{V_j}}\qquad \text{(5)式}$$

そういうわけで、候補 j が選ばれる確率　Pj　は

$$P_j = e^{V_i} \Big/ \sum e^{V_j} = e^{V_i} \big/ (e^{V_i} + K) \qquad [K = \sum_{j \neq i} e^{V_j} \text{ と置いて}]$$

ロジットカーブ



離散候補からひとつの候補が、このカーブにしたがって選択されると考えるのがロジットモデル。

候補 j が定食Aと定食Bだけなら、Aが選ばれる確率　P^A　は

$$P^A = e^{V_A} / (e^{V_A} + e^{V_B}) = \left[1 + \exp(V_B - V_A)\right]^{-1}$$