

電力市場における容量メカニズムと電源投資

東京理科大学大学院理工学研究科 高野 祐人

Yuto Takano

Graduate school of Science and Technology, Tokyo University of Science

東京理科大学理工学部 高嶋隆太

Ryuta Takashima

Department of Science and Technology, Tokyo University of Science

1 はじめに

2011 年の東日本大震災の影響を受け、我が国では、急速に電力システムの改革が進められており、今後予定される電力自由化や規制緩和の進展は、電気事業者にとって考慮すべき大きな要因となっている。このように、電力の価格が、市場メカニズムにより決定されるような状況において、その不確実性や、電源投資に関わる固定費・可変費等の莫大なコスト回収の見通しは、電源投資の意思決定に多大なる影響を及ぼす。また、電力は、基本的に貯蓄することが困難であることから、電気事業者は常に変動していく需要に対応し、電力生産量をコントロールする必要がある。このような出力調節可能な電源は、停電等のリスクを回避するという意味で非常に重要な役割を果たしている。

近年、電力市場内における売電収入のみでは、投資コストの回収が困難となる可能性があり、解決すべき問題として指摘されている。これは、missing money の問題と呼ばれており [1]、世界的にも注視されている。特に、再生可能エネルギーの導入が進む欧米諸国において、出力調節可能なミドル・ピーク用電源の設備利用率が低下する可能性があり、このような電源に関してコスト回収の見通しが立てにくく、将来的な電源供給力の低下が懸念される。容量メカニズム政策は、このように供給予備力として存在する電源に価値付けを行うメカニズムである。すなわち、供給予備力として存在する発電容量が、稼働しているかどうかによらず、収入を得ることができるメカニズムであり、再生可能エネルギー導入の拡大が進む我が国においても検討が進められている。本政策は、米国の電力市場の一つである PJM を初めとして、2000 年代から各国で導入されている。現在、地域により様々な形態が検討されており、代表的なものとして以下の事例が挙げられる [2]。

- 信頼度価格モデル (米国)
- 容量支払制度 (スペイン)
- 集中管理型容量市場 (英国)
- 分散型容量市場 (フランス)
- 戦略的予備力 (スウェーデン, フィンランド)

スペインにおいて導入されている容量支払制度は、容量あたりに支払う価格が決定されるものであり、電気事業者に対する補助金としての役割が強い。数量ベースのメカニズムとして、英国の集中管理型容量市場は、当局が必要容量を公表し、その容量に対して供給元のみ参入するオークションにて価格を決定するものである。一方、フランスの分散型容量市場は、小売事業者が契約した販売先の容量を推測し、発電事業者との相対契約にて容量を確保するものである。米国のPJMにおける信頼度価格モデルは、イギリス、フランスの集中型、分散型両方の特徴を併せ持つ制度である。さらに、スウェーデン、フィンランドで用いられている戦略的予備力は、電力の不足が見込まれる場合に不足分を入力で確保する制度である。

本政策に関する研究として、Joskow[1]は、不完全電力市場における容量支払制度に関して、簡便な発電コストモデルを用いて、本制度の市場への影響について分析している。また、de Vries and Heijnen[3]は、システムダイナミクスモデルを用い、需要成長率不確実性下における、異なる市場設計について分析を行っている。

発電事業へのリアルオプションの適用については、数多くの研究が行われているが[4]、容量メカニズムの制度自体について、または、電源投資への影響に関するモデル分析は、ほとんど行われていない。そこで本研究では、リアルオプションの枠組みを用い、容量メカニズム政策を講じたときの、電気事業者における電源投資の最適タイミングについて分析を行う。特に、電力価格の投資閾値、投資価値を算出し、これらに対し、不確実性要因や制度設計がどのように影響を及ぼすのかについて明らかにする。

2 モデル

2.1 問題設定と仮定

本研究では、発電事業者の発電容量拡大投資について考える。発電事業者は現時点において、 $Q_0(\text{kW})$ の発電容量を持ち、容量 $Q_1(\text{kW})$ への投資オプションを保有するものとする。すなわち、現状の発電容量 $Q_0(\text{kW})$ で操業するか、 $Q_1(\text{kW})(> Q_0)$ に容量拡大の投資を行うかの選択問題である。また、単位量あたりの投資コストを $\xi(\text{円/kWh})$ とする。すなわち、投資コスト I は以下のように表される。

$$I = \xi(Q_1 - Q_0) \quad (2.1)$$

また、燃料費を含むプラントのO&M費を $C(\text{円/kWh})$ 、割引率を ρ とする。本研究では、電力価格 P_t を不確実性の要因と考え、時刻 t での電力価格が以下の幾何ブラウン運動に従うと仮定する。

$$dP_t = \mu_p P_t dt + \sigma_p P_t dW_t^p, \quad P_0 = p \quad (2.2)$$

ここで、 μ_p 、 σ_p は、それぞれ電力価格の期待成長率、ボラティリティであり、これらは外生的に与えられる定数である。また、 W_t^p は、標準ブラウン運動を表している。発電プラントを操業する

ことにより得られるキャッシュフローは以下の式で示される。

$$\pi_t = Q_i(P_t - C), \quad i = 0, 1 \quad (2.3)$$

また、本研究では、計算の簡便化のため、プラントの操業期間は無限であると仮定する。

2.2 電力市場のみを考えるケース

電気事業者が、電力市場のみ参入するケースを考える。ここでは、電気事業者が、プラントの容量拡大を行う場合の投資オプションについて示す。最適投資タイミングは、投資の意思決定を行い建設コストを支払うことにより、受け取るキャッシュフローの価値が、意思決定を遅らせることの価値より大きくなる時点である。投資コストを支払うことにより得られるキャッシュフローの価値を求める。すなわち、投資の正味現在価値（NPV）を表す。投資後の期待現在価値は以下の式で表される。

$$\begin{aligned} V_e(p) &= \mathbb{E} \left[\int_0^\infty e^{-\rho t} Q_1(P_t - C) dt \right] - \xi(Q_1 - Q_0) \\ &= \frac{Q_1 p}{\rho - \mu_p} - \frac{Q_1 C}{\rho} - \xi(Q_1 - Q_0) \end{aligned} \quad (2.4)$$

また、このときの投資オプション価値を $F_e(p)$ とすると、bellman 方程式より

$$\frac{1}{2} \sigma_p^2 p^2 F_e''(p) + \mu_p p F_e'(p) - \rho F_e(p) + Q_1(p - C) = 0 \quad (2.5)$$

となる。プライム記号は p に関する微分を表している。(2.5) 式の一般解は以下の式で表される。

$$F_e(p) = A_1 p^{\beta_1} + A_2 p^{\beta_2} + \frac{Q_0 p}{\rho - \mu_p} - \frac{Q_0 C}{\rho} \quad (2.6)$$

ここで、 A_1, A_2 は未知定数である。 $p \rightarrow 0$ の極限における境界条件を考えると、投資を実施する可能性が極めて低い場合オプション価値は 0 である。すなわち、

$$\lim_{p \rightarrow 0} F_e(p) = \frac{Q_0 p}{\rho - \mu_p} - \frac{Q_0 C}{\rho} \quad (2.7)$$

が得られる。これより、 $A_2 = 0$ となる。さらに、 β_1, β_2 は次の特性方程式の正負の 2 根であり、 $\beta_1 > 1, \beta_2 < 0$ である [5]。

$$\frac{1}{2} \sigma^2 \beta(\beta - 1) + \mu \beta - \rho = 0 \quad (2.8)$$

$$\beta_1 = \frac{1}{2} - \frac{\mu_p}{\sigma_p^2} + \sqrt{\left(\frac{1}{2} - \frac{\mu_p}{\sigma_p^2}\right)^2 + \frac{2\rho}{\sigma_p^2}} > 1 \quad (2.9)$$

$$\beta_2 = \frac{1}{2} - \frac{\mu_p}{\sigma_p^2} - \sqrt{\left(\frac{1}{2} - \frac{\mu_p}{\sigma_p^2}\right)^2 + \frac{2\rho}{\sigma_p^2}} < 0 \quad (2.10)$$

投資の閾値を p_0^* とすると, p_0^* における $V_e(p)$ との接続条件であるバリュー・マッチング条件と, 最適化条件であるスムーズ・ペースティング条件を求めると,

$$F_e(p_0^*) = V_e(p_0^*) \Leftrightarrow A_1(p_0^*)^{\beta_1} + \frac{Q_0 C}{\rho - \mu} - \frac{Q_0 C}{\rho} = \frac{Q_1 p_0^*}{\rho - \mu} - \frac{Q_1 C}{\rho} - \xi(Q_1 - Q_0) \quad (2.11)$$

$$F'_e(p_0^*) = V'_e(p_0^*) \Leftrightarrow \beta_1 A_1(p_0^*)^{\beta_1-1} + \frac{Q_0}{\rho - \mu} = \frac{Q_1}{\rho - \mu} \quad (2.12)$$

となる. (2.11) 式, (2.12) 式より, 投資の閾値 p_0^* は

$$p_0^* = \frac{\beta_1}{1 - \beta_1} (\rho - \mu) \left(\frac{C}{\rho} + \xi \right) \quad (2.13)$$

となり, 解析的に導出することができる. 投資の意思決定は電力価格が閾値 p_0^* を上回ったときに行われる.

2.3 容量市場を考慮したケース (容量価格固定値)

容量メカニズム政策が講じられた場合を考える. 電気事業者は, 電力市場と容量市場へ売電, 容量を売ることが可能であるとし, ここでは容量価格が固定値であると仮定する. 投資後において, 事業者は $Q_1 (> Q_0)$ の発電容量を得ることになるが, 全発電容量の割合 α 分を容量市場へ売却するものとして, 確保しておくものとする. すなわち, 容量市場へ売却する容量として αQ_1 (kW), 残りの容量 $(1 - \alpha)Q_1$ (kW) を電力市場へ売電するものとする. 容量価格を固定価格 $X_t = x$ (円/kW) とすると, 投資後の期待現在価値は以下の式で表される.

$$V_c(p, x) - I = \frac{(1 - \alpha)Q_1 p}{\rho - \mu_p} - \frac{Q_1 C}{\rho} + \alpha Q_1 x - \xi(Q_1 - Q_0) \quad (2.14)$$

また, このときの投資オプション価値は 2.2 節の議論より, 以下の式で表される.

$$F_c(p) = B_1 p^{\beta_1} + \frac{Q_0 p}{\rho - \mu_p} - \frac{Q_0 C}{\rho} \quad (2.15)$$

ここで B_1 は非負の未知定数である. また, 投資の閾値 p_1^* における $V_c(p, x)$ との接続条件であるバリュー・マッチング条件と, 最適化条件であるスムーズ・ペースティング条件から, 投資の閾値 p_1^* を求めることができる.

$$\begin{aligned} F_c(p_1^*) = V_c(p_1^*) \Leftrightarrow B_1 (p_1^*)^{\beta_1} + \frac{Q_0 C}{\rho - \mu_p} - \frac{Q_0 C}{\rho} \\ \frac{(1 - \alpha)Q_1 p_1^*}{\rho - \mu_p} - \frac{Q_1 C}{\rho} + \alpha Q_1 x - \xi(Q_1 - Q_0) \end{aligned} \quad (2.16)$$

$$F'_c(p_1^*) = V'_c(p_1^*) \Leftrightarrow \beta_1 B_1 (p_1^*)^{\beta_1-1} + \frac{Q_0}{\rho - \mu_p} = \frac{(1 - \alpha)Q_1}{\rho - \mu_p} \quad (2.17)$$

(2.16) 式, (2.17) 式を同時に満たす投資の閾値 p_1^* は, 解析的に以下の式のように求めることができる.

$$p_1^* = \frac{\beta_1}{\beta_1 - 1} \frac{\rho - \mu}{(1 - \alpha)Q_1 - Q_0} \left[(Q_1 - Q_0) \left(\frac{C}{\rho} + \xi \right) - \alpha Q_1 x \right] \quad (2.18)$$

2.4 容量市場を考慮したケース (容量価格不確実)

電力価格 P_t (円/kWh) と容量価格 X_t (円/kW) が共に不確実である状況を考える. すなわち, 容量価格が以下の幾何ブラウン運動に従うと仮定する.

$$dX_t = \mu_x X_t dt + \sigma_x X_t dW_t^x, \quad X_0 = x \quad (2.19)$$

ここで μ_x , σ_x は, それぞれ容量価格の期待成長率, ボラティリティであり, これらは外生的に与えられる定数である. また, W_t^x は, 標準ブラウン運動を表している. また, 電力価格と容量価格の関係は, 相関係数 η により, 以下のように関係付けられるものとする.

$$\mathbb{E}[dW_t^p dW_t^x] = \eta dt \quad (2.20)$$

容量価格は投資時点にて決定されることから, 2.3 節の議論より, 投資後の期待現在価値を以下のように求めることができる.

$$\begin{aligned} V_c(p, x) &= \mathbb{E} \left[\int_0^\infty e^{-\rho t} \{ (1 - \alpha) Q_1 P_t - Q_1 C \} dt \right] + \alpha Q_1 x - \xi (Q_1 - Q_0) \\ &= \frac{(1 - \alpha) Q_1 p}{\rho - \mu_p} - \frac{Q_1 C}{\rho} + \alpha Q_1 x - \xi (Q_1 - Q_0) \end{aligned} \quad (2.21)$$

また, 電力価格と容量価格が不確実な状況における, 投資を延期する価値, すなわち投資オプションの価値は以下の Bellman 方程式に従う.

$$\begin{aligned} \frac{1}{2} \sigma_p^2 p^2 \frac{\partial^2 F_c(p, x)}{\partial p^2} + \frac{1}{2} \sigma_x^2 x^2 \frac{\partial^2 F_c(p, x)}{\partial x^2} + \eta \sigma_p \sigma_x p x \frac{\partial^2 F_c(p, x)}{\partial p \partial x} + \mu_p p \frac{\partial F_c(p, x)}{\partial p} \\ + \mu_x x \frac{\partial F_c(p, x)}{\partial x} - \rho F_c(p, x) + Q_0 (p - C) = 0 \end{aligned} \quad (2.22)$$

上記式より, 一般解は以下の式で表すことができる.

$$F_c(p, x) = D p^{\delta_1} x^{\theta_1} + \frac{Q_0 p}{\rho - \mu_p} - \frac{Q_0 C}{\rho} \quad (2.23)$$

ここで, D, δ_1, θ_1 は非負の未知定数である. 投資閾値を p_2^* とすると, 閾値を算出するための境界条件は以下の式で示される.

$$F_c(p_2^*, x) = V_c(p_2^*, x) \quad (2.24)$$

$$\frac{\partial F_c(p_2^*, x)}{\partial p} = \frac{\partial V_c(p, x)}{\partial p} \quad (2.25)$$

$$\frac{\partial F_c(p_2^*, x)}{\partial x} = \frac{\partial V_c(p, x)}{\partial x} \quad (2.26)$$

$$\frac{1}{2}\sigma_p^2\delta_1(\delta_1 - 1) + \frac{1}{2}\sigma_x^2\theta_1(\theta_1 - 1) + \eta\sigma_p\sigma_x\delta_1\theta_1 + \mu_p\delta_1 + \mu_x\theta_1 - \rho = 0 \quad (2.27)$$

ここで,

$$\frac{\partial V_c(p_2^*, x)}{\partial x} = \alpha Q_1 \quad (2.28)$$

$$\frac{\partial F_c(p_2^*, x)}{\partial x} = A p_2^{*\delta_1} \theta_1 x^{\theta_1-1} \quad (2.29)$$

$$\frac{\partial V_c(p_2^*, p)}{\partial p} = \frac{(1 - \alpha) Q_1}{\rho - \mu_p} \quad (2.30)$$

$$\frac{\partial F_c(p_2^*, p)}{\partial p} = A \delta_1 p_2^{*\delta_1-1} x^{\theta_1} + \frac{Q_0}{\rho - \mu_p} \quad (2.31)$$

である。

上記の議論より、境界条件を満たす閾値、すなわち、電力価格と容量価格不確実性下における投資の閾値を p_2^* を数値計算にて算出することができる。

3 結果と考察

本分析で用いる基本パラメータは以下のとおりである。電力価格に関するパラメータとして $\mu_p = 0, \sigma_p = 0.2$ 、容量価格に関するパラメータとして $\mu_x = 0, \sigma_x = 0.2$ 、割引率 $\rho = 0.1$ 、発電容量 $Q_0 = 1.0(\text{kW})$ 、 $Q_1 = 2.0(\text{kW})$ 、燃料費含む O&M 費 $C = 5.0(\text{円/kWh})$ 、単位当たりの投資コスト $\xi = 10(\text{円/kWh})$ として数値計算を行う。

図 1 は、電力価格に関する投資の閾値に対する容量割合の影響を示している。また、ここでは容量価格の初期値を、50 から 80 まで変化させた結果について示している。fig.1 より、容量価格が

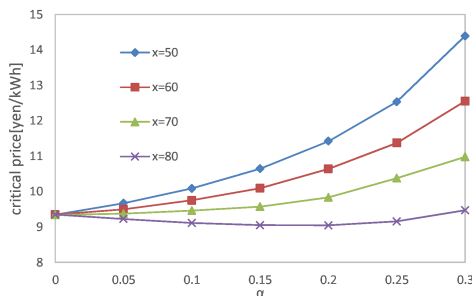


図 1: 投資閾値に対する容量割合の影響

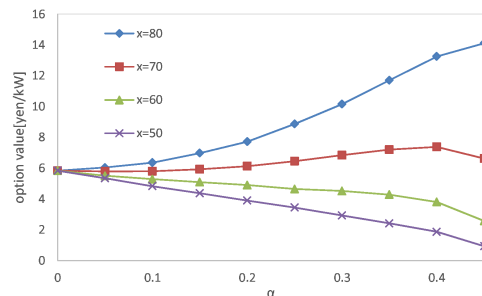


図 2: 投資価値に対する容量割合の影響

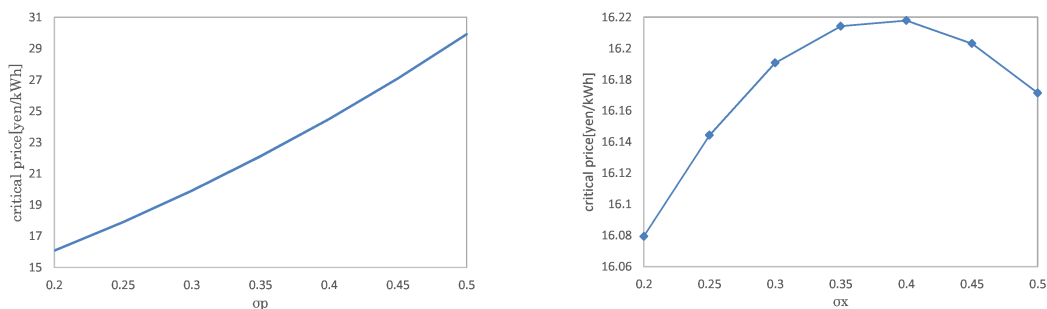


図 3: 投資閾値に対する電力価格の不確実性の影響 図 4: 投資閾値に対する容量価格の不確実性の影響 ($x=20$)

低い場合、投資の閾値は α に対して単調増加していることが確認できる。すなわち、容量価格が低い場合は α を大きくするほど投資へのインセンティブは低下する。また、容量価格が高価格である場合、 α の増加に伴い、閾値は低下する。しかしながら、 α の過度の上昇は投資閾値を高めることも確認できる。これは、容量価格は投資時点で価格が決定されるが、電力価格は不確実であり、価格上昇の可能性を保持していると考えられることから、 α の上昇によって、電力価格上昇の可能性を打ち消していることが理由として考えられる。つまり、容量価格が高い場合であっても、割合を考える必要があり、最適な割合が存在すると考えられる。また、図 2 は、投資の価値に対する容量割合の影響を示している。図 2 より、容量価格が高い場合、 α に対して価値が単調増加し、容量価格が低いほど価値が低くなることが確認できる。また、 $x = 70$ においては、最適な α となる割合が確認できる。

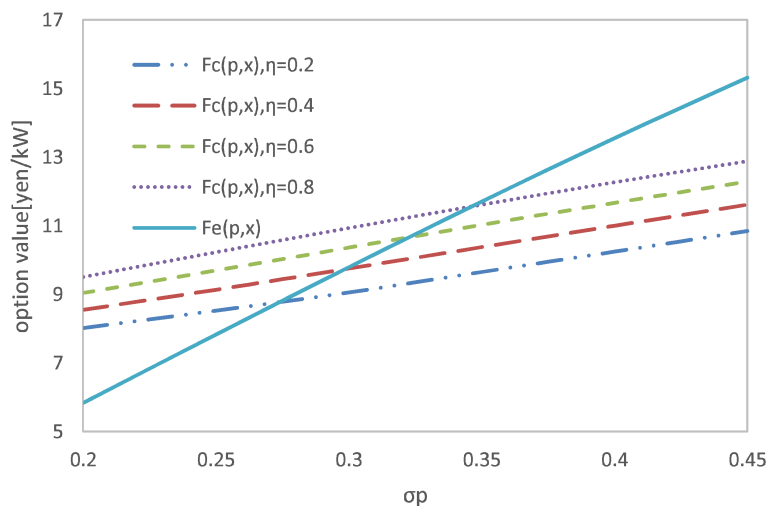


図 5: 投資価値に対する電力価格の不確実性の影響、電力市場のみの場合との比較

図 3 は、投資閾値に対する電力価格の不確実性の影響を示しており、また、図 4 は、投資閾値に

対する容量価格の不確実性の影響 (ここでは $x = 20$) を示したものである。図3から、電力価格に関するボラティリティが大きいほど投資閾値は増加していることが確認できる。これは、不確実性が大きいほど投資を延期する価値が増加し、延期の意思決定が正当化されるためである。しかしながら、図4より、容量価格が低価格であり、容量価格のボラティリティが過度に上昇した場合、投資へのインセンティブが増加していることが確認できる。これは、容量価格が低く、その不確実性が非常に大きい場合、容量価格の上昇を期待するよりも、早期に投資を実行し、電力市場における売電収入を期待するインセンティブが働くためであると考えられる。

図5は、投資価値に対する電力価格の不確実性の影響を示しており、電力市場のみのケースとの比較を行っている。容量市場を考慮した場合、電力価格と容量価格の相関が強いほど、価値は上昇していることが確認できる。また、電力市場のみのケースは、容量市場を考慮したケースと比較して、価値に対する電力価格のボラティリティの影響が大きいことが確認できる。この影響から、電力価格のボラティリティにより、それぞれのケースの価値が逆転する。すなわち、不確実性が高い場合、電力市場のみの方が価値が高く、不確実性が低い場合、容量市場への参入を考慮した方が価値が高いという結果となった。

4 おわりに

近年、電力システムにおける改革により、電力事業はより複雑化し、不確実性を考慮したモデルによる、意思決定分析の重要性は増大していると考えられる。本研究では、各国にて検討中である容量メカニズムに着目し、電力価格と容量価格が不確実な状況における容量メカニズムを講じた場合の、電源投資の意思決定問題に関して評価モデルを構築し、投資意思決定について分析を行った。特に、容量市場への売電割合に対する投資の閾値を算出することにより、容量価格が高い場合でも容量割合に対する投資の閾値が単調減少でないことから、その割合を考える必要があるということが明らかとなった。また、電力市場のみのケースと、容量市場を考慮したケースの投資オプション価値に関する分析から、電力価格の不確実性がそれぞれのケースの投資オプション価値に影響し、電力価格の不確実性が小さいならば、容量市場を考慮した場合の投資オプション価値は考慮しない場合よりも大きくなることが明らかとなった。

Missing money 問題への対応として、電源の稼働停止の可能性をモデル化することや、売電容量の不確実性を考慮し、分散型の容量市場をモデル化すること、また、電力小売業者に関する影響を分析することも拡張研究として考えられる。

参考文献

- [1] Joskow, P.L.: Capacity payments in imperfect electricity markets: Need and design, *Utilities Policy*, **16**(2008), 159-170.

- [2] 後藤美香, 古澤健, 服部徹:欧州における容量メカニズムの動向と課題, 電力中央研究所研究報告, Y13013(2014)
- [3] de Vries, L. and Heijnen, P.: The impact of electricity market design upon investment under uncertainty: The effectiveness of capacity mechanisms, *Utilities Policy*, **16**(2008), 215-227.
- [4] E.A. Martinez Cesena, J. Mutale, F. Rivas-Davalos.:Real options theory applied to electricity generation projects: A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **19**(2013), 573-581.
- [5] Dixit, A.K. and Pindyck, R.S., *Investment under Uncertainty*, Princeton University Press, Princeton(1994).

Graduate School of Science and Technology
Tokyo University of Science
Noda-shi 278-8510, Chiba, Japan
E-mail address: 7414617@ed.tus.ac.jp

東京理科大学大学院理工学研究科 高野 祐人

Department of Science and Technology
Tokyo University of Science
Noda-shi 278-8510, Chiba, Japan
E-mail address: Takashima@rs.tus.ac.jp

東京理科大学理工学部 高嶋 隆太