電力系統の固定費回収を考慮した送電容量の最適基準

——わが国の串型連系系統へのインプリケーション*——

田　中　　誠

概　要

本稿では，ノーダル料金の適用下で，電力系統の固定費を回収しながら，設備形成を極力効率的に進めるための規制ルールを導出する．それは，混雑レントにより送電線の固定費を回収しつつ，長期社会余剰を極力大きくする送電容量の最適基準である．このルールに従えば，ループ系統では，混雑料金変化の効果と潮流変化を通じた外部不経済効果の差に応じて，送電容量を調整するのがよい．一方，ラディアル系統では，上記の外部効果が存在しないため，固有かつシンプルなルールが成立する．すなわち，混雑料金についての規模の弾力性に基づいて，送電容量を調整すればよい．特に，わが国の串型連系系統は典型的なラディアル系統であるため，本稿で導出する固有かつシンプルなルールを，直接応用することが可能である．

キーワード
ノーダル料金，固定費，送電容量，ループ系統，ラディアル系統

1．序

欧米を中心に，1990年代から電力改革が進められている．その結果，多くの国・地域の電力産業は，競争部門と規制部門が混然一体となった，特徴的な産業組織を形成するに至っている．製造部門にあたる発電事業と販売部門にあたる電力小売事業に関しては，世界的に自由化が進展している．他方，流通部門にあたる送電事業は，設備形成に関する規模の経済性や，電力システムの一元管理の必要性等の理由から，独占が維持され規制下で

* 本稿の作成にあたり，国際基督教大学の八田達夫教授，東京大学のセミナーの参加者から有益なコメントを頂戴した．ここに厚く御礼申し上げたい．

運営されるのが一般的である．

従来の電力産業における規制政策は，発電・送電・小売を垂直統合する独占的な電力会社に対するものであった．しかし，先述のとおり電力改革が進む中，従来型の規制政策の見直しが求められ，自由化された電力市場において，いかに送電部門を規制していくべきかという課題が認識されるようになった．特に，電力系統は，電力取引のためのエッセンシャル・ファシリティ（不可欠設備）と位置づけられ，適切な規制政策の検討が重要な課題となっている．近年，電力系統に関する規制政策について，研究が盛んになりつつあるが，まだ発展途上にあり，欧米を中心に議論が続いているのが現状だ．

電力系統に関する規制政策を検討する際には，次の3点を考慮することが重要となる．

1）短期における電力系統の効率的な活用

2）長期における電力系統の効率的な設備形成

3）電力系統の固定費の適切な回収

1）については，短期的な資源配分の観点から，送電線の効率的な混雑管理を行い，既存の電力系統を有効活用することが望ましい．2）については，長期的な資源配分の観点から，送電線の容量を適切に設定し，電力系統を効率的に形成することが望ましい．3）については，電力系統の膨大な固定費を，適切な方法で回収することが望ましい．

先行研究として，1）に関しては，Bohn et al.(1984) や Schweppe et al.(1988) が，電力系統の効率的な活用を可能にする，ノーダル料金という手法を導出した．その後，Hogan (1992) や Chao and Peck(1996) 等により，送電権と結びつけられ，さらに拡張されてきている．ノーダル料金は，需給バランスや送電線の容量等の制約下で，短期の社会余剰が最大となるように，電力系統のノードごとの価格付けを行う手法である．これは，限界費用に基づいた手法で，送電線の効率的な混雑管理を可能とし，短期における効率的な資源配分を実現する．現実にも，米国の PJM 等で既に採用され，他の国・地域でも導入が進んでいる．ただし，ノーダル料金は，既存の送電設備を所与とする短期の手法であり，長期における送電線の最適容量を導くものではない．

2）に関しては，Schweppe et al.(1988) や Leautier(2000) が，ノーダル料金の適用下で，いかにして電力系統の設備形成を効率的に進めていくべきかを論じている．Schweppe et al.(1988) は，ノーダル料金の適用下で，長期社会余剰を最大化するファースト・ベストの送電容量を導出した．Leautier(2000) は，ファースト・ベストの送電容量に関する議論を明確に定式化し，設備形成を行う際には，物理法則に基づく外部効果を明示的に考慮しなければならないことを論じた．

しかし，3）に関しては，ノーダル料金の適用下で，電力系統の設備形成と固定費回収をいかに整合させていくべきかという観点からは，分析が進んでいなかった．例えば，

Schweppe et al.(1988) や Leautier(2000) の議論では，固定費回収の制約が課されていないため，彼らの導出した最適容量の下で固定費が回収される保証は全くない．

そこで，本稿では，1）から 3）の全ての点を包括的に考慮して，標準的なノーダル料金をベースに，電力系統の固定費を回収しながら，設備形成を極力効率的に進めるための規制ルールを導出する．基本的な考え方は以下のとおりである．今，与えられた送電設備に対して，常にノーダル料金が課されるものとする．この場合，送電容量を小さくすると，混雑が激しくなり混雑料金収入が増大する一方，送電線の固定費は減少するので，送電事業者に利潤が発生する．逆に，送電容量を大きくすると，混雑が緩和され混雑料金収入が減少する一方，送電線の固定費は増大するので，送電事業者に損失が発生する．したがって，送電容量を適切に設定すれば，混雑レントたる混雑料金収入が送電線の固定費にちょうど等しくなり，送電事業者に利潤も損失も生じない．その際に，収支制約を満たす送電容量の組み合わせは多数あるため，長期的な社会余剰をできる限り大きくするような，送電容量の最適基準を導出するのである．特に，本稿では，ループ系統だけでなく，ラディアル系統に関する考察も行う．そして，ラディアル系統では，固有かつシンプルな送電容量の最適基準が成立することを明らかにし，わが国の串型連系系統に対するインプリケーションを引き出す．

本稿の構成は，以下のとおりである．第 2 節で，モデルを定式化し，第 3 節で，ループ系統における送電容量の最適基準を導く．第 4 節で，ラディアル系統における送電容量の最適基準を導出する．第 5 節で，わが国の串型連系系統に対するインプリケーションについて論じる．第 6 節で，以上の議論を簡単に要約し，いくつかの課題に言及する．

2. モデル

2.1 需要家，発電事業者，送電事業者の余剰

電力系統は，N 個のノード（地点）$n = 1, \cdots, N$ と，ノード間を結ぶ L 本の送電線 $l = 1, \cdots, L$ により構成される．各送電線には，送電容量，すなわち電力を流すことができる限度が決まっており，それを $\mathbf{k} = (k^1, \cdots, k^L)$ と表す[1)]．電力系統と電力潮流の詳細については，次項で述べる．

1) 送電線に電力を流すと，熱が発生する．送電線には耐えられる熱の上限があり，これが送電容量となる．送電容量を増設することで，送電線が耐えうる熱の限度も高くなり，その分大きな電力を流すことが可能となる．

電力市場の参加者については，需要家，発電事業者，送電事業者の3者を考える．需要家は，各ノードにおいて電力を需要する．発電事業者は，各ノードにおいて電力を発電する．需要家と発電事業者は多数おり，完全競争下にあるものとする．送電事業者は，電力系統を建設・所有し，全ノードを統括して，広域的な系統運用を行う．また，送電事業者は単独であり，規制下におかれているものとする．

需要家，発電事業者，送電事業者は，電力の取引により，それぞれ余剰を獲得する．まず，需要家について，ノード n における需要量の合計を $q^{n,d}$ とおき，逆需要関数を $p^{n,d} = P^{n,d}(q^{n,d})$ と表す．ノード n における需要家の粗便益を $B^n(q^{n,d})$ とおき，C^2 級で非減少の凹関数を仮定する．ここで，$\partial B^n(q^{n,d})/\partial q^{n,d} = P^{n,d}(q^{n,d})$ が成り立つ．結局，ノード n の需要家は，粗便益から電力の購入費用を差し引いた消費者余剰 $CS^n(q^{n,d}) \equiv B^n(q^{n,d}) - P^{n,d}(q^{n,d})q^{n,d}$ を得る．また，全ノードの消費者余剰の合計は，$CS(\mathbf{q}^{\mathbf{q}}) \equiv \sum_{n=1}^{N} CS^n(q^{n,d})$ と表せる．ただし，$\mathbf{q}^{\mathbf{d}} = (q^{1,d}, \cdots, q^{N,d})$ である．

発電事業者について，ノード n における発電量の合計を $q^{n,s}$ とおき，発電の限界費用関数を $p^{n,s} = P^{n,s}(q^{n,s})$ と表す．ノード n における発電事業者の発電費用を $G^n(q^{n,s})$ とおき，C^2 級で非減少の凸関数を仮定する．ここで，$\partial G^n(q^{n,s})/\partial q^{n,s} = P^{n,s}(q^{n,s})$ が成り立つ．結局，ノード n の発電事業者は，電力の販売収入から発電費用を差し引いた生産者余剰 $\Pi^n(q^{n,s}) \equiv P^{n,s}(q^{n,s})q^{n,s} - G^n(q^{n,s})$ を得る．また，全ノードの生産者余剰の合計は，$\Pi(\mathbf{q}^{\mathbf{s}}) \equiv \sum_{n=1}^{N} \Pi^n(q^{n,s})$ と表せる．ただし，$\mathbf{q}^{\mathbf{s}} = (q^{1,s}, \cdots, q^{N,s})$ である．

送電事業は，電力の流通部門に該当する．送電事業者は，発電事業者から電力を購入し，送電線による輸送を行い，需要家に電力を販売する．ノード n における，需要家への販売額と発電事業者からの購入額との差額が，送電事業者がノード n で獲得する余剰 $MS^n(q^{n,d}, q^{n,s}) \equiv P^{n,d}(q^{n,d})q^{n,d} - P^{n,s}(q^{n,s})q^{n,s}$ となる．また，全ノードの送電事業者の余剰合計は，$MS(\mathbf{q}^{\mathbf{d}}, \mathbf{q}^{\mathbf{s}}) \equiv \sum_{n=1}^{N} MS^n(q^{n,d}, q^{n,s})$ と表せる．Wu et al.(1996) は，これを Merchandizing Surplus と呼んだ．

以上より，全ノードに関して，需要家，発電事業者，送電事業者の余剰を合計すると，最終的な社会余剰

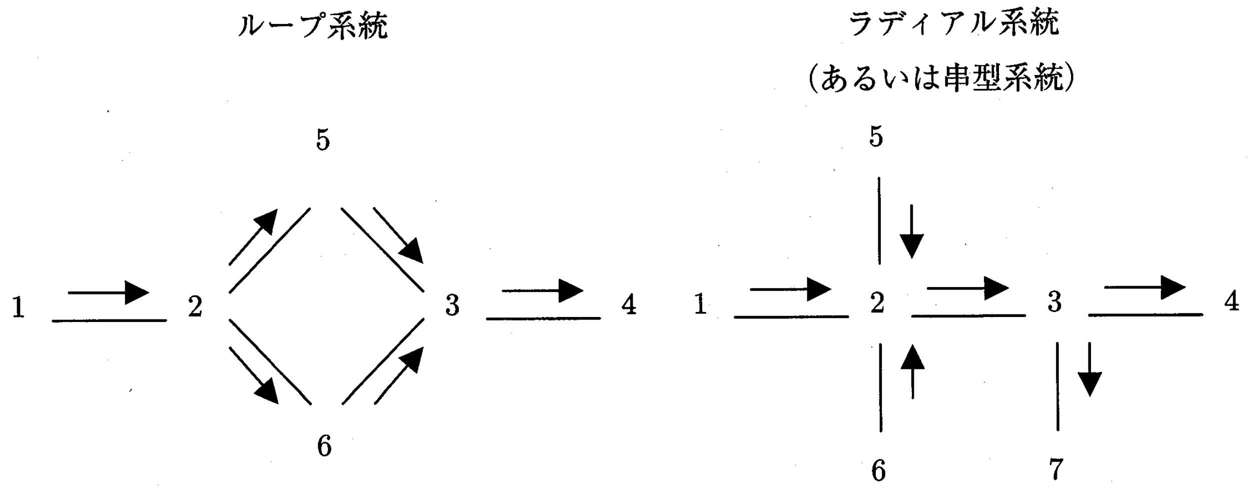
$$W(\mathbf{q}^{\mathbf{d}}, \mathbf{q}^{\mathbf{s}}) \equiv CS(\mathbf{q}^{\mathbf{d}}) + \Pi(\mathbf{q}^{\mathbf{d}}) + MS(\mathbf{q}^{\mathbf{d}}, \mathbf{q}^{\mathbf{s}}) \tag{1}$$

を得る．

2.2　電力系統の種類と電力潮流

電力系統は，ループ（Loop：環状）系統とラディアル（Radial：放射状）系統とに大

図1　ループ系統とラディアル系統（あるいは串型系統）の例



別できる．ループ系統は，環状に連結された送電線を含む系統である．この型の系統では，環状の電力潮流，すなわちループ潮流（Loop Flow）が生じる．ループ潮流は，キルヒホッフの法則と呼ばれる独特の物理法則に従う．一方，ラディアル系統は，送電線が放射状に連結された系統である．この型の系統は，環状に結ばれた送電線を含まないので，ループ潮流が生じない．ループ系統とラディアル系統の本質的な違いは，独特の物理法則に従うループ潮流が生じるか否かにある．

わが国の連系系統は，ラディアル系統の典型である．特に，沖縄を除く既存の9つの電力会社が，連系線により串状に連結されているため，串型系統と呼ばれることもある．図1に，ループ系統とラディアル系統（あるいは串型系統）の簡単な例を示してある．

もし送電容量 $\mathbf{k}$ を変化させるなら，電力系統全体の物理的な特性が変わるため，ループ潮流も変化する．したがって，ループ系統における電力潮流は，送電容量 $\mathbf{k}$ に依存して決まることになる．ところが，ラディアル系統では，ループ潮流がそもそも存在しないため，電力潮流は送電容量 $\mathbf{k}$ に依存しない．今，送電線 l の電力潮流を F^l とおく．すると，ループ系統における電力潮流は，電力の取引量 $(\mathbf{q}^{\mathrm{d}},\mathbf{q}^{\mathrm{s}})$ だけでなく，送電容量 $\mathbf{k}$ にも依存する形で，$F^l(\mathbf{q}^{\mathrm{d}},\mathbf{q}^{\mathrm{s}},\mathbf{k})$ と表される．一方，ラディアル系統における電力潮流は，送電容量 $\mathbf{k}$ には依存せず，電力の取引量 $(\mathbf{q}^{\mathrm{d}},\mathbf{q}^{\mathrm{s}})$ のみの関数として，$F^l(\mathbf{q}^{\mathrm{d}},\mathbf{q}^{\mathrm{s}})$ と表される．

直流法による潮流計算では，電力潮流を，各ノードの（ネットの）発電電力と潮流分流係数とを用いて定式化できる[2)]．ループ系統の場合，送電線 l の電力潮流は，

2)　電力潮流の近似法と考えてよい．電力を構成する有効電力と無効電力のうち，無効電力は捨象し，有効電力の潮流についてのみ計算する．直流法による潮流計算の詳細については，新田目 (1980) や Schweppe et al. (1988)，Leautier(2000) を参照されたい．

$$F^l(\mathbf{q^d}, \mathbf{q^s}, \mathbf{k}) \equiv \sum_{n=1}^{N-1} h^{l,n}(\mathbf{k}) Q^n(q^{n,d}, q^{n,s}),\ l = 1, \cdots, L \tag{2}$$

と表すことができる[3)]．

ここで，$h^{l,n}(\mathbf{k})$ は，潮流分流係数と呼ばれ，純粋に物理法則に従う係数である[4)]．ループ系統では，潮流分流係数は送電容量 $\mathbf{k}$ に依存して決まる．$Q^n(q^{n,d}, q^{n,s}) \equiv q^{n,s} - q^{n,d}$ は，ノード n における（ネットの）発電電力，すなわち発電量と需要量の差を表す．ノード n は，$Q^n(q^{n,d}, q^{n,s}) > 0$ なら供給過剰地となり，超過発電分が電力系統に注入される．逆に，$Q^n(q^{n,d}, q^{n,s}) < 0$ なら需要過剰地となり，超過需要分が電力系統から引き出される．

一方，ラディアル系統の場合，送電線 l の電力潮流は，

$$F^l(\mathbf{q^d}, \mathbf{q^s}) \equiv \sum_{n=1}^{N-1} h^{l,n} Q^n(q^{n,d}, q^{n,s}),\ l = 1, \cdots, L \tag{3}$$

と表すことができる．ラディアル系統では，潮流分流係数が送電容量 $\mathbf{k}$ に依存しない定数となる[5)]．

ラディアル系統は，ループ系統の特殊なケースとみなすことができる．電力潮流が簡単に表せるため，後述するように，送電容量に関するルールを，非常にシンプルな形で導出することが可能となる．

2.3　ノーダル料金

需給バランス制約は，電力市場全体での需給均衡の制約で，$Q(\mathbf{q^d}, \mathbf{q^s}) \equiv \sum_{n=1}^{N} Q^n(q^{n,d}, q^{n,s}) = 0$ と表される．電力潮流が送電容量を超えることはできないことより，各送電線の容量制約は，$F^l(\mathbf{q^d}, \mathbf{q^s}, \mathbf{k}) \leq k^l$ と表される．ラグランジュの未定乗数を，需給バランス制約については λ，送電線の容量制約については $\eta^l \geq 0,\ l = 1, \cdots, L$ とおき，短期の社会余剰を最大化する問題を解くと，ノーダル料金が求まる．

3)　基準となるノードとして，通常，スウィング・バス（Swing Bus）と呼ばれるノードを設定する．直流法では，スウィング・バス以外の N-1 個のノードを用いて，電力潮流を計算することができる．

4)　$h^{l,n}(\mathbf{k})$ は，他のノードの（ネットの）発電電力を 0 としたまま，ノード n からスウィング・バスに向け 1 単位の電力を送電した時に，送電線 l に分流する電力の値を表している．例えば，$h^{l,n}(\mathbf{k})$ が 0.2 であれば，ノード n に注入した電力の 20%が，送電線 l に分流することを示す．ループ系統では，送電容量 $\mathbf{k}$ を増減すれば，$h^{l,n}(\mathbf{k})$ の値も変化する．

5)　ラディアル系統では，環状の分岐がないことから，$h^{l,n} = -1,\ 0,\ +1$ のいずれかの値が一意に定まる．正負は電力の向きによる．

問題1：
$$\nu(\mathbf{k}) \equiv \max_{\mathbf{q^d},\mathbf{q^s}} : W(\mathbf{q^d},\mathbf{q^s})$$
$$\text{s.t. } Q(\mathbf{q^d},\mathbf{q^s}) = 0$$
$$F^l(\mathbf{q^d},\mathbf{q^s},\mathbf{k}) \le k^l,\ l=1,\cdots,L$$

一次の必要条件から，ノーダル料金は，$n=1,\cdots,N-1$ では $p^n=\lambda(\mathbf{k})-\sum_{l=1}^{L}\eta^l(\mathbf{k})h^{l,n}(\mathbf{k})$，$n=N$ では $p^n=\lambda(\mathbf{k})$ と求まる．ノーダル料金適用下の各ノードの需要量と発電量は，$\mathbf{q}^*(\mathbf{k})\equiv(\mathbf{q^{d*}}(\mathbf{k}),\mathbf{q^{s*}}(\mathbf{k}))$ とおく．また，$\nu(\mathbf{k})\equiv W(\mathbf{q^{d*}}(\mathbf{k}),\mathbf{q^{s*}}(\mathbf{k}))$ は，ノーダル料金適用下の短期社会余剰を表し，C^2 級であると仮定する．

ノーダル料金の適用下で，容量制約に関するラグランジュの乗数 $\eta^l(\mathbf{k})$ は，各送電線の混雑料金（(Shadow) Congestion Price）に相当する．一般に，送電容量 $\mathbf{k}$ が小さく，容量制約が厳しいほど，混雑料金 $\boldsymbol{\eta}(\mathbf{k})$ は大きくなる．逆に，送電容量 $\mathbf{k}$ が大きく，容量制約が緩いほど，混雑料金 $\boldsymbol{\eta}(\mathbf{k})$ は小さくなる．

送電線の混雑がもたらすレントとして，送電事業者は，混雑料金収入 $\rho(\mathbf{k})\equiv\sum_{l=1}^{L}\eta^l(\mathbf{k})k^l$ を獲得する．Wu et al.(1996) が論じているように，ノーダル料金の適用下で，送電事業者が獲得する余剰と混雑料金収入は一致する．すなわち，

$$MS(\mathbf{q^{d*}}(\mathbf{k}),\mathbf{q^{s*}}(\mathbf{k}))=\rho(\mathbf{k}) \tag{4}$$

が成り立つ．

3. ループ系統における送電容量の最適基準

需要に比べて電力系統の設備規模が巨大な場合には，送電事業者は，送電線の固定費を回収しきれず，赤字を被る可能性が高い．本節では，ノーダル料金の適用下において，長期的に送電容量を調整し，混雑料金収入の水準を変えることで，送電線の固定費回収を目指す．その際，収支制約を満たす送電容量の組み合わせは多数あるので，長期的な社会余剰をできる限り大きくするような，送電容量の最適基準を導出する．以下では，ループ系統を考え，一般化した議論を行う．

まず，送電容量を増設した時に生じる費用について述べる．送電線の固定費は，送電容量の大きさに依存しており，$c(\mathbf{k})$ とおく．$c(\mathbf{k})$ は，全ての送電線に関する資本費や修繕費等の合計額である．一般に，電力系統の設備形成には規模の経済が働くことを踏まえ，$c(\mathbf{k})$ は，C^2 級で非減少の凹関数であると仮定する．送電線 l の容量を増設した時の，固定費の限界増分は，$c_l(\mathbf{k})\equiv\partial c(\mathbf{k})/\partial k^l$ と表せる．送電容量に関する偏微分は，以下でも

同様の記号法とする．

ところで，前節で述べたとおり，送電線 l の容量を変えると，電力系統全体の物理的な特性が変化する．すなわち，潮流分流係数 $h^{m,n}(\mathbf{k})$ の値自体が変わり，電力系統における，電力潮流の配分比率が変化する．そのため，電力系統に注入される合計電力が一定のままであっても，配分比率の変化に応じて，電力潮流 $F^m(\mathbf{q}^\mathbf{d}, \mathbf{q}^\mathbf{s}, \mathbf{k})$ も変化してしまう．この変化分 $F_l^m(\mathbf{q}^\mathbf{d}, \mathbf{q}^\mathbf{s}, \mathbf{k})$ を，電力系統全体を通じて，シャドウ・プライスたる混雑料金 $\eta^m(\mathbf{k})$ で価値換算したものは，純粋に物理法則に基づく技術的外部効果を表す．これを，潮流変化を通じた外部不経済効果と呼ぶことにする．送電線 l の容量を増設する時の，潮流変化を通じた外部不経済効果を $\phi^l(\mathbf{k})$ とおくと，

$$\phi^l(\mathbf{k}) \equiv \sum_{m=1}^{L} \eta^m(\mathbf{k}) F_l^m(\mathbf{q}^\mathbf{d}, \mathbf{q}^\mathbf{s}, \mathbf{k})|_{\mathbf{q}=\mathbf{q}^*(\mathbf{k})} \tag{5}$$

と定義できる[6)]．

上記より，送電線 l の容量を増設する時の社会的限界費用 $\tau^l(\mathbf{k})$ を，私的限界費用 $c_l(\mathbf{k})$ と潮流変化を通じた外部不経済効果 $\phi^l(\mathbf{k})$ の和により，

$$\tau^l(\mathbf{k}) \equiv c_l(\mathbf{k}) + \phi^l(\mathbf{k}) \tag{6}$$

と定義することができる．

次に，送電容量の増設による混雑料金変化の効果に関して定義しておく．送電線 l の容量を増設した場合，電力系統全体の混雑状況が変わるので，各々の送電線の混雑料金 $\eta^m(\mathbf{k})$ が変化し，ひいては収入も変化する．inframarginal な送電容量に関するこのような効果を，混雑料金変化の効果と呼ぶことにする．送電線 l の容量を増設する時の，混雑料金変化の効果を $\psi^l(\mathbf{k})$ とおくと，

$$\psi^l(\mathbf{k}) \equiv -\sum_{m=1}^{L} \eta_l^m(\mathbf{k}) k^m \tag{7}$$

と定義することができる[7)]．

以上を踏まえ，ノーダル料金の適用下で，収支制約を課した場合の長期社会余剰の最大化問題を解く．

6)　$\phi^l(\mathbf{k}) > 0$ を外部不経済効果と定義する．$\phi^l(\mathbf{k}) < 0$ の場合には，外部経済効果となる．注意すべき点は，あくまでも合計電力を一定に保った状態で，配分比率の変化に伴い，各送電線に流れる電力がどう変化するかを評価していることである．送電容量の増設に伴い，容量に余裕ができた分，電力が余分に流入するのを評価しているわけではない．$\phi^l(\mathbf{k})$ は，Leautier(2000) が単に送電線間の外部性（externalities among transmission lines）と呼んだ効果に該当する．

7)　一般に，送電容量を増設すると，混雑が緩和，すなわち混雑料金が減少する方向に向かう．この効果の大きさ（絶対値）を知りたいので，マイナスを付けた $-\sum_{m=1}^{L} \eta_l^m(\mathbf{k}) k^m$ により $\psi^l(\mathbf{k})$ を定義する．なお本稿では，全ての送電線が混雑し，送電線の容量制約が常に効いている状況を考えている．

問題 2：

$$\max_{\mathbf{k}} : \nu(\mathbf{k}) - c(\mathbf{k})$$

$$\text{s.t. } \rho(\mathbf{k}) \geq c(\mathbf{k})$$

収支制約に関するラグランジュの未定乗数を $\xi \geq 0$，また，$R \equiv \xi/(1+\xi)$ とおくと，次の命題が成立する．

命題 1：ノーダル料金の適用下で，収支制約を満たす最適容量 $\mathbf{k}'$ は，送電線の混雑料金と，容量増設の社会的限界費用との乖離を，混雑料金変化の効果と潮流変化を通じた外部不経済効果の差に比例させる容量である．すなわち，$\mathbf{k}'$ は，

$$\eta^l(\mathbf{k}) - \tau^l(\mathbf{k}) = R\{\psi^l(\mathbf{k}) - \phi^l(\mathbf{k})\},\ l = 1, \cdots, L \tag{8}$$

を満たす．

証明　ラグランジアンを $\mathrm{L} \equiv \nu(\mathbf{k}) - c(\mathbf{k}) + \xi\{\rho(\mathbf{k}) - c(\mathbf{k})\}$ とおくと，一次の必要条件より，

$$\nu_l(\mathbf{k}) - c_l(\mathbf{k}) + \xi\{\rho_l(\mathbf{k}) - c_l(\mathbf{k})\} = 0 \tag{9}$$

包絡線定理より，$\nu_l(\mathbf{k}) = \eta^l(\mathbf{k}) - \phi^l(\mathbf{k})$ が成り立つことに注意すると，

$$\eta^l(\mathbf{k}) - \phi^l(\mathbf{k}) - c_l(\mathbf{k}) + \xi\{\eta^l(\mathbf{k}) - \psi^l(\mathbf{k}) - c_l(\mathbf{k})\} = 0 \tag{10}$$

$$(1+\xi)[\eta^l(\mathbf{k}) - \{\phi^l(\mathbf{k}) + c_l(\mathbf{k})\}] = \xi\{\psi^l(\mathbf{k}) - \phi^l(\mathbf{k})\} \tag{11}$$

よって，

$$\eta^l(\mathbf{k}) - \tau^l(\mathbf{k}) = R\{\psi^l(\mathbf{k}) - \phi^l(\mathbf{k})\} \tag{12}$$

を得る．(証明終)

ノーダル料金の適用下で，送電容量をうまく調整すれば，収支制約がちょうど満たされる．その際，混雑料金変化の効果 $\psi^l(\mathbf{k})$ と潮流変化を通じた外部不経済効果 $\phi^l(\mathbf{k})$ に応じて，送電容量を設定することで，長期的な社会余剰の損失を極力小さくすることができる．

具体的には，送電容量の小さな調整により，電力系統全体での大きな混雑変化を惹起する送電線を対象として，大幅な容量調整を行うべきである．すなわち，混雑料金変化の効果 $\psi^l(\mathbf{k})$ が大きい送電線に対して，容量調整を大きくするのである．そうすることで，容

量調整に伴う資源配分の歪みを抑えることができる．一方，ある送電線に関して，潮流変化を通じた外部不経済効果 $\phi^l(\mathbf{k})$ が大きい場合には，その送電線の容量調整は控えるべきである．

4．ラディアル系統における送電容量の最適基準

これまでは，ループ系統を想定して一般化した分析を行ったが，本節では，ラディアル系統に焦点を当てた考察を行う．第2節で述べたとおり，ラディアル系統では，ループ潮流が発生せず，電力潮流は送電容量に依存しない形となる．そのため，潮流変化を通じた外部不経済効果が全く生じないのである．この事実を用いることで，ラディアル系統における送電容量に関して，固有かつシンプルな最適基準を導くことができる．このルールは，ループ系統では成立しない特有なものである．本節の議論は，ラディアル系統の典型例であるわが国の連系系統に関して，特に有効である．

まず，準備として，ラディアル系統に特有な次の補題を示す．

補題1：ラディアル系統において，容量増設による混雑料金への交差効果は，対称である．すなわち，

$$\eta_l^m(\mathbf{k}) = \eta_m^l(\mathbf{k}),\ l, m = 1, \cdots, L \tag{13}$$

が成立する．

証明　ラディアル系統では，潮流変化を通じた外部不経済効果に関して，

$$\phi^l(\mathbf{k}) \equiv \sum_{m=1}^{L} \eta^m(\mathbf{k}) F_l^m(\mathbf{q}^\mathbf{d}, \mathbf{q}^\mathbf{s})|_{\mathbf{q}=\mathbf{q}^*(\mathbf{k})} = 0 \tag{14}$$

が成り立つ．よって，$v_l(\mathbf{k}) = \eta^l(\mathbf{k}) - \phi^l(\mathbf{k}) = \eta^l(\mathbf{k})$ が成り立つ．$\nu(\mathbf{k})$ は C^2 級であることに注意すると，

$$\eta_l^m(\mathbf{k}) = \frac{\partial^2 \nu(\mathbf{k})}{\partial k^l \partial k^m} = \frac{\partial^2 \nu(\mathbf{k})}{\partial k^m \partial k^l} = \eta_m^l(\mathbf{k}) \tag{15}$$

が成立する．（証明終）

このように，ラディアル系統では，2つの送電線に関して，一方の送電容量を増設する時の，他方の混雑料金に与える影響は，対称的である．これは，ラディアル系統に特有な性質で，潮流変化を通じた外部不経済効果が全く発生しないことに起因する．これに対

し，ループ系統では，潮流変化を通じた外部不経済効果が存在するために，

$$\eta_l^m(\mathbf{k}) - \phi_l^m(\mathbf{k}) = \eta_m^l(\mathbf{k}) - \phi_m^l(\mathbf{k}) \tag{16}$$

という関係が成り立つ．しかし，$\phi_l^m(\mathbf{k})$ と $\phi_m^l(\mathbf{k})$ が等しい保障はないため，一般に，容量増設による混雑料金への交差効果は対称とならない．すなわち，$\eta_l^m(\mathbf{k}) \neq \eta_m^l(\mathbf{k})$ である．

次に，電力系統の全ての送電線を比例的に増設した場合を考え，混雑料金についての規模の弾力性という指標を定義する．

定義 1：混雑料金についての規模の弾力性 (Elasticity of Scale)
全ての送電容量を 1%増やす場合に，特定の送電線の混雑料金が何%変化するかを示す指標を，混雑料金についての規模の弾力性と定義する．正式には，$\alpha > 0$ に対して，送電線 l の混雑料金についての規模の弾力性を，

$$\varepsilon^l \equiv -\frac{\partial \eta^l(\alpha \mathbf{k})}{\partial \alpha} \frac{\alpha}{\eta^l(\alpha \mathbf{k})}\bigg|_{\alpha=1}, l = 1, \cdots, L \tag{17}$$

と定義する．

一般に，規模の弾力性は，生産関数について，規模に関する収穫の局所的な指標を与える．上記の**定義 1** は，一般の生産要素と産出物の関係を，送電容量と混雑料金の関係に応用したものである．これは，電力系統の規模の拡大が，各送電線の混雑度合，ひいては混雑料金にどのような変化をもたらすかを，局所的に示す指標となっている．通常，電力系統の規模の拡大により，送電線の混雑が緩和され，混雑料金は下がる傾向にある．そこで，変化の割合の大きさを表すために，上記ではマイナスをつけて定義してある．

以上の設定より，ラディアル系統において，固有かつシンプルな送電容量の最適基準を導くことができる．

命題 2：ラディアル系統において，ノーダル料金の下で，収支制約を満たす最適容量 $\mathbf{k}'$ は，送電線の混雑料金と，容量増設の（私的）限界費用との乖離率を，混雑料金についての規模の弾力性に比例させる容量である．すなわち，$\mathbf{k}'$ は，

$$\frac{\eta^l(\mathbf{k}) - c_l(\mathbf{k})}{\eta^l(\mathbf{k})} = R\varepsilon^l,\ l = 1, \cdots, L \tag{18}$$

を満たす．

証明　ラディアル系統では，潮流変化を通じた外部不経済効果に関して，$\phi^l(\mathbf{k}) = 0$ が成

り立つことから，命題1は，

$$\eta^l(\mathbf{k}) - c_l(\mathbf{k}) = R\psi^l(\mathbf{k})$$
$$= -R\sum_{m=1}^{L}\eta_l^m(\mathbf{k})k^m \tag{19}$$

と表せる．補題1より，$\eta_l^m(\mathbf{k}) = \eta_m^l(\mathbf{k})$ が成り立つので，

$$\eta^l(\mathbf{k}) - c_l(\mathbf{k}) = -R\sum_{m=1}^{L}\eta_m^l(\mathbf{k})k^m \tag{20}$$

ここで，$\left.\dfrac{\partial\eta^l(\alpha\mathbf{k})}{\partial\alpha}\right|_{\alpha=1} = \left.\sum_{m=1}^{L}\dfrac{\partial\eta^l(\alpha\mathbf{k})}{\partial(\alpha k^m)}k^m\right|_{\alpha=1} = \sum_{m=1}^{L}\dfrac{\partial\eta^l(\mathbf{k})}{\partial k^m}k^m$ なので，

$$\frac{\eta^l(\mathbf{k}) - c_l(\mathbf{k})}{\eta^l(\mathbf{k})} = -R\left.\frac{\partial\eta^l(\alpha\mathbf{k})}{\partial\alpha}\frac{\alpha}{\eta^l(\alpha\mathbf{k})}\right|_{\alpha=1}$$
$$= R\varepsilon^l \tag{21}$$

が成立する．（証明終）

命題2が示すように，ラディアル系統では，ループ潮流が発生せず，潮流変化を通じた外部不経済効果が生じないため，まず送電容量の最適基準がシンプルに表される．そればかりでなく，容量増設による混雑料金への交差効果が対称である事実に着目すると，ラディアル系統に固有なルールを導出することができる．すなわち，混雑料金についての規模の弾力性に基づいて，送電容量を決定するルールである．このルールでは，全ての送電容量を1%増やすことを考え，ノーダル料金の適用下で，各々の送電線の混雑料金が何%変化するかを考慮して，送電容量を決定することになる．

さらに，一定の条件の下では，シンプルな定率ルールが成立することを示せる．すなわち，短期の社会余剰 $\nu(\mathbf{k})$ が同次関数で表せるならば，次の命題が成立する[8)]．

系1：ラディアル系統において，短期社会余剰が同次関数で表せる場合，$\mathbf{k}'$ に関して定率ルールが成立する．すなわち，$\mathbf{k}'$ は，送電線の混雑料金と，容量増設の（私的）限界費用との乖離を，全ての送電線に関して定率とする容量である．換言すると，$\nu(\mathbf{k})$ が r

8）問題1は凹計画問題となるので，その最適値評価関数 $\nu(\mathbf{k})$ は，$\mathbf{k}$ に関して非減少の凹関数となる（この点については，例えばLuenberger(1969)等を参照されたい）．そのため，$\nu(\mathbf{k})$ については，1次以下の同次関数を考えればよい．ここで，もしも $\nu(\mathbf{k})$ が1次同次関数であると仮定するなら，$\nu_l(\mathbf{k}) = \eta^l(\mathbf{k})$ は0次同次関数となる．すると，全ての $\mathbf{k}$ を比例的に増やしても，$\eta^l(\mathbf{k})$ の値は不変である．これは，全ての送電線を増設しても，混雑が全く緩和されないことを意味する．このような送電容量 $\mathbf{k}$ の範囲は考察の対象外なので，$\nu(\mathbf{k})$ には，1次未満の同次関数を想定すればよい．

次同次関数（$r<1$）ならば，$\mathbf{k}'$ は，

$$\frac{\eta^l(\mathbf{k})-c_l(\mathbf{k})}{\eta^l(\mathbf{k})}=R\cdot(1-r),\ l=1,\cdots,L \tag{22}$$

を満たす． (23)

証明　$\nu(\mathbf{k})$ が r 次同次であることから，同次関数に関するオイラーの定理より，$\nu_l(\mathbf{k})=\eta^l(\mathbf{k})$ は，（$r-1$）次同次関数である．さらに，オイラーの定理より，$\sum_{m=1}^{L}\eta^l_m(\mathbf{k})k^m=(r-1)\cdot\eta^l(\mathbf{k})$ が成り立つ．よって，

$$\eta^l(\mathbf{k})-c_l(\mathbf{k})=-R\sum_{m=1}^{L}\eta^l_m(\mathbf{k})k^m \tag{24}$$

$$\frac{\eta^l(\mathbf{k})-c_l(\mathbf{k})}{\eta^l(\mathbf{k})}=R\cdot(1-r) \tag{25}$$

が成立する．（証明終）

全ての送電線が混雑している状況を考えれば，短期の社会余剰 $\nu(\mathbf{k})$ を，局所的に同次関数で近似できる可能性がある．その場合には，極めてシンプルな定率ルールが適用可能となる．これは，均一税率の従価税を課す方法だと解釈することができる．

5．政策的含意

わが国の串型連系系統は，9つのノードをもつラディアル系統だと考えることができる．既存の各電力会社が受けもつ供給ゾーンは，それぞれローカル市場であり，1つのノードに対応するものとみなせる．そして，各々のローカル市場，すなわちノードは，串状に配置された連系線により互いに連結されている．つまり，わが国の串型連系系統は，既存の9つの供給ゾーンに対応する9つのノードと，それを連結する串型に配置された連系線により構成されており，典型的なラディアル系統となっている．

したがって，串型連系系統における連系線の送電容量に関して，前節で導出した固有かつシンプルな最適基準を，直接応用することが可能である．実際に，わが国で設立予定の卸電力取引所は，上記の串型連系系統をベースとした全国規模の電力市場を目指している．同時に設立が予定される中立機関（電力系統利用協議会）が，電力系統の設備形成に関するルール策定を行う際には，本稿の議論が役立つものと期待される．

最後にもう1点，政策への適用を考える際の注意点を述べる．送電線の固定費を回収するためには，二部料金を活用することも現実的な手段の一つである．しかし，小規模需要家の存在を考慮すると，固定費の全額を基本料金で賄うことは，必ずしも適切ではない．特に，電力系統の設備規模は巨大であり，固定費も巨額である．固定費の全てを基本料金により回収しようとすると，基本料金の水準が高くなり，小規模需要家の排除による非効率が拡大する恐れがある．

現実の例では，東京電力が，上記の影響を考慮して，送電設備の固定費の全額ではなく，その50%だけを基本料金により回収し，残りの50%は従量料金側で回収している．ただし，送電容量を所与とした上で，その固定費の半額を，単純に平均して従量料金に上乗せしているにすぎない．そのため，そもそも，効率性の観点から送電容量を決定する基準がなく，資源配分の歪みが生じる．

そこで，固定費の全額ではなく，その一部だけを基本料金により回収し，残りについては，本稿で導出した方法により回収する方法が有効である．すなわち，ノーダル料金の適用下において，送電容量をうまく調整し，混雑料金収入の水準を変化させることで，固定費の残りを回収するのである．二部料金を活用しながら，本稿の収支制約を満たす最適容量を選択することで，小規模需要家の排除を抑えつつ，送電線の固定費を回収し，長期における資源配分の歪みを極力抑制することが可能となる．

6. 結　語

本稿では，ノーダル料金の適用下で，電力系統の固定費を回収しながら，設備形成を極力効率的に進めるための規制ルールを導出した．それは，混雑レントにより送電線の固定費を回収しつつ，長期社会余剰を極力大きくする送電容量の最適基準である．このルールに従えば，ループ系統では，混雑料金変化の効果と潮流変化を通じた外部不経済効果の差に応じて，送電容量を調整するのがよい．一方，ラディアル系統では，上記の外部効果が存在しないため，固有かつシンプルなルールが成立する．すなわち，混雑料金についての規模の弾力性に基づいて，送電容量を調整すればよい．わが国の串型連系系統は，典型的なラディアル系統であるため，本稿で導出した固有かつシンプルなルールを，直接応用することが可能である．

最後に，今後の課題について，いくつか言及する．

本稿で扱った送電線の容量制約は，主に熱容量に関する制約である．しかし，現実の系統運用では，これ以外にも，安定度や電圧等の技術的な送電制約が重要となる．これらの

技術的な制約条件も十分考慮して，分析のさらなる深化を図る必要がある．

本稿では，通常のノーダル料金の議論と同様に，基準となる平均的な需要と電力潮流を想定して，静学的な分析を行っている．しかし，需要が増大しているケースにも注意する必要があり，本稿の分析を動学的な枠組みに拡張していくことも重要である．

本稿では，発電事業者が完全競争の状態にあるものと想定している．しかし，少なくとも競争の初期には，大手の発電事業者による寡占競争が予想される．本稿の分析を，寡占競争の枠組みに拡張していくことも重要な課題である．

参考文献

Bohn,R.E., M.C.Caramanis and F.C.Schweppe(1984) "Optimal Pricing in Electrical Networks over Space and Time," *RAND Journal of Economics* 15(3):360-376.

Chao,H-P., S.Peck(1996) "A Market Mechanism for Electric Power Transmission," *Journal of Regulatory Economics* 10:25-59.

Hogan,W.W.(1992) "Contract Networks for Electric Power Transmission," *Journal of Regulatory Economics* 4:211-242.

Leautier,T-O.(2000) "Regulation of an Electric Power Transmission Company," *Energy Journal* 21(4):61-92.

Luenberger,D.G.(1969) *Optimization by Vector Space Methods*, John Wiley and Sons, New York.

Schweppe,F.C., M.C.Caramanis, R.D.Tabors and R.E.Bohn(1988) *Spot Pricing of Electricity*, Kluwer Academic Publishers, Norwell, MA.

Wu,F., P.Varaiya, P.Spiller and S.Oren(1996) "Folk Theorems on Transmission Access:Proofs and Counterexamples," *Journal of Regulatory Economics* 10:5-23.

新田目倖造 (1980)『電力系統技術計算の基礎』電気書院.