

レーザー誘雷技術の開発動向

Development of Laser-triggered Lightning Technology

新藤 孝敏*

Takatoshi Shindo

1. はじめに

雷は電力設備の絶縁設計上重要な問題の一つであり、古くから研究がなされている。現在のわが国の電力供給の信頼度は、諸外国に比しても極めて高い水準にあるが、それでもなお、毎年少なくない数の供給支障事故が発生しており、その約半数は雷に起因するものである。これまでの耐雷設計は、送電線などの電力設備への雷撃は不可避のものと考え、如何に雷のエネルギーを安全に大地に逃がすかという基本理念のものに構築されてきた。その具体化が架空地線や避雷装置などであるが、近年のレーザー技術の発達に伴い、レーザーを用いて雷事故を防止できる可能性が生じてきた。

大出力のレーザー光を大気中で集光すると、焦点近傍では鋭い音と発光を伴って空気の絶縁破壊が発生する。このような気体の絶縁破壊を生じるためには、レーザー光のエネルギー密度がある「しきい値」を越える必要があるが、もしもレーザー光のエネルギーを十分大きくできれば、焦点以前の集光段階でもレーザー光のエネルギー密度がこの「しきい値」を越えるようになり、写真1に示すようにレーザー光に沿って空気の絶縁破壊領域を形成することができる。以下では、このような絶縁破壊領域をプラズマチャンネルと呼ぶこととする。このプラズマチャンネルは放電を誘導する効果を持つため、プラズマチャンネルの生成にタイミングを合わせて高電圧を印加すれば、写真2に示すようにプラズマチャンネルに沿った放電を形成できる。

この現象を利用して、レーザー光を雷雲に向かって照射し、生成されたプラズマチャンネルによって、雷放電を任意の位置へ誘導し電力設備などへの雷撃を防止するというのが「レーザー誘雷」である。図-1にその概念図を示す。

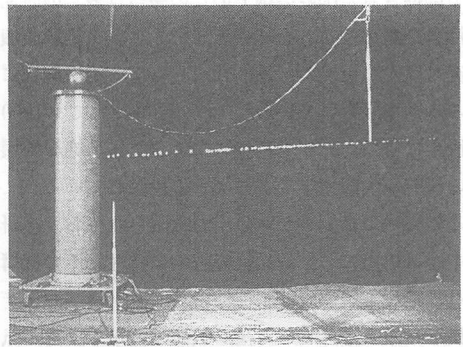


写真1 炭酸ガスレーザーで生成されたプラズマ

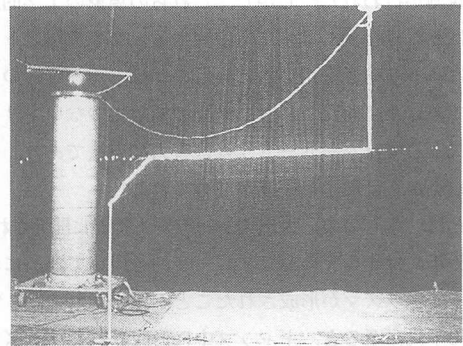


写真2 プラズマチャンネルで誘導された放電

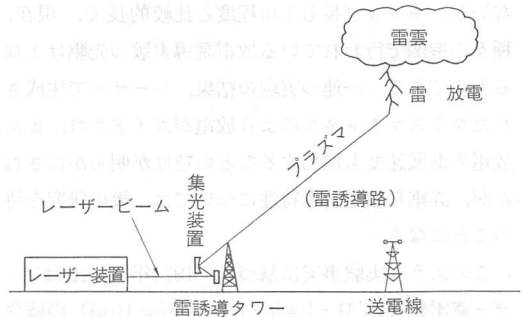


図-1 レーザー誘雷の概念図

* 助電力中央研究所 柏江研究所電気絶縁部
〒201 柏江市岩戸北2-11-1

本稿では、最近までのレーザー誘雷研究の経過を簡単に紹介するとともに、わが国を中心とした最近の研究動向について紹介する。

2. レーザー誘雷研究の歴史

Maimanによってルビーレーザーが開発されたのは1960年のことであるが、そのわずか3年後の1963年にはMakerらにより、ジャイアントパルスルビーレーザーを用いた気体の絶縁破壊が報告されている¹⁾。パリで開催された国際会議でのこの報告は多くの研究者の注目を集め、これを契機として光による絶縁破壊の研究は盛んに行われ、レーザー光による絶縁破壊に関する本も出版されている²⁾。わが国においても1960年代後半には、レーザーパルスによる気体の絶縁破壊特性の研究が大阪大学などによって行われている³⁾。

この時代にはレーザーの出力も限られており、研究の中心は焦点における光絶縁破壊の特性とその機構であり、絶縁破壊に及ぼす種々のパラメータ（レーザー波長、パルス幅、ビーム径、気体の種類や圧力、気体中に含まれる微粒子など）の影響が検討されるとともに、レーザーで生成されるプラズマの発達過程の詳細な観測が行われた。しかし、これらの現象の工学的応用はそれほど多くなく、気中短ギャップの放電のトリガにレーザー光を用いるというのがほとんど唯一のものであった。ただし、遅れ時間の極めて少ないトリガ方式としてはレーザートリガは有力な方法であり、その観点からは熱心に研究が進められた⁴⁾。

とはいうものの、大出力レーザーも徐々に開発され、1969年には4 GWのガラスレーザーを用いて25mにわたってプラズマが形成されたことが報告されている⁵⁾。1970年代に至ると、ギャップ中に形成されたプラズマチャンネルにより、放電を誘導する研究が行われるようになった⁶⁾。これらの研究は誘雷を目指したものではないが、ギャップ長も1 m程度と比較的長く、現在、種々の機関で行われている放電誘導実験の先駆けとなるものである。一連の実験の結果、レーザーで生成されたプラズマチャンネルにより放電がガイドされ、また放電の進展速度も増加するなどの特性が明らかにされたが、詳細な放電誘導特性については、後の研究を待つことになる。

このような実験事実に基づき、1974年にBallはレーザー避雷針（LLR: Laser Lightning Rod）の概念を提案している⁷⁾。Ballは提案のみで実験は行っていないが、1979年にはアメリカ空軍の研究所により、自

然雷を対象としたレーザー誘雷の実験がNew MexicoのSouth Baldy Mountain山頂で実施された。使用されたレーザーの出力など、実験の詳細は明らかにされていないが、この時は誘雷には成功していない。この後もSDI構想に関連して大出力レーザーの研究は進められたが、著者の知る限り、レーザー誘雷の研究はこの実験を最後に米国では中断する。ところが最近になって、わが国での活発なレーザー誘雷研究に触発され、米国の大学などでもレーザー誘雷の研究が再開されている。

3. わが国におけるレーザー誘雷研究

わが国におけるレーザー誘雷の研究は、1982年に著者らが行ったレーザーによる気体の絶縁破壊とレーザーを用いた誘雷の可能性に関する調査⁸⁾が、その嚆矢といえるであろう。この調査報告では、それまでに国内外で得られたレーザーによる気体の絶縁破壊特性、レーザーによる放電誘導特性を取りまとめるとともに、レーザーによる誘雷の可能性を論じている。

実験的研究としては、1980年代の中頃から、慶応大学で10cm程度の気中短ギャップにおいて紫外レーザーと赤外レーザーの重畳による気体の絶縁破壊に関する研究が開始された⁹⁾。さらに1980年代後半には、わが国では初めて、m級のギャップにおける気中放電誘導実験が大出力パルス炭酸ガスレーザーを用いて慶応大学の内山氏らにより実施された¹⁰⁾。

ほぼ時を同じくして、電力中央研究所でも大出力パルス炭酸ガスレーザーによる放電誘導特性の検討が開始され、1 m～5 mの気中ギャップを対象とした実験により、以下に示す特性が明らかにされた^{11, 12)}。

- 1) レーザー照射によりプラズマが生成されてから、電圧印加までの遅れ時間が、50 μ sec から 100 μ sec で、ギャップのフラッシュオーバー電圧が最も低くなる。一方、遅れ時間が 2 msec程度となるとレーザーがない場合とほぼ同等のフラッシュオーバー電圧となる。
- 2) 正極性放電より負極性放電の方がレーザーで生成されたプラズマチャンネルに誘導されやすく、フラッシュオーバー電圧の低下の割合も大きい。
- 3) レーザーで誘導された放電の進展特性は、通常の放電進展様相とは異なる。特に負極性放電の場合、雷放電で見られるような、ステップ状の放電進展が観測される。
- 4) 人工霧中での放電誘導実験の結果、霧の濃度が

0.1g/m³では霧のない場合に比べ、フラッシュオーバー電圧は10~20%程度上昇するに過ぎない。また降雨の放電誘導に与える影響もそれほど大きくない。

5) レーザーで生成されたプラズマで誘導された放電のフラッシュオーバー電圧-ギャップ長特性を、通常のギャップのフラッシュオーバー特性と比較することにより、レーザーによって生成されたプラズマチャンネルは、等価的に金属棒として働きギャップ長を短くする効果がある。

この最後の効果に関してであるが、等価的な金属棒の長さは光学的に観測されるプラズマ生成領域の長さとは一般的には一致せず、プラズマが粗に生成された場合にはその効果はない。一方、プラズマが密に生成された場合には、印加電圧による電界と直角方向にも放電を誘導することが可能であり、写真3のようにZ形の放電路を形成した例もある¹³⁾。

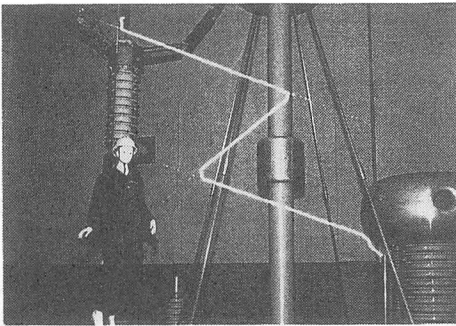


写真3 Z形に誘導された放電¹³⁾

4. 最近のレーザー誘雷研究の動向

前述した慶応大学における先駆的な研究、および電力中央研究所での研究に刺激され、わが国でも多くの大学、研究機関でレーザー誘雷の研究が行われ、さらに最近では海外でもレーザー誘雷の研究が開始されている。

一口にレーザー誘雷の研究といってもその取り組み方は様々であるが、それらを大別すると次のようになる。

- 1) レーザーによる大気絶縁破壊特性の研究
- 2) レーザー生成プラズマによる放電誘導機構の研究
- 3) 長ギャップにおける放電誘導特性の研究

以下、これらの項目について最近の研究の動向を紹介する。

4.1 レーザーによる大気絶縁破壊特性の研究

レーザーによる気体の絶縁破壊には、光の高周波電界で加速された電子が原子や分子との衝突電離によって増倍し絶縁破壊が生じるとする高周波破壊理論と、レーザー光の光子が多数個同時に原子や分子に吸収され、そのエネルギーで電離が生じ絶縁破壊に至るとする多光子吸収破壊理論の2種類がある。前者は主として炭酸ガスレーザーのような赤外レーザーに、後者はエキシマレーザーのような紫外レーザーが対象となる。

高周波破壊理論では、レーザー光を電磁波の一つと見なし、電子はレーザー光の周波数の電界で加速されてエネルギーを得て、電子のエネルギーが原子や分子の電離エネルギーを越えれば、原子や分子を電離し、電子が増倍すると考える。電子が光周波数の電界で加速された時に得るエネルギーは、その電界強度（言い換えるとレーザー光のパワー密度）の他、電子と気体分子などとの衝突周波数の関数となる。この衝突周波数は電子のエネルギーに依存する量であり、厳密にはボルツマン方程式を用いて電子のエネルギー分布を算出し、衝突周波数を計算する必要がある。

現在、大気の主な構成物質である窒素と酸素、および水蒸気について、それらの励起、電離、付着、解離などの数十の素過程を考慮した詳細な解析により、レーザー照射時の電子密度の時間変化、レーザー光のパラメーターの電子増倍に及ぼす影響が理論的に検討できるようになった¹⁴⁾。

上記の計算は空間的な変化を考慮しないモデルであるが、計算過程を簡略化し、レーザー光に沿ってプラズマがどの程度の領域に生成されるかを求めるため、レーザー光の伝搬とプラズマ生成の双方を考慮したシミュレーション¹⁵⁾がなされている。また大気中で炭酸ガスレーザーによりプラズマを生成する場合には、プラズマ生成の核となるエアロゾルの存在の影響により、写真1のようにレーザー光路上に離散的にプラズマが発生する。後述するように、プラズマの生成密度が放電誘導特性に大きく影響するため、核となるエアロゾルの分布を考慮して、生成されるプラズマの生成密度を求めるシミュレーション¹⁶⁾も行われている。

これらのシミュレーション手法の開発により、レーザーで生成されるプラズマチャンネルの特性が理論的に解明されることが期待される。

4.2 レーザー生成プラズマによる放電誘導機構の研究

4.2.1 プラズマパラメータ

レーザーで生成されたプラズマによる放電誘導のメカニズムに関しては、まだ不明な点が多い。そのため生成されたプラズマについて、電子密度、電子温度、中性子粒子密度などの観測を行い、放電誘導特性との関係を求めることが検討されている。炭酸ガスレーザーで生成されたプラズマを分光などの手法によって観測された結果を総合するとプラズマ生成後 $10\ \mu\text{sec}$ で、電子温度は $1\sim 2\ \text{eV}$ 程度、電子密度は $10^{17}/\text{cm}^3$ 程度であり、その後プラズマは急速に減衰することが明らかとなった。

前述したように、炭酸ガスレーザーでプラズマを生成した後、電圧印加までの遅れ時間が $50\sim 100\ \mu\text{sec}$ でギャップのフラッシュオーバー電圧が最低となるが、この原因は上述の電子温度、電子密度の変化からは単純には説明できない。そのため、レーザーで生成されたプラズマが膨張して空気が希薄化し放電電圧が低下する、プラズマ中のガス温度が高いため電子の付着が生じにくく、プラズマの導電性が保たれるなどの説が提案されているが、詳細はまだ不明である。

4.2.2 印加電圧波形

これまでレーザーによる放電誘導実験では印加電圧として主として、波頭長 $1\ \mu\text{sec}$ 、波尾長数 $10\ \mu\text{sec}$ の雷インパルス電圧が用いられてきた。実際の雷現象を考えると、雷撃時の電界変化はもっとゆっくりとしたものである可能性もあるため、印加電圧波形による放電誘導特性の検討も必要である。種々のインパルス電圧波形を用いて放電誘導特性を実験的に検討した結果では、波頭長が $1\ \text{msec}$ 以下では波形によって放電誘導特性に大きな差は見られないが、波頭長が msec 以上の緩波頭インパルス波形や直流電圧下では、放電誘導効果が低下することが示された¹⁷⁾。緩波頭インパルス波形で放電誘導効果が低下するのは電圧が上昇する前にプラズマが減衰してしまうためと考えられる。直流電圧下で放電が誘導されにくい原因は完全には解明されていないが、集塵効果でプラズマ生成の核となるエアロゾルが減少する、電極でのコロナ放電により電極がシールドされ、電界が弱まるなどの影響が考えられている。

4.2.3 放電進展様相

前述したように、正極性放電に比べ負極性放電の方が誘導され易いことが知られており、ほとんどの実験

は負極性電圧下で行われている。炭酸ガスレーザーでは生成されるプラズマは連続的ではなく、プラズマ球とでもいべきものがレーザー光に沿って離散的に形成されるが、当然ながらこのプラズマ球が密に生成されるほど放電は誘導され易い。ギャップ長よりプラズマチャンネルの方が短い場合には、ギャップのどこにプラズマチャンネルを形成するかによっても、フラッシュオーバー電圧が異なる場合がある。プラズマ球の生成密度とフラッシュオーバーに必要な電界もしくは電圧の関係を実験的に求めた結果では、プラズマ球が $1\ \text{cm}$ 当り数個程度形成されていれば、その領域をフラッシュオーバーするのに必要な電界は $\text{数kV}/\text{cm}^{18)}$ 、もしくはそれ以下¹⁹⁾となっており、気中平等電界配置でのフラッシュオーバー電界である $30\text{kV}/\text{cm}$ よりかなり小さくなっている。

正極性放電は負極性放電より誘導されにくいことから、その誘導特性やメカニズムに関する研究は負極性ほどはなされていないが、プラズマ球が密に形成され、連続的なプラズマ状態が形成されれば、正極性放電も負極性放電と同様に誘導できる可能性があることが示されている²⁰⁾。

また、これまでは大出力のレーザーが容易に入手できることもあって、赤外光のパルス炭酸ガスレーザーを用いた研究が中心であったが、紫外光であるエキシマレーザーを用いてプラズマチャンネルを形成し、放電を誘導することも行われている²¹⁾。一般に紫外レーザーで生成されるプラズマチャンネルは赤外レーザーで生成されるプラズマのような強い発光は示さないが、離散的なプラズマ球の連なりではなく、連続的なプラズマ領域となるのが大きな特徴である。紫外レーザーの場合、放電誘導距離は最大 $1\ \text{m}$ 程度と炭酸ガスレーザーに比べてまだ短い。正極性放電の誘導特性も負極性に比べてそれほど低下せず、レーザー誘雷の有力な一方法である。わが国では多くの研究者が赤外レーザーを用いているが、海外では紫外レーザーを用いた誘雷を有望視している。しかし数 m 以上の長距離にわたる放電誘導が実験的に検証されていない点、紫外レーザーによる誘雷の実現には赤外レーザーよりも未知の部分はまだ多く残されているといえよう。

今後は、これらの放電誘導特性の実験結果に基づき、レーザーで生成されたプラズマによる放電誘導メカニズムの詳細解明を目指した研究が進められるものと考えられる。

4.3 長ギャップにおける放電誘導特性の研究

既に電力中央研究所や九州大学・九州電力グループ

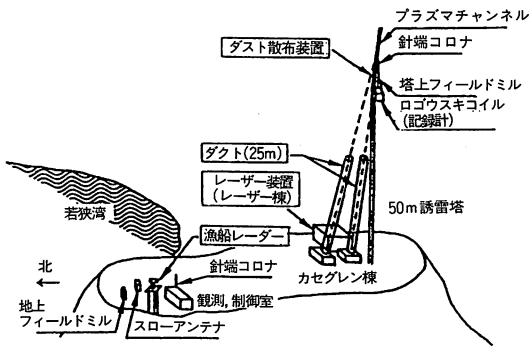


図-2 レーザー誘雷実験場配置図²²⁾

により、数百Jのパルス炭酸ガスレーザーを用いて10m以上のギャップでの放電誘導が達成されている。この結果を踏まえ、レーザー誘雷の実証実験が、関西電力・大阪大学のグループにより平成5年度から開始されている²²⁾。実験地点は日本海沿岸の福井県美浜町であり、雲底の低い冬季雷を対象としている。図-2に示すように標高約200mの山頂に50mの誘雷塔を設置し、その先端に1kJの大出力パルス炭酸ガスレーザーによってプラズマチャネルを生成することにより、雷雲接近時に誘雷塔からの上向き放電を誘発して誘雷塔への落雷を生じさせようとするものである。

平成5年からの実証実験の結果、降雪によるレーザー光の減衰、プラズマ生成の核となるエアロゾルの減少、レーザー光照射の適切なタイミングの設定など、いくつかの問題点が明らかとなったため、平成7年度には、レーザー光路へのダクトの敷設、雷放電に先立つ電磁波放射(PB: Preliminary Breakdown)をレーザー照射のトリガ信号として用いるなどの改良を行った。その結果、レーザーで生成されたプラズマにより誘発されたと思われる上向き放電が1例観測された。ただし放電は負極性と考えられるにも関わらずプラズマチャネルには沿っておらず、また雷撃には至っていない。

しかしながら、レーザー照射により上向き放電が発生したことは、レーザー誘雷の可能性を示すものである。実験は平成8年度まで継続される予定であり、本稿が活字になるころには、レーザーで自然雷の誘導に成功という報告がなされているかもしれない。

5. おわりに

レーザー誘雷は、雷を制御して雷事故を防止するという、いわば夢の雷害対策である。また、放電物理の面からもレーザー生成プラズマによる放電誘導は、空

間的に形成されたプラズマと放電の相互作用という非常に興味深い研究テーマである。レーザー誘雷の実現には、まだいくつか解決すべき問題が残されているが、夢の実現に向けて、今後さらに精力的な研究が進められるものと思われ、またレーザー誘雷はそれに値する課題であろう。

参考文献

- 1) Maker, P. D., in 3rd International Conf. on Quantum Electronics, Paris, (1963)
- 2) Raizer, Yu. P.; Laser-induced Discharge Phenomena, (1977), Consultants Bureau, New York,
- 3) 川辺他; レーザーパルスによる気体の絶縁破壊機構, 核融合研究, Vol.19, No.13 (1967), 187-198.
- 4) 例えばPendleton, W. K., Guenther, A. H.; Investigation of a laser triggered spark gap, The Review of Scientific Instruments, Vol.36, No.11 (1965), 1546-1550.
- 5) Hagen, W.F.; Diffraction-limited high-radiance Nd-glass laser system, J. of Applied Physics, Vol.40, No. 2 (1969), 511-516.
- 6) 例えばGreig, J. R. et al.; Electrical discharges guided by pulsed CO₂-laser radiation, Phys. Rev. Lett., Vol. 41, No. 3 (1978), 174-177.
- 7) Ball, L. M.; The laser lightning rod: Thunderstorm domestication, Applied Optics, Vol.13, No.10 (1974), 2292-2296.
- 8) 新藤, 鈴木; レーザによる気体の絶縁破壊と誘雷, 電力中央研究所調査報告No. 182010 (1982)
- 9) Yoshida, S. et al.; Effect of UV pre-ionization on optical breakdown induced by a pulsed CO₂ laser, J. Appl. Phys., Vol.58, No. 1 (1985), 620-622.
- 10) 内山他; レーザー誘雷の基礎研究, レーザー研究, Vol.16, No. 5 (1988), 267-277.
- 11) 相原他; レーザによる気中放電の誘導特性ならびに放電進展過程の観測, 電気学会論文誌B, Vol.112-B, No. 8 (1992), 668-686.
- 12) Shindo, T. et al.; "Laser-guided discharges in long gaps", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 8, No. 4 (1993), 2016-2022.
- 13) 永井他; レーザ誘雷の基礎実験 (VII), 電気学会放電高電圧合同研究会資料ED-93-54, HV-93-16, (1993)
- 14) 高橋, 西嶋; 大気中でのレーザー誘導プラズマ形成過程の計算機シミュレーション, 電気学会論文誌A, Vol.115-A, No. 7 (1985), 576-582.
- 15) 新藤他; レーザ伝搬に伴うプラズマ生成のシミュレーション, 電気学会論文誌A, Vol.115-A, No. 7 (1985), 589-594.
- 16) Shindo, T. et al.; A study of laser-triggered lightning (Part 2) - Calculation of plasma generation considering the existence of aerosols-, 9th International Symposium on High Voltage Engineering (ISH), 6773, Graz, (1995)
- 17) 三木他; レーザによる長ギャップ放電誘導, 電気学会放

- 電高電圧合同研究会資料, ED-96-78, HV-96-57, (1996)
- 18) 馬場他; CO₂レーザーを用いた霧中でのプラズマ生成および放電誘導実験, 電気学会放電高電圧合同研究会資料, ED-96-67, HV-96-46, (1996)
- 19) 島田他; レーザ誘雷の基礎実験, 電気学会放電高電圧合同研究会資料, ED-96-68, HV-96-47, (1996)
- 20) 三木他; 正極性放電のレーザーによる誘導特性, 電気学会論文誌A, Vol.115-A, No. 7 (1995), 644-651.
- 21) 三木他; 紫外レーザーを用いたレーザー誘雷-エキシマレーザーの放電誘導特性-, レーザー研究, Vol.24, No. 5 (1996), 564-571.
- 22) 石窪他; レーザー誘雷屋外実験の現状と実験結果概要, 電気学会放電高電圧合同研究会資料, ED-96-65, HV-96-44, (1996)

公 募

高崎経済大学教員公募について

1. 担当課目 ①環境論・環境政策論
②地域史概論, 地域産業概論
2. 採用職名・人員 教授, 助教授又は講師 1名
3. 応募資格 (1)大学卒業後5年以上で研究上の業績が優れている者。
(2)昭和10年4月2日以降に生まれた者。
4. 提出書類 (1)履歴書(押印, 写真貼付)
(指定用紙, またはそれに準拠)
(2)研究業績リスト(学会報告を含む)
・単著, 共著, 共同執筆などの区別も明示して下さい。
・掲載誌の名称は略さず, 当該の巻
- 号も記入して下さい。
・外国語による業績の場合は, 和文の要旨を業績につけて下さい。
(3)著書・論文等(抜刷可)
(4)健康診断書
- ※提出書類の内(1), (4)についてはコピー不可。
5. 提出期日 平成9年4月10日(木)必着
6. 採用予定日 平成10年4月1日
7. 書類送付先 〒370 高崎市上並榎町1300
高崎経済大学地域政策学部
人事委員会宛
TEL 0273-43-5417