

安全・安心な社会を実現するための 工学系の各種技術に関する研究

防災安全研究チーム（課題番号：117006）

研究期間：平成 23 年 7 月 22 日～平成 26 年 3 月 31 日

研究代表者：渡辺 浩 研究員：堺 純一、重松幹二、遠藤正浩、西嶋喜代人

1. まえがき

2011 年 3 月に発生した東日本大震災は、近代災害史を見ても特筆すべき規模であり、およそ 2 万人の人命が失われたと言う意味でも社会への衝撃は大きかった。このことは、自然災害に対する安全性のみならず、工学系全般においても「安全」の意味を見直すきっかけとなった。

工学系は、土木や建築、化学、機械、電気等の専門分野に特化しつつも、人々の安全安心で快適な暮らしに寄与するという点で共通の目的を持っている。しかしながら、各分野の研究が高度化する現状においては、分野横断的な研究は進みにくいのが現状である。

以上の背景から本研究プロジェクトでは、工学部の 5 学科において防災と安全を研究する 5 教員が集い、自由な発想のもとに各自の研究領域の境界を越えて議論と研究を行うことを目的に取り組みを進めた。以下にその成果の概要を示す。

2. 研究の成果

2.1 大学キャンパスの災害時支援拠点化に関する検討

近年の災害現場では、共助以上公助未満の存在としての災害ボランティアがクローズアップされてきているが、万一の際にそのパワーを活かすには受援側にもそれなりの準備が必要である。ここでは、東日本大震災における宮城県石巻市の取り組みを検証することで、今後の大規模災害に備えるためのひとつの考え方について検討した。

東日本大震災により、石巻市は中心市街地の全域が壊

滅的打撃を受け、都市機能は完全なマヒ状態に陥った。そのような中で石巻では他に類を見ない取り組みが行われた。津波が達しなかった石巻専修大学のキャンパスが被災 4 日後という早期の段階から支援拠点として活用され始めたのである。建物の一部は 1 日に最大で 2000 名が活動する災害ボランティアセンターになった。グラウンドはボランティアたちの宿泊地として活用され、動員数の向上に大きな役割を果たした。さらには図-2.1.1 のように避難所、病院、学校、自衛隊の駐留所、行政機関、物資倉庫等にも施設が提供された。

ただしこれは単なる偶然ではなく、石巻市と石巻市社会福祉協議会および石巻専修大学の三者が温めてきた構想が活かされたものであった。石巻市社会福祉協議会がかねてより中心市街地の津波被災を見越して第二の拠点を持つことの必要性を認識しており、石巻市役所や石巻専修大学との協議が重ねられていた。結果として石巻は、最大の被災地と呼ばれながら一方で最も初期の復旧支援が最も進んでいるとも言われた。ボランティア動員数も 2011 年度末までの 1 年あまりでのべ 27 万人と他を圧倒する数に達したが、それに石巻専修大学キャンパスが果たした役割は大きかった。

このような災害時の際の支援拠点、例えば社会福祉協議会事務所や市役所は多くの場合都心部にあるが、そこは有事の際に交通支障で機能が麻痺する可能性が高く十分な広さもない。このため大規模災害時における第二の拠点を想定しておくことには大きな意味がある。そして、この第二拠点には石巻専修大学の例のように大学の郊外型キャンパスは有力な候補となる。

表-2.2.1 試験体一覧

試験体名	内蔵鉄骨 寸法	コンクリート強度 csb (N/mm ²)	補強方法	補強材の板厚 (mm)	軸力比 n
C11-n3	CH-190 × 100 × 4.5 × 4.5	69.3	無	—	0.3
C11-n5		69.4	無	—	0.5
B11-n3		69.9	バンドプレート	4.5	0.3
B11-n5		67.6	バンドプレート	4.5	0.5
T11-n5		70.0	薄鋼板による全面補強	2.3	0.5

*内蔵鉄骨は、鉄骨比 10.7%、フランジ幅厚比 11.1 である。

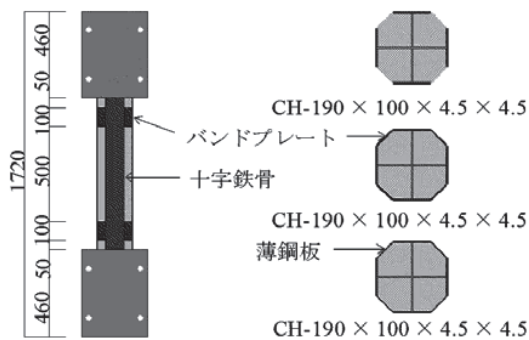


図-2.2.1 SC柱試験体

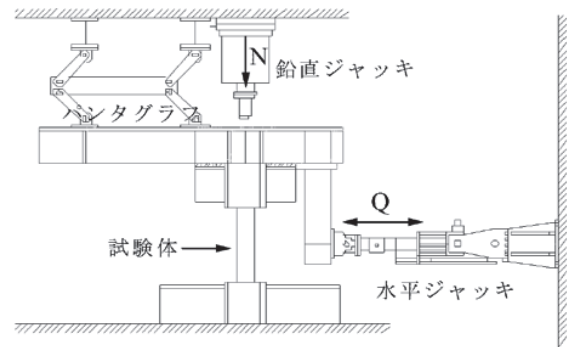


図-2.2.2 加力装置

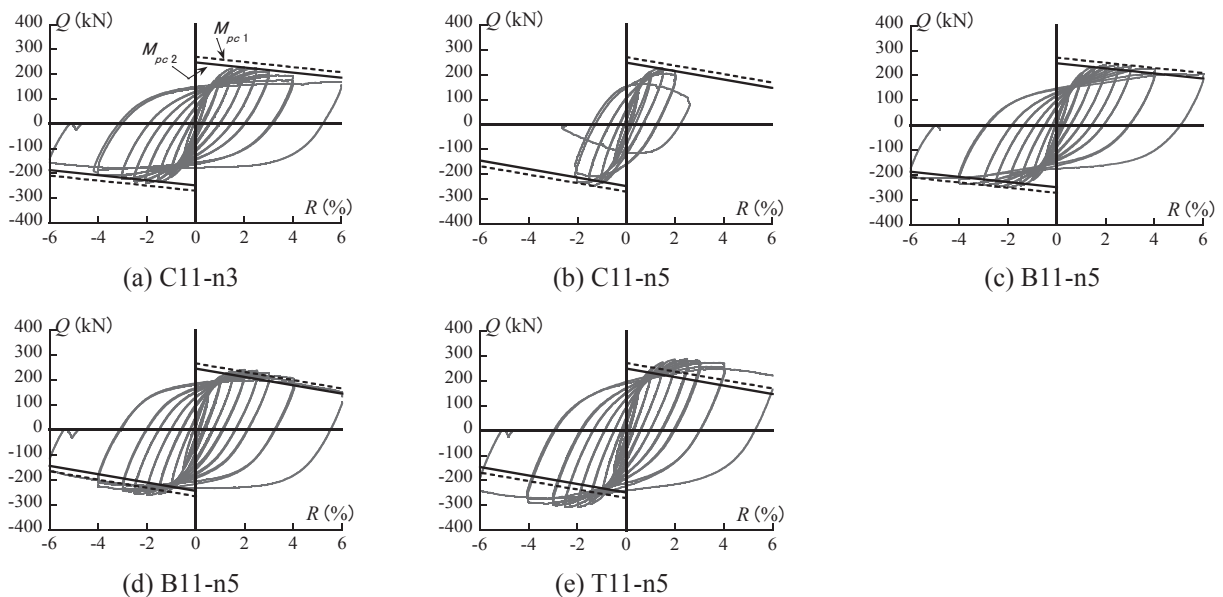


図-2.2.3 水平力-部材角関係

で 500kN の水平力荷重装置で正負交番繰返し水平力を荷重した。

2.2.3 実験結果

図-2.2.3 に水平力 Q - 部材角 R 関係を示す。図-2.2.3 中の点線は、鋼材の降伏点及びコンクリートの圧縮強度を用いて計算した一般化累加強度 (図-2.2.3 中 M_{pc1} と表記) を柱頭、柱脚部でそれぞれ発揮する

として式 (1) で求めた塑性崩壊機構直線である。同図中の一点斜線は SRC 規準によるコンクリートの低減係数 c_{ru} を用いて計算した一般化累加強度 (図-2.2.3 中 M_{pc2} と表記) で求めたものである。図-2.2.3 より、補強有りの試験体 B11-n3、B11-n5、T11-n5 は、 M_{pc1} を発揮しており、補強無しの試験体 C11-n3、C11-n5 は、 M_{pc2} を発揮したが、 M_{pc1} には達していない。

実験結果より、軸力比が0.3程度の軸力であれば、バンドプレートの補強をするまでもなく、本構造は優れた耐震性能を保持している。一方、超高層建物の最下層の柱材に対応するような軸力比が0.5程度の高軸力となると、バンドプレート等による補強をすることで、優れた耐震性能を保持させることができることがわかった。

2.2.4 まとめ

本研究で行った八角形断面の鋼コンクリート柱材は、省力化・省人化を目指したものであるが、高軸力下においても優れた耐震性能を保持させることが可能で、SRC構造の耐震性能と同等以上の構造性能を保持できる構造材である。このことから、巨大地震を想定した地域での防災拠点を設置する上でも、この構造を用いるメリットは十分にあると考えられる。

2.3 木質ペレット燃料から発生する崩壊ダストの粉じん爆発危険性

石油資源の枯渇に伴い、バイオマス为原料とした様々な再生可能エネルギーの開発が行われている。この中で木質ペレットは、製材屑などを原料として直径6～12mm、長さ10～30mm程度に押し固めた固形燃料である。製造コストが安く、保管や燃焼機器も簡便なため、災害緊急時にも利用しやすい燃料である。しかし、成形時に接着剤などは使用していないため、輸送時や保管中に一部が崩壊してダストが発生することがある。このダストは可燃性の微粉で粉じん爆発の危険性があるため、本研究はその特性について検討した。

試料は欧州材为原料とする市販のホワイトペレットを使用した。木質ペレット品質規格（日本木質ペレット協会、2011）に準じ、回転式の耐久性試験器によってペレットからダストを強制的に発生させ、ダスト発生率（wt%）を測定した。ただし、規格では50rpmで10分間と規定されているが、30分および60分間の長時間試験も行った。得られたダストはさらに細かいサイズに分級し、その乾燥試料に対してJIS Z8818に従い吹上式粉じ

ん爆発試験装置で爆発下限濃度を求め、危険性を評価した。

耐久性試験によって発生したダスト量を図-2.3.1に示す。ペレット規格ではダスト発生率は10分間で2.5%以下とされており、使用したペレットはこの規格を十分に満たしていた。しかし、試験時間を長くすると崩壊が続き、60分間では規定の倍程度のダストが発生した。

この発生ダストの粒径分布を調べた結果を図-2.3.2の棒グラフに示す。粉じん爆発を引き起こしやすい177 μm 以下のダストの合計は10分間の試験時間でも約0.5%発生しており、60分間では約2%に達した。図-2.3.2の折れ線グラフは各粒径における爆発下限濃度を示しているが、75～177 μm 程度のダストは50～65 g/m^3 であり、着火源があれば粉じん爆発を引き起こす危険性があることがわかった。なお、177 μm を超えるダストでは粉じん爆発が起きなかったが、75 μm 以下のダストは試料不足で測定できなかっただけであり危険性は高いと予想される。

以上より、木質ペレットの崩壊によって生じるダストの粉じん爆発の危険性は比較的高いことがわかった。なお、粉じん爆発を起こす177 μm 以下のダストは合計で1～2%発生することから、1kgのペレットから生じるダストが20Lの空間に舞い上がると爆発下限濃度である約50 g/m^3 に達する。このような状況は容易に考えられるため、製造時や保管中、あるいは燃焼利用の際には、その危険性に十分配慮しておかなければならない。特に緊急時には正規のペレットストープが稼動しない可能性があるが、火災の中にペレット燃料を一時に大量に投入するような燃焼法は禁物であるといえる。

2.4 免震構造用鉛ダンパーの疲労強度信頼性の評価

鉛ダンパーは各種大型建物に適用される免震構造のひとつである。鉛は降伏応力が低く延性に富むので、地震による振動エネルギーを鉛自身の塑性変形によって消費することにより建物へのダメージを小さくする。しかし、

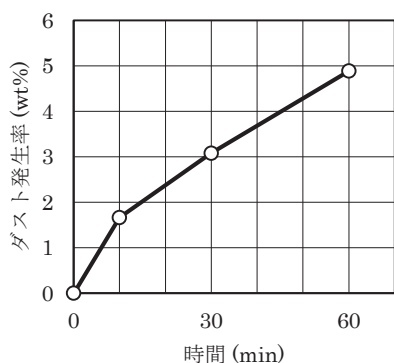


図-2.3.1 木質ペレットの耐久性試験における発生ダスト量

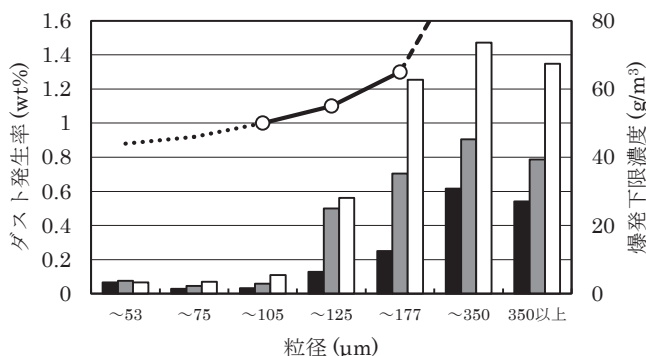


図-2.3.2 各粒径のダスト発生率と爆発下限濃度
■ 10min, ■ 30min, □ 60 min; -○- 爆発下限濃度

近年、大きな地震を経験していない鉛ダンパーの表面に疲労き裂の発生が確認されている。その原因は、建物周囲の風や交通などによる頻繁な微振動による高サイクル疲労と考えられている。鉛は他の金属に比べて強度が極端に低い材料なので、構造用の強度材料として使用することがないため、鉛の高サイクル疲労特性に関する実験データは極めて少なく不明な点が多い。

一方、この鉛ダンパーの表面にグリースを塗布することによってき裂の発生を抑制できることが明らかになっている。これまでその原因としては、き裂の発生に対する環境遮蔽効果が考えられてきたが、グリースが疲労き裂の進展挙動に及ぼす影響について検討した研究は見当たらない。そこで本研究では、鉛の高サイクル疲労域における疲労特性を調べるために、回転曲げ疲労試験を行った。さらに、試験片表面にグリースを塗布し、グリースが純鉛材の疲労寿命や疲労き裂の挙動に及ぼす影響について検討を行った。

供試材は鉛ダンパーに用いられる純鉛である。使用した試験機は小野式回転曲げ疲労試験機（島津社製、容量：100Nm）である。試験片の最小直径を28mmと大きくすることにより小さな曲げ応力の領域でも疲労試験が行えるように工夫した。鉛は柔らかく傷つきやすいため、面圧が試験片のつかみ部に一様に作用するように治具の設計を行った。試験部は酒石酸ジアンモニウムとアルミナの混合液を用いて研磨仕上げを行った。試験は大気中で行い、試験片の温度は $21\pm 2^{\circ}\text{C}$ に保った。繰返し速度は5～25Hzとした。本研究では疲労限度を繰返し数 3.0×10^7 回までに破断しない最高の応力と定義した。また、グリースを試験部に塗布した試験片についても同じ試験条件で疲労試験を行った。使用したグリースはリチウム複合石鹸グリースである。

図-2.4.1にS-N曲線を示す。グリースを塗布した試験片の疲労寿命は塗布していない試験片より5～10倍程度増加しており、グリース塗布の効果は大きい。曲げ

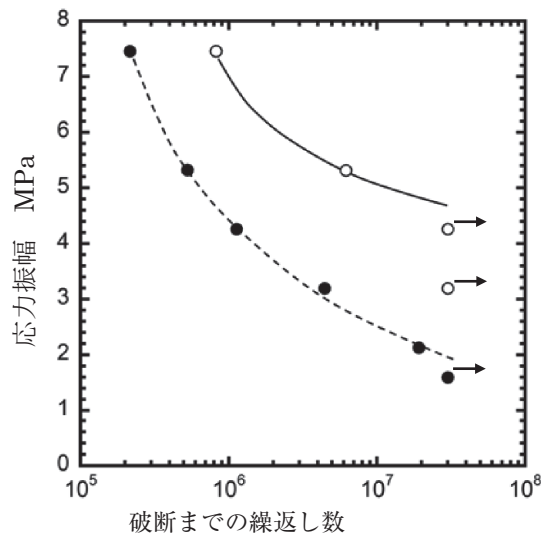


図-2.4.1 S-N 曲線

(矢印がついたプロットは 3.0×10^7 回までに破断しなかったことを示す)

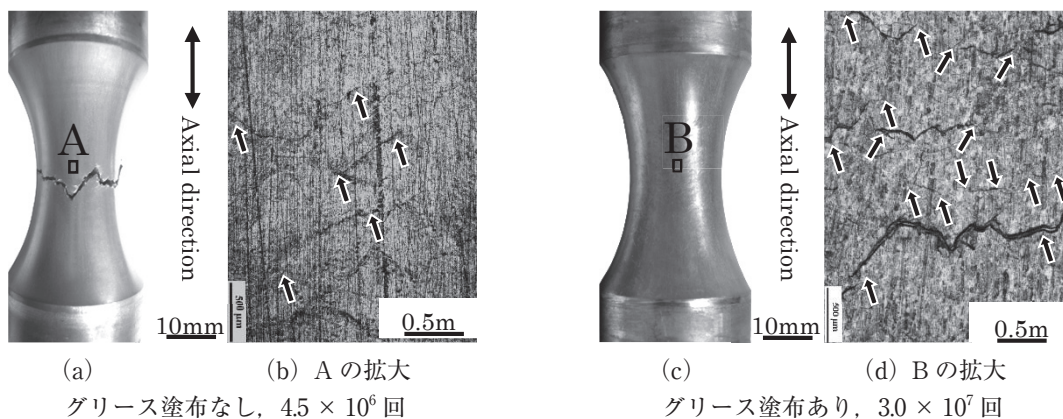


図-2.4.2 疲労試験後に試験片表面で観察されたき裂

応力が小さくなるにつれて、グリース塗布の効果がより顕著に現れる傾向がある。また、疲労限度もグリース塗布によって2倍以上向上した。

試験応力振幅が3.2MPaの場合の実験結果に注目し、試験後の試験片の表面観察によってグリース塗布の効果について調べた。この応力では、グリースを塗布していない試験片が 4.5×10^6 回で破断したのに対して、グリースを塗布した試験片は 3.0×10^7 回においても破断しなかった。図-2.4.2に疲労試験後の試験片を示す。グリースを塗布していない試験片(図-2.4.2(a))には目視で確認できるほど大きなき裂があったが、グリースを塗布した試験片(図-2.4.2(c))には図-2.4.2(a)のように大きなき裂は生じていなかった。図-2.4.2(a)、(c)の試験片のAとBを拡大した写真が図-2.4.2(b)、(d)である。矢印はき裂を示す。Aの拡大部に生じたき裂の数は少なく、試験片の破断は主き裂が成長して起こったと言える。一方、Bの拡大部には非常に多くのき裂が発生しており、長さは1mmのオーダーである。この試験片については 2.0×10^7 回でも表面状態を観察したが、この時のき裂の密集度は図-2.4.2(d)と同程度であった。すなわち、これらの微細き裂は少なくとも 2.0×10^7 回以降は進展をほとんどせず、停止していたと考えられる。

グリースはまずは環境遮蔽としてはたらく、従来から言われているようにき裂の発生を遅らせる効果があると考えられる。しかし、この効果に加えて、グリースには図-2.4.2(d)のように多くのき裂が発生しても試験片を破断させないほどの大きなき裂進展阻止能力があることは注目に値する。本研究では、き裂内へのグリースの侵入による粘性流体誘起き裂閉口がグリース塗布による顕著な疲労強度向上の主原因と考えている。予備実験によって、この材料はわずかな平均応力の作用で著しい繰返しラチェット変形を起こすことがわかっている。図-2.4.2のB部のき裂が無荷重状態で開口しているのはグリースがき裂内に侵入したことを示す証拠と言える。一般の鋼や合金では粘性流体誘起き裂閉口の効果は小さいと言われている。しかし、鉛はヤング率や降伏応力が極めて小さい(1/100のオーダー)ので、相対的にこの影響が大きく現われたものと思われる。

今後、環境遮蔽効果とき裂の発生の関係については、き裂の進展と分けて調べなおす必要がある。また、き裂閉口現象については、き裂の進展挙動を連続的に観察してグリースの役割を見える形で明らかにする必要がある。そして、鉛ダンパーの免震構造としての信頼性を向上させるためには、最適なグリースの材質とその使用条件について明らかにすることが重要と考えられる。

2.5 電気停電を引き起こす送電線近傍の山林火災の一考察

2.5.1 まえがき

超高圧送電線は大容量で信頼性の高い電力輸送を担っている。電気に依存した現在社会では、その電力の供給停止は社会活動の停止を意味し、甚大な影響を与える。

超高圧送電線の安定な電力輸送を阻害する主な要因は、雷撃による雷サージ高電圧による関連機器の電気的絶縁破壊である。この電気絶縁破壊を起こした電力機器は電気絶縁性能を回復させる処置を講ずるか、また同等の機能をもつ新しい電力機器との交換が必要である。どちらの対応も極めて長い停電時間を要し、社会的影響が極めて大きい。従って、今日の送電関連設備では、このような電気絶縁破壊事故を回避し、安定に電力を供給するより信頼性の高い電力システムの構築と開発が進められている。

本研究では、山岳地帯に施設される超高圧送電線の電気的絶縁破壊をもたらす新たな要因を考察する。特に、地球温暖化に伴い世界的に局在した乾燥地帯では、山林火災が頻発している。この森林地帯を通過する超高圧送電線は火災で電気絶縁破壊が起り、電力供給に支障を生じたとの報告もある。送電線直下での山林火災を除いて、多くの場合は送電線の近く発生した火災で、架空送電線の近傍の電気絶縁ガスである空気の炭酸ガス(CO₂)濃度の上昇が起こる。この炭酸ガスの濃度の上昇と電気絶縁耐力との関係はこれまでほとんど究明されていない。

2.5.2 研究概要と主な結果

送電線を含む受変電設備の外部電気絶縁耐力は空気の状態決定される。特に、電力設備の設置された標高(気圧と温度を考慮した相対空気密度)とその場所での湿度(絶対湿度補正)が設置する電力機器の電気絶縁設計では考慮される。一方、電気絶縁耐力に与える山林火災の影響は、火災の周辺での空気の温度上昇が相対空気密度の変化としてのみ考慮されている。

しかし、山林火災による大気中のガス成分、特に炭酸ガス(CO₂)の濃度上昇が電気絶縁耐力の異常低下を与えることを、当研究室で見出した。そこで、空気中の炭酸ガス濃度の上昇が直流と交流の送電設備での電気絶縁性能をどのように低下させるか、その原因を探るために放電発光過程と放電プラズマの気体温度の計測から検討した。

図-2.5.1は、大気圧の合成空気/CO₂混合ガスでの6.25cmのギャップの長さの棒対平板電極に関する直流と交流の印加電圧によるコロナ放電開始電圧と火花破壊電圧の計測結果である。この図から、CO₂の混合率が2.0%程度まで僅かに増加するに伴って火花破壊電圧が20~30%と大幅に低下することが分かる。一方、CO₂の混合率を0から100%へ変化しても、コロナ放電開始

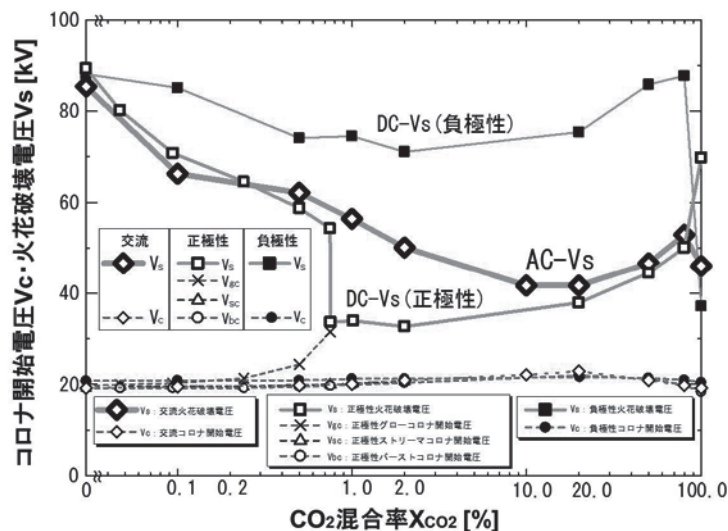


図-2.5.1 正極性・負極性直流電圧と交流電圧の合成空気/CO₂混合ガスの火花破壊特性 (XCO₂=0 ~ 100%)

		Synthetic air	Synthetic air + CO ₂ (2%)	Synthetic air + CO ₂ (5%)
500 pulse/sec.	Needle electrode ↑			
	Plane electrode ↓			

図-2.5.2 ストリーマコロナ放電の発光形態に与えるCO₂ガス混合の効果

電圧はほんの僅かな変化であった。

そこで、合成空気への僅かなCO₂ガスの混合が大幅な火花破壊電圧の低下をもたらす原因を探るために、次の実験を実施した。

- (1) 大気圧の合成空気/CO₂混合ガス中の荷電粒子の挙動をレーザ誘導電離法で調べた。電子の電離係数とドリフト速度、そして正イオンと負イオンのドリフト速度の計測から、CO₂ガスがこれらの荷電粒子の輸送係数に与える効果は少ないが、換算電界E/Pの高い領域では高エネルギー電子でCO₂分子の解離付着効果が大きくなることを明らかにした。
- (2) 大気圧の合成空気/CO₂混合ガスのインパルス放電で、そのストリーマコロナ放電の発光形態と気体加熱に与えるCO₂ガス混合の効果を調べた。合成空気へのCO₂ガスの混合率を増加すると、図-2.5.2に示すようにストリーマコロナの分岐数と分枝数が著しく減少し、そのストリーマチャンネルの気体温度が上昇することを分光診断から確認した。

これらの結果より、不平等電界ギャップを構成する超高压の架空送電線の電気絶縁耐力は、山林火災等によるCO₂混合率の増加で著しく低下することが想定される。その主な理由は、CO₂ガスの混合がストリーマコロナ放電の発生を促進し、そのストリーマチャンネルの気体加熱の強化がストリーマの進展と火花破壊誘発を促すこと

による。

2.5.3 まとめ

これまで、超高压送電線の電気絶縁設計と森林火災との関連はほとんど考慮されていなかった。約5年間に亘る当研究室での実験とモデル計算から、森林火災等による空気中のCO₂ガス濃度の上昇が電気絶縁破壊の要因となり得ることを明らかにした。

今後、CO₂ガス濃度を制御した気中高電圧ホールで、実スケールの長ギャップ(2メートル級)のインパルス電圧を用いた火花破壊実験を試みる。

3. まとめ

本報告では、推奨研究プロジェクト「防災安全」において共同研究を行った5名の研究成果をとりまとめた。ここでは、より優れた耐震性能を発揮できる部材の開発や免震構造用部材の信頼性向上のような防災技術の高度化により直接安全に関わるもの、木質ペレットを利用するプラントの危険性の検討や山林火災による超高压送電線の支障のような新たな環境問題と安全に関わるもの、そして防災と安全な社会を実現するための考え方に関わるものと多岐に渡る研究成果が示されている。

共同研究者らは、このプロジェクトによりそれぞれの防災と安全に関わるテーマを持ち寄り、貴重な情報交換

を行うことができた。これらの成果を活かしながら、次に続く重点研究テーマの創造と真の安全社会の確立において世界をリードできるような日本発の新しい産業の創出に繋げていきたいと考えている。

【研究成果の発表】

「2.1 大学キャンパスの災害時支援拠点化に関する検討」について

- 1) 渡辺 浩：東日本大震災における石巻社協の取り組みとその教訓, 第68土木学会年次学術講演会, IV-094, 2013.
- 2) 渡辺 浩：東日本大震災に学ぶ福岡の地域防災力向上のための知恵, 福岡大学地域共生研究, Vol.1, pp.45-50, 2012.
- 3) 渡辺 浩：東日本大震災における災害ボランティアの活動状況とそれを活かすための方策, 日本災害復興学会 2011東京大会講演論文集, pp.6-7, 2011.

「2.2 省力化と高耐震性を目指した鋼とコンクリートによる新しい合成柱材の開発」について

- 4) 倉富 洋, 堺 純一, 田中 照久：十字鉄骨とコンクリートで構成された合成柱材の弾塑性変形性状に関する実験的研究, 構造工学論文集, Vol.60B, pp.65-71, 2014.
- 5) 倉富 洋, 堺 純一, 田中 照久, 河本 裕行：多数回繰返し水平力を受ける鋼・コンクリート合成柱材の安定限界軸力の実験的研究, 日本建築学会構造系論文集, Vol.78, No.686, pp.875-884, 2013.
- 6) 倉富 洋, 堺 純一, 田中 照久, 河本 裕行：薄肉鋼管で横補強した鋼・コンクリート合成柱材の復元力特性-骨格曲線の定式化-, 日本建築学会構造系論文集, Vol.77, No.673, pp.491-498, 2012.

「2.4 免震構造用鉛ダンパーの疲労強度信頼性の評価」について

- 7) Syuichiro Maruta, Hyojin Kim, Keiko Morita and Masahiro Endo：HCF Characteristics of Pure Lead with Grease-coating, Abstracts of IUMRS-ICA2014 (International Union of Materials Research Societies-The 15th IUMRS International Conference in Asia), C5-208-004, 2014.
- 8) 丸田 修一郎, 金 孝鎮, 森田 慶子, 遠藤 正浩：鉛ダンパー用純鉛の高サイクル疲労特性に及ぼすグリース塗布の効果, 日本材料学会第63期学術講演会講演論文集, pp.265-266, 2014.
- 9) S. Maruta, M. Takayama, K. Morita, A. Yasunaga, K. Yanase and M. Endo：A study on high cycle fatigue behavior in lead, Proc. 9th International Conference on Fracture & Strength of Solids (FEOFS 2013), 2013.

「2.5 電気停電を引き起こす送電線近傍の山林火災の一考察」について

- 10) T. Matsumoto, R. Sasamoto, D. Shimizu, Y. Izawa and K. Nishijima：Measurement of Gas Temperature Distribution in Positive DC Glow Corona using Spectral Image Processing in Atmospheric Air, Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 54, No. 1, 2015.(in press)
- 11) T. Matsumoto, K. Kijima, Y. Izawa and K. Nishijima：Formation of Non-branched Positive Streamer with High-Frequency Impulse Voltage in Atmospheric Air, IEEE Transactions on Plasma Science, Volume: PP, Issue: 99, Page(s): 1, 2014.
- 12) 松本宇生, 貴島幸司, 霜重利春, 稲田陽一, 生澤泰二, 西嶋喜代人：Experimental investigation and numerical analysis of surface charge decay on acrylic and glass epoxy multilayer materials in air, 電気学会論文誌B, Vol.134, No.3, pp.203-209, 2014.

【謝辞】

本研究は、福岡大学研究推進部の研究経費によるものである。(課題番号：117006)