

論文 パルス放電法による廃コンクリートの細骨材への再生に関する基礎実験

前田 誠司^{*1}・重石 光弘^{*2}・大津 政康^{*3}・浪平 隆男^{*4}

要旨：廃コンクリート塊の処理において微粉末が二次廃棄物として発生し、その処理に相当のコストがかかるなどの今後解決すべき問題点がある。そこで本研究ではコンクリートの再生処理に高電圧パルスパワーを利用した制御破壊技術によって再生粗骨材として分離回収された後の残渣を回収して、再生細骨材及び微粉末に分別し、その残渣が再生細骨材としての品質を確保できる可能性について検討を行った。その結果、微粉末発生量は加熱すりもみ法による骨材再生技術と比較して少なく、またパルス印加回数 25 回回収細骨材は「再生骨材Ⅰを用いたコンクリート」に規定される細骨材の絶乾密度を有することがわかった。

キーワード：パルスパワー、リサイクル、再生細骨材、微粉末

1. はじめに

増大する廃コンクリート塊排出量への対処および天然骨材の枯渇懸念への対策として、コンクリート塊のコンクリート用骨材への活用を推進する必要がある。既往のコンクリート再生処理技術では、回収しようとする骨材自体が破壊されたり、あるいは骨材表面にモルタルやセメントペーストが付着した状態となったりする。そのため骨材の品質が低下し、構造用コンクリートへの再利用が困難となっている。高品質な再生骨材を得るためには、解体コンクリートの処理時に原骨材自体に新たな損傷を生じさせず、骨材表面に付着したモルタル分を完全に除去することが求められる。一方、既往の再生骨材回収技術では磨砕によりコンクリート塊から骨材を回収するため、大量の微粒分が発生することが懸念される。その他にも、コンクリート塊の再処理時に大型施設が必要であると同時に多大なエネルギーを要するため相当のコストがかかるという問題をはらんでいる。しかも地球温暖化対策の推進の必要性から廃コンクリートの処理の各過程(運搬、処理)において、CO₂の発生をより低く抑える手法の開発が必要となる。

水中パルス放電方式を用いた骨材回収技術は従来のような大型プラントを必要としないため、処理施設の現場内敷設が可能となり、コンクリート塊から再生骨材までの現場内材料循環が可能となると考えられる。現場内処理が可能となることにより、廃コンクリートの収集・運搬、再生処理された骨材の搬入などにかかる費用が削減でき、各物質の運搬時に発生するCO₂の削減も同時に期待できる。更に熱源を必要としないので、処理コストの低減も可能と予想される。

これまでの研究により、水中パルス放電を用いた骨材回収技術により高品質なパルスパワー再生粗骨材を回収できることがわかっている¹⁾²⁾。しかし、再生粗骨材として回収されなかったものは残渣となる。そこで本研究は、制御破壊技術である水中パルス放電方式を用いてコンクリートの再生処理を行い、粗骨材を回収する際に発生する 5mm 以下の残渣を回収し、高品質な再生細骨材として利用できないか検討を行っている。また破砕時に発生する微粒分の発生を抑えることも同時に目的としている。

2. パルスパワーによる再生細骨材の製造

2.1 再生骨材

コンクリート用再生骨材の指標としては、2005 年 3 月に JIS A 5021「コンクリート用再生骨材H³⁾」が規定されている。この規格は、構造物の解体などによって発生したコンクリート塊に対し、破砕、磨砕、分級等の高度な処理を行って製造したコンクリート用再生骨材Hについて規定したものである。さらにその他の規定として JIS A 5022「再生骨材Mを用いたコンクリート⁴⁾」や JIS A 5023「再生骨材Lを用いたコンクリート⁵⁾」が規定されている。この各 JIS 規格の附属書にはコンクリート用再生骨材Hの規格と同様にコンクリート用再生骨材M、Lの規格が規定されている。

本研究はパルスパワーの印加により分離された再生粗骨材回収後の残渣を有効活用するために、残渣が再生細骨材としての品質を確保できる可能性について検討を行った。再生細骨材の品質を評価するにあたり、表-1に示す再生骨材の規格を使用した。

*1 国立大学法人熊本大学 大学院自然科学研究科 環境共生工学専攻 (正会員)

*2 国立大学法人熊本大学 大学院自然科学研究科准教授 工博 (正会員)

*3 国立大学法人熊本大学 大学院自然科学研究科教授 工博 (正会員)

*4 国立大学法人熊本大学 大学院自然科学研究科准教授 工博

従来の再生細骨材の製造方法として、機械すりもみ法、加熱すりもみ法などがある。中でも高度処理による高品質な再生骨材の製造法として代表的な加熱すりもみ法は、コンクリート廃材を約 300℃に加熱し、セメントペースト部分を脆弱化させ、その後すりもみ処理することで、粗骨材、細骨材、微粒分として回収・再生する方法である。加熱すりもみ法により回収された再生細骨材の性質を表-2に示す⁶⁾。

この加熱すりもみ法により回収された再生細骨材の品質は表-1に示す各骨材品質規格と比較した場合、絶対乾密度、吸水率ともに再生骨材Hの規格を満たしていることがわかる。図-1は、加熱すりもみ法により回収および発生する各骨材及び微粉末量である⁷⁾。本研究ではパルスパワーによって再生処理を行う際に発生する残渣から再生細骨材を分離回収した後の微粒分量についてもこれと比較検討することとした。

2.2 パルスパワーによるコンクリートの破砕

コンクリートの破砕に使用したパルスパワー発生装置はマルクスバンク方式パルスパワー発生装置と呼ばれるものである(図-2)。これはコンデンサ 10 基を並列接続の状態で充電した後、放電ギャップを通じて直列接続として放電させる装置である。水中でコンクリート供試体に電気的衝撃を印加し破壊することで再生骨材を回収するものである⁸⁾。この原理を利用してコンクリート塊から再生細骨材を回収する仕組みについて概説する。水中に置かれた 5mm角開口のステンレス製半球状メッシュコンクリート供試体を設置し、ポリエチレン被膜された直径 5mmの銅線を高電圧電極とし、その下端と破砕前のコンクリート供試体を接触させて電極を固定した(図-3)。5mm角開口のステンレス製メッシュを使用する理由として、骨材直径 5mm以上のものと以下のものを分離回収するためである。

そして、パルスパワー再生粗骨材が回収された後の残渣より、ふるいの呼び寸法 10mm を完全に通過し、ふるいの呼び寸法 0.15mm に留まるものをパルスパワー再生細骨材、ふるいの呼び寸法 0.15mm を通過するものを微粒分とした。

本研究においては電気容量 0.8μF のコンデンサ 10 基にそれぞれ 40kV、合計 400kV 充電した後、コンクリート供試体にパルス放電を印加した。以後この一連の充電、放電の流れでパルス放電がコンクリートへ印加されることをパルスパワー印加とし、その回数をパルスパワー印加回数と呼ぶことにする。尚、その時のパルス放電一回あたりのエネルギーは 6.4kJ となり、100 回印加時の電気料金は 0.026 円となる。

2.3 パルスパワー再生細骨材の分離回収

本研究においてパルスパワー再生骨材を回収するた

表-1 再生細骨材品質規格³⁾⁴⁾⁵⁾

	再生骨材 H	再生骨材 M	再生骨材 L
吸水率(%)	3.5 以下	7.0 以下	13 以下
絶対乾密度(g/cm ³)	2.5 以上	2.3 以上	—
微粒分量(%)	7.0 以下	7.0 以下	10 以下

表-2 加熱すりもみ法による再生細骨材の品質⁶⁾

	再生細骨材
絶対乾密度(g/cm ³)	2.54
吸水率(%)	1.94

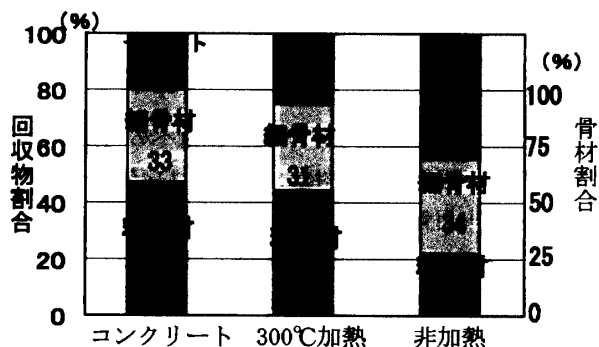


図-1 コンクリート及び回収物中の骨材割合⁷⁾

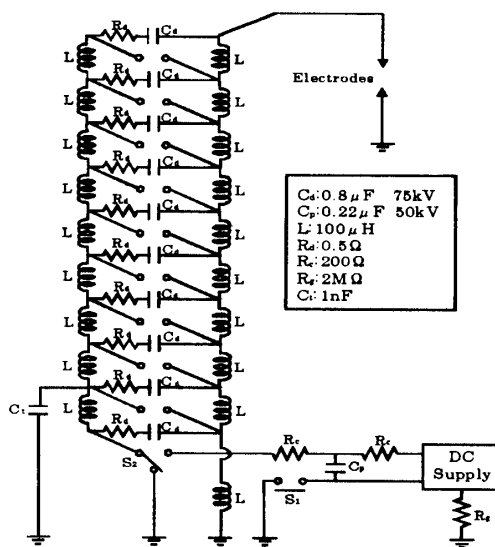


図-2 パルスパワー発生装置回路図

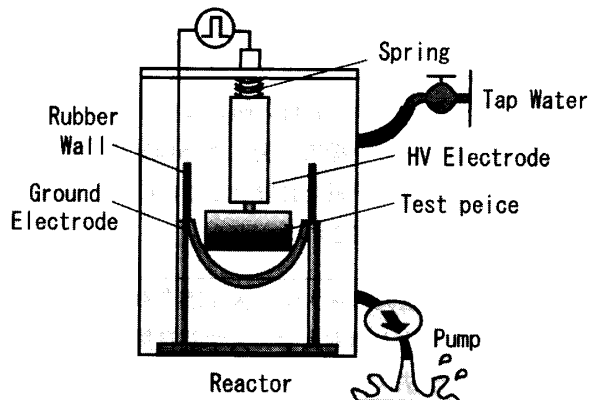


図-3 骨材回収の仕組み

めに供されたコンクリート供試体は、大正7(1918)年に竣工した鉄筋コンクリートアーチ道路橋のアーチ部材の一片である(図-4)。これを断面厚さ方向において上縁側から孔削して採取したコンクリートコアをコンクリートカッターにて切断し、両断面をコンクリート用研磨機にて整え、各コンクリートコアから1本ずつコンクリートコア供試体($\phi 10\text{cm} \times 20\text{cm}$)とした。

3 パルスパワー再生細骨材の品質試験

3.1 発生微粉末量

本研究では、パルス放電によりコンクリート塊の再生処理を行い回収された再生骨材の事をパルスパワー再生骨材と定義し、印加25回時回収パルスパワー再生細骨材をRS25、印加50回時回収パルスパワー再生細骨材をRS50と呼ぶ。

コンクリート供試体からパルスパワー再生骨材を回収時に発生する微粒分量は表-3のようになった。RS25、RS50を比較した場合、RS50は微粒分量の増加が確認できた。微粒分量が印加回数の増加とともに増加した原因は、印加時の衝撃により、骨材付着モルタル及び残渣内のモルタルが粉碎され増加したと考えられる。しかし、表-3に示した加熱すりもみ法における微粒分量の発生量⁷⁾がコンクリート塊の総重量に対し25%であったのに比べ、高電圧パルス放電による再生骨材回収技術の微粒分発生量は3分の1となっている。

3.2 ふるい分け試験

再生骨材の粒度分布を判定する試験としてふるい分け試験を行った。RS25およびRS50のふるい分け試験結果を図-5、図-6及び表-4に示す。

試験結果より、RS25およびRS50の粒度分布が標準粒度分布より外れていた。つまり本実験において、RS25とRS50は構造用コンクリートへの使用の際に、粒度調整をすることがあったことがわかった。RS25とRS50の粒度分布を比較すると、どちらの曲線も似た形状をしているが、RS50の粒度曲線は上にシフトしており、細粒化していることがわかる。また表-4の数値データを比較してみても、各ふるいに留まる量が減少しており、粗粒率が減少していることからわかる。RS25には、ふるいの呼び寸法5mmに留まるものがあるが、RS50には無い。にもかかわらずRS50の粒度分布において、各ふるいの呼び寸法に留まる量が同じように減少しているのは、印加の衝撃によりモルタル分が破碎され、微粒分となったためと予想される。これは、先ほどの印加回数の増加により微粒分量が増加した結果と符合する。

RS25およびRS50が標準粒度分布より外れた原因として、高電圧パルス放電によるコンクリート破碎時に、0.15mm以上5mm以下の粒の破碎モルタル片が残渣に混



図-4 コンクリートアーチ道路橋アーチ部材

表-3 微粉末発生量

	RS25	RS50	加熱すりもみ法 ⁷⁾
供試体重量(kg)	60.45	60.40	—
微粒分量(kg)	0.81	4.7	—
微粒分量(%)	1.34	8.06	25

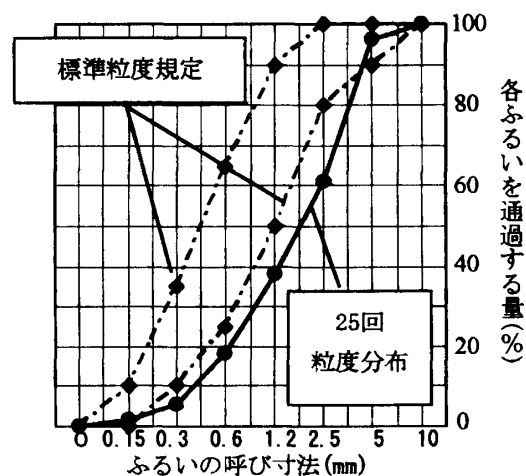


図-5 RS25 粒度分布

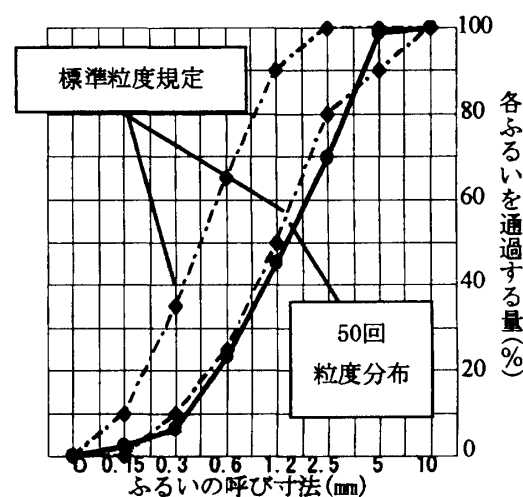


図-6 RS50 粒度分布

入し、その残渣を回収していることが主要因として考えられる。これは高電圧パルス放電による骨材回収技術が磨砕による破壊現象ではなく、パルスパワーが印加された際の衝撃及び、印加によるコンクリート内の空気膨張による骨材とモルタルの剥離現象⁹⁾¹⁰⁾によって骨材を回収しているため、微粒分が発生しにくい反面、モルタル片が多く発生するために引き起こされていると考えられる。また印加回数の増加に伴い、原粗骨材が衝撃により破砕片となり残渣として含まれていることも原因として考えられる。

そもそも、使用したコンクリートに含まれている原細骨材の粒度分布が不明なうえ、標準粒度分布より外れていた可能性もある。そこで、粒度分布が既知の細骨材を使用し、表-5 に示す配合の下、作製したコンクリート供試体よりパルスパワー再生細骨材を回収し、その粒度分布と原細骨材粒度分布の比較を行った。図-7、図-8 および表-6 にその結果を示す。

この結果より、残渣より回収したパルスパワー再生細骨材は、骨材に付着したモルタル分により、その骨材粒径を増し、結果として標準粒度規定より外れることがわかった。また再生細骨材の粗粒率が増加している点より、コンクリート塊の破砕により、モルタル片及び原粗骨材の破砕片が混入し、粗粒率が増加していることがわかる。

回収されたパルスパワー再生細骨材は、破砕モルタル片及び骨材片が混入することにより標準粒度分布より外れることがわかったが、本パルスパワーによるコンクリートの骨材回収法では、印加条件(コンデンサ容量、充電電圧)および印加回数を調整することによる制御破壊が可能であるため、細骨材と付着モルタル分の電気パルスに対する物性値(強度、空隙量)に適したパルスパワー印加条件を設定することにより、効果的に品質のよい細骨材を回収できる可能性がある。

3.3 密度・吸水率試験

再生細骨材の密度及び吸水率試験を行った。結果を表-7 に示す。

RS25 およびRS50 を用いた試験結果より、RS25 と比較してRS50 は吸水率が上昇、密度は低下していることがわかる。再生粗骨材では印加回数の増加により、骨材に付着しているモルタル分の剥離や破砕によって骨材品質が向上することがわかっている²⁾。しかし、RS50 の品質が低下している原因として、印加回数 50 回の再生細骨

表-4 再生細骨材ふるい分け試験結果

パルスパワー 印加回数	RS25		RS50	
	各ふるいに 留まる量		各ふるいに 留まる量	
ふるいの 呼び寸法	(g)	(%)	(g)	(%)
5	22	3.8	7.8	1.3
2.5	228.7	39	180.6	30.4
1.2	363.2	61.9	324.7	54.6
0.6	478.8	81.6	457.4	76.9
0.3	554.9	94.6	556.5	93.6
0.15	577.6	98.5	580.6	97.7
受け皿	586.5	100	594.5	100
粗粒率	3.79		3.55	

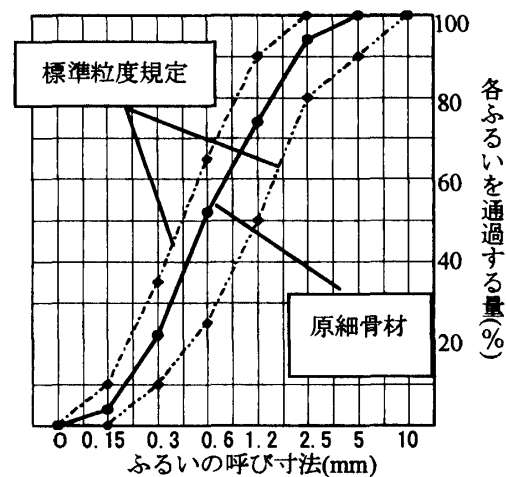


図-7 原細骨材粒度分布

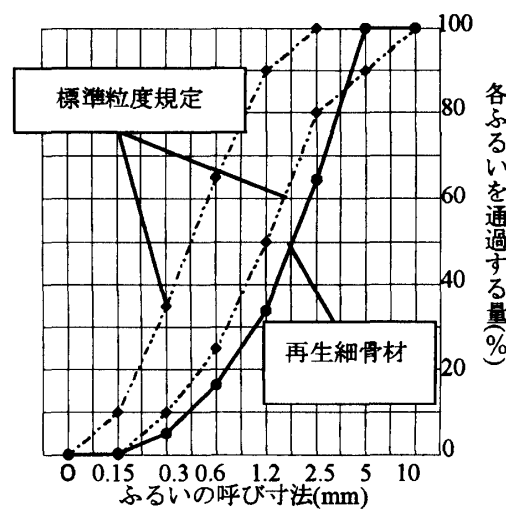


図-8 RS50 粒度分布

表-5 供試体配合表

粗骨材の 最大寸法	スランブ	空気量	W/C	s/a	単位量 (kg/m ³)				
					水	セメント	細骨材	粗骨材	AE 剤
(mm)	(cm)	(%)	(%)	(%)	W	C	S	G	(g/m ³)
20	8	6	55	44	175	318	742	1134	95

表-6 粗粒率

	粗粒率
原細骨材	2.53
RS50	4.80

材には高電圧パルス放電印加の衝撃により骨材から剥離したモルタル分が細粒化して多く混入したことにより、骨材品質が劣化しているのではないかと考えられる。さらに、印加時の衝撃により、少なからず骨材に亀裂が発生し劣化していることも考えられる。破碎モルタル片はRS25 およびRS50 両方において、目視によっても確認できた(図-9)。密度吸水率試験及びふるい分け試験の結果から、破碎の衝撃によるモルタル片が混入していることにより骨材品質が低下していることは間違いない。

今回の実験結果を各再生骨材の品質規格(表-1)と比較すると、再生骨材 H, 再生骨材 M の規定以下となった。再生骨材 L としては吸水率の項目において、RS25 が規定されているものを満たしている。

4. 結論

本研究では、コンクリート塊からの骨材の分離回収技術に高電圧パルス放電を利用した制御破壊技術を適用することによって、既存の骨材回収法で問題となる微粒分を発生させず、また再生粗骨材回収後の残渣から、本来の品質を損なわないままに細骨材を回収できる可能性について検討を行った。

0.8 μ F, 400kV の条件下において、高電圧パルス放電を用いた再生骨材回収技術は、既往の再生骨材回収法と比較し、発生微粒分量が少ないことがわかった。

今回、RS25 および RS50 の内、RS25 は、再生骨材 L の規格を満たすものが得られた。本研究が求める高品質な再生細骨材では無かった。しかし、骨材から剥離したモルタル分が混入することにより、回収された再生細骨材は標準粒度分布から外れ、密度や吸水率が変化し、骨材品質が低下していると考えられる。一方、今回の実験結果より、印加回数が増加することにより粒度分布が改善されていることがわかった。これは、印加の衝撃によりパルスパワー再生細骨材中のモルタル分が破碎されることにより、粒度分布が改善されていると考えられる。

ただし、密度吸水率の骨材品質は印加回数の増加によって改善されていない。この原因として、残渣への印加を行うと同時に、コンクリート供試体への印加も行っているため、印加によって骨材から剥離したモルタル分が残渣へと含まれる為に結果として細骨材品質が低下したと考えられる。

そこで、再生細骨材品質改善の可能性として、ある程度の量まで確保した再生細骨材のみに印加を行うことで品質を改善できる可能性があると考ええる。印加回数の増加により、高電圧パルス放電を用いた再生骨材回収法でも微粉末量が若干量増加することが確認されたが、高電圧パルス放電骨材回収法の特徴である制御破壊技術により、印加回数及び印加条件を変更することで、高品質な再生細骨材を要求される時は、回収再生細骨材に印加処理を行うことで品質を向上させ、発生微粉末量の低減が要求される場合は、印加処理の頻度を抑えることで要求を満たすことが可能となると考えられる。さらに今後の研究として、再生細骨材のみに印加処理をほどこした場合の品質変化を調べる必要がある。また、印加時の衝撃により粗骨材が損傷し、その破砕片が残渣に混入している可能性があることが今回わかった。そこで、粗骨材の破砕片が細骨材の品質に与える影響についても調べる必要がある。

表-7 密度吸水率試験結果

	吸水率 (%)	表乾密度 (g/cm ³)	絶乾密度 (g/cm ³)
RS25	11.78	2.28	2.04
RS50	13.74	2.23	1.96
再生骨材 H	3.5 以下	—	2.5 以上
再生骨材 M	7.0 以下	—	2.3 以上
再生骨材 L	13.0 以下	—	—



図-9 破碎モルタル片

質な再生細骨材を要求される時は、回収再生細骨材に印加処理を行うことで品質を向上させ、発生微粉末量の低減が要求される場合は、印加処理の頻度を抑えることで要求を満たすことが可能となると考えられる。さらに今後の研究として、再生細骨材のみに印加処理をほどこした場合の品質変化を調べる必要がある。また、印加時の衝撃により粗骨材が損傷し、その破砕片が残渣に混入している可能性があることが今回わかった。そこで、粗骨材の破砕片が細骨材の品質に与える影響についても調べる必要がある。

参考文献

- 1) 重石光弘, 浪平隆男ほか:「パルスパワーによるコンクリートからの粗骨材の分離, 回収」, コンクリート工学年次論文集, Vol.28, No.1, pp.1475-1480, 2006.7
- 2) 高木基志, 重石光弘ほか:「パルスパワーにより回収された再生粗骨材の品質について」, 土木学会西部支部研究発表会, pp.827-828, 2007.2
- 3) 日本規格協会: JIS A 5021「コンクリート用再生骨材 H」, 2005.3
- 4) 日本規格協会: JIS A 5022「再生骨材 M を用いた再生骨材コンクリート」, 2007.3

- 5) 日本規格協会：JIS A 5023「再生骨材Ⅰを用いた再生骨材コンクリート」，2006.3
- 6) 立屋敷久志：「加熱すりもみ法により回収した高品質再生骨材コンクリートの性状」，コンクリート工学年次論文集，Vol.23，No.2，pp.61-66，2001
- 7) 三菱マテリアル株式会社：「ダイヤモンド解体コンクリートから回収した高品質再生粗骨材及び細骨材」，NETIS 新技術情報提供システム，国土交通省，2004
- 8) 秋山秀典：「高電圧パルスパワー工学」，オーム社，pp.36-38，2003.12
- 9) 赤碕正則：「基礎高電圧工学」，昭晃堂，pp.87-88，1986
- 10) 大重力，原正則：「高電圧現象」，森北出版，pp.122-123，1985