

配線用遮断器のアーキ電圧上昇機構の解明および  
高性能化に関する研究

2023年 3月

渡邊 真也

配線用遮断器のアーキ電圧上昇機構の解明および  
高性能化に関する研究

渡邊 真也

理工情報生命学術院  
システム情報工学研究群  
筑波大学

2023年 3月

# 目次

<b>第1章</b>	<b>序論</b>	<b>1</b>
1.1	電力需要と給配電システムの動向	1
1.2	低圧配線用遮断器の基本構成と限流遮断	3
1.2.1	電気システムのシステム構成例	3
1.2.2	遮断器の技術変遷	6
1.2.3	直流給配電システムにおける遮断方法	8
1.2.4	低圧配線用遮断器 MCCB の基本構成	11
1.2.5	低圧配線用遮断器の限流遮断における回路パラメータ	14
1.3	低圧配線用遮断器の高性能化に向けた研究動向および課題設定	15
1.3.1	研究動向	15
1.3.2	本研究の課題設定	19
1.4	本研究の目的と構成	23
1.4.1	本研究の目的	23
1.4.2	論文構成	23
<b>第2章</b>	<b>配線用遮断器における大電流気中アークの基礎電圧特性</b>	<b>25</b>
2.1	はじめに	25
2.2	実験方法	25
2.2.1	実験系と検討パラメータの設定値	25
2.2.2	試験波形例	27
2.3	実験結果および考察	29
2.3.1	電極近傍に関するアーク電圧 $V_{elec}$ とアーク空間に関するアーク電圧 $V_{col}$ の定義	29
2.3.2	電極近傍に関するアーク電圧 $V_{elec}$ の特性評価	30
2.3.3	アーク空間に関するアーク電圧 $V_{col}$ の特性評価	33
2.3.4	各電圧特性の物理的意味についての考察	37
2.3.5	推定したアーク電圧の関係式の妥当性評価	40
2.4	アーク電圧の関係式の実器適用検討	42

2.5	まとめ	43
<b>第3章</b>	<b>大電流気中アークの消弧グリッド配置時の電圧特性</b>	<b>45</b>
3.1	はじめに	45
3.2	実験モデルおよび計算モデル	46
3.2.1	実験モデル	46
3.2.2	試験波形例	48
3.2.3	消弧グリッドが有効利用できる穴径の選定	48
3.2.4	電磁力の計算モデル	51
3.3	消弧グリッド配置時のアーク電圧特性の実験的検討	52
3.3.1	電極-消弧グリッド間のアーク電圧特性	52
3.3.2	消弧グリッド間のアーク電圧特性	57
3.3.3	消弧グリッド配置時のアーク電圧の関係式	60
3.4	消弧グリッドを有効利用するための電磁力条件およびグリッド配置方法の検討	63
3.4.1	消弧グリッドの有効利用度の定義	63
3.4.2	グリッド間隔と有効利用度の関係	63
3.4.3	アークに作用する電磁力と有効利用度の関係	67
3.4.4	消弧グリッドの有効利用するために必要な電磁力条件	69
3.5	まとめ	70
<b>第4章</b>	<b>細隙消弧空間における大電流気中アークの電界特性</b>	<b>72</b>
4.1	はじめに	72
4.2	実験方法	73
4.2.1	実験モデル	73
4.2.2	試験波形例	74
4.3	ポリマー細隙空間におけるアーク電界特性	76
4.3.1	アーク電圧とアーク長の関係	76
4.3.2	電極近傍電圧特性の評価	77
4.3.3	アーク電界特性の評価	78
4.3.4	アーク電界上昇効果についての考察	82
4.3.5	実遮断器におけるポリマー細隙空間のアーク電界特性	85

4.4	まとめ	87
<b>第5章</b>	<b>小電流気中アークにおける高効率アーク電圧上昇制御方式の構築</b>	<b>88</b>
5.1	はじめに	88
5.2	高効率アーク電圧上昇制御方式の原理および検証方法	89
5.2.1	アーク制御原理	89
5.2.2	要素試験モデル	91
5.2.3	実開閉器を用いた検証モデル	92
5.3	駆動アークおよび衝突アークのアーク電圧特性	93
5.3.1	アーク電圧のアーク長依存性	93
5.3.2	アーク電界の磁束密度依存性	94
5.3.3	アーク電界の電流依存性	95
5.4	実開閉器モデルへの高効率アーク電圧上昇制御方式の適用	98
5.4.1	磁気構造と磁束密度	98
5.4.2	実開閉器モデルにおけるアーク挙動とアーク電圧上昇効果	100
5.5	まとめ	101
<b>第6章</b>	<b>結論</b>	<b>102</b>
6.1	本論文の結論	102
6.2	今後の課題	104
	<b>謝辞</b>	<b>108</b>
	<b>参考文献</b>	<b>109</b>
	<b>論文・特許リスト</b>	<b>120</b>

# 目次

図 1.1 世界の一次エネルギー消費量の推移(文献[1]のデータベースを参考に作成)	2
図 1.2 世界のエネルギーの電化率の推移(文献[7]のデータベースを参考に作成)	2
図 1.3 発電所から需要家に至るまでの電力の送配電を示したシステム例	4
図 1.4 再生エネルギー設備を備えた需要家の単線結線図の一例	5
図 1.5 遮断器の変遷の概略	6
図 1.6 交流および直流系統における電流遮断時の電流・アーク電圧波形の違い	9
図 1.7 低圧配線用遮断器 MCCB の基本構成(文献[30]より引用)	11
図 1.8 低圧配線用遮断器 MCCB の消弧室の構成例	12
図 1.9 消弧板を配置した場合に生じる電磁力	13
図 1.10 電流遮断時における遮断器を含む等価回路	14
図 1.11 限流遮断におけるアーク電圧と電流波形例	15
図 1.12 消弧板によるアーク分割過程	16
図 1.13 電極近傍におけるアークモデル	17
図 1.14 短間隔の電極間におけるアーク電圧とアーク長の関係	19
図 1.15 永久磁石使用時のアークに作用する電磁力の向き	22
図 2.1 試験回路構成と実験装置構成	26
図 2.2 回路構成と実験装置構成	27
図 2.3 アーク電圧, 電流, 雰囲気圧力の測定波形例	28
図 2.4 アーク電圧のアーク長依存性	29
図 2.5 電極間の電位分布の概念図	30
図 2.6 $V_{elec}$ の電極面積依存性	31
図 2.7 $V_{elec}$ の雰囲気圧力依存性	32
図 2.8 $V_{elec}$ の電流依存性	32
図 2.9 $V_{col}$ のアーク長依存性	33
図 2.10 $E_{col}$ の電極面積依存性	34
図 2.11 $E_{col}$ の雰囲気圧力依存性	35
図 2.12 $E_{col}$ の電流依存性	36
図 2.13 $E_{col}$ の雰囲気圧力依存性(図 2.12 のデータから作成)	36
図 2.14 2 kA 以下の電流条件における $V_{elec}$ の電流依存性	38

図 2.15	アーク発光形態の電流・圧力依存性	39
図 2.16	アーク電圧推定値と実験値の比較	41
図 2.17	アーク電圧推定値の誤差率	41
図 2.18	実器適用検討に使用する消弧室構造とアーク発生領域の想定範囲	42
図 2.19	実際の消弧室を用いたアーク電圧実験値と推定値との比較	43
図 3.1	実験モデル	46
図 3.2	消弧グリッド	47
図 3.3	Grid A 配置時の(a)アーク観測画像と(b)アーク長の定義	49
図 3.4	アーク電圧・電流・圧力の測定波形例	50
図 3.5	消弧グリッド間電圧 $V_g$ の位置依存性	50
図 3.6	$V_g$ と Grid A に設ける穴径の関係	51
図 3.7	消弧グリッド配置時の電磁力の計算モデル	52
図 3.8	三次元電磁界解析による磁束密度分布の計算例	53
図 3.9	$V_{eg}$ のアーク長依存性	53
図 3.10	$V_{eg}^0$ のアーク長依存性	54
図 3.11	$E_{eg}$ の雰囲気圧力依存性	56
図 3.12	$E_{eg}$ の電流依存性	57
図 3.13	$V_g$ のグリッド間隔依存性	58
図 3.14	$V_g^0$ の電流・雰囲気圧力依存性	58
図 3.15	$E_g$ の雰囲気圧力依存性	59
図 3.16	$E_g$ の電流依存性	60
図 3.17	アーク電圧推定値と実験値との比較	62
図 3.18	$g_{eff}$ の経時変化	64
図 3.19	アーク電圧とグリッド間隔の関係	64
図 3.20	グリッド間隔が異なる場合の $g_{eff}$ の位置分布	65
図 3.21	$g_{eff}$ のグリッド間隔依存性	66
図 3.22	グリッド間隔が異なる場合のアーク観測画像	66
図 3.23	Grid B を 6 枚配置した場合の電極間の単位アーク長当たりの電磁力分布	67
図 3.24	$g_{eff}$ と電極-消弧グリッド間のアークに作用する電磁力の関係	68
図 3.25	各アーク分割位置の $g_{eff}$ に対する電磁力の対象計算範囲	69
図 3.26	消弧グリッドを有効利用するために必要な電極-消弧グリッド間の電磁力	70
図 3.27	消弧グリッドを有効利用するためのグリッド配置条件	71

図 4.1 試験回路構成と実験装置	73
図 4.2 電極と消弧材料の配置構成	74
図 4.3 試験波形例	75
図 4.4 様々な細隙幅条件におけるアーク電圧の電流依存性	76
図 4.5 様々な細隙幅条件における電極近傍電圧	77
図 4.6 細隙幅 5 mm の条件におけるアーク電界の電流依存性	78
図 4.7 細隙幅 5 mm の条件におけるアーク電界の雰囲気圧力依存性	79
図 4.8 様々な細隙幅条件におけるアーク電界の雰囲気圧力依存性	80
図 4.9 様々な細隙幅条件におけるアーク電界の電流依存性	81
図 4.10 電流増加に対するアーク電界の上昇率と細隙幅条件の関係	82
図 4.11 溶発性および難溶発性材料を用いる場合のアーク電界の比較	83
図 4.12 溶発性および難溶発性材料を用いる場合のアーク電界比	84
図 4.13 消弧材料を用いた細隙空間を適用した実遮断器の消弧室	85
図 4.14 実遮断器における細隙空間の効果検討用モデル	86
図 4.15 細隙空間の条件が異なる場合のアーク電界の比較	87
図 5.1 直流電力システムの例	88
図 5.2 高効率アーク電圧上昇制御方式の原理説明図	90
図 5.3 要素試験モデル	92
図 5.4 実開閉器を用いた検証モデル	93
図 5.5 要素試験モデルにおけるアーク電圧および電流波形例	94
図 5.6 駆動アークおよび衝突アークにおけるアーク電圧とアーク長の関係	95
図 5.7 駆動アークおよび衝突アークにおけるアーク電界の磁束密度依存性	96
図 5.8 駆動アークおよび衝突アークにおけるアーク電界の電流依存性	97
図 5.9 実開閉器に適用する磁気構造	98
図 5.10 図 5.9 の磁気構造適用時の磁束密度	99
図 5.11 実開閉器モデルにおけるアーク電圧および電流波形とアーク観測映像	100

# 表目次

表 1.1 直流給配電システムにおける研究開発課題の優先順位	5
表 1.2 低圧配線用遮断器の種類と特徴	7
表 1.3 代表的な直流遮断方式	10
表 1.4 消弧室の設計およびアークパラメータと各パラメータに係る構成要素	20
表 2.1 検討パラメータの設定範囲	27
表 3.1 評価パラメータの設計適用例と制約条件	61
表 4.1 検討パラメータの設定範囲	74
表 5.1 要素試験モデルにおける試験条件	92

## 記号表

$E_{col}$	:	アーク空間のアーク電界
$E_{eg}$	:	電極-消弧グリッド間のアーク電界
$E_g$	:	消弧グリッド間のアーク電界
$g_{eff}$	:	消弧グリッドの有効利用度
$I$	:	電流
$L$	:	負荷インダクタンス
$L_{arc}$	:	アーク長
$L_{eg}$	:	電極と消弧グリッド間のアーク長
$L_{eg,1}$	:	陽極側の電極と消弧グリッド間のアーク長
$L_{eg,2}$	:	陰極側の電極と消弧グリッド間のアーク長
$L_g$	:	消弧グリッド間のアーク長
$n$	:	消弧グリッドの利用枚数
$\Delta P$	:	大気圧からの圧力上昇値
$\rho$	:	抵抗率
$S$	:	電極面積
$S_{arc}$	:	アーク電流路の断面積
$t$	:	時間
$t_g$	:	利用する消弧グリッドの板厚
$V_{arc}$	:	電極間のアーク電圧
$V_{col}$	:	アーク空間に関するアーク電圧
$V_{eg}$	:	電極と消弧グリッド間のアーク電圧
$V_{eg}^0$	:	アーク長 0 mm 相当の電極と消弧グリッド間のアーク電圧見込み値
$V_{elec}$	:	電極近傍に関するアーク電圧
$V_g$	:	消弧グリッド間のアーク電圧
$V_g^0$	:	アーク長 0 mm 相当の消弧グリッド間のアーク電圧見込み値
$V_g^{est}$	:	アーク分割時の消弧グリッド間電圧の推定値
$V_g^{exp}$	:	消弧グリッド間電圧の実測値
$V_R$	:	負荷抵抗による電圧降下
$V_s$	:	電源電圧

# 第1章 序論

## 1.1 電力需要と給配電システムの動向

現在に至るまでの経済発展，産業・社会活動の背景には，豊富で安定したエネルギー供給が社会の基盤にあり，我々人類・社会の発展や高度化とともにエネルギーの消費は増加する傾向にある[1][2]。図 1.1 は世界の一次エネルギー消費量の推移である。同図によると，1970 年以降の世界の一次エネルギーの消費量は年平均で約 2 - 3%で増加し続けており，エネルギー需給の重要性は継続的に高まっている。エネルギー消費は経済成長とともに増加するため，今後も発展途上国を中心にエネルギー消費は更に増えていくことが予測される。一方，エネルギーの需要が高まる中で 2015 年の気候変動枠組条約第 21 回締約国会議(COP21)にて採択されたパリ協定では 2020 年以降における世界の温室効果ガスの排出量を削減することで，産業革命前と比べて気温上昇を 2 度以下に抑えることを目標に掲げられた。この目標を達成するために国際エネルギー機関(IEA)が提示した持続可能開発シナリオ[3]では，再生可能エネルギーの利用拡大や省エネルギー製品の開発と普及を促し，一次エネルギーの約 60%を占める石炭・石油の消費を約半分まで減らすことが重要であるとされている。

産業・社会の中で使用されるエネルギーの中でも特に電力エネルギーは，各種エネルギーへの変換・輸送の容易さや効率の高さから，近年では益々使用される割合が多くなっている。例えば，自動車，船舶，航空機などのモビリティ分野の電動化など，化石燃料から電力エネルギーへの転換によるエネルギー利用の効率化に向けた取り組みが精力的に行われている[4]-[6]。図 1.2 は文献[7]のデータベースを参考にまとめた世界のエネルギーの電化率の推移である。ここで，電化率とは，全てのエネルギー消費のうち電力エネルギーとして消費される割合を意味する。同図からわかるように世界の電化率は過去 40 年間で約 10%から約 20%へ倍増している。継続的な電力需要の高まりの中で，電力会社や製造業などの電力を扱う多くの業界では温室効果ガス排出量削減に向けて多種多様な電気製品・設備に使用されるエネルギーの効率的な運用が重要な責務となっている[8][9]。

パリ協定で掲げられた目標レベルまで温室効果ガスの排出量の削減を目指すためには，電気製品・設備の省エネ，効率運用を進めるだけでなく，エネルギー供給の約 8 割以上を再生可能エネルギーで賄う必要があることを IEA などの多くの機関が提示している。多くの機関で示される温室効果ガス削減シナリオでは共通して再生可能エネルギーの中でも太陽光発電と風力発電の大規模な導入と主力電源化の必要性について訴えている [8][10]-[12]。

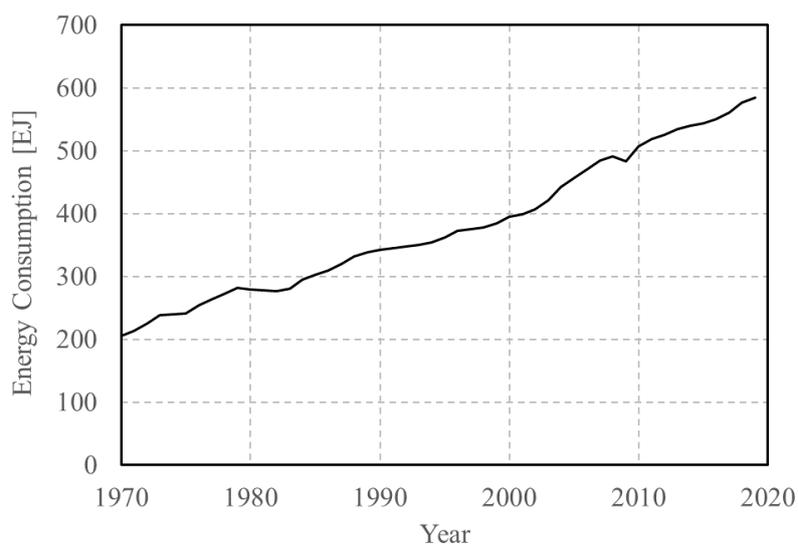


図 1.1 世界の一次エネルギー消費量の推移(文献[1]のデータベースを参考に作成)

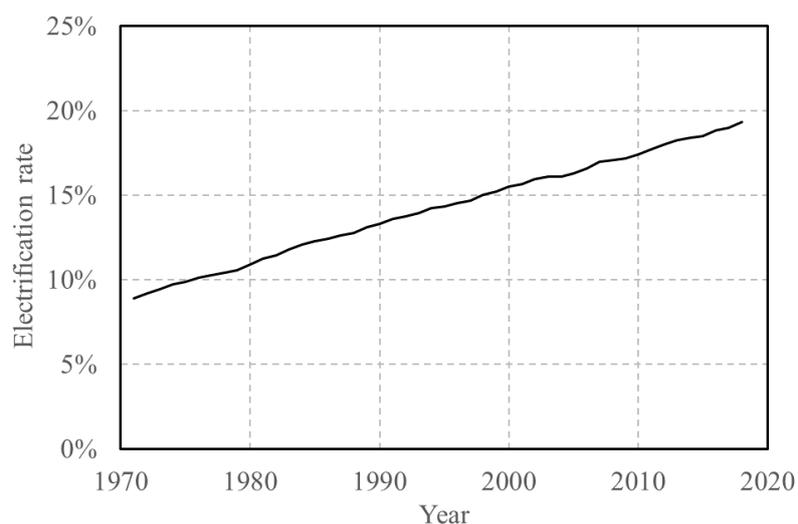


図 1.2 世界のエネルギーの電化率の推移(文献[7]のデータベースを参考に作成)

日本の再生可能エネルギー事情においては、1997年の京都議定書にて二酸化炭素 (CO<sub>2</sub>)の削減目標が設定されて以降、電気事業者に対する再生可能エネルギー利用割合基準(RPS: Renewables Portfolio Standard)が導入され、再生可能エネルギー設備が多く導入されるようになった[13]。特に太陽光発電システムの需要の拡大は著しく、当時、日本では世界で最も多くの太陽光発電システムが導入された。その後、普及が進むことでその需要は落ち着いたが、2011年に発生した東日本大震災時の福島第一原子力発電所事故を契機に原子力エネルギーから再生可能エネルギーへのエネルギー転換の機運が高まり、改めて再生可能エネルギーの需要が再燃した[14]。2012年には固定価格買取制度 (FIT: Feed-In Tariff)が制定され、運用効率を

高めるために数 MW 級以上の大規模な太陽光発電システムも多く登場するようになった [15][16]。

一方、電力需要の傾向としては、スマートフォンの世界的な普及、労働人口減少に伴う多くの産業分野でのデジタルトランスフォーメーション化、また、新型コロナウイルス感染症によるリモートワークなどの需要拡大などを背景に、大量のデータ通信を扱うための ICT (Information and Communications Technology) インフラ設備の電力消費量が急速に増大している [17]-[21]。ICT インフラ設備の電力消費量は年間 10% のペースで増大しており、2030 年には世界の全電力需要の 21% が ICT インフラに関連した設備で消費されるという予測もされている [21][22]。このため、多数の ICT インフラ設備を保有する大型のデータセンタでは、太陽光発電設備などの併設や、電力系統の直流高電圧化による給配電時の電力ロスの削減などの取り組みが行われている [23][24]。

また、近年の蓄電池のコスト低下を背景に電気自動車(EV: Electric Vehicle)の普及拡大も著しい。交通分野の CO<sub>2</sub> 排出量は、世界のエネルギー起源で排出される CO<sub>2</sub> の 24% を占め、自動車はこのうちの 75% を占める [25][26]。電気自動車では、ブレーキ時の回生エネルギーをバッテリーに蓄電し再利用することで、ガソリン車と比べて CO<sub>2</sub> 排出量が 1/2 - 1/3 となるため、電動化による温室効果削減の効果は極めて高い [25]。さらに、電気自動車に搭載されるバッテリーは家庭やビルなどの電気系統と接続することで電力系統の調整力の役割も担い、仮想発電所(VPP: Virtual Power Plant)の一部として系統全体における電力利用効率の向上にも貢献できることから、電気自動車の普及は各国のエネルギー政策においても重要な位置づけとなっている [5][27][28]。

## 1.2 低圧配線用遮断器の基本構成と限流遮断

### 1.2.1 電気系統のシステム構成例

図 1.3 は発電所から需要家に至るまでの電力の送配電を示したシステム例である。各発電所で発電された電力は 275 - 500 kV の超高電圧に変電され、送電線により超高電圧変電所まで送電される。そして、超高電圧変電所にて電圧は 154 kV へ降圧され、一次・二次変電所へと送電される。その後、一次・二次変電所にて 22 - 66 kV へ変電された電力は大規模工場や鉄道会社などの大掛かりな電力消費施設に送られるとともに、各自治体にて設けられている配電用変電所へと送られる。配電用変電所では 6.6 kV まで降圧され、ビル・工場や各家庭へと配電される。

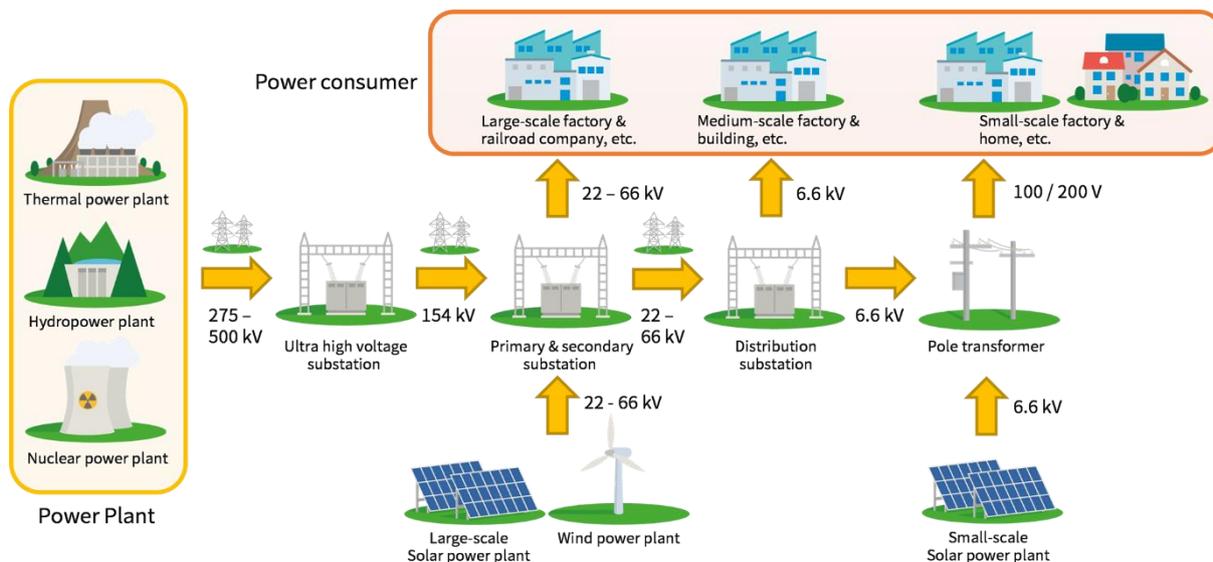


図 1.3 発電所から需要家に至るまでの電力の送配電を示したシステム例

電力の消費先であるビルや工場等の需要家では、発電所や変電所から送電された数 kV～数十 kV の高電圧の電力を、取扱いしやすくするため、受電設備で 1 kV 以下まで電圧を降圧して各種負荷設備へと配電される。

図 1.4 は再生エネルギー設備を備えた需要家の単線結線図の一例である。電力系統から 6.6 kV の電力を受電盤で受電し、複数の回路へ分岐した上で各回路に設けられた変圧器を介して使用負荷に応じた電圧へと変換される。ここで、太陽光発電設備が設けられている場合には、上記の分岐回路の一部にパワーコンディショナ(PCS: Power Conditioning System)が設けられ、集電箱や接続箱を介して太陽光パネルに接続される。また、2022 年より電力の FIT 制度に代わり、電力市場価格に応じて売電価格を変動させるフィードインプレミアム(FIP: Feed-In Premium)制度が国内に導入され、運用効率を高めるために蓄電池設備も設けられるケースが増えることを予測されている[29]。このケースでは、同図のように太陽光発電設備と蓄電池設備が併設して連結される。

このような電気系統では、電力・負荷設備や電力ケーブルなどの保護およびメンテナンスのために、それぞれの分岐点や連結点には遮断器が設置される。太陽光発電または蓄電池設備では電力の給配電は直流で行われるため、遮断器には交流(AC: Alternating Current)用以外にも直流(DC: Direct Current)用のものが必要とされる。さらに、電気系統内で使用する変圧器や負荷設備の種類、電力系統の短絡容量など、設備の規模や種類に応じて遮断器には多種多様な仕様が要求される [30]。表 1.1 は、2011 年頃にデータセンタなど電力需要の増加が著しい ICT インフラ設備を中心に DC 380V 以上の直流高電圧の給配電システムを導入するため

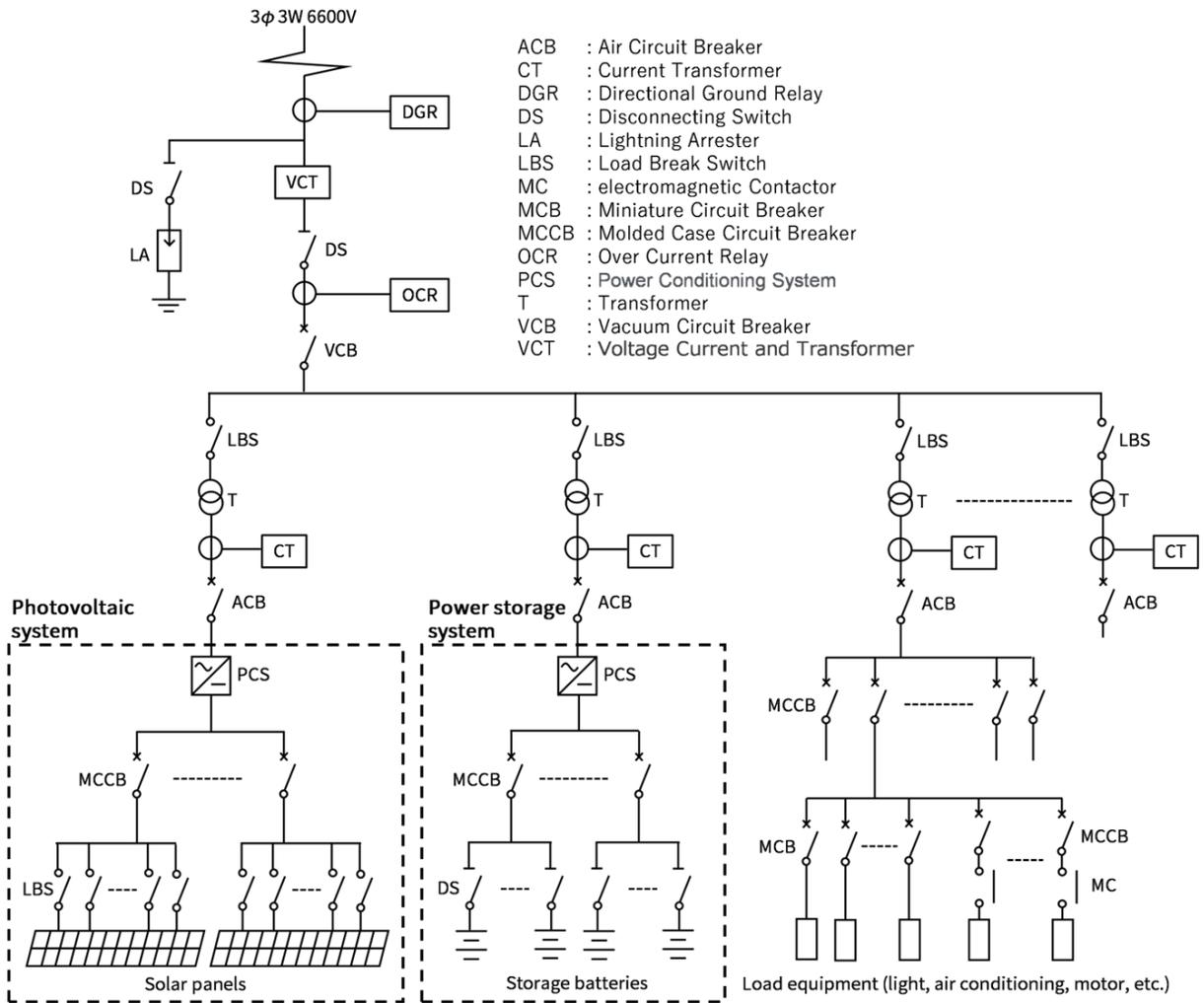


図 1.4 再生エネルギー設備を備えた需要家の単線結線図の一例

表 1.1 直流給配電システムにおける研究開発課題の優先順位[31]

Priority	Japan	USA
1 <sup>st</sup>	Standardization of voltage	Prescribed voltage
2 <sup>nd</sup>	Circuit breaker	Circuit breaker
3 <sup>rd</sup>	Loads for DC	Electric outlet for DC
4 <sup>th</sup>	Cost and benefit	Cost performance
5 <sup>th</sup>	Electric element and circuit technology	Circuit Structure

に国内外の専門家会議にて議論がなされた研究開発課題の優先順位を示したものである[31]。同表によると、国内・国外ともに遮断器などの保護装置の研究開発が2番目に高い優先度として位置づけられている。電気系統の設計時には安全性の確保が第一に優先されるため、適切な遮断器がない場合では優先的に要求仕様に対応した遮断器の開発を要求されることになる。

## 1.2.2 遮断器の技術変遷

電力需要の高まりとともに遮断器の用途が多様化する中で、遮断器には最大遮断電流(遮断容量)の向上、外形寸法の小形化、安全性・保守性・導入時の経済性の向上などが求められる、技術の進歩とともに遮断器の種類は多様に変遷してきた。

図 1.5 はその変遷の概略である。20 世紀初頭まで遡ると絶縁油を使用した油遮断器(OCB: Oil Circuit Breaker)が使用されていたが[32]-[34]、保護設備の不具合や事故時に火災の原因になるといった安全性の懸念や保守の困難性から、1950 年以降では安全面や保守性で有利な空気を消弧媒体とする空気遮断器(ABB: Air Blast circuit Breaker)が主流になった。ABB は電極間

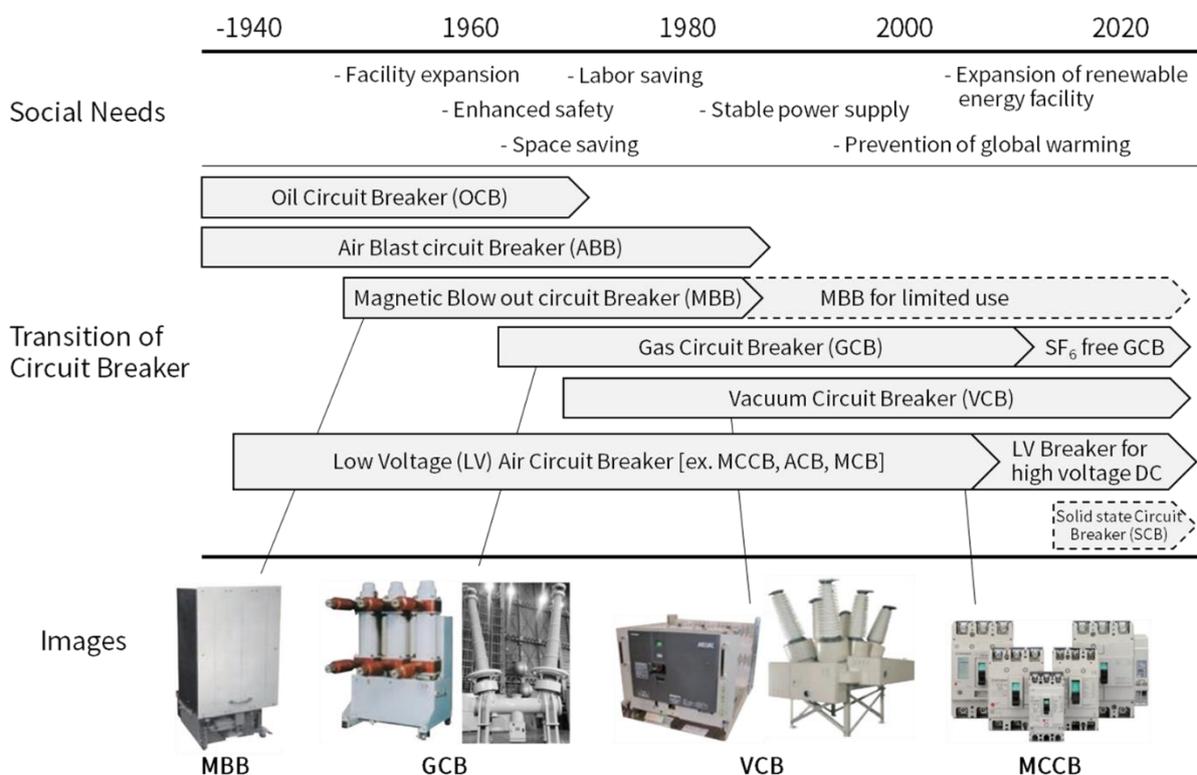


図 1.5 遮断器の変遷の概略

で発生するアーク放電(以降, アーク)に対して高圧空気を吹き付けて消弧する原理から, 大型のコンプレッサや空気タンクを併設する必要がある, 装置全体の大きさが極めて大きくなる傾向にあった[34][35]。このため, ABB もまた, 現在ではほとんどが後継機に置き換わり, 比較的小容量の遮断器には, アークを分割し冷却するための金属板を多数積層配置したアークシュートと呼ばれる消弧室を有する磁気遮断器(MBB)が使用されている。また, 発電所や変電所などの送配電に使用されるような大容量の遮断器には, 六フッ化硫黄(SF<sub>6</sub>)などの絶縁ガスを消弧媒体とした GCB(Gas Circuit Breaker)や, 真空を消弧媒体とした VCB(Vacuum Circuit Breaker)などが使用されている[36]。

一方, 電力の消費先である需要家などで使用される低圧電気系統では, 1900 年代初期まではナイフスイッチとヒューズを組み合わせたものが使用されてきた。1929 年には米国ウェスチングハウス社において大気中でアーク放電を消弧する遮断器が開発され, それ以降ではナイフスイッチが使用されることは少なくなった。この大気中でアークを消弧する遮断器は金属製の筐体から絶縁性に優れた樹脂筐体で構成した MCCB (Molded Case Circuit Breaker)へと変遷し, 現在では取扱いに優れた MCCB が電気低圧用の開閉機器として主流となっている[37]。表 1.2 に示すように, 低圧遮断器は, MCCB の他にも, ACB(Air Circuit Breaker), MCB (Miniature Circuit Breaker)などの種類がある。これらは多種多様な電力設備や負荷設備への対

表 1.2 低圧配線用遮断器の種類と特徴

	Miniature Circuit Breaker (MCB)	Molded Case Circuit Breaker (MCCB)	Air Circuit Breaker (ACB)
Image			
Ampere frame	≤ 100 A	30 A - 1,600 A	> 1,000 A
Rated insulation voltage	440 V	690 V	1,000 V
Feature	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Very compact</li> <li>- Economic with minimum necessary functionality</li> <li>- Low breaking capacity</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Compact</li> <li>- Addable Many option functions &amp; Adjustable trip condition</li> <li>- High breaking capacity</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Large size</li> <li>- Addable Many option functions &amp; Adjustable trip condition</li> <li>- High breaking capacity</li> <li>- Controllable time coordination on short-circuit current</li> <li>- Renewable parts in maintenance</li> </ul>

応のため、使用電流、絶縁電圧、遮断容量、短時間耐電流性能、付加機能(遠隔操作、不足電圧引き外し機能など)、外形寸法や保守性などの様々な要求仕様に応じて、主幹設備向け、家庭向けなど用途ごとに使い分けられる[30]。これらの低圧遮断器は VCB や GCB などの他の遮断器とは異なり、アークを消弧する消弧室、機構操作部、過電流を検知する電流検知部がそれぞれ一体となりケース内に組み込まれ、自律的に動作することを特徴としている。

また、近年では、アークを発生させずに高速な開閉が実現できる遮断器としてサイリスタや IGBT(Insulated Gate Bipolar Transistor)などの半導体素子を用いた半導体遮断器や電気接点・半導体を組み合わせたハイブリッド遮断器なども研究開発され、その一部が市場にも登場してきている[38]-[40]。

### 1.2.3 直流給配電システムにおける遮断方法

1.1 節で述べたように、近年、再生可能エネルギーの大量導入や、データセンタや蓄電池設備の需要拡大、自動車や船舶、航空機の電動化などを背景に、直流給配電システムの導入事例が増加している。直流給配電システムでは、電力の送電容量や利用効率の向上を図るために、システム電圧は高電圧化する傾向にあり、遮断器にも直流高電圧に対応した遮断性能が求められるようになってきた[31][41][42]。

高電圧の電力送電を主とする設備では、近年の洋上風力発電の大量導入に対応するため、電力システムを約 500 kV へ直流高電圧化し、数百 km を超える長距離送電による電力損失を最小化し効率よく送電するための研究開発が欧州を中心として多くの機関で進められている[42]-[45]。

一方、需要家における電気低圧の電力設備では、直流電力は従来 DC 200 V 以下での運用が主流であったが、太陽光発電設備の大規模化やデータセンタなどの電力消費量の増大、モビリティの電動化などへの対応のため、DC 400 V 以上の高電圧運用が要求されるようになってきた。特に太陽光発電で要求される電圧は高く、国内では電気低圧区分の最大電圧である DC 750 V で使用されるケースや、国外では IEC(International Electrotechnical Commission)規格の電気低圧区分の最大電圧である DC 1500 V が要求されるケースも多くなってきている[41][46]。なお、国内では、1950 年代頃に定められた路面電車の最大使用電圧が電気低圧区分の最大電圧として使用され続けられており、国外と比べて電圧低圧区分の適用範囲が異なっている[47]。

直流電力システムでは、交流電力システムとは異なり、電流ゼロ点が存在しないために遮断器による回路遮断が難しいとされている。図 1.6 は交流および直流システムでの電流遮断時の電流・ア

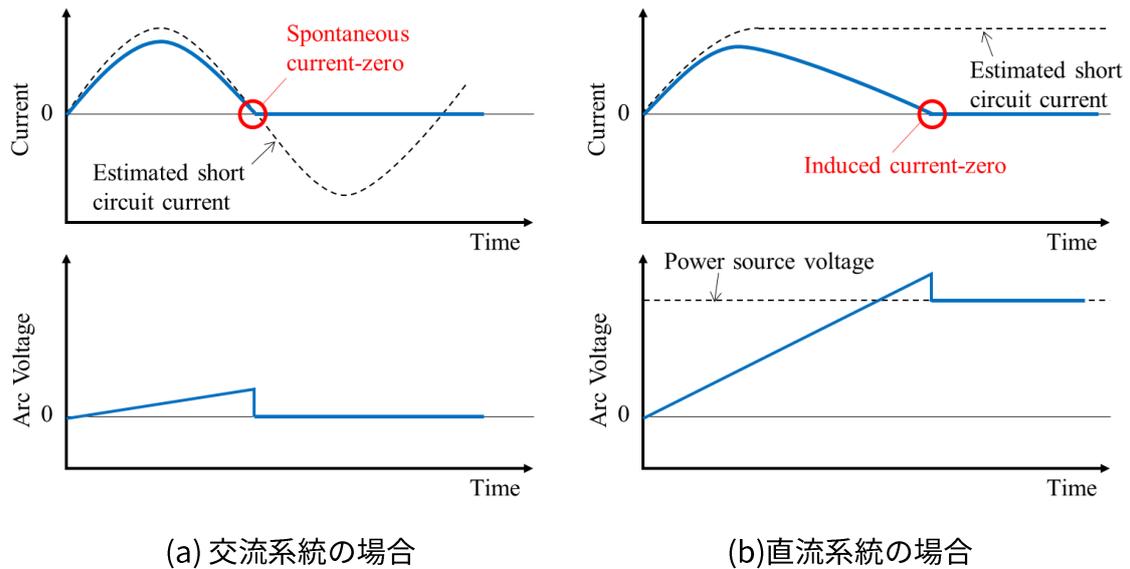


図 1.6 交流および直流系統における電流遮断時の電流・アーク電圧波形の違い

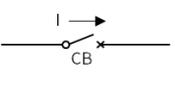
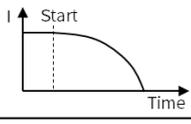
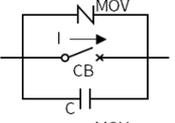
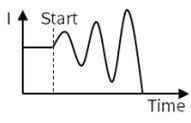
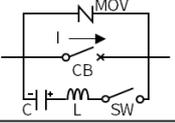
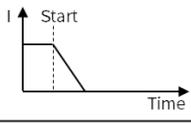
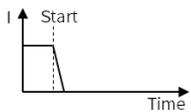
アーク電圧・電流波形例である。ここで、アーク電圧とは電流遮断時において遮断器内で発生するアーク放電内部に生じる電圧降下のことで、アーク電圧が高いほど「限流」と呼ばれる電流を小さく抑制する作用が働く。交流系統では、周期的に電流ゼロ点が発生することから、電流ゼロ点前後でアークへの入力エネルギーが一時的に小さくなり、このタイミングでアーク空間が急速に冷やされて導電性を失い、比較的容易に消弧することができる。一方、直流系統では、電流ゼロ点が存在しないため、電流遮断を行うためにはアークを消弧するための電流ゼロ点を人工的に作り出さなければならない。

そこで直流遮断器では、電流ゼロ点を人工的に生成するための様々な方式が検討・適用されている。代表的な方式として、表 1.3 の基本回路構成で示すような限流方式、振動方式、自己消弧方式がある[48]。

限流方式では、図 1.6 に示されているように、限流効果を利用した遮断方法であり、遮断器内でアーク電圧を電源電圧以上まで高めることで強制的に電流ゼロ点を発生させる。本方式では、他の方式と比べて遮断器のみの単純な構成であるが、高いアーク電圧を発生可能とする性能に優れた高性能な遮断器が必要となる。また、システム電圧が高くなるほど、遮断器にはより必要なアーク電圧は高くなることから、直流専用の特殊な遮断器が要求されることになる[41]。

振動方式では、表 1.3 に示されているように、遮断器と並列にインダクタやコンデンサを設けることで LC 共振を発生させて回路電流を振動させる、または、予め充電しておいたコンデンサを遮断時に放電することで、強制的に電流ゼロ点を発生させる方式がある。これら

表 1.3 代表的な直流遮断方式

Interrupting method	Example of circuit configuration*	Current waveform in CB
Current-limiting method	Backward voltage generating method 	
Oscillating method	Self-excited oscillating method 	
	Separately excited oscillating method 	
Self arc-extinguishing method		

\* CB: Circuit Breaker I: current MOV: Metal Oxide Varistor C: Capacitor SW: SWitch GTO: Gate Turn-Off thyristor

の振動方式では高い限流性能は求められないため高性能な遮断器を必要としないが、交流の商用周波数での遮断よりも電流ゼロ時の電流変化  $di/dt$  (ここで、 $I$ :電流,  $t$ :時間)が速く、電極間の絶縁回復のための時間は短くなる。そのため、インダクタンスやキャパシタンスの調整により  $di/dt$  を低くする必要がある[49]。しかしながら、この調整に付随して、限流方式よりも装置全体のサイズが大形化したり、経済性が低下したりする傾向にある。

最後に、自己消弧方式では、GTO (Gate Turn Off thyristor)や IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor)などの自己消弧形半導体素子を用いてターンオフ制御により電流遮断を行う方法である。本方式では、他の方式と比べて極めて高速な遮断が行えることに加えて、アークが発生しないことから回路開閉による電極損耗がなく高い時間制御性を有する開閉器としての用途に使用できる[38]。ただし、通電時に半導体素子のオン抵抗に伴う電力ロスと発熱が生じることから冷却器を併設する必要があり、発電効率や電力利用効率が重要視される設備などでは敬遠される傾向にある。

上記の直流遮断の方式や利点の違いから、数百 kV 以上の直流システムの場合では振動方式や自己消弧方式が採用される場合が多い。一方、太陽光発電やデータセンターのような電気低圧区分で運用される直流電力設備では、給配電効率や、遮断器の設置面積や発電コスト等の要因が優先され、特段の理由がなければ限流方式が用いられる。このため、電気低圧で運用される直流給配電システムにおいては、より高いアーク電圧を実現できる高性能な遮断器の開発が強く求められている。

## 1.2.4 低圧配線用遮断器 MCCB の基本構成

本節では、電気低圧系統用の遮断器として、MCCB を例にとって、低圧遮断器の基本構成とその遮断原理について説明する。なお、低圧電気系統の中で使用される遮断器の多くは、主な保護対象は配線保護であることから低圧配線用遮断器と呼ばれることが多い。

図 1.7 は低圧配線用遮断器 MCCB の基本構成である。遮断器の中央部に操作用のレバーと連結した開閉機構が設けられている。この開閉機構は多段の倍力構成を備えたトグルリンク機構が採用されており、人力による力を倍増させて可動電極および接点の接圧力へと変換し強い操作力で電極を動作できるようにしている。

図 1.7 の開閉機構の下側では、電流検知と過電流発生時のトリップ動作(引き外し操作)を行う過電流引き外し装置が設けられている。過電流引き外し装置は、過電流の大きさに応じ

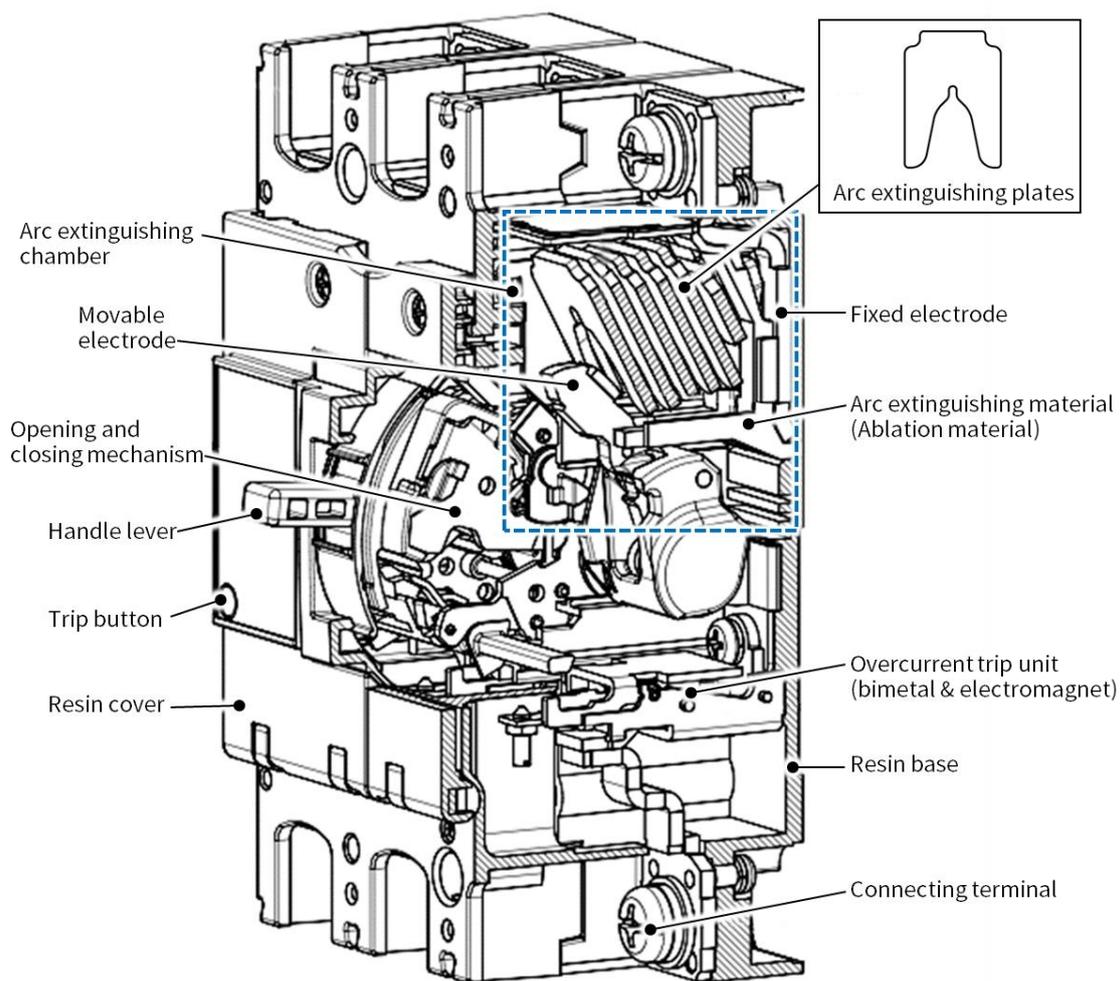


図 1.7 低圧配線用遮断器 MCCB の基本構成(文献[30]より引用)

てトリップ動作の開始時刻を制御(時限制御)する役割を担っており、予期しない回路電流の増加を検知した場合に、本装置から上記開閉機構の開極動作を自動的に行えるようにしている。この時限制御の方式として、制御タイミングをバイメタルと電磁石を用いて発熱量と電流値から判断する熱動電磁式や電流センサ(CT: Current Transformer)とマイコンを使用して電子的に判断する電子式などがあり、同図では熱動電磁式を用いた例を示している。

図 1.7 の開閉機構の上側では、消弧室が設けられており、消弧室内には回路の開閉のための電極とアークを消弧するための消弧装置が備えられている。低圧配線用遮断器では、下記にて後述するが電極の高速開極やアークの引き伸ばしに有利な点や、外形寸法の小形化に優位である点などから、回動による電極の開極方法が採用されている。一方、消弧装置では、消弧グリッドと呼ばれる U 字状の複数枚の消弧板(金属板)を一定の間隔を設けて積層配置されており、引き伸ばされたアークは各消弧板で分割され冷却される。この消弧グリッドは、消弧方式や制御時の現象に関連し「デアイオングリッド」や「スプリッター」と呼ばれる場合もある[32][50][51]。

図 1.8 は低圧配線用遮断器 MCCB の消弧室の構成例である。同図の電極構造では、通電電流から生じる磁場によって、可動電極を開極するための電磁力や、アークを消弧グリッド側へ引き伸ばすための電磁力を生成する[52]。一方、消弧板は強磁性材料である鉄で形成されるケースが多く、消弧板を U 字状の形状にすることで、アークを駆動し引き伸ばすための電磁力がさらに助長される[30]。アーク自身の電流から発生する磁場は、図 1.9(a)に示すように

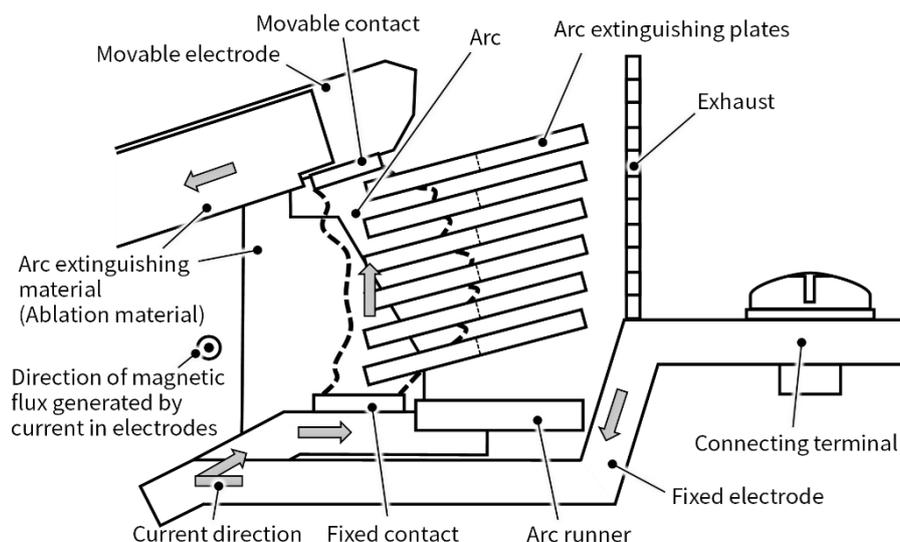


図 1.8 低圧配線用遮断器 MCCB の消弧室の構成例

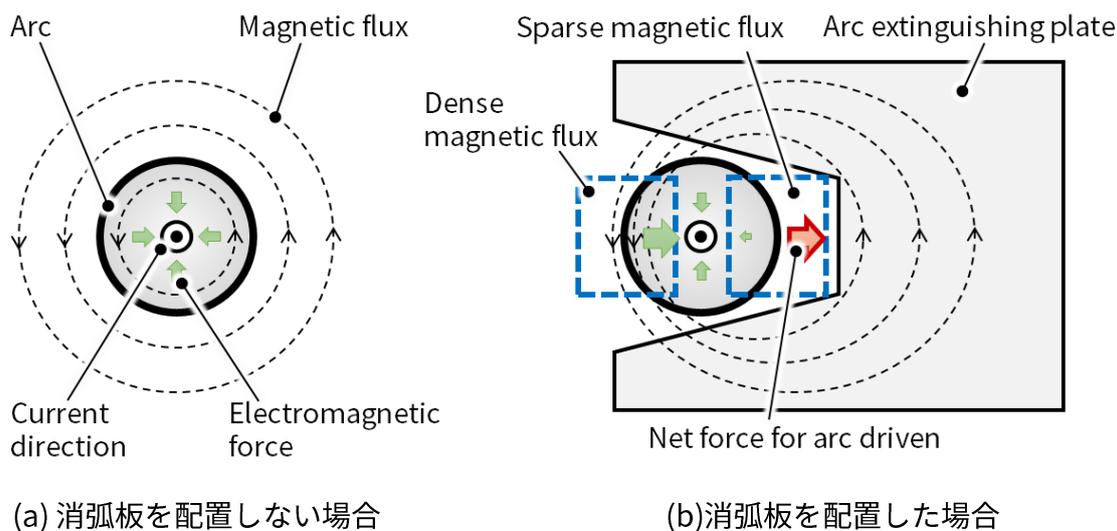


図 1.9 消弧板を配置した場合に生じる電磁力

アーク近傍に磁性体がない場合、磁気ピンチ効果としてアークを収束させる作用をもたらす。一方で、図 1.9(b)のように磁性体がアーク近傍に配置されている場合では、アーク周囲の磁場分布に粗密が発生し、磁場の粗密の影響でアークには磁性体へ誘引される電磁力が作用するようになる。さらに磁性体をU形状にしてアークを覆うことで磁場の粗密差が大きくなるため、より効率的にアークを消弧板へ誘引し引き伸ばすことができるようになる。このため、消弧グリッドを配置した場合では、アークは消弧グリッドに引き伸ばされて、最終的には消弧グリッドへ短絡し複数に寸断される。従って、アークを複数に分割することで高い電圧降下が生じ、アークを維持するために必要な電圧(アーク電圧)は高まり、効率的に電流を限流して消弧作用を高めることができる[50]。

さらに、低圧配線用遮断器では電流ゼロ点後の絶縁回復や限流性能を補強するために、電極間にはモールドケースの材料とは異なる消弧作用に特化したポリマー製の消弧材料を配置するケースが多々ある。消弧材料はアークの熱や光を受けて、熱分解反応による溶発ガス(アブレーションガス)を放出する[53][54]。消弧材料の種類で溶発ガスによる効果は異なるが、その多くは消弧室空間内の温度を低下させて、空間の導電性を消失させるものである。低圧配線用遮断器では、溶発ガスによる消弧作用を高めるために消弧材料は電極の回転面を二面で挟むように配置している。これにより、アークが引き伸ばされる前は溶発ガスの作用でアークの導電率は低下し、アークが引き伸ばされた後は消弧グリッドの分割作用でアーク電圧は高まり、効率良く限流している[41]。

MCCB 以外の低圧配線用遮断器の ACB や MCB もまた、外形寸法や電極構造、開閉機構な

どの構成の違いはあるが、消弧室での遮断原理や使用部品等は基本的には同様で、電極間で発生したアークを磁気駆動し、消弧グリッドによるアークの分割や溶発ガスによる冷却作用でアークを消弧し遮断を行う[55][56]。

### 1.2.5 低圧配線用遮断器の限流遮断における回路パラメータ

低圧電気系統では短絡事故時の電線や電気機器、電源設備などの焼損や故障を避けるため、低圧配線用遮断器には限流遮断が求められる。限流遮断とは、1.2.3節にて述べた限流方式による電流遮断のことで、遮断時に生じるアーク放電内部に高い電圧降下(アーク電圧)を発生させて、強制的に回路内を流れる電流を限流した後に遮断する方法である。限流遮断では電気設備の焼損を防止するだけでなく、遮断器自体の遮断時の溶損抑制や、健全回路への事故の波及を防止し広範囲の停電防止を行う上でも重要となる。

図 1.10 は遮断器、電源および負荷回路(あるいは短絡回路)の配置関係を簡易的に示した等価回路図である。同図において、電流遮断時のアーク電圧と負荷の関係を回路方程式で示すと次式のようになる。

$$V_s = V_R + L \frac{dI}{dt} + V_{arc} \quad (1.1)$$

ここで、 $V_s$  は電源電圧[V]、 $V_R$  は負荷抵抗による電圧降下[V]、 $L$  は負荷インダクタンス[H]、 $I$  は電流[A]、 $t$  は時間[s]、 $V_{arc}$  はアーク電圧[V]である。

短絡回路の場合では、上式の負荷抵抗および負荷インダクタンスはそれぞれ配線ケーブルに含まれる抵抗およびインダクタンスとなる。上式を  $dI/dt$  への寄与をわかりやすく整理すると、

$$\frac{dI}{dt} = \frac{(V_s - V_R) - V_{arc}}{L} \quad (1.2)$$

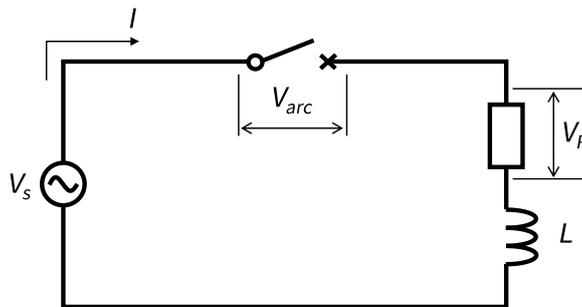


図 1.10 電流遮断時における遮断器を含む等価回路

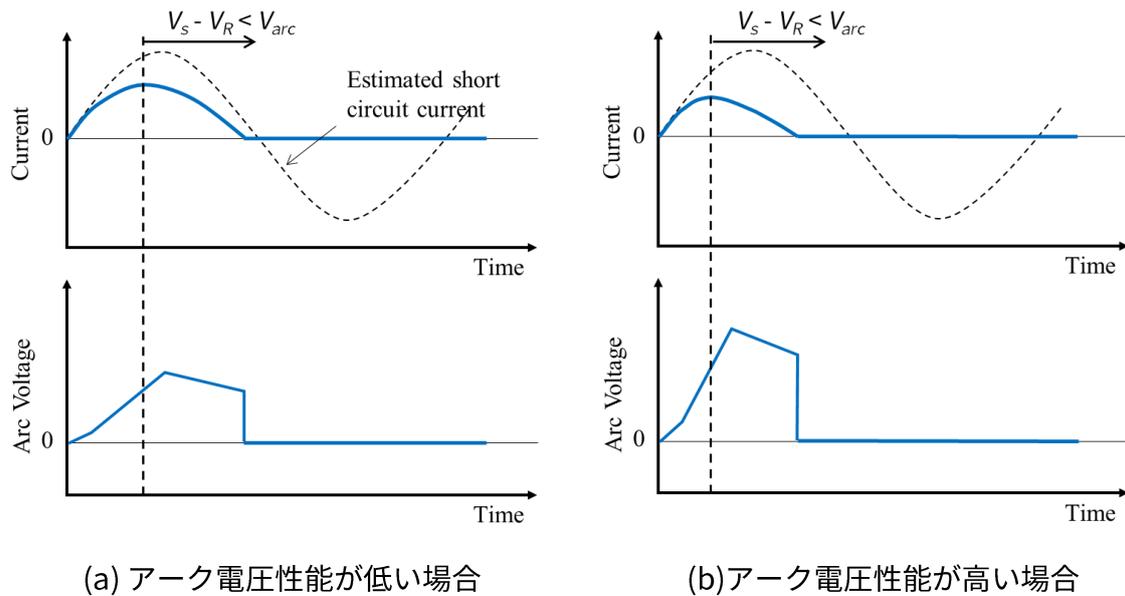


図 1.11 限流遮断におけるアーク電圧と電流波形例  
 $(V_s$ :電源電圧,  $V_R$ :負荷回路の電圧降下,  $V_{arc}$ :アーク電圧)

と示すことができ、右辺を 0 以下にすること、つまり、アーク電圧 $V_{arc}$ を $(V_s - V_R)$ より高めることで電流が減少する。図 1.11 は限流遮断時の電流およびアーク電圧波形を示した例である。

上式の関係からアーク電圧を高めることが、遮断器の電流遮断性能または限流性能を向上させる上で重要となる。特に直流回路においては、負荷抵抗による電圧降下は電流値の減少とともに低減するため、消弧室内で発生させるアーク電圧は電流ゼロ点に至るまで電源電圧以上の値を維持し続ける必要がある。このため、低圧配線用遮断器の高性能化にはアーク電圧を高める制御が不可欠であり、従来の多くの研究事例では消弧室の限られた空間サイズの中でより効率良くアーク電圧を高める方法を見出すことを主な目的に設定している [41][46][52][57]-[64]。

### 1.3 低圧配線用遮断器の高性能化に向けた研究動向および課題設定

#### 1.3.1 研究動向

低圧配線用遮断器の高性能化を行うためには、気中アークに対する物性理解やアークの制御中に生じる様々な物理現象を解明し、これらの知見を消弧室内で生じるアークの制御に反映する必要がある。低圧配線用遮断器では、前節で述べたように大気中でのアークの消弧能

力を高めるため、アークの磁気駆動・伸長、消弧グリッドによる分割、消弧材料からの溶発ガスの吹付けなどの制御が用いられる。これらの制御には極めて複雑なアーク現象の物理機構を考慮しなければならない。本節では、アーク現象の物理機構の理解や低圧配線用遮断器の高性能化に向けた様々な研究事例について述べる。

まず、気中アークの物理機構の理解に向けた研究として、Wu, Yang, Rong らの研究グループ[50][57][65]-[71]が、数値計算により電極や消弧グリッドの溶発蒸気がアークの磁気駆動特性に与える影響や消弧板によるアークの分割過程について詳細に解析している。彼らの研究では、アークが消弧板で分割される際には、図 1.12 に示すように、アークはひとまず消弧板に沿って伸長した後に、アーク電圧が一定以上上昇することでアークの分割状態に至ることを明らかにしている。これに加えて、アークの分割前には消弧板内に生じる渦電流がアークの伸長を阻害し分割過程を遅延させることや、消弧板から生じる溶発蒸気が消弧板の陰極面近傍の電路形成を促し分割過程が促進されることも明らかにしている。

また、Baudoin[72]や Swierczynski[73]らは、上記同様に数値計算を用いて磁気駆動中のアークに対して消弧材料からの溶発ガスを吹付けた際のアーク内部の電流密度分布への影響を調査し、アークに溶発ガスを吹付けることでアーク内部の電流密度分布が収縮することを明らかにしている。

一方、アークの磁気駆動や伸長は消弧グリッドでのアーク分割などを促すために重要となるが、電極の開離直後は電極間でアークは膠着し、アークの伸長を困難とさせる膠着現象が存在する。青山ら[74][75]の研究では、この膠着現象に関して分光測定による調査を行い、アーク内の構成原子・分子群の種類がアークの膠着現象に影響を与えていることを明らかにしている。彼らは、電極開離直後に電極の溶発から生じる金属原子の電離を主とするメタリ

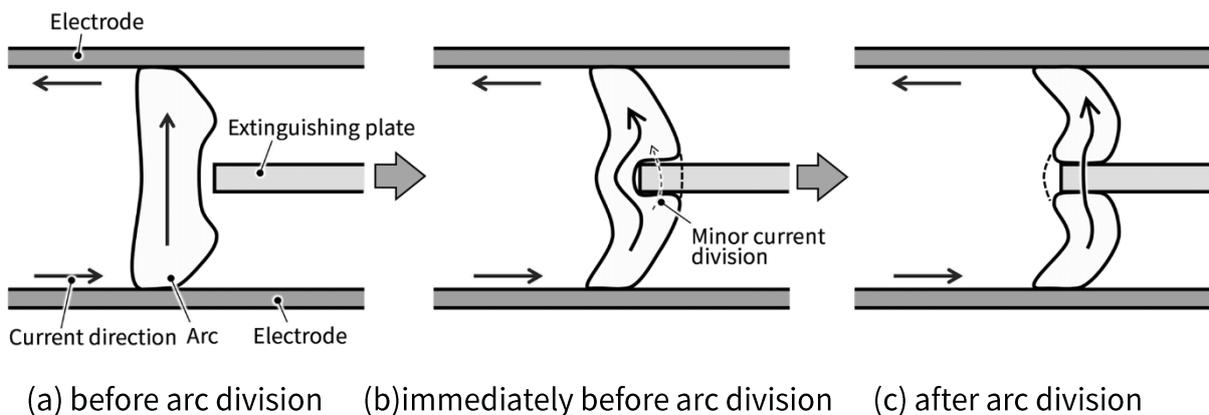


図 1.12 消弧板によるアーク分割過程

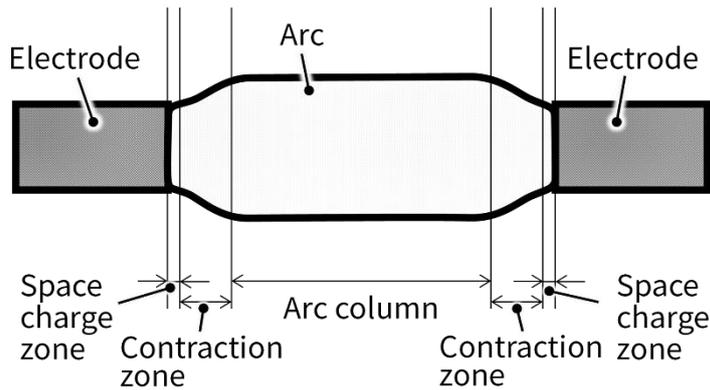


図 1.13 電極近傍におけるアークモデル

ック相アークの状態では、電極の開離が進み、窒素などの大気中ガスの電離を主とするガス相アークにアークの状態が遷移することで、膠着が解除されやすくなることを明らかにしている。そして、同研究の中でこの膠着時間は電極材料の種類や電極の開離速度などで変化し、試験条件の違いでメタリック相からガス相アークへの遷移時間が変化する調査結果を示している。

青山らの研究に関連して、McBride ら[76]、Belbel ら[77]、Lindmayer[78]、Rodriguez ら[79]は、電流、電極材料、開離速度、消弧材料の有無、排気口の大きさに対する膠着時間への影響を実験的に調査している。彼らの研究における共通の見解として、電流が大きい条件や電極材料に合金を使用した場合で膠着時間は長期化し、開離速度が速いほど膠着時間は短くなることが示されている。また、開離速度については複数の研究で約 4 m/s 以上で膠着時間の短縮効果は飽和することが報告されている。

次に、低圧配線用遮断器のアーク電圧上昇機構に関連した研究として、横水、中山、逸見らの研究グループ[80]-[85]は、消弧板枚数、電流値、アーク長、電極材料の違いがアーク電圧に及ぼす影響を実験的に検討している。図 1.13 に示すように電極近傍ではアークには空間電荷層とアーク電流路の収縮層が存在しており、電極近傍とそれ以外のアーク空間でアーク電圧の上昇機構が大きく異なる。電極近傍に関するアーク電圧上昇機構に関する研究動向は後述するとし、まず、アーク空間のアーク電圧上昇機構の研究動向を述べる。同研究グループの複数の研究事例においてアーク空間中のアーク電界（単位アーク長当たりのアーク電圧）は数 kA 以上の大電流条件下で電流増加とともに上昇することを明らかにしている。ただし、他の研究グループの研究事例で大電流条件下のアーク電界の電流依存性は小さいことを示す報告例もあり[86][87]、アーク電界の特性に関してその見解が分かれている。一方、Shea[54]、Dai ら[88]、磯崎ら[89]は、アーク周囲の雰囲気圧力が高まることでアーク電界は上昇するこ

とをそれぞれ報告している。これらの複数の研究事例を鑑みると、アーク電界の上昇機構の詳細な理解には電流および圧力条件の両方の影響を含めて調査する必要があることを示唆している。ただし、雰囲気圧力は電流やアーク電界、消弧室の大きさ等で変化するため、各因子がアーク電界に及ぼす影響をそれぞれ検討することが難しく、これら因子がアーク電界に及ぼす影響を明確することはアーク電圧上昇機構を理解する上での一つの課題となっている。

また、アーク電界の特性に強く関連する他の要因として、消弧材料からの溶発ガス(アブレーション)や飛散粒子(スポレーション)がアークに及ぼす影響を研究した事例も多い。田中、恩地らの研究グループ[53][90-92]、伊藤ら[93]、Shea[54]、吉安ら[62]、Schlitzら[63]、Tonmitrら[94]は、それぞれ試験条件や消弧材料の種類などは異なるものの、消弧材料からの溶発ガスがアーク内部に混入することで共通してアーク電界が上昇することを報告している。これらの先行研究により、溶発ガスはアークの導電率を低下させることに加えて、対流熱損失や輻射損失を増加させてアークを冷却する効果をもつことが明らかにされている。特に、溶発ガス内に水素が多く含まれる場合で熱伝導率は高まりやすく、水素含有率の高い消弧材料ほどアーク電圧上昇への寄与に優れることが複数の研究で報告されている[63][90][93][94]。また、消弧材料が大気中などの水分を吸水している場合には、その水分の膨張により消弧材料の一部は飛散しアーク内にその飛散粒子が混入するスポレーションと呼ばれる現象を生じる。この現象がアーク電圧に及ぼす影響を調査している研究事例はないものの、スポレーションはアークを内部から冷却する作用をもつことを示されており[95]、アーク電圧上昇機構の有力な一要因になっている可能性が示唆されている。

さらに、大石ら[96]は構造部材で強制的にアーク空間に制限を行った場合でも、アーク電界が上昇することを報告している。彼らの研究では、ガラス円管を用いて調査を行っており、円管の小径化や円管内の圧力増加がアーク内部の電流密度を高め、電流密度の増加からアーク電界が上昇することを明らかにしている。これに加えて、円管内に金属蒸気が混入することでアーク電界がさらに上昇する傾向をもつことも報告している。このように、円筒形モデルにおけるアーク電界の上昇機構に着目した研究は既になされているが、低圧配線用遮断器内に構成される二面の消弧材料で部分的にアーク空間の拡がり制限された半制限条件下においてはアーク電界の上昇機構は十分に理解されていない。このため、遮断器を高性能化する上で半制限条件下でのアーク電界上昇機構の解明は課題の一つとなっている。

次に、電極近傍で生じるアーク電圧上昇機構に関して、横水、中山、逸見らの研究グループは、図 1.14 に示す短間隔の電極間におけるアーク電圧とアーク長の関係から、空間電荷層で生じる電極降下電圧に着目した検討を行っている[80]-[85]。彼らの研究の中で、空間電荷

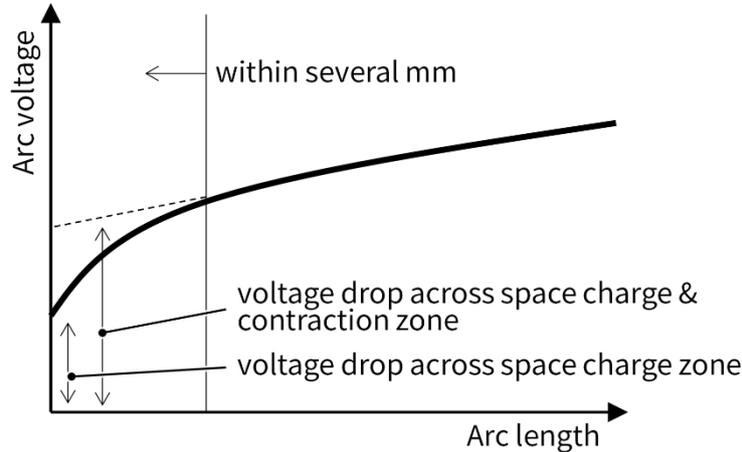


図 1.14 短間隔の電極間におけるアーク電圧とアーク長の関係

層で生じる電極降下電圧は熱電子放出と電界放出の両方から電子放出機構が説明された T-F 理論[97][98]の空間電界方程式を用いることで説明できることを示している[83]。また、同研究の中で、電極降下電圧の値は電極材料の仕事関数やイオン化ポテンシャルの違いで数 V 程度の変化が生じることを解析と実験の両面から明らかにしている[84][85]。さらに、空間電荷層で生じる電極降下電圧には電流条件は影響を与えないことを同時に明らかにしている[83]-[85]。消弧板でアークを分割した場合においても、消弧板の材料である鉄の物性に従った電極降下電圧が生じることを明らかにしている[82]。一方、同研究グループの電極近傍の収縮層も含めた電圧降下を評価した研究事例[80][81]では、その電圧降下は電流とともに上昇し、収縮層が電流に依存する電圧特性を持つことが示唆されている。これに関して、Zhu ら[99]の研究では、この収縮層で生じる電圧降下は電極界面におけるアークの電流密度に依存することを明らかにしており、電流密度が一定以上となる条件で電圧降下が高まることを報告している。

### 1.3.2 本研究の課題設定

遮断器性能である高遮断容量、高電圧、直流対応などを実現するには、遮断器の消弧室空間内において高いアーク電圧を発生させることが重要である。1.2 節にて述べたように、低圧配線用遮断器では消弧室が遮断器内部の大半のスペースを占めるため、小形化への要求にも同時に対応するためには消弧室の省スペース化も併せて検討しなければならない。上記の要求を全て同時に満たすためには、遮断器内で発生する気中アークのアーク電圧特性に対する理解を深め、この知見を消弧室設計に反映する必要がある。表 1.4 は消弧室の代表的な設

表 1.4 消弧室の設計およびアークパラメータと各パラメータに係る構成要素

Design parameter	Arc parameter	Associated component
Gap between electrodes	<u>Arc length</u>	- Electrodes - Chamber size - Opening & closing mechanism - Rated insulation voltage
<u>Surface area on Electrode</u>	Arc spot size	- Electrodes - Rated current & breaking capacity
Arc extinguishing chamber & outlet size	<u>Pressure surrounding arc</u>	- Chamber size & strength - Outlet
Breaking capacity	<u>Arc current</u>	- Electrode size
<u>Number of arc extinguishing plates</u>	Number of divided arc	- Deion grid - Chamber size
Electrode structure & layout of extinguishing grid	<u>Electromagnetic force acting on arc</u>	- Electrodes - extinguishing grid
<u>Width of restricted space by arc extinguishing material</u>	Arc cross section & arc conductivity under diffusion of ablation gas	- Arc extinguishing material (ablation material)

計パラメータと各設計パラメータに強く依存するアーク特性(アークパラメータ)および各パラメータに係る消弧室の構成要素である。低圧配線用遮断器を高性能化しつつ要求される仕様に応じて最適な設計を行うためには、消弧室を構成する各種の設計パラメータおよびアークパラメータとアーク電圧との関係を明確化することが有効である。

1.3.1 節では気中アークに対するアーク電圧上昇機構に関する研究例をいくつか述べたが、その多くが検討対象とする特定の要因に対する電圧特性への影響を調査されたもので、それぞれのパラメータの要因を複合的に検討し、パラメータ間の相関関係も含めてアーク電圧に与える影響を定量的に明示した研究はこれまでにほとんどない。実際の遮断器設計において、対象とする遮断器の定格電流や遮断容量により消弧室や電極の大きさを変更する場合や、遮断器の外形寸法の制約から少ない消弧板枚数での消弧グリッド構成や消弧材料をほとんど使用しない場合もある。さらに、一部のケースでは、遮断時の電圧サージが問題となる場合でアーク電圧の上昇値に制約を設けられる場合もある[100]。また、高められたアーク電圧に起因して高温空気中の絶縁破壊が生じアークが接点間に戻ってしまうリストライク現象を回避するため、アーク電圧を一定以下の範囲で制御しなければならない場合もある[101]。従って、実遮断器にて柔軟な消弧室設計に十分に適用し得るレベルで消弧室の設計指針を構築するためには、アーク電圧特性に対する遮断器の構成部品に係る設計パラメータおよびアークパラメータの影響に関する複合的かつ定量的な理解が必要となる。

そこで、本論文では、遮断性能への影響が想定される表 1.4 の下線部に示す 7 項目(アーク長、電極面積、雰囲気圧力、電流、消弧板枚数、電磁力、消弧材料の細隙幅)に着目し、これらのパラメータに対するアーク電圧特性への寄与を明確化する。同表の下線部に着目する理由は以下である。

まず、アーク長は、電極間隔や消弧室、開閉機構の大きさなど遮断器の外形寸法に正の相関性を持つため、小形化を狙うためには極力短く設定する必要がある。このため、遮断器の高性能化と小形化の両立を実現する上で特に重要なパラメータとなる。

電極面積は、電極面上のアーク発弧面の電流密度に関係する項目であり、電極とアーク空間との界面における電位分布(電圧損失)や電極近傍のアーク電流路の収縮層におけるアーク電圧特性に影響する。電極面積は通電時の発熱、電流遮断時の電極の溶損量にも影響するため、遮断器の設計時には発熱・溶損などの制約条件を考慮し消弧室サイズに見合った大きさが選定される。

雰囲気圧力(アークの周囲圧力)は、アーク自身を熱源として空気が加熱される際の消弧室空間内の圧力増加により上昇するパラメータであり、その上昇値は消弧室サイズに依存する。消弧室サイズが小さいほど圧力が高まるが、これに反して筐体に要求される材料強度も高くなるため、遮断器の経済性が損なわれる恐れがある。このため、遮断容量に応じて適切な圧力となるように消弧室サイズを選定する必要がある。

電流は、遮断器の遮断容量で決まるため、高性能な遮断器ほど扱う電流値が大きくなる。前述したように、アーク内を流れる電流は電極の溶損にも影響するため、遮断容量に応じて電極サイズも大きくなる傾向がある。

消弧グリッドの消弧板枚数は、消弧板によるアークの分割数に影響し、その分割数が多くなるほどアーク電圧は高まる。ただし、消弧グリッドは、消弧室の多くの配置スペースを占め、電流遮断時の損耗に耐えられるだけの体積を確保しておく必要があるため、消弧室サイズを決定する大きな要因の一つとなる。

アークに作用する電磁力は、消弧グリッドでアークを分割する際のアーク電圧上昇に影響するパラメータである。電磁力はアークを伸長させてアークを分割する過程で必要になる。

最後に、消弧材料によるアーク空間の制限幅(細隙幅)は、アークの断面積や消弧材料からのアブレーションガスによる導電率低下の効果に影響する。この細隙幅は、電極を回動させるためのスペースで制約が生じるため、基本的には扱う電流が大きくなるほど、電極サイズは大きくなり細隙幅も大きくなる傾向となる。

一方、太陽光発電システムや電気自動車などの、近年急速に普及が進んでいる直流電力を

扱う設備では、据付スペースの制約から開閉機器の小形化の要求が特に高く、極めて小さな消弧室でのアーク電圧の高電圧化が求められる。上記設備では、短絡保護機能のない数十 A クラスの比較的小さな電流を扱う機種が多数扱われるが、これら機種では電流は小さいため自己電流による電磁石効果を用いた電磁力が有効に機能せず、アークの制御には永久磁石を用いた駆動制御が一般的に適用される[102]。しかしながら、永久磁石を用いる方法では電圧の極性(+/-極)と磁石の極性(N/S 極)の関係から、図 1.15 に示すようにアークに作用する電磁力の向きは一意的に決まるため、特定の通電方向以外では遮断性能は著しく低下する問題があった。このため、全ての極性に対応させるためには、アークを伸長させるためのアーク空間を複数用意しなければならず、消弧室は大形化する傾向があった。また、従来の知見で有するアークの単調な伸長制御などで得られる電圧上昇のみでは、上記設備で要求されるアーク電圧を確保することは困難であり、小形機器を高電圧化するために冷却性能の高い水素ガスを用いた方式を余儀なくされていた[103]。しかしながら、水素ガスを用いる方式ではガス封入および長期間のガス漏洩防止のために特殊なガス容器で構成する必要がある。これにより、経済性は著しく低下し、太陽光発電システムの発電コストが増大する要因になっていた。このため、直流電力設備における経済的効率化を目指すためには、特殊なガス容器を必要とせず、気中の限られた省スペース空間で水素ガスを扱う場合と同等以上のアーク電圧上昇を期待できる新しいアーク制御技術の構築が重要な位置づけとなる。

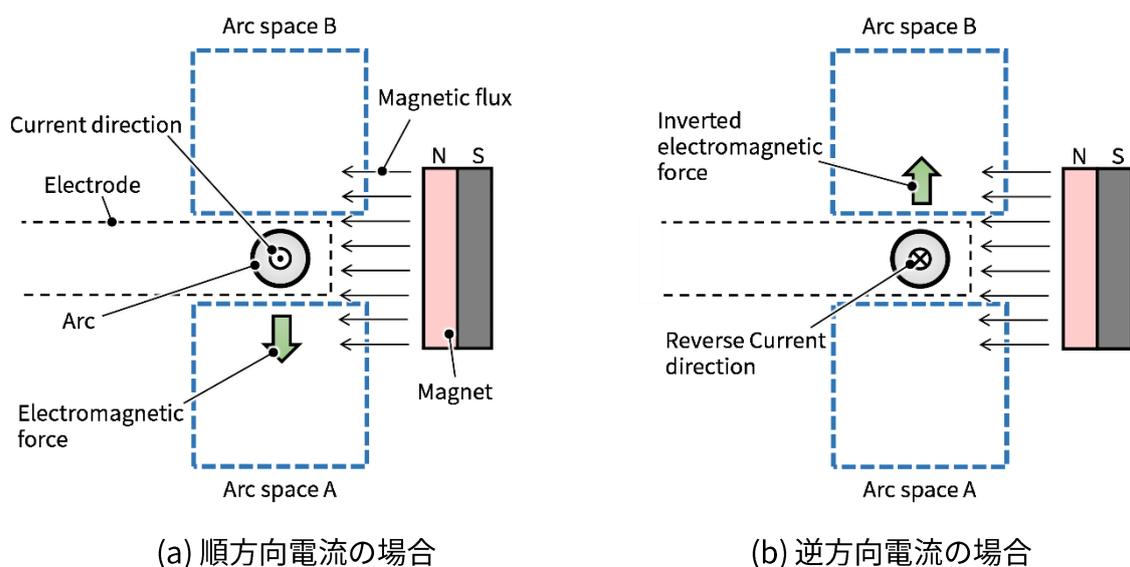


図 1.15 永久磁石使用時のアークに作用する電磁力の向き

## 1.4 本研究の目的と構成

### 1.4.1 本研究の目的

以上の研究背景を踏まえ、直流給配電システムへの実装を狙った低圧配線用遮断器の更なる高性能化に資するべく、以下を本研究の目的とした。

- 低圧配線用遮断器の高性能化に係る7種のパラメータ(アーク長、電極面積、雰囲気圧力、電流値、消弧板枚数、電磁力、消弧材料の細隙幅)と数kA以上の大電流気中アークのアーク電圧との関係を実験的なアプローチで明確化し、これらの関係に基づいた消弧室の設計指針を提示する。
- 直流給配電システムで求められる数10A–100Aの小型開閉機器として適用可能な低圧配線用遮断器の開発を狙い、気中の省スペース環境下で、従来よりもアーク電圧の高電圧化を可能にする新たなアーク制御技術を構築する。

### 1.4.2 論文構成

本論文は全6章で構成する。第2章以降の各章の概要は以下の通りである。

第2章では、まず、消弧グリッドや消弧材料を配置しない条件下での数kA以上の大電流気中アークの(1)電流値、(2)アーク長、(3)電極面積、(4)雰囲気圧力とアーク電圧の関係について評価する。ここでは、大電流気中アークの基本となるアーク電圧特性を明確にし、その電圧特性と第3章、第4章の中で消弧グリッドおよび消弧材料を配置する場合の電圧特性とを比較することで、それぞれの要因によるアーク電圧への寄与を議論する。

第3章では、大電流気中アークにおいて消弧グリッドによるアークの分割がアーク電圧特性に与える影響について検討する。ここでは、消弧グリッドを配置した条件において(1)電流値、(2)アーク長、(3)雰囲気圧力、(4)消弧板枚数、(5)電磁力とアーク電圧の関係を評価する。そして、第2章の評価結果との対比を行うことで、消弧グリッドがアーク電圧上昇機構に与える影響について議論する。

第4章では、大電流気中アークにおいて消弧材料を用いた細隙空間でアーク空間の拡がりを半強制的に制限する場合に、細隙空間がアーク電界特性へ与える影響について検討する。本検討では細隙空間における(1)電流値、(2)アーク長、(3)雰囲気圧力、(4)消弧材料の細隙幅(空間制限幅)がアーク電界に及ぼす影響を評価する。また、消弧材料からの溶発ガスの多寡がアーク電界特性に与える寄与についても議論を行う。

第5章では、小形開閉機器の直流高電圧対応に向けて数10-100 Aの小電流気中アークを対象に、省スペース空間において効果的にアーク電圧を高めるための制御方式を提案し、この有効性について実機器を用いて検証する。

最後に、第6章で本論文を総括し、本研究で得られた知見をまとめるとともに、今後の課題について言及する。

# 第2章 配線用遮断器における大電流気中アークの基礎電圧特性

## 2.1 はじめに

低圧電路の保護に用いられる配線用遮断器は、ビル、工場の受配電設備や工作機械等の過電流保護機器など、用途の多様化に応じた性能が要求される。この要求への対応のためには、遮断器の高性能化とともに外形寸法の小形化の両立が必要な要素として挙げられる。しかしながら、遮断器の高電圧または大電流への対応など高性能化を行うことにより、多くの場合で必要な消弧室サイズが大形化する傾向がある。このため、高性能化と小形化の両立には、消弧室の限られた空間内でアーク電圧を効果的に高めることを可能とする設計が重要となる。数 kA 以上の大電流気中アークのアーク電圧上昇機構に関して電流、アーク長、電極面積、雰囲気圧力の影響を調査した研究事例[81]-[90][99]は複数あるが、これらのパラメータを複合的かつ定量的に検討した例はない。遮断器の消弧室設計に適用し得る指針を構築するためには、アーク電圧上昇機構と消弧室を構成する種々の設計およびアークパラメータの関係性について複合的な理解を深める必要がある。

本章では、配線用遮断器における消弧室構成に係るアーク電圧特性の理解に向け、まず、前章の図 1.8 に示した消弧グリッドおよび消弧材料を配置していない場合の大電流気中アークの基本となる電圧特性を実験的に調べる。ここでは、アーク周囲の雰囲気圧力を調整できる密閉容器を用いて、(1)電流値、(2)アーク長、(3)電極面積、(4)雰囲気圧力の4種のパラメータが及ぼすアーク電圧への影響について複合的な調査を行う。また、その調査結果に基づいて構築した4種のパラメータとアーク電圧の関係式の実遮断器への適合性についても議論する。

## 2.2 実験方法

### 2.2.1 実験系と検討パラメータの設定値

実験に使用する試験回路構成および実験装置構成を図 2.1 に示す。乾燥空気を充填したステンレス製円筒型密閉容器内(容積 1300 cm<sup>3</sup>)に丸棒状の鉄製電極対を配置し、電極間に設置したヒューズ線を通電し溶断させることで電極間にアークを発生させた。電極部の側面には

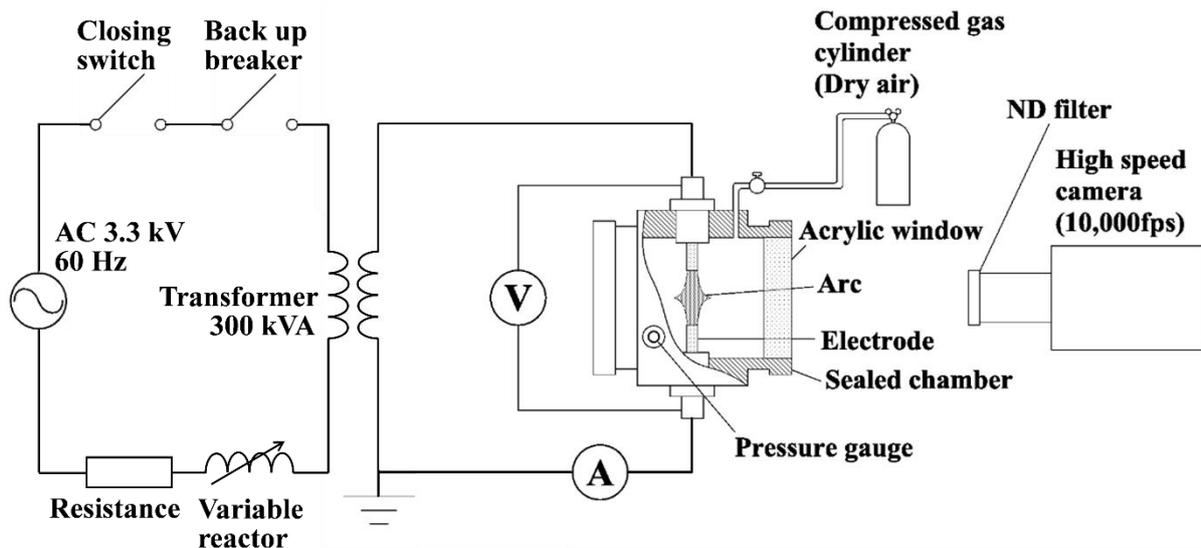


図 2.1 試験回路構成と実験装置構成

耐熱性の絶縁テープ(ポリイミドフィルム)を巻いて、アーク発弧面は電極対の対向面のみで形成されるようにした。アーク長は電極間隔で評価し、電極間隔の調整により制御した。また、電極は試験毎に毎回新品に交換した。

試験回路には、300 kVA の変圧器の一次側回路に 3.3 kV/60 Hz の電源回路、通電を開始するための投入スイッチ、回路を断路(通電の中断)するためのバックアップ遮断器(真空遮断器を使用)、電流調整用の抵抗器と可変リアクトルを設けている。変圧器の二次側回路に上記密閉容器を配置し、密閉容器内を短絡状態とすることで短絡電流が発生するようにしている。通電条件としては、図 2.2 に示すように、一次側に設けた投入スイッチとバックアップ遮断器の動作タイミングの調整により、電源電圧が最も高くなる時間、すなわち、投入位相が 0 度となるタイミングで通電を開始し、半サイクル後に通電を終了するように設定した。また、電流値は可変リアクトルを用いて試験時(限流時)の電流最大値が 10 kA 程度になるように設定した。

次に、測定系として、アーク電圧は陽極-陰極間の電極間電圧を測定して評価した。遮断時の容器内圧力の変化は容器壁面に PCB PIEZOTRONICS 社製の圧電型圧力センサ(型名：113B24)を設置し測定した。また、容器の一面にアクリル樹脂製の観測窓を配置しており、この観測窓から NAC IMAGE TECHNOLOGY 社製の高速度カメラ(型名：MEMRECAM fx6000)を用いてアーク光を観測した。なお、高速度カメラには減光のために ND(Neutral Density)フィルタをレンズに設け、10,000 fps の撮影速度でアーク光を観測している。

表 2.1 は評価に用いる検討パラメータの設定範囲である。各パラメータの検討範囲は実遮

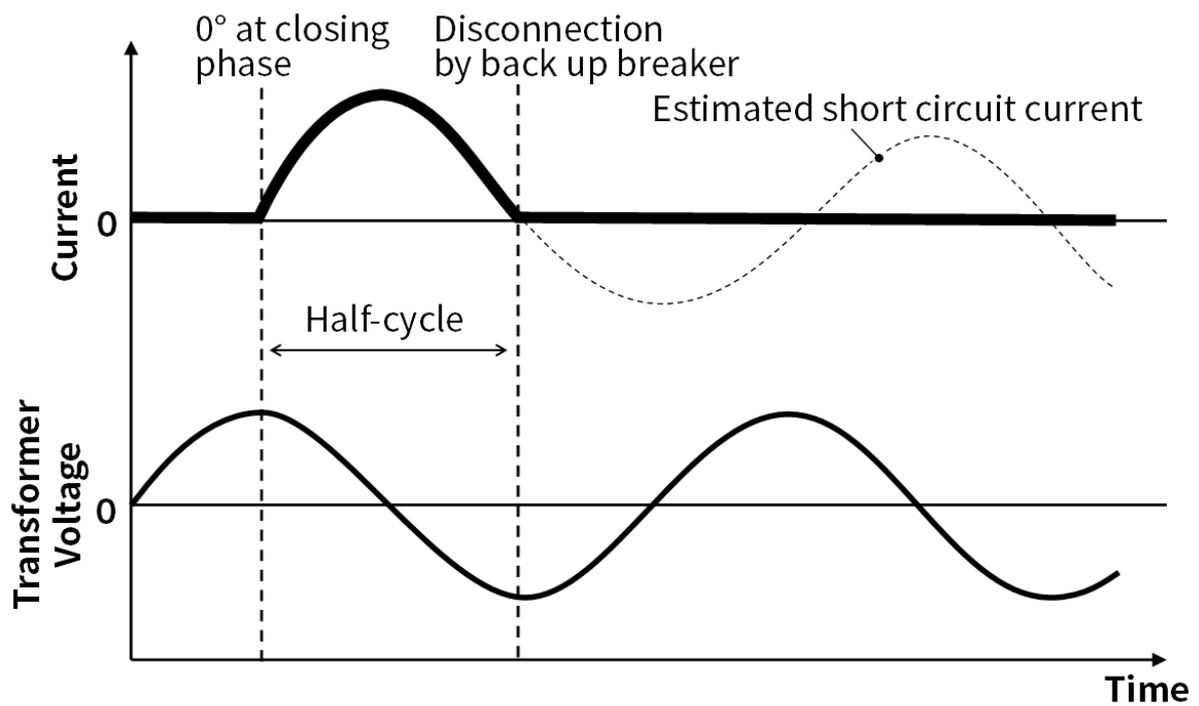


図 2.2 回路構成と実験装置構成

表 2.1 検討パラメータの設定範囲

Current	Arc length (Gap between electrodes)	Surface area on electrode	Charged (initial) pressure
1 - 10 kA	10 - 40 mm	20 - 80 mm <sup>2</sup>	0 - 0.9 MPa

断器にて想定される範囲で設定している。なお、同表の充填圧力値(初期圧力値)は大気圧からの相対圧(ゲージ圧)であり、以降では圧力値は相対圧で表記し、図中の圧力単位は相対圧を示す MPa-g を用いる。また、充填圧力値は試験条件として取扱い、雰囲気圧力は圧力センサによる圧力測定値として定義し、以降で表記を使い分ける。

## 2.2.2 試験波形例

図 2.3 はアーク長 30 mm、充填圧力(初期圧力)を大気圧(0 MPa)とする条件におけるアーク電圧、電流および雰囲気圧力の測定波形例である。同図において、通電開始(0 ms)直後の 0 -

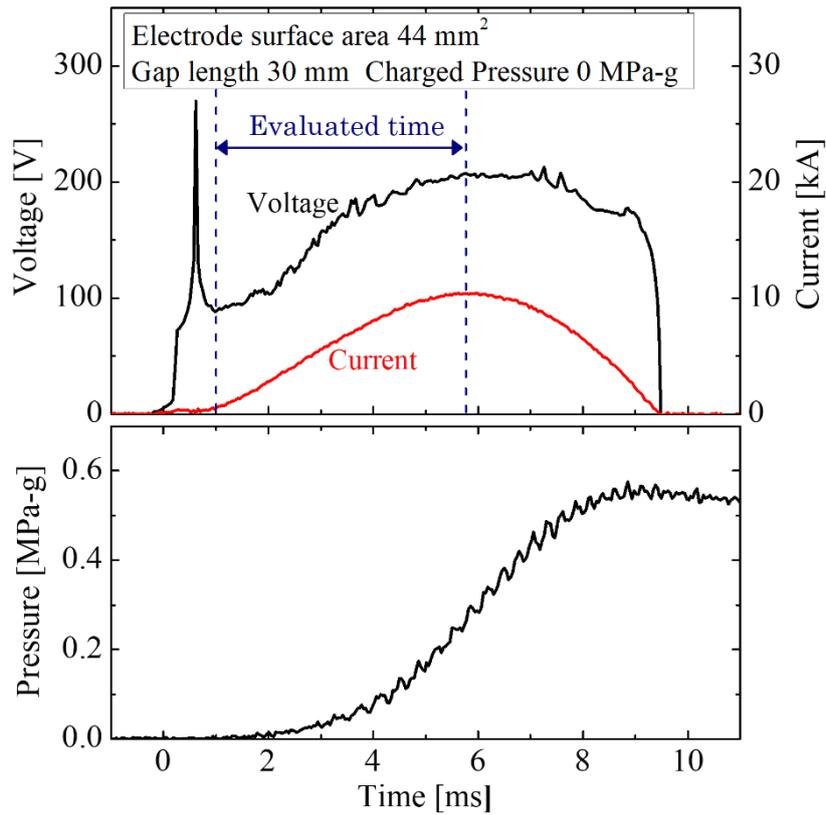


図 2.3 アーク電圧，電流，雰囲気圧力の測定波形例

1 ms でアーク電圧に急峻なスパイクが確認できるが，このスパイクはヒューズ溶断時の電気抵抗に伴う発生電圧であり，溶断後にアークが発生することで電圧は急落する。このため，本検討では電圧スパイクは評価から除き，電圧が低下した時間(図中では 1 ms の破線部)以降のアーク電圧のみを評価した。雰囲気圧力は時間経過とともに上昇し，電流零点に至るまでに 0.55 MPa-g 程度まで上昇する。この圧力上昇はアークへの入力電力(アーク電圧と電流の積)の積算時間，すなわち，入力エネルギーに依存することから[104]，各種条件において電流ピーク後(5.6 ms 以降)よりもピーク前(5.6 ms 以前)の方が充填圧力からの圧力変化が小さく，比較的近い雰囲気圧力条件での評価が可能となる。このため，次節以降では特に記載がない限り雰囲気圧力の制御が容易な電流ピーク前(図中では 1 - 5.6 ms)の電圧特性を検討する。

## 2.3 実験結果および考察

### 2.3.1 電極近傍に関するアーク電圧 $V_{elec}$ とアーク空間に関するアーク電圧 $V_{col}$ の定義

図 2.4 は電極面積の異なる 3 種の電極を使用した場合のアーク電圧とアーク長の関係である。ここで、同図の充填圧力は大気圧(0 MPa)とし、アーク電圧は電流瞬時値が 7 kA となる時間の値を用いている。同図において、それぞれの電極面積の条件においてアーク電圧はアーク長に対してほぼ線形に増加し、図中の破線で示すようにアーク長 0 mm 相当の箇所で有限のアーク電圧が存在することが推測できる。図 2.5 は電極間にアークが発生した際に生じる電位分布の概念図である。電極界面の近傍ではシースによる電位勾配やアーク電流路の収縮により電圧成分が発生することが認められており[83]-[85][99]、アーク長 0 mm 相当でのアーク電圧見込み値は電極近傍現象の発生電圧に関連して生じるアーク電圧であると考えられる。ここで、本検討ではアーク長 0 mm 相当でのアーク電圧見込み値を電極界面近傍の諸現象から生じる電圧成分として一意的に電極近傍に関するアーク電圧  $V_{elec}$  で定義し、それ以外の電圧成分をアーク空間に関するアーク電圧  $V_{col}$  と定義する。本検討では電極間のアーク電

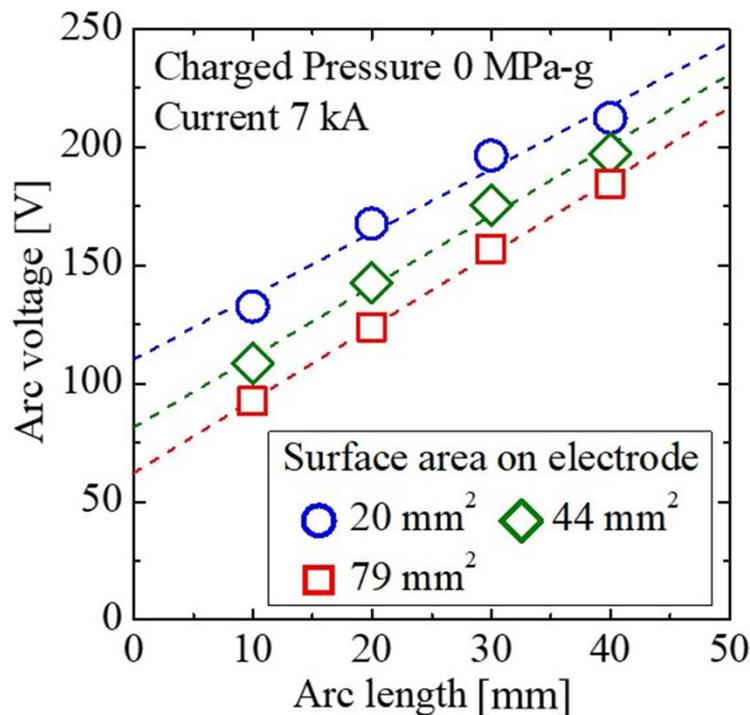


図 2.4 アーク電圧のアーク長依存性

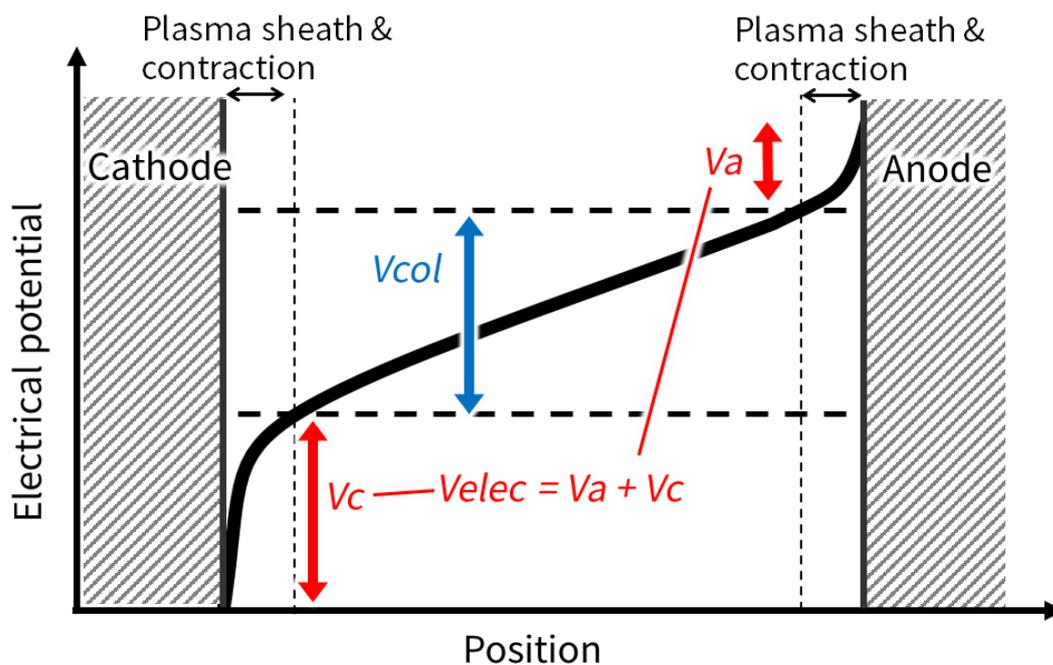


図 2.5 電極間の電位分布の概念図

圧  $V_{arc}$  は次式のアーク電圧の関係式で成立すると仮定し、 $V_{elec}$  と  $V_{col}$  のそれぞれにおいてアーク電圧特性を検討する。

$$V_{arc} = V_{elec} + V_{col} \quad (2.1)$$

### 2.3.2 電極近傍に関するアーク電圧 $V_{elec}$ の特性評価

電極近傍に関するアーク電圧  $V_{elec}$  に及ぼす各種パラメータの寄与についての評価結果を以下に示す。

#### (A) $V_{elec}$ の電極面積依存性

図 2.6 は充填圧力(初期圧力)が大気圧(0 MPa-g)条件下での各電流瞬時値における  $V_{elec}$  と電極面積の関係である。 $V_{elec}$  は電極面積の縮小とともに増加し、この傾向は電流瞬時値が大きいほど顕著となる。特に電流瞬時値 9 kA の場合では電極面積は約 80 mm<sup>2</sup> から 20 mm<sup>2</sup> へ縮小すると  $V_{elec}$  が約 60% 増加し、電極面積は  $V_{elec}$  に大きく寄与することがわかる。一方、電流瞬時値が小さい場合では、約 40 mm<sup>2</sup> 以上の電極面積条件で  $V_{elec}$  の変化は小さく、電極面積が一定以上の条件では飽和傾向を示す。

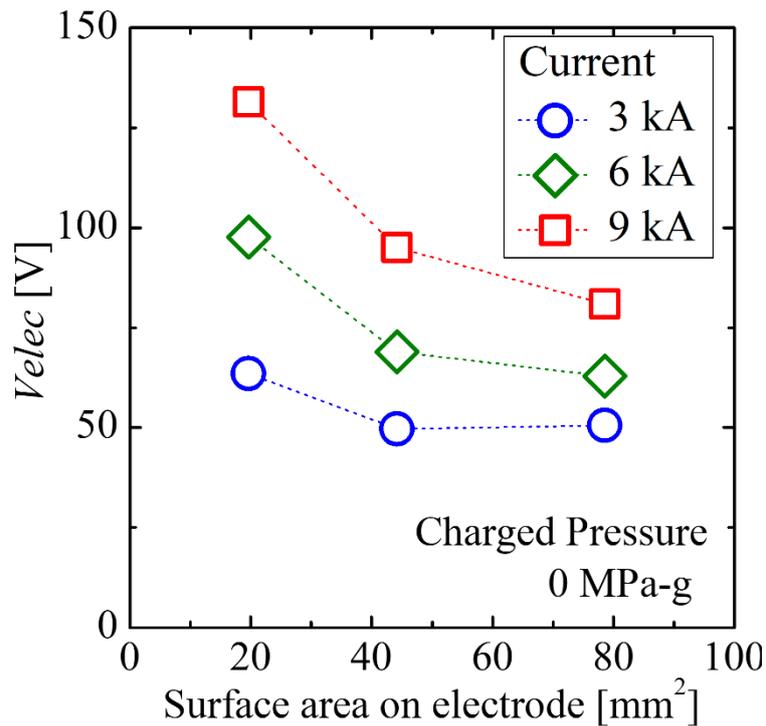


図 2.6  $V_{elec}$  の電極面積依存性

### (B) $V_{elec}$ の雰囲気圧力依存性

図 2.7 は電流瞬時値を 5 kA とした場合の  $V_{elec}$  と充填圧力の関係である。各プロットの雰囲気圧力は充填圧力から +0.2 MPa 以内で、 $V_{elec}$  を推定するために使用した各条件のデータセット間の雰囲気圧力の差は 0.1 MPa 以下である。同図において、電極面積が異なるそれぞれの条件で  $V_{elec}$  に共通する明確な圧力依存性は見られず、 $V_{elec}$  の傾向はそれぞれの条件で異なる。また、この  $V_{elec}$  の圧力依存性は電流条件が異なる場合においても比例あるいは反比例などの明確な傾向は確認できなかった。このことから、図 2.7 に示す  $V_{elec}$  は、その値を見積もる際に生じた推定誤差の範囲内で変動していることが考えられ、今回評価する圧力条件内では  $V_{elec}$  の明確な雰囲気圧力依存性はないと推定する。

### (C) $V_{elec}$ の電流依存性

図 2.8 は充填圧力条件を大気圧(0 MPa-g)とした場合の各種電極面積条件における  $V_{elec}$  と電流瞬時値の関係である。 $V_{elec}$  は全ての電極面積の条件で電流とともにほぼ線形に増加し、その増加率は電極面積が小さいほど高くなることがわかる。なお、 $V_{elec}$  は同図の各プロットを直線近似(図中の破線)すると 0 kA で有限値を持つが、この値は電流条件に依存しない空間電荷層の電極降下電圧の寄与が反映された成分[83]-[85]と考えられる。この成分についての考

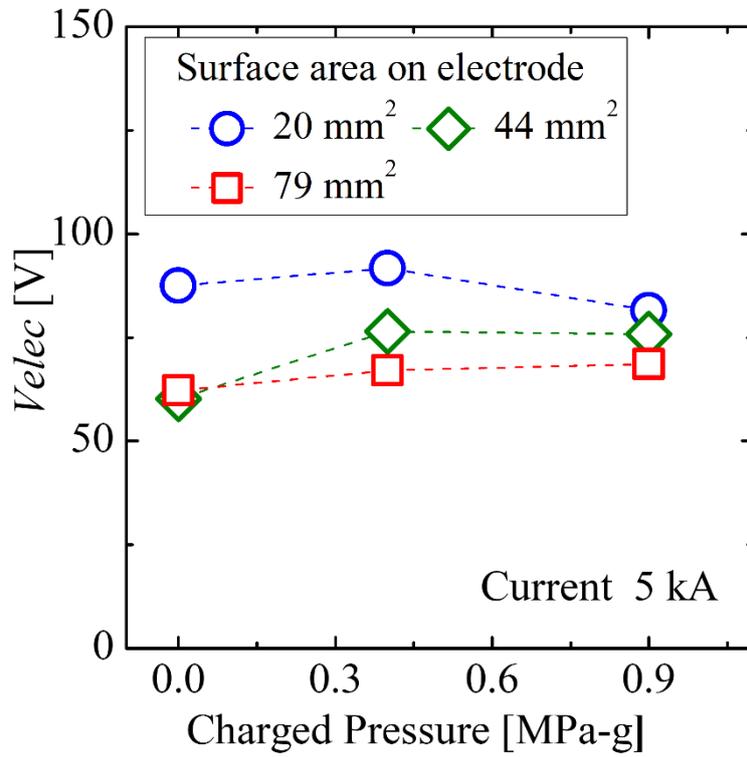


図 2.7  $V_{elec}$  の雰囲気圧力依存性

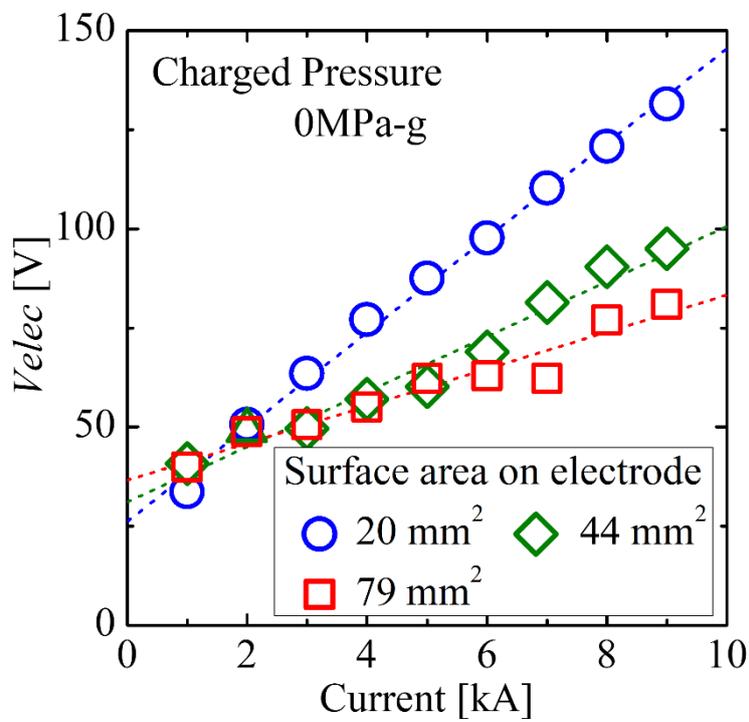


図 2.8  $V_{elec}$  の電流依存性

察は 2.3.4 節にて後述する。

以上より  $V_{elec}$  は電極面積と反比例の関係があることと、電流とともに線形的に増加することから、 $V_{elec}$  と電極面積および電流の関係式として次式を得た。

$$V_{elec} = 8S^{0.4} + 0.13\left(\frac{I}{S^{0.8}}\right) \quad (2.2)$$

ここで  $S$  は電極面積[mm<sup>2</sup>]、 $I$  は電流瞬時値[A]であり、各項の係数と  $S$  の乗数は最小二乗法を用いた近似計算により求めた。なお、上式の物理的意味の考察については 2.3.4 節にて後述する。

### 2.3.3 アーク空間に関するアーク電圧 $V_{col}$ の特性評価

式(2.1)、(2.2)より、アーク電圧から前節にて導出した電極近傍に関するアーク電圧  $V_{elec}$  を差し引くことでアーク空間に関するアーク電圧  $V_{col}$  を見積もる。以下に各種パラメータと  $V_{col}$  の関係性を評価した結果を示す。

#### (A) $V_{col}$ のアーク長依存性

図 2.9 は電流瞬時値を 5 kA、電極面積を 44 mm<sup>2</sup> とする場合の各種充填圧力条件下の  $V_{col}$  とアーク長の関係である。同図において、図 2.4 のアーク電圧のアーク長依存性と同様に  $V_{col}$  も

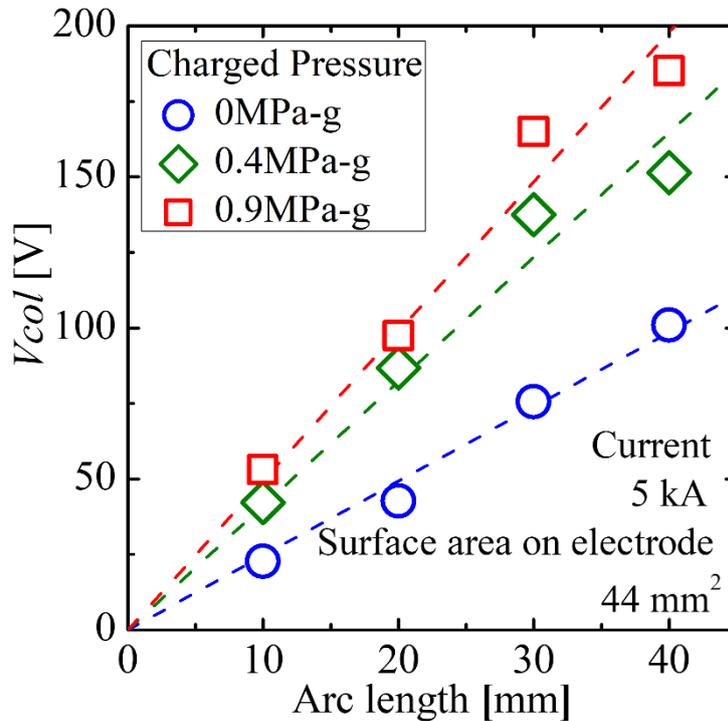


図 2.9  $V_{col}$  のアーク長依存性

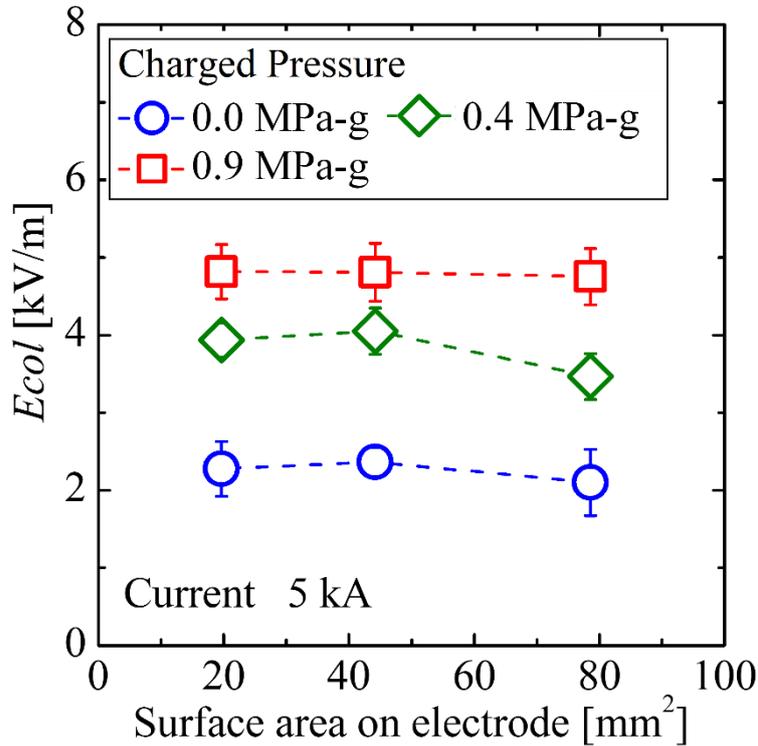


図 2.10  $E_{col}$  の電極面積依存性

またアーク長に対してほぼ線形の関係を示す。この関係から、 $V_{col}$  はアーク空間の平均的なアーク電界  $E_{col}$  とアーク長  $L_{arc}$  を用いて以下の式で近似できる。

$$V_{col} = E_{col} \cdot L_{arc} \quad (2.3)$$

ここで、図 2.9 の  $V_{col}$  の傾きは充填圧力の違いで異なり、この違いは  $E_{col}$  が圧力に依存することを示唆する。以降では、 $E_{col}$  を用いて  $V_{col}$  に与える各種パラメータの影響を評価する。

#### (B) $E_{col}$ の電極面積依存性

図 2.10 は電流瞬時値が 5 kA の場合の各種充填圧力条件での  $E_{col}$  と電極面積の関係である。電極面積の違いによる  $E_{col}$  の差は最大で 0.5 V/mm 程度で明確な傾向は確認できず、本評価の条件内では電極面積依存性は小さいと考えられる。なお、電流瞬時値が異なる場合でもこの結果は同様であり、明確な電極面積依存性は確認できなかった。

#### (C) $E_{col}$ の雰囲気圧力依存性

図 2.11 は電流 1 kA 以上において初期圧力が異なる条件下の  $E_{col}$  と雰囲気圧力の関係を示している。ここで、図中のプロットは圧力センサで測定した圧力瞬時値を使用しており電流ピーク後のデータも含めている。同図において、 $E_{col}$  は大気圧からの圧力上昇値の約 0.3 乗に比例し(図中の破線)、大気圧近傍では圧力上昇による  $E_{col}$  の増加は大きくなる。一方、0.2 MPa-g よりも高圧力領域では圧力上昇の寄与は小さくなる。

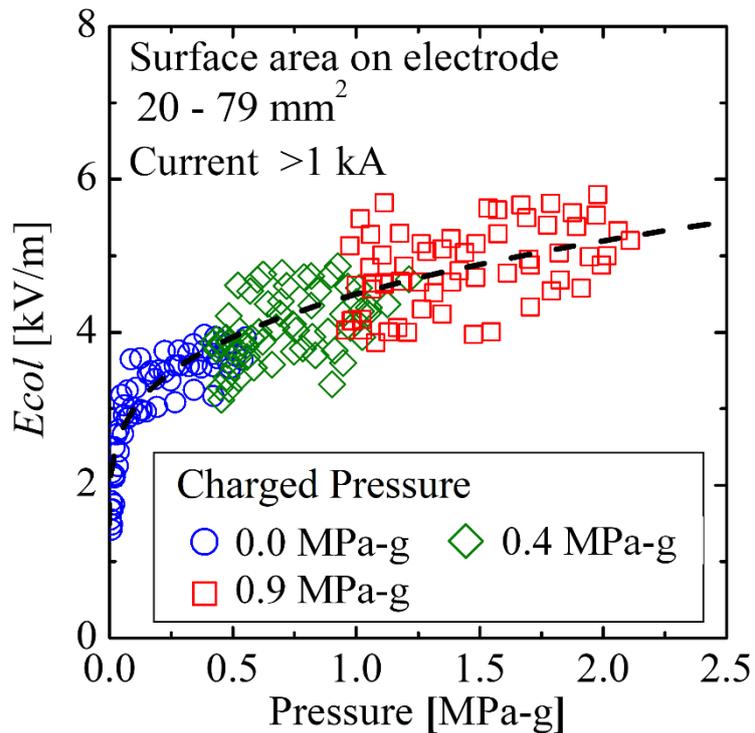


図 2.11  $E_{col}$  の雰囲気圧力依存性

#### (D) $E_{col}$ の電流依存性

図 2.12 は異なる充填圧力条件における  $E_{col}$  と電流瞬時値の関係である。充填圧力が 0.4 MPa-g 以上の条件では明確な電流依存性は確認できないが、充填圧力が 0 MPa-g の場合で電流とともに  $E_{col}$  は増加する。ここで、図 2.12 と同じデータセットに対して横軸を雰囲気圧力に変更して再プロットしたグラフを図 2.13 に示す。同図において、充填圧力が 0 MPa-g の場合の  $E_{col}$  は図 2.11 の圧力依存性とほぼ同じ傾向となることがわかる。従って、充填圧力が高い条件では電流依存性は確認できないこと、大気圧近傍では  $E_{col}$  は図 2.11 の圧力依存性と同様の変化をすることから  $E_{col}$  の電流依存性は小さいと考えられる。

以上の結果から、上述のパラメータと  $E_{col}$  の関係式を以下の式で構築する。

$$E_{col} = 3\Delta P^{0.3} + 1.5 \quad (2.4)$$

ここで、 $\Delta P$  は大気圧からの圧力上昇値 [MPa-g] であり、各項の係数や乗数は最小二乗法を用いた近似計算により得た値を用いた。なお、上式の物理的意味の考察については次節にて後述する。

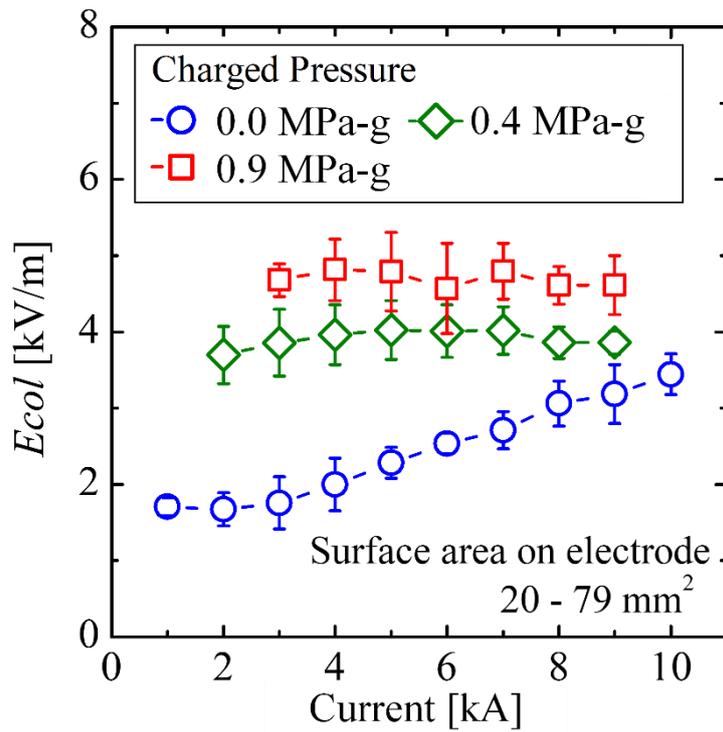


図 2.12  $E_{col}$  の電流依存性

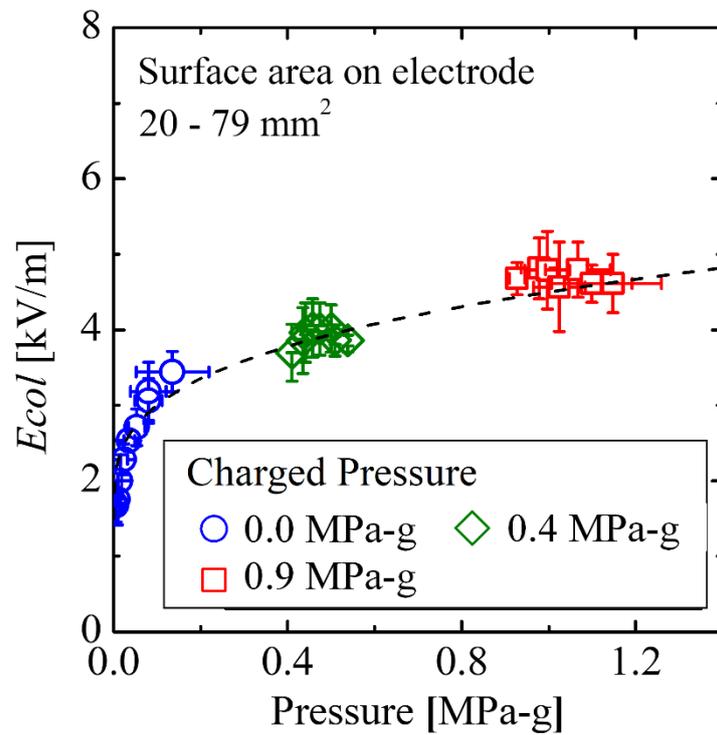


図 2.13  $E_{col}$  の雰囲気圧力依存性(図 2.12 のデータから作成)

## 2.3.4 各電圧特性の物理的意味についての考察

### 2.3.4.1 電極近傍に関するアーク電圧 $V_{elec}$ の物理的意味について

式(2.2)において  $V_{elec}$  は電流に依存する項(A)と電流に依存しない項(B)で構成される。本節では以下で  $V_{elec}$  の各項におけるアーク電圧上昇要因を考察する。

#### (A) 電流に起因する項

この項は電極界面の近傍空間のインピーダンスに起因した電圧降下による電圧と考えられる。電極近傍の空間温度は電極材料の融点で制約を受けることに加え、電極からの溶発蒸気の影響で、電極近傍ではアーク空間の温度よりも低温の層が形成される[69][70]。電極界面からアーク空間に至るまでの空間には、少なからず低温の高抵抗率の層が存在し、この層で電圧降下が生じていると考えられる。

Zhu らの研究[99]では、大電流条件下の電極近傍で生じるアーク電流路の収縮層の電圧降下は電流密度に依存することを明らかにしている。Zhu らは、電極界面の電流密度が約 50 A/mm<sup>2</sup> 以上の条件で、電極界面のアーク電流路の断面積がアーク空間よりも縮小することを報告している。本検討では評価に用いた多くの条件がこの電流密度以上に該当しており、本検討においてもこの収縮層の影響を受けて、電極近傍空間のインピーダンスが上昇したものと考えられる。図2.14は本検討の実験系において電流ピークが2 kA以下となる回路条件で、前節までと同様の方法で推定した  $V_{elec}$  である。同図より、電極面積 19.6 mm<sup>2</sup> の条件において電流値が 1.2 - 1.4 kA 前後で  $V_{elec}$  の特性が変化していることを確認できる。この電圧特性の変化が生じる電極界面の電流密度は約 60 - 70 A/mm<sup>2</sup> であり、Zhu らが示す電流密度条件と概ね一致する。

従って、アーク空間から電極界面に至るまでの空間でアークの電流路は漸次収縮し、インピーダンスが空間的に変化していると考えられる。このため、 $V_{elec}$  は電極面積の-1乗よりも少し大きな値(-0.8乗)で依存するものと考えられる。

#### (B) 電流に起因しない項

この項は電極界面のシースにより形成する電位勾配や電極の仕事関数、電極界面近傍のガスのイオン化ポテンシャル等に起因する空間電荷層で生じる降下電圧と考えられる。図 2.12を参照すると、電流 1 kA 以下では電極面積が異なる場合でもほぼ同等の電圧値を示し、 $V_{elec}$  は 30 - 40 V に位置する。先行研究事例[83]-[85]などでは空間電荷層の降下電圧は 20 V 以下と推定されており、先行研究事例で示された値よりも同図の  $V_{elec}$  は高い値を示している。一方、電極近傍では、上記(A)にて上述したアーク電流路の収縮層においてシース厚よりも長い範囲で電位勾配が存在する[83][99]。本検討では  $V_{elec}$  は数 10 mm の比較的長い電極間隔の実験

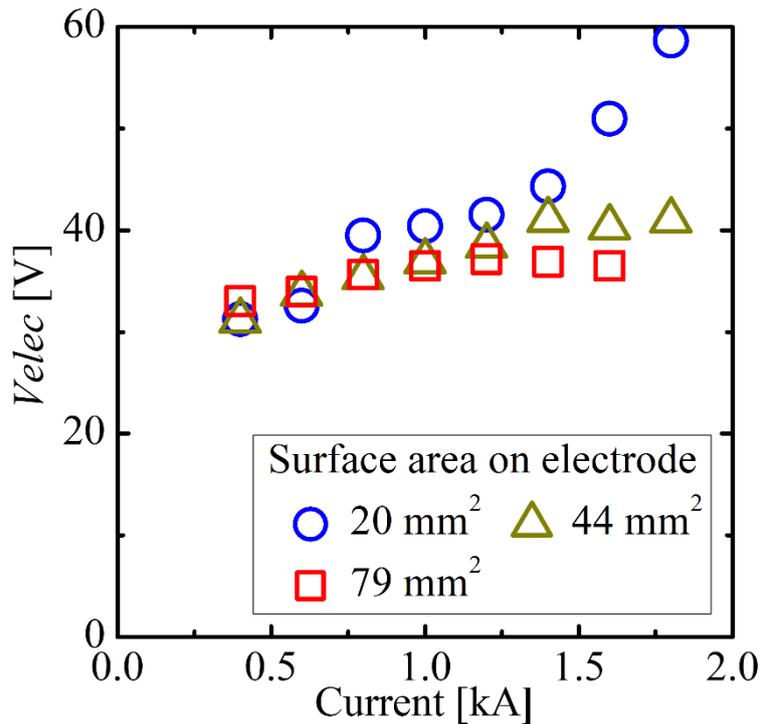


図 2.14 2 kA 以下の電流条件における  $V_{elec}$  の電流依存性

結果から推定しているため、電極近傍で生じる特異な電位勾配の寄与は考慮できていない。従って、この寄与が含まれた結果として、既知の電極降下電圧よりも  $V_{elec}$  は高くなると考察する。

他方、上記(A)で考察したように、電極近傍のアーク電圧の特性は電極面の電流密度で特性が変化するが、式(2.2)の電流に依存しない項には 1 kA 以上の電流条件における  $V_{elec}$  と電極面積の関係を近似的に推定する際の誤差も含まれる。

従って、本項については、電極降下電圧や電位勾配などの電圧成分に、近似の際の誤差が重畳した結果として推定された項であると考えられ、式(2.2)の  $V_{elec}$  の関係式は電流 1 kA 以上の場合のみで有効となる。

以上の考察により、式(2.2)の電極近傍に関するアーク電圧の関係式は、電極近傍のアークの断面積変化や、特異な電位勾配から生じる発生電圧を近似的に表現した実験式であると言える。本検討において使用した条件内においては本関係式によりアーク電圧特性は表現できるが、電流 1 kA 以下や数 10 kA 以上の条件においてはアーク電圧を関係式で表現する場合には、更なる調査が必要と考えられる。

### 2.3.4.2 アーク空間に関するアーク電圧 $V_{col}$ の物理的意味について

アーク空間で発生するアーク電圧はアーク長  $L_{arc}$ 、アーク電流路の断面積  $S_{arc}$ 、抵抗率  $\rho$ 、電流値  $I$  を用いて表現すると、以下の式でも表すことができる。

$$V_{col} = \left( \frac{\rho L_{arc}}{S_{arc}} \right) I \quad (2.5)$$

本検討では  $V_{col}$  に明確な電流依存性は確認できなかった。この理由として、上式を参考にすると、電流の増加時に  $V_{col}$  がほぼ一定になるように電流路の断面積は変化していると考えられる。ここで、アーク発光形態の電流および圧力依存性を図 2.15 に示す。数千～数万度のアークの発光輝度は温度の上昇とともに増加するため[105]、発光輝度の拡がりやアーク内の熱的半径(電流路の断面積)の拡大を示唆している。図 2.15 (a)において、アークの発光領域は電流増加とともに拡大し、電流の増加が電流路の断面積を拡大させることを示唆している。これは、電流増加に伴う抵抗加熱でアーク空間の温度が高まり、高温の導電率の高い領域が拡大するためと考えられる。一方、図 2.15(b)においては、充填圧力が 0 MPa-g の条件と比べ

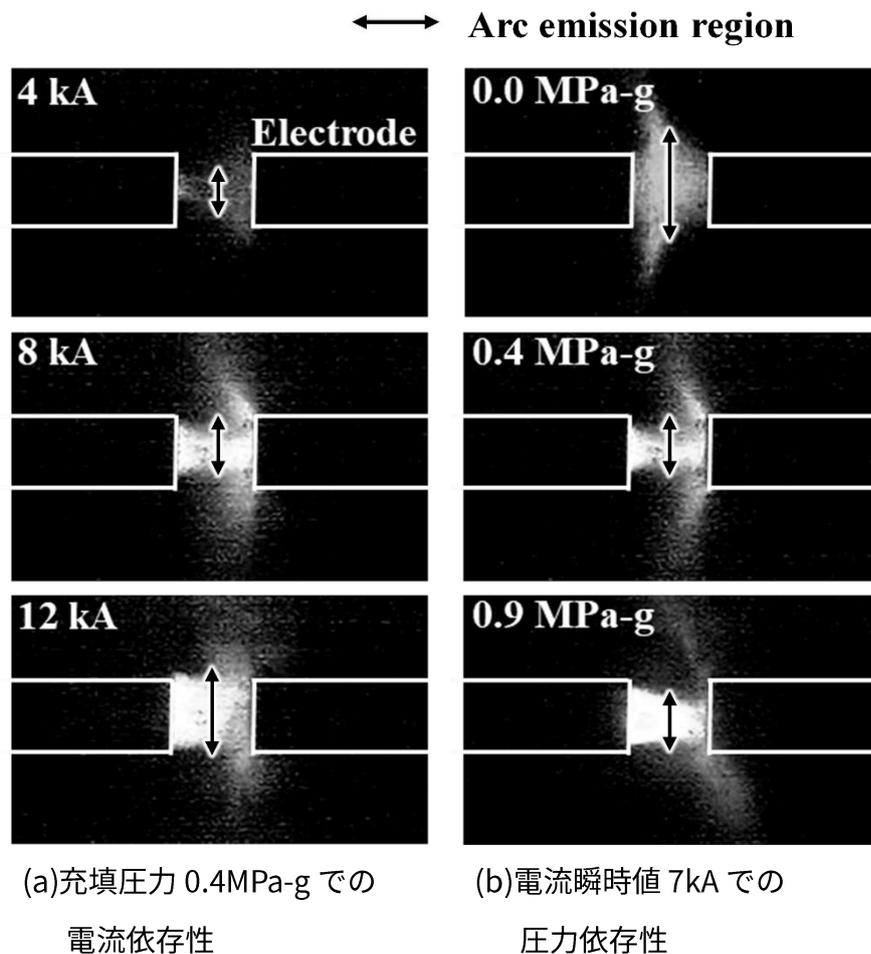


図 2.15 アーク発光形態の電流・圧力依存性

て 0.4, 0.9 MPa-g の条件で発光領域は狭く、圧力上昇は電流路の断面積を縮小させることを示唆している。これは、アーク周囲の圧力が高まることで、アーク内部と周囲の圧力勾配が低下すること、または、温度上昇に必要なエネルギーは増加しアーク周囲の温度が上昇しにくくなることから、高温の導電率が高い領域が狭まるためと考えられる。従って、 $V_{col}$  の特性は電流路の断面積に影響を受け、電流増加時にはその断面積も拡大するため電流依存性は小さくなり、圧力上昇時には電流路が収縮するため収縮の程度に応じた  $V_{col}$  の上昇が生じるものと考察する。

以上の考察により、式(2.3)および式(2.4)のアーク空間に関するアーク電圧の関係式は、圧力変化に伴うアーク電流路の断面積の相対的变化を近似的に示した実験式となる。このため、本検討で評価した条件内における基礎的な気中アークに対しては本関係式でアーク電圧の特性を表現できるが、アーク電流路の断面積に影響を及ぼす環境下、例えば、アーク周囲に消弧材料の構造物が配置される場合や、消弧材料や消弧グリッドからの溶発蒸気が混入する場合などでは、この特性は変化すると考えられる。

### 2.3.5 推定したアーク電圧の関係式の妥当性評価

式(2.1)、式(2.2)、式(2.4)より消弧グリッドや消弧材料を配置しない場合の各種パラメータとアーク電圧の関係式を以下の式で構築する。

$$V_{arc} = 8S^{0.4} + 0.13 \left( \frac{I}{S^{0.8}} \right) + (3\Delta P^{0.3} + 1.5)L_{arc} \quad (2.6)$$

図 2.16 は、本評価におけるアーク電圧の実測値と上式から得られた推定値の経時変化を比較した例である。なお、アーク電圧推定値は、電極面積  $S$  は 19.6 mm<sup>2</sup>、アーク長  $L_{arc}$  は 20 mm とし、電流瞬時値 1 kA 以上の時間帯において測定した電流、雰囲気圧力の瞬時値を式(2.6)に代入して見積もっている。同図において、アーク電圧推定値は実験値とほぼ一致し、実際のアーク電圧を再現していることがわかる。今回実施した全ての試験条件(36 条件)について実験値と推定値の誤差を評価した結果を図 2.17 に示す。ここで図中の誤差率は推定値と実験値との比を電流瞬時値 1 kA 以上となる時間内で平均した値である。試験は 48 回実施しており、評価には同条件で 2 回以上実施した例も含めた。同図において、推定値の平均的な誤差は約 6%で、全試験の 85%以上のデータを 10%以下の誤差であった。また、この誤差の程度が今回評価に用いた設計およびアークパラメータの種類の違いにより偏りが生じないことも確認している。これらの結果から式(2.6)のアーク電圧の関係式により実際のアーク電圧を推定することができると考えられる。

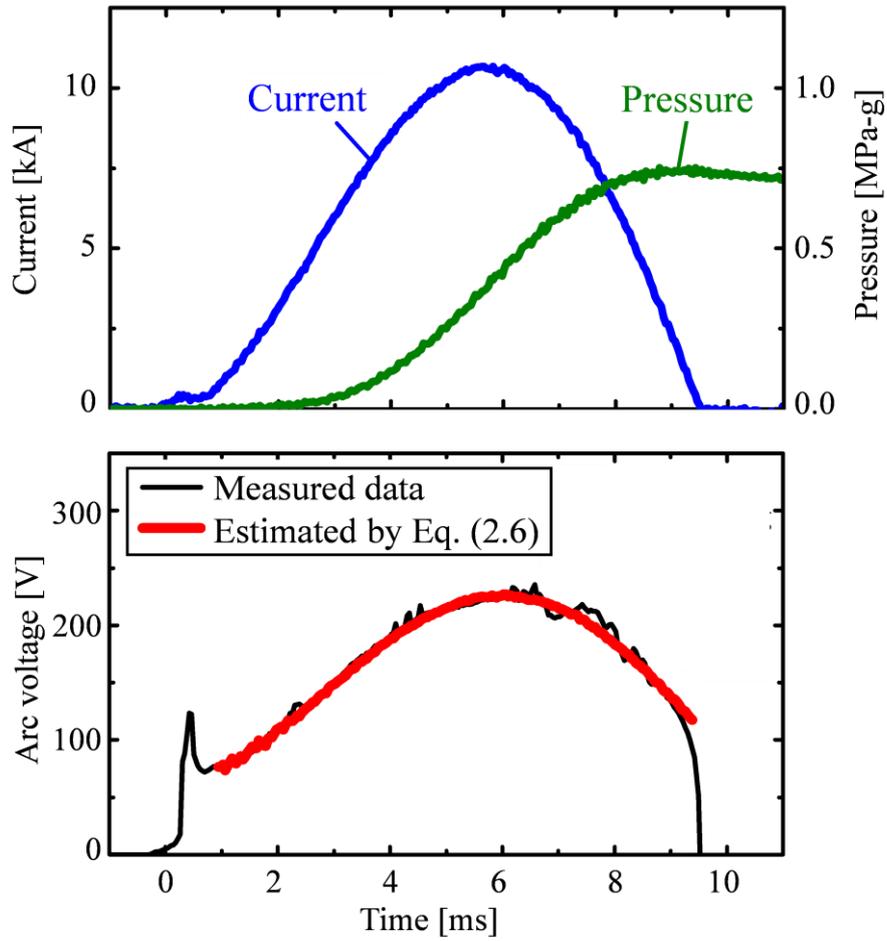


図 2.16 アーク電圧推定値と実験値の比較

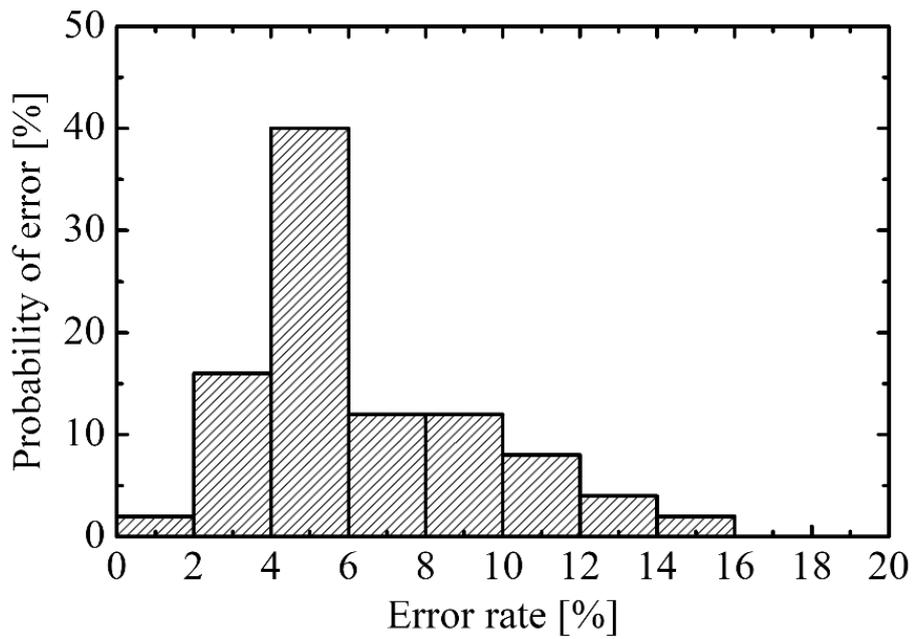


図 2.17 アーク電圧推定値の誤差率

## 2.4 アーク電圧の関係式の実器適用検討

図 2.18 に示す実遮断器の消弧室を用いて式(2.6)のアーク電圧の関係式の実遮断器への適用に対する妥当性について検討する。試験は直径 5 mm の丸型接点の間にヒューズを配置し、ヒューズを通電し溶断させることでアークを発生させた。接点以外の電極面はガラス繊維製の絶縁テープで保護し、接点間だけにアークが発生するようにした。排気口はアークの極端な伸長やガスの噴き出しを防止するために蓋を配置し密閉度を高めた状態とした。消弧室内圧は同図に示す可動接点の右上箇所壁に圧力センサを設置して測定した。遮断時のアークは同図に示す範囲内に存在するものと想定し、アーク長は 20–30 mm で仮定した。

上記消弧室を用いて試験したときのアーク電圧・電流・圧力波形と式(2.6)によるアーク電圧の推定範囲を図 2.19 に示す。ここで、式(2.6)への代入値として電極面積  $S$  は  $19.6 \text{ mm}^2$  (直径 5 mm)、アーク長  $L$  は 20–30 mm とし、電流  $I$  と圧力上昇値  $\Delta P$  は電流 1 kA 以上となる時間帯で測定した瞬時値を用いた。同図において、ほとんどの時間でアーク電圧は推定範囲内に位置することを確認できる。アーク長や圧力などの厳密な調整は難しいパラメータはあるものの、この結果から一定の仮定の下で構築したアーク電圧の関係式が実遮断器のアーク電圧を概ね再現できると考えられる。

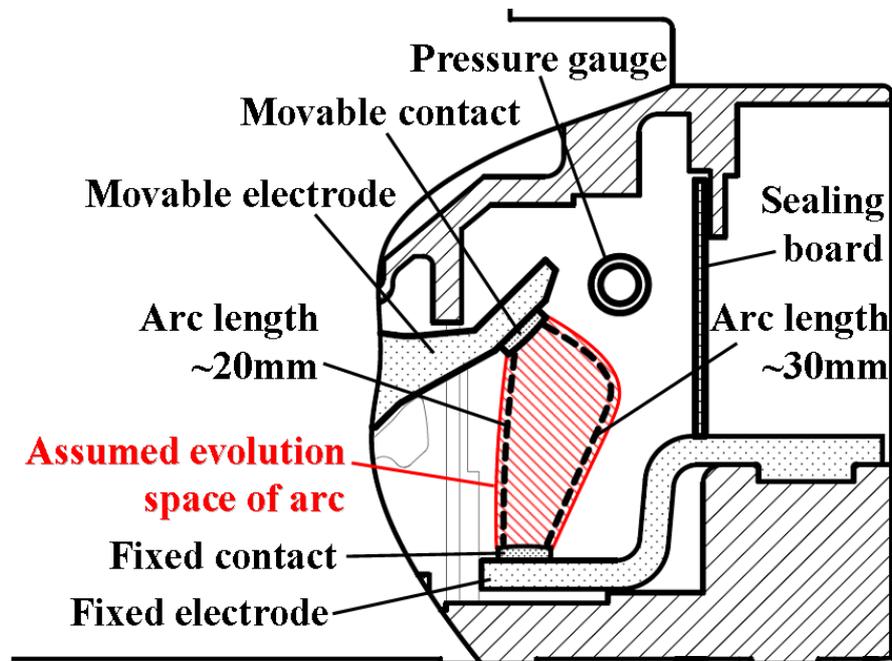


図 2.18 実器適用検討に使用する消弧室構造とアーク発生領域の想定範囲

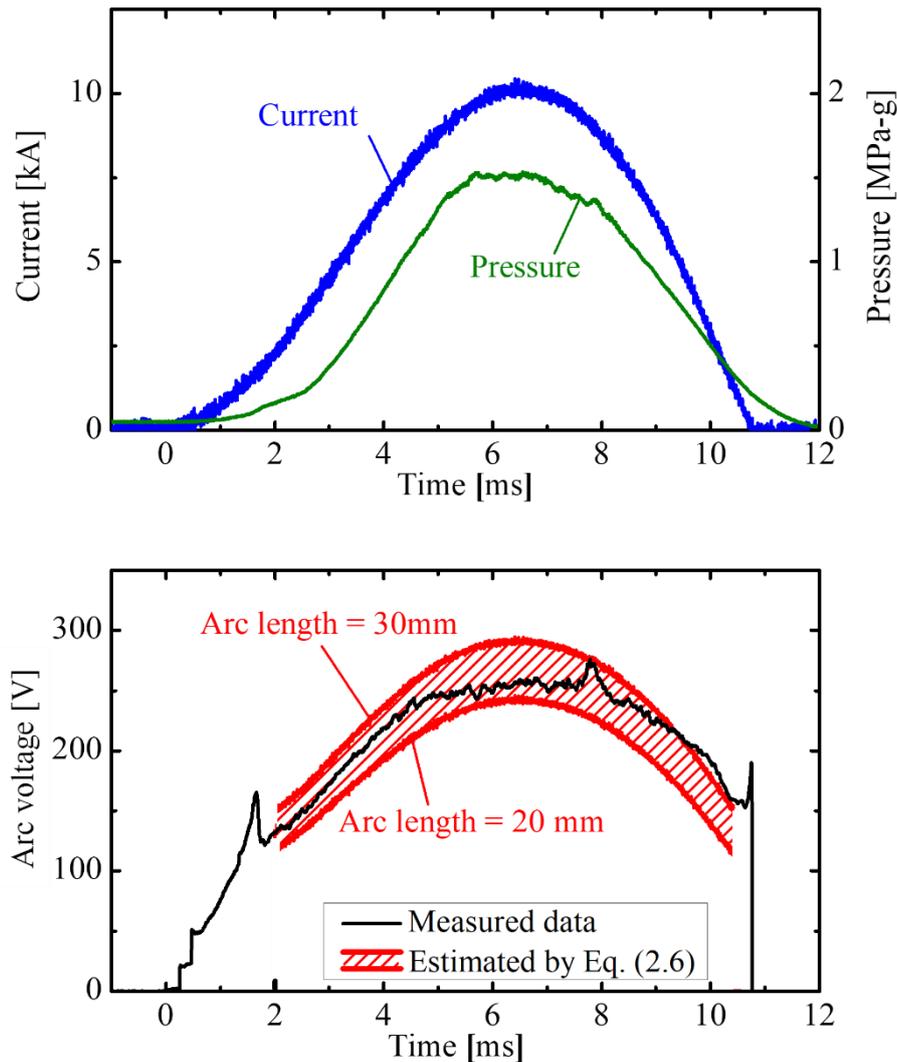


図 2.19 実際の消弧室を用いたアーク電圧実験値と推定値との比較

## 2.5 まとめ

本章では、消弧室構成に係る大電流気中アークの基本となる電圧特性を明らかにするため、アーク周囲の雰囲気圧力を制御可能な消弧室空間内において、アーク電流、アーク長、電極面積、雰囲気圧力がアーク電圧に及ぼす影響を実験的に検討した。本検討では、アーク電圧の性質が大きく異なる2種の特性領域、すなわち、電極近傍に関する電圧特性  $V_{elec}$  と、アーク空間に関する電圧特性  $V_{col}$  に別けて各パラメータの依存性を調査した。本検討の結果を以下にまとめる。

- 電極近傍に関する電圧特性  $V_{elec}$  は電流に線形で増加し、電極面積の 0.8 乗で反比例することがわかった。また、アーク空間に関する電圧特性  $V_{col}$  はアーク長に対して線形で増加し、大気圧からの圧力上昇値に対して 0.3 乗で増加することがわかった。

- アーク空間で生じるアーク電界上昇はアーク電流路の断面積の縮小によって生じ、その断面積は電流または圧力条件で変化することが明らかになった。また、電流増加で電流路の断面積が拡大するため、アーク電界に及ぼす電流の影響は小さくなることがわかった。
- 上記特性より以下のアーク電圧の関係式を構築し、本関係式によるアーク電圧の推定値と実際の消弧室における実測値を比較した。その結果、推定値と実験値が概ね一致することを確認し、同関係式の妥当性を実証した。

$$V_{arc} = 8S^{0.4} + 0.13\left(\frac{I}{S^{0.8}}\right) + (3\Delta P^{0.3} + 1.5)L \quad (2.7)$$

## 第3章 大電流気中アークの消弧グリッド配置時の電圧特性

### 3.1 はじめに

配線用遮断器の高性能化や外形寸法の小形化を実現するためには、消弧室の限られた空間内でアーク電圧を速やかに高めて電流を限流させることが重要である。配線用遮断器では、アーク電圧を高めるための方法の一つとして、複数の鉄製の板で構成された消弧グリッドを用いてアークを複数に分割する方法がよく採用される。ただし、図 1.8 で示したように消弧グリッドは消弧室の多くのスペースを占有するため、高性能化と小形化を両立するためには、消弧グリッドがアーク電圧に与える影響を正確に理解し、適切な消弧室設計を行うことが重要となる。

前章では、消弧室の設計指針を得るための検討の第一段階として消弧グリッドを配置しない条件のアーク電圧と(1)電流値、(2)アーク長、(3)雰囲気圧力、(4)電極面積の関係を調査し、各パラメータにより構成される基礎的なアーク電圧の関係式を構築した。本章では、検討の第二段階目として、消弧室内に搭載される消弧グリッド(図 1.7 参照)がアーク電圧上昇に与える影響について検討する。

消弧グリッドに関する先行研究では、消弧グリッドでアークを分割することで電極降下電圧に相当する電圧上昇が生じることが報告されており[82]、この電圧上昇を活用して遮断器を高性能化するための研究が多くなされている[55][56][80][81][106][107]。ただし、これらの先行研究の多くが電極降下電圧による電圧上昇の効果のみが議論の対象としており、分割時に生じる金属蒸気がアーク内部に混入した際に生じるアーク電圧への影響についてはほとんど議論されていない。また、アークを消弧グリッドで分割するためには、電磁力で消弧グリッド内にアークを引き込み分割することが必要となるが、分割過程中的アークに対して電磁力がアーク電圧上昇に与える影響を定量的に評価している例はない。さらに、前章にて雰囲気圧力がアーク電圧上昇に寄与することを示したが、消弧グリッドを配置した条件での雰囲気圧力がアーク電圧に及ぼす影響を定量的に調査した例も見当たらない。

そこで本章では、数 kA 以上の大電流気中アークにおいて(i)消弧グリッドによるアーク分割制御がアーク電圧に及ぼす定量的効果と(ii)アーク分割制御時のアーク電圧上昇に電磁力が及ぼす影響について調査する。具体的には検討(i)では、実遮断器サイズの半密閉容器内において消弧グリッドでアークを強制的に分割した条件のアーク電圧と(1)電流値、(2)アーク長、(3)雰囲気圧力、(4)消弧板枚数の関係を評価する。そして、その評価結果と前章で示した基

礎的なアーク電圧特性とを対比し、消弧グリッドがアーク電圧に与える影響を明らかにする。検討(ii)では、実際に使用される消弧グリッドの形状を模擬した消弧板を用いて、アークに作用する電磁力と消弧グリッドによるアーク電圧上昇の関係を調べる。そして、その調査結果から消弧グリッドを用いたアーク電圧上昇に必要な電磁力条件を明確にする。

## 3.2 実験モデルおよび計算モデル

### 3.2.1 実験モデル

実験モデルを図 3.1 に示す。試験容器は 130 mm × 80 mm × 38 mm の大きさで、材質は実遮断器で使用される不飽和ポリエステル樹脂 (BMC) で構成した。容器壁の一つの側面(130 mm × 80 mm の面)は透明のアクリル樹脂 (PMMA)製の観測窓として構成しており、その観測窓の対向面には PCB PIEZOTRONICS 社製の圧電型圧力センサ(型名：113B24)を設置した。また、他方の容器側面には密閉可能な通気口(直径 5 mm)を 4箇所設置することで容器内の圧力上昇量を制御した。容器内には外部の電源回路に接続した直径 7.5 mm の丸棒状の鉄製電極対を配置し、電極間に設置したヒューズ線を通電し溶断させることで電極間にアークを発生させた。アーク電圧はこの電極間電圧を用いて評価する。電極間には図 3.2 (a)および図 3.2 (b)に示す 2 種類の消弧グリッドを下記の用途に応じて選択して配置した。

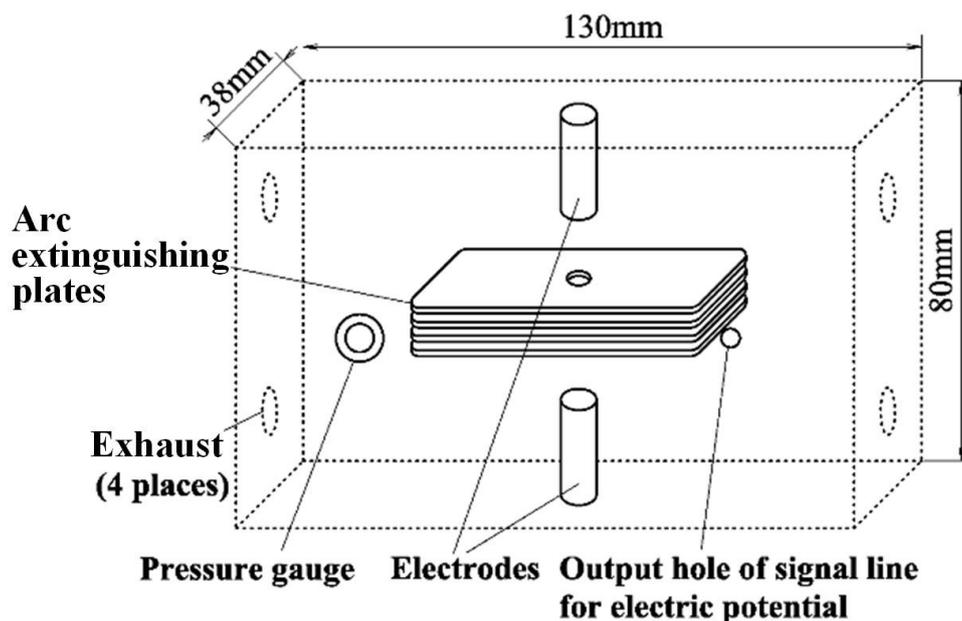


図 3.1 実験モデル

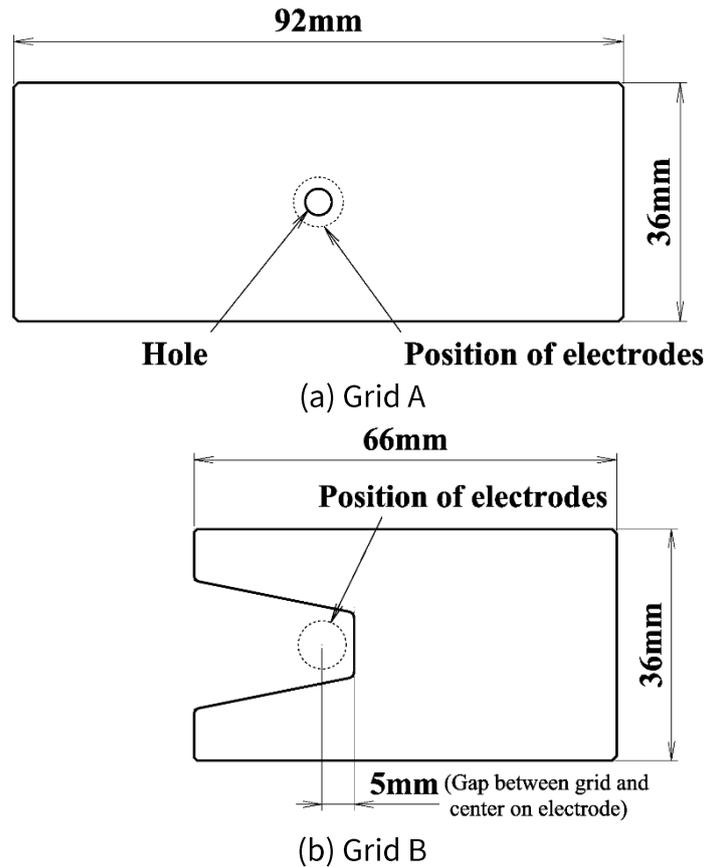


図 3.2 消弧グリッド

図 3.2(a)の長方形で中央にヒューズ設置用の穴を設けた鉄製の消弧グリッド (以降, Grid A) は, アーク分割時のアーク電圧上昇効果を調査するため使用し, 穴以外の全ての面でアークは強制的に分割されるようにした。消弧グリッドの配置枚数は 4 - 10 枚, 板厚は 1 - 2 mm, 穴径は直径 5 mm としている。なお, この穴径の設定理由については後節で述べる。

図 3.2(b)の U 字型の消弧グリッド (以降, Grid B)は実遮断器の消弧室に搭載される消弧グリッドを模擬しており, Grid B を用いることでアークを分割しアーク電圧を高めるために必要な電磁力条件を検討する。図のような U 字型の形状にすることで, アーク周囲に形成される磁気構造が変化し(図 1.9 参照), 自発的にアークが消弧グリッドへ吸引される電磁力が生じるようになる[30][107]。

試験回路は前章と同様の図 2.1 の回路を使用し, 試験回路には 300 kVA の変圧器の一次側回路に 3.3 kV/60 Hz の電源回路, 通電を開始するための投入スイッチ, 回路を断路(通電の中断)するためのバックアップ遮断器(真空遮断器を使用), 電流調整用の抵抗器と可変リアクトルを設けている。変圧器の二次側回路に上記実験モデルを配置し, 短絡状態とすることで短絡電流が発生するようにしている。通電条件としては, 図 2.2 に示したように, 一次側に設

けた投入スイッチとバックアップ遮断器の動作タイミングの調整により、電源電圧が最も高くなる時間、すなわち、投入位相が 0 度となるタイミングで通電を開始し、半サイクル後に通電を終了するように設定した。また、電流値は可変リアクトルを用いて試験時(限流時)の電流最大値が 8 kA 程度になるように調整した。

また、各消弧板には電位測定プローブを取り付け、電極-消弧グリッド間と消弧グリッド内の電圧特性を分離してそれぞれ評価する。図 3.3 (a)および図 3.3 (b)はそれぞれ Grid A 配置時のアーク観測画像と以降で用いるアーク長の定義を示している。Grid A を用いる場合にはアークは観測画像から直線状に発生することを確認しているため、電極と消弧グリッド間のアーク長 $L_{eg}$ は図 3.3 (b)を基に下式で定義し、消弧グリッド間の各空間のアーク長 $L_g$ はグリッド間隔で定義する。

$$L_{eg} = L_{eg,1} + L_{eg,2} \quad (3.1)$$

ここで、 $L_{eg,1}$ と $L_{eg,2}$ はそれぞれ陽極側および陰極側の電極と消弧グリッド間のアーク長である。また、各アーク長は電極間隔(30–40 mm)やグリッド間隔を変化させることで調整した。

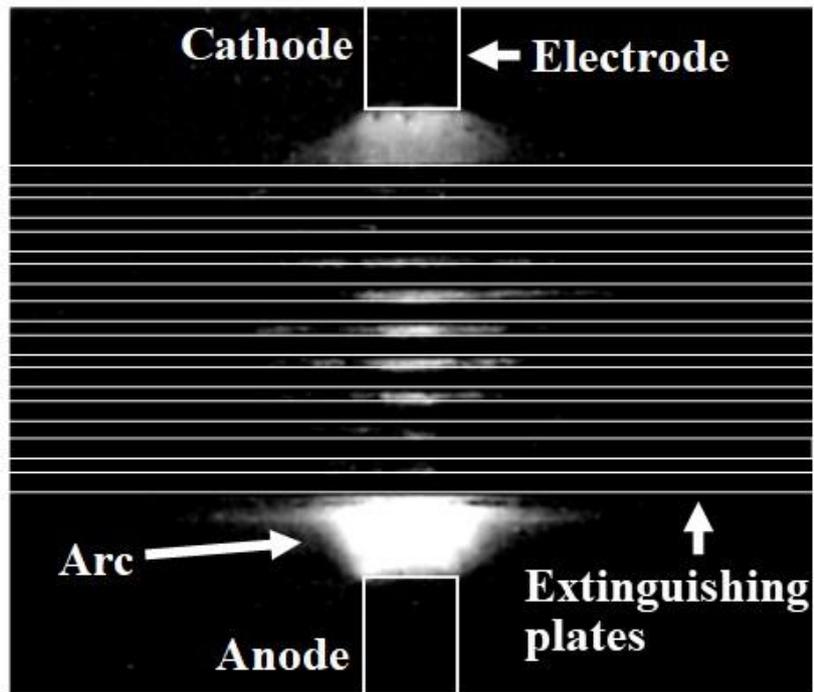
### 3.2.2 試験波形例

電極間隔 30 mm の電極間に Grid A を 2 mm 間隔で 6 枚配置した場合のアーク電圧 (実線)、各消弧グリッドの対地間電圧 (破線)、電流、圧力波形を図 3.4 に示す。陽極側と陰極側の電極-消弧グリッド間の空間で生じる電圧の和を $V_{eg}$ 、消弧グリッドで挟む空間で生じる各電圧を $V_g$ と定義し、これらの電圧成分からそれぞれの空間の電圧特性を検討する。

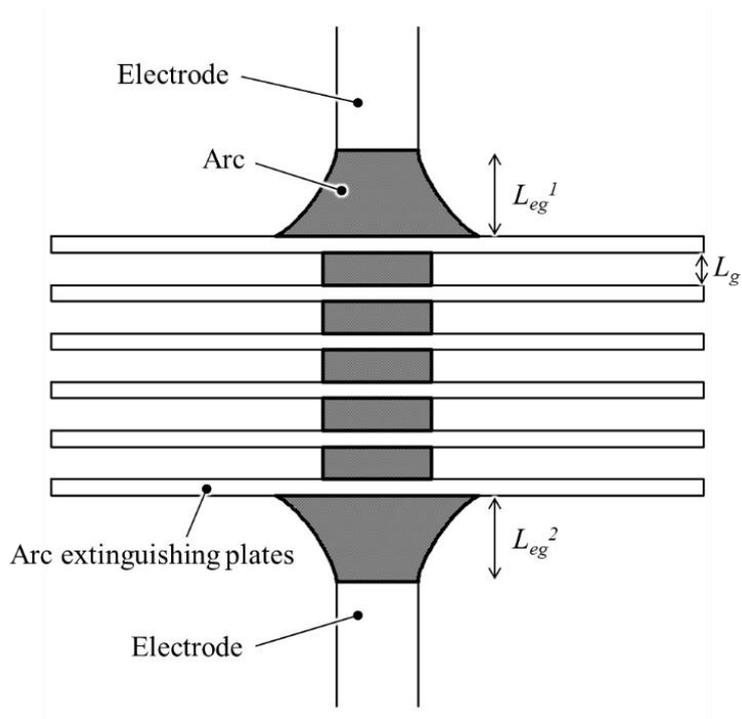
図 3.4 の波形データを用いて異なる時間の $V_g$ をプロットしたグラフを図 3.5 に示す。図中の横軸の記号は消弧グリッド間のアーク分割位置を示し、例えば G2、G3 はそれぞれ陽極側から数えて 2 枚目と 3 枚目、3 枚目と 4 枚目の消弧グリッド間を意味する。各位置の $V_g$ は時間により異なるが、同時間においては $V_g$ のばらつき(標準偏差)が 5%以下と小さく、アーク分割位置の依存性は小さい。このため、Grid A を配置する場合では各アーク分割位置のアーク電圧上昇機構はほぼ同一と考え、Grid A を用いる場合の $V_g$ は全ての消弧グリッド間電圧の平均値で評価する。

### 3.2.3 消弧グリッドが有効利用できる穴径の選定

グリッド間隔 2 mm の場合の Grid A に設ける穴径と $V_g$ の関係を図 3.6 に示す。同図において、穴径が 10 mm よりも大きい場合では穴径の拡大とともに $V_g$ は小さくなるが、10 mm 以下



(a) アーク観測画像



(b) アーク長の定義

図 3.3 Grid A 配置時の(a)アーク観測画像と(b)アーク長の定義

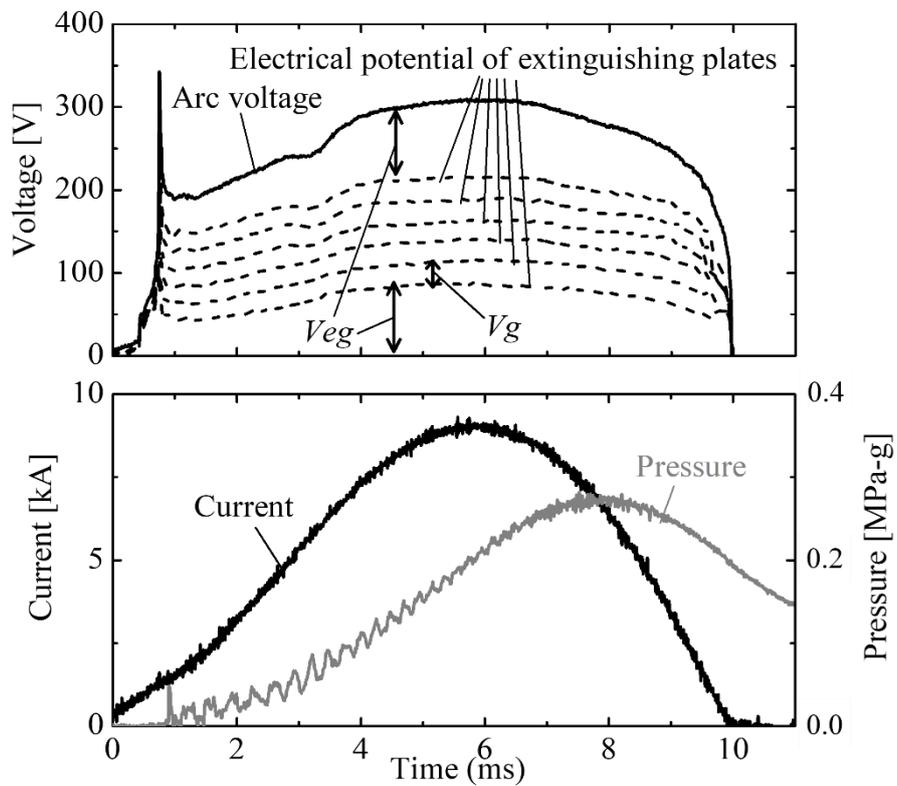


図 3.4 アーク電圧・電流・圧力の測定波形例

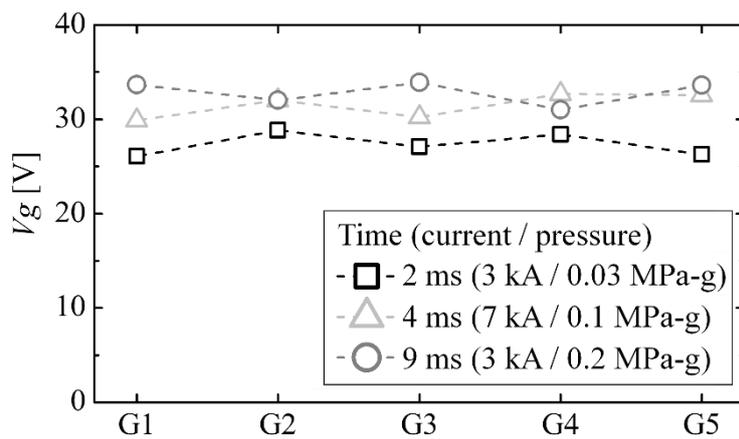


図 3.5 消弧グリッド間電圧  $V_g$  の位置依存性

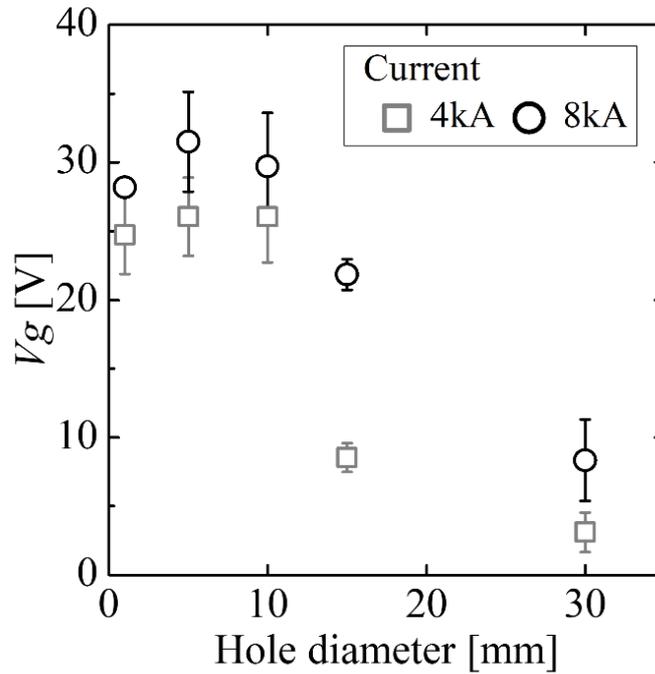


図 3.6  $V_g$  と Grid A に設ける穴径の関係

の場合では穴径の違いに対する  $V_g$  の変化は小さく飽和傾向を示す。この傾向は電流条件が異なる場合でもほぼ同様である。なお、穴径 10 mm 以下の条件で、極端に穴径が小さい場合 (穴径 1 mm) に若干の電圧低下の傾向が見られるが、これは穴径縮小に伴って穴近傍のアーク電流路の断面積が拡大しアーク空間の電気抵抗が低下するためと考えられる。ただし、この電圧低下の程度は 5%以下で  $V_g$  のばらつきと同程度であることから、Grid A に設ける穴径が 10 mm 以下の条件では  $V_g$  はほぼ同等とし、本検討では Grid A の穴径を消弧グリッドでアークを有効に分割できると考えられる 5 mm で設定した。

### 3.2.4 電磁力の計算モデル

図 3.7 はアークに作用する電磁力と消弧グリッドによる電圧上昇効果の関係を調査するための計算モデルの説明図である。本調査では市販の三次元電磁界解析ソフト EMSolution を用いて電磁力を計算する。計算モデルでは電極間隔 40 mm の電極間中央に板厚 1 mm または 2 mm の Grid B (図 2(b)) を 6 枚、所定の間隔  $L_g$  で連続して均等に配置した。アークは電極間で直線状に発生するケースを想定している。なお、アークの大きさは、光学観測の結果からアーク発光輝度の高い領域が電極サイズとほぼ同程度であったため、電極と同じ直径 7.5 mm と仮定し計算した。アークおよび電極の中心軸と消弧グリッドのアーク分割面までの間隔は

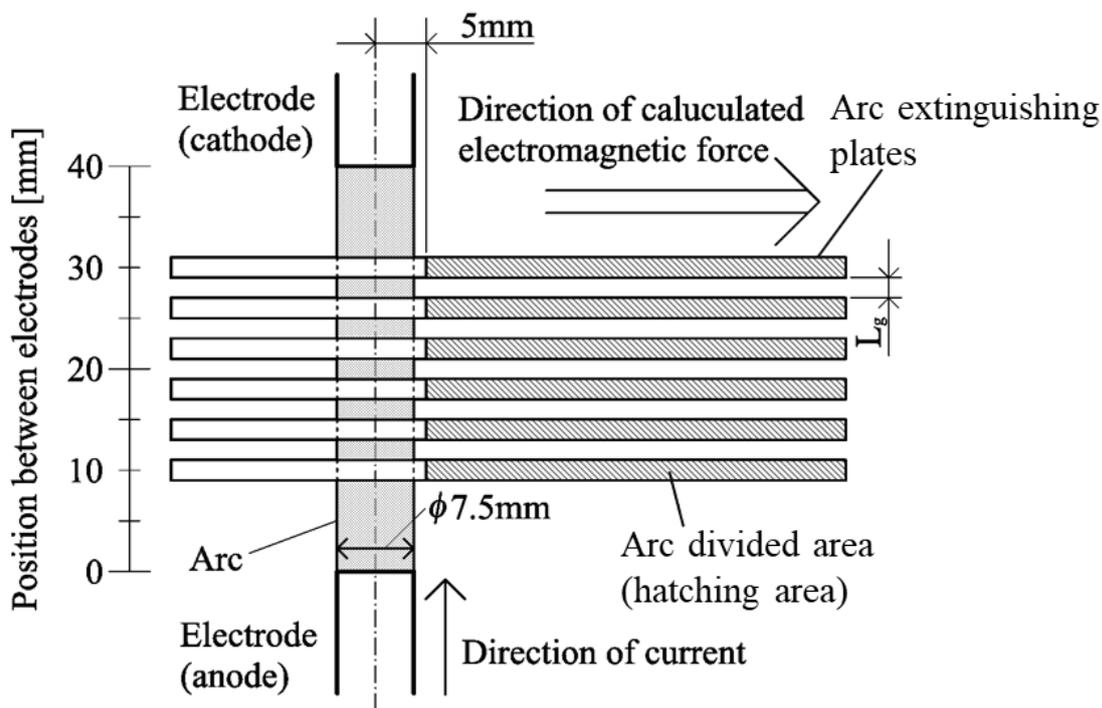


図 3.7 消弧グリッド配置時の電磁力の計算モデル

5 mm であり、アークと消弧グリッドが近接しているケースで設定した。また、電磁力の計算方向は図中の右側にある消弧グリッドのアーク分割面が位置する方向とした。

図 3.8 は本解析ソフトによる磁束密度分布の計算例の一例である。本解析では、磁気ベクトルポテンシャルと電気スカラーポテンシャルを利用した A- $\phi$  法と辺要素有限要素法を用いてアーク周囲の磁束密度分布を計算している。そして、計算した磁束密度ベクトルとアーク内部を通過する電流ベクトルとの外積からローレンツ力を計算し、アークに作用する電磁力の算出を行った。

### 3.3 消弧グリッド配置時のアーク電圧特性の実験的検討

#### 3.3.1 電極-消弧グリッド間のアーク電圧特性

雰囲気圧力と電流の瞬時値がほぼ一定となる条件における電極-消弧グリッド間の電圧  $V_{eg}$  とアーク長  $L_{eg}$  の関係を図 3.9 に示す。同図において、 $V_{eg}$  は  $L_{eg}$  に対してほぼ線形に増加する関係を示す。なお、電流や雰囲気圧力が異なる場合でもこの関係は同様である。ここで、図中の破線で示すようにデータプロットの近似線を延長し外挿すると、アーク長 0 mm 相当の箇所で有限のアーク電圧が存在することを推測できる。この電圧は前章の図 2.5 でも示し

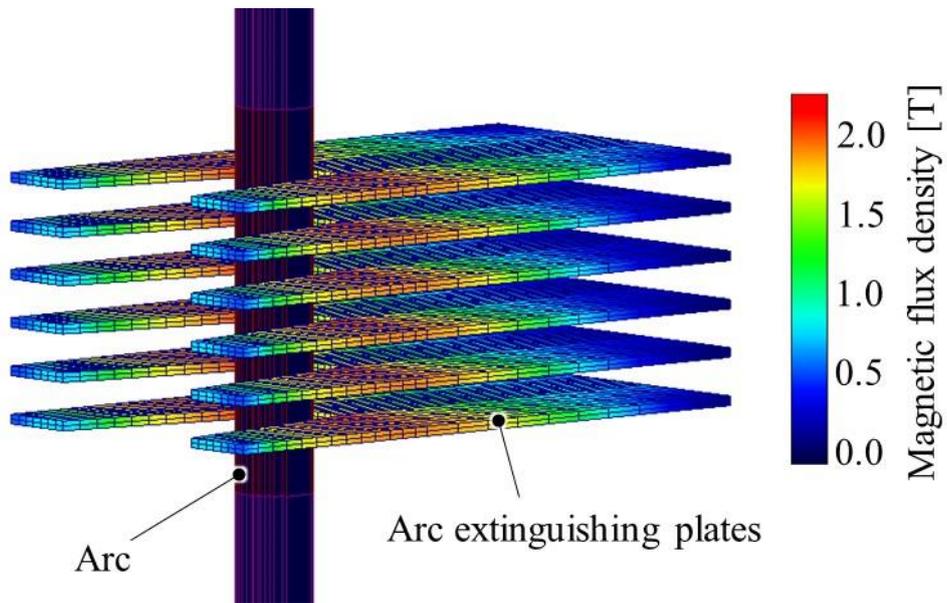


図 3.8 三次元電磁界解析による磁束密度分布の計算例

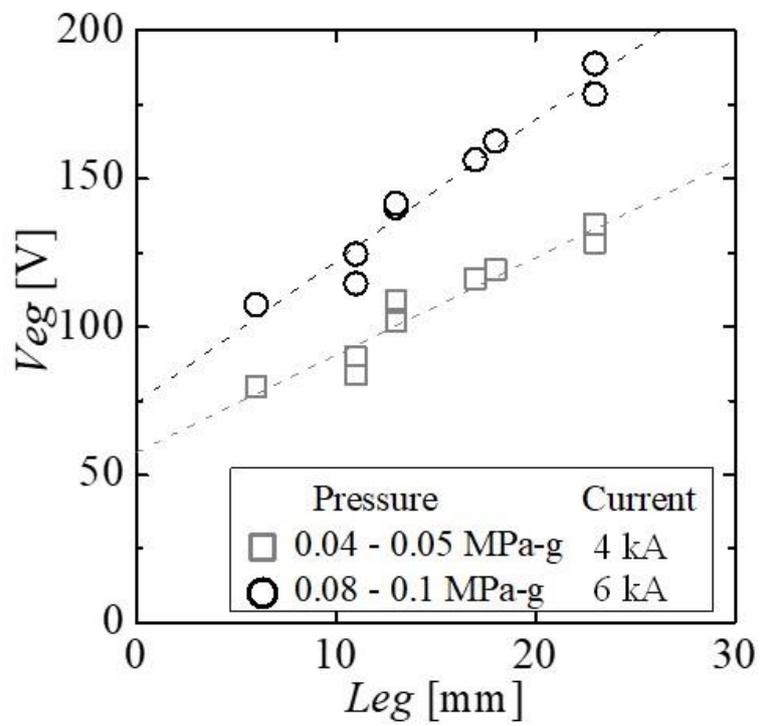


図 3.9  $V_{eg}$  のアーク長依存性

たように、電極近傍ではシースによる電位勾配やアークの収縮等による電圧上昇を生じることが認められており[83][99]、電極および消弧板界面近傍で生じる諸現象に伴う発生電圧と考えられる。このアーク長 0 mm 相当でのアーク電圧見込み値を電極-消弧グリッド間の界面近傍に関するアーク電圧 $V_{eg}^0$ と定義すると、 $V_{eg}$ は次式で近似できる。

$$V_{eg} = E_{eg} \cdot L_{eg} + V_{eg}^0 \quad (3.2)$$

ただし、 $E_{eg}$ は電極-消弧グリッド間のアーク電界[V/m]である。

以下では、式(3.2)を構成する電圧成分 $V_{eg}^0$ および電界成分 $E_{eg}$ の特性についての評価結果を述べる。

#### (A)電極-消弧グリッド間の界面近傍に関するアーク電圧 $V_{eg}^0$ の特性

図 3.10 はアーク長が異なる複数の試験データから式(3.2)より最小二乗法を用いて推定した $V_{eg}^0$ と電流瞬時値の関係である。 $V_{eg}^0$ は電流瞬時値に正の線形関係を示し、この特性は前章で評価した電極近傍で生じる電圧特性(図中の破線部(図 2.8 参照))とほぼ一致する。すなわち、この結果は $V_{eg}^0$ は電極近傍で生じる電圧成分の寄与が支配的で、消弧グリッドによる $V_{eg}^0$ への影響は小さいことを示唆する。

さらに、消弧グリッドによる $V_{eg}^0$ の影響を詳細に確認するため、消弧グリッドを1枚のみ配

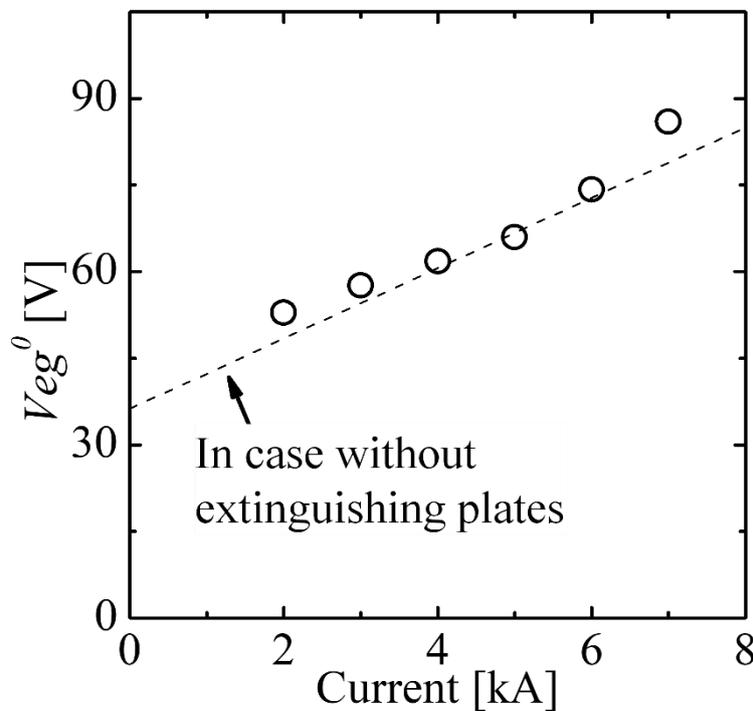


図 3.10  $V_{eg}^0$  のアーク長依存性

置した場合[108]や穴を設けていない鉄板を電極間に配置した場合などでも同様の評価を行ったが、結果はともに同じで、 $V_{eg}^0$ は消弧グリッドを配置しない場合の電圧特性とほぼ一致していた。また、 $V_{eg}^0$ の雰囲気圧力依存性についても前章の結果と同様に明確な依存性は確認できなかった。

ここで、消弧グリッドが $V_{eg}^0$ に与える影響が小さい理由について、(1)電流に依存する電圧成分と(2)電流に依存しない電圧成分で分別し、それぞれ次のように考察する。

まず、上記(1)について、前章では電極の断面積がアーク断面積と比べて小さい場合には、電極界面でアーク電流路の断面積の収縮が生じ、この影響でアーク電圧が上昇することを考察した。一方、消弧グリッドの面積は、図 3.3 (a)に示すようにアーク断面積と比べて十分に大きいので、収縮の影響が作用せず、明確なアーク電圧上昇が生じなかったと考えられる。

次に、上記(2)について、電極近傍で生じる電位勾配に比べて消弧グリッド界面で電位勾配が小さくなるためと考察する。図 3.3 (a)のアーク観測画像を見ると電極から消弧グリッド面に向かってアークジェットが吹き付けられていることがわかる。試験後に電極対向面の消弧グリッド面を確認すると、消弧グリッド内の面と比べて損耗が激しく、金属溶融物が多く付着していた。これは電極からのアークジェットに金属粒子が含まれ、これらが消弧グリッド面に衝突したためと考えられる。粒子の衝突時には運動エネルギーの一部が消弧グリッド内の自由電子を励起させ、電子が消弧グリッドから放出される。これにより消弧グリッド界面近傍では電子密度が増加し、電位勾配が大きなイオンシースが電氣的に中和されると考えられる。その結果、消弧グリッド界面近傍で電位勾配が小さくなることを考察する。ただし、上記考察を裏付けるための、アークジェット吹付け環境下での電圧降下電圧を調査した研究事例はなく、この特性理解には今後さらなる検討は必要となる。

以上の定性的考察と、図 3.10 のプロットに基づき、 $V_{eg}^0$ の特性を以下の近似式(3.3)で推定する。

$$V_{eg}^0 = 8S^{0.4} + 0.13 \left( \frac{I}{S^{0.8}} \right) \quad (3.3)$$

ただし、 $S$ : 電極面積[mm<sup>2</sup>],  $I$ : 電流瞬時値[A]である。

#### (B) 電極-消弧グリッド間のアーク電界 $E_{eg}$ の特性

試験波形から読み取った電流瞬時値を用いて式(3.2)と式(3.3)より算出した電極-消弧グリッド間のアーク電界  $E_{eg}$  と雰囲気圧力の関係を図 3.11 に示す。 $E_{eg}$  は消弧グリッドを配置しない場合(図中の一点鎖線(図 2.11 参照))より 0.1 - 0.2 MPa-g 以上で約 3 kV/m 程度高い。

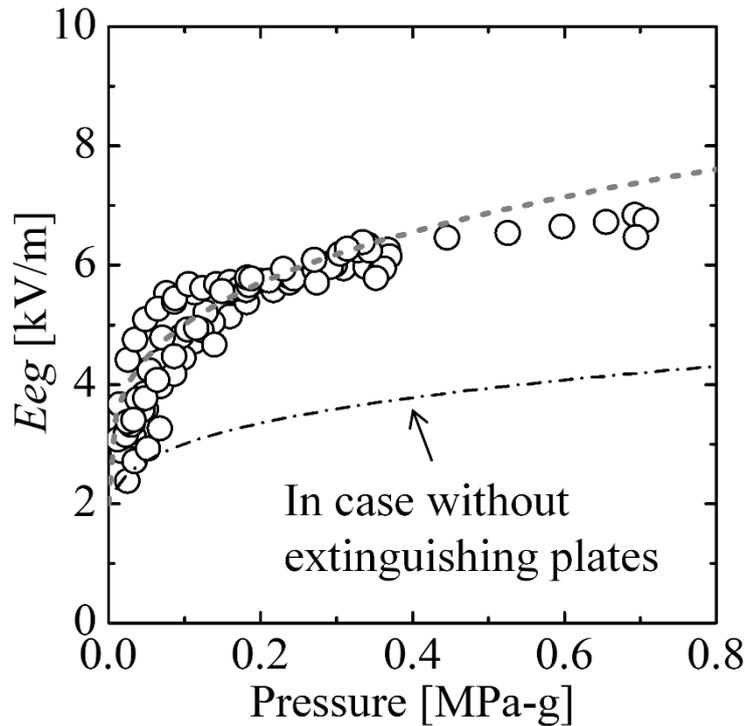


図 3.11  $E_{eg}$  の雰囲気圧力依存性

この $E_{eg}$ の上昇は Grid A の配置枚数 4-10 枚の範囲内では配置枚数の条件が異なる場合でも明確な差はなく、消弧グリッドの配置枚数が $E_{eg}$ に与える影響は小さい。

図 3.12 はほぼ同じ雰囲気圧力の条件におけるデータセットを用いて評価した $E_{eg}$ と電流瞬時値の関係である。同図において、各圧力条件で $E_{eg}$ のばらつき(標準偏差)は約 5 % (0.3 kV/m)と小さく、今回検討する電流範囲内では $E_{eg}$ の電流依存性は小さいと推定する。

ここで消弧グリッドの配置が図 3.11 に示す $E_{eg}$ に及ぼす影響について次のように考察する。アーク空間内に介在する消弧グリッドは、アーク熱による溶発やアークジェットによるスパッタリングの作用を受け多量の鉄原子がアーク空間内に混入する。アーク空間内部への鉄原子の混入率が高まると、アーク内部の電子密度の増加とともに電子と鉄原子間の衝突周波数は増加し衝突断面積が拡大する。電子密度の増加はアーク内部の導電率を高めるが、衝突断面積の拡大は導電率を低下させる。ただし、電子密度増加による導電率の上昇の効果はアーク温度が 15000K 以上では飽和するため、15000K 以上の温度領域では相対的に衝突断面積の拡大に伴う導電率低下の寄与が大きくなる[69]。また、他の研究事例[109]において数 kA 以上の大電流アークではその弧心が 15000 K 以上になることが観測されている。これらのことから、本モデルにおいてもアーク弧心が 15000K 以上と想定すると、金属蒸気の混入によりアーク弧心の導電率が低下し、その結果として $E_{eg}$ が上昇したと考えられる。

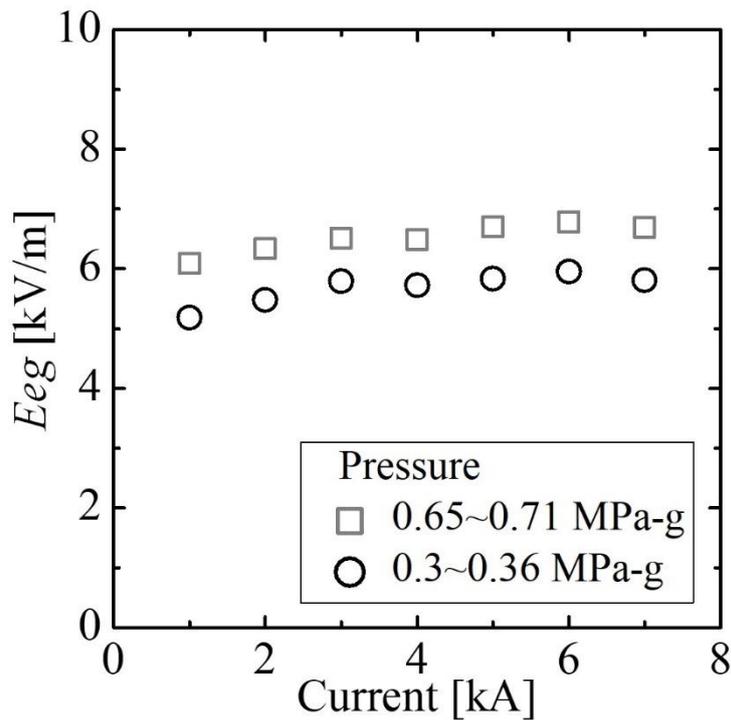


図 3.12  $E_{eg}$  の電流依存性

### 3.3.2 消弧グリッド間のアーク電圧特性

雰囲気圧力と電流の瞬時値がほぼ一定となるデータセットを用いて評価した消弧グリッド間の電圧 $V_g$ とアーク長(グリッド間隔) $L_g$ の関係を図 3.13 に示す。 $V_g$ もまた電極-消弧グリッド間の電圧 $V_{eg}$ の特性と同様に、 $L_g$ に対してほぼ線形に増加し、この傾向は電流や雰囲気圧力が異なる場合でも同様となる。そこで、このアーク長 0 mm 相当でのアーク電圧見込み値を消弧グリッド間の界面近傍に関するアーク電圧 $V_g^0$ と定義すると、図 3.13 の結果より $V_g$ は下式で近似できる。

$$V_g = E_g \cdot L_g + V_g^0 \quad (3.4)$$

ただし、 $E_g$ ：消弧グリッド間のアーク電界[V/m]である。

以下、式(3.4)を構成する電圧成分 $V_g^0$ および電界成分 $E_g$ の特性についての評価結果を述べる。

#### (A) 消弧グリッド間の界面近傍に関するアーク電圧 $V_g^0$ の特性

$V_g^0$ と電流および雰囲気圧力の瞬時値の関係をそれぞれ図 3.14 (a)および図 3.14 (b)に示す。ここで、 $V_g^0$ の各プロットはそれぞれ電流、雰囲気圧力の瞬時値がそれぞれ一定となるデータセットを用いて最小二乗法による近似計算から推定している。同図において、 $V_g^0$ の電流、雰囲気圧力依存性はともに小さく、 $V_g^0$ はほぼ一定となる。これより、 $V_g^0$ の値は図中の全ブ

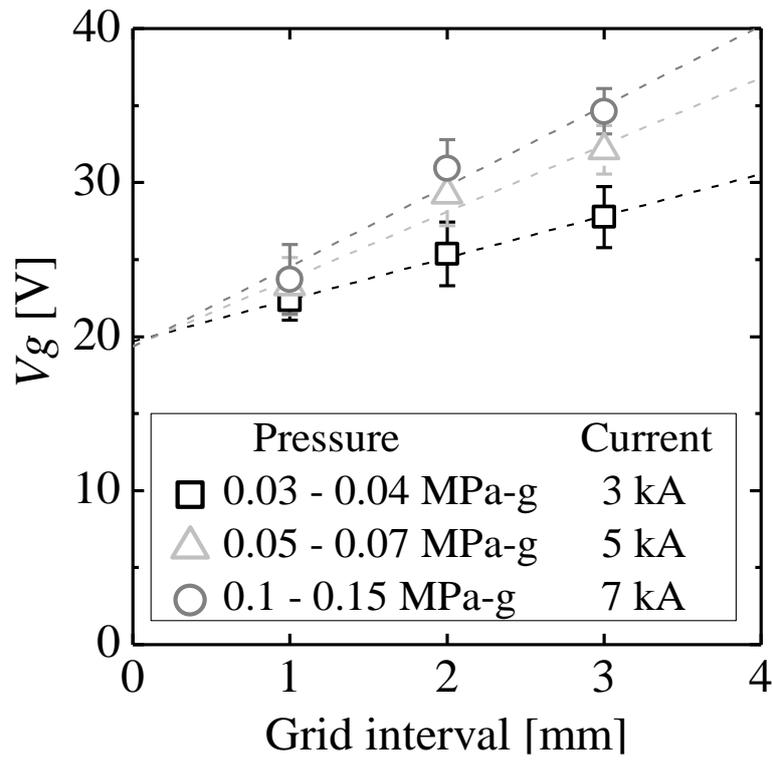
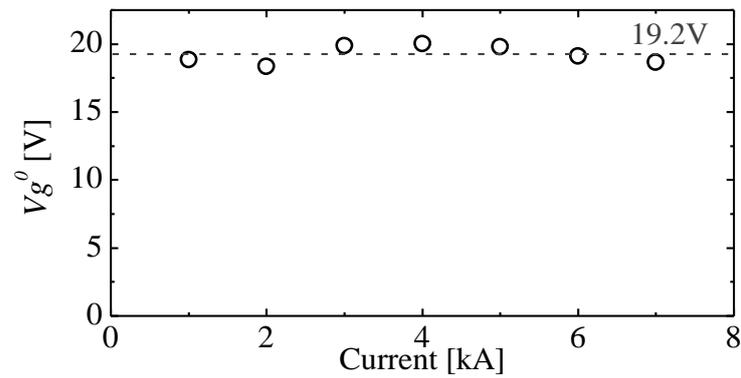
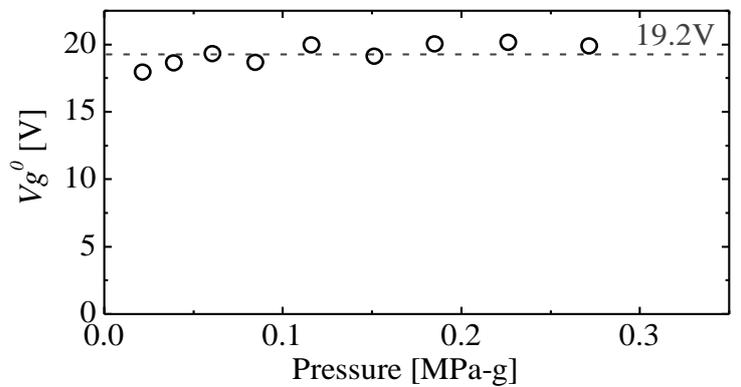


図 3.13  $V_g$  のグリッド間隔依存性



(a)  $V_g^0$  の電流依存性



(b)  $V_g^0$  の雰囲気圧力依存性

図 3.14  $V_g^0$  の電流・雰囲気圧力依存性

ロットの平均値から 19.2 V(図の破線)で一定と推定し、分割アーク数毎にこの電圧上昇が生じる。また、この電圧上昇値は他の研究事例[82]でも報告されている電極降下電圧の値によく一致しており、消弧グリッド界面で生じる電極降下電圧により生じるものと考えられる。

電極近傍とは異なり消弧グリッド界面で $V_g^0$ の電流依存性が確認できない理由は、消弧グリッドとアークが接触するスポット面積が電極と比べて十分に大きく、消弧グリッド界面に存在するアーク電流路の収縮層の影響が小さいためと考えられる。

また、消弧グリッド界面で生じる電極降下電圧により生じるエネルギーは、アークの加熱のみでなく、その一部が消弧グリッドの溶融・気化潜熱へと変換される[84][110]。このため、アーク分割時にはこのエネルギーにより消弧グリッドから金属蒸気が生じ、3.3.1節で述べたように金属蒸気がアーク空間の導電率に影響を及ぼすと考えられる。

### (B) 消弧グリッド間のアーク電界 $E_g$ の特性

式(3.4)の $V_g^0$ に 19.2 V を代入して見積もった $E_g$ と雰囲気気圧力の関係を図 3.15 に示す。 $E_g$ もまた電極-消弧グリッド間のアーク電界 $E_{eg}$ とほぼ同様の雰囲気気圧力依存性(図 3.11 の破線を図 3.15 に転載)を示し、ともに一定のばらつきは存在するものの $E_g$ と $E_{eg}$ の特性は概ね一致する。

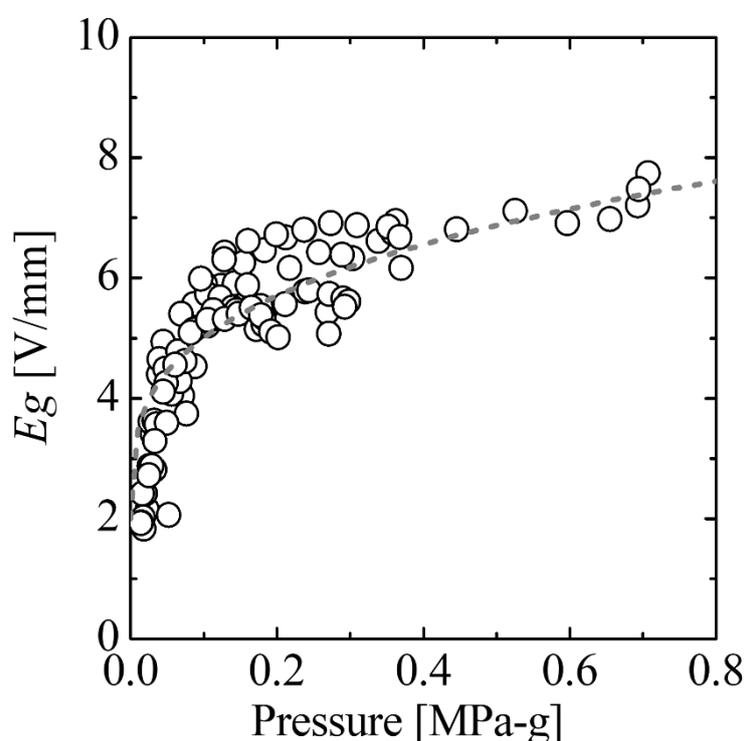


図 3.15  $E_g$  の雰囲気気圧力依存性

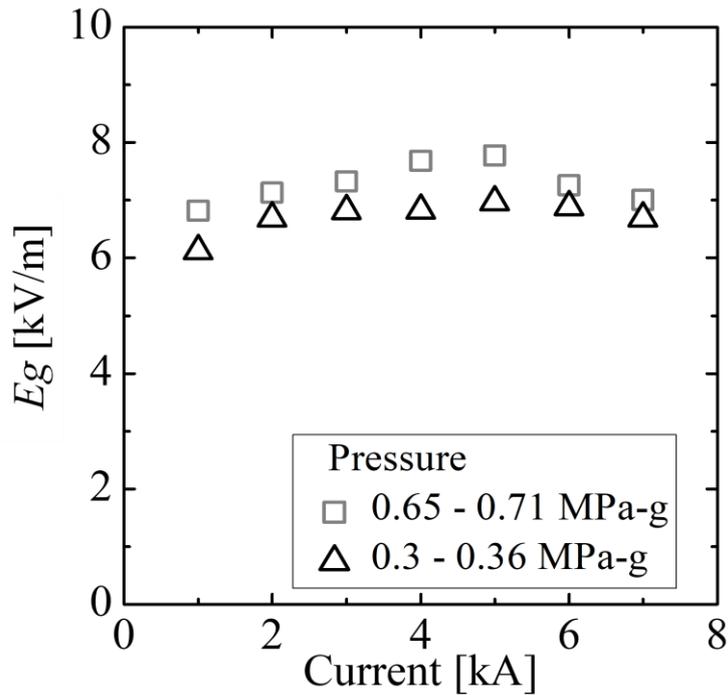


図 3.16  $E_g$  の電流依存性

図 3.16 はほぼ同じ雰囲気圧力条件のデータセットを用いて評価した  $E_g$  と電流瞬時値との関係である。本結果も  $E_{eg}$  の特性と同様に明確な電流依存性は確認できない。従って、 $E_g$  は  $E_{eg}$  とほぼ同様の特性になると推定する。

以上の結果から図 3.11, 3.15 に示す  $E_{eg}$  と  $E_g$  の全プロットに対して最小二乗法を用いて雰囲気圧力とアーク空間の平均電界  $E$  の関係式を次式で構築する。

$$\begin{aligned} E &= E_{eg} = E_g \\ &= 2 + 6\Delta P^{0.3} \end{aligned} \quad (3.6)$$

ただし、 $\Delta P$ : 大気圧からの圧力上昇値[MPa-g]。なお、図 3.11 および 3.15 の破線部は上式より見積もった近似曲線を用いている。

### 3.3.3 消弧グリッド配置時のアーク電圧の関係式

前節までの結果から設計およびアークパラメータで構成した電極-消弧グリッド間の電圧  $V_{eg}$  [V] および消弧グリッド間の電圧  $V_g$  [V] の関係式をそれぞれ次式で構築する。

$$V_{eg} = 8S^{0.4} + 0.13 \left( \frac{I}{S^{0.8}} \right) + (2 + 6\Delta P^{0.3})L_{eg} \quad (3.7)$$

$$V_g = 19.2 + (2 + 6\Delta P^{0.3})L_g \quad (3.8)$$

上式より、消弧グリッドを搭載する場合の消弧室のアーク電圧 $V_{arc}$  [V]は、以下のアーク電圧の関係式に基づき推定することができる。

$$V_{arc} = V_{eg} + (n - 1)V_g = \left(8S^{0.4} + 0.13\left(\frac{I}{S^{0.8}}\right)\right) + 19.2(n - 1) + (2 + 6\Delta P^{0.3})(L_{arc} - n \cdot t_g) \quad (3.9)$$

ここで、

$$L = L_{eg} + (n - 1)L_g + n \cdot t_g \quad (3.10)$$

ただし、 $V_{arc}$ ：アーク電圧[V]， $L_{arc}$ ：電極間で発生するアークのアーク長[mm]， $n$ ：消弧グリッドの利用枚数， $t_g$ ：利用する消弧グリッドの板厚[mm]。なお、式(3.10)では $t_g$ を含めたアーク長 $L$ を導入することで、光学観測等を用いて推定できるアーク長からアーク電圧を評価できるようにしている。

今回評価した各パラメータは表 3.1 に示す消弧室の設計適用例の中で制約条件を考慮しつつ適切に設定することで、仕様に適したアーク電圧性能を決定できる。ただし、本関係式は各種実験結果に基づき構築された実験式であるため、本評価で用いたパラメータの条件範囲内において適用可能である。また、消弧グリッドを配置していないケース( $n = 0$ )や鉄製以外の消弧グリッドを使用するケースでは、溶発蒸気がアークに及ぼす影響や電極降下電圧を決定するイオン化ポテンシャル等の物性値は異なるために式(3.9)の第 2 項および第 3 項の係数は変化すると考えられ、本関係式は適用できない。

式(3.9)の関係式の妥当性を検証するため、関係式より見積もったアーク電圧の推定値と試験より得られた実験値の比較を行った。この結果を図 3.17 に示す。図中の試験条件は電極面積が 44.6 mm<sup>2</sup>，アーク長(電極間隔)が 40 mm，消弧グリッドの利用枚数が 6 枚，消弧グリッドの板厚が 2 mm であり、これら条件値と電流，雰囲気圧力の実測値を式(3.9)に代入して推定値を見積もった。比較の結果，両電圧値の増減の傾向，大きさはともにほぼ一致し，実験

表 3.1 評価パラメータの設計適用例と制約条件

Parameter	Designed example of parametric control	Constraint condition
Current	Interrupting capacity	Current limiting performance
Arc length	Gap between electrodes	Chamber size
Pressure rise	Chamber size	Strength of chamber
Surface area on electrode	Electrode size	Erosion rate of electrode
Number of extinguishing plates	Mounted number of extinguishing plates	Chamber size

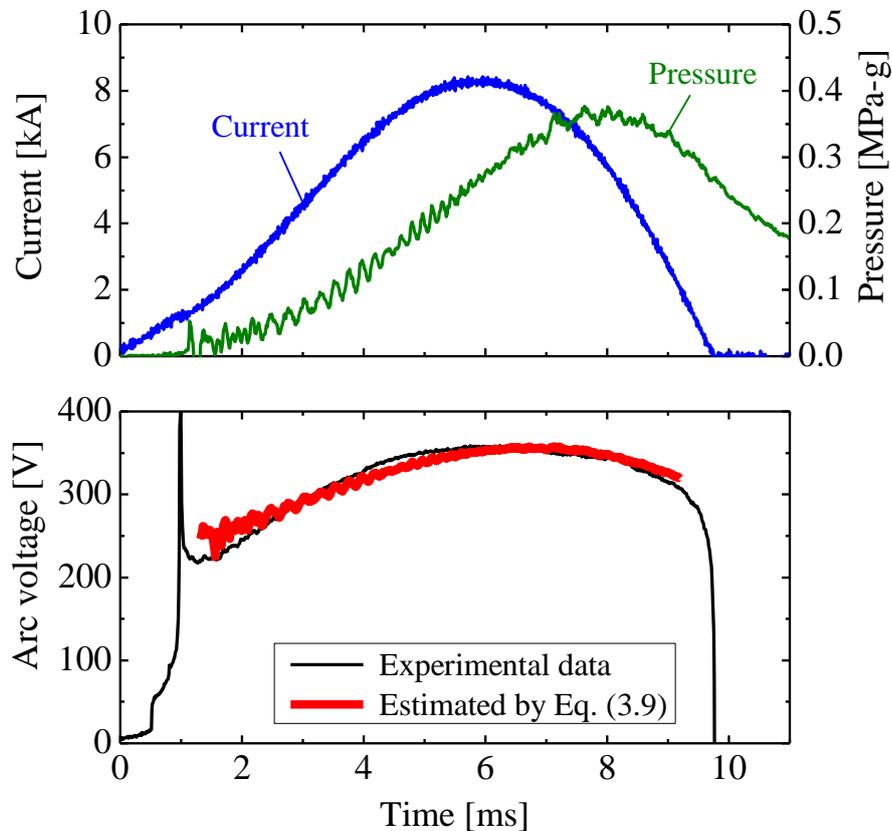


図 3.17 アーク電圧推定値と実験値との比較

式によりアーク電圧を概ね推定できていることが確認できる。さらに、電極間隔、Grid A の配置枚数や間隔等を変えた様々な条件下で試験を 14 回実施し、それぞれにおいて実験値と推定値の誤差を評価したところ、誤差の平均値は 5%程度であり、全試験の 90%以上の試験データが誤差 10%未満で推定できることを確認した。以上の結果より、構築したアーク電圧の関係式が、実遮断器のアーク電圧の再現に有効と考えられ、設計段階で想定される機種毎の電流、発生圧力、アーク長の値を式(3.9)に反映することでアーク電圧を推定できる。従って、上記関係式を用いることで、本評価で用いた各種パラメータの範囲内において消弧室に要求されるアーク電圧性能を満たすための必要な消弧室設計値の定量的選定が可能となる。

## 3.4 消弧グリッドを有効利用するための電磁力条件およびグリッド配置方法の検討

### 3.4.1 消弧グリッドの有効利用度の定義

本節では実遮断器の消弧グリッド形状を模擬した Grid B (図 3.2 (b))を使用し、消弧グリッドによるアーク電圧上昇に必要な電磁力条件およびグリッド配置方法を検討する。ここで、消弧グリッドによるアーク電圧上昇の程度を示す指標として、消弧グリッドの有効利用度  $g_{eff}$  を次式で定義し、この値を用いて評価を行う。

$$g_{eff} = \frac{V_g^{exp}}{V_g^{est}} \quad (3.11)$$

ここで、 $V_g^{exp}$  は消弧グリッド間電圧の実測値であり、 $V_g^{est}$  は消弧グリッドによるアーク分割状況下における消弧グリッド間電圧で式(3.8)による推定値である。 $g_{eff}$  が 1 以上の場合は、消弧グリッド分割時に生じる電極降下電圧がアーク電圧に寄与していることに加え、消弧グリッド間においてアークがグリッド間隔以上に伸長しアーク電圧が高くなる状況を示す。一方、 $g_{eff}$  が 1 未満の場合は、電磁力による消弧グリッド内へのアークの誘導(伸長)が不十分であり、アークは分割された状況に至らずにアーク電圧に実効的な電極降下電圧が発生していない状況を示す。

図 3.18 は電極間隔が 40 mm の電極間に板厚 2 mm の Grid B を 6 枚、2 mm 間隔で配置した条件での各アーク分割位置における  $g_{eff}$  の経時変化である。ここで、G1 から G5 の記号は消弧グリッド内のアーク分割位置を示し、陽極側から順に G1, G2, …, G5 となる。同図において、各位置の  $g_{eff}$  は時間の経過で電流瞬時値や雰囲気圧力の条件は変動しているが、これら条件の変化に対する明確な影響は確認できない。また、経時変化で  $g_{eff}$  に多少の増減はあるが、そのばらつき(標準偏差)は 0.1 程度で概ね一定値を示す。この傾向はグリッド間隔や板厚等の異なる条件においても同様で、 $g_{eff}$  は概ね一定値を示していた。

従って、以降では、試験条件毎に  $g_{eff}$  を電流瞬時値が 1kA 以上となる時間帯で平均した値で評価し、この  $g_{eff}$  と電磁力とグリッド配置方法の関係を検討する。

### 3.4.2 グリッド間隔と有効利用度の関係

図 3.19 は電流瞬時値を 7 kA とした条件において電極間隔 40 mm の電極間に板厚 1 mm または 2 mm の Grid B をそれぞれ 6 枚配置した場合のアーク電圧とグリッド間隔の関係である。

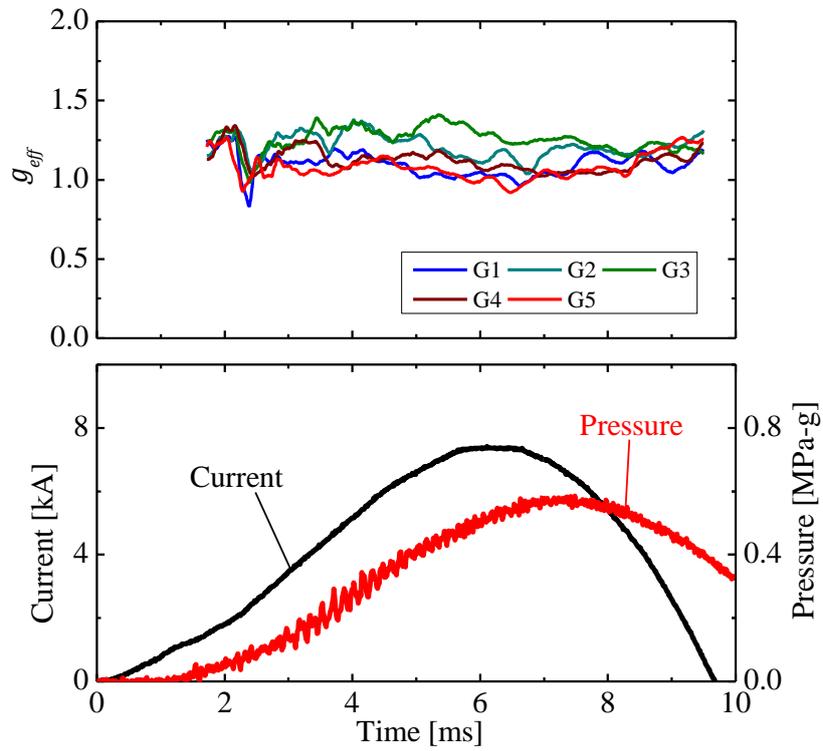


図 3.18  $g_{eff}$  の経時変化

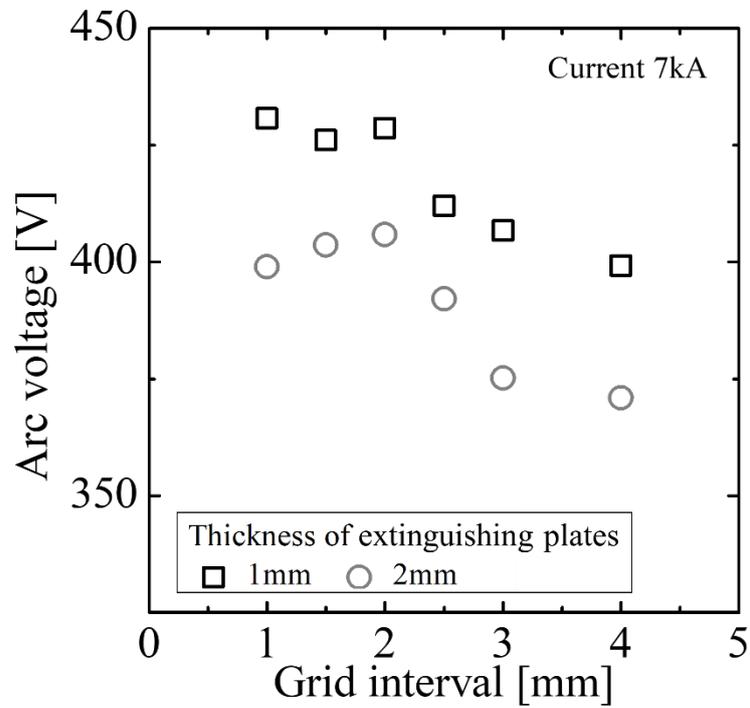


図 3.19 アーク電圧とグリッド間隔の関係

同図において、グリッド間隔が 2 mm 以下の条件と比べて 3 mm 以上ではアーク電圧は 20 – 30 V 程度低く、グリッド間隔が長いほどアーク電圧は低下する。次に、グリッド間隔が異なる条件での各アーク分割位置における  $g_{eff}$  を図 3.20 に示す。グリッド間隔が 2 mm 以下の条件では全ての位置で  $g_{eff}$  は 1 以上となるが、3 mm 以上の場合では G1 および G5 の位置で  $g_{eff}$  は約 0.8 となる。したがって、グリッド間隔が長い場合でのアーク電圧の低下は、電極近傍の消弧グリッドでアークを有効に分割できていないことによるものと考えられる。

図 3.21 (a) および図 3.21 (b) はそれぞれ G3 の位置と G1 または G5 の位置における  $g_{eff}$  のグリッド間隔依存性である。ここで、G1 と G5 の  $g_{eff}$  はほぼ同程度であるため、図 3.21 (b) の縦軸には G1 と G5 における両位置の  $g_{eff}$  の平均値を使用している。各位置においてグリッド間隔を拡げることで  $g_{eff}$  は低下する傾向があり、特に G1 および G5 の電極近傍の位置でこの傾向は顕著となる。ここで、グリッド間隔が 1 mm と 4 mm の条件におけるアーク観測画像を図 3.22 に示す。なお、消弧グリッドのアーク分割面はハッチングで示している。同図において、グリッド間隔が 1 mm の場合は消弧グリッドの分割面までアークは伸長しているが、グリッド間隔が 4 mm の場合は電極近傍において消弧グリッドの分割面までアークは十分に伸長していない。このことから、観測画像からもグリッド間隔が長い条件では消弧グリッドによりアークを有効に分割できていないことを確認できる。

従って、グリッド間隔の違いで電極近傍の消弧グリッドの有効利用度が異なる結果は電極近傍のアークの伸長量の差で生じており、この伸長量に寄与する電磁力が有効利用度に影響

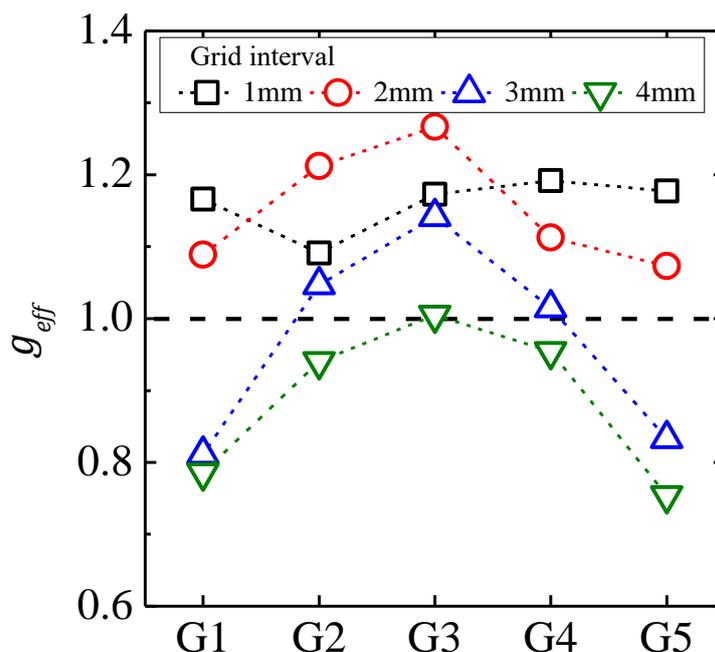


図 3.20 グリッド間隔が異なる場合の  $g_{eff}$  の位置分布

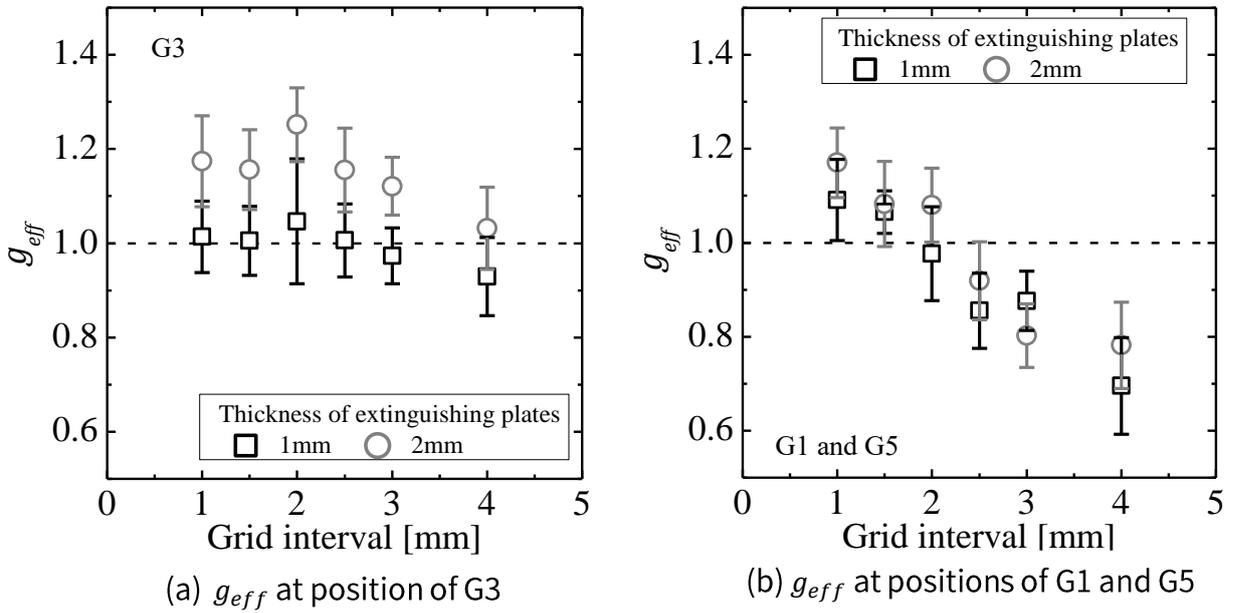


図 3.21  $g_{eff}$  のグリッド間隔依存性

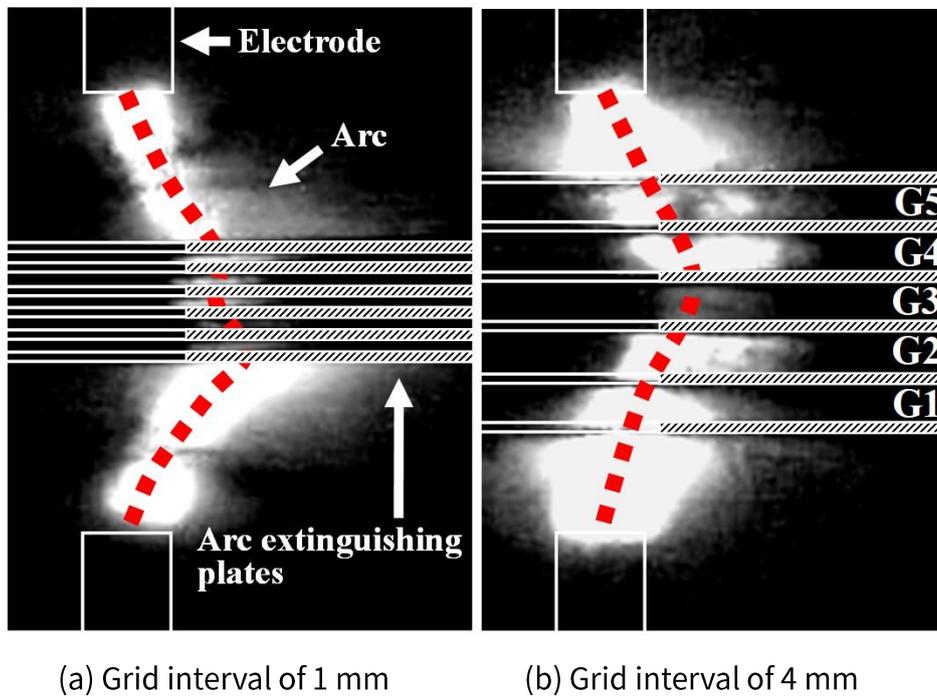


図 3.22 グリッド間隔が異なる場合のアーク観測画像

を及ぼすと考えられる。また、図 3.21 において、板厚を厚くすることで $g_{eff}$ は高くなる傾向を示すが、これもアークに作用する電磁力が強くなるためと考えられる。この電磁力と有効利用度に関する議論は次節で行う。

### 3.4.3 アークに作用する電磁力と有効利用度の関係

本節では図 3.7 の計算モデルによる電磁界解析にて算出したアークに作用する電磁力を用いて、電磁力が消弧グリッドの有効利用度に与える影響を検討する。

図 3.23 は 6 枚の Grid B を様々な板厚およびグリッド間隔で配置した場合のアークに作用する単位アーク長当たりの電磁力分布を計算した結果である。ここで、同図の電磁力分布の計算例は電流値 5kA の場合である。同図において、単位アーク長あたりの電磁力はグリッド間隔が短いほど電極間中央(20 mm)で強く、板厚が厚い条件では全ての位置の電磁力は強くなる。これはアークと消弧グリッド間で形成される磁気回路の磁気抵抗が消弧グリッドとアークとの位置関係や板厚で増減し、アークが消弧グリッドに近接する条件、あるいは、厚い板厚条件で磁気抵抗が低下するためである。

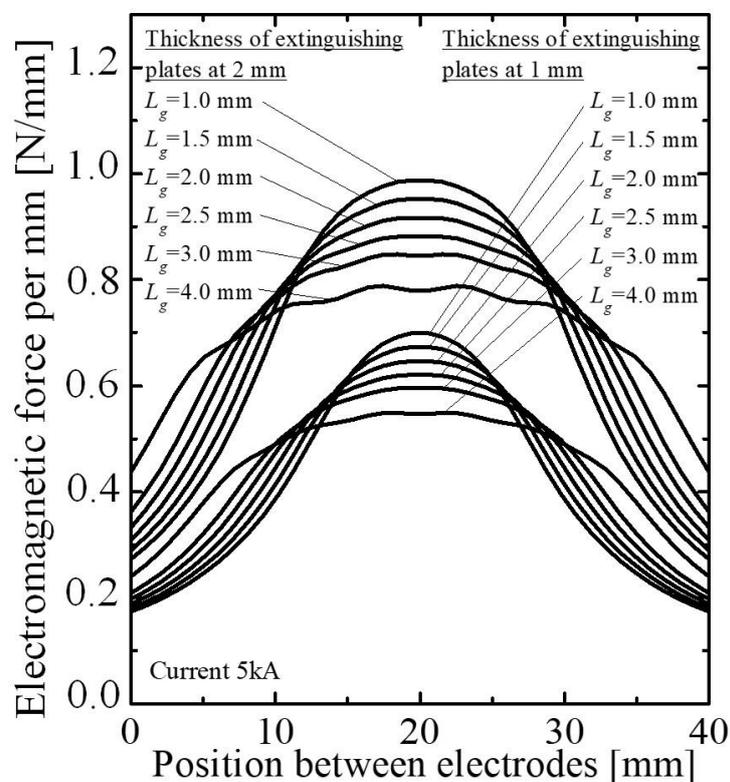


図 3.23 Grid B を 6 枚配置した場合の電極間の単位アーク長当たりの電磁力分布

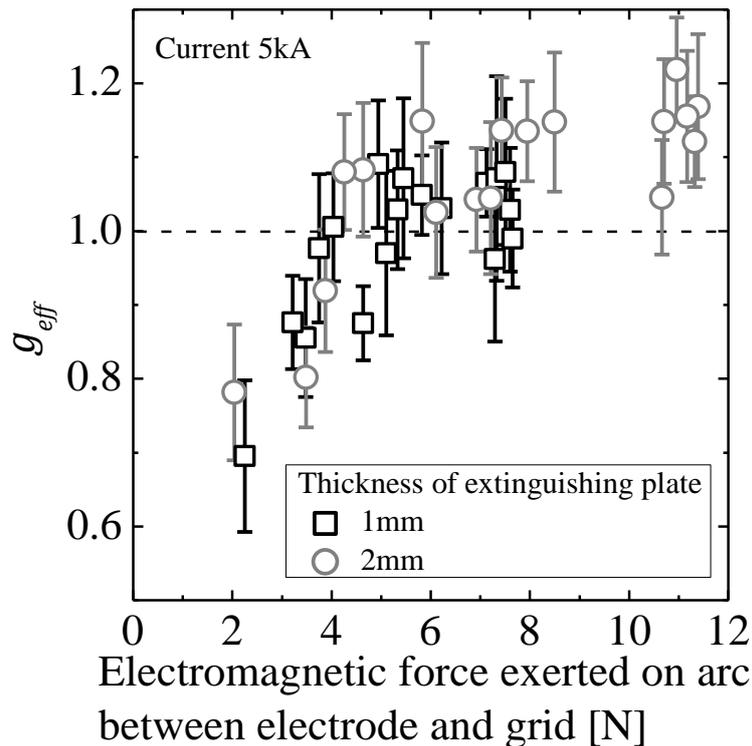


図 3.24  $g_{eff}$ と電極-消弧グリッド間のアークに作用する電磁力の関係

図 3.24 はそれぞれのアーク分割位置における  $g_{eff}$  と各アーク分割位置の分割面から電極までの間でアークに作用する電磁力の関係をまとめたグラフである。ここで、同図の横軸の電磁力は、図 3.25 に示すように、例えば、G2 の位置では電極から G2 の下側の消弧グリッドまでの範囲を、G5 の位置では電極から G5 の上側の消弧グリッドまでの範囲で計算した電磁力の積算値を使用している。図 3.24 において、 $g_{eff}$  は電磁力の増加とともに高くなり、約 5N 以上で  $g_{eff}$  は 1 以上に達して飽和傾向を示すことがわかる。この傾向は消弧グリッドの板厚が異なる条件でも同様である。なお、 $g_{eff}$  は電磁力の積算値のみに影響を受け、各アーク分割位置近傍の局所的な電磁力の強弱による  $g_{eff}$  の変化は確認できなかった。従って、消弧グリッドでアーク電圧を高めるためには局所的な電磁力を高めるよりもむしろ電極と消弧グリッド間で作用する電磁力を高めて、消弧グリッドのアーク分割面までアークを伸長させることが重要となる。

ここで、アークに作用する電磁力は電流条件で増減するが、図 3.18 に示すように  $g_{eff}$  には明確な電流依存性は確認できない。これは電流の増加に応じてアークを伸長させるために必要な電磁力も増加することが原因と考えられ、この要因として電流値に応じて電極間の空間の温度分布、すなわち、導電率分布が変化するためと考えられる。アークの伸長には、電極

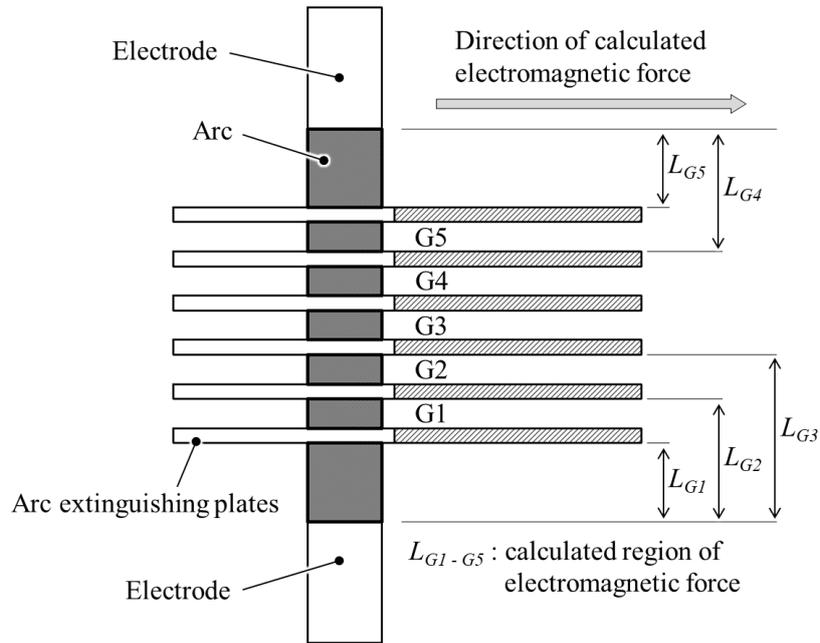


図 3.25 各アーク分割位置の $g_{eff}$ に対する電磁力の対象計算範囲

間から伸長先の空間温度を高めるとともに伸長元の電極間の温度を相対的に低下させる必要がある。しかしながら、電流増加に伴う発熱の増大は電極間の空間温度を高めてしまうため、アークを膠着させる原因になる。このため、電流増加とともに伸長に必要な電磁力も高まり、本検討においては $g_{eff}$ に対して明確な電流依存性が見られなかったものと考察する。本特性の更なる詳細な理解には、電磁界解析と熱流体解析を連成した高度な電磁流体解析による数値計算が必要であり、これに関しては今後の課題となる。

### 3.4.4 消弧グリッドの有効利用するために必要な電磁力条件

本検討において配置する全ての消弧グリッドが有効利用できる条件 ( $g_{eff} \geq 1$ )の中で、板厚 1 mm, グリッド間隔 1.5 mm の条件で電磁力が最も低い条件となる。この条件における電極と消弧グリッド間に作用する電磁力の電流依存性を計算した結果を図 3.26 に示す。同図の各電流条件における電磁力よりも強い電磁力をアークに作用可能な消弧室を設計することで全ての消弧グリッドが有効に利用できると推定する。

一般的な配線用遮断器 (MCCB : Molded Case Circuit Breaker)では、可動電極と消弧グリッドの間隔は 5 mm 以下で、板厚は約 1 - 2 mm, グリッド間隔は約 1 - 3 mm で 6 枚以上連続して配置する構成が多い。このような構成では、電極から消弧グリッドまでの電磁力を図 3.26 に

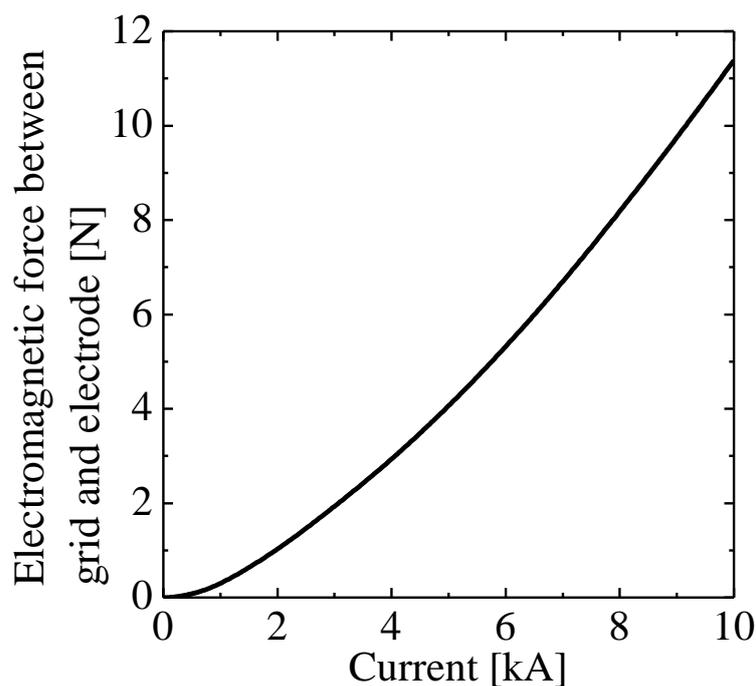


図 3.26 消弧グリッドを有効利用するために必要な電極-消弧グリッド間の電磁力

示す値以上の電磁力を確保することで消弧グリッドを用いてアーク電圧を効果的に高める事ができる。ここで、図 3.23 および図 3.26 の結果に基づき、6 枚で構成された消弧グリッド配置のみで消弧グリッドを有効利用するための電磁力を確保できるグリッド配置条件を整理した結果を図 3.27 に示す。ただし、消弧室サイズの制約などの理由から図 3.27 のグリッド配置条件を満たすことが困難なケースでは、併せてアークに作用する電磁力を強化するための電極形状の設計も重要となる。

### 3.5 まとめ

本章では、配線用遮断器の消弧室空間内に消弧グリッドを配置した場合のアーク電圧特性を検討するため、前章にて推定した気中アークの基礎電圧特性と対比することで消弧グリッド配置がアーク電圧に及ぼす影響を調査した。また、消弧グリッドによるアーク電圧上昇に必要な電磁力条件およびグリッド配置方法について検討した。本検討の結果を以下にまとめる。

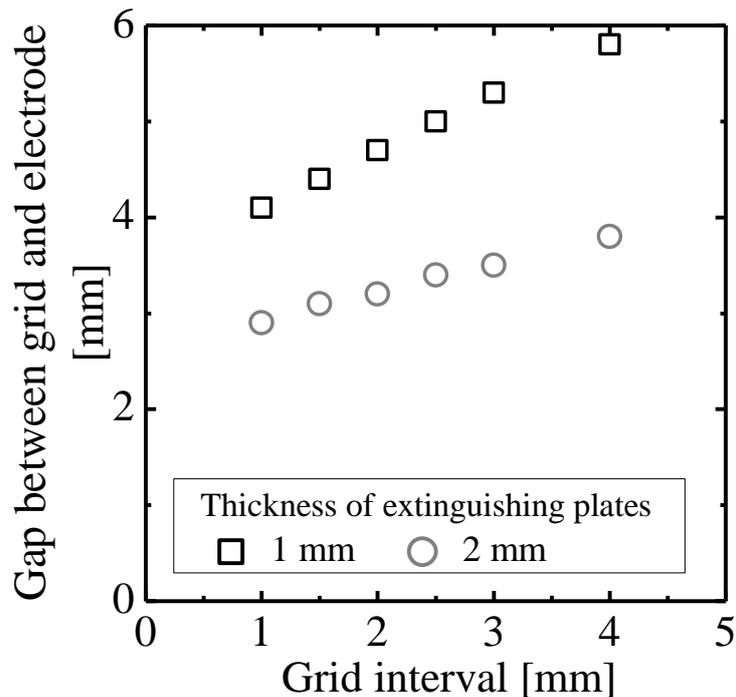


図 3.27 消弧グリッドを有効利用するためのグリッド配置条件

- 消弧グリッド配置時では，アーク電界強度が基礎電圧特性と同様に大気圧からの圧力上昇値に対して約 0.3 乗で比例する関係をもつが，0.2 MPa-g 以上の圧力条件において消弧グリッドからの溶発蒸気の影響を受けて基礎電圧特性よりも約 3 kV/m 上昇することが明らかになった。また，消弧グリッドでのアーク分割時には分割数毎にアーク電圧は約 19.2 V 上昇し，この電圧上昇値は電流や雰囲気圧力に影響しないことがわかった。
- 上記の電圧特性を基に各種パラメータと消弧グリッド配置時のアーク電圧の関係式を以下のように構築した。

$$V_{arc} = \left( 8S^{0.4} + 0.13 \left( \frac{I}{S^{0.8}} \right) \right) + 19.2(n-1) + (2 + 6\Delta P^{0.3})(L - n \cdot t_g) \quad (3.12)$$

この関係式による推定値と実験値を比較した結果，5%程度の誤差でアーク電圧をこの関係式から推定できることを確認した。従って，本関係式がアーク電圧の観点から消弧室を設計する上での有用な指針になり得ると考えられる。

- アークに作用させる電磁力と消弧グリッドによるアーク電圧上昇の関係を定量的に評価し，消弧グリッドでアークを分割するために必要な電磁力条件を推定した。また，グリッド配置条件毎にアークに作用する電磁力を整理し，上記電磁力条件と整合させることで，アークを分割するための有効な消弧グリッド配置条件を提示した。

## 第4章 細隙消弧空間における大電流気中アークの電界特性

### 4.1 はじめに

配線用遮断器の消弧室では限流性能を高めるために、前章で議論した消弧グリッドに加えて、モールドケースの材料とは異なる消弧作用に特化したポリマー製の消弧材料が搭載される。消弧材料はアークの熱や光を受けて、熱分解し溶発ガス(アブレーションガス)や、剥離・破碎によるポリマー粒子の飛散(スポレーション粒子)が発生する。これらのガスや粒子がアーク空間に混入することで、アーク内部で輻射損失や対流熱損失が増大し、アークは冷却し導電率の低下が生じる [90]-[95]。これによりアークのアーク電圧が高まり、消弧室の限流性能を高める事ができる[111]。従って、消弧材料は遮断器の遮断容量や限流性能の向上に重要な部品であり、消弧室を高性能化する上で消弧材料がアーク電圧に与える影響を理解することは重要である。

従来の消弧材料に関する研究事例によると、円筒形の消弧材料を用いてアーク電圧特性を検討したケースでは、その円筒内のアーク空間の大きさや電流密度、雰囲気圧力などにアーク電圧が強く依存することが報告されている[96]。一方、配線用遮断器の多くは回動機構を備えた電極構造を採用していることから、二面の壁で電極の回動面を挟むようにして消弧材料を配置し細隙空間を形成している。このような二面の細隙空間が限流性能に与える影響について検討している研究例もあるが、アークの駆動制御や膠着性に関する観点から限流性能に与える影響を検討した報告が主であり、アーク電圧に着目して調査を行っている例は少ない[57][112]-[114]。また、二面の細隙空間では、空間の一部が開放された条件となるため、アークの大きさは細隙空間で制限されず、溶発ガスの一部が開放空間へ流出する極めて複雑な現象を以ってアークに影響を及ぼす。このため、配線用遮断器で適用される二面の細隙空間がアーク電圧に与える影響については未だ十分に理解されていないのが現状である。

そこで本章では、数 kA 以上の大電流気中アークにおいて、消弧材料で構成された二面の細隙空間内におけるアーク電圧特性を調査する。具体的には、消弧材料が及ぼすアーク空間への影響を評価するため、アーク空間内のアーク電界(単位アーク長あたりのアーク電圧)に着目し、アーク電界に対する(1)細隙空間の細隙幅、(2)電流値、(3)雰囲気圧力の影響をそれぞれ調査する。また、第二章で推定した基礎電圧特性との対比を行うことで、各パラメータ間の相関関係も含めて消弧材料がアーク電界に与える影響を検討する。

## 4.2 実験方法

### 4.2.1 実験モデル

試験回路構成と実験装置を図 4.1 に示す。乾燥空気を充填したステンレス製密閉容器内 (容積  $1300 \text{ cm}^3$ ) に鉄製(SPCC)で板状の電極対を配置し、電極間に配置したヒューズを通电し溶断させることでアークを発生させる。アーク電圧は電極間電圧を測定することで評価し、遮断時の雰囲気圧力は容器壁に設置した圧電素子型の圧力センサを用いて測定する。アーク長は電極間隔で定義し、電極間隔の調整でアーク長を制御する。試験回路は、第二章および第三章で議論した回路と同様のものを使用し、300 kVA の変圧器の一次側回路に 3.3 kV / 60 Hz の電源回路、通电を開始するための投入スイッチ、回路を断路するためのバックアップ遮断器(真空遮断器を使用)、電流調整用の抵抗器と可変リアクトルを設けている。投入スイッチ、バックアップ遮断器の調整により投入位相 0 度 0.5 サイクル通电となるように設定し、アークを発生させずに短絡させた場合に電流ピークが 21 kAp となるように可変リアクトルで調整している。

図 4.2 は電極周囲の細隙空間を構成する主要部品のみを示した配置図である。同図において、消弧材料には実機器でよく用いられるポリアミド樹脂を使用し、電極を 2 枚の消弧材料の板で挟んでボルトで締結することで電極の板厚と同じ幅の細隙空間を形成している。また、本検討ではアーク電界に対する各検討パラメータの寄与度を推定しやすくするために、電極近傍で生じる電圧特性(収縮層で生じる電圧)の影響が小さくなるように電極サイズを設定す

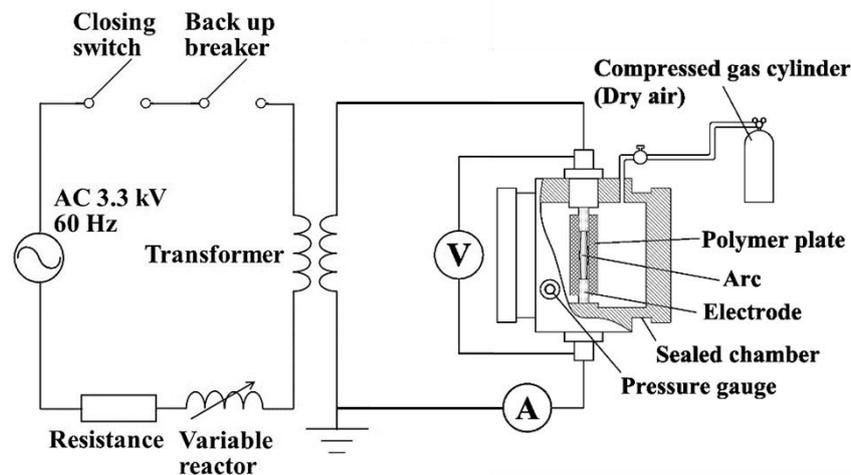


図 4.1 試験回路構成と実験装置

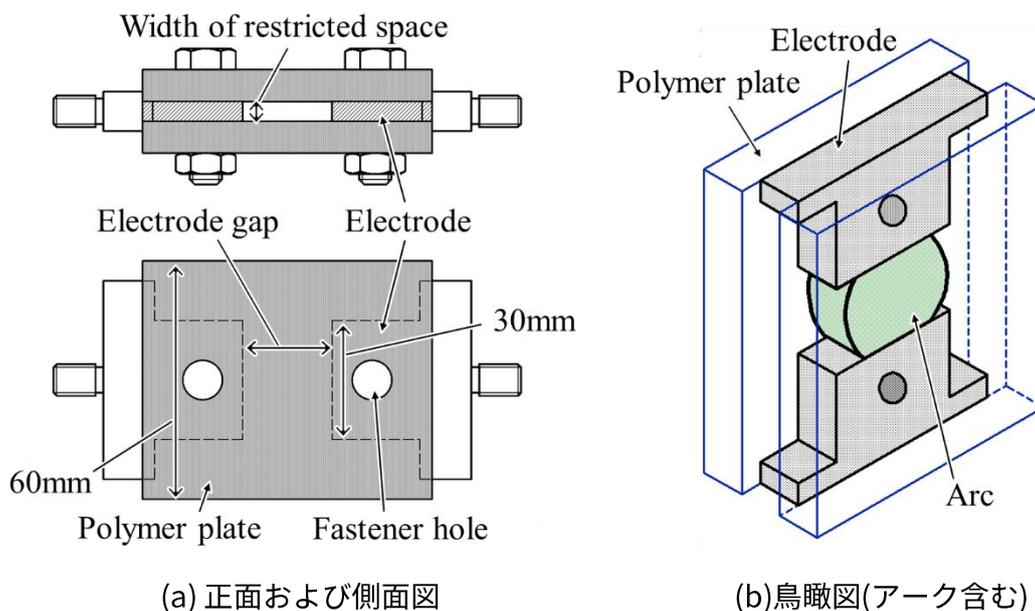


図 4.2 電極と消弧材料の配置構成

表 4.1 検討パラメータの設定範囲

Estimated short circuit current, kAp	Charged (initial) Pressure, MPa-g	Electrode gap, mm	Width of restricted space, mm
21	0, 0.4	5, 10, 20, 30	5, 7, 10, 15, 30

る。すなわち、電極面積が大きな条件で電極近傍の発生電圧が小さくなるため[99]、電極の幅は 30 mm (電極面積 150 mm<sup>2</sup>以上)で設定している。また、細隙空間の幅については、電極幅の 2 倍の 60 mm としている。なお、電極および消弧材料は試験毎に毎回新品に交換を行う。その他の試験条件については表 4.1 に記載する。同表において、電極間隔および細隙幅は配線用遮断器での適用実績の多い条件の範囲で設定しており、充填圧力(初期雰囲気圧力)は実際の短絡事故時の電流遮断の際に発生し得る圧力上昇範囲内としている。

#### 4.2.2 試験波形例

図 4.3 は電極間隔 30 mm, 細隙幅 7 mm, 充填圧力 0 MPa-g(大気圧)の条件におけるアーク電圧・電流・圧力波形例である。同図において、通電の開始直後では、ヒューズの溶断に至

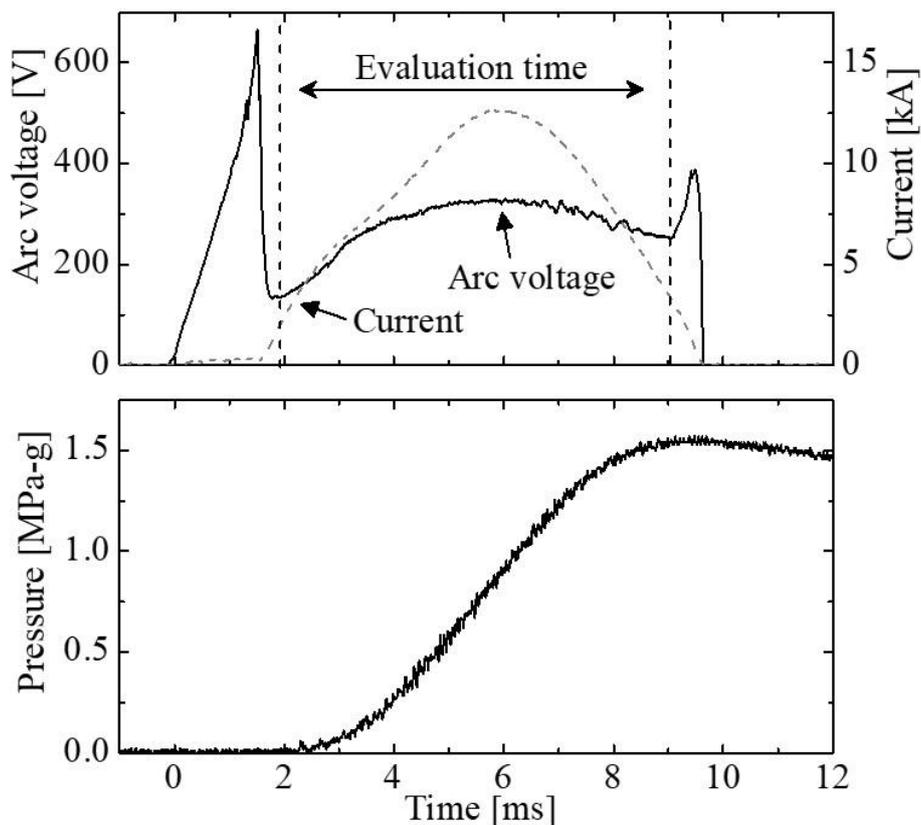


図 4.3 試験波形例

るまで (0 - 2 ms) の時間ではヒューズの電気抵抗により電流は小さくなり、ヒューズの溶断後 (2 ms 以降) のアークの発生により電気抵抗が低下し電流は上昇する。また、電流ゼロ点 (約 9.5 ms) の直前でバックアップ遮断器を動作させることで強制的にアークを消弧している。通電開始直後と遮断後期にはアーク電圧に急峻なピークが発生するが、通電開始直後のピークはヒューズの電気抵抗に伴う発生電圧である。一方、遮断後期のピークは電極間の外側までアークが伸長し、このピーク発生以降ではアーク長が電極間隔よりも長くなっていると考えられる。従って、本評価ではこれらの電圧ピークが発生していない時間帯のデータのみ (図 4.3 では 2 - 9 ms) を使用する。各種条件 (充填圧力、電極間隔、細隙幅) 毎にそれぞれ 1 回ずつ試験を実施し、各データを整理することでそれぞれのパラメータがアーク電界特性に与える影響を評価する。

### 4.3 ポリマー細隙空間におけるアーク電界特性

#### 4.3.1 アーク電圧とアーク長の関係

図 4.4 は電流瞬時値 10kA(電流立ち上がり時)における様々な細隙幅条件下でのアーク電圧とアーク長の関係である。全ての細隙幅条件でアーク電圧はアーク長に対してほぼ線形増加し、この増加率は細隙幅が狭いほど高くなる。この傾向は充填圧力(初期雰囲気圧力)の条件や、電流瞬時値が異なる場合でも同様で、ほぼ線形増加する関係があることを確認している。また、この電圧特性の傾向は第二章で導出した基礎電圧特性とも同様であり、アーク長 0 mm 相当の箇所では有限のアーク電圧が存在することが推定できる。本電圧は図 2.5 で示した電極界面近傍のシースによる電位勾配等の諸現象に伴う発生電圧と考えられる。そこで、このアーク長 0 mm 相当でのアーク電圧見込み値を電極近傍電圧 $V_{elec}$ 、アーク空間の平均電界を $E_{col}$ と定義すると、アーク電圧 $V_{arc}$ は下式で近似できる。

$$V_{arc} = V_{elec} + E_{col} \cdot L_{arc} \quad (4.1)$$

ここで、 $L_{arc}$ はアーク長である。

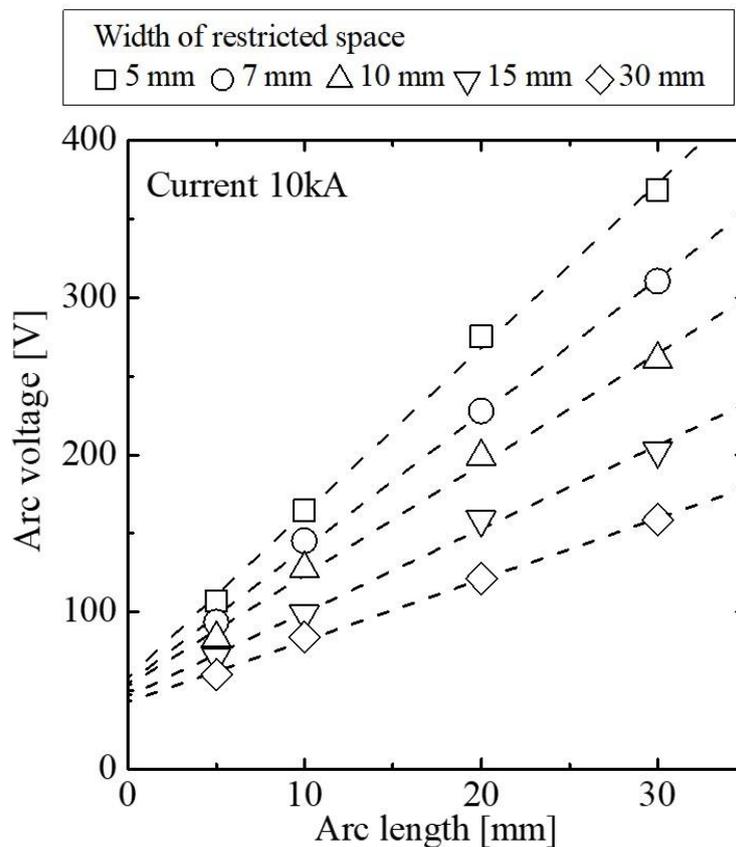


図 4.4 様々な細隙幅条件におけるアーク電圧の電流依存性

### 4.3.2 電極近傍電圧特性の評価

図 4.5 は最小二乗法を用いて式 (4.1)から推定した各細隙幅条件の電極近傍電圧 $V_{elec}$ の平均値である。ここで、同図のプロットは電流瞬時値や充填圧力条件が異なるデータも含まれるが $V_{elec}$ は概ね同等の値を示し、明確な電流や雰囲気圧力の依存性は確認できなかった。第二章で導出した基礎電圧特性と比べると、本実験モデル(図4.2)の $V_{elec}$ は雰囲気圧力の影響が小さい点は同様だが、電流の影響も小さくなる点で特性は異なる。ここで、図 2.8 で示した基礎電圧特性では電極面積が大きい条件では電流の影響は小さくなることを確認しているが、本モデルの電極面積は最も小さい条件でも第二章の検討条件の約 2 倍の大きさであるため、電流の影響の差異は電極面積の違いで生じていると考えられる。

また、図 4.5 において $V_{elec}$ は細隙幅が狭くなることでやや増加する傾向を確認できる。この傾向は電極近傍空間においても消弧材料によるアークの収縮作用あるいはアブレーションガス等の影響を受けていることを示唆する。消弧材料の影響で電極近傍では導電率、シース電位分布、アーク断面積など各物性間における複雑な機構がアーク電圧に作用していることが考えられるが、この詳細な理解に関しては、解析的アプローチによる検討が必要であり今後の課題として設定する。

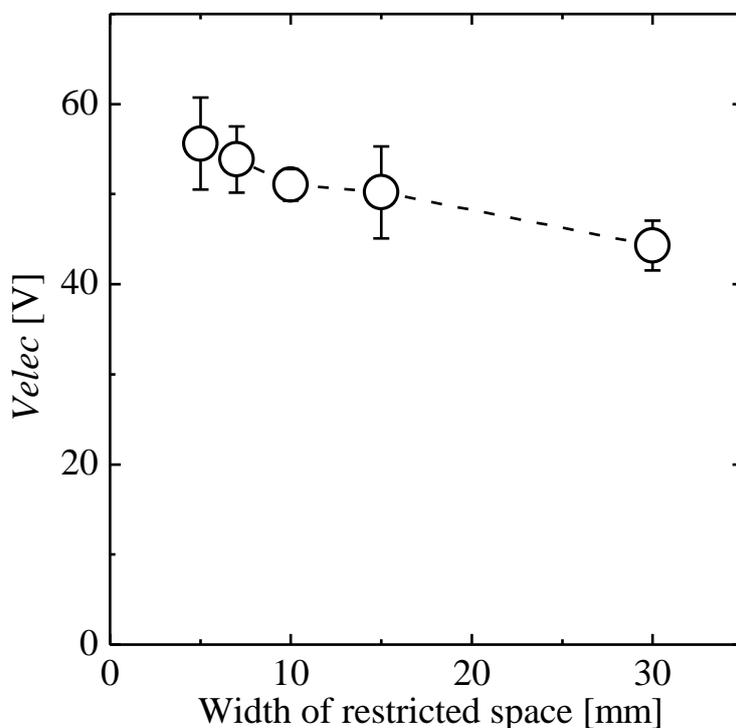


図 4.5 様々な細隙幅条件における電極近傍電圧

以降の節において、細隙幅条件毎に推定した図 4.5 の電極近傍電圧の平均値を式(4.1)へ代入することで細隙空間内の平均的なアーク電界 $E_{col}$ を算出し、その特性を評価する。なお、電極近傍電圧 $V_{elec}$ のばらつきによる $E_{col}$ の推定誤差を小さくするため、以降では、アーク長 10 mm 以上の条件となるデータのみを用いて $E_{col}$ を評価する。電極近傍電圧のばらつきは $\pm 5$  V 程度のため、アーク長 10 mm 以上の場合では、このばらつきに対する $E_{col}$ への影響は約 0.5 kV/m 以下となる。

### 4.3.3 アーク電界特性の評価

本節では、まず細隙幅 5 mm の条件におけるアーク電界特性について述べ、次にアーク電界 $E_{col}$ と細隙幅の関係について報告する。

#### (A)細隙幅 5 mm におけるアーク電界特性

図 4.6 は細隙幅 5 mm における $E_{col}$ と電流瞬時値の関係である。ここで、同図において、異なる電極間隔条件(10–30 mm)にて推定した $E_{col}$ をそれぞれ重ねてプロットしている。また、

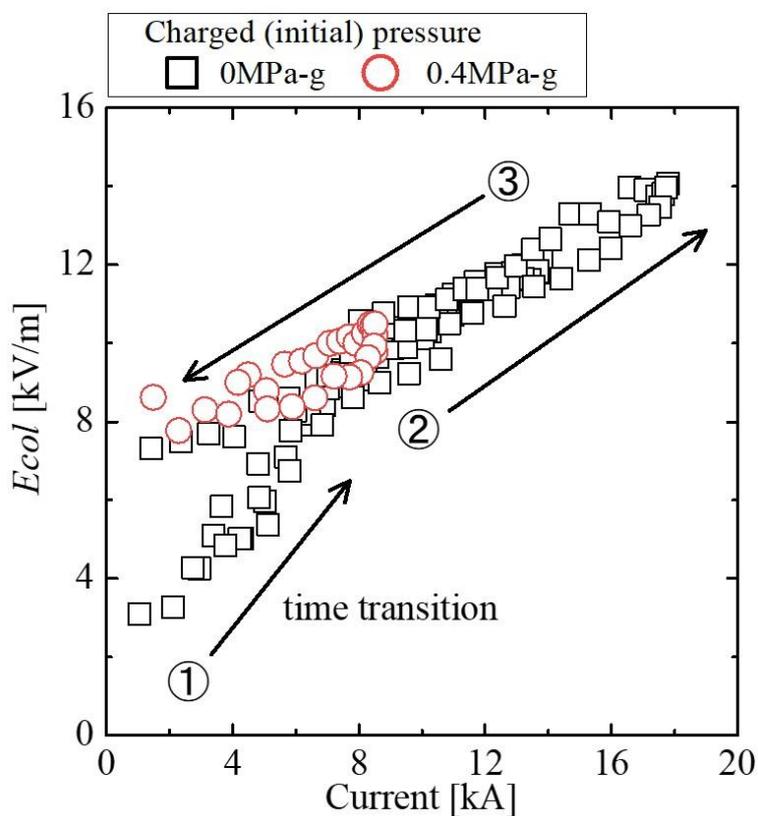


図 4.6 細隙幅 5 mm の条件におけるアーク電界の電流依存性

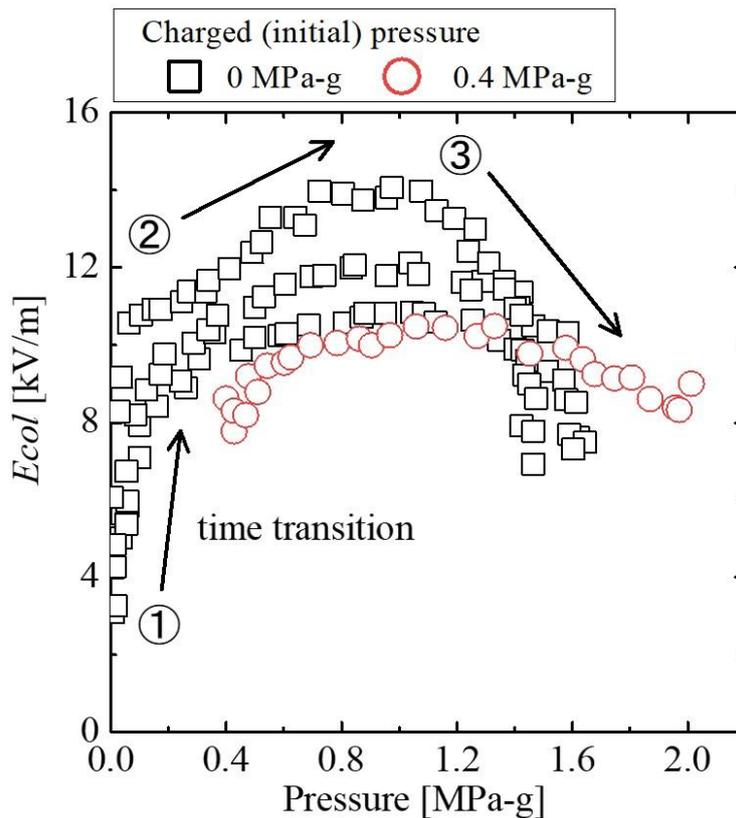


図 4.7 細隙幅 5 mm の条件におけるアーク電界の雰囲気圧力依存性

(図 4.6 のデータから作成)

同図の矢印と番号は充填圧力(初期雰囲気圧力) 0 MPa-g の場合の時間推移を示しており、図中の①から③まで順番にアーク電界の特性が時間的に推移する。まず、充填圧力 0 MPa-g の場合において、試験初期(①)に着目すると  $E_{col}$  は電流増加に対して大きく上昇するが、電流瞬時値が約 6 kA を超えたあたりからその増加率は低減する。次に試験中期以降(②と③)に着目すると、アーク電界は電流に対してほぼ線形関係を維持しながら変化し、遮断後半(③)では電流瞬時値 6 kA 以下になる場合でもアーク電界の大きな低下はなく、時間推移②と同様の線形関係上で変化することがわかる。次に、充填圧力が 0.4 MPa-g となる条件のアーク電界特性に着目すると、試験初期でも充填圧力 0 MPa-g の場合のような電流増加に対するアーク電界上昇は確認できず、充填圧力 0 MPa-g の遮断中期以降の特性とほぼ一致する。この結果より試験初期のアーク電界上昇は電流増加による寄与でなく、雰囲気圧力による寄与が強く表れていると推定できる。

図 4.7 は図 4.6 と同じプロットを使用して  $E_{col}$  と雰囲気圧力の関係を示したグラフである。ここで、同図の横軸の雰囲気圧力は大気圧を基準としたゲージ圧で示している。 $E_{col}$  は大気圧近傍(0 - 0.2 MPa-g)では圧力増加とともに大きく上昇する。一方、0.2 MPa-g を超える場合

で $E_{col}$ に圧力上昇に対する明確な依存性は確認できず、ほぼ一定あるいは低下する傾向にあることがわかる。これらの結果から、細隙空間におけるアーク電界は、雰囲気圧力が大気圧に近い条件では電流依存性よりも雰囲気圧力に対する依存性が顕著に表れるが、一定以上の圧力条件下(0.2 MPa-g 以上)ではこれらの関係性が逆転し、雰囲気圧力に対する依存性が小さく相対的に電流依存性が強く表れるようになると考えられる。

#### (B) アーク電界特性の細隙幅依存性

細隙幅 5 mm の条件における評価結果を踏まえて他の細隙幅条件も含めたアーク電界特性を検討する。図 4.8 は各細隙幅条件におけるアーク電界  $E_{col}$  の雰囲気圧力依存性である。ここで、同図の横軸の雰囲気圧力は大気圧を基準としたゲージ圧で示し、各プロットはそれぞれの細隙幅条件での各電極間隔条件 (10 - 30 mm) および各充填圧力条件 (0 - 0.4 MPa-g) における全ての条件の  $E_{col}$  の推定値を重ねて表示している。同図において細隙幅 5 mm 以外の条件においても同様に、0.2 MPa-g 以下では圧力増加でアーク電界は大きく上昇するが、0.2 MPa-g 以上では各細隙幅条件ともに圧力増加に対するアーク電界への明確な寄与は確認できない。ここで、図 4.8 の雰囲気圧力 0.2 MPa-g 以上のデータのみを抽出して  $E_{col}$  と電流瞬時値の関係を示したグラフを図 4.9 に示す。細隙幅 15 mm 以上では電流増加に対する明確な

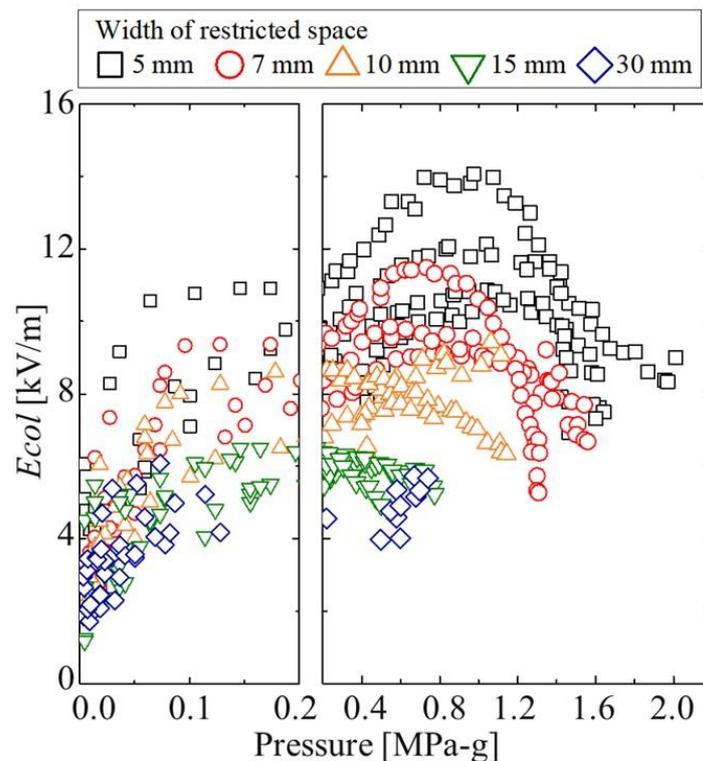


図 4.8 様々な細隙幅条件におけるアーク電界の雰囲気圧力依存性

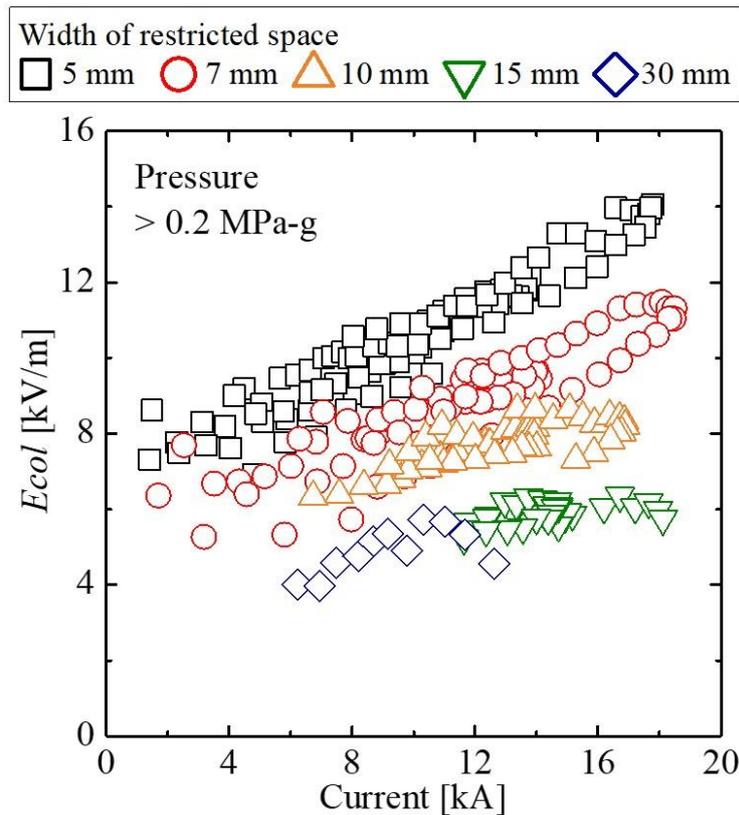


図 4.9 様々な細隙幅条件におけるアーク電界の電流依存性  
 (図 4.8 の 0.2 MPa-g 以上のデータから作成)

$E_{col}$ の上昇は確認できないが、細隙幅が 15 mm より狭い条件では細隙幅 5mm の場合と同様に  $E_{col}$ が電流とともにほぼ線形的に増加する。図 4.10 は、図 4.9 のプロットから最小二乗法を用いた線形近似により電流増加に対するアーク電界の上昇率を算出した結果である。同図において細隙幅条件 15 mm よりも短い条件でアーク電界上昇率は高まり、細隙幅を 5 mm まで縮小することで、細隙幅 15 mm 以上の条件と比べてアーク電界上昇率は約 7 倍になる。従って、細隙幅条件を 15 mm よりも狭くするほど電流増加によりアーク電界は上昇する影響を受けやすくなるため、遮断容量 (遮断電流)が大きな配線用遮断器では、消弧材料で細隙幅の狭い細隙空間を構成することで、より高い限流効果を得ることができる。

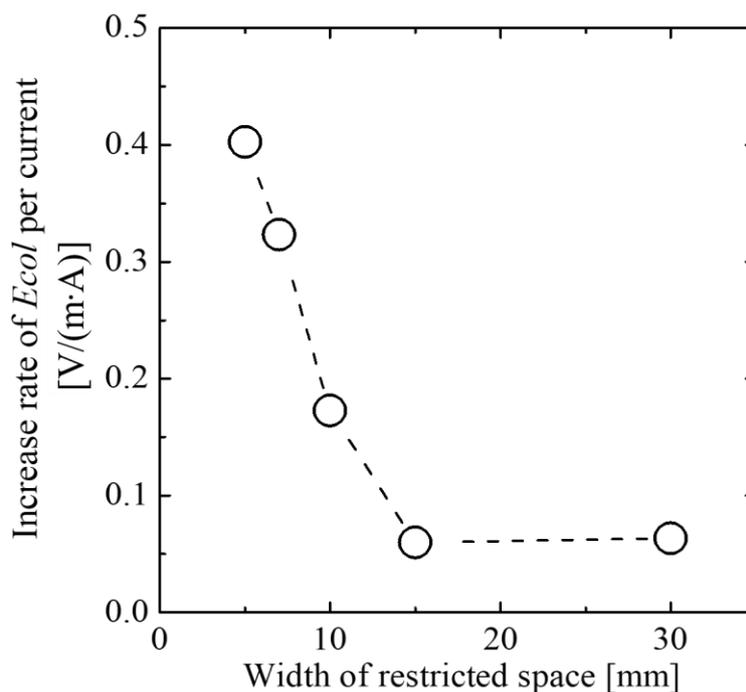


図 4.10 電流増加に対するアーク電界の上昇率と細隙幅条件の関係

#### 4.3.4 アーク電界上昇効果についての考察

前節までで推定した細隙空間におけるアーク電界特性を以下にまとめる。

(I) 雰囲気圧力が大気圧近傍 (0 - 0.2 MPa-g) では圧力増加によりアーク電界は大きく上昇する。

(II) アーク電界は電流増加とともに上昇し、その上昇率は細隙幅が狭くなるほど高くなる。

本節では、上記のアーク電界上昇効果に対する物理的意味についての考察をそれぞれ以下で述べる

##### (I) 大気圧近傍における圧力増加に対するアーク電界上昇効果

アーク電界の圧力依存性が 0.2 MPa-g 近傍で変化する特性は第二章で導出したフリーアークの基礎電圧特性と同様であり、図 2.15 に示したようなアークの実効的な導電路面積の縮小が起きていると考えられる。

本章で使用する細隙空間モデルでは、アークを消弧材料で完全に覆っていないため、アークの一部が雰囲気圧力の影響を受ける状況にある。このため、消弧材料で覆えていないアーク外縁部では、雰囲気圧力が高くなると圧力勾配に伴うアークの拡がりには抑制され、この結

果としてアークの導電路面積が縮小しアーク電界は上昇すると考えられる。また、アーク中心部においては、圧力が雰囲気圧力よりはるかに高く、雰囲気圧力が多少高くなってもアーク外縁部のみでしかその影響が表れないため、圧力増加に対するアーク電界上昇効果が一定以上の圧力条件では飽和すると考察する。

## (II) 電流増加および細隙幅縮小に伴うアーク電界上昇効果

電流増加および細隙幅縮小に伴うアーク電界上昇効果については、消弧材料の溶発現象などによるガス物性の変化を伴う冷却効果、あるいは細隙構造に伴うアーク導電路の断面積の縮小効果による寄与が考えられる。

上記の冷却効果および縮小効果のアーク電界に対するそれぞれの寄与を検討するため、細隙材料に溶発ガスの発生が少ない比較材料として  $\text{SiO}_2$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$  を主要成分とした耐熱結晶化ガラス (難溶発性材料) と前節までの評価で使用したポリアミド樹脂製ポリマー材料 (溶発性材料) を用いた場合の電界特性を比較した結果を図 4.11 に示す。ここで、難溶発性材料使用時では電極間隔が 30 mm、充填圧力 0 MPa-g の条件で評価し、アーク電界は式 (4.1) と図 4.5 の電極近傍電圧の値を用いて算出している。なお、難溶発性材料使用時のアーク電界の圧力依存性は、図 4.8 に示すポリマー使用時の傾向とほぼ同様であったため雰囲気圧力が 0.2 MPa-g 以上となる条件で比較している。

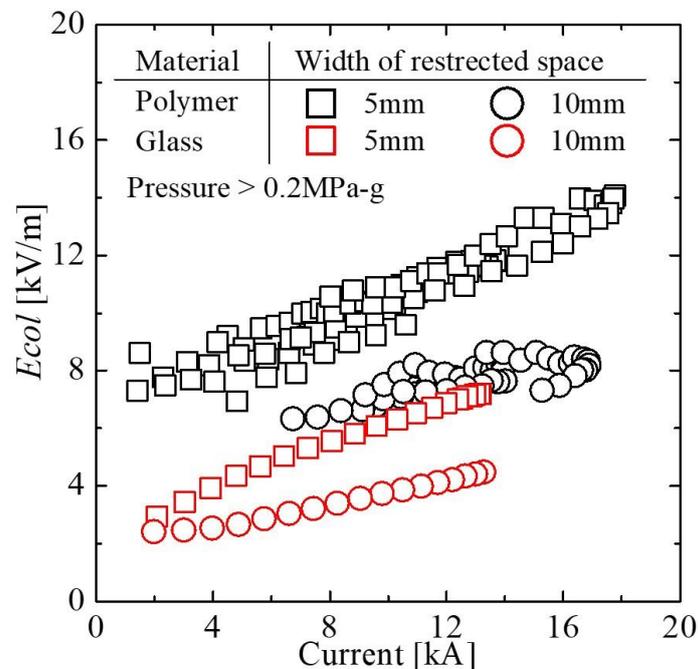


図 4.11 溶発性および難溶発性材料を用いる場合のアーク電界の比較

各材料のアーキ電界を比較すると、各細隙幅条件ともにポリマーを使用した場合でアーキ電界は高くなる。一方、電流増加に対するアーキ電界の上昇率については明確な差はなく比較的近い傾向を示す。ここで、難溶発性材料使用時には細隙空間によるアーキ空間の制限に伴う収縮効果が主に作用し、溶発性材料使用時には収縮効果に加えて溶発現象等における物性変化・冷却作用の効果の両方が同時に作用すると考えると、これら材料のアーキ電界の差は主に溶発現象等の影響を示唆するものと推定される。

図 4.12 は溶発性材料と難溶発性材料使用時のアーキ電界の比である。同図において、各細隙幅ともに電界比は 1.5 – 2.5 倍で、溶発現象等によるアーキの物性変化および冷却の効果として、アーキ内部の導電率が低下し、この電界比に相当するアーキ電界上昇が生じたものと考えられる。また、電流増加によりアーキ電界の比が徐々に小さくなる傾向が見られるが、これは電流上昇に伴う発熱量の増加からアーキ内部の温度分布条件が変化し、溶発ガスの導電率への影響を及ぼしにくくなる 1 万 K 以上の高温領域の割合がアーキ内部で相対的に拡大した結果[53]、電流が小さい条件と比べて溶発現象の寄与は小さくなったためと考察する。

一方、電流増加に伴うアーキ電界の上昇効果については、図 4.10 のアーキ電界上昇率はその物理量の単位の次元が単位長あたりの抵抗と同義であることから、細隙幅が狭くなるほど、磁気ピンチ効果および熱ピンチ効果の影響等によりアーキの導電路の断面積が縮小するとともにアーキの内部抵抗が増加し電流増加に伴うアーキ電界上昇が生じたものと考えられる。

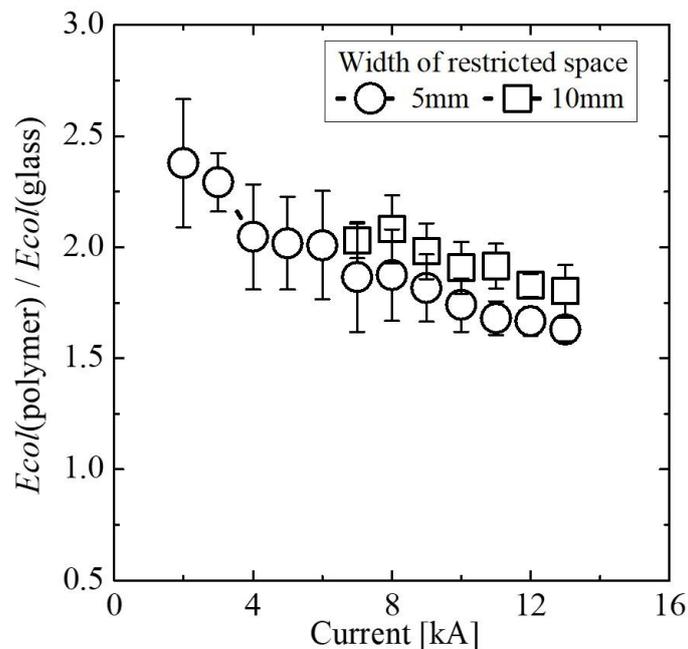


図 4.12 溶発性および難溶発性材料を用いる場合のアーキ電界比

従って、消弧材料で構成される二面の細隙空間においては、溶発現象などの物性変化および冷却の効果による導電率低下に加えて、細隙幅縮小に伴うアーク形態の変化から内部抵抗が上昇し、これら結果として電流増加に比例したアーク電界の上昇が生じたと考察する。

#### 4.3.5 実遮断器におけるポリマー細隙空間のアーク電界特性

本節では、実遮断器を用いて消弧材料の配置方法が異なるケースでアーク電界の比較を行い、消弧材料で構成された細隙空間が実際にアーク電界の上昇に与える影響を検討する。図4.13は本検討で用いる実遮断器の消弧室である。同図の消弧室では、U字状に折り返した固定電極を使用しており、固定電極の一部の面は可動電極が回転できるように中央を切削している。消弧材料は固定電極の切削面を覆うように設けており、固定電極と可動電極間で発生したアークをその消弧材料の壁で挟むようにして二面の細隙空間を構成している。本検討では、図4.14に示す3ケースの条件のアーク電界を比較することで、実遮断器での細隙空間におけるアーク電界上昇を評価した。ここで、消弧板に電位プローブを設けて消弧板間の電圧を測定し、その電圧から消弧板間で生じる電極降下電圧の19.2 V(式(3.8)参照)を差し引き消弧板間の間隔で除することでアーク電界を推定した。また、3ケースの条件の選定理由は次に示す通りである。

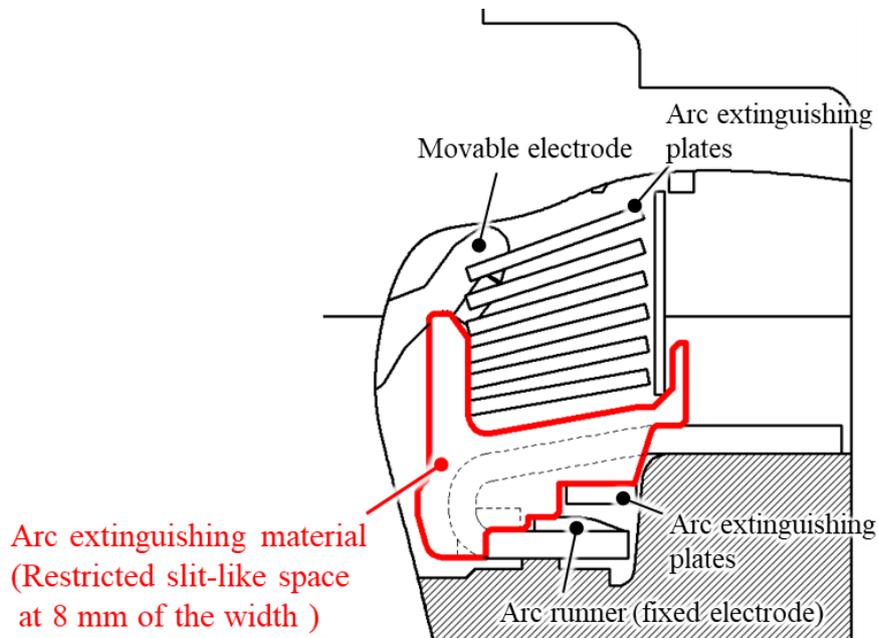


図 4.13 消弧材料を用いた細隙空間を適用した実遮断器の消弧室

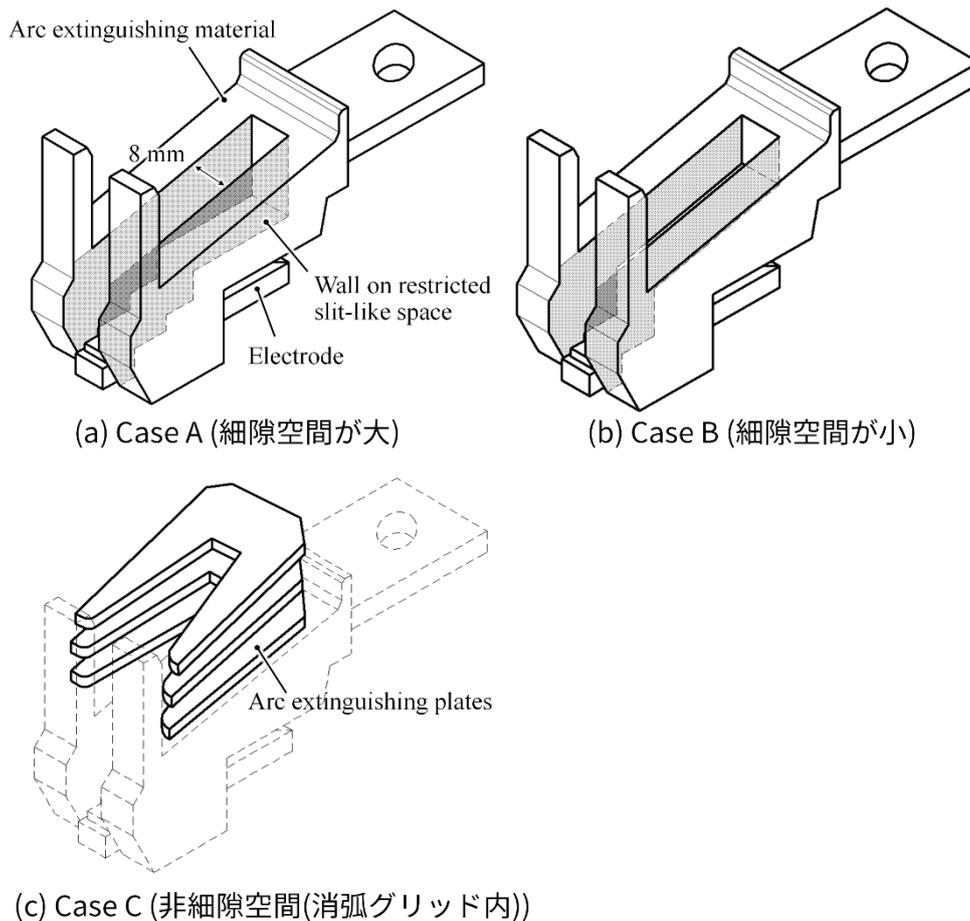


図 4.14 実遮断器における細隙空間の効果検討用モデル

Case A では消弧グリッドの配置箇所以外の空間を極力消弧材料で覆うことで細隙空間による影響が最も強く表れる条件としている。Case B では固定電極の切削面などアークと固定電極を隔離するために必要な箇所のみ消弧材料を残し、それ以外の箇所を削除した部分的に細隙空間が存在する条件としている。本ケースでは Case A と比べて消弧材料でアークを覆う面積は約 4 割縮小している。Case C では消弧材料に隣接して配置されている消弧グリッド内の空間(非細隙空間)であり、Case A および Case B の細隙空間の影響がある場合に対する比較基準とするための条件としている。

図 4.15 は上記 3 ケースにおけるアーク電界の比較結果である。同図において Case A は各条件の中でアーク電界が最も高く、Case B、Case C の順にアーク電界は低くなる。Case A では図 4.9 に示す細隙幅 7 mm の条件と比較的近いアーク電界を示し、Case C では図 3.15 に示した消弧グリッド間のアーク電界とほぼ同様の値となる。本比較結果より、実遮断器においても細隙空間の適用によりアーク電界は上昇し、その上昇値は前節までの密閉容器を用いて評価したアーク電界に概ね一致することを確認した。

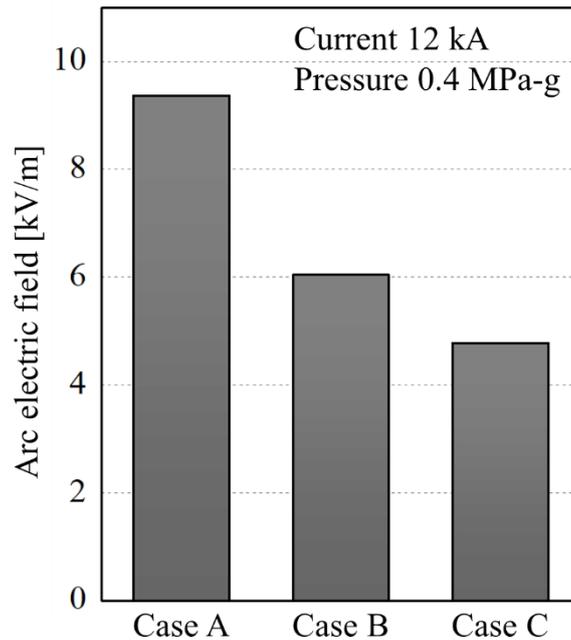


図 4.15 細隙空間の条件が異なる場合のアーク電界の比較

#### 4.4 まとめ

本章では、配線用遮断器の消弧室空間内に搭載するポリアミド樹脂製の消弧材料がアーク電圧に及ぼす影響を検討するため、消弧材料で構成された二面の細隙空間において、大電流気中アークのアーク電界と各種設計パラメータおよびアークパラメータとの関係を調査した。本章にて明らかにした消弧材料で構成された細隙空間内のアーク電界の特性を以下にまとめる。

- 0.2 MPa-g 未満の雰囲気圧力条件下ではアーク電界は主に圧力の影響を受けて上昇するが、0.2 MPa-g 以上の雰囲気圧力条件下ではアーク電界は主に電流の影響を受けて線形増加することが明らかになった。
- 電流がアーク電界に及ぼす影響はアーク空間の制限から生じる特性であることが明らかになった。また、細隙空間の細隙幅を狭くすると電流増加によるアーク電界の上昇効果は高まることがわかった。
- 消弧材料からの溶発ガスの影響を受けてアーク電界は 1.5–2.5 倍に高まることが明らかになった。

# 第5章 小電流気中アークにおける高効率アーク電圧上昇 制御方式の構築

## 5.1 はじめに

近年の需要が著しい太陽光発電設備やデータセンタなどが接続される図 5.1 に示すような直流電力システムでは、電力利用効率の改善に向けてシステム電圧を高電圧化するための多くの検討[41][42]がなされており、この中でも遮断器や開閉器などの開閉機器の高電圧化が安全性確保の観点から優先的研究課題として位置づけられている[31]。1.2.3 節で述べたように、直流回路では電流ゼロ点を生成し回路遮断するためには、開閉機器の消弧室における発生アーク電圧をシステム電圧以上に高める必要があり、開閉機器の高電圧化のためにはアーク電圧を如何に高めるかが重要な課題となる。

前章までで議論してきた大電流の電流遮断に対応した消弧室では消弧グリッドなどを搭載するスペースを設けられるが、小電流の電流遮断のみを対象とした開閉器(短絡保護機能を持たない開閉機器)に搭載される消弧室はそのスペースは小さく、消弧グリッドなどの大形の消弧部品の適用は難しい。このため、開閉器の高電圧化への対応として、従来は大形の配線用遮断器での代替や、冷却性能に優れた水素ガスが充填された特殊なガス容器を用いた消弧室[103]などが使用されてきた。しかしながら、これらは経済性や設備サイズの大形化などの問題があるため、気中においてアーク電圧を高めることができる新しいアーク制御方式の

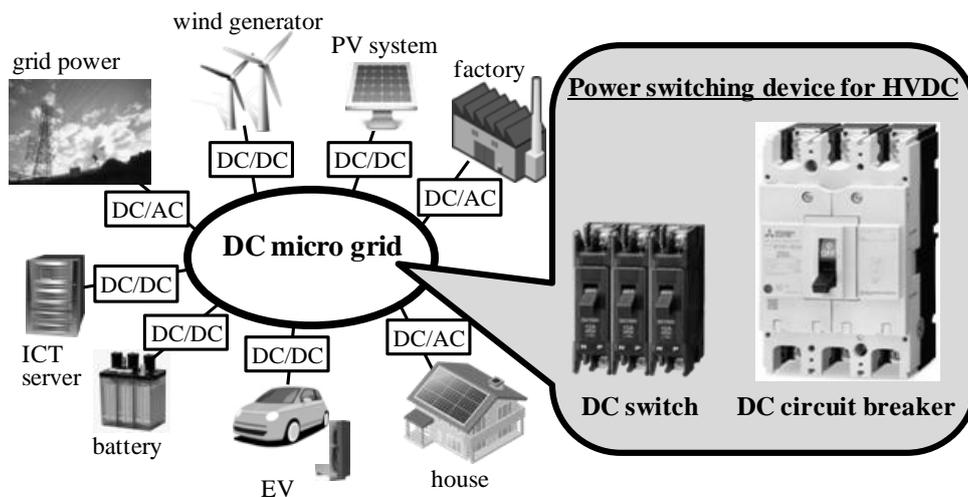


図 5.1 直流電力システムの例

構築が求められている。

また、数 10 - 100 A クラスの直流小電流の遮断では、アークを制御するための自己電流による電磁石効果を利用した電磁力は小さくなるため、一般的に永久磁石を用いてアークを伸長する方法が採用される[102]。しかしながら、永久磁石を用いる方法では磁石の極性(N / S 極)の関係から、アークに作用する電磁力の向きが固定化し、特定の通電方向以外で遮断性能は著しく低下する場合がある。このため、+ / -極の両方の極性で同一の遮断性能を確保するためには、アークを伸長させる消弧室空間を複数用意しなければならず、消弧室は大形化する傾向があった。

そこで本章では、上記課題を解決するために新たに考案した、小形消弧室向けの通電方向に依存しない効果的にアーク電圧を高める制御方式についての検討結果をまとめる。本章では、まず考案したその制御方式の原理説明を行い、次に要素試験モデルによるアーク電圧上昇効果に関する検討結果を述べる。そして、最後に実際の消弧室に本考案方式を適用時の有効性の検証結果を報告する。

## 5.2 高効率アーク電圧上昇制御方式の原理および検証方法

### 5.2.1 アーク制御原理

図 5.2 は考案した高効率アーク電圧上昇制御方式の主要構成要素とそのアーク制御原理の説明図である。まず、主な構成要素として、アークに駆動するための磁束を生成する磁石と、磁性体で形成された棒状の鉄心(吸引棒)と、これら 2 部品を覆う消弧材料で成形された絶縁カバーの 3 つの部品を用いる。吸引棒の一端面に磁石を配置し、他端面をアーク発生位置である接点間に近接させる。これにより、吸引棒周囲の空間において吸引棒を軸中心とした対称的な漏れ磁束が生じる磁場分布が形成される。この磁場分布内でアークが発生すると、アーク内を流れる電流と磁束との相互作用でアークを駆動、伸長するためのローレンツ力が発生する。

次に、本制御式によるアークの制御プロセスについて図 5.2 を用いて説明する。

- (I) 吸引棒先端で生じる漏れ磁束の作用でアーク内に電磁力が発生し、アークは吸引棒軸上から外れるように図中下側に移動する。
- (II) 吸引棒の先端から磁石の S 極へ回り込む磁束の作用によってアークは吸引棒側面空間へ移動する。

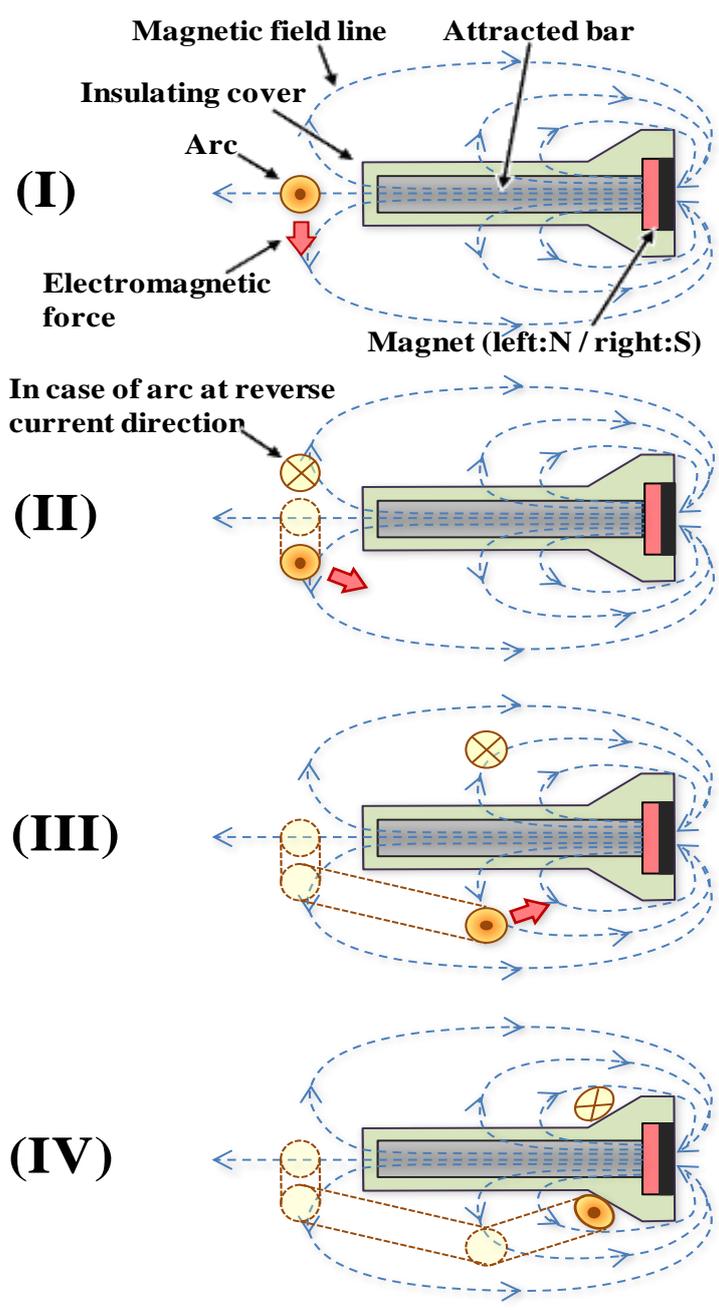


図 5.2 高効率アーク電圧上昇制御方式の原理説明図

(III) 吸引棒側面から生じる漏れ磁束がアークに作用し、アークは磁石配置側に伸長していく。

(IV) 吸引棒側面空間の奥側でアークが絶縁カバーに衝突し、アークと絶縁カバー間で熱分解反応が生じ絶縁カバーから消弧性の溶発ガスがアークに吹きつけられる。

以上の過程により、アーク内で輻射損失や対流熱損失などのエネルギー損失が増大し、アークは冷却され、その導電性を失い消弧する。本考案方式では、通電方向が逆の場合でも、吸引棒の反対側の空間(図 2 の吸引棒上側)でアークを駆動、伸長することができるため、通電方向に関係なくアークを消弧することができる。また、磁石からの磁束は吸引棒を介してアークに作用するため、磁石をアークから離れた位置に配置でき、アーク熱による磁石の熱減磁を防止することができる。これに加えて、電磁力で絶縁カバーにアークが衝突した状況下で、アークに溶発ガスを吹き付けるため、水素などの特殊なガス中のアーク制御や大きな消弧空間でアークを長く伸ばす制御を行わずともアーク電圧を高めることが可能になる。

## 5.2.2 要素試験モデル

前節の制御原理に対して、アーク電圧の観点からその有効性を検証するため、図 5.3 に示す要素試験モデルを用いてアークの磁気駆動時と消弧材料へのアーク衝突制御時のアーク電圧上昇効果を評価する。

同図のモデルでは、一对の直方体の棒状銅製電極を平行に配置し、電極間に配置したヒューズを通电して溶断させることでアークを発弧させる。電極の側面にはアレイ状に並べたネオジウム磁石を配置しており、この磁石の磁気作用により電極上でアークを駆動する。アークの初期位置(ヒューズ配置位置)よりアークを約 300 mm 駆動した先に溶発性樹脂で成形された消弧材料を配置する。この消弧材料に到達するまでの間の駆動状態にあるアークを“駆動アーク”と定義し、到達した後の消弧材料に衝突した状態のアークを“衝突アーク”と定義して、それぞれの状態のアーク電圧特性を評価する。アーク長とアークに作用させる磁束密度はそれぞれ電極間隔と電極-磁石間の間隔で調整し、評価に使用するアーク長の値は高速度カメラ(観測速度 10,000 fps)で観測するアークの様態から抽出する。また、実際の消弧室のような狭い空間を模擬するため、電極側面には  $\text{SiO}_2$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$  を主要成分とした耐熱結晶化ガラス板の対を 3 mm 間隔で挟んで配置する。試験電流は電源電圧と回路抵抗  $R$  の組合せで調整する。また、試験回路には、瞬時的なアーク電圧の増減で電流値が大きく変動しないようにリアクトルを配置し、そのインダクタンス  $L$  は回路時定数( $=L/R$ )が約 10 ms となるように設定している。詳細な試験条件は表 5.1 に示す。

表 5.1 要素試験モデルにおける試験条件

DC power supply	Current	Electrode gap	Magnetic flux density exerted on arc	Extinguishing material
500 - 750 V	10 - 100 A	5 - 30 mm	5 - 110 mT	Polyamide 66

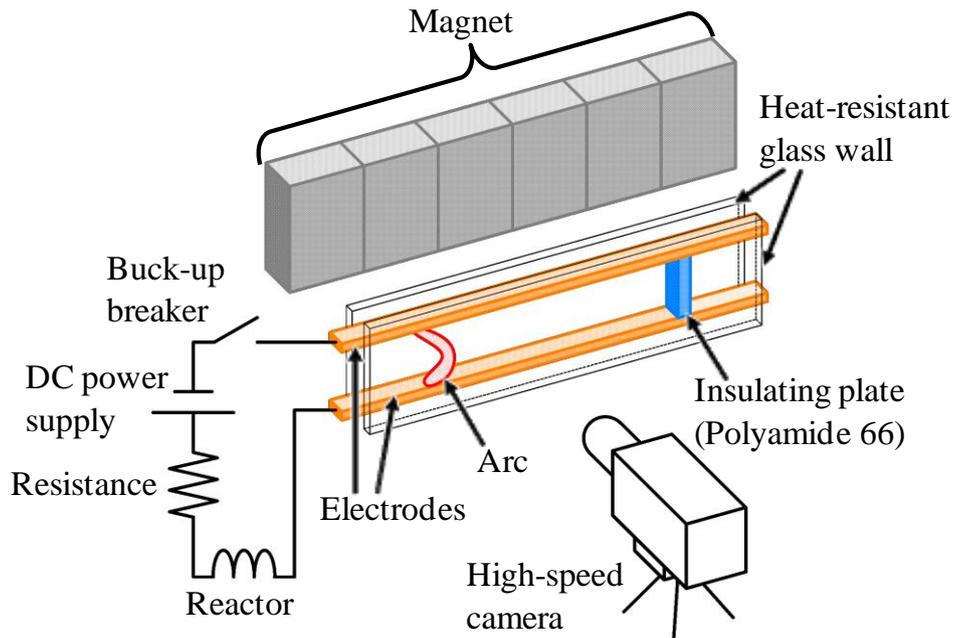


図 5.3 要素試験モデル

### 5.2.3 実開閉器を用いた検証モデル

図 5.4 は図 5.2 に示すアーク制御方式の構成を市場に流通する開閉器(三菱電機株式会社製, BH-C1) の消弧室に適用した例である。消弧材料 (Polyamide 66) で成形した絶縁カバーの内部に磁石(2.4 mm × 3.3 mm × 6 mm)および吸引棒(長さ 20 mm, 板厚 1.6 mm)を組み込み、絶縁カバーは可動接点の開極軌道と干渉しないように配置している。絶縁カバー側面側(図の紙面奥側と手前側)にはそれぞれ約 2 mm 程度の空間を設け、この空間内にアークを引き込めるようにしている。また、吸引棒の先端部は、接点間で作用する磁束密度を高めてアークをすぐ引き込めるようにするため、絶縁カバーから突出させて配置しており、固定接点に近接するように延伸させている。また、詳細は 5.4 節で後述するが、磁石の裏面(吸引棒配置位置と逆

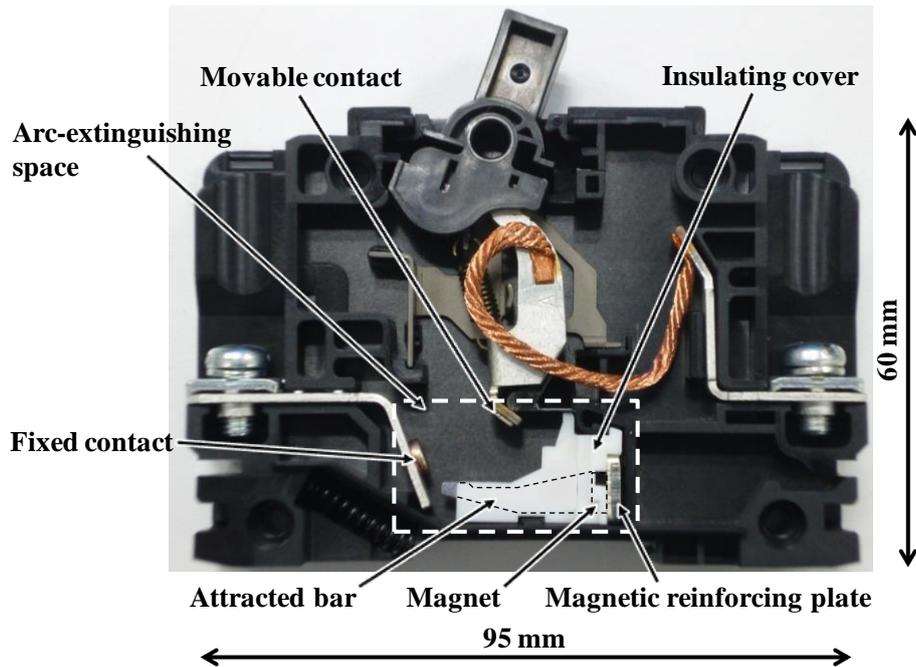


図 5.4 実開閉器を用いた検証モデル

側)には磁性体で形成された磁気補強板を設けており、吸引棒の周囲で形成する磁気回路の磁気抵抗を低減させ、アークに作用させる磁束密度を高めている。

制御中のアーク挙動を高速度カメラで観測するために、消弧室の側面の一部に透明のアクリル製の観測窓を適用している。また、アークの観測と同時にアーク電圧、電流を測定することで、アーク挙動に伴うアーク電圧の変化も併せて評価する。

## 5.3 駆動アークおよび衝突アークのアーク電圧特性

### 5.3.1 アーク電圧のアーク長依存性

本節では図 5.3 の要素試験モデルを用いて考案したアーク制御方式を適用した場合のアーク電圧の上昇効果を評価する。図 5.5 は本実験モデルにおけるアーク電圧・電流波形例である。ここで、アーク電圧は 2 段階の上昇が発生していることを確認できる。最初の電圧上昇は駆動状態にある駆動アークのアーク電圧上昇であり、約 20 ms に至るまで消弧材料へ向かってアークは駆動している。20 ms 以降の 2 段階目の電圧上昇は消弧材料へアークが衝突する衝突アークのアーク電圧上昇であり、この状態ではアーク電圧は約 2 倍上昇していること

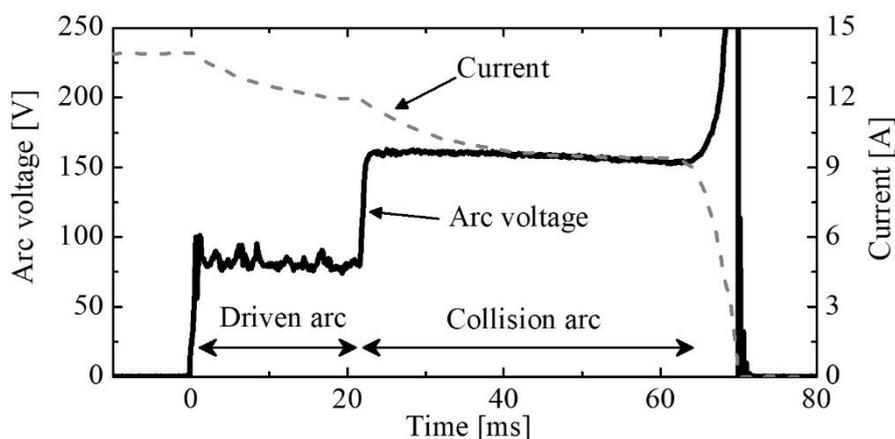


図 5.5 要素試験モデルにおけるアーク電圧および電流波形例

がわかる。なお、約 70 ms 付近でバックアップ遮断器を動作させ、回路電流を強制的に遮断している。

図 5.6 は駆動アークおよび衝突アークにおけるアーク電圧とアーク長の関係を示した一例である。駆動アークおよび衝突アークともにアーク電圧はアーク長に対して正の線形関係があることがわかる。ここで、同図において電流は約 10 A、アークに作用させる磁束密度は約 40 mT の条件であり、これらの条件が異なる場合においてもこの線形関係は同様に確認できる。

従って、各制御のアーク電圧をアーク長で除することにより、アーク空間内の平均的な電界強度(アーク電界)で評価できる。以降の節ではアーク電界を用いて駆動および衝突アークのアーク電界と磁束密度および電流の関係を評価する。

### 5.3.2 アーク電界の磁束密度依存性

図 5.7(a)と図 5.7(b)はそれぞれ異なる電流条件における駆動アークおよび衝突アークのアーク電界とアークに作用する磁束密度の関係である。同図において、少なくとも 10 mT 以上の磁束密度をアークに作用させることで駆動アークあるいは衝突アークの制御状態に遷移する。そして、両制御状態ともに電流が小さい条件では磁束密度の増加に伴ってアーク電界は緩やかに上昇する。一方、電流が大きい条件では、電流が小さな条件と比べると磁束密度が増加してもアーク電界の上昇は小さくなる。

これは、アークのエネルギー損失と入力エネルギー(抵抗加熱)の割合が電流条件により変化するためと考えられる。松村らの検討[115]では気中アークに圧縮空気の吹付けを行うこと

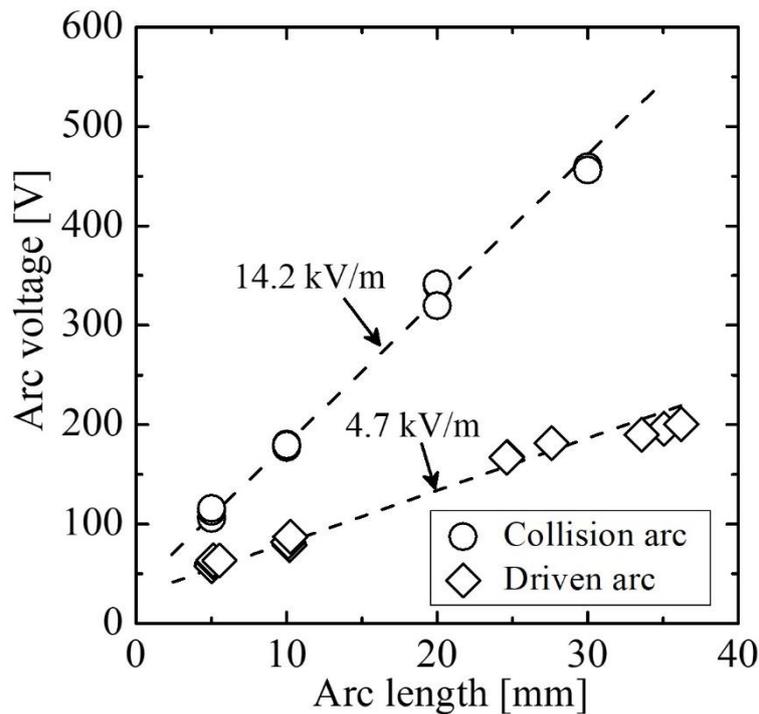
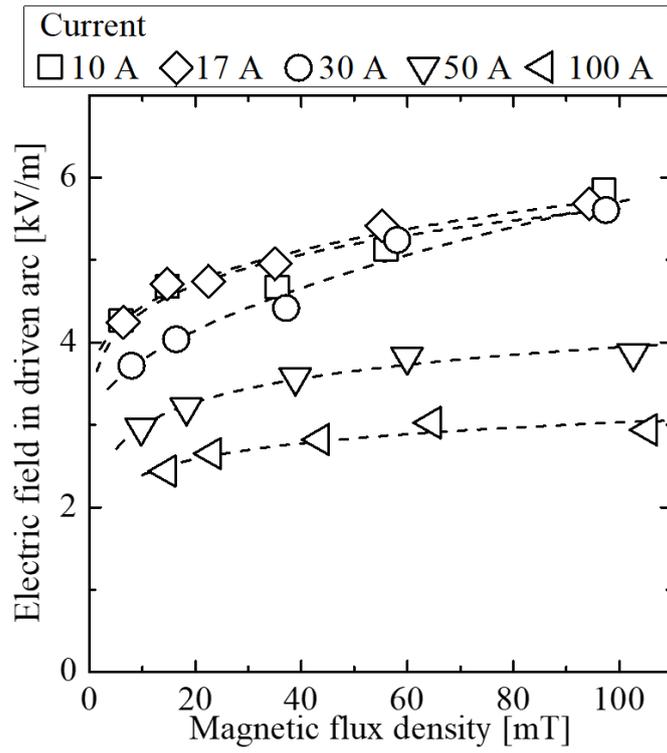


図 5.6 駆動アークおよび衝突アークにおけるアーク電圧とアーク長の関係

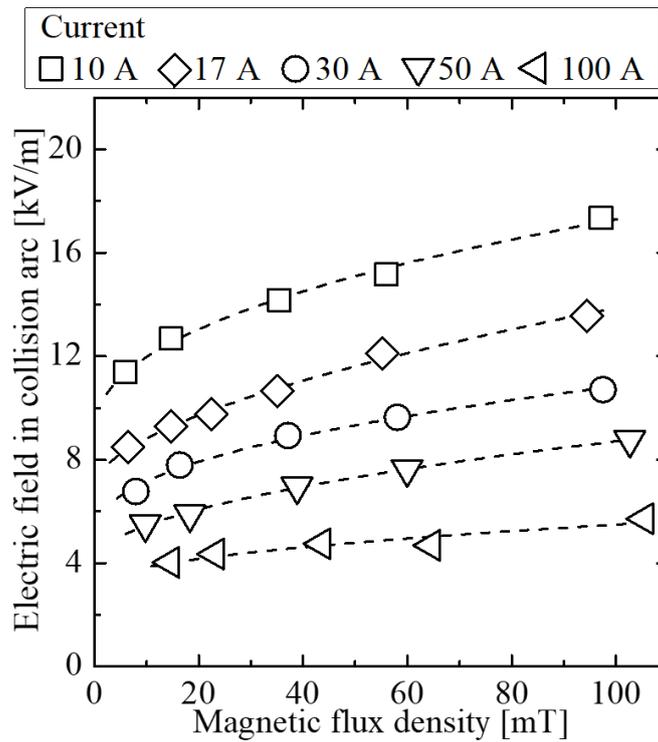
でアークのエネルギー損失が増大しアーク電界が高まるが、吹付け流量を増加させてもそのエネルギー損失が及ぼすアーク電界への寄与は飽和し小さくなることを明らかにしている。本実験モデルでも、駆動アークの周囲の空気にぶつかりながらアークが駆動される状況は、相対的にはアークが空気に吹付けられる状況に近い条件になると考えられる。一方、衝突アークでは、消弧材料からの溶発ガスがアークに吹き付けられる状況にあると考えられる。これらのことから、電流が大きい条件では入力エネルギーに比べてエネルギー損失の割合が小さくなり電流が小さい条件に比べてアーク電界の上昇が小さくなると考察する。

### 5.3.3 アーク電界の電流依存性

図 5.8 に約 100 mT の磁束密度をアークに作用させた場合における駆動アークおよび衝突アークのアーク電界と電流の関係を示す。同図において、比較参照のため図示したフリーアークのアーク電界[116]と比べて駆動アークは約 7–10 倍高く、衝突アークでは約 20–30 倍高くなることがわかる。また、各制御状態のアーク電界は電流が小さい条件で高く、電流の増加とともにアーク電界は低くなる。このアーク電界の電流依存性は、フリーアークの電界特性とほぼ同様で、各制御状態のアークともにフリーアークの特徴と同じように電流増加に伴う



(a) 駆動アーク



(b) 衝突アーク

図 5.7 駆動アークおよび衝突アークにおけるアーク電界の磁束密度依存性

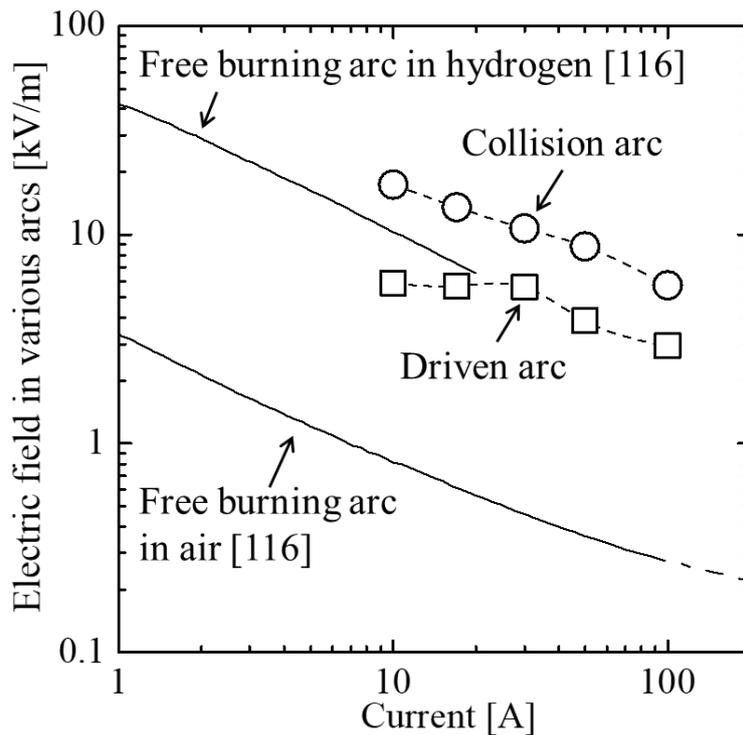


図 5.8 駆動アークおよび衝突アークにおけるアーク電界の電流依存性

アークへの入力エネルギーの増大からアークの熱的半径(高温領域)は拡大し、内部抵抗が低下したため生じているものと考えられる。また、駆動アークの 10 - 30 A の電流条件ではアーク電界はほぼ同程度となるが、これは図 5.7(a)を見ると磁束密度の高い領域で同等になる傾向を示すことから、前節の考察のようにアークの駆動に伴うエネルギー損失の効果が飽和した結果によるものと考えられる。

ここで、同図には参考のため水素ガス充填環境下におけるアーク電界[116]も記載しているが、衝突アークでは水素ガス中のアークよりも高いアーク電圧が発生している。消弧材料で使用する Polyamide 66 の化学式は $(C_{12}H_{22}N_2O_2)_n$ であり水素原子が多く含まれる。アークが消弧材料に衝突した際に生じる熱分解反応により、消弧材料から多くの水素原子が放出しアーク内部に混入すると考えられる。このため、衝突制御ではあらかじめ水素を充填しなくても遮断時のみ高密度の水素含有ガスをアークに向かって吹付けることが可能になり、大気中においても高いアーク電圧を確保することができる。

以上の結果から、図 5.2 のアーク制御の適用により、気中の小さな消弧室において高いアーク電圧上昇が期待できると考えられる。

## 5.4 実開閉器モデルへの高効率アーク電圧上昇制御方式の適用

### 5.4.1 磁気構造と磁束密度

本節では、まず図 5.4 の実開閉器に適用する考案方式の磁気構造について説明し、5.4.2 節にて考案方式を実開閉器に適用した場合の遮断試験結果を述べる。

図 5.9 は実開閉器の消弧空間に適用する磁気構造である。同図では、磁性体で形成された構成物と磁石のみを図示し、絶縁カバー等の非磁性体の構成物は省略している。同図の磁気構造を実開閉器に適用するにあたり、次の2点の磁束密度を高めるための構成を適用している。1点目は、吸引棒とは反対方向の磁石面への鉄製の磁気補強板(板厚2 mm)の配置である。この磁気補強板は、磁石、吸引棒とそれらの周囲空間で形成される磁気回路の磁気抵抗を低減させ、アークに作用する磁束密度を高めている。2点目は、吸引棒の先端側に向かって漸次縮小するように形成した吸引棒の形状である。これは吸引棒内を通過する磁束を先端側で密集させることで吸引棒先端の磁束密度を高め、吸引棒先端近傍に位置する接点間における

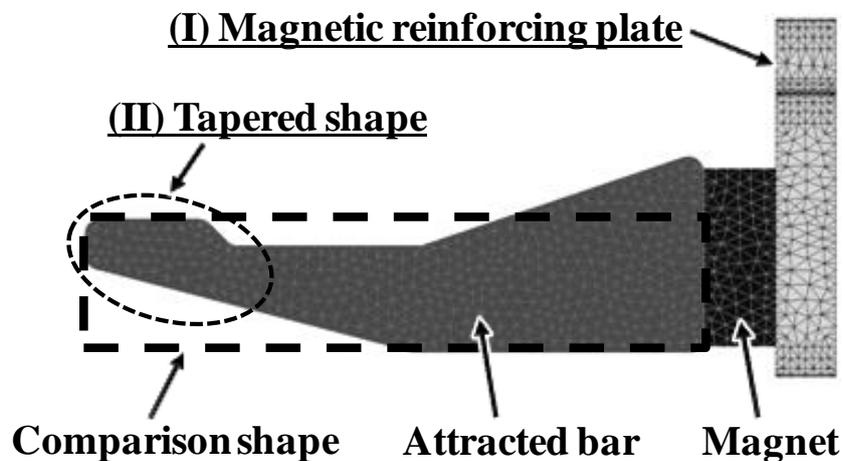
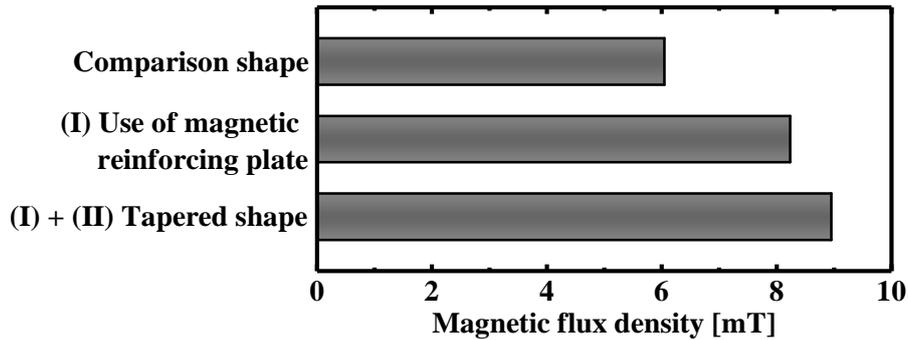
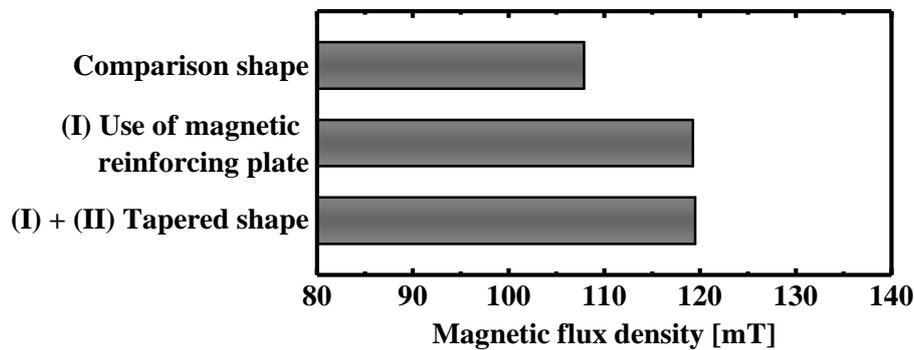


図 5.9 実開閉器に適用する磁気構造



(a)接点間の磁束密度



(b)アーク衝突面の磁束密度

図 5.10 図 5.9 の磁気構造適用時の磁束密度

磁束密度を増加させる。

図 5.10 は本磁気構造を適用した場合の磁束密度を 3 次元磁界解析により計算した結果である。ここで、同図では接点間および絶縁カバーとアークの衝突面の 2 か所の磁束密度を示している。接点間の磁束密度は、接点間に位置するアークを吸引棒の側面側への駆動時間に影響する。絶縁カバーとアークの衝突面の磁束密度は、図 5.7 に示すようにアーク電圧の上昇値に影響する。また、同図において、参考までに、上記 2 点の構成の優位性を示すため、磁気補強板を適用せず直方体の吸引棒(図 5.9 の破線部)を用いた場合の磁束密度も記載している。磁気補強板の適用により、接点間およびアーク衝突面の磁束密度がそれぞれ約 30%、約 10%高まり、これに加えて吸引棒を漸次縮小する形状の適用により接点間の磁束密度はさらに約 10%上昇する。これらの構成を適用した実開閉器では接点間およびアーク衝突面でそれぞれ約 9 mT、約 120 mT の磁束密度が形成され、この磁束密度の作用を受けアークは絶縁カバーのアーク伸長面まで引き伸ばされる。

## 5.4.2 実開閉器モデルにおけるアーク挙動とアーク電圧上昇効果

図 5.11 は DC 800 V / 20 A の試験回路において図 5.4 の実開閉器モデルで電流遮断試験を実施した際のアーク電圧および電流波形と高速度カメラによるアークの観測映像である。アークの観測映像に着目すると、アークは接点开離(0 ms)直後から吸引棒の側面へ引き込まれていき、約 8 ms かけて絶縁カバーのアーク衝突面に到達する。8 ms 以降では絶縁カバーから消弧性ガスがアークに向かって放出し、アークの発光領域は徐々に細く縮小するとともにその発光強度は減衰していく。この 8 ms 以降の時間帯でアークは衝突アークの制御状態となり、アークのエネルギー損失が大きくなることでアーク電圧は高まる。また、この時間帯ではアーク長は変動しないが、時間とともにアーク電圧は上昇し、これに伴って電流は減少する。このアーク電圧上昇は図 5.8 の電流依存性の特性に伴い生じており、アーク電圧が高まることで電流は低減し、電流低下に伴いアーク電圧はさらに上昇するフィードバックが発生するようになる。そして、最終的にアーク電圧は電源電圧の 2 倍以上の 1600V 以上まで上昇し、回路内で電流ゼロ点が形成され、電流遮断が完了する。

以上より、図 5.2 に示したアーク制御方式が有効であることを実開閉器において実証し、小さな消弧空間でも高いアーク電圧を発生できることを確認した。

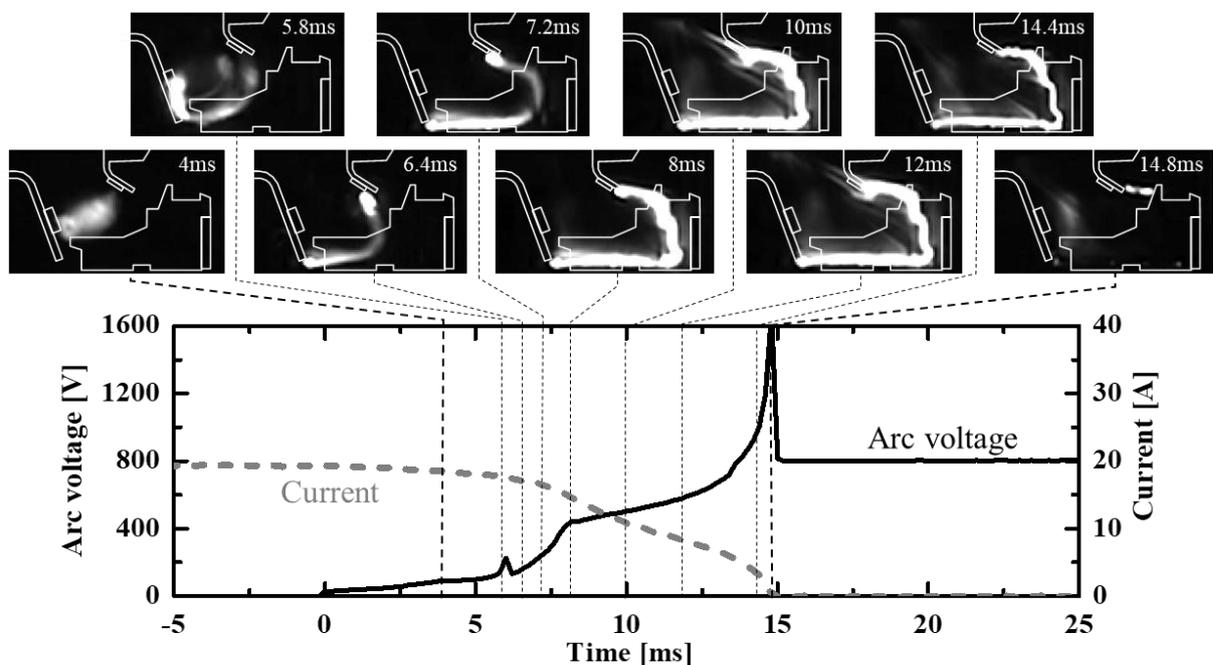


図 5.11 実開閉器モデルにおけるアーク電圧および電流波形とアーク観測映像

## 5.5 まとめ

本章では、太陽光発電設備などの電力システムで要求される直流高電圧回路における小電流遮断を実現するために、新たな高効率アーク電圧上昇制御方式を考案し、本考案方式の有効性を検証した。以下に本考案方式の特徴および有効性の検証結果をまとめる。

- 本考案方式の特徴として、磁化極性が固定の永久磁石を使用した場合においても、通電方向に関係なくアークを伸長できる。また、アークを伸長させた後にアークを消弧材料に衝突させることで、消弧材料からの溶発ガスを効率的にアークに吹き付け、アークを冷却し消弧することができる。本方式により、通電方向を考慮することなく直流高電圧回路の回路開閉が可能になり、蓄電池等の逆電流が生じる機器への接続や誤配線による事故を未然に防止できるようになる。
- 電磁力によりアークを駆動させる制御状態の駆動アークと、消弧材料に衝突させる制御状態の衝突アークのアーク電界上昇効果を評価した結果、単調なアーク伸長制御と比べてアーク電界は駆動アークで約7-10倍、衝突アークで約20-30倍上昇することがわかった。特に衝突アークで、水素ガス中のアークよりもアーク電圧が高まることを確認し、特殊なガス容器を使用することなく大気中でアーク電圧を効果的に高められる見込みを得た。
- 実開閉器にて、本考案方式の原理に沿ってアークが制御され、アーク電圧が上昇することを実証した。アーク電圧は最終的に電源電圧の倍となる1600V以上まで上昇した後に電流ゼロ点が生成され、回路遮断に成功した。この結果として、本考案方式が小さな消弧空間でもアーク電圧を効果的に高めることができ、小形消弧室の高電圧化に有効であることを実証した。

## 第6章 結論

本論文では、低圧配線用遮断器の高性能化に資するべく、数 kA 以上の大電流気中アークのアーク電圧と消弧室に係る設計およびアークパラメータとの関係性について複合的かつ定量的な評価を行い、各種パラメータがアーク電圧上昇に与える影響を調べた。また、数 10 A - 100 A の小電流気中アークに対してアーク電圧を効果的に高めることができるアーク制御方式を提案し、実開閉器の小形消弧室においてその有効性を調べた。以下では本論文で得られた結論をまとめるとともに、今後の課題を述べる。

### 6.1 本論文の結論

まず、低圧配線用遮断器の消弧室内に消弧グリッドおよび消弧材料を配置しない条件で、数 kA 以上の大電流気中アークに対するアーク電圧の電圧特性を実験から調べた。ここでは (1)電流値、(2)アーク長、(3)電極面積、(4)雰囲気圧力の 4 種のパラメータのアーク電圧に及ぼす影響を複合的に評価し、その評価に基づき、アーク電圧とこれらのパラメータ間の関係式を構築した。以下にここで得られた主要な結論をまとめる。

- 電極間の電極近傍の領域とその近傍を除いた領域(アーク空間)では、アーク電圧(電界)特性は異なり、その特性に主に影響を与えるパラメータもそれら二つの領域では異なることがわかった。具体的には、電極近傍のアーク電圧は、電流値に正の線形関係を持ち、電極面積の 0.8 乗に反比例すること、アーク空間のアーク電圧は、アーク長に正の線形関係を持ち、大気圧からの圧力上昇値の約 0.3 乗に比例することがわかった。また、アーク空間のアーク電圧への雰囲気圧力の影響は、雰囲気圧力の増加に伴ってアークの電路断面積は収縮することで生じていることが明らかになった。
- 上述の 4 種のパラメータとアーク電圧の関係を表現する以下の式を本実験結果に基づき構築した。

$$V_{arc} = 8S^{0.4} + 0.13 \left( \frac{I}{S^{0.8}} \right) + (3\Delta P^{0.3} + 1.5)L_{arc} \quad (6.1)$$

ここで、 $V_{arc}$  はアーク電圧[V]、 $I$  は電流瞬時値[A]、 $S$  は電極面積[mm<sup>2</sup>]、 $\Delta P$  は大気圧からの圧力上昇値[MPa-g]、 $L_{arc}$  はアーク長[mm]である。また、この関係式により、実遮断器のアーク電圧を概ね再現できることも本論文中の遮断試験から確認した。

次に、数 kA 以上の大電流気中アークに対して、アークの分割をもたらす消弧グリッドのアーク電圧に及ぼす影響を実験により調べた。ここでは、(1)電流値、(2)アーク長、(3)雰囲気気圧力、(4)消弧板枚数、(5)電磁力の5種のパラメータとアーク電圧の関係を調べた。また、ここで得られたアーク電圧特性と先の消弧グリッドを配置しない場合のアーク電圧特性(式(6.1))との対比から、消弧グリッドがアーク電圧に与える影響を検討した。以下にここで得られた主な結論をまとめる。

- 消弧グリッドによるアークの分割は、その分割数に応じた電極降下電圧を発生させるだけでなく、分割時に生じる溶発蒸気の効果により単位アーク長あたりのアーク電圧(アーク電界)を約 3 kV/m 上昇させることが明らかになった。一方で、この溶発蒸気のアーク電圧への影響は電流値や雰囲気気圧力に左右されないことがわかった。
- 本実験結果に基づき、消弧グリッド導入時の電磁力を除く上述の4種のパラメータとアーク電圧の関係式を次式の通り構築した。

$$V_{arc} = \left( 8S^{0.4} + 0.13 \left( \frac{I}{S^{0.8}} \right) \right) + 19.2(n-1) + (2 + 6\Delta P^{0.3})(L_{arc} - n \cdot t_g) \quad (6.2)$$

ここで、 $V_{arc}$  はアーク電圧[V]、 $I$  は電流瞬時値[A]、 $S$  は電極面積[mm<sup>2</sup>]、 $\Delta P$  は大気圧からの圧力上昇値[MPa-g]、 $L_{arc}$  はアーク長[mm]、 $n$  は消弧板枚数、 $t_g$  は消弧板の板厚[mm]である。

種々の異なる遮断条件下でのアーク電圧に対して、遮断試験での実測値と本関係式からの推定値を比較した結果、実測値と推定値が概ね一致することを確認した。すなわち、本関係式は消弧グリッド配置時の消弧室の設計に活用可能である。

- 電極から消弧グリッドのアーク分割面の間で作用する電磁力が一定値以上の条件では、式(6.2)でアーク電圧を定量的に概ね再現できるものの、一定値未満では式(6.2)はアーク電圧を過大に算出することがわかった。さらに、消弧グリッドの導入によりアーク電圧の上昇を可能にする電磁力条件を整理し、その結果から、アーク電圧上昇に最適なグリッド配置を見出した。

さらに、数 kA 以上の大電流気中アークに対するアーク空間のアーク電界に焦点を当て、消弧材料を用いた細隙空間によるアーク空間の制限がアーク電界に及ぼす影響を調査した。その結果、

- 雰囲気気圧力が 0.2 MPa-g 未満の条件では主に圧力増加の影響を受けてアーク電界は上昇することがわかった。一方、0.2 MPa-g 以上の条件では圧力増加による寄与は小さくなり、アーク電界は電流増加の影響で上昇することが明らかになった。

- 上記のアーク電界に対する電流の影響は細隙空間でアーク空間を制限したことによる電気抵抗の増加から生じていることが明らかになった。また、その影響は細隙幅条件を 10 mm 以下にした場合に表れることがわかった。また、その電流の影響に重畳し、消弧材料の溶発ガスの影響からアーク電界は約 1.5 – 2.5 倍高まることが明らかになった。

最後に、直流給配電システムで求められる小形開閉機器に適用可能な消弧室の高性能化に向け、省スペース環境下で、数 10 – 100 A の小電流気中アークのアーク電圧の高電圧化を可能にする以下のアーク電圧上昇制御方式を提案し、その提案した方式の有効性を実開閉器で検証した。以下にその結果をまとめる。

- アークを棒状鉄心(吸引棒)に沿って伸長させた上で、消弧材料に衝突させてアーク電圧を高める方式を提案した。本方式では、永久磁石、棒状鉄心(吸引棒)の組み合わせで対称磁気分布を形成させることで、吸引棒に沿ってアークが伸長するようになる。また、アークを消弧材料に衝突させることで、消弧材料からの溶発ガスがアークに吹き付けられるようになり、アークの内部抵抗が上昇する。
- 本方式のアーク電圧上昇効果を基礎実験により調査した結果、単調なアークの伸長制御と比べてアーク電界が約 20 – 30 倍高まることを確認した。
- 本方式を適用した実開閉器において DC 800V / 20 A の直流高電圧回路の電流遮断に成功し、その有効性を実証した。本方式では通電方向に関係なくアークの制御が可能であるため、逆電流発生時や誤配線等の事故を未然に防止でき、開閉器の安全性・信頼性向上にも資する。

## 6.2 今後の課題

- 本論文では、消弧グリッドとアークが近接している状況において、消弧グリッドでアーク電圧を上昇させるために必要な電磁力が明らかになった。しかしながら、実遮断器では消弧室サイズの制約などから電極を消弧グリッドに近接させた配置が難しい場合もある。この場合では消弧グリッドから離れた位置からアークを伸長させる必要がある。一方、消弧グリッドと消弧材料が併設された場合、消弧材料からの溶発ガスによる導電率低下や対流などの影響から消弧グリッドへアークを誘導しやすくなるという報告がある[51]。消弧グリッドが電極から離れているケース、または消弧材料が併設されているケースでは、消弧グリッドでアーク電圧を高めるために必要な電磁力条件が増減することが考えられる。こ

のため、今後、消弧グリッドとアーク発生位置の相関関係や消弧材料が電磁力条件に与える影響についても明らかにする必要がある。

- 消弧グリッドによるアーク分割時において、消弧グリッド内の空間では電極降下電圧による電圧上昇を確認したが、電極の対向面の消弧板界面では明確な電圧上昇を確認できなかった。消弧板界面でも電極界面と同様にシース等の電位勾配が発生すると考えられるが、本論文の評価では電位勾配の寄与が小さいことが示唆していた。消弧板の電極対向面では、電極から激しいアークジェット[87]が吹付けられ、光学観測の結果よりアークが局所的に広がっていることを確認している。さらに、この消弧板界面では高密度の中性粒子によるスパッタリング、高密度の金属蒸気の混入、二次電子放出などの現象が生じていることが考えられる。アークジェット吹付け環境下での消弧板界面のアーク電圧上昇機構を理解するためには、今後、これらの影響を詳細に分析し明らかにする必要があると考える。
- 消弧グリッドまたは消弧材料を配置の有無に関係なく、雰囲気圧力が 0.2 MPa-g 前後を境に圧力上昇に対してアーク電圧の特性が大きく変化する。本論文では、この圧力依存性はアークの断面積変化に伴う特性であることを消弧グリッドや消弧材料を配置しない条件で示した。しかしながら、消弧グリッドや消弧材料を配置する場合、アーク電圧には鉄または高分子の溶発ガスの影響やアーク空間の制限に伴う影響を受ける。これにより、熱ピンチまたは磁気ピンチの作用が変化し、アーク断面積も影響を受けることが考えられる。このため、今後、様々な制御下におけるアーク断面積の熱ピンチおよび磁気ピンチの寄与を数値解析などのアプローチから明らかにし、圧力条件がアーク電圧またはアーク断面積に及ぼす影響を正確に理解する必要がある。
- 本論文では、消弧材料を適用した場合についてはアーク電圧の関係式を構築していない。これは、消弧材料が電極近傍におけるアーク収縮層のアーク電圧に及ぼす影響について明らかになっていない点と、消弧材料の溶発ガスがアーク電界に与える影響について電流および雰囲気圧力のそれぞれの寄与を分別し整理できない点から、具体的な実験式へと落とし込むことが困難になっているためである。また、本論文では、消弧材料の材料に実遮断器において適用実績の多いポリアミド樹脂を用いたが、他の材料を用いた場合では溶発ガスの構成原子や溶発量は異なるため、アーク電圧に及ぼす影響も異なること

が考えられる。このため、消弧材料を用いた場合でアーク電圧の関係式を構築するには、消弧材料が電極近傍の発生電圧に及ぼす影響を明らかにすることに加え、溶発ガスの吹付け環境下におけるアーク電圧に対する電流や雰囲気圧力の影響をそれぞれ明確にする必要がある。そして、ポリアミド樹脂以外の消弧材料を用いた場合でのアーク電圧特性も調査し、アーク電圧に対する他の消弧材料も含めた共通的な影響と消弧材料固有の影響を明らかにする必要がある。

- 雰囲気圧力は消弧室の設計の中で直接制御できるパラメータではなく、アークエネルギー、消弧室や排気口の大きさ、消弧材料の種類および配置方法、消弧グリッドによるアークの分割状況などに依存する。このため、構築したアーク電圧の関係式に雰囲気圧力を反映するためには、一次評価等によりおおよその雰囲気圧力の情報を取得しておく必要がある。しかしながら、この評価は一旦の試作が伴い検討の工程が長期化するため、一次評価を行うことなく雰囲気圧力を推定する技術も必要となる。今後は、本論文の成果の有用性を高める上でも雰囲気圧力の特性に対する理解も深めていく必要がある。
- 本論文では電極近傍に関するアーク電圧と電極面積および電流値の関係が明らかになった。しかしながら、この関係より構築したアーク電圧の関係式の一部の項は物理的な機構ではなく、評価結果に基づく近似的なパラメータで表現されたものとなっている。これは、本論文の評価が電極面の電流密度が高い条件のみでなされており、電流密度が低い条件のアーク電圧を表現しきれていないためである。本論文では、低電流密度条件の特性に関しては詳細な議論を行っていないが、低電流密度条件の電極近傍で生じるアーク電圧も空間電荷層における電極降下電圧よりも高くなることが実験的に示されており、この理由は明らかになっていない。

また、電極近傍のアーク収縮層で生じる電圧上昇は電流に比例する特性を持つが、陽極側または陰極側において、それぞれの特性が共通かどうかについては明らかになっていない。また、本論文では丸形電極を用いてアーク電圧と電極面積の関係について評価を行ったが、丸形以外の形状でも特性が同様になるかはわかっていない。このため、電極近傍のアーク電圧特性の理解をさらに深めるためには、陽極・陰極の差異や電極形状が及ぼすアーク電圧への影響も明らかにする必要がある。これらは、電極近傍のシースイ現象を含めてアークモデルを構築し解析的に電極近傍の現象を理解する必要があると考える。

- 新たに構築したアーク制御方式の適用により数 10 A – 100 A 級の気中アークのアーク電圧を大幅に高めることができるようになった。本方式では吸引棒(アークを誘引する鉄心)を延伸させることでアーク電圧をさらに高めることもできる。ただし、吸引棒を延伸させた場合には漏れ磁束が増えて吸引棒先端付近の磁束密度は低下する。また、遮断電流が大きい条件では、消弧材料にアークを衝突させる制御は発生可能なアーク電圧が低下する。従って、今後、遮断器の遮断電流の対応範囲を高めるためには、本方式におけるアーク伸長可能な磁束密度と電流条件を見極めることも必要となる。そして、この条件から吸引棒の長さの最適化を行い、本制御方式の適用範囲の拡大を期待したい。

## 謝辞

本研究の遂行，ならびに本論文の作成にあたり，終始懇切丁寧なご指導を賜りました筑波大学理工情報生命学術院システム情報工学研究群の藤野貴康准教授に心から感謝の意を表します。

副査を引き受けて頂きました同大学の西岡牧人教授，同じく横田茂准教授，東北大学の高奈秀匡教授には，本研究に対する多数のご指摘，ご助言を賜りました。心より感謝の意を表します。

藤野研究室の皆様には，本論文を作成する上での多くの助言とご協力を頂きました。心から感謝の意を表します。

三菱電機株式会社 先端技術総合研究所の在籍中には，本研究を遂行するにあたり，終始ご指導ならびにご助言を賜りました竹内敏恵氏，佐藤伸治氏，大阪電気通信大学・月間満教授，山口信一氏に，厚くお礼を申し上げます。特に，入社して以来，筆者の教育係として公私にわたり暖かいご助言を賜りました小倉健太郎氏に，深く感謝の意を表します。

本研究を遂行するにあたり，多大なご支援を頂きました同社 相良雄大氏，森貢氏，内野聡介氏，池田清二氏，麻生誠司氏に心から感謝の意を表します。

本研究に関する開発業務の遂行にあたり，多大なご支援を頂きました同社 伏見征浩氏，幸本茂樹氏，中川淳氏，稲口隆氏，堀田克輝氏，石倉智史氏，春名賢一氏，神納康宏氏，細越文彦氏，川名隆志氏，阿部達広氏，大久保拓哉氏，五十嵐勝俊氏，依藤佑馬氏，辰川智昭氏，今村彰吾氏に，厚くお礼を申し上げます。

三菱電機株式会社 福山製作所への転任後では，本論文の作成にあたり，多大なご支援とご協力を頂きました齊藤光伯氏，川上兼弘氏に感謝の意を表します。

本研究に関連する遮断器の将来展望の検討のため，多くの議論とご協力を頂きました佐藤基宗氏，甲斐孝幸氏，竹松俊彦氏，堀之内克彦氏，道念大樹氏をはじめとして，同社の多くの方々に感謝の意を表します。

これまで長い間，仕事や研究生活を支えて頂き，いつも暖かく見守って下さった家族，友人には，この場を借りて感謝を申し上げます。

## 参考文献

- [1] "Statistical Review of World Energy," BP (2020)
- [2] "令和元年度エネルギーに関する年次報告," 経済産業省 資源エネルギー庁 (2020)
- [3] "World Energy Outlook," IEA (2020)
- [4] "国際海運のゼロエミッションに向けたロードマップ," 国土交通省 (2020)
- [5] 経済産業省 製造産業局自動車課, "自動車を取り巻く現状と電動化の推進について," 第7回 ESIシンポジウム「交通の電動化への選択とエネルギーの融合を考える」(2020)
- [6] JAXA, "航空機電動化 将来ビジョン ver.1," 航空機電動化(ECLAIR)コンソーシアム (2018)
- [7] "World Energy Balances," IEA (2020)
- [8] "In-depth analysis in support on the COM (2018) 773: A Clean Planet for all - A European strategic long-term vision for a prosperous modern competitive and climate neutral economy," European Commission (2018)
- [9] 浜瀧純大, 永井雄宇, 稲村智昌, 朝野賢司, 田頭直人, "2050年のCO2大規模削減を実現するための経済およびエネルギー・電力需給の定量分析," 電力中央研究所 研究資料, No. Y19501 (2019)
- [10] 都筑和康, "TIMES-Japanモデル計算に基づく2050年超に向けたエネルギー技術展望," 将来の原子力開発と展望に関する東京工業大学・マサチューセッツ工科大学(MIT) シンポジウム (2018)
- [11] "脱炭素社会に向けた長期シナリオ2017～パリ協定時代の2050年日本社会像～," WWF ジャパン (2017)
- [12] "GLOBAL RENEWABLES OUTLOOK," IRENA (2020)
- [13] 伊藤葉子, "再生可能エネルギー支援策の変遷 ～国内外の制度事例から得る日本のFIT見直しへの示唆～," 日本エネルギー経済研究所 (2015)

- [14] 渡邊太郎, "再生可能エネルギーの固定価格買取制度—これまでの経緯と今後の方向性—," 国立国会図書館, 調査と情報—ISSUE BRIEF—, No.906 (2016)
- [15] "太陽光発電開発戦略 2020," 新エネルギー・産業技術総合開発機構 (2020)
- [16] 太陽光発電協会, "太陽光発電の現状と自立化・主力化に向けた課題," 経済産業省, 第71回調達価格等算定委員会 (2021)
- [17] "DXレポート～ITシステム「2025年の崖」の克服とDXの本格的な展開～," 経済産業省, デジタルトランスフォーメーションに向けた研究会 (2018)
- [18] "令和3年度版 国土交通白書2021-機器を乗り越え豊かな未来へ-," 国土交通省 (2021)
- [19] "コロナ禍後の社会変化と期待されるイノベーション像," 国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構, TSC調査分析レポート (2020)
- [20] "「ポストコロナ」時代におけるデジタル活用について," 総務省, 「ポストコロナ」時代におけるデジタル活用に関する懇談会(第1回) (2020)
- [21] Nicola Jones, "The Information Factories: Data centres are chewing up vast amounts of energy — so researchers are trying to make them more efficient," *Nature*, Vol. 561, pp. 163-166 (2018)
- [22] 低炭素社会実現に向けた政策立案のための提案書, "情報化社会の進展がエネルギー消費に与える影響 (Vol.1) — IT 機器の消費電力の現状と将来予測—," 科学技術振興機構低炭素社会戦略センター (2019)
- [23] H. Yajima, K. Usui, T. Hayashi, Y. Ooi, Y. Yoshida, K. Hirose, T. Aoki, "Energy-saving effects of super computers by using on-site solar power and direct HVDC feeding systems," 2016 IEEE International Telecommunications Energy Conference (INTELEC), pp. 1-4 (2016)
- [24] S. M. Lisy and M. Smrekar, "Three case studies of commercial deployment of 400V DC data and telecom centers in the EMEA region," 2015 IEEE International Telecommunications Energy Conference (INTELEC), pp. 1-6 (2015)
- [25] 小端拓郎, "EV普及の動向と展望-気候変動対策の観点から-," 自然エネルギー財団 (2018)
- [26] "CO2 emissions from fuel combustion," IEA (2019)

- [27] 松本 知子, "Vehicle-to-Grid導入の利点と課題," 日本エネルギー経済研究所 (2019)
- [28] 資源エネルギー庁 新エネルギーシステム課, "令和2年度VPP構築実証事業等概算要求に関する資料," 第10回エネルギー・リソース・アグリゲーション・ビジネス検討会 (2019)
- [29] 鶴谷昂平, "分散型電源拡大下における欧米電力業界の新ビジネスモデル," 電気設備学会誌, Vol. 38, No. 4, pp. 196-199 (2018)
- [30] "三菱ノーヒューズ遮断器・漏電遮断器 技術資料集," 三菱電機株式会社 (2022)
- [31] 次世代電力システムにおける直流給配電調査専門委員会, "次世代電力システムにおける直流給配電の研究動向," 電気学会技術報告, No. 1215 (2011)
- [32] R. Yeckley, J. Perulfi, "Oil Circuit Breakers: A Look at the Earlier Generation [History]," IEEE Power & Energy Magazine, Vol. 16, No. 3, pp. 86-97 (2018)
- [33] 福田節雄, "遮断器の発達の歴史的展開と今後の動向," 電気学会論文誌, Vol. 77, No. 825, pp. 111-126 (1957)
- [34] 吉岡芳夫, 吉永淳, 柳父悟, "遮断器の歴史と日本独自技術開発への期待," 電気学会論文誌A, Vol. 124, No. 8, pp. 688-694 (2004)
- [35] "The further development of the air-blast highspeed circuit breaker up to the highest voltages encountered in Service and for outdoor erection," The Brown Boveri Review, Vol. XXVI, No. 3, pp. 55-68 (1939)
- [36] 豊田充, "電力用遮断器の技術変遷," 電気学会論文誌, Vol. 127, No. 9 (2007)
- [37] 竹内敏恵, "低圧遮断器の技術変遷と今後の展望," 三菱電機技報, Vol. 88, No. 9 (2014)
- [38] X. Song, P. Cairori, Y. Du, A. Antoniazzi, "A Review of Thyristor Based DC Solid-State Circuit Breakers," IEEE Open Journal of Power Electronics, Vol. 2, pp. 659-672 (2021)
- [39] K. Yasuoka, Y. Tsuboi, T. Hayakawa, N. Takeuchi, "Arcless Commutation of a Hybrid DC Breaker by Contact Voltage of Molten Metal Bridge," IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology, Vol. 8, No. 3, pp. 350-355 (2018)
- [40] K. Askan, M. Bartonek, K. Weichselbaum, "Power Module for Low Voltage DC Hybrid Circuit

- Breaker," 2019 IEEE Third International Conference on DC Microgrids (ICDCM), pp. 1-8 (2019)
- [41] 幸本茂樹, 小倉健太郎, 渡邊真也, "太陽光発電市場対応遮断器・開閉器の製品拡充," 三菱電機技報, Vol. 89, No. 4 (2015)
- [42] A. Alassia, S. Bañalesa, O. Ellabbana, G. Adamb, C. MacIverb, "HVDC Transmission: Technology Review, Market Trends and Future Outlook," Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 112, pp. 530-554 (2019)
- [43] N. Chapalain, "Power Electronics in HVDC," EC Workshop: Horizon 2050 power system and the role of HVDC technologies in a highly decentralized RES generation (2020)
- [44] "High Voltage Direct Current Transmission - Proven Technology for Power Exchange," Siemens AG HVDC Brochure Overview (2011)
- [45] M. P. Bahrman, B. K. Johnson, "The ABCs of HVDC Transmission Technologies," IEEE Power & Energy Magazine, Vol. 5, No. 2, pp. 32-44 (2007)
- [46] HB. Chung, KH. Lee, WJ. Park, KY. Ahn, YG. Kim, "Arc Extinction Structure of Air Circuit Breaker for Improvement of Direct Current Breaking Performance," 2022 6th International Conference on Electric Power Equipment - Switching Technology (ICEPE-ST), pp. 237-240 (2022)
- [47] 産業保安グループ 電力保安課, "電気設備の技術基準の解釈の解説," 経済産業省 (2022)
- [48] 藪野光平, 徳山俊二, 嶋田隆一, "直流電力の遮断," 核融合研究, Vol. 51, No. 6 (1984)
- [49] 恩地俊行, 山内芳准, 磯崎優, "低圧直流遮断器への自励振動方式の適用," 電気学会放電・静止器・開閉保護合同研究会, ED11-72/SA11-45/SP11-18 (2011)
- [50] F. Yang, M. Rong, Y. Wu, A. B. Murphy, S. Chen, Z. Liu, Q. Shi, "Numerical analysis of arc characteristics of splitting process considering ferromagnetic plate in low-voltage arc chamber," IEEE Transactions on Plasma Science, Vol. 38, No. 11, pp. 3219-3225 (2010)
- [51] M. Lindmayer, H. Stammberger, "Application of numerical field simulations for low-voltage switchgear," Proceedings of IEEE Holm Conference on Electrical Contacts, pp. 65-77 (1994)

- [52] T. Mitsuhashi, M. Takahashi, Y. Wada and S. Yamagata, "Development of a new current limiting technique by 3D nonlinear analysis of magnetic fields in arc chambers and its application to LV circuit breakers," IAS '96. Conference Record of the 1996 IEEE Industry Applications Conference Thirty-First IAS Annual Meeting, Vol. 4, pp. 2269-2274 (1996)
- [53] Y. Tanaka, K. Kawasaki, T. Onchi, Y. Uesugi, "Numerical investigation on behavior of ablation arcs confined with different polymer materials," 2008 17th International Conference on Gas Discharges and Their Applications, pp. 161-164 (2008)
- [54] J. J. Shea, "The influence of arc chamber wall material on arc gap dielectric recovery voltage," IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies, Vol. 24, No. 3, pp. 342-348 (2001)
- [55] W. Park, Y. K. Kim, S. Lee, K. Y. Ahn, Y. G. Kim, "Arc phenomena and method of arc extinction in air circuit breaker," Proceedings of 25th International Conference on Electricity Distribution (2019)
- [56] F. Pierre, J. J. Gonzalez, "Overview of Current Research into Low-Voltage Circuit Breakers," The Open Plasma Physics Journal, Vol. 2, pp. 105-119 (2009)
- [57] F. Yang, Y. Wu, M. Rong, H. Sun, A. B. Murphy, Z. Ren, C. Niu, "Low-voltage circuit breaker arcs—simulation and measurements," J. Phys. D: Appl. Phys., Vol. 46, 273001 (2013)
- [58] M. Lindmayer, Z. Huang, "Current-limiting switching by squeezing arcs into narrow insulating slots," Electrical Contacts-1991 Proceedings of the 37th IEEE HOLM Conference on Electrical Contacts (1991)
- [59] A. Abri, S. Kjellnas, R. Nordgren, S. Lindgren, L. A. Banghammar, "Mechanism of interaction between electric arc and breaking chamber in low voltage current limiting circuit breakers," IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 27, No. 5, pp. 841-848 (1991)
- [60] 横水康伸, "分散型電源を有する受配電システムと電流遮断技術の展開," 電気学会論文誌 B, Vol. 124, No. 9, pp. 1083-1086 (2009)
- [61] 森下由隆, 川口祐介, 眞塩聡, 山口巖, 植田玄洋, 岡部成光, 柳父悟, "直流配電回路における超電導限流器と直流遮断器の適用への検討," 電気学会論文誌 B, Vol. 130, No. 3, pp. 357-363 (2010)

- [62] 吉安一, 高橋貢, 村井裕, 和田勇一, "絶縁物による電極面積の制限が気中アークの電圧に及ぼす影響," 電気学会論文誌A, Vol. 106, No. 5, pp. 217-224 (1986)
- [63] 月間満, 三橋孝夫, 高橋貢, 伏見征浩, 細貝節夫, 山県伸示, "オートバッファ方式を利用した新型配線用遮断器の開発," 電気学会論文誌B, Vol. 122, No. 9, pp. 969-975 (2002)
- [64] 恩地俊行, 山内芳准, 浜田佳伸, 米満和哲, "小形直流高電圧回路用ブレーカの開発," 電気学会 放電・開閉保護・高電圧合同研究会, ED-13-117/SP-13-40/HV-13-78 (2013)
- [65] Y. Wu, M. Rong, Z. Sun, X. Wang, F. Yang, X. Li, "Numerical analysis of arc plasma behavior during contact opening process in low-voltage switching device," *Journal of Physics D: Applied Physics* Vol. 40, 795 (2007).
- [66] F. Yang, M. Rong, Y. Wu, H. Sun, R. Ma, C. Niu, "Numerical simulation of the eddy current effects on the arc splitting process," *Plasma Science and Technology*, Vol. 14, 974 (2012)
- [67] F. Yang, R. Ma, Y. Wu, H. Sun, C. Niu, M. Rong, "Numerical study on arc plasma behavior during arc commutation process in direct current circuit breaker," *Plasma Science and Technology*, Vol. 14, 167 (2012)
- [68] Y. Wu, M. Rong, F. Yang, A. B. Murphy, Q. Ma, Z. Sun, X. Wang, "Numerical modeling of arc root transfer during contact opening in a low-voltage air circuit breaker," *IEEE transactions on plasma science*, Vol. 36, 1074 (2008)
- [69] F. Yang, M. Rong, Y. Wu, A. B. Murphy, J. Pei, L. Wang, Z. Liu, Y. Liu, "Numerical analysis of the influence of splitter-plate erosion on an air arc in the quenching chamber of a low-voltage circuit breaker," *Journal of Physics D: Applied Physics*, Vol. 43, 434011 (2010)
- [70] M. Rong, Q. Ma, Y. Wu, T. Xu, A. B. Murphy, "The influence of electrode erosion on the air arc in a low-voltage circuit breaker," *Journal of Applied Physics* Vol. 106, 023308 (2009)
- [71] Y. Wu, M. Rong, J. Li, J. Lou, "Calculation of electric and magnetic fields in simplified chambers of low-voltage circuit breakers," *IEEE transactions on magnetics* Vol. 42, 1007 (2006)
- [72] F. Baudoin, J. J. Gonzalez, P. Checchin, "Study of the curvature of the electrical arc in low voltage breaking devices: influence of the external magnetic field," *Journal of Physics D: Applied Physics*, Vol. 38, 3778 (2005)

- [73] B. Swierczynski, J. J. Gonzalez, P. Teulet, P. Freton, A. Gleizes, "Advances in low-voltage circuit breaker modelling," *Journal of Physics D: Applied Physics*, Vol. 37, 595 (2004)
- [74] 青山洋一, 岡田健彦, "分光測定による低圧限流ブレーカのアーキこう着現象の解析 低圧限流ブレーカのアーキこう着現象に関する研究 I," *電気学会論文誌 B*, Vol. 107, 276 (1987)
- [75] 青山洋一, 岡田健彦, "分光分析による接点こう着アーキの陽光柱温度分布測定 低圧限流ブレーカのアーキこう着現象に関する研究 II," *電気学会論文誌 B*, Vol. 108, 593 (1988)
- [76] J. W. McBride, P. Kesorn, M. W. Paul, "Arc root commutation from moving contacts in low voltage devices," *IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies*, Vol. 24, 331 (2001)
- [77] E. Belbel, M. Lauraire, "Behavior of Switching Arc in Low-Voltage Limiter Circuit Breakers," in *IEEE Transactions on Components, Hybrids, and Manufacturing Technology*, Vol. 8, No. 1, pp. 3-12 (1985)
- [78] M. Lindmayer, "The Influence of Contact Materials and Chamber Wall Material on the Migration and the Splitting of the Arc in Extinction Chambers," *IEEE Transactions on Parts, Hybrids, and Packaging*, Vol. 9, 45 (1973)
- [79] P. Rodriguez, J. Didier, G. Bernard, S. Rowe "Arc-contact-insulating wall interactions in low voltage circuit-breakers," *IEEE transactions on power delivery*, Vol. 13, 480 (1998)
- [80] 中山和夫, 横水康伸, 松村年郎, 金森栄治, 桑村和男, "消弧グリッドの配置による大電流気中アーキの電圧上昇機構の実験的検討," *電気学会論文誌B*, Vol. 122, 1016 (2002)
- [81] 中山和夫, 横水康伸, 松村年郎, 金森栄治, 桑村和男, "消弧グリッドによる気中大電流アーキの姿態変化と電圧上昇の要因別分離," *電気学会論文誌 B*, Vol. 123, 1091 (2003)
- [82] Y. Yokomizu, Y. Ueda, T. Matsumura, T. Ichikawa, Y. Niwa, W. Sakaguchi, "Electrode fall voltage of arc between deion plates during direct-current interruption period," *Journal of Physics D: Applied Physics*, Vol. 50, 265601 (2017)
- [83] Y. Yokomizu, T. Matsumura, R. Henmi, Y. Kito, "Total voltage drops in electrode fall regions of

- SF<sub>6</sub>, argon and air arcs in current range from 10 to 20 000 A," *Journal of Physics D: Applied Physics*, Vol. 29, 1260 (1996)
- [84] R. Hemmi, Y. Yokomizu, T. Matsumura "Anode-fall and cathode-fall voltages of air arc in atmosphere between silver electrodes," *Journal of Physics D: Applied Physics*, Vol. 36, 1097 (2003)
- [85] Y. Yokomizu, T. Matsumura, W. Y. Sun, J. J. Lowke "Electrode sheath voltages for helium arcs between non-thermionic electrodes of iron, copper and titanium," *Journal of Physics D: Applied Physics*, Vol. 31, 880 (1998)
- [86] S. Ramakrishnan, A. D. Stokes, "E - I characteristic of stable free - burning arcs at high currents," *Journal of Applied Physics*, Vol. 45, 5480 (1974)
- [87] 合田豊, 岩田幹正, 池田弘一, 田中慎一, "50kA級超ギャップ大電流アークジェットの様相-アークジェットの直径および電圧特性-, " 電力中央研究所研究報告, W00034 (2001)
- [88] R. Dai, X. Li, C. Niu, W. Tong, H. Xiang, "Effect of back-volume of arc-quenching chamber on arc behavior," *IEICE transactions on electronics*, Vol. 91, 1261 (2008)
- [89] 磯崎優, 杉山修一, 秦淳一郎, 米満和哲, 鈴木精一, 石川武, "密閉容器内における大電流気中アークの特性," 平成13年電気学会電力・エネルギー部門大会, 416 (2001)
- [90] 恩地俊行, 柳瀬博雅, 山崎正志, 黒田昌美, 磯崎優, 杉山修一, 秦 淳一郎, 米満和哲, "平行平板樹脂間に発生するアークの特性," *電気学会論文誌 B*, Vol. 127, No. 6, pp. 692-698 (2007)
- [91] 恩地俊行, 田中康規, 川崎圭, 上杉喜彦, "高分子材料から発生するアブレーションガスを考慮したアークプラズマの熱流体解析," *電気学会論文誌 B*, Vol. 131, No. 2, pp. 196-204 (2011)
- [92] 恩地俊行, 田中康規, 上杉喜彦, "高分子材料から発生するアブレーションガスが電流減衰過程のアーク特性に与える影響," *電気学会論文誌 B*, Vol. 131, No.7, pp. 609- 620 (2011)
- [93] 伊藤裕幸, 作田忠裕, 小林正, "各種プラスチック蒸気が混入した器壁安定化空気アークの過渡減衰特性," *電気学会論文誌 B*, Vol. 120, No. 3, pp. 463-470 (2000)

- [94] N. Tonmitr, K. Ganaha, E. Kaneko, T. Hayashida, "Study on Factor of the Quenching Performance on the Polymer Material Characteristics of an Air Circuit Breaker," In Key Engineering Materials, Vol. 718, pp. 15-20 (2017)
- [95] T. Nakagawa, T. Nakano, Y. Tanaka, Y. Uesugi, T. Ishijima, "Numerical simulation on dynamics and thermal decomposition of spallation polymer particles flying in polymer ablated arcs," IEEJ Transactions on Power and Energy, Vol. 135, No. 11, pp. 681-687 (2015)
- [96] 大石浩之, 荒井聰明, "密閉細隙中のアーク電圧および圧力特性," 電気学会論文誌 B, Vol. 113, No. 1, pp. 75-82 (1993)
- [97] W.W. Dolan, W. P. Dyke, "Temperature-and-field emission of electrons from metal," Phys. Rev., Vol. 95, 327 (1954)
- [98] T. H. Lee, "T-F theory of electron emission in high-current arcs," J. Appl. Phys., Vol. 30, pp. 166-171 (1959)
- [99] T. Zhu, H. Liu, R. Guan, S. Jia, N. Yin "Study on voltage characteristics of short air arc with high current density arc root," AIP Advances, Vol. 9, 085120 (2019)
- [100] 則竹政俊, 廣瀬圭一, 松村年郎 "直流 400V 級 ICT 機器の瞬時電圧低下・過電圧耐量基準に関する実験的検討," 電気学会論文誌 B, Vol. 138, No. 3, pp. 229-235 (2018)
- [101] C. Fiévet, M. Barrault, P. Petit, P. Chevrier, C. Fleurier, V. Andre, "Optical diagnostics and numerical modelling of arc re-strikes in low-voltage circuit breakers," Journal of Physics D: Applied Physics, Vol. 30, No. 21, 2991 (1997)
- [102] A. Vassa, E. Carvou, S. Rivoirard, L. Doublet, C. Bourda, D. Jeannot, P. Ramoni, N. B. Jemaa, D. Givord, "Magnetic blowing of break arcs up to 360 VDC," 2010 Proceedings of the 56th IEEE Holm Conference on Electrical Contacts, pp. 96-100 (2010)
- [103] D. Volm, F. Winkler, "Development of a compact relay for high voltage switching of up to 1000V and 40A," Proceedings of the 27th International Conference on Electrical Contacts, pp. 144-148 (2014)
- [104] 田中 慎一, 田所 兼, 宮城 吏, 大高 聡也, 岩田 幹正, 天川 正士, "アークによる内部圧力上昇に及ぼす電極ギャップ長および密閉容器サイズの影響," 電気学会論文誌 B, Vol.

129, No. 9, pp. 1131-1138 (2009)

- [105] Y. Cressault, R. Hannachi, P. Teulet A. Gleizes, J. P. Gonnet, J. Y. Battandier, "Influence of metallic vapours on the properties of air thermal plasmas," *Plasma Sources Science and Technology*, Vol. 17, No. 3, 035016 (2008)
- [106] 松村年郎, 生熊良行, 鬼頭幸生, "配線用遮断器におけるアーク電圧急落現象抑制による限流性能の向上," *電気学会論文誌 B*, Vol. 110, No. 11, pp. 938-943 (1990)
- [107] Y. K. Choi, W. J. Seung, "The effect of the magnetic grids and Arc runner on the Arc plasma column in the contact system of a molded case circuit breaker," *IEEE Transactions on Plasma Science*, Vol. 46, No. 3, pp. 606-610 (2018)
- [108] 渡邊真也, 小倉健太郎, "ポリマーおよび金属蒸気混入のアーク電圧に対する影響," 平成24年電気学会全国大会, 6-295 (2012)
- [109] R. Kozakov, M. Kettlitz, K. D. Weltmann, A. Steffens, C. M. Franck, "Temperature profiles of an ablation controlled arc in PTFE: I. Spectroscopic measurements," *Journal of Physics D: Applied Physics*, Vol. 40, No. 8, 2499 (2007)
- [110] 宮城吏, 田中慎一, 岩田幹正, 田所兼, 大高聡也, 天川正士, "大電流アークを発生させた密閉容器内のエネルギー収支に及ぼすアーク電流の影響," *電気学会論文誌 B*, Vol. 130, No. 2, pp. 232-238 (2010)
- [111] J. Huo, S. Selezneva, L. Jacobs, Y. Cao, "Study of wall ablation on low-voltage arc interruption: The effect of Stefan flow," *Journal of Applied Physics*, Vol. 125, No. 21, 213302. (2019)
- [112] K. Koyama, H. Toya, Y. Wada, A. Hasegawa, "Arc behavior driven by electromagnetic force between rail electrodes," *IEEE transactions on magnetics*, Vol. 29, No. 1, pp. 843-847 (1993)
- [113] E. Gauster, W. Rieder, "Arc Lengthening between Divergent Runners: Influence of Arc Current, Geometry and Materials of Runners and Walls," *Proceedings of the 42nd IEEE Holm Conference on Electrical Contacts, Joint with the 18th International Conference on Electrical Contacts*, pp. 1-10 (1996)
- [114] E. Belbel, M. Lauraire, "Behavior of Switching Arc in Low-Voltage Limiter Circuit Breakers," *IEEE Transactions on Components, Hybrids, and Manufacturing Technology*, Vol. 8, No. 1, pp.

3-12 (1985)

[115] 松村年郎, 鬼頭幸生, "軸方向強制対流を伴う安定化定常空気アークモデル," 電気学会論文誌 A, Vol. 104, No. 5, pp. 241-246 (1984)

[116] A. von Engel, *Ionized Gases*, Oxford: Clarendon (1965)

# 論文・特許リスト

## 参考論文

1. 渡邊真也, 内野聡介, 森貢: ポリマー細隙空間における大電流気中アークの電界特性, 電気学会論文誌 B, Vol. 142, No. 3, pp. 192-168 (2022)
2. 渡邊真也, 小倉健太郎: 大電流気中アークにおける消弧グリッド配置時の電圧特性および消弧グリッドの有効利用度改善に向けた検討, 電気学会論文誌 B, Vol. 133, No. 11, pp. 806-817 (2013)
3. 渡邊真也, 小倉健太郎, 蓑田強平, 佐藤伸治: 密閉容器内における大電流気中アークの電圧特性, 電気学会論文誌 B, Vol. 132, No. 8, pp. 740-746 (2012)

## 国際会議発表論文

1. S. Watanabe, Y. Sagara, S. Yamane, S. Aso, K. Kokura, S. Ikeda and M. Mori: A novel simple technology for power switching in HVDC system, 2015 IEEE International Telecommunications Energy Conference (INTELEC), PS11-78, Osaka, Japan (2015)

## 国内学会・シンポジウム等における発表論文

1. 堀之内克彦, 江戸貴広, 阿部達広, 堀田克輝, 渡邊真也: 航空機電動化に向けた配電系統保護用 DC1500V 開閉機器, 電気学会 D 部門大会, 4-OS1-3 (2022)
2. 堀田克輝, 渡邊真也, 堀之内克彦: 水素中アークの電界および磁気駆動時膠着特性, 電気学会全国大会, 6-025 (2022)
3. 神納康宏, 相良雄大, 渡邊真也: 溝を有するレール電極における直流小電流アークの走行特性, 電気学会全国大会, 6-023 (2020)
4. 堀田克輝, 渡邊真也, 稲口隆: 低圧気中開閉器の開極速度が開極開始時の接点消耗に与える影響, 電気学会全国大会, 6-028 (2020)
5. 堀田克輝, 渡邊真也, 稲口隆: 低圧気中開閉器の開極開始時における接点間電圧の理論計算, 令和元年度電気学会 放電・プラズマ・パルスパワー 開閉保護 高電圧合同研究会, EPP-19-105 SP-19-027 HV-19-090 (2019)

6. 細越文彦, 春名賢一, 川名隆志, 渡邊真也: 細隙空間における衝突アーク電圧に樹脂材料が与える影響とその回数依存性, 電気学会全国大会, 6-034 (2019)
7. 堀田克輝, 渡邊真也, 稲口隆: 低圧開閉器の開極開始時通電加熱による接点消耗, 電気学会全国大会, 6-035 (2019)
8. 堀田克輝, 渡邊真也, 稲口隆: 低圧気中開閉器における開極開始時の接点消耗, 電気学会全国大会, 6-035 (2018)
9. 石倉智史, 渡邊真也: 転流回路を備えた開閉機器における接点开離時アークの存続時間に関する実験的検討, 平成 29 年度電気学会 放電 開閉保護 高電圧合同研究会, ED-17-159 SP-17-59 JHV-17-112 (2017)
10. 永田大河, 松岡成居, 熊田亜紀子, 日高邦彦, 渡邊真也, 小倉健太郎: 空气中アーク放電の温度および導電率の二次元分布測定, 平成 29 年度電気学会 放電 開閉保護 高電圧合同研究会, ED-17-155 SP-17-56 JHV-17-108 (2017)
11. 渡邊真也, 内野聡介, 森 貢: ポリマー細隙空間における大電流気中アークの電界特性, 電気学会 放電・開閉保護・高電圧合同研資, ED-16-075/SP-16-038/SP-16-004 (2016)
12. 堀田克輝, 渡邊真也, 稲口隆: 低圧気中開閉器における開極時 DC アークによる銀接点消耗特性, 平成 29 年度電気学会 放電 開閉保護 高電圧合同研究会, ED-17-123 SP-17-24 JHV-17-76 (2017)
13. 石倉 智史, 渡邊真也: 転流回路を備えた開閉機器における接点开離時アークのアーケエネルギーと存続時間, 電気学会全国大会, 6-058 (2017)
14. 永田大河, 松岡成居, 熊田亜紀子, 日高邦彦, 渡邊真也, 月間満: 気中アーク放電二次元温度分布計測における奥行方向温度分布の影響, 平成 28 年度放電学会年次大会, 2-5 (2016)
15. 相良雄大, 渡邊真也: 細隙空間における絶縁物衝突時のアーク電圧特性, 電気学会 A 部門大会, 6-E-a2-2 (2016)
16. 永田大河, 松岡成居, 熊田亜紀子, 日高邦彦, 渡邊真也, 月間満: 二線強度比法による気中アーク放電二次元温度分布測定, 平成 28 年度電気学会放電・静止器・開閉保護合同研究会, ED-16-90/SA-16-53/SP-16-19, pp.95-100 (2016)
17. 永田大河, 松岡成居, 熊田亜紀子, 日高邦彦, 渡邊真也, 月間満: 二線強度比法による気中アーク放電二次元温度分布計測装置の構築, 平成 27 年度放電学会年次大会,

A-2-4 (2015)

18. 相良雄大, 渡邊真也, 森貢: 細隙空間における駆動時および絶縁物衝突時のアーク電圧特性, 平成 27 年度電気学会放電・高電圧・開閉保護合同研究会, ED-15-137/HV-15-103/SP-15-061 (2015)
19. 森貢, 月間満, 渡邊真也, 相良雄大, 中川淳: 低圧気中アーク解析における電極蒸気の影響, 電気学会 B 部門大会, 294 (2015)
20. 渡邊真也, 山根彰太, 相良雄大, 小倉健太郎, 麻生誠司, 池田清二: 太陽光発電用開閉器向け直流高電圧遮断技術, 放電学会年次大会, B-1-6 (2014)
21. 相良雄大, 渡邊真也: 細隙空間における駆動時および絶縁物衝突時のアーク電圧特性, 平成 26 年度放電学会年次大会, B-1-3 (2014)
22. 渡邊真也, 山根彰太, 相良雄大, 小倉健太郎, 麻生誠司, 池田清二: 直流アークの無極性駆動制御方式の開発, 電気学会全国大会, 6-301 (2014)
23. 相良雄大, 渡邊真也, 小倉健太郎: 細隙アークのアーク電圧と駆動速度依存性, 電気学会全国大会, 6-300 (2014)
24. 中川淳, 渡邊真也, 小倉健太郎, 小樋悠太, 三好伸郎, 伏見征浩: 配線用高電圧 DC 遮断器の開発, 電気学会全国大会, 6-264 (2014)
25. 森田祐介, 渡邊真也, 月間満, 松岡成居, 熊田亜紀子, 日高邦彦: 二線強度比法による気中アークの温度測定, 平成 26 年度放電学会年次大会, A-2-4 (2014)
26. 渡邊真也: 密閉容器内アークに対する消弧グリッドの利用による圧力上昇抑制効果の検討, 電気学会 B 部門大会, 318 (2013)
27. 渡邊真也, 小倉健太郎: 配線用遮断器における消弧グリッドの有効利用に必要な磁気駆動力の検討, 電気学会全国大会, 6-210 (2013)
28. 渡邊真也, 小倉健太郎: アブレーション材料と消弧グリッドの併用による大電流気中アークの電界特性への効果, 電気学会 B 部門大会, 356 (2012)
29. 渡邊真也, 小倉健太郎: ポリマーおよび金属蒸気混入のアーク電圧に対する影響, 電気学会全国大会, 6-295 (2012)
30. 渡邊真也, 小倉健太郎, 蓑田強平, 佐藤伸治: 密閉容器内における大電流気中アークの電圧特性, 電気学会放電・開閉保護・高電圧合同研資, ED-11-069/SP-11-015/SP-11-015 (2011)

31. 渡邊真也，小倉健太郎，伏見征浩: 低圧遮断器におけるグリッド利用枚数向上のための消弧室構造の検討，電気学会全国大会，6-476 (2011)

#### 発明・特許

1. 細越文彦，檜座秀一，渡邊真也，石倉智史，川名隆志: 消弧用絶縁材料成形体及び回路遮断器，特許第 6563153 号
2. 渡邊真也，内野聡介，相良雄大，森貢: 開閉装置，特許第 6407131 号
3. 渡邊真也，小倉健太郎，相良雄大，三好伸郎，小樋悠太: 開閉装置，特許第 6300681 号
4. 中川淳，江古憲一，相良雄大，渡邊真也，石倉智史，森貢: 遮断器，特許第 6293075 号
5. 渡邊真也，信太秀夫，小倉健太郎，幸本茂樹，相良雄大: 開閉器，特許第 6198450 号
6. 小倉健太郎，三好伸郎，小樋悠太，渡邊真也，相良雄大: 開閉装置，特許第 6091711 号
7. 渡邊真也，山根彰太，小倉健太郎，相良雄大: 開閉装置，特許第 5992603 号
8. 渡邊真也，小倉健太郎，相良雄大，三好伸郎，小樋悠太: 開閉装置，特許第 5940225 号
9. 渡邊真也，小倉健太郎，上迫彰彦: 回路遮断器，特許第 5355522 号