

消防研究技術資料 83 号

太陽光発電システム火災と消防活動における安全対策

平成 26 (2014) 年 3 月

消防庁 消防研究センター

まえがき

東日本大震災による原子力発電所の事故、再生可能エネルギー普及に向けた導入費用の補助制度や電力会社による電力の定額買い取り制度等によって、太陽光発電システム（Photovoltaic power system、以下 PV）の普及が急速に進んでいる。

PV は電力機器であるため、火災の観点から見ると家庭内の電気用品と同様に出火の危険性がある上、直流 300V と商用電源よりも高い電圧であることから放電時のエネルギーも大きいため、事故の際の出火の可能性も高いと考える。また、PV は発電装置でもあるため、出火したり火災に見舞われたりしても、日射があれば電力を供給し続けるので、感電の危険や放電による再出火の可能性があると考える。実際、PV からの出火事案や消防隊員の感電事案が報告されている。今後普及が進めば、必然的に PV から出火する件数や PV が火災に見舞われる件数が増大していくと考える。

そこで我々は、消防活動上の危険性に主眼を置き、PV の危険性について実験的に確かめ、消防活動を行う上で注意しなければならない点を抽出する研究を開始した。太陽電池モジュールの発電特性、破壊された時の機械的な特徴、加熱・燃焼した時の化学的な挙動、消防隊員の感電に関する各種測定や実験、発電を抑制するための遮光実験等を通じ、PV が設置された住宅火災に対する消防活動での留意点を見出した。

本報告書では、最初に PV の構造（第 1 章）、火災や感電の事案を紹介し（第 2 章）、そのあと、法規等の技術基準に言及した（第 3 章）。それ以降は実験により確かめた事項を記述するが、まずは、太陽電池モジュールが火災に遭遇した場合の挙動を把握するため、火災による発電特性、火炎曝露による発電特性と燃焼性状についての実験を行った（第 4、5 章）。そして、これらの実験により出てきた課題を踏まえて更なる実験や測定を実施した（第 6～11 章）。報告書の最後には、これらの実験や測定から見出された消防活動上の留意点をまとめた（第 12 章）。

ここでまとめた内容が、消防活動を行う上で少しでも安全に寄与できるならば幸いである。

平成 26 年 3 月

消防庁 消防研究センター

技術研究部 大規模火災研究室	田村裕之、松島早苗、 阿部伸之、森井統正 ^{*1)}
技術研究部 特殊災害研究室	塚目孝裕 ^{*2)} 、志水裕昭 ^{*3)}
技術研究部 地震等災害研究室	高梨健一
技術研究部 危険性物質研究室	尾川義雄
技術研究部 上席研究官	河関大祐

*1) 平成23年4月～平成25年3月

*2) 平成24年4月～

*3) 平成25年4月～

太陽光発電システム火災と消防活動における安全対策に関する研究報告書

目 次

1. 太陽光発電システムの概要.....	1
1.1 はじめに.....	1
1.2 全体の構成.....	1
1.3 各部の機能.....	2
1.3.1 太陽電池モジュール.....	2
1.3.2 接続箱.....	4
1.3.3 パワーコンディショナ.....	4
1.3.4 漏電遮断器.....	4
1.3.5 分電盤.....	4
1.3.6 売電用積算電力量計.....	4
1.3.7 買電用積算電力量計.....	4
1.3.8 その他の機器.....	4
1.4 まとめ.....	4
2. 太陽光発電システムが設置された住宅の火災事例と感電事例.....	5
2.1 はじめに.....	5
2.2 火災事例.....	5
2.2.1 信越地方における火災事例.....	5
2.2.2 北関東地方における火災事例.....	5
2.2.3 関東地方における火災事例.....	5
2.2.4 東海地方における火災事例.....	6
2.2.5 東北地方における火災事例(1).....	6
2.2.6 東北地方における火災事例(2).....	6
2.2.7 東北地方における火災事例(3).....	6
2.3 感電事例.....	6
2.3.1 断熱材で感電した事例.....	6
2.3.2 屋根裏での活動中に感電した事例.....	7
2.4 まとめ.....	7
3. 太陽光発電モジュールに対する国内外の関連規格と法規.....	9
3.1 はじめに.....	9
3.2 太陽電池モジュール及びその構成材料に求められる試験とその適用規格.....	9
3.2.1 概要.....	9

3.2.2	IEC 規格に記載されている項目.....	9
(1)	感電危険試験.....	9
(2)	火災危険試験.....	10
3.3	国内外の太陽電池モジュールに対する試験規格.....	11
3.3.1	JIS 規格と IEC 規格.....	11
3.3.2	他の地域における規格と IEC 規格.....	11
3.4	太陽電池モジュールに関する国内法における位置づけ.....	11
3.4.1	建築基準法.....	11
3.4.2	電気用品安全法.....	13
3.4.3	消費生活用製品安全法.....	13
4.	太陽電池モジュール単体の火炎光受光及び火炎曝露による出力電圧特性.....	15
4.1	はじめに.....	15
4.2	火炎光を受光した太陽電池モジュールの出力電圧特性実験.....	15
4.2.1	目的.....	15
4.2.2	実験日及び実験場所.....	15
4.2.3	実験装置.....	15
4.2.4	計測条件.....	15
4.2.5	実験条件.....	18
4.2.6	結果と考察.....	18
4.2.6.1	太陽電池モジュール表面及び枠の最高温度.....	18
4.2.6.2	太陽電池モジュール出力電圧と照度の関係.....	18
4.3	火炎に曝露された太陽電池モジュールの出力電圧特性実験.....	20
4.3.1	目的.....	20
4.3.2	実験日及び実験場所.....	20
4.3.3	実験装置.....	20
4.3.4	計測条件.....	21
4.3.5	実験条件.....	21
4.3.6	結果と考察.....	21
4.3.6.1	モジュール小について.....	21
4.3.6.2	モジュール大について.....	23
4.4	まとめ.....	28
5.	太陽電池モジュールの実大規模火災時の出力電圧特性.....	29
5.1	はじめに.....	29
5.2	屋外における 24 時間太陽電池モジュール出力電圧特性実験.....	29
5.2.1	目的.....	29
5.2.2	実験日及び実験場所.....	29
5.2.3	実験装置.....	29
5.2.4	計測条件.....	29
5.2.5	結果と考察.....	31

5.2.5.1	実験中の照度及び雰囲気温度	31
5.2.5.2	実験中の太陽電池モジュールの出力電圧及び表面温度	31
5.2.5.3	照度と太陽電池モジュール出力電圧の関係	33
5.3	火炎光を受光した太陽電池モジュールの出力電圧特性実験	34
5.3.1	目的	34
5.3.2	実験日及び実験場所	34
5.3.3	実験装置	34
5.3.4	計測条件	36
5.3.5	結果と考察	36
5.3.5.1	火災時の発生する煙が発電に与える影響	36
5.3.5.2	火炎光と水銀灯の場合の発電特性の違い	37
5.4	火炎に曝露された太陽電池モジュールの出力電圧特性実験	38
5.4.1	目的	38
5.4.2	実験日及び実験場所	38
5.4.3	実験装置	38
5.4.4	計測条件	38
5.4.5	結果と考察	40
5.4.5.1	火災進展状況と太陽電池モジュール出力電圧	40
5.4.5.2	太陽電池モジュールの消火困難要因	42
5.4.5.3	太陽電池モジュールの構造と熱的損傷状況	42
5.5	まとめ	45
6.	種々の火炎光の分光スペクトルと太陽電池モジュールの発電特性	47
6.1	はじめに	47
6.2	実験の諸条件	47
6.2.1	燃料の種類及び計測装置	47
6.2.2	測定条件	49
6.3	分光スペクトル測定結果	49
6.4	太陽電池モジュール発電特性	52
6.5	考察	55
6.6	まとめ	56
7.	太陽電池モジュールの力学的特性・化学的特性	57
7.1	はじめに	57
7.2	火炎曝露の無い場合の破壊形態	57
7.2.1	実験	57
7.2.1.1	太陽電池モジュールの種類	57
7.2.1.2	実験装置	58
7.2.1.3	単結晶シリコンモジュールの破壊	58
7.2.1.4	CIS モジュールの破壊	58
7.2.2	結果	58

7.2.2.1	単結晶モジュールの結果	58
7.2.2.2	CIS モジュールの結果	59
7.2.3	火炎曝露の無い場合の破壊形態のまとめ	60
7.3	火炎曝露による破壊形態	61
7.3.1	実験	61
7.3.2	結果	61
7.3.2.1	モジュール No.1 の結果	61
7.3.2.2	モジュール No.2 の結果	63
7.3.2.3	モジュール No.3 の結果	66
7.3.2.4	モジュール No.4 の結果	67
7.3.3	各太陽電池モジュールの構成部材と燃焼挙動	69
7.3.4	火炎曝露による破壊形態のまとめ	72
7.4	まとめ	72
8.	太陽電池モジュール破壊時の発電特性	73
8.1	はじめに	73
8.2	モジュール破壊実験	73
8.2.1	単結晶シリコンモジュール	73
8.2.1.1	破壊方法	73
8.2.1.2	破壊時の単結晶シリコンモジュール出力電圧	73
8.2.2	CIS モジュール	75
8.2.2.1	破壊実験	75
8.2.2.2	破壊時の CIS モジュール出力電圧	75
8.3	まとめ	75
9.	太陽電池モジュール燃焼時の生成ガス	77
9.1	はじめに	77
9.2	試料	77
9.2.1	使用した太陽電池モジュール	77
9.2.2	太陽電池モジュールの構造	77
9.3	実験経過	78
9.3.1	モジュール構成部材の加熱分解実験	78
9.3.2	太陽電池モジュールの燃焼実験	79
9.4	結果と考察	81
9.4.1	TG-IR による構成部材単体の測定結果	81
9.4.1.1	PVF の窒素及び空気中での加熱分解	81
9.4.1.2	EVA の窒素及び空気中での加熱分解	86
9.4.1.3	PET の窒素及び空気中での加熱分解	90
9.4.2	MS による太陽電池モジュール燃焼生成ガスの測定結果	94
9.4.2.1	モジュール A の燃焼結果	94
9.4.2.2	モジュール B の燃焼結果	94

9.4.3	加熱分解と火炎の燃焼による分解の比較	95
9.5	まとめ	96
10.	消防隊員の手袋、靴及び破壊器具の絶縁抵抗と感電危険性	97
10.1	はじめに	97
10.2	感電の人体への生理学的作用	97
10.3	人体の電気抵抗	97
10.4	手袋、靴及び破壊器具の電気抵抗測定実験	98
10.4.1	手袋の抵抗測定実験	98
10.4.1.1	手袋の種類	98
10.4.1.2	測定方法	100
10.4.1.3	測定結果	101
10.4.2	靴の抵抗測定実験	104
10.4.2.1	靴の種類	104
10.4.2.2	測定方法	104
10.4.2.3	測定結果	104
10.4.3	破壊器具の抵抗測定実験	104
10.4.3.1	破壊器具の種類	104
10.4.3.2	測定方法	104
10.4.3.3	測定結果	107
10.5	消防活動時の感電危険性	108
10.5.1	放水時の感電危険性	108
10.5.2	複数の単結晶シリコンモジュール接続時の破壊実験と出力電圧	109
10.5.2.1	実験方法	110
10.5.2.2	出力電圧の測定方法	110
10.5.2.3	破壊器具による単結晶シリコンモジュールの破損状況	111
10.5.2.4	破壊時の出力電圧	112
10.5.2.5	太陽電池モジュール破壊時の感電危険性の評価	113
10.6	まとめ	113
11.	種々の遮光物による太陽電池モジュール出力確認実験	115
11.1	はじめに	115
11.2	遮光物について	115
11.2.1	防火フィルム	115
11.2.1.1	ポリエステル防火フィルム	116
11.2.1.2	耐候性を持たせた防火フィルム	116
11.2.2	ブルーシート	116
11.3	種々の遮光物による発電抑制比較実験	116
11.3.1	目的	116
11.3.2	実験日及び実験場所	116
11.3.3	実験装置	116

11.3.4	計測条件	117
11.3.5	結果と考察	118
11.4	ポリエステル防火フィルムを貼り付けたモジュールを設置した模擬家屋火災実験	119
11.4.1	目的	119
11.4.2	実験日及び実験場所	119
11.4.3	実験装置	119
11.4.4	計測条件	119
11.4.5	結果と考察	120
11.5	ポリエステル防火フィルムの発泡特性と発電抑制効果	123
11.5.1	目的	123
11.5.2	実験日及び実験場所	123
11.5.2.1	発電抑制効果実験	123
11.5.2.2	ポリエステル防火フィルム加熱実験	123
11.5.3	実験装置	124
11.5.3.1	発電抑制効果実験	124
11.5.3.2	ポリエステル防火フィルム加熱実験	124
11.5.4	計測条件	124
11.5.4.1	発電抑制効果実験	124
11.5.4.2	ポリエステル防火フィルム加熱実験	126
11.5.5	結果と考察	126
11.5.5.1	発電抑制効果実験	126
11.5.5.2	ポリエステル防火フィルム加熱実験	126
11.6	まとめ	129
12.	消防活動を行う上での留意点	131
12.1	はじめに	131
12.2	消火活動開始前の留意事項	131
12.2.1	太陽光発電システムの設置状況の確認	131
12.2.2	個人装備の選択	131
12.3	消火活動中の留意事項	131
12.3.1	太陽光発電システムの状況把握	131
12.3.2	放水方法	132
12.3.3	煙の排出口確保や安全確保のための破壊作業	132
12.3.4	太陽光発電システムの発電停止措置	133
12.3.5	太陽電池モジュール落下の警戒	133
12.3.6	燃焼生成ガスに関する注意	133
12.4	火災鎮圧後の留意事項（残火確認の際の注意事項）	134
12.4.1	太陽光発電システムの状況確認	134
12.4.2	残火確認のための破壊作業	134
12.4.3	太陽電池モジュールの取り外し	134

12.4.4 取り外した太陽電池モジュールの取り扱い.....	134
12.5 まとめ.....	135
成果・実績.....	137

1. 太陽光発電システムの概要

1.1 はじめに

太陽光発電システム（Photovoltaic power system、以下 PV）は、本格的な発電所としてのメガソーラー発電所と一般家屋に設置される住宅用 PV に分けられる。ここでは、消防隊が消火活動で遭遇する機会が今後増えるであろう、住宅用 PV を中心に、システムの構成や各部の機能について紹介する。

1.2 全体の構成

PV 全体の構成としては、図 1-1 のように、太陽電池アレイ、接続箱、パワーコンディショナ、漏電遮断器、分電盤、売電用積算電力量計、買電用積算電力量計、各部をつなぐ配線等で構成されている。主要な構成は、メガソーラー発電所でも住宅用 PV でもほぼ同じである。

メガソーラー発電所と住宅用 PV では取り出す電力が違うため、いくつか仕様として異なる部分がある。出力で見ると、メガソーラー発電所は文字通り数 MW～数十 MW で、住宅用 PV は数 kW である。太陽電池が発生する電力を集め作り出された直流電圧は、メガソーラー発電所が 600～1000V なのに対し、住宅用 PV は 250～300V である。メガソーラー発電所は平地の上に架台を設置してその上に太陽電池モジュール（以下、モジュール）を載せているが、住宅用 PV では屋根の上あるいは屋根一体型としてモジュールが設置されている。扱う電力に大小があるため、配線、パワーコンディショナ等の各部分は、電力に見合った仕様となっている。

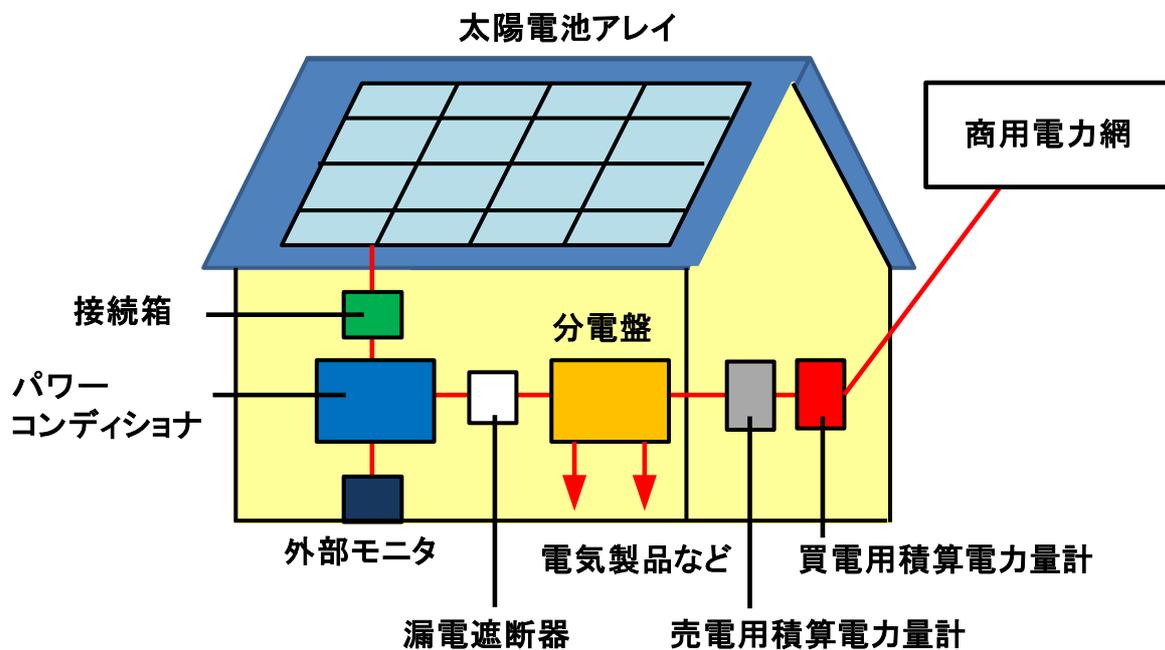


図 1-1 住宅用太陽光発電システムの構成

1.3 各部の機能

住宅用 PV について、システムを構成する各部の機能について説明する。

1.3.1 太陽電池モジュール

モジュールは日射を受け、光エネルギーを電気エネルギーに変換する装置である。電池材料には、結晶シリコン、薄膜シリコン、化合物半導体等がある。製造コスト、発電効率、波長特性、電池の厚さ等、それぞれに違いがある。太陽電池を小さい単位から表現すると、セル、クラスタ、モジュール、ストリング、アレイとなる（図 1-2）。発電はセルで行われている。モジュールの構造の一例として、結晶シリコン系と化合物半導体系のモジュールの断面構造を図 1-3 に示す。結晶シリコン系では、太陽光の当たる表面は強化ガラス、セルを固定する樹脂製の封止材（一般的に EVA (Ethylene-vinylacetate copolymer) が用いられる。）、裏面保護用の耐候性のあるバックシート（一般的に PVF (Polyvinylfluoride)、PTFE (Polytetrafluoroethylene)、PET (Polyethylene terephthalate)、アルミシート等が用いられる。）で構成されている。化合物半導体系では、太陽光の当たる表面は強化ガラス、樹脂製の封止材、太陽電池が蒸着されている基板ガラス、裏面保護用のバックシートで構成されている。

モジュールが一般的なパネル 1 枚に相当し、モジュール内のセルは直列に接続されている。モジュールをいくつか直列に接続したものをストリングと呼び、ストリングを数個並列に接続してアレイを形成する（図 1-2）。アレイが住宅 1 軒分である。1 つのストリングで設定の電圧（250～300V）にまで上昇させて、ストリングを並列にすることで電流量を確保している。モジュールの中はいくつかのクラスタに分かれていて、不具合のあるセルに電流が流れ込まないようにするためのバイパスダイオードがクラスタ毎に組み込まれている（図 1-4）。PV は割れたセルであっても、可視光線を受ければ発電を行う物理特性がある。発電を止めるには完全な遮光を行うしかない。

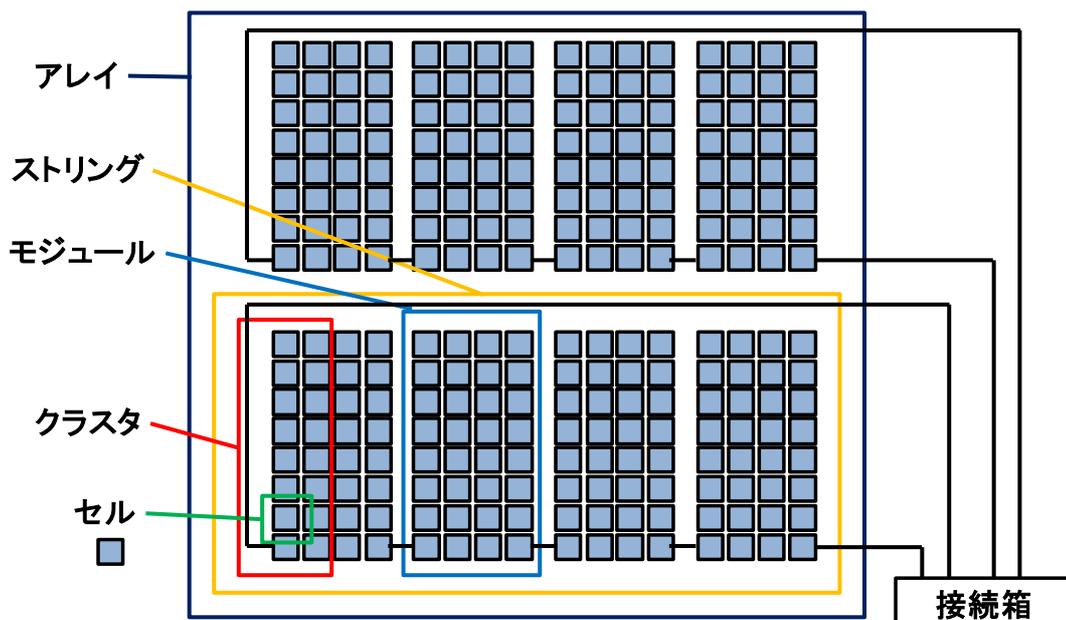


図 1-2 太陽電池の構成

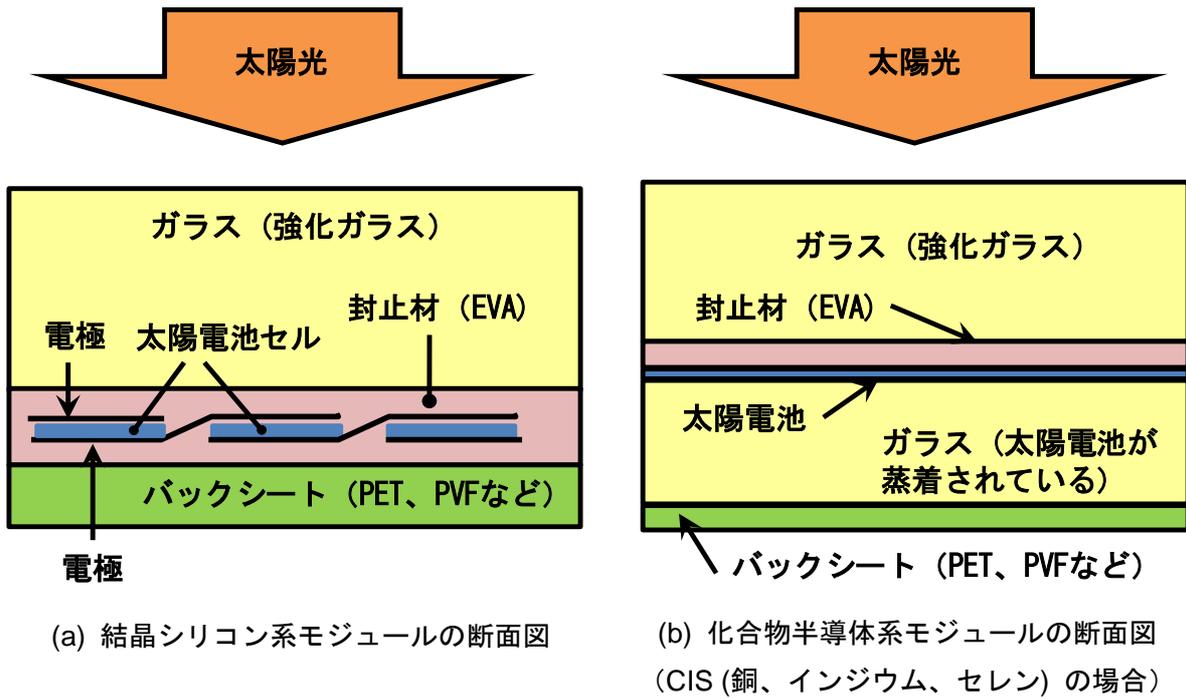


図 1-3 太陽電池モジュールの構造

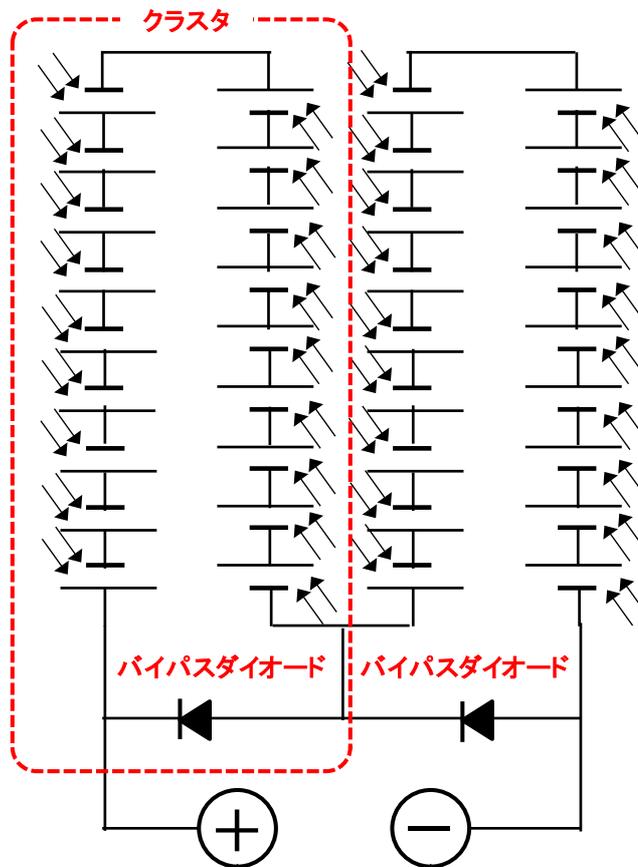


図 1-4 太陽電池モジュール内の回路構成

1.3.2 接続箱

並列に構成された複数のストリングの出力を合成しアレイの出力としてパワーコンディショナへ送り出すための接続端子を持った箱である。電圧の高いストリングから低いストリングに電流が逆流するのを防止するためのブロッキングダイオードや、電路を遮断する開閉器、雷対策としての避雷器が内蔵されている。

1.3.3 パワーコンディショナ

接続箱より供給されてくる電流と電圧を制御して最大の直流電力が得られるようにするとともに、直流電力を交流電力に変換し、住宅内コンセントへの供給や売電を行う。また、商用電力網に悪影響を及ぼさないように連係保護装置を内蔵している。接続箱の機能を併せ持ったパワーコンディショナもある。

1.3.4 漏電遮断器

電力系統から漏電があった場合に電力を遮断する。

1.3.5 分電盤

電力をコンセント等の電気機器に分配する。PV 専用のブレーカを持つ。

1.3.6 売電用積算電力量計

電力会社へ売った電力の積算を行う。

1.3.7 買電用積算電力量計

電力会社から購入した電力の積算を行う。逆電防止機能が付く。

1.3.8 その他の機器

これらのほかに、発電状況や売電状況を表示する外部モニタ、発電した電力を貯めておくための蓄電池及び充電装置、太陽の日射をモニタリングする日射計等が付加される場合がある。

1.4 まとめ

ここでは、PV の各部が持つ機能について紹介した。PV 自体は日々改良が加えられるシステムであるため、機能が複合された装置や新素材が使われることがあると考えられる。このことも想定し、今後も新しい技術については情報収集を継続していきたい。

2. 太陽光発電システムが設置された住宅の火災事例と感電事例

2.1 はじめに

太陽光発電システム（Photovoltaic power system、以下 PV）には、多くの電子部品、端子、電線が使われており、防水等の機能が付加されているが、電気部品であるため、経年劣化や初期不良、取り付け不良による出火が十分に考えられる。また、火災後や一部壊れた状態でも、太陽電池は日射があれば発電を継続し電力を供給するため感電の危険はなくなる。ここでは、我々が消防本部で聞き取り調査を行った中から、住宅用 PV が設置された住宅の火災事例や消防活動中に消防隊員が感電した事例を紹介し、消防活動上の危険性についてまとめる。

2.2 火災事例

ここでは、PV が設置された住宅の火災をいくつか紹介する。まだ火災事例が少ない状況ではあるが、その中でも把握できた火災の概要を述べる。これらの火災には、火災の原因が PV であるものとそうでないものとに分かれる。

2.2.1 信越地方における火災事例

屋根上に後付けされた PV から出火した事案である。出火する 3 日前に居住者から販売店に「太陽光発電のブレーカーが落ちる」との連絡が入った。販売店員が配線の漏電をチェックし、4 スtring の内の 2 スtring 目に絶縁不良を発見し、2 スtring 目の接続を遮断した。外観からは特別な異常は見つからなかった。出火し、消防が駆け付けた時には、居住者が屋根の上に乗し、園芸ホースで散水して消火し終えていた。出火した太陽電池モジュール（以下、モジュール）は 3 日前に接続を遮断した String ではなかった。燃えたモジュールは 3 枚で、1 枚はモジュール全体が焼損し脱落していた。駆け付けた販売店員がモジュールを外し、回収して原因を調査した。モジュールを外したときに、モジュールと屋根の間に落ち葉や枝が溜まっていた。屋根上の配線を小動物がかじったような跡が見つかった。

2.2.2 北関東地方における火災事例

屋根上に後付けされた PV から出火した事案である。車で走行中の近所の人から煙が出ているのを見つけ居住者に知らせた。居住者が PV 設置業者と消防に電話連絡を入れた。焼損したのは 1 枚のモジュールの 80cm×60cm くらいである。焼損していた部分のモジュールの裏の隙間には、余剰配線がまとめて押し込まれていて、鳥の巣（枯れ葉や枝）もあった。この部分の配線には溶融痕が認められた。

2.2.3 関東地方における火災事例

工場建屋の屋根上に PV を設置している工事期間中に出火した。まだ発電の運用は始めていないときであった。屋根上へのモジュールの設置が終わり、接続箱やパワーコンディショナへの配線のつなぎ込みを残して休日を迎えたため、配線の端部をビニルテープで巻き、屋根の上にまとめて放置して作業を終えた。雨が降った後に晴天になり、まとめてあった配線端部から出火した。配線端部の処理としてビニルテープを巻いていたが、String 毎に＋端子と－端子を一緒にビニルテープで巻いていたということで、雨の水がテープ内に浸み込み絶縁が悪くなったところで日射により発電が開始し、端部の両極間で絶縁不良により出火にいたったと考えられる。

2.2.4 東海地方における火災事例

屋根上に後付けの PV が設置された住宅が火災になった。出火原因は PV とは関係ないと考えられている。2 階の居室から出火し、屋根を焼き抜けモジュール数枚を焼いた火災である。屋根上のモジュールと配線が焼損し、配線が途中で切れ垂れ下がっている状態であった。この配線が揺れた状態の時に、配線がモジュール架台等の金属部に触れることで放電が起こっていた。この放電を停めることができなかった。

2.2.5 東北地方における火災事例(1)

東日本大震災での火災事例である。3 階建て住宅の 1 階車庫内に設置された PV のパワーコンディショナが津波により浸水し、パワーコンディショナ内部の配線から出火した。津波被害を受けた翌日の午前中に焼損を発見した。発見時は日射のある天気で、発電による電力で出火したものである。住民は避難所にいたため建物内は無人であった。発見時、パワーコンディショナ内はまだ湿っていた。駆け付けた消防隊員が粉末消火器で消火した。被害はパワーコンディショナ内部だけである。海水が端子部分に付着することで、端子の腐食、端子台等の絶縁劣化等が起こったのではないかと思われる。

2.2.6 東北地方における火災事例(2)

東日本大震災での火災事例である。2 階建て住宅の外壁に設置された PV のパワーコンディショナが津波により浸水し、配線に付着した海水の影響で絶縁が劣化し、微小電流が流れ続けることで発熱が起こり、約 2 ヶ月後に出火したと思われる。住民は避難所にいて建物内は無人であった。火災を発見したのは近くにいた作業員である。消火活動はなかった。被害は金属筐体でできたパワーコンディショナ内部だけで、配線被覆部分が焼損した。

2.2.7 東北地方における火災事例(3)

東日本大震災での火災事例である。2 階建て住宅 1 階外壁に設置された PV のパワーコンディショナ（接続箱機能も内蔵）と思われる機器が津波で浸水した。屋根上の太陽電池からの電力入力配線に力がかかり機器筐体から配線が脱落したことにより短絡し、配線被覆が焼損したと考えられる。被害は筐体付近の配線のみである。建物周辺は停電中であった。焼損が発見されたのは津波被害から約 2 週間後であった。

2.3 感電事例

ここでは、PV が設置された住宅の火災において消防活動をしていた消防隊員が感電した事例を紹介する。

2.3.1 断熱材で感電した事例

屋根一体型の PV を設置した 2 階建て住宅が火災となった。出火箇所はモジュールの配線部分と疑われている。この火災でモジュールは燃焼により穴が開いた。消火により火勢が収まり 2 階屋根裏の残火確認を行おうとした際に消防隊員が感電した。住宅の壁や屋根には断熱材が使われており、火災の影響により、断熱材がむき出しの状態となっていた。この断熱材は消火水が浸み込んだ状態であった。2 階の屋根裏を確認するため、吹き抜けの玄関に梯子をかけ、消防隊員が上った。この際、消防隊員は一般住宅火災の消火活動で身につける個人装備（防火帽、防火服、防火手袋（以下、手袋）、ゴム製防火靴）を着装していた。梯子に乗った消防隊員が、片手を梯子に、もう一方の手で断熱材に触れた時、手に電撃を感じた。幸い梯子から転落する等の被害は

なかった。

2.3.2 屋根裏での活動中に感電した事例

屋根一体型の PV を設置した 2 階建て住宅が火災となった。出火原因は PV とは無関係と思われる。発見時、モジュールのある屋根の隙間から煙が確認でき、モジュールに焼けはなかったが、鎮火後にモジュールが焼損し穴が開いていることを確認した。消火活動中に火災建物への商用電源の供給は電力会社により遮断した。消火活動を行った後、残火確認のため、消防隊員は、屋根上でのモジュールの引きはがし作業や 2 階屋根裏内でモジュールを外に押しはがす作業をしていた。消防隊員は一般住宅火災の消火活動で身につける個人装備を着装していた。屋根上での引きはがし作業中、破壊器具をモジュールの間に差し込み、てこの原理でモジュールを浮かし、手で引きはがそうとしたときにビリビリと手に感じた。また、屋根裏でのモジュールの押しはがし作業中、片手を建物の金属柱に置き、もう一方の手でモジュールの裏面を押したときに、バーンという電撃を感じた。幸い屋根から転落する等の被害はなかった。

2.4 まとめ

本章では火災事例と感電事例を紹介した。PV を設置した住宅の火災において、火災事例と感電事例、PV の構造を考慮すると、検討しなければならない課題が以下のように浮かび上がってきた。これらに対して実験や測定による確認をする必要がある。

- (1) 一般的な電気製品と同様に、構成機器や配線からの出火の可能性がある。
- (2) アーク放電による着火の可能性がある。
- (3) 濡れた手袋や破壊器具を通じて感電する可能性がある。
- (4) 棒状放水を通じて感電する可能性がある。
- (5) 壊れていても太陽光や火炎光があると発電を継続する。
- (6) 感電で致命傷にならなくとも、感電のショックで消防隊員が屋根上から落下する可能性がある。
- (7) モジュール及び大きなガラス片が落下してくる可能性がある。
- (8) モジュールの樹脂部材が加熱や燃焼により有毒ガスが発生する可能性がある。

3. 太陽光発電モジュールに対する国内外の関連規格と法規

3.1 はじめに

太陽光発電システム（Photovoltaic power system、以下 PV）の設置にあたっては、関連する法令に照らして適切な手続きが必要になる。PV は、電気事業法等の法令により電気工作物として扱われ、PV の出力容量や受電電力の容量によりその種類が一般用または自家用電気工作物に分類されるが、いずれの電気工作物も電気設備の技術基準に適合させることが、電気事業法で定められている。また、大規模なものを設置するにあたっては、農地法、土壤汚染対策法、森林法、都市計画法等の法令に基づく許可や届け出が必要になる場合がある¹⁾。

PV は第 1 章で述べたとおり、太陽電池モジュール（以下、モジュール）、接続箱、パワーコンディショナ、漏電遮断器、売電用及び買電用積算電力量計等の電子機器で構成されている。このうち、モジュールは、光エネルギーから電気エネルギーへの変換を担う重要な部分である。モジュールの関連規格を大別すると性能評価と安全性評価の両面があるが、本章ではモジュールにどのような安全性が求められ、そのためにどのような試験が課せられているのかについて記す。

3.2 太陽電池モジュール及びその構成材料に求められる試験とその適用規格

3.2.1 概要

モジュールに関する国際規格として国際電気標準会議（IEC：International Electrotechnical Commission）が制定する IEC 規格があり、性能評価を目的とした IEC 61215（結晶系モジュール）及び IEC 61464（薄膜系モジュール）と、安全性評価を目的とした IEC 61730-1（Photovoltaic (PV) module safety qualification – Part 1: Requirements for construction）及び IEC 61730-2（Photovoltaic (PV) module safety qualification – Part 2: Requirements for testing）がある。

このうち安全性評価に関する規格は、モジュールの想定される使用期間において、モジュールの誤った使用または内部構造の破壊により、機械的及び環境的負荷による電気ショック、火災危険、人的被害を防ぐことを意図している。IEC 61730-1 ではモジュールの構造及び使用される各種部材について規定し、また、IEC 61730-2 ではモジュール自体に適用される試験が規定されている。

3.2.2 IEC 規格に記載されている項目

IEC 61730-2 に規定されているモジュール安全性試験（Module safety tests：MST）は、プレコンディショニング試験、一般検査、感電危険試験、火災危険試験、機械的応力試験、部品試験に大別される。モジュール安全性試験の各項目は、MST から始まる試験番号で示されている。IEC 61730-2 に示されている試験手順のうち、感電危険試験及び火災危険試験に絞って紹介する。

(1) 感電危険試験

感電危険試験には、MST 11 接近性試験（Accessibility test）、MST 12 切断性試験（Cut susceptibility test）、MST 13 接地連続性試験（Ground continuity test）、MST 14 インパルス電圧試験（Impulse voltage test）、MST 16 耐電圧試験（Dielectric withstand test）が示されている。

MST 11 は絶縁していない電氣的結線が、人に対する感電の危険とならないかを試験するもので、モジュールの電気回路が外部から接近させる検査プローブとの間に電氣的接触が無いことを確認する。MST 12 は重合材で作られたモジュールの受光面及び裏面が、人を感電の

危険に曝さないことを調べるもので、モジュールの受光面に置いた炭素鋼の刃に一定の荷重をかけて引っ張り、モジュールの充電部が露出する切り口の有無を確認する。MST 13 はモジュールが金属製の導電部を持つ場合に、導電部と接地点との間に導通があることを調べる。MST 14 はモジュールの充填材等の固体絶縁物が過電圧に耐える能力を評価するもので、インパルス電圧発生器によってモジュールにインパルス電圧を加え、絶縁破壊または表面トラッキングの有無を調べる。MST 16 はモジュールが通電部分と筐体または筐体外部との間で十分絶縁しているか調べる。

(2) 火災危険試験

火災危険試験には、MST 21 温度試験 (Temperature test)、MST 23 火災試験 (Fire test)、MST 26 逆電流過負荷試験 (Reverse current overload test) が示されている。

MST 21 はモジュールの運転時の温度を測定し、表面、材料または部品の上限温度以下であることを確認する。MST 23 はモジュールに適用する基本的な耐火性を規定するもので、外部で発生した火災に曝される場合を想定している。火災安全等級は A、B 及び C に分類され、最高の耐火性を A、基本的耐火性を C で表すが、建物に設置される全てのモジュールについて火災安全等級 C 以上が必要である。IEC 61730-2 の附属書に MST 23 火災試験の火炎伝播試験 (Spread of flame test) 及び飛び火試験 (Burning brand test) が規定されている。火炎伝播試験は、勾配調整が可能な支持台に取り付けたモジュールをガスバーナー火炎に接炎させ、燃え広がりが一定距離を超えないこと (火災安全等級 A では 1.82m、B では 2.4m、C では 3.9m) が要求される。飛び火試験は、火災安全等級に応じてダグラスもみ (米松) で作成したクリブ状火種またはホワイトパインで作成した木片火種をモジュール上に置き、一定距離以上の燃焼の拡大、裏側への燃え抜け、モジュールのいずれかの部分が燃えながら落下しない事が要求される。表 3-1 に MST 23 の飛び火試験の火災安全等級に使用する火種について示す。MST 26 は逆電流故障時において入力されたエネルギーが熱として放出される際に発火または火災の危険性を確認するもので、薄紙及び綿布で覆ったモジュールに逆電流過負荷をかけ、モジュールの出火、薄紙や綿布の燃焼や焼焦が無いことが求められる。

IEC 61730-2 に規定されている試験の他に IEC 規格で火災に関連するものを表 3-2 にまとめて示す。

表 3-1 IEC 61730-2 MST 23 飛び火試験の火種

	火災安全等級 A	火災安全等級 B	火災安全等級 C
火種の大きさ	300mm×300mm×57mm	150mm×150mm×57mm	38.1mm×38.1mm×19.8mm
火種の数	1 個	2 個	20 個
材質	ダグラスもみ (米松)	ダグラスもみ (米松)	ホワイトパイン

表 3-2 モジュールの国際規格

適用規格	規格名 (内容)
IEC 61730-1	火炎伝播指数試験 (ラジアントパネル試験)
IEC 60695-1-1	燃焼性試験
IEC 60112	耐トラッキング性試験
IEC 61730-1	傾斜面トラッキング試験
IEC 61730-1、60664-1	部分放電試験
IEC 60216-5、61730-1	長期熱劣化試験
IEC 60695-2-20	ホットワイヤーイグニッション試験

3.3 国内外の太陽電池モジュールに対する試験規格

3.3.1 JIS 規格と IEC 規格

モジュール安全性評価に関する JIS 規格には、JIS C 8992-1 (太陽電池モジュールの安全適格性確認—第 1 部：構造に関する要求事項) と JIS C 8992-2 (太陽電池モジュールの安全適格性確認—第 2 部：試験に関する要求事項) があるが、それぞれ IEC 61730-1 及び IEC 61730-2 を基に作成されたものである。

JIS C 8992-1 及び JIS C 8992-2 の IEC 61730-1 及び IEC 61730-2 への対応程度については、一致していることを示す IDT (identical) が規格中にそれぞれ明記されている。

なお、性能評価の規格についても JIS C 8990 が IEC 61215、JIS C 8991 が IEC 61646 とそれぞれ一致したものとなっている。

3.3.2 他の地域における規格と IEC 規格

北米における安全性評価に関する規格は、米国保険業者安全試験所 (Underwriters Laboratories Inc. : UL) による UL 1703 が基になっている。UL 1703 ではモジュールの性能と安全の両方を規定しており、IEC 規格の性能評価 (IEC 61215 または IEC 61464) と安全性評価 (IEC 61730-1 及び IEC 61730-2) という構成とは異なったものとなっている^{2,3)}。IEC 61730 に整合させた UL 1703 の新ドラフトを策定するとともに、最終化が進められている IEC 61730 第 2 版に整合した UL 規格を発行する準備を行っている⁴⁾。

欧州における安全性評価は欧州規格 (European Norm : EN) によっており、IEC 61730-1 及び IEC 61730-2 から一部修正された EN 61730-1 及び EN 61730-2 が用いられている。

3.4 太陽電池モジュールに関する国内法における位置づけ

3.4.1 建築基準法⁵⁾

モジュールは、そのものが建築物の主要構造部となることはなく、通常は屋根面や壁面に貼られるか、屋根上に設置されるものである。これは、建築基準法の規制によるところが大きい。尚、ここでいう主要構造部とは、柱、はり、床、外壁、屋根、階段及び防火区画を構成する内壁を指し (建築基準法施行令第 107 条、107 条の 2、108 条の 3)、構造耐力上の主要構造部とは若干異なる。すなわち、建築基準法第 27 条による建物用途に対する建物への耐火性能の要求、及び同

法第 61 条、62 条における防火地域、準防火地域に建設される建物への防耐火性能の要求である。

法第 27 条では法で定めた用途の建築物（特殊建築物）については、耐火建築物または準耐火建築物とすることを求めている。一方、法第 61 条、62 条は、防火地域もしくは準防火地域に建設される一定規模以上の建築物への防耐火性能の要求である。これらの法の適用範囲にある建築物は、その主要構造部を原則として耐火構造もしくは準耐火構造でつくることが求められる。

ここで耐火構造としての屋根及び外壁に対してどのような性能が要求されるかを見てみると、「通常の火災」に対して屋根は 30 分間の「非損傷性能」と 1 時間の「遮炎性能」が求められる。「非損傷性能」とは、火災による加熱に対して、該当部材が一定の荷重を支持する能力を有することを求めるものであり、一方「遮炎性能」は火災による加熱に対して火炎を噴出させるような亀裂等が生じないことを求めるものである。一般的なモジュールの構造を考えると、ガラス部材が面材としての主たるものであり、上述の性能を保持することは難しい。さらにもう一つのポイントは外力として要求される「通常の火災」の内容であるが、これは ISO 834 で規格化されている標準火災曲線であり、この火災条件では該当部材は 900～1000℃の雰囲気曝されることとなる。モジュールがこのような厳しい火災条件で、上述の性能を満足することはほぼ不可能であり、よって耐火建築物や準耐火建築物で純粋な屋根や外壁として使用することはできないと考えてよい。

主要構造部として定められた方法で作られた屋根、もしくは国土交通大臣認定を取得している屋根に対して外装材として用いる場合、あるいは、建築物が上述の耐火建築物（もしくは準耐火建築物）要求のかからない用途や規模である時の屋根部材として用いる場合には、屋根葺き材として取り扱われるが、これらの場合でも建築基準法第 22 条第一項にて、通常火災を想定した屋根構造の防火性能、及び、同法第 63 条にて、市街地火災を想定した屋根構造の防火性能が要求される。一般的に前者を「22 条地域の屋根性能」、後者を「防火地域または準防火地域の屋根性能」と称し、それぞれの技術基準が建築基準法施行令第 109 条の 5 及び同令第 136 条の 2 の 2 にて定められている。

いずれの規定も、周辺の火災によって生じた火の粉によって、屋根葺き材上での展炎もしくは屋根葺き材の燃え抜けの有無を確認するものである。

試験方法は、国際規格（ISO/CD 12468 Test method for external fire exposure to roofs）に準拠したもので、火の粉を模した木材クリブを屋根面に設置し、屋根葺き材上の展炎、及び屋根葺き材の燃え抜けの有無を確認するものである。

建築基準法の飛び火試験で用いる火種は表 3-3 のとおりであるが、同法第 63 条で定める市街地火災を想定した試験の火種は、IEC 61730-2 MST 23 の飛び火試験の火災安全等級 C の試験よりも規模が大きい。このため、国内において外装材または耐火建築物要求のかからない用途や規模の建物の屋根部材としてモジュールを使用する場合には、IEC 61730-2 MST 23 すなわち JIS C 8992-2 MST 23 における火災安全等級 C の要求を満たすだけでなく建築基準法の規定を満足することが必要である。

表 3-3 建築基準法第 22 条及び第 63 条に規定される飛び火試験の火種

	第 22 条 (通常火災)	第 63 条 (市街地火災)
火種の大きさ	40mm×40mm×40mm	80mm×80mm×60mm
火種の数	2 個	2 個
材質	ブナ	ブナ

3.4.2 電気用品安全法⁶⁾

電気用品安全法が対象とする電気用品には、特定電気用品（116 品目）と特定電気用品以外の電気用品（314 品目）があるが、モジュールは同法第 2 条で定義される「電気用品」に含まれていない。

3.4.3 消費生活用製品安全法⁷⁾

家庭に設置される小出力発電装置としてPV（モジュールを含む）は、消費生活用製品に該当する。火災を含む重大製品事故が発生した場合、製造事業者または輸入事業者は同法第35条第1項に基づく報告義務がある。

参考文献

- 1) 経済産業省資源エネルギー庁：太陽光発電フィールドテスト事業に関するガイドライン基礎編（2012 年度版）, (2013.3), http://www.enecho.meti.go.jp/ohisama_power/common/pdf/guideline-2012.pdf (2014 年 2 月 5 日アクセス).
- 2) UL Japan : JAPAN ON the MARK, 第 34 号, (2010.8), <http://www.ul.com/japan/documents/onthemark/jponthemark-34-jpn.pdf> (2014 年 2 月 16 日アクセス).
- 3) UL Japan : JAPAN ON the MARK, 第 35 号, (2010.11), <http://www.ul.com/japan/documents/onthemark/jponthemark-35-jpn.pdf> (2014 年 2 月 16 日アクセス).
- 4) UL Japan : JAPAN ON the MARK, 第 41 号, (2012.5), <http://www.ul.com/japan/documents/onthemark/jponthemark-41-jpn.pdf> (2014 年 2 月 16 日アクセス).
- 5) 完山利行, 苺谷信次, 小早川香, 土橋常登, 高山真吾: "屋根部材の性能試験", GBRC, Vol.34, No.4, (2009.10).
- 6) 電気用品安全法 電気用品一覧 (2012.7.1 現在) http://www.meti.go.jp/policy/consumer/seian/denan/hourei/denkiyouhin_ichiran/tokutei_denki.htm, 及び http://www.meti.go.jp/policy/consumer/seian/denan/hourei/denkiyouhin_ichiran/tokuteigai_denki.htm (2014 年 1 月 29 日アクセス).
- 7) 消費者庁, 経済産業省: 消費生活用製品安全法に基づく製品事故情報報告・公表制度の解説～ 事業者用ハンドブック 2012 ～, http://www.caa.go.jp/safety/pdf/120731safety_1.pdf (2014 年 2 月 16 日アクセス).

4. 太陽電池モジュール単体の火炎光受光及び火炎曝露による出力電圧特性

4.1 はじめに

多結晶シリコン太陽電池モジュール（以下、モジュール）について、火炎光を受光した時の出力電圧特性や火炎に曝露し熱的損傷を受けた時の出力電圧特性及び燃焼性状を調べた。この実験を通して、太陽光がない夜間の火災時における発電の可能性や、損傷程度と発電停止との関連について調べたことを述べる。

4.2 火炎光を受光した太陽電池モジュールの出力電圧特性実験

図 4-1 及び表 4-1 に示す 2 種類の大きさのモジュール（京セラ株式会社、KC80S 及び KC60S）について、ヘプタン火炎から放出する光によって発電するモジュール 1 枚の出力電圧の特性を調べる実験を実施した。

4.2.1 目的

火災時に生じる火炎から放出する光を受けたモジュールが、太陽光を模擬した照明灯の有無によって、どのような発電特性を示すかを実験室レベルで確認する。

4.2.2 実験日及び実験場所

2012 年 2 月 27 日に消防研究センター・ルームカロリ試験室（以下、試験室）にて本実験を実施した。

4.2.3 実験装置

大きいモジュール（以下、モジュール大）は 155mm×100mm の 36 枚のセルから構成され、小さいモジュール（以下、モジュール小）は 155mm×75mm の 36 枚のセルから構成される。どちらの大きさのモジュールも厚さは 5mm であり、モジュールの周囲はアルミニウム製枠（厚さ 36mm）で囲まれている。

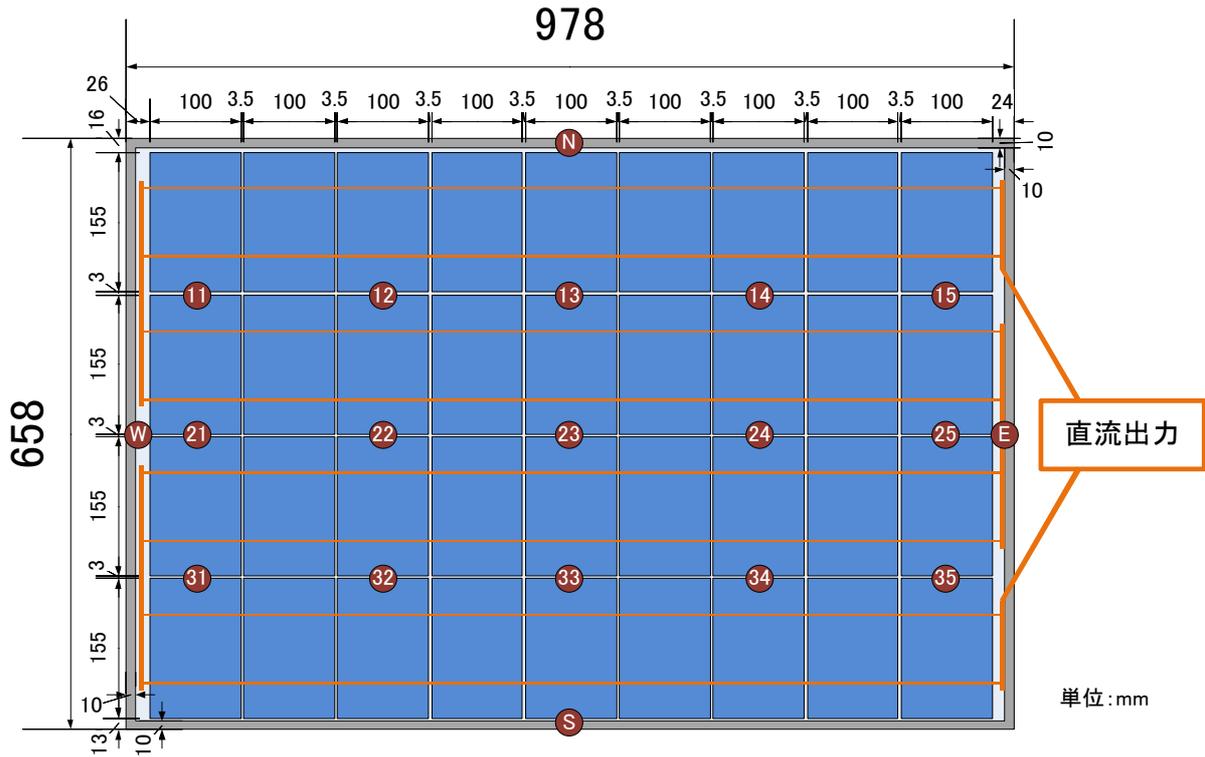
図 4-2 に実験装置の設置状況を示す。地面に対して垂直に立てたモジュール（図 4-1 の㊸が上になるように設置）に正対した n-ヘプタン 1L 及び水 5L を入れた鉄製の円形火皿（内法として直径 454mm、高さ 100mm、厚さ 3mm）の中心との離隔距離は 1m である。用意した火皿の大きさ及び燃料の量については、実火災を想定した火源を考える必要があるが、本研究では試験室において周囲環境を熱により損傷させないという制限を考慮の上、選択した。照明灯には、太陽光と似たスペクトル分布を持つランプ容量 500W の人工太陽照明灯（セリック株式会社、SOLAX XC-500E）を 6 台用い、それぞれの光軸がモジュール中央を向くように目視により調整した。

4.2.4 計測条件

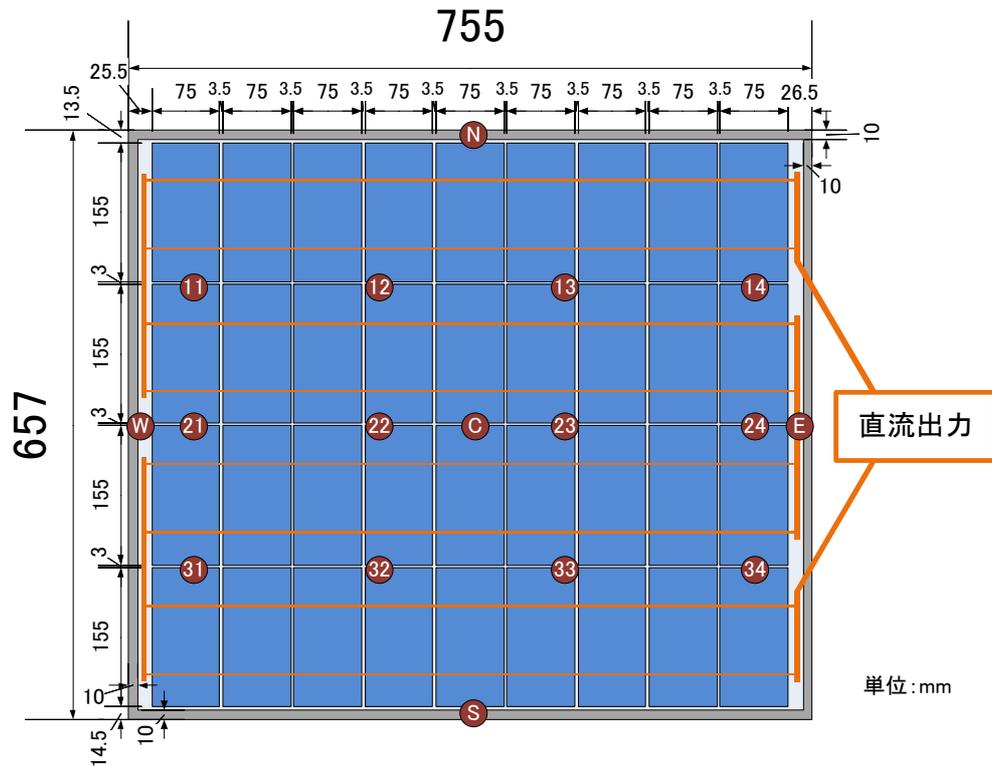
モジュール大を用いた時、実験開始時の試験室内の気温 13℃、相対湿度 29%、気圧 1008hPa であり、モジュール小を用いた時、試験室内の気温 12℃、相対湿度 31%、気圧 1009hPa であった。

図 4-1 に示した丸囲みの数字はモジュールの表面温度の経時変化を、丸囲みの英字はアルミニウム製枠の表面温度の経時変化を計測するための K 型熱電対（直径 0.32mm）の設置位置を表す。温度計測のサンプリング時間間隔は 1 秒である。

モジュールの脇（図 4-1㊸付近、円形火皿中心からの離隔距離は 1.07m）において、放射計（株式会社チノー、RE-III 型）によりモジュールへの放射受熱量の経時変化を、照度計（コニカ



(a) モジュール大



(b) モジュール小

図 4-1 実験で使用した多結晶シリコン太陽電池モジュール
(丸囲みの英数字は熱電対設置位置を示す)

表 4-1 太陽電池モジュールの出力の仕様

	太陽電池モジュール	
	大	小
製造者	京セラ株式会社	
型式	KC80S	KC60S
製造番号	99644009	9990340003
製造年月	1999. 6	1999. 9
公称最大出力[W]	80	60
公称開放電圧[V]	21. 5	
公称短絡電流[A]	4. 97	3. 73
公称最大出力動作電圧[V]	16. 9	
公称最大出力動作電流[A]	4. 73	3. 55
最大システム電圧[V]	600	

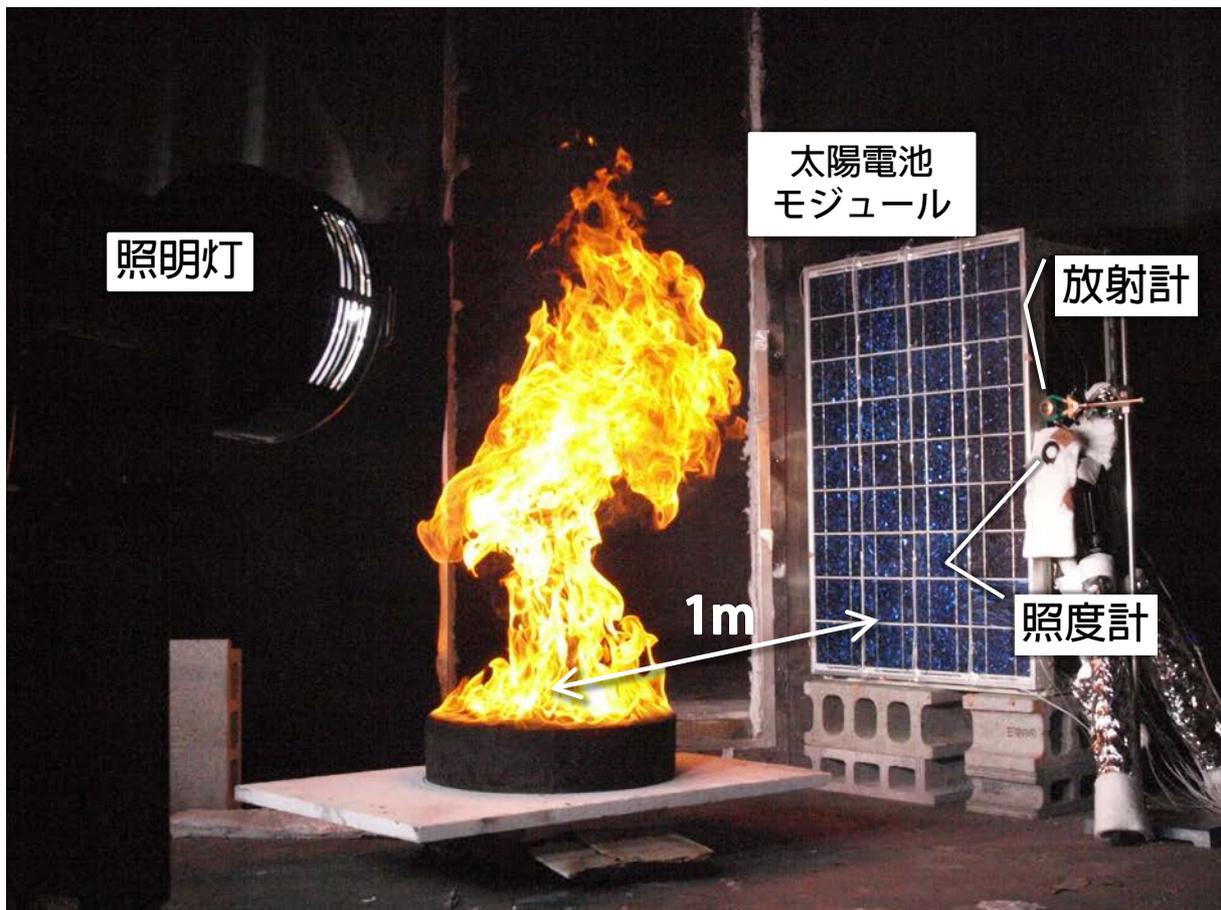


図 4-2 モジュール及び機器類の設置状況と実験の様子

ミノルタセンシング株式会社、T-10) により人間が感覚的に感じる光の明るさの目安として照度の経時変化をそれぞれサンプリング時間間隔 1 秒で取得した。

モジュールの出力端子には、負荷抵抗として 5Ω の抵抗器をデータロガーに対して並列に接続した。

熱電対をモジュール表面に設置したことにより、発電を妨げる要因になり得るが、熱電対を設置後のモジュールの出力電圧の低下は 1~2% であり、照度計の計測誤差範囲内であることを確認した。

4.2.5 実験条件

照明灯の光の有無及びヘプタン火炎の光の有無の組み合わせとして、実験条件は 4 通りである。この照明灯の光のみの場合のモジュール中央における平均照度 (5 回計測した平均) は、モジュール大の時 19300lx、モジュール小の時 18500lx であった。

4.2.6 結果と考察

4.2.6.1 太陽電池モジュール表面及び枠の最高温度

実験中のモジュール表面の最高温度は、モジュール大の時、 91°C (図 4-1(a)、位置㉔) であり、モジュール小の時、 96°C (図 4-1(b)、位置㉓) であった。外観上、特に損傷はなかった。また、アルミニウム製のモジュール枠の最高温度は、モジュール大の時、 53°C (図 4-1(a)、位置㉑) であり、モジュール小の時、 57°C (図 4-1(b)、位置㉒) であった。モジュール表面温度よりもモジュール枠温度の方が約 40°C 低く、モジュールを加熱した時にモジュール枠が放熱に寄与すると考える。

4.2.6.2 太陽電池モジュール出力電圧と照度の関係

図 4-3 にモジュール大の出力電圧とその時の照度の関係を示す。ここで、出力電圧と照度の瞬時値は同期が取れていないため、それぞれのデータに 10 秒の移動平均を施してある。結果については、モジュール小も傾向としては同様であったので、モジュール大について考察する。

ヘプタン火炎がなく照明灯を点けない場合は、電圧の出力はない。

ヘプタン火炎があるとその照度に従って線形的に出力電圧が増加する。約 2.6V の出力には約 6700lx のヘプタン火炎の照度が必要である。

一方、ヘプタン火炎がなく照明灯を点灯した場合には、照度約 13700lx で約 2.6V の出力電圧がある。つまり、ヘプタン火炎の照度が照明灯の 5% 程度で同じ出力電圧を生じることになる。

照明灯を点灯した状況でヘプタン火炎が存在する場合、ヘプタン火炎の発熱速度が増加するとモジュール出力電圧は増加するものの照度が低下する傾向が見られた (図 4-4)。その理由として、図 4-2 に示す位置関係から、照明灯とモジュールの間にあるヘプタン火炎の発熱速度が大きい時に火炎が大きくなり、その時に火炎光の強度が増すよりも照明灯からモジュールを照らす光を火炎光が遮る効果の方が強いことから、照度が低下すると考える。

消防活動中の消防隊員が感覚的に感じる光の明るさが、太陽光発電システム (Photovoltaic power system、以下 PV) の発電量に直接関連付けられれば単純であったが、可視光以外の光も発電に寄与し、光のスペクトルの赤外領域に大きなエネルギーを保有する火炎は、暗くても PV の発電量が大きいことも考えられるので注意を要する。また、夜間の消防活動であっても火炎の光により PV が発電している恐れがあることにも注意しなければならない。

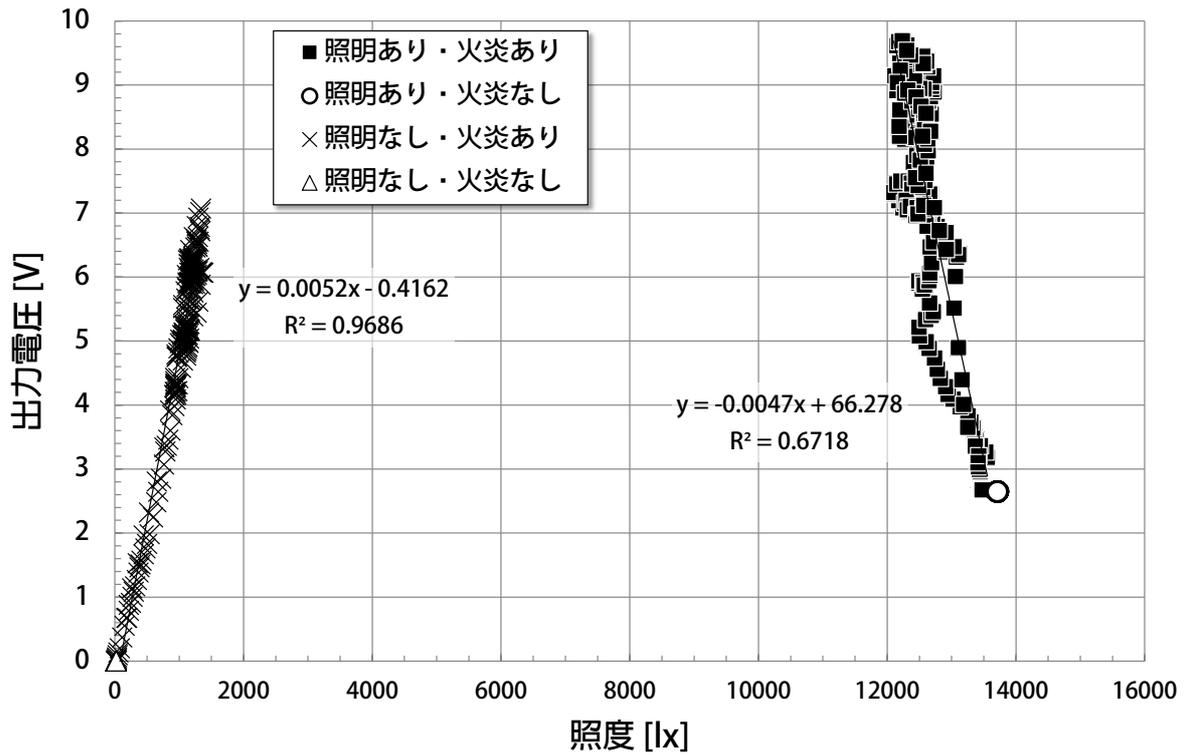


図 4-3 モジュール大の出力電圧と照度の関係

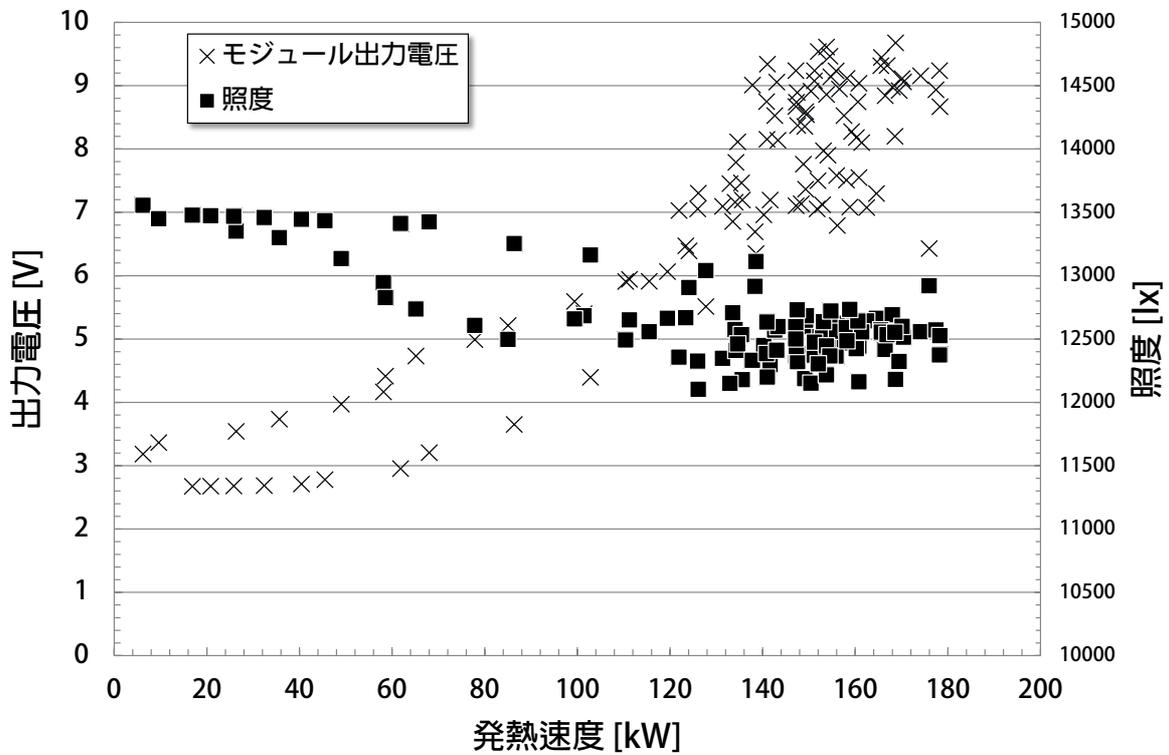


図 4-4 発熱速度とモジュール大の出力電圧及び照度の関係
(ヘプタン火炎光受光、照明灯点灯時)

4.3 火炎に曝露された太陽電池モジュールの出力電圧特性実験

図 4-1 及び表 4-1 に示す 2 種類の大きさのモジュールについて、モジュール 1 枚の裏面が火炎に曝露された際の出力電圧の特性を調べる実験を実施した。

4.3.1 目的

モジュールから出火したり、出火建物に設置したモジュールが火炎に曝露されたりする場合にどの程度の損傷をモジュールが受けるのか、また、その時の発電特性を調べようとするものである。

4.3.2 実験日及び実験場所

2012 年 2 月 28 日及び 3 月 1 日に試験室にて本実験を実施した。

4.3.3 実験装置

図 4-5 に実験装置の設置状況を示す。モジュール長手方向の一边を軸に地面に対して約 23° 傾けた状態で設置した。この設置角度は、「太陽電池モジュールの安全適格性確認－第 2 部：試験に関する要求事項 JIS C 8992-2 (IEC 61730-2)」で設定するモジュール傾斜角度と同じである。

助燃剤を入れる容器として、ステンレス製の円形火皿 1 (内法として直径 51mm、高さ 14mm)、ステンレス製の円形火皿 2 (内法として直径 146mm、高さ 30mm)、鉄製の角形火皿 (内法として一辺 355mm、高さ 68mm) を用意した。円形火皿 1 には n-ヘプタン 10mL、水 10mL、円形火皿 2 には n-ヘプタン 200mL、水 100mL、角形火皿には n-ヘプタン 3L、水 1L を入れた。



図 4-5 モジュール大及び機器類の設置状況

照明灯は、火炎光を受光したモジュールの出力電圧特性実験で使用した人工太陽照明灯を6台用い、それぞれの光軸がモジュール中央を向くように目視により調整した。

4.3.4 計測条件

モジュール大を用いた時、実験開始時の試験室内の気温 12℃、相対湿度 39%、気圧 1019hPa であり、モジュール小を用いた時、試験室内の気温 9℃、相対湿度 29%、気圧 1019hPa であった。

火炎光を受光したモジュールの出力電圧特性実験と同様に、図 4-1 に示した位置でモジュールの表面温度及びアルミニウム製枠の表面温度の経時変化を K 型熱電対（直径 0.32mm）で計測した。温度計測のサンプリング時間間隔は 1 秒である。同時にモジュール表面の温度分布を計測するために赤外線サーモグラフィ装置（日本アビオニクス株式会社、TVS-500）を用いた。放射率は 1.00 とした。

モジュールの出力端子には、負荷抵抗として 5Ω の抵抗器をデータロガーに対して並列に接続した。

4.3.5 実験条件

モジュールの燃焼性状に関する情報がなかったため、モジュール小については、試みとして以下の様々な環境で実験を行った。まず、照明灯を消した状態で円形火皿 1 を用いて燃焼させた。次いで円形火皿 2 を用いて燃焼させ、照明灯を点けて円形火皿 2 を用いて 3 回燃焼させた。その合計 5 回の各実験の合間に出力電圧及び損傷状況を観察した。

モジュール大については、照明灯を点けた状態で角形火皿を用いて燃焼させ、出力電圧及び損傷状況を観察した。この時のモジュール中央における平均照度（照度計により 5 回計測した平均）は 29300lx である。

4.3.6 結果と考察

4.3.6.1 モジュール小について

(1) 断面構造と燃焼性状

図 4-6 に示すようにモジュールの断面構造は層状構造である（モジュール大も同様）。図 4-6 の下側（モジュール裏面）から、白色ポリフッ化ビニル（以下、PVF）層、アルミニウム層、白色 PVF 層、白色エチレン-酢酸ビニル共重合体（以下、EVA）層である。白色 EVA 層の上に、さらに太陽電池のシリコン発電素子（以下、セル）を透明 EVA で封止した透明 EVA 層、強化ガラスがある。下側 3 層（白色 PVF 層、アルミニウム層、白色 PVF 層）はバックシートと呼ばれ、その厚みは各々約 50μm である。各層の材質特定は、EVA 層については、赤外分光法（以下、IR）を用いて EVA の標準スペクトルと一致していたことに基づく。また、PVF 層では、IR では特定出来なかったため、更に熱分解ガスクロマトグラフ/質量分析法（Py-GC/MS）を用い、ピログラム上に現れる熱分解時に生成する化合物から PVF と特定した。

n-ヘプタン 10mL の 1 回目の実験では、図 4-7 に示すようにヘプタン火炎に直接接していたモジュール裏面の最外側の薄い白色 PVF 層部分が膜状のまま黒色に炭化し、アルミニウム層を火炎が突き破ることはなかった。また、炭化せずに白色のまま残っている部分は、はじめと同じ弾力性を有し、目視上での変化は見られなかった。2 回目以降の燃焼では、アルミニウム層を除去し、更に内部の白色 PVF 層が火炎に曝される状態で燃焼させたが、その白色 PVF 層は最外側と同様の燃焼挙動が見られ、黒色薄膜状に燃焼して、その内側の白色 EVA 層が炭化しているのが認められた。

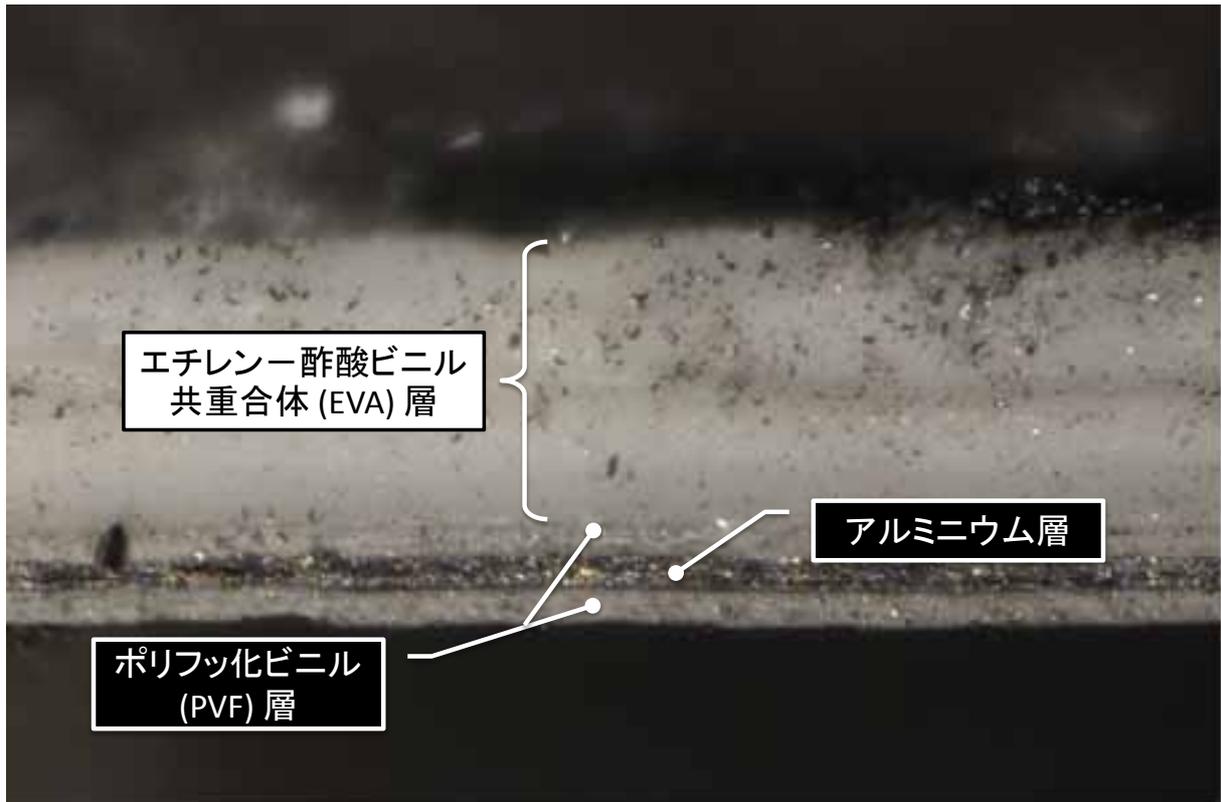


図 4-6 モジュール断面写真 (マイクロスコープ)

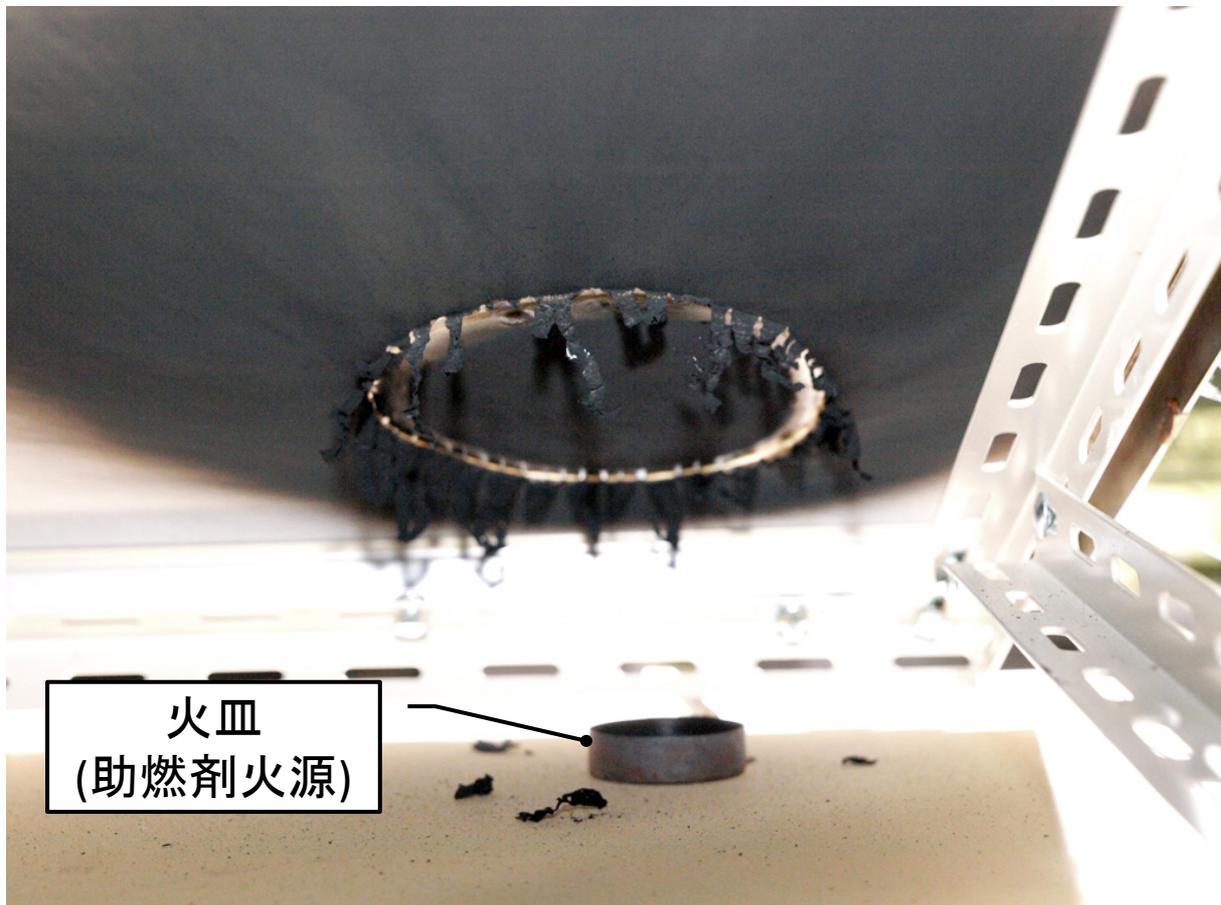


図 4-7 モジュール小 (裏面) の焼損状況

(2) 燃焼後の損傷状況

図 4-8 に燃焼後のモジュールの損傷状況を写真と模式図で示す。アルミニウム層の除去が大きく影響しており、セルの目地が茶色く変色している領域はアルミニウム層を除去した領域に一致する。アルミニウム層の除去領域を拡大することにより、変色領域も拡大するものとする。変色領域内でガラスに局所的に亀裂が入っている領域が存在した。加熱によるガラスの伸縮でたわみに耐えきれなかった領域に亀裂が出来たと考える。

(3) 発電特性

5 回目の加熱でモジュール表面の最高温度 290°C (図 4-1(b)、位置㉔) に到達しようとした時にモジュール出力電圧が 1.1V まで急激に降下した (図 4-9)。表面温度の低下に連れて出力電圧は 2.5V まで回復した。電圧が急激に低下したことと回復したことの理由は不明であるが、火災現場で損傷したモジュールがあっても発電している恐れがあることに留意しなければならない。

4.3.6.2 モジュール大について

(1) 燃焼性状

モジュール大がヘプタン火炎により加熱されている様子を図 4-10 に示す。ヘプタン火炎がモジュール側面から前面に廻り、枠部分からの火炎の侵入により、内部の透明 EVA 層が加熱され発泡する様子も認められた。ヘプタン火炎がなくなった後、モジュール自体が独立して燃焼することはなかった (モジュール小も同様)。実験中のモジュール表面の最高温度は、367°C (図 4-1(a)、位置㉑) であった。この図 4-1(a)、位置㉑はモジュールの損傷が激しかったため (図 4-11)、念のため赤外線サーモグラフィ装置で計測していた表面の最高温度を調べると 383°C (放射率 1.00 として計算) であった。損傷の激しい部分については、概ねこのような温度であったと考える。

(2) 燃焼後の損傷状況

図 4-12 に燃焼後のモジュールの損傷状況を写真と模式図で示す。モジュール大は広範囲に加熱されているため、表面の強化ガラスの圧縮応力が解放され、通常の板ガラスと同じ割れ方となる挙動が認められた。ガラスが冷えた時にモジュール一面に一樣な亀裂が入った。セルからガラスが剥離している領域 (図 4-11) は、透明 EVA 層が加熱され発泡していた領域である。

(3) 発電特性

モジュール小とは温度は異なるが、同様に、最高温度に到達した付近で急激に出力電圧が降下した (図 4-13)。助燃剤である n-ヘプタンの燃焼が終わったのが 16 分 18 秒 (978 秒) であるが (モジュール自体が自発的に燃焼することはなかった)、それ以降も徐々に電圧は降下し実験後に 0.003~0.004V で一定となった。この状態で照明灯を消灯したところ出力電圧は 0V になったので、わずかながら電圧を出力していたことになる。実験後、照明灯を点灯しモジュールの損傷状況を調べている際に電圧が回復していることに気付き、その時に 1 分間データを取得した時間平均出力電圧は 3.2V であった。実験前の電圧が 3.8V であったのでほぼ出力がなかった状態から 84%まで電圧が回復した。モジュール小と同様に損傷したモジュールが発電している恐れがあった。

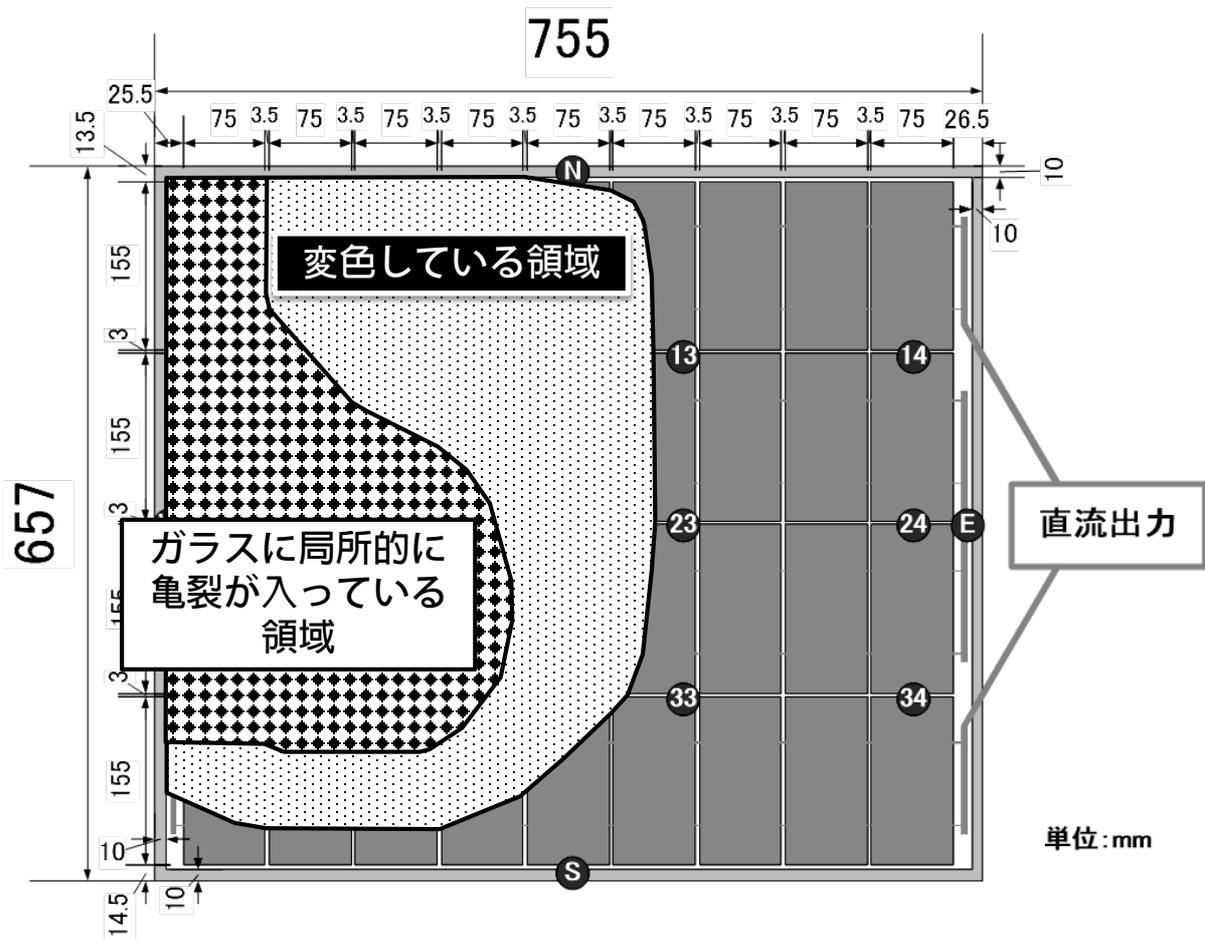
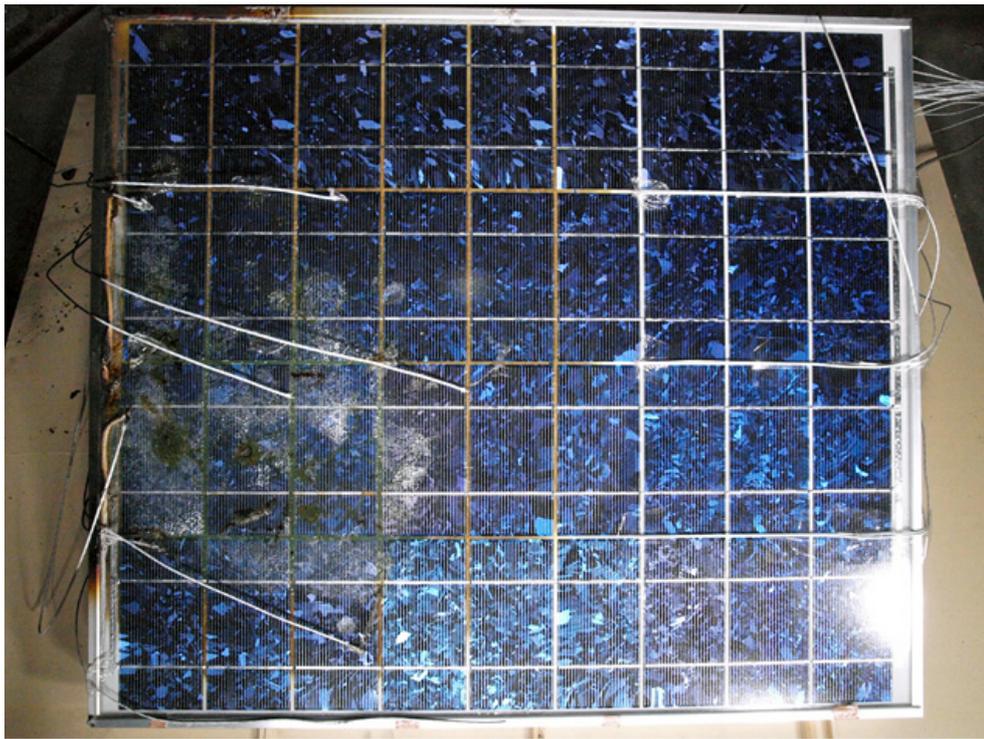


図 4-8 モジュール小（表面）の損傷状況（上）とその模式図（下）

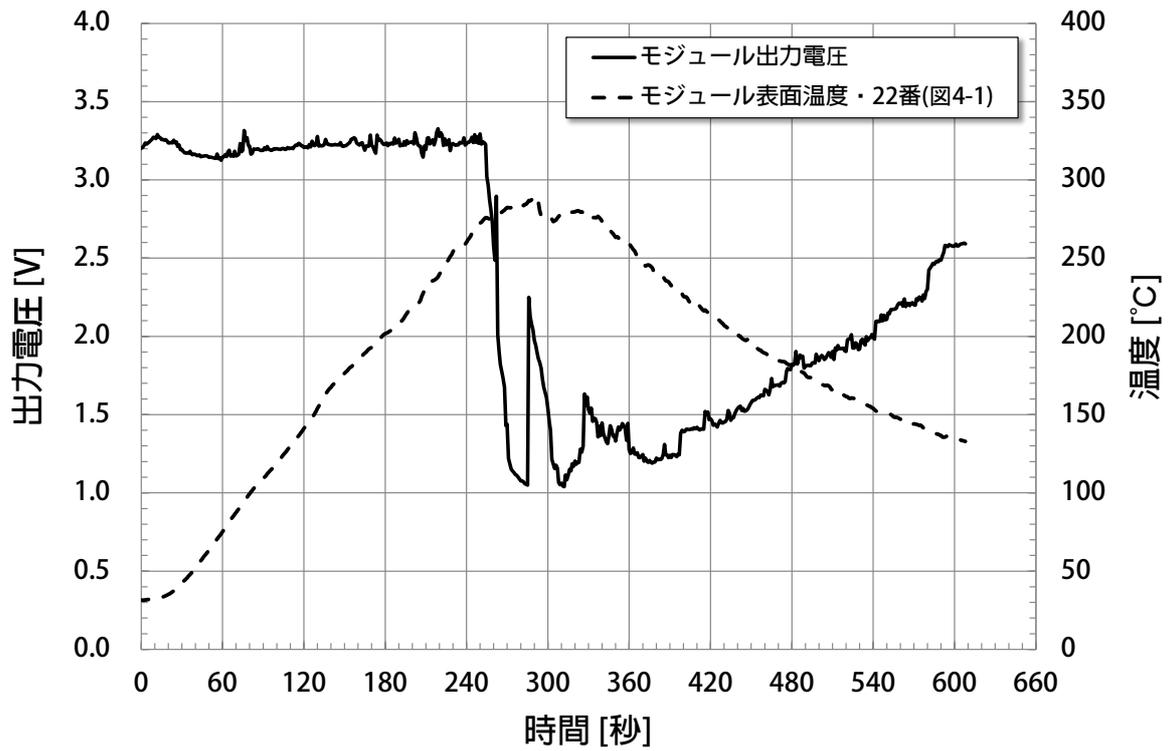


図 4-9 モジュール小の出力電圧及び表面温度（火炎曝露時）

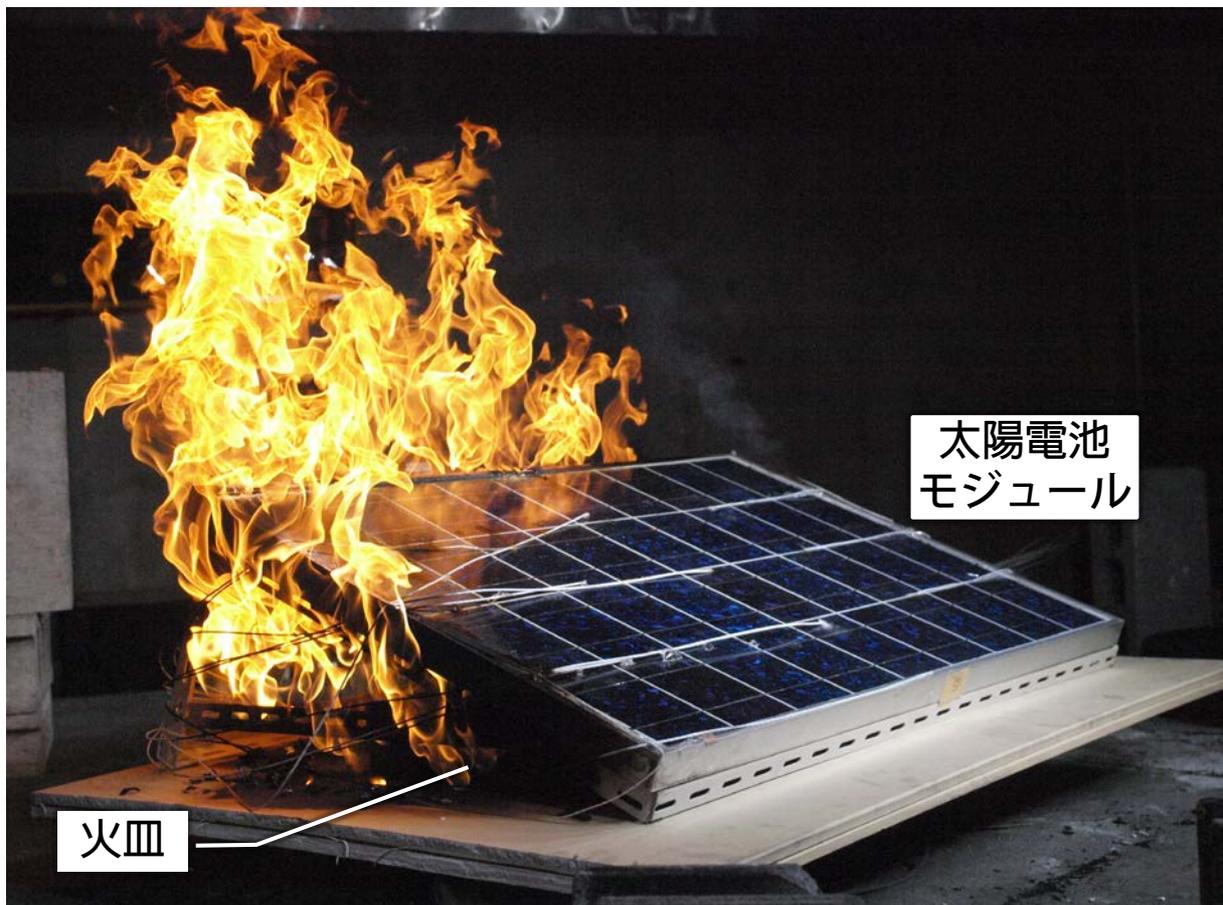


図 4-10 ヘプタン火炎によるモジュール大の加熱



図 4-11 燃焼後のモジュール大の損傷の様子

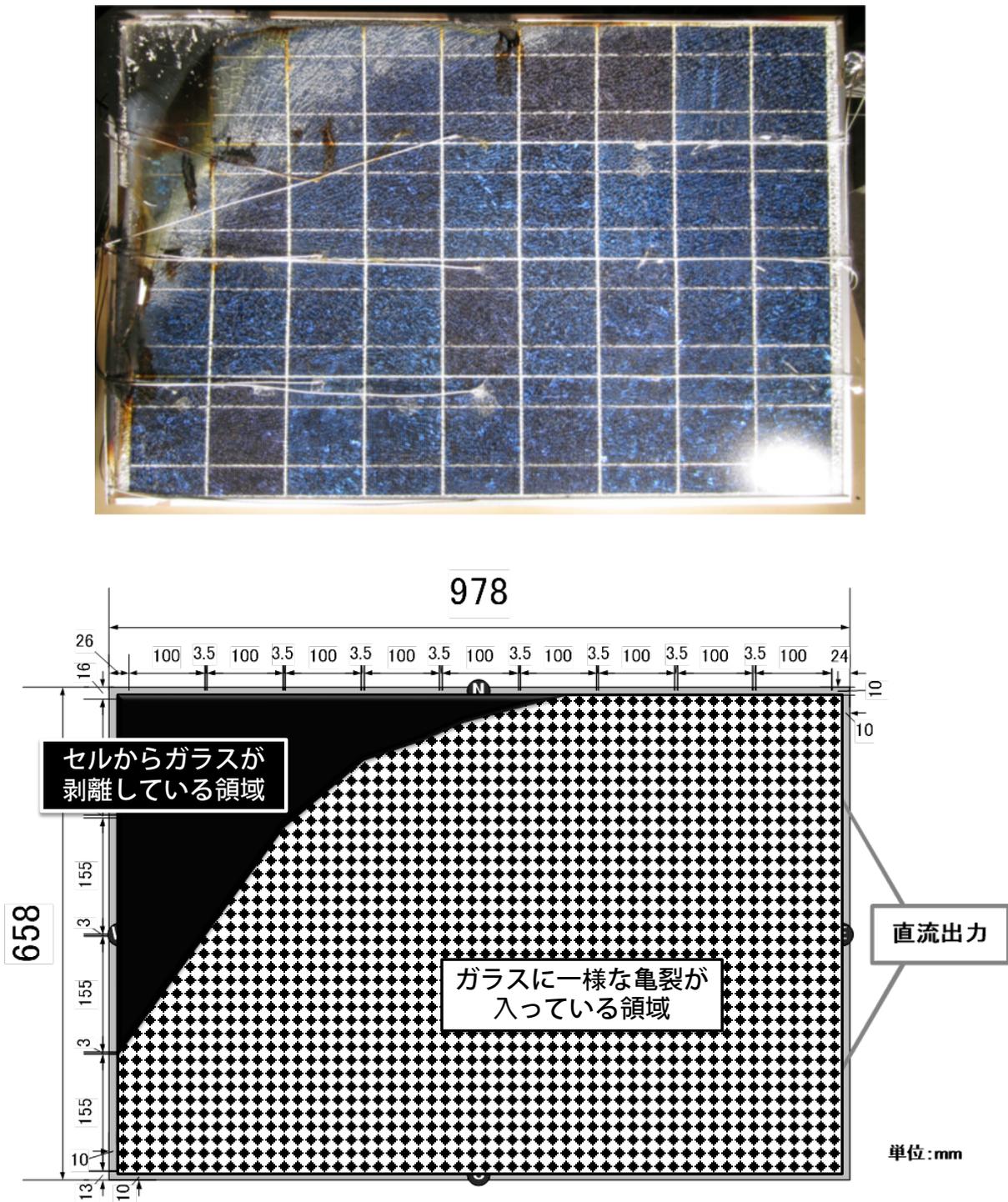


図 4-12 モジュール大（表面）の損傷状況（上）とその模式図（下）

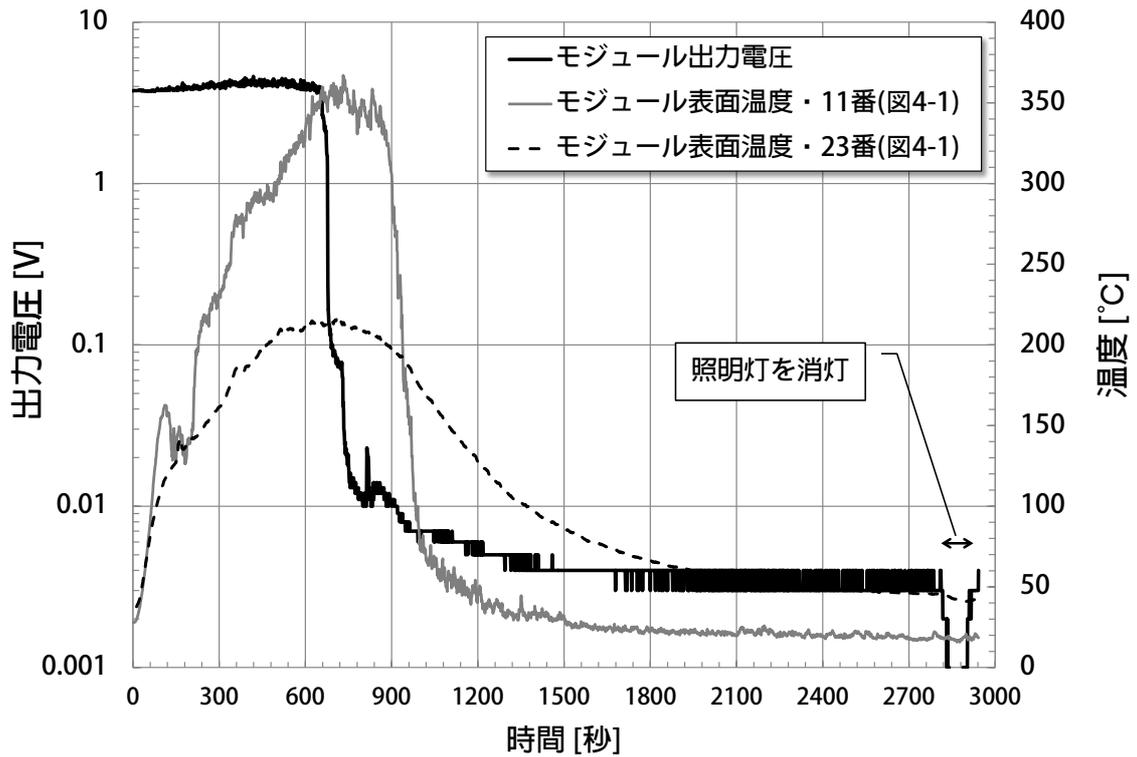


図 4-13 モジュール大の出力電圧及び表面温度（火炎曝露時）

4.4 まとめ

本研究では、ヘプタン火炎から放出する光によるモジュールの発電性状を調べた。その結果、同じ照度での照明灯とヘプタン火炎では、ヘプタン火炎の方がモジュール出力電圧は高かった。PV が設置された建物が火炎に見舞われた際、夜間の消防活動であっても火炎の光により発電している恐れがあるという知見を得た。

また、ヘプタン火炎に曝露したモジュールの損傷及び加熱中の発電特性を調べた。その結果、モジュールは損傷を受けて出力電圧が低下もしくは 0V になっても、時間の経過を追って電圧が回復することがあることに注意を要する。

5. 太陽電池モジュールの実大規模火災時の出力電圧特性

5.1 はじめに

第4章では、多結晶シリコン太陽電池モジュール（以下、モジュール）について火災時における発電性状を実験的に調べ、夜間の消防活動であっても火災の光により発電する可能性があり、モジュールは熱的損傷を受けて出力電圧が0Vになっても、時間の経過を追って電圧が回復することがあることがわかった。それを踏まえ、第5章では、模擬的に作成した家屋の屋根の上に設置し、実際に火災に見舞われた際にモジュールがどのような発電特性を示すかについて、隣接建物が火災になった場合と、モジュールを設置した建物が火災になった場合について、それぞれ調べた結果について述べる。

5.2 屋外における24時間太陽電池モジュール出力電圧特性実験

まず、モジュールの基本的な発電特性を調べるために、屋外において24時間のモジュールの出力電圧を計測する実験を行った。

5.2.1 目的

モジュール1枚を24時間発電させた実験により、太陽を含む外界からの入射光の照度とモジュールの出力電圧の基本的な関係を調べることを目的とする。

5.2.2 実験日及び実験場所

2012年5月30～31日に消防研究センター・本館屋上にて本実験を実施した。

5.2.3 実験装置

本実験で用いるモジュール（シャープ株式会社、ND-114CA、以下同様のモジュールを使用）は、156mm×156mmの30枚のセルから構成される。モジュールの仕様を図5-1及び表5-1に示す。モジュールの厚さは4.5mmであり、モジュールの周囲はアルミニウム製枠（厚さ46mm）で囲まれている。

図5-2に実験装置の設置状況を示す。比較のためモジュール2枚（モジュールA、B）を用意し、長手方向の一边を軸に地面に対して約23°傾けた状態で設置した。この設置角度は、「太陽電池モジュールの安全適格性確認－第2部：試験に関する要求事項 JIS C 8992-2 (IEC 61730-2)」で設定するモジュール傾斜角度と同じである。モジュールAとBの間の距離は、171mmである。

5.2.4 計測条件

天気は、晴れ時々曇りである。

図5-1に示す⑥の位置において、K型熱電対（直径0.32mm）を用いてモジュールの表面温度の経時変化を計測した。また、実験中の雰囲気温度もK型熱電対で計測した。温度計測のサンプリング時間間隔はそれぞれ10秒である。

モジュールAとBの間において、照度計（コニカミノルタセンシング株式会社、T-10）により人間が感覚的に感じる光の明るさの目安として照度の経時変化をサンプリング時間間隔10秒で取得した。

各モジュールの出力端子には、負荷抵抗として2Ωの抵抗器をデータロガーに対して並列に接続した。

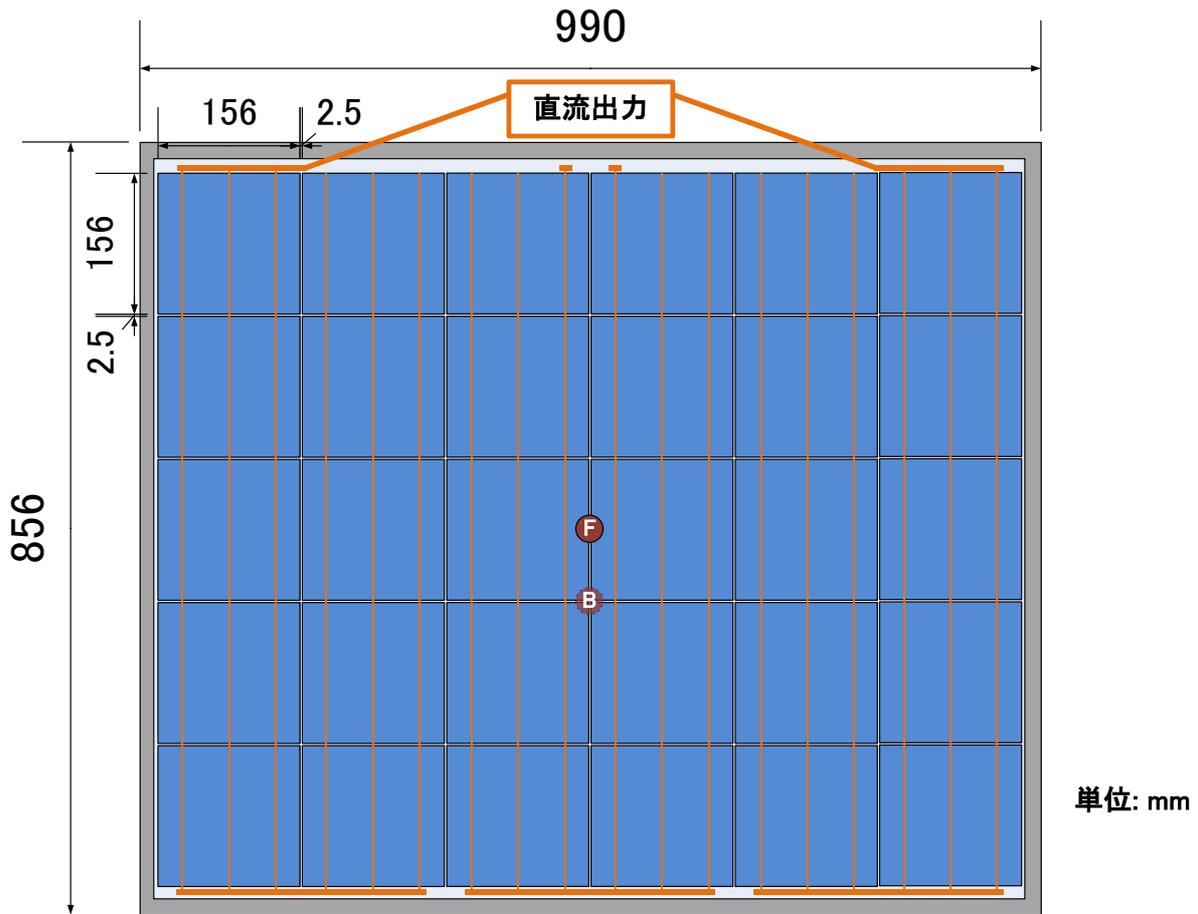


図 5-1 実験で使用した多結晶シリコン太陽電池モジュール
(図中の⊙は表面、⊗は裏面の熱電対設置位置を示す)

表 5-1 太陽電池モジュールの出力の仕様

	太陽電池モジュール	
	A	B
製造者	シャープ株式会社	
型式	ND-114CA	
製造番号	11Y127082	11Y127089
公称最大出力 [W]	114	
公称開放電圧 [V]	18.3	
公称短絡電流 [A]	8.42	
公称最大出力動作電圧 [V]	15.16	
公称最大出力動作電流 [A]	7.52	
最大システム電圧 [V]	600	

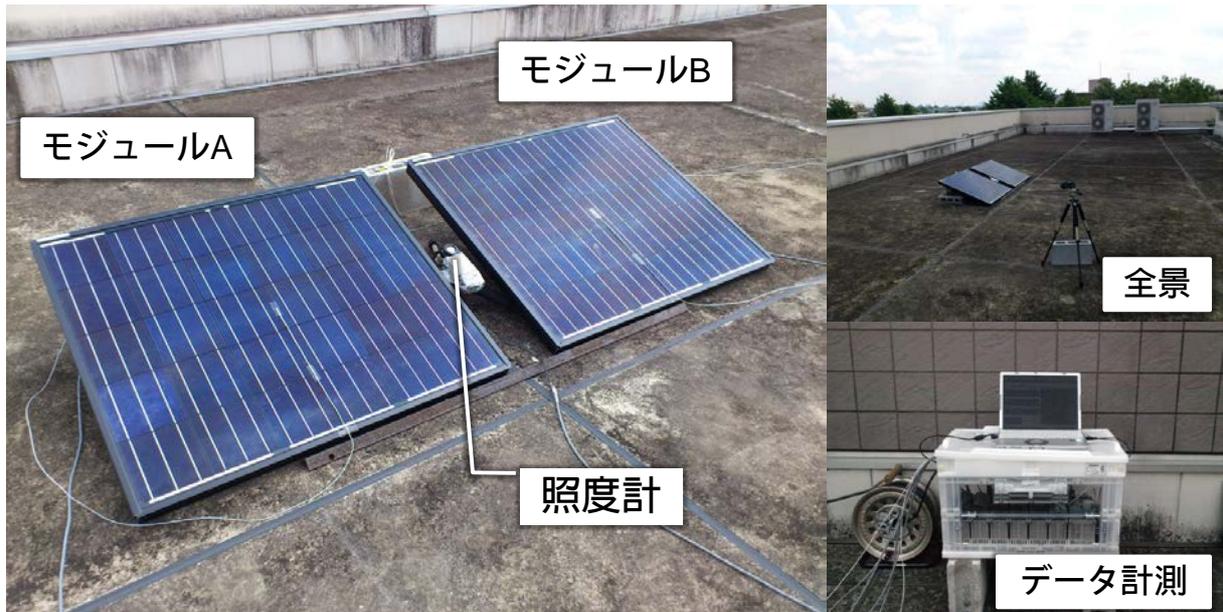


図 5-2 モジュール及び機器類の設置状況（消防研究センター・本館屋上）

計測開始日時は 30 日 9 時 45 分 0 秒であり、24 時間以上経過した 31 日 10 時 49 分 10 秒に計測を終了した。

5.2.5 結果と考察

5.2.5.1 実験中の照度及び雰囲気温度

図 5-3 に実験中の太陽からモジュールに当たる光の照度及び雰囲気温度を示す。ここで、横軸は時刻ではなく実験開始（9 時 45 分）からの経過時間である。

実験開始から 50 分 30 秒後（日時：30 日 10 時 35 分 30 秒）に実験中最大の照度 124500lx を観測した。また、夜間（日時：30 日 19 時 3 分 20 秒～31 日 4 時 14 分 50 秒）に最低照度 200lx を観測した。実験中の照度の範囲は、200～124500lx であり、太陽光からの照度としては広範囲である。

実験中の雰囲気温度については、実験開始から 5 時間 37 分 30 秒後（日時：30 日 15 時 22 分 30 秒）及びそれから 2 分後に実験中最大の温度 27.6℃を観測した。ここで、実験開始時～30 秒及び 6 時間 59 分 20 秒～7 時間 0 分 10 秒（日時：30 日 16 時 44 分 20 秒～同 45 分 10 秒）に雰囲気温度が 31.2℃及び 28.7℃まで上昇しているが、原因は不明ではあるもののこの急な変化を除けばその前後は連続的に変化していることから一時的に観測者が K 型熱電対の温度センサー部に触れていたものと考え、最高温度から除外した。また、実験開始から 18 時間 54 分 20 秒後（日時：31 日 4 時 39 分 20 秒）に最低温度 16.6℃を観測した。実験中の雰囲気温度は、16.6～27.6℃（平均 21.1℃）であり、気温差は 11.0℃であった。

以上の周囲環境において実験を実施した。

5.2.5.2 実験中の太陽電池モジュールの出力電圧及び表面温度

モジュール A と B の出力電圧及び表面温度の全体的な経時変化は同様である（図 5-4）。

前述した実験開始から 50 分 30 秒後（日時：30 日 10 時 35 分 30 秒）の最大照度 124500lx を観測した時に、モジュール出力電圧も最大値 14.6V（モジュール A、B 同じ）を観測した。夜間

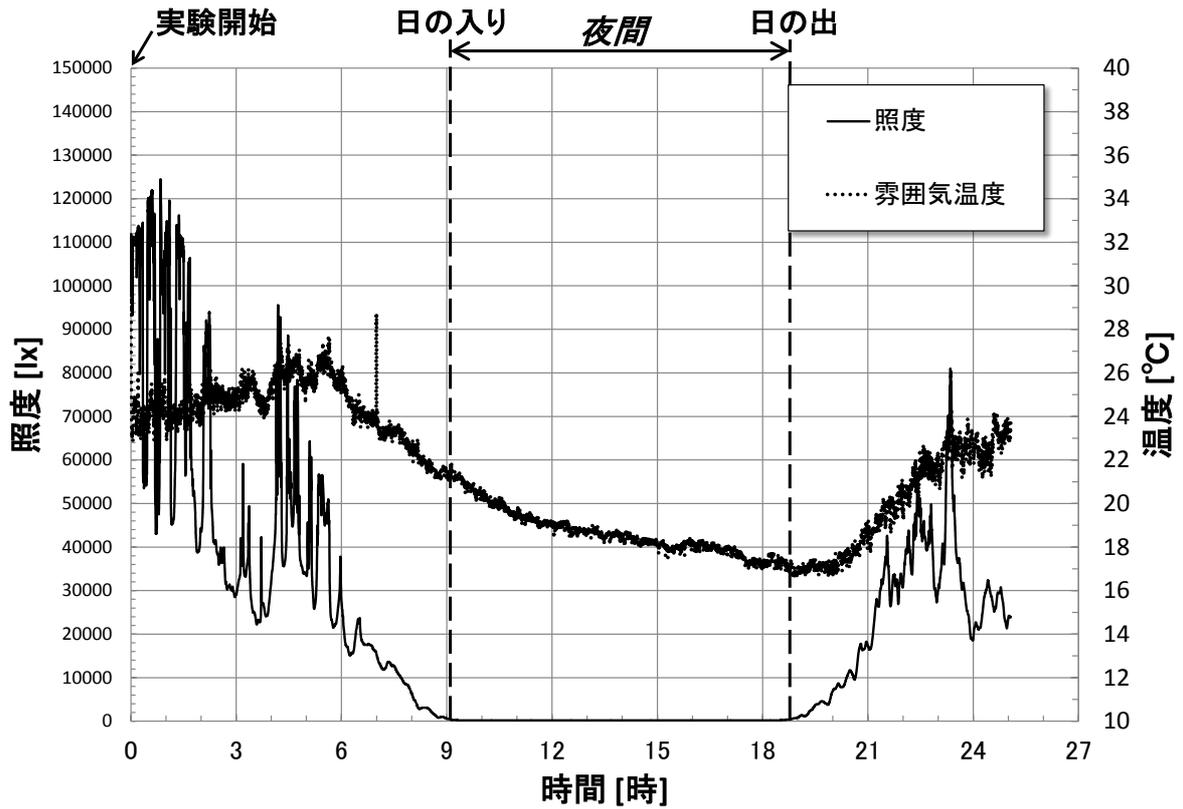


図 5-3 照度及び雰囲気温度の 24 時間経時変化

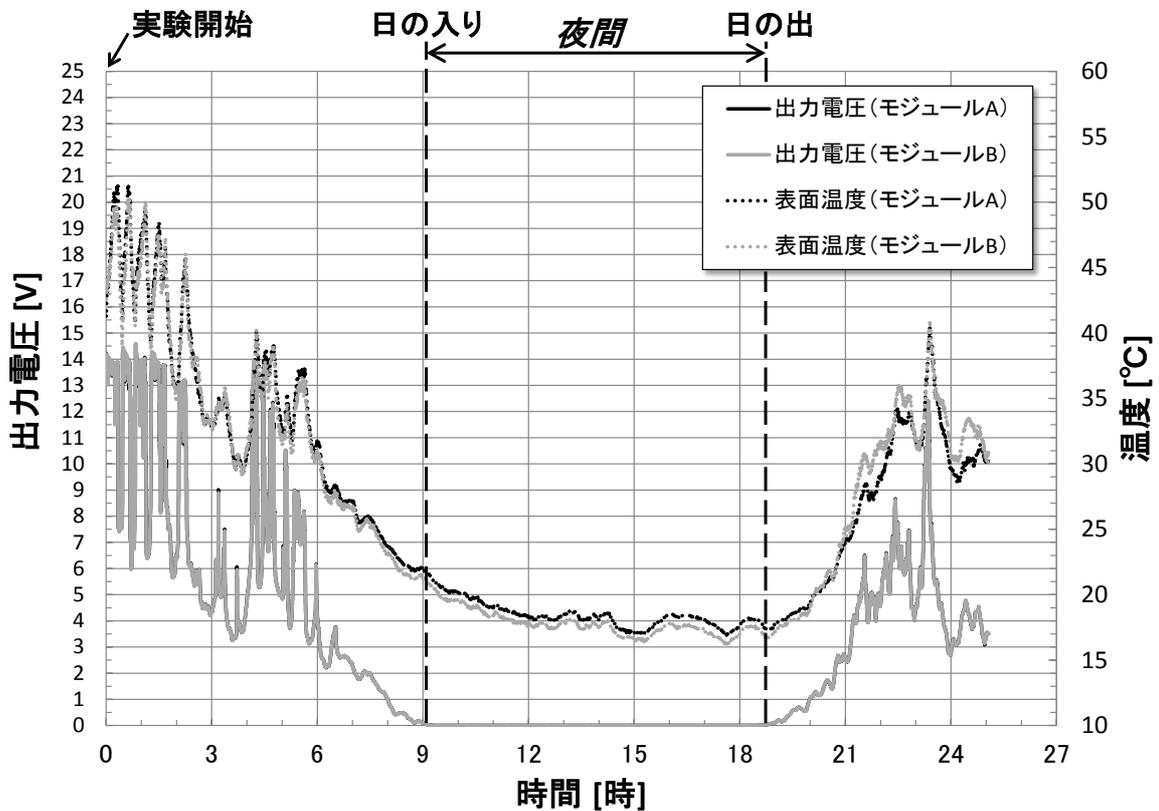


図 5-4 モジュールの出力電圧及び表面温度の 24 時間経時変化

時の照度 200lx では出力電圧は 0V になりモジュールからの出力はなくなる。実験中のモジュールからの出力電圧の範囲は 0~14.6V である。モジュールの公称最大出力動作電圧は 15.16V なので (表 5-1)、約 96%の作動範囲のデータが取得出来たことになる。

実験開始から 37 分 30 秒後 (日時: 30 日 10 時 22 分 30 秒) にモジュール表面の最高温度 51.4℃ (モジュール A) 及び 50.3℃ (モジュール B) を観測した。一方、最低温度は、実験開始から 17 時間 38 分 10~40 秒後 (日時: 31 日 3 時 23 分 10 秒~同 40 秒) に 16.9℃ (モジュール A) 及び 16.2℃ (モジュール B) を観測した。雰囲気最低温度が 16.6℃なので同程度である。日没後の温度変化を見ると、日照がなくなると速やかにモジュール表面温度と雰囲気温度はほぼ同じ温度変化になり、また日の出とともにモジュール表面温度が上昇するため、モジュールの表面温度は日照に影響を受けやすい。

5.2.5.3 照度と太陽電池モジュール出力電圧の関係

図 5-5 に太陽光による照度とモジュール A と B の出力電圧の関係を示す。モジュール A と B は同じ特徴を持ち、0~7000lx 程度までは直線性が良いが、7000lx を超えると照度の上昇に対してモジュール出力電圧の上昇が鈍化する性質があることに注意を要する。この分布を最小二乗法による 3 次多項式での近似式により定式化するとモジュール A の出力電圧 V_1 及びモジュール B の出力電圧 V_2 は式(5-1)及び(5-2)になる。

$$V_1 = 1.33287 \times 10^{-4}L + 7.01578 \times 10^{-10}L^2 - 6.91188 \times 10^{-15}L^3 \quad (5-1)$$

$$V_2 = 1.3333 \times 10^{-4}L + 6.84299 \times 10^{-10}L^2 - 6.73038 \times 10^{-15}L^3 \quad (5-2)$$

ここで、 L は照度[lx]である。式(5-1)及び(5-2)の決定係数 R^2 は 0.99919 及び 0.99915 であるので近似精度は高い。このように 3 次多項式で近似すれば広い照度域に対してモデリング出来るが、直

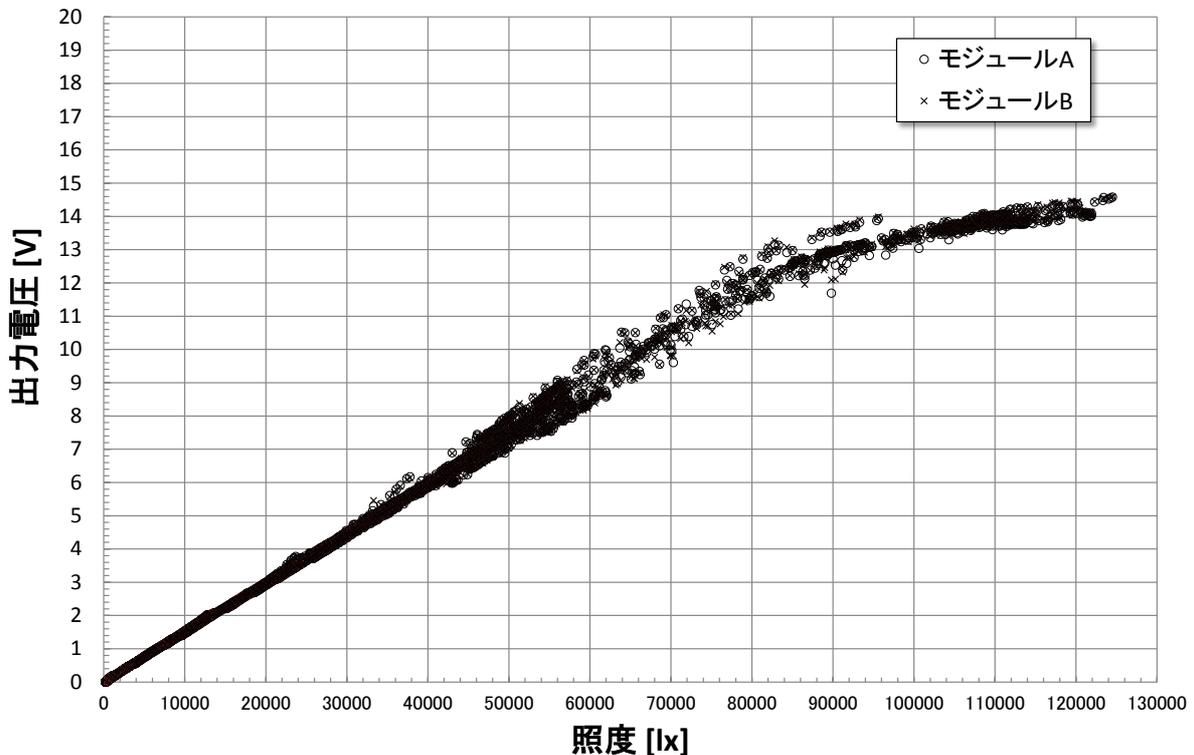


図 5-5 照度とモジュール出力電圧の関係

線性の良い 0~7000lx の範囲において最小二乗法による線形近似を行った際の近似式の係数を求めてみると $1.48647 \times 10^{-4} V/lx$ ($R^2=0.99914$) 及び $1.48286 \times 10^{-4} V/lx$ ($R^2=0.99910$) である。3 次元多項式による近似の方が照度域全体を精度良く近似できるが、線形近似した方がモジュール表面に遮蔽物を置いた際の遮光効果を定量的に評価する際に重要な指標となる。

5.3 火炎光を受光した太陽電池モジュールの出力電圧特性実験

モジュールを模擬家屋の屋根に設置し、隣接建物が火災になった際に生じる火炎でどの程度発電するかを調べる実験を行った。

5.3.1 目的

隣接した模擬家屋を燃焼させ、そこから生じる火炎や煙が離隔したモジュールの発電に与える影響を調べることを目的とする。

5.3.2 実験日及び実験場所

2012 年 6 月 18 日に消防研究センター・大規模火災実験棟主実験場（以下、実験場）にて本実験を実施した。

5.3.3 実験装置

図 5-6 に示す模擬家屋は 1 階建て木造家屋で、間取りは 1K である。主な開口部は玄関扉、腰高窓、掃き出し窓であり、台所に換気扇、天井裏に換気口がある。模擬家屋は A、B、C、D 棟と言う名称で 4 棟あり、各棟の構造上の違いは天井材のみで、A、D 棟は合板、B、C 棟は石膏ボードを使用している。

屋外における 24 時間モジュール出力電圧特性実験で使用したモジュール A を D 棟の屋根に設

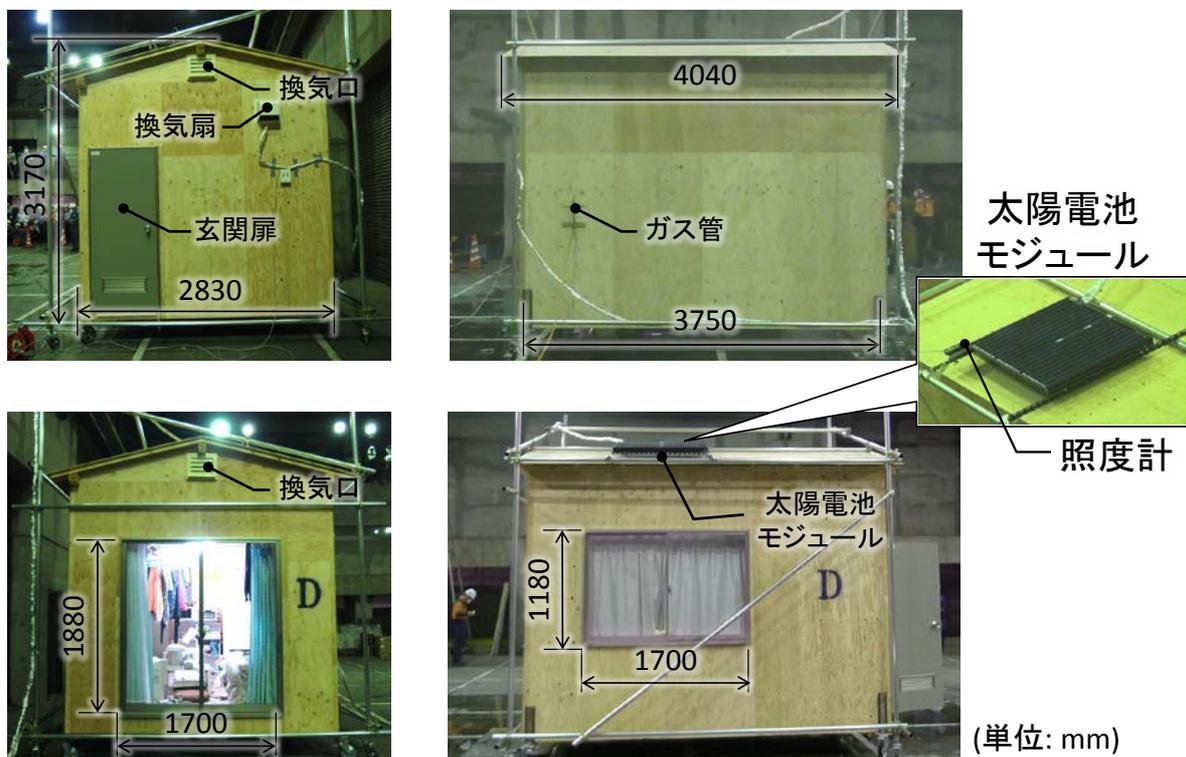
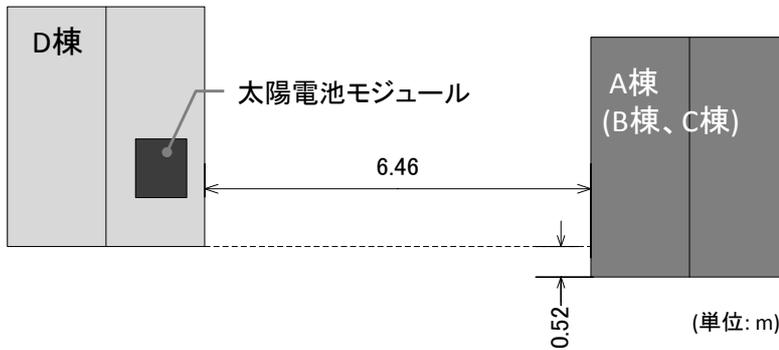


図 5-6 実験場の中央に設置した模擬家屋の外観 (D 棟)

置し（設置角は床面に対して約 15° ）、実験場中央に A、B、C 棟を実験毎に 1 棟ずつ設置し 3 回実験を行った。A、B、C 棟と D 棟の位置関係を図 5-7 に示す。D 棟に設置したモジュールは実験場中央に向けて設置してある。



(a) 写真（実験場中央に A 棟を設置した場合）



(b) 平面図

図 5-7 モジュールを設置した模擬家屋（D 棟）と火災家屋（A,B,C 棟）の位置関係
（実験毎に A,B,C 棟をそれぞれ 1 棟ずつ置き換えて 3 回実験を実施）



A 棟

B 棟

C 棟

図 5-8 模擬家屋（A,B,C 棟）内部の状況

A、B、C 棟に収納されている可燃物はすべて異なる（図 5-8）。A 棟は和室で、出火元はテーブルタップに継ぎ足した電源プラグのトラッキングである。B 棟も和室で、出火元はゴミ箱に捨てられたタバコである。C 棟は洋室で、出火元はガスコンロにかけた天ぷら油の過熱放置である。

5.3.4 計測条件

各実験開始時の環境について、A 棟の時は雰囲気温度 23℃、相対湿度 64%、気圧 1005hPa、B 棟の時は雰囲気温度 25℃、相対湿度 58%、気圧 1005hPa、C 棟の時は雰囲気温度 24℃、相対湿度 63%、気圧 1005hPa であった。

図 5-1 に示す ㊦及び ㊧の位置において、K 型熱電対（直径 0.32mm）を用いてモジュールの表面及び裏面温度の経時変化を計測した。また、実験中の雰囲気温度も K 型熱電対で計測した。温度計測のサンプリング時間間隔はそれぞれ 10 秒である。

5.3.5 結果と考察

5.3.5.1 火災時の発生する煙が発電に与える影響

図 5-9 に A、B、C 棟が燃焼した際に生じた火炎によって D 棟の屋根に設置したモジュールが受光した照度とそれによりモジュールが出力した電圧の経時変化を示す。天井材が石膏ボードである B 棟、C 棟の場合に比べて、合板である A 棟では天井裏から屋根に抜ける火炎が大きくなるため、モジュールの出力電圧が大きくなり 0.3V 程度の出力が出た。着火から 397 秒後に最大電圧 1.096V を観測したが、それは消防隊が消火のために放水開始した際に瞬間的に大きく吹き上げた火炎を捕らえた時である（図 5-10）。B、C 棟では、火炎が大きくなり、ともに 0.1V 前後の出力電圧であった。B、C 棟の照度の経時変化を見ると（A 棟の照度データは取得できな

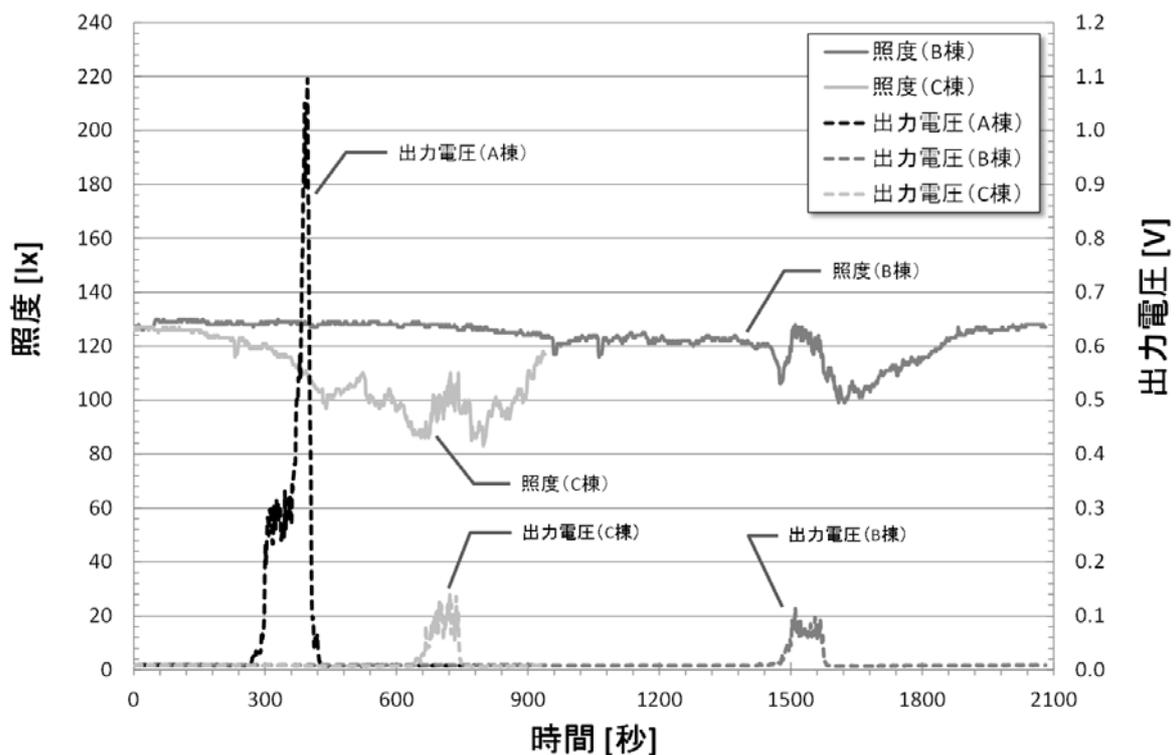


図 5-9 照度とモジュール出力電圧の経時変化



図 5-10 最大照度時の様子 (A 棟燃焼時)

った)、実験開始とともに実験場に既設の照明灯 (水銀灯) がバックグラウンドとして存在するための照度約 130lx から徐々に減少していく。これは火災時に発生する煙により照明灯の光が遮られた結果、煙量の増加により照度が減少する。ちょうどモジュール出力電圧が生じた当たりで火災に起因した発電となっており、その時間帯で照度が増加しているが、煙による遮光効果の方が優勢であった。今回は実験場内で排煙機が作動する前の結果だったが、屋外では風向きにより煙による遮光効果が弱まることもあるため、火災による発電が無視できない状況も考えられる。

5.3.5.2 火炎光と水銀灯の場合の発電特性の違い

図 5-11 に照度とモジュール出力の関係を示す。B、C 棟ともに L 字形状の同じ性状を示すので C 棟について考察する。実験場内の水銀灯により実験開始時には約 130lx の照度のもと 0.01V 弱のモジュール出力電圧が、火災による煙により 83lx まで減光して 0.006V まで出力低下する。その後、火災からの光により実験開始時の照度以下であっても 0.142V まで電圧が生じる。つまり、同じ照度でも人工太陽照明灯よりヘプタン火炎の方が高いモジュール出力電圧を観測したのと同じく、水銀灯よりも火災による火炎の方が高いモジュール出力電圧となった。

火災による火炎光を受光していた時のグラフの勾配は、前述の方法と同様に最小二乗法による線形近似より B 棟で 0.00361V/lx ($R^2=0.81033$)、C 棟で 0.00491V/lx ($R^2=0.73817$) であり、水銀灯による電圧出力を無視すると、火災による火炎光は太陽光に比べて単位照度当たり B 棟で 24 倍、C 棟で 33 倍の電圧出力をもたらす。

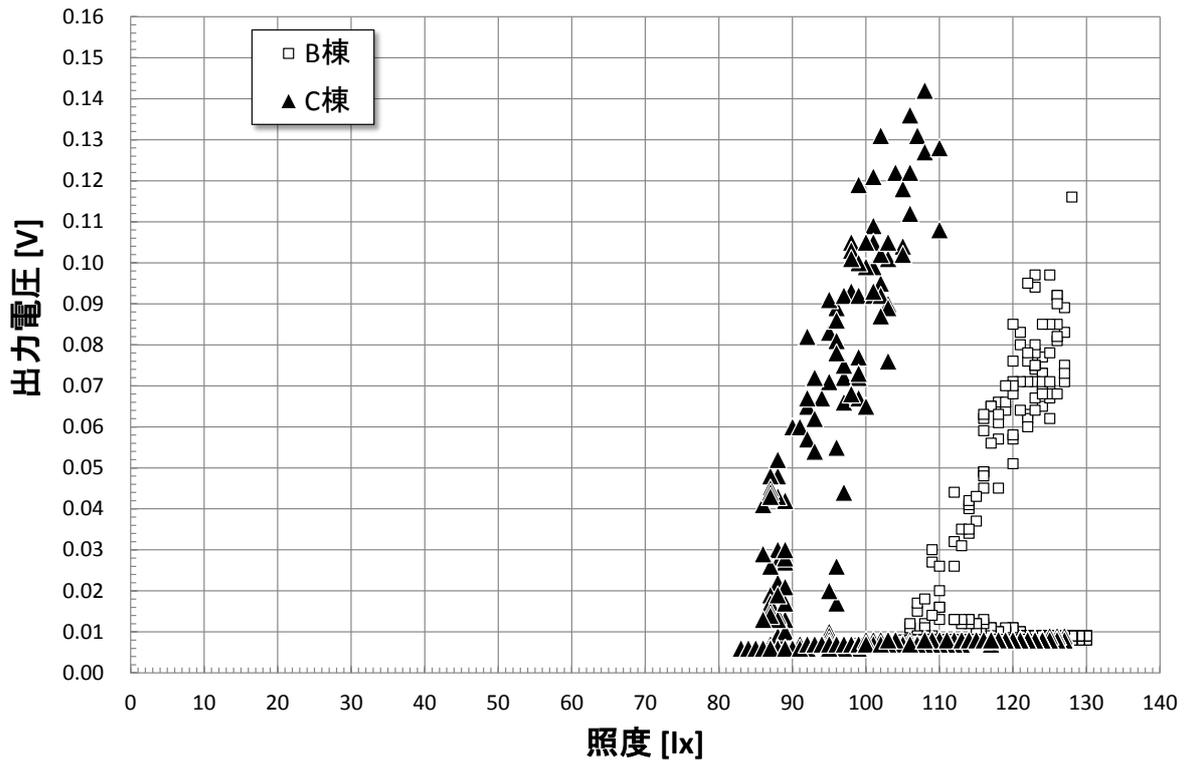


図 5-11 照度とモジュール出力電圧の関係

5.4 火炎に曝露された太陽電池モジュールの出力電圧特性実験

モジュールを設置した建物火災を念頭に、モジュールを模擬家屋の屋根に設置し、実火災に近い状況下におけるモジュールの発電状況及び燃焼性状を調べる実験を行った。

5.4.1 目的

モジュールの発電状況や燃焼性状が、実火災に近い環境や屋根の存在によって、どのような影響を受けるか調べることを目的とする。

5.4.2 実験日及び実験場所

2012年6月18日に実験場にて本実験を実施した。

5.4.3 実験装置

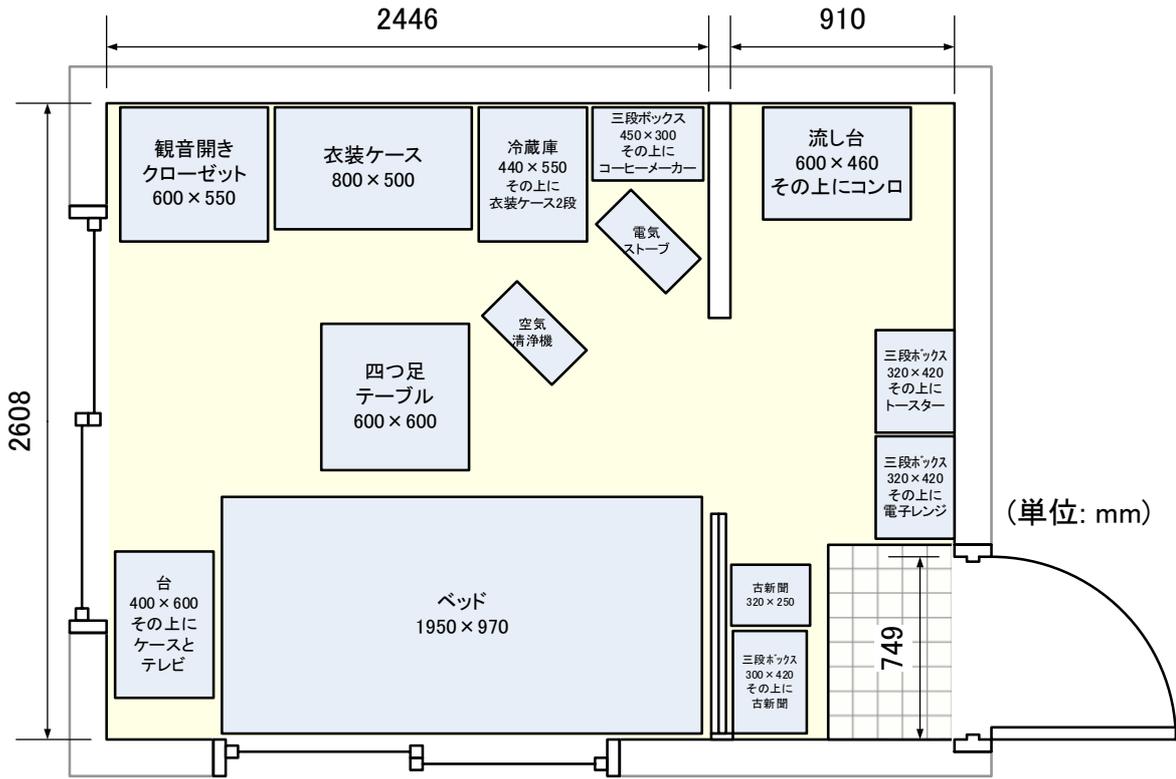
モジュール A を模擬家屋の屋根に設置した D 棟を用いた (図 5-6)。

D 棟は洋室でベッドやテーブル、衣類等が可燃物として存在する (図 5-12)、出火元は天ぷら油が浸みた布の酸化発熱である。

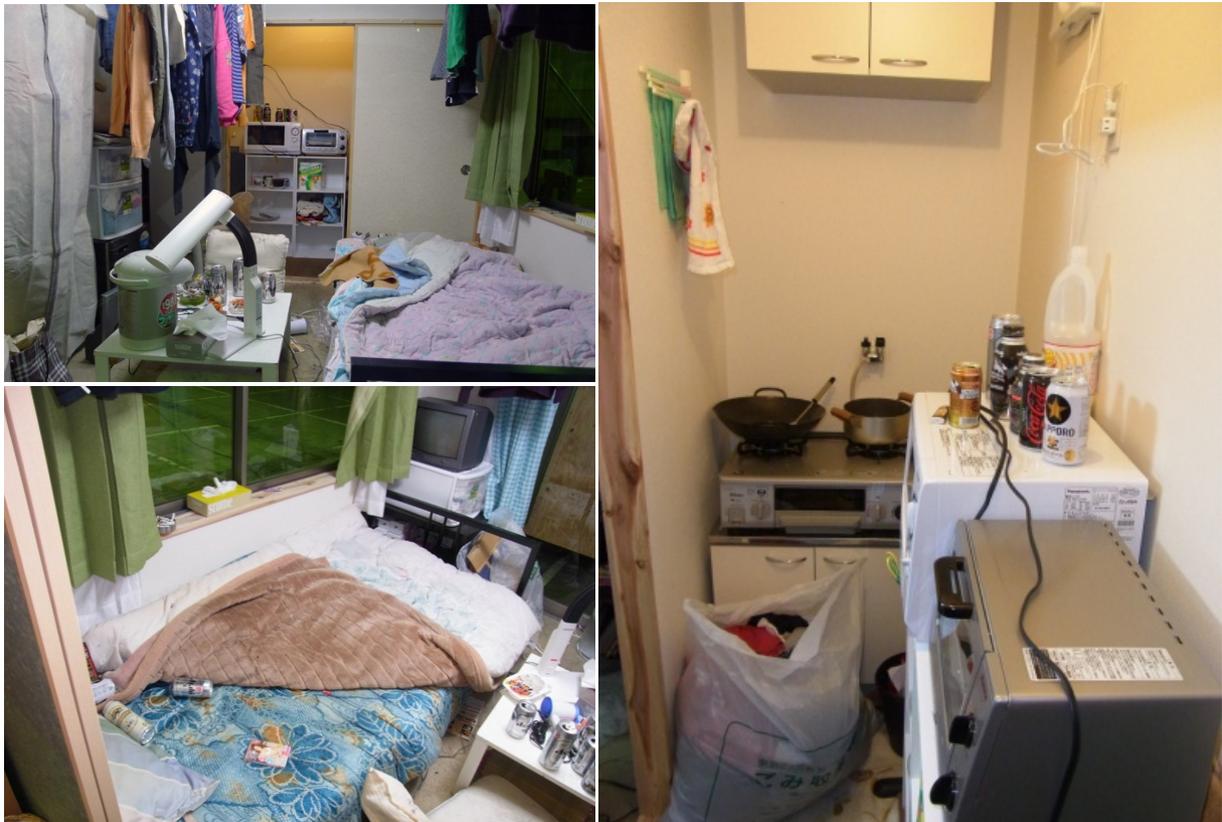
5.4.4 計測条件

実験開始時の環境について、雰囲気温度 26℃、相対湿度 58%、気圧 1005hPa であった。

火炎光を受光したモジュールの出力電圧特性実験と同様に図 5-1 に示す ㊦及び ㊧の位置において、K 型熱電対 (直径 0.32mm) を用いてモジュールの表面及び裏面温度の経時変化を計測した。D 棟の室内温度 (以下、火災室温度) として居室天井の中央から 1cm 下方においても K 型熱電対により温度を計測した。また、実験中の雰囲気温度も K 型熱電対で計測した。温度計測のサンプリング時間間隔はそれぞれ 10 秒である。



(a) 平面図



(b) 写真 (左上: 全景、左下: ベッド周辺、右: 台所周辺)

図 5-12 模擬家屋 (D 棟) 内部の状況

5.4.5 結果と考察

5.4.5.1 火災進展状況と太陽電池モジュール出力電圧

図 5-13 は火災室温度と D 棟の屋根に設置したモジュールの表面及び裏面温度と出力電圧の経時変化、表 5-2 は実験中に記録した火災進展状況である。

まず火災室温度を見ていくと、着火から徐々に温度上昇し、着火 10 分（600 秒）を経過した後、玄関扉を開放したことから酸素が少ない室内に外気が入り込み火勢が大きくなる。玄関扉を閉鎖するものの火災室温度は上昇し約 100℃から 600℃弱まで到達する。その後、火災室温度は低下していくが、着火 12 分（720 秒）を経過した後、腰高壁のガラスをとび口で破壊し開口したことから、再度外気が室内に取り込まれ盛期火災を迎える。火災室温度は約 800℃になる。

モジュール出力電圧は、着火 13 分 23 秒（803 秒）後に腰高窓から火炎が噴出した時から、その火炎の光をモジュールが受光し上昇を始める。既に盛期火災を迎えた着火 14 分 39 秒（879 秒）後に最大電圧 8.882V を観測した。その時の様子を図 5-14 に示す（図中右上のモジュールをズームで記録した写真はハレーションにより一面が白くなっている）。最大電圧を迎えた後、火炎からの光にモジュールが照らされているにもかかわらず、約 40 秒かけて電圧が降下し、そして、電圧が出力されなくなった。着火 18 分（1080 秒）後に後述するモジュール下部の欠損を確認するが、これは火炎と煙に影響により直接確認出来なかったものの、電圧が降下していく過程でモジュールが熱的損傷していったものと考えられる。

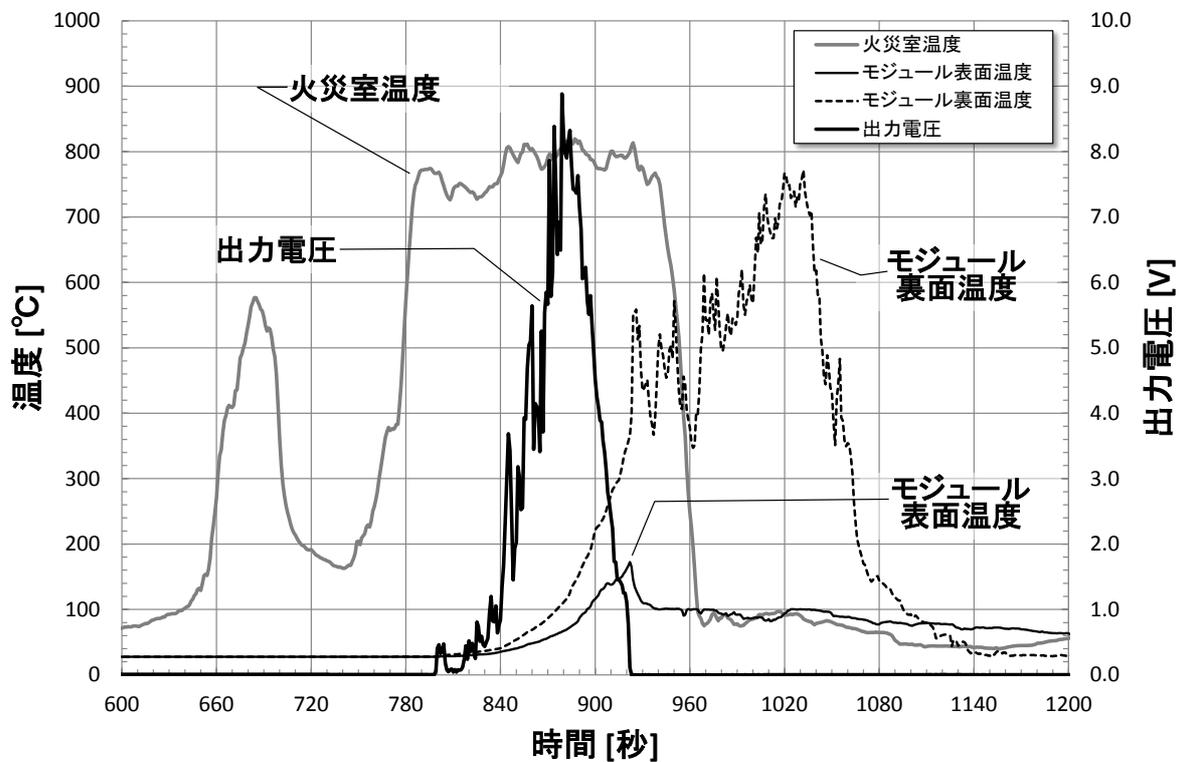


図 5-13 温度とモジュール出力電圧の経時変化

表 5-2 模擬家屋（D 棟）の火災進展状況

時間	状況
00分00秒	着火（出火元：食用油が浸みた布の酸化発熱）
01分50秒	室内が白煙で充満する。
03分40秒	換気扇と玄関扉の上端から煙が出てくる。
04分30秒	ゴミ袋から火炎が見える。床面からの火炎高さ 20～30cm位。
06分16秒	床面からの火炎高さ 60～70cm位。
10分20秒	玄関扉を開放する。その時、火勢が大きくなる。
10分54秒	玄関扉を閉鎖する。
12分12秒	腰高窓のガラスをとび口で割り、外気を入れる。
13分16秒	腰高窓から黒煙が噴出する。屋根に設置したモジュールが煙に包まれる。
13分23秒	腰高窓から火炎が噴出する。
14分00秒	掃き出し窓から火炎が噴出する。
14分15秒	火炎の高さは、模擬家屋の屋根から 3m 位上方に立ち上る。
15分25秒	消防隊が 2 線で消火を開始する。
18分00秒	モジュール裏面に火炎が残っている。モジュールの下半分が欠損している。
18分38秒	モジュール裏面の火炎を消火した。



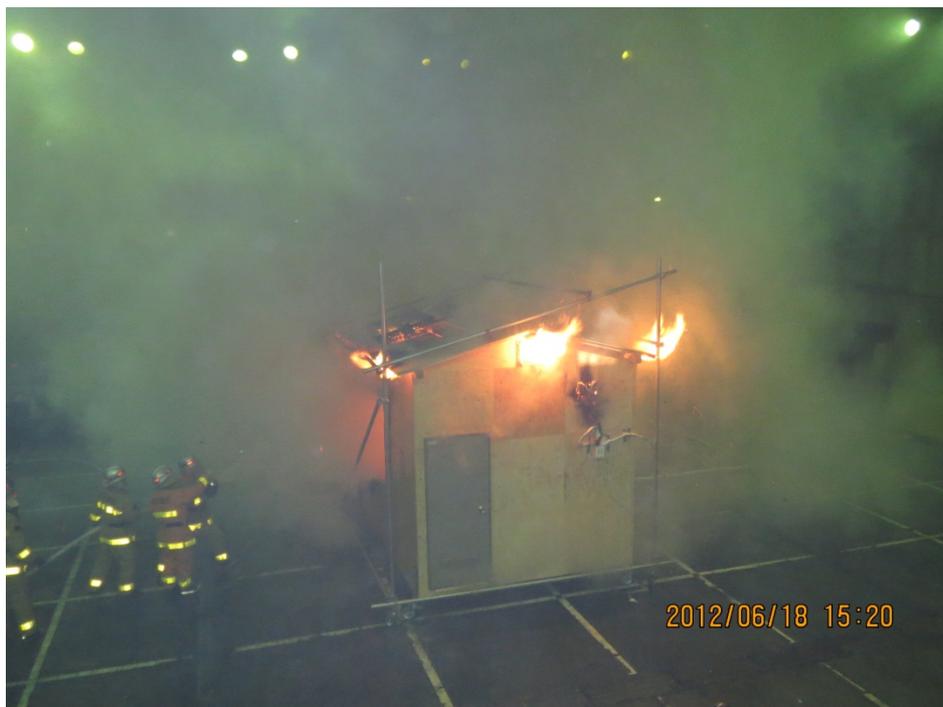
図 5-14 モジュール最大出力電圧時の様子

5.4.5.2 太陽電池モジュールの消火困難要因

モジュールの表面及び裏面温度については、モジュールの出力電圧が上昇したのと同時に表面及び裏面温度が上昇をはじめ、表面は約 150℃、裏面は約 760℃に到達した。火災室の天井は合板であり、屋根には瓦がないため、火災室の火炎がそのまま屋根を燃え抜け、モジュール裏面を直接加熱していたため、モジュール表面よりも裏面の方が高温であったと考える。着火 15 分 25 秒（925 秒）後に消防隊が消火を開始すると（図 5-15(a)）、モジュール表面温度は低下していくが、一方で、モジュール裏面温度は上昇した。火災室を放水した際に屋根を燃え抜けた火炎の勢いが一時的に大きくなり温度上昇したものとする。また、モジュール裏面で燃焼が継続し、モジュール自体が散水障害になって消火が困難であった（図 5-15(b)）。

5.4.5.3 太陽電池モジュールの構造と熱的損傷状況

図 5-16 は実験後に取り出したモジュールであり、下部 2/5 程度が欠損している。モジュール表面は強化ガラス、裏面はバックシートや封止材（エチレン-酢酸ビニル共重合体（EVA））といった樹脂系シートで構成されており（図 5-17）、常に火炎に曝露されていたモジュール下部のバックシート等が燃焼することにより、ガラスも破壊されていることからモジュールの形状を維持出来なくなり欠損するに至ったと考える。また、第 4 章では熱的損傷したモジュールでも発電したが、本実験ではモジュールが実験後に発電することはなかった。図 5-18 は今回使用したモジュール内の電気回路図である。モジュールを構成する各セルは直列接続になっており、3 箇所バイパスダイオードが入っており縦方向に 3 つのクラスタに分かれる。そのクラスタ単位で欠損があってもバイパスダイオードを経由することにより他のクラスタで発電は継続するが、横方向に各クラスタを横断するような欠損はすべてのクラスタの発電を停止させるため、本実験で熱的損傷したモジュールは再び発電することはなかったと考える。



(a) 消防隊による消火の様子



(b) モジュールの裏面で燃焼が継続

図 5-15 モジュール裏面に入り込んだ火を消火するが
モジュール自体が散水障害になっている

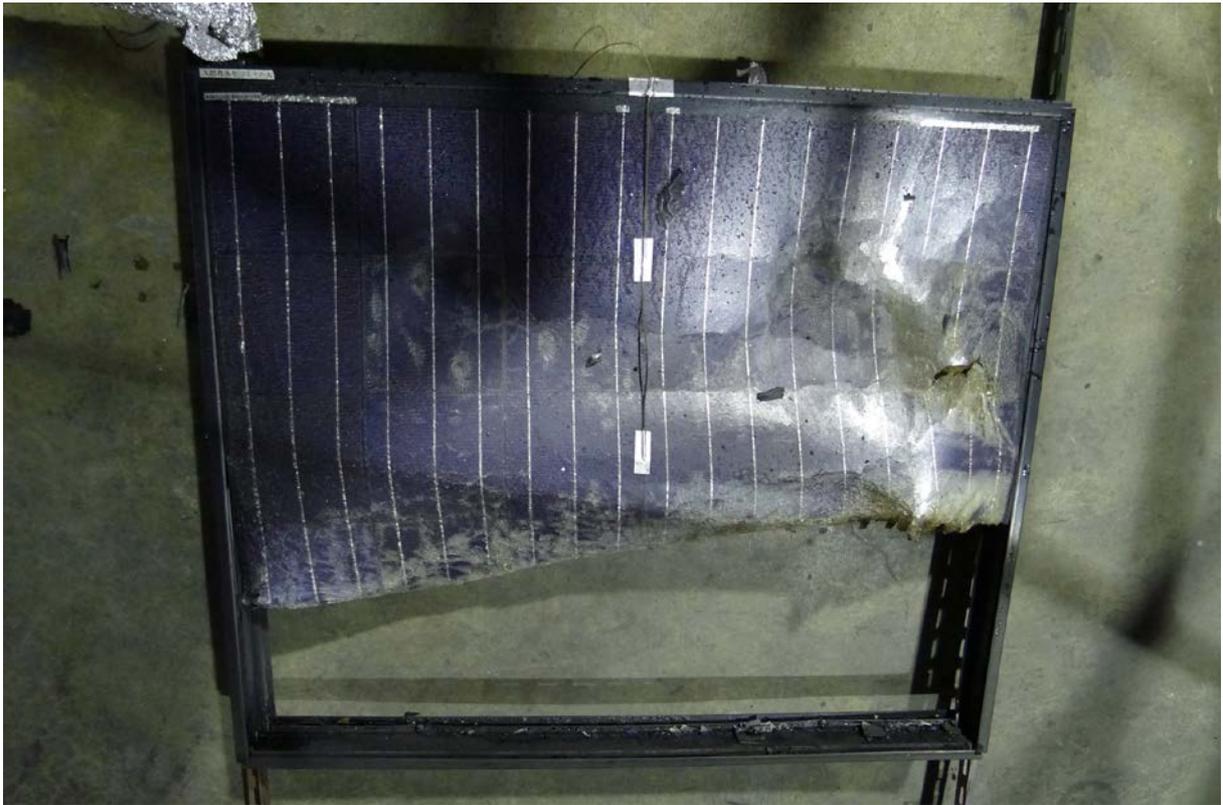


図 5-16 火炎に曝露されて損傷したモジュール

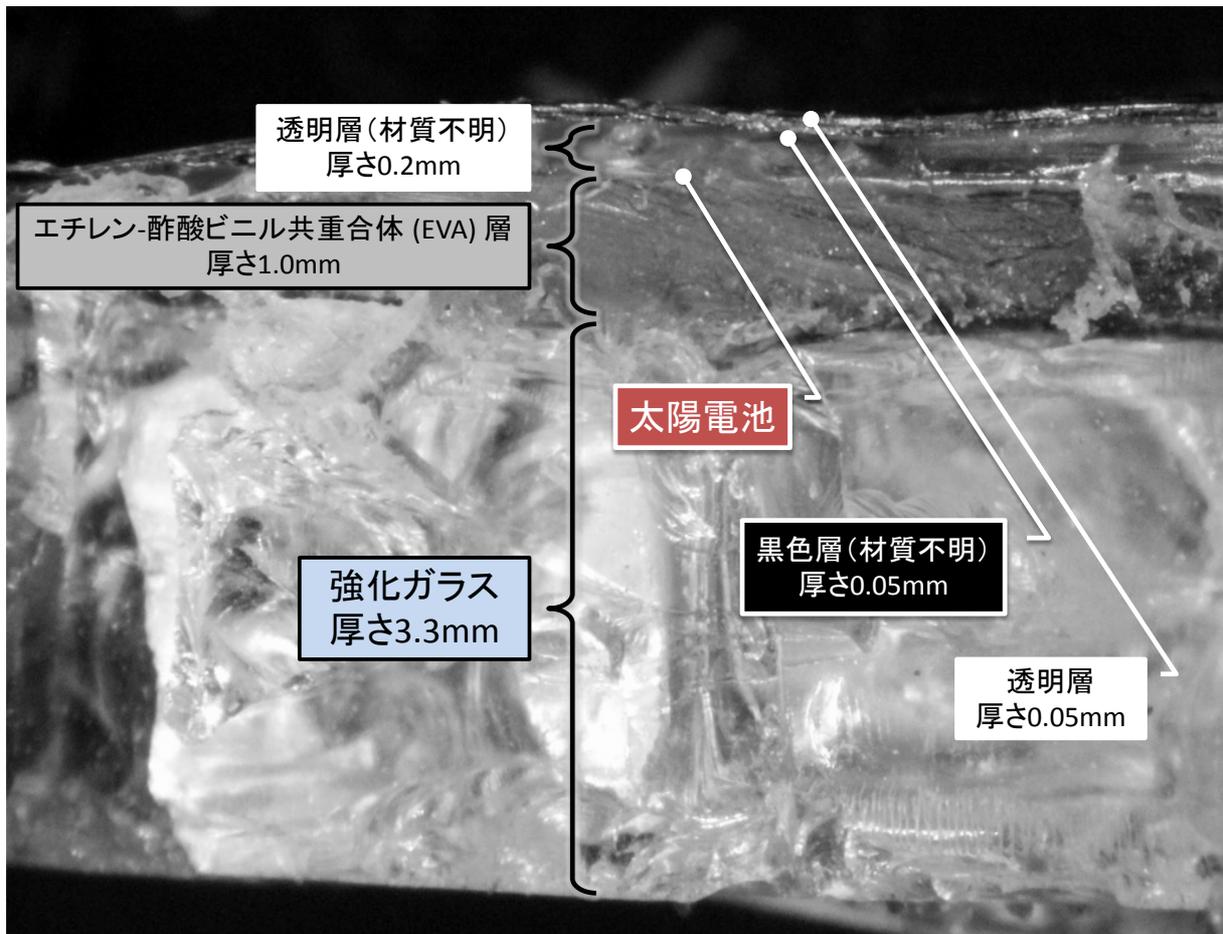


図 5-17 マイクロスコープによるモジュール断面写真 (下側がモジュール表面 (ガラス面))

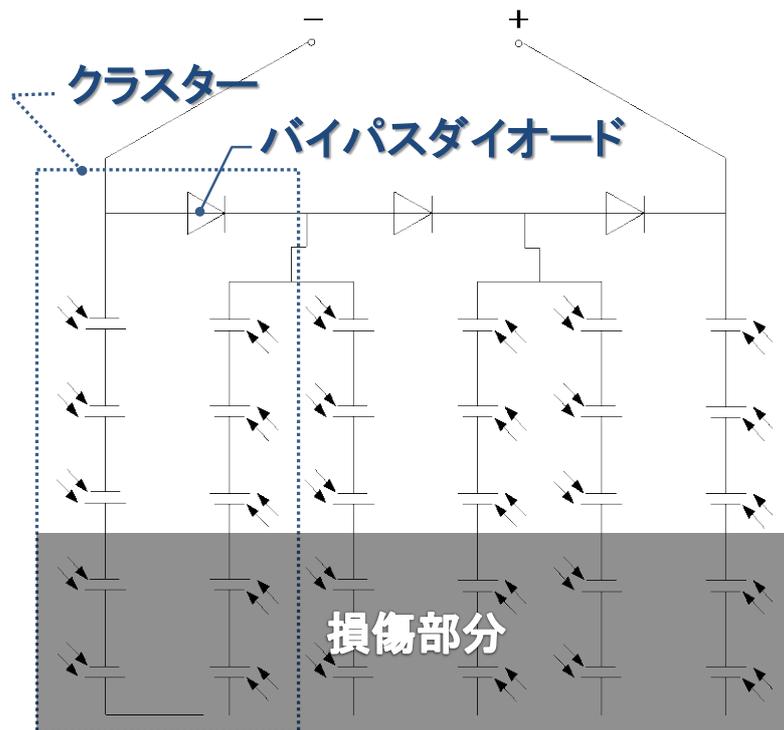


図 5-18 モジュール内の電気回路図と損傷箇所

5.5 まとめ

本研究では、実火災に近い状況を模擬するためにモジュールを模擬家屋の屋根の上に設置し、実大実験を通してモジュールの発電特性や燃焼性状を調べ、以下の結論を得た。

- (1) 水銀灯及び太陽光よりも火災による同照度の火炎光を受光した方がモジュールは高い出力電圧を示す。
- (2) 火災で生じる煙によりモジュールが受光する光が遮られ発電を抑制する。
- (3) モジュールの背面に回り込んだ火炎はバックシートを燃焼させ、消防隊の放水に対してモジュール自身が散水障害となってモジュール背面が消火困難になる。

謝辞

消防大学校火災調査科第 23 期・模擬家屋調査実習における模擬家屋火災実験に合わせて火炎光を受光したモジュールの出力電圧特性実験及び火炎に曝露されたモジュールの出力電圧特性実験を実施させていただきました。ここに記して御協力いただきました関係各位へ感謝の意を表します。

6. 種々の火炎光の分光スペクトルと太陽電池モジュールの発電特性

6.1 はじめに

太陽光発電システム（Photovoltaic power system、以下 PV）の普及に伴い、PV からの出火事例や PV が設置された住宅の火災において消火活動中の消防隊員の感電事例が報告されている¹⁾。第 4 章では太陽電池モジュール（以下、モジュール）が火炎からの放射光によっても発電することを確かめたが、火炎からの放射光は、燃料の種類により火炎の色が異なることから、そのスペクトル成分に違いがあると考えられる。そこで、燃料の種類を変え、火炎からの放射光の分光スペクトル及び太陽光の分光スペクトルを測定するとともに、モジュールの発電特性に違いがあるかを確認した。

6.2 実験の諸条件

本実験は分光スペクトル測定実験及びモジュール発電特性実験の 2 つから構成される。

6.2.1 燃料の種類及び計測装置

燃料は、アルコール系としてメタノール、エタノールを、石油系として n-ヘプタン、灯油を、セルロース系として木材クリブを選定した。表 6-1 に燃料の量または大きさを示す。木材クリブは着火させるために助燃剤として n-ヘプタン 300mL を燃焼させた。また、灯油はバーナーで加熱して着火、他の燃料は、棒の先の口火で着火させた。

表 6-1 燃料の種類と実験条件

燃料	仕様	測定開始
メタノール	3L （直径494mmの円形火皿）	着火3分後
エタノール	3L （直径494mmの円形火皿）	着火3分後
n-ヘプタン	3L （直径454mmの円形火皿）	着火3分後
灯油	5L （直径454mmの円形火皿）	着火3分後
木材クリブ	40cm×4cm×4cmの杉材28本8段井桁組み	着火3分後

計測には、多目的分光放射計 MSR-7000N（株式会社オプトリサーチ）、照度計 T-10（コニカミノルタ株式会社）を用いた。モジュールは多結晶シリコンの ND-114（シャープ株式会社）である。多目的分光放射計は、280～2500nm の波長域を波長 1nm 毎に放射照度 ($\mu\text{W}/(\text{cm}^2 \cdot \text{nm})$) を測定できる。ただし、この波長域を 280nm から 1nm 刻みで測定していくため全波長域を測定するには約 3 分の時間を要する。照度計は可視光域（およそ波長 450～750nm）に感度を持ち、人が感じる明るさを数値化する。可視光の波長範囲は文献によって若干異なっているが、本実験の可視光の波長範囲は、照度計が捉える波長範囲とした。モジュールは、30 枚のセルが直列に組み込まれていて、定格出力電圧 15.16V、定格出力電流 7.52A である。市場で比較的多く使われているモジュールを供試体にするため、占有率が高い多結晶シリコンで、大きさが 1m 四方程度、中程度の価格帯のモジュールを選定した。光子 1 個のエネルギーを E [eV]、光の波長を λ [nm]、光速を c [m/s]、プランク定数を h [J·s]、 $1\text{eV}=1.602 \times 10^{-19}\text{J}$ とすると、アインシュタインの式からこれらには、

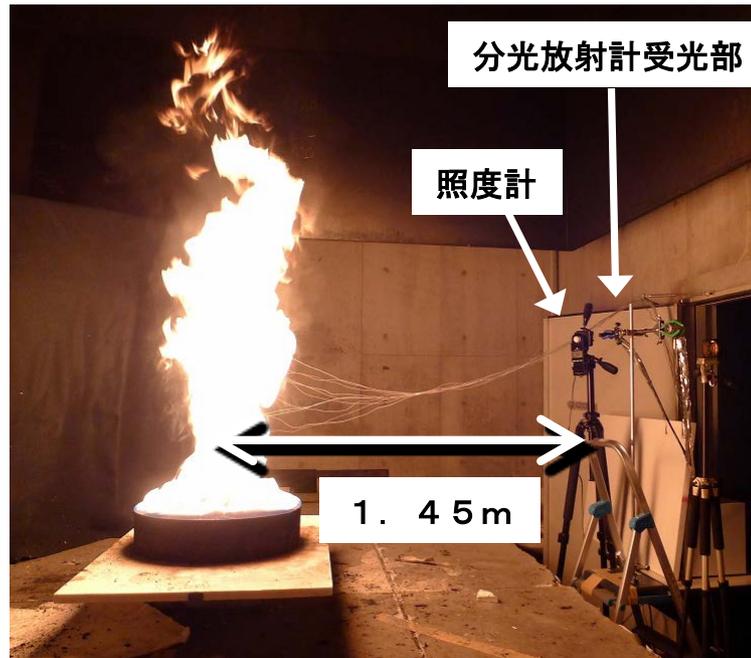


図 6-1 火炎光の分光スペクトル測定時の機器類設置状況

$$E = hc / \lambda = 1240 / \lambda \quad (6-1)$$

の関係がある。発電するには光子エネルギーを電子に与える光励起によって電子のエネルギーがバンドギャップエネルギーを超えなければならず、光子エネルギーは短波長ほどエネルギーが高いため、バンドギャップ超えを生じさせるにはある波長よりも短い光でなければならない。結晶シリコンのバンドギャップエネルギーは 1.1eV であるため、式(6-1)から、波長は 1130nm より短いことが必要となる²⁾。

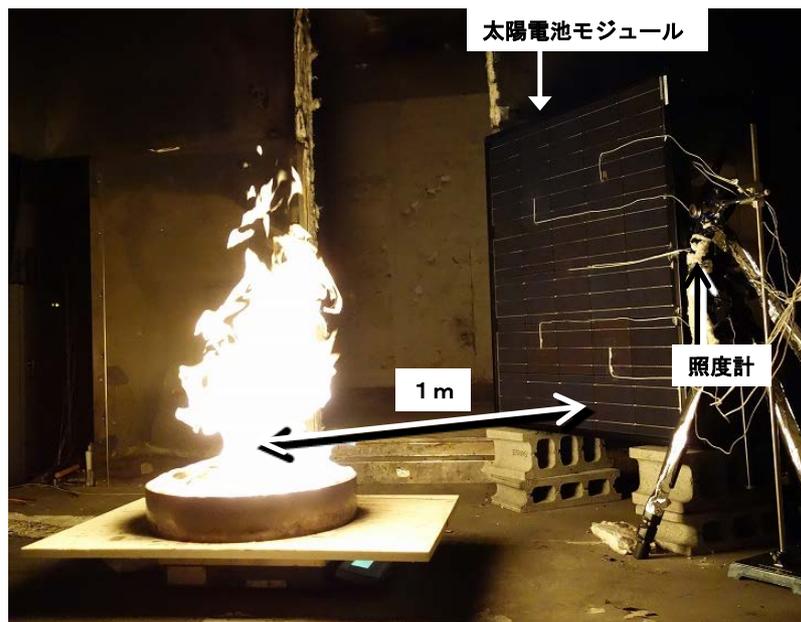


図 6-2 発電特性測定時の機器類の設置状況

6.2.2 測定条件

分光放射計で、280～2500nm の波長域を 1nm 毎に分光スペクトルを測定するには約 3 分かかるため、この測定時間以上継続して発熱速度がほぼ一定になるように燃料の量と測定開始時間を予め調べた。その結果、それぞれの燃料での測定条件を表 6-1 のようにした。分光スペクトルの測定時の機器類の設置状況を図 6-1 に示す。火源中央から分光放射計の受光センサーまでの距離は 1.45m とした。これは、実験場の広さ、受光センサーが受ける放射熱の影響を考慮してこの距離とした。分光放射計の受光センサーと並べて照度計を設置し、これらの出力をデータロガーで記録した。

また、発電特性測定時の機器類の設置状況を図 6-2 に示す。火源中央から 1m にモジュールと照度計を置き、照度とモジュールの出力電圧を 1 秒間隔でデータロガーに記録した。この時、モジュールの出力端子間に 2Ω の負荷抵抗を接続し、通常の使用時に近い状態を再現した。この負荷抵抗の両端電圧をモジュールの出力電圧として測定した。

6.3 分光スペクトル測定結果

分光スペクトルの測定結果を、メタノール、エタノール、n-ヘプタン、灯油、木材クリブの順に図 6-3～6-7 に示す。また、太陽光の分光スペクトルを図 6-8 に示す。

(1) メタノール (図 6-3)

青色の火炎であり、2m ほどの距離での観測では、明るさも放射熱もほとんど感じない。スペクトル分布を見ると、1300nm よりも短い波長の光はほとんどなく、可視光域が弱いことが分かり、この範囲の放射照度は $0.1\mu\text{W}/(\text{cm}^2\cdot\text{nm})$ 以下である。スペクトルは 1350～1550nm、1750～2100nm、2400nm 以上に分布している。最大放射照度は、 $3.4\mu\text{W}/(\text{cm}^2\cdot\text{nm})$ であった。可視光域の成分よりも赤外域の成分が多い。

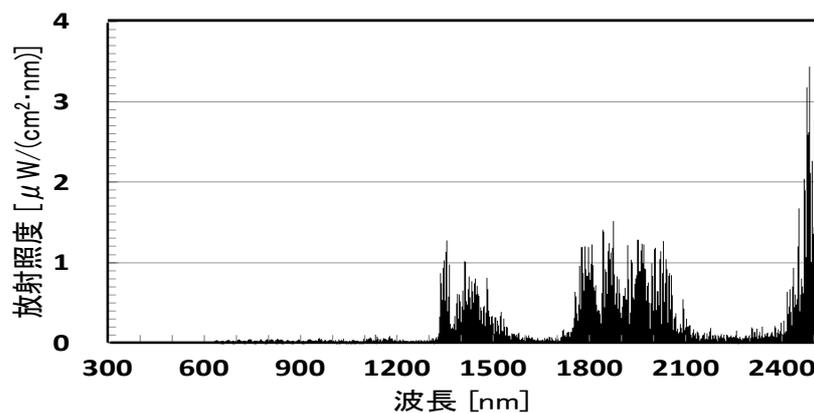


図 6-3 メタノール火炎光の分光スペクトル

(2) エタノール (図 6-4)

アルコール系でもメタノールと違い黄色の火炎である。スペクトル分布を見ると 600nm よりも短い波長の光はほとんどなく、放射照度は $1\mu\text{W}/(\text{cm}^2\cdot\text{nm})$ 以下である。スペクトルは 1350nm をピークに、600nm より長波長側に分布している。最大放射照度は、 $18\mu\text{W}/(\text{cm}^2\cdot\text{nm})$ であった。可視光域の成分よりも赤外域の成分が多い。

(3) n-ヘプタン (図 6-5)

黄色から橙色の火炎である。スペクトル分布を見ると 600nm よりも短い波長の光はほとんどなく、この波長域の放射照度は $1\mu\text{W}/(\text{cm}^2\cdot\text{nm})$ 以下である。スペクトルは 1400nm をピークに、600nm より長波長側に分布している。広い波長範囲でエタノールよりも強い放射照度になっている。最大放射照度は、 $21\mu\text{W}/(\text{cm}^2\cdot\text{nm})$ であった。可視光域の成分よりも圧倒的に赤外域の成分が多い。

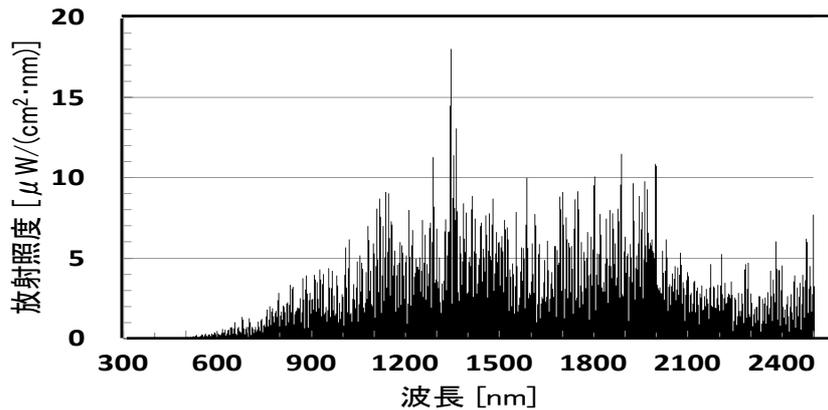


図 6-4 エタノール火炎光の分光スペクトル

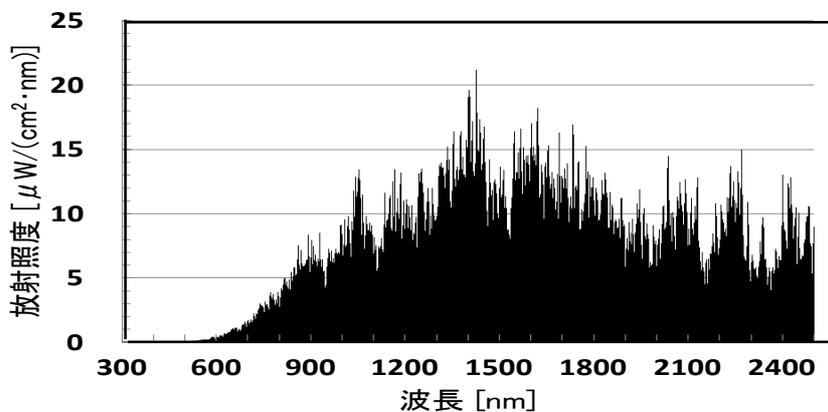


図 6-5 n-ヘプタン火炎光の分光スペクトル

(4) 灯油 (図 6-6)

黄色から橙色の火炎である。スペクトル分布を見ると 650nm よりも短い波長の光はほとんどなく、この波長域の放射照度は $1\mu\text{W}/(\text{cm}^2\cdot\text{nm})$ 以下である。スペクトルは $650\mu\text{W}/(\text{cm}^2\cdot\text{nm})$ より長波長側に分布しており、n-ヘプタンより長波長の 1700nm にピークがある。最大放射照度は、 $28\mu\text{W}/(\text{cm}^2\cdot\text{nm})$ であった。n-ヘプタン同様、可視光域の成分よりも圧倒的に赤外域の成分が多い。

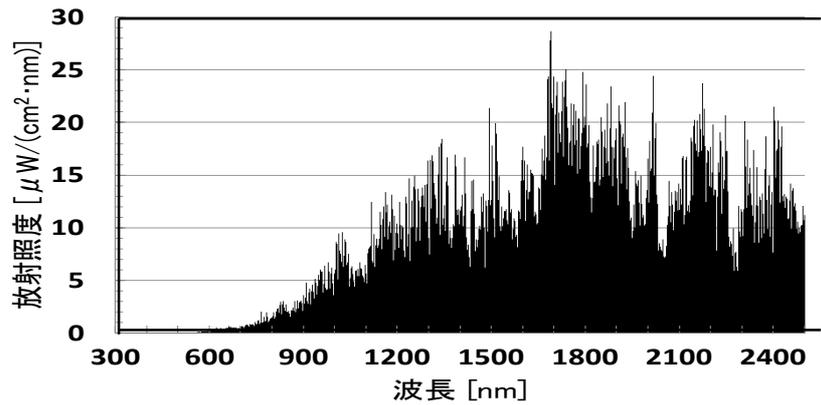


図 6-6 灯油火炎光の分光スペクトル

(5) 木材クリブ (図 6-7)

黄色から橙色の火炎である。安定した円錐形の火炎を形成する。スペクトル分布を見ると 600nm よりも短い波長の光はほとんどなく、この波長域の放射照度は $1\mu\text{W}/(\text{cm}^2\cdot\text{nm})$ 以下である。スペクトルは 600nm より長波長側に分布しており、灯油より長波長の 2000nm にピークがある。安定した火炎ではあるが、放射照度としては大きくなく、最大放射照度は、 $4.5\mu\text{W}/(\text{cm}^2\cdot\text{nm})$ であった。スペクトル成分が測定範囲内で連続的に存在している。可視光域の成分よりも圧倒的に赤外域の成分が多い。

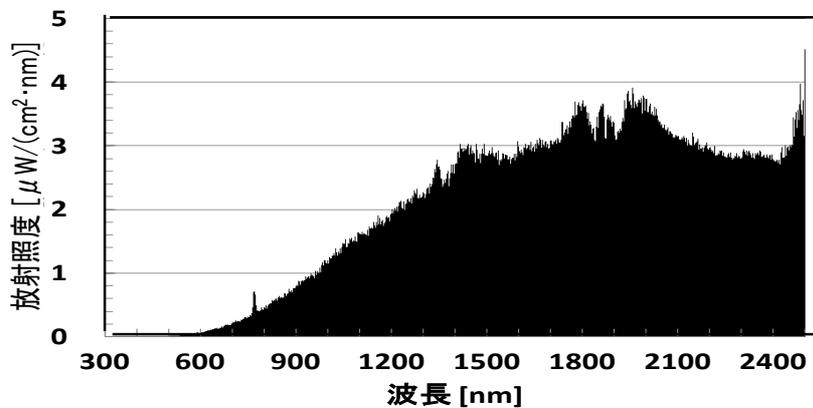


図 6-7 木材クリブ火炎光の分光スペクトル

(6) 太陽光 (図 6-8)

晴天時の太陽光のスペクトル分布は、紫外域から可視光域の放射照度が強く、赤外域に行くほど弱くなる。500~600nm に放射照度のピークがある。結晶シリコンの太陽電池が光を電気に変換できる限界波長の約 1130nm よりも短波長域のスペクトル成分が多い。放射照度は最大 $150\mu\text{W}/(\text{cm}^2\cdot\text{nm})$ であり、火炎に比較し圧倒的に大きい。

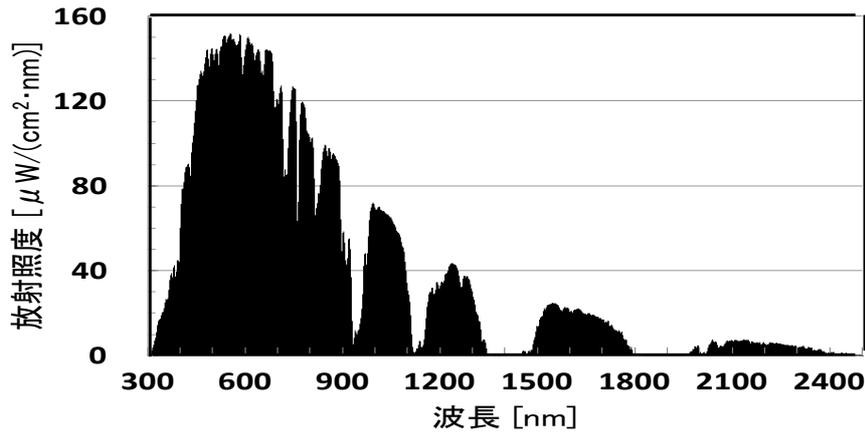


図 6-8 太陽光の分光スペクトル

6.4 太陽電池モジュール発電特性

照度と出力電圧の関係を、メタノール、エタノール、n-ヘプタン、灯油、木材クリブ、太陽光の順に図 6-9～6-14 に示す。これらのうち図 6-10～6-12 を見ると、照度に対して出力電圧のばらつきが大きい。これは、火炎の揺らぎの速さに対して、照度計の応答速度、太陽電池の出力応答速度が同じではないこと、照度計でとらえていない近赤外のスペクトルの強度が、火炎が揺らいでいる時にどの程度なのかが不明なこと等が重なり、ばらつきとなっていると考えられる。各燃料の結果と、照度とモジュール出力電圧の関係を述べる。

(1) メタノール (図 6-9)

スペクトル分布で見られたように、波長 1130nm よりも短波長側成分が少ないメタノールは、照度とモジュール出力電圧がほぼ 0V となった。グラフの原点付近にすべての測定点が集まった。

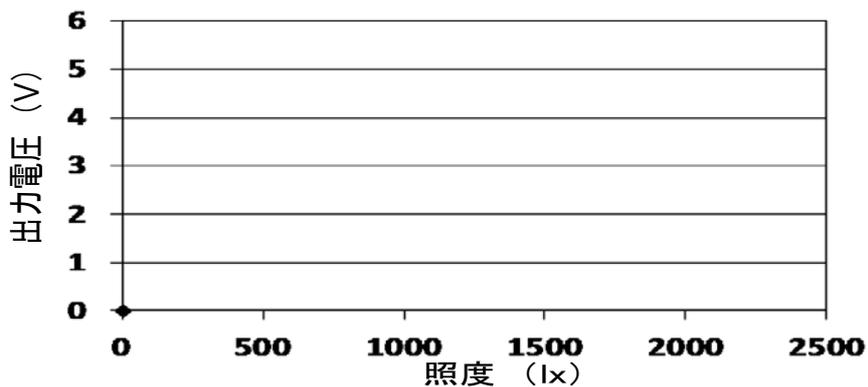


図 6-9 メタノール火炎の照度と出力電圧の関係

(2) エタノール (図 6-10)

照度は 800lx、モジュール出力電圧は 2V 程度までしか上がらなかった。メタノールとは違い黄色い火炎を伴う燃焼のため、メタノールよりも可視光の明るさや輻射熱が大きな燃焼となった。

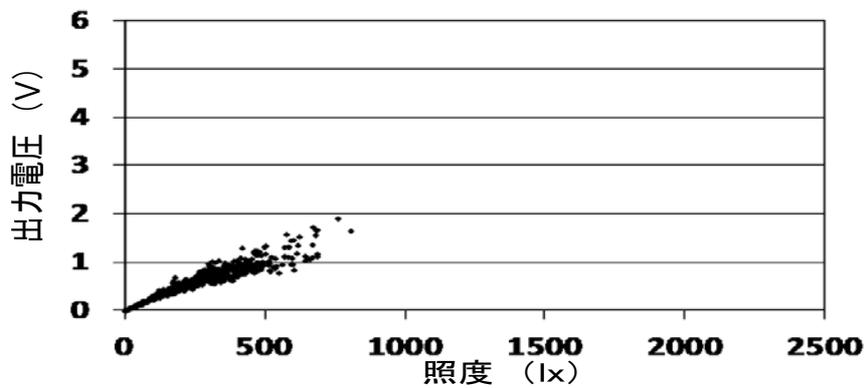


図 6-10 エタノール火炎の照度と出力電圧の関係

(3) n-ヘプタン (図 6-11)

照度は 2300lx、モジュール出力電圧は 6V 程度まで上昇した。今回の燃料の中では一番高い電圧を記録した。測定点の分布がグラフ上はまばらになっており、照度の変化が大きい火炎であった。

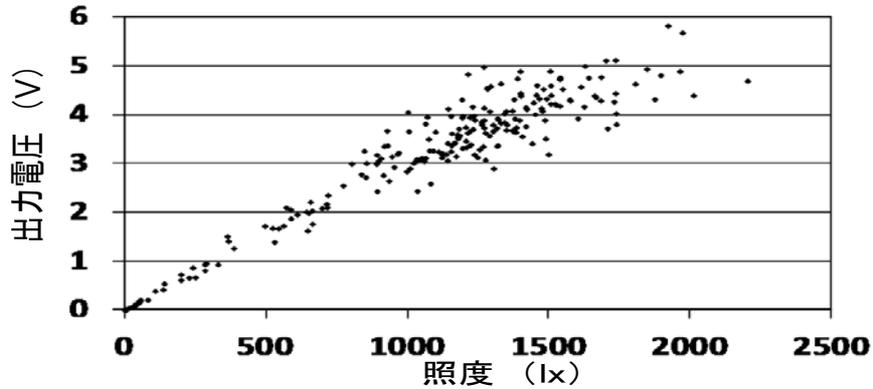


図 6-11 n-ヘプタン火炎の照度と出力電圧の関係

(4) 灯油 (図 6-12)

照度は 750lx、モジュール出力電圧は 5V 程度まで上昇した。可視光の照度の割には、高い出力電圧を記録した。他の燃料の火炎に比べ近赤外域の成分が多いためと考えられる。

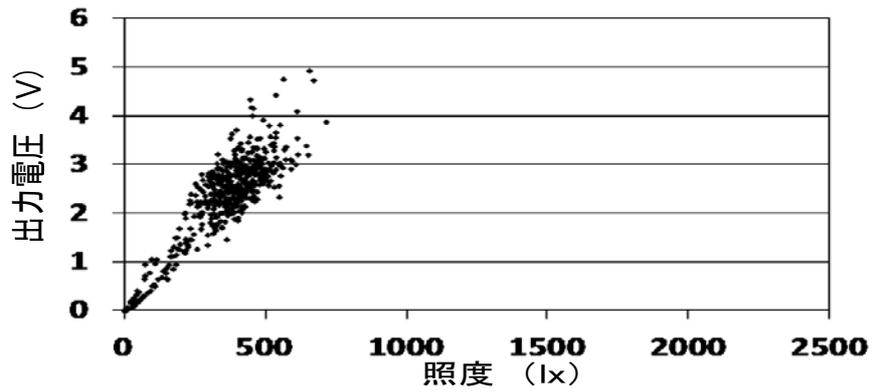


図 6-12 灯油火炎の照度と出力電圧の関係

(5) 木材クリブ (図 6-13)

木材に着火させるための助燃材 (n-ヘプタン) が燃えている間のデータは除外した。

照度は 180lx、モジュール出力電圧は 0.8V 程度までしか上がらなかった。火炎自体は円錐形に綺麗に燃えていたが、可視光の照度は低い結果であった。

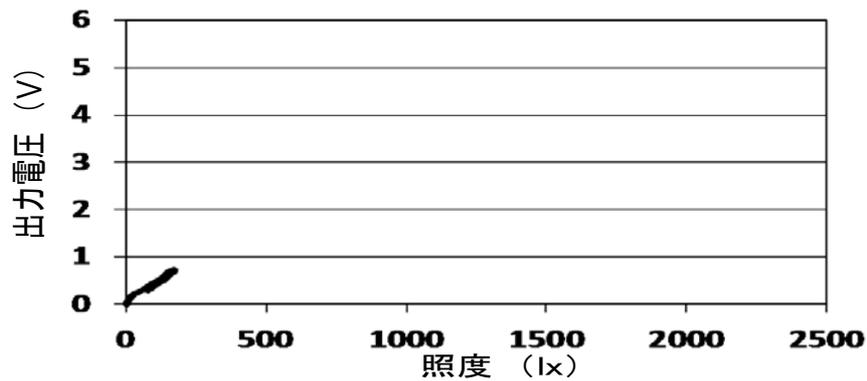


図 6-13 木材クリブ火炎の照度と出力電圧の関係

(6) 太陽光 (図 6-14)

横軸の照度は、図 6-9～6-13 に比べ 40 倍の範囲を表示している。縦軸の出力電圧も倍以上の 15V にしている。照度は火炎に比べ 40 倍以上と圧倒的に大きな値となっているが、出力電圧は数倍程度である

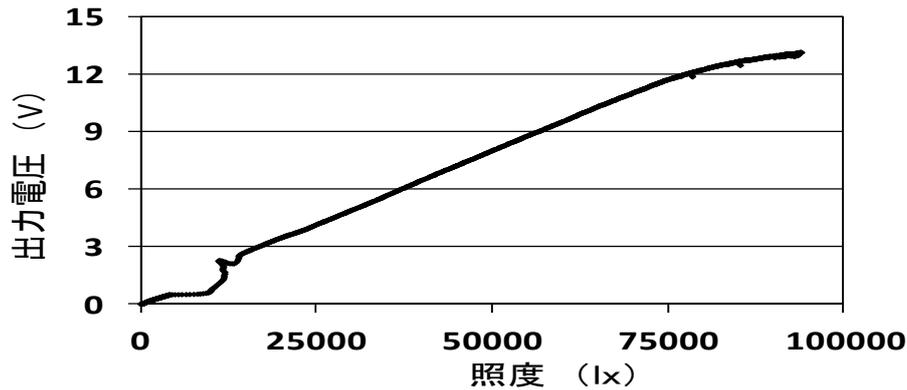


図 6-14 太陽光の照度と出力電圧の関係

6.5 考察

モジュールの最大出力電圧は高い順に、n-ヘプタン、灯油、エタノール、木材クリブ、メタノールであった。多結晶シリコン太陽電池が発電できる限界波長 1130nm よりも短波長側成分が少ないメタノールは、モジュール出力電圧がほぼゼロとなった。

燃料の種類とモジュール出力電圧の関係を見るために、500lx までの照度と出力電圧の線形近似を最小二乗法により求めた。木材クリブでの実験において照度が 180lx までしか上がらなかったため、低い照度範囲のデータを用いて比較する。燃料毎に、500lx までのデータで原点を通る線形の近似式を求めると、出力電圧を y 、照度を x 、とすると近似式と決定係数 R^2 はそれぞれ次のようになる。尚、メタノールはこの計算では除外した。

- ① エタノール $y = 0.00230x$
 $R^2 = 0.97812$
- ② n-ヘプタン $y = 0.00338x$
 $R^2 = 0.98405$
- ③ 灯油 $y = 0.00667x$
 $R^2 = 0.97208$
- ④ 木材クリブ $y = 0.00439x$
 $R^2 = 0.97427$

これらを見ると、黄色や橙色に輝いている火炎においては、どの燃料においても照度と出力電圧には強い相関があることが分かる。見た目にも明るい火炎、見かけの大きさが大きい火炎では発電も大きくなることが予想できる。近似式の傾きを見ると、灯油、木材クリブ、n-ヘプタン、エタノールの順に大きい。傾きの大きい火炎には、照度計で捉えられる可視光以外の波長成分が多いことになり、すなわち、結晶シリコン系太陽電池が近赤外域で電気に変換できる波長域（750～1130nm）の放射照度が、可視光域に比べて強いということになる。

4.2 において、紫外域、可視域、赤外域のそれぞれのエネルギー分布が太陽光の分布に近いように作られた人工太陽照明と n-ヘプタンの火炎を用いてモジュールの発電特性を比較した。この結果、同じ照度では火炎の出力電圧が高くなったが、これは、750～1130nm の近赤外線エネルギーでの発電が寄与していたと言える。この時、1m 離れた n-ヘプタンの火炎でモジュールの定格出力電圧の 40% 程度の発電をしていたが、本実験でも同様に 40% 程度の発電をしている。

6.6 まとめ

燃料の種類を変え、火炎からの放射光の分光スペクトルの測定と、モジュールの発電特性を確認した。火炎には赤外域の成分が多いため、可視光に感度を有する照度計の照度の値よりも大きな出力電圧が得られることから、火炎からの放射光が届くモジュールでは、夜間でも発電していることが考えられるので、消防活動においては、水の浸み込まない絶縁性の高い長靴や手袋を使用する等して、感電への注意が必要である。

参考文献

- 1) 小室修："住宅用太陽光発電システムが設置された建物火災の消防活動について", 第 59 回 全国消防技術者会議資料, (2011), pp.127-131.
- 2) 山口真史, Green, M. A., 大下祥雄, 小島信晃：太陽電池の基礎と応用, 丸善出版, (2010), pp.83-85.

7. 太陽電池モジュールの力学的特性・化学的特性

7.1 はじめに

太陽電池モジュール（以下、モジュール）が設置された家屋が火災に見舞われた際、消火活動や残火確認等の消防活動で、モジュールを除去しなければならない場合がある。また、消火活動時において、モジュールが火炎を受けて損傷した場合、損傷したモジュールの構成部材が崩落する等の危険性が生じる。特に一般住宅においては、屋根上にモジュールを設置することがほとんどであるので、頭上からの落下物は活動に際して大きな障害となる。

本章においては、モジュールをとび口、万能斧で破壊した「火炎曝露の無い場合の破壊形態」と、モジュールが火炎を受け損傷した「火炎曝露による損傷形態」について述べる。

7.2 火炎曝露の無い場合の破壊形態

モジュールが設置された建物における消火活動では、消防隊員が屋根に上り、モジュールを撤去する作業や破壊する作業等が考えられる。モジュールの除去や破壊作業では、モジュールの表面がガラスで覆われていることから、ガラスの飛散等の危険性についても考慮しなければならない。モジュールの種類によりどのような破壊形態が生ずるかを検討する必要がある。そこで、モジュール1枚を破壊器具で実験的に破壊し、モジュールによる破壊形態を調べた。

7.2.1 実験

7.2.1.1 太陽電池モジュールの種類

住宅用のモジュールとしては、一般に結晶シリコン系と化合物半導体系のものが使用されている。単結晶シリコンと多結晶シリコンでは太陽電池そのものは異なるが、モジュールとしての構造は同じである。破壊器具による実験では、結晶シリコン系では単結晶シリコン及び化合物半導体系では CIS（銅、インジウム、セレン）の2種類のモジュールを使用した。使用した単結晶シリコンモジュールは、シャープ株式会社製の NU-122CB モジュールである。CIS モジュールは、ソーラーフロンティア株式会社製の SF-160S モジュールである。仕様は、表 7-1 のようになっている。

表 7-1 単結晶シリコンモジュールと CIS モジュールの仕様^{1,2)}

型式	NU-122CB	SF160-S
会社名	シャープ(株)	ソーラーフロンティア(株)
セルの種類	単結晶シリコン	CIS
最大出力 (W)	122	160
最大出力動作電圧 (V)	14.96	84
最大出力動作電流 (A)	8.16	1.91
開放電圧 (V)	18.77	110
外形寸法 (幅mm×奥行mm×高さmm)	990×856×46	1257 x977 x 35
質量 (kg)	11	20

7.2.1.2 実験装置

モジュールを固定するため 50mm×100mm×厚さ 2mm の軽溝形鋼を用いて、4 本脚の固定台を製作した。固定台の大きさは、縦 1100mm、横 1185mm、高さ 400mm である。破壊の衝撃によって、モジュールが固定台からずれないように、モジュールの四隅と固定台を小型のシャコ万力を使って固定した。さらに、破壊の衝撃による固定台の揺れを少なくするように、固定台に 10kg の砂袋を 2 か所取り付けた。破壊器具としては、表 7-2 の万能斧①を使用した。

7.2.1.3 単結晶シリコンモジュールの破壊

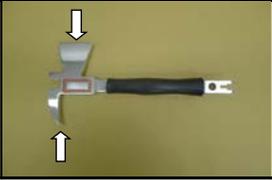
破壊実験については、消防研究センターの本館屋上で、2013 年 8 月 21 日に行った。天候は晴れ、気温は 37℃、湿度は 47% である。

万能斧①を使って、現役の消防隊員によって、単結晶シリコンモジュールの表面のガラス面から裏面まで、先端部で貫通するようにして破壊した。

7.2.1.4 CIS モジュールの破壊

実施日は、単結晶シリコンモジュールと同じ 2013 年 8 月 21 日である。単結晶シリコンモジュールと同じように、モジュールの表面から裏面まで、万能斧①の先端部が貫通するように打ち付けた。CIS モジュールでは、最初の 1 回の打撃で発電が止まったので、1 回だけの破壊実験である。

表 7-2 破壊器具の万能斧①。矢印は先端部、斧部を示す。

	会社名	品名 (柄の材質)	長さ寸法 [mm]	重量 [kg]	外観
万能斧 ①	オカニワ(株)	トップマンとび (絶縁ゴム)	330	0.95	

7.2.2 結果

7.2.2.1 単結晶モジュールの結果

図 7-1 は、万能斧①の先端部が貫通した単結晶シリコンモジュールである。打撃 1 回目の様子である。右側に電圧比較のために設置された同型の破壊していないモジュールとガラス面を比較すると、破壊したモジュールの表面には、細かいヒビがはいっている様子が見てとれる。先端部を突き刺したところから、クモの巣状に表面のガラスにヒビが入った。

図 7-2 は、1 回目の打撃に引き続き、発電しなくなるまで万能斧①の先端部、斧部により破壊した時の様子である。同じモジュールを使用して、打撃を繰り返し行った。打撃場所は、図 7-2 のように計 6 か所である。これらの実験からモジュール破壊時の状況を観察した。1 回目の打撃と比べると、6 回目までの打撃によってガラス表面にヒビは増えたが、封止剤がガラスと密着し支えとなったため、モジュールの枠からガラスが落下するような状況には至らなかった。



図 7-1 万能斧①の先端が貫通した単結晶シリコンモジュール
右下の枠内は、貫通場所の拡大写真

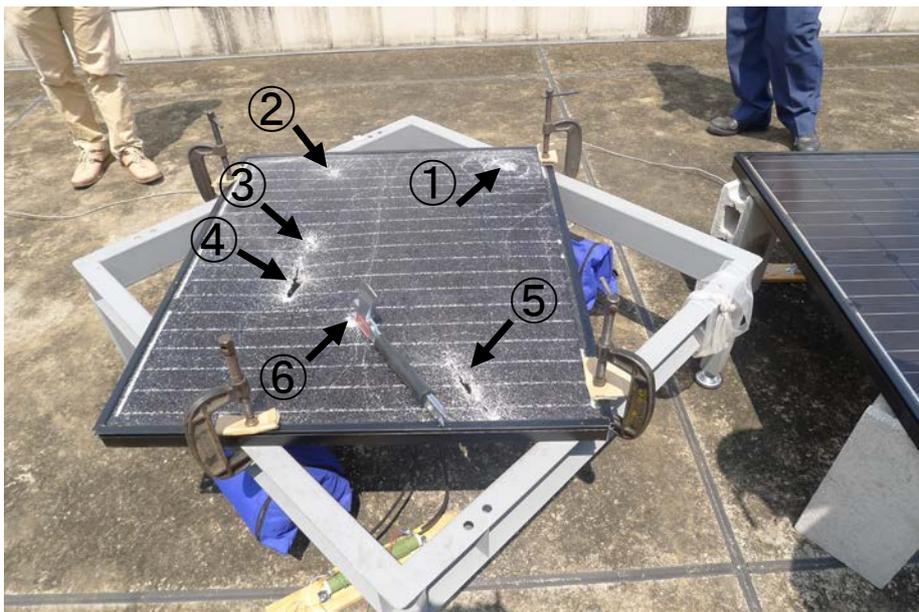


図 7-2 発電が停止するまで、万能斧①で6か所破壊した単結晶シリコンモジュール
(数字は打撃した順番)

7.2.2.2 CIS モジュールの結果

破壊器具の先端部が CIS モジュールに貫通したところを表面から観察すると、図 7-3 のように、万能斧①が貫通部から表面のガラスにクモの巣状にヒビが入った。貫通部以外のガラスの面においても、モジュールの表面が強化ガラスで覆われているため、細かなヒビが入った状態となった。図 7-4 のように、モジュールの裏面からも観察すると、破壊器具の先端が裏面から突き出ていた。モジュールの表面ガラスに、細かいヒビ割れが見られたが、モジュールの枠からガラスは落下していない。



図 7-3 万能斧①の先端部が貫通した CIS モジュール。
モジュール表面に細かいヒビが入った。右下の枠内は、貫通場所の拡大写真。



図 7-4 万能斧①の先端部が貫通した CIS モジュールを裏側から見た様子（丸の中）。
右上の枠内は、丸で示した貫通部の拡大写真。

7.2.3 火炎曝露の無い場合の破壊形態のまとめ

破壊器具として小型の万能斧①を使用し、単結晶シリコンモジュール、CIS モジュールを破壊してその時の形状について調べた。万能斧①の打撃により、破壊したモジュールの表面には、細かいヒビがはいっている様子が見られたが、モジュールによる破壊形状には大きな違いは見られなかった。また破壊器具として、万能斧①と別に、表 10-5 の万能斧③、とび口①を使って破壊実験を行った。破壊位置からクモの巣状にガラスの破壊が広がり、またモジュール全体のガラス

のヒビ割れ等、破壊状況について比較をしたが、破壊器具による違いは見られなかった。第 10 章にも機械的破壊について一部述べているので参照されたい。

7.3 火炎曝露による破壊形態

7.3.1 実験

燃焼実験には、4.2 で用いた京セラ株式会社製 KC80S（以下、モジュール No.1）、5.2 で用いたシャープ株式会社製 ND-144CA（以下、モジュール No.2）、7.2 で用いたシャープ株式会社製 NU-122CB（以下、モジュール No.3）、ソーラーフロンティア株式会社製 SF160-S（以下、モジュール No.4）の計 4 枚のモジュールを使用した。燃焼の際の各モジュールの設置角度は全て 4.3.3 と同じにした。助燃剤に 4.3.3 の角型火皿に入れた n-ヘプタン 1L を用い（ただし KC80S のみ 3L）燃焼させた。使用したモジュールの仕様、実験条件の一覧を表 7-2 に示す。

表 7-2 各モジュールの仕様及び助燃剤量

モジュール番号	モジュール			
	No.1	No.2	No.3	No.4
製造者	京セラ（株）	シャープ（株）		ソーラーフロンティア（株）
セル種類	シリコン多結晶	シリコン多結晶	シリコン単結晶	CIS（薄膜系）
型式	KC80S	ND-114CA	NU-122CB	SF160-S
外形寸法（mm） （W×D×H）	978×658×35	990×856×46	990×856×46	977×1257×35
n-ヘプタン液量（L）	3	1	1	1

7.3.2 結果

7.3.2.1 モジュール No.1 の結果

モジュール No.1 燃焼時の状態を図 7-6 に示す。



図 7-6 モジュール No.1 燃焼の状態

このモジュールでは、助燃剤の燃焼が終了すると共に火は消え、モジュール単体での独立燃焼は認められなかった。燃焼後の裏面の状態を観察すると、図 7-7 に示すように火炎に当たっている白色の面がほとんど炭化しており、一部には薄膜状に炭化している部分も認められた。



図 7-7 燃焼後のモジュール No.1 裏面の状態

表面は図 7-8 に示すように、火炎の激しく当たっている左上部の損傷が激しいが、その他の部分では変色等の状態は認められない。ただし、火炎があまり当たっていない部分は強化ガラス特有のクモの巣状の割れ方を呈しており、火炎が激しく当たった損傷の激しい部分は、鋭利な断面をもつフロートガラス状の割れ方を呈していた。



図 7-8 燃焼後のモジュール No.1 表面の状態

7.3.2.2 モジュール No.2 の結果

モジュール No.2 燃焼時の状態を図 7-9 に示す。



図 7-9 モジュール No.2 燃焼の状態

このモジュールでは助燃剤の燃焼終了後も、図 7-10 に示すように弱くではあるが裏面が独立燃焼した。



図 7-10 モジュール No.2 助燃剤燃焼終了後の状態

表面の状態は図 7-11 に示すとおり、火炎があまり当たっていない部分は強化ガラス特有のクモの巣状の割れ方を呈しており、火炎が激しく当たった損傷の激しい部分は、鋭利な断面をもつ

フロートガラス状の割れ方を呈していた。この状態はモジュール No.1 と類似していた。フロートガラス状に割れた表面ガラスは、消火時は保持されていたがモジュールが冷却すると割れ落ちた。割れ落ちたガラスを図 7-12 に示す。また、激しく火炎の当たっていた右上部は、燃焼と共に裏面部分から太陽電池セルが剥がれ落ち、ガラス面に直接当たっている火炎が観察された。

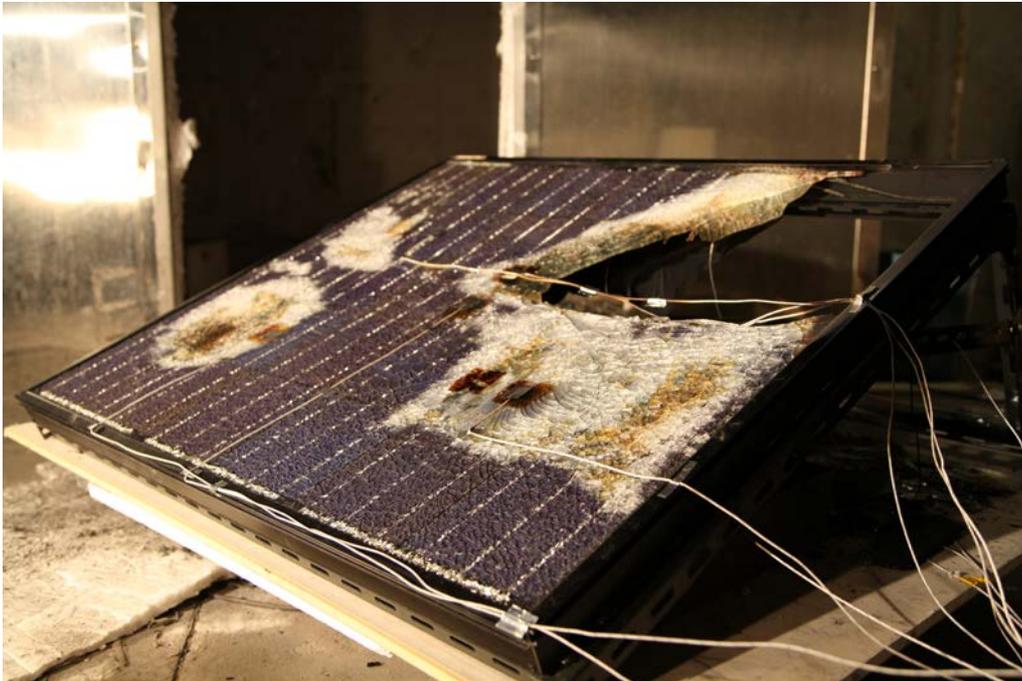


図 7-11 燃焼後のモジュール No.2 表面の状態
(左側の白色損傷部は別に予備的加熱を行った部分)



図 7-12 燃焼後のモジュール No.2 より欠落したガラスと太陽電池セル

7.3.2.3 モジュール No.3 の結果

モジュール No.3 燃焼時の状態を図 7-13 に示す。



図 7-13 モジュール No.3 燃焼の状態

モジュール No.3 も No.1 と同様に助燃剤の燃焼終了後も、図 7-14 に示すように裏面の燃焼が継続した。



図 7-14 モジュール No.3 助燃剤燃焼終了後の状態

燃焼終了後のモジュール No.3 の状態を図 7-15 に示す。このモジュールの燃焼挙動は、モジュール No.2 とほとんど同様であった。



図 7-15 燃焼後のモジュール No.3 表面の状態

7.3.2.4 モジュール No.4 の結果

モジュール No.4 燃焼時の状態を図 7-16 に示す。



図 7-16 モジュール No.4 燃焼の状態

モジュール No.4 では、No.2、No.3 と同様に、助燃剤の燃焼終了後も図 7-17 に示すように燃焼の継続が認められた。



図 7-17 モジュール No.4 助燃剤燃焼終了後の状態

ただし、このモジュールの場合は、No.2、No.3 のようにモジュール裏面が燃焼するのではなく、燃焼の結果生じた側部のフレームの隙間で燃焼が起こっていた。

燃焼後の表面の状態を図 7-18 に示す。表面のガラスは全面に渡り、強化ガラスに特徴的なクモの巣状の割れ方を呈しており、欠落はほとんど見られなかった。



図 7-18 燃焼後モジュール No.4 表面の状態

7.3.3 各太陽電池モジュールの構成部材と燃焼挙動

各モジュールの断面を顕微鏡下で観察したところ、以下の表 7-3 に示す構造を有していた。また、各層間での接着剤、蒸着層と考えられる層は除外した。

表 7-3 各モジュールの構造

モジュール 番号	モジュール			
	No.1	No.2	No.3	No.4
製造者	京セラ（株）	シャープ（株）		ソーラーフロンティア（株）
型式	KC80S	ND-114CA	NU-122CB	SF160-S
第 1 層	ガラス	ガラス	ガラス	ガラス
第 2 層	EVA（透明） （太陽電池セル）	EVA（透明） （太陽電池セル）	EVA（透明） （太陽電池セル）	樹脂（透明）
第 3 層	EVA（白色）	EVA（透明）	EVA（透明）	ガラス （太陽電池薄膜）
第 4 層	PVF（白色）	PET（黒色）	PET（黒色）	EVA（透明）
第 5 層	アルミニウム （銀色）	PET（透明）	PET（半透明）	PET（黒色）
第 6 層	PVF（白色）	—	PET（白色）	樹脂（透明）
第 7 層	—	—	—	アルミニウム （銀色）
第 8 層	—	—	—	PET（透明）

構造部材の材質に用いた略号は以下のとおりである。

EVA：エチレン酢酸ビニル共重合体（Ethylene-vinylacetate copolymer）

PVF：ポリフッ化ビニル（Polyvinylfluoride）

PET：ポリエチレンテレフタレート（Polyethyleneterephthalate）

一般的なモジュールの構造は、図 1-3 に示すとおりである。

太陽電池セルを含む材質が封止材、封止材を外部から保護するための材質がバックシートと呼ばれている。封止材は光透過性と密着性から透明 EVA が使用されることがほとんどである。太陽電池セルを含む EVA 層とバックシートの間、もう一層 EVA 層が含まれる場合がある。この層は製造の工程上、封止材の一部として独立して製造される場合と、バックシートと一体化されて製造される場合がある。

各試料断面の顕微鏡写真を図 7-19 から図 7-22 に示す。

モジュールの構造と燃焼挙動を併せて考えると、バックシートにアルミニウム層を持っている No.1 と No.4 は、助燃剤の燃焼が終了すると消火し、モジュール裏面での独立燃焼を起こしてい

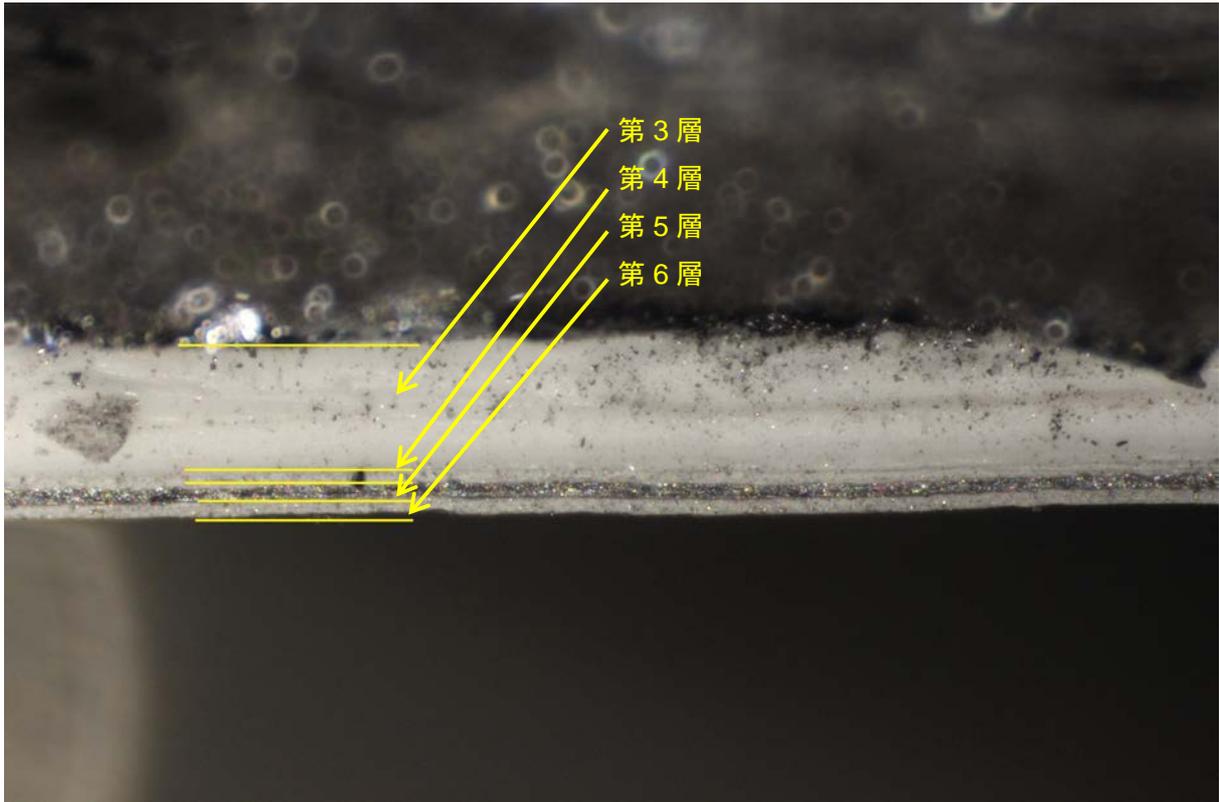


図 7-19 モジュール No.1 断面の顕微鏡写真

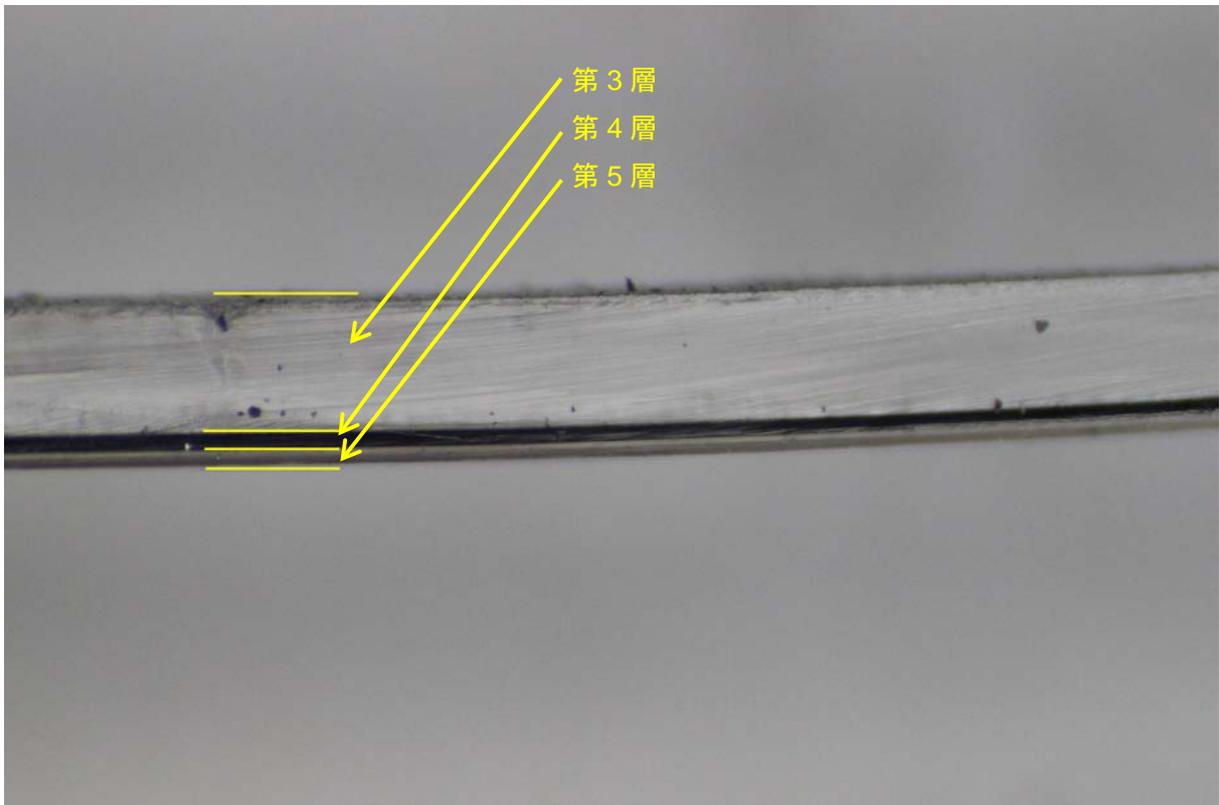


図 7-20 モジュール No.2 断面の顕微鏡写真

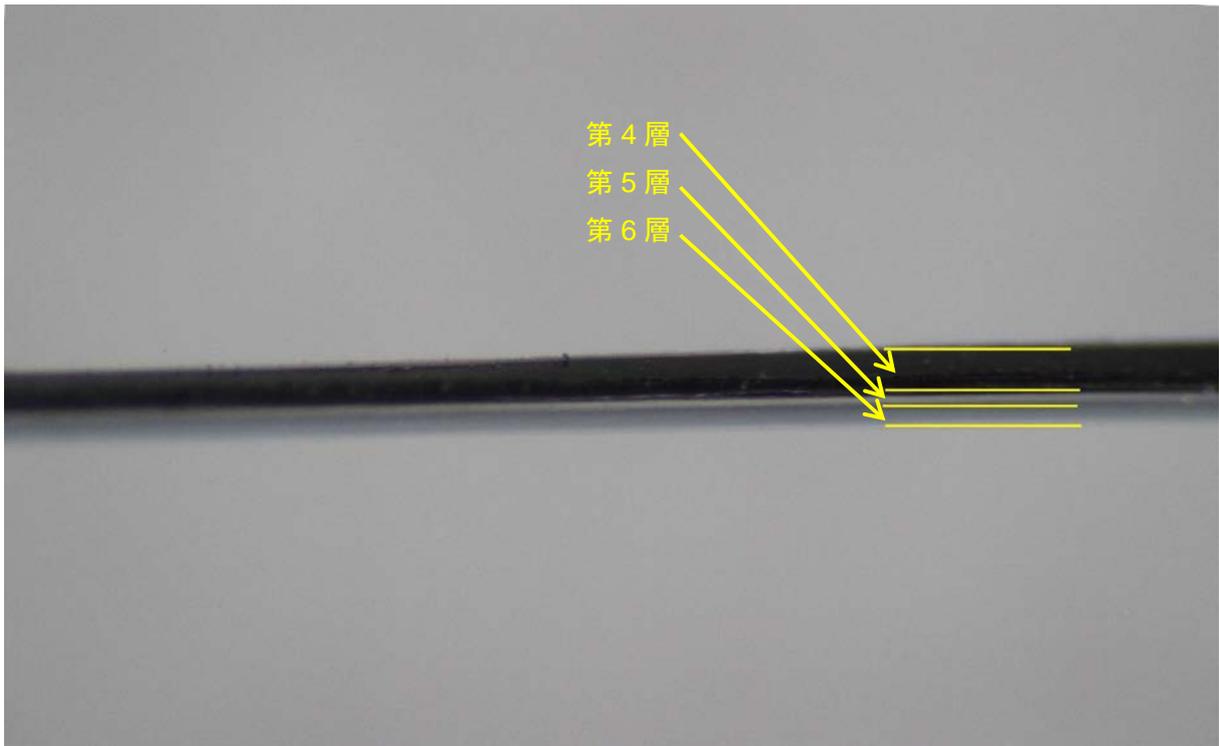


図 7-21 モジュール No.3 断面の顕微鏡写真

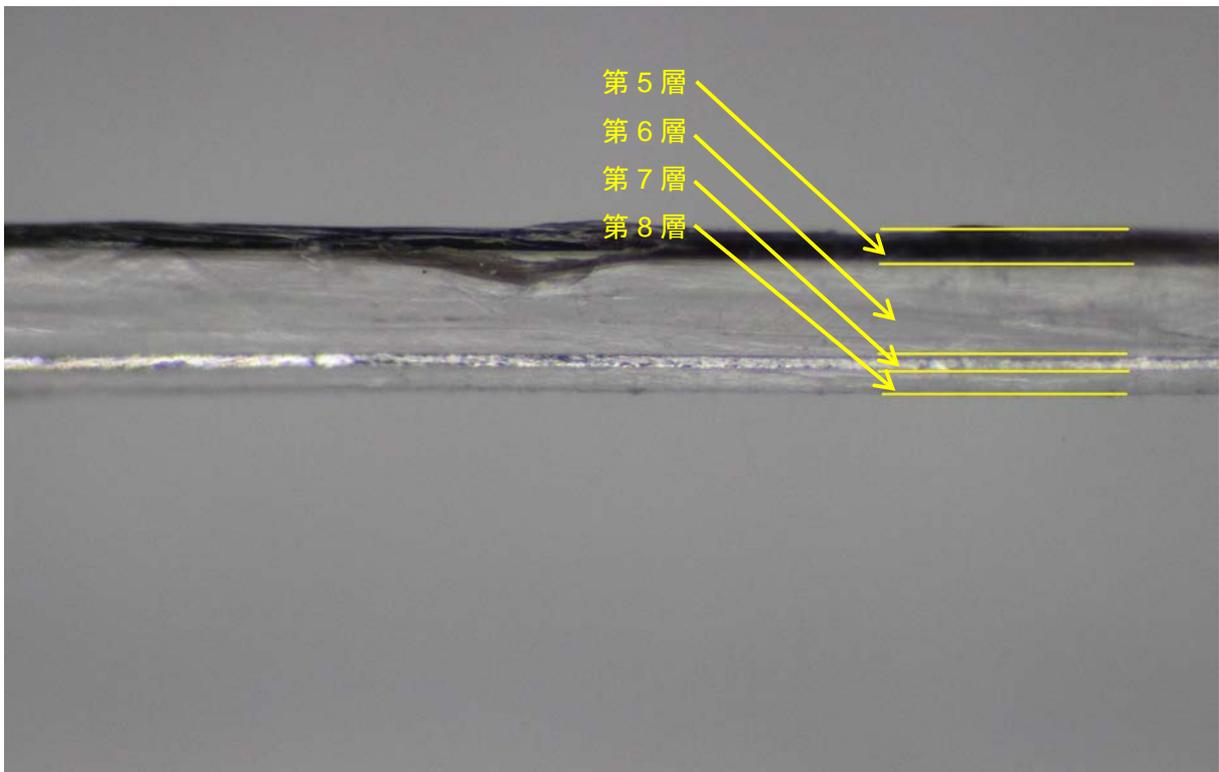


図 7-22 モジュール No.4 断面の顕微鏡写真

ない。これに対して、No.2、No.3 は、裏面が全て可燃性の樹脂で構成されているため、助燃剤の燃焼が終了しても、着火した樹脂の燃焼が続いていると考えられる。

また、No.1 のモジュールは、アルミニウム層があることと共に、難燃性である PVF が使用されているため、助燃剤の火災があるうちは樹脂層の分解が生じるが、火災が無くなると分解が止まるものと考えられる。また、No.1、No.4 の両者のモジュールは、アルミニウム層の溶解が認められないため、アルミニウムの融解に必要な熱量が与えられなかったと考えられる。裏面から与えられた熱は、表面ガラスから一部放熱され、ガラス直近の下部にある EVA 層の完全分解に至る熱量が得られず EVA の一部が残存しているものと考えられる。

No.4 のモジュールは、助燃剤の燃焼終了後も独立燃焼を起こしているが、燃焼の状態を観察するとモジュールフレームのみで燃焼しており、フレームとモジュール材質を固定しているパッキングの樹脂が燃えているものと思われる。

7.3.4 火炎曝露による破壊形態のまとめ

火炎曝露によるモジュールの燃焼形態は、構成部材の材質により異なった。

裏面の独立燃焼を起こしている No.2、No.3 のモジュールは、いずれも表面のガラスが欠落している。これは、バックシートの燃焼が太陽電池セルを包埋している EVA 層に達し、EVA 層が燃焼で欠損することから、割れた表面のガラスを保持できなくなり欠落するものと認められた。

7.4 まとめ

モジュールの破壊形態は、機械的な力による破壊と、火炎の加熱、燃焼による破壊により以下のようになった。

破壊器具を用いた機械的な力による破壊では、力が加わった点が大きく破壊し、破壊器具はモジュールを打ち抜いた。表面のガラスの一部に力が加わり破壊されることで、使用されている強化ガラスは全面に渡りクモの巣状にヒビが入った。ガラスと密着している樹脂層は破壊で剥がれることは無いため、ヒビの入ったガラスはそのまま保持された。ただし、表面から剥離すると考えられる小さいガラス片は飛散するので注意が必要である。

火炎の加熱、燃焼による破壊では、火炎がモジュールに当たり樹脂層の燃焼、あるいは熱分解が生じる熱量が与えられた部分のみ、樹脂層が欠落した。バックシートに難燃性の材料が使用されているものではモジュールの独立燃焼はせず、助燃剤の火炎の燃焼終了と共に消火した。バックシートに不燃材料の使用されていないモジュールでは、火炎の当たっている部分から上方の層に向かって燃焼が生じ、最表面のガラスまで火炎が達すると割れたガラスが保持できず、欠落する状態が見られた。この際に生じるガラス片は、強化ガラスのようにサイコロ状に割れるのではなく、一般の板ガラスのように鋭利な断面を持った比較的大きな破片となって割れる状態が認められた。火炎により燃焼したモジュールでは、高所よりこのようなガラス片が落下する恐れがあるため注意が必要である。

参考文献

- 1) ソーラーフロンティア株式会社ウェブページ：http://www.solar-frontier.com/jpn/products/commercial_modules/C009963.html (2013 年 9 月 8 日アクセス).
- 2) シャープ株式会社ウェブページ：<http://www.sharp.co.jp/sunvista/product/module/> (2013 年 9 月 8 日アクセス).

8. 太陽電池モジュール破壊時の発電特性

8.1 はじめに

太陽電池モジュール（以下、モジュール）が火災に曝露し、熱によりモジュールが破損した際の発電特性については、既に第4章、第5章に述べた通りである。消防活動においては、残火処理等のために、破壊器具によるモジュールの除去作業が考えられ、また住宅には種々のモジュールが設置されているため、破壊時にモジュールの種類によってどのような発電特性があるかを検討する必要がある。そこで、屋外においてモジュール1枚を実験的に破壊し、モジュールから出力される電圧変化を測定した。本章では、破壊時におけるモジュールの発電特性について報告する。

8.2 モジュール破壊実験

破壊したモジュールは、第7章で記載したものと同一種類で、単結晶シリコン及び CIS の2種類のモジュールを使用した。使用した単結晶シリコンモジュールは、シャープ株式会社製の NU-122CB モジュールである。CIS モジュールは、ソーラーフロンティア株式会社製の SF-160S モジュールである。詳細な仕様については、表 7-1 を参照されたい。

破壊するモジュールと破壊しないモジュールの出力電圧を比較するため、図 7-2 のように破壊するモジュールの隣にブロックを置いて、破壊しない別の同型モジュールをブロック上に設置した。モジュールの出力電圧変化を測定するために、モジュールの出力端子に負荷抵抗に見立てた抵抗器を取り付けた。単結晶シリコンモジュールは 2Ω 、CIS モジュールには 50Ω をそれぞれ取り付け、抵抗器の両端子をデータロガーに接続した。照度の経時変化は、照度計（コニカミノルタセンシング株式会社、T-10W_LA）で測定した。

8.2.1 単結晶シリコンモジュール

8.2.1.1 破壊方法

実験方法及び実施日は、第7章と同様である。破壊器具としては、図 7-1 に記載した万能斧①を使用した。万能斧①を使って、現役の消防隊員によって、モジュール表面のガラス面から裏面まで、先端部が貫通するようにして破壊した。

破壊には、同じモジュールを使用し、破壊場所は図 7-2 のように計 6 か所である。このモジュールは、3つのクラスタから構成されている。1つのクラスタにつき2か所貫通破壊するように破壊器具をモジュールに打ち付けた。また、破壊後、モジュール破壊部分にバケツで水道水を流した。これらによりモジュール破壊時、及び散水時のモジュール発電状況を調べた。

8.2.1.2 破壊時の単結晶シリコンモジュール出力電圧

モジュールの出力電圧は、日照により変化する。破壊実験時の陰の影響をなくした発電状況を見るため、縦軸に壊したモジュールと壊さないモジュールの電圧比をとって、破壊時の電圧比を時系列に示したものが図 8-1 である。モジュールをセル間の配列を切るように破壊していくと、出力電圧比が減少していった。尚、図 8-1 に示す打撃は破壊器具の先端部を使用したもので、その後は斧部を使用して図 7-2②④⑤の損傷部を拡大した。破壊後に、モジュールに2回散水を行ったが、散水時と電圧上昇時期はずれており、散水による影響は確認できなかった。

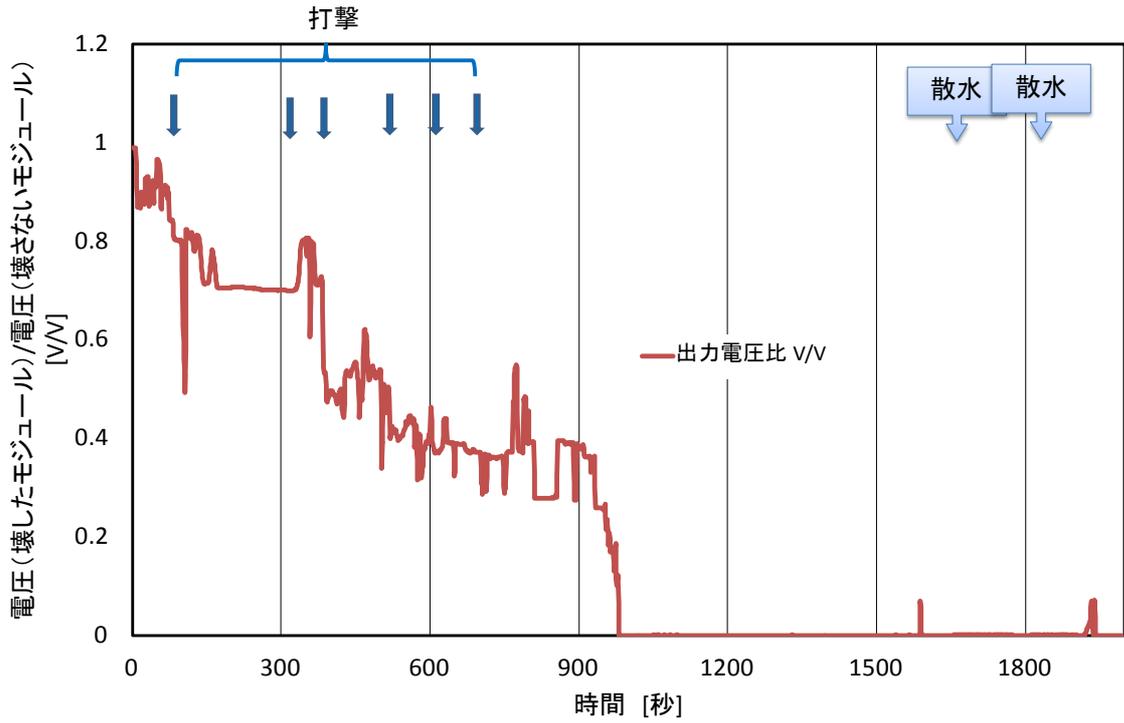


図 8-1 単結晶シリコンモジュール破壊時の出力電圧比

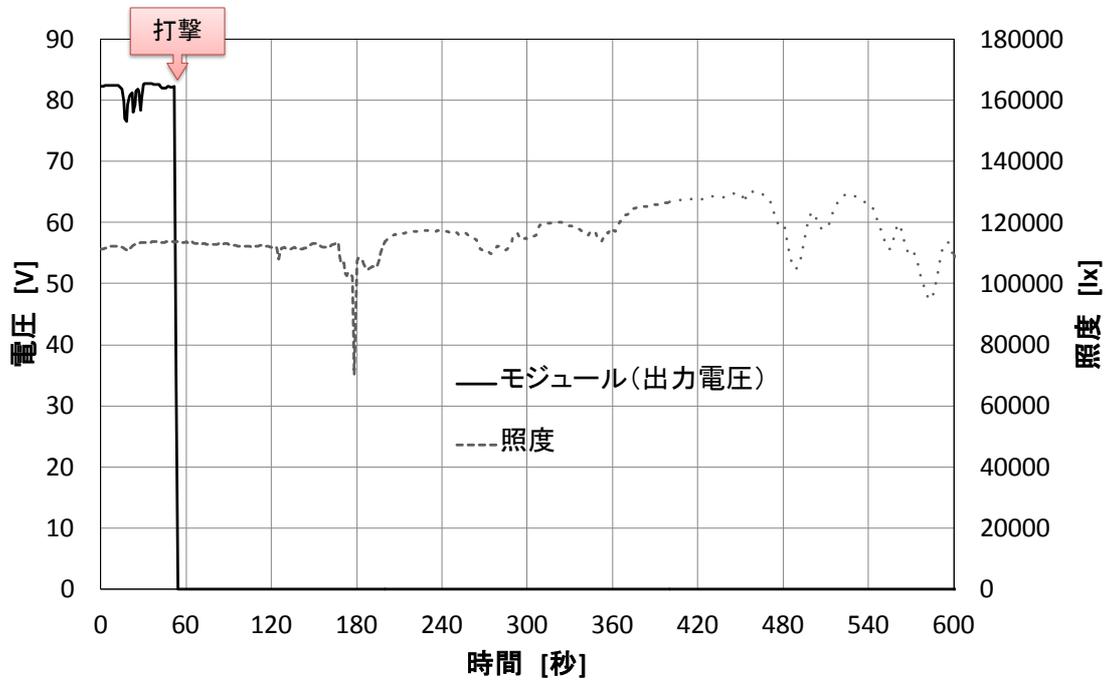


図 8-2 万能斧①による CIS モジュール破壊時の電圧

8.2.2 CIS モジュール

8.2.2.1 破壊実験

実験方法及び実施日は、第 7 章と同様である。単結晶シリコンモジュールと同じように、CIS モジュールの表面から裏面まで、万能斧①の先端部が貫通するように打ち付けた。モジュールの裏面から観察すると、破壊器具の先端が裏面から突き出ているのが確認できた。

8.2.2.2 破壊時の CIS モジュール出力電圧

実験時の太陽光の照度は、70000～130000lx で、CIS モジュール 1 枚の出力電圧は最大で約 82V だった。CIS モジュールを破壊した時の出力電圧は、図 8-2 に示すように打撃した瞬間から 0V となった。実験で使用した CIS モジュールは、破壊器具の一撃で、先端部が表面から裏面まで貫通すると、直ちに発電が停止することが確認された。

8.3 まとめ

モジュール破壊時の発電特性把握のため、屋外において単結晶シリコンモジュール及び CIS モジュール各 1 枚を実験的に破壊し、その時のモジュールによる電圧変化を測定した。

単結晶シリコンモジュールでは、モジュールの数か所を太陽電池セル間の配列を切るように破壊器具で破壊し続けると、発生電圧も破壊に伴って減少し、最後は発電が止まった。一方 CIS モジュールでは、破壊器具がモジュールを貫通した時点で発電が止まった。CIS モジュールに比べて、単結晶シリコンモジュールの出力を抑えるには、すべてのクラスタの破壊が必要になると考える。

9. 太陽電池モジュール燃焼時の生成ガス

9.1 はじめに

太陽光発電システムは発電効率を向上させるための技術的進歩から一般住宅にも普及が進んでいるが、このシステムが火炎を受けた時の燃焼生成ガスの危険性等に関しては統一的な知見がない。本章では、太陽電池モジュール（以下、モジュール）が火炎を受けた場合に構成部材から燃焼により生成するガスを中心に、示差熱重量分析－赤外分光分析装置（以下、TG-IR）、及び質量分析装置（以下、MS）を用いて分析したので報告する。

9.2 試料

9.2.1 使用した太陽電池モジュール

使用したモジュールは、第4章（モジュールA）及び第5章（モジュールB）の燃焼実験に用いた2種類のモジュールであり、焼け残った部分を本実験に使用した。メーカー及び型式を表9-1に示す。

表 9-1 各モジュールの仕様

	モジュール	
	A	B
製造者	京セラ（株）	シャープ(株)
型式	KC80S	ND-114CA
寸法 W(mm)×H(mm)	979×656	990×856
公称最大出力(W)	80	114
公称最大出力動作電圧(V)	16.9	15.2
公称最大出力動作電流(A)	4.73	7.52
最大システム電圧(V)	600	600

9.2.2 太陽電池モジュールの構造

モジュールにおいて、可燃性の材質はその構造から封止材とバックシートに使用されている高分子化合物である。封止材の材質は、エチレン－酢酸ビニル共重合体が一般に用いられているが、バックシートの材質は多種にわたっており、使用されている材質によって燃焼状態や発生ガスが異なる。モジュールの構造を顕微鏡下で観察し、使用されている各構成部材の材質を赤外分光光度計により測定して特定した。各モジュールの構造と、その材質及び色を表9-2に示す。表中に使用した略語は次のとおりである。

EVA：エチレン－酢酸ビニル共重合体（Ethylene-vinylacetate copolymer）

PVF：ポリフッ化ビニル（Polyvinylfluoride）

PET：ポリエチレンテレフタレート（Polyethyleneterephthalate）

表 9-2 各モジュールの構成

	モジュール	
	A	B
第1層	ガラス (透明)	ガラス (透明)
第2層	EVA (透明) (シリコン太陽電池セルを含む)	EVA (透明) (シリコン太陽電池セルを含む)
第3層	EVA (白色)	EVA (透明)
第4層	PVF (白色)	PET (黒色)
第5層	アルミニウム (銀色)	PET (透明)
第6層	PVF (白色)	—

9.3 実験経過

9.3.1 モジュール構成部材の加熱分解実験

構成部材の加熱分解挙動と、その際に生じるガスを解析するために、構成部材単体での生成ガス測定を行い、更にそれらの部材を組み合わせて作成されているモジュール全体について火炎による燃焼実験を行った。

モジュール A 及び B の焼け残っている部分を本体から一部採取し、それぞれ材質の異なる層（モジュール A の第3層及び第6層、モジュール B の第4層及び第5層）を顕微鏡下で分離して切り出し、TG-IR により測定した。ただし、モジュール B の第4層、第5層については、接着が強いことと薄いため分離できず、2層同時に測定した。測定機器及び測定条件は表 9-3 のとおりである。

熱重量分析（以下 TG）は、試料を一定の速度で加熱し、温度に対応した試料重量変化を測定するものである。一般に高分子化合物は、化合物毎に特有の一定温度で分解し、重量が減少する。分解生成物は低分子量のガスであり測定装置外へ排出される。即ち測定対象物が、何度で加熱分解されるかが分かる。示差熱分析（以下、DTA）は、試料を一定の速度で加熱し、その際の試料の吸発熱をとらえることができる。1つの試料に対し、この2つの測定を同時に行うことで、試料の重量変化が吸熱反応であるか発熱反応であるかということが分かる。重量減少時に生成する低分子量のガスを赤外分光光度計（以下、IR）に導入することで、分解生成物の同定を行い、試料がどのようなメカニズムにより分解してガスが生成しているのかを検討できる利点がある。

表 9-3 測定機器及び条件 (TG-IR)

TG/DTA	
機器	(株) 日立ハイテクサイエンス社製 示差熱重量同時測定装置 TG/DTA/7200
測定温度範囲	室温～600℃
昇温速度	20℃/min.
測定雰囲気・流量	窒素、空気 (100mL/min.)
試料重量	1.22～3.30mg
対照試料	アルミナ (4.08mg)
IR	
機器	サーモフィッシャーサイエンティフィック (株) 社製 フーリエ変換赤外分光光度計 iS10 TGA アクセサリ付
検出器	TGS 検出器
スキャン回数	32 回
スペクトル取得間隔	41 秒

9.3.2 太陽電池モジュールの燃焼実験

モジュール A 本体及びモジュール B の一部切り取ったものを消防研究センター・ルームカロリ試験室において燃焼させ、その際に生成するガスを MS により採取し測定した。燃焼させている様子を図 9-1、図 9-2 に、使用した装置及び測定条件を表 9-4 に示す。モジュールの燃焼はルームカロリ試験室で行ったため、可動型である MS のみを生成ガス測定に使用した。質量分析装置は、いろいろな検出法が存在するが、今回使用した機器は、水銀やキセノンを用いた弱いイオン化法を採用しており、主に機器に導入された化合物の分子イオンを生じさせ、検出するものである。



図 9-1 モジュール A を燃焼させている状態
(矢印円内はガス吸引口)



図 9-2 モジュール B を燃焼させている状態
(矢印円内はガス吸引口)

測定質量数は、表 9-2 に示した材質から、燃焼ガスとして発生する可能性のある物質を推定し、選択イオンモニタリング法で測定した。また、加熱源としてブンゼンバーナーによる都市ガスの火炎を使用した。

同時に、モジュール表面温度を赤外線サーモグラフィ装置（日本アビオニクス株式会社製、TVS-500）により放射率 1.00 として測定した。

表 9-4 使用機器及び測定条件 (MS)

機器	V&F 社製 ソフトイオン化質量分析装置 Air Sense	
イオン化法	イオン分子反応	
一次イオン	Hg ⁺ , Xe ⁺	
測定質量数		
質量数	可能性のある化合物	
	化合物名	構造
16	メタン	CH ₄
26	アセチレン	C ₂ H ₂
42	プロピレン	C ₃ H ₆
54	ブタジエン	C ₄ H ₆
58	プロパナール	C ₃ H ₆ O
60	酢酸	C ₂ H ₄ O ₂
72	ブタナール	C ₄ H ₈ O
	ペンタン	C ₅ H ₁₂
78	ベンゼン	C ₆ H ₆
86	ペンタナール	C ₅ H ₁₀ O
	ヘキサン	C ₆ H ₁₄
92	トルエン	C ₇ H ₈
100	ヘキサナール	C ₆ H ₁₂ O
	ヘプタン	C ₇ H ₁₆
104	スチレン	C ₈ H ₈
122	安息香酸	C ₇ H ₆ O ₂

9.4 結果と考察

9.4.1 TG-IR による構成部材単体の測定結果

9.4.1.1 PVF の窒素及び空気中での加熱分解

モジュール A 第 6 層の PVF について、窒素雰囲気下で測定した示差熱-熱重量曲線（以下、TG-DTA 曲線）を図 9-3 に示す。

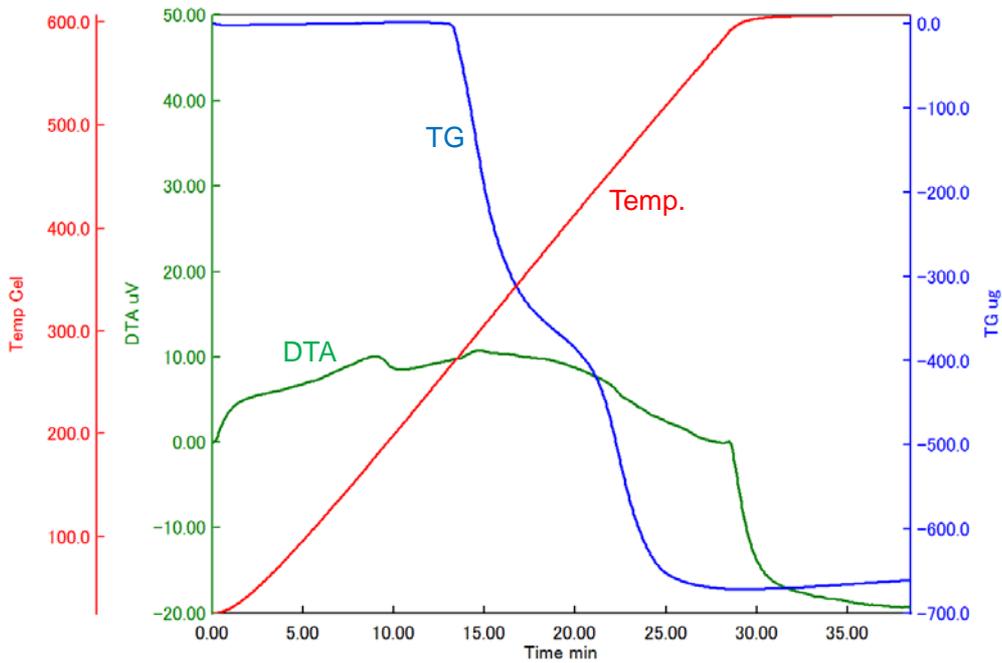


図 9-3 TG-DTA 曲線（窒素中モジュール A 第 6 層）

窒素雰囲気下では、300°C（13 分）から第 1 段階の減量が始まり、この減量が穏やかになる 400°C（20 分）から第 2 段階の減量が続いて起こっている。一方、試料の熱の出入りを示す DTA 曲線は、穏やかな変化はあるが、顕著な吸発熱のピークは認められない。TG-DTA 曲線と同時に測定している赤外吸収スペクトル（以下、IR スペクトル）で、400 cm^{-1} から 4000 cm^{-1} の範囲での総吸収強度を時間に対してプロットしたものを図 9-4 に示す。赤外吸収を持つ化合物は、13 分より発生し、16 分をピークとしていったん減少する。その後、21 分から再び増加し、24 分をピークとして減少し、その後赤外吸収を持つ化合物の生成はない。この増減は、TG 曲線の第 1 段階減量、第 2 段階減量とよく一致している。この両者から、窒素中で PVF は 2 段階のメカニズムを経て最終的に分解することを示している。

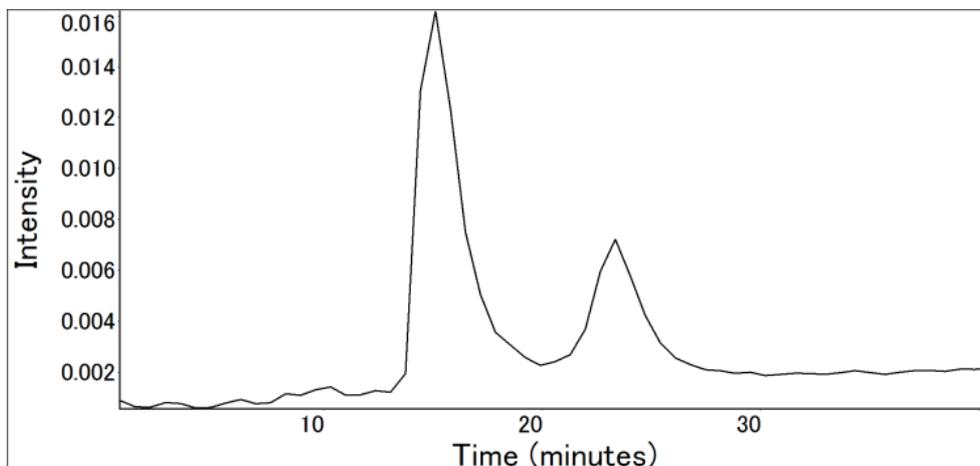


図 9-4 総赤外吸収スペクトルの時間変化（窒素中モジュール A 第 6 層）

総吸収強度プロットの2つのピーク位置でのIRスペクトルを図9-5に示す。16分のピーク位置のIRスペクトルは、 3500cm^{-1} から 4000cm^{-1} に現れている一連の吸収からフッ化水素(HF)と、 1030cm^{-1} 付近に現れている四フッ化ケイ素(SiF_4)の混合スペクトルであり、24分のピーク位置のIRスペクトルは、フッ化水素と 2800cm^{-1} から 3000cm^{-1} 、及び 1400cm^{-1} 付近のC-H吸収から炭化水素の混合スペクトルと認められた。また、共に 2400cm^{-1} 付近に CO_2 の吸収が認められるが、 CO_2 は分子吸光係数が大きく、空気中の CO_2 を検出してしまうことが多いため、評価の対象からは除外した。

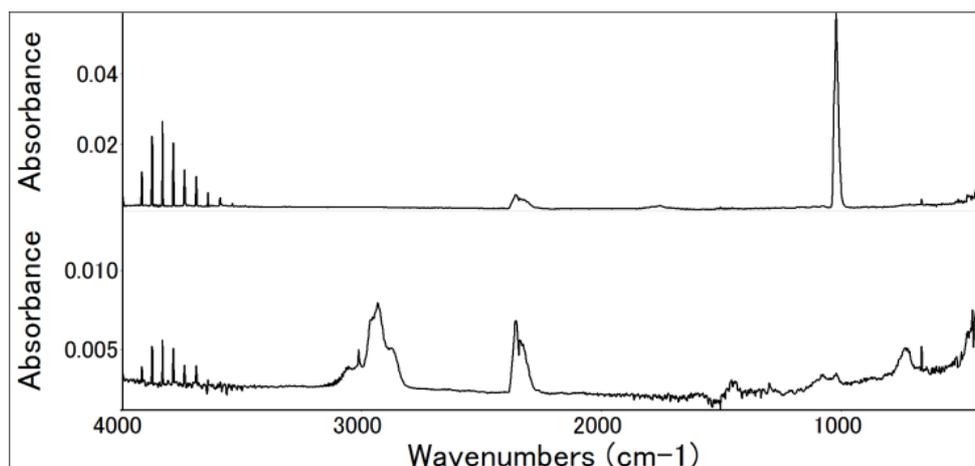


図9-5 16分のピークでのIRスペクトル(上段)と24分のピークでのIRスペクトル(下段)

総測定時間中の各波数の吸収強度を、時間、波数、強度で3次元表示したものを図9-6に示す。測定時間内では13分から20分にかけてのHF及び SiF_4 の強い吸収と20分から27分にかけての炭化水素の吸収のみしか顕著な吸収は見られない。

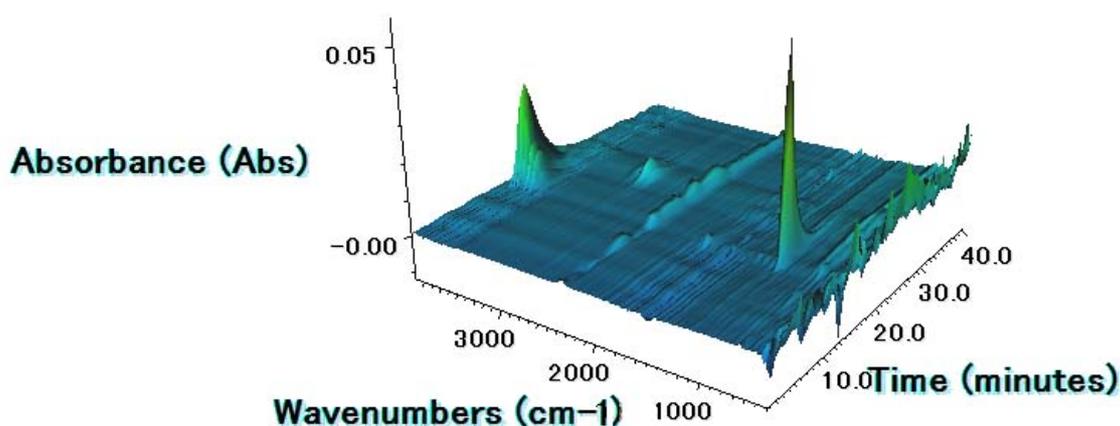


図9-6 測定時間に応じた各波数吸収とその強度(窒素中モジュールA第6層)

これらから、窒素中でのPVFの分解挙動は、温度上昇と共に置換基の脱離、直鎖の切断と図9-7に示すように進むことが確認された。この分解様式は、同一のモノマーを重合させたビニル化合物のホモポリマーで報告されている様式と同様である。

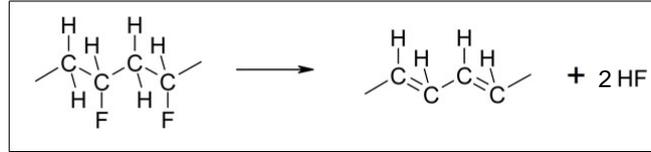


図 9-7 PVF の分解挙動

次に、モジュール A 第 6 層の PVF を空気雰囲気下で測定した TG-DTA 曲線を図 9-8 に示す。300℃からの第 1 段階減量、400℃からの第 2 段階減量は窒素雰囲気中と同様の挙動を示している。

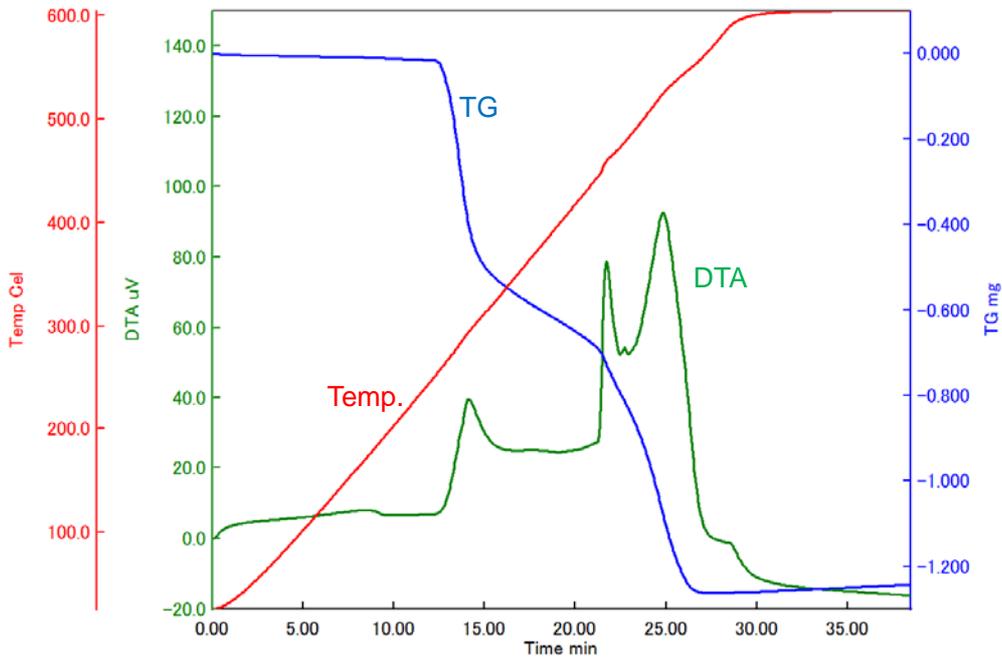


図 9-8 TG-DTA 曲線 (空气中モジュール A 第 6 層)

IR の総吸収強度のプロットを図 9-9 に示す。窒素雰囲気下と同様に 2 つのピークが認められ、それぞれのピークは TG 曲線の第 1 段階減量、第 2 段階減量に対応している。また、各減量に対応して、DTA 曲線に強い発熱ピークが認められ、空气中での燃焼分解を起こしていると考えられる。

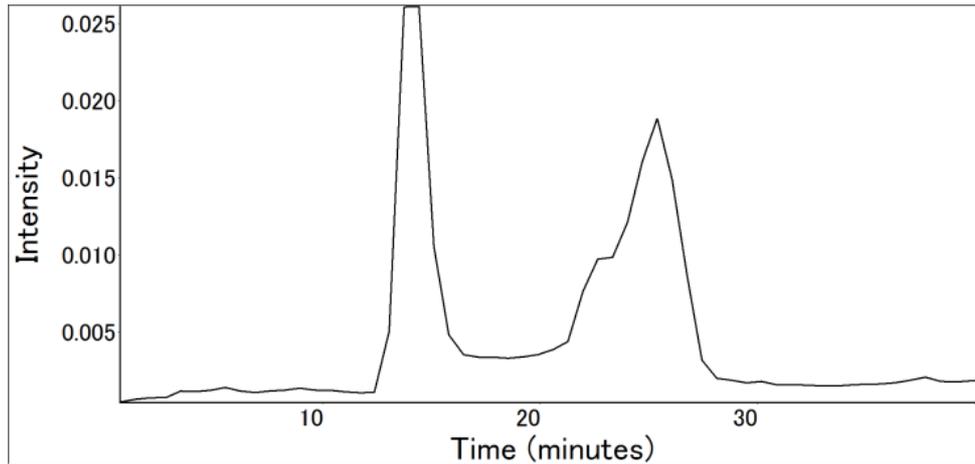


図 9-9 総赤外吸収スペクトルの時間変化（空气中モジュール A 第 6 層）

2つのピーク位置での赤外吸収スペクトルを図 9-10 に示す。15 分のピークは窒素雰囲気下と同様に HF と SiF₄ のスペクトルであるが、25 分のピークは窒素雰囲気下で見られた炭化水素の吸収が認められず、CO₂ の吸収のみであった。総測定時間中の各波数の吸収強度を、時間、波数、強度で 3 次元表示したものを図 9-11 に示す。測定時間内では 13 分から 16 分にかけての HF と SiF₄ の強い吸収と 20 分から 28 分にかけての二酸化炭素の吸収のみしか顕著な吸収は見られない。即ち、HF 脱離後の主鎖は、空气中的酸素による酸化分解又は分解と同時に酸化が起こっており、CO₂ に変化していると考えられる。

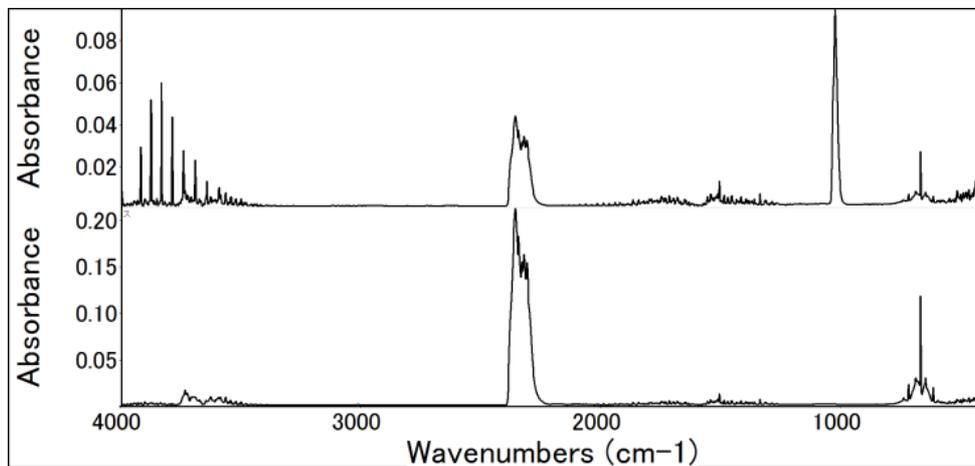


図 9-10 15 分のピークでの IR スペクトル（上段）と 25 分のピークでの IR スペクトル（下段）

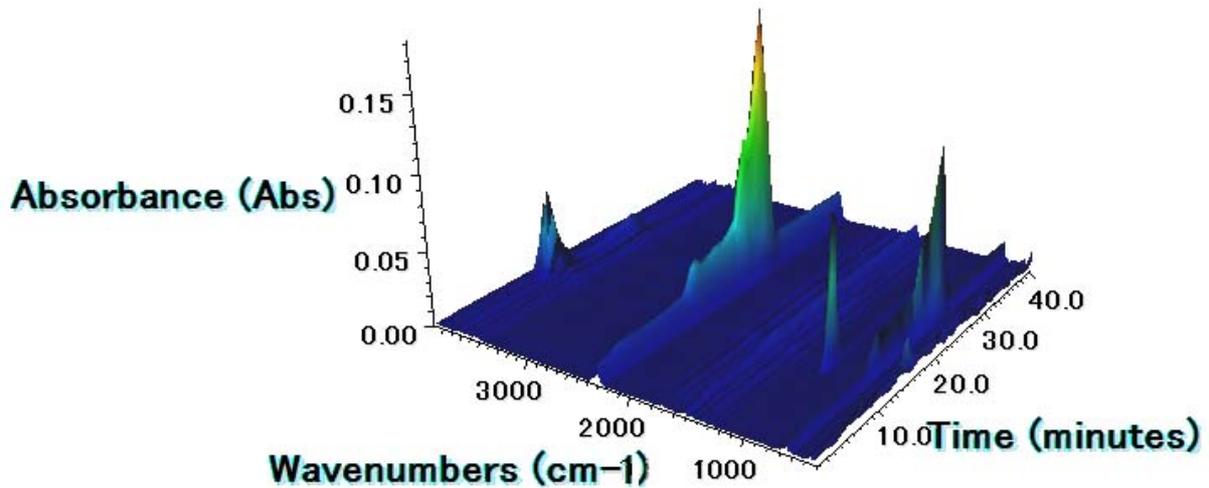


図 9-11 測定時間に応じた各波数吸収とその強度（空气中モジュール A 第 6 層）

これより PVF は、火災時の火炎中においては 300℃で HF の生成が予想され、HF 脱離後は、酸化分解又は分解と同時の酸化により、CO₂ の生成が予想される。

SiF₄ は、PVF からは生成しないが、PVF 中に充填剤としてケイ素を含む化合物が含有されているか、太陽電池セルに用いられているケイ素が混入した可能性がある。

9.4.1.2 EVA の窒素及び空気中での加熱分解

モジュール A 第 3 層の EVA について、窒素雰囲気下で測定した TG-DTA 曲線を図 9-12 に示す。

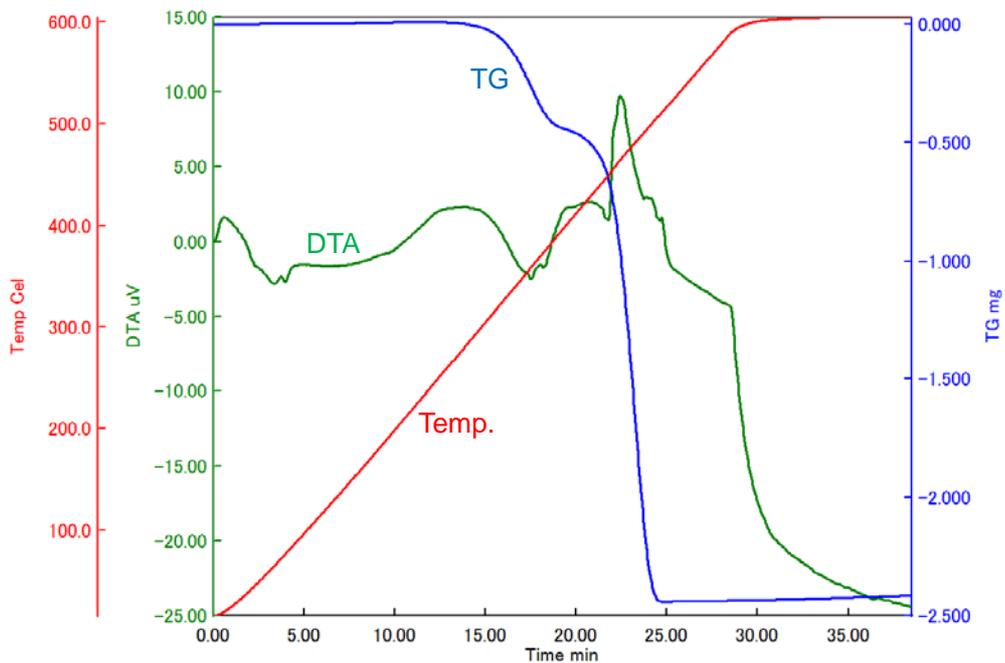


図 9-12 TG-DTA 曲線（窒素中モジュール A 第 3 層）

窒素雰囲気下では、300℃（13 分）から第 1 段階の減量が始まり、この減量が穏やかになる

350°C (16分) から第2段階の減量が続いて起こっている。双方の減量において DTA 曲線は弱い発熱を示しているが、発熱量は小さい。IR の総吸収強度をプロットしたものを図 9-13 に示す。赤外吸収を持つ化合物は、15 分より発生し、18 分をピークとしていったん減少する。その後、21 分から再び増加し、24 分をピークとして減少し、その後赤外吸収を持つ化合物の生成はない。この増減は、TG 曲線の第 1 段階減量、第 2 段階減量とよく一致している。この両者から、窒素中で EVA は 2 段階のメカニズムを経て最終的に分解することを示している。

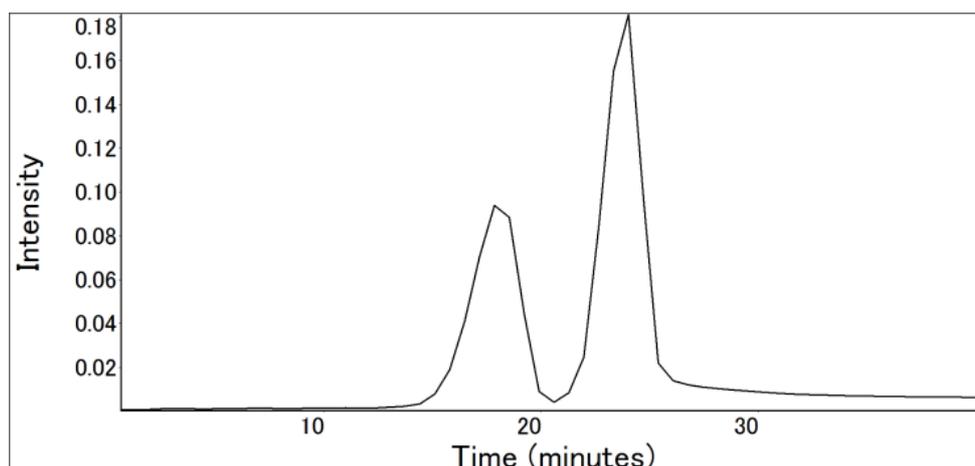


図 9-13 総赤外吸収スペクトルの時間変化 (窒素中モジュール A 第 3 層)

総吸収強度プロットの 2 つのピーク位置での IR スペクトルを図 9-14 に示す。18 分のピーク位置の IR スペクトルは、 3500cm^{-1} 付近の O-H、 1800cm^{-1} 付近の C=O、 1180cm^{-1} の C-O 等の各吸収から酢酸であり、25 分のピーク位置の IR スペクトルは炭化水素のスペクトルと認められた。

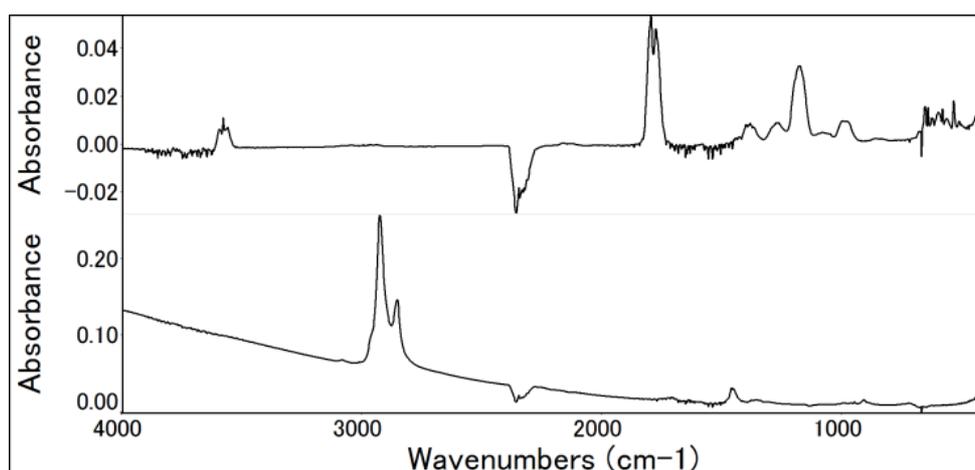


図 9-14 18 分のピークでの IR スペクトル (上段) と
25 分のピークでの IR スペクトル (下段)

総測定時間中の各波数の吸収強度を、時間、波数、強度で 3 次元表示したものを図 9-15 に示す。測定時間内では 18 分から 20 分にかけての酢酸の吸収と 21 分から 25 分にかけての炭化水素の吸収のみしか顕著な吸収は見られない。

これらから、窒素中での EVA の分解挙動は、PVF と同様に温度上昇と共に置換基の脱離、直鎖の切断と進むことが確認された¹⁾。

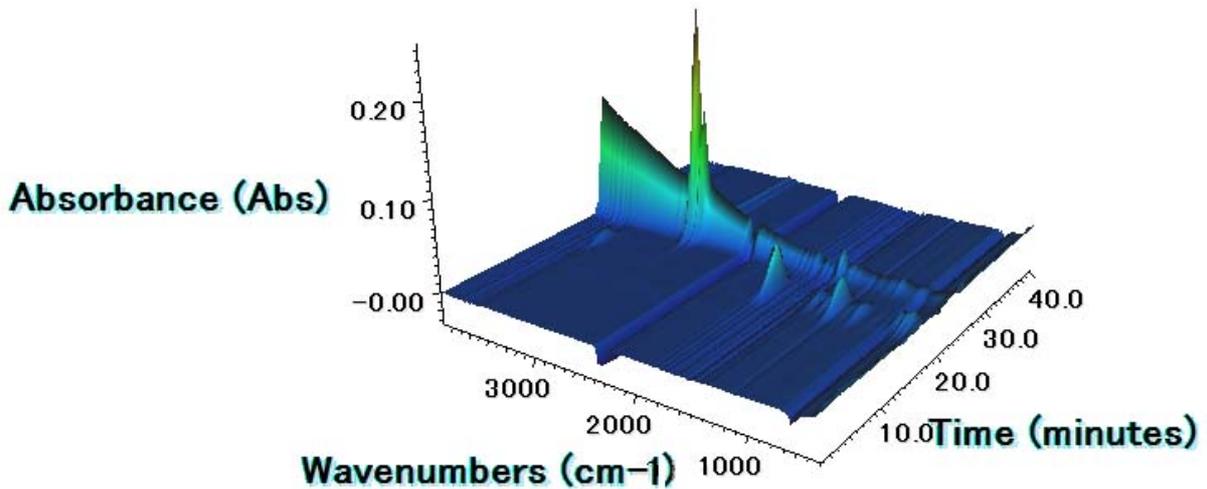


図 9-15 測定時間に応じた各波数吸収とその強度（窒素中モジュール A 第 3 層）

次に、モジュール A 第 3 層の EVA を空気雰囲気下で測定した TG-DTA 曲線を図 9-16 に示す。

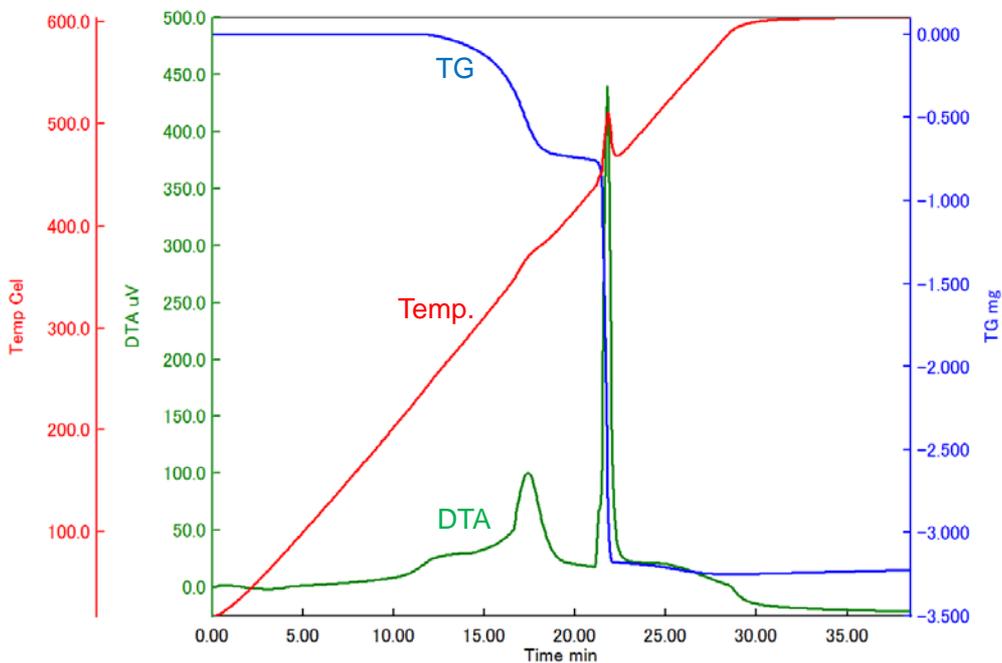


図 9-16 TG-DTA 曲線（空气中モジュール A 第 3 層）

300°Cからの第 1 段階減量、350°Cからの第 2 段階減量は窒素雰囲気中と同様の挙動を示している。双方の減量共に、DTA 曲線は強い発熱を示しており、2 つの減量は共に空気中の酸素による燃焼分解を起こしていると考えられる。

IR の総吸収強度のプロットを図 9-17 に示す。窒素雰囲気下と同様に 2 つのピークが認められ、

それぞれのピークは TG 曲線の第 1 段減量、第 2 段減量に対応している。

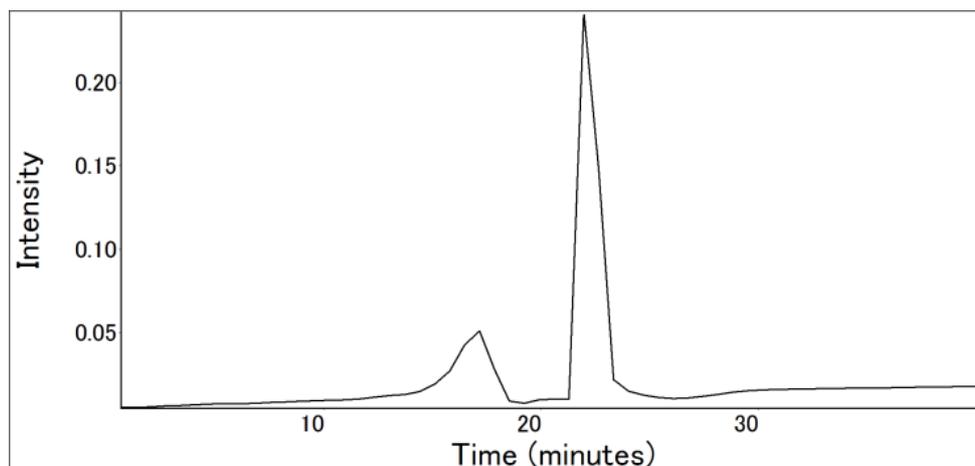


図 9-17 総赤外吸収スペクトルの時間変化（空气中モジュール A 第 3 層）

2 つのピークでの赤外吸収スペクトルを図 9-18 に示す。17 分のピークは酢酸と CO_2 の混合したスペクトルであり、22 分のピークは炭化水素鎖にカルボニルの吸収が認められ、アルデヒドのスペクトルと考えられた。また、 CO_2 の強い吸収も同時に認められた。

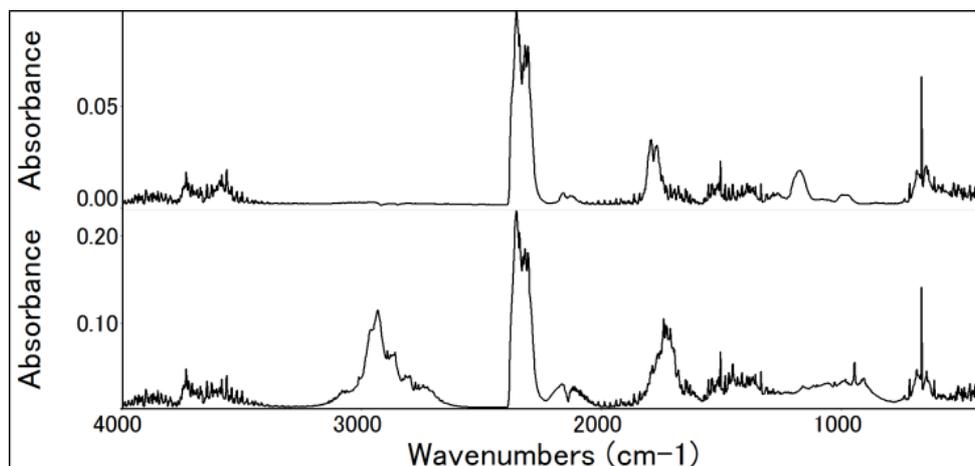


図 9-18 17 分のピークでの IR スペクトル（上段）と
22 分のピークでの IR スペクトル（下段）

総測定時間中の各波数の吸収強度を、時間、波数、強度で 3 次元表示したものを図 9-19 に示す。測定時間内では 15 分から 20 分にかけての酢酸、 CO_2 の強い吸収と 21 分から 23 分にかけてのアルデヒドと二酸化炭素の吸収のみしか顕著な吸収は見られない。即ち、加熱と同時に酢酸の脱離が起こるが、同時に酸化分解又は酢酸の酸化が生じ、脱離後の主鎖も同様に、酸化分解又は分解と同時に酸化が起こっており、アルデヒドと CO_2 に変化していると考えられる。

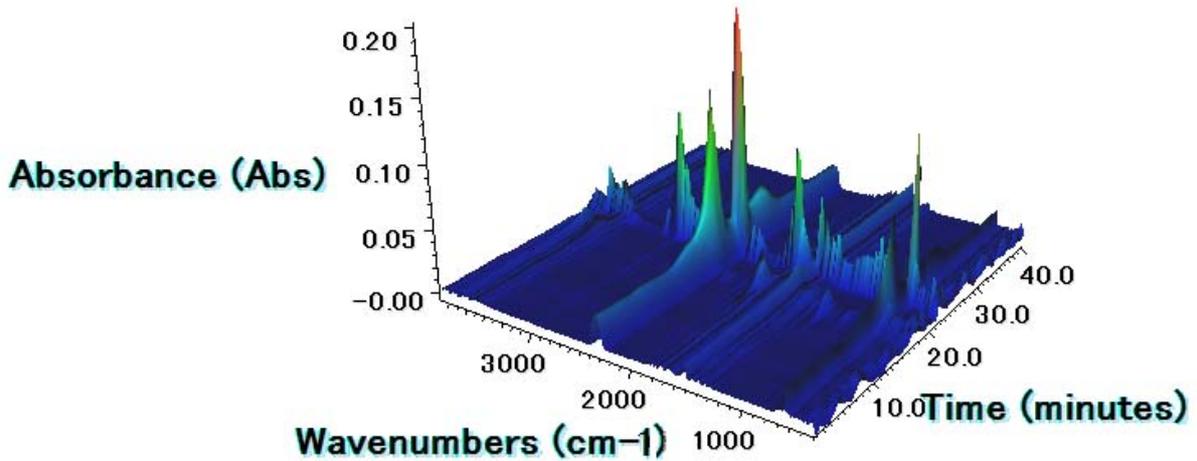


図 9-19 測定時間に応じた各波数吸収とその強度（空气中モジュール A 第 3 層）

これより EVA は、火災時の火炎中においては 300°C で酢酸の生成が予想され、酢酸脱離後は、酸化分解又は分解と同時の酸化によりアルデヒドが生じることが予想され、酢酸の脱離と同時に CO₂ が生成することが予想される。

9.4.1.3 PET の窒素及び空气中での加熱分解

モジュール B 第 4 層、第 5 層の PET について、窒素雰囲気下で測定した TG-DTA 曲線を図 9-20 に示す。

窒素雰囲気下では、350°C（17 分）から減量が始まり、500°C（25 分）まで 1 段階の減量が起きている。DTA 曲線は減量時に弱い発熱を示している。

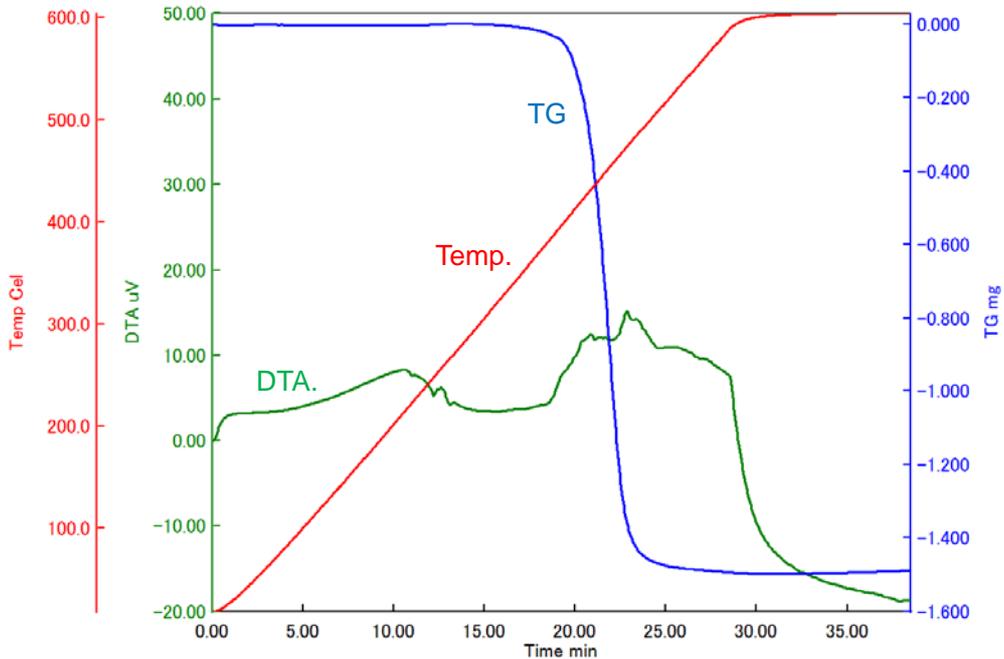


図 9-20 TG-DTA 曲線（窒素中モジュール B 第 4 層、第 5 層）

TG-DTA 曲線と同時に測定している IR の総吸収強度をプロットしたものを図 9-21 に示す。赤

外吸収を持つ化合物は、20分より発生し、23分をピークとして減少し、35分程度まで弱く出続ける。この増減は、TG 曲線の減量とよく一致している。この両者から、窒素中で PET は 1 段階のメカニズムを経て最終的に分解することを示している。

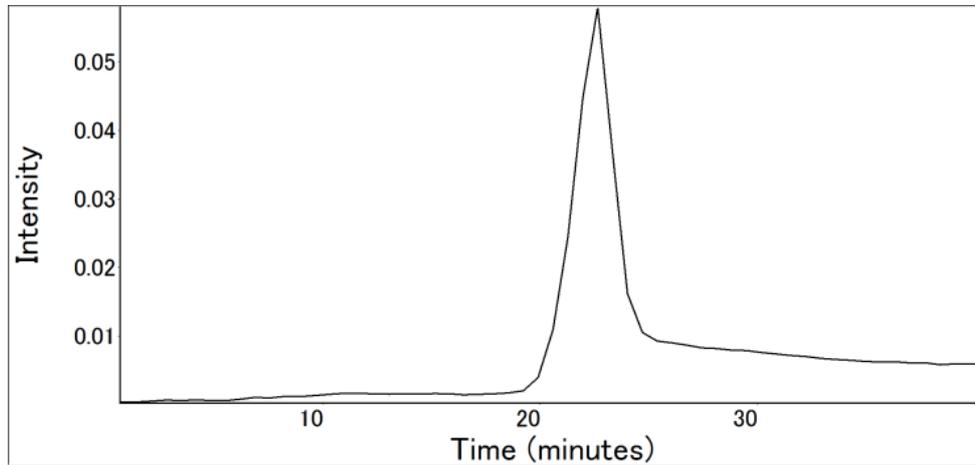


図 9-21 総赤外吸収スペクトルの時間変化（窒素中モジュール B 第 4 層、第 5 層）

総吸収強度プロットのピーク位置での IR スペクトルを図 9-22 に示す。ピーク位置の IR スペクトルは、カルボニル化合物のスペクトルであるが、同定までは至らなかった。

総測定時間中の各波数の吸収強度を、時間、波数、強度で 3 次元表示したものを図 9-23 に示す。

これらから、窒素中での PET の分解挙動は、PVF や EVA とは異なり、温度上昇と共に主鎖の切断が進行することが確認された。

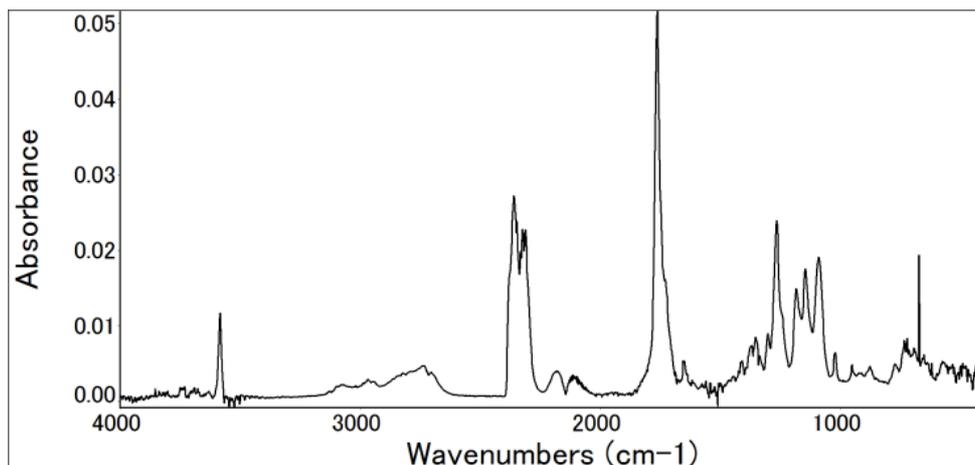


図 9-22 約 23 分のピークでの IR スペクトル

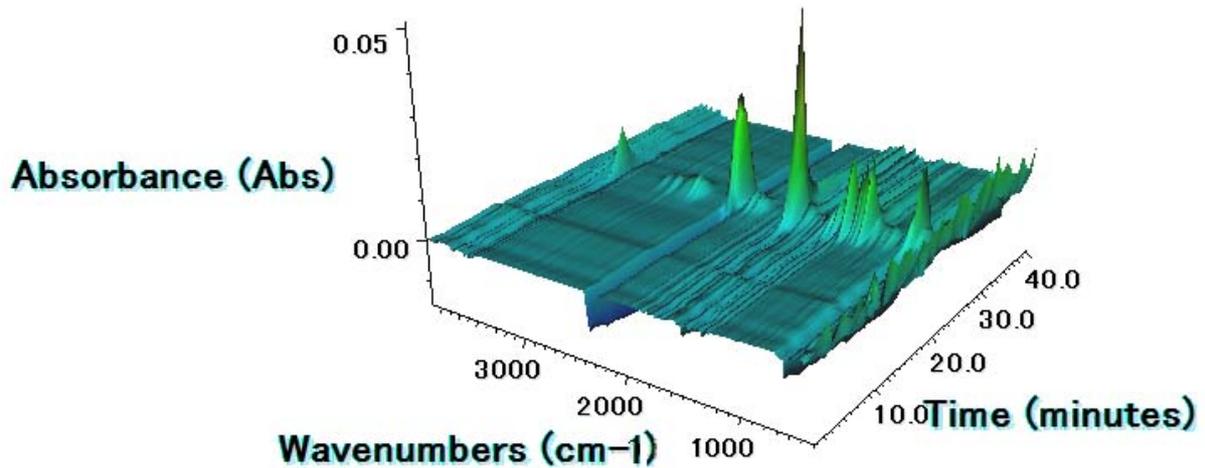


図 9-23 測定時間に応じた各波数吸収とその強度（窒素中モジュール B 第 4 層、第 5 層）

次に、モジュール B 第 4 層、第 5 層の PET を空気雰囲気下で測定した TG-DTA 曲線を図 9-24 に示す。

分解開始温度は窒素中とほぼ同じ 350°C から開始しているが、500°C からの第 2 段階減量が生じている。DTA 曲線は、双方の減量共に強い発熱を示しており、空気中の酸素による燃焼分解を起こしていると考えられる。

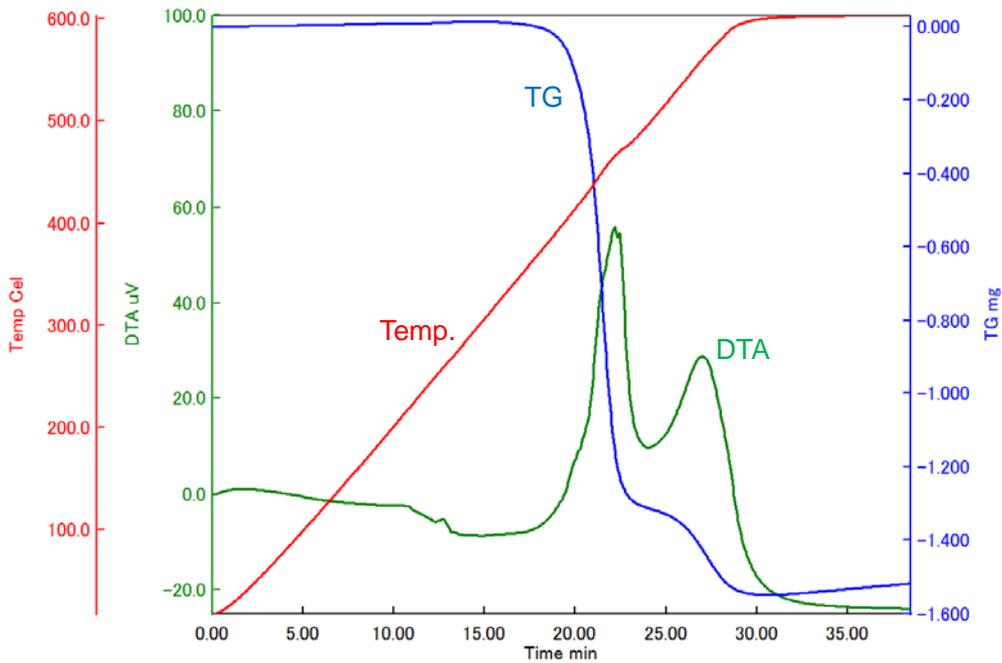


図 9-24 TG-DTA 曲線（空气中モジュール B 第 4 層、第 5 層）

IR の総吸収強度のプロットを図 9-25 に示す。窒素雰囲気下と異なり 2 つのピークが認められ、それぞれのピークは TG 曲線の第 1 段階減量、第 2 段階減量に対応している。2 つのピークでの赤外吸収スペクトルを図 9-26 に示す。22 分のピークは窒素中での分解生成物に CO_2 がより強く混合

したスペクトルであり、28分のピークはほとんどCO₂のスペクトルである。

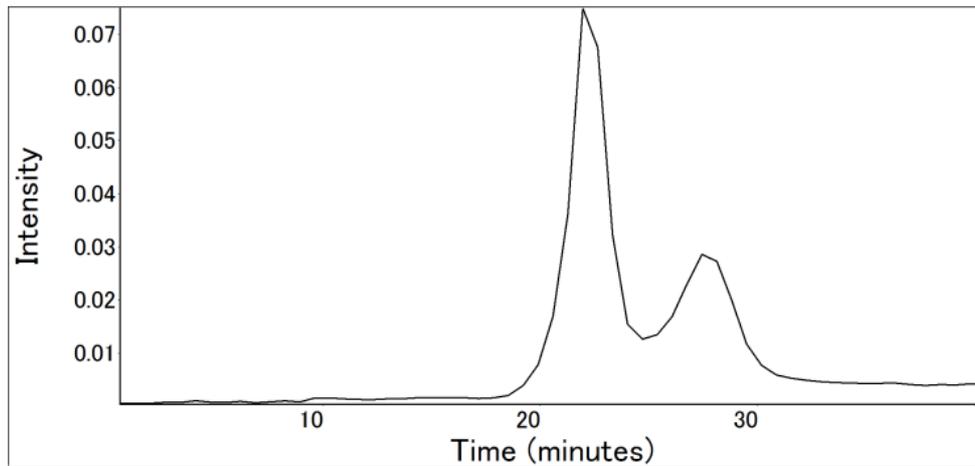


図 9-25 総赤外吸収スペクトルの時間変化 (空气中モジュール B 第 4 層、第 5 層)

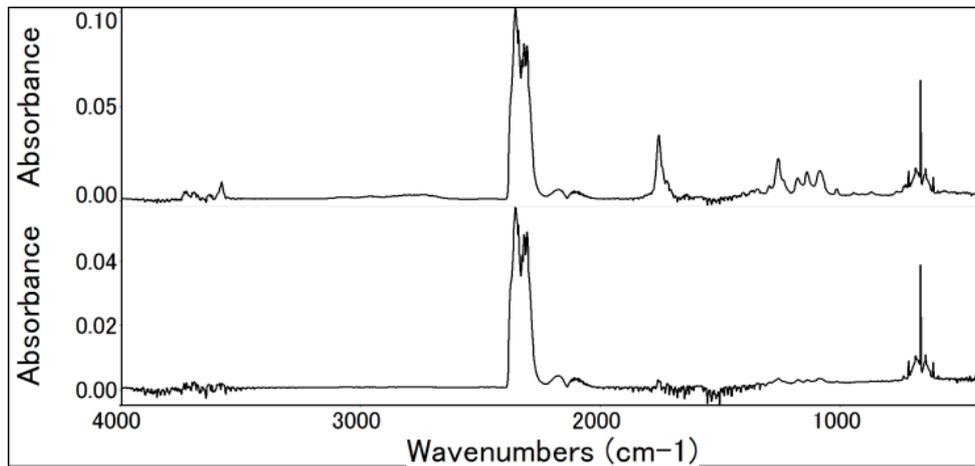


図 9-26 22 分のピークでの IR スペクトル (上段) と
28 分のピークでの IR スペクトル (下段)

総測定時間中の各波数の吸収強度を、時間、波数、強度で 3 次元表示したものを図 9-27 に示す。測定時間内では 19 分から 25 分にかけては、CO₂ 以外の含酸素化合物の生成が認められるが、それ以降は CO₂ のみが生成していることから、加熱と同時に PET 鎖のテレフタル酸部分の分解が生じ、同時に PET 鎖の酸化分解又は生成分解物の酸化が生じていると考えられる。

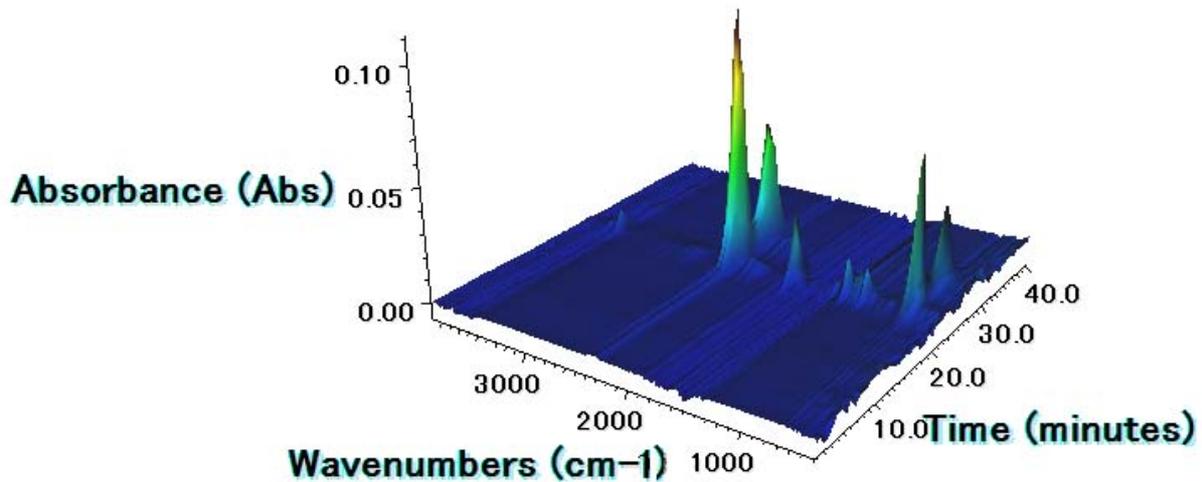


図 9-27 測定時間に応じた各波数吸収とその強度（空气中モジュール B 第 4 層、第 5 層）

これより PET は、火災時の火炎中においては 350℃から何らかのカルボニル化合物の生成が予想され、その後 CO₂ が生成することが予想される。

測定した 3 つの高分子化合物の全てにおいて、窒素中では高分子鎖の加熱のみによる分解挙動が、空气中では空气中に含有する酸素が関与した分解が認められ、それぞれに対応した分解生成物が確認された。

9.4.2 MS による太陽電池モジュール燃焼生成ガスの測定結果

9.4.2.1 モジュール A の燃焼結果

ブンゼンバーナーでモジュールを加熱したところ、セル温度は最高 450℃まで上昇した。表面温度が 270℃程度から分解生成物の検出が顕著になった。

検出された質量数は、16、26、42、54、58、78、92、104 であり、EVA の空气中 TG 測定により検出された酢酸の分子量に相当する質量数 60 は検出されなかった。その反面、空气中の TG 測定により検出されなかった芳香族化合物と思われる質量数 78（ベンゼン）、92（トルエン）、104（スチレン）が検出された。PVF は、置換基のフッ素が隣接水素とともに脱離すると、図 9-7 に示したような共役二重結合を有する直鎖が生成するため、この主鎖の分解から六員環を生成し安定化し、その置換体が生じたものと考えられる。

ガスが発生を開始してから約 5 分後には、接炎部分の燃焼がほぼ終了し、バーナー火炎が第 1 層のガラス面裏面に達しており、第 2 層から第 6 層までが燃焼、あるいは融解しているのが観察された。

窒素中、及び空气中の TG 測定により検出された HF は、MS 装置の機構上、検出はできなかった。

9.4.2.2 モジュール B の燃焼結果

モジュール B では、表面温度が 100℃程度からガスの生成が開始した。

検出された質量数は、16、26、42、54、58、78 であり、EVA の空气中 TG 測定により検出された酢酸の分子量に相当する質量数 60 は、モジュール A 同様に検出されなかった。検出された化合物は、PET の構造を考慮すると、熱分解生成物として生成可能性のあるものと考えられた。加熱開始から 2 分 30 秒後には接炎部分の燃焼がほぼ終了し、バーナー火炎が第 1 層ガラス面裏

面に達しており、第2層から第5層までが燃焼したのが観察された。

9.4.3 加熱分解と火炎の燃焼による分解の比較

9.4.1 及び 9.4.2 の実験で検出された生成ガスの一覧を表 9-5 に示す。

モジュール構成の部材を単体で加熱分解した際の生成ガスと、モジュール全体を火炎により燃焼させた際の生成ガスに違いがみられた。TG による加熱分解は、窒素中では高分子化合物の構造に由来するものがほとんどであるが、空気中では酸化物や CO₂ がほとんどである。空気中での酸化物についても、窒素中での分解生成物がその後酸化されていると考えられるものが多い。

表 9-5 各測定での検出ガス一覧

モジュール	火炎なし						火炎あり		
	PVF		EVA		PET		A	B	
	窒素	空気	窒素	空気	窒素	空気	PVF EVA	PET EVA	
測定雰囲気	窒素	空気	窒素	空気	窒素	空気	空気	空気	
化合物	フッ化水素	○	○					—	—
	四フッ化ケイ素	○	○					—	—
	酢酸			○	○				
	直鎖炭化水素類*	○		○					
	アルデヒド類*				○			○	○
	カルボニル化合物**					○	○		
	メタン							○	○
	アセチレン							○	○
	プロピレン							○	○
	ブタジエン							○	○
	プロパナール				△			○	○
	ベンゼン							○	○
	トルエン							○	
スチレン							○		

○：検出、△：可能性あり、—：測定対象外

*：n-炭化水素及びアルデヒドの鎖長は不明

**：カルボニル化合物のカルボニル基以外の詳細構造は不明

これに対して、火炎を用いてモジュールを燃焼させた際に生じる生成ガスは、空気中の酸素により酸化されたと考えられるアルデヒドのような酸化物、また加熱分解により生成し酸化されずに検出されたアセチレン等の不飽和炭化水素、及びベンゼン等の分解後の再結合により生成したと考えられる化合物が検出されている。

その中でも、モジュール A、B 双方で使用されている EVA は、TG においては窒素中、空気中いずれからも分解生成物である酢酸が検出されているのに対して、火炎を用いてモジュール本体

を燃焼させた場合、モジュール A、B どちらのモジュールからも酢酸は検出されない。EVA 主鎖からの酢酸の脱離は 300°C 程度で生じており、主鎖の切断温度よりも低いため、火炎に曝されて段階的に EVA 温度が上昇する過程では、主鎖からの分解物の生成前に切断反応が生じ、酢酸が生成しているものと思われる。しかし、脱離後の酢酸が周囲の火炎に再び加熱されることにより熱分解や酸化分解を起こし、更に小さい分子となることが酢酸が検出されなかった原因ではないかと考えられる。

このように、火炎による分解挙動は、空気中の酸素や火炎から常時与えられる熱により、分解や燃焼に複雑な挙動を有しているものと考えられる。

9.5 まとめ

モジュールの構成部材が燃焼の際に生成するガスについて、単体の構成部材を TG-IR、モジュールを MS により検査した。

構成部材単体では、温度に応じて構成部材特有の熱分解生成物が検出された。この生成物は、雰囲気により異なり、特に空気雰囲気下では酸化物の生成が認められ、構成部材の高分子化合物が酸化分解又は分解後の酸化反応を起こしていることが認められた。

モジュール燃焼の際の生成ガスは、TG による分解挙動よりも複雑なメカニズムによるものと推定された。これは、火炎の揺らぎにより生じる構成部材の温度むらから、分解が TG の場合のように起こらないことや、分解後に更に火炎に曝され高温になることから、その中での燃焼、再結合等が生じているものと考えられる。更に、バックシートにハロゲン化合物を含有する高分子化合物では、有害なハロゲン化水素等が生じる可能性がある。

また、モジュール全体で燃焼させた場合、各層間に用いられている接着剤も同時に燃焼しており、この影響も無視できない要因となっている可能性もある。

参考文献

- 1) 木下良一, 市村裕, 寺本芳彦, 武井義之, 吉野正浩: "TG-DTA/GC/MS 用インターフェースの試作", 第 29 回熱測定討論会要旨集, (1993), pp.32-33.

10. 消防隊員の手袋、靴及び破壊器具の絶縁抵抗と感電危険性

10.1 はじめに

太陽光発電システムを設置した住宅火災に対しては、消火活動や残火処理等の消防活動において感電に対する安全を十分に配慮する必要がある。本章では感電の人体への生理学的作用、人体の電気抵抗、消火活動時の感電危険性について述べる。また、個人装備品（手袋、靴）及び破壊器具の電気抵抗（以下、抵抗）を測定するとともに、太陽電池モジュール（以下、モジュール）を複数連結した状態での破壊実験結果から、消防隊員が握る破壊器具からの感電危険性を評価する。

10.2 感電の人体への生理学的作用

感電とは人体に電流が流れることにより生理学的な反応を生じることである。感電の危険度は人体を流れる電流の大きさと通電時間、通過経路、電源の種類（直流、交流、周波数、波形）が関係する。人体を通過する電流値が大きくなるに従って、(1)しびれを感じ始める、(2)筋肉のけいれんを生じる（自力で接触部から離れることができる）、(3)心臓が正常に働かなくなる、というような生理学的な反応があらわれる。この(1)、(2)、(3)の反応があらわれる電流は、(1)感知電流、(2)可随電流、(3)心室細動電流と呼ばれている。心室細動電流未満の電流通過であれば生理学的な生命の危険は低い。しかし、消防活動においては感知電流以上の電流通過があると感電に驚いて転落するなどの間接的な危険がおよぶ可能性があるため危険である。

感知電流、可随電流及び心室細動電流の電流値について、労働安全衛生総合研究所の資料¹⁾に記載されている国際電気標準会議（以下、IEC）の数値（通電時間 0.01 秒と 2 秒を抜粋）²⁾と米国電力研究所（以下、EPRI）の報告書に記載されている数値³⁾を表 10-1 に示す。

表 10-1 電流に対する人体の反応

	IEC			EPRI（成人）	
	通電時間 [sec.]	直流 [mA]	交流 [mA]	直流 [mA]	交流 [mA]
感知電流	0.01	2	1	2	0.5
	2	2	1		
可随電流	0.01	200	200	40	6
	2	20	10		
心室細動電流	0.01	500	500	240	105
	2	150	40		

10.3 人体の電気抵抗

人体の電気抵抗 (R_h) は電気の流れに対応して、皮膚の抵抗値 (R_s)、体内の抵抗値 (R_i) を用いて、式(10-1)で近似できる。

$$R_h = R_s + R_i + R_s \quad (10-1)$$

R_s は皮膚の乾燥状態や接触面積によって変化する。皮膚が乾燥していると R_s は高く、 R_h は数 kΩ 以上になる。一方、発汗や消火水で皮膚が完全に濡れると、 R_s は 0Ω に近づき、 R_h は R_i に近い値になる。また、接触部分の電圧が高いほど皮膚組織の絶縁破壊が進み抵抗値は小さくなり、

電圧が 10 倍大きくなると電気抵抗は約 1/2 になる。 R_1 は電圧の影響はなく、約 500Ω ²⁾ である。IEC の技術報告書²⁾に掲載されている電気抵抗値（接触面積が大きい場合の成人の両手間）を抜粋したものを表 10-2 に示す。尚、本章では人体の電気抵抗値を、最悪条件として 500Ω を用いる。

表 10-2 接触電圧と成人の両手間の電気抵抗²⁾
(注：IEC60479-1 の母集団に対する 50%の概数値)

皮膚の状態	接触電圧 [V]	電気抵抗 [Ω]	
		直流	交流
乾燥	100	1900	-
	400	950	-
	1000	775	-
真水浸潤	100	-	1675
	400	-	950
	1000	-	775
海水浸潤	100	-	1225
	400	-	950
	1000	-	775

10.4 手袋、靴及び破壊器具の電気抵抗測定実験

消防隊員は、活動中の安全性を高めるため、安全保護具を装着している。特に、活動中の隊員への感電を防止するには、絶縁性の高い装備品であることが望ましい。また、消防活動に使用する破壊器具についても、感電防止のためには絶縁性が高い器具がよい。一方、静電気の事故防止の点からすれば、電気を逃がしやすい装備品が求められる。

今回は消防隊員の感電防止を考慮していることから、消防で使用されている装備品が、どのような絶縁性能を持っているかを明らかにする必要がある。

消防活動時の感電防止策の資料とするため、活動中にモジュールに接触する可能性があるものとして、手袋、靴、破壊器具の抵抗を測定した。

10.4.1 手袋の抵抗測定実験

10.4.1.1 手袋の種類

消防活動時に使用する手袋の選定に際しては、消防本部で実際に使用されている手袋を調査し選択した。表 10-3 に示すように、測定した手袋は全部で 11 種類である。主に牛皮革で作られた手袋①、②、③、④、皮革とケブラー繊維で作られた手袋⑤、⑥、⑧、⑨、⑩、甲と掌にケブラー繊維を使った手袋⑦、この他に防水性のある一般の手袋⑪についても抵抗の測定を行った。

表 10-3 手袋の種類

	会社名	品名	材質	厚さ (mm)	外観
手袋①	(株)シモン	セイバー No.10	牛革	1.30	
手袋②	(株)トンボ	C-33W	牛革(撥水加工)	1.41	
手袋③	日本グローブサービス(株)	RESKAS No.150 WinDAM Pro-Function	牛革	1.27	
手袋④	日本グローブサービス(株)	RESKAS No.155 WinDAM Pro-Function	牛革(撥水加工)	1.85	
手袋⑤	(株)トンボ	K-501	ケブラー®繊維 人工皮革	1.84	
手袋⑥	日本グローブサービス(株)	RESKAS No.190	ケブラー®繊維 牛革	2.35	
手袋⑦	(株)ダイコープロダクト	BULLRESCUE DK-700-OR	甲 ケブラー®繊維、 ノーメックス® 掌 ケブラー®繊維、綿	1.70	
手袋⑧	小林防火服(株)	KC-60	ケブラー®繊維 セラミック配合牛革	1.98	
手袋⑨	(株)トンボ	K-152BK	ケブラー®繊維、牛革 防寒・防水タイプ (透湿・防水フィルム)	2.77	
手袋⑩	(株)トンボ	K-144	ケブラー®繊維 牛革(撥水加工)	1.70	
手袋⑪	(株)ベルモント	シームレス 防水グローブ	外側/ナイロン92%、 スパンデックス8% 内側/クールマックス®92%、 スパンデックス8%	2.05	

10.4.1.2 測定方法

手袋を流れる電流には、手袋の表面を流れる電流と手袋内部を流れる電流がある。人体への感電では、電流が手袋内部を流れることから、手袋の体積抵抗率を調べることにした。体積抵抗率は、単位体積当たりの抵抗値で、物質に固有の物理量であり、多くの材料の導電性の絶対的な尺度として用いられている。

体積抵抗の測定には、抵抗測定装置(株式会社アドバンテスト R8340A デジタル超高抵抗・微小電流計)を使用した。本来ならば、製品としての手袋の抵抗値を測定することが望ましいが、本装置では製品の状態で体積抵抗を測定することはできない。実際の消防活動においては、手袋の掌でモジュールに接することが多いと考えられ、また破壊器具の使用時も、手袋の掌と破壊器具が接触すると考えられる。このことから、手袋の掌の部分を中心に、ハサミを使用して、直径約 100mm の円形の試料を切り出し、図 10-1 のようにアルミシートで作成した測定用電極を用いて測定した。

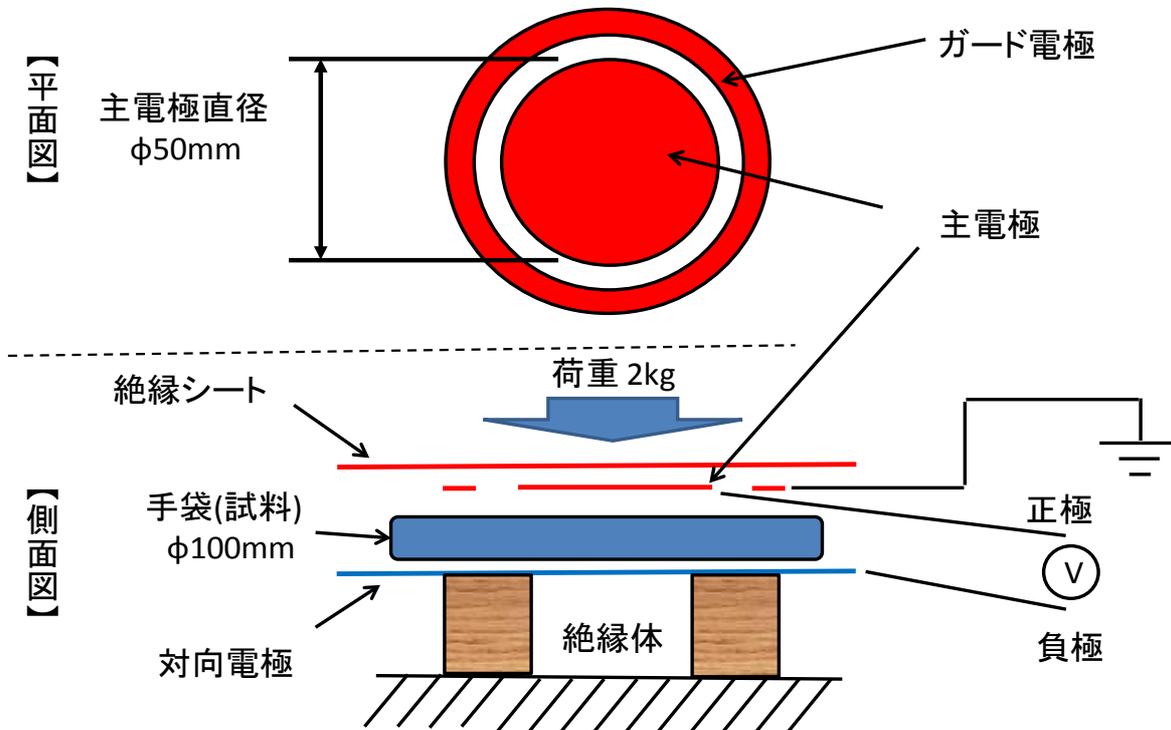


図 10-1 試料の抵抗測定用電極

各試料の厚さは、マイクロメータを使用して 5 か所を計測した値の平均とした。測定結果を表 10-3 に示す。測定に使用した手袋は、すべて未使用品である。この試料を使用して、乾燥状態と水に濡れた状態の体積抵抗を測定した。測定時に試料を電極で挟む荷重は 2kg とした。抵抗の測定を行うと、測定開始からの時間により測定値が変化するため、測定開始から 3 分後の比較的安定した値を手袋の抵抗値とした。試料に加える電圧（印加電圧）は、実際の屋根に設置されるモジュールの総発生電圧の最大値をおよそ 300V と推定し、すべて 300V とした。測定室内の温度は 18~25°C、湿度は 33~44%であった。抵抗測定装置により、体積抵抗 R_v [Ω]を計測した後、体積抵抗率 ρ_v [Ω・cm]を式(10-2)で求めた。

$$\rho_v = S \times R_v / t \quad (10-2)$$

ここで、 S は直径 5cm の主電極の面積 (19.63 cm²)、 R_v は体積抵抗[Ω]、 t は試料の厚み[cm]である。

10.4.1.3 測定結果

(a) 乾燥した手袋の場合

乾いた手袋の体積抵抗と体積抵抗率の結果をそれぞれ図 10-2、図 10-3 に示す。乾いた手袋の体積抵抗値は概ね 10⁸~10¹⁴ Ω である。この抵抗値を使って算出した手袋の体積抵抗率は、概ね 10⁹~10¹⁶ Ω·cm の間であった。牛皮革だけを使った手袋の体積抵抗率は、10¹² Ω·cm より低く、ケブラー繊維と組み合わせた手袋は 10¹⁵ Ω·cm より大きい値であった。皮革の手袋よりも、ケブラー繊維を組み合わせた手袋の方が、10000 倍以上大きい体積抵抗率を示した。手袋の体積抵抗率は、石英ガラスの 10¹⁸~10¹⁹ Ω·cm ほど大きくはないが、乾燥木材 10⁹~10¹³ Ω·cm と同程度の抵抗率をもっており、新品の手袋ではかなり絶縁性が高いことが分かった。

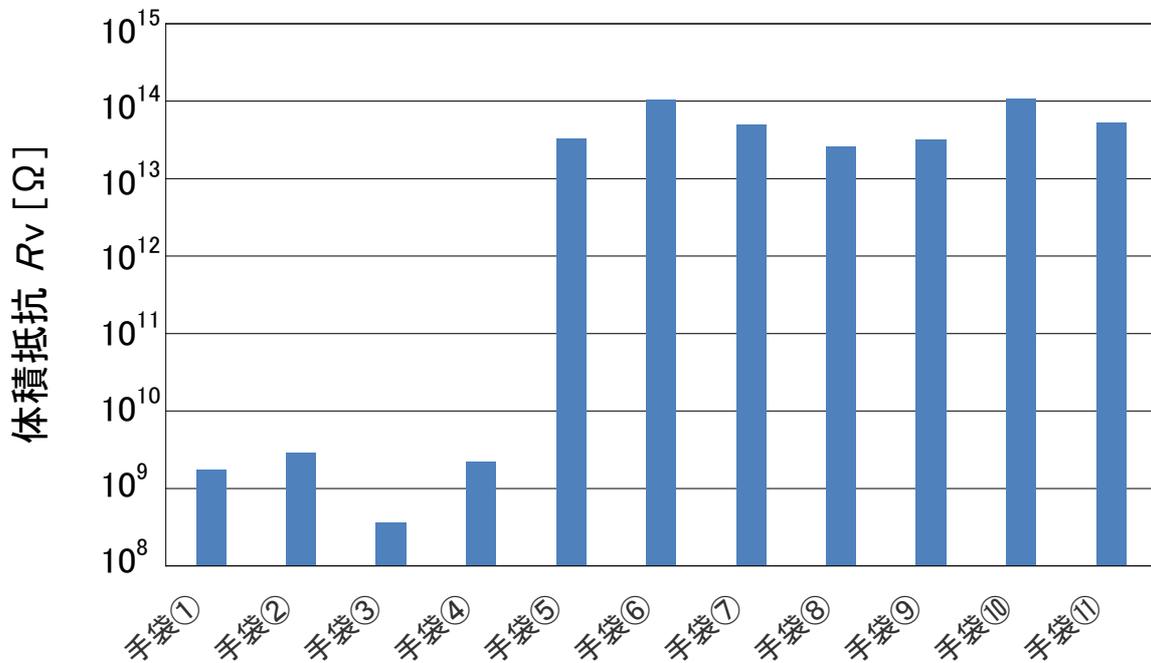


図 10-2 乾いた新品手袋の体積抵抗
(横軸の丸数字は表 10-3 に対応)

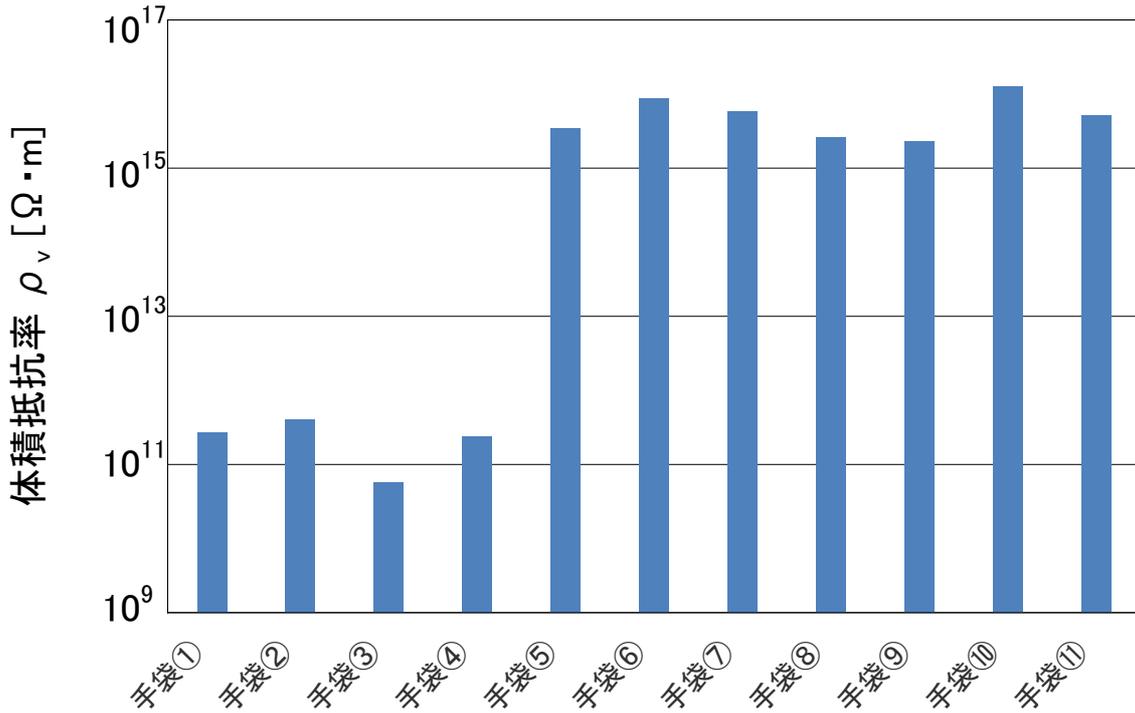


図 10-3 乾いた新品手袋の体積抵抗率
(横軸の丸数字は表 10-3 に対応)

(b) 水に濡れた手袋の場合

消防活動時では、消火のために水を使用することから、手袋が水で湿ることがある。そこで、手袋が水に濡れた状態では、どのように抵抗に変化があるかを調べた。試料を水で濡らす方法として、試料を濡らし指でたたいた。試料がどれくらい水を含んだかは、水をしみ込ませる前後の重量変化で表した。

尚、水に濡れた試料の抵抗値の測定の際も、乾燥手袋と同様に印加電圧を 300V とした。その結果を図 10-4 に示す。

水の影響を調べるため、ふき取り紙（株式会社クレシア、ケイドライ® ワイパー132-S）を 4 つ折りにして、中央に水を含ませて同様に抵抗の測定を行った結果、約 22kΩ であった。水に濡れた手袋の抵抗値は 21~60kΩ で、ふき取り紙を利用して測定した値と同程度の値であり、乾いた手袋の抵抗値（図 10-2）と比べると極めて小さい値となった。水に濡れた手袋の含水量を図 10-5 に示す。試料の厚みが大きいと含水量は多くなる傾向がみられた。この結果から手袋は水を含むと抵抗値が小さくなり、その値は含まれる水の抵抗値によると考えられる。図 10-4 の④、⑨は抵抗値が大きい、④は試料の厚さ、⑨は防水仕様で水が通りにくい部分が影響していると考えられる。

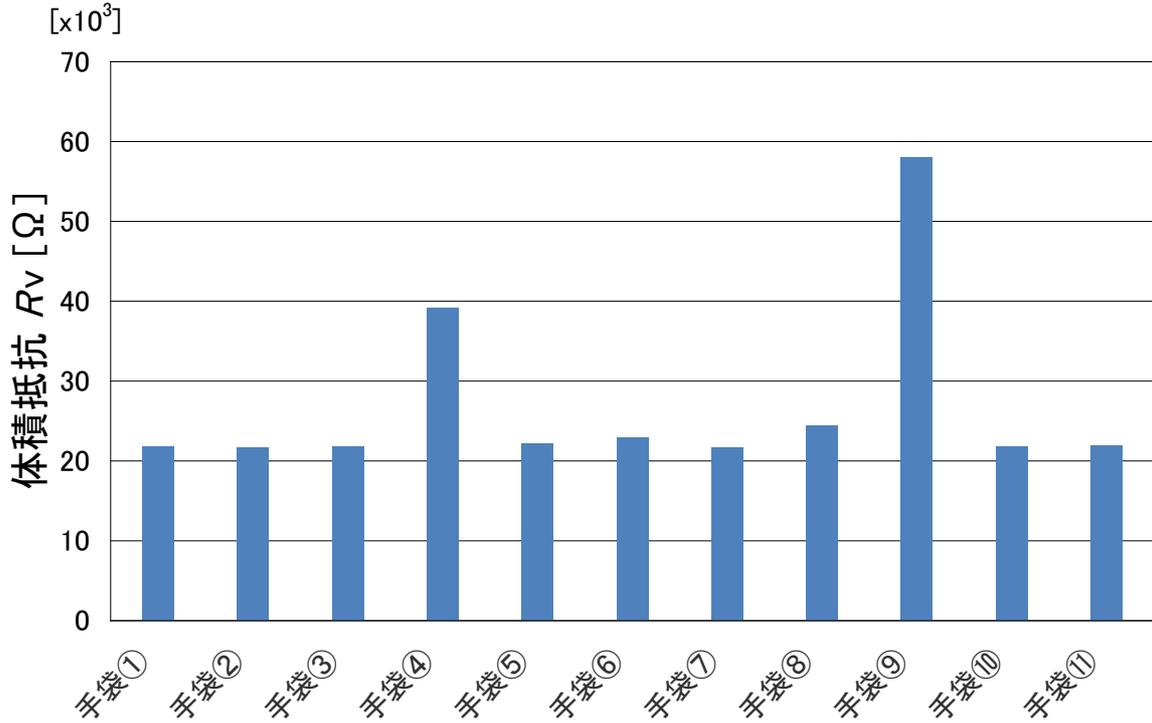


図 10-4 水に濡れた手袋の体積抵抗
(横軸の丸数字は表 10-3 に対応)

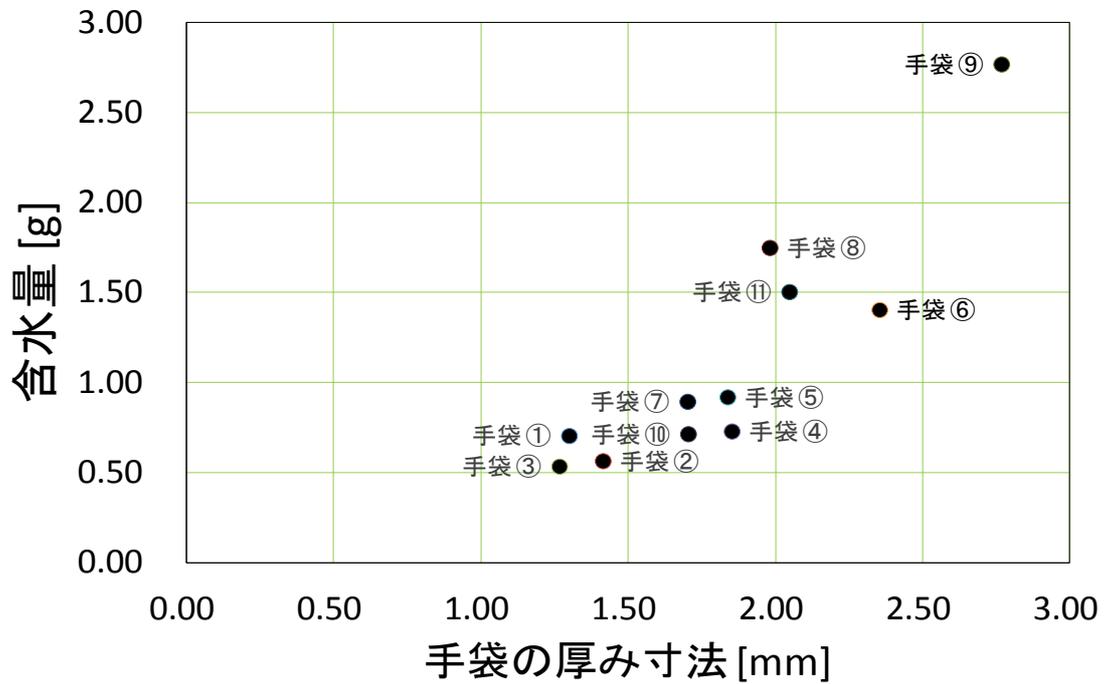


図 10-5 水に濡れた手袋の含水量
(丸数字は表 10-3 に対応)

10.4.2 靴の抵抗測定実験

10.4.2.1 靴の種類

消防隊員が使用する作業靴として、表 10-4 に示すようにゴム製の長靴 6 種類と編み上げ作業靴 4 種類の計 10 種類について抵抗を測定した。JIS T 8101 規格の安全靴、JIS T 8103 規格の静電気帯電防止タイプの静電靴が主である。

10.4.2.2 測定方法

消火活動中に、人体が電気の流れているものに接触したとしても、電気が人体を流れる通り道がなければ感電はしない。そこで人体から電気が流れる時の通り道となる靴底の抵抗を測定した。測定方法は図 10-6 に示すように、重量計（ザルトリウス株式会社、LA34001S）の上に靴を置き、靴の中敷きの上に幅 50mm のアルミ製のテープをのせた状態で、片足を入れてテープを踏んだ。その状態で靴の下に敷いた電極板とアルミテープ間の抵抗を測定した。テープを踏み込む時の荷重は約 20kg で、重量計の表示が約 20kg となるようにして、靴底の抵抗を 1 回測定した。印加電圧は、300V である。測定は、抵抗測定装置（株式会社アドバンテスト、R8340A デジタル超高抵抗・微少電流計）で行った。

10.4.2.3 測定結果

図 10-7 に示すように、測定した靴の抵抗は、 $10^6 \sim 10^{12} \Omega$ の値であった。その中の静電気帯電防止型の長靴②、編み上げ作業靴⑦と⑧の抵抗値は、およそ $1M\Omega$ オーダーであり他の靴よりも小さかった。

10.4.3 破壊器具の抵抗測定実験

10.4.3.1 破壊器具の種類

消防活動の際に、窓ガラスや家屋を壊すために使用される破壊器具として、ここでは人の手で扱う万能斧、とび口の 2 種類を測定した。エンジンカッターなど動力を必要とする機械類は、対象とはしていない。測定した破壊器具を表 10-5 に示す。

10.4.3.2 測定方法

破壊器具のグリップや柄にアルミテープを巻きつけて、抵抗の測定を行った。抵抗の測定位置は、万能斧①～④は尖端とグリップの間、とび口①は尖端と尖端から 164cm の間、とび口②は尖端と尖端から 77cm の間であり、表 10-5 に矢印で示す。塗装された尖端は複数回使用したことを想定して、やすりで塗装を部分的に除去した。柄の測定箇所も、やすり掛けを行った。測定装置としては、抵抗値に応じてデジタルマルチテスター（Agilent 社、U1252A）及び抵抗測定装置（株式会社アドバンテスト、R8340A デジタル超高抵抗・微少電流計）を使用した。抵抗測定装置を使用した時の印加電圧は 300V である。測定回数はそれぞれ 1 回である。

表 10-4 靴の種類

	長靴 ①	長靴 ②	長靴 ③
会社名	シバタ工業(株)	ミドリ安全(株)	インテルメイトーヨー(株)
品名	—	SK742S	TX-760T
性能等	安全靴 JIS T 8101	静電気帯電防止靴 JIS T 8103	—
外観			

	長靴 ④	長靴 ⑤	長靴 ⑥
会社名	第一ゴム(株)	(株)シモン	シバタ工業(株)
品名	SDM-09F	—	—
性能等	安全靴 JIS T 8101	安全靴 JIS T 8101	安全靴 JIS T 8101
外観			

	編み上げ ⑦	編み上げ ⑧	編み上げ ⑨	編み上げ ⑩
会社名	ミドリ安全(株)	ミドリ安全(株)	(株)アサヒコーポレーション	(株)シモン
品名	RT731F(消防静電P-4)	KS137FS(静電)	F54	SS22HiFR
性能等	静電気帯電防止靴 JIS T 8103	静電気帯電防止靴 JIS T 8103	—	静電気帯電防止靴 JIS T 8103
外観				

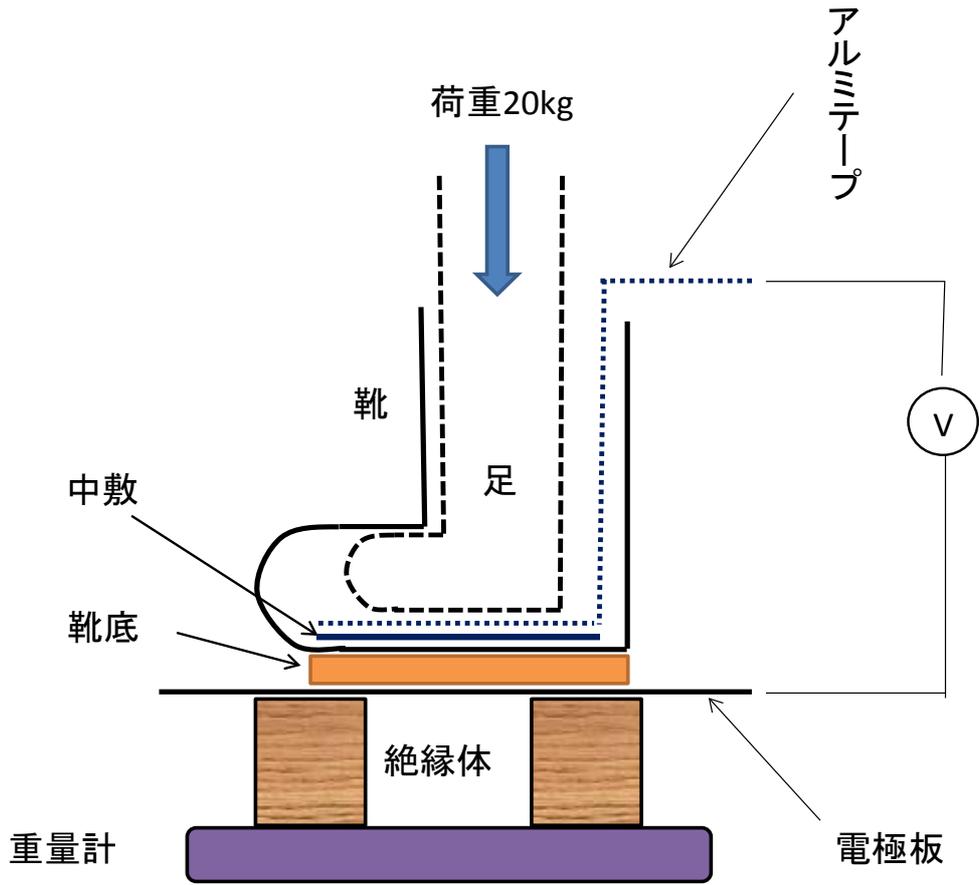


図 10-6 靴底の抵抗測定用電極

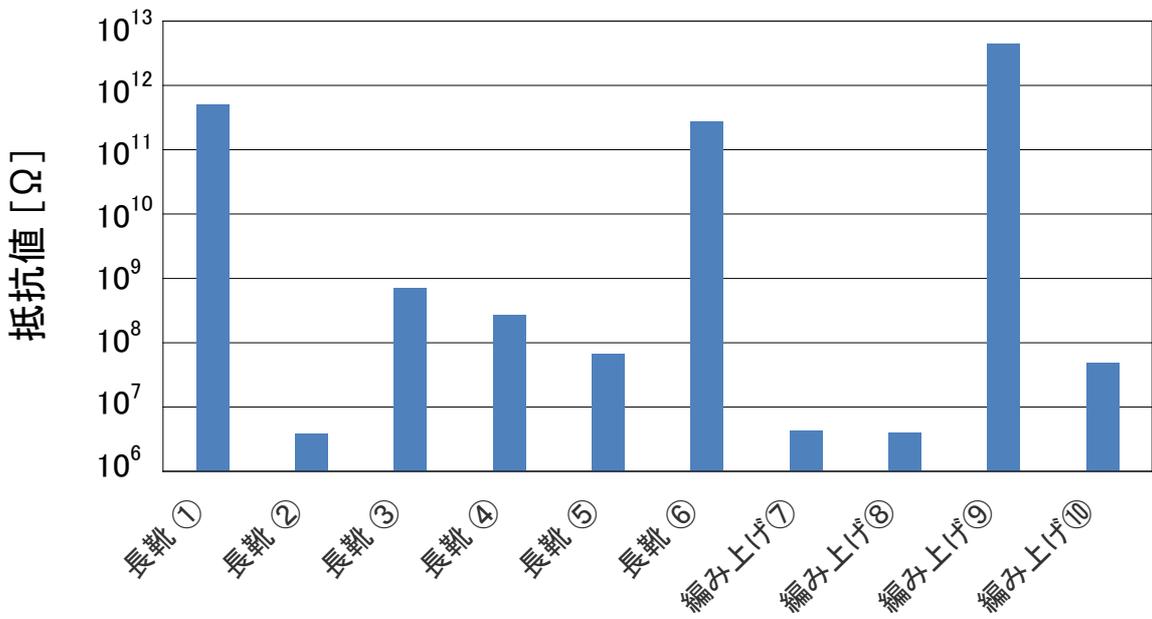


図 10-7 靴の抵抗値

表 10-5 測定に使用した破壊器具
 ※抵抗測定箇所は、写真に示した2つの矢印の間

	会社名	品名(柄の材質)	長さ寸法 [mm]	重量 [kg]	外観
万能斧 ①	オカニワ(株)	トップマンとび (絶縁ゴム)	330	0.95	
万能斧 ②	土牛産業(株)	DPX-RX	440	1.23	
万能斧 ③	PARATECH Emergency Equipment Manufacturers	PRY AXE	470	2.89	
万能斧 ④	土牛産業(株)	DPX-2311 (絶縁ゴム)	470	2.80	
とび口 ①	(株)モリタ	(グラスファイバー)	1890	1.99	
とび口 ②	東京サイレン(株)	(木)	1100	2.30	

10.4.3.3 測定結果

(a) 乾燥した破壊器具の場合

破壊器具の抵抗の測定結果を図 10-8 に示す。万能斧のグリップ部分の抵抗値は、概ね $10^3 \sim 10^{13} \Omega$ まで幅広い値を示した。万能斧①の抵抗値は、約 $5k\Omega$ と他の万能斧と比べて、小さかった。とび口の抵抗値は、 $1G\Omega$ 以上あり、絶縁性は良いと言える。

(b) 水に濡れた破壊器具の場合

破壊器具は、消防活動時の放水の影響により、水がかかることが考えられる。特に破壊器具の柄が木製の場合は、水によって絶縁性が悪くなることが考えられる。

そこで、水がしみ込みやすくするため、柄が木製であるとび口②の表面の塗料をサンドペーパーでこすり落とし、2日間水に浸した。その後、素材が樫と推定して木材水分計(株式会社ケット科学研究所、MT-900)で水分を測定した結果、約32%であった。抵抗の測定結果を図10-8(とび口②')に示す。水に浸した時の抵抗値は、乾燥時と比べておよそ $1/1000$ の $190k\Omega$ まで低下した。乾燥している状態では、高い絶縁性を有する木製のとび口であっても、水の影響で抵抗値が低くなることが分かった。

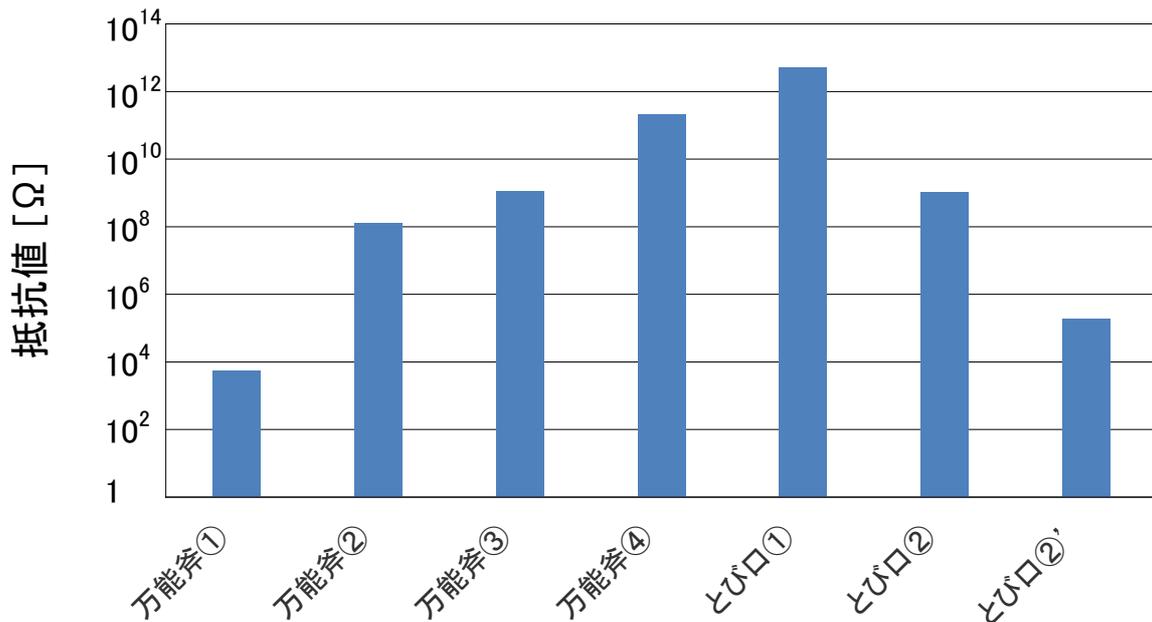


図 10-8 破壊器具の抵抗値
(とび口②'はとび口②の柄を水で濡らしたもの)

10.5 消防活動時の感電危険性

10.5.1 放水時の感電危険性

電気設備等の活線部に向かって放水消火を行う場合、活線部と消火ホースの間が放水により電氣的に接続すると、ホースノズル（以下、ノズル）に電流が流れる。ノズルに流れてきた電流の一部はホースを握っている消防隊員に流れて電撃を与えることとなる。ノズルから出る水の状態は、水滴や霧状で放水する状態と棒状で放水する状態に大別される。水滴や霧状の放水の場合は途中の空気層により電気抵抗が大きくなり感電の危険性は低い。棒状の放水の場合、空気層が存在せず棒状を保った状態で活線部に到達すると、放水流が導体として作用するため感電の危険が高くなる。従って、棒状放水時の感電を防ぐためには、ノズルと活線部の距離を一定以上離す必要がある。棒状を保った状態で到達する距離は水圧、ノズルの直径、ノズル出口の形状、風向や風速等の影響を受ける。棒状を保った状態で到達する距離について中内⁴⁾は、電撃危険距離と称し、直流 600V 活線への棒状放水時で 6~10m としている。中内が示した電撃危険距離の抜粋を表 10-6 に示す。

表 10-6 活線向け棒状放水時の電撃危険距離⁴⁾

口径	筒先圧力 60 lb/in ² (0.41 MPa) 以下 電撃危険距離 [m]			
	直流600V	直流1000V	交流3300V	交流11000V
5/8 inch (15.9mm)	6	6	6	8
6/8 inch (19.1mm)	6	6	6	8
7/8 inch (22.2mm)	10	10	10	12
1 inch (25.4mm)	10	10	10	12

米国においては米国防火協会（以下、NFPA）の防火ハンドブック⁵⁾に、1958年オンタリオ州水力発電委員会の試験結果⁶⁾として、安全距離を15フィート（約4.8m、5/8インチ棒状放水ノズル、電気設備の対地電圧2400V）以上としていることを記載している。また、米国電気電子技術者協会（以下、IEEE）の規格979-1994「変電所の防火に関する指針」⁷⁾には、138kVまでの電気設備への放水について、電気設備への電力供給を遮断できず、非導電性の消火剤で消火することも不可能な状況下での消火の注意点を次のように記載している。

- a) 水噴霧ノズルのみを使用する。
- b) 電気設備からの距離は、少なくとも10フィート（約3.0m）以上とする。
- c) 消防隊員は、水溜りの中には立たない。

この規格はまた、交流4000Vの設備に対し、口径が2.5インチ（63.5mm）のノズルを使用し、放水圧100psi（約0.69MPa）、放水量250gal/min.（約950L/min.）で、棒状放水の場合、消防隊員への通過電流値は、10フィート（約3m）の距離で7mA、20フィート（約6m）では3mAであり、一方、同じ口径と放水量で噴霧角度10°の水噴霧にすると、10フィートでの消防隊員への通過電流値は0mAになると記載している。

さらに、UL（米国保険業者安全試験所）の太陽光発電設備に対する消防活動時の感電危険に関する報告書⁸⁾では、様々な種類のホースノズルを用いた感電実験結果として、直流600V活線への放水に対して20フィート（約6.1m）以上離れることで電流値が感知電流である2mA以下となることが示されている。

以上のことから、太陽光発電システムへの放水時は、感電防止策として以下の点に留意する必要がある。

- 水に濡れても高い絶縁性能のある手袋及び靴を着用する。
- 放水は噴霧注水を用い、棒状注水は極力避ける。
- 棒状注水を行う場合は太陽光発電システムから6m以上（可能であれば10m以上）の距離をあける。

10.5.2 複数の単結晶シリコンモジュール接続時の破壊実験と出力電圧

消防活動中、直列に接続された複数のモジュールに、破壊器具の先端が接触し、消防隊員が破壊器具の金属部分に触れた場合を想定して、高電圧がかかった状態での破壊実験を行った。また、

破壊器具の種類を変えてモジュールの破壊実験を行い、破壊状況の観察、出力電圧の測定を行った。

10.5.2.1 実験方法

消防研究センターの本館屋上で、2013年8月20日に単結晶シリコンモジュールの破壊実験を行った。天気は晴れ、気温 35.5℃、湿度 45%であった。

一般住宅の屋根に設置した時と同程度の電圧を発生させた状態で破壊実験を行うため、図 10-9 のように単結晶シリコンモジュール 14 枚を 2 列に並べ、破壊するモジュールをその端に設置し、合計 15 枚のモジュールを直列に接続した。

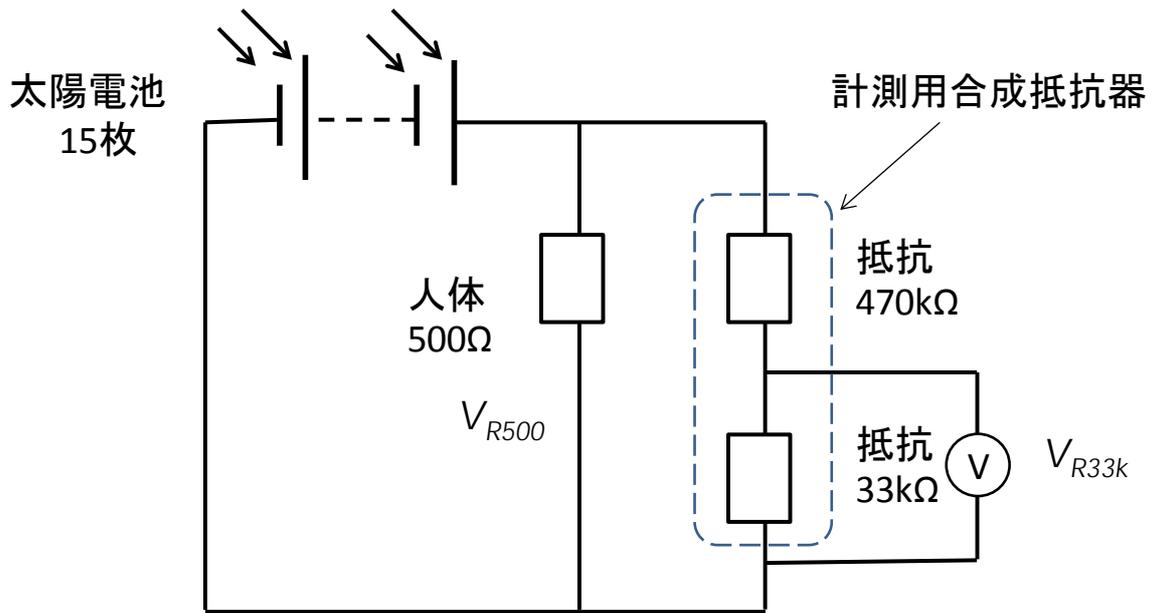
破壊時にモジュールが動かないように、いままでの破壊実験と同様、固定台に固定した。破壊器具として、3 種類の万能斧①、万能斧③、とび口①を使用した。1 種類の破壊器具について、1 枚のモジュールを破壊する実験を行った。

10.5.2.2 出力電圧の測定方法

破壊器具の先端部に導線を取り付け、これを人体の抵抗値に見立てた抵抗器 500Ω に接続し、この抵抗器の端子電圧を間接的に測定した。電圧測定回路図を図 10-10 に示す。15 枚のモジュールを直列に結線した場合、1 枚につき開放電圧値は 18V 以上あるので、15 枚全部を直列に接続すると約 270V の直流電圧値となる。データロガーが取り扱える最大電圧値が 100V であったため、データロガーへの入力のために、電圧を下げる必要があった。そこで、抵抗器 470kΩ と抵抗器 33kΩ を直列接続した計測用合成抵抗器を抵抗器 500Ω に並列接続し、抵抗器 33kΩ の端子電圧を測定することにより、抵抗器 500Ω の端子電圧を算出した。計測用合成抵抗器を並列に接続しても抵抗器 500Ω に流れる電流の変化は、0.1%程度に抑えられるため、人体を模擬した抵抗を流れる電流への評価には影響はないと判断した。



図 10-9 破壊する単結晶シリコンモジュールを含めモジュール 15 枚を並べた実験装置



$$V_{R500} = (470 + 33) / 33 \times V_{R33k}$$

$$\approx 15.2 \times V_{R33k}$$

図 10-10 単結晶シリコンモジュール破壊実験の電圧測定回路

10.5.2.3 破壊器具による単結晶シリコンモジュールの破損状況

万能斧③を使って、モジュールの表面ガラスから裏面に破壊器具の先端部が貫通するように、成人男性の力でモジュールを打撃した。感触では、容易にモジュールを貫通することができたとのことである。万能斧③により破壊したモジュールの様子を図 10-11 に示す。

破壊器具貫通後のモジュールの表面ガラスの状況を観察すると、先端部が貫通したところからクモの巣状にガラスが割れ、貫通場所以外でも、ガラスにヒビが入った状態となった。

図 10-11 に示すように、万能斧③とモジュールとが接触している部分では放電と思われる眩光、火炎が見られ、その部分から煙の発生、刺激臭が観察された。これは、モジュールに使用されている樹脂が熱分解して酢酸が生じたことによるとと思われる。ガラスの破碎状況、接触部分については、破壊器具の種類による違いは見られなかった。



図 10-11 万能斧③による単結晶シリコンモジュールの破壊
(丸で囲んだ部分に眩光、火炎が見える)

10.5.2.4 破壊時の出力電圧

万能斧③を打ち付けた時の出力電圧値の変化を図 10-12 に示す。実験時の太陽の照度は、70000~120000lx である。打撃時には、抵抗器 500Ω の端子電圧は、0V を示していた。このことは、破壊したモジュールから万能斧には、電流は流れていないことになる。消防隊員の破壊動作中に、破壊器具がモジュール内の発電回路に接触することを想定し、万能斧をモジュールに刺した状態で、えぐるように動かしたところ、抵抗器 500Ω の端子電圧が約 240V を示した。万能斧③をモジュールに突き刺したまま動かすと、出力電圧値は 0V と約 240V の値を行き来するように変化した。

他の破壊器具でも同様に、刺したままで破壊器具を動かすことにより、電気が流れたり、流れなかったりする状況が観測された。破壊作業中も、破壊器具に 240V 程度の高電圧の電気が流れることから、感電には注意を要する。

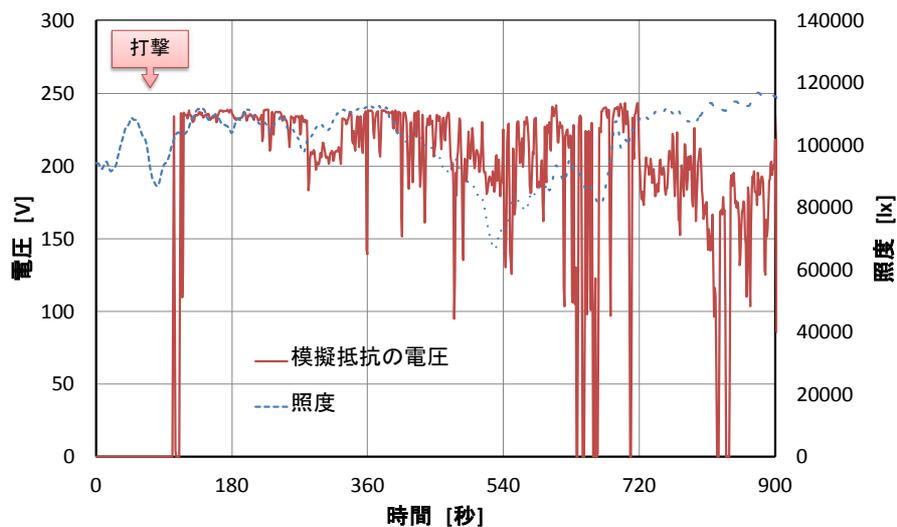


図 10-12 万能斧③により複数連結した単結晶シリコンモジュールを破壊した時の
人体を模擬した抵抗にかかる電圧の経時変化

10.5.2.5 太陽電池モジュール破壊時の感電危険性の評価

人体の感電のモデルを図 10-13 に示す。ここで、破壊器具の抵抗値が無視できるほど小さいものとし、モジュールから受ける電圧を 300V とする。濡れた手袋を通じて、電気が片方の手から人体に入り、もう片方の手から出ると想定する。

水に濡れた手袋の円形試料の抵抗値は、主電極との接触面積 19.63cm^2 における抵抗値が $20\text{k}\Omega$ 、物を掴んだ時の手袋の掌の接触面積を約 40cm^2 とする⁹⁾と、その抵抗値は $10\text{k}\Omega$ となる。両手では直列となり $20\text{k}\Omega$ 、更に人体の抵抗 500Ω が加わって合計 $20.5\text{k}\Omega$ となる。この場合、人体を流れる電流は 14.6mA と計算できる。一方、可随電流（または離脱電流）は、直流で 20mA ¹⁾ といわれているが安全とは断定しにくい。

更に、万能斧①（抵抗値 $5\text{k}\Omega$ ）を片手で握っていた場合、それを握っている手袋、人体と電気が流れ、もう片方に電気が逃げていくとすると、抵抗値は合計で $25.5\text{k}\Omega$ 、その時の電流値は 11.8mA となる。

また、靴（片方の抵抗値 $4\text{M}\Omega$ ）を通して電気が流れる場合、電圧が両足の靴底にかかるため、抵抗値は $2\text{M}\Omega$ となる。この時の電流値は 0.15mA であり、しびれを感じ始める電流値 2mA ¹⁾ 以下である。

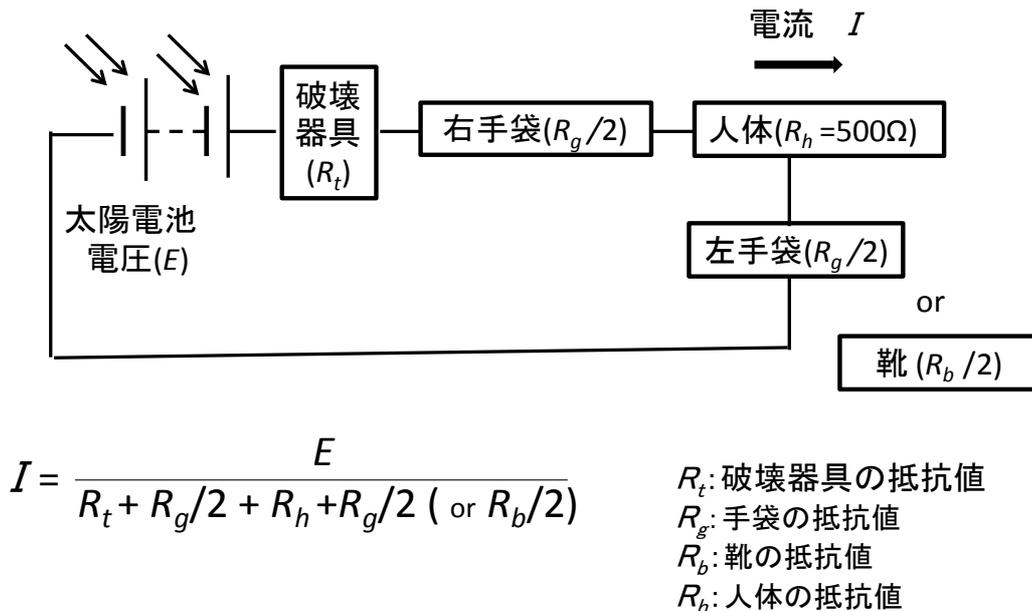


図 10-13 人体の感電モデル

10.6 まとめ

(1) 太陽光発電システムへの放水時は、放水流を伝わる電流による感電の危険がある。放水時の感電防止策として以下の点に留意する必要がある。

- 低圧用ゴム手袋、ゴム長靴等の高い絶縁性能のある手袋及び靴を着用する。
- 放水は噴霧注水を用い、棒状注水は極力避ける。
- 棒状注水を行う場合は太陽光発電システムから少なくとも 6m 以上（可能であれば 10m 以上）の距離をあける。

(2) 手袋の抵抗を測定した結果、新品の乾いた手袋では、体積抵抗率 $1 \times 10^{10}\Omega \cdot \text{cm}$ 以上の絶縁

性がある。しかし、水がしみ込むと絶縁性が低下し、水の導電性と同じになる。手袋に水がしみ込んだ場合、モジュールを取り扱う際には、慎重に作業を行う必要がある。

- (3) 万能斧のグリップ部分は乾燥していても絶縁性が低いものもある。柄が木製のとび口では、消火時に柄が水で濡れると絶縁低下の恐れがある。

謝辞

今回実験で使用した装備品の選択にあたっては、消防研究センター火災災害調査部原因調査室の調整官、上席主任調査官、主任調査官各位にご協力をいただきました。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 市川紀充, 富田一: 感電の基礎と過去 30 年間の死亡災害の統計, 労働安全衛生総合研究所安全資料, JNIOOSH-SD-NO.25, (2009).
- 2) International Electrotechnical Commission: Effects of current on human beings and livestock, Part 1: General aspects, third ed., IEC 60479-1, (1994).
- 3) Electric Power Research Institute prepared by Underwriters Laboratories Inc.: Personnel Protection Devices for Specific Applications, Project 6850-02, Final Report, (1999.10).
- 4) 中内俊作: "高電圧線への注水実験について", 火災, 第 2 巻第 1 号, (1952), pp.15-19.
- 5) National Fire Protection Association: Fire Protection Handbook. 20th ed., Quincy, MA, (2008).
- 6) G.W.N. Fitzgerald: "Fire Fighting Near Live Electrical Apparatus", Ontario Hydro Research News, April-June 1959, vol.11, no.2.
- 7) The Institute of Electrical and Electronics Engineers: IEEE Guide for Substation Fire Protection Std., 1979-1994, (1994).
- 8) Underwriters Laboratories Inc.: Firefighter Safety and Photovoltaic Installations Research Project, (2011.11).
- 9) 高野剛, 山本仁, 原利昭: 円筒物体の握り感覚の解明, 日本機械学会論文集(C 編), Vol.63, No.607, (1997.3), pp.311-317.

11. 種々の遮光物による太陽電池モジュール出力確認実験

11.1 はじめに

太陽光発電システム（Photovoltaic power system、以下 PV）に関わる火災に対して、消防活動上注意すべきことの一つに感電がある。火災により PV の構成要素である太陽電池モジュール（以下、モジュール）が損傷した場合でもモジュールは発電を継続する恐れがあることから、本章では、感電することなく安全に消防活動を実施できることを目指し、モジュールの受光を遮るための遮光物が発電を抑制する効果について、実験を通して調べたのでその結果を述べる。また、火災時に人手を介さずに遮光する方策についても提案する。

11.2 遮光物について

モジュールが受光することを妨げる遮光物について、実験で用いたものを説明する。

11.2.1 防火フィルム

防火フィルムは、ガラス面に貼り付けることにより火災時の熱からガラスを損傷させないために保護するものである。本研究では、防火フィルムが加熱される際に防火フィルムに含まれる水分が蒸発し発泡白濁することを遮光に利用しており、その本来の用途とは異なる。火災時に発電の最小単位であるセル一つ一つに対して人手を介さずに遮光できることは、後述する人手が必要なブルーシートに比べて、消防活動上、大きな利点である。

実験では、最表面がポリエステルフィルムで耐候性のない防火フィルム（清水建設株式会社、ファイヤーカット）（以下、ポリエステル防火フィルム）及び、ポリエステルフィルムをポリテトラフルオロエチレンフィルムに置き換えて耐候性を持たせた防火フィルムの2種類の防火フィルムを用いた（図 11-1）。

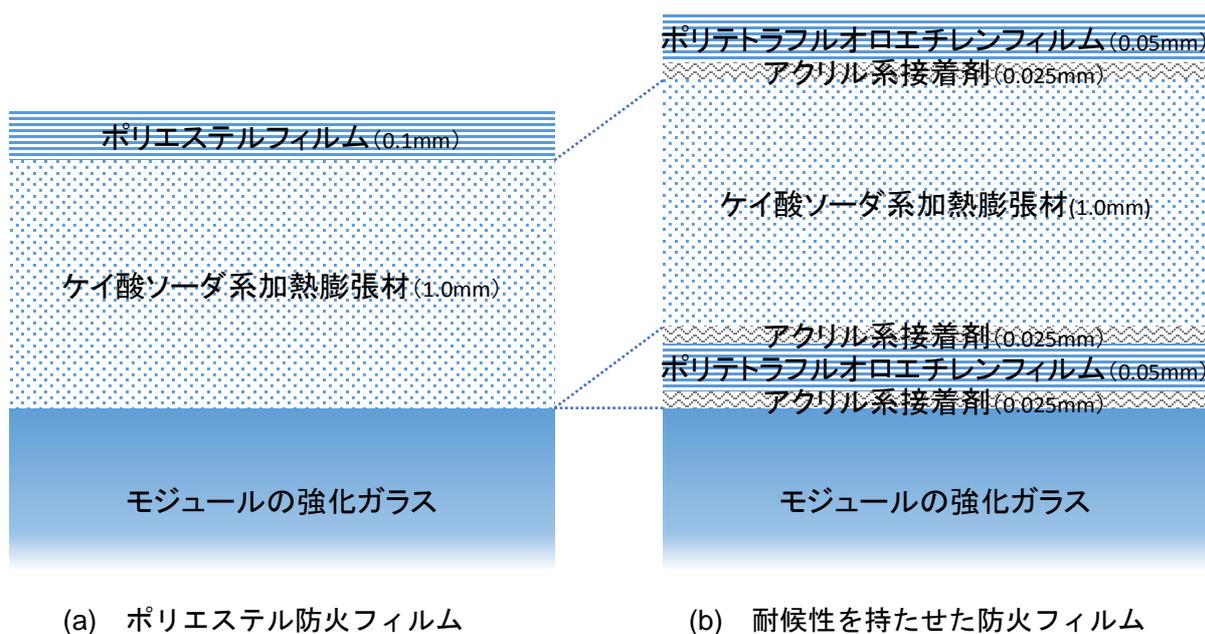


図 11-1 モジュールの強化ガラス面に貼り付けた防火フィルム（（ ）内は各層の厚み寸法）

11.2.1.1 ポリエステル防火フィルム

ポリエステル防火フィルムをモジュール表面の強化ガラスに貼り付けた際のフィルム構成断面図を図 11-1(a)に示す。モジュールのガラス面に接している厚さ 1.0mm の透明なケイ酸ソーダ系加熱膨張材には水分が含まれており、加熱されることにより水分が蒸発して 110℃以上で加熱膨張層が白く発泡する。最表面には 0.1mm の透明なポリエステルフィルムがあり加熱膨張材を保護している。

11.2.1.2 耐候性を持たせた防火フィルム

耐候性を持たせた防火フィルムをモジュール表面の強化ガラスに貼り付けた際のフィルム構成断面図を図 11-1(b)に示す。屋内での使用を想定しているポリエステル防火フィルムでは、最表面のポリエステルフィルムに耐候性がないため、モジュールの使用環境である屋外で使用するには不向きである。そこで試みとしてポリエステルフィルムを耐候性のあるポリテトラフルオロエチレンフィルムに置き換えた防火フィルムを作成した。ポリテトラフルオロエチレンフィルム自体は接着性が悪いため、接着剤として光学用透明粘着シート（日東電工株式会社、CS9621T）を用いた。この粘着シートはアクリル系接着剤が含まれており接着することが可能となった。

11.2.2 ブルーシート

消防隊が身近に所持している遮光物として、ブルーシートを選択した。ブルーシートの仕様は様々である。ここでは、市場で入手容易な青色のポリエチレン製のシートで#3000（3.6m×5.4mのシートにおいて質量が 3000g）のものを使用した。マイクロメーター（株式会社ミットヨ、CLM1-15QM）を用いて計測したブルーシートの厚みは 0.26mm（10 回計測平均値）であった。

11.3 種々の遮光物による発電抑制比較実験

本実験では、遮光しないモジュール（以下、無遮光モジュール）、ポリエステル防火フィルムを貼り付けたモジュール（以下、P モジュール）、耐候性を持たせた防火フィルムを貼り付けたモジュール（以下、PTFE モジュール）、ブルーシート 1 枚で覆ったモジュール（以下、BS1 モジュール）、ブルーシート 2 枚重ねて覆ったモジュール（以下、BS2 モジュール）の 5 種類のモジュールについて発電特性実験を行った。

11.3.1 目的

火災時に加熱膨張材が発泡することでモジュールによる発電を抑制する効果が期待できる防火フィルムを貼り付けたモジュール（P モジュール及び PTFE モジュール）が、未発泡（平常使用）時においてそれらを貼らない場合（無遮光モジュール）に対してどの程度出力が低下するのか実験により調べる。また、ブルーシートが発電抑制にどの程度効果的なのかあわせて調べる。

11.3.2 実験日及び実験場所

2012 年 11 月 7～8 日に消防研究センター・本館屋上にて本実験を実施した。

11.3.3 実験装置

本実験で用いる 5 枚のモジュールは、第 5 章の実験で用いたモジュールと同じ多結晶シリコン太陽電池モジュール（シャープ株式会社、ND-114CA（図 5-1、表 5-1））であり、156mm×156mm の 30 枚のセルから構成される。モジュールの厚さは 4.5mm であり、モジュールの周囲はアルミニウム製枠（厚さ 46mm）で囲まれている。遮光物については、7.2 で述べた通りである。

図 11-2 に実験装置の設置状況を示す。各モジュールは長手方向の一边を軸に地面に対して約 23° 傾けた状態で設置した。この設置角度は、「太陽電池モジュールの安全適格性確認－第 2 部：試験に関する要求事項 JIS C 8992-2 (IEC 61730-2)」で設定するモジュール傾斜角度と同じである。図 11-2 の左から PTFE モジュール、P モジュール、無遮光モジュール、BS1 モジュール、BS2 モジュールの 5 種類のモジュールが並べてある。

11.3.4 計測条件

天気は、晴れ時々曇りである。

無遮光モジュールと P モジュールの間において、照度計（コニカミノルタセンシング株式会社、T-10W_LA）により人間が感覚的に感じる光の明るさの目安として照度の経時変化を取得した。

各モジュールの出力端子には、通常使用時を想定した 2Ω の負荷抵抗を接続した。モジュール出力端子間にその負荷抵抗を接続し、抵抗両端の電圧をデータロガーで収集した。

サンプリング時間間隔は 10 秒でデータロガー（横河電機株式会社、MW100）に記録した。

計測開始日時は 7 日 12 時 0 分 0 秒であり、24 時間経過した 8 日 12 時 0 分 0 秒に計測を終了した。



図 11-2 種々の遮光物による発電抑制比較実験の様子
(左から PTFE モジュール、P モジュール、無遮光モジュール、
BS1 モジュール、BS2 モジュール)

11.3.5 結果と考察

日照による照度と各モジュールの出力電圧の関係を図 11-3 に示す。ここで、照度は雲の影響を強く受けることで時々刻々と変化し、また、各モジュールの出力電圧は同じ照度であっても雲や日が傾く影響から太陽光スペクトルの分布に違いが生じるため必ずしも同じにはならない。よって、1 種類のデータが二重三重に重なり複数のデータのように見えるが、1 種類のデータであることを注意されたい。概ね照度とモジュール出力電圧は線形関係にある。ただし、およそ 0 ~ 50000lx において、無遮光モジュール、P モジュール、PTFE モジュールでは照度に対してモジュール出力電圧が急に変化したり、全く変化せずに一定値を保ったりして、線形関係が崩れた。原因は不明であるが、線形関係にある照度とモジュール出力電圧の経時変化に時間差が生じると

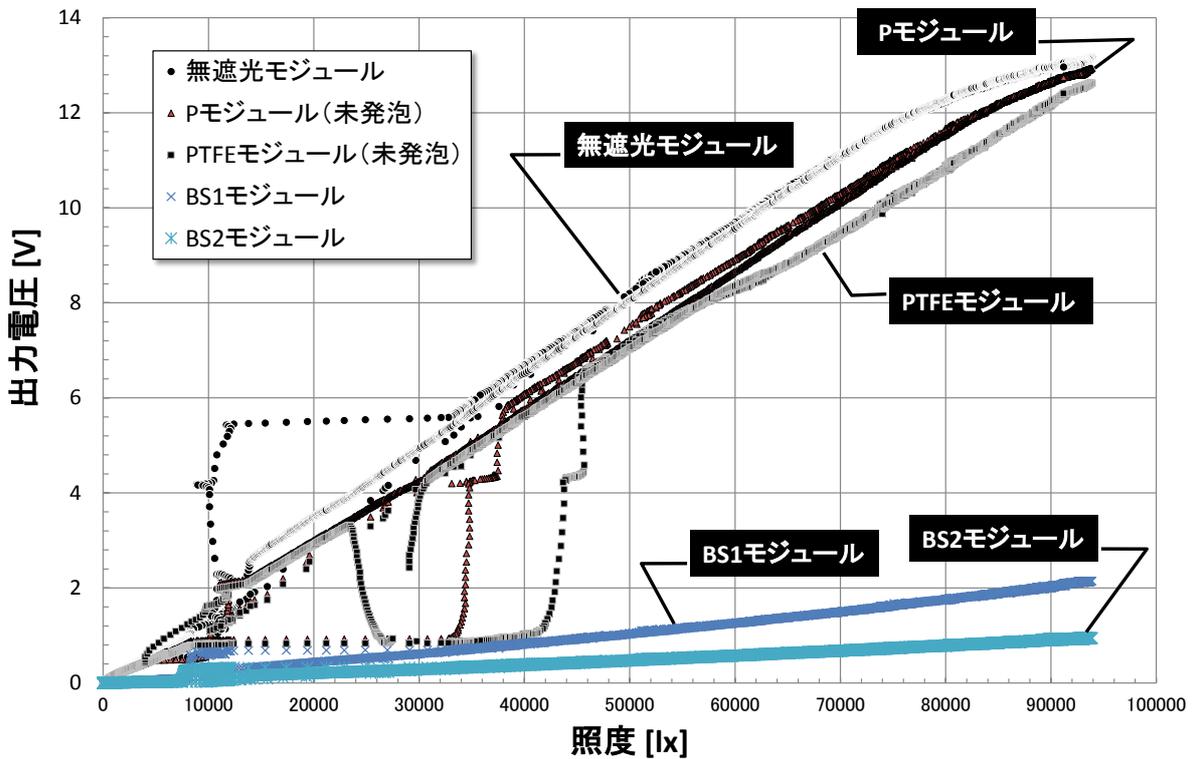


図 11-3 種々のモジュールにおける照度とモジュール出力電圧の関係

表 11-1 種々のモジュールにおける出力電圧・照度比と出力低減率

	出力電圧・照度比 [V/lx]	出力低減率 [%]
無遮光モジュール	1.60E-04	—
Pモジュール	1.46E-04	9
PTFEモジュール	1.38E-04	14
BS1モジュール	2.11E-05	87
BS2モジュール	9.66E-06	94

このようなグラフになる。また、それらのモジュールについて、モジュール出力電圧が 12V 前後でグラフの傾きが徐々に小さくなっていく。

グラフの直線性の良い 50000~70000lx の範囲において原点を通るような拘束条件の下に最小二乗法による線形近似を行うと、各モジュールの近似式の係数は、表 11-1 に示す出力電圧・照度比となる。この出力電圧・照度比は遮光物の効果を定量的に評価する際の指標となる。無遮光モジュールに対して、P モジュールは 9%、PTFE モジュールは 14% の出力低減率である。P モジュールに比べ、PTFE モジュールの出力低減率が高いのは、PTFE モジュールに貼り付けたポリテトラフルオロエチレンフィルムが白濁しているためであると考えられる。いずれも未発泡状態であり、平常時の発電を考慮すると出力低減率は低ければ低いほど良い。

一方、無遮光モジュールに対して、BS1 モジュールは 87%、BS2 モジュールは 94% の出力低減率である。こちらはブルーシートでモジュールを覆うことにより発電を抑制することが目的なので、出力低減率が高いほど良い。ブルーシート 1 枚でも 9 割近い発電抑制効果があるので、実用上使用した方が良い。ただし、あくまで発電を抑制するだけなので、出力がないわけではないことに注意は要する。また、懸念されることとして、ブルーシートの直近に火災がある場合、ブルーシートの材質によっては熱により軟化、熔融する恐れがあり、モジュールが露出することで十分な遮光効果が得られないことが考えられる。

11.4 ポリエステル防火フィルムを貼り付けたモジュールを設置した模擬家屋火災実験

遮光物のうちポリエステル防火フィルムの性能を調べるため、模擬家屋の屋根に P モジュールを設置し、ポリエステル防火フィルムの発泡状況や遮光性能を確認するための実験を行った。

11.4.1 目的

実火災に近い環境下におけるモジュールに貼り付けたポリエステル防火フィルムの発泡状況や遮光性能、モジュールの出力抑制効果を確認し、ポリエステル防火フィルムの有用性を検証することを目的とする。

11.4.2 実験日及び実験場所

2012 年 11 月 12 日に消防研究センター・大規模火災実験棟にて本実験を実施した。

11.4.3 実験装置

図 11-4 に示す模擬家屋は 1 階建て木造家屋である。主な開口部は玄関扉、腰高窓、掃き出し窓であり、台所に換気扇、天井裏に換気口がある。模擬家屋の屋根に P モジュールと比較のための無遮光モジュールを屋根と平行に各 1 枚並べて設置した。モジュールと屋根の隙間は約 13cm、設置角度は約 15° である。

模擬家屋の間取りは 1K の洋室で、ベッドやテーブル、衣類等が可燃物として存在する。出火は、天ぷら油が入った鍋をガステーブルで火にかけたまま放置したことによる（図 11-5）。第 5 章で使用した模擬家屋の天井は合板であったのに対し、本研究で用いた模擬家屋の天井は断熱ボードになっている。

11.4.4 計測条件

実験開始時の環境について、雰囲気温度 18℃、相対湿度 69%、気圧 999hPa であった。

赤外線サーモグラフィ装置（放射率 1.00）を用いてモジュールの表面温度の経時変化を計測した。模擬家屋の室内温度（以下、火災室温度）として居室天井の中央から 1cm 下方においても

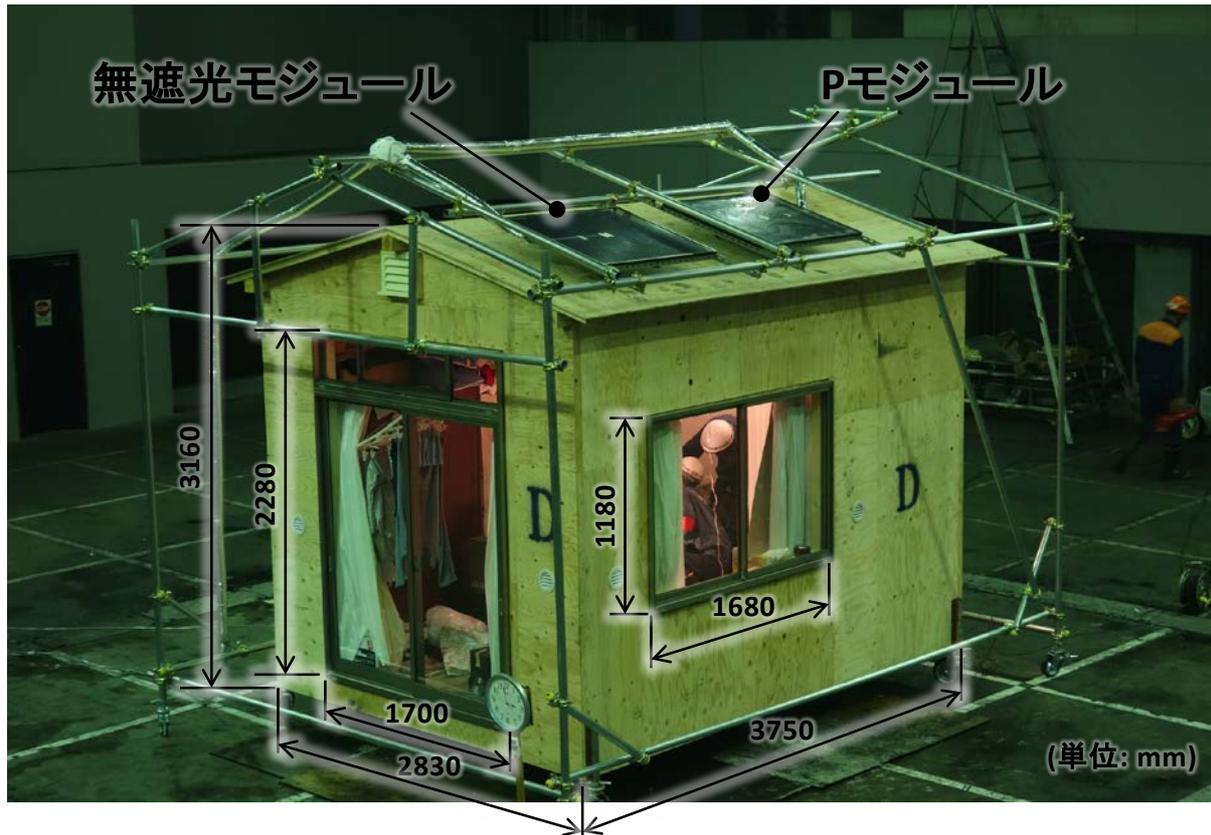


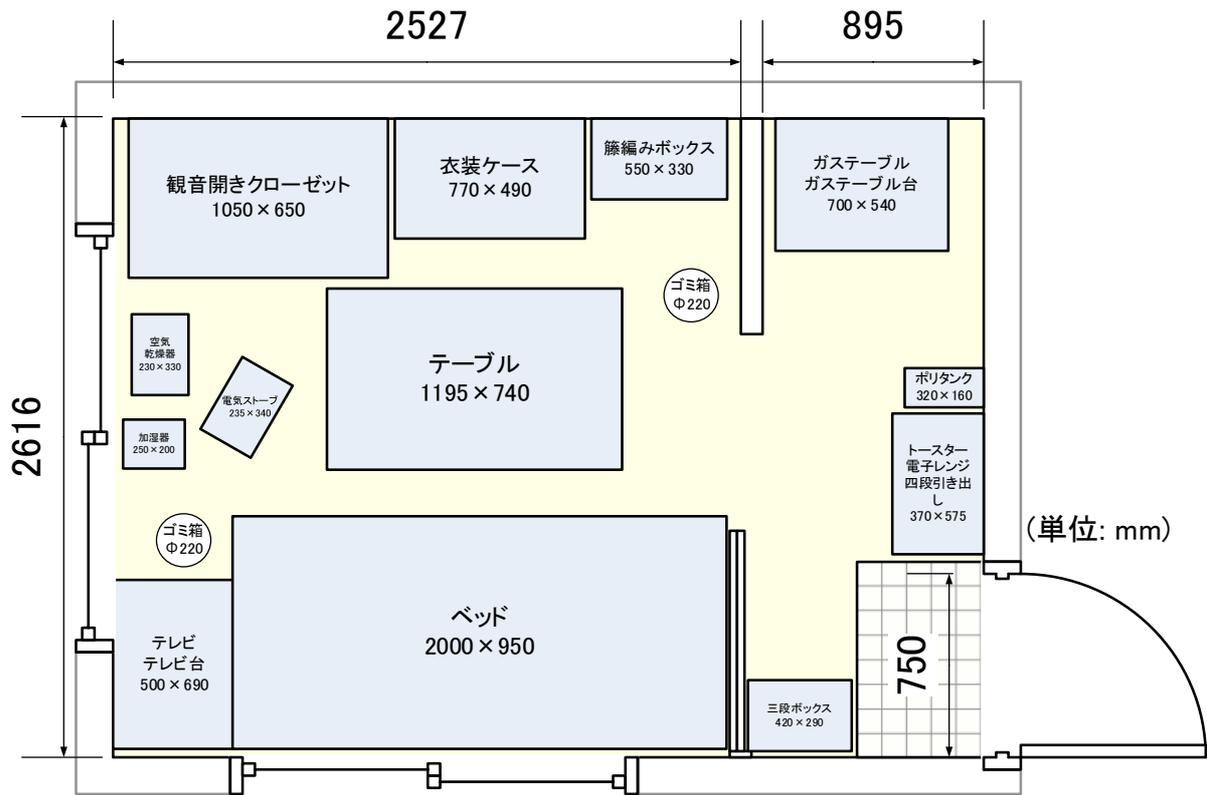
図 11-4 模擬家屋の外観とモジュールの設置状況

K 型熱電対により温度を計測した。温度計測のサンプリング時間間隔は 10 秒である。

11.4.5 結果と考察

図 11-6 に P モジュールの表面中央温度と出力電圧の経時変化のうち盛期火災時の時間帯を中心に示す。開口部を閉鎖した状態で実験を開始し、室内に黒煙が溜まった状態になる。実験開始から約 960 秒後、とび口を使って掃き出し窓のガラスを破壊することで外気が室内に入り込み火勢が急に強くなる。その 30 秒後、掃き出し窓から噴出火炎が出現し盛期火災に至る。盛期火災時の火災室の温度はおよそ 800℃前後を維持する。消火されるまでの 160 秒間、火炎からの光を受けた P モジュールから電圧が出力され、最大約 2.2V まで達した。その時のモジュールの火炎曝露状況を図 11-7 に示す。模擬家屋の天井材は断熱ボードであったため屋根が燃える抜けることはなかった。主に開口部から噴出した火炎がモジュールを曝露することになるが、写真からは接炎しているようには見えない。P モジュールの表面温度は、盛期火災開始から 60 秒くらいの間に 200℃を超え、それ以降は間欠的かつ瞬間的に 110℃を超え温度上昇する場合もあるが約 80℃を推移していた。

図 11-8 は実験後の P モジュールである。加熱膨張材が全面にわたって発泡するには至らなかったが、P モジュールの左下隅では最表面のポリエステルフィルムは残存していたものの加熱膨張材は発泡していた。全面にわたって加熱膨張材が発泡しなかった理由としては、加熱膨張材に含まれる水分が全面にわたって気化するほどの熱量に至らなかったことで、P モジュール表面温度が 100℃をなかなか超えきれず、約 80℃で推移して加熱膨張材が発泡するための温度 110℃



(a) 平面図



(b) 写真 (左: 居室、右: 台所 (出火元))

図 11-5 模擬家屋内部の状況

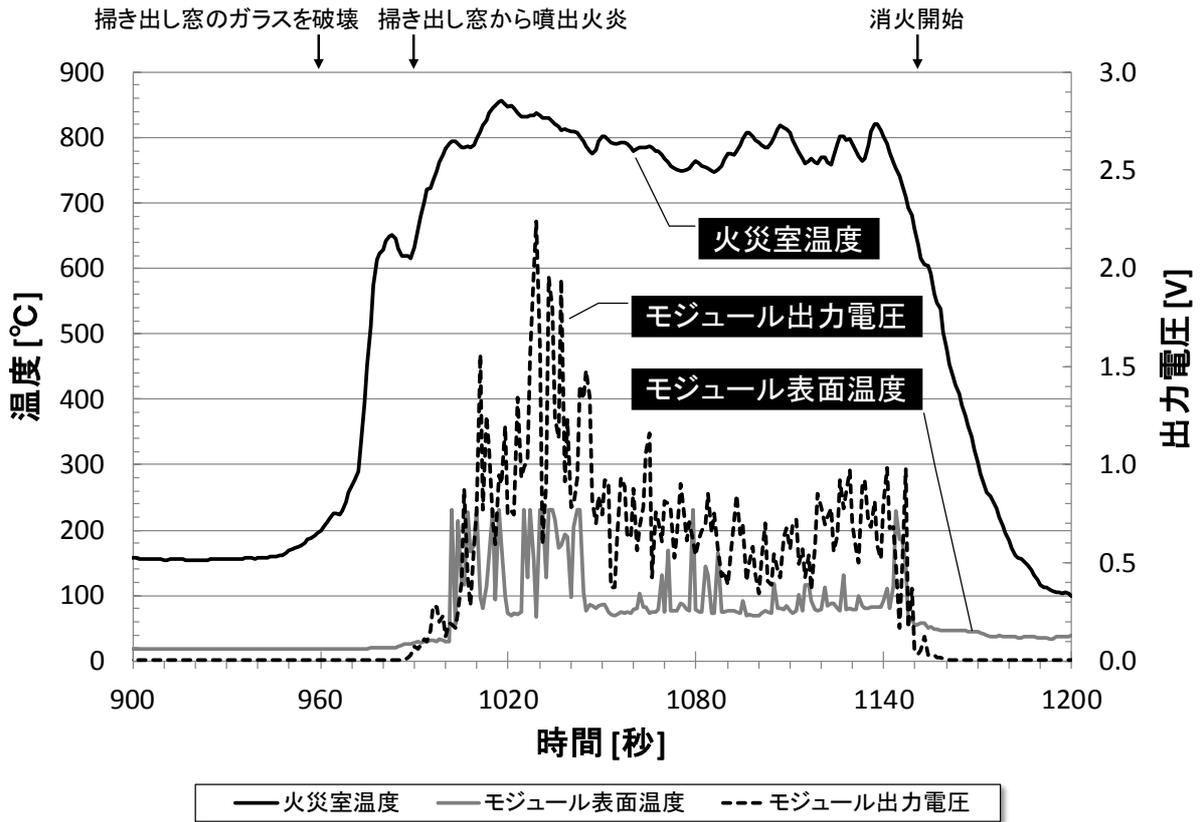


図 11-6 P モジュールの表面温度と出力電圧の経時変化 (模擬家屋火災)



図 11-7 モジュール出力電圧最大時のモジュールの火炎曝露状況

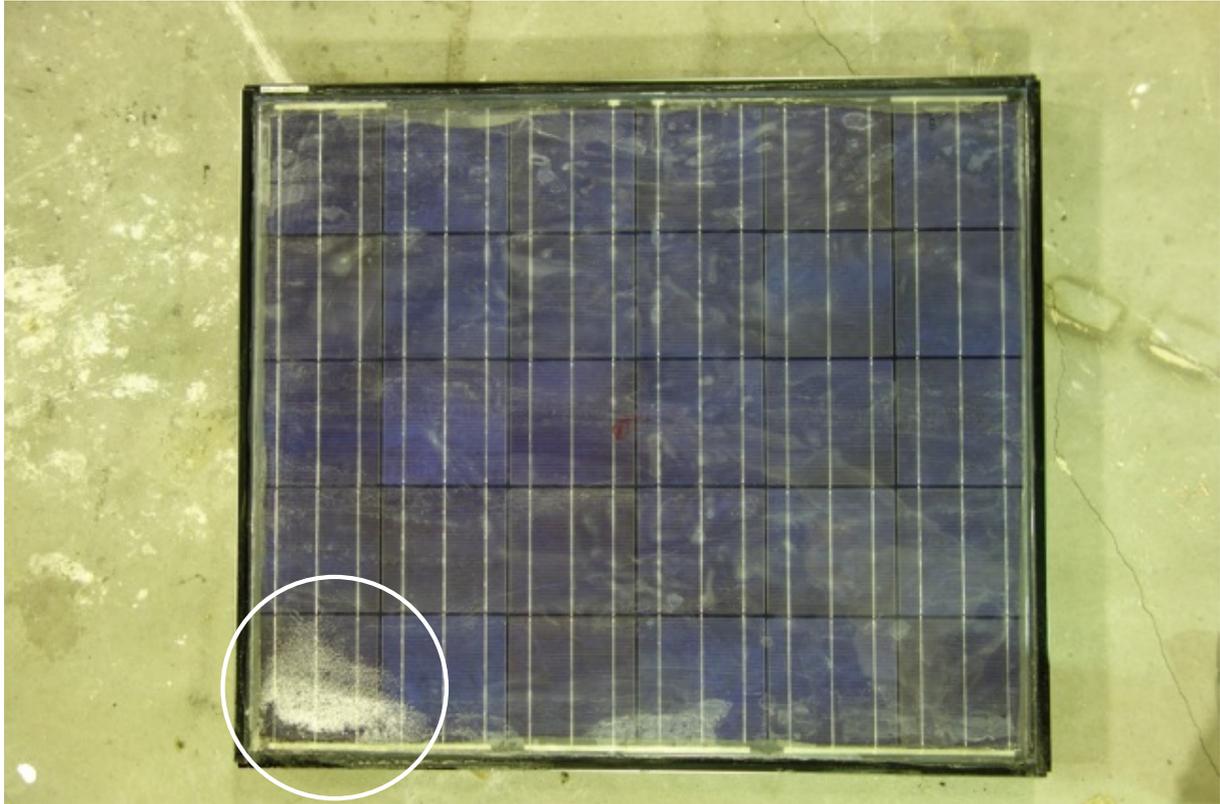


図 11-8 実験後の P モジュール（左下隅に発泡箇所があった（○で囲まれた場所））

以上に安定的に維持できなかったものとする。

11.5 ポリエステル防火フィルムの発泡特性と発電抑制効果

模擬家屋火災実験において発泡しなかったポリエステル防火フィルムが発泡した場合、どの程度発電を抑制できるのかを調べるための発電抑制効果実験（以下、発電抑制効果実験）を行った。また、未発泡 P モジュールを加熱した時の発泡性状をより詳細に調べる実験（以下、ポリエステル防火フィルム加熱実験）を行った。尚、発電抑制効果実験については、11.3 を補足するものである。

11.5.1 目的

ガスバーナーの火炎を接炎させることにより強制的に発泡させたポリエステル防火フィルムによりモジュールによる発電をどの程度抑制する効果が期待できるか調べた。また、P モジュールの表面をガスバーナーにより加熱し、どのような発泡特性があるか、なぜ模擬家屋火災実験時にポリエステル防火フィルムが発泡しなかったのかについて調べる。

11.5.2 実験日及び実験場所

11.5.2.1 発電抑制効果実験

2012 年 11 月 13、15 日に消防研究センター敷地内にて本実験を実施した。

11.5.2.2 ポリエステル防火フィルム加熱実験

2012 年 12 月 13、18、25 日に消防研究センター・試験火災実験室にて本実験を実施した。

11.5.3 実験装置

11.5.3.1 発電抑制効果実験

ガスバーナーの火炎を接炎させることにより強制的に発泡させた P モジュール及び比較のための無遮光モジュールをそれぞれ 1 枚ずつ用い、長手方向の一边を軸に地面に対して約 23° 傾けた状態で設置した (図 11-9)。発泡済み P モジュールについて、ポリエステル防火フィルムのポリエステルフィルムは発泡時に燃焼により除去されている。

11.5.3.2 ポリエステル防火フィルム加熱実験

図 11-10 にポリエステル防火フィルム加熱実験の実験装置 (寸法は内法) を示す。250mm の深さの断熱ボード製天蓋の天井面中央を 300mm 四方に切り抜き、そこへ 400mm 四方に切り出した P モジュールをポリエステル防火フィルムの面が下側になるように設置し、モジュール周囲から熱気流が逃げないように天井と同じものをその上から更にかぶせた。天蓋の下から都市ガスを燃料としたガスコンロ (株式会社タチバナ製作所、TS-210H) で熱気流を生成した。

11.5.4 計測条件

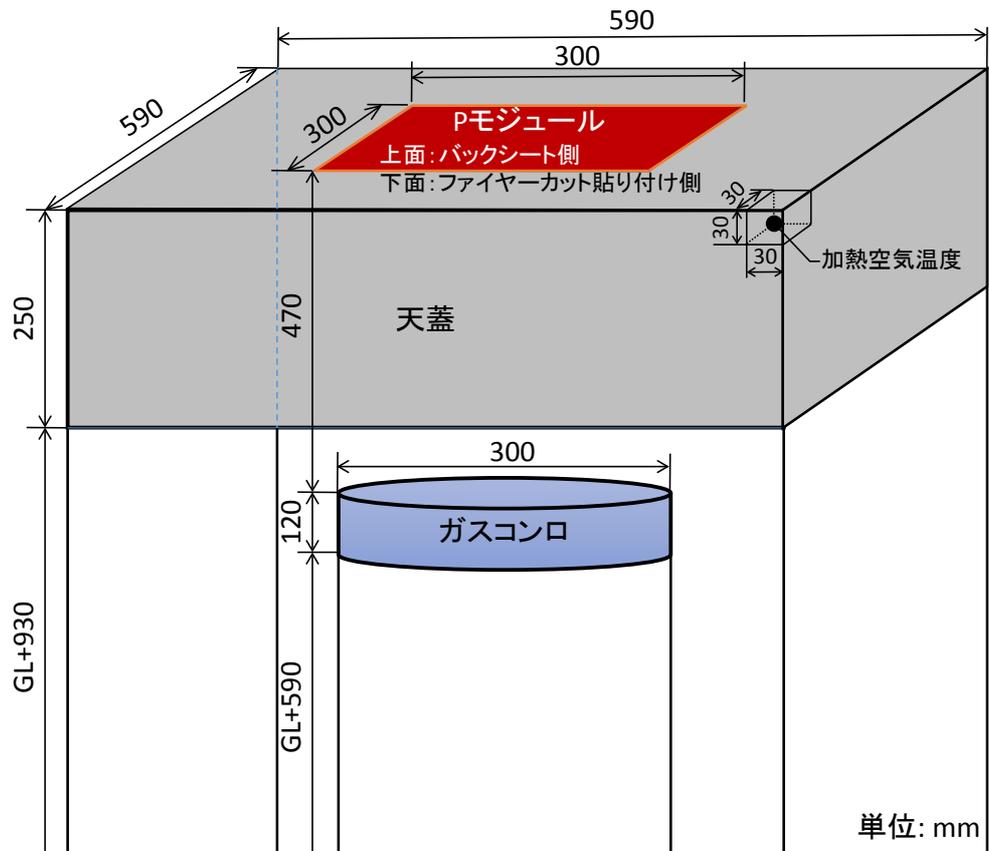
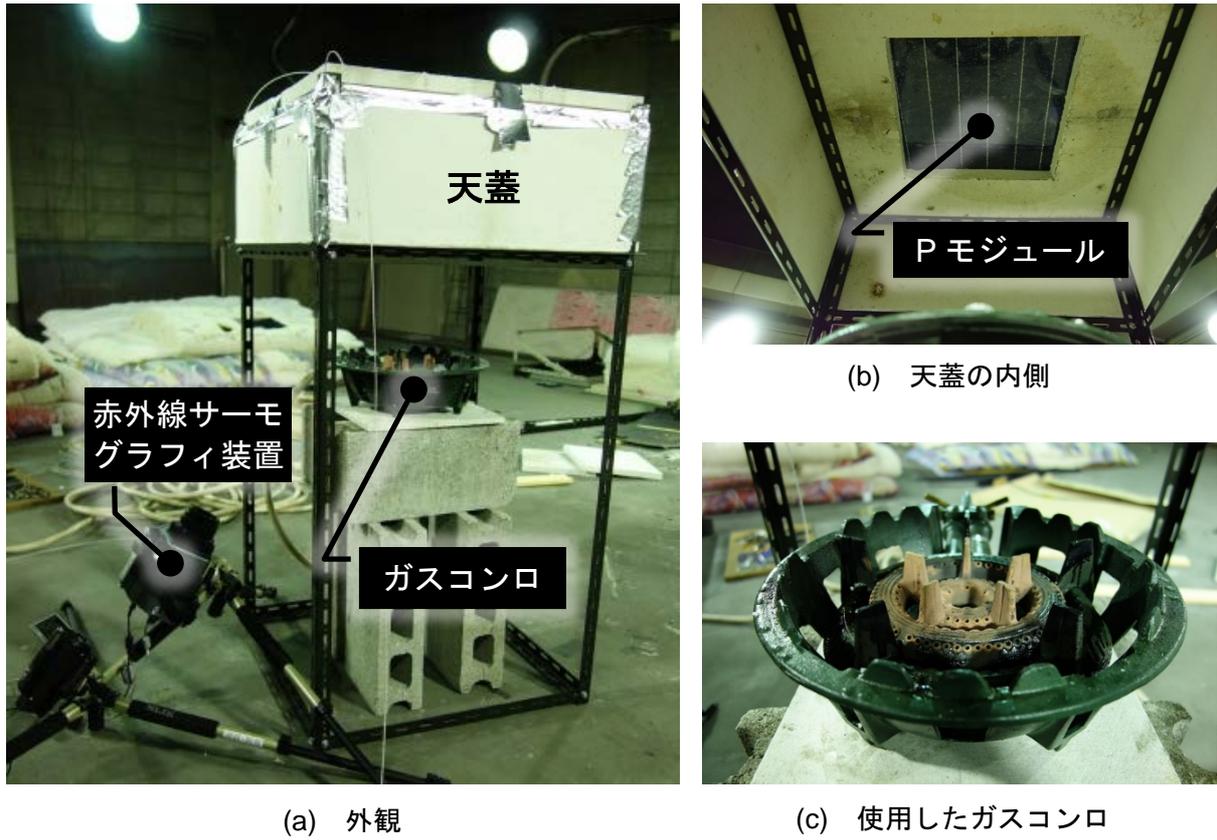
11.5.4.1 発電抑制効果実験

無遮光モジュールと P モジュールの間において、照度計により照度の経時変化を取得した。

各モジュールの出力端子には、通常使用時を想定した 2Ω の負荷抵抗を接続した。モジュール出力端子間にその負荷抵抗を接続し、抵抗両端の電圧をデータロガーで収集した。サンプリング時間間隔は 1 秒である。



図 11-9 発電抑制効果実験の実験装置



(d) 寸法

図 11-10 ポリエステル防火フィルム加熱実験の実験装置

11.5.4.2 ポリエステル防火フィルム加熱実験

図 11-10(a)に示すように、P モジュールにポリエステル防火フィルムを貼り付けた表面中央温度を天蓋の内側を下から見上げる位置から赤外線サーモグラフィ装置（放射率 1.00）で、バックシート側の裏面中央温度及び天蓋の隅にて加熱空気温度を K 型熱電対（心線直径 0.32mm）で計測し、データロガーに記録した。表面中央温度のサンプリング時間間隔は 1/60 秒（1 秒あたり 60 フレームの映像として記録したため）、裏面中央温度のサンプリング時間間隔は 1 秒である。

11.5.5 結果と考察

11.5.5.1 発電抑制効果実験

図 11-11 に発泡済み P モジュールにおける照度とモジュール出力電圧の関係を示す。ここで、図 11-3 と同様に、1 種類のデータが二重三重に重なり複数のデータのように見えるが、1 種類のデータであることに注意されたい。11.3.5 と同様に、図 11-11 に示す照度とモジュール出力電圧の関係より $0 \sim 70000lx$ の範囲において原点を通るような拘束条件の下に最小二乗法による線形近似を行うと、発泡済み P モジュールの近似式の係数は、表 11-2 に示す出力電圧・照度比となる。無遮光モジュールに比べて発泡済み P モジュールは 84% の出力低減率である。BS1 モジュールの出力低減率は 87% であったから、発泡済みのポリエステル防火フィルムはブルーシート 1 枚の遮光性能に匹敵し、全面が発泡した場合には実用的な遮光性能を持つと考える。

11.5.5.2 ポリエステル防火フィルム加熱実験

ポリエステル防火フィルムが発泡している状況を図 11-12 に示す。加熱開始から約 6 分後、ポリエステル防火フィルムの加熱膨張材の中央付近が局所的に発泡し始め、その部分が白くなる。加熱開始から 7 分後、加熱膨張材の中央付近に直径約 10cm の大ききで円形に発泡し山状（下に凸）に盛り上がる。加熱開始から 8 分後にその直径が約 20cm になる。その間、ポリエステルフィルムは伸張するだけで熔融はない。加熱開始から 13 分後、直径約 30cm の円形に発泡する。加熱開始から 21 分後、局所的に加熱膨張材に含まれていた水分が沸騰しているのが目視できる。加熱開始から 36 分後、発泡していた加熱膨張材を崩すようにポリエステルフィルムの中央に水が集まって沸騰していた（図 11-12）。加熱開始から 60 分後の終了までポリエステルフィルムを破壊することはなかった。

図 11-13 に加熱空気温度、P モジュールの表面温度及び裏面温度の経時変化を示す。ここで、モジュール表面温度はデータが保存できた加熱開始から約 35 分後までを表示している。また、瞬間的に温度が低下している部分が間欠的に見られるが、測定に使用した赤外線サーモグラフィ装置が間欠的にキャリブレーションすることにより生じ、サンプリング時間間隔が 1/60 秒と短いことでその瞬間のデータを取得したものである。加熱空気温度は加熱開始から 1 分後に 100℃ 以上に達し、その後徐々に温度上昇しながら実験終了の 60 分後までの間、190～200℃程度の温度を維持した。

P モジュールの表面温度は、加熱空気温度の上昇に少し遅れて温度上昇し、ポリエステル防火フィルムの加熱膨張材が局所的に発泡し始めるのが加熱開始から 6 分後であり、その時のモジュール表面温度は約 100℃である。その後、加熱開始から 21 分後に 180℃に達した。加熱開始から 21 分後、加熱膨張材に含まれていた水分が沸騰を開始するのに合わせて、モジュール表面温度が低下し始めた。この理由は、水が沸騰した際に生じた蒸気がモジュールの縁から逃げることと熱量を失ったことが原因であると考えられる。

P モジュールの裏面温度が、表面温度より更に遅れて温度上昇し、加熱開始から 8 分後に 90 ~100℃付近で一定となる。加熱膨張材に含まれる水分が蒸発せずに液相を維持している部分もあったため裏面温度は 110℃以上にならないものとする。

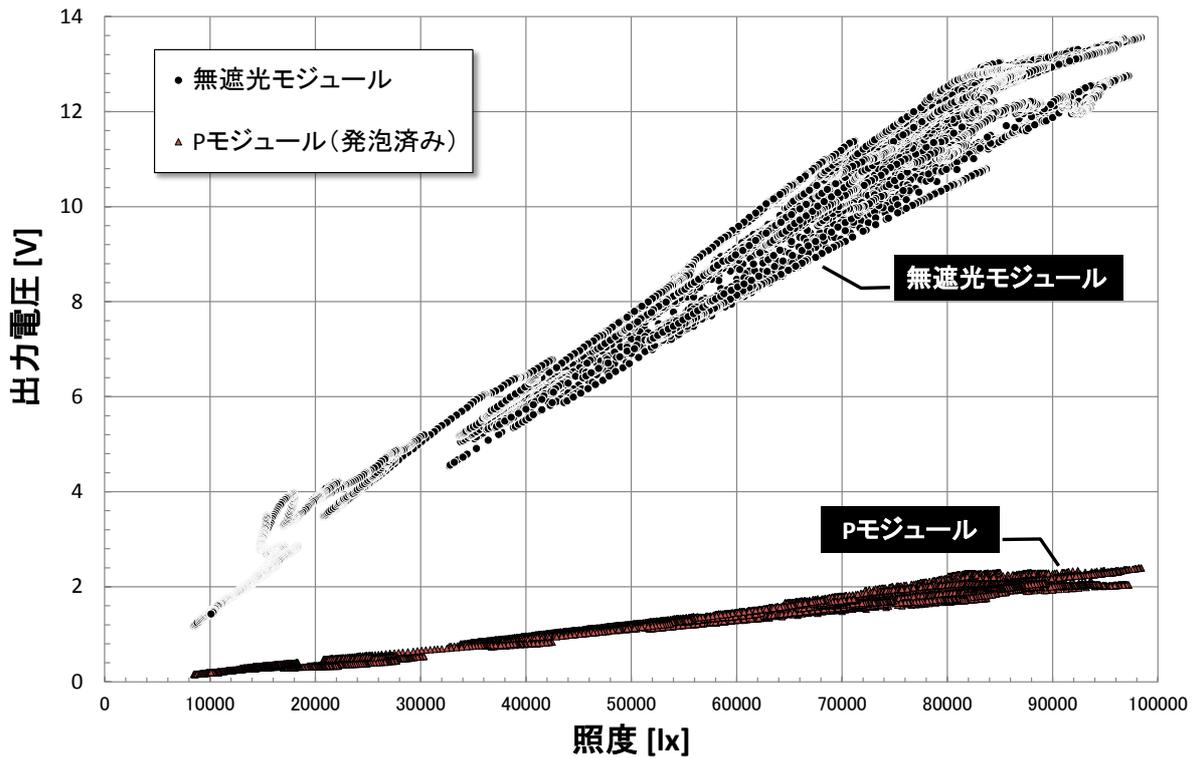


図 11-11 発泡済み P モジュールにおける照度とモジュール出力電圧の関係

表 11-2 発泡済み P モジュールにおける出力電圧・照度比と出力低減率

モジュールの状態	出力電圧・照度比 [V/lx]	出力低減率 [%]
無遮光モジュール	1.49E-04	—
発泡済みPモジュール	2.34E-05	84

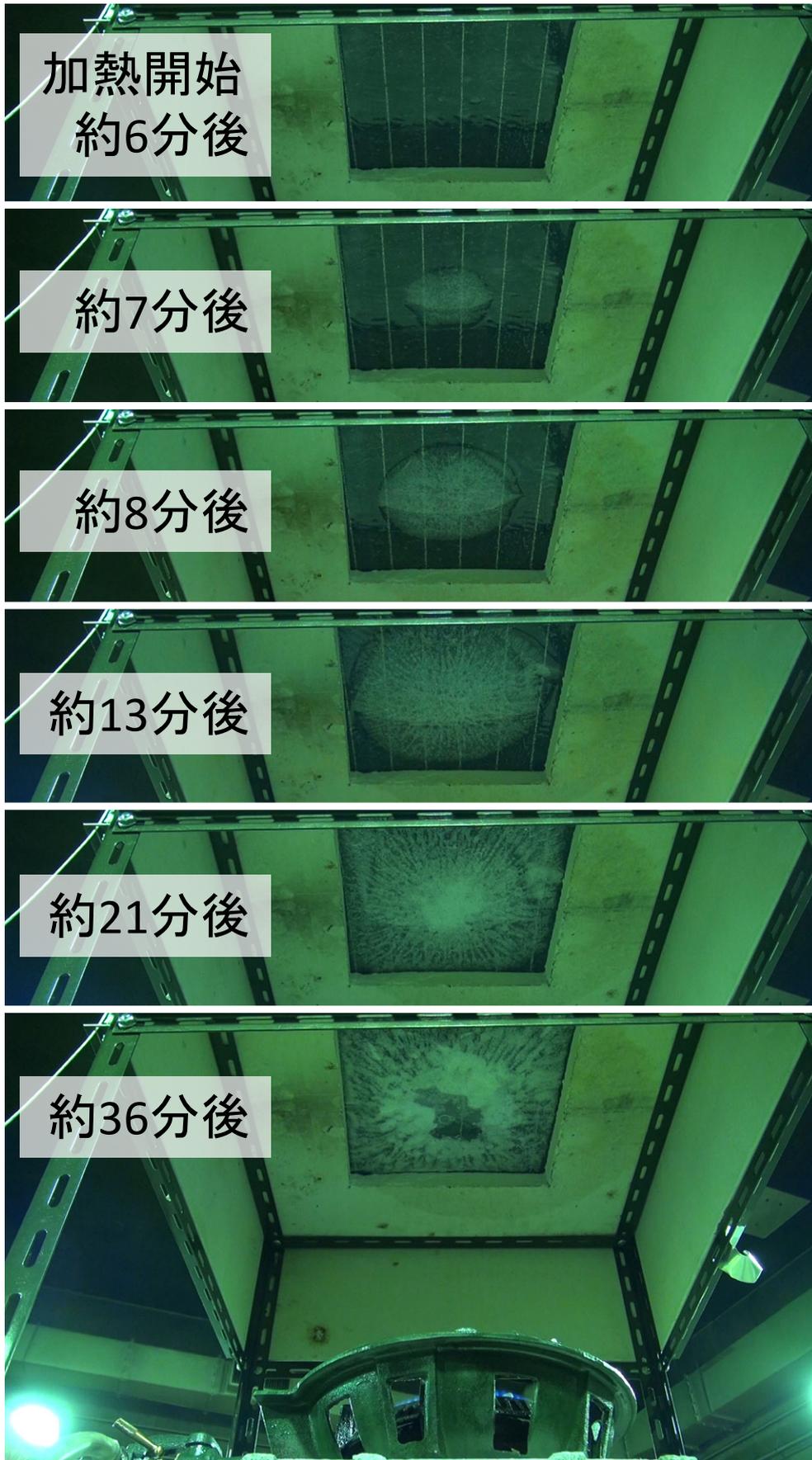


図 11-12 ポリエステル防火フィルムが発泡している状況

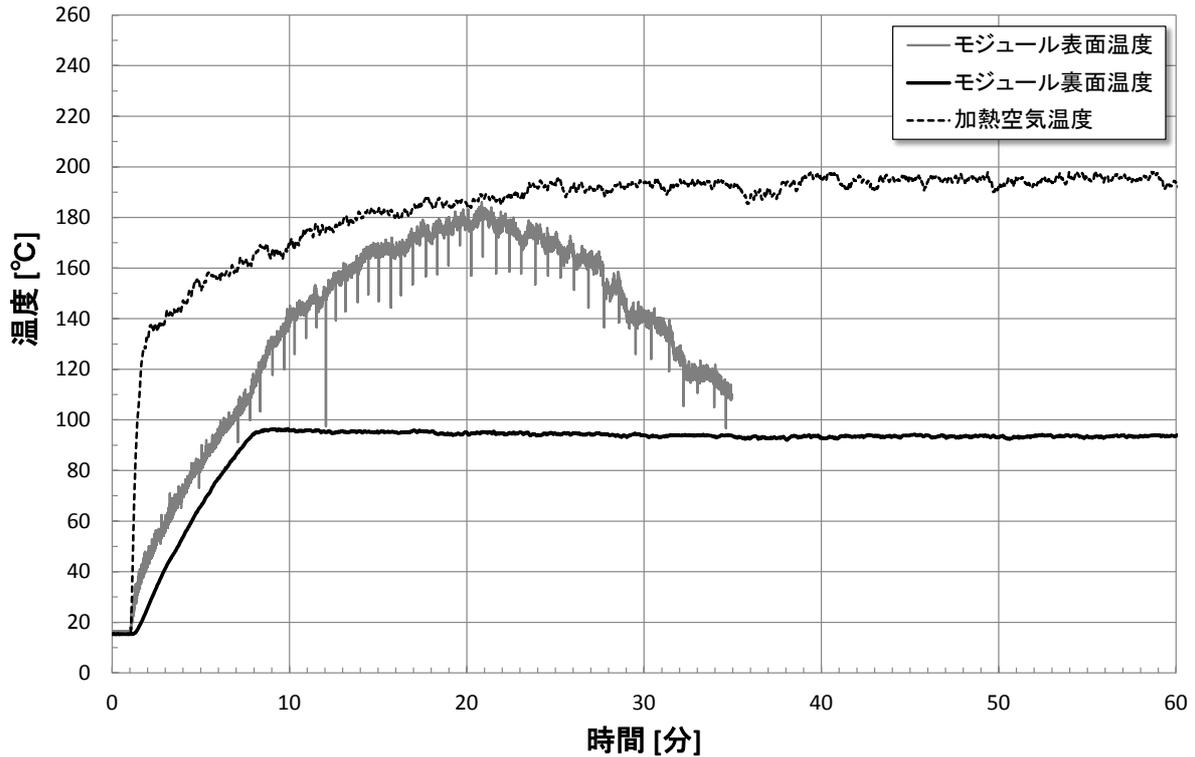


図 11-13 P モジュールの表面及び裏面中央温度の経時変化
(ポリエステル防火フィルム加熱実験)

11.6 まとめ

種々の遮光物によるモジュールの発電抑制効果を実験により調べた。実験を行った範囲では、ブルーシートや全面が発泡したポリエステル防火フィルムは実用的な遮光性能を有していると考えられる。今後、総合的な火災時遮光機能を目的とした防火フィルムに求められる性能としては、通常使用時では発電量を低減させないように光透過性がさらに高く、モジュールの一部としての機械的強度がある一方で、火災時には応答性良く発泡すること、さらに、紫外線で劣化しない耐候性、簡単にフィルムを交換できるメンテナンス容易性、普及することに欠かせない低コストが求められる。それらの性能を満たした時に防火フィルムは PV の火災危険性に対応できる実用的手段の一つになるものと考えられる。

謝辞

消防大学校火災調査科第 24 期・模擬家屋調査実習における模擬家屋火災実験に合わせて実験を実施させていただきました。ここに記して御協力いただきました関係各位へ感謝の意を表します。

12. 消防活動を行う上での留意点

12.1 はじめに

太陽光発電システム（Photovoltaic power system、以下 PV）は、太陽電池モジュール（以下、モジュール）によって光エネルギーを電気エネルギーに変換している。光を遮らない限り、一部のモジュールを除いて破壊等の他の手段で発電を停止させることは難しく、火災の初期から鎮火後まで、感電の可能性がある。これは、従来の送電線からの電源回路遮断と異なり、電力会社を現場に要請したとしても防ぐことが難しいという点で特徴的である。

また、PV は、屋根、屋上等高所に設置されることも多いことから、そのような活動現場では、落下の危険性にも注意が必要となる。

本章では、消火活動開始前、消火活動中、火災鎮圧後という時間推移に沿って、留意すべき事項をとりまとめたので、参考としていただきたい。

12.2 消火活動開始前の留意事項

12.2.1 太陽光発電システムの設置状況の確認

建物火災の消火活動のために出場した場合、その対象建物に、PV が設置されているか否かを確認しなければならない。

PV の建物への設置が始まった頃は、既存の建物の屋根や屋上に設置用の架台が取り付けられる等外見からも比較的判りやすいものだったが、近年では、屋根材と一体になったものや、透明・半透明なもの、曲面にシート状に貼り付けられたもの等、様々なモジュールが開発されており、注意深く観察しなければ、PV が設置されているのかわからない建物も存在する。

指揮者は火点一巡する際に PV の設置有無についても必ず確認し、設置されている場合には、活動上の危険要因としてその規模や位置を全隊に周知する必要がある。また、確証が得られない場合には、建物関係者や付近住民に積極的に情報収集を行う必要がある。

一方、消防隊員も設置に気づいた場合には、指揮本部に報告することが求められる。

12.2.2 個人装備の選択

PV が設置されている火災現場では、感電を念頭に置いて、個人装備を選択することが必要である。電気は回路が形成されなければ流れないため、感電事故は、絶縁性を高めることで防ぐことが可能である。

我々の研究でも、乾燥した手袋は濡れた手袋と比較して格段に絶縁性が高く、とび口の柄のような木製の器具も乾燥していると絶縁性が高いことが判明している。

また、利用を始めた時には撥水性を持っていた装備品も、繰り返し利用することによって、撥水性を失ってしまうことがあるため、手袋等はなるべく新しいものを使用することが望ましい。

12.3 消火活動中の留意事項

12.3.1 太陽光発電システムの状況把握

PV は、光を受けて発電をするため、火炎から発せられる光を受けても発電する。我々の実験では、ヘプタン火炎の光によるモジュールの発電状況を調べた結果、光源として人工太陽照明灯とヘプタン火炎を用いた場合を比較すると、同じ照度ではヘプタン火炎のほうがモジュールの出

力電圧は高くなった。更に、屋外実験や実大火災実験を通じて、水銀灯及び太陽光よりも同照度の火炎光を受光したほうが、モジュールが高い出力電圧を示すことが判った。このことから、夜間の消防活動であっても、火炎の光によって見た目から想定される以上の発電がおこなわれている恐れがあることに注意が必要である。

また、国内で設置されている PV は閉回路になるように設計されているため、健全な稼働状態の PV に触れても感電の可能性は低いが、火災の際には配線が火炎や熱気によって損傷している可能性がある。損傷した配線が、近くの物（例えば、PV が設置された建物での火災の場合は、建物の柱、梁、水を含んだ断熱材等）に触れていると、消防隊員が PV に触れた際に新たな回路が形成され、感電してしまう可能性があることから注意が必要である。

これらの事から、消火活動中は、PV の損傷状況について、できる限り把握するようにしなければならない。

12.3.2 放水方法

PV が設置されている火災現場では、前述のとおり、感電の危険性がある。PV の損傷状況を考慮のうえ、水にぬれても高い絶縁性能のある手袋及び靴を着用する、PV への放水は基本的に噴霧注水とし、棒状注水を行う場合は十分な距離を取る等、電気火災の場合と同様の対策が必要である。

また、PV が設置されている建物で発生した火災では、モジュールの背面に回り込んだ火炎がバックシートを燃焼させる場合がある一方で、モジュール表面のガラスやモジュールを支える架台が放水の障害となり、モジュールの背面の消火が困難となる場合がある。

これらを考慮のうえ、放水方法を選択する必要がある。

12.3.3 煙の排出口確保や安全確保のための破壊作業

消火活動の際、煙の排出口を確保するために天井に開口部を作ることや、天井からのモジュールの落下による危険を排除することを目的として、屋根や屋上のモジュールを破壊する場合がある。

その際、屋根材一体型のモジュールの場合、普通の屋根と見分けがつけづらい場合があるので、屋根材を注意深く観察し、破壊対象がモジュールで有るか否かを確認する必要がある。

我々の研究では、モジュールを破壊する際の現象について検証するために、破壊器具を用いて数種類のモジュールの破壊実験を行った。CIS モジュールの破壊実験では 1 カ所でも貫通するほどに破壊すると発電が停止したが、単結晶シリコンや多結晶シリコンを用いたモジュールでは数カ所を破壊しても発電が継続した。

また、破壊器具を用いてモジュールを破壊する場合、破壊器具を通じて消防隊員が感電する可能性があるため、絶縁性能を確保するために、水にぬれても高い絶縁性能のある手袋及び靴を着用したり、柄が木製の破壊器具の場合はなるべく乾燥した破壊器具を利用したりする等、感電に対する注意が必要である。

破壊時には、消防隊員の顔面保護のためゴーグル等を使用する必要がある。

尚、実験では太陽光の下で発電状態にある単結晶シリコンを用いたモジュールを破壊器具で破壊した時、破壊箇所にアーク放電と思われる眩しい光が発生するとともに、モジュールに用いられている高分子化合物が燃える事例があった。同様の現象により周囲の可燃物に着火しないよう注意することも必要である。

このように、破壊作業に伴って新たな危険が発生することがあるため、作業を行う消防隊員には、事前にそのような危険要因を理解させる必要がある。その上で、消防隊員の感電やモジュール落下等による二次災害を防止するため、指揮者の強い統制のもと、周囲の状況確認や足場の確保、落下防止措置をとった上で作業を行う事が重要である。

12.3.4 太陽光発電システムの発電停止措置

モジュールの発電を止めるためには、モジュール表面に光が当たらないようにしなければならないが、モジュール表面に光が当たらないようにする方法にも一長一短があり、決め手に欠ける状況にある。

我々が実験を行った範囲では、ブルーシートで覆う場合や、熱により発泡するポリエステル防火シートをモジュールに貼付し全面が発泡した場合には、実用的な遮光性能が得られることが判った。

ブルーシートでモジュールを覆う場合、無遮光のモジュールに比べ、ブルーシート1枚で覆った場合には87%、ブルーシート2枚で覆った場合には94%の出力電圧の低減効果が得られ、全面が発泡したポリエステル防火シートでは84%の出力低減効果が得られた。

尚、ブルーシートを利用する場合には、火災に起因する熱により軟化、熔融、収縮する可能性があり、十分に遮光効果が得られない可能性がある。

さらに、モジュールが屋根や屋上に設置されている場合には、高所の作業となり危険であるとともに、PVの損傷状況によっては感電の危険性がある。直接的に生死にかかわるほどの感電ではなかったとしても、感電の衝撃等により転落の恐れがあることから注意が必要である。

また、熱により発泡するポリエステル防火シートは、耐候性や受熱に対する応答性等改良の余地が大きく、まだまだ実用的手段とは言えない状況である。

12.3.5 太陽電池モジュール落下の警戒

PVの重量は、モジュール及び架台の重量を合計するとかなりのものとなる。建物の屋上や屋根にPVが設置されている場合、火災によりPVを支持する構造部材の強度が低下すると、落下の危険性がある。

また、火災の熱によりモジュールが高温になった場合には、モジュール表面の強化ガラスの圧縮応力が解放され、フロートガラスに変化している場合がある。この場合、モジュールのガラスが割れた時に細片とはならず、大きな破片や鋭利な破片が落下してくる可能性があるため、危険を察知したら緊急退避することが求められる。

通常の消防活動において、棒状注水により落下危険のある屋根瓦等を払い落とすことがあるが、同様の目的で落下危険のあるモジュールを払い落とす際には、12.3.2で述べたように、至近距離での棒状注水をなるべく避けるとともに、真下に消防隊員がいないように指揮者の統制のもと、十分に注意して行う必要がある。

12.3.6 燃焼生成ガスに関する注意

日々、モジュールの開発は進められており、様々な素材が用いられている。我々の研究グループでは、モジュールが火災に巻き込まれた際、どのような燃焼生成ガスが発生するかを実験により調べた。その結果、ポリフッ化ビニルが用いられているモジュールの燃焼生成ガスに、フッ化水素や四フッ化ケイ素といった有害なハロゲン化合物が含まれている場合があった。PVに含まれる可燃性物質の量は限られているが、これらのガスは健康被害をもたらす可能性があることか

ら、消火活動時には煙の流れ、空気呼吸器の装備、警戒区域の設定に注意して活動する必要がある。

12.4 火災鎮圧後の留意事項（残火確認の際の注意事項）

12.4.1 太陽光発電システムの状況確認

火災鎮圧後に残火確認等のために現場に立ち入る場合にも、PV の状況を確認すべきである。

我々の実験では、単結晶シリコンを用いたモジュールの発電能力が火災により破損し、出力電圧が 0V になった後、時間の経過とともに 84% まで回復した事例があった。また、表面を覆う強化ガラスのみを破壊しても、出力電圧に殆ど変化が見られないという結果が得られた。火災の熱により損傷しているように見えても、消防隊員を感電させるのに十分な発電能力を有している可能性があることから、注意が必要である。

また、PV は、モジュール及び架台を合計するとかなりの重量があることから、建物の屋上や屋根に PV が設置されている場合、火災により PV を支持する構造部材の強度が低下すると、PV の一部が落下する可能性や、建物の PV が設置されている部分が崩壊する可能性があるため、注意が必要である。

さらに、火災の熱によりモジュールが高温になった場合には、モジュール表面の強化ガラスの圧縮応力が解放され、フロートガラスに変化している場合がある。この場合、モジュールから、大きな破片や鋭利な破片が落下してくる可能性があるため、注意が必要である。

12.4.2 残火確認のための破壊作業

PV が設置された建物での火災を消火した際、屋根裏の残火確認のために屋根を破壊する場合にも、感電の可能性がある。

感電の危険を避けるため、破壊する屋根材が屋根材一体型のモジュールか否かを確認する必要がある。

モジュールを破壊する場合には、絶縁性能を確保するために、水にぬれても高い絶縁性能のある手袋及び靴を着用する等、感電に対する備えが必要である。

また、PV が破損して配線が建物の建材等に触れている場合には、建材に触れた際に、湿った建材を通じて回路が形成される可能性があるため、注意が必要である。

12.4.3 太陽電池モジュールの取り外し

火災鎮圧後、モジュールの落下防止等を目的としてモジュールを取り外さなければならない場合があると考えられるが、その場合には、感電及び高所からの転落に注意する必要がある。

12.4.1 でも触れたとおり、モジュールの出力電圧は、火災時に 0V になったとしても、時間の経過とともに回復することがある。

そして、回路が形成されると電気が流れる可能性があることから、不要な回路が形成されないよう注意して作業を行う必要がある。

さらに、モジュールが屋根や屋上に設置されている場合には、高所の作業となり危険が伴う。前述のとおり、PV の損傷状況によっては感電の危険性があり、直接的に生死にかかわるほどの感電ではなかったとしても感電の衝撃等により転落の恐れがあることから、注意が必要である。

12.4.4 取り外した太陽電池モジュールの取り扱い

モジュールは、取り外しても光を受けて発電を行っている。端子部分を絶縁テープ等で覆うと

ともに、モジュール表面に光が当たらないよう、受光面を遮光したり、受光面を下にして設置したり、適切な箱があれば格納したりすることが必要である。

また、可燃物の近くにモジュールを置かないようにするとともに、状況によっては標示テープ等で囲んで注意喚起することが必要である。

12.5 まとめ

本章では、我々の研究結果を踏まえ、消火活動を行う上での留意点を取りまとめた。最後に、一覧として表 12-1 のように取りまとめたので参考としていただければ幸いである。

表 12-1 太陽光発電システム火災に関する消防活動上の注意事項・留意点一覧（住宅火災編）

消火活動 開始前	太陽光発電システムの 設置状況の確認	<ul style="list-style-type: none"> ● 指揮者は火点一巡する際に太陽光発電システムの設置有無についても必ず確認する。 ● 消防隊員は太陽光発電システムの設置に気づいた場合、指揮本部に報告する。
	個人装備の選択	<ul style="list-style-type: none"> ● 絶縁性の高い装備（乾燥しているもの、ぬれても絶縁性が低下しないもの）を選択する。
消火活動中	太陽光発電システムの 状況把握	<ul style="list-style-type: none"> ● 夜間の消防活動であっても、火炎の光によって見た目から想定される以上の発電がおこなわれている恐れがある。 ● 損傷した配線が近くのものに触れていると、消防隊員が太陽光発電システムに触れた際に回路が形成され感電する可能性がある。
	放水方法	<ul style="list-style-type: none"> ● 水にぬれても高い絶縁性能のある手袋及び靴を着用する、太陽光発電システムへの放水は基本的に噴霧注水とし棒状注水を行う場合は少なくとも6mの距離を取る等、電気火災の場合と同様の対策を講じる。 ● 太陽電池モジュールの背面の消火が困難となる場合があることを考慮の上、放水方法を決定する。
	煙の排出口確保や 安全確保のための破壊作業	<ul style="list-style-type: none"> ● 屋根材一体型の太陽電池モジュールと普通の屋根を見分けづらい場合があるので注意する。 ● 結晶シリコン系太陽電池モジュールでは数か所を破壊しても発電が継続する場合がある。 ● 破壊器具を通じて消防隊員が感電する可能性がある。 ● 破壊時には、消防隊員の顔面保護のためゴーグル等を使用する。
	太陽光発電システムの 発電停止措置	<ul style="list-style-type: none"> ● 現状では、太陽電池モジュールの発電を止める決定的な方法はない。 ● ブルーシートで太陽電池モジュールを覆う場合、出力電圧の低減効果は得られるが、熱によりブルーシートが軟化、溶融、収縮する可能性もある。 ● 太陽電池モジュールが屋根や屋上に設置されている場合には、感電の衝撃等により転落の恐れがある。
	太陽電池モジュール 落下の警戒	<ul style="list-style-type: none"> ● 建物の屋上や屋根に太陽光発電システムが設置されている場合、火災により建物の構造部材の強度が低下すると落下の危険性がある。 ● 火災の熱で太陽電池モジュールのガラスが割れると、大きな破片や鋭利な破片が落下してくる可能性がある。
	燃焼生成ガスに関する注意	<ul style="list-style-type: none"> ● ポリフッ化ビニルが用いられている太陽電池モジュールの燃焼生成ガスに、有害なハロゲン化合物が含まれている場合があった。 ● 煙の流れ、空気呼吸器の装備、警戒区域の設定に注意して活動する。
火災鎮圧後	太陽光発電システム の状況確認	<ul style="list-style-type: none"> ● 太陽電池モジュールが火災により損傷しているように見えても、十分な発電能力を有している可能性がある。 ● 建物の屋上や屋根に太陽光発電システムが設置されている場合、火災により建物の構造部材の強度が低下すると落下の危険性がある。 ● 火災の熱で太陽電池モジュールのガラスが割れると、大きな破片や鋭利な破片が落下してくる可能性がある。
	残火確認のための破壊作業	<ul style="list-style-type: none"> ● 屋根材一体型の太陽電池モジュールと普通の屋根を見分けづらい場合があるので注意する。 ● 絶縁性能を確保するために、高い絶縁性能のある手袋及び靴を着用する等、感電に対して備える。 ● 損傷した配線が近くのものに触れていると、消防隊員が太陽光発電システムに触れた際に湿った建材を通じて回路が形成され感電する可能性がある。
	太陽電池モジュール の取り外し	<ul style="list-style-type: none"> ● 太陽電池モジュールの発電能力は、火災時に0Vになったとしても、時間の経過とともに回復することがある。 ● 太陽電池モジュールが屋根や屋上に設置されている場合には、感電の衝撃等により転落の恐れがある。
	取り外した 太陽電池モジュール の取り扱い	<ul style="list-style-type: none"> ● 太陽電池モジュールの端子部分を絶縁テープ等で覆うとともに、太陽電池モジュール表面に光が当たらないよう、受光面を遮光したり、受光面を下にして設置したり、適切な箱があれば格納したりすることが必要である。 ● 可燃物の近くに太陽電池モジュールを置かないようにし、標示テープ等で囲んで注意喚起することが必要である。

成果・実績

【学会口頭発表】

- 1) 田村裕之, 阿部伸之, 松島早苗, 塚目孝裕, 尾川義雄, 森井統正, 河関大祐: "火災時における太陽電池モジュールの発電特性", 日本火災学会研究発表会概要集, (2012), pp.230-231.
- 2) 松島早苗, 阿部伸之, 田村裕之, 塚目孝裕, 尾川義雄, 森井統正, 河関大祐: "太陽電池モジュールの火災による損傷と発電特性", 日本火災学会研究発表会概要集, (2012), pp.232-233.
- 3) 田村裕之, 阿部伸之, 松島早苗, 塚目孝裕, 尾川義雄, 森井統正, 河関大祐: "火災時における太陽電池モジュールの発電特性 (その1 太陽光及び火炎光による発電)", 日本建築学会大会学術講演梗概集 (防火), (2012), pp.187-188.
- 4) 松島早苗, 阿部伸之, 田村裕之, 塚目孝裕, 尾川義雄, 森井統正, 河関大祐: "火災時における太陽電池モジュールの発電特性 (その2 火炎曝露によるモジュール損傷と発電)", 日本建築学会大会学術講演梗概集 (防火), (2012), pp.189-190.
- 5) 塚目孝裕, 阿部伸之, 田村裕之, 松島早苗, 尾川義雄, 森井統正, 河関大祐: "火災時における太陽光発電モジュール部材の燃焼と発電特性", マテリアルライフ学会研究発表会, (2012), pp.23-24.
- 6) 田村裕之, 阿部伸之, 松島早苗, 塚目孝裕, 高梨健一, 尾川義雄, 河関大祐: "種々の火炎光における太陽電池モジュールの発電特性と分光スペクトル", 日本火災学会研究発表会概要集, (2013), pp.258-259.
- 7) 松島早苗, 阿部伸之, 田村裕之, 塚目孝裕, 尾川義雄, 高梨健一, 河関大祐: "模擬家屋火災時の太陽電池モジュール発電特性", 日本火災学会研究発表会概要集, (2013), pp.260-261.
- 8) 尾川義雄, 阿部伸之, 田村裕之, 松島早苗, 塚目孝裕, 高梨健一, 河関大祐: "水損防止シートで覆われた太陽電池モジュールの発電特性", 日本火災学会研究発表会概要集, (2013), pp.262-263.
- 9) 河関大祐, 阿部伸之, 田村裕之, 松島早苗, 塚目孝裕, 高梨健一, 尾川義雄: "太陽電池モジュールに貼付した防火フィルムの遮光効果", 日本火災学会研究発表会概要集, (2013), pp.264-265.
- 10) 塚目孝裕, 阿部伸之, 田村裕之, 松島早苗, 尾川義雄, 高梨健一, 河関大祐: "太陽電池モジュールの材質と受熱破損形態", 日本火災学会研究発表会概要集, (2013), pp.266-267.
- 11) 松島早苗, 阿部伸之, 田村裕之, 塚目孝裕, 尾川義雄, 高梨健一, 河関大祐: "火災時における太陽電池モジュールの発電特性 (その3 模擬家屋を用いた火災実験)", 日本建築学会大会学術講演梗概集 (防火), (2013), pp.17-18.
- 12) 田村裕之, 河関大祐, 阿部伸之, 松島早苗, 塚目孝裕, 高梨健一, 尾川義雄: "火災時における太陽電池モジュールの発電特性 (その4 防火フィルムの光透過性)", 日本建築学会大会学術講演梗概集 (防火), (2013), pp.19-20.

【消防研究所報告 (技術報告)】

- 1) 阿部伸之, 塚目孝裕, 田村裕之, 松島早苗, 尾川義雄, 河関大祐, 森井統正: "火災時における太陽電池モジュールの発電特性", 消防研究所報告, 114, (2013), pp.1-8.

- 2) 阿部伸之, 松島早苗, 田村裕之, 塚目孝裕, 尾川義雄, 高梨健一, 河関大祐: "模擬家屋火災時における太陽電池モジュールの発電特性", 消防研究所報告, 114, (2013), pp.9-18.
- 3) 田村裕之, 阿部伸之, 河関大祐, 松島早苗, 塚目孝裕, 尾川義雄, 高梨健一: "太陽光発電システム火災と消防活動上の問題点", 消防研究所報告 114, (2013), pp.19-25.
- 4) 阿部伸之, 尾川義雄, 田村裕之, 塚目孝裕, 松島早苗, 高梨健一, 河関大祐: "遮光物による太陽電池モジュールの発電抑制効果の検討", 消防研究所報告, 115, (2013), pp.1-11.
- 5) 田村裕之, 阿部伸之, 松島早苗, 河関大祐, 塚目孝裕, 尾川義雄, 高梨健一: "種々の火炎光の分光スペクトルと太陽電池モジュールの発電特性", 消防研究所報告, 115, (2013), pp.12-17.
- 6) 塚目孝裕, 阿部伸之, 田村裕之, 松島早苗, 尾川義雄, 高梨健一, 河関大祐, 志水裕昭: "太陽電池モジュール燃焼時の生成ガスについて", 消防研究所報告, 116, (2014), pp.1-10.
- 7) 松島早苗, 田村裕之, 阿部伸之, 高梨健一, 塚目孝裕, 河関大祐, 尾川義雄, 志水裕昭: "消防活動時の太陽電池モジュールの感電危険性", 消防研究所報告, 116, (2014), pp.11-22.

【解説・講演】

- 1) 田村裕之, 阿部伸之, 松島早苗: "火災時における太陽電池モジュールの発電特性", 火災, 63 (3), (2013), pp.20-25.
- 2) 田村裕之: "太陽光発電システムを設置した住宅火災における消防活動について", 検定協会だより, (2013.7), pp.15-24.
- 3) 田村裕之, 阿部伸之, 松島早苗, 塚目孝裕, 高梨健一, 尾川義雄, 河関大祐: "太陽光発電システムを設置した住宅の火災と消防活動の問題点", 消防防災研究講演会資料, 16, (2013), pp.81-90.
- 4) 田村裕之: "太陽光発電システムを設置した住宅の火災と消防活動上の問題点", 平成 25 年度日本火災学会火災科学セミナー, (2013), pp.46-59.
- 5) 塚目孝裕: "火災時の太陽電池モジュールの発電特性と破壊形態", 消防試験研究センターだより Voice., (2013), pp.8-10.
- 6) 塚目孝裕: "太陽光発電システムの火災における消防活動上の危険性", 平成 25 年度日本火災学会講演討論会テキスト, (2014), pp.32-44.
- 7) 田村裕之: "太陽光発電システムの火災の危険性と課題", 太陽光メガソーラーの実態と諸問題, 九州ソーラーネットワーク, (2014).
- 8) 田村裕之: "消防研究センターにおける太陽光発電システムの火災リスクに関する取り組み", 太陽光発電部会第 8 回セミナー太陽光発電システムの火災リスク(1), 日本太陽エネルギー学会, (2014).
- 9) 塚目孝裕: "より安全な太陽光発電へ(2) 特別報告 B 消防活動における安全性", AES 太陽光発電システム研究発表会 (第 16 回), (2014.3).

【講義】

- 1) 田村裕之: 豊田市消防本部消防活動研修, (2012.10).
- 2) 田村裕之: 三重県消防学校警防科警防課程, (2013.2).
- 3) 田村裕之: 船橋市消防局予防事務研修, (2013.6).

- 4) 田村裕之：茨城県消防学校消防職員専科教育救助科機械事故対策, (2013.9) .
- 5) 田村裕之：館林地区消防組合消防本部太陽光発電設備講義, (2013.12) .
- 6) 田村裕之：いわき市消防本部安全管理再点検週間, (2013.12) .
- 7) 田村裕之：大阪府下消防長会火災調査研修会, (2014.2) .
- 8) 田村裕之：三重県消防学校警防科警防課程, (2014.2) .
- 9) 田村裕之：鳥取県消防学校消防職員幹部教育上級幹部科, (2014.3) .

太陽光発電システム火災と消防活動における安全対策

平成 26 年 3 月 発行

禁無断転載

発行 消防庁 消防研究センター

〒182-8508

東京都調布市深大寺東町 4-35-3

TEL 0422-44-8331 FAX 0422-42-7719

<http://nrifd.fdma.go.jp/>

印刷 ケーティエス情報株式会社

ISBN978-4-88391-091-5

消防研究技術資料一覧

号数	題名	年月
1	武蔵野台地における地表水および地下水の測水資料	S43.12
2	武蔵野吉祥寺における揚水実験資料	S44.12
3	武蔵野台地における帯水槽の性状に関する調査資料	S45.12
4	地震時における少量危険薬品の出火危険とその対策	S48.3
5	大震災火災の延焼性状に関する研究野外火災実験 概要報告	S48.10
6	市街地火災の延焼性状等に関する研究 旧松尾鉱山廃屋火災実験報告書	S50.7
7	四日市市大協石油タンク火災原因調査報告書	S50.10
8	石油タンク消火実験結果報告書	S51.3
9	呉市山林火災現場付近の小気候	S52.3
10	主要繊維・プラスチックの燃焼・熱分解時の重量減少と発生ガス	S52.3
11	酒田市大火の延焼状況等に関する調査報告書	S52.10
12	炭化水素系燃料による可燃性蒸気雲の爆発特性に関する研究 ーファイヤーボールに関する実験ー	S53.10
13	震害分布と表層地盤の関係に関する調査資料 ー関東地域ー	S55.1
14	日本海中部地震による危険物施設の挙動に関する調査報告書	S59.1
15	水幕と樹木の併用による延焼防止向上効果に関する研究報告書	S60.3
16	石油タンクの底板・アニュラー板の裏面腐食に関する研究 ー厚さ分布と腐食量についてー	S61.2
17	円筒貯槽のスロッシングに関する研究報告書	S61.3
18	修復石油タンクの水貼り試験時 AE 特性	S61.3
19	簡易型火災警報器の非火災報に関する調査・研究	S61.3
20	火源の輪郭抽出	S62.3
21	林野火災の飛火延焼に関する研究	S63.3
22	パソコンを用いた林野火災の拡大予測に関する研究	H2.3
23	早期津波予測システムに関する資料	H3.3
24	火災規模の防災効果に及ぼす影響に関する研究	H3.3
25	火災性状把握システムに関する研究 その1 ー非火災報データベースに関する共同研究報告書	H3.3
26	火災性状把握システムに関する研究 その2 ー火災性状把握システムの試作に関する共同研究報告書	H3.3
27	防災物品等を含む火災における発生ガスの毒性に関する研究	H5.3
28	火災性状把握システムに関する研究 (2次) 実用化をめざしたシステムの改良に関する共同研究報告書	H5.3
29	地下利用の特殊空間内における火災性状に関する研究報告書	H6.3
30	大火源燃焼試験方法によるカーテンの燃焼性評価に関する研究報告書	H7.3
31	阪神・淡路大震災における石油タンクの座屈強度に関する調査研究報告書	H8.3
32	ISO 6941 による収縮性、溶融性繊維の燃焼性評価に関する研究報告書	H8.3
33	平成5年8月6日鹿児島豪雨災害時における鹿児島市民の災害時の行動に関する調査報告書	H8.3
34	火災性状把握避難誘導システムに関する研究 (その1 試作システムの概要)	H8.3
35	火災性状把握避難誘導システムに関する研究 (その2 試作システムのソフトリフト)	H8.3
36	地下施設における火災の特性に関する研究報告書 その1 地下施設の利用状況に関する調査研究 その2 深層地下駐車場模型内における機械排煙時の煙流動特性に関する実験的研究	H9.3
37	コーンカロリメーターによる防火材料の燃焼性状に関する研究報告書	H9.3
38	地下施設における火災の特性に関する研究報告書 その3 深層地下駐車場模型内における無排煙状況下の火災特性に関する実験的研究	H9.3
39	少量水による延焼阻止技術の開発に関する研究報告書	H9.12
40	被害情報の早期収集システムに関する研究	H10.3
41	照明灯による舞台幕の着火・燃焼性状に関する実験的研究報告書	H10.3
42	市街地火災時の空中消火による延焼阻止効果に関する研究報告書	H10.3
43	実大規模でのカーテン類の燃焼性状に関する実験的研究報告書	H11.3
44	大震災火災時における地域防災活動拠点の安全性確保に関する研究報告書	H11.3
45	市街地火災時における空中消火の延焼阻止効果に関する研究報告書	H11.3
46	大規模石油タンクの燃焼に関する研究報告書	H11.9
47	プラスチックパレットの難燃化とその燃焼性に関する研究報告書	H12.3
48	市街地火災時の空中消火による火災抑止効果に関する研究報告書	H12.3
49	文化財建造物等の防火対策に関する研究報告書 (その1)	H12.3
50	地下施設における消防活動のための加圧防排煙実験 その1 中型基本地下模型を用いた加圧防排煙実験	H13.3

消防研究技術資料一覧（つづき）

号数	題名	年月
51	地下施設における消防活動のための加圧防排煙実験 その2 小型基本地下モデルを用いた加圧防排煙実験	H13.3
52	AE法による石油タンク底部の腐食モニタリング技術に関する共同研究報告書	H13.8
53	文化財建造物等の防災対策に関する研究報告書（その2）	H13.9
54	煙量を減少させる添加剤を含む可燃性液体の燃焼性状に関する研究報告書	H14.2
55	AE法による工水タンク底部の腐食および漏洩のモニタリング技術に関する共同研究報告書	H14.3
56	水による固体可燃物火災の消火と延焼阻止の機構に関する研究報告書	H14.10
57	実大規模燃焼実験による難燃杉材の燃焼性状に関する研究報告書	H14.10
58	動物性飼料の自然発火に関する研究報告書	H15.3
59	ウォーターミストの消火機構と有効な適用方法に関する研究報告書 分冊1	H15.3
60	ウォーターミストの消火機構と有効な適用方法に関する研究報告書 分冊2 —小中規模閉空間におけるウォーターミストの消火性能—	H15.3
61	ヒドロキシルアミン及びその塩類の危険物性に関する研究報告書	H15.11
62	消防用防火服の耐熱性能の評価に関する研究報告書	H16.1
63	林野火災の発生危険度と拡大を予測するシステムの開発に関する研究報告書	H16.3
64	消防用防火服の快適性能、機能性能の評価に関する研究報告書	H16.6
65	AE法による石油タンク底部の腐食劣化評価に関する共同研究 —平成15年度共同研究報告書—	H16.6
66	地下鉄火災における駅構内の煙流動シミュレーションに関する研究報告書 —韓国大邱市の地下鉄中央駅の場合—	H17.3
67	救急対応の実情に関する調査報告書 —救急対応に関するアンケート調査結果—	H17.3
68	消防用防火服の総合的な評価手法に関する研究報告書	H17.7
69	平成16年（2004年）新潟県中越地震被害および消防活動に関する調査報告書	H17.9
70	斜面崩壊現場の二次崩壊危険度予測手法に関する研究報告書	H18.3
71	RDF火災に関する調査研究報告書（平成15年度）	H18.3
72	一般住宅における初期火災時の燃焼特性に関する研究報告書 —住宅火災による死者低減に役立つ感知特性を探る—	H18.3
73	石油タンク火災の安全確保に関する研究報告書 —石油タンク火災に使用される泡消火剤の消火特性—	H18.3
74	災害弱者の火災時避難安全のための警報・通報手法の開発	H18.3
75	AE法による石油タンク底部の腐食劣化評価に関する共同研究 —平成16・17年度共同研究報告書—	H18.3
76	新燃料自動車に求められる消火設備の能力に関する研究報告書	H19.3
77	RDF爆発・火災に関する研究報告書（その1）	H19.9
78	RDF爆発・火災に関する研究報告書（その2）	H19.9
79	再生資源燃料等の危険性評価に関する研究報告書	H19.3
80	2007年能登半島地震、2007年新潟県中越沖地震時の消防活動に関する調査報告書	H20.3
81	中華鍋に入れた食用油の加熱・着火・燃焼性状に関する天ぷら油火災実験報告書	H22.1
82	平成23年（2011年）東北地方太平洋沖地震の被害及び消防活動に関する調査報告書（第1報）	H23.11
83	太陽光発電システム火災と消防活動における安全対策	H26.3

