

農業用ビニールハウスでの収れん火災に関する研究

十日町地域消防本部（新潟県） 瀬沼 哲司
志賀 達也

1 はじめに

農業用ビニールハウス（以下「ハウス」という。）の天窓にたまった水が凸レンズとなり、内部の資材等が焼損する『収れん火災』について、出火原因を数値化することで出火条件を導き出す研究を行った。

ハウスは、鋼材等の骨組にポリオレフィン系樹脂等（以下「フィルム」という。）で外壁を被覆した作物栽培用温室施設であり、国内の設置面積は約41,000ha、温室設置面積の約95%以上を占めているが、建築物や工業製品等には該当しない。

農作物の生産効率の向上を目的に日々改良が行われているが、法的な設計基準はなく、一般財団法人日本施設園芸協会策定の「地中押し込み式パイプハウス安全構造指針」により、製造者等に構造計画や設計、保守管理等が周知されているのみである。そのため、瑕疵（かし）にかかる情報収集や対策等の措置を講ずる機関が定まっておらず、使用者利益の保護は、各製造者等の企業倫理に委ねられている。

SDGsの取組が進められている中、農業は安心安全な農作物の生産や供給を通じて、私たちが生きていく上で欠かせない「食」を支える大切な役割を担っており、ハウスにおける収れん火災の原因究明と予防対策の研究は、ますます重要な課題となっている。

2 火災事例について

令和2年7月某日、ハウス所有者から「1か月前からハウス内の収容物がたびたび焼損している。」といった内容の事後聞知火災があった。

この火災は、防草シートやブルーシート、根切りマット、育苗箱、ごぎ、管理機の一部が焼損し、日ごとに焼損の範囲や程度が進むことから、所有者が不審に思い通報したものである。

ハウスの特徴は、屋根のアーチ頂点部に開閉が可能な換気用の天窓を有し、間口7.2m、軒高4.0m、奥行20.7mの1連棟である。ハウスの内

部では、地面に敷かれている防草シートが掻破（そうは）状に溶融していることが認められる【写真1】。掻破状の溶融は、幅30～150mm、長さ300～2,400mmで東西に細長い。また、その間隔は、30～1,100mmで南北方向に不規則である。また、育苗台やブルーシート、根切りマット、育苗箱、ごさ、管理機は不規則に焼損している。

実況見分時、ハウスの天窓が水平に開口し、水たまりが確認できる。また、この水たまりから生じる太陽光の収れんが、防草シート上に認められる。ただし、焦点は定まっておらず、この部分に焼損は生じていない。焼損が認められる範囲に太陽光の収れん以外の火源は確認できない。

3 再現実験について

同型ハウスの天窓を用いて水たまり（水レンズ）を作り、再現実験を行う。

(1) 再現実験1

出火時の環境に近似させ、防草シートにおける幅30mm、長さ2,400mmの掻破状の溶融痕を対象とした実験を行う【写真2】。

8月4日11時25分、天窓を地面から4,000mmの位置に作成。気象データは、気温30.9℃、湿度73.3%、風向きは北、風速平均2.1m/sである。水レンズの条件を検証するため、天窓縦垂木のピッチごとに異なる量の水を入れ、【資料1水レンズ表1】のとおり水レンズを作成する。また、焼損品と同型の防草シートを地面に敷設する。

この結果、11時27分、天窓南側から2番目と3番目の水レンズ（南側から「①」と表記する。）から収れんが発生した。②の収れんは天窓真下から西に1,600mm、③の収れんは天窓真下から西に1,400mmの位置に確認できる。同時に防草シートを溶融させている事実が認められ、溶融に要した時間は約2.5秒、直径10mm程度の円形であることが確認できる。収れんにより生じた焦点箇所は、西から東に11時27分から12時10分まで750mm移動し、防草シートの端部で終了する【写真3】。

(2) 再現実験2

ハウス内の育苗台や根切りマット等の焼損は、底面から高い位置で生じていることから、天窓から収れんが生じる箇所の距離が変化してもハウスの収容物に焼損が生じるか実験を行う。

8月6日10時40分、脚立を用いて天窓を地面から1,100mmの位置に作成。気象データは、気温31.8℃、湿度67.2%、風向は北北東、風速平均1.5m/sである。実験1同様、天窓縦垂木のピッチごとに異なる量の水を入れ、【資料1水レンズ表2】のとおり水レンズを作成する。また、地面には、実験1で使用した防草シートを敷設する【写真4】。

この結果、10時43分、天窓における①～⑤（東側から「①」と表記する。）全ての水レンズから収れんが発生する。焦点箇所は、天窓真下から西に600mmの位置に確認でき、同時に④の水レンズから生じた焦点箇所では防草シートが発煙、穿孔し、搔破状に溶融していることが認められる。穿孔に要した時間は約1.0秒で、焦点箇所は直径12mmの円形状であった。この焦点箇所は、西から東に10時43分から11時35分までの間に260mm移動する【写真5】。

(3) 再現実験3

実験2と水レンズの高さを変え、比較実験を行う。

8月6日12時40分、脚立を用い実験2の天窓を地面から2,000mmの位置に移動する。気象データは、気温33.4℃、湿度61.3%、風向きは北、風速は平均1.2m/sである。水レンズは実験2で利用したものを利用し、④（東側から「①」と表記する。）の円直径は変更せず最大水深を増加させる。また、⑤には水を追加し、円直径を増加させ最大水深も増加させる。これを【資料1水レンズ表3】とする。

この結果、防草シートを敷設したと同時に、①～⑤全てに収れんが生じていることが確認できた。収れんにより生じた焦点箇所の面積を実験2と比較すると、①は減少、②は減少、③は減少、④は減少、⑤は増加していることがわかった。①の焦点箇所の地面から10cmの位置に発泡ウレタンを設置すると燃え込みが認められ、②の焦点箇所に根切りマットを設置すると炭化していることが認められた。それらが発煙し炭化が確認できるまでの所要時間は、1.3秒であった。また、根切りマット上に上質紙を設置すると、1.0秒で着火し有炎火となることが確認できる【写真6】。

以上、再現実験1から3の結果より、【資料2】の条件の水レンズが収れんを発生させ、防草シートを溶融させる事実を確認した。

4 出火条件の推定について

(1) 自然条件

ア 出火日

発火源となる凸レンズが天窓に形成されるには一定の降水量が必要であり、太陽光が収れんするには水たまりがある間に晴天となることが条件となる。T市の降水量（気象庁データ）は、6月11日から14日の4日間で74.5mm、15日から18日の4日間は0mmであった。条件から、出火日は6月15日であることが推定できる。

イ 出火時間

現場の防草シート溶融位置と天窓の位置から水レンズに入る太陽光の角度（以下「太陽高度」という。）と水レンズからの焦点距離を算出すると、防草シートの溶融は、太陽高度が74° 焦点距離4,148mmで始まり、太陽高度71° 焦点距離4,205mmで終了している。

6月15日の太陽高度と方位を国立天文台の内暦計算室（以下「暦計算」という。）から算出すると、収れんは6月15日11時10分から生じ、12時45分で終了していると推定できる【資料3、4】。

ウ 焦点の移動

前記イから、同時刻の太陽高度と入射方位のデータが得られる。防草シートの溶融長さとして焦点が移動した方位を作図、計算で求めると、防草シートの溶融は、長さが2,471mm、焦点は西南西から東北東へ移動していることが推定できる。

エ 太陽のエネルギー

6月15日11時10分の日射量は、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）の日射量データベースによると、T市の過去20年間の平均で直達日射量が3.1MJ/m²であり、1m²あたり毎秒861W(W1)の熱量が生じていることが推定できる。

(2) 天窓に発生した水レンズ

ア 水レンズの寸法

本実況見分時、水レンズの水面に相当する面を直径430mm（半径215mm=R）の円とし、水面と水レンズの深さで形成される弓型の

半球体とする。4 (1)イの焦点距離4, 148 mmを用いて、水レンズの弓形に相当する曲率半径を求める。一般的な凸レンズの焦点距離 f は、両球面の半径を R_1 、 R_2 とする時の近似式である次の式のとおりとなる¹⁾。

$$1/f = (n - 1)(1/R_1 + 1/R_2) \quad *R_2 \text{は水面のため無限大}$$

出火時の水レンズは R_1 、深さは不明である。 R_2 は無限大、 n は水の屈折率が1.33なので $R_1 = 1,368$ mm、水レンズの曲率半径は1,368 mmとなる。

水レンズの水面大きさと水レンズの曲率半径から計算すると、弓型の半球体の水レンズ深さは17 mmとなる。

イ 水レンズの投影面積等

(ア) 水レンズの投影面積 (R = 半径、 S_1 = 水レンズの投影面積)

$$\begin{aligned} S_1 &= R \times R \times 3.14 \\ &= 0.215 \text{ m} \times 0.215 \text{ m} \times 3.14 \\ &= 0.145 \text{ m}^2 \end{aligned}$$

よって、水レンズの投影面積は、0.145 m²となる。

(イ) 水レンズの熱量 (W_1 = 水レンズへの熱量、 S_1 = 水レンズの投影面積、 W_2 = 1 m²あたりに生じる熱量)

$$\begin{aligned} W_1 &= W_2 \times S_1 \\ &= 861 \text{ W/m}^2 \times 0.145 \text{ m}^2 \\ &\doteq 124 \text{ W} \end{aligned}$$

よって、水レンズへの熱量は、124 Wとなる。

(ウ) 焦点箇所面積

実況見分から、焦点箇所を直径30 mmの円と仮定する。(R = 半径、 S_2 = 焦点箇所面積)

$$\begin{aligned} S_2 &= R \times R \times 3.14 \\ &= 0.015 \text{ m} \times 0.015 \text{ m} \times 3.14 \\ &= 0.0007065 \text{ m}^2 \end{aligned}$$

よって、焦点箇所面積は、0.0007065 m²となる。

(エ) 焦点箇所の熱量 (K_1 = 光の熱量、 W_2 = 水レンズへの熱量(124 W)、 S_2 = 焦点箇所面積0.0007065 m²)

$$\begin{aligned}
 K1 &= W2 \div S2 \\
 &= 124W \div 0.0007065 \text{ m}^2 \\
 &\doteq 175 \text{ kW/m}^2
 \end{aligned}$$

よって、 175 kW/m^2 の熱量が焦点箇所が生じていると推定できる。

- (3) 防草シートの材質であるポリプロピレン（以下「PP」という。）の熔融高分子材の樹脂は厚さによって分解に必要な熱量が異なり、PPが厚さ1mmの場合 318 KJ/m^2 である²⁾。厚さ1mmのPPの熔融時間は、下記のとおり計算となる。(S3=厚さ1mm、PPの着火時間J=厚さ1mmのPPの分解熱量 318 kJ/m^2 、W3=焦点箇所の熱量密度 175 kW/m^2)

$$\begin{aligned}
 1W3 &= 1J / S3 \\
 S3 &= J / W3 \\
 &= 318 (\text{KJ/m}^2) / 175 (\text{kW/m}^2) \doteq 1.81 \text{ 秒}
 \end{aligned}$$

よって、防草シートは、焦点箇所が生じてから1.81秒で熔融することが推定できる。また、着火に要する臨界熱流束は、PPの厚さが1mmでは 46 kW/m^2 となる。なお、臨界熱流束とは、無限時間加熱した場合に着火する熱量である²⁾。また、防草シートの焦点箇所に生じる熱量密度が 175 kW/m^2 である場合は、周囲に熱量が伝播していくことが推定できる。

- (4) 焦点箇所の移動速度

焦点箇所の移動速度の計算は、下記のとおりである。(1mmあたりの照射時間(T1)、熔融時間95分=5,700秒(T2)、熔融長さ2,471mm(W3))

$$\begin{aligned}
 T1 &= T2 \div W3 \\
 &= 5,700 \div 2,471 \text{ mm} \\
 &= 2.3 \text{ s/mm}
 \end{aligned}$$

よって、熔融の長さは、1mmあたり2.3秒の速さで焦点箇所が移動していることが推定できる。

- (5) 熔融の長さ1mmあたりの熱量

焦点箇所の熱量は 175 kW/m^2 であり、移動速度は 2.3 s/mm である。

よって、溶融の長さ1 mmあたりの熱量は、下記の計算となる。(溶融の長さ1 mmの熱量(K 2)、1 mmあたりの焦点照射時間(T 1)、焦点箇所
の熱量(K 1))

$$\begin{aligned} K 2 &= T 1 \times K 1 \\ &= 2.3 \text{ s/mm} \times 175 \text{ kW/m}^2 \\ &= 402 \text{ kW/m}^2 \end{aligned}$$

よって、1 mmあたりの熱量は、402 kW/m²と推定できる。

(6) PPが溶融するかの可否

厚さ1 mmのPPの分解熱量は、318 kW/m²である。1 mmあたりの
熱量は402 kW/m²であるため、防草シートの分解熱量を上回りPP
は溶融すると推定できる。

(7) 太陽光が水レンズに全反射する臨界角度

太陽光は、空気、水、フィルム、空気の順で水レンズを透過する。フィ
ルムから空気へ透過する際に、屈折率は小さくなる。この際に、フィルム
から空気には透過せず、スネルの法則により太陽光が全反射する太陽高度
が存在する。例えば、朝日のように太陽高度が小さい時間帯では、全反射
により光が集束する事象は発生しない。

よって、太陽高度が29.9度以下では、収れんは生じない【資料5、
6】。

(8) 焦点箇所の消失

出火時以降に太陽高度が74.2°を下回るのは、暦計算において6月
15日12時22分である。

ア 焦点箇所が消失した時の焦点箇所の面積

焦点箇所の面積は、0.001096 m²と計算できる(S 4)。

イ 焦点箇所が消失した時の熱量

$$K 3 = W 1 \div S 4 = 113 \text{ kW/m}^2$$

ウ 焦点箇所が消失した時の溶融長さ1 mmあたりの熱量(K 3)

$$\begin{aligned} K 4 &= T 1 \times K 3 = 2.3 \text{ s/mm} \times 113 \text{ kW/m}^2 \\ &= 259.9 \text{ kW/m}^2 \end{aligned}$$

焦点箇所が消失した時の熱量は259.9 kW/m²となり、PPの分解
熱量の318 kW/m²を下回ることから、溶融が停止していることが推定

できる。

以上、再現実験 1～3 を行い 4 の出火条件を導き出し、出火することが確認できた。

5 まとめ

- (1) ハウスによる収れん火災の発火原因は、水レンズが形成され熱エネルギーが集約されることに起因する。
- (2) 水レンズは、円形で水平投影面積が大きいほど集約される熱エネルギーが大きく、水レンズが厚いほど焦点距離は短くなる。
- (3) ハウスの天窓に地表面と平行な水レンズが形成される場合、太陽光が水レンズに対して全反射しない高度で収れんが発生し、PP を溶融させる熱量を獲得する。よって、太陽高度が低い冬期には発生しにくい。
- (4) ハウスの換気用の天窓に水レンズができることが問題であり、使用方法や構造の改良などで予防できる火災であると考えられる。

6 おわりに

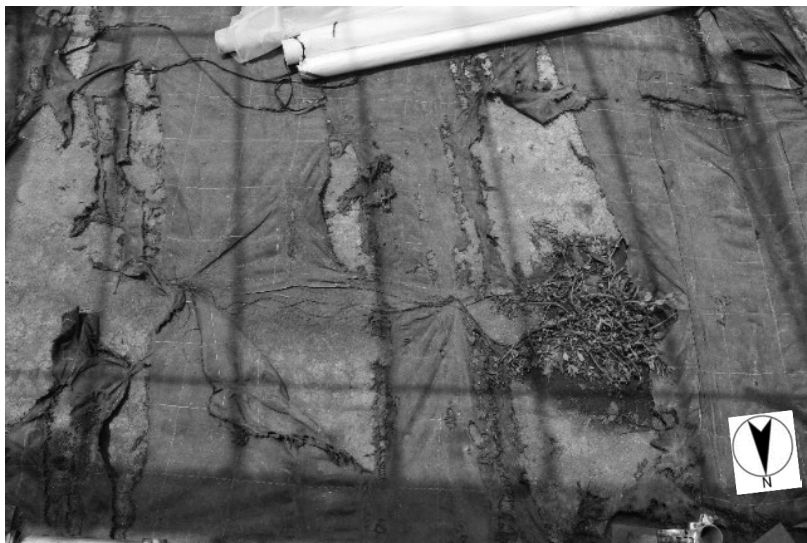
今日まで、多くの消防関係者が収れん火災の原因を蓄積し、予防広報をし続けてきたが、今回の研究により農林水産省から、11月19日付け「農業用ハウスにおける収れん火災の発生防止について」【資料7】が文書発出されるに至った。これもひとえに、原因をデータとして蓄積し続けてきた先人のご努力の賜物であり、深く感謝申し上げたい。

最後に、自然現象の火災は、無人で発生し、出火痕跡が少ないことも多い。しかし、出火条件を数値化して近似した実験を重ねることで、出火原因の判定や安全対策の提示ができることを実証することができた。物理や化学等を苦手とする消防職員も多いと思うが、この論文が自然現象の火災に対するアプローチ方法の参考となり、また、ハウスにおける法改正等への積み重ねとなることで、火災予防と被害の拡大防止につながれば幸いである。

参考文献

- 1) 講談社 山本明利、左巻健男 「新しい高校物理の教科書」
- 2) 高佐健治他 5 名著 「高分子材料の形状と延焼による着火危険性」

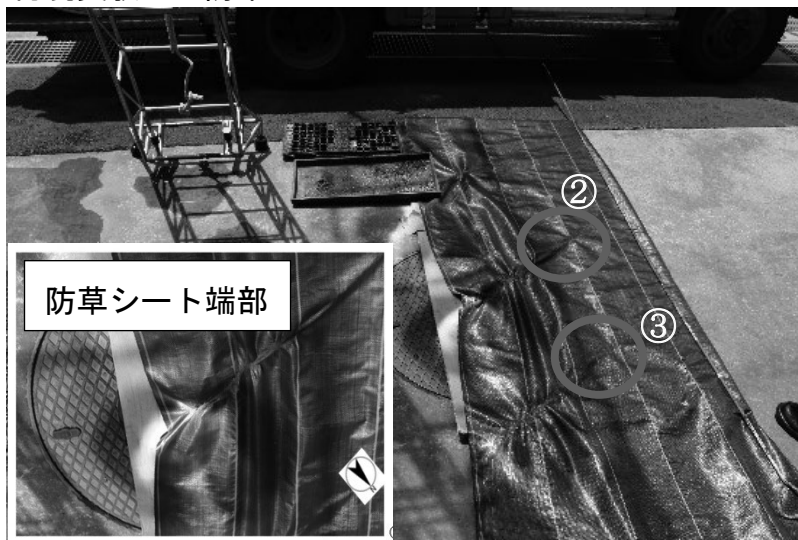
【写真1】 火災事例



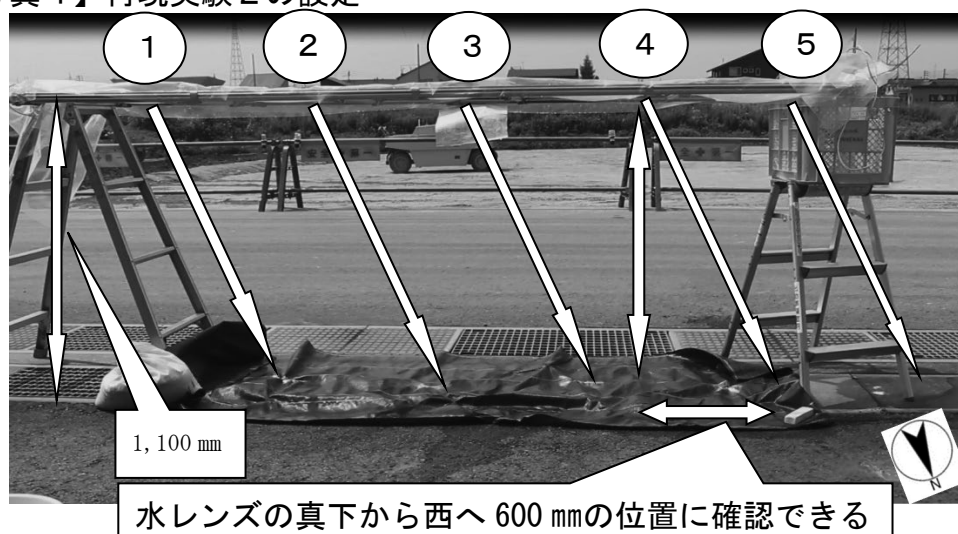
【写真2】 再現実験1の設定



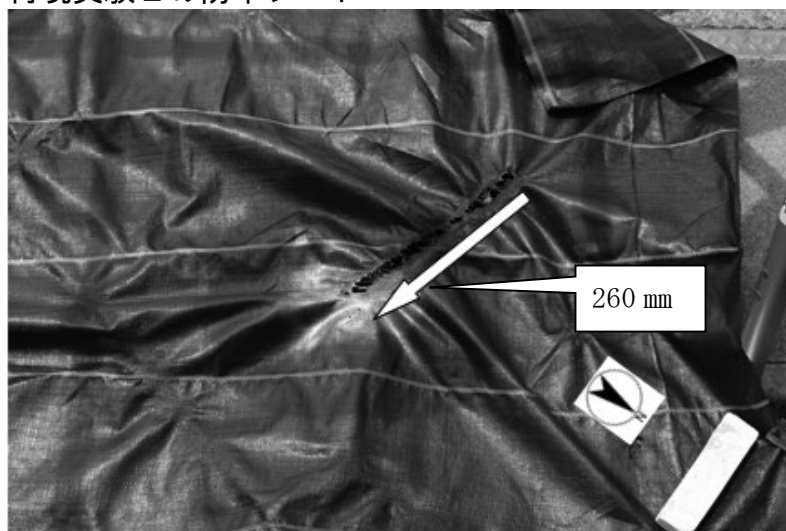
【写真3】 再現実験1の防草シート



【写真4】再現実験2の設定



【写真5】再現実験2の防草シート



【写真6】再現実験3 上質紙からの有炎火



【資料 1】

[水レンズ表 1]

水レンズ	円直径 (mm)	最大水深 (mm)	真下からの形
①	300	35	不完全円形
②	400	20	円形 (近位)
③	430	16.5	円形 (近位)
④	250	25	不完全円形
⑤	不明	不明	
水レンズは南側から①とする			

[水レンズ表 2]

水レンズ	円直径 (mm)	最大水深 (mm)	真下からの形
①	底辺200、上辺100	1.3	不完全円形
②	220	1.4	楕円形
③	縦150、横200	2	四角形
④	260	2.1	円形
⑤	300	1.6	半円形
水レンズは東側から①とする			

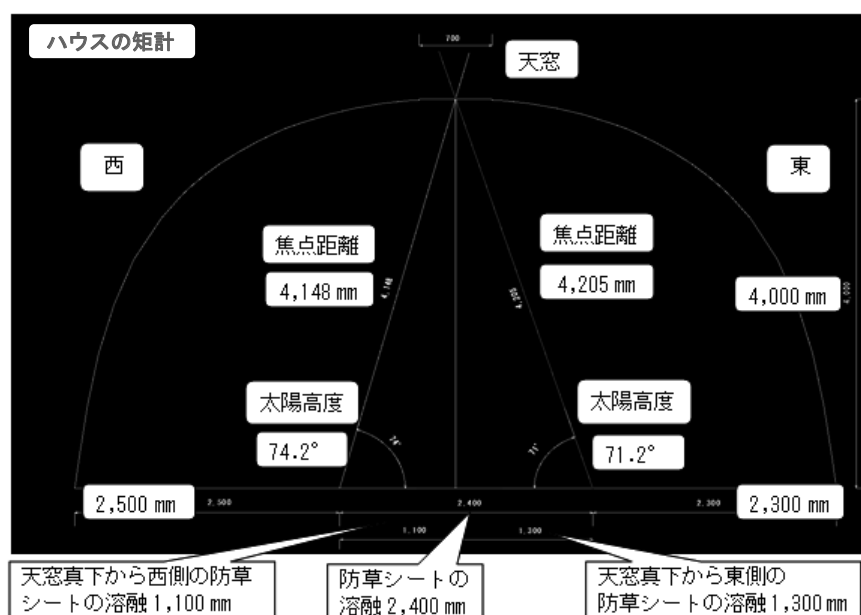
[水レンズ表 3]

水レンズ	円直径 (mm)	最大水深 (mm)	真下からの形
①	底辺200、上辺100	1.3	不完全円形
②	220	1.4	楕円形
③	縦150、横200	2	四角形
④	360	2.5	円形
⑤	300	2.6	円形
水レンズは東側から①とする			

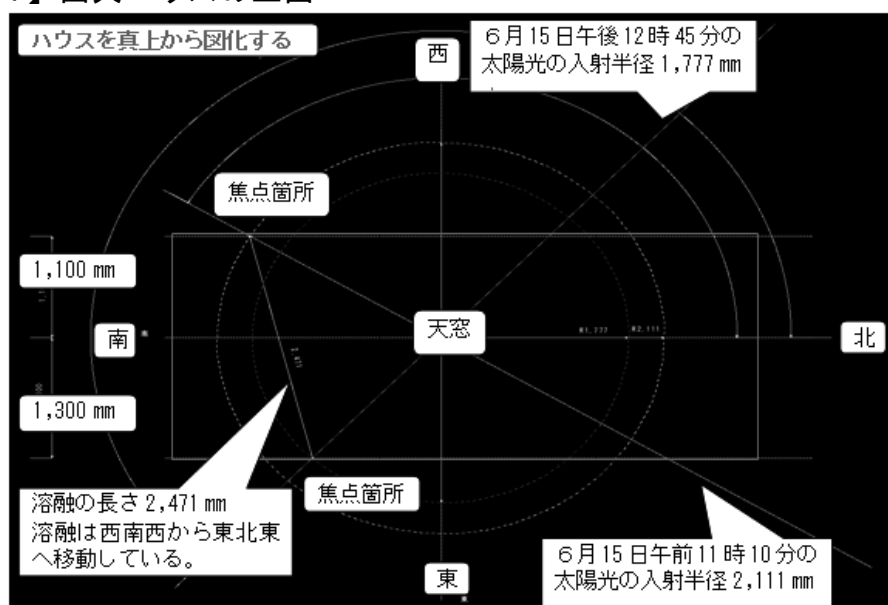
【資料2】 収れんが発生する水レンズ一覧表

案件	水レンズ			焦点距離	焦点面積	焦点熱量	焼損状況
	形	円直径	最大水深				
現場想定計算	円	430mm	15.6mm	4,148mm	直径30mm	175KW/m ²	PPが溶融
再現実験1	円	430mm	16.48mm	4,276mm	直径20mm	205KW/m ²	PPが溶融、穿孔
再現実験2	円	256mm	21mm	1,217mm	直径12mm	372KW/m ²	PPが溶融、穿孔
再現実験3	円	360mm	25mm	2,000mm	直径20mm	265KW/m ²	根切りマット、紙が有炎燃焼

【資料3】 出火ハウスの短計



【資料4】 出火ハウスの上面



【資料5】太陽光が水レンズに入射する時の角度変化と全反射する臨界角度

★各層の角度変化(74.1° 太陽高度の場合)

境界①(空気→水)での屈折角度
 $\times 90 - 74.1 = 15.9^\circ$
 スネルの法則式 $n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$ より
 $1.00(\text{空気の屈折率}) \times \sin 20 = 1.33(\text{水の屈折率}) \times \sin X$
 $\sin X = \sin 15.9 / 1.33$
 $= 0.274 / 1.33 = 0.206 = \sin 11.9$ よって 78.1°

境界②(水→フィルム)の屈折角度
 $\times 90 - 78.1 = 11.9^\circ$
 $1.33 \times \sin 11.9 = 1.54(\text{フィルムの屈折率}) \times \sin X$
 $\sin X = (1.33 \times 0.206) / 1.54 = \sin 10.3$ よって、 79.7°

境界③(フィルム→水)の屈折角度
 $\times 90 - 79.7 = 10.3$
 $1.54 \times \sin 10.3 = 1.00(\text{空気の屈折率}) \times \sin X$
 $\sin X = (1.54 \times 0.1788) / 1.00 = 0.2753 = \sin 16.0$
 よって、 74.0°

光線の入射角 θ_1 、屈折角(出射角) θ_2 、反射角 θ_3 、入射側媒質の屈折率 n_1 、出射側の屈折率 n_2 とすると、スネルの法則は、 $n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$

★水レンズの場合に転換するイメージ

空気

水

フィルム

空気

実際には、水の底面とフィルムは弧線上になっている

上記の計算により焦点(地面)への集束光の角度は太陽高度と等しいことが推定できる。

★全反射の考え方 平面の場合(全反射する角度を算出し、逆の流れで太陽高度を計算する)

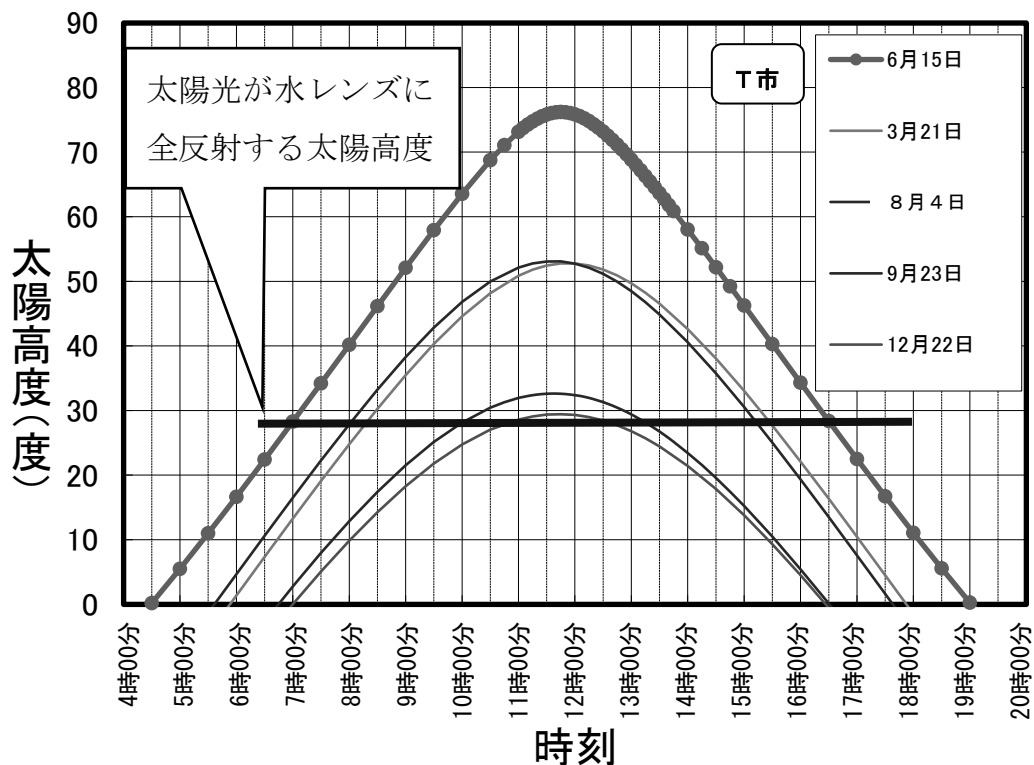
境界③(フィルム→水)の全反射角度

\sin 反射角 $= 1/1.54 = 0.649 = \sin 40.4$
 反射角 $= 49.6$

境界②(水→フィルム)の屈折角度
 $1.33 \times \sin Y = 1.54(\text{フィルムの屈折率}) \times \sin 40.4$
 $\sin Y = (1.54 \times 0.648) / 1.33 = 0.750 = \sin 48.6$
 よって、 41.4°

境界①(空気→水)での屈折角度
 $1.00(\text{空気の屈折率}) \times \sin Y = 1.33(\text{水の屈折率}) \times \sin 41.4$
 $\sin Y = 1.33 \times 0.750 = 0.9975$
 $= \sin 61$
 よって、 29°

【資料6】太陽高度と時刻の推移（T市）



【資料7】農林水産省発出リーフレット

屋根や天窓に水が溜まっていますか？

農業用ハウスの収れん火災にご注意を！

農業用ハウスの屋根や天窓に溜まった水を放置すると、火災が発生するかもしれません。

発生のメカニズム

- ① 屋根や天窓のフィルムに溜まった水がレンズとなって、太陽の光を集める
- ② 焦点に位置する作物や資材が発火

火災を防ぐには

屋根・天窓に水溜まりをつくらない！

- 通り雨の後の晴天は特に注意！
- 天窓に水が溜まっている場合は開閉して水を落とす
- 屋根のフィルムがたるんでいる場合は張り直すなどで補修する
- レンズ現象を抑える散乱光フィルムを張る
- 覚えがないのに、資材や作物が溶けたり焼けていたりする場合は、既に発生しているかも！

出入りが少ないハウス（育苗ハウスや資材置き場など）は、水溜まりの発生に気が付きにくいので注意が必要です。

※万が一の火災に備えて「園芸施設共済」に加入しましょう。詳しくは最寄りの農業共済組合まで。

農林水産省生産局園芸作物課 TEL: 03-3593-6496