

第2 可燃性蒸気の滞留範囲に係るシミュレーション実験

1 シミュレーションの解析プログラム

文部科学省の国家プロジェクト「戦略的基盤ソフトウェア開発プロジェクト」(2002年～2007年)において開発された国産の汎用3次元流体ソフトウェアのFrontFlow/Redを用いて解析を実施した。乱流モデルについては、RANS系標準 $k-\epsilon$ モデルを採用している。

2 ガソリンの物性について

ガソリンは多成分系であり、蒸発した気相の化学濃度成分も刻々と変化する。したがって、シミュレーション実験では、ガソリンからの蒸気発生速度を一定とし、蒸発開始から初期(1分後の蒸気発生速度)の蒸発速度を採用している。

3 シミュレーション実験における留意事項

給油取扱所における可燃性蒸気の滞留範囲を明らかにするにあたり、可燃性蒸気拡散測定実験との比較シミュレーション、給油取扱所における通常の取扱い時及び流出事故時に発生する可燃性蒸気の滞留シミュレーションの3件について、気象条件等を考慮した実験を実施した。現実が発生する現象の全てをシミュレーションで再現することは計算量が膨大となるため、想定される状況をモデル化したシミュレーション実験を実施している。例えば、気象条件において風速を考えた場合、実際には一定の風速、方向で流れる風が発生することは少ないが、シミュレーション実験では常に一定の風速、方向で流れる風を想定した解析を実施している。

したがって、後述のシミュレーション結果については、現実が発生する現象を捉えているものの、現実では稀に生じる、厳しい条件での解析となっていることに留意する必要がある。

4 可燃性蒸気拡散測定実験に係るシミュレーション

(1) 目的

第1に記載の可燃性蒸気拡散測定実験結果とシミュレーション実験の解析モデルを比較し、シミュレーションの解析モデルの妥当性について検証する。

(2) 分析モデル

分析の条件は以下のとおり。

- (a) 気温条件 28°C (拡散測定実験時の平均気温)
- (b) 風速条件 0m/s、1m/s、3m/s、5m/s

- (c) オイルパンの大きさ $1\text{m} \times 1\text{m} \times 0.01\text{m}$ 、 $2\text{m} \times 2\text{m} \times 0.01\text{m}$ の 2 種類
(d) 対称性を考慮した 1/2 モデルを採用した。

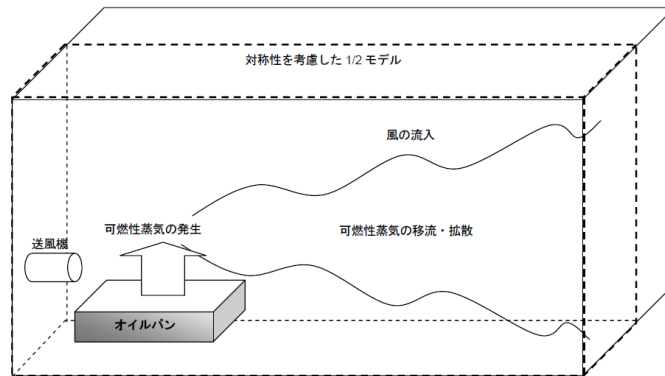


図2 分析モデル

(3) 分析結果

シミュレーションの分析結果を以下に示す。

なお、シミュレーション実験と比較を行った拡散測定実験データについては、可燃性蒸気濃度分布の定性的な傾向が顕著に表れているものを採用した。

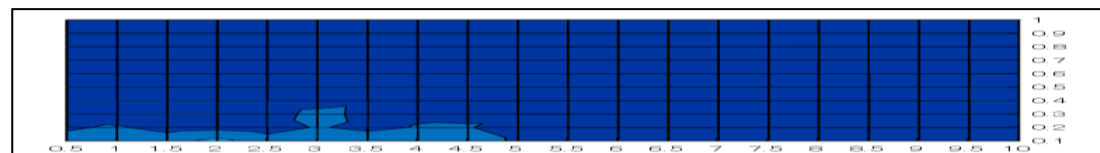
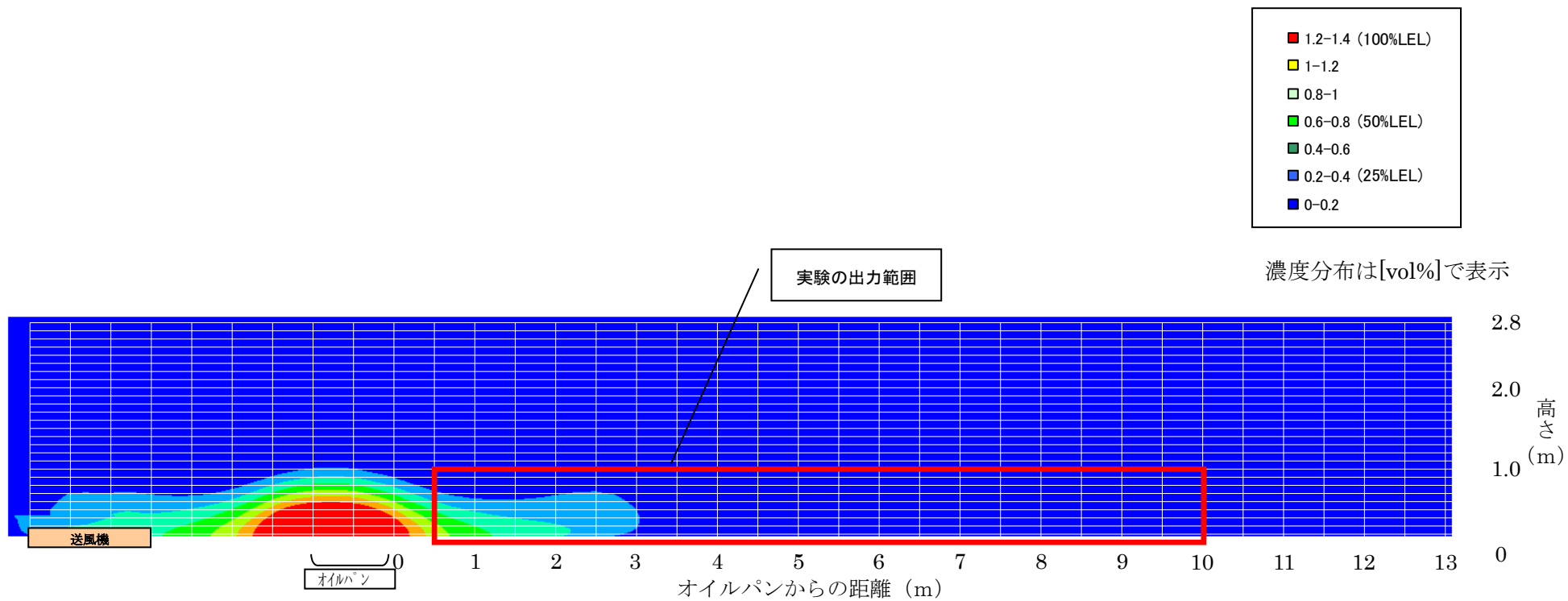


図3-1 拡散開始から1分後（オイルパン1m角、風速0[m/s]）

上：シミュレーション 下：実験

※シミュレーションと実験の蒸気濃度に係る色は同色としている。

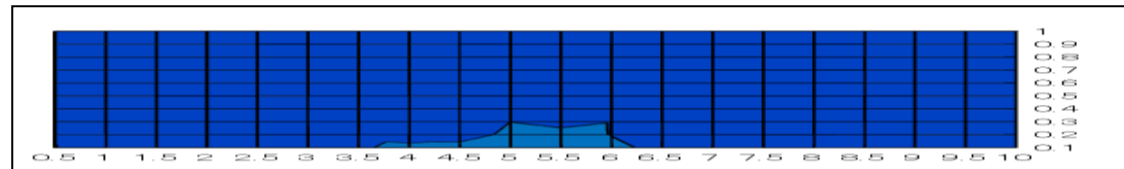
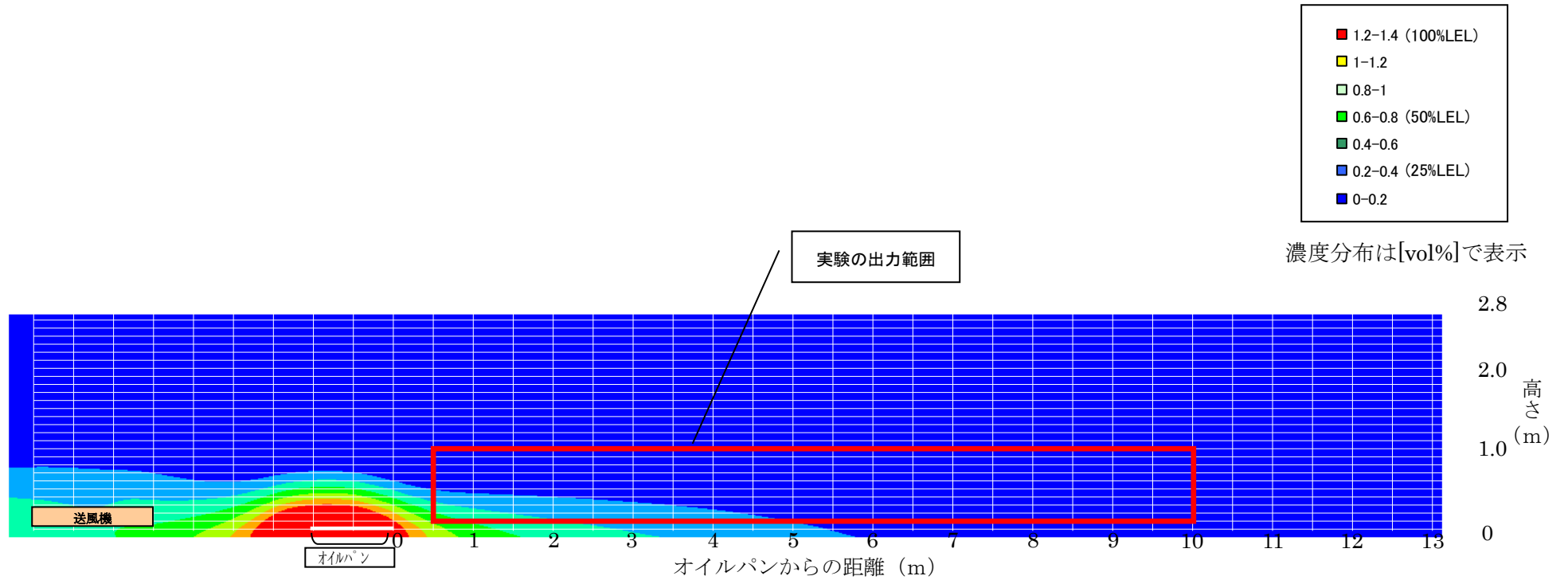
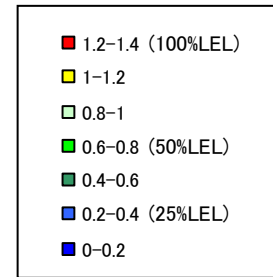


図3-2 拡散開始から2分後 (オイルパン1m角、風速0[m/s])

上: シミュレーション 下: 実験

※シミュレーションと実験の蒸気濃度に係る色は同色としている。



濃度分布は[vol%]で表示

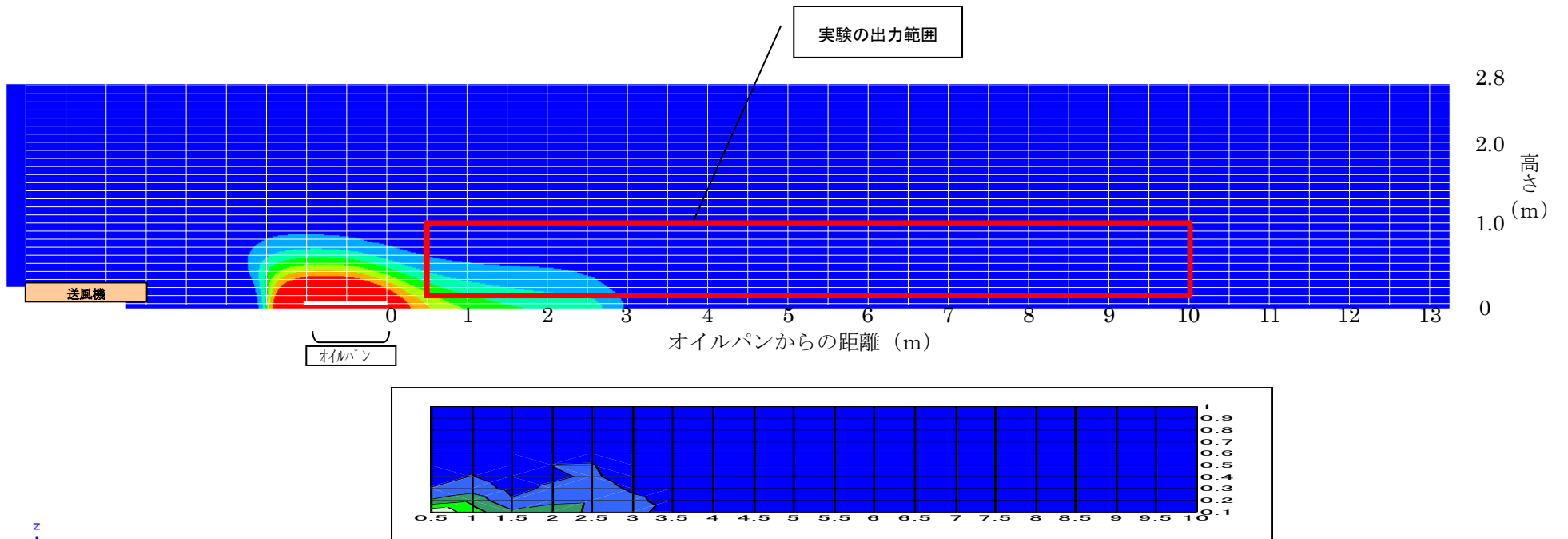


図3-3 拡散開始から1分後(オイルパン1m角、風速1[m/s])

上:シミュレーション 下:実験

※シミュレーションと実験の蒸気濃度に係る色は同色としている。

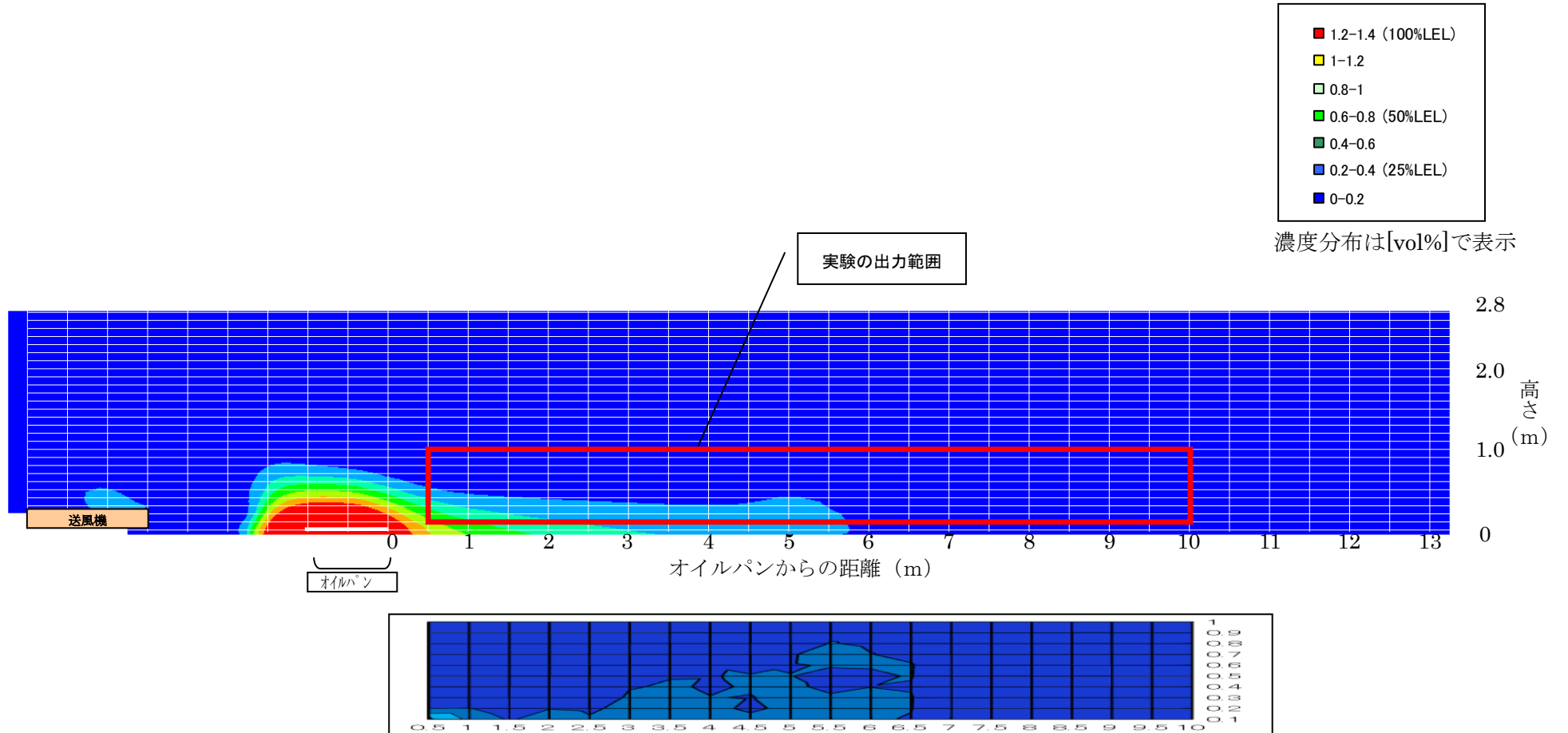


図3-4 拡散開始から2分後（オイルパン1m角、風速1[m/s]）

上：シミュレーション 下：実験

※シミュレーションと実験の蒸気濃度に係る色は同色としている。

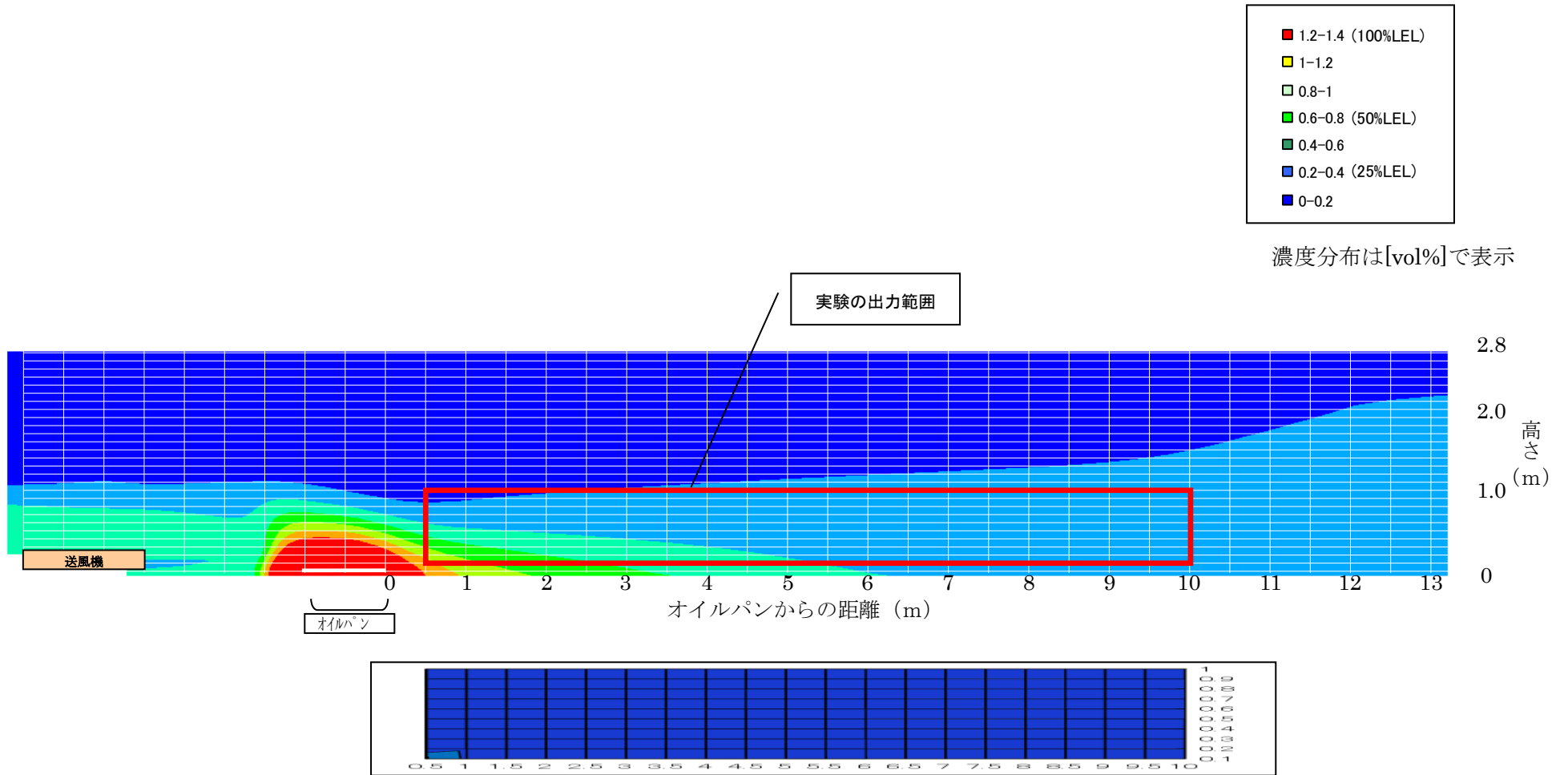


図3-5 拡散開始から5分後（オイルパン 1m角、風速 1[m/s]）

上：シミュレーション 下：実験

※シミュレーションと実験の蒸気濃度に係る色は同色としている。

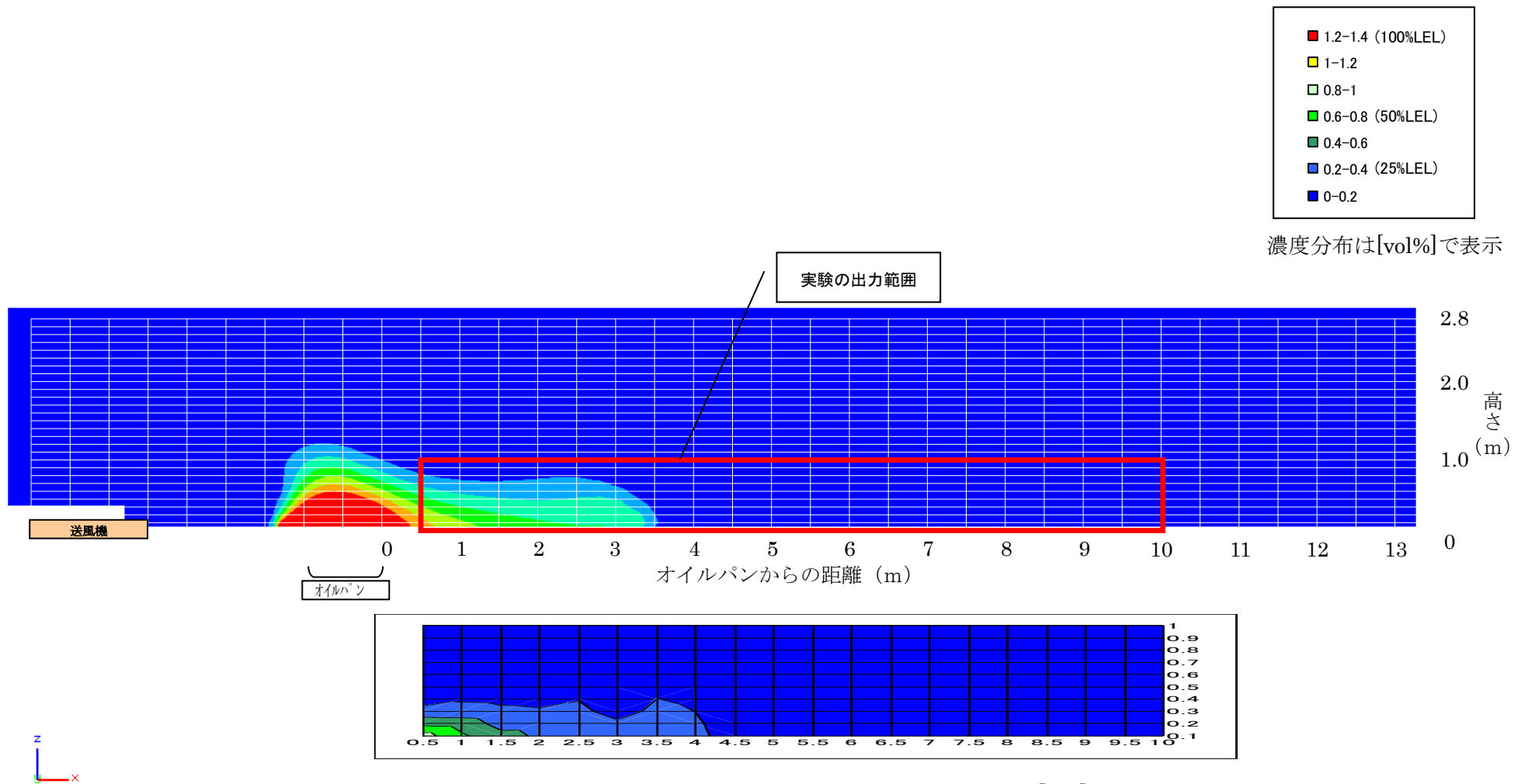
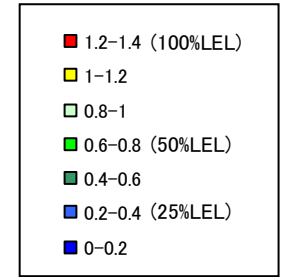


図3-6 1分後（オイルパン1m角、風速3[m/s]）

上：シミュレーション 下：実験

※シミュレーションと実験の蒸気濃度に係る色は同色としている。



濃度分布は[vol%]で表示

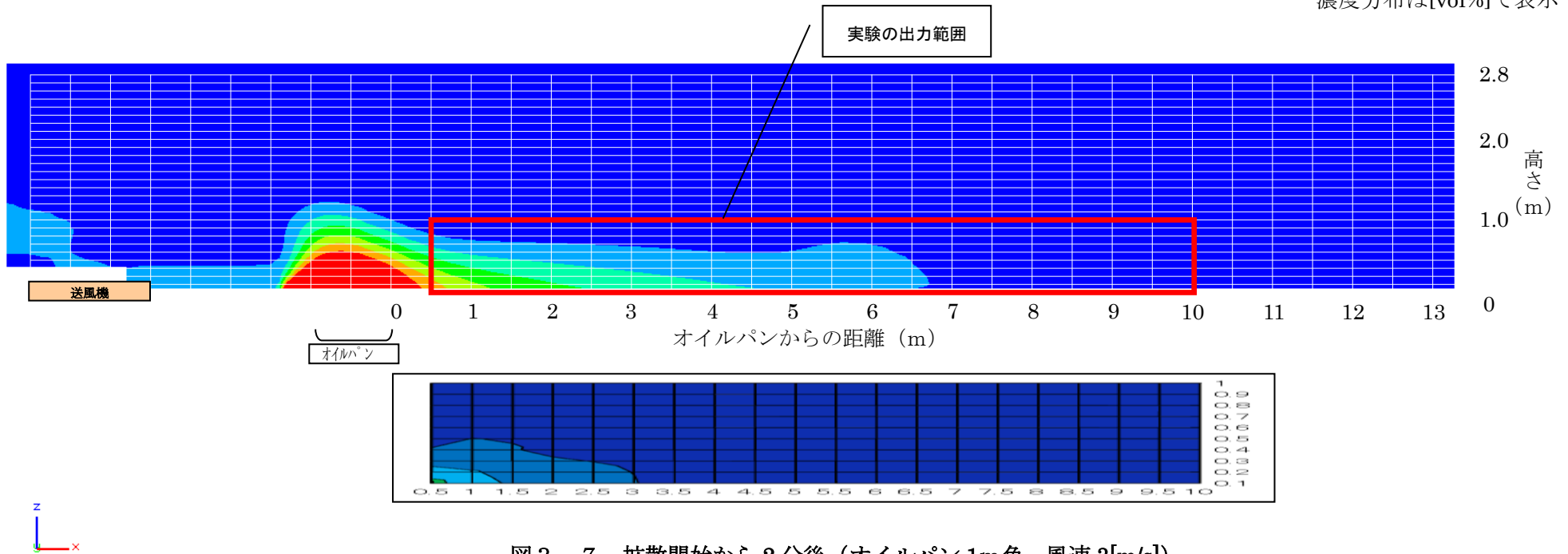
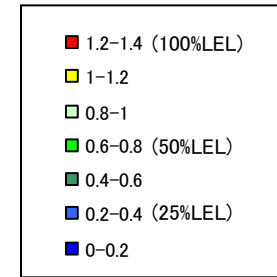


図3-7 拡散開始から2分後 (オイルパン1m角、風速3[m/s])

上: シミュレーション 下: 実験

※シミュレーションと実験の蒸気濃度に係る色は同色としている。



濃度分布は[vol%]で表示

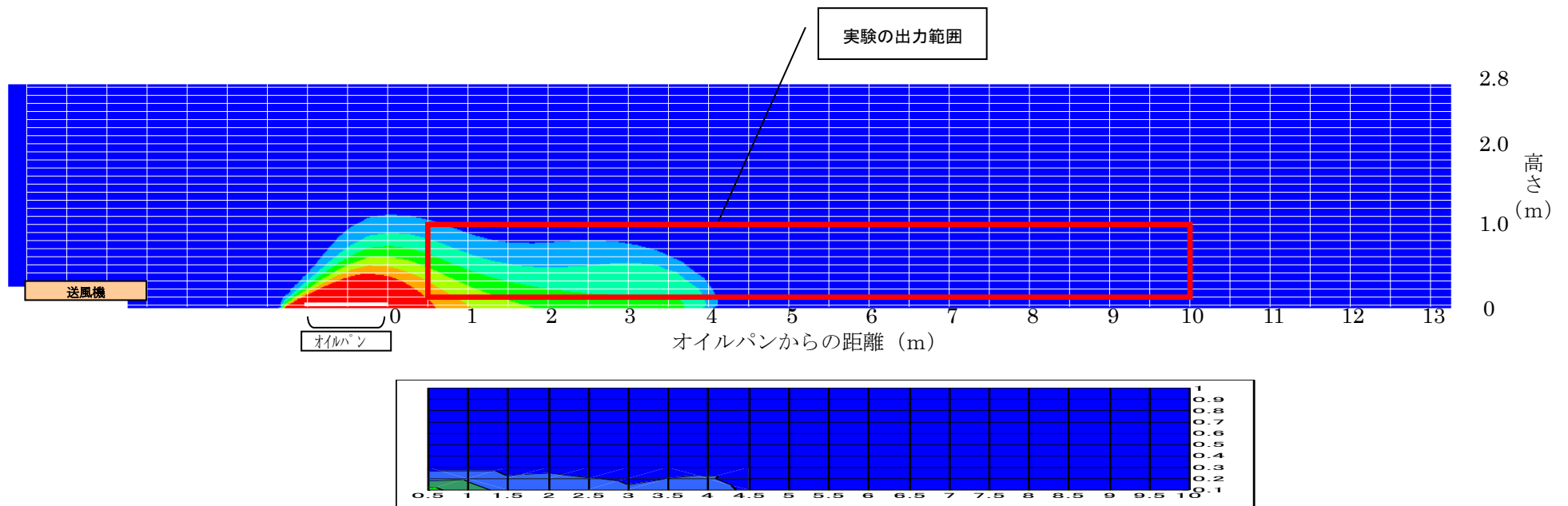


図3-8 拡散開始から1分後 (オイルパン 1m角、風速 5[m/s])

上：シミュレーション 下：実験

※シミュレーションと実験の蒸気濃度に係る色は同色としている。

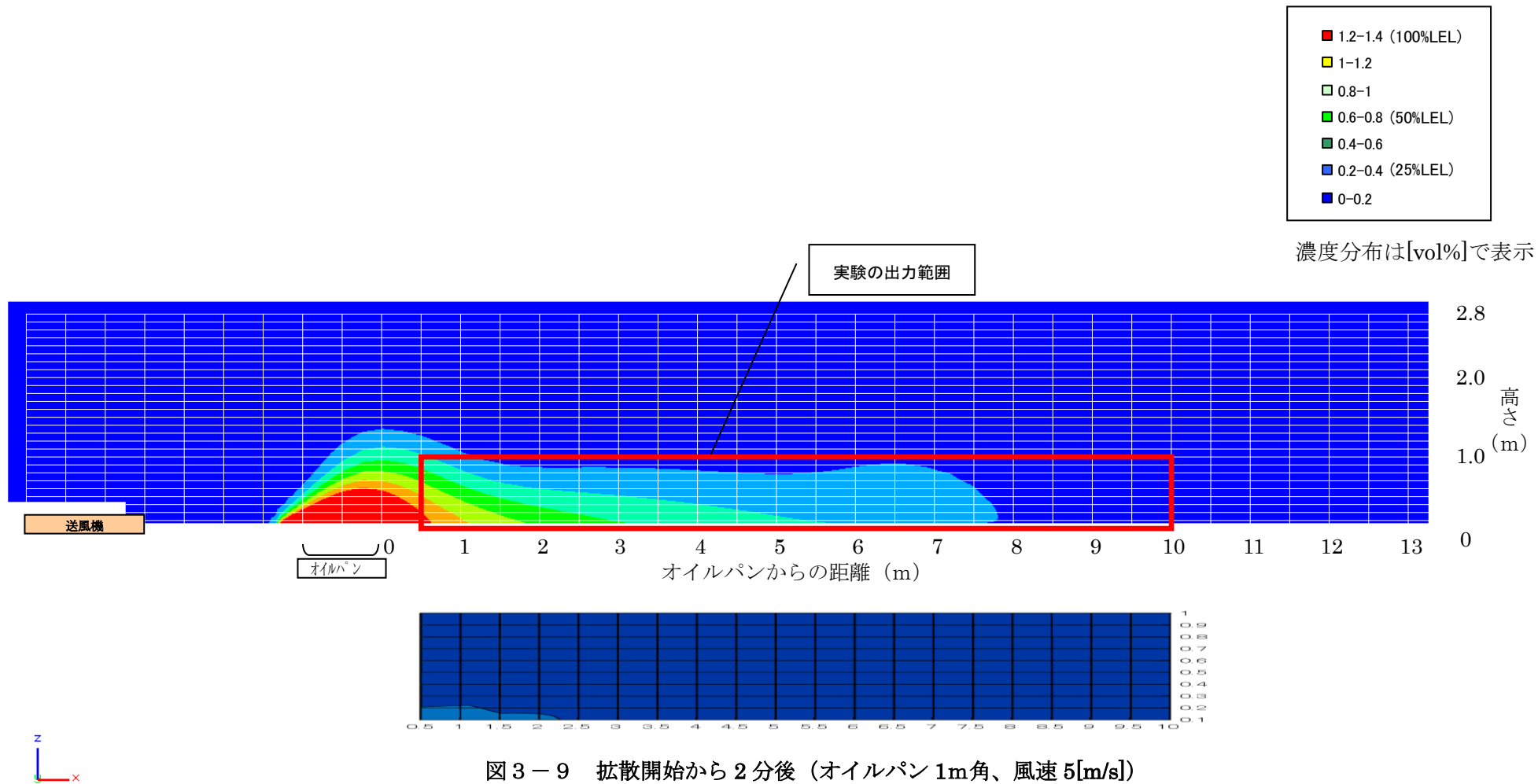


図3-9 拡散開始から2分後（オイルパン1m角、風速5[m/s]）

上：シミュレーション 下：実験

※シミュレーションと実験の蒸気濃度に係る色は同色としている。

(4) 考察

可燃性蒸気拡散測定実験とシミュレーション実験結果を比較すると、実験の測定開始後1～2分については、風の下流方向に対するガソリン蒸気の到達距離は、差が見られたものの全体的な流動傾向を再現していると考えられる。

一方、高さ方向については、シミュレーション結果は測定実験結果に対して大きい値となっており、これはシミュレーションの乱流モデルにより鉛直方向の拡散が大きくなったと考えられる。

測定開始後5分については、シミュレーション結果と測定実験結果に大きな差が見られた。これは、実際のガソリンでは揮発性の高い成分から蒸発するため、蒸気の発生速度は時間と共に減少することから、初期の蒸気発生速度で解析したシミュレーション実験結果と測定実験結果とに差が生じたものと考えられる。

後述の事故時に発生する可燃性蒸気滞留シミュレーション実験においては、流出したガソリンから新鮮な可燃性蒸気が発生することから、上記のシミュレーション解析方法を事故時のシミュレーションに適用することとした。

5 通常の実験時の可燃性蒸気滞留範囲に係るシミュレーション実験

(1) 目的

給油取扱所における通常の実験時に発生する可燃性蒸気の滞留範囲を明らかにするため、シミュレーション実験を実施した。

(2) 想定条件

通常の実験時に可燃性蒸気が発生する場所として、固定給油設備、通気管を想定した。想定条件は以下のとおり。

表4 通常の取扱いの場合の想定

想定する場所	想定する条件	想定するガソリン取扱量
固定給油設備(地上式)	<ul style="list-style-type: none"> ・自動車給油時に給油口とノズルの隙間から、自動車給油タンクに溜まっていたガソリン蒸気(蒸気濃度100%)が排出されることとする。 ・給油口断面積(内径50mm)から、ノズル断面積(内径28mm)を引いた面積から、ガソリン蒸気が排出されることとする。 ・排出速度はガソリン給油速度 <u>50L/min</u> と同じとする。 ・給油口高さを <u>1m</u> とする。 	60 リットル (燃料タンク)
通気管	<ul style="list-style-type: none"> ・移動タンク貯蔵所から地下タンクへの荷卸し時に、通気管先端からタンクローリーの払出し量と同じ速度 <u>670L/min</u>*で、地下タンクに溜まっていたガソリン蒸気(蒸気濃度100%)が排出されることを想定。 ・通気管の内径は <u>50mm</u> とする(ガソリンスタンドの一般的な内径)。 ・通気管放出口高さを <u>4m</u> とする。 	20 キロリットル
気象条件及び風速条件	(a) 気温条件: 20°C、32°C (b) 風速条件: 0m/s、1m/s、3m/s、5m/s	

※670L/min は移動タンク貯蔵所から 20 キロリットルの地下タンクへのガソリンを荷下ろしに約 30 分かかることから、荷下ろし速度 670L/min とした。

解析モデルは対称性を考慮して、以下のとおりとしている。

表5 各ケースで採用した対称モデル

固定給油設備		通気管	
風速 0[m/s]	風速 1, 3, 5[m/s]	風速 0[m/s]	風速 1, 3, 5[m/s]
1/2 モデル	対称性なし	1/4 モデル	1/2 モデル

(3) 分析結果

シミュレーションの分析結果を以下に示す。

(ア) 固定給油設備

表6にガソリン蒸気濃度の到達距離を示す。

表6 ガソリン蒸気濃度の到達距離 (固定給油設備)

分析ケース	風速 [m/s]	気温 [°C]	100% LEL 到達距離 [m]	50%LEL 到達距離 [m]	25%LEL 到達距離 [m]	100% LEL 到達高さ [m]	50%LEL 到達高さ [m]	25%LEL 到達高さ [m]
B-1-1	0	20	2.8	4.5	6.2	0.12	0.24	0.44
B-1-2	1		3.9	7.9	11.2	0.11	0.24	0.31
B-1-3	3		4.9	11.2	15.0	-	0.08	0.02
B-1-4	5		6.1	10.5	15.0	-	-	-
B-1-5	0	32	2.8	4.7	7.1	0.15	0.32	0.91
B-1-6	1		3.8	6.9	9.5	0.09	0.20	0.29
B-1-7	3		5.0	10.9	15.0	-	0.08	0.13
B-1-8	5		5.3	9.6	14.6	-	-	-

※ 到達高さは、蒸気が地面に着地した場合に計測し、蒸気の地面からの最大高さを記載。

シミュレーション結果図を以下に示す。

なお、解析モデルとしては以下の計算格子により解析を実施しており、下図のA-B面は自動車の側面を想定して、全面を壁として計算している。

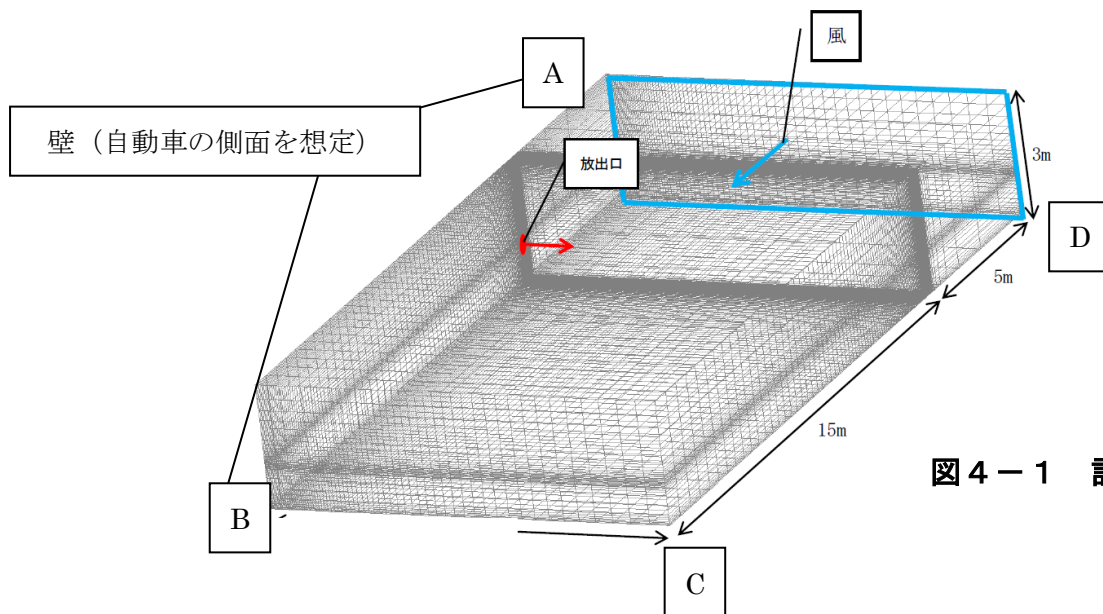
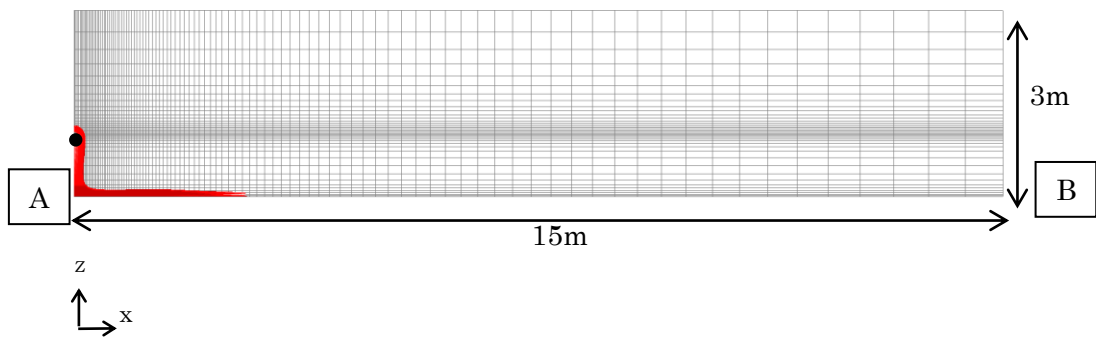
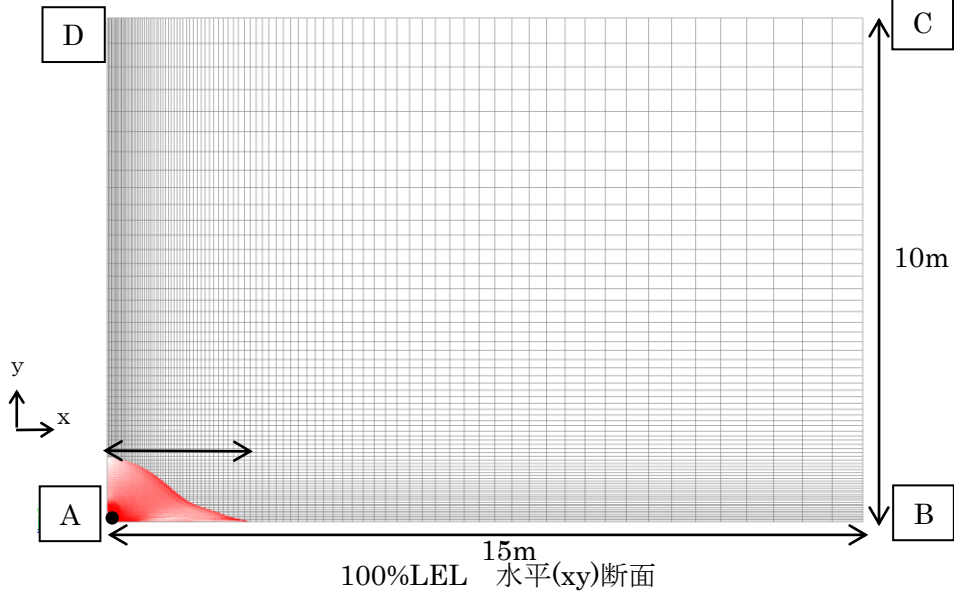


図4-1 計算格子図

(図中の●は給油口、以下同じ。)



100%LEL 鉛直(xz)断面

図4-2 100%LEL 風速 0m/s、気温 20°Cの解析結果

※A-B面は壁(自動車の側面)を想定して解析

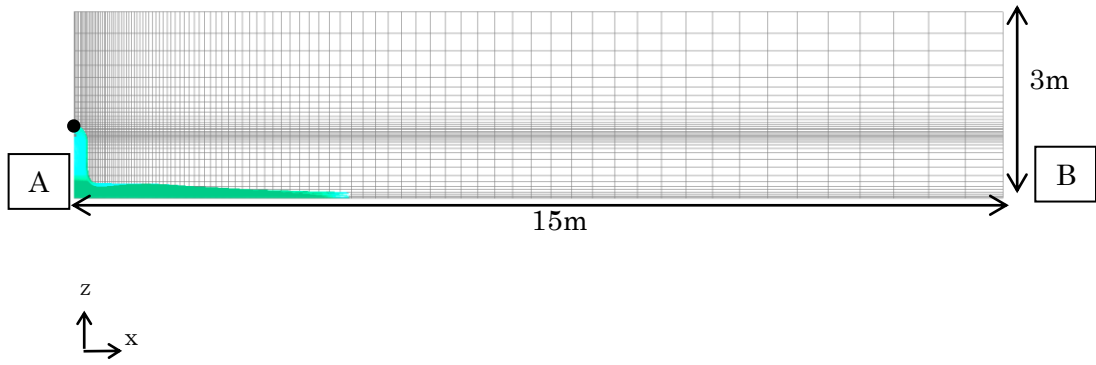
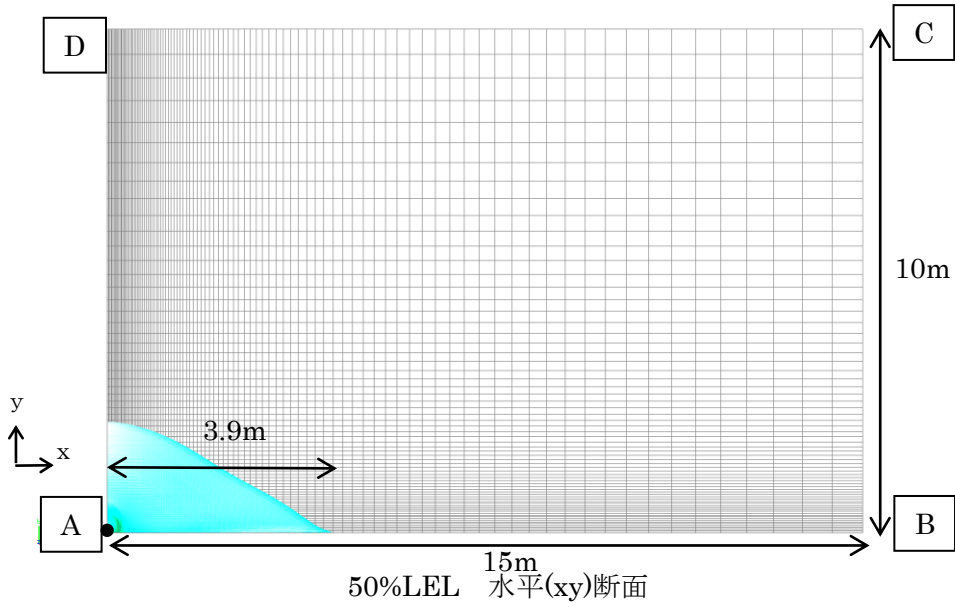


図 4 - 3 50%LEL 風速 0m/s、気温 20°Cの解析結果
 ※A-B 面は壁（自動車の側面）を想定して解析

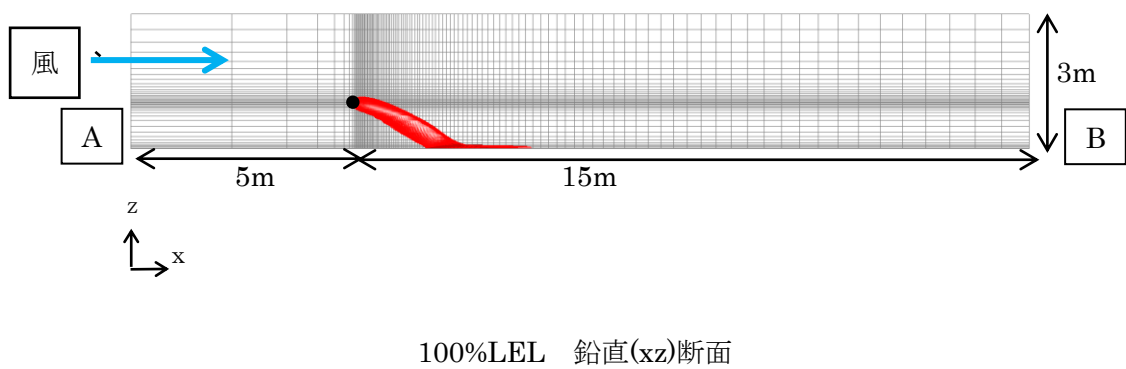
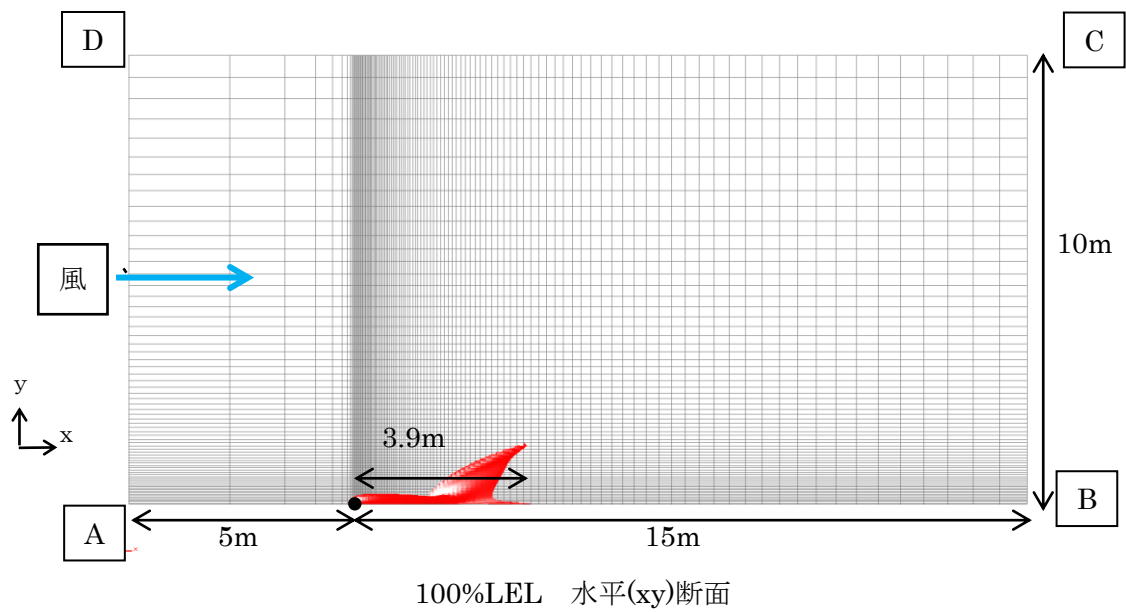


図4-4 100%LEL 風速 1m/s、気温 20°Cの解析結果
 ※A-B面は壁（自動車の側面）を想定して解析

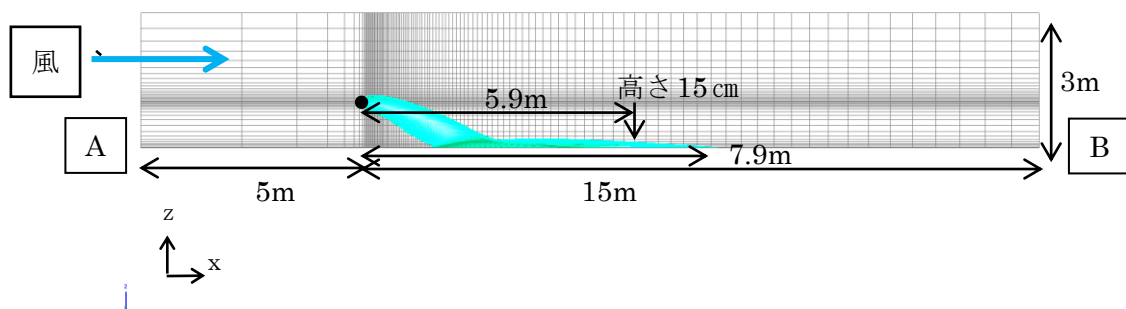
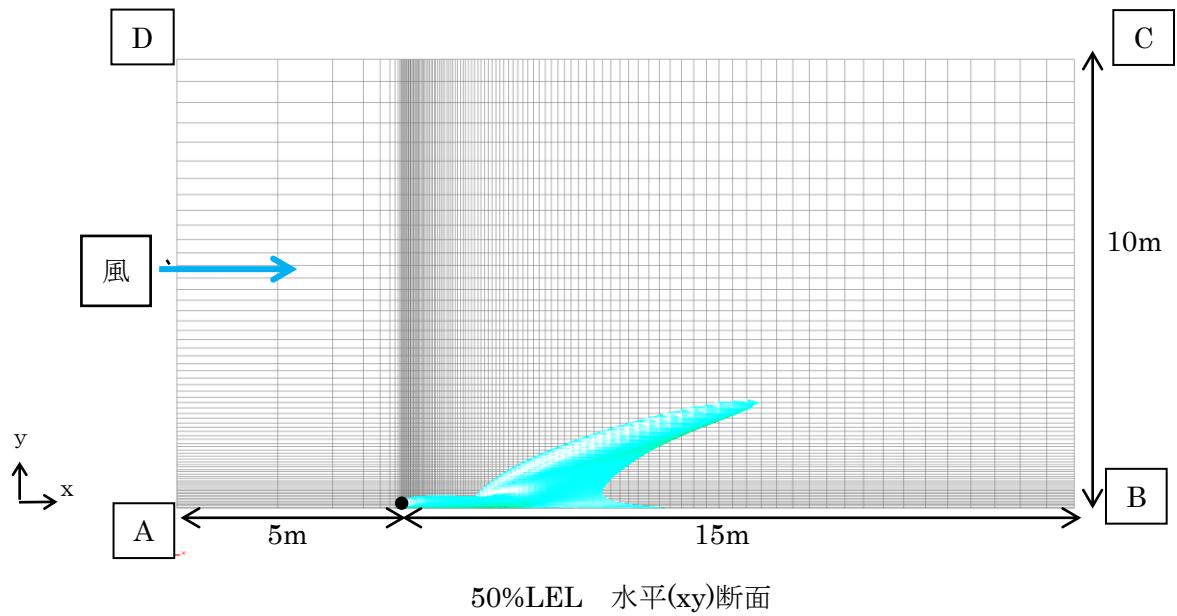


図4-5 50%LEL 風速 1m/s、気温 20°Cの解析結果
 ※A-B面は壁（自動車の側面）を想定して解析

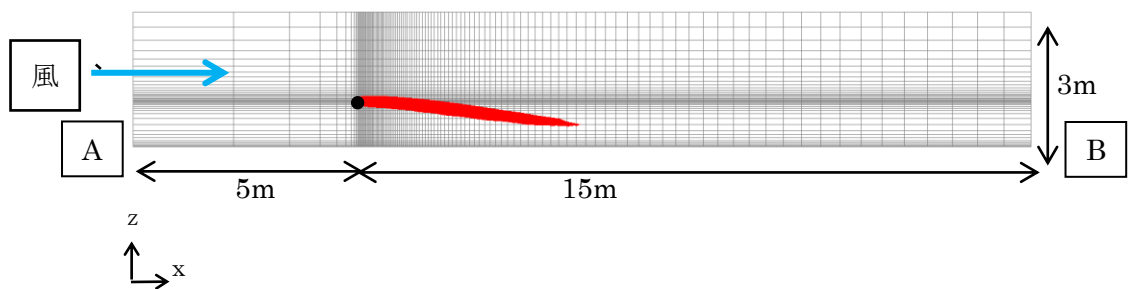
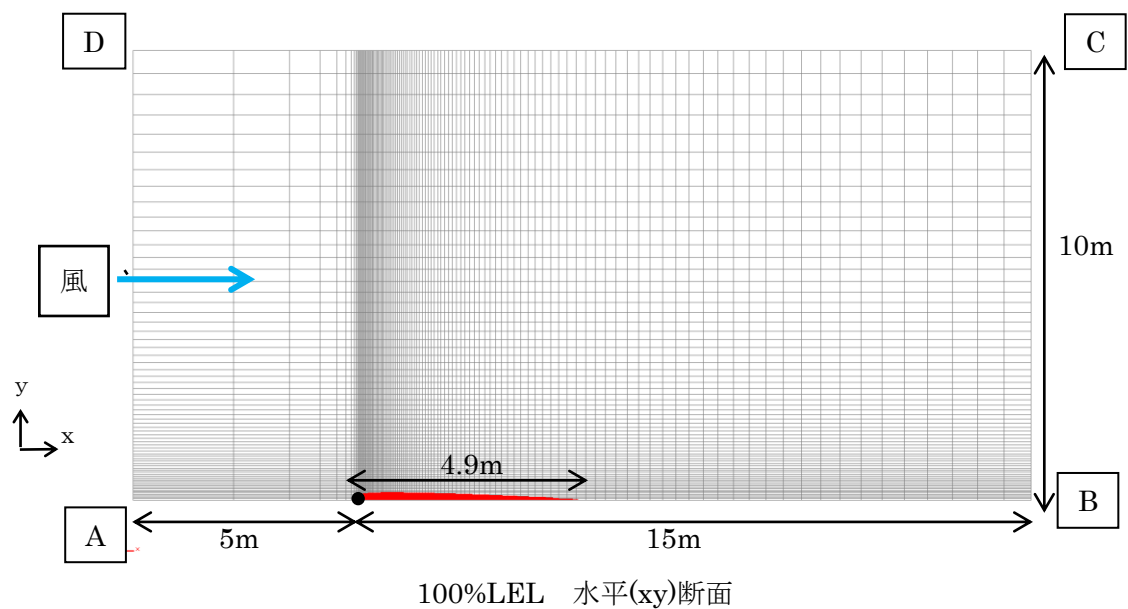


図4-6 100%LEL 風速 3m/s、気温 20°Cの解析結果
 ※A-B面は壁（自動車の側面）を想定して解析

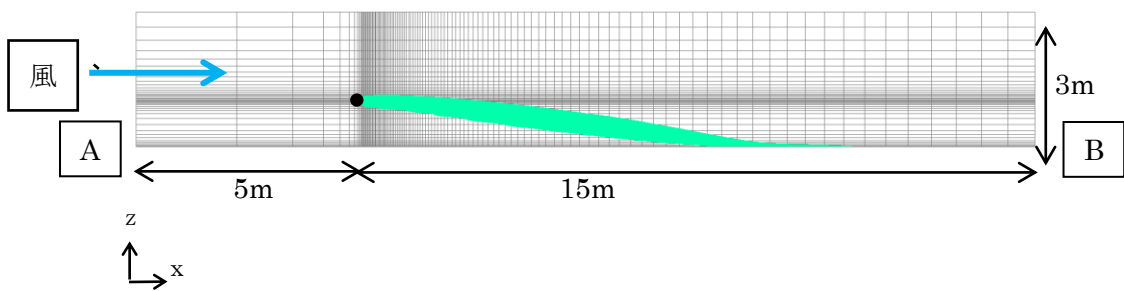
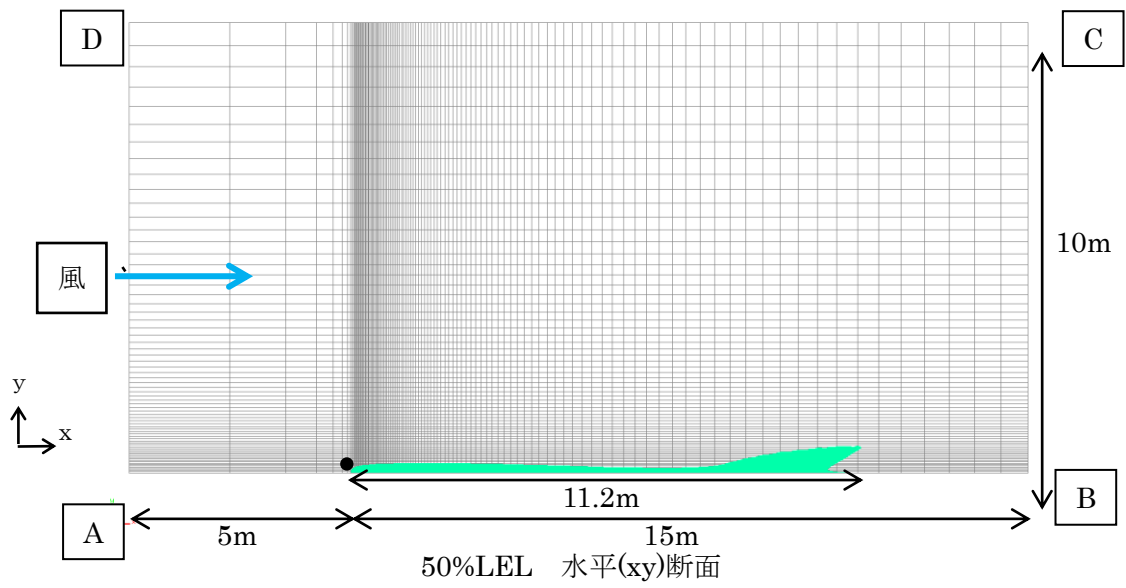
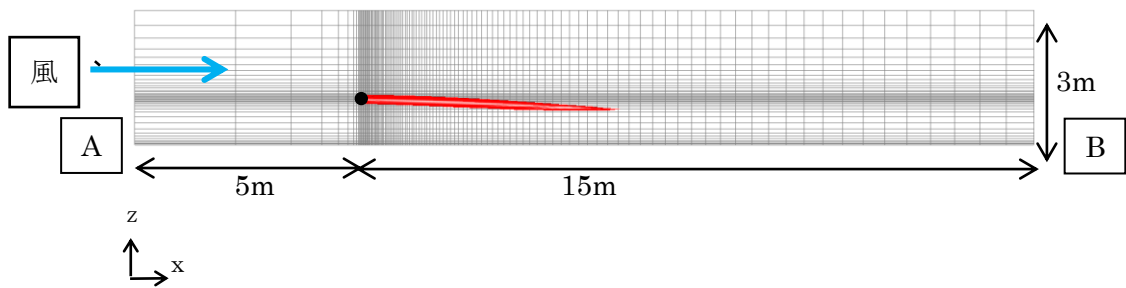
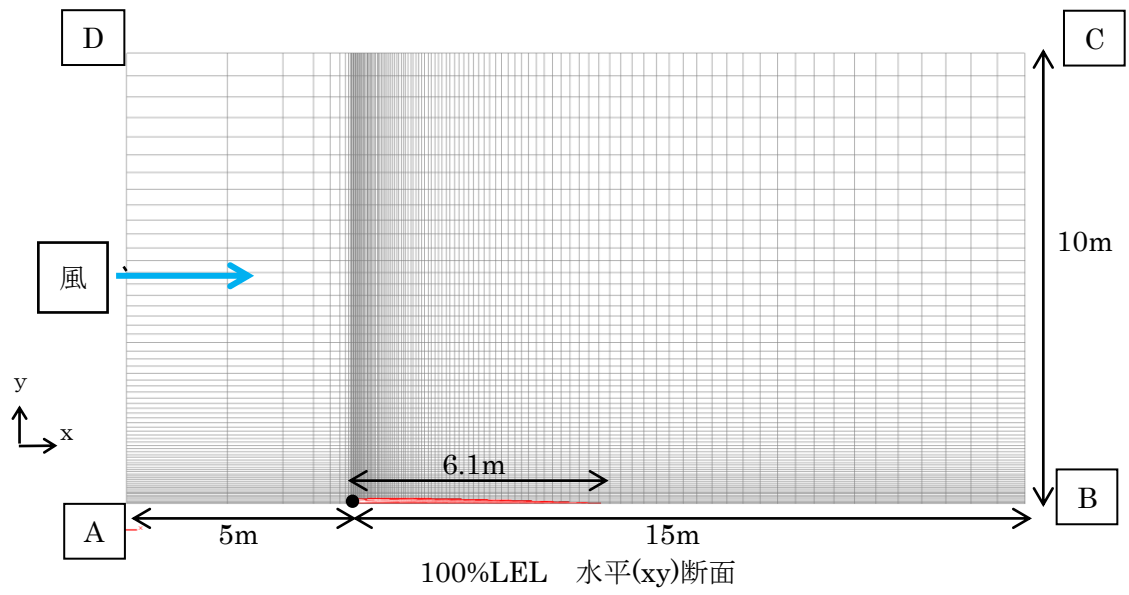


図4-7 50%LEL 風速 3m/s、気温 20°Cの解析結果

※A-B面は壁（自動車の側面）を想定して解析



100%LEL 鉛直(xz)断面
 図4-8 100%LEL 風速 5m/s、気温 20°Cの解析結果
 ※A-B面は壁（自動車の側面）を想定して解析

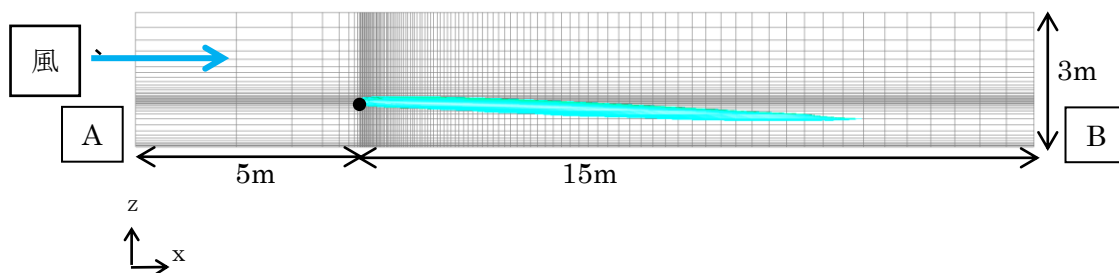
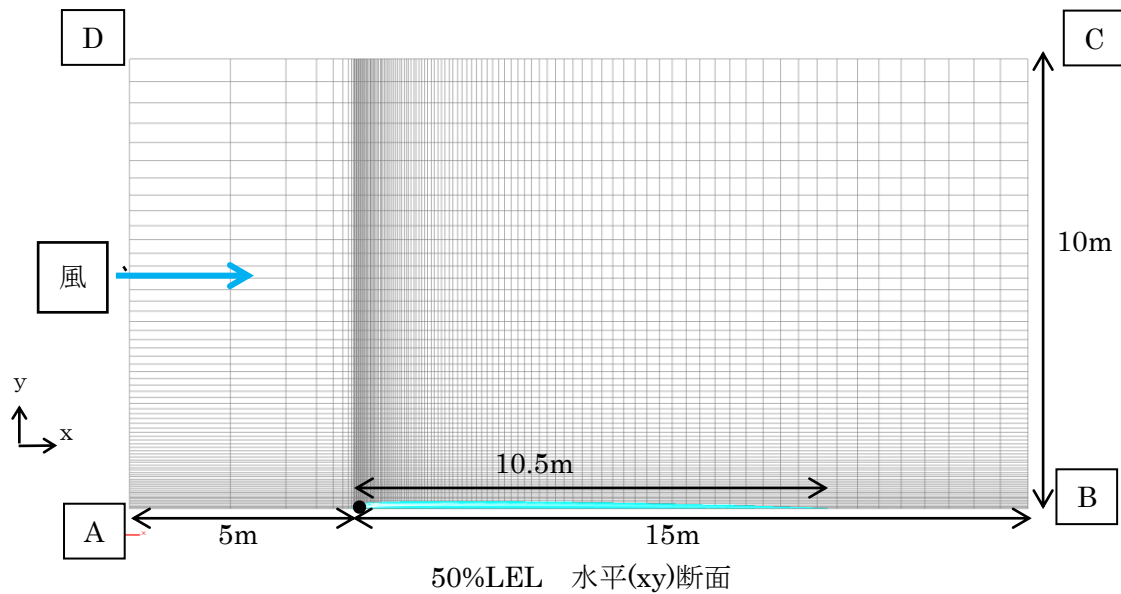


図4-9 50%LEL 風速 5m/s、気温 20°Cの解析結果

※A-B面は壁（自動車の側面）を想定して解析

図4-2～図4-9から、風速 0m/s においては、給油口から放出された可燃性蒸気が流下し、地盤面に到達後、水平方向へ広がる様子がわかる。また、風速 1m/s においては、給油口から放出された可燃性蒸気が地上で滞留し、A-B面の壁（自動車の側面）から離れて、給油口から水平方向に 7.9m まで広がる様子が見られる。高さ方向について、アイランド等の高さは 15 cm 程度であることから、地上から可燃性蒸気の高さ 15 cm 以上に可燃性蒸気が滞留する部分は、給油口から 5.9m となっている。

風速 3m/s 以上となると、給油口から放出された可燃性蒸気は針状に A-B面の壁（自動車の壁を想定）に沿って広がる様子が見られる。

(イ) 通気管

表7にガソリン蒸気濃度の到達距離を示す。

表7 ガソリン蒸気濃度の到達距離

ケース	風速 [m/s]	気温 [°C]	100%LEL 到達距離 [m]	50%LEL 到達距離 [m]	25%LEL 到達距離 [m]	100%LEL 到達高さ* [m]	50%LEL 到達高さ* [m]	25%LEL 到達高さ* [m]
B-2-1	0	20	0.6	2.5	6.1	-	0.27	0.50
B-2-2	1		4.3	8.1	14.3	-	-	-
B-2-3	3		7.9	12.3	20.8	-	-	-
B-2-4	5		8.4	14.2	21.7	-	-	-
B-2-5	0	32	0.6	2.5	6.2	-	0.31	0.49
B-2-6	1		4.3	10.2	14.4	-	-	-
B-2-7	3		6.9	12.3	20.7	-	-	-
B-2-8	5		9.2	16.2	25.5	-	-	-

※ 到達高さは、蒸気が地面に着地した場合に計測し、蒸気の地面からの最大高さを記載。

シミュレーション結果図を以下に示す。

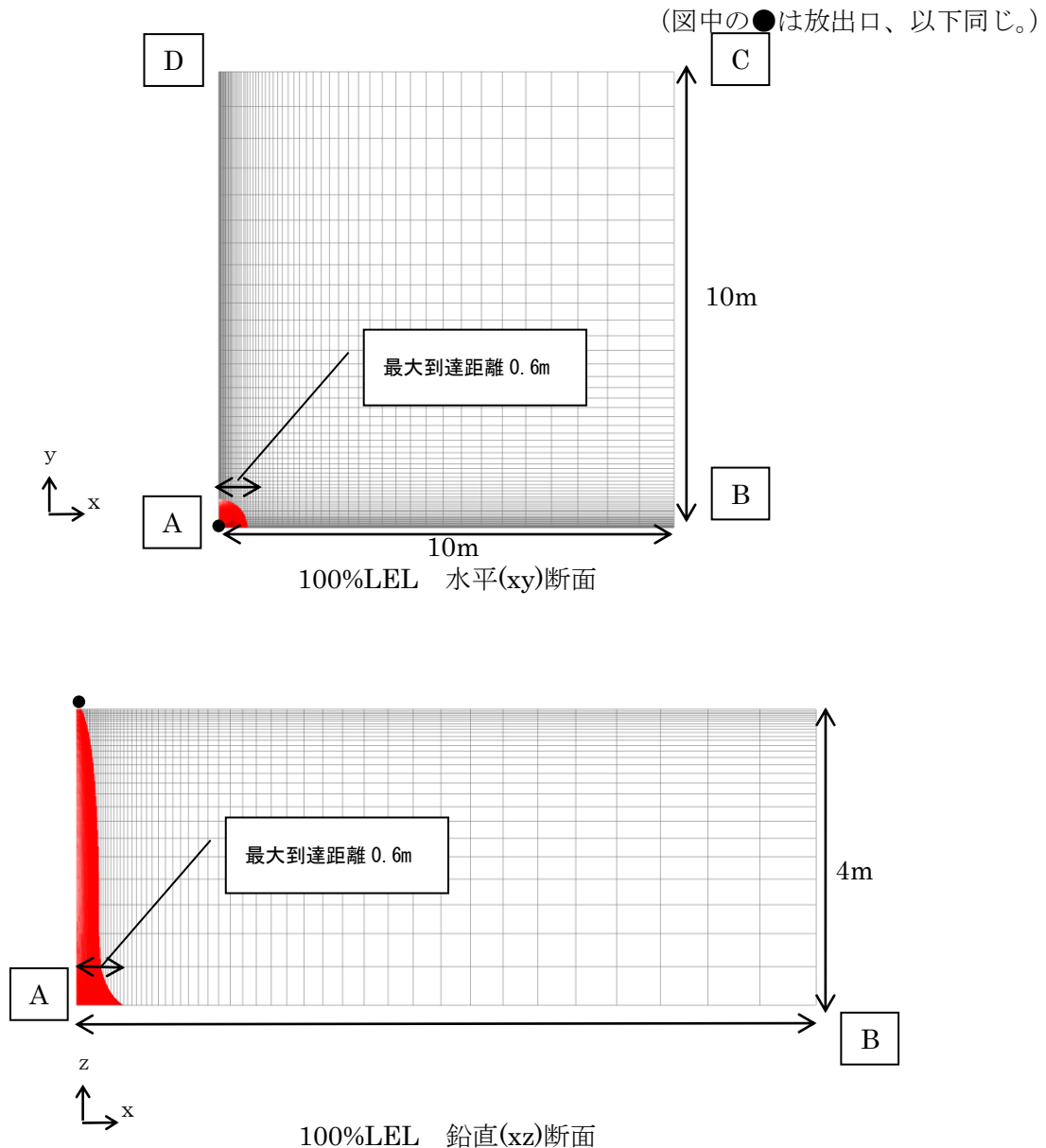
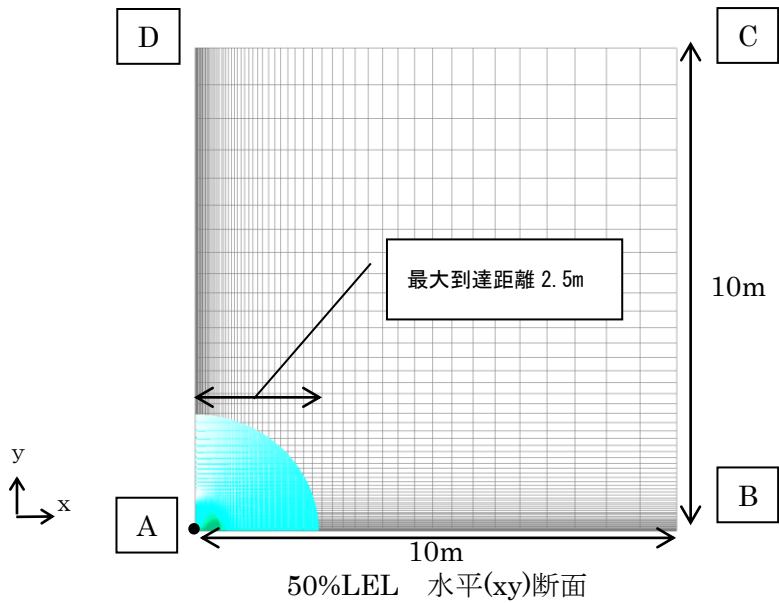
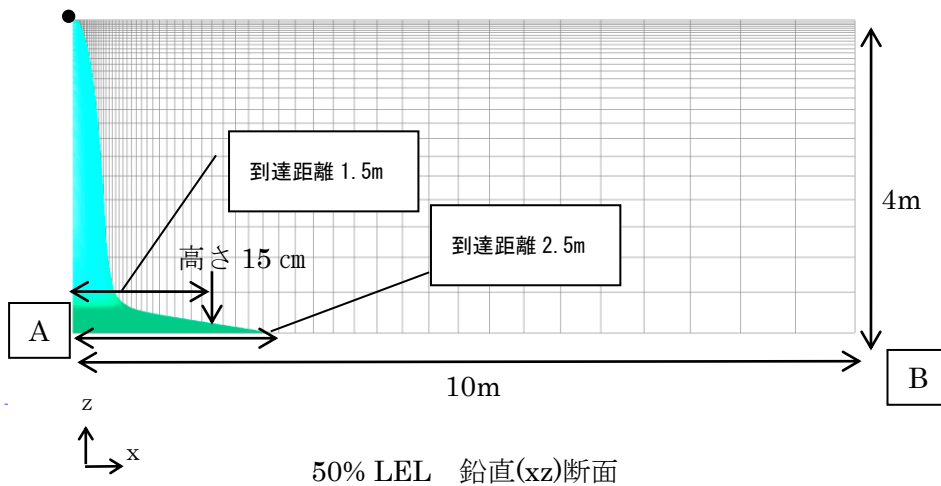


図5-1 100%LEL 風速 0m/s、気温 20°Cの解析結果



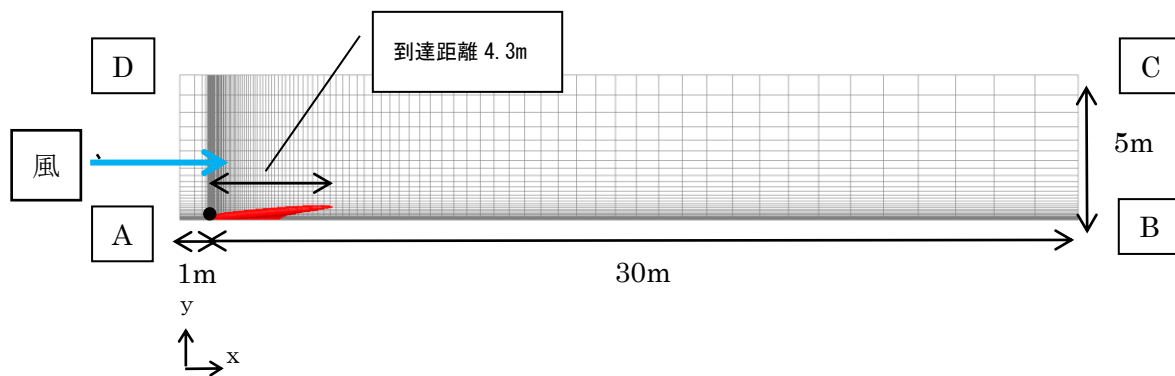
50%LEL 水平(xy)断面

100%LEL 鉛直(xz)断面

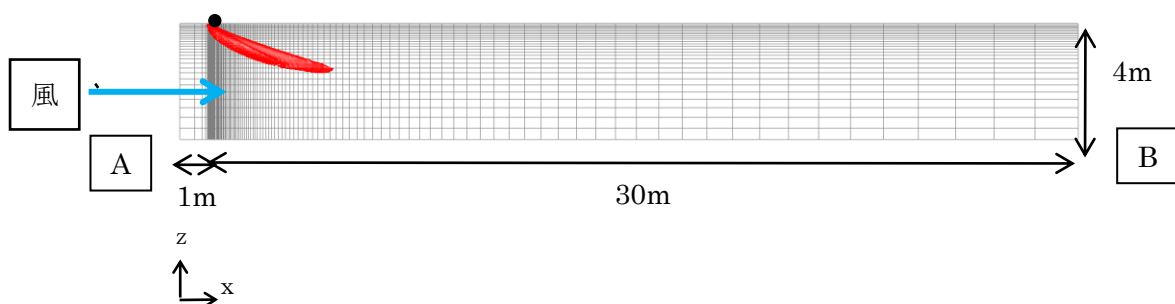


50% LEL 鉛直(xz)断面

図 5 - 2 50%LEL 風速 0m/s、気温 20°Cの解析結果

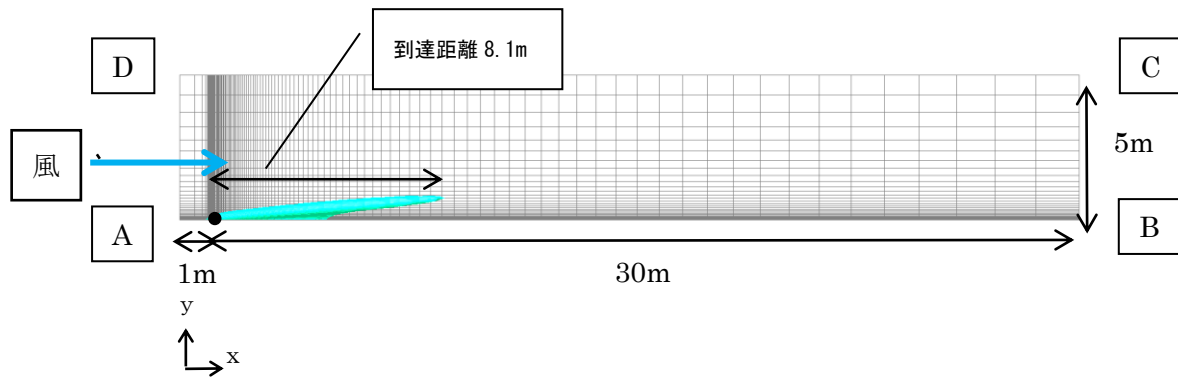


100%LEL 水平(xy)断面

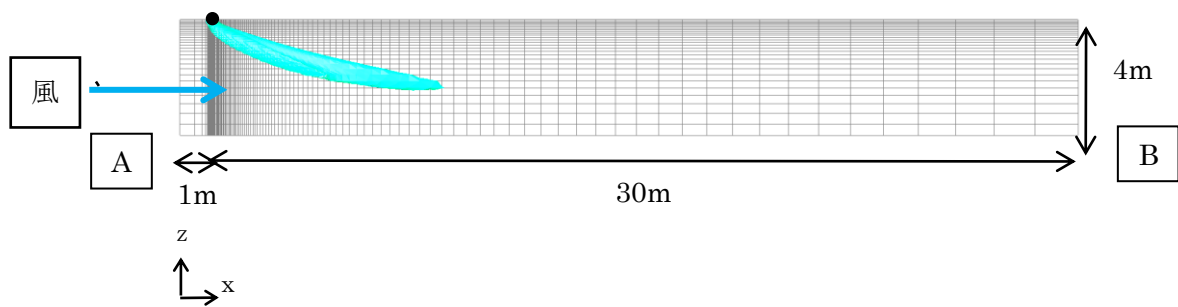


100%LEL 鉛直(xz)断面

図5-3 100%LEL 風速 1m/s、気温 20°Cの解析結果

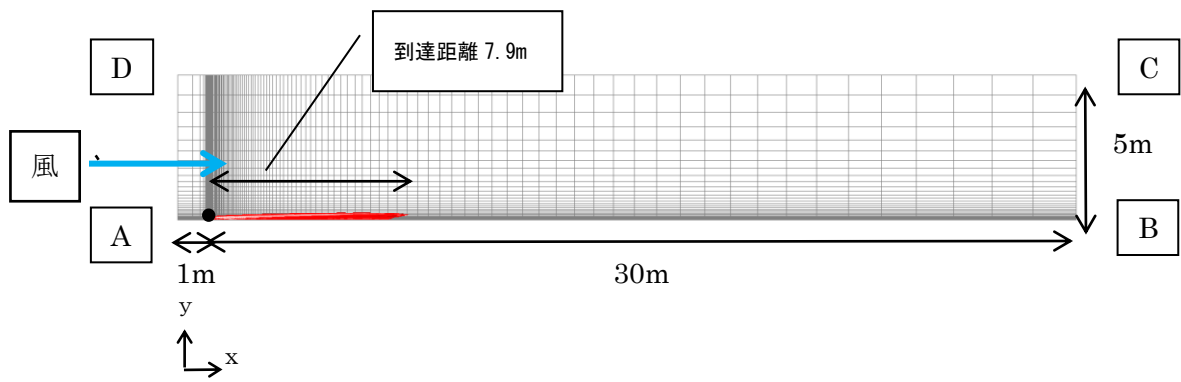


50%LEL 水平(xy)断面

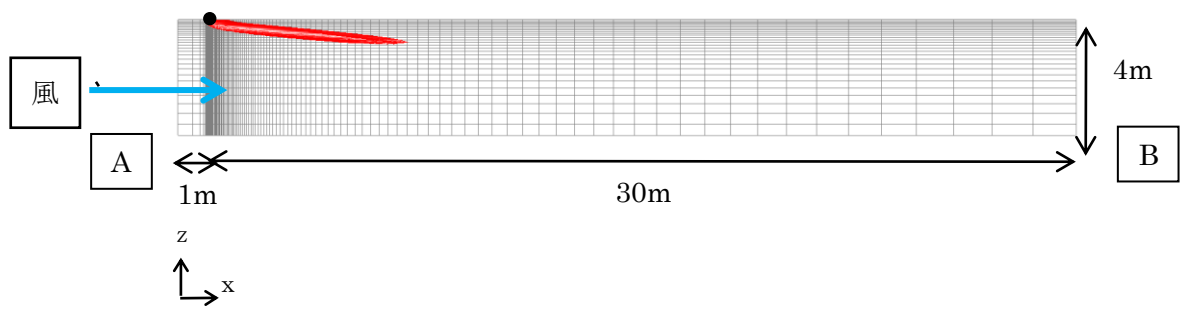


50% LEL 鉛直(xz)断面

図5-4 50%LEL 風速 1m/s、気温 20°Cの解析結果



100%LEL 水平(xy)断面



100%LEL 鉛直(xz)断面

図5-5 100%LEL 風速 3m/s、気温 20°Cの解析結果

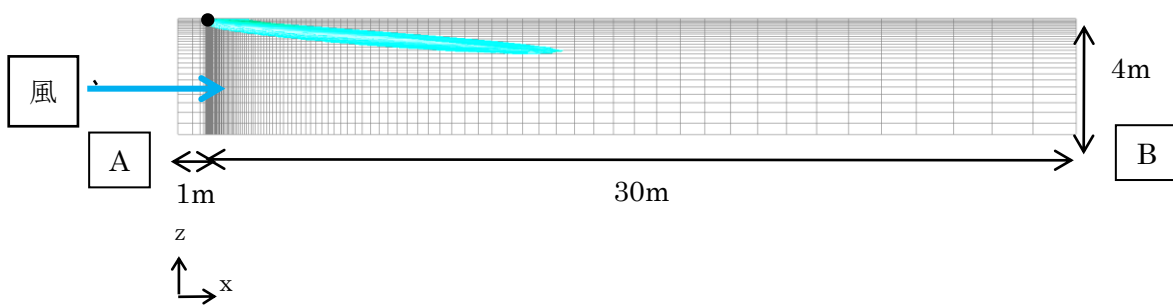
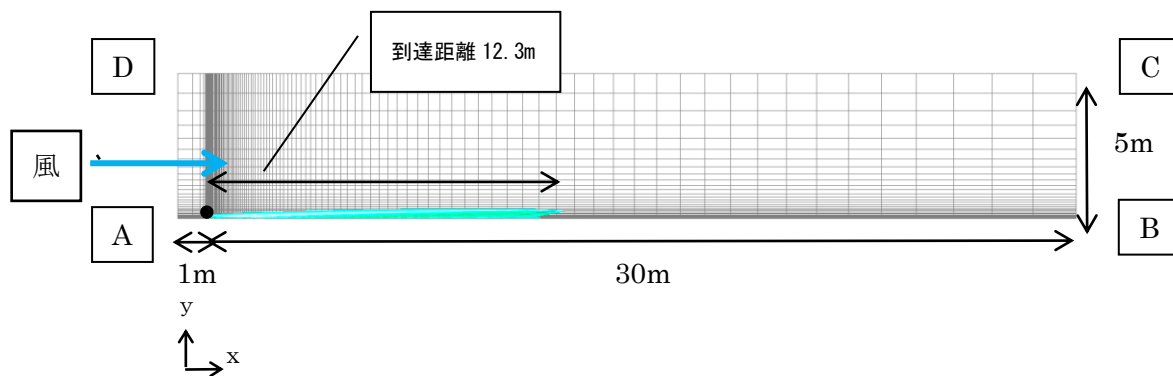
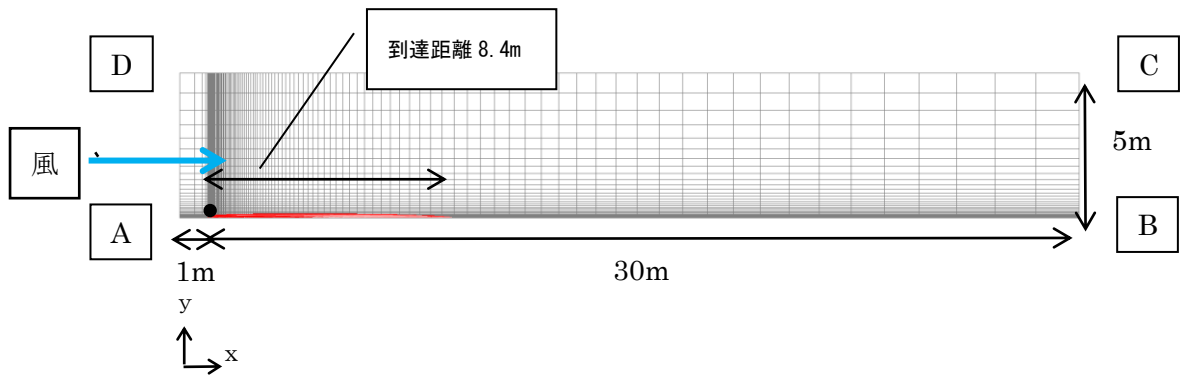
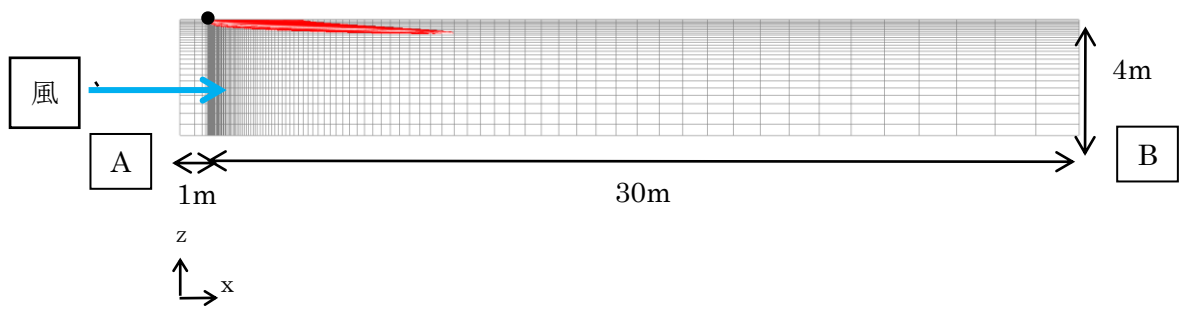


図5-6 50%LEL 風速3m/s、気温20°Cの解析結果

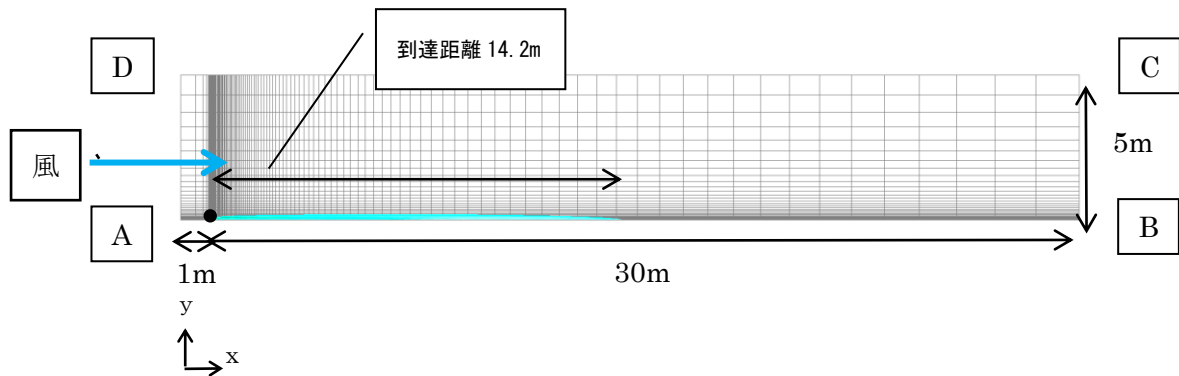


100%LEL 水平(xy)断面

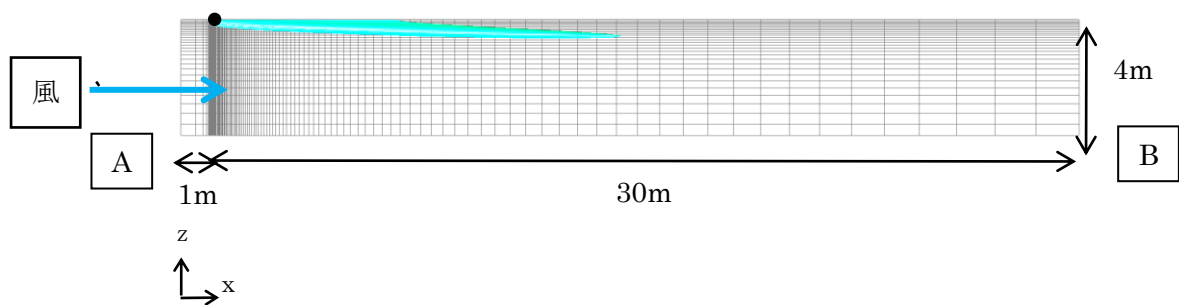


100%LEL 鉛直(xz)断面

図5-7 100%LEL 風速 5m/s、気温 20°Cの解析結果



50%LEL 水平(xy)断面



50% LEL 鉛直(xz)断面

図5-8 50%LEL 風速5m/s、気温20°Cの解析結果

図5-1～図5-8から、風速0m/sの場合、地上から高さ4mの放出口から可燃性蒸気が流下し、地盤面に到達後、同心円状に水平方向へ広がる様子がわかる。この場合、100%LELの可燃性蒸気の水平到達距離は0.6m、50%LELで2.5mとなっており、可燃性蒸気の分布は同心円状となっている。高さ方向について、アイランド等の高さは15cm程度であることから、高さ15cm以上の可燃性蒸気滞留範囲は1.5mとなっている。また、風がある状況下においては、放出口から放出された可燃性蒸気が風の方向へ流され、地盤面に到達せずに、拡散する様子がわかる。

(4) 考察

(ア) 給油中に発生する可燃性蒸気の滞留シミュレーションについて

図4-2～図4-9に示したとおり、風速が1m、3m、5mいずれの場合も仮定の壁に沿って可燃性蒸気が分布している様子が見られるが、実際には普通乗用車の全長は約5mであることから、給油口から最大5m弱のところまでは車体の側面に密着した状態で分布してもその部分を超えると車体の前面部分に巻き込まれるように乱流が発生し、可燃性蒸気の濃度が急激に低下すると考えられる。ただし、風速1mの場合には、車体に密着した部分だけでなく、地面に到達したところから水平方向に広がりを見せながら分布しているため、このケースについてさらに考察する必要がある。

一般的に給油取扱所の設備は15cm程度の基礎などの上に設置されることから、地面からの高さが約15cm以上となる部分の水平方向の距離を求めると5.9mとなっている。

一方、予備実験の結果からは高さ方向に最大で50cm程度は50%LELの部分が分布することが分かっている。

シミュレーションの結果及び予備実験の結果を踏まえ、安全側に考慮した場合、水平方向は6m程度、高さ方向は60cm程度の空間を可燃性蒸気が滞留する部分として想定する必要があるものと考えられる。

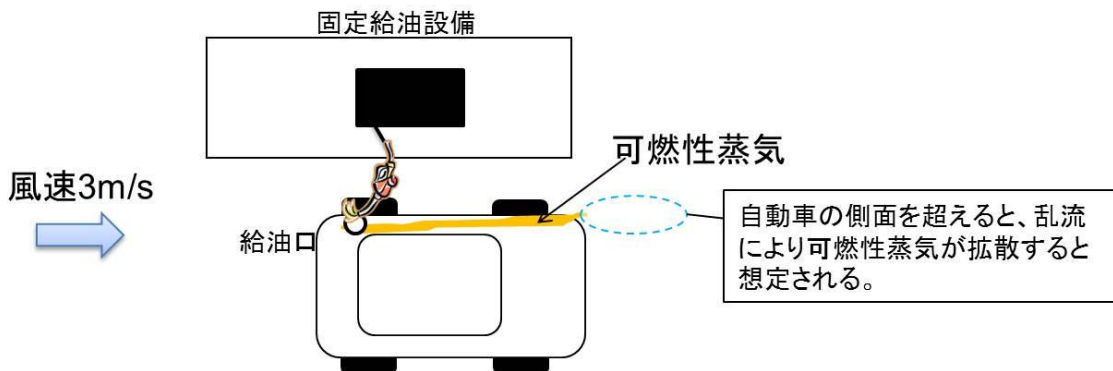


図6 風速3m/s及び5m/sにおけるシミュレーション解析結果の分析イメージ

(イ) 荷下ろし中に発生する可燃性蒸気の滞留シミュレーション

風速0mの時には、図5-2に示すとおり50%LELの分布状況は地盤面へ流下し、そこから水平方向へ広がりを見せながら分布している。

前述したとおり、一般的に給油取扱所の設備は15cm程度の基礎などの上に設置されることから、地面からの高さが約15cm以上となる部分の水平距離を求めると1.5mとなっている。

可燃性蒸気が上部から流下してくる場合、実際には空気を巻き込みながら流下してくるものと考えられ、安全側に考慮した場合、水平方向には1.5m程度、垂直方向は4m程度の空間を可燃性蒸気が滞留する部分として想定する必要があるものと考えられる。

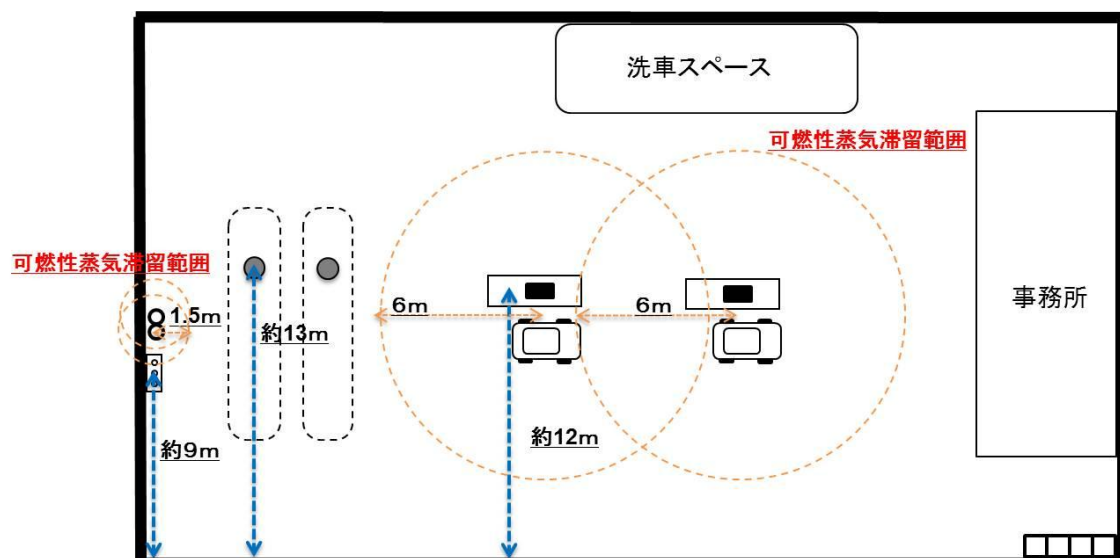


図7 通常の取扱い時に発生する可燃性蒸気の滞留範囲イメージ図