

## 研究論文

## 実規模LPガス漏洩・爆発評価システムの開発

高橋邦彦<sup>\*†</sup>, 富塚孝之<sup>\*</sup>, 永野勝尋<sup>\*</sup>, 高桑博文<sup>\*</sup>, 武井重雄<sup>\*</sup>, 越光男<sup>\*\*††</sup>,  
土橋律<sup>\*\*</sup>, 山鹿冬芽<sup>\*\*\*</sup>, 難波三男<sup>\*\*\*†††</sup>

<sup>\*</sup>(株)富士総合研究所 〒101-8443 東京都千代田区神田錦町2-3

<sup>†</sup>corresponding author: takahasi@star.fuji-ric.co.jp

<sup>\*\*</sup>東京大学工学部化学システム工学科 〒113-8656 東京都文京区本郷7-3-1

<sup>††</sup>corresponding author: koshi@chemsys.t.u-tokyo.ac.jp

<sup>\*\*\*</sup>高圧ガス保安協会 〒194-0035 東京都町田市忠生2-16-4

<sup>†††</sup>corresponding author: namba@khk.or.jp

2003年12月25日 受付 2004年2月6日 受理

## 要旨

LPガス保安合理化対策を検討するためには、ガス漏洩・燃焼現象を正確に把握する必要がある。これらの現象は、複雑であり、多くの物理的・化学的条件が関与している為、実験で全てを解明するのは難しい。そこで、近年のコンピュータと計算科学の発展に基づき実規模サイズの漏洩・拡散・燃焼・構造強度・破片飛散までの一連の解析を行う実用的な統合評価システムを開発した。

開発したシステムを用いた解析による予測結果と実規模実験の結果を比較することにより、数値解析手法の妥当性について検討を行った。

## 1. 緒言

ガス漏洩・爆発現象は、多くの条件が関与するため複雑な現象となる。これらを解明するために実規模実験を数多く実施することは、実験の負荷が大きく、費用面でも難しい。

一方、コンピュータの高性能化と数値解析技術の高度化により数値解析による燃焼解析も進み、エンジン等の燃焼機器の設計に利用されるようになってきた。LPガス容器置場(以下「容器置場」という)における漏洩ガスの燃焼現象についても数値解析によりその影響を予測できれば、保安対策を検討する際のコストの低減や期間の短縮が図られ、大きなメリットがある。しかし、従来の数値解析による燃焼解析では計算格子幅を反応領域より小さくする必要があり、そのため、数cmレベルの矩形ボックス内での燃焼解析は行われていたが、数mレベルとなる容器置場のよう大きなスケール空間を対象とした燃焼解析を行うことは大変困難である。また、現実の容器置場で発生するガス爆発の火炎には通常乱れが発生し乱流燃焼状態となることから、解析を一層困難としている。

更に、容器置場の保安対策を検討するためには、燃焼現象のみならずガス漏洩から爆発・飛散までの一連の現象の解析を行う必要がある。大きなスケールでのガス爆発現象の解析ソフトウェアは既にいくつか開発されているが(AutoReaGas, TRACE, PHAST, FLACS等)、これらを

用いてもガス漏洩から爆発・飛散までの一連の現象の解析を行うことが出来ない。

## 2. 目的

本研究の目的は、先に述べたような要因から、容器置場のような実規模サイズでも解析可能な乱流予混合燃焼数値解析技法を開発し、更に漏洩拡散、構造強度、破壊飛散に至るまでの一連解析が可能な統合評価システムを開発することである。

この一連解析の目的は容器置場の保安対策の検討であり、必要な評価項目は、壁上部・下部換気口の開口面積の評価、漏洩量影響の評価、火炎到達距離の評価、容器置場外への圧力波伝播による影響評価、容器置場の容積の評価、容器置場を構成する屋根材・壁材の構造強度の評価、および破壊時における飛散物の影響評価である。

また、解析対象の容器置場における実規模サイズでの燃焼実験<sup>1),2)</sup>(以下「実規模実験」という)が実施されているので、本システムによる予測結果との比較検討を行い、実現象との整合性を確認するとともに数値計算モデルのパラメータ調整を行った。

## 3. 統合評価システム

ガス漏洩から爆発・飛散までの一連現象の解析を行う統

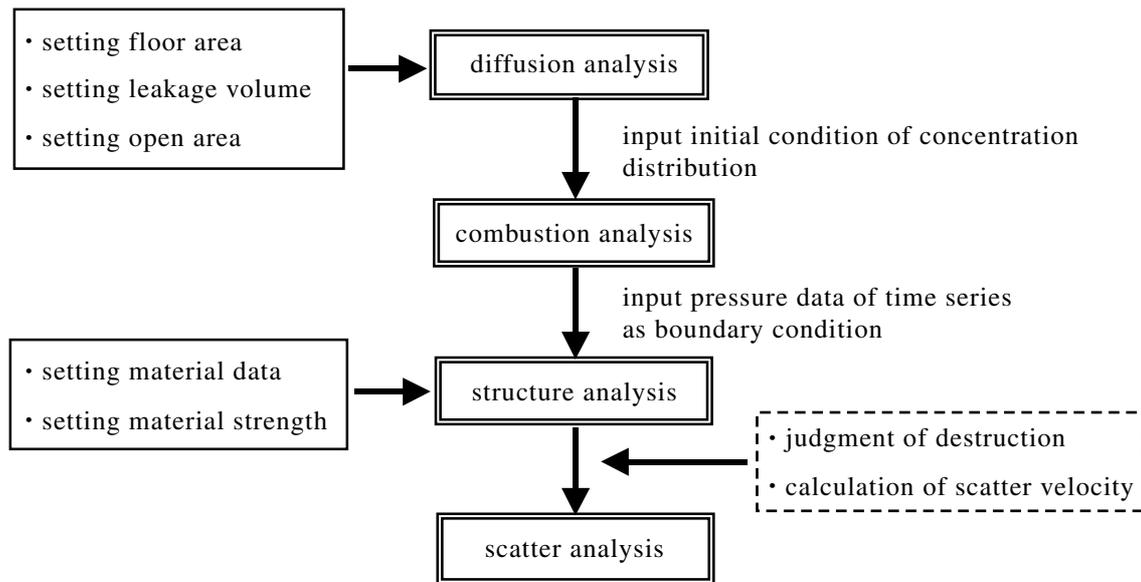


Fig.1 System flow of integration evaluation.

合評価システムは、拡散解析部、燃焼解析部、構造強度解析部および飛散解析部の4つのサブシステムから構成される (Fig. 1参照)。拡散解析部では、容器置場内に設置されている容器・配管系もしくは調整器から何らかの原因で、LPガスが漏洩した時のガスの拡散状態および滞留状態を非圧縮性流体の数値解析手法を用いて計算し、ガスの濃度分布状態を予測する。燃焼解析部では、ガスが溜まった状態で何らかの原因で着火・爆発した時の火炎の挙動および圧力変動を圧縮性流体の数値解析手法を用いて予測する。構造強度解析部では、圧力上昇によって壁または屋根材が破壊に至るか否かを有限要素法を用いた構造解析によって予測する。飛散解析部では、建材が破壊した場合に破片を1質点系と想定して飛散距離を予測する。以下に各解析部の数値解析手法と数値計算モデルについて示す。

### 3.1 拡散解析

拡散解析では、LPガスの供給機器から漏洩したLPガスの拡散現象を解析し、ガスの挙動を把握すると同時に燃焼可能な濃度範囲(爆発下限界2.1vol%と爆発上限界9.5vol%間の濃度)にあるガスの分布を予測することを目的としている。

#### (1) 数値解析手法

解析手法としては基礎方程式にNavier-Stokes方程式(運動方程式)、連続の式、エネルギー保存式および濃度の移流拡散方程式を用いており、また乱流モデルには標準k- $\epsilon$ 2方程式モデルを採用している。

座標系には一般曲線座標系を採用し、これにより構造物境界面の形状近似を高めている。

数値解法には有限差分法を用い、空間微分の離散化に1次風上差分のドナーセルスキームと3次精度のTVDスキームを有している。

時間積分はSIMPLE法で行っているため、噴流ガスのよ

うな高速流体でも時間ステップ幅の制限が緩和される。

LPガスの漏洩口はノズルやホースなどのように、解析領域のスケールに比べ口径が非常に小さいケースが多い。口径と同じスケールで計算格子を作成すると解析領域全体では計算格子数が膨大となり、多大な計算時間を要する。この問題を回避するため、噴出し境界面に面透過率<sup>3)</sup>が設定できるようにし、計算格子幅より小さい漏洩口にも対応が可能である。

#### (2) ガス噴出口モデル

LPガス容器からの漏洩量は、容器内での自然気化量に依存するため容器内の温度に支配される。容器内の液温度は、ガスの噴出に応じて生ずる容器内液の気化により失われる潜熱と、外部との温度差による入熱とで求まる。また、容器内の気相・液相の組成は、成分毎に蒸発量が異なるため、LPガスの供給に伴い、時々刻々と変化する。

本モデルは、各時刻においてLPガス容器内の気相と液相は平衡となっていると考え、LPガス供給に伴う温度変化を求め、その温度における気液の組成を求めることで、噴出量を計算した。

### 3.2 燃焼解析

拡散解析で得られたLPガスの濃度分布を初期値として燃焼解析を行う。燃焼解析の目的は、伝播する火炎の挙動と燃焼に伴う容器置場内の圧力上昇を予測することであり、圧力上昇の解析結果は構造強度解析部へ引き渡され、容器置場を構成する部材の構造強度が評価される。

火炎に及ぼす乱流の影響が小さいスケールでは、燃焼実験との検証で整合性が確認され実証されている。<sup>4)</sup>

#### (1) 数値計算モデル

燃焼反応を取り扱う詳細な数値計算モデルでは、火炎の内部構造を解像できるだけの詳細な格子分割が必要であり、一般的に格子幅は10 $\mu$ m程度となる。典型的な容器置場は1辺が3~5m、高さ2m程度あり、格子数は10<sup>5</sup>程度に

なる。解適合格子法を使って火炎近傍だけを詳細に格子分割すれば格子数を大幅に減らせる可能性はあるが<sup>5),6)</sup>、それでも一般的な計算機資源で実用的な時間内に容器置場内の燃焼解析を行うのは極めて困難である。今回開発したモデルは、高野<sup>7)</sup>により提案された予混合燃焼の数値計算モデルをベースにしている。高野のモデルは火炎を未燃ガスと既燃ガスを分ける不連続面としてモデル化している。この不連続面を未燃ガスが層流燃焼速度と同じ速さで進入し、既燃ガスに移行することにより火炎の挙動を解析する。燃焼反応を取り扱わないため火炎の内部を解像する詳細な格子が必要なく、容器置場のような大きなスケールの場にも適用できる可能性がある(Fig. 2参照)。ただし、高野のモデルは等濃度場における層流予混合燃焼を対象としているのに対し、本システムは濃度分布のある場における乱流予混合燃焼を対象としている。そのため、高野のモデルに容器置場内のLPガスの濃度分布を計算する機能、乱流モデル、および乱流燃焼速度を推定する機能を加えた<sup>3)</sup>。

解析手法の概要は以下のとおりである。基礎方程式として未燃ガスと既燃ガスの混合ガスに関する質量保存式、運動量保存式、エネルギー保存式、状態方程式、および既燃ガスとLPガスに関する質量保存式を解く。乱流モデルはk-ε2方程式モデルを用いている。乱流燃焼速度 $S_f$ はLPガス濃度と乱流エネルギーから乱れの等方性を仮定して求めた乱流強度をパラメータとして実験式(1)から推定している。<sup>8)</sup>

$$S_f = S_l \left\{ 1 + k_1 (u' / S_l)^n \right\} \quad (1)$$

ただし、 $u'$ は乱流強度、 $S_l$ は層流燃焼速度、 $k_1, n$ は一定値で4.3, 1である。層流燃焼速度はプロパンの当量比 $\phi$ および温度、圧力への依存性を考慮して、

$$S_{l0} = 38.31 + 24.84(\phi - 1) - 153(\phi - 1)^2 \quad (2)$$

$$S_l = S_{l0} (T_u / T_0)^a (P / P_0)^b \quad (3)$$

で表される<sup>9)</sup>。ただし、 $T_u$ は未燃ガスの温度、 $T_0, P_0$ は基準温度と圧力で、 $T_0=298\text{K}$ 、 $P_0=1\text{atm}$ であり、 $a, \beta$ は一定値で $a=2.13$ 、 $\beta=-0.17$ である。

## (2) 解析の流れ

拡散解析より得られたLPガス濃度分布を初期値とする。LPガスの密度は空気より大きく、濃度は下部で高く上部で低い分布になる。着火位置は事故シナリオに基づき可燃領域から選定する。計算上は着火位置の計算セルを既燃ガスとすることで着火を模擬する。火炎面は着火位置から放射状に伝播し容器置場内の圧力を上昇させる。一定時間間隔毎に壁面上の格子点の圧力をファイル出力し、構造強度解析部へ引き渡す。

## 3.3 構造強度解析

構造強度解析の目的は、容器置場内でガスが滞留し何らかの原因で着火し爆発した時、燃焼による圧力上昇によって容器置場を構成する壁材・屋根材が破壊されるか否かの

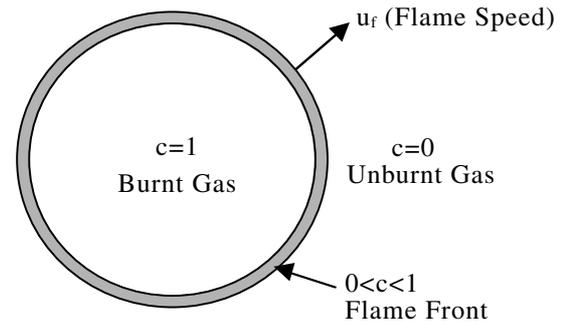


Fig. 2 The model of flame front.

強度確認を行うことである。

構造強度解析では、先の燃焼解析から得られる圧力の時系列データを入力とし、容器置場を構成する壁材、屋根材に動的に荷重させ部材の構造強度を評価する。

### (1) 数値解析手法

有限要素法により半離散化近似された運動方程式(4)を直接積分法による線形加速度法を改良したNewmark β法またはWilson θ法を用いて動的応答弾塑性解析を行う。

$$\text{運動方程式} \quad M\ddot{x} + C\dot{x} + Kx = F(t) \quad (4)$$

ここで、 $M$ ：質量行列(構造物の質量)、 $C$ ：減衰行列、 $K$ ：剛性行列(構造物の剛性)、 $F(t)$ ：時間依存による外力(ガス爆発による圧力)、 $x$ ：節点変位

### (2) 数値計算モデル

容器置場を構成する各部材は、以下に示すような要素を用いてモデル化を行った。

- ・壁材、屋根材：シェル要素
- ・配筋鉄筋、母屋C鋼：梁要素
- ・チャンネルボルト：バネ要素

### (3) 破壊判定手法

鉄筋・母屋C鋼については、軸力および曲げモーメントによる引張応力と降伏応力との比較によって塑性判定を行い、更に歪みからは破断判定(破断ひずみ20%を設定)を行っている。

壁材・屋根材については、面内応力と曲げモーメントより縁応力・主応力を算定し、更にVon Misesの相当応力と降伏応力との比較によって破壊判定を行っている。

本システムでは、破壊過程をより現実的に表現するために、屋根材スレートと母屋C鋼を留め付けているチャンネルボルトが母屋C鋼から外れる破壊判定を4実規模実験結果との比較で示す実規模実験の結果から抽出し設定していることである。

## 3.4 飛散解析

飛散解析の目的は、容器置場が爆発した時に破片が周辺に及ぼす影響範囲を把握することである。破片の飛散距離が保安距離を満足するか否かが保安上の評価の目安となる。

### (1) 数値解析手法

破壊直後の破片の飛散初期速度を算定する手法として、

一般的な考え方がない。本システムでは、4.実規模実験結果との比較で示す実規模実験の破壊過程・飛散状況から妥当な算定手法を見出した。

(a) 飛散初期速度の算定手法

飛散初期速度の算定手法として、力積による方法、仕事量による方法の2種類が考えられ検討を行った結果、仕事量から飛散初期速度を算定する手法が4.実規模実験結果との比較で示す実規模実験との比較検討から妥当な値を得ていることが分かった。以下に仕事量による算定手法を示す。

動的応答解析にて、破壊直前まで各時間ステップ毎の仕事量の総和を(5)式より求める。

$$\int pdV = w \tag{5}$$

ここで、 $p$ ：ゲージ圧（絶対圧－大気圧）

この総積分値が飛散物に与えられる運動エネルギーと考へ、(6)式より飛散初期速度を算定する。

$$(1/2)mv^2 = w \quad \therefore v = \sqrt{2w/m} \tag{6}$$

ここで、 $m$ ：物体の質量、 $v$ ：物体の飛散速度、 $w$ ：構造物が得た全エネルギー

(b) 飛散距離の算定手法<sup>10)</sup>

飛散物を質点と想定し、飛散角度、飛散初期速度、抗力係数、揚力係数を設定し、以下に示す軌跡式(7)を用いて飛散距離を算定する。

$$\frac{d^2x}{dt^2} = -\frac{A_D C_D \rho (v_x^2 + v_y^2) v_x}{2m} - \frac{A_L C_L \rho (v_x^2 + v_y^2) v_y}{2m} \tag{7}$$

$$\frac{d^2y}{dt^2} = -g - \frac{A_D C_D \rho (v_x^2 + v_y^2) v_y}{2m} - \frac{A_L C_L \rho (v_x^2 + v_y^2) v_x}{2m}$$

ここで、 $C_L$ ：揚力係数、 $C_D$ ：抗力係数、 $\rho$ ：空気の密

度、 $x, y$ ：飛散物の軌跡 ( $x$ ：水平方向、 $y$ ：鉛直方向)、 $A_D$ ：飛翔方向と平行な面への飛散物の投影面積、 $A_L$ ：飛翔方向と垂直な面への飛散物の投影面積、 $v, v_x, v_y$ ：ある時間における速度、速度成分

初期速度が $V_0$ であり、飛翔の初期角度を $\alpha_0$ とすると、初期条件は次式で与えられる。

$$t = 0 \text{で} , \quad \frac{dx}{dt} = v_0 \cos \alpha_0, \quad \frac{dy}{dt} = v_0 \sin \alpha_0 \tag{8}$$

式(8)を初期条件として、式(7)をRunge-Kutta-Gill法を用いて計算式を解くと、軌跡( $x, y$ )を求めることができる。

4. 実規模実験結果との比較

ここでは、開発した統合評価システムの妥当性を確認するため、実規模実験（床面積20m<sup>2</sup>前後、容器なし）<sup>1)2)</sup>との比較検討を行い、先に述べた各解析部の数値解析手法の確認、システム改良およびパラメータ調整を実施した。以下に比較検討の内容を示す。

4.1 拡散解析

実規模実験と構造条件（容器置場形状、開口率など）および漏洩条件（漏洩量、漏洩位置など）を同様にし、本システムを用いた解析計算を実施した。実規模実験で用いた容器置場をFig. 3（壁上部には0.1m幅の開口部が存在）に、また漏洩条件をTable 1に示す。本実験では規定の漏洩量を長時間供給できるように特殊な供給装置を用いたため、ガス漏洩境界条件にガス噴出口モデルは適用せず漏洩量固定条件とした。

計算領域は、容器置場の周りに水平方向3.0m、高さ方向に2.1mの領域を設置した。全領域の格子点数は42×69×39で総数113,022である。漏洩口は直径12mmおよび18mmの2つの穴で、漏洩時間は実験と同じ3分18秒とした。ただし、実験当初下部換気口は全開であったがガスが可燃濃度まで滞留しないため、下部換気口を紙で塞いでガス漏洩を行った。ガス濃度は接触燃焼式のLPガスセンサーを用いて、水平方向および鉛直方向に設置し計測を行った。

Fig. 4に3分18秒後（着火時）の濃度分布図を、Fig. 5に

Table 1 Boundary condition for analysis.

particular	content
leakage volume	26.5m <sup>3</sup> /h
leakage height	1.4m
leakage direction	horizontal direction
ejection shape	inner diameter:18mm,12mm parallel two nozzle
leakage time	3m18s
concrete block	block: C type JIS A 5406
reinforce	reinforced concrete JIS G 3112 SD345 D13
main house	steel pipe: JIS G 3466 STKR400 light steel pipe: JIS G 3350 SSC400 4223 stainless steel: JIS G 4303
wave bord slate	reinforced fiber cement: JIS A 5430 slate/wave bord/large wave

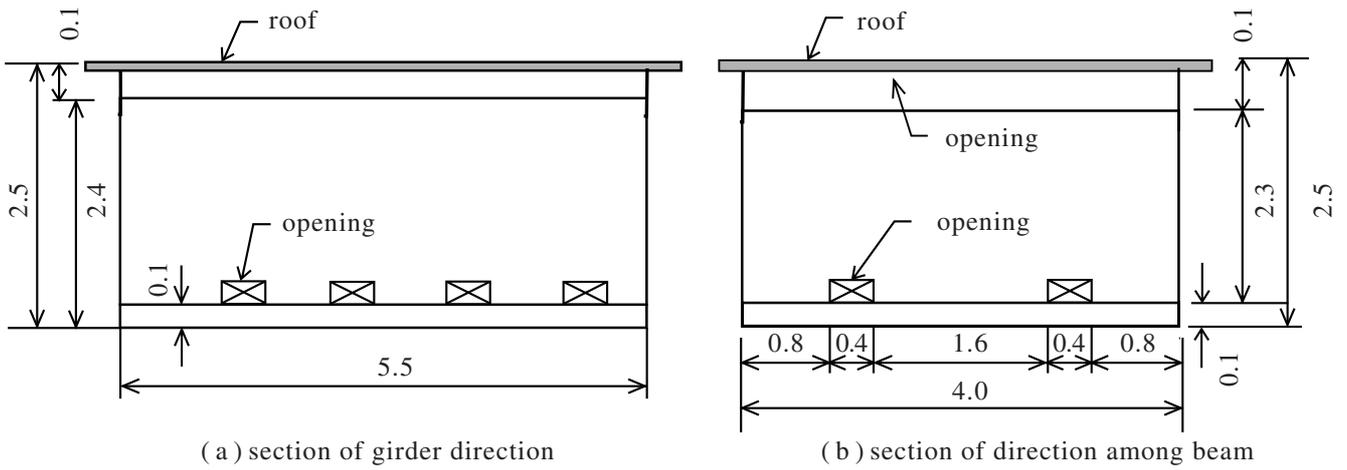


Fig. 3 Dim. of the LPG-tank container [m] (inner floor area : 19.24m<sup>2</sup>).

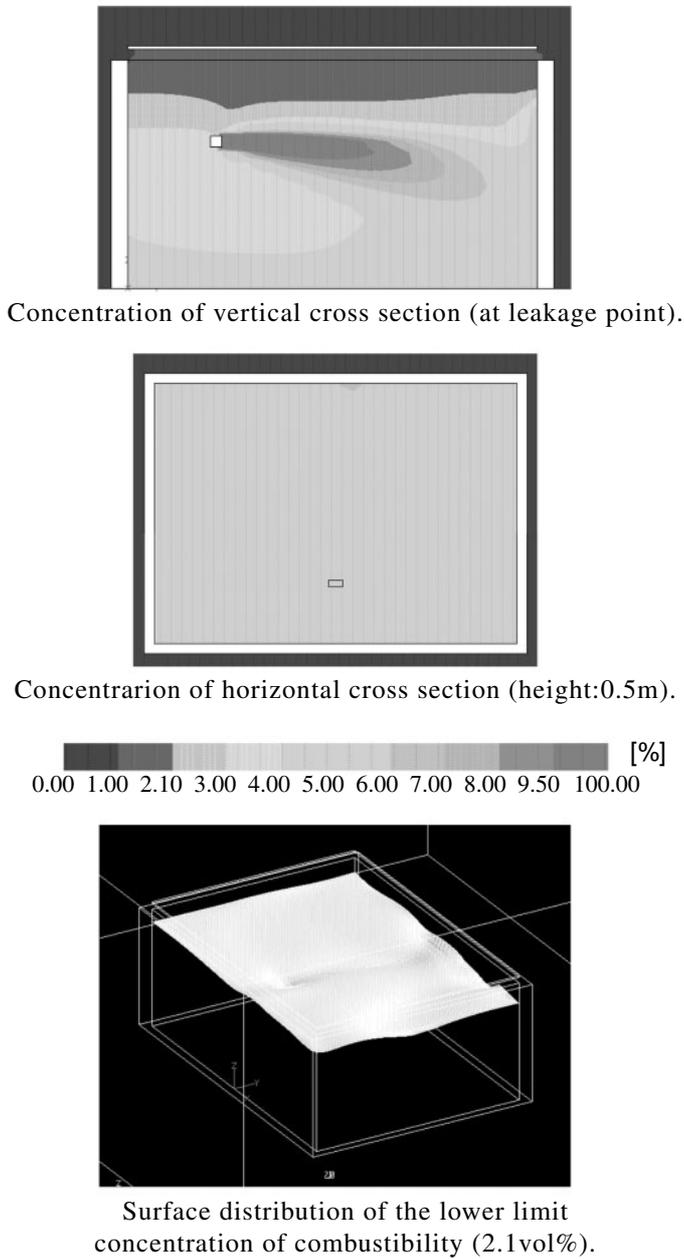


Fig. 4 Concentration Distribution.

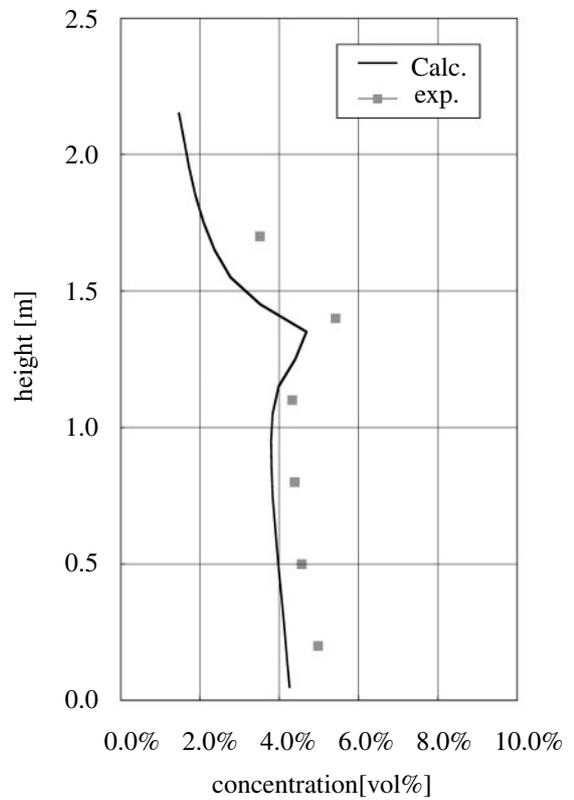


Fig. 5 Vertical distribution of LPG concentration at center point of the container.

同時刻における実験結果との比較結果を示す。

Fig. 5より解析結果は実規模実験における容器置場内の濃度分布をよく再現していることが分かる。

4.2 燃焼解析

拡散解析で着火時のガス濃度分布を予測し、燃焼解析により着火後の火炎伝播の様子や容器置場内の圧力上昇を解析した。実験において圧力は歪みゲージ式圧力センサーを容器置場壁面に設置し、時系列変化を測定した。また火炎伝播速度については着火点を原点に、水平方向に30cm間隔で設置したイオンプローブと、2箇所に設置したCCDカメラにより火炎面の動きを計測した。この結果と実規模実験の結果を比較した。着火位置は容器置場中央の床上50cmである。計算に用いた格子は拡散解析で用いた格子と同じであり、時間刻みを $1.0 \times 10^{-5}$ 秒として着火後1秒まで解析を行った。下部換気口の紙は圧力の上昇とともに破れて開口するが、解析でも実験結果をもとに着火後0.2秒で開口するとした。

Fig. 6は火炎伝播速度を解析と実験で比較したものであるが、実験結果は0.25秒~0.3秒付近を最大とした凸型の変化を示している。LPガスの層流燃焼速度は最大で約 $0.3 \sim 0.4 \text{ms}^{-1}$ であり、体積膨張を考慮すると層流状態での火炎伝播速度は約 $2 \text{ms}^{-1}$ 程度である。実験結果から火炎はすぐに乱流燃焼をおこし、燃焼速度が大きくなっていると考えられる。それに対し当初のモデルでは、火炎伝播速度の上昇が実験結果に比べ0.3秒ほど遅れる結果となった(Fig. 6解析結果(調整前)参照)。この不一致の主原因は、乱流強度の予測が不十分なためであると推定されたため、乱流モデルのパラメータ等を見直し、最適化を行った。その結果、ほぼ実験結果と一致する火炎挙動を再現することができるようになった(Fig. 6(調整後)参照)。Fig. 7は解析により得られた火炎の様子を0.1秒ごとに示したものである。0.4秒で火炎は容器置場全体に広がり、一部が下部換気口、屋根と壁の隙間から噴出している。

Fig. 8は容器置場内の圧力上昇を示しており、解析、実験とも0.2秒後から急激に圧力が上昇し始め、0.34秒後には

5.61kPa(破壊圧力1)に達している。実験では、ここでスレート葺きの屋根が外れ飛散に至っているが、燃焼解析では屋根は外れないという想定で計算を実施しているため0.4秒後にピーク圧力7.03kPaに達している。実験結果の初期圧力が0でないのは、計測開始をLPガス拡散時から行っているため、LPガスの対流等の要因により常時圧力に若干の変動が生じているものと思われる。

4.3 構造強度解析

飛散に至るまでの破壊過程として、当初の予想ではスレート自体が破壊し飛散するものと想定していたが、実規模実験の結果ではスレート自体の破壊は少なく、スレートと母屋C鋼とを接続しているチャンネルボルトが外れスレート1ユニットで飛散する現象であった。

以上の破壊過程を数値計算モデルに反映させ、燃焼解析から得られた圧力上昇曲線(Fig. 8参照)を用いて構造強度解析を行った。その結果、壁材(鉄筋コンクリートブロック)より強度的に弱い屋根材(スレート)で構成されている屋根中央部が盛り上がり、スレートと母屋C鋼を留め付けているチャンネルボルトが圧力4.81kPaで外れ始め、圧力6.04kPa(破壊圧力2)に達した時点でスレート1ユニット(1820×950mm)が飛散する結果となった。実規模実験では、圧力5.61kPa(破壊圧力1)で破壊し飛散する結果であった。実規模実験より得られた知見を数値計算モデルに反映させた破壊判定を用いることによって、実現象とほぼ同じ破壊過程を再現することが確認出来た。本システムは、破壊発生後の2次的な爆発現象までは再現できないが、着目すべき破壊過程までの現象については実規模実験との比較から妥当な結果を得ている。

容器置場の破壊直後の変形Fig. 9(1)より、スレート1ユニットで破壊しているのが分かる。破壊直後の応力状態Fig. 9(2)より、スレートが屋根中央部で盛り上がることによって、母屋C鋼が曲げられ、またチャンネルボルトが引張られ、大きな応力が発生している様子が分かる。本解析で使用した容器置場の材料構成は、一般的に使用されている部材を設定している(Table 1参照)。

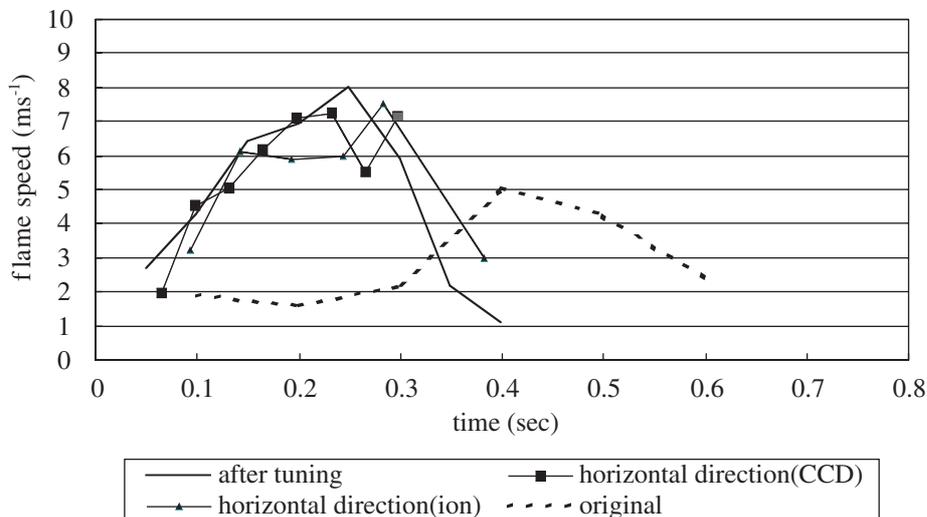


Fig. 6 Flame speed.

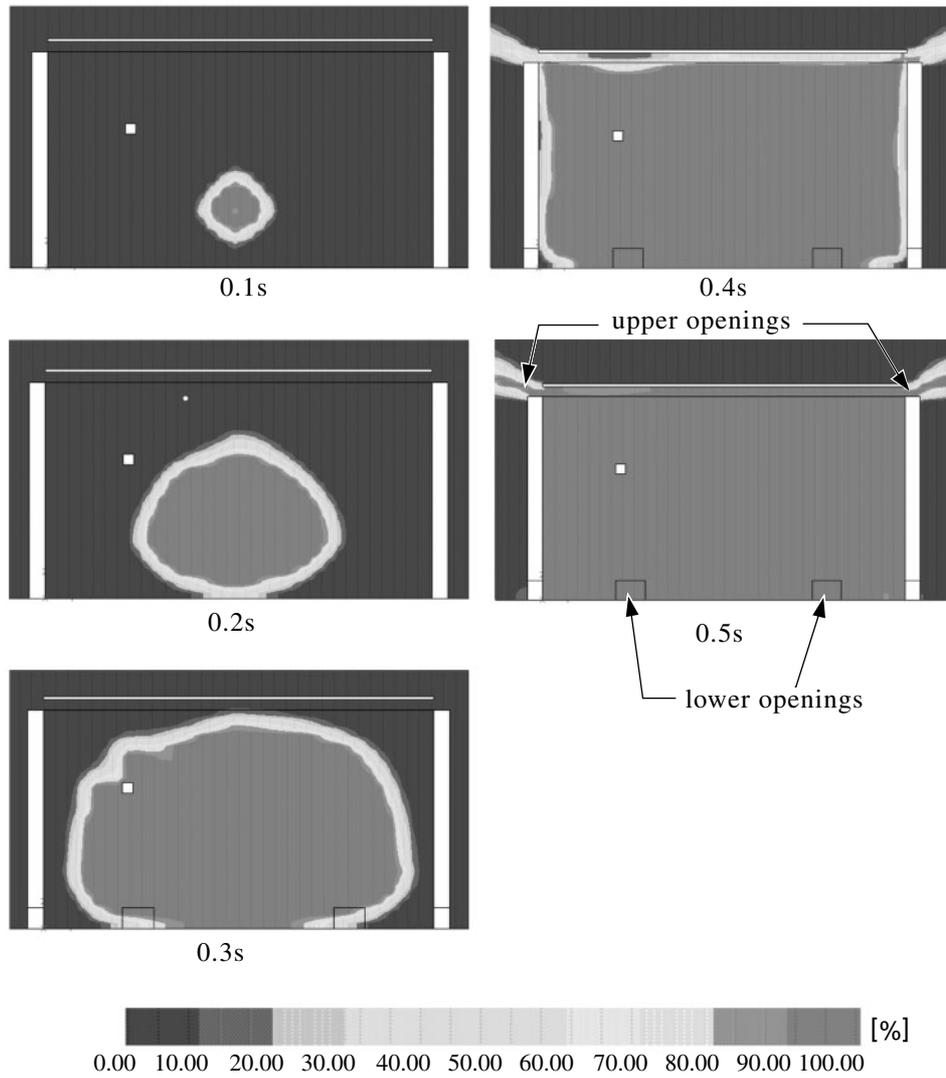


Fig. 7 Spread of the flame.

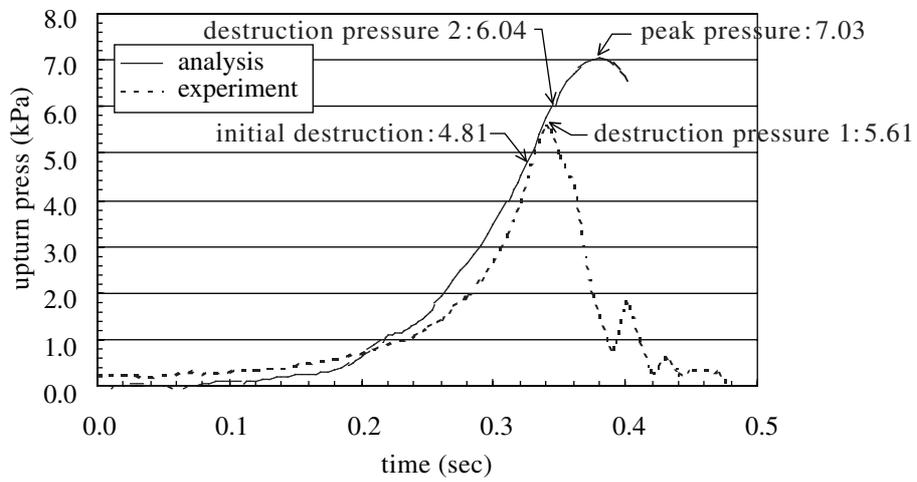


Fig. 8 Comparison of upturn press curve between large scale experiment and combustion analysis result.

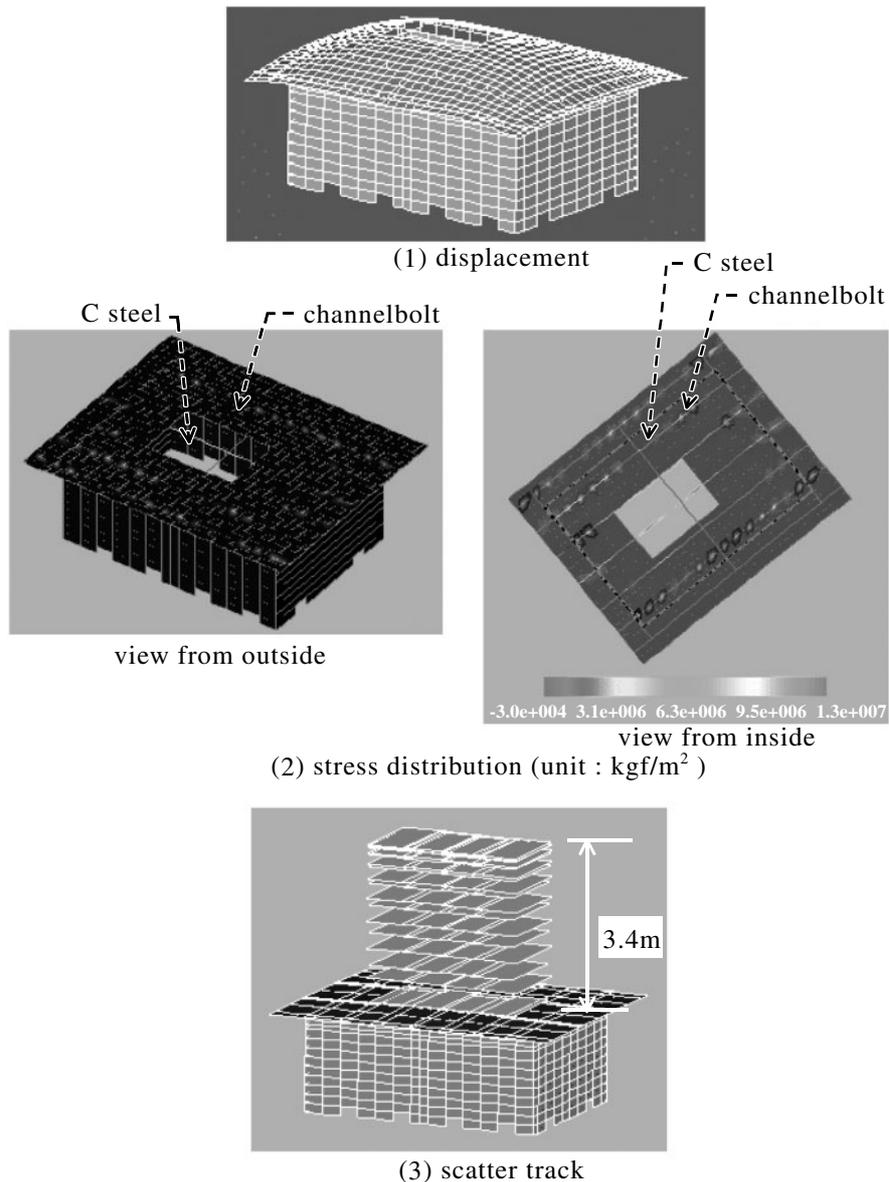


Fig. 9 Process from destruction to scatter. (leakage: 26.5m<sup>3</sup>/h, floor area: 19.24m<sup>2</sup>, max. disp: 3.8cm, destruction pressure: 6.04kPa)

#### 4.4 飛散解析

実規模実験による飛散状況から、3・4(a)でも述べたが飛散初期速度の算定手法として仕事量から算定する方法が実現現象に近い妥当な値を得ることが確認された。力積による方法では、仕事量から算定される値より大きめに評価し、現実的な値ではなかった。

以上より、飛散初期速度は仕事量から算定する方法を採用した。その結果、飛散高度は3.4mとなり実規模実験の結果(3.3m)とほぼ一致した(Fig. 9 (3) 参照)。水平方向への飛散距離については、実規模実験では3m前後あったが、解析結果では屋根傾斜角が0度であるためほぼ真上に上昇し落下するのみであるためほぼ0mに近い結果となった。実規模実験では、落下途中で他の屋根等に衝突または地面に着底する際に割れて破片が散乱する結果であった。解析では、2次の破壊現象を考慮に入れていないため、実験との違いが生じたものと思われる。

#### 5. まとめ

数mの実規模サイズでの漏洩・拡散・燃焼・構造強度・破片飛散までの一連解析を行う実用的な統合評価システムを開発した。実規模実験から得られた容器置場内のガス滞留濃度分布、燃焼による圧力上昇曲線、破壊過程、飛散距離が解析結果とほぼ一致し、実現現象との整合性が確認され、本開発統合評価システムの妥当性が実証された。

本研究の結果は以下の通りである。

燃焼解析においては実規模実験と比較解析を行い、燃焼速度の妥当性について評価した。乱流燃焼速度計算においてパラメータ調整を行ったことにより、層流燃焼速度領域から乱流燃焼速度領域に燃焼速度が発達していく過程を解析できるようになった。

構造強度解析および飛散解析では、材料強度試験・実規模実験の結果を基に容器置場の施工条件に適したモデル化と実現現象に見合った破壊判定の設定、また今回見出した飛

散初期速度の数値解析手法を用いることによって、容器置場のような大きいスケールでの爆発現象を模擬することが可能であることが実証された。

以上より、本システムはLPガスに着目した数mレベルのスケールの大きい容器置場内の様々な条件下でのガス漏洩・爆発現象を予測することが出来る実用的な統合評価システムであると言える。

## 6. 今後の課題

拡散から爆発までの一連の過程を全体的に見ると、解析結果は実規模実験とほぼ一致しているが、更に評価精度を上げるためには個々の過程において精度向上が必要である。

特に燃焼解析においては、乱流燃焼速度の微小変化が容器置場内の圧力上昇に大きく影響する。圧力上昇は構造物の強度・飛散解析に重要な要素であるため、より精緻な乱流燃焼速度の計算手法を改良・開発することが重要な課題といえる。

また、構造強度解析においては破壊判定基準値の詳細な検討、飛散解析においては仕事量を用いて飛散初期速度を算定したが異なる条件下での妥当性について詳細な検討が今後必要となる。

## 謝辞

本システムの開発にあたり、高圧ガス保安協会において平成8年度から平成11年度までの4年間に渡って行われた容器置場の保安対策技術の開発委員会、火気の保安対策技術の開発委員会およびワーキングのメンバーからご指導および御助言を頂きましたことを、ここでお礼を申し上げます。

## 文献

- 1) 山鹿, 武井, 「容器置場, 火気の保安対策技術の開発-ガス漏洩・爆発シミュレーションプログラム-」, 高圧ガス, vol.38, No.5, pp.62-73 (2001).
- 2) 山鹿, 武井, 「容器置場, 火気の保安対策技術の開発-LPガスの漏洩拡散及びエアコン屋外機の着火危険性について-」, 高圧ガス, vol.38, No.5, pp.30-38 (2001).
- 3) Sha, W.T. et al, "COMMIX-1 : A Three Dimensional Transient Program for Thermal-Hydraulic Analysis", NUREG/CR-0785 (1978).
- 4) Nagano, et al., Numerical Simulation of Gas Explosion Phenomena in a Large Scale Container with Turbulent Flow : Loss Prevention (投稿予定) .
- 5) T.Huld, G.Peter, and H.Stadtke, Numerical simulation of explosion phenomena in industrial environments, Journal of Hazardous Materials 46, pp.185-195 (1996).
- 6) 滝史郎, 「解適合多重レベル格子系を用いた非定常燃焼流れ場の直接シミュレーション」, 第6回数値流体力学シンポジウム講演論文集, pp.37-40 (1992).
- 7) 高野泰斉, 「火炎を伴う気流の差分計算モデル」, 日本航空宇宙学会誌, 第36巻, 第411号, pp.186-191 (1988).
- 8) U.Bielert, M.Klug, and G.A.domeit, "Application of Front Tracking Techniques to the Turbulent Combustion Processes in a Single Stroke Device", COMBUSTION AND FLAME 106, pp.11-28 (1996).
- 9) M.Metghalchi and J.C.Keck, "Laminar Burning Velocity of Propane-Air Mixtures at High Temperature and Pressure", COMBUSTION AND FLAME 38, pp.143-154 (1980).
- 10) 平野敏右, 「ガス爆発予防技術」, pp.135-138(1983), 海文堂.

# Development of real scale LP gas leakage-combustion evaluation system

Kunihiko Takahasi\*, Takayuki Tomizuka\*, Katsuhiro Nagano\*,  
Hirofumi Takakuwa\*, Shigeo Takei\*, Mitsuo Koshi\*\*,  
Ritsu Dobashi\*\*, Fuyume Yamaga\*\*\*, and Mitsuo Namba\*\*\*

It is essential to understand gas leakage/combustion phenomena precisely in order to find out the rational security measures of LP gas. These phenomena can not be clarified for all conditions by experimental approach, because the phenomena are complicated and depend on various physical and chemical factors. Thereupon, the practical total evaluation system was developed, in which the series of phenomena including leakage, dispersion, combustion, structure strength and fragment scattering of real scale were analyzed on the basis of recent development of the computer and computational science. The appropriateness of the analyzing method was examined by comparing the results of the simulation with those of the real scale experiments.

\*Fuji Research Institute Corporation, 2-3 Kandanishiki-cho, Chiyoda-ku, Tokyo 101-8443, JAPAN

\*\* Department of Chemical System Engineering, School of Engineering, The University of Tokyo, 7-3-1 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo 113-8656, JAPAN

\*\*\*The High Pressure Safety Institute of Japan, 2-16-4 Tadao, Machida-city, Tokyo 194-0035, JAPAN