

ビル用マルチエアコンの冷媒漏洩時における現象予測

諏訪 好英 永森 俊博
(本社 設備設計第1部)

末吉 祐二 上田 博嗣
(本社 設備設計第1部) (本社 設備設計第1部)

Studies on Leak Conditions of Refrigerant-Gas from Multiple Air-Conditioning Systems

Yoshihide Suwa Toshihiro Nagamori

Yuji Sueyoshi Hirotosugu Ueda

Abstract

The conditions under which leakage of refrigerant-gas occurs from multiple air-conditioning systems were studied in order to establish safety design criteria for buildings. Experimental measurements were carried out to assess the characteristics of leakage caused by operating the air-conditioning system under different conditions. Using the experimental results, we fitted the leakage characteristics of refrigerant-gas during pipe rupture to a model formula, and we determined the maximum gas concentration in a room when an accidental gas leak occurred. Finally, we performed a three-dimensional airflow simulation, and we studied the distribution of the gas concentration in detail.

概要

冷媒漏洩時に対応したビル用マルチエアコンの安全設計技術の確立を目的として、実験および数値シミュレーションにより冷媒ガス漏洩時の現象把握を試みた。まず、実験システムにより空調運転状況ごとのガスの漏洩特性を明らかにした。また実験結果に基づき配管破断時の冷媒ガス漏洩特性をモデル化し、ホテルの客室で漏洩事故が発生した場合の室内濃度の到達最大値を予測した。さらに三次元数値シミュレーションを実施し、空調運転時および非空調時について室内におけるガスの拡散状況を検討した。

1. はじめに

ビル用マルチエアコン（以下ビル用マルチと呼ぶ）は、室外機の集約により高効率な空調システムを実現することができ、さまざまな建物に適用されている。しかしビル用マルチでは、空調対象とする各室の容積に対し、配管系統内に多量の冷媒ガスを持つこととなる。一般に、酸素濃度18%を下回ると窒息の危険性があると言われており、何らかの原因で冷媒ガスが単一室に集中して漏洩した場合には、ガスそのものが吸入毒性を持たない場合であっても酸素濃度が不足し、窒息などの重大事故につながる可能性があると考えられる。また山岸ら^{1),2)}は、ビル用マルチの冷媒用銅配管におけるフレア管継手部の抜け事故に関する事例を示し、バースト的な漏洩に伴う窒息事故発生の可能性を指摘している。

現在、ビル用マルチの冷媒ガスについては、JRA-GL13（社）日本冷凍空調工業会³⁾、KHK S 0010（高圧ガス保安協会）⁴⁾、建築設備設計基準（国土交通省）⁵⁾等の基準、ガイドラインがあり、また国際規格としてISO/TC⁶⁾においてもWD 5149の審議が行われている。いずれの規格においても、冷媒ガスとしてR22を対象とした場合の許容限界濃度を0.3kg/m³としているが、法的な規制はない。また近年多用されているR410A等に対応していないため、これらの

基準値が他の冷媒にもそのまま適用されているのが現状である。さらに空調対象室の設計を考えた場合、複雑なガスの漏洩・拡散現象に対してどのようにこれらガイドラインを適用すべきか十分な知見がないことも大きな課題である。室内におけるガス濃度は、その室の換気状態と冷媒ガスの漏洩速度によってさまざまに変化すると考えられるが、漏洩事故発生時の冷媒ガスの漏洩速度等に関する詳細は明らかになってはいない。そこで、冷媒漏洩時に対応したビル用マルチの安全設計技術の確立を目的として、実験および数値シミュレーションによる現象把握を試みた。

2. ホテルの客室内を対象とした現象予測

2.1 対象としたホテルおよび空調システム

ホテルにビル用マルチを採用した場合、系統に接続すべき室数が多く、各室の容積が相対的に小さいことから、単一の客室で集中的に漏洩を生じると短時間で室内が高濃度に至る可能性があり、危険性が高いと考えられる。また宿泊施設であることから、就寝時に漏洩事故が発生した場合、宿泊者が迅速に避難できない可能性もある。以下では、ホテルにビル用マルチを採用する場合を想定し、冷媒漏洩を生じた場合の現象予測を試みた。

2.2 冷媒漏洩速度による室内濃度の比較

室容積 V 、換気風量 Q の室内に漏洩速度 M で冷媒が漏洩した場合、室内濃度 C の時間変化は以下の式で表される。

$$V \frac{dC}{dt} = M - (C - C_0)Q \quad (1)$$

ここに時間 t 、外気濃度 C_0 である。ルンゲクッタギル法により (1) 式を数値的に解き、客室内に冷媒が漏洩した場合について室内濃度の時間変化を試算した。結果を Fig. 1 に示す。ここでは1系統のシステムで8室の空調をまかなうものとし、系統内には12kgのR410A冷媒を使用しているものとした。また各客室は、容積25m³ (床面積10.8m²) のシングルタイプで、常時80 m³/hの機械換気を行っているものと仮定した。ここで、冷媒漏洩速度は未知数であるため、図には0.1kg/min~4kg/minの4種類を想定した結果を併記した。図からも明らかのように、漏洩速度が異なると、到達し得る漏洩ガスの室内濃度最大値は大きく異なる。漏洩速度1kg/min以上では、室内濃度がガイドラインの限界濃度0.3kg/m³を大きく超えることがわかった。冷媒漏洩時の現象予測には、配管系統の損傷に伴うガスの漏洩速度について、正確な現象把握を行うことが必要と考えられる。

3. 冷媒漏洩速度の測定実験

冷房・暖房時の系統内の冷媒は、Fig. 2のモリエル線図で表されるサイクルで運用されており、各部に異なる温度、圧力状態の気体、液体および気液混合が存在する。配管が破断した場合には、まず、気体で存在する冷媒が配管内のとともにその漏洩速度は減少し、やがて液体から蒸散するガスにより、緩やかな漏洩が長時間にわたり継続すると予測される。このような複雑な挙動を考慮し、既往の経験

式等から冷媒の漏洩速度を定量的に予測することは困難である。このため、実際の空調システムに近い実験系を成し、各部で擬似的な漏洩を生じさせたときの冷媒ガス漏洩量を直接測定する実験を行った。

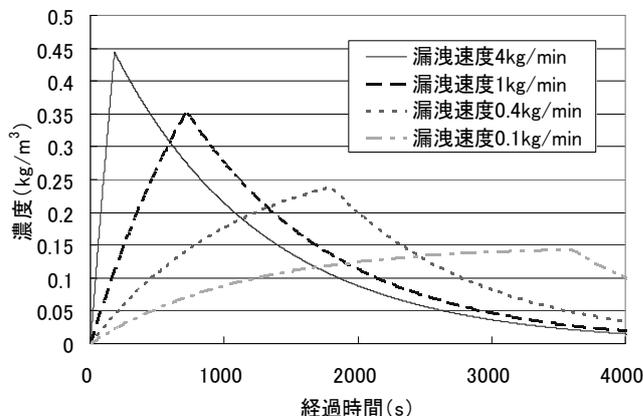


Fig. 1 漏洩速度毎の室内濃度と経過時間の関係
Gas Concentration in a Room vs. Elapsed Time in Different Leakage Speed

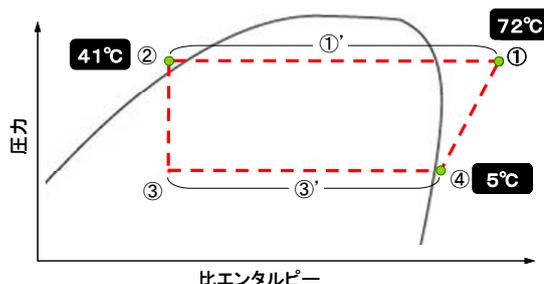


Fig. 2 R410Aのモリエル線図
Mollier Diagram of R410A

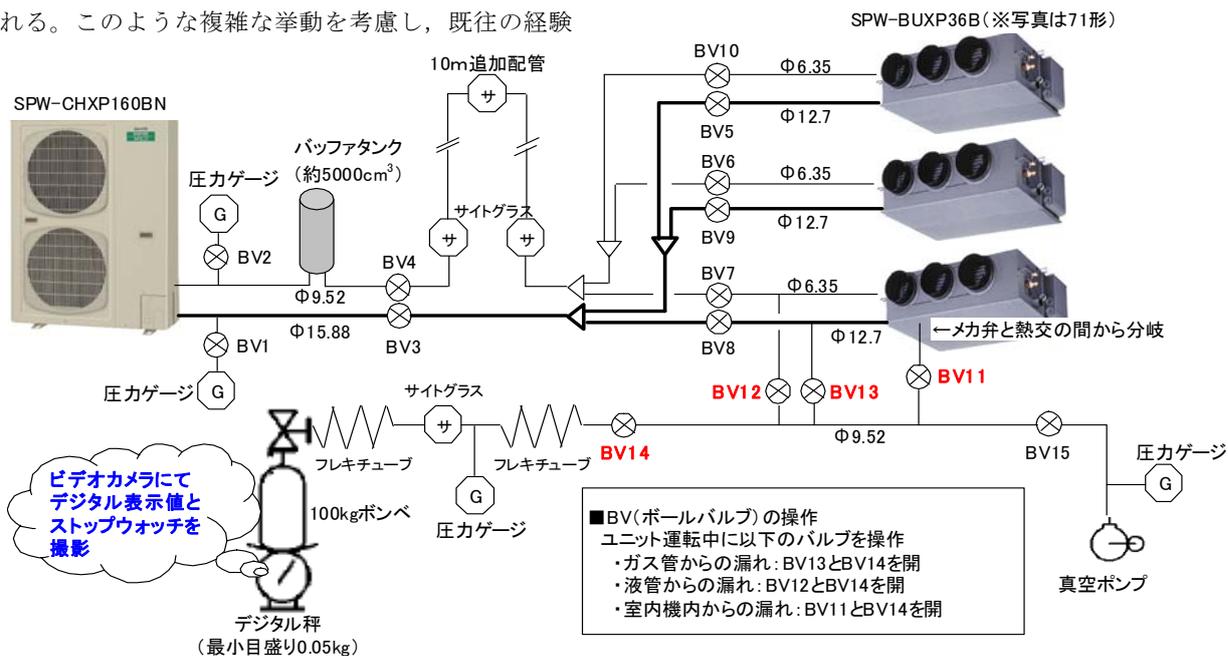


Fig. 3 実験装置の概要
Outline of Experimental System

3.1 実験装置および測定方法

Fig. 3に実験装置の概要を示す。実験装置は外調機1台、室内機3台から構成されており、RV-11~RV-13の各バルブを開放することでモリエル線図の各状態での漏洩を模擬した(実験中RV-14は常時開放)。R410Aについては、大気中への放出が禁止されているため、実験に用いた冷媒を外部に放出しないよう工夫した。すなわち、バルブを開放する際、模擬的に漏洩させた冷媒ガスをこれに接続した100kgボンベ(あらかじめ減圧してある)に全量回収し、そのときのボンベの重量変化を測定することで各時刻の冷媒漏洩量を評価することとした。実験系にはバッファタンクを設けて系内の冷媒量を調整し、室内機台数が増えた場合を再現した。本実験で使用した冷媒量は7.25kgである。実験は冷房、暖房、空調停止時のそれぞれについて、モリエル線図(Fig. 2)の状態①、③、④を再現する条件で実施した。実験条件をTable1に示す。

3.2 実験結果

測定データの例をFig. 4に示す。冷媒漏洩量は単調に増加しているが、冷媒ガスを回収したボンベ近傍の圧力は時間の経過とともに特異な変化を示す傾向が認められた。これは、減圧されたボンベと系統との圧力差が冷媒の回収に伴い変化するためと考えられる。漏洩開始初期には、ガスの漏洩速度が室内濃度の最大値に影響するため重要である。本実験では、減圧されたボンベにより実際の現象に対して安全側評価となる。また、その後の蒸散に伴う漏洩の室内濃度への影響は比較的少ないと考えられることから、実験は妥当であったと考えている。

実験結果から集計した各時刻の冷媒漏洩量を、Fig. 5にまとめて示す。実験の結果、暖房運転時、液管で漏洩したときの漏洩量が最も大きく、冷房時よりも暖房時の危険性が高いことがわかった。

4. 現象のモデル化と室内濃度に関する検討

4.1 冷媒漏洩速度のモデル化

実験では、漏洩開始から重量変化が顕著な約60秒間について測定を行ったが、漏洩はその後も長時間にわたって継続するため、これを含めた漏洩速度のモデル化を考える必要がある。また測定結果には若干のばらつきもあり、そのままの形でデータを評価することが難しい。このため、何らかの関数形でこれを近似することを考えた。Fig. 6は、実験結果を冷媒漏洩速度としてまとめ直したものに対し、指数関数および対数関数で近似を試みた結果である。指数関数を用いると、冷媒漏洩速度の実験結果をよく再現でき、またその積分値(全漏洩量)は、ある程度の時間が経過した時点で一定値に漸近する。各条件の実験結果に最小二乗法を適用し、これらを指数関数型のモデルに近似した。

4.2 室内平均濃度の時間変化に関する検討

瞬時一様拡散を仮定すると、室内平均濃度の時間変化は

(1)式で表せる。2.2節と同様の方法を用いて冷媒漏洩時における室内平均濃度の時間変化を予測した。なお、実験は系統内全冷媒量を7.25kgとして実施しているの、ここでは冷媒量12kgの空調システムを想定し、4.1節で導出したモデルの各定数を冷媒量の比率で割り増しして使用することとした。

Table.1 実験条件
Experimental Conditions

Case	状態点 (図1参照)	バルブ	モード		備考
			運転 [※]	冷媒の状態	
Case 1-1	③'	BV-11	冷房	気液混合	メカ弁と熱交換器の間からリーク インバータ周波数75Hz、室内メカ弁開度成行き
Case 1-2	③'	BV-11	冷房	気液混合	メカ弁と熱交換器の間からリーク インバータ周波数75Hz、室内メカ弁全開
Case 2	④	BV-13	冷房	ガス	ガス管からリーク インバータ周波数75Hz、室内メカ弁全開
Case 3	②	BV-12	冷房	液	液管からリーク インバータ周波数75Hz、室内メカ弁全開
Case 4	①'	BV-11	暖房	気液混合	メカ弁と熱交換器の間からリーク インバータ周波数60Hz、室内メカ弁全開
Case 5	①	BV-13	暖房	ガス	ガス管からリーク インバータ周波数60Hz、室内メカ弁全開
Case 6	②	BV-12	暖房	液	液管からリーク インバータ周波数60Hz、室内メカ弁全開
Case 7	-	BV-13	停止	気液混合	メカ弁と熱交換器の間からリーク 室内メカ弁全開
Case 8	-	BV-12	停止	気液混合	ガス管からリーク 室内メカ弁全開
Case 9	-	BV-11	停止	気液混合	液管からリーク 室内メカ弁全開

※冷房、暖房とは、室内機運転および外気導入・換気運転の状態である。
停止とは、室内機停止および外気導入・換気運転の状態である。

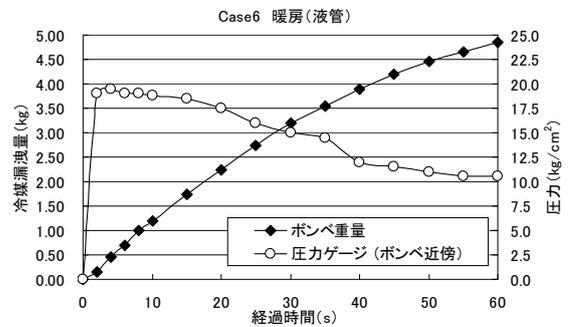


Fig.4 Case6における冷媒漏洩量と経過時間の関係
Leaked Gas Amount vs. Elapsed Time in Case-6

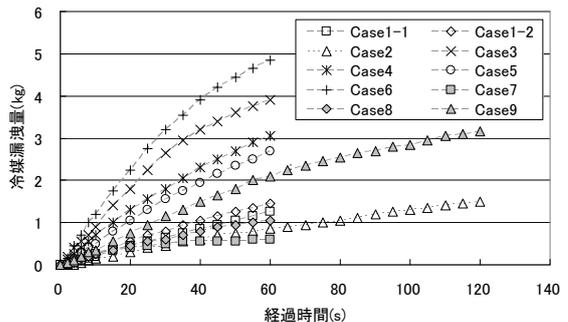


Fig.5 各Caseにおける冷媒漏洩量と経過時間の関係
Leaked Gas Amount vs. Elapsed Time in Each Case

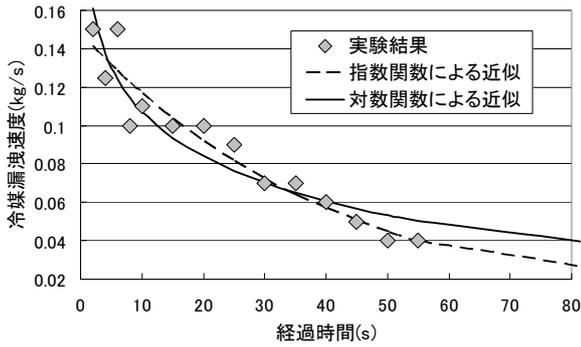


Fig. 6 指数関数, 対数関数により近似した冷媒漏洩速度
Fitted Curves of Leakage Speed with the Index Function and the Logarithmic-Function

空調システムの運転状況ごとに比較した室内濃度変化をFig. 7に示す。客室容積は 25m^3 , $80\text{m}^3/\text{h}$ の機械換気を行っていることを想定した。いずれの場合も, 漏洩事故発生後に室内のガス濃度が上昇し, 100~200秒後に最大濃度に達した後, 緩やかに減衰する傾向が認められた。2.2節でも考察したように, 最大到達濃度は初期の冷媒漏洩速度と室容積に, また後半の濃度減衰は室内の換気量に支配されることがわかる。

比較した空調運転状況のうち, 室内濃度が最も大きく

なるのは, 暖房時に液管から漏洩したケース6の場合であり, 最大到達濃度は $0.35\text{kg}/\text{m}^3$ に達した。ただし本研究では最も危険な配管破断の場合を想定している。また室空間に冷媒配管が露出した状態で設置されており, パースト的に冷媒が漏洩すると仮定している。実際の客室では室内機が天井内に隠蔽設置されており, 室内との間に隙間はあるものの, 大きな流路抵抗が存在する。このため, 室内への影響は本現象予測ほど急俊ではないと思われる。なおケース6を除く他の条件では, JRAのガイドライン $0.3\text{kg}/\text{m}^3$ を超える濃度は出現しなかった。

5. 三次元シミュレーションによる検討

前節の検討では, 客室内に漏洩した冷媒ガスについて瞬時一様拡散を仮定した。しかし実際の冷媒ガスは空間的に分布を持ち, Fig. 7の結果よりも高濃度な部分を生じる可能性があることが懸念される。そこで, 三次元数値シミュレーションにより, 漏洩事故発生時の客室内における冷媒ガスの拡散状況を予測した。

5.1 解析手法

解析に用いた基礎方程式をTable2に示す。ここでは冷媒ガスの挙動はパッシブスカラーとして近似できるもの

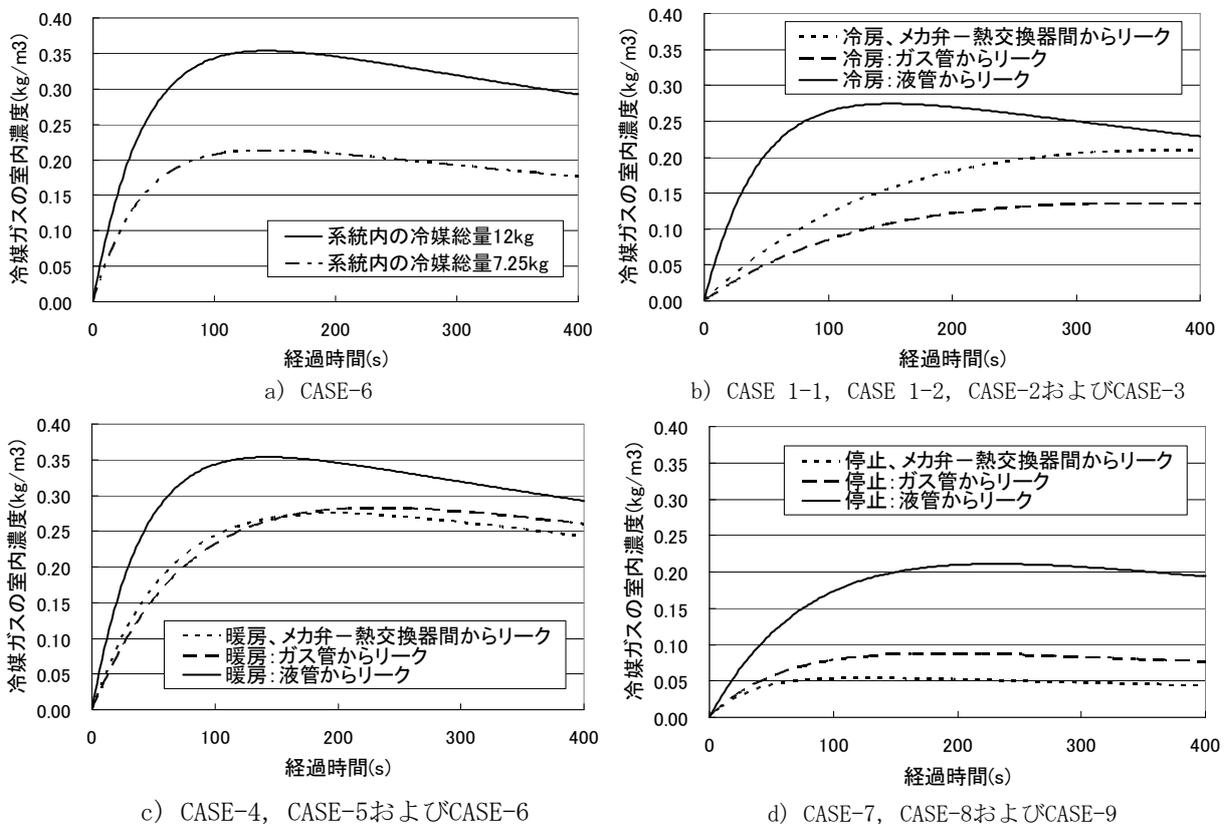


Fig. 7 空調システムの運転状況ごとに比較した室内濃度変化の予測結果
Predicted Result of gas Concentration in the Room
in Different Operation Modes of Air-conditioning Systems

Table. 2 解析に用いた基礎方程式
Fundamental Equations

連続の式および運動量方程式

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0, \quad \frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial u_j u_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \nu_i \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + a_c$$

$$a_c = -g_i \{ C \Delta \rho / (\rho - \Delta \rho) + \beta \Delta T \}, \quad \Delta \rho = \rho - \rho_{H_2O}$$

温度および漏洩ガスの濃度輸送方程式

$$\rho c_p \left\{ \frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial u_i T}{\partial x_i} \right\} = \frac{\partial}{\partial x_i} K \frac{\partial T}{\partial x_i} + \dot{q}$$

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial u_i C}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} D \frac{\partial C}{\partial x_i} + \dot{d}$$

乱流モデル(標準k-εモデル)

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \frac{\partial u_i k}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\nu_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_i} \right) + G_s - \varepsilon$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \frac{\partial u_i \varepsilon}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\nu_t}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right) + C_1 \frac{\varepsilon}{k} G_s - C_2 \frac{\varepsilon^2}{k}$$

$$\nu_t = C_t \frac{k^2}{\varepsilon}, \quad G_s = \nu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j}$$

x_i :座標, u_i :流速, t :時間, ρ :空気密度, p :圧力,
 ν_i :渦動粘性係数, ρ_{H_2O} :水素の密度, a_c :浮力(沈降)項,
 g_i :重力加速度, β :空気の体積膨張率, c_p :定圧比熱,
 K :熱伝導率, \dot{q} :発熱量(吸熱量), C :冷媒ガスの濃度,
 $\Delta \rho$:空気と冷媒ガスとの密度差, D :拡散係数,
 \dot{d} :冷媒ガスの発生項, k :乱流エネルギー,
 ε :乱流散逸率, $\sigma_k, \sigma_\varepsilon, C_1, C_2$:モデル定数

Table. 3 対象としたホテル客室の概要
Specifications of Guest Room

部屋のタイプ	シングル
部屋面積	10.8m ²
部屋容積	25m ³
空調設備	空冷ヒートポンプビル用マルチ冷暖フリー
室内設備	外気量: 80m ³ /h PAC室内機循環風量: 480m ³ /h UB排気量: 55m ³ /h 冷媒漏洩排気量: 25m ³ /h
冷媒量	12kg(室外機10馬力程度の系統相当)

と仮定し、運動量方程式、温度および濃度の輸送方程式を連成した。冷媒漏洩速度に関しては4.1節で導出したモデルを組み込み、境界条件を設定した。また運動量方程式には空気との密度差、温度差による冷媒ガスの沈降力を考慮し、冷媒は室内に放出されたときの断熱膨張により冷却されるものとして計算を行った。乱流モデルとしては標準k-ε型乱流モデルを用いた。

5.2 対象とした客室とそのモデル化

対象としたホテル客室をFig. 8およびTable3に示す。対象室は容積25m³、床面積10.8m²のシングルタイプで、室内循環風量480m³/hの空調システムを備えるものとした。またユニットパスに55m³/h、客室内通路下部に25m³/h(計80m³/h)の機械換気(排気)が行われているものとした。

5.3 シミュレーション結果

(1) 空調運転時に冷媒が漏洩した場合 (CASE-6)

室内機運転中に漏洩事故が発生した場合を想定して行ったシミュレーション結果をFig. 9a)に示す。漏洩した冷媒ガスは、空調吹出し気流に乗って室内に噴出し、その時点で既に空調空気と混合・希釈されている。シミュレーションの結果、冷媒ガスは室内に均一に拡散し、室内には均一に近い濃度分布を形成することがわかった。これは、室内に供給される循環風量のうち外気量を除く480m³/hの気流が室内空気を積極的に攪拌するためと考えられ、室内濃度はFig. 7に示した理論解析結果に近い時間変化を示した。シミュレーション結果から、空調運転時の冷媒漏洩に関しては4.2節の理論計算により安全を考慮した設計を実現できると考えられる。

(2) 非空調時に冷媒が漏洩した場合 (CASE-9)

非空調時には、配管の破断により天井内の内圧が上昇し、冷媒ガスはレターン吸込み口等の開口から室内に噴出するものと予測される。このとき、天井内で冷媒ガスはある程度希釈されると思われるが、空調時に冷媒が漏洩した場合に比べると、室内に噴出するガスは高濃度になることが予測される。

シミュレーション結果をFig. 9b)に示す。冷媒ガスはレターン吸込み口から低温かつ大きな比重を保ったまま室内に噴出し、客室内の局部に高濃度領域を形成している。

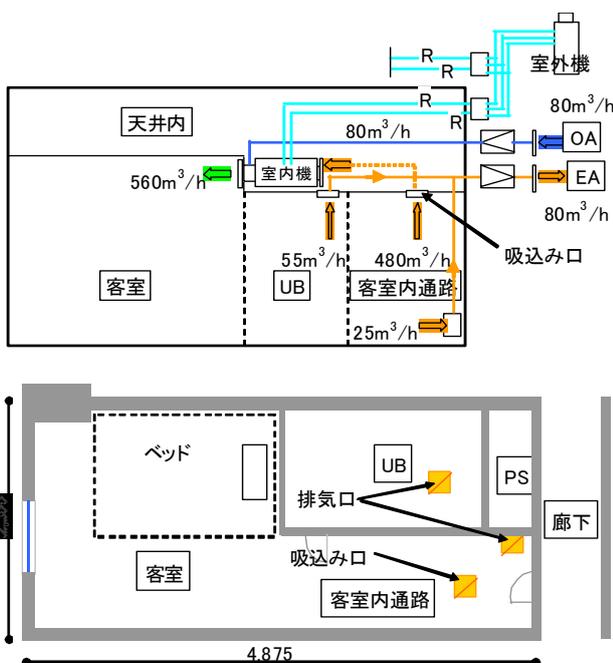
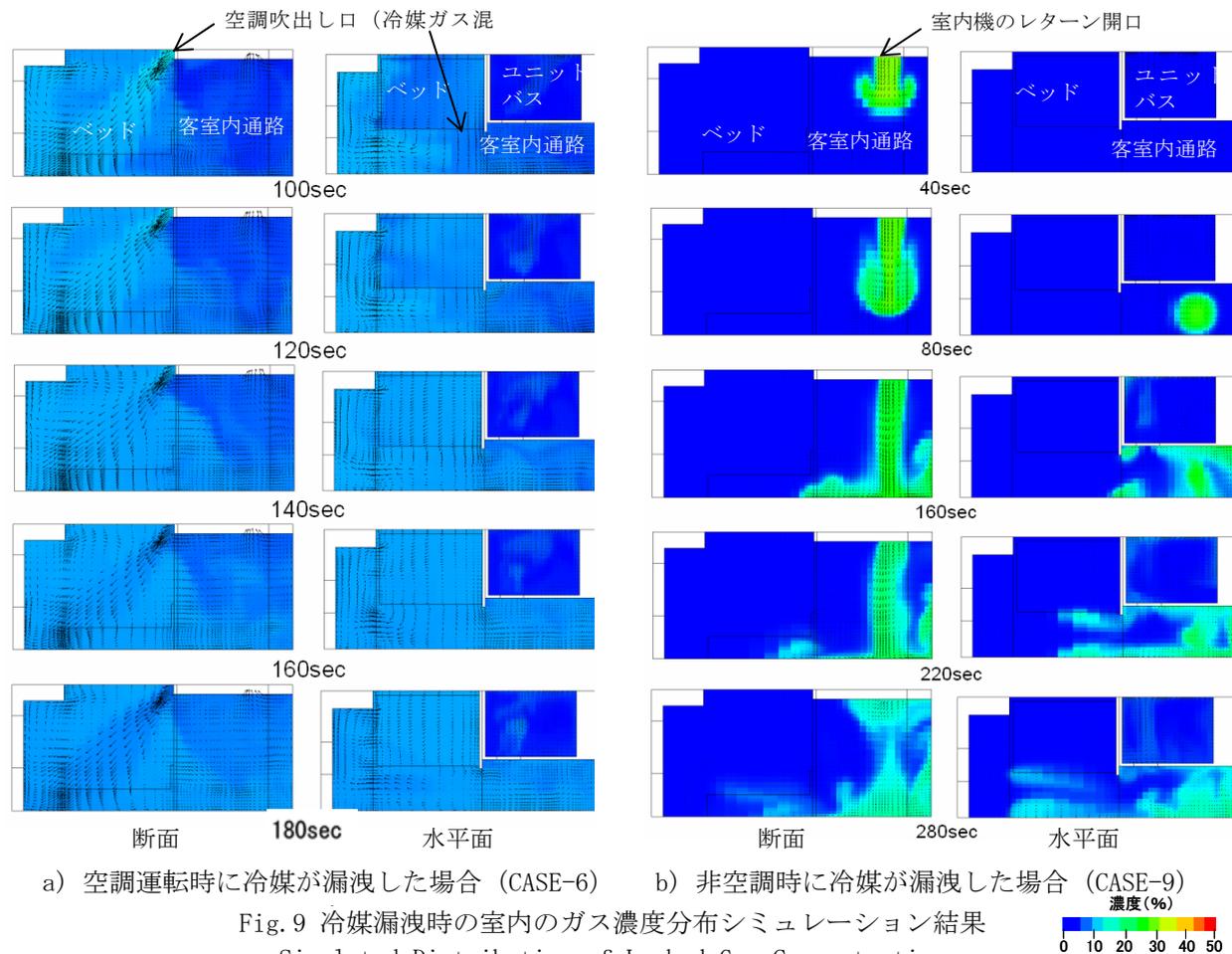


Fig. 8 対象としたホテルの客室
Studied Guest Room in the Hotel



ただしガスは室内の広い領域には拡散せず、この例では、宿泊者が就寝中のベッドに影響する可能性は低いと考えられる。このような高濃度の冷媒ガスが室内に噴出した場合には、空気中の水分が急激に凝縮し、噴流近傍が白く濁って目視できることが経験的にわかっている。宿泊者が就寝していなければ、異常を感じて避難できると予測できる。

6. まとめ

冷媒漏洩時に対応したビル用マルチエアコンの安全設計技術の確立を目的として、実験および数値シミュレーションにより冷媒ガス漏洩時の現象把握を試みた。まず、実験システムにより空調運転状況ごとのガスの漏洩特性を明らかにした。また実験結果に基づき配管破断時の冷媒ガス漏洩特性をモデル化し、ホテルの客室で漏洩事故が発生した場合の室内濃度の到達最大値を予測した。さらに三次元数値シミュレーションを実施し、空調運転時および非空調時について室内におけるガスの拡散状況を検討した。その結果、モデル化したホテル客室（換気設計はJRA指針に基づく）について安全対策の可能性が確認できた。今後さらに具体的安全設計手法の検討を進める予定である。

今回の検討結果が冷媒漏洩時の対策としてJRA等の安全性確保の基準への一助となり、業界の発展に寄与できれば幸いである。

謝辞

本研究の実施にあたり、三洋電機 谷達也氏、鏡一豊氏および元三洋電機 佐藤鋼平氏より多大なるご協力をいただきました。ここに記して感謝いたします。

参考文献

- 1) 山岸ほか: 空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集, p.2139-2142, 2008
- 2) 永山ほか: 空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集, 学術講演論文集, pp.2143-2146, 2008
- 3) JRA-GL13, (社)日本冷凍空調工業会
- 4) KHK S 0010, 高圧ガス保安協会, H6年9月改訂第2版
- 5) 建築設備設計基準, 国土交通省大臣官房官庁営繕部設備・環境課監修, (社)公共建築協会, (財)全国建設研修センター, 平成18年
- 6) ISO Technical Committee Working Draft ISO/WD 5149