

論文

[2128] ガス爆発による鉄筋コンクリート建築物の破壊と補修

竹下 輝^{*1}・高本秀幸^{*2}・谷川達彦^{*3}・竹田仁一^{*4}

1. はじめに

通常の鉄筋コンクリート構造物が爆発に対して十分な耐力をもたないのは当然である。このことは通常の設計荷重が kgf/m^2 の単位で表される大きさであるのに対し、爆発圧力は一般に kgf/cm^2 で表されることから推察されよう。しかし、建築物等の爆発事故が頻発する現状を見ると、何等かの防災上の対策が要求されるのもまた、当然である。殊に、エネルギー施設等で、積極的にこの種対策が求められる場合も多いが、現在のところ、この分野の研究は極めて少ない。ここでは、実際に発生した鉄筋コンクリート造集合住宅のガス爆発事故を対象とし、発生した被害の特異な状況(写真1)をもとに、爆発中でのガス爆発の特徴、建築物に対する被害発生メカニズムを研究し、あわせて、効果的な補修方法について検討を行った。

2. 構造と破壊状況

研究対象とした建築物は地上11階、塔屋1階の集合住宅で、6階までSRC造、7階以上RC造(1種軽量コンクリート $F_c = 210\text{kgf/cm}^2$)であり、1階は店舗、2階以上が集合住宅になっている。1戸毎に厚さ18cmの耐力壁(2階から11階まで連続している)で区切られ、2戸毎に共用の階段室(厚さ18cmの耐力壁で仕切られている)が設けられている。図-1は平面図である。基礎は場所打ちコンクリート杭(長さ19m)、支持地盤は密な細砂層である。

ガス爆発は最上階の1戸で発生し、屋根スラブ(厚さ12cm, 15cm)は大破(写真2)した。床スラブ(厚さ12cm, 15cm, 写真3)、耐力壁(写真4)梁なども被害を受けたが破断は生じなかった。

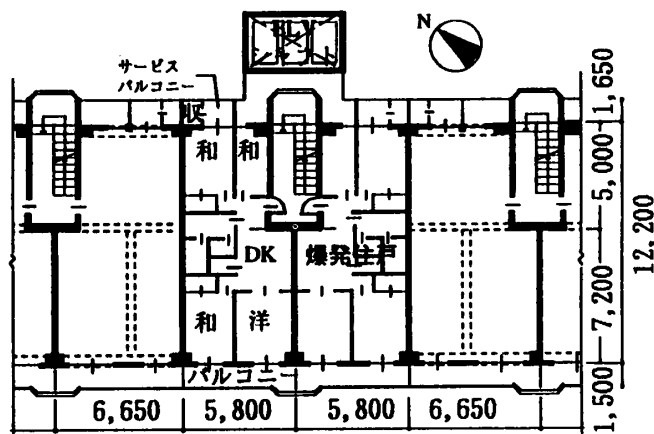
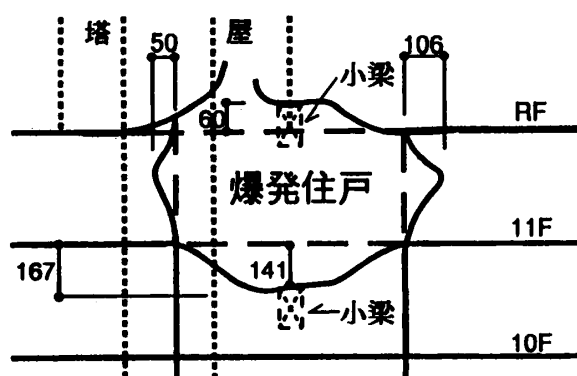


図-1 爆発階(11階)の平面

図-2 爆発による床・壁・小梁の残留変形
(拡大して示す。数字は最大値である)

- * 1 東急建設(株) 技術本部 (正会員)
- * 2 熊本工業大学助教授 工学部建築学科 (正会員)
- * 3 熊本工業大学助手 工学部建築学科
- * 4 TK衝撃・爆発工学研究所 所長 防衛大学校名誉教授 工博 (正会員)

それらの変形の概要及び最大変形を図-2に示した。

事故時、この建築物は建設後10年経過していたが、調査の結果、コンクリートの強度は設計基準強度以上であり、中性化深さも僅かであった。被害を受けた耐力壁から数個の鉄筋試験体を採取し静荷重引張り試験を行った。図-3がその結果である。この図から、耐力壁のひびわれを含む部分の鉄筋には明瞭な残留歪が認められるのに対し、ひびわれとひびわれの中間部の鉄筋には残留歪は全く見られない。このことは筆者の中の3名が既に発表した〔1〕のように、爆発等の衝撃的荷重をうける鉄筋コンクリート部材中の鉄筋の歪は連続して発生するのではなく、数ヶ所の位置に集中して進展することを示している。また、従来の実験から知られるように、鉄筋の変形には速度効果が発生し、降伏応力が上昇していたと考えられる〔2〕。

この事故で、最も特徴的な被害は、南西側のバルコニーに面する二室の引違ガラス戸（1.75 m × 1.80 m）が写真1のように周囲の枠材とともに飛散し、また、この間の鉄筋コンクリート壁の上部に剥離が生じていたことである。サッシ及び枠材がガラスごと飛散したのは必ずしも施工の不良を示すものではなく、以前、発生したガス爆発事故でも同様に確認された現象である〔3〕。実は、このことがガス爆発の特異な性質を示すものである（次項3）。コンクリートの剥離は鉄筋コンクリート



写真-1 バルコニー側壁上部のコンクリート剥離状況及びアルミサッシュと周囲の枠材がガラスとともに飛散した状況

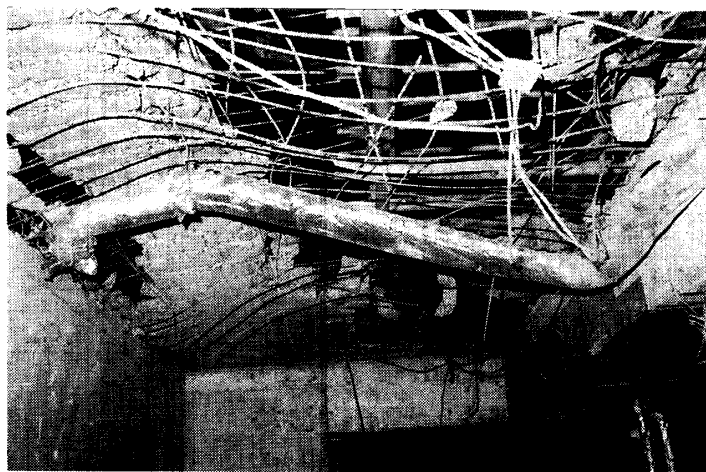


写真-2 屋根スラブの破壊状況

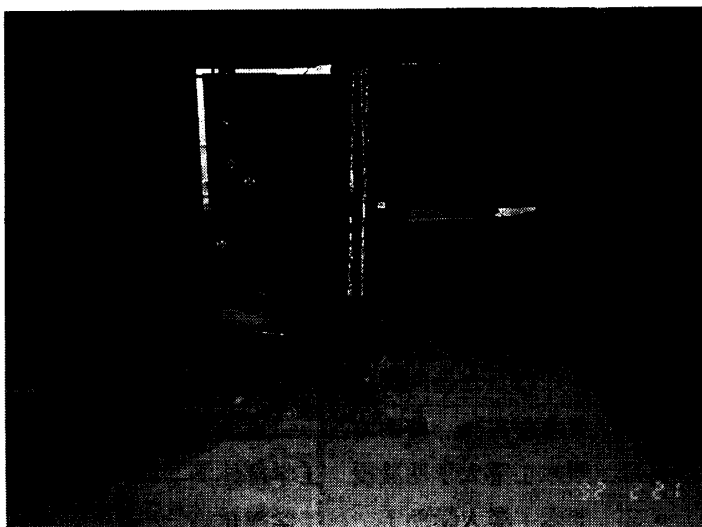


写真-3 床スラブの変形状況

部材が衝撃的载荷を受けたとき、しばしば発生する〔2〕。この剥離も両側のガラス戸が急速な加力をうけたとき発生したと考えられる。

事故の被害をうけた部分は建築物の中のかかなり狭い範囲に限られており、爆発のあった住戸の両隣り及び直下の住戸とその隣りの階段室を共有する住戸であった。この範囲内でも柱には残留変形は全く認められなかった。これは各住戸の戸境壁（厚さ18cmの耐力壁）の効果と考えられるが、もうひとつ構造部材の固有周期（両端固定または周辺固定とすると0.020～0.072秒の間に入る）とガス爆発の主要周期（次項3、図-4で燃焼が途中、開始後0.5秒で終わったとしても $0.5 \times 4 = 2.0$ 秒程度になる）が離れていたためと考えられる。この事故で、犠牲者1名が発生したが、それは変形した出入口スチールドア（写真5）から階段室を通して隣接住戸に侵入した爆風によるものであり、直接の爆発圧力によるものではない。この風速はベルヌーイの定理を使って略算すると、爆発した住戸と階段室間の温度差を6℃とした場合約110m/sに達する。防災上のひとつの課題であろう。また、この事故では火災の発生はなく、爆発した住戸の構造部材でも熱的な影響は全く認められなかった。

3. ガス爆発による圧力及び建築物の応答
一般的にも知られているように、爆発には爆燃と爆ごうがある。その燃焼速度が音速より遅い（爆燃）か速い（爆ごう）かの区別である。ガス爆発では特別な場合（大量のガスの爆発の場合、または隅角部、ふきだまり部等）を除いて殆ど爆ごうは生じず、30～50 cm/s程度の速度（室の大きさで変わる〔4〕）で燃焼が進んで行く。燃焼した部分は温度も圧力も高くなるが、その圧力は音速で伝播する〔5〕。従って、集合住宅程度の広さでは、室全体が同じ圧力になると考えてよい。このことが後述するように、サッシュ及び枠材がガラスとともに飛散した理由である。

ところで、かなり複雑な形の室内でも、ガス爆発で発生する圧力・時間曲線はガス1次燃焼理論で近似できることが既に知られており〔6〕、筆者の1人はこの理論によって爆発をうける構造物の応答解析を行った〔2〕。この理論によると、圧力（室内全体の圧力） $p(t)$ は次式で表される

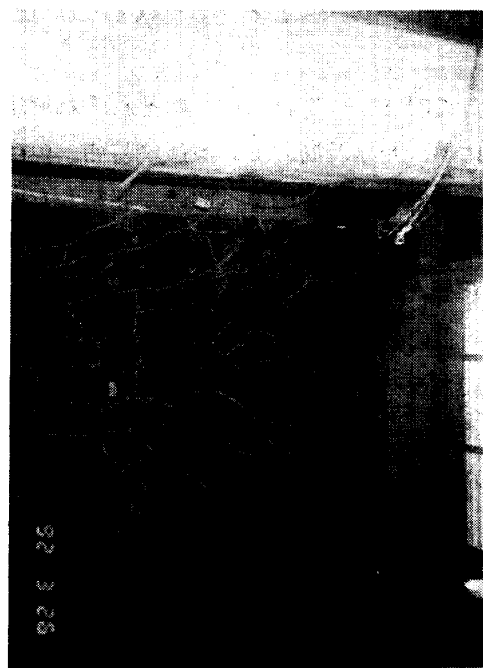
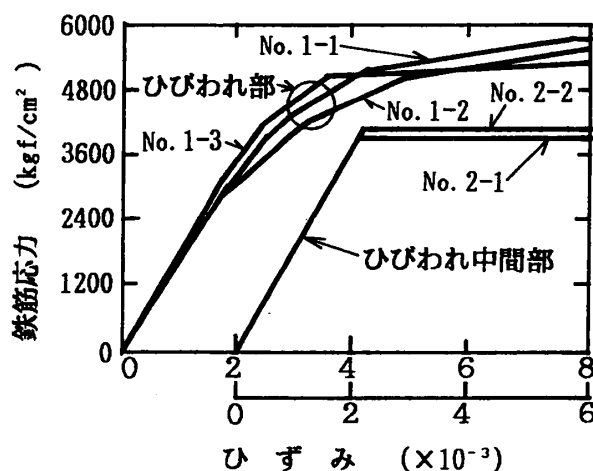


写真-4 耐力壁の変形状況
（隣室より撮影）



註 No. 1-1～1-3 : ひびわれ部から採取
No. 2-1, 2-2 : ひびわれ中間部から採取

図-3 変形した耐力壁の鉄筋（SD-30, D 10）の応力-ひずみ曲線

$$p(t) / p_0 = \gamma / \{ \gamma - (\gamma - 1) (t / t_m) \}, \quad \gamma = (C_{p1} / C_{p2}) \{ 1 - (Q / C_{p1} T_1) \}$$

ここで p_0 、 T_1 、 C_{p1} はそれぞれ燃焼前のガス圧、温度、定圧比熱であり、 C_{p2} は燃焼後の定圧比熱、 t は時間、 t_m は燃焼時間、 Q は単位ガス量の発熱量である。 Q はガスの組成によって変化するので、式中の γ (燃焼が完結した場合に到達する最大圧力を表している) も同時に変化し、例えばメタン 5.5% 混入空気 (爆発限界に近い) の場合、約 5 kgf/cm^2 である。図-4 は圧力・時間曲線の例である。

ガラスの強度は経年変化、ロットの違い、支持条件、荷重の速さ等によって変化する [7]。しかし、ロットも荷重も支持条件も一定の場合、ガラスの耐風圧強度は概ねガラス厚さの 2 乗で表わされ [8]、このことから、もし窓か同じ相似形の、厚さ一定のガラスで構成されているとき、静的載荷として計算すると、その窓ガラスは大きさに関係なく、一定の合計作用圧力 (耐荷力) で破壊することがわかる [3]。従って、面積の大きい程、小さな圧力で破壊することとなるがこれは実験でも確かめられている [8]。しかし、ガラス全面に等しい大きさの、急速に増加する圧力が作用する場合、ガラスの動的応答は静的載荷と異なり後述のように、大きなガラスでも破壊までの時間はかなり長くなる (図-5)。このことから逆に、ベランダ側引違戸には均等な、

ような圧力が作用したと推定することができる。ガラスのこのような性質はその最大変形量が面積に比例して大きくなること、質量が比較的小さいことから生まれる [3]。事故を生じた住戸のバルコニー側引違戸のガラス、主要構造部材等に、図-4 に示す圧力

(燃焼時間 t_m を 1 秒とした) が作用するとして応答計算を行った結果を図-5 に示した。この計算には筆者の一人が以前発表した方法 [2] の第 2 次応答 (全体的応答) 解析法を使った。第 1 次応答 (局部的応答) は全面一様に作用する圧力では発生しないからである [2]。この計算によると $\gamma = 6$ (燃焼が完結したとき到達する最大圧

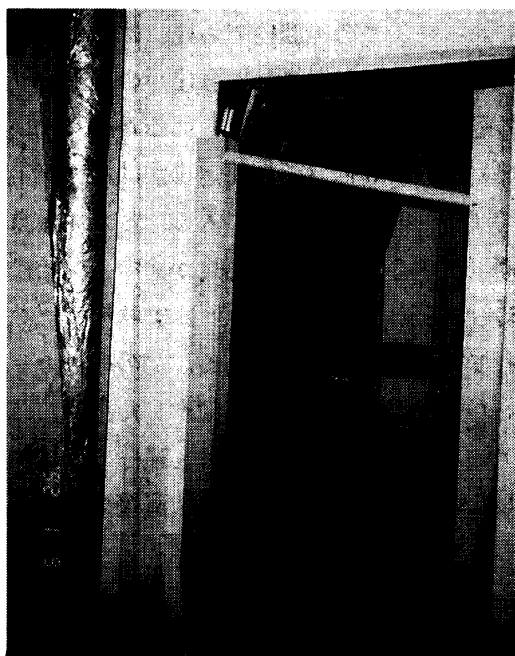
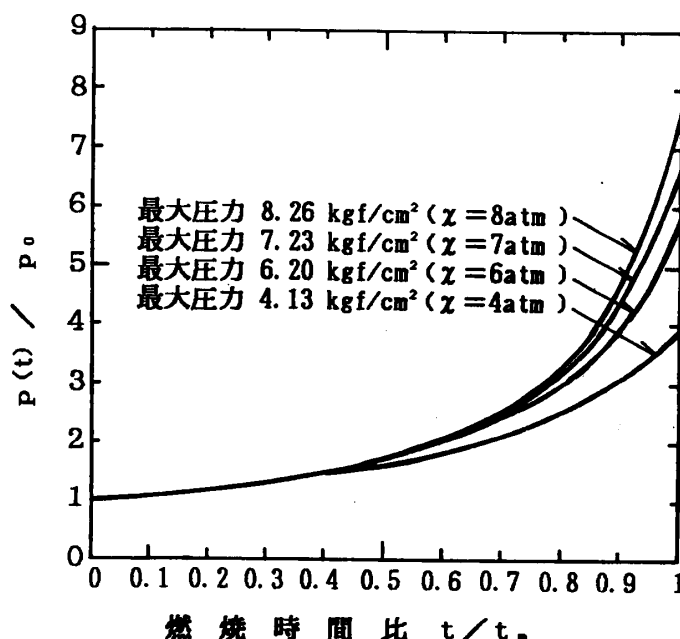


写真-5 階段室に面する玄関スチールドアの変形状況 (下階、斜下方の住戸の例を示す)



燃焼時間比 t / t_m
 γ : 燃焼が完了したとき到達する最大圧力

図-4 圧力比 $p(t) / p_0$ - 燃焼時間比 t / t_m 曲線の例

力が $6 \text{ atm} : 6.20 \text{ kgf/cm}^2$)

の場合、ベランダ側引違戸のガラス ($76 \text{ cm} \times 80 \text{ cm} \times$ 厚さ 5 mm) は爆発開始後 0.336 秒で破壊すると推定されるので、その前に、サッシュ、枠材もろとも吹き飛ばされたと考えられる。更にその以前、 0.267 秒の時点では爆発した住戸の屋根スラブ (RS1, $4.52 \text{ m} \times 4.92 \text{ m} \times$ 厚さ 15 cm) は降伏 (そのときの超過圧力は 0.27 kgf/cm^2) である。このスラブはダブル配筋であり、通常の場合より破壊圧力は大きい) し、相前後して他の屋上スラブも降伏に達し、その後急速に変形が進んで破断しガスと破片が飛散して圧力は下降に向かったと推測される。従って室内の圧力は爆発の最大圧力には到達することなく低下したと考えられるが、この間にその他の構造部材の変形も進んだと推定される。この事故ではガラスだけでなく、手摺、室内の物品等が周囲 60 m 付近まで飛散した。

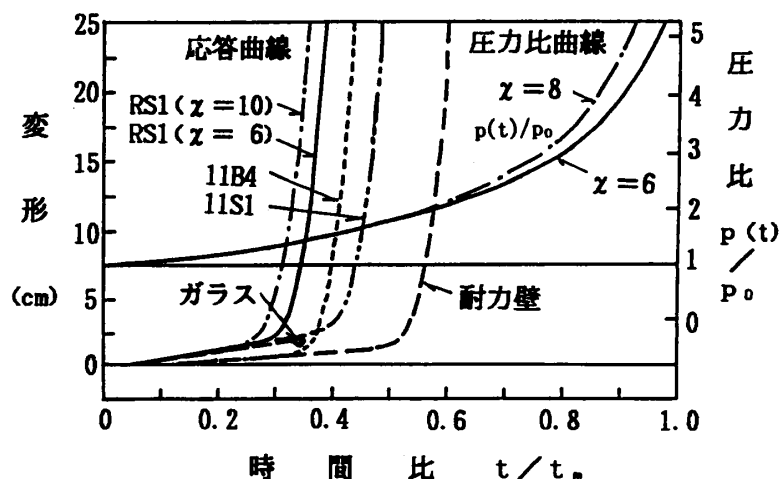


図-5 ガス爆発による引違戸のガラス及び構造部材の変形 (応答解析の結果)

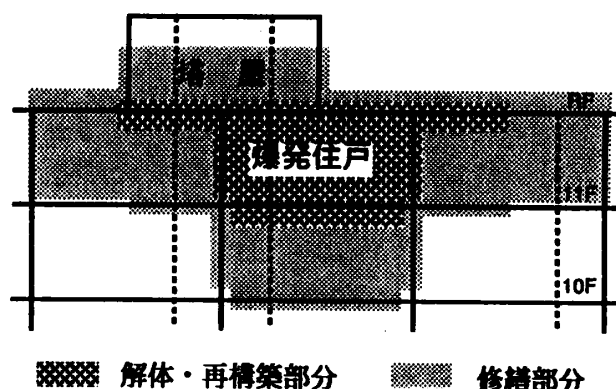


図-6 補修範囲と補修方法の区分

4. 補修計画及び工事

被災した対象建築物の補修では次の事項に着眼した。

- (1) 補修によって、建築物被災部分の構造及び機能を事故前の状態に回復するとともに、その他の部分とのなじみを考慮し、バランスのとれた建物とすること。
- (2) この建築物は耐震設計規定改正前に建設されたものであるが、被災補修部を含む建築物の耐震性が補修によって低下しないよう留意し、現行規定の考え方によっても検討する。

4.1 補修計画 補修計画を作製するため広範囲の部分について、事故による被害、損傷の種類と程度、ひびわれの有無と大きさの調査を行い、補修を要する範囲を決定した (図-6)。更にこの範囲について、変形及びひびわれの大きさと分布、コンクリートの材質変化、中性化深さ、コンクリート及び鉄筋の材料試験を行い、次の2種の補修方法の場所と範囲を決定した。

- (1) 解体、再構築：変形が大きな部分、巾 0.5 mm 以上のひびわれが多数生じている部分、部分的にコンクリートが剥落しているもの等、破壊の大きな構造部材と造作に採用する。
- (2) 修繕：上記以外の場所で構造、機能上支障とならない程度の小被害、ひびわれは生じているが残留変形が認められない部分に採用する。

4. 2 補修工事 構造部材の解体、再構築を行う部分については工事期間の短縮及び工事中の剛性保持に特に注意した。工事にあたっては在来部分との接続を良好にし一体化するため、一部鋼材を用い、これら及び鉄筋の溶接には、熱応力の集中を避け熱の拡散を防ぐ方法をとった。梁主筋の継手にはエンクローズ溶接を採用した。新たに打設するコンクリートには無収縮剤を混和して収縮キレツを防止し、在来部分との接続部にはエポキシ樹脂またはポリマーセメントペーストを塗布して一体化をはかった。端部で打継ぐスラブの端部配筋は一応原設計のとおりとしたが、万一、端部固定が不十分な場合を考慮し中央部の配筋を割り増しし、また、クリープを考慮してダブル配筋とした。

修繕を必要とする部分のひびわれには低圧エポキシ樹脂注入を行い、必要な補修を行なった。

4. 3 補修結果の検討 補修工事終了後、定期的に点検を行なっているが、新旧構造部材の接続部、再構築を行った部分等に何等の支障も見られない。従って、現行耐震設計規定中に見られる層間変形、剛性係数等についても、原設計の性能は十分保持していると考えられる。

5. 結論

- (1) 鉄筋コンクリート建築物の仕切られた区画内でガス爆発が発生すると、通常の場合、区画内部の圧力は全体が殆ど一様に増大する。従って周囲の構造部材、窓等も同じ圧力をうけ、弱い部分が破壊し、生成ガスの散逸によって圧力が低下する。
- (2) このような圧力による構造部材の応答は筆者の一人が以前報告した方法〔2〕によって解析することができる。この解析によると、対象建築物のガス爆発では $0.27 \text{ kgf/cm}^2 (= 2700 \text{ kgf/m}^2)$ 程度の超過圧力で上方のスラブが降伏し、前後してガラス戸が飛散したと考えられる。
- (3) 従って室内の最大超過圧力はこの圧力より著しく増大したとは考えられないが、床スラブ、耐力壁等にかんがりの変形が生じた。ガス爆発の被害は超過圧力によるものだけではなく、生成ガスの散逸（爆風）によっても生ずる。
- (4) 被災部分の補修にはその部分の構造、機能を回復するとともに、新旧部分のバランスをはかることを方針とし、一部部材の解体、再構築を行い、必要な補修を行って良好な結果を得た。

参考文献

- 1) 竹田仁一・高本秀幸・谷川達彦：鉄筋コンクリート構造物の大歪を対象とするボンド応力とその耐爆耐衝撃性に与える影響，コンクリート工学年次論文報告集 Vol. 9 No. 2, 417～422, 1987
- 2) 竹田仁一・河村 隆：爆発による鉄筋コンクリート構造物の変形、破壊の定量的予測，工業火薬協会誌 第46巻第4冊，187～195，1985
- 3) 竹田仁一：都市ガスの爆発による鉄筋コンクリート構造物の変形と破壊〔爆発、衝撃による構造物応答の解析 その1〕 工業火薬協会誌（投稿中）
- 4) W. Bartknecht: Explosions, Springer-Verlag, 10
- 5) 玉本章夫：流体力学Ⅱ，共立出版，14
- 6) 林 光一・藤原俊隆：隔壁をもつ容積一定燃焼器内の火炎伝播：実験と計算，日本航空宇宙学会第14回年会講演集1 C 2, 1983-2
- 7) 竹田仁一・立川博之・藤本一男・工藤利昭：爆発によるガラスの破壊，日本建築学会大会学術講演梗概集（関東），昭和50年10月，249～250
- 8) 三好俊二：ガラス板の耐風圧試験，日本建築学会論文報告集第 100号，昭和39年 7月，13～18