

# ニューヨーク世界貿易センタービル2号棟の 飛行機衝突解析

Aircraft Impact Analysis of New York World Trade Center Tower 2

○ 磯部大吾郎<sup>1)</sup>, チョウ ミヨウ リン<sup>2)</sup>

Daigoro Isobe and Kyaw Myo Lynn

1) 工博 筑波大学大学院助教授 (〒305-8573 茨城県つくば市天王台1-1-1, isobe@kz.tsukuba.ac.jp)

2) 工修 筑波大学大学院生 (〒305-8573 茨城県つくば市天王台1-1-1)

In this paper, the previously developed ASI-Gauss technique is applied to an aircraft impact analysis of New York World Trade Center Tower 2 (WTC2), to evaluate the structural vulnerability and behavior of the aircraft, at the horrifying scene that occurred in 2001. The ASI-Gauss technique is a modified version of the formerly developed Adaptively Shifted Integration (ASI) technique for the linear Timoshenko beam element, which computes highly accurate elasto-plastic solutions even with the minimum number of elements per member. The ASI-Gauss technique gains still higher accuracy especially in elastic range, by placing the numerical integration points of the two consecutive elements forming an elastically deformed member in such a way that stresses and strains are evaluated at the Gaussian integration points of the two-element member. From the numerical results, propagation of the shock waves resulted from the impact and high-level stresses in the structural members were observed. We could also see how the main wings of the aircraft cut through the perimeter columns and spandrels, how the debris moved through the building and to where it caused damages. Moreover, the velocity reduction of the right engine and the location from where it moved out of the building were in good agreement with the observed data.

**Key Words:** WTC2, Aircraft Impact Analysis, ASI-Gauss Technique, FEM

## 1. はじめに

2001年のニューヨーク世界貿易センタービルのテロ事件において、最終的にビルの倒壊を招いた主な原因は、航空機燃料に引火して発生した大規模な火災であるとされている[1]。しかしその一方で、飛行機が衝突した際に、瞬間的に発生した衝撃力が床スラブの結合部を損傷し、構造物を進行性崩壊に早く至らしめた可能性も否めない。そこで本報告では、骨組構造体の衝突崩壊問題に対して有効な解析手法として開発された ASI-Gauss 法[2]を、ニューヨーク世界貿易センタービル2号棟(WTC2)の動的解析に適用し、飛行機の衝突による影響を調べた。ASI-Gauss 法は、部材の性状に合わせて要素内の数値積分点を順応的にシフトすることで、計算コストを低く抑えることが可能な ASI 法(順応型 Shifted Integration 法)[3]をさらに改良した手法である。ASI-Gauss 法では、2つの要素をサブセット要素として考え、そのガウス積分点に相当する位置に応力評価点を配するように数値積分点をシフトすることで、弾性変位解の精度を向上させている。また、積分点のシフトと同時に断面力を解放することで破断を表現し、幾何学的な位置関係に基づいて要素間をギャップ要素で拘束することで接触を表現可能としている。解法の詳細については他文献[2]に譲り、本報告では、可能な限り実情報に基づいてモデル化された WTC2 に対し、ボーイング 767-200ER 型航空機が衝突した際の挙動についての解析結果を報告する。

## 2. WTC2のモデル化と解析条件

飛行機が衝突した階付近の77階から86階の部分を線形チモシェンコはり要素によってモデル化した。モデルの水平断面図を図1に示す。1部材当り2要素で構成され、モデル全体では総要素数54740、総節点数47267、総自由度数281880である。77階下部と86階上部の境界条件を

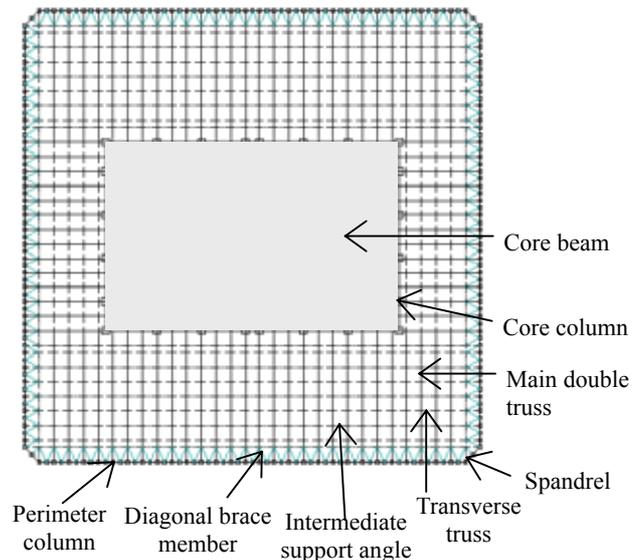


Fig. 1: Cross-section of WTC2 model

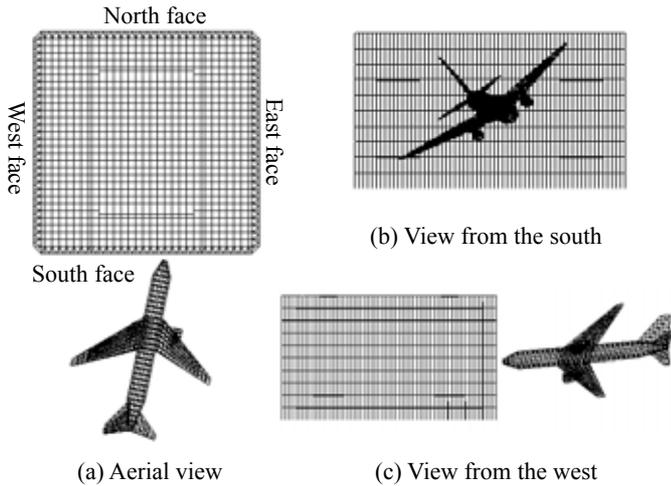
水平ローラーとし、床部には平均 8.29 kN/m<sup>2</sup>の重量を載荷した。また本解析では、減衰は考慮していない。表1に部材の断面形状および材料定数値を示す。

B767-200ER 型機も同様に線形チモシェンコはり要素でモデル化し、総要素数 4322、総節点数 2970、総自由度数 17820 とした。部材の断面形状を箱型断面とし、超々ジュラルミンの材料定数値を用いた。飛行機の総重量を 142.5 t とし、このうち燃料の重量は 30 t、個々のエンジンの重量は 19.315 t とした。

図2に解析モデル全体の概観と飛行機の初期位置を示

**Table 1: Dimensions and material properties of structural members in WTC2**

Name	Shape	Cross-section (mm)	Young's Modulus (GPa)	Yield strength (MPa)	Critical axial strain	Critical bending strain
Perimeter column	Box-shaped	356x356x4.5x9.5	206	439	0.1	0.00030
Spandrel	Plate	1321x16	206	439	0.1	0.00005
Main double truss	H-shaped (double)	700x300x13x24	206	243	0.1	0.00005
Transverse truss	H-shaped	900x300x16x28	206	243	0.1	0.00005
Diagonal brace member	H-shaped	900x300x16x28	206	243	0.1	0.00005
Intermediate support angle	H-shaped	500x200x10x16	206	243	0.1	0.00005
Core column	Box-shaped	550x550x52.5x52.5	206	243	0.1	0.00030
Core beam	H-shaped	500x200x10x16	206	243	0.1	0.00005

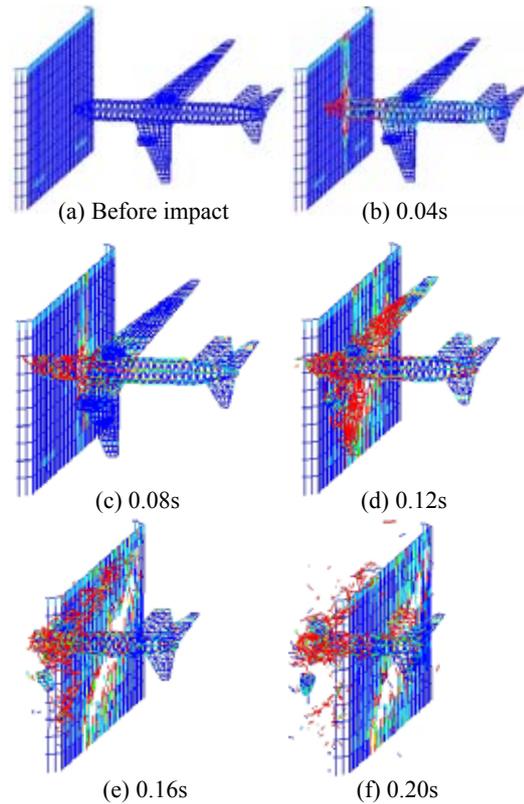


**Fig. 2: Analyzed model and initial position of aircraft**

す。衝突直前に飛行機の頭が  $11.5^\circ$  東、 $5^\circ$  鉛直下方向へ向き、主翼が  $35^\circ$  傾斜していたものと仮定した。また、 $262 \text{ m/s}$  の速度で WTC2 の 81 階に衝突したものと仮定した[4]。ソルバーには共役傾斜法 (CG 法)、非線形増分理論には Updated Lagrangian Formulation、時間積分には陰解法 (Newmark の  $\beta$  法、 $\delta=5/6$ 、 $\beta=4/9$  [5]) を用いた。実現象の時間  $0.8 \text{ s}$  に対し、時間増分  $0.2 \text{ ms}$  として  $3.3\text{GHz}$  P4 CPU、 $2\text{GB}$  RAM の PC で 23 時間の計算時間を要した。

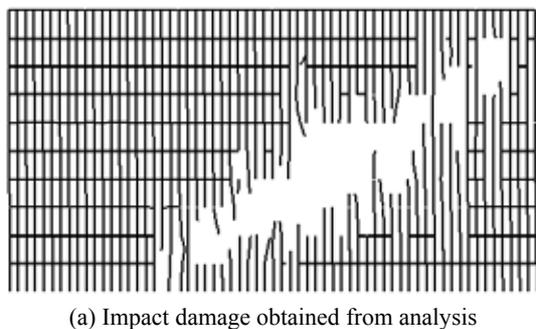
### 3. 解析結果

南面に飛行機が突入する様子を図 3 に示す。図では、部材の降伏関数値によって色の濃淡を付け、破断した要素は削除して描いている。衝突の瞬間から鉛直方向へ色が行き来する様子が観察される。衝撃波が伝播し、設計段階では想定されていない特異な応力状態に構造物がさらされていた可能性があることが確認された。また、機体により建物南面の外柱とスパンドレル梁が切断され、大きな穴が形成されている。飛行機のエンジンは形状を保ったまま、粉々となった機体から瞬時に離脱している様子が分かる。図 4 には、南面の損傷の様子を示す。観測された損傷状況より解析結果は大きめになっているが、これは上下面を水平ローラーとして拘束しているため、境界近辺で応力の集中および伝播が起き、壊れやすくなったものと思われる。次に、上から見た機体および左右の両エンジンの動きを図 5 に示す。左エンジンは比較的強固な構造のコア部を直撃し、急激に減速していることが分かる。コア部の損傷は、主に左エンジンと機体によって引き起こされたものと考えられる。機体の一部は北

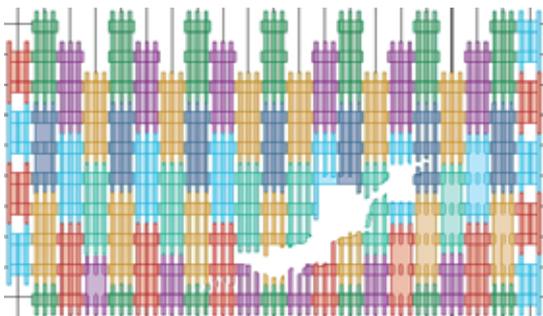


**Fig. 3: Aircraft cutting through perimeter columns and spandrels on the south face**

面から飛び出している。他方、右エンジンはコア部を避けて通っているため、建物の外壁まで貫通し、衝突後  $0.617 \text{ s}$  に北東の角から外へ飛び出している。エンジンの飛び出した位置は、観測データ[1]とほぼ一致する。図 6 には、右エンジンの速度曲線を示す。衝突後、特に外柱と接触する区間で急激に速度を落とし、北東の角から飛び出る瞬間には  $53 \text{ m/s}$  まで減速している。この結果は、先の観測データとも良好に一致している。図 7 には、東面と北面の損傷の様子を示す。東面は、北面との角の右エンジン貫通口以外は比較的損傷が少ない。北面には、エンジンと機体の一部による損傷が 2 箇所確認できる。最後に、78 階から 82 階までのコア柱の損傷の様子を図 8 に示す。5 階層に渡って広くコア柱が損傷を受けており、56 分後に起きる進行性崩壊に対し、このことが大きな影響を与えた可能性も考えられる。



(a) Impact damage obtained from analysis



(b) Observed impact damage [1]

Fig. 4: Impact damages on the south face obtained from analysis and observation

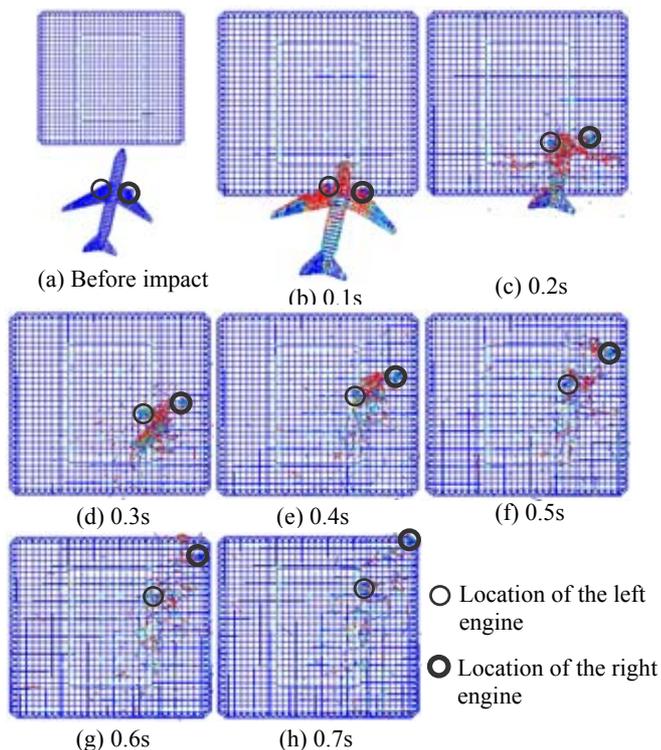


Fig. 5: Motion of aircraft debris during impact

#### 4. 結論

本研究では、ASI-Gauss 法を WTC2 の飛行機衝突解析に適用し、衝撃波の伝播の様子、機体と左右エンジンの挙動および建物の損傷状況を調べた。ともに観測データと良好に一致し、本解法が実用的であることが確認された。その一方で、モデルの境界条件により想定外の応力集中や衝撃波の伝播が生じる可能性は否定できない。そこで今後は、WTC2 の全体モデルによる解析を実施し、

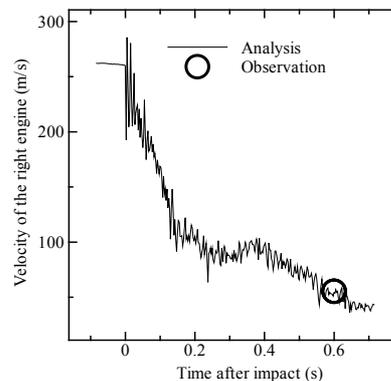
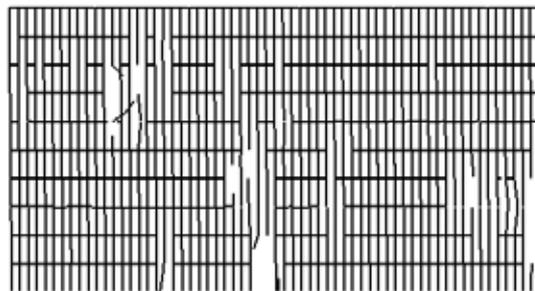
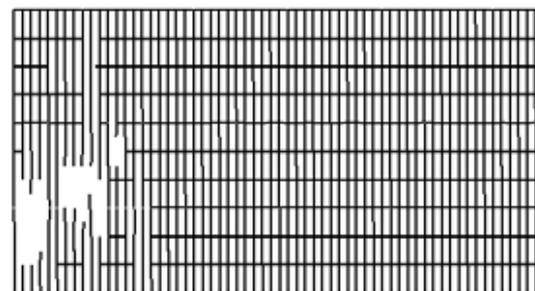


Fig. 6: Velocity reduction curve of the right engine



(a) East face



(b) North face

Fig. 7: Impact damages on the east and north faces

併せて火災による耐力低下を考慮した進行性崩壊解析を実施する予定である。衝突前後から崩落に至るまでの現象を時系列で調査することで、事件の全貌を明らかにできるものと期待している。

#### 謝辞

本研究を遂行するにあたり、独立行政法人日本学術振興会の科学研究費補助金基盤研究 A1 (課題番号: 16206055) から一部援助を得た。ここに記し、謝意を表す。

#### 参考文献

- [1] ASCE/FEMA: World Trade Center Building Performance Study: Data Collection, Preliminary Observation, and Recommendations, 2002.
- [2] 磯部大吾郎, チョウ ミヨウ リン: 飛行機の衝突に伴う骨組鋼構造の崩壊解析, 日本建築学会構造系論文集, 第 579 号, 2004, pp. 39-46.
- [3] Y. Toi and D. Isobe: Adaptively Shifted Integration Technique for Finite Element Collapse Analysis of Framed Structures. Int. J. Numer. Methods Eng., Vol. 36, 1993,

[4] R. Fukuda, E. Fukuzawa, N. Koshika, H. Morikawa, S. Yoshikai and K. Makibe: Structural Response and Damages of New York World Trade Center Towers due to Aircraft Impacts, Proc. Int. Conf. Design and Analysis of Protective Structures

against Impact/ Impulsive/ Shock Loads (DAPSIL 2003), Tokyo, Japan, 2003.

[5] K. J. Bathe: Finite Element Procedures, Prentice Hall, 1996.

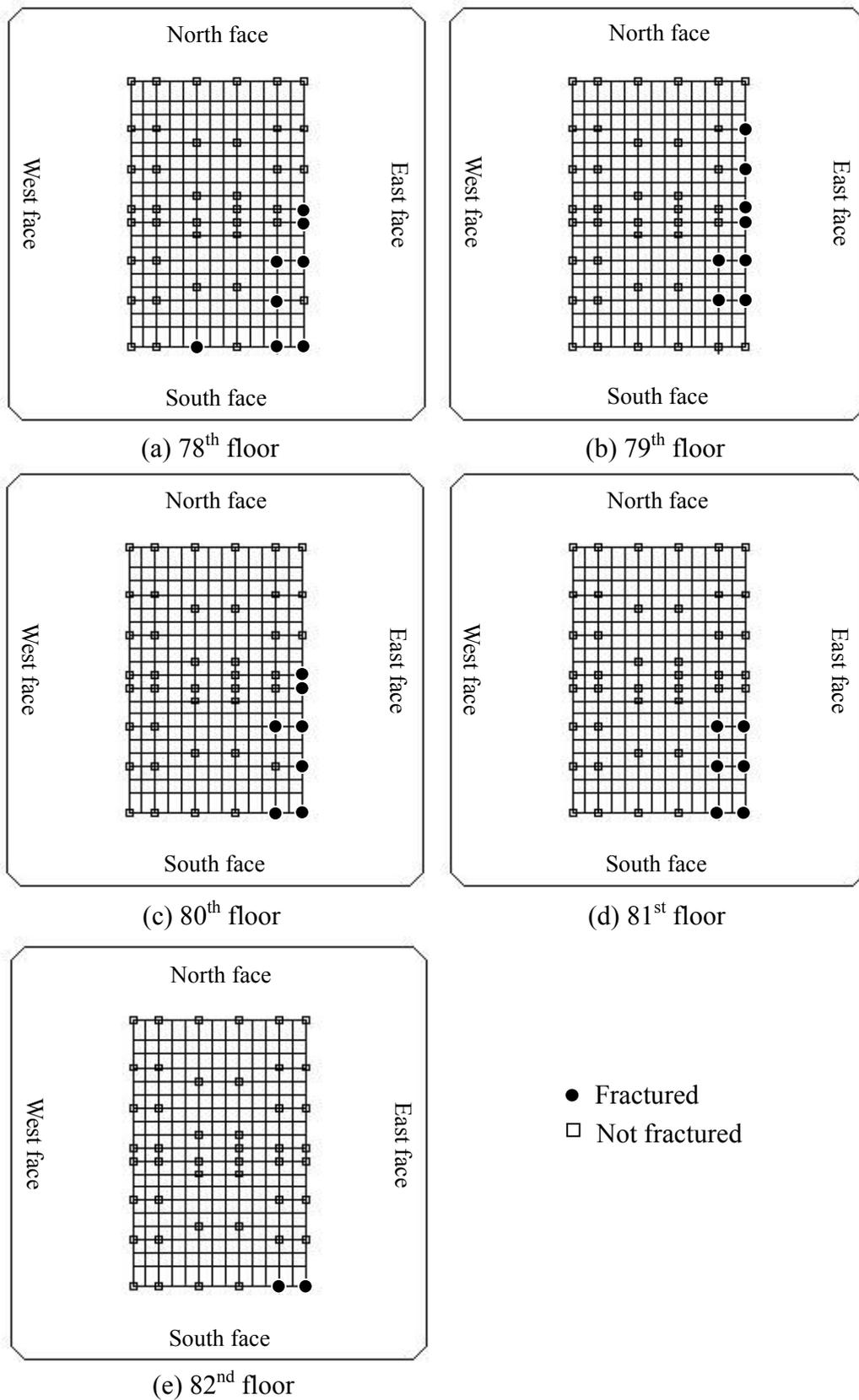


Fig. 8: Locations of fractured columns