

博士論文

天井落下時に発生する頭部衝撃荷重の
逆問題解析による同定に関する研究

中 楚 洋 介

論文の内容の要旨

論文題目 天井落下時に発生する頭部衝撃荷重の 逆問題解析による同定に関する研究

氏 名 中 楚 洋 介

天井落下被害は、世界各国で地震の有無に関わらず日常的に発生している。我が国においては1923年の関東大震災の頃から被害報告がなされてきた。地震時には広範囲に渡り同時多発的に被害が発生するため、天井の耐震化ばかりに意識が向いてしまう。留意すべき点は、地震のないときでも天井落下被害は日常的に発生している、という点である。その原因には、風、交通振動、結露、雨漏り、錆、経年劣化、温度変形等が挙げられ、水泳場や温浴施設、駅といった施設での被害が代表的である。2011年3月に発生した東日本大震災では、天井落下被害は少なくとも2000施設に及び、多くの死傷者が発生した。東日本大震災を契機に天井落下被害に対する関心は急速に高まり、産学官がこぞって安全対策に尽力している。安全対策を行うに当たり、第一に行わなければならないのが危険度評価である。既存の天井やこれから設計する天井が落下した場合に、人命に危害を及ぼすか否かという天井の危険度を評価することは非常に重要であり、最優先事項である。危険と評価された天井は迅速に天井材の軽量柔軟化、落下防止ネットの設置、撤去等を行い、人命保護を確保しなければならない。

天井落下時の危険度は、落下した天井材が人体に与える物理量とそれを受ける人体側の耐性値によって決まる。危険度を評価する上では、非可逆的な傷害を受けやすい頭部を対象とする。頭部傷害は接触傷害と慣性傷害に分けられるが、天井落下事故で発生する傷害

は接触傷害であるため、その傷害の発生要因として重要視される物理量は衝撃荷重である。

人体側の耐性値には、女性の頭蓋骨の中でも弱いとされる側頭頭頂骨の線状骨折を引き起こす荷重の閾値として1968年にNahumらにより示された2000 Nを採用している。これは、米国で用いられている「人命に対する危険度」の尺度であるAbbreviated Injury Scale : AISにおいて、AIS2（中傷等：1時間未満の意識喪失，線状骨折）に当たり，可逆的な傷害（後遺症なく速やかに元へ戻る）を許容する傷害レベルを示している。一般的に耐性値は個人差が大きく，定量的な評価には大きな幅を伴う。また，同じ衝撃荷重でもインパクトの衝突時の接触面積によって頭部に発生する応力は変わるため応力で評価すべきとの見方もある。しかし，人体実験は倫理的な問題もあり，応力レベルでの提案は数値解析上でしか行われていない。Nahumらの提案した閾値は，他の研究者が異なるサイズのインパクトを用いて行った頭蓋骨衝撃実験で得られた骨折荷重の中でも下限値を示しており，現状では閾値として適当な値であると考えられる。また，Nahumらによると耐性に対して衝撃の作用時間や載荷速度は重要な要因でなく最大衝撃荷重に依存することが示されている。

天井が落下した際に発生する衝撃荷重は主として天井材の設置高さや材質に依存する。著者らは，天井材落下実験を行い各種天井材の落下衝撃荷重を計測してきた。天井材落下実験では，JISで規格化されたマグネシウム合金製の衝撃吸収性試験用人頭模型に市販の大きさの各種天井材を様々な高さから水平を保持したまま落下させている。人頭模型は，地面に敷かれた鉄板上のH形鋼を土台として設置されており，人頭模型とH形鋼の間に設置したひずみゲージ式ロードセルで時刻歴荷重を計測している。

以上のように，天井材落下実験で得た最大衝撃荷重と頭蓋骨骨折の閾値を比較することで天井の危険度を定量的に評価することができる。但し，天井材落下実験はあくまで実被害を模擬して行ったものであり，その違いには十分注意した上で評価を行う必要がある。

上記の危険度評価手法において重要な課題として挙げられるのが，天井材の衝撃荷重の同定である。Nahumらはインパクト先端に取り付くロードセルで計測した荷重を基に閾値を

提案している．一方で，天井材落下実験では，天井材は一般的に衝突時に脆性的な破壊を示す場合が多いため，衝撃面での荷重を計測することは困難であるという理由から人頭模型下に設置したロードセルで荷重を計測している．そのため，衝撃面で発生する荷重と人頭模型を伝わってロードセルで計測される荷重には何らかの差異が生じていると考えられる．本研究では逆問題解析手法を適用することで，天井材落下実験において人頭模型下のロードセルで記録した荷重から衝撃面での荷重を次のように同定する．人頭模型に作用する衝撃力を入力，ロードセルの記録を出力とする線形の系を仮定すると，入力と出力はインパルス応答関数を用いて畳み込み積分により関係付けられる．入出力を同時に計測できるインパクトハンマを用いた打撃試験を行い，インパルス応答関数を予め求めておくことで，天井材落下実験で計測した出力から逆畳み込みにより入力である衝撃力を求める．

本研究の目的は，次の4点である．

- 1．既往の天井材落下実験で不十分であった石膏ボードの衝撃荷重等のデータを蓄積する．
- 2．インパクトハンマを用いた打撃試験により推定した人頭模型の伝達関数を評価する．
- 3．圧電型のパッドセンサにより衝撃面直下の荷重を計測した天井材落下実験を通して，得られた衝撃荷重と逆解析の推定結果を比較することで逆解析の妥当性を検証する．
- 4．既往の天井材落下実験のデータを利用することで，逆解析により各種天井材が様々な高さから人頭模型に落下した際に衝撃面で発生する荷重を同定する．

本論文は，以下の7章から成る．

第 1 章では，本論文の目的，研究の背景及び本論文の構成について述べ，本論文の概略を説明している．

第 2 章では，天井材落下実験の結果を纏めている．石膏ボードは不燃材で安価という利点から天井材として世に広く普及しているが，既往の天井材落下実験では十分なデータを得ることができていなかった．そのため，石膏ボード落下実験を新たに行い，その結果を既往の実験結果に加えて纏めている．

第 3 章では、逆問題解析の理論について紹介している。天井材落下実験において、人頭模型下で計測した荷重は衝撃面からロードセルに伝わるまでに土台である H 形鋼を含めた人頭模型の系の振動特性や人頭模型自体の影響を受けて増減している。そこで、ロードセルの記録から衝撃面で発生する衝撃力を逆問題解析により推定する。逆問題解析とは、応答や結果から入力を推定する逆問題の扱いを指し、既に様々な物体の衝突における衝撃力の同定にも応用されている解析手法である。

第 4 章では、衝撃の加わる人頭模型頂部から人頭模型下に設置したロードセルまでの伝達関数を同定している。逆問題解析は、次の 2 段階で行う。1. 物体に作用する衝撃力（入力）と応答（出力）を同時に計測し、これらの測定データをフーリエ変換して系の伝達関数を同定する（較正実験）。2. 出力の記録のフーリエ変換を伝達関数で除し、フーリエ逆変換して入力を算出する。本研究では、較正実験としてインパクトハンマによる打撃試験を行い、伝達関数を同定した。

第 5 章では、頭頂部から 3 cm 下の水平面で切った分離型人頭模型に 1 mm 厚の圧電型パッドセンサを挿入し、新たに天井材落下実験を行うことで天井材衝撃面付近の荷重を計測した。実験を行うに当たり、新たに製作した分離型人頭模型とパッドセンサの性能の検証及びパッドセンサで計測した荷重が衝撃面での荷重とほぼ同等とみなせるかの確認を打撃試験により行った。天井材落下実験において、パッドセンサの計測値と逆問題解析による推定衝撃荷重を比較することで逆問題解析の妥当性を示している。

第 6 章では、過去に行った天井材落下実験の結果を利用し、逆問題解析により各種天井材の衝撃面での荷重を同定している。

第 7 章では、本論文を通して得た結論を述べている。

付録には、軽量新素材天井材の衝撃力の同定結果を載せている。また、著者がサブテーマとして研究していた放物線状ケーブルを用いた吊り天井の地震時挙動の制御法についても併せて載せている。

業績リスト

＜受賞歴＞

- 1) 2014 年度日本建築学会大会シェル・空間構造運営委員会 若手優秀発表：発表題目「人体耐性指標を用いた天井材の安全性評価に関する基礎的研究 その 7 最適伝達関数の同定」, 2014.10
- 2) シェルと空間構造に関する夏期セミナー2014「優秀発表賞」受賞：発表題目「天井材落下実験における逆解析の妥当性の検証」, 2014.8
- 3) IIS PhD Student Live 2014「Best Presentation Award」受賞：発表題目「The Safety against Ceiling Collapses in Large Enclosures」, 2014.7
- 4) 2012 年日本建築学会「優秀修士論文賞」受賞：受賞論文名「ケーブルを用いた既存天井の耐震補強方法に関する基礎的研究」, 2012.9

＜職歴＞

2012年4月~9月	東京大学生産技術研究所準博士研究員
2014 年 4 月~ (現在に至る)	日本学術振興会特別研究員 (DC2)

＜学協会における活動歴＞

2011 年 4 月~ (現在に至る)	日本建築学会 図書委員会 文献抄録小委員会 第 1 部会 (構造) 委員
------------------------	--------------------------------------

＜外部資金獲得状況＞

2012 年 4 月~ 2013 年 3 月	竹中育英会建築研究助成金 500,000 円 (1 年間)
2014 年 6 月~ 2016 年 3 月	平成 26 年度科学研究費助成事業 (科学研究費補助金) (特別研究員奨励費) 1 年目 : 1,200,000 円, 2 年目 : 1,100,000 円

<学術雑誌等（紀要・論文集等も含む）に発表した論文、著書>

（査読有り）

- 1) 中楚 洋介, 川口 健一, 荻 芳郎, 大矢 俊治, 小澤 雄樹, 森 雄矢, 佐藤 大輔 : 既存天井におけるケーブルを用いた制震システムに関する基礎的研究, 日本建築学会 構造工学論文集 Vol.59B, pp.489～495, 2013.3
- 2) 川口 健一, 大場 康史, 中楚 洋介 : 2011 年東北地方太平洋沖地震による空港ターミナルビル内天井落下及び天井落下衝撃力の推定, 日本建築学会 技術報告集 Vol.39 No.18, pp.789～793, 2012.6
- 3) 荻 芳郎, 川口 健一, 清本 莉七, 中楚 洋介, 新谷 真人, 大場 康史, 上村 一貴 : 日本科学未来館における吊り天井の余震時挙動の観測調査と基礎的考察, 日本建築学会 構造工学論文集 Vol.58B, pp.519～526, 2012.3

（査読無し）

- 1) 中楚 洋介, 川口 健一, 大矢 俊治, 荻 芳郎, 小澤 雄樹, 細見 亮太, 益田 悠司, 森 大 : 天井材の安全性評価に関する基礎的研究 : 石膏ボード落下実験, 生産研究 Vol.64 No.6, pp.95～100, 2012.11
- 2) 中楚 洋介, 川口 健一, 大矢 俊治, 荻 芳郎, 小澤 雄樹, 佐藤 大輔, 森 雄矢 : 放物線状ケーブルを用いた天井の制震補強法に関する基礎的研究, 生産研究 Vol.64 No.6, pp.85～93, 2012.11
- 3) Yoshiro OGI, Ken'ichi KAWAGUCHI, Rina KIYOMOTO, Yosuke NAKASO, Masato ARAYA, Yasushi OBA, Kazutaka UEMURA : Preliminary study of observed response of suspended ceiling during aftershocks in a large roof building, Bulletin of Earthquake Resistant Structure Research Center, No.45, pp.69～74, 2012.3
- 4) Ken'ichi KAWAGUCHI, Yoshiro OGI, Yosuke NAKASO, Kazutaka UEMURA, Yasushi OBA : Damage to non-structural components in a large roof building during the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake and its aftershocks and recovery of ceiling using membrane materials, Bulletin of Earthquake Resistant Structure Research Center, No.45, pp.63～68, 2012.3
- 5) Yasushi OBA, Yosuke NAKASO, Ken'ichi KAWAGUCHI : Failure of ceilings in an airport building during the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake and estimation of its impact, Bulletin of Earthquake Resistant Structure Research Center, No.45, pp.55～62, 2012.3
- 6) Ken'ichi KAWAGUCHI, Yoshiya TANIGUCHI, Yuki OZAWA, Yosuke NAKASO, Sho WATANABE : Damage to non-structural components in large public spaces by the Great East Japan Earthquake, Bulletin of Earthquake Resistant Structure Research Center, No.45, pp.45～53, 2012.3

- 7) 荻 芳郎, 川口 健一, 清本 莉七, 中楚 洋介, 新谷 真人, 大場 康史, 上村 一貴 : 日本科学未来館における余震時の天井挙動測定の基礎的考察, 生産研究 Vol.63 No.6, pp.83~88, 2011.11
- 8) 川口 健一, 中楚 洋介, 荻 芳郎, 上村 一貴, 大場 康史 : 日本科学未来館における天井落下被害と膜天井による復旧, 生産研究 Vol.63 No.6, pp.77~82, 2011.11
- 9) 大場 康史, 中楚 洋介, 川口 健一 : 2011 年東北地方太平洋沖地震による空港ターミナルビル内天井落下及び天井落下衝撃力の推定, 生産研究 Vol.63 No.6, pp.71~76, 2011.11
- 10) 川口 健一, 谷口 与史也, 小澤 雄樹, 中楚 洋介, 渡邊 祥 : 東日本大震災における公共大空間施設での天井落下被害事例, 生産研究 Vol.63 No.6, pp.63~70, 2011.11

<学術雑誌等又は商業誌における解説、総説>

- 1) 中楚 洋介 : Earthquake simulator testing and seismic evaluation of suspended ceilings (抄録), 建築雑誌 Vol.129 No.1655, pp.57, 2014.3
- 2) 中楚 洋介 : Performance characteristics compound curved sandwich shell structures (抄録), 建築雑誌 Vol.128 No.1641, pp.77, 2013.2

<国際会議における発表（口頭発表 査読無し）>

- 1) ○Ken'ichi KAWAGUCHI, Ryota HOSOMI, Yosuke NAKASO, Yoshiro OGI : Investigation of the Collapse of 3tons Suspended Ceiling in a Swimming Pool Arena, Proceedings of the International Association for Shell and Spatial Structures (IASS) Symposium 2014, Brazil, 2014.9
- 2) ○Yosuke NAKASO, Ken'ichi KAWAGUCHI, Yoshiro OGI, Shunji OYA, Yuki OZAWA, Yuya MORI : A New Seismic Retrofit of Existing Suspended Ceilings with Parabolically Arranged Cables, 13th World Conference on Seismic Isolation, Japan, 2013.9
- 3) ○Ken'ichi KAWAGUCHI, Yosuke NAKASO, Yoshiro OGI, Shunji Ohya : Non-Structural Components and Life-Safety in Large Rooms of Spatial, Proceedings of the International Association for Shell and Spatial Structures (IASS) Symposium 2013, Poland, 2013.9
- 4) ○Yosuke NAKASO, Ryo ISHIMARU, Yasuhisa TAGAWA : Study on Shear Strength Evaluation Method of Headed Stud Connector for Using High-depth Steel Deck, International Symposium on Steel Structures, Korea, 2011.11

<国内学会・シンポジウム等における発表（査読無し）>

- 1) ○細見 亮太, 川口 健一, 荻 芳郎, 中楚 洋介 : 非地震時の天井落下事例(2013 年 7 月 15 日富士市)に関する基礎的調査研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集 B-1, pp.909~910, 2014.7

- 2) ○中楚 洋介, 川口 健一：人体耐性指標を用いた天井材の安全性評価に関する基礎的研究 その7 最適伝達関数の同定, 日本建築学会大会学術講演梗概集 B-1, pp.921～922, 2014.7
- 3) ○中楚 洋介, 川口 健一：人体耐性指標を用いた天井材の安全性評価に関する基礎的研究 その6 伝達関数に基づく天井材落下衝撃荷重の推定, 日本建築学会大会学術講演梗概集 B-1, pp.1007～1008, 2013.7
- 4) ○細見 亮太, 川口 健一, 中楚 洋介, 森 大：人体耐性指標を用いた天井材の安全性評価に関する研究 その5 既往の人頭崩壊荷重実験の比較, 日本建築学会大会学術講演梗概集 B-1, pp.1005～1006, 2013.7
- 5) ○森 大, 川口 健一, 荻 芳郎, 小澤 雄樹, 中楚 洋介, 細見 亮太：人体耐性指標を用いた天井材の安全性評価に関する基礎的研究 その4 石膏ボード落下実験, 日本建築学会大会学術講演梗概集 B-1, pp.1003～1004, 2013.7
- 6) ○田川 泰久, 堀田 洋志, 中楚 洋介, 浅田 勇人：デッキプレートを用いた合成梁における頭付きスタッドの押抜き試験 その1 太径スタッドの配置と突出長さの力学的性状への影響, 日本建築学会大会学術講演梗概集 C-1, pp.855～856, 2012.7
- 7) ○中楚 洋介, 川口 健一, 大矢 俊治, 荻 芳郎, 小澤 雄樹, 森 雄矢：ケーブルを用いた既存天井の耐震補強方法に関する基礎的研究 その3：補強効果の検証, 日本建築学会大会学術講演梗概集 B-1, pp.895～896, 2012.7
- 8) ○森 雄矢, 川口 健一, 大矢 俊治, 荻 芳郎, 小澤 雄樹, 中楚 洋介：ケーブルを用いた既存天井の耐震補強方法に関する基礎的研究 その2 起振器による補強前天井の振動実験, 日本建築学会大会学術講演梗概集 B-1, pp.893～894, 2012.7
- 9) ○大矢 俊治, 川口 健一, 荻 芳郎, 小澤 雄樹, 中楚 洋介, 森 雄矢：ケーブルを用いた既存天井の耐震補強方法に関する基礎的研究 その1 留め付け金具の水平及び鉛直方向載荷実験, 日本建築学会大会学術講演梗概集 B-1, pp.891～892, 2012.7
- 10) ○荻 芳郎, 川口 健一, 清本 莉七, 中楚 洋介, 新谷 真人, 大場 康史, 上村 一貴：日本科学未来館での吊り天井の地震時挙動に関する基礎的調査研究 その1 余震時観測データを用いた地震被害後の振動性状, 日本建築学会大会学術講演梗概集 B-1, pp.853～854, 2012.7
- 11) ○堀田 洋志, 田川 泰久, 中楚 洋介, 浅田 勇人：せいが大きい合成スラブ用デッキプレートに埋め込まれた頭付きスタッドの押抜き実験, 日本地震工学会大会梗概集 Vol.8, pp.312～313, 2011.11
- 12) ○荻 芳郎, 川口 健一, 中楚 洋介, 上村 一貴, 大場 康史：東北地方太平洋沖地震により日本科学未来館で発生した非構造材等落下被害に関する調査速報 その2 シンボルゾーンの被害とエントランスホール天井の余震観測の概要, 日本建築学会大会学術講演梗概集 B-1, pp.765～766, 2011.7

- 13) ○川口 健一，荻 芳郎，中楚 洋介，上村 一貴，大場 康史：東北地方太平洋沖地震により日本科学未来館で発生した非構造材等落下被害に関する調査速報 その 1 建物概要とエントランスホール天井等の落下被害，日本建築学会大会学術講演梗概集 B-1，pp.763～764，2011.7
- 14) ○中楚 洋介，川口 健一，大場 康史：2011 年東北地方太平洋沖地震による空港ターミナルビル内天井落下に関する調査速報 その 2 ビデオ映像と落下実験結果を用いた天井材落下衝撃力の推定，日本建築学会大会学術講演梗概集 B-1，pp.761～762，2011.7

天井落下時に発生する頭部衝撃荷重の 逆問題解析による同定に関する研究

IDENTIFICATION OF IMPACT LOAD OF DROPPED CEILINGS
TO A DUMMY HEAD BY INVERSE ANALYSIS

2015年2月
東京大学大学院

中 楚 洋 介

目次

論文内容の要旨	i
業績リスト	v
1. 序章	7
1.1 天井落下被害と人命に対する危険度評価	9
1.1.1 天井落下被害とその対策	12
1.1.2 天井材の落下及び傷害発生の過程	26
1.1.3 人体の傷害メカニズムと傷害耐性	30
1.1.4 天井材の危険度評価法及び評価に用いる衝撃荷重の計測における問題	45
1.1.5 逆問題解析による衝撃荷重の計測方法	50
1.2 逆問題解析	53
1.2.1 逆問題とその分類	53
1.2.2 逆問題における不適切性と適切化处理	59
1.2.3 本研究で扱う逆問題解析の位置付け	64
1.3 研究目的	67
1.4 本論文の構成	68
2. 天井材落下実験	71
2.1 緒言	73
2.2 既往の実験	74
2.3 石膏ボード落下実験	86
2.4 人頭模型の振動モードの推定	97
2.5 結言	101
3. 逆問題解析による衝撃力の推定法	103
3.1 緒言	105
3.2 衝撃力の原波形解析	107
3.3 積分変換を利用した原波形解析における不適切性	111
3.4 定式化	113
3.5 結言	117
4. 打撃試験による人頭模型の伝達関数の評価	119
4.1 緒言	121
4.2 試験概要及び結果	123

4.3	スペクトル解析時における検討.....	128
4.3.1	解析範囲.....	130
4.3.2	ラプラス変換の有効性.....	131
4.4	伝達関数の評価.....	133
4.5	結言	144
5.	天井材落下実験における逆問題解析の妥当性の検証	145
5.1	緒言	147
5.2	分離型人頭模型及び圧電型パッドセンサの性能検証.....	148
5.2.1	分離型人頭模型の性能確認.....	152
5.2.2	圧電型パッドセンサの性能確認.....	153
5.2.3	上部パッドセンサとインパクト先端で計測した荷重の比較.....	154
5.2.4	パッドセンサ挿入による人頭模型の固有振動の変化の確認.....	156
5.2.5	ロードセル自体の固有振動数の変化の確認.....	156
5.3	逆問題解析の妥当性の検証.....	159
5.3.1	天井材衝突時に発生する衝撃面付近の荷重計測実験.....	159
5.3.2	打撃試験による伝達関数の同定.....	161
5.3.3	逆問題解析による天井材の推定最大衝撃力の妥当性の検証.....	164
5.3.4	振動モードを除去した場合における最大衝撃力との比較.....	172
5.4	結言	173
6.	逆問題解析による各種天井材の衝撃力の同定及びその評価	175
6.1	緒言	177
6.2	各種天井材の衝撃力の同定.....	178
6.3	逆問題解析における誤差の評価.....	181
6.4	結言	184
7.	結論.....	185
	参考文献	191
	付録 A：軽量新素材天井材落下実験.....	205
	付録 B：天井落下被害調査.....	209
	付録 C：ケーブルを用いた吊り天井の地震時挙動の制御法	255
	謝辞	289

1. 序章

1.1 天井落下被害と人命に対する危険度評価

建築構造の分野では、建物を利用する人々の命や財産を確保するため、建物の倒壊や過度な損傷を防ぐことが一つの命題となっている。研究者らのこれまでの功績により建物が倒壊に至るような被害は少なくなってきた。その一方で、地震等の外力による躯体の損傷はほとんどないにも関わらず、意匠性や温熱環境、音響性等の室内環境を向上させるために設けられた天井が落下して人命を脅かすという被害が頻発している。

天井落下被害は、世界各国で地震の有無に関わらず日常的に発生している。我が国においては 1923 年の関東大震災[1]の頃から地震の度に被害報告がなされてきた。地震時には広範囲に渡り多くの建物で天井落下被害が発生するため、天井の耐震化ばかりに意識が向いてしまう。留意すべき点は、地震のないときでも天井落下被害は日常的に発生している[2~10]、という点である。その原因には、風、交通振動、結露、雨漏り、錆、経年劣化、温度変形等が挙げられ、水泳場や温浴施設、駅といった施設での被害が代表的である。2011 年 3 月に発生した東日本大震災では、その被害は約 2000 施設に及び、少なくとも 5 名が死亡、72 名が負傷した。東日本大震災を契機に天井落下被害に対する関心は急速に高まり、産学官がこぞって落下防止対策に尽力している。

新設の天井と既存の天井に対する落下防止対策の考え方は基本的に同様である。ここでは、日本建築学会の「天井等の非構造材の落下事故防止ガイドライン[11]」を参考に既存天井に対する落下防止対策の流れを説明する。既存天井の落下防止対策は、図 1.1 に示すように「人命保護（人命を保護するための対策）」と「機能維持（天井の有する音響性能、断熱性能、意匠性等の機能を維持するための対策）」の 2 つのフェーズに分けられる。安全対策を行うに当たり、まず行わなければならないのは天井落下時の危険度評価である。天井が落下した場合に、人命に危害を及ぼすか否かという天井の危険度を評価することは新設、

1. 序論

既設に関わらず全ての天井に対して必ず行わなくてはならない最優先事項である。

天井材の危険度評価を行った上で危険と判断された天井に対しては後述する 1.1.1 項に示すような対策を取り，確実な人命保護を行わなければならない。また，機能維持の目的からさらに損傷そのものを制御したいという要求がある。これについては付録 C を参照されたい。

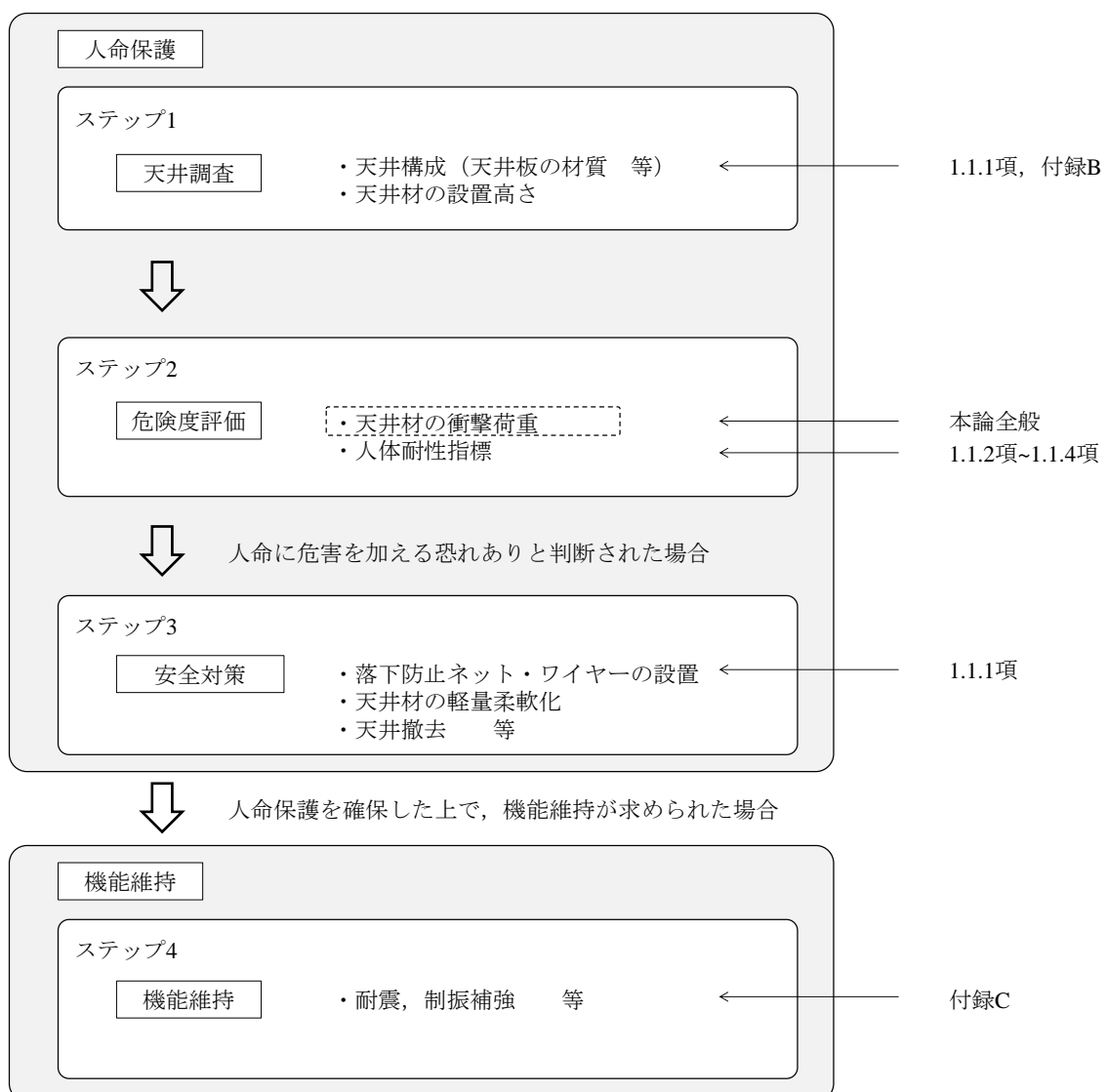


図 1.1 既存の天井に対する落下防止対策の流れ

1.1.1 項では、まず天井の種類や構成、天井落下被害の歴史と対応、落下のメカニズムや落下防止対策といった天井落下被害に関する全般的な事項について概説する。続いて、1.1.2 項及び 1.1.3 項では、天井落下事故における傷害の発生過程や傷害バイオメカニクスの分野で扱われている人体の耐性といった天井落下が人体へ与える影響について述べる。それらを踏まえ、1.1.4 項では、現在利用されている天井材落下時の衝撃力を用いた人命に対する危険度評価法についてその概要を述べ、天井材の衝撃荷重計測における問題を挙げる。最後に 1.1.5 項で、逆問題解析による衝撃荷重の計測法を示し、逆問題解析の必要性を述べる。

1. 序論

1.1.1 天井落下被害とその対策

天井は、意匠性や温熱環境、音響性等の室内環境を改善するために設けられる「非構造部材」である。仕上げ材としての非構造部材は、意匠性、施工性を最優先で発達してきた。

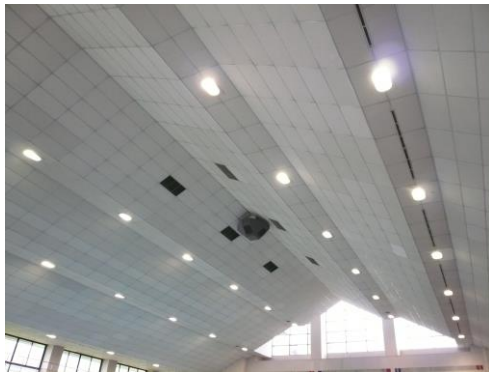
まず、天井の分類（表 1.1）について簡単に述べる。天井は、スラブ下面に直接仕上げをする「直天井」と梁や床スラブの構造躯体から吊り材で吊られた「吊り天井」に大別される。直天井では、下地を用いずスラブ下面に直接仕上げを施す。仕上げには木毛セメント板等の既成の天井板を用いたり、左官による仕上げがなされたりする。吊り天井は、設備機器と天井板の配列を合理的に計画されたシステム天井（グリッド型及びライン型）、軽量鉄骨下地を用いた在来工法天井、その他の工法による天井に分けられる。天井板には規格化された石膏ボード、ロックウール吸音板（軟質繊維板）、スレートボード（繊維強化セメント板）、ケイ酸カルシウム板、金属スパンドレル、木板、膜材等が用いられる。下地の有

表 1.1 天井の分類

天井種類			下地材の構成	代表的な仕上げ材	特徴
直天井			-	モルタル、石膏、木毛セメント板等の既成の板材 等	・スラブ下面に直接仕上げを施した天井。 ・天井を張らないものを直天井と呼ぶこともある。
吊り天井 (数段で構成されることもある)	システム天井	グリッド型	吊りボルト、ハンガー、Tバー、Hバー	グラスウール、ロックウール 等	・設備機器と天井板の配列が合理的に計画されたもの。欧米で一般的に普及している。 ・グリッド型は、格子状に組まれたTバーの上にパネルを載せたもの。 ・ライン型は、Tバーをライン状に設け、その間にパネルを載せたもの。
		ライン型			
	在来工法天井		吊りボルト、ハンガー、野縁受け、クリップ、野縁	ロックウール吸音板 石膏ボード ケイ酸カルシウム板 スレートボード 金属スパンドレル 等	・φ9mm程度の吊りボルトや野縁、野縁受けと呼ばれるC形チャンネルにより構成された下地に各種天井板を留め付けたもの。 ・1枚の天井板を下地に留め付けたものを直張り、直張りの上にロックウール板等仕上げ材を張ったものを捨て張りと呼ぶ。
	その他の工法		木吊りやアルミフレーム 等	膜、木板 等	・上記以外の下地の構成のもの。

以下の天井は、下地の有無や構成に関わらずに用いる仕上げ面の材料から一般的に次のように呼ばれる。

- ・膜天井
- ・メッシュ天井
- ・ワイヤーメッシュ天井
- ・スパンドレル天井



(a) システム天井



(b) 在来工法天井



(c) 膜天井



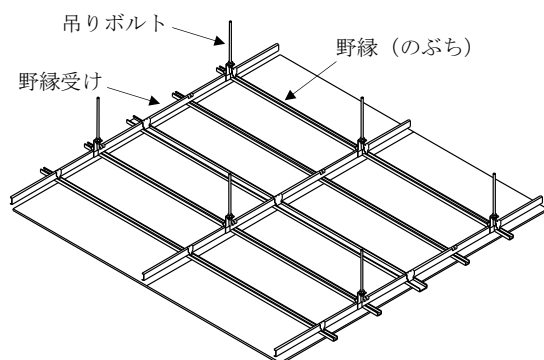
(d) ワイヤーマッシュ天井

図 1.2 天井の例

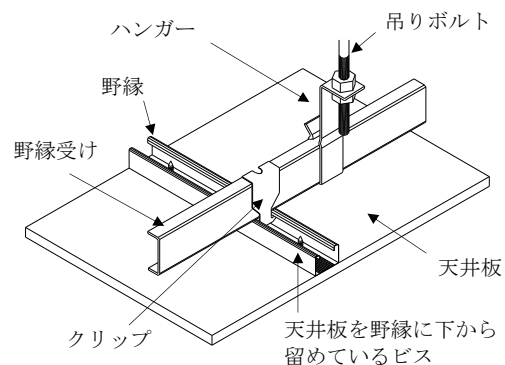
無や構成に限らず仕上げ面の材料から膜天井，ワイヤーマッシュ天井，メッシュ天井，スパンドレル天井といった呼び名もある．上述した天井の例を図 1.2 に示す．

我が国で用いられている主な吊り天井の工法を図 1.3~図 1.8 に示す．最も汎用的な軽量鉄骨下地を用いた在来工法の吊り天井を例に挙げてその構成を紹介する．下地は吊りボルト，ハンガー，野縁受け，クリップ，野縁により構成される．床スラブや梁からインサート金物やクランプ式の吊り金具等を用いて吊りボルトが吊られ，吊りボルトの先端に接続されたハンガーに野縁受けがかけられる．野縁受けと直交方向に野縁がクリップにより接続される．下地が組まれた後，天井板が野縁にビス留めされる．

1. 序論

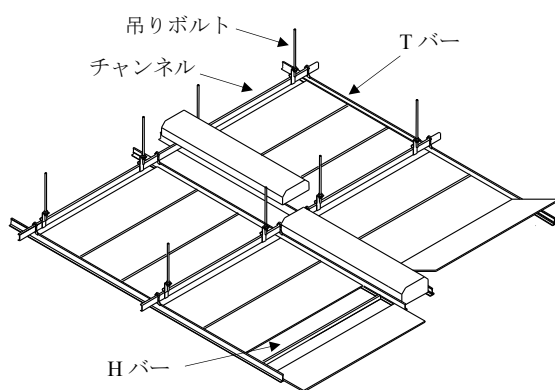


(a) 天井裏からの見下げ図

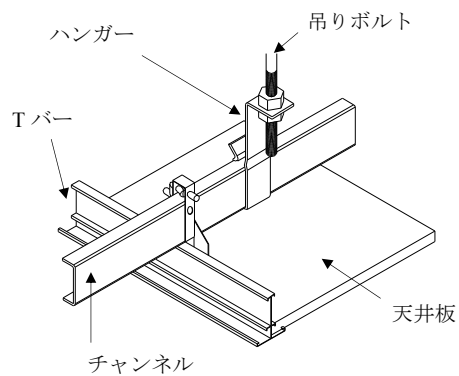


(b) 詳細図

図 1.3 在来工法による軽量鉄骨下地を用いた吊り天井の例

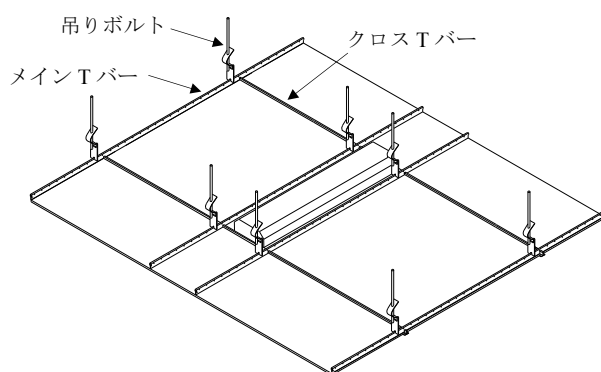


(a) 天井裏からの見下げ図

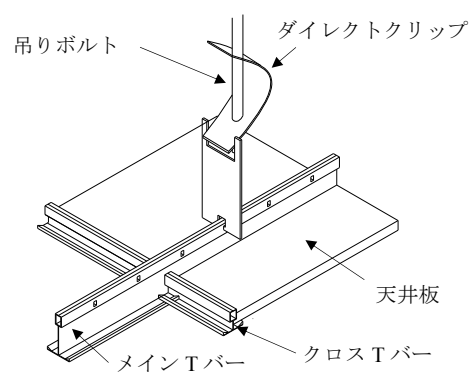


(b) 詳細図

図 1.4 ライン型システム天井の例



(a) 天井裏からの見下げ図



(b) 詳細図

図 1.5 グリッド型システム天井の例

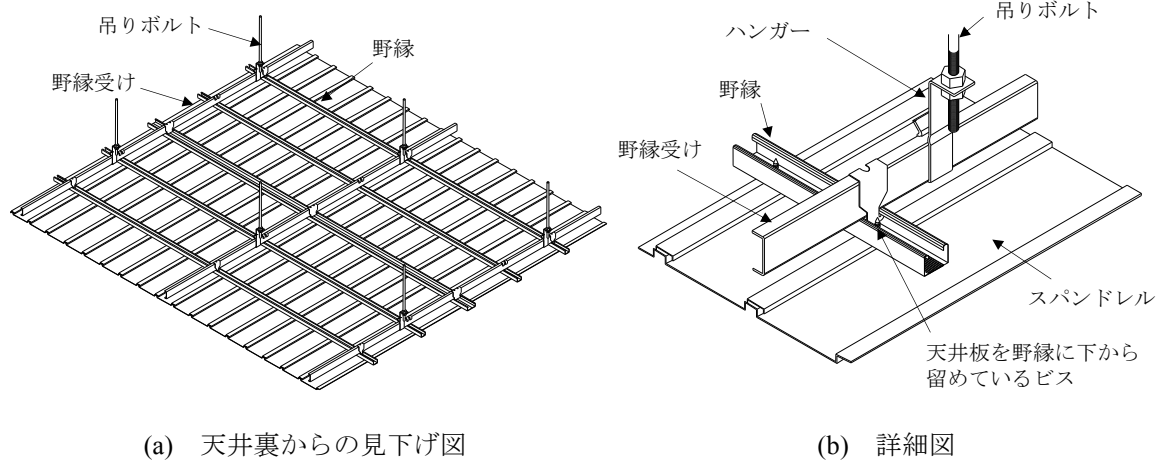


図 1.6 スパンドレル天井の例

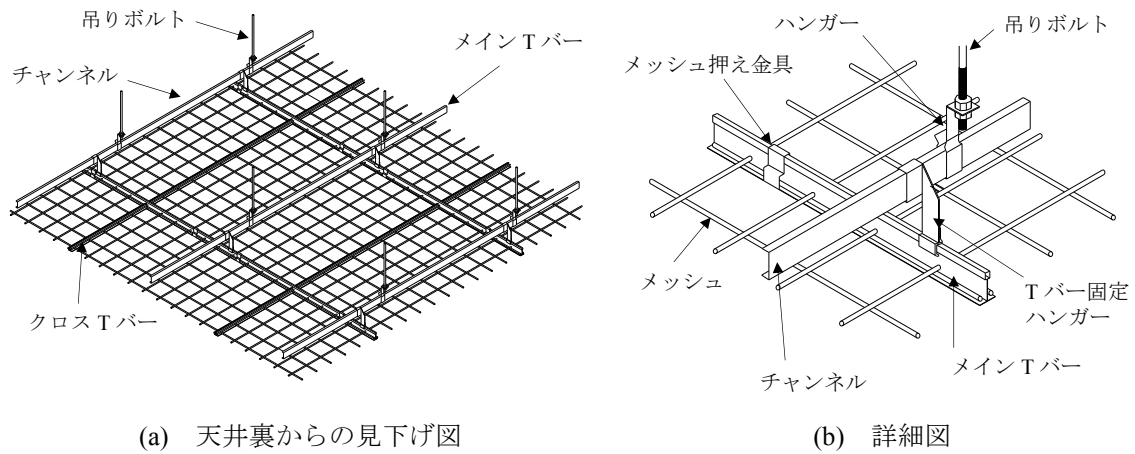


図 1.7 ワイヤメッシュ天井（2段吊り）の例

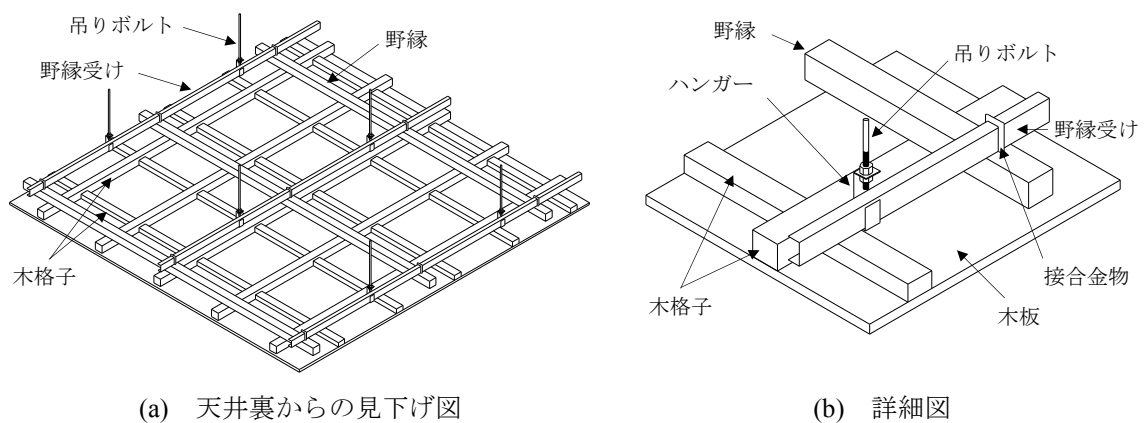


図 1.8 木製下地を用いた吊り天井の例

1. 序論

続いては、代表的な天井落下被害事例を紹介し、それらに対してどのような対策が施されてきたかを概説する（表 1.2）。

我が国においては、著者の知る限り最も古いものは 1923 年 9 月の関東大震災の報告[1]である。漆喰塗の天井の落下等が写真により簡単に報告されている。1950 年 5 月には建築基準法が定められ、天井については、同施行令 39 条で「・・・，内装材，・・・は，風圧並びに地震その他の震動及び衝撃によって脱落しないようにしなければならない。」と，規定されている。1968 年 5 月の十勝沖地震の調査報告[12]では，八戸市役所での天井モルタルの剥離による職員の死亡事故を受け，その施工への注意喚起がされている。1978 年 1 月伊豆大島近海地震では，学校体育館において軽量鉄骨下地を用いた吊り天井の被害が報告された[13]。伊豆大島近海地震に引き続き，1978 年 6 月宮城県沖地震でも天井の被害報告が目立った[14]。この背景として，鉄骨造建物の絶対数が増えたこと，地震を経験していない当時では新しい天井工法である軽量鉄骨下地を用いた工法（現在は在来工法とも呼ばれている）が広く普及したことが挙げられている。この時の落下原因は，クリップの変形，ビスの頭抜け，空調吹出口およびスプリンクラーヘッドとの接触等であり，在来工法天井の典型的な落下原因である。補修直後の天井の落下再発といった在来工法の脆弱性を示す記述も見られる。これらの地震での報告を受け，日本建築学会では，「非構造部材の耐震設計施工指針・同解説および耐震設計施工要領（1985）[15]」が纏められた。1995 年 1 月阪神・淡路大震災の折には，日本建築学会のシェル・空間構造運営委員会により大スパン建築での天井被害が多数報告されている（図 1.9(a)）[16]。構造部材に損傷がなくても建物内部で人命が危険に曝されていること，避難所としての機能が喪失されることなど，天井落下被害の危険性が改めて指摘された。また，在来工法天井の他にもシステム天井に関する被害報告書[17]がロックウール工業会吸音板部会・システム天井耐震検討会から纏められた。2001 年 3 月芸予地震では，天井落下により負傷者が複数発生[18]し，新聞やテレビにおけるマスコミ報道が多くなされたため，同年 6 月に国土交通省から都道府県建築行政担当部長宛て

に技術的助言（国住指第 357 号）を配信するという対応が行われた。その内容の概略は、

1. 重量の大きい天井については、天井面の周辺部と壁面の間にクリアランスを設けること、
2. 吊りボルトが長くなる場合には、吊りボルト相互を補剛材で連結すること、
3. 軽量の天井については、目地材として置かれる T バー等を下地に固定すること、

といったものである。しかし、その後、2003 年 9 月十勝沖地震において釧路市内の空港ターミナルビル出発ロビーの吊り天井が約 300m² に渡り脱落、管制塔内の天井も全面的に落下し釧路空港が機能停止を余儀なくされた[19]。この事故を受け、1. 天井面に凹凸、段差、設備を設ける場合には、天井が一体に動くよう補剛材の配置による剛性の調整を行った上で、周辺にクリアランスを設けるか、剛性の異なる部分相互の間にクリアランスを確保する、2. 既設の施設について天井の点検、改善を行う場合の確認点や改善が困難な場合におけるネットによる落下防止措置の勧告、といった内容を追記した 2 度目の技術的助言（国住指第 2402 号）が国土交通省より同年 10 月に配信された。2004 年 10 月新潟県中越地震では、震度 5 を超えると天井落下被害が発生し始める傾向について指摘されている[20]。2005 年 8 月の宮城県沖地震では、オープン間もない水泳場内の天井が 9 割近く落下し、30 名以上の負傷者が発生した[21]。これを受け、国土交通省から 3 度目の技術的助言（国住指第 1427 号）が同年 8 月に配信された。ここでは、1. 建築確認の際に、設計図書の提出を求め、天井落下防止策が適切にとられているかの確認、2. 中間検査又は完了検査において、天井の工事写真により設計図書通りに施工されているかの検査、が勧告されている。2007 年 3 月能登半島沖地震[22]でも多くの被害が発生した。2008 年 4 月には天井の定期調査が規定された国土交通省告示第 282 号が施行された。告示の中では、概ね 500m² 以上の空間を有する建築物においては、その空間の耐震対策の状況を設計図書等により確認するとともに、必要に応じて双眼鏡等を使用し目視により確認すること等が書かれている。その後も 2008 年 6 月岩手・宮城内陸地震[23]、2008 年 7 月岩手県沿岸北部地震[23]、2009 年 8 月駿河湾沖地震[24]等で天井落下被害が数多く報告されている。2011 年 3 月東北地方太平洋沖地震を契機とした東日

1. 序論

本大震災では、夥しい数の天井落下被害が報告されている[25]. 文部科学省の 2011 年 6 月末の調べでは 1600 棟以上の学校施設で天井落下被害が報告され、同じく 400 以上の学校施設で照明落下などが報告されている. 国土交通省の 2012 年 4 月の調べでは、天井落下施設の数に約 2000 施設に及び、少なくとも 5 名が死亡、72 名が負傷していたとしている. 東日本大震災においても天井落下被害のあった施設は、震度 5 弱以上を観測した地域に分布していることを著者らは確認した[25]. これらの被害を受けて、日本建築学会は「天井等の非構造材の落下事故防止ガイドライン[11]」を取り纏めている. ガイドラインでは、「人命保護」は絶対必要かつ最優先の性能、「機能維持」は建物や施主によって異なるレベルを設定できる二次的な性能として、優先順位を明確に位置付けている. 一方で、国土交通省においては天井の脱落対策に係る基準が新たに定められ、新築建築物等への適合を義務付ける建築基準法施行令及び関連省令の改正(2013 年 7 月公布)並びに関連告示の制定・改正(2013 年 8 月公布)が行われ、平成 26 年 4 月より施行された. この告示は、特定天井(吊り天井であって次の 3 点を満たすもの. 1. 人が日常立ち入る場所に設置されている. 2. 高さが 6m を超える天井の部分で、その水平投影面積が 200m^2 を超えるものを含むもの. 3. 天井面構成部材等の単位面積質量が 2kg を超えるもの.) に対し、中規模地震では、天井の損傷をなくし、大規模地震では、天井脱落の低減を図るというものである. また、文部科学省においても、2013 年 8 月に「学校施設における天井等落下防止対策のための手引き[26]」を纏めている. 手引きには、屋内運動場、武道場、講堂、屋内プールのいずれかを有する学校施設に関しては、原則として全ての施設を総点検及び対策の対象とすることが述べられている. 対策としては、確実な安全確保策として天井撤去を中心とした対策の検討を促している.

再三注意を促すが天井落下被害は、地震時のみならず日常的に発生している. その代表的な被害事例を数例示す. 2005 年 11 月に埼玉県飯能市内のスポーツクラブ内屋内プールにて天井が $10\text{m} \times 25\text{m}$ の範囲でほぼ全面にわたって落下し、プール内にいた 2 名が軽傷を負

った（図 1.9(b)）[2]. 2008 年 1 月には愛知県豊田市内の水泳場にて、約 $4\text{m} \times 20\text{m}$ の範囲で天井板がビスの頭抜けにより脱落した[3]. 2011 年 10 月には岩手県花巻市内の駅の新幹線ホーム側階段上にある天井が約 $3\text{m} \times 9\text{m}$ の範囲で落下した[4]. 2013 年 7 月には静岡県富士市内の水泳場で $5\text{m} \times 60\text{m}$ という範囲で大規模な天井落下[5]が、続いて同月に神奈川県横須賀市内の水泳場でも天井板の落下[6]が発生した. この 2 つの落下被害を受け、天井高 6m 超の部分が面積 200m^2 超ある空間となっている部分の内吊り天井が設置されているもので、建築物の建設後震度 4 以上の地震が観測された建物に対して、天井裏の目視点検の実施、異常があれば落下防止措置等の実施を行うといった内容が、国土交通省から 4 度目の技術的助言（国住指第 1852 号）として同年 8 月に配信された. 水泳場で見られる被害の多くは、湿度や錆により天井板が劣化してビスの頭抜けにより落下するというものである. しかし、静岡県富士市内の水泳場で発生した被害は、ビスの頭抜けでなくクリップの変形によりある日突然落下した. この原因としては、温度変形による繰り返し力によりクリップが変形し落下したと考えられている[5].

天井落下被害は、建築に留まらず、土木でも発生している. 2012 年 12 月には山梨県内のトンネルにおいて重さ約 1.2t ほどのコンクリート板およそ 270 枚が 138m にわたって崩れ落ち、9 名の尊い命が失われた（図 1.9(c)）[7, 8].

また、海外においても天井落下被害は数多く報告されている. 地震被害については、Gilani らの論文にも紹介されているため、ここでは地震のないときに発生した近年の被害事例を 2 例だけ挙げる. 2012 年 10 月にヨルダンのアンマン市内のショッピングモールで、突然天井が落下し 5 名が負傷した（図 1.9(d)）[9]. 2012 年 12 月には、イギリスのロンドン市内の劇場で 720 名もの人が観劇中に天井が落下し、観客ら 76 人が負傷し、このうち 7 人重傷を負った[10].

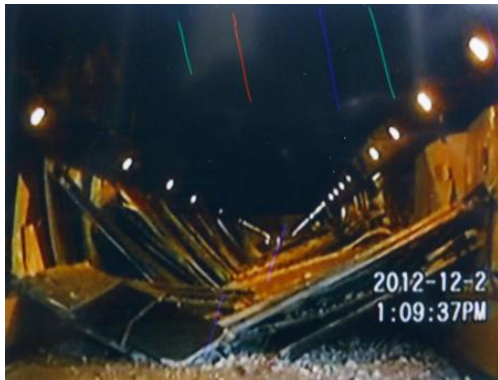
1. 序論



(a) 兵庫, 日本 (1995)



(b) 埼玉, 日本 (2005)



(c) 山梨, 日本 (2012)



(d) Amman, Jordan (2012)

出典：共同通信（山梨県警提供）[8]

出典：Jordan Times[9]

図 1.9 天井落下被害事例

表 1.2 我が国における代表的な天井落下被害及びその対応

年月	災害等	天井被害に関する主な報告	対応
1923年9月	関東大震災	漆喰等の天井被害.	-
1950年5月	-	-	建築基準法施行令39条にて「・・・, 内装材, ・・・は, 風圧並びに地震その他の震動及び衝撃によって脱落しないようにしなければならない。」と規定.
1968年5月	十勝沖地震	天井モルタルの剥落による死亡事故.	1985年5月に日本建築学会により「非構造部材の耐震設計施工指針・同解説および耐震設計施工要領[15]」が纏められる.
1978年1月	伊豆大島近海地震	学校体育館における軽量鉄骨下地を用いた在来工法吊り天井の被害.	
1978年6月	宮城県沖地震	軽量鉄骨下地を用いた在来工法吊り天井の被害.	
1995年1月	阪神・淡路大震災	大スパン建築の天井落下被害やシステム天井の被害.	-
2001年3月	芸予地震	-	同年6月に国土交通省から都道府県建築行政担当部長宛てに技術的助言（国住指第357号）を配信.
2003年9月	十勝沖地震	釧路市内の空港ターミナルビル出発ロビーの吊り天井被害.	同年10月に国土交通省から都道府県建築行政担当部長宛てに技術的助言（国住指第2402号）を配信.
2004年10月	新潟県中越地震	震度5を超えると天井落下被害が発生し始める傾向について指摘.	-
2005年8月	宮城県沖地震	オープン間もない水泳場内の天井が9割近く落下し, 30名以上の負傷者が発生.	同年8月に国土交通省から都道府県建築行政担当部長宛てに技術的助言（国住指第1427号）を配信.
2005年11月	非地震時	埼玉県飯能市内のスポーツクラブ内屋内プールにて天井が10m×25mの範囲でほぼ全面にわたって落下し, プール内にいた2名が軽傷.	-
2008年1月	非地震時	愛知県豊田市内の水泳場にて, 約4m×20mの範囲で天井板がビスの頭抜けにより脱落.	-
2008年4月	-	-	500m ² 以上の空間を有する建築物の天井の定期調査が規定された国土交通省告示第282号の施行.
2007年3月	能登半島沖地震	上記同様の吊り天井等の被害.	-
2008年6月	岩手・宮城内陸地震		
2008年7月	岩手県沿岸北部地震		
2009年8月	駿河湾沖地震		
2011年3月	東日本大震災	文部科学省の2011年6月末の調べでは1600棟以上の学校施設で天井落下被害が報告され, 同じく400以上の学校施設で照明落下などが報告. 国土交通省の2012年4月の調べでは, 天井落下施設の数約2000施設に及び, 少なくとも5名が死亡, 72名が負傷.	2013年3月に日本建築学会により「天井等の非構造材の落下事故防止ガイドライン[11]」が纏められる. 国土交通省により天井の脱落対策に係る基準が新たに定められ, 新築建築物等への適合を義務付ける建築基準法施行令及び関連省令の改正並びに関連告示の制定・改正が行われ, 平成26年4月より施行. 2013年8月に文部科学省により「学校施設における天井等落下防止対策のための手引き[26]」が纏められる.
2011年10月	非地震時	岩手県花巻市内の新幹線ホーム側階段上にある天井が繰り返し風圧変動により約3m×9mの範囲で落下.	-
2012年12月	非地震時	山梨県内のトンネルにおいて重さ約1.2tほどのコンクリート板およそ270枚が138mにわたって崩れ落ち, 9名が死亡.	2013年6月に道路法等の一部を改正する法律が公布（平成25年法律第30号）.
2013年7月	非地震時	静岡県富士市内の水泳場でクリップの変形により5m×60mという範囲で大規模な天井落下.	同年8月に国土交通省から都道府県建築行政担当部長宛てに技術的助言（国住指第1852号）を配信.
		神奈川県横須賀市内の水泳場で金属枠の変形による天井板の落下.	

1. 序論

天井落下の直接的な要因には次の4つが挙げられる(図 1.10). 1. クリップの変形, 2. ビスの頭抜け, 3. ハンガーの変形, 4. 吊りボルトの脱落, である. 最も多く見られる被害は, クリップの変形によるものであり, 特に地震時に多く見られる. クリップが外れることで野縁が付いたまま天井板が落下する. 次に多くに見られるのは, ビスの頭抜けによる被害である. 結露, 雨漏り, 錆, 経年劣化等により発生するため, 水泳場や温浴施設等で日常的に発生している. クリップの変形時とは異なり, 天井板のみが落下する. 被害の頻度では, ハンガーの変形, 吊りボルトの脱落がそれらに続く.



(a) クリップの変形



(b) ビスの頭抜け



(c) ハンガーの変形



(d) 吊りボルトの脱落

図 1.10 落下要因

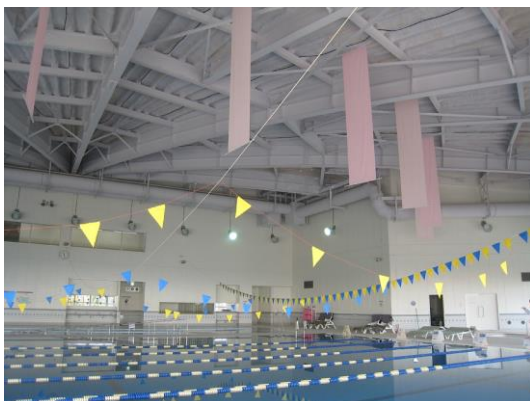
人命に危害を及ぼす危険性を有する天井に関しては、人命保護を達成するため落下を引き起こす本質である重力による鉛直方向の挙動に対して何らかの対策を講じる必要がある。この対策としては、1. 落下防止ネット・ワイヤーの設置、2. 天井の軽量柔軟化、3. 天井の撤去がある。ホール建築の天井のように音響性能を確保するためどうしても重量を必要とする場合を除けば、天井材は仕上げ材であるため、本来であれば軽量柔軟なものを用いることが可能である。天井落下の原因は地震に限らないため、いたずらな耐震補強はかえって天井重量を増して危険性を増大させるだけであり、天井落下防止の本質的な解決にはならない。上記の安全対策の概要をそれぞれ次に記す。



(a) 落下防止ネット・ワイヤーの設置



(b) 天井の軽量柔軟化



(c) 天井の撤去



(d) 天井の耐震・制震化

図 1.11 人命保護(a~c)及び機能維持(d)の例

1. 序論

1. 落下防止ネット・ワイヤーの設置

落下防止ネットは、ネットを天井面の下に張ることで、天井が落下した際に受け止めるというフェイルセーフ機能を有する。ネットを張っても天井が持つ断熱、吸音性能を維持することができるという利点がある。天井落下被害においてクリップの変形の次に多い落下原因であるビスの頭抜けは材料劣化や湿度・雨漏り等によってビスの引張耐力やずれ耐力が低下することで発生することが知られている[27~31]。落下防止ネットを設けると、こうした耐震・制震補強では防ぐことのできないビスの頭抜けに対しても対応できる。また、被災後の応急処置としても有効である。ただし、大面積で天井が落下した場合、荷重をネットの強度のみで負担させることは難しく、補強ケーブルを併用する必要がある[32, 33]。ケーブルネットを天井に緊結し、ケーブル端部を周囲の柱や梁等に固定することで耐震補強も同時に行うというケーブルネット補強法も提案されている[34]。落下防止ネットの課題としては、その意匠性及び施工方法が挙げられる。ネットの初期形状を極小曲面とすることでケーブルにかかる最大軸力を減らすことができるとの報告 [35, 36]があり、曲面の形成は視覚的価値を高める効果もあるためこうした課題に対する一つの解決策と言える。また、落下防止ネットは比較的安価に設計、施工できるという利点があるが、体育館等の天井高が高い場所に設置する際には床の養生や足場の設置が必要となるため工費が上がってしまう。そのため、吊り足場を用いる等の落下防止ネットの利点を損なわない簡易な施工方法が求められる。駅等で多く用いられるスパンドレル天井に対しては、天井材を面で受けるネットではなく、線や点で受ける天井直下に設置した水平材や落下防止ワイヤーによる対策も有効である[37, 38]。

2. 天井の軽量柔軟化

軽量柔軟な素材は、質量が小さいため地震時に入力される慣性力は小さく、変形に対しては追従性を有する。さらに、たとえ落下しても大きな事故に発展しづらいという利点がある。日本科学未来館では、東日本大震災で被災した天井を落ちてでも安全なように膜天井

に改修した[39]。現在では膜材の他にも多くの軽量新素材天井材が開発されつつあり、こうした天井材の普及が望まれる。但し、ホール建築のように音響性能を確保するため天井材に重量が必要となる場合には軽量天井材は適していない。重量の大きい天井材を用いる場合には、準構造化[11]といった対策が別途必要となる。

3. 天井の撤去

天井を撤去すると落下の可能性はなくなるため、人命保護としては確実な方法である。ただし、天井の有している機能（断熱性能や吸音性能、意匠性等）が失われるため、内部空間の使い方を考慮して検討する必要がある。茨城県内の空港では、東日本大震災で天井落下被害が発生し、出発ロビーの天井を全面撤去した[40]。

一度天井落下が発生すると、企業の事業継続性が損なわれるといった問題や被災時には避難所としての機能や避難経路を失うといった問題がある。そのため、人命保護が達成された上でも機能維持の目的から、さらに、損傷そのものを制御したいという要求がある。これについては、本論末尾に設けた付録 C を参照されたい。

1. 序論

1.1.2 天井材の落下及び傷害発生過程

傷害とは、生体力学的応答の結果、生体に回復不可能な変形が生じて解剖学的組織・構造が損傷を受け、正常な機能を果たせなくなることである。人体は力学的、化学的、熱的、電氣的な負荷といった様々な負荷により傷害が発生する。天井落下事故では、力学的な衝撃による傷害が人体に及ぼす影響について扱う。天井落下による傷害発生過程を図 1.12 に示す。

天井の落下メカニズムについては前項で説明したため、ここでは、天井材が落下し始めてからどのように地面まで落ちていくかを実被害時に記録されたビデオ映像を基に紹介する。映像は、2011 年 3 月の東北地方太平洋沖地震により空港内ロビーで発生した天井落下 [40]を偶然にも報道カメラが撮影したもの（表 1.3）である。落下した天井は、軽量鉄骨下地を用いた在来工法の吊り天井であり、落ち方の特徴として挙げられるのは、天井板が野

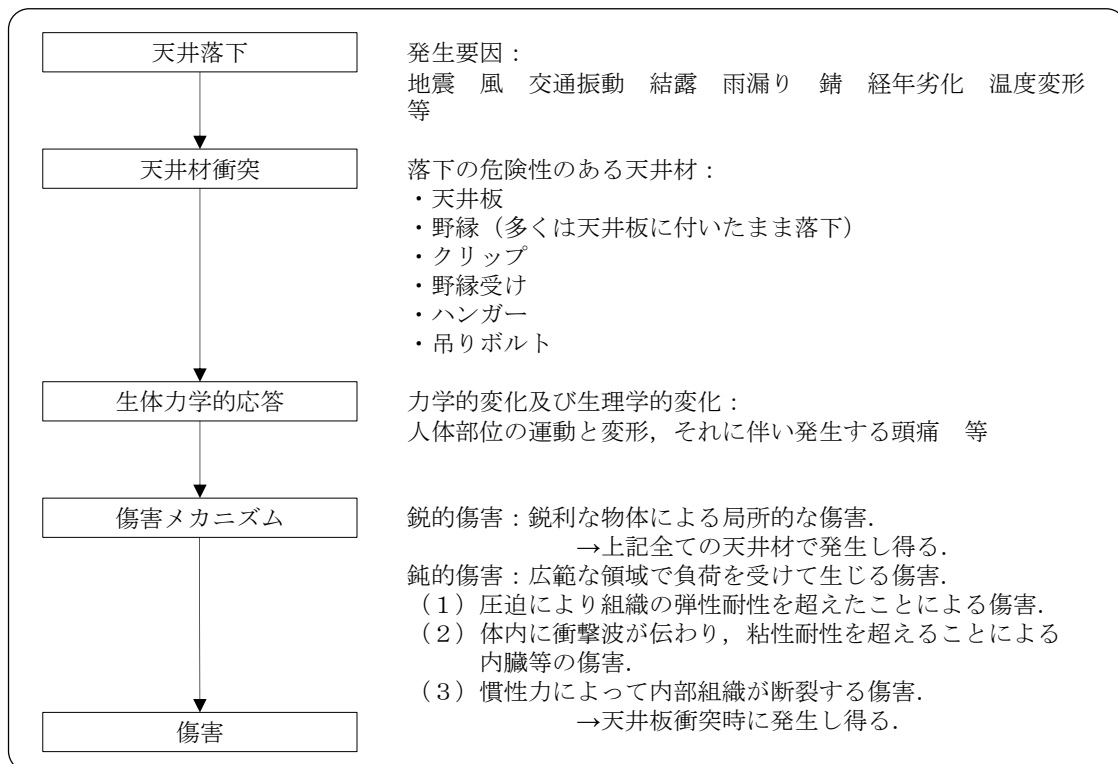


図 1.12 天井落下による傷害発生過程

縁によって連結され、ある程度一体となって落ちてきている点である。地震時には天井面に慣性力が発生し、クリップが変形して脱落に至ることが知られている。ある箇所のクリップが脱落するとそのクリップが負担していた荷重が他のクリップに分配され、荷重に耐えられなくなったクリップが連鎖的に脱落していく。在来工法の吊り天井では連鎖的な脱落挙動を示すため、天井材は水平面に対し角度を持って落ちてくるが、動画のキャプチャーから比較的水平を保っている様子が窺える。天井材の落下の仕方は千差万別であり、まったく同じ落ち方をすることはないと言えるが、天井材の構成や落下のメカニズムから落下の特徴を表 1.4 のように分類することができる。在来工法の吊り天井でも落下を引き起こす原因が地震ではなく結露や雨漏りによる材料劣化の場合は、ビスの頭抜けにより天井板が不整形な形で落下してくる場合が多い。一方、直天井については、接着剤が剥がれて落下に至る場合が多く、どのようなユニットで接着を行っているかで落下物の大きさも落ち方も変わってくる。システム天井に関しては、地震等により天井材が T バーから外れて市販の天井材の大きさのままで落下してくる傾向にある。システム天井で用いられる代表的な天井板は比較的軽量なものが多いため、その落ち方は在来工法天井とは異なり直線的ではなく、空気抵抗を受けて左右に揺れながら落下する場合が多い。

1. 序論

表 1.3 空港ロビー内に設置された吊り天井の落下過程





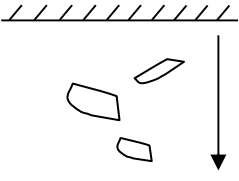
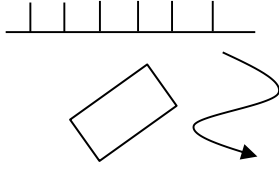
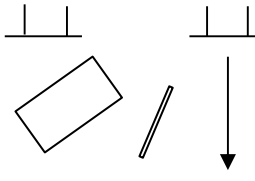
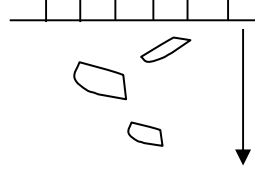
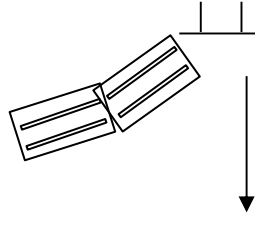
施設	空港ターミナルビル
被災日時	2011 年 3 月 11 日 14:46 （東北地方太平洋沖地震 M9.0）
天井構成	軽量鉄骨下地を用いた在来工法吊り天井
落下物	野縁付き石膏ボード
天井高さ	約 8.3 m
負傷者	なし
ビデオ映像 のキャプチャー ※NHK の 映像より	   

表 1.4 天井構成別の落下物の分類

天井構成	代表的な落下物	落ち方の特徴	
直天井	天井板や左官による仕上げ材		接着剤等の継ぎ目が損傷し、落下に至る場合が多い。落下物の大きさは天井毎で異なる。
システム天井	天井板		天井板は通常 T バーの上に単に載せられているため、T バーから市販のサイズの天井板がそのまま落ちてくることが多い。ガラスウール板等は落下時には空気抵抗を受け、木の葉が落ちてくる様にひらひらと落ちてくる傾向にある。
	H バー、T バー (天井板も共に)		H バー、T バーは空気抵抗をあまり受けずにまっすぐに落ちてくる傾向にある。H バー、T バーが落下することで、天井板も共に落下する傾向にある。
在来工法吊り天井	天井板		結露や雨漏り等により材料劣化が発生することが原因となり天井材が落下するため、市販の天井材に多い矩形の形ではなく、不整形な天井板が落下してくる傾向にある。
	野縁付きの天井板		市販のサイズの天井材が野縁により連結されることで市販の天井材の大きさ (910 mm x 910 mm) を超えてある程度一体となって落ちてくる。空気抵抗は受けるが、天井材が重いため、ひらひらとした挙動ではなくドサッと落ちてくる傾向にある。

1. 序論

1.1.3 人体の傷害メカニズムと傷害耐性[41~43]

人体耐性に関する研究は、主に自動車事故を対象として研究が進められている傷害バイオメカニクス（インパクトバイオメカニクスとも呼ばれる）の分野で発展してきた。その分野では、傷害の定義に始まり、傷害メカニズムの解明、衝撃応答の同定、傷害閾値の定量化、傷害リスクの低減方法の開発等が行われてきた。傷害の程度は、傷害の重傷度または傷害程度によって表現される。傷害の種類と重症度は傷害スケールによって数値的に表現されている。傷害バイオメカニクスの分野では、種々の傷害スケールの中でも簡易傷害スケール（Abbreviated Injury Scale : AIS）[44]（表 1.5）が最も良く用いられている。

表 1.5 人体部位による AIS の例[43]

AIS	頭部	胸部	腹部及び骨盤 内臓器	脊椎	四肢あるいは 骨盤
1 : 軽傷	頭痛またはめまい感	1 本の肋骨骨折	腹部壁の表在性裂創	捻挫（骨折、脱臼なし）	足趾骨折
2 : 中傷等	1 時間未満の意識喪失 線状骨折	2-3 本の肋骨骨折 胸骨骨折	脾臓、腎臓または肝臓の裂傷または挫傷	脊髄損傷を伴わない軽度の骨折	脛骨、骨盤、膝蓋骨の単純骨折
3 : 重傷	1-6 時間の意識喪失 陥没骨折	4 本以上の肋骨骨折 血胸または気胸を伴う 2-3 本の肋骨骨折	脾臓または腎臓の著しい裂傷	神経根損傷を伴う椎間板損傷	膝関節部脱臼 大腿骨骨折
4 : 重篤	6-24 時間の意識喪失 開放骨折	血胸または気胸を伴う 4 本以上の肋骨骨折 動揺胸郭	肝臓の著しい裂傷	不完全脊髄麻痺	膝から上の切断または挫滅 骨盤挫滅（閉鎖性）
5 : 瀕死	24 時間を超える意識喪失 100 cc 以上の頭蓋内血腫	大動脈の裂傷	腎臓、肝臓、結腸破裂	四肢麻痺	骨盤挫滅（開放性）

人体の耐性について表現する際には、次の用語が用いられる。

傷害値	： 重症度と相関のある物理量（加速度，力の大きさ等）
傷害基準	： 傷害値からなる関数
傷害耐性	： 傷害発生の閾値を示す傷害値または傷害基準
傷害基準値	： ある重症度レベルに対応する傷害値
許容値	： 法規等で定められる傷害値の上限

傷害バイオメカニクスの分野において提案されてきた人体の代表的な部位の傷害耐性を表 1.6 に纏める。傷害耐性の提案においては、各部位の傷害メカニズムに対応した傷害値が用いられている。これらの傷害耐性は、交通外傷による傷害を対象として提案されたものもあり、天井落下による傷害メカニズムに対応するかについては判断を要する。

人体の部位の中でも頭部については、しばしば中枢神経が回復不能な損傷を受けるため、衝突状況下の傷害で最も重要な部位と考えられている。各部位の耐性に関する詳細な説明は他の専門書に譲り、ここでは天井落下事故で最も重要視される頭部外傷と傷害耐性についてその詳細を記述する。

まず、頭部の構成について簡単に述べる。頭部は外側から皮膚（頭皮）、頭蓋（脳頭蓋、顔面頭蓋）、髄膜（脳膜）、脳によって構成される（図 1.13）。皮膚は 5~7 mm の厚みを持ち、皮膚、緻密結合組織、髄膜層、疎性結合組織、頭蓋骨膜の 5 層から成る。頭皮に引張力が作用すると、外側の 3 層（皮膚、緻密結合組織、髄膜層）が一体となり動く。頭蓋は、22 個の骨から成り、脳を収めて脳を守る頭蓋腔を作る脳頭蓋（前頭骨、頭頂骨（2 個）、側頭骨（2 個）、後頭骨、蝶形骨、篩骨：計 8 個）と、顔面頭蓋（鼻骨（2 個）、上顎骨（2 個）、頬骨（2 個）、下顎骨、涙骨（2 個）、口蓋骨（2 個）、下鼻甲介（2 個）、鋤骨：計 14 個）により構成される（図 1.14(a)）。頭蓋骨は断面がサンドイッチ構造になっており、外側と内側の緻密質が間の海綿質によって結合されている。緻密質は、ほとんど隙間がなく骨組織の最も強い形態であり、保護や支持といった負荷に耐える役割を有する。海綿質は、不規則

1. 序論

表 1.6 各部位における傷害耐性

人体 部位	傷害値	傷害基準や 許容値の名称 または提案者	内容
頭部	並進加速度	WSTC(Wayne State Tolerance Curve)	頭部有効加速度の時間依存関数が定められており、これより小さければ線状骨折（脳震盪）は発生しないとされている。
		SI(Severity Index)	WSTC に加速度波形の積分の概念を導入したもの。 $SI = \int_0^T a(t)^{2.5} dt$ $a(t)$: 三軸合成加速度 [G], T : 衝撃持続時間 [s], t : 時間 により計算された値に対して、前面衝突時では 1000, 接触を伴わない場合は 1500 を閾値としている。
		HIC(Head Injury Criterion)	$HIC = \left\{ (t_2 - t_1) \left[\frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} a(t) dt \right]^{2.5} \right\}_{\max}$ t_1, t_2 ($t_1 < t_2$) は HIC が最大を取る値。従来 $t_2 - t_1$ の最大値としては便宜上 36 ms が用いられてきたが、近年では頭蓋骨骨折との相関が高い 15 ms が用いられることが多い。閾値は、一般に 1000 が用いられる。
		ECE(Economi c Commission for Europe) R94	持続時間 3 ms 以上の頭部加速度が 80 G 以下。
	角速度, 角加速度	Ommaya, Hirsh による 提案	脳震盪の閾値として, 角加速度 1800 rad/s ² , 角速度 70 rad/s が示されている。
		Lowehielm に よる提案	脳挫傷の閾値として, 角加速度 4500 rad/s ² , 角速度 70 rad/s が示されている。
	角速度, 角 加速度, 脳 のひずみ	Margulieds に よる提案	角加速度, 角加速度と脳のひずみの関係が定められており, 脳のひずみ 5%以下では損傷がなく, 5~10%では脳震盪, 10%を超えるとびまん性軸索損傷の発生が予測される

			としている.
	並進加速度, 角加速度	Newman による提案	<p>脳損傷閾値として,</p> $G(t) = \left[\left(\frac{a(t)}{a_c} \right)^n + \left(\frac{\ddot{\alpha}(t)}{\ddot{\alpha}_c} \right)^m \right]^{1/s}$ <p>$a(t)$, $\ddot{\alpha}(t)$ はそれぞれ並進加速度と角加速度. n, m, s は実験的な定数. $a_c(t)$ と $\ddot{\alpha}_c(t)$ は加速度の臨界値 (耐性) を表している.</p>
	最大荷重	Nahum らによる提案	<p>最大衝撃荷重の閾値として 1968 年に,</p> <p>< 男性 > 前頭骨 : 1100 lbs (≒ 4900 N) 側頭頭頂骨 : 550 lbs (≒ 2450 N) 頬骨 : 225 lbs (≒ 1000 N)</p> <p>< 女性 > 前頭骨 : 900 lbs (≒ 4000 N) 前頭骨 : 450 lbs (≒ 2000 N) 前頭骨 : 200 lbs (≒ 900 N)</p> <p>が示され, 1975 年に,</p> <p>< 男女 > 前頭骨 : 800-1600 lbs (≒ 3550-7100) 頬骨-頬骨体 : 200-650 lbs (≒ 900-2900) 頬骨-頬骨弓 : 200-400 lbs (≒ 900-1800) 下顎骨-歯槽突起 : 550-900 lbs (≒ 2450-4000) 下顎骨-側面 : 300-750 lbs (≒ 1350-3350) 上顎骨 : 150-300 lbs (≒ 650-1350)</p> <p>が示された.</p>
頸部	後頭頸まわりのモーメント, 頭部の角度	Mertz, Patrick による提案	傷害を発生させる後頭頸まわりのモーメントと頭部の角度の関係が屈曲, 伸展運動それぞれに関して定義された.
	頸部の軸方向の圧縮力・引張力, せん断力	FNIC, ECE R94	頸部の軸方向の圧縮, 引張, せん断の持続時間関数が提案された.
	後頭頸で計測された軸力と曲げモーメントの組み合わせ	N_{ij} , FMVSS(Federal Motor Vehicle Safety Standards)	<p>AIS2 以上の損傷を評価するための指標であり,</p> $N_{ij} = \frac{F_z}{F_c} + \frac{M_y}{M_c}$ <p>F_z : 軸力, M_y : 屈曲, 伸展の曲げモーメント, F_c, M_c : 荷重とモーメントがそれぞれの軸と交わる切片</p>

1. 序論

		208	で計算された値に対して，傷害閾値は1である．
	胸椎に対する頭部重心の相対速度と相対加速度の関数	NIC	$NIC = 0.2 \times a_{rel} + v_{rel}^2$ a_{rel} : 胸椎 (T1) と後頭顆間接の間の水平方向相対加速度 v_{rel} : 胸椎 (T1) と後頭顆間接の間の水平方向相対速度 で計算された値に対して，むち打ち損傷は 15 m/s ² である． 衝撃開始後 150 ms まで適用可能．
	せん断力， 曲げモーメント	N _{km}	後突時の頸部損傷を評価するための指標であり， $N_{km} = \frac{F_x}{F_{int}} + \frac{M_y}{M_{int}}$ M_y : 屈曲，伸展の曲げモーメント 添字 int : 荷重とモーメントの切片を表す で計算された値に対して，傷害閾値は1である．
胸部	胸たわみ	Kroell による 提案	胸部傷害の閾値は，胸たわみがエアバックによる分布荷重の場合は 63 mm，シートベルトによる局所的な荷重の場合は 50 mm である．
	並進加速度		胸椎 (T4) で計測される胸部合成加速度 (3 ms 持続) の閾値は 60 G とされている．
骨盤	荷重	Cesari, Ramet による提案	骨盤骨折の閾値は， $F = 193.85M_c - 4710.6 \text{ [N]}$ M_c : 体重 [kg] により計算された値に対して，成人男性 (体重 75 kg) の場合は 10 kN，成人女性 (体重 45 kg) の場合は 4.0 kN となる．
下肢	荷重	FMVSS 208	膝関節，大腿骨，骨盤骨折の傷害基準として，大腿骨の圧縮荷重が用いられており，その閾値は 10 kN である．
		FFC(Femur Force Criterion)	大腿骨の圧縮荷重の時間依存関数を定めており，これより小さければ膝蓋骨，大腿骨，骨盤の骨折は発生しないとされている．
	変位	ECE R94	膝関節の後十字靱帯損傷の閾値として，膝変位 (大腿部と下腿部の相対変位) 15 mm が採用されている．

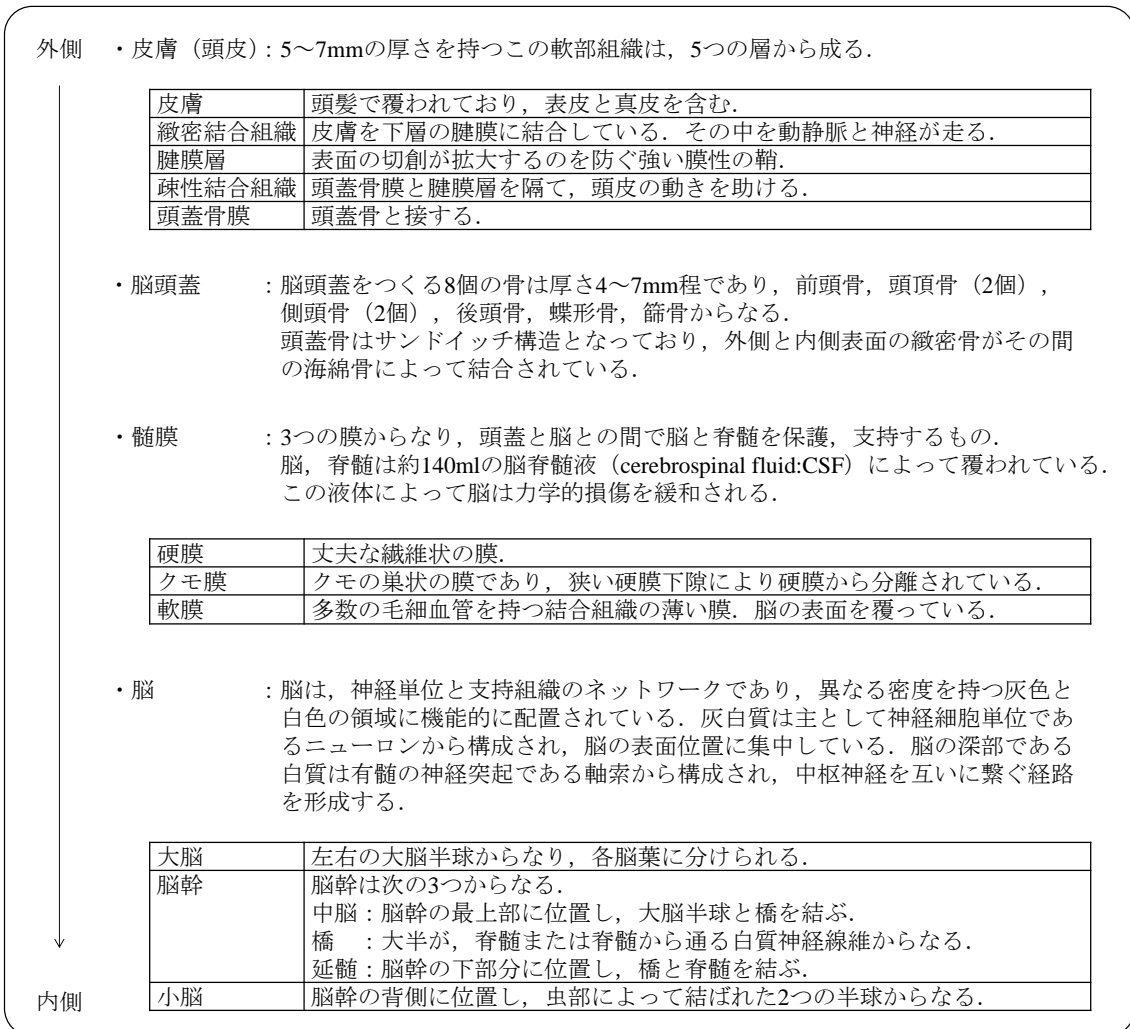
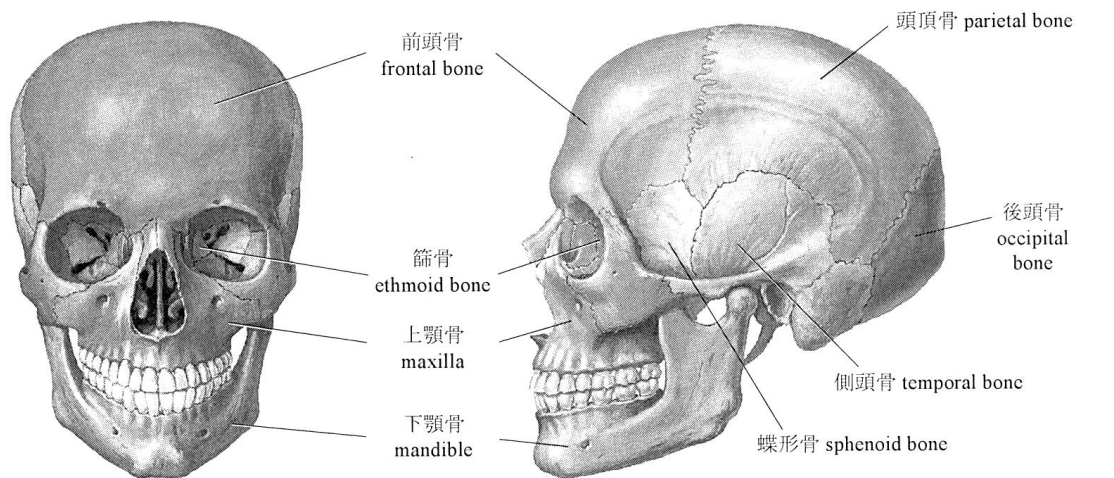


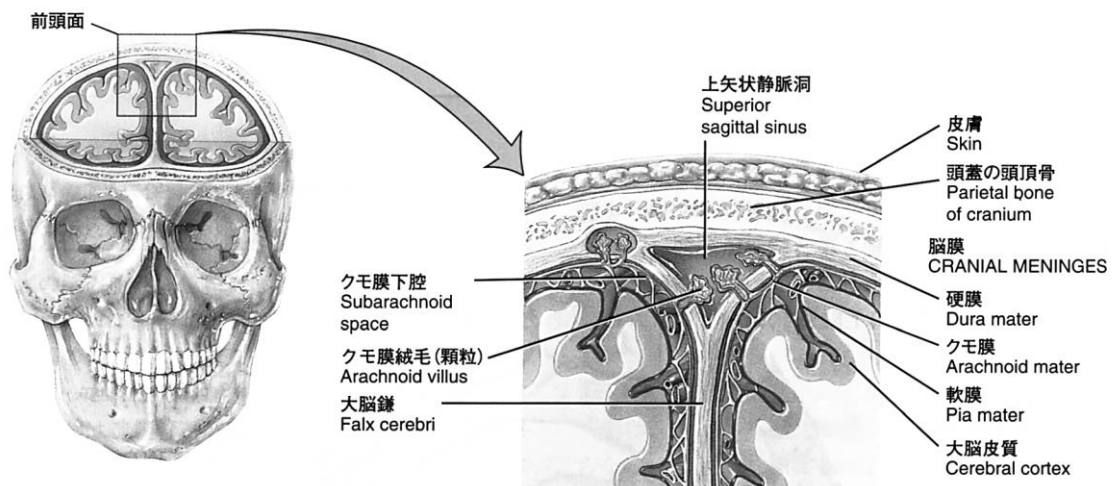
図 1.13 頭部構成

な格子状の骨の細い柱の骨小柱でできており、緻密質に比べて軽く柔らかい構造となっている。髄膜は、脳を保護する被膜であり、外側から、硬膜、クモ膜、軟膜により構成される（図 1.14(b)）。脳、脊髄は約 140 ml の脳脊髄液（cerebrospinal fluid:CSF）によって覆われている。この液体によって脳は力学的損傷を緩和される。脳は、大脳、間脳、脳幹、小脳の4つの主要部位から成る（図 1.14(c)）。脳幹は脊髄の続きであり、延髄、橋、中脳から成り、間脳は、視床、視床下部、視床上部から成る。大脳は間脳と脳幹に支えられ、脳の大部分を占める。

1. 序論



(a) 頭蓋[43]



(b) 頭蓋の断面[41]

図 1.14 頭部解剖学

次に、頭部傷害及びその発生メカニズムについて述べる。頭部傷害は図 1.15 のように分類できる。頭部傷害は大きく頭蓋と脳の傷害に分けられる。頭蓋の傷害については、次のような傷害が代表的である。

・顔面外傷

顔面外傷の重大な外傷には、上顎骨の骨折、眼窩周囲の開放骨折、転位骨折、粉碎骨折が重傷であり、特に上顎骨の骨折はル・フォー骨折として知られている。

・頭蓋骨骨折

頭蓋底骨折と頭蓋冠骨折に分けられる。頭蓋冠骨折は、更に線状骨折と陥没骨折に分けられる。骨折自体は生命に危険はない。線状骨折の場合は脳損傷に対してもそれほど重要ではなく可逆的な損傷（元通りに治る）であるが、陥没骨折（骨の変位が伴う骨折）が発生した場合は、神経損傷や頭蓋内血腫を伴い生命に危険がある。

一方、脳の傷害については、次のような傷害が代表的である。

・局所性脳損傷

硬膜外血腫（頭蓋骨直下の髄膜の血管の損傷である。発生頻度は低く死亡率は併発する損傷に依存する。）、硬膜下血腫（大腦表層と硬膜静脈洞の間をつなぐ橋静脈の裂傷である。予後に危険があり、その死亡率は 35%を超えるとされている。）、脳内血腫（脳内での均一な血液の貯留である。血腫のより顕著な局所化により脳挫傷と区別される。クモ膜下出血がその代表であり、死亡率は、6%~72%と幅がある。）、皮質挫傷（脳損傷及び血管損傷の混在したものである。頭部衝撃で最も頻度が高く、衝撃側（直達挫傷）または衝撃から離れた場所（対局挫傷）で発生する。硬膜外血腫や硬膜下血腫、頭蓋骨骨折といった他の損傷と併発する頻度が高く、死亡率は 25~60%といわれている。）がある。

・びまん性脳損傷

脳が広い範囲にわたって損傷を受けるものであり、次の2つの損傷形態がある。1つ目は、脳震盪（一時的な神経的機能傷害である。軽症脳震盪と古典的脳震盪がある。軽症脳震盪は、錯乱状態、自己の状況が理解できなくなる見当識傷害、軽度の記憶喪失、15 分以内の意識喪失であり、完全に回復するものである。古典的脳震盪は、24 時間未満続く一時的な意識喪失であり、完全に回復するものである。臨床的な予後は、併発する外傷に依存する）である。2つ目のびまん性軸索損傷（意識喪失が 24 時間以上）は、大腦白質繊維のせん断による破壊であり、脳幹機能障害を伴う。完全な回復は 30%に過ぎない。

1. 序論

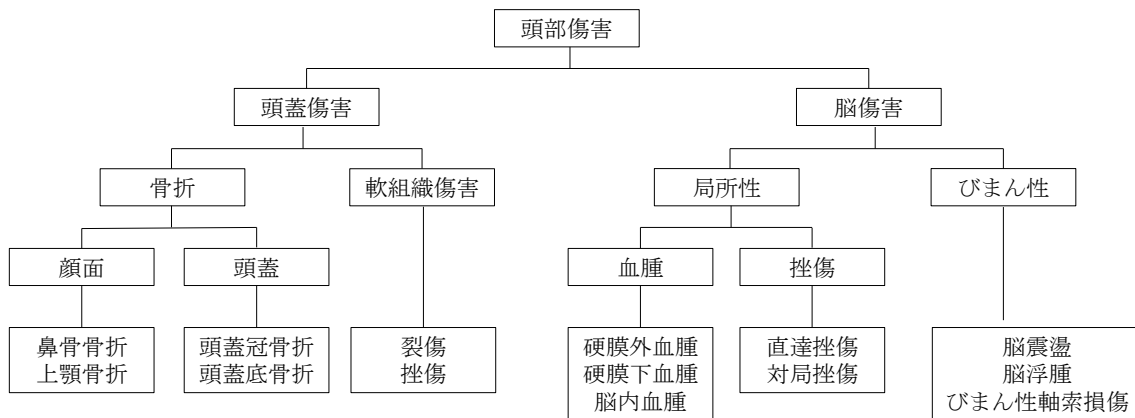


図 1.15 頭部傷害の分類[43]

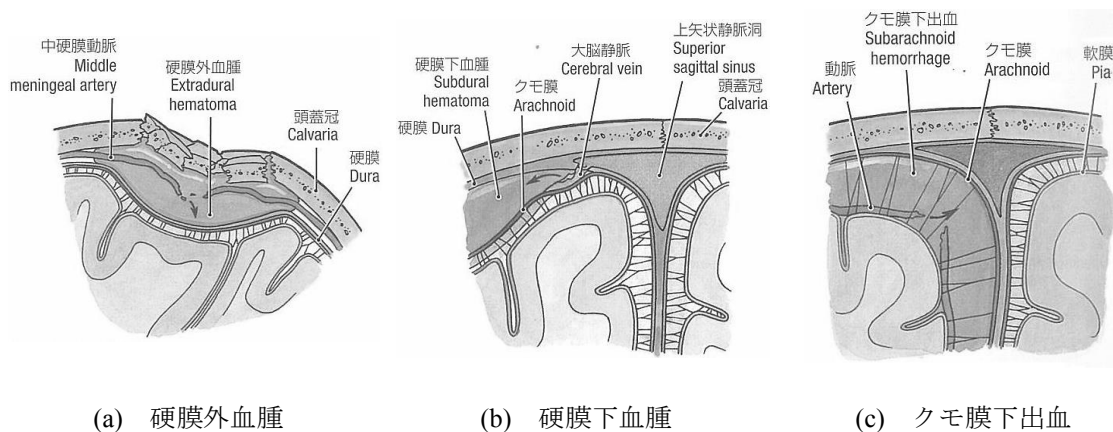


図 1.16 局所性脳損傷[45]

傷害メカニズムは、図 1.17 に示すように接触傷害（局所的接触効果、遠隔接触効果）と慣性傷害に分けられる。

接触傷害とは、接触による衝撃で発生し、頭部運動を必ずしも伴わない傷害である。接触障害は、局所的接触効果により衝撃場所で発生する傷害と遠隔接触効果により衝撃場所から離れた場所で発生する傷害に分けられる。局所的接触効果では、頭皮損傷、頭蓋骨折、硬膜外血腫、直達挫傷が発生する。硬膜外血腫は、頭蓋骨骨折がない場合でも頭蓋の内側への曲げ変形によって生ずることがある。直達挫傷は、衝撃部位の直下で起こる血管と脳の損傷が混在したものであり、頭蓋の内側への曲げ変形、陥没骨折による圧縮ひずみ、

接触障害

接触により発生し、頭部運動を必ずしも伴わない傷害。

局所的接触効果： 頭皮損傷，頭蓋骨骨折，硬膜外血腫，直達挫傷が発生。

遠隔接触効果： 頭蓋冠骨折，頭蓋底骨折，対局挫傷が発生。

慣性傷害

：3軸並進加速度と回転加速度によって発生する傷害で硬膜下血腫やびまん性脳損傷の最も重要な要因であると考えられている。

図 1.17 傷害メカニズムの分類

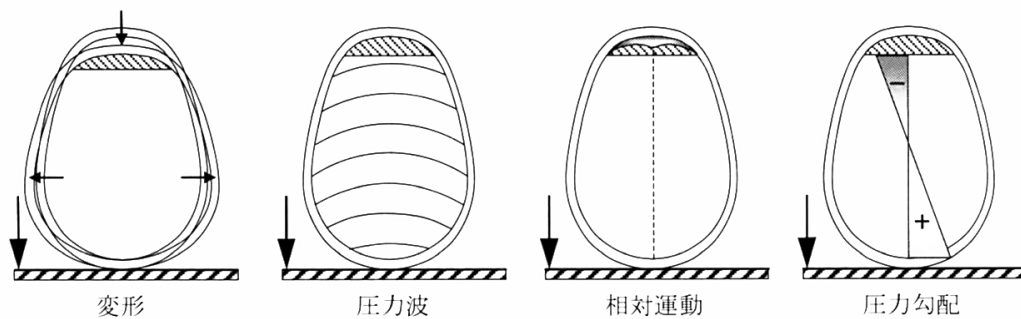


図 1.18 接触による傷害メカニズム[43]

頭蓋骨の反発による引張ひずみにより発生する。遠隔接触効果では、衝撃場所から離れた位置で頭蓋冠骨折，頭蓋底骨折，対局挫傷が発生する。接触荷重によって頭蓋と脳内に圧力波が生じ，頭蓋と脳の相対変位によって脳内に圧力勾配ができることで直達挫傷と対局挫傷それぞれが発生する（図 1.18）。但し，これは自動車事故における前面衝突や左右からの衝突時の傷害メカニズムを解明したものであり，直上からの衝撃に対してどのような障害メカニズムとなるかはわかっていない。

一方，慣性傷害とは，並進加速度と回転加速度（角加速度）による発生する傷害である。並進慣性力によって引き起こされる直達挫傷と対局挫傷，並進負荷による局所性損傷（脳内血腫や硬膜下血腫等）が生じる。回転加速度は，脳内に引張応力とせん断応力を生じ，脳震盪を引き起こす危険が示されている。さらに，重症傷害である硬膜下血腫とびまん性脳損傷を引き起こす最も重要な要因とも言われている。

1. 序論

最後に、頭部の傷害耐性（表 1.6）について述べる．頭部の耐性についての研究は、19 世紀中頃から海外においてバイオメカニクス分野で大きく発展してきた[46~50]．

傷害値として並進加速度に着目した研究には次のようなものがある．1958 年頃から Wayne State 大学で実施された研究[51]では、頭部を鉄板に落下させ、頭部並進加速度と骨折の有無が記録された得られたデータから人間の頭蓋骨線状骨折（脳震盪の発生と強い相関がある）を示す曲線（Wayne State Tolerance Curve : WSTC）が提案された．頭部有効加速度の時間依存関数が定められており、これより小さければ線状骨折（脳震盪）は発生しないとされている．頭蓋骨の線状骨折は AIS2：中傷等にあたり、速やかに回復する軽傷で済むかの一つの基準となっている．WSTC を両対数でプロットし、直線近似すると、

$$2.5 \log \bar{a} + \log \Delta t = 3 \quad (1.1)$$

となり次式のように書き換えることができる．ここで、 \bar{a} ：平均加速度 [G]、 Δt ：衝撃持続時間 [s]である．

$$\bar{a}^{2.5} \Delta t = 1000 \quad (1.2)$$

Gadd は(1.2)式を積分することで衝撃持続時間中の加速度の変化を考慮した Severity Index : SI を提案している[52]．

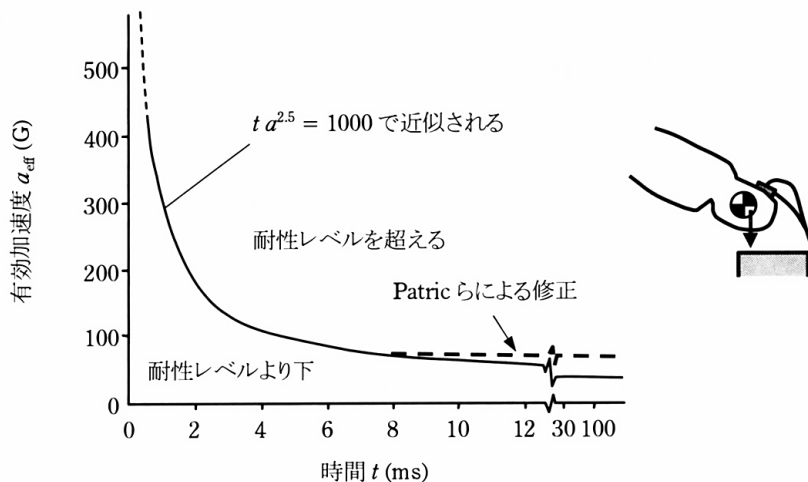


図 1.19 Wayne State Tolerance Curve : WSTC[43]

$$SI = \int_0^T a(t)^{2.5} dt \quad (1.3)$$

ここで、 $a(t)$: 三軸合成加速度 [G], T : 衝撃持続時間 [s], t : 時間 [s]である. (1.3)式により計算された値に対して、前面衝突時では 1000、接触を伴わない場合は 1500 を閾値としている. 米国運輸省道路交通安全局 (National Highway Traffic Safety Administration : NHTSA) は、衝撃持続時間の長さを考慮した Head Injury Criterion : HIC[53]を提案した.

$$HIC = \left\{ (t_2 - t_1) \left[\frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} a(t) dt \right]^{2.5} \right\}_{\max} \quad (1.4)$$

t_1, t_2 ($t_1 < t_2$) は HIC が最大を取る値. 従来 $t_2 - t_1$ の最大値としては便宜上 36 ms が用いられてきたが、近年では頭蓋骨骨折との相関が高い 15 ms が用いられることが多い. 閾値は、一般に 1000 が用いられる. 平均加速度と作用時間に着目した評価法は他にもいくつか提案されている[53~57]が、HIC は頭部傷害基準として自動車事故等で最も広く一般的に利用されているものである. また、欧州経済委員会による基準 94 項 (Economic Commission for Europe : ECE Regulation 94) 「前面衝突時における乗員の保護」においては「衝突時の頭部の加速度が 80G 以下 (持続時間 3 ms 以上)」が規定されている[58].

傷害値として角速度、角加速度に着目した傷害耐性としては、Ommaya と Hirsh により脳震盪の閾値として提案された角加速度 1800 rad/s^2 、角速度 70 rad/s が、Lowehiellm により脳挫傷の閾値として提案された角加速度 4500 rad/s^2 、角速度 70 rad/s が代表的である.

傷害値として衝撃荷重に着目した研究は 20 世紀中頃から Hodgson, swearingen, Gurdjian らにより行われている[59~68]. 傷害耐性についての提案は Nahum らにより 1968 年、1975 年のそれぞれで行われている[69, 70]. 1968 年に行われた研究の詳細を述べる. Nahum らは 55~81 歳の男性 4 名と女性 6 名の屍体の頭蓋骨に 1 sq in. (2.54 cm^2) のインパクトを落下させてインパクト先端に取り付くロードセルで衝撃荷重を計測し、その上で骨折の発生状況を精査した. 頭蓋骨や顔面骨は左右対称に近いので、左右で異なるパラメータを用いて実験は行われた. パラメータは、死亡時の年齢、病歴、性別、防腐処理の有無、軟組織の影響

1. 序論

響，骨格の特徴，衝撃時間履歴（衝撃継続時間，载荷速度，最大荷重，減衰）であり，打撃箇所は前頭骨，側頭頭頂骨，頬骨，下顎である．頭部は首との境で切り離されており，実験の大部分では気泡入りの柔らかいゴム材により支持されている．上述した実験を基に Nahum らは臨床的に重要な骨折荷重の閾値として次の傷害耐性を示した．

＜男性＞ 前頭骨 : 1100 lbs (≒4900 N)

側頭頭頂骨 : 550 lbs (≒2450 N)

頬骨 : 225 lbs (≒1000 N)

＜女性＞ 前頭骨 : 900 lbs (≒4000 N)

前頭骨 : 450 lbs (≒2000 N)

前頭骨 : 200 lbs (≒ 900 N)

臨床的に重要な骨折とは，微細なものではなく，目に見えて明らかな線状骨折のことを指す．これは，AIS2（中傷等：1 時間未満の意識喪失，線状骨折）に当たり，既述した通り可逆的な傷害（後遺症なく速やかに元へ戻る）を許容する傷害レベルを示している．同様の実験が 1975 年にも行われ，そこでは次のような幅を持った傷害耐性が示された．

＜男女＞ 前頭骨 : 800-1600 lbs (≒3550-7100 N)

頬骨-頬骨体 : 200-650 lbs (≒ 900-2900 N)

頬骨-頬骨弓 : 200-400 lbs (≒ 900-1800 N)

下顎骨-歯槽突起 : 550-900 lbs (≒2450-4000 N)

下顎骨-側面 : 300-750 lbs (≒1350-3350 N)

上顎骨 : 150-300 lbs (≒ 650-1350 N)

一般的に耐性値は個人差が大きく，定量的な評価には大きな幅を伴う．また，同じ衝撃荷重でもインパクトの衝突時の接触面積によって頭部に発生する応力は変わるため応力で評価すべきとの見方もある．しかし，人体実験は倫理的な問題もあり，応力レベルでの提案は数値解析上でしか行われていない[71, 72]．Nahum らの提案した閾値は，他の研究者が異

なるサイズのインパクトを用いて行った頭蓋骨衝撃実験[73~84]で得られた骨折荷重の中でも下限値を示しており、現状では閾値として適当な値であると考えられている[85]。また、



図 1.20 衝撃箇所 (Nahum ら, 1968) [69]

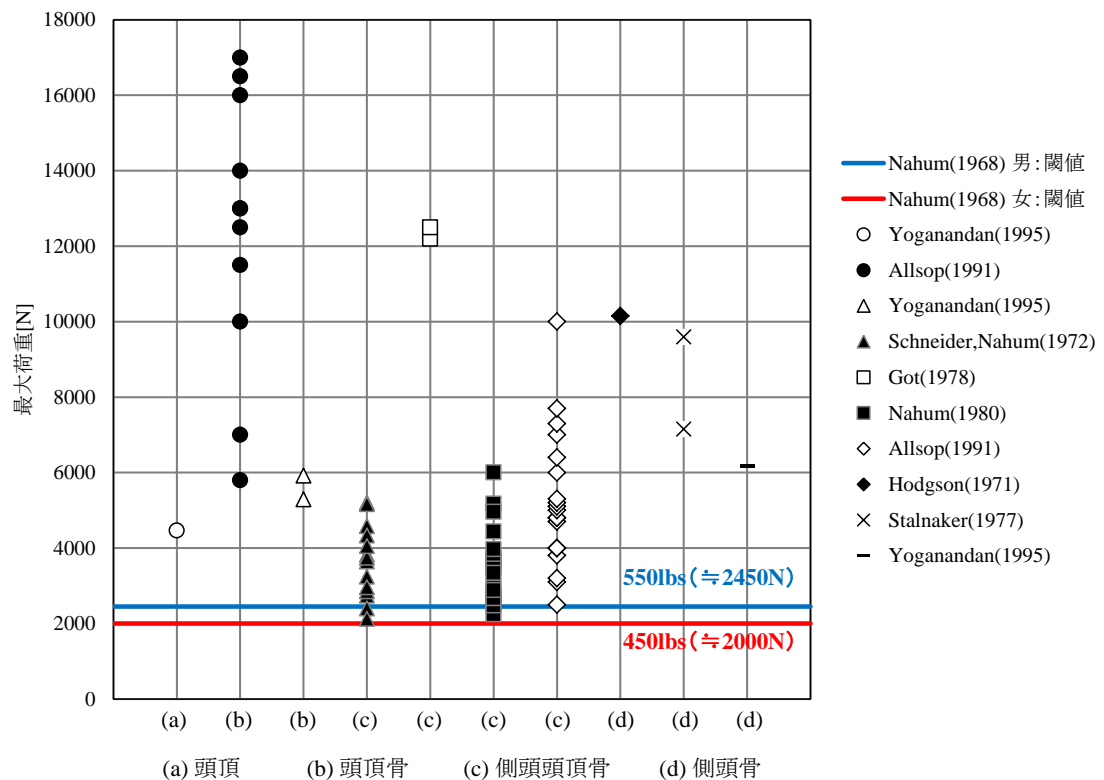


図 1.21 1968 年に Nahum らにより行われた人屍体頭部衝撃実験[85]

1. 序論

図 1.22 に Nahum らの行った頭蓋骨衝撃実験において記録された時刻歴荷重を示す。インパクト先端にチューブを取り付けることで衝撃の作用時間を調整し、その影響を比較したものである。どちらも衝撃を与えた部位は側頭骨であり、図 1.22(a)は作用時間を短くした試験の結果を、図 1.22(b)は作用時間を長くした試験の結果を示している。このとき、荷重の作用している時間はどちらも約 10 ms である。最大値の持続時間は、(a)は瞬間的なものであるのに対し、(b)では数 ms 続いている。与えた力積としては明らかに(b)の試験の方が大きい。 (b)の示す試験では骨折は見られず、(a)の示す試験では、陥没または複雑骨折といった臨床的に重要な骨折が発生している。上述のような比較結果は他の部位に対する衝撃実験でも確認されており、Nahum らによると頭蓋骨骨折の傷害値としては、衝撃の作用時間や載荷速度は重要でなく最大衝撃荷重に依存することが示されている。

我が国における衝撃荷重に着目した傷害耐性には、保護帽の規定[86]がある。これは、保護帽を装着した人頭模型に質量 5 kg、半径 48 mm の半球形ストライカを 1 m の高さから落下させ、その際に人頭模型下に設置したロードセルで計測した荷重が 4.9 kN 以下であることを規定するものである。

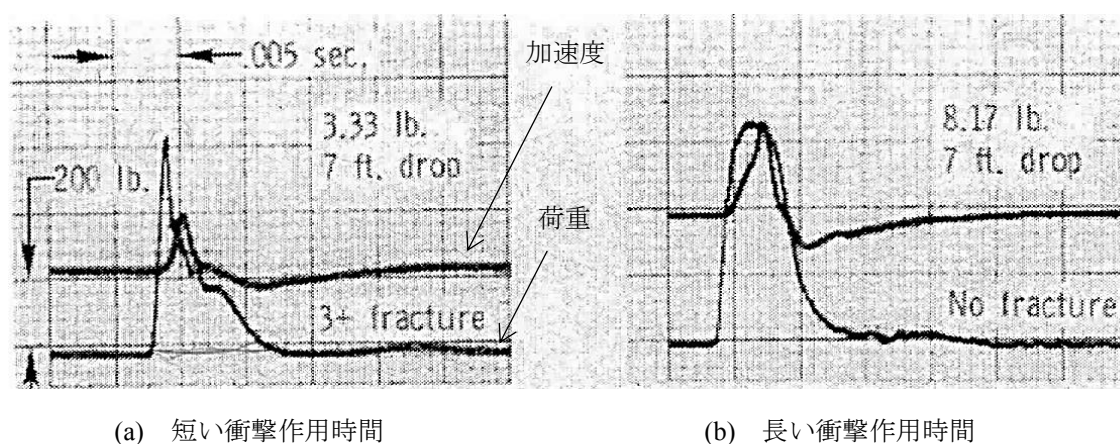


図 1.22 側頭骨衝撃実験時における衝撃荷重作用時間の比較 (Nahum ら, 1968) [69]

1.1.4 天井材の危険度評価法及び評価に用いる衝撃荷重の計測における問題

天井落下時の危険性は落下した天井材が人体に与える物理量とそれを受ける人体側の耐性値によって決まる。内田らは、天井材の衝撃力を適切な人体耐性指標と比較することで天井材の危険度評価指標[87~89]を提案しており、それは日本建築学会の「天井等の非構造材の落下事故防止ガイドライン[11]」にも利用されている。本評価法は、片山らが行った天井材落下実験[88~90]と Nahum らが行った人屍体の頭蓋骨への衝撃実験[69]を基に提案されている。ここでは、本評価法がどのようなクライテリアを設定しているかといった危険度評価指標の概要（図 1.23）及び利用の際の注意点を示す。

まず、危険度評価指標の概要について説明する。本指標は、落下した天井が人体に衝突した際に人命に危害を及ぼす危険性があるかどうかを判断するためのものである。危険度を評価する上では、天井材が落下した際に比較的当たりやすいという点、非可逆的な傷害を受けやすく傷害を負ったときの経済、社会コストが非常に高いという点から頭部を対象としている。但し、幼児に関しては、傷害耐性に関する知見が乏しく、また耐性が比較的低いことが予想されるため対象外であり、常時幼児が利用する室に関しては、別途安全対策を講じる必要があると考えられる。人体側の傷害耐性には、1.1.3 項で示した高齢の女性を対象とし、頭蓋骨の中でも弱いとされる側頭頭頂骨の臨床的に重要な骨折荷重の閾値として 1968 年に Nahum らが提案した 2000N を採用している。これは、1.1.3 項に記した AIS からわかるように軽傷で済むかどうかの傷害レベルを指す。線状骨折自体は生命に危険はないが、陥没骨折が発生した場合には、骨折を引き起こすほどの衝撃により硬膜外血腫や脳損傷等が生じて命を落とす恐れがある。前項で述べたように頭蓋骨骨折に相関のある重要な傷害値は最大衝撃荷重である。一方で、頭蓋骨骨折と頭部応答加速度の関係をを用いた評価法[51]も提案されている。自動車事故等では慣性傷害が重要視されており、頭部の応答加速度を用いた評価法が広く用いられている。しかし、天井落下のような直上からの衝撃による慣性傷害の発生メカニズムは明らかとされておらず、接触傷害における遠隔接触

1. 序論

クライテリアの設定	
外的条件	→ 「地震の有無に関わらない」日常的に発生する天井落下.
対象	→ 人命の保護を目的としているため「人間」を対象としている.
対象とする部位	→ 非可逆的な損傷となりやすく人命に危害を及ぼす危険性が高い「頭部」を対象としている.
許容傷害レベル	→ 外傷バイオメカニクスの分野で多く用いられている「頭蓋骨の線状骨折」の荷重を閾値としている. これは可逆的な傷害（後遺症なく速やかに元へ戻る）を許容する傷害レベルを示す.
人体に影響を及ぼす物理量	→ 頭蓋骨の線状骨折の閾値としては、頭蓋骨骨折と関連の高い1.2.3項で記した「最大衝撃荷重」を採用している. 頭部の応答加速度を用いた評価もあるが、天井材の衝突時に発生する接触傷害である頭蓋骨骨折を直接表す物理量は衝撃荷重と考えられる.
傷害耐性（傷害発生の閾値を示す物理量）	→ 高齢の女性を対象とし、頭蓋骨の中でも弱いとされる側頭頭頂骨の臨床的に重要な骨折荷重の閾値として1986年にNahumらが提案した2000Nを採用している.
衝突実験におけるモデル化	
想定する衝突体	→ 市販のサイズの天井板単体及び野縁付き天井材
被衝突体のモデル化	→ H形鋼によって支持されあたマグネシウム合金製の人頭模型
衝突の仕方	→ 天井板が水平状態を保ち衝突
衝突箇所	→ 頂部への衝突を仮定

図 1.23 天井材の危険度評価指標の概要

効果や慣性傷害が人体に及ぼす影響は不明である。天井材の衝突により発生する頭蓋骨骨折のような接触傷害を直接表す物理量は衝撃荷重であるため、衝撃荷重に着目している。

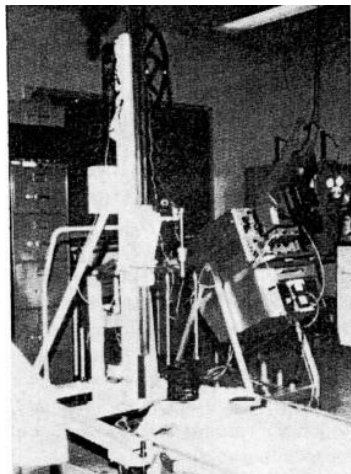
天井が落下した際に発生する衝撃荷重は主として天井材の設置高さと材質に依存する[91]。片山らは、天井材落下実験を行い各種天井材の落下衝撃力を計測してきた。天井材落下実験では、JIS で規格化されたマグネシウム合金製の衝撃吸収性試験用人頭模型（大型）（以下、人頭模型）[92]に市販の大きさの各種天井材を様々な高さから水平を保持したまま

落下させている。人頭模型は、地面に敷かれた鉄板上の H 形鋼を土台として設置されており、人頭模型と H 形鋼の間に設けられたひずみゲージ式ロードセルで衝撃荷重を、人頭模型脇に設置したスピードガンで天井材の落下距離を計測している。実験のセットアップ等の詳細については次章で述べる。天井材落下実験と実被害における違いに関して注意すべき点としては、以下の点が挙げられる。

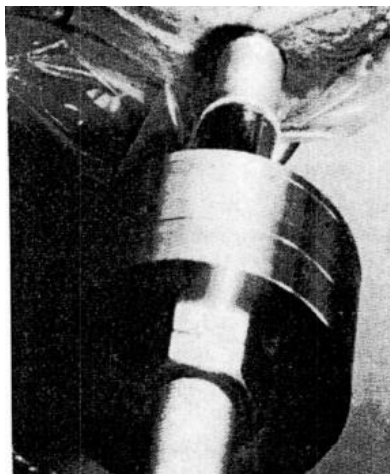
1. 人頭模型の質量は 5.4kg であり、実際の人間(成人)の頭部の重さや形を模擬している。
但し、頭蓋骨の硬さや皮膚等の質までは模擬できていない。人頭模型は金属でできているため頭蓋骨に比べて接触時間が短く最大衝撃荷重は大きめに出る傾向にあると考えられ、天井材落下実験では実際に人頭に天井材が衝突した際に発生する衝撃荷重よりも大きめの値を計測していると考えられる。この点においては、安全側の評価を与えている。
2. 天井材は水平を保ったまま天井材のほぼ真ん中が人頭模型に当たるよう調整されている。これは天井材が斜めになって衝突した際より大きめの荷重となることが考えられ、ここでも安全側の評価を与えている。但し、鋭利な角や鋼製の下地等が直接当たった場合には、その衝撃荷重は飛躍的に増大することが予想される。
3. 在来工法の天井では天井材は野縁等の連結により市販の大きさより大きな面積で落下する被害も見受けられるが、衝撃荷重は比較的局所的な破壊で決まることが実験時の観察から予想されるため、天井材には市販の大きさのものが用いられている。但し、局所的な破壊は落下高さが比較的高い場合に多く観察されており、落下高さが 2m 付近のときには天井面積の増加に伴い衝撃荷重も増加する危険性があると考えられる。
4. 1.1.2 項で示したように在来工法の天井では、野縁と天井板が一体となって落下する場合がある。野縁が天井板に取り付くことによって天井材の面外の曲げ剛性が増大され衝撃荷重は高まる傾向にある。また、衝突箇所の直上に野縁が配されていた場合にはその傾向はさらに顕著に表れる。

1. 序論

天井材の危険度の評価を行う上では、こうした実験と実被害の違いをしっかりと認識する必要がある。その他にも、一般に天井材として用いられる材料の特性（重量や硬さ等）は製造や管理の段階である程度のばらつきが生じるため、同じ規格の天井材で実験を行っても最大衝撃荷重には幅が生じることに注意する必要がある。

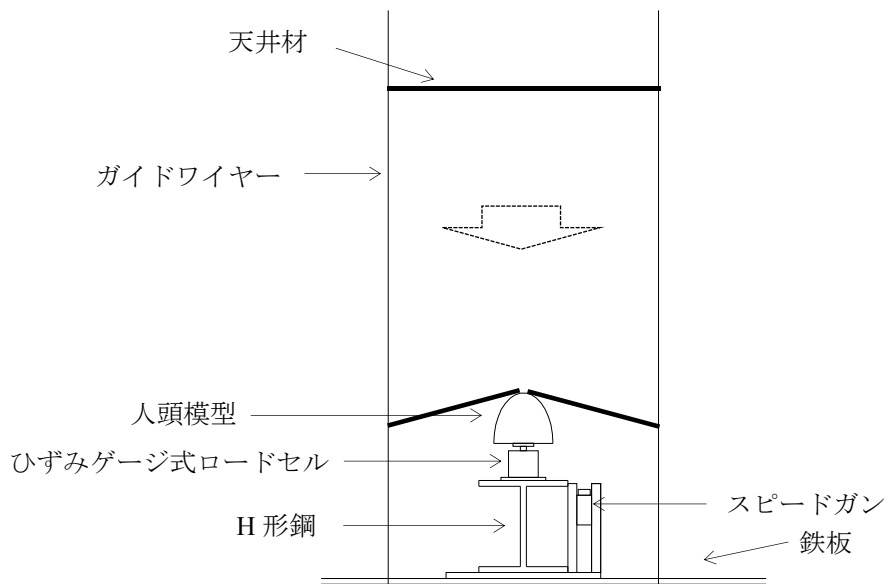


(a1) 実験装置



(a2) インパクト

(a) 1968年にNahumらにより行われた人屍体頭部衝撃実験[69]



(b) 天井材落下実験[87~90]

図 1.24 衝撃荷重の計測位置の違い

以上のように、天井材落下実験で得た最大衝撃荷重と頭蓋骨骨折の閾値を比較することで天井材の危険度を定量的に評価することができる。但し、上述したように天井材落下実験と実被害における違いには十分注意した上で評価を行う必要がある。

本項で記した天井材の危険度評価法において重要な課題として挙げられるのが、天井材が人頭模型に衝突した際に発生する衝撃面での荷重の同定である。Nahum らはインパクト先端に取り付くロードセル（図 1.24(a)）で計測した荷重を基に閾値を提案している。一方で、天井材落下実験では、天井材は一般的に衝突時に脆性的な破壊形式を示す場合が多いため、衝突面での荷重を計測することは困難であるという理由から人頭模型下に設置したひずみゲージ式ロードセル（図 1.24(b)）で荷重を計測している。そのため、衝突面で発生する荷重と人頭模型を伝わってロードセルで計測される荷重には何らかの差異が生じていると考えられる。

1. 序論

1.1.5 逆問題解析による衝撃荷重の計測方法

衝撃荷重の計測法には，1. 直接的方法，2. 間接的方法[93]，3. 逆問題解析手法の 3 通りの方法がある．それぞれの利点と難点を表 1.7 に整理する．1.1.4 項で記したように既往の天井材落下実験では，天井材が脆性的な破壊を示すため衝突面での荷重計測が困難であり，人頭模型下に設置したロードセルで荷重を計測してきた．これは間接的方法に近いが，人頭模型は複雑な形状でありロードセルにより測定される荷重と衝撃面での衝撃力の関係がわからないため，衝撃力を理論的に求めることができず不完全な計測であった．

表 1.7 衝撃荷重の計測方法[94]

	1. 直接的方法	2. 間接的方法	3. 逆問題解析手法
方法	圧電素子などを使用したトランスデューサを衝撃点に取り付けて測定する方法．	衝撃物体の適切な箇所にひずみゲージなどのセンサを取り付け，センサによる測定値と衝撃力との関係に基づいて衝撃力を求める方法．	インパルス応答関数(あるいは，そのフーリエ変換である伝達関数)をあらかじめ同定し，出力，すなわち応答の測定データをもとにして，畳み込みの逆演算である逆畳み込みを行うことにより任意の入力，すなわち衝撃力が求められる．
利点	トランスデューサの出力波形が衝撃力波形に直接対応する．	衝撃点の接触状態を変化させることなく衝撃力を測定できる．	直接的方法，間接的方法の両方の難点を解決している．
難点	トランスデューサを取り付けたことによる衝撃点の接触状態の変化や，応力波伝播によってトランスデューサ自体に生じる振動などのために，衝撃波形が正確に測定できない場合がある．	センサにより測定される物理量と衝撃力との関係があらかじめ知られていなければならぬため，この関係を理論的に導出することができるとできるような単純な形状の構造物，すなわち，棒，はり，板などに適用範囲が限られている．	任意の衝撃力に対して有効とされているが，実際に複雑な形状を有する被衝撃体に対して応用した例は少なく，逆問題解析で推定した値と真値との誤差については不明である．

そこで本研究では、ロードセルで記録した荷重から逆問題解析により衝突面での荷重を推定する（図 1.25）。

物体に作用する衝撃力を入力とし、ひずみ、変位、加速度等の応答を出力とする線形の系を仮定すると、入力と出力はインパルス応答関数を用いて畳み込み積分により関係付けられる。従って、インパルス応答関数を予め理論や実験により求めておけば、計測した出力から逆畳み込みを行うことで入力である衝撃力を求めることができる。つまり、本計測方法を用いれば、H 型鋼を含む人頭模型の系を線形の系と仮定した場合に系のインパルス応答関数さえ求めておけば、人頭模型下に設置したロードセルの記録から衝突面での荷重を推定することが可能であることを示唆している。逆問題解析は次の手順で行う。

1. まず、系（物体）の伝達関数を同定するため較正実験を行う。ある系に対して作用する衝撃力を入力、衝突点以外の場所で計測されたひずみ、変位、加速度等の応答を出力として両者を計測する。入出力のデータをフーリエ変換し、伝達関数を求める。
2. 任意の衝撃力に対する出力を計測し、出力のフーリエ変換を 1 で求めた伝達関数で除し、フーリエ逆変換して衝撃力を算出する。

上述した 2 回の逆畳み込みにより衝撃点における衝撃力が求まる。

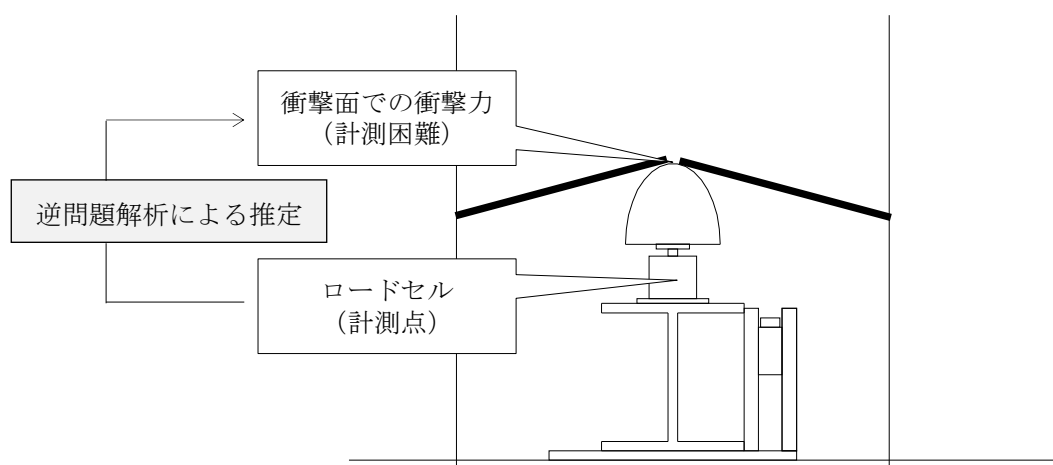
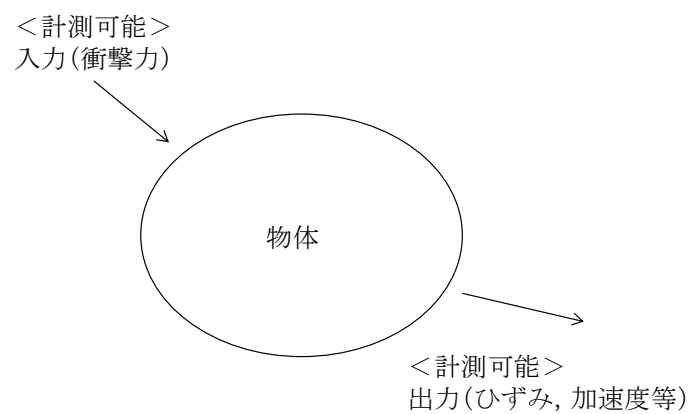
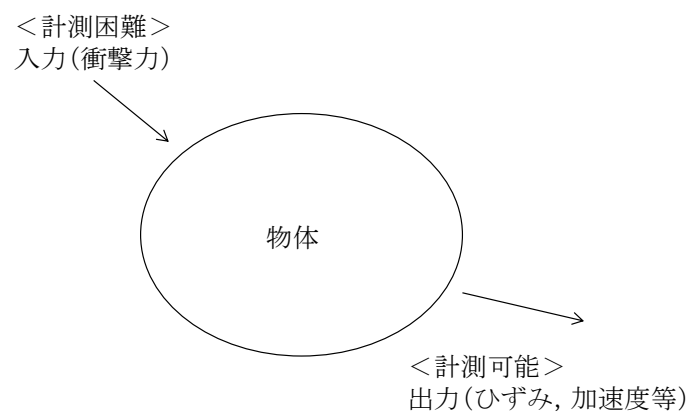


図 1.25 逆問題解析による衝突面における天井材衝撃荷重の推定

1. 序論



(a) ステップ 1 : 伝達関数の同定



(b) ステップ 2 : 出力から逆畳み込みにより推定

図 1.26 逆問題解析の手順[94]

1.2 逆問題解析

本論文では、医学、理学、工学等の様々な分野で扱われている逆問題解析（逆解析とも呼ばれる）という数値解析手法を中心として論旨を展開していく。逆解析とは、逆問題の取り扱いのことであるが、そもそも逆問題とは何であろうか。本節では、逆問題の定義に始まり、種々の逆問題とその分類を述べる。続いて、逆問題特有の不適切性といった問題を逆問題の代表であるマトリクス方程式を取り上げて説明する。最後に本論文で扱う逆問題の位置付けを示す。

1.2.1 逆問題とその分類

逆問題とは何か。C. Groetsch は、「逆問題とは何かをはっきり定めることは難しい。しかし、ほとんどすべての数学者が見れば、それが逆問題であると見分けがつく。」と述べている[95]。これは、逆問題とは共同体の規準により定義されるものであるとの解釈もできる。多くの書物[95~106]では、逆問題は順問題と対となる順問題以外の問題である、もしくはそれに近い表現で示されている。ここでいう順問題とは、十分な情報（入力）が与えられ、一つしかない答え（出力）をしっかりとプロセス（システム）で進むことのできる問題や、因果律に沿って原因から結果を導く問題を指す（図 1.27）。科学では、このプロセスはモデルと呼ばれ、入力は原因、出力は結果と呼ばれる。つまり、逆問題とは、「出力や結果から入力や原因、またはプロセスやモデル自体を決定する問題（図 1.28）」であると言える。

1. 序論

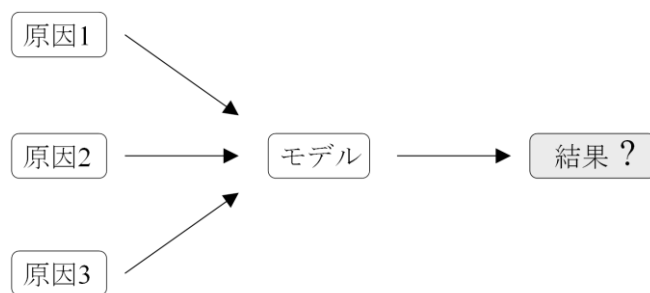
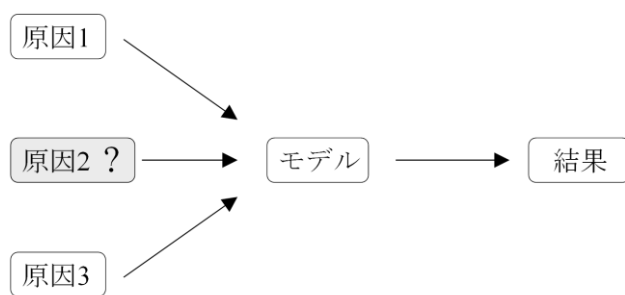
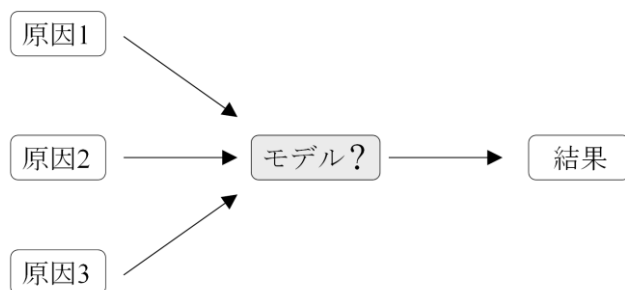


図 1.27 順問題の図式



(a) 原因を求める逆問題



(b) モデルを求める逆問題

図 1.28 逆問題の図式

久保は、物理量など、空間変化及び時間変化を扱う場の解析を具体例に挙げて逆問題を以下のように分類している[98].

順解析では、現象や状態を表している何らかの量を ϕ で表すとき、 ϕ の空間変化あるいは時間変化を支配している(1.5)式の微分方程式を用いて、 ϕ の応答を求める.

$$L(x)\phi = f \quad (1.5)$$

ここで、 $L(x)$ は材料特性 κ を含んだ作用素であり、 f は負荷に相当する項である. 順解析は、次の(a)~(e)の情報が十分に与えられて行われる (図 1.29). この内の1つでも情報が欠落した場合には解析を行うことができない.

- (a) 対象としている領域 Ω とその境界 Γ の位置と形状
- (b) 物理量 ϕ に関する場の支配方程式 ($L\phi = f$)
- (c) ϕ 及びその微係数に関する境界条件 (もし必要であれば初期条件も含む)
- (d) 負荷 f
- (e) 支配方程式に含まれる材料特性 κ の分布

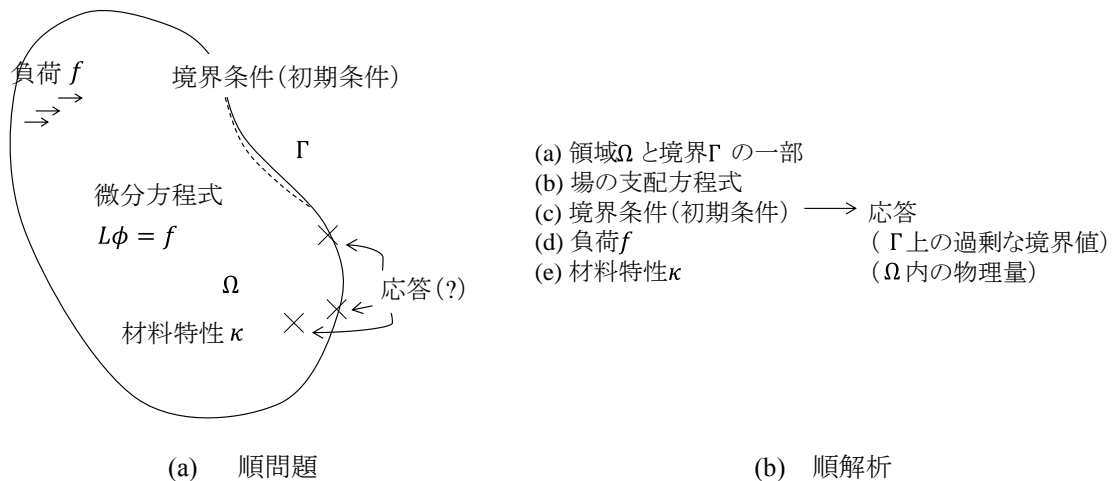


図 1.29 順問題と順解析[98]

1. 序論

1.2.1 項で述べた定義に基づくと，ここでの逆問題は何らかの応答が得られた状態で欠如した情報を推定することである．どの情報が欠如したかによって問題が異なり，逆問題は順問題で与えられた情報(a)~(e)に対応させて次のように分類することができる．

- (A) 領域/境界逆問題 (領域 Ω の形状を求める問題. 物体内にある未知境界を同定する問題)
- (B) 支配方程式逆問題 (ϕ の場を支配している微分方程式を求める問題)
- (C) 境界値/初期値逆問題 (境界 Γ の一部あるいは全部における境界値，あるいは領域 Ω 内の初期値を求める問題)
- (D) 負荷逆問題 (領域 Ω の内部で作用している負荷 f を求める問題)
- (E) 材料特性逆問題 (領域 Ω の内部における材料特性 κ を推定する問題)

逆解析を行う際には，欠如した情報の代わりに応答が用いられる．この応答には，領域の境界上における応答と領域内における応答があり，それらは一次情報とも呼ばれる．この一次情報である応答の他にも，逆解析では未知情報について既に得られている先験情報や物理的な制約条件が利用されることがある．これらは2次情報あるいは補助情報と呼ばれ，解の存在範囲を狭めたり，解を一つに求めたり，解の精度を向上させるのに役立つ．

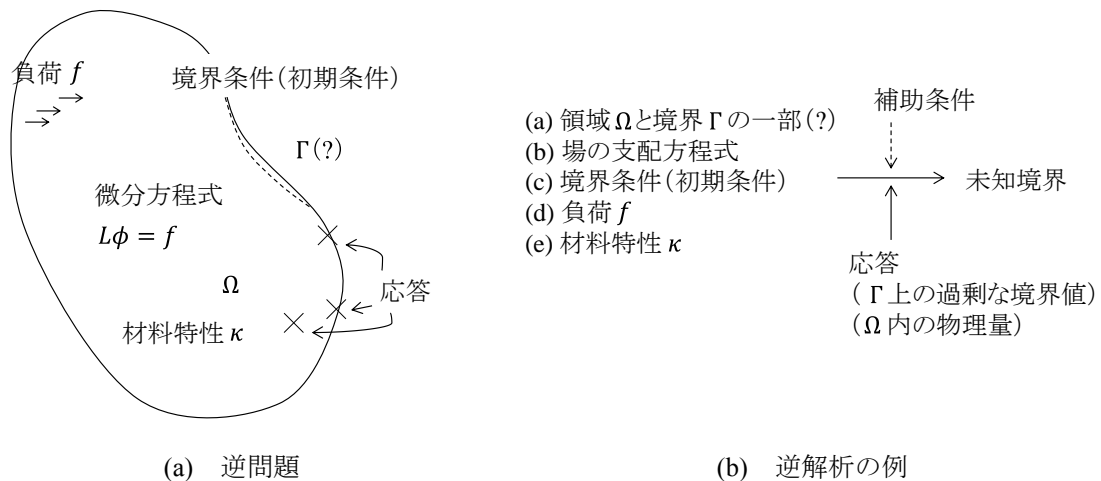


図 1.30 逆問題と逆解析（未知境界を求める例）[98]

逆問題は、直接測ることのできない対象を間接的なデータから推定することとも捉えられ、エストステネスによる地球の大きさの推定も逆問題の一つとして数えられる。このような思考は紀元前から行われており、逆問題の例には枚挙にいとまがない。ここでは、上記それぞれの種類の逆問題について代表例を挙げて説明する。

<(A) 領域/境界逆問題>

領域/境界逆問題とは、物体がどのような形をしているかや物体内部に発生するき裂や空洞の大きさや形状を調べる問題である。物体の形状決定に関しては、構造物（建築物や航空機の翼等）の最適設計に関する研究が挙げられる。通常の構造解析は、構造物に関する形状や材料特性、境界条件等の十分な情報が与えられ、負荷を受けた構造物の変位や部材に発生する応力等の応答を調べるというものである。これに対し、応答である変位や応力が予め設計要件として指定され、例えば重量を未知としてこれを最小化して得られる形状等を探すのが形状決定、形状最適化と呼ばれる逆問題である。物体内部のき裂や空洞の大きさや形状を調べる問題は非破壊検査に代表され、超音波、X線、電気信号等を用いた種々の方法がある。超音波を使ったものでは、物体に音波を入射し、物体内の欠陥により散乱した波を観測することで、欠陥の大きさや形状を調べるというものである。

<(B) 支配方程式逆問題>

微分方程式による物理現象の記述は、ニュートンの運動方程式に始まり様々なものがある。支配方程式逆問題では、微分方程式の式そのものをいきなり求めるというものではなく、支配方程式に含まれる係数を観測結果から決定するという問題として扱われている。支配方程式に求めたい物理量に関する微分がどの階数まで含まれるかは未知であり、利用する階数を変えて逆解析を行い、その結果を比較して最良のモデルを選ぶ必要がある。

<(C) 境界値/初期値逆問題>

境界値/初期値逆問題とは、直接計測することが難しい境界部あるいは領域内部で計測した応答から未知境界値を求める問題である。医学の分野では、心電図逆問題が早くから取

1. 序論

り上げられていた。心臓の電氣的な活動に伴い体組織に電場が形成され、体表面に電位分布が生じる。心電図逆問題とは、体表面の電位分布から心臓の表面の電氣的活動を推定する問題である。

<(D) 負荷逆問題>

負荷逆問題とは、領域の中で負荷、音、破壊が生じた際にそれらが発生した位置や大きさを同定する問題である。アコースティック・エミッション法（AE 法）は負荷逆問題の代表例として知られている。物体内部で破壊が発生した際には、物体内部を音波が伝播する。物体の境界上における複数の箇所でその音波の観測を行い、得られた AE 信号の到達時間を比較することで発生源を特定することができる。場所の特定をした後に発生音の特性を AE 原波形解析と呼ばれる方法で求める。AE 原波形解析とは、予め特定しておいたセンサ特性や物体内の伝播特性を用いて発生位置からセンサに伝わる過程で歪んでしまった波を発生時点の波に復元するというものである。特定した発生音からどのような破壊が起きたかを推定する方法は、地震時の断層のすべりのメカニズムを解明するのにも利用されている。

<(E) 材料特性逆問題>

材料特性逆問題とは、領域内の材料特性値の成分や分布が未知の場合に応答を利用してそれらを推定する問題であり、最も有名なものは X 線 CT 法（X-ray Computed Tomography）である。X 線 CT は医療分野において人体の断面像を作成する際に良く使われる。X 線をある方向から照射し、その反対側で X 線の強度を計測する。これをあらゆる方向から行うことで断面における X 線吸収係数の分布が求まり、異物等を発見することができる。

古来より扱われてきた問題を含め、上述した問題の中でも逆問題として認識されずに扱われているケースは多々ある。しかし、これらを逆問題として捉えることは、逆問題特有の問題である不適切性を認識することに繋がり、問題解決の糸口となるため重要である。

1.2.2 逆問題における不適切性と適切化处理

因果律に沿った順問題における数学的な特徴をアダマールは「適切性」という概念で示しており、それは次の3つの条件から成る。

- (条件 1) 解の存在 : 解が存在すること.
- (条件 2) 解の一意性 : 解が一つしかないこと.
- (条件 3) 解の安定性 : 逆解析に用いるデータが微小変動しても解が大きく変化しないこと.

逆問題では、上記の少なくとも1つの条件を満足しない「ill-posed(不適切なまたは非適切な)」問題であることが多い。例えば、設計を行う際に与えられた条件が厳しすぎると解は存在せず、(条件 1) の解の存在は満足されない。但し、物理現象から原因を同定する場合には、モデルが正しければ解の存在は保障されるため、厳密な証明は必要とされない場合が多い。(条件 2) の解の一意性については、求めたい未知数に対して方程式の数が少なければ解が1つに定まらず、無数に存在してしまうことがある。逆問題では、(条件 3) の解の安定性が最も問題となることが多く、これは計測の技術とも密接に関係している。連続的な情報に対する離散的な扱いや、外乱等の雑音による誤差が計測した出力データの中には常に含まれている。その結果、逆解析の過程で混入した誤差が推定する入力に大きな影響を与え、解が不安定となる場合が多い。そのため、逆解析を行う際には多くの場合「適切化もしくは正則化」といった処理が行われる。

逆問題解析では、対象の問題に応じて様々な手法が用いられる。上述したように逆問題は不適切性を有するため、適切化を行う必要があり順問題と同じ解析方法を用いることは多くの場合できないが、順解析で用いる積分方程式、有限要素法、差分法、境界要素法といった解法は逆解析の基礎として用いられる場合が多い。積分方程式以外の解法は、線形連立方程式をマトリクス表記したマトリクス方程式に帰着されるため、ここではマトリクス方程式を取り上げ、不適切とはどんな問題か、どのようにして適切化を施すかといった

1. 序論

ことを具体的に示す．ここで示す適切化の方針は，積分方程式の解法にも通じるものもある．但し，本論文で扱う逆問題で用いる解析方法は積分方程式を利用したものであるため，積分方程式の解法については 3 章にて別途取り上げその詳細を述べる．以降では，特に断りがない場合，ベクトルや行列はボールド体で表す．

逆解析で用いる m 個の計測データから成るベクトルを

$$\mathbf{y} = [y_1, y_2, \dots, y_m]^T \quad (1.6)$$

と表し，逆解析の対象となる未知数が n 個あるとき，未知ベクトルを

$$\mathbf{x} = [x_1, x_2, \dots, x_n]^T \quad (1.7)$$

と表すこととする．ここで，添え字 T は転置を表す．また，これらは m 行 n 列の行列 \mathbf{A} により次のように関係付けられるものとする．

$$\mathbf{Ax} = \mathbf{y} \quad (1.8)$$

\mathbf{x} の属する n 次元ベクトル空間を X ， \mathbf{y} の属する m 次元ベクトル空間を Y とすると，ここでの順解析と逆解析は図 1.31 に示すような線形写像，逆写像の関係で表される．つまり，順解析は， \mathbf{x} が与えられた状況で $\mathbf{Ax} = \mathbf{y}$ を \mathbf{y} について解く問題であり，逆解析は， \mathbf{y} が与え

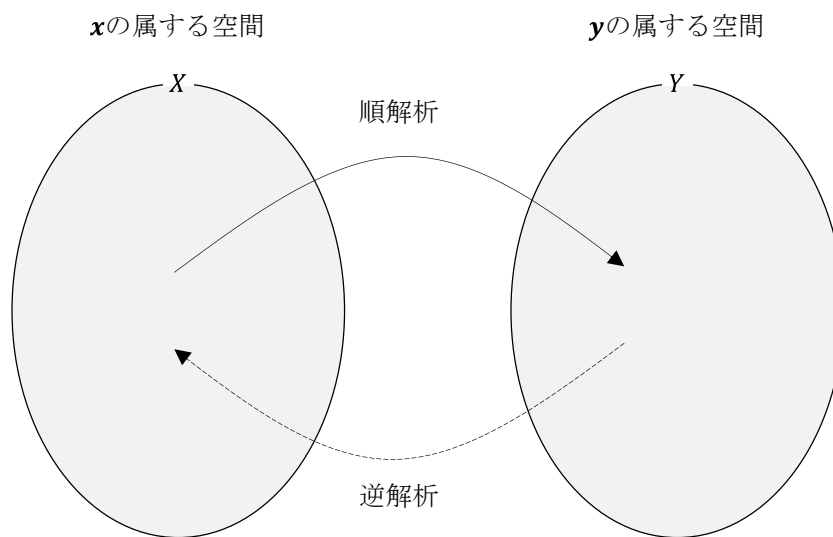


図 1.31 順解析と逆解析の図式

られた状況で $\mathbf{Ax} = \mathbf{y}$ を \mathbf{x} について解く問題である．実質的な連立方程式の数（係数行列における線形独立な列ベクトルの個数）を表す行列の階数を r で表す．未知数 n に対して階数が r の場合には求めることのできない解が $p = n - r$ 個存在する． p は退化次数であり，線形独立な零空間ベクトルは p 個存在する．計測データから成るベクトル \mathbf{y} を係数行列の列ベクトルの線形結合で表せないときを「不能」という．線形結合で表すことができる場合は，解が一意に定まる「正則または非特異」あるいは解が複数求まる「不定」のどちらかとなる．行列の階数 r が係数行列 \mathbf{A} の行数あるいは列数の少ない方の数と一致する場合をフルランクと呼ぶ．係数行列 \mathbf{A} がフルランクであるとし，正方行列と長方形列（縦長行列及び横長行列）とで場合分けを行い，それぞれにおいて \mathbf{x} を求める方法を示す．

(1) 正方行列 ($r = m = n$)

\mathbf{A} が正方行列の場合は，行列式 D を計算することができそれが零以外となるため，正則となり解は次のように一意に定まる．

$$\mathbf{x} = \mathbf{A}^{-1} \mathbf{y} \quad (1.9)$$

(2) 横長行列 ($r = m < n$)

横長行列では，係数行列に線形独立な m 次元のベクトルが全て揃っているため， \mathbf{x} は係数行列の列ベクトルの線形結合で表すことができ解は必ず存在する．しかし，横長行列は未知数 n に対して実質的な方程式の数が少ないため，退化次数 p の分だけ線形独立な零空間ベクトルが存在し不定となる．擬逆行列 $\mathbf{A}^T (\mathbf{A} \mathbf{A}^T)^{-1}$ を用いて解は一般に次式で表される．

$$\mathbf{x} = \mathbf{A}^T (\mathbf{A} \mathbf{A}^T)^{-1} \mathbf{y} + \alpha_1 \mathbf{h}_1 + \cdots + \alpha_p \mathbf{h}_p \quad (1.10)$$

\mathbf{A}^{-1} は \mathbf{A} の逆行列を表す．擬逆行列を用いた第一項は特解であり，任意実数 $\alpha_1, \dots, \alpha_p$ と大きさ 1 に正規化された線形独立な零空間ベクトル $\mathbf{h}_1, \dots, \mathbf{h}_p$ で表される第 2 項以降は余解である．特解は，一般解の内最もノルムの小さいノルム最小解を与えている．

(3) 縦長行列 ($r = n < m$)

縦長行列では，係数行列に線形独立な m 次元のベクトルが揃っていないため，不能とな

1. 序論

る場合がある．また，退化次数 p は 0 となり零空間は存在しないため，解は不能か唯一のどちらかとなる．ここで，計測データに含まれる誤差を減らすため，最小二乗法を適用する．誤差を

$$\mathbf{e} = [\mathbf{e}_1, \mathbf{e}_2 \cdots \mathbf{e}_n]^T \quad (1.11)$$

とすると，(1.8)式を用いて

$$\mathbf{e} = \mathbf{A}\mathbf{x} - \mathbf{y} \quad (1.12)$$

で表される．すると，誤差の二乗和 Π は

$$\Pi = |\mathbf{e}|^2 = \mathbf{e}^T \mathbf{e} = \mathbf{x}^T \mathbf{A}^T \mathbf{A} \mathbf{x} - 2\mathbf{x}^T \mathbf{A}^T \mathbf{y} + \mathbf{y}^T \mathbf{y} \quad (1.13)$$

Π を最小とする条件

$$\frac{\partial \Pi}{\partial \mathbf{x}} = \mathbf{0} \quad (1.14)$$

を用いて式を整理すると，

$$\mathbf{x} = (\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{y} \quad (1.15)$$

が求まる．

上記の解法は係数行列 \mathbf{A} がフルランクの場合にしか使うことができない．これを階数分解により一般化する．係数行列 \mathbf{A} を

$$\mathbf{A} = \mathbf{B}\mathbf{C} \quad (1.16)$$

のようにフルランクの縦長行列 \mathbf{B} と横長行列 \mathbf{C} に階数分解し，

$$\mathbf{B}\mathbf{C}\mathbf{x} = \mathbf{y} \quad (1.17)$$

に左から \mathbf{B} の擬逆行列 $(\mathbf{B}^T \mathbf{B})^{-1} \mathbf{B}^T$ と \mathbf{C} の擬逆行列 $\mathbf{C}^T (\mathbf{C}\mathbf{C}^T)^{-1}$ を順に掛けることで

$$\mathbf{x}_0 = \mathbf{C}^T (\mathbf{C}\mathbf{C}^T)^{-1} (\mathbf{B}^T \mathbf{B})^{-1} \mathbf{B}^T \mathbf{y} \quad (1.18)$$

と求まる． $\mathbf{C}^T (\mathbf{C}\mathbf{C}^T)^{-1} (\mathbf{B}^T \mathbf{B})^{-1} \mathbf{B}^T$ はムーア・ペンローズ一般逆行列 \mathbf{A}^+ と呼ばれる．ムーア・ペンローズ一般逆行列は，連立方程式が解をもつ場合はノルム最小解を，解をもたない場合はノルム最小かつ最小二乗の解を与える．このときの解の存在条件は

$$[I - AA^+]y = 0 \quad (1.19)$$

である。ここで、 I は単位行列を表す。ムーア・ペンローズ一般逆行列の一般解は、

$$x = A^+y + [I - AA^+]a \quad (1.20)$$

である（ a は任意の n 次元ベクトル）。

本項では、線形連立方程式を例に挙げ逆問題の持つ不適切性を示し、その適切化手法の一例を示した。

1. 序論

1.2.3 本論文で扱う逆問題解析の位置付け

本研究で扱う逆問題は、1.1.5 項で述べたように、物体に何らかの衝撃を与えて衝撃点から離れた箇所で計測した応答から衝撃点における衝撃力を求める問題である。この種の問題は、1.2.1 項で示した逆問題の分類に当てはめると、境界値/初期値逆問題と負荷逆問題の両方に属する。本研究における逆解析は、1. 衝撃点から計測点までの間の衝撃の伝播特性を表す伝達関数の同定、2. 計測した出力のフーリエ変換を 1 で求めた伝達関数で除し、フーリエ逆変換して衝撃力を算出する、という 2 段階の逆畳み込みにより行われる。このような積分変換を用いた解析方法は、負荷逆問題の代表例であるアコースティック・エミッション原波形解析に代表される解析方法である。本論文では衝撃点における衝撃力を推定する逆問題の扱いのことを「衝撃力の原波形解析」と呼ぶこととする。

衝撃力の原波形解析では、まずインパルス応答関数もしくは伝達関数の同定が必要となる。その手法は図 1.32 に示すように、1. 理論的手法、2. 数値解析的手法、3. 実験的手法の 3 種類に大別される。理論的手法や数値解析的手法は適用範囲が被衝撃体の形状が簡単なもののみと限定されているため、本研究では実験的手法を利用する。実験的手法はさらに、1. 周波数掃引法、2. インパルス応答法、3. ランダムノイズ法に大別される。インパルス応答法は簡易に高周波域まで一定のパワーを与えることができるという利点を有する。そこで、本研究ではインパルス応答法を採用し、インパクトハンマによる打撃試験を行うことで伝達関数を同定する。

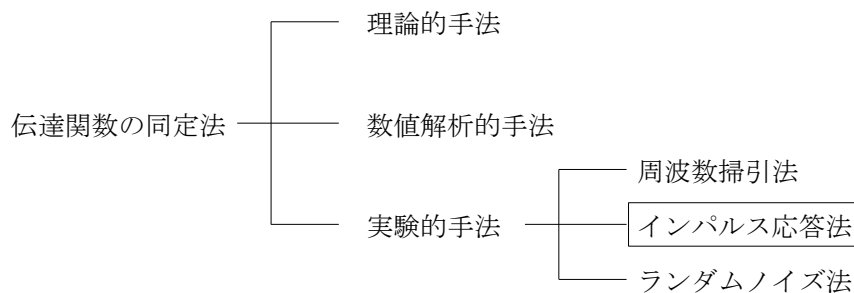


図 1.32 伝達関数の同定方法

物体に働く衝撃力の計測に始まり原波形解析を行うまでの一連の流れ及びその過程で含まれる誤差を図 1.33 に示す。誤差には、入力誤差、AD 変換による誤差、離散フーリエ変換による誤差があり、詳しくは 4.3 節にて記す。本研究では、こうした誤差により発生する逆解析の不適切性を解消するため、第 3 章で紹介する井上らによって提案されたウィーナフィルタ理論を用いた 5 種類の伝達関数[94, 107]を利用し、逆解析手法の実用上の検討を行っている。同時に、伝達関数を算出する際には、離散フーリエ変換を行う際に発生する分解能誤差や漏れ誤差についての検討も行っている。

逆解析手法の妥当性の検証は、一般的に次の 3 段階で行われる。

段階 1. 誤差やノイズを含まない一次情報を用いた場合に、正解が得られること。

段階 2. 一次情報に小さな誤差やノイズが含まれる場合に、正解に近い解が得られること。

段階 3. 実測定に対応した誤差やノイズを含む一次情報を用いた場合に、要求された精度、あるいは原理上上限に近い精度の解が得られること。

逆解析手法としては、段階 1 と段階 2 の要件は満たしている必要がある。逆解析手法を実用的に使うには段階 3 までの要件を満たしていることを確認する必要があるが、段階 1 や段階 2 までしか検証を行っていないことが多い。井上らは自身が提案するウィーナフィル

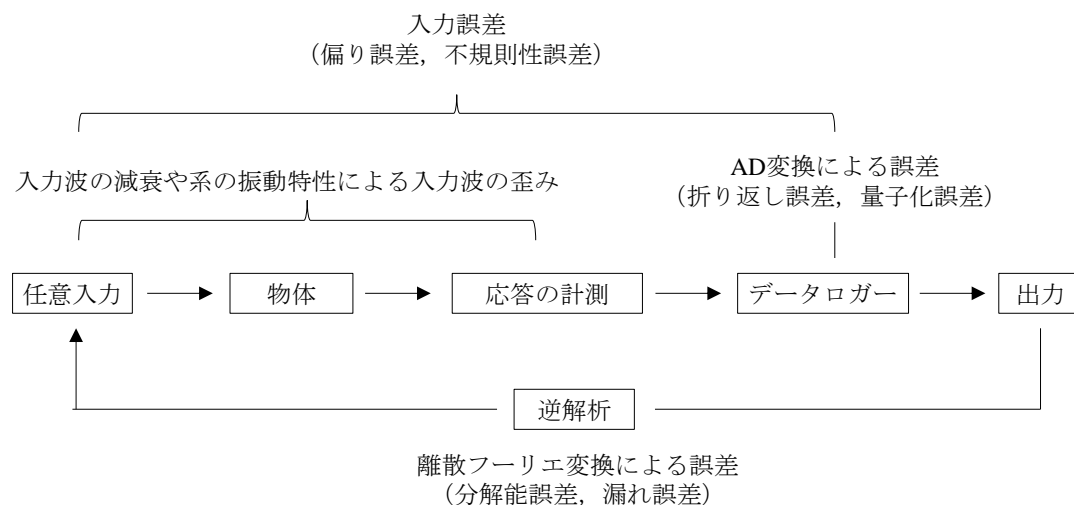


図 1.33 衝撃力の原波形解析における一連の流れ及びその過程で発生する誤差

1. 序論

タ理論を用いた伝達関数を利用し、実験や数値解析を通じて段階 3 までの検証を行い、その有効性を確認している。しかし、逆解析はそもそも入力計測が難しい場合に対して応答や出力から入力を推定するものであり、段階 3 まで検証を行った研究においても、衝突体に用いられる物体は理論的に衝撃力を計算できる棒等の簡易な形状のものに限られる。被衝突体についても比較的簡単な形状のものでしか検証は行われていない。また、較正実験で得られた伝達関数が種々の入力に対しても有効であるか検証を行っている研究は少ない。そこで、本研究では、任意の物体について衝突面での衝撃力を推定できるという逆解析の利点を保証するために重要である実用性（段階 3）に関して、次の項目の検証を行う。

- ・被衝突体が曲面を有する場合における逆解析の有効性。
- ・マグネシウム合金という減衰の大きい材料を用いた場合における逆解析の有効性。
- ・被衝突体の支持条件が単純でない場合における逆解析の有効性。
- ・較正実験にて算出した伝達関数の異なるスペクトル特性を有する衝撃力に対する有効性。

これらの検証結果については、第 4 章及び第 5 章にてその詳細を記す。

1.3 研究目的

1.1.4 項に既述したように天井が落下した際に人命に危害を及ぼすか否かは、天井落下時に頭部との衝突面で発生する衝撃力と頭蓋骨骨折荷重を比較することである程度定量的に評価できる。しかし、頭蓋骨骨折荷重は、衝撃面で計測した荷重を基に提案された閾値であるのに対し、片山らが行った天井材落下実験では、天井材と人頭模型の衝突面で発生する衝撃力を計測することは困難であったため、人頭模型下に設置したひずみゲージ式ロードセルで荷重を計測している。そのため、天井材と人頭模型の衝撃面で発生する荷重と人頭模型下に設置したロードセルで計測した荷重には何らかの差異があると考えられる。そこで、本研究では、1.1.5 項及び 1.2.3 項で記した逆問題解析手法を応用することで、天井材落下実験における人頭模型下への衝突面の荷重を同定する。

本研究の目的は、次の 4 点である。

1. 既往の天井材落下実験で不十分であった石膏ボードの衝撃荷重等のデータを蓄積する。
2. インパクトハンマを用いた打撃試験により推定した人頭模型の伝達関数を評価する。
3. 圧電型のパッドセンサにより衝撃面直下の荷重を計測した天井材落下実験を通して、得られた衝撃荷重と逆解析の推定結果を比較することで逆解析の妥当性を検証する。
4. 既往の天井材落下実験のデータを利用することで、逆解析により各種天井材が様々な高さから人頭模型に落下した際に衝突面で発生する荷重を同定する。

1. 序論

1.4 論文の構成

本論文は、以下の 7 章により構成される。

第 1 章 序論

本論文の目的、研究の背景及び本論文の構成について述べ、本論文の概略を説明する。

第 2 章 天井材落下実験

石膏ボードは不燃材で安価という利点から天井材として世に広く普及しているが、既往の天井材落下実験では十分なデータを得ることができていなかった。本章では、石膏ボード落下実験を新たに行うことで得た結果を既往の実験結果に加えて纏めている。

第 3 章 逆問題解析による衝撃力の推定法

逆問題解析の理論について紹介する。天井材落下実験において、人頭模型下で計測した荷重は衝撃面からロードセルに伝わるまでに土台である H 形鋼を含めた人頭模型の系の振動特性や人頭模型自体の影響を受けて増減している。そこで、ロードセルの記録から衝撃面で発生する衝撃力を逆問題解析により推定する。逆問題解析とは、応答や結果から入力を推定する逆問題の扱いを指し、既に様々な物体の衝突における衝撃力の同定にも応用されている解析手法である。

第 4 章 打撃試験による人頭模型の伝達関数の評価

衝撃の加わる人頭模型頂部から人頭模型下に設置したロードセルまでの伝達関数を同定する。逆問題解析は、次の 2 段階で行う。1. 物体に作用する衝撃力（入力）と応答（出

力)を同時に計測し、これらの測定データをフーリエ変換して系の伝達関数を同定する(較正実験)。2. 出力の記録のフーリエ変換を伝達関数で除し、フーリエ逆変換して入力を算出する。本研究では、較正実験としてインパクトハンマによる打撃試験を行い、伝達関数を同定した。

第5章 天井材落下実験における逆問題解析の妥当性の検証

頭頂部から3 cm下の水平面で切った分離型人頭模型に1 mm厚の圧電型パッドセンサを挿入し、新たに天井材落下実験を行うことで天井材衝撃面付近の荷重を計測した。実験を行うに当たり、新たに製作した分離型人頭模型とパッドセンサの性能の検証及びパッドセンサで計測した荷重が衝撃面での荷重とほぼ同等とみなせるかの確認を打撃試験により行った。天井材落下実験において、パッドセンサの計測値と逆問題解析による推定衝撃荷重を比較することで逆問題解析の妥当性を示している。

第6章 逆問題解析による各種天井材の衝撃力の同定及びその評価

過去に行った天井材落下実験の結果を利用し、逆問題解析により各種天井材の衝撃面での荷重を同定する。

第7章 結論

本論文を通して得た結論を述べる。

付録

付録には、軽量新素材天井材の衝撃力の同定結果を載せている。また、著者らが行った東日本大震災以降の天井落下被害調査の記録や、著者がサブテーマとして研究していたケーブルを用いた吊り天井の地震時挙動の制御法についても併せて載せている。

2. 天井材落下実験

2.1 緒言

天井落下被害は地震の有無に関わらず日常的に発生している。特に、大空間構造物では、多種の材質の天井材が高所に設置されており、落下時の危険性が高いことは一目瞭然である。しかし、その危険性を定量的に評価することは難しい。

傷害バイオメカニクス分野では、頭蓋骨の線状骨折が傷害耐性を決める際の対象の傷害として良く用いられている。これは 1.1.3 項で示した AIS2 に当たり速やかに回復するめまい程度の傷害で済むかどうかの境界を示している。1.1.3 項で記したように接触障害により発生する頭蓋骨の線状骨折と相関が高い物理量は、最大衝撃荷重である。そのため、天井材が落下し人体に衝突した際の危険性は、発生する衝撃荷重と人体側の耐性値で決まると考えられる。また、その衝撃荷重は主として天井材の設置高さや材質に依存する。

片山らは天井材が人頭に衝突した際の衝撃力を把握するため、市販の大きさの天井材を高さ 1~20 m から鉄板及び H 形鋼を土台として設置した JIS 規格のマグネシウム合金製衝撃吸収性試験用人頭模型（大型）[92]に衝突させ、人頭模型下に設置したロードセルで荷重を計測してきた[88, 89, 108~110]。様々な材質の天井材を用いて落下実験を行い、衝撃荷重等のデータを蓄積してきたが、落下時に多量の粉塵が発生するという理由から、不燃材であり価格が非常に安価であるというメリットから天井材として世に広く普及している石膏ボードについては十分なデータが得られていない。

本章では、まず大塚[108]、片山[109]、内田[110]が行ってきた実験を既往の実験として紹介する。続いて、粉塵により周辺環境に影響の出ない環境を得ることによって著者らが行った石膏ボードの落下実験の結果について述べる。また、インパクトハンマを用いた打撃試験による人頭模型の固有振動数及び固有モードの推定結果についても併せて示す。

2.2 既往の実験

種々の天井材の落下時の衝撃力を計測することを目的とし、2007年～2012年に大塚らが行った一連の天井材落下実験[108~110]の概要を表 2.1 に、使用した天井材を表 2.2 に示す。この一連の実験は大きく 4 つのシリーズに分けられる。実験では、JIS で規格化されているマグネシウム合金製の衝撃吸収性試験用人頭模型（大型）[92]に天井材を落とし、天井材の時刻歴落下距離と衝撃荷重を計測している。実験を行うに当たり、全国にある 100 の大規模施設を対象に天井の設置高さ等に関するアンケート調査が内田らによって行われた[111]。これによると、回答が得られた 62 施設にある天井の多くが 20 m 以下に設置されている。また、天井材の最大衝撃荷重は、ある程度設置高さが高くなると落下速度の収束と共に収束する傾向にある。以上より、一連の実験において落下距離の最大は 20 m としている。ここでいう落下距離とは、人頭模型の頭頂から天井材の下面までの距離を指す。

シリーズ 1[108]は 2007 年に東京大学生産技術研究所内 Be 棟地下実験室（屋内）で行われたものである。ここでは、室内の高さから落下の最高高さが決まっており、7 m が最高高さとなっている。表 2.2 に記した 3 種類の天井材を 1~7 m まで 1m 刻みで各高さ 3 回ずつ落下させている。紐で天井材を吊り下げてその紐をクレーンで上下させることにより所定の高さに天井材を移動させている。天井材のほぼ中央を人頭模型に当てるため、狙った位置に落とす必要がある。そのため、人頭模型の両脇にはガイドワイヤーが用意されており、ガイドワイヤーと天井材をクリップによって接続することで狙った位置に落下させている。人頭模型はコンクリート上に置かれた H 形鋼の上に設置されており、人頭模型と H 形鋼の間に設置したひずみゲージ式ロードセルにより衝撃荷重を計測している。また、人頭模型の脇に設置したスピードガンにより天井材の落下距離を計測しており、そこから落下速度を算出している。

シリーズ2[109]は2008年に東京大学生産技術研究所内An棟非常階段吹き抜け部（屋内）で行われたものである。ここでも落下の最高高さは室内の高さで決まっており、12 mが最高高さとなっている。シリーズ1と同様の方法で表2.2に記された5種類の天井材の落下実験が行われた。シリーズ1からの改良点としては、ロードセルのサンプリングレートを上げた点、ガイドワイヤーとの接続にクリップではなくリングを用いた点、落下の最高高

表 2.1 既往実験の概要[108~110]

シリーズ1(大塚ら)[108]		シリーズ2(片山ら)[109]	シリーズ3,4(内田ら)[110]
実施年		2007	2008
実験場所		東京大学生産技術研究所内 Be棟地下実験室 (屋内:最高落下高さ7m)	東京大学生産技術研究所内 An棟非常階段吹き抜け部 (屋内:最高落下高さ12m)
実験概要		東京大学生産技術研究所内 An棟非常階段吹き抜け部 (屋内:最高落下高さ20m)	東京大学生産技術研究所内 An棟非常階段吹き抜け部 (屋外:最高落下高さ20m)
実験概要		実験室天井 フック ガイドワイヤー 人頭模型 ロードセル H形鋼 速度計	7000 1138 4450
人頭模型及び計測器 設置状況		コンクリート上	コンクリート上
サンプリング レート[kHz]		0.1	0.1
スピードガン ロードセル		1	1,5,10
ガイドワイヤーとの接続 (重量)		クリップ (不明)	リング (不明)
		アルミアングル (46g) +アルミチャンネル (22g)	※但し、天井材が膜の際にはガイドワイヤーを4本とし、接続にはリングを用いている。

2. 天井材落下実験

さの上限が上がった点が挙げられる．図 2.1 に示すようにロードセルのサンプリングレートを上げることで衝撃のピークを捉えることができ，同じ条件で計測した衝撃荷重のばらつきはシリーズ 1 に比べ格段に抑えられている．

シリーズ 3, 4[110]は 2009～2012 年に東京大学生産技術研究所内 An 棟非常階段吹き抜け部（屋外）で行われたものである．シリーズ 3, 4 では落下の目標最高高さである 20 m を確保できるように実験場所が選定された．シリーズ 1, 2 とは違って屋外で行われたため落下時に風の影響を受けやすく，無風時を狙って実験は行われた．実験の方法は基本的にはシリーズ 1, 2 と同様であり，表 2.2 に記された 6 種類の天井材の落下実験が行われた．シリーズ 1, 2 からの改良点としては，落下の最高高さの上限が上がった点，天井材が水平を保持したまま落下するように天井材とガイドワイヤーとの接続にアングルとチャンネル材を組み合わせて製作した水平保持用金物が用いられた点が挙げられる．シリーズ 1, 2 では天井材が大きく横揺れして人頭模型に当たる位置に毎回バラツキがあったり，傾いて衝突

表 2.2 試験体一覧（シリーズ 1～4[108～110]）

	略称	材質	サイズ(mm)	重量(kg)	実験内容	ロードセル サンプリングレート
シリーズ1 (2007)	GB(D)	化粧石膏ボード	910×910×9.5	6.4	1～7m, 1m毎, 3回ずつ	計21枚
	GW	グラスウール	990×990×25.0	1.2	1～6m, 1m毎, 3回ずつ	計18枚
	SB	スレートボード	1000×1000×6.0	11.5	1～7m, 1m毎, 3回ずつ	計21枚
シリーズ2 (2008)	CS	ケイ酸カルシウム板	910×910×12.0	10.1	1～10m, 1m毎, 3回ずつ	計30枚
	CS+RW	ケイ酸カルシウム板	910×910×8.0	9.5	1～10m, 1m毎, 3回ずつ	計30枚
		ロックウール吸音板	300×600×12.0			
	GB(D)	化粧石膏ボード	910×910×10.0	5.5	1～12m, 1m毎, 3回ずつ	計36枚
	GW	グラスウール	910×910×15.0	1.1	1～10m, 1m毎, 3回ずつ	計30枚
	RW	ロックウール吸音板	300×600×12.0	0.7	1～11m, 1m毎, 3回ずつ	計33枚
シリーズ3 (2009～12)	AS	アルミスパンドレル	132×1000×1.0	0.5	2～20m, 2m毎, 3回ずつ	計30枚
	CS	ケイ酸カルシウム板	910×910×8.0	5.5	2～20m, 2m毎, 3回ずつ	計30枚
	CS+RW	ケイ酸カルシウム板	910×910×8.0	9.5	2～20m, 2m毎, 3回ずつ	計30枚
		ロックウール吸音板	300×600×12.0			
	CS+RW+F(4)	ケイ酸カルシウム板	910×910×8.0	10.5	2～20m, 2m毎, 3回ずつ	計30枚
		ロックウール吸音板	300×600×12.0			
		シングル野縁	17×25×0.8			
		ダブル野縁	17×50×0.8			
シリーズ4 (2009～10)	MM①	膜(ポリエステル基布+塩ビコーティング)	910×910×0.6	0.2	2, 10m, 3回ずつ	計6枚
	MM②	膜(ガラス繊維基布+フッ素コーティング)	910×910×1.0	0.7	2, 10m, 3回ずつ	計6枚
	MM③	膜(ガラス繊維基布+フッ素コーティング)	910×910×0.6	0.4	2, 10m, 3回ずつ	計6枚
	MM④	膜(ガラス繊維基布+フッ素コーティング)	910×910×0.8	0.5	2, 10m, 3回ずつ	計6枚
	MM⑤	膜(ガラス繊維基布+フッ素コーティング)	910×910×0.4	0.4	2, 10m, 3回ずつ	計6枚
	MM⑥	膜(ガラス繊維基布+フッ素コーティング)	910×910×0.8	1.2	2, 10m, 3回ずつ	計6枚
	MM⑦	膜(ガラス繊維基布+塩ビコーティング)	910×910×0.5	0.7	2, 10m, 3回ずつ	計6枚
	MM⑧	膜(ガラス繊維基布+塩ビコーティング)	910×910×0.4	0.5	2, 10m, 3回ずつ	計6枚
	RW	ロックウール吸音板	300×600×12.0	0.7	2～20m, 2m毎, 3回ずつ	計30枚

※Fの後の括弧内の数字は野縁の本数を示している．

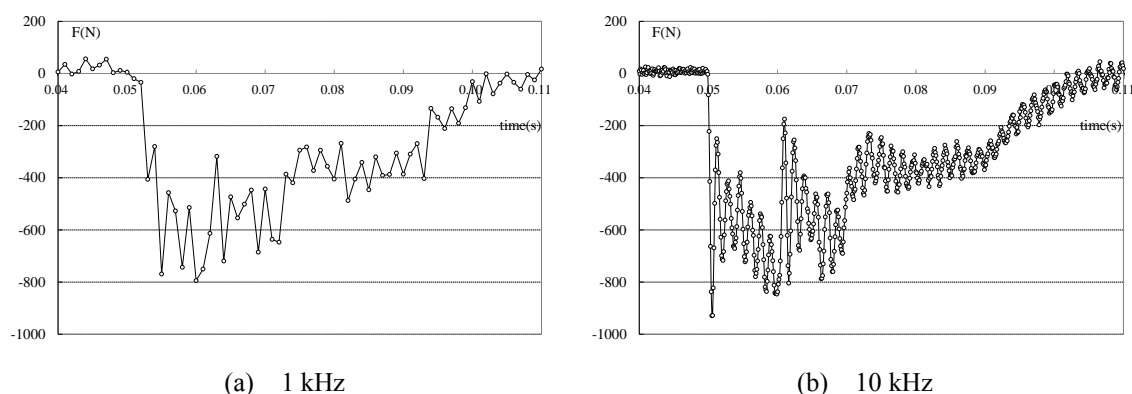


図 2.1 時刻歴衝撃荷重におけるサンプリングレートの比較[109]

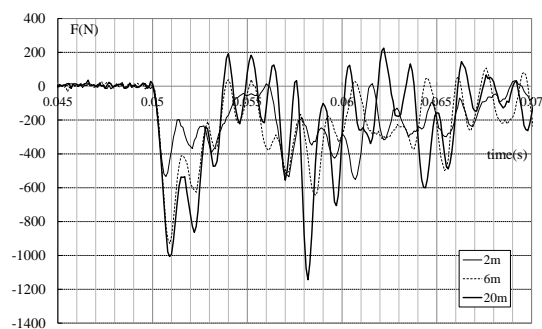
(シリーズ 2, GB-t10.0, 落下高さ 2 m)

することがあったりしたため衝撃荷重にバラツキが見られた。シリーズ 3, 4 ではガイドワイヤーとの接続を改良し、天井材を狙った場所に水平を保持したまま落下させたことによりデータのバラツキを更に抑えられている。

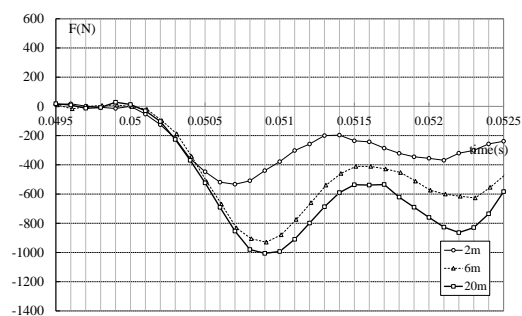
上述の通り，シリーズを重ねる度に実験条件やセットアップは改善されており，実験の再現性は高くなっている。そこで，ここではシリーズ 3, 4 を代表例として，各種天井材を 2, 6, 20 m から落下させた際の時刻歴衝撃荷重を破壊モードと共に図 2.2~図 2.7 に，衝撃点の 50 ms 前から 300 ms 間のデータを用いて算出したフーリエスペクトルを図 2.8 に示す。時刻歴衝撃荷重については，膜材を除くと約 1.5 ms (650 Hz) の周期で振動していることが見て取れる。これは，H 形鋼を土台とした人頭模型の系の固有周期であると考えられる。膜材を用いた実験では，その周期は約 6.7 ms (150 Hz) と他の材料に比べ長くなっている。膜材の実験を行う際には，発生する荷重が小さいことが明らかだったため，小さめの容量のロードセル（容量 0.5 kN）を用いていた。そのため，H 形鋼を土台とした人頭模型の系の固有周期がロードセルの重量や人頭模型との接続箇所の形状の違い等の影響を受けて変化したと考えられる。これらの周期は図 2.8 に示した荷重フーリエスペクトルからも確認することができる。最大衝撃荷重は，全ての材料において衝撃作用時点から一つ目の山で発生

2. 天井材落下実験

する傾向にある．このことから，最大衝撃荷重は系の固有周期等の振動特性の影響を受けており，衝突面からロードセルに荷重が伝わる間に衝撃荷重は少なからず増減していると考えられる．衝撃の作用時間は，概ね 10~40 ms であり，膜材のみ他の材に比べ 200 ms 程度と長い．破壊モードに関しては，アルミスパンドレルと膜材は割れることはなく，単なる変形に留まる．ロックウール吸音板は全ての高さで同様に 2 枚に割れている．その他のケイ酸カルシウム板を用いた天井材は脆性的な破壊を示し，落下高さが 2 m 付近では天井板は 2 つに割れており，落下高さが 6m 付近を超えると天井材は 2 つに割れ，中央には人頭模型が突き抜けた跡が観察される．つまり，落下高さが低い場合にはその破壊モードは曲げ破壊となり，落下高さが高い場合にはその破壊モードはパンチング破壊となり衝撃の作用時間は比較的短くなる傾向にあることがわかる．また，パンチング破壊は局所的な破壊であるため，その衝撃荷重に天井材の面積は大きく影響しないものと考えられる．

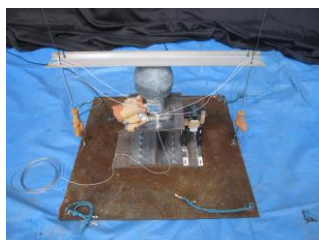


(a1) 25 ms 間

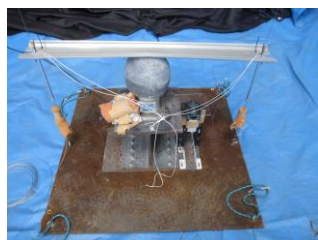


(a2) 3 ms 間

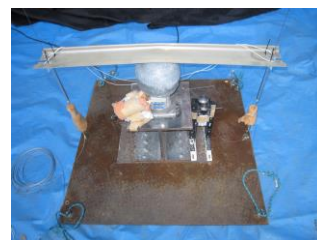
(a) 時刻歴荷重



(b1) 2 m



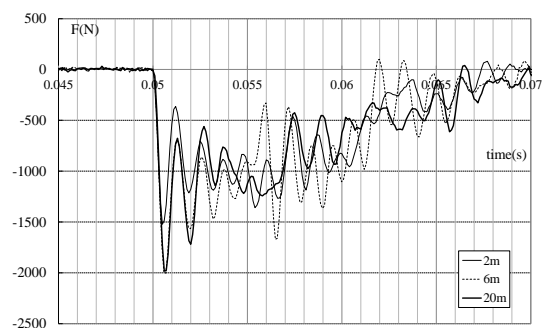
(b2) 6 m



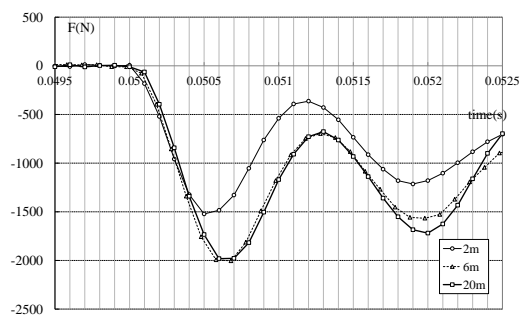
(b3) 20 m

(b) 破壊モード

図 2.2 アルミスパンドレル (AS) -t1.0



(a1) 25 ms 間



(a2) 3 ms 間

(a) 時刻歴荷重



(b1) 2 m



(b2) 6 m

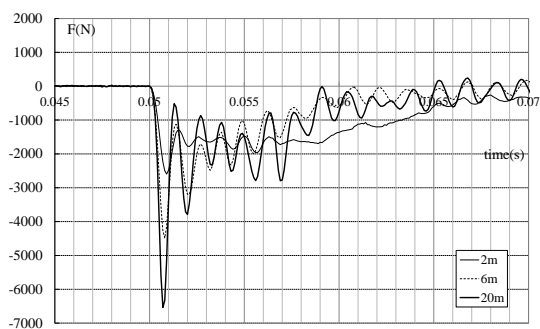


(b3) 20 m

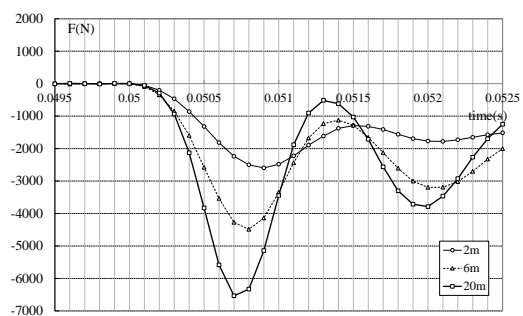
(b) 破壊モード

図 2.3 ケイ酸カルシウム板 (CS) -t8.0

2. 天井材落下実験



(a1) 25 ms 間



(a2) 3 ms 間

(a) 時刻歴荷重



(b1) 2 m



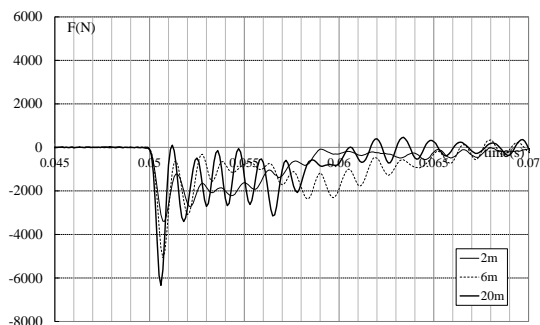
(b2) 6 m



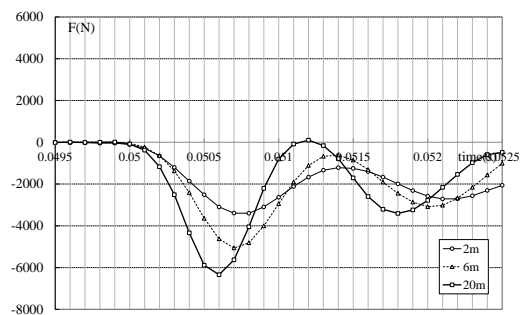
(b3) 20 m

(b) 破壊モード

図 2.4 ケイ酸カルシウム板 (CS) -t8.0+ロックウール吸音板 (RW) -t12.0



(a1) 25 ms 間

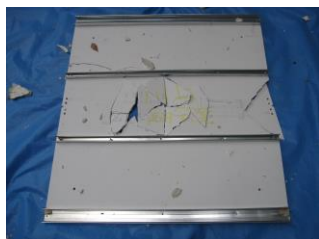


(a2) 3 ms 間

(a) 時刻歴荷重



(b1) 2 m



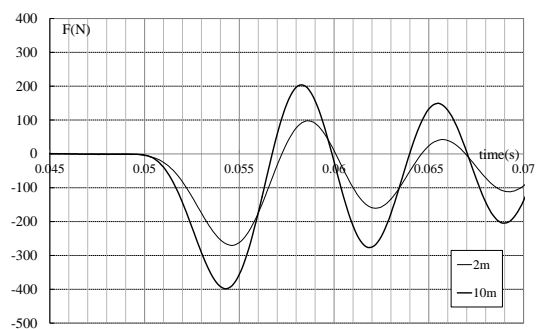
(b2) 6 m



(b3) 20 m

(b) 破壊モード

図 2.5 ケイ酸カルシウム板 (CS) -t8.0+ロックウール吸音板 (RW) -t12.0+野縁(F)4 本

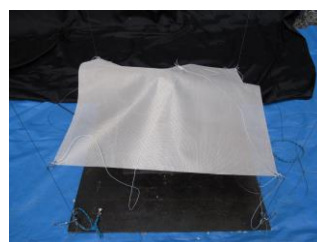


(a1) 25 ms 間

(a) 時刻歴荷重



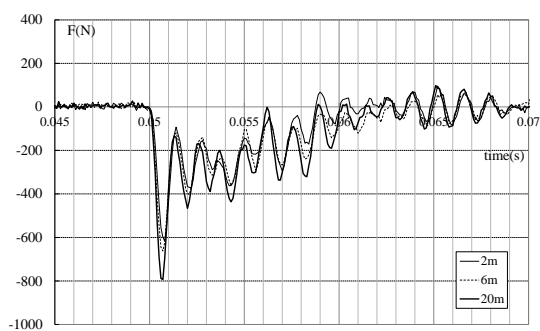
(b1) 2 m



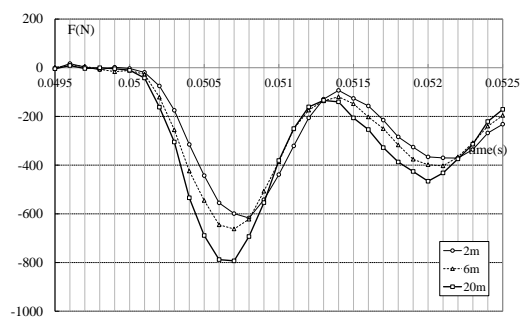
(b2) 10 m

(b) 破壊モード

図 2.6 膜材⑥ (MM) -t0.8



(a1) 25 ms 間



(a2) 3 ms 間

(a) 時刻歴荷重



(b1) 2 m



(b2) 6 m

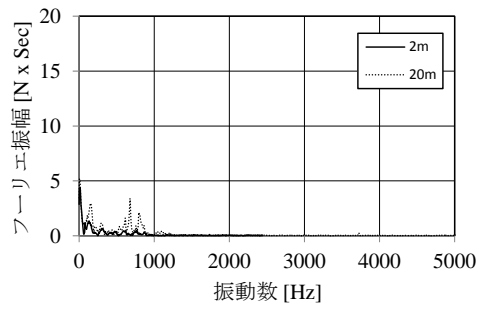


(b3) 20 m

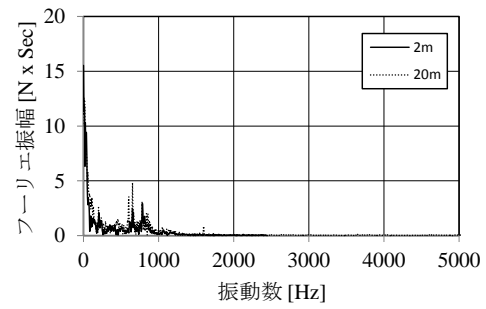
(b) 破壊モード

図 2.7 ロックウール吸音板 (RW) -t12.0

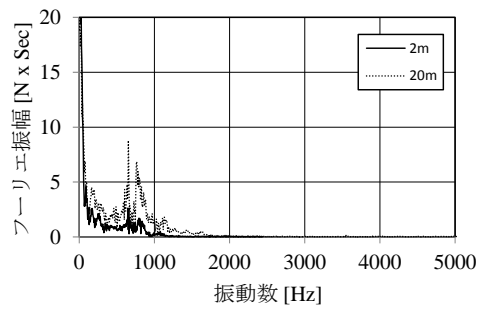
2. 天井材落下実験



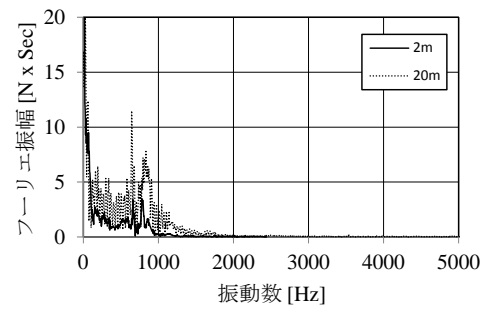
(a) AS-t1.0



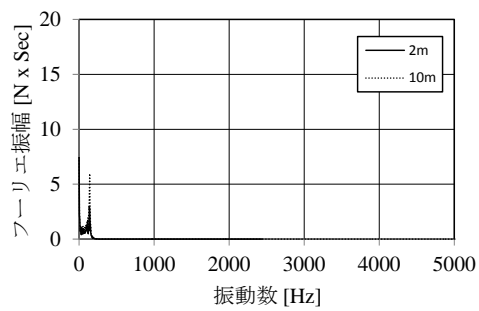
(b) CS-t8.0



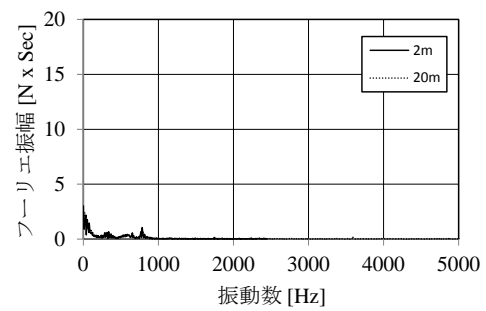
(c) CS-t8.0+RW-t12.0



(d) CS-t8.0+RW-t12.0+F(4)



(e) MM⑥-t0.8



(f) RW-t12.0

図 2.8 荷重フーリエスペクトル

既往の実験で得られた時刻歴落下速度を理論値と共に図 2.9 に示す．ここでは代表例として、シリーズ 3 のケイ酸カルシウム板 t8.0+ロックウール吸音板 t12.0 を 20 m から落とした実験の結果を挙げている．スピードガンの記録にはノイズが多く含まれていたため、50 ms で移動平均処理を行い平滑化している．衝突直前速度は、図 2.9 に示される時刻歴速度の中で最大の値とする．また、理論値は以下のように求めた．空気中での自由落下する試験体の運動方程式は鉛直下向きを座標の正の向きとすると、以下ようになる．

$$ma = mg - \frac{1}{2} C_d \rho v^2 S \quad (2.1)$$

ここで、 m は試験体質量 [kg]、 a は加速度 [m/s^2]、 g は重力加速度 [m/s^2]、 S は代表面積（試験体見付け面積） [m^2] を表す．また、空気密度 ρ は $1177 [\text{g/m}^3]$ （温度 $25 [^\circ\text{C}]$ 、湿度 $50 [\%]$ 、大気圧 $101.35 [\text{kPa}]$ ）とし、抗力係数 C_d は 1.17（平板）としている．

時刻 t における初期位置、初期速度を $x(0)=0$ 、 $v(0)=0$ とし、(2.1)式から落下距離 $x(t)$ 、落下速度 $v(t)$ を求めると次の 2 式が得られる．

$$x(t) = \frac{v_t}{\lambda} \ln(\cosh \lambda t) \quad (2.2)$$

$$v(t) = v_t \tanh \lambda t \quad (2.3)$$

ここで、 $v(t) = \sqrt{mg/k}$ 、 $\lambda = g/v_t = \sqrt{gk/m}$ 、 $k = 1/2 C_d \rho S$ である．

理論値は速度の上がり方も衝突直前速度も概ね実験を模擬できているが、実験値と比べるとどちらもやや低い傾向にある．

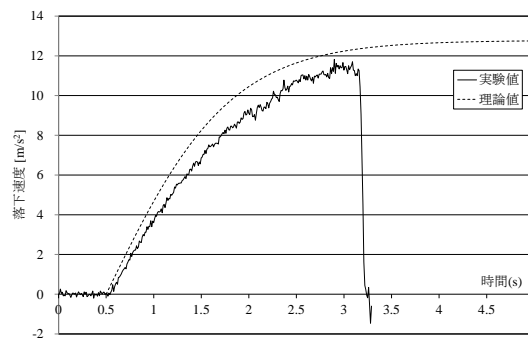
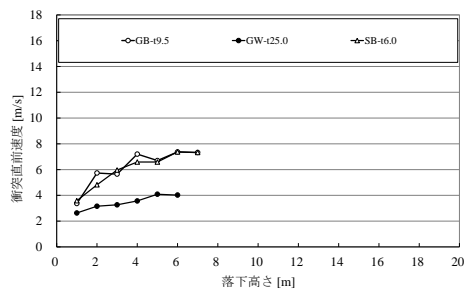
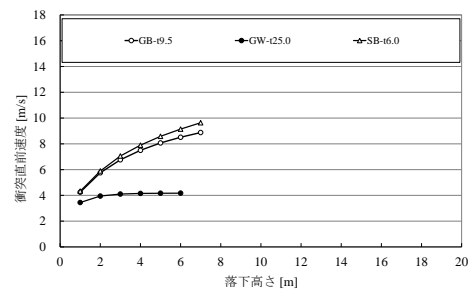


図 2.9 落下速度（CS-t8.0+RW-t12.0，落下高さ 20 m）

2. 天井材落下実験

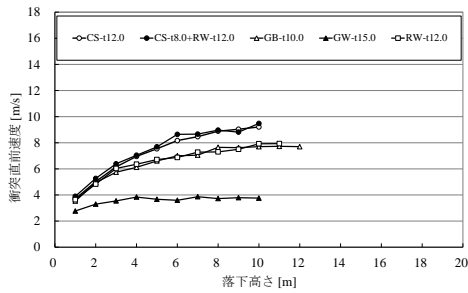


(a1) 実験値

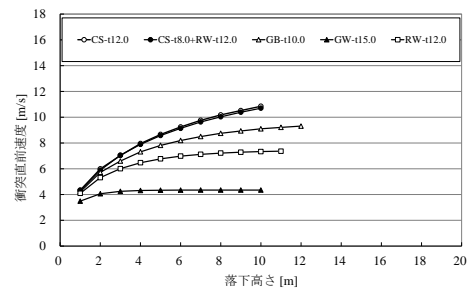


(a2) 理論値

(a) シリーズ 1

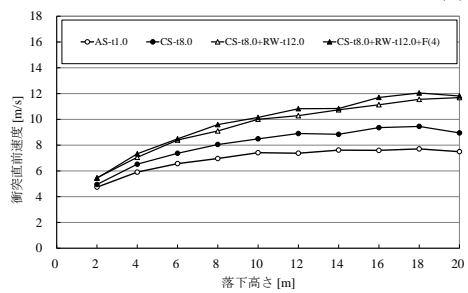


(b1) 実験値

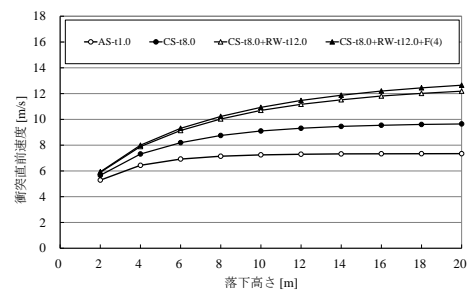


(b2) 理論値

(b) シリーズ 2

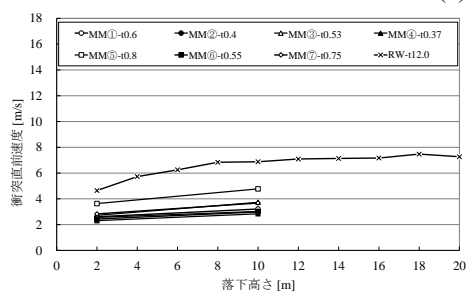


(c1) 実験値

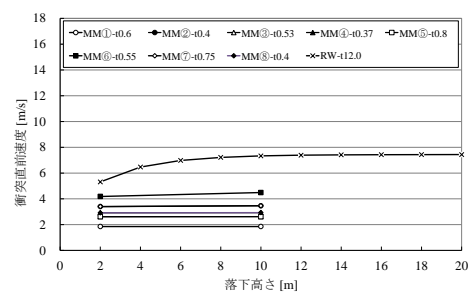


(c2) 理論値

(c) シリーズ 3



(d1) 実験値



(d2) 理論値

(d) シリーズ 4

図 2.10 落下高さと衝突直前速度の関係

図 2.10 に落下高さ与人頭模型への衝突直前速度の関係を理論値と共に示す．いずれの材料も落下高さの上昇と共に衝突直前速度は上がり，ある高さに達すると収束することがわかる．また，衝突直前速度は理論値に比べ実験値の方が低い傾向にある．これは，狙った場所に天井材を落とすために設置したガイドワイヤーの摩擦による影響であると考えられる．また，既往の実験で得られた落下高さと最大衝撃荷重の関係を図 2.11 に示す．ここで，最大衝撃荷重は時刻歴荷重の中で最大の値としている．比較的ばらつきが少なく安定したデータのとれていた衝突直前速度に比べ，最大衝撃荷重はばらつきが大きいことがわかる．

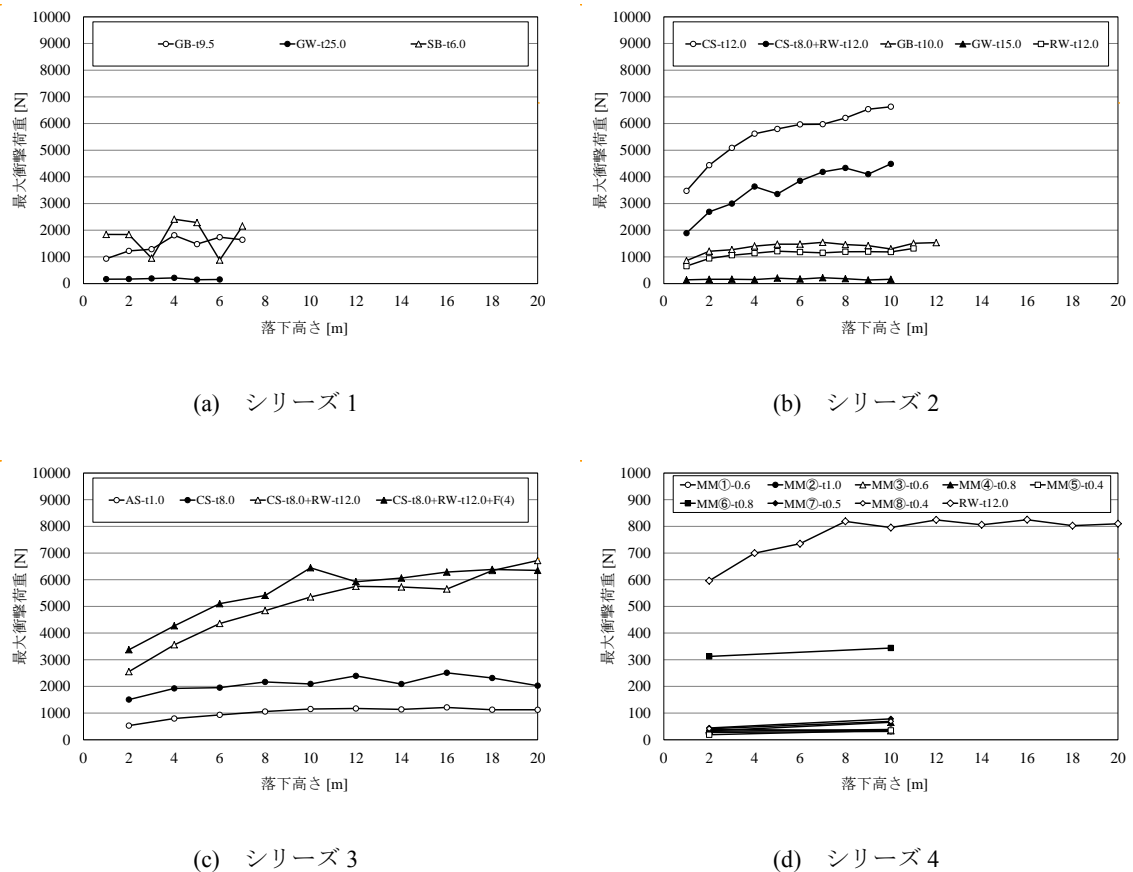


図 2.11 落下高さと最大衝撃荷重の関係

2.3 石膏ボード落下実験

石膏ボードは不燃材であり，価格が非常に安価であるというメリットから，天井材として世に広く普及している．従って，石膏ボードの落下実験を行い，データを蓄積することは天井材の危険度評価指標を確立する上で必要不可欠である．しかし，石膏ボードは落下時に多量の粉塵が発生するため，大塚らが過去に行った実験でも十分な回数の実験を行うことができていない．本節では，これらの粉塵によって周辺に影響の出ない環境を得ることによって石膏ボードの落下実験を行うことができたので，その結果[90]を示す．本実験を一連の天井材落下実験においてシリーズ 5 とする．実験は 7 種類の材料を組み合わせた 11 種類の天井材に対して 1~16 m の高さで合計 235 回の落下実験を行った（表 2.3）．代表として，実験で試験体として用いた 3 種類の石膏ボード（GB-D, GB-R, GB-P），野縁付き捨て張り（GB+RW+F(3), GB+RW+F(4)）の写真を図 2.12 に示す．前節で述べたように実験方法はシリーズが上がるごとに改良されている（特にガイドワイヤーとの接続）．そのため，本実験では試験体の設置方法，計測システム，天井材を水平に保ち狙った場所に落下させるためのガイドなどはシリーズ 3,4 の手法を踏襲している．但し，本実験はシリーズ 3,4 とは異なる実験環境で行われているため，予備実験としてシリーズ 3 で用いたものと同様のケイ酸カルシウム板を用いて落下実験を行い，得られた結果に大きな差異がないかを確認した後に行っている．

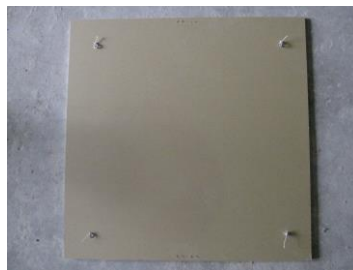
表 2.3 試験体一覧 (シリーズ 5[90])

	略称	材質	サイズ(mm)	重量(kg)	実験内容		ロードセル サンプリングレート
シリーズ5 (2012)	CS	ケイ酸カルシウム板	910×910×8.0	5.5	4,10,16mを1回ずつ	計3枚	10000Hz
	GB(D)	化粧石膏ボード	910×910×9.5	6.1	2~16m、2m毎、4回ずつ 但し6,10mのみ5回ずつ	計34枚	
	GB(R)	石膏ボード	910×910×9.5	6.5	10m、3回	計3枚	
	GB(R)	石膏ボード	910×910×12.5	8.1	1m、2~16m、2m毎、3回ずつ	計27枚	
	GB(R)+RW	石膏ボード	910×910×9.5	8.6	2~16m、2m毎、3回ずつ 但し2,4mのみ4回ずつ	計26枚	
		ロックウール吸音板	300×600×12.0				
	GB(R)+RW	石膏ボード	910×910×12.5	10.0	2~16m、2m毎、3回ずつ 但し12mのみ4回	計25枚	
		ロックウール吸音板	300×600×12.0				
	GB(P)	石膏吸音ボード	910×910×9.5 (孔径6mm、ピッチ 22mm、孔数40×40)	6.1	2~16m、2m毎、3回ずつ 但し8,12mのみ4回ずつ	計26枚	
	GB(R)+GB(D)	石膏ボード	910×910×12.5	12.8	2~16m、2m毎、3回ずつ 但し8,12,16mのみ4回ずつ	計27枚	
		化粧石膏ボード	910×910×9.5				
	GB(D)+F(4)	化粧石膏ボード	910×910×9.5	7.1	2~16m、2m毎、3回ずつ 但し12,14,16mのみ4回ずつ	計27枚	
		シングル野縁	19×25×0.5				
		ダブル野縁	19×50×0.5				
	GB(R)+RW+F(4)	石膏ボード	910×910×9.5	9.6	1m、2~16m、2m毎、3回ずつ	計27枚	
		ロックウール吸音板	300×600×12.0				
		シングル野縁	19×25×0.5				
ダブル野縁		19×50×0.5					
GB(D)+F(3)	化粧石膏ボード	910×910×9.5	6.9	1,2,4,10,16mを2回ずつ	計10枚		
	シングル野縁	19×25×0.5					
	ダブル野縁	19×50×0.5					

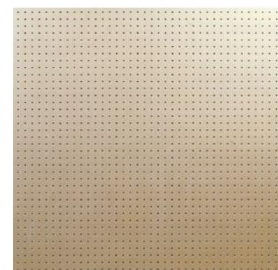
※Fの後の括弧内の数字は野縁の本数を示しており、3本の場合F(3)、4本の場合F(4)と記述している。
また、F(3)では衝突時に野縁が人頭模型の真上にくるように天井材の中央に配置している。



(a) GB-D



(b) GB-R



(c) GB-P



(d) GB-D-F(4)



(e) GB-D-F(3)

図 2.12 代表的な試験体

2. 天井材落下実験

実験は三重県四日市市に位置する 1 層鉄骨造の倉庫内で行った (図 2.13)。通常、石膏ボードの廃材倉庫等として用いられているため、落下実験に伴い発生する粉塵も周辺環境へ影響を与えないことが確認されている。以下、実験装置について概説する。図 2.14 に示すように、倉庫の棟 (高さ約 19 m) の 3 か所にアイボルトを設置した。中央のアイボルトは天井材を吊るための昇降式ホイスト用、その両脇は天井材を狙った位置に落下させるためのガイドワイヤー用である。ガイドワイヤーの下端にはワイヤー長さを調整できるフック付き金物が接続されており、シャックルを介してこれを磁力式鉄板保持器に接続する。地面 (粉状の石膏) には厚さ 2 cm の鉄板が敷かれており、その上に人頭模型が置かれている (図 2.15)。鉄板から 1 cm 程度浮かせた状態の磁力式鉄板保持器を引張り鉄板に固定することでワイヤーに張力を与える。次に、試験体 (天井材) の設置方法について概説する。ホイストのフックに天井材落下保持解放装置を接続し、紐を用いて天井材を落下保持解放装置から吊るす。ガイドワイヤーに予め通しておいた天井材水平保持用の部材 (パイプ (ステンレス, $\phi 5$ mm, 長さ 50 mm), コの字チャンネル (アルミ, $1 \times 7 \times 10$ mm, 長さ 300 mm), アングル (アルミ, $1.5 \times 30 \times 30$ mm 長さ 90mm) による構成) のアングル部分に天井材を樹脂製結束バンドで固定 (図 2.16) し、ホイストを昇降させることで、狙った高さからの落下実験を行う。天井材はワイヤー同士を結ぶ線と天井材の繊維方向が一致するよう設置した。

図 2.17 に示す落下保持解放装置により遠隔操作で天井材を落下させ、人頭模型に衝突させる。その際、天井材の落下速度及び人頭模型に入力される衝撃荷重を計測する。地上から遠隔操作で天井を落下させるため、落下保持解放装置にはラジコン用のサーボ機構 (株式会社ハイテックマルチプレックスジャパン社製 HS-M7990TH) とホイール式制御送信機 (双葉電子工業株式会社製 3PRKA) を利用した (図 2.18)。サーボモータの回転運動が連結した丸棒の直線運動に変換され丸棒が引っ込み、紐が外れ落ちるという仕組みである。

計測システムは図 2.19 に示すようにロードセル、スピードガン、データロガー、ノート PC から成る。それぞれの仕様を表 2.4 に、計測器の設置状況を図 2.20 に示す。



図 2.13 倉庫内実験場所



図 2.14 ホイスト及びガイドワイヤーの設置状況



図 2.15 人頭模型及び試験体設置状況

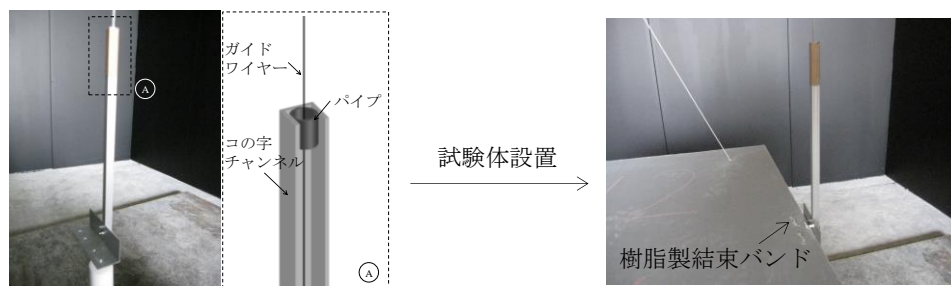


図 2.16 ガイドワイヤーとの接続部

2. 天井材落下実験



(a) 落下保持解放装置



(b) 設置状況

図 2.17 落下保持解放装置



図 2.18 ホイール式
制御送信機

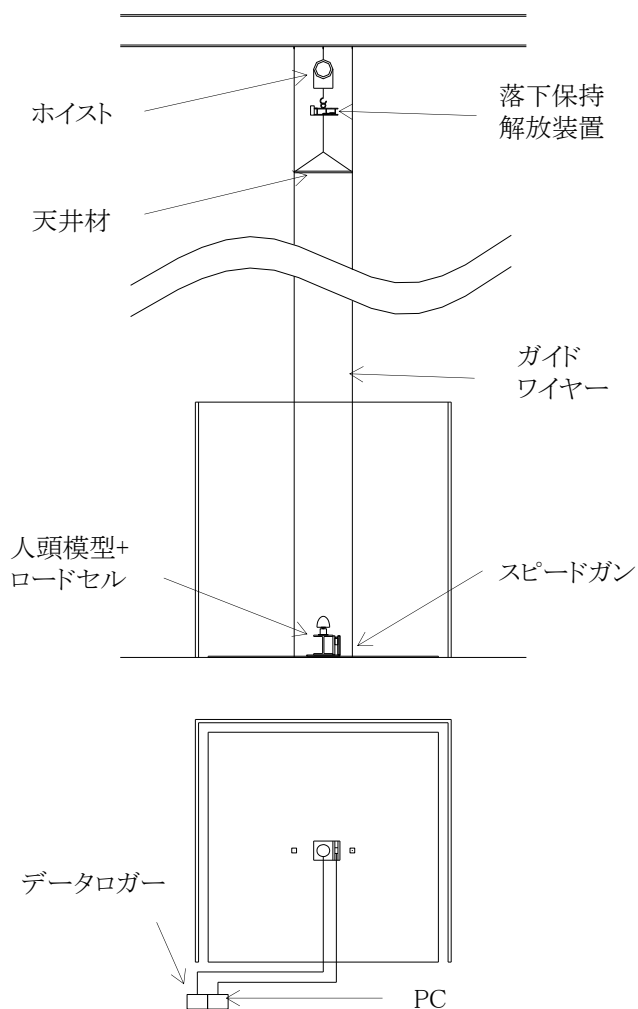


図 2.19 計測システム概念図

表 2.4 各種計測機器の仕様

機器	型番
人頭模型	JIS 規格衝撃吸収性試験用人頭模型（大型）（マグネシウム合金製）
ロードセル	共和電業社製引張圧縮両用型ロードセル LU-2TE （容量：±20kN，固有振動数：約 4.97kHz） 共和電業社製引張圧縮両用型ロードセル LU-50KE （容量：±500N，固有振動数：約 1.54kHz）
スピードガン	JENOPTIK 社製レーザー距離計・スピードセンサーLDM301.100
データロガー	共和電業社製 EDX-2000A

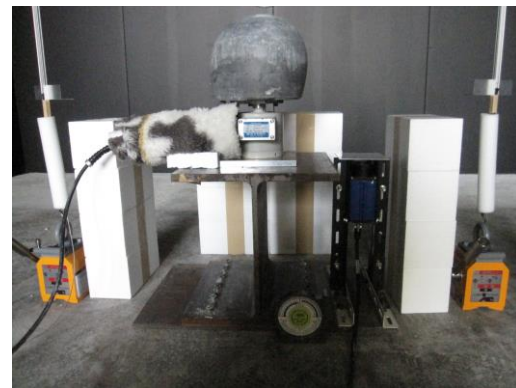
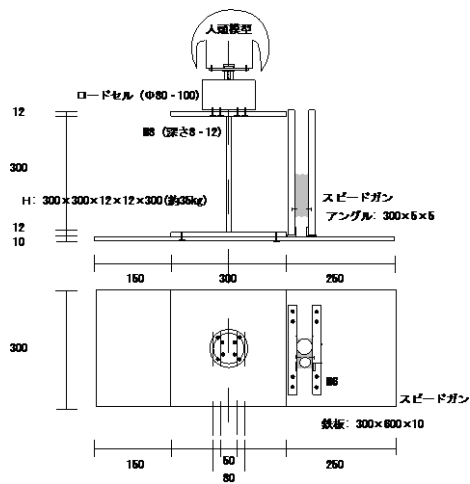
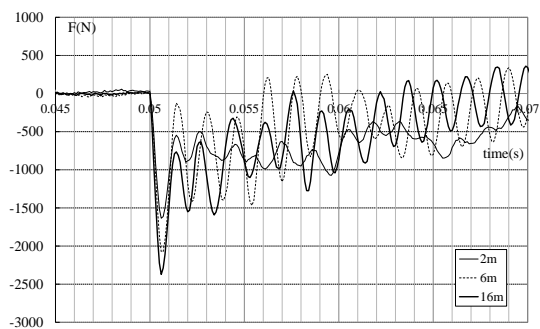


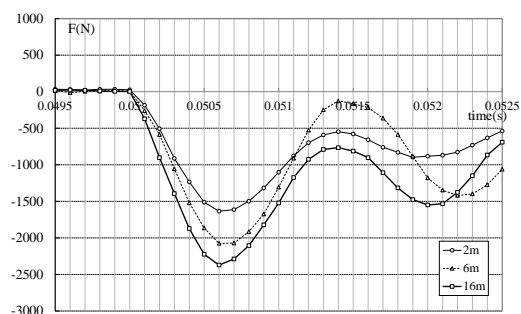
図 2.20 計測器設置状況

前項と同様に代表的な天井材の時刻歴衝撃荷重を破壊モードと共に図 2.21~図 2.26 に示す。

2. 天井材落下実験



(a1) 25 ms 間



(a2) 3 ms 間

(a) 時刻歴荷重



(b1) 2 m



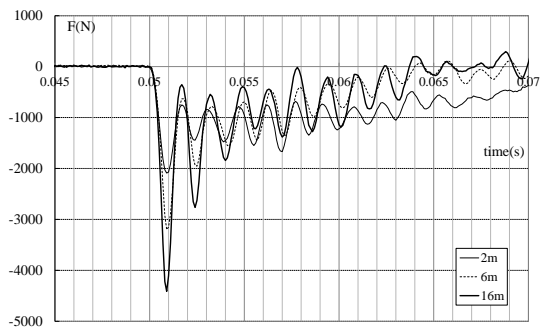
(b2) 6 m



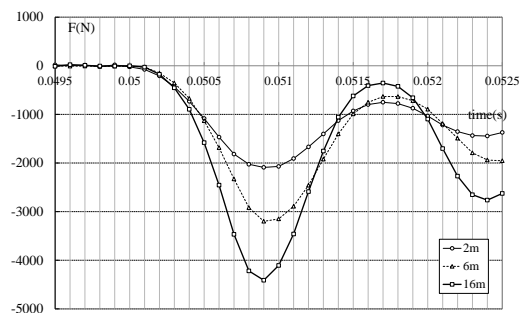
(b3) 16 m

(b) 破壊モード

図 2.21 化粧石膏ボード (GB(D)) -t9.5



(a1) 25 ms 間

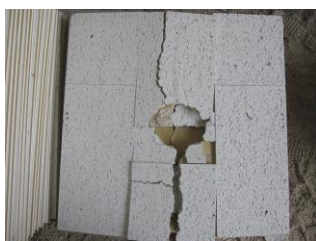


(a2) 3 ms 間

(a) 時刻歴荷重



(b1) 2 m



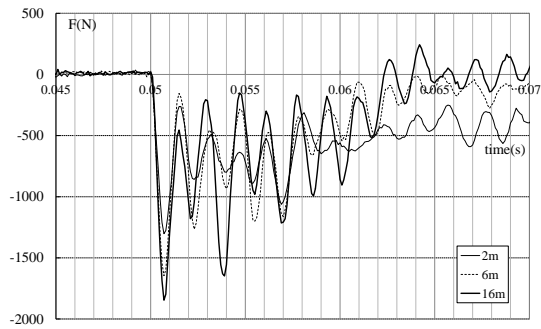
(b2) 6 m



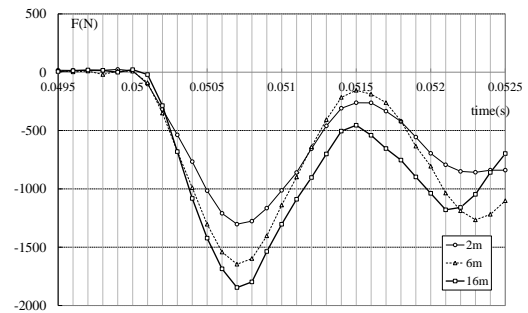
(b3) 16 m

(b) 破壊モード

図 2.22 石膏ボード (GB(R)) -t9.5+ロックウール吸音板 (RW) -t12.0



(a1) 25 ms 間



(a2) 3 ms 間

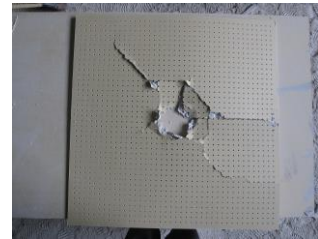
(a) 時刻歴荷重



(b1) 2 m



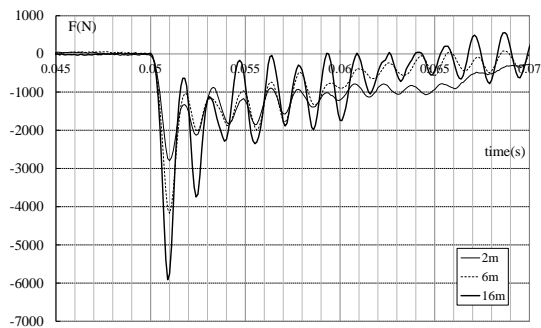
(b2) 6 m



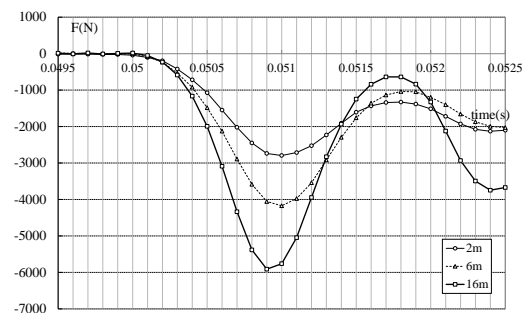
(b3) 16 m

(b) 破壊モード

図 2.23 有孔石膏ボード (GB(P)) -t9.5

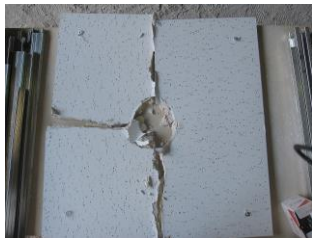


(a1) 25 ms 間



(a2) 3 ms 間

(a) 時刻歴荷重



(b1) 2 m



(b2) 6 m

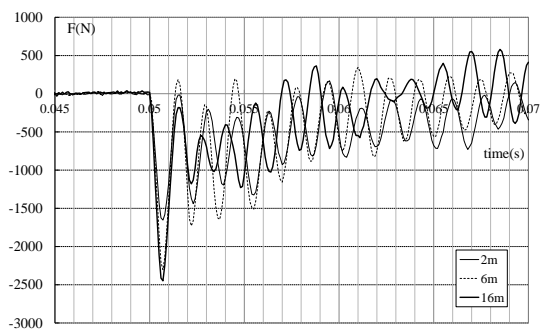


(b3) 16 m

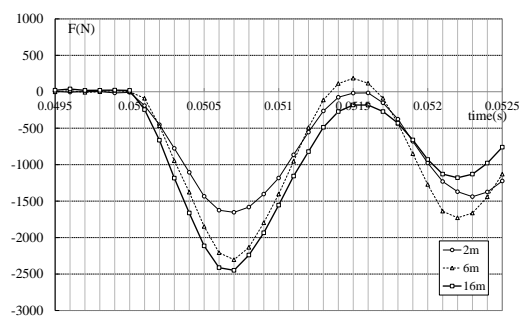
(b) 破壊モード

図 2.24 石膏ボード (GB(R)) -t12.5+化粧石膏ボード (GB(D)) -t9.5

2. 天井材落下実験



(a1) 25 ms 間



(a2) 3 ms 間

(a) 時刻歴荷重



(b1) 2 m



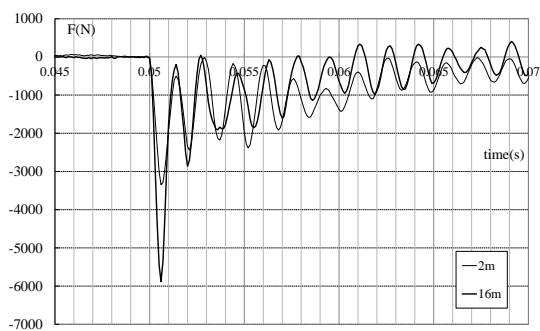
(b2) 6 m



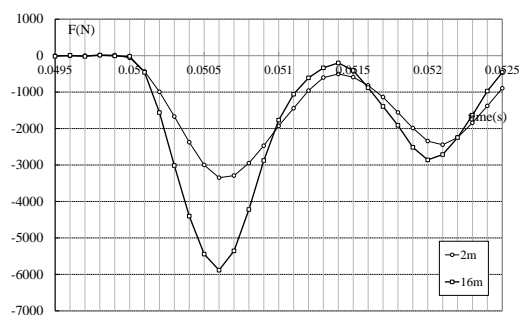
(b3) 16 m

(b) 破壊モード

図 2.25 化粧石膏ボード (GB(D)) -t9.5+野縁 (F) 4 本



(a1) 25 ms 間



(a2) 3 ms 間

(a) 時刻歴荷重



(b1) 2 m

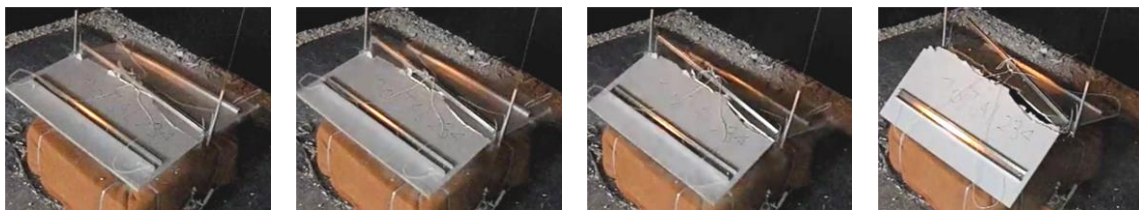


(b2) 16 m

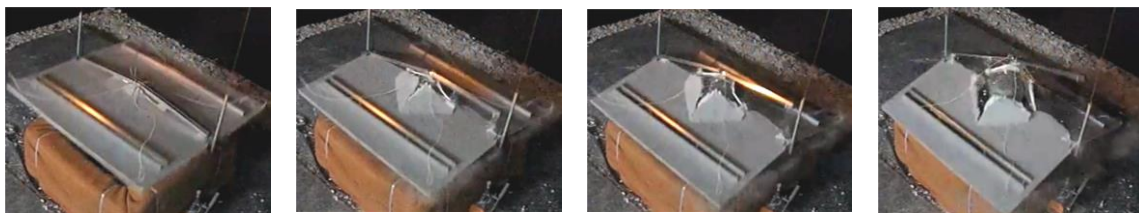
(b) 破壊モード

図 2.26 化粧石膏ボード (GB(D)) -t9.5+野縁 (F) 3 本

本実験では、高速カメラを用いて天井材の破壊の過程を記録し、その破壊モードを3つに分類した(図 2.27)。図内(a)は曲げにより天井材が折れ曲がり2つに割れるという破壊モードである。(b)は人頭模型が天井材を突き抜けるパンチング破壊が先行して発生し、その直後に天井材が折れ曲がり2つに割れて壊れる曲げ破壊が発生するという破壊モードである。(c)は人頭模型が天井材を突き抜けるパンチング破壊が発生するという破壊モードである。(b)ではパンチング破壊が発生すると同時に天井材が大きく折れ曲がっていることが観察されるが、(c)では天井材はほぼ平面を保ったままパンチング破壊が生じている。天井材にもよるが、(a)は2 m 付近で、(b)は6 m 付近で、(c)は10 m を超えた高さで発生する傾向にある。但し、破壊モードの変化が衝撃荷重に与える影響については特に見られなかった。



(a) 曲げ破壊



(b) 曲げ破壊+パンチング破壊



(c) パンチング破壊

図 2.27 連続写真による破壊モードの分類

2. 天井材落下実験

図 2.28 に落下高さ与人頭模型への衝突直前速度の関係を、図 2.29 に落下高さで最大衝撃荷重の関係を示す。衝突直前速度は理論値を用いることで概ね予測できることがわかる。最大衝撃荷重に関して野縁の付いた天井材に着目すると、野縁が付いたまま落下しても最大衝撃荷重は大きくは変わらないが、野縁が丁度頭の真上に来た場合には2~3 倍近く最大衝撃荷重が上がることをわかる。

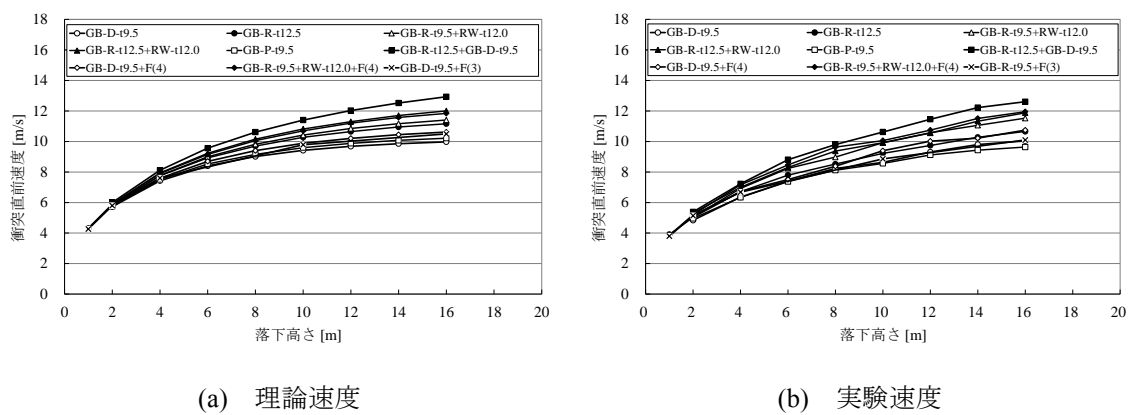


図 2.28 落下高さで衝突直前速度の関係

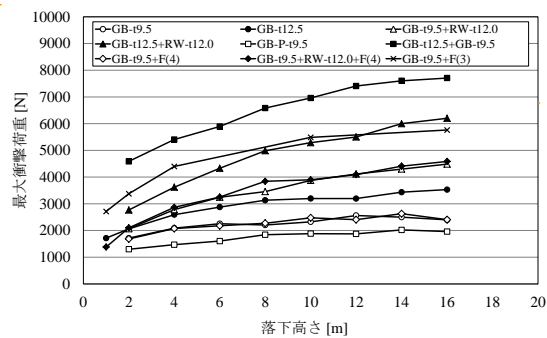


図 2.29 落下高さで最大衝撃荷重の関係

2.4 人頭模型の振動モードの推定

前節で既述したように、人頭模型下に設置したひずみゲージ式ロードセルで記録した時刻歴荷重の波形は、容量 20 kN のロードセルを用いた実験では約 650 Hz で、容量 0.5 kN のロードセルを用いた実験では約 150 Hz で振動していた。これは人頭模型（ここでは、人頭模型、ロードセル、H 形鋼によって構成された全体を表す）の固有振動数であると考えられる。そこで、容量 20 kN のロードセルを用いた場合の固有振動に対する振動モードの推定をインパクトハンマ（PCB Piezotronics 社製 model 086C03）を用いた打撃試験により行った。試験パターンを図 2.30 に示す。パターン 1 は、ロードセルをコンクリート上に置き真上から打撃を行ったものである。パターン 2 では、ロードセルを H 形鋼と接合するためのプレートを設置し、パターン 3 では、ロードセルの支持台として H 形鋼を設けた。パターン 4~6 はそれぞれパターン 1~3 に人頭模型を載せたものである。各条件で 1 回ずつ打撃を行い人頭模型下のひずみゲージ式ロードセルにて荷重を計測した。

パターン 1~6 それぞれで得られた時刻歴荷重から算出した荷重フーリエスペクトルを図 2.31 に示す。これらは全て直上から打撃したものである。パターン 1 のフーリエスペクトルから、約 4600 Hz で振動数が卓越しており、これがロードセル自体の固有振動数と考えられる。この値はカタログ値である約 4970 Hz と概ね一致している。パターン 2 からは、ロードセルにプレートを付けると固有振動数が 5000 Hz 付近まで上昇し固有振動数付近のフーリエ振幅が大きくなっていることがわかる。パターン 3 で得られたフーリエスペクトルは、パターン 2 とほとんど同じであり、H 形鋼による支持の影響は見られなかった。人頭模型を用いたパターン 4 では、卓越振動数が約 232 Hz と約 1400 Hz の 2 つに増えており、増えた固有振動に対応する振動モードは人頭模型の横揺れであると推測される。パターン 5 では、人頭模型を用いていないパターン 1,2 を比較した場合と同様にロードセルへのプレート設

2. 天井材落下実験

置による顕著な影響は見られていない。パターン 6 では、卓越振動数が更に 1 つ増えて 3 つの卓越振動数が確認された。人頭模型を用いていない場合には H 形鋼の支持による固有振動数への影響はなかったため、新たな振動モードは人頭模型の横揺れにより誘発されたモードであり、それは上フランジの縦揺れであると推測できる。このことは上フランジの上に錘を載せて行った打撃試験結果から固有振動数の変化を確認することで確かめている。また、全てのパターンにおいて振動数約 3700 Hz の卓越した成分が見られるが、これはパルスの成分であり信号に含まれる雑音成分であると考えられる。

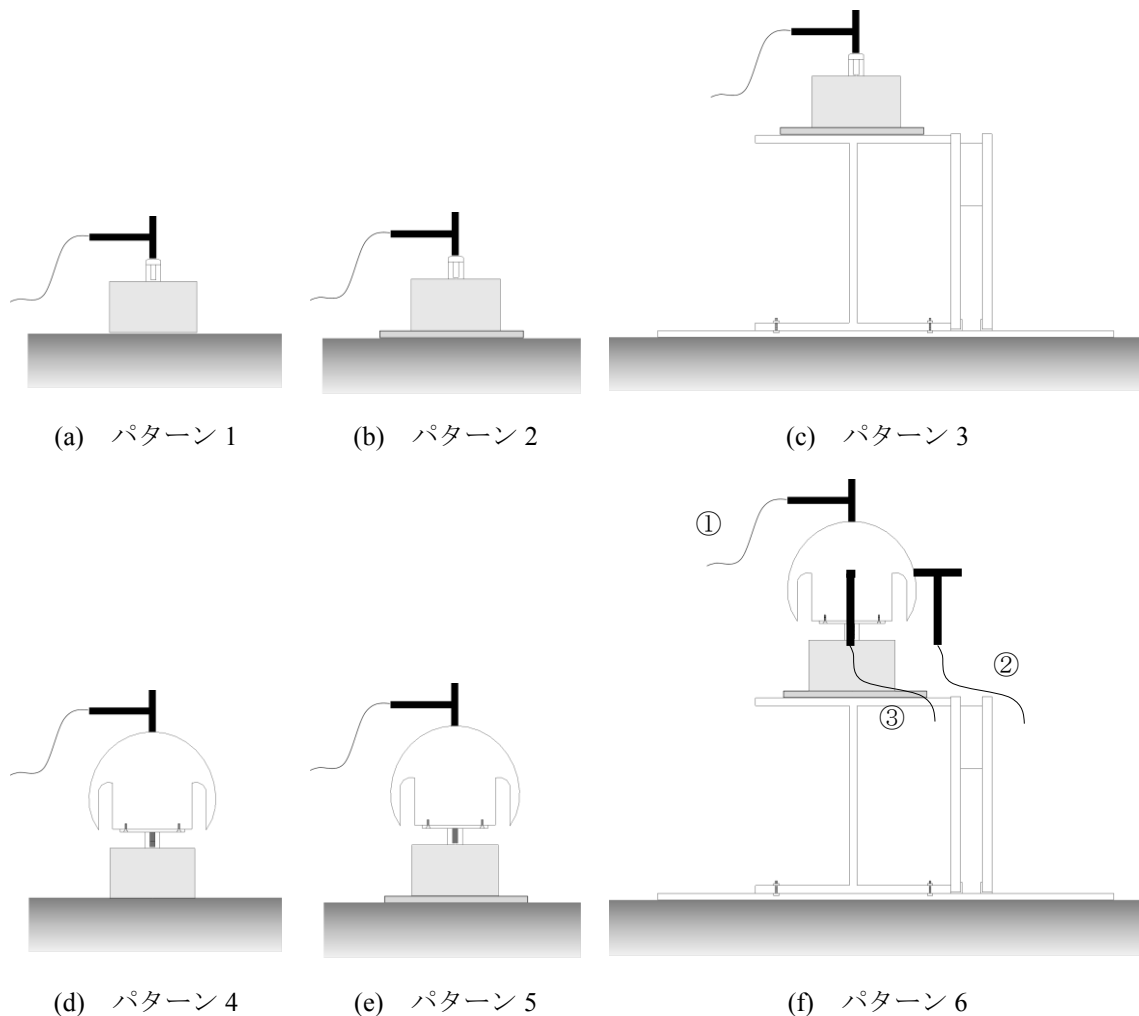
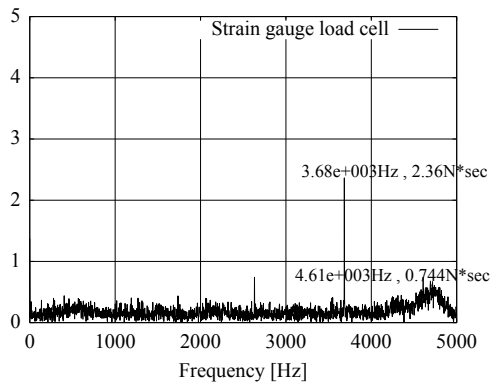
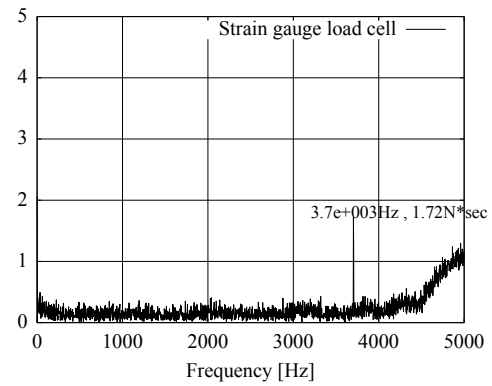


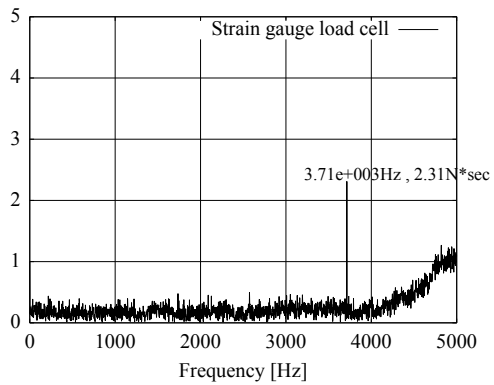
図 2.30 試験パターン



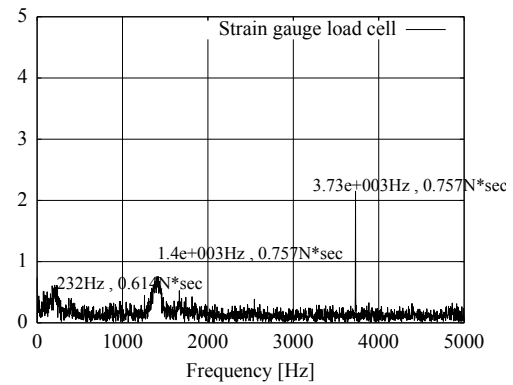
(a) パターン 1



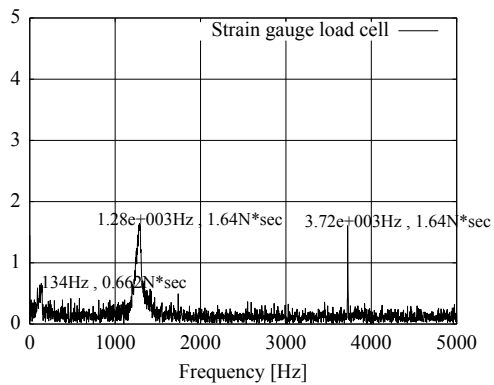
(b) パターン 2



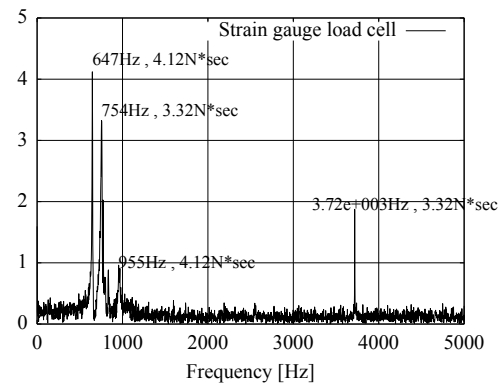
(c) パターン 3



(d) パターン 4



(e) パターン 5



(f) パターン 6 (打撃方向: ①)

図 2.31 荷重フーリエスペクトル

2. 天井材落下実験

ここで、パターン 6 において発生していると推測される振動モードを図 2.32 に示す。どの卓越振動数がどのモードに対応するかを特定するため、パターン 6 について図 2.30(f)に示す 3 通りの方向から打撃を行った。打撃方向②と③で得られた荷重フーリエスペクトルを図 2.33 に示す。打撃方向②のフーリエスペクトルを見ると、卓越振動数が一つ減っているのがわかる。この減った約 955 Hz に対応する振動モードは人頭模型の縦振動と推定される。次に打撃方向③のフーリエスペクトルを見ると、さらに卓越振動数が一つ減っているのがわかる。この減った約 652 Hz に対応する振動モードは、人頭模型の横揺れによって誘発された上フランジの縦振動と推定される。残った約 752 Hz に対応する振動モードは人頭模型の横揺れであり、これで全ての卓越振動数に対応する振動モードを推定できた。

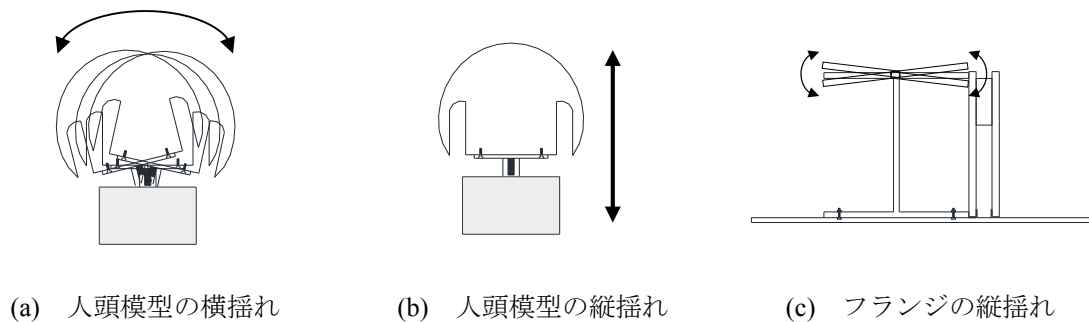


図 2.32 振動モード

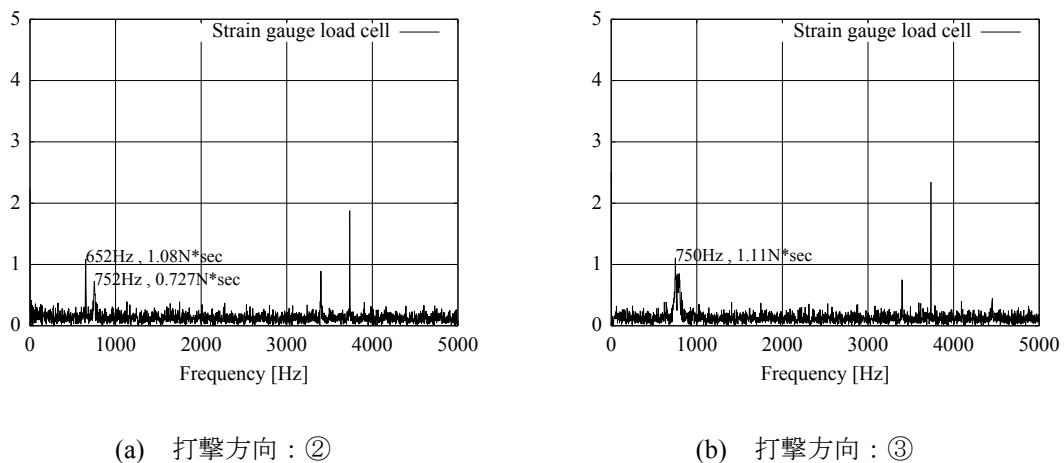


図 2.33 パターン 6 の荷重フーリエスペクトル

2.5 結言

本章では、天井材の落下衝撃力を把握するため片山らが行った実験の結果を整理し、著者の行った石膏ボード落下実験のデータを追加した。本章で用いたグラフは内田らが行って得た実験の生データを利用し、著者が作成し直したものである。また、インパクトハンマによる人頭模型の打撃試験を行い、人頭模型の振動モードを特定した。本章で得られた知見を以下に示す。

- ・石膏ボードの落下実験を行い、異なる落下高さにおける最大衝撃荷重を計測した。
- ・時刻歴荷重の波形から、10 kHz というサンプリングレートで最大衝撃荷重を捉えられていることを示した。
- ・時刻歴荷重の波形は容量 20 kN のロードセルを用いた実験では約 650 Hz で、容量 0.5 kN のロードセルを用いた実験では約 150 Hz で振動していることを示した。
- ・時刻歴波形に見られた振動は H 形鋼を土台とした人頭模型の系の固有振動数であり、ロードセルの重量や人頭模型との接続箇所の形状等の違いの影響を受けることがわかった。
- ・人頭模型下に設置したロードセルで記録した最大衝撃荷重は人頭模型の固有振動数と思われる波の 1 波目で計測されており、衝撃面における真の衝撃荷重と計測荷重の間に誤差が含まれる可能性を指摘した。
- ・打撃試験により得られた時刻歴荷重のフーリエスペクトルから 3 つの卓越振動数が確認され、それぞれに対応する振動モードを特定した。それらは、人頭模型の縦揺れ及び横揺れ、H 形鋼の上フランジの縦振動であり、天井材落下実験で得られた時刻歴荷重の波形にもこれらの影響が表れていた。
- ・落下高さが高くなるにつれて最大衝撃荷重は大きくなるが、その値は天井材の人頭模型

2. 天井材落下実験

への衝突直前速度が空気抵抗により収束すると共に収束する傾向にある。

- ・衝突直前速度は、空気抵抗を考慮した自由落下の理論式から概ね推定することができる。
- ・高速カメラで衝突時の撮影を行い、各種天井の破壊モードを記録した。破壊モードは、曲げ破壊、曲げ破壊＋パンチング破壊、パンチング破壊の 3 種類である。これらのモードは落下高さの上昇と共に変化する。

多くの天井材は、割れや貫通を伴う脆性的な破壊を示すことや人頭模型頂部に設置できるような曲面を有するロードセルの入手が難しいことから衝突面での衝撃荷重計測は困難である。そのため、本章における実験では、人頭模型下に設置したひずみゲージ式のロードセルで衝撃荷重を計測した。サンプリングレートを 10 kHz とすることで最大衝撃荷重を捉えることはできたが、時刻歴荷重の波は一定の周期（H 形鋼を含む人頭模型の系の固有振動数）で揺れており、最大衝撃荷重はその波の一山目のピークであるため系の固有振動数の影響を受けていると考えられる。つまり、衝突面から人頭模型下に設置したロードセルまで荷重が伝播する過程で荷重は増減していると考えられる。そこで、次章以降ではロードセルの記録を用いて衝突面での最大衝撃荷重の推定を行う。

3. 逆問題解析による衝撃力の推定法

3.1 緒言

衝撃問題は様々な分野で取り扱われている。建築・土木分野においても、天井材・壁材等の非構造材の落下、台風・竜巻・爆発等による飛散破片物の衝突、テロによる爆破、落石防護用のロックシェッド、砂防堰堤、道路のガードフェンス、波浪衝撃に対する防波堤、シャルピー試験や重錘落下試験等の検査等多くの事例が挙げられる。衝突とは物体同士の動的な接触問題であり、衝撃力とは接触応力の合力を表す。物体の衝突面における接触応力により生じる波動（縦波、せん断波、表面波等の応力波）が伝播することで物体内部に衝撃応力が発生する。衝撃負荷を受ける物体の応力解析を行う上でも実験によって衝撃力を精確に計測することは非常に重要である。

従来衝撃荷重の計測は直接測定法や間接測定法[93]により行われている。直接測定法は、圧電素子等を使用したトランスデューサを衝突面に取り付けて衝撃力を計測する方法である。トランスデューサの出力波形が直接衝撃力波形を表しているため簡便に衝撃力を計測することができる。但し、衝突面にトランスデューサを取り付けることによる接触状態の変化や、トランスデューサ自体の振動により衝撃力波形が正確に計測できない場合がある。一方で、間接測定法は衝撃力の伝播が理論的に明らかとされている棒等を衝撃体として用いて、衝突面から少し離れた衝撃体表面に接着したひずみゲージの出力から衝撃荷重を間接的に求める方法である。衝撃体には、衝撃力の伝播が理論的に明らかとなっている棒や板等比較的単純な形状の物体にしか用いることができない。間接測定法の一つとして衝撃体に加速度センサを取り付け、計測した加速度に衝撃体の質量を乗じて衝撃力を算出する方法も挙げられるが、上述した測定法では本研究のように脆性的な破壊を示す板材の衝撃力を精確に計測することは非常に困難である。

近年では、1.1.5 項に記したように上述した測定法の他に応答や結果などの原因から入力

3. 逆問題解析による衝撃力の推定法

を推定する逆問題解析手法を利用した衝撃力の計測方法が研究されている．物体に作用する衝撃力を入力とし，ひずみ，変位，加速度等の応答を出力とする線形の系を仮定すると，入力と出力はインパルス応答関数を用いて畳み込み積分により関係付けられる．従って，インパルス応答関数を予め理論や実験により求めておけば，計測した出力から逆畳み込みを行うことで入力である衝撃力を求めることができる．つまり，本計測方法を用いれば，H型鋼を含む人頭模型の系を線形の系と仮定した場合に系のインパルス応答関数さえ求めておけば，人頭模型下に設置したロードセルの記録から衝突面での荷重を推定することが可能であることを示唆している．本章では，衝撃力の原波形解析の理論について紹介する．

3.2 衝撃力の原波形解析

本節では、本研究で扱う積分変換を用いた衝撃力の原波形解析に関する既往の研究を紹介する。衝撃力の原波形解析とは、ある物体に入力された衝撃力をその衝撃力による応答である何らかの物理量を基に同定するという問題である。従って、衝撃の作用点から出力の計測点までに衝撃がどのように伝播されるかを把握する必要がある。そのアプローチ方法は、(方法 1) 理論的手法、(方法 2) 有限要素解析プログラムや境界要素解析プログラム等を用いた数値解析的手法、(方法 3) 実験的手法、に大別することができる。理論的方法 [112] は、古くから多くの研究がなされているが、明らかにされた伝播理論は棒や板等の単純な形状のみで適用範囲は限られている。境界要素解析プログラムを用いた数値解析手法 [113] についても同様のことが言える。それらに対し、実験的手法は、衝撃の伝播過程がわかりづらいような形状の物体に対しても適用が可能である。また、方法 2 に比べて計算量は格段に少なく済むため比較的容易に行えるという利点もある。構造物の安全性や信頼性の検討を行う上で構造物に入力される衝撃力を同定することは非常に重要であり、様々な衝撃現象において本手法が適用されている。

実験的手法は次の手順で行なわれる。

1. まず、系（物体）の伝達関数を同定するため較正実験を行う。ある系に対して作用する衝撃力を入力、衝突点以外の場所で計測されたひずみ、変位、加速度等の応答を出力として両者を計測する。入出力のデータをフーリエ変換し、伝達関数を求める。
2. 任意の衝撃力に対する出力を計測し、出力のフーリエ変換を 1 で求めた伝達関数で除し、フーリエ逆変換して衝撃力を算出する。

上述した 2 回の逆畳み込みにより衝撃力を求める。伝達関数を求める際の較正実験方法には、周波数掃引法、インパルス応答法、ランダムノイズ法があるが、負荷逆問題において

3. 逆問題解析による衝撃力の推定法

は簡易に高周波域まで一定のパワーを与えることのできるインパルス応答法が多く用いられている。また、逆畳み込みの計算方法には、フーリエ変換を用いる方法と、畳み込み積分を時間領域で離散化して連立一次方程式に帰着させて解く方法がある。放生らは両方の方法で衝撃荷重を推定したが、大きな差は見られなかった[114]。フーリエ変換を用いる方がデータの演算処理を効率よく行うことができ、また信号処理の分野で発展した様々なデータ処理方法を活用できるため、ここではフーリエ変換を用いた方法に焦点を当てる。

方法 3 はあくまで実験的手法であり経験的に得られる知見も多い。そのため、較正実験の方法や、どのような衝撃に対して逆解析の適用性があったか等の情報は有用である。そこで、フーリエ変換等の積分変換を用いて系の伝達関数を実験的に同定した研究（表 3.1）について以下に纏める。Holzer[115]は高速圧縮実験において材料のひずみ-応力関係を計測する技術を示すことを目的とし実験を行った。較正実験では、 $\phi 0.25$ in. ($=0.64$ cm) の鋼製のボールベアリングを市販のアルミニウムに落下させ試験体の下に設置したロードセルで衝撃荷重を計測した。サンプリングレートは 500 kHz である。理論的に求めた衝撃力と記録した出力を基に伝達関数を算出している。計測した値に比べ逆解析で求めた衝撃力は振動成分が除去されていることは確認されているが、その妥当性は示されていない。岸本ら[116]は、衝撃破壊靱性試験で試験片に発生する衝撃力を精確に計測することを目的とし実験を行った。較正実験では、ほぼフリーになるように $\phi 30$ mm の鋼球と $\phi 20$ mm の円柱棒を吊り、鋼球を円柱棒に衝突させた。衝撃力は鋼球に取り付けた加速度計の値から算出し、出力は衝撃が作用する円柱棒の端点から 100 mm の位置に取り付けたひずみゲージでひずみを計測した。伝達関数は、32 回の試験それぞれで得られた伝達関数の積算平均を用い、Hamming ウィンドウによる平滑化処理を行っている。較正実験時より大きめの $\phi 40$ mm の鋼球を用いて較正実験で得られた伝達関数から衝撃力を推定しその妥当性を示した。さらに、構造用炭素鋼 S45C 及び耐食アルミニウム合金 6061-T6 の疲労予き裂入り試験片を用いて衝撃力を計測した。中尾ら[117]は、木造住宅の床衝撃音を低減する研究の一環として、

金属落下、運動靴歩行、ハイヒール歩行等の木質床への衝撃力とその作用時間を求めることを目的に実験を行った。較正実験では、パチンコ玉（重さ 5.45 g, ϕ 1.1 cm）を合板床パネル（91.6 cm 角, 15 mm 厚, 5 プライ）に上方 30 cm から落下させ伝達関数を同定した。パチンコ玉の衝撃力は既知のものをを用い、木質床側は衝撃点から 15 cm 離れた位置に取り付けた加速度計で加速度を計測している。運動靴歩行、ハイヒール歩行の疑似音源としてゴムマリ落下、タッピングマシンの衝撃点での波形を推定し、衝撃力の大きさ及び作用時間の算出を行ったが、逆解析の妥当性については検証されていない。放生ら[114]は、逆解析をシャルピー試験時の衝撃力測定に応用することを目的に実験を行った。較正実験では、 ϕ 20 mm, 長さ 256 mm の鋼製の棒を長さ 200 mm, ϕ 20 mm の平滑試験棒と先端 50 mm を ϕ 42 mm とした段付き試験棒に落下させた。衝突体と被衝突体の間に ϕ 20 mm, 長さ 2048 mm の棒を挿入し、棒の中央に貼ったひずみゲージから衝撃力を算出した。被衝突体には、同様に中央にひずみゲージを貼付しひずみを計測した。サンプリングレートは 500 kHz である。逆畳み込みの演算方法に関する検討を行っており、指数窓の利用を検討している。衝撃力を変化させるため、被衝突体の直上にはアルミニウムの円柱を挿入し、長さ 512 mm と 1024 mm の落下棒で打撃を行い、衝撃荷重を推定してその妥当性を示した。そこで、逆解析をシャルピー試験に適用し衝撃荷重を求めた。Chang ら[118]は、単純な形状や支持条件に限られていた衝撃の研究を拡張し、逆解析の実際の構造物への適用性を調べることを目的に実験を行った。較正実験では、 ϕ 1/8 in. (=0.32 cm) のボールを 30 cm 上方から 1 x 10 in. (=2.54 x 25.4 cm) の炭素繊維複合板に落下させた。衝撃力は、衝突体であるボールにロードセルを取り付けて計測し、板の真ん中とそこから 1 in. 離れた箇所にひずみゲージを貼付しひずみを計測した。サンプリングレートは 1000 kHz である。計測した衝撃荷重と推定結果が合うかを比較している。違う大きさの鉄球の衝撃荷重を推定はしているが、その妥当性の検証は行っていない。辻ら[119]は、衝撃による放射音から衝撃力を逆解析により同定することを目的に実験を行った。較正実験では、細長い衝撃棒を 760 mm で両端支持された棒に落下さ

3. 逆問題解析による衝撃力の推定法

せた．衝撃力は、 $\phi 20\text{ mm}$ 、長さ 300 mm のジュラルミン棒の先端から 14 mm の位置に張り付けたひずみゲージから求めている．出力としては、衝撃音をマイクロフォンで計測した．FFT 時には指数窓を用いている． $\phi 20\text{ mm}$ 、長さ 150 mm のジュラルミン棒の先端から 14 mm の位置に張り付けたひずみゲージから求めた衝撃力で推定結果が合うか確認している．形状の異なる衝突体を用いて、ひずみゲージによる推定値と音による推定値といった推定値同士を比較している．衝突体として、ジュラルミン棒を用いて軟鋼、アクリル、ポリエチレン、木といった様々な材質の被衝突体に衝突させて衝撃荷重と推定値が一致することを確認している．

上述の研究では、伝達関数の同定の際に窓関数として指数関数を用いてフーリエ変換を行ったり、複数回の試験の積算平均を用いたりしているが、それによる効果についての検証はなされていない．井上ら[94, 107, 120, 121]は、負荷逆問題における不適切性を明らかにし、衝撃力の伝播現象が理論的に解明されている弾性棒の縦衝撃に関する数値解析を行い、適切化を行うための伝達関数の算出方法及びラプラス変換の有効性を示した．これらについては 3.3 節及び 3.4 節で詳細に述べる．

表 3.1 フーリエ変換等の積分変換を用いて系の伝達関数を実験的に同定した研究

	被衝突体	サンプリングレート [kHz]	伝達関数	窓関数	妥当性の検証 (1.2.3項参照)
Holzerら[115]	試験片	500	H_1	-	-
岸本ら[116]	3点曲げ試験片	-	H_2	Hamming窓	段階3
中尾ら[117]	合板床パネル	33	H_1	-	-
放生ら[114]	平滑試験棒, 段付き試験棒, シャルピー衝撃試験機	500	H_1	指数窓	段階3
changら[118]	炭素繊維複合板	1000	H_1	-	段階3
辻ら[119]	角棒（鋼材）, 軟鋼丸棒, アクリル丸棒, ポリエチレン丸棒, 木材の角棒	1000	H_1	指数窓	段階3
井上ら [94,107,120,121]	梁, 平板, シャルピー衝撃試験機	500	$H_1\sim H_5$	指数窓	段階1~3

3.3 積分変換を利用した原波形解析における不適切性

物体の1点に衝撃荷重 $f(t)$ が作用するとき、他の任意の点での応答 $e(t)$ を計測する。 $f(t)$ を入力、 $e(t)$ を出力とする線形の系を仮定すると、両者の関係は次式の畳み込み積分で表される。

$$e(t) = \int_0^t h(\tau) \cdot f(t - \tau) d\tau \quad (3.1)$$

ここで、 $h(t)$ は系のインパルス応答であり、 $t < 0$ において $f(t) = e(t) = h(t) = 0$ である。(3.1)式から畳み込み則より、

$$F(\omega) = E(\omega) / H(\omega) \quad (3.2)$$

が得られる。ここで、 $F(\omega)$ 、 $E(\omega)$ 、 $H(\omega)$ はそれぞれ $f(t)$ 、 $e(t)$ 、 $h(t)$ のフーリエ変換で、 $H(\omega)$ は系の伝達関数である。

一般に逆問題は数学的に不適切であることが多く、測定データに含まれる様々な測定誤差により結果が不安定になりやすい。負荷逆問題における不適切性を図 3.1 に示す測定時の雑音を考慮した線形システムの入出力モデルを例に挙げて示す。ここでいう雑音とは、「測定対象からの真の信号以外の全ての信号成分」を示す。較正時の実験データを用いて(3.2)式により伝達関数を推定すると、

$$\hat{H}(\omega) = \frac{Y(\omega)}{X(\omega)} = \frac{E(\omega) + N(\omega)}{F(\omega) + M(\omega)} \quad (3.3)$$

となる。一般に、高周波成分は周波数が高くなるほど減衰する傾向にあるのに対し、雑音成分は高周波域に渡って一定となるため、高周波域では雑音成分の影響が大きくなる。これにより、伝達関数の推定精度は低下する。また、(3.2)式に従い、出力（測定）から真の入力を推定すると、

$$\hat{F}(\omega) = \frac{Y(\omega)}{H(\omega)} = \frac{E(\omega) + N(\omega)}{H(\omega)} \quad (3.4)$$

3. 逆問題解析による衝撃力の推定法

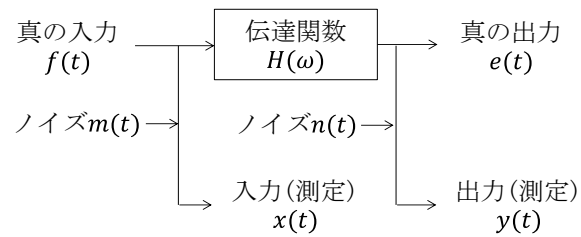


図 3.1 測定時の雑音を考慮した線形システムの入出力モデル[94]

となる．真の伝達関数が既知であると仮定し，全周波数域において 0 でない場合においても，0 に近くなる高周波域においては入力に含まれる雑音成分が除算によって拡大される．これにより，衝撃力の推定精度はさらに低下する．こうした高周波の除去方法には平滑化（移動平均法（単純移動平均法，多項式適合法，適応化平滑法）及び周波数領域法）があり，衝撃力計測時の波形処理に対しても用いられている．但し，波形に含まれる高周波成分の衝撃力に対する影響は未知なことから，無造作に平滑化を行うと衝撃力波形を歪めてしまう恐れがある．上述した逆解析における 2 つのステップそれぞれで雑音による誤差の拡大が発生し，それらが負荷逆問題における不適切性となる．

3.4 定式化

入出力に含まれる雑音成分の影響を減らすため、真の衝撃力と推定衝撃力の残差の 2 乗平均を最小とする計算手法がある。以後では、計測したデータに含まれる雑音成分 $m(t)$, $n(t)$ は平均値 0 の定常不規則信号とする。

真の入力と出力の測定データは畳み込み積分により次式により表される。

$$y(t) = \int_0^t h(\tau) \cdot f(t-\tau) d\tau + n(t) \quad (3.5)$$

真のインパルス応答関数 $h(t)$ を仮に同定できたとしても、ノイズ $n(t)$ の影響で上式からは真の出力を求めることはできない。そこで、出力と入力との関係を逆に捉え、次式のような線形の逆システムを考えることで衝撃力の推定を試みる。

$$\hat{f}(t) = \int_{-\infty}^{\infty} g(\tau) \cdot y(t-\tau) d\tau \quad (3.6)$$

$g(t)$ は逆システムのインパルス応答関数であり、線形、時不変である。

ここで、 ε を期待値演算子として、衝撃力の推定誤差である残差 $r(t)$ の 2 乗平均値

$$R = \varepsilon \left\{ \left[\hat{f}(t) - f(t) \right]^2 \right\} \quad (3.7)$$

を最小とする逆システムの伝達関数 $G(\omega)$ を求める。これは、残差 $r(t)$ と出力側記録 $y(t)$ が直交するとき、すなわち次式が成り立つとき最適となる。

$$\varepsilon \left[\left\{ f(t) - \int_{-\infty}^{\infty} h(\tau) y(t-\tau) d\tau \right\} y(t-\sigma) \right] = 0, \quad -\infty < \sigma < \infty \quad (3.8)$$

(3.8)式より、自己相関関数 $R_{yy}(\tau)$ と相互相関関数 $R_{yf}(\tau)$ を用いて次式が得られる。

$$R_{yf}(\sigma) = \int_{-\infty}^{\infty} g(\tau) R_{yy}(\sigma-\tau) d\tau, \quad -\infty < \sigma < \infty \quad (3.9)$$

畳み込み則により、残差の二乗平均を最小にする意味で最適な逆システムの伝達関数は、

$$G(\omega) = \frac{S_{yf}(\omega)}{S_{yy}(\omega)} \quad (3.10)$$

3. 逆問題解析による衝撃力の推定法

となる． $S_{yy}(\omega)$ と $S_{yf}(\omega)$ はそれぞれ $R_{yy}(\tau)$ と $R_{yf}(\tau)$ のフーリエ変換である．ここで，雑音が $m(t)$ ， $n(t)$ がそれぞれ他の測定データと無相関であることから，

$$S_{yf}(\omega) = S_{yx}(\omega) \quad (3.11)$$

が成り立ち，(3.10)式は，次式のように入出力の測定データを用いて表すことができる．

$$G(\omega) = \frac{S_{yx}(\omega)}{S_{yy}(\omega)} \quad (3.12)$$

上式は，出力に相関のない誤差が入力に含まれていた場合に真の衝撃力と推定衝撃力の残差の二乗平均を最小にする伝達関数であり，非因果的ウィーナフィルタの伝達関数と同様である．この伝達関数は，入力に含まれる誤差の影響を減らす効果を有する．

較正実験における雑音による測定データの誤差は極力減らす必要がある．較正実験を複数回行い単純に積算平均にすることでもその効果が得られる．ここでは，自己スペクトル密度関数 $S_{yy}(\omega)$ 及び相互スペクトル密度関数 $S_{yf}(\omega)$ の推定値を次式のようにアンサンブル平均で求め，

$$\begin{aligned} \hat{S}_{yy}(\omega) &= \frac{1}{T} \sum_{j=1}^k Y_j^*(\omega) Y_j(\omega) \\ \hat{S}_{yf}(\omega) &= \hat{S}_{yx}(\omega) \\ &= \frac{1}{T} \sum_{j=1}^k Y_j^*(\omega) X_j(\omega) \end{aligned} \quad (3.13)$$

(3.10)式に代入することで，伝達関数が次式で求まる．ここで， $j=1 \sim k$ は打撃試験の回数を， $*$ は複素共役を表す．フーリエ変換は $0 \leq t \leq T$ の範囲で行っている．

$$\hat{G}(\omega) = \frac{\sum_{j=1}^k Y_j^*(\omega) X_j(\omega)}{\sum_{j=1}^k Y_j^*(\omega) Y_j(\omega)} \quad (3.14)$$

上述した伝達関数は入出力を逆に捉えると出力に含まれるノイズを最小にする伝達関数が求まる．以上が負荷逆問題における適切化処理である．

上記の伝達関数の有効性は井上らにより数値解析的にも実験的にも確認されている[94]が，本研究においても有効であるか調べるため，次章以降では次に示す 5 つの伝達関数を

利用して解析を行っている．伝達関数 $H_1(\omega)$ は，1 回の打撃試験の入出力のデータから得られる最も単純な方法である．

$$H_1(\omega) = Y(\omega) / F(\omega) \quad (3.15)$$

伝達関数 $H_2(\omega)$ は，同じ条件で行った打撃試験で得られる入出力のデータを次式のように積算平均することで雑音の影響を少なくしたものである．

$$H_2(\omega) = \frac{\sum_{k=1}^K Y_k(\omega)}{\sum_{k=1}^K F_k(\omega)} \quad (3.16)$$

伝達関数 $H_3(\omega)$ は，出力側の衝撃力の推定誤差の二乗平均を最小にする伝達関数は次式により表され，出力側に含まれる雑音成分を最小とする伝達関数である．ここでも(3.16)式と同様に積算平均を行っている．

$$H_3(\omega) = \frac{\sum_{k=1}^K F_k^*(\omega) Y_k(\omega)}{\sum_{k=1}^K F_k^*(\omega) F_k(\omega)} \quad (3.17)$$

伝達関数 $H_4(\omega)$ は，入出力を逆にした逆システムを考え，入力側に含まれる雑音成分を最小とする伝達関数である．

$$H_4(\omega) = \frac{\sum_{k=1}^K Y_k^*(\omega) Y_k(\omega)}{\sum_{k=1}^K Y_k^*(\omega) F_k(\omega)} \quad (3.18)$$

伝達関数 $H_5(\omega)$ は， $H_3(\omega)$ と $H_4(\omega)$ の単純平均であり，Mitchell はより精度の高い伝達関数が得られることを示している．

$$H_5(\omega) = [H_3(\omega) + H_4(\omega)] / 2 \quad (3.19)$$

上記の 5 種類の伝達関数の特徴を表 3.2 に纏める．

3. 逆問題解析による衝撃力の推定法

表 3.2 本論文で用いる 5 種類の伝達関数

伝達関数	特徴
$H_1(\omega) = Y(\omega) / F(\omega)$	1 回の入出力データから得られる最も単純な方法である.
$H_2(\omega) = \frac{\sum_{k=1}^K Y_k(\omega)}{\sum_{k=1}^K F_k(\omega)}$	入出力のデータを積算平均することで雑音の影響を少なくしたものである.
$H_3(\omega) = \frac{\sum_{k=1}^K F_k^*(\omega) Y_k(\omega)}{\sum_{k=1}^K F_k^*(\omega) F_k(\omega)}$	出力に相関のない誤差が入力に含まれていた場合に真の衝撃力と推定衝撃力の残差の二乗平均を最小にする伝達関数. つまり, 出力に含まれるノイズを最小にする伝達関数である.
$H_4(\omega) = \frac{\sum_{k=1}^K Y_k^*(\omega) Y_k(\omega)}{\sum_{k=1}^K Y_k^*(\omega) F_k(\omega)}$	$H_3(\omega)$ を算出する際のシステムにおける入出力を逆にした逆システムを考えたものであり, 入力側に含まれる雑音成分を最小とする伝達関数である.
$H_5(\omega) = [H_3(\omega) + H_4(\omega)] / 2$	$H_3(\omega)$ と $H_4(\omega)$ を単純平均したものである.

3.5 結言

本章では、積分変換を用いて衝撃点における衝撃力を推定する「衝撃力の原波形解析」に関する理論について述べた。

衝撃力の原波形解析に関して、物体の形状が複雑である等の理由で伝達関数の同定が理論的に難しい場合には、入出力を同時に計測できる較正実験を行うことで伝達関数を同定する実験的手法が用いられる。実験的手法では経験的に得られる知見も多くあるため、既往の研究を纏めて較正実験の方法やどのような物体の衝撃力を推定しているかといった適用例を示した。

衝撃力の原波形解析における不適切性は、主に信号に混入される雑音成分によるものである。ここでいう誤差とは、真の入出力信号以外の余分な信号成分である。本章では、系の伝達関数を求める際にウィーナフィルタ理論を用いて誤差を最小化する適切化処理方法を纏めている。

本研究で扱う問題は、板材の曲面を有する物体への貫通を伴う衝突であり、非常に複雑な衝突現象である。既往の研究においてもこのような衝突現象に対して逆問題解析手法を適用した例はないと言える。次章以降では、本章で示した理論を用いて天井材の衝撃力の同定を行う。

4. 打撃試験による人頭模型の伝達関数の評価

4.1 緒言

本章では、前章で述べた理論を基に天井材落下実験で用いた人頭模型の伝達関数(図 4.1)を同定する。逆解析を行うには、既述した通りまず伝達関数の同定が必要となる。人頭模型は頂部が凸の形状をしており、天井材落下による荷重は集中荷重的に与えられると考えられる。そのため、本研究では較正実験で良く用いられるインパルス応答法を採用し、インパクトハンマによる人頭模型の打撃試験を行った。本実験の目的は、表 3.2 に示した 5 種類の伝達関数を算出し、逆解析におけるそれらの有効性を評価することである。天井材落下実験では、人頭模型がロードセルを介して H 形鋼の上に支持されていたため、較正実験時はそのような状況を再現して行っている。人頭模型は H 形鋼の上にロードセルを介して支持されており、ロードセルの記録には人頭模型の影響のみならず H 形鋼の振動特性の影響も受ける恐れがある[122]。複雑な支持条件を有する被衝撃体において逆解析により衝撃力を精度良く推定できるかは未知である。

そこで、本節では、以下に示すようなパラメトリックスタディを実験的にを行い、まず基本的な衝撃と考えられるインパクトハンマによる打撃で発生する衝撃力を出力から推定できるか確認した。天井材の当たる人頭模型頂部をインパクトで叩き、インパクト先端に取り付いた圧電素子を使用した力変換器で入力となる衝撃荷重を計測し、人頭模型下に設置したひずみゲージ式ロードセルで従来通り出力に当たる荷重を計測した。入出力のフーリエ変換から伝達関数が得られる。理論的には伝達関数は一意に定まるが、入力のスペクトルのパワーを全周波数領域に渡って理想的に一定に与えることはできないため、毎回の試験で算出する伝達関数には真値からのずれが必然的に生じることとなる。計測により予め既知である入力を様々な条件で推定した伝達関数を用いて出力から算出することで伝達関数の評価を行う[123]。用いたパラメータは、フーリエ変換を行う際の解析範囲、ラプラス

4. 打撃試験による人頭模型の伝達関数の評価

変換の適用の有無，インパクト先端の材質変化に伴う異なるスペクトル特性を有する衝撃である．まずフーリエ変換による誤差の減少を目的にフーリエ変換を行う際の解析範囲，ラプラス変換の適用の有無について検討を行う．その結果を受け，表 3.2 で示した 5 種類の伝達関数を用いてインパクト先端の材質及び打撃の強弱をパラメータとした打撃試験の入力を推定し，実験結果と比較することで本実験環境において有効と判断される伝達関数を同定する[124]．

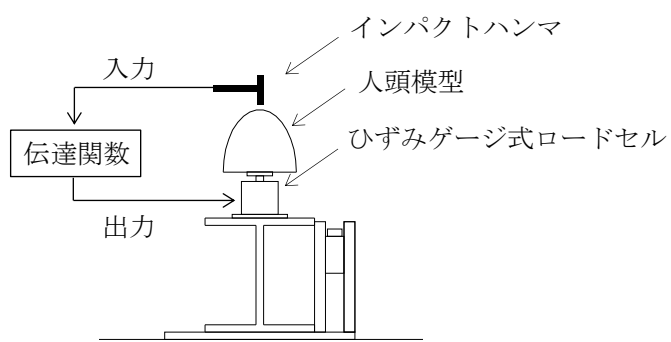


図 4.1 H 形鋼を土台とした人頭模型の伝達関数

4.2 試験概要及び結果

天井材落下実験と同様の支持方法で人頭模型をコンクリート上に設置し、インパクト（PCB Piezotronics 社製 model 086C03）による打撃試験[145]を行った（図 4.2）。打撃箇所は天井材落下実験で天井材が衝突する人頭模型頂部で、インパクトの先端に取り付く圧電素子を使用した力変換器で入力となる衝撃力を、人頭模型下に設置したひずみゲージ式ロードセルで出力となる荷重を計測した。ここでは、入力と出力を用いて伝達関数を算出することを目的としている。サンプリングレートは入出力共に天井材落下実験時同様 10 kHz としている。ノイズの影響が大きい場合には、ノイズ除去のため帯域通過フィルタを用いることが多いが、未知の伝達関数や衝撃力を求める上では、どの周波数帯で雑音成分の影響が大きいかを見極めるのは困難であるため、ここでは帯域通過フィルタは用いていない。負荷逆問題の逆解析において較正実験により伝達関数を同定した例は報告されているが、本実験のように扱う物体の支持条件が複雑であったり、曲面を有したりする構造物等への適用の例はほとんどない。また、入力の特長を変化させて伝達関数を同定し、



(a) 打撃風景



(b) インパクト

図 4.2 試験装置

4. 打撃試験による人頭模型の伝達関数の評価

それらがスペクトル特性の異なる種々の衝撃力に対して有効であるかについて調べた例も非常に少ない。本実験では、同定する伝達関数が任意の衝撃に対して適用できるかを検証するため、インパクト先端の材質を Steel, Plastic, Rubber と変え、入力の特徴特性が異なるようにして行った。また、打撃力の大きさの違いにも対応できるかについて検証

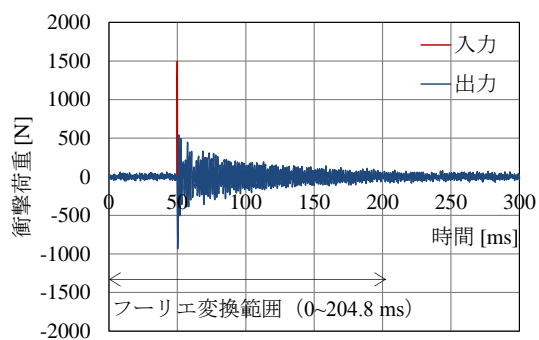
表 4.1 試験結果

試験番号	インパクト 先端 の材質	打撃力 の目安 [N]	入力の 最大値 [N]	出力の 最大値 [N]	出力/入力	出力のフーリエスペクトル			
						一次 卓越振動数 [Hz]	フーリエ 振幅 [N×sec]	二次 卓越振動数 [Hz]	フーリエ 振幅 [N×sec]
Test001	Steel	1500	1496	931	0.62	632	11.71	745	2.13
Test002			1422	771	0.54	632	10.55	745	1.66
Test003			1563	793	0.51	632	10.44	745	2.20
Test004			1498	873	0.58	632	11.68	745	2.73
Test005			1535	958	0.62	632	12.28	742	2.52
Test006			1510	647	0.43	632	9.34	745	1.92
Test007			1513	810	0.54	632	11.00	745	2.02
Test008			1488	909	0.61	632	12.09	745	2.23
Test009			1464	820	0.56	632	11.60	745	2.17
Test010			1570	1009	0.64	632	12.70	745	2.41
Test011	Plastic	1500	1454	1197	0.82	632	16.16	742	3.33
Test012			1446	1274	0.88	632	16.83	742	2.92
Test013			1625	1311	0.81	632	17.38	742	3.27
Test014			1555	1293	0.83	632	16.82	742	2.99
Test015			1501	1321	0.88	632	17.24	742	2.93
Test016			1503	1374	0.91	632	17.36	742	3.54
Test017			1643	1520	0.93	632	18.56	740	3.84
Test018			1585	1407	0.89	632	18.02	742	3.72
Test019			1686	1480	0.88	632	18.50	742	3.45
Test020			1645	1351	0.82	632	17.16	742	3.30
Test021	rubber	500	507	574	1.13	632	7.76	745	1.51
Test022			496	553	1.11	632	7.64	745	1.56
Test023			507	560	1.10	632	7.81	745	1.43
Test024			532	552	1.04	632	7.48	745	1.73
Test025			495	557	1.13	632	7.42	745	1.44
Test026			521	540	1.04	632	7.21	745	1.53
Test027			542	557	1.03	632	7.43	745	1.51
Test028			506	554	1.10	632	7.60	745	1.54
Test029			510	549	1.08	632	7.47	745	1.56
Test030			482	511	1.06	632	7.17	745	1.46
Test031	steel	500	475	320	0.67	632	3.94	745	0.81
Test032			553	338	0.61	632	5.27	779	0.77
Test033			476	356	0.75	632	4.44	750	1.25
Test034			476	329	0.69	632	4.61	747	0.83
Test035			566	341	0.60	632	5.42	747	0.83
Test036			516	369	0.72	632	4.75	745	0.83
Test037			486	327	0.67	632	4.51	750	0.73
Test038			486	327	0.67	632	4.83	747	0.84
Test039			525	261	0.50	632	3.66	781	0.65
Test040			541	286	0.53	632	4.24	750	0.76

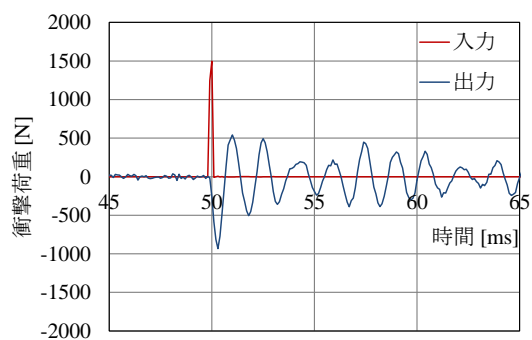
するため、インパクト先端の材質を Steel した実験では、打撃力（入力 of 最大値）の目安を 1500 N, 500 N と変えて行った。それぞれの条件で試験は 10 回ずつ行っており、計 40 回の打撃試験を行った。試験項目を結果と共に表 4.1 に示す。

一回の打撃試験で得られる入出力の荷重履歴を図 4.3~図 4.6 に、それらのフーリエスペクトルを図 4.7 に示す。荷重履歴から、同程度の衝撃力を与えた場合でもインパクト先端の材質によって出力の大きさには違いがあることがわかる。また、出力波形からはいずれの場合も同じような周期で振動していることが見てとれる。出力には常時振幅 20 N 程度の定常不規則信号が含まれており、特にインパクト先端の材質を Steel とし、打撃力 500 N を目安とした場合では SN 比がかなり小さくなっている。フーリエ変換は、図 4.3 (a)内に示すように、応答がほぼ初期値まで減衰する衝撃点前後の 204.8 ms（計算点数 2048）の範囲で行っている。また、入力に関しては不規則性誤差を減らすため、衝撃点の前後 10 ms の範囲で力窓をかけている。入力に対する出力の比はインパクト先端の材質毎に異なる傾向がある。Steel, Plastic, Rubber それぞれの平均は約 0.60, 0.86, 1.08 となっており、衝撃は衝撃点から人頭模型下に設置したロードセルへの伝播過程で減衰も増幅もすることがわかる（図 4.8）。このことは、入出力のスペクトル特性に起因する。入力のフーリエスペクトルから、どのインパクト先端の材質においても人頭模型の固有振動数までは十分励起できていることがわかる。出力のフーリエスペクトルにおける 1 次の卓越振動数は、入力のスペクトル特性に関わらず約 632 Hz であり、これは、2.4 節で述べたように人頭模型を支持する H 形鋼上フランジの縦振動のモードに対応する固有振動数である。入力のスペクトルに含まれる固有振動数の成分により一種の共振現象が発生し、その成分の大小次第で衝撃点からひずみゲージ式ロードセルに伝達する過程での荷重の増減が決まると考えられる。出力のフーリエスペクトルを見ると、人頭模型の固有振動数以外の周波数成分はかなり小さい。これは、人頭模型の材質であるマグネシウム合金が内部摩擦による減衰が大きく振動や衝撃を吸収しやすいためであると考えられる。

4. 打撃試験による人頭模型の伝達関数の評価

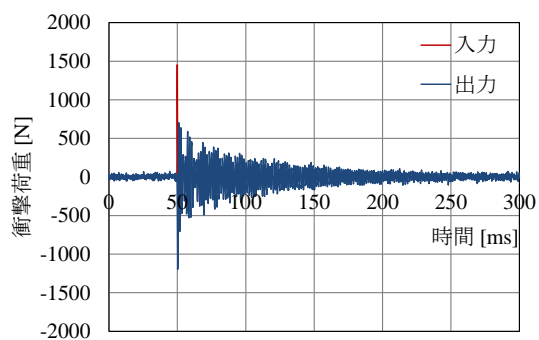


(a) 300 ms 間

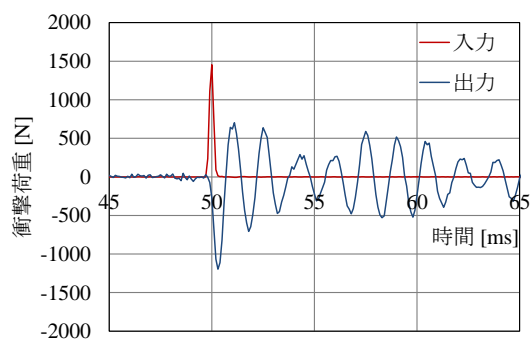


(b) 20 ms 間

図 4.3 Test001 (Steel : 強) の入出力の荷重履歴

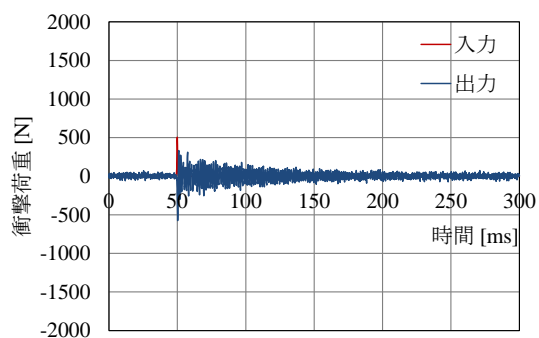


(a) 300 ms 間

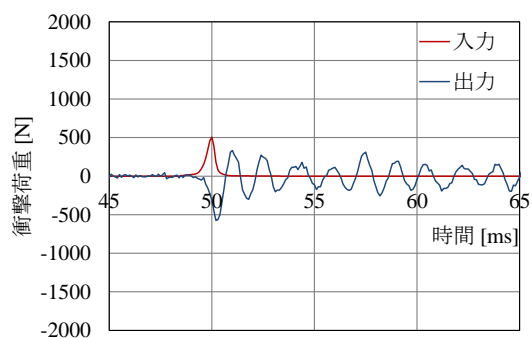


(b) 20 ms 間

図 4.4 Test011 (Plastic) の入出力の荷重履歴



(a) 300 ms 間



(b) 20 ms 間

図 4.5 Test021 (Rubber) の入出力の荷重履歴

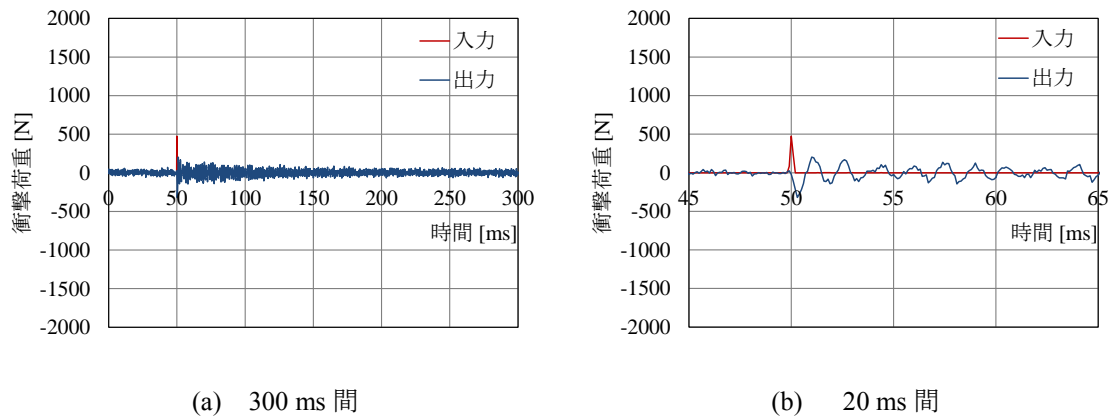


図 4.6 Test031 (Steel : 弱) の入出力の荷重履歴

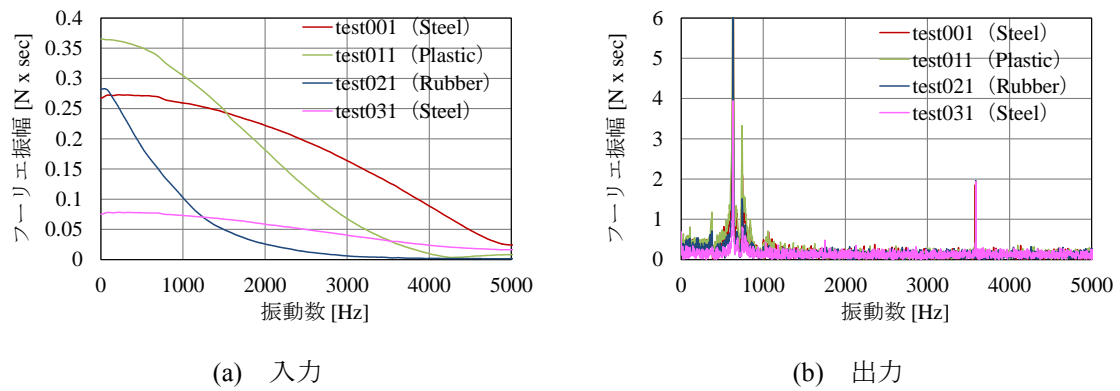


図 4.7 Test001 (Steel : 強), Test011 (Plastic), Test021 (Rubber), Test031 (Steel : 弱)

の入出力のフーリエスペクトル

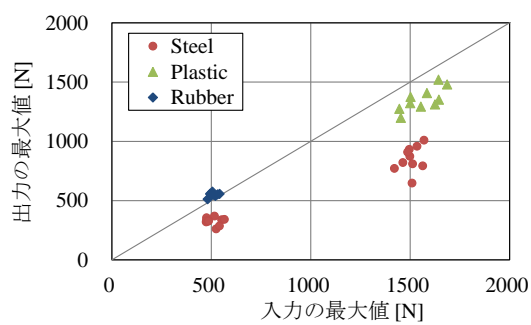


図 4.8 出力と入力の最大値の関係

4.3 スペクトル解析時における検討

スペクトル解析においては，測定時に含まれる誤差を減らすための手法が数多く存在する[125~133]．誤差の除去は信号処理において非常に重要な点である．本実験における逆解析の過程で含まれる誤差を図 4.9 に図示する．誤差には，1. 入力誤差，2. AD 変換による誤差，3. 離散フーリエ変換による誤差がある．それらを波形処理の手順に沿って概説する．

まず初めに混入されるのは，入力誤差である．入力誤差は，信号を記録するセンサの取り付け位置や加振方向のずれ等により発生する偏り誤差と環境による不規則な雑音や振動により発生する不規則誤差から成る．偏り誤差は比較的原因を特定するのが容易であるが，信号処理によって雑音を除去することはできない．一方，不規則誤差は原因の特定はしづらいが，アンサンブル平均をとることである程度除去することが可能である．次に発生する誤差は，AD 変換時の標本化によって発生する折り返し誤差と量子化誤差である．ナイキスト標本化定理にあるように，信号を正しく標本化するためには信号に含まれる最高周波

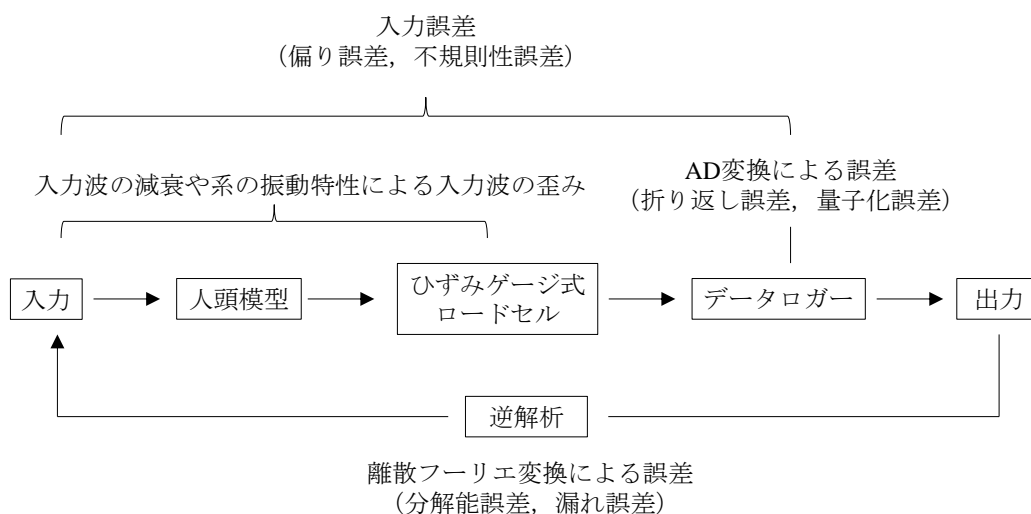


図 4.9 逆解析の過程で含まれる誤差

数の 2 倍以上の標本化周波数を用いなければならない。信号にナイキスト周波数以上の成分が含まれていた場合にはスペクトルに折り返し誤差が発生する。つまり、折り返し誤差とは実際は高周波数成分であるにもかかわらず、低周波数成分と間違えてしまう危険性を有する。そのため、フーリエ変換を行う際には、基本的にローパスフィルタを用いることでこれを防ぐ。一方、量子化誤差は、実験モード解析では基本的に十分な桁数で量子化が行われているため問題にならない場合が多い。最後に、離散フーリエ変換による誤差があり、それは分解能誤差と漏れ誤差から成る。分解能誤差は、離散フーリエ変換時における時刻歴データの有限化による誤差である。周波数領域における分解能は解析データ範囲（サンプリング点数）によって決まる。データ長を長くすると分解能が上がり、より低周波数の成分まで検出することができる。一方、漏れ誤差は、有限化した波を繰り返し継いだ周期波形を作ることで継ぎ目に不連続性が生じるために発生する。この不連続により周波数スペクトルに実際には存在しない成分が誤差として生まれ、それによりピークが鈍化して最高値が減少したり、ピークの周辺になだらかな裾が発生したりする。そのため、漏れ誤差を抑えるために様々な窓関数が用いられている。

本節では、伝達関数を同定するに当たって離散フーリエ変換により発生する誤差の除去法について数値実験により検証する。ここでは、インパクト先端の材質を **Steel** とし打撃力の目安を 1500 N として行った Test001~010 の試験データを基に検討を行う。入力誤差である不規則性誤差に関しては次節にて検討を行う。AD 変換による誤差については、図 4.7 に示した入力の荷重フーリエスペクトルに見られるように、5000 Hz 付近ではパワーがほとんど減衰しつつあることとローパスフィルタにより高周波成分をカットすると衝撃力に関して重要な成分まで取り除いてしまう恐れがあることから除去操作は行わないこととする。本節における検討項目は、離散フーリエ変換による誤差であり、分解能誤差を減らすための解析点数の検討及び漏れ誤差を減らすための指数窓を用いたラプラス変換の有効性の検討を行う。

4. 打撃試験による人頭模型の伝達関数の評価

4.3.1 解析範囲

離散フーリエ変換時の解析点数には衝撃荷重がほぼ減衰し初期状態に戻るのに必要な最小データ点数である 2048 点及びその 2 乗及び 4 乗である 4096, 8192 点を用いる. いたずらにデータ長を長くしても衝撃に関係のない雑音成分をその分多く検出して SN 比が小さくなってしまうため, 最長は 8192 点とした. これらは, 計測のサンプリングレートが 10 kHz であることからそれぞれ 204.8 ms, 409.6 ms, 819.2 ms 間のデータに相当する. また, フーリエ変換を行う際のデータの開始点を衝撃がちょうど加わるタイミングとその 50 ms 前の 2 通りで比較を行う. Test001 の入出力の荷重履歴を図 4.10 に再掲し, 図中に比較を行う解析範囲を示す.

解析範囲の検討では, 10 回分の試験で得られた入出力の記録から各範囲のデータを用いて表 3.2 で示した伝達関数 H_3 を求め, 求めた伝達関数 H_3 を利用し Test001~010 のそれぞれの出力から入力を推定することで実験値との比較を行う. 推定した衝撃力の最大値に対する実験値の比の平均値と標準偏差は, ①では 1.02 と 0.09, ②では 1.02 と 0.08, ③では 1.00 と 0.07, ④では 1.00 と 0.10 である. この結果から, いずれも精度よく入力の最大値を推定できていることがわかったため, 次項以降では計算コストの低い②により計算を行うこととする.

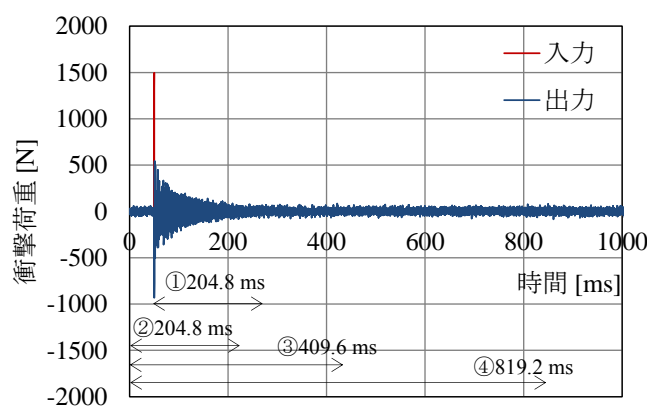


図 4.10 Test001 (Steel : 強) の入出力の荷重履歴

4.3.2 ラプラス変換の有効性

離散フーリエ変換による漏れ誤差を除去するため、窓関数に指数関数を用いてその有効性の検証を行う。窓関数として指数関数を用いたフーリエ変換はラプラス変換と同義である。衝撃力が作用する構造物の応力解析等でラプラス変換は多用されており、負荷逆問題への適用を目的として、数値ラプラス変換・逆変換法の精度が井上ら[121]により正弦関数と単位ステップ関数を試験関数として用いた数値解析で確かめられている。ここでは、本実験における数値ラプラス変換・逆変換法の有効性を数値実験的に検証する。

$t > 0$ において定義された関数 $f(t)$ のラプラス変換は次式となる。

$$F(p) = \int_0^{\infty} f(t) \cdot e^{-pt} dt \quad (4.1)$$

$$f(t) = \frac{1}{2\pi i} \int_{\gamma-i\infty}^{\gamma+i\infty} F(p) \cdot e^{pt} dp \quad (4.2)$$

p は複素数であり、 $p = \gamma + i\omega$ (i は虚数単位) で表すと、

$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \cdot e^{-\gamma t} \cdot e^{-i\omega t} dt \quad (4.3)$$

$$f(t) = \frac{e^{\gamma t}}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} F(\omega) \cdot e^{i\omega t} d\omega \quad (4.4)$$

となる。ラプラス変換がフーリエ変換により表されており、フーリエ変換時に窓関数として指数窓を用いた場合と同様であることを示している。また、高速フーリエ変換を利用した N 点の離散ラプラス変換・逆変換はそれぞれ次式によって表されることが知られている。

$$\hat{F}(n\Delta\omega) = \Delta t \sum_{k=0}^{N-1} \hat{f}(k\Delta t) \cdot e^{-\gamma k\Delta t} \cdot e^{-2\pi i k n / N} \quad (4.5)$$

$$\hat{f}(k\Delta t) = \frac{e^{k\Delta t}}{2\pi} \Delta\omega \sum_{n=-N/2}^{N/2-1} \hat{F}(n \cdot \Delta\omega) \cdot e^{2\pi i k n / N} \quad (4.6)$$

Δt と $\Delta\omega$ はそれぞれ離散化の際の時間と周波数の刻み幅を表している。以下では、(4.5), (4.6) 式を用いて計算を行う。

伝達関数 H_3 を用いて Test001 の出力からラプラス変換を利用し入力を推定した。 γ は (a) $\gamma=0$, (b) $\gamma=1/T$, (c) $\gamma=2\pi/T$, (d) $\gamma=5\pi/T$ と変えて行った。ここで、(a) $\gamma=0$ はフーリエ

4. 打撃試験による人頭模型の伝達関数の評価

変換に相当する．推定した入力荷重履歴を実験値と共に図 4.11 に示す． $\gamma=1/T$ のときに推定精度は最も高いが $\gamma=0$ のフーリエ変換の結果と比べると大きな差はない．これは，解析範囲を 2048 点（204.8 ms）として応答が減数するまでのデータを用いてフーリエ変換を行っているために漏れ誤差は抑えられており，ラプラス変換をしても推定精度は大きく上がらなかったと推測される．そのため，以下では計算効率を考慮しフーリエ変換を用いて解析を行う．

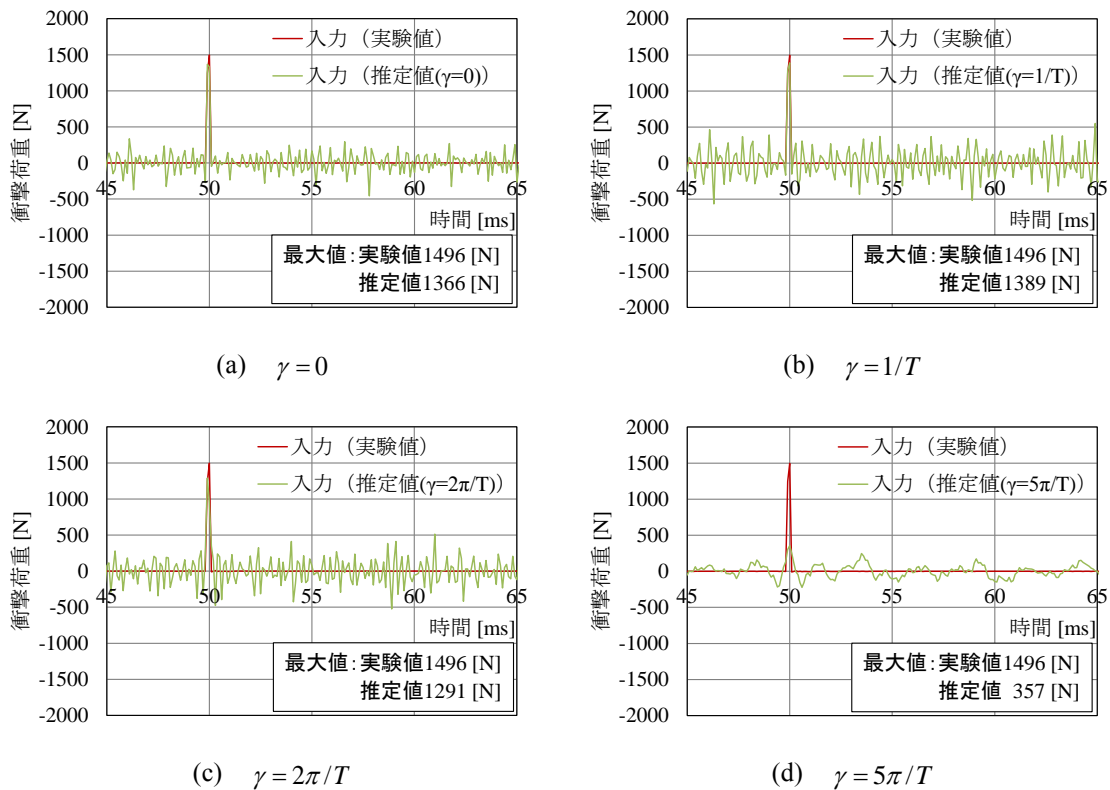


図 4.11 Steel (test001~010) から算出した伝達関数 H_3 を用いた Test001 の推定荷重履歴

4.4 伝達関数の評価

インパクタ先端の材質を Steel（打撃力の目安：1500 N, 500 N）、Plastic（打撃力の目安：1500 N）、Rubber（打撃力の目安：500 N）と変えることで様々なスペクトルを有する入力に対しても逆解析を行う際に同定した伝達関数が有効であるかの検討を行う。インパクタ先端を Steel とした場合のみ打撃力には 2 つの目安を用いた。試験は各条件で 10 回行っており、得られた入出力のデータから各条件において表 3.2 に示した 5 つの伝達関数が求まる。前節の結果を受けて、フーリエ変換は出力のピークの 50 ms 前から振動が収まる 204.8 ms 間で行った。それぞれの伝達関数を用いて全試験の出力から逆解析により入力の最大値を推定し、実験値と比較することで精度を検証した。推定結果を表 4.2~表 4.5 に示す。また、Steel(強)の場合を代表例とし、算出した 5 つの伝達関数を図 4.12 に、それらを用いて Test001 の出力データから推定した入力の荷重履歴を図 4.13 に示す。算出した 5 つの伝達関数の概形は 1000 Hz 程度までは概ね同様である。伝達関数 H_2 は H_1 に比べると 1000 Hz 以上の周波数帯において伝達率が小さくなっていることがわかる。つまり、積算平均することで不規則性誤差が除去されることから、高周波成分は不規則性誤差により生じていたものと考えられる。 H_3 は出力に入力と相関のない誤差が含まれる場合に最適な伝達関数であり、概形はほとんど H_2 と同じである。また、 H_4 は入力に出力と相関のない誤差が含まれる場合に最適な伝達関数である。ここで、伝達関数 H_3 と H_4 は前章で示したように複数回試験を行い得られた $S_{xy}(p)/S_{xx(p)}$ と $S_{yy}(p)/S_{yx(p)}$ の平均をとったものである。 $S_{xy}(p)/S_{xx(p)}$ と $S_{yy}(p)/S_{yx(p)}$ は $m(t)$, $n(t)$ が他の信号と相関を持たないことからそれぞれ次式のように表すことができる。

$$\frac{S_{xy}(p)}{S_{xx}(p)} = \frac{S_{fe}(p)}{S_{ff}(p)} \left[1 + \frac{S_{mm}(p)}{S_{ff}(p)} \right]^{-1} \quad (4.7)$$

4. 打撃試験による人頭模型の伝達関数の評価

$$\frac{S_{yy}(p)}{S_{yx}(p)} = \frac{S_{ee}(p)}{S_{ef}(p)} \left[1 + \frac{S_{nn}(p)}{S_{ee}(p)} \right] \quad (4.8)$$

上式から伝達関数の絶対値が H_3 では真の伝達関数に比べて小さく、 H_4 では大きくなること
 がわかる。第 3 章で述べたように入力を推定する際には、伝達関数の絶対値が大きければ
 特に高周波域において雑音の影響を減らすことができる。しかし、入力のパークの値も小
 さくしてしまう可能性を有することに注意する必要がある。一方で、伝達関数の絶対値が
 小さいと逆に雑音を増幅してしまう可能性がある。本実験においては、出力に不規則性誤
 差が多く含まれていることは出力の時刻歴波形から明らかであり、一意に決まる真の伝達
 関数には H_3 が一番近いと推測できる。但し、上述したような誤差が拡大し入力の波形に重
 畳することで与える入力の最大値への影響については別途考察する必要がある。

図 4.13(a)より、 H_1 を用いて推定した荷重履歴が実験値と一致していることから、系の線
 形性を確認することができる。これは、コヒーレンスからも確認できる。 H_2 、 H_3 を用いて
 推定した入力波形は、図 4.13(b), (c)に示されるように同様の特徴を有している。雑音成分
 は増幅されているが、衝撃の立ち上がりは概ね再現できている。 H_4 、 H_5 を用いて推定した
 入力波形は、図 4.13(d), (e)に示されるように雑音成分は抑えられているが、ピークが鈍化
 してしまっている。これらは、伝達関数の形から推測した通りの結果である。

図 4.14 に Steel (強) の入出力の結果から得られた 5 つの伝達関数を用いて推定した入力
 の最大値と実験値を比較したグラフを示す。グラフから入力のスペクトル特性に関わらず、
 伝達関数 H_2 、 H_3 を用いた場合に精度よく入力の最大値を推定できることがわかる。全試験
 の入力に対する出力の比はどちらもほぼ 1 であり、標準偏差を比べると H_2 が 0.16 であるの
 に対して H_3 は 0.15 とわずかな差はあるがばらつきが少ない。そのため、伝達関数 H_3 を用い
 た場合に一番推定精度が高いと判断し、以降では H_3 を用いて推定を行うこととする。イン
 パクタ先端の材質及び打撃の強弱をパラメータとし、各条件において得られた伝達関数 H_3
 を用いて全試験の出力から推定した入力の最大値と計測した入力の最大値の関係を図 4.15
 に示す。伝達関数を求める際に用いた入力と異なるスペクトル特性を持つ入力に対して推

定を行うと、その推定精度は落ちる傾向にある。各条件で得られた伝達関数 H_3 を図 4.16 に示す。Rubber の試験では図 4.7(a)に示した入力のパワースペクトルから明らかなように 2000 Hz 程度までしかパワーを与えることができていない。そのため、得られた伝達関数は 2000 Hz 以降で絶対値がかなり大きくなっている。この伝達関数を用いて他の材質の入力を推定すると、2000 Hz 以降に含まれる雑音成分と共に衝撃荷重に影響する成分まで小さくしてしまうため、推定精度が落ちる。つまり、伝達関数を求める際に用いた入力より高周波成分を含む入力に対しての推定は大きく精度が低下する傾向にある。上記の考え方からもわかるように、5000 Hz まである程度パワーを与えられている Steel を使うと他の材質に関しても精度良く推定できる。但し、Steel を用いた場合でも打撃力の目安を 500 N とした場合、SN 比が小さいため推定精度が落ちていると考えられる。

4. 打撃試験による人頭模型の伝達関数の評価

表 4.2 Steel（強）で得た伝達関数による推定結果

試験番号	インパクト 先端 の材質	打撃力 の目安 [N]	入力 の 最大値 [N]	出力 の 最大値 [N]	出力/入力	入力の実験値/推定値					入力の推定値				
						H ₁	H ₂	H ₃	H ₄	H ₅	H ₁	H ₂	H ₃	H ₄	H ₅
Test001	steel	1500	1496	931	0.62	1.00	0.85	1.10	2.12	1.80	1496	1768	1366	707	831
Test002			1422	771	0.54	1.88	0.93	1.08	2.21	1.87	755	1521	1311	642	759
Test003			1563	793	0.51	2.20	1.12	1.03	2.29	1.94	710	1402	1524	682	807
Test004			1498	873	0.58	1.78	1.09	0.92	2.12	1.82	844	1371	1632	707	822
Test005			1535	958	0.62	1.86	0.89	0.98	2.08	1.79	827	1733	1569	739	858
Test006			1510	647	0.43	2.86	1.08	1.09	2.72	2.28	528	1404	1392	555	663
Test007			1513	810	0.54	2.19	1.32	1.10	2.23	1.88	691	1148	1375	679	807
Test008			1488	909	0.61	1.81	0.88	0.89	1.97	1.67	821	1684	1674	756	891
Test009			1464	820	0.56	2.02	0.95	1.06	2.10	1.77	726	1539	1376	697	825
Test010			1570	1009	0.64	1.66	1.05	0.99	2.05	1.75	948	1490	1580	765	895
Test011	plastic	1500	1454	1197	0.82	1.27	1.15	1.31	1.69	1.52	1143	1266	1109	858	959
Test012			1446	1274	0.88	1.31	1.27	0.98	1.63	1.47	1106	1141	1469	886	981
Test013			1625	1311	0.81	1.52	1.25	1.28	1.72	1.55	1071	1298	1268	946	1049
Test014			1555	1293	0.83	1.30	1.10	1.04	1.69	1.50	1200	1419	1494	921	1040
Test015			1501	1321	0.88	1.51	1.31	1.19	1.67	1.51	997	1146	1262	897	996
Test016			1503	1374	0.91	1.25	0.92	0.80	1.55	1.38	1206	1630	1876	967	1092
Test017			1643	1520	0.93	1.34	0.86	1.06	1.58	1.41	1224	1918	1545	1041	1169
Test018			1585	1407	0.89	1.31	1.00	1.03	1.60	1.43	1208	1590	1534	988	1108
Test019			1686	1480	0.88	1.37	1.11	1.10	1.63	1.45	1233	1523	1537	1036	1165
Test020			1645	1351	0.82	1.51	1.39	1.21	1.72	1.54	1091	1188	1361	958	1068
Test021	rubber	500	507	574	1.13	1.11	0.91	0.94	1.28	1.17	458	557	538	395	431
Test022			496	553	1.11	0.83	0.82	0.78	1.26	1.16	597	606	634	392	429
Test023			507	560	1.10	0.90	0.90	0.87	1.29	1.20	561	564	583	393	421
Test024			532	552	1.04	1.12	0.86	1.00	1.34	1.23	476	615	533	396	431
Test025			495	557	1.13	1.13	0.78	0.91	1.27	1.17	439	632	546	388	422
Test026			521	540	1.04	1.02	0.88	0.69	1.33	1.23	513	589	758	391	424
Test027			542	557	1.03	0.98	0.86	0.89	1.37	1.25	552	629	608	394	434
Test028			506	554	1.10	0.90	0.98	0.72	1.31	1.22	559	518	707	386	415
Test029			510	549	1.08	0.84	0.86	0.84	1.34	1.23	611	591	606	382	413
Test030			482	511	1.06	1.07	0.86	0.79	1.39	1.32	450	562	609	346	365
Test031	steel	500	475	320	0.67	1.46	0.86	0.94	2.12	1.85	324	552	504	224	257
Test032			553	338	0.61	1.33	1.11	1.00	2.22	2.03	417	499	550	249	272
Test033			476	356	0.75	0.96	0.77	0.80	1.80	1.59	497	616	596	265	300
Test034			476	329	0.69	1.38	0.96	0.87	2.24	2.08	344	496	545	213	229
Test035			566	341	0.60	1.58	1.08	1.06	2.26	2.02	358	526	534	251	281
Test036			516	369	0.72	1.14	1.07	0.76	2.00	1.77	454	483	680	258	291
Test037			486	327	0.67	1.15	0.66	0.93	2.13	1.93	421	733	522	228	252
Test038			486	327	0.67	1.20	0.94	0.91	1.85	1.63	406	516	534	263	298
Test039			525	261	0.50	1.12	0.99	0.89	2.83	2.54	468	529	588	185	206
Test040			541	286	0.53	1.80	1.16	1.14	2.55	2.23	301	469	477	212	243

表 4.3 Plastic で得た伝達関数による推定結果

試験番号	インパクト 先端 の材質	打撃力 の目安 [N]	入力 の最大値 [N]	出力 の最大値 [N]	出力/入力	入力の実験値/推定値					入力の推定値				
						H ₁	H ₂	H ₃	H ₄	H ₅	H ₁	H ₂	H ₃	H ₄	H ₅
Test001	steel	1500	1496	931	0.62	1.88	1.55	1.36	2.21	2.06	795	964	1103	678	728
Test002			1422	771	0.54	2.36	1.76	1.65	2.39	2.23	603	807	863	595	637
Test003			1563	793	0.51	2.14	1.92	1.71	2.49	2.31	729	816	914	629	678
Test004			1498	873	0.58	1.96	1.44	1.56	2.22	2.05	765	1042	958	676	731
Test005			1535	958	0.62	2.07	1.56	1.96	2.14	1.98	743	984	784	718	775
Test006			1510	647	0.43	2.84	1.99	2.64	2.99	2.79	532	757	572	505	542
Test007			1513	810	0.54	2.28	1.82	1.72	2.42	2.23	664	829	879	625	677
Test008			1488	909	0.61	2.00	1.44	1.38	2.02	1.85	743	1035	1078	735	804
Test009			1464	820	0.56	1.86	1.31	1.41	2.20	2.01	786	1117	1040	666	729
Test010			1570	1009	0.64	2.15	1.64	1.54	2.13	1.96	731	955	1019	739	803
Test011	plastic	1500	1454	1197	0.82	1.00	0.99	1.10	1.52	1.40	1454	1463	1323	954	1038
Test012			1446	1274	0.88	1.38	0.97	1.00	1.44	1.32	1050	1484	1450	1005	1094
Test013			1625	1311	0.81	1.48	1.03	0.99	1.51	1.38	1095	1575	1647	1077	1180
Test014			1555	1293	0.83	1.60	0.87	0.98	1.53	1.40	973	1781	1594	1017	1111
Test015			1501	1321	0.88	1.48	1.07	1.03	1.50	1.39	1016	1397	1458	999	1083
Test016			1503	1374	0.91	1.35	0.92	0.98	1.40	1.29	1113	1632	1528	1070	1164
Test017			1643	1520	0.93	1.35	0.93	0.91	1.42	1.31	1219	1763	1809	1155	1257
Test018			1585	1407	0.89	1.38	1.04	0.99	1.43	1.32	1150	1520	1593	1105	1198
Test019			1686	1480	0.88	1.34	1.01	0.89	1.45	1.33	1258	1669	1905	1162	1268
Test020			1645	1351	0.82	1.37	1.10	1.09	1.53	1.41	1199	1498	1505	1074	1166
Test021	rubber	500	507	574	1.13	1.10	0.87	1.05	1.27	1.23	459	583	480	398	411
Test022			496	553	1.11	1.22	0.73	1.01	1.20	1.14	406	683	490	415	435
Test023			507	560	1.10	0.98	1.10	0.88	1.24	1.21	518	460	576	408	420
Test024			532	552	1.04	1.16	0.83	0.99	1.26	1.20	457	637	535	421	443
Test025			495	557	1.13	1.03	0.78	0.74	1.21	1.15	481	637	666	409	431
Test026			521	540	1.04	1.00	0.90	1.15	1.30	1.26	523	582	454	401	414
Test027			542	557	1.03	1.21	1.18	0.67	1.33	1.27	448	458	804	407	426
Test028			506	554	1.10	0.98	0.84	0.87	1.22	1.18	515	599	580	413	429
Test029			510	549	1.08	1.09	1.13	1.07	1.28	1.24	469	452	479	398	412
Test030			482	511	1.06	1.13	1.02	0.94	1.25	1.20	428	473	511	386	402
Test031	steel	500	475	320	0.67	1.26	1.09	0.88	2.12	1.98	378	437	537	224	240
Test032			553	338	0.61	1.84	1.00	1.00	2.00	1.85	300	553	555	277	299
Test033			476	356	0.75	1.44	1.13	1.08	1.71	1.60	330	423	442	278	298
Test034			476	329	0.69	1.62	1.34	1.22	2.22	2.15	293	355	390	215	222
Test035			566	341	0.60	1.97	1.58	1.38	2.12	1.94	288	358	410	267	292
Test036			516	369	0.72	1.65	1.46	1.22	2.04	1.90	312	354	423	253	272
Test037			486	327	0.67	1.94	1.25	1.26	2.04	1.91	250	388	387	239	254
Test038			486	327	0.67	1.77	0.91	1.06	1.71	1.56	275	535	460	285	313
Test039			525	261	0.50	2.33	1.23	1.28	2.57	2.30	225	425	409	204	228
Test040			541	286	0.53	2.10	1.22	1.17	2.60	2.39	258	443	461	208	226

4. 打撃試験による人頭模型の伝達関数の評価

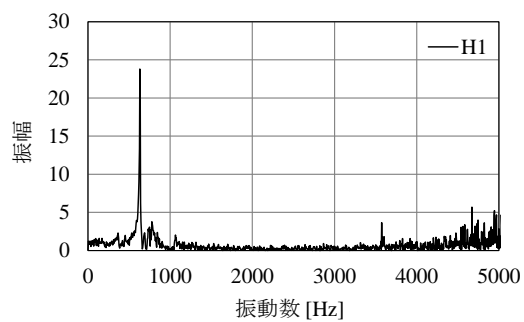
表 4.4 Rubber で得た伝達関数による推定結果

試験番号	インパクト 先端 の材質	打撃力 の目安 [N]	入力 の最大値 [N]	出力 の最大値 [N]	出力/入力	入力の実験値/推定値					入力の推定値				
						H ₁	H ₂	H ₃	H ₄	H ₅	H ₁	H ₂	H ₃	H ₄	H ₅
Test001	steel	1500	1496	931	0.62	2.67	2.40	2.35	3.22	2.90	559	623	636	464	517
Test002			1422	771	0.54	2.87	2.44	2.48	3.47	3.12	495	583	572	409	456
Test003			1563	793	0.51	3.02	2.47	2.56	3.64	3.27	518	634	611	429	478
Test004			1498	873	0.58	2.63	2.29	2.20	3.21	2.88	570	656	682	467	519
Test005			1535	958	0.62	2.56	2.05	2.02	3.14	2.81	600	750	760	490	547
Test006			1510	647	0.43	3.84	2.85	3.08	4.29	3.85	394	530	490	352	392
Test007			1513	810	0.54	3.04	2.36	2.39	3.63	3.25	498	642	634	417	465
Test008			1488	909	0.61	2.46	2.08	2.04	3.08	2.77	606	715	731	483	538
Test009			1464	820	0.56	2.82	2.11	2.13	3.29	2.94	519	692	686	445	499
Test010			1570	1009	0.64	2.55	2.31	2.21	3.14	2.83	615	681	712	500	555
Test011	plastic	1500	1454	1197	0.82	1.88	1.67	1.59	2.28	2.06	772	870	914	637	704
Test012			1446	1274	0.88	1.72	1.60	1.51	2.16	1.95	842	904	959	668	743
Test013			1625	1311	0.81	1.94	1.68	1.62	2.31	2.08	838	967	1001	703	782
Test014			1555	1293	0.83	1.95	1.70	1.64	2.34	2.10	799	917	949	664	739
Test015			1501	1321	0.88	1.78	1.66	1.64	2.24	2.02	844	901	916	670	743
Test016			1503	1374	0.91	1.72	1.47	1.43	2.12	1.90	875	1020	1053	709	789
Test017			1643	1520	0.93	1.83	1.42	1.46	2.17	1.94	898	1157	1123	758	845
Test018			1585	1407	0.89	1.84	1.45	1.43	2.18	1.96	863	1096	1110	728	810
Test019			1686	1480	0.88	1.74	1.58	1.63	2.24	2.01	970	1069	1037	754	840
Test020			1645	1351	0.82	1.94	1.52	1.50	2.34	2.10	847	1080	1097	703	784
Test021	rubber	500	507	574	1.13	1.00	1.04	1.05	1.47	1.34	507	485	483	344	377
Test022			496	553	1.11	1.29	1.01	0.91	1.45	1.31	385	493	546	341	378
Test023			507	560	1.10	1.37	1.06	0.95	1.44	1.31	370	476	533	351	387
Test024			532	552	1.04	1.43	0.97	1.04	1.55	1.41	372	548	512	342	378
Test025			495	557	1.13	1.32	0.96	1.08	1.46	1.32	374	518	460	340	374
Test026			521	540	1.04	1.39	1.01	1.13	1.53	1.39	374	518	460	340	374
Test027			542	557	1.03	1.42	1.05	1.00	1.57	1.42	381	518	542	344	382
Test028			506	554	1.10	1.22	0.98	0.96	1.49	1.35	416	516	526	340	373
Test029			510	549	1.08	1.26	0.97	1.04	1.49	1.35	403	528	491	342	378
Test030			482	511	1.06	1.38	0.98	1.00	1.49	1.35	351	491	481	325	357
Test031	steel	500	475	320	0.67	2.42	1.72	2.02	2.98	2.64	196	276	235	160	180
Test032			553	338	0.61	2.11	1.66	1.79	2.80	2.50	262	333	309	197	221
Test033			476	356	0.75	2.01	1.67	1.49	2.57	2.29	237	286	319	186	208
Test034			476	329	0.69	1.94	1.76	1.79	2.66	2.36	245	270	266	179	201
Test035			566	341	0.60	2.33	2.02	1.70	3.02	2.73	242	281	333	187	207
Test036			516	369	0.72	2.49	1.95	2.01	2.80	2.54	207	264	256	184	203
Test037			486	327	0.67	2.13	1.96	1.91	2.69	2.42	228	249	255	181	201
Test038			486	327	0.67	2.22	1.65	1.62	2.56	2.30	219	295	300	190	212
Test039			525	261	0.50	2.37	3.06	2.96	3.82	3.43	222	171	178	137	153
Test040			541	286	0.53	2.50	2.37	2.37	3.56	3.21	216	228	228	152	169

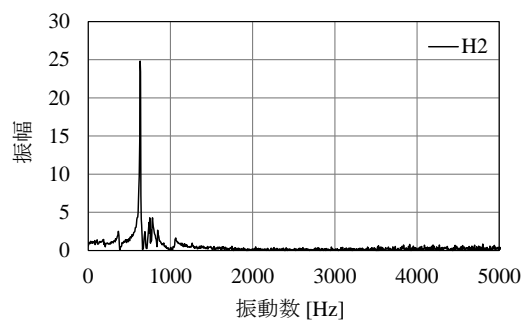
表 4.5 Steel（弱）で得た伝達関数による推定結果

試験番号	インパクト 先端 の材質	打撃力 の目安 [N]	入力 の最大値 [N]	出力 の最大値 [N]	出力/入力	入力の実験値/推定値					入力の推定値				
						H ₁	H ₂	H ₃	H ₄	H ₅	H ₁	H ₂	H ₃	H ₄	H ₅
Test001	steel	1500	1496	931	0.62	3.76	1.95	1.96	4.14	3.40	398	767	765	362	440
Test002			1422	771	0.54	3.83	2.02	2.18	4.45	3.66	371	705	654	319	388
Test003			1563	793	0.51	4.29	2.40	2.25	4.65	3.80	364	652	695	336	412
Test004			1498	873	0.58	3.87	1.91	1.84	4.04	3.31	387	783	814	370	453
Test005			1535	958	0.62	3.57	2.09	1.87	4.08	3.35	431	734	820	377	459
Test006			1510	647	0.43	4.85	2.61	2.46	5.42	4.42	311	579	613	279	342
Test007			1513	810	0.54	4.10	2.26	2.35	4.60	3.79	369	671	643	329	399
Test008			1488	909	0.61	3.78	1.94	1.89	3.96	3.23	394	767	786	376	460
Test009			1464	820	0.56	3.80	2.09	1.83	4.23	3.46	385	701	802	346	423
Test010			1570	1009	0.64	3.53	1.94	1.90	4.11	3.38	445	810	826	382	465
Test011	plastic	1500	1454	1197	0.82	2.77	1.53	1.43	2.96	2.42	525	950	1015	491	601
Test012			1446	1274	0.88	2.62	1.34	1.30	2.81	2.30	552	1077	1116	515	630
Test013			1625	1311	0.81	2.79	1.48	1.55	3.05	2.51	583	1096	1048	533	648
Test014			1555	1293	0.83	2.77	1.76	1.53	3.06	2.51	561	886	1016	508	621
Test015			1501	1321	0.88	2.66	1.51	1.42	2.92	2.40	565	993	1054	514	626
Test016			1503	1374	0.91	2.47	1.25	1.25	2.74	2.24	608	1206	1204	548	671
Test017			1643	1520	0.93	2.62	1.43	1.44	2.83	2.31	628	1150	1138	581	710
Test018			1585	1407	0.89	2.59	1.33	1.38	2.83	2.31	611	1194	1151	559	685
Test019			1686	1480	0.88	2.53	1.40	1.33	2.89	2.36	666	1207	1266	583	716
Test020			1645	1351	0.82	2.68	1.54	1.65	3.08	2.52	614	1067	999	534	653
Test021	rubber	500	507	574	1.13	1.52	1.03	0.86	2.10	1.75	334	492	587	241	289
Test022			496	553	1.11	1.69	0.99	1.34	2.11	1.74	292	502	371	235	284
Test023			507	560	1.10	1.84	0.89	0.95	2.01	1.63	275	572	536	252	310
Test024			532	552	1.04	1.88	1.09	1.24	2.22	1.85	284	488	430	239	288
Test025			495	557	1.13	1.72	0.92	0.97	2.09	1.73	288	539	508	237	287
Test026			521	540	1.04	1.97	1.09	1.16	2.18	1.81	265	479	450	239	288
Test027			542	557	1.03	1.98	1.25	1.22	2.29	1.90	273	434	446	237	286
Test028			506	554	1.10	1.77	1.10	1.06	2.09	1.72	286	458	476	241	294
Test029			510	549	1.08	1.90	1.23	0.99	2.12	1.74	268	415	518	241	293
Test030			482	511	1.06	1.83	0.93	1.09	2.13	1.77	263	520	443	226	272
Test031	steel	500	475	320	0.67	1.00	0.83	0.83	3.04	2.31	475	570	570	156	205
Test032			553	338	0.61	2.46	1.07	0.99	2.91	2.26	225	516	556	190	245
Test033			476	356	0.75	2.93	0.93	0.85	2.66	2.06	163	515	561	179	232
Test034			476	329	0.69	3.47	1.07	1.05	2.87	2.26	137	444	455	166	211
Test035			566	341	0.60	3.13	1.15	1.10	3.05	2.39	181	491	516	185	237
Test036			516	369	0.72	3.01	0.89	1.03	2.90	2.27	172	578	500	178	227
Test037			486	327	0.67	3.17	0.99	0.86	2.79	2.19	154	493	565	174	222
Test038			486	327	0.67	2.74	0.86	0.76	2.60	2.00	178	568	641	187	243
Test039			525	261	0.50	3.82	0.93	1.11	3.61	2.76	138	565	475	145	190
Test040			541	286	0.53	3.92	1.17	1.02	3.49	2.68	138	463	531	155	202

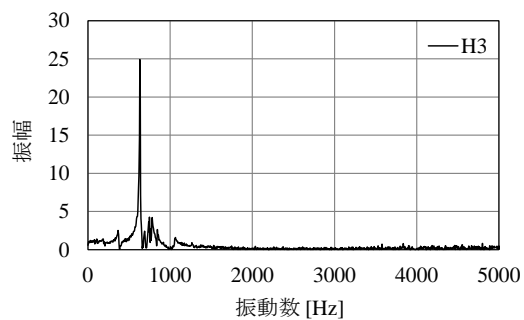
4. 打撃試験による人頭模型の伝達関数の評価



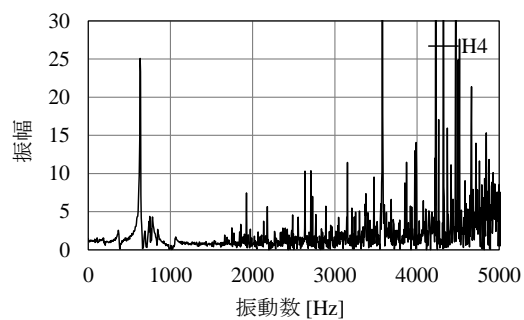
(a) 伝達関数 H_1



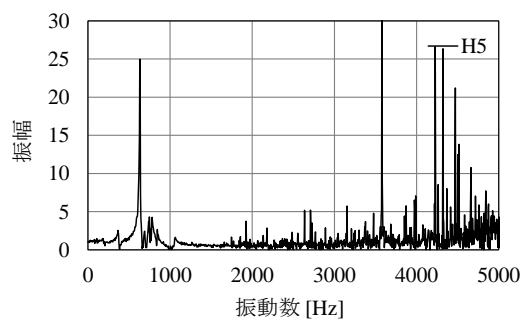
(b) 伝達関数 H_2



(c) 伝達関数 H_3



(d) 伝達関数 H_4



(e) 伝達関数 H_5

図 4.12 Steel (test001~010) における伝達関数の算出結果

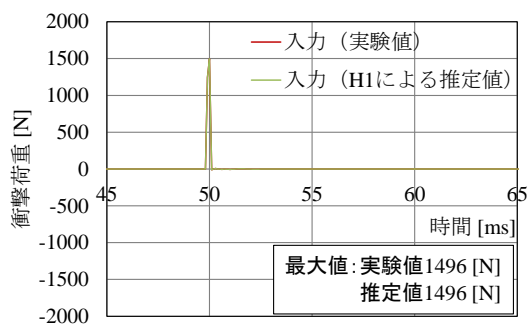
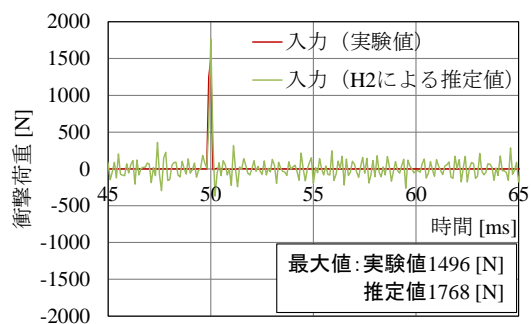
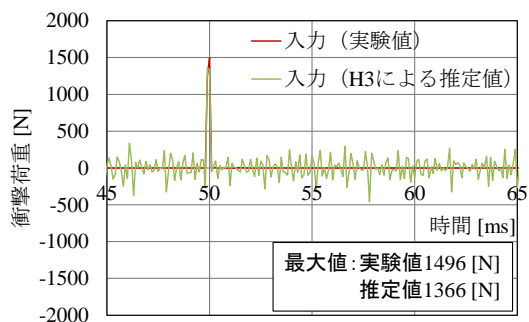
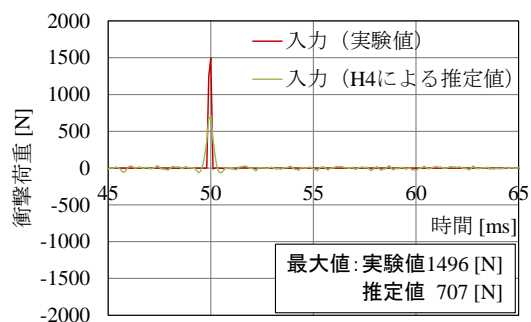
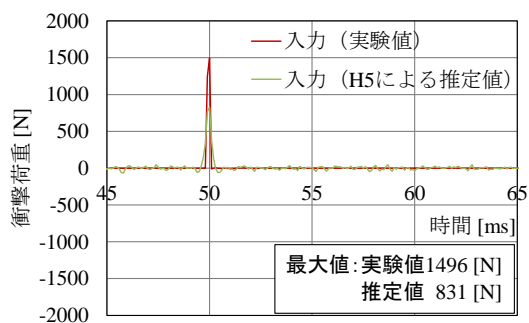
(a) 伝達関数 H_1 (Test001 から算出)(b) 伝達関数 H_2 (c) 伝達関数 H_3 (d) 伝達関数 H_4 (e) 伝達関数 H_5

図 4.13 Steel (test001~010) から算出した伝達関数を用いた Test001 の推定荷重履歴

4. 打撃試験による人頭模型の伝達関数の評価

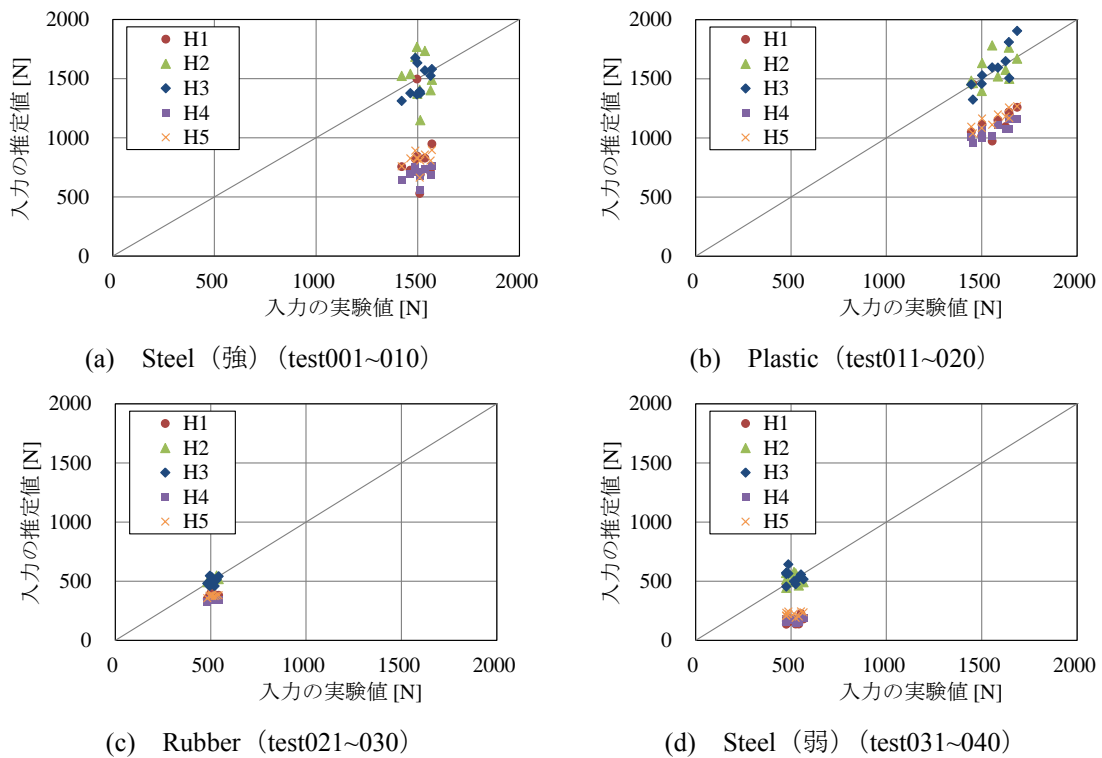


図 4.14 伝達関数の比較

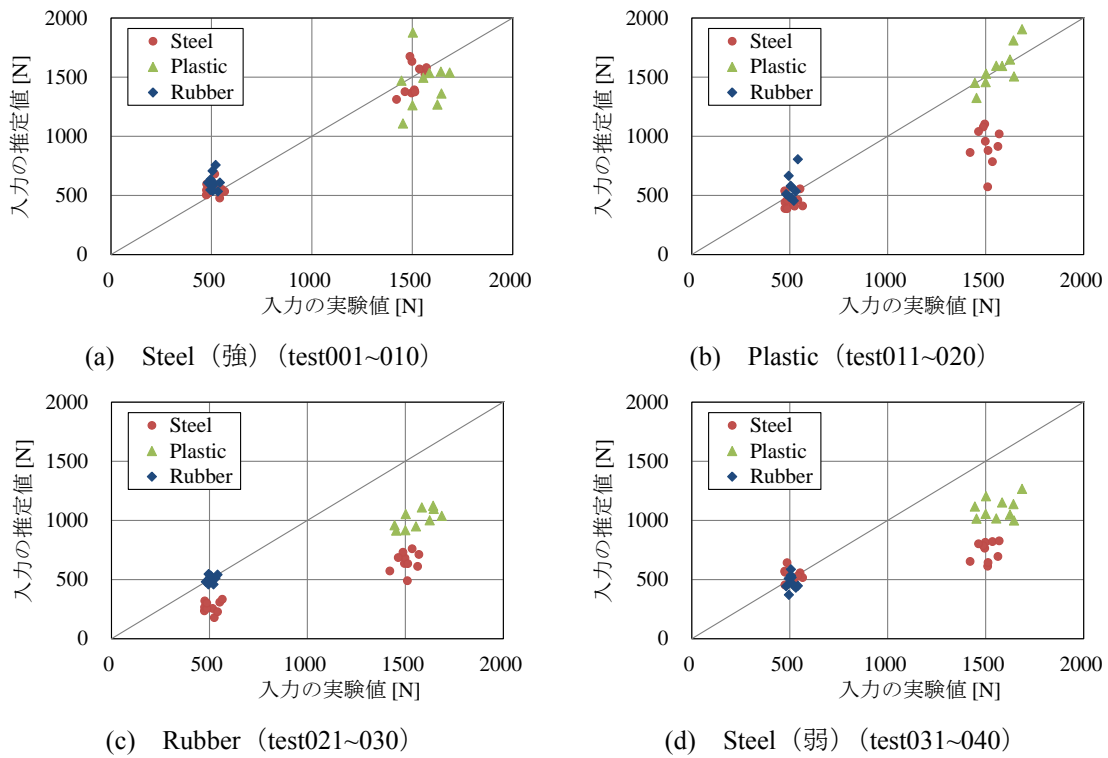
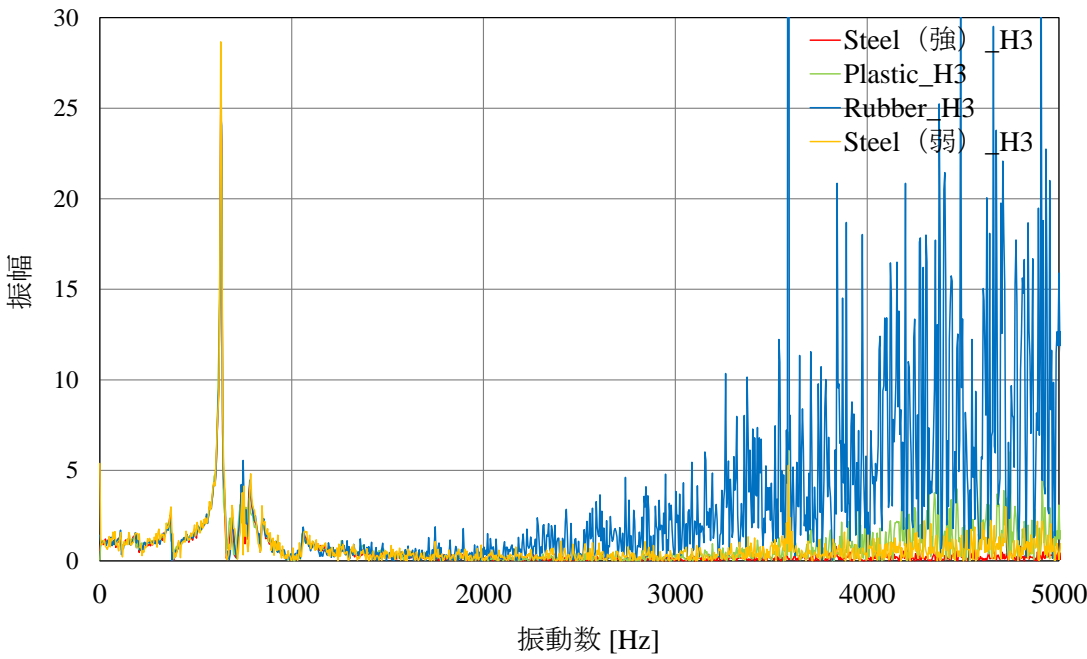
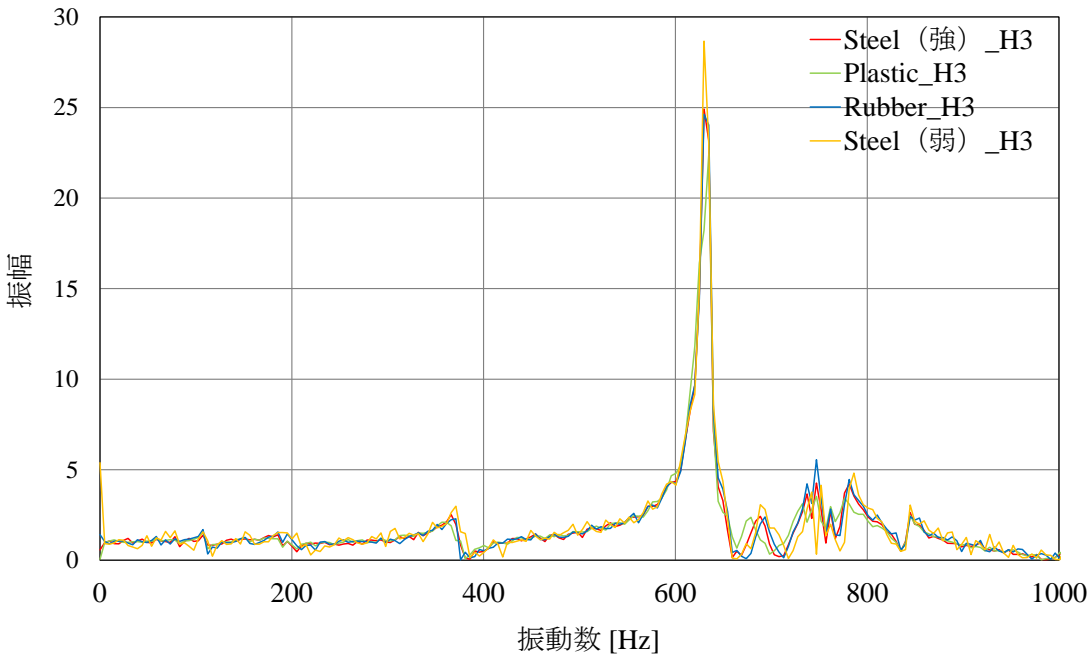


図 4.15 Steel (test001~010) から算出した伝達関数 H_3 による入力 の推定値と実験値の関係



(a) 0~5000 Hz



(b) 0~1000 Hz

図 4.16 伝達関数 H_3

4.5 結言

本章では、天井材の衝撃力を逆解析で求めるための第一段階として、H 形鋼で支持された人頭模型の系の伝達関数を同定することを目的とし較正実験を行った。較正実験では、インパクトハンマによる打撃を行い、インパクトハンマ先端で計測される荷重を入力、人頭模型下のロードセルで計測される荷重を出力として計測を行った。得られた知見は以下の通りである。

- ・ 入力の特クトルに含まれる人頭模型の固有周期成分の多寡により一種の共振現象が発生し、衝撃点から人頭模型下のロードセルに衝撃が伝わるまでに荷重が増減する傾向が確認された。
- ・ 離散フーリエ変換を行う際に発生する誤差の影響を数値実験的に調べた。本実験では、荷重が十分に減衰しきるまでのデータを用いてフーリエ変換を行っているため、漏れ誤差は少なく窓関数は必要ないことがわかった。
- ・ 前章で示した 5 種類の伝達関数を用いて、既知である入力を出力から逆解析により推定し、最も精度良く衝撃力を推定できる伝達関数を明らかにした。その伝達関数は、出力に含まれる雑音成分を最小にする伝達関数である。
- ・ どの伝達関数を用いると推定精度が高いかは、入出力に含まれる雑音成分の多寡により異なるため、実験環境が変わる度に較正実験を行い確かめる必要があることを示した。
- ・ 伝達関数を求める際に用いた入力より高周波成分を含む入力に対しての推定や SN 比が小さい入出力データから同定した伝達関数を用いた推定では大きく精度が低下する傾向にあることがわかった。

5. 天井材落下実験における 逆問題解析の妥当性の検証

5.1 緒言

前章では、人頭模型の打撃試験を行うことで表 3.2 に示した 5 種類の伝達関数を算出し、逆解析を行う際に種々の入力に対してそれらが有効であるか、といった伝達関数の評価を行った。本章では天井材落下実験を新たに行い、前章で得られた伝達関数を用いて天井材の衝撃面における衝撃力を逆解析により推定する。ここでは、衝撃面における衝撃力とほぼ同等の荷重を計測できるよう人頭模型頂部の直下に圧電パッドセンサを設置している。逆解析の結果と圧電型パッドセンサの記録を比較することで天井材落下実験における逆解析の妥当性の検証を行う。

既往の実験で用いた人頭模型（以下、一体型人頭模型）と同様の材質、形状の人頭模型を新たに製作した。新たに製作した人頭模型（以下、分離型人頭模型）は頂部から 3 cm 下の水平面で分離されており、分離面に 1 mm 厚の圧電型のパッドセンサを挿入することで衝撃面直下の荷重を計測することができる。

本章では、まず、分離型人頭模型及び圧電型パッドセンサの性能を打撃試験により検証する。ここでは、人頭模型が従来通りの性能を保有しているか、パッドセンサが荷重を精確に計測できるか、パッドセンサで計測した荷重がインパクト先端で計測した衝撃面における衝撃力とほぼ同様とみなせるか、を検証する。続いて、分離型人頭模型を用いて天井材落下実験を新たに行い、天井材の衝撃面直下の荷重を計測する。既往の実験と同様に人頭模型下に設置したひずみゲージ式ロードセルで荷重を計測しており、その記録から衝撃力を逆解析により推定し、衝撃面直下に設置した圧電型パッドセンサの記録と比較することで天井材を対象とした逆解析の妥当性の検証を行う。

5.2 分離型人頭模型及び圧電型パッドセンサの性能検証

本節では、衝突面直下の荷重を計測するために新たに製作した分離型人頭模型及び圧電型パッドセンサの性能の検証を行うことを目的とする。検証は打撃試験により行った。実験で用いる人頭模型及び圧電型パッドセンサをそれぞれ図 5.1, 図 5.2 に示す。

人頭模型は 2 種類のものを用いる。一つは、従来から用いているマグネシウム合金製の衝撃吸収性試験用人頭模型（大型）（以下、一体型人頭模型）である。もう一つは、1mm 厚のパッドセンサを挿入するために頂部から 3 cm 下の水平面で分離した人頭模型（以下、分離型人頭模型）である。分離型人頭模型は、従来用いていた一体型人頭模型を 3D スキャンし、上部は削りだしにより、下部は鋳物により製作した。そのため、分離面での削りしろはない。上下部は 4 ヶ所をボルト締めすることで緊結することができ、衝撃時の上下部のずれを防ぐと共にパッドセンサに適当な予備圧を与えることができる仕組みとなっている。また、材料は一体型人頭模型と同様のマグネシウム合金を用いており、重量もほぼ一致することが確認されている。

圧電型パッドセンサ（有限会社計測サポート社製）には 2 種類のものを用いる。一つは、102 x 80 mm の矩形のパッドセンサであり、これは人頭模型の底面に設置しひずみゲージ式ロードセルに近い位置で荷重を計測するためのものである。もう一つは、楕円型の人頭模型分離面に内包される 12 角形のパッドセンサであり、これは衝撃面で発生した荷重をより近くで計測するためのものである。上部は M5、下部は M6 のボルトを用いてそれぞれ 4 ヶ所をトルク管理しながらボルト締めし適正な 3 Nm の予備圧を与えることで、圧縮、引張両方の荷重を計測することができる。ここで、圧電センサ自体は非常に高剛性なため、衝撃が作用した際にボルト張力が抜けることによる衝撃荷重の計測誤差はほとんどない。

本実験における検討項目は次の 5 点である。

1. 分離型人頭模型の性能確認
2. 圧電型パッドセンサの性能確認
3. 上部パッドセンサとインパクト先端で計測した荷重の比較
4. パッドセンサ挿入による人頭模型の固有振動数の変化の確認
5. ロードセル自体の固有振動数の変化の確認

インパクト先端の材質を Steel にすると必要以上に高周波を与えてしまう恐れがあるため、ここでは Plastic を用いて打撃試験を行った。サンプリングレートは 10 kHz とし、フィルタは用いていない。上記の検討を目的に、人頭模型の種類、パッドセンサの挿入位置、ひずみゲージ式ロードセルの同形スチール材への置換をパラメータとして組み合わせた図 5.3 に示す 10 パターンについて各 5 回打撃を行い、計 50 回の試験を行った。以下では、インパクト、人頭模型上部に設置した 12 角形パッドセンサ、下部に設置した矩形パッドセンサ、人頭模型下に設置したひずみゲージ式ロードセルをそれぞれ IMP (Impactor), UPS (Upper Pad Sensor), LPS (Lower Pad Sensor), SGLC (Strain Gauge Load Cell) と略記することとする。試験項目を結果と共に表 5.1 に示す。

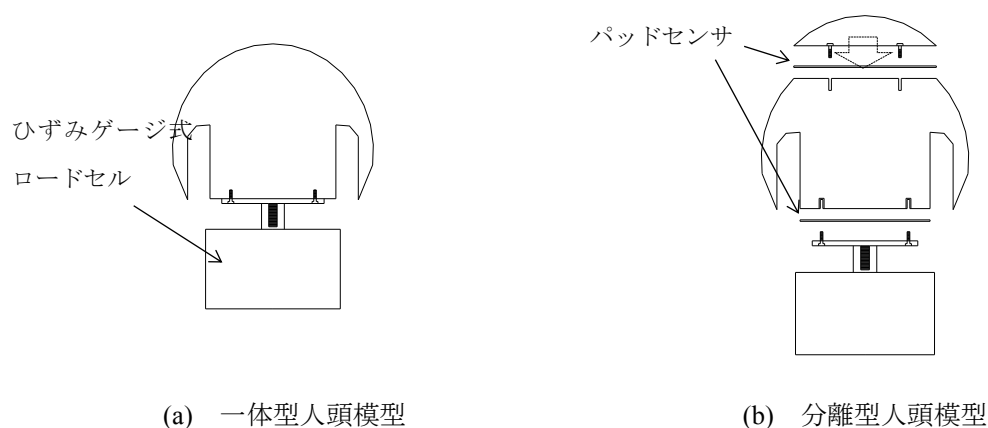


図 5.1 人頭模型

5. 天井材落下実験における逆問題解析の妥当性の検証

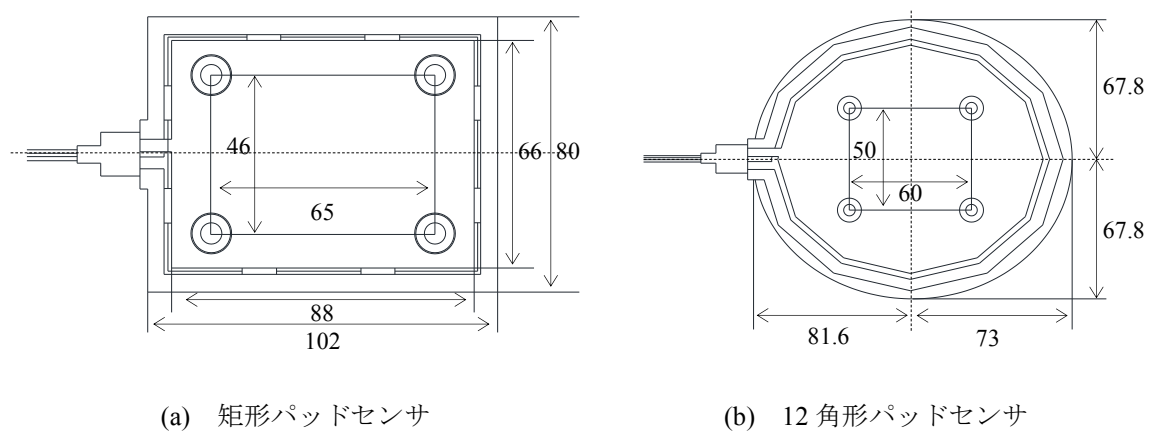


図 5.2 圧電型パッドセンサ

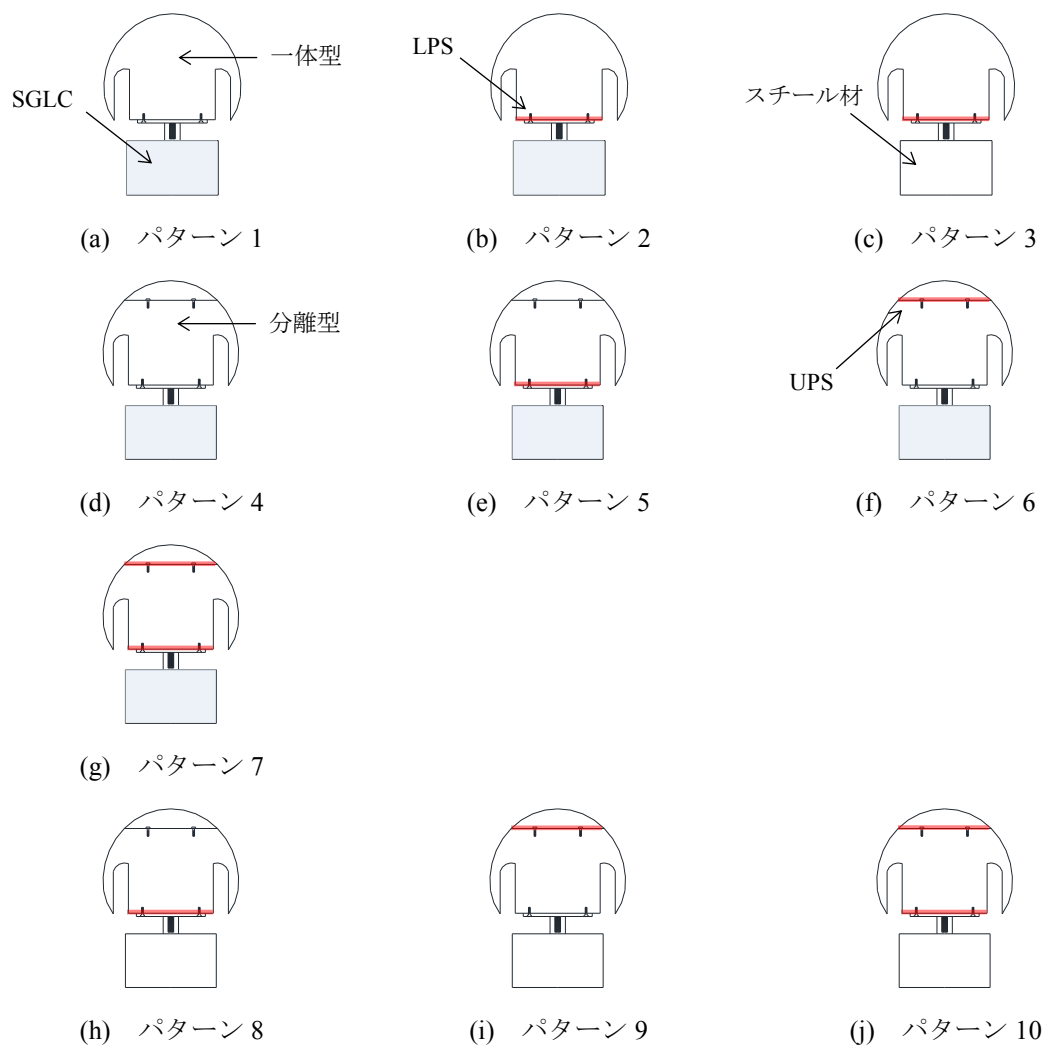


図 5.3 試験パターン

表 5.1 実験結果

試験番号	pattern	人頭模型	最大衝撃値 [N]				一次卓越振動数 [Hz]			フーリエ振幅 [gal×sec]		
			IMP	UPS	LPS	SGLC	UPS	LPS	SGLC	UPS	LPS	SGLC
1	1	一体型	770	-	-	676	-	-	662	-	-	3.39
2			841	-	-	676	-	-	662	-	-	3.20
3			947	-	-	725	-	-	662	-	-	3.60
4			842	-	-	750	-	-	659	-	-	3.55
5			719	-	-	576	-	-	662	-	-	2.63
6	2	一体型	669	-	689	583	-	657	654	-	5.61	5.00
7			647	-	674	586	-	657	657	-	5.55	5.03
8			615	-	621	561	-	657	657	-	5.22	4.67
9			679	-	712	634	-	657	654	-	5.86	5.28
10			651	-	661	619	-	657	654	-	5.37	4.74
11	3	一体型	669	-	775	-	-	698	-	-	0.88	-
12			712	-	871	-	-	698	-	-	0.98	-
13			643	-	795	-	-	698	-	-	0.89	-
14			703	-	827	-	-	698	-	-	0.92	-
15			634	-	755	-	-	698	-	-	0.84	-
16	4	分離型	702	-	-	647	-	-	657	-	-	6.48
17			619	-	-	558	-	-	657	-	-	6.05
18			653	-	-	622	-	-	654	-	-	6.23
19			687	-	-	587	-	-	654	-	-	6.35
20			672	-	-	601	-	-	654	-	-	6.39
21	5	分離型	685	-	623	559	-	669	669	-	6.57	5.93
22			679	-	640	588	-	669	669	-	6.92	6.33
23			668	-	596	565	-	669	669	-	6.43	5.84
24			696	-	654	599	-	669	669	-	6.99	6.49
25			735	-	668	583	-	669	669	-	7.20	6.55
26	6	分離型	763	730	-	634	662	-	667	0.73	-	5.87
27			664	644	-	580	662	-	667	0.67	-	5.21
28			844	834	-	670	659	-	667	0.78	-	6.14
29			707	668	-	626	662	-	667	0.72	-	5.77
30			728	692	-	611	662	-	662	0.69	-	5.41
31	7	分離型	926	901	835	734	659	659	659	0.87	7.20	6.54
32			794	779	732	673	659	659	659	0.77	6.33	5.71
33			774	742	714	657	659	659	659	0.75	6.08	5.46
34			777	753	722	670	659	659	659	0.76	6.20	5.69
35			752	732	679	626	659	659	659	0.72	5.82	5.40
36	8	分離型	666	-	843	-	-	698	-	-	0.84	-
37			735	-	837	-	-	698	-	-	0.84	-
38			699	-	845	-	-	698	-	-	0.81	-
39			732	-	876	-	-	698	-	-	0.84	-
40			672	-	770	-	-	698	-	-	0.78	-
41	9	分離型	708	700	-	-	698	-	-	0.25	-	-
42			603	605	-	-	698	-	-	0.21	-	-
43			687	701	-	-	698	-	-	0.24	-	-
44			660	650	-	-	698	-	-	0.22	-	-
45			698	707	-	-	698	-	-	0.24	-	-
46	10	分離型	737	727	882	-	698	698	-	0.25	0.90	-
47			741	711	892	-	698	698	-	0.26	0.93	-
48			748	742	857	-	698	698	-	0.25	0.91	-
49			817	796	942	-	698	698	-	0.27	0.98	-
50			775	767	909	-	698	698	-	0.26	0.95	-

5. 天井材落下実験における逆問題解析の妥当性の検証

5.2.1 分離型人頭模型の性能確認

新たに製作した分離型人頭模型の性能確認を行うため、パターン 1 とパターン 4 の比較を行う。表 5.1 に示した実験結果からわかるように人頭模型の固有振動数はどちらも約 650 Hz であり概ね一致している。これは天井材落下実験時に得られた値とほぼ同様である。代表例として、Test001 と Test016 の時刻歴荷重と荷重フーリエスペクトルをそれぞれ図 5.4, 図 5.5 に示す。時刻歴荷重の波形を見てわかるように一体型人頭模型に比べて分離型人頭

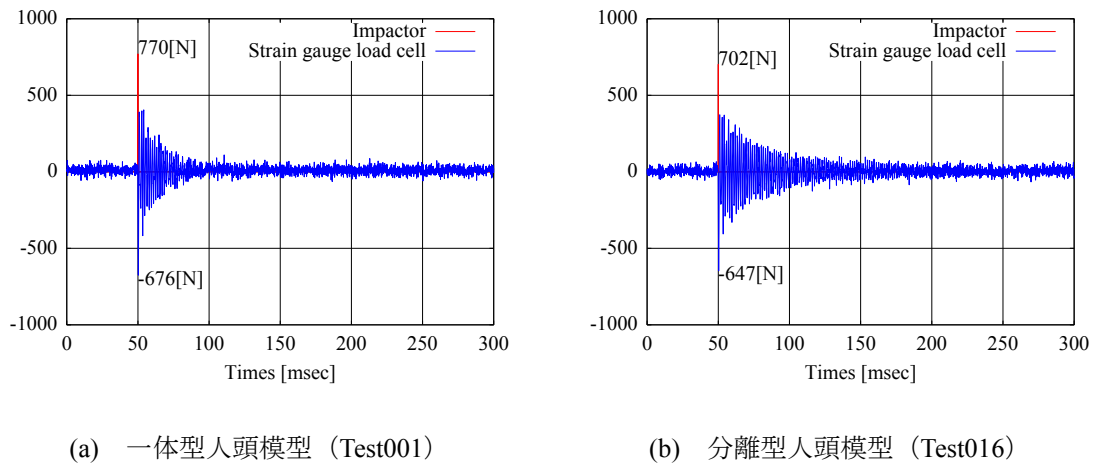


図 5.4 時刻歴荷重

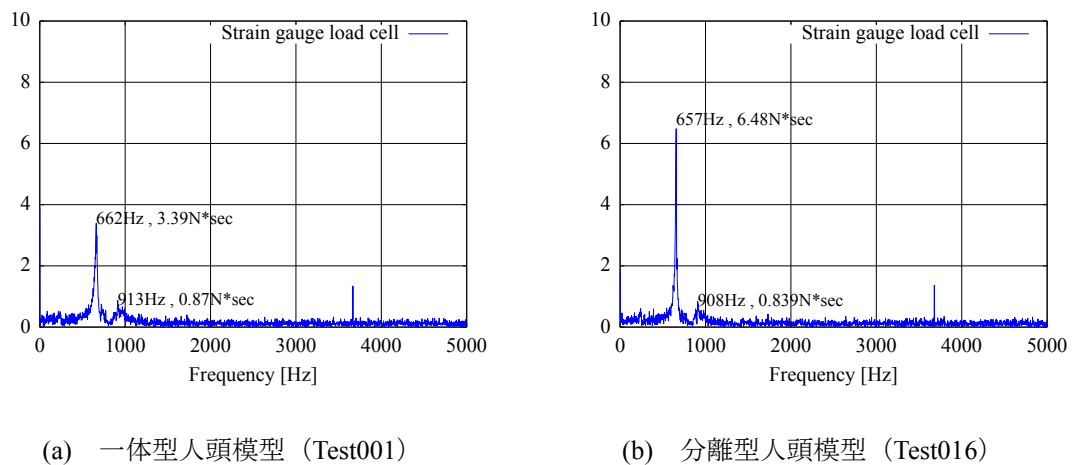


図 5.5 荷重フーリエスペクトル

模型は減衰が小さい。これは、荷重フーリエスペクトルのピークの山が鋭くなっていることから確認できる。両人頭模型は同じ材料を用いて製作しているが、わずかな材料特性の違いが減衰に表れたのではないかと考えられる。両人頭模型で多少の減衰の違いは見られるが、基本的なスペクトル特性は概ね一致していることが確認できた。

5.2.2 圧電型パッドセンサの性能確認

本実験で用いる 1mm 厚の圧電型パッドセンサが荷重を精確に計測できるかの検討を行う。ここでは、分離型人頭模型の底面の矩形パッドセンサと人頭模型下に設置したひずみゲージ式ロードセルで荷重を計測したパターン 5 の結果を用いて検討を行う。代表例として、Test021 の時刻歴荷重と荷重フーリエスペクトルをそれぞれ図 5.6, 図 5.7 に示す。矩形パッドセンサとひずみゲージ式ロードセルはかなり近い場所の荷重を計測しているため、時刻歴荷重はほとんど同様の波形となっており、両者が荷重を精確に計測できていることがわかる。圧電型パッドセンサは、時刻歴荷重の拡大波形からわかるようにひずみゲージ式ロードセルの波形に常に含まれている振幅 20 N 程度のノイズを含んでいない。このことは、

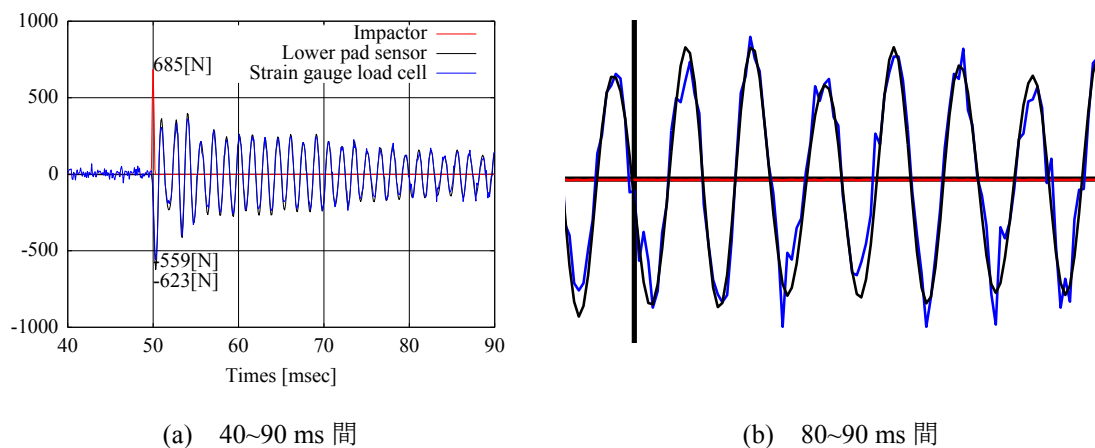


図 5.6 時刻歴荷重 (Test021)

5. 天井材落下実験における逆問題解析の妥当性の検証

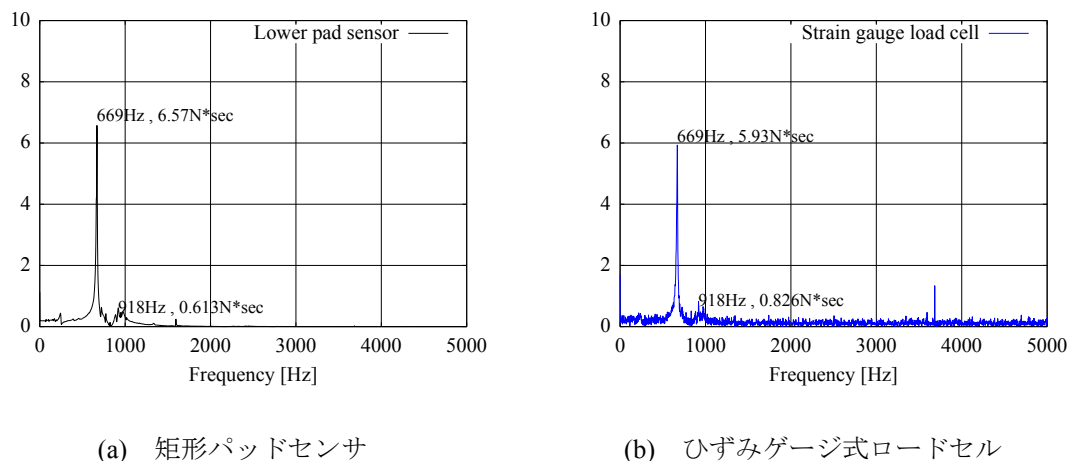


図 5.7 荷重フーリエスペクトル (Test021)

荷重フーリエスペクトルの乱れが少ないことから確認できる。また、両者の波形が概ね一致することから圧電型パッドセンサのキャリブレーションをうまく行えていることがわかる。

5.2.3 上部パッドセンサとインパクト先端で計測した荷重の比較

分離型人頭模型の分離面に挿入した 12 角形の圧電型パッドセンサで計測した値が、インパクト先端で計測した衝撃面での衝撃力とほぼ同等とみなせるかを検討する。ここでは、分離面にパッドセンサを挿入した全てのパターン（パターン 6, 7, 9, 10）の結果を用いる。代表例として、上下部のパッドセンサ及びひずみゲージ式ロードセルで荷重を計測した Test031 で得られた時刻歴荷重及びインパクト、上部パッドで計測した荷重のフーリエスペクトルを示す（図 5.8）。時刻歴荷重から本試験においては、荷重はロードセルに伝わるまでに減衰していることがわかる。また、上部パッドセンサの記録の最大値はインパクトで記録したものと数パーセントの違いしかないことが確認された。フーリエスペクトルについては、上部パッドセンサとインパクトの波形は近いものとなっており、人頭模型の固有振動数付近のみ励起されて振動数成分のパワーが増減していることがわかる。これは上部

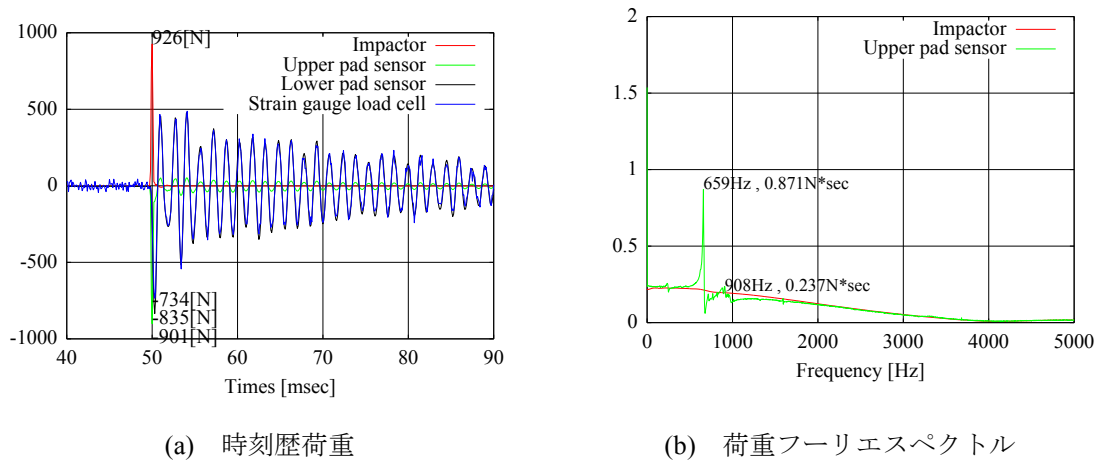


図 5.8 Test031 (パターン 7)

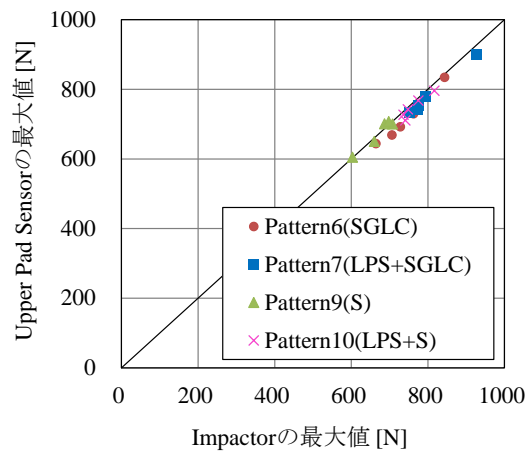


図 5.9 上部パッドセンサとインパクトの最大値の関係 (パターン 6, 7, 9, 10)

パッドセンサのフーリエスペクトルから入力のスpekトルの概形を推測することが可能であることを示唆している。パターン 6, 7, 9, 10 の試験で得られた上部パッドセンサとインパクトの先端で計測された荷重の最大値の関係を図 5.9 に示す。インパクト先端で記録した最大荷重に対する上部パッドセンサで記録した最大荷重の比の平均は 0.98, 標準偏差は 0.02 であり, 上部パッドセンサで記録した値は衝撃面での衝撃力とほぼ同等とみなせることが確認された。

5.2.4 パッドセンサ挿入による人頭模型の固有振動数の変化の確認

上部パッドセンサの挿入による人頭模型の固有振動数の変化について検討を行う．ここでは，分離型人頭模型を用いて分離面にパッドセンサを挿入したもの（パターン 6）とそうでないもの（パターン 4）の結果を比較する．代表例として，Test016 と Test026 で得られた時刻歴荷重のフーリエスペクトルを図 5.10 に示す．スペクトル特性にも特段違いは見られないため，系の基本的な特性は保たれていると判断できる．

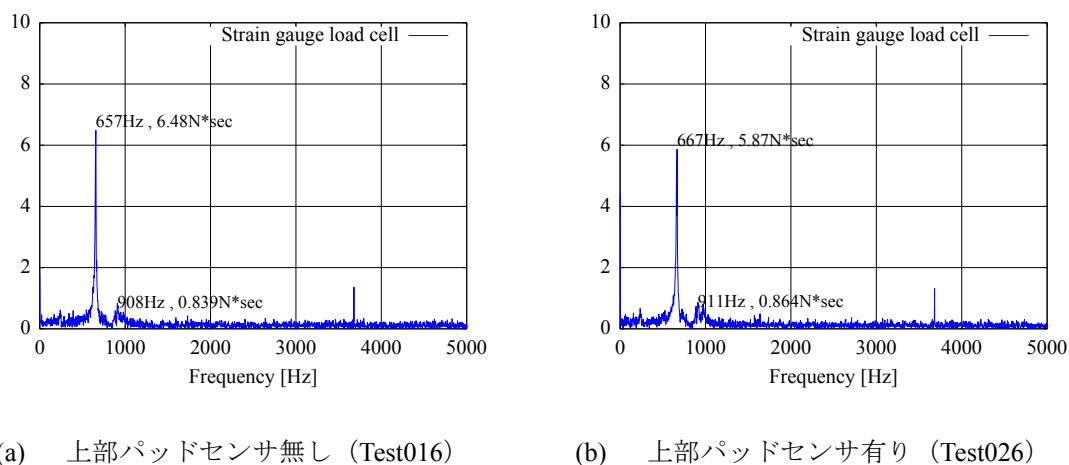


図 5.10 荷重フーリエスペクトル

5.2.5 ロードセル自体の固有振動数の変化の確認

ひずみゲージ式ロードセルの上に重量物を載せるとロードセルの固有振動数は小さくなることが知られている．天井材落下実験では，固有振動数 4970 Hz のひずみゲージ式ロードセルに質量 5.5 kg の人頭模型を載せた状態で，人頭模型を含めた系の固有振動数は約 650 Hz であり，衝撃を受けた後にその周期での振動現象が見られた．この振動は衝撃荷重の波形に重畳することで衝撃力の最大値に影響を与える可能性があるため，ひずみゲージ式ロードセルを同形スチール材へ置き換えることでその固有振動数がロードセルに重量物を載せたことに起因するかについて検討した．ここでは，天井材落下実験時に用いていた一体型

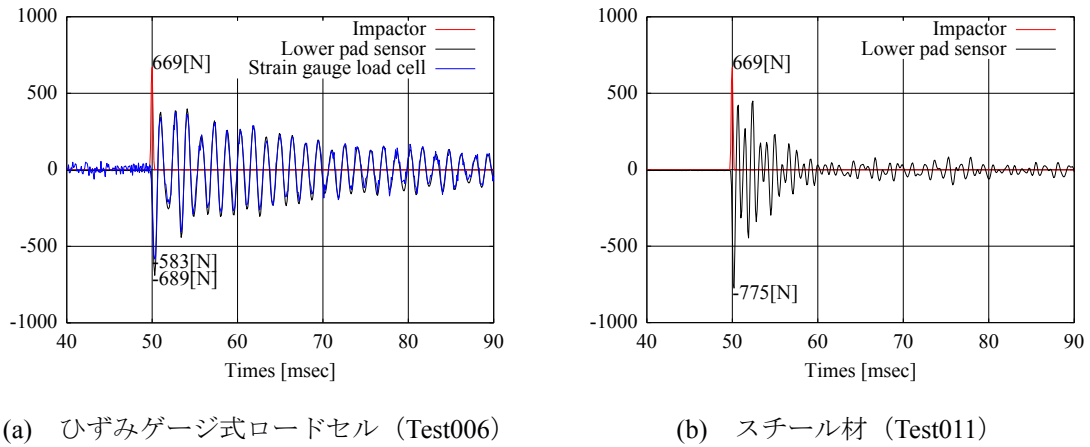


図 5.11 時刻歴荷重

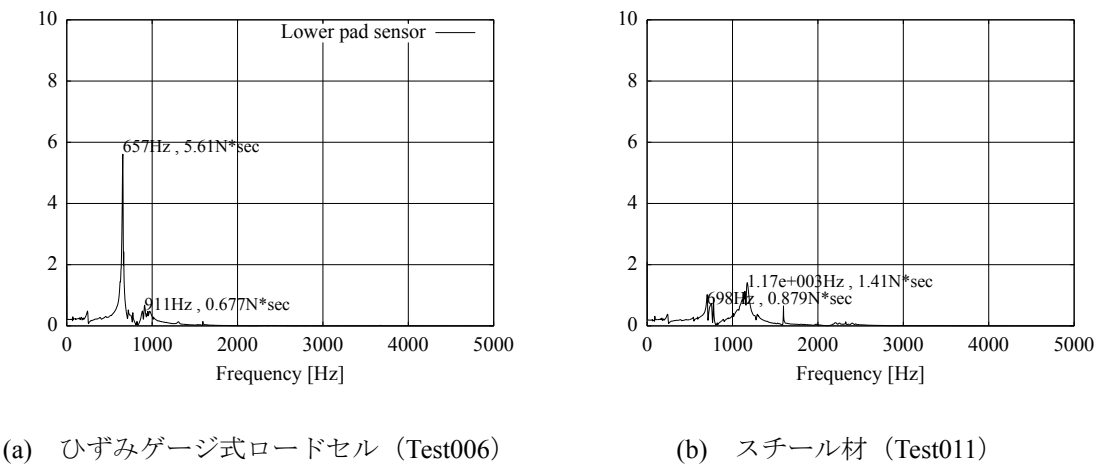


図 5.12 荷重フーリエスペクトル

の人頭模型に対して底面に矩形パッドセンサを挿入し、ひずみゲージ式ロードセルを設置したもの（パターン 2）と同形のスチール材を設置したもの（パターン 3）で比較を行う。代表例として、Test006 と Test011 で得られた時刻歴荷重及び下部パッドセンサで計測された荷重のフーリエスペクトルを示す。時刻歴波形からは、スチール材に置き換えた試験では従来見られた約 650 Hz での振動が消えているように見える。また、スチール材に置き換えた場合は減衰が大きくなっており、H 形鋼に支持された人頭模型の系の振動特性はロード

5. 天井材落下実験における逆問題解析の妥当性の検証

セルにある程度依存することがわかる．下部パッドセンサの荷重フーリエスペクトルを見ると，650 Hz 付近で見られたピークは鈍化しているが山は残っているため 650 Hz での卓越振動数は人頭模型を載せたことによるロードセル自体の固有振動数の低下からくるものではなく，2.4 節で述べたように H 形鋼上フランジの縦振動のモードに対応する固有振動数であると考えられる．

5.3 逆問題解析の妥当性の検証

前節で、分離型人頭模型の分離面に 12 角形の圧電型パッドセンサを挿入することで衝撃面における衝撃力とほぼ同等の荷重を計測できることが確認できたため、本節ではこれらを利用して新たに天井材落下実験を行い、天井材の衝撃力を計測する。一連の天井材落下実験において、付録に記した軽量新素材の天井材落下実験をシリーズ 6 としているため、本実験はシリーズ 7 とする。

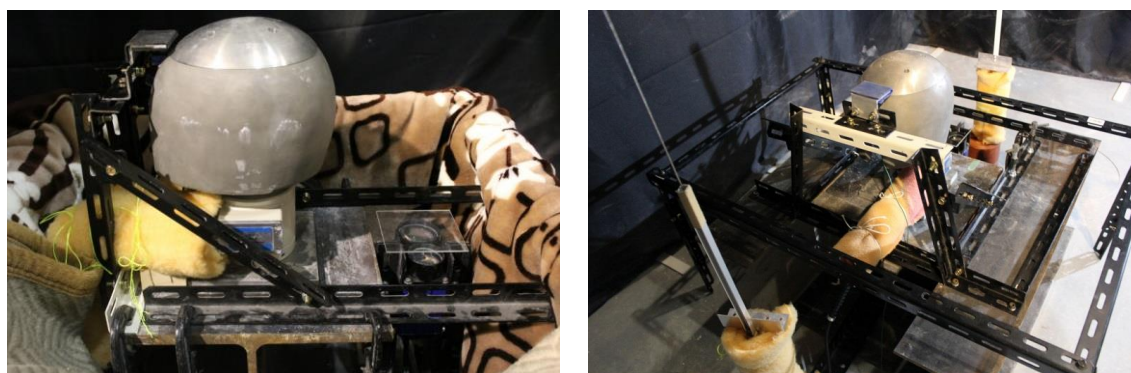
5.3.1 天井材衝突時に発生する衝撃面付近の荷重計測実験

実験は、シリーズ 1 で利用した東京大学生産技術研究所内 Be 棟地下実験室（屋内：最高落下高さ 7m）で行った。ガイドワイヤーとの接続等の実験のセットアップはシリーズ 3, 4 で用いた手法を踏襲している。実験項目を表 5.2 に示す。上部パッドセンサのケーブル端

表 5.2 実験項目（シリーズ 7）

	人頭模型	UPS	ロードセル	略称	材質	サイズ	質量 [kg]	実験内容	
第1回	一体型	なし	容量20 kN	CS	ケイ酸カルシウム板	910×910×8.0	5.9	2, 6 m, 3回ずつ	計6枚
	分離型	なし	容量20 kN	CS	ケイ酸カルシウム板	910×910×8.0	5.9	2, 6 m, 3回ずつ	計6枚
	分離型	あり	容量20 kN	CS	ケイ酸カルシウム板	910×910×8.0	5.9	2, 4, 6 m, 3回ずつ	計9枚
				NCS	ケイ酸カルシウム板	910×910×6.0	2.4	2, 4, 6 m, 3回ずつ	計9枚
				ACM	アルミ複合板	910×910×20.0	0.9	2, 4, 6 m, 3回ずつ	計9枚
				CS+RW	ケイ酸カルシウム板	910×910×8.0	8.9	2, 4, 6 m, 3回ずつ	計9枚
					ロックウール	300×600×12.0			
				CS+RW+F(4)	ケイ酸カルシウム板	910×910×8.0	10.3	2, 4, 6 m, 3回ずつ	計9枚
					ロックウール	300×600×12.0			
				CS+RW+F(3)	シングル野縁, ダブル野縁	17×25,50×0.8	9.9	2, 6 m, 1回ずつ	計2枚
					ケイ酸カルシウム板	910×910×8.0			
					ロックウール	300×600×12.0			
	一体型	なし	容量0.5 kN	GW	グラスウール	892×892×25.0	1.5	2, 6 m, 3回ずつ	計6枚
	分離型	なし	容量0.5 kN	GW	グラスウール	892×892×25.0	1.5	2, 6 m, 3回ずつ	計6枚
	分離型	あり	容量0.5 kN	GW	グラスウール	892×892×25.0	1.5	2, 4, 6 m, 3回ずつ	計9枚
				MM⑤	膜(ガラス繊維基布+フッ素コーティング)	910×910×0.4	0.4	2 m, 3回	計3枚
				MM⑥	膜(ガラス繊維基布+フッ素コーティング)	910×910×0.8	1.1	2 m, 3回	計3枚
				MM③	膜(ガラス繊維基布+フッ素コーティング)	910×910×0.6	0.4	2 m, 3回	計3枚
				MM④	膜(ガラス繊維基布+フッ素コーティング)	910×910×0.8	0.6	2 m, 3回	計3枚
				MM②	膜(ガラス繊維基布+フッ素コーティング)	910×910×1.0	0.4	2 m, 3回	計3枚
				MM②	膜(ガラス繊維基布+フッ素コーティング)	910×910×1.0	0.4	2 m, 3回	計3枚
第2回	分離型	なし	容量20 kN	CS	ケイ酸カルシウム板	910×910×8.0	5.9	2, 6 m, 3回ずつ	計6枚
	分離型	あり	容量20 kN	CS	ケイ酸カルシウム板	910×910×8.0	5.9	2, 6 m, 3回ずつ	計6枚
				NCS	ケイ酸カルシウム板	910×910×6.0	2.4	2, 6 m, 3回ずつ	計6枚
				CS+RW	ケイ酸カルシウム板	910×910×8.0	8.9	2, 6 m, 3回ずつ	計6枚
					ロックウール	300×600×12.0			
				ACM	アルミ複合板	910×910×20.0	0.9	6 m, 3回	計3枚

5. 天井材落下実験における逆問題解析の妥当性の検証



(a) 第1回

(b) 第2回

図 5.13 上部パッドセンサのケーブル保護材の設置方法

部が天井材の衝撃により破損する危険性があったため、アングル材を組んで保護した（図 5.13）。実験は 2 回に分けて行われている。第 1 回実験では、保護材を人頭模型の土台となる H 形鋼の上に設置した。第 2 回実験では、人頭模型の系が保護材設置の影響を受けないように、人頭模型の両脇に H 形鋼を 2 つ並べその上に保護材を設置した。既往の実験では荷重が比較的小さい膜材とグラスウールに対しては容量 0.5 N のひずみゲージ式ロードセル（共和電業社製 LU-50KE，固有振動数 1.54 kHz）が用いられていたため，本実験においても膜材とグラスウールに関してはこのロードセルを使用した。実験を行うに当たり，従来の一体型人頭模型を用いてリファレンスとしてケイ酸カルシウム板の落下実験を行い，得られた荷重データを比較することで既往の実験状況を再現できたか確認している。続いて，分離型人頭模型を用いて従来の一体型人頭模型と近い荷重を計測できているかを確認めた。その際には，上部パッドセンサは挿入していないが保護材は設置しており，保護材の衝撃に対する影響が少ないことも同時に確認している。その後に，上部パッドセンサを挿入して再度実験を行うことで衝撃面直下の荷重計測を行った。落下高さは 2, 4, 6 m の 3 通り，用いた天井材は 12 種類であり，試験は合計 122 回行った。

5.3.2 打撃試験による伝達関数の同定

上部パッドセンサを挿入した本実験状況における H 形鋼に支持された分離型人頭模型の伝達関数を同定するため、打撃試験を行った。同定する伝達関数は次の 3 つの状況における伝達関数である。

状況 1：上部パッドセンサの保護材を土台である H 形鋼の上面に設置した状況（第 1 回実験）において容量 20 kN のロードセルを用いた場合

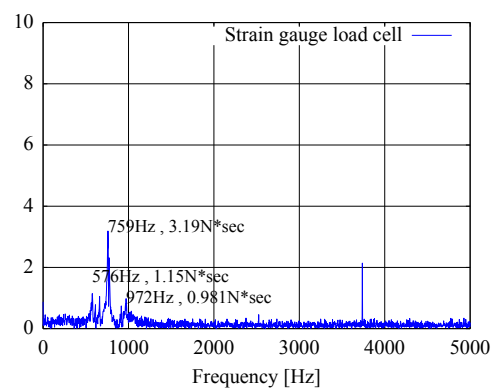
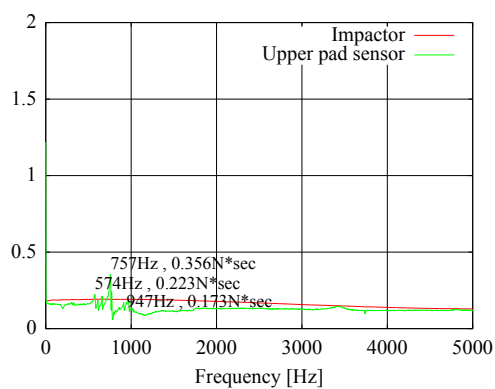
状況 2：状況 1 と同様の保護材設置状況において容量 0.5 kN のロードセルを用いた場合

状況 3：保護材設置による土台への影響をなくして従来の天井材落下実験と同様の状況にするために両脇に置いた H 形鋼に保護材を設置し、容量 20 kN のロードセルを用いた場合

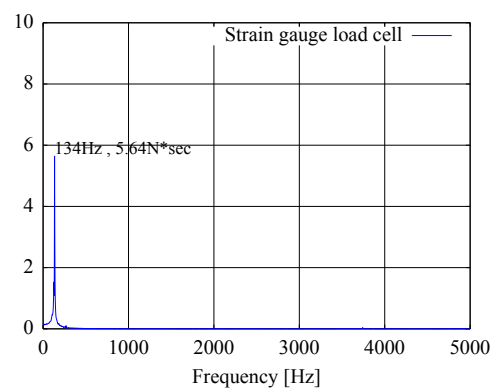
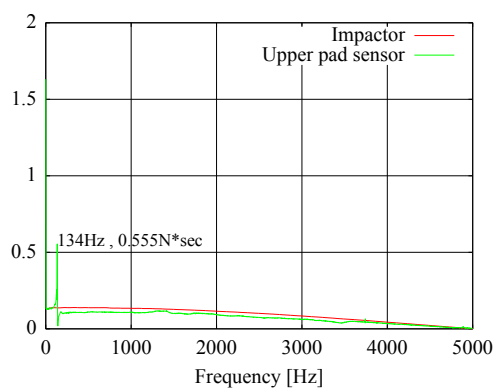
伝達関数は、インパクト先端の材質をプラスチックとし、第 3 章と同様に同状況で 10 回ずつ打撃を行った。

各状況において得られるインパクト、上部パッドセンサ、ひずみゲージ式ロードセルの記録から算出した荷重フーリエスペクトルを図 5.14 に、伝達関数 H_3 、 H_4 を図 5.15 に示す。フーリエスペクトルからわかるように、状況 1 では従来推定されていた人頭模型の固有振動数である約 650 Hz 付近のピークが鈍化していることがわかる。保護材は H 形鋼のフランジに載せられており、H 形鋼の上フランジ部分の振動が人頭模型の固有振動数に大きく影響していたと考えられる。状況 2 では、天井材落下実験時と同様に約 150 Hz にピークがはっきりと立っている。状況 3 に関しても、天井材落下実験時と同様に約 650 Hz にピークがはっきりと立っており、従来の人頭模型の設置状況を概ね再現できたと言える。

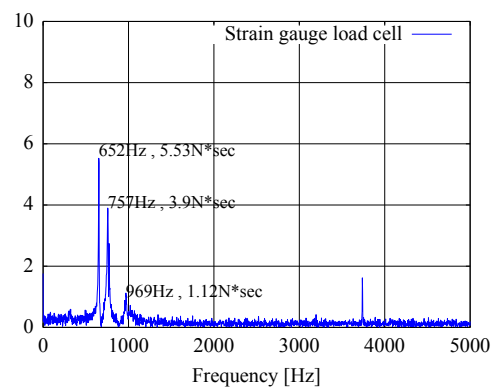
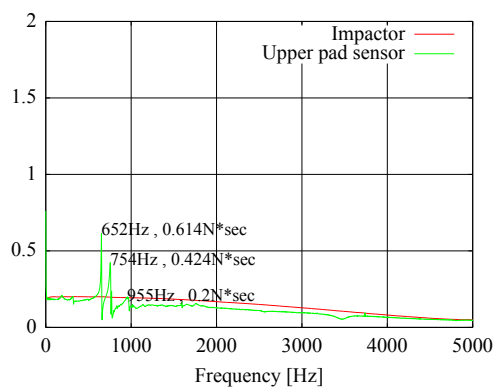
5. 天井材落下実験における逆問題解析の妥当性の検証



(a) 状況 1 (第 1 回実験, ロードセル容量 20 kN)

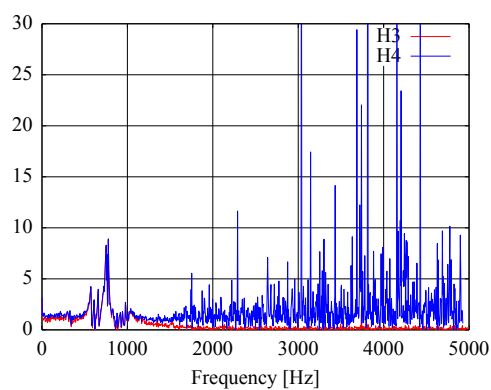


(b) 状況 2 (第 1 回実験, ロードセル容量 0.5 kN)

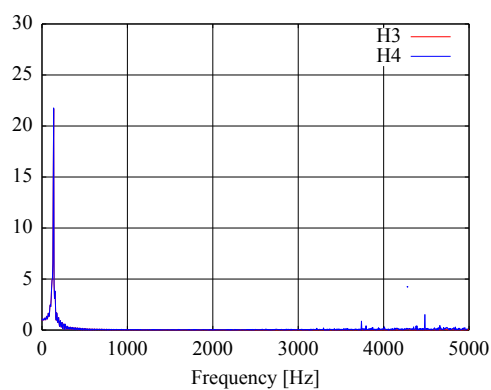


(c) 状況 3 (第 2 回実験, ロードセル容量 20 kN)

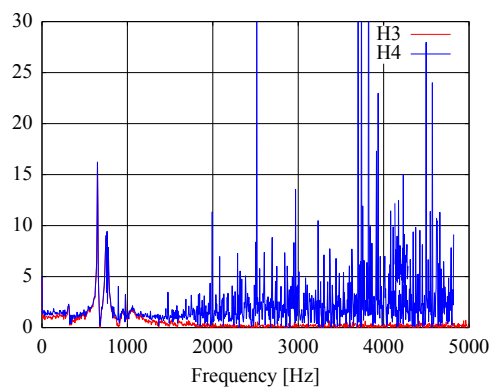
図 5.14 荷重フーリエスペクトル



(a) 状況 1 (第 1 回実験, ロードセル容量 20 kN)



(b) 状況 2 (第 1 回実験, ロードセル容量 0.5 kN)



(c) 状況 3 (第 2 回実験, ロードセル容量 20 kN)

図 5.15 伝達関数

5.3.3 逆問題解析による天井材の推定最大衝撃力の妥当性の検証

分離型人頭模型を用いて新たに行った天井材落下実験で得た人頭模型下に設置したロードセルの荷重から衝撃面で発生した最大衝撃力の推定を試みる。表 3.2 に示した 5 種類の伝達関数を用いて人頭模型下に設置したロードセルの記録から逆解析を行った。フーリエ変換は 4.3.1 項で示したように衝撃点前後の 204.8 ms で行っている。但し、膜材は常時静電気を帯びており、その影響で上部パッドセンサが荷重を精確に計測できなかったため解析対象から除いている。上述した 3 つの状況それぞれにおける代表例として、ケイ酸カルシウム板 t8.0 mm とグラスウール t25.0 mm を 6 m の高さから落下させた際にひずみゲージ式ロードセルで記録した時刻歴荷重を、推定時刻歴荷重をパッドセンサの記録と共に図 5.16~図 5.18 に示す。状況 1, 2 では推定した時刻歴荷重に基線のずれが見られる。これは、出力に含まれる低周波成分の影響と考えられる。状況 1 と状況 3 より、伝達関数 H_4 では雑音成分が少なく、伝達関数 H_3 では雑音成分が大きいという傾向は打撃試験時と同様である。

図 5.20~図 5.22 に各状況において 5 種類の伝達関数で推定した入力 of 最大値とパッドセンサで記録した最大値の関係を示す。容量 20 kN のロードセルを用いた状況 1 と 3 では、打撃試験と同様に伝達関数 H_3 を用いると精度良く最大衝撃力を推定できていることがわかる。一方、容量 0.5 kN のロードセルを用いた状況 2 においては、ピークをうまく再現できていない。これは、状況 2 で用いた天井材は衝突後に割れずに人頭模型に乗ったままであり、衝突前は荷重が 0 だったのに対して衝突後には天井材の重量分だけ荷重が計測され、フーリエ変換を行う際に漏れ誤差が発生してしまうためと考えられる。状況 2 で用いたロードセルは容量が小さいため、この影響が顕著に表れたと考えられる。状況 2 において、漏れ誤差を除去する手段も考えられるが、図 5.17 からわかるようにひずみゲージ式ロードセルと上部パッドセンサの最大値には大きなずれはないため、容量 0.5 kN のロードセルを用いた場合にはひずみゲージ式ロードセルの記録が直接衝撃力を表していると思えることができる。状況 1, 3 において伝達関数 H_3 による推定値が実験値に比べやや低くなる傾向に

ある原因は上述した基線のずれにある。そこで、衝撃が加わる前の 0~30 ms 間の荷重の平均値を求めて全体から引くことで基線の補正を行った。基線の補正後の推定値とパッドセンサの最大値の関係を図 5.23 に示す。図 5.23 より、今度は推定値が実験を上回る結果となった。これは、逆解析により増幅した雑音成分の影響であると考えられる。各試験における基線補正後の推定値と実験値の差は概ね一定であり、平均で 98 N であった。また、推定値と実験値の差の標準偏差は 86 N であり、いずれの材質の天井材に関してもばらつきは少なく、衝撃面での衝撃力と同等とみなせるパッドセンサの最大値を精度良く推定することができており、天井材落下実験における逆解析の妥当性を示すことができたと言える。

5. 天井材落下実験における逆問題解析の妥当性の検証

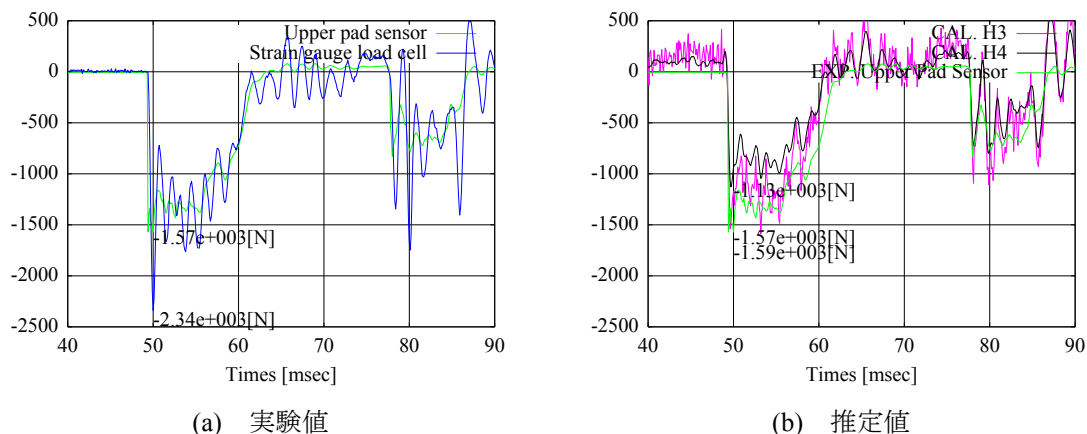


図 5.16 状況 1 における推定時刻歴荷重（ケイ酸カルシウム板 t8.0 mm，落下高さ 6m）

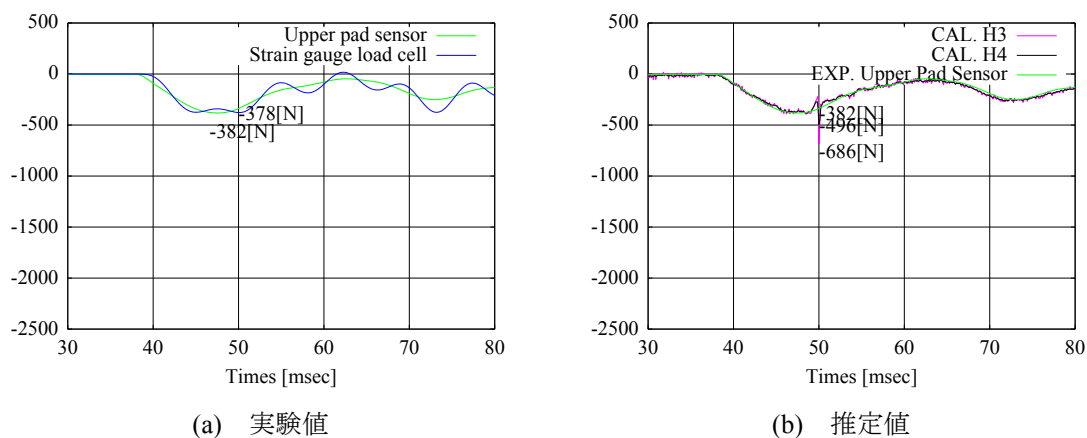


図 5.17 状況 2 における推定時刻歴荷重（グラスウール t25.0 mm，落下高さ 6m）

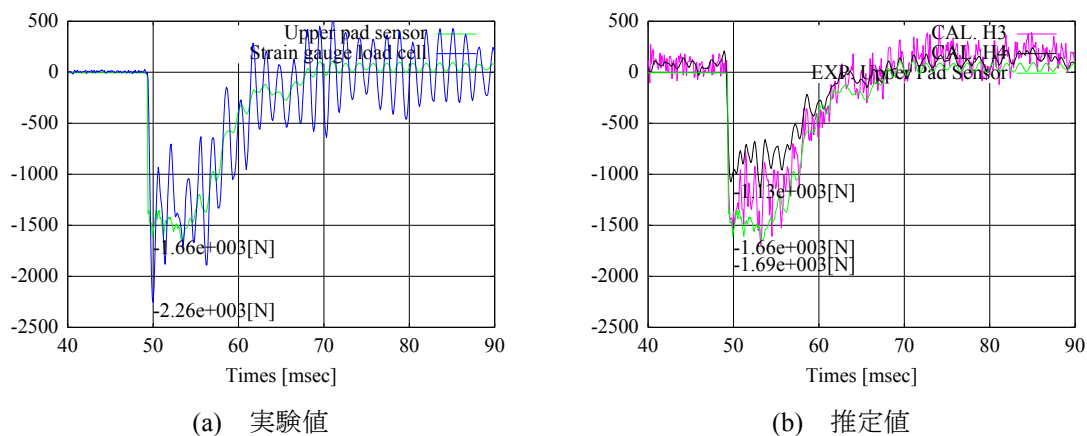
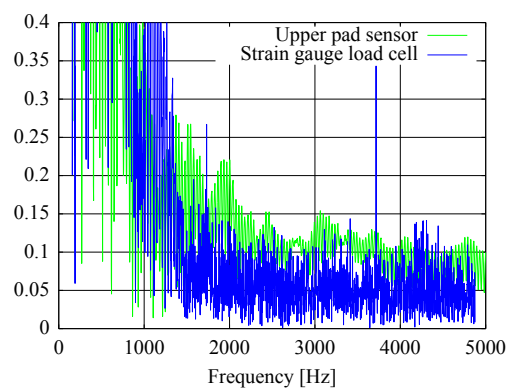
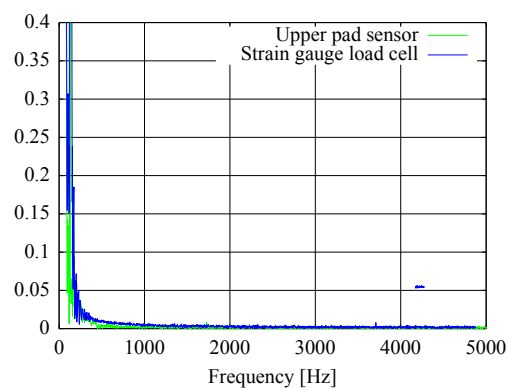


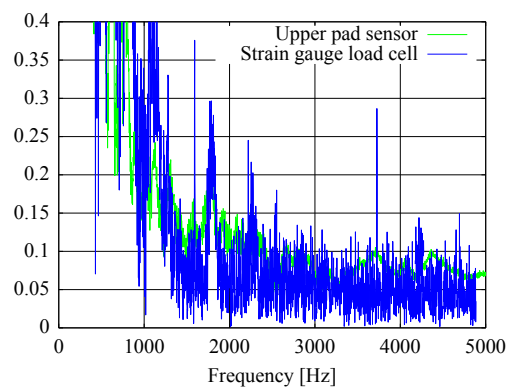
図 5.18 状況 3 における推定時刻歴荷重（ケイ酸カルシウム板 t8.0 mm，落下高さ 6m）



(a) 状況 1 (ケイ酸カルシウム板 $t8.0$ mm, 落下高さ 6m)



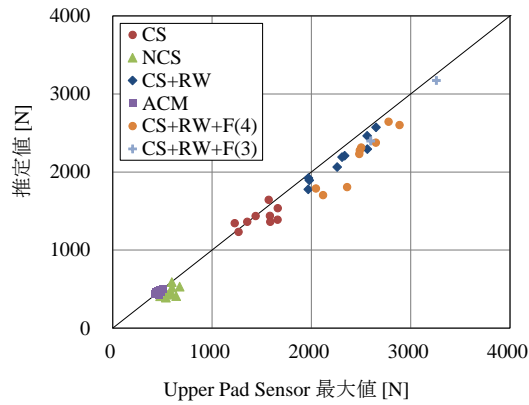
(b) 状況 2 (ガラスウール $t25.0$ mm, 落下高さ 6m)



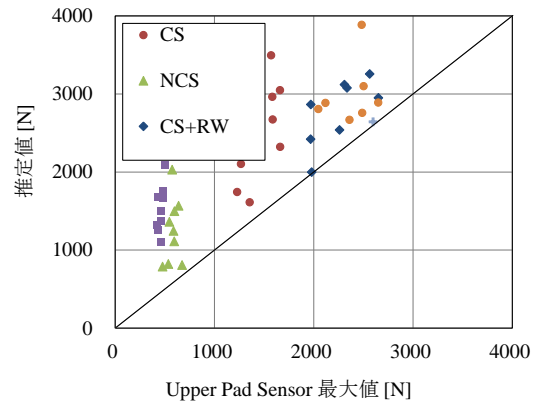
(c) 状況 3 (ケイ酸カルシウム板 $t8.0$ mm, 落下高さ 6m)

図 5.19 パッドセンサ及びひずみゲージ式ロードセルの荷重フーリエスペクトル

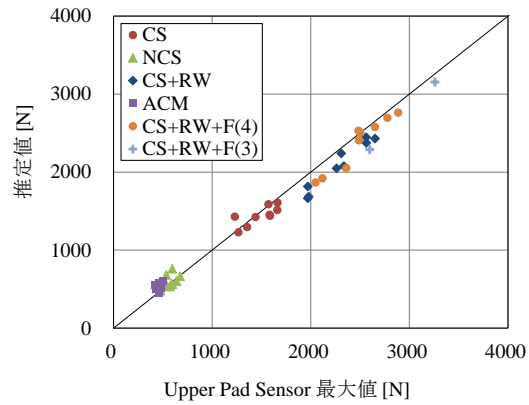
5. 天井材落下実験における逆問題解析の妥当性の検証



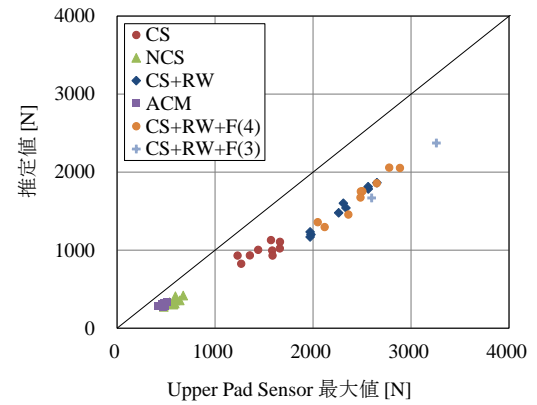
(a) 伝達関数 H_1



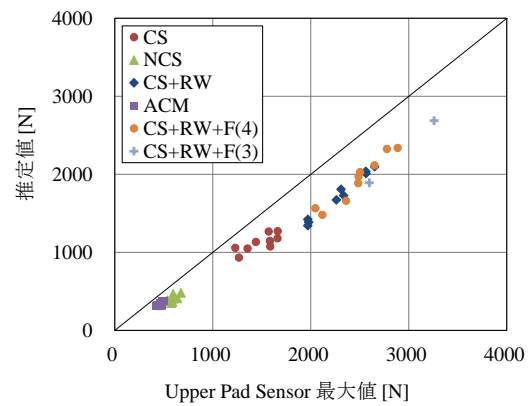
(b) 伝達関数 H_2



(c) 伝達関数 H_3



(d) 伝達関数 H_4



(e) 伝達関数 H_5

図 5.20 逆解析による推定衝撃力とパッドセンサで記録した
最大値の関係(状況 1 : 第 1 回実験, ロードセル容量 20 kN)

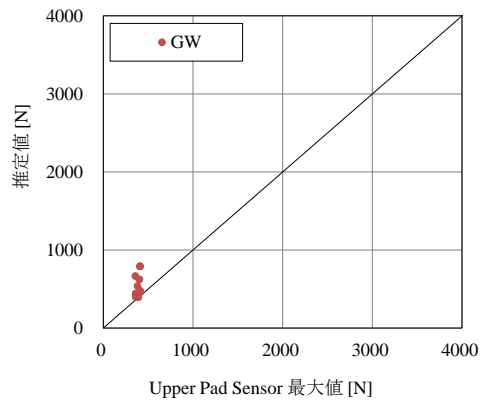
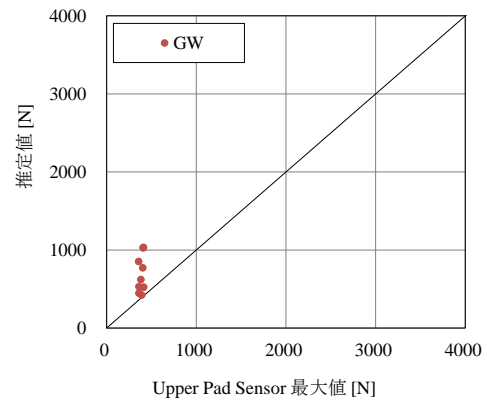
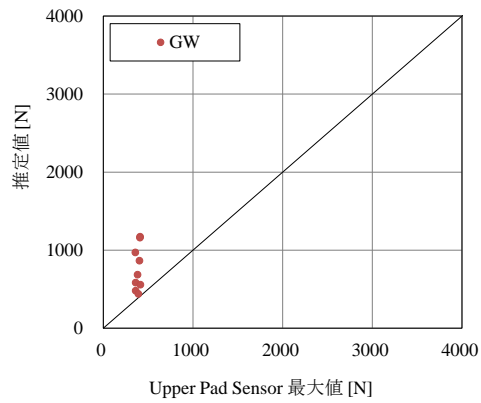
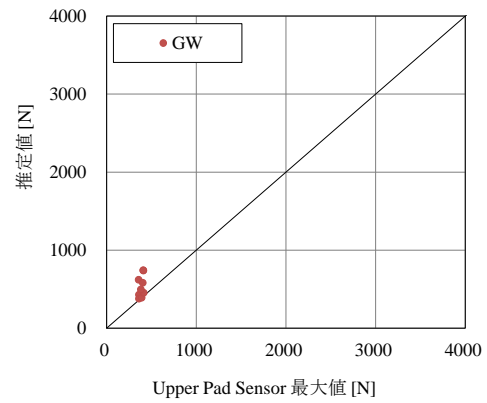
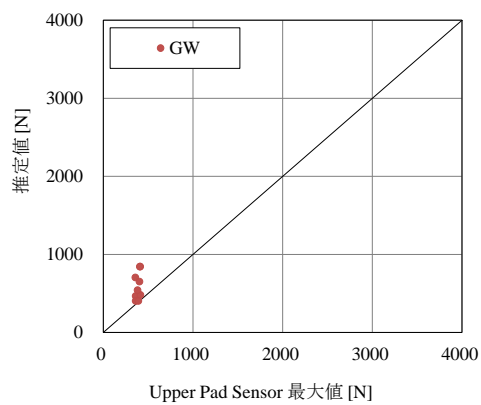
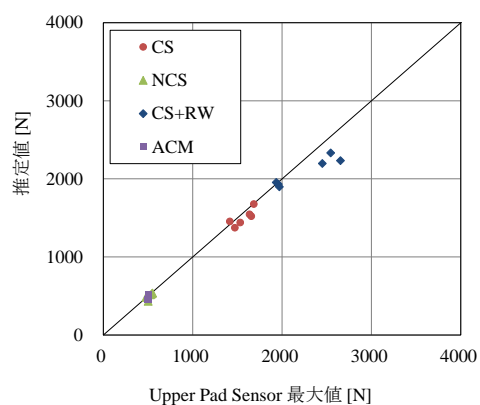
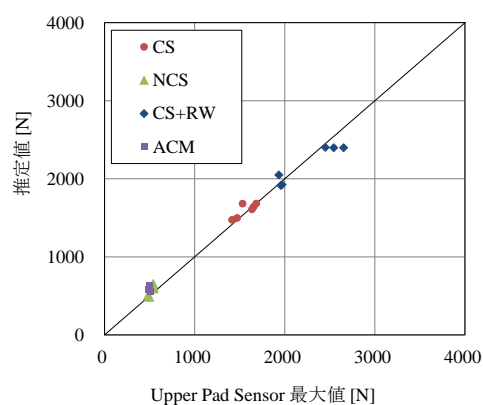
(a) 伝達関数 H_1 (b) 伝達関数 H_2 (c) 伝達関数 H_3 (d) 伝達関数 H_4 (e) 伝達関数 H_5

図 5.21 逆解析による推定衝撃力とパッドセンサで記録した
最大値の関係(状況 2：第 1 回実験，ロードセル容量 0.5 kN)

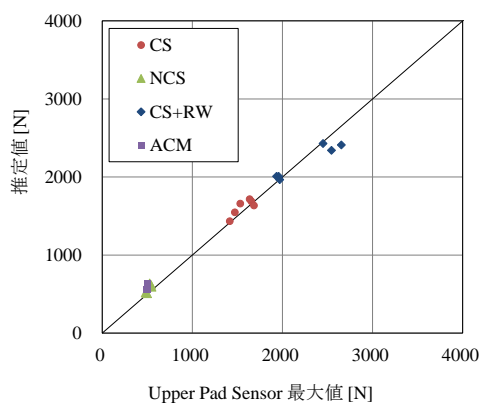
5. 天井材落下実験における逆問題解析の妥当性の検証



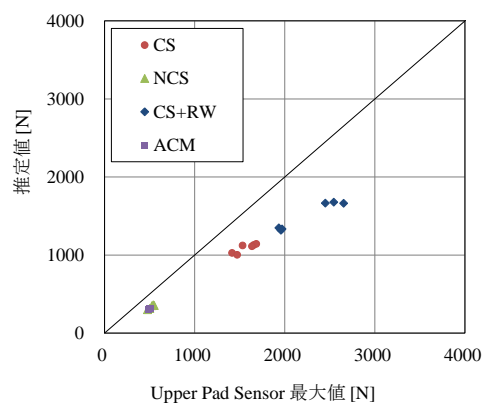
(a) 伝達関数 H_1



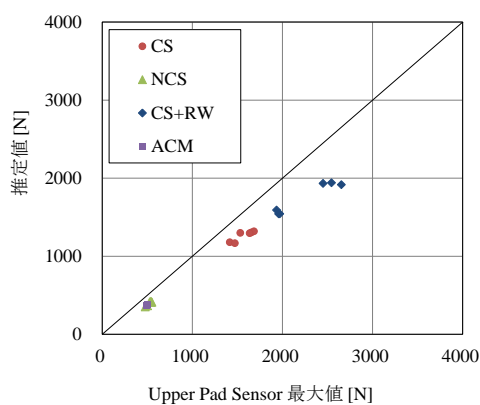
(b) 伝達関数 H_2



(c) 伝達関数 H_3



(d) 伝達関数 H_4



(e) 伝達関数 H_5

図 5.22 逆解析による推定衝撃力とパッドセンサで記録した
最大値の関係（状況 1：第 2 回実験，ロードセル容量 20 kN）

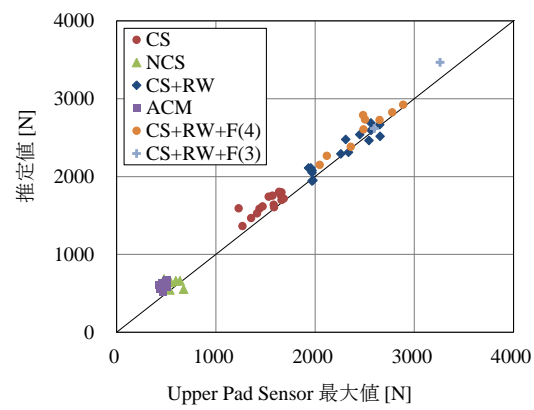


図 5.23 基線補正後の逆解析による推定衝撃力とパッドセンサで記録した最大値の関係

(状況 1, 3 : 第 1 回及び第 2 回実験, ロードセル容量 20 kN)

5.3.4 振動モードを除去した場合における最大衝撃力との比較

人頭模型下に設置したひずみゲージ式ロードセルと上部パッドセンサで記録した時刻歴荷重を示した図 5.16, 図 5.18 を見ると, ローパスフィルタ (LPF) で高周波成分を除去する (振動モードを取り除く) ことで上部パッドセンサが記録した人頭模型衝突面直下における時刻歴荷重を推定することができるのではないかと考えられる. そこで本項では, 図 5.16 で示したケイ酸カルシウム板 $t8.0\text{ mm}$ を 6 m の高さから落下させた際ひずみゲージ式ロードセルで記録した荷重に LPF をかけることで, 衝突面付近で計測した時刻歴荷重を推定できるかを検証する. 600 Hz をカットオフ周波数とした場合の推定荷重履歴を図 5.24 に示す. この結果では, LPF をかけて振動モードを除去することで, 最大衝撃荷重を概ね推定できている. 但し, 上部パッドセンサで記録した時刻歴荷重は, 600 Hz 以上の波に最大荷重が乗っているため, 600 Hz 以上の高周波成分も最大衝撃荷重に影響していると考えられ, LPF の利用についてはさらなる検討を行う必要があると考えられる.

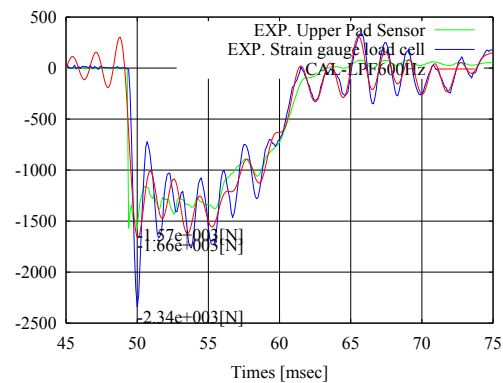


図 5.24 LPF をかけた場合の時刻歴荷重

5.4 結言

本章では、天井材落下実験における逆解析の妥当性の検証を行った。妥当性の検証を行うため、衝撃点直下の荷重を計測するための方法を考案した。頂部から 3 cm 下の水平面で分離された人頭模型を製作し、分離面に内接するよう製作した 12 角形、1 mm 厚の圧電型パッドセンサを挿入することで計測を行う。まず、インパクトハンマを用いた打撃試験を行い次のことを確認した。

- ・新たに製作した人頭模型が従来の人頭模型と同様であること。
- ・圧電型パッドセンサを挿入することによる系の振動特性の変化がほとんどないこと。
- ・インパクトハンマ先端で記録した衝撃力とパッドセンサで計測した荷重が一致すること。

続いて、新たに天井材落下実験を行い、人頭模型下に設置したロードセルで記録した荷重から衝撃面の衝撃力を逆解析により推定した。推定した時刻歴荷重には基線のずれが見られたため、衝撃が作用する前の 30 ms 間の平均値が 0 となるように基線を補正した。逆解析により推定した最大衝撃荷重と衝突面における衝撃力とほぼ同等とみなせることを確認した。圧電型パッドセンサで記録した最大衝撃荷重を比較することで逆解析の妥当性を検証した。得られた知見を以下に示す。

- ・天井材落下実験においても伝達関数 H_3 を用いた場合に最も推定精度が高いことを確認した。
- ・容量 20 kN のロードセルを用いた実験では、パッドセンサの最大値に対する伝達関数 H_3 を用いた逆解析による推定値の比は平均で 1.11、標準偏差は 0.12 であり、ばらつきも少なく精度良く推定できることを確認した。また、推定値と実験値の差は平均で 98 N、標準偏差は 86 N であり、その差と落下高さや材質との相関は見られなかった。
- ・容量 0.5 kN のロードセルを用いた実験では、パッドセンサで計測した値とひずみゲージ

5. 天井材落下実験における逆問題解析の妥当性の検証

式ロードセルで記録した値はあまり変わらないため、ひずみゲージ式ロードセルにより荷重を計測できることがわかった。

今回考案した衝撃点近くの荷重計測方法を用いれば、天井材の衝撃力を精確に計測することは可能だが、天井材落下実験には多くの費用と労力がかかるため容易に行うことはできない。過去に蓄積された非常に貴重な膨大なデータを活かすという点に逆解析の有用性があり、本章ではその妥当性を確認することができた。そこで、次章では過去のデータを用いて天井材の衝撃力を推定する。

6. 逆問題解析による各種天井材の
衝撃力の同定及びその評価

6.1 緒言

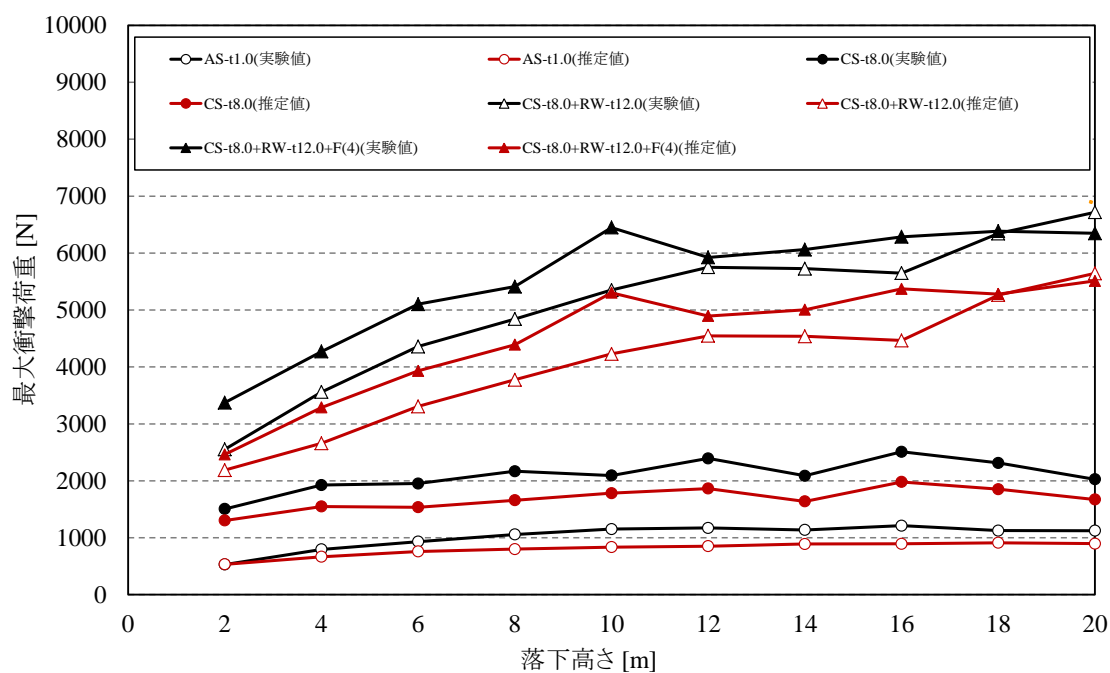
前章までで、H形鋼を土台とした人頭模型の伝達関数を同定し、天井材落下実験における逆解析の妥当性を示した。分離型人頭模型及び圧電型パッドセンサを用いることで衝突面における衝撃力とほぼ同等の荷重を計測できることを示し、本方法で天井材の衝撃力を計測した。天井材の衝撃力を精確に計測するのであれば、本方法が有用であると考えられる。しかし、天井材落下実験を再度一からやり直すことには労力と費用がかかる。そのため、従来の実験データを利用して衝撃力を同定することは有意である。

そこで、本章では既往の実験データから逆解析により各種天井材の衝撃面における衝撃力を同定する。また、逆解析で推定した値にはばらつきがあるため、標準偏差を用いてその誤差の評価を行う。

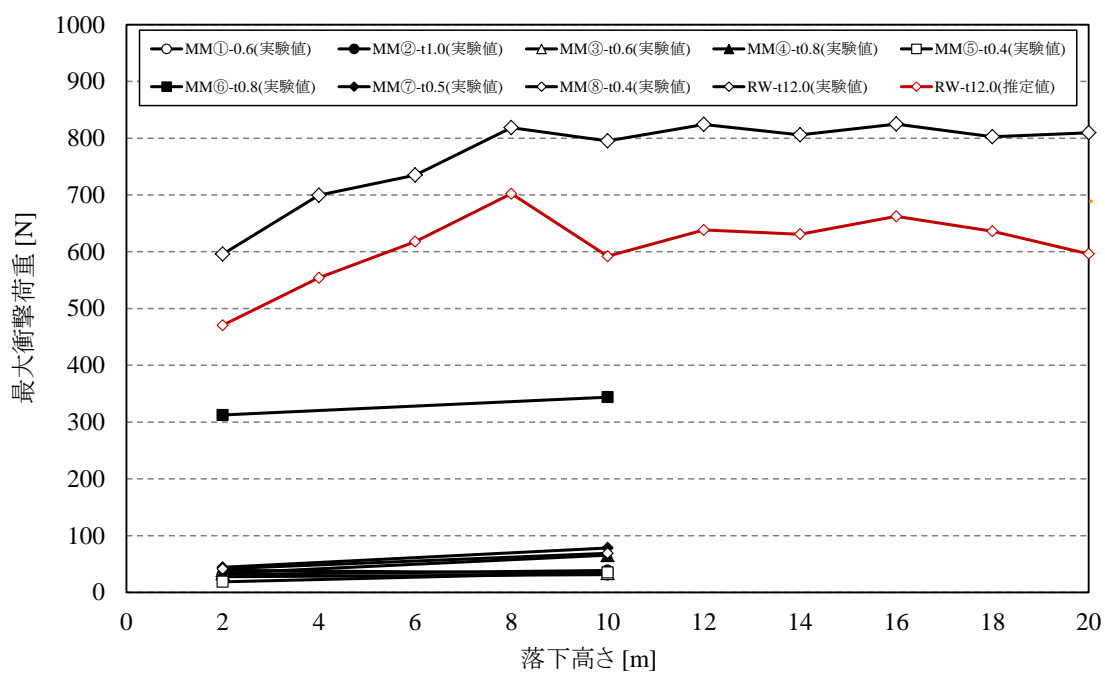
6.2 各種天井材の衝撃力の同定

既往の天井材落下実験（シリーズ 3~5）で得られた落下高さと最大衝撃荷重の関係を表したグラフに逆解析により得られた推定値を載せる．黒線が人頭模型下に設置したひずみゲージ式ロードセルの最大値を，赤線がその荷重データから逆解析により同定した衝撃面での最大衝撃力を表している．ここで用いている最大衝撃力は各高さ 3 回ずつ行った実験値及びその推定値それぞれの平均値である．逆解析で用いた伝達関数は，第 3 章で示したインパクト先端の材質を Steel として行った打撃試験で同定した伝達関数である．ここでは，第 5 章と同様に基線の補正を行っている．

天井材の材質によって推定値と実験値の比にはばらつきがあるが，いずれの場合も落下高さ（衝撃荷重の大きさ）によらずその比は概ね 0.7~1.0 であり，衝突面での衝撃荷重は出力より低いもしくはほぼ同等である．このことから，衝撃が作用点である人頭模型頂部から荷重を記録していた人頭模型下のロードセルまで伝播する過程で衝撃は増幅していたと考えられる．また，その増幅は衝撃荷重が大きい程顕著に表れる傾向にある．



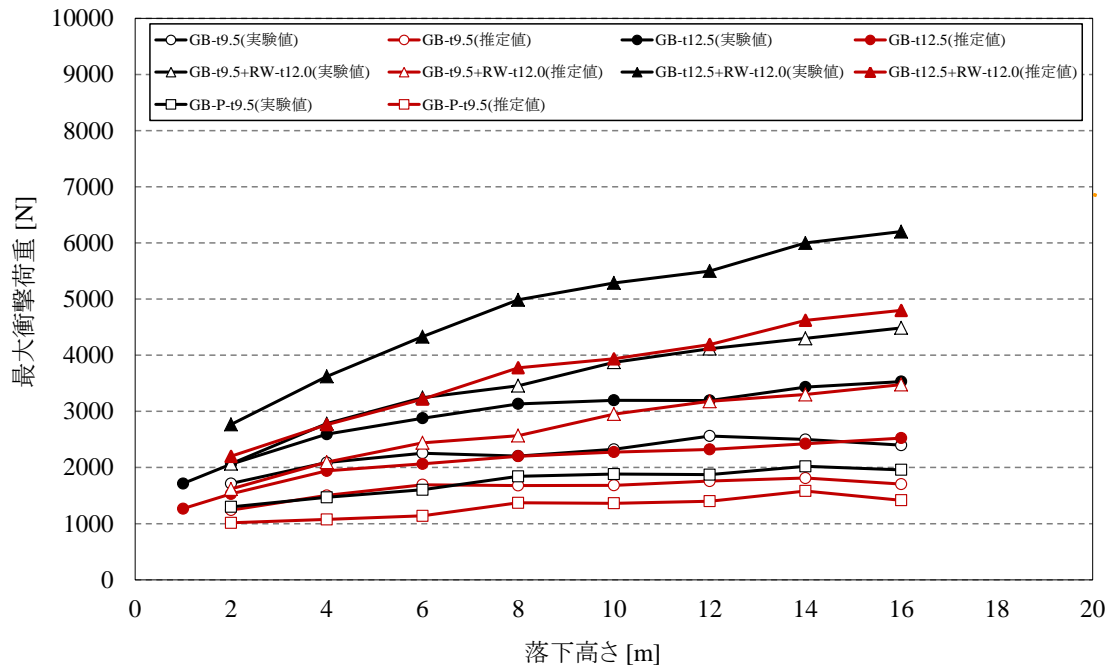
(a) シリーズ 3



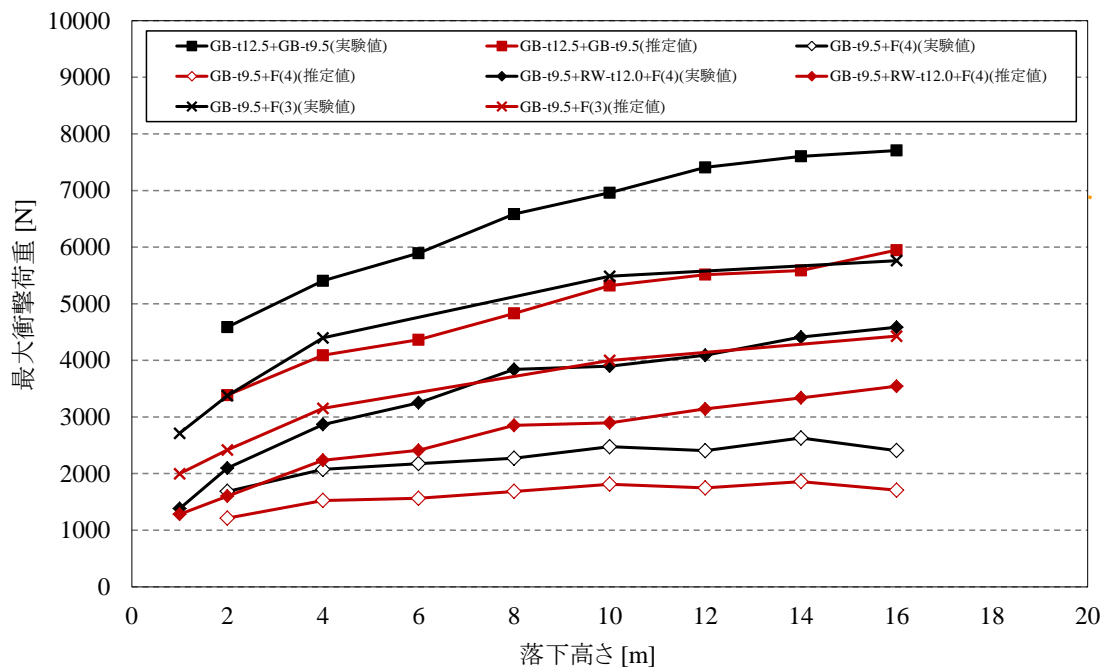
(b) シリーズ 4

図 6.1-2 落下高さと最大衝撃荷重の関係

6. 逆問題解析による各種天井材の衝撃力の同定及びその評価



(c) シリーズ 5 a



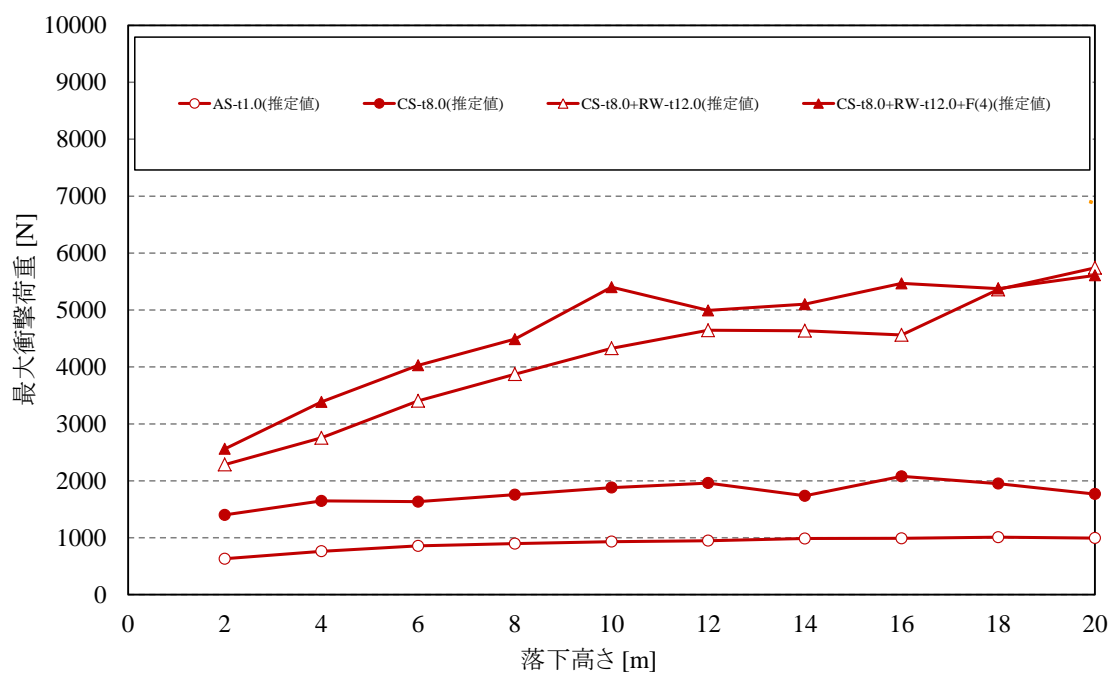
(d) シリーズ 5b

図 6.1-2 落下高さと最大衝撃荷重の関係

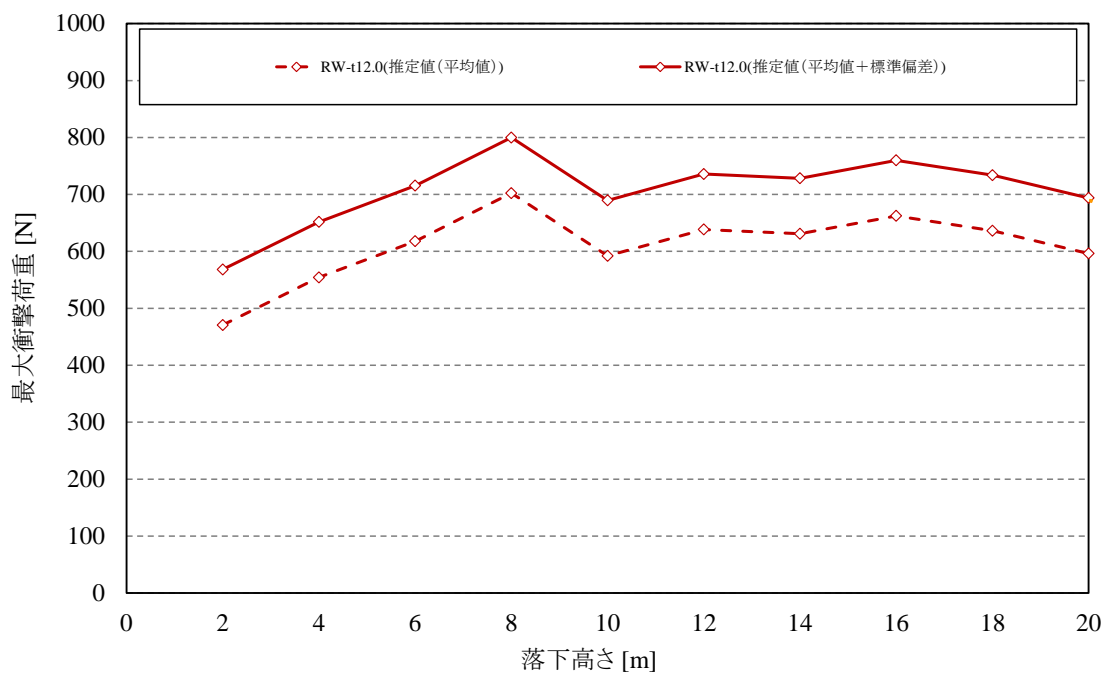
6.3 逆問題解析における誤差の評価

逆解析により同定した最大衝撃力にはばらつきがある。第5章で示した推定値と真値（パッドセンサの記録）の差の標準偏差は86 Nである。天井材の危険度を評価する上では、荷重は安全を見込んで予め多く見積もっておく必要がある。そのため、この値（標準偏差 $\sigma=87$ [N]）を上乗せして評価した最大衝撃荷重と落下高さの関係を図6.2に示す。比較的最大の小さなシリーズ4のロックウール吸音板のみ平均 μ を図内に破線で示した。ここでは第5章で得られた標準偏差をそのまま逆解析の誤差として上乗せしているが、各施設や部屋の要求性能に応じて標準偏差の何倍を安全率として設定するか検討する必要がある。

6. 逆問題解析による各種天井材の衝撃力の同定及びその評価

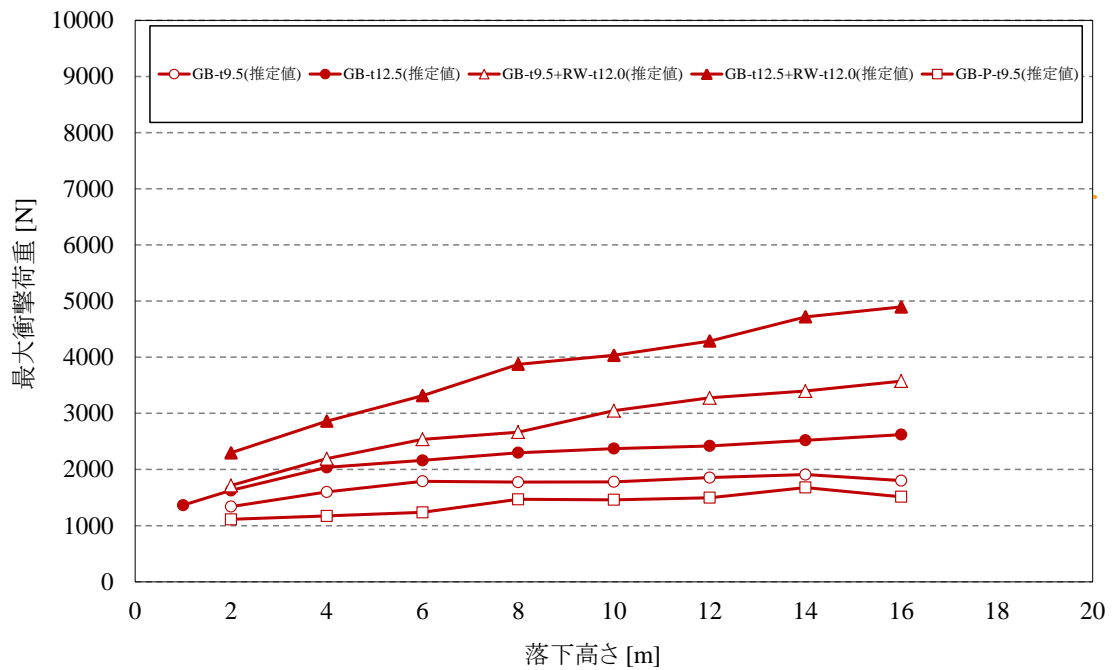


(a) シリーズ 3

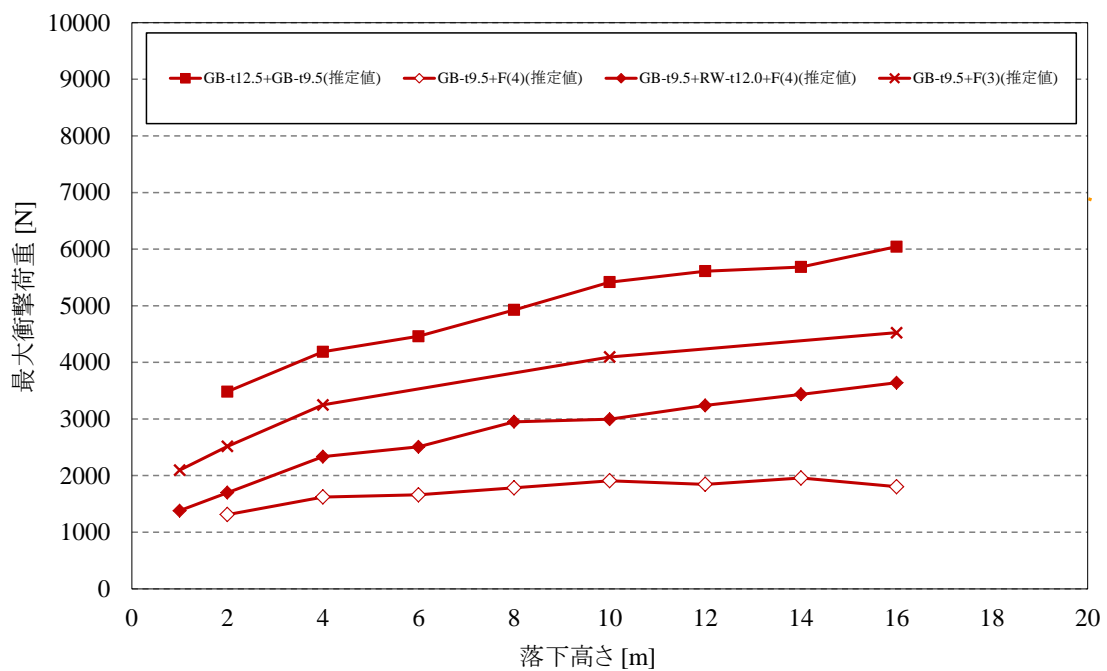


(b) シリーズ 4

図 6.2-1 落下高さと最大衝撃荷重の関係



(c) シリーズ 5 a



(d) シリーズ 5b

図 6.2-2 落下高さと最大衝撃荷重の関係

6.4 結言

本章では，既往の実験において人頭模型下に設置したひずみゲージ式ロードセルから逆解析により天井材の衝撃面で発生する衝撃力を同定した．さらに，逆解析の誤差を評価した各種天井材の衝撃力を示した．

天井材の材質によって推定値と実験値の比にはばらつきがあるが，いずれの場合も落下高さ（衝撃荷重の大きさ）によらずその比は概ね 0.7~1.0 であり，衝突面での衝撃荷重は出力より低いもしくはほぼ同等である．このことから，衝撃が作用点である人頭模型頂部から荷重を記録していた人頭模型下のロードセルまで伝播する過程で衝撃は増幅していたと言える．また，その増幅は衝撃荷重が大きい程顕著に表れる傾向にあることを明らかにした．

7. 結論

本論文では、天井材が落下した際に発生する衝突面での衝撃力を同定することを目的としている。天井材落下実験において、衝突面から離れた位置で計測した各種天井材の荷重を基に衝突面で発生する衝撃力を逆解析により推定し、実験を通してその妥当性を示した。本論文を通して以下のような結論を得た。

1. 天井落下の危険度を明らかにするため最も普及している天井材である石膏ボードの落下実験を行い、異なる落下高さにおける最大衝撃荷重を計測した。同時に、真の衝撃荷重と計測荷重の間に誤差が含まれる可能性を指摘した。
2. 真の衝撃荷重と計測荷重の間の関係を逆問題としてとらえ、システムの特性を知るため、インパクトハンマによる打撃試験により、5種類の伝達関数を評価した。その結果、本実験環境においては、ウィーナフィルタ理論を用いて算出した出力に含まれる誤差の影響を最小にする伝達関数が最も精度良く最大衝撃荷重を推定できることを示した。
3. 人頭模型下に設置したひずみゲージ式ロードセルの記録から衝突面の衝撃力を逆解析により推定した。さらに、衝撃点直下に圧電型パッドセンサを挿入した状態で実験を行い、その最大値を上記逆解析による推定値と比較することで逆解析の妥当性を示した。

被衝突体は減衰の大きいマグネシウム合金で作られた複雑な形状の人頭模型であり、こうした逆解析を行う上でかなり不利と言える条件下においても比較的高い精度で逆解析により荷重の同定が行えることを示した。
4. 既に得られている過去の実験データに対し、上記逆解析を適用し各種天井材の落下高さと最大衝撃荷重の関係を明らかにした。

7. 結論

天井落下時の危険度をより正確に評価するためには今後の課題として以下が挙げられる。

1. 天井材落下実験における荷重等のデータの蓄積.

天井材として用いられる材料の特性（重量や硬さ等）は製造や管理の段階である程度のばらつきが生じるため、同じ規格の天井材で実験を行っても最大衝撃荷重には幅が生じる。データ数が多いほどデータのバラツキを精確に評価できるため、より多くの材料の天井材に対して荷重等のデータを蓄積する必要がある。また、今後新たな天井材の衝撃荷重等を計測する場合には、圧電型のパッドセンサを人頭模型頂部の直下に挿入することで計測することもできるが、分離型人頭模型やパッドセンサは特別に製造したものであるため、一般的には、逆解析により衝撃荷重を同定するという方法が用いられると考えられる。

2. 人頭模型の支持方法等の改良.

人頭模型下のロードセルで記録した時刻歴荷重は、H 形鋼の上フランジの上下振動といった振動モードに対応する固有振動数で振動している。最大衝撃荷重はその一山目に当たり、振動モードの影響を受けていることが確認されている。極力振動モードが発生しないように工夫することで、衝撃面における衝撃力とロードセルの計測値の誤差を減ずることができる可能性がある。その方法としては、土台である H 形鋼をより剛体に近づける、ロードセルに載せている人頭模型の重量を減らすため、人頭模型を水平面で分断し衝撃面の頭部形状のみを模擬した上部のみを用いる、といった方法等が考えられる。

3. 天井材が市販のサイズではなく大面積で落下した場合のスケール効果の検討.

在来工法の吊り天井では、野縁により連結されることで規格の天井板の大きさより大面積で落下する傾向にある。天井材落下実験での観察から、落下高さが高くなると天井材の破壊モードはパンチング破壊となり、天井面積の影響は比較的少ないと考えられる。但し、

落下高さが低い場合には、破壊モードは曲げ破壊であるため、スケール効果を考慮する必要があると考えられる。

4. 人頭模型と実際の人頭の違いの検討.

天井材落下実験で用いた人頭模型は、実際の人頭の形状や重量を模擬して作られている。但し、繰り返し試験で用いることができるように、材質はマグネシウム合金製となっている。こうした材質の違いが最大衝撃荷重に与える影響を検討する必要があると考えられる。

5. 新しい材料が開発された際等に、天井材落下実験を行わなくてもより簡易に衝撃荷重を同定する手法の提案.

天井材落下実験を行えば、天井材が落下した際の衝撃荷重を直接計測することはできるが、本実験では特殊な実験装置や労力が必要となる。そこで、天井材落下実験を行わなくても簡易に衝撃荷重を同定する手法の開発が望まれる。これには、曲げ試験や硬さ試験等の静的試験で得られる情報から衝撃荷重を予測する方法と人頭モデルを含んだ有限要素法等の数値解析により衝撃荷重を予測する方法等があると考えている。天井材の破壊モードは静的な実験から最大衝撃荷重を類推する際に利用でき、より精確な時刻歴荷重を逆解析や新たな計測方法から得ることが出来れば、人頭モデルを含んだ有限要素法等の数値解析を行う際にインプットとして利用できると考えられる。

参考文献

<本論>

- [1] 土木学会：大正十二年關東大地震侵害調査報告（第三卷）橋梁・建築物之部 道路之部，土木学会，1927.12
- [2] 共同通信：プールの天井落ち 2 人軽傷 埼玉県飯能市で，
<http://www.47news.jp/CN/200511/CN2005112401003921.html> (2014.11.11)，2005.11
- [3] 国土交通省国土技術政策総合研究所，独立行政法人建築研究所：豊田スタジアムスポーツプラザ屋内プールの天井板脱落の現地調査報告，
<http://www.nilim.go.jp/lab/bbg/saigai/h19toyota/toyota.pdf> (2014.11.11)，6pp.，2008.1
- [4] 共同通信：JR 新花巻駅の天井落下 新幹線ホーム、けが人なし，
<http://www.47news.jp/CN/201110/CN2011100601000443.html> (2014.11.11)，2011.10
- [5] 細見 亮太，川口 健一，荻 芳郎，中楚 洋介：非地震時の天井落下事例（2013 年 7 月 15 日富士市）に関する基礎的調査研究，日本建築学会大会学術講演梗概集 B-1，pp.909～910，2014.7
- [6] 日経アーキテクチュア：止まらない天井落下、今度は横須賀市のプールで，
<http://kenplatz.nikkeibp.co.jp/article/building/news/20130809/627951/2013.8> (2014.11.11)，2013.8
- [7] トンネル天井板の落下事故に関する調査・検討委員会：トンネル天井板の落下事故に関する調査・検討委員会報告書，
<http://www.mlit.go.jp/common/001001299.pdf> (2014.11.11)，2013.6
- [8] 共同通信：天井板連結のため広範囲崩落か 中央道笹子トンネル事故，
<http://www.47news.jp/CN/201212/CN2012120501000902.html> (2014.11.11)，2012.12
- [9] THE JORDAN TIMES：Shopkeepers at mall fear decorative ceiling collapse might scare off shoppers，
[shopkeepers-at-mall-fear-decorative-ceiling-collapse-might-scare-off-shoppers](http://www.jordan-times.com/2012/12/shopkeepers-at-mall-fear-decorative-ceiling-collapse-might-scare-off-shoppers) (2014.11.11)，2012.10
- [10] theguardian：Apollo theatre ceiling collapse blamed on failure of old cloth ties，
<http://www.theguardian.com/uk-news/2014/mar/24/apollo-theatre-ceiling-collapse-cause> (2014.11.11) 2014.3
- [11] 日本建築学会 非構造材の安全性評価及び落下事故防止に関する特別調査委員会：天井等の非構造材の落下事故防止ガイドライン，
<http://www.aij.or.jp/scripts/request/document/20130304.pdf> (2014.11.11)，236 pp.，2013.3
- [12] 1968 年十勝沖地震調査委員会：1968 年十勝沖地震調査報告，1968 年十勝沖地震調査委員会，pp.721～722，1968.5
- [13] 日本建築学会：1974 年伊豆半島沖地震 1978 年伊豆大島近海地震災害調査報告，日本建築学会，pp.365～367，pp.420，1980.6
- [14] 日本建築学会：1978 年宮城県沖地震災害調査報告，日本建築学会，pp.722～729，1980.2
- [15] 日本建築学会：非構造部材の耐震設計施工指針・同解説および耐震設計施工要領，

- 日本建築学会, 322pp., 2003.1 第2版 (初版 1985.11)
- [16] 阪神・淡路大震災調査報告編集委員会：阪神・淡路大震災調査報告 建築編-3 鉄骨造建築物 シェル・空間構造 容器構造, 日本建築学会, pp.228, pp.304～310, 1997.10
 - [17] ロックウール工業会 吸音板部会, システム天井耐震検討会：阪神大震災 システム天井被害状況調査及び原因と対策案報告書, http://www.rwa.gr.jp/download/data/hanshin_shinsai.pdf (2014.11.11), 24pp., 1995.3
 - [18] 国土交通省国土技術政策総合研究所, 独立行政法人建築研究所：2001年3月24日芸予地震被害調査報告 -体育館など大空間を構成する建築物の天井落下-, http://www.rwa.gr.jp/download/data/hanshin_shinsai.pdf (2014.11.11), 29pp., 2001.5
 - [19] 国土交通省国土技術政策総合研究所, 独立行政法人建築研究所：2003年十勝沖地震における空港ターミナルビル等の天井の被害に関する現地調査報告, <http://www.nilim.go.jp/lab/bbg/saigai/h15tokachi/terminal030926.pdf> (2014.11.11), 24pp., 2003.10
 - [20] 川口 健一, 鈴木 悠介, 大矢 俊治, 服部 真子：新潟中越地震と福岡西方沖地震の被災調査にみる大規模集客施設の内部空間の安全性, 生産研究 Vol.57 No.6, pp.39～41, 2005.11
 - [21] 国土交通省国土技術政策総合研究所, 独立行政法人建築研究所：スポパーク松森における天井落下事故調査報告 -大空間を有するスポーツ等施設の天井落下-, <http://www.mlit.go.jp/kisha/kisha05/07/070826/03.pdf> (2014.11.11), 27pp., 2005.8
 - [22] 国土交通省国土技術政策総合研究所, 独立行政法人建築研究所：能登半島地震及び三重県中部を震源とする地震の現地調査の実施状況について, <http://www.kenken.go.jp/japanese/contents/activities/other/disaster/jishin/2007noto/houkoku-sho/20070510/index.pdf> (2014.11.11), 52pp., 2007.4
 - [23] 荻 芳郎, 川口 健一, 大矢 俊治, 片山 慎一郎, 熊谷 祥吾, 櫻井 重喜：平成20年(2008年)岩手・宮城内陸地震または2008年7月24日の岩手県沿岸北部の地震による大規模集客施設の非構造材被害, 日本建築学会技術報告集 Vol.16 No.33, pp.821～826, 2010.6
 - [24] 荻 芳郎, 大場 康史, 川口 健一：2009年8月11日駿河湾の地震による大規模集客施設の非構造材被害, 生産研究 Vol.61 No.6, pp.1035～1041, 2009.10
 - [25] 例えば, 川口 健一, 谷口 与史也, 小澤 雄樹, 中楚 洋介, 渡邊 祥：東日本大震災における公共大空間施設での天井落下被害事例, 生産研究 Vol.63 No.6, pp.63～70, 2011.11
 - [26] 文部科学省：学校施設における天井等落下防止対策のための手引, http://www.nier.go.jp/shisetsu/pdf/ceiling_all.pdf (2014.11.11), 103pp., 2013.8
 - [27] 湊川 諒, 元結 正次郎, 金子 建作, 天野 聡志, 佐藤 恭章, 佐藤 幸博, 佐々木 康人, 田原 健一：非構造部材に用いられる要素の力学的性状 その2 セン断ずれ耐力

- および頭抜け耐力の検討，日本建築学会大会学術講演梗概集 B-1，pp.937～938，2014.7
- [28] 丸山 一平，五十嵐 豪，石岡 由紀子，谷川 恭雄：けい酸カルシウム板の中性化と留付け強度低下に関する研究：一天井落下事故を生じた材料の分析－，日本建築学会構造系論文集 Vol.78 No.689，pp.1203～1208，2013.7
- [29] 櫻井 重喜，川口 健一，熊谷 祥吾，安藤 顕祐，永井 拓生，新谷 真人：非地震時における屋内プール天井の落下被害に関する基礎的考察：吸水時のビスの頭抜け強度について，日本建築学会大会学術講演梗概集 B-1，pp.897～898，2009.7
- [30] 杉山 達也，貫井 泰，柏崎 琢也，鈴木 篤，野曾原 瑞樹，小林 俊夫，赤瀬 竜也，井原 和弘，河野 洋介，藪内 彰夫，寺山 武士，荒井 智一（順不同）：在来工法天井の下地ボードと野縁のビス止め接合部のせん断試験 その1～その3，日本建築学会大会学術講演梗概集 B-1，pp.871～876，2010.7
- [31] 富岡 裕一，岡本 肇，高橋 弘，山本 正人，嶺脇 重雄，鴨下 直登（順不同）：在来天井の耐震性に関する研究 その1～その4，日本建築学会大会学術講演梗概集 B-1，pp.1103～1110，2013.7
- [32] 小澤 祐周，川口 健一：非構造材（天井材）落下防止ネットの力学に関する基礎的考察，日本建築学会大会学術講演梗概集 B-1，pp.817～818，2008.7
- [33] 廣玉 拓也，川口 健一：非構造材（天井材）落下防止ネットと補強ケーブルの力学に関する基礎的考察，日本建築学会大会学術講演梗概集 B-1，pp.917～918，2014.7
- [34] 小澤 祐周，川口 健一：大面積天井落下防止のためのケーブルネット構造に関する基礎的研究，日本建築学会大会学術講演梗概集 B-1，pp.885～886，2010.7
- [35] 小澤 祐周，川口 健一：非構造材落下防止ネットの力学と形状に関する基礎的考察，日本建築学会大会学術講演梗概集 B-1，pp.895～896，2009.7
- [36] 佐藤拓人，川口 健一：非構造材落下防止ネットの初期形状に関する基礎的考察，日本建築学会大会学術講演梗概集 B-1，pp.1041～1042，2013.7
- [37] 荒井 貴浩，飯沼 輝人，福田 久雄，高谷 真実，荻原 健二：金属系パネル天井に対するワイヤーを用いた落下防止措置に関する研究，日本建築学会大会学術講演梗概集 B-1，pp.919～920，2014.7
- [38] 小林 隼人，文野 正裕，山中 裕一，山高 円，中内 正人，阿部 亮：スパンドレル天井の落下防止構法に関する研究，日本建築学会大会学術講演梗概集 B-1，pp.1039～1040，2013.7
- [39] 荻 芳郎，川口 健一，清本 莉七，中楚 洋介，新谷 真人，大場 康史，上村 一貴：日本科学未来館における吊り天井の余震時挙動の観測調査と基礎的考察，日本建築学会 構造工学論文集 Vol.58B，pp.519～526，2012.3
- [40] 川口 健一，大場 康史，中楚 洋介：2011年東北地方太平洋沖地震による空港ターミナルビル内天井落下及び天井落下衝撃力の推定，日本建築学会 技術報告集 Vol.39

- No.18, pp.789~793, 2012.6
- [41] Gerard J. Tortora(著), 大野忠雄(訳), 黒澤美枝子, 高橋研一, 細谷安彦: トートラ人体の構造と機能 第3版, 丸善株式会社, 1229pp., 2010.3
- [42] J.S.H.M. Wismans(著), 水野幸治(訳), 一杉正仁: 交通外傷バイオメカニクス, (社)自動車技術会 安全部会歩行者保護分科会, 242pp., 2003.5
- [43] 水野幸治: 自動車の衝突安全, 名古屋大学出版会, 309pp., 2012.2
- [44] 日本外傷学会・財団法人 日本自動車研究所: AIS90 update98 日本語対訳版, へるす出版, 83pp., 2003.12
- [45] Anne M.R. Agur, Arthur F. Dalley(著), 坂井建雄(監訳), 小林靖(訳), 小林直人, 市村浩一郎: グラント解剖学図譜 第5版, 医学書院, 875pp., 2007.4
- [46] Bruns : Uber Elasticitat und Festigkeit der Menschlichen Knochen, 1854
- [47] Hyrtl : Uber Elasticitat und Festigkeit der Menschlichen Knochen, 1857
- [48] Cohnstein : Ueber Zangen application bei Beckenege, Arch. Path. Anat. Physiol. 64, 82-101, 1859
- [49] Baum : Uber Elasticitat und Festigkeit der Menschlichen Knochen, 1876
- [50] Messerer : Uber Elasticitat und Festigkeit der Menschlichen Knochen, 1880
- [51] Lissner, H. R., M. Lebow, F. G. Evans: Experimental studies on the relation between acceleration and intracranial pressure in man, Surgery, Gynecology and Obstetrics 111, pp.329~338, 1960.9
- [52] Charles W. Gadd: Use of a weighted-impulse criterion for estimating injury hazard, SAE Technical Paper 660793, 1966.2
- [53] Michael Kleinberger, Emily Sun, and Rolf Eppinger, Shashi Kuppa, Roger Saul : Development of Improved Injury Criteria for the Assessment of Advanced Automotive Restraint Systems, NHTSA, 1998
- [54] U.S. Department of Transportation: FMVSS(Federal Motor Vehicle Safety Standard) 208 - Occupant Crash Protection, pp.744~745, 2008.10 edition
- [55] Richard G. Snyder: Human impact tolerance - American viewpoint, SAE Technical Paper 700398, 1970.2
- [56] Ono, Koshiro , Astumi Kikuchi , Marumi Nakamura , Hajime Kobayashi , Norio Nakamura : Human head tolerance to sagittal impact reliable estimation deduced from experimental head injury using subhuman primates and human cadaver skulls, SAE Technical Paper 801303, 1980.9
- [57] Versace, J.: A review of the severity index, SAE Technical Paper 710881, 1971.2
- [58] United Nations Economic Commission for Europe: ECE(Economic Commission for Europe) Regulation No.94, pp.10, 1958 agreement(Rev.1/Add.93)
- [59] Gurdjian : Deformation of the skull in head injury studied by stresscoat technique, Surg. Gyn.

- Obst. 83, 219-233, 1940
- [60] Gurdjian : The mechanism of production of liner skull fractures, Surg. Gyn. Obst. 85, 195-210, 1940
 - [61] Gurdjian : Studies on skull fracture with particular reference to engineering factors, Am. J. Surg., 736-742, 1940
 - [62] Gurdjian : Obsevation on prediction of fracture site in head injury, Radiology 60, 226-235, 1940
 - [63] Hodgson : Tolerance of the facial bones to impact, Am. J. Anat., 120: 113-122, 1971
 - [64] Hodgson : Breaking strength of human skull vs. impact surface curvature, US Department of Transportation, HS-800-583, 1971
 - [65] Hodgson : Effect of long-duration impact on head, The 16th Stapp Car Crash Conference, pp292-295, 1971
 - [66] Hodgson : Breaking strength of the human skull vs impact surface cuevature, DOT-HS-801-002, 1971
 - [67] Hodgson : Concussion levels determined by HPR windshield impacts, The 17th Stapp Car Crash Conference, 1971
 - [68] Swearingen : Tolerance of the human face to crash impact, Office of aviation medicine, FAA, Civil aeromedical research institute, Oklahoma city, 1965.7
 - [69] Nahum, A., Gatts, J., Gadd, C., Danforth, J. : Impact tolerance of the skull and face, SAE Technical Paper 680785, 1968.2
 - [70] Nahum, A. : The biomechanics of facial bone fracture, The LayngoscopeThe Laryngoscope, Volume 85, Issue 1, pp.140~156, 1975.1
 - [71] 片桐麻衣佳, 片方健太, Pramudita Jonas A., 宇治橋貞幸 : 直接衝撃を受ける頭部の有限要素解析と骨折発生クライテリア, スポーツ・アンド・ヒューマン・ダイナミクス講演論文集 2010, pp.88~93, 2010.11
 - [72] 渡邊竜司, 伊藤雅人, 難波嘉彦, 岸本隆 : 人体障害予測のための頭部シュミレーションモデルの開発, Panasonic Technical Journal Vol.59 No.1, 2013.4
 - [73] Narayan, Y., Frank, A. P., Anthony, S. J., Patrick, R. W., Channing, L. E., Daniel, J. T., Richard, G. S. : Biomechanics of skull fracture, Journal of Neurotrauma Vol.12 No.4, pp.659~668, 1995.5
 - [74] Got, C., Patel, A., Fayon, A, Tarrière, C., Walfisch, G. : Results of experimental head impacts on cadavers : The various data obtained and their relations to some measured physical parameters, SAE Technical Paper 780887, 1978.2
 - [75] Nahum, A., Ward, C., Raasch, E., Adams, S., Schneider, D. : Experimental studies of side impact to the human head, SAE Technical Paper 801301, 1980.9
 - [76] Stalnaker, R., Melvin, J., Nusholtz, G., Alem, N., J. B. Benson : Head impact response, The

- 21st Stapp Car Crash Conference, pp.305-335, 1977.2
- [77] Schneider, D., Nahum, A.: Impact studies of facial bones and skull, SAE Technical Paper 720965, 1972.2
 - [78] Allsop, D., Perl, T., Warner, C.: Force/deflection and fracture characteristics of the temporo-parietal region of the human head, SAE Technical Paper 912907, 1991.10
 - [79] Narayan, Y., Frank, A. P., Biomechanics of temporo-parietal skull fracture, Clinical Biomechanics Vol.19 No. 3, pp.225~239, 2004.3
 - [80] Hodgson, V. R.: Tolerance of the facial bones to impact, Am. J. Anat., 120, pp.113~122, 1967.1
 - [81] Hodgson, V. R., Thomas, L. M.: Breaking strength of human skull vs. impact surface curvature, US Department of Transportation, HS-800-583, Springfield, VA, 1972.6
 - [82] Hodgson, V. R., Thomas, L. M.: Effect of long-duration impact on head, In: Proceedings of the 16th Stapp Car Crash Conference, pp.292~295, 1972 .2
 - [83] Hodgson, V. R., Thomas, L. M.: Breaking strength of the human skull vs impact surface curvature, DOT-HS-801-002, 1973 .6
 - [84] Hodgson, V. R., Thomas, L. M., Brinn, J.: Concussion levels determined by HPR windshield impacts, In: Proceedings of the 17th Stapp Car Crash Conference, 1973.2
 - [85] 細見 亮太, 川口 健一, 中楚 洋介, 森 大: 人体耐性指標を用いた天井材の安全性評価に関する研究 その5 既往の人頭崩壊荷重実験の比較, 日本建築学会大会学術講演梗概集 B-1, pp.1005~1006, 2013.7
 - [86] 労働省: 保護帽の規定, 労働安全衛生法第42条, 1976.1
 - [87] 内田 拓見, 川口 健一, 片山 慎一郎: 人体耐性指標を用いた天井材の安全性評価に関する基礎的研究 その1 人体耐性指標, 日本建築学会学術講演梗概集 A-1, pp.1081~1082, 2009.7
 - [88] 片山 慎一郎, 川口 健一, 内田 拓見, 荻 芳郎: 人体耐性指標を用いた天井材の安全性評価に関する基礎的研究 その2 天井材落下実験, 日本建築学会学術講演梗概集 A-1, pp.1083~1084, 2009.7
 - [89] 内田 拓見, 川口 健一, 荻 芳郎, 大矢 俊治: 人体耐性指標を用いた天井材の安全性評価に関する基礎的研究 その3 天井材落下実験2, 日本建築学会学術講演梗概集 B-1, pp.881~882, 2010.7
 - [90] 中楚 洋介, 川口 健一, 大矢 俊治, 荻 芳郎, 小澤 雄樹, 細見 亮太, 益田 悠司, 森 大: 天井材の安全性評価に関する基礎的研究: 石膏ボード落下実験, 生産研究 Vol.64 No.6, pp.95~100, 2012.11
 - [91] 日本建築学会: 空間構造の動的挙動と耐震設計, 日本建築学会, pp.239~240, 2006.3
 - [92] 日本規格協会, 日本保安用品協会: JIS T 8133 乗車用ヘルメット, 日本規格協会, 36pp., 2007.3

- [93] 松本 浩之, 中原 一郎, 木村 正則: 衝撃荷重の直接測定法と間接測定法, 非破壊検査 Vol.31 No.4, p258~266, 1982.4
- [94] 井上 裕嗣: 衝撃力の逆問題解析に関する研究, 東京工業大学 学位論文(博士), 1993.9
- [95] チャールズ W. グロエッチュ 著, 大西 和榮, 田沼 一実, 山本 昌宏 訳: はじめての逆問題 具体例で学ぶ逆からの思考法, サイエンス社, 177pp., 2002.6
- [96] 日本機械学会: 逆問題のコンピュータアナリシス コンピュータアナリシスシリーズ 6, コロナ社, 208pp., 1991.11
- [97] 岡本 良夫 著, 武者 利光 監: 逆問題とその解き方, オーム社, 423pp., 1992.3
- [98] 久保 司郎: 逆問題 計算力学と CAE シリーズ 10, 培風館, 246pp., 1992.5
- [99] 田中 博, 阿部 政之, 鈴木 貴: 逆問題 岩波講座 応用数学 [方法 6], 岩波書店, 106pp., 1993.6
- [100] 久保 司郎: 逆に考え、逆に解く, オーム社, 120pp., 1997.8
- [101] 登坂 宣好, 大西 和榮, 山本 昌宏: 逆問題の数理と解法 偏微分方程式の逆解析, 東京大学出版会, 294pp., 1999.11
- [102] 土木学会: 土木工学における逆問題入門, 土木学会, 158pp., 2000.4
- [103] 山本 昌宏: 逆問題入門, 岩波書店, 110pp., 2002.11
- [104] 小國 健二: 応用例で学ぶ逆問題と計測, オーム社, 242pp., 2011.2
- [105] 堤 正義: 逆問題 -理論および数理学への応用-, 朝倉書店, 252pp., 2012.1
- [106] 久保 司郎: 構造工学ハンドブック 逆解析法, 丸善株式会社, pp.483~526, 2004.3
- [107] 井上 裕嗣, 岸本 喜久雄, 渋谷 寿一, 小泉 堯: 逆解析による衝撃荷重の推定 (逆解析のための最適伝達関数), 日本機械学会論文集 A 編 Vol.57 No.543, pp.113~120, 1991.11
- [108] 大塚 彩: 大規模集客施設内部の非構造材に関する基礎的調査研究, 東京大学 学位論文 (修士), 2008.2
- [109] 片山 慎一郎: 人体耐性指標を用いた天井材の安全性評価に関する基礎的研究, 東京大学 学位論文 (修士), 2009.2
- [110] 内田 拓見: 人体耐性指標を用いた天井材の落下安全性評価手法に関する基礎的研究, 東京大学 学位論文 (修士), 2010.2
- [111] 内田 拓見, 川口 健一, 吉中 進, 大塚 彩, 片山 慎一郎: 大規模集客施設内部の非構造材に関する基礎的調査研究: その 1: フロア面積と天井設置高さに関するアンケート調査, 日本建築学会大会学術講演梗概集 A-1, pp.209~210, 2008.7
- [112] 例えば, Jordan, R.W., Whiston, G.S.: Remote impact analysis by use of propagated acceleration signals, II: Comparison of theory with experiment, Journal of sound and vibration Vol.96, pp.53~63, 1984.1
- [113] 例えば, 田中 正隆, 松本 敏郎, 山村 啓了: 弾性板の衝撃曲げ応答を用いた荷重及び材料定数同定逆解析, 日本機械学会年次大会講演論文集 (I), pp.35~36, 2001.8

- [114] 放生 明廣, 茶谷 明義, 上村 文人: 畳み込み積分による衝撃力推定法, 日本機械学会論文集 A 編 Vol.55 No.511, pp.477~482, 1989.3
- [115] Holzer, A. J. ; A technique for obtaining compressive strength at high strain rates using short load cells, International journal of mechanical sciences Vol.20 Issue 9, pp.553~560, 1977.11
- [116] 岸本 喜久雄, 黒田 聖昭, 青木 繁, 坂田 勝: FFT アナライザを用いた動的応力拡大係数計測システム -落重式衝撃三点曲げ試験への適用-, 材料 Vol.35 No.395, pp.850~853, 1986.8
- [117] 中尾 哲也, 田中 千秋, 高橋 徹: 木質床上で発生する衝撃力の原波形解析, 材料 Vol.37 No.416, pp.565~570, 1988.5
- [118] Chang, C., Sun, C. T. : Determining transverse impact force on a composite laminate by signal deconvolution, Experimental mechanics Vol. 29 Issue 4, pp.414~419, 1989.12
- [119] 辻 智章, 川田 祐嗣, 鈴木 喜浩, 山口 友康, 野田 直剛: 被衝撃体からの放射音による衝撃力の同定 (逆問題解析を用いた非接触測定による同定実験), 日本機械学会論文集 A 編 Vol.65 No.632, pp.701~707, 1999.4
- [120] 井上 裕嗣, 石田 宏之, 岸本 喜久雄, 渋谷 寿一: 逆解析手法を用いた衝撃荷重の測定 (伝達関数の推定法の比較検討と計装化シャルピー衝撃試験への応用), 日本機械学会論文集 A 編 Vol.57 No.534, pp.204~209, 1991.2
- [121] 井上 裕嗣, 上林 稔, 岸本 喜久雄, 渋谷 寿一, 小泉 堯: 高速フーリエ変換を利用した数値ラプラス変換・逆変換, 日本機械学会論文集 A 編 Vol.57 No.542, pp.245~250, 1991.10
- [122] 片山 慎一郎, 川口 健一, 吉中 進, 大矢 俊治, 大塚 彩: 大規模集客施設内部の非構造材に関する基礎的調査研究: その 3: インパクトハンマーによる人頭模型の応答実験, 日本建築学会大会学術講演梗概集 A-1, pp.213~214, 2008.7
- [123] 中楚 洋介, 川口 健一: 人体耐性指標を用いた天井材の安全性評価に関する基礎的研究 その 6 伝達関数に基づく天井材落下衝撃荷重の推定, 日本建築学会大会学術講演梗概集 B-1, pp.1007~1008, 2013.7
- [124] 中楚 洋介, 川口 健一: 人体耐性指標を用いた天井材の安全性評価に関する基礎的研究 その 7 最適伝達関数の同定, 日本建築学会大会学術講演梗概集 B-1, pp.921~922, 2014.7
- [125] 長松昭男: モード解析入門, 株式会社コロナ社, 505pp., 1993.7
- [126] 石川 信隆, 大野 友則, 藤掛 一典, 別府 万寿博: 基礎からの衝撃工学, 森北出版株式会社, 241pp., 2008.3
- [127] 和泉 正哲: 地震動 -その合成と波形処理-, 鹿島出版会, pp.200~231, 1994.2
- [128] 土木学会: 構造工学シリーズ 6 構造物の衝撃挙動と設計法, 土木学会, pp.41~55, 1994.1

- [129] 南 茂夫：科学計測のための波形データ処理 計測システムにおけるマイコン/パソコン活用技術，CQ 出版株式会社，pp.84～110，1988.11 第 6 版
- [130] 松葉 美晴，音田 奨，佐藤 彰，後藤 吉晴，岡畑 博子，井上 理恵：衝撃実験における測定方法についての一考察，第 2 回 落石等による衝撃問題に関するシンポジウム論文集，土木学会，pp.1～6，1993.5
- [131] 小暮 幹太，酒巻 勝，喜多 龍一郎，藤掛 一典，大野 友則：衝撃実験における種々の荷重計測方法に関する検討，第 3 回 落石等による衝撃問題に関するシンポジウム論文集，土木学会，pp.145～149，1996.5
- [132] 酒巻 勝，喜多龍一郎，小暮 幹太，藤掛 一典，大野 友則：衝撃実験計測データのフィルター処理方法に関する考察，第 3 回 落石等による衝撃問題に関するシンポジウム論文集，土木学会，pp.151～155，1996.5
- [133] 大野 友則，藤掛 一典，井元 勝慶，別府 万寿博：衝撃現象の計測におけるいくつかの問題点，第 5 回 落石等による衝撃問題に関するシンポジウム論文集，土木学会，pp.183～188，2000.6

<付録>

- [134] 中楚 洋介，川口 健一，荻 芳郎，大矢 俊治，小澤 雄樹，森 雄矢，佐藤 大輔：既存天井におけるケーブルを用いた制震システムに関する基礎的研究，日本建築学会構造工学論文集 Vol.59B，pp.489～495，2013.3
- [135] 例えば，高井 茂光，武内 義夫，浅沼 裕之，三橋 健：グリッドシステム天井の耐震安全性に関する振動実験，日本建築学会大会学術講演梗概集 B-2，pp.845～846，2002.8
- [136] 小林 俊夫，由利 隆行，荒井 智一：鋼製天井下地を用いた吊り天井の耐震性に関する研究日本建築学会構造系論文集 Vol.73 No.630，pp.1295～1302，2008.8
- [137] 日本建築学会：建築工事標準仕様書・同解説 JASS 26 内装工事，日本建築学会，pp.454，2006.2 第 2 版
- [138] 中本 康，元結 正次郎，吉川 昇，中川 祐介，Nguyen Thanh Sang（順不同）：鋼製下地在来工法天井におけるクリップの力学的特性に関する研究 その 1，その 2，日本建築学会大会学術講演梗概集 B-1，pp. 843～846，2006.7
- [139] 中川 祐介，元結 正次郎：鋼製下地在来工法天井におけるクリップの力学的特性に関する研究 その 3，日本建築学会大会学術講演梗概集 B-1，pp. 847～848，2006.7
- [140] 佐藤 恭章，元結 正次郎，川西 拓人，水谷 国男：鋼製下地在来工法天井におけるクリップ接合の非線形力学的特性に関する研究 鋼製下地在来工法天井の動的性状 その 4，日本建築学会大会学術講演梗概集 B-1，pp.881～882，2009.7
- [141] 森田 佑輔，元結 正次郎，吉川 昇，佐藤 恭章，船積 宏彰（順不同）：鋼製下地在来工法天井におけるクリップ接合の力学的性状 その 1～その 4，日本建築学会大会学

- 術講演梗概集 B-1, pp.807～814, 2008.7
- [142] 元結 正次郎, 佐藤 恭章, 川西 拓人, 船積 宏彰 (順不同): 鋼製下地在来工法天井の数値解析 その 1, その 2, 日本建築学会大会学術講演梗概集 B-1, pp.889～892, 2010.7
- [143] 金井 崇紘, 湊川 諒, 元結 正次郎: 鋼製下地在来工法天井におけるクリップの挙動に関する研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集 B-1, pp.1051～1052, 2013.7
- [144] 後藤 裕晃, 元結 正次郎, 佐藤 恭章, 船積 宏彰 (順不同): 鋼製下地在来工法天井の動的性状 その 1～3, 日本建築学会大会学術講演梗概集 B-1, pp.875～878, 2009.7
- [145] 寺西 正輝, 元結 正次郎, 佐藤 恭章, 清水 雄一郎 (順不同): 野縁受け方向の振動特性に関する研究 その 1, その 2, 日本建築学会大会学術講演梗概集 B-1, pp. 785～788, 2011.7
- [148] 日本建築センター: 体育館等の天井の耐震設計ガイドライン, 日本建築センター, 89pp., 2005.5
- [149] 元結 正次郎, 後藤 裕晃, 佐藤 恭章, 船積 宏彰: 鋼製下地在来工法天井の動的性状 その 3 鋼製下地在来工法天井の水平剛性に対する簡易算定法, 日本建築学会大会学術講演梗概集 B-1, pp. 879～880, 2009.7
- [150] 大谷 友香, 元結 正次郎, 川西 拓人, 佐藤 恭章, 水谷 国男, 石原 直: 鋼製下地在来工法天井の動的性状 その 5 鋼製下地在来工法の固有周期と安定領域での応答予測, 日本建築学会大会学術講演梗概集 B-1, pp. 883～884, 2009.7
- [151] 清水 雄一郎, 元結 正次郎, 笠井 和彦, 水谷 国男, 佐藤 恭章, 川西 拓人, 引野 剛: E-ディフェンス鋼構造建物実験研究 その 71 鋼製下地在来工法天井の剛性評価と応答予測に関する検討, 日本建築学会大会学術講演梗概集 C-1, pp. 831～832, 2010.7
- [152] 梶原 浩一, 佐々木 智大, 青井 淳, 田川 浩之, 壁谷澤 寿海, 清家 剛, 山田 哲, 福山 洋: E-ディフェンス実験に基づく大規模空間吊り天井の脱落被害低減技術開発 その 1～その 13, 日本建築学会大会学術講演梗概集 B-1, pp.997～1022, 2014.7
- [153] 荒井 智一, 由利 隆行, 小林 俊夫: 天井の耐震性に関する研究 その 3 在来鋼製下地天井の静的水平加力実験, 日本建築学会大会学術講演梗概集 B-1, pp. 841～842, 2006.7
- [154] 例えば, 吉川 昇, 岩下 裕樹, 渡壁 守正, 稲井 慎介, 石岡 拓, 飯塚 信一, 高井 茂光, 金川 基: 耐震クリップ工法の開発 その 1 材料実験, 日本建築学会大会学術講演梗概集 B-2, pp. 391～392, 2011.7
- [155] 三浦 彰一, 元結 正次郎, 仲川 勇誠, 佐藤 恭章 (順不同): 鋼製下地在来工法天井の耐震性能向上手法に関する研究 その 1, その 2, 日本建築学会大会学術講演梗概集 B-1, pp.777～780, 2011.7
- [156] 例えば, 金井 崇紘, 元結 正次郎, 佐藤 恭章 (順不同): 強化されたクリップを用いた在来工法天井に関する研究 その 1, その 2, 日本建築学会大会学術講演梗概集

- B-1, pp.877～880, 2012.7
- [157] 森田 佑輔, 元結 正次郎, 中川 祐介 (順不同): 小規模天井試験体による鋼製下地
在来工法天井の動的実験 その 1, その 2, 日本建築学会大会学術講演梗概集 B-1,
pp.863～866, 2007.7
- [158] 中本 康, 豊島 学, 船積 宏彰, 元結 正次郎: 耐震補強を目指した在来型天井の振
動台実験 その 1 実験概要, 日本建築学会大会学術講演梗概集 B-1, pp.875～876,
2007.7
- [159] 倉本 真介, 高山 正春, 木村 雄一, 佐々木 晴夫, 欄木 劉, 大原 史彦, 小竹 達也,
糸井 達哉: 耐震性に優れた大規模在来天井工法の開発 その 1 開発および実験概要,
日本建築学会大会学術講演梗概集 B-2, pp.503～504, 2006.7
- [160] 八潮建材工業株式会社: YASHIO G-1 工法, http://www.yasio.jp/3_3_2.html (2014.11.11)
- [161] 佐々木 晴夫, 大喜多 一晃, 井上 和夫, 成原 弘之, 日比野 浩, 出雲 洋治: 耐震
システム天井の開発 その 1 概要および静加力試験, 日本建築学会大会学術講演梗概
集 B-2, pp.883～884, 2004.7
- [162] 稲毛 康二郎, 秦 一平, 柳崎 尚輝: 天井板を TMD として利用した新しい吊り天井
システムの開発 その 1 最適設計方法と制震部材の単体試験, 日本建築学会大会学術
講演梗概集 B-1, pp.1035～1036, 2013.7
- [163] 豊田 将文, 中本 康, 船積 宏彰, 吉川 昇: 在来工法天井における耐震補強に関す
る実験的研究 (その 1) 実験概要, 日本建築学会大会学術講演梗概集 B-1, pp.799～
800, 2008.7
- [164] 例えば, 荒井 智一, 星川 努, 九野 修司, 渡辺 恵介, 大庭 章, 小林 俊夫: 金属パネル天井
の耐震性に関する研究 (その 10) ブレースを設置せず壁に突きつけた在来鋼製下地
天井の耐震性に関する基礎的実験, 日本建築学会大会学術講演梗概集 B-1, pp.225
～226, 2009.7
- [165] 中西 敦士, 元結 正次郎, 國崎 洋, 船積 宏章 (順不同): 鋼製下地在来工法天井に
おける天井面の安定性に関する研究 その 1～その 3, 日本建築学会大会学術講演梗概
集 B-1, pp.881～886, 2012.7
- [166] 田中 栄次, 寺田 岳彦, 櫻庭 記彦, 内本 英雄, 小川 雄一郎, 室田 文男: 軽量鉄
骨下地間仕切壁の面外静的加力実験, 日本建築学会技術報告集 Vol.18 No.39, pp.575
～578, 2012.6
- [167] 湊川 諒, 元結 正次郎, 佐藤 幸博, 佐々木 康人: 軽量鉄骨下地間仕切壁における
面外構造特性に関する研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集 B-1, pp.1053～1054,
2013.8
- [168] 船積 宏章, 元結 正次郎, 仁科 雄太郎, 吉川 昇: 在来工法による鋼製下地天井の
力学的特性に関する研究 その 1 天井各構成部位の力学的特性, 日本建築学会大会学
術講演梗概集 B-1, pp.911～912, 2005.7

- [169] 天野 聡志, 元結 正次郎, 金子 建作, 湊川 諒, 佐藤 恭章, 佐藤 幸博, 佐々木 康人, 田原 健一: 非構造部材に用いられる要素の力学的性状 その2 仕上げボードの材料特性, 日本建築学会大会学術講演梗概集 B-1, pp.935~936, 2014.7
- [170] 元結 正次郎, 佐藤 恭章, 角 友太郎, 沖 佑典 (順不同): クリアランスを有さない天井の動的挙動 その1~その4, 日本建築学会大会学術講演梗概集 B-1, pp.1043~1050, 2013.7
- [171] 角 友太郎, 元結 正次郎, 金子 建作, 菅野 嵩晃 (順不同): 不可避免的な隙間を有する天井の地震時衝突挙動に関する検討 その1, その2, 日本建築学会大会学術講演梗概集 B-1, pp.987~990, 2014.7
- [172] 佐々木 康人, 元結 正二郎, 田原 健一, 佐藤 幸博, 佐々木 聡 (順不同): クリアランスを有さない天井の振動台実験, 日本建築学会大会学術講演梗概集 B-1, pp.993~996, 2014.7
- [173] 石原 直, 稲井 慎介, 森田 泰弘, 渡壁 守正, 脇山 善夫, 喜々津 仁密 (順不同): 周囲の壁等に慣性力を負担させる水平な在来工法天井の耐震性に関する実験的研究 その1~その5, 日本建築学会大会学術講演梗概集 B-1, pp.977~986, 2014.7
- [174] 佐藤 幸博, 元結 正二郎, 田口 博晃, 小林 美之, 佐々木 康人, 田原 健一: 中層鉄骨造建物に設置したクリアランスを有さない天井の地震観測, 日本建築学会大会学術講演梗概集 B-1, pp.991~992, 2014.7

付録 A 軽量新素材天井材落下実験

近年，落下しても人命に危害を加えないような軽量な天井材の開発が進められている。

中でも，従来のものより軽量化されたケイ酸カルシウム板とアルミ複合板に関して，既往の天井材落下実験であるシリーズ 3,4 の実験方法（本論 2.2 節参照）を踏襲して落下実験を行ったため，その結果を本付録で示す．本実験をシリーズ 6 とし，実験で用いた試験体の一覧を表 A.1 に示す．人頭模型下に設置したひずみゲージ式ロードセルの記録から逆解析を行い衝撃面における衝撃荷重を推定した．本論 6.2 節と同様に逆解析の誤差（標準偏差 $\sigma=87$ [N]）を予め上乘せして評価した最大衝撃荷重と落下高さの関係を図 A.1 に示す．

表 A.1 試験体一覧（シリーズ 6）

略称	材質	サイズ(mm)	重量(kg)	実験内容	ロードセル サンプリングレート
LCS	軽量ケイ酸カルシウム板	910×910×6.0	4.8	1~6,8,10mを3回ずつ 但し5mのみ5回	計26枚
ACM	アルミ複合板	910×910×20.0	0.9	2~10m、2m毎、3回ずつ	計15枚
ACM+RW	アルミ複合板 リブ付ロックウール吸音板	910×910×20.0 300×600×15.0	4.8	10m、3回	計3枚

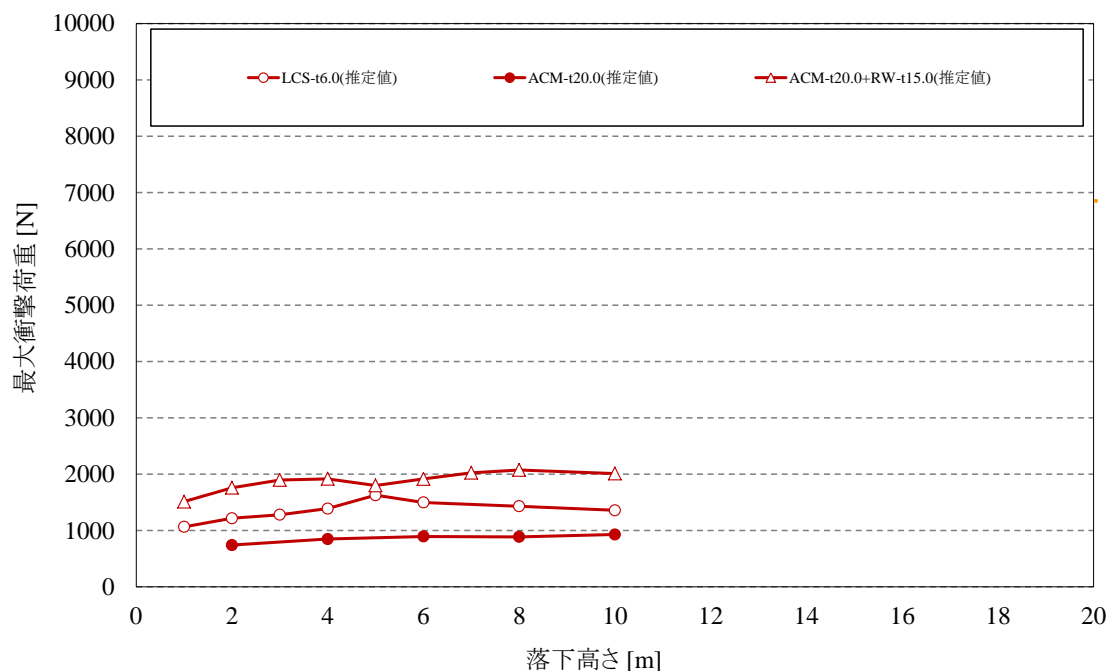


図 A.1 落下高さと最大衝撃荷重の関係（シリーズ 6）

付録 B 天井落下被害調査

B.1.1 緒言

著者らが 2011 年 3 月東北地方太平洋沖地震以降に行った天井落下被害の調査記録を本付録に纏める。本付録では、B.1.2 節に東北地方太平洋沖地震時における被害調査を、B.1.3 節に非地震時における被害調査を記す。学校体育館、屋内水泳場、運動施設、文化施設、温浴施設等の様々な施設における被害事例を纏めている。

B.1.2 東北地方太平洋沖地震時被害調査

B.1.2.1 WEB 調査

2011 年 3 月 11 日以降に発生した震度 6 強以上の地震（表 B. 1.2.1）の推計震度分布を重ね合わせた図に各都道府県，市町村 HP 及び新聞社 HP より報告された天井落下事故のあった施設位置（2011 年 5 月 20 日現在）をプロットした（図 B. 1.2.1）。これより，天井落下被害は震度 5 弱以上の地震が発生した地域に多く見られることがわかる。これは 2004 年 10 月の新潟県中越地震の際に川口らが確認している同様の傾向と一致している[20]。天井落下被害は建物の躯体の被害よりも小さな震度で発生しやすいため，被害がより広範囲に及ぶ傾向がある。

表 B. 1.2.1 地震履歴

年月日	最大震度	震源深さ	マグニチュード	震源
2011 年 3 月 11 日	7	24km	9.0	三陸沖
同年 3 月 11 日	6 強	43km	7.7	茨城県沖
同年 3 月 12 日	6 強	8km	6.7	長野県北部
同年 3 月 15 日	6 強	14km	6.4	静岡県東部

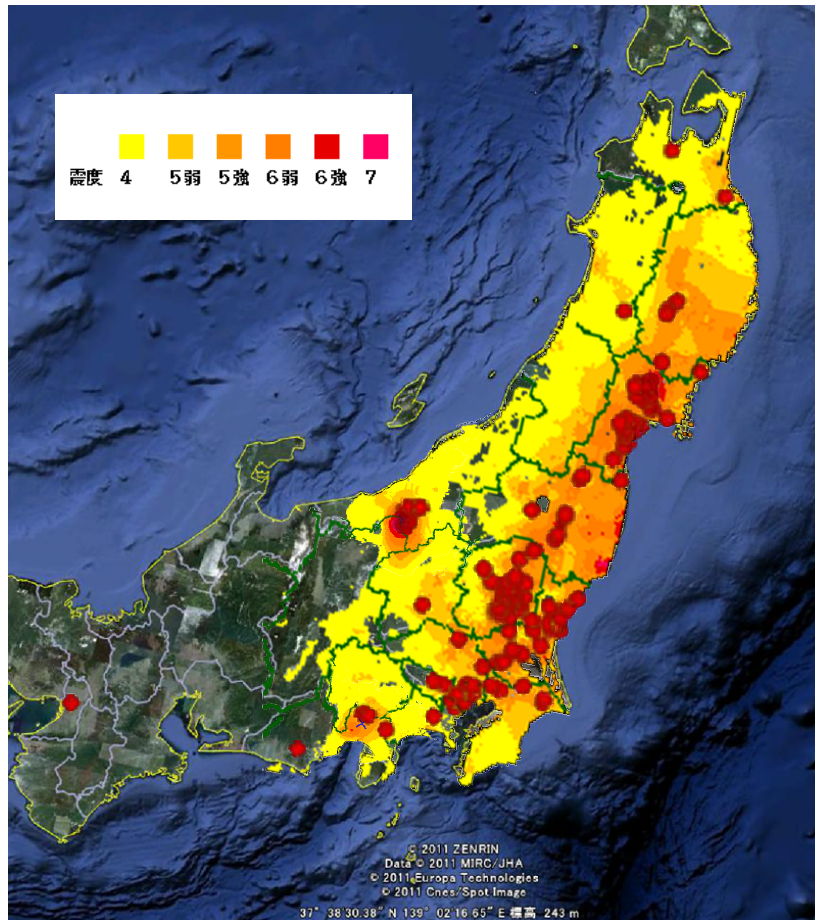


図 B.1.2.1 天井落下被害分布[25]

B.1.2.2 実地調査

著者らが行った東北地方太平洋沖地震及びその余震で発生した天井落下被害の実地調査の概要を表 B. 1.2.2 に示す. 本項では, 各施設における天井落下被害の実地調査記録を示す.

表 B. 1.2.2 調査概要

施設名称 場所(竣工年)	構造種別	規模	被害概要
展示施設 東京都内 (2001 年)	地上 8 階, 地下 2 階, 塔屋 1 階 S 造(一部 RC 造)	(エントランス フロア: 詳細不明 ホール) 天井高: 25.6m (シンボル フロア: 詳細不明 ゾーン) 天井高: 13m	天井落下(石膏ボード t9.5+ロックウール吸音板+ロックウール吸音板 t12.5, 石膏ボード t9.5 二枚張り), 懸垂オブジェ 1 体落下, ファサードガラス 2 枚破損, スプリンクラー配管破損等 天井落下(パンチングメタル), 壁面メタル製仕上げ材の変形
学校体育館 栃木県内 (1985~87 年)	地上 2 階 RC 造(屋根 S 造)	(アリーナ) フロア: 38m×30m 天井高: 7~11m	天井落下(有孔石膏ボード t9.5), 照明カバー落下
公共プール 1 栃木県内 (1997 年)	地上 1 階建 SRC 造(屋根 S 造)	(屋内プール) フロア: 50m×24m 天井高: 5~9m	天井落下(ケイ酸カルシウム板 t8.0+ロックウール化粧吸音板 t12.0 二枚張り), 照明落下, ガラスカーテンウォールガラス損傷
公共プール 2 茨城県内 (1997 年)	地上 1 階建 RC 造(屋根 S 造)	(メインプール) フロア: 99m×60m 天井高: 14~19m (サブプール) フロア: 59 m×38m 天井高: 8~15m	天井落下(アルミ製不織布+グラスウールボード) 天井落下(アルミ製不織布+グラスウールボード), (石膏

			ボード t8.0+ロックウール吸音板 t12.0 二枚張り)
文化施設 1 宮 城 県 内 (1987 年)	地上 2 階建 RC 造(一部 S 造)	(大ホール) フロア：2800m ² 天井高：7～16m	天井落下(石膏ボード t12.5+ ロックウール吸音板 t9.0 二 枚張り), 吊ボルト脱落
文化施設 2 福 島 県 内 (2010 年)	地上 3 階建 RC 造(一部 S 造)	(大ホール) フロア：1800 m ² 天井高：3～16m (展示場) フロア：43m×23m 天井高：4.5m	天井落下(木製合板 t12.0) 天井落下(2 段構成天井), 照 明落下

B.1.2.2.1 展示施設[39]

調査概要	
調査日	2011 年 3 月 22 日～5 月 26 日
調査メンバー	<p>東京大学生産技術研究所 教授 川口健一</p> <p>東京大学生産技術研究所 助教 荻芳郎</p> <p>東京大学生産技術研究所 準博士研究員 大場康史</p> <p>東京大学生産技術研究所 準博士研究員 上村一貴</p> <p>東京大学大学院 工学系研究科 建築学専攻 修士課程 中楚洋介</p>
建物概要	
場所	東京都江東区
構造, 規模	<p>鉄骨一部鉄筋コンクリート造, 各種ダンパーを利用した制振構造</p> <p>地上 8 階, 地下 2 階, 塔屋 1 階, 延床面積 約 40600 m²</p>
竣工	2001 年 3 月
被害概要	
被災日時	2011 年 3 月 11 日東北地方太平洋沖地震本震及び余震, 震度 5 弱 (江東区)
被害箇所	<p>エントランスホール: 天井材落下, 懸垂オブジェ落下, ファサード強化ガラス 2 枚破損, スプリンクラー配管破損</p> <p>シンボルゾーン: 天井材落下, メタル製仕上げ材変形</p>
落下天井概要 (エントランスホール)	
天井構成	<p>< 軽量鉄骨下地を用いた在来工法吊り天井 ></p> <p>7 階床のデッキスラブ面に埋め込まれたインサートにより吊りボルト (直径 9 mm, 長さ 1630 mm, 間隔 1500 mm) がアンカーされ, 大型のハンガーによりチャンネル材 (C-75×45) を吊っている. さらに, このチャンネル材に直交し</p>

	<p>でもう一段、チャンネル材 (C-60×30) が角 U 字ボルトで吊られている (ぶどう棚部)。ぶどう棚部からは、吊り長 5 cm の吊り金物で野縁受けが吊られ、軽量鉄骨下地の在来工法で天井材が張られている (軽鉄天井部)。天井の北側 (ファサード側) には段差部が設けられている。</p>
落下物	<p>防煙垂れ壁沿い：石膏ボード 9.5 mm + 仕上げロックウール化粧吸音板 9.5 mm</p> <p>下がり壁：石膏ボード 9.5 mm の 2 枚張り</p>
天井高	25.6 m
被害状況 (エントランスホール)	
<p>防煙垂れ壁取り付け部の東側天井部分が、細長く旗形に損傷し脱落した。垂れ壁ガラスも破損した。また、周辺段差部分の鉛直壁において、25 m に渡りパネル約 30 枚 (主要サイズ 0.8 m × 0.9 m) が、野縁と共に数回にわけて脱落した。建物本体壁と天井の取り付け部分でも、小規模な天井材の破損やガラスの破損が見られた。ガラス・ファサードの強化ガラス 2 枚も破損した。また、天井から懸垂されているオブジェ (重量約 100～200 N, 全 107 体) が 1 体落下した。</p>	
落下原因 (エントランスホール)	
<p>本震と余震により、天井段差部の下がり壁は上部が段差上側天井端部に押しつけられ、野縁受け変形とクリップ脱落により、パネルが損傷し野縁ごと脱落した。防煙垂れ壁脇の天井は、天井材と野縁受けが変形し脱落した。また、吊りボルト間には南北方向・東西方向とも斜め材が所々に設けられていたが、全てが接合ビスの破断や金具の変形、材そのものの座屈変形により脱落・損傷していた。</p>	
備考	
<p>3 月 24 日より約 2 週間、5 台の 3 軸加速度計を用いて、エントランスホール東側にある吊り天井の余震時観測を実施した。エントランスホール天井は、震災直後より復旧工事が始まり、最終的には、懸垂オブジェと軽鉄天井部を全て撤去し、ぶどう棚部に斜め材を多数追加した上で、川口教授の指導の下「落ちても安全」というコンセプトで新しく膜天井に改修している。</p>	





<p>外観</p>	<p>シンボルゾーン内観</p>
	
<p>エントランスホール内観</p>	<p>防煙垂れ壁取り付け合い部の東側天井部分</p>
	
<p>エントランスホール天井裏</p>	<p>ファサード側天井段差部</p>
	

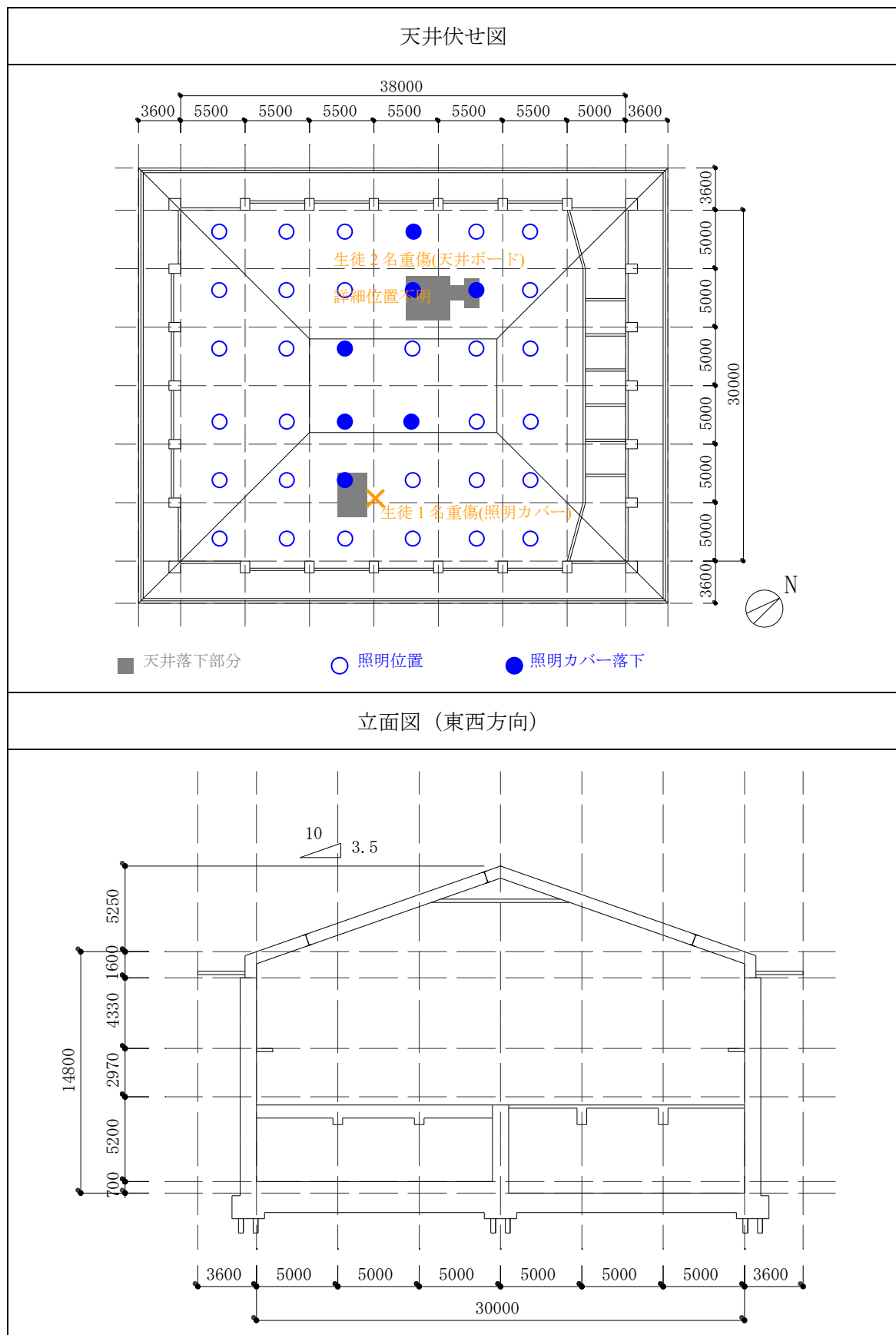
<p>全体平面概要図</p>	
<p>エントランスホール東側天井の北側ファサード付近の南北方向断面図</p>	
<p>無線式 3 軸加速度計の設置状況</p>	<p>膜天井への改修</p>

B.1.2.2.2 学校体育館[25]

調査概要	
調査日	2011 年 4 月 12 日
調査メンバー	東京大学生産技術研究所 教授 川口健一 東京大学生産技術研究所 準博士研究員 大場康史 東京大学大学院 工学系研究科 建築学専攻 修士課程 中楚洋介
建物概要	
場所	栃木県下野市
構造, 規模	RC 造, 屋根 S 造, 2 階建て, アリーナフロア 38 m x 30 m
竣工	1985 年~1987 年. 詳細不明.
被害概要	
被災日時	2011 年 3 月 11 日 14:46, 東北地方太平洋沖地震本震, 震度 5 強 (下野市)
被害箇所	アリーナ: 天井材落下, 照明カバー落下(7 個), アルミ製の見切り材落下, プラスチック製の見切り材落下, クリップ等 体育館軒天井: 天井材落下
落下天井概要 (アリーナ内)	
天井構成	＜軽量鉄骨下地を用いた在来工法吊り天井＞ 吊ボルトの吊り長は約 1m であり, 野縁受は短手方向に約 900mm 間隔, 野縁は長手方向に約 300mm 間隔で配置されている. 落下した北西面の天井面の観察によると, 大棟に近い吊ボルトは天井面に対し垂直に設置され, 軒先に近い吊ボルトは鉛直に設置されている.
落下物	有孔石膏ボード-t9.5 mm (63.7 N/m ²)
天井高	8~13 m

被害状況（アリーナ内）
<p>2 階体育館でビスの頭抜けによる天井ボードの落下、照明カバーの落下被害が発生した。北西方面と南東方面の天井でそれぞれ約 14 パネル分（1 パネル＝910×910mm）、6 パネル分の有孔石膏ボード（t=9.0mm）が落下。また、隅棟に沿った天井ボードの落下も見られた。</p>
落下原因（アリーナ内）
<p>落下した北西面の天井面の観察によると、大棟に近い吊ボルトは天井面に対し垂直に設置され、軒先に近い吊ボルトは鉛直に設置されている。垂直に設置された吊ボルトについているハンガーから野縁受の浮き上がりも観察された。これは元々自重により鉛直方向に力を受けていた吊ボルトが地震により鉛直方向へ一時的に曲がり、それが地震後に戻ったことが原因であると考えられる。落下原因は、雨漏りで脆くなった有孔石膏ボードの地震によるビスの頭抜けによるものであると考えられる。</p> <p>照明は固定式であり、照明カバーは簡易的な取り付けとなっており、照明カバーの四隅に付いた細い金具により照明に取り付けられている。これが地震時に外れ落下した。</p>
備考
<p>職員からのヒアリングによると過去天井ボードは複数回落下しており、体育館で雨漏りも起きていた。320 人程度の生徒が列を成して座っていた中、地震が発生した。初め小さな揺れが続く、大きな揺れと共に一枚の天井ボードがステージ側で落下した。その直後、体育館全体で天井ボード、照明カバー等が一挙に落下し、生徒は両脇のギャラリーの下、ステージへ避難。落下直後、また避難中に天井材、照明カバーが当たり、肩や腕の擦り傷や打撲で 20 名(男子学生 11 名、女子学生 9 名)が病院へ搬送された。内 1 名は、高さ約 10m から落下した照明カバー(約 1kg)が眉間に当たり、出血し、2 名は額、後頭部に高さ約 8~13m から落下した天井ボード(63.7N/m²)が当たり、重度の打撲を負った。地震が発生した際、緊急地震速報は鳴っていたが、体育館は避難所としての機能もあるので、学校職員は体育館にいれば安全だと考えていた。しかし、災害時に身を守ってくれるはずの場所でこのような大惨事が起きてしまった。</p>

外観	内観
	
北西面の天井落下面	
 <p>ハンガーからの 野縁受の浮き</p> <p>天井面に対し垂直</p> <p>鉛直</p>	
照明カバーの落下	
	



B.1.2.2.3 プール 1[25]

調査概要	
調査日	2011 年 4 月 12 日
調査メンバー	東京大学生産技術研究所 教授 川口健一 東京大学生産技術研究所 準博士研究員 大場康史 東京大学大学院 工学系研究科 建築学専攻 修士課程 中楚洋介
建物概要	
場所	栃木県下野市
構造, 規模	SRC 造 1 階建, 屋根 S 造, 延床面積: プール施設 2196 m ²
竣工	1997 年 (供用開始年)
被害概要	
被災日時	2011 年 3 月 11 日 14:46, 東北地方太平洋沖地震本震, 震度 5 強 (下野市)
被害箇所	プール施設: 天井材落下, カーテンウォールガラス 1 枚破損, 照明落下
落下天井概要	
天井構成	<p><軽量鉄骨下地を用いた在来工法吊り天井></p> <p>吊り長は約 2m で, 屋根面に対して垂直に母屋から下げられている. 野縁受は長手方向に通されており, アーチ状に曲げられている. 野縁は短手方向に 360mm 間隔で配置されている. 短手方向の斜め材が, 吊ボルトの 1 つ置き約 2m ごとに設けられているが, 取り付けはボルトや下地材への点付け溶接である. 水平振れ止め材は, 長手短手とも吊ボルト 1 つ置きごと程度に入っている. 捨て張りのケイ酸カルシウム板 (標準寸法 1820×910) は, その長辺方向がアーチ方向と合うように張られている. 仕上げ材は, ロックウール吸音板(標準寸法 600×300)が張られている. 箱型の鉛直面も同様の工法と仕上げになって</p>

	いる。天井下面からトップライトまでの鉛直立ち上がり部の天井は、アーチに沿うように野縁が 7～8 段ほど比較的密に配置され、野縁受が屋根面に垂直に設置されている。
落下物	ケイ酸カルシウム板 (t=8.0 mm) + ロックウール吸音板 (t=12.0 mm) + 野縁 (105 N/m ²)
天井高	5～9 m
被害状況	
<p>屋内プール（南北約 49.6 m×東西約 24.0 m）の天井落下被害。トップライトの列と交互に 4 列に分けて長手方向に設置された吊り天井の天井板が野縁と共に約 2/3 以上の範囲で落下。</p> <p>照明の落下も見られたが、その取り付けは野縁受にチャンネル材を渡した簡易なものである。落下防止チェーンなどもない。また、落下した天井の衝突により外壁ガラスカーテンウォールのガラスが 1 箇所破損している。</p>	
落下原因	
<p>曲面に大判な平板であるケイ酸カルシウム板を曲げて張っているために、ケイ酸カルシウム板は弾性変形をした状態になり、元に戻ろうとする力が常に働いていたことが推察される。一方で、吊ボルトが屋根面に垂直に吊られ鉛直でないことから、天井の自重によるスラストが発生し、天井アーチが外側に広がろうとする力が働いていた可能性がある。以上から天井板及び野縁は弾性変形を伴っており、常に元に戻ろうとする力が働いていたことが推察される。そのため、クリップを開くような力が平常時からあったと考えられる。地震によりアーチが短手方向に揺れ、クリップが緩むと同時にアーチが外へ広がる力が開放される様に、全域が落下したと考えられる。</p>	
備考	
<p>地震発生時には利用者が 20 名程いたが、日頃より天井の危険性に関心のあったプール内監視職員によって速やかに避難誘導が行われたため、幸いにも負傷者はいなかった。</p>	

<p>外観</p>	<p>組み立て H 型鋼と屋根面ブレース</p>
	
<p>落下した野縁付き天井板</p>	<p>落下したクリップ</p>
	
<p>落下した照明</p>	<p>外壁ガラス破損</p>
	

プール内観



残存天井下地



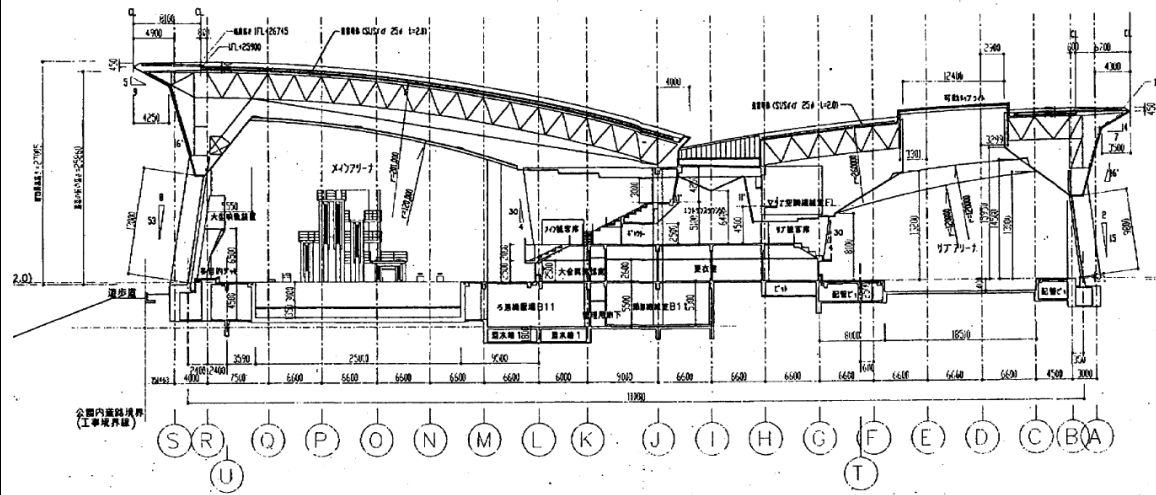
B.1.2.2.4 プール 2[25]

調査概要	
調査日	2011 年 6 月 9 日
調査メンバー	<p>東京大学生産技術研究所 教授 川口健一</p> <p>芝浦工業大学 小澤雄樹 准教授</p> <p>東京大学生産技術研究所 準博士研究員 大場康史</p> <p>東京大学大学院 工学系研究科 建築学専攻 修士課程 中楚洋介</p>
建物概要	
場所	茨城県ひたちなか市
構造, 規模	RC 造, 屋根鉄骨, 地上 2 階
竣工	1997 年
被害概要	
被災日時	2011 年 3 月 11 日 14:46, 東北地方太平洋沖地震本震, 震度 6 弱 (ひたちなか市)
被害箇所	<p>メインプール: 天井材落下</p> <p>サブプール: 天井材落下</p>
落下天井概要 (メインプール)	
天井構成	<p><システム天井></p> <p>天井構成は T バー, H バーを用いたシステム天井であり, 天井材はグラスウールボード (断熱材) とアルミ製不織布 (仕上げ材) の 2 枚張り.</p>
落下物	グラスウールボード (断熱材) +アルミ製不織布 (仕上げ材)
天井高	14~20 m
被害状況 (メインプール)	
T バー, H バーから外れた天井板のみ部分的に落下.	

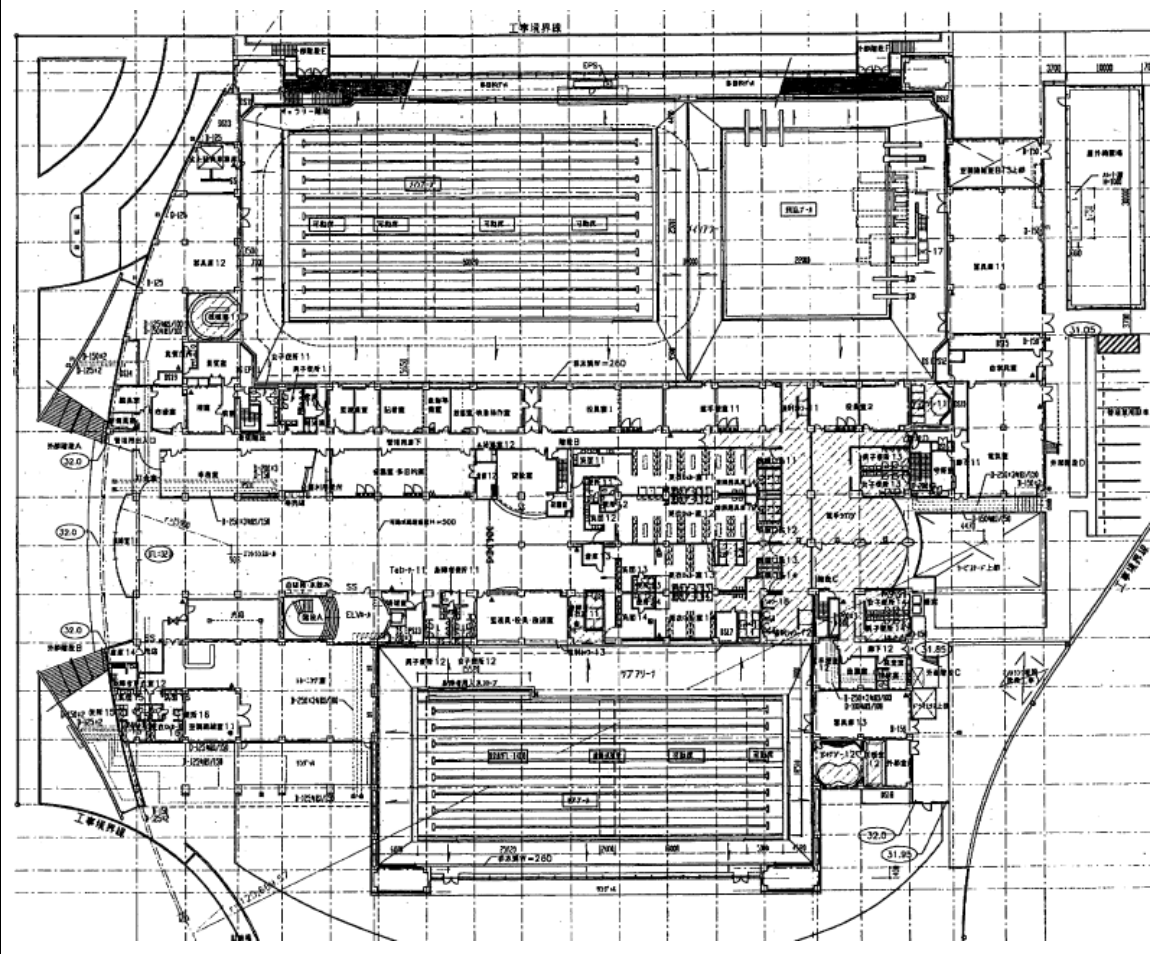
落下天井概要（サブプール）	
天井構成	<p><軽量鉄骨下地を用いた在来工法吊り天井及びシステム天井></p> <p>サブプールでは2種類の吊り天井の構成が用いられている。1種類目の天井構成は短辺方向に配置された、円の一部を切り取ってできた片流れの天井に用いられている、軽量鉄骨下地を用いた在来工法である。鉄骨の母屋から吊ボルトが下げられ、アルミ製リップ溝型鋼が短辺方向に吊られている。アルミ製リップ溝型鋼から更に吊ボルトが下げられ野縁受が同様に短辺方向に吊られ、長辺方向に野縁が配置されている。仕上げ材は石膏ボード(t=8.0mm)とロックウール吸音板 (t=12.0mm)の捨て張り(91N/m²)である。吊り長は約 1.5~5m, 水平振れ止めは 1500mm 間隔で配置されている。もう1種類の天井構成は長辺方向に配置された天井に用いられており、メインプールと同様のシステム天井である。</p>
落下物	<p>グラスウールボード（断熱材）+アルミ製不織布（仕上げ材）</p> <p>石膏ボード t8.0+ロックウール吸音板 t12.0</p>
天井高	8~15 m
被害状況（サブプール）	
<p>サブプールの中央には天窓が配され、それを囲うように天井が設置されている。天井は長手方向に対称的な形状であり、落下箇所もほぼ同様である。在来天井部はほぼ全面野縁ごと落下しており、システム天井部は部分的な落下である。</p>	
落下原因（サブプール）	
<p>ヒアリングによると、プール短辺方向に配置された在来工法の天井はアーチの中央から落下し、その後脇が落下した。長辺方向には鉛直立ち上がり部分の補強と考えられる斜め材が部分的に配置されているが、この斜め材の接続された水平部分の野縁受けに変形が集中している箇所が観察された。この部分に局所的に負荷がかかり、クリップの変形等を誘発し、落下が始まった可能性がある。中央部ではハンガーの開きによる野縁受けの落下の形跡も確認された。</p>	

外観	メインプール内観 1
	
メインプール内観 2	落下した天井材（メインプール）
	
サブプール内観 1	サブプール内観 2
	

立面図







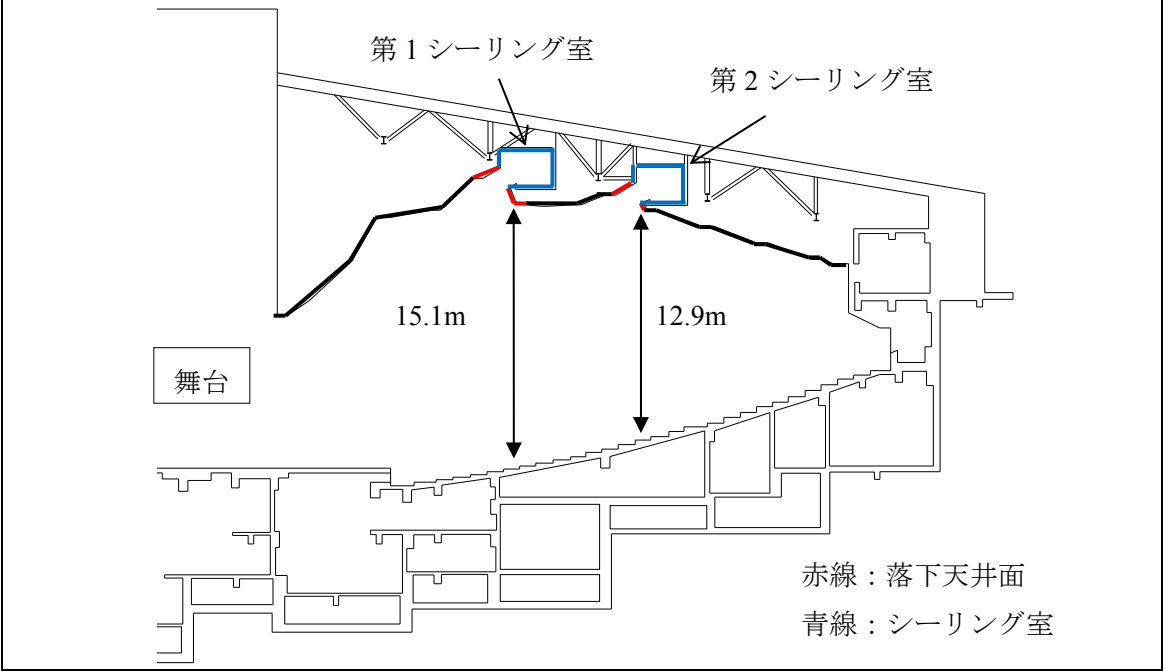
平面図

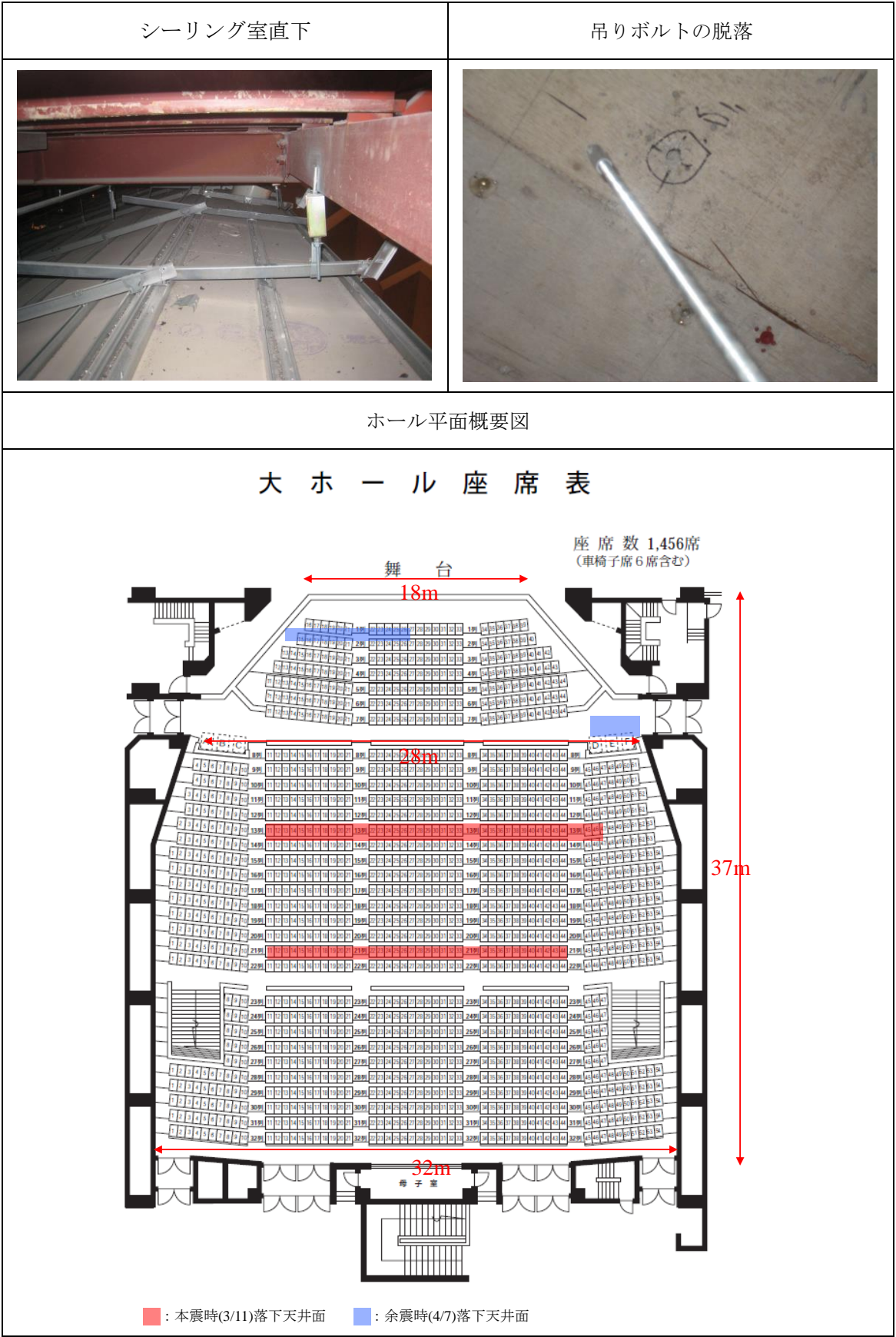


B.1.2.2.5 文化施設 1[25]

調査概要	
調査日	2011 年 6 月 11 日
調査メンバー	<p>東京大学生産技術研究所 教授 川口健一</p> <p>芝浦工業大学 小澤雄樹 准教授</p> <p>東京大学大学院 工学系研究科 建築学専攻 修士課程 中楚洋介</p> <p>東京大学大学院 工学系研究科 建築学専攻 修士課程 古市渉平</p>
建物概要	
場所	宮城県仙台市
構造, 規模	RC 造, 地上 2 階(一部 S 造)
竣工	1987 年 8 月
被害概要	
被災日時	<p>2011 年 3 月 11 日 14:46, 東北地方太平洋沖地震本震, 震度 6 弱 (仙台市)</p> <p>2011 年 4 月 7 日 23:32, 東北地方太平洋沖地震余震</p>
被害箇所	大ホール: 天井材落下
落下天井概要	
天井構成	<p>< 軽量鉄骨下地を用いた在来工法吊り天井 ></p> <p>ホールは段丘状となった天井を有している。吊ボルトの吊り長は位置毎で異なり, 約 3~5 m である。但し, シーリング室の直下に設置された天井はシーリング室を形成する鉄骨から吊られているため, その吊り長は梁から吊られている他の箇所に比べ非常に短い。</p>
落下物	石膏ボード $t=12.5$ + ロックウール吸音板 $t=9.0$ (109 N/m ²)
天井高	12.9~15.5 m

被害状況
<p>大ホール内の天井が本震（3月11日 14:46）と余震（4月7日 23:32）で2度に渡り落下した。落下した天井材は、石膏ボード $t=12.5\text{ mm}$ とロックウール吸音板 $t=9.0\text{ mm}$ の2枚張り（重さ 109 N/m^2）であり、落下高さは、約 $12.9\sim 15.5\text{ m}$ である。落下箇所は、2ヶ所に設置されているシーリング室それぞれの前方と直下である。</p>
落下原因
<p>シーリング室は屋根から鉄骨で吊られており、比較的地震による動きは少ない。シーリング室直下の天井はシーリング室から吊られているが、他の天井は屋根から吊ボルトにより吊られている。そのため吊り長が異なり、地震時挙動も異なるため、局所的に負荷がかかり、シーリング室直下の天井が落下したと考えられる。</p>
備考
<p>事故当時本ホール内には約 600 名の利用者がいたが、幸いにも少数が軽傷を負う程度で済んだ。</p>

外観	内観
	
天井下地	斜め材の変形
	
ホール断面図	
 <p>第1シーリング室</p> <p>第2シーリング室</p> <p>15.1m</p> <p>12.9m</p> <p>舞台</p> <p>赤線：落下天井面 青線：シーリング室</p>	



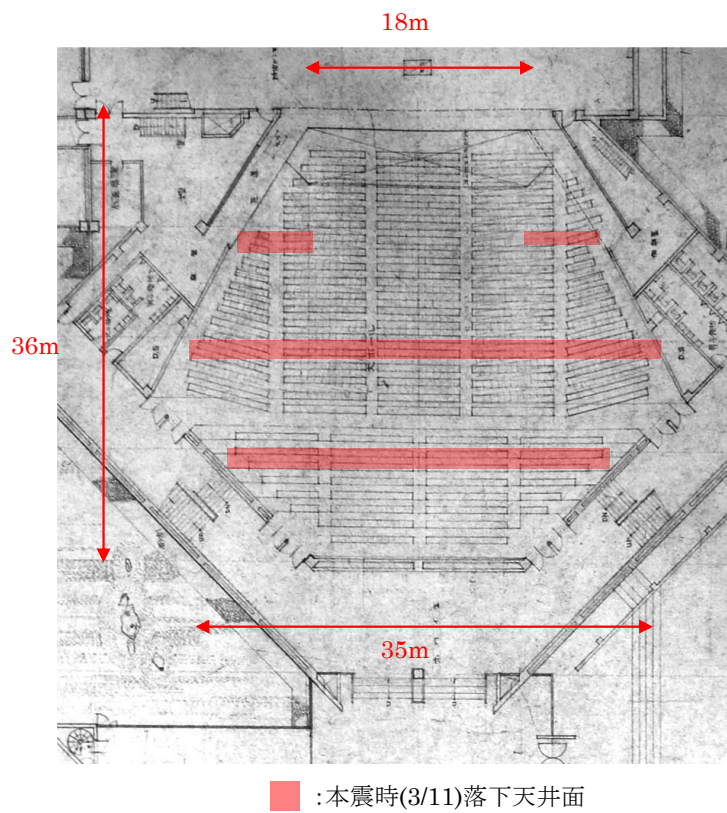
B.1.2.2.6 文化施設 2[25]

調査概要	
調査日	2011 年 6 月 12 日
調査メンバー	東京大学生産技術研究所 教授 川口健一 大阪市立大学 教授 谷口与史也 芝浦工業大学 准教授 小澤雄樹 東京大学大学院 工学系研究科 建築学専攻 修士課程 中楚洋介 東京大学大学院 工学系研究科 建築学専攻 修士課程 古市渉平 大阪市立大学 工学系研究科 都市系専攻 修士課程 渡邊祥
建物概要	
場所	福島県福島市
構造, 規模	鉄筋コンクリート造・一部鉄骨造 3 階建て, 延べ床面積約 7800 m ²
竣工	2010 年 3 月 11 日 (供用開始年)
被害概要	
被災日時	2011 年 3 月 11 日 14:46, 東北地方太平洋沖地震本震, 震度 5 強 (福島市)
被害箇所	大ホール, 展示室, エントランスホール, 2 階会議室: 天井材落下
落下天井概要 (大ホール)	
天井構成	<木製吊り天井> 段状のフラットな面と, 落下した曲面部分とでは天井の支持方法が異なる. 全部で 5 段のフラット部は木製野縁 (45×45) に合板を釘打ちすることで天井面が形成されている. 野縁は木製の野縁受 (45×45) が受け, さらにこれを直交方向に約 900 mm 間隔で配置された鋼製下地 (□-25×45) が支持している. 吊り材はハンガーを介してこの鋼製下地を吊っており, 屋根デッキスラブにアン

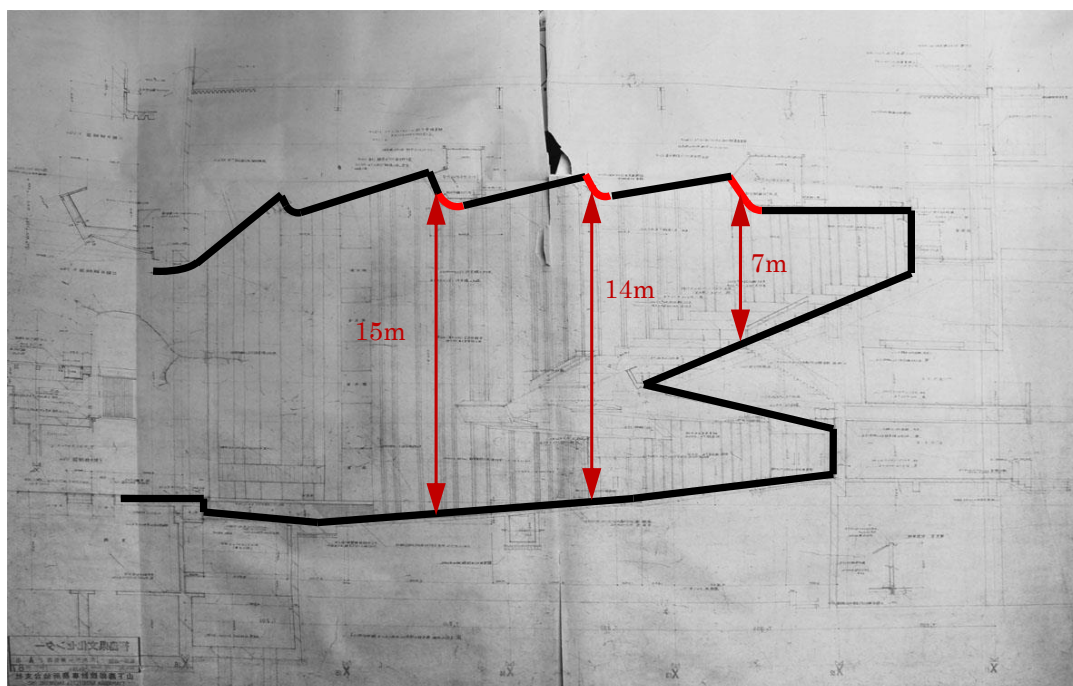
	<p>カーされている。またこの吊り材には近年追加されたと思われる斜め材が配置されているが、数も少なく吊り材の中間位置から中間位置にかけて架け渡されており、横繋ぎ材もその下端位置にしかないため、その効果は不明である。一方、曲面天井部では、木製下地に曲げ合板を釘打ちすることで天井材がパネル化されており、フラットな天井の段差部の隙間を埋めるように設置されている。この範囲には吊り材は存在せず、フラット部の端部に単に釘打ちすることのみで2辺により単純支持されている。</p>
落下物	木製曲げ合板 t12.0（塗装仕上げ）
天井高	7~15 m
被害状況（大ホール）	
<p>大ホール上部の木製の曲面吊り天井の部分的な落下被害である。段丘状となった天井の、段と段の繋ぎ目となる曲面状の立ち上がり部分が、本震時部分的に落下した。</p>	
落下原因（大ホール）	
<p>落下の原因は、各段のフラット天井部分がそれぞれ独立かつ複雑な挙動をしたことから、これらの繋ぎとなる部分に変形が集中し、簡易な接続である釘が引き抜けたことによりこの部分の落下が発生したものと考えられる。</p>	

<p>外観</p>	<p>エントランスホール天井パネル落下</p>
	
<p>大ホール内観</p>	<p>天井下地</p>
	
<p>落下曲面天井部分</p>	<p>落下した曲面天井板</p>
	


大ホール平面概略図



大ホール断面概略図



落下天井概要（展示室）	
天井構成	<p>展示場の天井は 2 段天井の構成となっている。上段は軽量鉄骨下地を用いた在来工法の吊り天井となっている。吊ボルトの吊り長は 1.9 m となっており、野縁受（@900 mm）を吊っている。野縁受と直交方向に野縁（@900 mm）が配置されている。仕上げ材は石膏ボード（$t=9.0$ mm, 単位重量 57 N/ m²）である。更に吊り長 0.3 m の吊ボルトが上段の野縁に溶接されており、H バー、T バーを用いた下段のシステム天井が吊られている。仕上げ材はロックウール吸音板（$t=5.0$ mm, 単位重量 17 N/m²）の 3 枚張りであり、更にその下に落下防止用の鋼製格子組（150×150 mm）が設けられている。この 2 段構成の天井が通気の役割を担っている。</p>
落下物	2 段天井の野縁受け以下
天井高	4.5 m
被害状況（展示室）	
<p>吊り天井の周辺部と壁面の衝突による破損と局所的な落下被害である。一部吊ボルトの脱落も確認された。</p>	
落下原因（展示室）	
<p>本震時に外壁周辺部の天井が落下した。落下箇所は外壁周辺部で見られ、天井が面外に大きく孕んでいることから壁面との衝突が落下原因と推測される。また、一部でハンガーの開きにより、野縁受ごと天井材が落下した。この場所ではナットが緩んだことによるハンガーの落下、吊ボルトの落下も確認された。2 段構成の重い天井を経年劣化のために緩んだナットで支えきれずに落下した可能性が考えられる。また、吊ボルト間にダクトが走っており、その箇所では吊ボルト間隔が広げられている。ダクト両側に配された吊ボルトの負担荷重は大きく、そこを起点に地震時、天井が落下した可能性があり、天井が床面に達した段階で落下が止まったと考えられる。</p>	

壁面と衝突による落下	2 段天井の下段
	
ダクト付近の局所的な落下	ハンガーの開き
	
断面概略図（ダクト付近の局所的な落下箇所）	平面概略図（ダクト付近の局所的な落下箇所）
	

B.1.3 非地震時被害調査

天井落下被害は地震時には同時多発的に発生するため注目されがちであるが、日常的に発生している。その発生原因は風、交通振動、結露、雨漏り、錆、経年劣化、温度変形等と多岐に渡る。本節では、非地震時において天井落下被害が多く発生する水泳場と温浴施設における調査記録を示す。

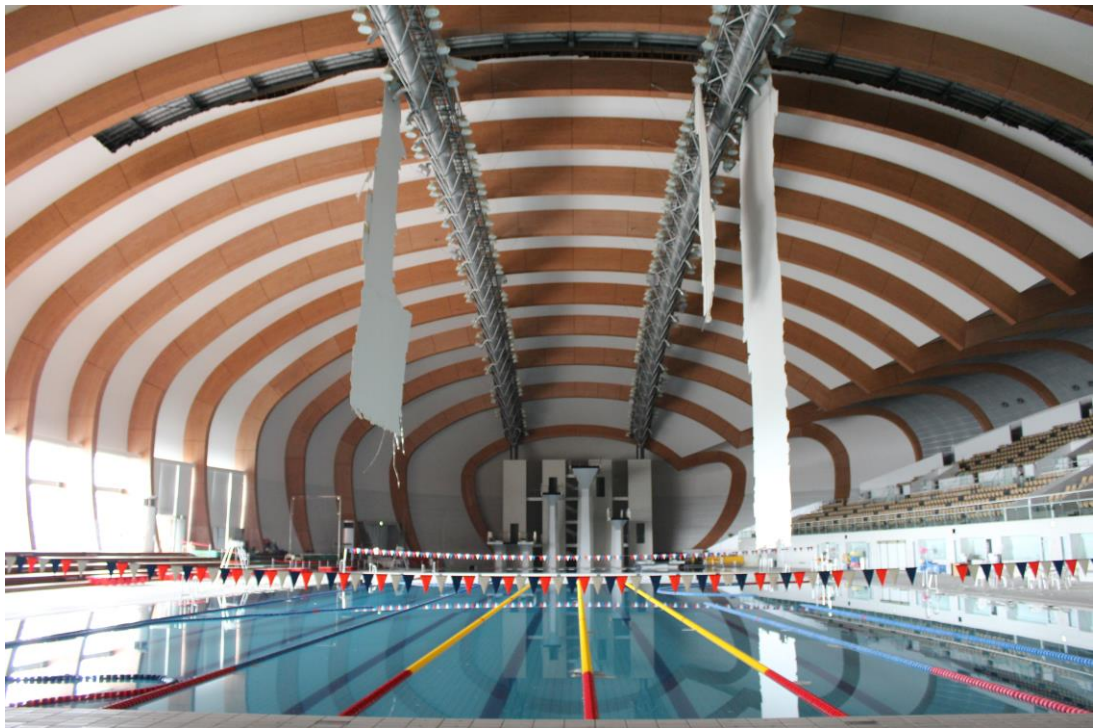
B.1.3.1 屋内プール[5]

調査概要	
調査日	2013 年 7 月 20 日～
調査メンバー	<p>東京大学生産技術研究所 教授 川口健一</p> <p>東京大学生産技術研究所 特任講師 荻芳郎</p> <p>東京大学生産技術研究所 助教 秋田大輔</p> <p>東京大学大学院 工学系研究科 建築学専攻 博士課程 中楚洋介</p> <p>東京大学大学院 工学系研究科 建築学専攻 修士課程 細見亮太</p>
建物概要	
場所	静岡県富士市
構造, 規模	<p>水泳場（競泳プール(50m×25m)+飛込プール）+トレーニングルーム,</p> <p>直接基礎, 下部 RC 造（一部 SRC 造）, 屋根 S 造, 地下 1 階, 地上 3 階,</p> <p>敷地面積 25,200m², 建築面積 9,787.63m², 延床面積 13,181.00m²</p>
竣工	2002 年 3 月
被害概要	
被災日時	2013 年 7 月 14 日 21 時以降から 7 月 15 日 7 時までの間に発生
被害箇所	水泳場：天井材落下
落下天井概要	
天井構成	<p><軽量鉄骨下地を用いた在来工法吊り天井></p> <p>吊元は屋根の下に施工されたデッキプレートにねじ込まれている。天井面は異形アーチの鉄骨トラスのベイ間に挟まれるように、幅 5 m で区切られており、フレーム脇と接する端部はダブル野縁で強固に固定されている。この部分はダブル野縁を介して、鉄骨トラスの木製仕上げ材にビス留めされている。木製仕</p>

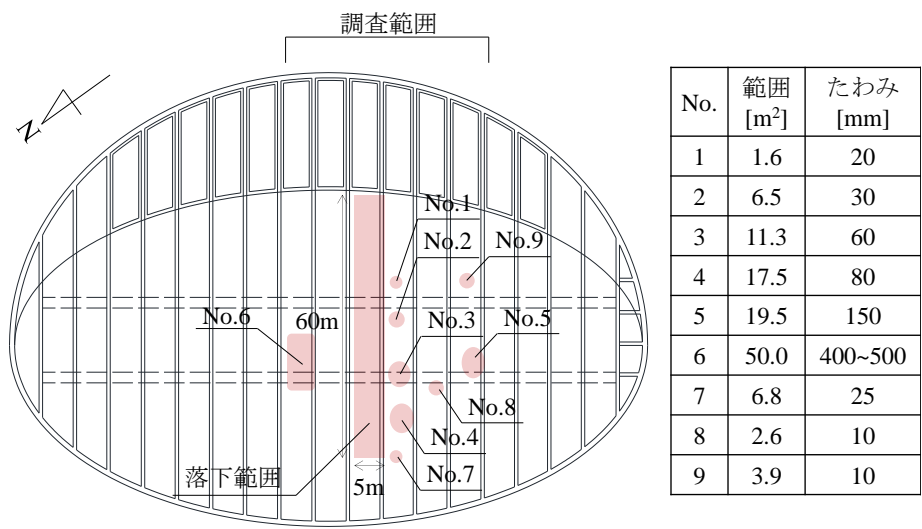
	<p>上げ材とトラスは強固に固定されている．結果的に天井面は幅 5 m で鉄骨トラスに沿ってしっかりと固定された状態になっている．吊り天井のスパン中央部分はアーチの法線方向に吊りボルトにより吊られており，アーチ形状の天井板には重力を受け足元が外側に開こうとするスラスト力が発生する．このため，天井のスパン端部には，スラストによる引張りに効くように斜材が設置されている．また端部のこの切り替え周辺で野縁受け方向が 90 度変更されている．</p>
落下物	ケイ酸カルシウム板 t8.0+ロックウール吸音板 t12.0+野縁
天井高	最高高さ 25 m
被害状況	
<p>アーチ中央部分の 1 スパン部分約 300 m² (60 m×5 m) の落下が確認された．施工業者による天井裏の観察により落下した天井以外にも，クリップが変形し野縁受けから野縁が外れている部分が多数あることが観察された．</p>	
落下原因	
<p>天井板と共に野縁が落下していることから落下の直接的原因はクリップ部の変形による落下であることがわかる．細見ら[5]は，天井落下事故の発生原因に関し，数値解析による考察を行っている．これによると，天井の設置状況および事故時の状況より，過去の地震によるクリップ部への損傷蓄積が原因となり落下に至った可能性は少ないと考えられている．同時に，真夏日が連続した時期に発生した事故であることに着目し，実地計測，熱変形の全体解析及び熱変形による変形を考慮した天井板詳細モデ解析により，おいて熱変形の繰り返しによる逐次的な損傷の蓄積によってクリップの脱落が誘発される可能性が高いことが示されている．</p>	
備考	
<p>幸いにも負傷者はいなかった．天井裏内部の空気は正圧に保たれており，湿度はよく制御されていた．結露が発生するような高い湿度は感じられず，湿気による天井板，軽量鉄骨の劣化は特段見られなかった．</p>	

<p>外観</p>	<p>落下したクリップ</p>
	
<p>内観 1</p>	<p>吊りボルトの設置状況及びデッキの支持状況</p>
	
<p>クリップの脱落による天井のたわみ</p>	<p>天井板端部ダブル野縁と フレーム木仕上げ材との接合部</p>
	

内観 2



施工業者による天井裏からの調査（天井伏せ図）



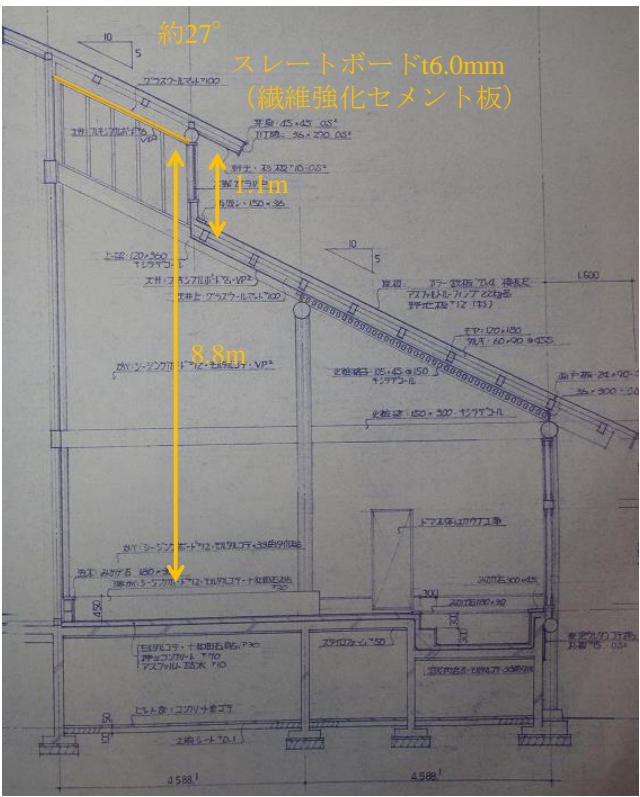
B.1.3.2 温浴施設

調査概要	
調査日	2013 年 11 月 23 日
調査メンバー	東京大学大学院 工学系研究科 建築学専攻 博士課程 中楚洋介
建物概要	
場所	山形県最上郡
構造, 規模	木造, 1 階建て, 延べ床面積 922.9 m ²
竣工	1992 年 10 月
被害概要	
被災日時	2013 年 11 月 21 日午前 11 時 30 分頃
被害箇所	男性浴室内
落下天井概要	
天井構成	木製吊り天井
落下物	スレートボード t-6.0 mm+グラスウール t-100.0 mm
天井高	8.8~12 m
被害状況	
<p>事故は, 非地震時に発生した. 6 mm 厚のスレートボード (繊維強化セメント板) が下地を構成する木材とともに落下した. ボードおよび木材は一度約 1m 下の梁に衝突し, それらの破片が浴場で座っていた 64 歳男性の頭頂部に当たり, 頭部裂傷の傷を負った. 天井板, 木材どちらが当たったかは定かではないが, 切り傷から見てスレートボードの破片が当たったと考えられる.</p>	
落下原因	
<p>天井裏で腐食が進み, 吊り木上部から落下した. 釘の腐食によるものか, 木が腐って落下したかは不明である.</p>	

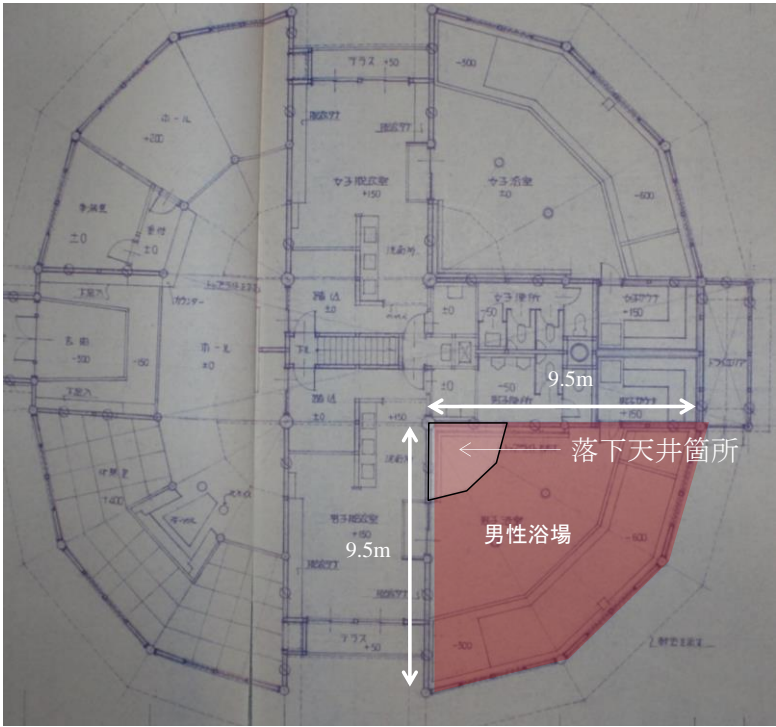
備考
<p>女性風呂では応急処置として、落下防止ネットの設置、天井直下に添え木の設置がなされていた。男性風呂で残存天井裏を調査し、その後耐用年数を見極め復旧の方針を判断する予定。天井板の張り替えも考慮しており、発砲ポリエチレンにアルミフィルムが蒸着された比較的軽い材料への変更を考えている。</p>

外観	内観
	
<p data-bbox="443 741 560 775">天井伏図</p> 	
吊り木の脱落	女性風呂の一時的な補強状況
	

立面図



平面図



B.1.4 結言

本付録では、著者らが東日本大震災以降に行った天井落下被害の WEB 調査及び実地調査の記録を纏めた。得られた知見を以下に示す。

<WEB 調査>

- ・ 天井落下被害の分布は震度 5 弱以上の地震の分布に概ね合致する傾向がある。

<実地調査（地震時）>

- ・ ホール建築の多くは音響効果を目的とし、段丘状の天井が重い仕上げ材で構成されている場合が多い。吊り長も長く、場所によって長さや固定方法も違うため、変形や力など、天井材に無理がかかりやすいため、落下事故が発生しやすい。暗い中で大勢の観客が身動きのとりにくい姿勢で集まっている場合が多く、早急に対策を考えていく必要がある。
- ・ 体育館は避難所としての機能もあるので安全だと考えられている。このように有事の際に避難所として機能する施設では、早急に人命保護を行う必要がある。
- ・ 天井板を曲げて曲面状に仕上げると、天井板には常に元の形状に戻ろうとする力が働いていると考えられ、その分余計な力が天井下地にかかるため注意が必要である。
- ・ 在来工法の吊り天井は従来水平面に施工するためのものであるため、斜めの天井を施工する場合には吊りボルトの設置方向等に注意する必要がある。
- ・ 通気路の機能を有するような 2 段天井は、一般的に 1 段の天井に比べて天井重量が大きくなる傾向がある。そのため、人命保護、耐震対策は注意して行う必要がある。

< 実地調査（非地震時） >

- ・ 富士市の水泳場では、水泳場で良く見られる結露・湿気等ではなくフレームの温度変形により天井落下が発生したと考えられている。天井落下被害は様々な外力により発生するため、耐震対策では防ぐことができないことに注意する必要がある。
- ・ 温浴施設では、結露・湿気等によって天井材の材料劣化が発生しやすい。特に、吊り材に木等の腐食の発生しやすい材料を用いる場合は特に注意する必要がある。

付録 C ケーブルを用いた吊り天井の 地震時挙動の制御法

C.1.1 緒言

著者は、サブテーマとして機能維持を目的とした吊り天井の新しい補強法に関する研究を行っていた[134]。本付録では、まず C.1.1 節で主に軽量鉄骨下地を用いた在来工法吊り天井を取り上げ、既往の耐震・制振補強方法及びそれらが有する問題を示す。C.1.3 節では、著者らが提案するケーブルを用いた吊り天井の地震時挙動の制御法の概要を説明する。C.1.4 節以降では提案する補強法の効果を実大実験にて検証した結果を示す。

天井の安全性を考える時、第 1 に大切なことは人命保護であり、天井の落下事故防止には重力による落下現象を制御する必要がある。この対策としては、本論 1.1.1 項に記したように、天井の高さに見合った軽量な天井材の採用や落下防止ネットの設置などがある。人命保護が達成された上でも、機能維持の目的から、さらに、損傷そのものを制御したいという要求がある。損傷には錆や湿気による材料劣化や繰り返し力による疲労、地震や風圧などの強い外力による損傷などがあるが、外乱として地震を想定する場合には、非構造材である天井に対しても耐震補強や制振などの損傷制御方法を適用する場合がある。このような耐震補強の慣用例が、天井下地に対する斜め材の設置などである（図 C. 1.1.1）。これらは、非構造材である天井及びその下地材に構造材と同様の考え方を直接持ち込むことが可能であるとする考え方であるが、もともとの天井裏の空間は多数の設備機器などが縦横に設置され、必ずしもバランスの良い補強が可能とは限らない。特に既存の吊り天井の場合には、斜め材の追加設置は空間的にも施工的にも非常に困難なものとなる。不完全な耐震補強はいたずらに天井の重量を増すだけでなく、かえって地震時の損傷を助長することにもつながりかねない。

これに対して、十分なスペースの取れる室内側から天井面にアプローチすることによって、制振や耐震による損傷制御を行う方法がある。これにも様々な方法が考えられるが、

本付録では、ケーブルなどの柔軟軽量な素材の引っ張り強さを用いた、簡易かつ効果的な補強方法を提案する。特にここでは、ケーブルを天井面に放物線状に配置する方法について述べ、起振器を用いた実大天井実験によりその効果と挙動を確認した結果について報告する。

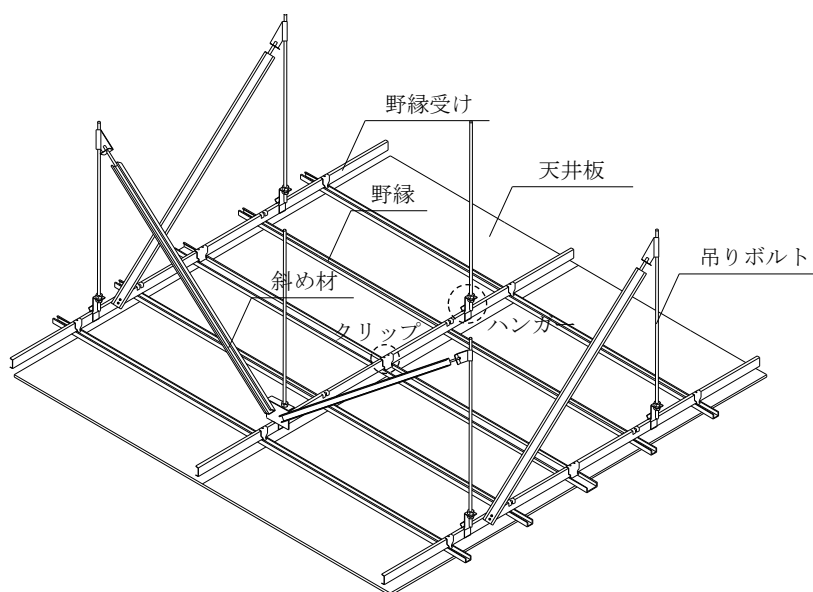


図 C. 1.1.1 斜め材設置による吊り天井の耐震補強例

C.1.2 天井の耐震・制振化

吊り天井にはいくつか種類があるが、軽量鉄骨下地を用いた在来工法天井はその被害の多くを占めている。2001年の芸予地震以降、多くの研究者が吊り天井の力学的特性や振動性状を究明するために様々な実験や数値解析を行ってきた。ここでは、はじめに無補強下地の軽量鉄骨下地を用いた在来工法吊り天井の基本的な力学的特性や動的特性について述べ、その後に各企業等で開発された補強法を紹介する。本論文では特に取り上げないが、システム天井に関しても多くの研究がなされている[135]。

地震時に天井に入力される水平慣性力の構造躯体への伝達経路は大きく2つ考えられる。1つは、天井周囲と壁等との間にクリアランスがある場合（図 C. 1.2.1(a)）であり、力は「天井板→野縁→クリップ→野縁受け→ハンガー→吊りボルト→斜め材→吊りボルト→吊り金具、インサート金具→上階床」と伝達される（これは鋼製下地在来工法天井についてだが、システム天井についても考え方は同様である）。もう一つは、クリアランスがない場合（図 C. 1.2.1(b)）であり、力は「天井板→壁等」と伝達される。この違いにより、補強についての考え方は大きく変わってくる。

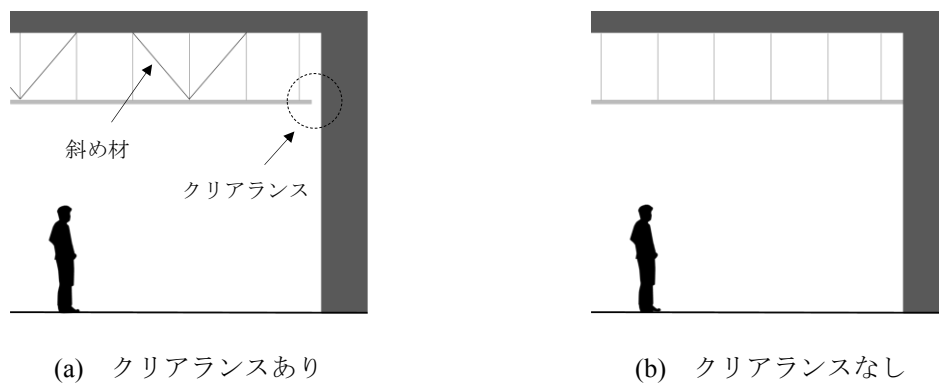


図 C. 1.2.1 水平慣性力の伝達経路[11]

C.1.2.1 クリアランスのある場合

クリアランスのある場合については、2001 年に配信された技術的助言にクリアランスの必要性が述べられたこともあり、多くの研究がなされている[136]。天井の標準的な仕様の詳細については、必要に応じて「建築工事標準仕様書・同解説 JASS 26 内装工事[137]」を参照されたい。ここでは、まずクリップ、ハンガーといった吊り天井の代表的な構成要素の力学的性状について述べる。

C.1.2.1.1 クリップ

鋼製下地在来工法天井に関して、水平慣性力の伝達経路の中で最も耐力が低いとされているのが、野縁と野縁受けを接合するクリップである。クリップには、腹掛け、背掛けと呼ばれる 2 種類の接合方法があり、通常それらを交互に用いて野縁と野縁受けを繋いでいる（図 C.1.2.2, 図 C.1.2.3）。天井脱落時の野縁-クリップ-野縁受け間の挙動、クリップの耐力は元結らにより実験、数値解析の両側面から明らかにされている。まず、鉛直荷重について述べる。JIS 規格のクリップ一個当たりの鉛直下向き方向への耐力は、約 0.5 kN である[11]。ただし、この値は、野縁受けへのクリップの掛け方（腹掛け、背掛け）やクリップの幅（シングルクリップ、ダブルクリップ）、野縁受けにかかるツメの折り曲げ角度、野縁並びに野縁受けの板厚（JIS 規格品と非規格品）の違いにより変わる[138]。また、クリップの耐力には野縁受けの曲げねじりが影響を及ぼす。野縁受けは非対称断面部材であり、せん断中心と図心がずれているため、鉛直荷重により曲げねじりが発生する。特に腹掛けのクリップが付いた野縁受けでは曲げねじりが発生しやすく、ハンガー間の距離が長くなるほど最大耐力は低下する傾向にある。腹掛けタイプでは、荷重の増大とともに変形が単調に増加し、野縁受けにかかるクリップのツメの変形により耐力が決まる傾向にある。野縁受けの曲げねじりの影響が耐力に顕著に表れることは、野縁受けの固定点の長さを変えた実験により実証されている。一方、背掛けタイプでは、クリップのフックが降伏することにより一度荷重が低下し、再び上昇した後フックのかかる野縁のリップ部が変形すること

で耐力が決まる傾向にある。そのため、野縁受けの曲げねじりの影響はほとんど見られない。最大耐力は載荷速度 2.5~25 cm/sec の範囲ではほぼ変わらず、また、繰り返し載荷によるクリップの挙動（荷重-変位曲線）は単調載荷を行うことで推定することができるとされている。続いて、水平荷重のみが作用した場合におけるクリップの力学的性状について述べる[139]。クリップは基本的に摩擦力により水平力を伝達する。腹掛け、背掛けのクリップ共に野縁の変位に伴いクリップ胴部が野縁受けに接触する方向に変位した場合、早期に滑りが発生する。一方、反対方向に変位した場合では、なんらかの水平抵抗機構が形成され耐力を発揮する。腹掛けクリップでは、鉛直載荷時と同様に野縁受けの曲げねじりに伴いクリップのツメが変形することにより脱力耐力が決まる。背掛けクリップでは、フック部分が野縁内を滑ることによって耐力が決まるため脱落は見られない。その性状は繰り返し載荷でも載荷速度を 2.5~25 cm/sec の範囲で変化させても変わらないことが確認されている。さらに、鉛直・水平荷重が同時に作用した場合におけるクリップの力学的性状について述べる[139]。クリップの破壊モードは水平載荷時と変わらないが、鉛直下向きの荷重が作用した場合には、摩擦力が増加することでクリップの耐力が増加する傾向にある。また、鉛直上向きの荷重が作用した場合にはクリップの滑り出す荷重が低下する傾向にある。クリップ一個当たり 0.075 kN の水平荷重がかかると滑りが発生することが示されている[140]。こうしたクリップによる接合部の挙動は接触・離間およびすべりなどを考慮した数値解析に

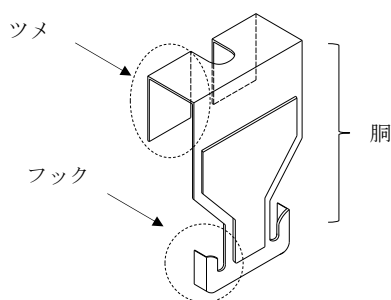


図 C.1.2.2 クリップ各部名称

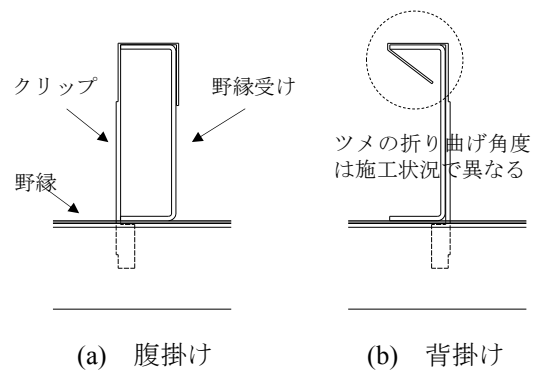


図 C.1.2.3 クリップの掛け方

より腹掛け・背掛けクリップ共に高精度に再現されており，クリップの応力状態も有限要素解析により明らかにされている[141~143].

C.1.2.1.2 ハンガー

ハンガーは，吊りボルトの先端に取り付き野縁受けを支える材である．在来工法の吊り天井は，一軸方向（野縁方向）の载荷でもハンガーの開く方向（正方向）と閉じる方向（負方向）で剛性が異なる（図 C. 1.2.4）[144]. 自由振動実験から天井全体の水平剛性を求めると，その値は正負方向の剛性の中間にあることが示されている．このような剛性の違いは，主にハンガー形状の方向性に起因する．正側载荷時のハンガー単体の剛性・耐力は，負側载荷時のそれに比べそれぞれ 4 倍，1.2 倍となっている．野縁受けを含めたハンガー接合部の剛性には，野縁受けの剛性が重要な因子となってくる．通常野縁受けは約 300 mm 間隔でクリップにより野縁に連結されているが，クリップ及び野縁は野縁受けを完全に拘束するわけではない．元結らはその拘束状態を表すための適切な野縁受けの長さを実験的に 340 mm とした．以上から求めた野縁受けの曲げねじり変形を考慮した際のハンガー接合部の水平剛性は約 $3.23 \times 10^4 \text{ N/m}$ である．この値は一般的なハンガー形状を基に計算されるハンガー単体のばね剛性 $3.89 \times 10^4 \text{ N/m}$ に比べ少し低めの値となっている．これは，野縁受けの曲げねじり変形に対する回転ばねの剛性が影響したと考えられる．

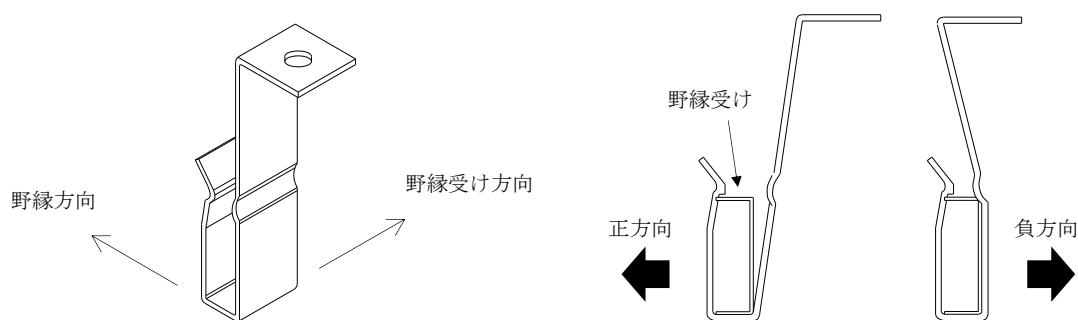


図 C. 1.2.4 ハンガー形状の方向性

一方、野縁受け方向に関しては、天井面の絶対変位 5 mm を上限として行った自由振動実験、静的載荷実験から、この範囲内ではクリップ、ハンガーのすべりは見られず、ハンガー上端部を起点とした回転により変位が生じることが明らかにされている[145]。天井面の絶対変位 5 mm 以内でも、天井の剛性は振幅依存性を示しており、非線形性を有することが確認されている。

続いて、動特性の重要な要素である固有周期について述べる。

C.1.2.1.3 固有周期

固有周期は、基本的には吊りボルトの長さにより決まる振り子振動と吊りボルトのばね剛性によって決まるばね振動とが合成された振動として評価され、次式で与えられる。

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{ml}{mg + kl}} = 2\pi \sqrt{\frac{m}{mg/l + k}} = 2\pi \sqrt{\frac{m}{K}} \quad (\text{C.1.1})$$

ここで、 T は振り子振動及びばね振動を同時に考慮した固有周期、 m は天井重量、 l は振り子長さ、 g は重力加速度、 k は吊りボルトのばね剛性、 K は等価なばね剛性を示す。

坂本らは、斜め材が下端に取り付いた吊りボルトのばね剛性を実験的にハンガーの 1/3 の剛性と評価している[148]。この値を用いて算出した固有振動数と実大実験で得た固有振動数との比較から次の知見が示されている。

在来工法吊り天井に関しては、

- a) 斜め材なしでは、吊りボルト両端を固定-固定として算定した値と固定-ピンとして算定した値のほぼ平均値として評価できる。
- b) 斜め材ありでは、吊りボルト両端を固定-固定として算定した場合も固定-ピンとして算定した場合もほとんど差はなく評価できる。

システム天井では、

- c) 斜め材なしの場合には、在来工法と同様に評価できる。
- d) 斜め材ありの場合には、斜め材の剛性への効果が在来天井に比べて低いため、計算値は低めにでる。

一方、元結らは、在来工法の吊り天井が線形システムにある場合の固有周期を算定するための簡便な剛性推定法を次のような仮定に基づき提案している[149].

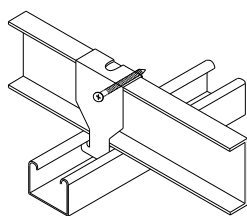
仮定) 斜め材により構成される水平力に対する抵抗機構は安定しており、斜め材下端以下の部分の剛性に比べて十分大きいものとする.

上記仮定に基づき、斜め材下端を固定支持とみなすことで、斜め材の取り付け吊りボルトの剛性を求めることができる. ただし、剛性が期待できないブレース構面ではその影響を直列バネとして考慮しなければならない. ここで元結らは、ハンガーの剛性として自身が実験により得たハンガー接合部の水平剛性を用いている.

上述の方法により算出した固有周期を用いて応答スペクトル解析により比較的変位の小さい領域では天井の応答を予測することができる[150, 151]. しかし、変位が大きくなると、背掛けクリップのフックの損傷に続き斜め材近傍のクリップの滑りが発生して非線形応答を示すため、天井の応答を推定することは難しい. 防災科学技術研究所では、E-ディフェンスにて小中学校で使用される鉄骨造体育館を想定した大規模な振動台実験を行った[152]. ここでは、耐震対策のされていない天井、H26.4 施行の基準に準拠した耐震天井、大地震にまで対応する高耐震天井を用いて実験を行っている. 各種地震波を入力し、各天井が落下するまでの挙動を調べている. 上記実験の結果から構造体と天井材が相互に与える影響に関する知見が今後期待される.

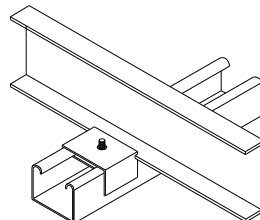
ゼネコンや下地メーカー等は、天井落下の直接的な原因となることの多いクリップやハンガーの補強を中心に様々な耐震・制振補強方法を開発している. 代表例を図 C. 1.2.5 に示す. クリップに関しては、滑り、脱落を防ぐためのビス留め補強、ネジ式クリップ[153]、2つのクリップの嵌合による補強[154]等が、ハンガーに関しては、ハンガーの開きを抑制するための抑え金物[153]やビス留め補強等が用いられている. 補強されたクリップの挙動と耐力は要素実験により明らかにされている[155]. 従来クリップとの違いは、水平載荷時にクリップ根本ではなく野縁受けとツメの間で滑りが発生した点と、この滑りが荷重変位関

係において安定したループを示す点である。クリップ単体の耐力が上がることも確認されているが、その結果ハンガー破断を引き起こす危険性も指摘されており、他の損傷要因にも留意してクリップの特性を決定する必要がある。こうした補強を施した耐震補強天井の終局耐力は、主にブレース近傍の野縁受けが塑性ヒンジによって崩壊する場合と、ブレースが座屈する場合の2通りに分けられ、一般的な理論によりいずれも耐力を算定することが可能であると報告されている[156]。地震時には天井材の振れ止め用に吊りボルト間に設



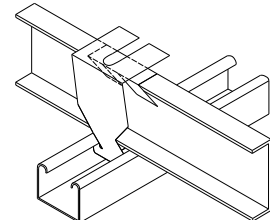
(a) クリップの補強

(Ex. 1 ビス留め補強)



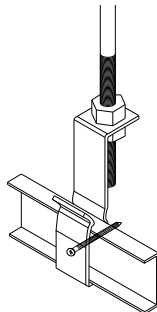
(b) クリップの補強

(Ex. 2 ネジ式クリップ[153])

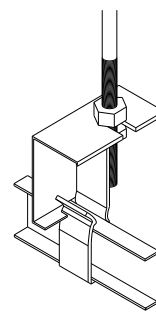


(c) クリップの補強

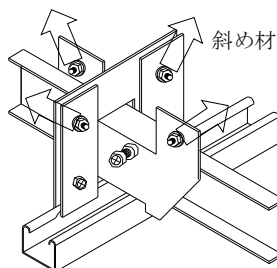
(Ex. 3 クリップの嵌合[154])



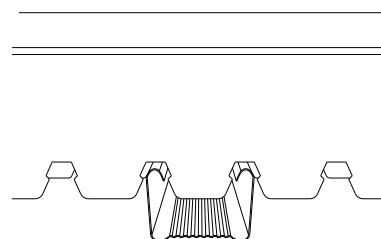
(c) ハンガーの補強 (Ex. 1 ビス留め補強)



(d) ハンガーの補強 (Ex. 2 抑え金物[153])



(e) 斜め材による補強の改良[158]



(f) 改良型野縁受け[160]

図 C.1.2.5 天井耐震補強例

置した斜め材付近に応力が集中し、その近傍のクリップが滑り、腹掛け、背掛けの順でクリップが脱落し、大規模な落下に発展することが知られている[157]。それを回避するため、クリップを介さずに天井板の水平慣性力を吊りボルト上端に伝えるため、斜め材下端を野縁に接合するための接合金物等の開発[158]や斜め材を吊りボルト間に設置せず斜め材上端を上階スラブ等に接続する方法[159]が提案されている。また、クリップを用いず野縁を直接野縁受けに接続するために加工された野縁受けも開発されている[160]。その他にも靱性型支持部材や支持部材にオイルダンパーが取り付けられた制振システム天井[161]や、天井板の滑りを利用した同調質量ダンパー（TMD）による制振天井[162]、クリップを用いない天井[163]等も開発されている。

上述した補強法は、あくまで耐震・制振補強であり、地震等による振動を対象とした対策であるため、水漏れ、結露等が主な原因で発生するビスの頭抜けによる天井板の落下に対しては全く効果を発しないことに注意しなければならない。

C.1.2.2 クリアランスのない場合

クリアランスを失くし、天井の水平慣性力を直接壁や柱などに伝えるという考えもある[164]。クリアランスがない場合については、天井単体の構造特性と天井周囲の壁側の構造特性の把握が必須であり、それぞれについて研究が進められている。天井単体の構造特性については、作用する慣性力に対して天井が保有する圧縮耐力が元結らにより実験・数値解析的に明らかにされている[165]。天井に慣性力が作用した際に、野縁方向では天井板の図心に圧縮力が働くが、天井板に野縁が付くことで天井板単体と図心がずれ、偏心力が発生して天井板が面外に曲げ変形する。これにより吊りボルトに圧縮がかかり座屈が発生する。つまり、吊りボルトの有効細長比により天井面内の圧縮耐力がきまる。野縁受け方向については、野縁方向とは異なり圧縮方向に野縁が断続的にしか配されていないため、天井板の見かけ上の剛性の上昇や偏心圧縮による影響が少ない。圧縮方向には野縁があるビ

ッチで配されているため、それらの点が天井面の座屈変形の節となり、野縁に上下方向の力がかかる。下向きの力がかかることでクリップに引張力が発生し脱落することで座屈長さが長くなり耐力が急激に低下する。天井周囲の壁側の構造特性については、一般的に用いられる軽量鉄骨間仕切壁についての面外挙動に関する研究[166]がなされており、曲げ剛性及び曲げ耐力が数値計算により推測できることが示されている[167]。また、天井板の材料特性についても研究がなされている[168, 169]。

天井に働く慣性力を周囲の壁に伝達する際に、不可避免的に生じる隙間（意図的に設けたものは「クリアランス」、そうでないものは「ギャップ」と呼ばれている。）により衝突現象が発生する可能性がある。元結らは、Hertz モデルを適用することで繰り返し発生する衝突現象を数値解析的に追えることを示している[170, 171]。但し、被衝突体である壁が剛体でない場合については今後の課題とされている。ギャップを考慮した天井は、数値解析に加えて振動台実験[172, 173]や地震観測[174]等によりその性能が明らかにされつつある。

C.1.2.3 既往の補強方法における問題

吊り天井の耐震化方法は各種指針等[15, 137, 148]に挙げられている天井裏での斜め材設置による補強が広く知られており、C.1.2.1 項で紹介したように、その配置及び取り付け方法やクリップ、ハンガーの補強法に関する開発研究がなされてきた。一方、ダンパーによる天井の制震補強法等も提案されているが、既往の補強法の多くは天井裏で補強を行うもので、以下のような問題がある。

- ・既存の天井裏では補強箇所へのアクセスや作業スペース、安全性確保に困難が伴う場合が多く、補強作業が非常に難しい。
- ・新築では作業工程が複雑になり、既往工法の利点を損なう。
- ・設備機器との取り扱いからバランスの良い配置が困難。
- ・追加部材の設置により重量が増し、かえって地震力を呼び込む。

C.1.3 ケーブルを用いた吊り天井の地震時挙動の制御法

本節では、吊り天井に対する既往の補強方法における問題を改善するため、十分な作業空間を確保できる室内側から簡易に行うことのできる補強工法を提案し、その効果を実験により検証する。なお、本工法は天井面の地震時の水平挙動を制御し、損傷低減と機能維持を主な目的とするものであって、天井材の落下そのものを防ぐものではない。従って、重たい天井材を用いる場合には落下防止ネット等と併用することを想定している。

本補強方法は、ケーブルやネット等の軽量柔軟で引っ張り強度の高い材料を室内側の天井面に金具などで止めつけ、端部を周辺の柱や梁等の支持点に定着し、必要に応じて初期張力などを導入し、天井面の主に水平運動を拘束するものである。ケーブル等の配置形状は制御したい天井面の運動や、支持点の位置などによって多様に考えることが可能である(図 C. 1.3.1)。本報告では、面内長手方向の運動を制御することを主目的とし、天井全体の慣性力を均等に受け止めることを意図してケーブル配置は放物線形状としたものを例として考えている(図 C. 1.3.2)。

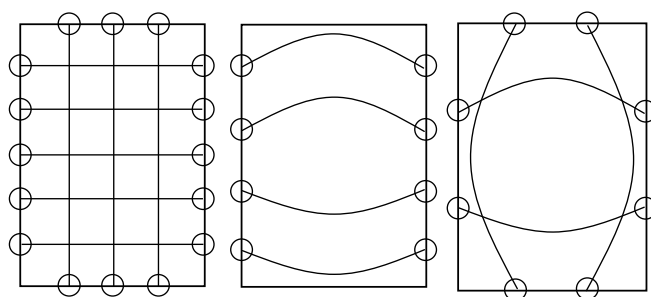


図 C. 1.3.1 ケーブルによる天井面の制振補強の配置例

(矩形平面の見上げイメージ：○部分には支持点が必要)

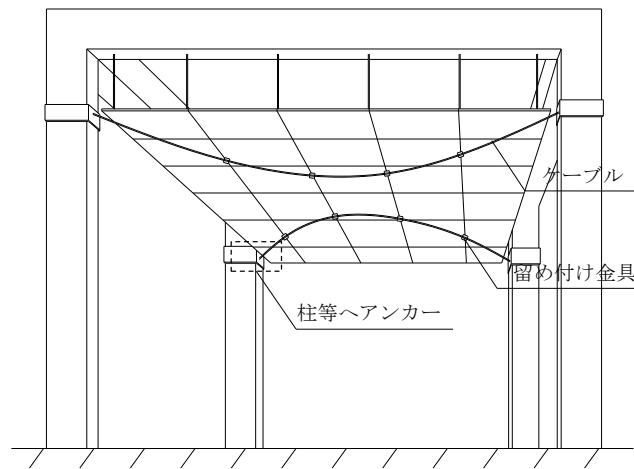


図 C. 1.3.2 本付録で実験を行ったケーブル補強の概形図

C.1.4 留め付け金具水平及び鉛直方向載荷実験

ケーブルを天井に軸方向のみ拘束せず留め付けるため、本方法では鋼板 ($t=1\text{mm}$) を曲げて加工した $10\times 10\text{cm}$ の金具を考案し、製作した。この金具接合一ヶ所当たりの水平及び鉛直耐力の把握を目的とし、静的載荷実験を行った。

C.1.4.1 水平方向載荷実験

実験パラメータは、天井材材質(表 C. 1.4.1)、金具種類(図 C. 1.4.1)、ビス本数(図 C. 1.4.2)である。ビスは載荷軸に対象となるよう配置した。これらを組み合わせ、

表 C. 1.4.2 に示す 14 種類の試験体に対し各 3 回、計 42 回の実験を行った。実験時に金具 A に比べ金具 B の耐力が明らかに小さいことを確認したので、2 枚張りの天井材に対しては金具 A のみ実験を行った。また、次節の実大実験用に石膏ボード (GB) とロックウール吸音板 (RW) の 2 枚張りに対してはビス本数 8、12 本の実験も行った。

実験装置は、天井材を載せる可動台とそれを支持する支持台により構成されている (図 C. 1.4.3)。天井材 ($15\times 30\text{cm}$) を可動台に載せ、ケーブルの代わりに鋼棒 (SK ドリルロッド $\phi 9\text{mm}$) を天井材に沿わせ、その上から留め付け金具で覆いビス留めする。鋼棒両端を当て金に固定し、ジャッキで可動台を水平に引くことで載荷を行う。載荷方法は単調載荷とし、金具の浮き上がりが確認されるまで載荷を行った。可動台とジャッキの間に挿入したロードセルにより荷重を測定し、可動台の変位をばね式変位計により測定した。しかし、この測定方法では天井材と金具のずれの他に鋼棒の変形を含んでしまう。そこで、天井を設置せずに可動台に直接金具を固定し同様に載荷するという予備実験を 3 回行い、得られた鋼棒の水平剛性の平均値を用いて全体の変位から鋼棒の変形量を引き、天井材と金具のずれを抽出した。このため、載荷は鋼棒の弾性範囲内で行っている。

表 C.1.4.1 天井材材質

材料	厚み
石膏ボード(GB)	t = 9.5mm
ケイ酸カルシウム板(CS)	t = 8.0mm
石膏ボード(GB)+ロックウール吸音板(RW)	t = 18.5mm (9.5 + 9.0)
ケイ酸カルシウム板(CS)+ロックウール吸音板(RW)	t = 17.0mm (8.0 + 9.0)

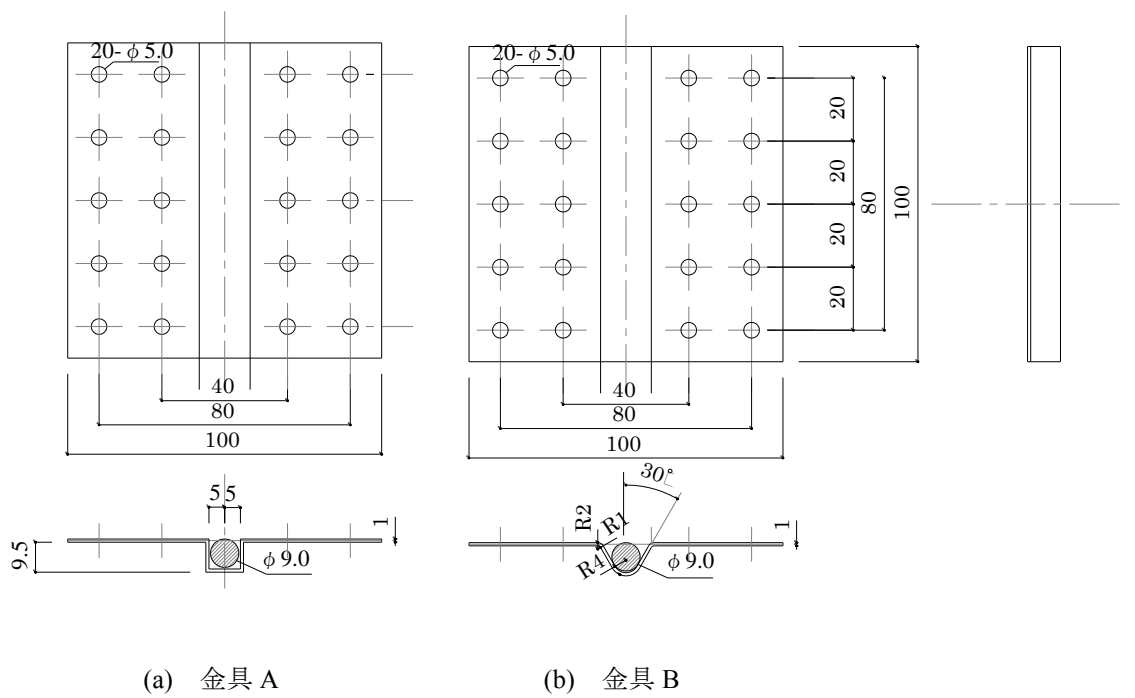


図 C.1.4.1 金具種類

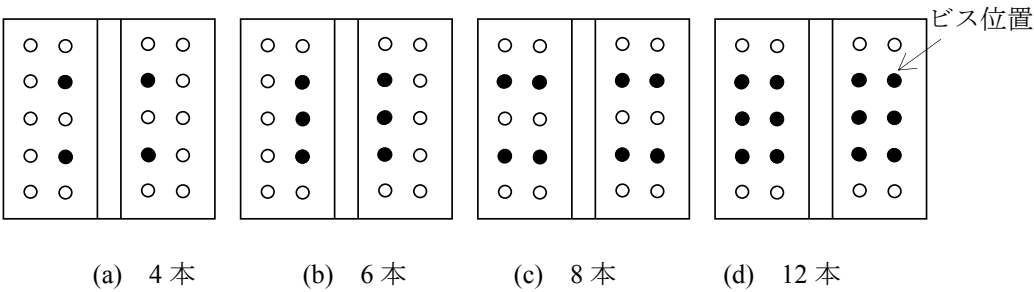


図 C.1.4.2 ビス本数

表 C. 1.4.2 試験体種類

	天井材材質	金具種類	ビス本数
1	石膏ボード(GB)	A	4
2	石膏ボード(GB)	A	6
3	石膏ボード(GB)	B	4
4	石膏ボード(GB)	B	6
5	石膏ボード(GB)+ロックウール吸音板(RW)	A	4
6	石膏ボード(GB)+ロックウール吸音板(RW)	A	6
7	石膏ボード(GB)+ロックウール吸音板(RW)	A	8
8	石膏ボード(GB)+ロックウール吸音板(RW)	A	12
9	ケイ酸カルシウム板(CS)	A	4
10	ケイ酸カルシウム板(CS)	A	6
11	ケイ酸カルシウム板(CS)	B	4
12	ケイ酸カルシウム板(CS)	B	6
13	ケイ酸カルシウム板(CS)+ロックウール吸音板(RW)	A	4
14	ケイ酸カルシウム板(CS)+ロックウール吸音板(RW)	A	6

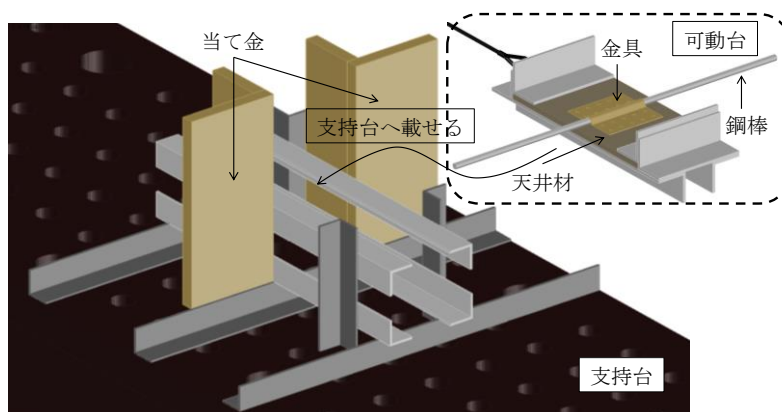


図 C. 1.4.3 実験装置

以下に、実験結果について示す。まず、図 C. 1.4.4 に荷重-ずれ曲線の例を示す。載荷初期では荷重は単調に増加していくが、図中に三角で示した点で一旦荷重が低下する。このとき金具の浮き上がり（図 C. 1.4.5）が音とともに目視で確認された。本実験ではこの点を最大水平耐力として評価する。

次に、実験パラメータの違いによる最大水平耐力の比較を行う。天井材の材質に関して

は、1枚張り、ロックウール吸音板との2枚張りの天井材のいずれの場合も、ケイ酸カルシウム板（CS, CS+RW）の方が石膏ボード（GB, GB+RW）より最大耐力が高く、平均で約2.9倍高い。また、2枚張りの最大耐力は1枚張りに比べ10~30%程度落ちる（図 C. 1.4.6）。これは2枚張りにすることで厚みが増すが、第1層目のロックウール吸音板は材質が柔らかく剛性が低いため、この部分では反力がほとんど発生せず、結果的にビスにモーメントが発生するためと考えられる。モーメントによりビスが回転し、第1層目のロックウール吸音板を削っていることが確認された（図 C. 1.4.7）。金具形状に関しては、金具 A の方が金具 B より最大耐力が高く、平均で約1.4倍高い（図 C. 1.4.8）。これは金具 B では鋼棒が金具の下に潜り込んでしまい、容易に浮き上がりが発生してしまうためである。本実験範囲内ではビス本数が増えるにつれて、最大耐力が高くなる傾向にあることがわかる（図 C. 1.4.9）。

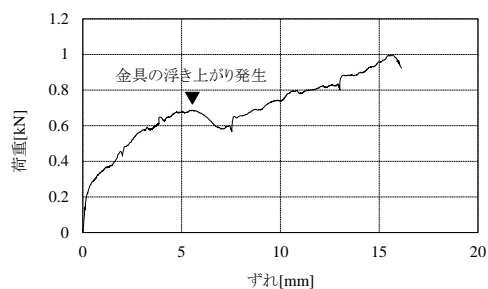


図 C. 1.4.4 GB+RW の荷重-ずれ曲線

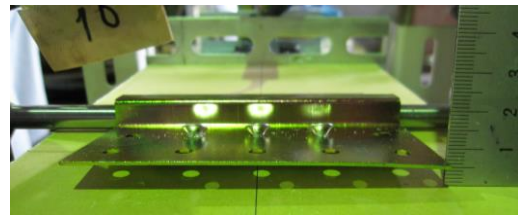


図 C. 1.4.5 金具の浮き上がり

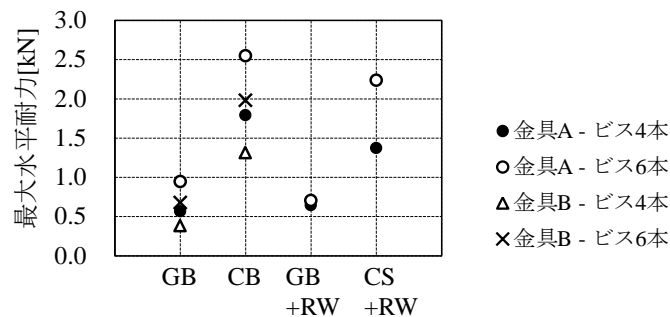


図 C. 1.4.6 天井材の材質比較

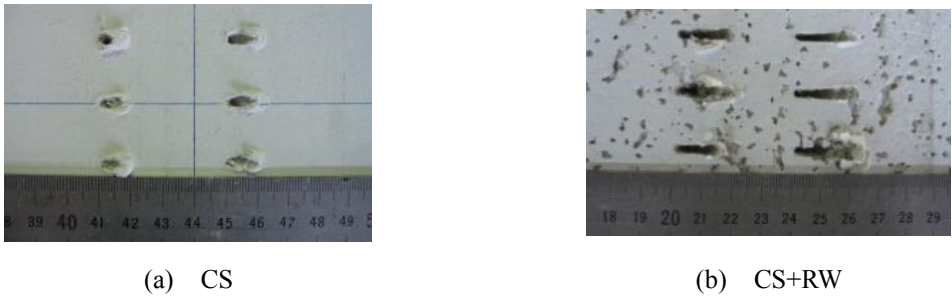


図 C.1.4.7 載荷後の天井材

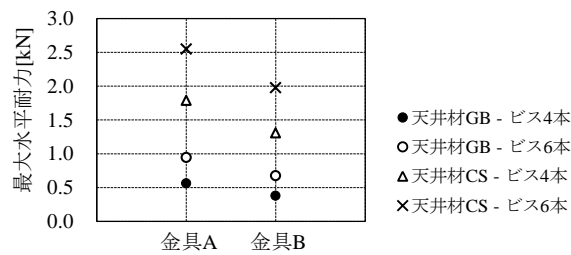


図 C.1.4.8 金具種類の比較

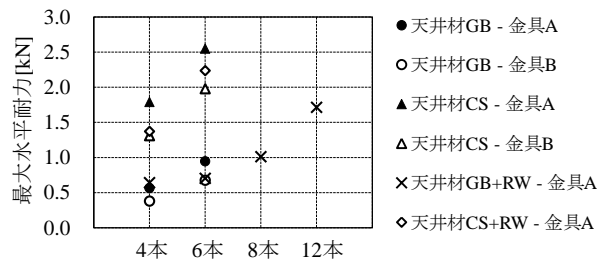


図 C.1.4.9 ビス本数の比較

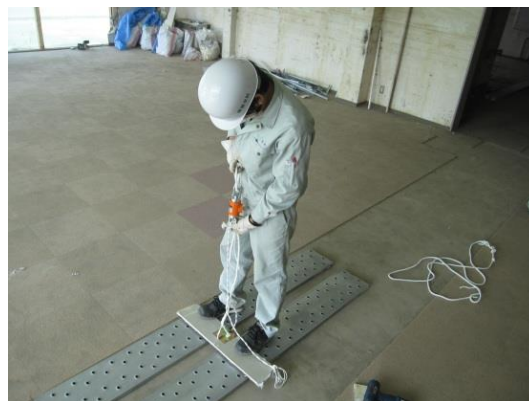
C.1.4.2 鉛直方向載荷実験

天井材に留め付けた金具に紐を通し、鉛直下向き又は上向きに人力で引っ張ることで載荷した（図 C.1.4.10）. 紐に取り付けたロードセルにより引張荷重のみ測定した. パラメータは天井材材質, ビス種類, ビス本数である. これらを組み合わせ 3 種類の試験体に対し各 1 回, 計 3 回の実験を行った. 表 C.1.4.3 に実験結果の一覧を示す.

実験結果よりビス 2 本で石膏ボードに留め付けた場合、金具 1 個当たりの鉛直耐力は 0.2~0.3kN となることがわかる。



(a) 下向き



(b) 上向き

図 C. 1.4.10 載荷風景

表 C. 1.4.3 実験結果一覧

試験 番号	載荷 方向	天井材材質	ビス種類	ビス本数 [本]	最大鉛直耐力 [kN]
1	鉛直 下向き	石膏ボード(GB) t=9.5mm+ ロックウール吸音板(RW) t=12.0mm	タッピング ねじ	2	0.29
2	鉛直 上向き	石膏ボード(GB) t=9.5mm	タッピング ねじ	2	0.21
3	鉛直 上向き	石膏ボード(GB) t=9.5mm	ワンタッチ スクリユー	2	0.27

C.1.5 起振器を用いた実大天井加振実験

C.1.5.1 実験概要

本付録で提案しているケーブルを用いた制振補強方法の効果の検証を目的とし、起振器を用いた実大天井実験を行い、結果を補強前後で比較した（表 C. 1.5.1）。

表 C. 1.5.1 実験項目

	実験項目	目的
無補強天井	静的載荷実験	水平及び面内回転剛性の推定
	スweep加振実験	固有振動数の推定
	自由振動実験	減衰定数の推定
ケーブル補強天井	スweep加振実験	固有振動数の推定
	自由振動実験	減衰定数の推定

C.1.5.2 天井概要及び計測器・起振器設置

仙台市若林区内のコミュニティーセンター（1層鉄骨造）内の集会室の天井を用いて実験を行った。内観を図 C. 1.5.1 に示す、中央部の天井（天井高 3.3m, 天井面積 $6 \times 10 = 60\text{m}^2$ ）を試験体とした。前準備として外周部垂れ壁との縁を切った。

本天井は軽量鉄骨下地を用いた在来工法吊り天井である（図 C. 1.5.2）。吊りボルト（ $\phi 9\text{mm}$, 吊り長約 440mm）が両方向約 900mm 間隔で、梁に架けられた C 型チャンネルからクランプ形式の支持金具で吊られている（図 C. 1.5.4）。天井材は石膏ボード t9.5mm 捨て張りと、化粧材としてリブ付ロックウール吸音板 t19.0mm を張り合わせたものである。

母屋からチェンブロックで起振器（サンエス社製 Model SSV-125, 重量 490N）を吊り下げ、天井重心位置の天井面に設置した（図 C. 1.5.3）。起振器の自重は母屋が負担し、水平慣性反力のみ天井に入力される。

天井の挙動を把握するため、天井の4隅と重心位置、更に重心位置付近の大梁の上に無線式3軸加速度計（Colibrys 社製 SF3000L）を設置した。計測器にはアルニク社製無線式3軸加速度計測システム RS-MAX24 を用いた。また、天井の重心位置において鉄骨梁に対する相対変位をレーザー変位計により測定した（図 C.1.5.5）。



図 C.1.5.1 内観



図 C.1.5.2 天井裏

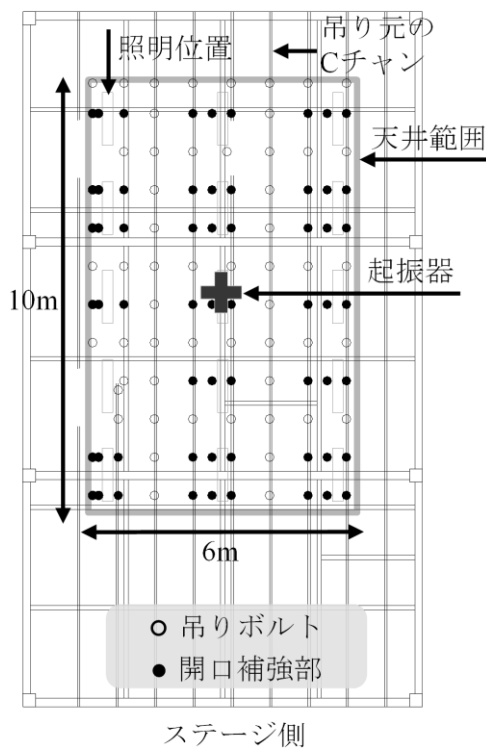


図 C.1.5.4 吊りボルト配置



図 C.1.5.3 起振器設置

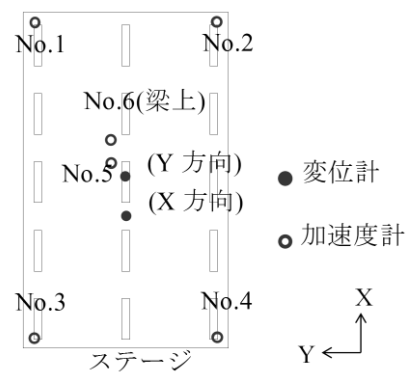


図 C.1.5.5 計測器設置

C.1.5.3 ケーブル設置

ケーブル配置状況を図 C. 1.5.6 に示す．長手 X 方向の補強効果を狙い，計 4 本のケーブルを放物線状（サグ比 0.25）に配置し，ケーブル一本当たり 8 個の金具を用いてそれぞれ 6 本のビスで天井面に下から留めつけた（図 C. 1.5.7）．ケーブルを天井に軸方向のみ拘束せず留め付けるため，本実験では鋼板（ $t=1\text{mm}$ ）を曲げて加工した $10\times 10\text{cm}$ の金具を使用した（本金具の準備実験については文献 15 を参照）．柱にはアンカー用の溝型鋼を U 字ボルトで取り付けた（図 C. 1.5.8）．溝型鋼の中央にアイボルトを溶接し，ターンバックルを接続して

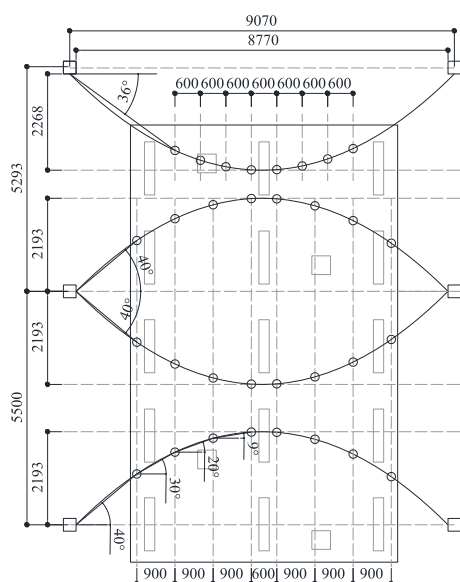


図 C. 1.5.6 ケーブル配置



図 C. 1.5.7 ケーブル，金具設置



図 C. 1.5.8 アンカー用金物



図 C. 1.5.9 ロードセル設置

いる．ターンバックルは放物線状ケーブルの両端につながっており，両側からケーブルの初期張力の調整を行えるようになっている．また，ケーブル張力をモニタリングするため，ロードセルを各ケーブル端部(片側のみ)に設置した（図 C.1.5.9）．補強設置作業は，移動式足場を2脚と4名ほどの人員で，2日間程度で完了した．

C.1.5.4 人力による静的載荷実験

C.1.5.4.1 実験概要

補強前の天井の水平及び水平面内の回転剛性を推定するために，人力による静的載荷実験を行った．天井の周囲に設置されている軽量鉄骨による下地材（ランナー）に紐を結び付け，この紐を取り付けた辺を反対側の辺に向かって人力で引っ張ることで水平方向載荷を行った（図 C.1.5.10）．捩れ方向に関しては，偶力を発生するように，向い合う辺の対角線側端部2箇所に紐を取り付け，取り付けた辺と反対側の辺に向かって直角方向に引っ張り載荷した．荷重は紐に取り付けたロードセルにより測定し，変位はレーザー変位計及びばね式接触変位計で測定した．X，Y，面内回転方向に対し，それぞれ18回，12回，6回と計36回の実験を行った．

C.1.5.4.2 結果と考察

人力静的載荷実験の結果の荷重-変位曲線から最小2乗法により剛性を算出した（図 C.1.5.11）．得られた水平剛性の平均はX，Y方向それぞれ約0.21，0.59 kN/mmである．Y方向の水平剛性はX方向に比べ約2.79倍高い．これは，ハンガーの強軸がY方向に向いていることやY方向にのみ設けられている開口補強材（照明のために天井に開けられた長穴の補強のため，長穴を跨ぐよう吊りボルト中間部に溶接されたC型チャンネル(38×12×1.0)）などの影響であると考えられる．吊りボルトの剛性やハンガーの剛性は低いいため，開口補強材による影響が強く表れていると考えられる．また，人力載荷実験で求めた面内回転剛性の平均は約 $1.24 \times 10^7 \text{ N} \cdot \text{m/rad}$ である．



図 C. 1.5.10 荷重風景

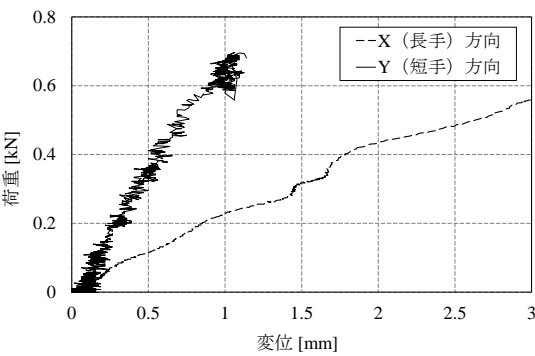


図 C. 1.5.11 荷重-変位曲線

C.1.5.5 スイープ加振実験

C.1.5.5.1 実験概要

天井全体の振動性状の調査を目的とし、天井重心位置に設置した起振器の振動数を連続的に変化させてスイープ加振実験を行った（表 C. 1.5.2）.

表 C. 1.5.2 スイープ加振実験の概要

＜無補強天井実験＞	
パラメータ	入力加速度 (50,100,200gal)、入力振動数 (1.0~7.0Hz)、スイープ回数 (1~3往復)、スイープ速度 (0.003~0.033Hz/sec)
実験回数	X方向:9回、Y方向:4回
＜ケーブル補強天井実験＞	
パラメータ	入力加速度 (50,100,200,300,400,500gal)、入力振動数 (1.0~10.0Hz)、スイープ回数 (1往復)、スイープ速度 (0.008~0.017Hz/sec)、各ケーブルの初期張力目安 (100,200,300,400,500,600,1000N)
実験回数	X方向:45回、Y方向16回

C.1.5.5.2 結果と考察

各実験で得られた天井重心位置の応答加速度から加速度フーリエスペクトルを算出し、固有振動数を推定した．一例として、起振器への入力振動数，レーザー変位計により計測された天井重心位置付近の鉄骨梁と天井の相対変位，加速度計で計測された天井重心位置付近の応答加速度から算出した加速度フーリエスペクトルを図 C. 1.5.12~図 C. 1.5.14 に示す.

実験より, 補強前天井の X 並進, Y 並進, 面内回転の固有振動数はそれぞれ約 2.2 Hz, 4.4 Hz, 4.4 Hz と推定された.

静的載荷実験より得られた X, Y 方向の水平剛性 (k_X , k_Y) とスワイプ実験より得られた固有振動数 (f_X , f_Y) からばね振動の式 ($T=2\pi(m/k)^{1/2}$) より天井重量 (mg) を両方向について求め, 平均すると約 8.4 kN と推定される. これは構成部材の単位重量から概算した天井重量 8.1 kN と概ね一致しており, 推定結果の妥当性を示している.

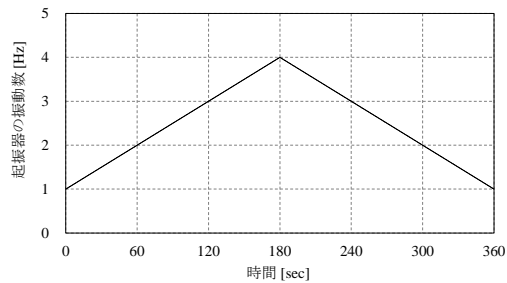


図 C. 1.5.12 起振器への入力振動数

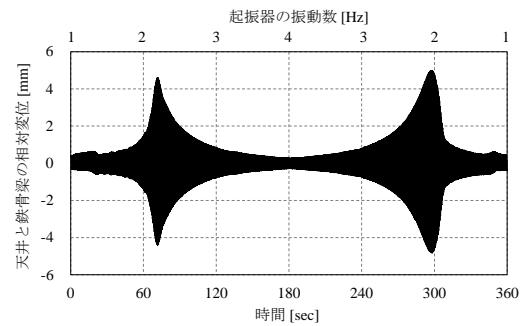


図 C. 1.5.13 鉄骨梁と天井の相対変位

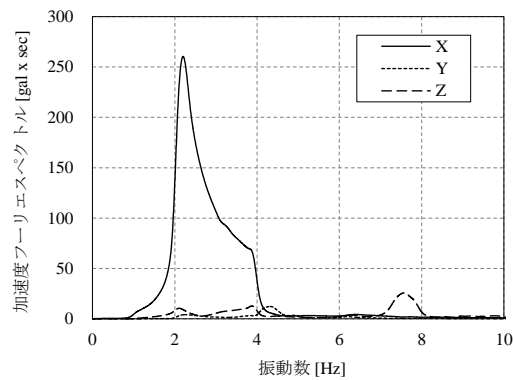


図 C. 1.5.14 加速度フーリエスペクトル

(重心位置付近)

C.1.5.6 自由振動実験

C.1.5.6.1 実験概要

天井全体の振動に対する減衰定数の推定を目的として自由振動実験を行った。実験は、定常加振からの起振器急停止と、人力によって与えた強制変位の解放の 2 通りの方法により行った。これらの実験のパラメータの詳細を表 C. 1.5.3 に示す。

図 C. 1.5.15 に両実験で得られた自由振動波形を示す。得られた変位データを用いて 5 周期分の振幅比から減衰定数を算出した。ただし、実験によっては変位計の値にノイズが多く含まれていたため、天井重心位置に設置した加速度計の値を積分して変位を推定することのできる実験 1 では、加速度計から得られる変位を用いた。加速度計から変位を精度良く推定できることは別に確認している(図 C. 1.5.16)。

表 C. 1.5.3 自由振動実験の概要

実験1. 定常加振からの起振器急停止による自由振動実験	
実験方法: 起振器で定常加振させた後に急停止させる。	
< 無補強天井実験 >	
パラメータ	入力加速度 (50,100,200gal)、入力振動数 (2.1~5Hz)
実験回数	X方向: 5回、Y方向27回
< ケーブル補強天井実験 >	
パラメータ	入力加速度 (50,100,200,300,400,500gal)、入力振動数 (2.1~7.0Hz)、各ケーブルの初期張力目安 (100,500,1000N)
実験回数	X方向: 36回、Y方向19回
実験2. 人力による強制変位からの自由振動実験	
実験方法: 静的載荷実験と同様紐を引っ張り、一気に離す。	
< 無補強天井実験 >	
パラメータ	載荷位置 (1~3ヶ所)、載荷人員 (2~3人)
実験回数	X方向: 2回、Y方向5回
< ケーブル補強天井実験 >	
パラメータ	載荷位置 (1~3ヶ所)、載荷人員 (1~3人) 各ケーブルの初期張力目安 (100,500,1000N)
実験回数	X方向: 12回、Y方向9回

C.1.5.6.2 結果と考察

実験 1 より得られた減衰定数は、X 方向が 6.0～8.0%，Y 方向が 2.5～8.0%であり、実験 2 では X 方向が 4.5～5.0%，Y 方向が 3.0～5.0%である。在来工法天井では、減衰はハンガーより下部で発生していると考えられている。ハンガー、野縁受け、クリップ、野縁、これらの接合には異方性があるため、X、Y 方向で減衰にも差異が生じたと考えられる。減衰定数と振幅の関係を図 C. 1.5.17 に示す。X 方向より Y 方向のほうが、振幅依存性の影響が大きいことが確認された。また、実験 2 では実験 1 に比べ減衰定数が低く出た。実験 1 は急停止には有限の時間がかかるため影響が出るものと考えられる。

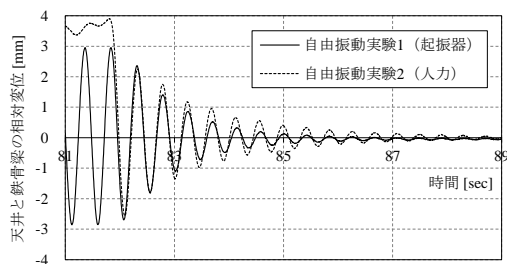


図 C. 1.5.15 実験 1 と実験 2 の自由振動波形

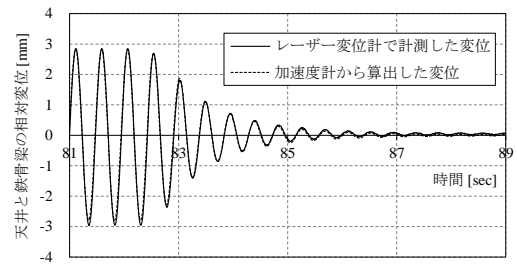
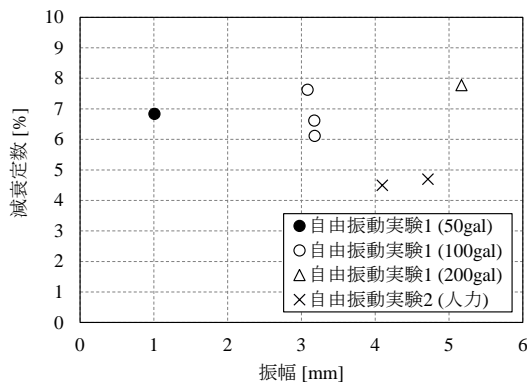
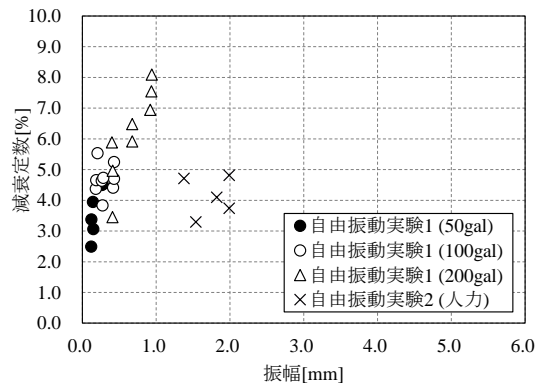


図 C. 1.5.16 加速度計から算出した変位
と変位計の値の比較



(a) X 方向



(b) Y 方向

図 C. 1.5.17 減衰定数と振幅の関係

C.1.5.7 補強効果の検証

C.1.5.7.1 水平剛性と初期張力の関係

スワイプ実験から推定された固有振動数より単振り子としての天井の水平剛性を算出した。水平剛性と初期張力の関係を図 C. 1.5.18 に示す。X, Y 方向ともにケーブル初期張力の増加に伴って水平剛性が増加する傾向にある。初期張力 500N, 1000N で補強したときの無補強時に対する水平剛性の倍率は、X 方向ではそれぞれ 6.2, 8.7 倍となり、Y 方向ではそれぞれ 2.2, 4.2 倍となる。また、X 方向に関しては、水平剛性は初期張力 300N までは大きく増加し、300N 以降は緩やかな増加を示している。本補強方法は、主にケーブル軸剛性によって抵抗することを意図して計画しており、初期張力 300N における剛性は、天井面の水平 X 方向の剛性が、ちょうどすべてのケーブルの軸剛性によって得られる場合の計算値とほぼ一致している。すなわち、初期張力 300N の段階ではほぼ計画通りの剛性が得られる状態に至っており、それまでは摩擦等の影響でケーブル全長の剛性がフルに活かされる状況に至っていないと考えられる。

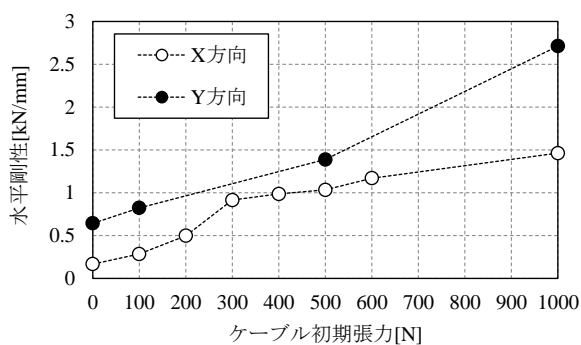


図 C. 1.5.18 水平剛性と初期張力の関係

C.1.5.7.2 最大応答変位と初期張力の関係

スワイプ実験で計測された天井重心位置の最大応答変位と初期張力の関係を図 C. 1.5.19 に示す。X, Y 方向ともにケーブル張力を上げると最大応答変位が減少する傾向にある。X

方向に関して、無補強時と比較して初期張力 100N で 30～40%，200N で 15～20%まで減少した。Y 方向に関しては、100N で 45～70%，500N で 30～45%まで減少した。初期張力 300N 以上では最大応答変位の無補強時に対する比はほとんど変わらない傾向にある。

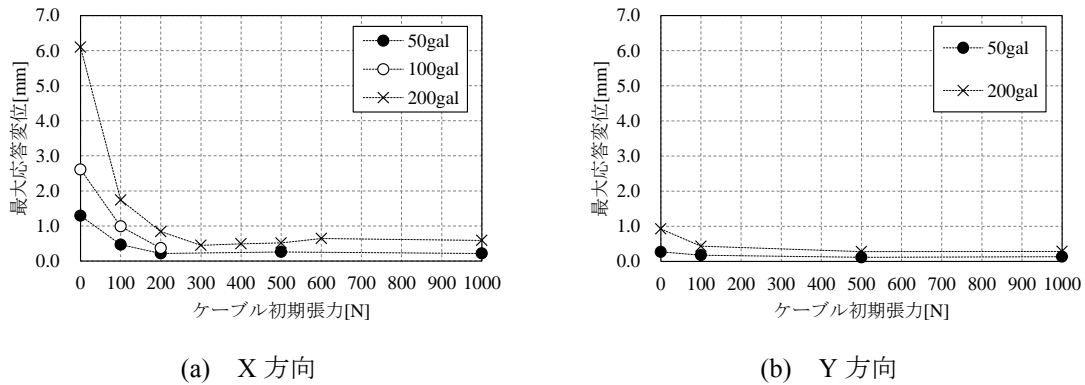


図 C. 1.5.19 最大応答変位と初期張力の関係

C.1.5.7.3 減衰定数と初期張力の関係

減衰定数は、X 方向に関して、初期張力 0N のとき 4.0～8.0%，100N のとき 4.5～9.0%，500N のとき 2.0～5.0%，1000N のとき 3.0～5.0%であった。Y 方向に関しては、0N のとき 2.0～8.0%，500N のとき 3.0～7.0%，1000N のとき 10.0～11.0%であった。同じ初期張力でもばらつきがあり、初期張力と減衰定数の関係性を見出すことはできなかった(図 C. 1.5.20)。

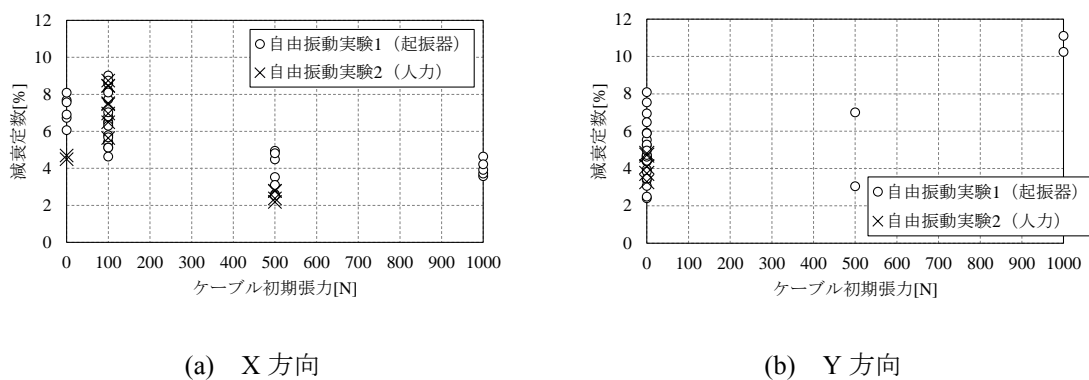


図 C. 1.5.20 減衰定数と初期張力の関係

このばらつきに関しても、ケーブルの振動による金具部分での摩擦が影響しているのではないかと考えられる。

C.1.6 結言

吊り天井の地震時損傷制御のために、ケーブルを用いた新しい制振補強工法を提案し、その一例としてケーブルを放物線状に配置した場合における補強効果を実大実験にて検証した。同時に、補強の際にケーブルの軸方向の動きを拘束しないように天井材に留め付けるための金具を考案し、留め付け耐力を実験により検証した。得られた知見を以下に示す。

- ・留め付け金具のビス 1 本あたりの最大水平耐力は、ケイ酸カルシウム板では 0.38kN、石膏ボードでは 0.13kN であり、それぞれをロックウールとの 2 枚張りにしてもその値はほぼ同様である。
- ・ビス 2 本で石膏ボードに留め付けた場合、金具 1 個あたりの鉛直耐力は 0.2~0.3kN である。
- ・室内側から取り付けを行う本工法の施工要領を把握すると同時に施工の容易さを確認した。また、柱等の周辺支持材との接続方法の詳細設計などを通して、本工法の実施可能性を確認した。
- ・ケーブルの導入初期張力を上げると天井面全体の水平剛性が上昇し、100 N 程度のケーブル初期張力でも天井の最大応答変位は 4~7 割近く低減されることを確認した。
- ・初期張力を 100~1000 N の範囲で変化させると、天井面の水平剛性は、300N までは大きく増加し、300N でケーブル全体にほぼ初期張力が行き渡り、軸剛性が有効となる。300 N 以降も初期張力増加の影響は観察されるが緩やかな増加となることが分かった。
- ・減衰に関しては、2~10%の範囲で大きくばらつきがあり、初期張力との関係性についても同定することは難しい。
- ・静的載荷、スweepや振動実験を計 300 回以上行ったが、金具部分に緩みや脱落などは発生しなかった。

謝辭

本論文は、著者が東京大学大学院に在籍した5年間の研究成果を纏めたものである。

東京大学工学系研究科の川口健一教授には、著者が東京大学大学院に入学した修士課程から今日に至るまで、研究はもとよりあらゆる面で終始懇切丁寧な御指導を賜った。その言動から研究者としてのあるべき姿を常日頃学ばせていただいたことには筆舌にし難いほど感謝している。また、東京大学 伊山潤准教授、東京工業大学 井上裕嗣教授には本研究について細部にわたり御助言を賜った。

川口研究室の技術専門職員の大矢俊治氏、特任講師の荻芳郎氏、助教の秋田大輔氏（現東京工業大学准教授）、秘書の鶴原康子氏、柿本光代氏、近藤洋子氏には研究に関することから事務手続きに至るまで研究以外の面でも大変お世話になった。川口研究室の卒業生である日本原子力研究開発機構 西田明美氏、芝浦工業大学 小澤雄樹准教授には、多くの御助言を賜った。唯一の同期であった佐藤淳構造設計事務所の井上健一氏とは共にコンペを行う等研究テーマ以外の面でも多くの刺激を受けた。実験の遂行に当たり、東京大学の修士課程の学生である細見亮太氏、野中翔太氏、西崎慶氏、芝浦工業大学の学部生である佐藤大輔氏、森雄矢氏、益田悠司氏、森大氏には多くの協力を得た。

東日本大震災は著者が博士課程に進学する契機となった未曾有の災害である。現地調査では、研究の社会的意義を実感すると同時に未熟ながらも研究者としての自覚が芽生えた。サブテーマであった天井の新しい補強法に関して実大実験を行うに当たっては、仙台市から津波被害を受け利用されていない施設をお借りした。また、天井落下被害は日常的に発生することから東日本大震災時の他にも数多くの施設で調査をさせていただいた。実験場所を御提供下さった仙台市の皆様、調査に御協力下さった各関係の皆様、共同調査者の皆様に改めて感謝申し上げます。

本研究は、上に挙げた方のみならず多くの大学、研究機関等の方々の協力なしには遂行し得なかったものである。ここに記して深甚なる謝意を表する。

最後に、本研究は独立行政法人日本学術振興会より平成26年度科学研究費助成事業の助成を受けて行った。ここに謹んで謝意を表する。

2014年12月1日

本論文の審査に当たって、東京大学 川口健一教授には主査として、東京大学 高田毅士教授、東京大学 伊山潤准教授、東京工業大学 井上裕嗣教授、東京工業大学 元結正次郎教授には副査として、多くの貴重な御助言を賜った。厚く御礼申し上げます。

2015年2月27日

