

高ひずみ速度における純氷の変形・破壊特性

防衛大学校理工学研究科後期課程

装備・基盤工学系専攻 装備生産工学教育研究分野

中尾 友紀

令和4年12月

目 次

第1章 序 論	1-29
1. 1 背 景	1
1. 2 氷の変形・破壊特性に関する先行研究	4
1. 2. 1 氷の種類と結晶構造	4
1. 2. 2 転位による氷の塑性変形	5
1. 2. 3 氷のクリープ変形	9
1. 2. 4 亀裂生成メカニズム	12
1. 2. 5 脆性圧縮破壊	14
1. 2. 6 圧縮応力のひずみ速度依存性	16
1. 2. 7 SHB 法による氷の圧縮応力測定	19
1. 3 インデンテーション試験と氷の変形・破壊	23
1. 3. 1 インデンテーション試験の概要	24
1. 3. 2 氷のインデンテーション試験に関する先行研究	25
1. 4 研究目的および論文構成	28
第2章 単軸圧縮試験におけるひずみ速度の影響	30-57
2. 1 緒 言	30
2. 2 単軸圧縮試験方法	31
2. 2. 1 試験片	31
2. 2. 2 準静的および動的試験	32
2. 2. 3 衝撃試験	35
2. 3 結果および考察	39
2. 3. 1 準静的および動的試験	39
2. 3. 2 衝撃試験	41
2. 3. 2. 1 応力-時間関係と変形・破壊の観察	41
2. 3. 2. 2 応力-ひずみ関係	46
2. 3. 2. 3 最大応力に及ぼす接触状態の影響	49
2. 3. 3 圧縮強度の定義	51
2. 3. 4 圧縮強度のひずみ速度依存性に関する考察	54
2. 4 結 言	57

第3章 インデンテーション試験における圧子形状とひずみ速度の影響	58-92
3. 1 緒言	58
3. 2 インデンテーション試験方法	58
3. 2. 1 試験片	58
3. 2. 2 準静的および動的試験	58
3. 2. 3 衝撃試験	60
3. 3 試験結果	63
3. 3. 1 球圧子	63
3. 3. 2 円錐圧子	67
3. 4 考察	73
3. 4. 1 インデンテーション試験におけるひずみ速度の考え方	73
3. 4. 2 破壊荷重のひずみ速度依存性	76
3. 4. 2. 1 球圧子	76
3. 4. 2. 2 円錐圧子	80
3. 4. 3 変形・破壊挙動	83
3. 4. 3. 1 変位量および接触半径	83
3. 4. 3. 2 亀裂進展挙動	85
3. 4. 3. 3 脆性破壊メカニズム	88
3. 4. 4 変形・破壊エネルギー	90
3. 5 結言	92
第4章 結論	93-95
付録 A	96-98
付録 B	99-101
謝辞	102
参考文献	103-111
業績	112-114

第1章 序 論

1.1 背 景

氷は、理工学の幅広い分野で研究対象とされてきた。理学分野では、惑星科学において、宇宙空間の低温領域や地球高層大気に存在する氷微粒子に着目した研究^{1),2)}や氷の高速衝突実験^{3),4)}が行われ、惑星や衛星の起源の解明に重要な役割を果たしている。また、地球上には水とともに氷は広く存在する物質であり、氷が主役となる自然現象を解明するため、氷の結晶成長^{5),6)}や高圧下での氷の表面融解現象^{7),8)}などの研究が行われている。さらに、氷河や氷床の変動に関する研究^{9),10)}は、気候変動の解明に役立っている。

一方、工学分野では、氷による災害からの被害低減や氷をいかにうまく利用するかという観点から、氷の変形・破壊に関連した研究が行われている。以下に例を示す。

① 雹の衝突被害

雹は、発達した積乱雲から降る直径 5 mm 以上の氷の粒である。雲の中で氷の粒が上昇と下降を繰り返すことで成長し、ある程度の大きさになり上昇気流で支えられない重さになると氷の粒のまま地表に落下する。直径 50 mm の大きな雹が落下した場合、終端速度は約 30 m/s (120 km/h) に達する。降雹により農作物に深刻な被害を与えるほか、自動車や家屋が破損する等の被害(図 1-1)¹¹⁾をもたらす。また、降雹による人的被害として、打撲や割れた窓ガラス等により怪我をする恐れがあり、非常に危険である。日本では、北関東で雹の被害が最も多く発生すると言われている。2000 年 5 月に茨城県や千葉県で発生した雹は、農作物被害額 60 億円、負傷者 160 人、窓ガラス破損などを被った建物約 4 万 5 千棟、自動車の損傷約 3 万 3 千台の大きな被害をもたらした¹²⁾。また、2022 年 6 月の降雹では、群馬県、埼玉県および千葉県での農作物およびビニールハウスなどの農業生産施設の合計被害額は 56 億円に上るほか、人的被害や建物、自動車損傷の被害も多数報告されている¹³⁾⁻¹⁵⁾。農作物への雹害対策では、防雹網で覆うという方法があるが、自動車や建築物などへの対策方法の確立は急務である。



図 1-1 降雹による自動車のへこみ¹⁴⁾

② 航空機からの氷塊の落下

航空機には、機内で使用する飲料水などの水を空中で大気中に放出する仕組みが備えられている。しかし、機外排出管の凍結防止用ヒーターの故障や注水・排水パイプの水切りが不十分な場合に機体表面で氷が凍結し、機体に氷塊が付着する。また、大気中の水分が機体表面で凝縮・凍結した場合や離陸時に地上の雪氷を巻き上げることで氷塊が付着する(図 1-2)¹⁶⁾。このような氷塊は、航空機が地表近くに降下した際、外気温の上昇による融解や機体の振動等により地上に落下する場合がある。2017 年 1 月に実施された調査では、成田空港に到着した航空機の 2.14%に氷塊の付着が確認されている。さらに、成田空港周辺においては、2008～2019 年度で 5 件の氷塊の落下事故が発生しており、民家の屋根瓦が損壊する等の被害が報告されている¹⁶⁾。羽田空港においても、国際線増便に伴い、都心上空を飛行する新飛行経路の運用が開始されたことから、氷塊の落下による事故の発生が懸念されている。

(a)



(b)

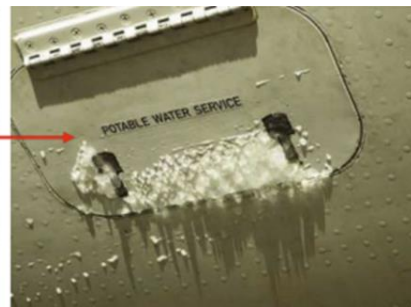


図 1-2 航空機からの氷塊の落下

(a) 機体への着氷、(b) 地上に落下した氷塊¹⁶⁾

③海氷による災害および砕氷船

世界中の海氷の多くは、北極海と南極周縁の海域で形成される。日本では、北極域でできた海氷の一部が南下し、毎年オホーツク海全体の約 8 割が海氷に覆われる (図 1-3 (a))。そこで、気象庁や海上保安庁が海氷情報を提供しているが、予想外に海氷が船舶と衝突することにより、船体が損傷、沈没するなどの事故が発生する。また、船舶が閉塞されることにより海氷域から脱出不能となる事態を引き起こす (図 1-3 (b))¹⁷⁾。さらに、防波堤などの港湾施設の破損や出入港の封鎖のほか漁業被害などが発生している¹⁸⁾。

一方、近年の地球温暖化によって北極海の海氷面積は減少傾向にあり、北極海航路を利用した新しい輸送ルートが注目されている¹⁹⁾。北極海航路は、スエズ運河航路と比較し、航行距離を約 6 割に短縮でき、海賊リスクも少ない。北極海航路の航行においては、各条件に応じ、砕氷船の支援等が義務付けられているほか、通常の船舶の耐氷能力も重要となる。また、日本国内では、北極海の観測・研究のための北極域研究船の建造計画が進められており、氷海域を安全に航行できる砕氷船の技術の高度化や船舶の耐氷能力への関心が高まっている。

(a)



(b)



図 1-3 海氷による災害

(a) オホーツク海の流氷、(b) 南極海で立ち往生する船¹⁷⁾

以上のように、雹や氷塊の衝突被害対策や船舶の事故、砕氷能力の向上など工学的な問題の解決が求められている。また、近年盛んに行われている北極圏や寒冷地での資源開発においても、船や海洋構造物と氷の力学的相互作用の評価は不可欠である。さらに、南極などでは氷河や海氷上を輸送路として利用するほか、航空機が離発着する滑走路としても活用している (図 1-4)²⁰⁾。こうした背景から、氷の変形・破壊特性を解明することが重要となる。また、実際の氷との衝突現象を考える場合には、準静的な評価だけでなく、高速変形・破

壊現象を含めた幅広いひずみ速度での機械的特性を評価する必要がある。

そこで、次節で氷の基本特性および変形・破壊特性に関する先行研究を述べ、重要となる課題をまとめる。



図 1-4 南極に着陸する米空軍の C-17 貨物機²⁰⁾

1.2 氷の変形・破壊特性に関する先行研究

1.2.1 氷の種類と結晶構造

氷は、温度や圧力によって異なる結晶構造を有する数多くの多形が存在する。図 1-5 (a) に水の状態図²¹⁾を示す。実線は安定相の実測された境界、破線は推定された境界、点線は推定された準安定相の境界である。0.2 GPa 以下の低圧で安定な相は氷 I と呼ばれ、氷 I には六方晶系の氷 I_h と立方晶系の氷 I_c が存在する。図 1-5 (b) に氷 I_h の結晶構造²²⁾を示す。一般的に我々が目にする通常の氷は氷 I_h であり、氷 I_c は -90°C 程度以下の低温で水蒸気を凝縮させることやガスハイドレートを分解することなどで形成される準安定相である²³⁾。一方、低温高圧下では、いくつもの多形が出現し、2022 年現在までに少なくとも 20 種類の結晶相および非晶質（アモルファス）相の存在が報告されている²⁴⁾。以下、特に断らない限り氷 I_h を単に氷と呼称する。

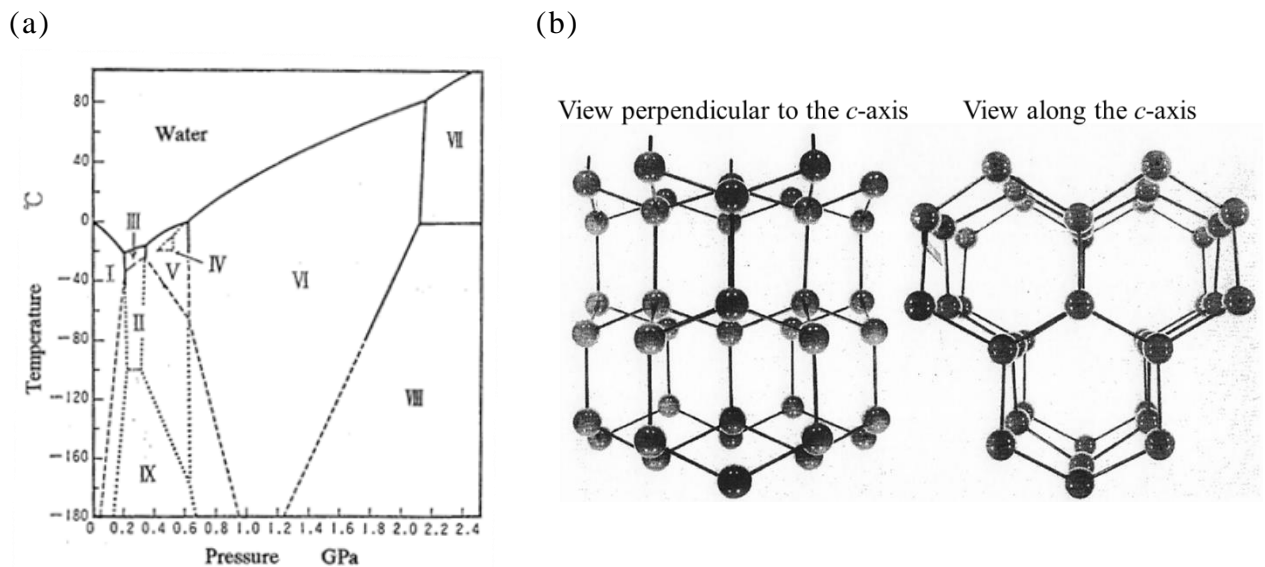


図 1-5 (a) 水の状態図²¹⁾, (b) 氷 I_h の結晶構造 (酸素原子の配置)²²⁾

1.2.2 転位による氷の塑性変形

氷の塑性変形に関する研究の歴史は長く、1891年の McConnel²⁵⁾の研究によって最初に実験で示された。McConnel は、棒状の単結晶氷の曲げ試験を行い、底面 (c 軸に垂直な面) ですべりが起きていることを発見した。その後、1950年代に多くの研究者によって単結晶氷の変形実験が行われ、氷の単結晶には底面ですべりやすく、それ以外の結晶面ですべりにくいという異方性があることが見出された²⁶⁾⁻²⁸⁾。このとき、Nakaya ら²⁸⁾は、曲げ変形時に c 軸に垂直な基底面に沿って多数の平行なすべり線が現れる様子をシュリーレン法によって観察している (図 1-6)。この塑性変形のメカニズムを解明するために様々な研究が行われ、導入されたのが金属材料で発展した転位による変形の考え方である。

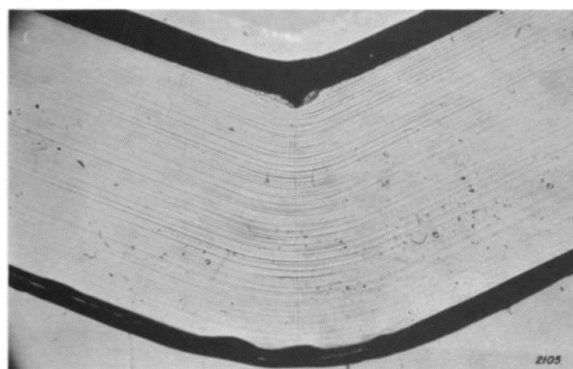


図 1-6 棒状の単結晶氷の曲げ試験によって得られたすべり線²⁸⁾

転位の概念は、1934年に Taylor²⁹⁾, Orowan³⁰⁾および Polanyi³¹⁾によってそれぞれ独立に論文が発表されたのが始まりであり、現在では金属材料の変形を理解する上で必須である。転位とは、結晶内に存在する線欠陥であり、その移動が結晶内のすべり変形をもたらす。氷においても金属と同様に転位による塑性変形が多く、研究者によって報告された。しかし、金属と氷は、転位のすべり運動によって変形するという点では同じであるが、転位のすべり運動を誘起させるために必要な応力が異なる。転位を移動させるのに必要なせん断応力をパイエルス応力と呼び、金属のパイエルス応力は、結晶の破壊応力よりもはるかに小さいため、小さな力でも容易に変形させることができる。一方、氷はパイエルス応力が大きいいため、金属のように小さな力では転位を動かさず、変形させることができない。しかし、後述するように、氷の温度は融点に近いため、転位は熱活性化（原子の熱振動の助け）によってパイエルス・ポテンシャルを乗り越えることができる。これは、キンク対が形成され³²⁾、そのキンク対が容易に移動できるためである。この際の転位の運動は比較的ゆっくりであるため、氷は負荷を与え続けることで徐々に塑性変形させることができる。

図 1-7 (a) に氷 I_h の単位胞³³⁾を示す。白丸は酸素原子の位置、太線は水素結合であり、水素原子は太線上に 1 個存在する。氷結晶中には、基本格子ベクトル \mathbf{a} , \mathbf{c} およびこれらの和である $\mathbf{a} + \mathbf{c}$ をバーガースベクトルとする 3 種類の完全転位が確認されている³⁴⁾。一方、最小の並進ベクトルよりもさらに小さいバーガースベクトルを有する転位もあり、これは部分転位と呼ばれる。部分転位がすべり運動すると、すべり面を境界として原子の積み重なりの不整である積層欠陥が生じる³⁵⁾。例えば、図 1-7 において氷 I_h は layer A-a と layer B-b の繰り返し構造により六方晶系を形成しているが、E の水分子を \mathbf{p}_1 だけ平行移動させると部分的に立方晶の氷 I_c の構造 (layer A-a, B-b, C-c の繰り返し構造) が現れる。図 1-8 に氷 I_h を a 軸方向から見た際の部分転位と積層欠陥³⁶⁾を示す。白丸は通常の六方晶の構造をとる酸素原子、黒丸は立方晶の構造になっている酸素原子であり、(a) ~ (c) はそれぞれ、図 1-7 の $\mathbf{p}_1 + \mathbf{c}/2$, \mathbf{p}_1 および $\mathbf{c}/2$ をバーガースベクトルとする部分転位を基底面上に平行に移動した後に形成されたものである。これら基底面上の積層欠陥エネルギー（欠陥単位面積あたりのエネルギー増加）は非常に小さい³⁶⁾ため、基底面上に存在する完全転位は 2 本の部分転位に分解する（拡張転位）ことで安定する。一方、非基底面上の積層欠陥は四面体結合を構成できないため、そのエネルギーは基底面上よりはるかに大きく、転位の拡張はほとんど起こらないと考えられている³⁴⁾。また、転位の拡張幅は、部分転位間の反発力と積層欠陥の引力が等しくなるところで決まり、積層欠陥エネルギーに逆比例する³⁵⁾。そのため、氷結晶中での部分転

位は基底面上に大きく伸びたりボン状の構造をとる．拡張転位が基底面以外の結晶面を運動するには，転位の拡張を閉じるための相当大的な応力を要するため，底面上の転位は非底面上への交差すべりが極めて困難となる³⁴⁾．よって，氷中のほとんどすべての転位の運動は，底面上に制限されることになる．

底面すべりでの応力—ひずみ関係は，Higashi ら³⁷⁾による単結晶氷を用いた引張試験によって報告されている．図 1-9 (a) は，一定温度でひずみ速度を変化させた場合の応力—ひずみ曲線，図 1-9 (b) は，一定ひずみ速度下で温度を変化させた場合の応力—ひずみ曲線である．引張軸は底面に対し 45°方向であり，結晶底面には最大ずれ応力が作用している．いずれのひずみ速度・温度でも当初，変形は弾性的であり，応力はひずみの増加とともに増加する．しかし，降伏点に達すると塑性変形が始まり，応力は急激に減少する．これらの結果から，転位運動に起因した塑性変形にはひずみ速度および温度依存性が存在することが確認された．

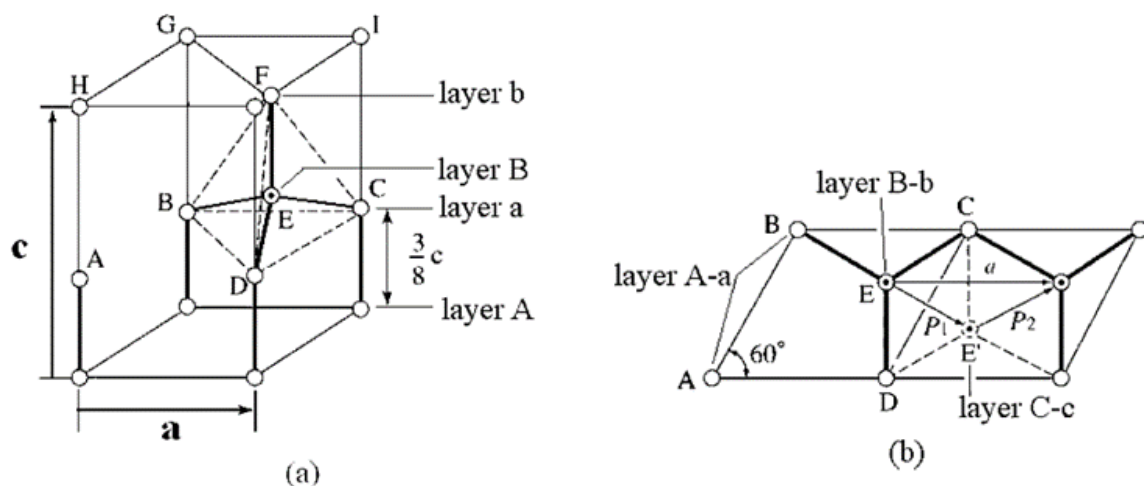


図 1-7 氷 I_h の結晶構造と積層欠陥³³⁾

(a) 氷 I_h の単位胞，(b) 底面 (ABCD) への投影図

白丸：酸素原子の位置，水素原子：太線上に1個あり水素結合を形成

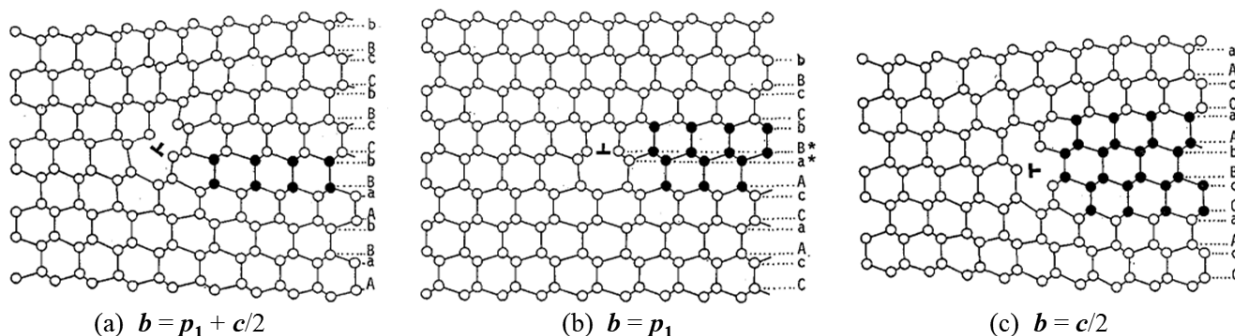


図 1-8 部分転位と積層欠陥³⁶⁾

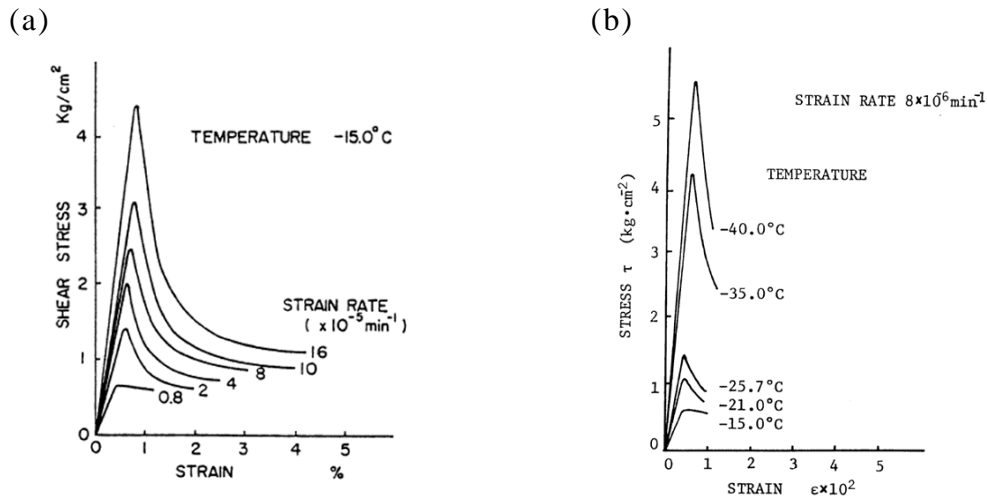


図 1-9 応力—ひずみ曲線³⁷⁾

- (a) 一定温度 (-15°C) でひずみ速度を変化させた場合,
 (b) 一定ひずみ速度 ($8 \times 10^{-6} \text{ min}^{-1}$) 下で温度を変化させた場合

他方, X線トポグラフィによる観察において, 氷は底面すべりだけではなく, 図 1-10 に示すようなプリズム面などでの非底面すべりも生起していることが明らかになっている^{36),38)-41)}. また, 観察結果から, 同じ応力下では, プリズム面での転位の速度は底面での転位の速度の約 10 倍であることが報告されている³⁶⁾. しかし, 底面以外には短い転位セグメントしか存在しないために転位密度は非常に小さい^{36),42)}. また, 非底面すべりは局所的な変形をもたらすものの, 試料全体の変形には大きく寄与しない³³⁾. そのため, 基底面すべりの降伏応力³⁷⁾は非基底面すべりの降伏応力³⁸⁾よりも 1 桁小さく, 氷の塑性変形は, 巨視的には底面すべりが支配的となる.

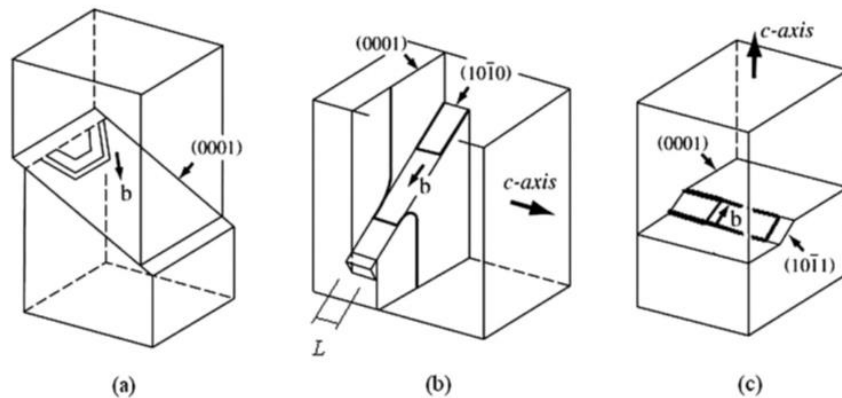


図 1-10 氷における変形モード³³⁾

- (a) 底面すべり (上下方向に引張応力), (b) プリズム面すべり (上下方向に圧縮応力), (c) ピラミッド面すべり (上下方向に引張応力または圧縮応力)

1.2.3 氷のクリープ変形

図 1-11 に様々な物質の温度と融解温度に対する割合⁴³⁾を示す。横軸はそれぞれの物質の融解温度に対する割合であり、100%がその物質の融点である。融点の80%に達する温度は、氷では -55°C であるのに対し、鉄では 1174°C 、アルミニウムでは 473°C であることがわかる。地球上に存在する海氷などの温度は、低温でも約 -30°C 程度である。氷の場合、このような温度範囲は非常に融点に近い領域であることから、高温材料とみなすことができる。よって、氷は容易にクリープ変形する材料と言える。クリープ材料の変形特性には温度依存性とひずみ速度依存性がある。

1978年に Shoji と Higashi⁴⁴⁾によって報告された粒径 2 mm の多結晶氷の変形機構領域図を図 1-12 示す。前項で述べた転位のすべりによる塑性変形は、図の DGC (Dislocation glide with cracking : 亀裂を伴う転位すべり) 以上のせん断応力の範囲に該当し、かなり低いひずみ速度でも亀裂は発生することがわかる。しかし、後述するように、この領域での亀裂は安定しており、破壊には寄与しない。一方、低ひずみ速度では、ほとんどクリープによって変形する。

応力が非常に小さい場合、氷は他の物質と同様に拡散クリープによって変形する。拡散クリープには、原子が格子内を流れる格子拡散クリープと粒界を流れる粒界拡散クリープがある。しかし、前述のように地球上の氷は、 $0\sim-30^{\circ}\text{C}$ 程度までの温度範囲であるため、粒界拡散クリープは起こらないと考えてよい。格子拡散クリープでは、結晶粒に引張応力を加えた場合に、応力軸に平行な粒界は空孔を吸収し(原子を放出)、垂直な粒界は空孔を放出(原子を吸収)することにより結晶粒は細長くなる⁴⁵⁾。

一方、融点の約 0.5 倍以上の温度において、拡散クリープが優勢な応力よりもやや高い応力下では転位クリープが支配的となる。転位クリープは、転位のバーガースベクトルと垂直な方向への移動である上昇運動に起因する。転位の上昇運動は、空孔を吸収するか格子間原子を放出することによって生じる。空孔供給の経路には、格子内(格子拡散)と原子が乱れた転位芯(転位芯拡散)の2つがある⁴⁵⁾。

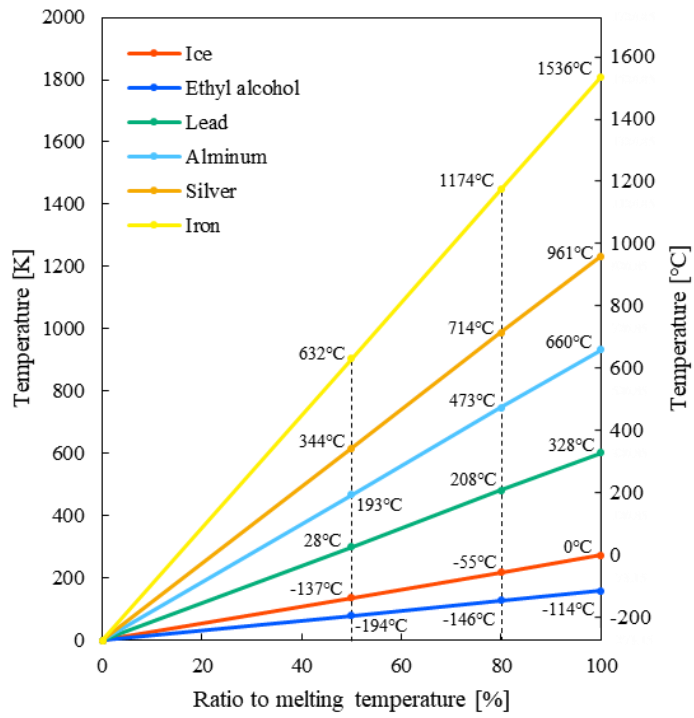


図 1-11 様々な物質の温度と融解温度に対する割合 43)

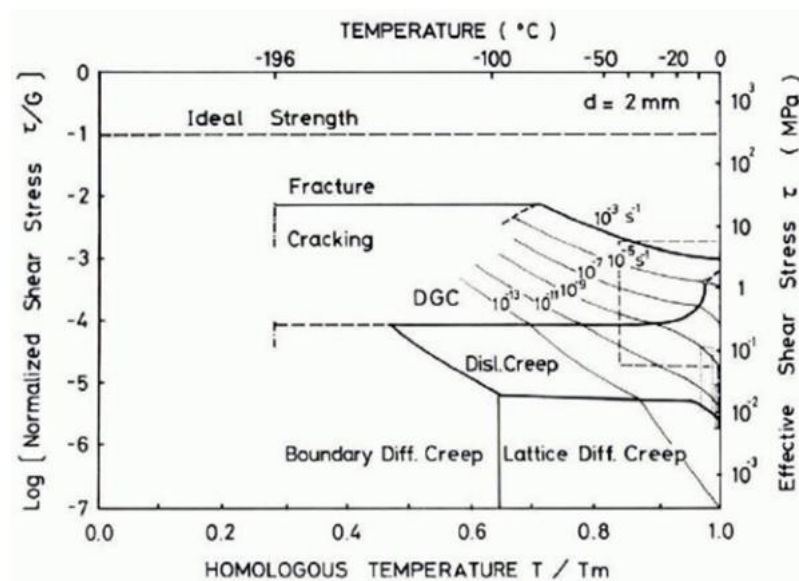


図 1-12 氷の変形機構領域図 44)

多結晶氷のクリープについては Barnes⁴⁶⁾によって次のように報告されている。典型的なクリープ曲線は、図 1-13 で表され、中程度の応力下では Curve II のような曲線となる。負荷がかかると、まず、OA 間で瞬間ひずみが発生し、AB 間では、クリープ速度が徐々に低下する遷移クリープ（1 次クリープ）となる。BC 間は、定常クリープ（2 次クリープ）と呼ばれ、クリープ速度は一定であり、ほぼ定常状態となる。C を超えると、クリープ速度は再び増加し、2 次クリープ時よりも大きな定常状態のクリープ速度に到達する（3 次クリープ）。3 次クリープは、金属の圧縮試験ではみられない氷特有の現象であり、応力下で再結晶する動的再結晶に起因し、高温状態の氷では拡散によって容易に発生することが知られている⁴⁷⁾。一方、高応力下（Curve I）では、定常クリープはみられず、低応力下（Curve III）では、遷移クリープが支配的であり、定常クリープは数か月経っても生じない。

氷の定常クリープひずみ速度を最初に定義したのは、Glen⁴⁸⁾であり、次式のように表した。

$$\dot{\epsilon}_c = k\sigma^n \quad (1-1)$$

ここで、 $\dot{\epsilon}_c$ は定常クリープひずみ速度、 σ は応力、 k 、 n は材料定数である。これは、Glen の法則（氷の流動則）と呼ばれ、特に氷河や大陸氷床の流動の問題において、現在まで広く利用されている。その後、Glen⁴⁹⁾は、温度範囲を広げた実験から氷の定常クリープひずみ速度には温度依存性があることを確認し、反応速度が温度に依存することを表す Arrhenius の式を応用した次の式を提案した。

$$\dot{\epsilon}_c = A\sigma^n \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right) \quad (1-2)$$

ここで、 Q は活性化エネルギー、 R は気体定数、 T は絶対温度、 A は材料定数である。その後もクリープひずみ速度と応力の関係として式(1-2)に類似した式がいくつか提案されている^{37),50)}。なお、1 次クリープが結晶界面のすべりに関連し、結晶粒径が 1 次クリープ速度に影響を与えるのに対し、2 次クリープは主に転位に関連するとされ、定常クリープ速度は初期の結晶粒径に依存しないことが報告されている⁵¹⁾⁻⁵⁴⁾。

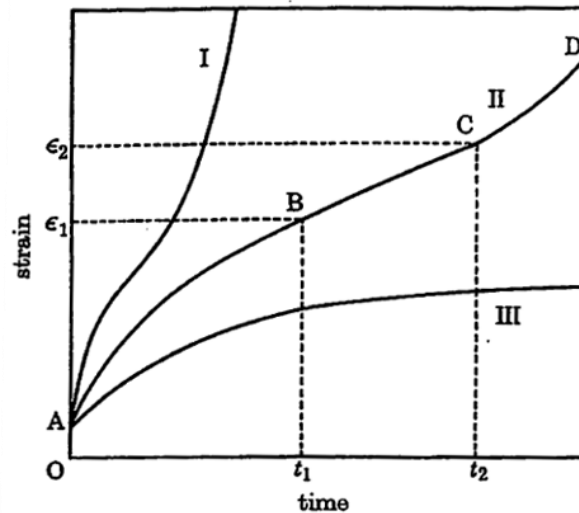


図 1-13 一定温度において様々な応力を与えた際の氷のクリープ曲線の模式図⁴⁶⁾

1.2.4 亀裂生成メカニズム

図 1-12 に示した氷の変形機構領域図の通り，DGC では亀裂生成が生じている．亀裂の生成メカニズムは Frost⁵⁵⁾によってまとめられている．内部に粗大な欠陥や介在物を含まない理想的な氷においては，亀裂の核生成は転位の集積（パイルアップ）または粒界すべりによる応力集中の 2 つのメカニズムによって説明される（図 1-14）．

転位の集積による応力集中は，隣接結晶粒と結晶方位が異なるために，結晶粒界に転位が堆積することで生じ，亀裂は応力集中点から粒内に向かって生成する．転位の集積や粒界での転位の生成については，X 線トポグラフィを用いた Liu ら^{56),57)}の研究により観察されている．また，Kalifa ら⁵⁸⁾によると，多結晶体では亀裂は最大主応力軸に平行になる傾向がある．

一方，多結晶体における粒界すべりと亀裂の関連性については古くから認識されており，1948 年に Zener^{59),60)}が繰り返し荷重中の粒界すべりが内部摩擦の一因となること，また，すべり界面の端に応力集中が生じると亀裂の核になることを説明した．その後に Cole⁶¹⁾によって行われた繰り返し荷重実験により，内部摩擦が粒界すべりに直接起因していることが実証された．また，Picu と Gupta⁶²⁾は， -10°C の環境下でひずみ速度 10^{-3} s^{-1} と 10^{-2} s^{-1} において柱状の淡水氷を用いた一軸および二軸圧縮試験を実施し，粒界で亀裂の核が生成されることを確認した．粒界すべりによる亀裂の核生成過程⁵⁵⁾を図 1-15 に示す．応力

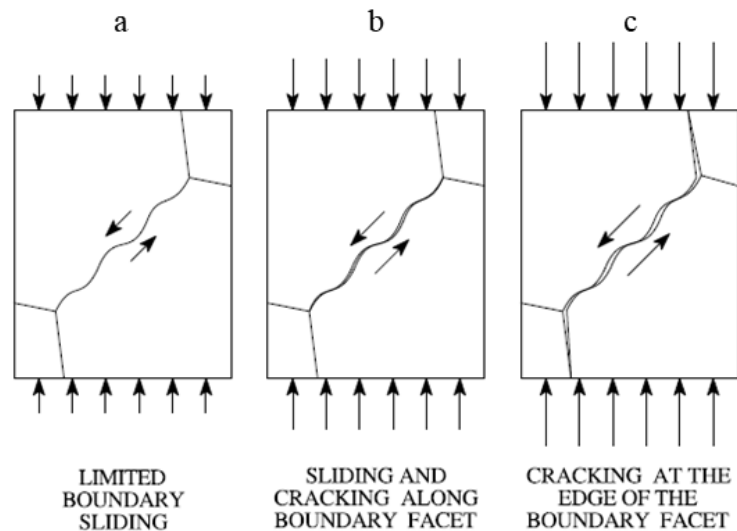


図 1-15 粒界すべりによる亀裂の核生成過程⁵⁵⁾

1.2.5 脆性圧縮破壊

ひずみ速度が増加すると、氷は亀裂進展を伴い脆性的に破壊することがわかっている。生成されたウイングクラックによって破壊するメカニズムは Schulson⁶⁵⁾によって報告されている。

ウイングクラックは粒界すべりによって生成される初期亀裂（図 1-15 (b)）の先端付近から発生する亀裂である。ウイングクラックは柱状の氷と粒状の氷の両方にみられる変形特徴であり、初期亀裂の面外拡張と定義される⁶⁶⁾。単軸圧縮においては、ウイングクラックは、負荷荷重とほぼ平行な方向に成長する。このウイングクラックが相互に作用して連結することにより、図 1-16 に示すような軸方向の割れが生じる⁶⁷⁾。一般に、破断面は割れた結晶粒の境界による段差がみられ、不規則である。また、ウイングクラックは、一定の速度で成長するのではなく、極短時間に成長と停止を繰り返すことによって微小振動しながら成長する。これは、初期亀裂のすべり面に沿った摩擦係数がすべり運動中に変動するためである⁶⁸⁾。ウイングクラックが微小振動しながら成長する様子は、PMMA⁶⁹⁾や岩石⁷⁰⁾でも観察されている。

一方、多軸圧縮下では、拘束によってウイングクラックの成長が抑制され、図 1-17 に示すようなせん断断層が形成される⁷¹⁾。Schulson⁶⁵⁾は、そのメカニズムを次のように提唱している。図 1-18 に示すようにせん断断層発生前の材料全体には、初期亀裂、ウイングクラックを有する初期亀裂、楕形亀裂が一様に分布している。楕形亀裂とは、初期亀裂の片側から結晶粒内に発生した 2 次亀裂の集合体である。自由表面（外部表面または穴や空孔等の内部表面）近くの楕形亀裂は、拘束力が弱いために最初に破壊され、細かい粒となる。これが

隣接する亀裂に負荷を与え、断層の核となる部分が形成される。その後、局所的な応力増大により、連続的に楕円形亀裂が生成されることでせん断強度の低下した帯状の損傷域（微小破壊の生じた破壊進行域）となる。損傷域は、断面を横切って急速に伝播し、氷の破片の帯を形成する。最終的に、主応力に対し 30° 傾いたせん断断層が形成され、破壊に至る。この過程は、Renshaw と Schulson⁷²⁾ によってモデル化され、理論的な破壊応力は実験値とよく一致することが確認されている。このような楕円形亀裂は、岩石^{73),74)} においても観察され、脆性圧縮破壊の一般的な特徴であると考えられている。

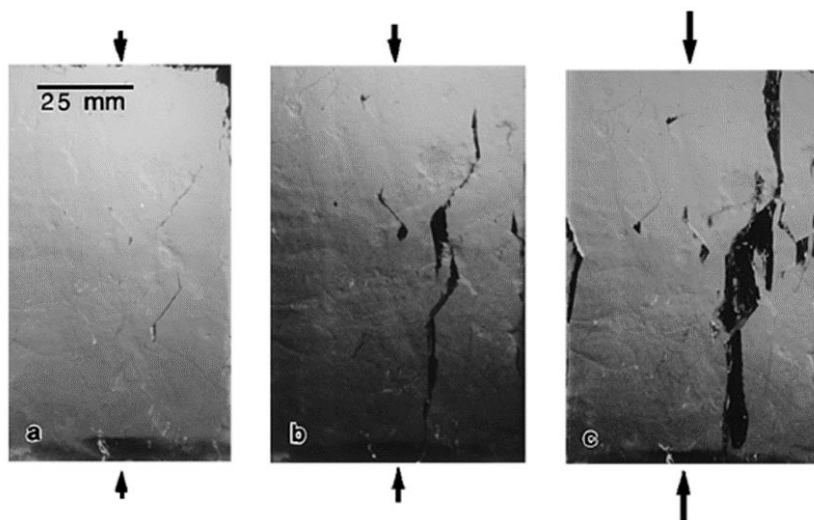


図 1-16 柱状多結晶氷の単軸圧縮により観察されたウイングクラックおよび軸方向の割れ⁶⁷⁾

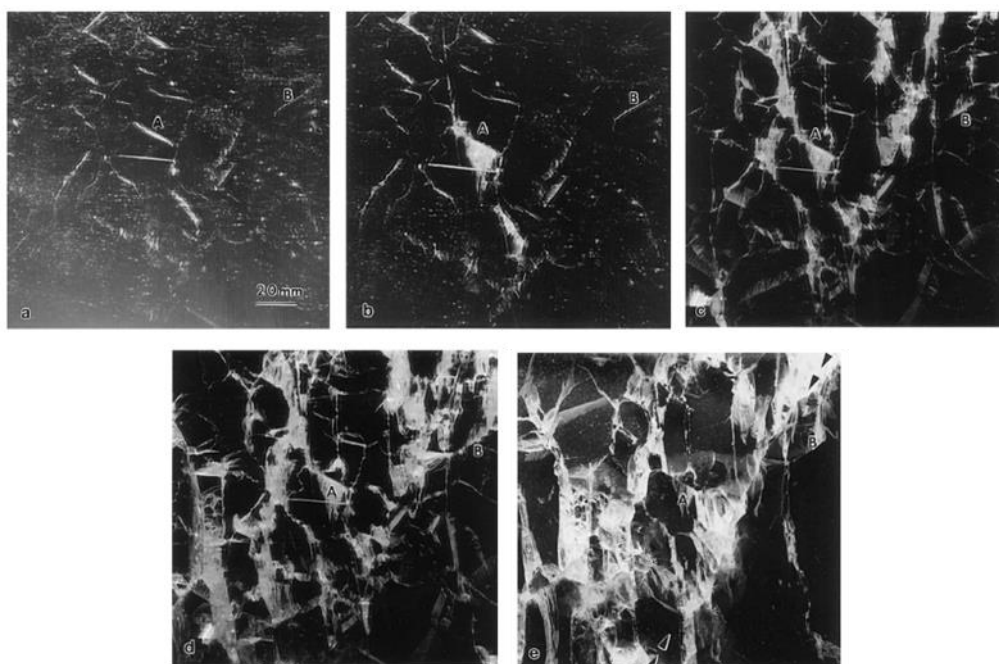


図 1-17 二軸圧縮荷重下での典型的なせん断断層の発達過程⁷¹⁾

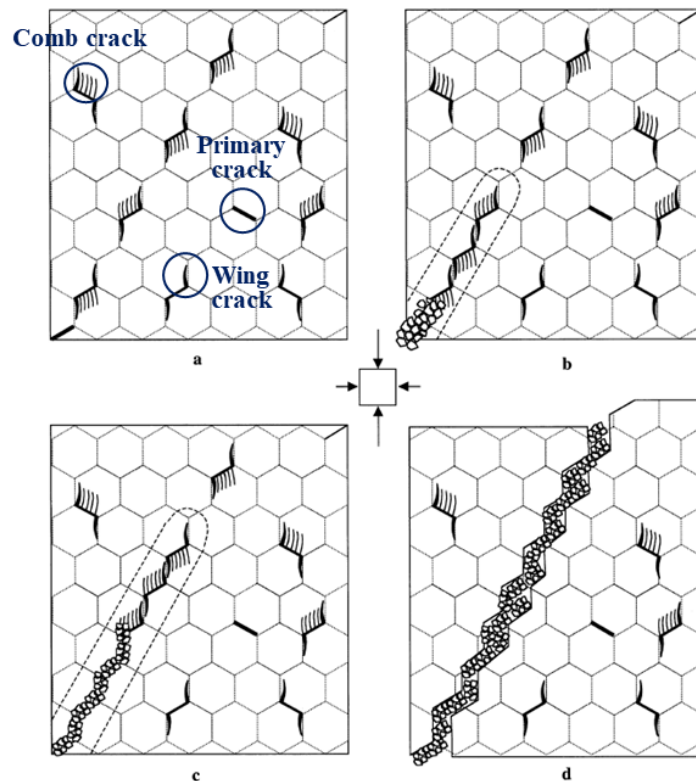


図 1-18 圧縮せん断断層の発生と成長の模式図⁶⁵⁾

1.2.6 圧縮応力のひずみ速度依存性

先行研究により，延性破壊を示すひずみ速度約 10^{-3} s^{-1} まではひずみ速度の増加に伴い最大圧縮応力は増加することが知られている^{75),76)}。これは，ひずみ速度の増加に伴い，塑性変形やクリープ変形に必要な応力が増加するためである。さらにひずみ速度が増加すると，氷は延性破壊から脆性破壊に遷移する。延性と脆性の遷移領域は，図 1-19 に示すように -10°C において，おおよそひずみ速度 $10^{-4} \sim 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ であることが明らかになっている⁷⁷⁾⁻⁷⁹⁾。なお，温度の上昇や粒径の微細化，塩分濃度の増加などの要因によってこの遷移ひずみ速度は上昇することが知られている⁶⁵⁾。例えば，遷移ひずみ速度は -40°C では -10°C よりも約 1 桁低くなる⁸⁰⁾。

延性—脆性遷移は，一般的な金属材料の考え方と異なり，図 1-20 に示すようにマクロ的には応力—ひずみ曲線の形状や材料の挙動・外観によって定義される。すなわち，応力—ひずみ曲線が丸みを帯びたピークもしくはプラトーを示し，透明だった氷の内部に亀裂が発生し乳白色になっても，急激に耐荷重性が失われない場合は，延性があるとみなされる。それに対し，応力が急激に低下して試験片が構造として崩壊する場合は，脆性的であるとみなす。一方，より根本的な定義として，延性—脆性遷移は，亀裂が伝播し始める点を示すとい

う考えがある⁶⁵⁾。すなわち、低ひずみ速度では、クリープおよび動的回復による亀裂先端の応力緩和が生じることで亀裂の進展が抑制され延性挙動になるが、高ひずみ速度ではクリープおよび動的回復が発生しにくくなり、亀裂先端の応力集中によって亀裂が進展し、脆性挙動を示すようになる。

延性—脆性遷移領域以上のひずみ速度になると、圧縮応力のひずみ速度依存性は変化する（図 1-21）。Schulson⁶⁵⁾は、最大圧縮応力は、ひずみ速度 10^{-8} s^{-1} で約 0.5 MPa であるが、ひずみ速度 10^{-3} s^{-1} で約 10 MPa まで急激に増加した後、ひずみ速度 10^{-1} s^{-1} では約 7 MPa に減少することを示した。一方、Cole⁸¹⁾は、ひずみ速度 $10^{-7} \sim 10^{-1} \text{ s}^{-1}$ の範囲の圧縮試験を行い、ひずみ速度 $10^{-2} \sim 10^{-1} \text{ s}^{-1}$ での圧縮応力は、ひずみ速度に依存しないと報告している。また、Jones⁸²⁾は、 -11°C においてひずみ速度 $10^{-1} \sim 10^1 \text{ s}^{-1}$ の圧縮試験を行い、最大圧縮応力がわずかに増加したことを報告している。

高ひずみ速度における研究は比較的少ないものの、近年スプリット・ホプキンソン棒（SHB）法⁸³⁾（詳細は後述）を用いた実験が行われている。Dutta ら^{84),85)}は -10°C と -40°C においてひずみ速度 $10^2 \sim 10^3 \text{ s}^{-1}$ の実験を行い、最大圧縮応力が準静的変形領域からほとんど変化しないことを示した。また、Kim と Keune⁸⁶⁾は 0°C においてひずみ速度 $400 \sim 2600 \text{ s}^{-1}$ の範囲の実験を行い、この速度域では最大圧縮応力はほぼ一定であり、その平均値は 19.7 MPa であると報告している。一方、Shazly ら^{87),88)}は、 -10°C と -30°C の実験においてひずみ速度 $60 \sim 1400 \text{ s}^{-1}$ での氷の最大圧縮応力は正のひずみ速度依存性を示すとともに、温度の低下によって増加することを報告している。さらに、Schulson ら⁸⁹⁾の準静的試験の結果を参照することにより、ひずみ速度 $0.01 \sim 1400 \text{ s}^{-1}$ で最大圧縮応力が増加し続けることを示唆している。最近では、Song ら⁹⁰⁾がひずみ速度 $500 \sim 1200 \text{ s}^{-1}$ での圧縮試験において、最大圧縮応力の増加を報告している。

このように、脆性域では報告例のばらつきが比較的大きいものの、氷の最大圧縮応力のひずみ速度依存性の全般的な傾向としては、ひずみ速度の増加に伴いひずみ速度約 10^{-3} s^{-1} 付近まで増加し、ひずみ速度約 $10^{-3} \sim 10^{-1} \text{ s}^{-1}$ ではやや減少もしくはほぼ一定に推移すると考えられる。高ひずみ速度になると、圧縮応力が再び増加するという報告例が多いものの、どの程度の速度域から増加に転じるかについては統一した見解が得られていない。また、高ひずみ速度において最大圧縮応力が正の速度依存性を示す理由については明らかになっていない。一般に、強度のひずみ速度依存性が詳細に研究されている金属材料やプラスチック材料の場合、流動応力は準静的範囲からひずみ速度の増加に伴い増加し、 $10^1 \sim 10^2 \text{ s}^{-1}$ 以上の高ひずみ速度域で急激に増加する⁹¹⁾⁻⁹⁴⁾。よって、氷は他の材料にはない特殊な材料強度のひずみ速度依存性を示すと言える。

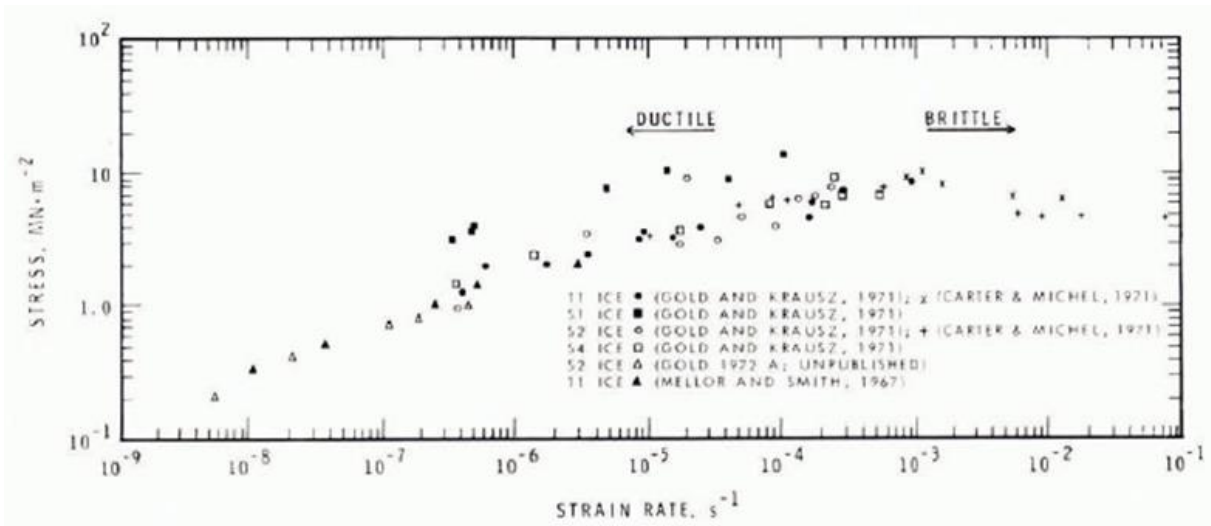


図 1-19 単軸圧縮試験における多結晶氷の圧縮応力のひずみ速度依存性 78)

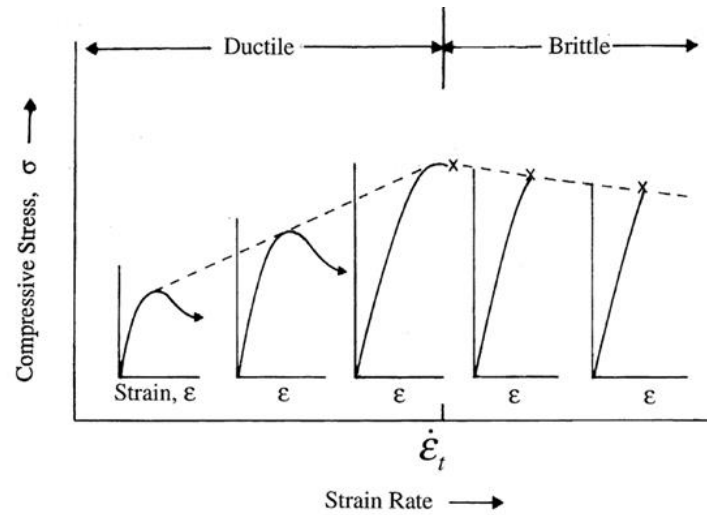


図 1-20 単軸圧縮試験における応力—ひずみ曲線の模式図 65)

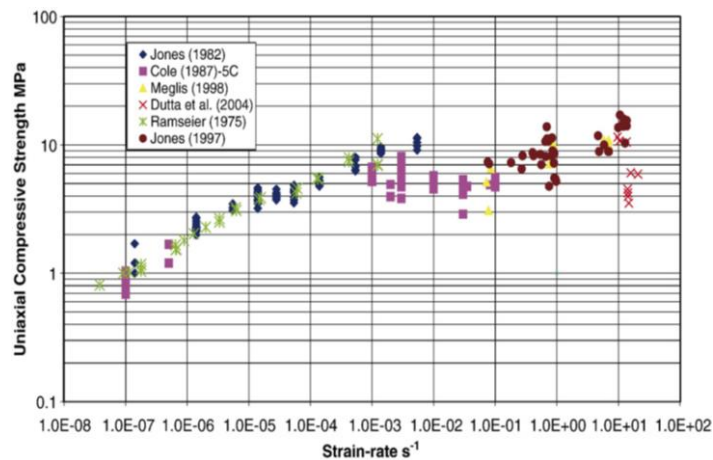


図 1-21 氷の温度 -10°C (Cole (1987) のみ -5°C) の単軸圧縮試験における最大圧縮強度とひずみ速度の関係 82)

1.2.7 SHB 法による氷の圧縮応力測定

ここで、高ひずみ速度で脆性的な破壊挙動を示す氷への SHB 法の適用について検討する。SHB 法は、Hopkinson⁹⁵⁾によって発見された細長い棒で弾性応力波を測定する技術に端を発し、Kolsky⁹⁶⁾によって提案された高ひずみ速度下の材料の応力—ひずみ関係を測定する試験方法である。この試験手法は原理的に様々な材料に対して応用できるため、近年では金属材料^{97),98)}だけでなく、非金属材料^{99),100)}にも適用されている。これらは主に延性材料であり、試験片の両端に作用する応力の平衡を確認することにより一般的な準静的試験で得られる応力—ひずみ関係と比較可能なデータを取得することができる。しかし、脆性材料は、小さなひずみでも破壊するため試験片両端での応力状態が一致しにくく、SHB 法の適用には高い技術を要する。

図 1-22 に SHB 圧縮試験装置の基本的な構成と弾性応力波の伝播の様子を示す。SHB 圧縮試験装置は、打撃棒、入力棒および出力棒の 3 本の長い棒により構成され、入力棒と出力棒の 2 つの棒の間に試験片を固定する。空気圧等により射出された打撃棒が入力棒に衝突することで、入力棒に弾性応力波が伝播する。弾性応力波は入射波として試験片に到達すると、一部は試験片内を透過して出力棒に伝播（透過波）し、残りは試験片の入力棒側の端面で反射して入力棒の反対方向へ伝播（反射波）する。この際、棒内を伝播する弾性応力波を測定し、一次元弾性波伝播理論^{101),102)}を用いることで試験片の両端に作用する応力、ひずみ、ひずみ速度を算出することができる。SHB 法において、入出力棒の材質および断面積が同じ場合、応力—ひずみ関係を算出するためには次の 3 通りの方法がある。

(i) 入射波、反射波、透過波を用いる場合

$$\sigma(t) = \frac{AE}{2A_S} [\varepsilon_I(t) + \varepsilon_R(t) + \varepsilon_T(t)] \quad (1-3)$$

$$\dot{\varepsilon}(t) = \frac{C_0}{L_S} [\varepsilon_I(t) - \varepsilon_R(t) - \varepsilon_T(t)] \quad (1-4)$$

$$\varepsilon(t) = \frac{C_0}{L_S} \int_0^t [\varepsilon_I(t) - \varepsilon_R(t) - \varepsilon_T(t)] dt \quad (1-5)$$

(ii) 入射波，反射波を用いる場合

$$\sigma(t) = \frac{AE}{A_S} [\varepsilon_I(t) + \varepsilon_R(t)] \quad (1-6)$$

$$\dot{\varepsilon}(t) = \frac{2C_0}{L_S} \varepsilon_R(t) \quad (1-7)$$

$$\varepsilon(t) = \frac{2C_0}{L_S} \int_0^t \varepsilon_R(t) dt \quad (1-8)$$

(iii) 入射波，透過波を用いる場合

$$\sigma(t) = \frac{AE}{A_S} \varepsilon_T(t) \quad (1-9)$$

$$\dot{\varepsilon}(t) = \frac{2C_0}{L_S} [\varepsilon_I(t) - \varepsilon_T(t)] \quad (1-10)$$

$$\varepsilon(t) = \frac{2C_0}{L_S} \int_0^t [\varepsilon_I(t) - \varepsilon_T(t)] dt \quad (1-11)$$

ここで、 A_S は試験片の断面積、 L_S は試験片の長さ、 A は入出力棒の断面積、 E は入出力棒の弾性率、 C_0 は入出力棒の弾性応力波速度、 $\varepsilon_I(t)$ 、 $\varepsilon_R(t)$ および $\varepsilon_T(t)$ はそれぞれ入射波、反射波および透過波のひずみ値である。

条件(i)は、入射波、反射波、透過波を用いて一次元弾性波伝播理論に基づき算出した平均公称応力、平均公称ひずみ速度および平均公称ひずみである。ここで、応力平衡（試験片両端での力のつり合い）が成立するためには、次式を満たす必要がある。

$$\varepsilon_I(t) + \varepsilon_R(t) = \varepsilon_T(t) \quad (1-12)$$

応力平衡が成立すれば、式(1-3)～(1-5)は式(1-6)～(1-8)および式(1-9)～(1-11)のように表現することが可能である。SHB法を金属材料等に適用する場合、試験片の応力平衡を確認することで入射波と透過波のみを用いた式(1-9)～(1-11)を使用することが多い。これは、入射波や透過波に比べ、反射波は外乱要素の影響を受けやすいため、反射波を用いると試験片の応力—ひずみ関係がその影響を受けてしまうからである。

ここで、氷の SHB 圧縮試験を実施した先行研究^{84)-88),90),103)-105)}を表 1-1 にまとめた。氷の先行研究の多くは、金属材料とは異なり、式(1-3)～(1-5)を用いて応力-ひずみ関係を算出している。試験片が小さい場合、測定分解能を考慮すると、亀裂の伝播による影響をほとんど受けずに応力平衡は成立すると考えられる。しかし、結晶粒のサイズを考慮すると、氷の単軸圧縮試験では金属材料などと比較して大きな試験片を用いる必要があり、亀裂進展によっては応力平衡が成立しにくい条件となる。よって、氷のように小さなひずみでも亀裂が伝播し破壊する脆性材料に対して、平均公称応力、平均公称ひずみ速度、平均公称ひずみを用いて評価することが正しいのかは判断が難しい。また、試験片両端の応力差が大きいと、平均化することに意味があるのか断言できない。しかし、先行研究では、試験片両端の応力平衡が成立しているかについて言及している研究はあるものの少数であり、ほとんどの研究では明示および図示されていないため、応力平衡が成立しているか、またその成立はどの程度の水準であるかを第三者によって確認することができない。

そこで、SHB 法と合わせて変形状態を可視化するなどの評価方法を考える必要がある。近年、変形状態を定量的に可視化する手法として、デジタル画像相関法 (DIC) を用いた研究が行われている¹⁰⁶⁾。DIC は、試験片にスプレーなどで塗布したランダムパターンを画像処理により追跡することで、変位やひずみを解析する手法である。クリープ変形中の氷に対して DIC を適用した研究¹⁰⁷⁾や太陽光により形成されるスペckルパターンにより瓦礫に覆われた氷河の移動を計測した研究¹⁰⁸⁾があるものの、氷に対してランダムパターンを塗布することは困難なため、DIC を用いた研究例は非常に少ない。その一方、氷は透明な材料であるため、ハイスピードカメラにより変形過程を撮影することで内部の亀裂を観察することが可能である。先行研究では、Shazly ら^{87),88)} や Song ら⁹⁰⁾がハイスピードカメラによる観察を試みている。しかし、これらの研究では、亀裂の発生や伝播を明瞭に観察できておらず、氷の圧縮応力と破壊挙動の関連性については十分な議論がなされていない。

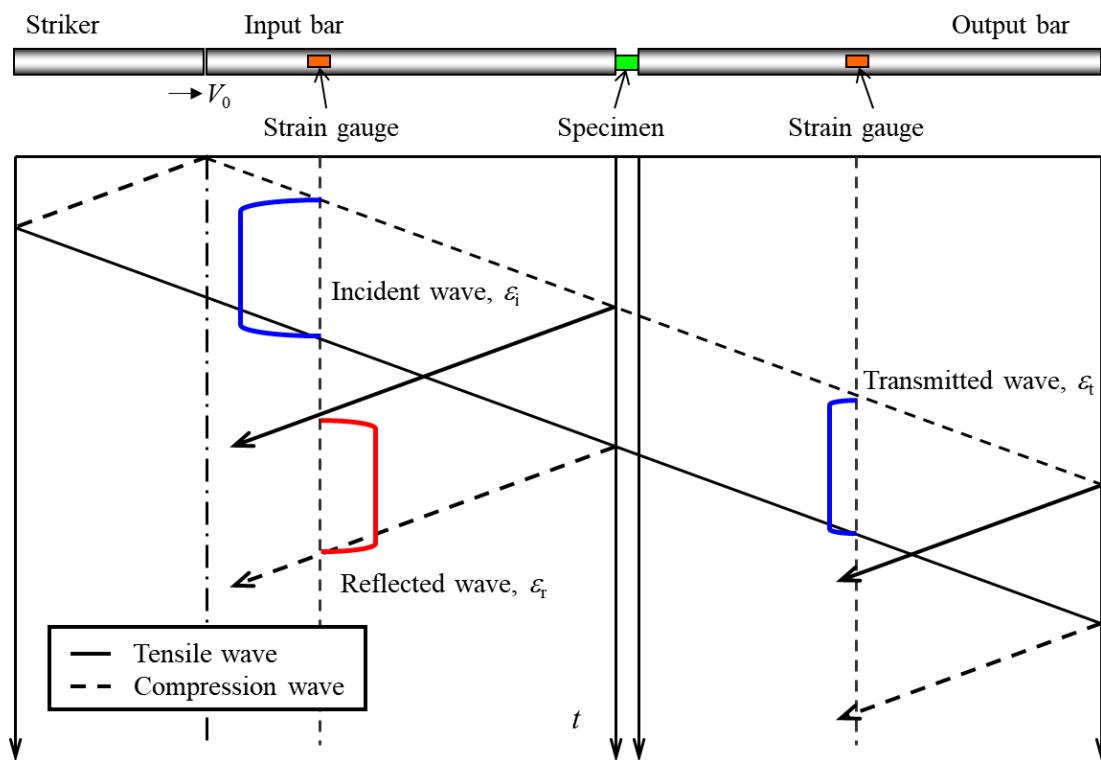


図 1-22 SHB 圧縮試験装置の基本的な構成と弾性応力波の伝播の様子

表 1-1 SHB 圧縮試験の先行研究

Authors	Calculation formula	Reference to stress/force equilibrium	Graphical display of stress/force equilibrium	High-speed camera observation
Dutta et al. ^{84),85)}	(1-3) – (1-5)	×	×	×
Kim and Keune ⁸⁶⁾	(1-3) – (1-5)	×	×	×
Shazly et al. ^{87),88)}	(1-9), (1-7), (1-8)	○	×	△
Wu and Prakash ¹⁰³⁾	(1-9), (1-7), (1-8)	○	×	×
Bragov et al. ¹⁰⁴⁾	No description	×	×	×
Song et al. ⁹⁰⁾	(1-3) – (1-5)	○	×	△
Potter et al. ¹⁰⁵⁾	No description	○	○	×

1.3 インデンテーション試験と氷の変形・破壊

ここで、氷の破壊現象について考える．例として、氷を割る際には、一般的にアイスピックのような鋭い形状のものが使用されるが、経験的に金属製スプーンの裏で叩くことでも簡単に割れることが知られている（図 1-23）．また、砕氷船の砕氷能力は、船首下部の形状に依存すると考えられ、その形状が工夫されている¹⁰⁹⁾．こうしたことから、物体の持つ形状に依存して氷の破壊現象が変化することは経験的に明らかである．しかし、形状の変化に起因した氷の脆性破壊メカニズムについては、研究されていないのが現状である．

一方、工学的な視点で考えると、1.1 節で述べたような問題を解決するためには、物体の形状が氷の変形・破壊特性に及ぼす影響を理解することが不可欠である．なぜなら、構造物との衝突によって氷が破壊する場合、完全に平らな2つの平面同士が作用するとは考え難く、互いの凸面が相互に作用することで局所的な変形が生じ、破壊することになるためである．よって、前節でまとめた単軸および多軸試験を用いた均一変形による材料強度特性の評価のみでは、工学的には応用できない．そこで、本節では物体の形状がもたらす局所的な変形による破壊現象を評価できる試験手法として、インデンテーション試験に着目する．

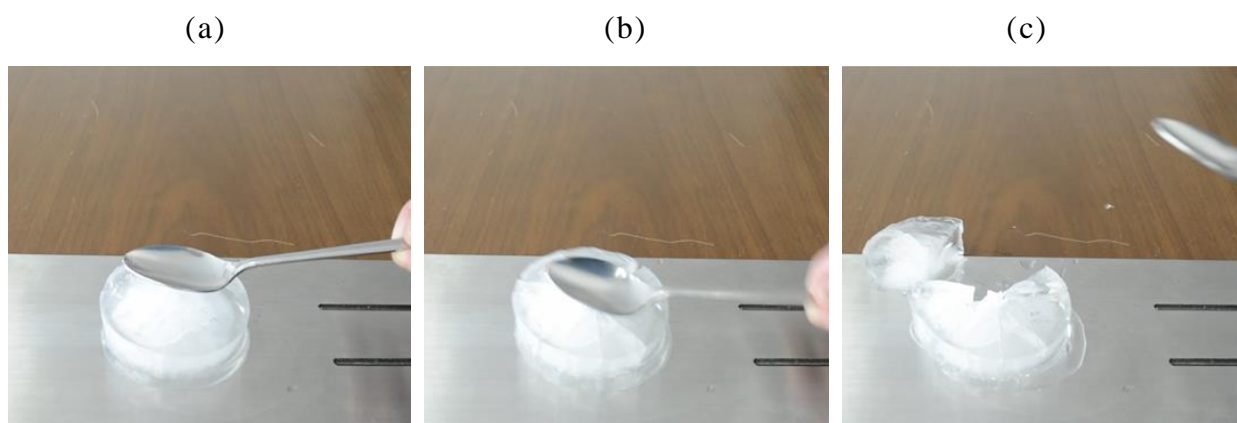


図 1-23 金属製スプーンでの打撃による氷の破壊
(a) 打撃前，(b) 打撃の瞬間，(c) 打撃後

1.3.1 インデンテーション試験の概要

材料強度特性を評価する手法には、引張試験や圧縮試験、曲げ試験などがある。その中で硬さ試験は、簡便かつ迅速に材料特性を得られる評価法である。硬さは、一般に局所的な材料の変形に対する抵抗力で表され、押し込み試験は圧子を材料表面に押し付け、生じたくぼみ（圧痕）の大きさを硬さを評価する¹¹⁰⁾。硬さ試験の代表的なものとして、ブリネル硬さ試験、ロックウェル硬さ試験、ビッカース硬さ試験、ヌープ硬さ試験などがある。これら硬さ試験から発展したのがインデンテーション試験（押し込み試験）である。図 1-24 にインデンテーション試験で得られる代表的な荷重—変位曲線¹¹¹⁾を示す。インデンテーション試験の特徴は、材料の押し込み変形挙動中の荷重と変位の関係を負荷開始から除荷終了まで定量的に測定できることであり、材料の硬さやヤング率の測定が可能である。また、材料の破壊靱性評価にも応用できる¹¹¹⁾。インデンテーション試験は、ナノ・マイクロメートルサイズの微小領域の機械的特性評価に非常に優れている。そのため、金属¹¹²⁾や薄膜材^{113),114)}、バルク材¹¹⁵⁾のほか、電子部品^{116),117)}や溶接・接合部¹¹⁸⁾の機械的特性の評価にも幅広く応用されている。また、荷重—変位関係から得られる変形挙動を直接用いて、金属材料における転位の生成・増殖^{119),120)}、粒界などの格子欠陥に起因する変形挙動^{121),122)}などの研究が行われている。

インデンテーション試験で用いられる圧子には、球、円錐、ビッカース、バーコビッチ圧子などがある（図 1-25）。圧子により材料を押し込むことから、インデンテーション試験では、単軸試験とは異なり材料内部に多軸応力場が形成される¹¹¹⁾。

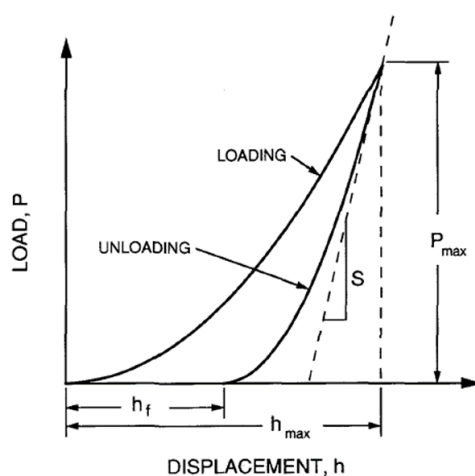


図 1-24 インデンテーション試験により得られる荷重—変位曲線¹¹¹⁾

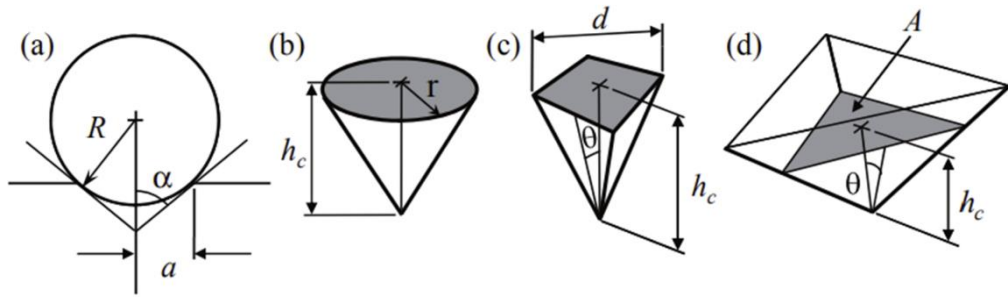


図 1-25 インデンテーション試験で用いられる代表的な圧子¹¹⁾
 (a) 球, (b) 円錐, (c) ビッカース, (d) バーコビッチ

1.3.2 氷のインデンテーション試験に関する先行研究

氷の研究分野でもインデンテーション試験を用いた研究が行われているが、前述したインデンテーション試験とは取り扱いが異なる。氷のインデンテーション試験に関する報告の多くは、海洋構造物に及ぼす氷荷重に関する研究の分野で用いられている。海洋構造物や船舶を建設する際、設計荷重として構造物に作用する氷の荷重や圧力を的確に評価する必要がある。自然界に存在する海氷等の氷には凹凸が存在するため、海洋構造物と接触する際に、局所的に高圧領域が発生する（図 1-26 (a)）。Jordaan¹²³⁾によると、高圧領域下では、微小亀裂、動的再結晶、局所的な圧力融解に伴う微細構造の変化により層（図 1-27）が形成され、高圧領域から離れたところでは局所的に氷片が生成される破壊が生じている（図 1-26 (b)）。

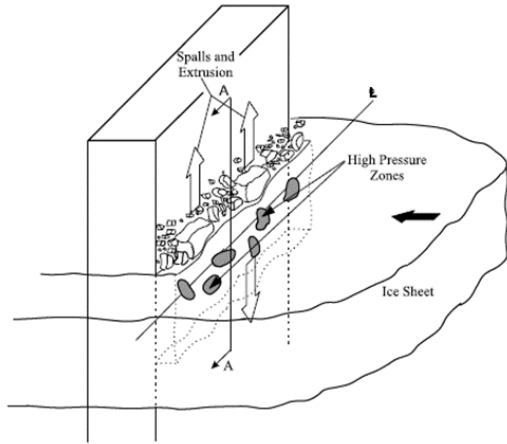
局所的な高圧領域を再現するため、主に平面圧子を用いた大規模・中規模の野外実験や小規模な室内実験が行われてきた¹²³⁾⁻¹²⁵⁾。球圧子を用いた室内実験としては、Barrette ら¹²⁶⁾は変形速度 2 mm/s, 4 mm/s, 6 mm/s における圧子直下の氷層の微小亀裂の観察を行った。Wells ら¹²⁷⁾は、200 mm×200 mm×100 mm の多結晶氷について、変形速度 0.2~10 mm/s での押込中の表面破壊過程と圧子下の圧力分布を調査した。Mackey ら¹²⁸⁾は、ハイスピードカメラを用いて、押込中の荷重の低下が氷の破壊や局所的な氷片の発生に関連があることを報告している。しかし、カメラのフレームレートは最大で 1000 フレーム/s であり、表面的な破壊現象しか見ておらず、内部の亀裂進展までは捉えられていない。これらの研究で用いられた球圧子は、野外実験¹²⁹⁾で使用したものを 1/50 にした、曲率半径 256 mm、直径 200 mm の球圧子もしくは 1/10 にした曲率半径 178 mm、直径 100 mm の平面に近いものであり、圧子形状の影響については考えられていない。

圧子形状を考慮した先行研究では、Masterson ら¹³⁰⁾および Masterson と Frederking¹³¹⁾は、球圧子のインデンテーション試験において、圧子下の圧力は球圧子の半径が大きくなるほど増加することを実験で示した。Kim ら^{132),133)}は、インデンテーション試験における圧力—面積関係において、負荷面積が大きくなると接触圧力が減少すること（押込サイズ効果）、ある接触面に対し、圧子の半径が大きくなると接触圧力が増加すること（圧子半径効果）について説明している。これらの研究は、接触圧力に及ぼす圧子サイズの影響について述べているものの、圧子形状を変化させたときに生じる変形・破壊現象への影響やその速度依存性について言及したものではない。

一方、荷重と変位の履歴を測定したインデンテーション試験としては、Michel と Toussaint¹³⁴⁾の研究がある。彼らは、810 mm×810 mm の氷板の厚さ（25～100 mm）方向に対し長方形の平面圧子（幅 6.3～203.2 mm）を用いたインデンテーション試験を行い、氷板中のひずみ速度推定式を提案している。しかし、この推定式は平面でのインデンテーション試験に限定され、球圧子や錐型圧子には適用できない。また、Ulan-Kvitberg ら¹³⁵⁾は、円錐や楔型の鋼または氷の圧子を氷または鋼板に 100 m/s で衝突させ、荷重—変位関係を測定しているものの、荷重の履歴と破壊の関連性については検討されていない。

以上のように、氷のインデンテーション試験は、実スケールの氷山を考えた大規模・中規模の野外実験や小さくても数百 mm 程度の氷を使用した実験がほとんどである。落下する雹などの破壊を考えた場合は、数十 mm 程度の氷を使用した実験的検討が必要であるが、このような研究結果は見当たらない。また、これら研究の多くは、氷と構造物が接触した際に発生する局所的な高圧領域と表面層での破壊に着目しており、内部の亀裂進展や氷の破壊そのものに関するものではない。さらに、圧子形状を変化させたときの変形・破壊現象やその速度依存性については検討されていない。

(a)



(b)

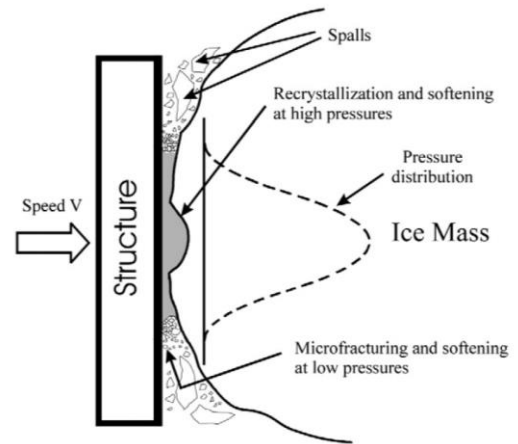


図 1-26 (a) 氷と構造物の接触面 ¹²³⁾, (b) 高圧領域での氷表面の破壊 ¹²⁷⁾

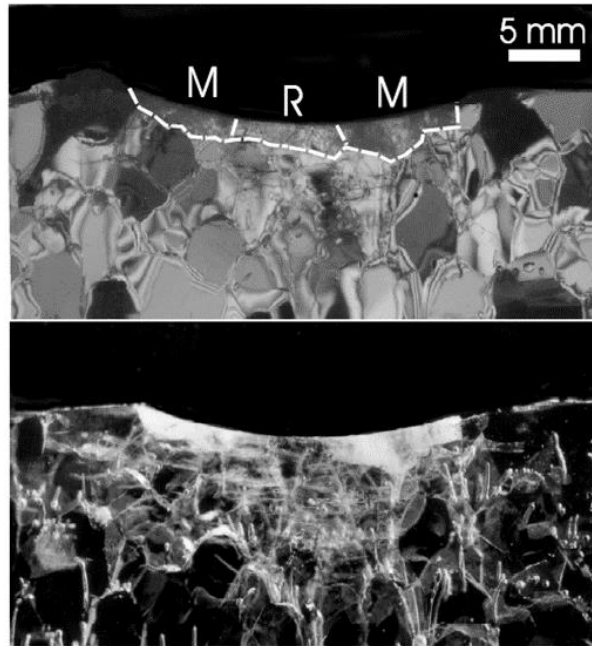


図 1-27 高圧領域に形成される層 ¹²⁶⁾ (R : 再結晶, M : 微小亀裂)

1.4 研究目的および論文構成

これまで述べてきたように、氷の変形・破壊特性については、材料学的な知見を駆使して多くの先行研究が行われている。特に塑性変形特性およびクリープ変形特性の研究は盛んに行われ、低ひずみ速度では、転位のすべり運動とともに、粒界すべり、転位クリープ、動的回復が同時に起こることが知られている。この際、転位の集積や粒界すべりによる応力集中に起因し、粒内や粒界で亀裂の核が生成する。しかし、生成された亀裂は、クリープおよび動的回復の発現によってその先端に集中した応力は緩和され、成長が抑制されるため延性的な破壊挙動となる。一方、ひずみ速度を増加させると、延性破壊から脆性破壊に遷移する。延性—脆性遷移は亀裂先端のクリープおよび動的回復と亀裂の伝播の関係性から理解することができる。脆性域では、クリープおよび動的回復が発生する十分な時間がなく、亀裂先端に応力が集中し、亀裂が伝播することで破壊に至る。脆性圧縮破壊では、単軸荷重下において、ウイングクラックの連結による軸方向の割れが発生し、多軸荷重下では、楕形亀裂が連続的に破壊され細粒化することにより氷の破片の帯がせん断層を形成する。また、氷には材料強度のひずみ速度依存性があり、氷の最大圧縮応力は、ひずみ速度の増加に伴い延性域では単調に増加する。しかし、ひずみ速度約 $10^{-4} \sim 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ で延性から脆性に遷移すると減少またはほぼ一定の値を示すようになる。この最大圧縮応力の推移は、クリープ変形のひずみ速度依存性や亀裂の進展による脆性破壊に起因すると考えられている。このように、準静的ひずみ速度範囲については多くの研究が行われ、その変形・破壊特性が明らかになってきている。

一方、氷に関する自然災害への対処や構造物の安全設計を行う際には、高速変形を考慮する必要がある。動的から衝撃の高ひずみ速度においては、近年 SHB 法を用いた研究が行われ、その多くは高ひずみ速度で最大圧縮応力が増加することを報告している。しかし、高ひずみ速度において最大圧縮応力が再び増加する原因についてはこれまで議論されておらず、また、どの程度の速度域から増加に転じるかについての見解は研究者によって異なる。さらに、SHB 法において、氷のような脆性材料は亀裂の進展により試験片両端の応力平衡が成立しにくい条件となる。しかし、先行研究の多くは、試験片両端の応力平衡がどの程度の精度で成立しているか報告しておらず、正しく評価できているのか判断することができない。また、カメラによる観察では、亀裂の伝播を明瞭に捉えられておらず、圧縮応力と破壊挙動の関連性については十分な議論がなされていない。したがって、高ひずみ速度下の氷の変形・破壊に関する研究は発展途上である。

一方、材料強度特性の評価手法の一つに、圧子を用いて材料を押し込むインデンテーション試験がある。実際の氷の破壊現象を考える際には、単軸のような均一変形によって破壊するのではなく、局所的な応力集中によって破壊が生じる。そのため、氷の研究分野では、海洋構造物に作用する荷重や圧力を評価するためにインデンテーション試験が行われている。しかし、これらの研究は、局所的な高圧領域と表面層での破壊に着目しており、内部の高速亀裂進展や氷の破壊そのものに着目した研究例は見当たらない。また、冰山などを想定した大規模な実験が多く、落下する雹や氷塊などの破壊を考える際には、数十 mm 程度の氷を使用した実験的検討が必要である。さらに、氷の破壊には圧子の形状が大きく関与していると考えられるものの、圧子形状を変化させたときの変形・破壊現象やその速度依存性については検討されておらず、インデンテーション試験における脆性破壊メカニズムは明らかになっていない。

以上のことから、本論文では、これまで不明な点が多かった単軸圧縮試験における高ひずみ速度下の氷の変形・破壊特性や、インデンテーション試験における氷の脆性破壊メカニズムの解明に焦点を絞り、主に以下の2点について検討する。

- (1) 単軸圧縮試験における高ひずみ速度下の応力と破壊挙動の関連性
- (2) インデンテーション試験時の変形・破壊挙動に及ぼす圧子形状やひずみ速度の影響

これらを検討することにより、高ひずみ速度における純氷の変形・破壊特性の一端を明らかにすることを目的とする。

以下に本論文の構成を示す。第2章では、純氷の単軸圧縮試験を実施し、特に高ひずみ速度における圧縮応力の評価方法を検討することで、応力と破壊挙動の関連性について明らかにする。また、高ひずみ速度における材料強度のひずみ速度依存性をもたらす要因について考察する。第3章では、インデンテーション試験を行い、純氷の変形・破壊特性に及ぼす圧子形状やひずみ速度の影響について検討する。また、インデンテーション試験における氷の脆性破壊メカニズムについて議論する。最後に、第4章において、本研究の内容をまとめる。

第2章 単軸圧縮試験におけるひずみ速度の影響

2.1 緒言

第1章で述べたように、氷はひずみ速度に応じて変形・破壊挙動が異なる。そこで、本章では、基本的な機械的特性として、準静的から動的、衝撃までの幅広いひずみ速度における純氷の単軸圧縮変形特性を評価する。なお、ひずみ速度範囲は Lindholm¹⁾や Field ら²⁾によって図 2-1 のように分類されており、本研究ではこれを基準に、ひずみ速度 10^{-1} s^{-1} までを準静的、ひずみ速度 $10^{-1} \sim 10^1 \text{ s}^{-1}$ を動的、ひずみ速度が 10^1 s^{-1} を超えた場合は衝撃と呼称する。準静的および動的試験では万能試験機、衝撃試験では SHB 圧縮試験装置にそれぞれ低温チャンバーを組み合わせた試験装置を用いて、 -10°C における純氷の単軸圧縮試験を実施する。また、衝撃試験では、ハイスピードカメラにより衝撃変形時の氷内部の亀裂の様子を観察し、試験片両端の応力と破壊挙動の関連性について評価を行う。さらに、動的から衝撃の高ひずみ速度において、材料強度のひずみ速度依存性をもたらす要因について考察する。

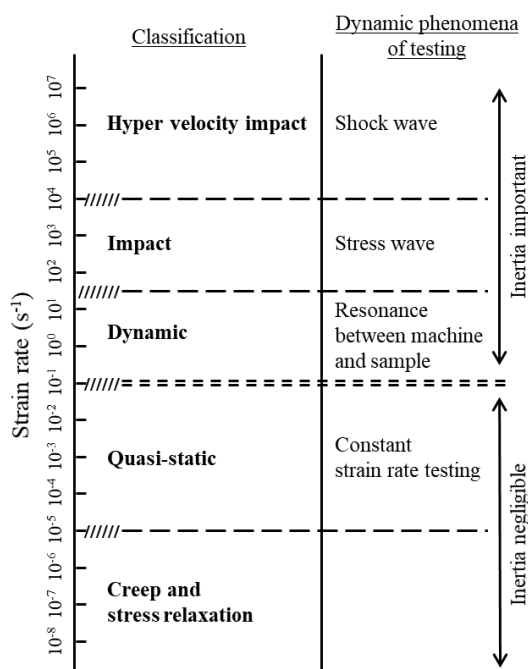


図 2-1 ひずみ速度の分類¹⁾

2.2 単軸圧縮試験方法

2.2.1 試験片

本研究では、破壊に大きく関与する亀裂の可視化を行うため、透明な氷を必要とする。しかし、実験室レベルでは、熟練の技術がなければ内部に空気や不純物を含むことで氷が白く濁ってしまい、安定した試験片を得られない。そこで、内部に不純物やマクロな欠陥が存在しないことを確認した上で市販の純氷を用いることとした。純氷のブロック（260 mm×550 mm×1000 mm）を切り出し、コンターマシンで 20 mm×20 mm×30 mm の直方体に加工した後、-20°C の冷凍庫内で保管した。以下、特に断らない限り純氷を氷と呼称する。

冷凍庫から取り出した氷は、底面を金属板上で少し溶かした後、準静的および動的試験では試験片固定台に、衝撃試験では AA2017 アルミニウム合金製のフランジに固着させた。試験片固定台は、氷との接触部となる 5083 アルミニウム合金製薄板の周囲を熱伝導率が低く耐衝撃性に優れるポリカーボネートで支持したものである。アルミニウムは熱伝導率が良いため、ドライアイスで冷やすことで氷を固着させることが可能である。その後、試料の表面精度を良くするため、マイクロトーム（大和光機製、REM-710）を用いて氷の上面を 10 μm ずつ切削して平面を出した。準静的および動的試験では、氷の高さ L_s が 20 mm となる立方体形状の試験片を作製した。一方、衝撃試験では、断面積 20 mm×20 mm, L_s が 5 mm, 10 mm, 20 mm, 25 mm となる 4 種類の試験片を作製した。 $L_s=5, 10$ mm の試験片はひずみ速度 10^2 s^{-1} 以上、 $L_s=20, 25$ mm の試験片はひずみ速度約 10^1 s^{-1} の実験に使用した。

氷試験片を構成する結晶の形状を調べるため、2 枚の偏光板の間に厚さ約 1 mm の薄片状にした試験片を挟み、LED ライトを当てて観察した。図 2-2 (a), (b) は、それぞれ氷の結晶の成長方向に垂直な面および平行な面の代表的な偏光写真である。氷試料は複数の柱状氷で構成された多結晶氷であり、粒径は 5~10 mm 程度の粗大な結晶粒であることがわかる。本研究では、実験条件を統一するため、結晶の成長方向に対し垂直な方向が軸方向となるように試験片を設置し、圧縮試験を行った。

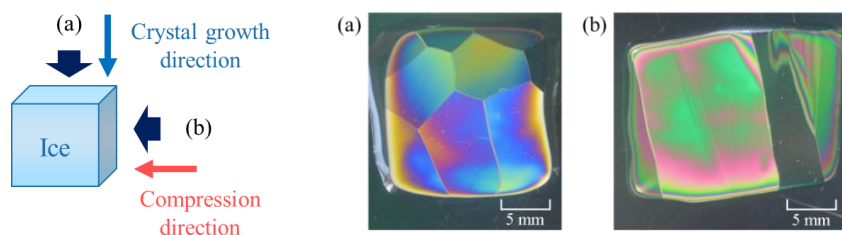


図 2-2 本研究で用いた純氷の代表的な偏光写真 (a) 垂直断面、(b) 平行断面

2.2.2 準静的および動的試験

準静的および動的試験は、ロードセル容量 100 kN の万能試験機 (Instron 製, 5982) と冷却システムに接続した低温チャンバー (コレット工業製, CLC-01) を組み合わせた装置を使用した。図 2-3 (a) に試験装置の外観, 図 2-3 (b) に冷却システムの概略図を示す。なお, 図 2-3 (b) 中の矢印は窒素ガスの流れを示している。冷却システムは, 窒素ボンベから液体窒素貯蔵容器に窒素ガスを流入し, その圧力を利用してチャンバー内に低温の窒素ガスを送ることで冷却する仕組みとなっている。チャンバー内の温度は K 型熱電対で測定し, 温度コントローラー (コレット工業製, MC-1000R) により確認する。この間, チャンバー内に送る窒素の流量を窒素ガスコントローラー (コレット工業製, MC-500) により手動で調整する。なお, 熱電対挿入口は 2 つあり, 2 ヶ所の温度を同時に測定することが可能である。

チャンバーは二重壁となっており, 壁と壁の間は真空断熱されている。軸との接続部は, フェルトおよび銅製のリフレクターを使用している。フェルトは断熱・保温効果があり, リフレクターは薄い銅板を均等間隔に配置することで, 外部からの空気の流入とチャンバー内の冷気の漏れによる温度の乱れを緩やかにし, チャンバー内の温度を安定化する役割を果たしている。

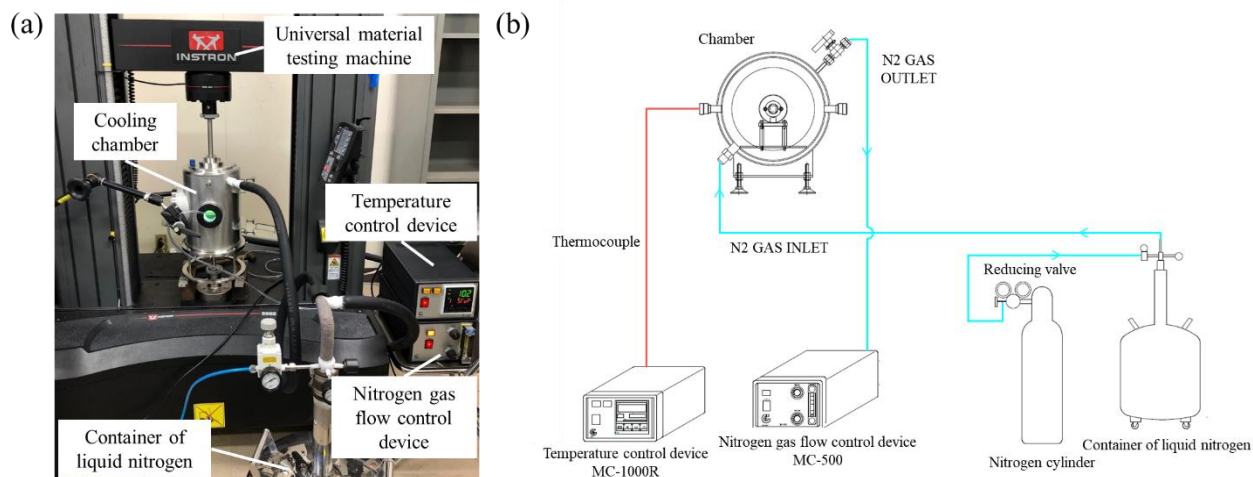


図 2-3 (a) 準静的および動的試験装置の外観, (b) 冷却システムの概略図

図 2-4 にチャンバー内の概略図を示す．上部の治具の先端に S45C 製，直径 32 mm の平面圧子を取り付けた．氷試験片は，試験片作製時に使用した台ごと下部の治具の上に設置した．試験時に試験片固定台がずれないようにするため，試験片固定台と治具は万力で固定した．試験速度は，0.002 mm/s，0.02 mm/s，0.2 mm/s，2 mm/s，16 mm/s の 5 種類とし，サンプリング周期は，それぞれ 100 ms (0.002 mm/s および 0.02 mm/s)，10 ms (0.2 mm/s)，1 ms (2 mm/s)，10 μ s (16 mm/s) とした．各速度における初期ひずみ速度は，それぞれ 10^{-4} s^{-1} ， 10^{-3} s^{-1} ， 10^{-2} s^{-1} ， 10^{-1} s^{-1} ， 0.8 s^{-1} である．各速度でそれぞれ 7~11 回ずつ試験を行った．なお，試験機および試験片固定台のコンプライアンスを測定し，変位量を校正している．

氷の変形および破壊の様子は，チャンバーの観察窓の前に設置したカメラで撮影した．亀裂の観察は高速現象のため，ハイスピードカメラでの撮影が望ましい．しかし，試験速度が遅いと，ハイスピードカメラではメモリ容量が足りず，試験開始から終了までの間を撮影できない．そこで，試験速度 0.002 mm/s，0.02 mm/s，0.2 mm/s ではデジタルビデオカメラ（ニコン製，D5200），2 mm/s および 16 mm/s ではハイスピードカメラ（ナックイメージテクノロジー製，MEMRECAM HX-3）を使用した．フレームレートは，それぞれ 25 fps および 2000 fps である．この際，光源としてメタルハライドランプ（ARRI 製，POKET PAR125）または LED ライト（アイテックシステム製，LLBK1-LA-W-0001）を使用した．チャンバー窓は，氷内部の亀裂を明瞭に観察できるように透過波面収差 $\lambda/8$ ($\lambda=632.8 \text{ nm}$) の高性能なガラスを使用している．また，冷却時に使用した窒素ガスを再利用し，ガラス窓に吹きかけることで，ガラスが結露するのを防止した．

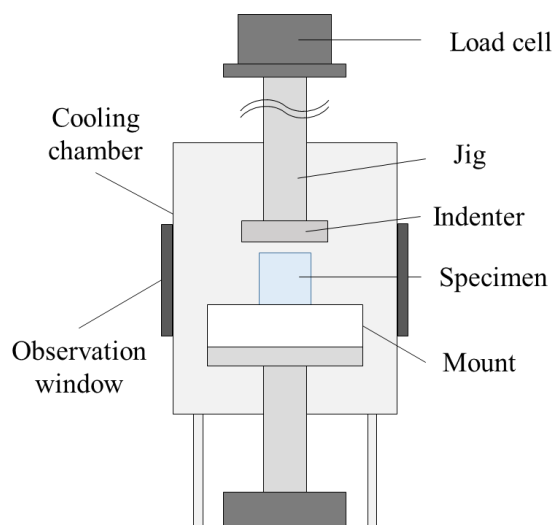


図 2-4 チャンバー内の概略図

本研究では、強度の速度依存性に議論の焦点を定めるため、温度条件を統一することとした。第 1 章で述べたように、地球上に存在する氷は 0～-30℃程度であり、氷の強度評価を扱う先行研究の多くは-10℃付近の温度を基準としていることから、本研究でも実験温度として-10℃を選択した。

実験ごとに氷試験片の温度を測定できないため、予備実験として、万能試験機と組み合わせたチャンバー内の温度計測を行った。2つの K 型熱電対を使用し、1つはチャンバー内の空間、もう 1つは氷試験片内部約 5 mm の位置に挿入した。チャンバー内に窒素ガスを流して冷却し、約-10℃に保持してチャンバー内の空間温度と氷試験片の温度変化を計測した。温度の計測にはデータロガー（GRAPHTEC 製、GL220）を使用し、サンプリング周期は 10 s とした。

図 2-5 にチャンバー内の空間と氷の温度変化の一例を示す。チャンバー内を-10℃付近まで冷却して温度を保持すると、氷の温度は徐々に低下していくことがわかる。表 2-1 に空間温度が-10℃に到達してから 5, 10, 15 分後の氷の温度の平均値を示す。なお、氷の温度は 6 回の温度計測の平均値である。氷の温度は、空間温度が-10℃に到達してから 5 分後では温度のばらつきが大きいですが、温度保持時間が長くなるにつれ安定した温度を得ることができた。そこで本研究では、-10℃での実験を行うためにチャンバー内の空間温度が-10℃に到達した後 15 分間保持し、氷の温度-10.1±0.3℃で実験を行った。

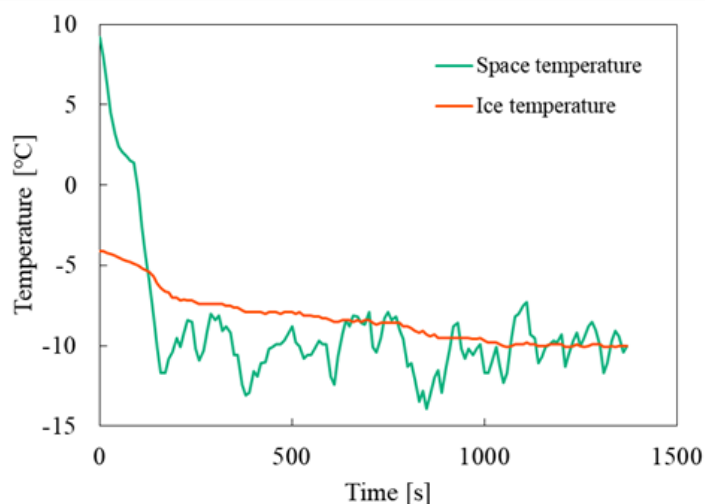


図 2-5 チャンバー内の空間と氷の温度変化の一例

表 2-1 氷の温度の平均値

Elapsed time	300 s	600 s	900 s
Ice specimen temperature	-8.6±1.1℃	-9.3±0.8℃	-10.1±0.3℃

2.2.3 衝撃試験

図 2-6 に衝撃試験で用いた SHB 圧縮試験装置の外観および概略図を示す。氷の強度は金属材料等と比較して低いため、測定感度を良くするためにはできる限り棒の断面積を小さくし、弾性率の低い棒を使用することが望ましい。しかし、弾性率の低いアルミニウムは熱伝導率が良いため、温度変化の影響を受けやすく、ひずみゲージの測定感度に影響を及ぼす。そこで、各棒には熱伝導率が比較的 low、錆びにくいステンレス鋼 (ISO 4301-304-00-I) を用いた。また、SHB 法では、一般的に試験片の底面の対角線の長さが入力棒および出力棒の直径を超えないように設計する。本研究で用いる試験片は底面の長さが一辺 20 mm の正方形のため、直径約 29 mm 以上の棒を用意する必要があるが、棒の直径を大きくすると測定感度が悪化する問題が生じる。そこで本研究では、入力棒と出力棒の直径は 16 mm とし、その先端に直径 34 mm、厚さ 4.5 mm のアルミニウム合金製のフランジを取り付けた。フランジのみを熱伝導率の良いアルミニウム合金製とすることで入出力棒に低温が伝わりにくくなり、試験片周囲のみを効率的に冷却することができる。フランジ付の棒を使用した SHB 試験は、先行研究^{3),4)}で発泡フィルムを対象に行われており、フランジを用いても試験片の両端で応力平衡が成立し、軸方向応力を高感度で測定できることが報告されている。

SHB 試験装置には、準静的および動的試験でも用いた低温チャンバーを組み合わせた。試験片は、図 2-7 に示すようにフランジの間に設置した。2.2.1 項で示した氷の切削後、氷試験片を固着させたフランジを出力棒側に取り付けた。フランジと試験片の接触状態の影響を比較するため、入力棒側との接触には 2 種類の方法を用いた。一方は、入力棒側のフランジには固着させずに、入力棒に取り付けたゴムの復元力で微小な荷重を加えて接触させた (出力棒側のみフランジと固着)。もう一方は、試験片の上面 (入力棒側の表面) をやや溶かし、あらかじめ冷却した入力棒側のフランジに固着させ、試験片の両端をしっかりとフランジに固着させた。なお、各試験片の寸法はチャンバー内に設置する前に測定した。

チャンバーの観察窓の前には、ハイスピードカメラ (ナックイメージテクノロジー製、ULTRA Cam HS-106E) を設置し、氷の変形および破壊の様子を撮影した。撮影条件は、フレームレート 500000 fps、画素数 360×410 pixel、シャッタースピード 0.2 μ s である。分解能は約 74 μ m である。この際、光源としてストロボ (パナソニック ライティングデバイス製、PE-60SG) を用い、図 2-6 に示すようにカメラの反対側から試験片に向けて光を照射した。

なお、ストロボは瞬間的に発光するため、試験片への熱の影響を最小限に抑えることができる。

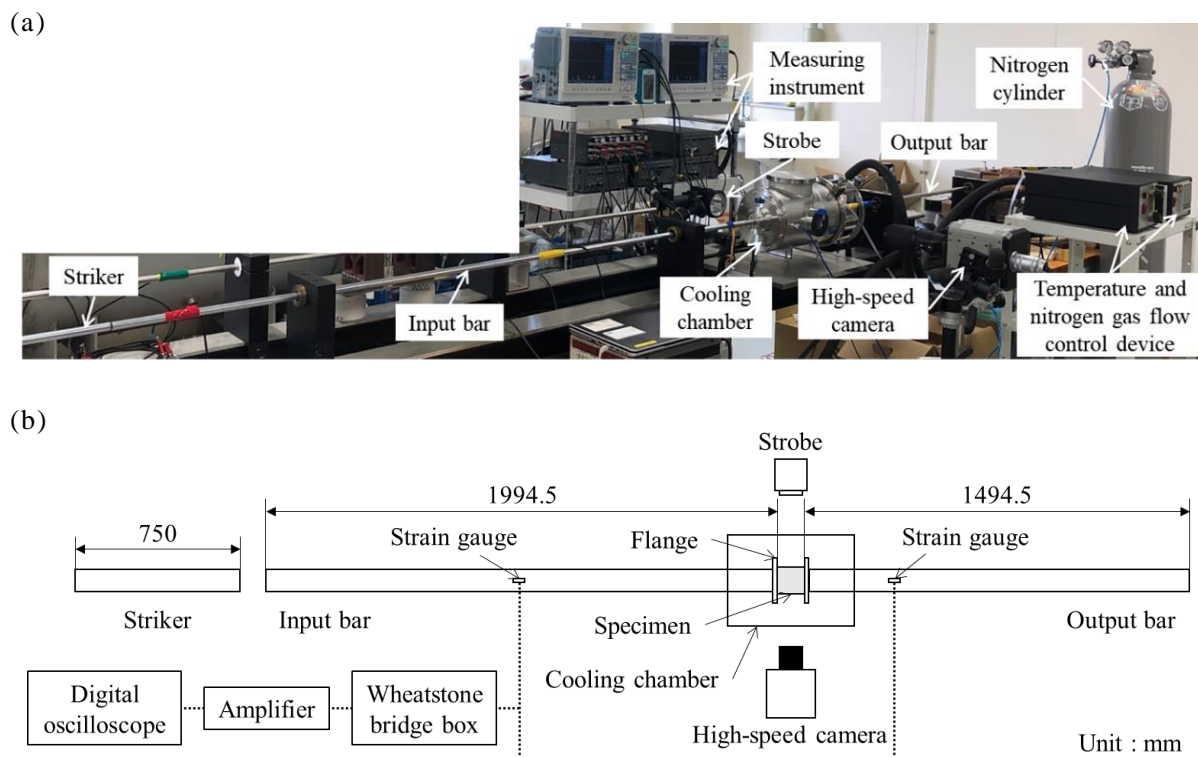


図 2-6 SHB 圧縮試験装置 (a) 外観, (b) 概略図

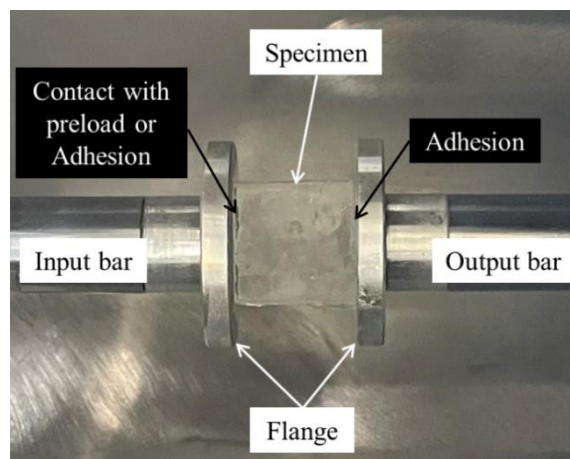


図 2-7 試験片の設置方法

棒内を伝播する弾性応力波を測定するため、入出力棒にはひずみゲージを貼り付けた。ひずみゲージの出力は、ホイートストンブリッジ回路および差動増幅器（エヌエフ回路設計ブロック製，5307）を通し，サンプリング周期 1 MHz でデジタルオシロスコープ（横河計測製，DL850E）に記録した。この際，差動増幅器により 1 MHz のフィルタをかけ，高周波の電気ノイズを消去している。打撃棒の発射空気圧を 0.025~0.4 MPa の間で変化させ，約 $10^1 \sim 10^3 \text{ s}^{-1}$ オーダーの衝撃ひずみ速度を得た。

SHB 法では，入射波の立ち上がりが急峻であるほど，立ち上がり時の弾性応力波（入射波）の振動が生じやすくなる。そのため，多くの衝撃試験では，打撃棒と入力棒の接触面に緩衝材を用いて入射波の立ち上がりを緩やかにし，乱れの少ない入射波を得る工夫がなされている^{5),6)}。図 2-8 に緩衝材として厚さ 0.27 mm の厚紙を使用した場合と使用しなかった場合に得られた入射波の一例を示す。緩衝材を使用しない場合，入射波の立ち上がりが急峻であることがわかる。また，発射圧が高い場合には，入射波の立ち上がり時にひずみ波の振動がみられた。緩衝材として厚紙を用いることで，入射波の立ち上がり時間を長くし，応力波振動を抑制できることを確認した。

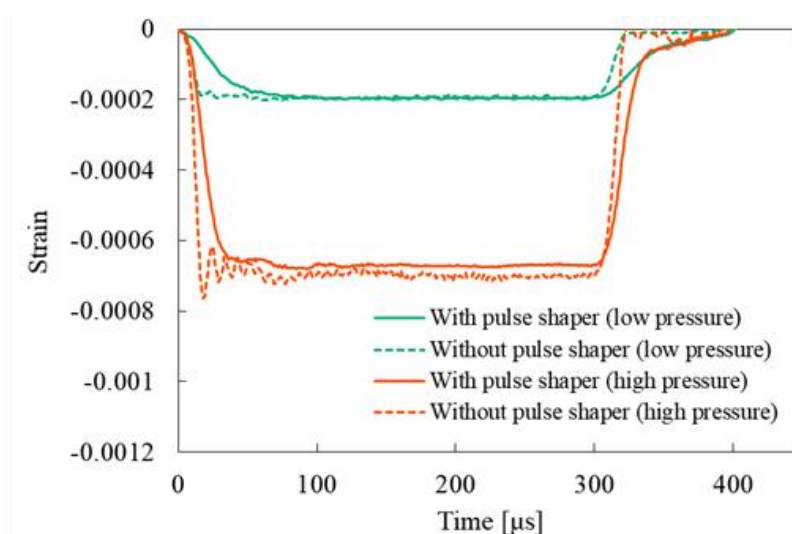


図 2-8 緩衝材を使用した場合と使用しなかった場合に得られた入射波の一例

緩衝材の効果を確認するため，断面積 20 mm×20 mm，高さ 10 mm の市販の ABS 樹脂試験片を用いて室温で SHB 試験を行った。入力棒側の応力および出力棒側の応力は，次式（式(1-6)および(1-9)を再掲）を用いてそれぞれ $\sigma_1(t)$ および $\sigma_2(t)$ として算出した。

$$\sigma_1(t) = \frac{AE}{A_S} [\varepsilon_1(t) + \varepsilon_R(t)] \quad (2-1)$$

$$\sigma_2(t) = \frac{AE}{A_S} \varepsilon_T(t) \quad (2-2)$$

図 2-9 に緩衝材を使用しなかった場合と使用した場合に得られた応力—時間関係の一例を示す．緩衝材を使用しない場合， $\sigma_1(t)$ および $\sigma_2(t)$ で変形開始から 200 μs 付近までフランジの振動に起因するとみられる応力振動が観察された．しかし，緩衝材を用いることで，この応力の乱れを大幅に低減することができた．一方，緩衝材の有無に関わらず， $\sigma_1(t)$ は原点(0, 0)を通過せず，変形開始後から約 20 μs まで出力が負の値を示した．これは入射波と反射波が干渉しているためと考えられるが，測定時間に対し微小なため，その影響は無視できると考えられる．また，緩衝材を使用しなかった場合における 300 μs 付近からの $\sigma_1(t)$ の急激な増加は，反射波の影響を受けるためと推察されるが，後述するように氷の破壊時間はこれより短いため測定には影響を及ぼさない．以上の結果から，緩衝材を用いても波形の一部が乱れるという問題は残るものの，応力振動の抑制に有効であることが明らかとなった．よって，本研究ではすべての実験に緩衝材を使用した．

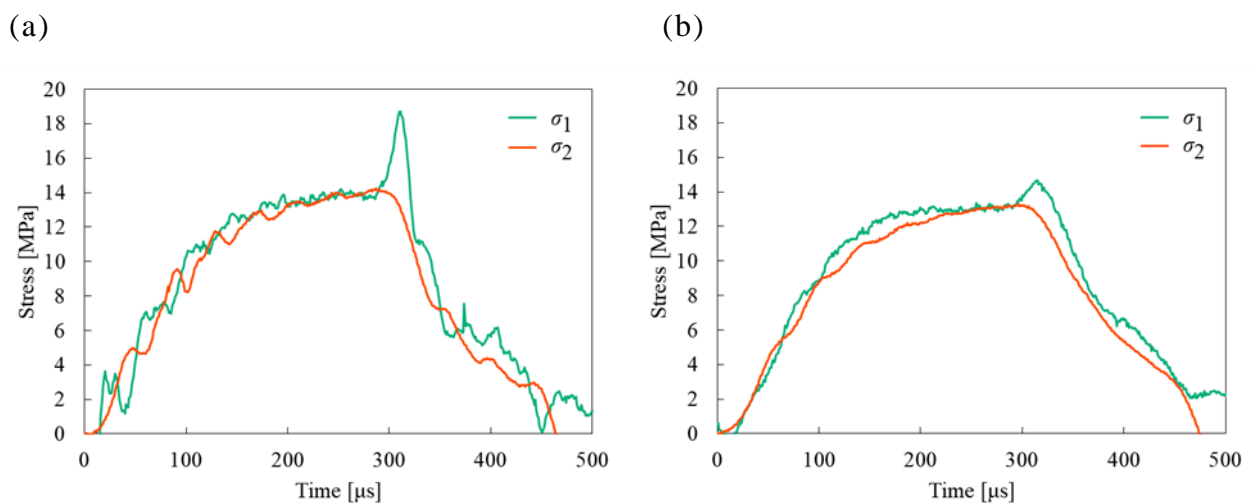


図 2-9 SHB 試験により得られた ABS 樹脂の応力—時間関係の一例
 (a) 緩衝材を使用しない場合，(b) 緩衝材を使用した場合

2.3 結果および考察

2.3.1 準静的および動的試験

図 2-10 に準静的試験および動的試験の各ひずみ速度において得られた応力—ひずみ関係を示す。第 1 章で述べたように、氷における延性と脆性の区分は、応力—ひずみ関係の形状や材料の外観・挙動によって決定される⁷⁾。塑性変形により応力—ひずみ関係が丸みを帯びたピークを示す場合を延性的とみなすのに対し、応力が極大値を示した後急激に低下し、試験片が構造として崩壊する場合は、脆性的であるとみなす。ひずみ速度 10^{-4} s^{-1} では、塑性変形を起こした後に破壊する延性的な破壊挙動を示した。このとき、デジタルビデオカメラで撮影した破壊の様相の一例を図 2-11 に示す。氷内部に亀裂が発生した後も巨視的には崩壊せず、氷としての構造は保ったままであることがわかる。一方、ひずみ速度 10^{-3} s^{-1} では延性的な挙動を示す試験片と脆性的に破壊する試験片の両方がみられ、ひずみ速度 10^{-2} s^{-1} 以上では、ほとんど塑性変形することなく脆性的に破壊した。圧縮試験では、延性と脆性の遷移領域がひずみ速度約 $10^{-4} \sim 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ であることが報告されており⁸⁾⁻¹⁰⁾、本研究でも同様の傾向が確認された。しかし、応力—ひずみ関係の初期傾きや最大応力は、試験片によるばらつきが大きい。そこで本研究では、多くの先行研究と同様に最大応力を用いてひずみ速度依存性を評価する。

準静的および動的試験における最大応力とひずみ速度の関係を図 2-12 に示す。最大応力は、ひずみ速度 $10^{-4} \sim 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ にかけて増加し、ひずみ速度 $10^{-3} \sim 10^{-1} \text{ s}^{-1}$ では減少する傾向がみられた。また、ひずみ速度 $10^{-1} \sim 0.8 \text{ s}^{-1}$ では、最大応力にほとんど変化がみられなかった。第 1 章で述べたように、氷の圧縮応力のひずみ速度依存性は一般的な金属材料等とは異なる。先行研究では、氷の最大応力は、ひずみ速度約 10^{-3} s^{-1} 付近まで単調に増加し、その後ひずみ速度 10^{-1} s^{-1} までの間でやや減少またはほぼ一定の値を示すと報告されており^{7),11),12)}、本研究の傾向とも一致する。ひずみ速度 10^{-1} s^{-1} 以上の最大応力のひずみ速度依存性については、衝撃試験の結果と合わせて 2.3.3 項で考察する。

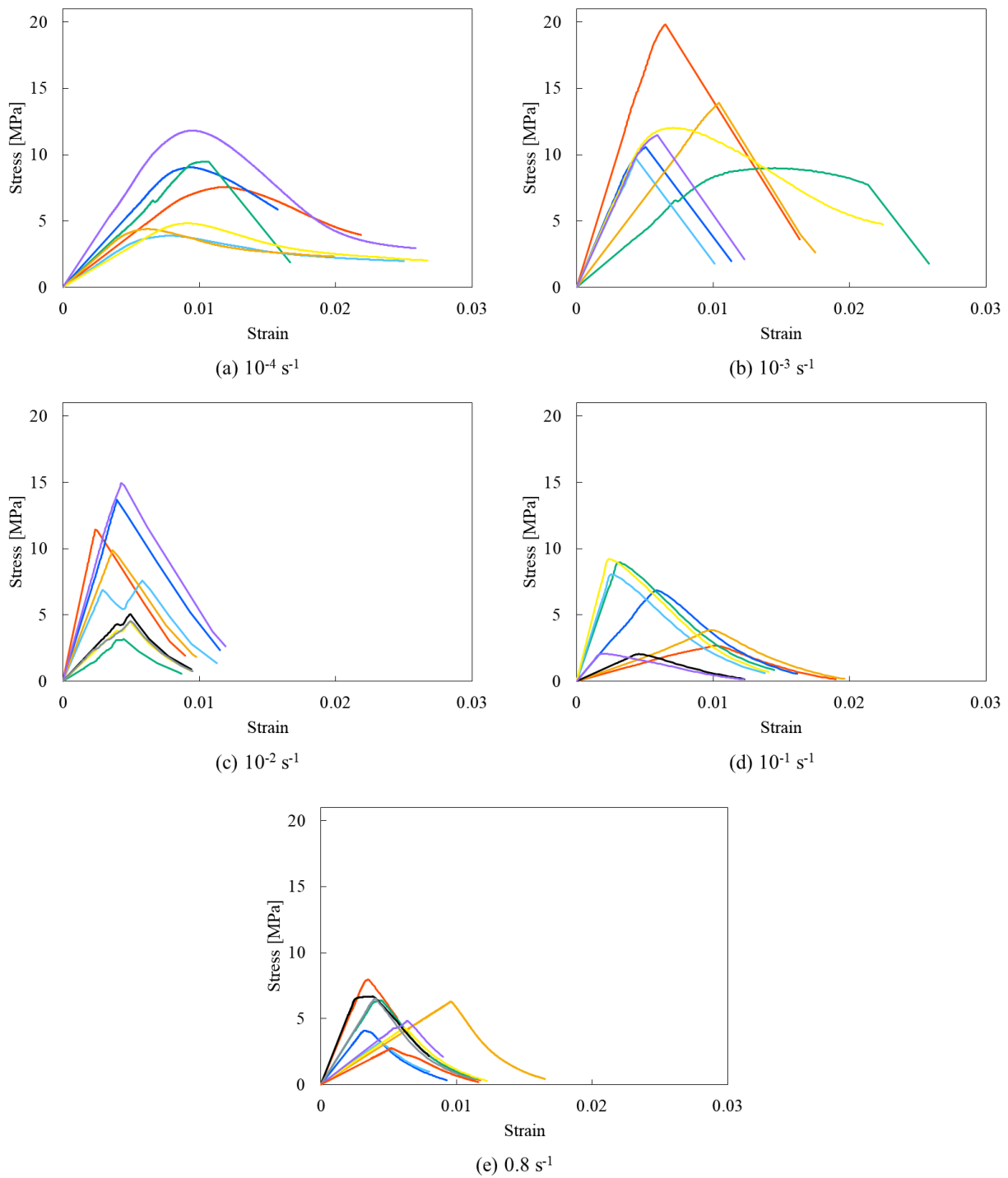


図 2-10 準静的および動的試験の各ひずみ速度における応力—ひずみ関係

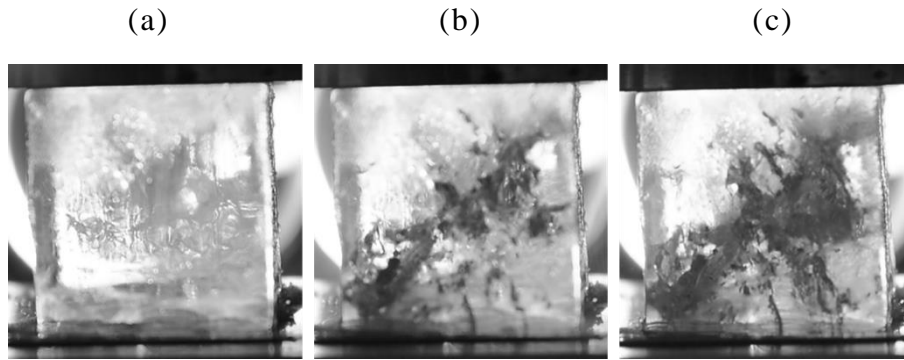


図 2-11 ひずみ速度 10^{-4} s^{-1} における破壊の様相の一例
 (a) 変形前, (b) 最大応力に達する前, (c) 最大応力到達後

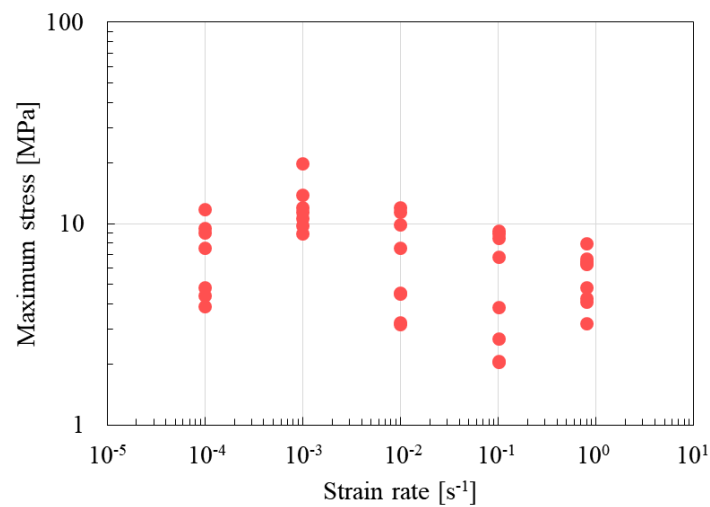


図 2-12 準静的および動的試験における最大応力とひずみ速度の関係

2.3.2 衝撃試験

2.3.2.1 応力-時間関係と変形・破壊の観察

衝撃試験の各試験において、応力平衡状態を確認するため、時刻 t における入力棒側の応力 $\sigma_1(t)$ 、出力棒側の応力 $\sigma_2(t)$ および平均公称応力 $\sigma_A(t)$ を算出した。各式を以下に再掲する。

$$\sigma_1(t) = \frac{AE}{A_S} [\varepsilon_1(t) + \varepsilon_R(t)] \quad (2-1)$$

$$\sigma_2(t) = \frac{AE}{A_S} \varepsilon_T(t) \quad (2-2)$$

$$\sigma_A(t) = \frac{AE}{2A_S} [\varepsilon_1(t) + \varepsilon_R(t) + \varepsilon_T(t)] \quad (2-3)$$

一例として、各式によって求めた応力—時間関係を図 2-13 に示す。実験条件および破断時のひずみ速度はそれぞれ表 2-2 の通りである。また、この際にハイスピードカメラで撮影した氷の変形および破壊の様相を図 2-14 に示す。なお、図 2-14 の各画像上部に示す時間は、弾性応力波が試験片左端に到達しからの時間を示している。また、 $0 \mu\text{s}$ 以降に現れる黒い影が亀裂である。長さ 20 mm の試験片（図 2-13 (a) および図 2-14 (a)）では、変形初期から破壊に至るまで $\sigma_1(t)$ と $\sigma_2(t)$ の差が大きく表れている。この際の連続写真を確認すると、亀裂が試験片の入力棒側で発生した後、出力棒側に伝播する際に試験片の上側にのみ伝播していることが確認できる。このように試験片端部から一方向に破壊することで軸方向の応力平衡が崩れ、入力棒側と出力棒側の応力に大きな差が生じたと考えられる。一方、長さ 25 mm（図 2-13 (b)）および 5 mm（図 2-13 (c)）の試験片では、2.2.3 項でも言及したように、 $\sigma_1(t)$ は変形初期に入射波と反射波が干渉して出力が負の値になっている。長さ 25 mm の試験片は、変形時間が長いため、その影響はほとんど無視できる。一方、長さ 5 mm の試験片は、変形時間が短いため、初期の時間のずれが相対的に大きく影響してしまう。しかし、変形が進むにつれ $\sigma_1(t)$ と $\sigma_2(t)$ の差は小さくなる。そこで、入力棒側の最大応力 ($\sigma_{1 \max}$) と出力棒側の最大応力 ($\sigma_{2 \max}$) の誤差率 R を次式により求めた。

$$R(\%) = \frac{\sigma_{2 \max} - \sigma_{1 \max}}{\sigma_{2 \max}} \times 100 \quad (2-4)$$

図 2-13 に示した試験片における R の値は、それぞれ 38.15%（長さ 20 mm の試験片）、9.87%（長さ 25 mm の試験片）、12.10%（長さ 5 mm の試験片）となった。長さ 25 mm および 5 mm の試験片の R 値は比較的近い値を示した。一方、変形初期から応力差が大きく表れていた長さ 20 mm の試験片では、 R 値は大きくなった。すべての実験の R 値について検討を行った結果から、本研究では、 R が $\pm 15\%$ 以内のとき応力平衡が成立していると定義し、それらのデータのみを採用することとした。173 回の試験のうち、応力平衡が確認できたのは 94 回であり、このとき、式(2-3)の $\sigma_A(t)$ を用いて評価した。また、本来は平均公称ひずみおよび平均公称ひずみ速度を用いるべきだが、フランジの振動に起因すると考えられる反射波の乱れにより、平均公称ひずみ、平均公称ひずみ速度を用いるのが困難であった。そこで、応力平衡が確認できる場合、反射波を用い

ずに公称ひずみ速度および公称ひずみを次式（式(1-10)および(1-11)を再掲）により算出し，結果を整理した．

$$\dot{\varepsilon}(t) = \frac{2C_0}{L_S} [\varepsilon_1(t) - \varepsilon_T(t)] \quad (2-5)$$

$$\varepsilon(t) = \frac{2C_0}{L_S} \int_0^t [\varepsilon_1(t) - \varepsilon_T(t)] dt \quad (2-6)$$

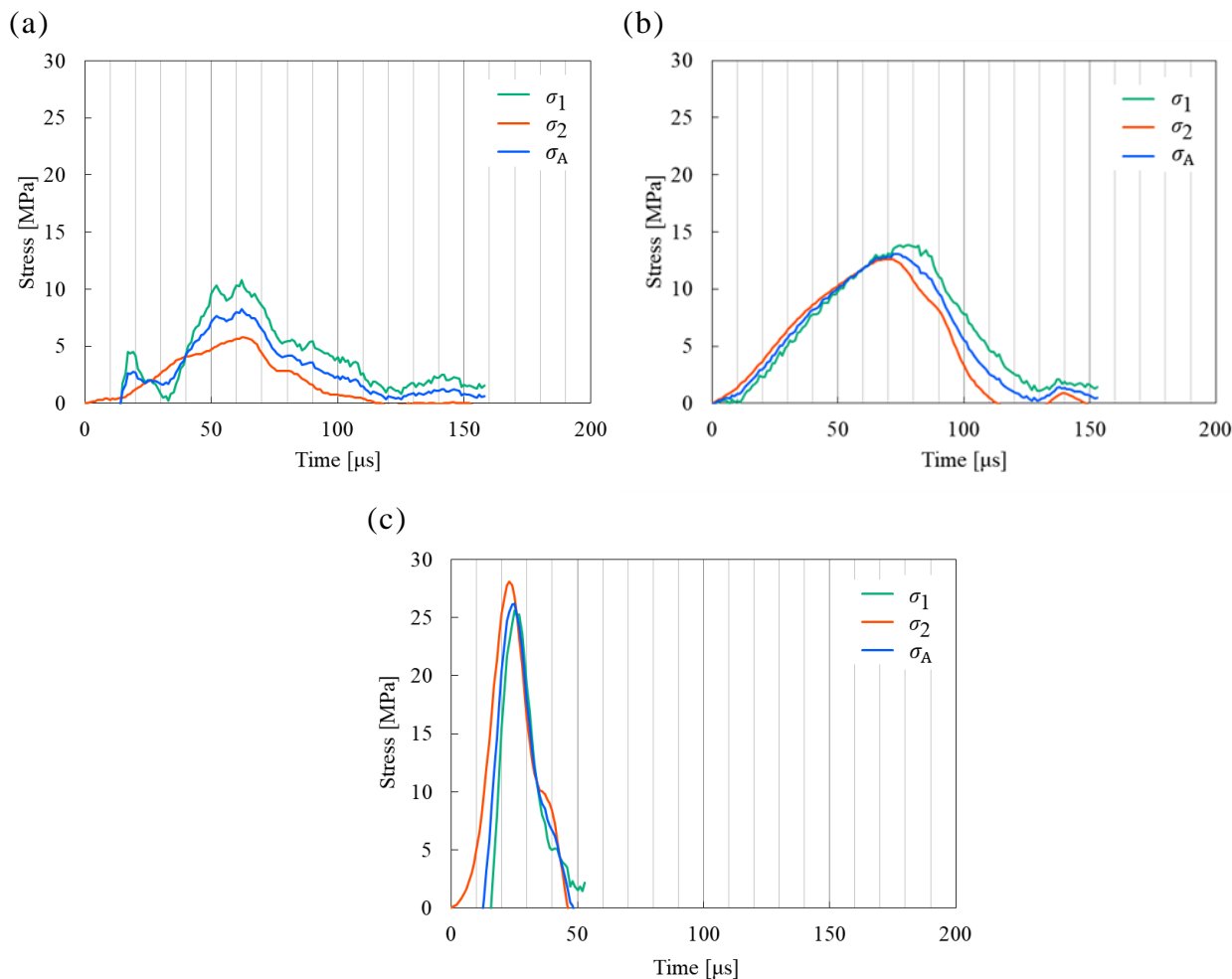
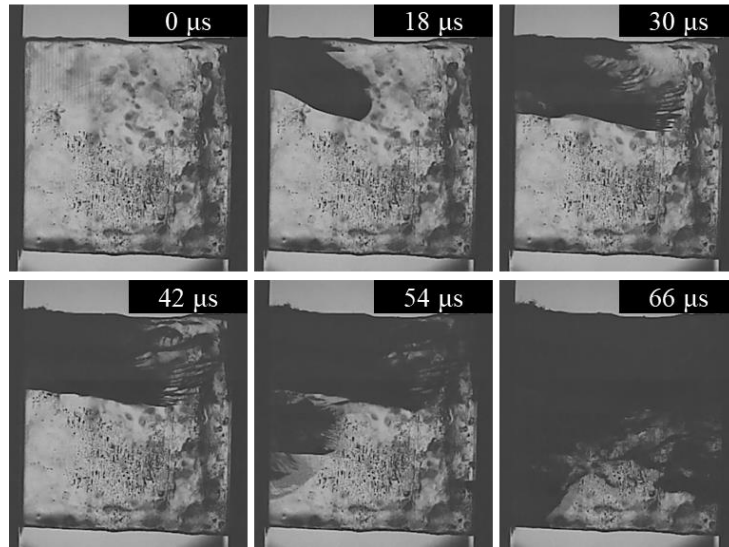


図 2-13 応力—時間関係 (a) $L_s=20$ mm, (b) $L_s=25$ mm, (c) $L_s=5$ mm

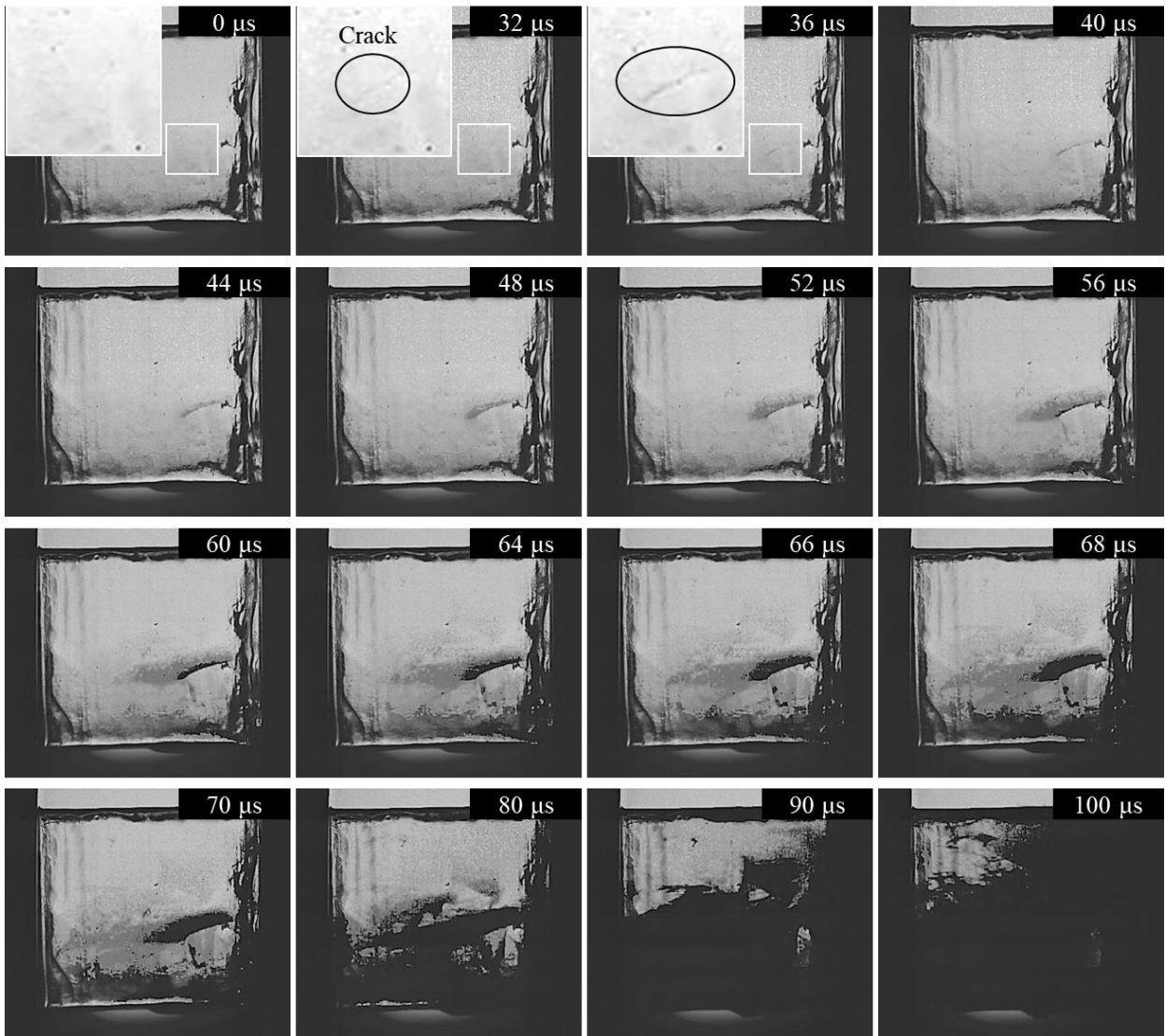
表 2-2 実験条件および破断時のひずみ速度

Test number	Specimen length (mm)	Air pressure (MPa)	Strain rate at fracture (s^{-1})
25	20	0.188	162
163	25	0.056	9.09
148	5	0.400	551

(a)



(b)



(c)

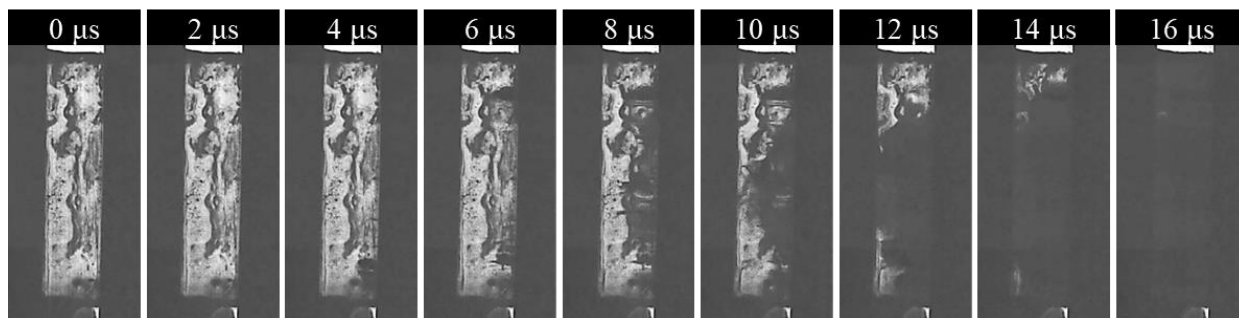


図 2-14 ハイスピードカメラで撮影した氷の破壊の様相

(a) $L_s=20$ mm, (b) $L_s=25$ mm, (c) $L_s=5$ mm

ここで、長さ 25 mm の試験片の結果（図 2-13 (b) および図 2-14 (b)）に着目すると、変形応力は緩やかに増加し、ピーク値に達した後、減少する。この際、破壊の様相を確認すると、32 μ s 付近で試験片中央下部に小さな亀裂が確認できた。その後、発生した亀裂が徐々に成長し、試験片の両端に向かって伝播していく様子を観察することができた。ここで、亀裂と流動応力の関係について考察するため、応力を時間で微分した応力速度 ($d\sigma/dt$) について考える。この際、平均化した $\sigma_A(t)$ ではノイズが大きくなり応力速度の変化を正確に判断できないため、 $\sigma_2(t)$ を用いた。図 2-15 に出力側の応力 $\sigma_2(t)$ およびその応力速度と時間の関係を示す。図 2-15 (a) より、 $\sigma_2(t)$ は 68~71 μ s で最大値に達するのに対し、応力速度は約 24 μ s 付近まで増加した後、減少している。この時、カメラの映像ではまだ亀裂は確認できず、亀裂が確認できるのは 32 μ s 付近からである。カメラの最小分解能は 74 μ m のため、この値より微小な亀裂を観察することは不可能である。よって、カメラでは観察できない微小な亀裂が生成することにより、応力速度が低下したと推察される。また、応力速度が急激に低下し始めた約 70 μ s は、カメラの観察において多数の亀裂が一挙に進展し始める時間と概ね一致している。これらの結果から、応力速度の変化と亀裂の生成・進展の相関関係が示された。

一方、長さ 5 mm の試験片（図 2-13 (c) および図 2-14 (c)）では、変形応力は急激に増加する。この時、試験片の右側から複数の亀裂が発生し、左側に向かって亀裂が進展し、破壊に至る様子が観察された。一方向からのカメラの観察では、16 μ s 以降ではすでに多数の亀裂により氷は崩壊しているように見受けられた。しかし、その後も応力は増加し続けている。これは、変形速度が速いため、氷が破壊されて粉々になった後もフランジ間に挟まれたままとなり、

押し続けられたことが原因と考えられる。一方，図 2-15 (b) より， $\sigma_2(t)$ が 23 μs で最大値に達するのに対し，応力速度は 17 μs 以降減少に転じていることがわかる。これは，カメラの観察で氷が破壊した時間と概ね一致している。長さ 5 mm の試験片では，長さ 25 mm の試験片に比べて変形速度が速いため，亀裂が生成しても応力速度に変化はみられなかったが，複数の亀裂が発生および進展することにより応力速度が変化すると推察される。

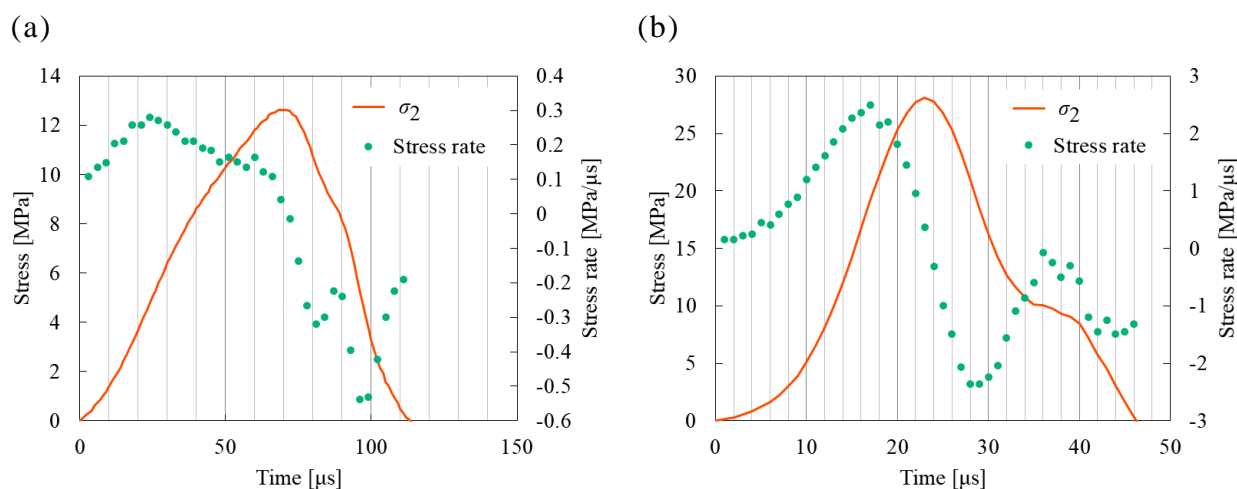


図 2-15 出力側の応力 $\sigma_2(t)$ および応力速度と時間の関係

(a) $L_s=25$ mm (3 μs 間隔で微分), (b) $L_s=5$ mm (1 μs 間隔で微分)

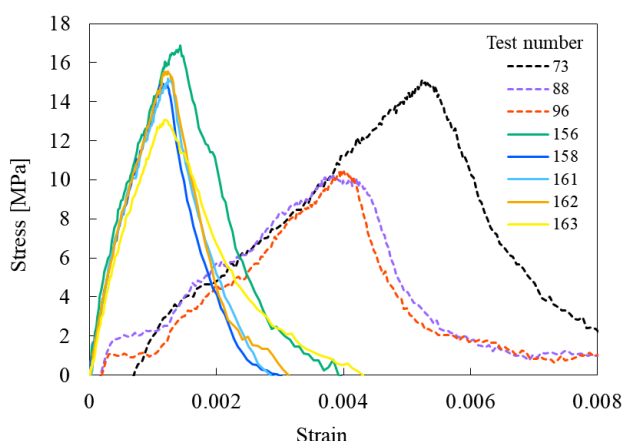
2.3.2.2 応力-ひずみ関係

図 2-16 に衝撃試験において得られた応力-ひずみ関係の一例を示す。図 2-16 (a) はひずみ速度 9.09~15.7 s^{-1} , (b) はひずみ速度 500~706 s^{-1} の結果をまとめたものである。実験条件および結果は表 2-3 の通りである。最大応力は，ひずみ速度とともに増加する傾向にあることが確認できた。また，ひずみ速度に関わらず，応力は最大値に達した後，緩やかに低下している。この傾向は，Shazly らの研究^{13),14)}でも報告されており，破壊した後の氷がフランジの間に拘束されて残っているためと考えられる。

試験片とフランジの接触状態に着目すると，試験片をフランジの両端としっかり固着させた場合は変形初期から応力が増加しているのに対し，片側のみ固着させた試験片は，曲線の初期傾きが緩やかであり，最大応力時のひずみ量が大きくなった。この接触状態による差は試験片の長さ（ひずみ速度）に関係なく生じた。これは，変形初期でフランジ表面と試験片表面にわずかな隙間が存

在し、全面で接触できていなかったことが原因と考えられる。カメラの映像を確認すると、長さ 20 mm および 25 mm の試験片のうち Test No. 156, 158, 161, 162, 163 では、図 2-14 (b) のように亀裂は試験片内部で発生していたが、片側のみフランジに固着させた Test No. 73, 88, 96 では、亀裂は必ず固着させていないフランジ側から発生し、伝播することが確認された。これは、試験片の一部分のみがフランジと先に接触することで試験片表面で応力集中が起き、表面から亀裂が入りやすくなったためと推察される。一方、試験片長さの短い 5 mm の試験片では、接触状態によらずカメラの映像において亀裂の発生に明確な違いは認められなかった。これは、試験片が短いことで試験片端部と中央部の応力分布の差が小さく、片側から亀裂が発生しても平衡を保つことができたためと考えられる。つまり、SHB 法において試験片の長さを短くすることで応力平衡を確立すること¹⁵⁾と同義である。これらの結果は、氷の場合、試験片の接触状態が応力—ひずみ関係に多大な影響を及ぼすことを示唆している。

(a) $9.09 \sim 15.7 \text{ s}^{-1}$



(b) $500 \sim 706 \text{ s}^{-1}$

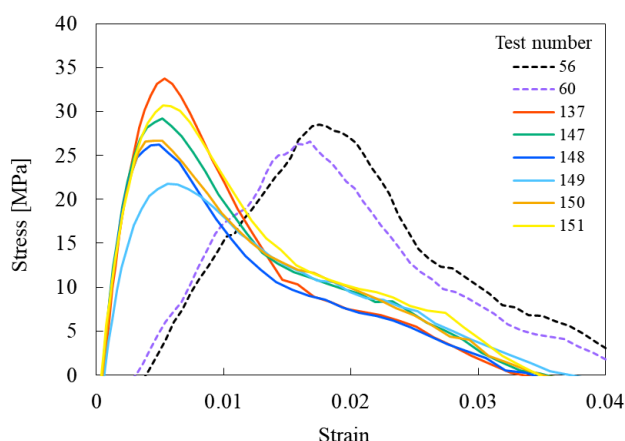


図 2-16 衝撃試験における応力—ひずみ関係の一例

(a) ひずみ速度 $9.09 \sim 15.7 \text{ s}^{-1}$, (b) ひずみ速度 $500 \sim 706 \text{ s}^{-1}$

破線：片側のみフランジと固着，実線：両端をフランジと固着

表 2-3 衝撃試験における実験条件および結果

Test number	Specimen length (mm)	Contact condition between flanges and specimen	Maximum stress (MPa)	Strain rate at maximum stress (s ⁻¹)	Strain at maximum stress
73	20	One end adhered (Output bar side)	15.1	14.0	0.00524
88			10.2	13.9	0.00384
96			10.4	13.0	0.00398
156	25	Both ends adhered	16.9	9.30	0.00606
158			14.9	9.59	0.00254
161			15.2	9.50	0.00206
162			15.5	9.09	0.00198
163			13.1	15.7	0.00190
56			5	One end adhered (Output bar side)	28.5
60	26.6	500			0.0168
137	33.7	534			0.00533
147	29.2	608			0.00519
148	26.2	551			0.00495
149	21.8	706			0.00557
150	26.7	589			0.00449
151	30.7	618			0.00521

図 2-17 に両端をフランジに固着させた試験片における最大応力時のひずみ量と試験片長さの関係を示す。片側のみ固着させた試験片は、最大応力時のひずみ量が過大評価されてしまうため除外した。最大応力時のひずみ量は、試験片長さが短くなるにつれ増加する傾向にある。2.3.2.1 の応力-時間関係やカメラの観察結果より、試験片が短い場合、試験片内に亀裂が多数発生した後も応力は増加し続けるため、最大応力時のひずみ量も増加したと推察される。一方、SHB 試験の先行研究^{13),14),16)-22)}では、強度評価の指標に最大応力を用いているが、実際にはそれ以前に氷が破壊していた可能性がある。したがって、高ひずみ速度での氷の破壊ひずみは応力-ひずみ関係だけでは定義できず、カメラによる観察を併用する必要があることが示された。ただし、本研究で氷が破壊したように見えるのは一方向からの観察結果によるものである。したがって、破

壊ひずみを定義し得る試験片全体の亀裂の評価については、多方向からの観察を行うなど、さらなる検討が必要である。

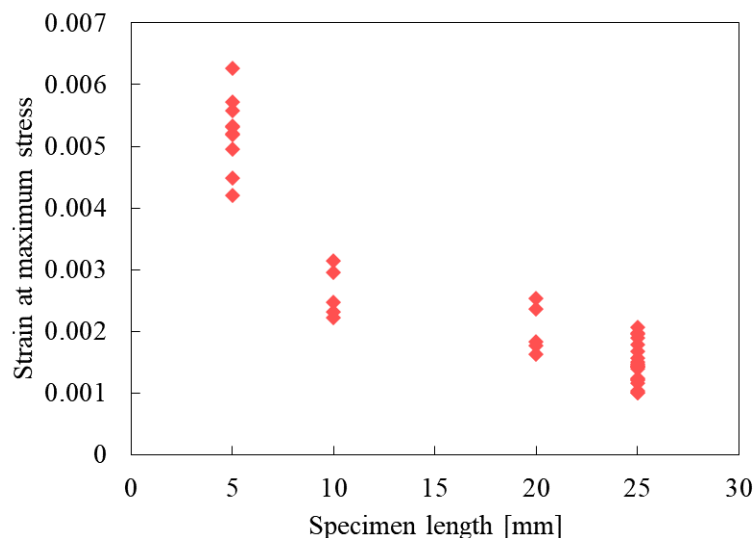


図 2-17 最大応力時のひずみ量と試験片長さの関係

2.3.2.3 最大応力に及ぼす接触状態の影響

図 2-18 に衝撃試験で得られた最大応力とひずみ速度の関係を示す。両端をフランジに固着させた試験片と片端のみを固着させた試験片では、応力に顕著な差がみられ、両端を固着させた試験片の方が最大応力は大きいことがわかる。2.3.2.2 でも述べたように、フランジ表面と試験片の接触状態が悪いと片側から亀裂が生成、進展し、結果的に最大応力が低下すると考えられる。このように、SHB 法を用いて氷の圧縮応力を測定するためには、試験片端面から亀裂が入らないよう、試験片と試験装置の接触状態に留意する必要があることが明らかになった。一方、Shazly ら^{13),14)}は、接触面にグリースを用いた場合と薄い水の層により固着した場合を比較し、高ひずみ速度での治具による試験片端部の拘束の影響を否定し、端面の摩擦の影響はみられないことを報告している。接触面にグリースを塗らないと接触面から亀裂が発生するが、接触面にグリースを塗ることにより、氷表面の凹凸がなくなり、端部からの亀裂の発生を抑制することができる。つまり、これら二つの条件は、本研究において試験片をフランジに固着させた場合と見かけ上同じ条件となっていたと考えられる。どちらの手法も端部からの亀裂の発生を防ぐことができていたため、両者に大きな差がみられなかったと推察される。

また、ひずみ速度の増加によって生じた最大応力の増加割合を次式の累乗近似により算出した。

$$\sigma = C\dot{\varepsilon}^{\alpha} \quad (2-7)$$

ここで、 C は定数、 α はひずみ速度の増加に伴う最大応力の増加割合（ひずみ速度感受性指数）を示しており、両対数グラフの傾きで表される。算出した α の値を図 2-18 中に示す。片側のみ固着させた試験片は両端を固着させた試験片に比べ α の値が大きく、接触状態による最大応力の差は、ひずみ速度の増加とともに小さくなっている。しかし、前述のように、ひずみ速度 10^2 s^{-1} 以上の実験では試験片が短く、接触状態の違いによって亀裂の発生や伝播に差がみられなかった。よって、初期亀裂が最大応力に与える影響は小さい可能性がある。SHB 試験では、異なるひずみ速度の実験を行うために試験片の長さを変化させている。そのため、同じ長さの試験片を用いてすべての衝撃ひずみ速度の試験を実施することはできなかった。よって、試験片長さが氷の破壊に与える影響については、新たな実験方法を含め、今後の検討課題である。

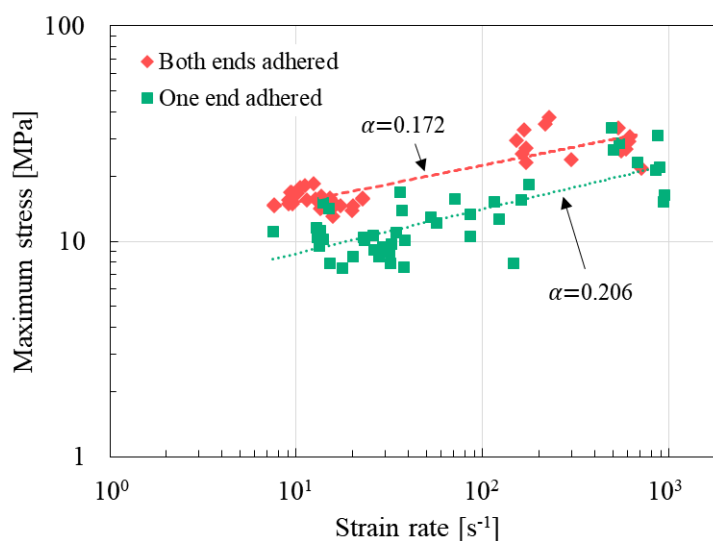


図 2-18 衝撃試験における最大応力とひずみ速度の関係

衝撃試験で得られた結果を先行研究と比較する。本研究で実施した破断時のひずみ速度約 $10^1 \sim 10^3 \text{ s}^{-1}$ の範囲では、最大応力に正のひずみ速度依存性があることを確認した。この傾向は、Kim と Keune¹⁸⁾、Shazly ら^{13),14)}および Song ら²¹⁾の報告と一致するが、Dutta ら^{16),17)}とは一致しない。Dutta ら^{16),17)}の実験

で使用された試験片の長さは 76.2 mm であったため、SHB 法において重要な応力平衡が成立していなかった可能性が考えられる。しかし、測定データが記載されていないため、明確な判断はできない。また、衝撃試験で得られた最大応力を Kim と Keune¹⁸⁾や Shazly ら^{13),14)}と比較すると、片側のみ固着させた試験片の結果と良い一致を示したが、両端を固着させた試験片の最大応力はこれら先行研究の結果よりもやや高くなった。この原因として、まず Kim と Keune¹⁸⁾の実験は 0°C で実施していることが挙げられる。氷の最大応力は温度の低下とともに増加する²³⁾⁻²⁵⁾ため、本研究の方が高い応力値が得られたと考えられる。また、室温環境下において氷袋で棒を冷却する手法を採用しているため、接触面で氷が溶けてしまったことが影響した可能性がある。一方、Shazly ら^{13),14)}の実験は本研究と同じ条件の -10°C で実施しているものの、軸方向から見た試験片の中央面に試験片作製過程でできた界面が存在している。この影響により最大応力が低下した可能性は否定できない。

2.3.3 圧縮強度の定義

図 2-19 に準静的試験、動的試験および衝撃試験における代表的な応力-ひずみ関係を示す。なお、準静的および動的試験の結果はばらつきが大きかったが、衝撃試験の結果から、氷と治具の接触状態が悪く、表面から亀裂が発生した場合、応力-ひずみ関係の初期傾きが小さくなることがわかった。よって、準静的および動的試験の代表曲線は、平均的なものではなく、応力-ひずみ関係の初期傾きが大きい結果の中から抽出した。応力-ひずみ関係の初期傾きは、ひずみ速度の増加に伴い増加する傾向がみられた。また、最大応力時のひずみは、ひずみ速度の増加に伴い減少する傾向を示した。しかし、ひずみ速度 0.8 s^{-1} の結果は、この傾向とは一致しなかった。準静的および動的試験は万能試験機を用いて実施しており、試験片は固定されている下部の治具には固着したが、上部の治具は可動させるため試験片と固着させていない。氷は低ひずみ速度では延性的な挙動を示すため、この接触状態による影響はほとんど無視できると考えられる。しかし、 10^{-3} s^{-1} よりも高いひずみ速度においては、氷が脆性的な挙動を示すようになるため、接触状態が大きく影響する。特にひずみ速度 0.8 s^{-1} の試験は使用した万能試験機で実施できる最高速度であるため、この接触状態が応力-ひずみ関係の初期傾きの低下と最大応力時のひずみ量の増大につながったと考えられる。SHB 法では、応力波を利用するため試験片の両端をフランジと固着させることで試験片表面からの亀裂の発生を抑制することが

できた。しかし、準静的および動的試験では、万能試験機が所定の速度に達するまでの加速時間を考慮すると、試験片の両端を治具と固着させて実験することはできない。試験片を大きくすることで加速時間の影響を小さくすることができるが、チャンバーのサイズの関係上、試験片を大きくするのは難しい。ひずみ速度 10^0 s^{-1} オーダーの圧縮応力を正確に測定する実験手法の検討は今後の課題である。

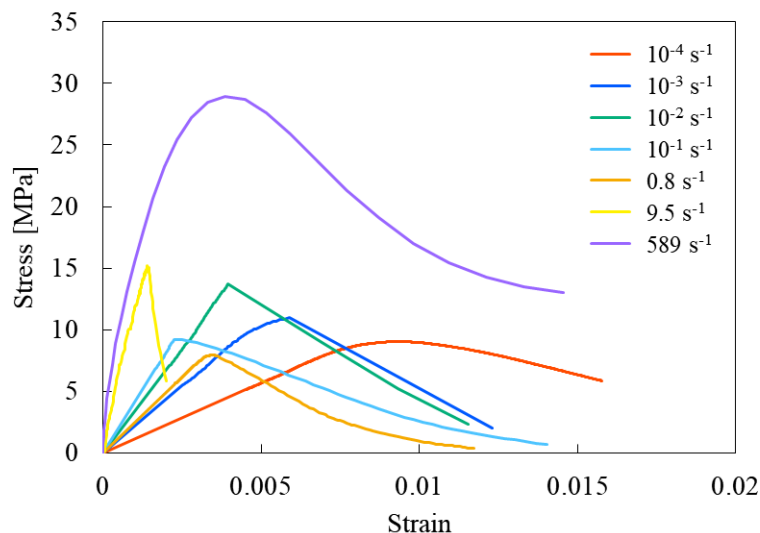


図 2-19 単軸圧縮試験における代表的な応力—ひずみ関係

図 2-20 に最大応力とひずみ速度の関係を示す。図中の緑の点線および赤の破線は、それぞれ、衝撃試験において片側のみ固着させた試験片の結果および両端を固着させた試験片の結果から式(2-7)により求めた直線である。緑の点線は、万能試験機で実施したひずみ速度 0.8 s^{-1} の結果と非常によく一致している。これは、ひずみ速度 0.8 s^{-1} の試験では衝撃試験で片側のみ固着させた試験片と同じような接触状態となり、表面から破壊していたことを示唆している。また、赤の破線で示される試験片の両端を固着させたものの直線は、ひずみ速度 0.8 s^{-1} の結果を通らず、ひずみ速度 10^{-1} s^{-1} における応力の上限值に近い値を示す。これは、一部の試験片において、試験片と治具との接触状態が悪く、表面から亀裂が発生することにより本来の材料強度よりも最大応力が低下したためと推察される。このため、図 2-20 中の赤の破線は、ひずみ速度 10^{-1} s^{-1} の平均値ではなく、応力の上限值に近い値となったと考えられる。よって、表面から破壊したと考えられる試験片を除くと、少なくともひずみ速度 10^{-1} s^{-1} 付近から最大圧縮応力は増加する傾向にあることが示唆された。

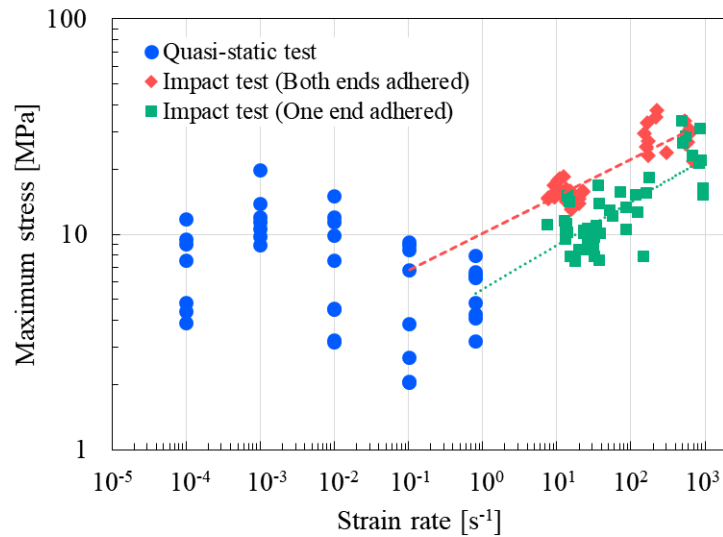


図 2-20 最大応力とひずみ速度の関係

さらに，2.3.2.1 および 2.3.2.2 でも述べたように，ひずみ速度 10^2 s^{-1} 以上では最大応力とカメラの観察による破壊のタイミングは一致しない．このことから，最大圧縮応力と破壊時の応力は必ずしも一致しないと言える．そこで，ひずみ速度 10^2 s^{-1} 以上の試験片では，カメラの観察で氷が破壊した時間と応力速度が減少に転じた点が概ね一致していることから，この時点で氷が破壊したと定義し，破壊時の応力を圧縮強度として整理を試みた．ただし，応力速度が極大値に達した時点では，まだ反射波の影響が大きく，応力平衡が成立していない．そこで，応力平衡が成立しているひずみ速度約 10^1 s^{-1} では平均公称応力 $\sigma_A(t)$ を用いたが，ひずみ速度 10^2 s^{-1} 以上では出力側の応力 $\sigma_2(t)$ を用いて圧縮強度をまとめた．なお，ひずみ速度 0.8 s^{-1} の結果およびひずみ速度 10^{-2} s^{-1} ， 10^{-1} s^{-1} において最大応力が小さくなった結果は，図 2-20 の赤の破線との関係や応力—ひずみ曲線の初期傾きから，表面からの亀裂の発生により破壊していた可能性が高いと判断し，除外して考察する．また，ひずみ速度が 10^2 s^{-1} より小さい場合においても，応力—ひずみ関係の最大値が破壊に寄与した最大の応力とみなし，圧縮強度と呼称する．

図 2-21 に圧縮強度とひずみ速度の関係を示す．ひずみ速度 10^2 s^{-1} 以上におけるひずみ速度は破壊時を基準として算出し直したため，図 2-20 とは異なる値になっている．また，式(2-7)により求めたひずみ速度 10^1 s^{-1} 以上の圧縮強度の累乗近似を赤の破線とし，ひずみ速度感受性指数と合わせて図中に示す．圧縮強度は最大応力よりもやや低下し，圧縮強度のひずみ速度感受性指数は，最大応力のひずみ速度感受性指数よりも小さくなった．また，図 2-20 と比較すると，赤の破線はひずみ速度 10^{-1} s^{-1} の上限値とより近い値となった．最大応

力と同様に，圧縮強度の結果も少なくともひずみ速度 10^{-1} s^{-1} 付近から増加する傾向にあることが示唆された．

衝撃ひずみ速度での最大応力の増加はいくつか報告されている^{13),14),18)-21)}が，どの程度のひずみ速度から増加に転じるかについては統一した見解が得られていない．また，先行研究では，最大応力時を破壊として圧縮応力のひずみ速度依存性を評価しているが，本研究より，ひずみ速度 10^2 s^{-1} 以上における氷の最大応力と破壊時の応力である圧縮強度は一致しないことが示された．よって，氷の圧縮強度のひずみ速度依存性を議論するためには，高速度カメラによる観察などを併用し破壊のタイミングを正しく評価する必要がある．

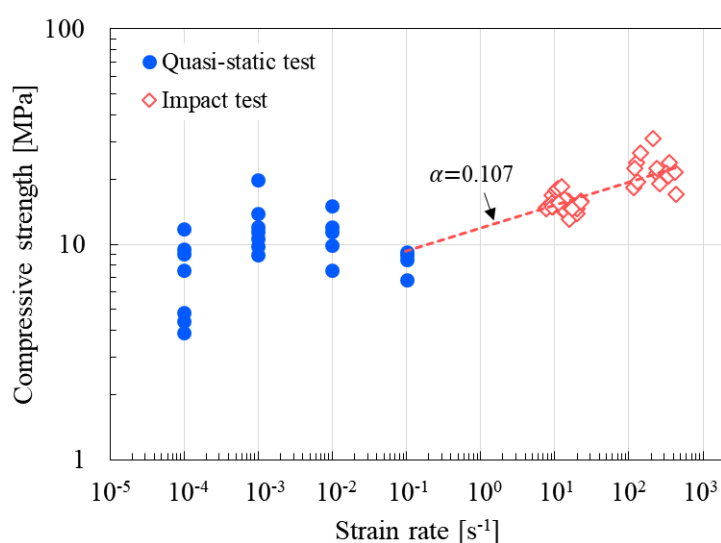


図 2-21 圧縮強度とひずみ速度の関係

2.3.4 圧縮強度のひずみ速度依存性に関する考察

図 2-22 に本研究で得られた -10°C における氷の単軸圧縮試験結果を基にした圧縮強度とひずみ速度の関係の模式図を示す．延性破壊を示す 10^{-3} s^{-1} 以下の低ひずみ速度における圧縮強度はひずみ速度の増加に伴い増加するが，脆性破壊を示すひずみ速度 $10^{-3} \sim 10^{-1} \text{ s}^{-1}$ でやや減少し，ひずみ速度 10^{-1} s^{-1} 以上で再び増加する． -10°C の低ひずみ速度の場合，転位のすべり運動とともに高温状態に起因した粒界すべり，転位クリープ，動的回復が同時に作用する．そのため，亀裂が生成しても先端の応力集中が緩和されることによりその成長が阻害され，延性挙動を示す．この領域での圧縮強度の増加は，転位クリープ挙動のひずみ速度依存性によって説明される．

ひずみ速度 10^{-3} s^{-1} 以上では、転位クリープが発現する時間が短くなり、応力緩和が徐々に減少することで、亀裂先端に応力が集中して亀裂進展が生じ、脆性的な挙動を示し始める。この亀裂進展に伴う脆化によって、破断ひずみが減少し、圧縮強度はやや減少する傾向を示すと考えられる。

一方、ひずみ速度 10^{-1} s^{-1} 以上では、脆性破壊が促進するにも関わらず、圧縮強度は増加する。この領域では、変形速度が速くなることで転位クリープの影響が大幅に減少すると予測される。また、ひずみ速度の増加によって粒界すべりが起きにくくなるため、粒界でのすべり伝播より粒内の転位のすべり運動が生じやすくなると考えられる。その結果、転位の集積によって粒界に応力集中が生じ、粒内に亀裂が生成・進展していると推察される。ここで、転位のすべり運動に必要な応力について考える。一般的に、金属材料の塑性変形は、転位の熱活性化過程に支配される。転位には、抵抗が広範囲に及ぶ長範囲応力場と原子間距離程度の短範囲にしか働かない短範囲応力場があり、転位の熱活性化過程とは、転位が熱振動の助けを借りて短範囲の障害を乗り越える過程のことである²⁶⁾。図 2-23 に転位の運動に対する短範囲の障害と塑性変形に必要な応力 (σ) の関係を模式図で示す。応力は、弾性定数の温度変化を除けば温度とひずみ速度に依存しない非熱的成分 (σ_{μ}) と温度とひずみ速度に依存する熱的成分 (σ^*) の和として次式で与えられる。

$$\sigma = \sigma_{\mu} + \sigma^* \quad (2-8)$$

長範囲応力場と短範囲応力場は、それぞれ非熱的成分と熱的成分に該当する。高温では、熱振動の活性化エネルギー (ΔG) が大きいため、 σ^* は非常に小さくなり、 σ が小さくても転位は短範囲の応力場を容易に乗り越えることができる。一方、温度が低い場合は、 ΔG が減少するため変形には大きな応力を必要とする。同様に、変形速度が速い場合は、変形時間が短くなるため ΔG が小さくなる。つまり、転位の熱活性化過程においては、ひずみ速度の増加は温度の低下と同義となる。金属材料において、高ひずみ速度域で流動応力が急上昇する傾向²⁷⁾は、 ΔG の減少分を σ^* で補完することで、式(2-8)が示す通り、 σ が増加するためである。氷の場合、第 1 章で述べたように、塑性変形には温度依存性があり²³⁾⁻²⁵⁾、また、衝撃試験においても低温での最大圧縮応力の増加が報告されている^{13),14)}。よって、ひずみ速度 10^{-1} s^{-1} 付近からの氷の圧縮強度の増加は、その変形が転位の熱活性化過程によって支配されていると考えることで説明できる。

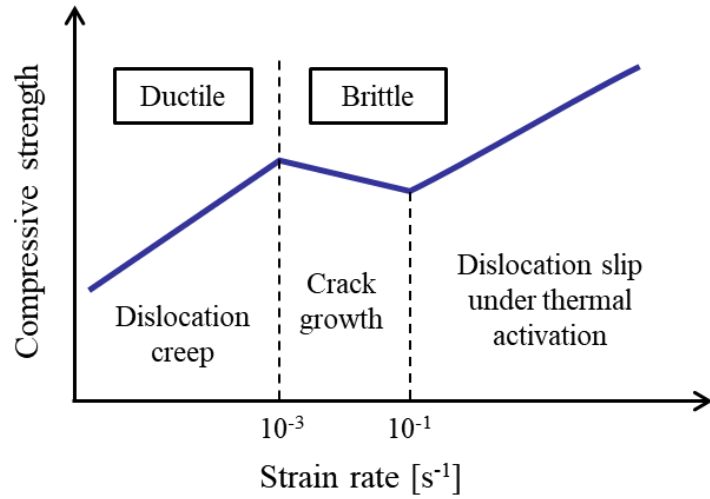


図 2-22 圧縮強度のひずみ速度依存性とその主要因

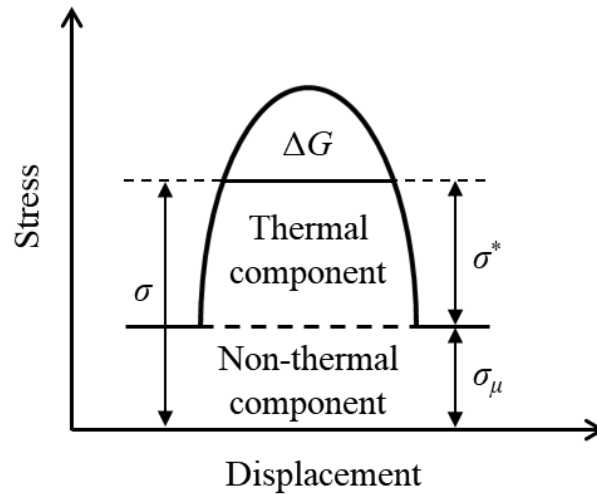


図 2-23 転位の運動に対する短範囲の障害と塑性変形に必要な応力

2.4 結 言

本章では、万能試験機およびフランジ付 SHB 圧縮試験装置を用いて、幅広いひずみ速度における単軸圧縮試験を実施し、氷の圧縮変形特性を評価した。以下に得られた結果を示す。

- (1) 準静的および動的試験での最大応力は、ひずみ速度 $10^{-4} \sim 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ にかけて増加し、ひずみ速度 $10^{-3} \sim 10^{-1} \text{ s}^{-1}$ では減少する傾向がみられ、ひずみ速度 10^{-3} s^{-1} 付近で延性破壊から脆性破壊に遷移することが確認された。
- (2) 衝撃試験の各試験において応力平衡を確認し、入力棒側と出力棒側の応力の差が $\pm 15\%$ 以内の時に応力平衡が成立したとみなし、結果を整理した。
- (3) 衝撃試験において、試験片と治具（フランジ）の接触状態が悪い場合、応力—ひずみ関係の初期傾きが小さくなった。これに伴い、最大応力は低くなり、最大応力時のひずみは増加した。これは、変形初期に試験片と治具（フランジ）表面に存在するわずかな隙間によって応力集中が生じ、そこから亀裂が発生したことが原因と考えられる。このことから、試験片の接触状態が圧縮応力に大きく影響することが示された。
- (4) 衝撃試験において、SHB 試験とカメラによる観察を組み合わせることにより亀裂の生成・進展と応力速度の変化には相関関係があることが示された。また、ひずみ速度 10^2 s^{-1} 以上では、実際には最大応力に達する前に氷が破壊していたことが示唆された。
- (5) ひずみ速度 10^2 s^{-1} 以上における破壊を応力速度が減少に転じた点として再定義し、その時の応力を圧縮強度として整理すると、圧縮強度のひずみ速度依存性は、最大応力よりも小さくなることがわかった。さらに、準静的および動的試験の結果と合わせると、圧縮強度は少なくともひずみ速度 10^{-1} s^{-1} 付近から増加する傾向にあることが示唆された。この圧縮強度の増加は、転位の熱活性化過程で説明することができる。

以上より、単軸試験で得られる氷の圧縮強度のひずみ速度依存性を明らかにした。この結果を踏まえ、次章でインデンテーション試験における氷の変形・破壊特性を明らかにする。

第3章 インデンテーション試験における 圧子形状とひずみ速度の影響

3.1 緒言

第2章の単軸圧縮試験により、氷の圧縮変形特性のひずみ速度依存性が明らかになった。しかし、氷と構造物の衝突現象などの工学的な問題を解決するためには、局所変形による氷の破壊現象を解明する必要がある。そこで本章では、単軸試験とは異なる多軸応力場が形成されるインデンテーション試験を実施し、氷の変形・破壊特性に及ぼす圧子形状の影響やその速度依存性について検討する。また、単軸圧縮試験との比較により、インデンテーション試験における脆性破壊メカニズムについて考察する。

3.2 インデンテーション試験方法

3.2.1 試験片

インデンテーション試験で用いた試料は、第2章の単軸圧縮試験で用いたものと同様である。準静的および動的単軸圧縮試験時と同様に、20 mm×20 mm×30 mmの純氷を試験片固定台に固着させた後、上面を切削し、一辺20 mmの立方体形状の試験片を作製した。

3.2.2 準静的および動的試験

準静的および動的試験では、変位速度0.002 mm/s、0.02 mm/s、0.2 mm/s、2 mm/s、16 mm/sの5種類の速度の実験を行った。サンプリング周期は、単軸圧縮試験と同様である。変位速度0.002～2 mm/sの試験は、2.2.1項で使用した万能試験機と低温チャンバーを使用した。一方、変位速度16 mm/sの試験は、万能試験機に容量10 kNのロードセル（東京測器研究所製，TCLA-10KNB）を取り付け、その出力をシグナルコンディショナ（共和電業製，CDV-230C）を通してデジタルオシロスコープに記録した。

図3-1にチャンバー内の概略図および球圧子と円錐圧子の外観を示す。上部の治具の先端には、S45C製の球圧子および円錐圧子を取り付けた。先端形状の影響を比較するため、球圧子には直径10 mm、15 mm、20 mm、円錐圧子に

は圧子角度（頂角）90°、120°、140°の3種類ずつを用いた。形状解析レーザー顕微鏡（KEYENCE 製，VK-X260）を用いて圧子形状を計測したところ，円錐圧子の先端は，加工精度の影響で先端が完全に尖っておらず，欠損が確認された。そのため，インデンテーション試験における変位量や荷重は，先端が尖っている場合に比べて過小に評価されると考えられる。先行研究¹⁾では，金属材料に対するインデンテーション試験において圧子先端の丸みを補正する方法が提案されているが，氷の試験片は押込中に亀裂が発生するため，この方法では補正できない。そこで本研究では，次式によりインデンテーション試験で得られる変位量 h を先端の欠損量 Δh で補正し，変位量として h_t を用いて評価した。

$$h_t = h + \Delta h \quad (3-1)$$

ただし，荷重の補正はできていないため，変形初期は本来の荷重値より小さくなっている可能性がある。試験結果のばらつきを抑えるため，各条件で4～16回ずつ試験を行った。また，準静的および動的単軸圧縮試験と同様に試験機および試験片固定台のコンプライアンスを測定し，変位量を校正した。

氷の変形および破壊の様子は，チャンバーの観察窓の前に設置したカメラで撮影した。変位速度 0.002 mm/s，0.02 mm/s，0.2 mm/s ではデジタルビデオカメラ（ニコン製，D5200），2 mm/s ではハイスピードカメラ（ナックイメージテクノロジー製，MEMRECAM HX-3），16 mm/s ではハイスピードカメラ（ナックイメージテクノロジー製，MEMRECAM ACS-1）を使用した。フレームレートはそれぞれ 25 fps，2000 fps および 100000 fps である。また，光源としてメタルハライドランプ（ARRI 製，POKET PAR125）および LED ライト（アイテックシステム製，LLBK1-LA-W-0001）の光をカメラの反対側から照射した。

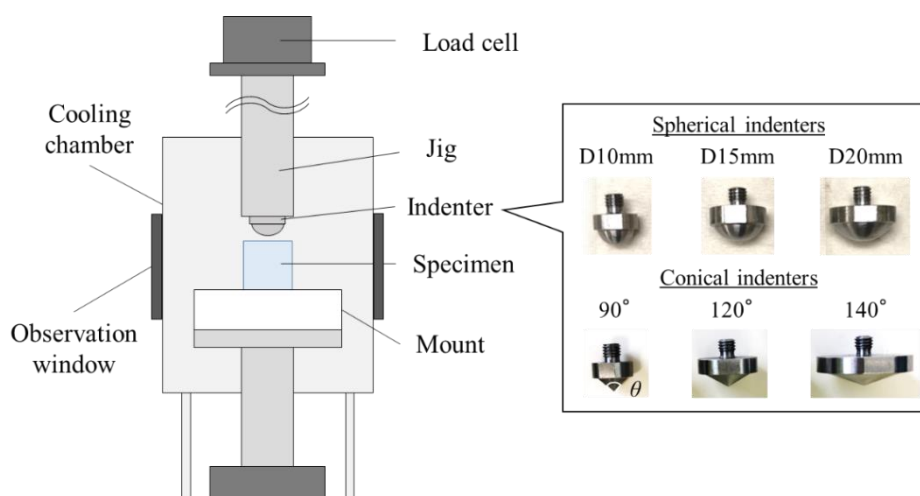


図 3-1 チャンバー内の概略図および球圧子と円錐圧子の外観

3.2.3 衝撃試験

衝撃試験では，自作の自由落下式インデンテーション試験装置を使用した．図 3-2 (a) に試験装置の外観を示す．本装置は，打撃棒を糸で一定の高さに吊るした後，その糸を切断して打撃棒直下に設置した試験片に衝突させる仕組みである．この際，打撃棒が垂直に落下するよう，アクリル樹脂製のパイプ内部に固定されたフッ素樹脂製のリングに沿って打撃棒を落下させた．また，打撃棒を落下させる高さを変えることで，試験速度を変化させることが可能である．試験片は，試験片固定台ごと金属板に固定した．打撃棒は，長さ 1200 mm，外径 16 mm，内径 12 mm の SUS304 製の円管とし，先端には図 3-2 (b) に示す球圧子および円錐圧子を取り付けた．圧子は，準静的および動的試験と同じ直径 10 mm，15 mm，20 mm の球圧子および圧子角度 90°，120°，140° の円錐圧子を用意した．また，試験は -10°C に設定したプレハブ冷凍庫（庫内容積 5.63 m^3 ）内で実施した．実験の温度を保証するため，熱電対を取り付けた温度計測用の氷を冷凍庫内に設置し，この氷の温度が $-10\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ となった際に実験を行った．

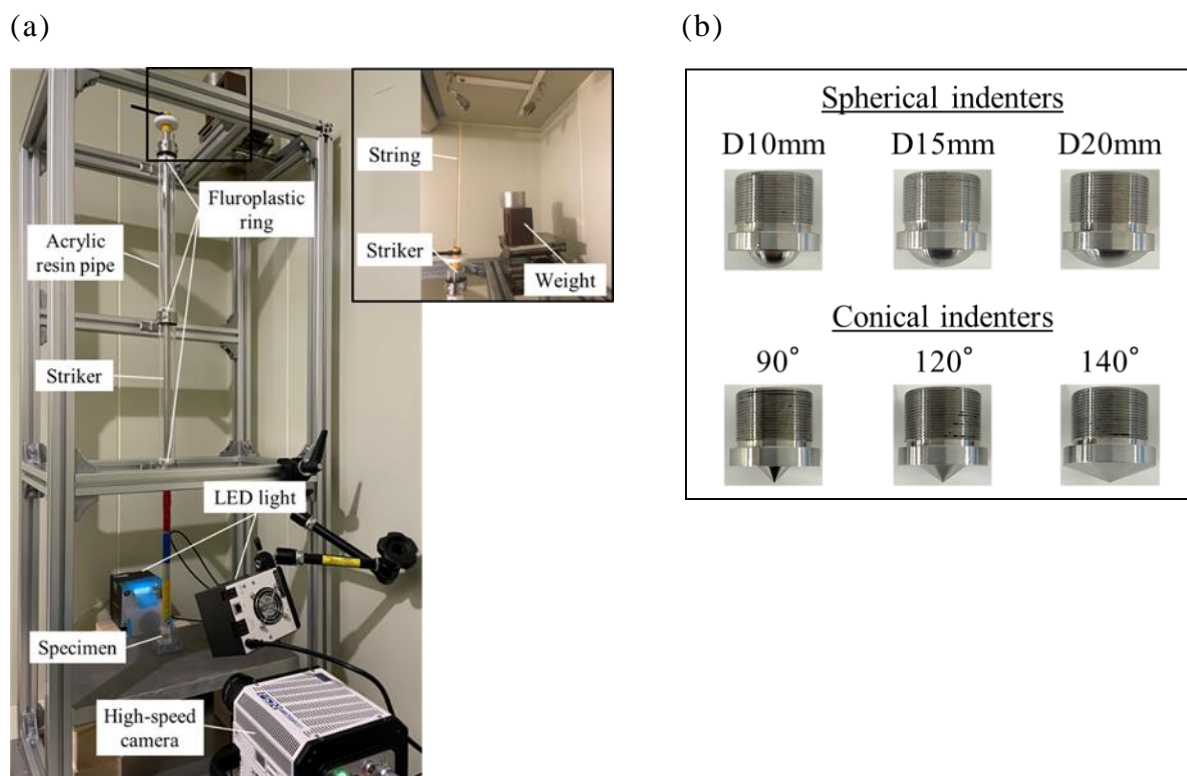


図 3-2 (a) 試験装置の外観，(b) 球圧子および円錐圧子の外観

本試験では、試験片に直接負荷を与えることで衝撃変形を評価するダイレクトインパクト・ホプキンソン棒法^{2),3)}を用いた。打撃棒にはひずみゲージを貼り付け、氷との衝突時に棒内を伝播する弾性応力波を測定した。箔ひずみゲージは圧子の先端から 106 mm の位置、半導体ひずみゲージは先端から 156 mm および 312 mm の位置に貼付した。ひずみゲージの出力は、ホイートストンブリッジ回路および差動増幅器（エヌエフ回路設計ブロック製，5307）を通し、サンプリング周期 1 MHz でデジタルオシロスコープ（横河計測製，DL850E）に記録した。また、ヤング率は温度によって変化するため、Ledbetter⁴⁾の実験結果を基に、ヤング率と温度の関係を数式化し、 -10°C における SUS304 のヤング率（202 GPa）を算出した。

ホプキンソン棒を用いて弾性応力波を測定する場合、反射波の影響を受けるため、測定可能な時間は棒の長さによって制約される。そのため、本試験装置においても測定時間が長くなる場合、打撃棒の他端から反射する弾性応力波の影響を考慮する必要がある。本装置では、反射波の影響を考慮せずに測定できる時間は $415\ \mu\text{s}$ までである。そこで、氷の破壊に要する時間がこれを超える場合、2点応力測定法⁵⁾⁻⁷⁾を用いた。この手法では、2つのひずみゲージ（本研究では上述の半導体ひずみゲージ）を使用して棒の2点の応力を測定することによって、衝撃端に作用する応力を時間的制約なしに測定することができる。図 3-3 に 2点応力測定法の模式図を示す。打撃棒が落下して試験片に衝突するとき、打撃棒の上方向に伝播する波を $\sigma_a(t)$ 、下方向に伝播する波を $\sigma_b(t)$ とする。任意の時刻 t においてひずみゲージ g_1, g_2 を通過する応力をそれぞれ $\sigma_1(t), \sigma_2(t)$ とすると、以下の式で表せる。

$$\sigma_1(t) = \sigma_a(t) + \sigma_b(t) \quad (3-2)$$

$$\sigma_2(t) = \sigma_a(t - T) + \sigma_b(t + T) \quad (3-3)$$

ここで、 T は弾性応力波がひずみゲージ g_1, g_2 間の距離 l_0 を伝播するのに要する時間である。試験片との接触端での応力 $\sigma(t)$ は、式(3-2)および(3-3)を用いると次のようになる。

$$\begin{aligned} \sigma(t) &= \sigma_a(t+T) + \sigma_b(t-T) \\ &= \sigma_1(t+T) + \sigma_1(t-T) - \sigma_2(t) \end{aligned} \quad (3-4)$$

これより、試験片に作用する応力を時間的制限なしに測定することが可能となる。また、打撃棒の断面積を A とし、試験片に作用する荷重を以下の式により算出した。

$$P(t) = \sigma(t)A \quad (3-5)$$

図 3-4 に 2 点応力測定法を適用した場合と適用しなかった場合に得られた荷重一時間関係の一例を示す。2 点応力測定法を適用しない場合、400 μs を超えた付近から反射波の影響を受けて荷重が大きく低下する。しかし、2 点応力測定法を適用することで反射波の影響が取り除かれ、この荷重の低下が改善されることを確認した。

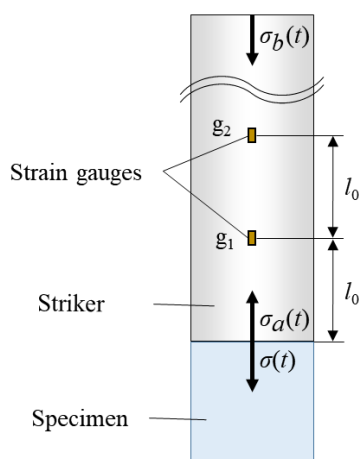


図 3-3 2 点応力測定法の模式図

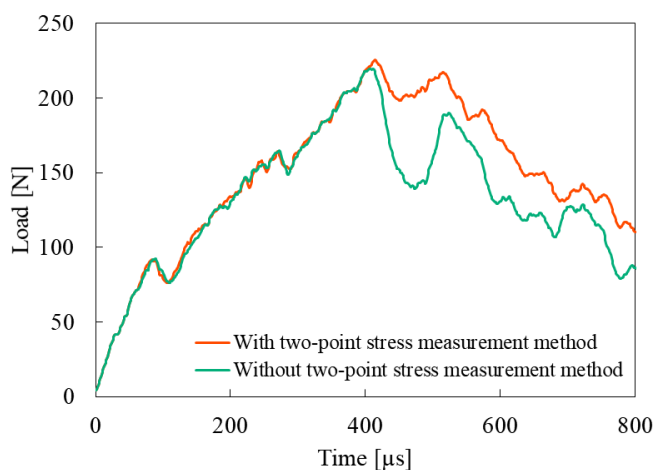


図 3-4 2 点応力測定法を適用した場合と適用しなかった場合に得られた荷重一時間関係の一例

実験は、試験片正面に設置したハイスピードカメラ（ナックイメージテクノロジー製、MEMRECAM ACS-1）を用いてフレームレート 200000 fps で撮影し、氷の変形・破壊の様子を観察した。この際、光源には前述の LED ライトを使用し、試験片の正面および背面から光を照射した。撮影した映像を基に、動画画像運動解析ソフトウェア（ナックイメージテクノロジー製、MOVIAS Neo）を用いて打撃棒に貼り付けたマーカークの位置を追跡し、解析した。すべての実験を通じて、押込中の速度はほぼ減衰していなかったため、一定速度での押込みとみなして変位速度および変位を算出した。2種類で試験を行い、変位速度の平均は、それぞれ約 0.5 m/s および約 2.2 m/s であった。

3.3 試験結果

3.3.1 球圧子

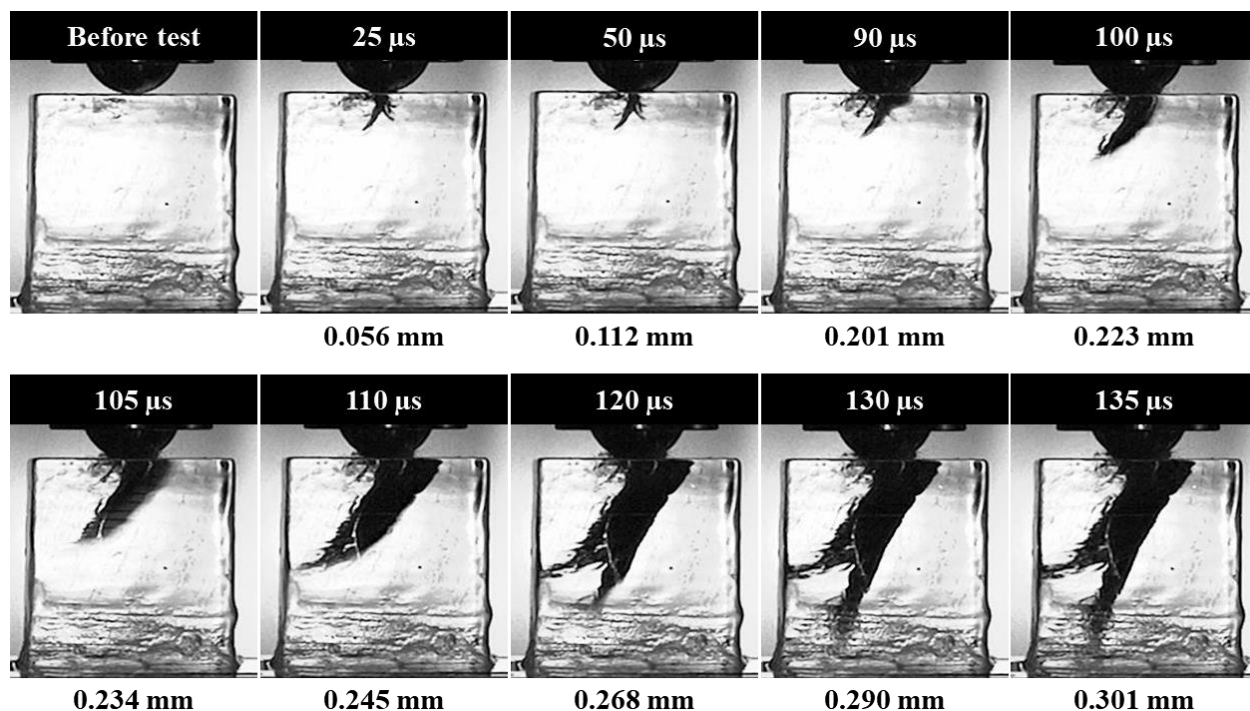
各変位速度で撮影した映像のうち、氷の破壊の様相の一例として、球圧子の変位速度 2.2 m/s においてハイスピードカメラで撮影した代表的な連続写真を図 3-5 に示す。なお、それぞれの画像上部には、圧子先端と氷表面が接触してからの経過時間、下部にはその際の変位量を示しており、試験開始後に黒く影になる部分が亀裂である。圧子形状に関わらず、圧子の接触点付近に小さな亀裂が発生し、時間の経過とともに亀裂が進展する様子が観察された。直径 10 mm の圧子では、押込初期にほとんど亀裂が進展しない時間がみられるが、直径が大きくなるにつれ、亀裂の進展に要する時間は短くなった。また、直径 10 mm の圧子では、押込中に氷表面付近から氷片が飛散する様子が観察された。この氷片は、圧子の直径が大きくなるにつれ減少し、直径 20 mm の圧子ではほぼ見られなくなった。

図 3-6 に球圧子の各変位速度における代表的な荷重—変位関係を示す。すべての実験結果については付録 A にまとめて示す。なお、変位速度 0.5 m/s および 2.2 m/s の結果は、双一次変換を用いたゼロ位相の 1 次のローパスフィルタ（カットオフ周波数は 50 kHz）を通し、計測データからノイズを低減させた。なお、このフィルタは最大荷重値にほとんど影響していないことを確認している。一般的に、金属材料などに対してインデンテーション試験を行った際、変位量の増加に伴い荷重は増加する⁸⁾。氷試験片でも同様の結果がみられた。変位速度 16 mm/s までは、荷重がピーク値に達した後、急激に低下しており、破壊のタイミングは明らかであった。しかし、変位速度 0.5 m/s および 2.2 m/s で

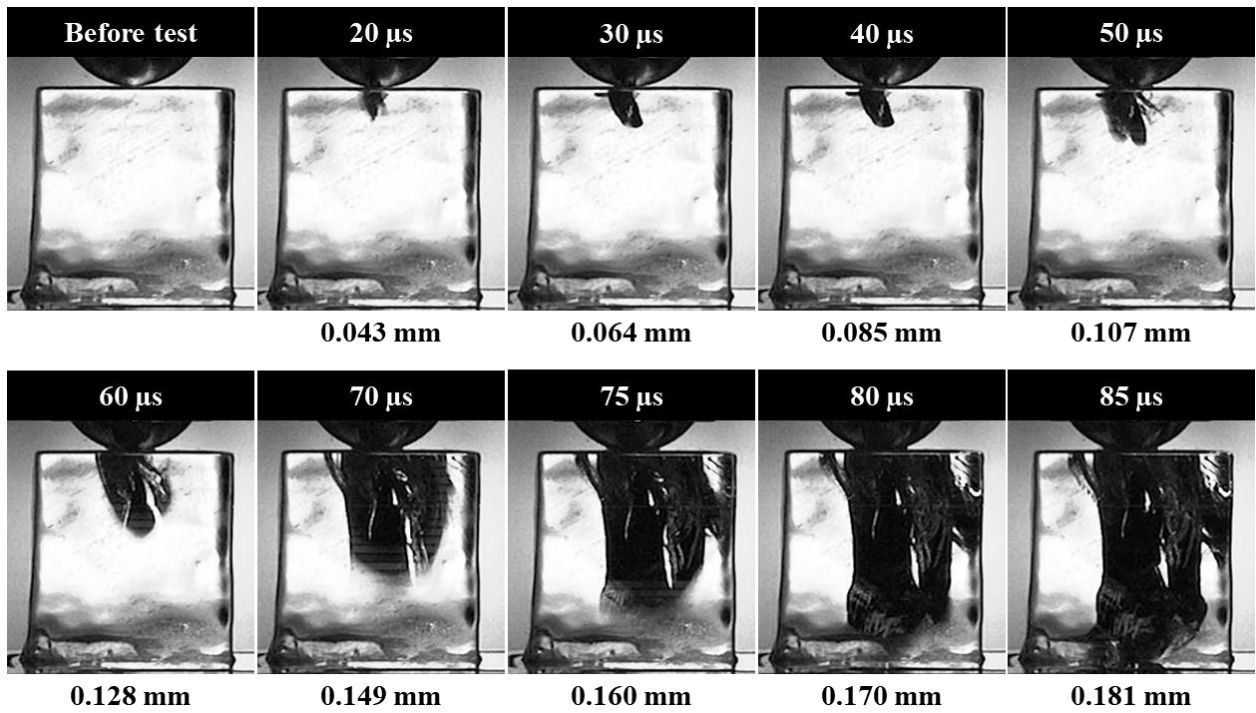
は、ピーク値に達した後も荷重はすぐに低下せず、ある程度の荷重が残留したまま変形が進む。特に変位速度 0.5 m/s、圧子の直径 20 mm のようにピーク値が複数存在するような結果では、氷の破壊のタイミングを判断するのが難しい。そこで、衝撃試験では、ハイスピードカメラの映像において、亀裂が試験片の底面または側面に到達した時点で氷が破壊したと定義する。各条件において、氷が破壊した点を図 3-6 中に×印で示す。氷は、荷重の最大値付近で破壊されていることが確認できた。変位速度が速いと、本研究で定義した破壊が生じた後も試験片構造として崩壊する前に圧子が氷試験片を押込むため、荷重がすぐに低下しなかったと考えられる。以下、すべての変位速度で荷重の最大値を破壊荷重としてまとめる。

図 3-7 (a) に球圧子における破壊荷重と圧子の直径の関係、図 3-7 (b) に球圧子における破壊時の変位量と圧子の直径の関係を示す。破壊荷重は圧子の直径が大きくなるにつれ増加する傾向がみられた。一方、破壊時の変位量は変位速度によって変化率に差がみられるものの、圧子の直径が大きくなるほど小さくなる傾向を示した。ただし、変位速度 2 mm/s では、圧子によらずほぼ一定値となった。

(a) D10 mm



(b) D15 mm



(c) D20 mm

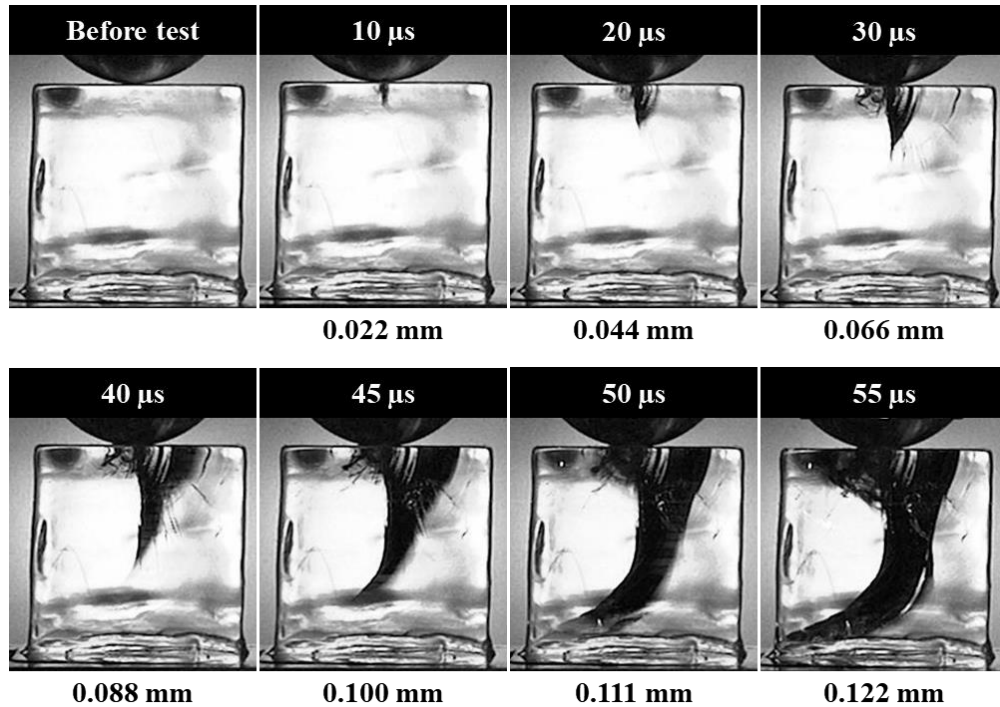
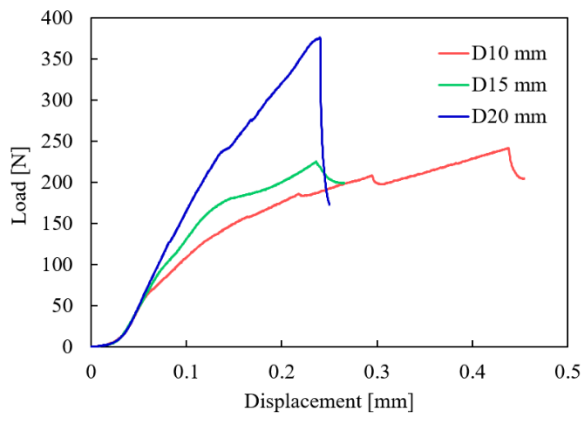
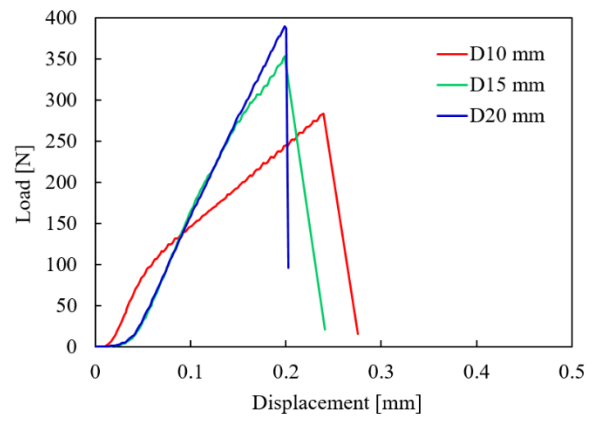


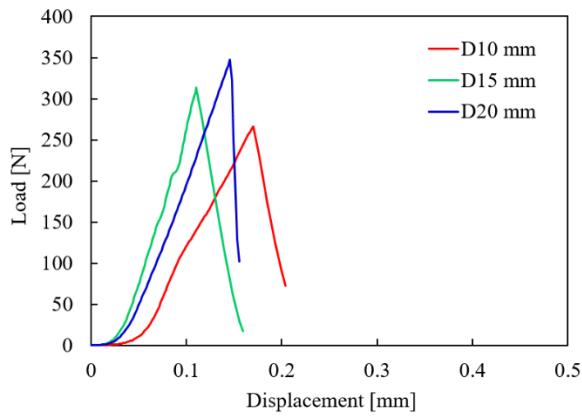
図 3-5 ハイスピードカメラで撮影した破壊の様相の一例（変位速度 2.2 m/s）



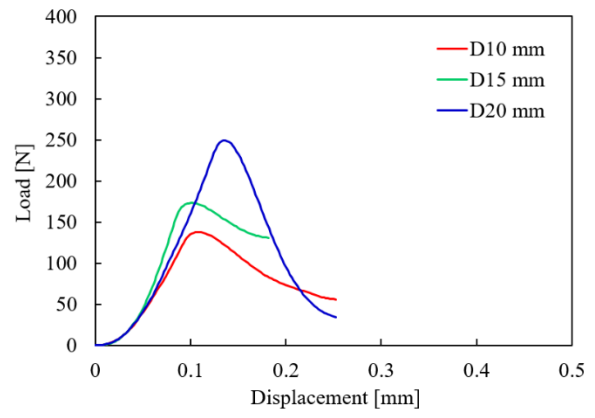
(a) 0.002 mm/s



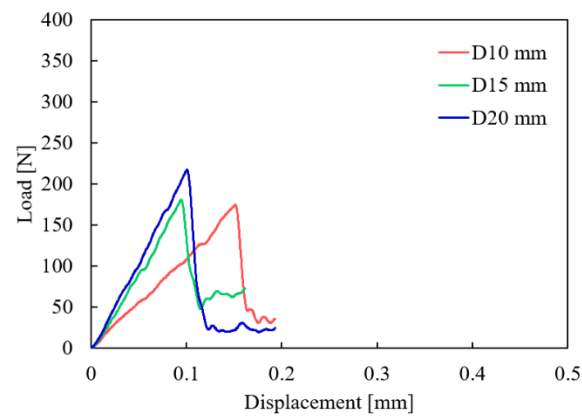
(b) 0.02 mm/s



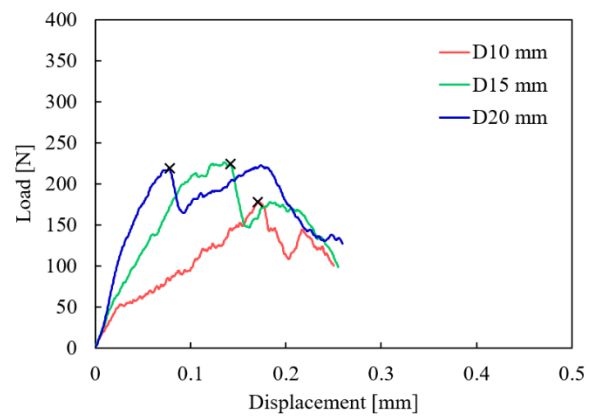
(c) 0.2 mm/s



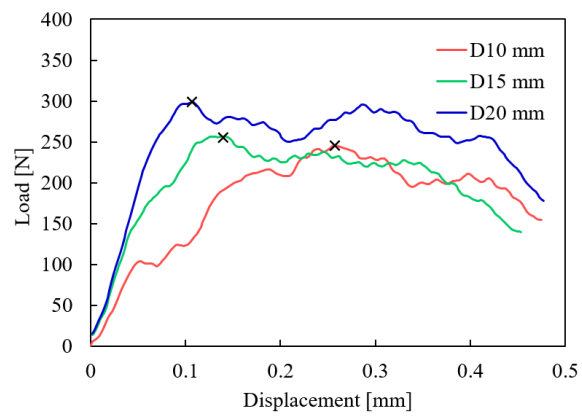
(d) 2 mm/s



(e) 16 mm/s



(f) 0.5 m/s



(g) 2.2 m/s

図 3-6 球圧子における
代表的な荷重—変位関係

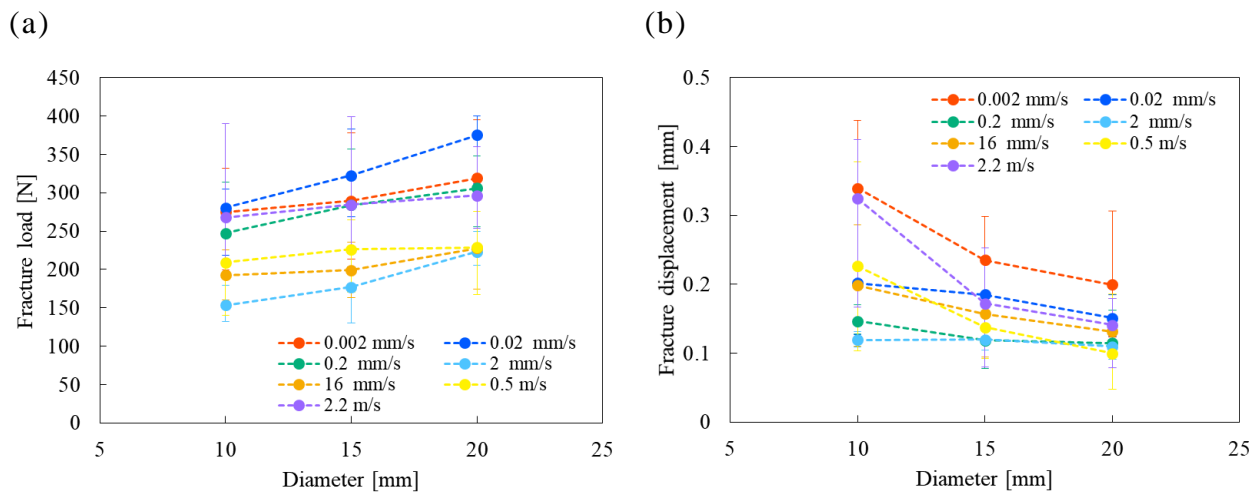


図 3-7 (a) 球圧子における破壊荷重と圧子の直径の関係，
(b) 球圧子における破壊時の変位量と圧子の直径の関係

3.3.2 円錐圧子

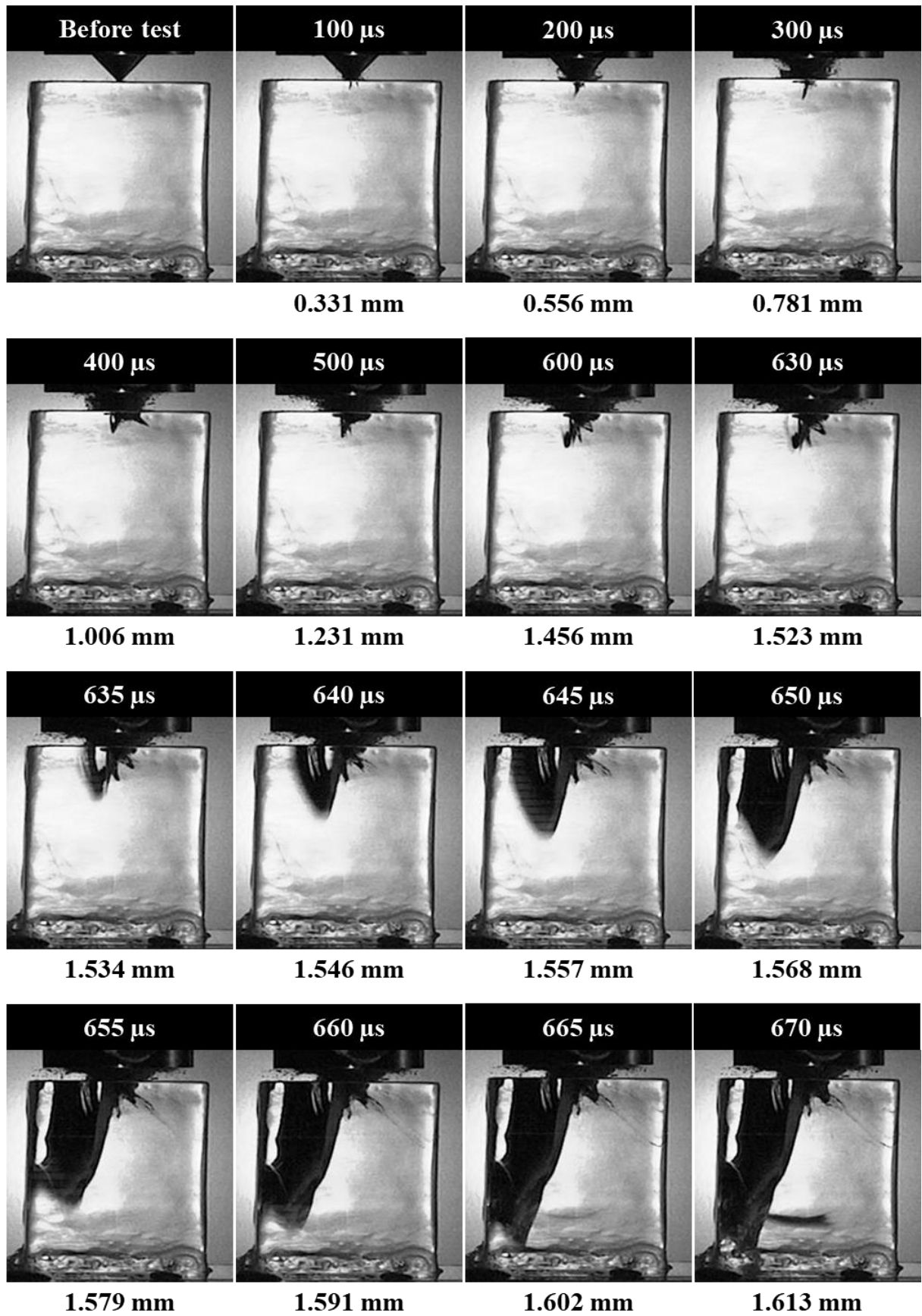
図 3-8 に円錐圧子の変位速度 2.2 m/s においてハイスピードカメラで撮影した氷の破壊の様相の一例を示す．球圧子と同様に，圧子の接触点付近に発生した亀裂が，時間の経過とともに進展する様子が観察された．亀裂の進展に要する時間は，圧子角度が小さくなるにつれ長くなった．また，球圧子と比較すると，円錐圧子では押込初期に亀裂が進展しない時間が長くなった．さらに，圧子形状に関わらず，押込初期から破壊に至るまでの間，表面から多くの氷片が飛散し続ける様子が観察された．

図 3-9 に円錐圧子の各変位速度における代表的な荷重—変位関係を示す．すべての実験結果については付録 B にまとめて示す．円錐圧子では，計測時間が長くノイズの影響を受けやすいため，球圧子と同じ 1 次のローパスフィルタでノイズを除去するとピーク荷重が減衰されてしまった．そこで，変位速度 0.5 m/s および 2.2 m/s の結果は，ゼロ位相の 2 次バターワースローパスフィルタ処理を行った．この際，カットオフ周波数は 15～50 kHz の間でピーク荷重をなるべく減衰させない周波数を選択した．このため，例えば変位速度 0.5 m/s の初期（例えば，圧子角度 120°の変位量 0.3～0.5 mm 付近）にみられる荷重の振動は，ノイズを完全に除去できていない結果となる．円錐圧子の場合，変位速度 0.002 mm/s および 0.02 mm/s では破壊に至るまで荷重はほとんど変動せずに増加するが，変位速度の増加に伴い，最大荷重に達するまでの押込中に荷重が減少する現象が確認された．そこで変位速度 2 mm/s 以上において，球圧子

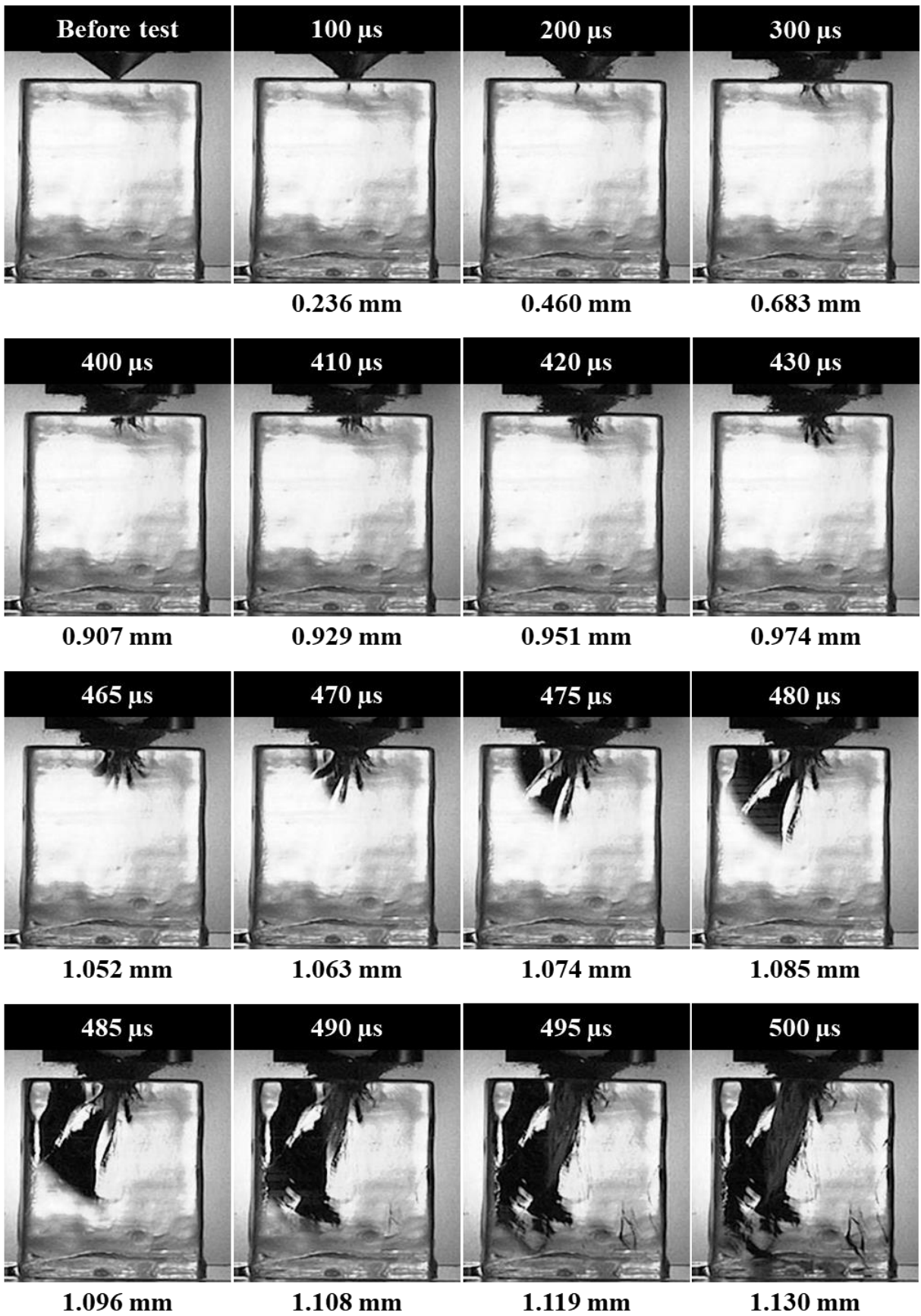
と同様にハイスピードカメラで破壊のタイミングを観察し、図 3-9 中に×印で示した。破壊は、球圧子と同様に最大荷重付近で生じていることがわかった。円錐圧子では、球圧子よりも変形時間が長いため、押込中に生成された亀裂や飛散した氷片によって荷重が一時的に減少したと考えられる。

図 3-10 (a) に円錐圧子における破壊荷重と圧子角度の関係、図 3-10 (b) に円錐圧子における破壊時の変位量と圧子角度の関係を示す。すべての変位速度において、圧子角度が大きいくほど破壊荷重は増加する傾向がみられた。また、変位速度 0.002 mm/s および 16 mm/s 以上において圧子角度の影響が大きく表れている。一方、破壊時の変位量は、変位速度に関わらず圧子角度が大きくなるほど低下し、その変化率に有意な差は認められなかった。

(a) 90°



(b) 120°



(c) 140°

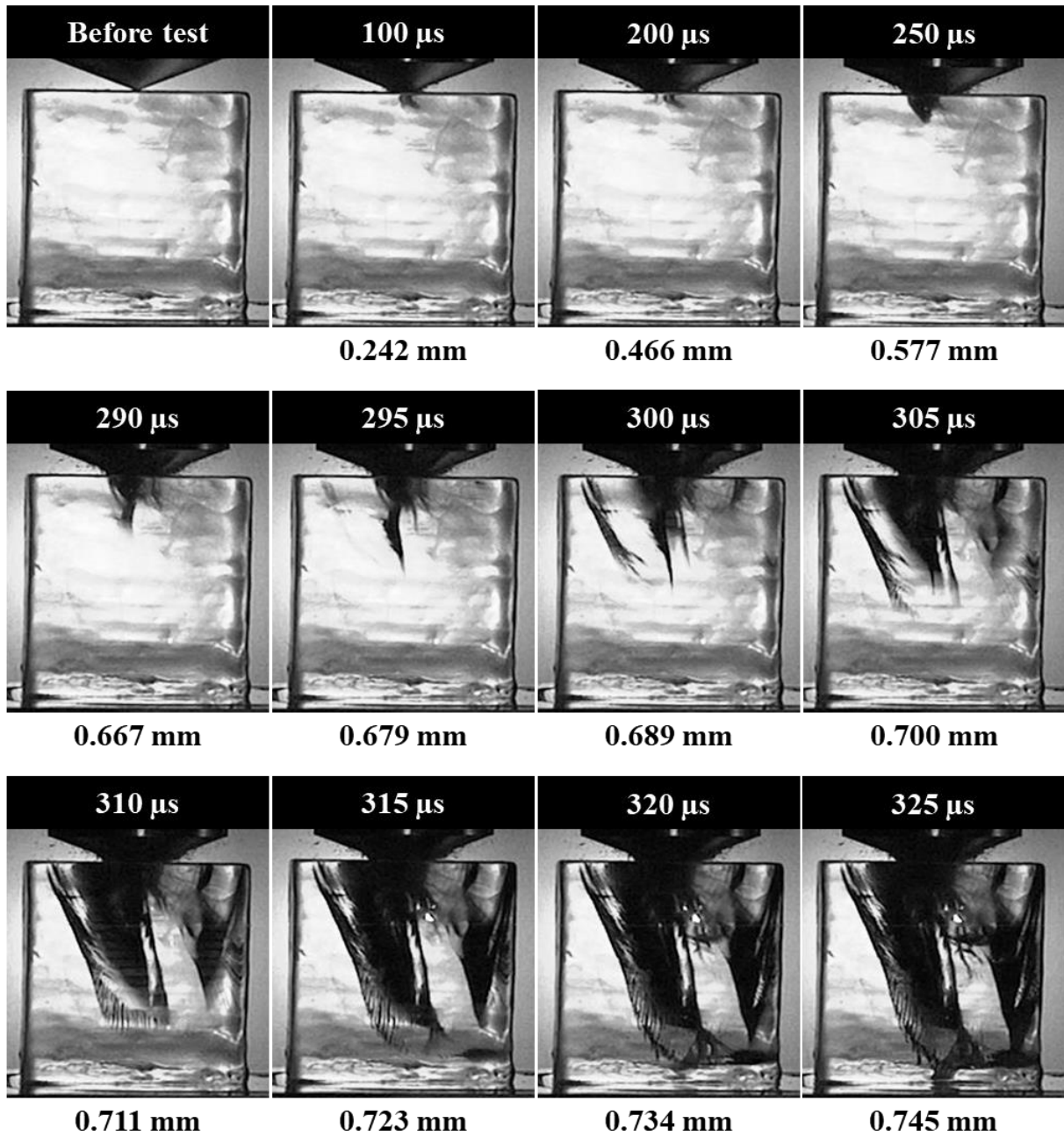
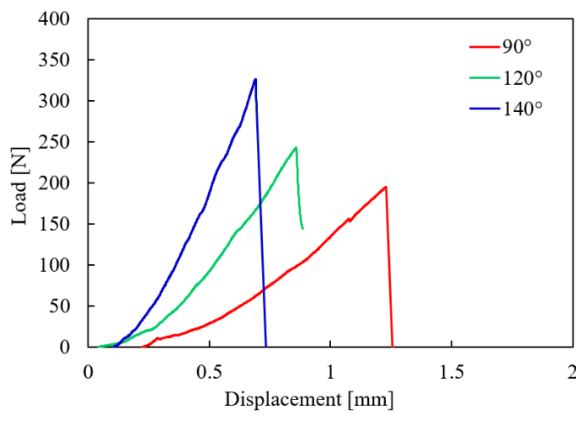
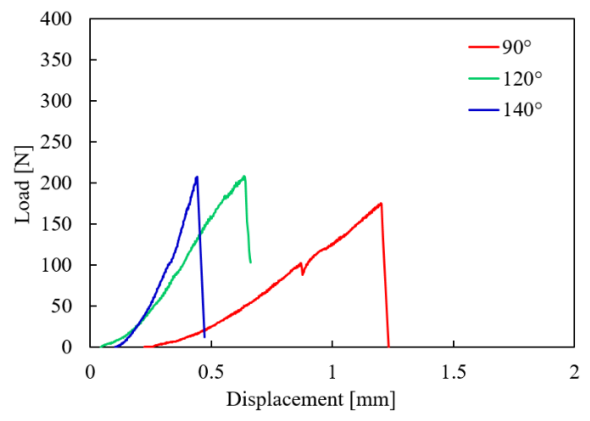


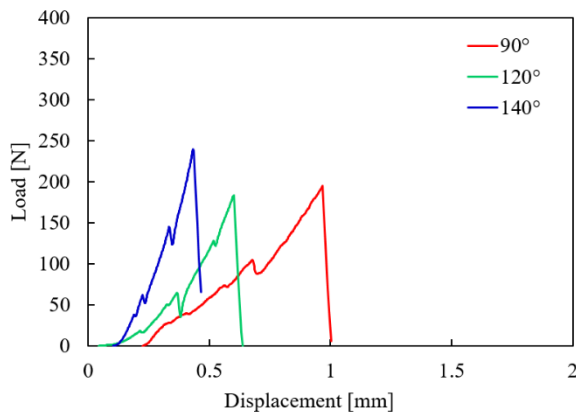
図 3-8 ハイスピードカメラで撮影した破壊の様相の一例(変位速度 2.2 m/s)



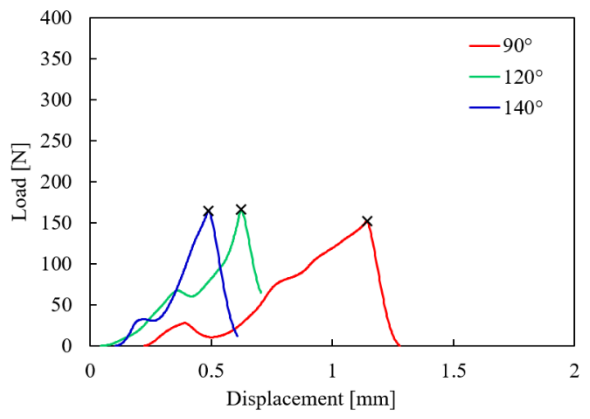
(a) 0.002 mm/s



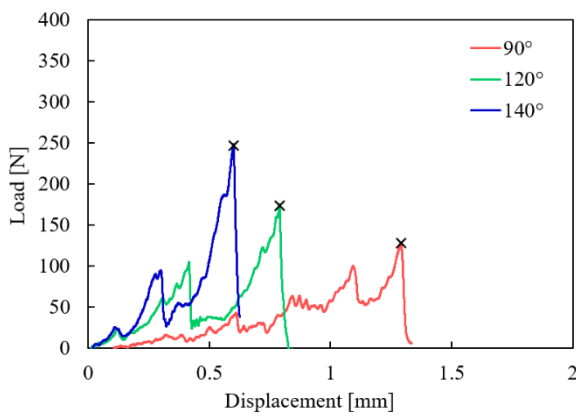
(b) 0.02 mm/s



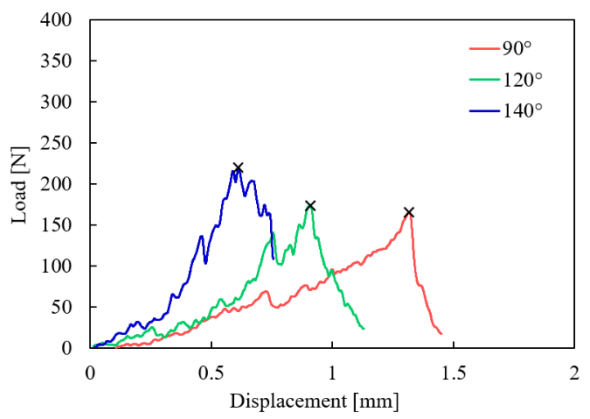
(c) 0.2 mm/s



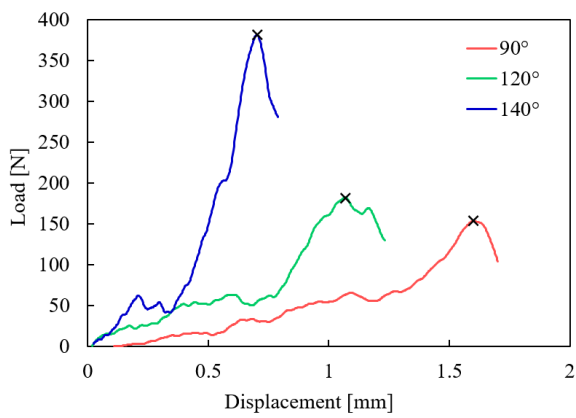
(d) 2 mm/s



(e) 16 mm/s



(f) 0.5 m/s



(g) 2.2 m/s

図 3-9 円錐圧子における
代表的な荷重—変位関係

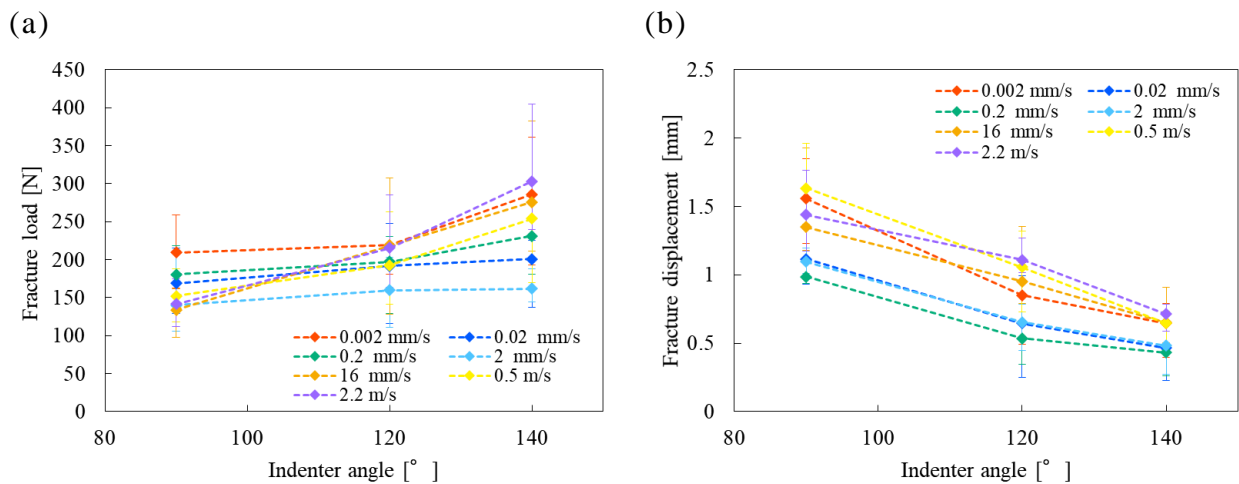


図 3-10 (a) 円錐圧子における破壊荷重と圧子角度の関係，
(b) 円錐圧子における破壊時の変位量と圧子角度の関係

3.4 考 察

3.4.1 インデンテーション試験におけるひずみ速度の考え方

インデンテーション試験の結果と単軸圧縮試験の結果を比較し、ひずみ速度依存性について考察するため、インデンテーション試験におけるひずみ速度を考える。先行研究⁹⁾によると、有限要素法 (FEM) 解析により算出した金属材料に対する円錐圧子のインデンテーション試験におけるひずみ速度は図 3-11

(a) のように場を形成していることが報告されている。このひずみ速度場における高ひずみ速度領域は、圧子縁近傍に集中するとともに、圧子縁から伸びる環状の領域に存在する。したがって、ひずみ速度 $\dot{\epsilon}$ と圧子先端からの押込方向の距離 Y の関係を模式図で表すと、図 3-11 (b) のようになり、圧子直下よりも少し離れたところでひずみ速度が高くなる。このようなインデンテーション試験のひずみ速度の分布を定量的に評価するため、次のような代表ひずみ速度の式が提案されている¹⁰⁾。

$$\dot{\epsilon}_R \approx k_{R,(a,n)} \left(\frac{\dot{h}}{h} \right) \quad (3-6)$$

ここで、 $\dot{\epsilon}_R$ は代表ひずみ速度、 h は変位、 \dot{h} は変位速度、 $k_{R,(a,n)}$ は加工硬化指数 n および圧子角度 (半頂角) α に依存する値であり、それぞれ次式で表される。

$$k_{R,(70.3,n)} = -0.118n + 0.188 \quad (3-7)$$

$$k_{R,(a,0.3)} = -0.008a + 0.736 \quad (3-8)$$

$\dot{\varepsilon}_R$ は、ひずみ速度場を平均化し、単軸圧縮試験と対応させることができる。ただし、式(3-8)は加工硬化指数 0.3 の時の圧子角度の影響しか報告されておらず、圧子角度 140°の円錐圧子における $k_{R,(a,0.3)}$ の値は、式(3-8)より、0.176 となる。一方、式(3-7)において、圧子角度 140.6°のバーコビッチ圧子に該当する $k_{R,(70.3,n)}$ は、加工硬化指数が 0~1 まで変化したとき、0.070~0.188 の間で変化する。したがって、式(3-6)および(3-8)を用いて代表ひずみ速度を算出した場合、加工硬化指数の変化を考慮すると最大でおおよそ 3 倍の誤差が生じる可能性がある。しかし、速度依存性の議論は対数スケールで行うため、この程度の誤差は考察に支障をきたさない範囲と考えられる。よって、本研究では、式(3-6)および(3-8)を用いてインデンテーション試験の各変位速度における代表ひずみ速度を算出した。

一方、球圧子では、円錐圧子のように代表ひずみ速度を導出する研究結果はこれまでに報告されておらず、円錐圧子と同じ式を用いて代表ひずみ速度を評価できない。しかし、球圧子の先端は円錐圧子よりも丸みを帯びているため、内部に形成される変形場の広がりは大きくなり、単軸試験の場合に近づくと推察される。そこで、単軸試験と同様に変位速度 \dot{h} と試験片高さ H から次式によって代表ひずみ速度を仮定した。

$$\dot{\varepsilon}_R = \frac{\dot{h}}{H} \quad (3-9)$$

上記のように、変形場の影響を受けるインデンテーション試験のひずみ速度は、単軸試験のひずみ速度とは異なるものの、圧子形状に伴うひずみ速度場とその取扱いについては、未だ整理されていない。インデンテーション試験におけるひずみ速度の考え方に関する詳細な議論については、今後、有限要素法解析等を用いて検討する必要がある。

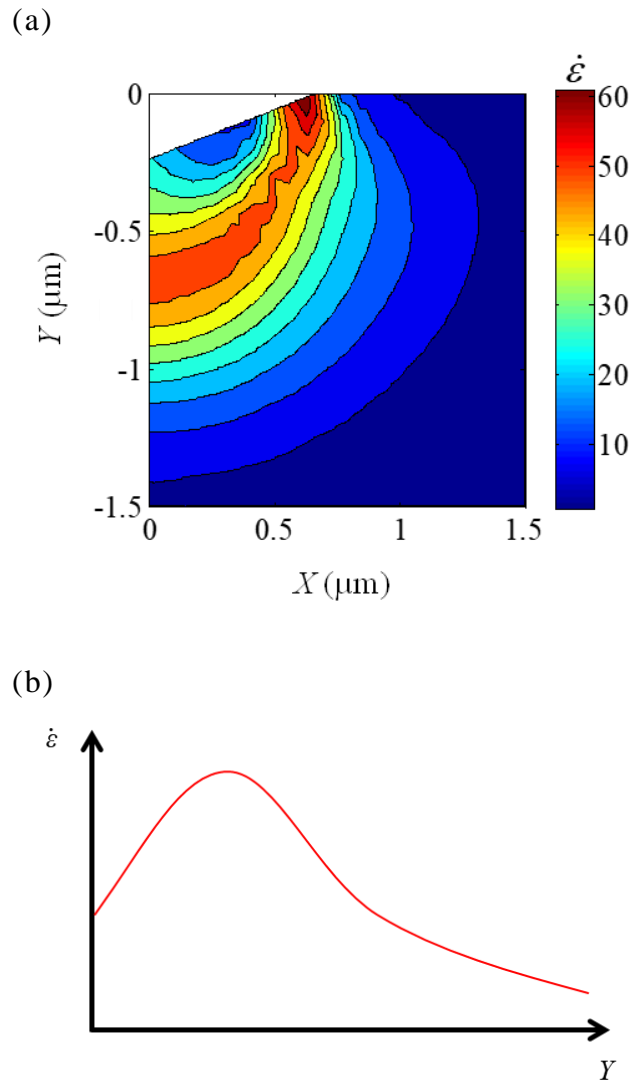


図 3-11 (a) 有限要素法で得られた金属材料内部のひずみ速度場の一例⁹⁾,
 (b) 円錐圧子インデンテーション試験におけるひずみ速度 $\dot{\epsilon}$ と圧子先端からの距離 Y の関係の模式図

3.4.2 破壊荷重のひずみ速度依存性

前項の代表ひずみ速度を用いて，球圧子および円錐圧子の破壊荷重のひずみ速度依存性についてそれぞれ考察する．

3.4.2.1 球圧子

(1) 破壊荷重と代表ひずみ速度の関係

図 3-12 に球圧子の破壊荷重と代表ひずみ速度の関係を示す．破壊荷重は，圧子の直径に関わらずひずみ速度 $10^{-4} \sim 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ で増加した後，ひずみ速度 10^{-1} s^{-1} まで減少する傾向を示した．一方，ひずみ速度 $10^{-1} \sim 10^1 \text{ s}^{-1}$ では，直径 20 mm の圧子は破壊荷重にほとんど変化がみられなかったが，直径 10 mm および 15 mm の圧子は破壊荷重が増加し，その増加率は直径 10 mm の圧子の方が大きくなった．その後，ひずみ速度 10^1 s^{-1} 以上ではすべての圧子で再び破壊荷重は増加する傾向がみられた．第 2 章の単軸圧縮試験において，圧縮強度はひずみ速度 10^{-1} s^{-1} 以上で増加する傾向が示されたことから，インデンテーション試験では圧子形状によって単軸圧縮試験とは異なる破壊荷重のひずみ速度依存性を示すことが確認された．

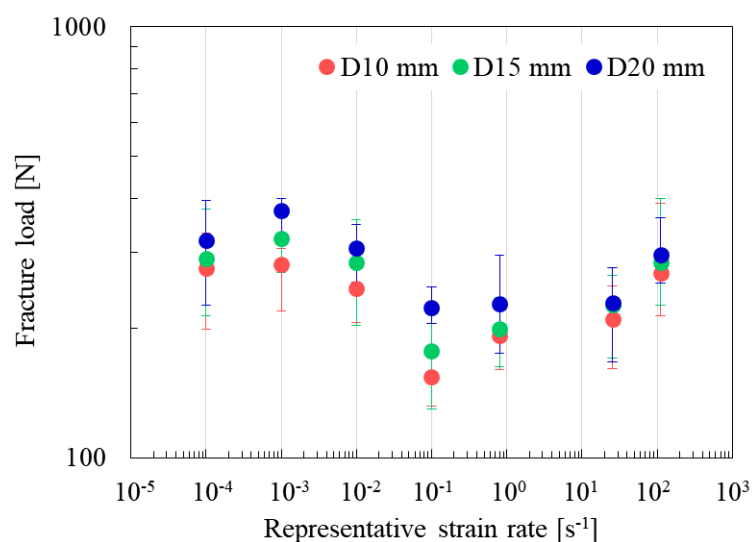


図 3-12 球圧子の破壊荷重と代表ひずみ速度の関係

(2) 表層の破壊

単軸圧縮試験とは異なるインデンテーション試験時の破壊荷重のひずみ速度依存性について考察するため、押込中の氷表面付近に注目する。図 3-13 に直径 10 mm および 20 mm の各速度における押込中の氷表面付近の破壊の様相の一例を示す。速度の遅いひずみ速度 $10^{-4} \sim 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ のインデンテーション試験では、両方の圧子で氷が砕けている様子は観察されなかった。一方、直径 10 mm の圧子では、ひずみ速度 10^{-1} s^{-1} 以上において、圧子との接触部から細かな氷片が飛び散る様子が確認できた。先行研究の二軸拘束下のインデンテーション試験では、押込後に圧子直下の氷が微細化している様子が観察されている¹¹⁾。また、第 1 章で述べたように、多軸圧縮下では結晶粒内に楕形亀裂が形成され、自由表面近くで破壊されることにより微細化するというメカニズムが報告されている¹²⁾。これらのことから、インデンテーション試験では材料内部に多軸応力場が形成される⁸⁾ため、変形が集中する圧子近傍において楕形亀裂が形成され、連続的に破壊することで氷片となり飛散したと推察される。また、この氷片の飛散は、インデンテーション試験において表層から破壊が生じている証左である。動画で確認すると、ひずみ速度 $10^{-1} \sim 10^1 \text{ s}^{-1}$ の範囲では、ひずみ速度の増加に伴い氷片の飛散量は増加した。これは、ひずみ速度の増加によって、圧子直下のひずみ速度が高くなり、脆化が促進された結果と言える。一方、ひずみ速度 10^2 s^{-1} で氷片の飛散量が減少しているのは、圧子の押込速度が速いために氷片の飛散よりも早く破壊が生じ、結果として氷片の飛散が抑制されたためと考えられる。このように表層の破壊が生じるのはひずみ速度 10^{-1} s^{-1} 以上である。前述の通り、インデンテーション試験では内部にひずみ分布が生じ、局所的にひずみ速度が高くなるため、単軸試験のひずみ速度とは異なる。圧子下のひずみ速度が脆性破壊領域に達することで楕形亀裂に起因する氷片が形成され、それが飛び散ったと考えれば、インデンテーション試験においては、ひずみ速度 10^{-1} s^{-1} 以上で脆性破壊が生じたと捉えることができる。

一方、直径 20 mm の圧子では、ひずみ速度 10^{-1} s^{-1} 以上においても氷片の飛散量はわずかであった。直径の大きい圧子は氷との接触面積が大きいため、表層で破壊が生じることにより氷片が生成されても、それを圧子が抑え込むと推察される。

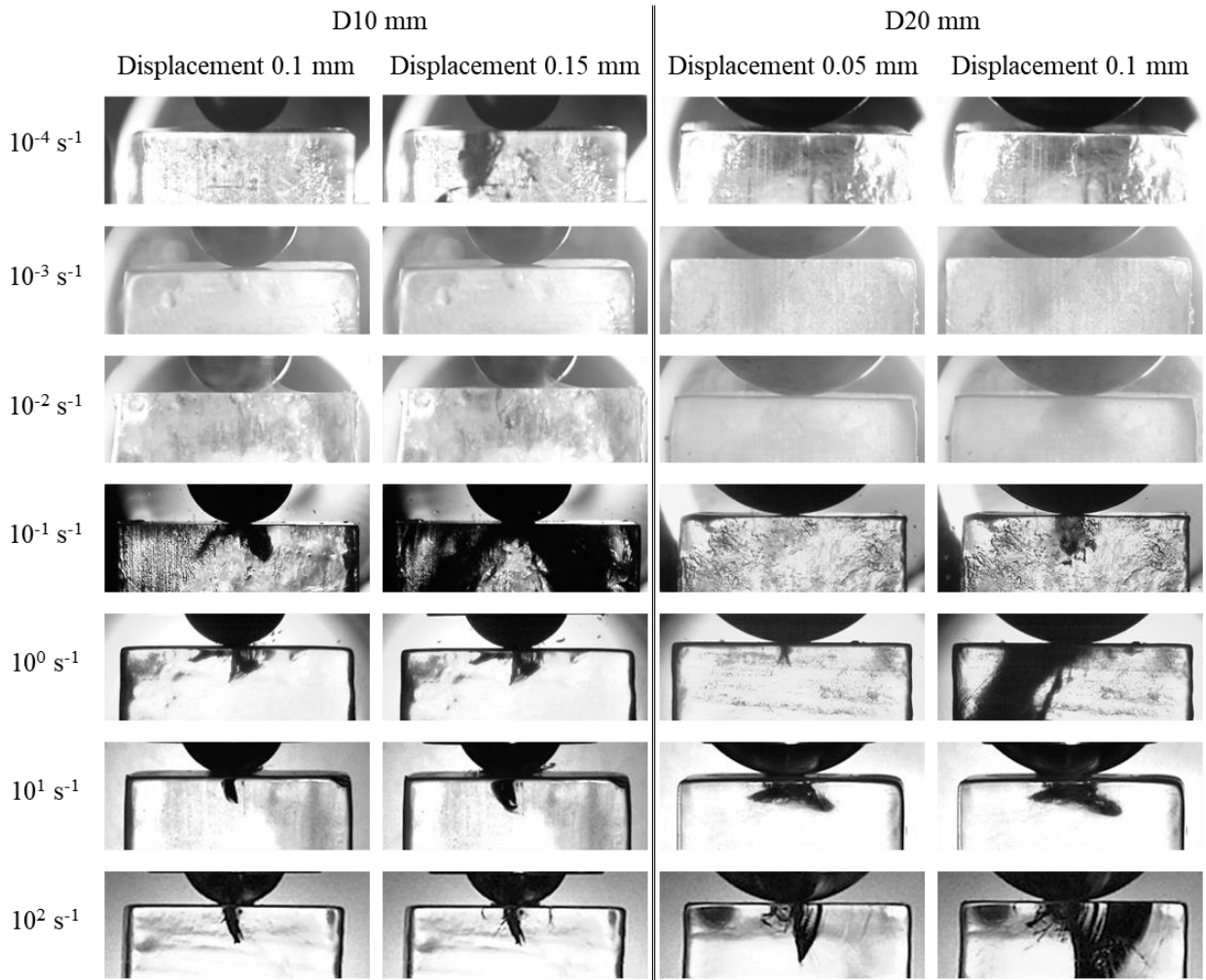


図 3-13 押込中の氷表面付近の破壊の様相の一例

(3) 球圧子インデンテーション試験における破壊荷重のひずみ速度依存性

図 3-12 に示した球圧子の圧子形状と破壊荷重の関係について考える．前述の通り，インデンテーション試験では表層から破壊が生じていることが確認された．第 2 章の単軸圧縮試験において，試験片と治具の接触状態が悪い場合，脆性的な挙動を示し始めるひずみ速度 10^{-3} s^{-1} 以上では試験片表面から亀裂が発生し，本来の圧縮強度よりも低下することが明らかになった．よって，ひずみ速度 $10^{-3} \sim 10^{-1} \text{ s}^{-1}$ における破壊荷重の低下率は，単軸圧縮試験の圧縮強度（接触状態が良好な場合）と比較して大きくなると考えられる．また，圧子の直径が小さいほど，圧子先端の応力集中効果が大きくなり，局部的にひずみ速度が高くなるため，脆化が促進される．その結果，表層の破壊に伴う氷片の飛散量が増加して内部に力が伝わりにくくなり，変形場の広がりや抑制される．そのため，氷片が飛散し始めたひずみ速度 10^{-1} s^{-1} では，圧子の直径が小さいほど破壊荷重が大きく低下したと考えられる．

ひずみ速度 10^{-1} s^{-1} 以上では破壊荷重のひずみ速度依存性は圧子形状によって異なる傾向を示す．そこでまず，直径 10 mm および 15 mm の圧子における破壊荷重の推移の要因について考える．氷のインデンテーション試験では，圧子の周囲に変形が集中し，押し固められると考えた図 3-14 (a) のような変形モデルが考案されている¹³⁾．この従来モデルでは，圧子下の領域がキャビティモデル⁸⁾（弾塑性材料のインデンテーションを単純化したモデル）における静水圧コアの役割を果たし，氷を変形させるとしている．しかし，前述のように，圧子直下は細かく破壊（破砕）されるため，従来モデルをそのまま適用できない．また，従来モデルでは適用される速度範囲について言及しておらず，一定ひずみ速度以上において氷片が飛散する脆性破壊現象を表現できていない．そこで，従来モデルを発展させた図 3-14 (b) のような高ひずみ速度変形モデルを考える．この提案モデルでは，圧子を押し込むと，圧子周囲の氷は破砕される．この際，破砕領域のうち，表面近傍は氷片として飛散する．一方，圧子直下の破砕領域は，変形が進むにつれ微細化して押し固められ，周囲よりも硬くなることで凝集体を形成すると考えられる．この凝集体は，圧子と内部の氷の間で力を伝達する役割を果たし，さらに変形が進むと，この凝集体を通じて内部に変形場が広がる．この凝集体の存在を仮定することで，ひずみ速度 10^{-1} s^{-1} 以上の破壊荷重の推移が説明可能となる．ひずみ速度が増加すると脆化が促進される．その結果，表層の破壊に伴う氷片の飛散量が増加し，試験片を破壊させるためにはより深く押し込む必要がある．圧子の押し込み量が増加すると，圧子と凝集体との接触面積は増加することになる．そのため，変形場が広がり，直径 10 mm および 15 mm の圧子では，ひずみ速度 $10^{-1} \sim 10^1 \text{ s}^{-1}$ で破壊荷重が増加したと考えられる．ひずみ速度が 10^2 s^{-1} まで増加すると，表層から破壊が生じても氷片の飛散を阻害しながら押し込み続けることになり，破壊荷重はさらに増加したと推察される．

一方，直径 20 mm の圧子では，直径 10 mm および 15 mm の圧子と異なり，ひずみ速度 $10^{-1} \sim 10^1 \text{ s}^{-1}$ で破壊荷重が増加しなかった．圧子の直径が大きくなると，押し込み初期の氷との接触面積が大きくなる．そのため，直径 20 mm の圧子は押し込み初期から変形場の広がりが大きく，直径 10 mm および 15 mm の圧子と比較して圧子直下の亀裂が広範囲に生成され，破砕領域は増加する．ひずみ速度が増加すると，局所的には材料強度が増すものの，同時に脆化が促進されて亀裂が生成されやすくなるため，材料強度のひずみ速度依存性が打ち消され，荷重が増加しにくくなったと考えられる．一方，ひずみ速度が 10^2 s^{-1} まで増加すると，変形速度が速く，多方面に亀裂が生成しても，破壊された表層ごと押し込み続けることになり，荷重が再び増加したと推察される．

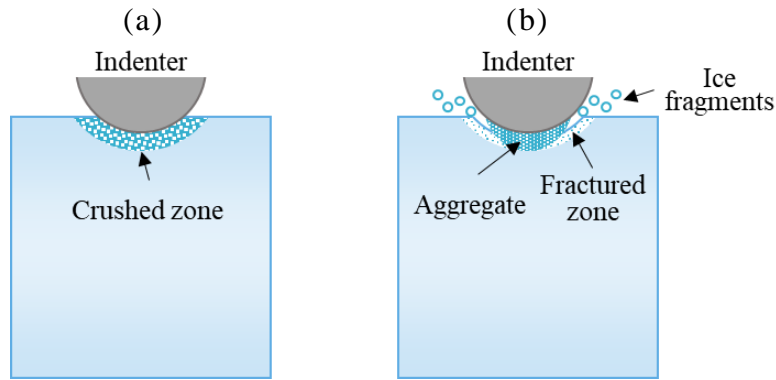


図 3-14 直径が小さい球圧子を用いた場合の氷のインデンテーション試験の変形モデル (a) 従来モデル¹³⁾ (b) 提案モデル (高ひずみ速度変形モデル)

3.4.2.2 円錐圧子

(1) 破壊荷重と代表ひずみ速度の関係

図 3-15 に円錐圧子の破壊荷重と代表ひずみ速度の関係を示す. 破壊荷重は, ひずみ速度 $10^{-3} \sim 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ で減少した後, ひずみ速度 $10^{-2} \sim 10^{-1} \text{ s}^{-1}$ では大きく変化せず, ひずみ速度 10^0 s^{-1} で再び減少する傾向を示した. その後, 圧子角度 120° および 140° の圧子では, ひずみ速度 $10^0 \sim 10^1 \text{ s}^{-1}$ で破壊荷重が増加した後, ひずみ速度 $10^1 \sim 10^3 \text{ s}^{-1}$ ではほぼ同じ値を示した. 一方, 圧子角度 90° の圧子では, 10^0 s^{-1} 以上のひずみ速度において, 破壊荷重はほとんど変化しなかった.

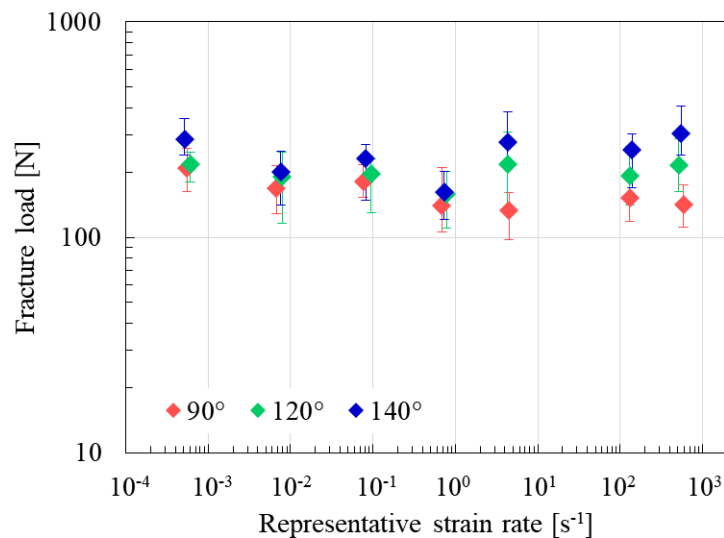


図 3-15 円錐圧子の破壊荷重と代表ひずみ速度の関係

(2) 表層の破壊

ここで、球圧子と同様に押込中の氷表面付近の破壊の様相を確認する．図 3-16 に圧子角度 90° および 140° の圧子の各速度における押込中の破壊の様相の一例を示す．なお，速度の遅いひずみ速度 $10^{-3} \sim 10^0 \text{ s}^{-1}$ のインデンテーション試験では，変位速度と表層からの氷片の飛散速度の差が大きく，ひずみ速度 10^1 s^{-1} 以上の試験と同じ条件では比較できなかった．そのため，表層の破壊の様相がわかりやすい静止画を示している．両圧子とも，ひずみ速度 10^{-3} s^{-1} および 10^{-2} s^{-1} では球圧子と同様に表層が砕ける様子は観察されなかった．一方， 10^{-1} s^{-1} 以上のひずみ速度では，氷片が飛散する様子が観察され，脆性的に破壊が生じていることがわかる．画像から，氷片の飛散量は，圧子角度 140° の圧子よりも圧子角度 90° の圧子の方が多い．また，球圧子（図 3-13）と比較すると，氷片の飛散量は円錐圧子の方が定性的に多いことが確認できた．円錐圧子は球圧子と比べて接触面積が小さいため，破壊された表層の氷を抑え込むことができず，多くの氷片が飛散したと考えられる．

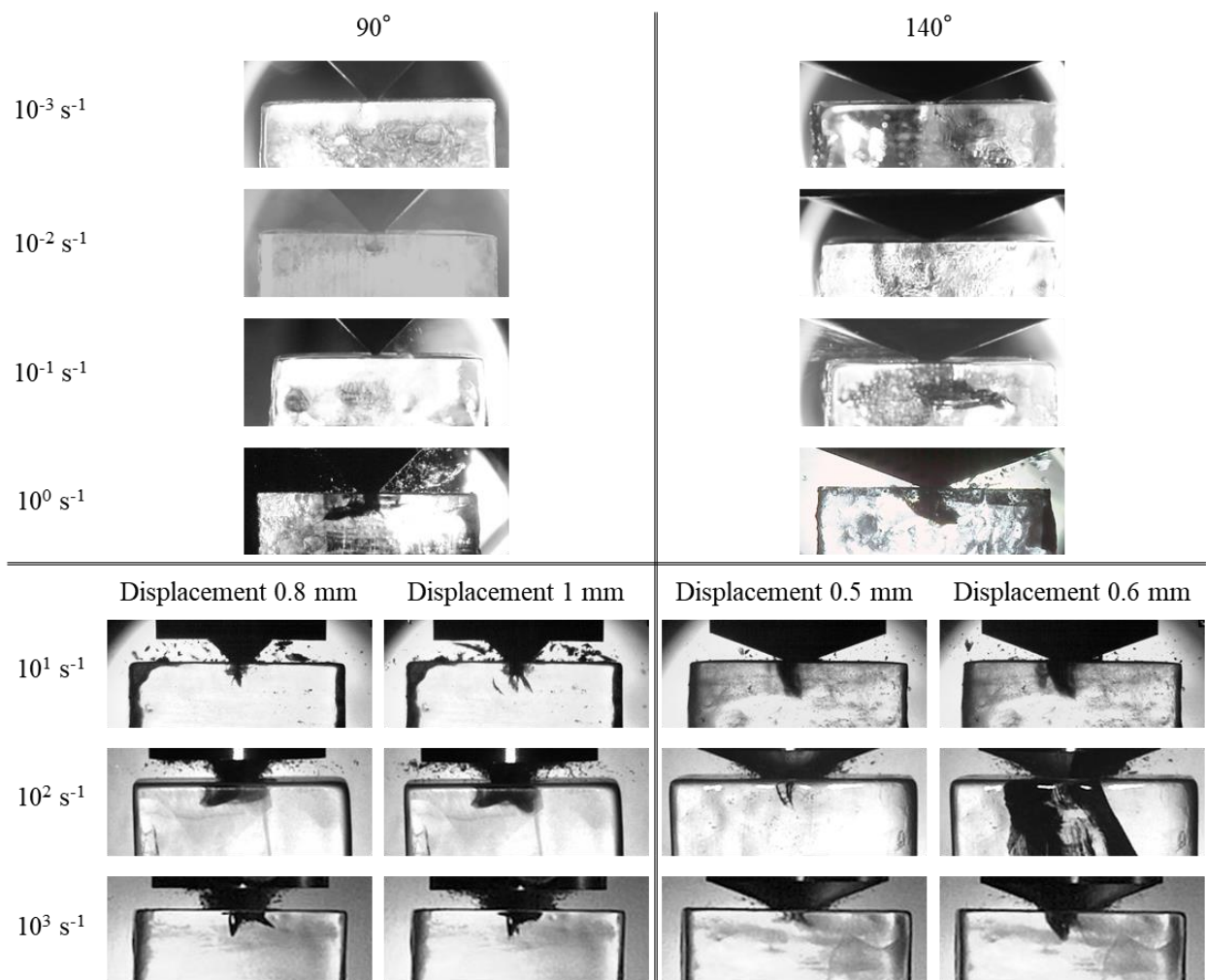


図 3-16 押込中の氷表面付近の破壊の様相の一例

(3) 円錐圧子インデンテーション試験における破壊荷重のひずみ速度依存性

図 3-15 に示した円錐圧子の圧子形状と破壊荷重の関連性について考察する。第 2 章で述べたように、氷の圧縮強度は、ひずみ速度 $10^{-3} \sim 10^{-1} \text{ s}^{-1}$ で負のひずみ速度依存性を示した後、ひずみ速度 10^{-1} s^{-1} 以上では増加に転じる。円錐圧子の破壊荷重は、圧子形状に関わらず、ひずみ速度 $10^{-2} \sim 10^{-1} \text{ s}^{-1}$ で大きな変化はみられないものの、ひずみ速度 $10^{-3} \sim 10^{-1} \text{ s}^{-1}$ において単軸圧縮試験と同様の減少傾向を示したと言える。しかし、単軸圧縮試験と異なり、ひずみ速度 $10^{-1} \sim 10^0 \text{ s}^{-1}$ でも破壊荷重は減少した。図 3-16 より、ひずみ速度 10^{-1} s^{-1} における氷片の飛散量はごくわずかであるが、ひずみ速度 10^0 s^{-1} では、大きな氷片が表層から剥がれるように飛散していることが確認できる。よって、ひずみ速度 10^0 s^{-1} では、大きな氷片が飛散することで押込中の荷重が一時的に大きく低下することになり、最終的な破壊荷重の低下に繋がったと推察される。

圧子角度 120° および 140° の圧子では、ひずみ速度 $10^0 \sim 10^1 \text{ s}^{-1}$ で破壊荷重は増加する。これは、球圧子の直径 10 mm および 15 mm の場合と同様に、破壊された表層の氷が氷片として飛散することにより圧子がより深く押込まれ、凝集体が形成されて接触面積が増加するためと考えられる。しかし、 10^1 s^{-1} 以上のひずみ速度においては、ひずみ速度が増加しても破壊荷重はほとんど変化しなくなる。図 3-17 に示すように、球圧子と円錐圧子の圧子形状を比較すると、円錐圧子の方が圧子先端は鋭くなっている。そのため、応力集中による高ひずみ速度の影響が強くなり、表層からの破壊が促進される。さらに、円錐圧子では、球圧子よりも氷表面との隙間が大きいため、生成された氷片は絶え間なく飛散し続ける様子が観察された。この表層の破壊の促進と氷片の飛散量の増加により、材料強度のひずみ速度依存性の発現が打ち消され、ひずみ速度 $10^1 \sim 10^3 \text{ s}^{-1}$ で破壊荷重にほぼ変化がみられなかったと推察される。

一方、圧子角度 90° の圧子は、圧子角度 120° および 140° の圧子よりも 1 桁遅いひずみ速度 10^0 s^{-1} 以降で破壊荷重はほとんど変化しなかった。圧子角度 90° の圧子は、他の圧子と比較して先端が極端に鋭く、応力集中効果が大きいため、早い段階で速度依存性が表れにくくなったことが原因と考えられる。

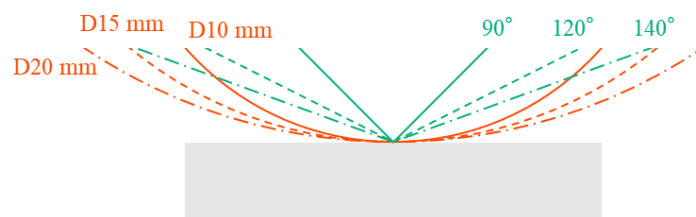


図 3-17 材料との接触面での圧子形状の比較（赤：球圧子，緑：円錐圧子）

3.4.3 変形・破壊挙動

3.4.3.1 変位量および接触半径

氷が破壊された際の変位量に着目し、インデンテーション試験における氷の変形・破壊挙動について考える。図 3-18 に球圧子と円錐圧子における破壊時の変位量と代表ひずみ速度の関係を示す。球圧子、円錐圧子ともに、変位量はひずみ速度 10^{-1} s^{-1} まで減少し、その後は増加する傾向がみられた。延性破壊から脆性破壊へと遷移する過程で変位量は減少する。しかし、ひずみ速度 10^{-1} s^{-1} 以降では脆性破壊が主役となり、表層が割れやすくなる。そのため、試験片を破壊させるためにはより押込む必要があり、変位量が増加したと推察される。また、球圧子と円錐圧子を比較すると、球圧子の変位量は円錐圧子よりも少ないことが確認された。

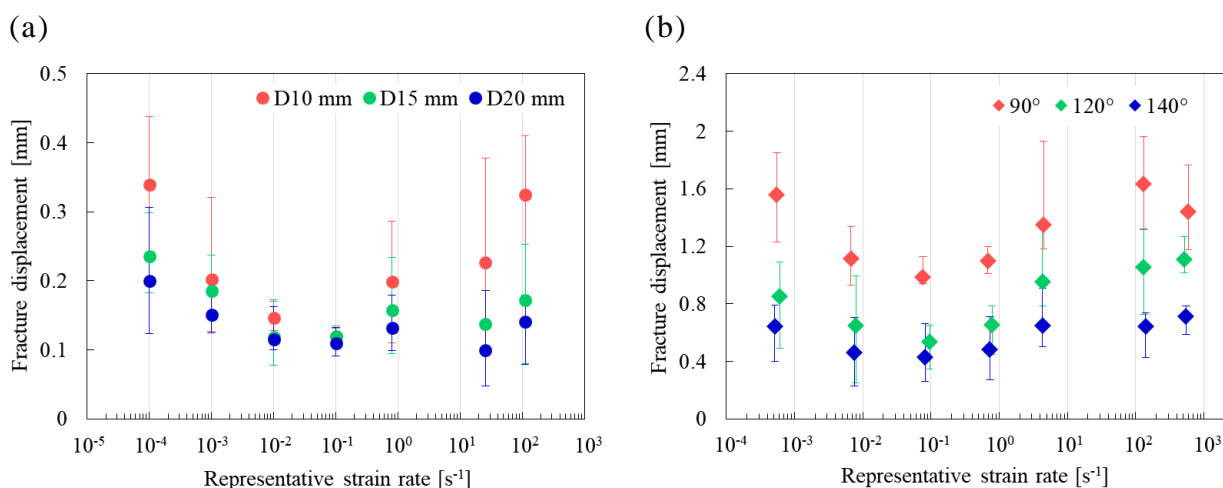


図 3-18 破壊時の変位量と代表ひずみ速度の関係 (a) 球圧子, (b) 円錐圧子

球圧子と円錐圧子の変位量の違いについてさらに考察するため、材料内部の変形場を考える。Samuels と Mulhearn¹⁴⁾は、球圧子およびビッカース圧子により金属材料のインデンテーション試験を行い、圧子と材料の接触半径が同じ場合、材料内部の軸方向のひずみ分布はほぼ同じであることを報告している。また、円錐圧子とビッカース圧子は、投影面積が同じ場合にひずみ分布はほぼ同じになるため、同等の圧子として扱えることが報告されている¹⁵⁾。すなわち、Samuels と Mulhearn の報告結果は、球圧子と円錐圧子の場合にも適用できる。

図 3-19 は、球圧子と円錐圧子を同じ接触半径だけ材料に押込んだ時の状態を模式的に示したものである。球圧子の変位量 $h_{spherical}$ および円錐圧子の変位量

h_{sharp} に対するそれぞれの接触半径 ($a_{spherical}$ および a_{sharp}) は、次式で表すことができる。

$$a_{spherical} = \sqrt{h_{spherical}(2r - h_{spherical})} \quad (3-10)$$

$$a_{sharp} = h_{sharp} \tan\left(\frac{\theta}{2}\right) \quad (3-11)$$

ここで、 θ は圧子の頂角、 r は圧子の半径である。式(3-10)および(3-11)により求めた球圧子および円錐圧子の接触半径と変位量の関係を図 3-20 に示す。円錐圧子では、変位と接触半径の比が常に一定となる相似則が成立するため、変位が増加してもひずみ分布の形状は変化しない⁸⁾。一方、球圧子では、この相似則が成り立たず、押し込み初期の変位量に対する接触半径の増加割合が円錐圧子よりも大きくなる。

図 3-21 (a) に球圧子および円錐圧子の破壊時の変位量と代表ひずみ速度の関係 (図 3-18 の (a) と (b) を重ねたもの)、図 3-21 (b) に球圧子および円錐圧子の破壊時の接触半径と代表ひずみ速度の関係を示す。前述したように、変位量は、ひずみ速度に関わらず、球の直径および円錐の圧子角度が大きくなるほど減少する。また、球圧子と円錐圧子の変位量には大きな差があり、球圧子は円錐圧子よりも少ない変位量で氷を破壊させることができた。しかし、接触半径で比較すると、同じひずみ速度での接触半径は、圧子形状が異なっても大きく変化しないことがわかる。これは、軸方向に同等の変形場が形成されたときに破壊が生じたことを示唆している。よって、氷のインデンテーション試験では、圧子形状に伴う材料との接触半径が破壊を生じさせる重要なパラメータであり、材料全体の破壊には変形場が大きく関与することが明らかになった。

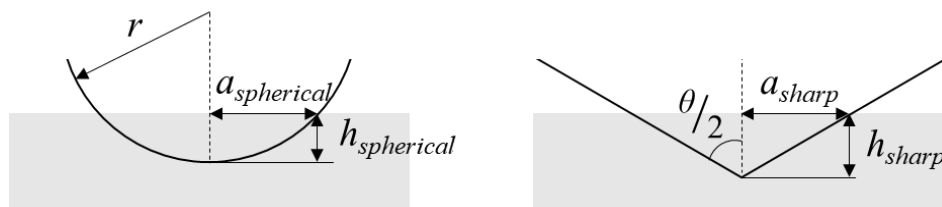


図 3-19 球圧子および円錐圧子と同じ接触半径で材料に押し込んだ際の模式図

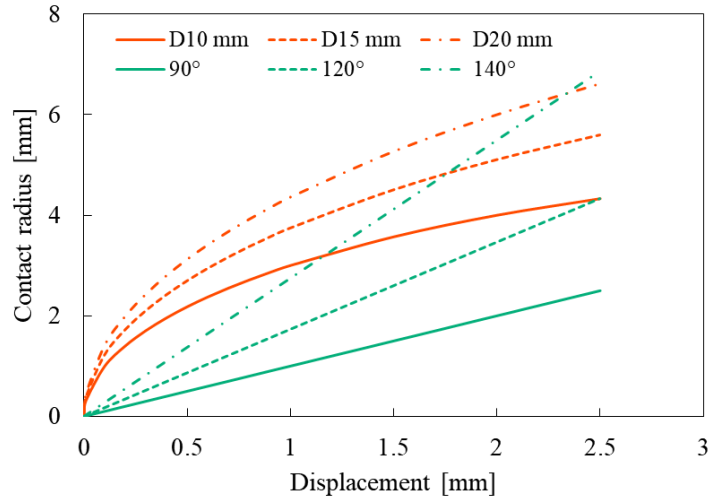


図 3-20 球圧子および円錐圧子の接触半径と変位量の関係

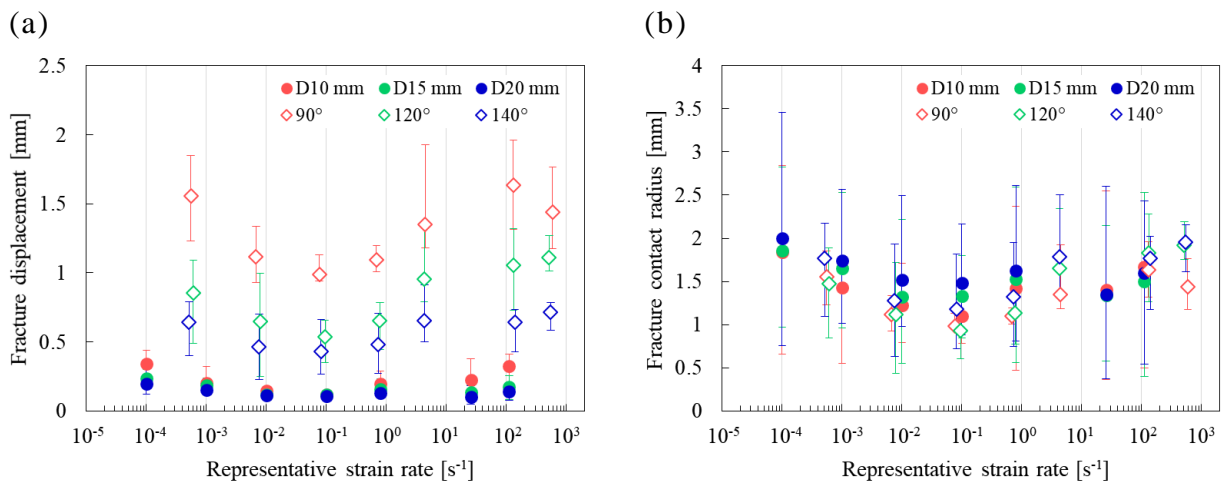


図 3-21 (a) 球圧子および円錐圧子の破壊時の変位量と代表ひずみ速度の関係
(b) 球圧子および円錐圧子の破壊時の接触半径と代表ひずみ速度の関係

3.4.3.2 亀裂進展挙動

3.3 節のカメラの映像から、亀裂の進展には圧子形状による違いがみられた。そこで、氷内部の亀裂進展の様相から衝撃ひずみ速度域での脆性破壊について考察する。なお、カメラは一方向から撮影しているため、3次元の亀裂の広がりを観察することはできない。そこで、圧子の接触面に対して垂直方向の亀裂長さをカメラの映像から測定し、2次元的な亀裂長さとして評価を試みた。

図 3-22 に画像解析により得られたひずみ速度 10^1 s^{-1} および 10^2 s^{-1} における

代表的な球圧子の亀裂長さと時間の関係を示す。なお、最終的な亀裂長さが 20 mm に達していない結果が存在するのは、底面ではなく側面方向に亀裂が進展したためである。ひずみ速度 10^1 s^{-1} では、すべての圧子において押込初期で亀裂が数 mm 進展した後、一定時間停滞していることが確認できた。その後、押込みが進むと亀裂は急激に進展した。亀裂の停滞時間は、直径の小さい圧子ほど長くなる傾向がみられた。一方、ひずみ速度 10^2 s^{-1} では、直径 10 mm および 15 mm の圧子においてひずみ速度 10^1 s^{-1} と同様に押込初期で亀裂が停滞していることが確認された。しかし、直径 20 mm の圧子では、亀裂の停滞はほぼみられず、氷との接触直後から亀裂は単調に進展した。

ここで、亀裂長さの時間微分である亀裂進展速度を算出した。図 3-23 にひずみ速度 10^2 s^{-1} における直径 10 mm と 20 mm の圧子の代表的な亀裂進展速度と時間の関係を示す。両圧子とも、亀裂は圧子の接触後すぐに約 200~300 m/s で高速進展している。その後、直径 10 mm の圧子では、亀裂進展速度が 30~95 μs の間で 0 となり、亀裂が停滞していることがわかる。一方、亀裂の停滞がみられなかった直径 20 mm の圧子においては、初期亀裂の進展がそのまま加速するわけではなく、15~25 μs の間で亀裂進展速度は一度減少していることが確認できた。また、押込初期を除く破壊に寄与した亀裂の進展速度は、約 400~700 m/s であり、ひずみ速度 10^1 s^{-1} および 10^2 s^{-1} で同様の速度範囲を示した。この亀裂進展速度は、各試験によるばらつきはあるものの、圧子の直径による違いはほとんどみられなかった。なお、亀裂長さ 20 mm の手前で速度が減衰しているのは、底面の拘束の影響を受けているためと考えられる。

図 3-24 にひずみ速度 10^2 s^{-1} および 10^3 s^{-1} における代表的な円錐圧子の亀裂長さと時間の関係を示す。円錐圧子においても、球圧子と同様に押込初期で亀裂の停滞が観察された。亀裂の停滞は複数回繰り返されており、圧子角度が小さいほど亀裂の停滞時間は長くなった。また、同じひずみ速度で比較すると、球圧子よりも円錐圧子の方が亀裂の停滞時間は長くなった。一方、亀裂進展速度は、ひずみ速度や圧子角度による違いはほぼみられず、球圧子とも同じ約 400~700 m/s であった。

以上のことから、亀裂の成長過程は圧子形状やひずみ速度によって変化するが、破壊に寄与する亀裂の進展は圧子形状やひずみ速度に依存しないと言える。

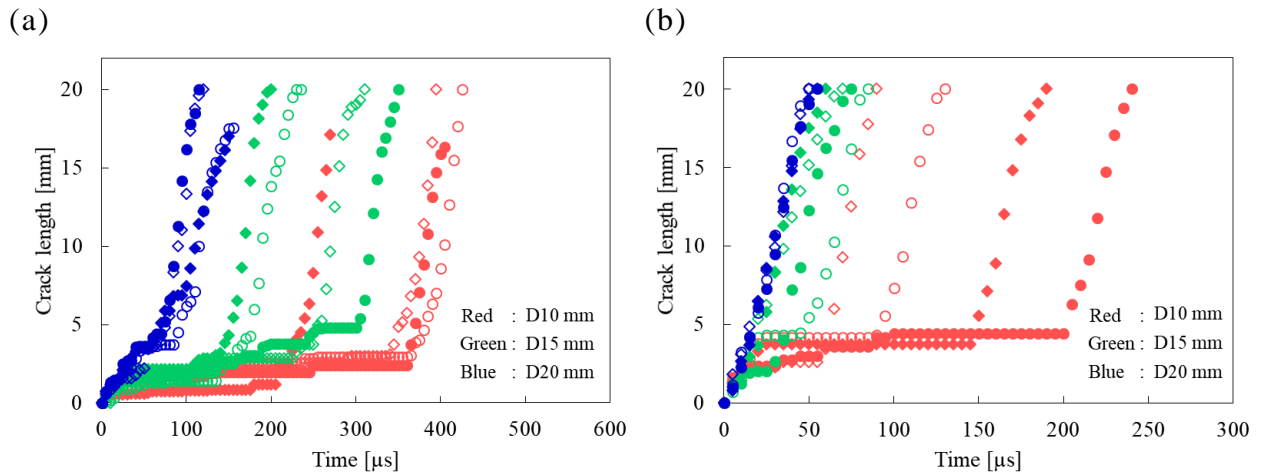


図 3-22 球圧子における代表的な亀裂長さと時間の関係
 (a) ひずみ速度 10^1 s^{-1} , (b) ひずみ速度 10^2 s^{-1}

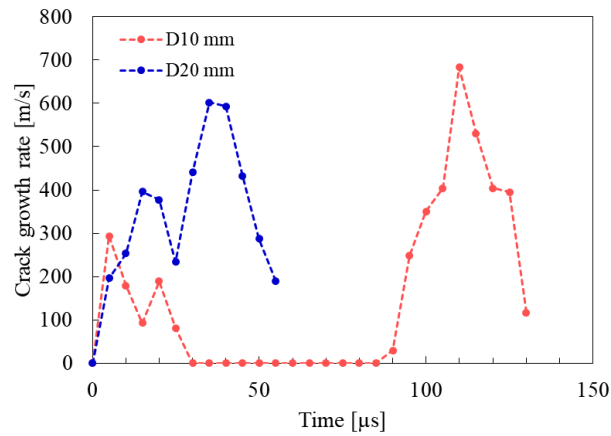


図 3-23 球圧子のひずみ速度 10^2 s^{-1} における
 代表的な亀裂進展速度と時間の関係

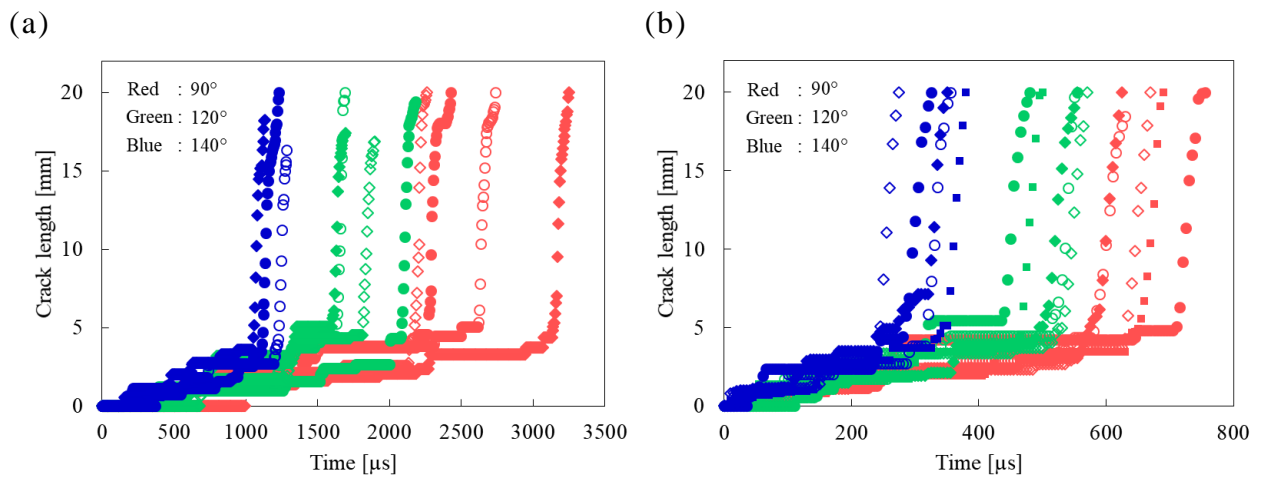


図 3-24 円錐圧子における代表的な亀裂長さと時間の関係
 (a) ひずみ速度 10^2 s^{-1} , (b) ひずみ速度 10^3 s^{-1}

3.4.3.3 脆性破壊メカニズム

ガラスやセラミックスなどの脆性材料へのインデンテーション試験では、圧子直下に塑性域が形成され、その下から亀裂が発生することが報告されている¹⁶⁾⁻¹⁸⁾。また、岩石では、圧子直下の塑性域に破砕帯が形成され、そこからメディアクラックやラテラルクラック等が生成する¹⁹⁾。一方、氷は、単軸試験の結果から高ひずみ速度における塑性変形量が少なく、押込中の表面から氷片が飛散するため、これら材料の破壊現象をそのまま採用することはできない。そこで、これまでの考察をまとめ、圧子形状によって異なるインデンテーション試験における氷の脆性破壊挙動について、以下のようなメカニズムを提案する。

図 3-25 に球圧子の直径が小さい場合における氷の脆性破壊挙動の模式図を示す。この場合の亀裂の進展を模式的に表すと a, b, c の 3 つの段階に分けることができる。まず、圧子が氷に接触すると氷内部に変形場が形成され、転位のすべり運動が生じ、粒内に亀裂が生成する (図 3-25 a)。押込みが進むと、粒内に発生した楕円亀裂が連続的に破壊されることで細粒化した破砕領域が形成され、表層から破壊が生じる。この際、破砕領域の一部が圧子と接触面の隙間から氷片として飛散する (図 3-25 b)。このように表層から破壊されることで変形場が広がりにくくなり、亀裂が停滞する。一方、圧子直下では、破砕された氷が微細化しながら押し固められ、凝集体となる (図 3-25 b~c)。さらに押込みが進むと、この凝集体を起点として再び変形場が形成され (図 3-25 c1)、一定以上拡大することで亀裂が急激に進展し、破壊に至った (図 3-25 c2) と推察される。

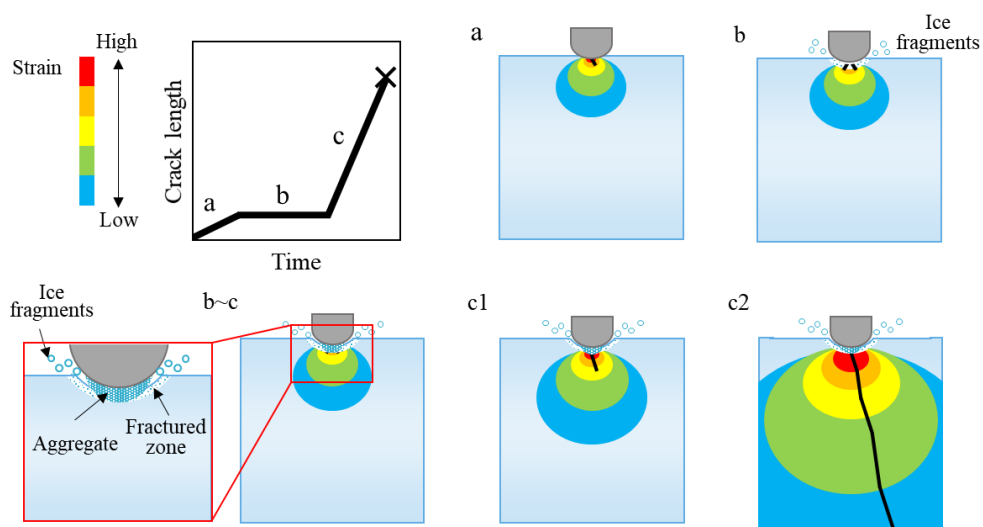


図 3-25 球圧子の直径が小さい場合における氷の脆性破壊挙動の模式図

図 3-26 に球圧子の直径が大きい場合における氷の脆性破壊挙動の模式図を示す。圧子の直径が大きい場合、氷片の飛散はわずかであり、ほとんど確認できていない。しかし、ひずみ速度 10^1 s^{-1} 以下では、押込初期に亀裂が停滞（亀裂進展速度がほぼ 0 m/s ）している。また、ひずみ速度 10^2 s^{-1} では押込初期の亀裂の停滞はほとんど生じなかったが、亀裂進展速度はやや減少する。これらのことから、直径の大きい圧子においても直径の小さい場合と同様に、表層から破壊が生じることで短時間ながら亀裂進展が停滞または減速したと判断できる。しかし、圧子の直径が大きいと氷との接触面積が大きくなるため、表層で破壊された氷の飛散が抑制されると推察される。また、ひずみ速度 10^2 s^{-1} で亀裂の停滞がほぼ生じなかったのは、圧子の直径が大きくなることで少ない変位量でも広範囲の変形場を形成できること、さらに変位速度が増加することで亀裂の停滞が起こる前に圧子を押込み続け、破壊に至ることが原因と考えられる。

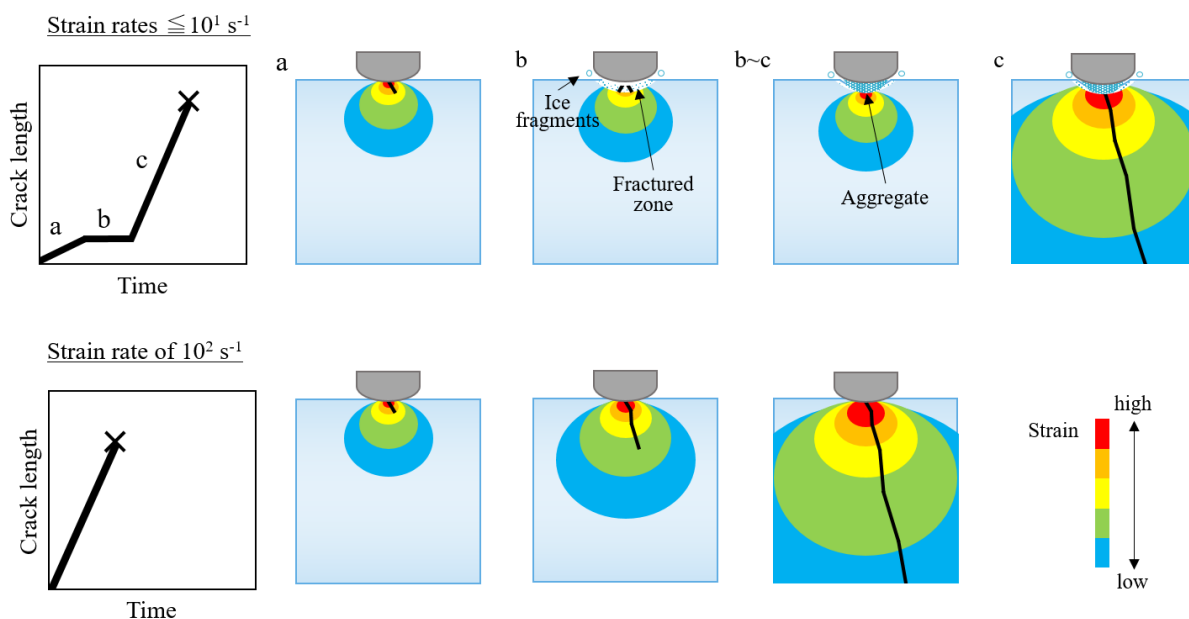


図 3-26 球圧子の直径が大きい場合における氷の脆性破壊挙動の模式図

図 3-27 に円錐圧子における氷の脆性破壊挙動の模式図を示す。円錐圧子では、球圧子の直径が小さい場合と同様に亀裂の進展は 3 段階に区分できる。しかし、円錐圧子では、球圧子と比較して先端形状が鋭いため、応力集中効果が高く、表層の破壊が促進されやすい。さらに、圧子と接触面の隙間が大きく、氷片の飛散量が多くなる。これらの傾向は、圧子角度が小さいほど顕著となるため、圧子直下で破碎された氷が堆積しにくく、小さな凝集体しか

形成することができない。よって、図 3-25 の球圧子の直径が小さい場合と同様のメカニズムで破壊するものの、圧子角度が小さいほど変形場が広がりにくく、より深く押込むことで亀裂を進展させ破壊に至ることができたと推察される。

以上のように、単軸圧縮試験とは異なるインデンテーション試験特有の脆性破壊メカニズムを示すことができた。

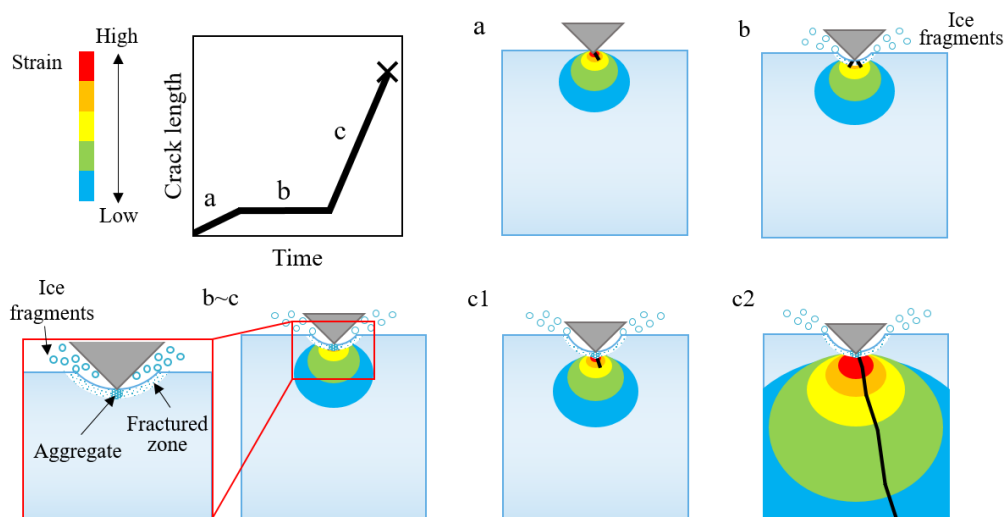


図 3-27 円錐圧子における氷の脆性破壊挙動の模式図

3.4.4 変形・破壊エネルギー

氷を割る際に最も適している圧子形状，速度について考える．3.3 節で得られた破壊までの荷重—変位関係を次式により積分し，氷が破壊されるまでに必要な変形・破壊エネルギー (U) を求めた。

$$U = \int P(h) dh \quad (3-12)$$

ここで、 $P(h)$ は変位 h における荷重である．式(3-12)が示すとおり，変形と亀裂生成や進展のような破壊現象を分離することなく，負荷するエネルギーとして評価している．図 3-28 に球圧子および円錐圧子における氷の変形・破壊エネルギーと代表ひずみ速度の関係を示す．球圧子の変形・破壊エネルギーは，ひずみ速度 $10^{-4} \sim 10^{-1} \text{ s}^{-1}$ で減少した後，ひずみ速度 $10^{-1} \sim 10^2 \text{ s}^{-1}$ では増加する傾

向がみられた。ひずみ速度の増加に伴い脆化するものの、ひずみ速度 10^{-1} s^{-1} 付近から氷片が飛散し始めるため、変位量の増加に起因して変形・破壊エネルギーが増加したと考えられる。また、円錐圧子の変形・破壊エネルギーは、ひずみ速度 $10^{-3} \sim 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ で減少し、ひずみ速度 $10^{-2} \sim 10^0 \text{ s}^{-1}$ 付近で最も小さくなった。ひずみ速度 10^0 s^{-1} 以上で変形・破壊エネルギーが増加したのは、球圧子と同様に氷片が飛散し始めたためと推察される。また、球圧子と円錐圧子を比較すると、各ひずみ速度における変形・破壊エネルギーは球圧子の方が小さい。このことから、氷片がほぼ飛散しないひずみ速度 10^{-1} s^{-1} 付近の速度において球圧子を用いると、最も低エネルギーで氷を破壊できることが明らかになった。単軸圧縮試験で表面から亀裂が生じた試験片の圧縮強度が低下したように、圧子を用いることで表層から破壊させることのできるインデンテーション試験は、低荷重かつ低エネルギーで氷を破壊する効率的な手段と言える。なお、この結果は氷の試験片形状に依存する可能性があるため、サイズ効果の検討が今後の課題である。

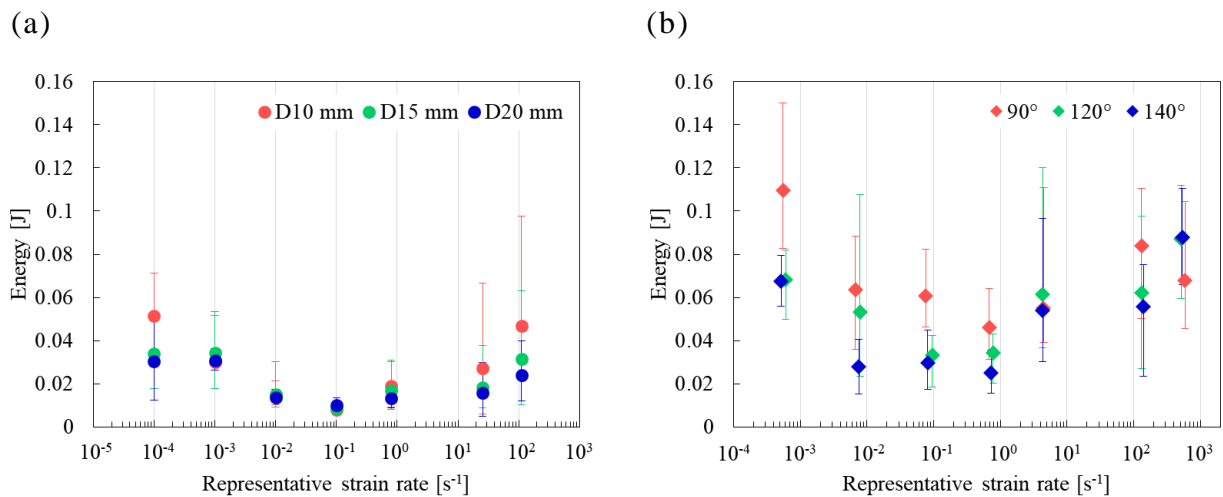


図 3-28 (a) 球圧子の変形・破壊エネルギーと代表ひずみ速度の関係
(b) 円錐圧子の変形・破壊エネルギーと代表ひずみ速度の関係

3.5 結 言

本章では、インデンテーション試験を実施し、氷の変形・破壊特性に及ぼす圧子形状やひずみ速度の影響について考察した。以下に得られた結果を示す。

- (1) 破壊荷重は、球圧子の直径や円錐圧子の圧子角度が大きくなるほど増加した。また、単軸圧縮試験との比較により、インデンテーション試験の破壊荷重は、圧縮強度とは異なるひずみ速度依存性を有することが示された。これは、インデンテーション試験では表層から破壊が生じることに起因すると考えられる。
- (2) 氷が破壊した際の変位量は、球圧子の直径や円錐圧子の圧子角度が小さくなるほど大きくなった。また、球圧子よりも円錐圧子の方が変位量は大きくなった。一方、同じひずみ速度において氷が破壊された時の圧子の接触半径は、圧子形状に関わらずほとんど変化しなかった。インデンテーション試験では、接触半径が同じ場合、材料内部の軸方向のひずみ分布は類似する。よって、インデンテーションにより形成される氷内部の変形場が氷の破壊に大きく影響していることが示唆された。
- (3) ハイスピードカメラによる観察から、衝撃インデンテーション試験では、変形初期に亀裂が一定時間停滞または減速した後、急激に進展することが示された。このような氷の脆性破壊挙動について、表層の破壊や氷片の飛散などの観察結果と圧子直下に形成される凝集体および変形場の広がりをもとに考察し、そのメカニズムを提案した。
- (4) インデンテーション試験における変形・破壊エネルギーは、球圧子の直径や円錐圧子の圧子角度が大きくなるほど小さくなる傾向がみられ、球圧子の方が小さくなった。また、変形・破壊エネルギーは、ひずみ速度 10^{-1} s^{-1} 付近で最も小さくなった。これは、ひずみ速度が大きくなると氷が脆性的になり表層の破壊が促進され、また、鋭い先端形状ほど表層で破壊された氷が氷片として飛散しやすいためと考えられる。

以上のことから、単軸圧縮試験の強度特性とは異なるインデンテーション試験特有の脆性破壊メカニズムを見出した。

第4章 結 論

本研究では、純氷の変形・破壊特性に着目した研究を行った。単軸圧縮試験においては、動的から衝撃の高ひずみ速度において最大圧縮応力が増加することが指摘されている。高ひずみ速度における氷の圧縮変形特性評価には、スプリット・ホプキンソン棒（SHB）法が用いられる。しかし、先行研究では高ひずみ速度で脆性挙動を示す氷の圧縮変形特性を SHB 法により正しく評価できているか判断できず、また、高ひずみ速度での最大圧縮応力の増加原因については解明されていないのが現状である。一方、実際に工学的問題となる氷の破壊現象を考える際には、インデンテーション試験を用いた局所変形による破壊現象を評価する必要がある。しかし、インデンテーション試験において圧子形状を変化させた時の変形・破壊特性やその速度依存性および脆性破壊メカニズムについては検討されていない。そこで本研究では、まず高ひずみ速度での単軸圧縮変形特性を把握した後、インデンテーション試験の変形・破壊挙動に及ぼす圧子形状やひずみ速度の影響について検討し、高ひずみ速度における純氷の変形・破壊特性を解明することを目的とした。

第1章では、氷の変形・破壊特性についてこれまで行われてきた研究について整理し、高ひずみ速度における単軸圧縮試験の課題を抽出した。また、工学的な観点からインデンテーション試験の重要性を示し、インデンテーション試験の過去の研究とその課題をまとめ、本研究の目的を明確にした。

第2章では、単軸圧縮試験を行い、純氷の圧縮特性を明らかにした。衝撃試験での応力平衡の成立を確認し、結果を整理した。試験片と治具の接触状態は得られた応力-ひずみ関係に大きく影響し、接触状態が悪い場合、最大応力が低下するとともに、最大応力時のひずみ量は増加することが確認された。また、衝撃試験において、SHB 法とハイスピードカメラによる観察の結果、亀裂の生成・進展と応力の時間微分である応力速度の変化には相関関係があることが明らかになった。さらに、ひずみ速度 10^2 s^{-1} 以上では、最大応力と破壊時の応力は一致しないことを見出した。このことから、応力速度が減少に転じた点で氷が破壊したと定義し、破壊時の応力を圧縮強度とすると、圧縮強度は、少なくともひずみ速度 10^{-1} s^{-1} 付近から増加する傾向にあることが示された。高ひずみ速度では粒界すべりよりも転位のすべり運動が支配的であると考えられ、脆性域での圧縮強度の増加は、転位の熱活性化過程によって説明できることを示した。

第3章では、球圧子および円錐圧子によるインデンテーション試験を実施し、純氷の変形・破壊挙動に及ぼす圧子形状とひずみ速度の影響について考察

した．インデンテーション試験における破壊荷重は，球圧子の直径や円錐圧子の圧子角度が大きくなるほど増加する傾向を示した．また，破壊荷重は，表層の破壊に起因し，単軸圧縮試験の圧縮強度とは異なるひずみ速度依存性を有することが明らかになった．他方，氷が破壊された際の各ひずみ速度における圧子の接触半径は，圧子形状に関わらずほぼ変化しなかった．インデンテーション試験において，接触半径が等しい場合，軸方向のひずみ分布は類似すると報告されていることから，氷内部の変形場が氷の破壊に大きく関与していることが示唆された．また，ハイスピードカメラを用いて亀裂の進展を観察すると，変形初期に亀裂が一定時間停滞または減速することが確認された．この亀裂進展挙動は，表層の破壊に伴い生成される氷片の飛散と凝集体の形成に伴う変形場の広がりに関連していると考えられ，単軸圧縮試験とは異なるインデンテーション試験における脆性破壊メカニズムを提案した．さらに，破壊までの荷重－変位関係を積分し，変形・破壊エネルギーを算出すると，球圧子の直径や円錐圧子の圧子角度が大きくなるほど，また，円錐圧子より球圧子の方が，変形・破壊エネルギーが小さくなる傾向がみられた．脆性域では，ひずみ速度の増加に伴い表層で破壊された氷が氷片として飛散することで変形量が増え，結果として変形・破壊エネルギーが増加する．そのため，氷片がほぼ飛散しないひずみ速度 10^{-1} s^{-1} 付近の速度において氷を最も効率よく破壊できることが明らかになった．

以上のように，本研究では単軸圧縮試験において，特に高ひずみ速度下の評価方法を検討し，氷の破壊の基準と圧縮強度を定義するとともに，材料強度のひずみ速度依存性を誘起する要因を考察した．また，インデンテーション試験における圧子形状やひずみ速度の影響を検討し，インデンテーション試験特有の脆性破壊メカニズムを明らかにした．さらに，インデンテーション試験は，氷を効率的に破壊する有効な手段であることを示した．これらの結果から，高ひずみ速度における純氷の変形・破壊特性の一端を解明したと言える．

本研究成果は，自動車や家屋，農作物を対象とした雹害対策用のシェルターや防護シートの開発に活用できる．また，砕氷船の船底やスクリュー等の形状に応用することで船舶の砕氷能力の向上に貢献できる．さらに，幅広い速度域での正確な氷の力学特性の取得は，氷の材料モデルの構築に反映でき，航空，宇宙分野等での氷との衝突現象の解明に繋がる．本研究成果がこれらの工学的問題解決の一助となることを期待する．

本研究の成果を今後発展させるためには、いくつかの課題が存在する。以下に、主要な課題について述べる。

- (1) 本研究では、高ひずみ速度における圧縮強度の増加原因を転位の熱活性化過程を用いて説明した。これを実証するためには、温度条件を変化させた実験を行い、ひずみ速度の増加に伴う熱活性化エネルギーの変化を定量的に評価する必要がある。
- (2) 本研究では、インデンテーション試験の結果を単軸圧縮試験と比較するため、代表ひずみ速度を用いて整理した。しかし、金属材料のインデンテーション試験においても材料内部のひずみ速度場とその取扱いに関する研究は発展途上であり、変形中に氷片が飛散する氷内部の変形場やひずみ速度場を解明することは大きな課題である。したがって、今後、有限要素法解析等を用いた詳細な検討が必要である。インデンテーション試験におけるひずみ速度場の解明は、氷の破壊現象のみならず、インデンテーション試験のひずみ速度の議論の発展に寄与することが期待される。
- (3) 本研究で行ったインデンテーション試験では、同一寸法の試験片を用いた。しかし、破壊荷重や破壊時の変位量、亀裂進展挙動等は、試験片形状に依存することが予想される。よって、試験片形状を変化させた実験を行い、試験片形状と圧子形状がもたらす破壊メカニズムへの影響を明らかにする必要がある。

付録 A

第 3 章の球圧子インデンテーション試験における荷重—変位関係を示す。

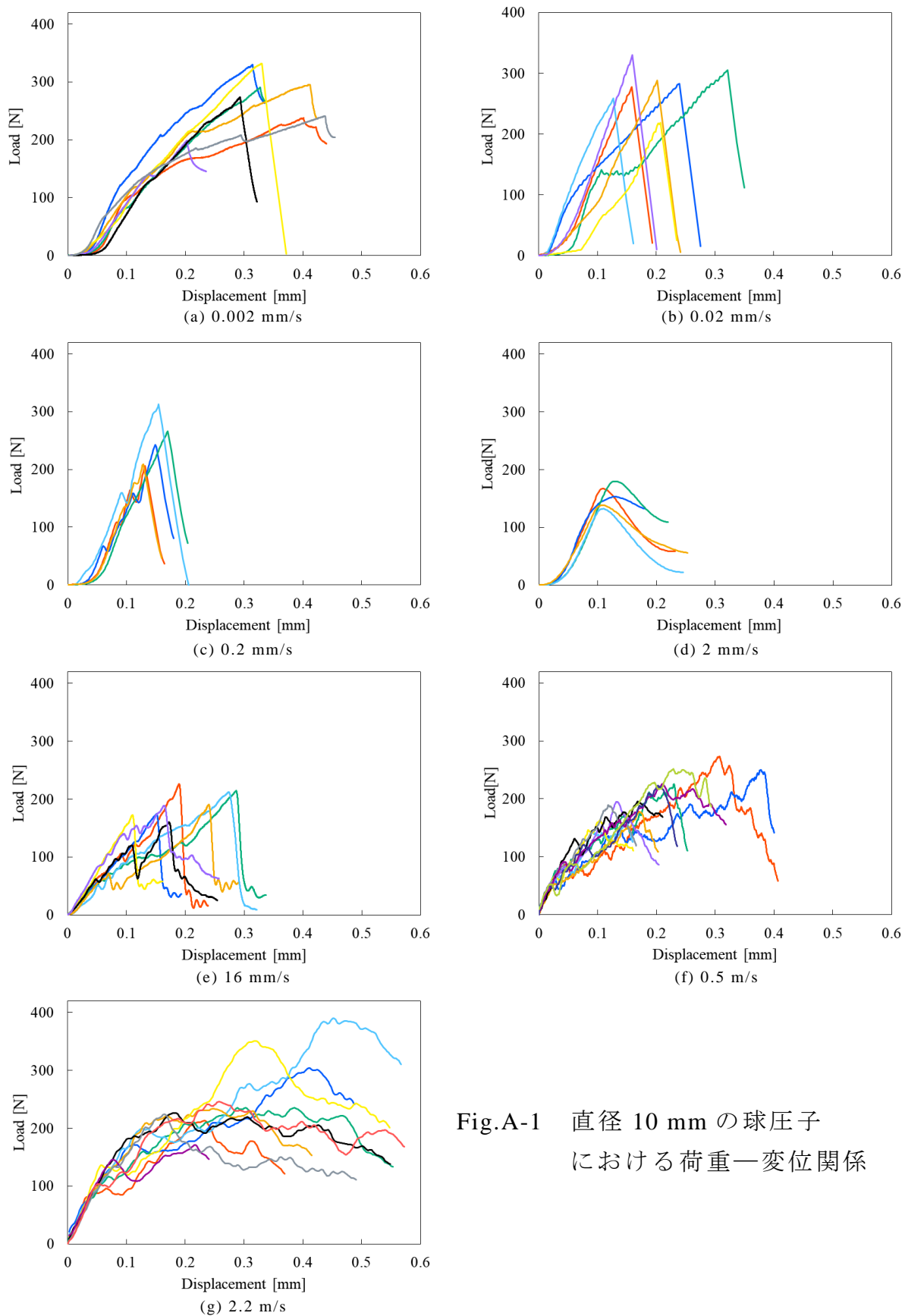


Fig.A-1 直径 10 mm の球圧子
における荷重—変位関係

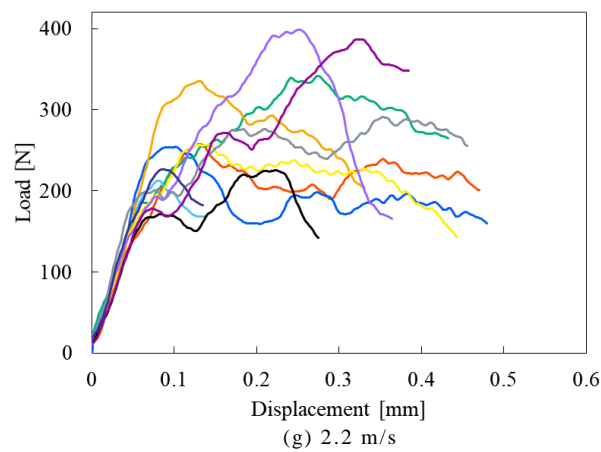
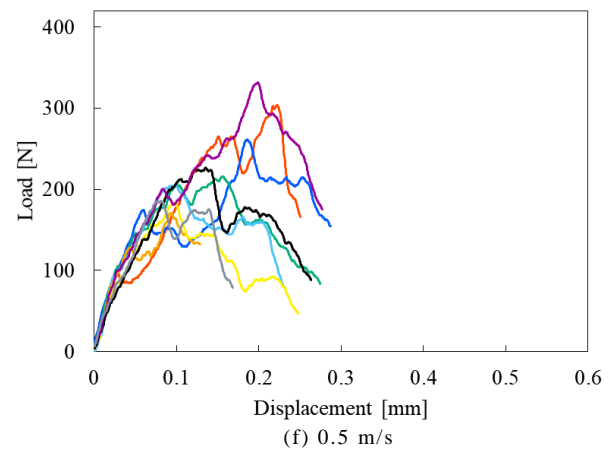
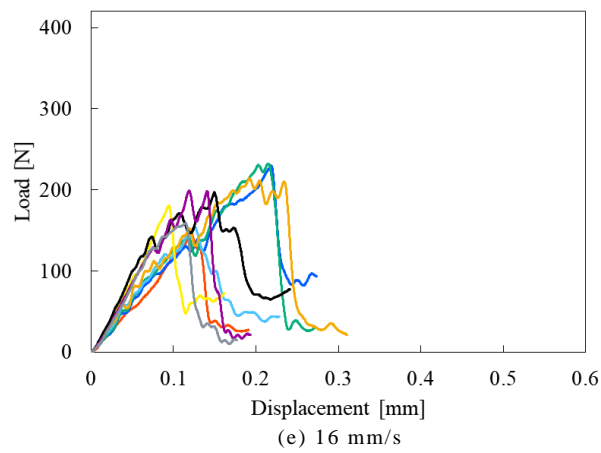
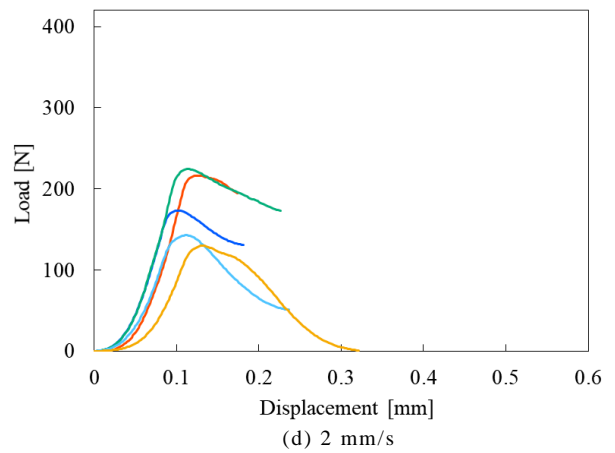
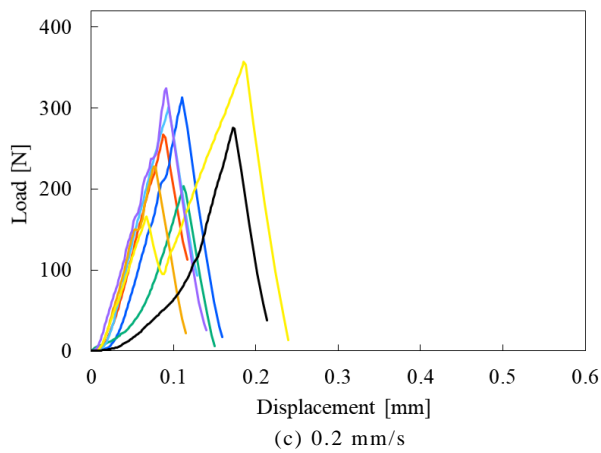
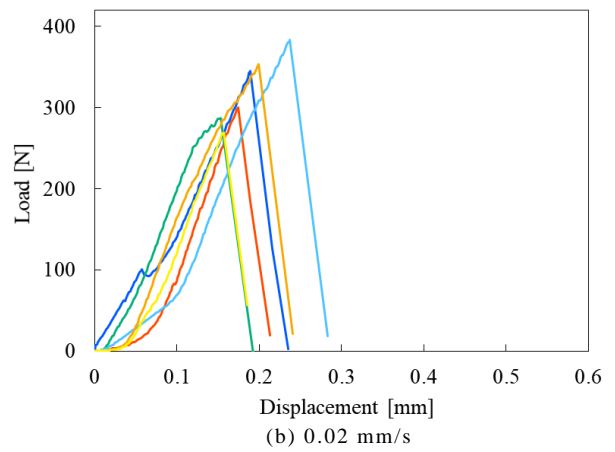
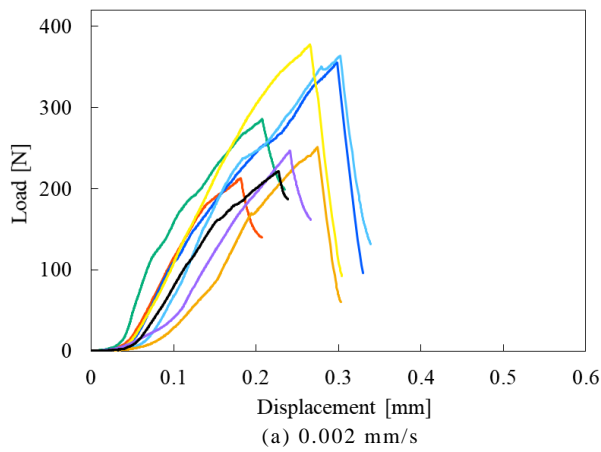


Fig.A-2 直径 15 mm の球圧子
における荷重—変位関係

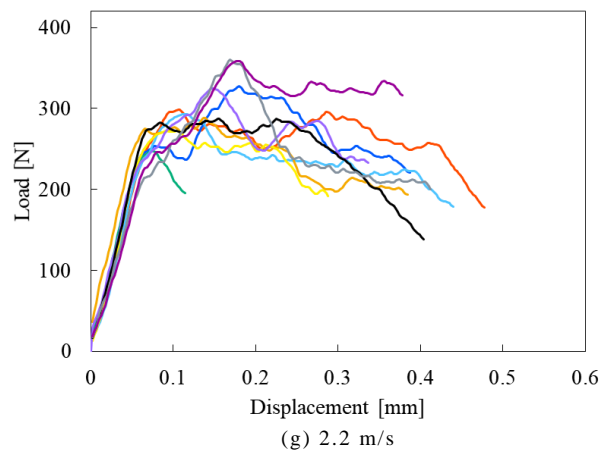
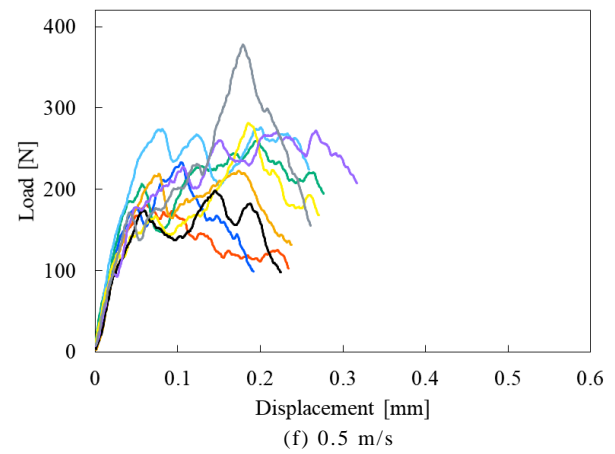
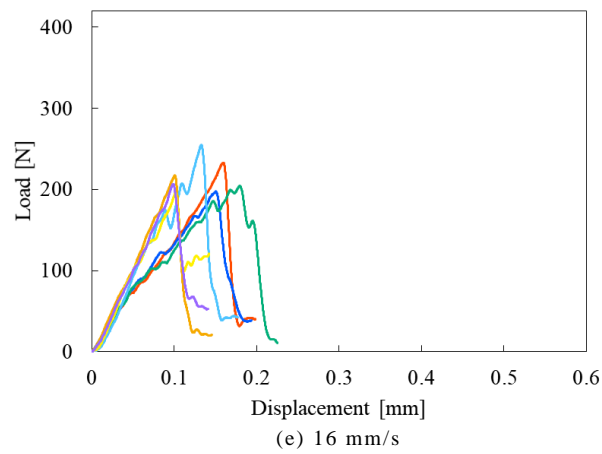
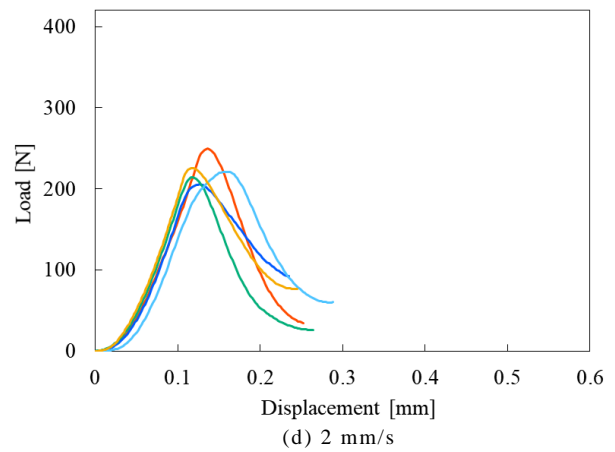
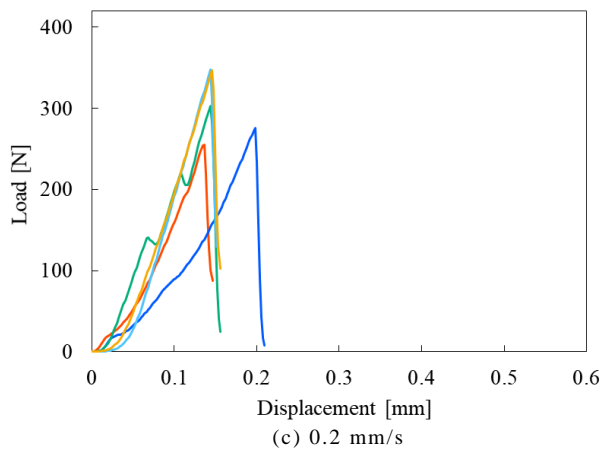
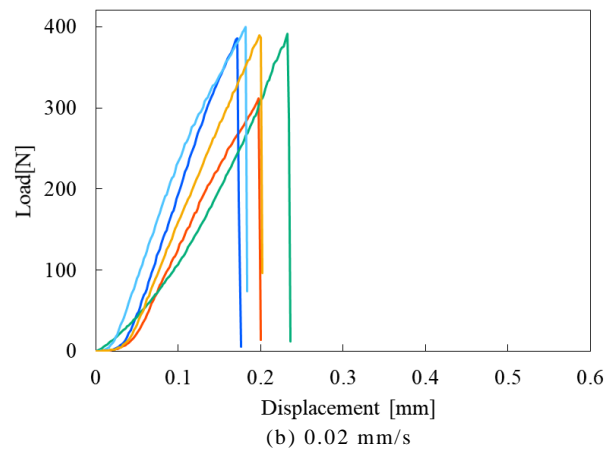
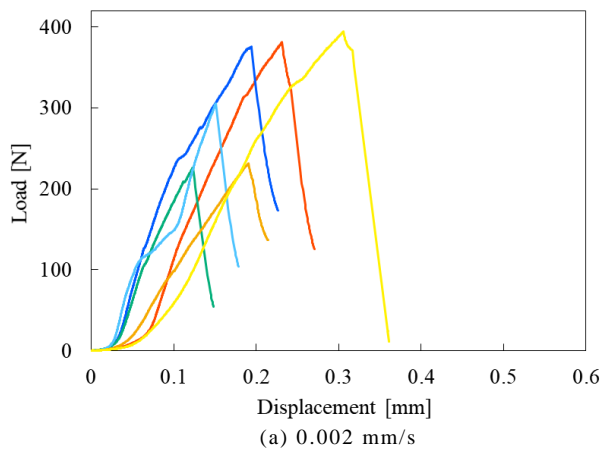


Fig.A-3 直径 20 mm の球圧子
における荷重—変位関係

付録 B

第 3 章の円錐圧子インデンテーション試験における荷重—変位関係を示す。

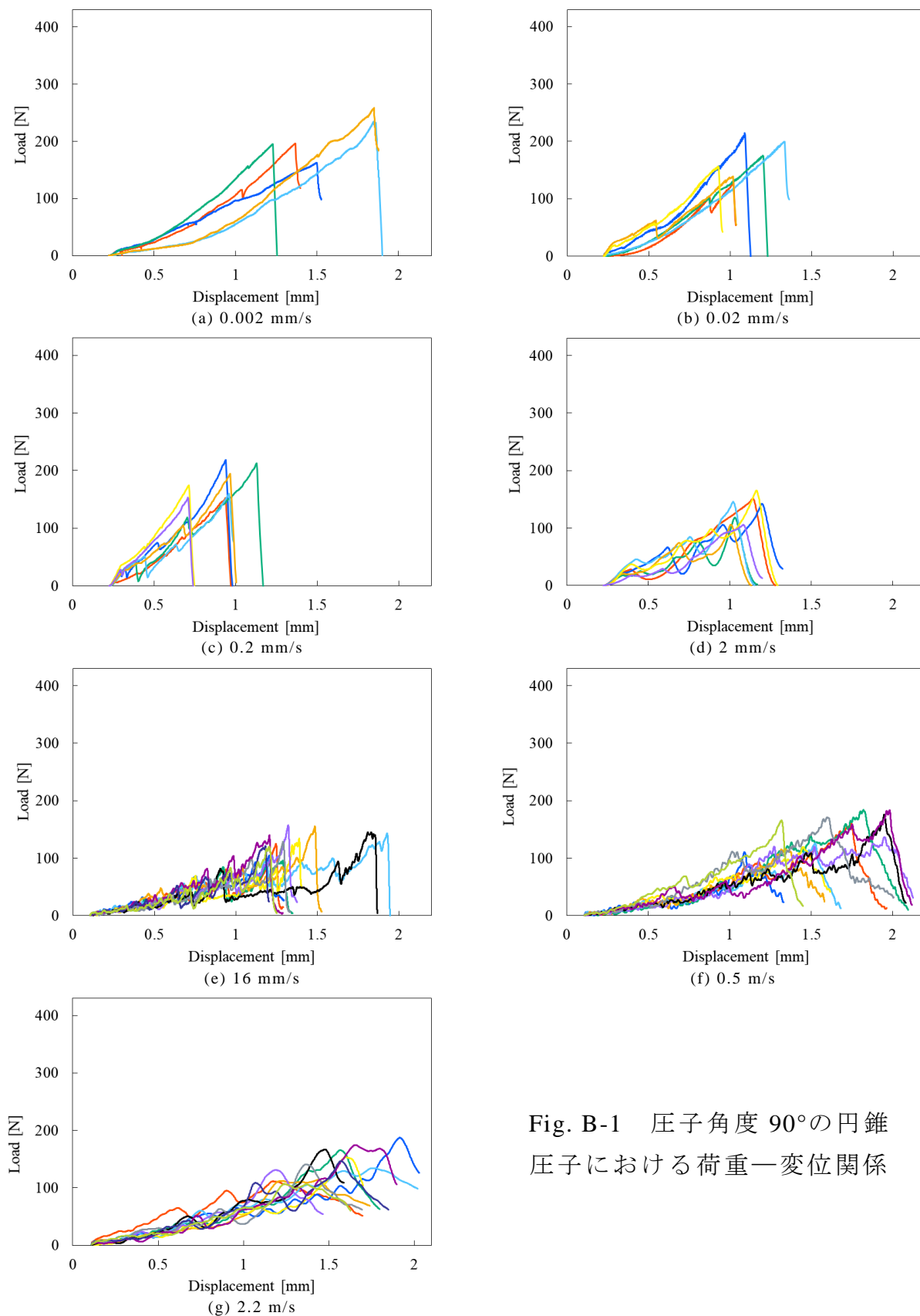


Fig. B-1 圧子角度 90° の円錐
圧子における荷重—変位関係

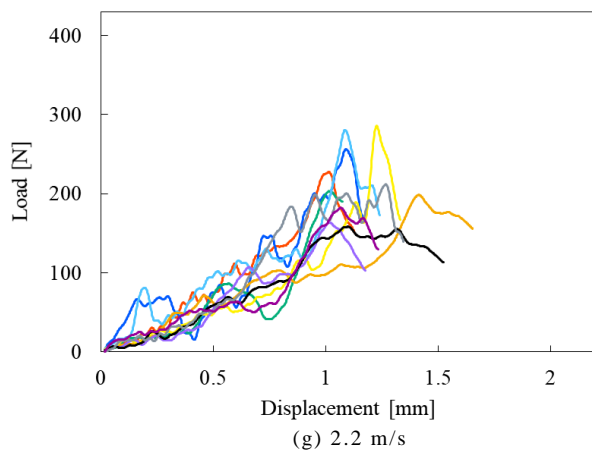
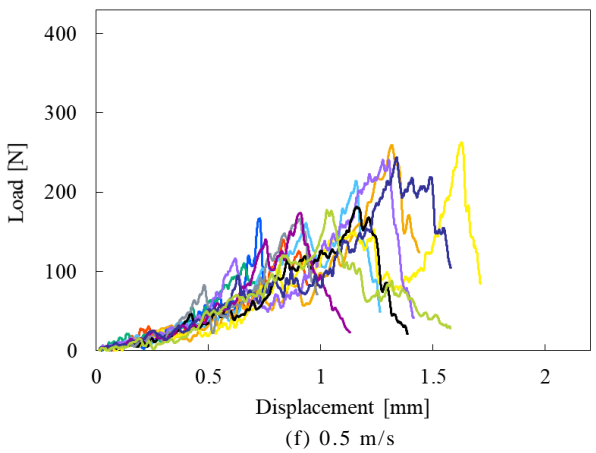
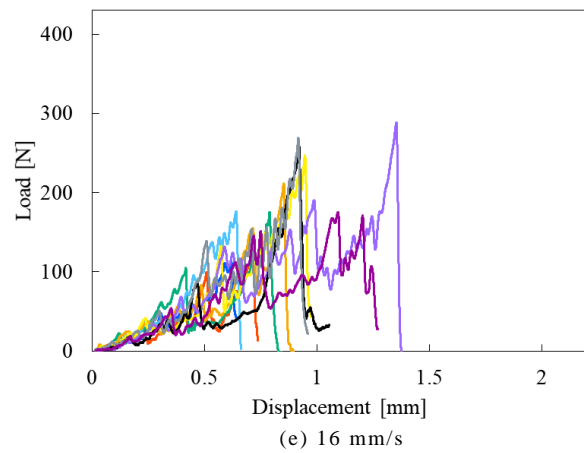
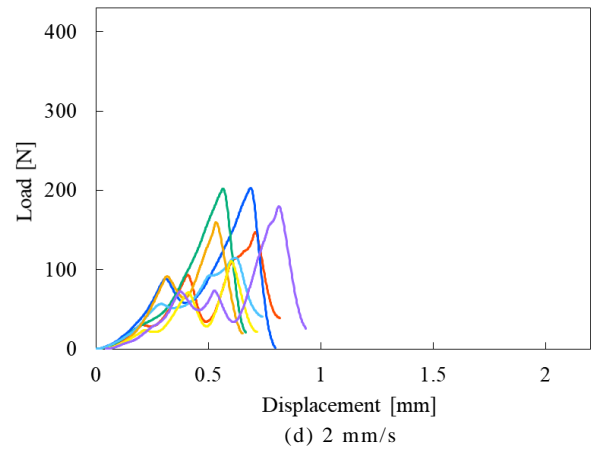
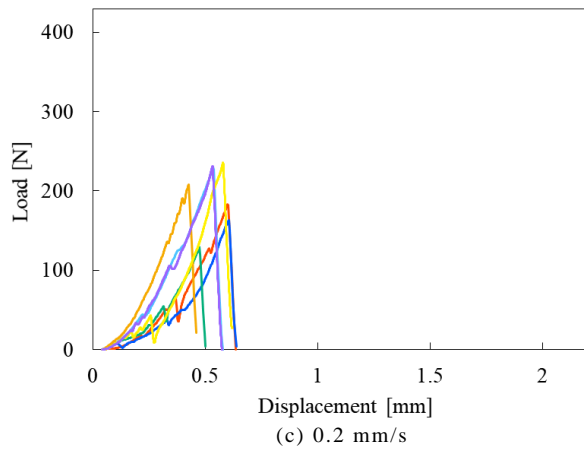
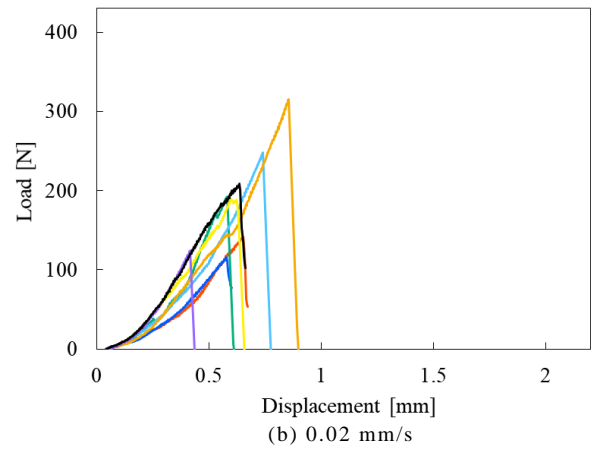
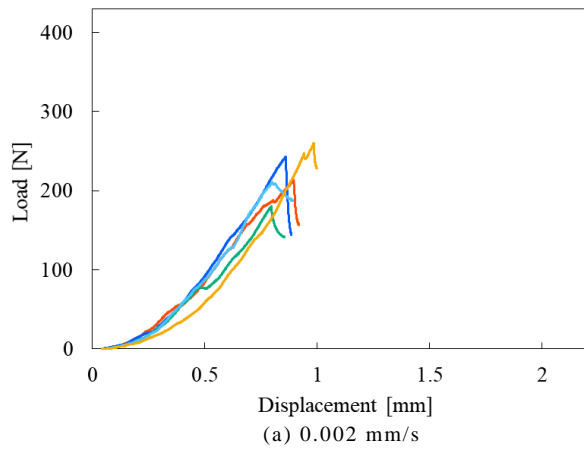


Fig. B-2 圧子角度 120° の円錐
圧子における荷重—変位関係

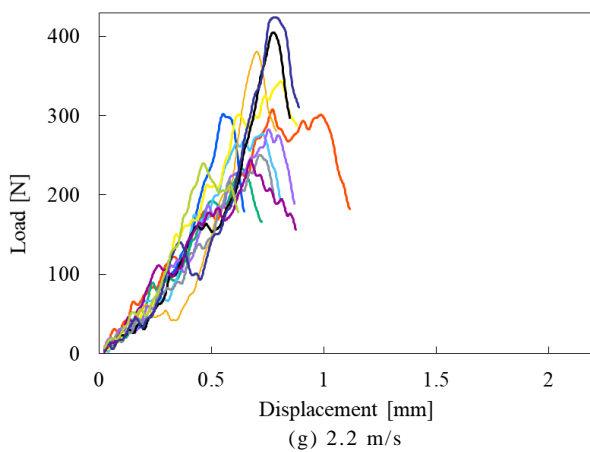
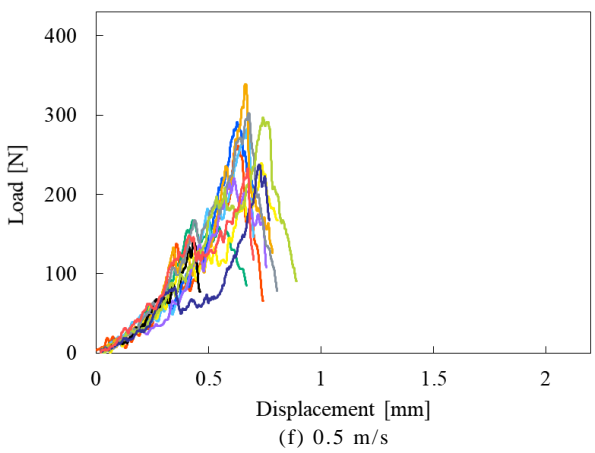
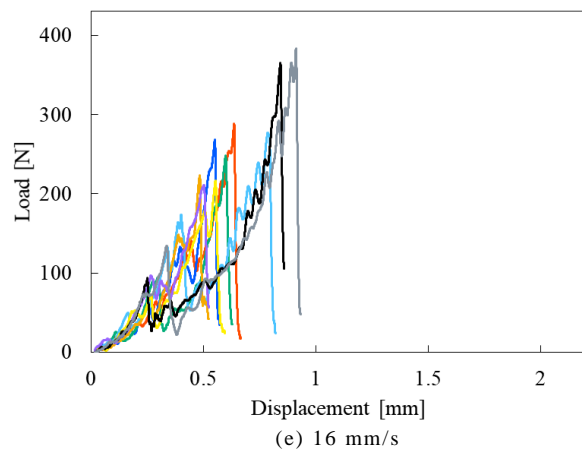
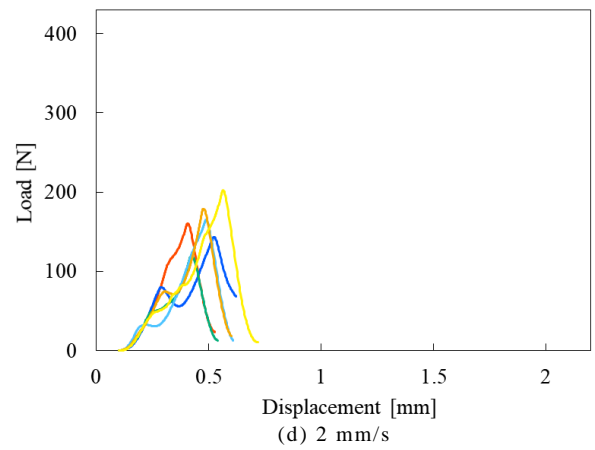
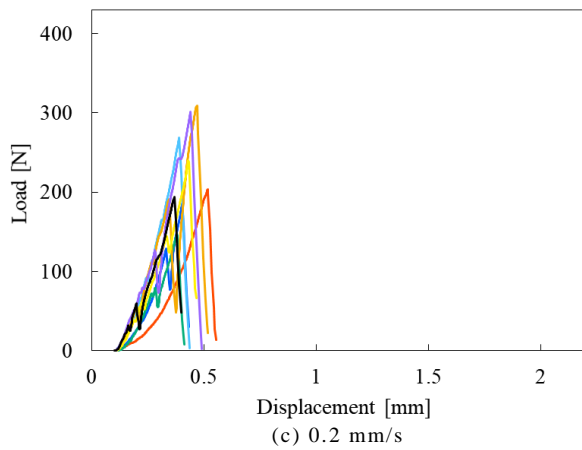
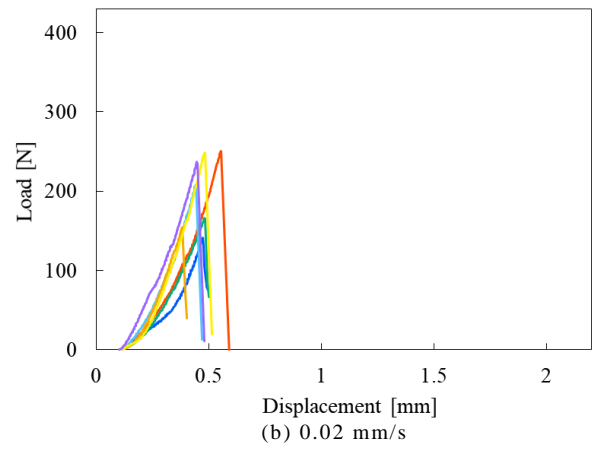
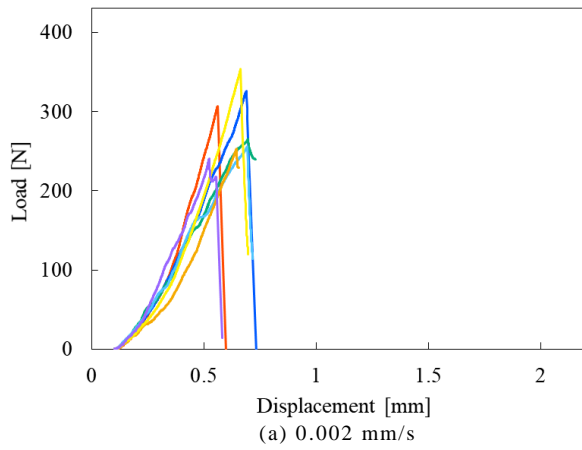


Fig. B-3 圧子角度 140°の円錐
圧子における荷重—変位関係

謝 辞

本研究を遂行するにあたり、終始丁寧かつ熱心なご指導を頂きました指導教官の山田浩之 准教授に心より感謝の意を表します。また、様々なご指導を頂くとともに、終始温かく見守ってくださった小笠原永久 教授に深く感謝申し上げます。本科学士時代から修士、博士に至るまで大変お世話になりました。

金沢大学 理工研究域 フロンティア工学系 樋口理宏 准教授，防衛大学校 システム工学群 機械工学科 山川淳也 教授，熊谷達夫 教授，同 応用科学群 応用物理学科 川合伸明 准教授には御多忙の中、副査としてご指導頂き、本研究をまとめる上で貴重なご意見を頂きました。心より感謝申し上げます。

防衛大学校 機械工学科 藤原浩幸 教授には、衝撃インデンテーション試験装置のノイズ改善に関してご協力頂くとともに、フィルタ処理方法等の多くの有用なご助言を頂きました。厚く御礼申し上げます。

国立研究開発法人 海上・港湾・航空技術研究所 海上技術安全研究所 松沢孝俊 氏には、氷を扱う研究者としての専門的な見地から様々なご助言を頂きました。厚く御礼申し上げます。

株式会社ナックイメージテクノロジー 木村祥二 氏，佐々木裕康 氏には、ハイスピードカメラでの撮影や画像解析においてご協力頂くとともに、数々のご助言を頂きました。ここに深く感謝申し上げます。

室蘭工業大学 生産システム工学系専攻 創造工学科 立山耕平 准教授には、防衛大学校本科学士時代から、研究のみならず様々な場面で多くのご助言を頂きました。心から感謝申し上げます。

中央大学 理工学部 精密機械工学科 小島朋久 助教には、ガラスの破壊に照らして氷における破壊の考え方について、有用なご助言を頂きました。ここに深く感謝申し上げます。

防衛大学校 実習工場の齋藤雅史 技官，小林浩明 技官，山之内智晴 技官，山田勇 氏，西田幸造 氏，杉澤勉 氏には、試験装置開発にあたり、多くの部品を製作して頂いたほか、機械加工に関する様々なご助言を頂きました。厚く御礼申し上げます。

横須賀氷業には、いつも快く氷試験片の加工を引き受けて頂きました。また、チャンバーの作製にあたっては、コレット工業株式会社にお世話になりました。ここに記して謝意を表します。

最後に、共に研究室で過ごした諸先輩方，後輩をはじめ、本論文を作成するにあたりご支援，ご協力を頂いた全ての方々に心より感謝申し上げます。

参考文献

第1章 参考文献

- 1) R. Smoluchowski, Formation of H₂ on amorphous ice grains and their importance for planetary atmospheres, *Astrophysics and Space Science*, Vol.65 (1979), pp.29–38.
- 2) K. Ros, A. Johansen, Ice condensation as a planet formation mechanism, *Astronomy and Astrophysics*, Vol.552 (2013), A137.
- 3) S. Kawakami, H. Mizutani, Y. Takagi, M. Kati, M. Kumazawa, Impact experiments on ice, *Journal of Geophysical Research*, Vol.88 (1983), pp.5806–5814.
- 4) M. Arakawa, K. Shirai, M. Kato, Shock wave and fracture propagation in water ice by high velocity impact, *Geophysical Research Letters*, Vol.27, No.3 (2000), pp.305–308.
- 5) H. Peterson, M. Bailey, J. Hallet, Ice particle growth under conditions of the upper troposphere, *Atmospheric Research*, Vol.97, No.4 (2010), pp.446–449.
- 6) E. Yokoyama, I. Yoshizaki, T. Shimaoka, T. Sone, T. Kiyota, Y. Furukawa, Measurements of growth rates of an ice crystal from supercooled heavy water under microgravity conditions: Basal face growth rate and tip velocity of a dendrite, *Journal of Physical Chemistry B*, Vol.115, No.27 (2011), pp.8739–8745.
- 7) X. Wei, P.B. Miranda, Y.R. Shen, Surface vibrational spectroscopic study of surface melting of ice, *Physical Review Letters*, Vol.86 (2001), pp.1554–1557.
- 8) K. Murata, H. Asakawa, K. Nagashima, Y. Furukawa, G. Sazaki, Thermodynamic origin of surface melting on ice crystals, *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, Vol.113, No.44 (2016), pp.E6741–E6748.
- 9) P.U. Clark, R.B. Alley, D. Pollard, Northern hemisphere ice-sheet influences on global climate change, *Science*, Vol.286 (1999), pp.1104–1111.
- 10) Y. Yokoyama, T.M. East, W.G. Thompson, A.L. Thomas, J.M. Webster, Y. Miyairi, C. Sawada, T. Aze, H. Matsuzaki, J. Okuno, S. Fallon, J. Braga, M. Humblet, Y. Iryu, D.C. Potts, K. Fujita, A. Suzuki, H. Kan, Rapid glaciation and a two-step sea level plunge into the last glacial maximum, *Nature*, Vol.559 (2018), pp.603–607.
- 11) <https://www.mag2.com/p/news/259797> (参照 2022.12.2)
- 12) 龍ヶ崎市役所ホームページ, https://www.city.ryugasaki.ibaraki.jp/anzen/bousai/bousai_yomimono/bousai/2013081503207.html (参照 2022.12.2)
- 13) 降ひょう（6月2日）に関する情報（最終報），群馬県報道発表資料, (2022.6).
- 14) 令和4年6月2,3日の降ひょうによる農業災害の特別災害の指定について, 埼玉県報道発表資料, (2022.6).
- 15) 令和4年6月3日降雹による農林水産業への被害について（第2報），千葉県報道発表資料, (2022.6).
- 16) 落下物対策の強化策（報告書），落下物防止等に係る総合対策推進会議 (2018.3).
- 17) <https://www.afpbb.com/articles/-/3006169> (参照 2022.12.2)
- 18) 千島昭司, 網走管内の流氷災害について, *雪氷*, Vol.28, No.4 (1966), pp.100–105.
- 19) 北極海航路に係る産学官連携協議会資料, https://www.mlit.go.jp/sogoseisaku/ocean_policy/sosei_ocean_tk_000021.html (参照 2022.12.2)
- 20) <https://www.nsf.gov/geo/opp/support/landstrp.jsp> (参照 2022.12.2)
- 21) 前野紀一, 氷と雪の構造と熱物性, *熱物性*, Vol.8, No.4 (1994), pp.250–255.
- 22) P.V. Hobbs, *Ice physics*, Oxford University Press (2010).
- 23) W.F. Kuhs, C. Sippel, A. Falenty, T.C. Hansen, Extent and relevance of stacking disorder in “ice I_c”, *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, Vol.109 (2012), pp.21259–21264.

- 24) R. Yamane, K. Komatsu, J. Gouchi, Y. Uwatoko, S. Machida, T. Hattori, H. Ito, H. Kagi, Experimental evidence for the existence of a second partially-ordered phase of ice VI, *Nature Communications*, Vol.12 (2021), 1129.
- 25) J.C. McConnell, On the plasticity of an ice crystal, *Proceedings of the Royal Society of London*, Vol.49 (1891), pp.323–343.
- 26) S. Steinemann, Results of preliminary experiments on the plasticity of ice crystals, *Journal of Glaciology*, Vol.2, No.16 (1954), pp.404–412.
- 27) H.H.G. Jellinek, R. Brill, Viscoelastic properties of ice, *Journal of Applied Physics*, Vol.27 (1956), pp.1198–1290.
- 28) U. Nakaya, Properties of single crystals of ice, revealed by internal melting, Snow, ice and permafrost research establishment, Corps of Engineers, U. S. Army (1956), Research Paper 13.
- 29) G.I. Taylor, The mechanism of plastic deformation of crystals. Part I.—Theoretical, *Proceedings of the Royal Society of London A*, Vol.145 (1934), pp.362–387.
- 30) E. Orowan, Zur Kristallplastizität. III, *Zeitschrift für Physik A Hadrons and nuclei*, Vol.89 (1934), pp.634–659.
- 31) M. Polanyi, Über eine Art Gitterstörung, die einen Kristall plastisch machen könnte, *Zeitschrift für Physik A Hadrons and nuclei*, Vol.89 (1934), pp.660–664.
- 32) D.J. Goodman, H.J. Frost, M.F. Ashby, The plasticity of polycrystalline ice, *Philosophical Magazine A*, Vol.43, No.3 (1981), pp.665–695.
- 33) 本堂武夫, 氷の塑性異方性と転位: 立方晶 I_c がもたらす立方晶 I_h の特異な物性, *低温科学*, Vol.64 (2006), pp.141–156.
- 34) 福田明治, 氷単結晶の変形の異方性と転位の挙動, *雪氷*, Vol.47, No.1 (1985), pp.15–20.
- 35) 日本金属学会編, 材料強度の原子論, 日本金属学会 (1985).
- 36) A. Fukuda, T. Hondoh, A. Higashi, Dislocation mechanisms of plastic deformation of ice, *Journal de Physique Colloques*, Vol.48 (1987), pp.C1–163–C1–173.
- 37) A. Higashi, S. Koinuma, S. Mae, Plastic yielding in ice single crystals, *Japanese Journal of Applied Physics*, Vol.3, No.10 (1964), pp.610–616.
- 38) J. Muguruma, S. Mae, A. Higashi, Void formation by non-basal glide in ice single crystals, *The Philosophical Magazine*, Vol.13 (1966), pp.625–629.
- 39) S. Ahmad, R.W. Whitworth, Dislocation motion in ice: A study by synchrotron X-ray topography, *Philosophical Magazine A*, Vol.57, No.5 (1988), pp.749–766.
- 40) T. Hondoh, H. Iwamatsu, S. Mae, Dislocation mobility for non-basal glide in ice measured by *in situ* X-ray topography, *Philosophical Magazine A*, Vol.62 (1990), pp.89–102.
- 41) C. Shearwood, R.W. Whitworth, The velocity of dislocations in ice, *Philosophical Magazine A*, Vol.64 (1991), pp.289–302.
- 42) 東晃, 福田明治, 本堂武夫, 後藤久美子, 雨海真也, 氷結晶中の転位・点欠陥の動的過程, 北海道大学工学部研究報告, No.125 (1985), pp.111–121.
- 43) 前野紀一, 氷の科学, 北海道大学出版会 (2006).
- 44) H. Shoji, A. Higashi, A deformation mechanism map of ice, *Journal of Glaciology*, Vol.21, No.85 (1978), pp.419–427.
- 45) 丸山公一, 中島英治, 高温強度の材料科学, 内田老鶴圃 (1997).
- 46) P. Barnes, D. Tabor, J.C.F. Walker, The friction and creep of polycrystalline ice, *Proceedings of the Royal Society of London A*, Vol.324, No.1557 (1971), pp.125–127.
- 47) P. Duval, M.F. Ashby, I. Anderman, Rate-controlling processes in the creep of polycrystalline ice, *Journal of Physical Chemistry*, Vol.87 (1983), pp.4066–4077.

- 48) J.W. Glen, Experiments on the deformation of ice, *Journal of Glaciology*, Vol.2 (1952), pp.111–114.
- 49) J.W. Glen, The creep of polycrystalline ice, *Proceedings of the Royal Society of London A*, Vol.228 (1955), pp.519–538.
- 50) M. Arakawa, N. Maeno, Mechanical strength of polycrystalline ice under uniaxial compression, *Cold Regions Science and Technology*, Vol.26, No.3 (1997), pp.215–229.
- 51) N. K. Sinha, Rheology of columnar-grained ice, *Experimental Mechanics*, Vol.18 (1978), pp.464–470.
- 52) R.W. Baker, The influence of ice-crystal size on creep, *Journal of Glaciology*, Vol.21, No.85 (1978), pp.485–500.
- 53) P. Duval, H. Le Gac, Does the permanent creep-rate of polycrystalline ice increase with crystal size?, *Journal of Glaciology*, Vol.25, No.91 (1980), pp.151–157.
- 54) S.J. Jones, H.A.M. Chew, Effect of sample and grain size on the compressive strength of ice, *Annals of Glaciology*, Vol.4 (1983), pp.129–132.
- 55) H.J. Frost, Mechanisms of crack nucleation in ice, *Engineering Fracture Mechanics*, Vol.68, No.17–18 (2001), pp.1823–1837.
- 56) F. Liu, I. Baker, M. Dudley, Dynamic observations of dislocation generation at grain boundaries in ice, *Philosophical Magazine A*, Vol.67, No.5 (1993), pp.1261–1276.
- 57) F. Liu, I. Baker, M. Dudley, Dislocation-grain boundary interactions in ice crystals, *Philosophical Magazine A*, Vol.71, No.1 (1995), pp.15–42.
- 58) P. Kalifa, S.J. Jones, T.D. Slade, Microcrack nucleation in granular ice under uniaxial compression: effect of grain-size and temperature, *Annals of Glaciology*, Vol.15 (1991), pp.222–229.
- 59) C. Zener, *Elasticity and anelasticity of metals*, The University of Chicago Press (1948).
- 60) C. Zener, *Fracturing of Metals*, American Society for Metals (1948).
- 61) D.M. Cole, Reversed direct stress testing of ice: initial experimental results and analysis, *Cold Regions Science and Technology*, Vol.18, No.3 (1990), pp.303–321.
- 62) R.C. Picu, V. Gupta, Crack nucleation in columnar ice due to elastic anisotropy and grain boundary sliding, *Acta Metallurgica et Materialia*, Vol.43, No.10 (1995), pp.3783–3789.
- 63) J. Weiss, E.M. Schulson, Grain-boundary sliding and crack nucleation in ice, *Philosophical Magazine A*, Vol.80 (2000), pp.279–300.
- 64) E.M. Schulson, The brittle compressive fracture of ice, *Acta Metallurgica et Materialia*, Vol.38, No.10 (1990), pp.1963–1976.
- 65) E.M. Schulson, Brittle failure of ice, *Engineering Fracture Mechanics*, Vol.68, No.17–18 (2001), pp.1839–1887.
- 66) E.M. Schulson, The fracture of water ice Ih: A short overview, *Meteoritics & Planetary Science*, Vol.41, No.10 (2006), pp.1497–1508.
- 67) N.P. Cannon, E.M. Schulson, T.R. Smith, H.J. Frost, Wing cracks and brittle compressive fracture, *Acta Metallurgica et Materialia*, Vol.38, No.10 (1990), pp.1955–1962.
- 68) C.E. Renshaw, E.M. Schulson, Non-linear rate dependent deformation under compression due to state variable friction, *Geophysical Research Letters*, Vol.25, No.12 (1998), pp.2205–2208.
- 69) J. Petit, M. Barquins, Can natural faults propagate under Mode II conditions?, *Tectonics*, Vol.7, No.6 (1988), pp.1243–1256.
- 70) L.N. Germanovich, R.L. Salganik, A.V. Dyskin, K.K. Lee, Mechanisms of brittle fracture of rock with pre-existing cracks in compression, *Journal of Geophysical Research*, Vol.143 (1994), pp.117–149.
- 71) E.M. Schulson, D. Iliescu, C.E. Renshaw, On the initiation of shear faults during brittle compressive failure: A new mechanism, *Journal of Geophysical Research*, Vol.104, No.B1 (1999), pp.695–705.

- 72) C.E. Renshaw, E.M. Schulson, Universal behaviour in compressive failure of brittle materials, *Nature*, Vol.412 (2001), pp.897–900.
- 73) T. Granier, Origin, damping, and pattern of development of faults in granite, *Tectonics*, Vol.4, No.7 (1985), pp.721–737.
- 74) K.M. Cruikshank, G. Zhao, A.M. Johnson, Analysis of minor fractures associated with joints and faulted joints, *Journal of Structural Geology*, Vol.13, No.8 (1991), pp.865–886.
- 75) M. Mellor, D.M. Cole, Deformation and failure of ice under constant stress or constant strain-rate, *Cold Regions Science and Technology*, Vol.5, No.3 (1982), pp.201–219.
- 76) S.J. Jones, The confined compressive strength of polycrystalline ice, *Journal of Glaciology*, Vol.28, No.98 (1982), pp.171–178.
- 77) I. Hawkes, M. Mellor, Deformation and fracture of ice under uniaxial stress, *Journal of Glaciology*, Vol.11, No.61 (1972), pp.103–131.
- 78) L.W. Gold, Engineering properties of fresh-water ice, *Journal of Glaciology*, Vol.19, No.81 (1977), pp.197–212.
- 79) E.M. Schulson, The brittle failure of ice under compression, *Journal of Physical Chemistry B*, Vol.101, No.32 (1997), pp.6254–6258.
- 80) S. Qi, E.M. Schulson, The effect of temperature on the ductile-to-brittle transition in columnar ice, *Proceedings of 14th International Symposium on Ice* (1998), pp.521–527.
- 81) D.M. Cole, The microstructure of ice and its influence on mechanical properties, *Engineering Fracture Mechanics*, Vol.68, No.17–18 (2001), pp.1797–1822.
- 82) S.J. Jones, High strain-rate compression test on ice, *Journal of Physical Chemistry B*, Vol.101, No.32 (1997), pp.6099–6101.
- 83) JIS Z 2205:2019, スプリット・ホプキンソン棒法を用いた高変形速度試験方法 (2019).
- 84) P.K. Dutta, Compressive failure of polycrystalline ice under impact, *Proceedings of the 3rd international offshore and polar engineering conference* (1993), pp.573–580.
- 85) P.K. Dutta, D.M. Cole, E.M. Schulson, D.S. Sodhi, A fracture study of ice under high strain rate loading, *International Journal of Offshore and Polar Engineering*, Vol.14, No.3 (2004), pp.182–188.
- 86) H. Kim, J.N. Keune, Compressive strength of ice at impact strain rates, *Journal of Materials Science*, Vol.42, No.8 (2007), pp.2802–2806.
- 87) M. Shazly, V. Prakash, B.A. Lerch, High-strain-rate compression testing of ice, NASA, Glenn Research Center (2006), NASA TM-2006-213966.
- 88) M. Shazly, V. Prakash, B.A. Lerch, High strain-rate behavior of ice under uniaxial compression, *International Journal of Solids and Structures*, Vol.46, No.6 (2009), pp.1499–1515.
- 89) E.M. Schulson, D. Iliescu, A. Fortt, Characterization of ice for return-to-flight of the space shuttle: Part 1—hard ice, NASA, Glenn Research Center (2005), NASA CR-2005-213643-Part 1.
- 90) Z. Song, Z. Wang, H. Kim, H. Ma, Pulse shaper and dynamic compressive property investigation on ice using a large-sized modified split Hopkinson pressure bar, *Latin American Journal of Solids and Structures*, Vol.13, No.3 (2016), pp.391–406.
- 91) K.G. Hoge, A.K. Mukherjee, The temperature and strain rate dependence of the flow stress of tantalum, *Journal of Materials Science*, Vol.12 (1977), pp.1666–1672.
- 92) 向井敏司, 東健司, 土田信, 谷村眞治, 各種アルミニウム合金の引張特性に及ぼすひずみ速度の影響, *軽金属*, Vol.43, No.5 (1993), pp.252–257.
- 93) 谷村眞治, 林寛幸, 山本照美, 各種プラスチック材料の広ひずみ速度域での動的引張強度特性, *日本機械学会論文集 (A 編)*, Vol.77, No.780 (2011), pp.192–201.

- 94) T. Tsuda, H. Hayashi, T. Yamamoto, A. Abe, S. Tanimura, Dynamic tensile properties of engineering plastics over a wide range of strain rates, *Journal of Solid Mechanics and Materials Engineering*, Vol.6, No.6 (2012), pp.711–720.
- 95) B. Hopkinson, A method of measuring the pressure in the deformation of high explosives by the impact of bullets, *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, Vol.213 (1914), pp.437–452.
- 96) H. Kolsky, An investigation of the mechanical properties of materials at very high rates of loading, *Proceedings of the Physical Society. Section B*, Vol.62 (1949), pp.676–700.
- 97) J.L. Chiddister, L.E. Malvern, Compression-impact testing of aluminum at elevated temperatures, *Experimental Mechanics*, Vol.3 (1963), pp.81–90.
- 98) W. Chen, B. Song, D.J. Frew, M.J. Forrester, Dynamic small strain measurements of a metal specimen with a split Hopkinson pressure bar, *Experimental Mechanics*, Vol.43 (2003), pp.20–23.
- 99) I.M. Daniel, J.M. Cho, Characterization of anisotropic polymeric foam under static and dynamic loading, *Experimental Mechanics*, Vol.51 (2011), pp.1395–1403.
- 100) S. Koumoulis, L. Lamberson, Strain rate dependent compressive response of open cell polyurethane foam, *Experimental Mechanics*, Vol.59 (2019), pp.1087–1103.
- 101) H. Kolsky, *Stress waves in solids*, Dover Publications (1963).
- 102) K.F. Graff, *Wave motion in elastic solids*, Dover Publications (2012).
- 103) X. Wu, V. Prakash, Dynamic strength of distilled water and lake water ice at high strain rates, *International Journal of Impact Engineering*, Vol.76 (2015), pp.155–165.
- 104) A. Bragov, L. Igumno, A. Konstantinov, A. Lomunov, A. Filippov, Yu. Shmotin, R. Didenko, A. Krundaeva, Investigation of strength properties of freshwater ice, *EPJ Web of Conferences*, Vol.94 (2015), 01070.
- 105) R.S. Potter, J.M. Cammack, C.H. Braithwaite, P.D. Church, S.M. Walley, Problems associated with making mechanical measurements on water–ice at quasistatic and dynamic strain rates, *Journal of Dynamic Behavior of Materials*, Vol.5 (2019), pp.198–211.
- 106) M.A. Sutton, J.J. Orteu, H. Schreier, *Image correlation for shape, motion and deformation measurements, basic concepts, theory and applications*, Springer Science & Business Media (2009).
- 107) F. Grennerat, M. Montagnat, O. Castelnaud, P. Vacher, H. Moulinec, P. Suquet, P. Duval, Experimental characterization of the intragranular strain field in columnar ice during transient creep, *Acta Materialia*, Vol.60, No.8 (2012), pp.3655–3666.
- 108) E.W. Smith, H. North, Sunlight speckle photograph, *Proceedings of 4th International Conference on Holographic Systems, Components and Applications* (1993), pp.232–236.
- 109) 野澤和男, 氷海工学—砕氷船・海洋構造設計・氷海環境問題—, 成山堂書店 (2006).
- 110) D. Tabor, The physical meaning of indentation and scratch hardness, *British Journal of Applied Physics*, Vol.7 (1956), pp.159–166.
- 111) A.C. Fischer-Cripps, *Nanoindentation: Third edition*, Springer (2011).
- 112) J. Chen, Y. Shen, W. Liu, B.D. Beake, X. Shi, Z. Wang, Y. Zhang, X. Guo, Effects of loading rate on development of pile-up during indentation creep of polycrystalline copper, *Materials Science and Engineering A*, Vol.656 (2016), pp.216–221.
- 113) W.D. Nix, Elastic and plastic properties of thin films on substrates: Nano indentation techniques, *Materials Science and Engineering A*, Vol.234–236 (1997), pp.37–44.
- 114) T. Chudoba, N. Schwarzer, F. Richter, Determination of elastic properties of thin films by indentation measurements with a spherical indenter, *Surface and Coatings Technology*, Vol.127, No.1 (2009), pp.9–17.

- 115) T. Ohmura, K. Tsuzaki, S. Matsuoka, Nanohardness measurement of high-purity Fe-C martensite, *Scripta Materialia*, Vol.45, No.8 (2001), pp.889–894.
- 116) S. Suresh, T.-G. Nieh, B.W. Choi, Nano-indentation of copper thin films on silicon substrates, *Scripta Materialia*, Vol.41, No.9 (1999), pp.951–957.
- 117) G. Gosh, Elastic properties, hardness, and indentation fracture toughness of intermetallics relevant to electronic packaging, *Journal of Materials Research*, Vol.19, No.5 (2004), pp.1439–1454.
- 118) V.H.B. Hernandez, S.K. Panda, Y. Okita, N.Y. Zhou, A study on heat affected zone softening in resistance spot welded dual phase steel by nanoindentation, *Journal of Materials Science*, Vol.45 (2010), pp.1638–1647.
- 119) W.W. Gerberich, J.C. Nelson, E.T. Lilleodden, P. Anderson, J.T. Wyrobek, Indentation induced dislocation nucleation: The initial yield point, *Acta Materialia*, Vol.44, No.9 (1996), pp.3585–3598.
- 120) A.M. Minor, S.A.S. Asif, Z. Shan, E.A. Stach, E. Cyrankowski, T.J. Wyrobek, O.L. Warren, A new view of the onset of plasticity during the nanoindentation of aluminium, *Nature Materials*, Vol.5 (2006), pp.697–702.
- 121) W.A. Soer, K.E. Aifantis, J.T.M. De Hosson, Incipient plasticity during nanoindentation at grain boundaries in body-centered cubic metals, *Acta Materialia*, Vol.53, No.17 (2005), pp.4665–4676.
- 122) T. Ohmura, K. Tsuzaki, Plasticity initiation and subsequent deformation behavior in the vicinity of single grain boundary investigated through nanoindentation technique, *Journal of Materials Science*, Vol.42 (2007), pp.1728–1732.
- 123) I.J. Jordaan, Mechanics of ice-structure interaction, *Engineering Fracture Mechanics*, Vol.68 (2001), pp.1923–1960.
- 124) K.R. Croasdale, N.R. Morgenstern, J.B. Nuttall, Indentation tests to investigate ice pressures on vertical piers, *Journal of Glaciology*, Vol.19, No.81 (1977), pp.301–312.
- 125) G.W. Timco, Indentation and penetration of edge-loaded freshwater ice sheets in the brittle range, *Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, Vol.109, No.3 (1987), pp.287–294.
- 126) P. Barrette, J. Pond, I.J. Jordaan, Ice damage and layer formation: In small-scale indentation experiments, *Ice in the Environment, Proceedings of the 16th International Association for Hydraulic Engineering and Research (IAHR) International Symposium on Ice*, Vol.3 (2002), pp.246–253.
- 127) J. Wells, I.J. Jordaan, A. Derradji-Aouat, R. Taylor, Small-scale laboratory experiments on the indentation failure of polycrystalline ice in compression: Main results and pressure distribution, *Cold Regions Science and Technology*, Vol.65, No.3 (2011), pp.314–325.
- 128) T. Mackey, J. Wells, I.J. Jordaan, A. Derradji-Aouat, Experiments on the fracture of polycrystalline ice, *Proceedings of the 19th international conference on port and ocean engineering under Arctic conditions (POAC '07)* (2007), pp.339–349.
- 129) R.M.W. Frederking, I.J. Jordaan, J.S. McCallum, Field tests of ice indentation at medium scale: Hobson's Choice Ice Island, 1989, *Proceedings of the 10th International Association for Hydraulic Engineering and Research (IAHR) International Symposium on Ice* (1990), pp.931–944.
- 130) D.M. Masterson, D.E. Nevel, R.C. Johnson, J.J. Kenny, P.A. Spence, The medium scale iceberg impact test program, *Proceedings of the 11th International Association for Hydraulic Engineering and Research (IAHR) International Symposium on Ice*, Vol.2 (1992), pp. 930–966.
- 131) D.M. Masterson, R.M.W. Frederking, Local contact pressures in ship/ice and structure/ice interactions, *Cold Regions Science and Technology*, Vol.21, No.2 (1993), pp.169–185.
- 132) E. Kim, N. Golding, E.M. Schulson, S. Løset, C.E. Renshaw, Mechanisms governing failure of ice beneath a spherically-shaped indenter, *Cold Regions Science and Technology*, Vol.78 (2012), pp.46–63.

- 133) E. Kim, E.M. Schulson, A phenomenological explanation of the pressure–area relationship for the indentation of ice: Two size effects in spherical indentation experiments, *Cold Regions Science and Technology*, Vol.115 (2015), pp.48–55.
- 134) B. Michel, N. Toussaint, Mechanisms and theory of indentation of ice plates, *Journal of Glaciology*, Vol.19, No.81 (1977), pp.285–300.
- 135) C. Ulan-Kvitberg, H. Kim, C. Daley, Comparison of pressure-area effects for various ice and steel indenters, *Proceedings of the 21st International Offshore and Polar Engineering Conference* (2011), pp.1048–1055.

第2章 参考文献

- 1) U.S. Lindholm, Dynamic deformation of metals, *Proceedings of the colloquium on behavior of materials under dynamic loading at the winter annual meeting of ASME* (1965), pp.42–61.
- 2) J.E. Field, S.M. Walley, W.G. Proud, H.T. Goldrein, C.R. Siviour, Review of experimental techniques for high rate deformation and shock studies, *International Journal of Impact Engineering*, Vol.30, No.7 (2004), pp.725–775.
- 3) K. Tateyama, H. Yamada, N. Ogasawara, R. Okui, K. Ogawa, Dynamic compressive behavior of foamed polyethylene film, *EPJ Web of Conferences*, Vol.94 (2015), 01038.
- 4) K. Tateyama, H. Yamada, N. Ogasawara, Effect of strain rate on compressive properties of foamed polyethylene film, *Polymer Testing*, Vol.52 (2016), pp.54–62.
- 5) J.C. Gong, L.E. Malvern, D.A. Jenkins, Dispersion investigation in the split Hopkinson pressure bar, *Journal of Engineering Materials and Technology*, Vol.112, No.3 (1990), pp.309–314.
- 6) D.J. Frew, M.J. Forrestal, W. Chen, Pulse shaping techniques for testing brittle materials with a split Hopkinson pressure bar, *Experimental Mechanics*, Vol.42 (2002), pp.93–106.
- 7) E.M. Schulson, Brittle failure of ice, *Engineering Fracture Mechanics*, Vol.68, No.17–18 (2001), pp.1839–1887.
- 8) I. Hawkes, M. Mellor, Deformation and fracture of ice under uniaxial stress, *Journal of Glaciology*, Vol.11, No.61 (1972), pp.103–131.
- 9) L.W. Gold, Engineering properties of fresh-water ice, *Journal of Glaciology*, Vol.19, No.81 (1977), pp.197–212.
- 10) E.M. Schulson, The brittle failure of ice under compression, *Journal of Physical Chemistry B*, Vol.101, No.32 (1997), pp.6254–6258.
- 11) S.J. Jones, High strain-rate compression test on ice, *Journal of Physical Chemistry B*, Vol.101, No.32 (1997), pp.6099–6101.
- 12) D.M. Cole, The microstructure of ice and its influence on mechanical properties, *Engineering Fracture Mechanics*, Vol.68, No.17–18 (2001), pp.1797–1822.
- 13) M. Shazly, V. Prakash, B.A. Lerch, High-strain-rate compression testing of ice, NASA, Glenn Research Center (2006), NASA TM-2006-213966.
- 14) M. Shazly, V. Prakash, B.A. Lerch, High strain-rate behavior of ice under uniaxial compression, *International Journal of Solids and Structures*, Vol.46, No.6 (2009), pp.1499–1515.
- 15) 横山隆, 衝撃工学の基礎と応用, 共立出版 (2014).
- 16) P.K. Dutta, Compressive failure of polycrystalline ice under impact, *Proceedings of the 3rd international offshore and polar engineering conference* (1993), pp.573–580.
- 17) P.K. Dutta, D.M. Cole, E.M. Schulson, D.S. Sodhi, A fracture study of ice under high strain rate loading, *International Journal of Offshore and Polar Engineering*, Vol.14, No.3 (2004), pp.182–188.

- 18) H. Kim, J.N. Keune, Compressive strength of ice at impact strain rates, *Journal of Materials Science*, Vol.42, No.8 (2007), pp.2802–2806.
- 19) X. Wu, V. Prakash, Dynamic strength of distill water and lake water ice at high strain rates, *International Journal of Impact Engineering*, Vol.76 (2015), pp.155–165.
- 20) A. Bragov, L. Igumno, A. Konstantinov, A. Lomuno, A. Filippov, Yu. Shmotin, R. Didenko, A. Krundaeva, Investigation of strength properties of freshwater ice, *EPJ Web of Conferences*, Vol.94 (2015), 01070.
- 21) Z. Song, Z. Wang, H. Kim, H. Ma, Pulse shaper and dynamic compressive property investigation on ice using a large-sized modified split Hopkinson pressure bar, *Latin American Journal of Solids and Structures*, Vol.13, No.3 (2016), pp.391–406.
- 22) R.S. Potter, J.M. Cammack, C.H. Braithwaite, P.D. Church, S.M. Walley, Problems associated with making mechanical measurements on water–ice at quasistatic and dynamic strain rates, *Journal of Dynamic Behavior of Materials*, Vol.5 (2019), pp.198–211.
- 23) M. Arakawa, N. Maeno, Mechanical strength of polycrystalline ice under uniaxial compression, *Cold Regions Science and Technology*, Vol.26, No.3 (1997), pp.215–229.
- 24) A. Higashi, S. Koinuma, S. Mae, Plastic yielding in ice single crystals, *Japanese Journal of Applied Physics*, Vol.3, No.10 (1964), pp.610–616.
- 25) E.M. Schulson, The brittle compressive fracture of ice, *Acta Metallurgica et Materialia*, Vol.38, No.10 (1990), pp.1963–1976.
- 26) 日本金属学会編, 材料強度の原子論, 日本金属学会 (1985).
- 27) K.G. Hoge, A.K. Mukherjee, The temperature and strain rate dependence of the flow stress of tantalum, *Journal of Materials Science*, Vol.12 (1977), pp.1666–1672.

第3章 参考文献

- 1) W.C. Oliver, An improved technique for determining hardness and elastic modulus using load and displacement sensing indentation experiments, *Journal of Materials Research*, Vol.7, No.6 (1992), pp.1564–1583.
- 2) G.H. Staab, A. Gilat, A direct-tension split Hopkinson bar for high strain-rate testing, *Experimental Mechanics*, Vol.31, No.3 (1991), pp.232–235.
- 3) H. Couque, The use of the direct impact Hopkinson pressure bar technique to describe thermally activated and viscous regimes of metallic materials, *Philosophical Transactions. Series A, Mathematical, Physical, and Engineering Sciences*, Vol.372, No.2023 (2014), 20130218.
- 4) H.M. Ledbetter, Stainless-steel elastic constants at low temperatures, *Journal of Applied Physics*, Vol.52, No.3 (1981), pp.1587–1589.
- 5) B. Lundberg, A. Henchoz, Analysis of elastic waves from two-point strain measurement, *Experimental Mechanics*, Vol.17, No.6 (1977), pp.213–218.
- 6) 柳原直人, 一次元弾性応力波理論による衝撃力測定法, 日本機械学会論文集, Vol.43, No.375 (1977), pp.4048–4052.
- 7) N. Yanagihara, New measuring method of impact force, *Bulletin of JSME*, Vol.21, No.157 (1978), pp.1085–1088.
- 8) A.C. Fischer-Cripps, *Nanoindentation: Third edition*, Springer (2011).
- 9) 小笠原永久, 清水陽子, 上剛司, 山田浩之, 鋭い圧子押し込みで生じたひずみ場に与えるひずみ速度の影響, *材料*, Vol.64, No.10 (2015), pp.783–789.

- 10) 山田浩之, 鋭い圧子押し込みにおける動的ひずみ速度に関する一考察, 日本実験力学学会講演論文集, Vol.17 (2017), pp.63–64.
- 11) E. Kim, N. Golding, E.M. Schulson, S. Løset, C.E. Renshaw, Mechanisms governing failure of ice beneath a spherically-shaped indenter, *Cold Regions Science and Technology*, Vol.78 (2012), pp.46–63.
- 12) E.M. Schulson, Brittle failure of ice, *Engineering Fracture Mechanics*, Vol.68, No.17–18 (2001), pp.1839–1887.
- 13) T.J.O. Sanderson, Working Group on Ice Forces; 3rd state-of-the-art report, U.S. Army Cold Regions Research and Engineering Laboratory (1987), Special Report 87-17.
- 14) L.E. Samuels, T.O. Mulhearn, An experimental investigation of the deformed zone associated with indentation hardness impressions, *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, Vol.5, No.2 (1957), pp.125–134.
- 15) N. Ogasawara, N. Chiba, X. Chen, Representative strain of indentation analysis, *Journal of Materials Research*, Vol.20, No.8 (2005), pp.2225–2234.
- 16) A.G. Evans, T.R. Wilshaw, Quasi-static solid particle damage in brittle solids—I. Observations analysis and implications, *Acta Metallurgica*, Vol.24, No.10 (1976), pp.939–956.
- 17) J.T. Hagan, Cone cracks around Vickers indentations in fused silica glass, *Journal of Materials Science*, Vol.14 (1979), pp.462–466.
- 18) B.R. Lawn, A.G. Evans, D.B. Marshall, Elastic/plastic indentation damage in ceramics: The median/radial crack system, *Journal of the American Ceramic Society*, Vol.63, No.9–10 (1980), pp.574–581.
- 19) Z.X. Zhang, *Rock fracture and blasting: Theory and applications*, Butterworth-Heinemann (2016).

業 績

学術論文

- 1 Yuki Nakao, Hiroyuki Yamada, Nagahisa Ogasawara, Takatoshi Matsuzawa, Ductile and Brittle Behavior During Deformation and Fracture for Pure Ice Detected by Quasi-Static Indentation Test, Mechanical Engineering Journal, Vol.8, No.3, 21-00083, 2021.
- 2 Yuki Nakao, Hiroyuki Yamada, Nagahisa Ogasawara, Takatoshi Matsuzawa, Impact Compression Test of Ice by Combining SHPB Method and High-Speed Camera Observation, Experimental Mechanics, Vol.62, No.7, pp.1227-1240, 2022.
- 3 Yuki Nakao, Hiroyuki Yamada, Nagahisa Ogasawara, Hiroyuki Fujiwara, Takatoshi Matsuzawa, Brittle fracture behavior of pure ice in impact indentation test, International Journal of Impact Engineering, 2023 (投稿中) .

国際会議録 < Proceedings (査読付き) >

- 1 Hiroyuki Yamada, Ryo Tanaka, Yuki Nakao, Hiroyuki Fujiwara, Nagahisa Ogasawara, Observation of Impact Fracture in Ice by Simplified Percussion Test, The 13th International Symposium on Advanced Science and Technology in Experimental Mechanics (13th ISEM'18), A09008, Kaohsiung City, Taiwan, 2018.
- 2 Yuki Nakao, Hiroyuki Yamada, Nagahisa Ogasawara, Deformation and Fracture Properties of Pure Ice Through Impact Indentation Testing, The 13th International Conference on Mechanical and Physical Behaviour of Materials Under Dynamic Loading (DYMAT 2021), 06005, Madrid, Spain, 2021.

国際会議録 < Abstract >

- 1 Yuki Nakao, Hiroyuki Yamada, Hiroyuki Fujiwara, Nagahisa Ogasawara, Measurement of Impact Deformation in Ice Using Percussion Test, The 10th International Symposium on Impact Engineering 2019 (ISIE 2019), Gmunden, Austria, 2019.
- 2 Yuki Nakao, Hiroyuki Yamada, Nagahisa Ogasawara, Impact Indentation Test of Pure Ice by Direct Impact Hopkinson Bar Method Using Conical Indenters, The 16th International Symposium on Advanced Science and Technology in Experimental Mechanics (16th ISEM'21), Hanoi, Vietnam, 2021.

- 3 Yuki Nakao, Hiroyuki Yamada, Nagahisa Ogasawara, Impact Compression Testing of Pure Ice Using Split Hopkinson Bar Method and High-Speed Camera, 19th International Conference on Experimental Mechanics (19th ICEM), Kraków, Poland, 2022.
- 4 Yuki Nakao, Hiroyuki Yamada, Nagahisa Ogasawara, Effect of Fracture Behavior on Impact Compressive Stress in Pure Ice, The 17th Asia-Pacific Conference on Failure and Strength and the 13th Conference on Structural Integrity and Failure (APCFS/SIF 2022), Adelaide, Australia, 2022.

国内学会発表

- 1 山田浩之, 中尾友紀, 藤原浩幸, 小笠原永久, 平板打撃試験による氷の衝撃変形および破壊現象の計測, 日本実験力学学会 2018 年度年次講演会, 2018.8.
- 2 中尾友紀, 山田浩之, 小笠原永久, 打撃試験による氷の衝撃変形および破壊現象の計測, 日本機械学会 M&M2018 材料力学カンファレンス, 2018.12.
- 3 中尾友紀, 山田浩之, 藤原浩幸, 小笠原永久, 打撃試験における氷の変形・破壊現象に及ぼす先端圧子形状の影響, 日本材料学会 第 68 期学術講演会, 2019.5.
- 4 山田浩之, 中尾友紀, 小笠原永久, 準静的インデンテーションによる氷の変形および破壊評価, 日本航空宇宙学会 第 57 回飛行機シンポジウム, 2019.10.
- 5 中尾友紀, 東園望美, 山田浩之, 小笠原永久, 円錐圧子を用いた打撃試験における氷の変形・破壊特性評価, 日本機械学会 山梨講演会 2019, 2019.10.
- 6 中尾友紀, 山田浩之, 小笠原永久, 準静的インデンテーションによる氷の変形および破壊現象の計測, 日本機械学会 M&M2019 材料力学カンファレンス, 2019.11.
- 7 山田浩之, 中尾友紀, 小笠原永久, 高速度カメラを用いた氷の打撃破壊の観察, 高速度イメージングとフォトニクスに関する総合シンポジウム 2019, 2019.11.
- 8 東園望美, 中尾友紀, 山田浩之, 小笠原永久, 円錐圧子打撃による氷の変形・破壊特性評価, 日本非破壊検査協会 第 51 回応力・ひずみ測定と強度評価シンポジウム, 2020.1.

- 9 中尾友紀, 山田浩之, 小笠原永久, 氷の打撃インデンテーションに及ぼす変形場の影響, 日本材料学会 第 69 期学術講演会, 2020.5.
- 10 中尾友紀, 山田浩之, 小笠原永久, 衝撃インデンテーションによる氷の変形・破壊特性評価, 日本材料学会 第 13 回材料の衝撃問題シンポジウム, 2020.10.
- 11 中尾友紀, 山田浩之, 小笠原永久, ダイレクトインパクト・ホプキンソン棒法を用いた氷の衝撃変形・破壊特性評価, 日本材料学会 第 70 期学術講演会, 2021.5.
- 12 中尾友紀, 山田浩之, 小笠原永久, インデンテーションによる動的変形速度下の純氷の変形・破壊特性評価, 日本機械学会 M&M2021 材料力学カンファレンス, 2021.9.
- 13 大谷和也, 中尾友紀, 山田浩之, 小笠原永久, インデンテーション試験を用いた動的速度における氷の変形・破壊特性評価, 日本非破壊検査協会 第 52 回応力・ひずみ測定と強度評価シンポジウム, 2022.1.
- 14 中尾友紀, 山田浩之, 小笠原永久, スプリット・ホプキンソン棒法を用いた純氷の衝撃圧縮特性評価, 日本材料学会 第 71 期学術講演会, 2022.5.
- 15 山田浩之, 中尾友紀, 小笠原永久, 衝撃インデンテーション試験を用いた純氷の破壊特性評価, 日本実験力学学会 2022 年度年次講演会, 2022.8.
- 16 中尾友紀, 山田浩之, 小笠原永久, スプリット・ホプキンソン棒法を用いた純氷の圧縮応力測定と破壊挙動の観察, 日本機械学会 M&M2022 材料力学カンファレンス, 2022.9.
- 17 光澤知花, 中尾友紀, 山田浩之, 小笠原永久, 氷の球圧子インデンテーション試験に及ぼす試験片寸法の影響, 日本非破壊検査協会 第 53 回応力・ひずみ測定と強度評価シンポジウム, 2023.1.

受賞

1. 三浦賞, 日本機械学会, 2020.3.
2. 優秀講演発表賞, 日本材料学会, 2021.6.
3. Poster Session - Award Third Place, European Society for Experimental Mechanics, 2022.7.