

圧縮破壊下における海氷のフラクタル特性 に関する室内試験

竹内 貴弘¹・木岡 信治²・成田 恭一³

¹正会員 八戸工業大学 工学部土木建築工学科 (〒031-8501八戸市妙大開88-1)
E-mail:take@hi-tech.ac.jp

²正会員 (独) 寒地土木研究所 寒冷沿岸域チーム (〒062-8602 札幌市豊平区平岸1条3丁目)
E-mail: kioka@ceri.go.jp

³(株) 丸田組 土木部 (〒093-0001網走市南1条東1丁目13番地3)
E-mail: kyouti-n@marutagumi.co.jp

海岸・海洋構造物に働く氷圧力の寸法依存性は氷圧力 P と貫入面積 A の関係で示され、この説明には幾つかのアプローチがある。その一つにPalmer and Sanderson(1991)のフラクタル理論を適用した明快な説明があるが、この場合に必要とされる海氷の圧縮破壊時のフラクタル次元 D に関しては、系統だったデータの取得が不可欠である。本研究では、海氷圧縮破壊時の氷破片のフラクタル次元 D に関する室内試験を試み、フラクタル次元 D に対するフラクタル性、氷温、密度、および結晶構造の影響を検討した。海氷の圧縮破壊時の氷破片にはフラクタル性があること、結晶構造の違いや密度には影響をあまり受けないこと、氷温の影響が僅かにあること、さらに D は2.16から2.39の範囲内にあったことなどを報告した。

Key Words : fractal, scaling effect, sea ice, arctic offshore structure

1. はじめに

海岸・海洋構造物に働く氷圧力の寸法依存性は非常に重要な課題と認識され、これまでに多くの研究が行われてきた(例えば: Sanderson¹⁾)。この寸法依存性は、氷圧力 P と貫入面積 A の関係($P = k \cdot A^\alpha$)を示すいわゆるP-Aカーブで主に表現され、この勾配 α の多くは-0.7~-0.25にあると報告されてはいるが、設計のガイダンスとなるISO TC67 / SC7-WG8²⁾やAPI 2n/CSA³⁾の記述を比較すると、未だに整合性がとれてはいない。寸法依存性の根拠については幾つかのアプローチがあり、中でもPalmer and Sanderson⁴⁾のフラクタル理論を適用した明快な説明がある。この場合には $\alpha = -0.25$ で、 k の誘導には海氷の圧縮破壊時のフラクタル次元 D が必要となるが、十分なデータがなく $D = 2.5$ とし1.7を得ている(図-1)。この k は海氷の破壊じん性値、最も大きい氷片サイズと最も小さい氷片サイズとの比に基づく数値、氷片が同様の形状で異なったサイズの n 個の氷片に粉碎される確率 p に依存し、この確率 p は D と n から計算できる。また、確率 p と n は、フラクタル性を示せば自己相似性から何れの氷片サイズにおいても一定である。これらそれぞれの氷片が与えた荷重の合計から氷圧力 P を算定し貫入面積 A と

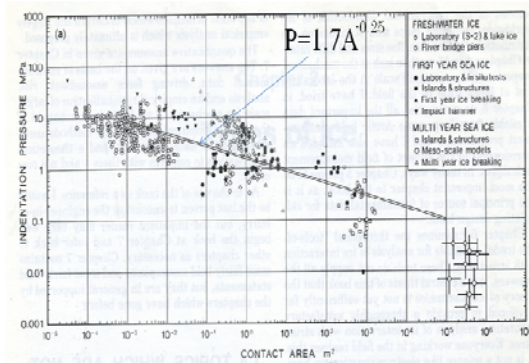


図-1 Palmer and Sanderson のモデルとフィールドデータによる氷圧力 P と貫入面積 A の関係

の関係からP-Aカーブが導かれる。他の材料に関する D の値の研究は多いが海氷に関しては若干の報告⁵⁾があるのみで、さらに系統だったデータの取得が不可欠である。Cammaert⁶⁾によると、海氷(氷片)の発生要因が圧縮過程によるものはフラクタル性を示すが、それ以外の力学的過程によるものや熱的な原因で発生した場合にはフラクタル性を示さないとの報告もある。本研究では、海氷圧縮破壊時の氷破片のフラクタル次元 D に関する室内試験を試み、フラクタル特性(フラクタル性、氷温、および結晶構造の影響)に関する検討を試みた。

2. 実験とフラクタル次元Dの算定

(1) 実験方法

写真-1や図-2のようなモールドとランマーからなる試験装置を新たに作成し、低温室内で作成した海水供試体(円筒形:直径10cm, 高さ5cm)にランマーを10cmの高さからN回落下させることにより圧縮破壊させた。これが発生した氷片に対し篩試験を行い(写真-2), 各篩サイズL (37.5, 26.5, 19, 9.5, 4.25, 2.0, 0.850mm)の氷片重量Mを其々計測することで氷片の分布を求めた。試験は全部で89ケース実施した。

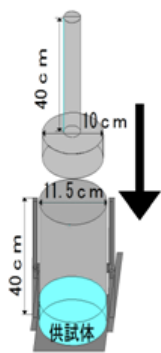


図-2 試験装置



写真-1 試験装置

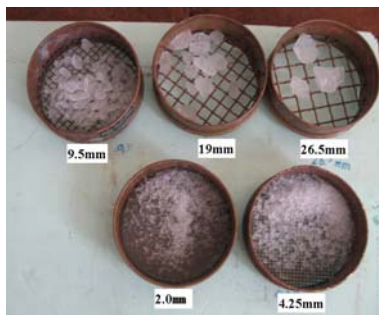


写真-2 篩試験後の氷片サイズ

海水供試体の作成にあたっては、塩分濃度を1.5‰の塩水を100 (cm)×90 (cm)の水槽に高さ25 (cm)の位置まで入れ低温室内で約1週間ほど氷点下20℃で結氷させ試験氷(塩分濃度5‰程度を目標)を作成する。一年海氷の結晶構造図(Schwarz&Weeks)⁶⁾は図-3の様に表層部の粒状氷、それより下層の柱状氷に大きく分かれるため、今回は試験氷の表層3.5cm切断し、それ以下の柱状氷を氷供試体とした。この時サンプリング方向によって結晶構造が変化するためType-I (鉛直方向), Type-II (水平方向)に分けてコアリングを行った。この様にして作成した氷供試体の結晶写真を写真-3 (a), (b)と写真-4 (a), (b)に示す。

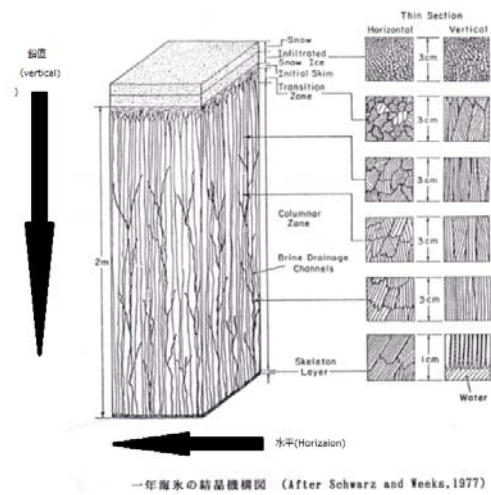
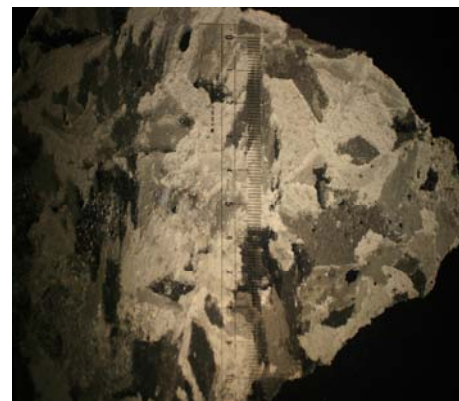


図-3 一年海氷の結晶構造図 (Schwarz&Weeks,1977)



(a)

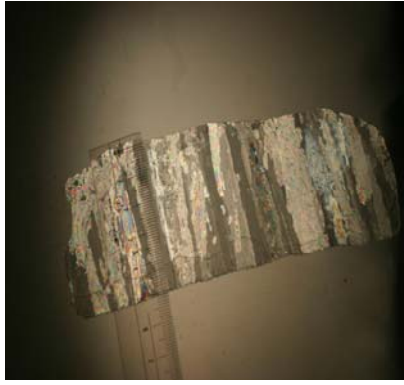
Type I -上層 結晶写真 水平で表層から 3.5 cm から 8.5cm (上層)の水平結晶写真. 結晶粒径 (平均) 1.1cm



(b)

Type I -下層 結晶写真 水平で表層から 8.5 cm から 135 cm (下層)の水平結晶写真.結晶粒径 (平均) 1.64cm

写真-3 (a),(b) 海水供試体の結晶写真



(a)

TypeII-上層 結晶写真 鉛直で表層から 3.5 cm から 8.5 cm (上層) の鉛直結晶写真



(b)

TypeII-下層 結晶写真 鉛直で表層から 8.5 cm から 13.5 cm (下層) の鉛直結晶写真

写真-4 (a),(b) 海氷供試体の結晶写真

(2) フラクタル次元Dの算定

フラクタル次元Dは次の式(1)の累乗で示される。

$$\frac{N(L_1)}{N(L_2)} = \left(\frac{L_1}{L_2} \right)^{-D} \quad (1)$$

D : フラクタル次元

N(L₁) : 寸法 L₁ より大きな氷破片の個数

N(L₂) : 寸法 L₂ より大きな氷破片の個数

このDの算定に当たっては、松下⁷⁾により幾つかの方法(スケール変換法, カバー法, ボックスカウント法, 視野拡大法, 回転半径法, 密度相関関数法など)が示されている。圧縮下で発生する氷破片の場合にはそれぞれの膨大な個数をカウントすることは適当ではなく、篩試験からは各篩(サイズL)上の氷片重量が其々計測されるため、各篩(サイズL)と氷片重量Mの累積値との関係をグラフ化し、MとLとの関係からDを求めることとした。そのためには、式(1)を式(2)の様に變形し、

$$\frac{dN}{dL} \propto L^{-D-1} \quad (2)$$

また、次に質量M, 個数N, 寸法Lとの関係は式(3)となる。

$$dM \propto L^3 \times dN \quad (3)$$

式(2)と式(3)よりdNを消去し積分すると式(4)となる。

$$M \propto L^{3-D} \quad (4)$$

篩試験から得られるMとLとの関係である式(5)の係数M₀, M₁を回帰式から求め、式(6)からDを計算した。

$$M = M_0 \times L^{M_1} \quad (5)$$

$$D = 3 - M_1 \quad (6)$$

3. 実験結果

実施した89ケースの試験すべてに対してMとLとの関係を示す図-4の図表を作成し、その時の累乗(M₁)や相関関係(R)を計算した。累乗(M₁)と式(6)からDを、また、相関係数(R)が1に近いことからフラクタル性があるかどうかを判断した。図-5(a)-(k)はMとLとの関係を示すすべてのデータの図表である。

また、表-1には試験条件とフラクタル次元D, 相関係数R, 密度ρ(g/cm³), 塩分濃度S(%), 落下回数N(10, 15, 20)を示した。また、表中の数字は主に平均値であり、()内の数字はデータの範囲, 【】内の数字はケース数である。

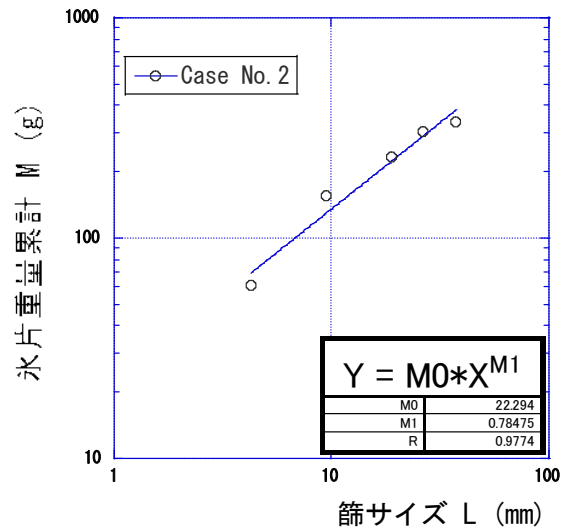


図-4 氷片重量Mと篩サイズLとの関係(case 2)

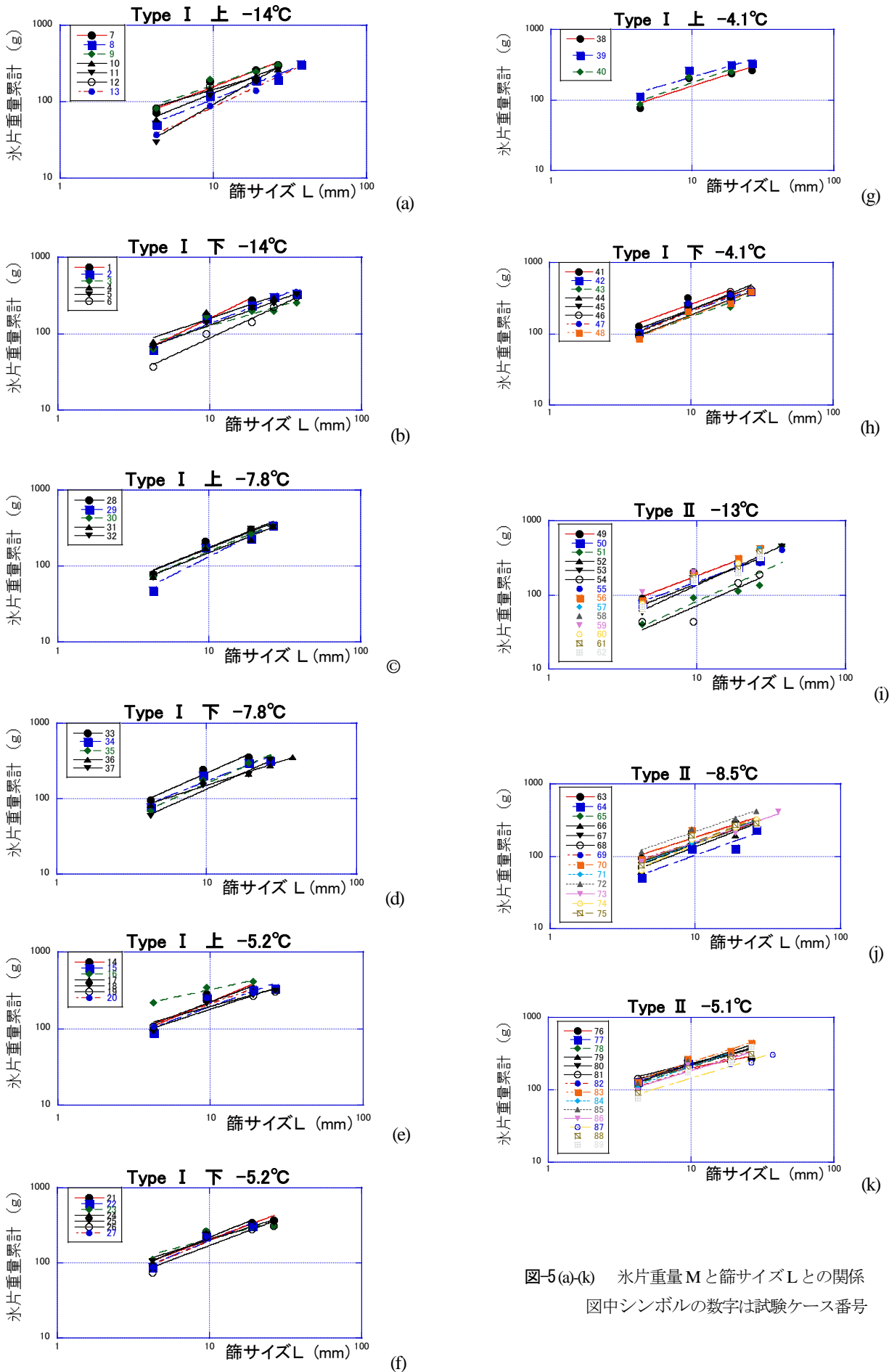


図-5(a-k) 氷片重量Mと篩サイズLとの関係
 図中シンボルの数字は試験ケース番号

表-1 試験条件と結果

T °C		Type I 上	ケース数
-14	D	2.18(1.85~2.41)	7
	R	0.98 (0.97~1)	
	ρ	(0.812~0.857)	
	S	欠測	
	N	10【6ケース】20【1ケース】	
-7.8	D	2.16(1.99~2.21)	5
	R	0.97 (0.98~1)	
	ρ	(0.847~0.859)	
	S	7	
	N	10【5ケース】	
-5.2	D	2.32(2.16~2.58)	7
	R	0.92 (0.87~0.98)	
	ρ	(0.817~0.847)	
	S	7	
	N	10【7ケース】	
-4.1	D	2.36(2.3~2.43)	3
	R	0.92 (0.92~0.93)	
	ρ	(0.842~0.852)	
	S	8.5	
	N	10【3ケース】	
T °C		Type I 下	ケース数
-14	D	2.22(2.03~2.42)	6
	R	0.97 (0.92~0.99)	
	ρ	(0.814~0.863)	
	S	欠測	
	N	10【6ケース】	
-7.8	D	2.19(2.1~2.37)	5
	R	0.98 (0.96~0.99)	
	ρ	(0.849~0.856)	
	S	5.1	
	N	10【5ケース】	
-5.2	D	2.26(2.15~2.46)	7
	R	0.94 (0.89~0.97)	
	ρ	(0.846~0.86)	
	S	5	
	N	10【7ケース】	
-4.1	D	2.25(2.18~2.31)	8
	R	0.95 (0.91~0.98)	
	ρ	(0.813~0.854)	
	S	3.9	
	N	10【8ケース】	
T °C		Type II	ケース数
-13	D	2.19(2.05~2.4)	14
	R	0.97 (0.87~1)	
	ρ	(0.824~0.849)	
	S	3.9	
	N	10【6ケース】15【5ケース】 20【3ケース】	
-8.5	D	2.28(2.14~2.38)	13
	R	0.97 (0.92~1)	
	ρ	(0.779~0.858)	
	S	5.7	
	N	10【6ケース】15【4ケース】 20【3ケース】	
-5.1	D	2.39(2.16~2.62)	14
	R	0.96 (0.88~1)	
	ρ	(0.812~0.858)	
	S	7.1	
	N	10【6ケース】15【4ケース】 20【4ケース】	

上記の様に整理された表-1 から、多くの実験で相関係数(R)が1に近くフラクタル特性があることを確認できた。これは Cammaert⁵⁾の報告と対応し、氷圧力の寸法依存性を示す Palmer and Sanderson¹⁾のモデルへの適用が可能となる。Cammaert⁵⁾は、現地海氷を用いて-10°Cの圧縮条件下で破砕された氷破片を用い6ケースの実験を行い2.05~2.27 (2.13±0.08)を得た。これは、今回の海氷の結果を平均値でみると2.16から2.39の範囲内となり、ほぼ対応する結果となった。参考までに、湖氷(柱状氷:鉛直・水平方向:5ケース)では1.75±0.06、湖氷(雪氷:水平方向:4ケース)では2.08±0.02となった。この結果は密度にも依存する可能性を示唆している。

次に、落下回数NとDの関係を試験ケース数の多いType IIで比較したものが図-6である。Dに対するNの影響は見られない。また、氷温に関しては依存性が僅かにある結果となっている。

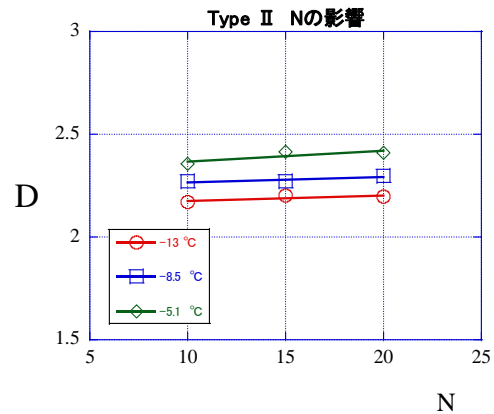


図-6 落下回数NとDの関係(Type II)

さらに、結晶構造(Type I 上下・II)への依存性と氷温への依存性を検討するためにプロットしたものが図-7である。データはばらつくが平均値でみると結晶構造(Type I 上下・II)の違いによる影響は見られない。また、平均値でみると氷温が大きくなるにつれ若干大きくなる傾向を示している。参考までに最大値、最小値の範囲も追加している。

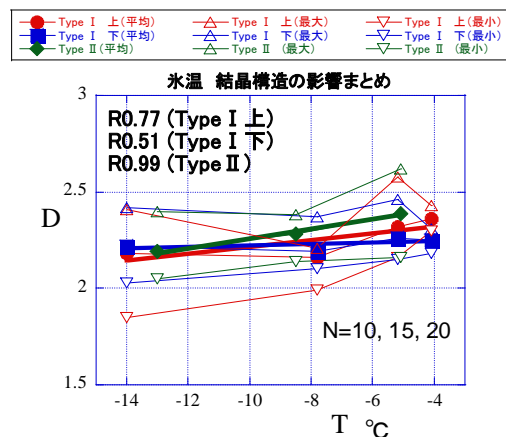


図-7 海氷の結晶構造(Type I 上下・II)と氷温への依存性

次に、密度の影響を温度毎にプロットしたものが図-8である。密度が大きくなるにつれDは若干減少する傾向を示している様であるが、相関は非常に小さい。

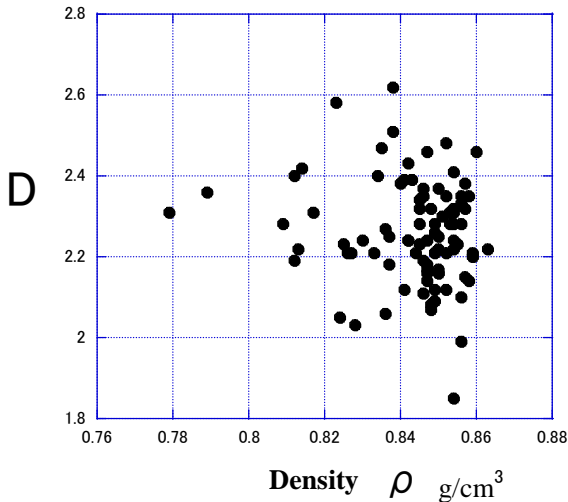


図-8 Dの密度への依存性

4. まとめ

各試験条件下で得られた D や R の平均値で評価すると次の結果となる。

- ① 海氷の圧縮破壊時のフラクタル次元 D は、表-1 の相関係数 R が 1 に近いことから logM と logL とがほとんどの場合直線的な相関関係を示し、フラクタル性があると判断される。
- ② 落下回数 N と D の関係から、D に対する N の影響は見られない。
- ③ 結晶構造(Type I 上下, Type II)毎に分類した氷温 T と D との関係から、結晶構造の違いは D に対して

顕著な影響を示さない。また、氷温 T の上昇に伴って D は僅かに増加する傾向を示した。また、氷温 T への影響は図-6 から同様のことが分かる。さらに、密度への依存性は僅かなものであった。

- ④ 以上のデータから、D は 2.16 から 2.39 の範囲内にあり、Cammaert⁵⁾が-10℃の現地海氷を用いて得た 2.05 ~ 2.27 (2.13±0.08) とほぼ対応する結果となった。

今後は、上記の値を氷盤貫入試験時に発生した氷片とも比較検討し、Palmer and Sanderson⁴⁾らの氷圧力モデルへ適用する予定である。また、試験条件を広げ氷温 T の影響を検討する必要がある。

謝辞：試験データの取得に当り当時学生であった中野倫希氏（八戸工業大学工学部）にご協力を得ました。記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) Sanderson, T. J. O. : A Pressure-Area Curve for Ice, Proc.7th of IAHR Symp. On IceStructure Interaction, Vol.2, pp.361-384, 1986.
- 2) Petroleum and natural gas industries, Arctic offshore structures, ISO/TC 67/SC 7, ISO/DIS 19906, 2010.
- 3) American Petroleum Institute (API) Recommended Practice or Planning, Designing, and Constructing Structures and Pipelines for Arctic Conditions – 2N. Second Edition, 1995.
- 4) Palmer, A. C. and Sanderson, T. J. O. : Fractal Crushing of Ice and Brittle Solids, Proc. R. Soc. Lond. A June 8, pp.469-477, 1991.
- 5) Cammaert, A.B. and Crocker, G.B. : Fractal characteristics of ice, Proc. Of Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions (POAC), pp.401-415, 1991.
- 6) Schwarz, J. and Weeks, W.F.: Engineering properties of sea ice, Journal of Glaciology 19(81), pp.499-531, 1977.
- 7) 松下貢：フラクタルの物理（I），pp.28-61，裳華房フィジックスライブラリー，2002.

INDOOR TESTS ON FRACTAL CHARACTERISTICS OF SEA ICE PRODUCED BY CRUSHING FAILURE

Takahiro TAKEUCHI, Shinji KIOKA and Kyouichi NARITA

The scaling effect of ice load acting on offshore structure is shown through the relation between ice pressure and indentation area, and there have been several explanations on the effect. Although there is clear explanation which applied the fractal theory of Palmer and Sanderson (1991) to one of them, there is little data of fractal dimension D. Systematic tests on fractal dimension D are required by the use of sea ice fragments produced by crushing failure.

In the research, indoor tests on D are conducted to examine fractal characteristics. There exists fractal properties on sea ice fragments produced by crushing failure, and very little dependence of ice temperature on D. The effect of density and crystal structure on D is little. Tests data on D ranges from 2.16 to 2.39.