

## [1090] 浸水面からのモルタル凍結融解劣化分布の実験的検討

高科 豊<sup>\*1</sup>

## 1. はじめに

モルタルの凍結融解による劣化は、内部組織における毛細管空隙の含有水分の相変化に起因する。一般に、凍結融解劣化は表層に近い部分から破壊していく現象と考えられている〔1〕。しかし、部材内部の劣化状況を十分に検討した研究事例は少ない。もし、部材の凍結融解劣化範囲を明らかにするための指標があれば、凍害劣化の補修において、有意義な見解が得られると考える。そこで本研究は、第一に水が供給される表層部からの距離に視点をおいて、観測値の場所的な把握をし、凍結融解の劣化分布について考察することを目的とする。また、第二に観測値として圧縮強度等の変動係数の大きい指標や距離間隔の小さい中では優劣のつきにくい指標が得られた場合、場所毎の劣化の大きさを少ないサンプル数で判断するのは非常に困難なことが予想される。そこで、得られる観測値をファジィ推論及びニューラルネットワークの数的処理を生かすことによって、凍害劣化基準値として統合化することにより、その評価の向上について検討するものである。

## 2. 実験計画

## 2. 1 モルタル配合条件

実験供試体はプレーン、AEモルタルに大別し、早強ボルトランドセメントを用い、配合条件はW/C=0.55、S/C=2.28で製作した。フロー値は、プレーン165、AE184である。

## 2. 2 試験体と実験条件

供試体の大きさは4\*4\*16cmで各実験シリーズ別に、施した条件等の概要及びそのサンプル数を表-1に示す。また、表-2に実験行程の概要及び観測指標とその時点を示す。特に、防水条件とは図-1の縦線でハッチした浸水面

(4×4cm: 1面)を除いて、他面すべてにコーティングを実施した。また、浸水面からの順にA~D部と命名した。材齢7日から14日までの期間は、水中養生及び30%wt塩化ナトリウム溶液浸漬したものの2通りとした。

## 2. 3 実験方法と測定項目

凍結融解条件は材齢14日から水中凍結水中融解式にて開始した。冷媒温度は最低温度-25℃、最高温度+10℃で、凍結、融解各2時間を1サイクル所用時間とした。

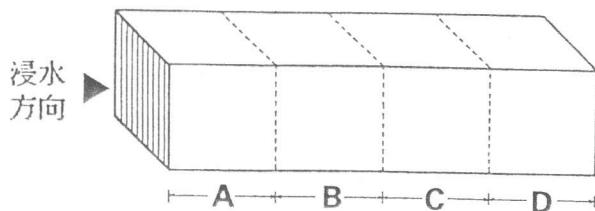


図-1 ブロック供試体各部と浸水面の方向

表-1 実験供試体の概要

要因	水準 \ シリーズ	I	II	III	IV	V	VI
対象モルタル	プレーンモルタル AEモルタル	○	○	○	○	○	○
防水条件	有り 無し	○	○	○	○	○	○
養生状態	水中養生 30%wt塩水浸漬	○	○	○	○	○	○
凍結融解条件	有り 無し	○	○	○	○	○	○
サンプル数	供試体単位 評価ブロック単位	16 32	16 16	9 18	15 15	16 16	10 20

(実施したもの ○)

\*1 神戸市立工業高等専門学校助教授 都市工学科、工修(正会員)

凍結融解条件を実施しない供試体も、実施したものと同じ凍結融解終了時点まで水中養生を継続し比較の対象とした。最終時点の各供試体はダイヤモンドカッターを用いてブロック4分割し、単位質量、圧縮強度をそれぞれ観測した。

### 3. 結果及び考察

分割化するまでの各シリーズ供試体単位質量の時系列変化を図-2に示す。養生行程前後において防水条件が無い場合、単位質量はプレーン、A-Eに関わらず含水量増加のため大きくなるが、有る場合では、一面から浸水しているにも関わらずほぼ同じである。この前者の傾向は養生行程が継続される健全供試体の場合、材齢進行とともにさらに大きくなる。また、塩分浸漬した場合、単位質量は低下し、水酸化カルシウム等の溶出が表層組織をポーラス化することが予想される。凍結融解行程では防水条件が有る場合、プレーン、A-Eに関わらずその前後で単位質量は増加し、逆に、無い場合は減少する。これは、前者の場合、凍結劣化による移動水圧の作用により含水量が増大し、かつ内部気泡が崩壊するためと考える。また、後者の場合は、内部組織の破壊より、スケーリング等表層部の毛細管組織の破壊が先行し、

密実性を失うためと考える。図-3に分割化した供試体各部の各シリーズの圧縮強度、単位質量の観測値の平均値の比較を示す。なお、防水条件が無い供試体は両端部と中央部の2ブロックを1つにまとめ、外部と内部として扱った。また、グラフ上の各部の値は平均値とともに、信頼度95%の母平均の信頼区間を示すこととした。上段に示す圧縮強度の結果について、初期乾燥に影響のあるものの、防水条件が有る場合の劣化は、表層部と内部に二極化しており、塩水浸漬以外はB部で最も劣化が小さい。また、D部の劣化は防水された閉鎖空間ほど移動水圧が集中し、劣化進行するためと考える。A-Eモルタルとプレーンモルタルとを比較すると、各ブロック間の相違が大きいのは前者である。これは気泡が侵入する移動水によって飽水状態に達すると劣化進行を急速に進めるのではないかと考える。一方、塩水浸漬の場合は最も劣化の小さいピークがC部に移る。下段に示す単位質量の結果については、A-Eモルタルの場合、体積膨張がみられないため、単位質量の変化が明確に表れにくいが、塩分浸漬の影響がC部まで及んでいることは、圧縮強度の結果と同意する。図-4に圧縮強度と単位質量の関係をまとめると、明らかにプレーンモルタルの場合には相関が十分あることがわかる。即ち、凍害劣化が進行することにより圧縮強度及び単位質量はそれぞれ小さくなるものと考えられる。

表-2 実験行程の概要

材齢1日	脱型	単位質量測定
2日	プライマー塗布	
3日	ライニング材塗布	
7日	養生状態の開始	
14日	養生状態の終了	単位質量測定
14日	凍結融解劣化開始	
凍結融解終了サイクル数時	供試体のブロック分割化	単位質量測定 圧縮強度測定
凍結融解終了サイクル数と材齢		
プレーン	材齢21日	40サイクル
A-E	材齢56日	210サイクル

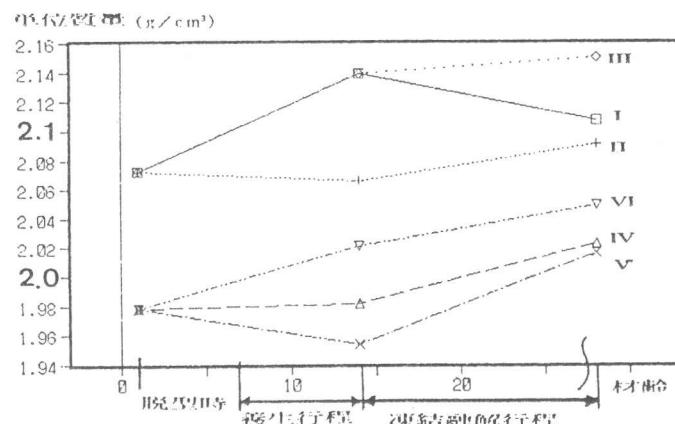


図-2 供試体単位質量の時系列変化

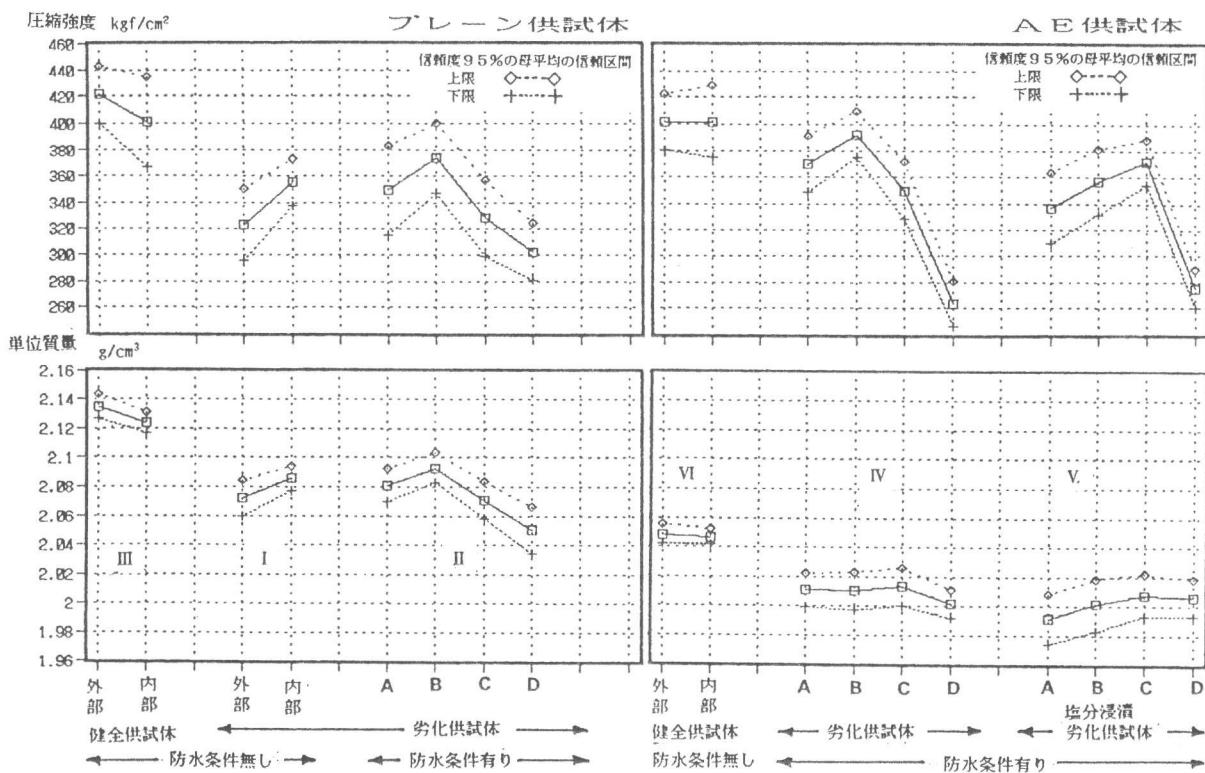


図-3 ブロック分割化供試体の凍結融解劣化状況等の比較

#### 4. ファジイ推論と観測値の統合

##### 4. 1 ファジイ if-then ルール

前章で得た知見「凍結融解劣化の観測値として、圧縮強度と単位質量には、プレーンモルタルの場合に、十分な相関関係がある」を、式(1)のようなファジイ if-then ルールとして表現し、2つの観測値から凍害劣化基準値として統合化するための推論を行った。

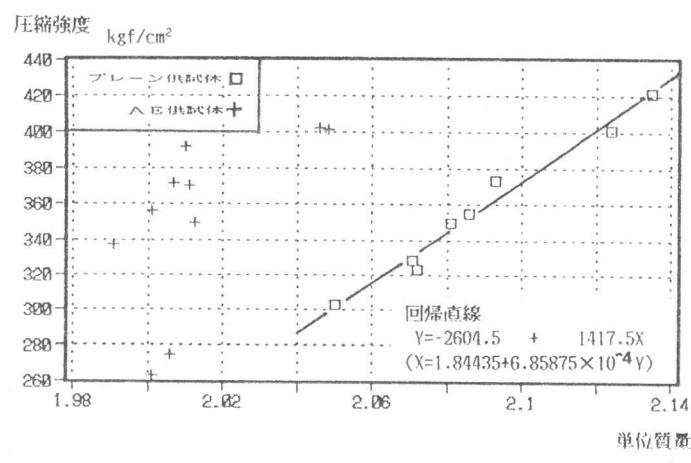


図-4 単位質量と圧縮強度の関係

$$\text{ルール i : IF } X \text{ が ほぼ } G_x \text{ and } Y \text{ が ほぼ } G_y \\ \text{THEN } Z \text{ は } G_z(j) \quad (j=1,2) \quad (\text{確信度}) \quad (1)$$

ここで、Xは単位質量、Yは圧縮強度、Zは凍害劣化基準を示す。G<sub>x</sub>、G<sub>y</sub>はそれぞれ観測値の分布に基づき定義域を設定し、7段階等分割として表現した代表値である。今、観測値X、Yをファジイ数として捉え、同じ7段階(G1～G7: グレードGz)に区分した凍害劣化基準に対応させて考え

表-3 G<sub>x</sub>G<sub>y</sub>と凍害劣化基準 (G<sub>z</sub>) の対応

単位質量	2.190	2.155	2.120	2.085	2.050	2.015	1.980
圧縮強度	530	470	410	350	290	230	170
グレード	G1	G2	G3	G4	G5	G6	G7
基準値	0.875	0.750	0.625	0.500	0.375	0.250	0.125

た。表-3に観測値によるGx、Gyと凍害劣化基準の対応関係を示す。なお、Gzの基準値は0～1の値で表現し、値が大きい方が劣化進行が小さいことを示す。また、条件部のメンバーシップ関数は図-5のように設定することにより、各観測値が凍害劣化基準のグレード値及びその帰属度を2つ或は1つずつもつものとして捉えることができる。ここで、設定推論ルールiの総数は $7 \times 7$ の49である。また、各ファジィif-thenルールの確信度(0～1)の割付を表-4のように行うことにより、XとYの両者に相関関係があるという特性を有意義に推論過程に反映できるものとして考えた。

#### 4.2 確信度の算出と結論部の値の合成

条件部の各条件文の成立する確からしさCx、Cyは、そのメンバーシップ関数の帰属度に相当し、条件部全体が成立する確からしさCaは、式(2)のようにmin演算で表現した。

$$Ca = f_a(Cx, Cy) = \min(Cx, Cy) \quad (2)$$

割付表に基づく各ルールの確信度をCbとすると、その結論文が成立する確からしさCcは、 $Cc = Ca \times Cb$ となり、今、確信度Cdの結論文がすでに存在している時、合成された確信度Ceは、式(3)のように算出できる。

$$Ce = f_b(Cc, Cd) = Cc + Cd - Cc \times Cd \quad (3)$$

また、結論部の値の合成として得られる推論値は、各確信度による重み付きの平均として、

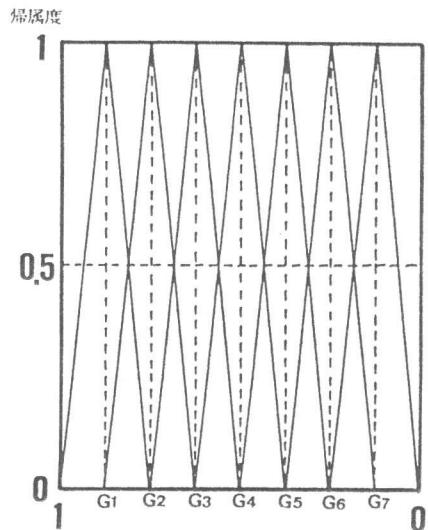


図-5 条件部メンバーシップ関数

表-4 ルールの確信度の割付

Gx Gy	G 1	G 2	G 3	G 4	G 5	G 6	G 7
G 1	1.0	1.0	0.5	0.5	0.3	0.2	0.1
G 2	1.0	1.0	1.0	0.5	0.5	0.3	0.2
G 3	0.5	1.0	1.0	1.0	0.5	0.5	0.3
G 4	0.5	0.5	1.0	1.0	1.0	0.5	0.5
G 5	0.3	0.5	0.5	1.0	1.0	1.0	0.5
G 6	0.2	0.3	0.5	0.5	1.0	1.0	1.0
G 7	0.1	0.2	0.3	0.5	0.5	1.0	1.0

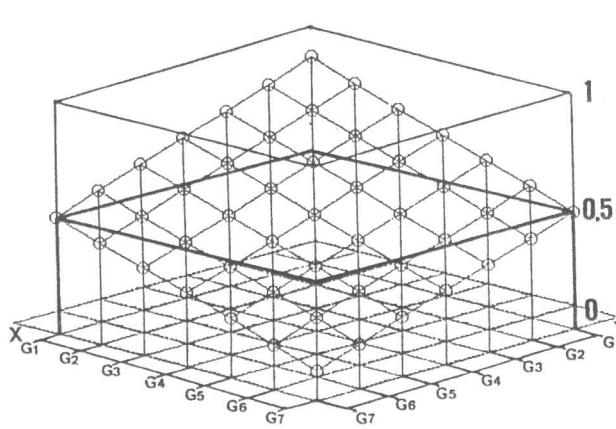


図-6 ファジィ推論より得られた凍害劣化基準

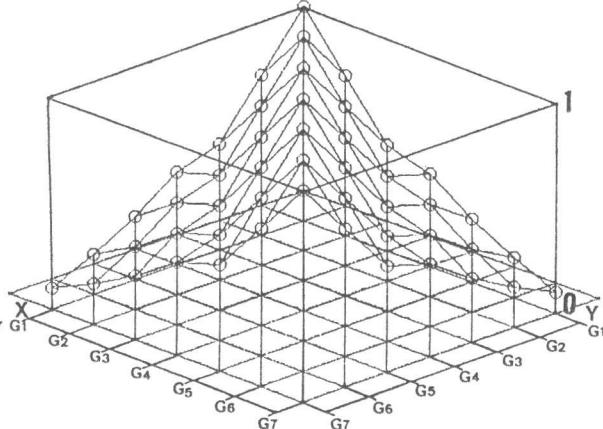


図-7 基準値の確信度の分布

式(4)にて算出するものとした。(今、結論の値  $a$ 、 $b$ 、確信度  $a_c$ 、 $b_c$  を得た場合、合成された結論の値  $c$  とする) [2]

$$c = f_c(a, a_c, b, b_c) = (a \times a_c + b \times b_c) / (a_c + b_c) \quad (4)$$

各観測値からファジィ推論の過程を経ることにより、凍害劣化基準値とその確信度を得る。今、ファジィ推論により観測値の統合として得られた凍害劣化基準値及びその確信度の分布を図-6及び図-7に示す。最も劣化進行が大きいものは単位質量のグレードがG7、圧縮強度のグレードがG7の場合であり、各段階の推論値が連続分布として表現できることがわかる。また、推論値の確信度は各観測値のグレード相違が大きいほど、小さいことを示している。

#### 4.3 ニューラルネットワークによる確信度の向上

ファジィ推論により得られた結果を、図-8のような階層型ニューラルネットワークに適用し、入力ユニット値として、確信度及び浸水面からの距離を正規化した値を、出力ユニット値として、推論された凍害劣化基準値を用い、中間層1、中間ユニット数5の基で学習を行った。ここで、学習させたデータのパターン（教師データ）は供試体毎に行い、ブロック化した各サンプルの凍害劣化基準値の確信度がすべて0.7以上を示すものとそれ以下を示すものを含むものとに大別し、観測順に1サンプルずつ組合わせて用いた。そこで、0.7未満の確信度の低い推論値については、学習させた教師データの確信度の平均値まで向上させて、再入力を用い、学習済みのニューラルネットワークより再び凍害劣化基準値として算出した。

#### 4.4 ノンパラメトリック法 (Kruskal-Wallis検定) による推論結果の有効性の検討

凍結融解作用における場所（ブロック）毎の劣化相違を検定する問題を取り上げ、観測値と統合された基準値による検定能力の比較を行うことにより、推論結果の有効性の検討を行う。検定対象はシリーズIIとし、Kruskal-Wallis検定とする。その統計量  $K$  及びデータ形式を表-5に示す [3]。また、検定結果として図-9に凍結融解劣化のブロック間相違における有意水準を示す。ここで、P値とは第1種の誤り（真に、劣化相違がないのにると判断する誤り）の確率である。観測数が8の場合、P値は圧縮強度 1.2. 8%、単位質量 4.7%、ファジィ推論値 1.8%、ニューラル推論値 0.2% であり、統合化

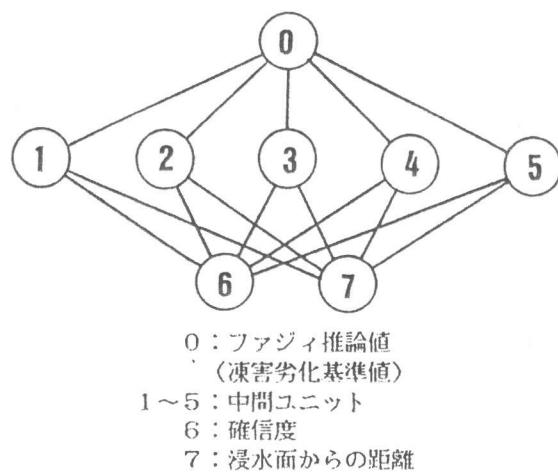


図-8 階層型ニューラルネットワーク

表-5 検定統計量とデータ形式

供試体	順位データ				計
処理 1	$r_{11}$	$r_{12}$	$\cdots$	$r_{1n_1}$	$r_{1\cdot}$
処理 2	$r_{21}$	$r_{22}$	$\cdots$	$r_{2n_2}$	$r_{2\cdot}$
:	$i$			$\vdots$	
処理 $m$	$r_{m1}$	$r_{m2}$	$\cdots$	$r_{mn_m}$	$r_{m\cdot}$
					$N(N+1)/2$

m処理:  $n$  分割ブロックの各浸水面からの位置 ( $m=4$ )

$$K = \frac{12}{N(N+1)} \sum_{i=1}^m \frac{1}{n_i} \left( r_{i\cdot} - n_i \frac{N+1}{2} \right)^2$$

$$N = n_1 + n_2 + \cdots + n_m \quad \text{サンプル数 } n_m$$

された推論結果の効果が伺える。また、図-10に検定統計量の比較を行う。観測数が大きくなるにつれて、ファジィ及びニューラルの両推論値は、単独の観測値より、検定統計量Kが十分大きいことがわかる。

## 5.まとめ

(1) A-E、プレーンの供試体種別に関わらず、表層からの凍結融解劣化作用によって、圧縮強度等に浸水面からの場所的相違があることがわかった。初期乾燥における影響はあるものの、今回のような防水条件を与えると、必ずしも表層に近い部分からのみ劣化進行するとは限らない。また、単位質量においてはA-E供試体では各部における劣化相違があまり明確にならなかったものの、塩分浸漬等の影響はわずかに確認できた。

(2) プレーン供試体の場合、凍結融解劣化過程において、圧縮強度と単位質量には十分な相関があることがわかった。

(3) 実験結果からの知見による知識表現を、ファジィ推論及びニューラルネットワークによって行い、観測結果を統合化することによって、少ないサンプル数でも、十分精度の良い凍結融解の劣化分布の推定を行うことの可能性があると考えられる。

今後、観測項目の多指標化を行い、凍結融解劣化基準の確立と新らたなるルールの拡張導入及びその精度面の向上を行い、かつ面的或は立体的な様々な空間分布の評価を行う予定である。

最後に、シール材を御提供頂いたコニシ株式会社・ボンド建設部の中村氏に心から厚く感謝致します。また、本研究の実行に際し、卒研生：奥村良宏君、竹内元則君、藤本佳彦君の協力に謝意を表します。

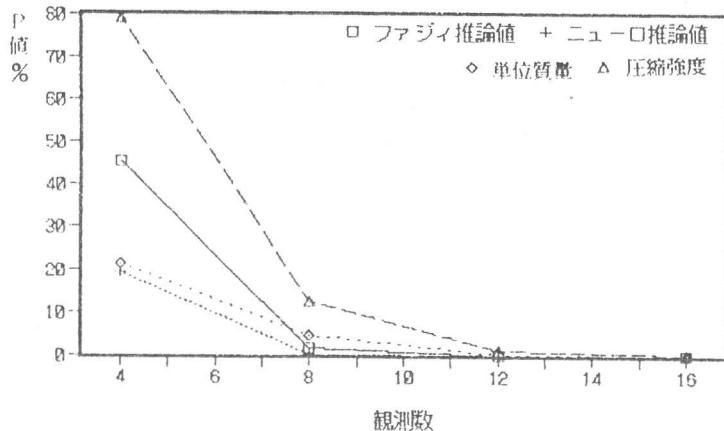


図-9 ブロック間劣化相違における有意水準（P値）

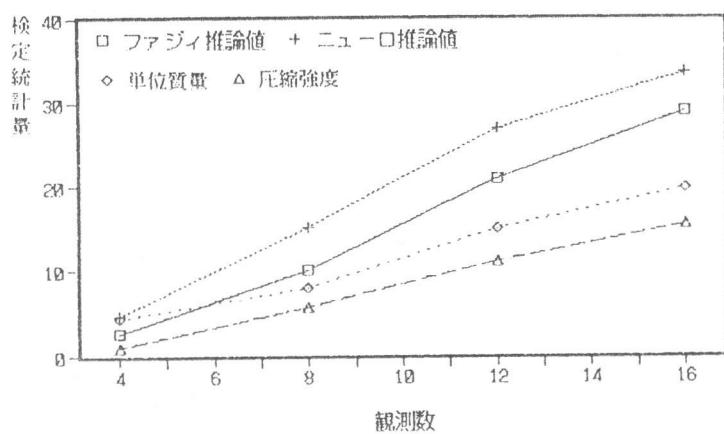


図-10 ブロック間劣化相違の検定統計量

## [参考文献]

- 1) 長谷川寿夫・藤原忠司著：凍害、技報堂、1988
- 2) 高橋邦芳著：エキスパートシステム構築法、日刊工業新聞社、1989
- 3) 脇本和昌・垂水共之・田中豊編：パソコン統計解析ハンドブック(1)、共立出版、1986
- 4) ニューラルネット型エキスパートシステム構築ツール、株式会社ブレインズ