

# 急速凍結融解作用をうけたコンクリートの劣化指標について\*

鮎田 耕一\*\*

(昭和50年9月29日受理)

## On the Deteriorative Indexes of Concrete subjected to Rapid Freezing and Thawing

by Koichi AYUTA

Many methods are being used to determine the resistance of concrete specimens to rapidly repeated cycles of freezing and thawing in the laboratory. The relative dynamic modulus of elasticity in frequency method among the rest is widely used to measure the degree of deterioration of concrete specimens, for a good correlation can be seen between values of the dynamic modulus of elasticity change and the strength change of concrete. On the other hand, some faults of this method have already been pointed out.

In this paper, various measuring methods are used to estimate the degree of deterioration of concrete. They are relative dynamic modulus of elasticity in ultrasonic method, in addition to frequency method, length change in dialgauge and contact gage method, and weight change. From the test results, it can be concluded that length change in dialgauge method expresses clearly the degree of deterioration and has a good parallel relation to dynamic modulus of elasticity.

### 1. ま え が き

凍結融解作用をうけるコンクリートの耐久性を調べるのに、一般には ASTM の規格<sup>1)</sup>に準じて水中における急速凍結融解試験を行っている。この場合、劣化の程度を示す指標(劣化指標)として、共鳴振動方法によって求めた動弾性係数の試験開始時の値との比である相対動弾性係数(Relative Dynamic Modulus of Elasticity),あるいは、これを基とした耐久性指数(Durability Factor)が用いられている。しかしながら、すでに明らかにされているとおり<sup>2),3)</sup>,凍結融解抵抗性の大きいコンクリートの場合、供試体の表面が凍結融解作用によって明らかに劣化しているにもかかわらず、凍結融解サイクルの進行とともに相対動弾性係数の値が大きくなる傾向にあり、この場合、相対動弾性係数は劣化指標として必ずしも実験の目的にあってい

\* 第29回土木学会年次学術講演会にて発表

\*\* 北見工業大学土木工学科

ない。

そこで、本研究では共鳴振動方法によって求めた動弾性係数の他に、適当と思われるいくつかの指標をとりあげ、それらの凍結融解作用をうけるコンクリートに対する劣化指標としての妥当性および指標間の関連性について比較検討を行ったものである。

## 2. 実験方法

### 2.1 凍結融解試験の方法

凍結融解試験は ASTM C 666 の〈急速凍結融解に対するコンクリートの抵抗試験法〉のうちの〈水中における試験法〉に準じて行った。試験装置は一槽式のもので同時に 10×10×40 cm のコンクリートはり型供試体 33 本に自動的に凍結融解作用を与え得るものである。ブラインには非腐食性グリコール水溶液を使用した。本実験では 1 サイクル 4 時間、凍結行程 2.5 時間、融解行程 1.5 時間にプログラムを設定して行った。また供試体の中心温度が約 -18°C ~ +5°C の範囲になるように制御した。

### 2.2 使用材料および供試体

使用したセメントは小野田セメント K.K. 製の早強ポルトランドセメントで、その物理試験の結果は表 1 に示すとおりである。細骨材は能取産山砂と北見産山砂を重量で 1:1 に混合して使用した。また粗骨材は常呂川産の砕石を使用した。細骨材 (混合後) と粗骨材の物理試験の結果は表 2 に示すとおりである。混和材料は山宗化学 K.K. の AE 剤 ヴィンソルを使用した。

供試体の配合等は表 3 に示すとおりである。

供試体は 10×10×40 cm のはり型供試体であるが、凍結融解試験開始時の圧縮強度および静弾性係数測定用として φ10×20 cm の円柱供試体も使用した。供試体は打設終了後、型枠のまま恒温恒湿室 (室温 21±1°C, 湿度 87±2%) で 1 日間養生し、脱型後、試験開始日まで水中

表 1 セメントの物理的性質

Table 1. Physical properties of cement

試験項目	比重	粉末度		安定性 (煮沸)	凝 結		強 さ							
		比表面積 (cm <sup>2</sup> /g)	88 μ 残分 (%)		始 発 (h-m)	終 結 (h-m)	曲げ強さ (kg/cm <sup>2</sup> )				圧縮強さ (kg/cm <sup>2</sup> )			
							1日	3日	7日	28日	1日	3日	7日	28日
試験成績	3.12	4450	0.5	良	3-46	5-10	24.4	41.1	51.9	68.5	94	193	278	394

表 2 骨材の物理的性質

Table 2. Physical properties of aggregates

試験項目 種 別	比 重	吸水量 (%)	粗粒率	洗 い (%)	安 定 性 (%)	単 位 容積重量 (kg/m <sup>3</sup> )	最大寸法 (mm)	すりへり 減 量 (%)
細 骨 材	2.63	1.81	2.60	1.6	2.8	1680	—	—
粗 骨 材	2.62	1.75	7.43	0.1	7.3	1530	25	11.8

表 3 コンクリートの配合および物理的性質

Table 3. Mix proportions and physical properties of concrete

種 別	項 目	単位セメント量 (kg/m <sup>3</sup> )	水セメント比 (%)	細骨材率 (%)	スランブ (cm)	空 気 量 (%)	圧縮強度 (kg/cm <sup>2</sup> )	静 弾 性 係 (t/cm <sup>2</sup> )	動 弾 性 係 (t/cm <sup>2</sup> )
non AE コンクリート		320	40	36.9	0.5		416	328	355
		320	50	36.9	4.3		299	282	320
		320	65	37.0	18.0		154	219	280
		320	80	37.0	22.7		118	155	246
AE コンクリート		320	43	39.6	2.8	3.5	308	284	313

養生 (水温 21±1°C) を行った。凍結融解試験を行った供試体の本数は各配合ごとに 6 本ずつで、試験開始時の材齢は 15 日~16 日とした。

### 2.3 劣化指標

比較検討する劣化指標として、①超音波伝播速度の測定より求めた相対動弾性係数、②共鳴振動方法による相対動弾性係数 (JIS A 1127)、③重量変化率、④ダイヤルゲージ方法による長さ変化率 (JIS A 1124)、⑤コンタクトゲージ方法による長さ変化率 (JIS A 1124) の 5 種類を用いた。他に劣化指標として考えられる残存強度は、その特徴が一応明らかなので<sup>4)</sup>、今回の実験では測定しなかった。

超音波方法による動弾性係数の測定装置は、円井製作所 K.K. 製のウルトラ・ソニースコープで、50 kc の振動子を使用した。共鳴振動方法による動弾性係数の測定装置は、三和商工 K.K. 製の無破壊試験器を使用した。重量は容量 10 kg、最小目盛 0.5 g の台秤を使用して測定した。ダイヤルゲージ方法による長さ変化率の測定装置は、丸東製作所 K.K. の最小目盛 1/100 mm のダイヤルゲージをもつもので、供試体端面埋め込みのゲージプラグは全長 30 mm のものを使用した。コンタクトゲージ方法による長さ変化率の測定装置は、丸東製作所 K.K. の最小目盛 1/1000 mm のダイヤルゲージをもつものを使用した。コンタクトゲージ方法のための供試体上の標点は、標点ボールを打ちこんだ 10×10×2 mm のしんちゅう板を接着剤で供試体の側面四面に貼付したものと、端面に標点ボールを打ちこんだ直径 13 mm、長さ 12 mm の丸鋼をコンクリート中に約 10 mm 埋め込んだものの 2 種類を使用した (図 1 参照)。いずれの標点の場合も、標点間の距離は 200 mm とした。

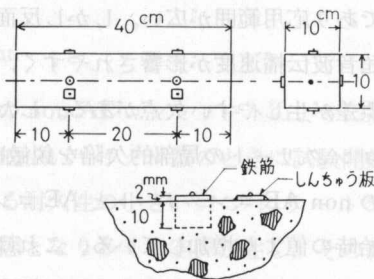


図 1 コンタクトゲージによる長さ変化測定用標点

Fig. 1. Marks for measuring length change by contact gage.

### 3. 実験結果及び考察

凍結融解試験開始時の供試体の圧縮強度、静弾性係数及び超音波方法による動弾性係数の実験結果は、配合別に表3に示してある。供試体は前述の円柱供試体で、各配合ごとに3本作製し、結果はその平均値である。

超音波方法、共鳴方法による相対動弾性係数の測定結果を図2に示す。ただし、測定は同一配合の供試体6本を3本ずつの組として行なったが、結果はそれぞれの平均値を一定サイクルごとに読みとった値を示してある。これは他の劣化指標についても同じである。

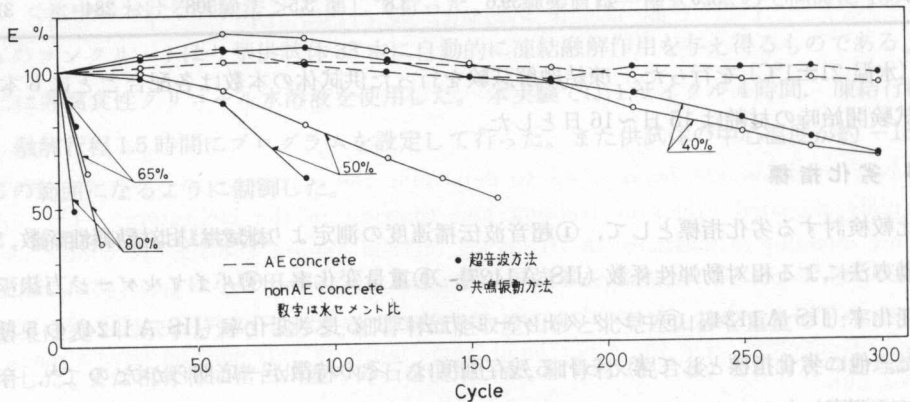


図2 相対動弾性係数の変化

Fig. 2. Change of relative dynamic modulus of elasticity.

超音波方法は、受信子・振動子をコンクリート表面におしつけて、その間の超音波の伝播速度を測定するものであるから、一定形状の供試体でなくても動弾性係数を測定するのが可能であり応用範囲が広い。しかし反面、凍結融解作用によるコンクリート表面のスケーリングに超音波伝播速度が影響されやすく、受信子・振動子のコンクリートへの接触圧の違いによって誤差が生じやすい欠点がある。したがって、強度との相関性はあまりよくないと思われるが、コンクリートの局部的欠陥を鋭敏に反映し得る可能性がある。実験結果によると、 $w/c=40\%$ の non AE コンクリートと AE コンクリートでは、凍結融解試験開始後も動弾性係数が試験開始時の値より増加している。これは試験開始後も水和作用の継続その他により強度が増加しているためと思われるが、これは測定値が必ずしも劣化の程度をあらわしていないという点で劣化指標としては目的にあっていないといえる。また  $w/c=65\%$ 、 $80\%$  の non AE コンクリートでは、凍結融解の繰り返し回数が10サイクル前後で、相対動弾性係数が50% ぐらいまで減少しているが、このような劣化状態になると、超音波測定装置のブラウン管の受信波形の立ちあがりが悪くなって、受信波形と時間信号を合わせづらくなり、測定者による個人差が生じやすく、測定の精度が悪くなるおそれがある。したがって、図からも明らかなように水セメント比が50%の non AE コンクリート程度の耐久性のコンクリートに対しては、急速凍結融解試験

において超音波方法による動弾性係数を劣化指標として用いても有効と思われるが、それより凍結融解抵抗性の小さい、あるいは大きいコンクリートに対しては適当でなく、その適用範囲が限られてくるので、劣化指標として適しているとはいえない。

つぎに、共鳴振動方法による相対動弾性係数は、最も広く用いられている方法で、強度との相関性も高いと一般にいわれている。しかし、この方法では超音波方法の場合と同じ欠点の他に、一次共鳴振動数とみられる値が同一の供試体でいくつか測定されるのを防ぐことはなかなかむずかしく、どの値が本当の一次共鳴振動数か判断に迷うことが多いことが大きな欠点の一つとなっている。図2の結果の値は同一の供試体の超音波方法による測定結果などを参考にして、一次共鳴振動数を決定したものである。したがって、共鳴方法と超音波方法による動弾性係数の値は、ほぼ一致している。しかし、共鳴方法のみによって動弾性係数を決定し、劣化指標とするのはなかなか困難であると思われる。

凍結融解作用による供試体の重量変化を劣化指標として用いた場合の結果を図3に示す。これによれば、観察による劣化の程度に比較して重量減少率が極めて小さく、w/c=50%のnon AEコンクリートの重量減少率が供試体の破壊時でわずか2%弱であり、指標としての鋭

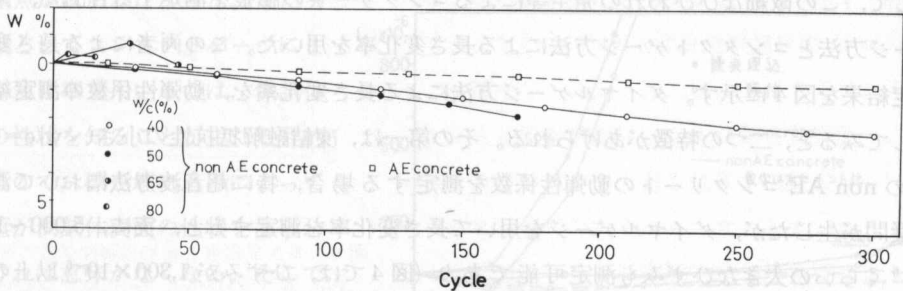


図3 重量の変化  
Fig. 3. Change of weight.

敏性に欠けることが明らかである。また w/c=65%, 80% の non AE コンクリートのように凍結融解抵抗性の小さいと思われるコンクリートでは、比較的少いサイクル数のときに試験開始時よりも重量が増加している。これは凍結融解作用に対する耐久性の小さいコンクリートでは、コンクリート中のモルタル部分が劣化し粉状に近い状態となり多くの空隙が生じ、その結果水分がそれらの空隙に充満するために見かけの重量がやや大きくなったのではないかと考えられるが、しかしながら、供試体の劣化がかなり進んでいるにもかかわらず、逆の傾向を指標が示すということは、劣化指標としてまったく不適である。ただ300サイクル終了時で重量減少率が0.8%程度と極めて小さく指標としての鋭敏性になると疑問があるが、AEコンクリートに対して劣化の傾向を示したのは他の指標にない特徴であった。

凍結融解作用によってコンクリートが破壊する過程は、主としてコンクリート表面から浸透した水が凍結して膨張し、そのとき生じる未凍結水の水圧によって微小ひびわれが発生・発

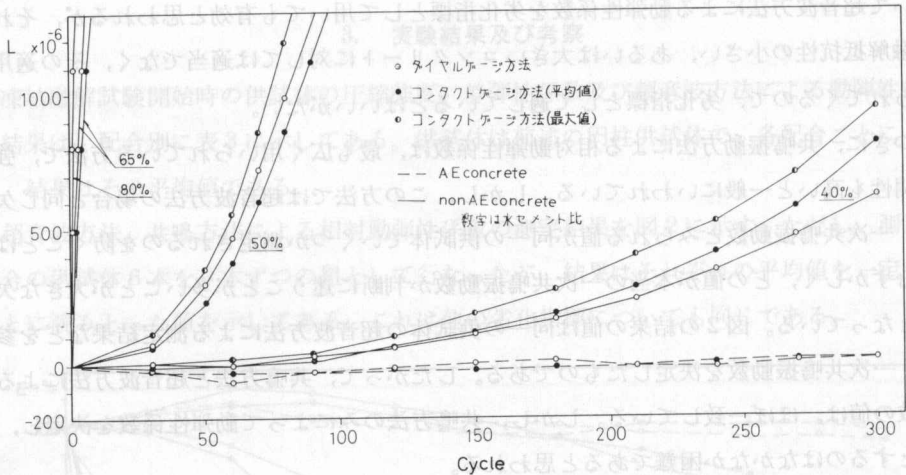


図 4 長さ変化

Fig. 4. Change of length.

達して、組織の崩壊に至ると考えられている<sup>5)</sup>。凍結融解作用による劣化の程度をあらわす指標として、この微細なひびわれの発生等によるコンクリートの膨張を測定する目的で、ダイヤルゲージ方法とコンタクトゲージ方法による長さ変化率を用いた。この両者による長さ変化率の測定結果を図4に示す。ダイヤルゲージ方法による長さ変化率を、動弾性係数の測定結果と比較してみると、二つの特徴があげられる。その第一は、凍結融解抵抗性の小さい  $w/c=65\%$ 、 $80\%$  の non AE コンクリートの動弾性係数を測定する場合、特に超音波方法において測定精度に疑問が生じたが、ダイヤルゲージを用いて長さ変化率を測定すると、実に、 $5,000 \sim 10,000 \times 10^{-6}$  くらい大きなひずみも測定可能であり (図4では、ひずみが  $1,300 \times 10^{-6}$  以上の測定結果は省略してある。)、凍結融解作用によって供試体端面が破損し標点のプラグがゆるまなにかぎり、供試体の破壊まで確実にコンクリートの長さ変化をとらえることができるということである。第二の特徴は、動弾性係数の測定結果では顕著にあらわれなかった  $w/c=40\%$  の non AE コンクリートと AE コンクリートの違いが明らかにでていることである。ダイヤルゲージ方法による長さ変化率の測定結果では、AE コンクリートは、150 サイクル前後まで試験開始時の状態より収縮の傾向を示している。これは動弾性係数の項でも述べたように、AE コンクリートは凍結融解抵抗性が極めて大きいため劣化による膨張が生じづらいことを示している。それに対して、 $w/c=40\%$  の non AE コンクリートは、試験開始直後から膨張の傾向を示し、他の配合の non AE コンクリートの程度ほどではないにしても、凍結融解作用によってコンクリート内部の劣化が進行していることを示している。この両者の長さ変化の挙動の相異は、供試体の劣化状態の観察ともよく合致している。さらに、実験逐行上の点からいえば、ダイヤルゲージ方法は長さ変化率の測定値のばらつきが極めて少なく、実験も簡便であることが特徴としてあげられる。ダイヤルゲージ方法の欠点をあげるとすれば、凍結融解抵抗性の大き

い AE コンクリートの場合、凍結融解サイクルの進行とともに生ずる供試体の収縮量が、凍結融解作用による内部の劣化によって、どの位抑えられているのか明らかにできないことであろう。これと同じ傾向は動弾性係数の測定にもあらわれたわけで両者共通の欠点といえよう。

もう一つの長さ変化測定方法であるコンタクトゲージ方法は、コンクリート供試体表面の標点の動きによって供試体の収縮・膨張の挙動を知ろうとするものであるが、この方法の最大の特徴は劣化挙動の最もはげしいコンクリート表面の長さ変化を測定し得ることである。前述のように凍結融解作用によるコンクリートの劣化は、試験条件の厳しいコンクリート表面から主として進行すると考えられるから、劣化指標として供試体表面の長さ変化率を測定することは有意義なことである。しかしながら、標点をコンクリート供試体表面に接着剤等で貼付した場合に、凍結融解抵抗性の小さいコンクリートでは、表面の劣化とともに、標点が簡単にはがれてしまう欠点をもっている。今回の実験でも  $w/c=65\%$ 、 $80\%$  の non AE コンクリートでは、貼付したしんちゅう板は、5 サイクル位の経過ではがれてしまい、實際上劣化の程度を測定することは不可能であった。したがって、標点として供試体中に 1 cm 程度埋め込んだ鉄筋を併用したわけだが、この方法によると  $w/c=80\%$  の non AE コンクリートでも、供試体の破壊時まで標点をはがれなかった。ただ劣

化指標としてコンタクトゲージによる長さ変化率を用いるのは、供試体表面の性状を知ることが主たる目的であるので、標点埋め込みによって測定値が供試体表面の性状をあらわさなければ意味がなくなる。そこで同一供試体による標点貼付と、標点埋め込みの長さ変化を比較した 2、3

の例が図 5 である。ただ貼付した標点が続いた測定に耐えられなく、標点のはりなおしを行ったので、この図の比較は各測定サイクル間のひずみの差で行っている。これによれば、両者の測定値は必ずしも一致していないが、ほぼ同じ傾向を示しているので、標点を埋め込んでも供試体表面の長さ変化を十分にとらえていると考えられる。したがって、考察はすべて標点埋め込みの方の結果を用いて行った。図 4 に示したコンタクトゲージ方法による長さ変化率も埋め込みの標点を用いた場合の結果であり、供試体四面の平均値と最大の伸びを示した面の値を示してある。この結果によれば、コンタクトゲージによる供試体四面の長さ変化率の平均値は、各配合のコンクリートともダイヤルゲージによる供試体の長さ変化率の値とほぼ同じである。つまり供試体四面の表面の長さ変化率の平均値が、供試体中心軸の長さ変化率とほぼ等しくなっている。

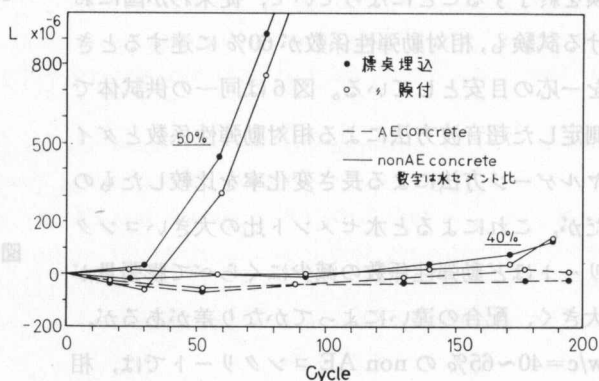


図 5 2 種類の標点による長さ変化率の比較

Fig. 5. Comparison of length change by two kinds of marks.

このことは、測定に時間がかかるコンタクトゲージよりも、簡便なダイヤルゲージの方が実用性が高いことを示している。またコンタクトゲージによる場合、測定器の作動距離の範囲がせまいために、劣化がはげしく長さ変化が大きくなると、測定が不可能になる欠点ももっている。さらに、今回の実験では埋め込みの標点としては、直径 13 mm の丸鋼のみを使用したのが、直径が大きくなるとコンクリートとの付着が悪くなり、標点とコンクリートとの間に界面ひびわれが生ずることが考えられ、測定値にその影響がでてくることも予想される。

以上 5 種類の劣化指標を比較検討した結果では、ダイヤルゲージ方法による長さ変化率が、急速凍結融解作用をうけるコンクリートの劣化指標として最も適していると思われる。ところで、ASTM の規格では劣化指標として動弾性係数を用いることとし、供試体に与える凍結融解回数が 300 サイクルになったとき、あるいは、供試体の動弾性係数が最初の値の 60% に達したときに試験を終了することになっていて、従来わが国における試験も、相対動弾性係数が 60% に達するときを一応の目安としている。図 6 は同一の供試体で測定した超音波方法による相対動弾性係数とダイヤルゲージ方法による長さ変化率を比較したのだが、これによると水セメント比の大きいコンクリートほど動弾性係数の減少にくらべて膨張量が大きく、配合の違いによってかなり差があるが、 $w/c=40\sim 65\%$  の non AE コンクリートでは、相対動弾性係数 60% は、ほぼ長さ変化率の  $1,000 \times 10^{-6}$  程度に匹敵するといえよう。

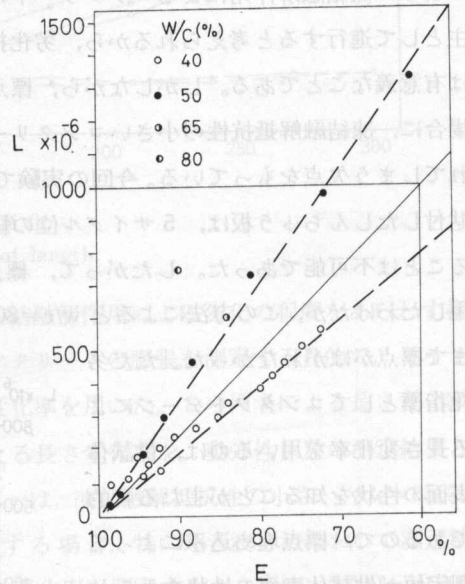


図 6 長さ変化率と相対動弾性係数の関係

Fig. 6. Relation between length change and relative dynamic modulus of elasticity.

#### 4. ま と め

限られた実験の範囲であるが、本実験の結果から以下のことが明らかになった。

- 1) 急速凍結融解作用を受けたコンクリートの劣化指標として、従来主として用いられてきた共鳴振動方法による相対動弾性係数とくらべて、ダイヤルゲージ方法による長さ変化率は、測定値が実験目的によく合致し、また精度・簡便さなどの点ですぐれている。
- 2) ダイヤルゲージ方法による長さ変化率にくらべて、超音波方法による相対動弾性係数は測定値の精度などの点で、重量減少率は鋭敏性などの点で、またコンタクトゲージ方法による長さ変化率は測定の簡便さなどの点で、劣化指標としての有効性がおとっている。
- 3) 水セメント比が 40% から 65% 程度の non AE コンクリートでは、ダイヤルゲージ方



法による長さ変化率  $1,000 \times 10^{-6}$  が、相対動弾性係数の 60% にほぼ一致する。

最後に本研究の遂行にあたり、多大な協力をいただいた土木工学科、猪狩平三郎技官、並びに実験に協力いただいた元本学学生の磯野 潤、中山正夫君に深く感謝致します。

なお、本研究は昭和 48 年度北海道科学研究費補助金をうけて行ったことを附記する。

## 文 献

- 1) ASTM C 666-1973.
- 2) 小林正凡：セメント技術年報. XXIII, p. 261 (1969).
- 3) 鎌田英治・洪 悦郎：セメント技術年報. XXV, p. 313 (1971).
- 4) 鮎田耕一：土木学会年次学術講演会講演集. 第 5 部, p. 253 (1972).
- 5) W. A. Cordon: ACI Monograph, No. 3 (1966).

## Deposits Developed Recently

— The Fukazawa Ore Deposits, Akita Prefecture, Japan —

by Juichi SATO, Toshimitsu AWAGANE, Hirozuki MAEDA  
and Youichi HAGIWARA

It is noted that the Fukazawa ore deposits were found in the central area of the Iwaka basin, while the other stratabound type Kuroko deposits are restricted to the marginal area of this basin.

Mineralogical problems on the ores from the ore deposits, as well as those on the geological aspects, have been given much attention.

Recent studies on the ores of the Kuroko deposits revealed that electrum is one of the most abundant and fairly ubiquitous minerals among minor constituent minerals. This fact suggests that the detailed studies on the features and the modes of occurrence of electrum will be of great use in elucidating the genetic differences in each deposit.

From this point of view, in addition to general descriptions on the ores, the present study has chiefly dealt with modes of occurrence, associations, grain sizes, reflectivity values, and chemical compositions of the electrum from the Fukazawa ore deposits. From the results obtained, some genetic problems are mainly discussed here in comparison with those of other Kuroko deposits.

## 1. 緒 言

黒鉱鉱床は、新第三紀中新世の火砕岩類が分布する主として東北日本内帯、いわゆるクマノエ地域に賦存する多金属硫化鉱物鉱床であり、我国特有の鉱床型として、また、成因上

\*\*\* 日本鉱物化学会・地質学会・地内地球化学会連合学術講演会(1974. 10. 31. 宇都)において講演

\*\*\*\* 北海道大学工学部資源開発工学科

\*\*\*\*\* 有限会社株式会社(北海道大学工学部資源開発工学科)

\*\*\*\*\* 北海道大学工学部