

非破壊試験方法によるコンクリート強度の推定

II. マッシヴなコンクリートの強度特性

服部九二雄*・森井 俊広*

An Estimation of Concrete Strength by Non - Destructive Methods

II. Properties of Massconcrete Strength

Kunio HATTORI* and Toshihiro MORI*

The design of a concrete structure is based on the compressive strength of cylindrical test pieces with the height to diameter ratio to 2.0 which are cured in water with 20°C for 28 days. But the curing condition of the concrete in structures and cylindrical test pieces has a big difference. As a result, the development of both concrete strength is not the same especially in the initial ages.

In this experiment the strength of the cores from massconcrete test piece with 70×40×20cm and 100×100×20cm was compared with that of the cylindrical test pieces. To make clear the difference of the strength development, we measured the following factors ; temperature inside the massconcrete, pulse velocity of massconcrete, compressive strength of the cores from massconcrete and cylindrical test pieces. The results obtained were as follows.

- ① The more massive concrete requires many hours to reach a stable ultimate inside temperature, the same as that in a room.
- ② The thick concrete element, for example, in the case of the massconcrete test piece with height 70cm, has the low strength in an upper part and the depth of its part is about 10cm, because this part has much capillary pores and water paths by means of bleeding.

ま え が き

建設材料としてのコンクリートは、耐久性、耐火性、耐震性が高く、取扱いも熟練を要せず、非常に廉価で、

形や大きさに制限なく構造物を造れるなどの特性を有するため、現在広範囲に用いられ、最も使用頻度の高いものである。しかし、最近では、セメントの品質向上にもかかわらず、使用骨材などの品質低下からコンクリート

*鳥取大学農学部農林総合科学科生産環境工学講座

*Department of Agricultural Engineering, Faculty of Agriculture, Tottori University

構造物自体の品質や強度の信頼性に疑問が投げかけられている。

コンクリート構造物の強度は、構造物の部材を構成しているコンクリートが設計基準強度を満たしているかどうか強度試験することで判定されてきている。この判定方法には、コンクリート打設時に並行して作製した標準供試体（ $\phi 10 \times 20\text{cm}$ または $\phi 15 \times 30\text{cm}$ の円柱供試体）を用いて強度を判定する方法と、構造物から採取したコアを用いて強度を測定し判定する方法とがある。しかし、両者は、締固め条件、養生条件や部材の大きさなどが異なるため、同じ材令でも強度や密度などの試験値に違いが生じることはよく知られている。

そこで、構造物コンクリートとほぼ同じサイズとなるようなマッシュパなコンクリート（以下マスコンと呼ぶ）を数体打設し、それらと並行して作製した標準供試体とを同じ条件で養生し、両者の強度発現の違いを比較し、養生効果の影響、打込み方向の影響、締固め効果の影響について検討した。なお、本論文は、平成4、5年度に行った実験をまとめたもので、それぞれの実験をシリーズ1、2と呼ぶことにする。

実験方法

1. 使用材料と配合

シリーズ1・2とも同じ材料、同じ配合を用いた。セメントは比重3.16の市販の普通ポルトランドセメント、細・粗骨材は鳥取県千代川産の川砂、川砂利で、それらの物理的性質を第1表に示す。また、第2表には実験に

第1表 使用材料の物理的性質

項目	川砂	川砂利
比重	2.59	2.60
粗粒率	2.75	6.54*
吸水率(%)	2.67	1.81
有効吸水率(%)	1.64	1.30

*人為的に調整した値

第2表 実験に使用した示方配合

最大骨材寸法 (mm)	スランプの範囲 (cm)	空気量 (%)	W/C (%)	s/a (%)	単 位 量 (kg/m ³)			
					水	セメント	細骨材	粗骨材
20	12±2	2.5	55	48.75	165	300	903	953

使用したコンクリートの示方配合を示す。配合の基本は、単位セメント量を300kg/m³と統一している点で、セメントの水和反応による発熱量の条件を同一になるようにした。なお、混和剤は使用しなかった。

2. 供試体の作製

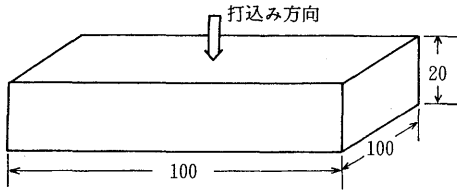
標準供試体は、 $\phi 10 \times 20\text{cm}$ の円柱供試体と10×10×40cmの角柱供試体の2種類を、さらにマスコン供試体として2種類のサイズ（100×100×20cm、70×40×20cm）を作製した。

各材料を1バッチ当たり50ℓまたは60ℓとし、まず骨材とセメントを強制練りミキサで75秒間空練りし、次に水を加えて30秒間練混ぜ、一旦ミキサを停止してから端部の練混ぜ不十分な部分を掻き出し、さらに150秒間練混ぜた。その後、練板上に排出し、手練りで2往復切返しを行いながら練混ぜた。

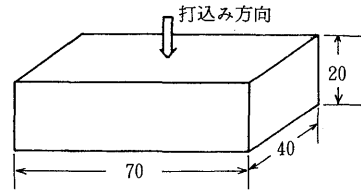
標準供試体はJIS規準¹⁾に従い作製した。マスコン供試体は、打込み方向を変えて打設した。第1図には大きさと打込み方向の異なるマスコン供試体3種類と標準供試体2種類を示す。マスコン供試体3種類とも、高さ10cmを1層として、横打ちで2層、縦打ちで7層に分けて打込んだ。また、締固めは、内部振動機で容積10×10×10cm³当たり1回行い、締固めエネルギーができるだけJIS規準¹⁾に近くなるように心掛けた。

マスコン供試体では、打設後温度センサー先端が供試体中心部に行くように挿入し材令3日まで連続して温度測定を行った。なお、標準供試体は、打設後恒温恒湿室に1日間置き、脱型してから20±3℃の恒温水槽内で所要期間標準養生した。一方、小さいマスコン供試体（70×40×20cm）は、打設後ビニールシートで覆い3日間実験室内に静置し、材令3日で脱型後恒温水槽内で所要期間標準養生した。

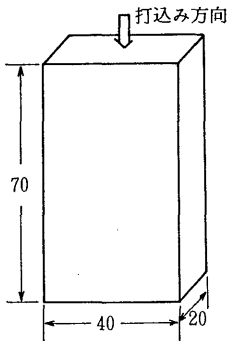
100×100×20cmの大きいマスコン供試体は重量が大きく持ち運びができなかったため、実験室前の中庭に敷いたビニールシート上に打設し、材令3日に脱型後、ビニールシートで仮設水槽を作り、水道水を連続補給して材令28日まで屋外で水中養生した。その間連続してコンクリートの内部温度を測定した。



㉑ マスコン供試体 1 (M1 : 100×100×20)



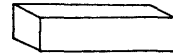
㉒ マスコン供試体 2 (M2 : 70×40×20, 横打ち)



㉓ マスコン供試体 3 (M3 : 70×40×20, 縦打ち)



㉔ 円柱供試体 (E : φ10×20cm)



㉕ 角柱供試体 (K : 10×10×40cm)

第1図 各種供試体とそのサイズ

3. 測定項目と測定手順

1) シリーズ1

円柱・角柱供試体については、材令3日に密度測定を行い、材令7, 14, 28日において次の項目を測定した。

- ① 密度
- ② 超音波伝播速度
- ③ 動弾性係数 (たわみ振動および縦振動)
- ④ 反撥係数 (シュミットハンマーN型)
- ⑤ 貫入抵抗 (ピンテスター)
- ⑥ 圧縮強度

なお、④と⑤は角柱供試体のみに適用した。

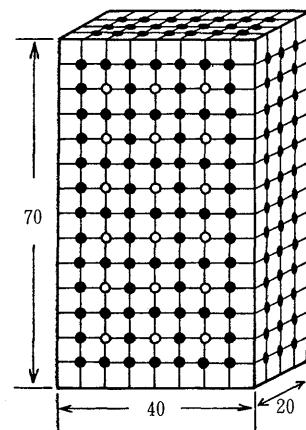
一方、マスコン供試体は、材令7, 14, 21, 28日に超音波伝播速度のみを測定し、材令28日には、直径10cm、高さ約20cmのコアを3種類のマスコン供試体より抜き取り、このコア円柱供試体について両端部を研磨して平滑処理後、上記の①, ②, ③, ⑥を測定した。なお、④と⑤は、マスコン本体で測定を実施した。

2) シリーズ2

シリーズ2では円柱供試体のみを打設しているので、材令3日に密度を測定した他、材令7, 14, 28, 56, 91日に次の項目を所定の材令で測定した。

- ① 密度

- ② 超音波伝播速度
- ③ 動弾性係数 (縦振動)
- ④ 圧縮強度



- シリーズ1 (10cm間隔)
- シリーズ2 (5cm間隔)

第2図 マスコン供試体 (70×40×20cm) の超音波伝播速度の測定点

一方、シリーズ2のマスコン供試体は、70×40×20cmのサイズのみを5体作製したので、コアを抜取っていないマスコン供試体について材令7, 14, 28, 56, 91日に超音波伝播速度のみを測定した。第2図には、70×40×20cmの大きさのマスコン供試体の超音波伝播速度の測定点を示す。それぞれ相対する面間を測定した。

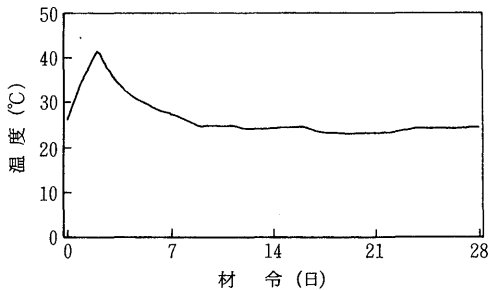
なお、コア抜取りは材令28, 56, 91日に行い、各材令で抜取った3本のコア円柱供試体について、標準供試体(円柱形)と同じ項目を測定した。

結果と考察

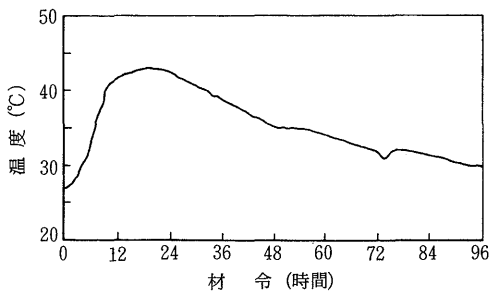
1. マスコン供試体内部温度の経日変化

第3図と第4図には、シリーズ1の大きいマスコン供試体と、シリーズ2の横打ちと縦打ちの小さいマスコン供試体の内部温度の経時変化を示す。シリーズ1では8月上旬に打設し屋外の仮設水槽内で水道水で連続水中養生した点と、シリーズ2では10月中旬に打設し室内で3日間気乾養生した点が違うため、最高温度などが異なるが、第3図および第4図から次のようなことが分かる。

① 打込みから最高温度に達するまでの時間は、ほぼ15



① 打込み後材令28日までの日平均内部温度



② 打込み後96時間までの時間平均内部温度

第3図 マスコン供試体 (100×100×20cm: シリーズ1) の内部温度変化

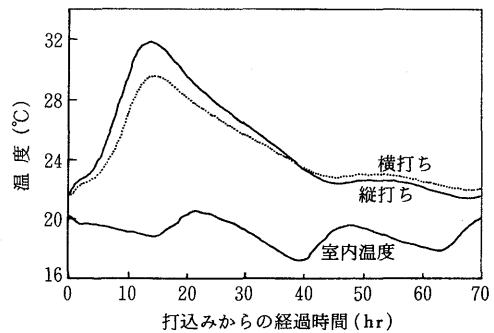
時間前後で、養生方法と供試体のサイズの違いの影響はさほどみられない。しかし、マスコン供試体のサイズが大きくなれば最高温度も高くなる。

② 最終安定温度(外気温)に達するまでの時間は、大きいマスコン供試体の場合打込み後約9日(226時間)で、小さいマスコン供試体では約48時間である。つまり、マッシュなコンクリートになるほど水和熱の放散が緩慢で、熱が内部に蓄積し最高温度も高くなる。

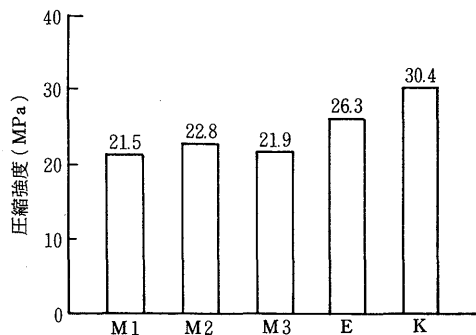
③ またシリーズ2の横打ちと縦打ちを比べた場合、縦打ちの方が内部最高温度は高くなるのが分かる。これは、縦打ちの方が型枠に囲まれている面積が大きいいため、水和熱の放散がスムーズにいかないからである。

2. 標準供試体と抜取りコアとの強度の比較

第5図は、シリーズ1の材令28日における圧縮強度を



第4図 マスコン供試体 (70×40×20cm: シリーズ2) の内部温度変化



M1: マスコン供試体 (100×100×20cm)
 M2: マスコン供試体 (70×40×20cm, 横打ち)
 M3: マスコン供試体 (70×40×20cm, 縦打ち)
 E: 円柱供試体 (φ10×20cm)
 K: 角柱供試体 (10×10×40cm)

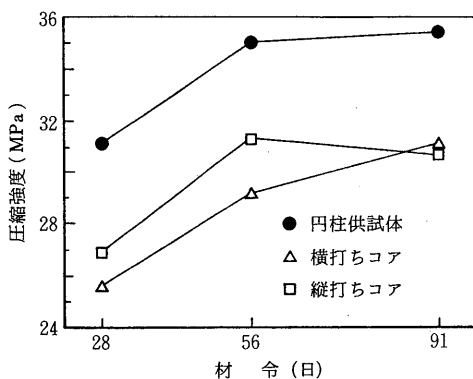
第5図 供試体形状別の圧縮強度の比較 (シリーズ1)

マスコン供試体と標準供試体について比較したものである。この図から、マッシュなコンクリートほど強度発現が遅く、さらに角柱供試体が最大の強度を示すことがわかる。これは、従来からよく知られているように次の3点から説明できる^{2,3)}。

- ① コンクリートの破壊は弱い部分から始まると考えれば、供試体が大きいほど弱い部分を多く含む確率が高くなるので、マッシュなコンクリートほど低い強度を示すことになる。
- ② 小さい供試体は内部まで湿潤養生の効果が発揮され早く強度発現が進むので、標準供試体の方が同じ材令なら大きい強度を示す。
- ③ 標準供試体の場合、直径または辺長と高さとの比が小さいほど圧縮強度は大きくなる。この点から考えれば、サイズは円柱供試体の方が小さくとも角柱供試体が大きい強度を示すことになるわけである。

第6図にはシリーズ2における圧縮強度の経日変化を示すが、第5図と合わせて考えてみると、横打ちと縦打ちの締固め効果の違いは、シリーズ1では明確ではないが、シリーズ2では縦打ちの方が大きい強度を示していることが分かる。ただし、超音波伝播速度とか動弾性係数などから判断しても、横打ちと縦打ちの強度差は明確には現われてこないようだ。

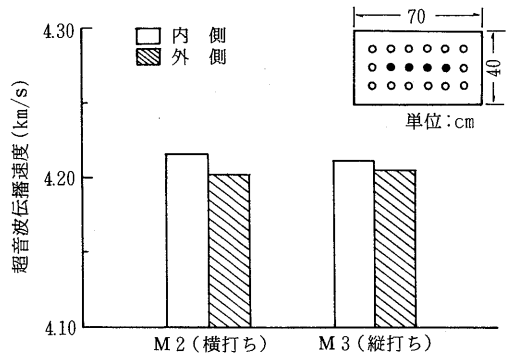
なお、同じサイズの円柱供試体の強度と抜き取りコアの強度を比較した場合、前者が後者の1.15~1.20倍程度あり、材令が進むにつれその差は小さくなる傾向がある。



第6図 圧縮強度の経日変化 (シリーズ2)

3. 養生効果の影響

マスコン供試体に限らず、どのコンクリートの場合でも湿潤養生の効果は、供試体の外側から内部に向かって進行していくはずである。そこで、小さい横打ちのマス



第7図 養生効果の影響 (マスコン供試体: シリーズ1)

第3表 材令91日における超音波伝播速度

測定位置	超音波伝播速度 (m/s)
SA1	4269
SA2	4266
SA3	4258
SA4	4253

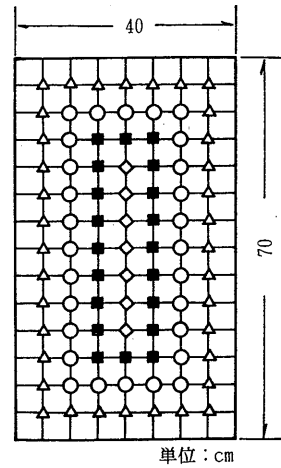
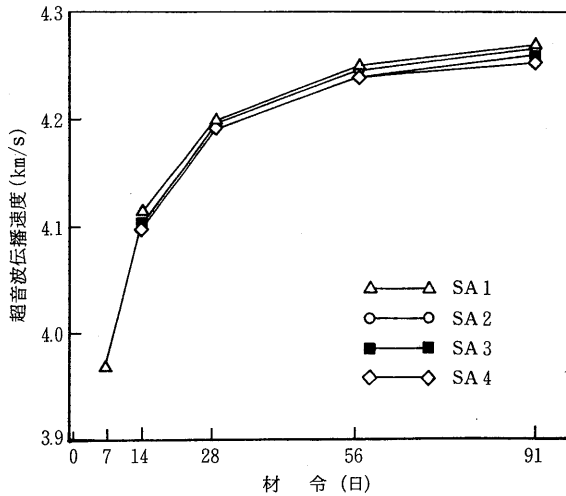
コン供試体について、超音波伝播速度の結果をもとに内部と外部の強度発現の違いを比較してみた。

第7図は、シリーズ1の材令28日における超音波伝播速度の測定結果である。なお、測定点は、同図⑥に示すように10cm間隔で、各値は外側と内側のそれぞれの平均値である。第8図は、シリーズ2の材令91日までの経日変化を示したものである。測定間隔は5cmで、同図⑥でわかるように外側から同心円状に順に4つのグループに分けてそれぞれの平均値を示したものである。また、第3表には材令91日における各グループの平均超音波伝播速度が示してある。

シリーズ1では、横打ち・縦打ちとも予想に反して内側の方が大きい強度を示しているが、シリーズ2でははっきりと外側から内側へ順に強度が小さくなっていることが分かる。測定材令が違うこともあるが、測定間隔を細かくし、測定点を多くすれば、養生効果の違いをはっきり捉えることができる。ただし、マスコン供試体の場合、材令はより長期のものを選択した方がよいといえる。

4. 打込み方向の影響

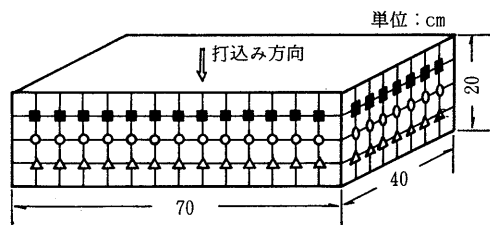
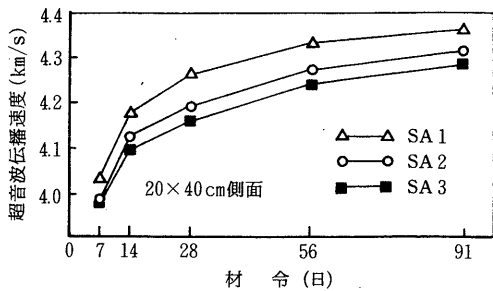
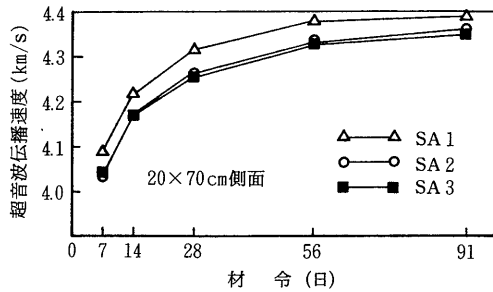
例えば高さ70cmの供試体では、コンクリートは高さ10cmごとに内部振動機で締固められ、次々と上の層が打込まれ締固められていくわけであるから、より下部にある



⑤各グループ平均値の経日変化

⑤測定点のグループ分け

第8図 養生効果の影響 (マスコン供試体：シリーズ2)



⑤各グループ平均値の経日変化

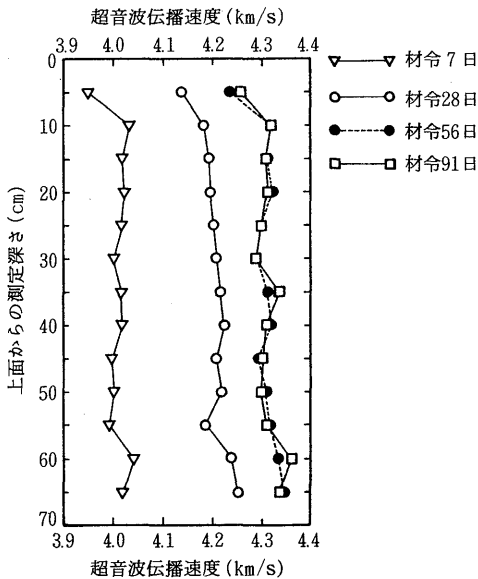
⑤測定点のグループ分け

第9図 打込み方向の影響 (シリーズ2：横打ち)

コンクリートは上部にあるものより締固めの効果を多く受けることは明かである。そこでシリーズ2の縦打ちと横打ちのマスコン供試体の超音波伝播速度の測定結果をもとに、深さ方向の強度の違いを検討してみた。

第9図には、横打ちマスコン供試体の大きい側面 (20

×70cm：測定長さ40cm)と小さい側面 (20×40cm：測定長さ70cm)の超音波伝播速度の材令91日までの経日変化を示したものである。厚さ20cmと薄いスラブ状のマスコン供試体でもはっきりと下部ほど強度が大きく、締固めの効果が大きくでていることが分かる。



第10図 打込み方向の影響 (シリーズ2: 縦打ち)

第10図は、縦打ちマスコン供試体の小さい側面 (20×70cm: 測定長さ40cm) の深さ5cmごとの材令91日までの超音波伝播速度の経日変化を示したものである。この面を選んだ理由は、その測定長さが大きい側面 (40×70cm: 測定長さ20cm) より長いから、超音波伝播速度の測定値の誤差が小さくなるからである。

この図より上部10cmの強度が他に比べ小さいことが分かる。これは締固め効果が期待できないだけでなく、振動締固めによって下部にある気泡が上昇するとブリージングによる水みちがこの部分に多く生じるためである。したがって、この部分の強度を回復させるには、振動締固め後に何らかの処理を施す必要があるが、その処理が必要となる程極端に小さいというほどのものではない。

結 論

マスコンクリートの強度発現の特徴を超音波伝播速度の測定結果に基づいてまとめてみると次のようになる。

- ① 内部温度はマッシブなコンクリートほど高くなり、また最終安定温度 (外気温) に達するまでの時間も長くなる。しかし、最高温度に達するまでの時間は、養生方法の違いや容積の大きさの影響を受けない。
- ② マッシブなコンクリートほど低い強度を示す。
- ③ マッシブなコンクリートの場合、養生効果は内部ほど行きわたりにくい。
- ④ 締固め効果は下部のコンクリートほどより多く受け、上部10cm厚さのコンクリートの強度はそれより下のものに比べ小さい強度となる。

あ と が き

マスコンクリートに関する多くの研究は、温度上昇に伴うひび割れ発生メカニズムとその抑制に向けられてきている⁴⁾。その重要性はいうまでもないが、実構造物が設計基準強度で設計され、その設計基準強度が、例えばφ10×20cmまたはφ15×30cmの小さな標準円柱供試体で求められていることを考えれば、より実構造物に近いマスコン供試体の強度発現の様子と、標準供試体のそれとの違いを十分把握しておくことも重要な側面である。

今後、供試体のサイズの違いによる温度上昇の違い、断熱部材で覆った場合の温度上昇の違い、反撥硬度、貫入抵抗などの非破壊試験によるマスコンクリートの強度推定を試みていきたい。

最後に本実験を遂行するにあたり、平成4、5年度における当研究室の専攻生の惜しみない御助力を賜った。ここに記して深甚なる感謝の意を表す。

引 用 文 献

- 1) 土木学会: コンクリート標準示方書《規準編》(平成3年版), pp.320-325
- 2) 伊東茂富: 新編コンクリート工学 (昭和52年新編第1刷), 森北出版 (東京), pp.81-83
- 3) 小林一輔: 最新コンクリート工学 (第3版), 森北出版 (東京), pp.70-71
- 4) 村田二郎: コンクリート技術《100講》(平成5年初版), 山海堂 (東京), pp.348-356