

論文 高温加熱を受けたコンクリートの内部温度分布と RC はりの爆裂・ひび割れ性状

羽原 和也^{*1}・長谷川 啓示^{*2}・藤本 雄^{*2}・栗原 哲彦^{*3}

要旨：爆裂のメカニズムの解明に有益な基礎データを得るために，爆裂時における内部温度分布，鉄筋コンクリートはりの爆裂・ひび割れ性状，昇温勾配と爆裂について実験的に検討した。その結果，からはコンクリート中の深さ 30mm 付近が気化温度に達すると爆裂が生じた。からは，鉄筋の加熱膨張によりコンクリートにひび割れが生じた場合，爆裂は生じず，そのひび割れから内部余剰水のしみ出しが生じた。からは，昇温勾配を変化させても，すべての供試体が炉内温度 460 程度で激しい爆裂を生じ，昇温勾配の違いによる爆裂性状の変化は確認できなかった。

キーワード：高強度コンクリート，高温加熱，爆裂，内部温度，昇温勾配

1. はじめに

コンクリートは，一般には不燃材・耐火材と認識され，広く土木／建築構造物に利用されてきた。しかし，近年の車両の大型化・交通量の増大・運搬物の多様化により，例えば交通事故により火災が発生すると，その火災は上記要因から大規模なものになる可能性が高まっている。これに加え，高強度コンクリートの実用化により，大規模火災時にはコンクリートの爆裂や大幅な強度低下を含む大きな被害が出るのが容易に推察できる。このため，国内外においてコンクリートの耐火性能に関する研究が盛んに行われるようになった。国内では，2000 年には日本コンクリート工学協会に「コンクリート構造物の火災安全性研究委員会」が，2002 年には土木学会に「コンクリート構造物の耐火技術研究小委員会」が相次いで設置され，コンクリートの耐火性能に関する議論が展開された^{1,2)}。海外においては，トンネル火災を想定した，実トンネル火災実験（EUREKA 火災実験³⁾）およびメモリアルトンネル火災実験⁴⁾）が実施され，トンネル火災時におけるコンクリートの耐火性が実験的に検討されている。

コンクリートの爆裂の要因は，コンクリート内部の水分の気化による内圧増加によるもの，熱応力の作用などであると指摘されている¹⁾。

本研究は，爆裂のメカニズムの解明に有益な基礎データを得ることを念頭に，爆裂時における内部温度分布，鉄筋コンクリートはりの爆裂・ひび割れ性状，昇温勾配と爆裂について実験的に検討した。

2. 爆裂時における内部温度分布（実験 1）

2.1 実験概要

(1) 供試体諸元および熱電対設置位置

水結合材比 20%の高強度コンクリートにより，100×100×1200mm のはり供試体を作製した。供試体本数は 2 本とした。表-1 に高強度コンクリートの示方配合を示す。セメントには早強ポルトランドセメントを使用し，さらに高強度を実現するために，シリカヒュームをセメントの一部として使用した。コンクリートの圧縮強度は 82.6N/mm²であった。なお，加熱時における含水率は 4.7%であった。

供試体内部に設定した K 型熱電対設置位置を図-1 に示す。後述の加熱方法により，最も受熱

*1 武蔵工業大学 工学部都市基盤工学科（正会員）

*2 武蔵工業大学 工学部都市基盤工学科（非会員）

*3 武蔵工業大学 工学部都市基盤工学科助教授 博士(工学)（正会員）

表-1 高強度コンクリートの示方配合

G _{max} (mm)	単位量(kg/m ³)					
	W	C	SF	S	G	Ad
20	103	533	97.6	767	871	25.7

SF：シリカヒューム

Ad：高性能 AE 減水剤

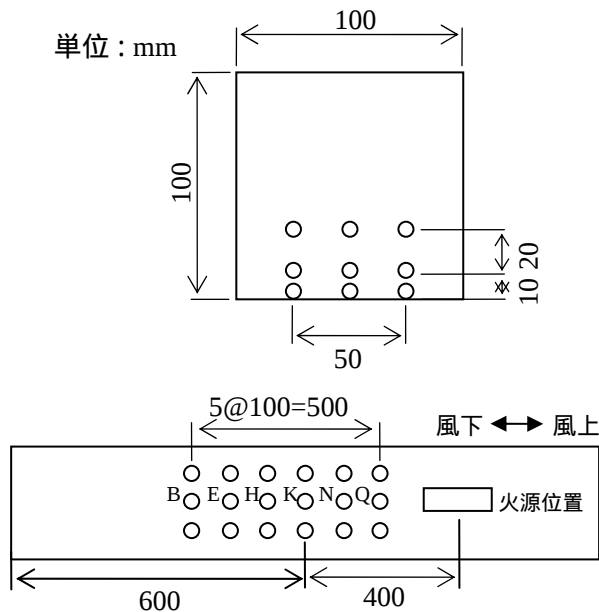


図-1 K型熱電対設置位置

温度が高くなる箇所を中心に、長手方向に6断面、また、その直角方向に3断面、1箇所につき高さ方向に3点（限りなく供試体下面に近い位置、下面より10mmの位置、下面より30mmの位置）の計54点にK型熱電対を埋め込んだ。

なお、供試体は2週間水中養生とし、養生後ただちに加熱実験を行った。

(2) 加熱方法

本実験では、著者らが以前実施した模擬トンネル内における灯油燃焼による加熱方法⁵⁾を採用した。その際、幅100mmの供試体が設置できるように模擬トンネルの幅を改良した。本実験で行った加熱実験状況を写真-1に示す。模擬トンネルとは、図-2に示すように耐火レンガでトンネル底面および側面を作製し、トンネル天井部に相当する部分に供試体を設置するものである。模擬トンネル内の温度を計測するために、図-3に示す位置にK型シーす熱電対を3つ設置した。なお、K型シーす熱電対は天井部コンクリートより下方10mm付近に設置した。灯油を

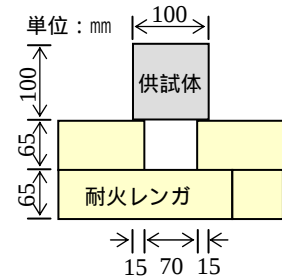


写真-1 加熱実験状況 図-2 模擬トンネル断面

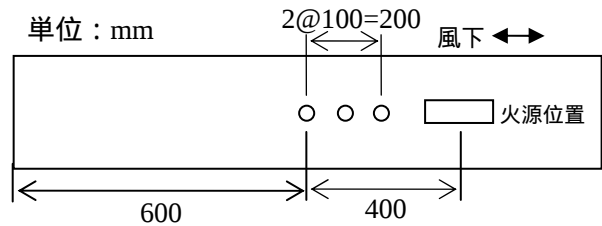


図-3 K型シーす熱電対設置位置

完全燃焼させ高温を得るためにトンネル入り口から送風を行った。風速はトンネル出口で2.0m/secとなるように調整した。

上記加熱方法により、模擬トンネル内温度は加熱開始から3分ほどで約650に達した。その後は、加熱開始から2時間最高温度を保持するものとした。しかし、爆裂が生じた際は、その時点で加熱を終了することとした。この加熱方法による昇温勾配は、メモリアルトンネル火災実験⁴⁾で計測されたトンネル内温度 - 時間曲線の初期勾配とほぼ一致するものである。

加熱実験終了後、爆裂およびひび割れ状況を確認し、適宜それらをスケッチした。

2.2 結果と考察

(1) 温度 - 時間曲線

実験は供試体2体に対して行ったが、ほぼ同様の結果が得られたため、ここではうち1体の結果を示す。

加熱後約21分で激しい爆裂が生じ、実験を中止した。加熱実験により得られた模擬トンネル内温度 - 時間曲線を図-4に示す。供試体長手方向中心に設置した熱電対の温度が最も高くなり、計画通りの加熱（3分ほどで約650）が実施されたことが確認できた。最高温度を示した位置から離れた位置では模擬トンネル内温度は低くなった。

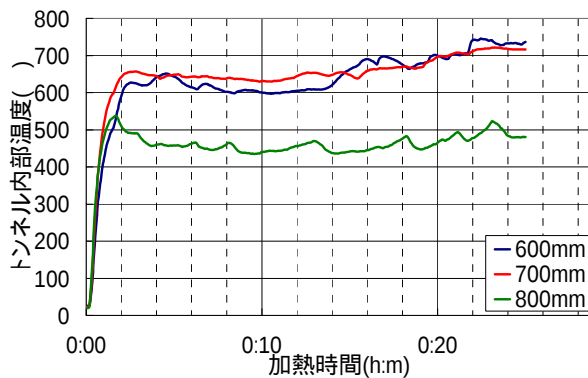
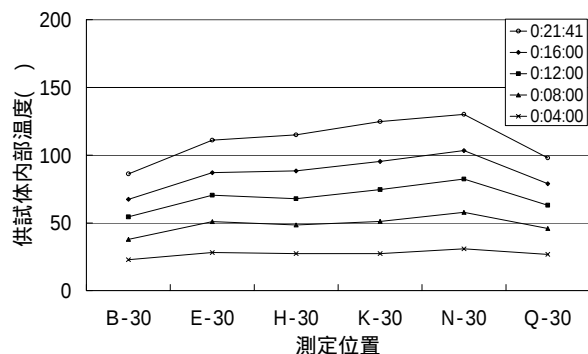
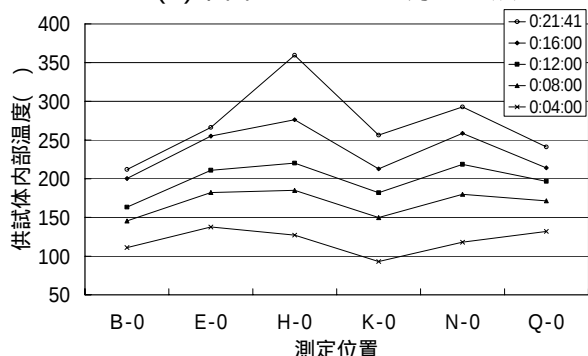


図-4 トンネル内部温度 - 時間曲線



(a) 下面より 30mm 上方の地点



(b) 下面

図-5 供試体長手方向の内部温度分布

図-5 に一例として断面中心位置における供試体長手方向の内部温度分布（爆裂直前まで）を示す。模擬トンネル内温度が最も高くなった付近で、内部温度も高くなり、風上側（図中の右側）の温度は小さくなった。最高温度を示した箇所より風下側（図中の左側）においても、直接炎が当たることはないが、コンクリート中の熱伝導により温度変化が認められた。

(2) 爆裂状況

爆裂箇所は、供試体長手方向中心位置付近であった。加熱実験後の爆裂状況を写真-2 に示す。図-4 より爆裂した箇所の爆裂直前の内部温度は、下面近傍で 360℃、それより上方 30mm の地点で



写真-2 加熱後の爆裂状況

130℃であった。130℃は水の気化温度にほぼ一致している。つまり本実験では、加熱表面から徐々に伝わった熱により、供試体内部の余剰水が下面から徐々に気化していき、気化領域が下面 30mm 程度までに達したとき、内部圧力がコンクリート強度を超え爆裂に至ったと推察される。

3. 鉄筋コンクリートはりの爆裂・ひび割れ性状（実験 2）

3.1 実験概要

(1) 供試体諸元および熱電対設置位置

実験 1 と同様の高強度コンクリート（圧縮強度 82.6N/mm^2 ，含水率 4.7%）により、 $100 \times 100 \times 1200\text{mm}$ の鉄筋コンクリートはりを作製した。供試体の概略図を図-5 に示す。断面は複鉄筋構造とし、引張鉄筋には SD295 の D10 を 2 本、圧縮鉄筋には同じく SD295 の D6 を 2 本配筋した。後述の加熱実験において鉄筋の受熱温度を高くするため、引張鉄筋のかぶり厚を 10mm と小さくした。なお、実験 2 では後述の加熱実験後の曲げ載荷試験をスパン 700mm の 2 点載荷実験を行うため、図-6 に示す位置に配筋した。また、鉄筋コンクリートはりを曲げ破壊させるため、スターラップ（D6，ピッチ 100mm）を配置した。

実験 2 では鉄筋の受熱温度を確認するため、受熱温度が最も高くなると予想される供試体中心部の鉄筋近傍に K 型熱電対を 25mm 間隔で設置した。引張鉄筋近傍の熱電対の設置位置を図-7 に示す。なお、この熱電対設置区間は加熱後の載荷試験において純曲げ区間となる。

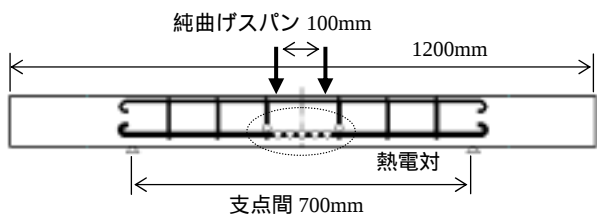


図-6 RC はり供試体概略図

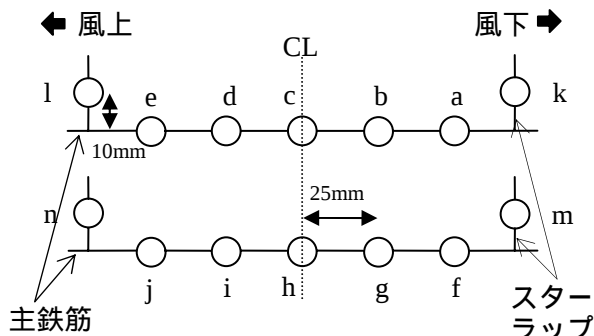


図-7 埋め込み熱電対設置位置

なお、供試体の養生条件および加熱実験時の材齢は、実験 1 と同様である。

(2) 加熱方法

加熱に使用するシステムは、実験 1 と同様とした。ただし、加熱時間を 1 時間および 2 時間の 2 ケースとした。加熱終了後、模擬トンネル内部温度が 100 となるまで送風は継続したまま冷却し、その後、載荷試験まで室内に放置した。なお、加熱途中に爆裂が生じた際は、実験 1 と同様に加熱を終了することとした。なお、模擬トンネル内の温度計測位置は実験 1 と同様である。加熱実験終了後、爆裂およびひび割れ状況を確認し、適宜それらをスケッチした。

(3) 加熱後の曲げ載荷試験

加熱 1 ヶ月後に、はり供試体をスパン 700mm の 2 点載荷実験を実施した。支点および載荷位置を図-6 に示す。荷重、載荷点変位（2 点）および支点沈下（2 点）を計測した。さらに、載荷試験後、載荷により新たに生じたひび割れの確認を行った。

3.2 結果と考察

(1) 温度 - 時間曲線

実験 1 と同様、実験は各ケース供試体 2 体に対して行ったが、ほぼ同様の結果が得られたため、ここではうち 1 体の結果を示す。

図-8 に最高温度を示した模擬トンネル内部の

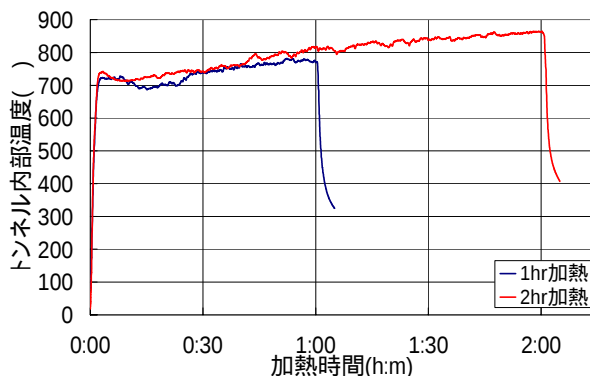


図-8 トンネル内部温度 - 時間曲線

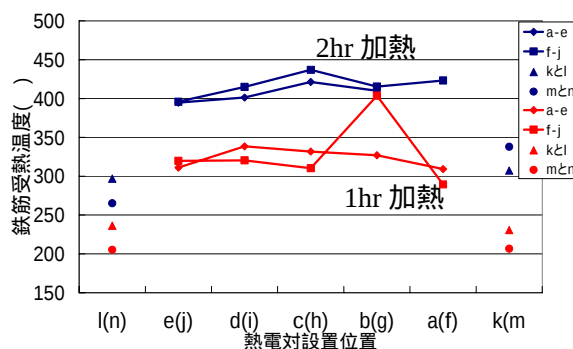


図-9 鉄筋近傍温度分布

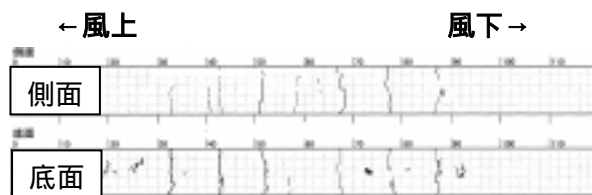


図-10 加熱後のひび割れ(2 時間加熱)

温度 - 時間曲線を示す。多少のばらつきはあるが、実験 1 とほぼ同様の初期勾配を持った温度 - 時間曲線が得られた。後に行う曲げ載荷試験における純曲げ区間で最も高い温度となった。

図-9 に引張鉄筋近傍に設置した熱電対により計測された温度分布図を示す。鉄筋近傍の温度も加熱開始から時間とともに上昇していき、加熱時間 1 時間でおおよそ 340 となり、加熱時間 2 時間で最高 437 となった。

(2) 爆裂・ひび割れ状況

加熱時間にかかわらず、加熱後のひび割れ性状はほぼ同一であったため、図-10 に一例として 2 時間加熱後のひび割れ状況を示す。実験 2 では、実験 1 とほぼ同様のトンネル内温度 - 時間曲線を得られているにもかかわらず、爆裂は生じなかった。はり供試体では、加熱から 5 分以内で



写真-2 水のしみ出し

小さな破裂音を発生した。はり供試体を観察すると、側面に鉛直方向にひび割れが発生していることが確認できた。このひび割れ位置はほぼスターラップ位置に相当しており、受熱により主鉄筋およびスターラップが膨張がしたために生じたものと考えられる。さらに、加熱を続けると、このはり側面に生じたひび割れから水分がしみ出しているのが観察された。水分がしみ出している様子を写真-2 に示す。コンクリートの爆裂性状は、コンクリート強度、含水率、供試体寸法、内部の配筋状況、加熱状況などにより影響を受ける。ここでは、下面近傍の内部余剰水の気化によりコンクリート内部の圧力が上昇し、これにより他の内部余剰水が側面に生じたひび割れ部より押し出されたと考えられる。結果、ひび割れからの内部余剰水のしみ出しが内圧を低下させ爆裂を抑制する一因となったと考えられる。これらより、これまで指摘されているように爆裂防止には内圧の上昇を緩和できる圧力の逃げ道をコンクリート内部に設置しておくことも有効であるとわかる。

(3) 荷重 - 変位曲線とひび割れ状況

図-11 に加熱後に行った載荷試験により得られた荷重 - 変位曲線を示す。図中には比較のために非加熱のはり供試体の載荷結果も併記する。加熱によりすでにひび割れが生じているため、荷重 - 変位曲線の初期勾配は鉄筋が降伏するまで直線的であることがわかる。非加熱のはりのように曲げひび割れ発生による初期勾配の変化

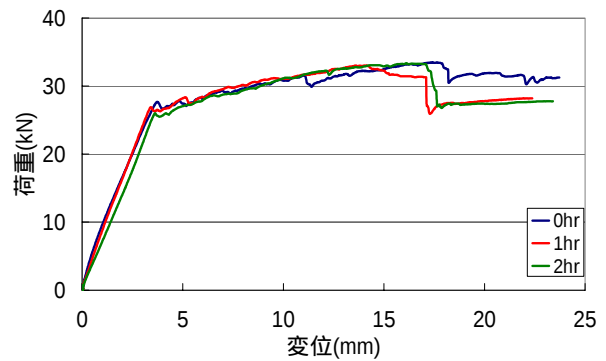


図-11 荷重 - 変位曲線

は認められなかった。鉄筋降伏後は、いずれのはり供試体も非加熱のはり供試体と同様の挙動を示し、最後は、上部コンクリートの圧壊により終局を向えている。最大荷重も差は認められなかった。これは鉄筋の受熱温度が最高で 450 程度であったため、鉄筋が自身の材料特性を変化させるだけの十分な熱を受けなかったためである。はり供試体に生じたひび割れに関しては、加熱により生じたひび割れが載荷とともに開口幅が広がっていく過程が観察された。載荷により新たに生じたひび割れは少なく、モーメントスパン内で 1 本程度、せん断スパン内では載荷点に向う斜めひび割れが新たなひび割れとして観察された程度であった。

4. 昇温勾配と爆裂 (実験 3)

4.1 実験概要

(1) 供試体

実験 1 において爆裂が加熱初期で観察されたため、加熱面の温度と内部温度との差が爆裂の発生に影響を与えているのではないと考え、昇温勾配を制御できる電気炉を利用して、加熱実験を試み、爆裂の発生の有無について検討した。電気炉の大きさ (炉内寸法: 幅 200 × 高さ 200 × 奥行 250mm) から供試体寸法は $\phi 50 \times 100\text{mm}$ とした。供試体本数は、後述の 3 ケースに対し、1 ケース 3 本とした。コンクリートには、実験 1 で使用した高強度コンクリートから粗骨材を抜いた高強度モルタルを用いた。高強度モルタルの示方配合を表-4 に示す。非加熱の高強度モルタルの圧縮強度は 83.6N/mm^2 である。

表-4 高強度モルタルの示方配合

単位量(kg/m ³)				
W	C	SF	S	Ad
162	804	147	1156	33.3

SF：シリカヒューム

Ad：高性能 AE 減水剤

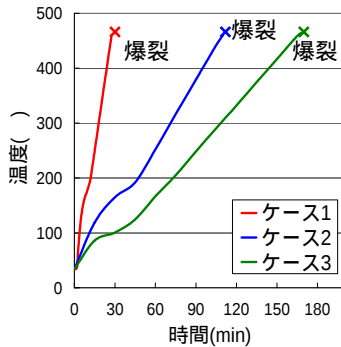


図-12 炉内温度 - 時間曲線

なお、供試体の養生条件および加熱実験時の材齢は、実験 1 と同様である。

(2) 加熱方法

電気炉内に円柱供試体を入れ、30 分で 500（ケース 1）、120 分で 500（ケース 2）、180 分で 500（ケース 3）の 3 つの昇温勾配にて加熱実験を行い、爆裂の発生について検討した。なお、爆裂による衝撃で炉が損傷するのを防ぐため金網内に供試体を入れ、電気炉内に設置した。

4.2 結果と考察

図-12 に電気炉内の温度 - 時間曲線を示す。いずれの場合も、炉内の温度が 460 程度で激しい爆裂を生じた。爆裂後の供試体を写真-3 に示す。本実験の結果からは、爆裂の発生に与える昇温勾配の影響は確認されなかった。

5. まとめ

以上より、実験 1 から 3 により得られた知見を以下にまとめる。

- (1) 無筋の高強度コンクリートを加熱すると、加熱開始から 21 分ほどで激しい爆裂が生じた。爆裂直前の内部温度は、下面近傍で 350、それより上方 30mm の地点で 130 であった。
- (2) 高強度コンクリートを用いた鉄筋コンクリートはりの加熱実験では爆裂は全く生じな

かった。また、スターラップ位置にひび割れが生じ、そこから内部余剰水のしみ出しが観察された。このはり側面に生じたひび割れからの内部余剰水のしみ出しがコンクリートの内圧を緩和し、爆裂を抑制する一因となったと考えられる。

- (3) 加熱後の鉄筋コンクリートはりの載荷試験では、最大荷重に大きな差はなかった。これは鉄筋が受けた受熱温度が最大でも 450 程度であったためである。また、載荷により新たに生じたひび割れは数本程度であり、ほとんどが加熱時に生じたひび割れが開口し、最終的には圧壊に至った。
- (4) 高強度モルタルによる昇温勾配と爆裂性状の違いに関しては、いずれの供試体においても炉内温度 460 程度で激しい爆裂が生じ、昇温勾配による影響を確認できなかった。



写真-3 爆裂後の供試体（ケース 1）

参考文献

- 1) 社団法人 日本コンクリート工学協会：コンクリート構造物の火災安全性研究委員会報告書，2002.6
- 2) 社団法人 土木学会：コンクリート構造物の耐火技術研究小委員会報告ならびにシンポジウム論文集，コンクリート技術シリーズ 63，2004.10
- 3) EUREKA - PROJECT EU 499：FIRES IN TRANSPORT TUNNELS REPORT ON FULL-SCALE TESTS, Editor：Studiengesellschaft Stahlanwendung e.V., 1995.11
- 4) Massachusetts Highway Department, Bechtel/Parsons Brinckerhoff：Memorial Tunnel Fire Ventilation Test Program Test Report, Central Artery/Tunnel Project, 1995.11
- 5) 新名正英，西元守人，栗原哲彦，吉川弘道：模擬トンネルを用いた火害によるコンクリートの強度特性評価，土木学会第 60 回年次学術講演会講演概要集，5-419，pp.837-838，2005.9