

新幹線の巨大地震に対する備え

明星大学理工学部総合理工学学科機械工学系 教授
元 公益財団法人鉄道総合技術研究所

石田 弘明 *Hiroaki Ishida*

1. 東北地方太平洋沖地震での東北新幹線の被害

2011年3月11日14時46分、最大震度7の東北地方太平洋沖地震が発生しました。このとき東北新幹線では、東京駅～新青森駅間の713.7kmの区間で、営業列車26本と試運転列車1本が運転中でしたが、試運転列車の車輪4輪が脱線した以外はすべて安全に停車し、乗客、乗員に怪我はありませんでした。また、この本震と4月7日の余震により、電化柱の折損・傾斜・ひび割れ約540箇所、高架橋柱などの損傷約100箇所など、設備に甚大な被害が発生しましたが¹⁾、鋭意復旧作業が進められ、49日後の4月29日には全線で運転を再開しました。

わが国観測史上最大の地震で人的被害を出すことなく、また、早期復旧を果たすことができたのは、過去の経験を活かしつつ、災害を克服するためのたゆまぬ努力が続けられてきた結果にほかなりません。

本稿では、鉄道、特に高速列車を運転する新幹線の巨大地震に対するこれまでの取り組みや、最近の研究開発事例について紹介します。

2. 減災という考え方と具体的な取り組み

鉄道は開業以来自然災害を防ぐために防災技術の開発と導入を進めてきました。しかし近年は、兵庫県南部地震(1995年1月17日)や新潟県中越地震(2004年10月23日)などでの経験を踏まえて、災害を防ぐ防災から災害を減らす減災へと考え方を見直し、効果的に対策を講じながら巨大地震に備えています。

減災とは、あらかじめ被害の発生を想定した上で、その被害を低減させるようにすることをいい、特に人命を守ることが最優先の課題となります。

新幹線では、鉄道システムとして総合的に減災を図るべく、設備対策、地震検知・警報システム、走行安全性の確保という三つの観

図1 新幹線の地震対策

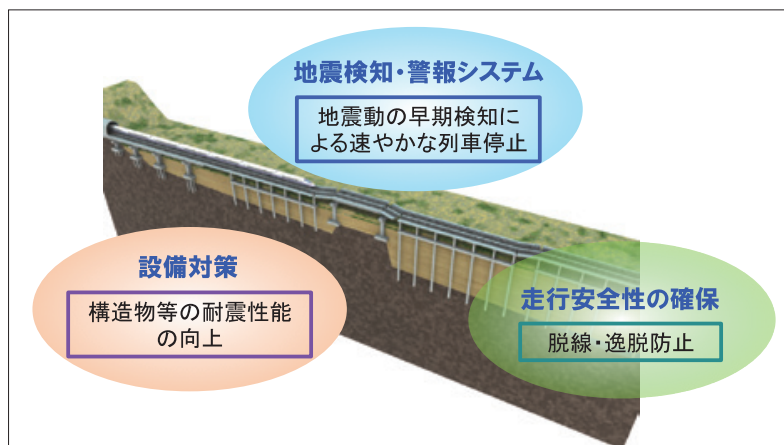
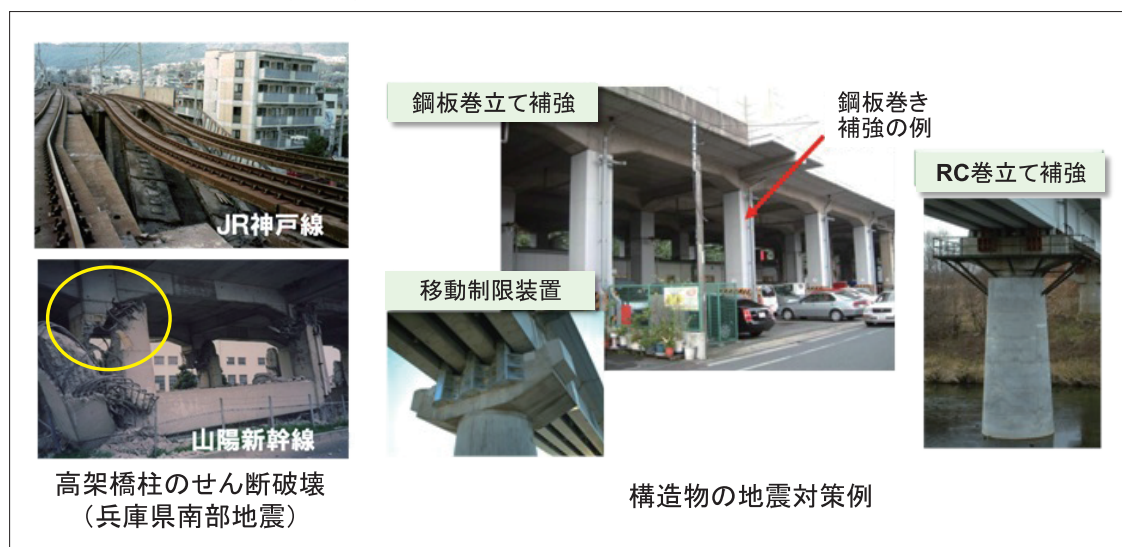


図2 高架橋柱のせん断破壊と地震対策の例



点から地震対策に取り組んでいます²⁾(図1)。

(1)設備対策

兵庫県南部地震では、柱のせん断破壊により高架橋が崩落するなど、甚大な被害が発生しました。このため、柱のまわりに鋼板を巻く、鋼板巻立て補強などの耐震対策が順次、施されてきました(図2)。

また、鉄道構造物の設計に関しては、震度5程度の中規模地震では損傷せず、震度6強～7の大規模地震では速やかに復旧できる程度の損傷を許容することを基本とした2段階の耐震性能照査型設計法³⁾が整備されました。

このほか、盛土の補強や液状化対策、トンネルの耐震対策、軌道の強化も行われています。

(2)地震検知・警報システム

新幹線には、地震の主要動が沿線に到達す

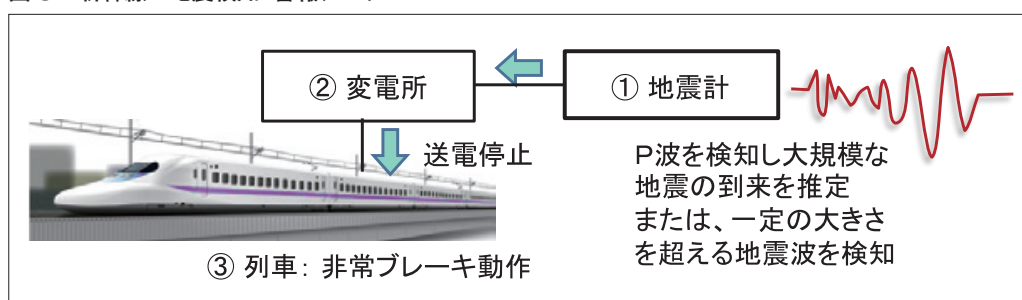
る前に地震動を検知し、列車を速やかに停止させるシステムが導入されています。これは、地震動がある一定の大きさを越えた場合に变电所からの送電を停止し、停電を検知した列車が瞬時に非常ブレーキを動作させて減速するというものです(図3)。

現在、P波と呼ばれる初期微動の数秒間のデータから震央※1の位置と地震のエネルギーの大きさを表すマグニチュードを推定し、さらに地震動の影響範囲を推定する早期地震検知・警報システムが稼働しています⁴⁾(図4)。

なお、地震計は变电所などを中心に線路に沿ってほぼ一定間隔に設置されているほか、海洋型地震の震源により近い海岸線にも設置されています。

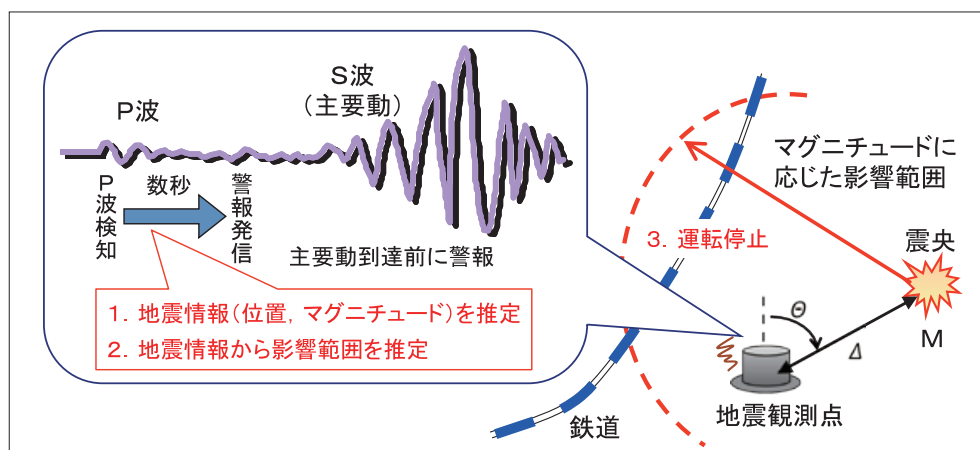
2004年新潟県中越地震以降、列車が停電を検知してから非常ブレーキを動作させるまで

図3 新幹線の地震検知・警報システム



※1
震央
震源の真上の地表面上の点のこと。

図4 早期地震検知・警報システムの概念



の時間を短縮し、列車の停止距離をさらに縮める対策も実施されました。

(3)走行安全性の確保

新潟県中越地震での上越新幹線の脱線を受けて、地震時の脱線対策と巨大地震により万が一脱線した場合の逸脱対策が検討され、順次施工が進められています。

逸脱とは、脱線した列車が軌道から大きくはみ出すことをいいます。JR各社がそれぞれの設備や輸送状況に合わせて導入を進めている脱線・逸脱対策の主な例を表1に示します⁵⁾。

例えばJR東日本は、新潟県中越地震の際に列車が脱線したものの、先頭車両の排障器^{※2}などがレールを挟み込んで軌道上からの逸脱

を防ぎ大きな被害を免れたという現場調査の結果⁶⁾を踏まえて、L型車両ガイドを開発し、すでに新幹線の全車両に取り付けています。

巨大地震が起きたときには、設備や軌道が破壊されなくても、大きな揺れによって列車が脱線する可能性が皆無ではありません。

鉄道総合技術研究所（以下、鉄道総研と記す）では、地震動を受けた鉄道車両の脱線を解析する車両運動シミュレータを開発し、車輪がレールから離れた後に再びレール上に戻り走行を続けるような動きをコンピュータ上で再現しました。

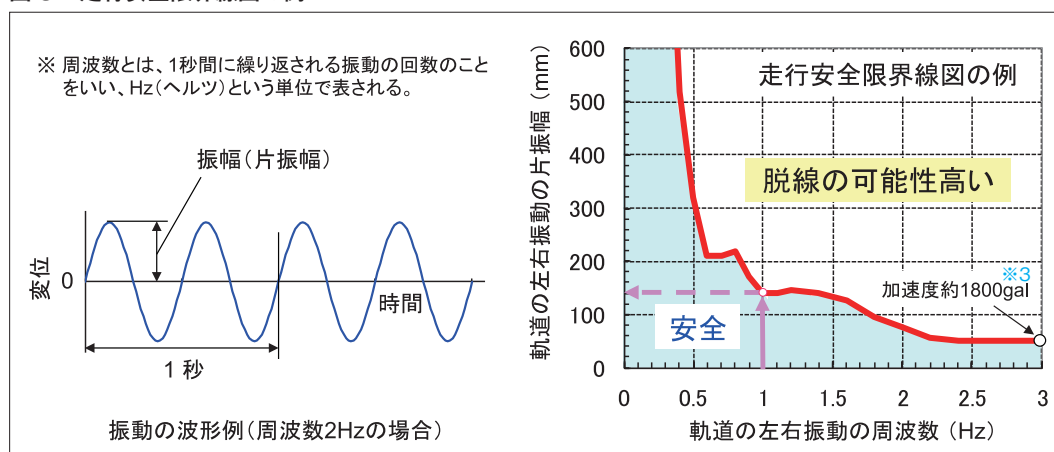
その後、新幹線用台車を用いた半車両を振動台に載せ、上下・左右に大きく揺する試験を行って解析の妥当性を検証しました。前後、

表1 新幹線脱線・逸脱対策の主な例

JR東日本	JR東海	JR西日本
地震時に列車が万一脱線しても、車両の車軸軸箱に取り付けたL型のガイドにより車両がレールから大きくはみ出すことを防止する。	脱線防止ガードにより地震時の列車の脱線を極力防止する。また、万一脱線した場合には、車両に取り付けた逸脱防止ストッパが脱線防止ガードに引っ掛かることにより、大きくはみ出すことを防止する。	地震時に列車が万一脱線しても、レールの内側に敷設した逸脱防止ガードに列車の車輪が引っ掛かることにより、大きくはみ出すことを防止する。
 レール転倒防止装置 L型車両ガイド	 逸脱防止ストッパ 脱線防止ガード	 逸脱防止ガード

※2 排障器
鉄道車両に装着されている、線路上の障害物をはね避け、車体下にまきこんで運転に支障をきたすことのないようにするためのもの。

図5 走行安全限界線図の例



左右、上下に揺れる地震動のうち、脱線に大きな影響を及ぼすのは、車両の進行方向に直角な左右方向の振動です。

地震時の脱線は周波数がおおむね0.3～3Hzの左右振動によって引き起こされ、左右の車輪が交互に上昇してレールから離れ脱線に至ること、1Hz前後を境に車両の挙動が変わることなどが解析により明らかになりました⁷⁾。

また、地震による左右振動の周波数に応じてどのくらいの振幅(揺れの大きさ)までなら脱線に至らないかを表す走行安全限界線図(図5)を作成し、地震動で揺すられたときの車両脱線に対しては、走行速度の影響は小さいことなどを示しました。

3. 東北地方太平洋沖地震での経験と新たな取り組み

(1) 地震対策

東北地方太平洋沖地震を受けて、鉄道構造物の設計に用いる地震動が見直されました⁸⁾。また、電化柱折損などの被害が広域多所に及んだことから、新設電化柱への鋼管柱の適用や電車線路設備耐震設計指針の改訂も進められています。

東北地方太平洋沖地震は、宮城県沖から茨城県沖に至る複数の断層が断続的に破壊した

継続時間が極めて長い地震で、観測された地震動波形を見ると、巨大地震にもかかわらず前述のP波初動部の振幅増加が非常に緩やかでした。

このため、気象庁の緊急地震速報では地震のエネルギーを過小に評価してしまい、最初のP波を検知してから116.8秒を経過した後も、予測値はマグニチュード8.1、最大震度6弱にとどまりました⁹⁾。

このような経験を踏まえ、鉄道総研では早期地震検知・警報システムでの震央やマグニチュードの推定を高度化し、広域震源の即時把握と強震動予測の精度向上を図る手法の開発に取り組んでいます。さらに、海底地震計を鉄道にも活用すべく、国および鉄道事業者が協議と検討を進めています。

このほか、東北地方太平洋沖地震の発生後、広範囲で長時間にわたり停電が発生したことから、情報伝送経路や通信機器用電源のバックアップなど、情報伝達手段の多様化・堅牢化も重要な課題となりました。

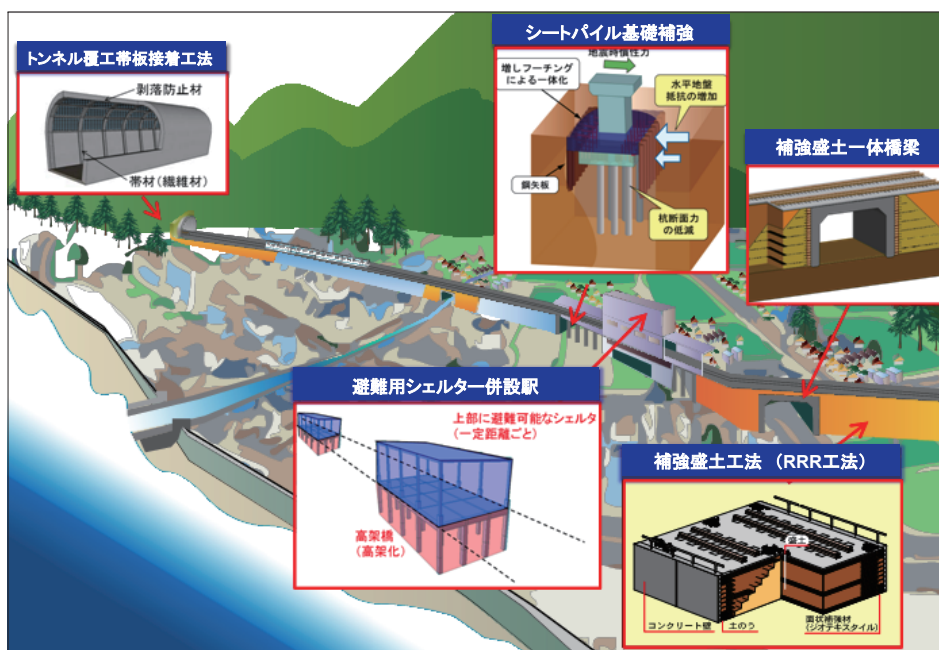
(2) 津波対策

東北新幹線は海岸線から離れた内陸部に建設されたため、東北地方太平洋沖地震で発生した津波による直接の被害はありませんでした。

しかし、東北地方沿岸部の在来線は、5列

※3 gal(ガル)
地震動の加速度の大きさを表すのに用いられる単位でcm/s²のこと。重力加速度は約980gal。

図6 津波に強い鉄道施設構造による復旧・復興技術



車が津波に押し流されるなど甚大な被害に遭い¹⁰⁾、地震から2年を経た現在でもまだ復旧していない線区があります。

鉄道総研では、復興に際し地震や津波に強い鉄道とするための具体的な方策として、防潮堤としての機能も期待できる補強盛土工法（RRR工法：Reinforced Railroad with Rigid Facing-Method）を適用した盛土や補強盛土一体橋梁などの施工を提案しました¹¹⁾（図6）。

また、鉄道構造物の特性を考慮した上で統一的な考え方に基づいて浸水マップを作成する手法、断層の破壊領域と津波の規模をリアルタイムに予測する手法についても検討が進められています。

4. 巨大地震に備えるための研究開発

すでに述べた新たな課題とともに、今後取り組むべき研究開発としては、①設備被害の最小化を目指した耐震対策（鉄道システム全体としてバランスの良い耐震対策）、②地震時走行安全性のさらなる向上、③早期復旧が

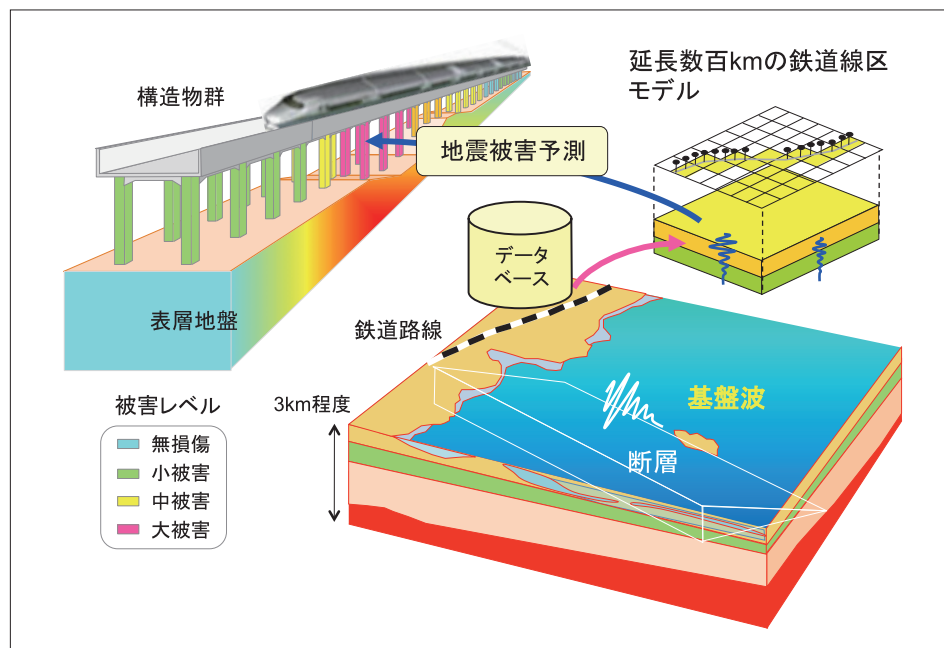
可能な鉄道システム、④耐震対策に対するマネジメント手法があります。例えば②については、車両の揺れを抑えるために台車に取り付けられているダンパーの特性を変えて、地震動を受けたときに車両をより脱線しにくくする研究開発が行われています¹²⁾。

また、鉄道構造物の状態を即座に知り③早期復旧を図るため、構造物の地震時挙動のモニタリング技術を開発し、さらにリアルタイムに損傷を把握できるリアルタイムハザード評価へと発展させていく必要があります。

今後は、発生・伝搬する地震動、地震動を受けた構造物・軌道の応答と列車の走行安全性を精度良く予測し、リスク評価手法を用いて対策優先度を決定する手法の研究が①、④のために重要と考えられます。

このような予測・評価技術の開発によって、各種地震対策の効果についても的確に評価できるようになります。現在すでに、鉄道沿線の地盤や構造物の情報をデータベース化し、数百kmに及ぶ鉄道線区のモデルを自動作成して地震被害を推定する「地震災害シミュレータ」の研究開発が進められています¹³⁾（図7）。

図7 地震災害シミュレータ



5. おわりに

本稿では、新幹線の巨大地震に対する備えについて、これまでの経緯と、対策や研究開発の主な事例を網羅的に紹介しました。新幹線をはじめとする鉄道の安全・安定輸送を確保するには、過去の災害から得た知見、それを基に開発された技術、様々な情報を駆使して弱点箇所を抽出し、対策を地道にかつ継続的に行っていくことが肝要です。

また研究開発には、現象の解明と予測（地震の発生・伝搬、構造物の破壊、脱線など）、安全性の評価（作用、応答、耐力に基づく指標、リスク評価手法など）、安全確保のための対策といったフェーズがあります。このような視点から見ると、特に巨大地震に関しては、現象解明、予測、評価という基礎的な研究をさらに深化していく必要があるといえます。

東海・東南海・南海地震（三連動地震）や首都直下地震の発生が懸念されている今、地震被害を最小限に食い止め、人命を守るための減災に向けた研究開発がますます重要になっています。

参考文献

- 1) 国土交通省, “東日本大震災による東北新幹線の被害と復旧状況”, <http://www.mlit.go.jp/common/000141656.pdf>, (2011)
- 2) 鉄道総合技術研究所, “巨大な自然災害に備える”, 第24回鉄道総研講演会, <http://www.rtri.or.jp/events/kouen/2011/index.html>, (2011)
- 3) 鉄道総合技術研究所, “鉄道構造物等設計標準・同解説, 耐震設計”, 丸善, (1999)
- 4) 山本俊六, 佐藤新二, “鉄道における早期地震警報システムの変遷”, RRR, Vol.67, No.3 (2010)
- 5) 国土交通省, “「新幹線脱線対策協議会」の結果について”, http://www.mlit.go.jp/report/press/tetsudo07_hh_000026.html, (2011)
- 6) 東日本旅客鉄道株式会社, “新潟県中越地震による新幹線の脱線現象の解明と脱線対策について”, http://www.jreast.co.jp/press/2005_2/20051020/no_5.html, (2005)
- 7) 熊谷則道, 石田弘明, “地震に対する鉄道車両の走行安全性解析”, 日本機械学会誌, Vol.109, No.1048 (2006)
- 8) 鉄道総合技術研究所, “鉄道構造物等設計標準・同解説, 耐震設計”, 丸善, (2012)
- 9) 気象庁, “平成23年度災害自然現象報告書「平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震」”, http://www.jma.go.jp/jma/kishou/books/saigaiji/saigaiji_201101/saigaiji_201101.html
- 10) 東北の鉄道震災復興誌編集委員会, “よみがえれ! みちのくの鉄道”, <http://www.tbt.mlit.go.jp/tohoku/td/td-sub100.htm>, (2012)
- 11) 鉄道総合技術研究所, “鉄道の震災復旧・復興に向けた技術提案”, (2011)
- 12) 宮本岳史, “地震時の車両脱線防止に向けた取り組み”, RRR, Vol.69, No.3 (2012)
- 13) 涌井一, 石田弘明, “鉄道シミュレータの構築”, RRR, Vol.68, No.1 (2011)

いしたひろあき

1982年東京大学工学部産業機械工学科卒業、同年日本国有鉄道入社、1987年(財)鉄道総合技術研究所入所。以後、鉄道車両の運動性能・走行安全性向上に関する研究開発に従事。原稿執筆時、(公財)鉄道総合技術研究所鉄道力学研究部長。2013年4月より現職。日本機械学会会員(第90期交通・物流部門長)、博士(工学)。