

博士學位論文

内容の要旨
および
審査結果の要旨

第 7 編

平成 15 年度

高知工科大学

はしがき

本編は、学位規則（昭和28年4月1日文部省令第9号）第8条による公表を目的として、平成15年度内に本学において博士の学位を授与した者の、論文要旨の内容および論文審査の結果の要旨を収録したものである。

学位記番号に付した甲は、学位規則第4条第1項（いわゆる課程博士）によるものであることを示す。

（平成16年5月発行）

< 目 次 >

甲第26号	本郷 宏通	多層溶接したオーステナイト・ステンレス鋼溶接継手の・・・ 1 クリープによる変形と破壊 Deformation and Fracture under Creep Loading for Austenitic Stainless Steel Welded Joints by Multi-Layer Welding
甲第27号	新田 紀子	低温イオン注入によって化合物半導体表面に形成される・・・ 5 セル状構造の成長機構の解明と構造制御 Cellular defect structure on the surface of compound semiconductor ion implanted at low temperature - Formation mechanism and application to nano-fabrication -
甲第28号	四宮 葉一	他動的揺動刺激技術の運動療法機器への応用に関する研究・・・ 12 A study about the continuous passive motion technology applying to the therapeutic exercise machine
甲第29号	金子 哲弥	高速イオンビームを用いた次世代集積回路用材料評価法・・・ 16 の研究 Development of Analytical System using Swift Ion Beam and its Application to Characterization of Next Generation ULSI Materials
甲第30号	羽場 真一	半導体集積回路プロセス用研磨剤の開発・・・ 20 Development of polishing slurry for semiconductor integrated circuit fabrication process
甲第31号	林 秀樹	自律分散型ネットワークQoS制御方式に関する研究・・・ 24 A Study on A Network QoS Control Scheme Based on Autonomous Distributed Control
甲第32号	中平 拓司	Content Delivery Networksにおける映像コンテンツ配信時・・・ 28 の品質維持制御に関する研究 Study on Sustaining The Quality of Video Content Retrieved through Content Delivery Networks

甲第33号	Jirapong Pipattanapiwong	Development of Multi-Party Risk and Uncertainty 3 2 Process for an Infrastructure Project (社会基盤整備事業のための複数主体リスク・不確実性 マネジメントプロセスの開発)
甲第34号	Supakit Swatekititham	Computational Model for Chloride Concentration at 3 7 Surface of Concrete Under Actual Environmental Condition (実環境においてコンクリート表面に蓄積する塩化物イオン量 の算定法)
甲第35号	若生 和夫	圧入支持杭設計法の提案 4 1 Approach to the 'Press-in' pile design method
甲第36号	飯田 永久	地方における効果的な起業家支援方法に関する研究 5 0 A study on how to effectively support entrepreneurs in local Japan
甲第37号	若木 宏一	有料放送事業における顧客離反の研究 5 7 A study of customer defection in pay television business
甲第38号	塚原 和幸	過疎地域への新広域学校システム導入の提案 6 0 Proposal of New School-Education System for Under-Populated Area
甲第39号	尾嶋 茂久	創知の杜の提案とその実現方法 6 3 Proposal of New Community (So-Chi) and its New Method for Actualization

氏名(本籍)	ほんごう ひろみち 本郷 宏通 (長野県)
学位の種類	博士(工学)
学位記番号	甲第26号
学位授与年月日	平成16年3月22日
学位授与の要件	学位規則第4条第1項
研究科・専攻名	工学研究科・基盤工学専攻
学位論文題目	多層溶接したオーステナイト・ステンレス鋼溶接継手のクリープによる変形と破壊 Deformation and Fracture under Creep Loading for Austenitic Stainless Steel Welded Joints by Multi-Layer Welding
論文審査委員	(主査) 高知工科大学 教授 門馬 義雄 高知工科大学 教授 谷脇 雅文 高知工科大学 教授 坂本 東男 大阪大学 教授 西本 和俊 高知大学 教授 内田 昌克

論文内容の要旨

溶接継手を含む高温構造のクリープ強度評価には未解明の点が多い。その理由として、溶接継手は、母材部、熱影響部(HAZ)および溶接金属部からなる複合的な不均質部材であり、それぞれの材料特性が異なるため、高温のクリープ条件下においても、これらの特性の違いに起因するクリープ変形をするものと考えられる。しかし、通常のクリープ試験では試験片の標点間変位を伸び計により計測する方法を採用しており、溶接継手の変形量は試験片の標点距離に占める、母材部、熱影響部(HAZ)および溶接金属部の割合に依存する。また、厚板を対象とする多層溶接では、溶接時の塑性拘束とパスごとに溶接施工の際に受ける溶接熱サイクルの数が異なるため、溶接金属の材料特性が積層間で不均一になる。特に、オーステナイト・ステンレス鋼の大型構造物では溶接後熱処理を行わないで使用されるため、溶接施工の際に生じる積層間の材料特性の違いが構造物の強度評価に直接影響を与えるものと考えられる。

そこで、本研究では高速増殖炉原型炉「もんじゅ」の炉容器相当材の SUS304 鋼の溶接継手および将来の高速実証炉の一次系構造材料として開発された低炭素・中窒素型 316 鋼(316FR)の多層溶接継手を対象として、溶接継手の高温強度特性評価の精度向上を図るために、前述のように不均質な部材で構成される溶接継手のクリープ変形と破壊挙動を調べ、各部の不均一な材料特性との関連を明らかにすることを目的に以下の検討を行った。

多層溶接継手における溶接まま材について硬さ分布を求め金属組織観察を行い、金属組織の材料特性に及ぼす影響を明らかにした。次に、全積層を含んだ大形溶接継手試験片のクリープ変形および破壊挙動を調べ、溶接金属部内の微細組織がクリープ特性評価に及ぼす影響について検討した。その結果溶接金属部でも材料特性が不均一であることが判明した。そこで、ミニチュア試験片を用いて高温強度特性の局所変動を明らかにし、それらのデータ

を基に溶接継手の有限要素法 (FEM) による弾塑性クリープ解析を行った。さらに、溶接金属内組織の長時間クリープに伴う変化からクリープ損傷を評価する手法について検討した。

まず、304 鋼および 316FR 鋼の溶接継手について不均一な溶接部の組織が長時間クリープ特性評価に及ぼす影響を調べた。304 鋼 (厚さ=60mm) については 308L を、316FR 鋼 (厚さ=50mm) については Mod.316L および Mod.16-8-2

表 1 母材および溶接ワイヤの化学成

Product form	Material	Chemical composition (mass%)									
		C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	V	N
Plate	304 base metal	0.05	0.56	0.85	0.026	0.002	8.86	18.47		0.046	0.0367
	316FR base metal	0.009	0.58	0.84	0.026	0.002	11.13	16.89	2.25		0.07
Welding wire	Y308L	0.02	0.225	1.73	0.026	0.004	10.55	19.05		0.064	0.069
	Mod. 316L	0.012	0.36	1.3	0.022	0.003	11.10	18.33	2.30		0.121
	Mod. 16-8-2	0.012	0.56	1.3	0.022	0.001	8.08	16.22	1.81		0.117

溶接ワイヤを用いて多層溶接した 3 種類の狭開先の突合せ溶接継手を製作して供試継手とした。製作した溶接継手の母材および溶接ワイヤの化学成分を表に示す。なお、3 種類の供試継手はいずれも H 形開先で上下対称溶接により製作した。いずれの溶接継手においても溶接金属部付近で母材原質部よりも硬さの大きい HAZ が認められ、その硬さは溶接金属部近傍で最も大きく、そこから離れるにつれて徐々に減少する。また、溶接金属部中央の板厚方向の硬さは、溶接施工の初期に積層し溶接熱サイクルを最も多く受けている積層付近で最も大きく、最後に積層し、溶接熱サイクルを受けない表面の積層で最も小さい。316FR 鋼溶接継手においても同様な傾向を示した。このような硬さ変化は溶接施工の際に導入された転位密度に対応しており、本供試継手のように上下対称に多層溶接を行った場合、初期に積層し転位密度が最も多い板厚中央付近で硬さのピークを持ち、最終層の表面近傍に近づくにつれて転位密度が減少するため、硬さが低下することを明らかにした。

不均質な転位組織を有する 304 鋼溶接継手から、溶接金属単体および全積層を含んだ大形溶接継手試験片 (厚さ:58mm×幅:20mm×平行部:180mm) を採取し 550 におけるクリープ変形および破断挙動を調べた。溶接金属単体および母材試験片のクリープ試験結果から判断すると、本供試継手のクリープ強度は母材よりも溶接金属の方が大きい、オーバーマッチング (overmatching) な溶接継手であった。通常、オーバーマッチングな溶接継手の破断位置は母材部で、その破断寿命は母材と同等と考えられる。しかし、本実験の応力範囲で大形溶接継手試験片はいずれの応力においても溶接金属部で破断した。これは、溶接金属部の板厚中央部では母材よりもクリープ強度が大きいオーバーマッチングな溶接金属であるが、表面近傍では、母材よりもクリープ強度が小さいアンダーマッチングの溶接金属であり、全積層を含んだ大形溶接継手試験片では、まず、表面近傍のアンダーマッチングな溶接金属に微視き裂が発生し、その微視き裂の成長・合体に伴う応力増加により、溶接金属部で最終破断に至ることがわかった。このことは、一般に行われている溶接継手から切出した小形試験片のクリープデータから、溶接金属のクリープ強度が母材よりも大きいオーバーマッチングな溶接継手であると判断できても、全積層の溶接継手では溶接金属部で破断する場合もあり得るということを意味する。

次に、16-8-2 系溶接継手から採取した大形溶接継手試験片のクリープひずみ分布の時間依存性を調べ、溶接金属部および HAZ のクリープ変形挙動と溶接継手の破断特性について検討した。溶接継手試験片における HAZ のクリープ速度はいずれの時間においても溶接金

属部よりも遅いことを明らかにした。本供試継手のように、板厚と比較して溶接金属の幅が狭い狭開先の突合せ溶接継手の場合、溶接金属部のクリープ変形がHAZに拘束され、溶接金属部で多軸応力状態になり相当応力が減少する。このため、溶接金属単体の試験片と比較して大形溶接継手試験片における溶接金属部のクリープ変形挙動が異なり、溶接金属部で破断した大形溶接継手試験片のクリープ破断寿命は、溶接金属単体の試験片よりも長くなったものと推察した。これらの、316FR鋼溶接継手においても微視き裂は304鋼溶接継手と同様、初期に表面近傍の析出物界面にボイドが発生しそのボイドが合体・成長することにより柱状晶界面を進展する。溶接継手はこのような微視き裂の成長による応力増加で最終破断に至ることを明らかとした。

以上の結果から、溶接継手から切出した小形試験片と全積層を含んだ大形溶接継手試験片によるクリープ特性評価は、溶接金属部内のクリープ特性が不均一なため、必ずしも一致しないことが明らかとなった。そこで、多層溶接継手のクリープ寿命予測や破壊発生位置を明確にするためには、全積層を含んだ大形継手試験片による評価と従来の小形試験片によるデータの比較・検討が必要であることを指摘した。

溶接継手のクリープ強度評価や寿命予測は高温での構造試験が困難であるために有限要素法などを用いたシミュレーションによって行われている。しかし、前述したように溶接金属部内で高温強度特性が不均一であるため、シミュレーションなどにより溶接継手のクリープ挙動を精度良く予測するには、溶接金属の試験片採取位置の違いによる高温特性の違いを把握し、そのデータをシミュレーションに反映させることが望ましい。そこで、溶接金属部の表面近傍、板厚の1/4および板厚中央から直径2mm、平行部10mmのミニチュア試験片を採取した。また、HAZのデータを取得するためボンド部から1.5mm離れた位置からミニチュア試験片を採取し550における高温引張およびクリープ特性について調べた。0.2%耐力およびクリープ強度は板厚中央部、板厚の1/4、表面近傍から採取した試験片の順に小さくなる。この結果は、これまでに行った大形溶接継手試験片のひずみ分布測定結果が正しいことを裏付けている。溶接施工の時の拘束および溶接熱サイクルにより、最後に積層した表面近傍よりも初期に積層した板厚中央部で多くの転位が導入され硬化していることを示唆している。

これらのデータを基に、母材部、HAZおよび溶接金属部の3分割したモデルと、さらに溶接部の局所変動を考慮し溶接金属部を板厚方向に13分割したモデルによる大形溶接継手試験片の弾塑性クリープ解析を行い、大形溶接継手試験片表面のひずみ分布測定および破断面解析結果との比較を行った。その結果、3分割モデルよりも、溶接金属の局所変動を考慮したモデルの方が大形溶接継手試験片のひずみ分布測定結果および破断試験片の観察結果と良く対応することを明らかにした。これらのことから、溶接継手の変形挙動や破壊挙動をシミュレーションにより予測するためには、溶接金属部の局所変動を考慮したモデル化が必要であることが明らかになった。

本研究における一連のクリープ試験の結果、オーステナイト・ステンレス鋼の大形溶接継手試験片が低応力長時間側でクリープ破断する位置は溶接金属部であることが実証できた。さらに、550、600および650の温度条件で、最長約76000時間までクリープ試験を行った16Cr-8Ni-2Mo系溶接金属についてクリープに伴う組織変化を調べクリープによる材質劣化を評価する手法について検討した。その結果、溶接金属のクリープ保持によるフェライト量の変化は温度により傾向が異なるため、溶接金属の材質変化の指標としては適さない

ことがわかった。しかし、溶接金属を高温保持およびクリープ保持した場合の析出物面積率と保持時間の関係はクリープ破断データの評価で広く用いられている Larson-Miller パラメータで整理すると一次式で表すことができ、溶接金属の材質変化の指標として利用できることを明らかにした。この関係を使うと、ある温度・時間での析出物の面積率から溶接継手のクリープ損傷の程度を評価が可能となり、今後の研究の新局面を開いたものとする。

審査結果の要旨

1. 論文の評価

1. 本研究は溶接継手を含む高温構造のクリープ強度評価に関する実証的な研究で、高速増殖炉の原型炉「もんじゅ」の原子炉容器相当材の SUS304 ステンレス鋼及び将来の実証炉の一次系構造材料として開発された低炭素・中窒素型 316 ステンレス(316FR)鋼の多層溶接継手を対象として、設計温度 550 付近の長時間クリープによる変形と破壊挙動を明らかにしたものである。
2. 板厚 50～60mm の供試ステンレス鋼の多層溶接継手について、板厚方向の硬さ分布の測定から、いずれの鋼種でも板厚中心は表裏面よりかなり硬化していることを見出し、その原因は溶接施工時に変形拘束のために導入される高密度の転位によることを明らかにした。50t もの荷重容量を持つ世界最大級のクリープ試験機を用いて、溶接継手の全積層を含む大形試験片のクリープ試験を最長約5万時間まで実施し、溶接継手の破壊は溶接金属部で起こることを示した。
3. 母材と溶接金属のクリープ強度は 304/308 鋼ではオーバマッチング、316FR/16-8-2 鋼ではアンダーマッチングであったが、いずれの鋼種でも溶接継手のクリープ変形は溶接金属の板厚方向不均質性、すなわち溶接後の表裏面付近のクリープ変形抵抗が中心部に比べて、かなり小さいことを発見した。このため溶接継手全体では溶接金属のクリープ変形が促進され、き裂の発生となることを実験的な結果ばかりでなく、直径 2mm のミニチュア試験片によるデータを基にした FEM シミュレーションでも明らかにした。
4. 溶接金属の組織変化を析出物の面積率測定から定量化し、クリープ破断における Larson-Miller パラメータ表記が成立していることから、溶接継手のクリープ寿命・余寿命予測の新しい可能性を示した。

以上の研究成果は申請者の長年に渡る努力と研究能力の高さによるもので、本学の学位にふさわしいものと認定できる。

2. 審査の経過と結果

- (1)平成16年1月14日 博士後期課程委員会で学位論文の受理を決定し、5名がその審査委員として指名された。
- (2)平成16年2月13日 公開論文発表会及び最終試験を実施した。
- (3)平成16年2月18日 博士後期課程委員会で学位授与を可とし、大学運営委員会で承認された。

氏名(本籍)	新田 紀子 (大阪府)
学位の種類	博士(工学)
学位記番号	甲第27号
学位授与年月日	平成16年3月22日
学位授与の要件	学位規則第4条第1項
研究科・専攻名	工学研究科・基盤工学専攻
学位論文題目	低温イオン注入によって化合物半導体表面に形成されるセル状構造の成長機構の解明と構造制御 Cellular Defect Structure on the Surface of Compound Semiconductor Ion Implanted at Low Temperature-Formation Mechanism and Application to Nano-Fabrication-
論文審査委員	(主査) 高知工科大学 教授 谷脇 雅文 京都大学 教授 義家 敏正 高知工科大学 教授 福富 兀 高知工科大学 教授 坂輪 光弘 高知工科大学 教授 神戸 宏

論文内容の要旨

本論文著者は、イオン注入した化合物半導体に形成される欠陥の研究に取り組んでいたが、その途上低温イオン注入した GaSb 表面に数ナノ - 数 10 ナノスケールの特異なセル状構造が現れることを見出した。そしてこの構造の結晶および組成を詳細に解析するとともにその形成機構モデルを提案した。このモデルではイオン注入によって導入された二種類の点欠陥-原子空孔と格子間原子-の低温での挙動の違いが、セル状構造形成に重要な役割を果たしている。注入量および基板温度を変えた実験を行い、これを半定量的に解析することによってモデルの検証を行うとともに、注入初期の表面近傍の構造変化について明らかにした。

これらの化合物半導体に形成される一つのセルの大きさは直径 50 nm 深さ 300 nm と大変微細であるがアスペクト比は極めて大きい。またセルを隔てる隔壁の厚さは 10 nm と極めて薄い。このような特徴は電子デバイスをはじめとしていわゆるナノテクノロジーの幅広い分野への応用の可能性が考えられる。これをねらいとして、規則正しいセル構造を形成する方法を提案した。この方法は、最初に基板上に規則正しい初期構造を作り、その後イオン照射を行い、これを発達させ規則正しいセル構造をつくるものである。このアイデアにもとづき、FIB を利用し実際にこれを行った。さらにこの現象が、GaSb、InSb 二つの系にとどまるのか、それとも他の系に拡大されるのか、元素半導体および - 族化合物半導体について探索を試みた。

本論文は以上の研究成果を中心にまとめられている。論文は 8 章から構成されており、各章の内容は以下の通りである。

第 1 章 緒言

研究の背景と本研究の特徴および目的が述べられている。

第2章 特異な表面欠陥構造とその形成機構の提案

低温で 60 keV Sn⁺イオン注入した GaSb 表面に特異なセル状構造が形成されることを発見した(図1)。表面には、内径 50 nm 程度の筒状空洞の集合が蜂の巣状に形成され、各空洞は厚さ 10 nm 程度の薄い壁で隔てられている。空洞の深さは約 220-250 nm であり、これは注入イオン飛程の約 10 倍にあたる。空洞を隔てる壁の厚さは 10 nm 程度である。その上部は非晶質であるが、下部はマトリクスと同じ結晶性が残っている。

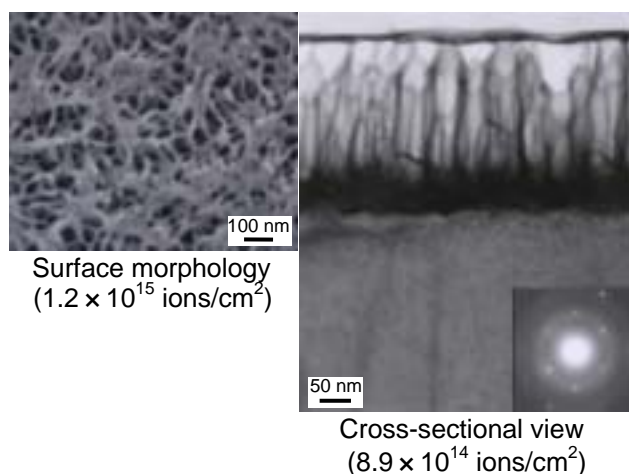


図1 GaSb-60 keV Sn⁺ (T_s = 153 K) の表面SEM像(左)と断面TEM像(右)

この表面欠陥構造の形成機構として、スパッタ効果および壁の気相成長の可能性はなく、壁は固体内現象によって成長することを示し、次のモデル(図2)を提案した。

まず、注入の較的早い時期に試料表面に盛り上がった所と窪んだ所ができるとする。Sn⁺イオンの注入によって、試料表面近傍(50 nm 程度の深さまで)には原子空孔と格子間原子が形成される。盛り上がった所では、表面が近いのでほとんど消滅する。窪んだ所では、原子空孔は近傍に留まるが、格子間原子は低温でも移動度が大きいので、比較的遠くに移動する。盛り上がった所には、周りの窪んだ所から格子間原子が流れ込みさらに高くなり、壁が形成される。窪み近傍に残された空孔は、注入が続く間に表面に逃げ窪みをさらに深くする。このようにして、セル状の欠陥構造が発達する。

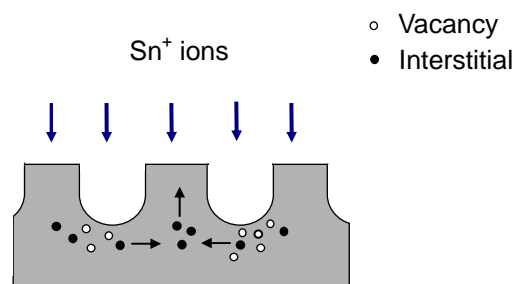


図2 欠陥構造形成機構モデル

第3章 形成機構の検証

提案した形成機構モデルを検証するための実験が行われた。提案したモデルでは、セル状構造形成はイオン注入によって形成される点欠陥挙動に支配されている。それを確かめるために、Sn イオンの注入量と基板温度を変え、点欠陥の形成量および点欠陥の移動度を変え、形成される構造の形状を調べた。

低温注入の場合 2.0×10^{14} ions/cm² サンプルで、直径約 50 nm の球形ポイドが 30 nm の深さ(ほぼイオンプロジェクトレンジに相当)にほぼ等間隔(60 nm 程度)に形成されている。注入量が増すと楕円形になり、さらに増加すると、縦に長いセルへと発達する。壁の厚さ、ポイドあるいは穴の径にはあまり変化はないが、注入量に比例して壁の高さつまりセルの深さは大きくなっている。

室温注入の場合、低温注入と比較してきれいなセル状構造は形成されていなかった。低注入量 1.0×10^{14} ions/cm² では、表面にアモルファス層が観察された。高注入量では欠陥の下のほうには丸く小さなポイドがたくさん形成されている。そして楕円形のポイドがいくつも縦に重なって欠陥構造が形成されている。注入中の基板温度のちがいで欠陥構造の様相が大きく異なっている。

注入量を増加させる(=点欠陥の形成量が増加すると)それとともに欠陥構造体積は大きくなり、基板温度を変える(=点欠陥の移動度をかえる)と形成される欠陥構造の様相が変化する。この結果は、構造形成が点欠陥の移動に支配されているとする本研究で提案した形成機構モデルを強く支持する。論文ではさらに、欠陥量とセル構造の大きさに関して半定量的な考察を行い、注入により形成される点欠陥の挙動によってセル状構造が形成されることを説明している。

第 4 章 熱アニールによる結晶性の回復

GaSb 表面欠陥の結晶構造は高ドーズ量ではアモルファスである。電子材料として使うためには一般的にはアモルファスより結晶性を持つ方が良い。低温で Sn イオン注入を行ない、その後水素雰囲気中で 400 °C 30 分アニールを行った。アニール後のセルの大きさは直径 ~ 50 nm、深さ ~ 120 nm、壁の厚さ ~ 45 nm であった。アニール前と比較して壁が縦方向に収縮していた。また結晶構造はアモルファスから多結晶になっていた。EDX 元素分析によると壁に Sb が少なくなり、Ga : Sb の濃度比は 4:1 にまでなっている。アニールによって表面から Sb が蒸発したものと考えられる。今後アニール方法の改善が必要である。

第 5 章 InSb に形成されるセル状構造

低温で InSb に 60 keV Sn⁺ イオン注入を行ない、表面に形成される欠陥の構造を調べた。表面欠陥形成挙動は、GaSb と同様であった。イオン照射によって作られる点欠陥の移動によって、セル状構造が形成されるとするメカニズムも同様のものだと考えられる。歪み領域は観察されなかったこと、注入量増大にともなう欠陥体積増加に飽和傾向が観察されたことが GaSb の場合と異なる。

第 6 章 微細構造形成法への応用

形成される構造はいわゆるナノスケールであるが、規則性に欠け、このままでは電子デバイスなどへの応用は制限される。これを克服するために、イオン注入に先立って基板表面に規則的な初期構造を与えることを考えた。その方法として、ここでは FIB = 集束イオンビームを利用する。提案した微細構造形成法を図 3 に示す。まず FIB で規則正しい初期構造 - 表面に浅い窪みを規則正しく配列、あるいは表面直下にボイドを規則正しく配列 - を作る。この後、温度を制御したイオン注入を行って、表面微細構造を発達させる。その機構は図 2 に示すものと同様である。この方法で期待できる微細化は、主として注入によるカスケード損傷の広がりによって支配され、現在 20 nm が限界であるが、将来、セル間隔は加速電圧を 5 kV の場合のカスケード損傷の広がり 5 nm と壁厚 (5 nm) の和 10 nm に近づけられると期待される。

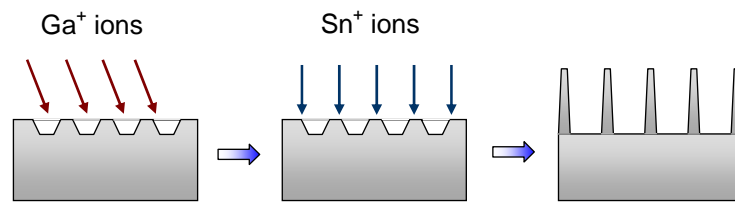


図 3 微細構造形成法の提案

実際に FIB 加工によって初期構造の作製を試みた。初期構造を等間隔でスポットで配置した。間隔は最小 50 nm のものまでつくることができる。図 4 はスポット間隔を 100nm で配置したもので、ドーズ量は $5 \times 10^{10} \sim 1 \times 10^{14}$ ions/cm² までいろいろと変えたマトリックスを作っている。左図が初期構造であるが、これを FIB 内で画像観察スキャンした (室温で 50 kV Ga イオンを一様に照射したことに相当する) 後の画像が右図である。初期構造をつくったときのドーズ量が 1×10^{13} ions/cm² 以上のマトリックスについては、規則性はこわされず、セル構造は深くなっている。

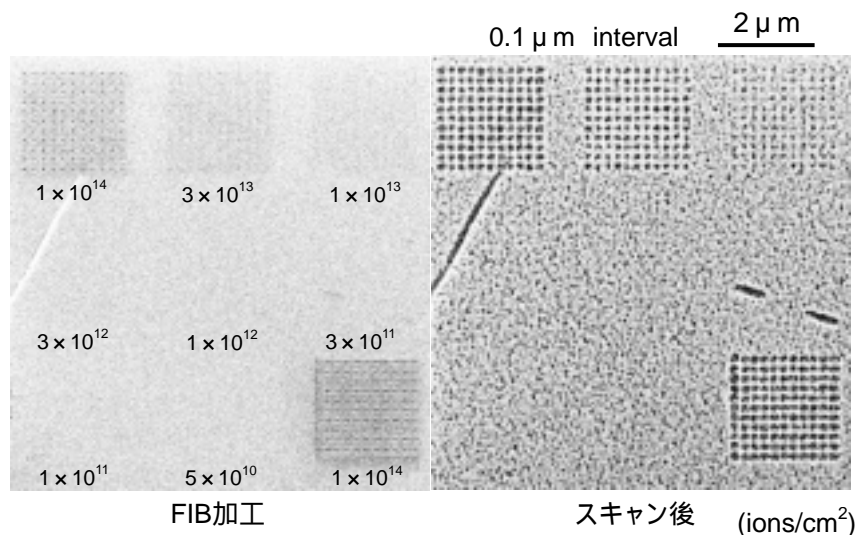


図 4 初期構造 (左) とイオン照射後 (右)

第 7 章 新しい系の探索

FIB および低温イオン注入によって、Si、Ge、GaP、InAs、GaAs、InP のイオン注入表面を調べた。このうち Ge については、GaSb および InSb と同様の現象が観察された。

第 8 章 総括

1. 低温イオン注入した GaSb、InSb 表面に特異なセル状構造の形成をみいだした。
2. その構造はナノ～サブミクロンスケールでありその結晶構造はアモルファスであることを示した。
3. 構造形成メカニズムを提案し、これを実験的に検証した。
4. この自己組織化的現象を微細構造形成法(ナノファブリケーション)に応用することを提案した。
5. FIB を利用して微細構造形成を試み、その可能性を実証した。
6. 新しい系の探索を元素半導体、 - 化合物半導体について行った。

審査結果の要旨

1. 論文の評価

本論文著者は、イオン注入した化合物半導体に形成される欠陥の研究に取り組み、その途上低温イオン注入した GaSb 表面に数ナノ - 数 10 ナノスケールの特異なセル状構造が現れることを見出した。そしてこの構造を詳細に解析するとともに、二種類の点欠陥-原子空孔と格子間原子-の低温での挙動の違いに基づく形成機構モデルを提案している。注入量および基板温度を変えた実験を行い、これを半定量的に解析することによってモデルの検証を行っている。

形成される一つひとつのセルの大きさは大変微細であるがアスペクト比は極めて大きい。この特徴を生かして、電子デバイスをはじめとするナノテクノロジーへの応用をねらいとして、規則正しいセル構造を形成する方法を提案している。最初に基板上に規則正しい初期構造を作り、その後イオン照射を行い、これを発達させ規則正しいセル構造をつくるものである。このアイデアにもとづき、FIB を利用し実際に行った。さらにこの現象が、GaSb、InSb 二つの系にとどまるのか、それとも他の系に拡大されるのか、元素半導体および - 族化合物半導体について探索を試みている。

本論文は以上の研究成果を中心にまとめられている。論文は 8 章から構成されており、各章の内容は以下の通りである。

第 1 章では研究の背景と本研究の特徴および目的が述べられている。

第 2 章は本論文の出発点となるものである。低温で 60 keVSn⁺イオン注入した GaSb 表面にサブミクロンオーダーの微細なセル状構造が形成されることを発見した。これは、通常の固体物質では観察されな

い現象である。この新規な現象に対して著者は詳細な解析を行うとともに、点欠陥挙動に基づく形成機構を提案している。

第 3 章では前章の仮説が実験および解析によって検証されている。点欠陥の形成量および点欠陥の移動度を変え、形成される構造の形状を調べ、欠陥構造の形成が点欠陥挙動に支配されていることを確かめている。論文ではさらに、欠陥量とセル構造の大きさに関して半定量的な考察を行い、注入により形成される点欠陥の挙動によってセル状構造が形成されることを証明している。

第 4 章では熱アニールによって結晶性の回復を試みている。アニールによって表面からの Sb 蒸発があり、今後アニール方法の改善が必要であることを述べている。

第 5 章では、InSb について調べ、基本的には GaSb と同様の表面欠陥形成挙動を確認している。

第 6 章では、見出された現象をナノファブ리케이션に適用することが提案され、さらに実際に試みられている。提案した微細構造形成法では、まず FIB で規則正しい初期構造 - 表面に浅い窪みを規則正しく配列、あるいは表面直下にポイドを規則正しく配列 - を作る。この後、温度を制御したイオン注入を行って、表面微細構造を発達させる。この方法で期待できる微細化は、主として注入によるカスケード損傷の広がりによって支配され、現在 20 nm が限界であるが、将来、セル間隔は加速電圧を 5 kV の場合のカスケード損傷の広がり 5 nm と壁厚 (5 nm) の和 10 nm に近づけられると評価している。実際に FIB 加工によって初期構造の作製が試みられた。初期構造として最小 50 nm 間隔のものまでつくられている。これを FIB 内で画像観察スキャン (室温で 50 kV Ga イオンを一様に照射したことに相当) により、規則性はこわされずセル構造が成長することが示されている。

第 7 章では新しい系の探索がなされている。FIB および低温イオン注入によって、元素半導体、
- 化合物半導体が調べられ、Ge および InAs については、GaSb および InSb と同様の現象が生じる可能性があることが示され、他の多くの物質についてもその可能性が論いられている。

第 8 章は総括である。

以上、本論文の著者は、化合物半導体 GaSb と InSb のイオン注入において、材料科学的に新規な現象を見出し、その機構の解明を行った。さらに研究を進展させ、この現象をナノファブ리케이션に応用することを提案し、実験によってその可能性を示している。また、探索を他の半導体に広げ、この新規な現象を支配する仕組みを明らかにしようと試みている。その業績の材料科学・工学分野への寄与は顕著であり、本論文著者は工学博士号授与に値するものと認められる。

2. 審査の経過と結果

(1) 平成 16 年 1 月 14 日 博士後期課程委員会で学位論文の受理を決定し、5 名がその審査委員として指名された。

- (2) 平成 1 6 年 2 月 1 3 日 公開論文発表会及び最終試験を実施した。
- (3) 平成 1 6 年 2 月 1 8 日 博士後期課程委員会で学位授与を可とし、大学運営委員会で承認された。

氏名(本籍)	しのみや よういち 四宮 葉一 (徳島県)
学位の種類	博士(工学)
学位記番号	甲第28号
学位授与年月日	平成16年3月22日
学位授与の要件	学位規則第4条第1項
研究科・専攻名	工学研究科・基盤工学専攻
学位論文題目	他動的揺動刺激技術の運動療法機器への応用に関する研究 A study about the continuous passive motion technology applying to the therapeutic exercise machine
論文審査委員	(主査) 高知工科大学 教授 王 碩玉 高知工科大学 教授 河田 耕一 高知工科大学 教授 井上 喜雄 高知工科大学 教授 竹田 史章 高知工科大学 助教授 岡 宏一

論文内容の要旨

他動的揺動刺激とは、乗馬やスキーなどに代表されるように、強制的にバランスを崩させ姿勢制御反射を誘発し、能動的な運動を得る刺激方法である。他動的揺動刺激を反復して与えると筋収縮が自然と誘発されるので、長期間続けることで訓練効果が期待できる。さらに、他動的な刺激は、自ら苦しい訓練をしなくても良いというメリットがあるため、運動意欲が高くない高齢者に対して良いソリューションを提供することが可能になる。

本研究は、他動的な揺動刺激で自発的な運動を誘発させ高齢者の健康増進を図る方法を確認することを目的としている。他動的な揺動刺激システムを構築するには、目指すべき健康増進とは何であるか、健康増進につながるための生理効果を導出する揺動刺激方法はいかなるものなのか、構築すべきシステムをより効率的・効果的なものとするにはどのようなフィードバックルールを構築すれば良いのか、といった基本的な命題をクリアしていく必要がある。従って、中長期的な訓練結果として得られる健康増進効果を如何に上手く引き出すようにシステムを最適化できるかというのが目的であると言い換えられる。

さて、本論文では、まず他動的揺動刺激によって自発的な運動を誘発する具体的な方法として乗馬療法に着目した。乗馬療法は、生きた馬を利用して身体障害者や障害児へ治療を行う方法であり、民間療法ながらここ10年来で日本でも広く利用されてきている。しかし、生きた馬では、刺激の程度・馬の種類・馬場の状態など条件を統一することができないため身体への効果を定量化することは実質不可能である。そこで、乗馬療法が持つ身体への効果とは何であるかという命題を考察することから開始した。即ち、乗馬療法によってもたらされる健康増進効果の定量化を試みた。

まず、身体への効果を定量化するためには刺激方法を一定に保たなければならない。そこで、バーチャルリアリティ技術を応用した乗馬療法システムを開発した。具体的には、モーションキャプチャにより馬の鞍の動きを3次元的に取得し、6軸パラレルメカニズムを用いることで、馬の各歩様を再生する機器を開発した。さらに、映像と音響システムを付加し、かつ、6軸パラレルメカニズムをインタラクティブに制御できるようにシステムをブラッシュアップし乗馬療法システムへと発展させた。

次に、健康増進効果の定量化を行うため、開発したVR乗馬療法システムを利用し、長期間のトレーニングを行なった。馬の歩様のうち、常歩は乗馬療法に最も適した歩き方であると

の理由から、常歩動作を用いて健常な若者 8 名、健常高齢者 10 名に対して、若年者群には 4 ヶ月間、高齢者群には 3 ヶ月間訓練を行い、前後での体幹部の筋力を計測した。この結果、高齢者では計測した筋力が有意に増加し、若年者でも等尺性の背筋力が有意に増加することが判明した。

ここで、筋力効果を目的とするならば、筋放電を得やすい制御方法であるほど、より効果的な筋力増加効果が得られる方法であると考えられる。しかし、位相差を考慮した場合、6 軸の組み合わせ方により得られる揺動方法は無限に存在するため、全ての動作方法に対して筋電による評価を行うことが不可能である。そこで、動作方法を数種類に絞るためのスクリーニングを行なった。「常歩動作を感じる方法は如何なる方法であるか」という命題に対し、乗馬部 7 名、乗馬未経験者 11 名への主観的評価を行い、動作方法を "x-pitch-roll"、"pitch-roll" の 2 種類に限定するに至った。ここで、x は前後へのスライド動作、pitch は左右軸を回転中心とした回転動作、roll は前後軸を回転中心とした回転動作であり、"x-pitch-roll" は x と pitch と roll の組み合わせである。さらに、若年者 6 名に対して、揺動方法を変化させた時の筋電図解析を行ない、鞍型の座位姿勢において x 軸方向、または、y 軸（左右）方向といった水平方向に対して強制的に重心を崩す方法によって効果的に筋電効果を得ることが可能であるという結果を導いた。この方法は、上下への運動を含まないため、モーターパワーの制限が可能となり、効率的な方法である。さらに、常歩の x、pitch、roll の各波形を 1 次のフーリエ級数で近似したところ、「"x、pitch、roll の各揺動周波数を 2:2:1" に、"x、pitch は同相" で、"roll は x、pitch と 45° の位相差" となるような各軸の単振動の組み合わせ方」は、常歩の感じを簡易に再生し、かつ、筋電量を上手く引き出す他動刺激方法であると結論した。この原理を適用し、1 つのモータを用い、ウォームギアとクランク機構を採用することによって機械的に揺動させる簡易型乗馬療法機器の開発に至った。さらに、高齢者に対する長期間の訓練を行ない、筋力増強効果を確認した。

ここまでの方法は、機器そのものの最適化と捕らえることができるが、より効果的な効果を得るため、システム全体の最適化を試みた。「いかなる指標でフィードバックシステムを行なうことが、効果的な健康増進効果を生み出すか」という命題に対して、簡易型乗馬療法機器を使用し、高齢者群 23 名と若年者群 17 名を比較することで高齢者特有の反応の抽出を試みた。生体的な反応として頭部位置の揺動変化に着目し、生理的なデータとしては筋電図による解析を行なった。頭部位置の揺動変化はバランスを上手く取れるようになれば頭部が空間上に定位するという一連の研究で得られた経験的な知見に基づくものである。この結果、高齢者群では、腰部に与えられる揺動に対して、揺動刺激の周波数成分の揺動が頭部に反映していた。つまり、1.2Hz で揺動を与えた場合、若年者群は、上半身で吸収し頭部は空間上に定位するのに対して、高齢者群は、揺動を吸収しきれず 1.2Hz の揺動が頭部に残ってしまう。また、筋電図による比較では、被験者の頭部の揺動をリアルタイムに提示した場合とそうでない場合により、筋肉の放電部位が変化した。提示をした場合、若年者群では体幹部の筋電が多くなり、提示をしない場合には、膝関節の伸展屈曲筋の筋電量が有意に増加していた。これに対して、高齢者群では、提示によって全体的に放電が多くなっていた。このことから、頭部揺動の、与えられる揺動周波数成分量を小さくすることによって、年齢層に応じた最適なフィードバックの仕方が存在する可能性が示唆された。

さらに、他動的揺動刺激によって得られる健康増進効果として糖代謝への改善効果について考察した。糖代謝に着目したのは、運動による筋収縮がインスリン作用を亢進させると言われており、筋放電を容易に誘発させ、かつ、高齢者でも利用可能な簡易型乗馬療法機器でインスリン抵抗性の改善が可能であると考えたためである。ここで、インスリン抵抗性の改善とは、糖尿病の治療目的であり、言い換えれば、インスリンが効く体になることである。

まず、糖代謝の急性的効果を把握するために、20 代の若者 1 名に対してグルコースクランプ計測を行い、ぶどう糖の取り込み能力が安静時より安静時の 1.8 倍程度亢進することを確認した。また、糖尿病患者 20 名に対し、3 ヶ月間、毎日 30 分以上使用した結果、採血によるインスリン抵抗性指標である HOMA-R が、3.7 から 3.1 に有意に改善した。

次に、糖代謝効果を目的とした他動的揺動刺激方法への考察を行った。座位姿勢であるために体重が免荷されることで、膝関節痛者が使用できるという簡易型乗馬療法機器がもつ大きな特徴を残したまま糖代謝効果をより高める方法を考察した。簡易型乗馬療法機器を使用した時のぶどう糖取込部位を特定するため、健常者6名に対してPET計測を行った所、内転筋を中心とした大腿部に糖代謝が集中していた。座位姿勢での揺動であるため体幹部への負荷の最適化を行なったものと言い換えられるが、それでも大腿部に対してぶどう糖の集中を起こさせることができたということは、下肢に対してさらに負荷をかけることでより代謝を亢進させることが可能であるという余地が残っていると考えられる。また、生理学的には、人体で最も大きな赤筋が分布している大腿部を筋収縮させることが効率よく糖代謝亢進に有利である。さらに、整形外科的な観点から、膝関節痛に対しては、膝関節の等尺性筋収縮でなければ利用できない。これら3つの理由から、他動的に各脚に自重をかけさせる4自由度の他動的揺動刺激システムを構築し、「膝関節を動かさないで、大腿部を収縮させる方法」を考察した。大腿部への代謝が得やすい方法であるほど、全身の効果として得られる糖代謝効果がより容易に得られる揺動方法であると仮定した。

そこで、同システムを利用し、大腿部への代謝効果が簡易に得られる方法を導出するために近赤外線分光法による筋代謝効果計測を行った。若年者3名に対して、体重の自重率、膝関節角度、動作速度の組み合わせを制御パラメータとした計測の結果、「40%の自重をかける」ことで簡易型乗馬療法機器の約1.3倍の効果が得られることを確認した。さらに、膝関節痛患者10名に対しては、体重が免荷された状態で脚部に体重をかけているという点、膝関節が屈曲しない点の2つの理由から、機器を使用したときの膝関節への痛みは歩行時よりも楽であることが判明した。これらの計測から、膝関節を屈曲させずに自重をかけていく他動的揺動刺激の考え方は、膝関節痛でも使用可能であり、かつ、糖代謝に対してより効果的な他動訓練法である。

以上、本研究を通して、他動的揺動刺激をトリガーとすることで、自発的な運動を誘発させ、健康増進を行う事が可能であるという知見を得ることができた。他動的揺動刺激は能動的な運動方法に比較すると心理的な負担が少なく継続しやすいものである。また、身体への効果は本研究で得られた結果以外にも様々なものがあると予想している。今後の高齢者のための運動、あるいは、運動療法に対する極めて有効な概念の一部を構築できたものと考えている。

審査結果の要旨

1. 論文の評価

本論文は、従来の能動的な運動ではなく、自発的な運動を自然と誘発させる「他動的自動運動誘発技術の構築」に向けた基本的な枠組みに関する提案を行ったものである。

健康増進とは何を指すのか、どういうデータを定量化すべきなのか、というニーズに対して、生体データをフィードバックするバーチャルリアリティ技術というシーズを如何に適用させていくかという命題がこの研究の根底にある。この命題を解決するために、他動的自動運動誘発技術には乗馬療法を機械で再現する手法を適用し、対象とする健康増進には「筋力増加」と「糖代謝の亢進」に着目することで、それぞれに対する効果の見極めを行うことから出発した。体幹部の筋力増加効果に対しては筋電による筋活動の反応を制御因子とし、糖代謝効果に対しては下肢を中心とした筋代謝反応を制御因子として利用した。若年群と高齢群に分け、合計延べ216人を対象とする臨床計測実験を通して、それぞれの効果への生体反応の原理原則を導いた。その結果、健康増進に必要な揺動刺激パラメータを同定することに

成功し、家庭でも使用可能な簡易型乗馬療法機器の開発と商品化にまで至った。将来的には、生体情報をフィードバックし、個人に応じたより効果的なシステムへと展開させることが可能であると考えている。

このように、一連の医学・生理学的な評価を通じ、他動的刺激技術の利点を生かす方法を具体的に提供するという基本的な研究の枠組みを構築することができたと考えている。よって、工学博士称号授与基準に達していると判断する。

2. 審査の経過と結果

- (1)平成16年1月14日 博士後期課程委員会で学位論文の受理を決定し、5名がその審査委員として指名された。
- (2)平成16年2月12日 公開論文発表会及び最終試験を実施した。
- (3)平成16年2月18日 博士後期課程委員会で学位授与を可とし、大学運営委員会で承認された。

氏名(本籍)	かねこ てつや 金子 哲弥 (大阪府)
学位の種類	博士(工学)
学位記番号	甲第29号
学位授与年月日	平成16年3月22日
学位授与の要件	学位規則第4条第1項
研究科・専攻名	工学研究科・基盤工学専攻
学位論文題目	高速イオンビームを用いた次世代集積回路用材料評価法の研究 Development of analytical system using swift ion beam and its application to characterization of next generation ULSI materials
論文審査委員	(主査) 高知工科大学 助教授 綿森 道夫 高知工科大学 教授 加納 剛太 高知工科大学 教授 谷脇 雅文 高知工科大学 教授 原 央 高知工科大学 教授 八田 章光

論文内容の要旨

本論文は MeV 領域の高エネルギーイオンをプローブに用いて固体薄膜試料の表面近傍の元素分析を行う手法とその応用についての研究をまとめたものである。

主要な論点は4点あり、それは、

- 【1】 固体薄膜試料中の酸素分布を核共鳴散乱分析法によって定量するための実証的研究
- 【2】 固体薄膜試料中の水素分布を弾性反跳散乱分析法によって定量するための実証的研究
- 【3】 強誘電体酸化物中の酸素および水素分析への応用
- 【4】 非導電性高分子材料であるポリイミド樹脂の照射損傷の研究

である。以下本要旨では本文中で論じられているこれら4点について要約する。

【要旨 1】 固体薄膜試料中の酸素分布を核共鳴散乱分析法によって定量するための実証的研究について

MeV 領域の高エネルギーに加速されたヘリウムイオンプローブと試料中の原子核とのクーロン反発力を利用したラザフォード後方散乱分析法は、試料中の元素の深さ分布が高精度に得られる元素分析法として確立されてきた。しかし、クーロン反発力を利用するという原理から、電荷の少ない軽い元素、即ち炭素、窒素および酸素等に対する感度が比較的小さいという弱点があった。通常おこなわれているラザフォード後方散乱法の場合、同じ小型の固体検出器を用いるという条件の下に感度を増大させるには、散乱角を小さくするか、あるいはプローブイオンのエネルギーを下げるのが考えられる。そうすると後方散乱プローブが試料表面から脱出するまでに試料内部を通過する距離が長くなるなどの原因で最大測定可能深さが浅くなったり、深さ分解能が悪化したりという欠点がある。またこのような感度改善法による感度の増大は元素に関して非選択的であって、目的の酸素以外の元素に対してもそれぞれ増大するので酸素信号とそれ以外の信号との分離という観点からは有効ではない。

一方本研究で行われたように原子核共鳴反応 $^{16}\text{O}(\alpha,\alpha)^{16}\text{O}$ による散乱断面積の増大現象を利用すると、最大測定深さや質量分解能を保ったまま、酸素に対する感度だけを選択的に増大させることができる。この原理はすでに知られており、実験報告もすでにあるが、実際に測定を遂行するには、照射条件の変化によって急峻に変化する断面積の理論値と実験値とのずれを補正し、エネルギーストラグリングによる共鳴ピークの鈍りを考慮した注意深い較正によって測定系を構築

する必要がある。

本研究における主要な成果(その1): 本研究では種々の酸化物薄膜を標準として共鳴散乱断面積を特定の実験系について較正することによって通常のRBS法より高感度な酸素分析系を構築した。本研究で構築された分析系を用いて酸化物セラミクスであるピスマス層状ペロブスカイト多結晶膜中の酸素深さ分布の定量分析を行い、その有用性を実証した。

【要旨2】固体薄膜試料中の水素分布を弾性反跳散乱分析法によって定量するための実証的研究

固体表面近傍の水素の深さ分布を高精度に測定することは、半導体表面のダングリングボンドの制御や水素吸蔵合金の改良など幅広い応用分野をもつ基礎技術である。低速イオンで試料をスパッタリングする2次イオン質量分析法(SIMS)に比べて、試料全体の構造を壊さずに測定する高エネルギーイオンプローブを用いた弾性反跳散乱分析法は、固体表面近傍の水素の深さ分布をより高精度に測定することができる方法であるといわれ研究が続けられている。

ヘリウムイオンをプローブとして用いた場合、プローブイオンは質量の軽い水素原子核との衝突によって後方散乱を起こさない。したがって水素分析のためにはプローブビームを試料表面法線に対して大きい角度で入射し、跳ね飛ばされた反跳水素自身を検出することになる。この場合に問題となるのは水素信号をマスクするように高エネルギー側に大量に散乱されてくるプローブイオンと目的の水素とを分離して検出することである。

本研究における主要な成果(その2): 本研究では被測定試料からの水素と前方散乱プローブとを分離するために各々の金属箔に対する透過性の違いが利用された。分離膜の膜厚や材質、プローブ照射条件の検討が行われ、文献による非ラザフォード的散乱断面積の補正式を利用して反跳水素検出系を構築し、水素の深さ分布を定量することに成功した。構築された分析系を用いてプラチナ膜層の上に堆積されたSr-Bi-Ta-O系材料の化合物薄膜表面、内部および下地Pt層中の水素を測定した。その結果本研究で構築した水素分析系が酸化物の還元劣化を引き起こす薄膜中の水素の動態研究に対して有用であることが実証された。

【要旨3】強誘電体酸化物中の酸素および水素分析への応用

強誘電体薄膜が次世代の不揮発性記憶媒体用材料として近年注目を集めている。強誘電体デバイスは結晶中のイオンの変位による電気双極子モーメントの変化を情報記録に利用しようとするものである。強磁性体を応用した磁気記憶媒体と異なり、アレイ状に並べたメモリ要素を電氣的に結線することにより書き込みおよび読み出しが可能であり、磁気ヘッドや光学系を機械的に動かす必要がない。したがって高速で機械的振動に強いデバイスが安価に実現できる可能性がある。また強磁性体デバイスが不揮発性の記憶デバイスであるのと同様、単位結晶格子の集合体で構成される強誘電体の分極ドメインの分極方向は室温で自然に反転することがなく、従って記憶保持に電力を消費することがない。またフローティングゲートへの電荷注入を利用する半導体メモリ素子に比べても、低電圧駆動、高速読み書き、長寿命という特性をもっている。このような高速頑強省電力という有望な特性を持つメモリを現在のULSI製造プロセスに組み入れ高密度集積化を実現するためには

- ・他の回路構成要素、例えば微細金属配線を損傷しない熱非平衡低温製膜プロセスの確立
- ・フォーミングガスアニールプロセスなど水素雰囲気で行われる還元劣化問題の克服

を達成する必要がある。

強誘電体材料の特性は結晶格子中のイオン変位と分極ドメイン壁の運動によって決定されるので、結晶方位、格子欠陥、サイト置換不純物、格子ミスフィットによる応力など結晶格子を修飾する要因によって変化する。RTA(Rapid Thermal Annealing)法を用い熱力学的非平衡状態で堆積された酸化物多結晶膜中の酸素定量と酸化物を還元劣化させる水素の深さ分布測定、相界面における拡散についての情報を得るために本研究で構築されたイオンビーム分析を応用することを試みる。

本研究における主要な成果(その3): 本研究ではコロラド大学 C. Araujo 教授および起業家コース加納剛太教授と共同で、有機金属分解法(MOD)を用い Pt 電極上にタンタル酸ストロンチウムピスマス系薄膜を作成した。堆積された膜に対して電子顕微鏡による結晶モルフォロジ観察や X 線回折、強誘電特性測定を行うと共に、酸素欠損や水素分布データを得ることを目的としてイオンビーム分析による薄膜評価を行い、結果を MOCVD 法で製膜された試料と比較検討した。その結果ピスマスの偏析形態、酸素分布や水素含量分布などについて製膜プロセス改善や還元劣化防止に結び付けるための有益なデータが得られた。

【要旨 4】非導電性高分子材料であるポリイミド樹脂の照射損傷の研究

導電性固体試料に対しては侵襲度の低い分析法であるイオンビーム分析法であるが、非導電性高分子試料に対しては、試料の脆化、収縮、着色、強度上昇などの巨視的な物性の変化を引き起こすことが知られている。その理由としては、入射、散乱、反跳イオンが試料中の電子を励起する結果、化学結合が切断され、生成されたラジカルによって連鎖的に架橋反応と分解反応とを引き起こすためであると考えられる。このような研究の工学的応用にはイオントラックエッチングによる微細孔フィルタの作成や、局所非平衡加熱、イオン打ち込みによる表面硬化層の形成や剥離といった特殊加工技術の開発がある。

本研究では、新たに構築した水素定量システムを用い、イオン照射に伴う高分子材料中の損傷機構に関する基礎データの収集を目的に、耐熱耐放射線材として人工衛星保護膜や LSI の宇宙線防護膜などに用いられるカプトン樹脂(PMDA-ODA ポリイミド)に高エネルギーイオンを照射し、その応答を調べた。

本研究における主要な成果(その4): カプトン樹脂に 1.5MeV のヘリウムイオンを入射角 85 度で照射した場合、表面から 200nm までの浅い領域ではプローブイオンによる反跳カスケードによる損傷効果は小さいことがモンテカルロシミュレーションによって予測される。一方前方反跳および後方散乱プローブスペクトル同時測定を行い、プローブイオンビーム照射に伴う酸素、水素組成変化を動的に計測した結果、反跳カスケードによる損傷機構では説明できない著しい酸素、水素の組成変化が観測された。

照射は 1.5MeV の ${}^4\text{He}^+$ イオンをプローブとして、 $0.1\text{W}/\text{cm}^2$ 未満のエネルギー注入密度で、照射フラックス $1.4 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$ から $2.8 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ まで変化させながら行われた。30-150nm の領域においてほぼ一様に初期量比で 50% 以上の水素が失われており、最表面(0-30nm)では水素の減少量はさらに大きく 70% 程度にであった。また、同時に測定された最表面(0-30nm)の酸素量の減少は初期比 25% であった。照射後の表面には導電性の変化が見られ、肉眼では照射領域における着色が観察された。X 線回折測定によれば照射によって分解と共に架橋反応が起きていることが示唆され、SEM 観察では反跳カスケード欠陥が集中する領域に境界層が形成されていることが観察された。以上の結果から、イオン照射に伴う著しい水素、酸素の減少には電子励起機構が重要な役割を果たしていると考えられる。このようにして、イオン照射による電子励起局所加熱やイオン打ち込みによる原子核叩き出しをさまざまな機能性材料加工・開発に応用するための基礎となるデータが得られた。

審査結果の要旨

1. 論文の評価

金子哲也君の学位論文は、小型の粒子加速器をその要素技術ごとに条件を確立することによって酸素元素と水素元素の分析が可能なシステムに組み立てあげることによって前半の力点がそそがれており、このことによって現在日本では約 6ヶ所しか測定可能な報告がない 6 番目の地点にしたことに 1つの大きな成果が

ある。小型加速器を用いた水素と酸素の測定原理は古くから知られていたにもかかわらず、日本中に数多く存在する小型加速器でほとんど実用化されていないこの測定法は、システムとして組み上げるのが非常に煩雑で、実験に対する日々の努力がなければなしえない。このことを1歩1歩なしえたことに高度技術者としての学位を与える価値を見出すことが可能である。

また、学位論文の後半においては、この実用化した酸素元素と水素元素の分析法を用いて、新材料として現在最も注目されているものの1つである強誘電体薄膜の分析を行っていることと、半導体の絶縁シールド膜として用いられるポリイミド薄膜の粒子照射損傷の研究を行っている。次世代メモリーの切り札としての強誘電体薄膜は、その測定の難しさから酸素と水素の挙動が非常に重要となっており、今回の研究はまさに時代の要請を浴びたものであった。この研究の重要性からほとんど無名の研究室の1学生でありながら強誘電体の国際会議で招待講演に選ばれた実績を持つ。また、ポリイミド膜の照射損傷は純学術的に興味深いものであり、Elsevier社の研究雑誌である Nucl. Instr. & Methods B に掲載される運びとなった(査読有り)。以上のことから十分に高度技術者としての学位の資格を有し、学位論文審査及び最終審査に合格とした。

2. 審査の経過と結果

- (1)平成16年1月14日 博士後期課程委員会で学位論文の受理を決定し、5名がその審査委員として指名された。
- (2)平成16年2月13日 公開論文発表会及び最終試験を実施した。
- (3)平成16年2月18日 博士後期課程委員会で学位授与を可とし、大学運営委員会で承認された。

氏名(本籍)	羽場 眞一 (奈良県)
学位の種類	博士(工学)
学位記番号	甲第30号
学位授与年月日	平成16年3月22日
学位授与の要件	学位規則第4条第1項
研究科・専攻名	工学研究科・基盤工学専攻
学位論文題目	半導体集積回路プロセス用研磨剤の開発 Development of polishing slurry for semiconductor integrated circuit fabrication process
論文審査委員	(主査) 高知工科大学 教授 河東田 隆 高知工科大学 教授 神戸 宏 高知工科大学 教授 成沢 忠 高知工科大学 教授 山本 哲也 高知工科大学 教授 河田 耕一

論文内容の要旨

1. 緒言

1980年代に、米国IBM社とロデル社においてデバイス領域での超精密研磨加工技術が検討され、1991年にこれらの技術がCMP(Chemical Mechanical Planarization)として発表されて以降、重要なLSIプロセス技術の一つとして発展している。これまでのULSIデバイスの高性能化・集積化は、MOSFETを基本素子としてそのMOSFETの高速化を進めることによって性能向上を得てきた。しかし近年、水平方向への高集積化だけでなく、垂直方向への高集積化(多層配線)が研究されている。それに伴い、超微細パターンを作る低波長露光技術の必要性が高まり、各層における超平坦化加工技術も必要になってきた。平坦化加工技術の発展に伴い、CMPの周辺技術も進化している。特に、高精度・高研磨レートを確保するために、消耗資材である研磨剤の高性能化が活発である。研磨剤の高性能化においては、主成分である砥粒や化学液の改良が主に行われている。特に、砥粒に関しては、コスト面で安価であり、研磨対象物に対し表面にマイクロスクラッチ欠陥を与えず、高い研磨レートが可能な砥粒が望まれる。そのような背景において、最近、汎用的になっているのが、比較的安価で、多種多様化されているシリカ砥粒である。CMPに使用される代表的なシリカ砥粒は、フュームドシリカ、球状コロイダルシリカ、非球状コロイダルシリカに分類され、研磨対象物によって使い分けられる。フュームドシリカ系研磨剤の場合、高い研磨レートが期待でき、表面精度のスペックが比較的低い酸化膜CMP用の研磨剤として多く使用されている。しかし、デバイスの微細化が進み、表面精度のスペックが厳格化され、マイクロスクラッチ欠陥に影響を及ぼすフュームドシリカの粗大粒子を簡便に除去できるような研磨剤の精製方法が課題になっている。一方、コロイダルシリカ系研磨剤は、表面精度のスペックが高い金属配線用の研磨剤として多く使用されている。典型的な真球状のコロイダルシリカは、研磨レートは低い、高い研磨精度が期待できる。しかし、最近のタンゲステン(W)、銅(Cu)等の金属配線に対する研磨においては、研磨精度だけでなく、研磨レートの超高速化が求められているため、球状のコロイダルシリカでは対応が困難となってきている。そういった背景から、近年、研磨レートを向上させる砥粒として開発されたのが、非球状のこぶ型シリカである。こぶ型シリカは、球状コロイダルシリカと異なり、粒子同士が会合した不均一な形状を持つコロイダルシリカであるが、こぶ型コロイダルシリカの特徴及び研磨への影響等については、未だ明らかにされていない。本研究において、第2章では、ビーズミルで機械的に分散したフュームドシリカ系研磨剤を用い、研磨剤中に含まれる粗大粒子を静置沈降法によって除去する精製方法及び精製されたフュームドシリカ系研磨剤を用いて、酸化膜への研磨性能の影響について考

察している。第3章では、テトラメトキシシラン(TMOS)から合成されたこぶ型コロイダルシリカを用い、砥粒自体の特徴と pH 変化による酸化膜 CMP への影響について述べている。第4章では、W への腐食性を考慮し最適化されたヨウ素酸カリウム(KIO_3)ベースの腐食液とこぶ型コロイダルシリカを組み合わせることによって、高研磨レート・低ディッシング研磨剤の開発について述べている。第5章では、Cu をエッチングさせずに、不溶性の腐食防止剤と Cu との錯体膜を形成させるような、新しい Cu 腐食液について評価し、その腐食液とこぶ型コロイダルシリカと組み合わせることによって、低圧条件下で高研磨レート・低ディッシングの研磨性能を示す Cu CMP 用研磨剤の開発について述べている。

1. フュームドシリカ系研磨剤の粗大粒子低減と酸化膜研磨への影響

一般的な酸化膜 CMP 用研磨剤として用いられるフュームドシリカ系研磨剤は、研磨対象物の表面状態に悪影響を及ぼす粗大粒子を多く含むため、その除去を目的とした様々な分級方法が検討されている。

フィルターレーションは、簡便に粗大粒子を除去する方法として多く用いられているが、分級性能を長時間持続することが困難であることから、異なる分級方法が必要とされている。本研究においては、ピーズミルによって分散されたフュームドシリカ系研磨剤の粗大粒子低減について、静置沈降法を用いることを検討した。また、静置沈降によって処理された研磨剤については、酸化膜 CMP に対する研磨性能が確認された。フュームドシリカの分散性や沈降性については、砥粒の臨界粒子径に着目し、各粒子径別の粗大粒子の沈降性及び分散性について考察した。また、静置沈降システムでフュームドシリカ系研磨剤を処理することで、臨界粒子径以上の粗大粒子が選択的に除去されることが明らかになった。一方、精製された研磨剤を CMP に用いることにより、マイクロスクラッチ欠陥及び表面粗さが飛躍的に改善され、酸化膜に対して良好な研磨性能を示すことが確認された。

2. こぶ型コロイダルシリカにおける酸化膜研磨への影響

CMP 用のシリカ砥粒としては、球状コロイダルシリカとフュームドシリカが知られている。一般的に、球状コロイダルシリカを用いた CMP においては、フュームドシリカに比べ、CMP 後のウエハー表面状態を良好化させる傾向が見られる。しかしその反面、研磨レートも減少する傾向が見られることから、最近、低研磨レートの改善を図る目的で、形状を不均一化させたこぶ型コロイダルシリカ系研磨剤の開発が行われている。本研究においては、こぶ型コロイダルシリカ系研磨剤の砥粒自体の特徴と酸化膜 CMP への影響について確認した。こぶ型コロイダルシリカは、表面に多くの活性なシラノール基が存在していることが、ゼータ電位とシラノール滴定の結果から確認され、pH の変化に対して非常に敏感な砥粒であることが明らかになった。そのため、こぶ型コロイダルシリカをアルカリ条件下に浸漬させると、シラノール密度の高さが影響して、砥粒表面近傍が膨潤し、砥粒としての研磨能力が失われることが確認された。一方、酸性条件下におけるこぶ型コロイダルシリカは、非常に安定な表面状態が保たれ、pH が低くなるにつれて、逆に研磨レートが増加していく傾向が確認された。

3. こぶ型コロイダルシリカを用いたタングステン用研磨剤の開発

CMP の研磨対象物がタングステン(W)の場合、W 自体が非常に硬い材質かつ耐腐食性に富むため、一般的に、強力な酸化剤やエッチング剤が必要となる。現在、使用されている W CMP 用の研磨剤は、過酸化水素水と硝酸鉄をベースとした金属に対して高い腐食性を持つ組成で構成されている。しかし、このような強力な酸化剤を用いることで、研磨後のディッシングやエロージョンに悪影響を及ぼすことが問題となっている。本研究においては、新しい酸化剤であるヨウ素酸カリウム(KIO_3)について評価を行った。 KIO_3 単体では、W に対して腐食性が見られないが、 KIO_3 溶液に対して有機酸を組み合わせ、低い pH 条件にすることで、W への腐食性が高まること、ターフェルプロット測定から確認された。一方、砥粒においては、こぶ型コロイダルシリカが評価され、W CMP においても、球状コロイダルシリカより高い研磨レートを示すことが確認された。また、研磨面に対して接触面積が大きくなる小粒子径のこぶ型コロイダルシリカが、研磨レートを向上させる上で有利であることが明らかになった。高い腐食性が確認された KIO_3 + 有機酸の腐食液とこぶ型コロイダルシリカを組み合わせた研磨剤を用い W CMP を

行ったところ、研磨レートは、従来の過酸化水素水 + 硝酸鉄系の研磨剤と同等で、ディッシング量の小さい良好な研磨面を得ることが出来た。

4. こぶ型コロイダルシリカを用いた銅配線用研磨剤の開発

配膳材料に銅 (Cu) を用いた多層配線構造においては、下層の絶縁膜に Low-K 材を使用するケースが増加しているが、絶縁膜に TEOS が採用されていた時代に用いていた高い圧力条件において、CMP を行うと、バリアメタルと Low-K 膜の界面で剥離が生じ、Cu 膜とバリアメタルが全面にわたって、剥がれ落ちる問題が指摘されている。従って、現在の Cu CMP においては、非常に低い圧力で、高い研磨レートを保持しながら、初期に存在する Cu 膜の段差を解消できる様な研磨剤が必要とされている。そこで、本研究においては、低い圧力でも Cu の高速研磨を保持しながら、段差解消性の優れた新しい Cu 用研磨剤の開発を行った。従来の Cu 用研磨剤は、腐食防止剤である BTA とエッチング性の高い有機酸との混合液が用いられていた。しかし、低い研磨圧力条件で研磨レートを出すことが困難であるため、Cu に対しエッチング性が低くキレート性の高いリン酸塩を添加した腐食液と水溶性の BTA 誘導体にリン酸塩を添加した腐食液について検討が行われた。BTA + リン酸塩系の混合液の場合、Cu に対する腐食電位が低下し、Cu 表面に研磨されやすい不溶性の Cu 錯体が生じていると考察した。一方、水溶性の BTA 誘導体 + リン酸塩系の混合液の場合、腐食電流が大きく上昇し、腐食電位も低下したことから、腐食が進行し過ぎて Cu 表面がエッチングされ不溶性の Cu 錯体が生成されにくいことが確認された。研磨への影響については、各腐食液に対して、球状のコロイダルシリカが添加され、圧力変化に伴う研磨レート変化と段差解消性の評価が行われた。BTA + リン酸塩系の研磨剤は、低圧でも高い研磨レートを示し、研磨圧力に対して研磨レートが直線的に向上するプレストニアンとの関係が明らかになり、高い段差解消性が確認された。更に、高い研磨レートを得るため、BTA + リン酸塩系の腐食液にこぶ型コロイダルシリカを添加した研磨剤の検討が行われた。その結果、砥粒にこぶ型コロイダルシリカを用いることにより、研磨レートが、10% ~ 20% 向上することが確認され、BTA + リン酸塩系の腐食液にこぶ型コロイダルシリカを添加することが、低研磨圧力でも高い研磨レートを示し、段差解消性に優れた有効な組成であることが分かった。

審査結果の要旨

1. 論文の評価

本論文は、高い研磨速度を持ち、シリコン酸化膜表面に生じる欠陥が少ない研磨剤及びタングステン又は銅配線を含む集積回路作製に適した研磨剤を開発することを目的とした研究の成果をまとめたものであって、6章から成る。

第1章は序論であって、本研究の背景と目的について述べている。

半導体集積回路の高度化に伴い、その作製プロセスで使用する研磨剤にも、より高度な条件が課されるようになってきている。本研究の具体的な目的は、既存の研磨剤であるフュ - ムドシリカ及びコロイダルシリカ研磨剤について、シリコン酸化膜表面に発生する微小欠陥を減らすための改善を行うこと、及びタングステン又は銅配線を含む集積回路の作製プロセスに適した新しい研磨剤を開発することであると述べている。

第2章は既存の研磨剤であるフュ - ムドシリカ研磨剤の改善についての研究成果をまとめたものである。大きさの異なる砥粒を分級するために、沈降性及び分散性について、明らかにしている。また、分級する手法として用いられている静置沈降法について、粗大粒子を除去し、研磨速度が低下せず、酸化膜表面の欠陥の少ない研磨が行える研磨剤が得られることを、明らかにしている。

第3章は既存の研磨剤であるコロイダルシリカ研磨剤の改善について、研究成果をまとめたものである。砥粒としての性質が未解明であったこぶ型コロイダルシリカについて、その生成機構を明ら

かにした。更に、酸又はアルカリ条件がこぶ型コロイダルシリカの研磨特性に及ぼす影響を、明らかにしたと述べている。

第4章はこぶ型コロイダルシリカを用いたタングステン配線用研磨剤の開発に関する成果をまとめたものである。タングステン配線を含む集積回路の作製プロセスに適した研磨剤として、ヨウ素酸カリウム及び乳酸溶液と混合させたこぶ型コロイダルシリカ研磨剤が開発出来たことを述べている。

第5章はこぶ型コロイダルシリカを用いた銅配線用研磨剤の開発に関する研究成果をまとめたものである。銅配線を含む集積回路の作製に適した研磨剤として、水溶性ベンゾトリアゾール、リンゴ酸及びリン酸塩系溶液と混合させたこぶ型コロイダルシリカ研磨剤が開発出来たことを述べている。

第6章は本論文の総括である。

以上これを要するに、本論文は半導体集積回路の高度化に適合させた既存の研磨剤の特性改善及び新しい研磨剤の開発に関する研究成果をまとめたものであって、半導体集積回路プロセスの向上に寄与すること大である。よって、博士の学位論文(高度技術者)として合格と認める。

2. 審査の経過と結果

- (1)平成16年1月14日 博士後期課程委員会で学位論文の受理を決定し、5名がその審査委員として指名された。
- (2)平成16年2月12日 公開論文発表会及び最終試験を実施した。
- (3)平成16年2月18日 博士後期課程委員会で学位授与を可とし、大学運営委員会で承認された。

氏名(本籍)	はやし ひでき 林 秀樹 (東京都)
学位の種類	博士(工学)
学位記番号	甲第31号
学位授与年月日	平成16年3月22日
学位授与の要件	学位規則第4条第1項
研究科・専攻名	工学研究科・基盤工学専攻
学位論文題目	自律分散型ネットワーク QoS 制御方式に関する研究 A Study on A Network QoS Control Scheme Based on Autonomous Distributed Control
論文審査委員	(主査) 高知工科大学 教授 寺田 浩詔 高知工科大学 教授 島村 和典 高知工科大学 教授 坂本 明雄 高知工科大学 助教授 菊池 豊 高知工科大学 教授 岩田 誠

論文内容の要旨

昨今の光通信技術の飛躍的な進展を受けて、波長多重や光増幅技術など、伝送路(リンク)技術の進展には著しいものが見られ、これら技術進展を背景とした、伝送帯域の広帯域大容量化が進んでいる。これに伴い、ネットワークを介して様々な情報の疎通を行うことが期待され、実際に、ストリーミング配信, VoIP(Voice over IP(Internet Protocol)), E-learning, 電子商取引など、多様なサービスやアプリケーションが試みられ、導入が進められている。このようなサービスの多様化は今後一層進んでいくと考えられ、特にインターネットにはあらゆるサービスを包含していく動向が見受けられる。

しかしながら、ネットワークの広帯域大容量化は、ビットレートの飛躍的向上と共に、ネットワーク内に存在する種々の遅延を相対的に顕在化させることになる。このため、これらの遅延の累積が、ネットワークに導入された個々のサービスやアプリケーションの性能や特性に無視できない影響を及ぼしていく。さらに、インターネットのように拡張が続き、不均質なネットワークでは、これらの遅延は変動し、その変動は統計的事象として評価ができたとしても、正確な予測が困難である。このような遅延の影響を、エンドホスト間のみで補正する場合、非常に大きなバッファと許容遅延時間を設ける必要があり、サービスやアプリケーションの要求する品質(QoS: Quality of Service)を満足することが難しい。すなわち、このようなネットワークでは、ネットワークを構成するルータやスイッチ(ノード)間において、処理遅延の影響を限定的に留め、さらにノード内においても処理遅延の影響の累積を解消することにより、エンドホスト間の QoS 保証を満たすネットワーク QoS 制御が必要である。したがって、各ノードの処理遅延の影響を局所化し、トラフィックの変動やネットワークの拡張に柔軟な自律分散型制御システムの実現が重要な課題となる。

ノードの処理能力の向上に伴い、処理遅延の大きな要因は処理待ちのキューイング遅延となりつつある。このキューイング遅延を抑制し、かつ累積させないことが課題解決において肝要である。そこで、本研究では、大きなキューイング遅延が見込まれる、各ノードにおける優先制御、およびノード間のフロー制御に着目し、ノードからネットワークに至る自律分散的制御手法の確立によって、自律分散型ネットワーク QoS 制御方式の実現を目指している。すなわち、

- 1) ノードのキューメモリ内部でのキューイングを必要最小限に抑え、低遅延かつ機能的に優先制御を行い、入出力の遅延変動を吸収できる自律分散型制御アーキテクチャ、ならびに、
- 2) ノードの処理能力が不均質であることを前提とし、フローの出力先ノードに過度な負荷を与えないようにフローを送出し、フロー送出ノードに余剰能力があれば、フローを分散して送出するフロ

ー分散制御が行える, 自律分散型制御アーキテクチャ, を柔軟かつ拡張性の高い, 自己同期型制御方式を基礎として, 確立することを目指している.

本研究の, 第一の目的に対する既存技術の具体的な問題としては, AQM (Active Queue Management) 等のキューイング制御におけるキューイング遅延があげられる. 例えば, 代表的な AQM である RED (Random Early Detection) では, キューイング前に平均キュー長に応じて確率的にパケットを廃棄し, 単純な FIFO (First In First Out) メモリにキューイングする. これにより, バースト的なフローによるキューイングメモリの寡占や, 他のフローのパケット廃棄への影響を抑制している. RED を応用し, 優先度に応じてパケットの廃棄確率を変えた WRED (Weighted RED) も同様な仕組みを採る. しかし, この方式は, 輻輳時に FIFO メモリ内のキュー長が長くなると, 全ての優先クラスのパケットの平均キューイング遅延が増大するという問題がある.

これに対して, 本方式では, 自己同期型パイプラインを応用したキューイング機構を構成し, これを優先制御に適用することによって, キューイング遅延を低く抑え, パケット流量の変動に対して自律緩衝能力 (エラスティック性) の高い, 可変長自律優先キューイングを実現している. 本機構内では, 各パケットが優先度に応じて自律的に振る舞い, この結果, 優先度の高いパケットは可変長キュー内をバイパスできる. したがって, メモリ内のキュー長の影響を受けずに, 優先的に出力され, 低遅延のキューイングを可能にしている. 本機構のシミュレーション評価により, 既存のキューイング方式と比較して, 低遅延で優先度別に遅延の差別化が行え, 回線の輻輳状況に応じて緩やかにパケット廃棄が行われ, かつ優先度別に廃棄率の差別化が行えることが確認されている.

次に, 本研究の第二の目的に対する既存技術の具体的な問題として, 各ノードの処理能力が不均質なネットワークでは, ノードの処理能力を十分に発揮できないことがあげられる. 例えば, TCP/IP (Transmission Control Protocol / IP) におけるフロー制御の場合, コネクション間に介在するノードの処理能力が低く, このノード (低速ノード) と高速ノードの処理能力の差が大きいと, パケット廃棄検出, 再送, ウィンドウサイズの縮小を何度も繰り返し, これがフローの遅延や揺らぎを増加させる原因となる. また, フロー制御を行わない UDP/IP (User Datagram Protocol / IP) の場合, 制御されないパケットが大量に低速ノードに流入し, 最悪の場合, 低速ノードがフリーズする可能性もあり, ネットワークの信頼性を大きく損ねてしまう. また, 仮にこれらノード間で適切にフロー制御ができたとしても, 低速ノードが隘路にならないように, トラフィックを負荷分散することが必須となる.

これに関して, フローを複数経路に均等に負荷分散して送出し, 経路あたりの負荷を下げる方法が提案されている. しかし, パケット単位あるいは, パケットを細分化したセル単位で均等に負荷分散を行うと, スケジューリングやパケット順序補正のために高速な専用ハードウェアが必要となり非効率的である. 簡易な実装を目指して, フロー単位で分散する経路を選択する方式も提案されているが, フローの総量が大きいと特定のノードが高負荷になる場合があり, 適切な負荷分散が難しい.

これに対して, 本方式では, より柔軟で信頼性の高いネットワークを構築するために, 高速ノードと低速ノード (新旧ノード) 間の性能差に伴うパケットロスや遅延変動を低減する自己同期的フロー制御を行うと同時に, フローをパケット単位で複数経路に自律分散させることによって, ネットワーク内のスループットを向上している. 本方式のシミュレーション評価より, 低速ノードで構成される複数経路が十分存在すれば, 高速ノードからの高速フローをスループットの劣化なく, 送出できることが確認されている.

これらの結果より, 自己同期型制御方式による自律分散型制御アーキテクチャが確立でき, 柔軟かつ拡張性の高い, 優れた優先キューイング機構やフロー分散制御方式を実現できる自律分散型ネットワーク QoS 制御方式を示すことができた.

本論文は5章で構成する.

第1章序論では, 本研究の目的ならびにその工学上の意義, および QoS 制御やフロー制御の関連分野での研究の現状について述べ, 本研究で得られた新しい成果について概説する.

第2章では、将来のネットワークにおけるサービスやアプリケーションの多様化に伴い、既存のキューイング制御方式では対応できない問題を示し、この問題を解消するため、自律分散型ネットワーク QoS 制御方式に基づいた、自己同期型パイプラインを応用する新しいキューイング機構の特長を明らかにし、その基本的な構成について述べる。さらに本機構が状態遷移方程式を用いて解析可能であることを示し、原理的に優先制御機構向きの構成であり、機能分散により従来のキューイング方式には見られない遅延制御や廃棄制御を包含した優れたキューイング特性を持つことを明らかにする。

第3章では、ノード技術の進展に伴い、将来のネットワークにおける新旧ノード間の性能格差の拡大と、それに伴う、ネットワーク性能向上が十分に発揮できない問題について述べ、これを解消するために、従来方式の延長にはない、本方式による新しい自律分散型フロー制御方式が必要であることを明らかにしている。さらに、このような自律分散型制御アーキテクチャを適用したフロー制御方式が、自律的に分散先の各リンク上でのパケット廃棄を抑制し、中継先の処理能力に応じて過負荷を与えないフロー分散により、キューイング遅延を抑制でき、この結果、処理性能、柔軟性、および信頼性の観点から、原理的に非常に優れた方式であることを明らかにする。

第4章では、本研究で明らかにした自律分散型制御アーキテクチャ実現法の評価手法について述べ、シミュレーションによる評価結果を提示し、本研究によるアーキテクチャ実現法の有効性、および優れた性能を発揮できることを明らかにする。

第5章では、本論文の各章で得られた成果を総括し、ノードからネットワークの制御まで、一貫した自律分散型制御に関して、今後の課題ならびに将来展望について述べる。

審査結果の要旨

1. 論文の評価

本論文は、ネットワーク QoS 制御の自律分散型実現に関する一連の研究成果を、5章に分けてまとめたものである。本研究は、情報通信ネットワークの拡大と大容量化に伴い多様化していく、サービスやアプリケーションの品質(QoS)を保証できる制御技術の本質的な要件を明確にし、今後の発展すべき方向性を提示したもので、その主な成果は次の通りである。

(1) ビットレートの飛躍的向上により、相対的にネットワーク内の種々の遅延が顕在化し、従来技術ではこれら遅延の累積のため、サービスやアプリケーションの QoS を劣化させている。この問題を解決するため、従来技術の延長にない、自律分散型 QoS 制御方式の考え方を提起している。

(2) 顕在化する遅延の主な要因がキューイング遅延であることを指摘し、この要因を解決する自律分散型アーキテクチャを具体的に適用した制御方式を、ノードレベルの QoS 制御とネットワークレベルの QoS 制御の観点からそれぞれ提案している。

(3) ノードレベルの QoS 制御の観点から具体化した自律分散型 QoS 制御方式として、自己タイミング型パイプラインを応用した新しい優先キューイング機構を提案している。このキューイング機構が遅延制御や廃棄制御を機能分散実装させた、従来にない優れたキューイング特性を有することを有限状態マルコフモデルおよび離散事象シミュレーションを用いて定量的に示している。

(4) ネットワークレベルの自律分散型 QoS 制御方式として、自律分散型フロー制御方式を提案している。本方式は、リプライされるキュー情報を活用し、隘路に過負荷を与えずに遅延の低減を図る仕組みを基礎としている。本方式による自律分散型のフロー送出・迂回制御と自律フロー集約制御を組み合わせることにより、各種のネットワークポロジで効果を発揮できることを定量的評価を通して明らかにしている。

以上のように、本論文は従来技術に因われない、全く新しい QoS 制御方式を提案しており、その有効性についても、評価結果から明らかにしており、得られた成果は、情報通信技術の発展に寄与するところが大きい。よって、本論文は博士論文として価値あるものと認める。

2. 審査の経過と結果

- (1) 平成16年1月14日 博士後期課程委員会で学位論文の受理を決定し、5名がその審査委員として指名された。
- (2) 平成16年2月12日 公開論文発表会及び最終試験を実施した。
- (3) 平成16年2月18日 博士後期課程委員会で学位授与を可とし、大学運営委員会で承認された。

氏名(本籍)	なかひら たくじ (高知県)
学位の種類	博士(工学)
学位記番号	甲第32号
学位授与年月日	平成16年3月22日
学位授与の要件	学位規則第4条第1項
研究科・専攻名	工学研究科・基盤工学専攻
学位論文題目	Content Delivery Networksにおける映像コンテンツ配信時の品質維持制御に関する研究 Study on Sustaining The Quality of Video Content Retrieved Through Content Delivery Networks
論文審査委員	(主査)高知工科大学 教授 島村 和典 高知工科大学 教授 岡田 守 高知工科大学 教授 木村 義政 高知工科大学 教授 清水 明宏 高知工科大学 教授 岩田 誠

論文内容の要旨

本論文は、IP 網の上に構築されたコンテンツ配信ネットワーク (Content Delivery Networks: CDN) を通して提供される映像コンテンツについて、配信時の品質を維持するための制御技術に関する研究成果を述べたものである。論文は、第1章「序論」、第2章「クライアントへの配送時における品質維持制御」、第3章「サーバ間でのコンテンツ配布時における性能改善」、第4章「利用可能帯域測定による配信制御」、第5章「結論」の5つの章から構成されている。

最初に、第1章では、本研究に至った背景を整理した。近年のインターネット環境の高速大容量化に伴い、従来よりも高品質な映像コンテンツの配信に向けた研究開発が盛んとなっている。一般に、ネットワークを介して映像を配信するには、その解像度や符号化処理によって決まるビットレートを送受信者間で確保する必要がある。残念ながら、現在のTCP/IPプロトコルスタックに基づいたネットワークアーキテクチャでは、ネットワークおよびサーバにかかる負荷が時間と共に変動し、かつその振る舞いを予測するのは困難である。従って、受信、再生される映像の品質を保つことが難しい。そのため、配信対象のコンテンツを複数の広域に分散配置されたサーバ群に複製しておき、クライアントからのアクセスを、ネットワークおよびサーバの状態に応じて最適なサーバに誘導することでネットワークとサーバの負荷分散を図り、品質保証を目指すCDNの概念が現れた。しかし、数十分から数時間といった比較的長い再生時間を持った映像コンテンツをCDNによって配信する場合、上記のような基準によってあるサーバを選択したとしても、一般にそのサーバからの配信経路の状態は時間によって変化する。ゆえに、コンテンツの配信終了まで品質を維持し続けることはまだ困難である。これまでの研究では、映像配信時にネットワーク品質が劣化した場合には、映像のフレームを間引いたり、解像度を下げたりすることで配信を続行する手法が中心であった。

これに対して第2章では、CDNによって映像コンテンツが配信される場合、「コンテンツが複数のサーバに複製配置されていることを利用して再生品質を可能な限り保つ配信制御法はないか」という点に着目し、検討を進めた。その結果、1) コンテンツがミラーリングされている環境においてクライアントへの転送量を前回の転送時の転送速度に比例させる方法、2) コンテンツをストライピングすることで記憶容量のコストを下げながらも一定の品質維持に

寄与させる方法，を提案するに至った．以下，各方式について詳細を述べる．

まず，1) については， S_1, S_2, \dots, S_N と N 台のサーバに配信対象のコンテンツ（サイズを S_i [bytes]とする）が配置されているとき，クライアント C は，これを U [bytes]ごとを取得するものとする．1 回目の転送では，すべてのサーバから U/N [bytes]ずつデータを取得する．このとき，サーバ S_i からの転送速度 B_i [Mbit/s]を算出する．2 回目以降の転送では， S_i からの転送量= $B_i / (B_i$ の総和) $\times U$ [bytes]とする．つまり，転送量を前回の転送速度に比例配分する．本手法により，理論上， C に対するコンテンツの実効的な転送速度が B_i の総和となることから， B_i の総和がコンテンツのビットレート B_c [Mbit/s]以上あれば再生品質を維持できることになる．すなわち， B_i それぞれが所定のビットレート未満であったとしても，合計で B_c 以上あれば良いということになる．

一方，2)では，コンテンツを一定サイズごとに $S_1 \sim S_N$ にストライピングすることを考える．これは，RAIDにおけるレベル0のデータ配置を，ネットワーク越しに繋がっているストレージに対して適用したものと見える．ストライピングすることにより，各サーバ S_i に必要な記憶容量は S_i/M [bytes]と $1/N$ ですむ計算になる．クライアント C は， N 台すべてのサーバからストライピングされたデータを取得し，元のビットストリームに再構成する．このとき，各経路の転送速度が B_c/M [Mbit/s]以上である限り，再生品質を維持できることになる．1)と比べると，いずれか一つの経路の転送速度が B_c/N [Mbit/s]を下回ると品質を維持できないため，ネットワーク品質の変動への耐性は劣るが，ミラーリングするほどストレージ容量が十分でない場合や，日常的な転送速度が B_c/N 以上 B_c 未満であることが既知である場合には，簡単で有効な手段となる．また，1)と2)いずれの場合にも，既存のTCPを転送プロトコルとして使用することで，転送速度を得るのに余分なトラフィックを送出せずに済み，他のトラフィックとの公平な帯域共有が行える点も利点である．

次に，これら提案方式を，実ネットワークを使って有効性を検証した．クライアントにはPC-AT 互換機にPC-UNIXを搭載したものを選び，既存のオープンソースソフトウェアにコードを追加する形で上記1)，2)の方式を実装した．配布コンテンツには，近年民生用としても急速に普及しているDigital Video(DV)形式を選んだ．なお，DVのビットレートは約30Mbit/sとなる．コンテンツをUNIXサーバに蓄積し，転送プロトコルにはHTTPを用いた．サーバおよびクライアントは，研究開発用テストベッドであるJGNにより，サーバ---PC ルータ---JGN---PC ルータ---クライアントという形で接続した．幕張と岡山にサーバを1台ずつ，クライアントを高知（大学内）に配置した．PCルータ間を結ぶATM PVCの帯域幅を設定し，二つの経路の転送速度を変えていったとき，両方15~30Mbit/sのときには上記1)，2)いずれの方式でも30fpsでの途切れない再生が行えた．片方が15Mbit/sを下回っているがもう片方と足すと30Mbit/s以上となる場合には，2)の方式では再生が止まるのに対して，1)の方式では理論通り再生を続行することができた．

続いて第3章では，上記1)の方式を，コンテンツのミラーリング時に活用する方法について検討した．従来，あるコンテンツを複数の宛先に配布する方法としては，ユニキャストによる配布とIPマルチキャストによる配布がある．ユニキャストによる配布は簡単に実行できるが，内容が重複するパケットをネットワークに送信することになり，帯域の消費が大きい．IPマルチキャストによる配布は，途中のルータで必要に応じてパケットを複製するために最小限の帯域で配布が行えるが，規模が大きくなったときの配布ツリーの維持が難しい，既存のルータ全てが対応していないといった問題がある．さらに，両者とも一つの送信ホストから複数の受信ホストに同報するという形であるため，配布に要する時間あるいは速度は，他の経路の状態に関わらず一つのボトルネックによって決定される．

この状況を改善するため，提案方式1)を次のように利用することを考えた．始めに，配布対象のコンテンツを N 等分し，配布先となる N 台のミラーサーバにストライピングする．続いて，各ミラーサーバが残り $N-1$ 個のブロックをオリジンサーバと他のミラーサーバから1)の方式によって受信する．こうすることにより，ネットワーク品質の変動があってもそれに応じて転送速度が最大化され，ボトルネックに依存せずに配布時間の短縮につながる．さらに，台数 N が増えるにつれて転送速度の向上が見込めるため，配布時間の規模適応性も有す

ることになる。仮に $N=4$ 、サーバ間の帯域がすべて等しいとしたとき、配布に要する時間はユニキャストあるいは IP マルチキャストによる場合に対して 50% 近くまで短くなる計算となる。その上、個々の転送はあくまでも通常のユニキャストであるため、ルータやホストへの新たな実装も必要ない。

先に述べた実験環境において、高知にもう 1 台 UNIX サーバを配置しこれをオリジンサーバとし、残る 2 台をミラーサーバとした場合、最初のストライピング時に対して、次の並列転送では 1.5~1.6 倍の転送速度が得られ、全体として 1.2 倍前後の速度向上が見られた。この結果は、サーバ間に時間と共に変動する負荷トラヒックを与えたときも同様であり、ネットワーク品質への耐性が向上しているといえる。

ここまで、ミラーリングされていることを利用し、転送量を転送速度によって比例配分する方式、およびストライピングすることでストレージ容量と 1 パスあたりに必要な帯域を減少させる方式を提案し、評価したが、両者とも N 台のサーバすべてを配信に参加させ、サーバ、ネットワークともに正常に稼働するという仮定があった。実際には、サーバやリンクがダウンしたり、輻輳が激しくなって他の経路と比べて大きく転送速度が低下したりすることも起こり得る。また、システム全体を見渡したとき、そのクライアントでの再生品質は維持できるが N 台すべてから配信することが最適とは限らない。これらを一般化すると、「クライアントでの再生品質を維持した上で、システム全体の負荷を最も良く分散するには、 N 台のサーバのうちどの K 台から配信してもらえば良いか？」という問題に帰着される。この問題を解くには、経路の現在の状態、具体的には「あと何 Mbit/s 利用可能か」という利用可能帯域を知る必要がある。ここ 1,2 年の間に、アクティブ計測による利用可能帯域の推定手法の研究が活発になっている。しかし、プローブ用のパケット送信により帯域が消費される、推定に時間がかかる、測定中のパスに他のトラヒックが混在すると精度が落ちるといった問題が存在する。

第 4 章では、こうした問題を克服し、実際の配信制御に適用可能な方法として、自律システム (AS: Autonomous System) ごとに経路と利用可能帯域をチェック、保持するモニタリングサーバを置き、送信ホストからのプローブパケットを中継する方式を提案した。具体的には、まずモニタリングサーバが SNMP により自 AS 内のルータから経路表を取得後、存在するパスの一覧を作成する。次いで、リンク容量とトラヒック量を取得し、パスごとに利用可能帯域を求めて保存する。以後定期的にトラヒック量を取得、利用可能帯域を更新していく。送信ホストは、利用可能帯域の初期値を記入したプローブパケットを自 AS にあるモニタリングサーバに送信する。このとき、モニタリングサーバはプローブパケットの IP ヘッダからどのパスを通過するのか特定し、そこの利用可能帯域とプローブパケットに記された値とを比較する。前者の方が小さければプローブパケットの値を書き換え、次の AS のモニタリングサーバに転送する。これを受信ホストに到達するまで繰り返し、最後に受信ホストが受信したプローブパケットに記された値を送信ホストに返信することで、エンドホスト間の利用可能帯域を得る。提案方式により、往復 2 つのパケットで RTT と同程度の時間で正確な測定が可能となる。さらに、標準となっているプロトコルのみで処理できるため、ルータに新たな実装を要求しない。PC に提案方式を実装、評価した結果、他の測定方式と同等の正確さを保ちながらも、測定時間は $RTT+1ms \times$ ルータ数程度に、CPU 使用率は 10 分の 1 以下に抑えられることが示された。

最後に、第 5 章において本研究で得られた成果をまとめ、今後の検討課題、将来展望について論述している。

審査結果の要旨

1. 論文の評価

申請論文の要点は、

IP 網上に構築されたコンテンツ配信ネットワーク CDN を通して提供される映像コンテンツの配信時の再生品質を維持する網制御技術に関する研究を述べたものである。

CDN によって映像コンテンツが配信される場合、コンテンツが複数のサーバに複製配置されていることを利用して、再生品質を可能な限り保つ配信制御を考案・実証している。その結果、1) コンテンツがミラーリングされている環境においてクライアントへの転送量を直前の転送時の実転送速度に比例制御する方法、および2) コンテンツをストライピングすることで記憶容量のコスト値を下げながら一定の品質維持に寄与させる制御方法を具体的にあらたに考案し、実験室環境および実広域 IP 網上で、その有効性の検証を行った。

また、上記制御方法をさらに有効にするために、IP 転送系の自律システムごとに経路と利用可能帯域を検査し結果を保持させるモニタリングサーバ機構とモニタリングサーバ群のみに、利用可能最小帯域を巡回回答させる測定負荷の極めて少ない利用可能パス帯域測定法を考案し、検証を進めた。

本研究は映像をはじめ IP 網の新しいストリーミング利用に有効な配信技術となる。IP 転送が支配的になりつつある通信系で通信の高度利用・放送との融合利用など将来に望まれる研究を着実に進展させた。

論文審査委員会の意見は、

学術的な発表内容も博士の水準に達しており、最終判定は合格とするのが妥当との合意に至った。

2. 審査の経過と結果

- (1) 平成16年1月14日 博士後期課程委員会で学位論文の受理を決定し、5名がその審査委員として指名された。
- (2) 平成16年2月12日 公開論文発表会及び最終試験を実施した。
- (3) 平成16年2月18日 博士後期課程委員会で学位授与を可とし、大学運営委員会で承認された。

氏名(本籍)	ジラポン ピパタナピオン (タイ)
学位の種類	博士(学術)
学位記番号	甲第33号
学位授与年月日	平成16年3月22日
学位授与の要件	学位規則第4条第1項
研究科・専攻名	工学研究科・基盤工学専攻
学位論文題目	Development of Multi-party Risk and Uncertainty Management Process for an Infrastructure Project (社会基盤整備事業のための複数主体リスク・不確実性マネジメントプロセスの開発)
論文審査委員	(主査) 高知工科大学 助教授 渡邊 法美 高知工科大学 教授 岡村 甫 高知工科大学 教授 草柳 俊二 高知工科大学 教授 馬場 敬三 高知工科大学 教授 中田 慎介

論文内容の要旨

東南アジア諸国の社会基盤整備事業では、事業目標が達成できず深刻な問題が発生する場合も多い。工期遅延は代表的な問題の一つである。この問題の背景には、事業の計画、入札、契約、施工の各段階で、事業内部さらには事業の外部で発生する様々なリスク要因の存在が挙げられる。

これらのリスクに対応するため、リスクの抽出、リスクの構造化と分析、リスク対応策の評価、を支援する様々なリスクマネジメントプロセス(Risk Management Process: RMP)の手法が開発されてきた。しかし、従来手法には幾つかの課題が存在する。

従来手法では、主に高頻度に発生しかつ高被害をもたらすリスクが分析の対象とされる。このため、発生頻度は極めて小さいが、発生した場合には著しく大きな被害をもたらすリスクは抽出されないことが少なくない。本論では、このような「カストロフィックな」リスクを特に「不確実性」と呼ぶ。不確実性に対して必ずしも十分に対処できないことが第一の課題である。

また、従来手法ではリスクの構造化や分析手法の具体的手順が確立されていない。分析精度が低いことが第二の課題である。

従来手法によって得られる最終解は、各リスク対策を採用したときの被害の期待値と被害の分散を表す無次元数である。これらの数値を、日数や金額といった日常用いる事業管理指標によって解釈することが困難であることが第三の課題である。

さらに従来手法では通常単一主体の視点しか考慮されない。各主体のリスク認識は異なっていて当然であるが、それを放置して事業を進めれば主体間の対立を招く危険性が高い。各主体の見解に相違があることを早期に認識し(Problem Awareness)、対立をもたらす相違点を特定し(Problem Identification)、対立解決を支援する(Problem Solving)機能を有していないことが第四の課題である。

本論文は、工期遅延を予防するために、上記の根源的課題と技術的課題の解決を図ることによって、リスク・不確実性事象の抽出 - 構造化 - 分析 - 対応策評価 - 各主体見解の相違認識 - 相違点特定 - 対立解決支援、という一連の行程を効率的に実施する手法を提案することを目的とした。

第1章の序論では、従来のリスクマネジメント手法の問題点を概括した後、本論文の背景、目的、構成を述べた。

第2章の社会基盤整備事業のリスクマネジメントに関する文献調査では、リスクマネジメントに関する既往文献の包括的な調査を行った。リスクと不確実性に関する種々の定義、従来のリスクマネジメントプロセスを概括した。前述したように、複数主体の協働行為である建設事業を円滑に執行するためには、まず各主体がリスクに関する自分と他者の見解が異なる可能性があることを認識する必要がある(Problem Awareness)。各主体の見解の相違を明らかにし、それらを互いに参照できる機会を設けることを目指して、論文提出者とその主指導教官が以前提案した複数主体リスクマネジメントプロセス(Multi-party Risk Management Process: MRMP)についても概説した。

第3章の(複数主体)リスクマネジメントプロセス((M)RMP)の事後評価では、MRMPの適用結果の妥当性と手法の改善点を把握するための追跡調査を行い、その調査結果を整理した。これまでリスクマネジメントプロセスの開発とその適用に関する調査研究は多数存在するが、追跡調査を行った例は皆無である。(M)RMPの適用における実務上の課題を整理した。

第4章の国際援助機関融資の社会基盤整備事業における問題点とリスク・不確実性の階層構造(Hierarchical Structure of Risk and Uncertainty: HSRU)では、不確実性への対応方法を検討した。

不確実な事象の発生を予測するためには、当事者(個人および組織)の知識や経験が重要となる。しかし、発展途上国における大規模な社会基盤整備事業では、当事者の知識や経験が不足している場合が少なくないため、不確実な事象を的確に抽出することは必ずしも容易ではない。

そこで、当該発注機関だけでなく同様な社会経済状況下にある他の発注機関からの過去の同種工事の経験を「知識ベース」化することによって「リスク・不確実性マップ」を作成・更新し、それを参照しつつ不確実性やリスクを抽出・構造化することが有益であると考えられる。

論文提出者は、国際援助機関から融資された東南アジア地域の3つの社会基盤整備事業においてリスクマネジメントに関する現地調査を行った。その結果、これらの事業では幾つかのリスク・不確実性が共通して発生していることを明らかにした。これらの調査結果に基づき、「リスク・不確実性マップ」を作成した。

次にこのマップを参照して作成するリスク・不確実性構造図は階層性を有する点に特色がある。

従来の構造図では、原因と結果、すなわち、リスクとそれが工期などに与える影響、とが明確に分離されていない。このことは、正確なリスク分析を困難にする。

本構造図は、

原因リスク・不確実性: 工期遅延をもたらす根源的なリスク・不確実性事象

影響リスク・不確実性: 直接の工期遅延をもたらすリスク・不確実性事象

影響作業 : リスク・不確実性の発生によって影響を受ける作業

遅延種類 : 例えば、作業開始の遅れが生産低下による遅れかを表す

の四つの階層から構成することとした。この階層化により、原因リスク・不確実性の発生から各種遅延発生までの一連の過程を分かりやすく視覚化することが可能となった。

第5章の工期推定プロセス(Duration Valuation Process: DVP)では、各リスク対策の効果を工期によって表現する工期推定プロセス(Duration Valuation Process: DVP)を検討した。

DVPは、

リスク・不確実性の階層構造図の作成

各リスク・不確実性の発生頻度の推定

各リスク・不確実性の影響度の推定

モンテカルロ法による工期の確率シミュレーション

の四段階から構成される。

あるリスク・不確実性の発生によって別のリスク・不確実性が連鎖的に発生する場合、後者の発生頻度を注意深く推定する必要がある。従来のリスクマネジメントプロセスでは、具体的な推定方法が示されていなかったため、推定の厳密さに欠ける危険性があった。本手法では、条件付確率や乗法定理など確率の基本法則を用いて、連鎖的に発生する事象の発生頻度を論理的かつ簡潔に求めることが可能となった。

各リスク・不確実性の影響度の推定にも改良を試みた。従来手法では、各リスクが各作業に与える影響を推定することは困難であった。本手法では、事業全体のワークブレイクダウンストラクチャー(作業階層)(Work Breakdown Structure: WBS)とクリティカルパス法(Critical Path Method: CPM)を導入することにより、各リスク・不確実性が各作業項目並びに工程全体に与える影響を推定することが可能となった。

リスク・不確実性構造図への階層性の導入、確率基本法則を用いた連鎖的発生事象の発生頻度の推定、WBS・CPM を導入した各リスク・不確実性影響度の推定によって、分析精度の向上を試みた。

これらの手法によって、あるリスク対策を実施したときの工期の累積分布関数、すなわち、ある期日までに事業が完了する確率値を求めることも可能となった。

第 6 章の複数主体リスク・不確実性マネジメントプロセス(Multi-party Risk and Uncertainty Management Process: MRUMP)では、各主体の見解に相違が存在することを認識させ、対立をもたらす相違点を特定し、対立解決を支援する機能を有する複数主体リスク・不確実性マネジメントプロセス(Multi-party Risk and Uncertainty Management Process: MRUMP)について検討した。

MRUMP は リスク・不確実性マネジメント計画、 リスク・不確実性抽出・構造化、 リスク・不確実性評価・分析、 リスク・不確実性対策、 リスク・不確実性制御、の 5 部門構成とした。

検討結果は、MRUMP 使用マニュアルとして整理した。

第 7 章の複数主体リスク・不確実性マネジメントプロセス(MRUMP)の適用では、事例研究として MRUMP を国際援助機関から融資された東南アジア地域の社会基盤整備事業に適用し、MRUMP の適用性を検討するとともに同事業における改善点を提案した。

適用時点は工事の開始時点と設定した。本事業における発注者、コンサルタント、施工者の上級管理者を調査対象者として選定し、各主体が工事開始以降に発生するリスク・不確実性をどのように捉えているかを調査した。

各主体の認識の相違点は、「統合型リスク・不確実性階層構造図(Integrated Hierarchical Structure of Risk and Uncertainty: IHSRU)」および「リスク・不確実性影響評価図(Risk/Uncertainty Impact Quantification Chart: RUIQC)」によって表現した。

前者は各主体のリスク・不確実性階層構造図(HSRU)を重ね合わせたものである。これによって、「リスク・不確実性の構造認識図は主体間によってどのように異なっているか」を分かりやすく表現することが可能となった。後者は、「各リスク・不確実性がもたらす工期への影響評価は主体間によってどのように異なっているか」をバーチャートによって表したものである。

これらの分析結果によって、各主体のリスク・不確実性認識に関する相違点が存在し(Problem Awareness)、対立の原因となっている相違点を定量的に示し(Problem Identification)、解決策を提案する(Problem Solving)ことが可能となった。

さらに、今回提案した MRUMP によって、工事契約条項の妥当性を評価できることも示した。

第 8 章の結論と今後の課題では、複数主体リスク・不確実性マネジメントプロセスの開発・適用・貢献・今後の課題について整理した。

審査結果の要旨

1 . 論文の評価

東南アジア諸国の社会基盤整備事業では、事業目標が達成できず深刻な問題が発生する場合も多い。工期遅延は代表的な問題の一つである。この問題の背景には、事業の計画、入札、契約、施工の各段階で、事業内部さらには事業の外部で発生する様々なリスク要因の存在が挙げられる。

これらのリスクに対応するため、リスクの抽出、リスクの構造化と分析、リスク対応策の評価、を支援する様々なリスクマネジメントプロセス(Risk Management Process: RMP)の手法が開発されてきた。しかしながら、従来のリスクマネジメントプロセスには以下の課題が存在する。

発生頻度は極めて小さいが、発生した場合には著しく大きな被害をもたらすリスク(本論文では「不確実性」と呼ぶ)に対して必ずしも十分に対処できないこと。

リスクの構造化や分析手法の具体的手順が確立されていないため、分析精度が低いこと。

得られる最終解は、各リスク対策を採用したときの被害の期待値と被害の分散を表す無次元数であるが、これらの数値を日数や金額といった日常用いる事業管理指標によって解釈することが困難であること。

通常単一主体の視点しか考慮されないこと。各主体の見解に相違があることを早期に認識し(Problem Awareness)、対立をもたらす相違点を特定し(Problem Identification)、対立解決を支援する(Problem Solving)機能を有していないこと。

本論文は、工期遅延を予防するために、上記課題の解決を図ることによって、リスク・不確実性の抽出 - 構造化 - 分析 - 対応策評価 - 各主体見解の相違認識 - 相違点特定 - 対立解決支援、という一連の行程を効率的に実施する方法を提案したものである。

不確実性への対処方法としては、当該発注機関だけでなく同様な社会経済状況下にある他の発注機関からの過去の同種工事の経験を「知識ベース」化することによって「リスク・不確実性マップ」を作成・更新し、それを参照しつつ不確実性やリスクを抽出・構造化する手法を提案した。

分析精度の向上を図る方法としては、a)リスク・不確実性の構造を、原因リスク・不確実性 - 影響リスク・不確実性 - 影響作業 - 遅延種類、からなる階層図によって表現し、b)連鎖的に発生する事象の発生頻度を確率基本法則を用いて推定し、c)各リスク・不確実性の影響度をワークブレイクダウンストラクチャー(WBS)およびクリティカルパス法(CPM)を導入して具体的に推定する手法を提案した。さらに、モンテカルロ法による工期の確率シミュレーションを実施することによって、各リスク対策の効果を工期によって表現する手法を提案した。

主体間の見解相違の早期認識、相違点の特定、対立解決支援を図るための方法として、各主体のリスク・不確実性構造認識図とそれらの影響評価をそれぞれ全主体で重ね合わせた「統合型リスク・不確実性階層構造図」および「リスク・不確実性影響評価図」を提案した。

これらの要素手法をもとに、複数主体リスク・不確実性マネジメントプロセス(Multi-party Risk and Uncertainty Management Process: MRUMP)使用マニュアルを作成した。

提案した手法を東南アジアの社会基盤整備事業に適用し、手法の有効性を確認するとともに、同事業における改善案を提案した。さらに、本手法によって、工事契約条項の妥当性を評価できることも示した。

近年、海外の建設事業では、頻発する対立・紛争を予防するために、主体間の意思疎通の円滑化を図る新たなリスクマネジメントのあり方が模索・提案されている。

本論文は、この新しい潮流に具体的な手法を提供するものであり、「高度技術者」の博士論文として十分に値するものと判断される。

2 . 審査の経過と結果

- (1)平成 1 6 年 1 月 1 4 日 博士後期課程委員会で学位論文の受理を決定し、5 名がその審査委員として指名された。
- (2)平成 1 6 年 2 月 1 3 日 公開論文発表会及び最終試験を実施した。
- (3)平成 1 6 年 2 月 1 8 日 博士後期課程委員会で学位授与を可とし、大学運営委員会で承認された。

氏名(本籍)	スバキット スワットキッタム Supakit Swatekititham (タイ)
学位の種類	博士(工学)
学位記番号	甲第34号
学位授与年月日	平成16年3月22日
学位授与の要件	学位規則第4条第1項
研究科・専攻名	工学研究科・基盤工学専攻
学位論文題目	Computational Model for Chloride Concentration at Surface of Concrete Under Actual Environmental Condition (実環境においてコンクリート表面に蓄積する塩化物イオン量の算定法)
論文審査委員	(主査) 高知工科大学 教授 岡村 甫 高知工科大学 教授 藤澤 伸光 高知工科大学 教授 中田 慎介 高知工科大学 教授 島 弘 高知工科大学 助教授 大内 雅博

論文内容の要旨

The deterioration of the existing structure occurs with plenty of attacking causes through the life after construction. The common damages happening in the reinforced concrete structure are the shrinkage, creep, and corrosion. The location with near to seashore is the location with high potential to lead corrosion of steel in a structure. Mainly reason is due to the chloride penetration with cause unstabilization and corrosion of the steel surfaces. The mechanism of chloride penetration depends on the ambient environment of the structural location. The proposed model for evaluation of chloride penetration in concrete structure in a simple ambient condition had been developed continuously. One of the most famous microstructural analysis of concrete properties with time dependence is created as in the name of DuCOM.

According to DuCOM analysis, the mechanism of chloride transport in a steady state and some various wetting-drying conditions. These wetting-drying cycles have a large influence to the diffusion and advective movement into concrete along the depth. The effective wetting-drying ratio is shown the most severity of the chloride penetrated level. The knowledge for understanding the wetting-drying periods to judge against the climate in the real environmental situation could be helpful. This helps to scrutinize the facts of chloride transport through concrete in a certain time. However, The simulation of actual wetting-drying cycles is found that it does not influence much on the severity of penetration.

The understanding of available chloride in any environments becomes a main criterion to explain chloride attacking to structures located in the sea, tidal zone, splash zone, and atmosphere in a distance

from seashore. The consideration starts from seawater breaking of chloride ions from seashore and next on the transportation to the land. In the different levels of the chloride amounts in the atmosphere, the initial chlorides attacking to a concrete structure must provide the variety of damages. The calculation of chloride transport with wind and distance effects followed the equation of motion. This model is an average movement without the obstruction. The obstruction is thought as the reduction of transport distance further from this model. The chloride in a atmosphere transports to the surface of concrete structure and accumulates to the surface concrete along the surface roughness and pores according to exposure time and weather conditions. Raining effect is the most effective parameter to decrease the amount of chloride at surface layer and it is able to cause low chloride contents even locating near seashore.

The weather has a big influence on the accumulative chloride at surface and the transport during the concrete depth. The wind speed and direction effects on the amount of airborne chloride by taking to the air and attached at structure. This adsorbed chloride contributes along the surface depth and penetrates in which relates to damping of concrete surface itself. The desiccated chloride seems not to be sever in a low humid day, but it turns to have a large influence whenever raining starts. Rain is a factor of declination of surface chloride and at the same time, it increases the degree of saturation on the surface influencing diffusion and advection in concrete. The appropriate method of airborne transportation is expressed. The 4 zones of different severity are separated into Okinawa, Japan Sea Coastline, Pacific Ocean Coastline and others.

The understanding of environmental supply of chloride content is known as related to the function of overall environmental parameters. DuCOM in with the combination of environmental influences uses in analyzing the structure with a certain water to cement ratio in order to obtain the chloride penetration. As the results, the verification of the proposed calculation of each environmental parameter is compared case by case in details according with the specific characteristic of each investigated data. The particular recommendations from analysis of different structural types and sections would be applicable for a design advice. The actual investigated data on chloride distribution obtained from PWRI is used for verify the simulated result from proposed calculation method.

The new design procedure is the fulfillment of this research by modifying the Fick' 2nd Law in JSCE specification. The better accuracy design than current one is succeeded based on knowledge in above described model. This leads the reduction of safety factor due to discovering exact effect of each parameter. In addition, the proposed model can be used for evaluate current situation of individual existing structure and prediction of limitation service life of a monitored structure.

鉄筋コンクリート構造物は、竣工時から供用期間を通じてさまざまな要因により劣化が生じ得る。鉄筋コンクリート構造に最も一般的な損傷は収縮、クリープと腐食である。海岸付近における鉄筋コンクリート構造物は鉄筋腐食の可能性が高い。鉄筋コンクリート構造物中の鉄筋腐食の主な原因は塩化物イオンの浸透による不動体被膜の破壊である。塩化物イオン浸透は構造物が立地する周囲の環境に依存する。コンクリート構造物への塩化物イオン浸透を評価するモデルは単純な環境条件のみを想定して提案されてきた。コンクリートの性状について微細組織から時系列に解析するプログラムの一つとして DuCOM をあげることができる。

DuCOM の解析結果によると、塩化物イオン移動のメカニズムは定常的なものと乾湿繰り返しによる非定常的なものとに分けることができる。この乾湿繰り返しサイクルは塩化物イオンの深さ方向の拡散現象に大きな影響を及ぼす。最も厳しい塩化物イオン浸透のレベルは有効乾湿比率により示される。実際の気象条件下での乾湿期間を知ることは有用である。このことはある期間内における塩化物イオンの移動現象を観察するのに役立つ。しかしながら、乾湿繰り返し現象はシミュレーションでは塩化物イオンの浸透にそれほど大きな影響を及ぼさないことがわかった。

あらゆる環境下での塩化物を理解することが、沖合、沿岸、飛沫帯、そして海岸から離れた場所に立地する構造物への塩害現象を説明するための主な基準となる。考察は、波が砕けて塩化物イオンが飛び散り、海岸から陸地に移動することから出発する。空気中の塩化物イオン濃度の違いにより、コンクリート構造物に到達する塩化物イオン量が異なり、塩害の程度が変わってくるはずである。風速と海岸からの距離の影響を考慮した塩化物移動を運動方程式により記述した。このモデルは障害物の無い上程での平均の運動についてのものである。この際、障害物は塩化物の移動距離の現象という形で考慮される。大気中の塩化物はコンクリート構造物の表面まで運ばれ、暴露時間と気象に応じて表面の凹凸および細孔に蓄積される。降雨は表面近傍における塩化物の蓄積を最も減らす効果的があり、海岸付近に立地する構造物でも塩化濃度が軽減される。

天候は構造物表面における塩化物の蓄積と内部への浸透に最も大きな影響を及ぼす。風速と風向は、塩化物を大気中に取り込み構造物表面に付着させることにより空気中の塩化物量に影響を及ぼす。吸着された塩化物は表面近傍に分布し、コンクリート自身の表面湿度に応じて内部に浸透する。乾燥状態の塩化物は湿度の低い日にはさほど問題ないように見えるが、降雨が開始するとつねに大きな影響を及ぼすようになる。降雨は表面の塩化物量を減らす大きな要因であるが、同時に、構造物表面における飽和度を増加させコンクリート中の拡散に大きな影響を及ぼす。大気中の塩化物移動を適切に記述した。これにより、日本国内を 4 地域 - 沖縄、日本海沿岸、太平洋沿岸、そしてその他 - に分類した。

環境からの塩化物の供給への理解はあらゆる環境の変数によって関連付けられていることが知られている。DuCOM と環境条件の影響とを組み合わせることにより、ある特定の水セメント比のコンクリート構造物での塩化物の浸透を解析した。その結果を実構造物での測定データと詳細

に比較した。異なる構造形式と部材の解析結果から得られた知見については設計に活かすことが可能であることがわかった。なお、検証には土木研究所による構造物内の塩化物の分布の実測定データを使用した。

土木学会標準示方書にあるフィックの第二則を修正することにより、本研究では新しい耐久設計法を構築した。上記に示したモデルにより、従来の設計法よりも精度が向上した。これにより安全係数を低減させることが可能となる。加えて、本研究で提案したモデルは、既存の構造物の状態および寿命予測に適用可能であるものと思われる。

審査結果の要旨

1. 論文の評価

本論文は、海中に存在する塩化物が実際のコンクリート構造物に飛来し、表面に付着するまでをモデル化し、それを既往のモデルに入力することによって、構造物中における塩化物分布を推定するシステムを提案し、それを実構造物の測定結果によって検証したものである。実際の気象条件を入力することによって、各地の構造物に対して適用できることが特長である。

研究成果は世界的にも優れたものであり、高度研究者としての博士（工学）の資格があると認められる。

2. 審査の経過と結果

- (1) 平成16年1月14日 博士後期課程委員会で学位論文の受理を決定し、5名がその審査委員として指名された。
- (2) 平成16年2月13日 公開論文発表会及び最終試験を実施した。
- (3) 平成16年2月18日 博士後期課程委員会で学位授与を可とし、大学運営委員会で承認された。

氏名(本籍)	わこう かずお 若生 和夫 (神奈川県)
学位の種類	博士(工学)
学位記番号	甲第35号
学位授与年月日	平成16年3月22日
学位授与の要件	学位規則第4条第1項
研究科・専攻名	工学研究科・基盤工学専攻
学位論文題目	圧入支持杭設計法の提案 Approach to the 'Press-in' pile design method
論文審査委員	(主査) 高知工科大学 教授 岡村 甫 高知工科大学 教授 藤澤 伸光 高知工科大学 教授 島 弘 高知工科大学 助教授 高木 方隆 高知工科大学 助教授 大内 雅博

論文内容の要旨

はじめに

基礎の目標・目的は、「上部構造物の荷重を地盤に均等に配分し、かつ上部構造物に不利な変形を生じさせない沈下耐力を持つこと」と規定できる。この事は、「基礎は、上部構造とバランスが保たれている事、基礎そのものが荷重耐力と沈下抵抗力を持つ事」と言い換えることが出来る。

地盤の耐荷重強度が上部構造の荷重強度に耐えられない場合は、特別な基礎形状にしなければならない。杭基礎形状が最も一般に用いられる形状であるが、支持地盤と構造物の間に杭を介在させるために、純粹に構造物と地盤の關係に置き換えられないという問題が生じる。このため杭基礎には、支持力評価に曖昧さと不確定さが同居しており、現在に至るまで改善はされていない。

杭基礎が構造物を支えるとき、杭基礎は以下の三点を担保して、構造物の安全性を確保しなければならないといえる。

- 支持力が確実に確定できる
- 構造物の変形に対して杭基礎との関連が確立されている
- 杭基礎と上部構造物との抵抗力の信頼性が確認されている

本研究は、このスキームに基づき圧入工法を用いて支持杭設計を行う為の杭の設計方法と施工方法を論じ、上部構造物との間の抵抗力信頼性をどの様に担保するかを考察している。

設計の基本

圧入支持杭の設計の基本は、摩擦影響を最小化して杭先端に負荷を集中させ、そこから抵抗力としてフィードバックされる力と発生力を一致させることで最大発生力 = 最大抵抗力の関係を導き、その先端抵抗力を直接的に測定することで成立している。

杭設計に求められる基本検討項目は、以下の四点である。

- 1 杭の抵抗力が設計荷重を上回ること

$$P_{design} < P_{allowable} = R_{limit}$$

- 2 杭部材応力が部材の許容応力度以内に収まること

$$\sigma_{actual} < \sigma_{design} < \sigma_{allowable}$$

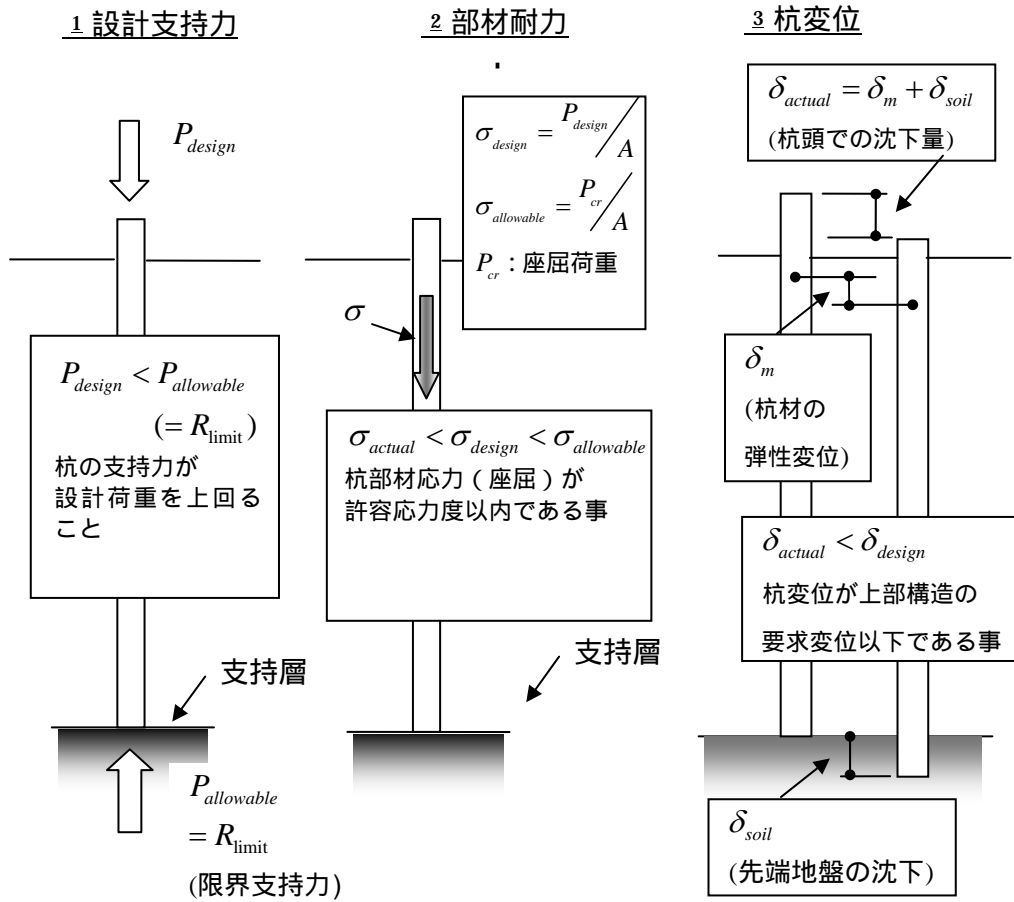
- 3 杭変位が上部構造の要求する変位以下であること

$$\delta_{actual} < \delta_{design}$$

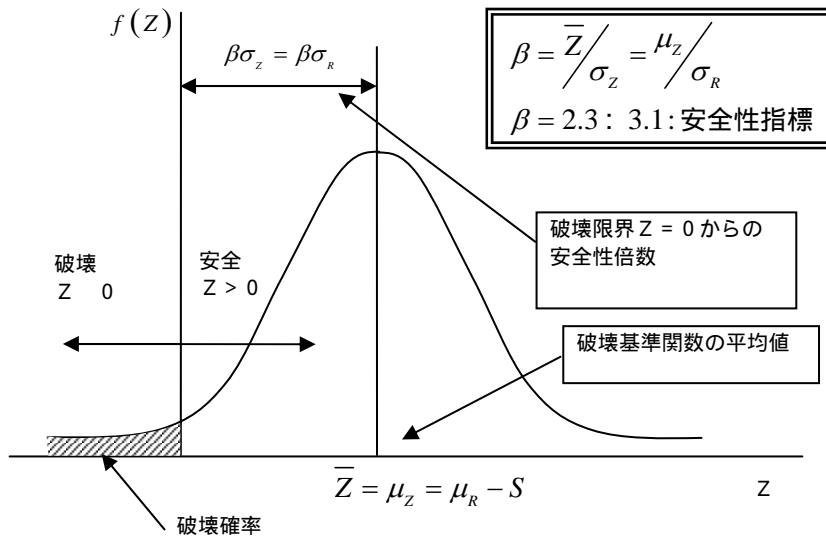
- 4 上部荷重に対して杭基礎全体の支持力信頼性が確認できること

$$\text{安全性指標 } \beta = \frac{\bar{Z}}{\sigma_Z} = \frac{\mu_R - S}{\sigma_R} = 2.3 : 3.1 \text{ を確認}$$

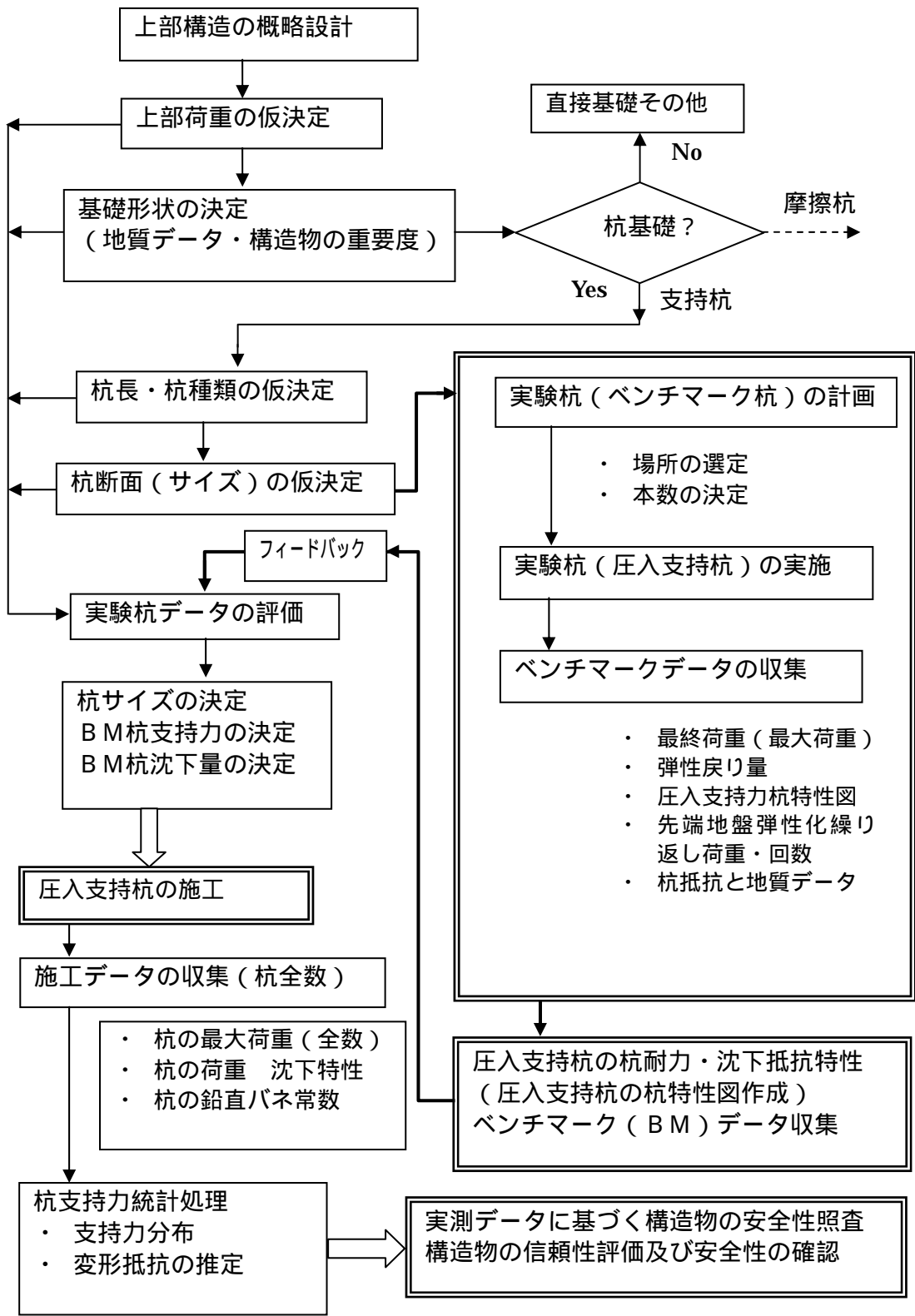
この四点が確認されて、杭が荷重に対して破損せず、上部荷重に対して抵抗力を持ち、変形が許容値に収まり、最終的に構造物と基礎を信頼性評価で結び付けることが出来る。この4つの検討を圧入支持杭設計の基本スキームとする。



4 信頼性評価



設計荷重の決定及び許容沈下量の決定



杭の鉛直限界支持力

圧入支持杭の支持力は

鉛直支持力 = 先端支持力 = 先端抵抗力 (杭周面摩擦力 = 0)

で示される。先端支持力は実測値を用い、実測先端支持力は、支持層に到達した時の圧入最終荷重 (ほぼ圧入最大荷重と同値) によって決定される。この圧入最終荷重を杭の鉛直限界支持力とするためには、繰り返し荷重による杭先端地盤の弾性化が必要である。この関係は、

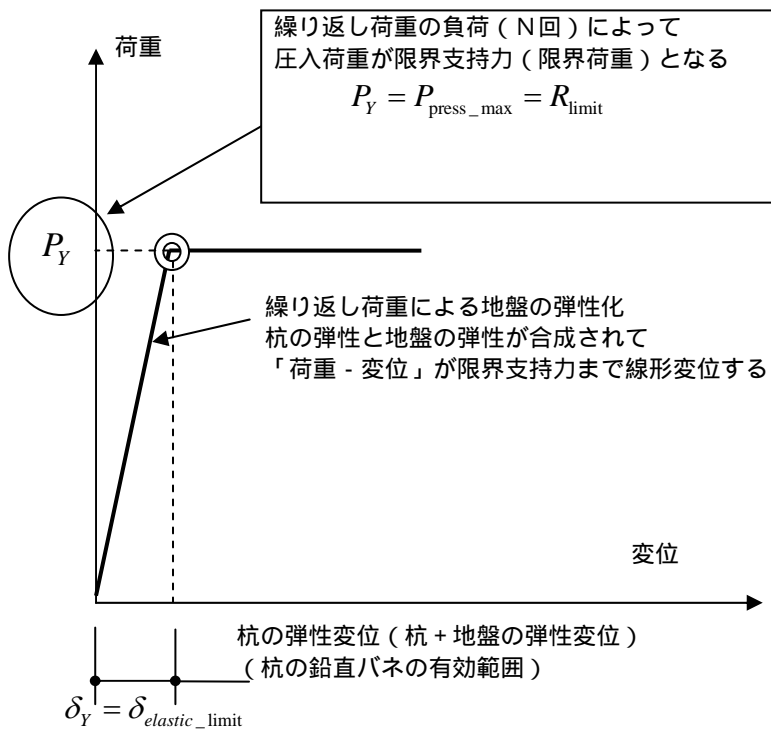
$$R_{\text{limit}} = R_{\text{bearing_capacity}} = \alpha P_{\text{press_max}}$$

α : 低減係数 ($\alpha=0.8:0.9$)

で示され、低減係数で評価された後、圧入最終荷重が杭の鉛直限界支持力となる。

先端繰り返し荷重を経て圧入最終荷重が限界支持力となったときには、杭の変形特性は限りなく杭の弾性挙動に近づいており、圧入支持杭の特性図として完成することが出来る。

杭一本ごとに定められる 圧入支持杭特性図



限界支持力の推定

許容変位量（杭基礎の許容沈下量）

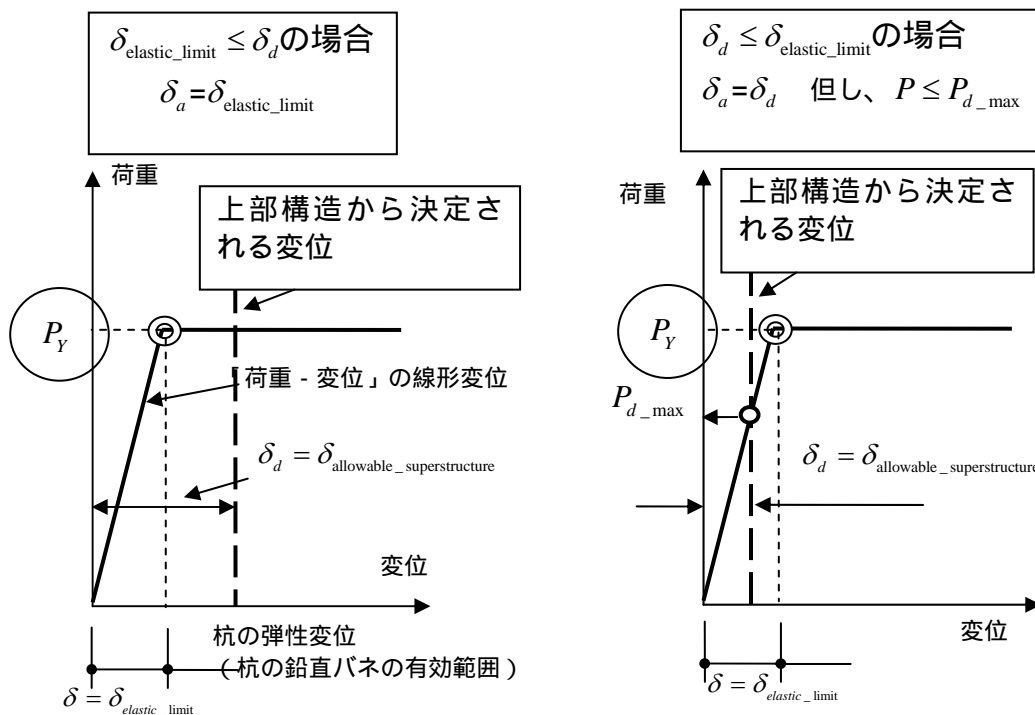
基礎の許容変位量は上部構造の重要度によって規定される。基礎の（推定）変位量は、上部構造に規定される変位量を超えてはならず、圧入支持杭は杭ごとに限界荷重までの変形量（杭の弾性沈下量）が規定できる。

上部構造の許容変位量は構造設計の考え方に依存するため絶対量では規定できないが、圧入支持杭の圧入履歴から決定される許容変形量（弾性変形量）は、構造設計によって決定される変形量以下に押さえる必要がある。上部構造から規定される変形許容量が圧入支持杭の変形限界以下であるときは、許容変形量は、上部構造物によって規定される。この時、圧入支持杭の支持力特性図から決められる荷重値を杭荷重の限界値とする。

$$\delta_a = \min(\delta_{\text{elastic_limit}}, \delta_{\text{allowable_superstructure}})$$

$$\begin{cases} \delta_a = \delta_{\text{elastic_limit}} < \delta_{\text{allowable_superstructure}} \\ or \\ \delta_a = \delta_{\text{allowable_superstructure}} < \delta_{\text{elastic_limit}} \end{cases}$$

許容変位量の推定



圧入支持杭特性図

集合杭の支持力評価（信頼性）

圧入支持杭は、単杭施工ではなく集合杭として施工される。このため単体での評価ではなく、杭全体の信頼性を確認する必要がある。各々の杭は杭造作の施工時に支持力を確認しており、杭のパネ常数も施工履歴の中で推定が可能である。即ち、単体の支持力は直接的に数値比較によって確認が可能である。が、連続施工された杭が集合されて一体となったときの全体の信頼性も確認する必要がある、むしろこの評価が最も重要な杭基礎(集合杭)の支持力評価となる。

構造物の安全性に關与する不確定量を抵抗要素と作用要素に以下のように分ける。

R：抵抗強度に關係するものを代表（限界抵抗力の集合）

S：作用荷重に關連するものを代表（設計値一定：S = 一定）

これらは互いに獨立している。両者の關係を評価する確率変数を定義する。

$$Z = R - S$$

$R > S$ ならば $Z > 0$ 安全

$R \leq S$ ならば $Z \leq 0$ 破壊もしくは限界状態

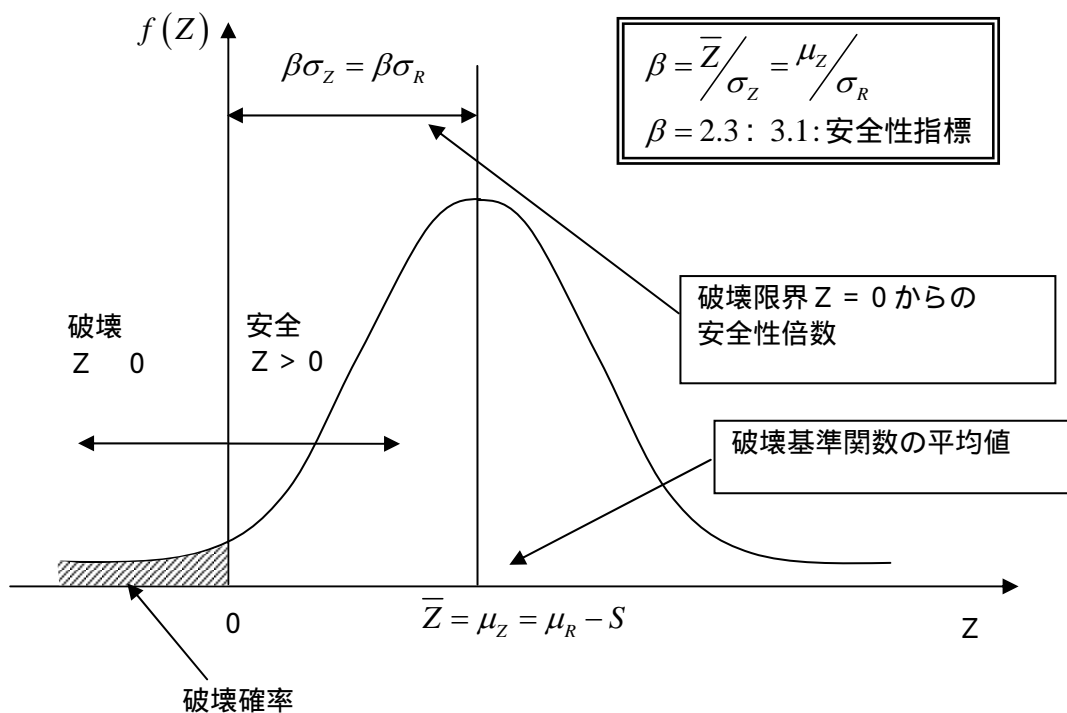
Zを破壊基準関数とする。

荷重値が獨立に変動する場合であっても、常時荷重・地震時荷重のみを考慮する場合であっても、上記の破壊基準関数で評価できる。常時荷重のみを考慮する場合はS = 一定であるため破壊基準関数は、杭の抵抗強度だけの分布形で規定できる。圧入支持杭は、集合杭となるため一つの基礎構造体に杭が数多く配置される。各々の杭は異なる抵抗強度（支持力特性）を有しているため、全体の抵抗力は統計的に評価する必要があり、かつ一基礎に対する標本数が多い事からも統計手法が有効である。

安全性指標を $\beta = \bar{Z} / \sigma_Z$ で定義すると $\bar{Z} = \mu_Z = \beta \sigma_Z = \beta \sigma_R$ となる。

これは、施工済みの杭データの標準偏差が、破壊基準関数の平均値周り（破壊に対する安全比率）にどれだけ破壊限界から離れて存在しているかと言うことを示している。

安全性指標を用いて集合杭の基礎構造を評価することによって、過大設計の防止、真の構造物の信頼性・安全性が評価できることになる。圧入支持杭はこの統計量に対する信頼性が、杭毎に測定された実データを活用できる事により、より正確な評価が出来ると言える。



正規確率密度関数から求められる破壊確率とそれを与える t の値、即ち β の値は以下の通りである。

破壊確率	10%	1%	0.1%	0.01	0.001%
安全性指標	1.28	2.33	3.09	3.72	4.26

集合杭の評価を、信頼性評価で行えば $\beta = \frac{(\mu_R - S)}{\sigma_R} = 2.3 : 3.1$ の値で基礎の安全性は 99% ~ 99.9% 確保できることになる。

圧入支持杭設計法の提案

圧入工法で造られた圧入支持杭は、杭基礎に要求される三つの基本項目を杭を造作する過程で得られたデータおよび杭の最終的な造作荷重によって表現することが出来る。即ち、支持力の確定、変形量の確定、杭の信頼性の確認を、推定値を交えずに確定できる。

これを実現するためには、圧入工法が持つ優れた杭操作方法が必要である。圧入工法は、杭を油圧によって無騒音・無振動で土中に貫入する工法であり、この特徴によって初めて杭基礎の三つの基本性能が満足させられる。支持杭の定義を支持層の上に杭を着地させると言う発想から、杭を地盤の強度を改善しながら造り上げると言う新しい支持杭の可能性を本論では提案している。

圧入支持杭設計法は、圧入工法の利点を各基本設計項目に反映させて成立している。即ち、圧入工法によって限界荷重を推定値から確定値にする杭設計法、杭先端地盤の弾塑性変位を弾性変位に改善して杭の「荷重 - 変位」特性を線形化させる設計法、杭基礎の基本理念である「上部構造物の荷重の均等配分」を検証する集合杭での信頼性評価手法の導入によって成り立っている。これらの基本要件がすべて圧入工法の基本動作で表現できる事が、本提案（設計法）の中心議論である。

本提案の設計法は、実験杭の実証にて確認済みであり、N値8程度の軟弱に近い砂質層の上に約30tfの支持能力を持つ杭の造作を可能にした。現行の基準、設計法では数トンの支持性能しか期待できない地層上に、これを遙かに上回る支持性能を持った杭を本提案の設計法で造ることができた。この事は、将来の基礎設計の基本的な考え方に大きな前進をもたらすと同時に、長い間改善されていない杭基礎の設計パラダイムに大きな変革をもたらすものであると確信している。

審査結果の要旨

1. 論文の評価

本論文は、従来土留めに利用されていた「圧入工法」を基礎杭、特に支持杭として活用することができることを実証し、その設計、施工方法を提案したものである。この工法は、世界的にも優れており、新しい分野を開くものである。よって、高度研究者としての博士（工学）の資格があると認められる。

2. 審査の経過と結果

- (1)平成16年1月14日 博士後期課程委員会で学位論文の受理を決定し、5名がその審査委員として指名された。
- (2)平成16年2月13日 公開論文発表会及び最終試験を実施した。
- (3)平成16年2月18日 博士後期課程委員会で学位授与を可とし、大学運営委員会で承認された。

氏名(本籍)	飯田 永久 (岡山県)
学位の種類	博士(学術)
学位記番号	甲第36号
学位授与年月日	平成16年3月22日
学位授与の要件	学位規則第4条第1項
研究科・専攻名	工学研究科・基盤工学専攻
学位論文題目	地方における効果的な起業家支援方法に関する研究 A study on how to effectively support entrepreneurs in local Japan
論文審査委員	(主査) 高知工科大学 教授 長尾 高明 高知工科大学 教授 馬場 敬三 高知工科大学 教授 富澤 治 高知工科大学 教授 阿部 俊明 高知工科大学 教授 加納 剛太

論文内容の要旨

[要約]

起業家支援効果の向上のため、「起業の価値」を「起業家能力」、「企業の価値」及び「ビジネスシーズの価値」の3要素で表す「起業の価値モデル」を提案した。この概念は、客観的に起業を扱う上で有用である。

このうちの2要素「起業家能力」と「企業の価値」を求めるための起業初期向きの評価式を考案して被支援者に適用し、次のことを見出した。

支援効果は、支援期間が長いと、低下する傾向がある(支援効果の低減現象)。

支援内容によっては、起業家の成長を阻害するものがある。

上のことの改善を図るため、次の提言を行い、一部は実践して実証した。

起業家の依存心を強める支援と自立を促す支援とは区分して実施するべきである。

支援者は専ら「起業家能力」の成長支援に重点を置くべきである。

実務から隔離して基礎教育を施すと、起業家能力の成長が大きい。

1 はじめに

地方での起業家支援の問題は、能力の伴わない起業家に対して過剰な支援をすることに象徴される。これは基本的に地方では「起業家支援」が単独ではビジネスになり得ず、したがって、公的機関で行わざるを得ない、ということに起因する。

筆者は約7年間、岡山県で公的な起業家支援に携わり、やはり「支援努力の割に成果が小さい」ことを実感した。地方では大都市圏より、強力なシーズ技術出現の機会が少ない。市場規模が小さくその牽引力も小さい。有望な起業家が少なくベンチャーキャピタル等の活動も低調、などベンチャー企業輩出に不利な点が多い。

筆者は合わせて次の要因も指摘した。これらは必ずしも地方特有ではないが、相対的には大都市圏よりも市場原理が働き難い、地方に多い傾向である。

支援項目に、インキュベータなどの施設貸与、補助金交付、販路紹介等直接的に起業活動を支援するものが多い。また起業家もこの種の支援を多く望む。支援に携わる者に異動が多く、知識・能力の蓄積・増強が行われ難い。依存心が強く、自立の遅い起業家が多い。専門知識を切売りするのみで、起業家の成長はあまり意識しない専門家が多数。起業後のフォローを長期的に行える支援者、あるいはメンター的な人材が少ない。

本論文はこれらについて解決のための方向、あるいは検討の方向を示した。

2 地方での起業家支援の実態

2.1 支援者

本論文では「支援者」とは、起業家の全成長局面を通じて、分野を限定せずに支援する人を指す。インキュベーション・マネジャー等、起業家と専門家を仲介する人は典型的な支援者である。地方では支援ビジネス市場が未発達で、支援者はほとんど公的機関に属している。一方「専門家」とは、中小企業診断士、公認会計士等、必要な局面ごとに企業経営の指導・支援を行う人を指す。多くが公的資格かそれに近いものを持つ。専門家も公的機関に属することがあるが、この場合も専門家としての基本的役割は変わらない。専門家は通常、支援者の要請を受けて、起業家を支援する。

支援者には、行政機関、金融機関、大企業から公的機関へ派遣された者が多く、通常2年程度で入れ替わる。このため支援知識、ノウハウの蓄積は少ない。

支援者も専門家も一般に安定志向の人が多い。

2.2 起業家の概要

本研究で対象とした「起業家」は次の如くである。

年齢、性別、職業歴を含む前歴は多様だが、企業経営はほとんど初めて 起業前か起業後2年程度までで、経営者は起業家自身のみ。従業員は0~3人 特定の既存企業との従属関係等はない 業種は主にIT関連。製造業等は約25%。

3 支援効果の評価

3.1 起業家成長の要素

支援効果の議論には効果の定量化が必要であるが、起業活動が多様なため、一般的手法は確立されていない。

筆者は支援対象の起業活動全体の価値を「起業の価値V」とし、これが次の3要素で構成されるとした。 起業家の資質と能力（起業家能力I） 起業家が構築したビジネスシステムの価値（広義の「企業」の価値K）及び ビジネスシーズの価値Sである。図1に「起業の価値V」を3次元空間表示した。

次に本論文では、簡単のため、図2のように前述の要素を除き、要素、の平面で議論した。この2要素を合成したものを「起業家の価値P」とする。図2では「起業家の成長（ P_1 P_2 ）」を、「起業家能力の成長（ I の変化= $I_2 - I_1$ ）」と「企業の価値の成長（ K の変化= $K_2 - K_1$ ）」の2要素で表している。

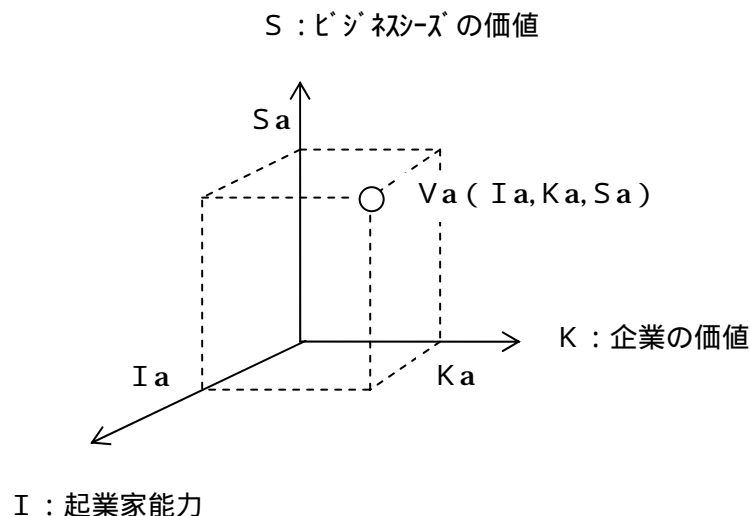


図1 起業の価値空間モデル

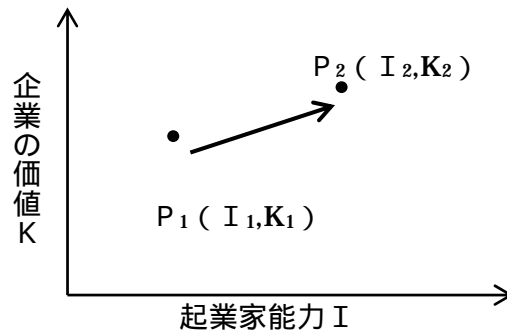


図2 「起業家の価値P」の成長直線

3.2 量的表現

筆者は「起業家能力I」は下の式(1)を、「企業の価値K」は式(2)を用いて求めた。成長は支援前後の差となる。これはあくまで起業初期向けの簡易表現であり、年商約5千万円以下の段階に適用する。

$$\text{起業家能力 } I = C \cdot W (S+M) \dots\dots\dots (1)$$

ここで、S: ビジネス感覚 M: マネジメント力 W: 意志、思い
C: 社会的コミュニケーション力

各要素: 0~5点で評価 I: 0~250点

$$\text{企業の価値 } K = \text{就業者数} + \text{年間営業利益} / 500 \text{ [万円]} \dots\dots (2)$$

4. 支援効果の例

4.1 単位時間における成長

前述の表現法を用いて、筆者らが支援したAインキュベータ入居の8者の変化を図3に示した。支援期間は2001年度の約1年間である。

起業家能力Iは筆者が評価した。矢印が各起業家の成長を表し、その方向は入居時から1年後に向かっている。図3からおおよそのことがいえる。

初期起業家能力が大きいと、起業家能力の成長が大きい 初期企業の価値が大きいと、企業の価値の成長が大きい 企業の価値の大小と起業家能力の成長には相関がみられない 起業家能力、企業の価値とも小さい起業家の成長は小さい。

4.2 支援期間と支援効果との関係

前述の8者にそれ以外の起業家のデータを加えて、支援期間の長さとして「起業家の価値」の成長の関係を図4に示した。ただし、「起業家の価値P」は、単純に図2の2成分要素「起業家能力」と「企業の価値」のそれぞれの成長量を正規化したものを加算して求めた。図4には次の制約がある。

支援開始時の起業家の価値は表現されない 支援が一段落した起業家を掲げたが、支援途上の者もある 期間中に他機関で支援を受けたか否かは考慮していない 期間中支援を受け続けた訳ではない。

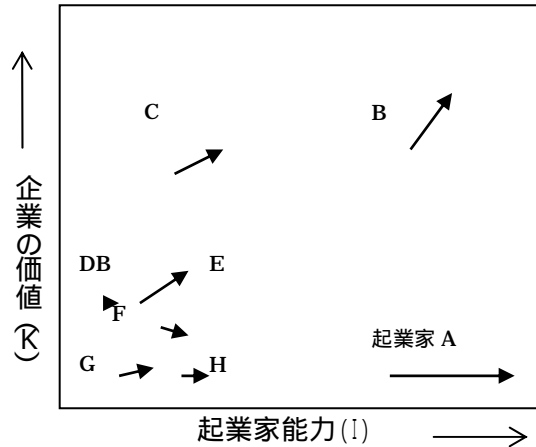


図3 一定期間の起業家成長例
(IT系Aインキュベータ)

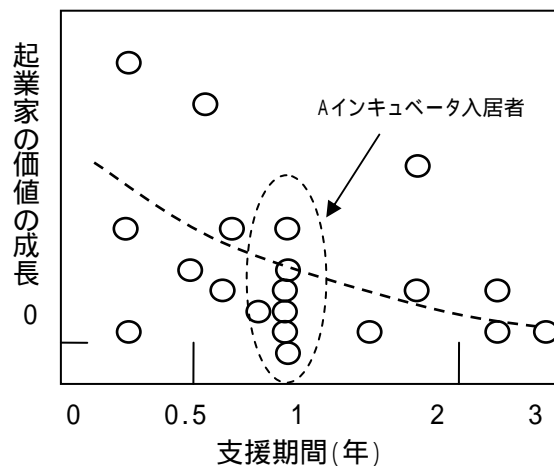


図4 支援期間と成長との関係

上記 ~ の曖昧さはあるが、図4からほぼ次のことがいえる。

支援期間と成長には負の相関が見られる(支援効果の低減現象)。これは支援開始時の起業家の価値Pが影響を与えたと考えられる。また支援の本質である「力がないと支援は長期化する。自力で成長できる者には支援は不要」ということも表れている。

Aインキュベータ入居者の成長の平均値は、他の起業家の平均値より小さい。この一因は、インキュベータへの入居が安心感を与えたと考えられる。支援が起業家の自立心を育てず、逆に依存心を強めている例である。

現実にわが国の公的インキュベータの多くが、入居者が部屋を十分に利用していないという問題を抱えている。

5. 支援効果の考察と改善の方向

5.1 支援の要素分離

「起業家能力I」の成長支援と「企業の価値K」の成長支援を区分する。前者は自立のための起業家精神とビジネス感覚の涵養であり、後者は企業自体の成長つまり事業の支援である。支援者は次の理由で、前者に注力すべきである。

多くの場合公的機関の支援者は事業支援に長けておらず、支援はリスクが大きい。事業支援は専門家等が行うべきである。事業支援には際限がない。また起業家の依存心を助長する。起業家能力が高まり自立可能になれば、支援は早期に不要となる。

これらの2要素の関係を比喻も含めて表1に表す。

表1 支援対象の2要素

起業家能力の支援	企業の価値の支援
起業家精神涵養	ビジネス支援
魚の釣り方	魚そのもの
自立心の涵養	依存心助長
ビジネスの基本概念	ビジネスの実行
顧客、資金の集め方	顧客、資金自体

5.2 新しい支援例：岡山方式プレ・インキュベーション

起業家支援では、次の理由で、起業家能力の支援を先行するべきである。

起業家能力が十分なら事業は自力で進められる。事業を始めると実務に追われ、基本的能力の涵養に時間が割けなくなる。自己流の事業の方法が身に付いた後は、基本に戻ることが困難になる。

このことの実証のため、筆者らは事業開始前にインキュベータに入居せずに起業家能力養成を行う「プレ・インキュベーション（以下PI）」を実施した。概要を表2に示す。「事業イメージは持っているが事業の実行は原則として行わない」この方式を、筆者らは「岡山方式PI」と呼ぶ。

この結果、受講者の起業家能力Iの約半年間の成長の平均値は、図3のインキュベータ入居者の1年間の平均値を上回った。

PIを一般化した概念を図5に示す。整理すると次のようになる。

事業開始前のPIとしての起業家教育は重要である。内容は事業実務より、自立と起業家精神、社会的使命、ビジネスの基本的考え方等とすべきである。大学等では、文・理系を問わず、ビジネスの基本、MOT（技術経営）などの教育を施すべきである。小・中・高校では実務よりも自立心と基本的ビジネス感覚を涵養する教育が重要である。

表2 岡山方式プレ・インキュベーションの実施例

期間	(第1期) 2002.7.27 ~ 2003.2.9
受講者	15名
開講時間	2回/月 休日午後、平日夕 2~4時間/回
特徴	具体的事業支援はしない インキュベータに入居させない グループ討議、見学、ゲーム等を多用
講師	厳選。主任講師が大半を一貫担当

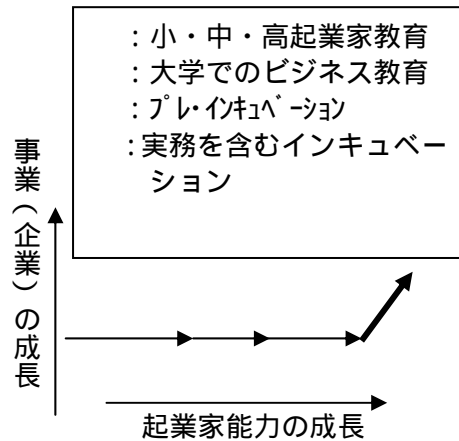


図5 プレ・インキュベーションと早期起業家教育

5.3 支援者のレベル向上と意識改革

公的機関の支援者にはビジネスの実務体験が少ない者が多いが、真面目に、熱心に支援しようとする。この結果、支援努力が成果につながらない。対策としては次のことがあげられる。

支援機関は支援者にビジネス実務経験者を増やす。起業経験者か大企業のライン部長経験者等がよい。支援者が起業後のフォローを含めて長期に支援できる仕組みを作る。支援者は常に経験豊かな専門家と連携し協働する。

6. おわりに

起業家精神を知らない者が、自立心の乏しい起業家を支援するのが多くの地方の実態である。このため「支援者が熱心に支援すればするほど、起業家は成功から遠ざかる」というジレンマも起きる。人生をかけた起業であれば、深刻である。しかし、支援の本質を見誤らなければ、解決の方向は見えてくる。関係諸氏が本論文の趣旨を酌み、より効果的な起業家支援を展開されることを期待する。

審査結果の要旨

1. 論文の評価

本論文は著者の岡山県における起業家支援の実績の中から導き出されたものであって、「地方における効果的な起業家支援方法に関する研究」と称する論文であり、全体は8章から成る。

第1章にて概要を述べ、第2章では地方における起業家支援の現状と問題点につき記述している。

第3章で起業家支援効果の評価、第4章で起業家支援の基本、第5章で岡山方式プレ・インキュベーションと早期起業家教育、第6章で支援体制の改善、第7章で資金面の支援、第8章で結言となっている。

この中で、能力のない起業家を公的機関が過剰に支援するという実態をふまえ、「起業の価値」を「起業家能力」、「企業の価値」、「ビジネスシーズの価値」の3要素で表す「起業の価値モデル」を提案し、合理的、客観的に「起業」を判断する基準を提唱している。

そして支援方法としては起業家の自立を促すため、現物支援は行わず、方法支援を重視することを眼目とした岡山方式プレ・インキュベーションを提案・実行し、多大の効果を上げたことが記述されている。また

早期起業家教育の有効性にも言及している。

支援者の能力・資質や支援環境にもふれ、支援者は少なくともある程度の起業体験もしくは疑似起業体験をもつことが望ましいこと、避けるべきことは、企業規模による区分、実績の有無を問うこと、年齢、性別、国籍、経験の長短を問うこと、失敗経験、転職頻度を問題視すること、紹介者、知人の有無を尋ねること、実質より形・外観を問うこと、出る釘を打つことなどをあげている。そして資金面での支援体制の問題点にも言及している。

以上を勘案するに、著者独自の見解が充分多く見られ、その有効性も確かめられており、まことに実際的かつ効果的な起業家支援方法を提唱した論文と考えられ、博士(学術)の学位に値する論文であると評価できる。

2. 審査の経過と結果

- (1)平成16年1月14日 博士後期課程委員会で学位論文の受理を決定し、5名がその審査委員として指名された。
- (2)平成16年2月12日 公開論文発表会及び最終試験を実施した。
- (3)平成16年2月18日 博士後期課程委員会で学位授与を可とし、大学運営委員会で承認された。

氏名(本籍)	わかき こういち 若木 宏一 (東京都)
学位の種類	博士(学術)
学位記番号	甲第37号
学位授与年月日	平成16年3月22日
学位授与の要件	学位規則第4条第1項
研究科・専攻名	工学研究科・基盤工学専攻
学位論文題目	有料放送事業における顧客離反の研究 A study of customer defection in pay television business
論文審査委員	(主査)高知工科大学 教授 富澤 治 高知工科大学 教授 馬場 敬三 大阪府立大学 教授 荒木 長照 高知工科大学 客員教授 倉重 光宏 高知工科大学 教授 阿部 俊明

論文内容の要旨

日本に有料放送事業というビジネスが起業されてから今年で12年が経過した。先行事業者であるWOWOWはアナログ、デジタルのBS放送を展開し、2003年9月末現在、約250万件の顧客を維持している。また、後発のCS有料放送、スカイ・パーフェクトTV!は同じく約307万件の顧客を獲得している。テレビは無料という概念が支配的であった日本の放送業界にあって、これだけの有料顧客を囲い込み、新しい市場を形成したことについての、両社の経済的貢献の度合いは大きい。しかし近年、この両社において顧客が離反する解約増加の問題が顕在化してきた。しかも離反率は年々上昇傾向にある。

有料放送事業は、顧客個人から直接視聴料を徴収することにより、コストを吸収し利益を得て成立するビジネスモデルである。したがって顧客の減少、すなわち顧客離反増加問題は直接収益の低下を招来するという意味で、早急に改善されることが今、両社に求められている。

放送事業はこれまで限られていた資源である電波によってのみ可能とされていた。したがって電波を管理する国からの認可が必要で、放送事業に進出したくても新たな参入は困難であった。しかしデジタル技術など放送技術の進歩や放送と通信の融合、さらにはインターネットのような新しいメディアの出現により映像や音声を送信や配信する方法が多様になり、今後は多くの事業者が有料・無料を問わず広義の意味の放送事業に参入していくことが予想される。特に有料放送の分野ではソフトバンクがすでにインターネット放送に進出しており、KDDIも光回線を利用した有料放送を2003年12月から開始すると発表している。

事業としてみた場合、先行の有料放送事業者2社は累積損失を抱えるものの単年度の決算においては利益を計上しており、すでに事業として成立できる体質を持っている。しかし先に述べたようにここ数年は顧客離反が増加し、それが収益を低下させる原因のひとつとなってきた。つづく後発事業者においても同じビジネスモデルを持つ以上は、やがては同じ経緯をたどることが予想される。

以上こうした業界環境を背景に、本研究は有料放送事業そのものを健全な形で成長させるため、顧客離反問題を主題としてとらえ、その解決策を見出す研究を進めていった。

本研究では、有料放送の顧客離反について、顧客のとり2つの行動研究からアプローチをしてきた。テレビ視聴者の行動研究からは、視聴者の「低関与性」について注目して、一般

の広告放送の視聴者だけでなく、有料放送視聴者も低関与であることを証明した。有料放送の視聴者は本質的にテレビを見ることが好きであり、積極的である。そのためお金を支払ってでもテレビを見るという行動をとるのであるが、時間が経つにしたがって、本来の「低関与性」が現れ、番組を見なくなり、そのため費用に効用が見合わなくなって、やがて離反して行くという離反プロセスを明らかにした。

有料放送サービスを購入するという消費者の立場からの行動研究では、「関与」の役割について注目した。「関与」とは、この場合「購買の動機付け」のことである。

再購入に至る購買プロセスを説明するため、効用を意味する変数である「満足」と「利用継続意向」を独立変数とする共分散構造分析による「モデル」化を試みた。そして4つの関与因子（番組への期待、料金の値頃感、可処分時間、視聴本数）が「購買関与」を構成して、その「購買関与」が「態度」を形成して、「満足」や「利用継続意向」を規定して行くという仮説を証明した。

また、その過程で満足度と利用継続意向の間の相関関係が低いことを発見した。これは、顧客は満足しているのに離反するという矛盾を意味していることになる。

そのため、どのような要因が顧客を購入と離反に分けるのか、4関与因子を独立変数として判別分析を実行したところ、結果は、番組視聴をどれだけ経験したかをあらかず「視聴本数」がもっとも重みのある因子変数としてあらわれた。これは何が顧客を有料放送に引き付ける「価値」なのかを言い表している。

有料放送事業者が顧客維持を考える時の指標は「満足度」よりも、顧客が番組をどれだけ見たかという「視聴本数」であったのである。これは視聴率の高低を言っているのではない。顧客全体の視聴規模の比率や平均値では顧客維持の「指標」になりえない。なぜなら離反する、しないは、内的要因により離反する場合、個人の4関与因子により規定されるのであって、顧客個人の心理的变化に招来する問題であるからだ。

視聴本数を含めた4つの関与因子（個人の心理尺度）をもとに、判別分析を行って算出される顧客個人個人の離反危険確率を把握することによって、マーケティングのターゲットが特定され、初めて顧客維持のための施策を打つことができるのである。顧客維持型マーケティングがマス・プロモーションではなく、ワン・ツー・ワン・プロモーションの方が有効である所以である。

顧客維持型のマーケティングを実施して行く上で大切なことは、ターゲットの特定である。判別分析により算出された顧客離反危険率によって顧客を、離反から遠い「ロイヤル顧客」と離反に近い「離反危険顧客」の二通りに区別して、内容の異なるプロモーションを番組嗜好の異なるクラスターごとに行うことが効率的である。

このように顧客維持型マーケティングに取り組む時、顧客情報の取得と分析、そしてそれを実行たらしめるためのシステム化は必須である。不特定多数をターゲットとする新規獲得のためのマス・マーケティングは媒体費に投資をするが、ワン・ツー・ワン・マーケティングは情報化に投資することになる。

こうして、顧客個人個人の購買関与を高めて、離反の予防や防止につなげて行くのである。

新規顧客の獲得と顧客維持の関係をよく車の両輪にたとえることがある。しかしこれは本質的に誤った表現である。リスウツの指摘するように、今日、顧客維持と新規獲得を分けて考えるようになったのは、販売と販売後にやってくるものを明確に区別する異常なマーケティングの発展プロセスの責めに帰するものであって、それ以前は両者の関係は車の両輪の関係ではなく、不可分なものであったのだ。

また、リーバイの言うように顧客維持のマーケティングの目的は、顧客維持によって得た収益でもって新規顧客を獲得することにあるということであり、顧客を新たに獲得しようとする時、顧客維持によって得られる収益がなければ、新規獲得のための原資が得られないということ意味している。

車の両輪という表現であれば、それは決して交わることがないことになるが、顧客の新規獲得と既存顧客維持の関係は、その意味において一体化している関係なのである。輪で例えるのであればそれは「メビウスの輪」であると言えよう。そして、それであればこそ収益は

無限大へと向かう可能性を帯びるのである。

有料放送の事業にはこれまで見てきたように宿命的に「低関与性」が付きまとう。したがって獲得した顧客は離反を前提に考えてケアをしなくてはならない。今後ますます参入の増加が見込まれるこの事業において、ゴーイング・コンサーンとしての企業体として、健全に成長していくためには顧客維持と新規獲得のマーケティング概念の発想を転換しなくてはならないのだ。

審査結果の要旨

1. 論文の評価

有料放送事業では近年顧客離反が増加し経営的な問題となっている。顧客離反の問題を「有料放送サービスを購入する」消費者行動と「有料放送サービスを視聴する」テレビ視聴行動の観点から分析し対策として顧客維持型マーケティングに基づいた顧客離反对策の提言を行った論文である。本論文の社会心理学的あるいは消費者心理学的な最大の貢献は、有料放送の視聴時における視聴者の動機付けられた状態を、購買関与の一種であると洞察した点にある。

離反顧客の解約理由インタビューデータ925件を因子分析し7つの理由に整理、このうち顧客の内的要因4つが購買関与を構成すると仮定、さらにこれが顧客満足や利用意向の態度を形成するとするモデルを構築、共分散構造分析を実施した。一方テレビ視聴者、有料放送視聴者の視聴率、番組嗜好に関して分析を行い有料放送もテレビ視聴理論で言われている低関与の概念が当てはまることを確認、結果として離反の原因は購買関与の低下にありその根本は視聴者特性としての低関与性にあるため構造的な問題であることを明らかにしている。対策として顧客維持型マーケティングの事例に基づいた提案を行っている。21世紀のマーケティングとしてヘスケットやサッカー等がマーケティングをコンシューマ発想からカスタマー発想に転換したカスタマー・マーケティングに転換すべきとの主張を行っているが企業側の顧客理解が進んでいないのが実態である。本論文で提起された購入離反判別モデルによれば顧客から適切な事前情報を取ることで2年以内の離反する個人特定が予測できる。これをベースにロイヤル顧客と離反危険顧客にターゲット選定を行った戦略的 CRM 構築の提言を行っている。プロアクティブに展開できるアプローチはきわめて有益なものと言える。

視聴行動そのものの分析はまったく手付かずの領域であり、先行研究調査 / 実データの統計処理 / モデル化 / 検証 / の研究プロセスの中で既存の多くの分析方法を駆使して、それを切り開いたことも、問題意識のオリジナリティという点で高い評価が与えられ、新規性、有用性の面で高く評価でき学術博士の学位に値する論文であると考える。

2. 審査の経過と結果

- (1) 平成16年1月14日 博士後期課程委員会で学位論文の受理を決定し、5名がその審査委員として指名された。
- (2) 平成16年2月13日 公開論文発表会及び最終試験を実施した。
- (3) 平成16年2月18日 博士後期課程委員会で学位授与を可とし、大学運営委員会で承認された。

氏名(本籍)	塚原 和幸 (兵庫県)
学位の種類	博士(学術)
学位記番号	甲第38号
学位授与年月日	平成16年3月22日
学位授与の要件	学位規則第4条第1項
研究科・専攻名	工学研究科・基盤工学専攻
学位論文題目	過疎地域への新広域学校システム導入の提案 Proposal of New School-Education System for Under-Populated Area
論文審査委員	(主査) 高知工科大学 教授 岡村 甫 高知工科大学 客員教授 永野 正展 高知工科大学 教授 長尾 高明 高知工科大学 客員教授 前田 昇 高知工科大学 教授 馬場 敬三

論文内容の要旨

新しい時代に、「新しい学校システム」を

今日教育議論は教育基本法の改正にいたるまで改革議論が盛り上がり、衆人になじみの深いテーマである。本論の主題も「学校システムの提案」であるが、実は私は教育ということに関して門外漢である。教育分野の研究者でもなければ、例えば学校教育の現場に携ってきた者でもない。本論は教育論ではないことをまず申し上げておく必要がある。

学校教育は重要な社会システムのひとつであり、教育とは「公共財」でもある。今過疎地学校は「急速に」過小規模化し、閉塞し閉校に追い込まれていっている。そうした学習環境を強いられ、その犠牲者は明らかに将来の日本を担う子どもたちである。本論はその学校教育の現状をその「仕組み」の視点で再点検し、過疎地域におけるひとつの学校教育のモデル FAS-System; Flexible Accommodation Schooling System を「社会システム」という観点で、実施可能な学校教育システムを提案するものである。このシステムは、実現すれば世界的にも稀な(おそらくまだどこにもない)先行事例となりうるものと自負している。

「ではその学校でどういう教育を実施するのか」という部分は、素人であることを自覚し深入りはしない。教育は誰もが口を挟めるテーマであり、イデオロギー的議論、知ったかぶりの情緒的な議論も多い。つかみどころのない理想論を展開しても意味がない。これについては英国で生まれた長女のロンドンでの小学校と日本の小学校での体験を思い起こしながら、一児の父親として希望を申し述べる程度にとどめた。

小さい学校であることを逆手にとって、特徴的な学校教育を展開している事例もあるが、過疎地の学校の衰退は、地方にとって、国にとっても、そして子どもたち自身にとっても差し迫った課題である。この地域の学校教育の問題に必要なものは個別の問題に処する「対策」ではない、「システム」である。

“「対策」から「システム創成」へ”これが本論のキーワードである。

<研究の概要>

少子高齢化の進行が著しい過疎地域の小中学校教育が疲弊しつつあり、それらに対する公的な諸施策も閉塞している。一部の硬直的な教育行政そして地方の逼迫した財政状況などのために、実際「子どものためのよい教育」が傍らに置き去りにされている。そのことが過疎地の衰退を加速していると考えた。

人口減少という未曾有の時代に入ろうとしているわが国の将来の社会システム設計を考えると、学校教育特に義務教育はきわめて重要な社会システムのひとつと位置づけられる。地方分権、市町村合併、規制緩和、教育改革という大きな時代の変革を捉え、真に子どものためのよい教育環境を実現することを目的とした新しい学校システムを構想し、実現しようとする実践的研究である。「社会全体で子どもを育てていく」という理念を具体化する **FAS-System (Flexible Accommodation Schooling System)** という新しい学校システムを高知県の一地域をモデルとして提案したい。

「僻地教育対策」という学校教育問題としてとらえず、住まい方、医療・介護など“街づくり”をベースとした総合的社会問題解決手法による社会システム改革の提案である。

< 研究の背景 >

現在の日本が抱える大きな社会問題に少子・高齢化がある。30年に及ぶ種々の過疎化対策にもかかわらず、人口減少が続く地方の過疎市町村(表-1)。そこにある小中学校の過小規模化という深刻な状態を、この急速に進む少子高齢化問題がその痛手を追い討ちしている。

過疎地域の学校の多くでは、児童・生徒数の激減により極めて小人数での学校運営を強いられている。そこでは複式学級や他校との合同学習など関係者によりさまざまな工夫がされてきたが、児童生徒数の一定水準を維持できなくなり、休校に陥った、廃校になったという話は昨今枚挙に暇がない。

この学習環境悪化の最大の犠牲者は、そこに暮らす子どもたちである。

出生率低下による少子化は、自然減少として児童生徒数を減少させるが、過小規模校での子どもの教育環境を懸念する親が、その地域を離れて行く世帯移動という社会的減少も引き起こす。過小規模校は更に疲弊し、廃校に追い込まれていく。義務教育の学校がなくなればその地域は更に衰退し、地域の存亡にかかわるような過疎化が一層進むという負のスパイラルに陥る。

表-1 日本の過疎市町村	
•	数にして 1230 団体と全市町村数の約 40% (高知県: 66%)
•	総面積の約 50% (高知県: 70%)
•	総人口の約 6% (高知県: 22%)
*	高知県では公立小学校数の 46% が僻地校

人口増加を前提とした社会システム設計の時代は終わった

2006年には日本の人口はピークを迎える。その後急激でしかも長期的な人口減少が続くと予測されており、これは人類史上始まって以来の現象である。社会のさまざまな分野で制約条件が変化し、社会的・経済的構造が変容すると考えられる¹⁾。われわれは、縮小と撤退(閉校)という現実を受け入れながらも、新たな価値観による「活力ある文明」を創出する方向に転換する必要がある。社会資本は文明の転換装置であるといわれる¹⁾。学校(教育システム)はまさに文明の柱であり、それは転換装置になり得ると考えてよいのではないか。

戦後民主化政策の中で、機会均等の理念の下、面的量的な学校施設整備が進められてきた。僻地教育の問題点は早くから指摘されており、さまざまな対策が講じられてきた。しかし、今日日本において多くの割合をしめる過疎地学校において前述した過疎化の負のスパイラルが加速しており、“過小規模”という教育環境が深刻化する。義務教育を提供する地元の学校がなくなれば(もしくはそれを提供する別のしくみがないのであれば)、就学年齢の子供を持つ世帯はそこには住めない。

過疎地域にとって特に学校はコミュニティの核であり、文化の拠り所でもある。「地域の皆さんの暖かい支援のおかげで、最後の一人の卒業生を送るまで地域の小学校を維持できました(卒業生が一人)」として閉校するケースがある。学校に子供一人という学習環境を守ったとして、それは子どもにとって良質な学習環境を提供したことになるだろうか。現在のシステムでは、この閉塞状態を打破できないのである。今こそ、子どもの為の学習環境を改善するための新しいシステムが求められている。

< 研究の目的 >

予測される 21 世紀社会の特徴を俯瞰的にとらえ、日本社会の少子化高齢化、情報化、知識社会の輪郭をドロッカーのイノベーションについて考察整理する。

それを踏まえ、地方分権、市町村合併、規制緩和、教育改革という大きな時代の変革を捉え、真に子どものためのよい教育環境を実現することを目的とした過疎地域の新しい学校システムを構想し、実現しようとする実践的研究である。

審査結果の要旨

1. 論文の評価

本論文は、小中学校の零細化と過疎化のスパイラルを解決する方法として、全く新しい概念である「広域学校システム」の導入を提案し、その実現に至る具体策を提示したものである。このシステムは、週5日の寄宿と学校の統合とを組み合わせることによって、広域通学を可能とするものであって、経済的にも有益であることを示した。

海外経験と大学院で学んだ知識とを統合して作成されたものであって、高度技術者としての博士（学術）の資格があると認められる。

2. 審査の経過と結果

- (1) 平成16年1月14日 博士後期課程委員会で学位論文の受理を決定し、5名がその審査委員として指名された。
- (2) 平成16年2月12日 公開論文発表会及び最終試験を実施した。
- (3) 平成16年2月18日 博士後期課程委員会で学位授与を可とし、大学運営委員会で承認された。

氏名(本籍)	おじま しげひさ 尾嶋 茂久 (愛知県)
学位の種類	博士(工学)
学位記番号	甲第39号
学位授与年月日	平成16年3月22日
学位授与の要件	学位規則第4条第1項
研究科・専攻名	工学研究科・基盤工学専攻
学位論文題目	創知の杜の提案とその実現方法 Proposal of New Community (So-Chi) and its New Method for Actualization
論文審査委員	(主査) 高知工科大学 教授 岡村 甫 高知工科大学 客員教授 永野 正展 高知工科大学 教授 草柳 俊二 高知工科大学 客員教授 前田 昇 高知工科大学 教授 馬場 敬三

論文内容の要旨

1 研究の背景

日本の社会・経済は少子高齢化社会に象徴されるように、既に成長期から成熟期に移行しており、それに対応した社会・経済システムに変更すべき時期に至っているにも拘わらず、それまでの価値観を固守して社会の変革を依然停滞させている。また明治以降、あらゆる資源を都市へ集中・集積させ、都市化によって近代的な国家づくりを推進してきた。この都市集積による近代化政策は大きな成果を生み出してきた反面、人材をはじめとするあらゆる資源を都市へ提供してきた地方は資源の空洞化を引き起こし、今や存続の危機に直面している。

本研究ではこうした旧態依然とした社会システムの根幹にある居住システムに着目し、都市部に流出していった人々が過疎地となっている地方に還流し、地域を再生する革新的なコミュニティを構想した。手をつけられないまま残されてきた高知の都市近郊の山間地は、明治以降の近代化過程で日本人が獲得することのできなかつた、豊かな自然に包まれたゆとりある居住空間を実現することができる適地であり、ここに近代化の過程で失ってきた本来のコミュニティ機能を付加した、創知の杜コミュニティを提案した。

二十一世紀が求める革新的なコミュニティを実現するためには、従来の開発手法とは異なる、既存社会に固着した通念を革新する新しい事業手法が要請される。特にコミュニティの実現に際して大きな障害となる既存の行政規範を克服できる事業手法でなければ、革新的コミュニティを実現することはできない。

2 革新的コミュニティ“創知の杜”の提案

ニュータウン開発は二十世紀の初頭より世界各地で様々な発展を遂げてきたが、日本におけるニュータウン開発は当初の理念を貫徹できず、経済的な状況に翻弄されながら、欧米とはかけ離れたニュータウンを生み出してきた。ニュータウン開発の創生期に打ち立てられた開発理念に立ち返り、そこに普遍するニュータウン開発の理念を踏襲しながら、さらに二十世紀のニュータウンづくりで答えを求められなかつた「コミュニティの永続性」を実現するコンセプトを導入し、革新的コミュニティ、創知の杜コミュニティを構想した。

以下に、革新的コミュニティを構成する4つのコンセプトを述べる。

1) 自然と共生するゆとりある居住空間

自然とふれあうゆとりある居住空間の実現はニュータウン開発において追い求められ続けた普遍の理念である。しかし、日本においては土地政策の歪みが影響し、国際水準のゆとりある居住

空間とはかけ離れた狭小な居住空間しか実現できなかった。

ゆとりある居住空間は居室空間の絶対的広さと建築周囲の余裕空間によって決定され、住宅という社会資本を次世代へ継承するためには、その要件を崩すことなく維持していくことが重要である。そして高知の都市近郊山間地域には、ゆとりある居住空間を実現できる地理的および地形的特性があり、豊かな自然も残されている。ここにおいて、新しい価値観を投影した開発手法を導入することにより、日本人の希求する、自然と共生できる真のゆとりある居住空間を実現することができる。

2) 地方の安価な土地への移住による老後生活の安心

都市圏に居住していた移住者は自然と共生するゆとりある居住空間を獲得できるとしても、容易には移住を決断できない。その最大の理由の一つに今まで居住していた都市内の住宅を放棄し、老後の生活を安心して託せる財産的保証を失う不安である。

土地や住宅は日本人の財産形成における価値観の根源にあり、戦後の高度成長期には資産形成の主役として評価されてきた。しかし、バブル崩壊以降、その普遍的価値観も揺らぎ、新しい価値観が創造されようとしている。不動産の個人所有を起源とする様々な弊害から開放され、また居住者のライフスタイルに適した住まいへの住み替えを可能とすることこそ、今求められている。

3) コミュニティの結束が生み出す安心と安全

都市生活における治安の低下は従来の都市に対する魅力を揺るがし始めている。しかし、居住経験のない新しい土地へ移住するためには、前述の資産の担保と同様に新しい居住環境に自らが適応できるかという不安も存在する。

本研究ではこうした生活の安心・安全に対して居住者がまちづくりやまちの運営に積極的に関与することにより、コミュニティの結束を生み出すことを提案した。コミュニティの共同体精神はまちの安全性を高める上で、重要な要件であるし、従来の居住者の関与によって行政に任せきりの住民サービスの質を向上し、また行政コストを低減することに貢献できる。

4) 知恵が生み出すコミュニティの永続

二十世紀のニュータウン開発は、持続的な発展を可能とするために雇用を生み出す産業機能を内包することを模索してきた。しかし、時代の花形となる産業の寿命は年々短命となっており、持続的な雇用を確保することはできなくなった。

一方、世界には、知恵をまちの持続性の源泉としている事例があり、その持続期間も数百年に及ぶ事例も少なくない。知恵はその時代の要請に応じて進化し、高度な最先端の英知は新しい産業を創造する源泉であり、知恵を伝承する教育は新しい社会を拓いていく人材を生み出すものである。本研究では、こうした知恵が持つ機能をまちの持続性を担保する原動力として導入する。

3 創知の杜コミュニティを実現するリスクマネジメント

本研究で提案するマネジメント手法は革新的コミュニティを具現化するために不可欠なコンセプトを持ち、既存社会の抵抗を克服する強固な起業家精神を発揮するマネジメント手法を総合して構築した。また提案するマネジメント手法は既存のコミュニティ創出事業に欠落していた事業リスクという観点から、アプローチしている。革新的な事業には様々な事業リスクが存在しており、この事業リスクを低減し、移転し、さらには回避するリスクマネジメントは事業を実現するためには不可欠である。

提案するマネジメント手法は以下の5つのコンセプトから構成されている。

1) 居住概念を革新する非都市空間居住

非都市空間居住は自然と共生するゆとりある居住空間を実現するために、従来の都市空間を創出する土地利用ではなく、自然の地形を残存しながら低密度で分散した居住空間と社会インフラを実現する概念である。都市近郊において建蔽率を抑えたゆとりある敷地と広々とした住宅を、ライフサイクルコストを考慮したリーズナブルな価格で提供することは、日本国民が西欧文明をめざし明治以降追い求めても獲得することができなかった住環境の夢であり、21世紀の日本人の新しいライフスタイルを実現するものである。

2) 不動産の通念を革新する不動産の流動化手法

不動産の流動化は不動産を個人所有することなく、安全に不動産を利用する新しい不動産活用の概念である。このコンセプトは従来の事業手法の根源にある、土地を保有することこそ財産形成上、安全で有利な手法であるという、不動産のパラダイムを変革するものであり、従来の土地

を所有する呪縛から開放されることにより新しいライフスタイルを実現することができる。

3) コミュニティ構築の骨格となるコーポラティブ事業

従来のコミュニティでは住宅部分は居住者が私有財産として管理し、それ以外の部分は公共が公物として管理する通念が固定化してきた。本研究で提案するコミュニティ構築のためのコーポラティブ開発は江戸時代まで営々と日本で培われてきた“共”の機能を再評価し、“共”が機能するコミュニティの仕組みを導入する。このシステムは居住者が開発資金の調達、まちづくりおよびまちの維持管理への参画を要請しているため、コミュニティの骨格となる人間関係を構築し、事業リスクの低減・分散にも貢献することができる。

4) 知恵の連鎖と交流を生み創知

創知の杜コミュニティは、二十世紀のニュータウン開発において解決できなかったコミュニティの永續という課題に対して、知恵が生まれ、知恵が交流し、増幅していく知恵の連鎖機能“創知”をコミュニティの基本に置いている。創知はコミュニティ移住者の教育需要に応え、またコミュニティ居住者の知的貢献の場となる。そしてその中核機能として、次世代を担う子供たちを育てる新学校システムを導入した。

5) 既存社会システムを革新する事業推進組織，PPM

革新的な事業を推進し具現化するためには、従来の事業枠組みにとらわれない新しい推進組織が求められる。本研究では、アントレプレナーシップを発揮する民間事業主体、事業推進プロセスを透明化するプロジェクトマネジメント組織そして学による中立な事業評価組織という3つの組織機能が鼎立し機能する組織システム“PPM：Public Policy & Management System”を提案した。

4 提案するリスクマネジメントの優位性と意義

提案するマネジメント手法は、非都市空間居住と不動産の流動化を導入したコーポラティブにより、事業企画段階の事業リスクを低減、分散することができ、環境リスクも低減することができた。特に提案したコンセプト、創知は地方におけるコミュニティの成功に大きく寄与するものである。また事業推進組織PPMは事業遂行過程で出現する障害を克服できる原動力となる。

事業遂行過程で発生する多くのリスクに対して、総合的にリスク対応できる、提案マネジメント手法は、革新的コミュニティ実現に止まらず、多くの公的社会システムの革新に貢献することができる有効なシステムであると考えられる。

審査結果の要旨

1. 論文の評価

本論文は、少子高齢化時代における新しいコミュニティ「創知の杜」の創設を提案し、それを実現するための5つの鍵を明らかにし、それを解くためにはリスクマネジメント手法を活用することが有用であることを示したものである。

過去に積み重ねた経験と大学院で学んだ知識とを統合して作成されたものであって、高度技術者としての博士（工学）の資格があると認められる。

2. 審査の経過と結果

- (1) 平成16年1月14日 博士後期課程委員会で学位論文の受理を決定し、5名がその審査委員として指名された。
- (2) 平成16年2月12日 公開論文発表会及び最終試験を実施した。
- (3) 平成16年2月18日 博士後期課程委員会で学位授与を可とし、大学運営委員会で承認された。