

博士學位論文

内容の要旨及び審査の結果の要旨

第20号

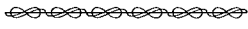
2004年3月

京都産業大学

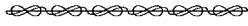
は し が き

本号は、学位規則（昭和28年4月1日文部省令第9号）第8条の規定による公表を目的とし、平成16年3月21日に本学において博士の学位を授与した者の論文内容の要旨及び論文審査の結果の要旨を収録したものである。

学位番号に付した甲は学位規則第4条第1項によるもの（いわゆる課程博士）であり、乙は同条第2項によるもの（いわゆる論文博士）である。



目 次



課程博士

1. 藤原智子〔博士（物理学）〕 1
2. 小泉耕蔵〔博士（物理学）〕 7
3. 吉富泰央〔博士（生物工学）〕 16

論文博士

1. 野口夕子〔博士（法律学）〕 24

氏名(本籍)	藤原 智子(静岡県)
博士(専攻分野)	博士(物理学)
学位記番号	甲理第10号
学位授与年月日	平成16年3月21日
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当
論文題目	Survey of long-term stellar variabilities (文献比較による長周期変光星の探査)
論文審査委員	主査 三好 蕃 教授 副査 原 哲也 教授 " 愿山 毅 教授

論文内容の要旨

近代的な変光星の観測が始まってまだ100年であり、必然的に、確認された変光の時間スケールには100年を超えるものはない。その一方で、星の進化の研究は、進化の晩期において数百年から数千年の時間スケールで星の光度が変化する時期があることを示唆している。現在の進歩した観測体制によっても、そうした星の情報取得にはこの先数百年から数千年の時間を要する。本論文は、天文学の古文獻の中に含まれている星表に記載された星の等級比較から、こうした数百年から数千年の時間スケールで明るさが変動した星の探査を目指して、歴史的資料としての信頼度が高いアルマゲストを始めとする6種類の古文獻[1]と1種類の現代版星表を用いて行った詳しい調査研究の結果をまとめたものである。

論文の全体的構成は以下のようになっている。第1章で申請者が本研究を行うに至った動機および学問的背景を中心とした一般的な導入を述べ、第2章では天体測光の歴史的発展と本研究で用いた星の等級が掲載されている資料についての詳細な紹介を行っている。すなわち、星座名および個々の星の命名方の変遷、ヒッパルコスによる星の等級の導入から現代の等級システムが採用されるまでの歴史的経緯について総合的なレビューをし、次

いで本研究で使用するに至った6種類の古文献のそれぞれについて、文献学的見地からなされた調査研究の結果について詳しく報告している。第3章では、相互比較のために、これらの文献に記載されている星の中から、現在の星表に掲載されている星と同定できるものをどのような手順で抽出したかについて、用いた判断の基準およびその採用理由なども含めて、詳しく述べている。そして第4章が具体的に星の等級変化を調べるために行った一連の調査研究の報告となっている。その詳しい内容は以下の通りである。

文献によって記載されている星の総数は異なるが、最終的に延べ2123個の星をサンプルとして抽出し、種々の基礎的チェックを行った後に、各星について文献毎の等級を時系列的に比較してその等級変動の大きさを調べ、最後に、変動幅の大きかった上位10個の星について詳しい特性を調べ、その等級変動の原因について考察している。基礎的チェックの第一は使用した文献相互の独立性に関するもので、任意の2つの古文献に記載されている個々の星の等級差の度数分布を調べ、それらが何れもガウス分布に近いことから、夫々の古文献に記載されている星の等級は独立な観測によっていると考えられるとの結論に至っている[2]。基礎的チェックの第二は、各文献に使われている等級システムの整合性に関するもので、文献毎にわずかなずれが見られるものの、その大きさは、本研究が目指す過去約2000年の間に0.5等以上の等級変動を見せた星の探査には問題にならない程度であることを確かめている[3]。そのあと、各星表に掲載されている星の平均等級を（対応する各星の）現在の等級の平均値と比較して、観測位置や観測状況の違いによる影響の補正をおこなっている。以上の解析によって、過去約2000年の間に3等以上の等級変動を示したものが8個（2.5等以上の等級変動では18個）見つかっている。そのうち最も大きい変動を示したのは α Sgr（いて座 α 星）で、その変動幅は3.91等である。この星の等級が各(文献)年代毎にかなり激しく変動しているのに対し、その近傍にある複数個の星の等級が殆ど変動していないことから、 α Sgrの等級変動がリアルであり、文献毎の観測条件の違い等によるものではないと考えられる。これら8個の星のうちの6個は主系列星であるが、主系列星がそれ自身で数百年間で3等以上も明るさを変えることは考えにくいから、その等級変動は（多重連星の可能性も含めて）主に周辺環境の変化によるものと考えられる。実際、 α Sgrの赤外線観測の結果は、その周りにはかなりの星間塵があることを示唆している。残りの2個の星（61 Herと5 Her）はHR図の赤色巨星の位置にあるため、その等級変動のかなりの部分が星自身による可能性が高い。勿論、周辺環境の変化による分も含まれているはず

だから、これらの星の周辺も詳しく調べる必要がある。以上が第4章の内容の総括である。

最後に第5章で結論と今後の課題について述べまとめとしている。今後の課題として、信頼性の高い文献をさらに追加して星の等級変化をより細かく調べてゆくとともに、既に大きい等級変動を示している星の精密観測を行い、その等級変動を周辺効果によるものと星自身によるものとの分離し、理論計算との比較をより精密化させてゆくことを挙げている。

それから、本編を補うものとして、3つの付録がついている。付録Aでは、星の構造と進化およびその進化の時間スケールについて、圧力勾配と重力の釣り合いの式に星内部における放射輸送、さらには化学組成の時間的変化などを加えてなされた計算から、これまでに確立しているところを要領よくまとめている。付録Bでは、星形成から始まって、主系列、赤色巨星などの段階を経て、最後に白色矮星や中性子星に至る星の進化の各段階における星構造の具体的様相についてまとめている。そして最後の付録Cは本研究の基礎資料で、サンプルとして選んだ2123個の星の夫々について、その名称、星座名、古文献から採った各年代毎の等級、現在観測されている実視等級、絶対等級、およびスペクトル型を一覧表の形で与えている。

参考文献

- [1] “「フラムスチード天球圖譜」と「Atlas Celeste de Flamsteed」について”，
藤原智子，天文教育，第15巻，第3号，21-25ページ（2003）
- [2] “Survey of long-term variabilities of stars I. Reliability of magnitudes in old star catalogues”， by T. Fujiwara, H. Yamaoka & S. J. Miyoshi,
Astronomy and Astrophysics (2004) 印刷中
- [3] “Magnitude systems in old star catalogues”， by T. Fujiwara & H. Yamaoka,
Journal of Astronomical History and Heritage (2003) 投稿中

論文調査結果の要旨

本論文は、天文学の古文献の中に含まれている星表に記載された星の等級比較による数百年から数千年にわたる時間スケールで明るさが変動した星の探査を目指して、6種類の

古文献に1種類の現代版星表を用いて行った詳しい調査研究の結果をまとめたものである。

天文学の古文献に記載されている古代・中世の観測データを使った天文現象の長期的振舞いの研究としては、既にかなり以前から「天文年代学」や「天文考古学」と呼ばれる学問分野が確立されている。例えば藤原定家の「明月記」に書かれている記録からかに星雲の元になった超新星の爆発の年代を特定したこと、あるいは、古代において出現した日食の記録から、地球自転の長期的変動を割り出し、それに見合う潮汐摩擦の効果や地球の慣性能率の変化を調べる研究、あるいは、古代の彗星出現記録と現代の彗星観測記録の比較から彗星に作用する非重力効果（ジェット効果）を決定する研究などがこれに含まれる。本研究は、恒星の明るさの変動に対してこの「天文年代学」、「天文考古学」の手法を適用したものであるが、その内容は過去において他に類を見ない新しいもので、先駆的な研究として評価される。一方、天体物理学的観点から見ると、本研究が目指す数百年から数千年の時間スケールでの星の等級変動の探査は、水素燃焼の主系列時代を終えてヘリウム燃焼以後の核融合反応が複雑に進行する赤色巨星時代に入った星の進化の研究に貴重な観測データを提供する可能性を有する。

この種の古い文献・資料を用いた研究においては、記録されている数値の信憑性が最大の問題であり、当然のことながら本研究もそれに最も精力を割いている。申請論文に従って以下にそれを順に見て行く。

まず、使用古文献の選択については、オリジナル版が現存する場合はそれを用い、オリジナル版が既に失われている場合はその写本または翻訳本のうちで文献学的に高い信頼を得ているもののみを採用している。使用古文献は現段階では6種類であるが、将来的にはさらに増える可能性がある。次に文献に記載されている個々の星の同定は申請者が自力で行っている。これは、古文献の多くにおいて個々の星の位置が赤経・赤緯ではなく文章と星図表で示されているため、両者を見比べながら、それが現在我々が知っているどの星であるかを見極める作業である。その際、位置決定精度の低い星はサンプルから外しているため、この件については特に問題はないものと考えられる。

次に、用いた古文献に掲載されている等級相互の独立性の調査を行っているが、申請者は任意の2つの古文献に記載されている各星の等級差の度数分布を調べ、それがガウス分布に近いことから、夫々の文献に記載されている星の等級は全てそれぞれ独立な観測によるものと考えられるとしている。これは全体的には妥当な結論と評価されるが、西暦964

年と1437年の文献の組み合わせについては、その間の473年という比較的長い時間差にもかかわらず、他の組み合わせに比べて極端に小さい標準偏差 ($\sigma = 0.29$) を示しているため、独立性には問題があり、等級比較をする場合には注意が必要である。しかし、仮に独立性が崩れていたとしても、それは等級変動を抑制する方向に効くため、それが原因で有るはずのない大等級変動を生じるおそれはない。その次の、各文献に使われている等級システムの整合性のチェックも本研究においては重要な課題である。これについては、文献毎にわずかなズレが見られるものの、そのズレの大きさは本研究が目指す「過去に0.5等以上の等級変動を見せた星の探査」には問題にならない程度であることを確かめているが、調査方法は適切であり問題はない。

以上の手続きを踏まえて、(現在変光星とされていない星や、変光星ではあるが等級変動幅が0.5等以下の) 2123個の星をサンプルとして選び出し、そのサンプル星のそれぞれについて文献毎の等級を時系列的に比較してその等級変動の大きさを調べ、過去約2000年の間にかなりの星が大きい等級変動を示したとの結論に達している。その数は、2等以上の変動を示したものが70個、そのうち2.5等以上の変動を示したものが18個、そのうち3等以上の変動を示したものが8個となっている。ここで、等級決定の精度を単純に文献比較における標準偏差の平均値に近い0.7等に等しくとって、3等以上の変動で既にその星数は 4σ 以上となっており、統計的ゆらぎでそれだけの変動が生じる確率は千分の1以下である。それ故、上記数値は統計的には十分に有意であると考えられる。ただ、ミスプリントや写本時の書き間違いの危惧が全く無いわけではないから、こうして得られた等級変動が全てリアルであるとは言いきれない。しかし、変動幅が最大であった α Sgr (いて座 α 星)の等級変化に対する細かい検証は、その変動がリアルであることを強く保証しているものと評価される。同様の考察から、変動幅が大きい上位数個については α Sgrと同じくミスプリントや写し間違いによる可能性は非常に低いものと考えられる。ただし、これを科学データとして使う場合に備えて、記載されている等級値に含めるべき誤差の評価が今後の課題として残る。

星は主系列期を終えた後、赤色巨星の領域で一生の約1割近くを過ごす、そこにおける進化の実際は質量放出を伴った非常に複雑なものである。その途中に数百年から数千年の時間スケールで激しく明るさを変える時期があることも理論的に予言されているが、その詳細はパラメータの値により大きく変わっている。理論を精密化するためには、こうし

た激しい変動期にある星の観測データを実際に手に入れる必要がある。しかし、現在の優れた観測装置を用いてこの種のデータを揃えようとしてもこの先数千年かかることになり、現時点でこの時間スケールの星の等級変動を調べるための資料は古文献に限られる。その意味で、本研究で浮かび上がった長期変光星のうち、HR図の赤色巨星領域にあるものが、現時点で唯一取得可能な赤色巨星の実際の光度変化の観測データを提供している可能性が高い。したがって、まだ解決すべき問題はいくつか残っているが、今後それらが順次解決してゆくにつれて、この種の研究が次第にその重要性を増してゆくものと予想される。

以上に示したように、本研究は、数百年から数千年にわたる長期変光星を特定し、その変光データを提供することを目的として、申請者自らが立ち上げ、形あるものに仕上げてきたもので、萌芽的研究として十分に評価されるものである。また、本研究は一見だれにでも出来そうに見えて実はそうではない特徴を持ち、申請者に対する学会の期待も大きい。

平成16年1月20日(火)午後5時より、理学部会議室において本調査委員会委員全員の出席のもとに、2時間にわたって学位申請者藤原智子に対して最終試験を行い、学位申請論文の研究目的、用いた研究方法、得られた結果およびその学問的意義、将来の研究計画、及びこれらに関連した星の進化と変光の物理等について質問し概ね妥当な回答を得た。さらに、変光幅が特に大であった上位10個の星の大部分を主系列星が占めていることに関連して、HR図のB1星のすぐ近くに β Cephei 星と呼ばれる変光星があり、またセフィイド不安定帯もHR図上で主系列と交叉しているため、上記主系列星の変光幅に星自体の変光によるものがかなり含まれている可能性があり、他の星同様、やはり精密観測が必要であるとの指摘もあった。将来の研究計画については、文献調査の継続とともに、個々の文献に記載されている等級値の信頼度や誤差の評価方法の確立、および過去に大変動を示した星の精密観測をこの先の重要課題として挙げており、着実な発展が期待できる。

以上により、本調査委員会は学位申請者藤原智子が最終試験に合格し、申請論文が博士学位論文に値するものと判定する。

氏 名 (本籍)	小泉 耕蔵 (大阪府)
博士(専攻分野)	博士 (物理学)
学 位 記 番 号	甲理第11号
学位授与年月日	平成 16 年 3 月 21 日
学位授与の要件	学位規則第 4 条第 1 項該当
論 文 題 目	q -変形振動子と境界可積分模型
論文審査委員	主 査 曾我見 郁夫 教授 副 査 櫻井 明夫 教授 " 原 哲也 教授

論 文 内 容 の 要 旨

調和振動子は、多様な物理現象の記述に不可欠な「要素的な系」である。特に、場の正準量子化は、自由場の各モードの振幅を調和振動子の昇降演算子と同定することによって達成され、調和振動子のエネルギースペクトルが等間隔であるため、場は各モードの量子の集団として記述される。この場の量子論は、素粒子物理学や固体物理学で広範な成功をおさめて来た。とりわけ、ゲージ群 $SU(3) \times SU(2) \times U(1)$ を持つ素粒子の標準模型は、繰り込み処方に伴う摂動法によって、現時点でのすべての実験結果を記述することができる。

しかしながら、摂動論に限定されない場の量子論の全容は、無限大自由度を持つ場の複雑さのために未だ明らかにされていない。その解明には、場の量子論の要素的な基本構造を分析し、場の量子論の本質的部分を保持する厳密に解ける系を研究することが必要である。申請者は、そのような問題意識の下に「 q -変形振動子」と「可積分な 2 次元 Sine-Gordon 型量子場」の研究を推進してきた。本学位論文は、申請者等が発表した研究論文[1,2,3,4]をまとめた総合報告である。以下で、論文内容の要旨を述べる。

第 1 章の序論では、問題設定と論文の構成が述べられている。第 2 章では、 q -変形振動

子と量子群の関係が簡潔に要約されている。角運動量演算子の代数 $su(2)$ が2組の調和振動子で表現されるように、量子群 $U_q(su(2))$ は2組の q -変形振動子によって構成される。この章では、量子群 $U_q(su(2, \mathbb{C}))$ および $SU_q(2)$ に q -変形振動子がどのように埋め込まれているかが示されている。

第3章-第6章は、論文[1,4]でなされた q -変形振動子に関する研究成果の報告に充てられている。 q -変形調和振動子の座標表示には、空間対称性を破るMacfarlane型(M-振動子)と空間対称性を保つDubna型(D-振動子)が存在する。M-振動子は、主として量子群 $U_q(su(2))$ の表現を構成するために導入された。これとは独立に、Dubnaのグループは相互作用をす一次元の相対論的な系の厳密に解ける模型として、D-振動子の研究を行ってきた。

申請者等の研究の特徴は、個別に研究されてきたM-振動子とD-振動子を統一的に記述したことにある。第3章で、その理論が構成されている。M-振動子とD-振動子は、統一された q -変形振動子の変形パラメータの2つのセクター ($q=\exp[s^2]>1$)と($q=\exp[-s^2]<1$)で実現される。 q -変形振動子のハミルトニアンは、 q -変形反交換子で与えられる。調和振動子の場合と同様の代数的方法で、 q -変形振動子のエネルギー固有値は $E_n = 1/2 + (q^{-1} - q^{2n-1}) / (q - q^{-1})$ と求められ、そのスペクトルは図1のようになる。M-振動子($q > 1$)が有界なスペ

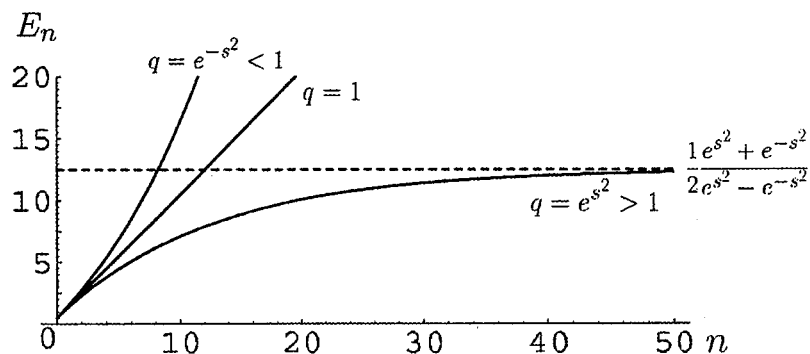


図1：M-振動子のエネルギースペクトルは有界であり、上限 $(q+q^{-1})/2(q-q^{-1})$ が存在する。

D-振動子は指数関数的に増大するエネルギースペクトルを持つ。

クトルを持つのに対して、D-振動子($q < 1$)は指数関数的($\exp[s^2 n]$)に増大するスペクトルを持つ。但し、後に述べるように、これらのエネルギー固有値に属する固有状態は、完備ではない。

続いて、 q -交換関係を満足する生成・消滅演算子の座標表現が定められ、エネルギー固

有関数が具体的に決定されている。その際、演算子を構成する関数の解析性が重要な役割を演じる。M-振動子とD-振動子のエネルギー固有関数は、 q -変形されたHermite関数を含む。この新しい特殊関数とそれが満たす漸化式は、通常のHermite関数とその漸化式の自然な拡張になることが示されている。

第4章では、 q -変形振動子の統一理論を発展させた論文[4]の研究成果がまとめられている。量子力学の特性により、 q -変形振動子の位置表現の詳細な構造を把握する事は難しい。そこで、 q -変形振動子系の古典極限である c -変形振動子の分析が行われた。すなわち、WKB法を用いることにより、 q -変形振動子のハミルトニアン H_q から c -変形振動子（古典変形振動子）のハミルトン関数 H_c が導出され、それから数値計算によって相空間での軌道が求められた。

この量子論から古典論への移行（縮約）を行うために、系のすべての量に物理的次元を復活させる必要がある。調和振動子系は、エネルギーと長さの自然な単位として、 $\hbar\omega$ と $l = \sqrt{\hbar/m\omega}$ を持っている。無次元の変形パラメータ s と長さの単位 l を結び付けるために、変形を特徴づける新たな次元量 $l_q = l/\kappa_q$ が導入され、 s は $s = (l/l_q)s_* = l\kappa_q s_*$ と表現される。その結果、極限操作 $s \rightarrow 0$ は、非変形極限 $\kappa_q \rightarrow 0$ と古典極限 $\hbar \rightarrow 0$ の2つの意味を持つことになる。古典極限 $\hbar \rightarrow 0$ で、両振動子の H_c が求められ、ハミルトンの運動方程式が分析された。

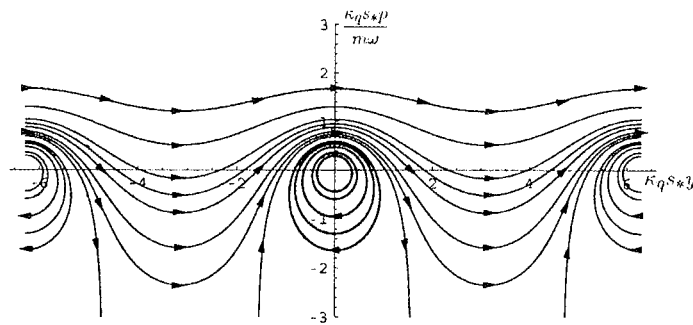


図2：相空間でのM-振動子の定エネルギーの軌道 ($s_* > 0$)。軌道の周期は 2π である。

閉軌道と開軌道を区別する臨界エネルギー値 $E_c = m\omega^2/(2\kappa_q^2 s_*^2)$ が存在する。

M-振動子の c -変形ハミルトン関数 H_c は、Shabanovが経路積分法を用いて導出したものと一致している。M-振動子の相空間には、開軌道と閉軌道が存在する。それら二種類の軌道を区別する臨界エネルギー値 $E_c = \frac{m\omega^2}{2\kappa_q^2 s_*^2}$ は、図1のスペクトルの上限値の古典極限 $\lim_{\hbar \rightarrow 0} \frac{1}{2} \hbar \omega \frac{q+q^{-1}}{q-q^{-1}}$ に一致する。この結果は、古典の開軌道に対応する量子状態が、図1のスペクトルでは欠落していることを意味する。即ち、通常の調和振動子の代数的手法で構成されたエネルギー固有状態は、まずM-振動子に関しては「完備ではない」ことが明らかにされた。

D-振動子のハミルトン関数 H_c は、申請者によって初めて決定されたものである。この

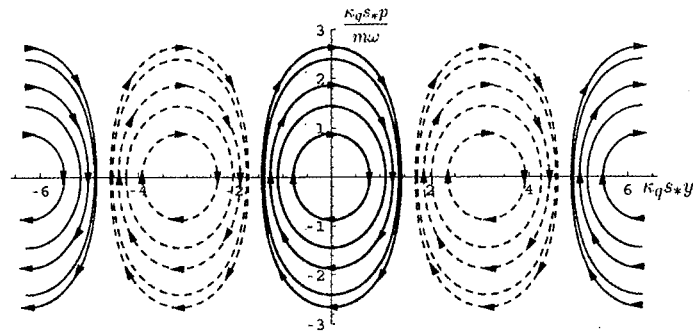


図3：相空間でのD-振動子の定エネルギー軌道 ($s_* > 0$)。点 $\kappa_q s_* x = \pi \times (\text{偶数})$ および $\kappa_q s_* y = \pi \times (\text{奇数})$ に中心を持つ軌道は、それぞれ実線と点線で示す。

H_c による相空間の軌道は、図3のように、すべて閉じており開軌道は存在しない。D-振動子は、開軌道を持たない代わりに、M-振動子の倍の数の閉軌道を持っている。図3の点線で描かれた閉軌道に対応する量子状態は、図1のスペクトルには存在しない。従って、M-振動子の場合とは異なる形であるが、D-振動子のエネルギー固有状態が「完備でない」ことが示された。

c -変形ハミルトン関数の解析は、M-振動子とD-振動子の差異と共に、両振動子の持つ類似点を明らかにした。両振動子は共に離散的な並進対称群を持つが、D-振動子の並進対称群の離散周期は $\pi l_q / s_*$ であり、M-振動子の周期 $2\pi l_q / s_*$ の半分である。非変形極限 $\kappa_q \rightarrow 0$ では、両振動子共に、図2と図3の原点を中心とする閉軌道のみが残り、他の軌道は消滅する。

このような c -変形振動子の解析結果を踏まえて、第5章と第6章では、 q -変形振動子の研究がなされている。即ち、第5章で、 q -変形振動子の位置表示のハミルトニアン $H_q(x)$ の並進対称性が調べられて、 q -変形振動子が c -変形振動子と同じ周期を持つことが示された。即ち、 q -変形振動子の場合も、M-振動子は $2\pi/s$ の周期を持ち、D-振動子は π/s の周期を持つ。また、図3の点線で描かれた閉軌道に対応するD-振動子のエネルギー固有関数が決定された。

第6章では、 q -変形振動子のハミルトニアンが c -変形振動子のハミルトン関数と同じ並進対称群を持つことに導かれて、局在しない伝搬するBloch型のエネルギー固有状態が研究されている。Blochの定理から、シュレーディンガー方程式の平面波解は並進対称性を持つ変調波となる。その変調成分をフーリエ級数で表現し、その係数が満たす三つの項からなる漸化式を導き、自明でない解が存在する条件として連分数の形の永年方程式を求めている。これらは、従来の q -変形振動子の研究では全く知られることのなかった新しい成果であり、変形理論の研究に貢献するものである。

論文の後半は、SG (Sine-Gordon)模型の研究報告に充てられている。SG模型に代表される可積分な二次元量子場には、無限に多くの保存量を持つという著しい性質がある。この性質は、物理的対象から正確な情報と非摂動的情報を引き出すことを可能にし、統計物理学や超弦理論の研究で重要な役割を果たしている。Bernard-LeClairは、SG模型およびその一般化であるアフィン戸田理論を含む質量を持つ二次元可積分場の理論に対して、非局所保存量が量子群 $U_q(\widehat{sl(2)})$ に従うことを示した。申請者はPascal Baseilhacとの共同研究[2,3]で、境界による反射の効果を含むSG模型の一般化を研究している。

第7章では、共形場の形式を用いてSG模型を分析し、高次の非線形場の散乱行列が代数的手法によって如何に決定されるかを解説している。即ち、保存するカレントの積分量として5種類の非局所保存量 $Q_{\pm}, \bar{Q}_{\pm}, T$ が構成され、これらが $\widehat{sl(2)}$ アフィン・カツ・ムーディ環の包絡環 $U_q(\widehat{sl(2)})$ を形成することを示し、それらの保存量の余積との可換性から散乱行列(の骨格)が決定される。

量子化されたSG模型では、保存するベクトルカレントに対する条件として「ヤン・バクスター方程式」が出現する。これは、時間と(次元)空間が共に順序集合となることに起因する二次元量子場理論の特殊性に由来し、ソリトンおよび反ソリトンの多体構造を記述する際に、直積に代わって「余積」が導入されることになる。その結果、通常の量子論での

リー代数の役割を、量子群(ホップ代数)が演じることになる。

量子化されたSG模型の研究は、静的な境界と動的な境界を持つ場合へと発展した。第8章では、そのような研究の流れを紹介すると共に、申請者とPascal Baseilhacが行った動的な境界を持つSG模型に関するオリジナルな研究成果[2,3]を詳しく述べている。

境界を持つ系では、適切な境界条件を課すことにより可積分性が保たれ、正確な解析を行うことが可能となる。境界から遠くに離れた場合、物理過程は、通常バルク理論と一致しなければならない。また、境界の効果は、反射因子を導入することで記述される。境界を持つ量子化されたSG模型は、Ghoshal-Zamolodchikovによって体系化された。彼等は、反射と散乱の順序に関する「境界ヤン・バクスター方程式」を設定し、境界ユニタリティー条件を満たす反射行列を求めた。彼等の理論では、境界は動的な自由度を持たない。

境界の存在は、境界がない場合の理論が持つ量子群 $U_q(\widehat{sl(2)})$ の対称性を壊す。その結果、保存量の一部のみが意味のある物理量となり、それらが $U_q(\widehat{sl(2)})$ の部分環を形成することになる。Delius-Mackay等によれば、部分環の生成子は、鏡映法の組み合わせ $Q_{\pm} + \bar{Q}_{\pm}$ に境界からの因子を加えたものとなる。

「動的な自由度を持つ境界」は、BaseilhacおよびDeliusによって、まず量子力学のレベルで考察された。申請者はBaseilhacと共に、その考えを量子化されたSine-Gordon場に適用し、動力的境界による反射散乱行列の研究を行った。この場合は、境界自体が物理的自由度を持つから、鏡映法の組み合わせ $Q_{\pm} + \bar{Q}_{\pm}$ に動的な境界の演算子を加えて非局所保存量を形成する。彼等は、それらが量子群の部分環を形成するための条件式を解き、その解が「新しい境界ヤン・バクスター方程式」を満たすことを示した。この新しい解は、Ghoshal-ZamolodchikovやDelius-Mackay達が求めた解の自然な動力的拡張になっている。新しい解は無数個の極を持ち、それらはソリトンと反ソリトンの結合状態であるブレザーの散乱を記述する。また、境界状態の構造も考察されている。境界上に存在する力学系の量子条件は、SG模型の結合定数と密接に関係している。更に、結合定数を解析接続することによって、動力的境界付きのSinh-Gordon模型を分析し、Sinh-Gordon模型の反射因子が強-弱結合の交換の下で自己双対であることを明らかにした。参考論文[2,3]は、申請者の優れた計算力によって完成させることが出来たものである。

最終の第9章では、申請者等が行った研究成果の要約され、その発展として今後取り組むべき課題が述べられている。

q -変形振動子については、「中心荷 z が零固有値を持つ Fock 状態」と「中心荷が零でない伝搬する Bloch 解」を统一的に記述する研究方針が示されている。また、変形パラメータ s に関する解析接続の予備的な考察が述べられている。置き換え $s \rightarrow is$ は、M-振動子と D-振動子を反転させる。しかし、M-振動子では、この置き換えは消滅演算子と生成演算子の間の Hermite 共役関係を壊す。他方、パリティ不変性を持つ D-振動子では、この置き換えの下で Hermite 共役関係は保たれる。 s に関する接続の下での q -変形振動子のエネルギー固有関数研究は、興味深い課題である。

可積分な SG 模型についても、非線形相互作用 $\cos(\hat{\beta}\Phi)$ に現れるパラメータ $\hat{\beta}$ に関する解析接続の重要性が指摘されている。特に、境界が量子論的な自由度を持つ場合に、Sine-Gordon 模型と Sinh-Gordon 模型の関係を解析性の視点から考察することが必要となる。また、パラメータの特定の値 $\hat{\beta}^2 = 4/3$ で実現される超対称性に関して、予備的な分析の結果が述べられている。更に、本論文の発展として、反射と透過を許す模型に関する研究の指針が与えられている。

参考文献

- [1] I. S. Sogami and K. Koizumi, Unified Description of q -Deformed Oscillators, Prog. Theor. Phys. 107 (2002) 1.
- [2] P. Baseilhac and K. Koizumi, Sine-Gordon quantum field theory on the half line with quantum boundary degrees of freedom. Nucl. Phys. B 649 (2003) 491.
- [3] P. Baseilhac and K. Koizumi, $N=2$ boundary super-symmetry in integrable models and perturbed boundary conformal field theory, Nucl. Phys. B 669 (2003) 417.
- [4] I. S. Sogami, K. Koizumi and R. Mir-Kasimov, q -Deformed and c -Deformed Harmonic Oscillators, Prog. Theor. Phys. 110 (2003) 819.

論文調査結果の要旨

素粒子の標準模型に代表されるように、場の量子論は、摂動近似と繰り込み手法を利用することにより輝かしい成功を収めた。しかし、場が持つ連続無限の自由度のために、摂動近似に頼らない非摂動論的な場の量子論の全容は未だ十分には解明されていない。申請者は、「変形」の概念を用いることによって、場の量子論の要素的な基本単位を分析し、場の量子論の非摂動論的な構造の研究を行ってきた。本論文は、申請者が推進してきた「 q -変形振動子」と「可積分な2次元Sine-Gordon型量子場」の研究に関する総合報告である。

q -変形振動子の研究は、独立な二つの系統を持っている。その一つは量子群の表現を構成するためにMacfarlaneによって提唱されたもの(M-振動子)であり、もう一つは定曲率を持つ運動量空間を研究する過程でDubnaのグループによって考察されたもの(D-振動子)である。申請論文は、それらの異なる系統の q -変形振動子を、変形パラメータ($q \in \mathbb{R}$)空間の異なるセクター($q > 1, q < 1$)で統一的に記述する。ハミルトニアン H_q の固有状態は、まず通常の調和振動子の場合($q=1$)と同じ方法で求められてFock空間が構成される。 q -変形振動子の代数は中心荷 z を持ち、Fock空間は z の核を形成する。Fock状態とそれに作用する演算子の位置座標表現が求められ、 q -Hermite関数の特性が調べられた。

続いて、位置表現のハミルトニアン $H_q(x)$ の古典極限である c -変形振動子のハミルトン関数 $H_c(x)$ がWK B法で決定され、相空間中の軌道が分析された。M-振動子は閉軌道と開軌道を持ち、D-振動子は閉軌道のみを持つ。変形は振動子に並進対称性を誘導し、M-振動子はD-振動子よりも2倍長い周期を持つ。このような c -変形振動子の特性は、通常の調和振動子の場合には完備であるFock状態が、 q -変形振動子に対しては完備でなくなることを示している。ハミルトニアン $H_q(x)$ がハミルトン関数 $H_c(x)$ と同じ周期を持つことが証明され、Blochの定理から伝播する解の存在が明らかにされた。それらの伝播する解は、中心荷 z の零でない固有値に属し、Fock空間に含まれない新しい状態を構成する。

これらの成果は、 q -変形振動子を統一的に記述して具体的な位置表現を求め、 c -変形振動子との対応を分析することによって求められたものである。その研究の手法と成果は独創性に富むものであると評価することが出来る。

二次元の量子場理論の可積分性は、多くの場合、系が持つ量子対称性にに基づいている。対称性を生成するベクトルカレントは、非局所的であり、非自明な同時刻交換関係によっ

て特徴付けられる。ベクトルカレントの積分によって定義される作用素は、多粒子に作用するとき代数が余積構造を取り、量子群(ホップ代数)を形成する。直積に代わる余積は、可積分な量子場理論の非摂動論的な構造を示すものである。Sine-Gordon模型の場合には、この量子群は、 $\widehat{sl(2)}$ 代数の包絡環の q -変形 $U_q(\widehat{sl(2)})$ によって与えられる。

申請者は、Pascal Baseilhac との共同研究で、Sine-Gordon模型に動的な自由度を持つ境界を導入し、その可積分性を研究した。一般的には、境界の存在は可積分性と $U_q(\widehat{sl(2)})$ 対称性を壊す。しかし、申請者等は、境界の自由度を適切に選べば、可積分性が保たれて $U_q(\widehat{sl(2)})$ の部分対称性が残ることを見出した。また彼らは、動的な境界による反射散乱行列を分析し、ソリトンと反ソリトンの結合状態であるプレザーの反射散乱行列を求めている。これまで境界ヤン・バクスター方程式を満たす反射行列は、Ghoshal-Zamolodchikov の解しか知られておらず、この研究成果は数理物理学に新しい知見をもたらすものとして高く評価することができる。

このように、本論文「 q -変形振動子と境界可積分模型」は、独創性に満ちた価値あるものである。

申請者は、平成15年12月3日に開催された公聴会に於いて、本論文について良く準備された明快な報告を行った。また、平成16年2月21日に開かれた最終試験に於いて、研究の応用と発展等に言及しつつ研究内容を解説し、多様な質疑に対して的確な回答を行った。これらの調査の結果、本委員会は全員一致により、本論文は博士学位論文に値するものであると判定した。

氏 名 (本籍)	吉富 泰央 (大阪府)
博士(専攻分野)	博士 (生物工学)
学 位 記 番 号	甲工第7号
学位授与年月日	平成 16 年 3 月 21 日
学位授与の要件	学位規則第 4 条第 1 項該当
論 文 題 目	ルイス肺癌細胞の転移・浸潤におけるヘパラン硫酸および シンデカン-2 の役割
論文審査委員	主 査 岡山 實 教 授 副 査 福井 成行 教 授 " 船越 育雄 教 授

論 文 内 容 の 要 旨

ヒトの死の中で癌による死亡率が最も高く、その主要な原因は転移によるものである。"転移を制するものは癌を制する"と言う格言の所以でもある。発癌機構の解明や癌診断の方法の開発は、近年、飛躍的に発展した。しかし、癌の悪性度を象徴する転移については、その現象の複雑さの故に研究が大幅に立ち遅れている。従って、転移に対する有効な臨床的対処方法も開発されていないのが現状である。

このような状況にあって、本学位申請論文（以下、本論文と略）は、がんの浸潤・転移を腫瘍の組織形成の視点から明らかにしようとしたものである。これは、これまでに試みられていない全く新しい方法である。臨床の場における癌の悪性度の総合的判断は最終的には腫瘍組織の観察に基づいてなされている。従って、本研究は目的の達成に長時間を要するが、癌の悪性度に関する臨床的判断の基礎を構築するという意味で大変価値あるものと考えられる。本研究においては、ヒト腫瘍の85パーセント以上が上皮性腫瘍であることを考慮し、マウスの肺に自然発生したルイス肺癌をモデル系として採用している。その腫瘍から自然転移能の差に基づいてクローン化した転移能の異なる株細胞を用いて、それらの細胞が示す腫瘍組織形成の特徴を明らかにし、それをもたらす分子的背景を解析すると

いう研究方法を採用している。動物組織の形成においては、腫瘍形成のみならず、個体発生や創傷治癒においても形態誘導能をもつ構造単位として細胞外マトリックス（以下、ECMと略）が良く知られている。それを踏まえ、本論文はECMとECM受容体を介した細胞との相互作用に焦点を絞って研究を展開している。

多細胞生物に特有なECMは、種々のコラーゲン、ラミニンやフィブロネクチン等の糖タンパク質、および種々のプロテオグリカンからなる超分子会合体であり、細胞にとっての微小環境を構築する。これらのECM構成分子はいずれも数個の機能ドメインを含む巨大分子である。ECMはそれを構築する細胞種およびその局在により二つに大別される。ひとつは上皮性細胞の形成する基底膜で、上皮組織と結合組織とを分離する境界薄層膜として存在する。従って、基底膜上に整列して接着する上皮細胞には細胞極性が誘導される。いまひとつは間質細胞の形成する間質型ECMで、産生細胞の周囲を取り囲む無定形構造のため、間質細胞は細胞極性を示さない。これらのECMは組織形成時に形態誘導能を示し、形成された形態の維持に中心的な役割を担っている。従って、胚発生に伴う形態形成、創傷治癒、腫瘍形成の過程において、ECMには劇的な組成変化および形態的变化が誘導される。細胞はそれらの変化に応答して分裂、分化、移動といった種々の細胞動態を示す。このようなECMと細胞との相互作用を仲介する媒体が細胞膜上のECM受容体である。

ECM受容体として最もよく研究されているインテグリンはフィブロネクチン、ラミニン、テネイシン、各種コラーゲン等、種々のECM成分に対して特異的あるいは重複的に結合する数種の α 、 β ヘテロ二量体からなるファミリーで、それぞれのリガンド結合依存的にアクチン繊維結合性タンパク質と細胞内で結合し、アクチン細胞骨格形成の制御に寄与している。もう一群のECM受容体として、本論文の中心的テーマであるシンデカンファミリーが同定されており、現在までに、哺乳類で4分子種、鳥類で2分子種、両生類で3分子種、魚類、ショウジョウバエ、ウニ、ホヤ、線虫で各1分子種が同定されている。シンデカンは、細胞膜一回貫通型のI型膜タンパク質で、細胞外ドメインに数本のヘパラン硫酸鎖が共有結合しており、膜貫通ドメイン、短い細胞質ドメインからなる。シンデカンの特徴は、リガンド結合部位が構造的多様性を有するヘパラン硫酸鎖であることである。そのためシンデカンは固相、液相を問わずヘパリン結合性の細胞外活性分子の受容体となる可能性が考えられている。

以上のような研究背景のなかで、本申請者の所属する研究室（以下、所属研究室と称す

る)は、『がん転移を腫瘍組織形成の視点から明らかにする』という研究に取り組んでおり、これまでに、マウス肺癌から転移能の異なるクローンを単離後、株細胞として樹立し、分子、細胞、組織および個体レベルで互いに検証可能な癌転移実験モデル系を作成してきた。本申請者が研究に着手した時点で実験的に樹立され、内容的に明らかにされていた事柄は次の通りであった。1) マウスの肺に自然発生したルイス肺癌3LLから転移能の異なるクローン性細胞株(低転移性細胞株P29、中転移性細胞株LM12-3、高転移性細胞株LM66-H11)が樹立されていた。2) これらの株細胞が生体内腫瘍組織形成において異なったECM依存性を示すことが明らかにされていた。即ち、強い間質誘導能を示すP29細胞は、腫瘍組織内に誘導した宿主間質細胞の形成するフィブロネクチンに富んだ間質型ECM依存的な腫瘍形成を示すのに対し、間質誘導能を持たないLM66-H11(以下、H11と略)細胞はフィブロネクチンを含まない基底膜依存的な腫瘍形成を示す。従って、3) 前者が細胞極性を示さない低分化型であるのに対して、後者は一定の細胞極性を示す中分化型腫瘍組織像を示す。4) 培養下でのECM成分に対するこれら2種の細胞の接着応答性は、生体内でのECM依存性を反映して異なっていることが明らかにされていた。即ち、フィブロネクチン基質への細胞接着に際して、P29細胞はストレスファイバーを形成して伸展するのに対して、H11細胞は皮質型アクチン形成を示す。5) 前者の細胞応答は、インテグリン $\alpha 5 \beta 1$ とシンデカン-2を介したフィブロネクチンへの同時的接着により誘導されるのに対して、後者の細胞応答は、インテグリン $\alpha 5 \beta 1$ のみを介したフィブロネクチンへの細胞接着により誘導される。本申請者は、このようなECMに対する細胞の接着応答の差をもたらすシンデカン-2の細胞膜表層における発現レベルの差に着目し、細胞表層におけるヘパラン硫酸、およびそれを糖側鎖とするシンデカン-2の浸潤・転移における役割を機構的に明らかにするという研究課題を分担した。

この研究目的を達成するため、本研究においては上記のルイス肺癌由来の転移能の異なる3つのクローン性株細胞を用いて転移能と細胞表層ヘパラン硫酸プロテオグリカンの発現との間の関係を定量的に解析した。その結果、ルイス肺癌細胞は全てのシンデカンメンバー(シンデカン-1~-4)とグリピカン-1を発現していることが明らかとなった。しかし、これらの分子群の中でシンデカン-2以外の分子は転移能の高・低に拘らずほぼ同じレベルの発現を示すのに対して、シンデカン-2の発現レベルのみが転移能と逆相関を示すことを見出した。そこで、シンデカン-2低発現性の高転移性H11細胞にシンデカン-2の

遺伝子を導入後、P29株細胞と同じレベルのシンデカン-2を発現しているクローン(H11-SN2)を単離し、株細胞として樹立した後、転移能を解析した。その結果、シンデカン-2の高発現は転移能を大きく抑制することが明らかとなった。即ち、転移能とシンデカン-2発現の間には因果関係のあることが証明された。

上で樹立した種々の株細胞を用いて、シンデカン-2の関与する発現形質を詳細に検討し、次の事柄を明らかにした。1) これまでいくつかの研究グループから腫瘍の成長速度と転移能の間には正の相関があるということが報告されている。しかし、少なくともルイス肺癌細胞においては転移能、即ち、シンデカン-2の発現と腫瘍の成長速度との間に相関性は存在しない。2) ヒトの上皮性腫瘍では、腫瘍の種類を問わず腫瘍の増殖に依存して色々な程度の間質誘導を伴うことが知られている。ルイス肺癌から樹立した転移モデルにおいては、シンデカン-2の発現量と間質誘導の間には正の相関が存在する。3) 転移に対して大きな影響を持つことが知られている腫瘍血管新生に対するシンデカン-2の影響として次の事柄が明らかにされた。即ちシンデカン-2の発現が増加するにつれ血管形成は抑制される。また、シンデカン-2の発現は、形成される血管構造にも大きな影響を与え、シンデカン-2の発現の低い腫瘍組織内に形成される血管は断面積の広い類洞様構造を示すのに対して、その発現の高い組織内に形成される血管は断面積が狭く、毛細血管構造を示す。他の多くの研究においても高転移性腫瘍内に形成される血管が類洞様構造を示すのに対して、低転移性腫瘍内に形成される血管は毛細血管構造を示すことが報告されており、本研究結果はそれらの報告と良い一致を示している。しかし、この現象の制御機構を示唆したのは本研究が最初である。

上記のシンデカン-2の発現に共役した発現形質の検討に加え、本研究ではシンデカン-2の転移への関与の機構を解明する一連の研究が行われた。転移能とシンデカン-2の発現との間に存在する因果関係の分子的背景を明らかにするため、癌転移への直接的関与が示されているECM分解酵素であるマトリックス・メタロプロテアーゼ(以下、MMPと略)の発現とシンデカン-2の発現との関係が検討された。MMPは現在までに哺乳類で26分子種がクローニングされており、大きなファミリーを形成している。本酵素群は、発生に伴う形態形成、創傷治癒、血管形成、組織の再生現象等に深く関与している。癌の浸潤・転移に寄与しているMMPとして特にMMP-2とMMP-9が注目されている。これらの酵素は腫瘍細胞の浸潤・転移に対して自然障壁となっているECMを融解し、腫瘍細胞の空間的

移動を可能にしていると考えられている。

本研究では、MMPとシンデカン-2の発現の関係が解析され、次の事柄が明らかにされた。1) ルイス肺癌細胞は転移能の高・低に拘らず、MMPファミリーのうちMMP-2のみを同じレベル発現している。2) MMP-2はシンデカン-2低発現性の高転移性細胞においてのみ活性化されている。3) この活性化はシンデカン-2の高発現化により阻害され、その阻害はシンデカン-2のヘパラン硫酸鎖依存的である。ヘパリン或いはヘパラン硫酸は、MMP-2に対して強い親和性を示し、その酵素活性を促進することが知られている。この知見は、本研究で得られた結果と一見矛盾している。しかし、この矛盾は、本研究で見出されたMMP-2活性化抑制は、シンデカン-2ヘパラン硫酸鎖のMMP-2酵素に対する直接的な阻害作用というよりは、シンデカン-2とproMMP-2の活性化受容体であるMT1-MMP/TIMP2複合体との間でのproMMP-2の競合的奪い合いの結果であると仮定することにより解消しうる。事実、本研究においてそれを支持する結果が得られている。

ここで発見されたシンデカン-2のヘパラン硫酸鎖によるproMMP-2の活性化抑制が、上で証明されたシンデカン-2高発現化による転移抑制の理由であるならば、proMMP-2の産生細胞であるルイス肺癌細胞に、MMP-2に対して親和性の強いヘパリンを作用させることによりproMMP-2の活性化を抑制し、ひいては癌細胞の転移能を抑制しうる筈である。本研究で、この仮定の正しさが検証された。即ち、マウスの体液にヘパリンを投与することにより、ルイス肺癌細胞の転移が大きく抑制されることが示された。また、このヘパリンの示す転移抑制作用は、ルイス肺癌細胞のみならず、メラノーマ細胞、大腸ガン細胞、骨肉腫細胞などの悪性度の高い腫瘍細胞の転移に対しても有効であることが示された。

この転移抑制効果は、ヘパリンのみならず過ヨウ素酸酸化後、水素化ホウ素ナトリウム処理で還元し、血液の凝固活性を低下させたヘパリン（以下、low anticoagulant ヘパリン；LACヘパリンと略）においても保持されていることが示された。即ち、ヘパリンの示す転移抑制効果は、抗血液凝固作用によるものではないことが明かにされた。本申請者は上に紹介した内容を総合的に考え、ヘパリンおよびLACヘパリンの抗転移作用の機構として、投与したこれらの可溶性ヘパリン様物質と細胞膜上に局在するproMMP-2受容体であるMT1-MMP/TIMP-2複合体との間でproMMP-2の競合的奪い合いの機構が介在している可能性を提唱した。しかし、この抗転移作用として腫瘍細胞膜上に存在するヘパラン硫酸鎖を介したECMへの細胞接着のヘパリン様物質による競合的阻害、或いはNicolsonらやVI

odavskyらの提唱している転移に寄与するヘパリナーゼのヘパリン様物質による直接阻害の可能性も考えられる。現在、本申請者は、これらの作用機作をも視野に入れ、研究を推し進めている。

本研究に用いられているルイス肺癌の転移モデルにおいて、一次腫瘍作成に際して転移能の高・低に拘らず死期に有意の差が観察されなかった。本研究において、その原因の解明も試みられた。その結果、シンデカン-2高発現性の低転移性P29細胞は、一次腫瘍周縁部位に強い浸潤性を示すことが明らかにされた。一方、シンデカン-2低発現性の高転移性H11細胞は、周縁組織への浸潤は全く示さなかった。P29細胞の腫瘍周縁組織への浸潤能は、先に説明した間質誘導能との関係において検討された。即ち、腫瘍細胞を取り囲むフィブロネクチンを高濃度を含むECMとの相互作用として解析された。その結果、P29細胞はH11細胞に比べ、フィブロネクチン基質に対して有意に高い移動度と浸潤性を示すことが明らかにされた。このような細胞運動を可能にする原因として、MMP-3の発現誘導が発見され、この酵素の誘導レベルは、シンデカン-2の発現と正の相関を示すことも明らかにされた。この観察結果は、MMP-3が間質型ECM成分特異的であるという基質特異性についての知見と良い一致を示している。さらに、この発見は、MMP-3がヒト腫瘍の中でも特に悪性度の高い硬癌が示す腫瘍組織周縁への強い浸潤能の原因分子である可能性を示唆しており、その腫瘍の化学療法の開発と関係して非常に興味深く、今後の研究の一層の発展が期待される。

論文調査結果の要旨

本博士論文の審査結果は以下の通りである。

1. 論文内容の評価

本論文は、マウス・ルイス肺癌から自然転移能に基づいてクローン化された転移能の異なる細胞株（低転移性細胞株P29、中転移性細胞株LM12-3、高転移性細胞株H11）を用い、癌の浸潤・転移とシンデカン-2分子との間に存在する関係を現象的および機構的に明らかにした内容から構成されており、次の4点に要約することが出来る。

第一は、シンデカン-2により制御されているルイス肺癌細胞の発現形質として次の事柄を明らかにしたことである。 1) シンデカン-2の発現と培養下における細胞増殖と

の間には正の相関があるにも拘らず、生体内での腫瘍組織の成長との間にその相関は存在しない。2) シンデカン-2の発現と間質誘導の間には正の相関が存在する。3) シンデカン-2の発現と腫瘍血管形成能との間には逆相関があり、このプロテオグリカンは、形成された血管構造に大きな影響を及ぼす。即ち、シンデカン-2低発現性腫瘍組織内に形成される血管は断面積が広く、類洞様構造を示す。一方、シンデカン-2高発現性腫瘍組織内に形成される血管は断面積が狭く、毛細血管構造を示す。シンデカン-2の細胞増殖、間質誘導、および血管形成への関与が示されたのはこれが初めてであり、その背後に存在する機構の解明が待たれるところである。

第二は、ルイス肺癌の転移モデル系において、転移能とシンデカン-2の発現との間には逆相関があり、その背後に因果関係のあることを明らかにしたことである。機構として細胞外マトリックス分解酵素であるマトリックス・メタロプロテアーゼ(MMP)の転移への関与を示唆した。即ち、この細胞の転移におけるMMP-2酵素の活性化の関与を示唆し、その活性化はシンデカン-2のヘパラン硫酸鎖により阻害されることを明らかにした。MMPの活性制御に関する研究は始まったばかりであり、ヘパラン硫酸プロテオグリカンのMMP活性化制御への関与を示したのは本研究が初めてであり、高く評価される。

第三は、ヘパリンおよびLACヘパリンをマウスに投与することにより悪性度の高い種々の腫瘍細胞の転移を抑制し得ることを示したことである。機構として投与したヘパリン様物質による腫瘍細胞の細胞表層ヘパラン硫酸を介したECMへの細胞接着に対する競合的阻害、MMP-2の活性化抑制、および動物組織ヘパリナーゼの活性阻害の可能性を提唱した。これらの機構のうちMMP-2の活性化抑制の機構は本研究において明確に示されており、腫瘍細胞を体内にばらまく危険性の最も高いヒト腫瘍の手術時における臨床的応用も考えられ、それへ向けての研究の進展が期待される。

第四は、少なくともルイス肺癌においては癌細胞の浸潤能と転移能とは独立した細胞活性であることを示すことに成功したことである。これまで、腫瘍細胞の浸潤能と転移能とは連結した細胞活性であると考えられてきたし、現在でも、浸潤能の低い細胞は転移しないと考えられている。従って、この発見は国際的に見ても最初であり、非常に高く評価され得る。また、この研究結果は、癌の浸潤・転移に対する化学療法開発の糸口を与えるものとしても評価される。

以上の如く本論文は、胚発生に伴う形態形成、成体における創傷治癒、腫瘍形成等の中

心的役割を担っていることが示されているMMPの活性制御へのシンデカンの関与を、また、腫瘍の浸潤・転移の背後にある複雑な分子間相互作用を見事に証明している。本論文は、全体的にみて非常に高いレベルにあり、博士の学位論文にふさわしい内容を有している。

2. 研究業績

本申請者は、原論文を英文専門誌に3報発表している。また、シンデカン分子の最近の研究に関する総説論文を日本結合織学会機関誌に英語で発表しており、本博士論文の一部を京都産業大学先端科学研究所報2報に発表している。国際学会（12回）や国内での種々の学会（16回）での発表も多数行っており、博士の学位にふさわしい研究業績を備えている。

3. 総合判断

以上、本審査委員会は慎重審議の結果、全員一致で、本論文が博士の学位論文として十分に値するものと判断する。

氏名(本籍)	野口 夕子 (徳島県)
博士(専攻分野)	博士(法律学)
学位記番号	乙法第3号
学位授与年月日	平成16年3月21日
学位授与の要件	学位規則第4条第2項該当
論文題目	保険契約における損害防止義務 ー保険市場に内在するモラル・ハザード防止機能という 観点からー
論文審査委員	主査 今井 薫 教授 副査 清河 雅孝 教授 " 溝部 英章 教授

論文内容の要旨

本論文は、一般にオプリーゲンハイトの一種とされる損害防止義務を定めるわが国商法660条1項の規定、すなわち、「被保険者ハ損害ノ防止ヲカムルコトヲ要ス但之カ為メニ必要又ハ有益ナリシ費用及ヒ填補額カ保険金額ニ超過スルトキト雖モ保険者之ヲ負担ス」に定める、いわゆる損害防止費用に関する規定が損害防止義務とリンクするか否かに関して、経済学的、歴史的ならびに比較法的な考察の下に明らかにしようとするものである。

本論文は、第1章「序章」、第2章「保険立法史にみる損害防止義務規定」、第3章「保険契約におけるリスク対応原理」、第4章「モラルハザード防止規定としてのわが国商法660条」、第5章「各国法制度にみる損害防止義務ーその規定と解釈をめぐってー」、第6章「結論」から構成されている。

第1章では、まず問題の所在、その考察の目的と範囲が提示される。すなわち筆者は「損害防止義務」について、情報の完全性を欠いた不完全競争市場である現行保険制度下では、制度瓦解の要因である「逆選択」と「モラルハザード」の発生要因が内在しているが、オプリーゲンハイトあるいは付随義務とされる商法規定は、このような「逆選択」な

いし「モラルハザード」の発生を防止する手段であると定義する。商法660条1項ももとよりその一種であるとするが、同条が但書で定める損害防止費用の規定の部分は強行規定とされず、損害防止費用全額不担保約款などが広く採択されるのがわが国の保険実務である。論者は、モラルハザード防止規定たる本条で、任意にその但書を排除できるのか、排除した場合にその本来の機能が失われることがないかについて、経済学的、歴史のおよび比較法的な検討を加える必要があることを明らかにする。

第2章は、保険立法史において損害防止義務がどのように登場してきたかを詳らかにすることで、わが国商法660条の存在を外側から確定する。論者は、そこで1532年のフィレンツェの海事条例における保険証券約款をはじめとする近世の保険約款に登場する損害防止義務を検証する。それによれば、損害防止費用はきわめて不完全な形式でフィレンツェ海事条例では扱われ、海難救助費用との明確な区別がつかない。

これに対して1538年のブルゴス条例以降は、船舶の委付との関係を切断できないまま損害防止費用の保険者負担が被保険者の権利として認められることになる。ただし、こにちの保険者の義務という形式ではないので、その意味で現代的な、保険者の義務としての損害防止費用は1731年のハンブルク保険・海損条例まで待たねばならぬが、論者はこのような差異が生じたのは、挙げて海難救助における船舶委付と無関係ではおれなかった中世海運の残滓であるとの加藤由作（一橋大学）の見解を紹介する。

第3章では、情報の偏在を前提にする保険市場では、モラルハザードや逆選択が発生し、それが市場を失敗させるという経済学的な立場から、商法660条1項を、その内側から機能的に確定しようとする。すなわち、論者は情報の偏在が保険制度を瓦解に追い込む結果、契約の自由を制限してさまざまな付随義務が要請されるようになると考える。すなわち、逆選択を回避するシステムとして商法644条ないしは678条が定める告知義務があり、モラルハザードを回避する手段としてここで触れる損害防止義務があるのだと論じる。とくに、注意義務が付保により散漫になるモラルハザード（保険に限らない。製造物責任、労災、福祉、破産、医療給付、銀行などをめぐる問題一切を含む）については、インセンティブ・コントロールにより防止策が講じられる必要があり、660条もその性格を具備していると論者は主張する。

ところで、論者は従来行為者の悪意性に帰着せしめてきた被保険者のモラルハザード的行為について、一般的倫理にニュートラルな大多数の者は、ある制度下での行動決定にお

いて自己の得る利益の大小が基準となり、利益いかんでは悪徳者にも善良者にもなる存在であることを、保険経済学者高尾厚（神戸大学）の論説をベースに展開する。そして、この説が妥当するとすれば損害防止に関して、もし被保険者に義務のみ課して費用負担を行わないとすると、損害防止義務を履行しない被保険者よりも過大な費用を自ら負担する、その意味で過大な資産減少を引き起こすことになるかもしれない。論者はこれを明らかにするために近代経済学の優れた研究者である許碩芬（高雄大学）の研究成果を援用して、この結果が経済学的には無差別曲線の乗り換え（善良者の選択する無差別曲線から悪徳者の選択する無差別曲線へ）という衝撃的結果を招来するというをここで証明する。本論文の中心的なポイントで、このような無差別曲線の乗換えを生じさせないためには、論者は被保険者の合理的行動が損害防止に努めるべく行動をなさしめるシステム、すなわちここでは損害防止費用を保険者が負担するという制度に合理性があり、かつまた中世以来の海事条例では、経験的にモラルハザード防止の目的から本規定が形成されるにいたったのではないかと結論する。

第4章は、以上の結果を踏まえて商法660条1項についてその効力を再び検討する。ここで論者は、概説的説明を展開したのち、損害防止義務と損害防止費用の関連について、損害防止費用全額不担保約款の効力を、①すべて無効とする無効説、②保険金額の範囲内であっても負担しないとするのを無効とする条件的無効説、③いかなる約款も有効とする有効説の3説があることを紹介し、損害保険改正試案では②説が採用されることなどが説明されると同時に、論者の、本条をモラルハザード防止規定とする見解から諸説について検討を加える。

第5章では、4章の分析にもとづいて、わが国の通説を批判的に検討したあと、論者はさらにドイツ保険契約法、中国保険法、イタリア民法典を、それぞれ比較法的に検証する。すなわちドイツ法では、同保険契約法62条は当初損害防止義務のみを規定し、1939年12月にいって損害防止義務違反の効果を同条2項に、「責務」として規定しているという特殊性に言及しつつ、ドイツではかかる義務をもっぱら責務として解釈され、またその根拠は給付における信義則（独民法典242条）であることが指摘される。しかし損害防止費用に関しては、公平な利益調整機能と解釈されるとともに、条文の解釈から保険者の指図によらない損害防止義務の履行については被保険者の負担する費用は保険金額の限度内であると解されている（保険契約法63条1項第2文の反対解釈より）としている。しかも、63条は

強行規定でないことから、ドイツにおいても損害防止費用の償還が否認されているケースも散見されるが、現在では普通取引約款規正法9条2項1号との関係から、一括して費用償還を否認するような約款は無効と解釈され、少なくとも保険金額の範囲内では保険者が費用負担するものと解釈されているとされる。中国法の場合は同保険法41条で保険者に損害防止費用の負担を義務づけている。この場合、費用の償還義務については「必要かつ合理的な費用」については保険者が当然に負担すべきものと解されてはいるが、これを定める同条2項規定が果たして強行規定か否かについては明文の規定もまたこれを論じる学説も判例もなく、今後の展開を待つより方法がないと結論する。最後にイタリア民法典に定める損害防止義務であるが、やはり責務とされる損害防止義務を定める1914条の第2項において、わが国同様損害防止費用は保険金額を超過するときといえども保険者が負担とされている。ところで同項は、民法典1932条において片面的強行規定とされるので、これを約款等により排除することを得ないということになる。ただ、いずれにしても損害防止費用不担保約款は、ドイツでは解釈により、イタリアは法規定により、あるいは台湾では行政規定により不当なものとしてされ、また後二者では強行規定とされる事実を論者は指摘することで、現在のところ任意法とされるわが国の解釈がいささか異彩を放つことをしめしつつ、わが国商法661条がモラルハザード防止規定としての目的に適うのであれば、かかる見解は問題が残ることを結論する。

論文調査結果の要旨

保険は経済的制度であって、とくに現代においては法的制度も経済学的な分析と不可分ではあり得ない。その意味で本論文は、射倖契約たる保険契約に固有の付随義務を、経済学的な2つの市場の失敗の要因たる「逆選択」と「モラルハザード」に、法的な意味でも連携せしめたところに大きな特色を見て取ることができる。とくに付随義務のうち、論者は告知義務、損害発生通知義務などをリスク認知の不十分さに関連する逆選択を防止する規定とし、本件の損害防止義務を、付保による保険契約者・被保険者の注意義務の低下を防止する規定とする点で、従来にはない斬新な見解と評価することができる。また、射倖契約であることを奇貨として本性的悪徳者を排除するための制度と解されてきた付随義務

について、むしろ制度構築の失敗が相対的悪徳者を増大させるのだというインセンティブ・コントロールの観点から付随義務を論じたという点でも、すぐれて注目すべき見解であると評価される。

ところで本論文の中心は損害防止費用を保険者が負担しない場合、理論的に想定されるある財貨の（善良者の）無差別曲線から、費用部分を保険者から償還できないために事故時の品質劣化が著しい資産となる、すなわち下方左側にシフトした（悪徳者の）無差別曲線へ移行するとする許碩芬博士の経済学的成果を、上述の見地からこれを咀嚼し導入したところにある。許論文は説得力に富むきわめて魅力的な学説であり、すでに述べたとおり保険契約者・被保険者のビヘイヴィアが、その利益の帰属いかんにより機会主義的に合理的な行動をとるのだという現在の保険経済学の見解からすれば、かつての所得保障保険の失敗と同様の契機を、損害防止義務の履行にも認めることになる。論者が、この点に着目したことは今後の保険制度をめぐる約款制定、法解釈のうえでも重要で、その意味でまことに有用な論文であるということができよう。

論者は、これをさらに比較法的に各国法の検討へと拡大していく。とくに伝統的なドイツ法のみならず新しい立法である中国法、わが国のシステムと類似したイタリア法にも、損害防止義務そのものの要件・効果についても詳細に言及していることは、まだこれらの諸国の研究が十分とはいえないだけに論者の労を多とするところである。

しかし、残念なことに、ここでは上述の論者の主張するところを完全に論証することができていないのも事実である。すなわち、ドイツ法では保険金額を超過する場合にも費用償還を請求することはできないし、中国法ではわが国同様の規定はあるがこれを強行法とするか否かが定かではなく、わずかにイタリア法が論者の主張に適う立法であると思えることができるだけである。また、現実に保険者が損害防止費用を一部もしくは全部負担しないとする契約がモラルハザードを誘引し、損害額が増加している（逆選択とは異なり、原則として事故の発生確率には影響を及ぼさない）というデータがあるわけでもない。多くの場合、保険契約者・被保険者が行使できる損害防止措置は限定的で、費用面でも問題にならない程度の額だからである。したがって、理論的にはともかく、現実にどれだけの費用が増加したかを論証することはきわめて困難であるといわねばならない。さらに、法史的にも、損害防止費用について保険者負担が認められてきた背景には、損害防止を事務管理として位置づける考えが古くから存在していたことによるのかもしれない。用語の点でも

救助と損害防止は明確に区別されていたわけではない。論者が、損害防止義務を検討するうえで、かかる点にも論を進めていく道もあったのではないかと思料される。

しかしながら、これらはいずれも隴を得て蜀を望むの感の否めないものであって、もとより本論文の目的とするところではなく、これによって本論文は、聊かもその価値を減ずるものではないことはいうを俟たない。むしろ本論文によって、再びかかるテーマが今後のわれわれの課題となったというべきものであろう。なによりも、従来の告知義務、損害防止義務や通知義務などの付随義務を、市場の不完全性がもたらす逆選択やモラルハザードを抑止するための規定であると断じた点は本論文の最大の功績ということは疑いないところである。

以上により審査員一同は、野口夕子氏が博士（法学）の学位を授与されるにたる十分な資格を有するものと判定する。