学位論文審査結果の報告書

氏　　名　　松井　宏夫

生年月日　　昭和　５３年　１０月　２２日

本籍（国籍）　　山口県

学位の種類　　博　　士　（　農　　学　）

学位記番号　　第 **231** 号

学位授与の条件　　学位規程第５条該当
（博士の学位）

論文題目　Study on the influence of the hop cultivation factors on its growth, development and qualities
（ホップ栽培因子の生育・品質への影響に関する研究）

学位論文受理日　　平成２９年１２月　５日

学位論文審査終了日　　平成３０年　２月２０日

審査委員

（主　査）　重岡　成

（副主査）　川﨑　努

（副主査）　林　　孝洋

（副　査）　田茂井　政宏

（指導教員）　重岡　成

論 文 内 容 の 要 旨

ホップ(Humulus lupulus L.)は雌雄異株・宿根多年草のアサ科の植物である。雌株で形成されるホップ毬花は麦芽・酵母とともにビールにとって不可欠な原料で、ビールの苦味、香り、コクに多大に影響を与える。寄与成分の主たるものは、苦味はフムロン類、香りはテルペン類、コクはフェノール類である。北緯・南緯共に35-55° の地域で雌株が栽培されている。主産地はヨーロッパ、北アメリカ、オセアニア地域で、栽培規模は2017年時点で約5万ha（ペレット重量で約9 万ton）であり、その99%以上がビール醸造に使用されている。商用として栽培される品種は100種前後ある。

ホップは、前年の古い根を切り取る春先の「株切り」を行った後に発芽し、誘導用のワイヤを伝って3ヶ月後には草丈7-9mの高さに生長する。初夏に開花した未受精の花から毬花が形成され、苦味成分のフムロンが十分量形成された後に収穫される。収穫直後の毬花は水分含率がおよそ80%であるので、品質安定化のために苦味成分や香気成分が変化しない60℃以下の条件で水分含率が10%になるまで乾燥させる。乾燥毬花を粉砕・ペレット化したものをビール醸造に使用するのが一般的である。

ビール中のホップ由来の香味を制御する手段として、ホップの品種の選択、ペレットや苦味成分や香り成分など特定の成分を濃縮したエキスなどの加工形態の選択、また、煮沸工程での投入タイミングの設定、酵母系統の選択や発酵条件の検討が行われてきた。しかしながら、農作物であるホップの品質は気候条件などによって毎年変化するため、上記の製造工程を工夫するだけでは狙いのビール品質を安定的に製造することは難しい。ホップ品質に影響を及ぼす栽培要因として、土壌・株年齢・病虫害などの環境要因、施肥方法・つる上げ本数・株切り時期・収穫時期などの作業要因、雨量・日照・気温などの天候要因が挙げられる。本研究では、ビールに華やかな香りを与えるとして世界で高い評価を得ているチェコのザーツ品種ホップについて、「株切り・収穫時期」、「株年齢」及び「アップルモザイクウイルス」といった要因が生育・ホップ香品質に及ぼす影響について検討を行った。ザーツ品種については、年によって収量や品質の変動が大きいことが問題となっている。変動が大きい要因を明らかにし、この問題を解決する技術の開発に繋げることは生産者・ビール会社の双方にとって有益である。

1) 株切り時期、収穫時期が生育・品質へ及ぼす影響

ザーツ品種ホップの栽培は、春先に前年の古い根を切り取る「株切り」を行うことで始まる。その後、7月に開花し未受精の花から毬花が形成され、8月に収穫が行われる。ザーツ地方では、栽培されている約3,500 haのホップの約9割がザーツ品種であるため、株切り作業・収穫作業にそれぞれ3週間程度と長い期間を要する。同じ品種でありながら株切り時期・収穫時期がそれぞれ最大3週間異なる収穫物が存在することになる。ビール品質に寄与するフムロン類やテルペン類は開花から収穫までの成熟の時間により変化すると考えられたため、株切りと収穫の実施時期によって生育や品質が異なることが予想されるが、いままでにこの点に着目した研究はなかった。

本研究では株切り時期の開花時期への影響・開花から収穫までの日数の収量やホップ香品質への影響を明らかにすることを目標とし、複数年（2010年、2011年、2012年）、ザーツ地方の4地点で調査を行った。その結果、株切り時期については、株切りを20日間遅らせても開花時期は5日間程度しか遅れず、これらを同じ日に収穫したところビールホップ香品質の差異はなかった。株切りから開花までの積算気温の解析から、積算気温への寄与が低い4月の株切り時期の日間差は7月の開花時期への影響は小さいと考えられた。一方、収穫時期に関しては、初期（8月中旬）から晩期（9月下旬）にかけての約40日間で苦み成分（フムロン）量や収量は変化しなかったが、テルペン類を含む精油量が6割程度増加し華やかな香りに寄与するモノテルペン類の比率が高くなった。この変化はビールホップ香へも影響を及ぼした。とりわけビール中のホップ香の指標であるリナロールは収穫初期のホップを用いた場合に較べ収穫後期のホップを用いた場合は2.5倍程度に増加した。以上よりホップの収穫時期を選定すると狙いのビール品質を達成できること、リナロール量を増やすためには晩期に収穫することが重要であることが示された。

収穫期間中の成熟の指標として毬花の色変化を観察した。開花から継時的に鮮やかな緑色から黄色・茶色へと変化することが観察され、この変化を、色測計にて定量できた。黄色・茶色の毬花において病害菌が検出されなかったことから、この色の変化は収穫期間中の気温の低下から引き起こされる植物の老化（セネッセンス）に起因すると考えられた。以上より、狙いの品質に最適な収穫時期の判別に、香気成分を分析するよりも、より簡便な方法として毬花の色測定が有効であることがわかった。

2）ホップ株年齢が生育・品質へ及ぼす影響

ホップは植栽後20年程度栽培される宿根多年草の植物であるが、これまで株年齢と品質の相関を詳細に調べた研究はなかった。株年齢によりホップ品質が変化するか否かを明らかにするために、異なる年（1991, 1996, 2001, 2006, 2007, 2008, 2009, 2010）にザーツ品種ホップが植えられたザーツ地方の8つの圃場にて2010年と2011年の2年間、栽培観察、原料品質評価とビール品質評価を行った。5齢以下の若い株（若齢株）は10齢以上の株（成熟株）と比べ、栽培期間を通じて葉が大きく（5%程度）・茎が太く（10%程度）なる一方、開花時期が遅れた（約10日間）。即ち、若齢株は成熟株と比べ栄養成長が旺盛である一方、生殖成長が遅れた。これは根量を増やすことに転流が盛んに行われているためと推察された。また若齢株の毬花では苦味の元となるフムロンの含量が高く（3割程度）、穏やかな香りに寄与するセスキテルペン類も多くなる傾向である一方、華やかな香りに寄与するモノテルペン類が少なくなった。このことからフムロンやテルペン類の生成に関わる植物中の二次代謝が若齢株と成熟株では異なっていると考えられた。本試験で得られた毬花を用いて小スケールにてビール醸造を行った。若齢株から得られた毬花を用いて醸造したビールは成熟株のそれと比べ華やかな香り、フルーティーな香り、シトラスの香りが弱くなった。ビール中のテルペン類も原料中のテルペン類と同様な傾向を示しリナロール、ゲラニオールといったモノテルペン類が少なくなっていた。これら原料中のモノテルペン類の量が少ないことがビールのホップ香品質へも反映されたと考えられる。以上より、狙いのビール品質に合わせて使用するホップの株年齢を考慮する必要があり、華やかな香りをつけるためには成熟株から収穫された毬花を使用する必要があることがわかった。

3) アップルモザイクウイルスが生育・品質へ及ぼす影響

ホップはアップルモザイクウイルス（ApMV）やホップモザイクウイルス（HpMV）などウイルスやウイロイドに感染することで収量の低下や品質変化が起こる。本研究では種々のウイルス・ウイロイドの中でアメリカ、オセアニア地域といった世界のホップ産地の種々のホップ品種へ収量低下や品質変化を引き起こすApMVがザーツ品種ホップの生育、収量、原料品質・ビール品質へ及ぼす影響を試験圃場で調査した。またザーツ地方の生産圃場でのApMVの感染分布状況を調査した。試験圃場の調査では、ApMVに感染したホップ40株、ウイルスフリー株40株を1999年に植栽した試験圃場にて2010年と2011年の2年間これらの株の生育特性やホップ品質を比較した。調査時点で両試験区共にApMV以外の他のウイルス・ウイロイドが感染していないことを確認した。ApMVに感染することで、茎頂の高さ（10%程度減）や主茎葉のサイズ（10%程度減）が小さくなり、また収量が5割以上低下した。ApMVの感染の有無に関わらず節数や葉の形状は同じであったことから、葉面積の低下により光合成量が低下しそれに伴って収量が低下したと推察された。またApMVに感染したホップから得られた毬花中にはビール品質にとって重要なフムロン（20%程度減）やエッセンシャルオイル量（20%程度減）が低下し、香気成分のプロファイルもモノテルペン比率が低下しセスキテルペン比率が高くなった。これら香味寄与物質の変化はApMVに感染することで植物中の一次・二次代謝が変化したためと考えられた。本試験で得られた毬花を用いて小スケールにてビール醸造を行ったところ、ApMVに感染したホップ毬花で醸造したビールはフルーティーな香りが弱くなりビールホップ香品質が低下することが判明した。これは原料中のモノテルペン比率が低かったことに起因する。以上から生産者・ビール会社双方の観点からApMVの感染を防ぐ必要があることがわかった。ザーツ地方のウイルス感染状況を調査したところ、植栽後3年でApMVの感染が確認された圃場があった一方で、植栽後20年経過した圃場でもApMVの感染率が低く抑えられている圃場もあった。樹液に触れる設備に対する熱処理・薬剤処理や媒介虫の対策など栽培の適切なマネージメントにより、ApMVの感染を低く抑えられる可能性が示唆され、栽培方法を最適化することによって品質と収量を向上できることがわかった。

論 文 審 査 結 果 の 要 旨

松井宏夫氏は、栽培因子（株切り時期、収穫時期、ホップ株年齢、ウイルス感染）がホップの生育および品質に及ぼす影響について、ザーツ地方のホップ農場においてデータを集積し、ビール醸造に適したホップ栽培因子の決定を試みられている。

ホップ(Humulus lupulus L.)は雌雄異株・宿根多年草のアサ科の植物である。雌株で形成されるホップ毬花は麦芽・酵母とともにビールにとって不可欠な原料で、ビールの苦味、香り、コクに多大に影響を与える。寄与成分の主たるものは、苦味はフムロン類、香りはテルペン類、コクはフェノール類である。北緯・南緯共に35-55° の地域で雌株が栽培されている。主産地はヨーロッパ、北アメリカ、オセアニア地域で、栽培規模は2017年時点で約5万ha（ペレット重量で約9 万ton）であり、その99%以上がビール醸造に使用されている。商用として栽培される品種は100種前後ある。ホップは、前年の古い根を切り取る春先の「株切り」を行った後に発芽し、誘導用のワイヤを伝って3ヶ月後には草丈7-9mの高さに生長する。初夏に開花した未受精の花から毬花が形成され、苦味成分のフムロンが十分量形成された後に収穫される。収穫直後の毬花は水分含率がおよそ80%であるので、品質安定化のために苦味成分や香気成分が変化しない60℃以下の条件で水分含率が10%になるまで乾燥させる。乾燥毬花を粉砕・ペレット化したものをビール醸造に使用するのが一般的である。

ビール中のホップ由来の香味を制御する手段として、ホップの品種の選択、ペレットや苦味成分や香り成分など特定の成分を濃縮したエキスなどの加工形態の選択、また、煮沸工程での投入タイミングの設定、酵母系統の選択や発酵条件の検討が行われてきた。しかしながら、農作物であるホップの品質は気候条件などによって毎年変化するため、上記の製造工程を工夫するだけでは狙いのビール品質を安定的に製造することは難しい。ホップ品質に影響を及ぼす栽培要因として、土壌・株年齢・病虫害などの環境要因、施肥方法・つる上げ本数・株切り時期・収穫時期などの作業要因、雨量・日照・気温などの天候要因が挙げられる。ザーツ品種については、年によって収量や品質の変動が大きいことが問題となっている。変動が大きい要因を明らかにし、この問題を解決する技術の開発に繋げることは生産者・ビール会社の双方にとって有益である。

本研究では、ビールに華やかな香りを与えるとして世界で高い評価を得ているチェコのザーツ品種ホップについて、「株切り・収穫時期」、「株年齢」及び「アップルモザイクウイルス」といった要因が生育・ホップ香品質に及ぼす影響について検討が行われている。

最初の項目では、株切り時期、収穫時期が生育・品質へ及ぼす影響について検討されている。ザーツ品種ホップの栽培は、春先に前年の古い根を切り取る「株切り」を行うことで始まる。その後、7月に開花し未受精の花から毬花が形成され、8月に収穫が行われる。ザーツ地方では、栽培されている約3,500 haのホップの約9割がザーツ品種であるため、株切り作業・収穫作業にそれぞれ3週間程度と長い期間を要する。同じ品種でありながら株切り時期・収穫時期がそれぞれ最大3週間異なる収穫物が存在することになる。ビール品質に寄与するフムロン類やテルペン類は開花から収穫までの成熟の時間により変化すると考えられたため、株切りと収穫の実施時期によって生育や品質が異なることが予想されるが、いままでにこの点に着目した研究はなかった。

そこで本研究では、株切り時期の開花時期への影響・開花から収穫までの日数の収量やホップ香品質への影響を明らかにすることを目標とし、複数年（2010年、2011年、2012年）、ザーツ地方の4地点で調査が行われた。その結果、株切り時期については、株切りを20日間遅らせても開花時期は5日間程度しか遅れず、これらを同じ日に収穫したところビールホップ香品質の差異は見られていない。株切りから開花までの積算気温の解析から、積算気温への寄与が低い4月の株切り時期の日間差は7月の開花時期への影響は小さいと考えられた。一方、収穫時期に関しては、初期（8月中旬）から晩期（9月下旬）にかけての約40日間で苦み成分（フムロン）量や収量は変化していなかったが、テルペン類を含む精油量が6割程度増加し、華やかな香りに寄与するモノテルペン類の比率が高くなっていることを明らかにされた。この変化は、ビールホップ香へも影響を及ぼしているようである。とりわけビール中のホップ香の指標であるリナロールは収穫初期のホップを用いた場合に較べ収穫後期のホップを用いた場合は2.5倍程度に増加していた。以上よりホップの収穫時期を選定すると狙いのビール品質を達成できること、リナロール量を増やすためには晩期に収穫することが重要であることが示されている。さらに、収穫期間中の成熟の指標として毬花の色変化が観察されている。開花から継時的に鮮やかな緑色から黄色・茶色へと変化することが観察され、この変化を、色測計にて定量することを可能にされている。黄色・茶色の毬花において病害菌が検出されなかったことから、この色の変化は収穫期間中の気温の低下から引き起こされる植物の老化（セネッセンス）に起因すると考えられている。以上より、狙いの品質に最適な収穫時期の判別に、香気成分を分析するよりも、より簡便な方法として毬花の色測定法を確立されている。

2つめの項目では、ホップ株年齢が生育・品質へ及ぼす影響について検討されている。ホップは植栽後20年程度栽培される宿根多年草の植物であるが、これまで株年齢と品質の相関を詳細に調べた研究はなかった。そこで本研究では、株年齢によりホップ品質が変化するか否かを明らかにするために、異なる年（1991, 1996, 2001, 2006, 2007, 2008, 2009, 2010）にザーツ品種ホップが植えられたザーツ地方の8つの圃場にて2010年と2011年の2年間、栽培観察、原料品質評価とビール品質評価が行われている。5齢以下の若い株（若齢株）は10齢以上の株（成熟株）と比べ、栽培期間を通じて葉が大きく（5%程度）・茎が太く（10%程度）なる一方、開花時期が遅れていた（約10日間）。即ち、若齢株は成熟株と比べ栄養成長が旺盛である一方、生殖成長が遅れることを明らかにされている。これは、根量を増やすことに転流が盛んに行われているためと推察されている。また若齢株の毬花では、苦味の元となるフムロンの含量が高く（3割程度）、穏やかな香りに寄与するセスキテルペン類も多くなる傾向である一方、華やかな香りに寄与するモノテルペン類が少なくなっていた。このことから、フムロンやテルペン類の生成に関わる植物中の二次代謝が若齢株と成熟株では異なっていると考察されている。本試験で得られた毬花を用いて小スケールにてビール醸造が行われている。若齢株から得られた毬花を用いて醸造したビールは成熟株のそれと比べ華やかな香り、フルーティーな香り、シトラスの香りが弱くなっているようである。ビール中のテルペン類も原料中のテルペン類と同様な傾向を示し、リナロール、ゲラニオールといったモノテルペン類が少なくなっていた。これら原料中のモノテルペン類の量が少ないことがビールのホップ香品質へも反映されたと考察されている。以上より、狙いのビール品質に合わせて使用するホップの株年齢を考慮する必要があり、華やかな香りをつけるためには成熟株から収穫された毬花を使用する必要があると結論づけられている。

3つめの項目では、アップルモザイクウイルスが生育・品質へ及ぼす影響について検討されている。ホップはアップルモザイクウイルス（ApMV）やホップモザイクウイルス（HpMV）などウイルスやウイロイドに感染することで収量の低下や品質変化が起こる。本研究では、種々のウイルス・ウイロイドの中でアメリカ、オセアニア地域といった世界のホップ産地の種々のホップ品種へ収量低下や品質変化を引き起こすApMVがザーツ品種ホップの生育、収量、原料品質・ビール品質へ及ぼす影響が試験圃場で調査されている。またザーツ地方の生産圃場でのApMVの感染分布状況も調査されている。試験圃場の調査では、ApMVに感染したホップ40株、ウイルスフリー株40株を1999年に植栽した試験圃場にて2010年と2011年の2年間これらの株の生育特性やホップ品質が比較された。調査時点で両試験区共にApMV以外の他のウイルス・ウイロイドが感染していないことが確認されている。ApMVに感染することで、茎頂の高さ（10%程度減）や主茎葉のサイズ（10%程度減）が小さくなり、また収量が5割以上低下していた。ApMVの感染の有無に関わらず節数や葉の形状は同じであったことから、葉面積の低下により光合成量が低下しそれに伴って収量が低下したと考察されている。またApMVに感染したホップから得られた毬花中には、ビール品質にとって重要なフムロン（20%程度減）やエッセンシャルオイル量（20%程度減）が低下し、香気成分のプロファイルもモノテルペン比率が低下しセスキテルペン比率が高くなっているようであった。これら香味寄与物質の変化は、ApMVに感染することで植物中の一次・二次代謝が変化したためと考察されている。本試験で得られた毬花を用いて小スケールにてビール醸造を行われたところ、ApMVに感染したホップ毬花で醸造したビールはフルーティーな香りが弱くなりビールホップ香品質が低下していたようである。これは、原料中のモノテルペン比率が低かったことに起因すると考察されている。以上から、生産者・ビール会社双方の観点からApMVの感染を防ぐ必要があると結論づけられている。ザーツ地方のウイルス感染状況が調査されたところ、植栽後3年でApMVの感染が確認された圃場があった一方で、植栽後20年経過した圃場でもApMVの感染率が低く抑えられている圃場もあった。樹液に触れる設備に対する熱処理・薬剤処理や媒介虫の対策など栽培の適切なマネージメントにより、ApMVの感染を低く抑えられる可能性が示唆され、栽培方法を最適化することによって品質と収量を向上できると結論づけられている。

本研究により、株切り時期、収穫時期、ホップ株年齢、ウイルス感染など、ホップの栽培因子を制御することによって、消費者のニーズに応じたビールに必要なホップの品質をコントロールすることが可能である事を明らかにされている。本研究成果は、ビールの醸造会社だけでなく、ホップの生産者にも非常に重要な知見となる結果であると考えられる。

よって、本論文は博士（農学）の学位論文として価値あるものと認める。なお、審査にあたっては、論文に関する専攻内審査および公聴会など所定の手続きを経たうえ、平成30年2月20日、農学研究科教授会において、論文の価値ならびに博士の学位を授与される学力が十分であると認められた。