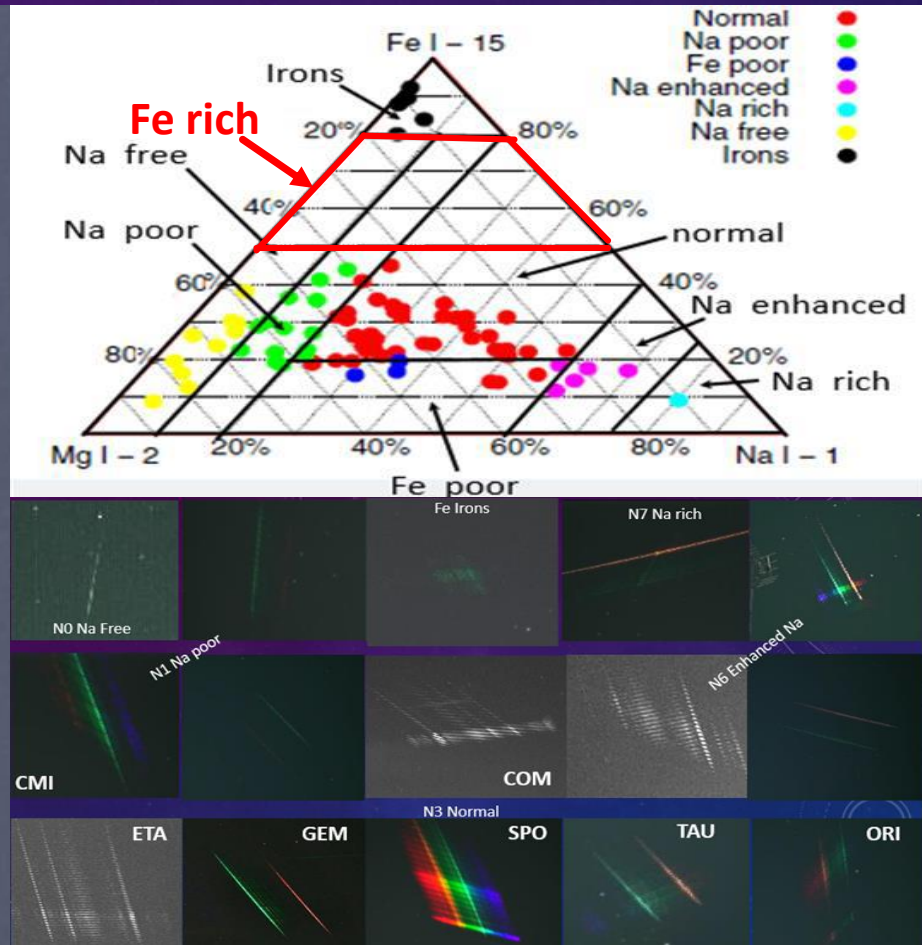
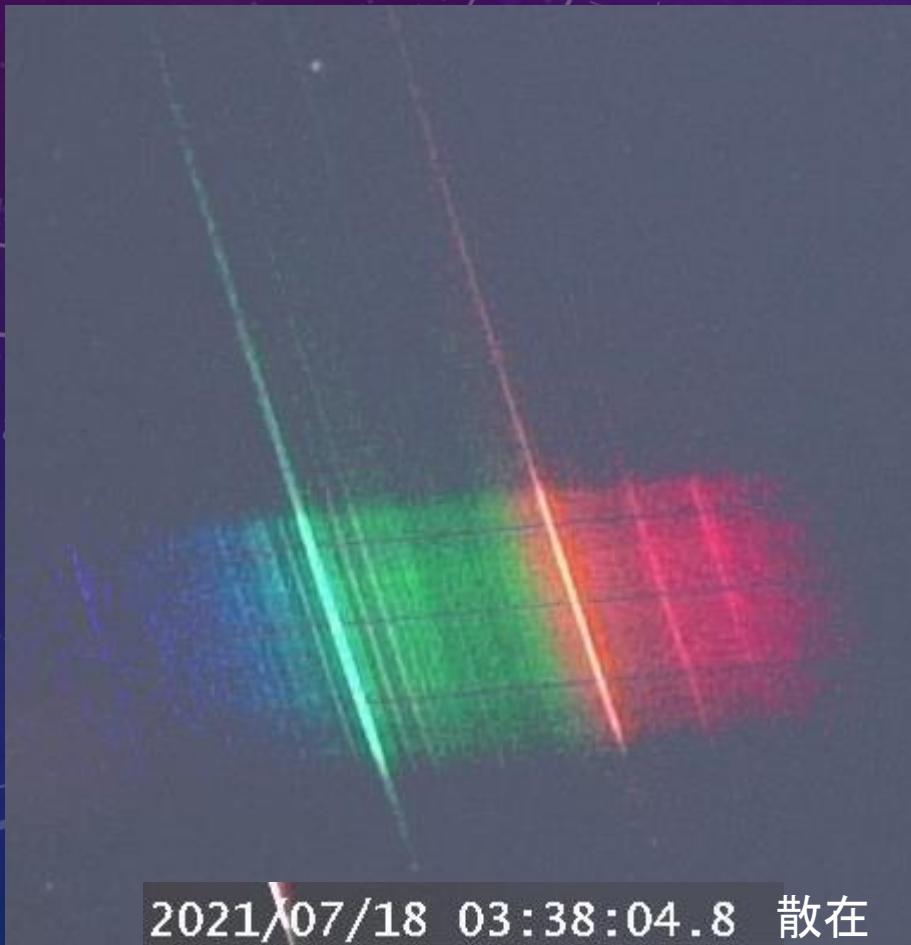
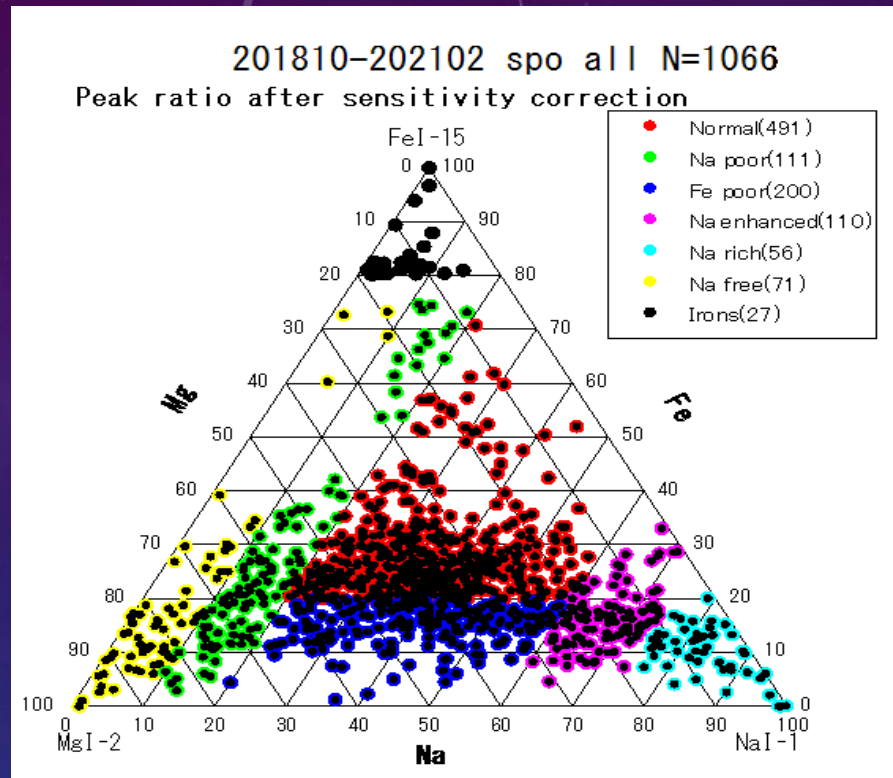
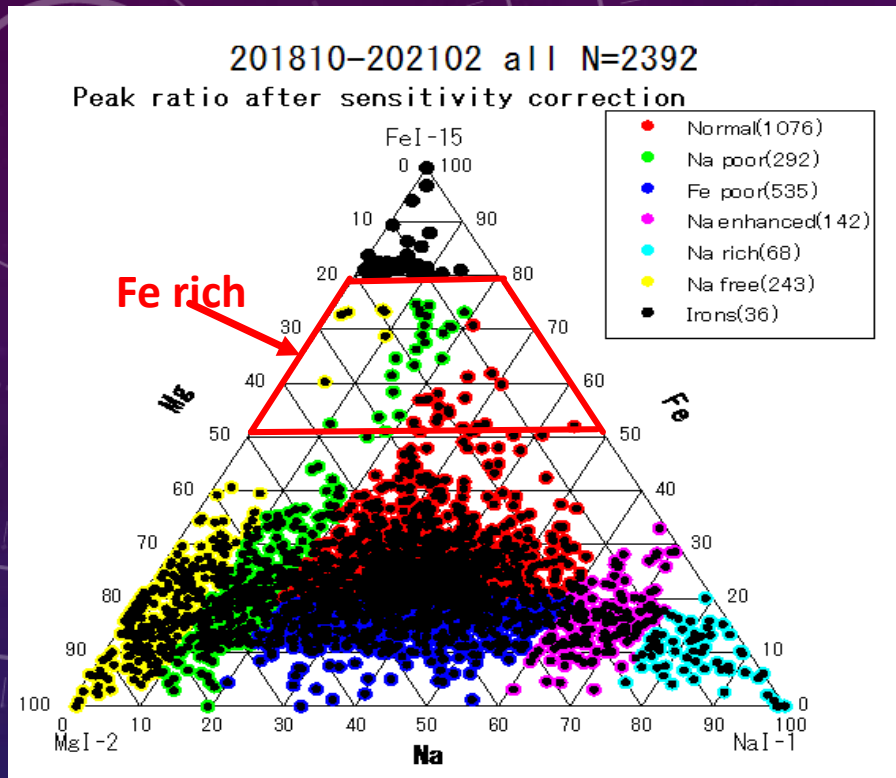


2018年10月から2021年2月までの スペクトル解析結果と考察

関口 孝志 20211103

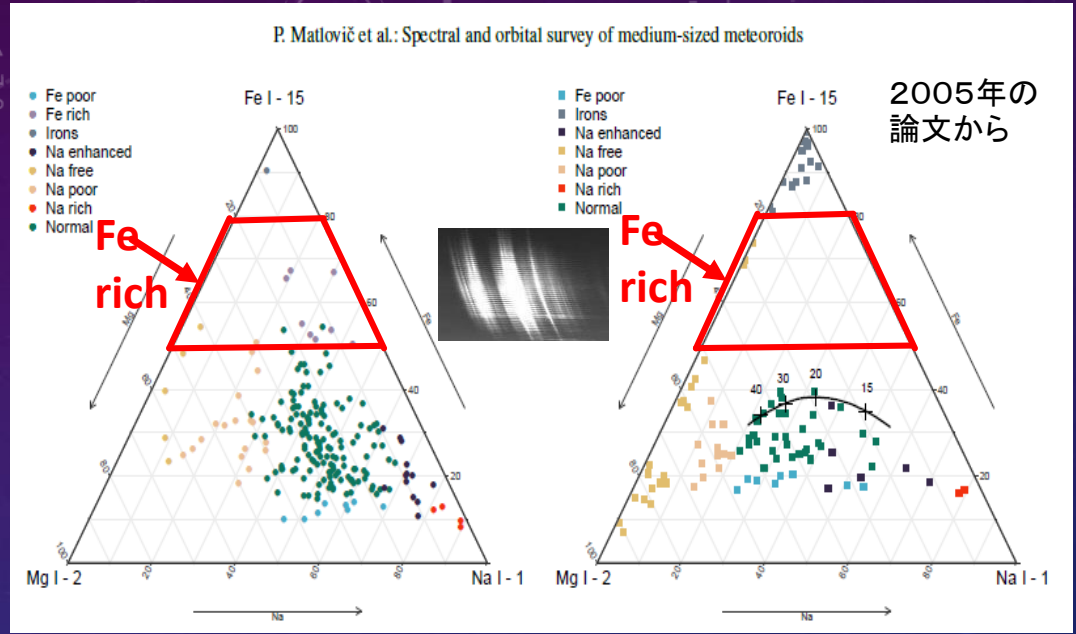
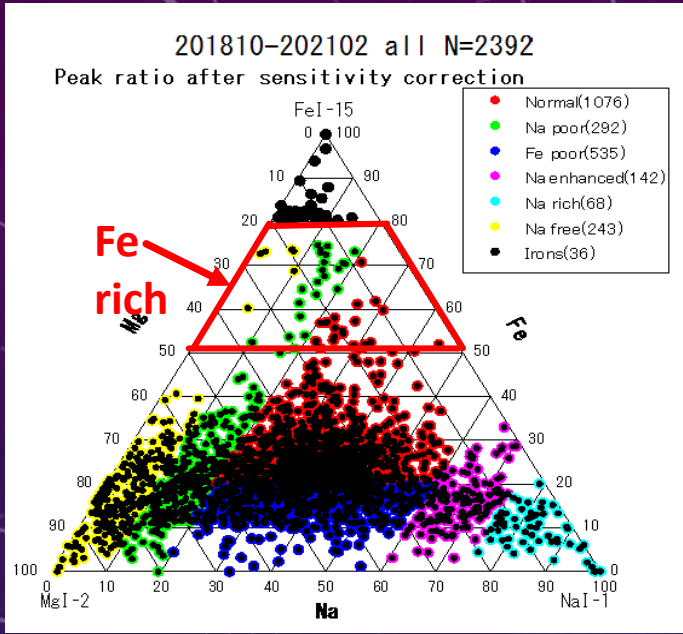


2018年10月から2021年2月のスペクトル解析結果と考察



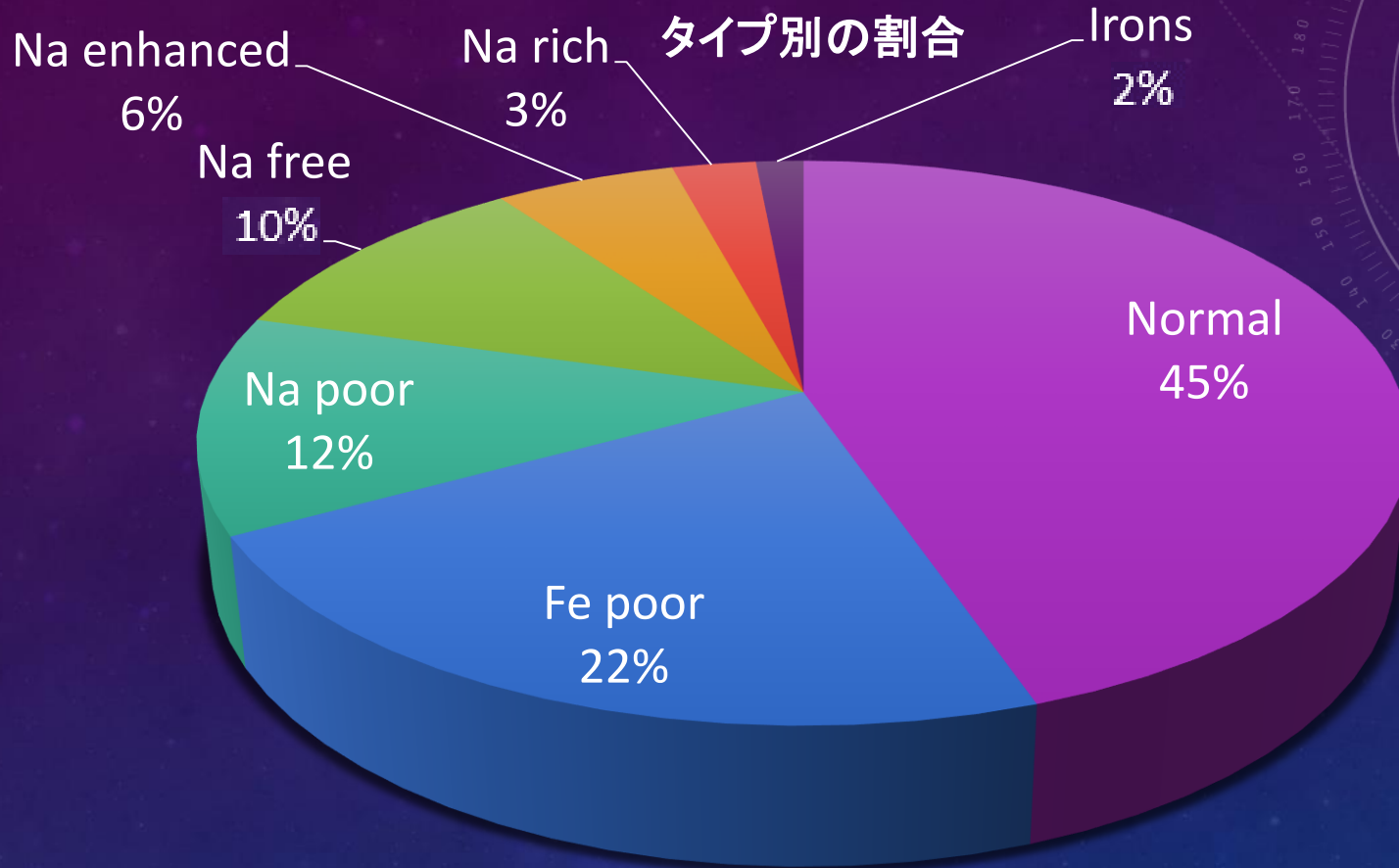
2018年10月から2021年2月までの2392個のスペクトル解析結果です。カメラや解析方法やソフトや分類の仕方は、2019年の流星会議の私の資料を参考にしてください。最後のスライドにアドレスがあります。グラフは、カメラ8台の感度補正までのピーク比です。左が全流星のタイプ別の三角図です。**中央部分に集中が見られます。Feが50-80%になっているタイプが54個ありました。ここを Fe richとして新グループとしている論文(2019年PAVOL MATLOVIĆら)もあります。全てのタイプのスペクトルが撮影されています。Na rich(68個)と Irons(36個)が少ないです。**右が1066個の散在判定のみのタイプ別の三角図です。やはり、中央部分に集中が見られ**Feが40%以上の流星とNa richとNa enhancedと Ironsの流星の殆どが散在流星**になっています。2020年5月までの分布とあまり変わりません。

タイプ分類の2005年と2019年の論文との比較



前のスライドのFeが50-80%になっているタイプを Fe richとして新グループとしている論文(2019年PAVOL MATLOVIČらのSPECTRAL AND ORBITAL SURVEY OF MEDIUM-SIZED METEOROIDS)との比較です。右側の三角図の分類は、この論文で、2005年のJ. BOROVIČKA, ET AL ICARUS 174, 15の論文と比較しています。一番右がもとになっている2005年の論文の三角図です。ここには、Fe richがありません。なので7つのタイプで分類されています。真ん中が2019年の論文で8つのタイプに分類されています。しかも、2005年の分類とは、少し異なっています。8個がFe richになっています。この領域には、4個の別のタイプも含まれています。左が私の結果です。Fe richのこのタイプが54個ありました。この図は、2005年の分類でしているので、3つのタイプが合わさっています。しかし、どうも1つのタイプにした方がよいと思っていた所で、この論文を見つけ、納得しました。

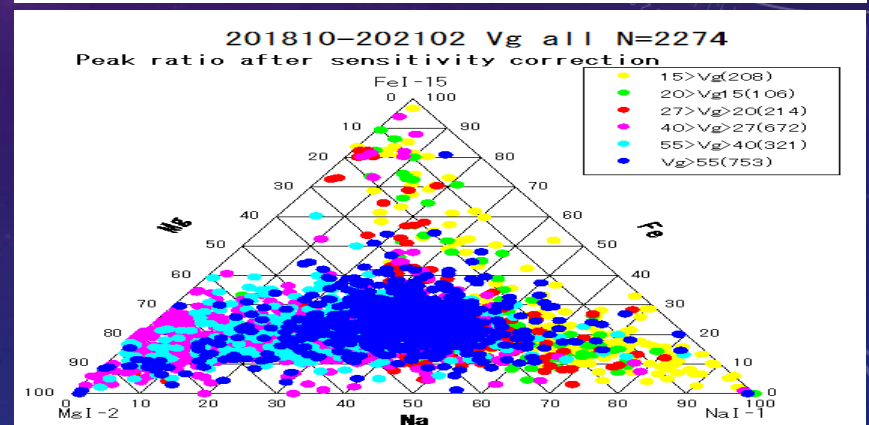
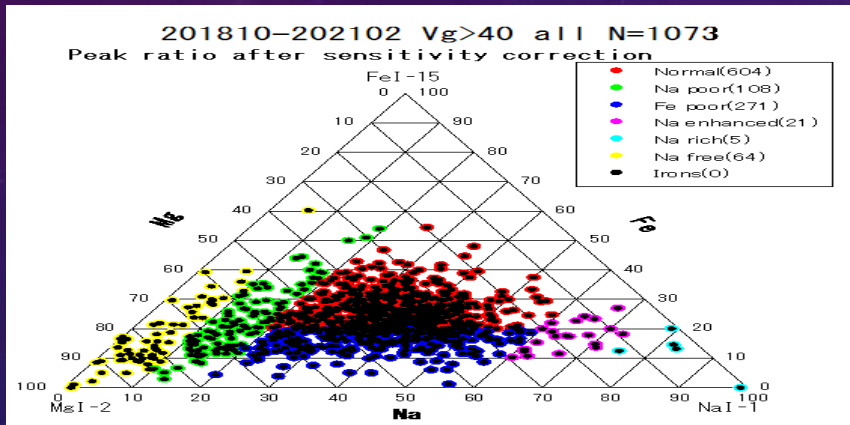
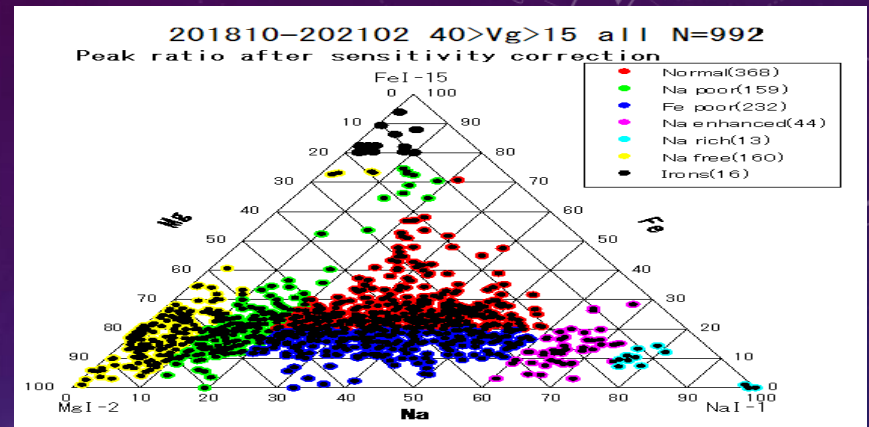
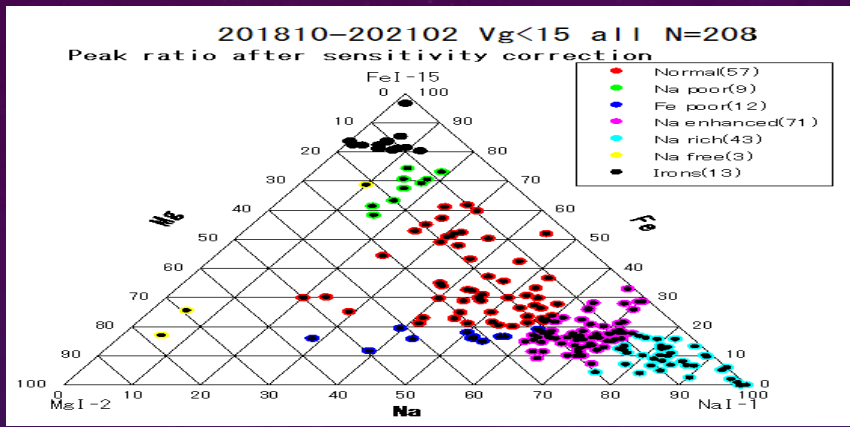
流星スペクトルの得られたタイプ別の割合



■ Normal ■ Fe poor ■ Na poor ■ Na free ■ Na enhanced ■ Na rich ■ Irons

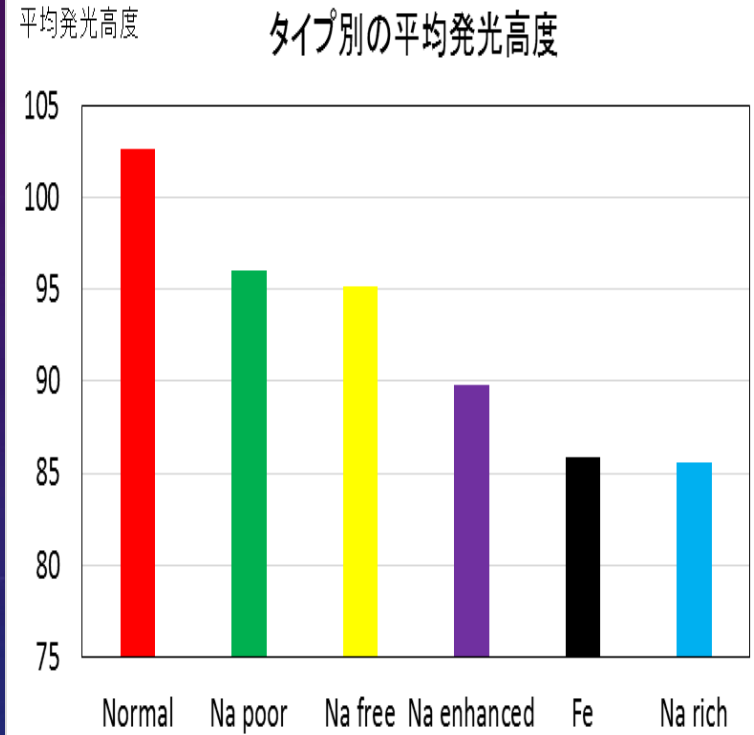
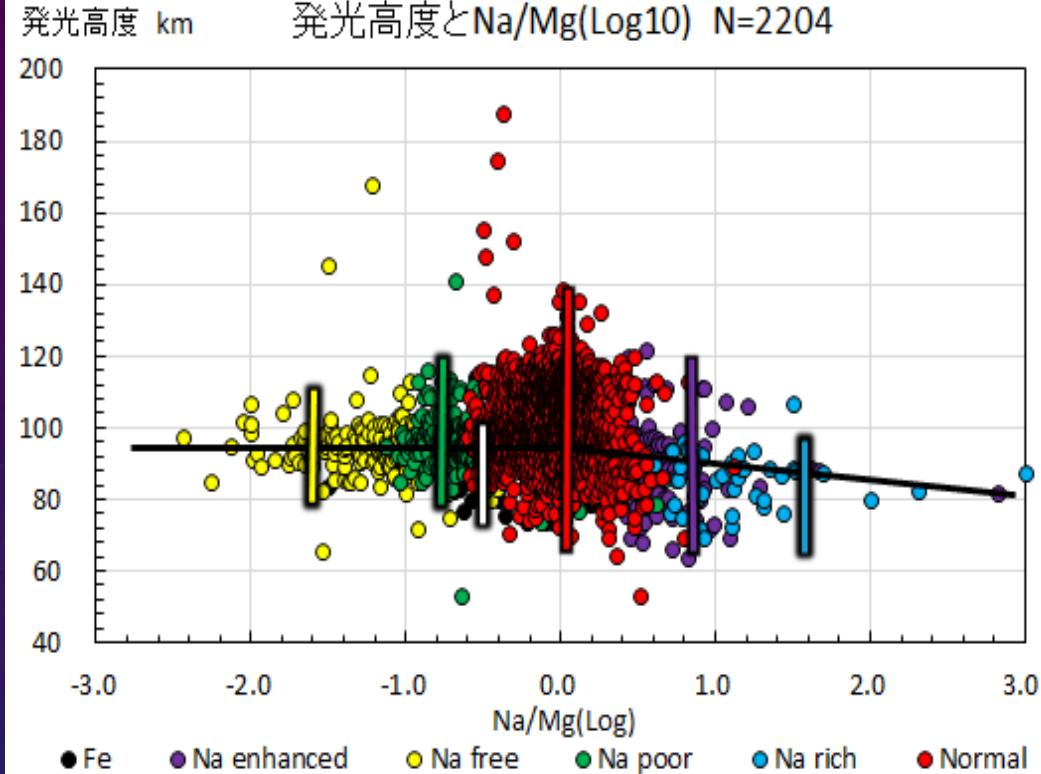
2392個の全流星のスペクトルのタイプ別の割合です。**Normalが45%と一番多かった**です。次にFe poorでこの2つで約3/4になります。**Na richとIronsは、合わせても全体の5%**しかありませんでした。Fe richは、分類していません。第3回スペクトル研究会等の資料の時と殆ど変わっていません。

全流星の速度によるタイプ別の三角図



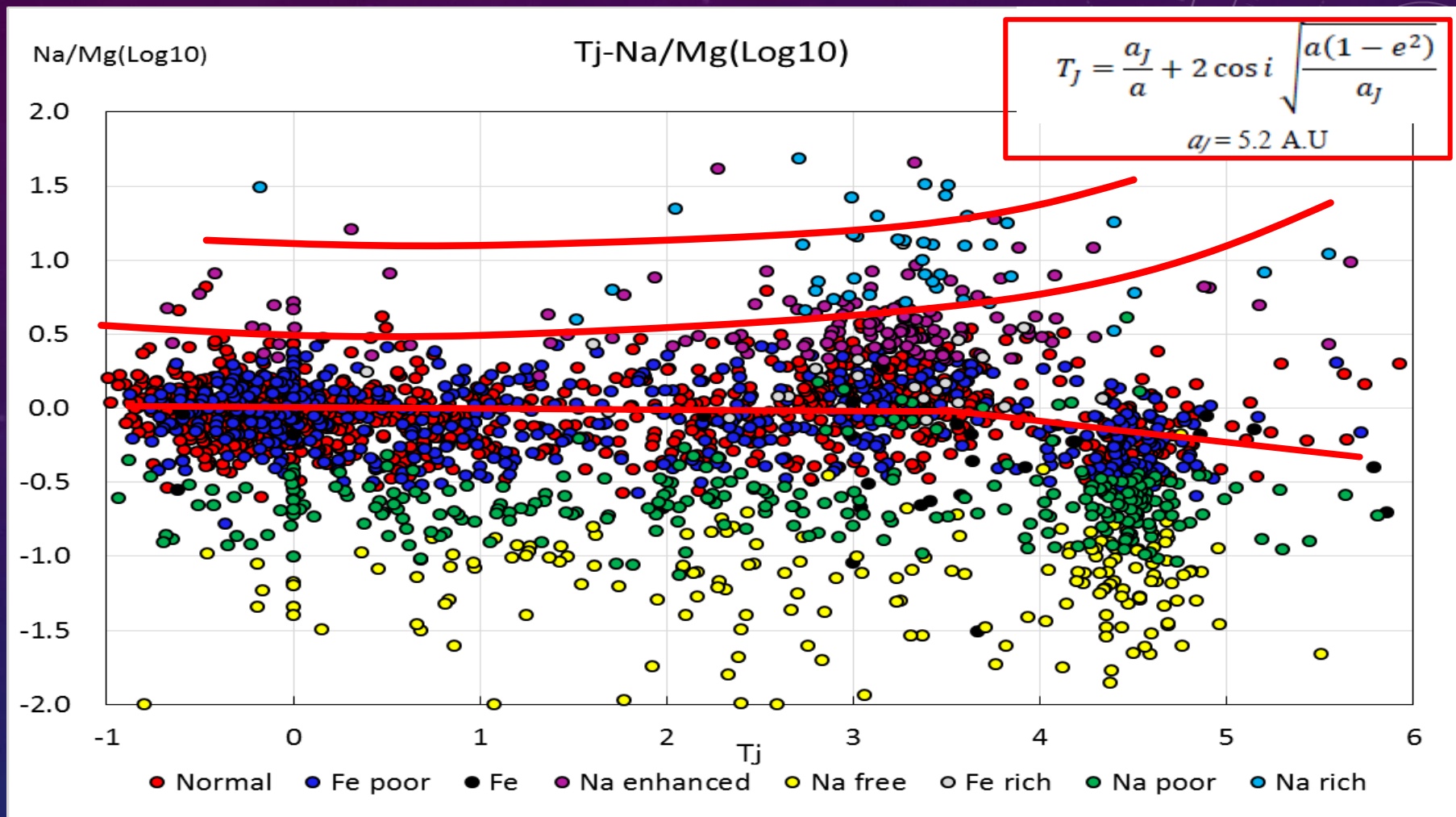
全流星の速度でのタイプ別の三角図です。左上は、Vgが**15km以下**です。7つの全部のタイプがみられます。**Mgの量は、0-30%の間に集中**しています。FeとNaの量の差で各タイプに分かれています。右上は、 $40\text{km} > Vg > 15\text{km}$ です。こちらも7つのタイプが見られます。IronsとNa enhancedは、左上と同じくらい見られます。Na richは、少なくなっています。Na freeとNa poorとNormalとFe poorは、Feの量が10-40%に集中しています。Na poorとNormalは、やや鉄の量が多いものが中央の上に固まっています。左下は、**Vgが40Km以上**です。Ironsは、ありません。Na richとNa enhancedが少し見られます。Na freeとNa poorとNormalとFe poorは、右上より集中が少なくなっています。**Normalが一番多く中央の下に集中**しています。右下は、全流星の速度別の三角図です。この図から、**IronsとFe richとNa richとNa enhancedは、低速流星が多い**ということがわかります。

全流星の発光高度とNa/Mgの関係等



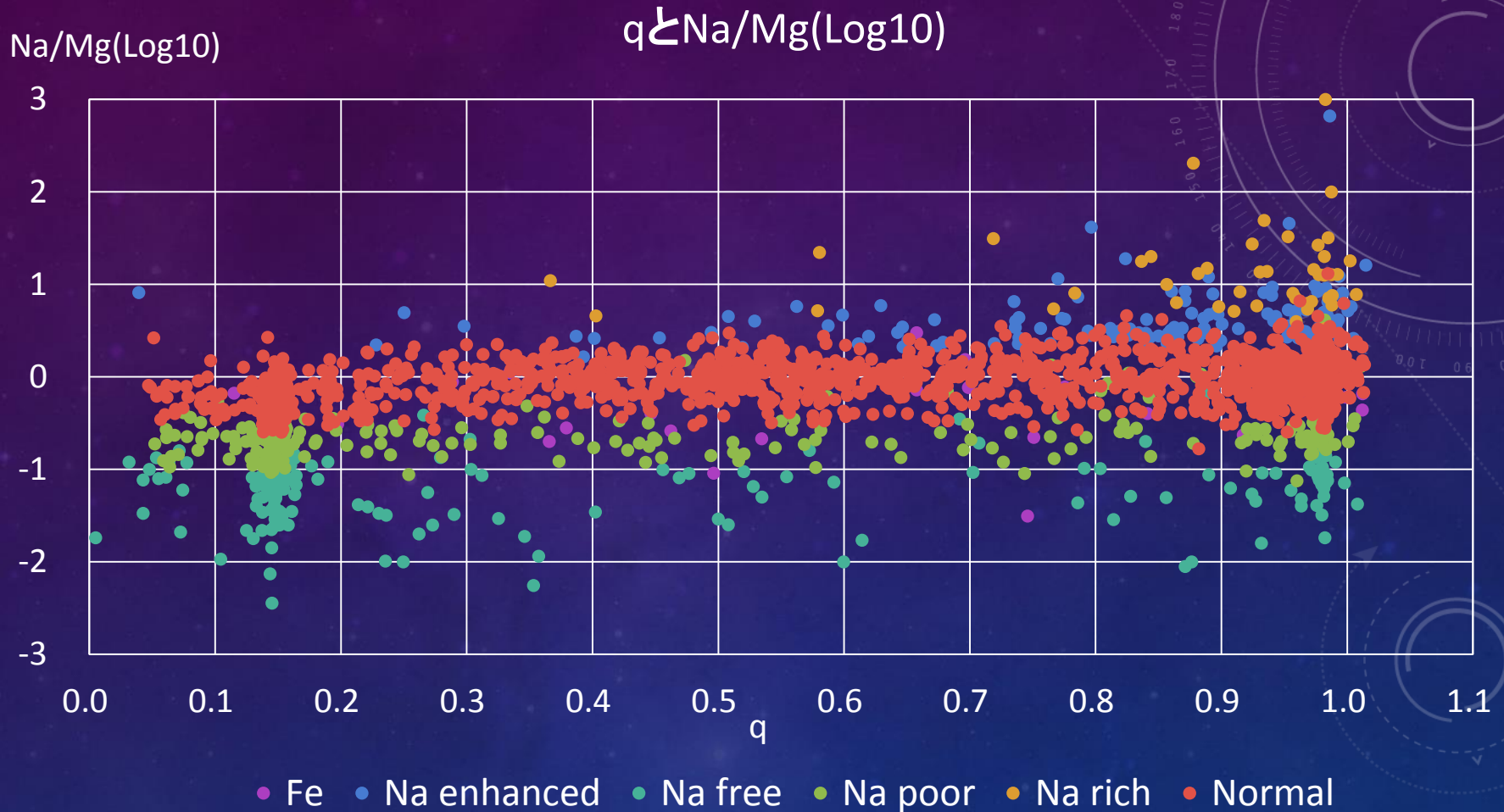
左は、全流星の発光高度とNa/Mg比です。どのタイプ(Fe richとFe poorは、分類してなくNormalに含めています。)も100Km付近からの発光が見られます。Na/Mg比が0以下では、集中している部分が殆ど100kmです。Na/Mg比が0以上では、100kmから80kmへと低くなっています。タイプでは、Na enhancedとNa richです。これらは、低速流星が多いので低くなっているのがわかります。右は、タイプ別の平均の発光高度です。これを見ても、**Na enhancedとNa richとIrons(Fe)**が低速が多く低くなっていることがわかります。前のスライドからも**NormalとNa poorとNa freeは、中高速が多く発光点が高くなっています**。Normalに比べるとNa poorとNa freeは、暗い流星が多く高度の差が小さくなっています。

全流星のTj(Tisserand parameter)とNa/Mgの関係



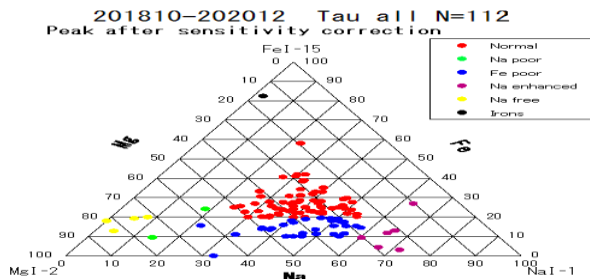
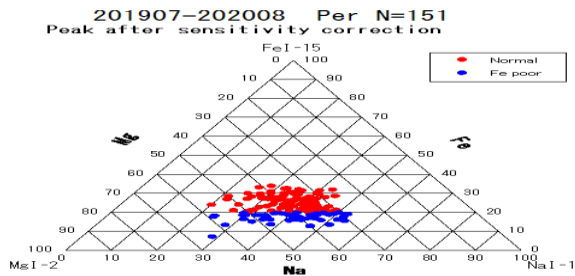
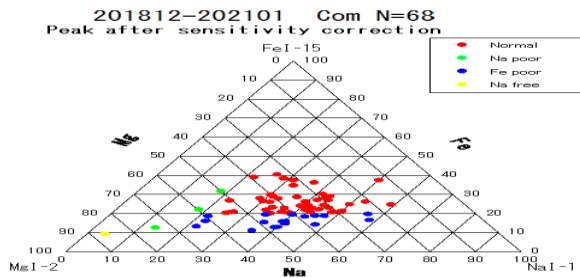
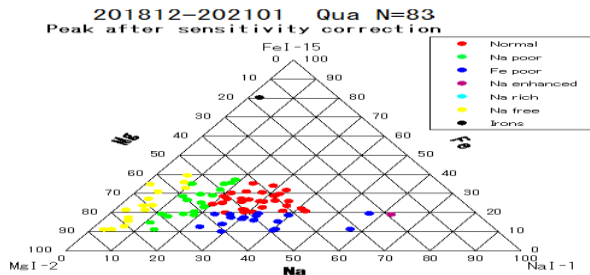
全流星のTj(Tisserand parameter 上の赤四角の式 a_j は、木星の軌道長半径)とNa/Mg比です。Normal とNa poorとNa freeは、特に変化が見られません。Na enhancedとNa richは、Tj 3以下でほぼ一定ですが、Tj 3からNa/Mgの比の増加がやや見られます。Fe poorは、Tj 3以上でNa/Mgの比の減少がやや見られます。

全流星のq(近日点距離)とNa/Mgの関係等



上は、全流星のqとNa/Mg比です。これをみても、**Na richとNa enhancedがqが小さくなるに従ってNa/Mg比が低くなっていることがわかります。**前のスライドとNaが減る似た傾向があります。**Na poorとNa freeは、もともとNaの量が少ないので特に大きな変化が見られません。**Normalは、qが0.35以下になると少しずつ低くなっています。

Qua群とCom群とPer群とTau群の三角比



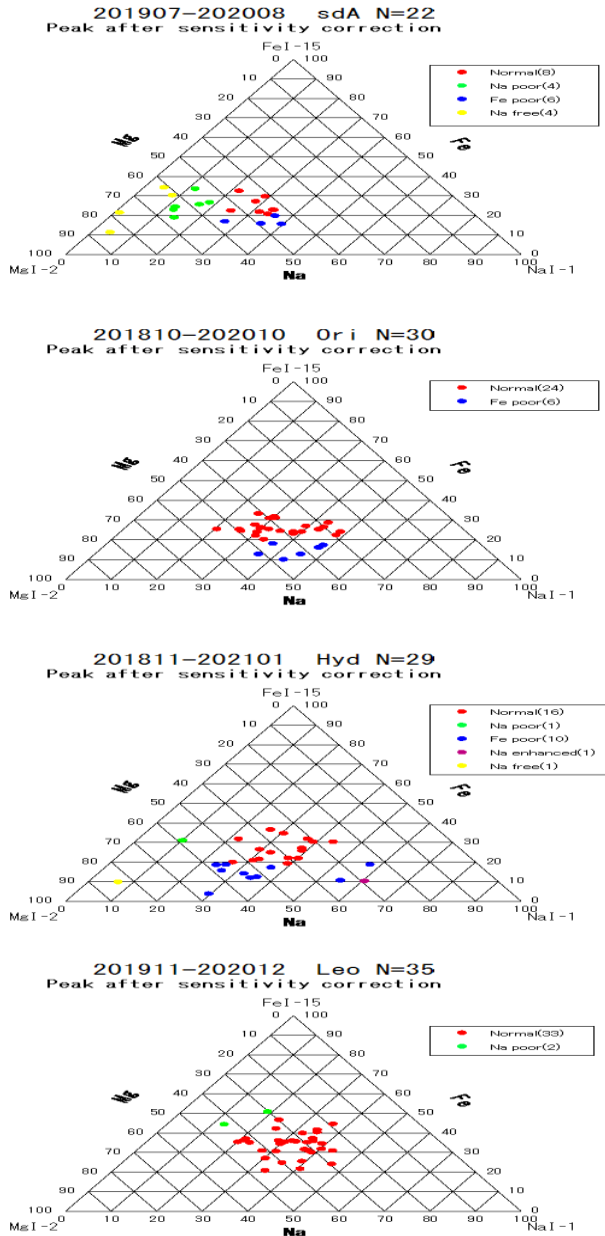
1つ目は、2018年-2021年の**しぶんぎ群**の全流星83個のスペクトルのタイプ別の三角図です。三角図の中央から左側によっています。Naの割合が0-40%に集中が見られます。また、鉄の割合は、10-40%に集中しています。**4つのタイプが多く大体同じ割合**で分布しています。後のスライドのふたご群と似ています。

2つ目は、**かみのけ群**の全流星68個の結果です。**NomalとFe poorが殆ど**で中央に集中しています。Naの割合が30-50%に集中が見られます。鉄の割合は、10-40%に集中しています。Na poor とNa Freeが少しあります。

3つ目は、2019年から2020年の**ペルセ群**の全流星151個のスペクトルの三角図です。三角図の中央に集中しています。**NomalとFe poorが殆ど**です。明るい流星が多くスペクトルがよく出ています。Naの割合が30-50%に集中が見られます。また、鉄の割合は、10-30%に集中しています。

4つ目は、**おうし群全体**のタイプ別の結果です。**6つのタイプ**に分かれました。**NomalとFe poorが殆ど**です。火球が多く爆発時のFeの割合が影響しFe割合の幅があります。いくつか散在判定と紛らわしいものがあります。中央から外れているものは、散在の可能性もあります。

sdA群とOri群とHyd群とLeo群の三角比



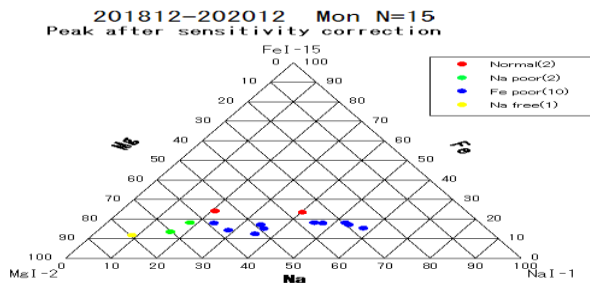
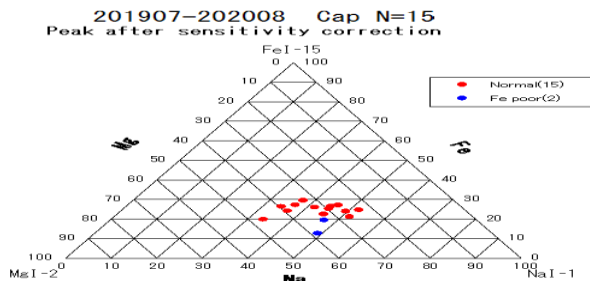
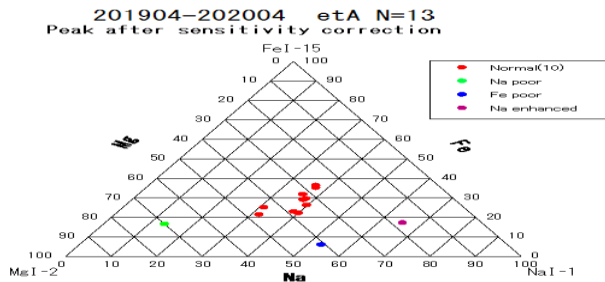
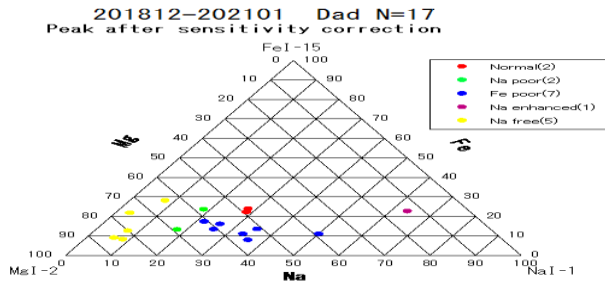
1つ目は、2019年-2020年の**水がめ南群**の全流星のスペクトルのタイプ別の三角図です。三角図の中央から左側によっています。Naの割合が0-40%に集中が見られます。また、鉄の割合は、10-40%に集中しています。**4つのタイプが多く大体同じ割合**で分布しています。しぶんぎ群とふたご群と似ています。

2つ目は、2018年-2020年の**オリオン群**の結果です。**NomalとFe poorが殆ど**で中央に集中しています。Naの割合が20-50%に集中が見られます。鉄の割合は、10-40%に集中しています。ペルセ群と似ていますが同じ母天体の水がめ群とは、少し違うようです。

3つ目は、2018年-2021年の**うみへび群**の結果です。三角図の中央に集中しています。**NomalとFe poorが殆ど**です。Naの割合が20-40%に集中が見られます。また、鉄の割合は、10-35%に集中しています。

4つ目は、**しし群全体**のタイプ別の結果です。**Nomalが殆ど**です。Na poorが2つあります。火球が多く爆発時のFeの割合が影響しFe割合が20-50%と幅があります。高速でスペクトルがきれいに出るのでペルセ群と似たような感じです。でも、**明らかに鉄の割合が多い**のが違います。

Dad群とetA群とCap群とMon群の三角比



1つ目は、2018年-2021年の12月から1月の**りゅう群**のスペクトルのタイプ別の三角図です。三角図の中央から左側によっています。Naの割合が0-40%に集中が見られます。また、鉄の割合は、10-30%に集中しています。**4つのタイプが多く大体同じ割合**で分布しています。しぶんぎ群と判定が難しいですが似ています。

2つ目は、5月の**みずがめ群**の結果です。**Nomalが殆ど**で中央に集中しています。Naの割合が30-40%に集中が見られます。鉄の割合は、20-35%に集中しています。

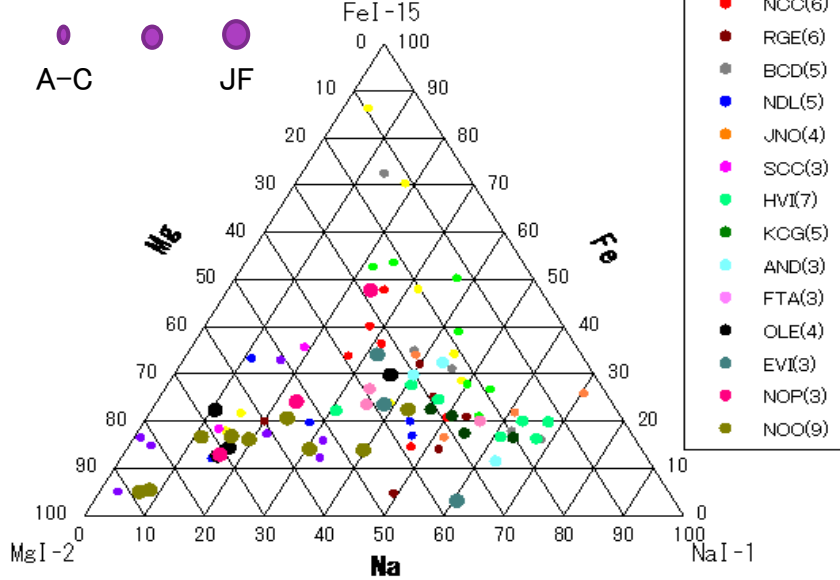
3つ目は、2019年-2020年の**やぎ群**の全流星15個のスペクトルの三角図です。三角図の中央に集中しています。**NomalとFe poorが殆ど**です。明るい流星が多くスペクトルがよく出ています。Naの割合が30-50%に集中が見られます。また、鉄の割合は、10-30%に集中しています。

4つ目は、**一角獣群**のタイプ別の結果です。**4つのタイプ**に分かれました。**Fe poorが殆ど**です。Naの割合が10-60%と広く分布しています。**qが小さいのでNaの枯渇**が見られているようです。

流星数が3~10個の小流星群の三角比

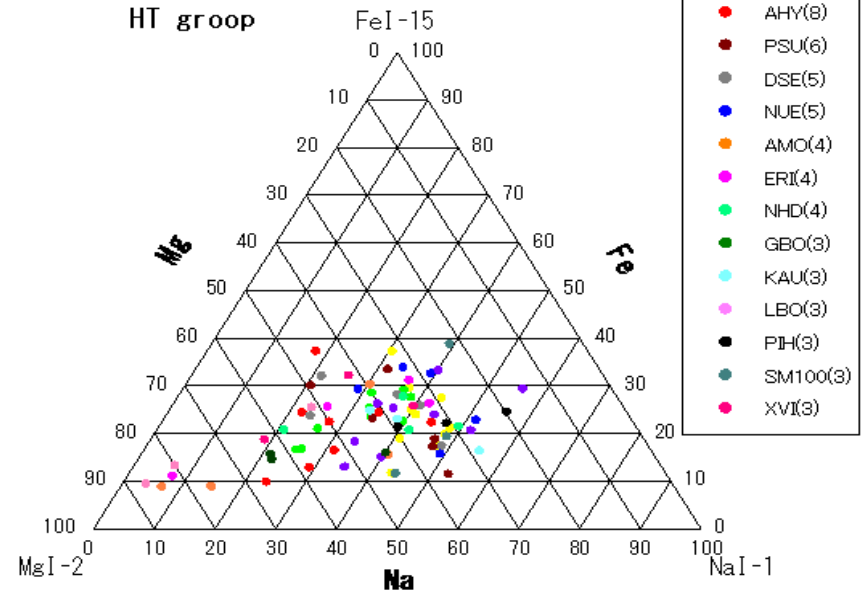
minor meteor showers-1 (N>=3)

Peak after sensitivity correction
a-c group and JF group



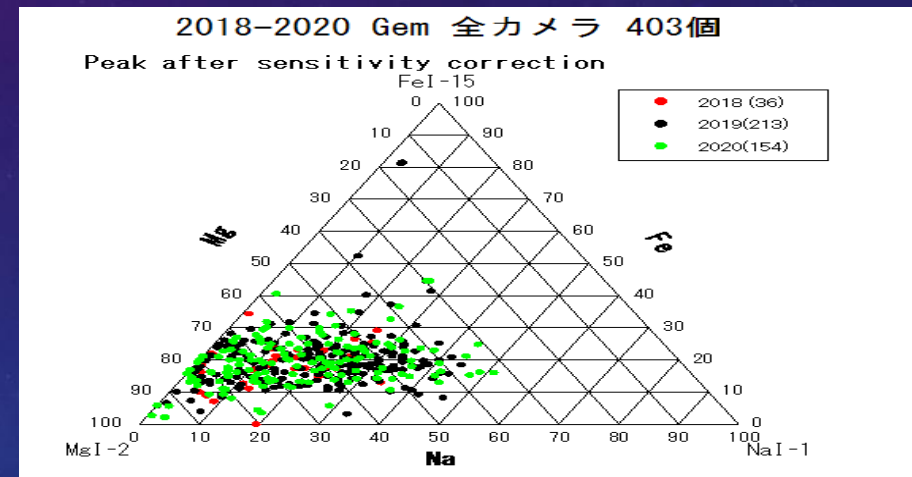
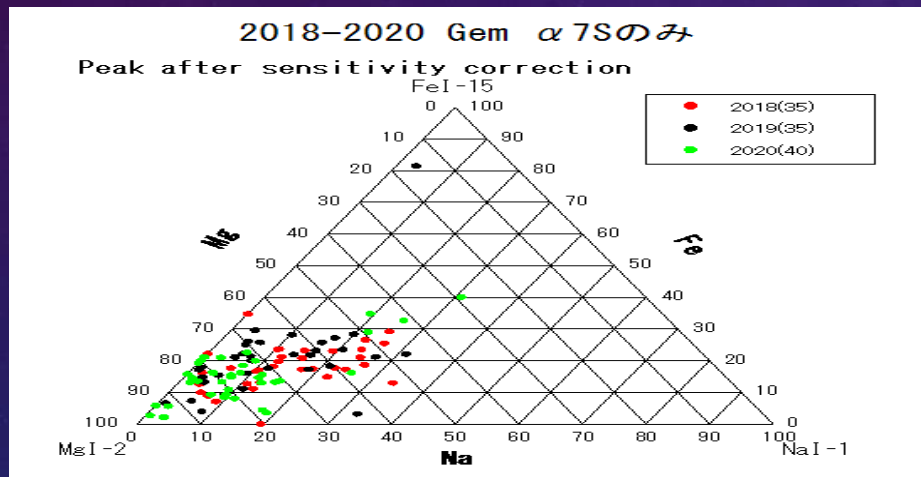
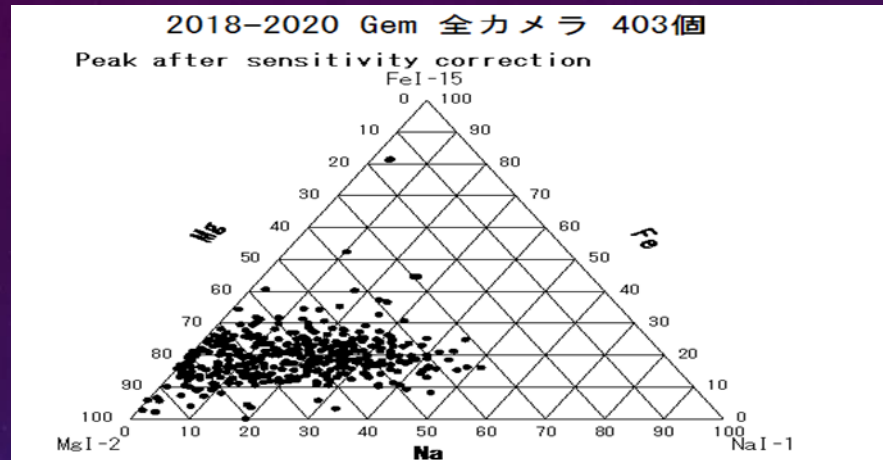
minor meteor showers-2 (N>=3)

Peak after sensitivity correction



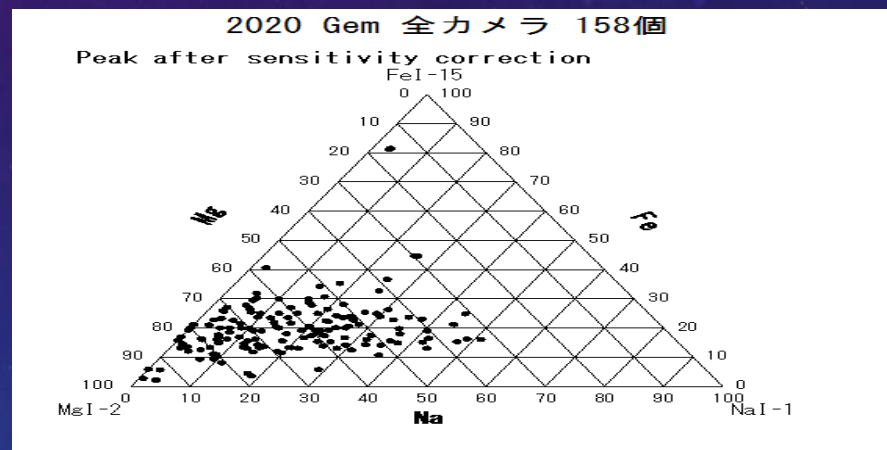
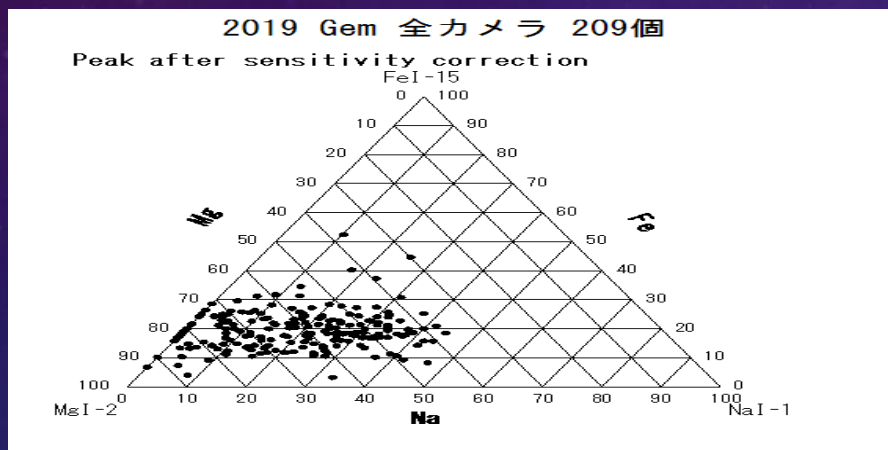
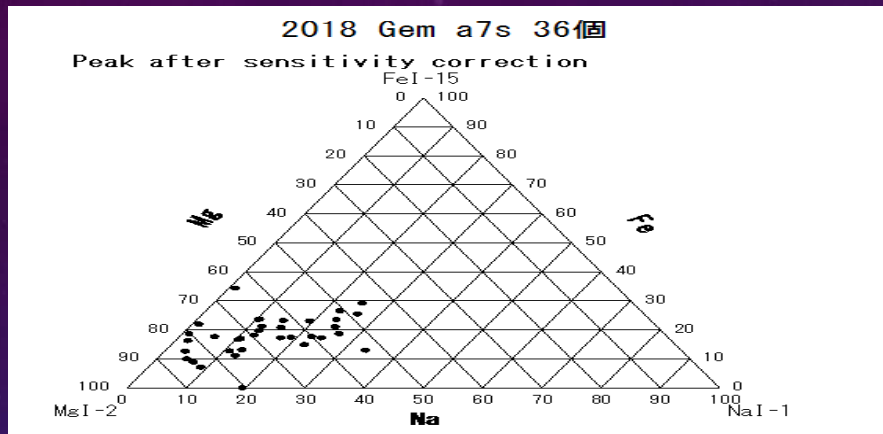
左がA-CとJFグループで、右がHTグループに分けてあります。左右から分かることは、**Naが0-30%と少ない群**は、軌道から見ると**SCC**($q=0.1$ $i=5$ a-c)と**XUM**($q=0.2$ $i=67$ a-c)と**NDL**($q=0.5$ $i=5$ a-c)と**ACC**($q=0.5$ $i=8$ a-c)と**NOO** ($q=0.1$ $i=20$ JF)と**OLE** ($q=0.1$ $i=30$ JF) となっています。これらは、全てで、 q が小さくAsteroidal-chondritic class (A-C)とJupiter-family orbits(JF)です。また、Halley-type orbits (HT)タイプのもので**AHY**($q=0.3$ $i=60$ HT)と**AMO** ($q=0.4$ $i=130$ HT)と**LBO**($q=0.97$ $i=80$ HT)と**GBO**($q=0.9$ $i=80$ HT)があります。**Naの少ない群**は、**Naの枯渇**があるものと考えられます。**Feが多い群**として**ACC**($q=0.5$ $i=8$ a-c)と**NCC**($q=0.4$ $i=3$ a-c)と**SLE**($q=0.7$ $i=5$ a-c) さらに、**Naが多い群**として**HVI** ($q=0.8$ $i=1$ JFとa-c)と**JNO**($q=0.8$ $i=5$ a-c)と**KCG**($q=0.9$ $i=30$ JFとa-c)と**BCD**($q=0.8$ $i=6$ a-c)があります。**他の小流星群**は、中央部に分布しています。

流星スペクトルの得られた全Gem群の三角比



上は、2018年から2020年のふたご群の全流星のスペクトルの三角図です。三角図の中央から左側によっています。Naの割合が0から40%に集中が見られます。また、鉄の割合は、10-30%に集中しています。鉄流星が2個撮影できています。左下は、 $\alpha 7S$ のみの結果で3年分を分けています。右下は、全カメラの3年分を分けています。2018年は、赤点。2019年は、黒点。2020年は、緑点です。 **$\alpha 7S(50mm)$ のみと全カメラでは、ともに年によって分布の仕方が違います。全カメラは、6mmが多いので明るい流星も多く広い範囲に広がってます。**

流星スペクトルの得られたGem群の年別の三角比

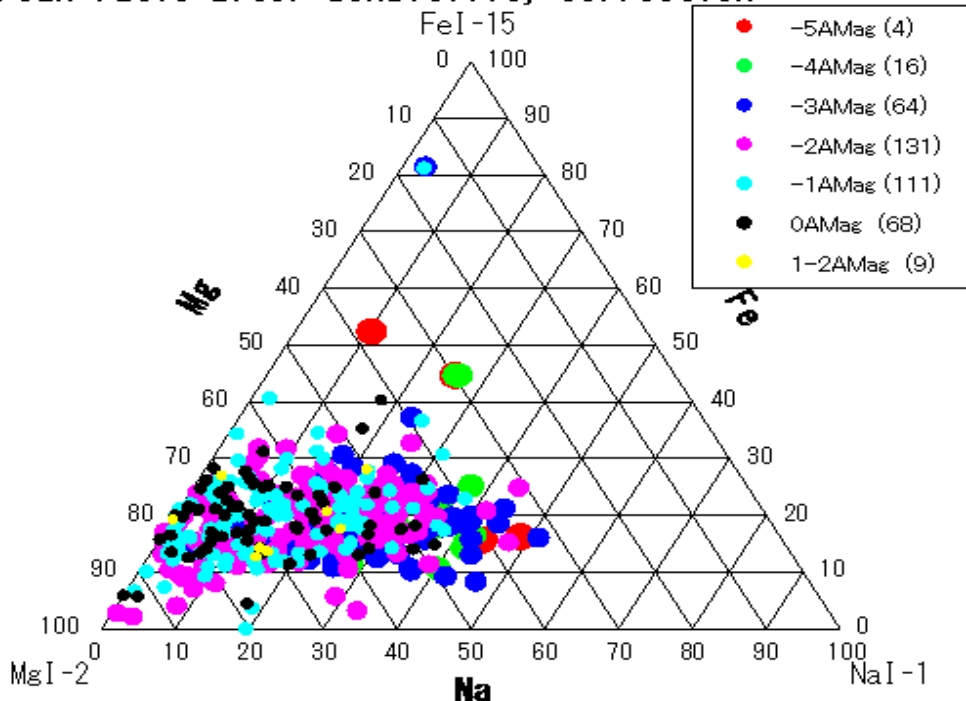


前のスライドの上の全部のふたご群のグラフを年毎に分けました。上は、2018年のa7sのみの結果です。Naは、30%以下です。左下は、2019年の全カメラによるふたご群の結果です。極大付近の明るいものが焦点距離の短いレンズでたくさん撮影され、Naの20-40%に集中が見られます。右下は、2020年の全カメラのふたご群のスペクトルの結果です。2020年の方は、Naの割合が30-40%に集中が見られなくて、0-30%に集中しています。**年によって分布の集中の違いが見られますがFeの分布の範囲は、10-30%と似た傾向があります。**

スペクトルの得られたGem群の絶対光度別の三角比

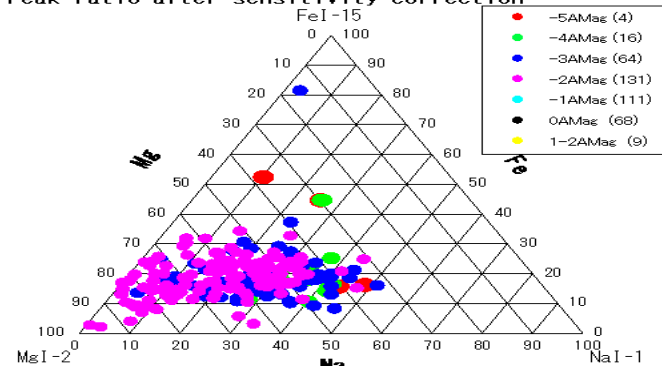
2018-2020 Geminids (N=403)

Peak ratio after sensitivity correction



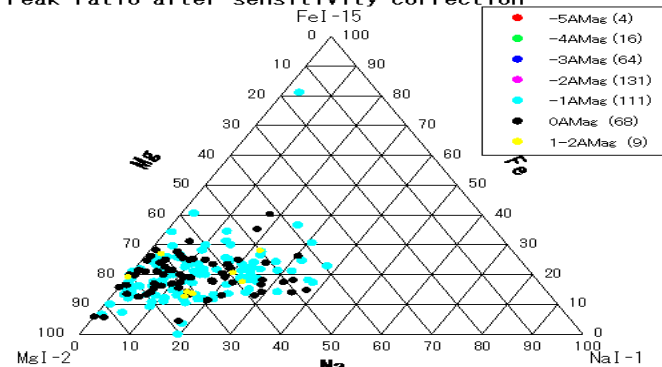
2018-2020 Geminids (N=403)

Peak ratio after sensitivity correction



2018-2020 Geminids (N=403)

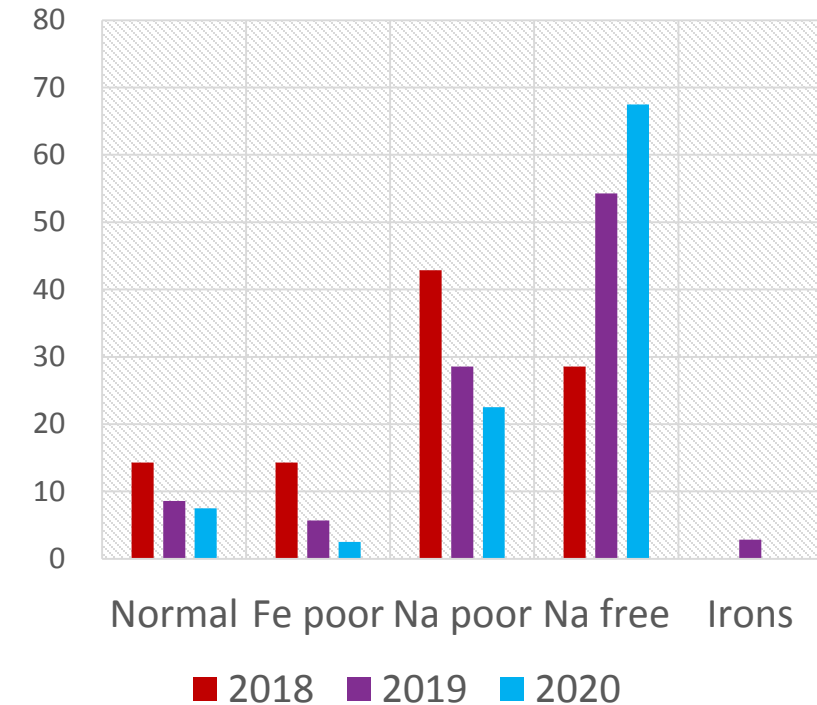
Peak ratio after sensitivity correction



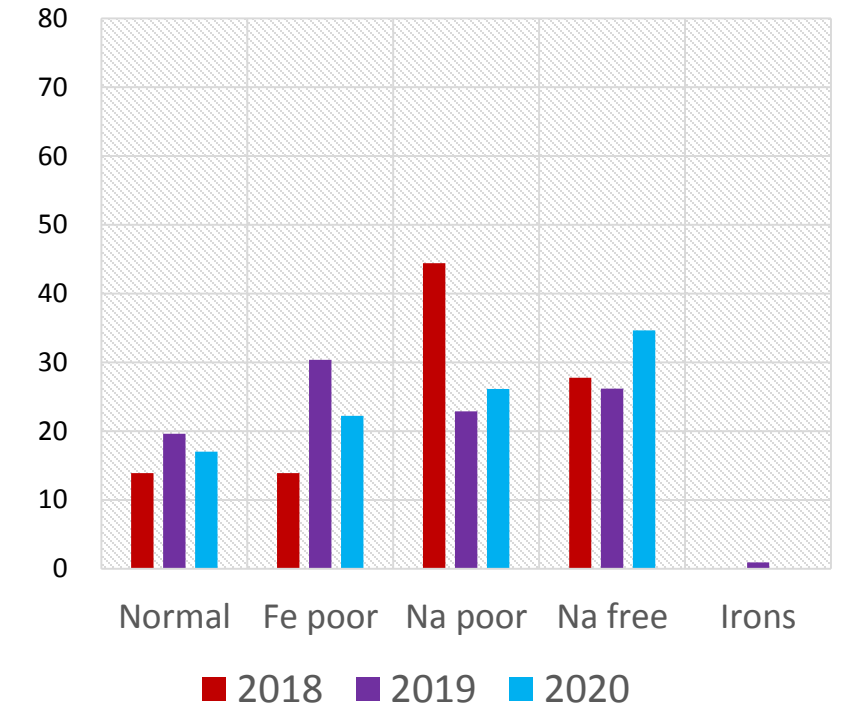
左は、2018年から2020年の全カメラによるふたご群の全絶対光度別の三角比です。中央に明るいものが左に暗いものが集中しています。重なりが多いので2つに分けました。右上は、絶対等級-5等から-2等までの明るい流星の分布です。右下は、絶対等級-1等から2等までの暗い流星の分布です。-2等から-1等は、やや広がりが大きいですが、集中部のずれは、10%程度あります。0等から2等は、左の0-10%の範囲が多くなっています。暗い流星は、Naの量が少ないので、暗い流星ほどNaの枯渇が起きやすいと考えられます。

Gem群のカメラごとの年によるタイプ別の割合

ふたご群の年別のタイプ別の割合の比較 a7s カラーHDカメラ



ふたご群の年別のタイプ別の割合の比較 全カメラ



左は、**a7sの50mmレンズのみ**のふたご群のタイプ別の割合の年による変化です。年によって割合の違いが見られます。**NormalとFe poorが少なく、Na freeとNa poorが多い**ですが年によってばらつきが見られます。Na Freeが、毎年割合が増えていて他の3つは逆に毎年減っています。右は、**全カメラ**の結果です。こちら、年によってタイプの一番多いものは、違います。**2019年だけがNormalタイプとFe poorが他の年より多かった**ことがわかります。2018年と2020年の方は、反対にNa freeとNa poorが多かったことがわかります。

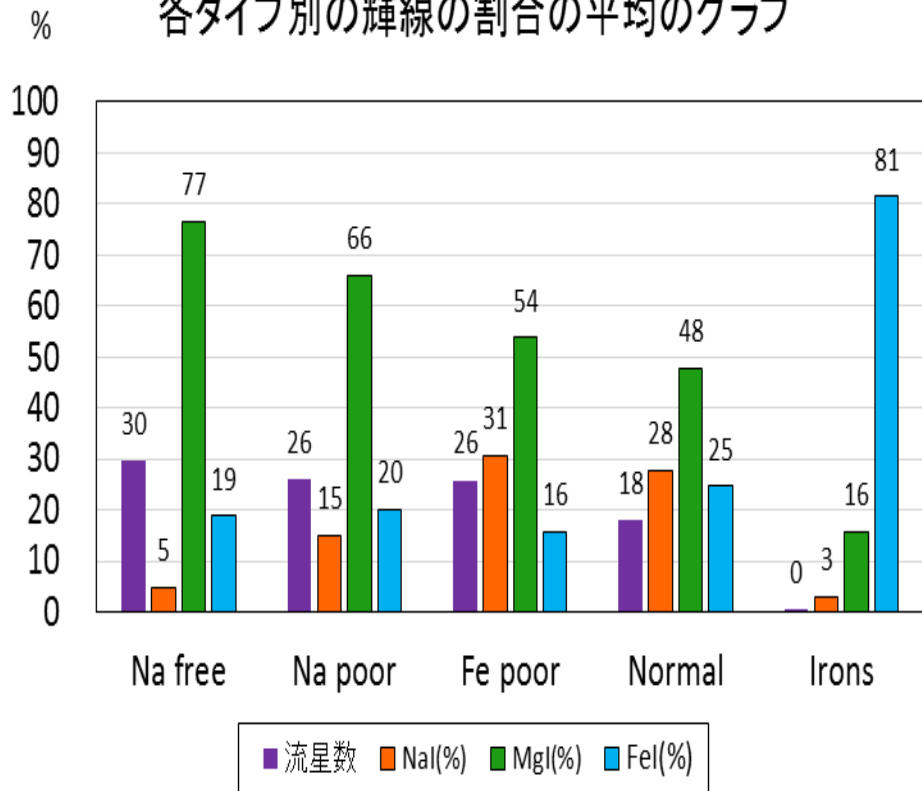
全Gem群のタイプ別の輝線の割合の平均の比較

Class	流星数	NaI(%)		MgI(%)		FeI(%)	
Na free	119	4.7	±2.6	76.6	±6.1	18.8	±5.5
Na poor	105	14.9	±2.4	66.0	±6.3	20.0	±5.7
Fe poor	104	30.6	±6.1	53.8	±6.4	15.7	±2.5
Normal	73	27.8	±4.4	47.7	±5.6	24.6	±3.4
Irons	2	3.1	±0.0	15.6	±0.2	81.4	±0.1

第3回スペクトル研究会資料 阿部氏
2017年と2018年のGemの合計

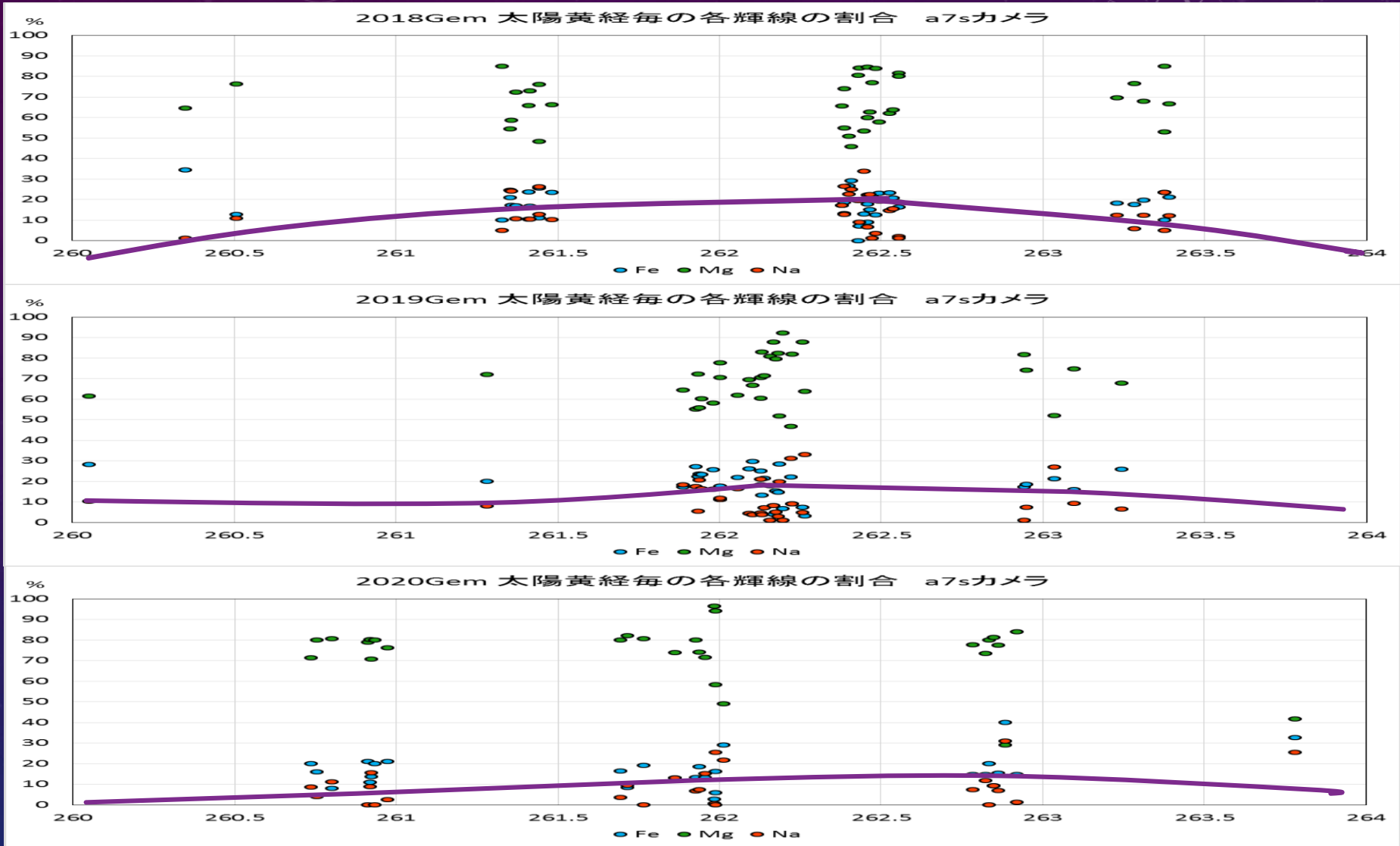
Class	流星数	NaI(%)		MgI(%)		FeI(%)	
Na free	114	3.7	±2.6	75.1	±6.4	21.2	±6.0
Na poor	24	12.8	±1.7	70.0	±4.6	17.6	±4.6
Fe poor	9	31.8	±9.6	52.1	±9.7	16.1	±2.9
Irons	3	0.37	±0.3	12.1	±6.0	87.6	±5.7

各タイプ別の輝線の割合の平均のグラフ



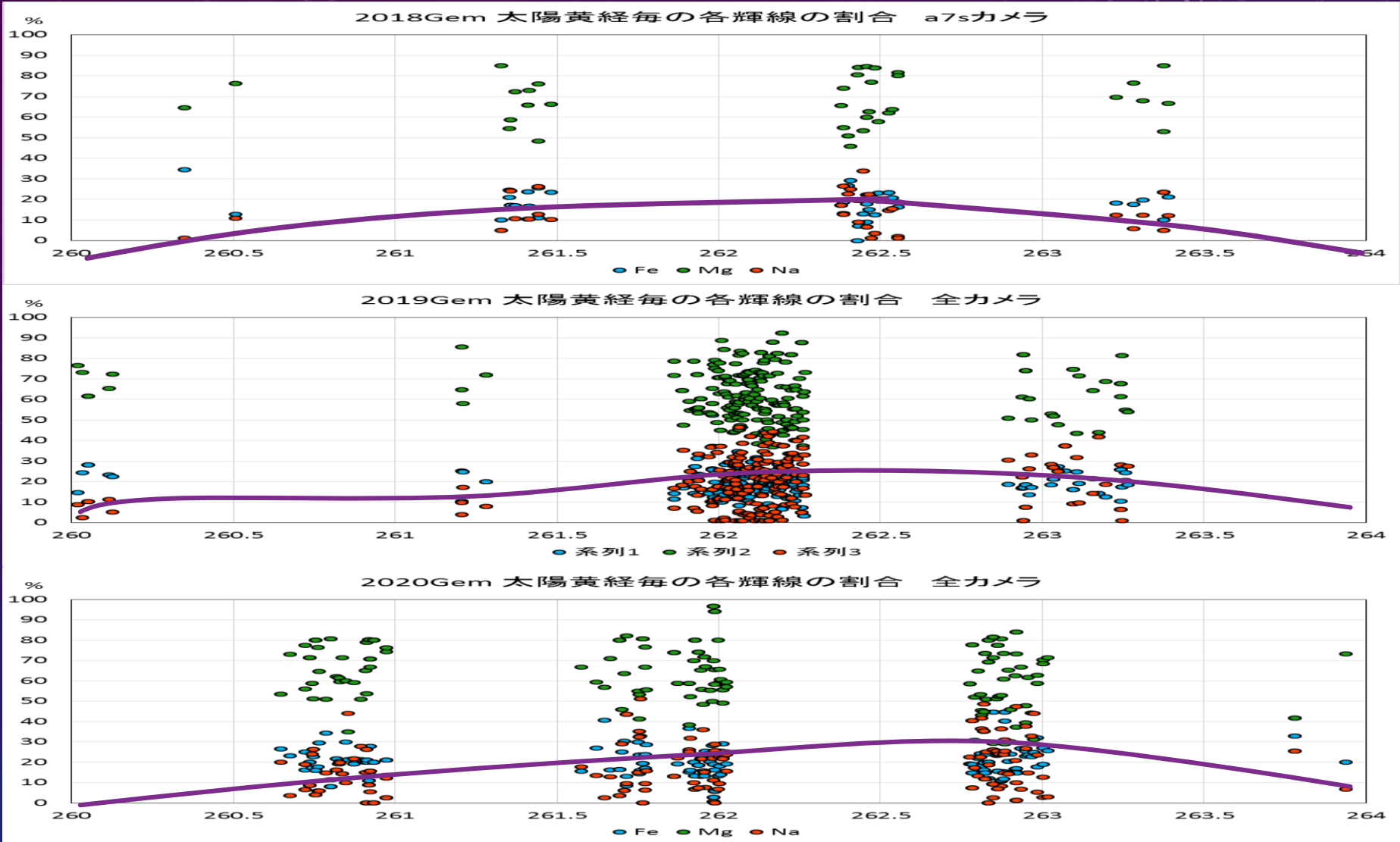
左は、全カメラのふたご群のタイプ別の輝線の割合の表です。上が私の結果で、下が阿部さんの結果です(第三回スペクトル研究会資料参照)。タイプによって輝線の割合の違いが見られます。ともに、Na freeが一番多くNaの枯渇がわかります。タイプ別の輝線の割合も大体似た傾向になっています。右は、私の左の表をグラフにしたものです。Feは、Ironsを除くとタイプ別でも大体同じ割合ですが、Mgは、タイプによって減っています。Naは、逆に増えています。このことからふたご群は、Na freeが多いのでNaの枯渇が起きていることがわかります。

a7sのカメラのGem群の各年の太陽黄経毎の輝線別の割合



上は、**a7sの50mmレンズのみ**のふたご群の輝線別の割合の年による変化です。年によって大きな違いは、見られません。**Mgが一番多く、次にFeが多く、Naは、一番少なくなっています。**このことから**Naの枯渇がわかります。**どの年も極大付近で**Naがやや多くなる傾向**が見られます。2019年は、極大前が天候が悪く数が少なくなっています。

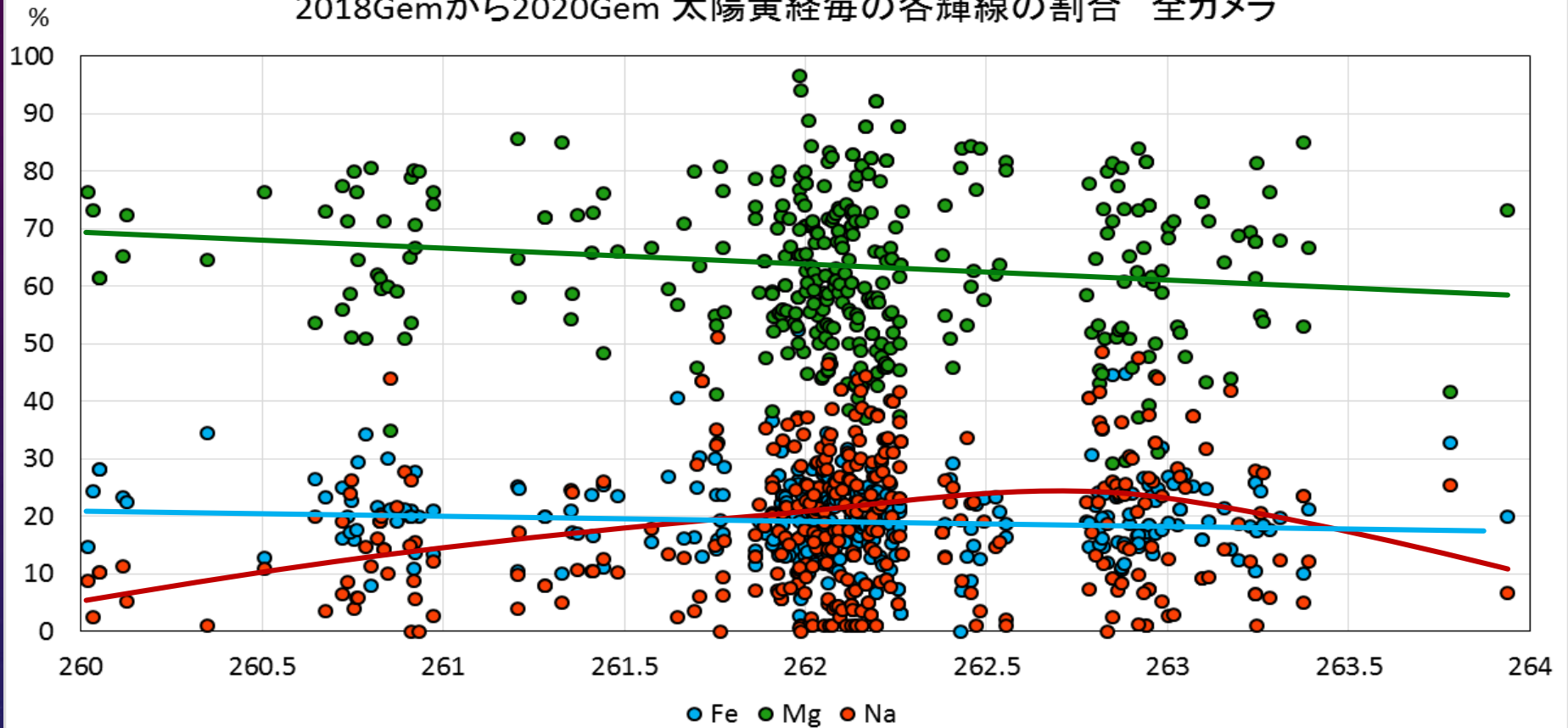
全カメラのGem群の各年の太陽黄経毎の輝線別の割合



上は、**全カメラ**のふたご群の輝線別の割合の年による変化です。どの年も極大付近と極大前後にNaがやや多くなる傾向は、前のスライドと変わりません。2019年は、極大付近のため、Naが、他の年よりも多くなっています。2018年と2020年は極大後の方が少しNaが多くなっています。Feは、広がりが一番少ないです。**Naの増加曲線は年によって違った変化**をしています。

全カメラの3年分のGem群の太陽黄経毎の輝線別の割合

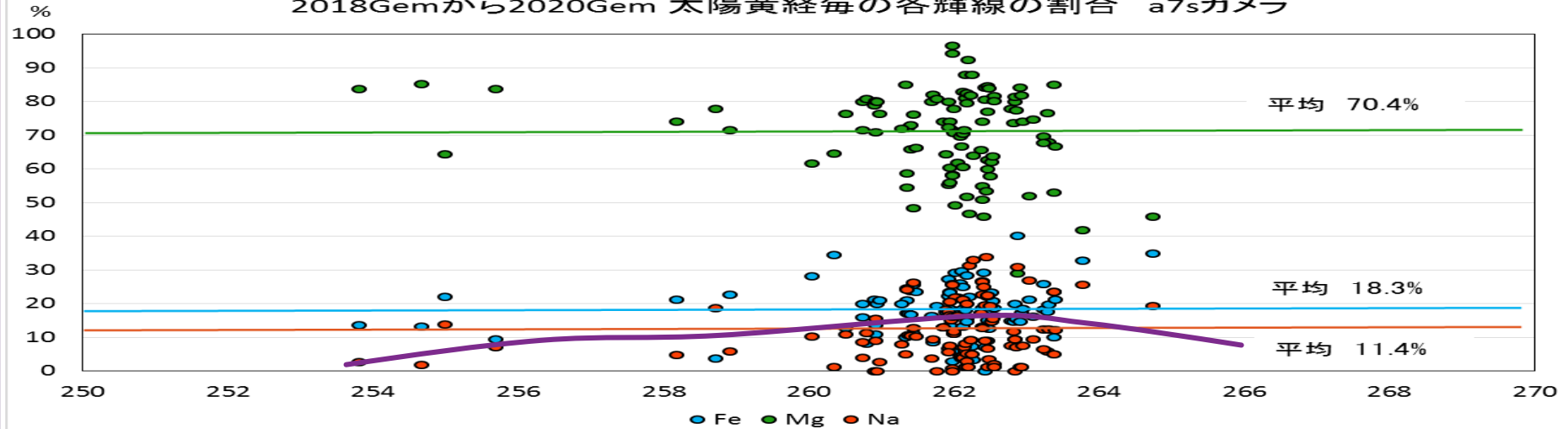
2018Gemから2020Gem 太陽黄経毎の各輝線の割合 全カメラ



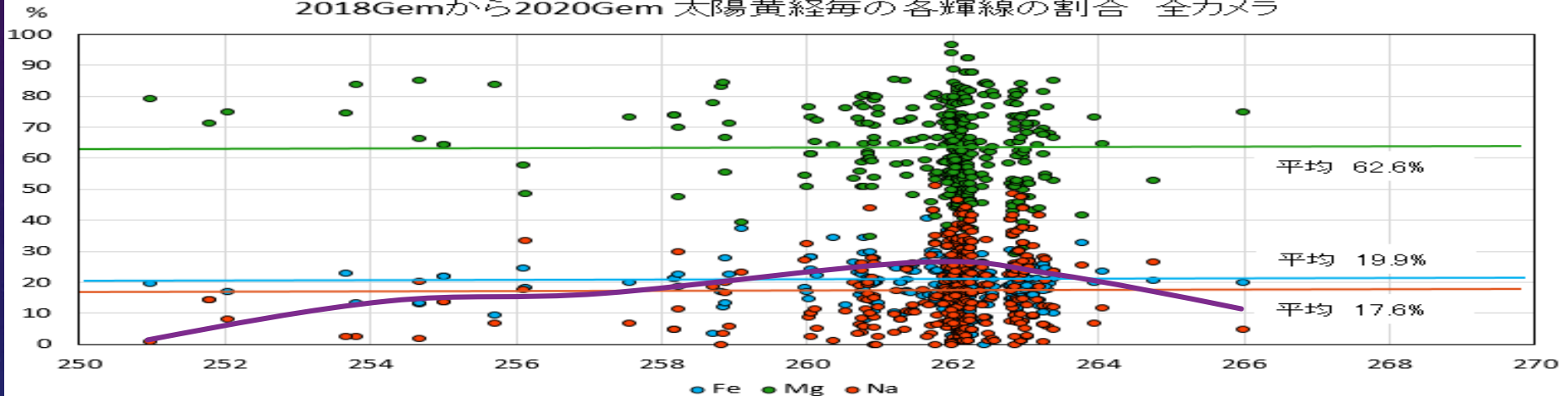
全カメラの3年分のふたご群の太陽黄経毎の輝線別の割合の変化です。まとめたことでふたご群全体の傾向が見えてきました。**Feの割合は、20%程度の広がり**で、広がりの範囲は、一番少ないです。Naは、極大付近と極大前後にやや多くなる傾向は、変わりません。また、**Naは、極大前より極大後にやや多くなっています**。Mgは、Naと反対で極大付近と極大前後にやや減る傾向が見られます。まだ、隙間がありますが今年の結果が入ると4年分となりまた、傾向がわかりやすくなると思われます。

a7sと全カメラのGem群の3年分の太陽黄経毎の輝線別の割合

2018Gemから2020Gem 太陽黄経毎の各輝線の割合 a7sカメラ

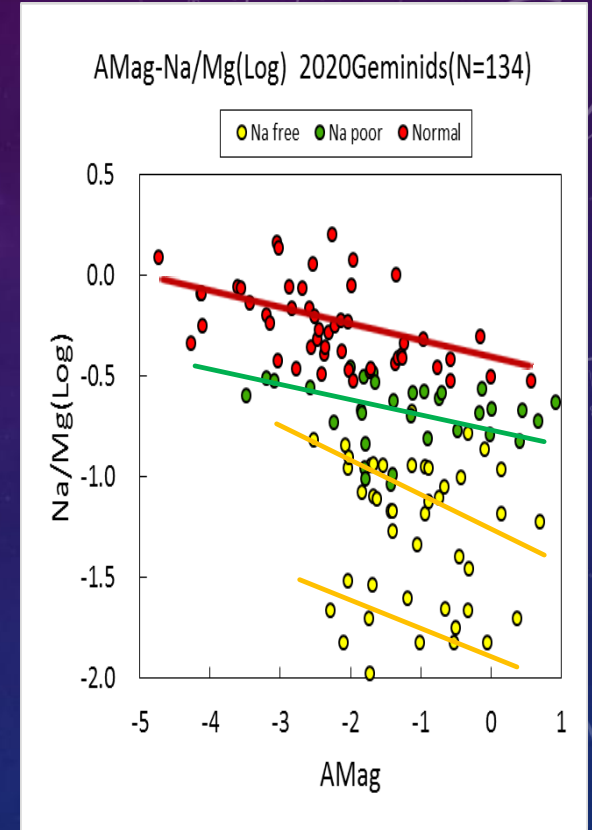
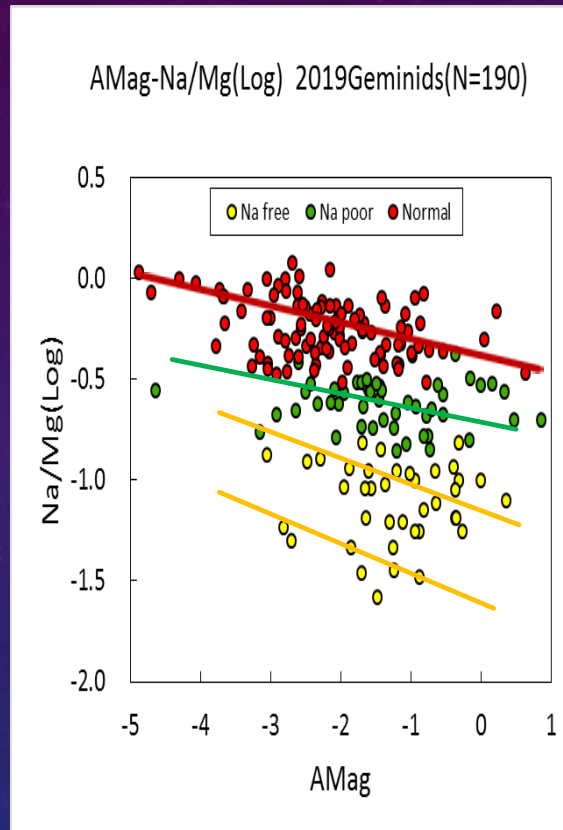
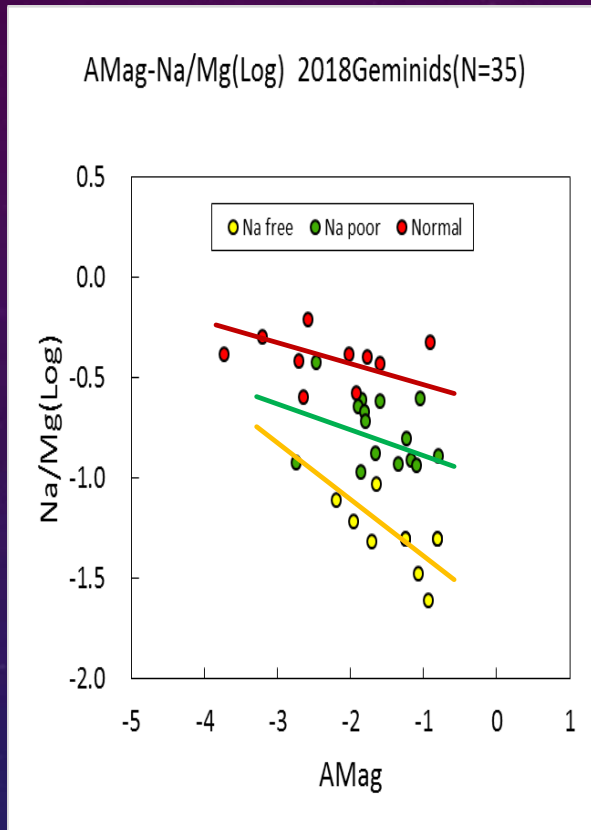


2018Gemから2020Gem 太陽黄経毎の各輝線の割合 全カメラ



上は、**a7s**の50mmレンズのみの3年分のふたご群の変化です。太陽黄経の範囲を前後少し増やしました。**Mg**の平均は、約**70%**で、**Fe**の平均は、約**18%**で、**Na**の平均は、約**11%**です。下は、**全カメラ**の3年分です。**Mg**の平均は、約**63%**で、**Fe**の平均は、約**20%**で、**Na**の平均は、約**18%**です。カメラによってやや違いが見られます。前のスライドと同様に、**Na**は、極大付近と極大後にやや多くなる傾向は、変わりません。**Mg**と**Fe**の傾向も変わらずよくわかります。

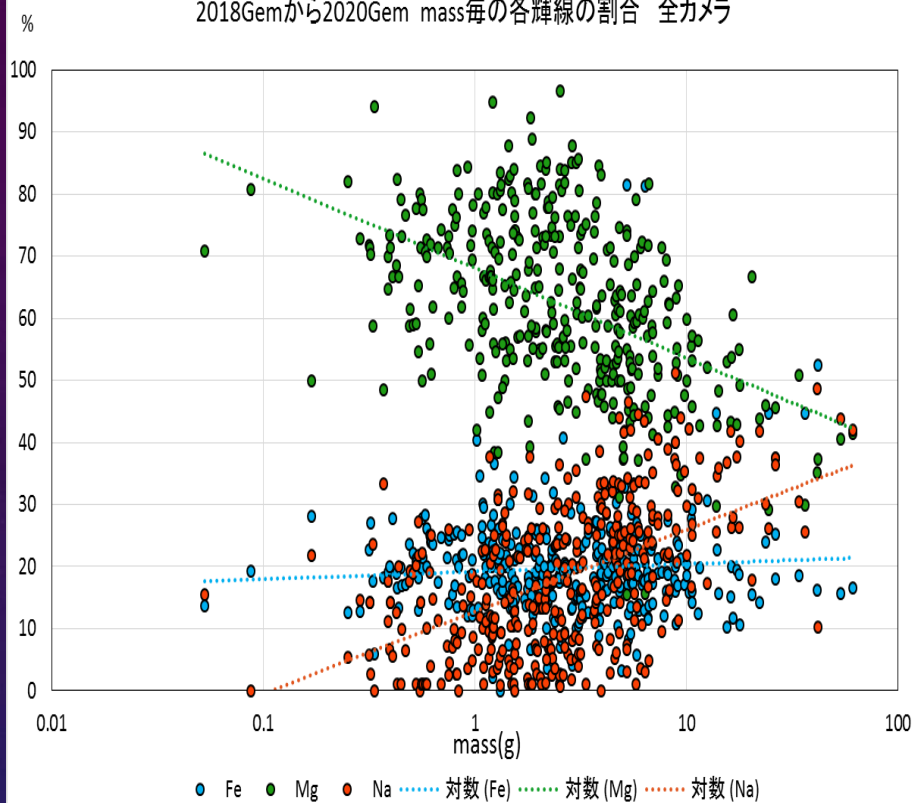
全Gem群の各年のAMagとNa/Mg(Log)の関係



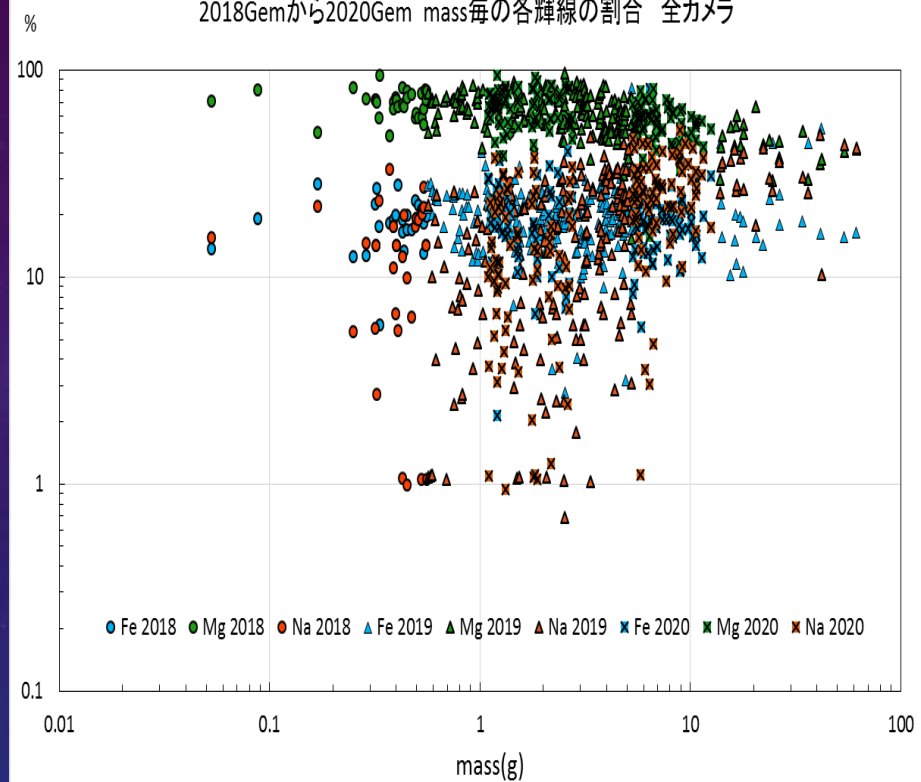
左は、2018年の a7sの50mm レンズのみのでたご群のタイプ別のAMagとNa/Mg(Log)の関係のグラフです。3つのタイプともAMagが小さくなるとNa/Mg(Log)の値も小さくなっています。真ん中は、2019年のふたご群のタイプ別のAMagとNa/Mg(Log) の関係のグラフです。右が2020年のふたご群のタイプ別のAMagとNa/Mg(Log) の関係のグラフです。**3年間とも3つのタイプで似たような直線の傾き**になっています。2019年と2020年は、2018年よりもNaのばらつきが大きくNa Freeが2つのグループに分かれているように見えます。**暗い流星ほどNaが少なくなっている**のでNaの枯渇が見られていることがわかりやすくなったと思われます。

全Gem群のNaとMgとFeのそれぞれの割合とMassの関係

2018Gemから2020Gem mass毎の各輝線の割合 全カメラ

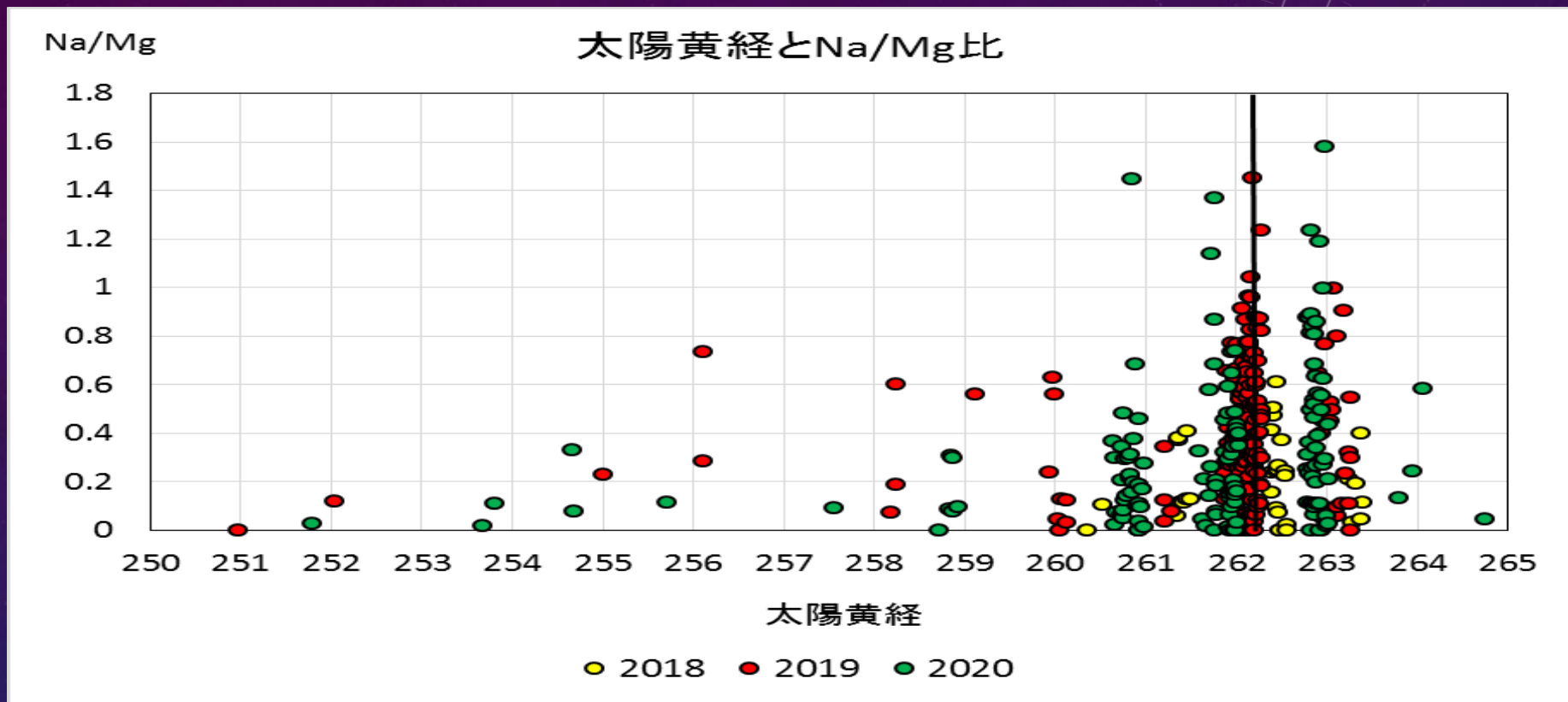


2018Gemから2020Gem mass毎の各輝線の割合 全カメラ



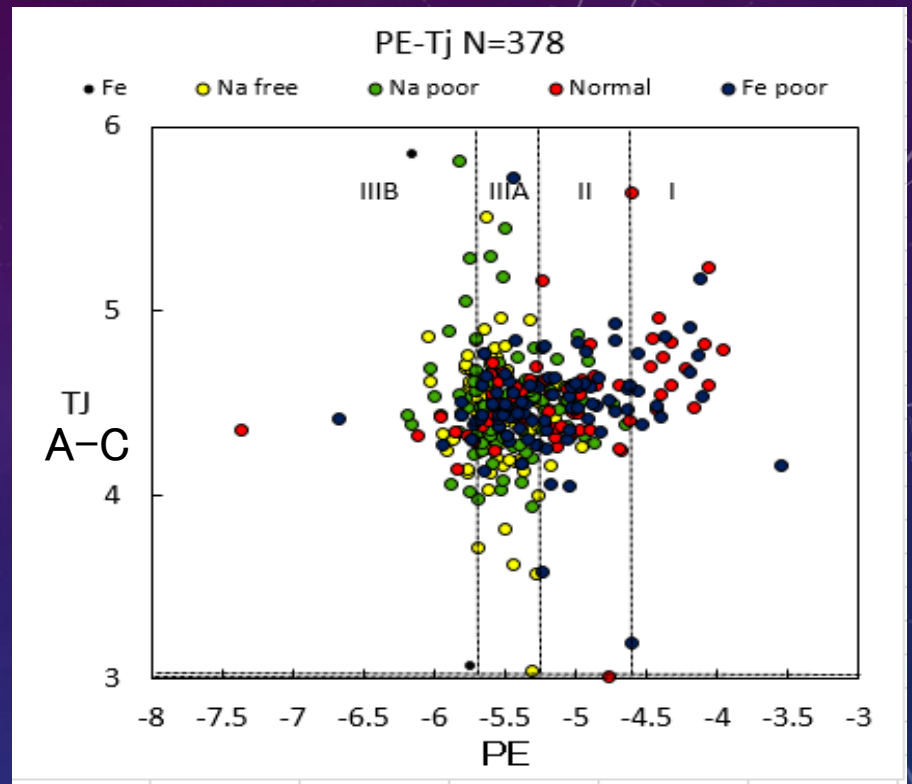
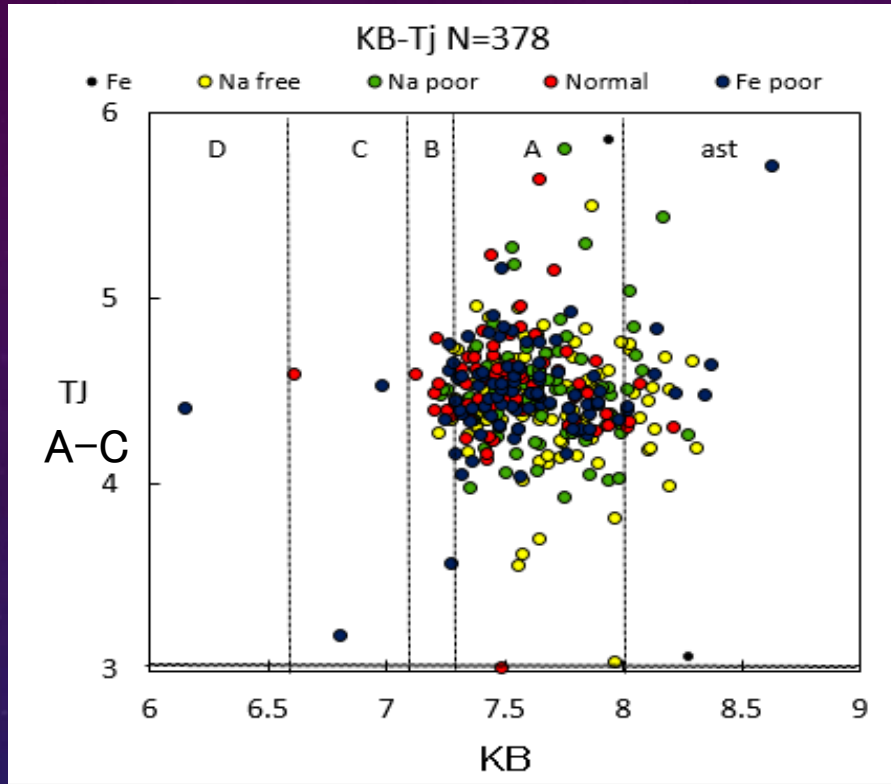
左は、2018年から2020年までの3年間のふたご群の全流星のNaとMgとFeのそれぞれの割合とMassの関係のグラフです。質量の小さいほどMgの割合が多くなっています。Feは、殆ど変わりません。Naは、質量の小さいほど割合が少なくなっています。このことから、Naのみ質量に依存して変動や枯渇していると言えます。右のグラフは、縦軸を対数にしてあります。また、年ごとにマークを変えています。MgやFeに比べて、Naの広がりが大きいことがわかります。年よっての質量の違いも見られます。2018年は、0.1gから1gに集中しています。2019年は、0.6gから6gと幅広くて分布し、15gから70gまでの重いものもあります。明るい流星が多かったことからもうなづけます。2020年は、1から10gに集中しています。

全Gem群の年別の太陽黄経とNa/Mgの関係



全カメラの3年分のふたご群の年別の太陽黄経とNa/Mg比です。太陽黄経の範囲は、250—265です。極大は、2019年の262.1度付近としました。これを見ると、**2018年と2020年**が極大後に少しNa/Mg比が多くなっています。**2019年は、ほぼ極大で極大前と比べると極大後の方が約2倍近く多くなっています。**これは、261度付近は、天候が悪かったのもう少し多かったものと思われます。このことから、**ダストレイルの分布は、太陽黄経によってNa量の分布が異なると考えられます。**前のスライドと合わせるとNaが多いほど質量が大きいという結果から、**小さい流星ほどポインティング・ロバートソン効果が大きく効き、極大前に小さい流星が観測されやすい**と考えられ今までの先行研究と似た結果になりました。

軌道の求まったGem群のTJとKBとTjとPEの関係



左は、2018年から2020年までの3年間の軌道の求まったふたご群の全流星のKBとTjの関係のグラフです。ふたご群は、Tjでは、小惑星とコンドライトA-Cタイプです。KBのタイプでは、astタイプには、Fe poorとNa poorとNa freeが見られます。Aタイプには、殆どのタイプがTj4-5に集中しています。特にNormalとFe poorが多いです。Na poorとNa freeは、ややばらけています。CとDタイプは、殆どありません。右は、PEとTjの関係のグラフです。PEのタイプでは、Iのタイプは、NormalとFe poorだけです。IIのタイプもNormalとFe poorが殆どで、Na poorとNa freeが少し見られます。IIIAタイプには、殆どのタイプがTj 4-5に集中しています。Na poorとNa freeが多く中央に集中していますがやや広がりもあります。このIIIAタイプが一番多いです。IIIBは、Na poorとNa freeが多くNormalとFe poorは、ほんの少しです。

8月下旬のはくちょう群と思われる流星のスペクトル



上は、8個のはくちょう群と思われるスペクトル画像です。似たような光度変化をしています。タイプは、**NomalとFe poorが多い**です。もう一つ下のサイトにアップしてあります。
<http://sonotaco.jp/forum/viewtopic.php?t=4982> また、軌道計算結果等もアップしてあります。今年、7年周期で活発な活動がとられました。**3つの群の複合群**のようです。

流星スペクトルの解析のまとめ

- 8台のカメラの観測で、ほぼ2年4か月で2390個近くのスペクトルが得られました。今回のデータは、2018年10月から2021年2月までの解析をしました。8つのタイプが得られました。Feが50-80%になっているタイプが46個得られました。Fe richのタイプであることが2019年の論文からわかりました。発光高度とNa/Mg比や速度によるタイプの違いを調べ速度によって違いが見られました。
- 解析結果を元にQua群Com群Per群Tau群や小流星群のタイプ別に分類し比較しました。Gem群の三角図を作成し考察しました。今回は、ふたご群の年とカメラによる三角比やタイプ別の割合等を比べました。ふたご群の年やカメラによって違いが見られました。また、色々な方法でNaの枯渇が見えてきました。
- 8月のはくちょう群と思われるスペクトルと軌道の結果から似たような光度変化をしていてタイプは、NomalとFe poorが多いことがわかりました。
- 2019年の流星会議の自動観測によるスペクトル観測と結果「2018年から2019年3月まで」の結果は、以下に公開しています。
<https://www.web-nms.com/app/download/13829249327/%EF%BC%A8%EF%BC%B0%E7%89%88%E9%9B%86%E9%8C%B2-5.pdf?t=1572683438>
- オンライン流星物理セミナーに2018年10月から2020年8月までの詳細の結果を以下に公開しています。
- <http://msswg.net/msonline/MSS19-spectrum-20201125-Sekiguchi-2018to20.pdf>